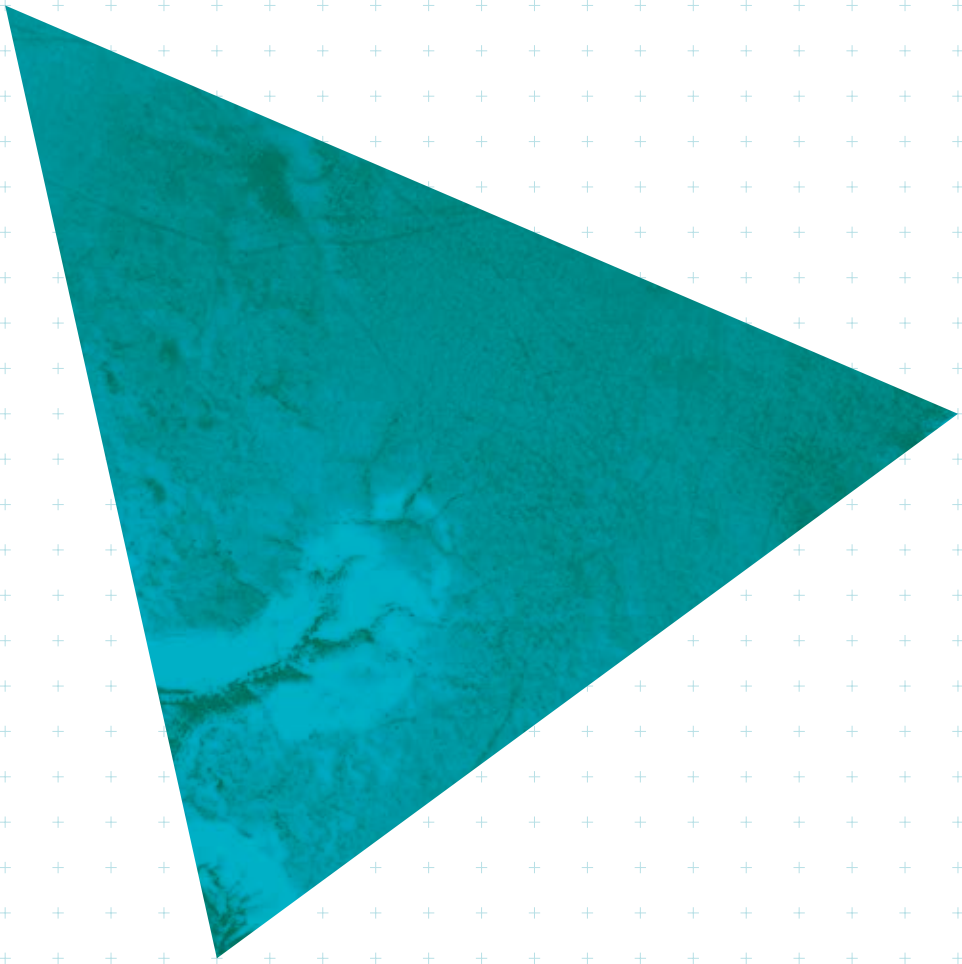
ワークショップ報告書
CRDS-FY2021-WR-06

俯瞰ワークショップ報告書

# 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー



国立研究開発法人科学技術振興機構
研究開発戦略センター

# エグゼクティブサマリー

本報告書は国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和三年5月から9月に　かけてオンライン開催した環境・エネルギー分野エキスパートセミナー「気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー」をまとめたものである。これは気象、気候と関わりのある研究開発の動向を俯瞰し、今後の推進策について検討するため企画したものである。

世界各国は極端気象災害の頻度増加などを受け、気候変動への危機感を高めている。我が国でも令和二年11月に、衆参両院で気候非常事態宣言が決議され、適応策の検討が活発化している。

極端気象災害への対応には対策の基盤を据える基礎研究の蓄積と、より良い活用が必要となる。多様な専門家により自然科学の基礎研究が進められ、得られた知見の結集や先端技術の導入が進んでいる。さらに多くの人々が極端気象災害の本質的な理解を深めて、防災・減災を進めていくためには、協働・対話が重要となる。

このような認識のもと、気象・気候に関連して、「気象・気候システム研究の発展と展望」「防災・減災に資する気象研究開発の最前線」「衛星で知る地球環境変化」「気象・気候に関連する超学際研究や異分野協働研究」の4つの区分でエキスパートを迎え、合計16のセミナーを実施した。

- 「気象・気候システム研究の発展と展望」では気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の概観、観測と解析による温室効果ガス吸収量・排出量の推定、エアロゾルが気候に与える影響、気候システムにおける海洋の役割、極域研究から解明が進む大気大循環、地球環境システム進化・変動史などについて議論した。そして、目指すべき社会像についての考察を深め、よりよい方向に社会が向かうのを後押しする研究開発について検討した。

- 「防災・減災に資する気象研究開発の最前線」では、異常気象と気候変動・気候変化、マイクロ波放射計による積乱雲発生前環境場の実態解明、フェーズドアレイ気象レーダーを駆使した災害級豪雨の早期探知、航空機直接観測による台風強度予測精度の改善などの最先端の研究開発動向を把握し、社会実装に向けて鍵となる課題も議論した。

- 「衛星で知る地球環境変化」では我が国の地球観測衛星であるALOS衛星（だいち衛星）シリーズ、GCOM衛星（しきさい衛星、しずく衛星）シリーズなどで得られる地球環境情報に関する理解を深めた。

- 「気象・気候に関連する超学際研究や異分野協働研究」では、気象学と水文学の超学際研究による洪水予測、気象データのビジネスへの利活用検討、生態系スケール解析による熱帯泥炭の炭素循環変化、気象環境と熱中症リスクなどの気象・気候に関連する研究開発や社会実装の深まり、拡がりについて俯瞰し、今後の見通しについて検討した。

気象・気候はまさにマルチスケールの時空間にまたがり、多様な物理化学生物地学的過程が絡み合うマルチフィジックス複雑システムである。観測とシミュレーションの両輪の推進によって、日々の気象環境の変動をもたらす雲生成やエアロゾルの影響、大気海洋相互作用のような地球サブシステム間の相互フィードバックの実態、地球規模の大気大循環や変化強制因子などの科学的解明が進められてきている。それにより、気象防災のレジリエンスや気候変動の理解が向上している。

本セミナーシリーズを通して、衛星や地上、海洋ビッグデータの高度活用による気候変動の実態の解明、データ同化やデータ解析技術を駆使した異常気象早期探知、AIを用いた未知の河川洪水法則の発見、気象ビッグデータを活用した新規ビジネス創出、数値モデルを用いた古気候・古海洋の復元などのデジタル技術を活用した研究開発が多くの成果を創出していることが確認された。発展著しいデジタル技術の効果的な活用が引き続き本分野および社会の注目を集めることは疑いない。

気象、気候は現実の自然を相手とするため、観測がきわめて重要となる。本分野のエキスパートの多くが観測の重要性を指摘していた。一方、非専門家のステークホルダーは観測の重要性を見逃しがちである。どれだけデータ処理や解析技術が進化しても、シミュレーションと両輪の関係にある観測がなければ、研究開発は進展せず、社会のレジリエンスも向上しない。地理的特性から線状降水帯や台風などの自然災害リスクが高い我が国において、レジリエンスをさらに高めていくにはシミュレーションとの両輪で観測もしっかり推進していかなければならない。また、気候変動がもたらす影響に適応していくためには、分野を超えた総合的な取組みが必要である。ただ一つの解決策で気候変動に備えることは不可能であり、個人、社会あらゆる階層で複数の対策を講じ、包摂的にレジリエンスを向上させていく必要がある。その土台となる研究開発基盤の構築と、社会への浸透が今後も重要である。

JST–CRDSでは引き続き環境・エネルギー分野の中心的な分野の一つとして気象・気候に関する俯瞰を行うとともに、関わりが深い関連分野の研究開発動向を調査分析していく予定である。

# 目次


**1 ｜ 開催趣旨** …… 1

**2 ｜ 気象・気候システム研究の発展と展望** …… 2

2.1 IPCC における議論の動向と気候変動研究の課題
三村 信男（茨城大学）…… 2

2.2 地球をめぐる温室効果ガス
三枝 信子（国立環境研究所）…… 14

2.3 カーボンニュートラル指向時代の
短寿命気候強制因子（SLCFs）に関する研究
竹村 俊彦（九州大学）…… 22

2.4 気候に関わる海洋研究―全球海洋観測に着目して―
須賀 利雄（東北大学）…… 32

2.5 大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気
大循環モデルの融合による中層大気階層構造の解明
佐藤 薫（東京大学）…… 53

2.6 地球環境システムの進化・変動史
田近 英一（東京大学）…… 74

**3 ｜ 防災・減災に資する気象研究開発の最前線** …… 93

3.1 気候変動・異常気象・大気海洋相互作用分野の
研究プロジェクトとの関わり―回顧と将来展望―
中村 尚（東京大学）…… 93

3.2 防災・減災のための雲科学研究
荒木 健太郎（気象庁気象研究所）…… 107

3.3 降水をセンシングする技術
牛尾 知雄（大阪大学）…… 131

3.4 台風・豪雨の航空機を用いた研究
坪木 和久（名古屋大学）…… 138

**4 ｜ 衛星で知る地球環境変化** …… 148

4.1 JAXA の地球観測衛星 ―ALOS シリーズを中心として―
祖父江 真一（JAXA）…… 148

4.2 GCOM 衛星による地球環境の観測
田中 一広（JAXA）…… 160

**5 ｜ 気象・気候に関連する超学際研究や異分野協働研究 …… 171**

5.1 洪水予測、AI、歴史
芳村 圭（東京大学／ JAXA）…… 171

5.2 情報社会における気象データとその利活用
越塚 登（東京大学／ WXBC）…… 181

5.3 熱帯泥炭生態系の炭素動態に与える人為攪乱の影響
平野 高司（北海道大学／農業気象学会）…… 198

5.4 熱中症をサイエンスする
永島 計（早稲田大学／生気象学会）…… 208

# 1 ｜ 開催趣旨



国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査・分析・提案を中立的な立場に立って行う組織として、今後わが国が取り組むべき重要な研究領域に関する提言を行ってきている。また、その提言に向けた前段階として、広く技術分野の状況を俯瞰し、注目すべき研究動向の抽出を行っている。これら俯瞰や提言は、文部科学省・内閣府をはじめとする政府の各種政策立案のためのインプットとなる。今回、環境・エネルギー分野の俯瞰調査および研究動向調査の一環として、「気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー」に関するエキスパートセミナーを2021年5月27日から9月24日にかけて、web開催した。

我が国のあるべき公的研究支援を考えるうえで、表層的、断片的、一過性、近視眼的な対策に留まるのではなく、本質的、包摂的、持続可能、中長期展望をもった課題解決策を見出し、社会実装につなげていく施策の検討が重要である。その際、我が国の地域社会での豊かな生活への貢献に加えて、世界の平和と発展にも貢献する志をあわせもつことも大切である。

現在、世界各国は極端気象災害の頻度増加などを受け、気候変動に対する危機感を高めている。我が国でも令和二年11月に衆参両院で気候非常事態宣言が決議された。

環境・エネルギー分野において、その時々で社会的関心を集めた環境問題に正しく対応するための緊急対策はもちろん必要だが、そのためには対策の基盤となる基礎研究の蓄積と、より良い活用が必要不可欠となる。そのため、これまでに多様な自然科学の知見の結集や先端技術の導入が進んできている。たとえば、情報学、数理、衛星、生物学、分析科学などの詳細な知見、先端技術が活用されている。さらに、分野横断で産業や防災などに貢献する試みもなされている。

一方、専門外の人々にとって、多要素、多過程、相互フィードバック機構などが絡み合った複雑性の高い環境・エネルギー問題は理解が難解で、言葉のイメージ、印象だけの感覚に留まることがある。より深く正確な理解やより良い取り組みの広がりには、協働・対話の取組みも大切である。

このような背景を踏まえ、CRDS環境・エネルギーユニットは、エキスパートによるセミナーシリーズ、「気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー」の開催を企画した。本セミナーシリーズでは、気象、気候に関連する専門分野の講演者から、これまでの研究によって明らかにされてきた科学的知見や関連領域にもたらされた波及効果などを紹介いただき、把握した。それとともに、今後の発展の可能性や、世界的に注目される挑戦的な課題なども話題提供いただき、議論した。本セミナーを通して、今後の環境・エネルギー分野の研究開発戦略の検討を深め、世界の中で我が国における望ましい研究開発や社会の在り方について示唆を得ることを目的とした。

# 2 ｜ 気象・気候システム研究の発展と展望

## 2.1 IPCCにおける議論の動向と気候変動研究の課題

三村 信男（茨城大学）

※講演日：2021年6月18日

本日は長期的な展望も含めて、大きく3つの話題を提供する（図2.1.1）。1番目はIPCCの変遷や最新の議論についてお話する。2番目は、将来に向け、課題になっていることを紹介したい。3番目は、昨年4月から研究代表を務めている、環境省推進費のS–18について、お話しする。



講演目次

1. 気候変動に関するIPCCの役割と動向
   —IPCCの経過とWGII第6次報告書に向けた最新の議論
2. 気候変動研究の課題
3. 環境省推進費S-18の紹介

**図2–1–1　講演の目次**

**はじめに**

私のバックグラウンドだが、東大の都市工学での博士論文のテーマは、下水処理や下水の流体力学の研究だった。博士課程修了後、土木工学科の港湾研究室の助手になり、海岸工学の研究を始めた。茨城大学に移った後の1980年代後半から、地球環境、温暖化の問題が大きくなり、海面上昇の沿岸域に対する影響などの地球環境研究を始めた。2006年から東大サステナビリティ学連携研究機構などと一緒に、より持続可能な社会をつくるためのサステナビリティ学を始めるなど研究分野を広げてきた。

1番目のIPCCにおける議論のお話をさせていただく背景だが、特に1992年以降、専門家として、IPCC第II作業部会に携わっている。IPCCは1988年に設立された。1990年にオーストラリアでIPCC海面上昇会議の開催が決まった際、環境省から海岸工学の専門家として、参加を要請された。その会議でさまざまな知り合いが増え、その後もIPCCの会合に継続して呼ばれることになった。1995年の第2次報告書、2001年の第3次報告書では海岸の章の執筆担当（LA）を務めた。2007年の第4次報告書、2014年の第5次報告書では、それぞれ小島嶼の章と適応の章で、まとめ役の執筆者（CLA）を務めた。今年から来年にかけて順次発表される第6次報告書では最後の展望の章のレビューエディター（RE）を務めている。

茨城大学の学長は2014年から5年7か月務めた。昨年3月に退任した後、特命教授を拝命している。3番目の話題だが、環境推進費は2005年からS–4、2010年からS–8を実施した。環境推進費S–18は2020年から5か年推進する計画だ。

## 1. 気候変動に関するIPCCの役割と動向

皆さまIPCCについてよく御存じだが、1988年に世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）が共同で設立した国際機関だ（図2–1–2）。

時々「IPCCの研究では」とマスコミが書くのを見かけるが、IPCC自体は研究をする機関ではない。温暖化、気候変動に関する科学的知見の評価を行うのがIPCCの役割だ。実際の研究は国際連携研究や、各国の研究機関が行う。現在では、膨大な数の研究成果が論文などで日々発表されている。 IPCCはそれをレビューして、現在の知見で分かっていること、それはどの程度確からしいかということ、どの点はまだ分かってないということ、そういった科学的な評価を行う。それを報告書にまとめ、国連やCOPの会議などに提出して、その議論の科学的な土台をつくる役割だ。

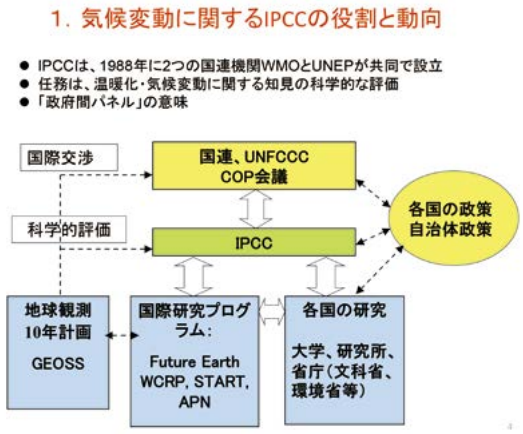



図2–1–2　IPCCの役割と動向

図2–1–3　IPCCの3つのWGの構成

IPCCの前の2文字、IPはIntergovernmental Panelの略で、政府間パネルと翻訳される。その意味だが、メンバーは各国の政府だ。そのため、IPCCの報告書は普通の報告書ではなく、200近い国の政府が認めた報告書という位置づけになる。

IPCCの構成だが、3つの作業部会で構成されている（以降、ワーキンググループの略称、「WG」で記載）（図2–1–3）。

WGIは気候変動の科学的な基礎を担う。気候システムに関する過去の変化や、温暖化の将来予測、それらの理学的、地球科学的な基礎に関する評価がなされる。

WGIIは、報告書に影響・適応・脆弱性というタイトルがついている。気候変動が起きたとき、農業や災害、沿岸、水資源などの分野ごとにどういった影響が出るのかや、アジアや北アメリカ、南アメリカ、アフリカといった地域ごとに影響を評価をしている。その影響を軽減するには、どのような適応策を取ったらよいかという評価も行う。

WGIIIは緩和策を担当している。温暖化自体を止めるために$CO_2$の排出を削減する技術や制度、そのためのコストがどれぐらいかといった評価を行っている。

それぞれのWGごとの報告書は、2,000から3,000ページ、ぎっしりと英文が詰まっている。これを全て通して読みこんでいる人は恐らくいないのではないかと思えるぐらいの分厚い報告書である。そのため、政策に生かすための要約が付いている。最後に、3つのWGの報告書のエッセンスを示す統合報告書も作っている。マスコミなどでよく報道されるものは、統合報告書が主にベースになっている。

では、IPCCが出してきた報告書が一体何を明らかにしてきたのか、どういう影響があったのか。図2–1–4に、ごく簡単に国際的な動きを示す。

1990年に第1次報告書が発表され、その警告が引き金の一つになり、1992年にリオデジャネイロで地球サミットが開かれた。このサミットで、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）が合意された。これが現在でも温暖化対策のベースになっている。

1995年の第2次報告書に基づいて、1997年のCOP3で京都議定書が結ばれた。そういった影響が順次あり、第5次報告書に基づいてパリ協定が結ばれるという画期的な国際的動きにつながってきた。第6次報告書は準備中で、今年から来年にかけて順次、公表されていく予定だ。

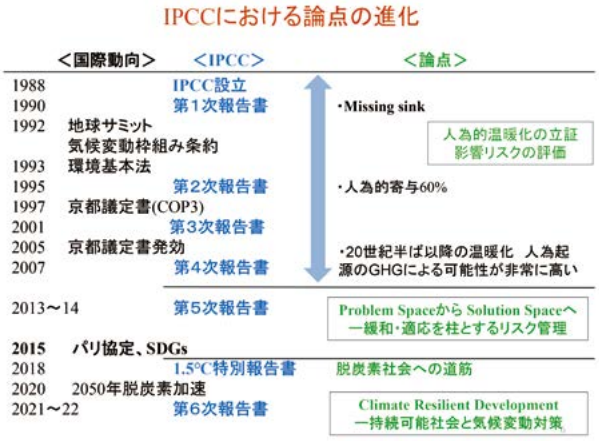



**図2-1-4　IPCCにおける論点の進化**

**図2-1-5　2014年のIPCC総会の様子**

論点の変遷について、非常に単純化して述べていくと、第1次報告書ではMissing sinkという言葉が非常に印象的だった。当時計測されていた$CO_2$の大気中の増加量と、排出量などに基づいて計算される$CO_2$の濃度の間に乖離があるという問題だ。つまり、まだ地球全体の炭素循環自体がはっきり把握できていない状況から、科学的に議論を深めていくこととなった。地球のどこかにもっと大きな吸収源があるのではないか、それがまだよく分かっていないということをMissing sinkと表現していた。後になって、実はそれは海洋の役割が大きいことが分かってきたのだが、第1次報告書はそういう状況から出発した。

第2次報告書では温暖化に対する人為的な寄与率は60%程度とされ、第4次報告書では20世紀半ば以降の温暖化は人為起源のGHGsによる可能性が非常に高い（very likely）と書かれた。第1次から第4次までの報告書には、様々な緩和策・適応策についても書かれているのだが、基本的には人為的に温暖化が進んでいることの科学的な立証と、その人為的な温暖化による影響やリスクがどの程度かという評価をやってきた面がある。

第5次報告書では、私は適応の章のまとめ役として、骨格をつくる議論にも参加した。そのとき、議長たちが非常に強調していたのが、Problem SpaceからSolution Spaceへ、という言葉だった。つまり、我々は温暖化という問題はかなり分かるようになった。では、どうすれば解決するのか。そこを議論しよう、と焦点の移行が進んだ。

第5次報告書での中心的なメッセージは、緩和・適応を柱とする気候変動のリスク管理だった。それを生かして、パリ協定が結ばれた。すると今度はパリ協定で掲げた平均気温を1.5℃上昇に抑える目標について、国連UNFCCCからIPCCに対して、これはどういう意味を持つかと問われた。これに応えて、1.5℃特別報告書を作成して、脱炭素社会に向けた削減の道筋を示すことになった。こうした動きの中で、2020年には我が国でも2050年のゼロ目標が掲げられ、世界的に脱炭素は加速している。

ここまででも、IPCCのスコープが大きく広がってきた。第6次報告書ではさらに広い社会的課題を包含しようとしている。第6次報告書のWGIIの最終章がClimate Resilient Development Pathwayというタイト

ルだ。つまり、気候にレジリエントな将来の開発の道筋について検討しており、持続可能な社会と気候変動対策の関係を論じるところに論点の広がりを見せている。

図2-1-5は2014年に開かれたWGIIの第5次報告書を承認するIPCC総会の風景だ。会場は日本のパシフィコ横浜で、参加メンバーは110か国程度で人数としては約400人で、報告書を承認してもらう側のCLA（代表執筆者）50人程度が交互に演壇で意見に対応した。会議では、政策担当者向けサマリーを一文ずつ了解を得ていく手続きを踏んだ。

会期は当初5日間の予定だったが、政府代表からの意見が多く、夜を徹した議論でもまとまらなかった。6日目に延長され、その日の午後3時になって、ようやく承認が得られた。その途端、あれだけ議論していた人たちが全員立ち上がって大きな拍手と歓声をあげた。私も会場にいて、たいへん感動した。

先ほど述べた、WGIIの基本的なコンセプトがProblem SpaceからSolution Spaceへ、について、もう少し詳しく説明する。

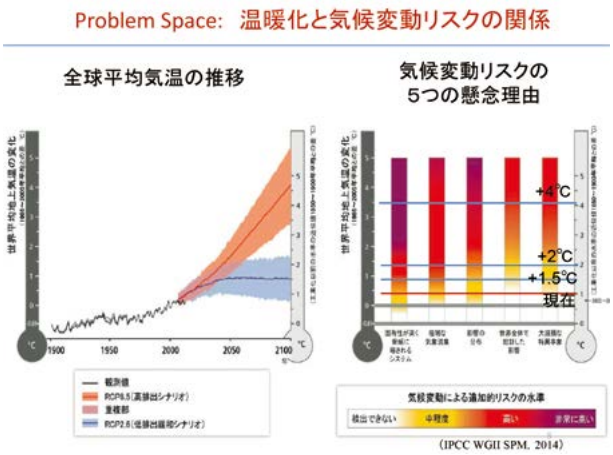



**図2-1-6　Problem Space**
（IPCC WGII SPM, 2014）

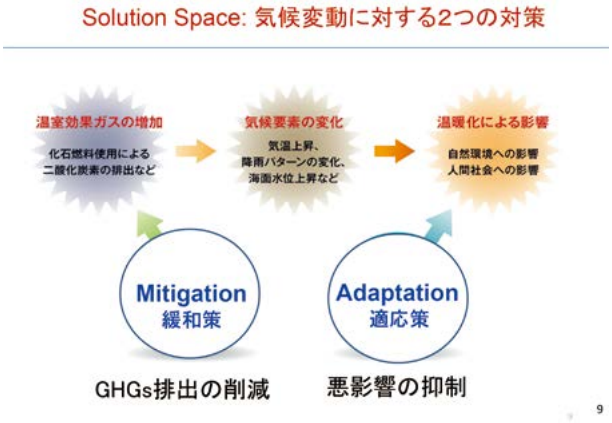



**図2-1-7　Solution Space**

Problem Spaceとは課題の認識ということで、温暖化と気候変動リスクの関係を把握できるようになったということだ。現状のまま、何もしなければ将来、全球平均気温が4℃上昇した世界になる。化石燃料からの排出を十分コントロールすれば2℃の世界になっていく。これがWGI第5次報告書の基本的な予測の内容だった（図2-1-6）。

この2つの温暖化した世界の予測だが、我々にどういう影響を与えるのか。WGIIでは、温度計の図を使う形でまとめた。

影響の対象として、5つの項目がある。①「固有性が高く脅威にさらされやすいシステム」とは、サンゴ礁や北極海の氷の下の生態系、高山の生態系などだ。これらにはもう既に影響が表れている。

②「極端な気象現象」は、日本を含めて世界各地で頻発している気象災害に関係する。

③「影響の分布」について、広い分野の影響が世界中に広がっていることは明らかだ。しかし、それらの影響を全部足し合わせた④「影響の総量」としては、現在はまだ大きくないが、2℃上昇では世界全体の経済にかなり顕著な影響を及ぼす。

⑤「大規模な特異現象」とは、例えば7ｍ程度の海面上昇をもたらすグリーンランドの氷床の融解や、アマゾンの熱帯雨林の乾燥化などだ。実はグリーンランドの氷はすでにかなり溶け始めている。数百年オーダーの長い時間がかかるとしても、危険水域に入りつつある。

気温上昇は、図の白い方の温度計で見ているが、産業化前の状態（1850～1900年平均で近似）をゼロ

としている。現在、すでに1℃上昇しているので、赤い線をひいた辺りになる。

1.5℃、2℃、4℃上昇それぞれでも線を引いた。4℃上昇した世界だと大変な影響が出てしまう。2℃上昇でもそれぞれ影響がある。1.5℃上昇ならそれよりもやや緩い影響に抑えられる。

全球平均温度の上昇に対して、こういった視覚的な表現を示すと、気候変動に対する危険水準がわかりやすくなる。

次に、Solution Spaceについて図2–1–7に示す。よく知られてとおり、温暖化対策には緩和策と適応策の2つがある。緩和策が$CO_2$の排出削減を進めるMitigation、適応策が悪影響自体を抑えるAdaptationである。

3つのWGが協力して、気候安定化の目標と$CO_2$排出経路を提示した（図2–1–8）。もし今までどおりに化石燃料の使用を継続すれば4℃上昇の世界になる。一方、持続可能な方向に努力すれば2℃上昇に抑える世界に近づく。では、どの程度の努力が必要か。それを第5次報告書の時点で算出したのが、2050年排出量70%削減減に向かう経路だった。



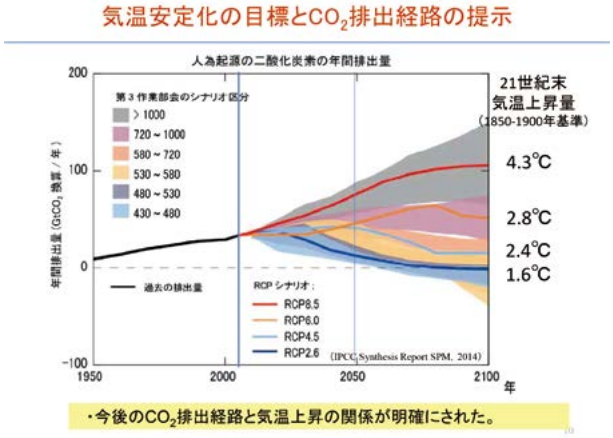



**図2-1-8　気候安定化の目標と$CO_2$排出経路**
（IPCC Synthesis Report SPM, 2014）

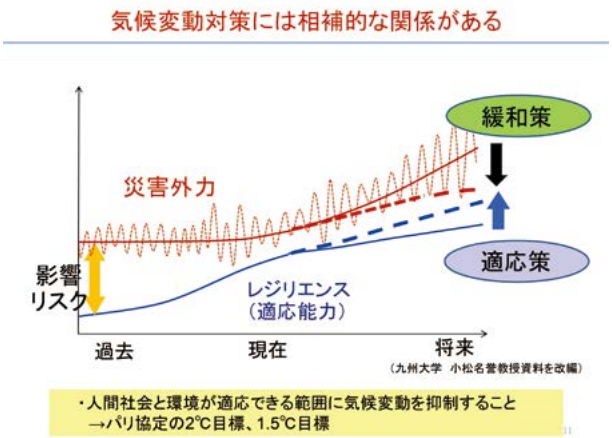



**図2–1–9　気候変動対策の相補的関係**

昨年、2050年カーボンニュートラル目標を掲げる前の日本の長期目標は、2050年に70%～80%削減という目標だった。これは、いま説明した想定に基づいて立てられていた。さらに、注意すべきことは、図2–1–8が、今世紀の後半以降にはさらにゼロエミッションに進めていく必要性を示していることだ。

Solution Space、つまり解決策として緩和策と適応策があることはそれ以前から言われていたが、第5次報告書では、その2つに相補的関係があると明示したことが特徴的だった。

図2–1–9は、模式的に過去から現在、将来にわたっての気候変動リスクについて示している。災害外力（気象要因）は、もともと自然の年々変動はあったが、一定の期間を通して見るとある程度一定のレベルだった。それが現在から将来では、温暖化によって、平均値自体も大きくなっていく方向になる。

これに対して、人間社会はどう対応してきたか。過去には対応力が弱く、災害の被害を受けるだけだった。そこから現在まで、防災や減災の仕組み、言わば社会のレジリエンス（適応能力）を営々と作り上げてきて、ギャップが小さくなった。しかし、今後を考えると、例えば日本の場合は人口減少や財政上の制約などから、これまでと同じよう適応能力を上昇させることが困難かもしれない。そうすると、将来このギャップが再び広がっていく。そうした状況に対して、緩和策は温暖化に災害外力を下げる意味があり、適応策は人間社会の対応能力を上げる意味がある。この2つでギャップを埋めようというのが気候変動のリスクマネジメントの基本的なコンセプトだ。第5次報告書では、それをさらに一歩進めて、人間社会と自然環境が適応できる範囲に気候変動を抑制することが必要だと述べている。

それ以前のWGIIの報告書では、緩和についてはほとんど触れていなかった。そこから、大きく踏み込んで、緩和と適応には相補的な関係がある、適応できる範囲に緩和策を発動する必要がある、と明言した。

これが、パリ協定の2℃目標や1.5℃の努力目標に反映された。1.5℃目標の経緯だが、パリ協定の議論で、小島嶼国連合（AOSIS）が2℃上昇の世界では海面上昇で我々の国は存続できない、1.5℃に抑える必要があると強く主張した。それにEUが同調し、最終的にはアメリカも賛同して、それで1.5℃の努力目標がパリ協定に入った。まさに適応できる範囲に気候変動を抑制する目標となった。

2014年に第5次報告書が出された後、2015年にパリ協定が締結され、SDGsが合意された。私自身は2015年はエポックメイキングな年だったと考えている。当時から、潮目が変わる年だと感じていた。緩和策として、再生可能エネルギーへの転換や電気自動車の普及促進、化石燃料に対する投資の絞り込みなど、$CO_2$ゼロエミッション、脱炭素社会への流れが生まれ、2020年以降、非常に大きく広がってきた。

1.5℃努力目標が設定された後、UNFCCC事務局からIPCCに、1.5℃上昇とはどういう意味を持っているのか明らかにしてほしいと要請が来た。それに応じて、IPCCは特別チームをつくり、1.5℃特別報告書を作成した（図2-1-10）。内容は多岐にわたるが、核心部の内容は、1.5℃上昇に抑える目標を達成するためには、現在の排出量約400億トンを2050年にはゼロにして、2050年から2100年はマイナス、ネガティブにしなければいけないという点だ。

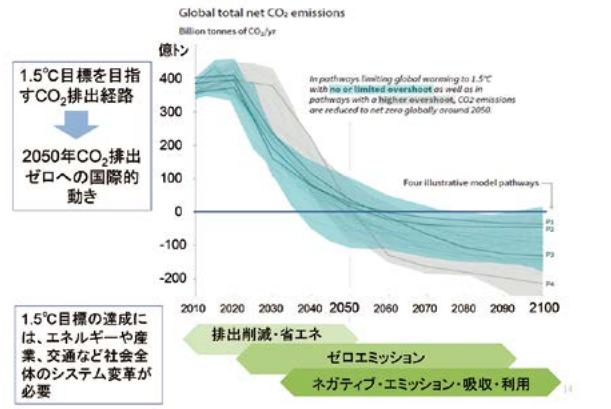



**図2-1-10　1.5℃目標に向けた排出経路**
（IPCC1.5℃ Special Report, 2018）

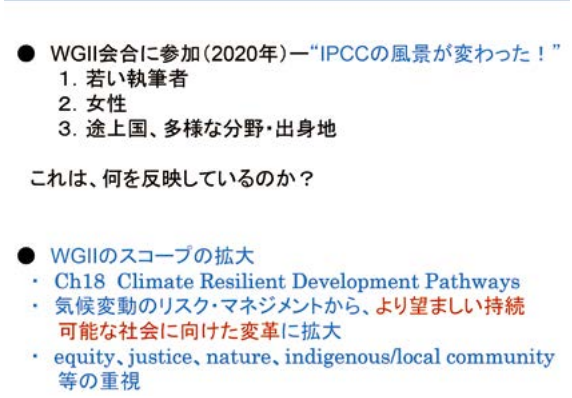



**図2-1-11　WGII第6次報告書に向けた議論**

この排出経路に沿って、2050年$CO_2$排出ゼロ、カーボンニュートラルとする宣言を各国が賛同していった。現在120を超える国や地域が宣言しているが、我が国も昨年10月に菅総理大臣からカーボンニュートラル宣言が出された。

この実現には、今までの排出削減や省エネ政策や技術だけでなく、排出ゼロ技術が必要だが、それでも不足しており、さらに吸収する技術（ネガティブエミッション）が求められる。大気中の$CO_2$濃度を減らすため、何らかの形で吸収、あるいは積極的に活用できる技術が必要となる。

WGIIの第6次報告書は、現在準備中で議論が進んでいる。私はレビューエディターなので、最初からは執筆者会合の議論に参加していない。昨年1月頃、ある程度原稿ができた段階だが、ポルトガルで開催された執筆者会合から参加した。そのとき、私が感じた印象は、IPCCの風景が変わった（図2-1-11）。その意味は、執筆者が若い。女性が多い。途上国の研究者や、様々な先住民族の代表といった多様な分野、出身地の方が多いといったことだ。これは大きな社会の変化を反映しており、さらに言えば、社会の変化に対応してWGIIの視野が拡大したとも感じた。

全体のまとめにあたる18章のタイトルはClimate Resilient Development Pathwayだと紹介したが、これは気候に対する強靭な開発経路とはどういうものかに関する内容だ。つまり気候変動のリスクマネジメントから、より望ましい持続可能な社会に向けた開発の方向を示すように視野が拡大している。

こうした動きに対応して、執筆担当者の中に社会学者とか、経済学者といった人が増えた。より幅広いテーマとして、equityやjustice、nature based solution、indigenous/local community knowledgeの重視など、気候変動と直接的には一見つながらないように思われるものが浮上してきている。

昨年1月の会議は、18章の執筆者と事務局メンバーとで300人弱が集まった。総括執筆者（CLA）の3人は、オックスフォード大学の研究者とアメリカの経済学者、インドの社会学者だ。レビューエディターは、私とアリゾナ大学の地理学の研究者の2人で、レビューコメントを反映する責任を負っている。18章でも女性の執筆者や、西欧の研究者だけではなく、途上国の出身者も多い。ダイバーシティをまさに体現するようなチームになっている。

その会議で特に議論されたことだがClimate Resilient Development Pathwaysというときに気候変動対策だけ、Solution Spaceだけでは足りない（図2–1–12）。気候変動の問題から社会全体の持続性をどう確保するか。 SDGsを実現することに対して、気候変動対策がプラスに貢献するか、ネガティブな効果はないのか。気候変動対策によってどう幸せな社会に結びつけられるかといった論点だった。こうした、非常に多様な観点に対して、延々と議論が行われた。

**図2–1–12　　気候変動対策×SDGs**

例えば、SDGsとのシナジーとトレードオフに関して、フランスの黄色いベスト運動は、対策コストを車の運転手や石油燃料に関係する職業の人だけが負っていて、生活が苦しくなるのはおかしい、と大きな反対運動が起きた。もともと政権側が示していた燃料の増税は、気候変動対策としては経済的にはあり得る対策だった。しかし、それがそういった一部の職業の人たちに対して不公平に結びつくのは果たしてどうなのか、といった問題も議論された。

## 2. 気候変動研究の課題

気候変動の問題を俯瞰すると図2–1–13のように考えられる。まず人間活動からGHGsが出て、炭素循環などを通して地球の大気中にたまる。その結果発生する温暖化や気候変動による影響が出てきて、適応策、緩和策が必要になる。それが社会システムを変えて新しい排出構造につながる。このサイクルがもうまく回れば、徐々に脱炭素社会につながっていく。

WGIの範囲は、温暖化の自然現象の解明と将来予測で、IPCCの当初はこれが非常に重要で大きな力を発揮してきた。 WGIIの守備範囲は、その変化が社会にどのような影響を及ぼし適応策の効果はどの程度か、WGIIIの担当は、その緩和策や社会システムの変化の分析ということだった。

WGIIがSolution Spaceと第５次報告書で言ったのは、この全体をまとめて考える必要があるという課題意識だった。第６次報告書では、気候変動問題だけでなくて、SDGsや、他の社会問題との関係をもっと捉える必要があるという方向にさらに拡大している。

拡大するスコープに対して、気候変動研究はどう対応していくべきか（図2–1–14、15）。５つの課題が考えられる。

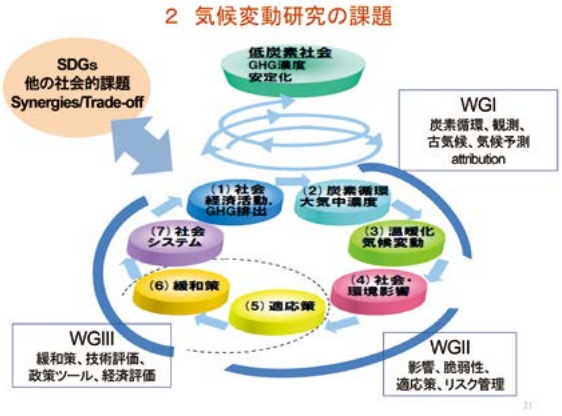



**図2–1–13　　気候変動研究の課題**

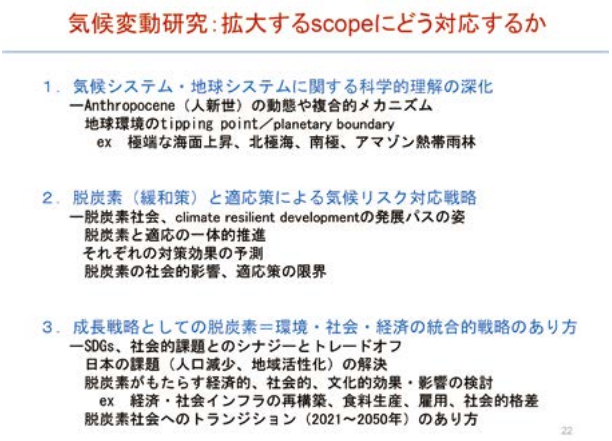



**図2–1–14　　拡大する視野への気候変動研究①**

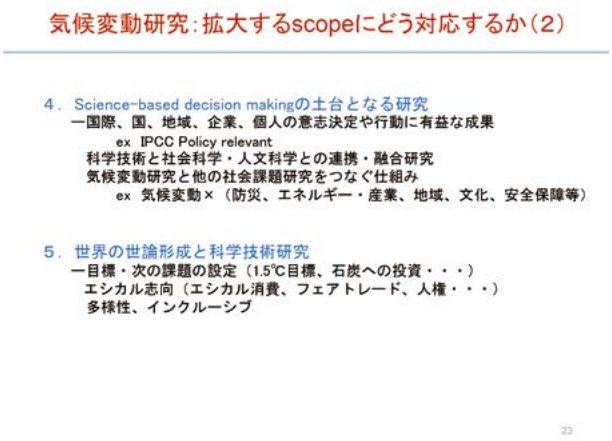



**図2–1–15　　拡大する視野への気候変動研究②**

まず、気候システム、地球システムに関する科学的理解を深化させることが基本となる。特に人間のもたらしている役割、複合的なメカニズムの解明、地球環境のtipping pointやplanetary boundaryなどを解明

していくことも重要である。

第2に、緩和策と適応策による気候リスク対応戦略を考える上で、Climate Resilient Developmentのあり方の検討が重要である。それぞれの対策の効果、何をすればどこまで対応できるのかといった予測が今後の大きな研究課題になる。脱炭素を進めるとき、コンフリクトを持つような社会的な影響、適応策では対応できなくなる限界がどこにあるか。これらを明らかにしていくことも重要な課題だ。

第3に、成長戦略としての脱炭素を言い換えると、環境、社会、経済の統合的な解決を目指すべきだ。SDGsなどの社会的課題とのシナジーとトレードオフをどう考えるか。日本の場合では、人口減少や地域活性化の問題の解決にどう貢献できるか。そういった、気候変動だけの視点ではなく、より広い社会的な文脈の中で考えていく必要がある。

4番目に、気候変動科学は、Science–based decision makingの土台となる成果を出す必要がある。国際レベルから国、地域、企業、個人に至るまで意志決定をする際、それぞれが、ある程度先の見通しを持って、それぞれ納得できる行動を選択できる土台をどう作っていくか。それには科学技術と社会科学、人文科学との連携・融合研究や、気候変動研究と他の社会課題研究をつなぐ仕組みが重要となる。

5番目に世界の世論形成と科学技術研究だ。日本国内の議論と今日ご紹介したような国際的な議論の雰囲気は若干違っているように感じる。本日は、時間の関係があるので、詳しくは述べないが、問題だと感じている。

### 3. 環境推進費 S-18 の紹介

現在進めている環境推進費 S-18 について簡単に紹介する（図 2-1-16）。2018 年に施行された適応法では、全国的な影響評価と適応評価を 5 年おきに行うと定めている。その 2025 年の評価に対応するため、気候変動影響予測・適応評価の総合的研究を実施することが主な目的だ。統一的な前提で全国的な予測をする、他の研究グループと連携を取ることも目的としている。

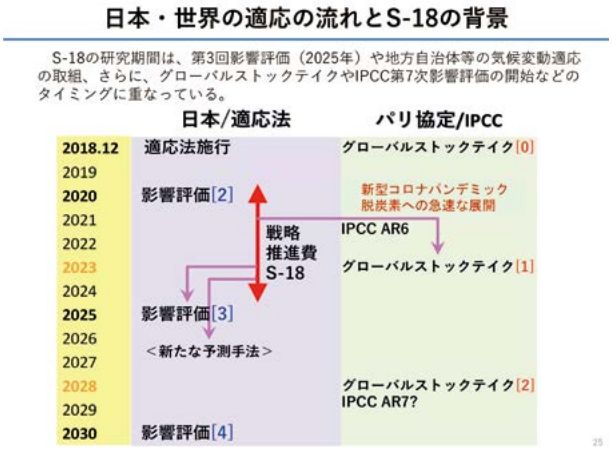



図 2-1-16　S-18 の背景

図 2-1-17　S-18 の研究の流れと体制

研究の流れは図 2-1-17 に示すとおりだ。まず、気候シナリオや社会経済・適応シナリオを共通化するところから進めている。農林水産業、自然災害、水資源、都市生活など各分野に対する影響予測を行い、それを政策につなげるという枠組みだ。温暖化レベルや気候モデルの種類、社会経済条件の違い、適応策の有無により将来影響がどうなるか描く。

研究テーマは 5 つで構成されている（図 2-1-18）。テーマ 1 はまとめ役で、テーマ 2、3、4 が分野ごとの研究、テーマ 5 が経済的な影響評価を行うグループだ。5 つのテーマの中に 19 課題、研究者が約 200 人という大きな体制で、一つの方向を共有して、足並みをそろえて動くようにするのには努力が必要だ。

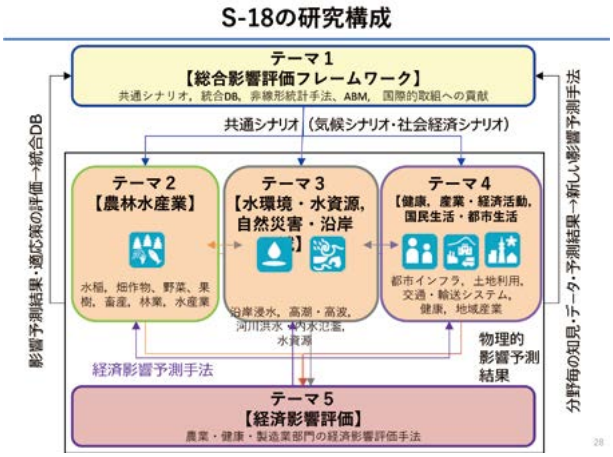



図 2-1-18　S-18 の研究構成

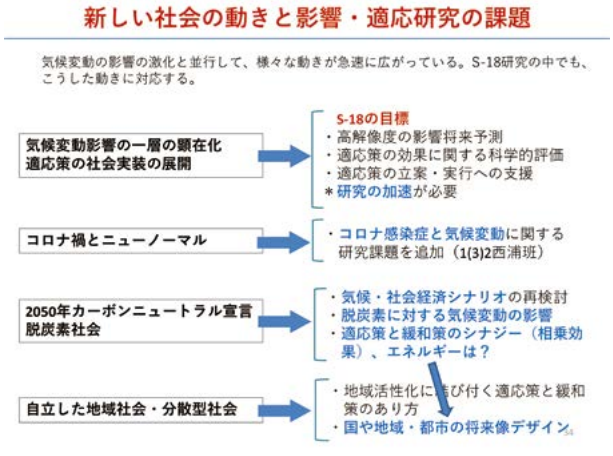



図 2-1-19　新しい社会の動きと適応の課題

近年、気候変動影響が一層顕在化してきており、気候変動適応法も成立した。社会が対応する体制を整えるための土台を築く研究がS–18の当初の目的だった。しかし、去年4月に開始した後、企画段階にはなかった新しい課題が生じた（図2–1–19）。

サブテーマ1（3）2では、京大の西浦教授のグループが気温と新型コロナウイルスの関係の研究を進めている。 S–18を開始するやいなやCOVID–19のパンデミックが発生したので、西浦教授の研究班のテーマに加えた。米国の研究者が、州の単位で気温と人口密度との感染との相関を報告した。気温が低くて人口密度が高いほどCOVID–19の疾患が広がりやすいという仮説だ。気候変動の影響研究で、もともと感染症に関係する研究はあったが、S–18では西浦研究班にそういった仮説を検証する研究を進めてもらっている。

昨年の秋にはカーボンニュートラル宣言が出た。それに呼応して、脱炭素社会において気候変動適応がどの程度必要で、どういう効果があるのかを研究するテーマを追加した。脱炭素がうまくいったとしても、気候変動自体はある程度進むため、自然災害などもさらに厳しくなる。脱炭素社会といっても、緩和策と適応策がバランスよく組み込まれる必要がある。脱炭素社会だからと緩和だけの視点ではなく、適応の視点の重要性を提言したいと考えている。

COVID–19とニューノーマルの文脈で、自立した地域社会、分散型社会を目指す必要があると主張されている。この流れの中で、適応策を国や地域、都市の在り方の将来デザインに結びつけるところまでS–18で成果を出したい。非常にチャレンジングな目標だが、努力したい。



**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：これからのニューノーマルやカーボンニュートラルによる社会の変化が気候変動予測にどう影響を及ぼすか、相互作用が重要と御指摘があった。これから起きる社会の変化について、まだ変化が起きてない状況を、何かをもって想定することになる。その実際の研究はどのようなアプローチで行われるのか伺いたい。

A：将来、脱炭素が進んだ状況、あるいは社会的な変化を影響の将来予測にどう取り入れるかという質問だが、この点は、S–18の共通シナリオに関係する。この共通シナリオでは複数の将来を想定しており、将来の気候予測については、温暖化が強く進む4℃上昇の世界、パリ協定での2℃上昇、1.5℃上昇の世界といった異なる外力の変化を考えたシナリオが作成されている。

第6次報告書に向けた気候予測は、CMIP6の気候予測データがどんどん出されている。日本の影響予測を行う際、その全球スケールのデータを日本の範囲にダウンスケーリングする。それぞれ4℃、2℃、1.5℃上昇の世界に対する日本の将来の予測をまず気候モデルで行う。これは、S–18ではなく、別のプロジェクトなどで既に行われており、それを使わせてもらう。

気候シナリオだけでなく、影響を受ける社会経済条件も複数想定している。4℃上昇の世界には、そこに行きつく日本の将来像がある。2℃上昇の世界でも、そうなるような人口の変化や産業の変化がある。1.5℃でもそうだ。将来の社会経済に関する社会経済シナリオでは、人口と土地利用の分布の違いを考慮する。これも、この分野を研究している人たちと協力する形である。

今後2℃上昇にとどめるには、その分だけ脱炭素が進めることになる。成り行きシナリオとの差を取ることで、脱炭素化の効果を比較できると考えられる。

さらに踏み込んで、対策の面で言えば、適応策の中にも緩和策に対して相乗効果、よい影響を持つものと緩和策とバッティング、コンフリクトを起こすようなものがある。緩和策と適応策の相互の関係を押さえて、両方ともに役立つ対策が提案できないか検討している。大きな枠組みとしては、こういったアプローチである。

Q：IPCCの創設の当初の時期は、地球温暖化の真偽の議論が多かった。世界各国の科学者、研究者が集まっていろいろな意見を検討していく際、基本的に一致した見方や確からしさの判定は合議制のような形で行っているのか。

政府に対する科学的助言がCOVID-19でも話題になっているが、IPCCの地球温暖化は科学的助言の課題により長く向き合ってきている。各国政府は温暖化に納得する、しないという判断の前に、それぞれの産業政策などへの負の影響もどうしても考えるだろう。それと独立して、IPCCでは科学的な確からしさを判断するために、どのようにそういう影響を避けて、科学的見解の議論しているか、ご教示ください。

A：IPCCは科学的な評価を行うのが目的の団体であることから、この点は核心的な問題である。この問題に対して、報告書の回を重ねるごとにたくさんの方法、システムを積み上げてきている。その1つとして、IPCCランゲージと呼ばれる仕組みがある。述べていることに対する確信度に関して、一定の基準で評価して、その評価の標語を報告書に掲載する方式である。

一定の基準での評価のため、科学者が個人の意見を書くのではなく、文献に基づく確からしさと、執筆者間の一致度という2つの軸を定めている。1つ目の軸は、あるテーマについて、複数の査読論文に当たり、、どのくらいの精度でその結論が導かれているか調べて評価する。もう1つの軸は、その章を担当する複数の執筆者の間で一致度があるかという尺度だ。確からしさが高く、一致度も高い項目ならば、IPCCランゲージで「非常に高い確信度」と表記する。

IPCCの報告書をそういう目で読むと、いろいろなところでIt is very likely thatとか、virtually certainとか、どの程度確からしいという表現が書かれているのに気づかれると思う。

Q：分野を超えた議論が今後ますます重要になってくる。ある被害に対しての対応には、たとえば、堤防をどうするか、発電所をどうするかとさまざまある。国全体の政策に対して、経済学や社会科学者も入れて議論していかないと、なかなかうまく進んでいかないだろうと感じる。

A：S-18プロジェクトにも非常に深く関係する観点だ。自然災害や農業などの被害の予測では、何人被害を受けるか、何ヘクタールが水に沈むか、といった算定だけではなく、経済的被害として金額を算定しようと考えている。

経済的被害の算定の方法は2つある。1つは直接的に損害を受けたものが金額的に幾らに相当するかという直接的な被害を算定する方法だ。もう1つは経済モデルを使って国のGDPなど、日本経済全体の中にどれだけの波及効果があるかという計算を行う方法だ。将来の被害額を計算する際、その前提としてどこでどれだけの被害が起こるかを推定する。雨の降り方の変化といった災害外力の見積もりには、気候モデルを使う。被害を受ける社会の側の変化は社会経済シナリオで想定する。こうして、影響研究を、経済評価にまで結びつける努力している状況といえる。

本講演全体を通しての引用文献[1,2]


1 IPCC WGII SPM (2014)：Summary for policy makers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, pp. 1-32.

2 IPCC 1.5℃ Special Report (2018): Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. et al. (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

# 2.2 地球をめぐる温室効果ガス

三枝 信子（国立環境研究所）

※講演日：2021年5月27日

本日は地球をめぐる温室効果ガス（GHG）の循環及びそれに関わる最近の社会の状況などを報告する（図2–2–1）。

**国立環境研究所について**

国立環境研究所（以降、「国環研」）について簡単に紹介する。職員は1,000名弱で、そのうち研究人材は職員240名程度とポスドク140名程度だ。地球規模の持続可能性と地域の繁栄を両立させる、という新たな目標に向け新しい中長期計画を始めた（図2–2–2）。それに応じて、中長期的な研究を担う8つの研究領域に改組された。5年間集中的に分野横断で行う8つの戦略的研究プログラムも開始した。黄色で囲った4つの研究プログラムが、特に気候変動に関わる。気候変動の問題を束ね、情報発信を行う気候危機対応研究イニシアティブも設置された。

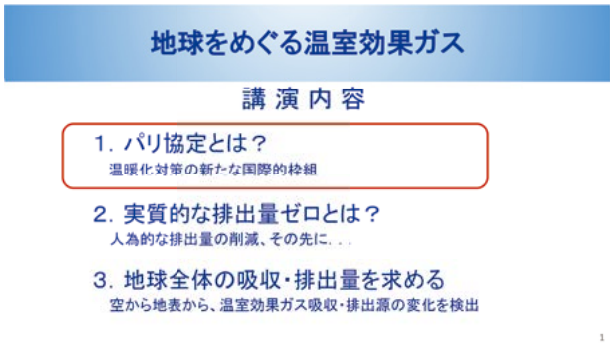



**図2–2–1　講演内容**

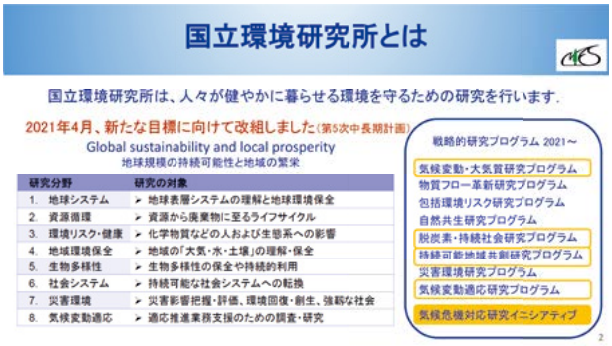



**図2–2–2　国立環境研究所の紹介**

**パリ協定とは**

パリ協定は2015年に国連気候変動枠組条約締約国会議（COP）21で採択され、2020年から開始した。産業革命前からの気温上昇を2℃、できれば1.5℃程度に抑える目標だ。そのためには、今世紀後半にGHGの実質的な排出量をゼロにしていく、大変強い削減の努力が必要となる。

2018年にパリ協定の実施ルールが決まった。各国・地域は、グローバル・ストックテイク、と呼ぶサイクルを5年ごとに繰り返す。ここでは、各国からのGHG排出量の報告の透明性が最も重要である。各国が別々のルールでGHG排出量を算出していては比較にならない。国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が国家GHGインベントリガイドラインを作成している。かなり分厚い資料だが、この方法に基づいた報告が義務化されている。数年～十年に一度改定されているが、2019年の改定でもさまざまな項目について新たな算定方法が追加された。加えて、従来のGHG排出量の算定方法はエネルギー消費量等の統計量をボトムアップ的に積み上げて算定していたところ、そこに、大気中GHG濃度の観測データとインバースモデルを使った排出量・吸収量の算出結果が国別報告の品質管理や検証システムの一部として利用可能である、と新たに追加された。その背景には、大気の流れを3次元的に再現できる数値モデルを使い、どこからどれだけのGHGが排出されたという逆推定ができる解析手法が開発され、高度化がたいへん進んでいると言う背景がある。

これには大きな意味がある。統計量に基づく従来の方法と、大気観測と逆推定に基づく新しい方法が比較

可能になることで、両者はお互いに精度を上げていくことができるためである。

2023年にはパリ協定の第1回グローバル・ストックテイクが行われる予定だ（図2–2–3）。ただし、COVID–19の影響などがあり、具体的な手順がまだ公開されていない。プロトコルの公開をただ待っているわけにもいかない。国際的な研究プログラムではこぞって、2022年ぐらいをめどに、全球、国別の温室効果ガスの吸収、排出量のベストのデータをつくろうと盛んに取り組んでいる。

パリ協定のさらに詳細はぜひ国環研のWebサイト（図2–2–4）を御覧ください。

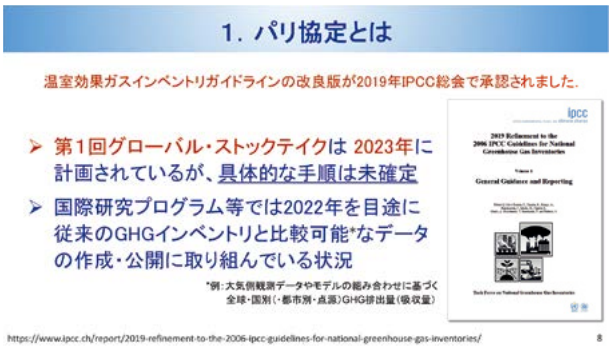



**図2–2–3　グローバル・ストックテイク**

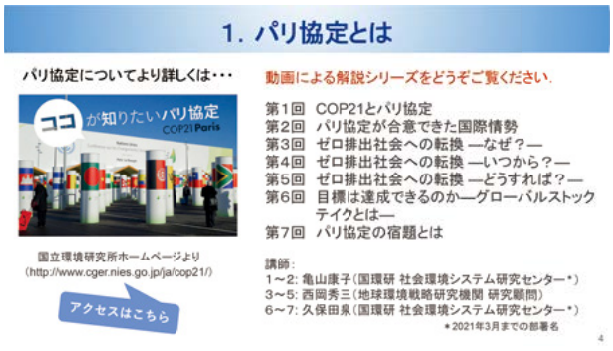



**図2–2–4　パリ協定の詳細**

**実質的な排出量ゼロとは？**

次に、実質的な排出量ゼロの道筋について紹介する。国環研のGHGインベントリオフィスが作成している日本のGHG排出量のデータを示す（図2–2–5）。2019年度は2013年度と比べ14%減ったが、削減スピードはまだ十分ではない。産業起源、運輸起源、家庭起源、それぞれの排出源で削減努力は進んでいるが、まだ十分ではない。

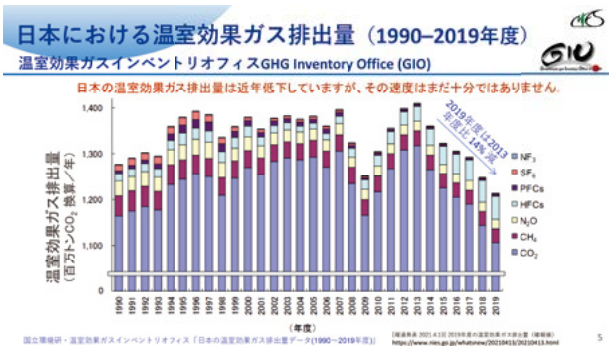



**図2–2–5　日本のGHG排出量**

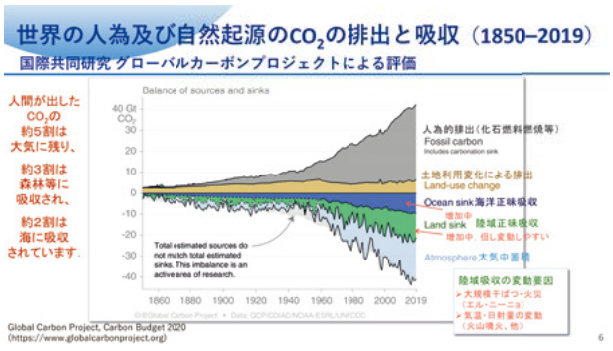



**図2–2–6　世界の全体の$CO_2$排出・吸収**

日本政府は今年、排出削減目標を大幅に引き上げ、2013年度と比べて2030年は46%排出量を削減する新たな目標を定めた。2050年にはさらに削減して、正味排出量をゼロとする目標だ。46%削減に至るのも大変だが、その先は、さらに削減しにくいものに対応するという、より厳しい道筋となる。

正味排出量ゼロとはどのような世界か。それは人為起源の排出量と人為起源の吸収量をバランスさせることだが、それで本当に世界の気候を安定化させることができるかどうかは人為起源の排出量だけの理解では足りない。世界全体の人為起源と自然起源の二酸化炭素（$CO_2$）の循環の理解も必要となる。人為起源の

GHG排出には化石燃料等と、農地開墾などに伴う土地利用変化がある。人為排出された$CO_2$の行き先だが、2010年から2019年の10年間のデータでは、約半分が大気中に蓄積され、3割が陸域、2割が海洋に吸収されたと見積もられている。より過去からのデータを見ると、この排出量と吸収量は時間と共に大きく変化している（図2–2–6）。化石燃料による人為起源の排出量が現在まで大きく増えており、これを急速に大幅に削減しなければならない。土地利用変化による排出も大きいが、これをゼロにしていくことはかなり大変だ。陸や海が今後もこれまでのように吸収し続けてくれるのかは実は分からない。なぜなら、例えば大規模な火災や干ばつがあれば、すぐに陸の吸収量は減ってしまう。人為排出だけではなく、自然起源の変動もしっかり見ていかなければならない。

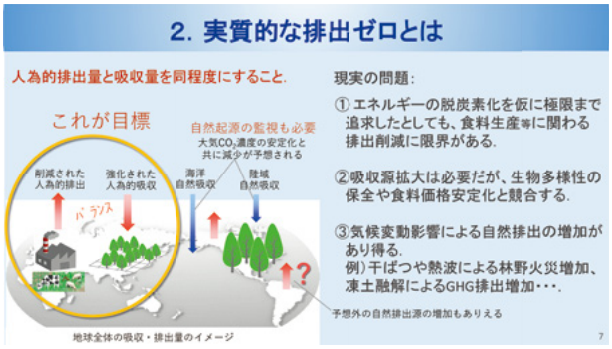



**図2–2–7　実質的な排出ゼロの現実の問題**

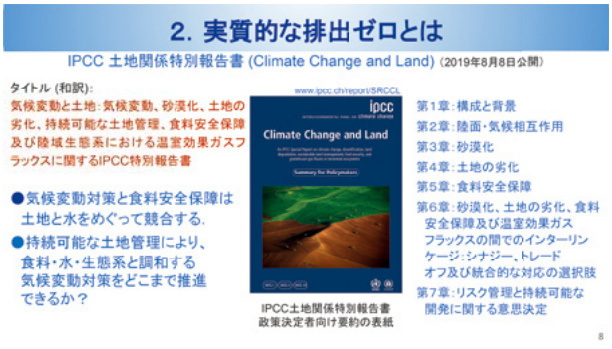



**図2–2–8　IPCC土地関係特別報告書**

実質的な排出ゼロで目指す世界を端的に示す（図2–2–7）。人為起源の排出量をできる限り速やかに減らし、人為起源の吸収量とバランスさせる。これが実質的な排出ゼロの目標だ。しかし、自然の排出と吸収の変動や未知の排出源なども、しっかりと監視しなければならない。これから起こり得る現実の問題として、非常に多くの努力によりエネルギーの脱炭素化が急速に進められたとしても、食料生産や土地利用変化による排出をゼロに近づけることは困難な道のりになるだろうと予想される。それを相殺するための吸収源拡大がどうしても必要となる。しかし、吸収源をどこまでも拡大すると、生物多様性や食料生産の問題と競合する。さらに、予期していない干ばつや熱波、あるいは永久凍土の融解といった自然起源GHG排出の増加もあり得るので、全体を監視していく必要がある。食料生産関係について、IPCC土地関係特別報告書の知見を紹介する（図2–2–8）。私も参加して、さまざまな気候変動対策と持続可能な土地管理、生態系保全、食料生産との競合などの章を担当した。

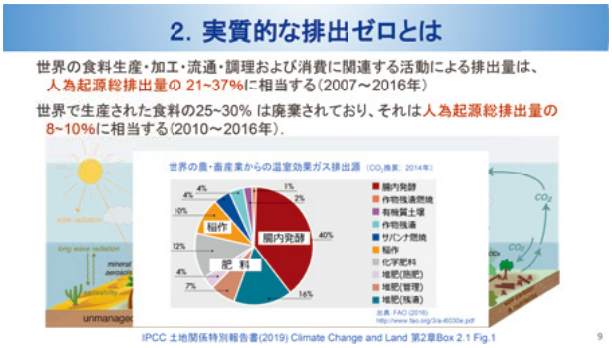



図2-2-9　食糧システム関連GHG排出

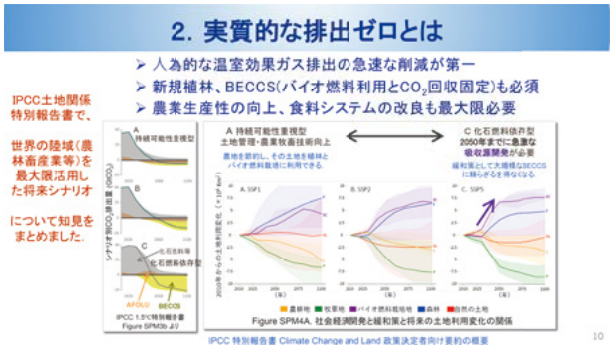



図2-2-10　複数の将来シナリオ

日本国内での排出は産業起源が大きく農業起源の排出の割合は小さいが、これは多くの食料を輸入しているからだ。私たちが食べている食料は、他の国の土地を使って、GHGを排出して生産されている。私たちも食料生産で排出されるGHGを、しっかり考えなければならない（図2-2-9）。世界全体の食料システムに関連するGHG排出量は、人為起源排出量の2割から4割弱にも上ると推計されている。しかも生産された食料の約3割が廃棄されており、大変もったいない。この削減はGHG排出削減のためにもなり、大きな努力を向けるべきだ。

食糧生産で実際にどこからGHGが出ているか。よく言われる牛や羊などの反芻動物の腸内発酵で出るメタンが4割程度。化学肥料の施肥で出る亜酸化窒素も4割程度。稲作の水田から出てくるメタンが1割程度。こうした大きな割合を占めるものをコントロールしていくことは、非常に大事な仕事になる。

人間は食料を食べなければ生きていけない。現在の農業生産システムを一気に脱炭素化するのは非常に苦しい。最後にはどうしても吸収源を拡大しなければいけないという議論が残る。

大気から$CO_2$を除去するネガティブエミッション技術にはいくつかある[1]。土地関係特別報告書では、大規模植林とBECCSの2つが大きく取り上げられた。後者はバイオマスを育てて、それを燃料とした発電を行う際に$CO_2$を回収するものだ。ただし、1.5℃目標を達成するために、この2つだけに頼るのは非常に危険だ。これだけに頼ると最大1億5,000万人が食料に困る世界になってしまうことを土地関係特別報告書では述べている。さらに、土地関係特別報告書では1.5度目標を達成するためには農林畜産業を含む世界の陸域をどのように活用する必要があるかを複数の社会経済シナリオに基づき計算した（図2-2-10）。

持続可能な方法をできる限り取り入れ、2020年頃からすぐに温室効果ガスを削減する持続可能性重視シナリオや、2030年頃まで化石燃料が減らせない化石燃料依存型シナリオ、中間的な中庸型シナリオなどがある。化石燃料依存型シナリオでの1.5度目標達成には2030年頃から20年ぐらいの間に大量の面積をバイオ燃料作物に変え、森林も増やさなければならない。その代わり食料生産、農耕地と牧草地をすごいスピードで減らさなければいけない、という計算結果だ。このシナリオでは、2100年までに750万$km^2$もの面積をBECCSに使わなければいけない。これから20年ほどの短い期間で、インドの2倍強の面積をバイオ燃料作物の生産地に変えないといけないという、無理筋のシナリオだ。吸収源は必要だが、吸収源だけに頼るのではなく、今すぐエネルギーその他の脱炭素化を急ぎ進めましょうという結論になる。

1　Phil Williamson, “Emissions reduction: Scrutinize CO2 removal methods”Nature, vol.530, pp.153–155（2016）

ここまでを（図2–2–11）にまとめる。

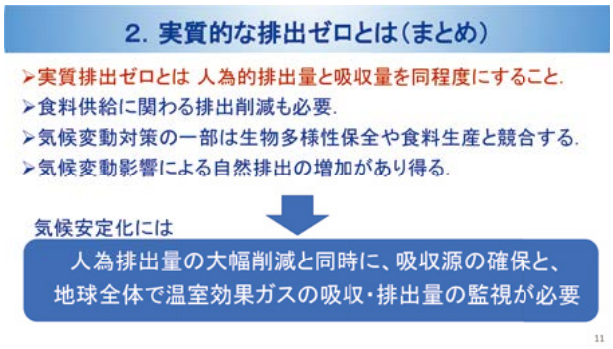



**図2–2–11　実質的な排出ゼロのまとめ**

**図2–2–12　国環研での観測及びモデル研究**



**地球全体の吸収・排出量を求める**

国環研で行っている地球全体のGHG吸収、排出の研究について紹介する。1990年代から大気、海洋、陸域におけるGHGの動態について観測及びモデルの研究を続けている（図2–2–12）。

2009年以降、環境省、JAXAと合同で温室効果ガス観測技術衛星GOSAT（いぶき）1号、2号を打ち上げ、地球全体のGHGを監視している。観測の空白域をできる限り減らすため、GOSAT、GOSAT–2のデータを取り込みながら、国別の排出量の推定値の精度を上げる研究を行っている。

大気観測とインバースモデルというデータ解析からGHG排出、吸収量推定は先ほどご紹介したが、幾つかの重要なポテンシャルがある。まだ統計データがあまりそろっていない新興国などの排出報告の不確実性を減らせることが1点目。大規模泥炭火災や、農地・湿地・凍土などからの間欠的な排出は従来の方法で精度よく求めるのが難しく、大気側の観測とインバースモデルから新しい評価データをつくるのが2点目。1年毎に策定される国別報告書に比べてより速報性のあるデータを提供することが3点目。例えば大都市などの特定の地域で、準リアルタイムで毎月、毎週、毎日と把握できれば、排出削減の対策の効果がどのくらい現れているか検討できる。こういうシステムをできるだけ早くつくりたい。

それに向けて、具体的には、①地球全体の大気観測と温室効果ガスの吸収、排出量の逆推定の研究、②それと比較するための海や陸の自然起源GHG収支のスケールアップの研究、③従来のインベントリデータの精度を上げる研究、を行っている。この三者を世界中、あるいは国別、地域別、都市別で比較して精度を上げていく研究を始めている。

実際の観測プラットフォームを紹介する。地上観測の歴史が一番長く、基本の観測である。海洋では、海運業者の協力を得て、太平洋やオセアニアを行き交う貨物船で$CO_2$の海洋表層の濃度を測っている。空では、日本航空の協力を得て、日本と世界各地の空路で、大気中$CO_2$を立体観測している（図2–2–13）。こうしたデータを使ってモデルの高度化を進めている[2]（図2–2–14）。

2　https://acp.copernicus.org/articles/21/9455/2021/

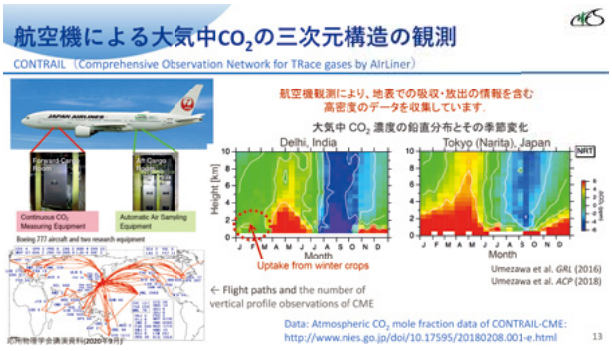



図2-2-13　航空機による大気中$CO_2$観測

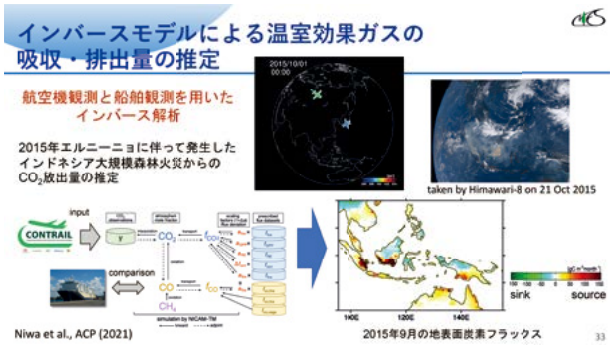



図2-2-14　インバースモデルによるGHG推定

数値モデルで大気の流れを計算すると同時に、飛び交っている飛行機で測定された大気中濃度のデータを順次取り込み、計算結果を向上させるデータ同化の研究も進めている。これにより、間欠的で捉えにくい東南アジアの火災の排出量なども、かなり現実的に捉えられるようになってきた。

大気観測は非常に重要だ。例えば沖縄県の波照間島サイトは、中国の風下に当たり、その排出量が解析できる[3]。2020年2、3月に中国でCOVID-19拡大防止のロックダウンが行われ、産業活動が非常に低下した。その際の$CO_2$やメタンの詳細な観測と解析も実施し、$CO_2$が数割ほど減った推定を報告している。

上述のトップダウン的な解析に加え、ボトムアップ的手法の改良も進めている。たとえば、東アジアにおけるメタンの排出量を陸域生態系プロセスモデルで解析している[4]。同様に、亜酸化窒素も解析している[5]。亜酸化窒素は、農業起源が多い。時空間的にどこから排出しているか、ボトムアップ的手法で精度を上げていこうとしている。

大都市圏での排出量の準リアルタイムモニタリングも始めている。東京スカイツリーに観測システムを置かせてもらい、様々な種類のGHGやその同位体比の測定している（図2-2-15）。意外かもしれないが、東京には緑地が結構あり、植物の吸収と人為起源の排出を分離するのがなかなか難しい。そういった起源別の吸収、排出量の分類も含めて、まだ道半ばだが取り組んでいる。

まとめを図2-2-16に示す。

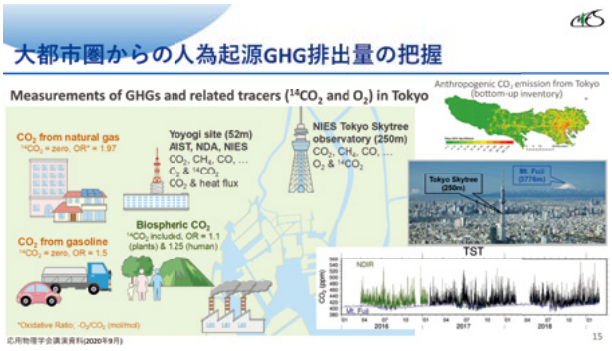



図2-2-15　大都市圏での人為GHG排出の把握

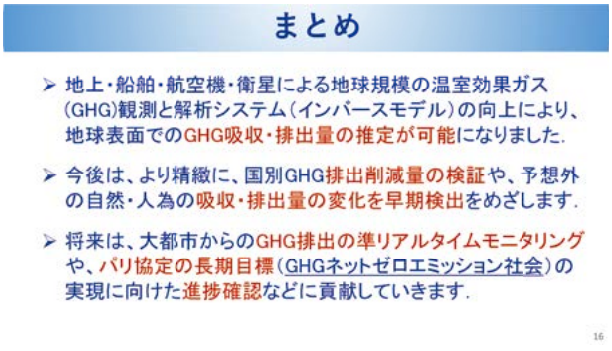



図2-2-16　まとめ

3　https://www.nature.com/articles/s41598-020-75763-6
4　Itoh et al., Science of The Total Environment Volume 676, 1 August 2019, Pages 40-52,
5　Itoh et al., Progress in Earth and Planetary Science volume 5, Article number: 55 (2018),

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：GHGと大気汚染物質の排出の同時観測によるベネフィットについて、さらに伺いたい。

A：GHGと大気汚染物質の同時削減は、都市環境を人間の健康にとっても良い状態にするシナジー効果がある。自治体でも、都市計画、大気汚染、気候安定化、GHG削減を行う部署が違うことがある。GHGと大気汚染物質の同時削減の対策を進めていくことは、自治体での縦割りをなくしていく後押しにもなりえる。

Q：従来のインベントリデータから見えなかったような排出源が特定できるといった可能性はあるか。また、将来についてさらに伺いたい。

A：ある。さらに、現実のGHG排出量が、従来のインベントリデータでの報告値と違うことがあれば、こういった観測と解析で推定できる。その際、インベントリデータの基になるエネルギー消費が行われる場所と、現実にGHGが排出される場所が違うという点も重要だ。発電所でエネルギーをつくるための排出があったとしても、そのエネルギーはどう送電されて、どこで利用されているか。私たちが到達している今の考え方よりも、もう一段深くサプライチェーンを知らないと解決できないような問題に今後ぶつかっていくことになる。この困難を乗り越えることでサプライチェーン全体の排出量の把握と、それも見据えた対策の効果の評価ができないかと、夢見ている。まだまだ将来的な内容となる。

Q：中国のロックダウン下でのGHG排出量の減少に関連して、さらに伺いたい。中国のロックダウンでの$CO_2$の減少が、どのぐらい地球温暖化に影響を与えられたか。どのくらいの時間差で、どのくらい気温上昇を避けるのに影響を与えられそうか、ご知見を願う。

A：確かに、2020年2月、3月の期間は、中国の排出量は非常に大きく減った。しかし、1年間、全球で見ると、わずか7%から8%程度の排出量の減少という推定が速報されている。より確実性の高いデータでの確報は例年のペースなら、おそらく2021年末頃とみられる。が、この7%程度という割合は自然変動レベルと同じ程度で、緩和にとってインパクトがない水準だ。今は経済活動が戻りつつあり、またリバウンドするのではないかと懸念されている。そのため、グリーンリカバリーの国際的な議論を進めるべきだ。

Q：もし仮に、2050年に$CO_2$排出実質ゼロの削減ができた場合、地球温暖化の上昇がどのくらいのタイムラグで抑えられるか。もし、そういった研究があれば、ご知見を教えてください。

A：様々な研究がなされている。$CO_2$やメタン、亜酸化窒素といった様々なGHGが、それぞれどのぐらい残るか計算されている。2050年に実質排出ゼロになっても、それまでの蓄積分が残る。排出削減を始めてから、気温に反映されるまで、ある程度の幅をつけた予測計算が行われており、今後発行されるIPCC第6次報告書にも反映されるだろう。前回2013年のIPCC第5次報告書では、その時点で急激にGHGを排出ゼロにできたとしても、0.6℃は上昇するという計算だった。しかし、前回報告からさらに詳細なフィードバックの計算もなされ、見積りも変わるだろう。

Q：ネガティブエミッション技術は重要だが、課題がある点をご教示いただいた。この技術に対してプラスの面、マイナスの面、両方あるのだと感じたが、その評価を行う研究などあれば、さらにご紹介いただきたい。

A：ネガティブエミッションは新規技術を想像するかもしれないが、実際には各国がすでに実施している大規模植林なども含まれている。日本は新規植林する土地がないので、あまりできていない。海外で、牧草地だったが使われなくなった土地を大規模植林にするような取組が実際にある。水をめぐる競合、土地を食料生産にすべきかに植林にあてるべきかという競合は出てくるが、こういう取り組みが最もトレードオフの少ないものの1つになるだろう。エネルギー作物も現在、様々な国で作られているが、そ

の地域の食料生産と競合して食料価格が値上がりするトレードオフがないか注意が必要となる。

他にも、様々なネガティブエミッションがある。地域循環共生圏の研究テーマもいくつか見られ、植林で得られた炭素を土壌中に長期保存する研究、日本の木造建築物をより長期保存する技術などである。しかしながら、地域の取り組みをより広域に拡大するには大きな障害がある。地球規模に拡大するのは難しい。

ほかの技術もかなりの資金がかかるといったネックがある。様々な研究があるが、地球規模で将来性があるネガティブエミッション技術は今のところ見つかっていない。

Q：グローバルカーボンプロジェクトの評価を示していただいた。海は広いので相当多く$CO_2$吸収しているイメージだったので、たった2割だけかと思った。これは多分、熱の吸収とは別の議論で、直接$CO_2$を溶かし込んでいる議論の数値なのだと理解した。どのような観測で求めたデータで、どういう理解がよいか。

A：海による吸収は、主に船舶などを使って、世界中の海の表層の$CO_2$の分圧を測り、大気との間での$CO_2$交換量を推定したものである。つまり、大気中の濃度が今上昇を続けているので、物理化学的に正味で海に取り込まれるプロセスがある。また、海洋表層で生育しているプランクトンがその活発な光合成により海洋への$CO_2$吸収をつくり出しているという面がある。

Q：世界の食料関連GHG排出が21～37%という問題は重要だ。日本での直接的な食料関連の排出量は、単純に水田での稲作が6%程度で、輸送や貯蔵を含めてスーパーに並ぶ段階で10%程度と推定していた。世界には工業国ではない国も多い。世界全体で見れば、人間の食糧のためのエネルギー消費は大きく、排出量もこういった大きな比率になるという理解でよいか。

A：日本の食料に関わる直接的な排出量は、総体的に産業起源が非常に大きいため、世界平均より低くなっている。食料生産の大きな国、アジアの各国やオーストラリア、特にニュージーランドなどは牧畜も多いため、国の排出量に対する農業起源の割合が非常に高くなる。

Q：日本はエネルギーや食糧はかなり輸入している。食料輸入の際、水もバーチャルウォーターとして間接的に輸入している見方がある。同様に、食糧生産でのGHG排出を他国に負わせている、つまり世界の平均との差を他国に負ってもらっているという考え方でよいか。

A：よい。日本は食料自給率が低いため、ある意味で、農地からの排出量を他国に負わせている構造がある。それは他国の排出量に含まれているため、自国の農業からの排出量は少ない形になる。しかし、それについて、私たちは考慮しなければいけない。

# 2.3 カーボンニュートラル指向時代の短寿命気候強制因子（SLCFs）に関する研究

竹村 俊彦（九州大学）

※講演日：2021年6月24日

本日は、短寿命気候強制因子（Short-Lived Climate Forcers: SLCFs）について紹介する。$CO_2$などの長寿命の温室効果気体（GHGs）に対して、短寿命のGHGsやエアロゾルに関する最近の科学的知見をお話しする。SLCFs研究で得た知見を活かしてIPCCへの貢献や、一般向け$PM_{2.5}$予測情報の提供などを行っている。



**大気汚染について**

導入として、大気汚染について振り返る（図2-3-1）。大気汚染は化石燃料を使い始めた産業革命以降に問題になった。石炭、石油、天然ガス等の使用量が増え、人口も爆発的に増えた結果、大気汚染が大規模、深刻化した。

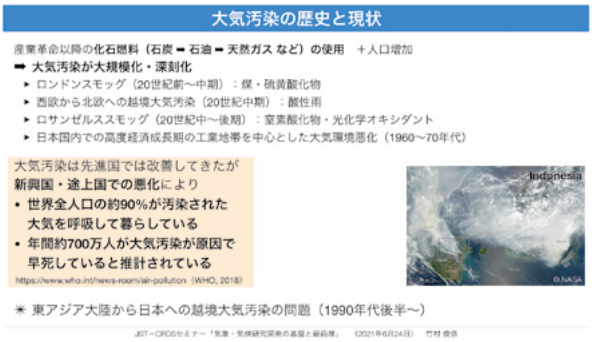



図2-3-1　大気汚染の歴史と現状

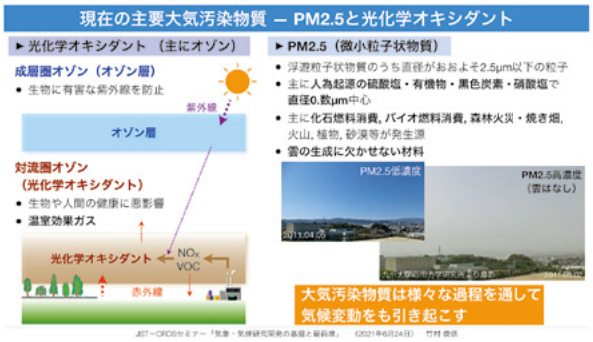



図2-3-2　主要な大気汚染物質

まず、先進国から顕在化した。20世紀初頭のロンドンスモッグが有名だ。そして、西欧から北欧へ越境大気汚染が起こり、森林が酸性雨で枯れる問題が起きた。その後、ロサンゼルススモッグも起きた。日本では高度経済成長期、主に工業地帯を中心に、大気環境が悪化した。四大公害病の一つ、四日市ぜんそくは、まさに大気汚染問題だ。

現在、先進国の大気汚染は改善してきたが、新興国・途上国では広範に悪化したままだ。WHOの報告書では、世界人口の約90%が健康影響が出る可能性のある汚染された空気を呼吸して、暮らしている。驚くべき数字だが、年間約700万人が大気汚染が原因で、本来の寿命よりも早く亡くなっていると推計されている。大気汚染は国際的に深刻な問題だ。

中国の大気汚染は近年、最悪期と比べ大分改善されてきたが、まだ冬には目で見て大気が濁った状況の日がある。世界的には森林火災が問題だ。自然発火が原因のものも一部あるが、大部分は火の不始末や、大規模農地開発のために森林を焼き払うといった人間活動が原因と考えられている。

日本国内での大気汚染物質の排出はかなり改善されたが、中国からの越境大気汚染が西日本、特に九州に及んでいるのが現在進行中の問題である。

現在、国際的に問題になっている大気汚染物質は2つある（図2-3-2）。

1つ目がいわゆる光化学オキシダントで、主にオゾンになる。御存じの通り、オゾンは成層圏、上空20 km

や30 kmでは、太陽からの紫外線を吸収してくれる重要な役割を果たす。そのおかげで、地表では波長の短い有害な紫外線が減っている。一方で、対流圏、我々の直接の生活圏でオゾン濃度が増えると健康に悪影響を及ぼす。また、実はオゾンもGHGだ。この対流圏のオゾンの問題は、新興国・途上国でも、日本を含む先進国でもまだ解決できていない状況である。

2つ目が、いわゆる粒子状物質で、中でも粒子のサイズが小さい$PM_{2.5}$である。大気中の微粒子を総称して「エアロゾル」と言うが、$PM_{2.5}$は皆様御存じのとおり、直径がおおよそ2.5ミクロン以下の粒子の総称だ。主に人間活動による硫酸塩や有機物、それからブラックカーボン、硝酸塩で構成されている。定義は、直径2.5ミクロン以下だが、主な粒子の直径は0.数ミクロンで、2.5ミクロンよりも小さい粒子が多い。この小さい粒子が多いと健康に悪影響を及ぼす。詳しく紹介しないが、この小ささだと、循環器系に取り込まれ、疾患につながる悪影響について研究されている。

発生起源は、化石燃料消費が一番大きい。植物系の燃料や森林火災や焼き畑でも発生する。自然由来で、火山や植物、砂漠などからも発生する。

エアロゾルの動態、濃度変化は気候変動にも関わっている。エアロゾルは、雲の生成に欠かせない。大気中に微粒子がなければ、地球上では雲は絶対に存在しない。雲は気候変動に大きく関わってくることも御存じかと思う。エアロゾルは気候変動のたいへん重要な要素になっている。

図2–3–2にある2枚の写真は、10年ほど前、私の研究室から撮ったものだ。2枚とも天気上は晴れの日で雲はほとんどない日だった。しかし、$PM_{2.5}$が越境飛来してきた日は大気がかすんでいる。この写真を見比べれば、大気汚染があるとすぐ分かる。

気候変動の観点でもこの2枚の日には違いが出ている。$PM_{2.5}$が飛来していない日では、太陽光が地上までさんさんと降り注いでいる。つまり、太陽のエネルギーが地上まで届いている。しかし、大気汚染の日は地上まで届かなくなっている。つまり、太陽エネルギーが地上まで届きにくい状態を$PM_{2.5}$がつくっている。直接的にエアロゾルが太陽光を散乱することでエネルギーの収支を変えている。

**エアロゾルが気候変動にもたらす作用**

エアロゾル粒子は大気汚染を引き起こすだけではなくて、気候変動をも引き起こす物質である。国際的にみても、オゾンや$PM_{2.5}$は大気汚染物質として認識されているが、同時に気候変動にも作用している。

あらためて気候変動の科学的な考え方をお話すると、やはりほかの様々な物理現象と同様で、エネルギー収支の変化を考えるのがスタート地点にあたる（図2–3–3）。まず、エネルギー収支がしっかり平衡状態にあるか、もしくは少しずれが生じているのかの解析が必要だ。

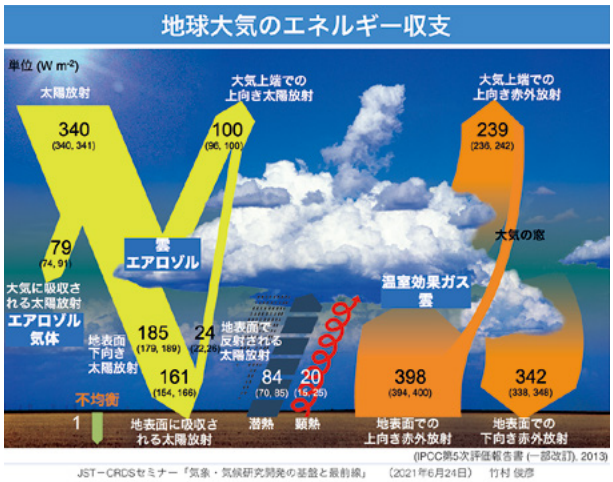



**図2–3–3　　地球大気のエネルギー収支**

皆さまが興味があるのは、気温がどうなるか、台風や大雨のような極端現象がどうなるか、といったことだが、それはあくまでも気候変動の最終的な影響として出てくるものだ。気温や降水量を決めるには様々な要素が複雑に絡み合って、結果的にその現象が起こっていると考えるのが適切である。

地球大気の場合、入ってくるエネルギーは太陽のエネルギーだ。出ていくエネルギーとしては、潜熱、顕熱などもあるが、赤外放射が多い。これは放射の物理的な原理に従っていて、物質が出す放射線、電磁波の波長は物質の表面の温度に依存する。太陽の表面温度に応じた電磁波が放射されて、それが地球に届いている。また、地球の温度に応じた電磁波が赤外線として放射されていて、また宇宙空間に戻っていくというエネルギーの出入のバランスが保たれている。

御存じの通り、GHGは赤外線のエネルギー収支を乱す物質である。赤外線を吸収する物質で、それによって地球のエネルギー収支を乱している。エアロゾルは赤外線に対する直接的効果も若干はある。しかし、定量的には、太陽放射を散乱したり吸収したりする効果のほうが、エネルギー収支の変化に与える役割としては大きい。

図2–3–3で説明したエネルギー収支の変化を専門的には「放射強制力」と呼び、放射強制力の評価は、過去に多数行われている。

$CO_2$と違って、オゾンやエアロゾルは、大気中での寿命が非常に短い。$CO_2$は1回放出されれば数十年から百年スケールで大気中にとどまるため、排出量削減を行っても、効果が出るのは大分先になってしまう点が厄介だ。$CO_2$のような長寿命GHGsの研究については、随分成熟してきた。その科学的知見に基づいて、国際社会全体でカーボンニュートラルを目指す流れが強まっており、日本も昨年から急激に、この傾向が強まってきた。



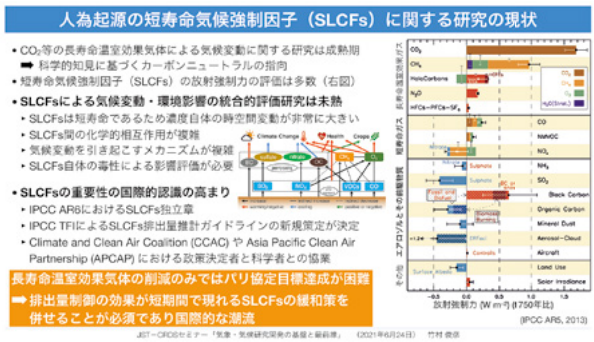



**図2–3–4　人為起源SLCFs研究の現状**

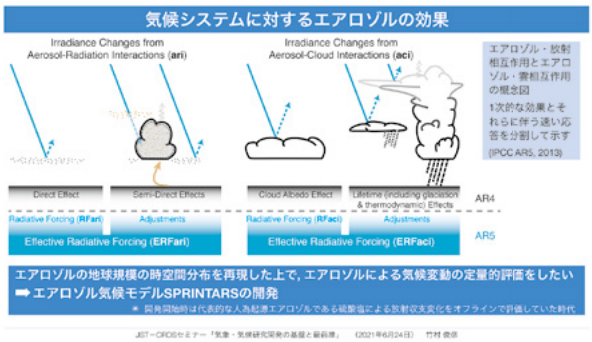



**図2–3–5　気候に対するエアロゾルの作用**

図2–3–4の右側の棒グラフはIPCCの2013年の第5次評価報告書で、私が執筆者として参加した章のデータだ。それぞれのGHGsでエネルギー収支がどの程度の変化を起こしているか見積られた結果である。正の放射強制力をもつGHGsの濃度が人間活動によって増えると、赤外線を吸収してエネルギー収支を乱す。

この棒グラフでは、メタンが長寿命GHGsに含まれているが、平均寿命が10年ぐらいなので、短寿命で扱われることもあり、実際には中間ぐらいの微妙な扱いだ。

エアロゾルはSLCFsとして、分類される中にある。ブラックカーボン（BC）は、黒い煤の粒子のことだ。色が黒いので、トータルとして太陽のエネルギーを吸収する効果が勝り、正の放射強制力になっているが、そのほかのエアロゾルはほぼ負の放射強制力だ。

図2–3–5で、雲に対するエアロゾルの作用を紹介する。エアロゾルは雲の凝結核、氷の氷晶核になる作用により、雲の性質を変えてエネルギー収支を変える効果がある。専門的にはエアロゾル－雲相互作用という。水滴でできている水雲は、水滴のサイズを変えて、太陽に対する雲の反射率を変える作用がある。それによってエネルギー収支が変えている。

エアロゾル－放射相互作用は、先ほど図2–3–2の2枚の写真で示したもので、エアロゾルが太陽光を散乱・

吸収する効果で、直接的に太陽エネルギーの収支を負の放射強制力で変えている。エアロゾルは大気汚染は引き起こすが、GHGsによる温暖化を幾らかうち消してくれている効果だ。大気汚染は健康影響上よくないのだが、気候変動に対して、もしかすると幾分よい効果をもたらしていることになる。

ただし、この放射強制力はまだ研究途上だ。IPCC報告書のもとになった研究成果、報告はあるが、これらのSLCFsによって、具体的に気温がどうなるか、降水量がどうなるかといった観点の研究はまだ不足しているのが現状である。IPCCの評価報告書では、それぞれのSLCFsについて気温変化がどうなるかという評価を実は第5次評価報告書では行っていなかった。かなり最近になって、ようやく気候変動の具体的な現象に対する影響が評価され始めた段階だ。なぜ$CO_2$と比べて、研究が遅れているか、という点には幾つか理由がある。濃度自体が短寿命なので、時空間変動が非常に大きいことが1つ目だ。把握すること自体がたいへん難しい。

2つ目に、化学的な相互作用が複雑なことがあげられる。図2-3-4の真ん中の模式図は、排出される大気汚染物質の量がそれぞれ、どう増えたらどういう物質が生成されて、その物質は例えば気候変化や健康影響、農作物の収量にどういった影響があるかまとめた図だが、かなり入り組んで複雑だ。$CO_2$自体に触れたり、吸い込んだりしても、健康影響に変化はないが、オゾンやエアロゾルは変化があるので、その影響評価も同時にしなければならない。それがさらに気候変動を起こすメカニズムはもっと複雑になる。

大気汚染の関心が国際的に高かったところに、さらに気候変動という観点でも国際的な認識が高まり、2021年に発行されるIPCC第1作業部会の第6次評価報告書では、SLCFsに関する独立の章が設けられることとなっている。

現在、IPCCのインベントリータスクフォース（TFI）によって決められた方法で、各国は毎年GHGs排出量を報告しなければならないルールになっている。そこにSLCFsも入れ込もうという動きがある。私もIPCCのTFIの中で、SLCFsの係数を定めるガイドライン策定作業に参画している。実際にそういう流れが今進んでいる。近い将来、SLCFs排出量の報告も義務化する可能性が高まってきている。

大気汚染と気候変動の関係性について、国際的には国連環境計画傘下のClimate and Clean Air CoalitionやAsia Pacific Clean Air Partnershipが着目している。政策決定者と科学者が協業で対策を考え、実際に政策に生かしていく動きがある。長寿命GHGsの削減のみでは、パリ協定の目標達成が非常に難しい状況にある。各国が提出している削減目標を全部足すと、地球の平均気温は産業革命前と比べ約3℃度上がる状況だ。パリ協定は2℃に抑える目標なので、達成はかなり遠い。長寿命GHGsの削減だけでなく、付加的対策として、$CO_2$以外のSLCFsも併せて減らして、当面の温暖化を緩和していく流れができつつある。

**エアロゾル気候モデルについて**

エアロゾル－放射相互作用を定量的に理解したいが、そのメカニズムが非常に複雑で、時空間分布が不均一等の難しい問題があることを先に述べた。エアロゾルの地球規模の時空間分布を再現して、エアロゾルによる気候変動の定量的評価をする目的で、エアロゾル気候モデル「SPRINTARS」を開発している。

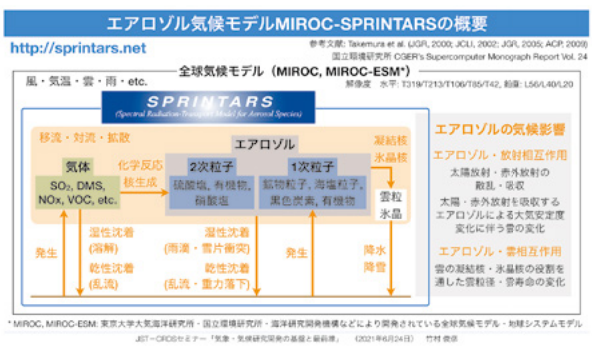



図2-3-6　エアロゾル気候モデルSPRINTARS

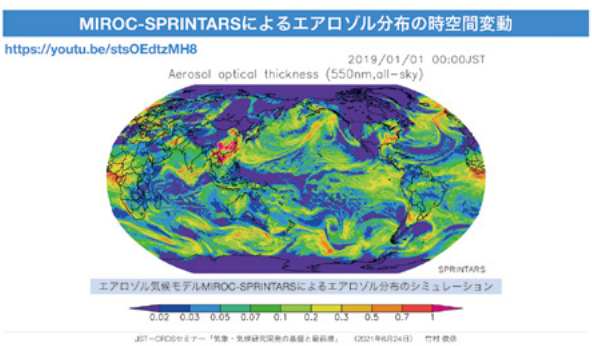



図2-3-7　エアロゾル分布の時空間変動

SPRINTARSの開発を始めたのは、1990年代後半で、まだ修士課程の学生のときだった。当時はこういった数値モデルが、国際的には全くない黎明期で、代表的な人為起源エアロゾルの硫酸塩エアロゾルの放射収支の変化をオフラインで評価していた。世界中の濃度分布をまず再現して、その再現された結果をまた別の気候モデルを使ってエネルギー収支などを考えていた。

数値モデルの概要を図2-3-6に示す。エアロゾルは1次粒子と2次粒子がある。1次粒子は発生源から直接粒子状で発生するものだ。例えば、砂漠の砂粒、海の波しぶきの塩でできているもの、ブラックカーボンなどだ。

2次粒子は、発生源からは気体で発生して、大気中で化学反応を起こして粒子化してエアロゾルになるというものだ。例えば、硫酸エアロゾルや硝酸エアロゾルなどがある。

有機エアロゾルは1次、2次両方がある。

発生したエアロゾルは移流や対流によって大気中で運ばれて、最終的にどこかで落下する。落下の方式には湿性沈着、乾性沈着がある。湿性沈着の1つは、雨に衝突して落下する方式だ。雨が降った後、大気がきれいなのはこの効果のためだ。また、エアロゾルは雲の核になる役割をすると説明したが、雲に取り込まれて、その雲が成長して雪や雨になれば、そのままエアロゾルも落下することになり、これも湿性沈着である。小さくても質量があるので、重力で落下する。また、地面付近の乱流で地面に落ちて捕らえられるものもある。それらが乾性沈着と呼ばれている。

この数値モデルはもともとはエアロゾルの気候影響を定量的に評価する目的で開発したので、当然その効果を含めている。

図2-3-7の動画はYouTubeに掲載しているのでぜひ御覧いただきたい。2019年の気圧配置や大気の流れの気象条件で、SPRINTARSにより地球規模のエアロゾルの流れを計算した結果を示している。地球規模での結果だが、ある地点、ある時刻に注目してみると、濃度がかなり不均一なことや、時々刻々、大きく変化していることが分かる。アジア域に注目すると、中国で排出された大気汚染物質が偏西風帯に乗って、東方向に流れていく様子、一部が日本に流れ込んでくる様子が分かる。同様にアメリカ東海岸やヨーロッパからも流れていく様子も見える。ほかにも、サハラ砂漠やアラビア半島からは砂塵嵐によるエアロゾルが輸送されていく様子、南米のアマゾンやアフリカ南部で乾期の森林火災によるエアロゾルが流れていく様子などもおおよそ再現できている。

### エアロゾル気候モデルの社会貢献

SPRINTARSは、気候変動をシミュレーションするために開発したのだが、社会貢献の一つとして、毎日この数値モデルを短時間走らせて、一般向け$PM_{2.5}$予測情報を提供している。

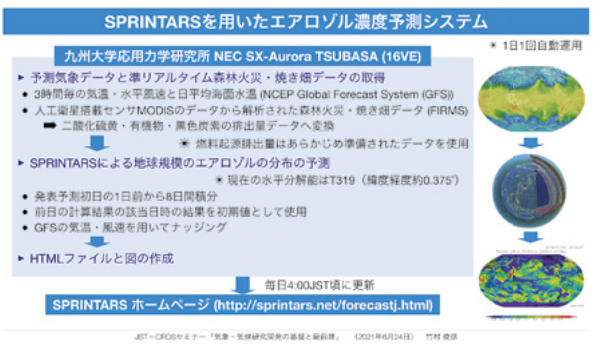



**図2-3-8　エアロゾル濃度予測システムの流れ**

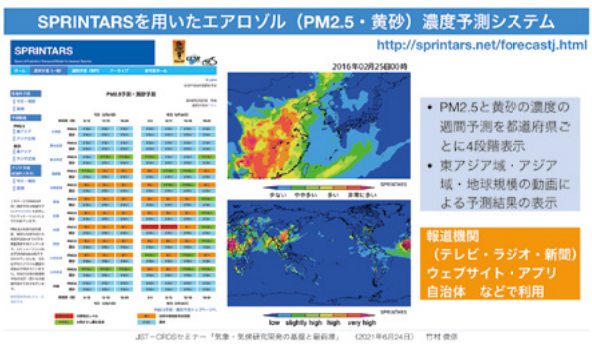



**図2-3-9　エアロゾル濃度予測の一般向け公開**

図2–3–8に流れを示す。私の所属である九州大学応用力学研究所ではすごく小規模だが、スパコンを保有しており、それを優先的に使用させてもらっている。気象データに加えて、森林火災などのデータも入力する。森林火災は時々刻々と、場所も規模も変わっていくので、固定の排出源として与えることができない。そのため、人工衛星からほぼリアルタイムにデータを取得させてもらい、それをエアロゾル排出量データに変換している。

それらのデータを使いSPRINTARSで8日間の積分計算を行い、1週間分の濃度予測を出している。計算が終わったらファイルを作り、毎朝早朝にホームページ上にアップロードしている。

今日、明日のエアロゾル濃度予測は6時間ごと、3日後より先は1日ごとに都道府県別に一般向け公開している（図2–3–9）。動画によって、なぜエアロゾル濃度が高くなるか視覚的に分かるように情報を示している。

我々の公開している情報はテレビやラジオ、新聞にそのまま転載されている状況だ。福岡ではほぼ全ての主要な新聞に毎日、私の予測結果が掲載されている。また、自治体の大気環境業務にも使われている。

**エアロゾル濃度変化と気候変化の関係の研究**

最近の研究成果をいくつか簡単に紹介する。気候変動は、専門的には放射強制力の変化、つまり、先ほど図2–3–3で示したエネルギー収支の変化を考えることが第1段階だ。ブラックカーボン（煤）であっても、硫酸塩エアロゾルの前駆気体（$SO_2$）であっても、排出量が増減すれば、それに応答してエネルギー収支は変わる。では、実際に気温がどう変化するか。硫酸塩エアロゾルの場合は、放射強制力に応じた形で気温も変化するが、ブラックカーボンはあまり気温変化を結果的に起こさないという結果を最近、報告した（図2–3–10）。この結果は他の研究者もほぼ同時期に論文化しており、恐らく間違いないだろう。この結果から言えるのは、放射強制力、エネルギー収支の変化だけを評価していても足りないということだ。実際の気温や降水量にもたらす変化をみるには、さらに踏み込みが必要で、さらに作り込んだ気候モデル等を使って評価しないとならない。放射強制力だけをもって、気温変化がどれくらいと粗く見積もるのは、定量的な評価としては問題があるということを指摘した。

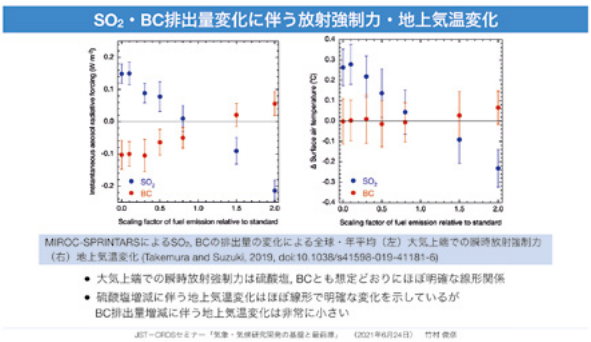



**図2–3–10　$SO_2$・BC排出量変化の影響**

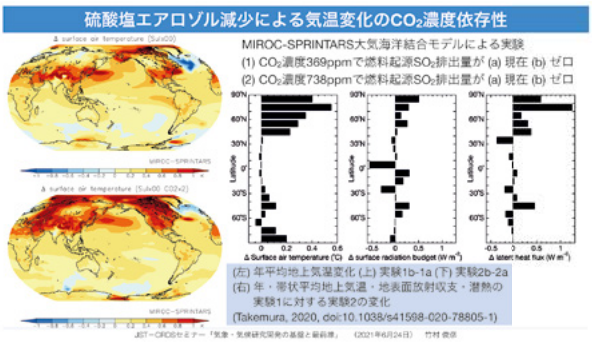



**図2–3–11　硫酸塩エアロゾル減少による変化**

次に昨年書いた論文の内容を紹介する。硫酸塩エアロゾルの原料となる$SO_2$の排出量を減らした場合だ。先ほど硫酸塩エアロゾルは大気を冷やす効果があることを紹介したが、単純に$SO_2$を削減すれば、温暖化をもたらすことになる。大気汚染は解決する方向に進むけれども、温暖化を進めてしまう方向になってしまう。では、その温暖化の量がどれぐらいか。その評価結果が図2–3–11の左上の図だ。 $SO_2$の排出量を削減したときに、極域や北半球中緯度で温暖化が起こる。しかし、実は$CO_2$の濃度にも大きく依存する。上と下の図で、$SO_2$の削減量は同じだが、そのときの$CO_2$の濃度で気温変化が変わるという結果である。これはどういうことか。 $CO_2$濃度があがれば温暖化が起こるのだが、$SO_2$の削減も温暖化を起こす。 $SO_2$の削減に伴う温暖化を

できるだけ抑えるには、$CO_2$濃度は低い状態のほうがよりよいことを示している。

この結果から言えることは、先進国はこれまで大気汚染対策を行ってきた際に、GHGs排出量も同時に削減しなければならなかった。しかし、実際には$CO_2$の削減は放置されて、大気汚染対策だけ偏って進めてきた。それが現在の温暖化をさらに助長していることを強く認識する必要がある。

**最近のエアロゾル研究プロジェクト**

現在、大きな研究プロジェクトを2つ推進している。1つ目は科研費の基盤Sだ（図2-3-12）。私のSPRINTARSと、研究者仲間の大気化学モデル「CHASER」を日本の伝統的な気候モデルMIROCや、雲解像モデルNICAMに結合させている。 NICAMは雲を解像できるぐらいの時間分解能、空間分解能で計算できるシステムだ。それらを同時に使って、それぞれの相互比較や、細かな雲スケールぐらいのシミュレーション結果を、よりラージスケールの気候モデルに生かす取組を行っている。さらに、1 kmやそれ未満のより細かなスケールで、エアロゾルの輸送や気候影響が表現できる数値モデルを新たに開発している。



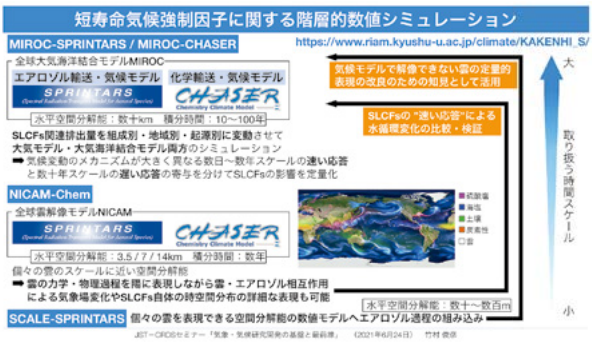



**図2-3-12　SLCFs階層的シミュレーション**

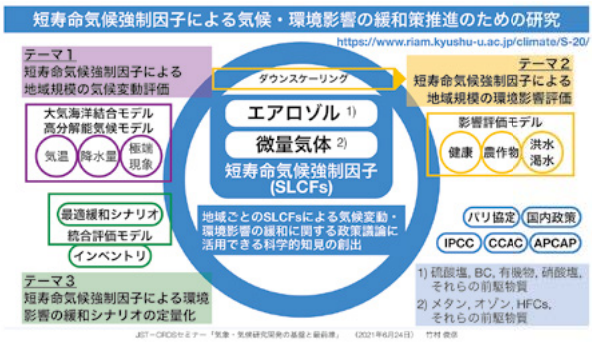



**図2-3-13　環境研究総合推進費S-20について**

2つ目は、環境省の環境研究総合推進費の戦略研究Ⅰで今年度開始した（図2-3-13）。SLCFsによる気候変動、健康や農作物への影響をいかに最小限に食い止めるか。将来の緩和シナリオを作り、政策に生かすための研究を始めている。日本国内にとどまらず、国際的な環境対策の場、気候変動の対策の場に活用できるような科学的知見の提供を目的としている。

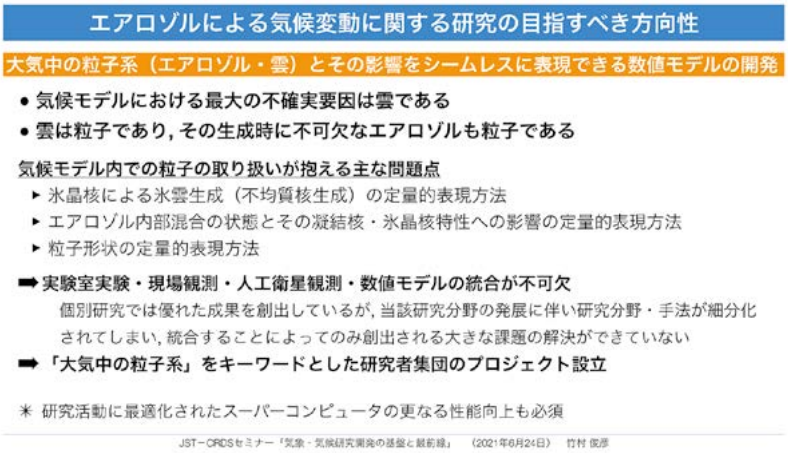



**図2-3-14　目指すべき方向性**

図2–3–14に、私が科学者として現在考えていることをまとめとして示す。定年までに、と言うと、まだ20年弱あるが、その間に大気中の粒子系の影響をシームレスに表現できる数値モデルを開発していきたい。現在の気候モデルにおける最大の不確実性は雲にある。雲は粒子であり、エアロゾルはその雲の核になる。逆にみれば、エアロゾルがなければ雲は存在しないという関係性だ。エアロゾルも雲も両方とも粒子であり、エアロゾルだけ、雲だけ、と個別個別に扱うのではなく、これらを粒子系としてトータルに捉えたシミュレーションを行いたい。

現在の大きな問題は雲に対する核のメカニズムだ。水雲については、ケーラー理論に基づいてある程度までなら表現できる。しかし、氷雲については、定性的なメカニズムはおおよそ分かっているが、定量的な表現ができていない。そのため、数値モデルにおいても、かなり簡略化された形で表現されているのが現状である。

単一組成で存在しているエアロゾルもあるが、それより複雑で2つ以上の組成で1つの粒子を形成しているエアロゾルがある。それを数値モデルとしてしっかりと普遍的に表現できる方法はまだ見つかっていない。形状についても、球形のエアロゾルもあるが、特に固体のエアロゾルは非球形のものがあり、それもまだ上手くモデルとして表現できていない。

これらの課題をうまく捉えるには、数値モデルだけでなくて、室内実験や現場観測、人工衛星観測などをトータルに行い、全ての情報を統合した形で研究を進めなければならない。これは、どの分野でもあてはまるかもしれない。優れた成果を創出している個別研究は幾つもあり、分野が成熟して研究者が増えてくるのはよいが、その分野をさらに発展させるには、やはり細分化されてしまっている点が問題になっている。お隣の研究者が何をやっているのかよく分からなかったり、うまく連携が取れなかったりして、統合的な研究がうまく進まず、大きな成果を生み出しづらくなっている問題が、この気候変動研究分野にあると思っている。そこを何とか解決するような役割を果たしていきたい。それで「大気の粒子系」というキーワードとして研究者集団のプロジェクトをつくりたい。

さいごに、現在、「富岳」が動き始めたが、気候変動研究分野では、スパコンの発展がまだまだ必要だ。計算機科学分野の方々にはぜひ引き続き頑張ってほしいと期待している。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：エアロゾル気候モデルSPRINTARSの鉛直方向や水平方向の解像度はどの程度か。

A：分解能の設定は変更可能だ。伝統的な気候モデルでは、気候変動を解析するために大体100年ぐらいの期間の積分が必要だが、その際は大体T85、緯度経度1.5度グリッドぐらいのものが使われている。今のスパコンの計算資源だと、これがせいぜいで、これ以上細かくした感度実験はできない。スパコンの性能向上がまだまだ必要となる。

一方、日々の$PM_{2.5}$予測については、もっと細かい分解能で対応している。1週間ぐらいしか積分が必要ないので、緯度経度大体0.375度ぐらいで日々計算している。このくらいで計算すれば、大阪や東京といった小さな都道府県でも、4つ、5つのグリッドが入るサイズになっている。もっと細かくしてもそんなに計算時間は増えないが、都道府県スケールの予報では、十分な解像度といえる。

Q：雲やエアロゾルは不均一な現象なので、ある程度パラメタライズも行う必要があるか。どのような課題があるかご教示ください。

A：本質的な難しさとして、ものすごく大きなスケールギャップがある。そもそも雲が凝結核の役割をなすのが微物理過程の数ミクロンスケールの現象だが、それを1,000 kmぐらいのグローバルスケールにまでつなげなければならない。現象としては物理法則にのっとっているはずだが、表現できないことは多々ある。その部分についてパラメタリゼーションしている。そのパラメタリゼーションに不確実性が乗っかってくることはある。そこを何とか観測データ等を使って修正したり、最近ではデータ同化手法

を使って、より良くパラメータを変更したりする研究が行われている。今まで結果を何となく眺めて、変更できるパラメータの数値を書いていたのに対して、データ同化手法を使うことで、しっかり観測データに基づき、直接的に変更できるようにする研究も進められている。

Q：$SO_2$のお話は少しショックを受けた。今後、途上国などで減らしていくときに、どのように考えていくのが一番よいか、もう一言、示唆をいただきたい。

A：これから大きく削減をしなければならない地域は新興国や途上国になってくる。それらの国でもグローバルに$CO_2$を削減しなければならないという風潮にもうなっている。それらの国では、基本的には同時に削減していく方向を目指す流れでよいだろう。

先進国は今まで、化石燃料をどんどん使いつつ、主に大気中に粒子状物質を出さないようにフィルターをする対策だけが先に進んで、$CO_2$は筒抜けで出ていた。そこで気候変動の対策として、化石燃料自体を使わない方向になってきている。そうすると$SO_2$も、$CO_2$も、両方とも排出しなくなる。同時に削減される方向性になる。先進国がこれまで行ってきた対策の仕方と、これから行っていくこととは全く異なっていく。

$CO_2$は1回排出すると大気中でかなり長く残存するが、短寿命の物質はすぐに減ってしまう。短期間でみると、より短寿命の物質の気候への感度が高く、その対策をしっかり考えて行く必要がある。上手な削減の仕方をしていかないと、温暖化を逆に助長してしまう可能性もある。その点を注意しながら実際の対策を行わなければならない。その科学的知見を提供できるよう研究をさらに進めていきたい。

Q：$SO_2$に関連した質問したい。最近の論文で、大気中アンモニア濃度が増えていて、それにより$SO_2$の大気中の動態が変わり、オゾン層に影響を与える懸念を報告していたものを読んだ。これからアンモニアを積極的に使っていく時代になると、使ったアンモニアがエアロゾルなどの物質の組成にも影響を与える可能性が考えられる。これから水素やアンモニア社会を政策的に指向していくとき、気候科学や環境科学的にみて、本当に適当なのかどうかという点を伺いたい。その評価や検証を行うにはどれぐらいの期間かかりそうか、教えていただきたい。

A：現状、まだ増えている物質も結構ある。短寿命の物質であっても増えているものがある。御指摘のとおり、アンモニアも短寿命の物質に関わってくるが、増えている。昔のオゾン層破壊物質のフロンガスはモントリオール議定書に従って減っているが、GHGである代替フロンの濃度は増えている。それらをトータルとして考えなければならない。

我々が作ってきたエアロゾルや大気化学の入った気候モデルがある程度成熟しているので、そのまま現状のバージョンで使うことになるが、具体的に将来のミッション、排出量を与えた場合にどうなるかという評価は今まさしく我々が開始したところだ。今年度から開始した環境推進費S–20で、個別の物質のそういった予測に関連して、短寿命の物質の増減によって気候影響をどの程度及ぼすか定量的な評価を行う計画だ。S–20は5か年の計画で、5年後には何らか結果を示せるだろうという見通しだ。

Q：全球のエアロゾルの濃度分布のシミュレーション結果について、例えば実際のJAXA衛星観測データなどを用いて、準リアルタイムのように検証できるような状態なのか。

A：準リアルタイムの検証はしていないが、ある程度データがたまってきたエアロゾル関係観測データは活用させていただいている。具体的には、新しい気象衛星ひまわり8号だ。ひまわり7号まではできなかったが、ひまわり8号は大きく進展し、エアロゾルのデータが得られる。静止衛星なので日本の観測領域、日本の経度帯の観測領域だけになるが、時々刻々の変化が得られる。それを用いて実際に比較検証を行ったことがある。

具体的には、個別の何か大きいエアロゾル関係の現象に対してとなる。例えば、黄砂の大規模現象やシベリアの森林火災が起こった際には、日本に流れてくる。そういった現象があった際の比較検証は、ひまわり8号観測データを使えば可能になっている。

Q：$CO_2$濃度などのGHGはJAXAのGOSAT衛星で観測測されているが、$SO_2$以外のエアロゾルに関連する微量成分も観測衛星で捉えられていて、活用されているのか。

A：$SO_2$観測以外にもNOxも人工衛星のデータとして得られていて、既に活用している。

Q：素人質問で恐縮だが、海上での自然起源のエアロゾルの供給はどの程度わかっているのか。日本では、台風や、線状降水帯への関心が高いが、それらの初期の形成プロセスでは、エアロゾルが雲の凝結核としての役割をはたしていると。海から自然に海塩粒子が供給されるのがコントロールできれば、そういう災害級の雨もかなり変えられるのではないかとも想像する。海は陸上と比べ、未知の要素が多い印象だが、どの程度までわかっているのかご知見を願う。

A：実は、エアロゾルについて、その点はポイントで、まだアンノウンの供給源がそれなりにある。
エアロゾルの主要な自然の発生源は、私の数値モデルにも取り入れられている。海塩や、砂漠の砂、耕作地の畑とかで出るような砂や土などは考慮できる。一方、バイオエアロゾルと呼ばれるもの、例えば生物の死骸が分解されて細かくなったものが大気中に舞い上がり、それが雲の核になって、特に氷晶核になっているのではないかと言われている。その要素を気候モデルに取り入れられている状況にはまだない。おそらく、そのように、まだ考慮されていない供給源がまだある。まだよく分かっていないものはまだ研究には取り入れていないという状況だ。

台風の源となると、そこまで細かいものは大きくは影響しないかもしれない。実は海には海塩エアロゾル以外にも硫酸エアロゾルの供給源もある。例えば海洋の植物プランクトンから出てくる硫化ジメチルという気体があり、それが大気中に放出されて酸化すると硫酸塩エアロゾルになる。基本的には海塩粒子が大きいが、その硫酸塩エアロゾルも実はこの分野では結構メジャーな物質で、バックグラウンドのエアロゾルとして数値モデルに入れている。

考慮しているところはしているけれども、まだ我々が定性的に有無は分かっていても、定量的に把握できていないところは取り入れられていないという状況だ。

# 2.4 気候に関わる海洋研究　―全球海洋観測に着目して―

須賀 利雄（東北大学）

※講演日：2021年7月2日



## 1. 気候と海洋

演題について、5つの節に区切って話題提供する。海洋が気候と強く関わっていることは、研究者にとっては当たり前だが、専門外の一般の方にとってはそうでないことを折に触れ感じている。最初に気候と海洋がどうつながっているか、ごく簡単に触れる。気候と海洋の関わりは地球温暖化の問題によってクローズアップされてきた側面がある（図2-4-1）。産業革命以前には釣り合っていた太陽放射と地球放射の均衡が温室効果ガスの増加によって崩れ、地球放射で宇宙に出ていくエネルギーが減り、地球の気候システムに熱がどんどんたまりつつある。それに伴って大気の気温も上昇するが、海も温まっている。海の熱膨張に加えて、陸上の氷が溶けて海に入る効果も加わって、海面水位が上昇している。気温が上昇すると飽和水蒸気圧が上がり、大気中に保持できる水蒸気量が増えるので大雨も多くなる。これらは地球に熱がたまっていることで端的に表れている。

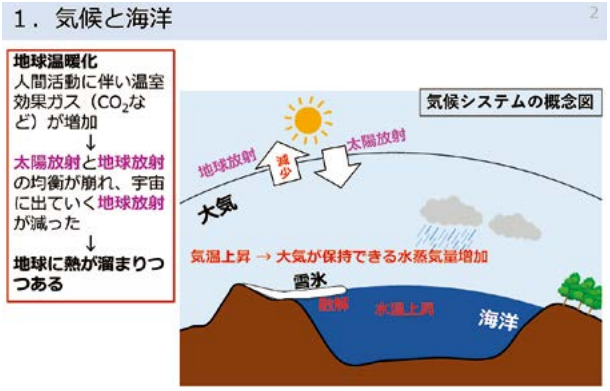



図2-4-1　気候システムの概念図

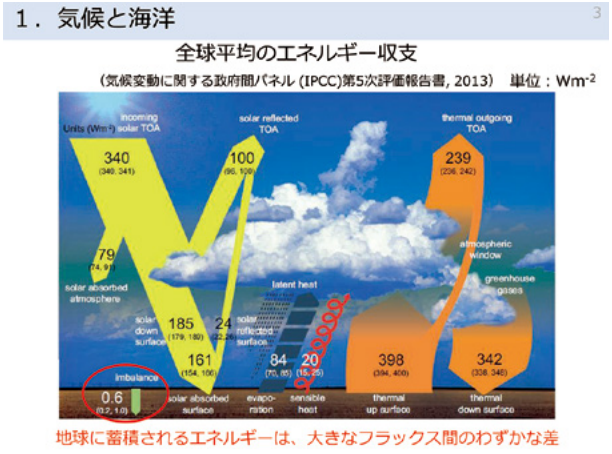



図2-4-2　全球平均のエネルギー収支

熱が地球全体でどのくらいたまっているか実測するのは、実際上、容易ではない。それを考える前に、エネルギーの出入りをIPCC第5次評価報告書（AR5）からの引用した図2-4-2で説明する。黄色で描かれている線が太陽からの短波放射で、雲や地表面で反射されるもの、大気や地表面で吸収されるものなどがある。地表面で吸収された短波放射のエネルギーで温められた地表面からは赤外放射が出る。オレンジ色で描かれた線が地面からの赤外放射で、宇宙に直接抜けていくものが一部あるが、大半が大気に吸収されて、大気自体が温まる。すると、大気からも赤外放射としてエネルギーが出される。それが再び地表面に戻ってくる。これが大気の温室効果だ。加えて、地表面からは潜熱や顕熱の形でも大気に熱が出されている。

それぞれ単位面積、時間あたりのエネルギーの全球平均の推定値を記載している。この出入りの僅かな差がある。図2-4-2の左下に赤丸で目印を付けたが、0.6 W/m$^2$と書いてある。1 m$^2$あたりで見ると僅かな差だが、これが地球の表面積全体で蓄積されていると見積もられている。また、実際にはこの蓄積された熱の大半が海に入っている。いずれにしても非常に大きなエネルギー収支の中で見たら小さな差がたまっている。このエネルギー収支から、この差を見積もることは非常に難しい。現状の観測精度では不可能に思われるレベルだ。実際どのぐらいたまったかという見積りが同じIPCCのAR5にある（図2-4-3）。1970年を基準に

して、それ以降2010年まで年々どう増加してきたか示されている。その40年で平均すると、1年あたり約7×$10^{21}$ Jのエネルギーが増えてきた。さきほどの単位面積時間あたりの単位W/$m^2$に換算すると0.4 W/$m^2$に相当する。1993年から2010年に限ると0.5 W/$m^2$となり、傾きが急に上がっていることを反映している。

約7×$10^{21}$ Jという膨大な熱が年々地球に蓄えられているが、なかなか実感されにくいので、一般の方にも伝わりやすい量に置き換えると、標準的な原子力発電所が年間に発電する発電量の20万倍以上となる。

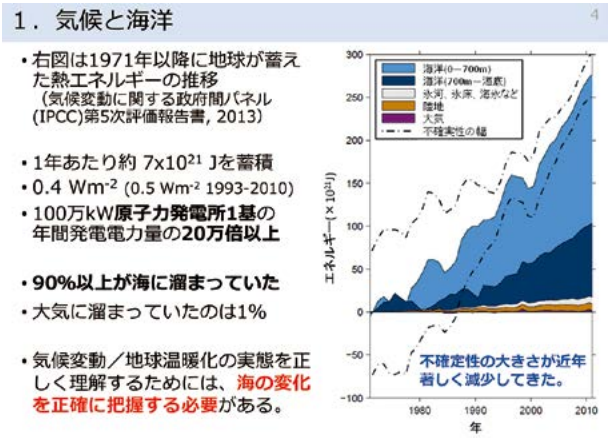



**図2-4-3　　地球に蓄積した熱の行き先**

グラフで熱の行先が色分けされているが、青色と水色が海だ。700 mまでの比較的浅い上層の海とそれより深い深層の海で区分けしている。蓄えられた熱エネルギーの90%以上が海にたまったと試算している。残りの行き先の試算値は、氷が溶けるときに吸収した熱エネルギーが約3%、陸地が暖まって吸収したものが約3%、大気にたまった熱は僅か約1%だ。皆さまがふだん関心のある気温の上昇は地球温暖化によって地球が蓄えた熱エネルギーのうち僅か1%の効果だ。IPCCのAR5の時点で、海が約93%を吸収してきたと見積もっているが、もし海の吸収が落ちると、どこにその熱エネルギーがいくだろうか。気候変動、地球温暖化の実態を正しく理解し、今後の推移を正しく予測するためには、海の変化を正確に把握する必要があるとご理解いただけるかと思う。

このグラフでは、もう一つ注目すべき点がある。一点鎖線の幅が見積りの不確定性だ。1970年側の初期の頃は非常に不確定性が大きかった。2010年側の最近になると不確定性が非常に減少してきている。過去の不確定性が大きい理由は単純にデータがなかったためだ。地球全体にたまっている熱量を見積もるだけのデータがなかった。データのないところを埋めるため、それぞれ研究者ごとに異なる仮定を用いて内挿して、推定していた。推定の方法にもいろいろあり、その種類だけ異なる見積りが存在する。それも不確定性の幅になって表れている。

### 2. 全球の海洋観測

ここから、海洋をグローバルに観測する取り組みがどう発展してきたか説明する。海が蓄えた膨大な熱がどのように運ばれ分布しているか知るためには、まず海を正確に測らなければいけない。そのことは国際社会はかなり以前から気づいていたが、1980年代に国際的観測網をつくろうという機運が高まって、国際的なプログラムが動き出した。この節の前半では海の構造について、後半で国際的な観測プログラムの動きを簡単にお話する。

2016年9月の1か月間の平均海面水温を示す（図2-4-4）。海面の温度は低緯度で高く、高緯度に行くほど低い分布をしている。ざっと眺めると、海の表面の水の大半は10℃以上の比較的温かい水だと見てとれる。

一番温度の高い西部赤道太平洋はウォームプールと言われ30℃以上ある。南極付近は約0℃だ。赤道から極地の距離が約6000 kmあるが、その温度差が約30℃ある。

次に海の深さ方向での水温分布を説明する（図2-4-5）。典型的な海の断面図として、西経165度の断面図を示している。太平洋のほぼ真ん中の経度に当たる。グラフの縦軸が水深で、横軸の見方は右側が北緯55度ぐらいなのでアラスカ付近、真ん中のEQは赤道、左側が南極側である。

図2-4-4の海面水温は、図2-4-5のグラフの一番上、水深0 mでの温度にあたる。海面だけ見ると10℃以上の海水が多かったが、断面も見ると海水の多くが10℃以下だとわかる。10℃より高いのは海表面付近のごく薄い層に過ぎない。海面水温が30℃の熱帯域の海でも、海底付近では0℃に近く、差が約30℃ある。海面と海底の差6,000 m、つまり6 kmで30℃の温度差がある。図2-4-4で、海面で赤道と南極の6,000 kmで30℃の温度差だったことと比べると、海の深さ方向では非常に大きな温度の変化があると分かる。



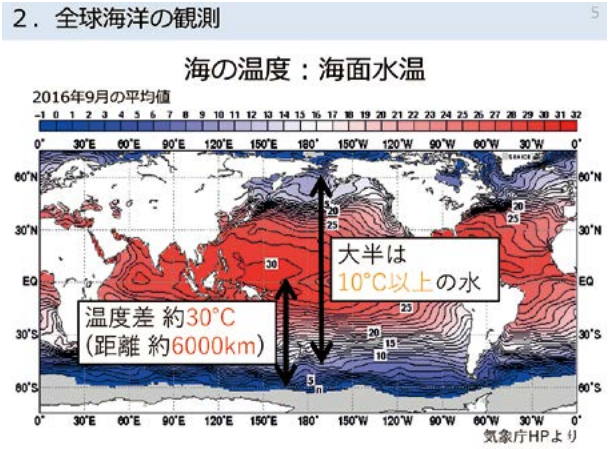



図2-4-4　海面水温

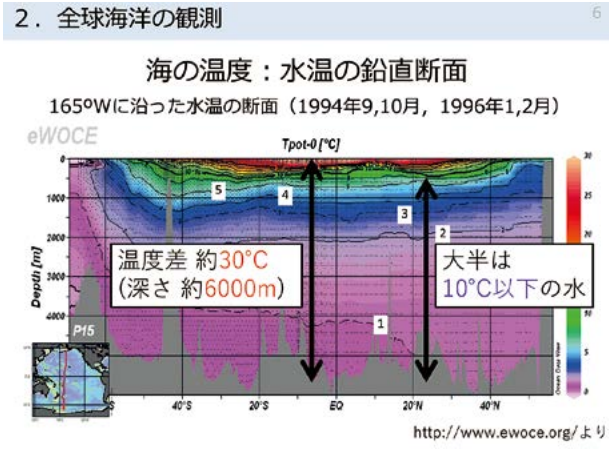



図2-4-5　海水温の鉛直分布

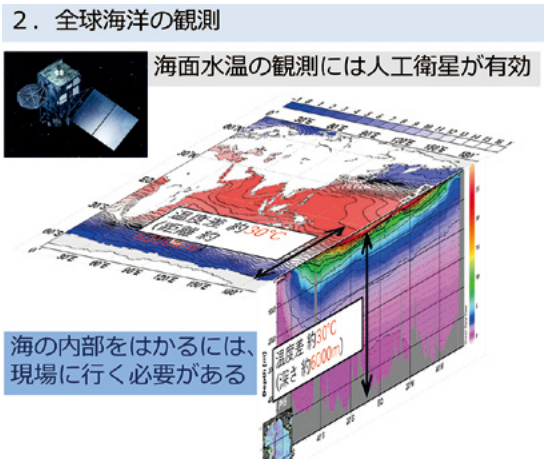



図2-4-6　海面水温の人工衛星観測

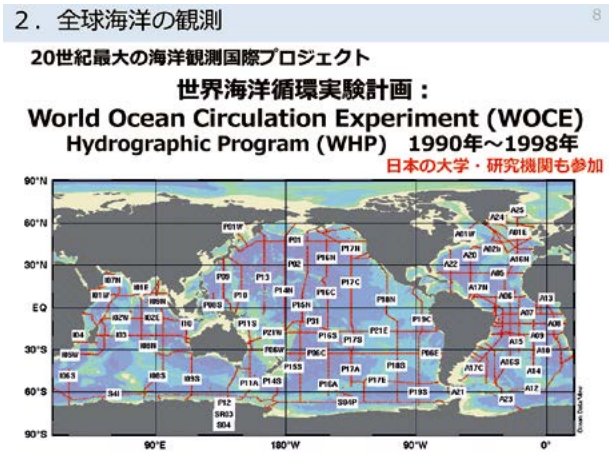



図2-4-7　世界海洋循環実験計画

たった6 kmと思われるかもしれないが、海の中を測るのは大変だ。海面水温に関しては1980年頃から人工衛星で常時測れるようになってきた（図2-4-6）。精度も年々向上してきている。しかし、海の内部は電磁波が通らないので、人工衛星のセンサで測れず、現場で観測装置を入れて測るしかない。これが海の観測の困難さの最大の理由である。困難なのだが、気候システム、気候変動の理解のためには海の中を測って、その姿を知らなければいけない。その考え方の下、様々な取組がこれまで実施されてきた。

世界海洋循環実験計画、World Ocean Circulation Experiment（WOCE）は20世紀最大の海洋観測国際プロジェクトとして知られている（図2-4-7）。ここでのHydrographicとは海の水温・塩分や流れの状態をいい、WOCE Hydrographic Program（WHP）では、約10年かけて、船舶での世界の海の断面観測が実施された。図2-4-7の海に描かれている赤い点線の、一つ一つの点が船舶で観測されたポイントだ。それぞれ数10 kmから約50 kmの間隔がある。1つの測線を測るのに数か月かかる規模だ。海面から海底まで、岸から岸までというスローガンで、この数十の断面を多くの国が分担して観測した。日本の大学、研究機関も参加した。これは人類が初めてグローバルにほぼ同時に10年かけて世界の海を測ったケースだが、最後のケースにもなっている。

日本でこの観測で活躍した船舶に学術研究船白鳳丸がある（図2-4-8）。海で船を停めて、数時間かけて観測装置を海底まで下ろして上げる。水温、塩分の測定に加えて、海水のサンプルも取って溶存酸素、栄養塩、微量元素なども観測している。

図2-4-8　学術研究船白鳳丸の参加

図2-4-9　全球海洋観測システム（GOOS）

この観測は船舶の運用費用を含めると1断面に数億円と膨大な費用がかかってしまう。世界の海をできるだけ短い期間で、網羅するため各国の様々な船の研究計画をアレンジして、実現できるように調整も行われた。そういった困難から、継続的にはできない。また、あくまでも線に沿った点しか観測しておらず、観測空白域のほうが多い。現在、図2-4-7で示した観測断面のうち1割程度を選択して10年ごとに再観測するGO-SHIPというプログラムが何とか継続している。

気候変動に伴う海の変化をモニタリングする必要があるが、WOCE規模の観測を何回も行うのは不可能なので、代わりに全球海洋観測システムGlobal Ocean Observing System（GOOS）がデザインされた（図2-4-9）。

GOOSは様々な観測手法を組み合わせて効率的に海をモニタリングしようという構想だ。

潮位計で海の高さが分かる。海水が過熱して膨張しても、陸上の氷が溶けて海に入っても、海面水位が上がる。海の高さは非常に有用な情報だ。係留系は海底にアンカーを打って係留されている。エルニーニョの実態把握と予測のためのデータを取るため、熱帯太平洋に多く展開された。海中のケーブルに様々な測器をつけている。海面漂流ブイは文字どおり海に浮く。上部に浮くフロートがあり、下部に筒状のドローグがある。ドローグはその外見から、穴あきソックスとニックネームがついている。風で流されるのではなく、海の表層の流れに追随する工夫が施されている。こういった観測機器で得た海の表面の流れや海面水温のデータが、人工衛星による海面水温測定、海面流速推定のための検証データとしても使われている。

GOOSの達成率を紹介する（図2-4-10）。2000年に開始した際、既に実装されていたものが約30%あった。徐々に増えたが、2010年頃から60%程度で頭打ちになり、現在に至っている。

GOOSの実現には世界各国の協力が不可欠だ。 GOOSはユネスコの政府間海洋学委員会（IOC）と世界気象機関（WMO）、国連環境計画（UNEP）、国際学術会議がスポンサーだ（図2-4-11）。中でもIOCがリードスポンサーである。 GOOSと似た名前で紛らわしいが、全球気候観測システム、Global Climate Observing System（GCOS）というプログラムもある。こちらはWMOがメインスポンサーで、IOC、UNEP、国際学術会議もスポンサーになっている。気候研究のプログラムとして世界気候研究計画（WCRP）もある。こちらはIOCとWMO、国際学術会議がスポンサーだ。

大ざっぱに言えば、気候の観測をGCOS、海の観測をGOOS、そのデータを使った研究をWCRP、その成果をIPCCが利用する構造だ。 GOOSとGCOSの関係は分かりにくいが、図2-4-11の下側にある観測するパラメータや、変数の分布をご参照されたい。GCOSは気候に関する様々な量を測っており、海だけでなく大気と陸上のデータも対象だ。 GOOSは海洋の気候に関わる変数の観測だけでなく、それ以外も測る。GOOSとGCOSのちょうど重なっている部分が気候に関する海洋の観測だ。この2つ以外に生物多様性や気象観測のプログラムもある。それぞれの守備範囲で重なりが出てくるので、一般の方にはごちゃごちゃしているように見えてしまうことがある。重なっていても二重に測っているのではなく、どちらかが測ったものをもう片方のプログラムが使うという分担をしている。GCOSが欲しい海洋の観測データはGOOSが担っている形だ。

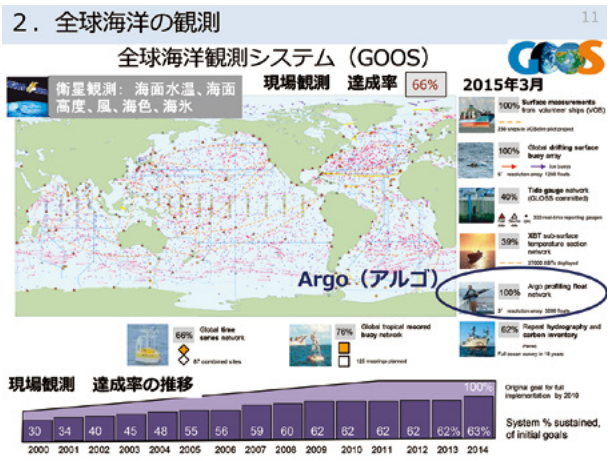



図2-4-10 GOOSの達成率

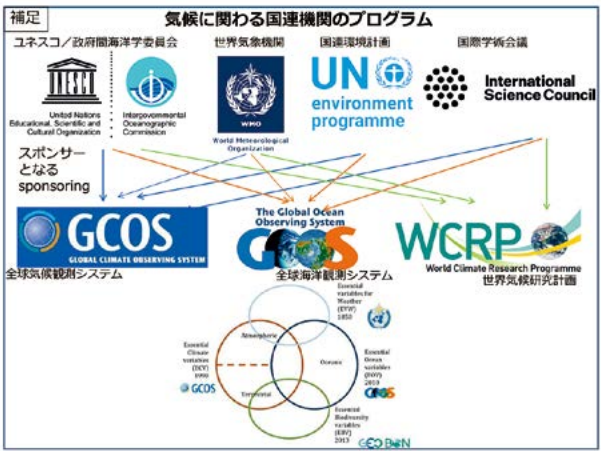



図2-4-11 気象に関わる国連プログラム

### 3.アルゴ（Argo）

アルゴは国際的な海洋観測網のプログラムだ。過去10年で最も気候の理解や予測に貢献した観測システムといった高い評価を記した論文・記事が科学ジャーナルや一般雑誌等に掲載されている。私自身も2000年頃、開始当初から携わってきた。

アルゴの前夜、20世紀末における海洋科学の課題は図2-4-12に示す状況だった。2000年以前の典型的な1か月分の観測点の例を図2-4-13に示す。

観測点の分布が、先ほどの図2-4-7とだいぶ違う。観測船で測っているのではなく、商船で航走中に投下して、海面から700 mまでの水温データが観測できる装置で測っていた。データが商船の航路沿いに偏る。したがって、広大な南半球の海はほとんど空白区域だ。どの年、どの月を見てもこの程度しか測れていなかった。このデータに基づいて海にたまった熱を見積もれば誤差、不確定性が大きくなることが想像できるだろう。

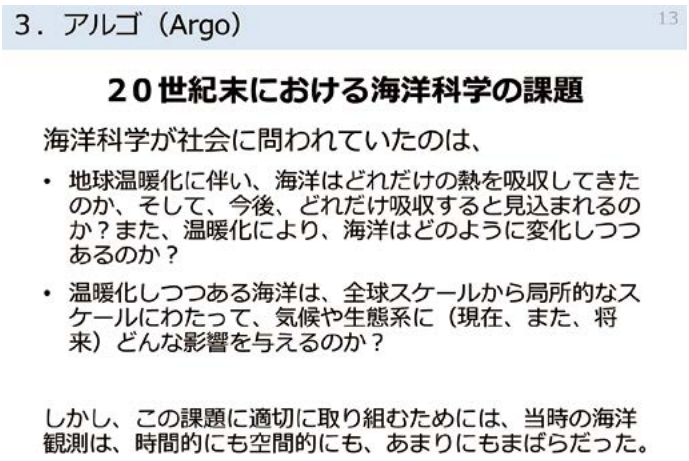



図2-4-12　20世紀末における海洋科学の課題

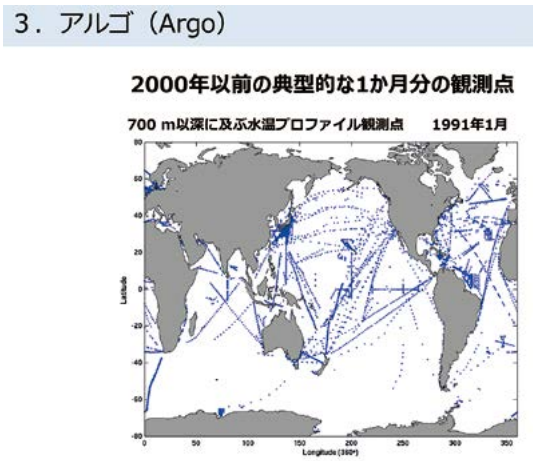



図2-4-13　アルゴ以前の1か月観測点の例

1990年代に自動観測ロボット、プロファイリングフロートが登場した（図2-4-14）。油の浮袋がついていて、油の出し入れで牛乳瓶1本分ぐらい体積を変化させる。それを利用して自動的に浮いたり沈んだりする。水温と塩分のセンサーがついていて、最深部から浮上しながら、海の深さ方向に水温と塩分のデータが計測される。人工衛星への転送アンテナもついていて、海面上に浮き上がった際、人工衛星を経由して計測データが転送される。

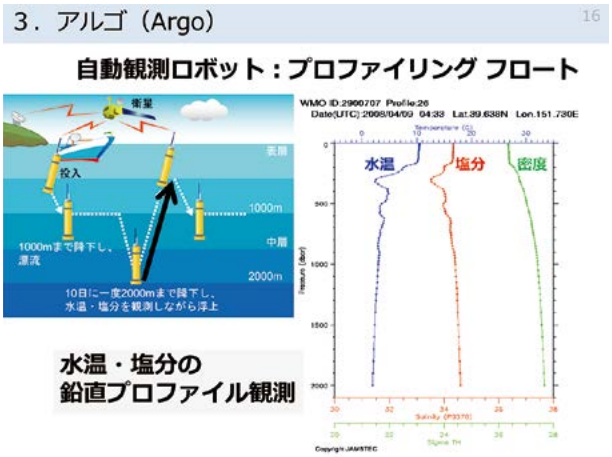



図2-4-14　プロファイリングフロート

図2-4-15　フロート小史

この自動観測ロボットは最大深度2,000 mまで潜る能力があり、その間で自由に設定を変えて動かせる。後ほど紹介するアルゴでは通常は水深1,000 mを漂流させ、10日に一度2,000 mまで潜らせて、そこから海面まで浮上する設定だ。水温と塩分の計測値を使って、密度は計算で求められる。密度は海洋の重要な特性量だ。

フロートの歴史を図2-4-15に示す。1955年に海の流れを測るために、スワローフロートが開発された。1970年にはSOFARフロートが開発された。フロートに搭載された音源からの音波を、水中に設置したレシーバで受信する。複数のレシーバで信号を受信すれば、そのフロートがどこにいるかが分かる。それをレシーバに記憶させておき、回収してから解析すると、フロートがたどってきた経路が求められる。それによって海の流れを推定する。海の中にレシーバを設置しなければならないことが厄介だった。データを得るには後でレ

シーバーを回収しなければいけない。

1986年に開発されたRAFOSは、SOFARの綴りをひっくり返している。要約するとSOFARフロートは音を出して、海の中に設置したレシーバーで聞く方式だ。 RAFOSはその方式をひっくり返して、逆に音源を海中に設置しておき、その音をフロートが聞く方式だ。フロートが海面に浮上したときに人工衛星にデータを全て送る。最初に音源を設置しておけば、あとはフロートを入れるだけで済む方式だ。ただ、音源を海に設置することも大変な労力を使う。

1990年代にALACEが開発された。これは音源も使わない。位置決めは人工衛星による衛星測位で行う。フロートを所定の深さ、具体的には水深1,000 mを漂流させる。定期的に海面に浮上させて、衛星で位置を決めてまた沈むという方式だ。オペレーションしたまま衛星経由で位置は刻々とモニタリングでき、流れの情報が得られる。

ALACEは先ほど図2-4-7で紹介したWOCEの一環として深度1,000 mに多数投入された。その後、ALACEに水温・塩分センサーが付いて、浮上時も観測できるように開発が進み、図2-4-14のプロファイリングフロートができた。

観測網アルゴについて説明する（図2-4-16）。海洋が気候システムにどのような役割を果たしているか。この疑問に答えるため、このプロファイリングフロートを全世界の海に3,000台以上、換算すると300 km四方あたり1台以上の割合で展開させて、リアルタイムで観測する画期的な観測網アルゴのアイデアが1999年に出された。当時の人に聞くと、実現できるかどうか半信半疑だったそうだが、実際に動き出した。

2015年時点での観測網を図2-4-17に示す。世界の海で4分に1回、1日に390回、1か月に1,200回の観測が実施されている。紫色のフロートが日本が投入したものだ。



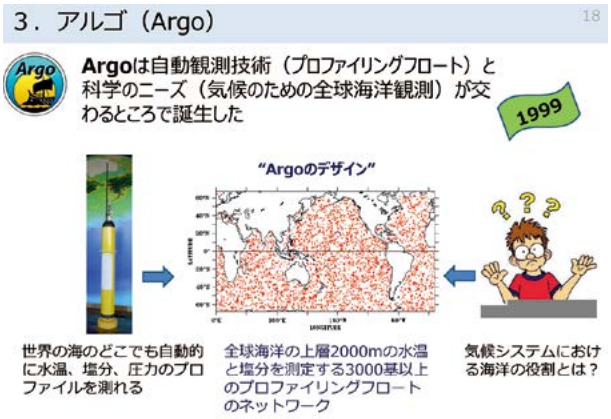



図2-4-16　アルゴのデザイン

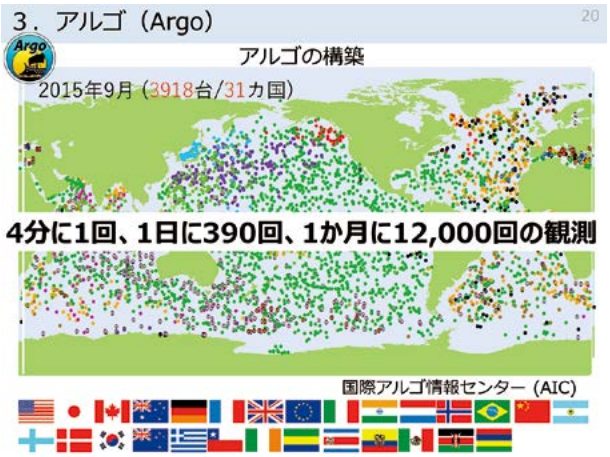



図2-4-17　アルゴの構築

アルゴの運用数の推移を図2-4-18に示す。最初は8か国の参加だった。開始から1年ぐらいで170台弱が投入された。徐々に参加国が増え、2004年に1,000台を超え、2007年に3,000台を超えた。当初の目標の数にその時点で達している。2012年に3,563台、2015年に大体3,900台に到達した。その後も、3,800台から4,000台の間を保っている。また参加国は約30か国を維持している。フロートの寿命は当初4年ほどだった。今は少し伸びたが、それでも5年から6年だ。そのため、フロートが常時3,000台以上稼働するためには投入を継続する必要がある。

国別にみると、アメリカが圧倒的に貢献している。アルゴ開始当初は、アメリカに次いで日本が貢献していたが、頭打ちになり、徐々に減ってきて、今はオーストラリアやフランスが日本より多く運用している。ただ、国際的な場では、このプログラムが立ち上げられ、実現するかどうか分からなかった時期に日本が非常に貢

献したことが記憶されていて、まだリスペクトされている。現在私は国際アルゴ運営チームの共同議長をしているが、そういう過去からの日本の貢献が認められてきたことが一つの理由だと思っている。

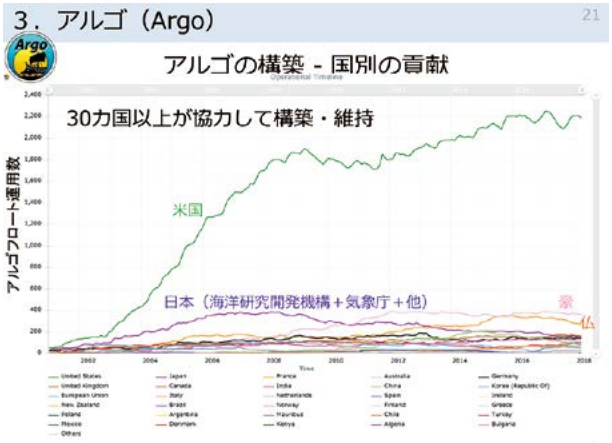



図 2-4-18　アルゴの国別貢献

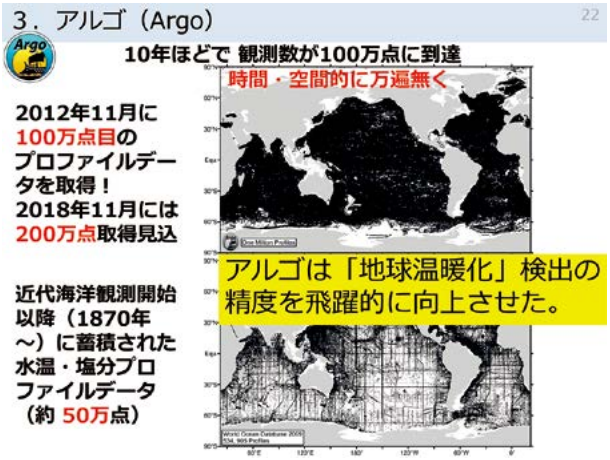



図 2-4-19　アルゴの進展

この観測網がどのくらい画期的だったか、図 2-4-19 で説明する。下側の図は、チャレンジャー号による近代の海洋観測が行われて以降、およそ 140 年間で得られた全データを示している。全部で 50 万点だ。これに対して上の図がアルゴが始まっておよそ 10 年で得たデータで、100 万点を超えている。2018 年には 200 万点を超えた。それも時空間的に満遍なく測っている。過去のデータでは、時間的には冬の荒れた海はほとんど測れず、夏に偏る困難があった。また空間的にも南半球はほとんど空白だった。こういった時空間的な空白が大きいと、海を正しく把握できなかった。画期的なアルゴ観測網の成功で、海の観測が革命的に変わったと言っても過言ではない。

最初に図 2-4-1 で熱を蓄えてきた地球とお話したが、その見積りの誤差を縮小できた最大の理由は、海の観測の充実だ。特にアルゴが非常に大きな貢献を果たした。 IPCC の AR5 で地球温暖化は疑いがない、と評価をくだす根拠になったデータの大きな部分を実はアルゴが供給していた。

**4. 気候システムにおける海洋の役割**

気候システムにおける海洋の役割と言うと、あたかも既によく分かっていることのように説明しているものが多い。しかし、実際にはまだよく分かっていないことが多い。例えば、将来がどのくらい予測できるか、どういう具体的な影響があるのか、より詳しく理解するには、研究をより深めていく対象が多く残されている。ここから、あくまでも現在の理解、いわば仮説も含め説明する。

海が熱を吸収する。こう言っても、よくよく考えてみると、一体どういうことなのか、実際何が起こっているか。まず、海は成層構造を持っている（図 2-4-20）。軽い水が上のほうに、冷たくて重い水が下にある。この上下の水はそう簡単に混合しない。海の中のそれぞれの層で熱の変化がどう伝わっていくか。まず、海洋内部の水温の変化は、より高緯度の海から始まると考えられている。その水温の層に対応する水が高緯度で形成され、それがほぼ等温線に沿って沈み込んでいくプロセスがある。形成時に記憶された温度の変化が沈み込んでいった水によって運ばれ、運ばれた先の温度が変化する。非常に簡単化すると、このように熱の変化が海の中に伝わっていく。このプロセスがしっかりと理解できていないと、海がどのように熱をためていくのか、そして熱のため方が今後どう変わっていくのか分からない。

これを念頭に、海の役割を大気と海洋の熱交換、海による熱輸送、水輸送、ベンチレーションの 4 つに着目して紹介していく（図 2-4-21）。水輸送と聞いても、海は水なので当然じゃないかと思われるかもしれない。

これは海が淡水を輸送しているという話だ。ベンチレーションは直訳すると換気だ。大気と接している海の表面の水が、より深い層の水と入れ替わるプロセスをこう呼んでいる。

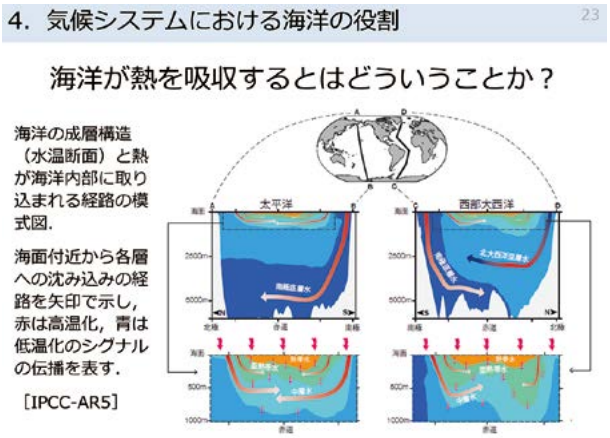



図 2-4-20　海の熱吸収

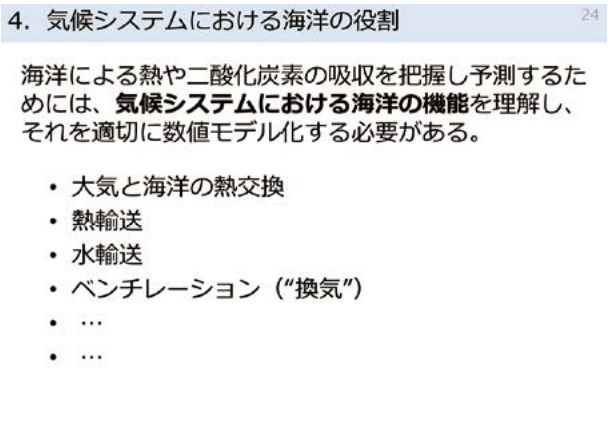



図 2-4-21　気候システムにおける海洋の役割

**（大気と海洋の熱交換）**

熱交換を図 2-4-22 を用いて説明する。大気に熱を放出しているところを暖色系、熱を吸収しているところを寒色系に塗り分けている。大気を加熱するところと冷却するところと言い換えてもいい。このプロセスによって海が気象現象や気候に影響を与えている。

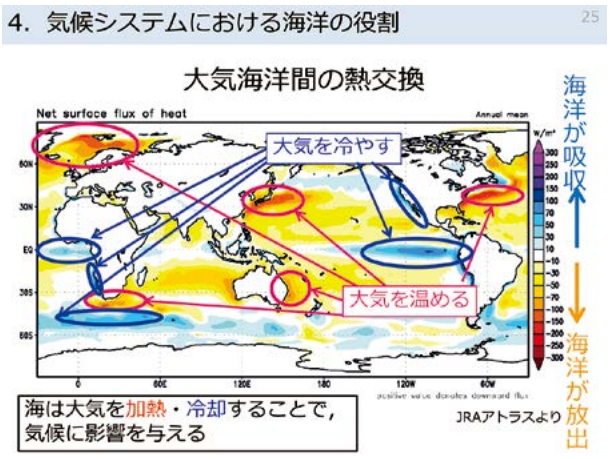



図 2-4-22　大気海洋間の熱交換

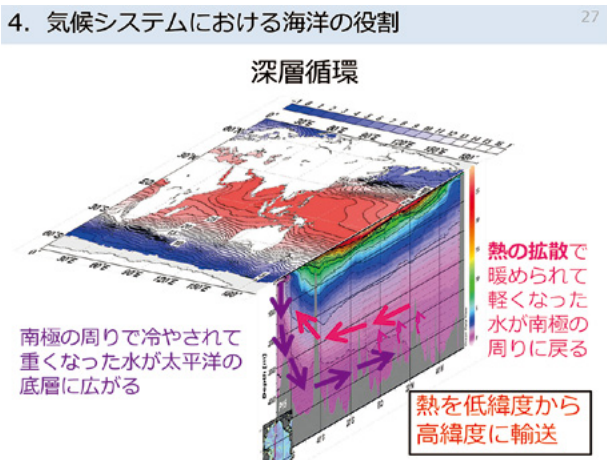



図 2-4-23　深層循環

**（熱輸送）**

この熱交換を支えているものは何か。海が熱をどんどん放出し続けたなら、当然その場所がどんどん冷えていくはずだ。しかし、実際にはそこは冷えていない。海が熱を吸収し続けたら、そこは温まるはずだが、温まってない。これは熱の吸収域から放出域へ海が熱を輸送しているプロセスの存在を示している。その輸送がどのように行われているか。その一つの例が深層循環である（図 2-4-23）。

南極の周りで海が冷やされると、海から熱が大気に放出されて、冷えた水が底層水として太平洋のほうに浸入していく。乱流混合のプロセスにあたる「拡散」によって伝えられた熱で底層水が温められて軽くなる。

深層水と言われる底層水よりも少し温かく変化した水が、南極のほうに戻ってくる。このプロセスによって熱が低緯度から高緯度に輸送される。別の言い方をすれば、比較的温かい水が高緯度に向かっていき、冷たい水が低緯度に向かう。その差し引きとなる熱が高緯度に輸送されている。

この深層循環のプロセスを地球全体で見たもので、ブロッカーのコンベアベルトとして知られているパターンがある（図2-4-24）。北大西洋の北側で表層水が冷やされて深層水になる。それが南極の周辺に達し、ぐるっと周って、インド洋や太平洋に入っていく。そして、海の中で乱流混合で温められた水が海洋表面に上がっていき、海洋表層で再び元に戻って大西洋のほうに流れていくパターンだ。

この循環を熱塩循環と言う。加熱と冷却、蒸発と降水により、水温と塩分が変化する結果、海水の密度が変化して重くなったり軽くなったりする。そのプロセスに起因して循環が起こっているので、熱塩循環と名付けられている。熱塩循環によって熱が運ばれてると述べたけれども、この図2-4-24はあまりに単純化し過ぎだ。現在、もう少し現実的なパターンが得られている（図2-4-25）。深さごとに赤、緑、青色に分けている。赤い表層水の線は、海面から深さ1,500 mまで一緒くたにしている。ここでの表層という言葉は、深層と対比したものと受け取ってほしい。大西洋は、表層水が北のグリーンランド付近で冷やされて底層水となり、さらに深層水となって世界を巡っていく。太平洋を見ていただくと、南極周辺から底層水が入ってきて、少し温まって深層水になり、また元に戻っていくプロセスがある。北太平洋に流れてくる底層水は非常に膨大な量だ。

熱塩循環は大局的にはこのレベルまでは分かっている。しかしながら、より詳しく分かっているか、この循環の変化がどれくらい捉えられているか、と問えばまだまだだ。研究対象の段階である。

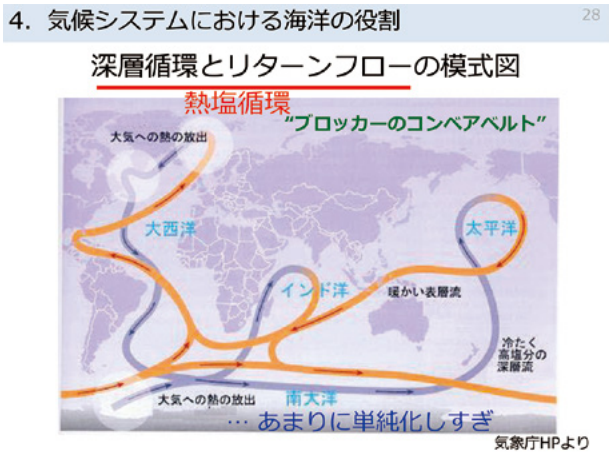



図2-4-24　熱塩循環の単純化した模式図

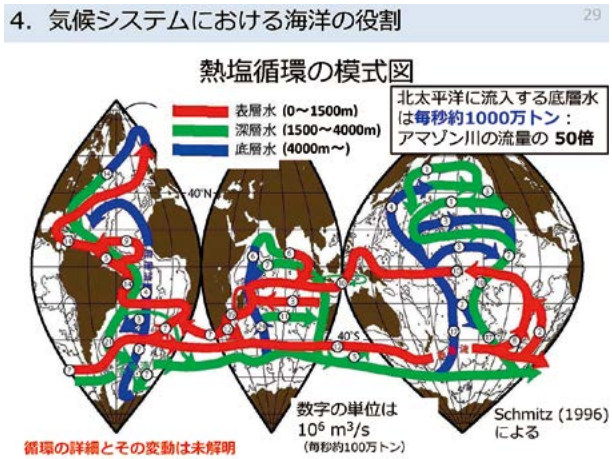



図2-4-25　熱塩循環の模式図

ところで、そもそも海の中の流れはどうやって調べているのか（図2-4-26）。海面が盛り上がっているとして、ある水平面を考えると、中心部が圧力が高く、外縁部ほど圧力が低くなる。すると、圧力傾度力が働く。圧力傾度力とコリオリ力が釣り合うような地衡流と呼ぶ流れができる。大規模な循環の流れはほとんど地衡流になっている。海面の凸凹を測定できれば、海面の等高線に沿って地衡流は流れていると考えることが可能だ。

この原理に沿って、例えば4,000デシバール面の高さの分布を見てみる（図2-4-27）。海の深さ約4,000 mに相当する圧力面である。この分布は、言わば天気図の等圧線の分布と同じだ。等値線に沿って流れていると推定できる。流速計を入れて測ることもあるが、より大局的な流れはこの海の中の圧力分布を調べる方法で求めてきた歴史がある。海の中の圧力分布を求めるには海の密度が必要だ。それには水温と塩分の観測値が非常に重要になる。先ほどのプロファイリングフロートの説明で密度が重要だと言ったのはこの点からだ。

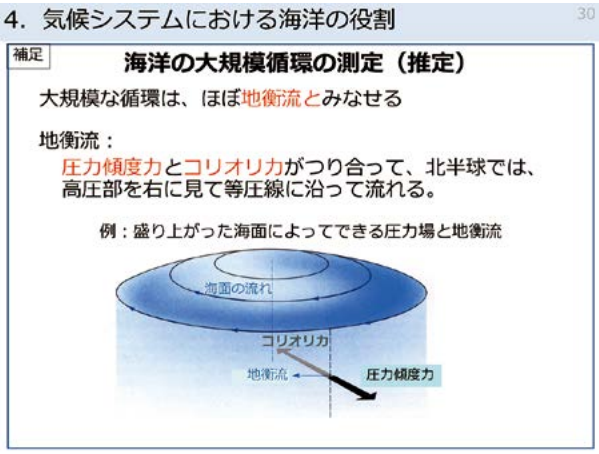



図2-4-26　海洋の大規模循環の測定（推定）

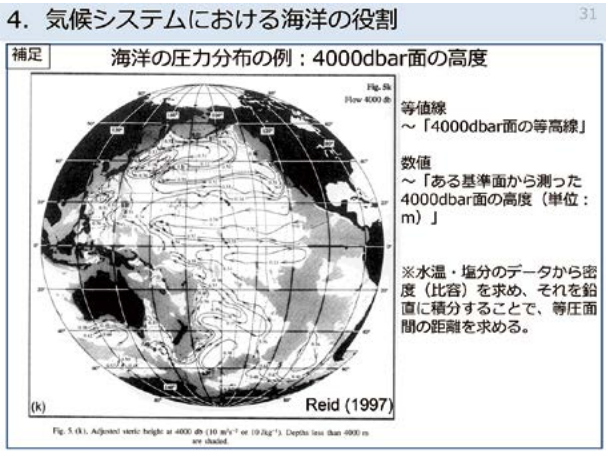



図2-4-27　海洋の圧力分布（4,000 dbar高度）

先ほど深層循環をみたが、表層循環も見てみる（図2-4-28）。温かい水が低緯度から高緯度に向かっているところと、冷たい水が高緯度から低緯度に向かっているところが見える。深層循環だけでなく、表層循環も熱を運んでいることがわかる。そこで、今度は海面の凸凹を調べる。表層の流れを調べると循環の様子が見えてくる（図2-4-29）。

歴史的には海面の凸凹も海の水温と塩分の計測から推定していた。1993年以降は衛星海面高度計のデータが常時得られるようになり、週刻みで海面高度の場が把握できる状況になった。このジェイソンミッションという衛星観測との連携をアルゴは非常に強く意識している。そもそも何故アルゴと命名されたのかといえば、ジェイソンはギリシア神話のイアソンの英語読みで、イアソンが乗った船、アルゴ号からきている。

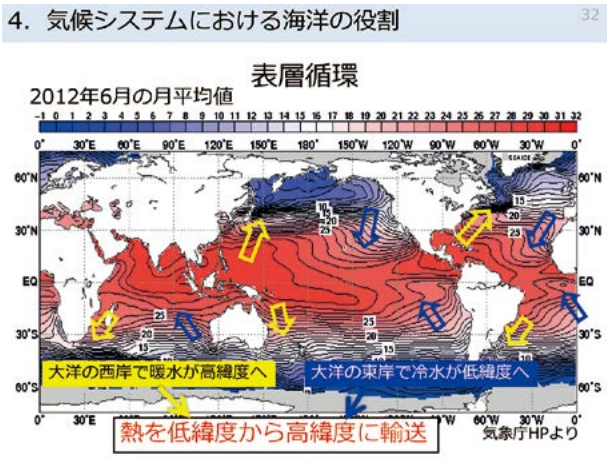



図2-4-28　表層循環

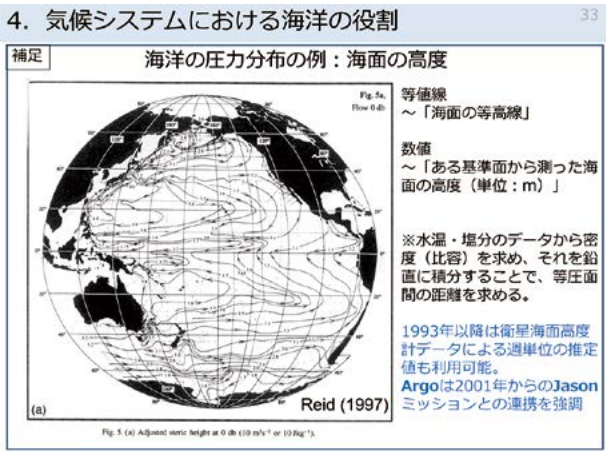



図2-4-29　海洋の圧力分布（海面高度）

この観測で分かる表層循環の模式図を図2-4-30に示す。北半球の太平洋を拡大した図を見ると、赤い線で描かれた亜熱帯循環がよく見える（図2-4-31）。この循環は風で駆動されている。偏西風と貿易風に挟まれたところでは世界中に亜熱帯循環がある。

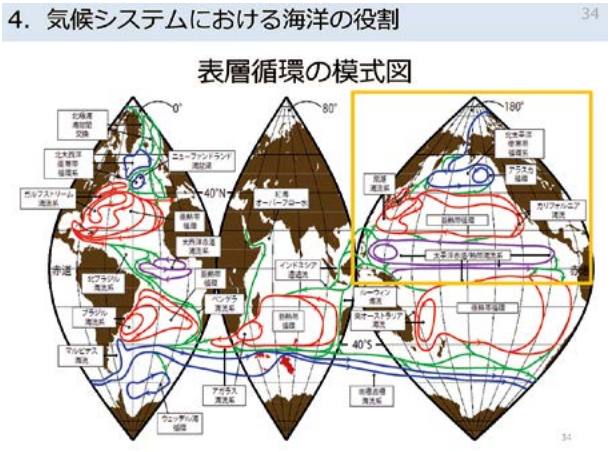



図2-4-30　表層循環の模式図（全球）

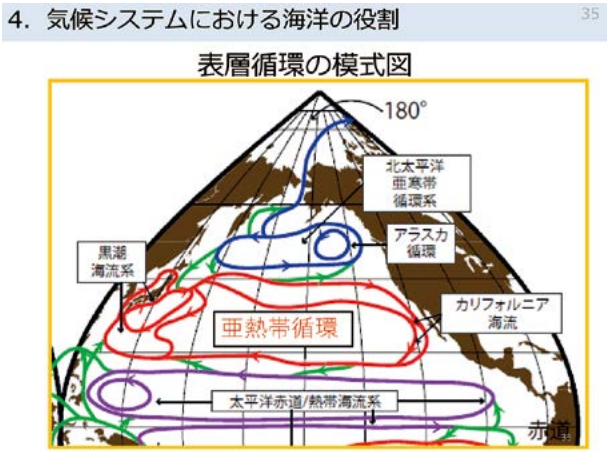



図2-4-31　表層循環の模式図（北半球太平洋）

風で駆動される循環なので、風成循環と言う（図2-4-32）。風の場が表層の主な海流系をつくっていることがポイントだ。したがって、風のデータは海洋循環の研究に欠かせないデータとなる。人工衛星での風の観測が非常に重宝され、重要な観測データとして扱われている事情がここにある。

さらに拡大して、日本周辺の様子を示す（図2-4-33）。高解像度モデルのアウトプットに観測データを同化したものだ。実際の海の流れは先ほどまでの模式図で描いたようなおとなしいものではなく、非常に変動に富んでいる。大きくうねる黒潮続流は耳にされたことがあるかもしれない。中規模渦と呼ばれる約100 kmのスケールの渦がたくさんある。熱や物質の吸収と放出、輸送には、約100 kmの中規模スケールや、それよりも小さい約1 kmから約10 kmのサブメソスケールの変動が重要だと分かってきている。海の循環の変動に関して、まだこういう研究を進めていかなければならないと認識されている。

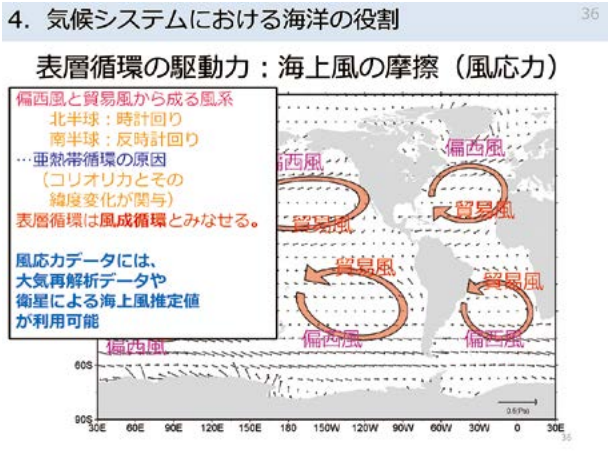



図2-4-32　表層循環の駆動力

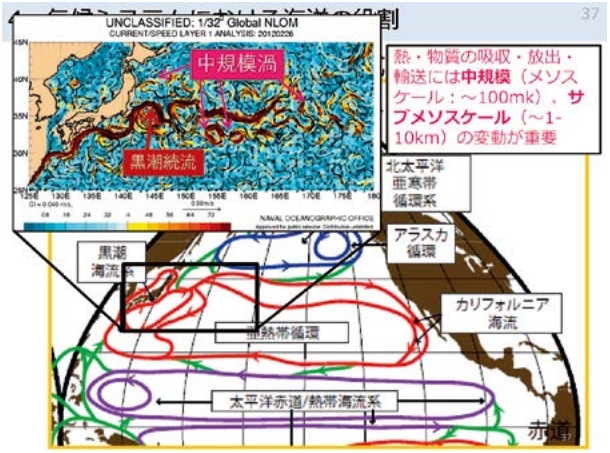



図2-4-33　表層循環（日本周辺）

**（水輸送）**

次に、水輸送に関して説明する。海水の塩分を変えるのは降水と蒸発の差だ。降水と蒸発の差をプロットした分布を示す（図2-4-34）。

降水が過剰なところが寒色系、蒸発が過剰なところが暖色系で塗り分けられている。サハラ砂漠があるよう

な緯度では海も蒸発が盛んだ。降水が過剰な海から、蒸発が過剰な海へ淡水を運んでいるのが海の循環だという概念的な見方もできる。これと大気の水蒸気輸送とが組み合わさって、地球全体の水循環の主要部分を形づくっているという理解ができる。

蒸発と降水の差を海の側から考えてみると、海から淡水が正味で抜けていくところでは塩分が高くなり、淡水が正味で入ってくるところでは塩分が低くなる傾向がある（図2-4-35）。塩分は天然の雨量計という言われ方もあるが、さらに塩分が変化すると、成層の強度が変わったり、深層循環の形成にも影響したりする。

深層水は北大西洋で形成されているが、北太平洋では形成されない。どちらの海も0℃ぐらいまで温度は下がるのだが、塩分が違うせいで深層水は大西洋でしかできない。この塩分の違いを生んでいるのが降水と蒸発の分布に加えて、海洋の循環になる。そういったものが全て絡み合ってグローバルな深層循環まで決まっている。その中で塩分は非常に重要な役割を果たしている。



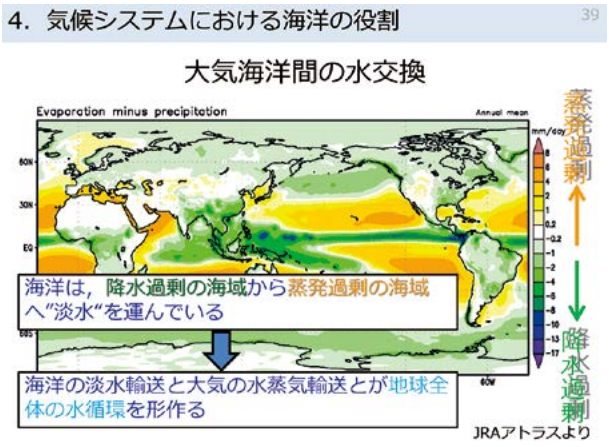



図2-4-34　大気海洋間の水交換

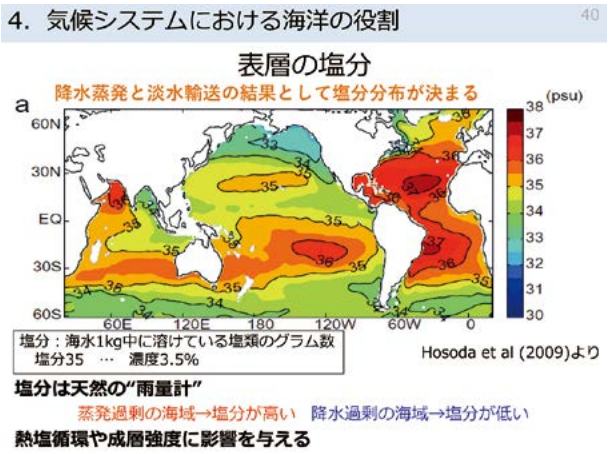



図2-4-35　表層の塩分

**（ベンチレーション"換気"）**

海洋のベンチレーション、換気については簡単なお話しにとどめる（図2-4-36）。先ほど、深さごとに異なる緯度の表面からの水が海に入っていくことをお話しした。そこでは混合というプロセスがあった。もう少し浅い層でもそういったプロセスがあり、各層で海がベンチレートされている。海が熱を吸収したり、二酸化炭素を吸収したりすることを理解するためにこのベンチレーションのプロセスが重要だが、この詳細もまだ研究途上である。

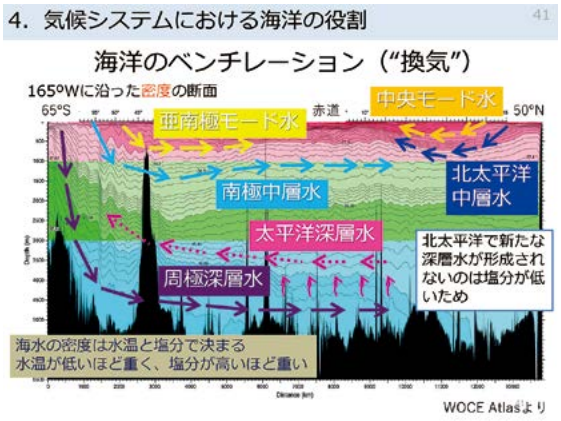



図2-4-36　海洋の換気

**（アルゴの成果事例）**

ここから、アルゴによって分かってきたことを幾つか紹介する。熱の蓄積に関する図2-4-37はアルゴのグローバルな観測網ができて以降のデータに基づくものなので、内挿する必要がない。観測データだけで世界の海の温度の分布が求められ、グローバルに平均したものだ。それを一つのプロファイルにして、それを年を追ってプロットしている。全球平均の海面から2,000 mまでの温度の分布を偏差で書いている。

年々の変動で温度が上がったり下がったりしながらも、全体として温まっていることが非常によく分かる。これが最近の熱の蓄積の見積りの精度を向上した最大の要因であると言って間違いない。

水循環に関する成果としては、塩分について過去の代表値とアルゴ観測での平均値を比較して変化を示している（図2-4-38）。過去はデータがあまり無かったので1960年から1989年の塩分の平均値を求め、代表値としている。アルゴの観測値は2003年から2007年の平均値だ。その差を取って、約30年間の塩分の変化を求めている。もともと高塩分だったところでますます塩分が高くなり、塩分が低かったところはますます塩分が低くなっていた。

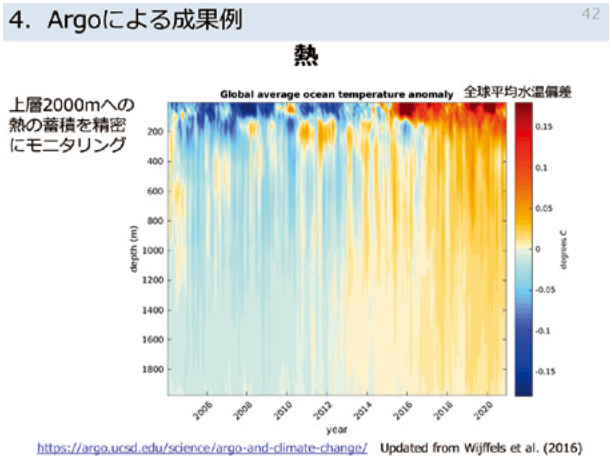



**図2-4-37　アルゴの成果「熱」**

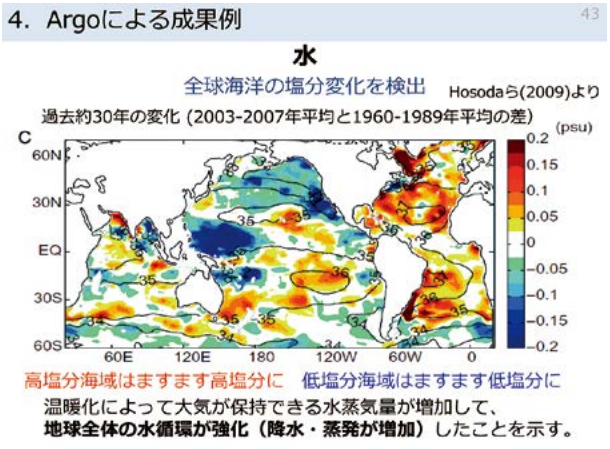



**図2-4-38　アルゴの成果「水」**

温暖化によって大気が保持できる水蒸気量が増したために、地球全体の降水と蒸発が活発化している。つまり水循環が強化したことで、もともと雨が多かったところはますます雨が多くなり、蒸発が盛んだったところでますます蒸発が多くなった。それが塩分にしっかり反映されているのだと理解されている。

海洋の密度の成層の変化に関して紹介する（図2-4-39）。海が温まるとき、表面ほど早く温まる。すると、海面付近と深いところの間の温度差が開く。温度差が開くと密度の差も開き、表面付近はますます早く軽くなる。そうして、表面の水と深いところの重い水は混ざりにくくなり、水中が安定化する。右の図で成層が強化しているところを赤色で示している。グローバルに成層が強化してきたことが見て取れる。

これが、鉛直混合を弱めてベンチレーションも弱め、基礎生産の低下や貧酸素化の原因になっていることが知られている。成層の強化も一様に起こっているわけでなく、さらに詳しく実態を調べていく必要がある。

ベンチレーションもアルゴのデータで全球的に年々の変動が見積もれるようになった（図2-4-40）。表面に接している海洋混合層の水が海の内部にどれだけ入っていくか（Subduction）、内部から表面にどれだけ戻ってくるか（Obduction）、という水の入れ替わりの早さを見積もっている。かつては30年分をまとめた平均場しか求まらなかったが、現在は毎年、毎年の値を求められるようになった。

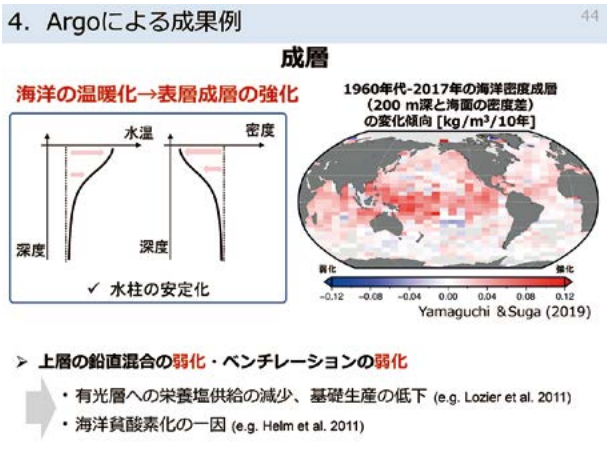



図2-4-39　アルゴの成果「成層」

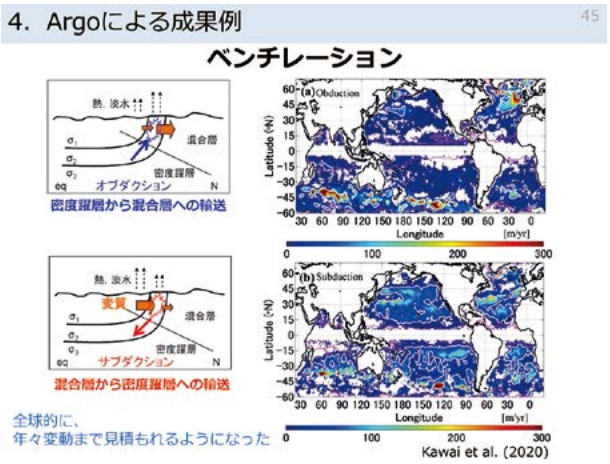



図2-4-40　アルゴの成果「換気」



## 5. 全球海洋観測システムと気候研究のこれから

先ほど全球海洋観測システム（GOOS）の展開が頭打ちになったとお話した。このアプローチは各国のボランタリーに基づく貢献の集合で、分担が決まっているわけではない。今の観測データのニーズや利用価値からでは、その程度の投資しか呼び込めておらず、限界だと海洋観測コミュニティ側で認識した。観測とデータ利活用の範囲をがらっと変えなければいけない。

GOOSのいきさつを図2-4-41に示す。とにかく海を測らないといけないということで、1991年にGOOSができた。2010年頃にはこのままではいけないとなり、大きく変革した。さらに最近GOOS 2030戦略を出した。より幅広いユーザーの要求を満たすように設定され、海洋観測システムの拡大を目指し、統合された全球海洋観測システムのビジョンを提示した。持続可能な開発や安全、福祉、繁栄に必要な必須情報の提供を幅広いパートナーシップで実現していこうと打ち出した。そこでは各国にナショナルGOOSの立ち上げを推奨しているが、まだナショナルGOOSがある国は少ない。ヨーロッパの幾つかの国やアメリカ、オーストラリアにはあるが、日本にはまだない。これが一つの課題だ。

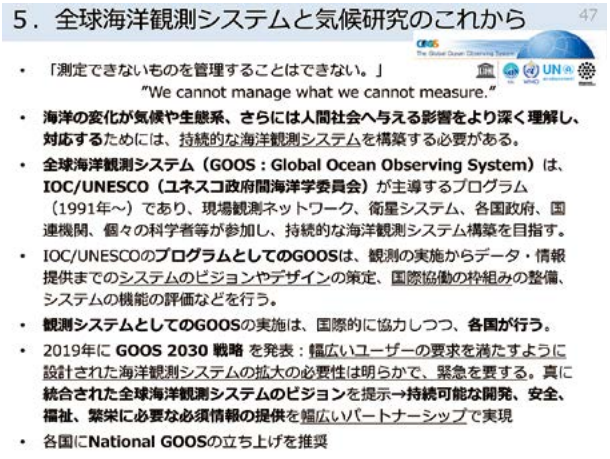



図2-4-41　GOOSの経緯

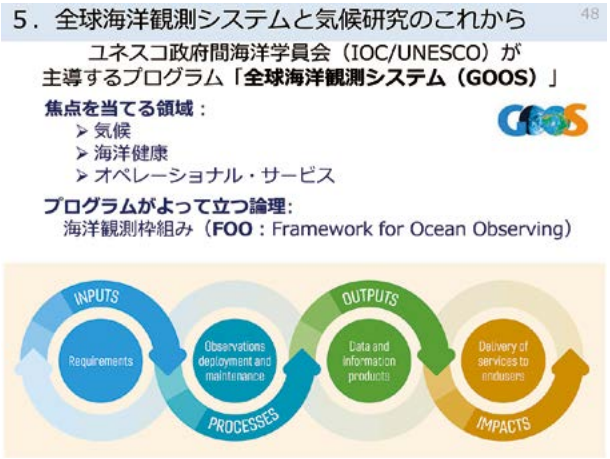



図2-4-42　GOOSの焦点

GOOSがどう変わったか（図2-4-42）。2009年に海洋観測枠組み（FOO）が打ち出された。それまで主に気候に特化していたが、海の健康とオペレーショナルサービスにも力を入れて、観測システムを活性化しよ

うとしている。下側の図でプロセスと書いてある観測のところからアウトプットのデータセット、データプロダクトを出していくまではGOOSの直接の守備範囲だ。さらに右側にいくには、様々なステークホルダーと連携して、インパクトを大きくしていく。そこからフィードバックをかけて、どんなアウトプットが必要か、そのためにはどんなプロセス、観測がいるか、としっかり返していく。どういう課題があり、そのために何を測ればいいか、精査する。それを測るための観測システムをつくり、そのアウトプットで課題の解決につなげていく。このサイクルを回し、より社会の役に立って、もっと投資を呼び込み、観測網をより最適化していこうという発想だ。

FOOの枠組みを別の形で図2-4-43に示す。左側のIssue Impact部分には幅広いパートナーシップが必要だ。これは観測を実施している人たちだけで幾ら考えても駄目で、実際のユーザー、社会的課題を抱えている人たちと連携し、パートナーシップで実現していかなければならない。

FOOの考え方は国連海洋科学の10年とも非常によく調和している（図2-4-44）。 GOOS 2030戦略もまさにフレームワークを回しながら、持続的な統合的海洋観測システムの実現を目指すもので、国連海洋科学の10年の目的と非常によく合っている。今後10年この方向で進んでいこうというモメンタムがついている状況だ。

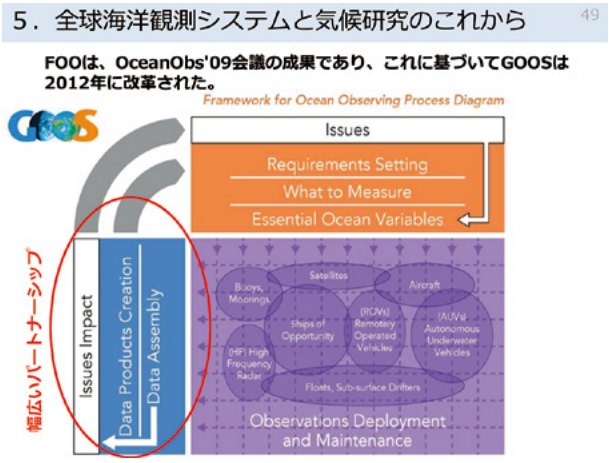



**図2-4-43　FOOのダイアグラム**

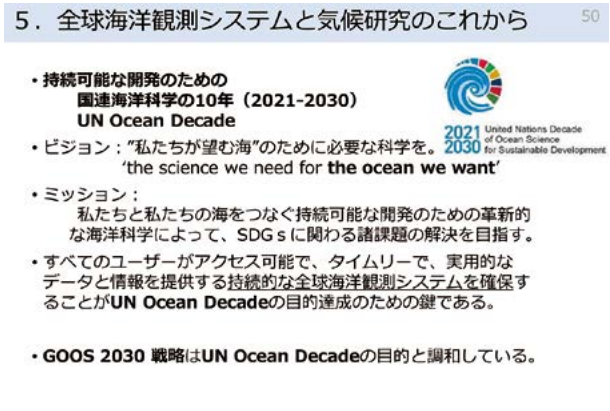



**図2-4-44　国連海洋科学の10年**

アルゴに関しても進展がある（図2-4-45）。今まで2,000 mまでしか測っていなかったが、海底まで測定できる装置が実用化し、CTDセンサーの精度もよりよくなった。深海まで測れるので、Deep Argoという。

生物地球化学の変数を観測できる新たなセンサーも実際に使えるようになってきた。炭素循環や海洋酸性化、貧酸素化、海洋資源管理などにも対応できる観測を実現していく機運が生まれた。こちらはBCG Argoと呼んでいる。この2つのアルゴの拡張が計画されている。

こういった新たな観測装置を使って、新たなデザイン、我々がOneArgoと呼ぶ構想を打ち出している（図2-4-46）。これまでの通常のフロートとDeep Argo、BGC Argoを組み合わせて一体的に運用するものだ。

NSFはGO-BGCプロジェクトを採択し、今年から開始した。全世界で1,000台のBGC Argoフロートを展開するプランのうち、半分を向こう4、5年で展開するという計画だ。 OneArgoの立ち上げの良い起爆剤になると期待されている。

図 2-4-45　アルゴの拡張

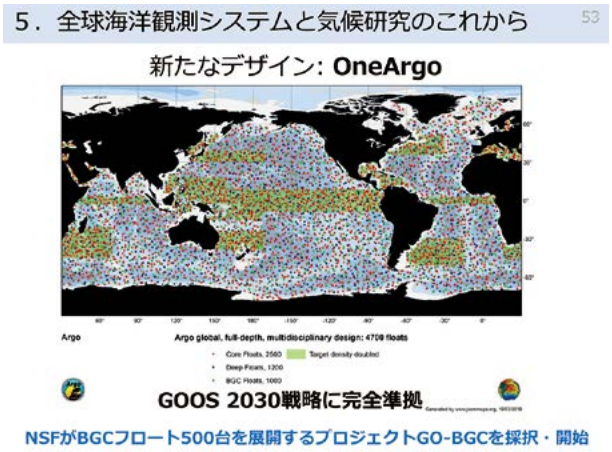



図 2-4-46　ワンアルゴ

図 2-4-47　各ネットワークのシナジー

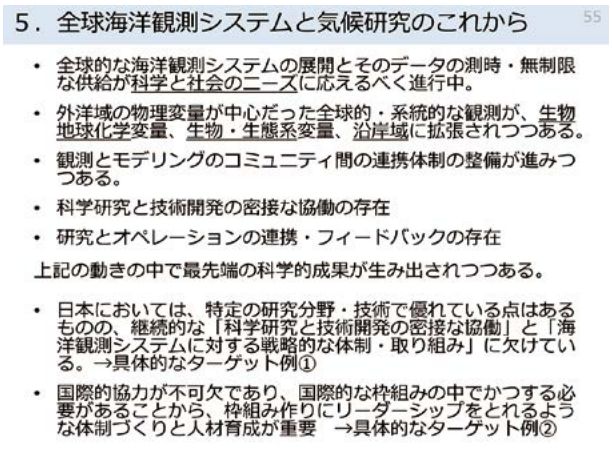



図 2-4-48　国際的動向、情勢のまとめ

アルゴはGOOSを構成する観測ネットワークの一つで、ほかにもGO-SHIPなどの観測ネットワークがある。国連海洋科学の10年では、それらがお互いに補完し合って、相乗効果を狙っていくプログラムも進められている（図2-4-47）。効率的に海を観測していき、エンドユーザーとの密接な連携により、より有用なプロダクトを出していこうという状況だ。

動向のまとめを示す（図2-4-48）。全球的な海洋観測システムを展開し、そのデータの即時、リアルタイムで無制限に供給するシステムをつくり、科学と社会のニーズに応える動きが進行中である。従来は外洋域の物理パラメータが中心だった観測網を沿岸域に、さらには生物地球化学や生物・生態系のパラメータに拡張しようとする動きも進行中だ。観測とモデリングのコミュニティの間の連携の整備も動いている。今までも連携しているが、モデルの高度化をにらみながら観測網を改良していく意識がさらに高まって、連携を進めていく動きだ。

科学研究と技術開発の密接な協働の存在があることは大きい。先ほどフロートの歴史を見たが、アメリカやフランスといった国では同じ大学、同じ研究所に研究者と技術者が一緒にいて、課題・目的を共有して、すぐに改良して、使い、発達してきた。これが、いろいろな国でも広がると、海洋科学はより効果的に進歩するだろう。日本はこの点がたいへん弱い。

研究とオペレーションの連携も非常に重要だ。オペレーションは、気象でいえば現業予報業務に使うような

データを取るところを指す。研究とオペレーションは、分けて考えられ、国の予算でも別のものとして扱われるケースが多い。これは非常に不幸なことだ。オペレーションに必要な観測データをオペレーションだけで取っていると実はどんどん劣化していく。研究に使うために、と考えると、日々工夫していいデータを取ろう、しっかり精度を確保しようというマインドになる。常にイノベーションが伴い、観測が効率化していいデータが取れる。一旦、オペレーションだけにしてしまうとそうはいかない。逆に、オペレーションで常時取り続けることがあって初めて研究が進む面もある。

研究とオペレーションは実は行ったり来たりの関係がある。観測について、ある時期は研究で行い、ある時期になったらオペレーションに渡るけれども、行ったきりではなく、また研究に戻ってくる、という形のほうが実は望ましいのではないかと広く認識されつつある。日本では例えばアルゴで気象庁とJAMSTECが連携し、一部こういう形をとっている。

先端の科学成果が生み出されつつあるが、日本においては、特に、科学研究と技術開発の密接な協働と、海洋観測システムに対する戦略的な体制や取組、戦略が欠けている。

国際的協力は不可欠で、国際的な枠組みの中で活動していかざるを得ない状況になっている。その枠組みづくりにリーダーシップを取っていくことも日本は弱い。体制づくりと人材育成が重要だ。

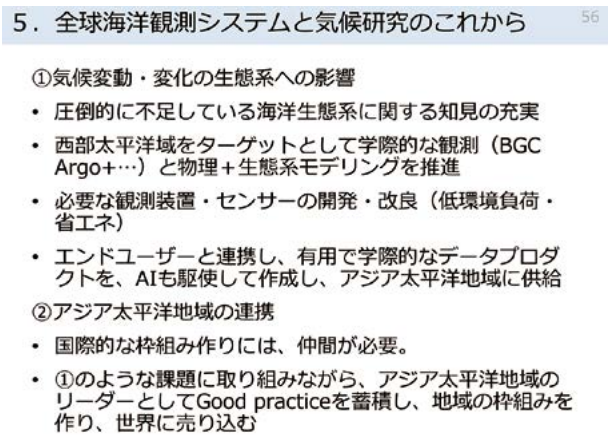



**図2-4-49　　これからのターゲット例**

この2点はやや抽象的なので、具体的な例を図2-4-49で示す。1番目に関しては、例えば気候変動、変化の生態系への影響を取り上げる。圧倒的に不足している海洋生態系に関する知見の充実を目的にして、西部太平洋域を重点領域に選び、そこで学際的な観測とモデリングを推進する戦略を立てる。必要な装置開発やセンサーを開発、改良していく際、特に低環境負荷、省エネがこれから非常に求められる。これは日本が得意な領域だ。

そうすると、日本発のセンサーが世界中で使われることにつなげられる。それから、エンドユーザーとの連携も見据えるべきだ。特にアジア太平洋地域で有用なデータを供給していく戦略を考えれば、いろいろな活動をつなげて効果的に進めていく発想になる。

2番目の国際的な枠組みだが、日本だけで幾ら良いことをしていても、それを国際的な枠組みにするハードルはなかなか高い。対照的に、ヨーロッパは非常にうまい。まず彼らはヨーロッパで自分たちの枠組みをつくり、それを国際的に売り込む。そうして、自分たちのやり方を世界標準にすることを彼らは頻繁に行っている。日本も仲間をつくる必要がある。アジア太平洋地域のリーダーとしてこの地域の枠組みをつくって、グッドプラクティスを積み上げて、それを世界に売り込んでいくアプローチをもっと考えるべきだろう。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：観測機器開発と研究をうまくウィン・ウィンの関係で回していくエコシステム、在り方を考える上で御示唆いただきたい。アメリカやフランスはアルゴのフロートの開発に携わる企業が複数ある。アルゴ開始当初、日本が数を増やしていたとき、民間企業の関与があったのか。観測機器を日本が展開していく上でも、民間企業との上手な連携が不可欠だ。今後を見据えた上で当時どういう企業が入られていたかというところを教えていただけますでしょうか。

A：アルゴ開始当初、日本が大量投入を実現した理由は非常に明快で、ミレニアムプロジェクトがあったからだ。当時の小渕首相が新しい千年紀と旗を掲げて、幾つか採択された中にアルゴが選ばれた。最初の5年は予算が多くあった。当時、海外企業のものを買って投入していた。ほかの国は最初の年から予算がつかず、準備できなかった。しかし、これが大きな起爆剤になって、世界の国が追随したので、非常に大きな貢献だった。

日本の研究者らも最初4、5年だけその予算が続くけど、その後は続かないと認識していた。何とか国内でフロートの生産やセンサー開発をやろうとJAMSTECが民間企業の鶴見精機と連携していた。ほかの国とは違う新しいコンセプトで、油ではなく、固体の棒を出し入れで浮力を調節するフロートを開発した。この方式だと非常に細かく調節できるメリットがある。NINJAと名付けてかなり注目されたが、残念ながら価格競争に負けて市場から撤退せざるを得なかった。コマーシャル的にはもっと早く値段をもう少し下げることができればよかった。それでフロートの国内生産が育たなかったという非常に痛恨の思いがある。その技術が根付いていれば、今の日本は違う立ち位置にいただろう。

Q：海洋と気象との関係について伺いたい。気候変動でヨーロッパが恐れている海洋の変化の一つが海流の変化だ。温暖化が進む際、その可能性はどのくらいあるか。

A：ご質問の内容は、ヨーロッパが観測に非常に大きな予算をつけて、特に極域の観測などに力を入れている理由の一つだ。氷が溶けて北のほうの海に淡水が入ることで塩分が下がってしまうと深層循環が形成されなくなり、止まってしまうのではないか、今は暖流が北欧まで流れているのが止まってしまい、寒冷化するのではないか。その危機を過大に煽って、予算をつけていたような側面があるにはあった。

現在でも、暖流が止まってしまう極端なところまではいかないが、循環が弱くなったり強くなったりの振動していて、それにより海面水温の偏差が出ている。エルニーニョほど強烈ではないが、それが地球全体の気候に影響している研究がなされている。海流の変化は気候に影響があり、あるティッピングポイントを超えたときにドラスティックに変化しない保証はない。変わる可能性は十分あるとは思う。

Q：日本でも黒潮の変化が関心事だ。親潮が日本の沿岸に着岸する、しないという海流の変化が冷害を生む気候に影響するなど、いろいろな問題に関連する。温暖化によってそういったパータベーション、変動はどうなると考えられているかお伺いしたい。

A：パータベーション、変動は大きくなると考えられる。非常に端的に言えば、もともと平衡状態にあって、安定していた場が今わずかにずれている。例えばハドレー循環が大きくなり、風の分布が変わると黒潮と親潮の位置が少しずつずれていく。そうすると、今まで落ち着いて流れていたものが出たり入ったり、北上したり南下したりということを繰り返すようになるため、変動の振幅は明らかに大きくなると予想される。

Q：エンドユーザーが必要という議論では、具体的に考えていかなければならない。海の問題だとやはり水産業ではないか。例えば黒潮が変化してサンマが突然どこかまで行ってしまった、カツオが北海道で取れた、と影響がある。水産業はエンドユーザーとなり得る議論か。

A：それを意識している。 BGCアルゴの立ち上げを、今行っている最中で、5月にG7のFuture of the

Seas and Oceans Initiativeが後押しして1週間置きに1か月にわたるワークショップを開催した。その中でのテーマの一つが、BGCアルゴが得る観測データをいかに生態系モデル、地球システムモデルを介して将来の漁業資源の予測管理につなげていくかだった。研究者は間違いなく、水産業やその関係業界をエンドユーザーとして見ている。そこから観測への投資がくるサイクルにできないかという期待もある。

Q：海の気候に対する役割の理解が深まった。大気より海は比熱が高いので、多く熱を蓄えてくれている。大気と海の分圧の観測で、二酸化炭素そのものは、あまり海はためていない。一方、熱で見ると膨大な量をためている。その姿も徐々にわかりつつある。今後、温暖化が進んでいった際、炭素循環を考えても、ためにくくなると想像しているが、ご知見をお伺いしたい。

A：重要な問題だ。ベンチレーションが関係する。熱は表面で受け取って、表面の海水が温まる。深いところに沈んでいく循環のプロセスそのものがどう変わっていくか、それと吸収の効率は表裏一体と考えている。現状の理解の下につくっている海洋モデルはかなり解像度を粗くしたバージョンを気候モデルに使っている。それで評価して見積もっている。

それで本当に十分か。中規模変動やサブメソスケールの変動が海水の混合に非常に重要な役割を果たしている。それが入っていないモデルで見積もっている。そうすると、海の熱や二酸化炭素の吸収の仕方が現在のIPCCが評価に使っているモデルでも、そのプロセスをしっかり反映できてない可能性がある。これは今まさに研究を進めようとしている内容と言ったほうがよい。

Q：海洋で魚が生きるには溶存酸素だけでなく、栄養分として植物性プランクトンも必要だ。その情報がBGCアルゴで取れるようになっていく期待が大きい。海洋でも植物性プランクトンが光合成で二酸化炭素を固定して、それを大型魚が食べて海底に沈んでいく割合はあまり大きくないと思っているが、現在どのぐらいまで炭素循環の生物過程が分かっていて、今後BGCアルゴで分かっていきそうかお伺いしたい。

A：その分野は私の専門領域からはかなり離れてくるので、教科書に書いてあるレベルの知識でお答えする。表面で光合成によってつくられた有機物、それが途中で食べられたり、沈んだものがバクテリアに分解されたりすることが起こって、最終的に海底にたどり着くのは1%を下回る非常に少ない割合だ。

ただし、途中で分解されたものは、溶存無機炭素として海に残る。これは、循環のタイムスケールに応じて、いずれは大気に出ていく。数年かもしれないし、数百年かもしれない。そういうタイムスケールで海の中にある意味暫定的に固定されている状況にはなる。

BGCアルゴにはクロロフィルのほか粒状有機炭素（POC）のセンサーもついていて、海の中で有機物がどういうふうに沈んでいっているか推定するデータも得られていく。今こういう研究が進もうとしており、これから理解が深まっていくだろう。

Q：先日の参議院での公聴会でEOOSに関して言及されている動画を拝見した。 EOOSとGOOSの関係性をお伺いしたい。

A：EOOSは、ヨーロッパ・レベルで、GOOS貢献するための枠組みであり、ヨーロッパの海洋観測コミュニティを統合し、海洋観測およびモニタリングのインフラストラクチャを運用、支援、維持する複数の組織の調整を促進するステークホルダー主導の枠組みです。複数のステークホルダーからの長期的な財政投資の確保を支援することで、ヨーロッパの海洋観測の価値と利益を最大化しつつ、GOOSの不可欠な一部となることを目指しています。

Q：将来的にナショナルGOOSができていくと、その横並びになる形になるのか。

A：EOOSは国レベルではなく、ヨーロッパ・レベルの枠組みなので、日本にナショナルGOOSができた場合、完全に横並びとは言えないが、EOOSの「ヨーロッパの」を「日本の」と言い換えたような枠

組みとして日本のナショナルGOOSを立てることも可能性としてあり得る。

ヨーロッパはヨーロッパの中で連携してやっている人たちがその関係をGOOSに持ち込んで議論するので非常に強力だ。私もGOOSの各種会議に参加しているが、日本の場合どうしても国内でほかのことをやっている人とつながる仕組みが、必ずしもない。国内体制がないのは国際競争力という面で非常に弱い。一人一人が国際的な1つずつのプログラムには貢献しているが、国内の仕組みでつながっていないのが、国際連携主導の面で、日本の国際競争力が弱い理由ではないかと最近強く感じている。

Q：数100万点という物すごい数のデータのマネジメントの状況はどのようなものか。国際協調の枠で誰でもオープンで使えるようなものか。

A：WOCEでもデータ管理が非常に大変だった。観測してもデータが出てこない状況が頻発した。そういう経験もあり、アルゴはプランニング段階から強力なデータシステムをつくらなければいけないと検討がされた。観測全体に係る資金の10%はデータ管理に使うべきだ、という考えを押し出し、そういう発想で進められた。その点はアルゴの最もイノベーティブなところだと言って良いと思う。リアルタイムのデータをどういう経路で誰が責任を持って、一次的な品質管理をして、それをどう全球の予報システムにGTSを通じて流し、もう一回フィードバックするか。より科学的な品質管理をして、気候研究に耐えるデータにして、それをまたグローバルデータセンターに戻すかという仕組みを最初からつくって運用している。もちろん改良を重ねているが、今でもこの仕組みで動いている。

観測フロートが浮上する際、9割方のデータが12時間以内にGTSに流れる。気象機関はその全てが使えて、ほかのオペレーショナルユーザーも使える。同時にインターネット上に公開されるので誰でもダウンロードできる。さらに1年かけて、フロートのセンサーのパフォーマンスを見ている。さらに高精度の品質管理をして、船舶データと遜色ないレベルに品質管理したデータを1年以内に整備する。それも全部公開する仕組みをつくっている。そして、これに相当マンパワーも割いている。

Q：海氷域のようなフロートが浮上できない海表面の観測もアルベドの問題などで大事かと思うが、これはGOOSの枠組みか。海氷面に氷があるとアルゴでは観測できないと思う。

A：アルゴには海氷検知機能があり、季節海氷域は観測領域に入れている。浮上できない間はデータをためておき、浮上できたらデータを全部送っている。ずっと氷が張っている海氷域だと浮上できないので、アルゴは対応できない。

極域の観測に関して、GOOSがターゲットから除いているわけではないが、極域研究コミュニティがもともとあるので、連携する形をとっている。ここでも、誰か観測している人がいるなら、その人たちとつないでグローバルなデータをしっかり見ていこうという発想だ。極域観測グループは重要なパートナーだ。国際的なGOOSの枠組みのいろいろな仕組みも伝えて、それと整合するようなものにしていく努力もしている。

Q：今後、海底まで測れるフロートが広がっていくと、今の仮説がさらに強化されていくのか、全く別の描像が出てくる可能性があるのか、現時点でどのような状況か。

A：海底まで実際に測れるフロートは既にできている。しかし、パフォーマンスが安定していない、センサーの精度が長期保証されるか、といったいろいろな問題があり、まだ改良が必要だ。長年の間、深層は非常に穏やかなゆっくりとした変化をする場だ思われてきた。しかし、そんなことはなく、実は非常に大きな時間変動していることを示すデータが得られ始めている。これまでの描像ががらっと変わってくる可能性はある。ただし、循環のパターンの理解などが激変するとまでは思っていない。

深層で起こっている様々なプロセス、たとえば混合の早さなどが現在の認識と変わってくる可能性は十分ある。深海の生態系などの理解は進むだろう。

# 2.5 大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気大循環モデルの融合による中層大気階層構造の解明

佐藤 薫（東京大学）

※講演日：2021年9月10日



## はじめに

図2-5-1の背景の写真は、南極昭和基地の大型大気レーダーである。私は南極での観測プロジェクトのリーダーを務めており、2018年12月に昭和基地に観測隊員として現地に行った際、自ら撮影した。南極の晴れているときの空はとてもきれいで、壮大な巻雲が写っている。

私の専門は気象学、特に大気力学、中層大気科学である。これまで南極に観測隊として参加したことが2回ある。極地研で助教授だった時、第44次日本南極地域観測隊に越冬隊員として参加した。東大の教授になってから図2-5-1の、第60次隊に夏隊員として昭和基地に出張した。ただし、私自身はフィールドワークよりも、どちらかといえば箱入り系と呼ばれる、理論に基づきコンピューターで観測データやシミュレーションデータの解析をガンガンやる研究が主体だ。

図2-5-1　南極の様子

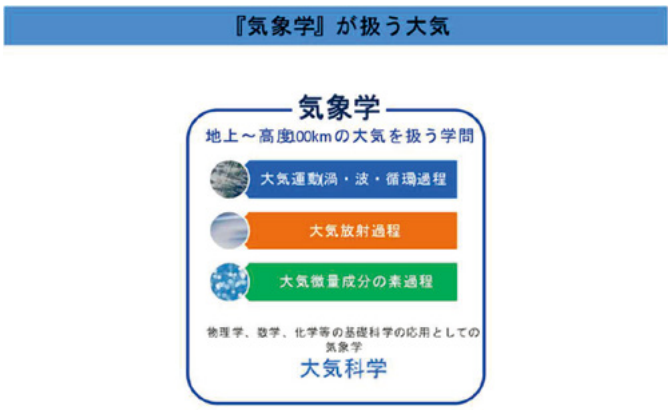



図2-5-2　気象学が扱う大気

## 気象学が扱う大気について

はじめに、気象学の対象は何かということを簡単にお話したい。気象学という学問が扱う大気は、実は地上から高さ100 kmの大気だ。私たちの生活に密着するお天気、温帯低気圧や台風といった地上だけではない（図2-5-2）。

私たちが呼吸している大気は、酸素と窒素の数密度の比率が1対4という混合気体だが、その比率が続いているのは実は高さ100 kmまでだ。酸素と窒素の分子量を使って平均分子量を計算すると約29になるが、高さ100 kmまでは大体29で一定している。つまり、高さ約100 kmよりも下の大気は非常によく混合している。この高さ100 kmまでが気象学で扱う大気の範囲になる。

気象学は大気の運動の過程と大気の放射過程、大気微量成分の素過程などを扱う。大気の運動の過程にはたとえば渦や波、大循環などがある。大気微量成分として、たとえば水、二酸化炭素やエアロゾルなどがある。これらを物理や数学、化学などの基礎科学の応用として気象学を見るとき、特に大気科学という言い方をする。

**大気の階層構造**

そして、大気には階層構造がある。多様なスケールの現象が混在して階層をなして大気のシステムをつくっている。図2-5-3は横軸が時間スケールで、ざっくりと数10分から100年の範囲だ。縦軸は空間の水平スケールで、一番小さいところで数ｍｍぐらいからだが、上限は決まっており、地球１周つまり約４万ｋｍになる。大気の現象を並べてみると、およそ時間スケールが長いものは水平スケールも大きいことがわかる。

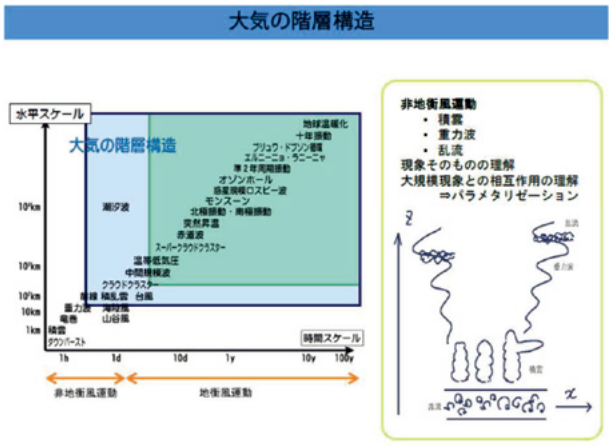



**図2-5-3　　大気の階層構造**

例外である潮汐波は、受け取る太陽放射の日変化で生じる波である。それ以外は図の左下から右上によくのっている。これらの現象は全て独立しているわけではなく、例えばスーパークラウドクラスターの中には積乱雲があり、それは積雲からなる。そういった入れ子の構造、階層構造をなしている。

実用に用いられるグローバルな気候モデルで解像できる範囲が緑枠、研究レベルの気候モデルで解像できる範囲が青枠で囲って示されている。実用の気候モデルでも、時間スケールで言えば３日程度以上の現象が大体解像できている。

しかし、左下の辺りにある小さなスケールの現象も全く無視できるものではない。運動量や熱を運ぶ点で非常に大事なプロセスだ。気候モデルで解像される現象に対しても、小さなスケールの現象の運ぶ熱や運動量に大きく影響されるので、理論や経験に基づきその作用のみ記述するスキーム（パラメタリゼーションとよぶ）で表現されている。代表的な現象としては積雲や重力波、乱流などがある。

理論的には図の右側にある相対的に大きな時間スケールを持つ地衡風運動と、左側にある小さな時間スケールを持つ非地衡風運動に分かれる。地衡風運動のほうの気象学は大体確立している。一方、非地衡風運動はようやくグローバルモデルで解像できるようになったし、観測もようやくできるようになったというレベルだ。まだまだ分かっていない。現象そのものの理解も大規模現象との相互作用の理解も進んでいない。その具体例を右側の絵で言えば、地表面の直上には乱流による混合層があり、ある時、そこから積雲が発達し、その過程で重力波が放射され、重力波が上空に伝播していくが、ある高さで砕波し乱流が生じるという過程がある。

地衡風って難しいなと思うかもしれないので少しだけ解説する。皆さまおなじみの天気図で、左側に低気圧の範囲を単純な丸で描き、右側に高気圧の範囲を単純に丸で描いたものを、まず考えるとよい。

気圧傾度力Ｐとは高気圧部分から低気圧部分に向かう力をいう。ここでは右の高気圧から左の低気圧の方向にかかる。コリオリ力Ｃｏは地球が自転しているために働く見かけの力だ。北半球でのコリオリ力Ｃｏは流れＶに対して直角右向きにかかる。従って、気圧傾度力が高気圧から低気圧のほうに向いていると、これとコリオリ力が釣り合うように流れができる。風が吹く向きだが、高気圧、低気圧があるときには高気圧を右側に見

るように風が吹く。したがって、低気圧の周りでは反時計回り、高気圧の周りでは時計回りに風が吹く。そういった力のバランスが成り立つ風を地衡風と呼ぶ。

つまり、図2-5-3の左側の非地衡風現象とは、そういうバランスが成り立っていない、扱いが難しい現象なのだと理解いただくとよい。

### 大気の波動

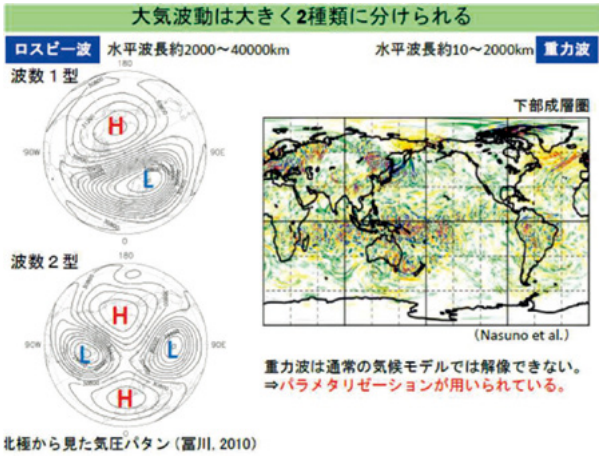



図2-5-4　　2種類の大気波動（富川、那須野提供）

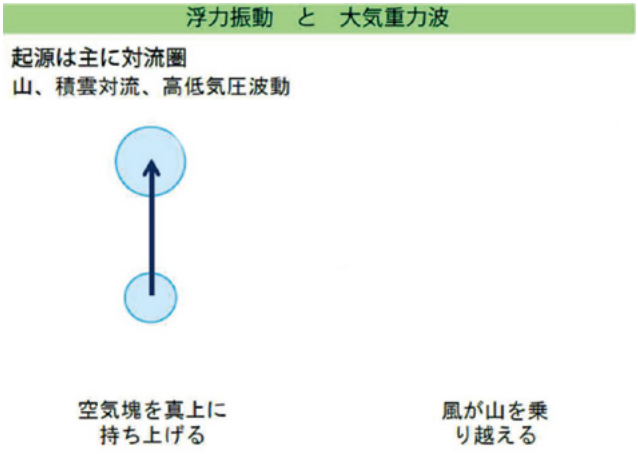



図2-5-5　　浮力振動と大気重力波

大気の現象は大気波動の現れと言っても過言ではない（図2-5-4）。大気の波動は大きく2種類に分けられる。地衡風現象はロスビー波と考えてよい。温帯低気圧や台風もロスビー波の仲間である。大きなロスビー波には地球規模のものまである。左側の図は北極を中心とした地図の上に気圧が描かれている。Lが低気圧、Hが高気圧を表し、大きな低気圧と高気圧がある波数1型、高気圧と低気圧が2つずつあって4つの目玉が並んでいるように見える波数2型の地球規模のロスビー波が現れている。

これに対して非地衡運動の代表は重力波だ。これは右側の地図に描かれているように非常に小さな波だ。対流から同心円状に放射される重力波や、地形から放射され、地形に沿った縞状構造を持つ重力波がある。

気象学の大気の重力波は物理の相対論で出てくる重力波と名前が一緒だが、全く違うものを指している。そのメカニズムは簡単なものだ。例えばある高さにある空気を真上に持ち上げると、上ほど気圧が低いので、少し膨らむものの、周りより重い状態になる（図2-5-5）。そうすると、この空気は重力により下がってくる。その際、上に持ち上がった分だけ位置エネルギーをもらっているので、元に戻ってもとどまれない。オーバーシュートしてさらに下がってしまう。そうすると周りよりも軽くなるので、また戻ってくるといった振動が起こる。これを浮力振動と呼ぶ。この振動が斜めに起こるものが大気の重力波である。

どういうときにこういう持ち上げが起こるか。山に風が流れてきて、風が山に当たると山は固体なので、空気が山に沿って上に持ち上がる。そうして発生する波が大気重力波である。富士山の笠雲も実は大気重力波だ。流れが富士山に沿って持ち上がり、それが波となって上に伝わっている。上ほど気温は低いので、持ち上がると水蒸気が凝結して雲ができ、富士山の笠雲となる。

ここまでで、ロスビー波と重力波という2つの波を理解していただいた。この後、別の波は出てこないので、安心していただきたい。

**極域の大気と雲について**

極域の大気温度について、図2-5-6でお話する。ここから、本質に進んでいく。

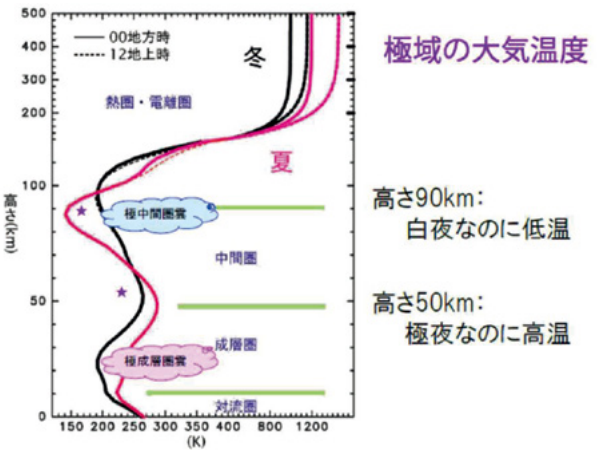



**図2-5-6　　極域の大気温度**

縦軸は高さで、地上の高さゼロkmから500 kmまで取っている。まず、地上から気温が上にいくほど下がっていく対流圏がある。対流圏界面の上には、上にいくほど気温が上がる成層圏がある。高さ50 km付近の成層圏界面で上がり止まり、その上には気温が高さとともに下がる中間圏がある。これも高さ90 km付近の中間圏界面で下げ止まる。その上は高さとともに気温が上がる熱圏と続いていく。気象学で扱う上端高度である100 kmは下部熱圏に位置する。

この地球の大気の温度の鉛直プロファイルは、火星や金星の大気と比べるととても複雑だ。火星や金星の大気は高さと共に1回下がって、上がって終わりという単純な鉛直構造だ。地球は成層圏界面に対応する高温層があるのが特徴的だ。これは地球にオゾン層があるためだ。オゾン層は、太陽からの有害な紫外線を吸収して地上の生物を守ってくれている。実はオゾン層は紫外線を吸収してその高さの大気を加熱している。この高温層があるのが地球大気の特色である。

ピンク色で示した線が夏の気温のプロファイル、黒色の線が冬のプロファイルだ。ところが、この極域の気温の鉛直プロファイルには不思議なところがある。それは、星マークの2か所だ。1つ目の星マークは高さ50 km付近にある。冬は太陽の光が極域には届かないので、オゾン層があっても吸収すべき紫外線がなく、加熱がないはずなのに、極大があることが不思議だ。もう1つの星マークは高さ90 km付近だ。極域の夏は1日中太陽が照っている白夜になる。しかし、白夜の夏よりも極夜の冬のほうが気温が高いということになる。

ここで、低温に着目する。冬の高さ20 km付近と夏の90 km付近にある。ここはそれぞれ極成層圏雲と極中間圏雲という2種類の雲が存在している。夏の90 km付近にできるのが極中間圏雲、冬の20 km付近にできるのが極成層圏雲だ。対流圏に見られる熱帯の雄大な積乱雲でも高さ17 kmぐらいまでしか届かないので、20 km以上にできる極成層圏雲や、90 km付近に出る極中間圏雲はきわめて高いところに生じることになる。それぞれとてもきれいな雲だ。

図2-5-7は昭和基地で撮影された極成層圏雲の写真である。オレンジやピンクに光る雲で美しい。その一方で、怖い側面もある。この雲の表面でフロンを起源とするオゾン破壊物質の塩素が大量に生成される。そして、春になると太陽の光が戻ってきて塩素が分解され、オゾン層破壊を加速する働きがある。オゾンホールはフロンを禁止したので、いずれなくなるだろうとは考えられているが、フロンの寿命は数100年と大変長い。南極ではいまだにオゾンホールは毎年形成されている。図2-5-7の右下は昨年9月20日の南極を中心としたオゾンのマップだが、真ん中の濃い青色部分がオゾンが徹底的に破壊されているオゾンホールだ。昭和基地

は南緯69度、東経40度にあり、すっぽりとオゾンホールで覆われている中にある。去年のオゾンホールは寿命が長く、南極が夏となる12月に入ってからもしばらく続き、12月の終わりにようやく消えた。

図2-5-7　極成層圏雲

図2-5-8　極中間圏雲（夜光雲）

図2-5-8は北極域で撮影された極中間圏雲だ。夏に高さ90 km付近にできる。夜中の12時ぐらいにきれいにブルーグレーに光る雲で、夜光雲という別名もある。湖に映っている様子が、とてもきれいだ。この雲は実は産業革命以前は存在しなかったと考えられている。というのは、もし存在していたら、こんなきれいな雲なので、詩や小説に残っていたのではないか、画家が絵を描いたのではないかと考えられるが、そのような記録がない。最初の記録は1883年、日本が明治の時代で、ちょうどインドネシアでクラカタウという火山の大噴火が起きて、その数年後に論文として報告されている。オゾンホールと同様に人間が地球上に作ってしまった雲ではないかと考えられている。

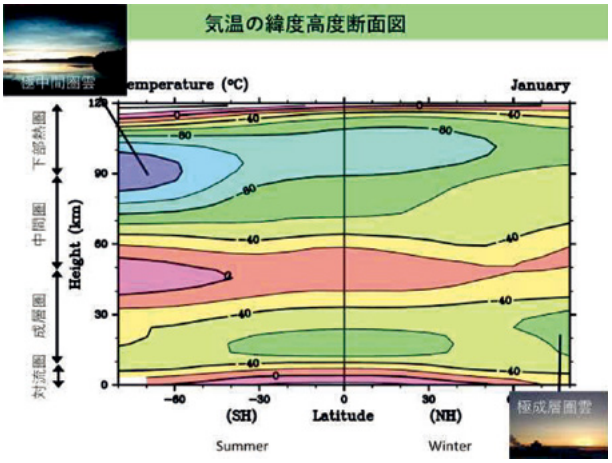



図2-5-9　気温の緯度高度断面図

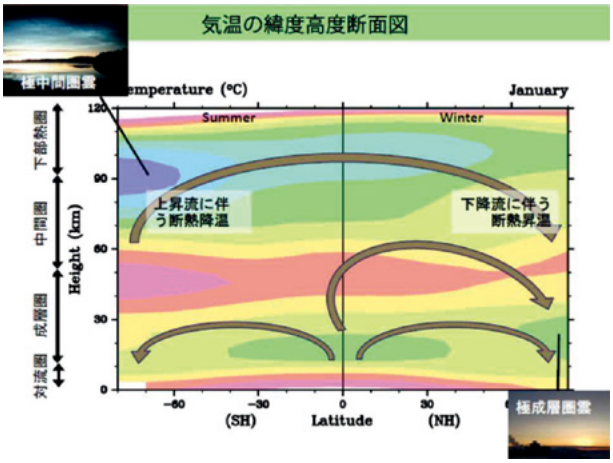



図2-5-10　気温の緯度高度断面図

先ほど図2-5-6で気温の鉛直プロファイルを示したが、緯度と高さの断面で1月の気温を描いたのが図2-5-9になる。色が気温の高さを示している。左の真ん中あたりにあるピンク色の線が摂氏0℃、その上の水色の線が摂氏マイナス80℃の等値線になる。

これは1月のデータなので、右側の北半球が冬半球、左側の南半球が夏半球となっている。極成層圏雲と

極中間圏雲は冬と夏にそれぞれ出現するさきほど言ったが、1月の地球全体で見れば、南極の高さ90 km付近に極中間圏雲、北極の20 km付近に極成層圏雲が同時に存在している。

高さ90 km付近の大気が低温であることと、冬極の50 km付近で温度が極大になっていることが不思議だと話したが、この気温の構造は、大気の大循環に関係している。

図2-5-10で、成層圏と中間圏、下部熱圏の大気の大循環を矢印で描いた。成層圏には熱帯付近から両極に向かう循環がある。冬には深い循環も存在している。中間圏はもっと単純で夏極から冬極に向かう循環がある。

大事なのは上下の流れである。気圧は下ほど高く、上ほど低いので、上昇流が生じると気圧が低いところから高いところに空気が運ばれるので断熱膨張により気温が下がる。逆に下降流があると、空気は気圧の低いところから高いところに運ばれ、断熱圧縮により気温が高くなる。太陽の放射の吸収だけを考えると不思議だった気温の構造だが、大気の大循環によって維持されていることが分かる。

この大循環に注目する理由は幾つかある。この循環で気温が変わるから雲の量が変わる。極成層圏雲の量が変わるので、オゾン破壊にも関係する。極中間圏雲も人間活動が反映された雲なので、その量の変動は気候変動を表している指標の一つだ。その理解のために重要でもあるのだが、そもそも中間圏は未知の領域である。



**中層大気について**

図2-5-11でお話しする中層大気とは、対流圏以外の気象学で扱う大気全てだ。対流圏のトップである対流圏界面の高さは緯度によって違いはあるが、平均すると大体12 km付近だ。その上から、100 kmまでの大気を中層大気と呼ぶ。

山登りが好きな方は高層天気図という言葉を聞いたことがあるかと思う。高さ5,500 mの天気図を高層天気図と呼んでいる。そうすると、実は高層大気の上に中層大気があるという、入れ違いの少しおかしなネーミングになってしまっている。中層大気の上には超高層大気がある。

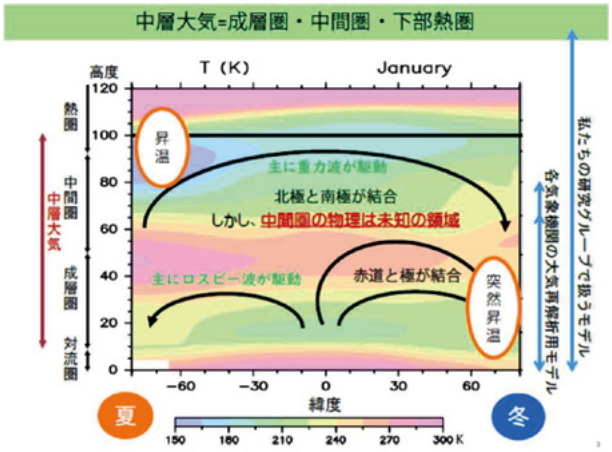



**図2-5-11　　中層大気における南北両半球結合**

衛星観測などによって、成層圏の変動は理解が進んでいるが、中間圏は本当に未知の領域だ。なぜかといえば、各気象機関の気候予測モデルのトップは中間圏全体をカバーしていない。一番高いモデルでもトップは80 km付近にある。また、観測が非常に難しい。なぜ各気象機関のモデルのトップをこの辺にしているかというと、中層大気を入れないと天気予報が当たらないこと、逆に中層大気を入れると非常に精度がよくなることが経験的に分かっているので、入れている。しかし中層大気の特に中間圏は全然分かってないに等しい。モデ

ルでトップを上げても、何を表現したらいいのかということすら分かっていない現状だと言っても過言ではない。私たちの研究グループは、モデルトップをもっと上の140 kmに取って、中層大気全体の研究を進めている。

先ほど大気には2つの波があるという話をした。1つはロスビー波という大きなスケールの波で、これは成層圏の循環を主に駆動している。中間圏の研究が難しいのは、中間圏の循環を駆動しているのがスケールの小さな重力波だからである。パラメタリゼーションではなく、重力波をまともに扱わなければならない。

**極域の成層圏突然昇温について**

最近さらに面白い現象が見つかった。冬の成層圏で急に気温が上がる、突然昇温という現象が起こる。突然昇温そのものは1950年代に発見された現象でメカニズムも1970年頃には大体分かっていた。しかし、最近、この冬の突然昇温が起こると反対半球の夏の中間圏の上部で温度が上がることがモデルや観測で分かってきたのである。しかし、そのメカニズムについてはまだはっきりしていない。これについては後ほど詳しく述べる。

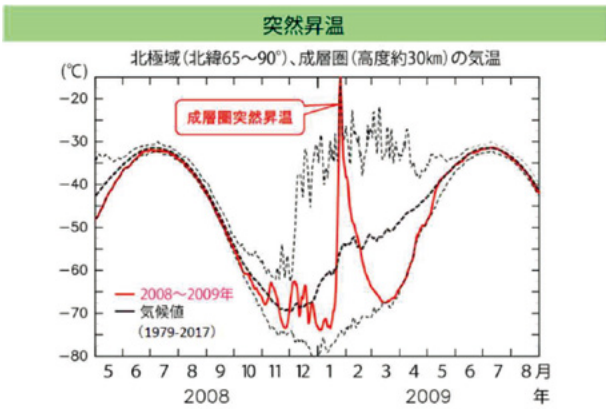



**図2-5-12　突然昇温**

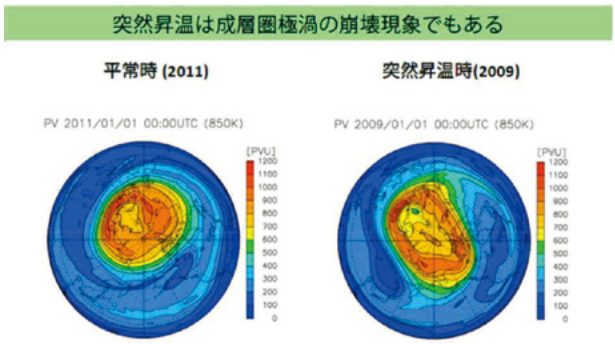



**図2-5-13　突然昇温と成層圏極渦（図はアニメーション）**

まず突然昇温について説明する。図2-5-12は北極域の成層圏の気温の時系列を表している。横軸が5月から翌年の8月までで、黒い線で太い破線で描かれたものが39年間の平均だ。成層圏でも夏に暖かく、冬に冷たいという季節変化がみられる。薄く描かれた黒い点線は毎年の変動の幅を示している。

赤色の線で示した2009年は普通の夏だったが、冬に、数日で50℃以上気温が上昇している。これが突然昇温現象である。つまり、北極域の成層圏の最高気温も最低気温も冬に生じるということになる。

この突然昇温は成層圏極渦の崩壊現象でもある（図2-5-13）。この2つの図は北極を中心とした、高さ約30 kmでの渦の様子である。右側のほうがアメリカ大陸、日本は左下のほうにある。真ん中に強い低気圧性の渦がある。左側は普通の年で、右側が突然昇温が起こった年だ。普通の年は、割と安定的に渦が北極中心にずっと存在しているが、2009年は渦が不安定となり、ついにはちぎれて引き延ばされ、散り散りになってしまった。このように極渦が大きくゆがむと成層圏の北極域は急激に気温が上がる。

この現象がなぜ注目されているか。それは対流圏に大きく影響する現象だからだ。図2-5-14は縦軸が高さ、横軸が突然昇温をゼロとしたときの時間で、一番右が60日後になる。左側の図は気温をしめす。気温が急激に上がる突然昇温はより高い高度から始まり、だらだらと下がっていく。高さ9 km辺りの線が極域の対流圏界面で、そこから少ししみ出して気温が上がっているのが見える。

対流圏への影響だが、実は右側の気圧を見るとわかる。高気圧性の偏差が地上まで達している。地上まで達した後に残る影響は60日後も残っている。しかし、なぜ成層圏の現象が地上気圧に及ぶのかについては、現状いろいろなメカニズムが提唱されているが、決定打には至ってない。

続いて、地上気象への影響はどうか（図2-5-15）。突然昇温が起こると、北極域の海面気圧が上がることが分かっている。すると、冬の気候を左右する北極振動が負に振れる。ジェット気流は通常は北極を中心におよそ同心円的に回っているが、北極振動が負になると花びら型に蛇行するジェット気流になる。ジェット気流の内側には北極の冷たい空気が存在している。日本付近ではジェットが北極域から下がってきて冷たい空気に覆われ、厳冬になることが多く、降水量にも影響する。シェードがかかっている領域は95%で統計的に有意という範囲だ。

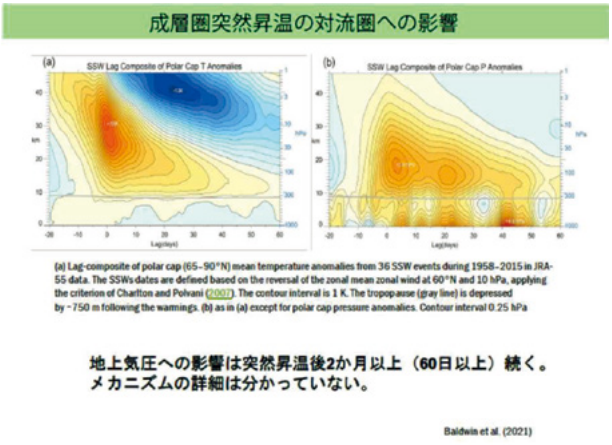



図2-5-14　成層圏突然昇温の対流圏影響

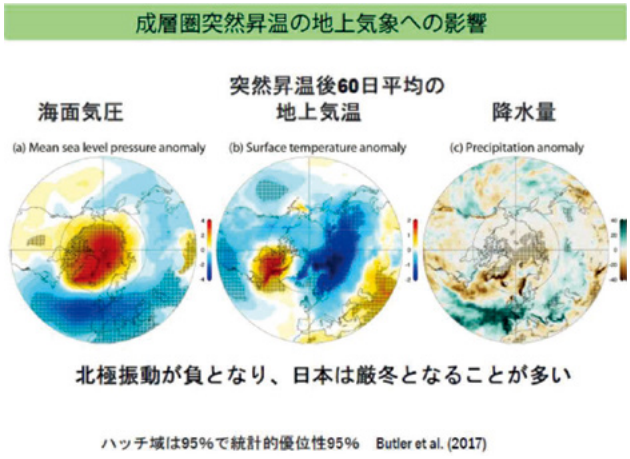



図2-5-15　成層圏突然昇温の地上気象影響

**角運動量の保存について**

成層圏の冬極向きの循環が強まると冬極域での下降流が強まり突然昇温現象が起きるのだが、この循環は実はそんなに簡単には維持できない。なぜなら、大気といえど物理の角運動量の保存則を満たさなければならないからだ。角運動量保存を簡単に復習のため説明する（図2-5-16）。

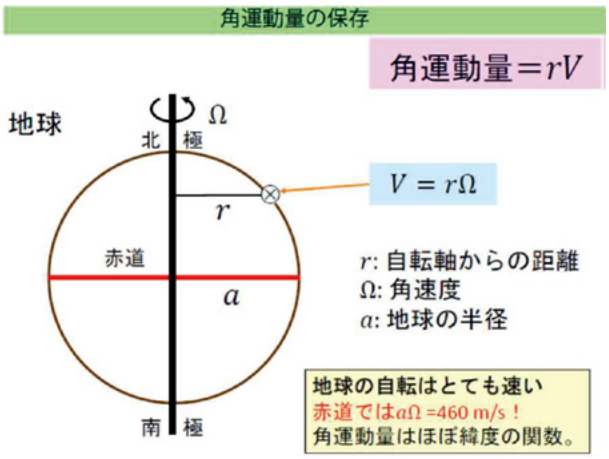



図2-5-16　角運動量の保存①

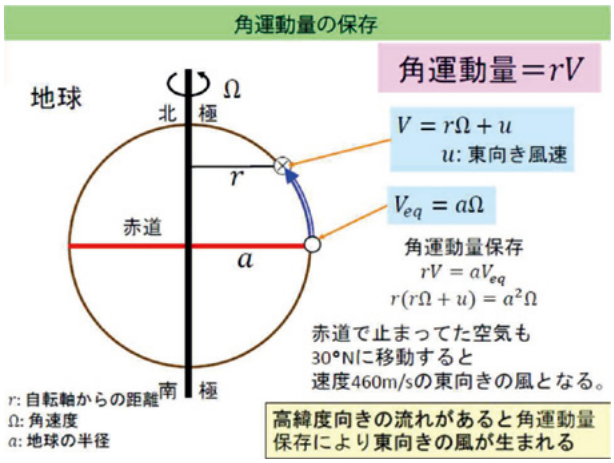



図2-5-17　角運動量の保存②

自転軸を中心にΩという角速度で地球は自転している。自転の角速度Ωは1日で地球が1回転する速さだ。自転軸からの距離をrとして、その位置でのスピードをVとすると角運動量はrVという式で表される。このVは地面に対して止まっていても（つまり風速ゼロでも）、自転があるためrΩであり、$r^2\Omega$が角運動量になる。

ちょうど中心から赤道の地面までが、地球の半径aになる。赤道ではaΩという速度になるが、これがどのぐらい速さかといえば、460 m/sという音速を超える速さだ。赤道上に立っているだけで、宇宙から見ると、実は460 m/sの速さで回転している。

私たちが住んでいる中緯度では、rが小さいので回転は遅くなるが、それでも380 m/sのスピードで動いている。角運動量は保存しないといけないので、赤道から極に向かって移動すれば、それだけで東向きの回転が生じることになる。スケート選手が腕を伸ばして回転を始めて、腕を自分のそばに引き込むと回転が速くなる例がよく経験として知られているが、それは角運動量保存が成り立っているからだ。

赤道にあった空気が高緯度に移動すると、角運動量を満たすように速く回転するようになる。速く回転するということは、赤道では止まっていた空気が高緯度に移動すると東向きの風が生じるということだ。

その強さはどれくらいだろうか（図2-5-17）。赤道で止まっていた空気を30° Nに移動するとする。$aV_{eq}$が赤道、rVが中緯度の角運動量で、VはrΩ+u、自転のスピード足す風速である。これが保存される、つまり$aV_{eq}$=rVという方程式を解くと、赤道で止まっていた空気も30° Nに移動すると460 m/sの東向きの風となることがわかる。60° Nまで移動すると690 m/sというすごい強い風になる。これが日本付近でジェット気流がある理由だ。しかし、実際はここまでは強くはなく、ジェット気流の速さはおよそ40 m/sである。つまり流れが高緯度に向かう時に西向きにブレーキがかかっているということになる。460 m/sから40 m/sまで落とすブレーキ作用、それが何によるものなのか今から議論していく。

**大気の大循環と突然昇温について**

図2-5-18は1月の大気の角運動量で、横軸が緯度、縦軸が高さに取ってある。ジェット気流が吹いていても、先ほど説明したように、自転のほうが著しく速いので、どの高さでも角運動量はほとんど緯度だけによっている。矢印で描いた低緯度から高緯度に向かう流れがある場合を考える。高緯度側には低緯度側の大きな角運動量を持った空気が移動してくるが、高緯度側では定常にほぼ自転に対応する角運動量が維持されているため、低緯度側の空気は角運動量を減速させる摩擦力（西向きの力）を受けることになる。

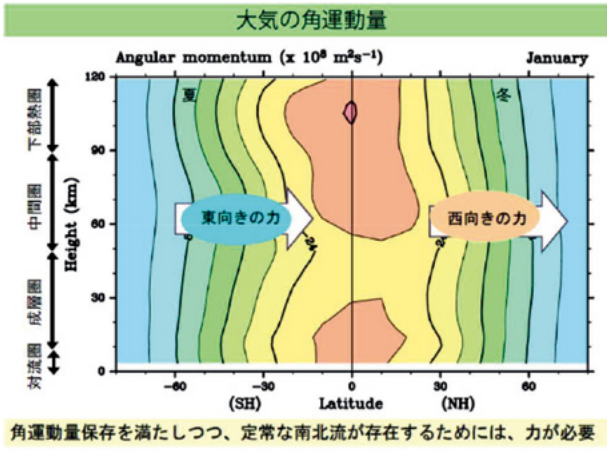



**図2-5-18　大気の角運動量**

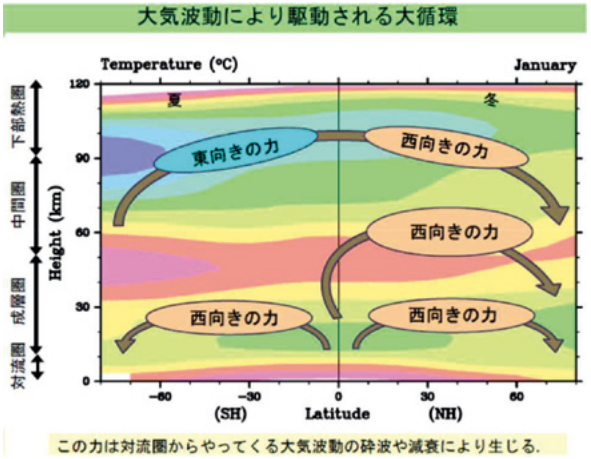



**図2-5-19　大気波動により駆動される大循環**

逆に、赤道向きの流れがある場合は、負の摩擦力、つまり東向きに加速させる力が必要になる。この図においては、右側の北半球では西向き、南半球では東向きの力が必要になる。東向きの力を水色、西向きの力をオレンジで表している。

以上のことから、中層大気の循環の維持には図2-5-19で示した力が働いている必要がある。空中には地面はないので、何かが摩擦力のような力をもたらしている。それは、実は先ほどお話しした大気の波がもたら

している。対流圏からやってきた大気の波は各高さで砕け、この摩擦力をもたらしている。

成層圏では対流圏からのロスビー波が砕けて西向きの力を与える（図2-5-20）。重力波は中間圏まで伝播していき、冬半球で西向き、夏半球では東向きの力を与えている。私たちのグループでは、世界に先駆けて、重力波も解像できる大気大循環モデルを開発し、これを用いたシミュレーションにより、重力波も含めた波によるこの東向き、西向きの力を求めた。結果を図2-5-21に示す。左側が全ての波による力で、大循環の向きから推定される図2-5-20に示した力の分布が再現できていることが分かる。各波に分けて、描いてみると成層圏では確かにロスビー波が利いていて、中間圏では重力波が効いていることが分かる。教科書的には中間圏は重力波、成層圏はロスビー波と理解するのだが、実は結構複雑だということが、この図を見ても分かる。

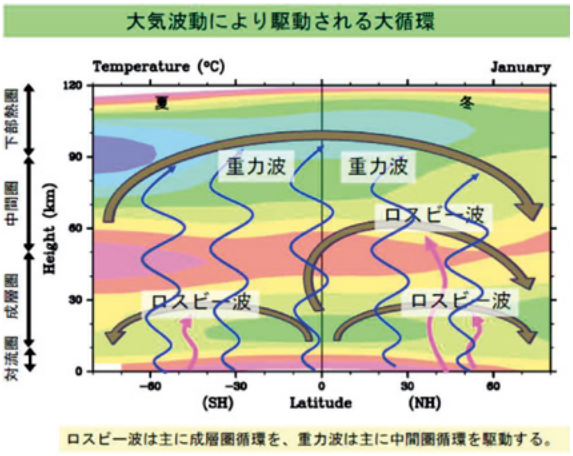



図2-5-20　大気波動により駆動される大循環

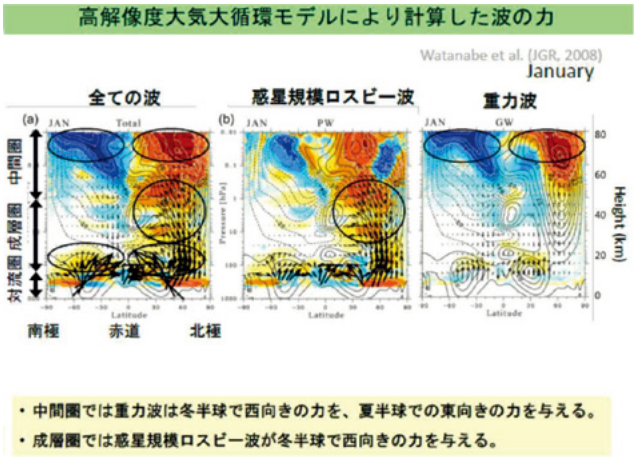



図2-5-21　モデル計算した波の力

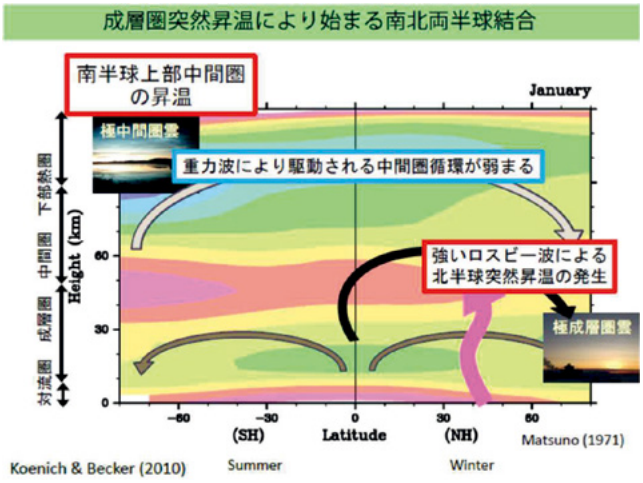



図2-5-22　成層圏突然昇温と南北両半球結合

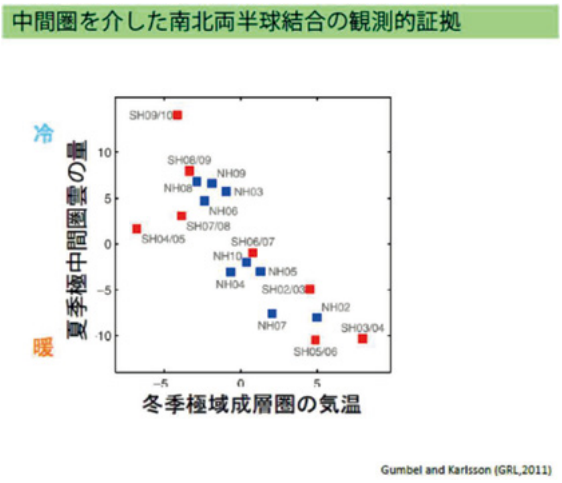



図2-5-23　南北の極現象の観測的な相関

突然昇温は、対流圏で発生した強いロスビー波が成層圏に上がってきて砕波することで、成層圏の循環を強化し、北極域の気温を急激に上昇させることで起こる（図2-5-22）。この時、夏半球の極域、中間圏上部の気温が上がる傾向があることがわかってきた。

つまり、北極の成層圏で暖まると南極の中間圏が暖まる。宇宙から見ると、まず成層圏の雲が消え、その後に中間圏の雲が消えるロマンチックな現象だ。観測的証拠もある。図2-5-23は冬の極域の成層圏の気温を横軸に、縦軸で夏の中間圏雲の量を示している。中間圏の雲の量が多いと気温が低い。図はきれいな逆相

関がみられるが、これは、2つの層の気温に正の相関があることを示す。

この南北両半球結合のメカニズムはまだよく分かっていない。しかし、2人の研究者が図2-5-24のような提案している。つまり、冬極域で突然昇温により極渦が弱まると、中間圏に到達できる重力波の量が減って、中間圏の循環が弱まる。すると、夏極域の上昇流が弱まり中間圏上部の断熱膨張作用が緩和され、温度が上がるというものだ。しかしながら、このメカニズムには問題がある。先ほどの角運動量保存の議論から、重力波が循環をつくるには、中間圏全てで循環を弱めるような力が働かなければならず、地球全体の重力波が一斉に変わらなければならないということだ。そんなことが本当に起こるのだろうか。今のところ中間圏全体で重力波が弱まるという観測的証拠はない。

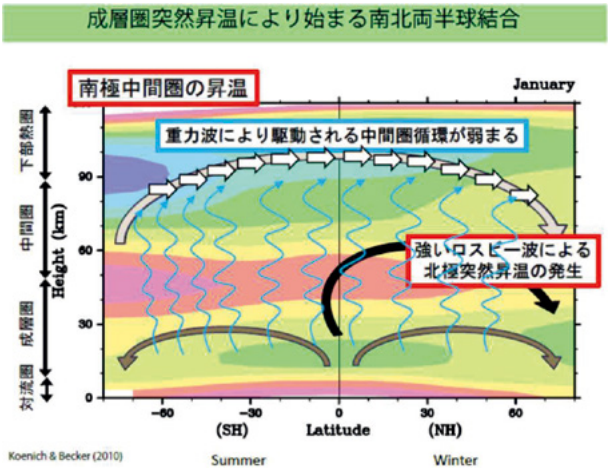



**図2-5-24　　メカニズムの仮説**

### PANSYレーダー

突然昇温時の中間圏重力波の変動を調べるため、私たちは南極で大型大気レーダーであるPANSYレーダーを中心とした国際共同研究を進めている（図2-5-25）。 PANSYレーダーは南極昭和基地に設置されており、私はそのプロジェクトの代表を務めている。 PANSYレーダーのアンテナは、高さがおよそ3 mのクロスの3素子の八木アンテナであり、これが1045本、4.5mの三角格子を作るように配置されている。アンテナエリアの広さは甲子園球場ぐらいだ。このプロジェクトは関西人が多いため、広さをそう表現することにしている。このレーダーは対流圏だけでなく成層圏、中間圏の中層大気の風を高精度、高分解能で連続観測できる。そのため、通常の観測では、スケールが小さく、振幅も弱くて捉えにくい重力波を精度よく測定できる。

PANSYは図2-5-26の左下の南極にあるが、この巨大なレーダー1個だけでは地球全体の重力波の変動を捉えられない。そこで、世界の研究者仲間に呼びかけて、ネットワークを組み、毎年観測を実施している。高性能の大型大気レーダーは価格も高く、持っている国は少ない。赤い星印で示しているのが大型大気レーダーで、わずかだ。大型大気レーダーほど、精度や分解能はよくないが、中間圏の重力波を検出できる他のレーダーもあるので、その協力も得ている。

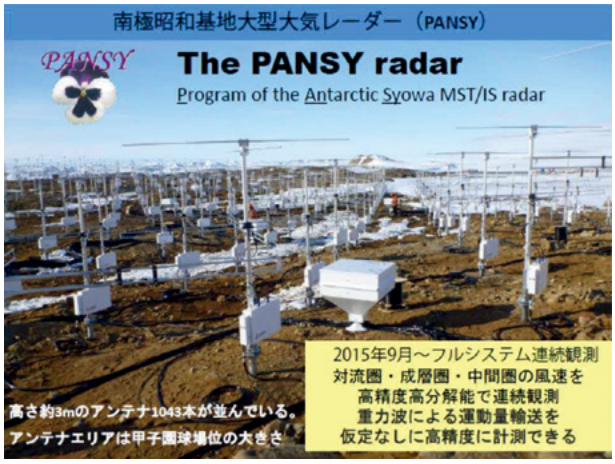



図2-5-25　PANSY

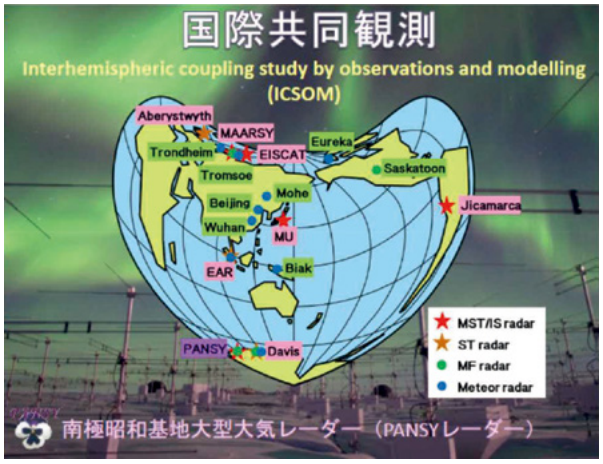



図2-5-26　国際共同観測ICSOM



図2-5-27が大型大気レーダーの観測原理だ。大型大気レーダーのターゲットは乱流である。乱流は風に乗って動いている。このレーダーで強力で細い電波ビームを打ち、乱流から散乱して戻ってくる微弱な散乱電波のドップラーシフトを調べることで風の動きを推定する。気象レーダーは雨滴がターゲットなので、雨滴が空中に存在している場所しか観測できない。しかし、この大型大気レーダーはいつでも存在する乱流がターゲットなので、天気によらずいつでも観測できる。しかも鉛直にビームを打てば、風の鉛直成分が観測可能という特徴がある。重力波は風の鉛直成分が大きく、これによって運動量を上空に運ぶ波なので、このレーダーの特徴は非常に重要だ。鉛直成分は積乱雲のような大きな災害をもたらす雲システムでも重要なパラメータである。大型大気レーダーはそういった気象の研究にも役立つ。

アンテナをたくさん並べているのはどうしてか（図2-5-28）。端的に言えばビームを自在に振ることができるためだ。各アンテナから出てくる電波の波面を水平にそろえると真上に向かうビームを作ることができ、電波の波面を傾けるとビームは斜めに出ていく。つまり、アンテナそのものの高さはどうでもよくなり、南極の自然を壊すような整地をしなくても設置できることになる。

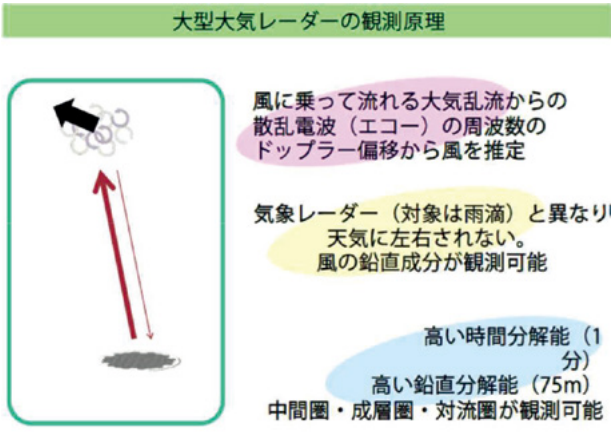



図2-5-27　大型大気レーダーの観測原理

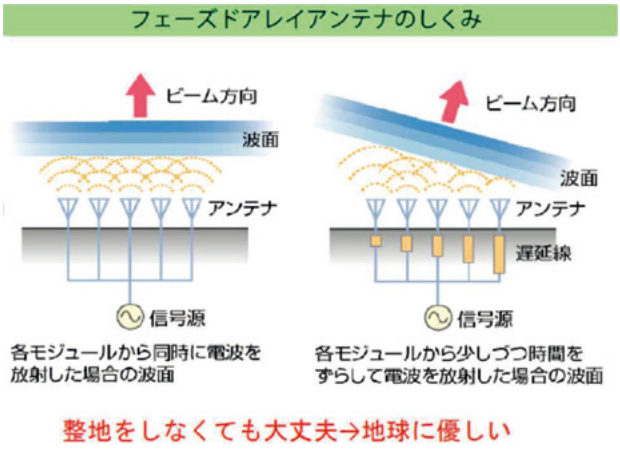



図2-5-28　フェーズドアレイアンテナ

### PANSYレーダーを用いた研究成果

図2-5-29がPANSYレーダーの観測例だ。中間圏は、昼間に太陽光がきて電離しているときしか観測できないため、中緯度や熱帯のレーダーでは昼間の十数時間しか観測できない。しかし、極域は白夜なので、24時間観測できる特色があり、昭和基地では50日以上の連続観測ができる。

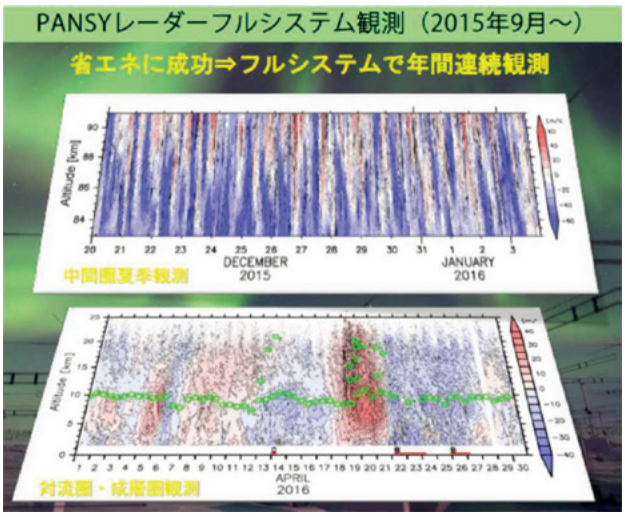



**図2-5-29　PANSYレーダーフルシステム観測**

### CRESTでの研究

現在、CRESTで行っている大規模な研究の狙いを紹介する（図2-5-30）。この大型大気レーダーのネットワーク観測で得られたデータに現れた重力波の解釈をする研究を進めている。レーダーネットワークの観測地点は、図2-5-29に示すようにまばらである。重力波の水平スケールは小さいため、各レーダーで捉えられた重力波の繋がりを観測だけで調べることはできない。しかし、全球的な重力波の変動を調べるためには高さ100 kmまでの全ての大気の精密なグリッドデータが必要である。南北両半球結合のメカニズムを解明するには、それを作成し、重力波も含めて解析する必要がある。

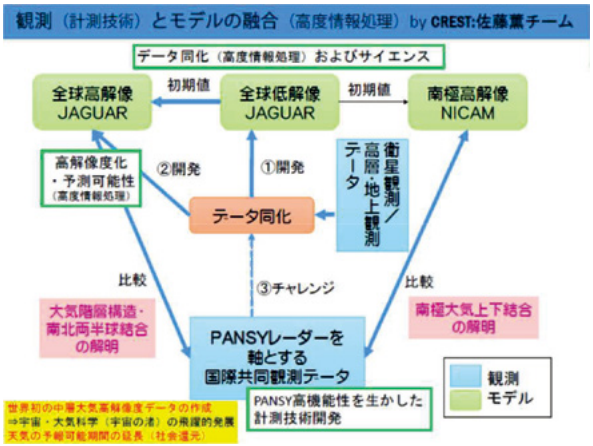



**図2-5-30　観測とモデルの融合**

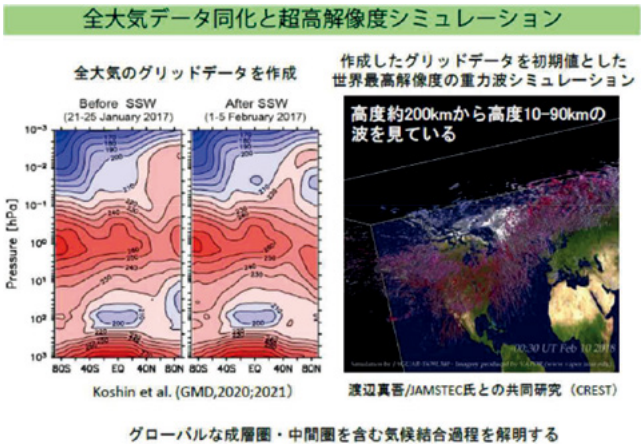



**図2-5-31　データ同化とシミュレーション**

しかし、そこに至るには長い道のりがある。まず、非常にスパースではあるが、現在では中間圏の気温の衛

星観測がなされている。スパースなのと、気温だけの観測なので、解析には限界がある。そのため、この衛星観測データを、トップを140 kmとする比較的低解像度の大気大循環モデルにデータ同化し、低解像度の全球グリッドデータをつくる。それを初期値にして重力波も解像できる大気大循環モデルを使って再現実験を行う。こうして、現実大気の重力波の場を再現する。再現の確からしさはレーダーネットワークデータで検証する。そしてようやく、南北両半球結合の解明に向けた研究がスタートできる。一歩一歩が世界最先端の仕事だったが、粘り強く研究と開発を進め、5年かけて、ようやく目標の重力波を含む現実大気の再現までたどり着くことができた。

図2-5-31は成果の一つだ。左の図は、高さが気圧での記載だが、$10^{0}$ hPaのところが高さ約50 km、$10^{-3}$ hPaが約100 kmに相当する。突然昇温が起こる前と後での気温の場がしっかりとつくられている。重力波も解像できるモデルに、それを初期値として与えてシミュレーションすると、重力波の場が表現される。右図が実際に国際共同観測を行ったときの重力波のシミュレーションの様子である。極渦の周りに重力波は存在しているが、突然昇温が起こると消えていく。それが全球規模で起こっているか、といえば、そうではないことが分かってきた。

私たちの研究からわかった南北両半球結合のシナリオを図2-5-32で説明する。まず右側の冬半球で強いロスビー波が成層圏にやってきて砕波し、循環が強まり、突然昇温が起こる、というところまではよい。中間圏に到達する重力波も弱まるのだが、それは、全球ではなく、突然昇温が起こっている冬半球中高緯度だけに限られる。

実は、この成層圏上部の循環を示す矢印付きの黒い線が成層圏で反対半球にしみ出しているところがたいへん重要だ。これによって図の左に位置する夏半球低緯度の成層圏が変わる。すると、成層圏上部で強いロスビー波が発生するのである。このロスビー波は夏半球中高緯度で平均風の構造を変える働きがある。すると重力波の伝播が阻害されるようになり中間圏の循環が弱められる。成層圏上部で発生したロスビー波自身も中間圏の循環を弱める働きがある。これがCRESTの研究で得た結論である。中間圏の循環全体が弱まるのではない。図にはこのシナリオで弱まる部分を示している。このような複数の波の共働作用による中間圏循環の弱まりで、南半球上部中間圏の昇温も確かに説明できる。

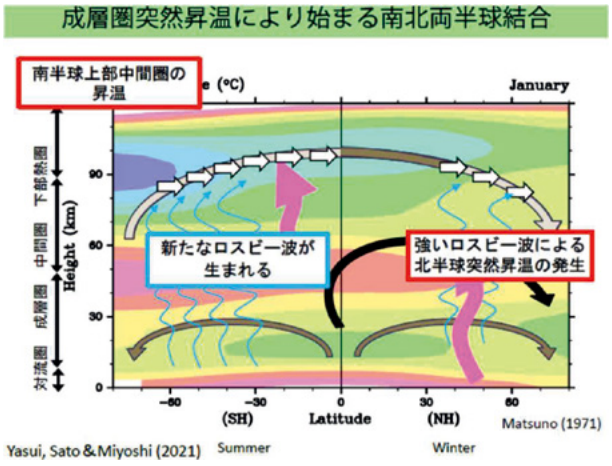



**図2-5-32　　突然昇温で始まる南北両半球結合**

### 気象学における観測データの重要性

ここから、一般的な話に移る。

気象学ではとにかくたくさんの量のたくさんの種類のデータを扱う（図2-5-33）。観測には本日ご紹介したような地上からのレーダー観測や、人工衛星による宇宙からの観測があるし、気象庁が定常的に実施して

いる気球やプロファイラ、各種地上測器による観測も行われている。これらのデータ量は膨大だ。

それから、地球システムモデルや気候システムモデルの長期ランのデータも膨大だ。特に、ご紹介したような重力波まで解像するような大気大循環モデルの出力はさらに量が多い。たとえば、空間分解能を10倍にすると、空間は3次元なので1,000倍になる。冒頭で話したように、空間スケールの小さな現象は時間スケールも小さいので、時間も10倍細かくサンプルすることになり10,000倍である。このように気象学のデータは量が多く、種類も多いため、単独の研究者や組織が維持できる範囲を大きく超えている。

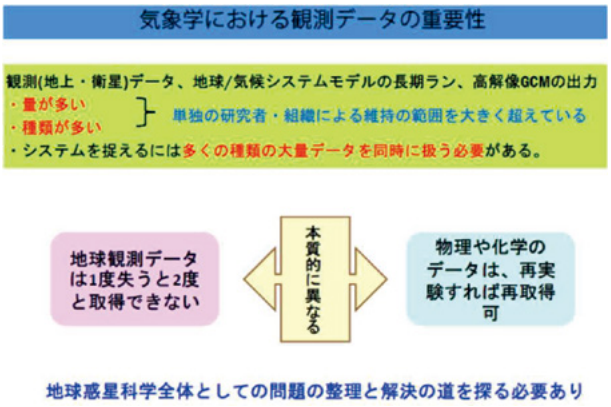



**図2-5-33　　気象学での観測データの重要性**

地球システム、気候システムを捉えるにはこの大量のデータを全部かつ同時に使うことになる。ビッグデータで苦しんでいる分野の一つだ。

観測データがなぜ重要かというと、地震もそうだが、地球の観測データは一度失うと二度と取得できないからだ。このことが物理や化学の研究者の方々とお話しするときに、なかなか理解してもらえないポイントだ。データを失ってしまっても再実験すれば再取得可能な研究分野と違って、地球は時々刻々と変わる。取得した全部の観測データが大事で、物理や化学の分野とは本質的に異なっている。

ビッグデータが増える一方なのだが、失ってはいけないデータなので、地球惑星科学全体としてどうアーカイブし、保存し、未来につなげていくか、解決の道を探る必要があると考えている。

### 小スケール現象の理解

非地衡現象は小さなスケールの現象とほぼ等しいが、実は理論的な理解がまだまだできてない（図2-5-34）。現在利用可能な非常に高い解像度のモデルでも鉛直風変動は再現できていない。

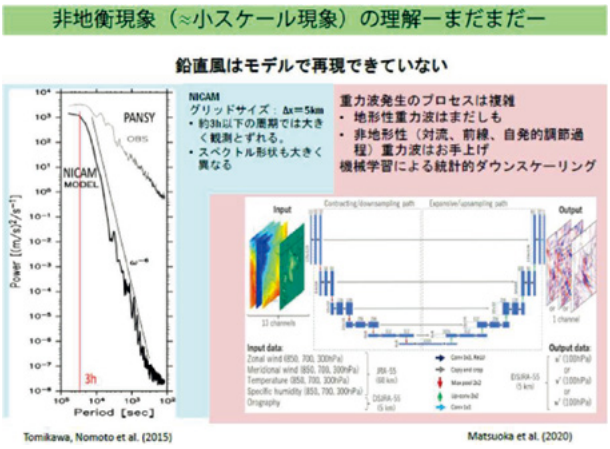



**図2-5-34　　非地衡現象の理解**

PANSYレーダーで観測したスペクトルと高解像度のモデルであるNICAMで再現した鉛直風のスペクトルを左のグラフに示している。3時間よりも短い周期ではモデルとPANSY観測でのスペクトルが桁で合っていない。これがどうしてなのかまだよく分かっていない。鉛直風変動のスケールが小さくモデルの解像度が十分ではないことが考えられるが、まだ見通しは得られていない。

重力波は本日お話したように非常に小さく、発生メカニズムもいろいろとある。山から出てくるものだけでなく、対流や前線、ジェット気流から自発的に出てくる過程などもある。それらの現象が同時に存在していて、非線形に絡み合うので、その記述は大変難しい。パラメータとして入れようにも発生メカニズムがよく分からないので、お手上げの状態に近い。

そこで、AIを使って重力波を記述してはどうかという発想の研究が徐々に進められている。私たちも世界に先駆け研究を始めており、大きなスケールの場を与えて、重力波を機械学習で統計的にダウンスケーリングして再現しようとしている。2020年に出版した論文はおそらく世界で初めての重力波の統計的ダウンスケーリングの成功例であり、アメリカ地球物理学連合のスポットライト論文として紹介され、注目されている。



**機械学習の捉え方**

機械学習は非常に便利だが、データサイエンスの視点から捉えるとどうなるだろうか（図2-5-35）。

データサイエンスの古典としては、ケプラーの法則がある。ティコ・ブラーエの膨大な天体観測データからケプラーが惑星の運動に関する法則を見つけ、それがニュートンによって一般的な古典力学に昇華された流れがある。機械学習はこの中のどこに位置づけられるかというと、ティコ・ブラーエの観測データとケプラーの法則のちょうど間にある。機械学習は重力波の再現や天気予報などの実用として役に立つが、ケプラーの法則にも至っていないし、ましてや不変物理にも至っていない。

今後の気象学の行き先としては、階層構造をなす複雑システムとしての大気現象について、ケプラーの法則やニュートンの力学にあたるものをビッグデータから導き出していく基礎研究が必要ではないかと思われる。機械学習はあくまで地道な基礎研究のサポートである。機械学習の助けを借りながら観測データをしっかりと理解し、よく見て解析し、理論をつくる。それをモデルで再現し、検証するというのが筋道ではないかと思われる。そういう意味では、モデルも研究道具の一つである。

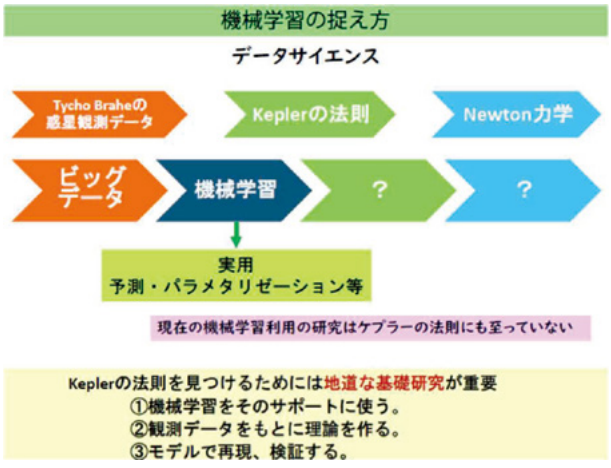



**図2-5-35　機械学習の捉え方**

**まとめ**

今日理解していただきたいこととして、中層大気の重要性がある（図2-5-36）。中層大気は水平にも、鉛直にも広い。現象が階層構造をなして絡み合って変動している。

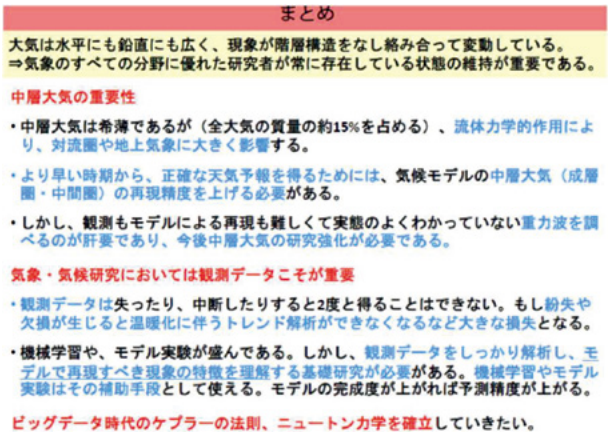



**図2-5-36　　まとめ**

大切なことは、中層大気も含め、気象の全ての分野にそれぞれ優れた研究者が常に存在している状態を維持することである。今後どのような気候変動や気象現象が起こったとしても、それが解決できるような研究体制というのはそういう状態ではないかと考えられる。

中層大気の具体的な重要性は幾つかあげられる。中層大気は非常に希薄だ。全大気の質量のほんの15%を占めるにすぎない。しかし、流体力学的な作用によって突然昇温の影響が、我々の生活している対流圏や地上気象に大きく影響することを紹介した。

このような上から降りてくる現象に対し、より早い時期から正確な天気予報をして備えるには、気候モデルの中層大気、すなわち成層圏・中間圏・下部熱圏の再現精度を上げる必要がある。特に、中間圏の変動には重力波がとても重要な現象だが、観測でもモデルによる再現でも非常に難しく、まだまだよく分かってない部分が多い。今後、中層大気の研究強化が必要であると考えている。

そして、観測データの重要性はもう一度強調しておきたい。観測データは失ったり中断したりすると、二度と得ることはできない。もし紛失や欠損が生じると、温暖化に伴うトレンド解析などが正確にできなくなるなど、大きな損失になる。トレンドは徐々に直線で気温が上がっていくというものではなくて、変動しながら上がっていくので、変動の凹のところや凸のところを取り損なうと正しいトレンド解析ができなくなる。

今は機械学習やモデル実験が盛んで、それは非常に重要だが、観測データをしっかり解析することがやや手薄になりつつあるのが懸念されている。モデルで再現するべき現象の特徴を理解する基礎研究がとても大事だ。機械学習やモデル実験はその補助手段として使うことができる。基礎研究がしっかりできればモデルの完成度があがる。基礎研究によりメカニズムが明らかとなり、再現を目指すところがはっきりすれば、予測精度も上がって社会に貢献できる。

基礎研究をしている気象研究者として考えるのは、ビッグデータ時代のケプラーの法則、ニュートン力学を確立していきたいということだ。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：AGUやEGU、JpGUでのGHGの報告を聞くと、英語でwell-mixed GHG、地球の大気がよく混ざ

り合ったという仮定での報告をみかける。確かに、よく二酸化炭素を排出している東京都と、ハワイのマウナロア山頂や南極での瞬間的な濃度は違い、ある時間がかかって混ざっていくので、GHGでおおよそ計算するときにはそういう仮定が理解できる。

本日の講演でお話いただいた現象で、北極から南極に動く伝達速度というか、時間スケールのようなものが実際のところ一体どのくらいとみられているのか。メカニズムがまだ分からない部分があり、このぐらいだと見積もられているような状況かと想像している。

A：大気運動による混合の速さは例えば重力分離と比べると圧倒的に大きい。重力分離は重い物質が下のほうにたまり、軽い物質が上のほうにたまるといった状態になる時間スケールであり、大気運動による混合の時間スケールと比べると10の3乗から6乗というように桁で長い。

混合の時間スケールは、対流圏では1か月程度である。中間圏の循環は、数十日程度で夏極から冬極に到着する。成層圏は重力分離に比べると時間スケールは大変短いが、対流圏、中間圏と比べると長く、赤道から極域まで流れるのに約5年かかる。人間の感覚でいうと5年はかなり長く感じられるが、重力分離に比べれば5年は十分に速い混合だと考えられる。



Q：PANSYのレーダーで用いられている八木アンテナについてお伺いしたい。人によっては八木宇田アンテナと呼ぶ技術そのものはかなり昔からあって、日本の一般人の感覚だと、テレビ放送がデジタル化されて、民家の屋根でも見かけなくなった。一方で、今回の中間圏ぐらいの現象を捉えるのにはいい理由が何かあるのだろうと思った。ご専門と違う電波分野の質問で恐縮だが、1,000本強敷き詰めても波面をそろえやすいことや、技術が確立されている信頼性などの理由があるか。

A：大型大気レーダーは乱流がターゲットだが、乱流のスケールは対流圏、成層圏、中間圏でそれぞれのこのぐらいと大体分かっている。そのどの圏の高さでも乱流からのブラッグ散乱が起こる波長の電波を出さないと観測はできない。それはちょうど50 MHz帯になる。波長でいうと6 m、ブラッグ散乱なので半分の3 mのスケールの乱流渦があれば散乱される。50 MHzのビームをつくるためにはアンテナの高さとしては3 mぐらいが必要で、結構高くなる。アンテナとアンテナの間隔は4.5 mで三角形に配置し、1,045本円形に並べるのが一番きれいな形ということになる。大岩があるなどで設置できないところが2か所あり、PANSYレーダーは1043本のアレーになっている。

Q：それを実現するのに今確立されている技術でベストということで配置されている。

A：アンテナの専門家から見るとすごく単純な3素子のアンテナなので、プリミティブと思われるかもしれない。しかし、南極でのメンテナンスなど総合的に考えると、なるべく単純なほうがいいという点がある。

Q：重力波はよく知らなかったので、勉強させていただいた。重力波の振動や運動がどのように地球温暖化のような時間スケールも含めて、影響してくるか伺いたい。例えば、先ほどの質疑応答であった大気の重力波の時間スケールと地球温暖化とでのもう少し長い時間スケールがどのように関係してくるか。

A：重力波は山や対流から放射され上空に伝わって、そこである方向の力を与えることで循環を駆動する役割がある。それが、西向きに力を及ぼすと東向きのジェット気流が弱まることになる。ジェット気流は、温帯低気圧の伝播の経路や、台風の動いていく経路を決めるので、重力波の作用は重要である。

重力波にはそういう役割があるので、天気予報にとっては大事だ。地球温暖化に関しては、興味深い気候モデルの実験結果がある。それは、地球温暖化したときに成層圏の循環は速くなることがどの気候予測モデルでも共通して再現されているのだが、その理由がわかっていない。循環が強くなる理由は、波による駆動力が高まるためなのだが、ロスビー波と重力波に分けて調べてみると、その割合はモデルによってばらばらだ。ほとんどロスビー波で説明されるというモデルとほとんど重力波で説明されるというモデルもあり、どれが正解なのかわからないし、ロスビー波と重力波の作用を合計すると循環の強まりがおよそ一定になる理由はよくわかっていない。

大体一定になるなら、中身はどうでもよいのではないかというとそうではない。ロスビー波か重力波かということは、循環の3次元構造などに大きく影響するからだ。つまり、駆動力の実態がわからないと予測とは言えず、重力波の役割をしっかりと記述するパラメタリゼーションをつくらないといけない。地球温暖化で成層圏の循環が加速して、それが対流圏に降りてくるのだが、どの地域で降りるのかなど、きめ細かい予測ができないからだ。温暖化予測モデルでも重力波をしっかりと記述できるようなスキームが必要だ。

Q：温暖化によって、重力波の振動の周波数は変わるのか、それとも重力波の大きさ、地域的な規模が変わるか。

A：重力波の周波数や大きさはあまり変わらないと思うが、振幅や、伝わっていく経路が変わる。二酸化炭素が増えて対流圏が温暖化すると、中層大気では逆に、二酸化炭素による冷却効果が強くなり気温が下がることになる。

Q：それは放射冷却か。

A：その通りである。対流圏が暖まるのは温室効果で、成層圏が冷えるのは放射冷却である。

それで、対流圏界面は熱帯のほうが高く、中緯度で低いので、その中間の高さでは、二酸化炭素が増加すると低緯度で暖かく、高緯度で冷たくなる。するとジェット気流が強まる。ジェット気流が強まると重力波の経路も変わり、ジェット気流の構造を変えるフィードバックが働く。すると、先に述べたようにジェット気流の構造が変わると低気圧の経路などの気象システムも変わることになる。

Q：角運動量輸送の話を聞いて、金星のスーパーローテーションの話を連想した。昔、「あかつき」が行って重力波を捉えて、その秘密を探る研究があった。今回の研究では重力波、ロスビー波の乱流散逸の摩擦によって地球ではブレーキがかかっている。加速するところもあるが、ブレーキがかかるところもある。一方で、金星ではそういうことが起きずにスーパーローテーションになっているというような議論に発展する可能性はあるか。

A：金星は自転が非常にゆっくりで、公転とあまり周期が変わらない。それは地球から見るとという意味でだが、珍しい惑星なので、コリオリ力が働くとしても、自分自身がつくり出すコリオリ力のほうが重要だ。言ってみれば地球の熱帯が金星全体を覆っているような惑星だ。熱帯というのは、地球の自転（コリオリ力）が利かないという意味で申し上げている。

実は地球でもスーパーローテーションは起こっている。熱帯の成層圏では東向きに強いスピードの流れができるときがあり、十数カ月たつと逆向きに風が吹く準2年周期振動がある。その東向きの風のフェーズは実はスーパーローテーションだ。

それがどうやって起こっているかというと、赤道域には重力波とその仲間であるケルビン波が関係している。これらの波が対流圏で生まれて上に伝わっていき、そこでブレークして東向きの加速を起こしてスーパーローテーションが起こる。金星も同じようなメカニズムでスーパーローテーションが起きている可能性がある。「あかつき」で今まさに研究が進められている。

Q：惑星データもかなりビッグデータになってきていると思う。惑星気象学、惑星気候学という観点で言えば、先生のPANSYのようなレーダーで、地上からの観測研究と、ほかの惑星探査機のデータや空からのデータなどがつながって、ビッグデータとして何か法則を生み出していく可能性はあるか。ディコ・ブラーエからケプラーの法則という例を聞いて、連想した。

A：その可能性はあると思う。先ほどの金星の「あかつき」での取得データもそうだ。火星もかなりデータが充実してきて、火星のグリッドデータを長期にわたってつくるプロジェクトも幾つか立ち上がっている。地球のデータのように10年ぐらいにわたり日々の火星の全球データをつくる取り組みがある。

これがよく進めば、特に火星は地球と自転も非常に似ているので、地球の気象学の理論ツールをそ

のまま適用できる。すると、火星と地球とで循環のつくられ方がどう違うのか、火星での非常に重要なプロセスであるダストストームの役割はどのようか、地球で似たようなものはあるかといった非常に面白い研究が展開できるだろうと思う。

Q：ここ数年、東から西にフックして日本に近づく台風や、ジェット気流から切り離した寒冷渦に絡んで、東北地方に上陸する台風があった。80年くらいの観測記録を調べても、東北地方から上陸した台風は、昭和14年ぐらいに一回あった様子だが、ほぼなかった。

ご質問したい内容は個々の台風ではなく、そういった頻度に関してだ。例えば、成層圏や中間圏についてのいろいろなデータを見たときに、たとえば成層圏突然昇温も起こる頻度を論じられるような観測データがあるか。今IPCCで世界的な温度上昇のグラフなどが出されているが、成層圏突然昇温のような現象も今年は起こっていたが、長い時間の50年や100年スケールで見たときの、地球の変化に関して、どういう状況か。



A：突然昇温に関しては、1990年代にはほとんど起こっていなかった。一方、1980年代はたくさん起こっていて、研究が盛んだった。しかし、1990年代に入ると、ぱったりとなくなってしまい、これは地球温暖化のせいではないのではないかという話もあったぐらいだった。ところが、2000年代に入ると、また頻繁に起こっている。

突然昇温には起こりやすい条件がある。熱帯のエルニーニョや、赤道の準2年周期振動と関係する。今年はそういった要素を考えても突然昇温は起こりにくい年だったのに、起こった。温暖化が進むとベースとなる気候の状態が変わる可能性がある。昔の基準で突然昇温が起こりやすくなるとみていたことが変わってくることもあるかと思われる。

南極も少し心配な状況だ。南極では、大昇温と分類される大規模な突然昇温は2002年しか起こっていなかったのだが、2019年にはこれに匹敵する大規模な突然昇温が起こった。南極でも気候が少しおかしくなっているシグナルかもしれない。

また、北極でのオゾンホールが最近見られることも心配なことだ。2006年のオゾン層のアセスメントレポートでは、北極ではオゾンホールは今後起こらないと考えられると述べられていた。しかし、北極でオゾンホールが見られる年もあり、今までの常識が当てはまらないような状態にシフトしつつあるのもしれないと考えられる。

1990年代に突然昇温が起こらなかった理由についてはまだよく解明されていない。自然変動の中の一部なのか、何か理由があったのかはまだ分かっていない。

Q：突然昇温は1960年代から1970年代は、結構起きていたのでしょうか。

A：あったと思われる。突然昇温が発見されたのが1950年代の終わりだった。

Q：ご質問した背景は、IPCCのレポートの温度の上がり方で、1960年代、1970年代で一旦踊り場になって、それから、また大きく上がっているので、極域成層圏の現象にも何か関係があるのかどうかと想像して伺った。知見のご教示に感謝する。

Q：周期性に関連してお伺いしたい。まだよく分からないと思うのだが、例えば太陽の11年周期のような、より上層の、電離大気からの影響で突然昇温などにつながる要因の状況はどうか。大気密度が大きいほうがよく利くので、大気下層からの波からの影響だけ考えるのでよさそうか。

A：電離圏よりも上をまとめて宇宙という言い方をすると、宇宙からの影響は無視できないものはある。例えば高エネルギー粒子が降り込んでくるとNOxというオゾン破壊物質がぐっと増えて、一時的だがオゾン破壊が激しく起こる。その影響は非常に重要だ。宇宙からの粒子起源のNOxが下りてくるスピードは先ほどお話しした大気の大循環の速さでコントロールされている。

大気の密度については、上に行くほど指数関数的に小さくなる。例えば高さ100 kmでは地上の

$10^{-6}$しかない。しかしながら、波が伝播できる、できないというのは流体力学で決まる。実は上の影響が下に徐々に降りてくることは簡単に起こる。したがって、薄くてもとても大事ということになる。

Q：ビッグデータでケプラーの法則やニュートンの法則に相当するところまでたどり着くのか、という問題意識をもった。ビッグデータ上から、こういうことが予測できるというところまでは出る。それがケプラーの法則やニュートンの法則にあたるところまで持っていけるか。その前に人間が頭でまずモデルを考え、それに対して、ああ、これだとビッグデータから気づくということかもしれない。より詳しく伺いたい。

A：ケプラーの法則に相当するところは、経験則という形で最初は出てくるのではないかと思われる。それは、ビッグデータでマクロな構造を捉えるという仕事になるかと思う。どんなパターンが起こりやすいかという答えは、多分AIからも得られる。人間はそれを見ながらどうしてそのパターンが選択されるのか考える仕事をすることかと思う。パターンの抽出は人間の目では限界がある。その部分はAIにやってもらい、そのパターンは、どんな物理が潜んでいてそれが出現するのかというところは、人間が理論的に考える。その積み重ねで、おそらく何か見えくるものがあるだろう。

例えば、線状降水帯は、ホットな気象現象のトピックだ。降水システムが起きている風上側に新たな降水システムができる、バックビルディング型がよく現れることが分かっている。しかし、実はそのメカニズムが分かっていない。それも気象の基礎物理のようなところに戻れば、例えば重力波で説明できるのではないかといった発想がいろいろと湧く。バックビルディングは分かりやすい面があるので、いっそう発展したAIの登場を待たなくても解明されるかもしれないが、そういったパターンを抽出する仕事でAIが活躍すると考えている。人間はその先をやる。

Q：私は少し理論屋的なスタンスで、先に理論、物理モデルを考えて、それを表すためのパラメータを考えて、実験パラメータでも、それで証明するというスタイルだ。その立場で、ビッグデータで、何だか分からないデータが並んだところから、ある関係が出てきても、それで本当にケプラーの法則やニュートンの法則にまでたどり着くのだろうかなと思う面がある。

むしろニュートン的に考えて、逆に戻って、こうなっているはずだと考えていく方向でデータをとって、それでパラメータも決まるという感覚があるのだ、その路線はどうか。

A：そういう研究はこれまで随分なされてきている。例えば、突然昇温のメカニズムはあるモデルでこういうものだというふうにつくったものがある。そのモデルは日本の松野太郎先生が昔考えたものだ。例えばロスビー波が突っ込んでくるジェット気流の強さを横軸に取りましょうとか、どのような突然昇温が起こるでしょうかといった研究はこれまで盛んになされた。それが地衡風運動の気象理論なのだが、やり尽くされている感がある。現在の気象学はそこに行き詰まりを感じているところがある。その次は非地衡風、小さなスケールの現象も絡んだもので、相手が小さく、しかもたくさんあるので、捉えるのが簡単ではない。そこで、AIの手でもちょっと借りましょうかという時代になっているのだと思う。

Q：やはり、AIは道具ということだと。

A：気候や気象という自然現象が相手なのだが、災害などを起こすもので、人命や財産にも関わる。なのでAI任せというわけにはいかない。お医者さんが病気を診断するのにAI任せというのが許されないように、気象・気候もAI任せということにはならないだろう。

# 2.6 地球環境システムの進化・変動史

田近 英一（東京大学）

※講演日：2021年7月9日



## はじめに

ここでは地球史に関する基礎的な知見を簡単に紹介した後、特徴的な事象を取り上げて解説したい。ただし、これから紹介する事象の時間スケールは百万年以上である点にご注意いただきたい。日常的な時間スケールとはまったく異なる事象の議論なので、混同しないようにしていただきたい。

46億年にわたる地球史の研究は、これまで地質学分野で研究されてきた。筆者は地球物理学分野出身であるが、地球史を研究するために、地球をひとつのシステムとして捉える見方で研究を行っている。地球科学は領域対象別に細分化されて発展してきたが、地球をひとつのシステムとしてみるため、私は分野の垣根を取り払い、多圏間相互作用と呼ばれる領域間の相互作用に注目することで、システム全体としての挙動特性や安定性・不安定性の観点で、地球がどのように進化・変動してきたのかを捉え直す、地球惑星システム進化学分野の研究に取り組んでいる（図2–6–1）。

図2–6–1　研究の関心

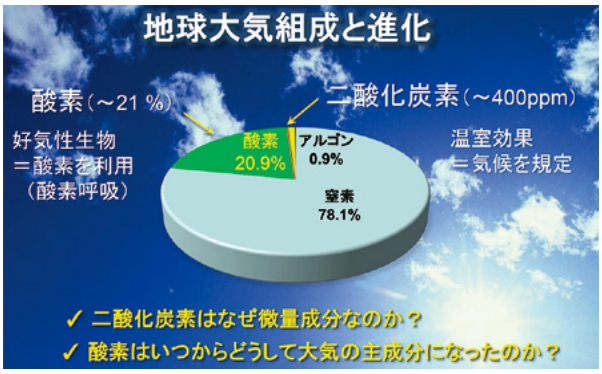



図2–6–2　地球大気組成と進化

地球の環境を気候状態を含めてより広く捉え、地球環境はどう進化、変動してきたか。特に、現在の地球の大気組成の特徴がいつ獲得されたのか。そういった観点を一つの切り口として紹介する。現在の地球大気は約78%が窒素、約21%が酸素からなる（図2–6–2）。さらに、約1%ほど不活性ガスのアルゴンが含まれている。実は大気進化の研究にはこれが非常に重要な指標となるのだが、今回の内容からは割愛する。さらに微量な成分として二酸化炭素（$CO_2$）が含まれている。これが温室効果を持っているため、微量にもかかわらず、気候変動をもたらす原因になっている。

一方、主成分のひとつである酸素は、生物にとって非常に重要な、代謝に関わる物質だ。私たちも酸素がなければ生存することができない。

ところが、酸素はもともと大気中にはなかった成分なのである。いつから地球大気中に含まれるようになったのか。これは生物の進化と密接に関わるだけではない。酸素は、地球の、とくに表層環境の酸化還元条件を規定していると捉えると、地球表層で起こっている多くの化学反応と関係あるといえる。その化学反応には生物の代謝も含まれる。したがって、酸素がいつどのように現在の濃度まで増えてきたのかは、地球環境や生物の進化にとって非常に重要な意味を持つ。これは古くからの地球科学上の重要課題のひとつであり、最近の研究の進展について後半で取り上げる。

もうひとつ取り上げたいのは、地球の気候に大きな影響を与える$CO_2$で、それがなぜ地球大気においては

微量成分なのかという問題である。というのは、金星の大気は90気圧あるが、ほとんどが$CO_2$であり、一方、火星の大気は0.06気圧しかないにも関わらず95%以上がCO2だからである。おそらく地球の大気も、もともとはこれらの地球型惑星と同様に$CO_2$主体の大気だったはずだと予想される。どういう理由で、現在の地球大気は$CO_2$が約0.04%という微量成分になったのか。これも地球の大気進化の大きな問題だ。

地球史は、図2–6–3のように時代が区分されている。まず、46億年間を冥王代、太古代、原生代、顕生代と大きく4つ分ける。顕生代はさらに古生代、中生代、新生代と3つに分けられている。そしてさらに細かく、カンブリア紀やジュラ紀、白亜紀といった区分がある。私たちは新生代の第四紀という時代を生きている。

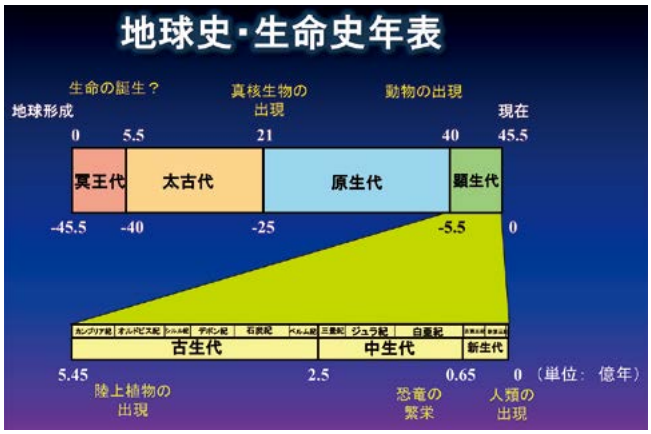



**図2–6–3　　地球史・生命史年表**

それでは、地球大気の組成はいつどのように変わってきたのだろうか。このことを理解するためには、太古代や原生代における変化に関する理解が必要になるため、少し詳しく紹介する。

私たちの日常感覚からいうと、10年、長くても100年がせいぜい実感できる限界だろう。1,000年となると、もはや遠い歴史のな話になる。さらに1万年となると、何があったのか、ほとんどの人はよく分からないだろう。図2–6–3の単位は億年なので、時間スケールの桁がまったく異なる。時代区分でも、現在に近いほど詳しくわかっていて、昔に遡るほど粗くなっていく。そこで地球史の年表は対数目盛りになっていることが多い。しかし、物理的なものの見方に立てば、対数で見るのではなく、完全にフラットな線形的なものの見方をするべきだと考える。太古代や原生代の地球がどのような状態で、どのような変化が生じていたのかを理解することは非常に重要である。

**太陽のパラドックスと地球環境の進化**

まずはじめに、地球大気中の$CO_2$と気候に関して、暗い太陽のパラドックスと地球環境の進化という話題について最近の動向も含めて紹介する。

地球の表面は太陽からの放射エネルギーを受けて温められる（図2–6–4）。日射量が変われば地球の気候も大きな影響を受ける。これは気候形成の基本であるが、実は日射量は時間的に一定ではなく、時間的に増大する。天文学では昔から知られていたことだが、恒星は進化の過程で明るくなっていくのである。太陽の進化は太陽の周りを回っている地球やほかの惑星の気候の進化に重大な影響をもたらすはずである。

太陽の明るさがどのように時間変化するのかについては、理論的に推定するしかない。恒星進化理論に基づく太陽進化の標準モデルによれば、46億年前の誕生したばかりの太陽の明るさは、現在の明るさの7割程度だったと見積もられている。現在も1億年で1%程度の割合で明るくなっていると推定されている。

太陽放射によって温まった地球表面からは温度の４乗に比例した熱輻射が放出される。大気上端では、地球が受け取るエネルギーと同量のエネルギーが地球放射として放出されているが、このエネルギーが釣り合う温度が有効温度である。

図2-6-5の赤い線は太陽光度の時間変化、それに対応した有効温度は下側の緑の線である。現在の有効温度は、マイナス18℃程度である。もちろん受け取る日射量によって有効温度は変わるので、日射量が低かった過去に遡るほど、有効温度も低くなっていく。

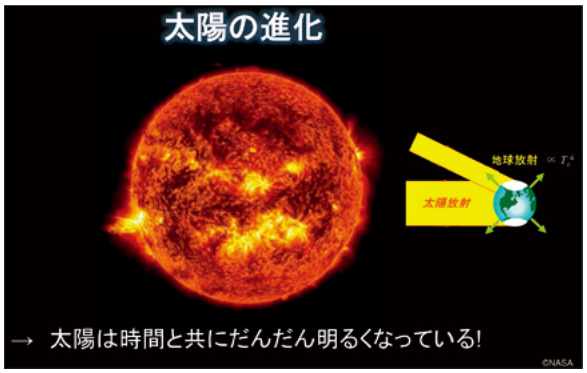



**図2-6-4　太陽の進化（画像：NASA）**

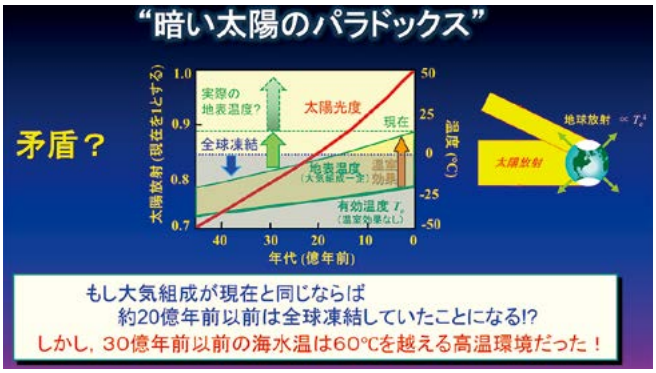



**図2-6-5　暗い太陽のパラドックス**

有効温度は、実際の地表面温度とは異なる。もし地球に大気が全くなかったならば、地表面温度は有効温度と等しくなり、氷点下になってしまう。しかし、大気中には温室効果ガス（GHG）が含まれているので、地表面温度はかさ上げされる。図の有効温度（緑線）に温室効果を加えると、上の緑線のようになる。現在の地球の地表面温度（全球平均温度）は、有効温度であるマイナス18 ℃よりも32～33 K高く、14～15 ℃になっている。

では、地球大気の組成や反射率などの条件が地球史を通じて一定だったとして、日射量だけが変化したら全球平均気温はどうなるか、という思考実験を行ってみる。受け取るエネルギーが減れば、全球平均温度は下がっていく。図の水平な点線は0 ℃を表しているが、約20億年前以前は、全球平均温度が氷点下を下回っていたことになる。

つまり、地球史を通じて、大気の組成などの条件が現在と同じであったと仮定すると、地球史の前半はずっと凍りついていたことになる。

ところが、実際の地球は、過去においてはむしろ温暖で、もしかすると高温環境ともいうべき状態だったことが知られている。たとえば、30億年前以前の海水温は60 ℃を超えていたという推定結果が、海底堆積物の酸素同位体比や珪素同位体比などから示唆されている。これとはまったく別の手法として、海洋表層で光合成を行うシアノバクテリアの遺伝子配列に基づいて、タンパク質の祖先型配列を推定し、それを実際に発現させて熱変成温度を実験的に調べたという研究もある。これは至適生育温度と関係しているので、それが当時の海洋表層水温に相当すると仮定すると、30億年前は60～70 ℃と非常に高温だったことになり、ほかの推定結果とも整合的である。

つまり、氷点下を下回っていたという理論的な推定結果と、高温だったという地質学的な推定結果とが矛盾してしまう。これを、「暗い太陽のパラドックス」と呼んでいる。

もちろん、こうした推定については、様々な議論があり、別の解釈もある。ただ、これがもし本当だとすると、どうして日射量が低いのに高温環境になっていたかという疑問がある。

その疑問を解決する最も単純な考え方が、昔の大気中には$CO_2$のようなGHGが現在よりもずっと多かったからではないか、というものである。つまり、温室効果がいまよりもずっと強かったので、日射量が低くても

気候を温暖に保てたのではないか、という考えである。GHGは$CO_2$以外もいろいろあるが、最も検討が行われていて、一番基本的なGHGは、$CO_2$だと考えられている。

図2-6-6はそうした計算の一例である。現在の大気中の$CO_2$濃度を基準とすると、現在と同じ全球平均温度15 ℃（緑線）を保つために、約30億年以上前には現在の数百倍以上の濃度が必要である。もし全球平均温度が60～70 ℃だったとなると、赤線よりもさらに上側の条件が必要で、現在の数千倍の$CO_2$レベルでなければならない。

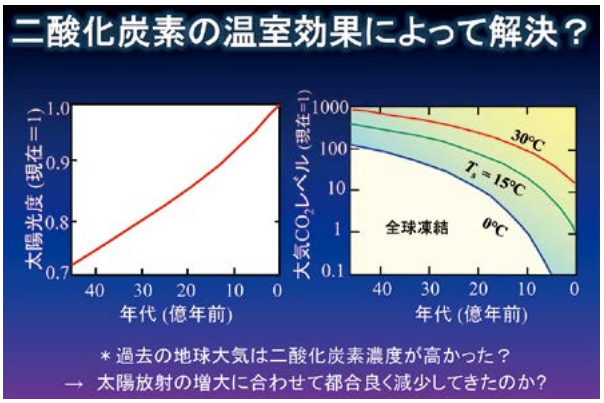



**図2-6-6　$CO_2$の温室効果で解決？**

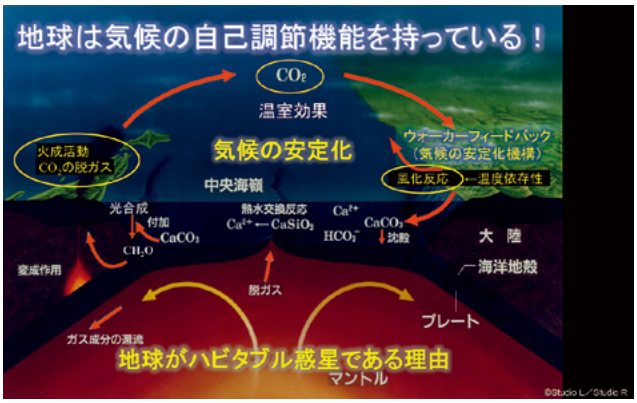



**図2-6-7　炭素循環システムにおける気候の自己調節機能**

私たちは、地球大気についてよく知っていると思っているが、私たちが知っている大気組成は、この図の時間軸でいえばゼロの時間断面を見ているだけである。過去に遡っていくと、現在の地球とは全く違う条件になっていた可能性が高いことが、こうした考察からも示唆される。

これで「暗い太陽のパラドックス」は解決できたと思われるかも知れないが、そう簡単にはいかない。太陽が明るくなるのにしたがって$CO_2$濃度が下がってくれば、地球は現在と似たような温暖な環境を保ってこられたことになるが、そんなに都合のよい話があるのかという問題である。必然的にそうなるメカニズムがなければ、納得することはできない。実は40年ほど前、そういう仕組みが実際にあるのだという考えが提唱された。

そもそも大気中の$CO_2$濃度を決めているのは炭素循環と呼ばれる物質の循環であるという描像が、1980年代から理解されるようになってきた（図2-6-7）。人間活動による現在の地球温暖化問題においても、人間が化石燃料の燃焼によって放出した$CO_2$が海洋に溶けたり海洋や陸上の植物が固定したりしながら、どのくらい大気中に蓄積されていくかを予測する必要があるが、これは数十年というタイムスケールでの炭素循環の問題である。これを数十万年、数百万年と拡張していくと、人間活動の影響は恐らく地球史的には“イベント”として記録されることになるだろう。化石燃料がなくなるか、人間が化石燃料の代替エネルギーを利用するようになれば、$CO_2$は放出されなくなる。その期間は、たかだか100年スケールであると考えられることから、地球史的にみればイベントとして捉えられるということである。

時間スケールが100万年スケールになると、大気にとって重要な$CO_2$の供給源は、火山活動になるものと考えられる。火山ガスには$CO_2$が含まれているので、活動が継続していくと大気中に$CO_2$が蓄積されていく。

一方で、$CO_2$の消費プロセスもある。代表的なものが化学的風化反応だ。$CO_2$は水に溶けて炭酸となるため、雨や地下水は弱酸性を呈している。炭酸が地表の岩石を構成している鉱物を溶解する化学反応が化学的風化反応（chemical weathering）であり、地表面で常に生じている。

化学的風化反応によって岩石から溶け出てきたカルシウムなどの陽イオンが河川を通じて海に流入する。海の中にカルシウムイオンが蓄積すると、炭酸カルシウムに飽和して沈澱が生じることで$CO_2$が固定される。こ

のような一連のプロセスが、地質学的時間スケールにおける$CO_2$の重要な消費プロセスとなっている。

このほか、生物による光合成活動によっても$CO_2$は固定されており、$CO_2$の重要な消費プロセスとなっている。ただし量的にみると、実は化学的風化反応とそれに続く炭酸カルシウムの沈澱の方が、光合成による炭素固定よりも大きい。

ところで、一般に化学反応の速度には温度依存性がある。高い温度では反応速度が速く、低い温度では反応が遅くなり進まなくなる性質がある。

この性質を踏まえると、火山活動による$CO_2$の供給速度はコントロールできないが、化学的風化反応による$CO_2$の消費速度は温度によってコントロールされることになる。

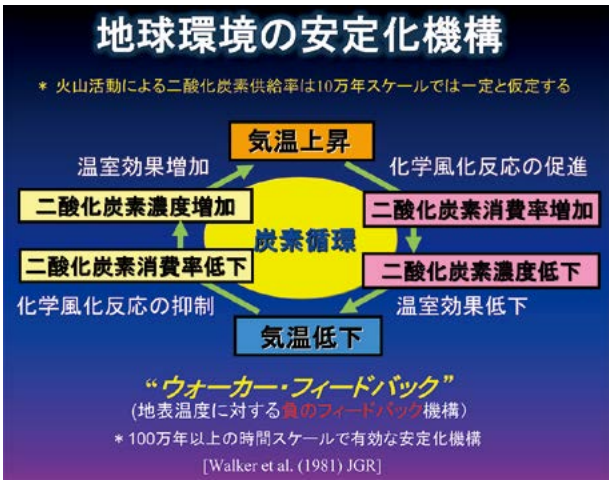



**図2-6-8　　地球気候の安定化機構**

ある気候の平衡状態を考えたとき、何か擾乱が加わって気候が温暖化したとする。先ほど述べたように、化学的風化反応が促進されるので$CO_2$の消費率が増加する。すると、$CO_2$の濃度が低下するので、温室効果が低下して気温が平衡状態まで下がっていく（図2-6-8）。

逆に、擾乱によって気候が寒冷化したとすると、化学的風化反応が進まなくなるため、$CO_2$の消費率が低下する。一方、火山活動は気候変動によらず一定だと考えると、$CO_2$の消費が減って供給が上回るため、大気中の$CO_2$濃度は増加し、温室効果が増えて気温は元の平衡状態に戻る。

これは地表面温度に対する負のフィードバック機構として作用することから、気候安定化メカニズムの役割を果たしていると考えられる。このプロセスは、地球の気候システムにおける自己調節機能と捉えることができ、提唱者であるジェームス・ウォーカーの名をとって「ウォーカー・フィードバック」とも呼ばれている。地球はこのような安定化メカニズムを持っているため、長期にわたって温暖な環境を維持することができたのだと考えられている。地球史46億年にわたって海が存在できたのも、この気候安定メカニズムによるものだと理解されている。このような環境は、生物の生存や進化に必須であると考えられることから、惑星のハビタビリティにはこうしたメカニズムが必要不可欠であると今日では理解されている。

ただし、このプロセスの特性時間は数十万年以上であることから、有効に働くのは100万年以上の時間スケールであることに注意が必要である。現在の地球温暖化のような数十年～100年といった時間スケールでは、このメカニズムは有効ではないことを念のため強調しておく。数十年スケールで見た地球システムにおいても、複数の負のフィードバックメカニズムが存在しているのではないかと予想されるが、その特性時間が十分に短く、短期間で有効に機能しない限り、急激な地球温暖化を抑えることは難しいであろう。

さて、太陽が時間的に明るくなることで、どんどん気温が上昇してきたのかというと、必ずしもそうはなら

なずに、大気中の$CO_2$濃度を低下させて温暖な環境を維持するように進化してきた可能性が高いことが明らかになった。この結果、太陽が明るくなってきたことによって、現在の大気$CO_2$濃度は280 ppm（産業革命前）という微量成分になったのだと理解することができる。

地質試料から過去の$CO_2$濃度を正確に推定することは難しいものの、さまざまな手法によって、古$CO_2$濃度を推定する研究がなされてきた。太古代～原生代の土壌（古土壌）がどのように風化されたのかを調べることにより、当時の$CO_2$濃度を制約した結果、過去の$CO_2$濃度は確かに現在よりも高かったことが示されている。しかしながら、理論的に必要とされる$CO_2$濃度より低いという結果が多く得られているのである。 $CO_2$濃度は炭素循環によって自己調節されることから、日射量が低かった過去の地球においては、高い$CO_2$濃度に調整されることによって温暖環境に保たれていたことが説明できるという話だったのだが、実際にはそうなっていなかった可能性が示唆される。

つまり、温暖気候の形成には$CO_2$の温室効果だけでは足りないということになり、その足りない分を説明するためには、たとえば別のGHGが必要な可能性が示唆される。たとえば、$CO_2$に加えて、強力なGHGであるメタン（$CH_4$）が過去の大気中に高濃度で存在していた可能性である。 $CH_4$以外のGHGや別のメカニズムで説明できるとする考えも盛んに提案されている。

それらのなかで、筆者らは$CH_4$が最有力候補であると考えている。 $CH_4$を支持する根拠はいくつかある。一般に、$CH_4$はメタン生成古細菌という微生物によって生産され、環境中に放出されている。生物の光合成でつくられた有機物は細菌によって分解されていくが、現在のように酸素濃度の高い好気的環境では、有機物は完全に分解されて水と$CO_2$に戻るが、過去の酸素のない嫌気的な環境では、有機物が嫌気的に分解されると、最終的には$CO_2$と$CH_4$が生成される。

実際現在でも、メタン生成古細菌が嫌気的な環境である海底堆積物中や土壌中で有機物を分解して$CH_4$を生成している。ある種のメタン生成古細は、牛の胃の中で活動しており、牛がげっぷすると$CH_4$が大気中に放出され、それが現代の温暖化を促進しているという話もよく知られている。しかし、大量の$CH_4$がつくられているのに、あまり大気中に放出されていないのは、生成された$CH_4$の大部分が酸素等で酸化されているからである。

ところが、30億年前は、大気中に酸素がほとんど含まれていない環境だった。そのような嫌気的な環境では、$CH_4$は酸化されずに、現在よりもずっと高いフラックスで大気中に放出されていたはずである。その結果、大気中の$CH_4$濃度は現在よりもずっと高かったことが示唆される。

ここで、$CH_4$濃度が高くなると、その温室効果によってより温暖化がさらに進行するのではないかと考えるかもしれない。しかし、先ほどのウォーカー・フィードバックを思い出して欲しい。温暖化が進むと何が起こるかというと、ウォーカー・フィードバックで$CO_2$を消費して、大気中の$CO_2$濃度を減らすことで環境を維持するようにはたらくことになる。これにより、長期的な平衡状態として、$CH_4$濃度が増えると$CO_2$濃度は相対的に低下する結果となる。大気中の$CH_4$濃度が高くなった結果、$CO_2$濃度は低下し、その両方の温室効果によって温暖な地球環境が維持されていたということであれば、すべて整合的な説明が可能である。

ただし、古$CO_2$濃度の推定値から要求される、温暖環境形成に必要な$CH_4$濃度は、約1,000 ppmという非常に高い濃度である。 $CH_4$のフラックスが十分大きくないと、1000 ppmにも及ぶ高い大気$CH_4$濃度は実現されない。

高い$CH_4$濃度の実現のために、なぜ大きな$CH_4$フラックスが必要かといえば、大気中における$CH_4$の寿命が短いからである。 $CH_4$は大気中のOHラジカルと反応し水素と一酸化炭素になる。一酸化炭素は酸化されて、最終的に$CO_2$になる。現在ではこの時定数は12年程度であり、現在の$CH_4$濃度はおよそ1 ppmだ。したがって、本当に現在の1,000倍もの$CH_4$濃度が実現可能なのか、必ずしも自明ではない。実際、先行研究では否定的な結果が得られていた。そのような高い$CH_4$濃度が、本当に実現可能だったのだろうか？

そこで、私たちの研究グループでは、それが本当に実現可能だったのかという問題について、海洋における原始的な微生物生態系を想定し、大気光化学モデルと結合した地球システムモデルを用いて検討を行った（図2–6–9）。

その結果、当時の海洋微生物生態系における基礎生産者として、単独種の光合成細菌を仮定すると、高い$CH_4$濃度条件を達成することはできないという結論が得られる。実は、先行研究もそうした仮定をおいた検討が行われていたので、それらとは整合的な結果であった。

ところが、基礎生産が複数種の光合成細菌によって担われていたことを仮定して同じ計算を行うと、大気への$CH_4$放出フラックスが非線形的に増幅され、1,000 ppmという高い$CH_4$濃度が実現可能である、ということが明らかになったのである。詳しい説明は省略するが、これは大気光化学系と海洋微生物生態系に内在する非線形効果によるものである。光合成細菌にはさまざまな電子供与体を用いる複数種の存在が知られているので、そうした複数種の光合成細菌が共存していたとしても、まったく不思議はない。高い$CH_4$濃度条件が実現していたのだとすると、それは初期地球における複雑な海洋微生物生態系の活動によるものだと考えれば説明はつくのである。



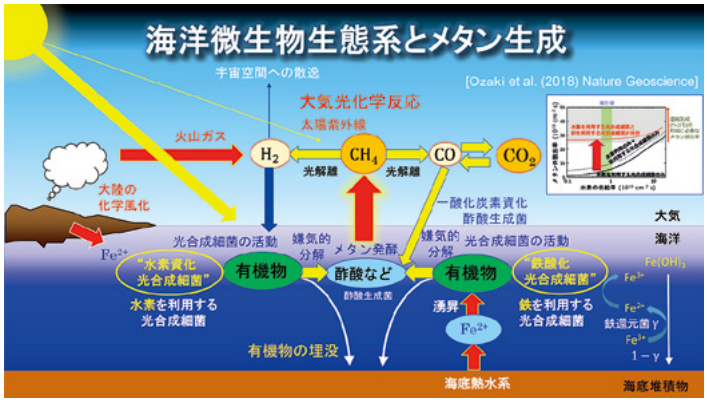



**図2-6-9　海洋微生物生態系とメタン生成**

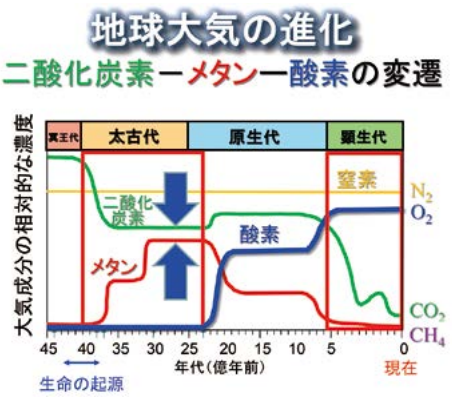



**図2-6-10　地球大気の進化**

図2-6-10に、地球大気の組成が地球史を通じてどのように変遷してきたのかの概要を示す。現在の大気組成（図2-6-2）は図の右端に対応している。ここではアルゴンは省略して、窒素、酸素、$CO_2$、$CH_4$の4つについてのみ示されている。

現在の地球大気で一番多い成分である窒素は、地球史を通じてほぼ一定だったと考えられている。現在の大気組成では、$CO_2$は微量成分、$CH_4$に至ってはもっと微量だが、30億年ぐらい前まで遡ると現在とは全く違う組成になっていることが分かる。酸素は大気中にほとんどなく、$CO_2$と$CH_4$が非常に多い条件だった。約35–25億年前（青い矢印付近）で$CO_2$が減っているようにみえるのは、$CH_4$が増えると$CO_2$が相対的に減るという前述のメカニズムが働いた結果である。この2つの成分の温室効果によって、当時の暗い太陽の条件が補なわれていたと考えられる。

$CO_2$は、大局的には地球史を通じてずっと低下してきて現在に至る。現在は地球史において最低の$CO_2$レベルだといえる。この先も太陽は当然明るくなっていくので、大気中の$CO_2$濃度は限りなくゼロまで低下していく。現在、人間活動で$CO_2$が増えているといっても、それは地球史レベルで見ればあくまでも一時的なイベントであって、長期的に見ると$CO_2$濃度はさらに下がっていくと予想される。酸素は逆に地球史を通じて増えてきた。これについては後述する。

次に、顕生代における$CO_2$の変動の概要を紹介する。顕生代（約5.4億年前～現在）は地球史では最も新しい時代に相当する。顕生代の$CO_2$濃度がどう変動してきたのか理論的および地球化学的な多くの研究がな

されている[1, 2]。地球化学的推定については手法によって、ばらつきがかなり大きいが、統計的にみると、理論曲線に近い平均値が得られることが知られている。顕生代においても、$CO_2$が気候変動と密接な関係にあったことは、よく知られている。

大局的にみて、現在の$CO_2$濃度が顕生代において最も低いレベルにあることが分かる。実は、いまから約3億年前の石炭紀後期も、現在と同じくらい$CO_2$濃度が低い時代であったことも分かる。石炭紀後期は大氷河時代（ゴンドワナ氷河時代）として知られてもいるが、$CO_2$濃度が低下した時期と一致している。現在も新生代後期の氷河時代である。すなわち、$CO_2$濃度が低い時代は基本的に寒冷期（氷河時代）である。

逆に、約5億年前や1億年前は、$CO_2$濃度が現在のそれぞれ二十倍から十倍程度もあったと推定されており、非常に温暖な時期だったことが知られている。地質時代の温暖期について詳しく知ることは、現在の地球温暖化を考える上で参考事例になると考えられることから、とりわけ約1億年前の白亜紀の研究は、古気候学の中心的課題のひとつとなっている。

一方、白亜紀が終わった後の新生代は、約5,000万年前まで温暖化の時代であったが、その後は一転して、現在に至るまで寒冷化が続く時代である[3]。$CO_2$濃度が高い時代から徐々に低下していき、寒冷化していく様子がみえる。

海水の酸素同位体比から海水温や氷床の量の変動が推定されている。直近の数百万年間に注目すると、250万年ぐらい前（すなわち第四紀の始まり）から変動の振幅が急激に増大していく。これが氷期・間氷期サイクルといわれる変動である。約2万年前のような氷河期（氷期）と現在のよう間氷期との周期的な変動である。

一方、新生代の初期は、前述のように温暖化が生じていた。温暖化の途上にある約5,500万年前には、PETMイベントとして知られる、急激な温暖化イベントが生じた。

海底堆積物中の炭酸カルシウムの炭素同位体比を調べると、急激な負異常が記録されている[4]。炭素同位体比の負異常は急激な温暖化と同時に生じている。この時の温暖化は、1万年程度の比較的短い時間スケールで生じており、5℃程度にも達する急激な変化であった。炭素同位体比の負異常は、生物由来の$CH_4$が関与していることを示唆する。おそらく、$CH_4$を閉じ込めた包摂水和物（メタンハイドレート）が不安定となり、大規模に分解して突然大気中に放出されたことを反映したものであろうと考えられている。その結果、温室効果の増加で急激な温暖化が起こったと解釈されている。

温暖化の途中でこうした現象が起こったというのは、非常に示唆的である。今後も同様のことが起こるかもしれないからである。温暖化によって海水温上昇が進み、海底のメタンハイドレートが熱力学的に不安定化して分解するという可能性は今後も十分に考えられる。

PETMはごく短期間に温暖化が生じたという意味で、現在の地球温暖化のアナロジーとしても非常に重要な研究対象となっており、実際IPCCのレポートでも以前から取り上げられている。現在及び将来の地球を理解することにもつながるという意味において、古気候学の重要研究課題のひとつとして注目され続けている。

**海洋無酸素イベントと大量絶滅**

さて、地球大気進化のもうひとつの重要な問題として、酸素（$O_2$）に関する議論を紹介する。

1 Robert A. Berner, “GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric $O_2$ and $CO_2$” Geochimica et Cosmochimica Acta, 70 (2006) 5653–5664

2 Dana L. Royer, “$CO_2$–forced climate thresholds during the Phanerozoic” Geochimica et Cosmochimica Acta, 70 (2006) 5665–5675

3 James C. Zachos et al., “An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics” Nature, 451 (2008) 279–283

4 Gordon N. Inglis et al., “Global mean surface temperature and climate sensitivity of the early Eocene Climatic Optimum (EECO), Paleocene–Eocene Thermal Maximum (PETM), and latest Paleocene” Climate of the Past, 16 (2020) 1953–1968

図2–6–11は、地球史における大気中の$O_2$濃度の変遷について示したものである。$O_2$濃度は地球史初期からずっと低いレベルにあったが、24.5～20億年前に急激に上昇した。これは大酸化イベント（GOE）と呼ばれている。そして、8～6億年前にも原生代後期酸化イベント（NOE）と呼ばれる$O_2$濃度の上昇イベントが起こった。大気$O_2$濃度は、地球史を通じて2段階で上昇して現在に至ったものと理解されている。海底堆積物中の酸化還元に敏感な微量金属元素の濃集度が段階的に増大するなど、それを支持する様々な証拠がある。

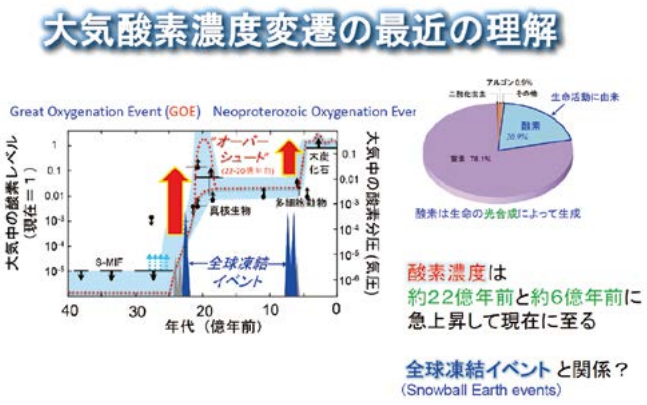



**図2–6–11　大気酸素濃度変遷の最近の理解**

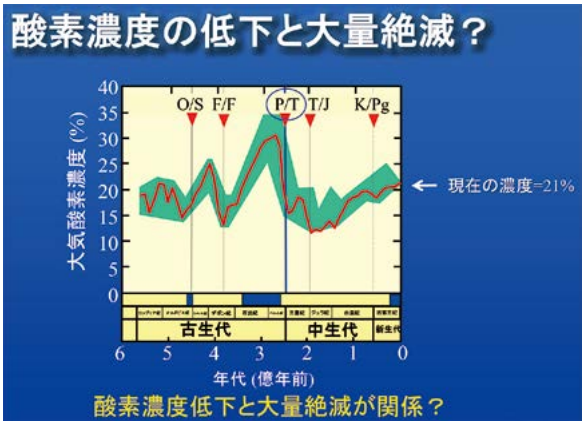



**図2-6-12　酸素濃度の低下と大量絶滅の関係**
Berner（2006）に基づく

大気中の$O_2$濃度が約20%になったのは46億年の地球史のうち、たかだか最近数億年間、すなわち全体の約1割ぐらいの期間である。それ以前は、現在の100分の1～1000分の1程度、さらに24億年前以前は、現在の10万分の1以下から10兆分の1という非常に低い濃度だったと推定されている。大気$O_2$濃度は、何かしらのイベントが起こって段階的に上昇してきたというのが一般的な理解である。

不思議なことに、$O_2$が増えた時期には全球凍結（スノーボールアース）という寒冷化イベントが起こったことが知られており、両者に何らかの因果関係があった可能性が示唆されている。全球凍結イベントについてはこの後で紹介する。

顕生代における、$O_2$濃度の変化については、理論的に推定されている（図2–6–12）。現在の濃度は21%だが、顕生代において一番濃度が高くなったのは約3億年前の石炭紀後期で30～35%ぐらいである。逆に、約2億～1億年前にかけて、$O_2$濃度は顕生代で最低レベルとなり約13%近くまで低下していたと推定されている。これは動物の大半は倒れてしまうレベルだ。ヒトは$O_2$濃度18%未満で酸欠になるとされる。つまり、このレベルの$O_2$の変動でも、生物にとってはかなり影響が大きいといえる。

実際、$O_2$濃度の変化は生物の変遷にも影響を及ぼしたとされている。約3億年前の石炭紀後期には酸素濃度が35%近くになったとされるが、当時は昆虫類を含む節足動物が巨大化したことで知られており、酸素濃度との関係が議論されている。一方、約2億年前から始まる中生代ジュラ紀において恐竜が繁栄したが、その理由は恐竜、とりわけ獣脚類の呼吸器官が現代の鳥類と類似の機能をすでに獲得しており、鳥類同様に低酸素レベルに適応していたからではないか、ともいわれている。

顕生代においては、多数の生物種が同時に絶滅するという大量絶滅が生じていたことが知られており、絶滅率のピークから5回の大量絶滅イベントが知られている（図2–6–13）。生物の大量絶滅イベントは、$O_2$濃度が低下したタイミングに近いようにもみえる。

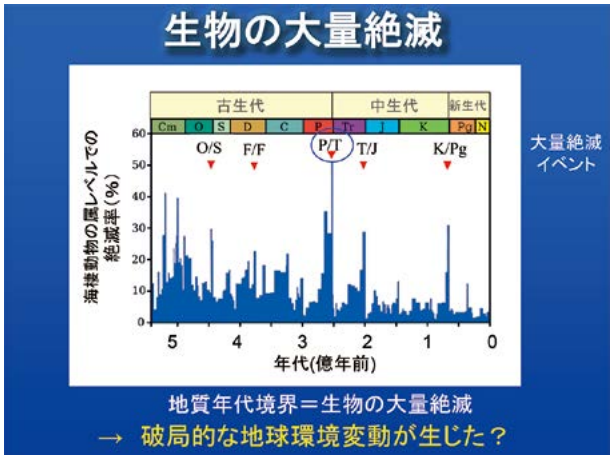



**図2-6-13　　生物の大量絶滅**

http://en.wikipedia.org/wiki/Extinction_ event/ に基づく



約6,600万年前の白亜紀／古第三紀（K/Pg）境界では、鳥類の系統を除く恐竜類が絶滅したことはよく知られている。この大量絶滅は$O_2$濃度の変化とは関係なく、小惑星が衝突したことが原因であるというのが一般的な考えだ。しかし、K/Pg境界イベント以外の４つの大量絶滅に関しては、もしかすると$O_2$濃度の低下が関係していた可能性も考えられる。

これまで知られている史上最大級の大量絶滅イベントは、今から約2億5000万年前のペルム紀／三畳紀（P/T）境界で生じた。種のレベルでは90％以上がP/T境界で絶滅している。このとき何が起こったのかについては、多くの研究がなされている。これまで分かっていることの一つは、シベリアントラップという超大規模な火成活動が生じたことである。これは通常の火山活動ではなく、マントルプリュームという熱いマントル物質が地球の深部から上昇してきて、地表で溶岩を洪水のように大量に噴出するイベント（洪水玄武岩の噴出イベント）であった。このイベントで大量の$CO_2$が放出されて、温暖化したことが知られている。

このとき同時に、スーパーアノキシアと呼ばれる、大規模な海洋無酸素イベントが起こったことが知られている。アノキシアとは酸素欠乏を指す言葉で、オーシャン・アノキシア（海洋無酸素）イベントと呼ばれる現象の大規模なものがスーパーアノキシアである。スーパーアノキシアは、気候の温暖化と関係して起こった可能性が指摘されている。一方で、当時の$O_2$濃度は古生代末期から急激に低下していたタイミングでもあることにも注意したい（図2-6-12）。

海洋無酸素イベントは、顕生代において繰り返し生じたことが知られている。とりわけ、ジュラ紀から白亜紀にかけての、$CO_2$濃度の高い、非常に温暖な時期に集中して生じた。当然ではあるが、海洋に生息している動物は、$O_2$がなくなれば生きていけないので、絶滅する。その最大規模のイベントが、約２億5000万年前のP/T境界であったということになる。

顕生代は、それ以前の原生代と比べて２～３桁も高い$O_2$濃度が維持されている時代だが、それにもかかわらず海洋無酸素イベントが繰り返し起こってきた。顕生代以前は現在よりはるかに大気酸素濃度が低い状況が続いており、海洋はずっと無酸素状態だった。原生代末期に海水中の$O_2$濃度が高くなって、ようやく動物が出現して、その後繁栄するようになったと考えられている。そうなってもなお、海洋においては無酸素状態になるイベントが繰り返し起こったということである。

海洋無酸素イベントの成因はいくつか考えられる。当然、大気中の酸素濃度が低下すれば海洋の酸素濃度も低下するため、海洋無酸素イベントが生じやすくなる。しかし、海洋無酸素イベントはほかの要因でも生じると考えられている。なかでも温暖化は重要な要因であると考えられる。

図2-6-14は現在の海洋で生じているプロセスである。有光層は海の表層100～200 mの太陽光が透過している領域で、植物プランクトンが光合成活動を行っている。プランクトンは1、2年で死んで、海洋内部を

沈降していく。沈降しながら、有機物は酸化分解されていく。海洋の中層付近まででそのほとんどが分解してしまうが、湧昇流によって表層に戻っていくものもある。表層で取り込んだリンや窒素といった栄養塩が有機物となって沈降し深いところで吐き出されるので、生物ポンプと呼ばれている。

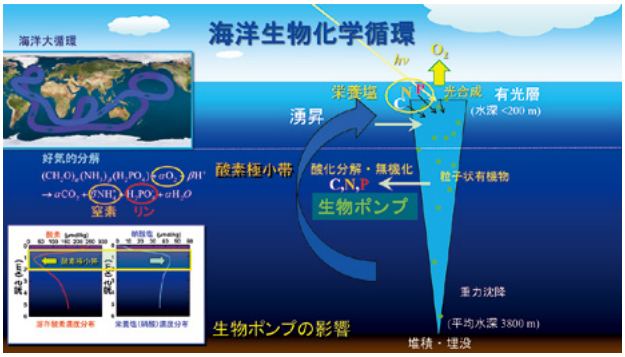



図 2–6–14　海洋生物化学循環

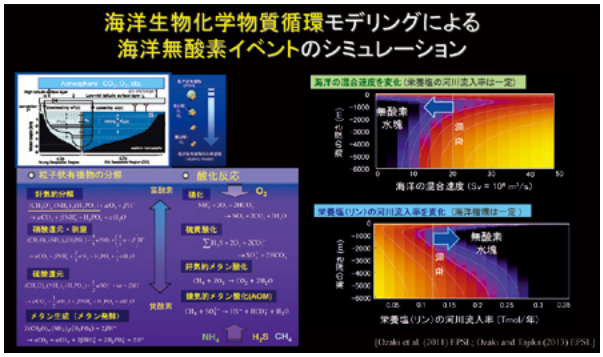



図 2–6–15　海洋無酸素イベントの再現計算

ここで、光合成で$O_2$が放出される一方、有機物の分解によって$O_2$が使われることに注意する。海洋の溶存酸素濃度分布を見ると、深さ1,000メートル付近に酸素極小帯が形成されている。表層からの有機物の沈降量と分解速度の関係で$O_2$濃度が最も低下している水深ということになる。

リンや窒素については$O_2$の逆で、同様の深さで濃度が高くなっている。栄養塩は、表層水中に残っていれば全部使われてしまうため、ほとんど枯渇している。したがって、栄養に富んだ中深層水が表層に湧昇してくることで、生物活動が持続可能となっている。

海洋無酸素イベントの発生条件を定量的に明らかにするために、私たちの研究グループが海洋生物化学循環モデルを開発して詳しく調べた結果についてお話しする（図2–6–15）。

海洋循環モデルに栄養塩等の物質を流し込み、さらにさまざまな化学反応を考慮する。海洋内部で有機物が分解していく際、$O_2$がなくなっても、実は酸化分解は進行することが知られている。 $O_2$がなければ別の酸化剤（硝酸、マンガン、鉄、硫酸など）を使って酸化分解が進行し、最後は$CH_4$が生成される。また、そうした反応の結果、$CH_4$や硫化水素、アンモニアなどが生成されるが、それらもまた酸化剤によって酸化される。こうした化学反応はすべて、微生物の代謝過程として生じている。こうした反応は、海洋内部に無酸素水塊が生じると、きわめて活発に生じるようになる。

そこで、こうした微生物の代謝系をモデルに入れてさまざまな条件における海洋生物化学循環を調べた。たとえば海洋の循環を遅くしていくと、海洋の酸素極小帯が拡大していくだけでなく、海洋深層水中の$O_2$も減っていく様子が分かる。まさにこれは海洋無酸素イベントに相当する。冷たい極域の水が海洋深層まで沈み込んで行く際、大気中の$O_2$をよく溶かしこんでいるが、その流入が弱くなってしまうため、結果として海洋深層水領域まで無酸素水塊が拡大することになっている。

一方、海洋無酸素イベントの発生要因として別のメカニズムも考えられる。生物制限元素であるリンが大陸の化学的風化反応によって海に供給されている。この流入率を現在の値から増加させていくと、海洋全体のリン濃度が上がっていくことになる。すると、湧昇する水塊中のリン濃度も増えていく。そうすると、海洋表層における光合成活動が活発になり、生産された有機物がたくさん沈降してくることになるので、より大量の$O_2$が消費されるようになる。無酸素水塊は酸素極小帯から拡大していって、簡単に海洋無酸素イベントが引きおこされる。

大陸からのリンの流入率が増えるというのは、大陸の岩石の化学的風化反応の速度が増加することを意味する。それはすなわち、地球が温暖化することによってもたらされる。大量のリンが海洋に流入して海洋全体

が富栄養化し、光合成活動が活発になって、有機物分解のために大量の$O_2$が使われる。海洋から大気には大量の$O_2$が放出されるが、海洋内部は無酸素化するという様相になる。

温暖化の原因としては、一般的には火山活動の活発化が考えられる。火山ガスの放出によって大量の$CO_2$が大気中に蓄積して、温暖化が起こる。すると化学風化の反応速度が増加して、大陸から海洋へのリンの供給速度が増加する。すると、海洋における光合成活動が活発になって、海の中は貧酸素環境になる（図2–6–16）。

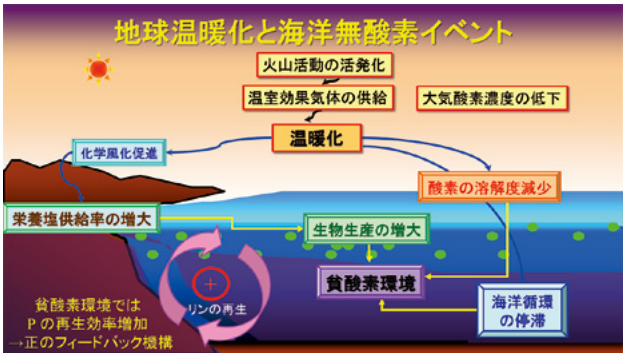



**図2–6–16　地球温暖化と海洋無酸素イベント**

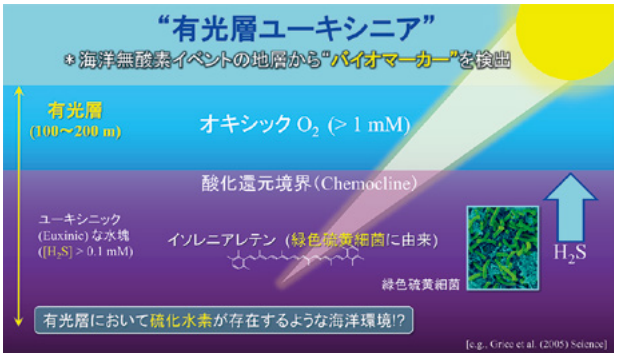



**図2–6–17　有光層ユーキシニア**

温暖化すると、表層水の密度が軽くなって海洋循環が起こりにくくなるのではないかという考え方もあるが、これについては必ずしもよく分かっていない。温暖化すると海洋循環がどう変化していくのかは非常に重大な問題であるが、もしも海洋循環が停滞する方向で変化が生じれば、海洋は貧酸素環境になるということが分かる。

温暖化が進むと、$O_2$の海水への溶解度が低下するため、海洋無酸素イベントの一因となる。また、海洋が無酸素化すると、海底堆積物中のリンが選択的に放出されることが知られており、その結果海水中のリン濃度が上昇するため、海洋表層では活発な生物生産が誘起され、貧酸素化をさらに加速するという、正のフィードバック機構が存在することも明らかになった。

ところで、海洋が無酸素化するとどうなるのであろうか。海洋無酸素イベントが起こった時代の地層中からは、バイオマーカー（分子化石）として、イソレニアレテンという特別な有機化合物がしばしば検出される。これは緑色硫黄細菌に特有の有機化合物だ。緑色硫黄細菌は、絶対嫌気性の光合成細菌の一種で、電子供与体として硫化水素を利用する（図2–6–17）。

光合成は日射が透過する100メートルから200メートルの有光層で生じるが、緑色硫黄細菌は$O_2$のない絶対嫌気的な環境条件で太陽光と硫化水素を使って光合成をする生物であることから、緑色硫黄細菌がつくった有機化合物が見つかるということは、当時は海洋有光層の酸素も枯渇し、代わりに硫化水素が充満していたような環境だったことを示唆する。硫化水素は、硫酸還元菌という微生物が、海水中の硫酸を使って有機物を酸化分解する際に生成される。海洋内部で$O_2$が消費された「アノキシア」状態になると、酸化剤として硝酸、マンガン、鉄等も消費されていくが、それらの量は少ないため、結局、硫酸が消費される状況になりやすい。そのような状況では、必然的に、海水中に硫化水素が充満する「ユーキシニア」状態になりやすいことが知られている。

つまり、大規模な海洋無酸素イベントが発生すると、海洋内部の$O_2$がなくなるだけでなく、硫化水素が充満する。そして、そのような水塊が、海洋のごく浅い表層100メートル程度ところにまで上昇してきていたことが示唆されるのである。

このバイオマーカーは、ほとんどの海洋無酸素イベントの地層中から検出されている。硫化水素はヒトを含

む脊椎動物にとって猛毒なので、もし万が一それが大気中に漏れ出してくるようなことが生じれば、陸上生物にとって大変危険である。 P/T 境界において海洋と陸上の生物が同時絶滅した原因として、このようなことが実際に生じた可能性が指摘されている。

実は、海洋無酸素イベントのような現象は、現在の地球上でも知られている。その代表的な例が黒海である。黒海では水塊中の溶存酸素が急激に低下して、代わりに硫化水素が充満するという鉛直構造が観測されている。すなわち、黒海もアノキシック（無酸素的）というよりユーキシニックな（無酸素かつ硫化水素に富む）条件になっている。したがって、海洋無酸素イベントのアナロジーとして、黒海は特別の関心をもって研究されている。

前述のように、地球温暖化が生じると、海洋内部は貧酸素環境になりやすい因果関係があることが分かってきた。現在の地球温暖化でも注視すべき課題だといえる。

現在の地球では、人間活動で富栄養化によって溶存酸素が枯渇している沿岸域の存在がよく知られている（デッドゾーン）。また、東太平洋のような外洋においても、この 50 年ぐらいの観測データを見ると、酸素極小帯が徐々に拡大していることが分かっている。

温暖化が進むと様々なメカニズムで海水中の溶存酸素が低下していく。その影響は、すでに魚の動態の変化としても現れてきているらしい。もともと広範囲の水深に生息していた魚が、深い水深には潜らず浅いところばかりに生息するようになっているという報告もある。

過去の地球で生じた現象が、現在もしくは将来生じるかも知れない。現在の地球の理解や将来予測の上でのヒントになることが、地球史においていろいろ生じてきたと捉えると、過去の地球を研究する意義が理解できるであろう。



**全球凍結イベントと酸素濃度の上昇**

ここまで、地球史を通じた $CO_2$ や $CH_4$、$O_2$ の変遷や、その気候や、とくに酸化還元環境の変動との関係について述べてきた。次に、地球全体が凍りついたスノーボールアース（全球凍結）イベントという、地球史における気候変動の中でも最大規模のイベントについて紹介する。

図 2–6–18 に、地球史において知られている氷河時代を示す。最も古い氷河時代が 29 億年前にあった可能性が示唆されている。しかし、最も古い確実な氷河時代の証拠としては、24 億～22 億年前の原生代初期もので、この時期には汎世界的な氷河時代が繰り返し生じたことが知られている。

**図 2–6–18　　氷河時代と全球凍結**

原生代中期には氷河時代（つまり寒冷期）はなかったと考えられているが、原生代後期になると、再び大きな氷河時代が繰り返し生じたことが知られている。顕生代では、約３億年前の石炭紀後期に大氷河時代（ゴンドワナ氷河時代）が生じたほか、現在も新生代後期の氷河時代にあたる。

その中で、原生代の初期と後期、今からおよそ23億年前と７億年前、6.4億年前は大規模な氷河時代だったことが昔から知られており、現在ではこれらは全球凍結イベントだったのではないかと考えられている。全球凍結イベントは少なくとも３回起こったようで、最後のものが6.4億年前に起こっている。この時代の氷河堆積物は、世界中に分布しており（図2–6–18）、分布だけ見ても、当時は汎世界的な氷河時代だったことがうかがえる。

プレート運動によって大陸は移動するので、6.4億年前の大陸配置は現在とは全く違っていた。氷河堆積物が形成された当時の緯度分布を調べるには、昔のその場所の緯度（古緯度）を調べる必要がある。南オーストラリアに露出する同時代の氷河堆積物を用いて、古地磁気学的手法によってその場所の古緯度を調べた結果、当時そこは赤道直下だったことが明らかになった。そのような「低緯度氷床」が存在した証拠が、上述の３つの時代で知られているのである。

その３つの時代が、ほかの氷河時代と全く違っている点は、まさしく赤道が凍っていたという点にある。理論上、中高緯度が凍らずに赤道だけが凍っていることはあり得ない。極から赤道まで、地球全体が凍っていた証拠だと考えられる。

それ以外にも、附随する様々な地質学的証拠が、全球凍結イベントが生じたと考えるとすべて説明できることから、当時の地球は全球凍結していたと考えられるようになってきたのである。

地球全体が凍結するという全球凍結状態の存在は、もともと理論上はよく知られていた（図2–6–19）。理屈の上では、地球が非常に温かければ氷は極にも形成されない「無凍結状態」となる。たとえば$CO_2$が現在の数倍～10倍の濃度だった約１億年前の白亜紀は、そういう気候状態だったということが知られている。まさにこれが真の温暖期というべき時代であり、現在と比べて平均気温が10℃ぐらい高かったといわれている。約5,000万年前の新生代始新世も同様に無凍結状態だったことが分かっている。

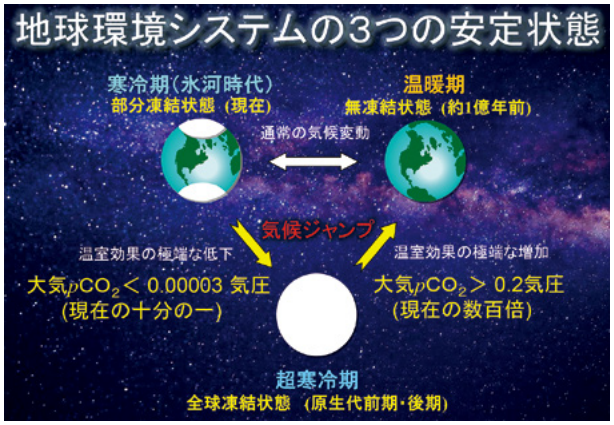



**図2–6–19　地球環境システムの３つの安定状態**

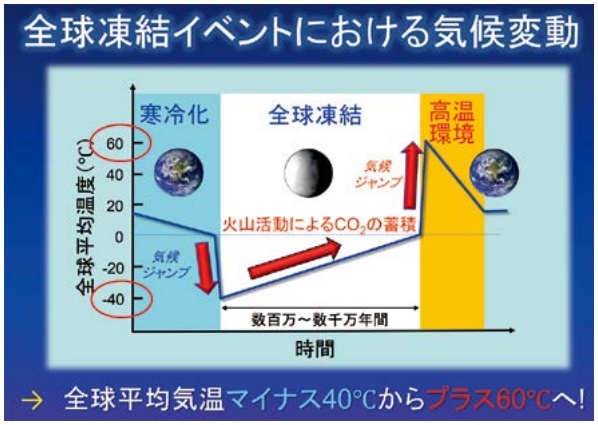



**図2–6–20　全球凍結における気候変動**

現在は、南極大陸やグリーンランドを氷床が覆っている、「部分凍結状態」と呼ばれる寒冷期にあたる。大陸に氷床が存在している時代が氷河時代と定義されているので、現在は氷河時代である。

地質時代の気候変動は、基本的にこの温暖期と寒冷期の２つの状態を繰り返してきたと考えられてきた。しかし、第３の状態として、地球全体が凍っている「全球凍結状態」も安定して存在し得ることは、1960年代から理論的に知られていたのである。

しかし、1980年代までは、地球がいったん全球凍結してしまうと、その状態から抜け出せないと考えられていた。気候変動の要因として日射量を考えると、日射量（＝太陽の明るさ）が短時間に大きく変化して、全球凍結状態から抜け出せるような条件になることはないからである。

1990年代に入ると、$CO_2$濃度が現在の数百倍増えると、その強い温室効果によって氷が溶けて、無凍結状態に不連続的に気候ジャンプすることが示された。

これを全球平均温度の変化として示すと、図2–6–20のようになる。現在の平均気温はだいたい15℃だが、寒冷化が進み、極から張り出した氷が緯度30～20度ぐらいまで拡大していくと、突然赤道まで氷が覆われ全球凍結するという、気候ジャンプが生じる。これは、氷のアルベドが高いことに起因したアイス・アルベド・フィードバックとして知られる正のフィードバック（不安定化）機構によるものである。全球が凍ってしまうと日射量のほとんどを反射してしまい、－40℃ぐらいの非常に寒冷な状態になる。

地球が全球凍結していても、火山活動は停止しない。火山活動で放出された$CO_2$は、水があれば溶けて炭酸となり、岩石を風化するなどで消費されていくが、水がすべて氷になっていればまったく消費されない。そのため、$CO_2$は時間とともにどんどん大気中にたまっていき、数百万～数千万年という長い時間が経過すると十分の一気圧から1気圧にも達することになる。そうなれば、強い温室効果で赤道から氷が一気に溶けていく。

これは、逆アイス・アルベド・フィードバックともいえる不安定化メカニズムによって生じる気候ジャンプで、氷は千年程度の時間スケールで一気に溶けてしまうと考えられている。その結果、大気中の$CO_2$はほとんど消費されずに大気中に残ることになる。すると、氷が溶けた直後の地球は、強力な温室効果によって、平均気温が60℃ぐらいの高温環境になると推定される。

理論的には、このようなイベントがもし起こるとすると、地球の平均気温は－40℃から＋60℃まで、100℃ぐらいの非常に大きな変動が生じることになる。普通の気候変動と全く違うので、私は気候システムの相変化（フェイズ・チェンジ）と呼んでいる。現在とは全く異なる気候システムの安定状態間の遷移が、地球史においては生じた可能性があると考えられるのである。

図2–6–21に、23億～22億年前の氷河堆積物が記録されている南アフリカ共和国のトランスバール累層群の柱状図を示す。青色で囲った層に氷河堆積物があり、低緯度氷床の証拠が得られていることから、全球凍結イベントだと考えられている。興味深いことに、氷が溶けた直後、氷河堆積物の直上の地層に、鉄とマンガンの酸化物の鉱床が形成されている。

マンガンは還元的条件では水溶性の二価の状態で海水中に溶存している。しかし、環境中に$O_2$があると、酸化されて沈殿する。マンガンは酸化還元電位が非常に高い元素で、マンガンを酸化できる酸化剤は、事実上、$O_2$しかない。つまり、地球史上初めて形成されたマンガン鉱床が氷河堆積物を直接覆っているということは、環境中の$O_2$濃度の上昇が、まさに23–22億年前の全球凍結直後に起こったことを示唆する。

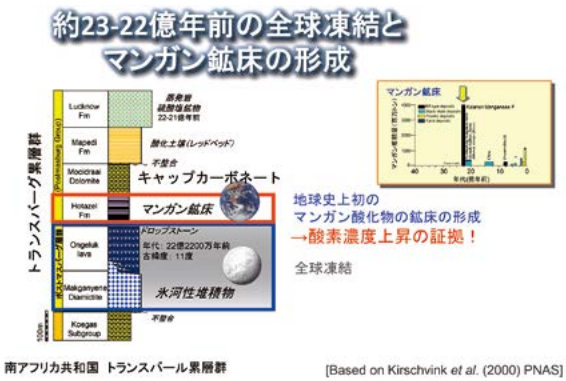



**図2–6–21　約23–22億年前の全球凍結とMn鉱床**
Kirschvink et al.（2000）に基づく

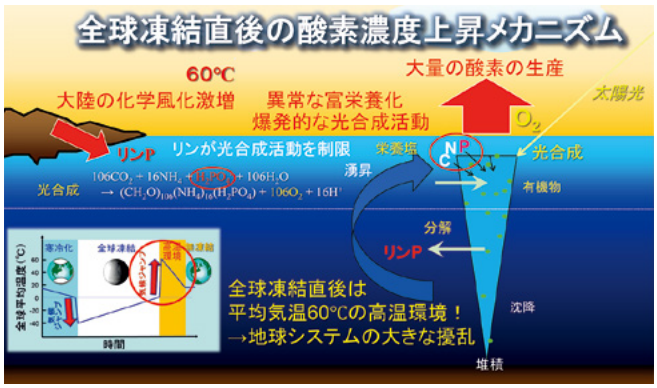



**図2–6–22　全球凍結直後の酸素濃度上昇**

このような地質学的な層序関係の解釈が正しいとすれば、全球凍結が終わった直後に$O_2$濃度が増えるような必然性があった可能性が考えられる。

筆者らの研究グループでは、以下のようなシナリオを考えている（図2-6-22～24）。現在の地球では、海洋の植物プランクトンの光合成によって$O_2$が放出されているが、この基礎生産を制限する元素がリンの供給率である。前述の通り、海洋の中深層水中のに含まれるリンが湧昇によって海洋表層に供給され、それを生物が使うというリン循環によって光合成活動が継続しており、$O_2$が大気中に放出されている。この放出量は自然変動では大して変動しないと考えられる。

ところが、全球の氷が溶けた直後の高温環境に着目すると、通常では起こらないことが生じる。平均気温60℃の高温環境なので、大陸地殻の化学的風化反応速度が通常の20倍ぐらい増加するのである。大陸地殻は、海洋のリンの供給源なので、これが桁で増大することにより、海洋には大量のリンが供給されることになる。これが数十万年続くので、海洋のリン濃度は一桁以上増加する。海洋全体が富栄養化して、通よりも一桁大きな光合成活動が起こり、$O_2$が大量に放出されるということが起こるのではないかと考えられる。

これを海洋生物化学循環モデルを用いて検証してみたところ、実際にそのようなことが起こることが定量的に示された（図2-6-23、24）。さらに、$O_2$が増え過ぎて一時的に現在程度のレベルに達した後、安定な状態に戻るというオーバーシュートが生じたことが地質学的証拠から指摘されているが、そのような現象が生じることも示された。

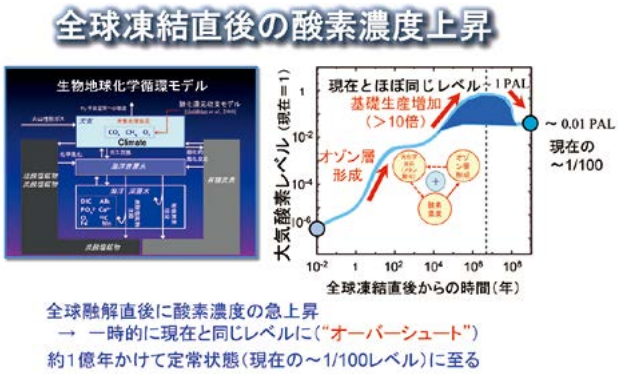



**図2-6-23　全球凍結直後の酸素濃度上昇**

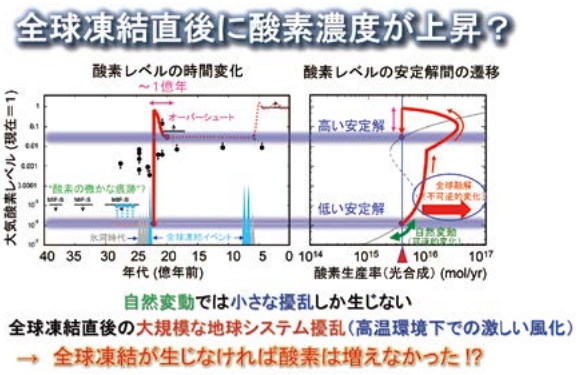



**図2-6-24　全球凍結直後に酸素濃度が上昇する過程の数値モデルを用いた再現結果**　縦軸は大気中の$O_2$レベル、横軸は（左）時間、（右）光合成による$O_2$の生成率。

全球凍結と$O_2$濃度が増加することの因果関係について、もう一つ重要な点がある。大気中の$O_2$レベルには、複数の安定解があると考えられており、それには多重性がある可能性も指摘されている。すなわち、同じ$O_2$の放出率に対し、低い$O_2$レベルと高い$O_2$レベルという複数の安定レベルがある可能性である（図2-6-24）。

ただし、最初に低い安定解の状態にあった場合、光合成活動による$O_2$の生産率が自然変動で2倍、3倍程度変化したとしても、低い安定解からは簡単には抜け出すことができない。

しかし、その変化が桁で増大すれば話は別である。光合成活動が10倍増えれば、低い安定解から抜け出すことができ、$O_2$濃度は高い安定解にジャンプすることになる。ただしその際、高い安定解を通り越して、一時的に現在と同じ程度のレベルにまで増加した後、現在の1/100程度のレベルに落ち着くという挙動が生じる。これがオーバーシュート現象である。

地球史において、大気$O_2$濃度はステップ状に増えたようにみえるが、その理由はこのような地球システムに生じた大きな擾乱によるものではないかと考えられる。全球凍結直後の非常に高温な環境条件によって、

通常では起こらないような高い基礎生産が引き起こされて大量に$O_2$が生産されて大気中に放出された結果、$O_2$濃度は低い解から高い解にジャンプすることになった。それが約22億年前頃に$O_2$濃度が上昇した大酸化イベントのメカニズムであることが強く示唆される。同じことが約6.4億年前にも生じて、大気$O_2$濃度は、もう一段階上のレベルに上昇したのではないかと考えられる（図2-6-25）。

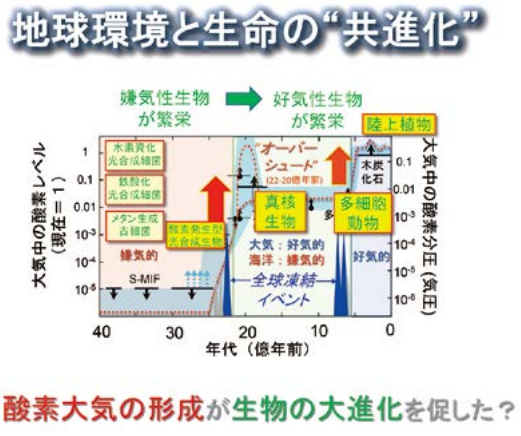



図2-6-25　地球環境と生命の“共進化”

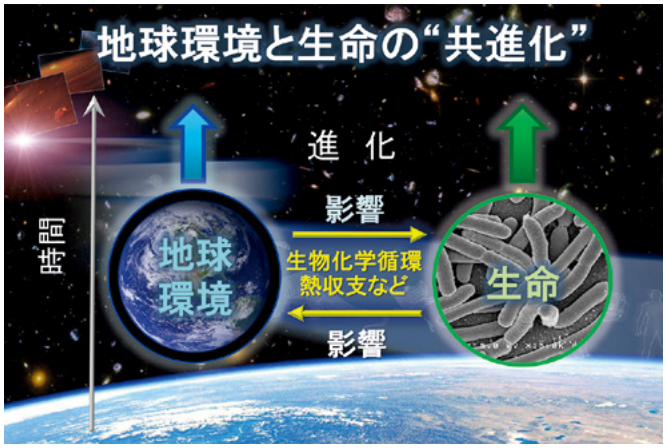



図2-6-26　地球環境と生命の“共進化”

この考えが正しければ、もし全球凍結が生じなければ地球大気の$O_2$濃度は現在も低いままだったという可能性も考えられる。このことは非常に重大な意味を持つ。もともと地球の大気中には$O_2$がほとんど含まれない嫌気的な環境条件であり、生命はそのような環境で誕生して進化してきたが、約22億年前に$O_2$濃度が急激に上昇し、突然、環境が好気的な条件に変化した。その新しい環境に適応した好気性生物などから真核生物が誕生したと考えられるのである。さらに約6億年前に$O_2$濃度が現在と同じぐらいまで上昇することで、動物が出現したと考えられる。こういった生物の進化は、環境中の$O_2$濃度に対する適応進化という側面が非常に強いと考えられる。そのような進化を支配していたのは、実は全球凍結イベントだったかもしれないということになる。

現在、天文学・惑星科学分野の関心事は、地球に似た惑星を太陽系外に探すことにあるが、それが地球とよく似た環境を持ち、生命が存在しているのかといった問題を考える上で、こうした進化的条件が満たされなければ、現在の地球のような惑星環境には進化できない可能性も考えられる。すなわち、この問題は、地球のような進化が生じる条件とはどのようなものなのかといった拡がりを持つともいえる。

地球上で$O_2$を発生させたのは、そもそも生物であるが、それによって環境の酸化還元条件が変わり、生物はその環境に適応進化するという形で、環境と生命は互いに影響し合って進化してきた。この問題は、地球環境と生命の共進化の考え方の最も重要な例であるといえる（図2-6-26）。

地球は常に変化している。この先、太陽が明るくなるため、長期的にみて大気$CO_2$濃度は今後低下の一途をたどることが理論的に予測できる。さらに太陽が明るくなっていくと、やがて海洋はすべて蒸発してしまう。進化や変動は、地球という惑星の本質である。地球環境が長期的にみてどのように進化・変動してきたのかを理解することは、現在の地球を知る上でも、あるいは将来の地球を考える上でも非常に重要である。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：$CO_2$のフィードバックのループについて、お伺いしたい。ある年数の規模での振動現象は見えているか。

つまり、フィードバックとして、増えたら減る方向、減ったら増える方向に働いて、全体としては幾つも安定点はあるが、1つの安定点の周囲を回るようなことを示す証拠が見えているか伺いたい。

A：ある平衡状態から、例えば火山噴火や、今の人間活動のように何かの擾乱が与えられたときに、元に戻っていく過程が見えているか、あるいは、あるイベントが起こったとき、元の状態にどのくらいの時間スケールで戻っていくのかが地質学的証拠として捉えられているか、ということか。

たとえば、いくつかの大量絶滅直後、環境がイベント前の状態に戻る回復過程には、だいたい数十万年から数百万年かかることが知られている。

ウォーカー・フィードバックの場合、その時定数について考えてみる。大気中の$CO_2$が入れ替わるのが、火山活動だとおよそ1万年かかる。しかし1万年の間には海洋も循環し、大気と混合する。そこで大気と海洋の両方を結合した系で$CO_2$はどのくらい含まれているかを考えると、大気の50倍の$CO_2$が含まれていることから、大気海洋系全体の$CO_2$が1回入れ替えるのには大体50万年という時間スケールがかかることになる。すなわち、長期的な炭素循環でフィードバックがはたらくのは、そのぐらいのタイムスケールだと見積もられる。ウォーカー・フィードバックが有効なのは100万年以上の時間スケールだとしたのは、そういう理由からだ。逆に言えば、何か擾乱が起きて状態が変わったとき、数十万年程度の時間スケールで元に戻ることが予想される。

これに関連して、最近、面白い研究があった。過去約60万年間の炭素収支が驚くべきことにほとんど釣り合っていることが観測データと理論モデルに基づいて示されたのである。このことは、この間に生じてきた氷期・間氷期サイクルという10万年スケールの変動にも、実はウォーカー・フィードバックが有効にはたらいていたということが示唆されている。

Q：生命の発生の際も、何か地球史上で大きなイベントがあったのか、ご知見をお伺いしたい。

A：生命の起源研究に関しては、最近ではアストロバイオロジーという分野で、この問題について研究がされている。

地球史の初期、地球が形成された直後の環境は非常に還元的だったと考えられている。還元的な環境ではアミノ酸は簡単に作れるので、何か大きなイベントが生じなくても、原始地球環境下で生命が誕生したことは、それほど不自然なことではないと、最近では考えられるようになっているようにみえる。

ただ、生命の材料となる有機化合物から生命になるまでのギャップは依然として大きく、生命の起原そのものの解明はまだまだ遠いといわざるを得ない。

一方、地球環境に対して初期の生物が代謝を通じてどのような影響を与えたかという観点では、まだよく分からない。基礎生産者が現れて有機物が生産されると、それを分解することでエネルギーを得る分解者が出てくる。それで$CH_4$が大気中に放出され、たまっていく。たとえば、系外惑星の観測で注目を集めているのは、大気のスペクトル観測によって生命活動の兆候を発見しようとするものだが、どういう成分を観測しようとしているかというと、最初は水蒸気の存在を調べて、その次には$O_2$が含まれているかを観測しようとしている。しかし、惑星の長期的な進化において、大気中に$O_2$を検出するのは非常に難しいのではないかと考える。地球を観測した場合でも、$O_2$が検出可能なのは46億年のうちのたかだか最近数億年程度の時間的ウィンドウに限られる。そこで次に候補となるのは$CH_4$である。 $CH_4$は生物起源、無生物起源の両方あるが、もし生物起源と判別できれば、生命活動の証拠になる。これは系外惑星だけでなく、地球でも同じだ。基礎生産者が出たら分解者も出てくる。このペアが物質循環に加わると、大気中の平衡が熱力学的・大気光化学的平衡からずれてくるが、そのずれた部分が生命活動の影響による可能性がある。一番有力なのが$CH_4$だ。他にもマイナーな成分もある。$O_2$が地球上に出てくるのは、それよりもずっと後の時代だ。

Q：地球史分野の様々な考察、理解が深まる中で、昨今、研究の方法論か、手段で何か大きな進展はあっ

たか伺いたい。

A：地球史の研究は、大部分が地質学の分野である。実際の地質試料をサンプリングしてきて化学分析し、得られたデータから当時どういう変化が起こっていたのかが初めて分かる。理論は、その変化のメカニズムを説明する理屈を考えたり定量的に検証するものである。

化学分析手法については、これまで分析できなかった非常に微小な領域や微量な試料の精密な分析ができるようになったことが重要な進展であろう。

計算機についても、パソコンレベルからスパコンレベルまでの革新的な進展に伴って、理論研究は大きく進展している。

モデルについても、一昔前と比べれば、はるかに複雑なモデルがつくられている。 GCMは解像度を格段に向上させるだけでなく、地球システムモデルとしてさまざまなサブシステムやプロセスを結合させている。以前は長時間積分ができず、古気候の研究にはあまり有効には使えなかったが、現在ではさまざまな分野で活用されるようになってきた。

モデルとしては、大気や海洋モデルにさまざまな物質を流し込み、生物過程を含むさまざまな反応を考慮する方向への進展がかなり進んでいる。物質の挙動は地質学的・地球化学的証拠の検証に有効なので、これはきわめて重要な方向性である。

そういった分析手法、計算機、複雑なモデルの進展に加え、昔と比べて、世界的にみても研究者層が厚くなり、総合的に進展しているのではないかという印象も持っている。

Q：素人質問で恐縮だが、地球史、古気候などで用いる「イベント」のニュアンスについて、お伺いしたい。単純な理解だと、ミランコビッチ・サイクルのように周期的な現象と違って、何か突発的に起きる出来事を想像して聴講した。

A：イベントとは、そういった１回限りのものを指す。安定な平衡状態にあるシステムに何らかの擾乱が加わり、乱された状態から元の状態に回復していく過程のことである。その引き金になるものは、たとえば大規模な火成活動や小惑星の衝突などで、それによって地球環境がどう変わってどう元に戻っていくかという事象である。これらはそれぞれ１回限りのイベントだととらえられる。一方、氷期間氷期サイクルのようなものは、軌道要素が天体力学的に変化し、日射量分布などが変わることで引き起こされる周期的な変化なので、イベントとは呼ばない。それらは区別して考える。

Q：やはり現在の人為影響の温暖化も地球史的なイベントにあたるように理解した。

A：人間活動の影響が地質学的時間スケール（百万年）で続くことは考えにくいという意味において、地球史的にみればイベントとして捉えることができると思われる。

# 3 ｜ 防災・減災に資する気象研究開発の最前線

## 3.1 気候変動・異常気象・大気海洋相互作用分野の研究プロジェクトとの関わり　―回顧と将来展望―

中村 尚（東京大学）

※講演日：2021年6月18日

### はじめに

本日はこれまで関わってきた気象・気候関係のプロジェクトの狙いや背景、成果を研究者としての歩みを交えて紹介する。昨今、温暖化研究にも関わっている状況だが、実は私はもともと温暖化研究に与する立場ではなかった。その経緯についてもお話したい。後半では、将来展望を交え、JSTベルモントフォーラムや、共創の場の支援形成の研究について説明する。

### 自然変動と人為影響の変動

最初に、温暖化について、私の捉え方をお話したい。図3-1-1は、気象庁が陸上、海上含めた全球平均の気温の推移を示したものだ。下のグラフの期間は19世紀終わりからだが、温暖化は明確で、この100年間でほぼ0.7℃上昇している。ただし、一方的に上昇しているのではない。時々、温暖化が停滞したり、最近のように温暖化が進んだり、を繰り返している。上のグラフは、対応する期間の日本での夏の平均気温だ。縦軸のスケールが変わっている点に注意いただきたい。100年で1.14度の上昇と全球平均よりも速いペースで温暖化が進んでいる。全球平均と同じように、ここ三、四十年でとくに温暖化が著しい。

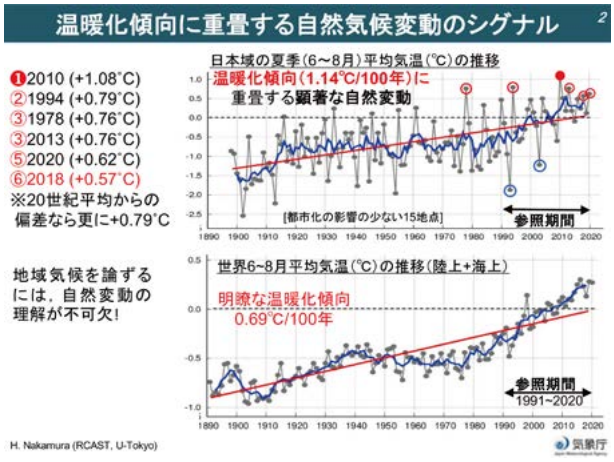



図3-1-1　温暖化傾向に重畳する自然気候変動

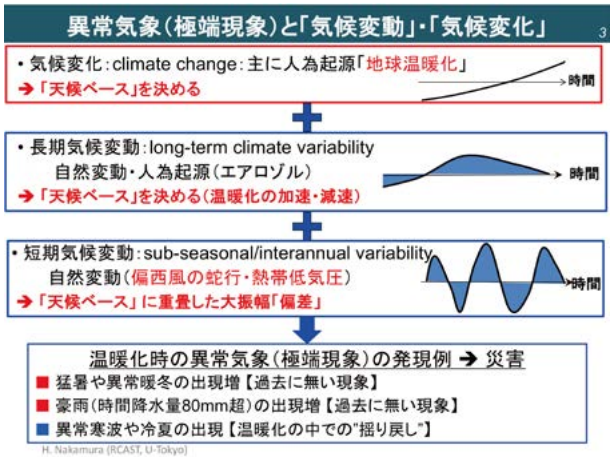



図3-1-2　異常気象と気候変動・気候変化

黒い点が毎年の値だ。日本域は、全球平均と比べ、年々の変動が圧倒的に大きいことがわかる。この特徴は何を意味しているか。温暖化の傾向に重畳した自然変動を明確に示している。温暖化が顕在化する以前から気候は揺らいでいるのだ。

これは、地域を論ずるには自然変動の理解が不可欠であることを示している。とは言っても、最近の温暖化

は明らかだ。全国平均で暑い夏の上位6位までをみる、昭和では3位の1978年だけで、ほかは全て平成以降だ。特に上位6位のうちの4年がここ10年に集まっている。皆さんが最近は暑い夏が多いと実感されているに違いないが、この値のように、実際に温暖化は顕著である。

もう少し、この点について説明する（図3–1–2）。先ほど述べた立場で、この変動を丁寧に見ていくと、まず気候の変化がある。この変化がIPCCで扱っているclimate changeである。主に人為起源の地球温暖化が全球規模であり、都市部ではさらに人為起源のヒートアイランド現象がある。これが天候のベースを決める。

それに長期的な気候の変動がのっている。この長期の変動は温暖化の加速、減速をもたらす要因になる。自然変動の影響による部分がかなり大きい。それに加えて、最近の研究から人為的なエアロゾルの影響も一部あると言われてきている。

そこにさらに短期の顕著な自然変動が重なったときに極端な現象が起きる。猛暑、あるいはこれまでになかったような異常な暖冬、経験したことがないような豪雨などが起きやすくなる。温暖化の中での逆方向の揺り戻し、異常寒波や極端な冷夏も実はかなり怖い現象だ。

日本が位置する亜熱帯から亜寒帯にかけては、主要な自然変動は偏西風の顕著な蛇行や、台風などの熱帯低気圧によってもたらされていると考える。具体的に、自然の変動のもたらすジェット気流の蛇行について説明する（図3–1–3）。

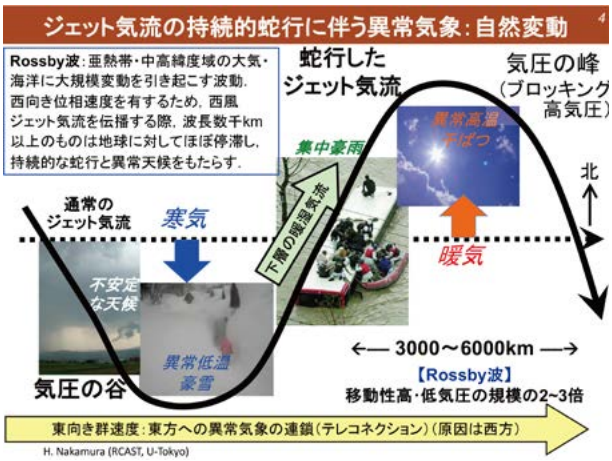



**図3–1–3　　ジェット気流蛇行に伴う異常気象**

ジェット気流は、力学的な特性によって、対流圏の上層に形成される強い偏西風である。温度風平衡の下で、北半球では暖気と寒気の境目を吹いている。通常は高・低気圧が発達して通るとき一時的に蛇行するが、すぐに元に戻り、適度に降水をもたらすといった周期的な天気変化が起きる。

ところが大規模な波動がやってきて、ジェット気流の蛇行が顕著になって持続することがある。蛇行しても寒気と暖気の境目である性質は変わらない。この図の右側、北にジェット気流がずれた地域では、暖かい高気圧に覆われた状態となる。これはブロッキング高気圧といって、異常高温、あるいは低気圧がやってこなくなるため干ばつをもたらす。逆に図の左側、ジェット気流が南下した地域では、上空に寒気が入ってくる。日本の夏では、不安定な天候になり、ゲリラ豪雨を起こす一因となる。冬でいえば、まさに寒波、あるいは豪雪をもたらす原因となる。

さらに危ない地域は図の真ん中、南西から北東にジェット気流が流れているところだ。ここでは対流圏の下層でも同じような大気の流れができるため、熱帯から暖かくて湿った気流が持続的に流れ込み、集中豪雨が起きやすくなる。

このジェット気流の大規模な蛇行をもたらす波動はロスビー波と呼ばれ、大気や海洋に大規模な変動をも

たらす。ロスビー波は常に西に進もうとする位相速度をもつ。別の言い方をすると、気圧の峰や谷を西にずらそうとするが、強い偏西風に乗っていると、それに押し戻されて地球に対して大体停滞する。移動性高・低気圧の2倍から3倍以上の水平規模であれば停滞する。そのとき、大きな特徴として、位相が止まっていてもエネルギーが東に速い速度で伝播する。すると、異常気象がジェット気流に沿って連鎖的に起きていく。これが自然変動としての異常気象をもたらしており、これについての研究を元来行ってきた経緯がある。

**気象解析研究プロジェクトの概要や成果**

略歴とともに、実施してきた研究プロジェクトを説明していきたい。1993年に米国から帰国して東大に赴任してからは、先ほどのブロッキング高気圧の形成に関わるロスビー波や移動性高・低気圧との相互作用、気象力学の指導原理に反するような日本付近の移動性高・低気圧活動の特異な季節性などの発見、要因分析を行った。当時、科技庁の地球フロンティア研究システムの設立を山形俊男先生が進められ、私も誘っていただいた。2002年にJAMSTECに移管された後も、地球シミュレータでの高解像度モデル開発に関与した。

この間、先ほど触れたロスビー波をはじめ、三陸沖などでの親潮や黒潮の境目が10年規模で強く変動する現象や、冬季北太平洋上のアリューシャン低気圧と冬季北大西洋上のアイスランド低気圧の勢力が逆相関で変動する現象などを科研費の基盤Aや環境省の総合推進費などの支援を得ながら研究してきた。この背景には、4人が学位を取得した後、ポスドクとして参加して、研究を進めてくれたことが、大変ありがたかった。日本の異常気象に関わる力学現象の研究が基盤となって、2010年の科研費新学術領域の採択につながった。

気象庁については、2001年から長期再解析の推進委員になった。再解析データとは、全球大気の状態を過去に遡って四次元的に再現したもので、現在の気候研究に必須のデータセットだ。2007年から異常気象分析検討会が設置された。現在、会長を拝命しているが、創設時から携わっている。

当時の研究の内容を簡単に紹介していく。まず、日本の冬の天候を左右するパターンの研究をお話しする（図3–1–4）。シベリア高気圧、冬のモンスーンを変動させる上空のブロッキング高気圧のパターンが実は2つある。1つはオホーツクの北に高気圧が居座る場合で、大西洋から波動がやってきてブロッキング高気圧ができ、それに影響するスカンジナビアパターンをしっかりと解明した。もう1つはWPという循環変動パターンで、オホーツク海の北のブロッキング高気圧から出されるロスビー波が、北極成層圏の極渦という巨大な寒冷低気圧を強化するという、ほかの地域のブロッキング高気圧とは逆の働きをすることを発見した。

このオホーツクの海氷変動がロスビー波を励起して北米の気候に影響を与えることや、アリューシャン低気圧の変動が北米大陸を越えてアイスランド低気圧に影響することなども示した。これらの現象は全てロスビー波が関わっている。速い群速度で蛇行の強い部分を東のほうに伝播させていくありさまをデータから理論に基づいてしっかりと診断できるようにした。この診断法は今、世界で広く使われている。

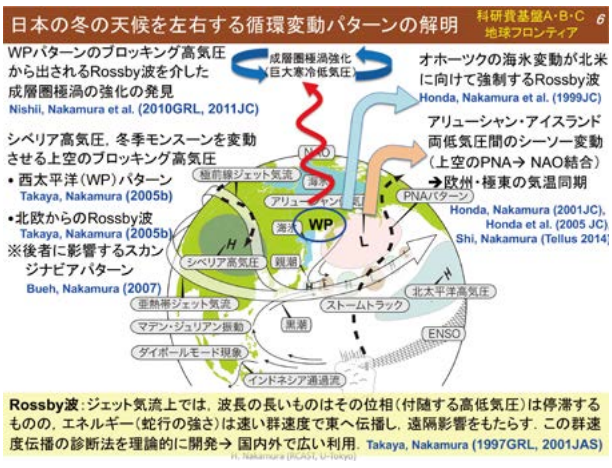



図3–1–4　冬の天候を左右する循環変動研究

図3–1–5　夏の天候を左右する循環変動研究

夏に関しても紹介する（図3–1–5）。夏の小笠原高気圧、梅雨期に出るオホーツク海高気圧、その間にできる梅雨前線、こののの三者の関係で日本の夏の天候が決まってくる。オホーツク海高気圧の発達には、北極の沿岸上空のジェット気流を伝播してくるロスビー波が重要であり、北欧の熱波と日本の冷夏がリンクすることを発見した。夏季に極東の上空を吹く亜熱帯のジェット気流はアジアモンスーンの影響でできている。このジェット気流に沿って梅雨前線ができる。このジェット気流に重畳したロスビー波が梅雨前線や夏の小笠原高気圧を変動させる現象を、シルクロードテレコネクションという。この蛇行ががなぜ卓越するか、梅雨にどう影響するかということを解明した。さらに、以前から現象として認識されていたのだが、フィリピン近くの台風の活動が小笠原高気圧の日本への張り出しを変えるというPJパターンという変動の力学的な仕組みを、理論的モデリングと観測データの解析から解明した。この2つの成果は小坂准教授がけん引して出してくれた。IPCC第6次評価報告書WG1の執筆者（LA）の1人でもある。

太平洋高気圧について言えば、実はその中心は太平洋の東側にある。その高気圧と下層雲、海面、陸面が相互に影響し合い、夏に形成されてくる新しい仕組みを提唱し、モデルで検証した。この成果は、宮本研究員がさらに新しい仮説を出して進展させてくれている。

我田引水で恐縮だが、日本に関わる夏、冬の季節予報、異常気象の要因分析、グローバルな気候力学への本質的な貢献を行ってきた。

**温暖化研究プロジェクトへの参画と成果**

そうして、2007年に環境推進費S–5に参加を呼びかけてもらった。それ以前は、私は自然変動しか研究してこなかった（図3–1–6）。2007年のIPCC第4次評価報告書は、IPCCの初期の目的をかなり達成したような当時として画期的なものだった。数値気候モデルのシミュレーションが2006年に完成し、それ以前と比べ、モデルの性能がかなりよくなってきていた。例えば中緯度では移動性高・低気圧をかなり現実的に再現できるモデルデータが出てきた。ここまでお話したように、私は基本的には現実のデータを見て現象を理解するという立場の人間、言わば、データ解析屋だ。松野太郎先生や住明正先生から、いよいよ君たちの出番だよ、と言われた。江守正多先生からも背中を押された。それで実際やってみると、結構面白かった。

1つ目は、温暖化した将来は春一番が早く吹くようになるという結果を示せた。春一番は早春に日本海で低気圧が発達することで起きる現象で、移動性高・低気圧がどのくらい極向きに熱を輸送しているかという指標で評価すればよい。気象力学の指導原理で考えると真冬で最も活動が強くなるはずだが、実際はモンスーンが強いと抑制効果になってしまう。IPCCに参加した20以上のモデルのうち、抑制効果がしっかり表せている8つを選び、解析すると、温暖化すると真冬の振幅抑制が緩和され、高低気圧が真冬でも活発なため、早く春一番が吹く状態になることを示せた。

2つ目は、PJパターンについてだ。南海上の台風と小笠原高気圧の勢力範囲を各モデルがどの程度再現しているか調べた。平均的な場が現実的に再現されているモデルほど、PJパターンの再現性も良かった。温暖化してくると、積雲対流活動が活発化するが、より成層安定になるので、南海上の上昇気流が抑えられる。その結果、冷夏型のPJパターンの位相にずれていき、小笠原高気圧が弱くなって梅雨が長引くという将来変化を見出した。

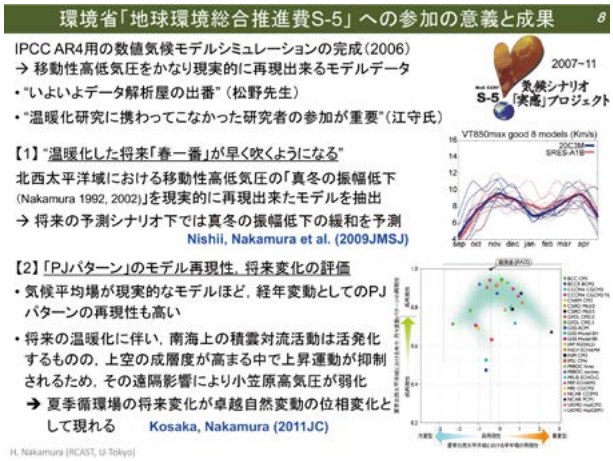



**図 3-1-6　　環境推進費 S-7 での研究成果**

### 気候系のホットスポットの概要や成果

S-7 と同じ時期に科研費の新学術領域を立ち上げることができた（図 3-1-7）。全国の大気や海洋の研究者の協力のおかげで、気候系のホットスポットという概念を新しく提唱できた。それまでの気候力学では、中緯度の海は熱帯のエルニーニョなどから伝わってくる影響で大気が変わり、それに強制されて、ただ受動的に海面水温が変わっているという受動的な捉え方だった。しかし、実際に 1 月に海から出ている熱や水蒸気をエネルギー換算でみると、メキシコ湾流でおよそ 1 ペタワット、黒潮など日本付近はその 2 倍だ。物すごいエネルギーが集中的に大気に出されており、これが大気に影響しないわけはない。そこで、中緯度の暖流域を気候系のホットスポットと名づけた。強い海流が熱や水蒸気を集中的に放出することで雲や降水、低気圧、さらには偏西風にも影響する。この研究の推進を呼びかけ、国際的にもしっかり確立させようと取り組んだ。

その結果、いくつかの成果を出せた。まず、海洋について紹介する。海洋は広いのだが、力学的スケールが、とにかく小さい（図 3-1-8）。波動としてどのくらいのスケールで伝わるか、力学的にはロスビーの変形半径で評価する。海洋では、小さな値しかとれず、大気よりも一桁小さい。高解像度の人工衛星データや、演算速度の速い地球シミュレータ、高分解能の海洋のモデルができて、より現実的な海洋循環が分かってきた。

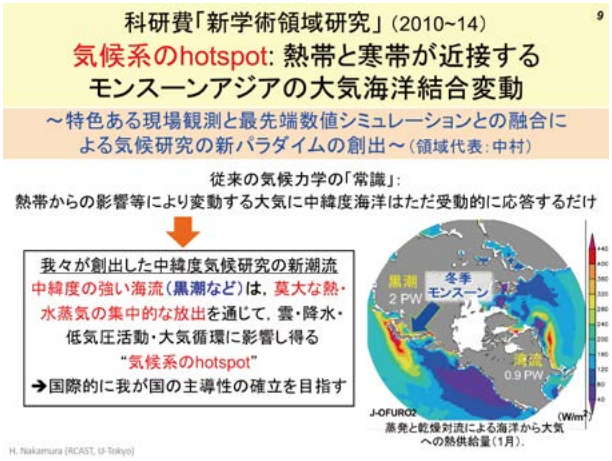



**図 3-1-7　　気候系の hotspot**

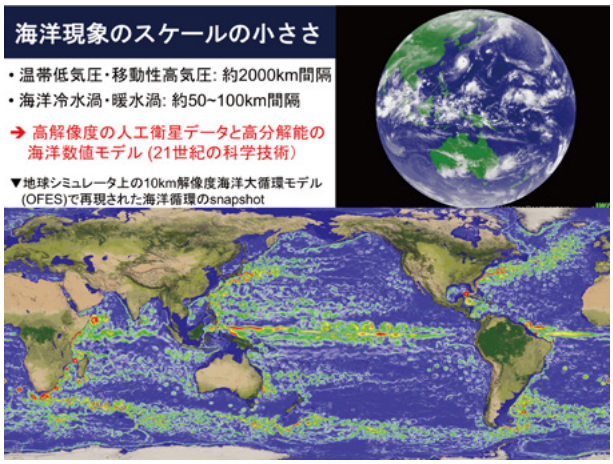



**図 3-1-8　　海洋現象のスケール**

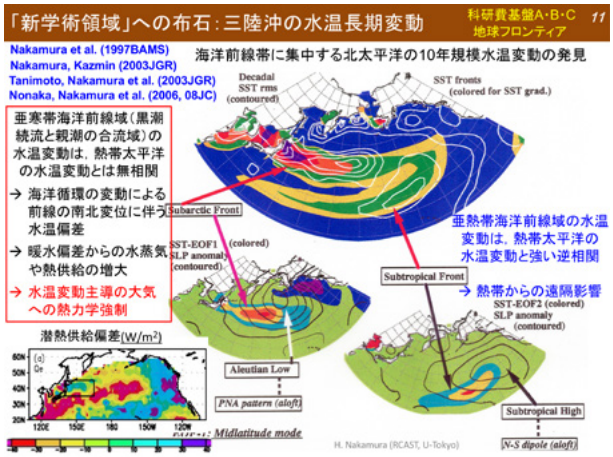



図3–1–9　三陸沖の水温長期変動

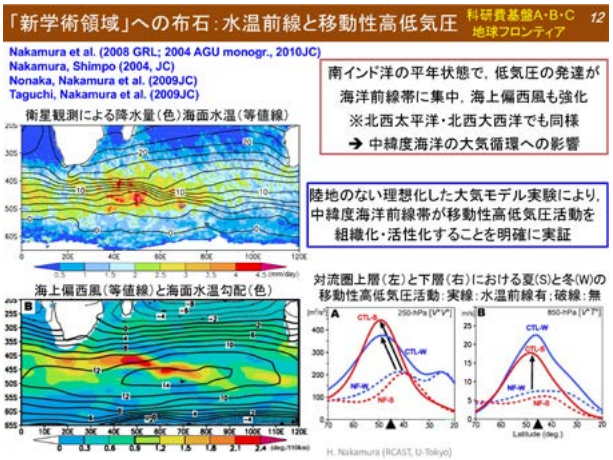



図3–1–10　水温前線と移動性高低気圧

新学術領域の発足の布石になった研究、即ち三陸沖で10年以上の長期の水温変動が卓越することを発見した成果を紹介する（図3–1–9）。平年の水温勾配を色で示しているが、図の左側の矢印の個所、三陸沖に暖流と寒流の境目、亜寒帯（水温）前線がある。図の右側の矢印の個所、亜熱帯にもう一つ前線があるが、その変動が実は三陸沖とは連動しておらず、熱帯の長期的な水温変動に連動している。これはかつての常識的な発想だ。しかし、三陸沖の変動は熱帯と同時には相関しておらず、大気の影響だけではないことが示せた。

海洋の循環が変わると、潮目の位置が南北にずれる。こういった潮目を水温前線と呼ぶが、その前線が北にずれた場合、暖水偏差が北のほうにもできる。暖かいと当然、水蒸気や熱供給が増える。これは熱帯と同じ状態で、水温変動が主導して、大気に海洋が熱力学的影響を与えている状態だ。これはまさしくホットスポットといえる。

図3–1–10は、南インド洋の水温前線を人工衛星で観測したものだ。左上の図では、水温を等値線で、降水量を色で描いている。降水量が多い赤色で示した海域では繰り返し低気圧が発達している。ここでは等温線が密集して海面水温勾配が強く、暖流と寒流の合流する水温前線であることが分かる。しかも左下の図でその海域の等値線を見ると、海上の偏西風が平均で毎秒10 mは軽く吹いており、低気圧、高気圧が束になって偏西風を維持していることによると分かってきた。

これこそがホットスポットが果たしている役割だろうとみて、解析を進めた。右下の2つのグラフは、陸地のない理想化した大気モデル実験の結果である。実線が、この水温前線を境界条件に入れた場合で、破線が入れない場合を示している。対流圏の上層と下層で高低気圧の擾乱活動を比較すると、水温前線を入れた実線のほうが圧倒的に活発で現実的になっている。これらの結果から、気候系のホットスポットが本当にあると分かった。

発展的な成果として、南極オゾンホールの影響も解析した（図3–1–11）。オゾンホールは人間が出したフロンガスの影響で形成されたが、成層圏オゾンによる紫外線の吸収が減って冷たくなっている。南極成層圏では冬の間、極渦という巨大な低気圧が形成されるのだが、それがオゾン層破壊によって、さらに冷たくなり、強くなっている。

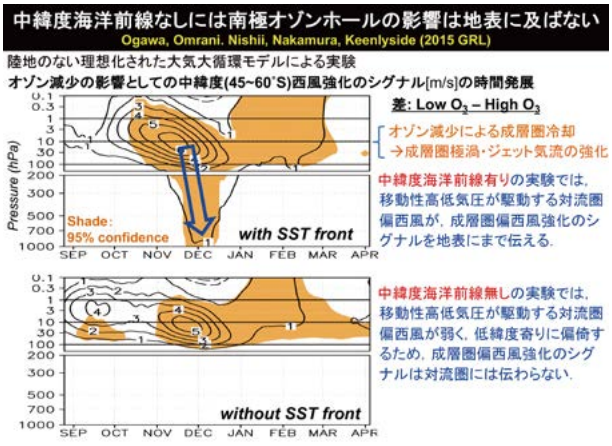



**図3-1-11　中緯度海洋前線とオゾンホール影響**

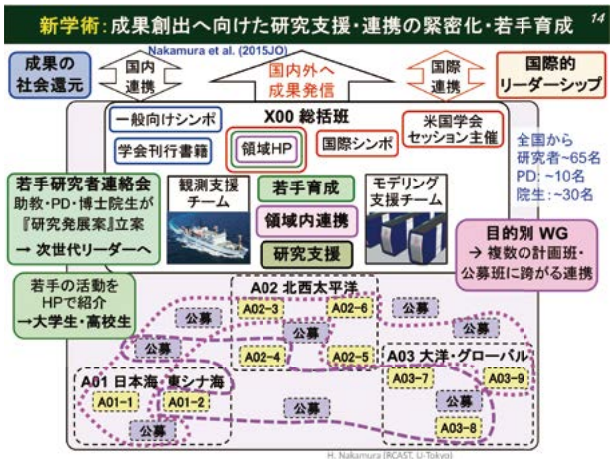



**図3-1-12　新学術領域の体制等**

その影響は観測でも捉えられており、冬は対流圏にまでジェット気流の変動として下りてくる。ここでも、中緯度水温前線の有無でシミュレーションを行った。図の中のオレンジ色はその成層圏の冷却によってジェット気流が強くなった様子を示している。境界条件として水温前線を入れた大気モデル実験では対流圏にまでジェット気流の変化が降りてきて、偏西風が強化される傾向がしっかり現実的に再現できていた。しかし、水温前線を入れないと、ジェット気流の強化は成層圏だけでに留まり、対流圏にそのシグナルが降りてこない。ここでも、ホットスポットの影響を加味することが重要だとわかった。

新学術領域ホットスポットは100名規模で、観測も地球シミュレータなどを用いたモデリングも、若手の人材育成も行った（図3-1-12）。計画研究9件に加え、公募研究も募集したが、お互いに連携できる目的別ワーキンググループなどを設け、成果を上げられるよう努めた。

新学術領域で行った観測研究を紹介する（図3-1-13）。7月の初めに集中して観測を行った。右上の図に示すよう、東方海上には黒潮続流という暖流が流れているが、それが親潮と出会う海域では、夏季に湿った下層大気が冷やされて下層雲ができやすい。その海域での航空機と船舶での同時観測を日本では初めて行った。また、ブイを増設して連続観測を可能にした。残念ながら漁船に切られてしまったり流されたりしたが、米国設置のものも加え、ブイ3基で9か月観測できたのは世界初だった。一方、黒潮続流沿いの水温前線の大気への影響を船1隻で観測すると空間の変化か、時間の変化か、分からなくなる。船3隻同時に水温前線を横切る観測を世界初で行った。これによって風向によって下層雲の出来方や高さが異なることがよく分かってきた。たった3日で50 kmも水温前線が動いたことを明らかにした。これまでの水温データの蓄積があっても、このような急激な水温前線の変化が、反映されていなかった。人工衛星のデータだけだと、こういったデータは捉えられず、やはり相補的な観測が重要だ。私自身は観測研究に直接携わっていないが、観測の研究者たちが考えた様々なアイデアがよく生かされた。

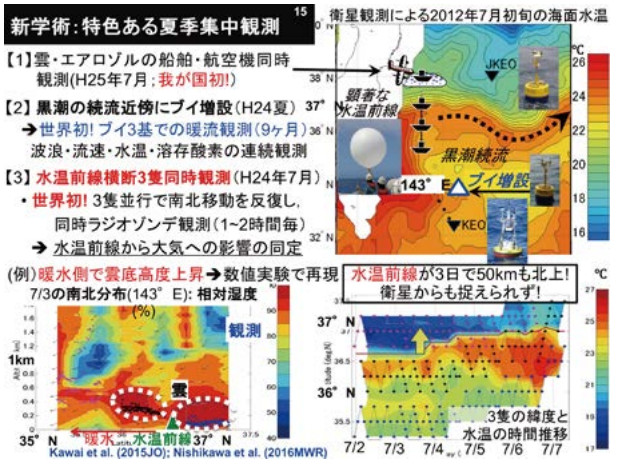



**図3-1-13　夏季集中観測による成果**

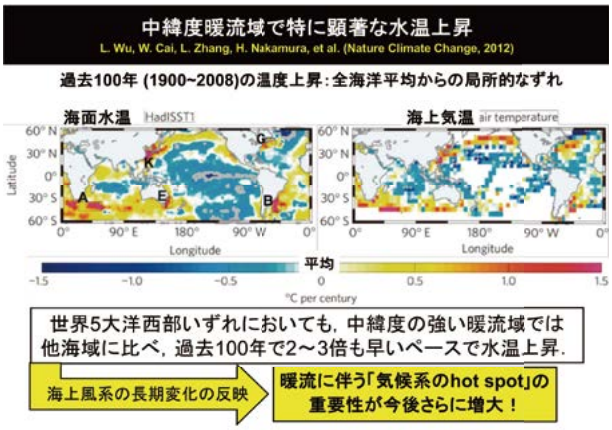



**図3-1-14　中緯度暖流域での顕著な温度上昇**

図3-1-14は温暖化に関する研究成果だ。温暖化と言うと一般の方は大気だけと思われることが多いが、海洋も温暖化している。黒潮やメキシコ湾流など、亜熱帯・中緯度の大洋の西側に暖流がある。図上で白く塗った海域が全球平均と同じ水温上昇ペースの海域だ。暖色系で塗られた中緯度の暖流域は、全球平均よりもはるかに速いペースで温暖化が進んでいる。特に日本付近の東シナ海や日本海は冬のモンスーンが弱くなってきていることも影響して、さらに顕著に温暖化している。

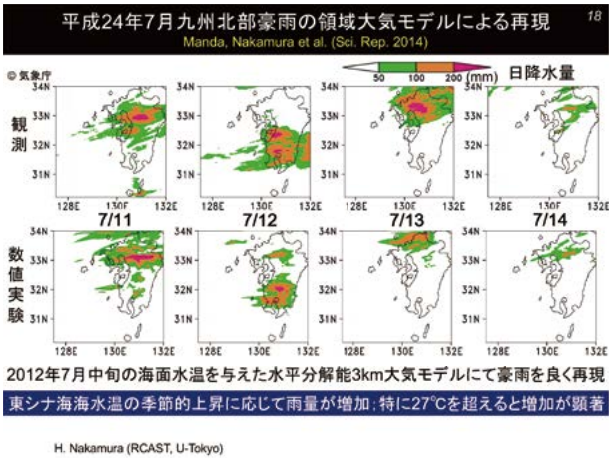



**図3-1-15　平成24年7月九州北部豪雨の再現**

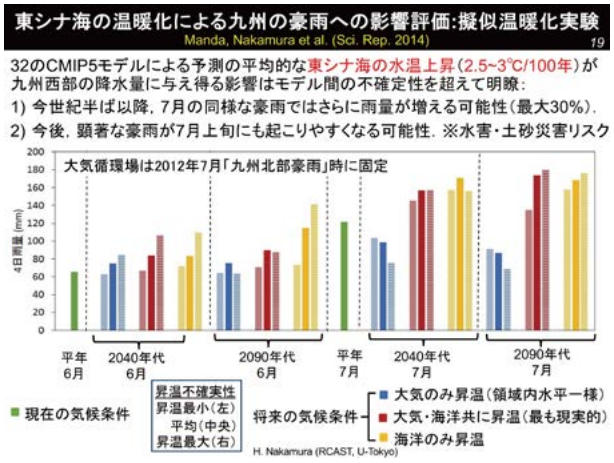



**図3-1-16　九州豪雨影響評価の疑似温暖化実験**

温暖化の影響の1つとして、雨の降り方が変わる。その意味で、今後の日本にとっては、黒潮に伴う気候系のホットスポットの影響がさらに重要になっていく（図3-1-15）。平成24年7月の九州北部豪雨では甚大な被害が出た。九州の北まで北上した梅雨前線に向けて、東シナ海を通って熱帯起源の水蒸気がどんどん流れ込んできて、線状降水帯ができた。レーダー観測により豪雨時の積算雨量などのデータが得られており、水平3 kmの分解能の領域大気モデルで数値実験したところ、これをうまく再現できた。

九州の豪雨は7月に多いのだが、6月の水温で再現するとどうなるだろう。それを調べる数値実験も行ったところ、雨量がかなり減った。7月に九州で豪雨が多い一つの大きな要因は、東シナ海が梅雨期を通じて急

速に暖まってくるからである。では、将来、さらに水温が上がると雨量はどのぐらい増えるのか。その影響を評価する議事温暖化実験も行った（図3–1–16）。

CMIP5とはIPCC第5次評価報告書に使われた数値気候モデルだ。その中から東シナ海で最小、平均的、最大の3通りの温度上昇を予測するモデル出力データを使った。それを観測された水温データに重ねた。大気でも同じように平均的な気温上昇も重ねて、評価した。

棒グラフで青、赤、黄が3本ずつ並べているが、それぞれの色は大気だけ温暖化させた場合、大気・海洋ともに温暖化、海洋だけ温暖化させた場合を表し、左から順番に、温暖化が最小の場合、平均、最大の場合と並べている。6月、7月の平年値に対して、2040年代、2090年代で算出した。青色の大気だけ昇温させた計算を見ていただくと、7月雨量は2012年の豪雨時よりも少なくなっていることがわかる。これは、海が温暖化する効果を入れないと、熱帯からの暖湿気流が相対的に下から冷やされてしまう影響が現れてしまっているのである。海も温暖化する効果を入れた赤色の7月の結果をみると、現実の豪雨時より雨量が約3割も増える。平成24年と同じような大気の循環がもし今世紀の終わり頃に起きると、さらに水害、土砂災害のリスクが高まってしまうと評価された。

模式図にすると図3–1–17のようになる。温暖化以前は日本の周りは夏でも熱帯ほどは海は暖かくなかった。熱帯からやってくる対流を起こすような不安定な気流は、日本近海で冷やされて不安定さを失った形で日本に流れてくるので、よほど条件が整わないと豪雨を引き起こす積乱雲に発達できなかった。しかし、現在、それから特に将来の夏は日本の近海は熱帯並みに暖かくなってきており、熱帯からの気流が不安定性を保ったまま日本列島に流れ込み、豪雨が起こりやすくなっている。この海の温暖化の影響は台風でも実は同じだ。つまり、台風があまり衰えずに上陸する、あるいは上陸寸前まで発達するという事例が、実際に近年起きている。

他にも、猛烈な台風の発生頻度が増えてくるだろうと予測されている。台風に伴った暴風、豪雨も酷くなるのだが、温暖化による海水膨張で海面の上昇も見込まれ、さらに高潮、高波による浸水被害がさらにひどくなると懸念される。

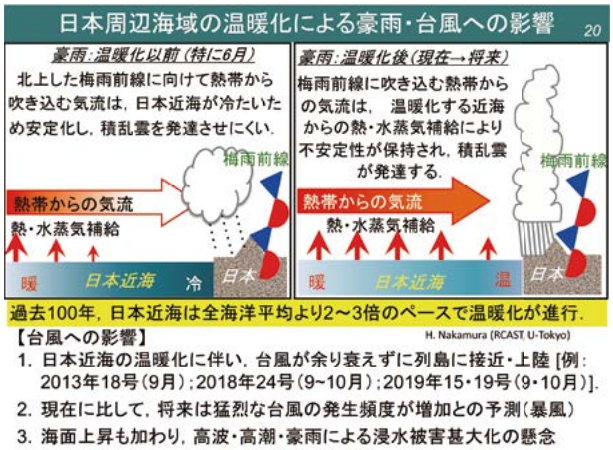



**図3–1–17　　日本周辺海域の温暖化の豪雨影響**

**気候系のホットスポット第2期**

2019年にホットスポットの第2期となる新学術領域が通り、計画研究の代表として推進している。（図3–1–18）

前述のように、気象庁は全球大気再解析を20年余り前から推進している。これまでは、とにかく時間的に均質なデータをつくるという観点から、最近の人工衛星で得られる高分解能の海面水温を与えずに再解析を行っていた。旧来型の観測データに基づく解像度の低い水温データを与えて続けていたが、それを近年の衛

星観測データに基づく空間解像度の高い水温データを与えて再解析をやり直した。すると、いろいろなことが見えてきた。水温前線と大気の前線がうまく影響し合って、海から大気への顕著な影響が出てくることなどを示せた（図3–1–19）。

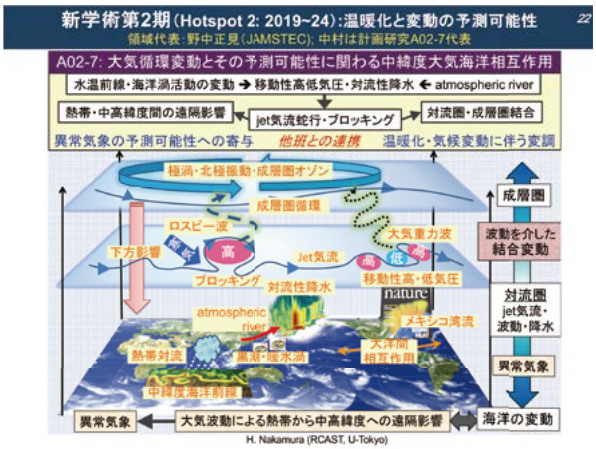



図3–1–18　気候系のhotspot第2期

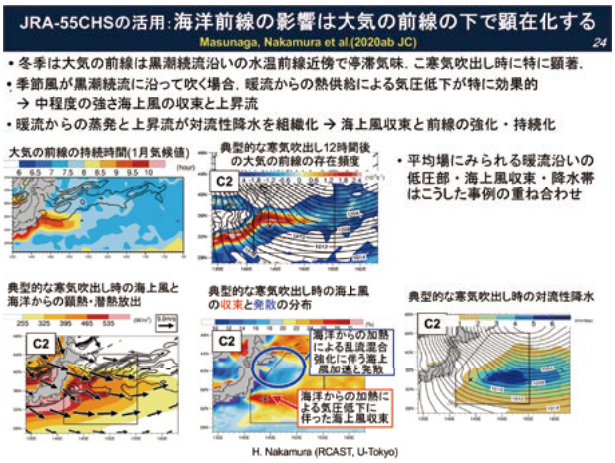



図3–1–19　大気の前線の下の水温前線の影響

**ベルモントフォーラム**

2016年から2020年までのベルモントフォーラムは、ドイツのマテイさんがリーダーで私がサブリーダーを務めた。日欧中6か国の国際共同研究で、遠隔影響に伴う予測可能性を評価するため、いろいろな現象を見た（図3–1–20）。

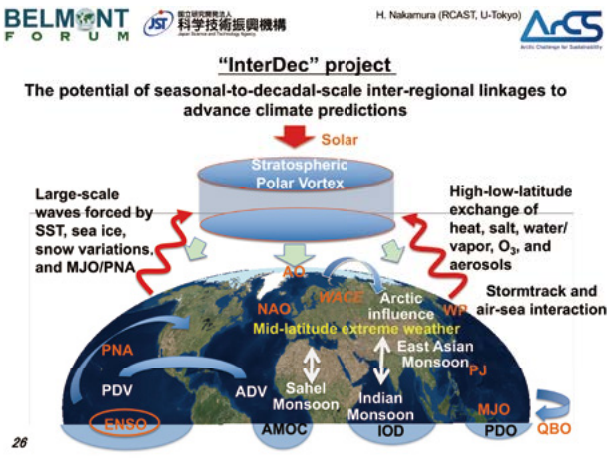



図3–1–20　ベルモントフォーラムでの研究概要

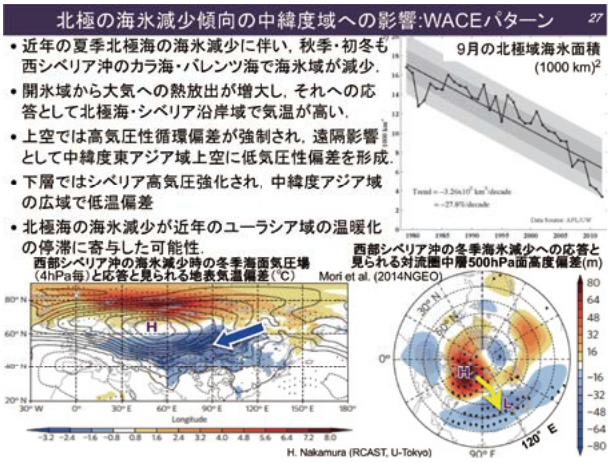



図3–1–21　WACEパターン

大きな成果を2つ選んで紹介する。現在北極域では非常に温暖化が進んでいる（図3–1–21）。特に、ロシア沖のバレンツ海、カラ海では海氷がどんどん減少している。それに伴って中緯度の冬、ユーラシアの冬が厳しくなっていることが指摘されている。この傾向を引き起こす大気変動WACEパターンに注目した。

これが、しっかりと海氷変動に連動して起きている様子が、実際の大気の中でも、モデルの大気の中でも表れていたが、大気モデルでは変動が過小評価されていることを見出した。その理由の一つは、海氷との結合が大気モデルでは表現できないからだ。現実では、シベリア沿岸にできる高気圧偏差とその下にある海氷

変動がお互いに影響し合っている。そうした相互作用を大気海洋結合モデルとして表現することがどうやら重要だとわかった。それでも、まだ過小評価気味なのだが、この論文は大きな反響があった。

熱帯のオーストラリアの夏のモンスーンに関する成果を紹介する（図3-1-22）。熱帯の変動にもかかわらず、海面水温変動と関係していないことが分かった。熱帯太平洋エルニーニョや熱帯インド洋のタイポールモード現象と地理的距離は近いのだが、それが全然関係していない。さらに、これが赤道を越えて北西太平洋にも影響していることも明らかにできた。つまり、オーストラリアモンスーンが活発な年には日本付近で冬の季節風が強くなって寒くなる。日本海側では降雪が増えることも分かってきた。海面水温とリンクしていないため、予測可能性を下げるほうに働く。つまり、不確定性要素になることも分かってきた。

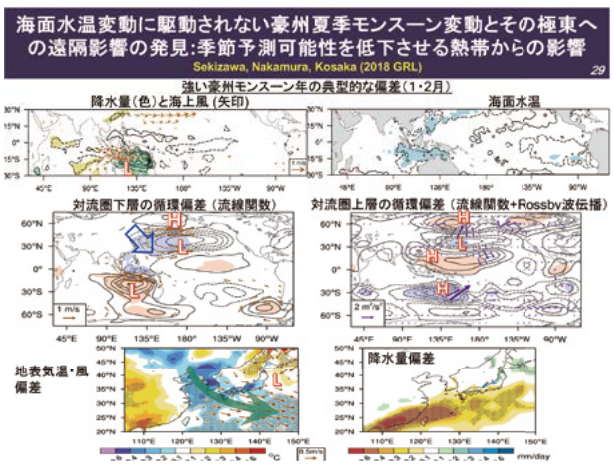



**図3-1-22　豪州夏季モンスーン変動の遠隔影響**

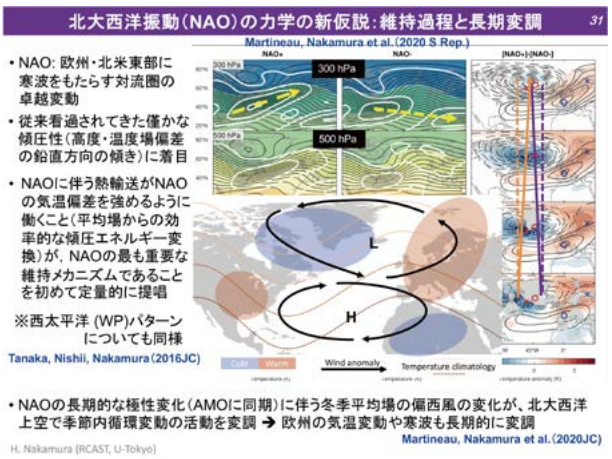



**図3-1-23　NAOの力学の新仮説**

我々は2016年から2018年まで、ノルウェーとノルパン（NORPAN）と名付けた2国間共同研究も行い、成果が挙がった。今後、2021年から2024年までの期間も文科省の北極研究加速事業ArCSIIの一環として、継続実施する予定だ。この共同研究での成果の1つをご紹介する。欧州・大西洋域で最も卓越する変動である北大西洋振動（NAO）は気温変動を伴うのだが、今まで、その重要性が見過ごされてきた。これは西太平洋の振動（WP）パターンでも同じで、新しい仮説を提唱できた。

現在、イスラエルとも連携した研究を行っている。高・低気圧を区別して擾乱の影響を評価できるという、今までになかった解析方法を編み出した。日本付近では真冬に高気圧性の渦の活動が顕著に抑えられていることが分かってきた。

**共創の場**

昨年から開始した「共創の場形成支援プロジェクト」について紹介する（図3-1-24）。我々は、「地域気象データと先端学術による戦略的社会共創拠点：Clim CORE」を実施している。大学、国研だけでなく、企業、気象庁、自治体も参画する産学官公の体制だ。副プロジェクトリーダー3名のうち2名は企業の方に務めていただいている。

他の研究支援よりも長い10年のプロジェクトである理由は、普通の研究開発だけでなく、この共創システムが10年後にはしっかりと自立的に動くようにするためで、その実現のための体制構築も含められている。

そのプロジェクトの背景にあるのは言うまでもなく、温暖化がどんどん顕著になってきており、自然災害リスクがどんどん増大していることだ。これに対して、各国はしっかり対応できる社会をつくろうとしている。我が国で言えば、気候変動適応計画をしっかり実行しようということになる。しかし、国土計画の基盤とできるくらいの日本域の高解像度の地域気象再解析データが存在しないという課題がある。欧州やオーストラリアで

は既に持っているが、日本だけが未整備という状況だ。まず、これを作成しないといけない（図3-1-25）。

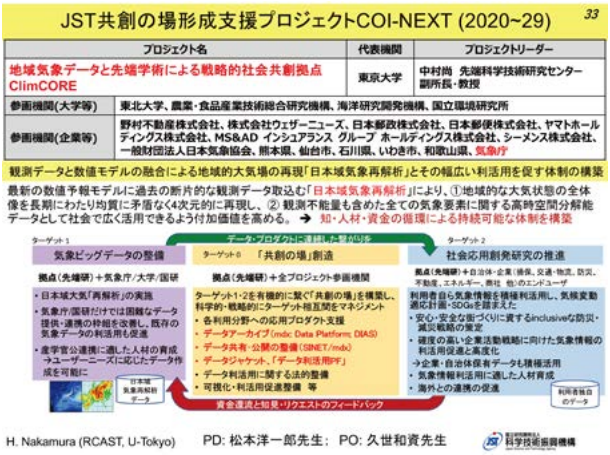



図3-1-24　共創の場でのプロジェクト概要

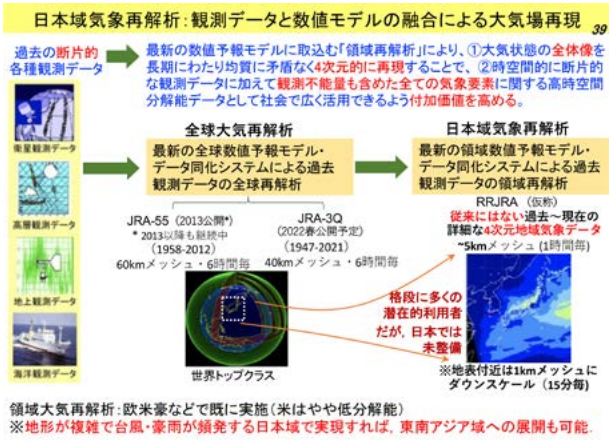



図3-1-25　日本域の気象再解析

ただ単に、作成できた、というだけでは駄目で、社会が広く利用できるような体制も併せて構築しなければならない。 SDGsの17の目標に関しては、特に気候変動の目標をしっかり抑えなければならない。そして、IoTを駆使し、データの利活用がスムーズに行える社会のシステムをつくることも目指している。

まず再解析データをつくるのだが、まずユーザーはどういう変数を、どんな出力間隔で欲しいのか、どのようなデータの形式で出してもらったらよいかといったことをしっかり聞き取りする。データを提供するだけではなく、さらに利用者が持っているいろいろな種類のデータを再解析データと絡めて、今までにない応用研究をどんどん展開していく。その器作りを進めている。

日本域の大気再解析においては、まずはグローバルに四次元的に再解析データをつくり上げる。それを境界条件に用いて、さらに日本域の地域レベルに水平解像度5 kmにダウンスケールした再解析データを作ることになる。過去の観測データを用いるが、観測データはどうしても断片的だ。衛星観測では多く見えていると思われるかもしれないが、実際のところ、取得できる変数は限られている。それらのデータを数値予報システムに入れて（同化し）、予報の初期場をつくり、この作業を積み重ねていく。同様にしてつくられたグローバルな大気再解析データは来年、気象庁が3代目のデータを公開する予定だ。それを境界条件として、さらに細かくした日本域の再解析を行う。

地域の気象というスケールになると、地形に強く制約を受ける。そして、日本で問題となる線状降水帯や台風だが、これを表すにも高解像度データが必要だ。さらにレーダーやアメダスの雨量を融合させた解析雨量も再計算して同化する。こうして精度を高め、使いやすく、価値の高いデータにしていく構想だ。活用としては日々の気象に大きく左右される農業や再生可能エネルギーなどの分野でのポテンシャルやリスクを評価する。過去の気象災害を起こした現象を再現して再予報も行う予定だ。 AIや深層学習が非常に有効で、これまでにない膨大な教師データの数になる。したがってAIから出てくるプロダクトの精度や価値が格段に高まっていくだろう。将来の地域気候シナリオについても、ダウンスケールに用いる領域大気モデルのくせがまだ分かってない。四次元のデータがないためだ。しっかりしたデータをつくれば、さらなる精度の向上につながる。さらに、海洋の再解析にもつなげていきたい。

**今後の展望**

私見となるが、今後の展望を述べる。グローバルから地域、メソスケールまでシームレスな大気や海洋の状態を再現する、予報する、あるいは将来予測をする。しかも大きなアンサンブルで行う。これが必要だ。

というのは、不確実性の評価が非常に大きな価値になるからだ。将来的には、領域再解析もいずれアンサンブルで行いたい。これによって付加価値の高い情報提供ができるようになる。

次に、本日、いくつかの成果を紹介したように、海洋は特に大事だ。ロスビー変形半径が大気よりも1桁小さいことに起因した課題をお話ししたが、海洋モデルの高解像度化は必須だ。海洋の再解析も望まれる。大気海洋結合モデルだけでなく、海面水温を境界条件としている大気モデル実験についてもいえる。 d4PDFや地域気候シナリオでも、大気モデルに与える海面水温データをしっかり細かくして、評価することが特に沿岸域は非常に重要となる。海面付近の気象状態をしっかり観測できる人工衛星や自動観測装置の開発、実用化も期待される。

ビッグデータのサイエンスが注目を集めているが、大気、海洋、気候分野は歴史的にその主要な分野だ。計算資源などのインフラ、プラットフォームの整備、拡充が急務だ。大気、海洋、気候分野がさらに学問的に発展すると、応用分野が広がり、社会に対しても役立つ。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：共創の場形成支援事業に関して、さらに教えてほしい。再解析でできた過去のデータを使って、今後の対策にも生かす計画や、近未来として50年ほど先まで見た研究を教えていただいた。実際にはいろいろな時間軸の予測があったが、その狙いについて教えてほしい。

A：再解析データは過去から現在までの大気の状態を再現したものだが、大前提として、そのまま直接的には将来の予測には使えない。間接的に再解析データを使った再予測を行うことは可能だが、20世紀にまで遡ると海面水温やレーダー雨量、衛星データなどの様々なデータの制約がある。

将来の時間軸はIPCCの予測シナリオを用いるが、それも幾つかのアプローチがある。

1つは、紹介したような地域気候シナリオがつくられるので、それにさらに磨きをかけるような使い方だ。ダウンスケーリングするモデルのくせをさらにしっかり再解析データを参照して評価できるようになれば、それに基づいてさらに地域気候シナリオの確度を上げられるようになる。それぞれのCO2の排出シナリオによっても当然変わっていくが、情報として出すことができる。

もう一つが、疑似温暖化実験と呼ばれる手法である。九州北部豪雨やが将来の温暖化した条件でどうなるかという研究を紹介した。今の状況では将来の豪雨事例がどうなるという直接的な予測はできない。しかしながら、現実の特定の現象に限って、それをもたらしたのと同じ循環場が再現された場合を気温や水温の温暖化予測を足し込んでシミュレーションすることで、ある意味で予測といってよい見積もり計算が行える。たとえば、過去に起きた豪雨がまた起きたとした場合、そのときに温暖化シナリオに沿って海と大気がこの数値だから、どのぐらい雨が増えるだろうといった計算ができる。このような計算を行うには、まず過去の再現を行い、その検証を行うことが大切だ。また、再予測の初期値として用いるためにも、再解析データは極めて有用である。

幾つかこういったシミュレーションを行うと、どのぐらいのリスクになるか、評価できるようになってくるので、再解析データは、基盤として広く使っていただきたい。さらに、過去の豪雨での雨の降り方はどうだったか、気温の振れ方はこのくらいだったという頻度分布も各地域スケールで描ける。過去に、このくらいの確率でしか発生していなかった豪雨事例が、温暖化した将来では、このぐらいの確率で起こるようになる、といったことも即座に分かるようになってくる。

特に風や気温に関して、かなり精度はよい。解析雨量も再計算することにしている。その結果を使っていただければ、雨もかなり精度よい頻度分布が得られるようになるので、組み合わせていただくことが一番大事だ。

Q：気候変動の将来シナリオで4℃や2℃、1.5℃の上昇シナリオごとに、このぐらいの災害が起きて、そ

れによる経済損失は幾らになる、という見通しは、日本の国にとってかなり重要な判断を与えるものになってくる。現在の解析結果である程度考え方を示すことができるか。

A：残念ながら今の私の知識では正確な回答ができない。これから経済の専門家にいろいろなデータを示して、評価していただく仕事をやらないといけない状況だ。例えば台風や豪雨でも、先ほど説明したようなメカニズムが働くと、現在よりも相当甚大にリスクが高まる。

異常気象分析検討会での公式見解として、例えば西日本豪雨、あるいは令和2年7月豪雨について、雨量の10%程度は温暖化によって上積みされていると示した。そして、紹介した我々の試算では九州北部豪雨が例えば2090年代にもし起きると、さらに2割から3割雨が増える。10%というと、あまり大したことがないように一見思われてしまう数字だが、実際に災害が起こる閾値を超える効果がある。山崩れ、崖崩れ、堤防を越える河川氾濫といった災害はある閾値を超えた瞬間に起こる。例えば400mmの雨に耐えられた斜面があったとして、そこに40 mm加わるともう耐えられない。

雨がこれだけ降ったらどのぐらい斜面崩壊のリスクが増えるのかといった課題は、例えば土木工学や土壌の専門家、関係者の方が行っている。それに対して、我々は基礎データを提供できる。それで評価をしていただいて、そこにさらに経済の方に入っていただいて、こういったリスクが増えたら、損失はこのぐらいになる、といった試算は、恐らく過去の災害時の値から出せると思われる。そういった共同作業が、これから分野を超えて、ますます必要になってくるのではないかと思われる。

C：分野を超えた議論が今後さらに重要になってくるだろう。国全体の政策的として損害を防ぐために、例えば、堤防をかさ上げするのが安いのか、発電所を造り直すのが安いのか、といった議論まで、経済や社会科学の専門家を入れて行っていかないと、うまく進んでいかない。

A：賛成する。

# 3.2 防災・減災のための雲科学研究

荒木 健太郎（気象庁気象研究所）

※講演日：2021年9月24日

## はじめに

対外的な活動をする際には、雲研究者という肩書を名のっているが、本日は雨や雪などの最近の研究を紹介する。私はサイエンスコミュニケーションの研究者ではないのだが、アウトリーチの取組も少し紹介する。

簡単に自己紹介すると、気象庁の気象大学校を出た後、現場の地方気象台に出て、予報や注意報・警報を発表していた。気象学は防災・減災が非常に重要な学問であることを実際の現場に出てから嫌というほど目の当たりにしてきた。その中で、予測が難しい現象がまだ非常に多くあることを強く感じた。気象災害をもたらす雲の仕組みを調べ、監視技術、予測技術など防災気象情報を高度化し、防災・減災に貢献するための活動をしている。

特に災害に対する気象庁の対応の一つとして、水害のような顕著な現象が発生したとき、私が所属する台風災害気象研究部では、すぐに情報発信するため、現象の解析を担当している（図3-2-1）。

今年の夏も豪雨が幾つかあり、報道発表した。今年8月、梅雨が明けてからも前線が停滞して、九州中心に大雨特別警報が出る大雨があった。その実態解明や後で説明する線状降水帯など、一つ一つの事例を調べて、高精度予測につなげたい。そういった研究活動を進めている。

雲や天気の魅力に関しても、SNSを中心に情報発信している（図3-2-2）。これは後半のサイエンスコミュニケーションの話で紹介する。

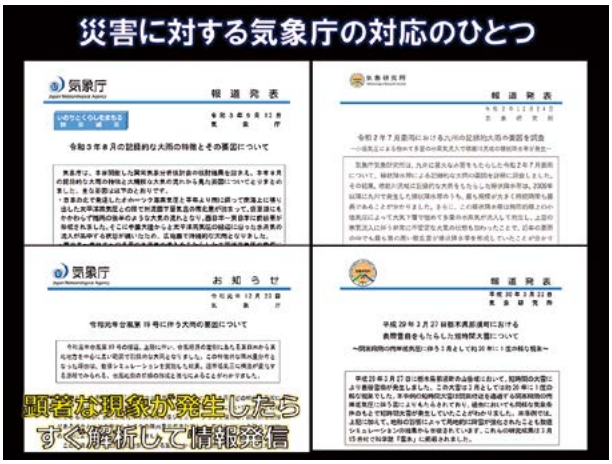



図3-2-1　災害に対する気象庁の対応のひとつ

図3-2-2　雲や天気の魅力を発信

## 雲の形成メカニズム

そもそも雲とはどういうものか、簡単にお話する（図3-2-3）。雲は、大気中に浮かんで見えている、無数の小さな水滴や氷の結晶の集合体と定義されている。重要なのは水だ。空気中にある水蒸気が凝結や昇華して、雲の粒が生まれる。この粒がさらに水蒸気を吸って、昇華や凝結で成長して大きくなると、上空で雪や雨として落ちてくる。夏でも上空では雪として降ってきて、途中で融けて雨になって降ってくる。

このときの空気の特性、簡単に説明しておく（図3-2-4）。空気の塊のパーセルは、気温が高いほど多く水蒸気を含むことができる特性がある。例えば暖かくて湿った空気が入ってきたら、海などから多くの水蒸気が供給される。それが上空に持ち上げられると、断熱冷却して、温度が下がる。すると、この空気の塊は飽和

水蒸気量が少なくなるので、水があふれてしまう。このあふれた水が雲になっている。この空気がどのぐらい水蒸気を持っているか調べることが重要になってくる。

図3-2-3　雲とは？

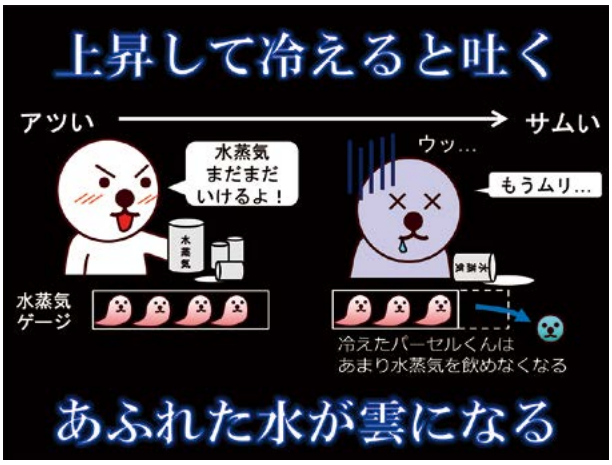



図3-2-4　あふれた水が雲になる

この空気を持ち上げるときの運動と雲の発達について端的に示す（図3-2-5）。まず、低い空にある空気が持ち上げられる。最初は乾燥断熱的に持ち上げられるが、途中で飽和してからは、凝結しながら上昇していく。潜熱を放出しながら上っていくことになるので、乾燥断熱より気温の下がり方が緩めになる。ある程度の高さまで持ち上げられると、周りの大気に比べて、持ち上げられた空気のほうが気温が高くなる。すると、浮力が正になり、自発的に持ち上げられるようになる。図のなかで、緑の線で書いた範囲では、下の空気を上に持ち上げる何らかのメカニズムが必要になってくる。その高さを自由対流高度と言う。その高度辺りまでは積雲、いわゆる綿雲みたいな雲だが、その高さを超えると雄大積雲に成長していき、最終的に発達できる限界の高さまでいって、積乱雲になる。

よく言われる大気の状態が不安定だが、主に2パターンある（図3-2-6）。上空が低温化する場合と、低い空に水蒸気が流入するような場合だ。特に上空が低温化した場合、積乱雲が発達できる限界がより高くなる。一方、下層に水蒸気が大量に流入してきている場合には、雲ができる高さも、自由対流高度も低くなる。少し持ち上げられただけでより発達する状況になる。

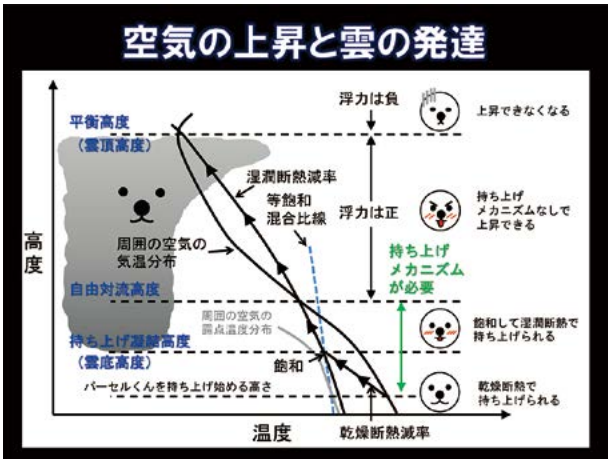



図3-2-5　空気の上昇と雲の発達

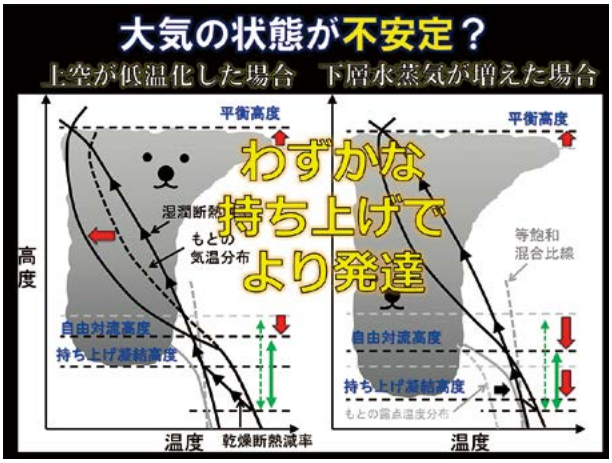



図3-2-6　大気の状態が不安定？

**雲物理過程**

雲の中で起こっていることは雲物理過程と言われ、0℃を境にして、水が関係するプロセスと氷が関係するプロセスとに分けられる。前者は暖かい雲、後者は冷たい雲となる。すごい多くの種類の粒たちが大量にいるので、シミュレーションするのもかなり大変だ。気象のシミュレーションでは、この雲の物理の部分が最も計算コストかかっている。細かい物理を全て計算するわけにいかないので、割とパラメタリゼーションを入れて、かなり簡易化したものにしているのが現状である。

**図 3-2-7　　雲物理過程**

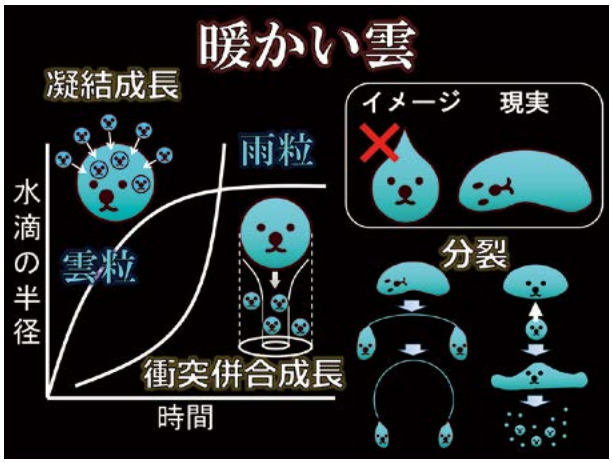



**図 3-2-8　　暖かい雲**

暖かい雲、水のプロセスでは、水の粒が小さいうちは主に凝結成長過程になる。水の粒が水蒸気を吸って大きくなり、雲粒が雨粒に変化する。この過程は体積が大きくなるほど成長速度が小さくなり、だんだん飽和する。そして、大きさの異なる水滴同士が落下していく中で衝突併合していき、指数関数的に急成長する。大きくなり過ぎると空気抵抗を受けて分裂する。水滴、雨滴を球形にしたときの半径を相当半径と言うが、それが最大で約 3 mm になる。

次に、冷たい雲、氷のプロセスについてお話しする。よく夏の空に見かけるような積乱雲の高いところはマイナス数十℃とかなり低温な環境になっている。高いところのもわもわして見える滑らかな雲の中はほぼすべて氷でできている。氷の結晶が水蒸気を吸って昇華成長していく。

積乱雲や雲の中で上昇気流が多くあるような雲だと、過冷却の水滴がたくさんある。これは、零度以下でも凍らず、液体のまま存在している雲粒だ。そこに上空から降ってきた雪の結晶がくっついた瞬間に凍る雲粒捕捉成長というプロセスが上昇気流が強い雲ではよく起こる。結晶に粒々がついて、回転しながら落下することで、丸っとした、あられのような形になっている。

図 3-2-9 の左下のように複雑な形をしている結晶が多いと、併合成長というプロセスで、絡まっていきボタン雪のようになって降ってくることがある。夏の間は地上の気温が高いので、融けて雨になって降ってくる。冬には雪が融けずにそのまま降ってくる。

**図3-2-9　　冷たい雲**

**雲の分類**

雲は十種雲形と呼ばれる10種類に分けられる。本日は特に積乱雲についてお話する。雪に関して、乱層雲も紹介する。十種雲形のフローチャートを著書に書いているので、ご覧頂きたい。たとえば「すごすぎる天気の図鑑」にも、フローチャートを掲載している（図3-2-11）。これを覚えていると、空を見上げた時に浮かんでいる雲の名前がわかるようになる。

**図3-2-10　　十種雲形**

**図3-2-11　　十種雲形フローチャート**

**積乱雲**

積乱雲は、気象災害の原因となる代表格の雲として知られている（図3-2-12）。特にゲリラ豪雨と呼ばれる局地的大雨や、最近よく聞く線状降水帯という集中豪雨をもたらす雲が、積乱雲である。竜巻や突風も積乱雲によってもたらされている。まずは積乱雲がおおよそ、どういう形になっているか見ていく。

大気の状態が不安定で、地上が暖かくて空が冷たいとき、水蒸気を含む空気が何らかの力で持ち上げられて雲ができる。さらに持ち上げられて自由対流高度を超えると、自発的に雲が成長できるようになり、どんどん上に上っていく。限界まで発達した雲は、それ以上は上に行けなくなって横に広がっていく。これは鍛冶のかなとこに似ているのでかなとこ雲と呼ばれている。

この頃には雲の中で構成粒子、いわゆる雪や雨などが成長して、中で粒子が落下するようになる。このときに雪の粒子が昇華や、融解して雨になった粒子が蒸発して、潜熱を吸収し、中に相対的に冷たい空気ができる。

これが周りよりも重いので落下するので、雲の中に下降気流ができる。この下降気流が上昇気流を打ち消して、だんだん雲が弱くなっていく。これが地上に達すると周囲に広がっていく。周囲が非常に湿潤な環境な場合、周りの暖かくて湿った空気を持ち上げて二次的な積乱雲が発生する。この現象は、夏場だと関東でもよく起こる。実際の積乱雲は単純ではない。複数の積乱雲が近接して発生・発達もする。

積乱雲によって数十 mm 程度の雨が短時間でもたらされる現象を、気象庁では局地的大雨と呼んでいる。世間ではよくゲリラ豪雨と呼ばれている。ゲリラ豪雨という言葉は、実は歴史が古くて、1950年代ごろ、最初は気象庁の人が言っていたらしい。しばらく眠っていたが、2000年代にメディアの方が使い始めて、復活してきた言葉だ。

最近、ゲリラ豪雨の言葉が定着してきた感があるのだが、何でもかんでもゲリラ豪雨と言うと、気象の専門家にいい顔をされない。ゲリラという言葉は、予測できない、突然発生するといった意味合いがある。予測が難しい現象はあるのは確かだが、予測できているものもある。

局地的大雨が発生するメカニズムや、その実態解明や予測ができるのか説明していく。積乱雲が発生するために、下層の空気を持ち上げる上昇気流が必要だ。その上昇気流の成因は前線や山など多くある。大気の状態が不安定なだけでは積乱雲は発生できない。大気下層の空気を持ち上げる何らかのメカニズムも必要だ。それはConvective Initiation（CI）と呼ばれている。日本語で定着した訳語がないので、私の著書では「対流の起爆」と表現している。前線や台風が接近しているときの山による強制はかなり規模の大きな現象で、比較的早い段階から現在の技術でも予測できる。そのため、最近はよく、大雨の何日か前に気象庁で臨時の記者会見して、注意喚起できている。一方、積乱雲単独の現象や、線状降水帯に関しては、天気図に現れるような大規模な強制や、下層の持ち上げのメカニズムそのものの観測が難しい現状だ。発生前の予測が相対的に難しい。

図3-2-12　気象災害の原因

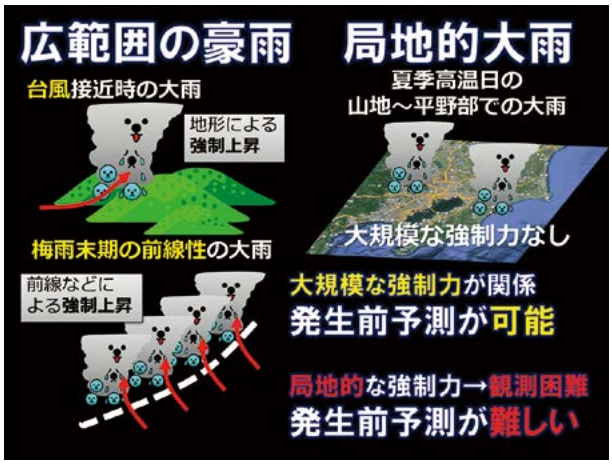



図3-2-13　広範囲の豪雨と局地的大雨

**予測困難な局地的大雨のCIプロセス**

特に予測が難しい局地的大雨のCIプロセスについて、関東の事例を紹介する。夏場に晴れていて気温が上がると、長野辺りに熱的低気圧、ヒートローと呼ばれる低気圧ができる（図3-2-14）。気温が高くなるので、空気が軽くなって上昇し、そこに向かって海から大規模な海風が入ってくる。海上の空気は陸上に比べ湿っているので、水蒸気が供給される。それが山岳域の斜面で持ち上げられ、積乱雲の発達がよく起きる。今年の夏もよくこういった上空になっていた。

こういう原理があると分かってはいるが、まだ水蒸気が鉛直積算でしか見られていない。水蒸気が増えていることは確かだが、この積乱雲の発生・発達の予測や現象の理解には、どの高さでどのぐらいの水蒸気が入っ

ているか調べないとよく分らない。こういったよくある積乱雲に関しても、現状でもまだ分かっていないことが多い。

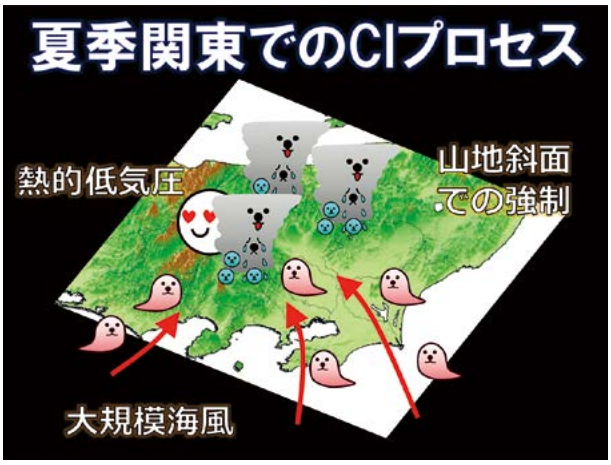



図3-2-14　夏季関東でのCIプロセス①

図3-2-15　夏季関東でのCIプロセス②

もっと難しい現象もある。大規模な海風ではなく、もう少し小規模な海風で、特に関東平野は東京湾からの風があり、茨城県からも北東風が入ってきて、風がぶつかりやすい（図3-2-15）。東京湾沿いに局地的な前線ができたり、前線同士が交差したりする。そういう現象が起こったときに水蒸気が海から供給されて、突然発生する積乱雲がある。これは非常に予測が難しい積乱雲だ。

海風同士のぶつかり合いや、海風の前線、すごく湿っている場合には、房総半島の小高い山で持ち上げられて積乱雲が発達することもある。

さらに難しいCIプロセスもある（図3-2-16）。先ほどの状況に加え、さらに山でも積乱雲が発達して、その中で発生した下降気流が地上に達して広がってくるケースで、ガストフロントと言われる。その先端部分でも空気が持ち上げられて積乱雲が発達する。既存の前線があると、それとぶつかって新しい積乱雲が発生・発達することもある。こういった局地的な前線の相互作用は非常に難しい。この表現には、積乱雲そのものもしっかり解像して計算しなければならず、予測がきわめて難しい。

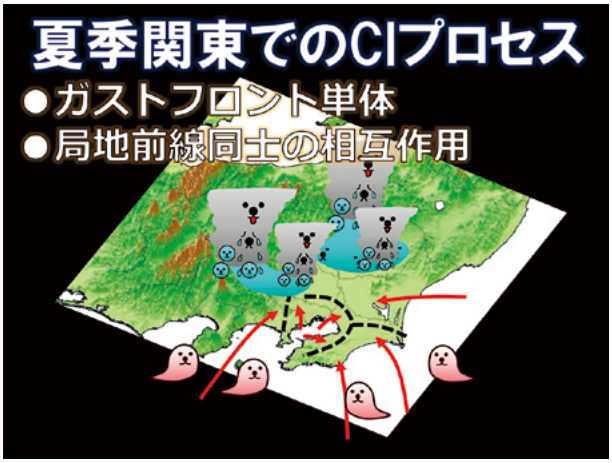



図3-2-16　夏季関東でのCIプロセス③

**地上マイクロ波放射計を用いた大気熱力学場推定手法の開発と応用**

さまざまに重要な要素はあるが、まず水蒸気の実際の様子を調べる必要がある。それについて、地上マイクロ波放射計を用いて気象研で実施している水蒸気観測を紹介する（図3-2-17）。

**図3-2-17　　マイクロ波放射計**

積乱雲の監視予測の技術を高精度化するためには、発生する前の環境を理解する必要がある（図3-2-18）。積乱雲の寿命が大体30分から1時間と、非常に時間の短い現象だ。気象レーダーは、雪や雨粒のように、ある程度大きくなったものしか見えない。レーダーで見えるのは成熟期辺りからだ。雲が発生・発達して粒子が成長する前は、まだ見えていない。

気温と水蒸気量の鉛直プロファイルが、大気の状態を議論する上で重要だ（図3-2-19）。この大気の状態を推定するための観測で、一番確実なのはゾンデ観測だ。つくばの高層気象台で1日2回、朝9時と夜9時にセンサーをつけた気球を飛ばしている。12時間間隔なので、積乱雲の寿命の30分から1時間よりも長く、積乱雲の発生直前の変化などを把握するのは難しい。やはり積乱雲発生前の環境場を高頻度かつ高精度に求める技術が必要だ。



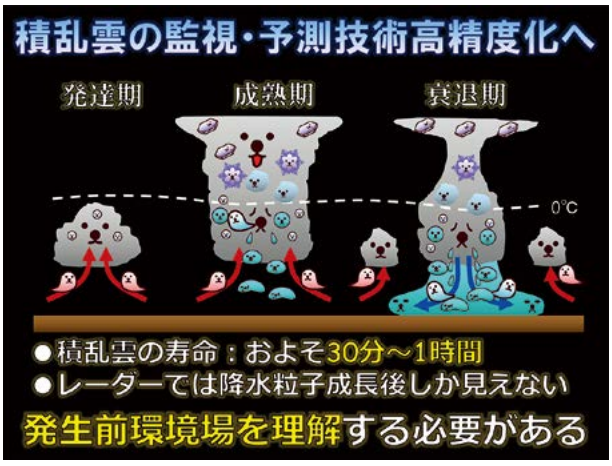



**図3-2-18　　積乱雲の監視予測技術高精度化へ**

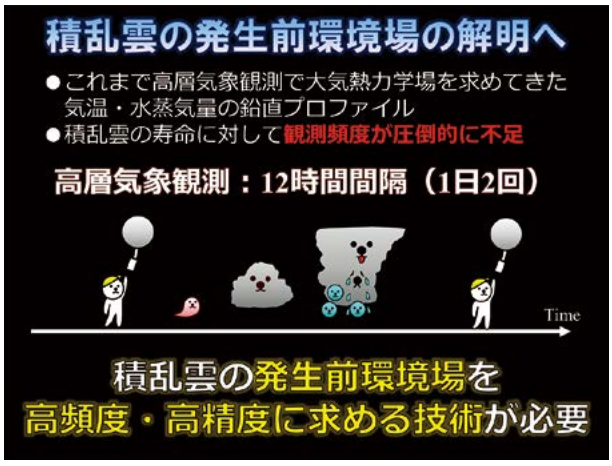



**図3-2-19　　積乱雲の発生前環境場の解明へ**

**マイクロ波放射計でできること**

このマイクロ波放射計は電磁波の受信機だ。レーダーのように電波を出して、跳ね返ってきたものを処理するのではない。複数の周波数帯で雲や大気が出しているマイクロ波を受信する。数十秒から数分ぐらいの間隔で高頻度に放射観測できる。

マイクロ波放射計が測っている周波数帯の吸収特性を表わしたのが図3-2-20である。特に水蒸気に感度がある20～30 GHz帯と、酸素に感度がある50～60 GHz帯の放射強度を観測している。

放射の強さは、気体分子の濃度と気圧、温度に関係している（図3-2-21）。

図3-2-20　複数周波数を用いるメリット

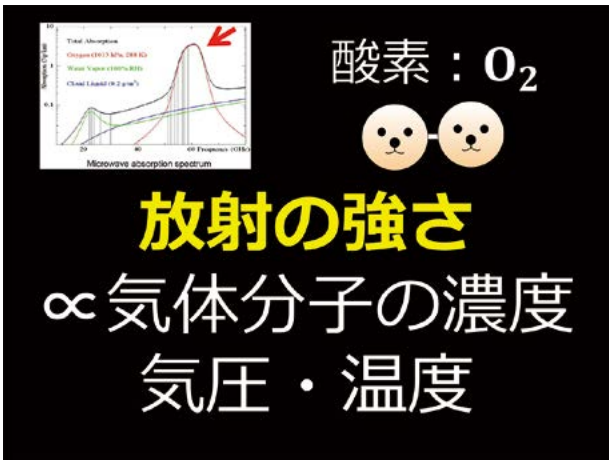



図3-2-21　放射の強さ

その特性から、大気中の酸素濃度を一定と仮定すると、大気の温度のプロファイル、つまり、気圧高度に対する温度が分かれば、その酸素を吸収する波長帯での放射強度の見積もりができる（図3-2-22）。これを前方計算と呼んでいる。

水に関しても、液体、気体いずれでも特性が分かっている。大気の温度、水蒸気、雲水の高度分布が分かっていれば、放射計算により、20～30 GHz帯の前方計算ができる。

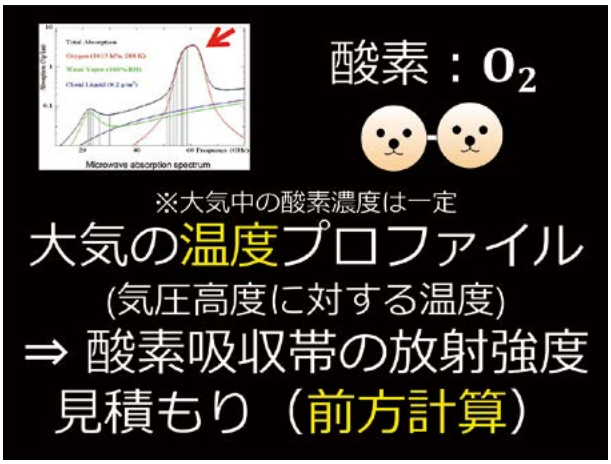



図3-2-22　酸素吸収帯の放射強度見積もり

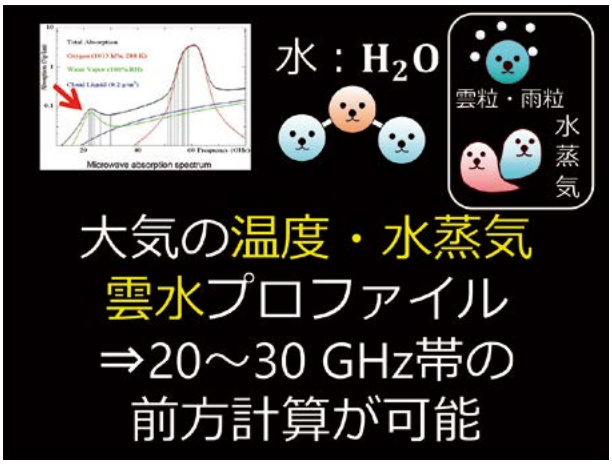



図3-2-23　雲水プロファイル

**観測データをもとにして逆問題を解く**

気温や水蒸気量のプロファイルがあれば放射計算ができるが、我々が必要なのはそのプロファイルである。それには、観測データを基に逆問題を解く必要がある。

この解法として世界で広く使われている従来手法はゾンデの高層気象観測の気候値などからニューラルネットワークで推定している。これは特に上空では著しく精度が低下する（図3-2-24）。それに対して、気象研内のチームで鉛直１次元変分法のデータ同化という手法を開発している。気候値ではなく、天気予報でも使っている数値予報モデルの結果をまず第一推定値として与える。数値予報モデルは特に水蒸気や大気下層の気温の分布などを正確に予測するのが難しい特性がある。上空での誤差はもともと小さいので、モデルが苦手としている大気下層の場をマイクロ波放射計を使って、改善する。

精度を検証した結果が図3-2-25だ。左が気温で、右側が水蒸気量である。値が大きいほうが誤差が大きい。赤い線の従来手法のほうが誤差が大きいことが見てわかる。特に気温に関して、高度１ km以上では誤差が非常に大きい。一方、NHMと書いてある黒い線が、シミュレーションしたモデルの結果だ。青い線が新しい手法だ。新しい手法は高度１ km以下の気温も改善していて、水蒸気に関しても一番いい結果で、最も現実的な解が得られるようになっている。

こういった基礎技術開発の研究により、まず高頻度・高精度な気温水蒸気の場を推定できるようになることが示せた（図3-2-26）。大気の状態を観測する手段が、今までのゾンデでは12時間間隔だったが、数十秒から数分間隔と細かくできるようになる。精度はゾンデと同程度とまではいかないが、積乱雲の発生前の環境が分かる。

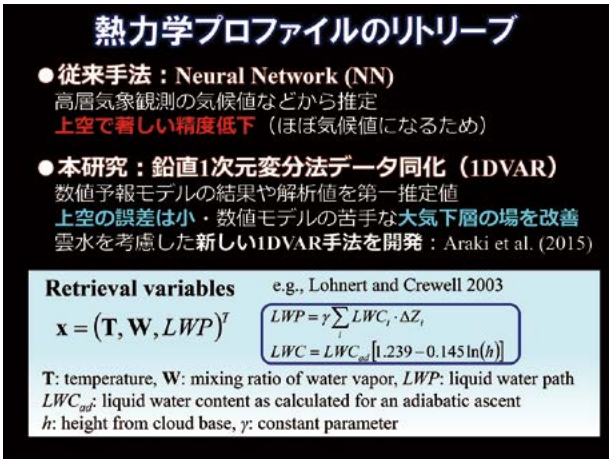



**図3-2-24　熱力学プロファイルのリトリーブ**

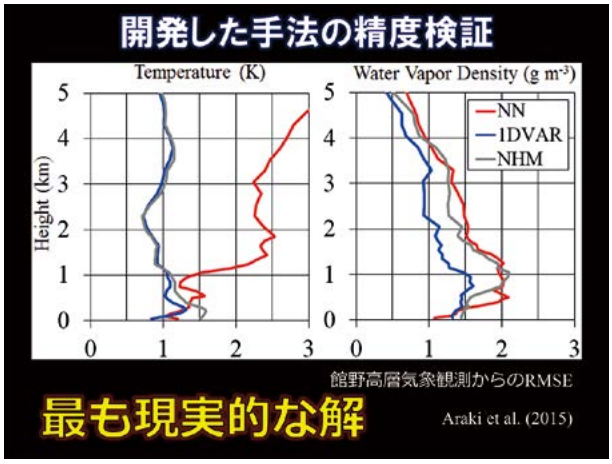



**図3-2-25　開発した手法の精度検証**

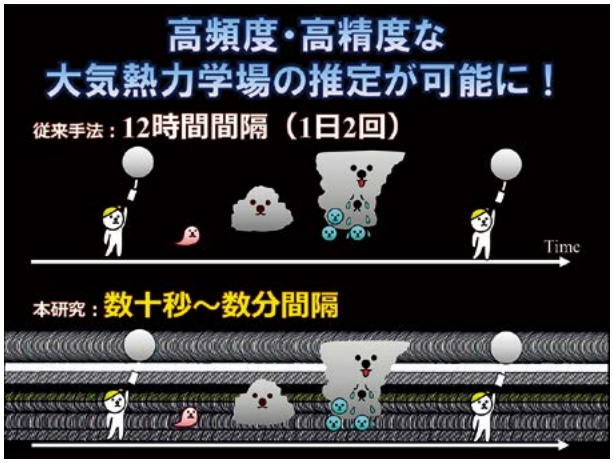



**図3-2-26　高頻度・高精度の大気熱力学場推定**

**マイクロ波放射計を用いた積乱雲の研究**

この放射計を用いて、さきほど3パターンあるとお話しした、関東の山のほうでの積乱雲の発生についての研究を紹介する（図3-2-27）。この観測は、3年分、夏に奥多摩で実施した。そこから大気の状態がどう変化するか調べた。グラフの赤い線が不安定度を表わしている。朝9時はあまり不安定ではないが、昼に気温が高くなり、海から水蒸気も入ってきて、不安定の度合いが増していく。夕方にかけて不安定な状態が持続して、積乱雲が発達するとともに、徐々に不安定が解消されている。降水と積乱雲が発達するピークが17時頃だ。この新しい計測器によって、海から入ってきた風が、高度約1.5 km以下で気温が上がり、同時に水蒸気が供給されて積乱雲が発達しているという重要な知見がわかった。

この放射計で竜巻が発生する直前の環境も捉えた事例がある（図3-2-28）。2012年に、国内最大級の強さの竜巻がつくばで起こった際、すぐ近くで観測できていた。解析した結果、モデルのシミュレーションでは不安定を過大評価していた。先ほどの手法を適用すると現実的な結果が求められ、竜巻が発生する約1時間半前から急激に大気の状態が不安定化していたことが明らかにできた。

この放射計は冬場の積乱雲にも応用できる（図3-2-29）。関東では冬場の積乱雲は落雷の原因になることがある。水蒸気の量そのものは冬はそもそも少なく、場としては減少していた。気温分布などを見ると、地上の気温が上がって、上空の気温が低下していた。上空に寒気が流入したことで、不安定化して、積乱雲が発達したことも明らかにできた。

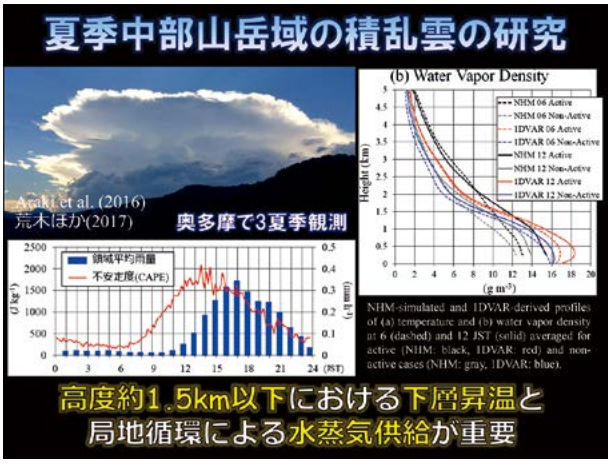



図3-2-27　夏季中部山岳域の積乱雲の研究

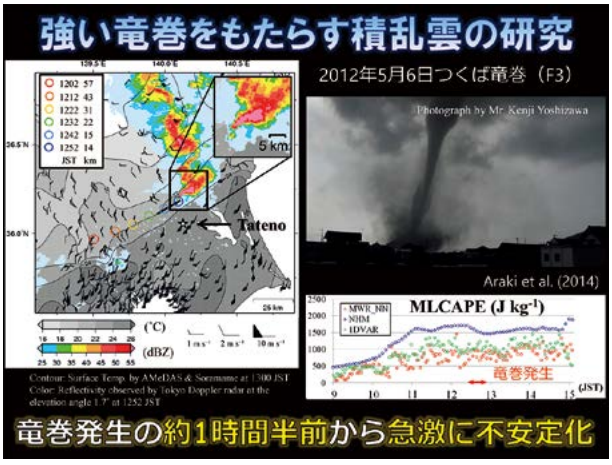



図3-2-28　強い竜巻をもたらす積乱雲の研究

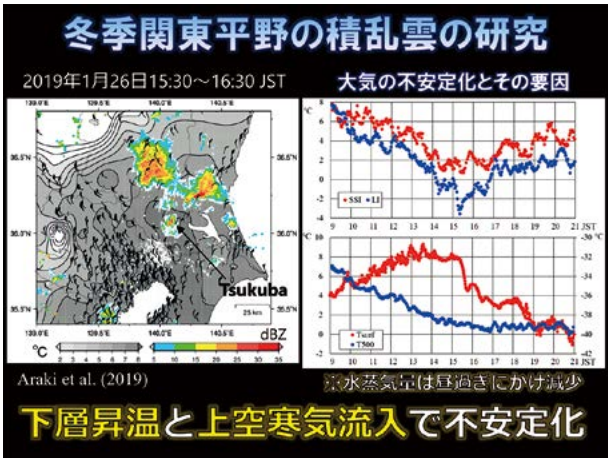



図3-2-29　冬季関東平野の積乱雲の研究

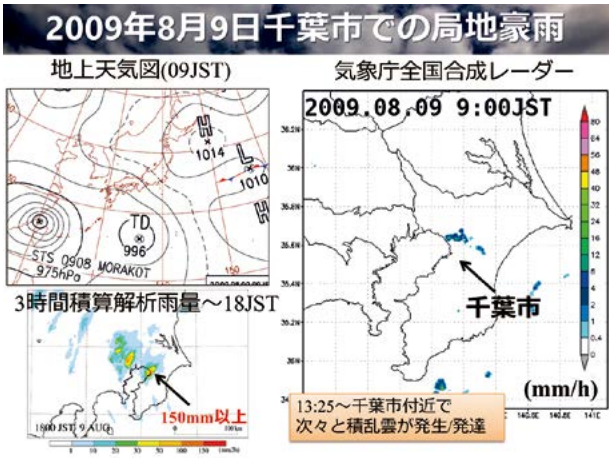



図3-2-30　2009年8月9日千葉市での局地豪雨

**地上観測データを生かした局地豪雨の研究**

ここから、気象台で関東の予報をしていた頃の事例を紹介する。ゲリラ豪雨と呼ばれる現象が2009年に千葉市で起きた。天気図を見ると、大規模な強制力としての前線などは全くない中で、突然に積乱雲が発生・発達して、千葉市や東京で大雨をもたらした（図3-2-30）。3時間の積算雨量150 mm以上の場所がすごく局地的に分布していて、この時は千葉駅が冠水してしまった。

気象庁の地上気象観測ネットワークとして「アメダス」がある。その分布を描いたのが図3-2-31だ。おおよそ21 km間隔で設置しているが、積乱雲が発生・発達していた瞬間を見てみると、ほとんど「アメダス」の空白域中に入ってしまっている。積乱雲を観測するには「アメダス」の分布では不十分だ。

そこで、環境省の「そらまめ君」というネットワークに目をつけた（図3-2-32）。これはそもそも大気汚染物質を監視するための仕組みだが、気温や湿度、風も観測している。特に都市域で約4 km間隔で観測している。このくらい高い分解能の観測だと、積乱雲の現象が分かるようになる。

図3-2-31　地上観測網アメダス

図3-2-32　大気汚染監視システムそらまめ君

「アメダス」に「そらまめ君」を加えてと、ちょうど千葉市付近に、東京湾沿いに発生・発達した海風前線と、北東方向に延びた局地的な前線がわかる（図3-2-33）。ちょうど前線が交差して、風が3方向から集まってくる、トリプルポイントと呼ばれるものがあることが分かった。

こういった実態解明を、シミュレーションに生かしていきたい。図3-2-34の左側が実際に降った雨、右側が当時の数値予報だ。ほとんど表現できていなかったことが一目瞭然だ。

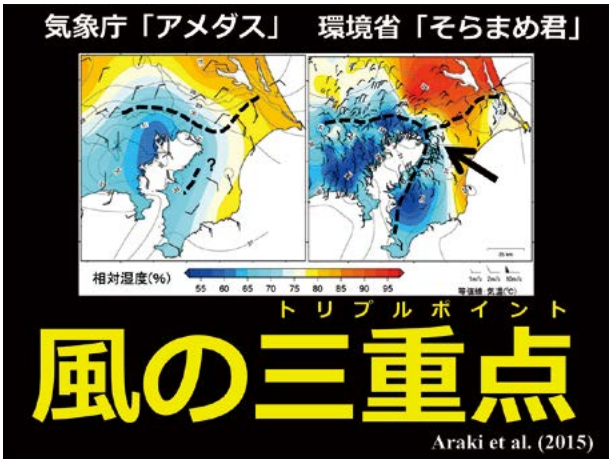



図3-2-33　風のトリプルポイント

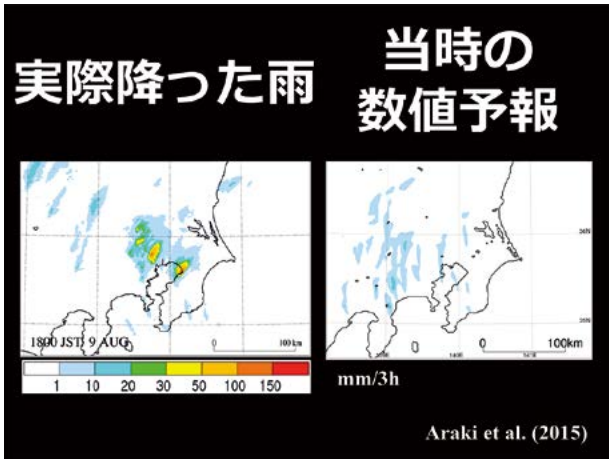



図3-2-34　実際降った雨と当時の数値予報

「そらまめ君」の地上観測データを取り込んで、データ同化して初期場をよくした上でシミュレーションすると、かなり現実に近づけられる。過大になっている部分はあるが、大雨が割とうまく再現できた（図3-2-35）。

結局のところ、気温や水蒸気の分布、風の収束などがもともとのデータ同化する前の場には足りていない。つまり、あまり観測できていない。豪雨にしても他の現象にしても、まずは実態解明が必要だ（図3-2-36）。相手のことを知って、その上で今のシミュレーションの技術に何が足りないのか、知ることが必要だ。その上で足りないものを補い、データ同化する。そうして、雨だけに限らず、うまい予測ができるのではないかと思う。

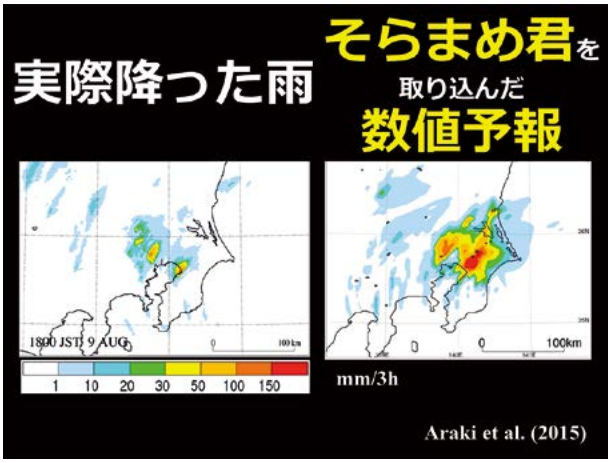



図3-2-35　そらまめ君を取り込んだ数値予報

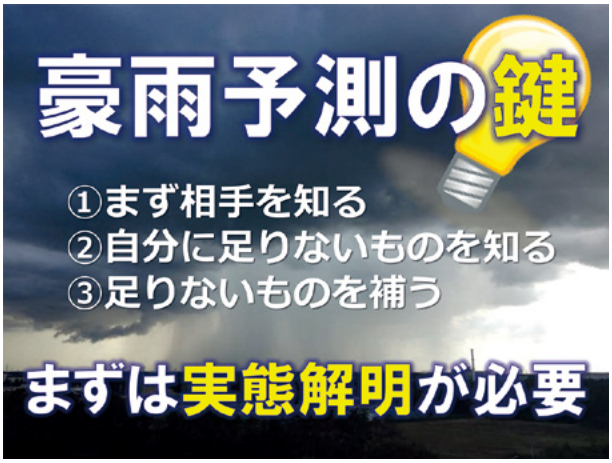



図3-2-36　豪雨予測の鍵

**線状降水帯による豪雨**

次に、線状降水帯についてお話する。最近、毎年7月上旬に線状降水帯による水害が起こっている。日本で発生する集中豪雨の約7割がこの線状降水帯だと言われている。我々は気の抜けない状況である。一つの積乱雲がもたらす雨は数十 mm 程度と言われている。上空の風に積乱雲が流されていくだけなら、1か所で降る雨は通り雨で終わってしまう。しかし、風上側で次々と空気が持ち上げられて、積乱雲が発生・発達し続ける状況になっていると、同じ場所で強い雨が降り続ける。雨域が線状になって、狭い範囲に集中して大雨が続く現象が起こる。こうして形成されるのが線状降水帯と呼ばれる。

線状降水帯の発生過程としては、積乱雲が進行していく後ろ側で新たに積乱雲が形成している。それで、積乱雲のバックビルディングとも呼ばれている（図3-2-37）。しかし、全ての線状降水帯がこのバックビルディングでできているわけではなく、実はまだよく分かっていない点がある。事例ごとに調べていかないとよく分からない状況だ。

図3-2-37　積乱雲のバックビルディング

**令和２年７月豪雨で九州に大雨をもたらした線状降水帯と大気環境場の特徴**

線状降水帯は特に九州や西日本の太平洋側などで度々発生して、甚大な災害をもたらす要因の一つと考えられている（図3-2-38）。令和２年７月には熊本県の球磨川流域中心に大規模な水害が発生した。九州北部でも大雨特別警報が発表され、大きな水害が起こった。やはり実態解明が必要で、線状降水帯について調べている（図3-2-39）。

近年、九州では、西日本豪雨と言われている平成30年７月豪雨や、その前年の平成29年７月にも九州北部豪雨が発生した。いずれも線状降水帯が発生して、大雨になっている。それぞれ多量の水蒸気の流入がやはりあった。九州北部豪雨では上空に寒気が入って不安定化していったことが、要因として挙げられている（図3-2-40）。

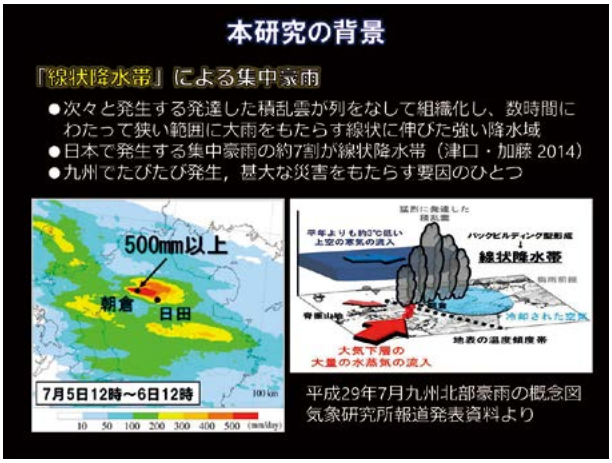



**図3-2-38　線状降水帯による集中豪雨**

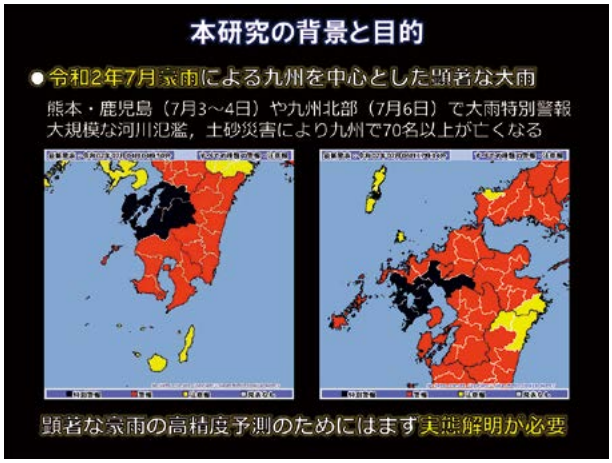



**図3-2-39　令和２年７月豪雨の実態解明**

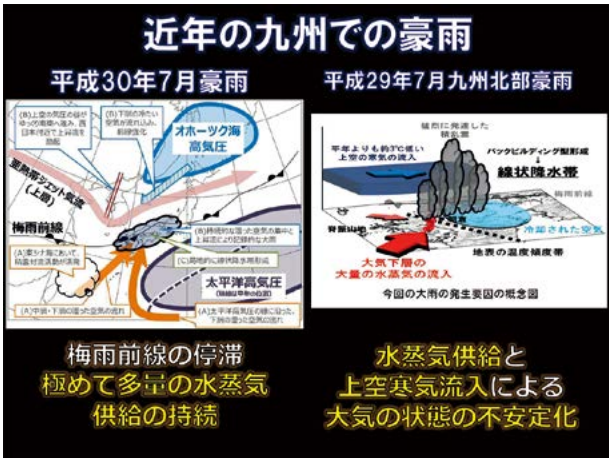



**図3-2-40　近年の九州での豪雨**

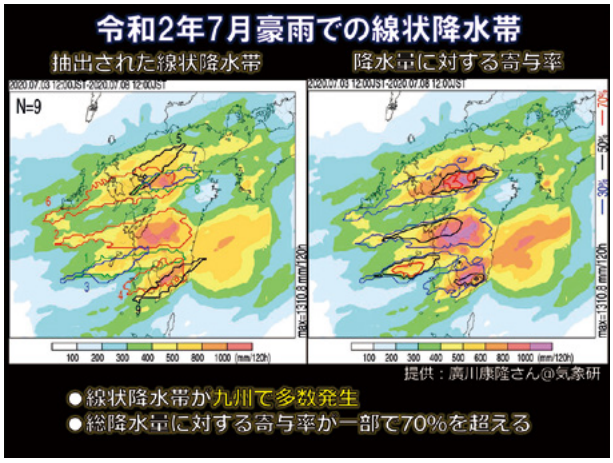



**図3-2-41　令和２年７月豪雨での線状降水帯**

令和２年７月豪雨で、どのぐらいの線状降水帯が起きていたか。雨量のデータで客観的に抽出する手法を気象研究所で開発している。それで抽出された結果が図3-2-41になる。豪雨の期間中、９事例の線状降水帯が形成され、その一つが球磨川流域に大雨をもたらした。総降水量に対する線状降水帯の寄与が計算でき、一部70%を超える。豪雨の期間をトータルで見ると、雨量に対してもかなりの大きな割合を占めている。線状降水帯は豪雨を議論する観点で非常に重要な事例といえる。

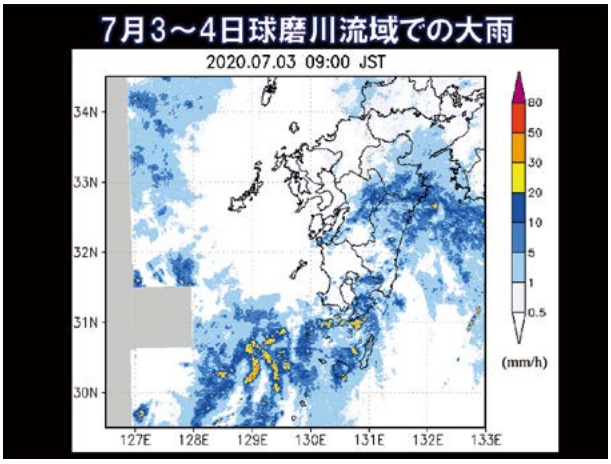



**図3-2-42　7月3～4日球磨川流域での大雨**

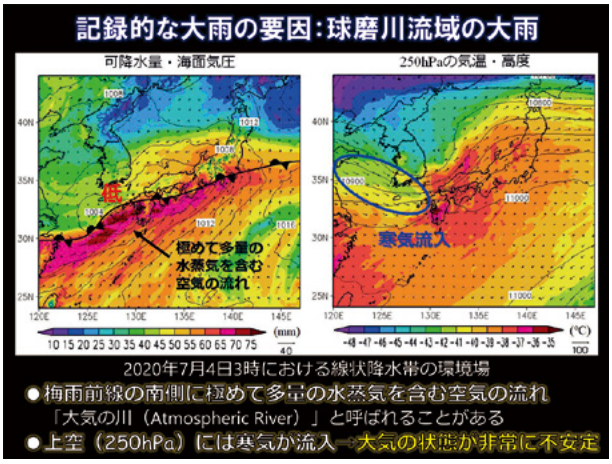



**図3-2-43　線状降水帯の環境場**

図3-2-42が球磨川流域での大雨の状況だ。組織化して一部分に停滞している。特に熊本県球磨川流域で大雨になったときの要因を、広い場で見てみたのが図3-2-43だ。梅雨前線が西日本辺りに停滞している状況で、その南側で極めて多量の水蒸気を含む空気の流れ、いわゆる大気の川がある状況だった。上空を見ると、そこに寒気が流入してきて、大気の状態が非常に不安定な状況になっていたことがわかる。

さらに細かいところを見ていくと、梅雨前線上にメソ低気圧や小低気圧という、規模の小さい低気圧ができていた（図3-2-44）。それが接近して風が強まったことにより、低気圧に伴う流れと、太平洋高気圧の縁辺の流れが強まって、下層で空気がぶつかり合う収束線ができていた。そこに極めて多量の水蒸気が流入し続けて線状降水帯が発生・発達していたことが、事例解析から分かった。

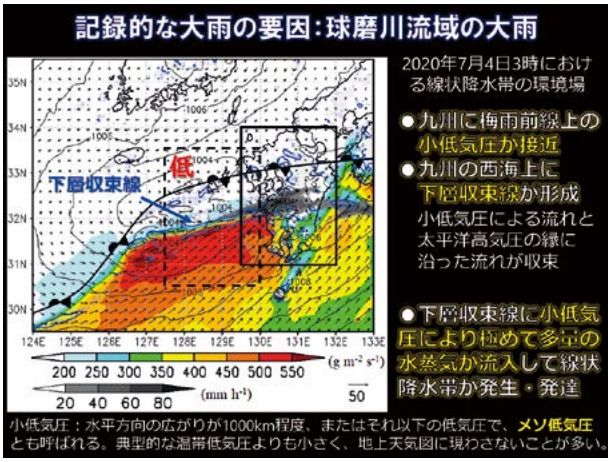



**図3-2-44　記録的大雨の要因**

**図3-2-45　近年の豪雨との比較**

近年の豪雨と比べても、令和2年7月豪雨は積乱雲の背の高さが最も高く、大気の状態が非常に不安定だったことが分かっている（図3-2-45）。特に近年の豪雨と比べても、極めて多量の水蒸気の流入があった。

9つの事例を見ていくと、実はその多くで九州に小低気圧が接近していた。線状降水帯が発生する数時間か1日ぐらい前から、この低気圧が明瞭化していたことも分かっている。こういったメソ低気圧に注目することで、もしかすると将来的に線状降水帯の予測につながるかもしれない。ただし、こういったメソ低気圧のない事例でも、線状降水帯が発達して豪雨になっているので、事例ごとに違いがあり、さらなる実態解明の研究

が必要だ。この予測の観点では、極めて多量の水蒸気の流入が重要だということは、どの事例でも共通している。水蒸気の観測が非常に重要である。

この線状降水帯の話題の考察と展望を図3-2-47に示す。

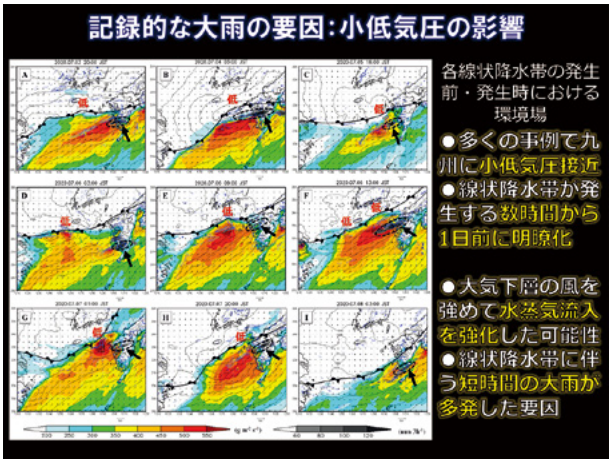



図3-2-46　小低気圧の影響

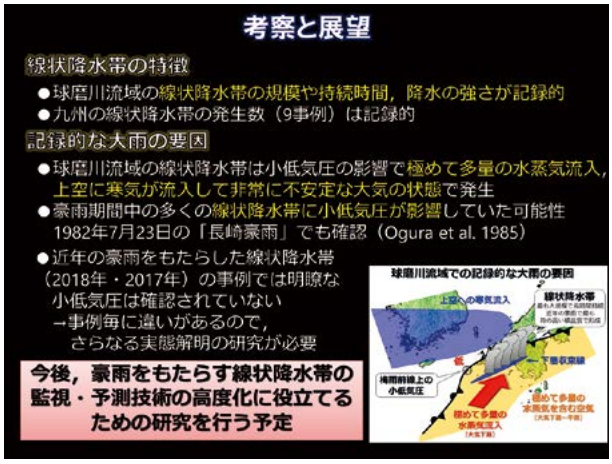



図3-2-47　考察と展望

**冬季に豪雪をもたらす雲**

ここから、冬季に豪雪をもたらす雲について、お話しする。数年ほど前にも日本海側でかなりの豪雪があった。日本海側の各地に大雪は、基本的には日本海で筋状の雲が発生・発達して、もたらされている。いわゆる西高東低の冬型の気圧配置になって、寒気が流入してくるのだが、寒気の温度は実は－10℃、－20℃といった、かなり低温だ。その低温の空気が日本海にどばっと流れ込んでいる。日本海の海面水温は、冬でも5℃や15℃ぐらいあるので、いわば熱湯風呂のような状態だ。日本海で多量の水蒸気の熱を供給されて、こういういわゆるベナール対流といった熱対流を発生する。さらに風が吹いている状況なので、水平ロール対流ができて、筋状雲が各地で形成される（図3-2-48）。

寒気が強いときは日本海が筋状の雲で覆われる状況になる。特にこの中で、日本海寒帯気団収束帯（JPCZ）が重要だ。朝鮮半島の付け根にある山へ回り込む風がぶつかって、ここで特に発達した積乱雲がこのJPCZをつくる。この動向によって局地的に降雪が強まると言われている。昨シーズン、立ち往生などが起こった事例でも、このJPCZが重要だったと言われてる。

図3-2-48　日本海上で発達する筋状雲

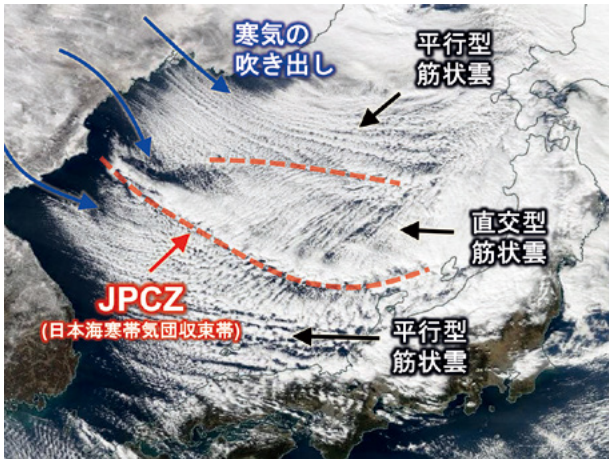



図3-2-49　日本海側の大雪のメカニズム

**首都圏の大雪**

さらに予測が難しいと言われているのが太平洋側の首都圏の大雪だ。いわゆる南岸低気圧に伴って降ると言われている。日本海側の雪を降らせる雲は全て積乱雲で、冬でもよく雷が鳴る。一方、太平洋側に雪を降らせる雲は乱層雲だ。

南岸低気圧の存在そのものは古くから知られている。太平洋側は、何しろ雪が降るのが年に数回程度と少なく、ハードの備えも充実していない。少し雪が降るだけで交通等に甚大な影響が出る。日本海側のように毎年雪が降っているわけではないので、観測網もほとんどない。実態がよく分かっていない状況だ（図3-2-50）。

この研究のきっかけは、2014年2月の大雪だった（図3-2-51）。このとき山梨県では集落孤立した（図3-2-52）。もちろん交通の影響もあったが、雪が積もった後に雨が降ったため、屋根雪の荷重がたいへん大きくなり、農業温室や建築物にも大きな被害が出た。雪崩もよく発生している。ほかにも着氷や着雪といった様々な雪氷災害が起こる。

この首都圏の降雪現象は、いまだに正確な予測が難しい代表事例として、気象庁のホームページに特出しして載る程度に難しい現象である。なぜ難しいのかというと、様々な過程が複雑に関係しているからだ（図3-2-53）。この低気圧そのものの過程だけではなく、そこからの雲の広がり、その雲の中でどういった粒子が成長しているのか、それがどういう形で地上に向かって下りてくるのか。それによって地上の気温が変わる。地表面の状態も含めて、それぞれ不確実性のあるプロセスが多くあり、まだ現状として予測は難しい。高精度な予測のためには、まず実態解明が必要だ。

図3-2-50　南岸低気圧による首都圏降雪現象

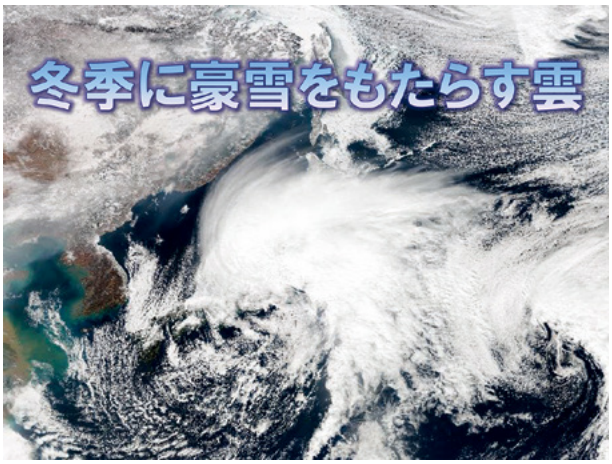



図3-2-51　2014年2月の首都圏での記録的豪雪

図3-2-52　首都圏大雪時雪氷災害の多様性

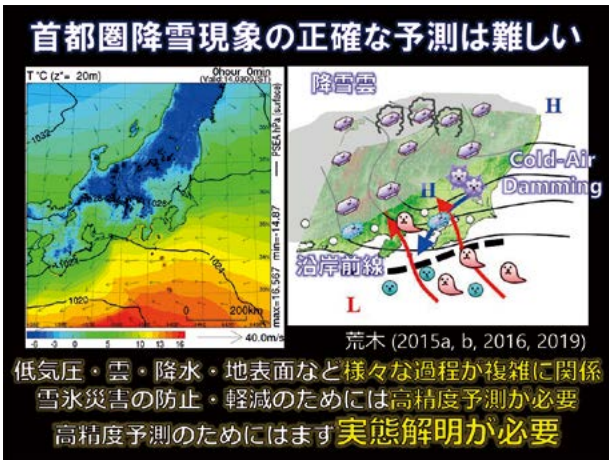



図3-2-53　首都圏降雪現象の予測の困難

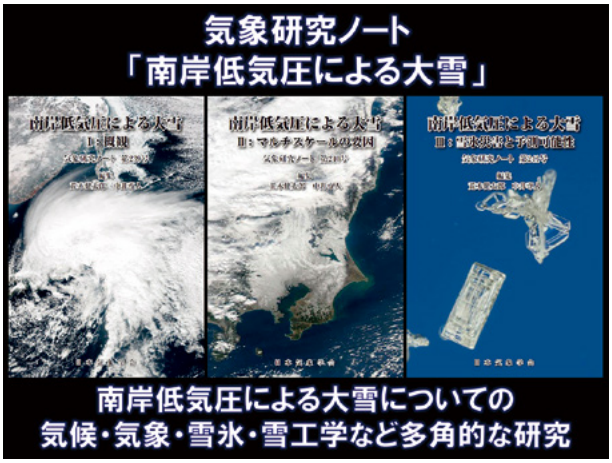



図3-2-54　南岸低気圧による大雪

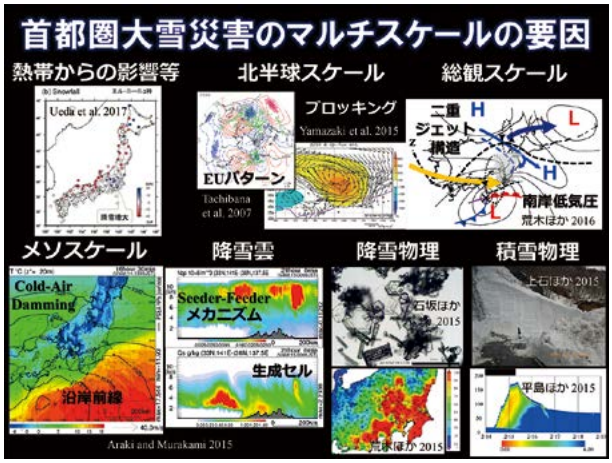



図3-2-55　首都圏大雪災害
マルチスケール要因

この2014年2月の大雪を受けて、気象学会と雪氷学会、雪工学会の研究者たちと連携して研究集会を開きつつ、実態解明の研究を進め、その内容を気象学会の気象研究ノートに「南岸低気圧による大雪」として公開している（図3-2-54）。

その中で扱っているものを簡単に紹介する（図3-2-55）。要因がたくさんあり、マルチスケールと言われている。大きいものだと熱帯からの影響では、エルニーニョのときには太平洋側の雪が増えやすいと言われている。北半球スケールの流れでは、いわゆるブロッキングと呼ばれている偏西風の蛇行の要因になる現象も、要因の一つになっていると言われている。南岸低気圧に加えて上空のジェット気流や、地形的な影響で起こる局地的な前線も関係している。雪雲の中はどうなっているのか、雪が降ってくるときにどうなっていて、積もった後にどう変化しているのか。そういったことも雪氷災害には非常に重要になってくることが分かってきている。

雪崩についても紹介する。図3-2-56は何回も雪崩が起こってできたデブリと呼ぶものの写真だ。南岸低気圧に伴う大雪では、こういう表層雪崩が起こりやすいことが古くから知られている（図3-2-57）。その発生要因は様々に言われている。雪の多い地域はもちろん雪崩は多いが、雪の量だけではない。短時間でどのぐらい降るかも重要だ。弱層という崩れやすい積雪層では、結晶構造や雪の質がほかの部分と違っていて、破断して表層雪崩が起こりやすいと言われている。さらさらした新雪、特に粉雪のようなすごくさらさらした雪は、降ったそばから流れていく。こういう雪が雪崩の発生要因として重要だと最近言われている。

図3-2-56　雪のデブリ

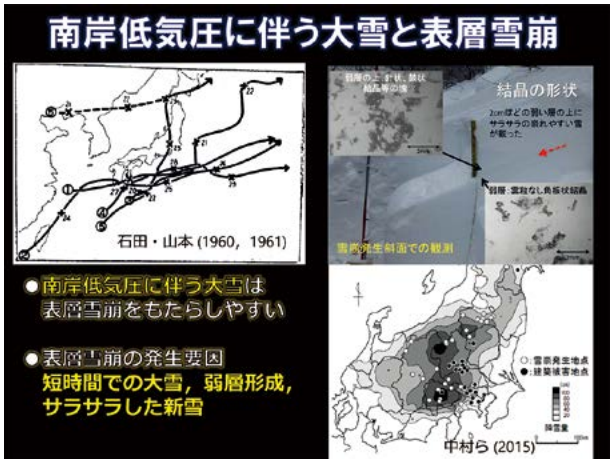



図3-2-57　南岸低気圧に伴う大雪と表層雪崩

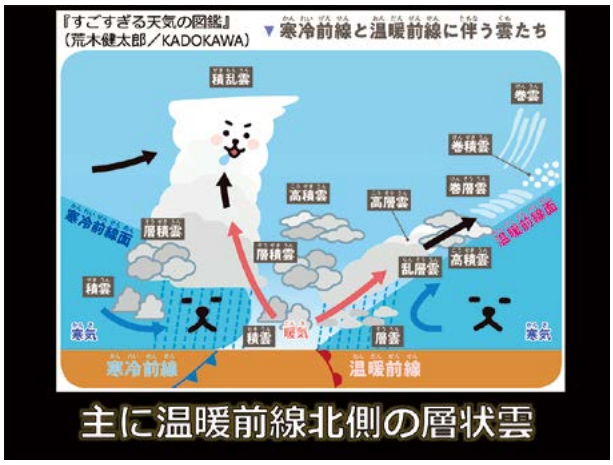



図3-2-58　寒冷前線と温暖前線に伴う雲たち

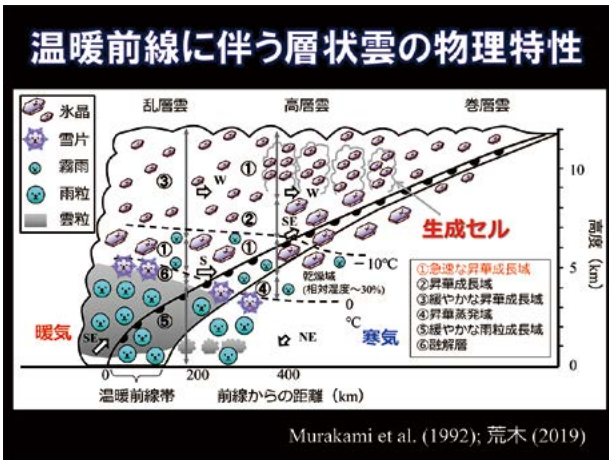



図3-2-59　温暖前線に伴う層状雲の物理特性

ここで雲にもう一回立ち返って見てみる（図3-2-58）。南岸低気圧でも、前線に伴う雲の発生がある。そのうち、乱層雲のような、温暖前線の北側にできる層状の雲が主に雪を降らせている。

乱層雲を成長させるような水蒸気の流れが非常に重要だ（図3-2-59）。低気圧の構造によって、前線を伴うしっかりした温帯低気圧では、ウォームコンベアベルトと呼ばれる暖湿気の流れがある。それが温暖前線を滑翔していき上空まで達して、生成セルと呼ばれている急速に雪の結晶が昇華成長するメカニズムがあることが分かっている。

アメリカでの研究で、温暖前線の北側だけでなく、低気圧中心の北西象限にも低気圧が閉塞している段階では生成セルが起こると報告されている。降雪バンドのようなものができて、降雪強度が強まることが分かっている。この知見から、関東に雪を降らせる低気圧を調べている（図3-2-60）。基本的には長く降るほど大雪になる。層状性の降水だ。積乱雲のように狭い範囲でどかっと降らず、広い範囲で降る。短時間で大雪になる事例が幾つかあり、その顕著なものが2014年2月の事例だった。閉塞している低気圧が関東の南東海上などにある状況で起こっていた。やはり生成セルなどの影響が考えられ、短時間の大雪をもたらす低気圧の特徴が分かってきた。

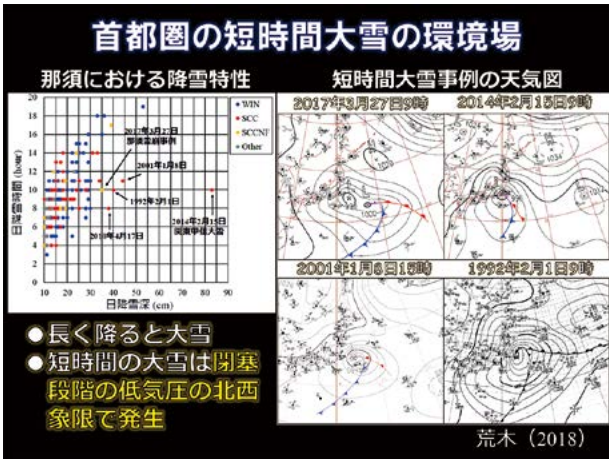



図3-2-60　首都圏の短時間大雪の環境場

**短時間大雪の発生メカニズムの研究**

この研究のきっかけは、2017年3月に那須で発生した雪崩の事故だった（図3-2-61）。雪崩が発災してすぐに防災科研のチームと現地に行き、積雪断面観測などを行った。積雪の状態は分かってきたのだが、なぜ大雪が降ったのかを科研費の支援で調べた。

図3-2-62は事故現場付近での、雪による総降水量を示している。かなり細かくシミュレーションを行った結果、局地的に北東象限で雪が強まっている様子が見てとれた。

図3-2-61　平成29年3月27日那須雪崩事故

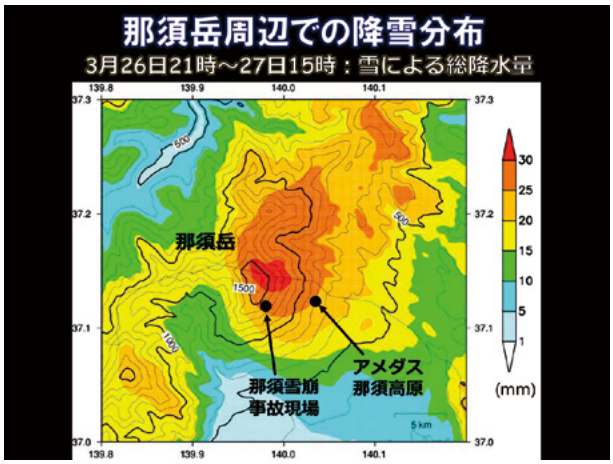



図3-2-62　那須岳周辺での降雪分布

短時間で大雪が降ったメカニズムをまとめた（図3-2-63）。低気圧が接近してくると同時に、大気下層で水蒸気が多量に供給され、その大量の水蒸気を含む空気が山にぶつかる。そこで地形性の上昇流が発生して、過冷却の水雲が山のすぐ上空にできた状況だった。

低気圧が接近する前に上のほうにあった雲から降った雪が最初に積もっていた。その上に水雲ができて雪が降り、そこで雪が雲粒捕捉成長して、雪が強まっていた。上の雲が種をまく雲で、下の雲は種をまかれる雲なので、それぞれシーダー、フィーダーと言われる。このメカニズムで、局地的に短時間の大雪が発生していた。こういった実態解明を通して、降雪粒子の変化や、山と下層風の関係、水蒸気が入ってくる量などの重要性が分かってきた。

降雪結晶が重要な表層雪崩では、さらさらした新雪が重要だ（図3-2-64）。いわゆる低温型結晶が、その代表で、－20℃以下の環境で成長する。普通の雪だとかき氷みたいにかなり積もるが、低温型結晶は全く積もらず、すぐ流れてしまう。

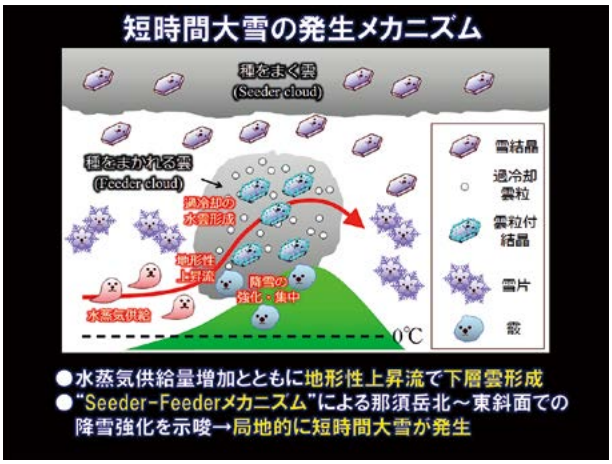



図3-2-63　短時間大雪の発生メカニズム

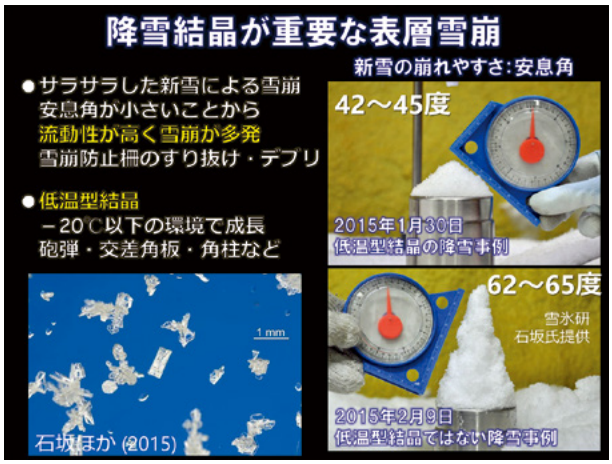



図3-2-64　降雪結晶が重要な表層雪崩

**シチズンサイエンスによる雪結晶観測**

低温型結晶は低気圧から離れたところで降りやすいと言われている。アメリカ東海岸などでは研究で観測した事例があるが、関東ではほぼなく、よく分かっていなかった。そこで、気象研究所で私が中心になって関東雪結晶プロジェクトを始めた。一般の方に向けて、雪の結晶の写真の投稿を呼びかけた（図3-2-65）。

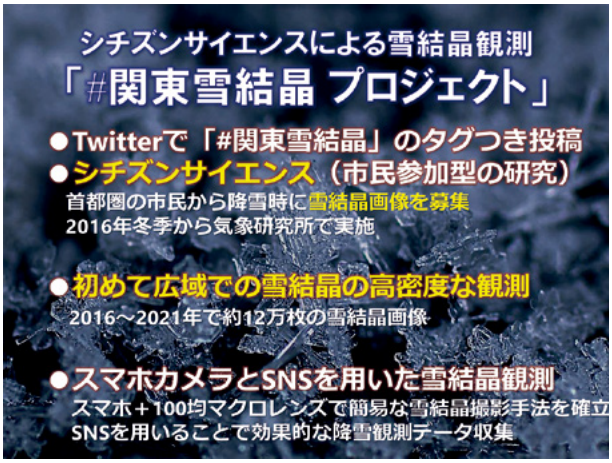



**図3-2-65　関東雪結晶プロジェクト**

この市民参加型の研究はシチズンサイエンスと言われている。2016年の冬から始めて、現在まで約12万枚の結晶の写真が集まっている。初めて広域で雪の結晶の高密度な観測ができた例として、いろいろと取り上げられた。専門家が特殊な顕微鏡を使わなくても、一般の方が百円のマクロレンズで、きれいに雪の結晶を撮影できる手法を確立したことと、SNSで効率的に降雪観測データを収集できるようにしたことがポイントだ。

図3-2-66は関東での雪などの固体も含む降水を観測していた官署の地点だ。すごく粗い。有人の観測は減っていて、今はもう東京しか測っていないかもしれない。図3-2-67がシチズンサイエンスでの観測地点で、段違いに細かい密度で雪結晶を観測できている。

100円ショップのマクロレンズでも性能が良く、雪の結晶構造がすごくきれいに写る（図3-2-68）。3年分の冬であった降雪9事例から、つくば市内で観測されたデータを用いた。降雪結晶は大きく9種類に分けている（図3-2-69）。

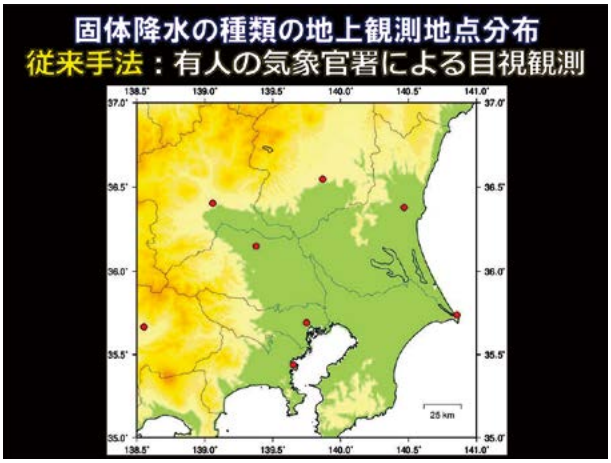



**図3-2-66　有人の気象官署による目視観測分布**

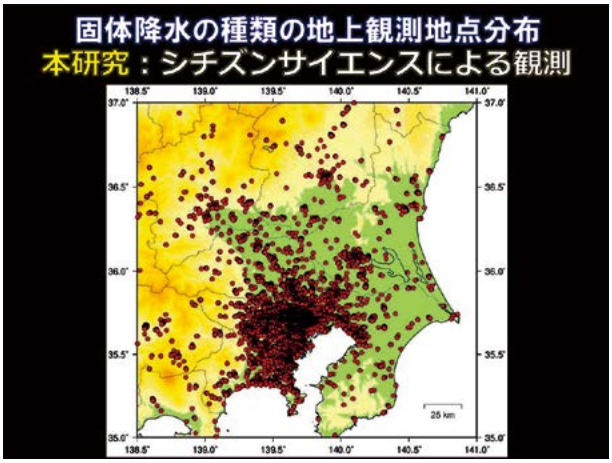



**図3-2-67　シチズンサイエンスによる観測分布**

**図3-2-68　首都圏の降雪結晶特性を調べる**

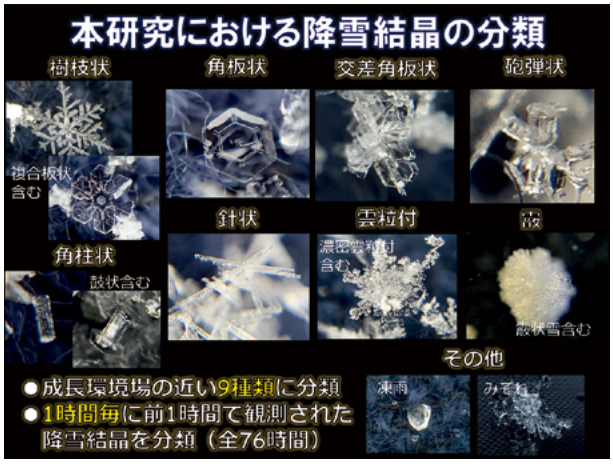



**図3-2-69　降雪結晶の分類**

2018年1月に関東で大雪があった際、1時間ごとに9種類に分類した（図3-2-70）。つくばでは多くの種類の結晶が混ざって降ってきていた。

全体の観測データを見ると、樹枝状が最も多く86%見られていた（図3-2-71）。雲粒付や角柱の結晶も多かったが、それぞれの事例を見ていくと、交差角板状や砲弾状といった低温型結晶が全く観測されない事例が幾つかあった。低温型結晶が観測されたかどうかで、低気圧A、低気圧Bと分けた。低気圧Aでは角柱状、樹枝状、交差角板状、雲粒付、針状が多く見られた。低気圧Bでは、ほとんどが樹枝状と雲粒付だけだった。

それぞれの低気圧での地上天気図を図3-2-72に示す。低気圧Aは前線を伴う温帯低気圧だった。低気圧Bはほとんど前線を伴わない低気圧で、関東の南海上などにわずかにできているような低気圧が関係していることが分かった。

それぞれの低気圧での、雲の構造を見たのが図3-2-73だ。低気圧Aの雲は背が高く、低気圧Bの雲は背が低い。－20℃以下で低温型結晶は成長するのだが、低気圧Bでは背の高さが足らず、そもそも低温型結晶が成長できる環境ではなかった。低気圧の構造に注目して、結晶を診断して、特に背の高い温帯低気圧の降雪の場合には、同じ量の降雪量予報をした場合でも、特に表層雪崩の発生リスクが高いと考えられる。こういった技術の応用として、予報現場への貢献が考えられる。例えば気象情報の中での注意喚起などの防災対応ができるのではないか。現在こういった研究成果を基に地方気象台に情報を出している状況だ。

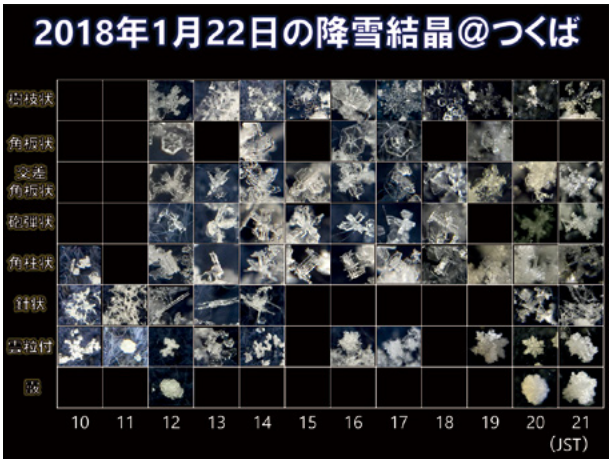



**図3-2-70　2018年1月22日の降雪結晶**

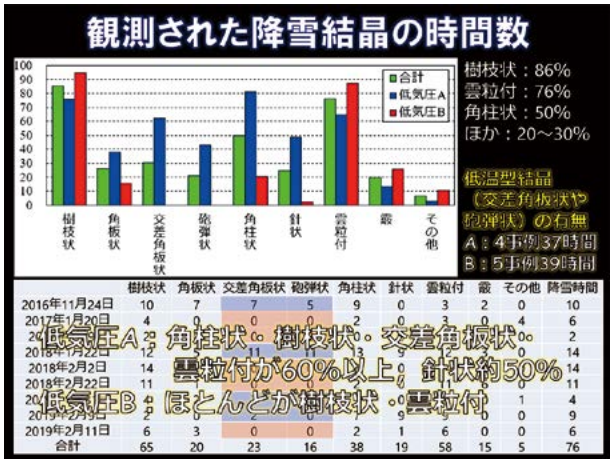



**図3-2-71　観測された降雪結晶の時間数**

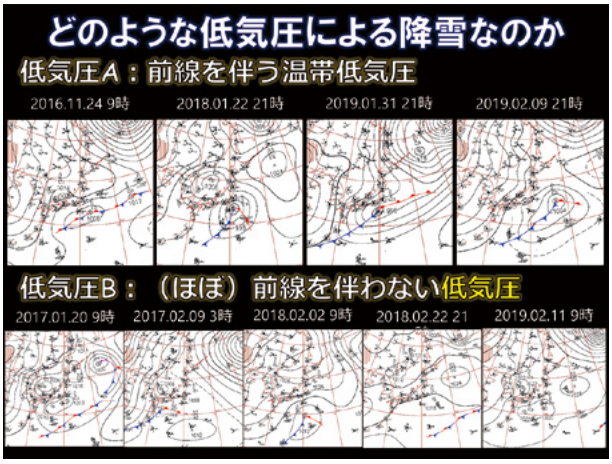



図3-2-72　どのような低気圧による降雪か

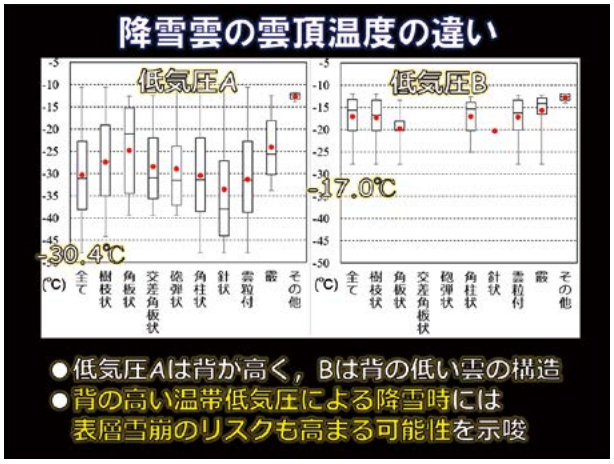



図3-2-73　降雪雲の雲頂温度の違い

ここまで豪雨と豪雪についてお話したが、未解明の点がまだまだ多い（図3-2-74）。そもそも観測が足りていない。特に水蒸気だが、雲や降水の観測も足りておらず、高時間分解能かつ高精度な観測が必要だ。実態解明の研究から監視・予測技術を高度化していき、最終的には防災気象情報高度化につなげていきたい。



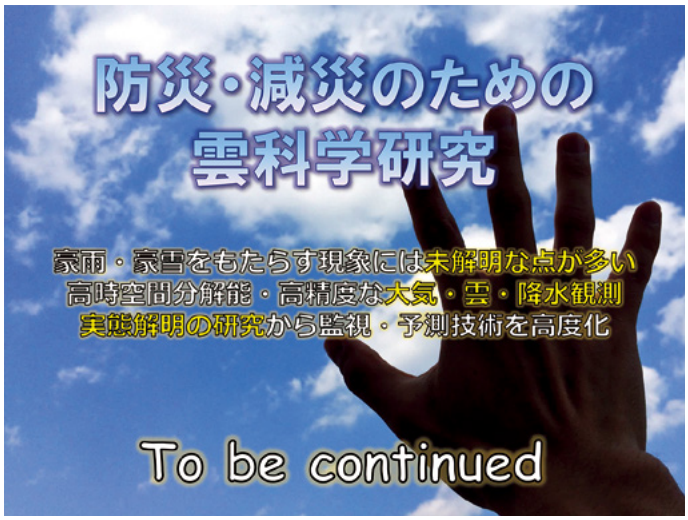



図3-2-74　防災減災のための雲科学研究は続く

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：線状降水帯は、今年の豪雨でも、菅総理が発言するくらい浸透した。今後はしっかりと予算がついて、予測精度を高める研究にますます力を入れられているところだと思う。この分野は気象研究所の皆様の研究がリードされていると思うが、大学との連携も進めていると思う。アカデミアの研究に期待されることを伺いたい。

A：気象研究所、気象庁での研究は研究課題に縛られる側面があり、なかなか自由には動けない。大学にぜひ協力してもらいたい。そもそも水蒸気の観測のような、現在観測自体が不足している研究は気象庁だけではとてもできない。今でもいろいろな大学の先生方に多大な貢献をいただきながら行っている。

気象庁でできないような研究、さらには災害情報や避難といった課題もぜひ連携できるといいなと考えている。

Q：線状降水帯に関して、低層の水蒸気の量や風の向き、おそらく水蒸気フラックスを捉えるところが一番ポイントだと思う。九州や西日本に豪雨をもたらす線状降水帯のもとになっている積乱雲の発生、発達を見るには、九州の西海上や南東海上、西日本の海上などを見る必要になると思う。設置されたマイクロ波放射計だと見える範囲もあるので、組み合わせてみていく必要があると思うが最新の状況はいかがか。

A：私が本日紹介したマイクロ波放射計の研究では、主に陸域を観測している。一方、最近、古野電気が可搬型のマイクロ波放射計を開発していて、船舶などひろがる可能性がでている。マイクロ波放射計だけではなく、いろいろな技術を組み合わせた水蒸気の観測でデータをとることが私も重要だと理解している。

たとえば、GNSSを手掛けている人たちと連携を進めている。気象庁でも保有船舶のGNSSで、東シナ海の観測する計画している。最近は波の力を利用して自己発電しながら推進できるWave Glider（ウェーブグライダー）と呼ばれる無人型観測装置が開発されている。比較的、低コストで観測でき、その無人船にGNSSを載せて、海上の水蒸気観測も最近始まっている。

GNSSは観測では、衛星との視線方向の大気の電波の遅延量で水蒸気を推定しているので、代表的な鉛直積分量としての水蒸気はある程度は分かる。しかし、一方向を見た場合の正確な量は分からない。それをしっかり観測するのがマイクロ波放射計だ。観測精度を高めた上で、GNSSやマイクロ波放射計などの機器を組み合わせて、多点展開することで、海と陸を含めて九州などに線状降水帯をもたらす積乱雲をターゲットに観測する計画を立てている。

Q：アメダスのデータをつかった数値予報で千葉のゲリラ豪雨が全く当たらなかったけれど、「そらまめ君」のデータもデータ同化に入れると再現できた研究について、伺いたい。再現はできたが、やや過大に降るように計算が出た理由は、数値計算で過敏に拾っている要素が何かありそうか。そうだとすると、例えばアンサンブル予報などで、より精度よく予測できる可能性があるのか。

A：要因はいろいろとある。データ同化の手法として、紹介した研究では3D–Varという手法を用いた。これは、3次元的にその観測データを使って、現実的な場をつくる方法だ。4D–VArという時間方向に変化させる手法で再現すると、水蒸気場などがもっとよくなる可能性はある。アンサンブルでも確率論的にどこでどういう雨が降りやすいという、議論はできると思われる。そういった検討は、今後の研究課題だ。

特に過大評価してしまう理由としては、やはモデルの不確実性だ。対流がどのくらい解像できているかということも結構重要になってくる。普通の積乱雲でも、一つ一つしっかり解像するためには、500 mや250 mぐらいの細かい分解能が必要となってくる。現実のもっと細かい雲をみようとすると、5 mや10 mまで必要となってくるが、それは現業予報のシミュレーションではできない。

本日ご紹介した昔の研究では2 kmの解像度でシミュレーションした結果だった。2 kmは気象庁の現在の局地モデルと同じ分解能だが、積乱雲一つ一つをしっかり解像できるわけではなく、そのまとまりを一つのものとして表現してしまう。そういった結果的に過大になってしまう要素があったのだろうとみている。「そらまめ」を使った研究については、私たちの研究がきっかけになって、現在、気象庁がアメダスに湿度計を導入を始めた。

C：大きな難しい課題に対して、環境省と気象庁の省庁間連携で進んでいる事例で素晴らしい。

Q：ニューラルネットや通常のモデル、新しい変分法のモデルとの比較があった。データのトランザクショ

ンなども大変に思われるが、計算コストは、どのぐらい考慮されている状況か。

A：その点も検討している。現業の天気予報で使っているモデルの結果を使っても、それなりにいい結果が出ることが分かっている。既にリアルタイムで1D–Varという変分法の仕組みで行うシステムをつくっている。これは1Dなので1次元しか計算しておらず、スパコンでなくても、かなり早く計算できる。観測端末でプロシージャを回して、それでがばっと計算する。1回分回す10秒くらいの中の一つのプロセスとして入っている。それに全く劣らない速さで計算できることを確認している。リアルタイムのナウキャストのように、今こうなっているから、こういうふうになりそうではないかという使い方も恐らくできる。発生前の環境の一つをデータとして同化してシミュレーションすることも、マイクロ波放射計のデータなどを使って可能になるだろうと考えている。

Q：時間スケールなどについて、さらに伺いたい。実際の予測では、何時間前にどのぐらいの精度で起こりそうだと出すタイミングがいろいろあると思う。例えば線状降水帯だと、どのくらい範囲で、どのぐらいの雨が、いつくらいにありそうだという予測は、時間が迫ってくるにつれて、より高精度に出せるようになっていく順序があるかと想像する。ただ、例えば、30秒前にこの地点に絶対に降ると高精度に分かっても、実際の現場はなかなか大変だ。今後、海上での無人観測や可搬型マイクロ波放射計の観測データがもし増やせたとして、最終的にどのくらいの時間や精度の兼ね合いで言えるようになっていくと想像するとよいか。

A：現在、いろいろなプロジェクトで、いろいろな時間スケールでやると言っている人たちがいる状況なので、あくまで私の個人的な印象として回答する。まず、気象庁が2030年までの業務目標として、半日前からの線状降水帯の高精度な予測をすると公表していたと記憶している。線状降水帯の研究は、どれも一応それに沿った方法で行われている。アプローチはいろいろとあり、線状降水帯が発生しやすい状況になるかどうかを診断する技術は現在開発中で、これを適用すれば機械的には数日前や1週間ぐらい前から分かるかもしれない。ただし、どこでどのぐらいの雨量をもたらす線状降水帯が発生するか、正確な予測は現状まだ難しい。例えば海上の水上観測データなどがもっと充実してきたら、それを使えば、恐らく半日前から水蒸気が増えてきて、それが流れてくるような様子が分かるようになるかもしれない。それをデータ同化するだけでいいかといえば、恐らくそれだけだとうまくいかないだろう。

　今、気象庁で持っている局地モデルは水平解像度が2 kmのモデルで、10時間先まで計算して、1時間ごとにアップデートしている。最近はメソモデルでもアンサンブルを使うようになってきている。最終的に局地モデルでやる前に、もう少し長い数日先までできるメソモデルを使って、初期場をよくしていき、大体このあたりにできそうだと、アンサンブルでおさえておく。その上で局地モデルを使って、半日前より短い時間スパンになるのだが、ここは本当に危なそうだと分かっていくという方向だろうと思う。

C：本日は、最先端の研究に加えて、良いメッセージもいただいた。防災意識は必要なのだが、楽しくやらないと続かない。これは非常に重要な気づきで、私たちもこれから、このメッセージをよく考えて、取り組んでいかないといけない。

## 3.3 降水をセンシングする技術

牛尾 知雄（大阪大学）

※講演日：2021年6月10日

簡単に自己紹介する。これまで工学系に属しながら、大気科学に関連する研究を一貫して進めてきている。大阪大学の電力工学講座で、停電の主な原因となる雷放電に関する観測的研究で博士号を取得した。その後、NASAマーシャル・スペース・フライト・センターで研究員になり、衛星からの降水や雷放電といった地球環境計測研究に従事した。帰国後、レーダーリモートセンシング、フェードアレイレーダーの研究開発に携わっている。

**背景**

近年、豪雨や猛暑等の極端気象による災害が多発しており、気候変動との関係が指摘されている（図3–3–1）。国連国際防災戦略によると、20年間の世界の自然災害による経済損失325兆円のうち、70%が気候変動に起因していると見積もられている。日本は、中国、アメリカに次ぐ世界第3位の43兆円と非常に甚大な被害額だ。気候変動に伴う自然災害への対応は、日本において安心・安全の社会を実現する重要な要素の一つだと言われている。

こうした背景を勘案して、降水のセンシング技術に関する話題を紹介する。

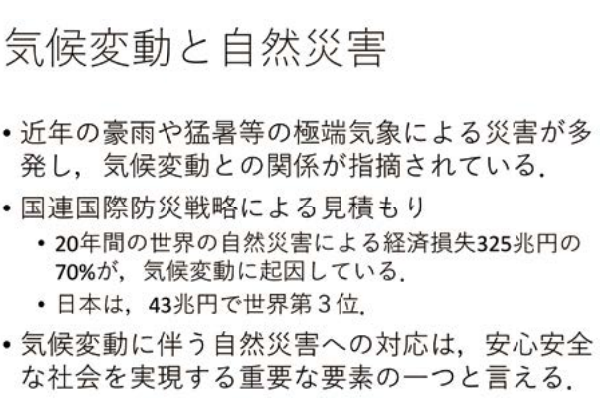



**図3–3–1　気候変動と自然災害**

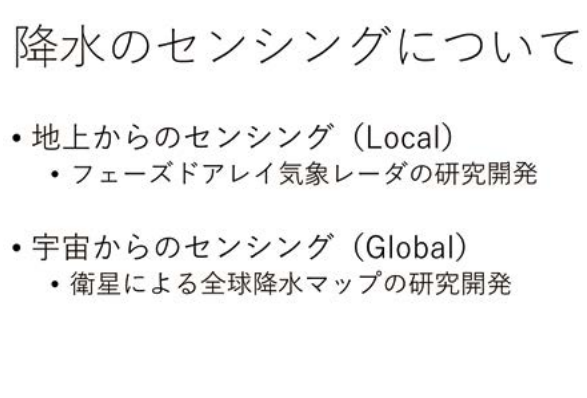



**図3–3–2　降水のセンシングについて**

まず、地上からのセンシングとして、フェーズドアレイ気象レーダーを紹介する。その後、宇宙からのセンシングとして、衛星による全球降水マップの研究開発についてお話しする（図3–3–2）。

**フェーズドアレイ気象レーダーの研究開発**

フェーズドアレイ気象レーダーは東芝、情報通信研究機構と我々、大阪大学の三者の産学官共同プロジェクトで開発した（図3–3–3）。

もう10年以上経つが、2008年7月に神戸の都賀川で非常に象徴的な事故があった。ふだんは流量が少ない穏やかな河川で、周囲の保育園児や小学生が水に親しむ親水公園があった。ところが、突然の豪雨で、たった十数分後には一挙に水かさが増えて、濁流となり、5人が亡くなる悲劇的な事故が起きた。階段を上がって避難する余裕が無いくらいの速さで、一挙に増水する局所的豪雨だった。

気象庁統計でも、こうした局所的豪雨や突風などの被害が増加傾向にあることが示されている。1975年から2017年までの1時間当たり降水量50 mm以上の年間発生回数を時系列で見ると、明らかに右肩上がり

傾向だ。気象モデルは初期条件にものすごく敏感で、少し変わるだけで、全く傾向が違ってくる。かなり慎重に扱う必要があるので、気象庁は慎重な言い方が多い。しかし、地球温暖化、気候変動により、自然災害の被害が顕著に増加している傾向は、いまや気象庁の方を含め、多くの識者が公言する情勢になっている。

今後も、こうした被害が常態化していく。こうした被害を低減させるために特に効果的な手段が気象用レーダーである。非常に短時間で、局所的に、しかし甚大な被害をもたらす現象を早く捉え、有意な情報を抽出して、それを避難警報か注意報に迅速に結び付けていく取組が絶対に必要になってくる。現在の気象レーダーシステムは、広い範囲を観測するという大きな使命があるため、5分、10分といった単位の時間分解能で観測している。それに対して、先ほど紹介した極端現象は非常に短時間に甚大な被害をもたらしており、さらに高速な観測にアプローチを変えないと捉えられない。そのため、新たに開発したのが、我々のフェーズドアレイ気象レーダーである。このレーダーは、10秒から30秒と非常に時間分解能が高い、高速スキャニング可能だ。なおかつ、ゼロ度から上空90度まで、100仰角にわたって高密度な観測できる特徴も併せ持っている。

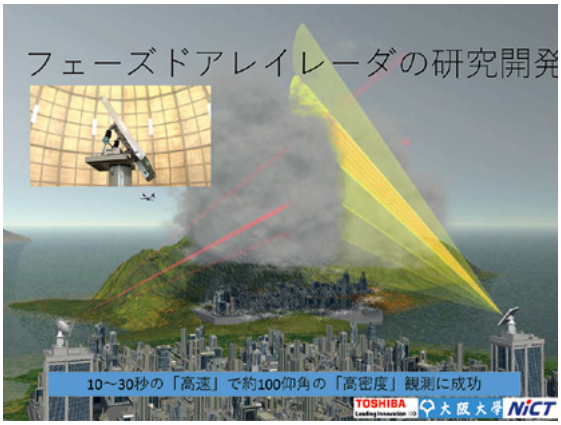



**図3-3-3　フェーズドアレイ気象レーダ**

**図3-3-4　アンテナの外観、機器**

図3-3-4は大阪大学の吹田キャンパスに設置された初号機の写真だ。屋上に白いドームがありが、その中にレーダーが格納されている。これまでのレーダーの形状はディッシュ型、パラボラタイプと言われるが、フェーズドアレイ気象レーダーは縦横2 mのパネル型だ。このパネルの中に、スロットアンテナが128本格納されている。128本それぞれの中にAD変換、受信機がついている。その全部で一つのアンテナを構成している。

観測結果について紹介する。レーダー設置場所が観測範囲の円の中心で、大阪北部の千里丘陵地帯になる。設置後、大阪平野の北側に非常に背の高い積乱雲が形成された際、積乱雲の内部構造を非常に高密度で観測できた。フェーズドアレイ気象レーダーの時間分解能の特徴を生かして、イメージが30秒ごとに更新されるようプログラムも組まれており、積乱雲がどのように形成され、変化していき、ゲリラ豪雨をもたらしているのか、高性能観測をもとに逐一表現できた。従来、気象学研究者がこうなっているだろうとモデル上だけで考えられていた現象を、実際に高精度に観測できて、実際の姿がこうなっていると示せた世界初の事例だった。

線状降水帯はこれまでも関西地方でもしばしば起きており、たまたま被害が出ていないだけだ。大阪北部から京都にかけて線状降水帯が形成された際の、このレーダーでの観測データを紹介する（図3-3-5）。

大きく見れば名称の通り形は線状なのだが、より細かく分解してみると、個々の対流セルという単位で構成されている。その中でゲリラ豪雨の卵と呼ばれるものが、上空で形成されて地面に降り注いでいく姿が手に取るように分かる。この研究成果は、当初想像していた以上に反響があった。多く報道されたほか、中学校の理科の教科書にも掲載され、たいへん感慨深かった。2012年9月から政府、自治体関係、電機メーカー、研究者などさまざまな方が千人以上見学に来られている。

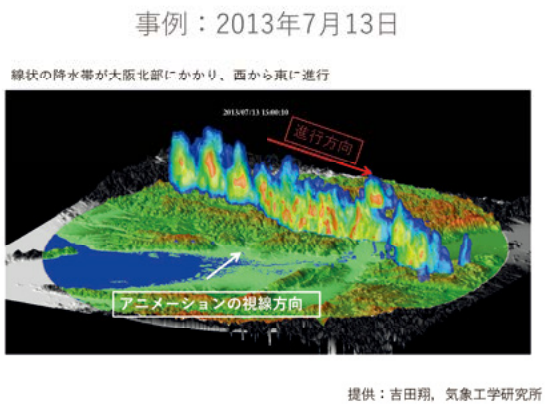



図3-3-5　線状降水帯の観測結果の事例

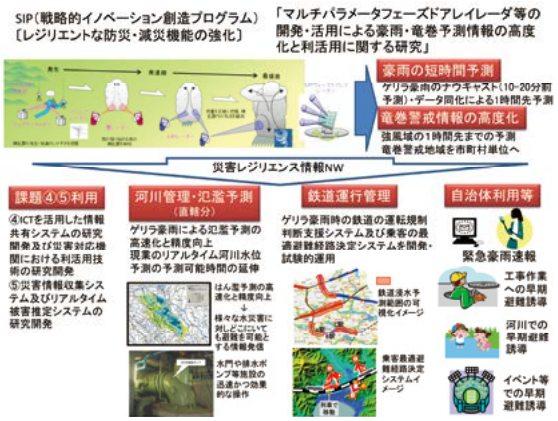



図3-3-6　SIPでの研究開発

この成果は、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）にもつながった（図3-3-6）。レーダーがよさそうなのは分かったが、本当にいい成果ならば世の中を変えるはずだ、そこまでやりなさいとはっぱをかけられた。そこで、河川管理や鉄道管理、自治体と連携した緊急ゲリラ豪雨速報なども行って、社会実装を進める取り組みをSIPで進めることになった。レーダーそのものについては、さらに電波の縦の変化と横の変化を捉えられるように開発を進めた。また、2017年には首都圏にも設置できた。

さらに、CRESTでは理研の京コンピューターを生かした共同研究も実施した（図3-3-7）。いまは京から富岳にリプレースされたが、実は我々のレーダーの観測データがリアルタイムに転送されている。最先端の気象レーダーのデータを、最新の気象モデルにデータ同化させて、気象予報にどの程度インパクトをもたらすことができるか、理研の三好先生たちと共同研究が進んだ。その成果の一例だが、2014年の突発的な局所豪雨の際、フェーズドアレイレーダーのデータを使った場合と、使わなかった場合で一目瞭然の差が出た。使わなかった場合、雨の強度だけでなく、そもそも雨ができる場所も別のところに予報結果が出てしまっている。全然当たらない。それと比べて、レーダーのデータを使った場合、非常に現実に近い環境場の再現に成功している。このような試験結果から、こうしたレーダーを全国展開できれば、10年後、15年後の気象予測や防護策を一変できるのではないかと示せた。

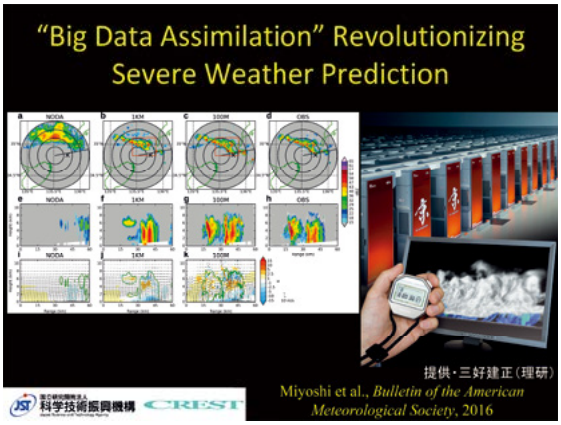



図3-3-7　CRESTでのビッグデータ同化

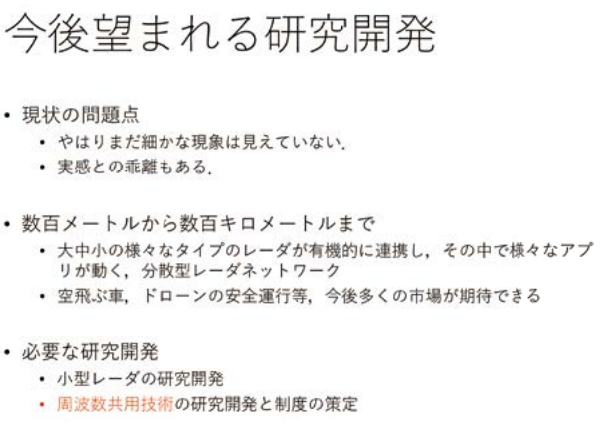



図3-3-8　今後望まれる研究開発

ここから、今後の課題を述べる（図3–3–8）。良い点は多いが、まだ課題はある。レーダーの画像を見ると、特にレーダーの遠方で、まだ細かな現象が見えていない。実感との乖離も実は若干ある。こうしたデメリットよりメリットのほうがはるかに上回るので、かなり高い評価を得たが、完ぺきではないので、まだ先がある、と思っている。今後の空想だが、ドローンなどの空間の３次元的な利用が進むことを想像すると、１人１台のレーダーとまでは言わないが、まるで自分がレーダーを持っているかのごとく感じられる社会まで進められれば、メリットが大きいだろうなと考えている。

どうしてもボトルネックとなる課題は周波数の共用技術である。レーダーの数が増えれば増えるほど、周波数資源が枯渇していく。個々のレーダー間の周波数の共用技術は解決しなければいけない大きな課題だ。これが解決できれば、より多くのレーダーが有機的に連携して、より細かな大気や雨の状況がわかり、さらに豪雨や竜巻の予兆現象がより細かく検出でき、ここから得られるベネフィットは経済的効果も含めて非常に大きいものになる。

**グローバル降水研究**

衛星からグローバルに見た高速センシング技術に関しての話題を紹介する。

CRDSの俯瞰報告書などでも紹介されているが、GSMaPというJAXAが運用しているプロジェクトがある（図3–3–9）。 Global Satellite Mapping of Precipitationの略語で、10 kmの空間分解能、１時間の時間分解能での全球の降水の観測データ速報である。宇宙空間を周回している複数の人工衛星のデータに加えて、静止軌道にあるひまわりの画像データも使い、全球で統合処理して、全球の雨の様子を示させている（図3–3–10）。 GSMaPの構想段階で、この主要なアルゴリズムを提案して、コーディングした私のコードが、今もそのままJAXAのシステムで動いており、現在は世界の8,000を超える機関で利用されているようだ。

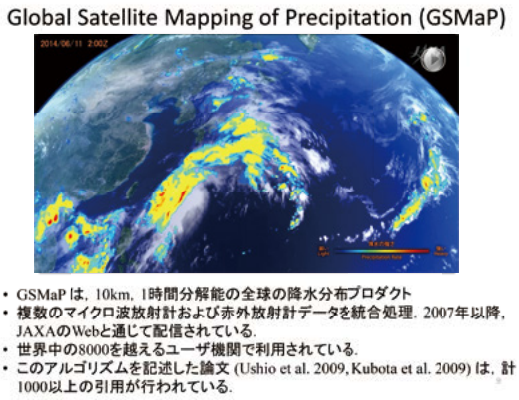



図3–3–9　GSMaP

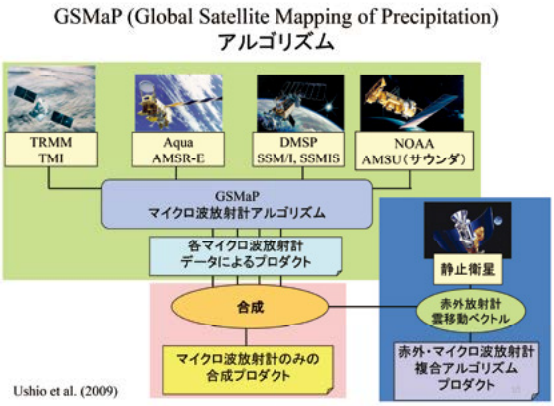



図3–3–10　GSMaPアルゴリズム

アルゴリズムを記述した論文は2009年に出したが、現在1,000以上引用されている。国際的にも、世界気象機関（WMO）の2019年の気候変動のレポートなどで、使われている。アジア太平洋地域にも貢献している。数年前にインドネシア気象局に出張した際、その報道スタジオでGSMaPの画像が映されていた。そのスタジオから毎日インドネシア全土に天気予報が放映されているということだった。

GSMaPはGPMという日米共同プロジェクトの一環だが、主要な中核プロダクトだ（図3–3–11）。幾つもの低軌道衛星から抽出した雨の情報と、雲の移動方向を抽出する静止気象衛星の情報を合成している。こういったプロダクトは日本以外にももちろんある。アメリカではNASA、NOAA、米軍研究所、大学等で同様なマップを作っている。世界中にいろいろなマップがあると、どれが優れているのかといわれるようになる。

WMOでは、そういった降水マップを同じ土壌で比較する議論をしている。私も議論に参加しているが、参加者はどれが一番と言うつもりはないと言いつつも、やはり意識はしている。

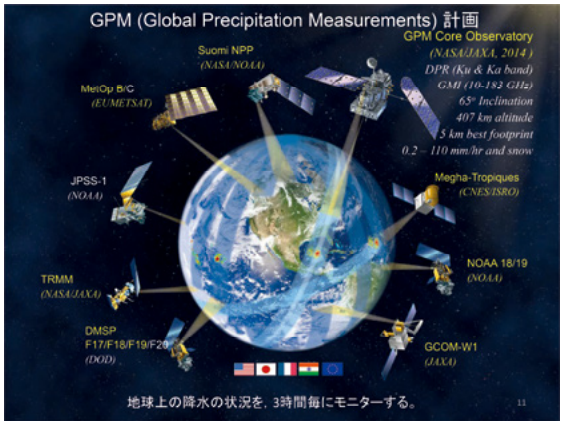



**図3-3-11　GPM**

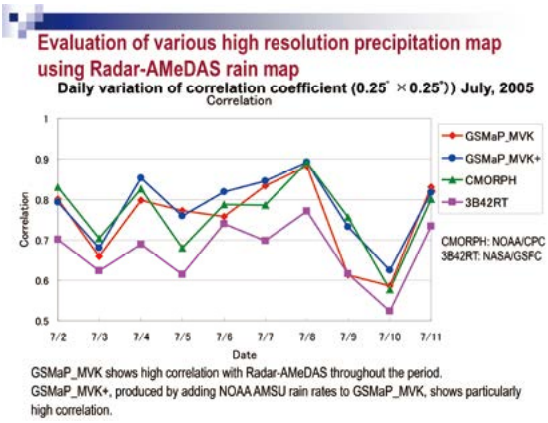



**図3-3-12　全球降水マップ比較評価**

図3-3-12はその例だが、日本のレーダーアメダスを真値として使って、いくつかのマップの日々の相関係数を比較したものだ。 GSMaPの青い線が一番上にあり、米国のCMORPHの緑の線と、紫色のNASAの3B42RTよりも高い相関係数を保っている。 GSMaPが実は世界一という状況だった。現在、アメリカは軍とNASA、NOAA、カリフォルニア大学がそれぞれ別々にプロダクトのアルゴリズムを開発していたが、全部解散して、一つのグループにまとまって、全てのいいところ取りをしたプロダクトを作ろうと躍起になっている。我々もいろいろな改定を重ねているが、そういった国際競走の状態になっている。

ここまでの話題を振り返ってメッセージを示したい（図3-3-13）。フェーズドアレイ気象レーダーもGSMaPも始めた当初の頃には、将来こういう状況になるとは自分も周りの方も全く想像していなかった。こういう状況になることが分かっていれば、ほかにもっと優秀な研究者が手掛けていて、私自身がやる必要もなかっただろう。ただ、当時は、誰もやろうとしなかったし、興味すら示されなかった。まさしく状況が様変わりした。

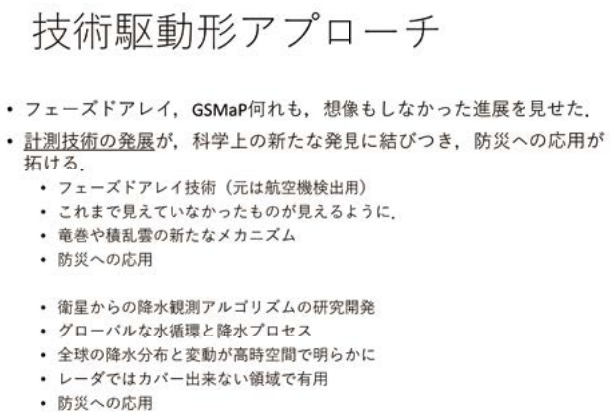



**図3-3-13　技術駆動系アプローチ**

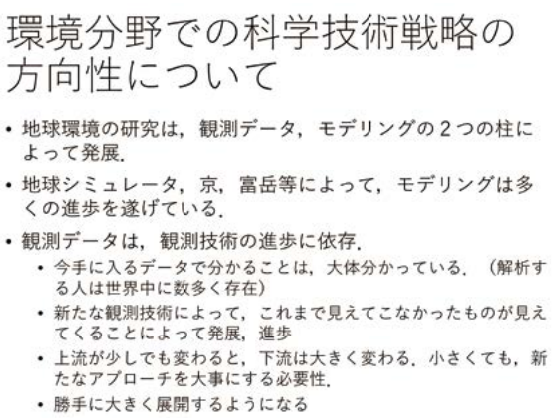



**図3-3-14　環境科学技術戦略の方向性**

計測技術の発展が科学上の新たな発見に結び付き、防災への応用が拓かれる経過をたどった。フェーズドアレイ技術はもともと航空機の検出用に発展してきたものだ。結局それがゲリラ豪雨等の速い変化を見せる現象に対しても有効だというアナロジーである。降水に適用したことで、これまで見えてこなかったものが見え

るようになり、どういうふうに積乱雲が発達するのかもより良く分かるようになった。積乱雲や竜巻の新たなメカニズムの解明につながり、そして防災への応用への用途が拓けてきた。

衛星からの降水観測アルゴリズムも、始めた当初は絶対無理だ、荒唐無稽だ、そこまで要らないだろう、など言われた。しかし、ちょっとやらせてみてください、と実際に進めると、たいへんよく発展した。グローバルな水循環と降水プロセスが高い時空間分解能で明らかになってきた。特に地上レーダーでカバーできない領域、あるいは地上レーダーが高くて購入できない発展途上国等での利用が急に進んだ。そこでも防災へ応用され、もはや社会実装の領域に使われている。

もう少し一般化して、環境分野での科学技術戦略の方向性を考える（図3-3-14）。地球環境の研究には、観測データとモデリングの2つの柱それぞれによって発展してきていると言える。モデリングに関しては、地球シミュレータ、京、富岳等のスパコンによって随分多くの進歩を遂げている。

観測データに関しては、どうしても観測技術の進歩に大きく依存する。見方を変えると、それだけに依存してしまっている。今や様々な衛星のデータも、レーダーのデータも入手できる。データ解析する人は世界中に数多いて、入手可能なデータで分かることは、もう既に大体分かっている。だから、データ解析の人たちは、新たな計測技術を常に期待して待っている。新たな観測技術によって、これまで見えてこなかったものが見えてくれば、論文も書けるし、様々な科学的プロセスが明らかになる。上流の観測技術が少し進歩すれば、下流のデータ解析ではすごく大きな変化になる構造だ。新しい計測技術で何か新しいデータが出ると、世界中の人たちが群がってくる。フェーズドアレイ気象レーダーもGSMaPも私の手を離れ、勝手に大きく展開している状況と言える。

その基になっているのは電磁気学や数学だ（図3-3-15）。その進歩が電磁波計測技術や信号処理技術といった基礎技術に反映される。それがレーダーシステムのような新規センシングシステムや、衛星ミッションを実現可能にして、これまで見えてこなかったものが見えてくる。そうして、科学上の発見や知見の蓄積や、降水プロセスなどのメカニズム解明、予測につながる。さらに様々な分野と融合して社会インフラシステムとして実装されていく。

図3-3-15　気候変動、安全安心への道筋

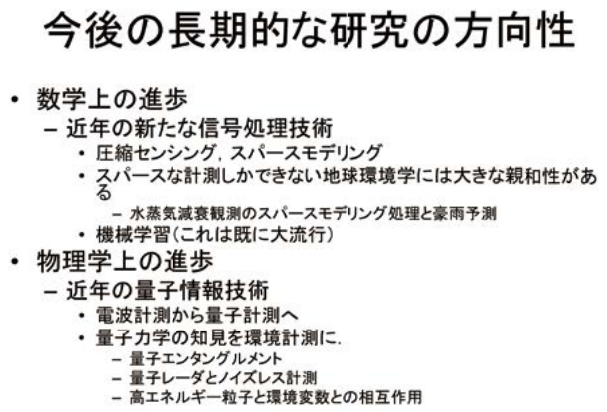



図3-3-16　長期的研究の方向性

それでは今後5年や10年で、どのような上流側の進歩が期待されるか。数学上と物理学上の2つの進歩がある（図3-3-16）。

数学上の進歩の結果、例えば圧縮センシング、スパースモデリングといった新たな信号処理技術が発展している。現状、社会実装やシステム技術よりもまだ前段階だ。飛び飛びでしか観測できないスパースな計測は、地球環境計測と大きな親和性がある。現状、地球環境分野で、まだ十分に使いこなせていない。

物理学上の進歩に関しては、量子情報技術、関連技術が非常に大きく発展している。現在の地球環境計測

は、マイクロ波計測や、VHF、UHFといったラジオ周波数といった電波計測が主で、やはり周波数の枠がある。今後、量子情報技術の地球環境計測への応用も期待される。

講演のまとめを図3–3–17に示す。

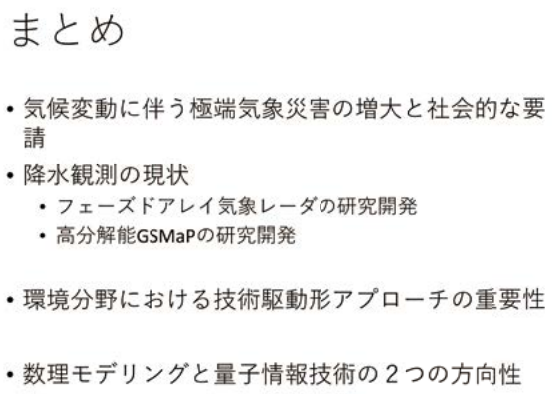



**図3–3–17　　講演のまとめ**

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：観測技術と理論研究や応用とのインタラクションについて伺いたい。新しい観測技術の開発が進んでいる中で、理論や応用側から観測側へのリクエストのようなものはどうか。

A：インタラクションは常に行われていると言える。ただし、測れるものは測れるし、測れないものは測れない。いろいろなリクエストを受けても、対応できないことが多い。例えば水蒸気の3次元分布を10ｍ間隔で測定したい、地面の中で深さ5 ｍの水分量を全球規模で知りたいといったレベルのリクエストに対して、対処はできない。

Q：信号処理技術の話題で少し触れられた、観測技術と数学や情報科学分野の共同研究の難しさや、そういう異分野の人が観測に入っていったときに大きく進展する可能性について、さらに伺いたい。国内と海外での状況も伺いたい。

A：実感として、分野間の壁は非常に厚い。なかなか難しい。例えば、純粋数学的な基礎数学に興味があってずっとやってきた方が、地球環境と言われても、数ある応用の一つにしか見えない。基礎数学では多くの人が既によく知っている知見を地球環境分野に適用しただけで、素晴らしい成果につながることがあるのだが。しかしながら、そういうメリットや、その学問分野の研究者として高い評価を得られる実感はない。壁の高さが依然としてある。海外でも、分野連携がうまくいく事例は非常にまれだ。そういう中で、応用数学出身で、理論に強くて非常に難しい数式を駆使できて、さらに大気科学の知識も持っていて、何とか課題解決しようと両面にしっかり取り組むスタンスの方は海外で見かけることがある。

Q：よく昔からXバンド帯の気象レーダーという言葉は耳にするが、水蒸気の雲の兆候を捉えられるようになった点について、マルチパラメーター・フェーズドアレイ気象レーダーの特徴について、より詳しく伺いたい。

A：偏波レーダーでいうVの変化とHの変化、位相の差を計測していくのがマルチパラメーターという特徴で、主に降水量の正確な推定につながる。それとフェーズドアレイによる高速測定の2つを両立させたのが、このマルチパラメーター、フェーズドアレイ気象レーダーになる。

# 3.4 台風・豪雨の航空機を用いた研究

坪木 和久（名古屋大学）

※講演日：2021年6月24日

最初に台風・豪雨研究の背景を紹介して、台風の航空機観測研究を中心にいくつか話題を提供する（図3-4-1）。

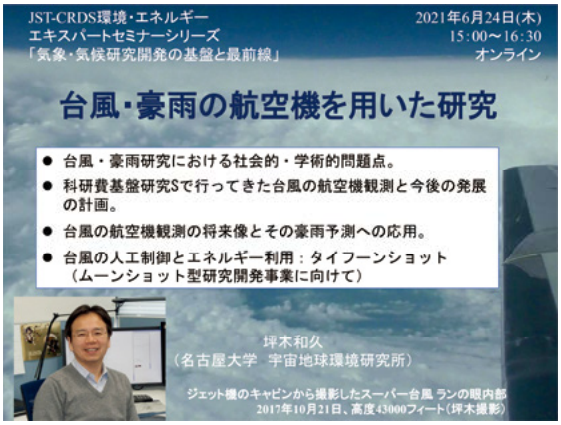



**図3-4-1　講演について**



**台風・豪雨研究における社会的・学術的問題点**

まず、防災という観点からお話する。およそ80年前に、寺田寅彦が、日本がいかに災害の多い国であるか既に述べている（図3-4-2）。日本の「地理的位置」が特殊であるために自然災害が非常に多い。そういうことが「天災と国防」という随筆にしっかり書かれている。

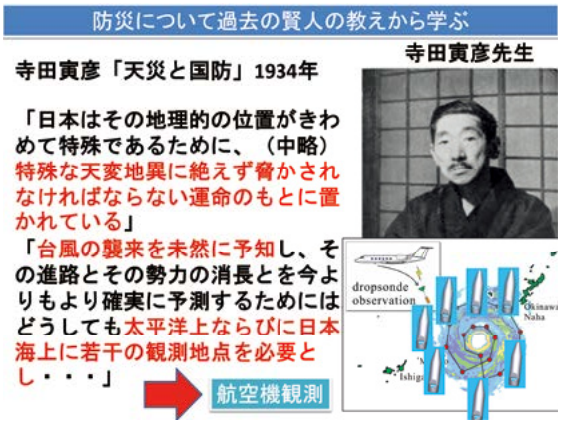



**図3-4-2　防災について過去の賢人の教え**

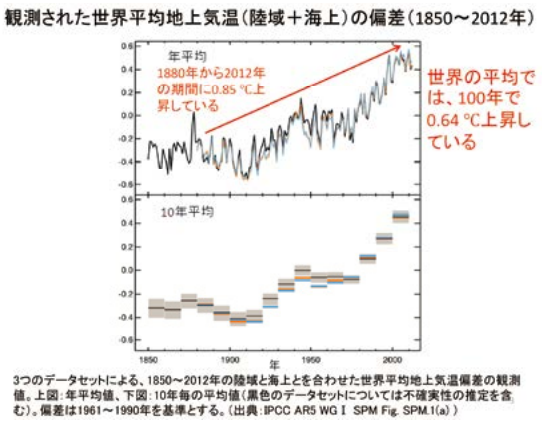



**図3-4-3　世界で観測された地上気温の偏差**

この随筆には、台風の襲来を未然に予知し、その進路とその勢力の消長を今よりも確実に予測するためにはどうしても太平洋上並びに日本海上に若干の観測地点が必要とすることがしっかりと書かれている。台風の進路はさることながら、勢力にも注目している。これは、寺田寅彦先生のまさに卓見だ。

台風の勢力の予測のためには、海洋上で観測が必要である。寺田先生の随筆から80年以上経過した現在において、そういった観測が十分行われているかと言えば、否である。気象衛星からの観測は進んだが、例えば気圧や気温などの直接観測ができていない。それを実現する手段がやはり航空機観測であると考えている。

災害の大きさをはかる指標の1つとして、保険金の支払額が引用される[1]。2020年6月時点までの風水害による国内の保険金支払額の上位10位を見ると、8つが台風に関する損害だ。台風は、依然として自然災害、特に風水害の中の大きな要因となっている。6位が大雪だが、9位に「西日本豪雨」と呼ばれた平成30年7月豪雨が入っている。

最も大きな損害を与えたのが2018年の台風21号だ。保険金支払額が1兆円を超えている。実際の被害額は、保険金支払額の数倍から10倍規模とみられている。

2019年の台風19号、台風15号が2位、4位に入っていて、支払額が約5000億円だ。台風19号では、千曲川が氾濫して、新幹線の基地が水没した光景が記憶に新しいと思う。

国外に目を転じると、2013年11月にスーパー台風ハイエンがフィリピンに上陸した。風速67 m/s以上の台風を「スーパー台風」と呼ぶ。ハイエンは中心気圧が900 hPa以下、最大瞬間風速90 m/s超とすさまじい規模で、同国の歴史でも史上最大規模となる死者、行方不明者あわせ8,000人を超える被害が生じた。フィリピンより北にある日本でも他人事ではない。進行する地球温暖化の影響によって、この規模のスーパー台風が将来、日本にも襲来しうると考えられている。

図3-4-3はIPCC第5次評価報告書の図だ。年々の変動はあるが、10年平均をとると、明らかに上昇している様子がわかる。特に2000年以降、高温の状態が続いている。過去100年で世界平均0.64度上昇している。

図3-4-4は気象庁のデータで、日本での気温の基準値からの偏差だ。過去100年を見ると、約1.24度上昇している。地球温暖化では地球全体が同じように気温が上がるのではなく、地域によってその上昇の仕方は異なる。特に、日本は上昇率が大きく、世界平均の約2倍の温度上昇だ。

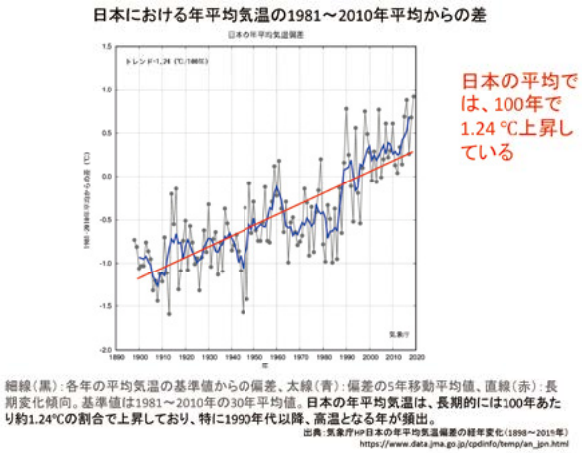



**図3-4-4　日本での平均気温偏差の年変動**

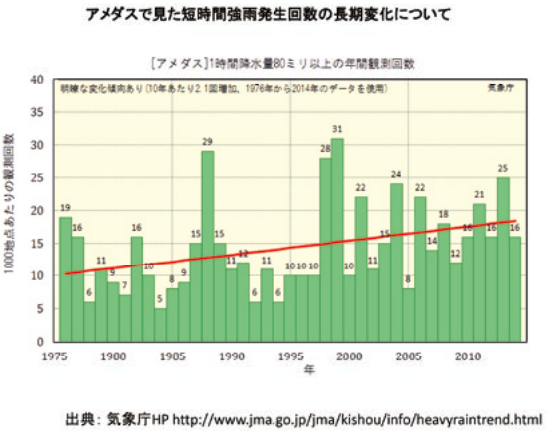



**図3-4-5　短時間強雨発生回数の長期変化**

1　（一般社団法人）日本損害保険協会
https://www.sonpo.or.jp/report/statistics/disaster/index.html （2021年6月アクセス）

温暖化に伴って雨も強くなってきている（図3–4–5）。気象庁のアメダスのデータの棒グラフだが、年間当たりに1時間80 mm以上の強雨が何回起きたかカウントしている。赤い線は、回数が増えるトレンドを示している。実際、多くの方が肌感覚としても、だんだん強い雨が増えてきたと感じられていることだろう。

台風については、気象研究所の研究[2]によると、日本の太平洋側の地域に接近する台風の数が増えている。その接近する台風について、強度が大きくなっている。また、台風の移動速度も遅くなっている。移動速度が遅くなると、それだけ風雨にさらされる時間が長くなってしまい、災害がより起こりやすくなることを意味する。

ここまで、これまでに上陸した台風の統計や観測値、気象庁の数値モデルを用いて実施された報告を紹介してきた。ここで、私が名古屋大学で1998年から開発してきた雲解像モデル「CReSS」の研究を紹介したい。これを用いて、伊勢湾台風の全貌の再現に成功した（図3–4–6）。伊勢湾台風は1959年に上陸して、5,000人を超える人的被害を出した。この台風を経験した人は多いが、当時は気象衛星もレーダーも整備できておらず、全体像は見えていなかった。 CReSSのモデル開発に加え、コンピューターの高速化、データの整備などによって、伊勢湾台風などの過去のスーパー台風が再現できるようになった。

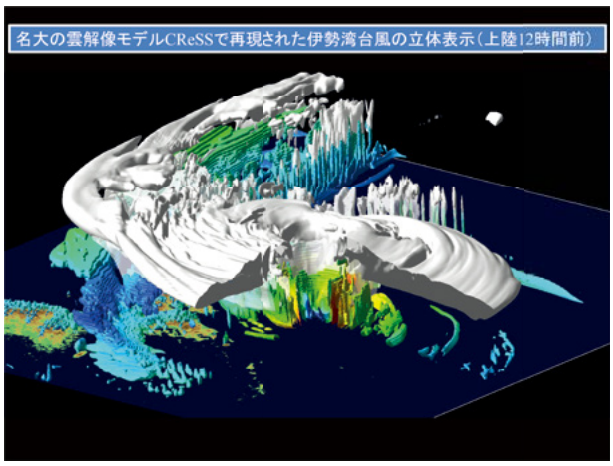



**図3–4–6　CReSSによる伊勢湾台風の再現**

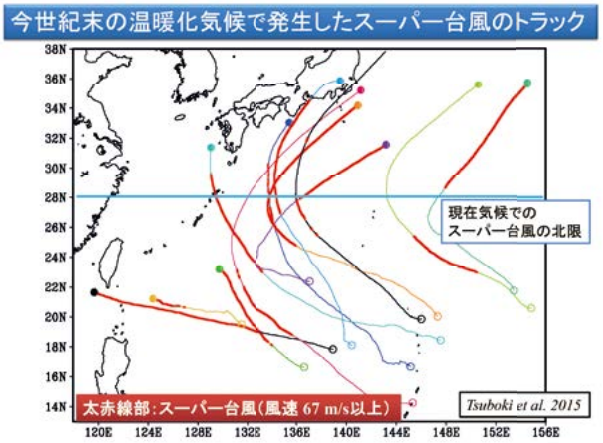



**図3–4–7　今世紀末の気候でのスーパー台風**

こういった数値モデルを使って、将来、たとえば今世紀後半の台風の研究も行ってきている。図3–4–7はその一つの例である。今世紀後半の気候の条件で、高解像度にシミュレーションして、将来の台風の強度や経路を計算したものだ。 CReSSは台風の強度を定量的に評価でき、今世紀後半の条件で、現在の気候より強いスーパー台風が発生するとシミュレーションされた。図中には12個の台風の経路が示してあり、そのうちの赤い太い線で示した部分がスーパー台風である期間を表している。現在の気候ではおおよそ北緯28度付近、奄美大島付近がスーパー台風の北限になっているのだが、今世紀末の気候では、赤い線が北緯30度を超え、本土に上陸する可能性が示されている。

現在の気候に比べ、今世紀末の気候では、中心気圧が10 hPaぐらい低い台風が増える。つまり現在よりも強い台風が増える結果になっている。

2 Yamaguchi, M., and S. Maeda, 2020: Increase in the number of tropical cyclones approaching Tokyo since 1980. J. Meteor. Soc. Japan, 98, 775-786. https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-039

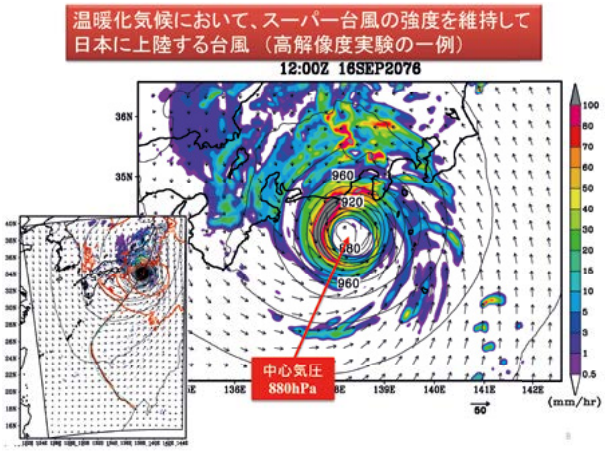



**図3-4-8　　将来のスーパー台風の高解像度実験**

図3-4-8では、「2076年9月16日」と書いてあるが、その年月そのものには意味がなくて、今世紀後半の条件だと思って見ていただきたい。この未来の台風は上陸直前で880 hPaという極めて強い勢力を維持している。しかも、伊豆半島に上陸する進路だ。この進路は東京湾にとって最悪のシナリオだ。このスーパー台風で計算すると、東京湾の最も奥では6 mを超える高潮が発生するという推定になる。

ここまで見たように台風は、現在の気候でも、未来の気候においても大きな災害をもたらす。しかしながら、台風について大きな問題が2つある。

1つ目は、台風の強度の推定値は非常に誤差が大きいことだ。

図3-4-9の実線は日本の気象庁が出しているデータを基に、風速54 m/sを超える猛烈な台風の数を約60年間にわたって表している。点線は米国のJoint Typhoon Warning Centerのデータを基に、同じタイプの台風の数をカウントしたものだ。1980年ぐらいまではあまり違いはないが、それ以降に大きな差が出てきている。

その大きな原因の1つが、1987年に米軍の航空機観測が終わったことだと考えられている。1980年代後半以降は直接観測のデータがないので、実際どちらのほうが正しいか分からない。つまり、強い台風の強度データについて、誤差が非常に大きくなっている。

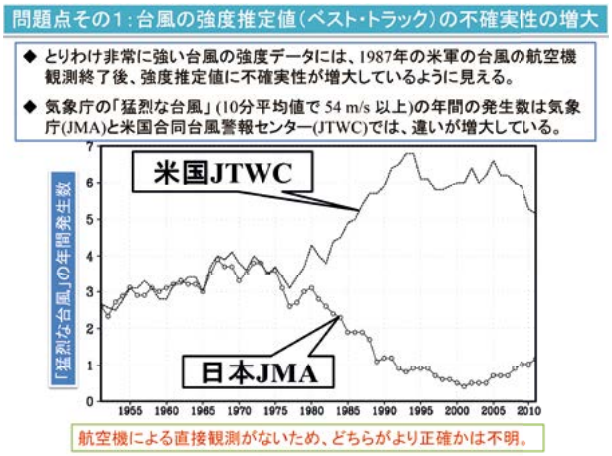



**図3-4-9　台風の強度推定値の不確実性**

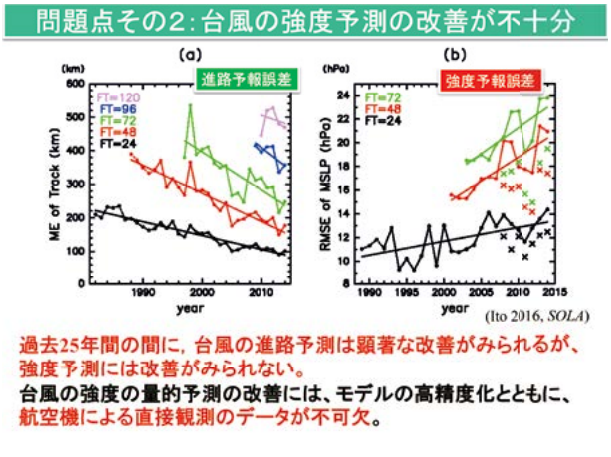



**図3-4-10　台風強度予測の改善が不十分**

（Ito 2016, SOLA）

2つ目の問題は、台風の強度予測が直近30年ほど、ほぼ改善されていないことだ（図3-4-10）。

左側の図が進路予測の誤差を示している。黒色が1日前、赤色が2日前、緑色が3日前からの予測だが、

いずれも近年になるほど、誤差の距離を小さくできており、改善が進んでいる。

右側の図が台風の強度予測を表している。進路予測と対照的に、年とともにほとんど改善しておらず、むしろ悪くなっている。その原因の１つとして、急速に強化をする台風が増えてきていることがあげられる。これは日本の気象庁だけでなくて、世界中の気象予報機関に共通した問題になっている。

**科研費基盤Ｓでの台風航空機観測**

地球上の熱帯低気圧と、その航空機観測の取り組みを図３–４–11にまとめた。この図に描かれている線は、熱帯低気圧の進路を表している。色で強度を表現している。西太平洋では台風、大西洋と東太平洋ではハリケーン、南太平洋やインド洋ではサイクロンという呼ばれ方になる。線の多さと色で分かるよう、西太平洋は地球上で最多最強の熱帯低気圧の台風が発生する地域である。

ハリケーンの航空機観測については、米国が高度３kmという高度で貫入観測を行っている。

西太平洋の台風の航空機観測だが、実は台湾が自国に向かってくる台風について、台風の周辺を航空して観測している。

そこで、我々も科研費基盤研究ＳのT–PARCIIいうプロジェクトで、日本の航空機を用いた観測を実施した（図３–４–12）。高度15 kmまで上空になると、台風の上端高度にあたる。その高度で台風の眼の中に入って台風の全層観測を行った。台風の目に入る前に、台風の周辺でドロップゾンデをたくさん落とし、鉛直方向のデータを取得した。そのデータを数値モデルに取り込み、高精度の数値予報につなげる連携や、台風の再現実験、感度実験を行う研究を実施した。



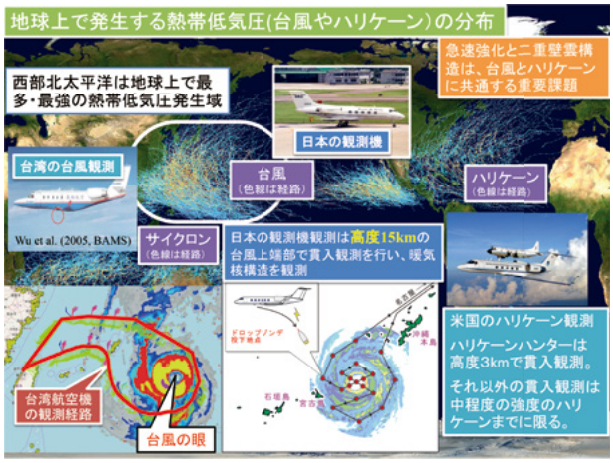



図３–４–11　地球上の熱帯低気圧の分布

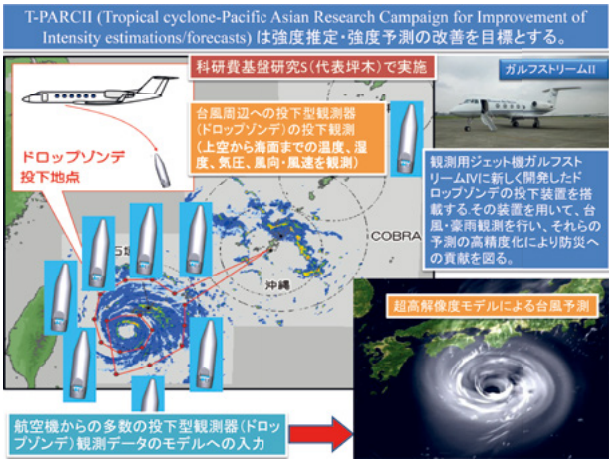



図３–４–12　T–PARCIIの航空機観測

図３–４–13　開発した軽量ドロップゾンデ

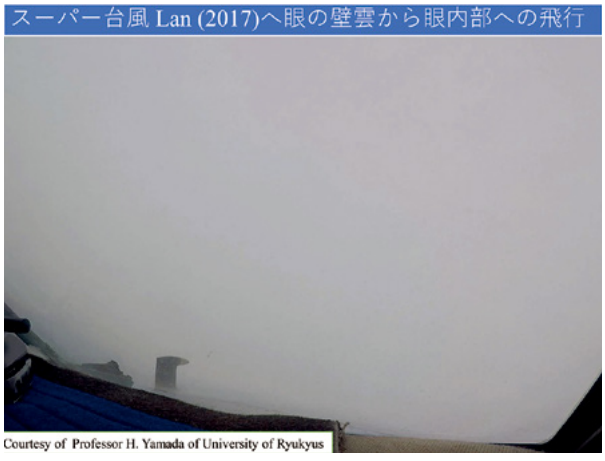



図３–４–14　壁雲から眼へ向かう航空時の光景

航空機から投下するドロップゾンデは、図3–4–13のような手のひらの上に乗るくらい小さく、重さ110 gと非常に軽いものを開発した。これまで世界で使われてきたドロップゾンデはパラシュートで落下速度を調整して観測していた。我々の新しく開発したドロップゾンデはパラシュートを用いない代わり、従来よりもかなり軽量化している。自重が軽いので、落下する速度が遅くなる。ボディは発泡スチロール製のように見えるが、実はトウモロコシ由来の生分解性素材である。海洋マイクロプラスチック問題も当時から配慮していた。

2017年のスーパー台風ランで、初めてこのドロップゾンデを用いた直接観測を行った。スーパー台風ランが非常に強い状態のときに、航空機で西側から接近して、台風の眼の中に入った。南側から眼をいったん出て、眼の周辺を観測して、もう一度西側から入り、旋回して抜ける航路をとった。その航路の途中でいくつもドロップゾンデを投下して観測を行った。高度は4万3,000フィートで、約14 kmに相当する。その高さからドロップゾンデを射出して、台風の全層にわたる観測を行った。

この観測は非常に危険ではないかと思われるだろう。私は実際にこの航空機にのって観測をしているのだが、実は、このような高高度では安全な飛行ができる。キャビンの中では立っていられるくらいの小さな揺れしかない。そういう状態だと我々は分かっているので、このような高高度を選択している。

だんだんと航空機が台風に近づいていくと、航空機先端のレーダーから台風の眼が見えてくる。台風の眼は壁雲が取り巻いている。壁雲が最も危険で、壁雲を突き抜けるときが揺れやすい。西側から入った理由の1つが、台風の眼の中心まで50マイルほど接近した際、レーダーで西側に壁雲が弱いところが見えたことだ。

図3–4–14は、まさに航空機が眼の壁雲を突き抜けているときのコックピットからの写真である。これはなかなか見られない風景で、日本人の研究者としては初めて、日本の航空機を用いてスーパー台風の中に入ったときの記録だ。眼の壁雲を突き抜けているときは視界すべてが真っ白だが、壁雲を突き抜けて眼の中に入ると、一気に視界が広がる。航空機の下には海面が見えるが、高度1 kmぐらいの低い層にある雲も見えている。進路方向、正面には高度15 kmまで達する壁雲がそそり立っている様子が見える。

壁雲を抜けているときは若干がたがた揺れが、眼の中に入った途端、静穏になる。眼の中は暖かく、非常に乾いた空気の世界になっている。さらに小さなメソサイクロンや、眼の小さな渦も観測できた。我々のドロップゾンデの投下地点は、この眼の中と眼の周辺だ。特に、壁雲周辺で多く投下している。眼の中心ではほとんど風がないが、眼からたかだか40 kmぐらい離れた壁雲では風速80 m/sと猛烈な風が吹いている。

ここまで2017年のスーパー台風ランでの航空機観測について紹介した。2018年にも、スーパー台風チャーミー（台風24号）が発生し、その航空機観測も行っている。この観測では、航空機からリアルタイムでデータを日本の気象庁へ送り、そのデータはさらに世界中の気象予報機関にも送信された。

その結果、このときのドロップゾンデのデータは気象庁で解析され、実際の台風予測、予報に用いられた。日本の気象庁の予測だけではなくて、アメリカ、ヨーロッパ、イギリスの気象機関の予測にも利用された。

**台風の航空機観測の将来像と豪雨予測応用**

航空機観測研究をさらに前に進めたいと考えているが、我々は台風の中でも、勢力の強いスーパー台風に学術的にも注目している（図3–4–15）。

今年、2021年にも台風2号が既にスーパー台風に成長していた。なぜスーパー台風が学術の観点でも重要かという点だが、強度及び強化速度の上限値であるためである。阻害要因がない環境で発生する。言い方を変えると、スーパー台風は、台風の成長にとって理想的な環境で発生する理想台風だ。最大強度をとって、なおかつ台風としての非常に基本的な構造をとるだろうと考えられる。

台風の構造の中で注目するのは、眼と眼の壁雲だ。眼の壁雲は台風のエンジンの役割になっている。そして、眼の中には暖気核が形成される。これが台風の強度を決める。理論式だが、台風の中心気圧は台風の眼の中の温度の逆数の鉛直積分で決まる。この眼の中の温度が、すなわち暖気核と呼ばれる空気の温度であり、台風の強さである中心気圧や、台風の構造に対して重要な役割をもっている。

台風の強度予測誤差をもたらすものとして、スーパー台風の形成に関する2つの大きな難問が残されている。

それは「急速強化」と「二重壁雲」と呼ばれる問題だ。ともに文字通りの現象だが、これらは共に暖気核と関係している。

急速強化の例として、今年発生したスーパー台風スリゲ、台風2号では1日で60 hPaの気圧低下が起きた。急速強化は、スーパー台風となるための重要な強化プロセスだが、台風の強度予測にとって厄介で、大きな誤差をもたらす現象だ。非常に重要な現象だが、数値モデルではまだ再現が難しい。

二重壁雲構造は、スーパー台風のような強い台風でみられる現象だ。内側壁雲と外側壁雲という二重構造が形成される。この内と外の壁雲の交替現象が起こると、台風の強度変化を引き起こす。その顕著な場合が、急速強化につながる。

これらの問題を明らかにするため、さらに航空機観測を進めていこうと考えている。西太平洋で、スーパー台風が発生する領域は全域ではなく、ある程度の範囲に絞られる。日本での地上観測点としては与那国島、南大東島があるが、名古屋から無着陸での航空機観測と連携が可能だ。これらの観測データを数値モデルに取り込むことで、耐風速の精度を上げる。

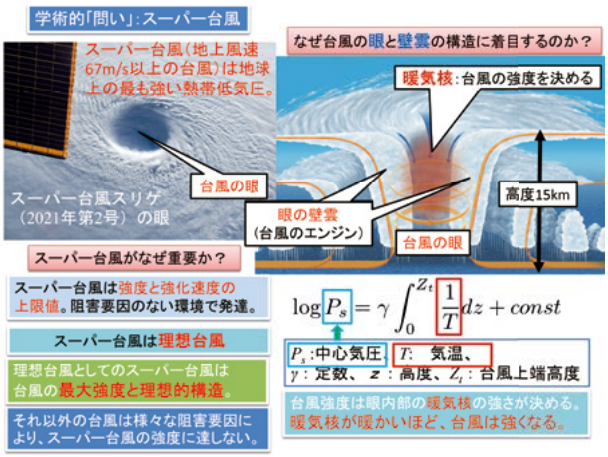



**図3-4-15　スーパー台風に注目する学術的理由**

**図3-4-16　国際共同での台風豪雨観測の構想**

2022年から、このような連携研究を米国、台湾、韓国との国際共同観測体制で行いたい。日本のT-PARCIIに加え、アメリカではPRECIP、台湾はTAHOPE、韓国はKPOPという合計4つのプロジェクトで連携して観測する構想だ（図3-4-16）。

与那国島が重要な拠点の1つだ。すでに我々は観測レーダーの設置を進めている。

ここまで、台風の性質でも、とくに風に関する観測研究について話してきたが、台風に伴う大雨や、梅雨前線に伴う大雨も重要だ。

2019年の台風19号、「東日本台風」での水蒸気の分布をみると、台風の中心の東側に非常に太く、強い水蒸気の流れがある。これは最近、大気の河、英語ではatmospheric riverと呼ばれている現象だ。2015年台風18号でも発生して、鬼怒川を決壊させた。さらに2020年の梅雨前線では、熊本で発生した線状降水帯でも、このような水蒸気の流れが見られている（図3-4-17）。

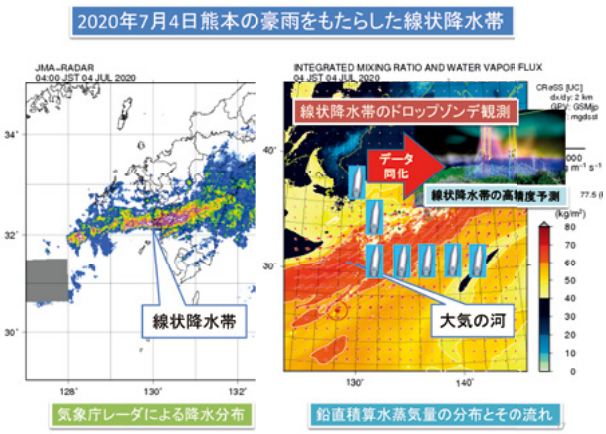



図3-4-17　2020年熊本豪雨での線状降水帯とその航空機観測の概念図

図3-4-18　さらなる発展研究の夢

先ほどまでお話ししたドロップゾンデ観測の適用先は台風だけに限定されない。例えば、大気の河を横切るように投下していき、そのデータを数値モデルに取り込むことで、線状降水帯の高精度予測にも貢献できると考えている。

今後、さらに発展した研究として、航空機に雲レーダーを搭載して、ドロップゾンデに加えてレーダー観測も行っていきたい（図3-4-18）。さらに発展した姿として、夢をもっている。現在、我々は有人の航空機でドロップゾンデを投下する観測を行っているが、これを無人航空機にできないか。成層圏を1週間、1か月と長期間飛行できる無人航空機ならば、太平洋上に発生した台風を追いかけながらモニタリングできる。必要に応じて無人機からドロップゾンデを投下して得たデータにより、台風の高精度予測ができ、防災にさらに貢献できる。こういった発展をぜひ進めていくべきだと考えている。

**タイフーンショットに向けて**

台風の常時観測と高精度予測という夢の、さらに先だが、台風の人工制御という夢がある。

現在、CSTIでムーンショットを進めているが、新しい目標を検討するムーンショット・ミレニア・プログラムが走っている。そのフィージビリティースタディーの1つで、タイフーンショットというプロジェクトが横浜国立大学の筆保教授を中心に実施されている。

2050年の社会を目指した検討だが、温暖化に対して、現状のまま対策が進まなければ、先ほど述べたよう、台風は激甚化していく。日本などの中緯度域における台風のリスクの増大を、ただ手をこまねいて見ているだけでよいはずがない。温室効果ガスの排出削減は不可欠であるが、さらに適応策を進めることが重要である。そのひとつとして、タイフーンショットでは、台風の人工制御を提案している。台風の脅威を減らせると、災害の軽減に加えて、台風のもつ巨大なエネルギーを発電にも利用していけるのではないか。そういう夢を掲げ、可能性を検討している。

風力発電は風のエネルギーを利用するが、日本の場合、陸上で風車を設置する土地がほとんどない。最近、海岸沿いや洋上での風力発電の検討が進められている。洋上風力だと何も問題がないかと言えば、漁業権等の難しい問題もある。では、別の発想はないものか。もっと積極的に船で電気を発電しにいくという夢のアイデアがある。船上で発電したエネルギーで、海水から水素を作って運ぶ。30年先にこういったアイデアが実現できないかという検討も行っている。

台風制御については、実はおよそ50年前、米国でハリケーン制御の実験が試みられたが、うまくいかなかった。その原因は、そもそもハリケーンは人間が何もしなくても自然の条件でどんどん変化していく。人間が人為的に行ったインパクト物質の散布で変化したのか、あるいは自然の条件でもともとハリケーンがそう変化す

るものだったのか、その区別が当時できなかった。

約50年前には現在のようなスパコンも、ハリケーンを精度高く再現するモデルもなかった。現在、スパコンの性能があがっている。さらに、先ほど紹介した、我々の雲解像モデルCReSSを使えば、台風を非常に高精度に再現できるようになっている。スパコン、モデルともに発達したことで、過去の台風を再現し、将来の台風もコンピューターの中で生成させて検討できるようになってきた。それ以外にもメカニズムの理解の深化、技術の進歩がある。50年前と違って、台風に対して人為的に行ったインパクトの影響を自然の変化と区別して、検証できる土台ができてきている。

台風制御といっても、台風を消し去ろうという考えではない。台風の強度を数%弱くするだけで減災に非常に大きなインパクトがある。

こういった夢の構想の中で、名古屋大学は航空機観測を担い、台風研究を進めていこうと考えている。台風災害を共有するアジアの国々に対しての国際協力も進めていきたい。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：台風の眼の立体構造だが、雲が上から見て、真っすぐすとんと落ちている台風だけではない。中心側にも雲がかかっている台風がある。気象衛星ひまわりは優れているが、上から見た2次元画像だと、その区別ができず、予測の難しさの原因の一つになっている。これに対しての航空機観測の意義についてさらに伺いたい。

A：台風の眼の上空で雲がかかることで、大きな誤差になっているのはその通りだ。

たとえば、2017年に観測した台風ランでの事例だが、台風が北上していくにつれて、気象庁では中心気圧が下がっていく推定値を出していた。すなわち台風が強化していくという推定だった。我々が2日間にわたって航空機観測したところ、実際には中心気圧が上がっていった。つまり、台風は弱まっていった。我々の航空機観測のデータは、本当に台風の眼のほぼ中心で観測しており、推定値よりも真値に近い観測値だ。こういった点からも台風の直接観測の必要性がある。

Q：米国のハリケーン・ハンターは観測データを公開している。日本でも国立情報学研究所（NII）の研究者が過去の台風の衛星画像データベースを作成して公開している。一方、教えて頂いた通り、それらのデータだけでは分からない要素がある。その点についてさらに伺いたい。

A：台風の眼の中の暖気核は、上空十数kmまで広がっており、上空の構造が重要だ。ハリケーン・ハンターは高度1万フィート、約3 kmぐらいの高さで台風の眼の中に突入している。そのため、暖気核の全体のデータは得られていない。暖気核の全層観測が必要だと我々は考えて、高度14 kmぐらいで眼の中に入る点で違いがある。高度3 kmの下層で台風に突入するにはハリケーン・ハンターのような特殊な航空機が必要で、彼ら以外には難しい。しかし、我々は観測という点に重きを置いている。上空14 kmから全層観測して、暖気核の全体像を調べることが重要である。そのデータは、ハリケーン・ハンターでは決して得られない。我々の観測のユニークな点であり、重要な意義を持つ点でもある。

Q：シミュレーションの世界で台風を制御する実験は理解できたつもりだが、実際の世界での台風の制御はどのように行われるのか伺いたい。

A：実際の台風の制御は様々な方法が検討される。我々が考えている最も重要な点は、台風以外の自然環境に全く影響を与えないことだ。その観点で、航空機を用いて台風の雲に影響を与える方法が最も現実的だと考えている。台風は雲の塊でもある。その雲にインパクトを与え、台風の強度を変える方法を主に検討している。

Q：エネルギーのバランスを変える方法のように認識した。日本の上空で台風のエネルギーが減ったら、ほかの国にエネルギーが出ていくのではないかと懸念についてはどうか。

A：まず、エネルギーのバランスを変えるというより、エネルギーの流れ方を変えるという形である。台風のエネルギーはすさまじく大きい。進路が他の国に変わる懸念だが、実際にそこまでの大きな変化が与えられるとは考えていない。3 m/sの風の低減で30%ぐらい被害を抑えられる話題を紹介したが、まさにそのような僅かな変化で大きな防災効果を2050年の夢として目指している。これは、中心気圧では数hPaから10 hPaの低下に相当する。進路については数度程度の変化をもたらす範囲だ。数度では他の国にまでは台風進路は変わらない。東京に上陸しそうだった台風が名古屋に変わるといった懸念にはまさに非常に注意が必要だ。

Q：台風の進路は、その周りの外場、大規模な大気の循環にも関係すると思う。シミュレーションモデルでも、その大規模な大気の流れを含めて進路は数度しか変わらないのか。

A：シミュレーションでは、与えるインパクトはかなり自由に検討できるので、数度よりもっと進路が変わる結果も出る。それを実際に適用できるかとなれば、やはり僅かな進路の変更をもたらすの範囲でしか恐らくできないだろう。

台風は積分値として最終的な進路や強度が変わってくる性質がある。もし、台風の発生初期の時点でインパクトを与えると、数度よりも大きく変わる可能性はあり得るが、これについては今後慎重に検討が必要である。台風予測を高める研究に、災害予測の研究も加えるという流れである。僅かな変化を与えることで、どのくらい災害を抑えられるか調べる研究として考えている。

# 4 ｜ 衛星で知る地球環境変化

## 4.1 JAXAの地球観測衛星 −ALOSシリーズを中心として−

祖父江 真一（JAXA）

※講演日：2021年7月15日

本日はJAXAの地球観測衛星、特にALOSという高分解能系の衛星シリーズに関してご紹介する。私は現在、地球観測衛星のだいち2号（ALOS-2）のプロジェクトマネジャーを務めており、特にその話題をお話したい。これまで主に地球観測衛星の地上システムの開発や将来の地球観測衛星の計画立案に携わってきたが、月を見る人工衛星かぐやの地上システムの開発・運用も担当した。かぐやでは、打ち上げる前から、打ち上げてから月に落下するまで携わることができた。

最初に簡単にリモートセンシング（以下、「リモセン」と略。）の基礎を説明する。その後、ALOS-2を含むALOSシリーズについてお話する。

**リモートセンシングについて**

リモセンとは、文字通りリモートにセンシングすることで、対象物を遠隔から測定する手法である（図4-1-1）。物体は形状や状態が違うと、電波や可視光の反射や放射の特性が違ってくる。電波や可視光はすべて電磁波で、違いは波長だ。波長は周波数にも置き換えられる。リモセンは、反射や放射してくる電磁波の違いを利用することで、遠隔で、物体を区別して、その状態を調べることができる方法だ。物の区別は可視光なら色で区別されるが、色は電磁波の波長で決まっている。したがって、電波でも同じように波長帯で違いを区別できる。土や植物、水面、地表面を跳ね返ってくる電磁波の強さによって区別できる。

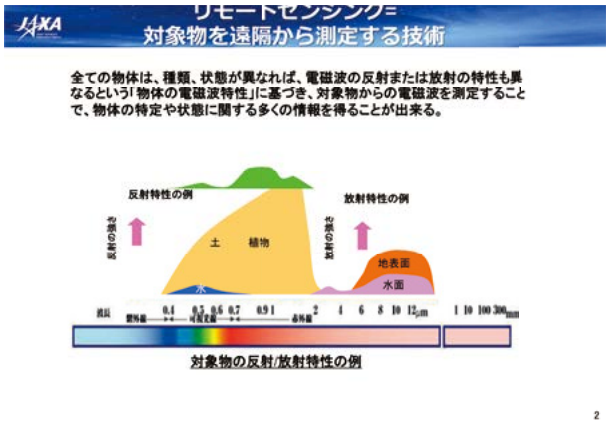



図4-1-1　リモートセンシングとは

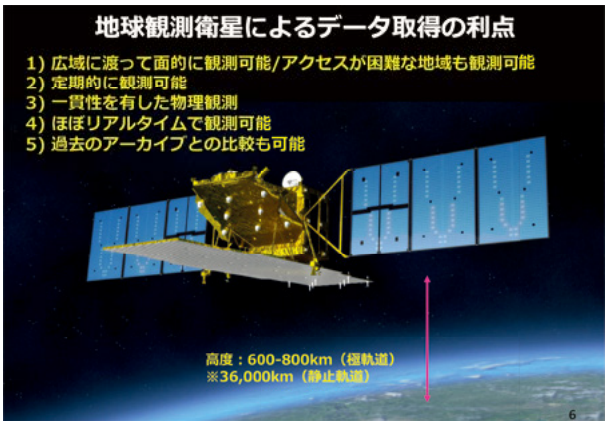



図4-1-2　人工衛星によるデータ取得の利点

電磁波を離れた場所から測定する技術を応用するわけだが、人工衛星という高いところから見ると、複数の利点がある（図4-1-2）。より広い範囲を同時に見られる。一度に面的に物を見られる衛星がずっと宇宙空間を飛んでいるので、繰り返し同じ場所を一貫した形で見られる。見た結果を何十分後には地上に送信できているので、まさにリアルタイムに近い状況が分かる。過去から継続して繰り返しデータを蓄積していけば、過去との比較ができるようになる。例えば災害が起こる前と後とで情報を比較できるようになる。

人工衛星のリモセンで、全て何でも思い通り観測できるかといえば、トレードオフになる制約がある（図4–1–3）。どれだけ細かく見られるか、どのくらい繰り返しで見られるか、どの波長で見るかという3つの軸がある。この3つのバランスをどうとるかによって、見られるもの、見える細かさ、時間的にどれぐらいの頻度で見えるか、が変わってくる。特に、どれだけの幅をどの時間帯で観測するかだが、一度に観測できる観測幅（観測頻度）＝横幅に大きく依存する。横幅を広くすれば、逆に一個一個の見られる点（空間分解能）が粗くなっていく。非常に細かく見ようとすれば、一度に見られる領域が狭い範囲に限定されてしまう。例えば軍事の偵察衛星の性能に近いようなもので、例えば10 cmまで区別して見たい場合、一度に見える横幅の範囲は数km以内になる。そうすると、地球一周が約4万kmなので、1 kmの幅に限って地球一周見るだけで4万点と膨大な数を見ないといけない。1機の人工衛星だけで、それだけ細かく区別して広く見るのは不可能だ。逆に、粗く見ていくいくことで、広い範囲を見る発想の衛星もある。たとえば、GCOM衛星はそういう発想で、粗いけれども、1,000 km以上の幅を一度に見えるようにして、日本のだいたいの領土が1回でほぼ測れて、ほぼ毎日取れる。そういったトレードオフの関係があるので、利用目的の用途などに応じて何を優先するか変わってくる。

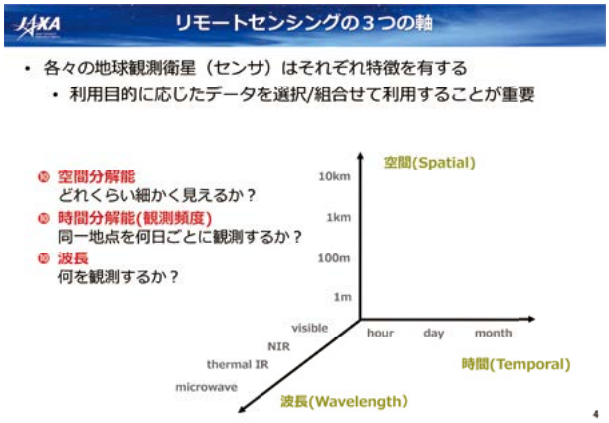



**図4–1–3　　リモセンの3つの軸**

**空間分解能、時間分解能について**

細かさとしてお話したのは、専門的には分解能と呼ぶ。大きさを識別して見られる細かさが空間分解能で、時間の識別できる細かさが時間分解能だ。

図4–1–4で、空間分解能についてご紹介する。少し古い衛星も一緒に載せている。一番下のMODISと言われるものだと250 mぐらいの幅が撮れるかわりに、粗い。 GCOM衛星に積んでいるSGLIがだいたいこのぐらいだ。 ALOS衛星は、上のほうのASTERからRapidEyeのあたりに該当する。一度にGCOM–Cなどに比べて狭い範囲しか見れない代わりに、5 mよりも細かく見える。ただし、ALOS衛星に搭載しているレーダは電波なので、こういった光学のカメラで観測するのと同じように複数の波長でのカラー画像では見えない。細かさ、空間分解能のわかりやすさの図として、聞いてほしい。横幅と、一度に見える観測幅と細かさはトレードオフになることはご理解いただけたと思う。より細かい分解能のデータはビジネスになるので、無償データではなく、有償データを提供する商業衛星になっている。相場は昔だと、25 $km^2$ぐらいのデータで5万円から10万円だった。

先ほど御説明した時間分解能と空間分解能のトレードオフについて、図4–1–5で示す。1回に測れる観測幅と時間分解能、何日ごとに見えるかというのは同じ横軸、1回の観測で1点当たりで見える細かさとが縦軸の形になっている。たとえば、毎日見ようとすると、細かさとして250 mから1 kmぐらいまでとなる。先ほどお話ししたGCOM–Cがここに該当する。ALOS–2では、2週間から1か月に1度程度の頻度だ。この理由は、3 mなどの細かさで見るために、横幅50 kmまでしか見えないという制約を受けるためで、その50 kmの観

測幅（横幅）で同じ場所を同じ条件（観測角度など）で見るために42～56日かかる。

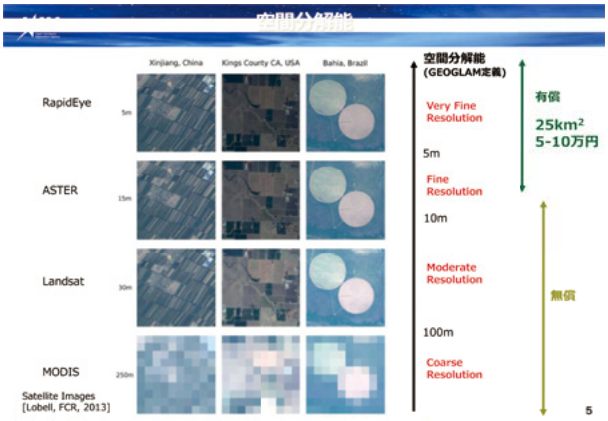



図4–1–4　空間分解能

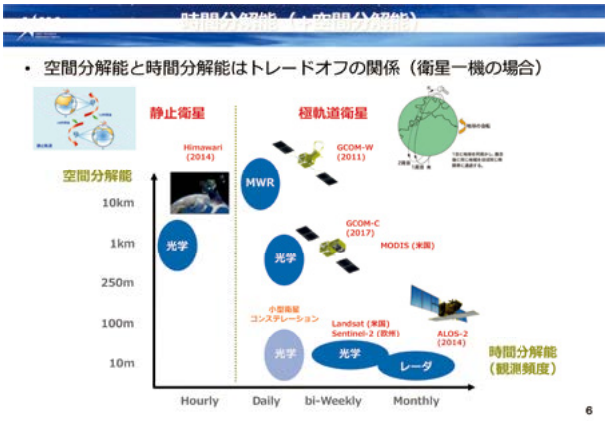



図4–1–5　時間分解能

**波長について**

図4–1–6で波長についてもう少しお話する。左側にある、光学（オプティカル）と言われるリモートセンシングの手法は、太陽光を光源として、太陽光が地表面に当たって反射してくる光を波長帯の違いで区別をして、物質の状況を見ている。2つ目は熱赤外を見る方式だ。地球も赤外線を放射しているので、それを見ることによって地表面の温度を見る。一番右側がマイクロ波のリモートセンシングだ。マイクロ波は赤外線よりも波長が長い。地表面はマイクロ波も放射しているので、それを見る。 ALOS–2衛星では、地表面から出ている放射や太陽光の反射を見るのではなくて、宇宙空間にある衛星レーダから電波を地表面に向かって照射して、その反射を見る形になる。これはアクティブレーダと言われる方式だ。これ以外は全て太陽光か地球そのものからの放射を使って観測する方式となる。その波長帯によって見えるものが違ってくる。

マイクロ波センサと光学センサの違いだが、人の目で見るのと同じように地球表面を見たい場合は、光学カメラで見たほうがよい。光学センサのほうが情報が多くある。短波長赤外光から熱赤外光も見ていくこともできる。光学センサの弱点は夜は見えないことと雲があったら地表面が見えないことがあげられる。普通のカメラで見るものと同じ弱点と思っていただくとよい（図4–1–7）。

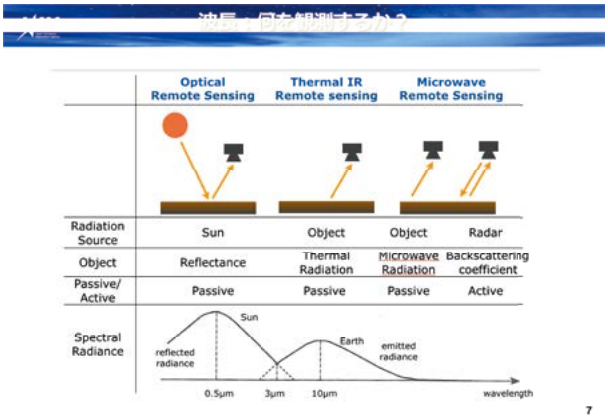



図4–1–6　波長

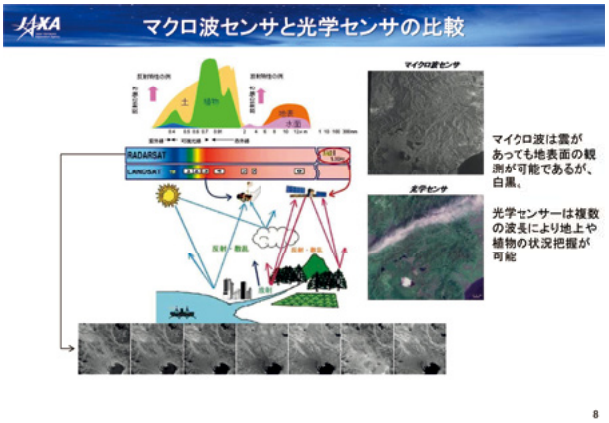



図4–1–7　マイクロ波センサと光学センサ

光学センサの代わりにマイクロ波センサを使うと、地表面から反射、もしくは放射してくるマイクロ波で地表が見られるが、細かさが粗くなってしまう。地表面から出てくるマイクロ波の放射とは非常に微弱で、数ｍといった細かい単位での観測はなかなか難しい。そのため、アクティブなレーダ衛星では、宇宙空間からマイクロ波を照射して、その反射を見る方式をとっている。ただし、レーダなので得られるデータは電波の反射なので、可視化した画像はカラーではなく、白黒になってしまう。物があるかないか、地表面が凹凸か平らかは分かるが、普通の光学カメラのように色の違いで物の判別はできない。

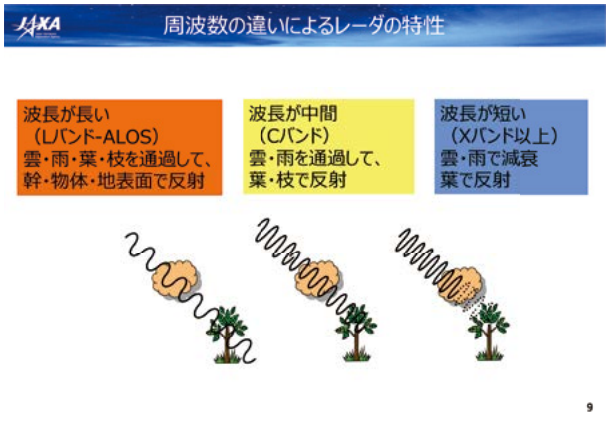



**図 4-1-8　周波数の違いによるレーダの特性**

**図 4-1-9　陸域観測技術衛星 ALOS シリーズ**

我が国のALOSで使っている周波数帯域のLバンドは比較的長い波長になる（図4-1-8）。外国の衛星ではCバンドかXバンドが用いられている。それぞれの違いは、波長帯が短くなれば短くなるほど、より細かく見られるということだ。 Xバンドの衛星では10 cmから数十 cmといった細かさで見える。 Cバンドもそれに近いものが見える。一方、Lバンドは最高分解能で3ｍほどまでしか見えない。3ｍのものが2つあったら区別できるが、それより細かいものは区別できない。その代わり、波長が長いので、雲の透過性がよく、葉っぱや枝があっても通り抜けて地表面の観測ができる利点がある。森林が多い我が国のような国土を見るには、こういう波長帯のほうが向いている。 Xバンドは、場合によって雲を通るが、豪雨が降っていると散乱されてしまう可能性がある。また、葉っぱがあると、葉っぱで反射されてしまい地表面が見られない。物がない裸地であれば、Xバンドは向いているが、森林に覆われている場所の近くの地表面の変化の状況をXバンドで見るのは厳しい。

**人工衛星ALOSシリーズについて**

ALOSシリーズについてお話していく。 ALOSシリーズは、広域・高分解能で見ることができる。国土保全、食料、天然資源、地球規模課題の解決等のために使われている（図4-1-9）。

ALOSの1号機は2006年に打ち上がって、2011年に運用を停止した。その後、ALOS-2が打ち上がった。2021年度に先進光学衛星ALOS-3、2022年度に先進レーダ衛星が打ち上げ予定である。ALOSの1号機は、もともと3つのセンサを同時に載せていた。光学の普通のカメラ、地表面の高さを測るためのカメラ、レーダの機器の3つの観測機器だ。それらを一緒に載せると、衛星の観測できる能力を奪い合うということもあり、運用が大変だった。また、非常に衛星が4 tと非常に大型になってしまった。そのため、それ以降の衛星は光学とレーダを分けることになった。分けてから初号機にあたる衛星がALOS-2で、レーダの搭載した。分けてから2号機にあたるのが先進光学衛星（ALOS-3）で、こちらは光学センサを搭載した衛星だ。 ALOS-2の直接の後継機にあたるSAR衛星がALOS-4となる。

### ALOSについて

ALOSの3つのセンサについて少しお話する（図4–1–10）。そのうち2つが普通のカメラ、1つがレーダだった。レーダは70 kmから350 kmを観測するものだった。カメラは、1つは普通の光学カメラで、AVNIR–2という70 kmで見ているものだった。もう1つのカメラはPRISMで、3つの方向を衛星から見ることで地表の高さを調べられるものだった。2.5 mの細かさで3方向を見ることで、高さ方向も5 mの高さ方向のデジタルサーフェスモデルという、表面の高度情報をもった地図を作る機能を持たせていた。

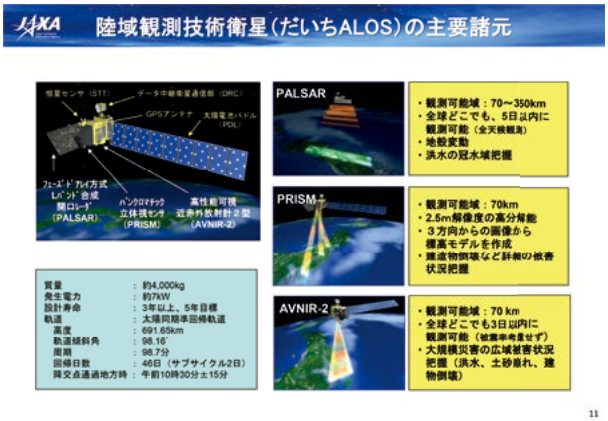



図4–1–10　だいち（ALOS）の主要諸元

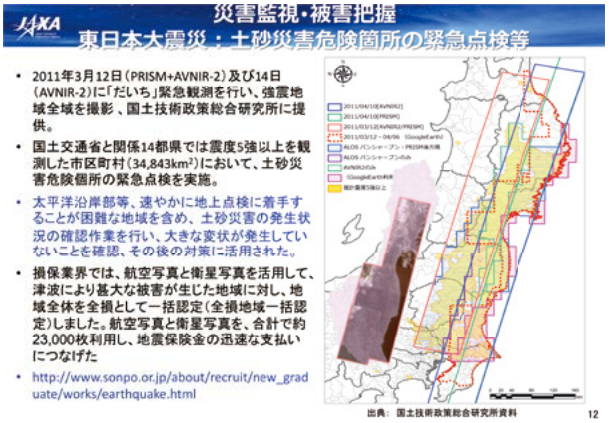



図4–1–11　災害監視、被害観測の成果事例

東日本震災の際に、ALOSで観測をかなり行った。図4–1–11は光学のカメラで撮った東日本の南側のほうだ。大きく見られる衛星の特徴で、衛星1シーンで相当広域の情報が見えている。これを航空写真だけで見ようとすると、相当膨大な量を撮って繋ぎあわせなければいけない。このとき、損保業界が通常は現地確認しながら保険金を払う形だが、特例措置として、衛星データと航空機写真とを組み合わせて浸水や倒壊していることを確認し、初めて一括認定した。東日本大震災の被害への保険料の迅速な支払いにALOSも貢献できた。

### ALOS–2について

2011年までALOSを運用できたが、ALOS–2の打ち上げには、政府の宇宙計画の制約もあり、時間が空いた。2014年にレーダ衛星のALOS–2が打ち上げられた。図4–1–12はこれまでの日本のレーダ衛星を比較したものだ。最初はJERS–1、ふよう1号という衛星が1992年の打ち上げから、98年まで運用していた。その後がALOS、だいち1号で、現在がALOS–2、だいち2号だ。それぞれの衛星の間で、空間分解能の細かさの改良を進めた。具体的には、JERS–1は18 m、ALOSは10 m、ALOS–2は3 mで見られる。3つの写真はどれも東京ディズニーランドの付近だが、見比べると違いがわかる。

ALOS–2の諸元などを図4–1–13に示す。大きな特徴として、昼の12時と深夜の12時にデータを取っている。普通のレーダ衛星は、衛星の電力を大量に使う技術的困難がある。ALOS、ALOS–2ともに、4 kW、5 kWの電力がないと衛星として運用できない。この大きな電力を確保しながら衛星の運用をするために、昼12時ごろに観測するのはよいが、夜12時ごろにさらに観測するのはシステムとしては厳しい。海外の同様のレーダ衛星では朝6時と夕方6時に運用している。それに対して我が国の衛星は、あえて0時、12時に入れている。これは、災害対応等のために深夜の観測データをユーザに朝までに提供するためのものである。

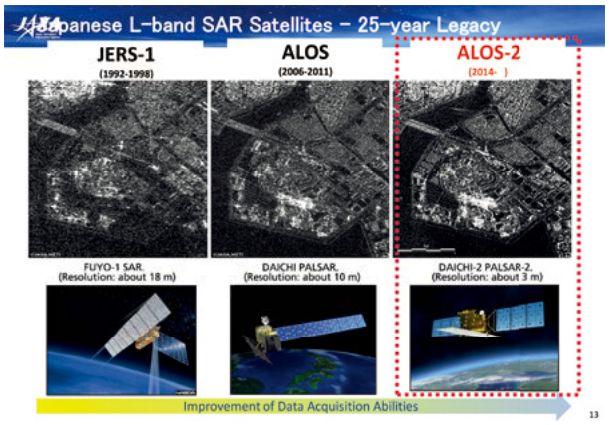



図4–1–12　日本のLバンドSAR衛星の蓄積

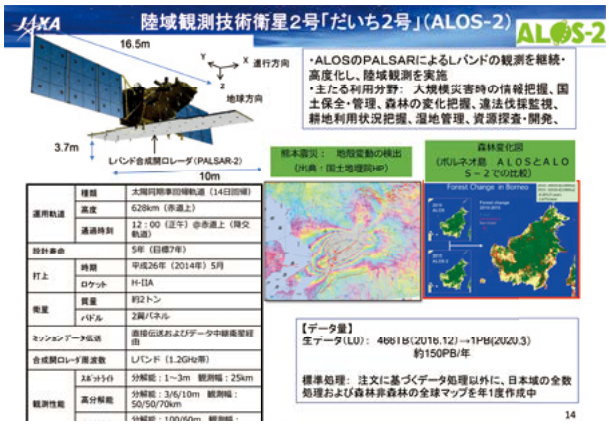



図4–1–13　だいち2号（ALOS–2）の主要諸元

繰り返しだが、森林が見られることがやはり特徴だ。森林あるいは植生の下の地表でも地殻変動等が分かる。これがLバンドならではの強みだ。先ほどから、葉っぱを通るとお話しているので、どうやって森林が見えるのか不思議に思われると思う。あまり密ではない森林だと透過するが、さすがにジャングルのように葉っぱが完全に地表面を覆ってしまっているところは厳しい。右側の写真のようにボルネオ島のようなに非常に繁茂しているジャングルだと、ALOS–2も地表面を見ているわけではなく森林の上を見る形になる。

ALOSの最大の目的は、やはり災害対応だった。 ALOS–2でも最重要のミッションだ（図4–1–14）。次に、気候変動などの環境問題として、森林や湿地などの変化もミッションである。新たな利用として、海洋などで海氷や油漏れ、船の監視などもできる。また、農業にも利用できる。

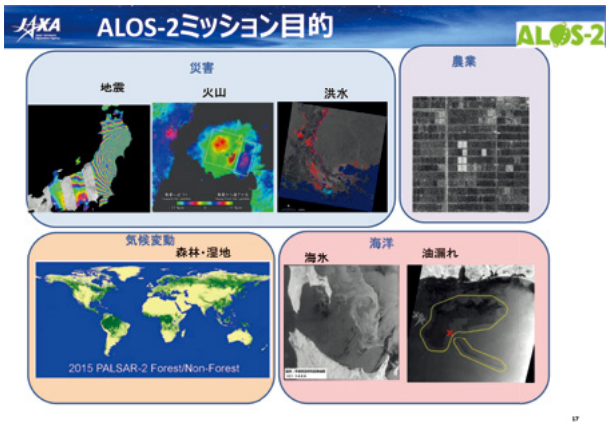



図4–1–14　ALOS–2のミッション

図4–1–15　防災へのALOS–2利用

防災分野では、地殻の変動を見られるのが、レーダ衛星の特徴だ（図4–1–15）。2回の観測により、どれだけ地表面が動いたか識別できる。

特に、山体膨張のような火山活動では、マグマが上がってきて山体が変化する。山の形が変化する場合、地殻、地表面にも変動がある。その観測は、噴火しそうかどうかの判断材料になる。地震の場合は、どちらの方向に地面が動いたか、干渉縞で分かる。ALOS–2の代表的な事例が熊本地震のときの観測になる。さらに、過去と比較することで、洪水被害の識別にも利用できる。鬼怒川が氾濫した常総洪水のような水害が起こったとき、もともと水がなかったところに水が入ってくる。過去に水がなかったときは表面が凹凸で写っていたのが、洪水で水が入ってきたらなだらかな表面になる。表面が凹凸のときにレーダで明るく映っていたとこ

ろが、表面がなだらかになると暗く写るようになる。その変化を、鬼怒川の近くで追いかけて浸水被害が起こっている場所を識別し、貢献した。

土砂崩れ等でも、地表の反射が変わるので、場所や範囲の把握に貢献できる。最近の豪雨等でも活用しており、国土交通省や林野庁等からの要請で緊急に観測を行って情報を提供している。

JAXAと防災関連機関との間では覚書や協定を結んでいる。内閣府を中心として、関係省庁といった政府指定の行政機関に加え、地方自治体とも直接協定を結んでいる。国際的にも センチネルアジア、国際災害チャーターという枠組みの中でALOS-2のデータを渡す。代わりに、外国の衛星でも観測してもらう相互協力の取組を行っている。

実際の具体例を示していく。図4-1-16は常総水害のときの観測データだ。なぜ夜12時に観測するかだが、国交省等が翌日のポンプ車の配置等のオペレーション計画の参考にするためだ。夜は現地を見に行くのは危険で情報がなかなか集まらない。そのため、夜12時に衛星で観測したデータを夜中のうちに情報の形にしておき、夜が明ける前に行政機関に渡してあげると翌日のオペレーションに使える。夜12時に観測したデータを、トータルで5時間以内でユーザー側に提供している。朝6時の観測だと、もうその時間には、その日の行動は決まっているので間に合わない。

図4-1-17は、同様に令和2年7月豪雨で熊本の球磨川洪水の観測をしたものだ。このデータも国交省、林野庁等にお渡しした。

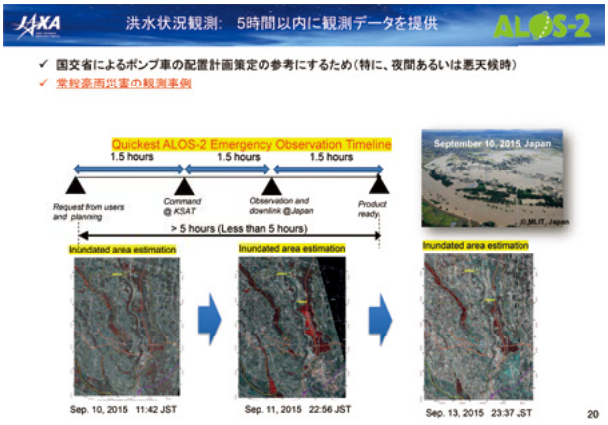



**図4-1-16　洪水の観測への貢献**

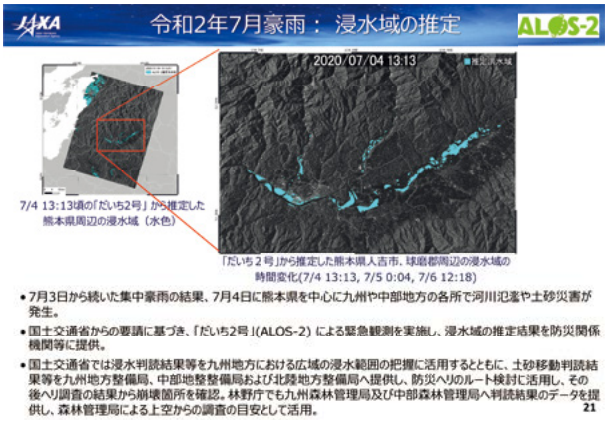



**図4-1-17　令和2年7月豪雨対応への貢献**

さきほど地殻の動きを干渉で見ることを簡単には御説明したが、その干渉SARの原理を図4-1-18に示す。虹色で干渉縞を示している。2回の干渉データを使って、地殻がどちらの方向に動いたか調べる。干渉縞の幅が細かくなればなるほど、より大きく動いたと分かる。

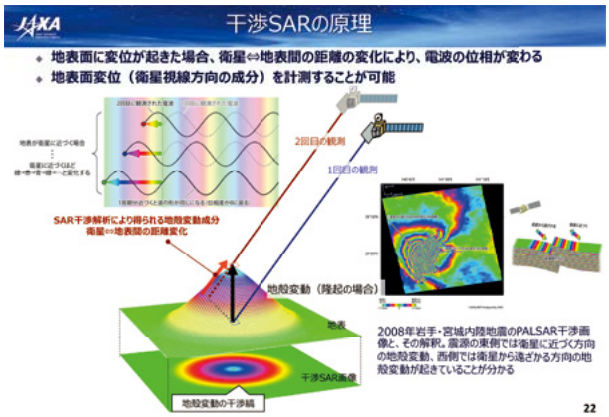



図4–1–18　干渉SARの原理

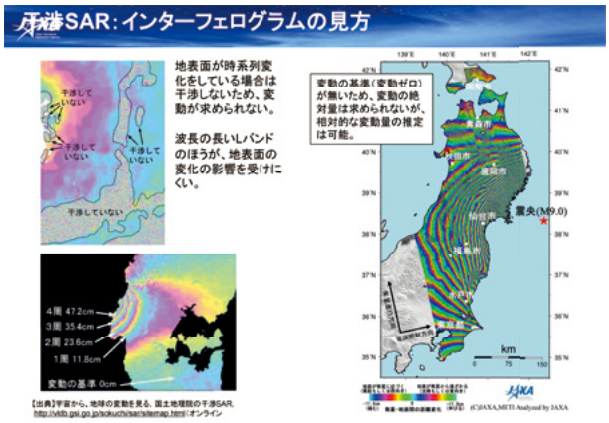



図4–1–19　インターフェログラムの見方

図4–1–19に実際の干渉縞のデータを示す。震源地の近くは非常に干渉縞が混み合っていって、外縁部に行くと、だんだんなだらかになっていく。この東日本大震災のときのデータは見ての通り、非常に広域に干渉縞ができている。これは、より広域に日本列島が動いたことを示している。

図4–1–20は継続的にデータをとっている西之島の火山活動だ。日本の陸地面積が増えていっているが、国土地理院のホームページでも公開されている。火山噴火している近くに人が航空機で行って調べるのは厳しいので、遠隔で見られる衛星の出番となっている。

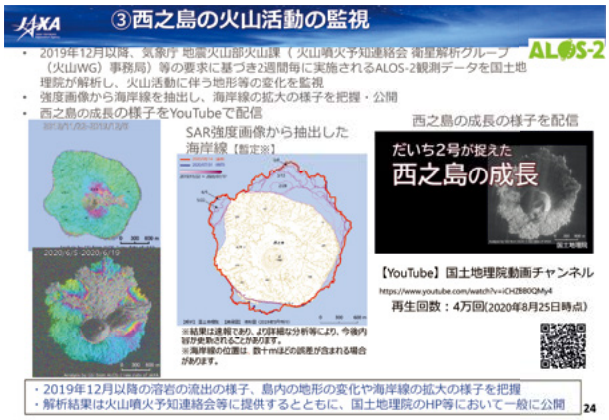



図4–1–20　火山活動の監視の事例

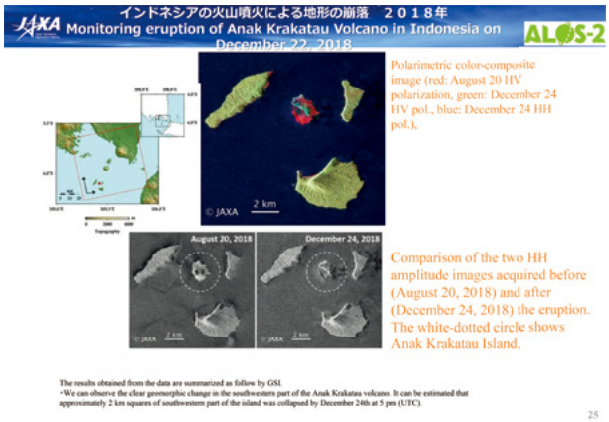



図4–1–21　火山噴火への国際貢献

図4–1–21は国際協力の事例だ。インドネシアのクラカタウという火山が噴火して、崩落による津波が起こったニュースを覚えておられる方もいると思う。偶然だが、崩落した直後にその上空をALOSが通っていた。上の図で赤く示しているところはかなり動いたところだ。下の白黒の写真は噴火前と噴火後の島の様子だ。噴火した後、南側の部分がなくなっている。その付近の海をよく見ると津波が縞模様で見える。この情報はインドネシアやJICAにも提供して、その後の活動にも使っている。

最近の日本では巨大インフラの老朽化管理という問題が顕著だ（図4–1–22）。先ほどの地殻の変動をみる技術は、地盤沈下やインフラの沈降にも同じように使える。例えば河川沿いにある自然堤防に関して、ALOS–2のデータを繰り返し見れば、どこの堤防のどの場所が沈降しているか分かる。衛星でわかった最も沈降しているところに実際に人が検査に行く。より危ないところをより効率的に調べられるので、インフラの状況把握にもレーダ衛星の出番が増えていくと期待される。

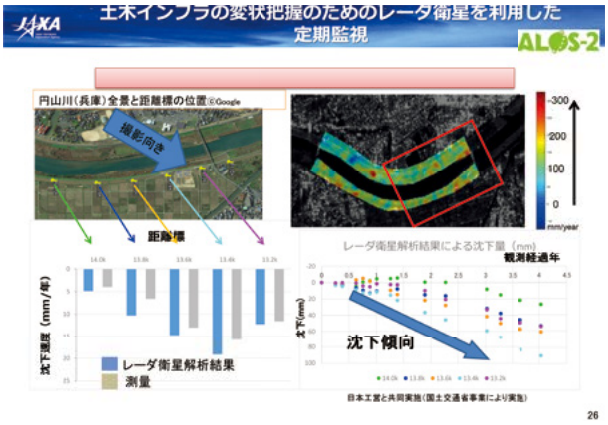



図4-1-22　土木インフラ定期監視の事例

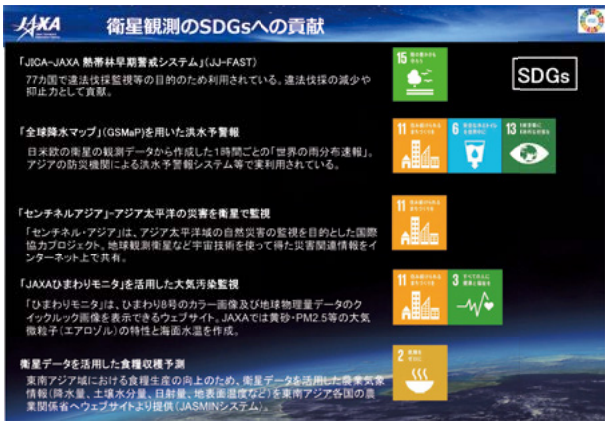



図4-1-23　SDGsへの貢献

都市部の地盤沈下の把握に関しても、環境省で衛星データを使ってよいというガイドラインを作っていただいた。これは実際に使えるが、現状では測量等の規制が残っていて、まだ現地での観測がセットで求められている状況だ。今後、水準測量と言われる手法以外に、衛星データで得た手法でもエビデンスと認められる形にならないと、なかなか自治体レベルで完全に使っていただくところまでいかない。そういう意味で省令、法令、政令等の見直しも、新しい技術に追いついていっていない面がまだある。こういった規制の問題は関連省庁と御相談しているところだ。

ALOSシリーズを含めて、日本の観測衛星がSDGsにも貢献している（図4-1-23）。ALOSは、JJ-FASTという森林の違法伐採防止システムに貢献している。ほかの衛星では、GSMaPという世界中の洪水情報を全部マップ化して、洪水予報を改善するものや、アジア太平洋地域の自然災害監視などにも対応している。ひまわり8号やGCOMなどのデータを使って大気汚染の監視ができる。また、GCOM等のデータで、食料の収量予測等にもつなげられる。直接的に統計情報が出てくるわけではないので、どのように衛星のデータを読み解くかが大きなテーマになる。

図4-1-24が森林の変化監視システムで、熱帯域の77か国に対し、定常的に情報提供している。ホームページ等で無償公開している。1か月半に1回ずつ更新している。ブラジルでデータを現地で検証しているときに、偶然に違法伐採している人たちがいて、逮捕できたという報道があった。

図4-1-24　JICA-JAXA森林監視システム

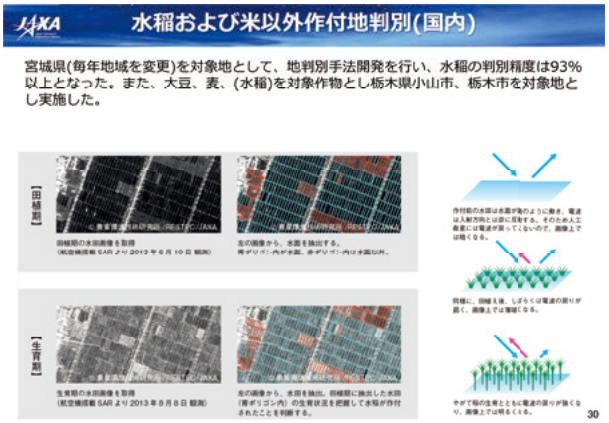



図4-1-25　作付地判別の事例

水田に関しても衛星でわかることがある（図4–1–25）。水田に水を張る前と後で反射が変わるのだが、稲の生育状況によっても、衛星にもどってくる反射光の強さに変化がある。それで作付面積が分かる。これは国内で農水省と共同実施した。

同様の研究をアジア地域で実施した事例を図4–1–26で紹介する。ベトナム政府等と協力してメコン流域全体を対象にしたデータセットを作った。海外でも併せて作って、それぞれのデータを比較した。

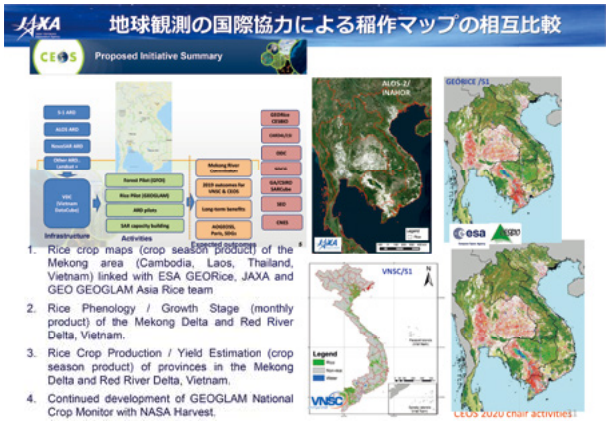



**図4–1–26　国際協力による稲作地図相互比較**

**図4–1–27　カンボジアでの統計改善の貢献**

カンボジア政府に対しては、現地での改善の検証まで一緒に行った（図4–1–27）。現地の統計情報がまだ当てにならないということがあり、こういった場合は果たして正解なのかどうかと揉めるケースが多い。現地の州政府の統計情報と衛星からの情報を突き合わせた。我々のINAHORという地図化ソフトを用いたが、52あるコミューンのうちの17のコミューンで、どうも怪しいところがあった。後で、中央政府が調べたら、この17のコミューンに関しては、実は現地の統計情報が間違っていたと分かった。現地の中央政府としては、こういった第三者的な情報、セカンドオピニオン的なデータがあると、まだ統計が怪しい地域でも、より効率的に統計情報が集められる示された。

COVID–19に対してもJAXAとNASA、ESAの3機関の協力で複数の衛星を使い、気候や商業、水質、農業、大気質に関するデータを公開した（図4–1–28）。日本からはALOS–2、GCOM–C、GOSAT等のデータを使っている。

その中でALOS–2を使った事例は、主に商業活動の変化の可視化だった（図4–1–29）。シンガポールの港湾と北京の自動車工場での対象物の変化を示している。これも、地表の凸凹の変化から分かるデータだ。コンテナや車があると明るく映り、ないと暗く写る。その変化で見ている。シンガポールの港湾は仮設テント宿泊施設に使われた変化がわかる。北京の自動車工場では、中国政府のロックダウンに対応して、駐車場に置かれた自動車が減ったことがわかる。自動車の生産台数が減ったことが衛星でも分かる。

図4-1-28　COVID-19への取り組み

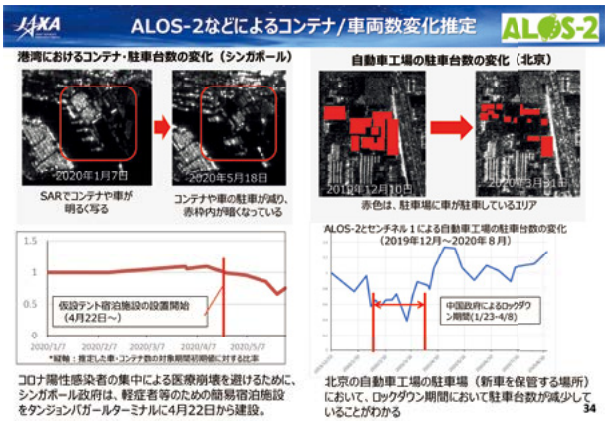



図4-1-29　コンテナ／車両数変化の推定

### ALOS-3、4について

先進光学衛星と先進レーダ衛星について、簡単に御説明する。 今年度打ち上げ予定のALOS-3は光学衛星で80 cmの空間分解能で、非常に細かく見える（図4-1-30）。

図4-1-30　先進光学衛星ALOS-3の概要

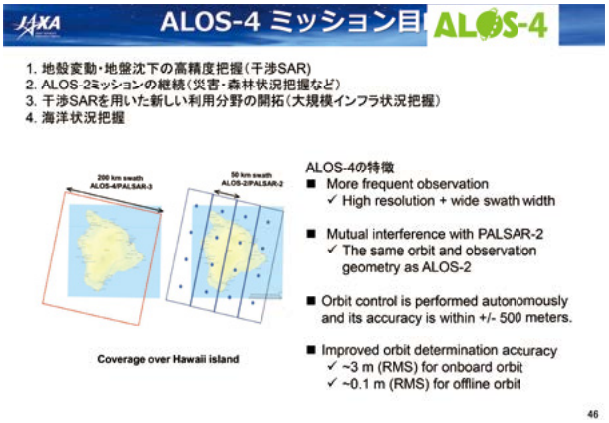



図4-1-31　先進レーダ衛星ALOS-4

やはり災害に対応するための特徴を備えている。普通の衛星は南北方向しか観測できないが、ALOS-3は南海トラフ地震に対応するため、西方向にも観測できる。南海トラフの約1,000 kmをほぼ1日で観測できる特殊モードを持たせている。

洪水や津波のような災害への対応には、レーダでの白黒画像より、カラーの光学センサの画像のほうが明確によく見える。ただし、雲があると見られないので、両方を組み合わせている。

ALOS-3は離島の地図の作成、更新など防災以外にもさまざまな目的に貢献が期待されている。

次に、来年度打ち上げ予定の先進レーダ衛星ALOS-4について、お話しする（図4-1-31）。

ALOS-2とALOS-4で、細かく見える分解能は変わらない。Lバンドの電波では最大の細かさが3 mになる。大きな違いはALOS-2で50 kmだった横幅が、ALOS-4だと200 kmを一度に、3 mで測れることだ。たとえば、ハワイ島を測るのにALOS-2だと4周必要で42日以上かかったが、ALOS-4は一度でカバーできる。日本で言えば、九州の観測が1回でできる。

図4-1-32にそのイメージを示す。 ALOS-4はまだ打ちあがっていないので、理解のためにALOS-2の画

像を繋げている。上が現在のALOS–2で見ている50 kmの幅で、下がALOS–4で見られることになる200 kmの幅のイメージ画像になる。ALOS–4になると関東平野がほぼ一度で見られる範囲に広がるとわかる。

**図4–1–32　　ALOS–2後継機サンプルイメージ（左：ALOS–2の幅、右：ALOS–4の幅のイメージ）**

**【質疑応答・ディスカッション】**

※講演4.2に祖父江先生と田中先生の質疑応答・ディスカッションをまとめて記載。

# 4.2 GCOM衛星による地球環境の観測

田中 一広（JAXA）

※講演日：2021年7月15日

簡単に自己紹介する。宇宙開発事業団に入社して30年以上、宇宙開発に携わってきた。その3分の2ぐらい地球観測衛星、特に今回御説明するGCOM立ち上げ当初から関わってきた。 GCOMには2つの衛星があるうち、しきさいという衛星の光学センサの概念設計から設計、製造、開発と携わってきて、現在のGCOMのプロジェクトマネジャーとして、軌道上の運用の責任者を務めている。

**GCOMについて**

本日は「しずく（GCOM-W）」という電波衛星と「しきさい（GCOM-C）」という光学衛星について御説明する。それぞれ2012年5月、2017年12月に打ち上げられ、地球を観測している（図4-2-1）。 GCOMはGlobal Change Observation Mission、地球環境変動観測ミッションの略称で、Wは Water、水、Cは Climate、気候のイニシャルだ。

図4-2-2はJAXAの地球観測衛星を、まだ宇宙開発事業団だった1987年からまとめた絵だ。内側の線に描かれた衛星は既に運用を終了しており、外側の線は現在、軌道上で運用している6機の衛星だ。今後打ち上げ予定のALOS-3、ALOS-4もある。

図4-2-1 はじめに

図4-2-2 JAXAの地球観測衛星

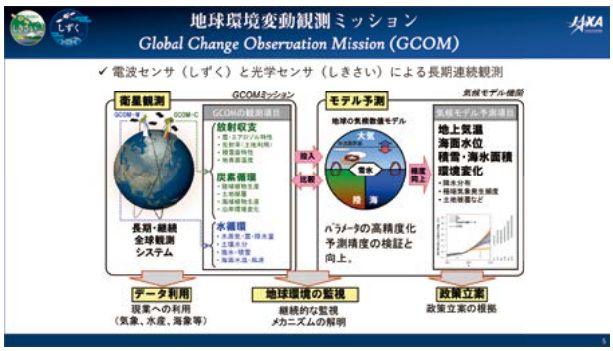



図4-2-3 地球環境変動観測ミッションGCOM

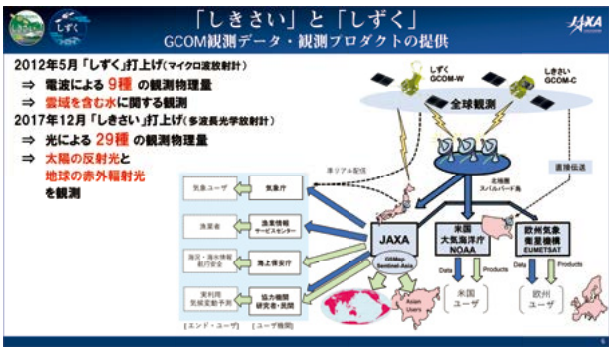



図4-2-4 「しきさい」と「しずく」

GCOMは電波と光学の2つの手段で地球環境を観測している（図4-2-3）。データ利用、地球環境の監視、

モデル機関との協力という3つの大きなテーマがある。データの利用は現業機関と協力して現業にも供していく。地球環境の監視は、地球環境のさまざまなメカニズムの解明を含め、研究機関と協力していく。モデル機関との協力は、ご存知の通りIPCC等の気候変動予測モデルの実施機関に、観測データを渡している。モデルと比較することで、モデルの精度向上や検証を行い、政策立案にも貢献している。

GCOMは、2つの衛星とも極軌道衛星で、地球を縦に回っている。地球を1日に15周ぐらい回る。北極のスバルバード局の上に来たときに、観測データをダウンリンクして、それを日本に送って、JAXAから国内の各ユーザーに配信している。地球を縦に周回しているので、地球の裏側も含めて観測できる。米国NOAA、大気海洋庁、欧州EUMETSAT、欧州気象衛星機構にも配信して使っていただいている。電波衛星しずくのデータだが、電波で16の観測チャンネルがあり、16の観測チャンネルから9つの観測物理量を出している。基本的には電波で水の分子の振動を見ている。雲を含む水に関する観測をしている。それでGCOM-W、しずくという水に関する名前をつけている。もう一方の光学衛星しきさいは光を使って29種の観測物理量を観測している。

なかなかイメージできないと思うので、図4-2-5で実際に観測したデータを可視化したものを示す。しきさいが光の強さで見ている。人間が見ている可視光と、赤外光を見て、合計19の観測チャンネルで見ている。しずくは電波で16の観測チャンネルで地球を見ている。それぞれの衛星で様々な物理量を見ている。海洋の海面水温は電波と光と両方で見ている。陸上の温度や、積雪の深さ、海氷の密接度などが見える。しきさいでは、植物の活性度も見られる。陸上における植生指数に加えて、海洋のクロロフィル濃度が見える。後者は海洋の植物プランクトンの観測にあたる。

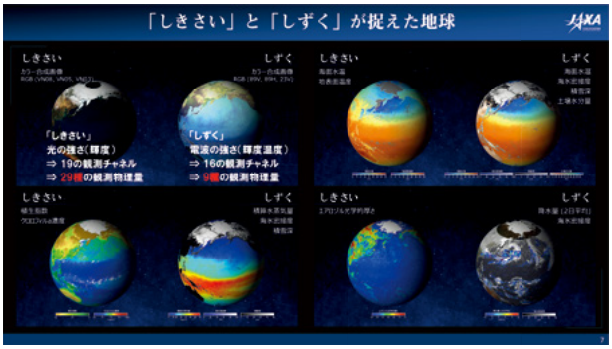



**図4-2-5　しきさいとしずくが捉えた地球**

**図4-2-6　「しきさい衛星」と「しずく衛星」**

基本的にGCOMという1つのプログラムをGCOM-WとGCOM-Cという2つの衛星で実施している（図4-2-6）。写真の中で下のほうを四角い点線で囲った部分を、我々はバス部と呼んでいる。観測センサに依存するデータ伝送量を除くと、バス部は全く同じ設計にしている。それに対して、上に搭載しているものが違う。しずくは電波のアンテナを乗せて、そのアンテナで地球観測している。しきさいは光学の大きなカメラが全部で7つ乗っている。こういった人工衛星を設計して開発するのは非常に手間がかかるので、下の部分をできるだけ共通化して、信頼性と効率化の両立を図っている。両方とも2 tぐらいの重さになる。この写真では太陽電池パドルがついていないが、軌道上で太陽電池パドルが開かれると14 mぐらいの幅になる。

**しずく衛星について**

しずくの観測の原理について説明する（図4-2-7）。しずくは6.9 GHzぐらいから89.0 GHzぐらいまでの、1桁違う6つの周波数の電波を観測している。周波数によっては偏波のチャンネルも観測できるので、合計36の観測チャンネルを有する。この観測チャンネルの違いによって、同じ水でも測定できるものが変わってくる。気象用語で可降水量と言っている水蒸気に相当する値や、雲水量と呼んでいる雲の持つ水の量、それが降水

になる量など、観測対象となる水の粒子の大きさが変わると感度の高い周波数が変わってくる。例えば可降水量と呼ぶ水蒸気だと、およそ23.8 GHzに非常に強い強度を持つので、そういった周波数を使って観測している。そのような組み合わせで９つの物理量を識別している。

右上の画像は台風だ。36 GHzで見ると、台風の目が非常によく写っているが、台風の近くの雲もよく見える。右下の画像は今年の１月の流氷だ。オホーツク海から動いてくる流氷が見えている。これは雲を通して流氷の状態が見えている。こういう水に関する様々な物理量を観測している。

こういった観測を行って、水蒸気や雲の水の量、地表面に落ちていく降水量、海面水温、海上風、土壌水分、陸面温度、海氷密接度、積雪深といった主に水に関係する物理量を測定している（図4–2–8）。先ほど周波数が１桁ぐらい違うと説明したが、それに対応した分解能が約5 kmから約50 kmとなる。光のセンサに比べて、電波のセンサは分解能が落ちる。

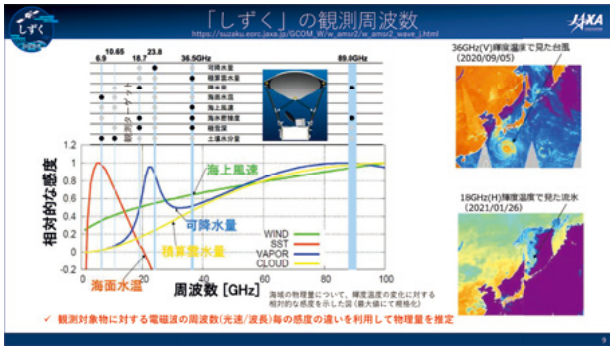



**図4–2–7　しずくの観測周波数**

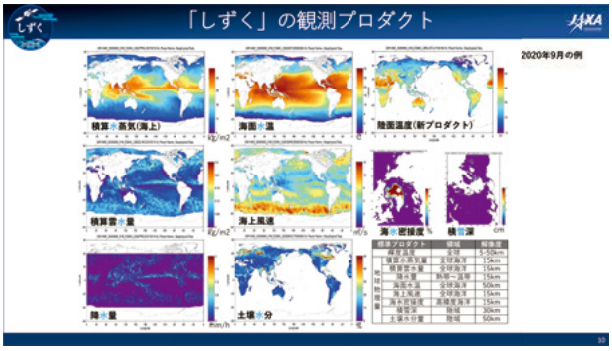



**図4–2–8　しずくの観測プロダクト**

**しきさい衛星について**

しずくに対してもう一つの衛星、しきさいの観測波長を図4–2–9に示す。

光学衛星には２種類の観測バンドがあり、太陽光の反射を見るバンドと、赤外輻射を見るバンドだ。太陽光の反射する光のセンサでは、人間が見える可視光の約400 nmから、約700 nmまでと、その先の赤外域の２μmから３μmぐらいまでの波長の範囲を含んでいる。

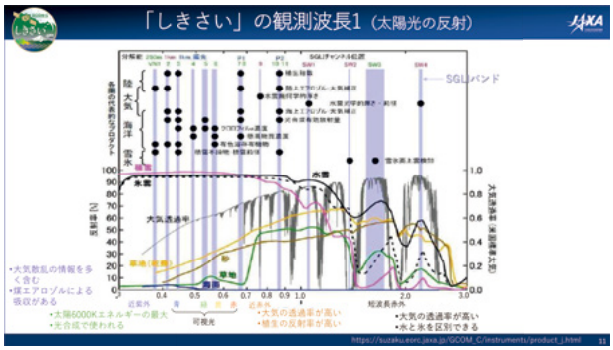



**図4–2–9　しきさいの観測波長①**
**太陽光の反射**

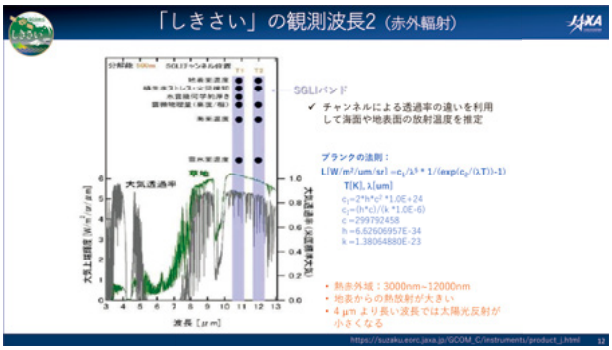



**図4–2–10　しきさいの観測波長②**
**赤外輻射**

それぞれ観測している波長に対して、観測する対象物の反射率が変わってくる。それを利用して衛星が何を

見ているかという、ピクセルごとに対象物を判定する原理である。

草地の場合、人間が見られる可視光の範囲は大体400 nmから700 nmなので、草地は緑に見える。人間の目では直接見られない赤外光で見ると、植生が枯れたり、芽吹いたり、新緑になったりすると反射率が変わってくる。それを応用して植生の状態を把握する。雲や雪の状態も、人間が可視光で見ていると白くて変わらないが、赤外光では雲や雪の状態で反射率が変わってくるのを利用して、観測する。

しきさいのもう1つの光学系での赤外輻射の観測チャンネルが、図4–2–10になる。赤外輻射を見るバンドとして、10 μm帯と12 μm帯の2つのチャンネルを持っている。これで地球からの赤外輻射量を見て、地球の大気や地表の温度など、対象物の温度を推定している。

図4–2–11は2020年の観測プロダクトだ。1年間の観測データをつなぎ合わせると、アニメーションで見られる。北半球の季節が冬から夏へ変わるに従い、太陽の高度が南から北に上がってくるのにあわせて、地表面温度や海面水温が上がってくる。すると、植生の活性度も上がってくる。海洋の植物プランクトンの光合成も温度に依存するので、活性度が上がってくる。しきさいの観測プロダクトで、季節による応答が見られる。

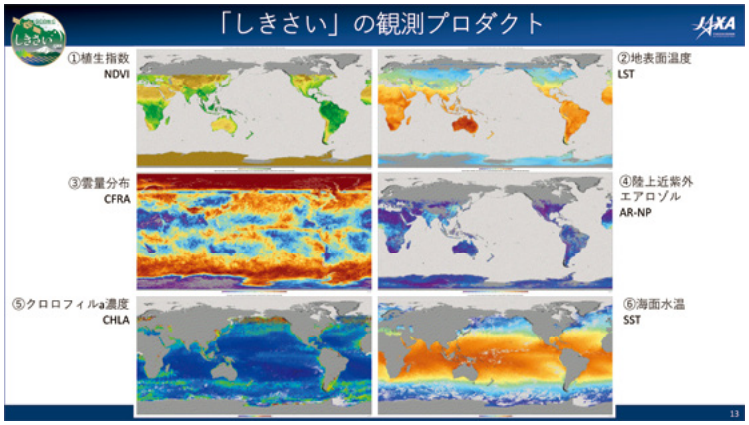



**図4–2–11　　しきさいの観測プロダクト**

**観測成果について**

GCOMは多様な物理量を測っている。全球気候監視システム（GCOS）が気候の監視に必要な観測パラメータ（ECV）として54の変数を規定しているが、そのうち22変数をGCOMは観測している。

約20年前、GCOMプログラムを立ち上げるときの議論では、最終的な枠組みであるGCOSの要求事項だけでなく、文科省でまとめている地球観測の進め方に合わせる形でGCOM–WとGCOM–Cの2つの衛星で物理量を測ることとなった。さらにJAXAのほかの衛星、GPMとGOSATなども含めて国際的にも重要なパラメーターをGCOMとコラボレートして測ろうとして、立ち上げられた（図4–2–13）。

**図4–2–12　　必須気候変数ECV**

**図4–2–13　　GCOSとGCOMの観測要求**

ここから、GCOM衛星による観測の実例を紹介していく。図4–2–14は、しずく衛星のエルニーニョ現象の観測成果である。 JAXAでモニターサイトを作っている。 AMSRと書いてあるが、しずく衛星のセンサのことだ。エルニーニョは、しずくの前号機の衛星を含めて2002年から継続して観測している。温度の平年値からの偏差を見ると年によって温かかったり冷たかったりする。エルニーニョやラニーニャをモニターしていく。2015年頃、非常に大きなエルニーニョが話題になったが、こういった連続観測から、偏差がよくわかる。

図4–2–15は北極の海氷の面積に関して、極地研究所とJAXAの共同モニタリングの成果だ。北極や南極といった雪氷域に気候の影響は非常に早く表れるについて、サイエンティストが非常に注目している。北極の海氷の面積はいつ最低になるか観測している。2012年は北極の海氷が非常によく融けて話題になった。全球では2018年が最小だったデータや、南極での変動が北極に比べて小さく出ているデータなどを、雪氷域の研究者に渡して、気候変動に関する研究を進めて頂いている。

図4–2–16も同様の話で、1978年からの北極圏の海氷面積の推移である。 AMSR2がしずくで、2002年から2011年のAMSR–Eがしずくの前号機だが、日本の衛星のデータだけでなく、アメリカの衛星もあるので、衛星観測をずっとつなげられている。やはり地球は温暖化していて、海氷率がどんどん下がっていると分かる。しずくは電波衛星で、水に関する観測をしていると説明したが、北極の氷が少なくなっているのなら、ユーラシア大陸やアメリカ大陸の北半球の積雪の面積も変わるだろうという議論が当然ある。NOAAがアメリカの光学衛星のデータを使って解析して、公開している。残念ながら、しきさいの打ち上げが2017年なので、しきさいのデータはここに入っているか微妙だ。季節ごとに状況が違うので、それを丁寧に見ているが、やはり北極の積雪面積が下がっているというのが観測されています。

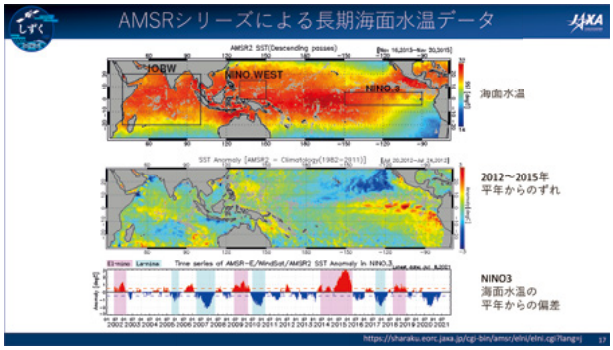



図4–2–14　しずくによる長期海面水温データ

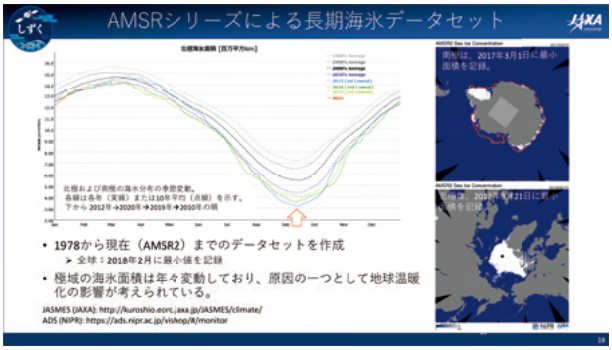



図4–2–15　長期海氷データセット

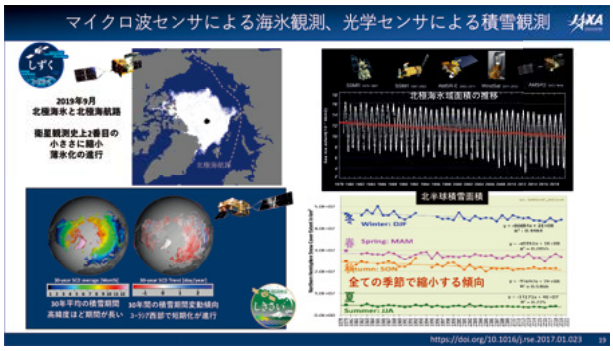



図4–2–16　海氷観測、積雪観測

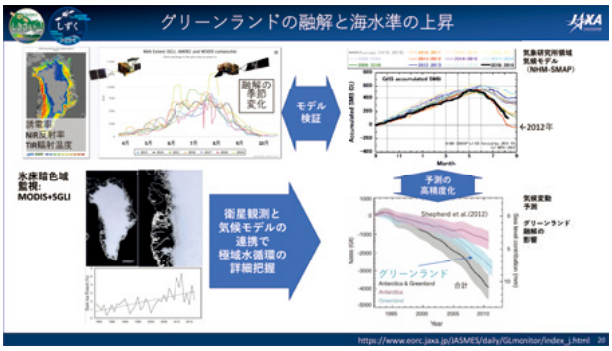



図4–2–17　グリーンランドの融解と海水上昇

気候変動でグリーンランドが話題になる（図4–2–17）。先ほどの2012年に北極の海氷が最小になったと

きと同じときに、グリーンランド上の雪が大きく融解した。なぜ溶けたかモデルで検証する際に、しずくの電波で測定された雪や氷の誘電率、しきさいの光学センサで得た雪氷面の反射率、粒径、温度といった観測値を用いている。グリーンランドの陸上に乗っている雪・氷が融解すると、南極が融解するよりも影響が大きいのではないかと見られている。グリーンランドの氷床が融けると、海面の上昇に大きく寄与すると言われている。グリーンランドの融解状況の観測は大きなトピックだ。

雪氷に関して、極地研の北極域研究加速プロジェクトにJAXAも参加して、観測データを使っていただいている（図4–2–18）。

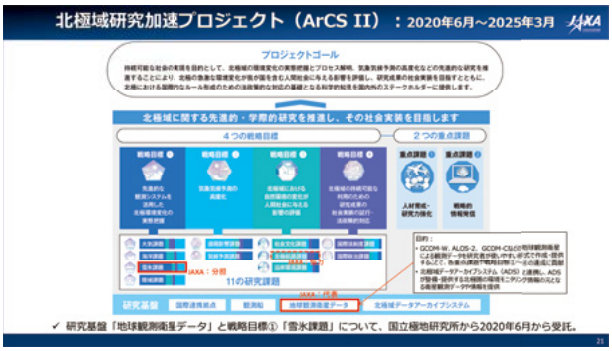



図4–2–18　北極域研究加速プロジェクト

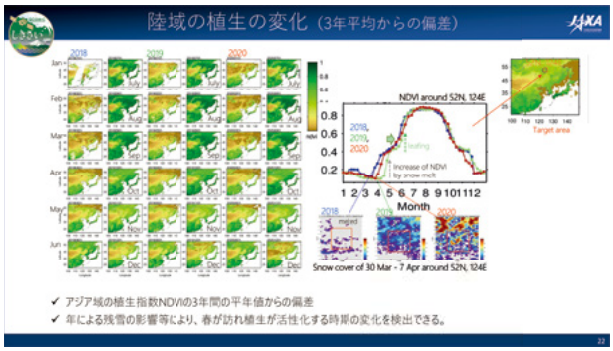



図4–2–19　陸域の植生の変化

ここから、しきさいによる陸域の観測を説明していく。打ち上げから3年半ほど経ち、3年分の偏差が見られる。それを使った研究ができる。図4–2–19はユーラシアの東側で2018年からの3年の植生を観測したものだ。季節の変化に応じて緑がだんだん濃くなっていく、どの年でもわかる。年ごとの差を、モンゴル周辺の地点を時系列で比較したデータを右側に示す。青色が2018年、緑色が2019年、赤色が2020年だが、植物の活性度が上がる時期が少しずつ違う。時期が変わると傾きが変わっている。植物は春に成長して展葉していくが、2019年の春はどうも残雪があった影響で、芽吹きが3月中旬ではなく4月中旬まで遅れていた。木々の場合は、展葉期の後、秋に落葉していく。このモンゴル周辺だと草原なので落葉と言うより、植物が枯れている状況を観測している。

図4–2–20は3年間の平均値からの偏差を使った千葉大とJAMSTECとの共同研究になる。落葉広葉樹の成長について、展葉開始日と落葉開始日という形で全球にマッピングしている。

千葉大チームが現実の落葉、展葉と合っているか照合し、JAMSTECチームでIPCCなどにも用いている気候モデルでも季節変化が合っているか研究している。具体的には、落葉のところを、冬の11月に寒くなってからの寒冷日の日数と、1月から温度が上昇していくときの気温の積算値で関数フィッティングし、その関数フィッティング状態と、モデルが自分自身で持っている気温と植生の状態が合っているか見ている。合っていない場合、その理由の検証とモデルの改良をしている。

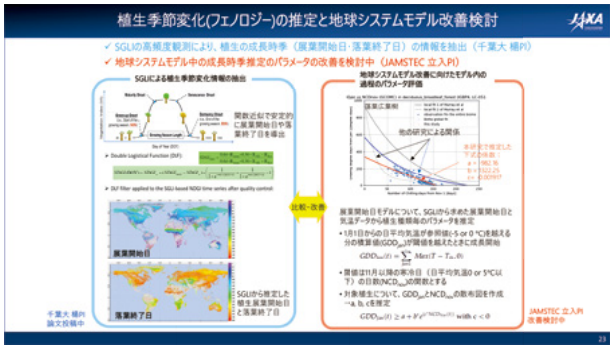



**図4–2–20　植生季節変化の推定**

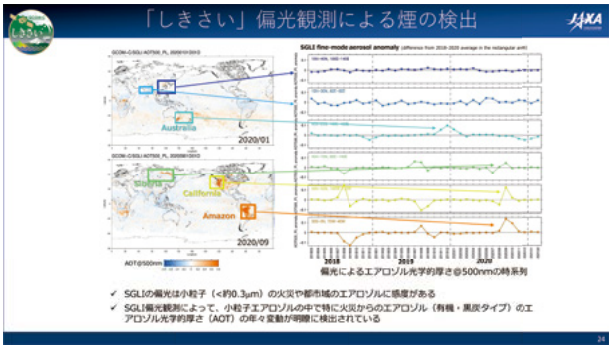



**図4–2–21　しきさい偏光観測による煙検出**

図4–2–21がエアロゾルに対する観測例になる。IPCCのレポートなどで、エアロゾルが非常に不確定性が大きく、温暖化に対して正の効果か負の効果のどちらになるかと議論されている。エアロゾルと一口に言っても、数nmから20μm程度まで、粒子の径のサイズの幅が非常に広い。そのため、様々な観測手段を組み合わせて観測している。しきさい衛星には、大気の偏光状態を観測する機能がある。これを使うと、森林火災や工場の煙突から出てくる煙に含まれる細かい粒子を見られる。それを2018年からの3年間測定しており、それぞれの年で、どのような細かさの煙がどこでどのぐらい出ていたか解析している。一番上と2番目の観測データからアジア域の工場立地やインドの野焼きの状態を見ると、偏差としてはそれほど大きくない。上から3つ目が2019年にオーストラリアで大火災が起きたときを含めて観測している。これはかなり大きく報道されていたのでご記憶の方も多いと思う。4つ目がシベリアで、毎年火災が起きている。5つ目がカリフォルニアで、この大火災も大きく報道されていたが、衛星からも観測している。一番下が南米のアマゾンで、ここでも毎年のように火災が起きて煙が出ている。オーストラリアやシベリア、カリフォルニア、アマゾンでは年によって煙の出方が違うのが偏差でもはっきり出ている。こういったデータをエアロゾルの発生メカニズムや分布、気候への影響を調べる研究に提供する活動も行っている。

つい先々週だが、今年の7月3日、シベリアを見ていた際、煙がかなり出ていたデータをご紹介する（図4–2–22）。左側が、人間が見ている可視光とほぼ同じ画像で、幅は700 kmから800 kmで非常に広い範囲だが、かなり濃い煙が出ている。右側が赤外光で見た画像だ。赤外で見ると煙をある程度まで通して見られるので、煙の下の植生が見えている。この写真では見えにくいが、煙が出て、燃えている火元がわかる。パッチ状に黒くなっているところはもう燃え終わったところで、かなりの面積になる。火災と一口にいっても、煙と、その火元、そして火災が起きた後のエリアの影響などのデータがしきさいで得られている。

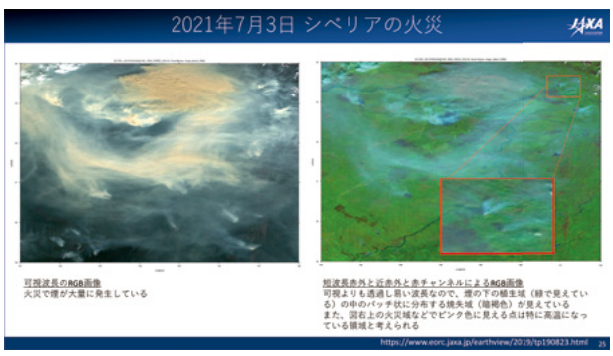



**図4–2–22　2021年7月シベリアでの火災の観測**

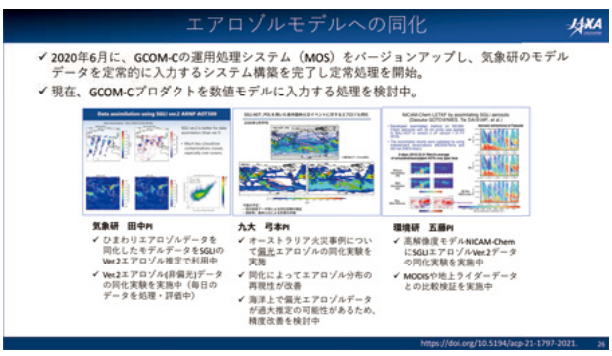



**図4–2–23　エアロゾルモデルへの同化**

しきさいの偏光観測は煙が中心だが、それ以外のエアロゾルも観測している（図4–2–23）。そのデータを気象研や九州大、環境研のそれぞれ得意な分野や技術をもつ外部の研究者と協力して、モデルで気候に対する影響や現象のメカニズムを解明しようとしている。エアロゾルの飛散挙動の予測と、JAXAの観測には相補的な関係がある。昨年からはJAXAのシステムに予測のデータを入れて、予測のデータの初期値としての観測データの精度を上げている。逆に、JAXAのデータを各モデルの機関で、モデルの精度を上げるのにも使うというように、大きなフィードバックループを作っていこうという活動も行っている。

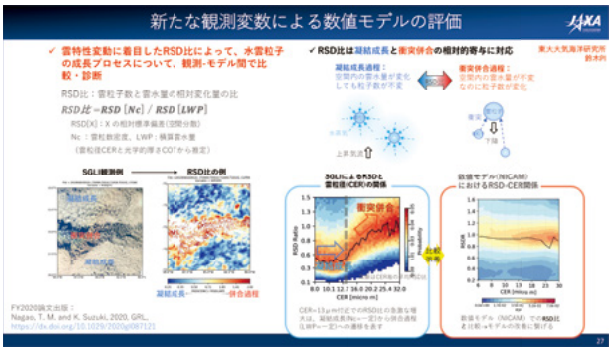



図4–2–24　新たな観測変数

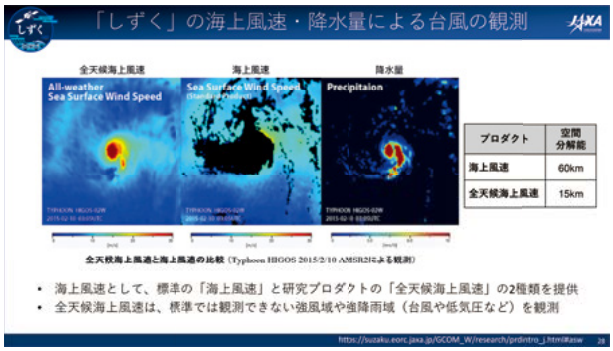



図4–2–25　海上風速、降水量による台風観測

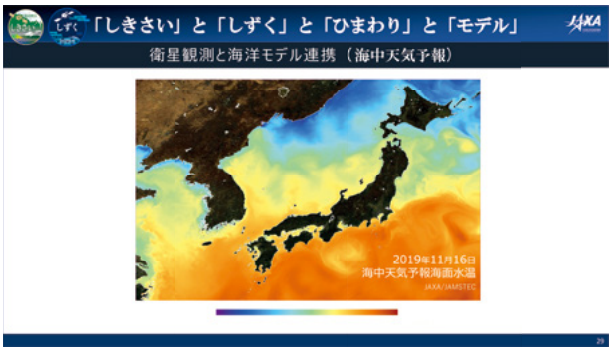



図4–2–26　衛星観測とモデル連携①

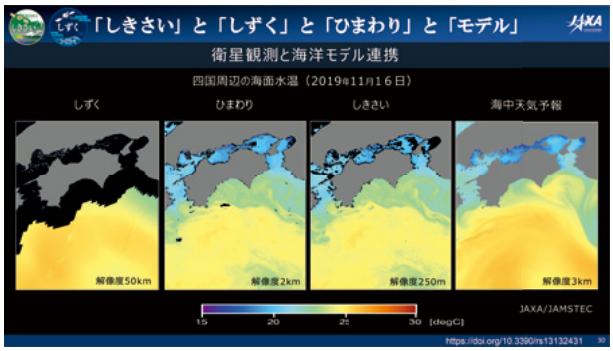



図4–2–27　衛星観測とモデル連携②

図4–2–24は雲の観測例だ。エアロゾルは雲を形成する核になる。雲核が雲粒になって、雲粒が凝結成長や衝突併合によってさらに大きくなり降水として落ちてくるサイクルがある。その状況をしきさいで空間的に見たのが左下の写真で、形状から衝突併合と凝結成長が起きているところが見える。その状況を物理量で見ようとすると、雲の粒の数や、雲が持っている水の量の比率を相対的に無次元にしたRSD比というパラメータがある。それを空間的に計算する。特にNICAMという数値モデルの中で雲がモデル表現されているので、モデルの中の状態と観測結果とを比較している。グラフは横軸が粒径で、縦軸がRSD比だが、観測のほうは粒径がだんだん大きくなると、凝結から衝突を経て雲になっていくのが比較的よく表現されている。同じ領域でモデルでの表現結果を見てみると、あまりよく表現されていない。こういった検証から、モデルに入れるどういう要因があるのか、もしくは観測かモデルになにかエラーがあるのか、といった議論を行っている。

ここまで、気候変動に関する事例を紹介したが、ここから現業に近い事例を2例説明する。

図4–2–25はしずく衛星での台風の観測だ。しずく衛星が観測に用いている電波は1桁違う周波数を用いていると紹介したが、その周波数の違いに応じて見えるものが違ってくる。

ある周波数では、海上風速や降水量が60 kmの分解能で見える。違う周波数を使うと、計測精度は落ちるが、分解能が15 kmまで上がり、台風の目が見える。同じセンサのデータを使っても、観測できる物理量は

アルゴリズムにより変わる。気象庁の数値予報モデルは様々なデータを組み合わせており、我々のデータも利用いただいている。

JAMSTECとJAXAで協力して海中天気予報を作成している（図4–2–26）。しずくの電波センサで、雲を通して海面の水温が見えるが、ぼやっとした見え方になる。陸側に近いところは陸の影響で観測できない。しきさいは雲があると見えないが、陸の近くの細かいところまで見える。ひまわりの海面水温のデータも含めをモデルに入れる。モデルにも予測誤差がある。それぞれの欠点を補いあって、いいところ取りする取り組みだ。

図4–2–27が実際の四国での事例だ。高知沖の黒潮の流れが、しずくだとぼんやりしか見えないが、ひまわりだとくっきりと見えている。ひまわりは、地球からかなり離れた静止軌道からの画像なので、解像度が2 km程度で、SN比に限界がある。しきさいは高度800 km程度なので、250 m分解能で見える。これらをモデルに入れ、海中天気予報を作成している。

**観測の継続について**

1980年代から、JAXAはどんどん衛星観測を継続、発展させてきた（図4–2–28）。 GCOMの電波と光の観測は、もも衛星、みどり衛星とこれまで開発してきた技術を継承してきた。

2023年度を目標に、次のGOSAT–GWを開発中だ（図4–2–29）。とくに降雪の観測を強化する。

図4–2–28　観測と技術の継承

図4–2–29　しずく観測の継続

日本だけの観測は何かとよく聞かれるが、ユーザーからは観測データ量が足りないとよく言われる。したがって、協調と競争が基本だ（図4–2–30）。しきさいに相当する衛星がアメリカ1種、ヨーロッパ3種ある。可視域や赤外域の観測は、各国やっている。しかし、各国ともデータ量が足りないのでみんなで補いあっている。しきさいの偏光観測や近紫外観測は特徴的だ。協調と競争のバランスを取って開発を続けている。

まとめを図4–2–31に示す。

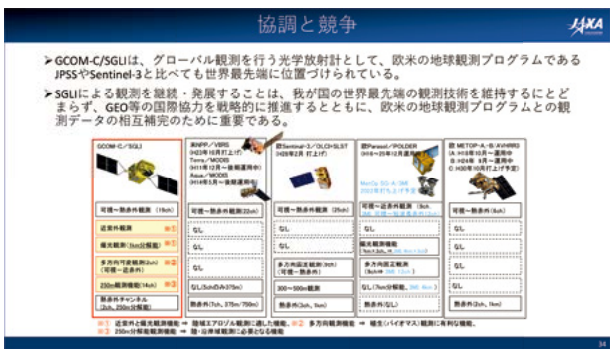



図4–2–30　協調と競争

図4–2–31　まとめ

**【質疑応答・ディスカッション】**

※講演4.1（祖父江先生）、講演4.2（田中先生）と同時に行った。

Q：森林の違法伐採を捕まえられた成果は非常によかった。解像度が高いので、先週あった熱海の土砂災害では、不法の盛り土が原因と怪しまれている。過去から、その上空を飛んで、撮影出来ていたら、違法の盛り土や、不法投棄のようなものも捉えられる可能性はあるか。

A：まさに調べたいと関心をもっているころだ。もし最初の盛土が2011年だと、ALOS−2が上がる前になってしまう。そうすると、ALOSの画像から比較しないといけない。すると、空間分解能が10 mで、識別可能なものに対象が限定される。森林と裸地の違いで、それなりの大きさがあれば、その変化は見られる。また、法令で土砂堰、防砂堤のようなものを造らなければいけないという決まりがもしあったら、コンクリートのある程度の形状で構造物がしっかり作られていっているかが分かる可能性がある。まだ見ていないが、我々、衛星の研究者も関心をもっている。

Q：今の質問に関連して、表層崩壊、深層崩壊というキーワードで、衛星の情報と様々なセンサと組み合わせて予兆を捉えるような研究に関心がある。衛星データを蓄積していき、将来どうなるかと判断する判断の材料に使う検討はどのような状況か。

A：直接的に表層・深層崩壊、特に深層崩壊を見るのはかなり難しいと思っている。衛星から見えるものはやはり地表面の変化だ。土砂崩れの予兆が分かればいいと思っているが、直接的にはやはり難しい。我々ができることは、崩れる前に降水が大量に降ることのほうになる。現在の土砂崩れ警報だと、ある時間内にある場所にこのぐらいの降水量があったのでリスクが上がっているというものだ。いくつかの衛星のデータを合わせると、河川の氾濫予測を行う研究もあるが、完全に表層・深層崩壊そのものとなると、時間的な速さも違ってきて、まだかなり難しいだろうと思う。

A：同じ意見だ。ピンポイントで、降水量が昨年よりも非常に増えているといった情報は出せても、それが深層にどう浸透していくかまでは衛星で見えない。それは地中探査になる。衛星に依存する方法では難しいと思う。

Q：森林の煙をしきさい衛星で検知できるということだったが、消防にも貢献もあるか。衛星観測と社会との連携で、どのくらいまで活用が進んでいるか伺いたい。

A：基本的には2つの側面がある。森林火災に関して、世界的に火災は公開されていて、使える状態にまではされている。それを実際にどんどん使っていくのはこれからの努力になる。アメリカやヨーロッパも取り組んでいて、協力していくことも今後の活動となる。

　日本国内の火災についても適用できないかという議論はあるが、250 mという分解能がネックになる。「もっと解像度が高いといいのですが」と言われているのがが現実だ。

Q：しきさい衛星、しずく衛星のセンサから鉛直方向のデータはあまり得られないのか。例えば雲の断面や、雨がどうなっているかといったデータは上空からの光学観測では得にくいか。

A：例外的に、降水量に関してのみだが、降水レーダーを搭載したGPM衛星で、鉛直方向も測っている。

A：GPM以外の衛星、しずくやしきさいは鉛直は得られない。基本的には面的な情報を見ている。ただ、将来的な検討の話としては、かなり技術的に難しいが、細かく観測することで鉛直方向の情報を出せるので、その研究開発は進んでいる。GPM衛星の鉛直方向の降水データは非常に幅を狭く測っているので、他の衛星と組み合わせている。

Q：JAXAの地球観測衛星以外にも、気象庁のひまわりなどの気象衛星や通信、防衛など様々な衛星が飛

んでいる。その協力関係やすみ分けの様子を伺いたい。

A：静止軌道の気象衛星ひまわりは気象庁担当で、それ以外の周回衛星はJAXAが担当という流れのすみ分けがある。解析する技術は共通部分がかなり多いので、データを使う部分は垣根を超えた協力ができないかと議論は行われている。

A：利用側の観点だと、さきほどの回答で話題にした降水量だと、ひまわりの降水量データ、GPM衛星の鉛直方向のデータ、その他のデータを組み合わせて、JAXAで10度メッシュで1時間おきの全球の降水量のデータセットを作って公開しており、地上での共有は今後も進んでいく。 GCOM-C衛星のために作ったアルゴリズムを、そのままひまわりにも適用して同じプロダクトを作るという連携もある。そういう広い意味では協力は進んでいる。あと、詳細はよく知らないが、IUU漁船の探査という衛星データの利用ニーズはあるようだ。

Q：地球の衛星観測データを使うときのプラットフォームとして、Google Earth EngineやマイクロソフトのAI for Earthなどが研究コミュニティーで多く使われ始めていると伺った。寡占になっているプラットフォームが、これから研究者や日本の政策などに及ぼし得る懸念事項をお伺いしたい。

A：非常に懸念される事項だ。そもそも衛星そのものは何で要るかというところにつながってくる話だ。極論から言えば、研究者から見れば、どの国の衛星でも、どの会社のプラットフォームでも、自分のやりたい研究のデータ、情報が簡単に解析できて、結果だけ持ってこれたらよい。その精度も含めて気にしない人が増えてきている。最後の情報だけ使えればよい、その出典を書いて、計算したらこういう結果がでましたという方向にどんどん行ってしまっていて、かなり懸念している。特にモデルの人たちがどこの衛星でもいいからデータがあって、結果的にできるリソースがあればよいというお話をされる傾向がある。

　日本政府としても経済産業省がTellusを作っているが、リソースのかけ方が圧倒的に違う。どうしても今さらだとできることは限られてしまってる。 TellusにはJAXAのALOS-2やGCOM-Cの衛星データも載っている。しかし、アプリケーションやライブラリーの揃い方は、やはりGoogle Earth Engineなどに比べるとまだこれからとなっている。これらの米国ベースのクラウドサーバーに全部ALOS-2やGCOM-Cのデータを載せて、そこだけでサービスすればいいかとなると、民間企業なので、ある日突然やめる、課金額を上げると言われるとどうするかとなる。日本の貴重なデータがアメリカに全部行っているだけでよいか。また、日本の衛星データを他の国で勝手に使われるだけになると、日本の国益に反するようなことにならないとも限らない。我々も非常に気にしている。

A：センサの開発にも競争と協調があると説明した。そもそもGCOM衛星を立ち上げるとか、ALOS衛星を立ち上げる。衛星自身にも、なぜ日本で衛星を作らなければいけないのか、海外の衛星を使えばいいじゃないかという議論は当然ある。それと全く同じ議論かなと私は思っている。結局のところ、日本のことは日本人しか分からないところがある。特に衛星の分解能がどんどん上がってきている。そうすると、今まで見えていないことが見えてくる。そうすると、それはなぜだといったときに、日本で見えていることは、やはり日本人でなければ分からない。日本周辺のここの海洋の状況に対してどういうことが起きていると考えられますか、と海外の研究者と議論したところで、それは分からないと言われる話になってくる。やはりよくあるローカルの話とグローバルの話と一緒で、日本として立つところは競争してでもやっていく。それ以外のところは協調してやっていくという、そのバランス問題だと思っている。日本のプラットフォームが全くないのは確かに問題だが、かといって、海外のプラットフォームに協力しないというのもやり過ぎになる。どういうバランスを取っていくのがよいかという問題と考えている。

# 5 気象・気候に関連する超学際研究や異分野協働研究

## 5.1 洪水予測、AI、歴史

芳村 圭（東京大学／JAXA）

※講演日：2021年5月27日

本日は科学政策に関わられる聴衆の皆様向けに、手広く話題を提供する。

私自身の専門は基本的には水文学だ。その関連で洪水予測を行っている。AIは、やや早い時期から取りかかっているが、最近だんだん分かってきた話題などを紹介する。水の同位体を研究している関係で、古気候も興味があり、その流れで歴史の話題も紹介する。

**洪水予測について**

皆様ご存知のことだが、災害として、日本では地震の被害規模も大きいが、洪水は、世界の各地で頻繁に起きて、経済被害は非常に大きい。ここ毎年の洪水災害で皆様がもう認識済みのことだが、日本の洪水による人命被害、経済被害も非常に大きい。私自身、2015年の平成27年関東・東北豪雨で、堤防が決壊した鬼怒川にいて、動画を撮影した。少し古いが、2006年にToday's Earthという形で作り始めていた（図5–1–1）。

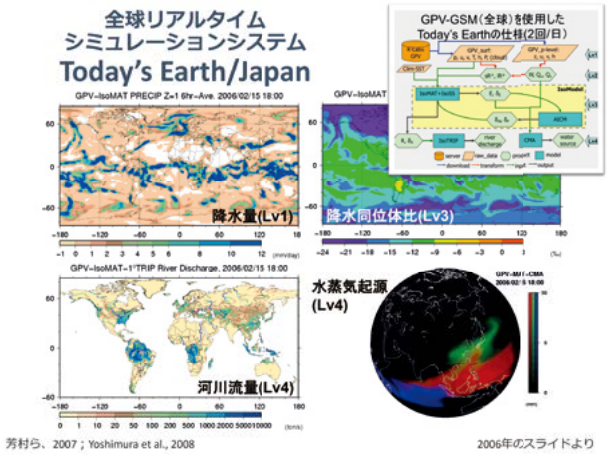



**図5–1–1　初期のToday's Earth**

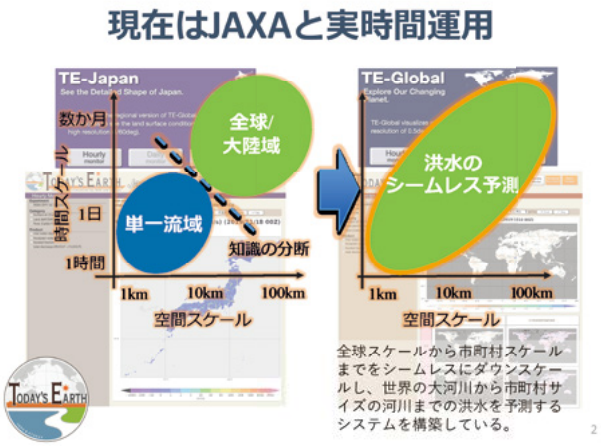



**図5–1–2　2つのシステムの実時間運用**

今日の地球をリアルタイムでシミュレーションするシステムということで、Today's Earthと和製英語を名付けて、今に至っている。気象庁が研究者にGPVという予報データ提供を始めてくれた時期だった。そのデータを使って、陸面モデルを動かし、河川流量や水蒸気起源だが、どこから水がやってくるか、といったシミュレーションをリアルタイムに表示するところから始めた。この2006年前後の頃のシミュレーションは、言わば、知的好奇心、遊びのようなものだ。そういう意味では非常に面白かったので、細々とずっと続けていた。しかし、2015年の鬼怒川の洪水が起き、このシステムで洪水が予測できているのではないかと気が付いた。検証したところ実際、予測されていた。これはしっかり予測して、皆さまにお伝えしないといけないという使命に駆られ、今に至っている。現在、JAXAと実時間運用をして、Today's Earth Japan、Today's Earth Global

という名前で、日本版、全球版の情報提供している（図5–1–2）。

このToday’s Earth JapanとGlobal、実は全くモデルで構成している。単純に解像度を変えただけだ。それぞれ解像度が約1 km、約25 kmだ。陸面モデルとして、陸の水と熱の状態や河川の水など、をどこでも1つのモデルでできるようになると、いわゆるキャリブレーションが不要になってくる。そのため、シームレス予測と呼んでいる。土地に対してシームレスで、グローバルから日本まで、アフリカでも東南アジアでも、どんなところでもリアルタイムで推計して予測を作られる。

JAXAと連携しているメリットの一つに、衛星観測データの入手がある。地球の雨や風、様々なデータを衛星でモニタリングしている。シミュレーションモデルにできる限りリアルタイムで、それを使う。予測する際には、気象庁のデータも使って陸面モデルを動かす。河川の流量や、陸面の土壌の水分量、湿気などをできる限りリアルタイムに推計して、そこから少し手放しで、予測計算するという仕組みだ（図5–1–3）。

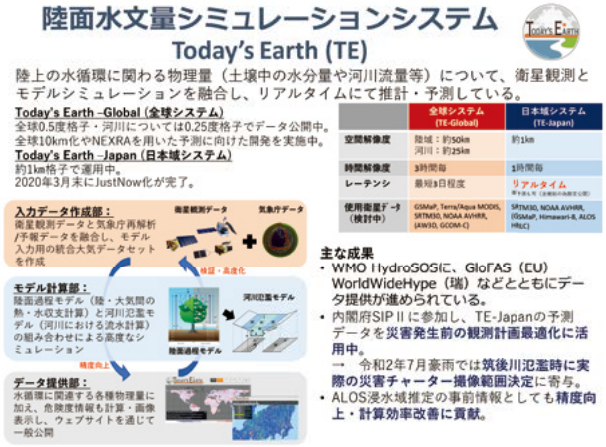



図5–1–3　Today’s Earthの特徴

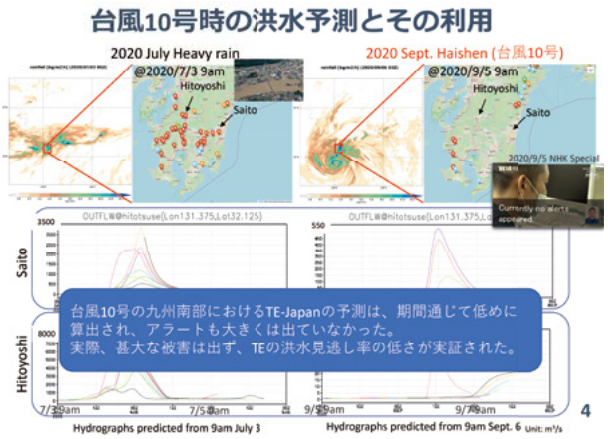



図5–1–4　令和2年台風10号での洪水予測

各国で類似のシステムが検討されている。欧州がGloFAS、スウェーデンがWorld Wide Hype、を出している。世界気象機関（WMO）が、HydroSOSを動かしていて、各国とともに私たちも貢献している。内閣府がSIPという施策で、災害を軽減する研究開発を支援しており、そこにも貢献している。

2019年10月の令和元年台風19号の際、これは大変なことになると思い、Today’s Earthを使ってリアルタイムで予測していて、NHKが取材で取り上げてくれた。案の定、大きな被害が出た。そのときの予測結果を後で検証した結果を紹介する。実際に破堤した142地点のうち、Today’s Earth では130地点、システム上の警報が出ていた。平均すると破堤の32時間ぐらい前に出していた。現在の日本の洪水予報のリードタイムが6時間前なので、それと比べかなり早く、予測できていた。使い勝手が良いものとして、ニーズは結構ある。自治体では災害前に、人員配置の準備をしたい。メディアも、どこに記者を派遣すればよいか、情報がほしい。そういうニーズがある。

ただし、他にも正確性などの様々な側面や課題はある。特に、空振りが多い。6割程度の空振り率だった。この改善を進める必要がある。ただし、そんなに悪くはない結果といえる側面がある。長い河川では、上流でも下流でも堤防が作られている。破堤前には、一般的にどの地点でも破堤のリスクはすごく高くなる。しかし、一旦、どこかで決壊が起こると、別の地点が安全になるという構造がある。そのため、警報的中率としては1か所だけが当たりとなり、他の個所が空振りとなる。そのため、どうしても空振りは起こる。

Today’s Earthの実証実験には、多くの自治体に参加してもらっている。自治体の首長が避難勧告を出す際の、意思決定支援システムという役割だ。

次に2020年7月の令和二年7月豪雨と、9月の令和二年台風10号の際の予測結果も紹介する。7月豪雨

では球磨川で洪水が起こった。台風10号は九州に近づく前に大きな騒ぎになったが、大きな洪水被害は出なかった（図5–1–4）。それぞれの予測結果だが、球磨川洪水災害ではしっかりアラートが出ていた。台風10号では、ところどころアラートは出ているが、大分少ない。洪水の見逃し率の低さが実証できた。このときも、NHKが取材に来てくれた。自治体の担当者の方が「このシステムで、アラートが出ていませんね」と話す姿が全国区で映ったので、もし洪水被害が出たら大変だと内心、不安もあったが、洪水が起きず的中して良かった。

SIPでの取り組みを紹介する（図5–1–5）。

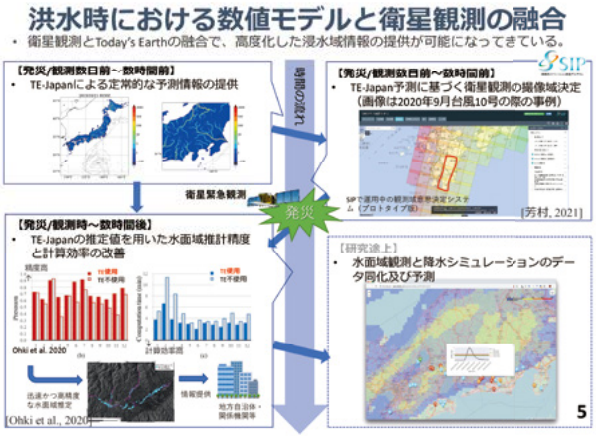



**図5–1–5　洪水数値モデルと衛星観測の融合**

| Name | WorldWide HYPE（瑞） | GloFAS（EU） | TE-Global Forecast（日） | USGS Waterwatch（米） | Hydrological Outlook UK（英） | Australian Bureau of Meteorology（豪） | Nepal River Watch（本） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Domain | Global | Global | Global | US | UK | Australia | Nepal |
| Ensemble Number | 25 | 51 | 51 | ? | 12-24 | 4 | 1 |
| Forecast range | 7 months | 45 days | 10 days | 7 days | 3 months | 10 | 7 days |
| Spatial Resolution | Catchment with1000km² in average | 10km | 25km | | 1km | 10km | ? |
| Forecast Frequency | Twice a month | Daily | 12 hourly | | monthly | 6-12 hourly | |
| NWP input | ECMWF SEAS5 | ECMWF ENS | ECMWF ENS, JMA GSMGPV | | UK Met Office's monthly data | BoM ACCESS | |
| Rainfall-Runoff model | HYPE | HTESSEL | MATSIRO | | G2G | GR4J | |
| Routing model | HYPE | Lisflood | CaMa-Flood | | G2G | Muskingum | |
| HP | https://climate.Copernicus.eu/global-seasonal-hydrological-forecasts | http://www.globalfloods.eu/glofas-forecasting | https://www.eorc.jaxa.jp/water/TE-global/ | https://waterwatch.usgs.gov | http://www.hydoutuk.net/ | http://www.bom.gov.au/water/ssf | http://www.hydrology.gov.np |

**図5–1–6　実時間洪水予測システム比較**

Today's Earth の予測情報は、JAXAの人工衛星ALOS–2「だいち2号」の撮影範囲の意思決定の支援に使っている。衛星は決まった軌道を決まった時刻に通るので、その上空に来た際にどの領域を撮るのが一番洪水把握に良いかという意思決定の支援に使っている。図5–1–5の右上の写真で、四角い升目のそれぞれが撮影可能な領域を示している。どの領域を選ぶか自由度がある。このときは赤枠で囲った領域を撮影すると決めた。JAXAは撮影する領域を6時間前に決めるので、半日前には洪水予測情報が欲しい。すると、やはりリードタイムの長い予測が非常に有用だ。私たちの予測結果がALOS–2の撮影支援に対して、もう1つ利点がある。ベイズ理論のポイントは、事前確率が分かっていれば事後の推定結果の精度が上がることだ。その事前確率としてもToday's Earthの情報を使える。

左下の図が球磨川での洪水氾濫面積を示している。こういった貢献を実際にリアルタイムで、できるだけ精度を高く、かつ計算効率もよく出して、自治体で使われるようにしていきたい。現在はまだ開発中だが、さらに洪水予報システムに戻し、データ同化させて、さらに精度をあげようという研究を実施中だ。

洪水予測について、国内の法規制の話題も提供する。洪水予報が法的に”出せない”という課題がある。洪水予報は、気象庁の予報業務の許可等に関する審査基準に従う必要がある。気象予報は日本ではシングルボイス、つまり国が一元的に出すべきいう考え方がある。それに関して全く異論はない。最近、いくつかの天気予報について、自由化の流れで、審査して認めた民間会社が気象予報を出せるようにしている。

一方で、洪水に関しては、防災との関連上、当面許可しないとなったままだ。この点が私たちの予測システムに関わってくる。自治体に情報提供はできるが、市民に情報提供すると法律違反になってしまう。少し前に、NHKの方に話していたら、この問題意識を持っていただけて、報道記事を何度も書いてくれた。今、実際に70年前の法規制の見直しが動き始めた。社会の動き、協力も目にした。

図5–1–6は海外比較だ。類似システムは海外にもある。それぞれ一長一短だ。

### AIについて

AIに関して、水文学の話題を提供する。2019年に「水文学における23個の未解決問題」が国際水文科学会の水文科学ジャーナルにオープンアクセスで掲載された[1]。その1つが「流域規模の水文学的法則とは何か」だった。水文学では先ほど紹介したような、どうしたら洪水予測できるか、どうモデル化できるのかといったテーマがある。その際、重力、水の流れといった流体力学を扱ってきている。流体力学の中でも特に何か依存するパラメーターや、経験的なものなどが多く研究されてきた。

水文学者は「観測不足の河川流域での予測（Prediction in Ungauged Basins ; PUB）」に長く取り組んでいる。特に発展途上国の観測が少ないが、被害を減らせるよう予測したい。我々のモデルはその一環の取り組みでもある。 PUB研究のこれまでの教訓として、結果はキャリブレーションあるのみ、パラメーター転用可能性は幻想ではないか、といった結論が出ていた。グローバルに、シームレスにと先ほど述べた私の研究と真逆の状態だった。ある意味、PUBは白旗が上げられていた。なぜ白旗なのか。理由の候補が3つあった。1つ目は、世界の多様な河川の不均一な状態に起因する複雑性のため、共通法則がなく、ある河川で成り立つ法則は別の河川で成立しないのではないか。2つ目は共通法則を見つけられるほどの観測データがない。まだ足りないということ。3つ目が私たちの考えが足りないのではないか。既存の観測データから法則性を見いだせていないのではないかという可能性だ。 PUBに関する研究者の立場としては、もっとデータを蓄積すれば分かるようになるだろうという2つ目の候補が基本的な考え方だった。

最近、潮目が変わった。2019年のクラッツァートという若いコンピューターサイエンティスト系の研究者らの報告を紹介する。既存のデータでディープラーニング、LSTMを使った取組だ。図5-1-7にオープンアクセス誌の結果を示す。一言でいうと、見事に既存のモデルの結果を追い抜いた。

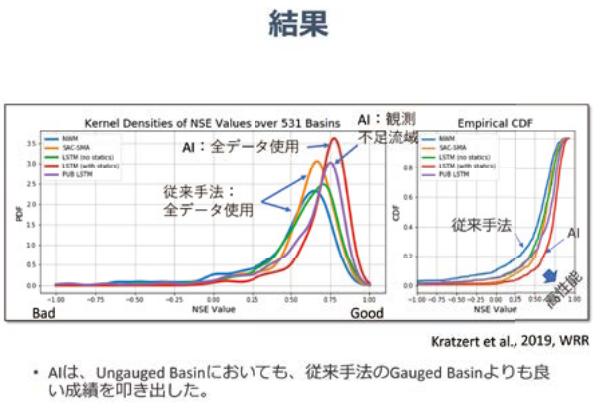



**図5-1-7　機械学習を用いたPUBの検討**

（Kratzert et al., WRR（2019）CC BY）[2]

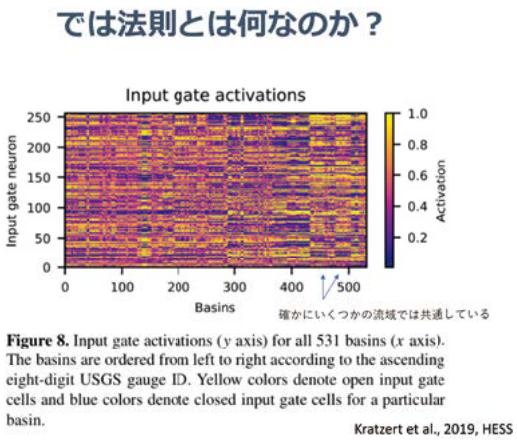



**図5-1-8　AI予測での法則**

（Kratzert et al., HESS（2019）CC BY）[3]

1 Günter Blöschl et al., “Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective” Hydrological Sciences Journal, Vol. 64, (2019)（Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License）

2 F. Kratzert et al., “Toward Improved Predictions in Ungauged Basins:Exploiting the Power of Machine Learning”, Water Resources Research,(2019), https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2019WR026065（2021年6月アクセス）

3 F. Kratzert et al., “Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets”, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 23, issue 12,HESS, (2019), p.5089 https://hess.copernicus.org/articles/23/5089/2019/（2021年6月アクセス）

左の図は、右に山があるほど良好な結果だ。右の図では右下によるほど高性能になる。一目瞭然でAIの結果が従来手法を上回っている。しかも、観測不足流域でのAIの結果が、全データを使った従来手法より良かった。 PUBの白旗は、データ不足のためと言っていたが、この結果を見ると、それとは違った。観測データはあるが、水文学者の考えが足りない、とAI学者が示した形で、大騒ぎになった。では、根本となる法則は何だったのか。従来手法で研究していた水文学者が用いていた流体力学のナビエ・ストークス方程式のようなものに相当する法則は、このAIの手法では何だったのか。彼らが示した回答が図5–1–8だ。

Input gate neuronとはLSTM、ディープラーニングのモデルでのニューロンの発火だ。脳を想像してもらってよい。ぴかっと光ったら、その回路が生きて何か予測し始める。横軸のBasinsは河川流域だ。

図の色は、どこでどのニューロンがよく発火しているのかを表わしている。人間がこれを見たところで、法則は分からない。しかし、AIは分かっている。もう、これが法則ではないか。

ここで、GoogleのGray Nearingの考えさせられる意見を紹介する（図5–1–9）。私見を含むが、地球物理学では、ポンチ絵を描くことで理解したと思われがちだ。それは皆さまも御経験があるだろう。1枚絵を出して、これが分かったことです、と説明する習慣だ。

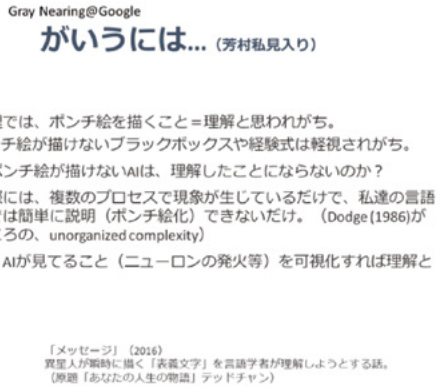



**図5–1–9　AI予測の法則の理解のために**

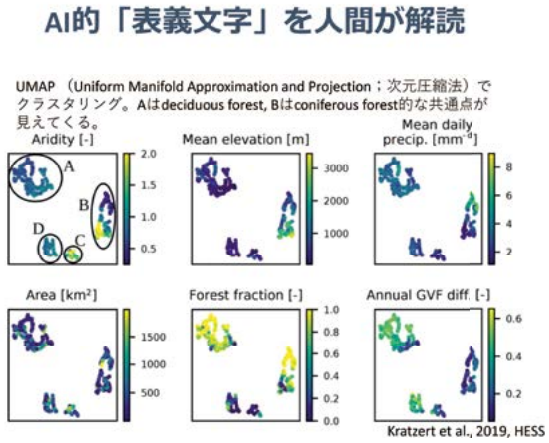



**図5–1–10　AI的表現の解読[3]**

AIはそういった人間の脳で考えていることをしていないから、ポンチ絵が書けない。ポンチ絵を描くことを最終目的としていたら、やはりAIを軽視してしまうことになる。

では、AIは理解していないのか、というと全く違っている。人間の脳で考えるよりも、しっかりと再現できているので、やはり理解されている。おそらく、私たちのもつ言語では簡単に説明できないのが事実だろう。テッド・チャン原作のSF小説「あなたの人生の物語」[4]に印象的なシーンがあった。人間が宇宙人と会って、その宇宙人がぐちゃっとした絵を描いてくる。その絵が表義文字になっている。これを人間がどうやって理解するのか、というあらすじだ。このSF小説の宇宙人の表義文字にあたるような表現をAIがやっているように思えば、既存の表現と違う表現なのだろうと、少し分かった気がしてくる。そういった背景もあって、KratzertらAI研究者は図5–1–8が法則だ、という主張だ。

そうはいっても、やはりこの図だけではよく分からない。どうにか解読しようと次元圧縮法で彼らは取り組んでいる（図5–1–10）。左上の図のクラスターのうち、Aが広葉樹的、Bが針葉樹的といった共通点を見出そうとしている。“What I cannot create, I do not understand”とリチャード・ファインマンが、言ったと

4　2016年に「メッセージ」という邦題でも映画化

されている。この解釈だが、生命科学分野の人たちが言っていたことが参照できる。分からぬものでもつくってしまう。それが再現できたらもう分かったことにしようと。脳の理解そのものは、どうしても分からないだろう。分からないけれども、何かコンピューターでモデルをつくる。つくったものが実際に機能を果たせたならば、理解したことと一緒だという。そういうものに馴染みのある分野だと、先ほどのAIの法則の解釈もすんなりと受け入れられるだろう。私たち地球物理分野では、どうしてもポンチ絵を描きたくなり、なかなか受け入れにくいという、悩みがある。

こういった水文学、気象学におけるAIは旬といってよい（図5-1-11）。とくにEarth Engineを作ったGoogleが非常に強い。 Earth Engineにデータを入れているので、私たちはプログラムを書く作業ができる。ツールも持っていて、データも持っている。ディープラーニング水文予測はイスラエルで行っていて、すごい勢いだ。

日本でも、AIを利用した水文、降水予測の研究はどんどん増えている。しかし、実施側の感覚だが、ほとんど力仕事だ。試行錯誤を何度も繰り返す。一般の方はAIと言えばスマートに感じるかもしれないが、実際に研究している研究者としてはそういう感覚は全然はない。 AIをうまく用いて、ブラックボックス化させないで、物理的な理解、数値モデルの問題として課題解決につなげることが重要だと考えている。

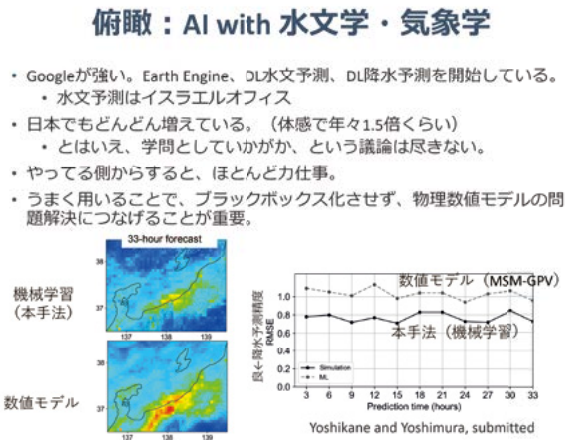



**図5-1-11　　水文学、気象学におけるAI**

**歴史について**

最近、気候変動影響が顕在化してきている。洪水も関連している。予測不可能性、英語でunpredictable、とよく言われるが、今後どういう社会をつくっていくか。現在ほど極端な気候変動ではないが、人類の歴史に学ぶことも大事だ。気候変動というもの自体はこれまでも起こっていて、人類の文明も経験している。

そういった研究は日本でも著名なジャレド・ダイアモンド氏らが行っている。彼はアメリカの生物の研究者だが、非常に面白い。日本人でも考古学の安田喜憲氏の「気候と文明の盛衰」や田家康氏らの著書が市販されている。これらは、物語風の内容だ。社会は気候の影響を実際受けているので、気温や降水量といった気候と歴史との関連の研究はScience誌などが定期的に取り上げている。近年の報告では、中国王朝の盛衰と鍾乳石の同位体比の比較[5]があった。唐や、元、明の終末期で、酸素の安定同位体比$\delta^{18}O$が下がっている。この数値は気温の指標で、気候変動があったことを示している。また、スペイン風邪の1914年～1920年の

5 Zhang et al., “A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record,” Science, Vol. 322, Issue 5903, p. 940, (2008)

氷河中の気体の濃度を解析した報告[6]もあった。こういった既往研究は歴史上の事象との比較が多い。

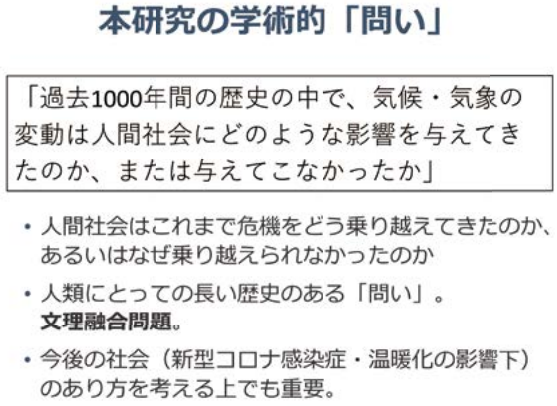



図5-1-12　気候変動と歴史の研究

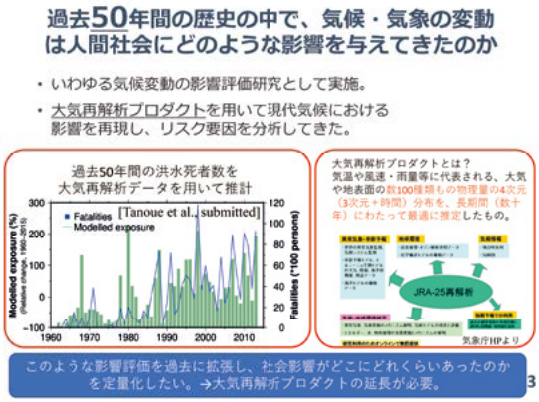



図5-1-13　過去50年の気候変動の影響解析

過去1000年間で、気候・気象の変動は人間社会にどのような影響を与えてきたのか、または与えてこなかったのか（図5-1-12）。研究者としては明らかにしたい「問い」だ。その危機を人間社会はどうやって乗り越えてきたのか、あるいは乗り越えられなかったのか、文理融合で取り組む課題だ。現在の新型コロナウイルス感染症や地球温暖化の影響を考える上でも大事だ。　そういった研究を、今まさに実施中だ（図5-1-13）。

大気再解析プロダクトというデータをまず作る。どういう場所でどういった気候か。ある緯度経度での風、降水量などを過去にさかのぼって解析する。人間の社会の反応も見る。例えば、実際の洪水死者数と、モデルで再現された数を比較する。気候の変動と人間社会への影響を定量的に分析する。

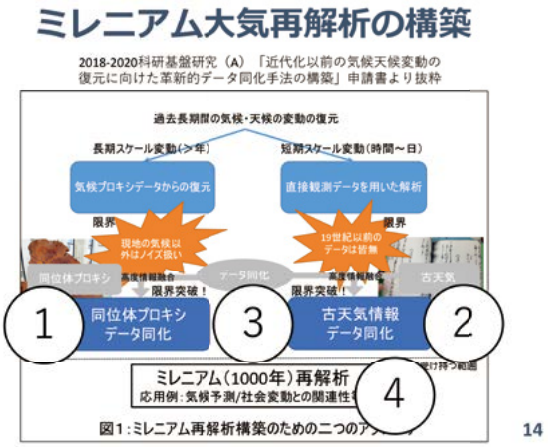
ボトルネックは、この大気再解析プロダクトで、非常に大きなデータ量が必要になる。衛星観測データでも足りない。気候の情報として、人工衛星はまだ直近50年程度しかない。もっと、過去に拡張して、社会影響を定量化するには、他のデータが必要になる。

20世紀再解析という研究が幾つか報告されている。19世紀以降、商業船や地上観測点での紙での地表面気圧の記録をデータマイニングして、データ同化した報告がある。

しかし、19世紀以前は気温の数値記録は残っていない。人間の観測の数値データだけでは、どうしても直近150年程度で打ち止めになる。

そこで、自然の記録を利用する発想となる。気候プロキシとは、自然の年輪幅やアイスコアの同位体比などを利用する。このような研究も古くから行われてきており、その成果として私たちは遥か昔の気候が寒かった時期、暑かった時期を知っている。このデータの特徴で、どうしても時空間解像度が低くなる。あくまでも同位体比なので、これ自体は気温とか降水量とかの指標ではない。どうにかして変換して、その課題を解決をはかるため、ミレニアム大気再解析というプロジェクトを始めた（図5-1-14）。

6　Alexander F. More et al., “The Impact of a Six-Year Climate Anomaly on the “Spanish Flu” Pandemic and WWI,” GeoHealth, Vol. 4, Issue 9, e2020GH000277, (2020)



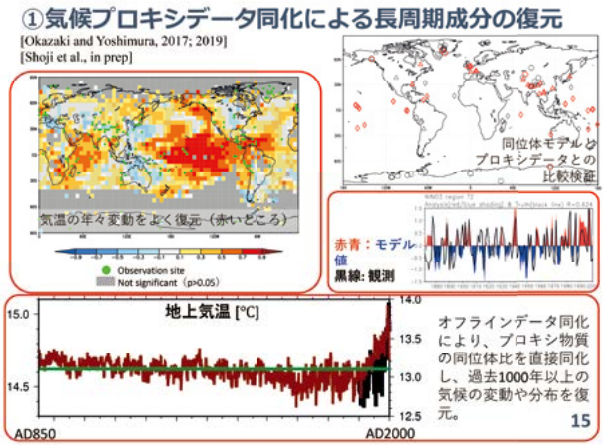




**図5-1-14　ミレニアム大気再解析の構築**　　**図5-1-15　同位体プロキシデータ同化**

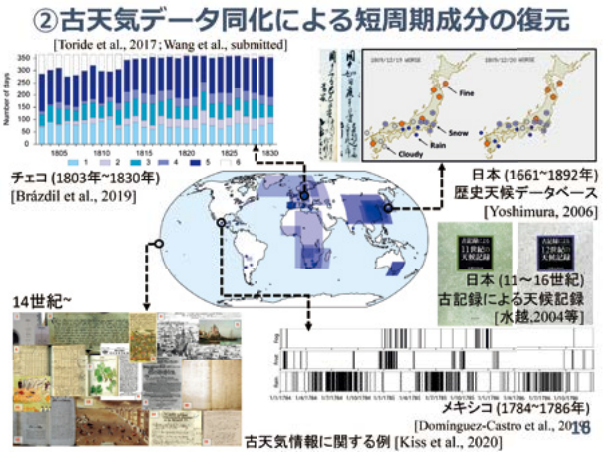
1点目は、気候プロキシデータ同化だ（図5-1-15）。サンゴや年輪、アイスコアなどに含まれる同位体比を、現在の最先端の気候モデル同化させ、昔の気候を導く。

分散的なデータだが、モデルに入れるとエルニーニョ、ラニーニャの変動がきれいに表れたり、過去1000年の地上気温の変動が見えたりする。課題の1つが低い解像度だ。年輪に含まれている同位体比は、名前の通り1年で1つの情報になる。アイスコアもそれに近い。我々が知りたい毎日というような時間幅よりも広い。

そういった日々の情報を得るため、人間の記録を使う研究が2点目だ（図5-1-16）。

現在も日記をつける人が今日の天気などを書くのを見かけるが、昔の人も日記に「何月何日、晴れ」と書いたものが残されている。私自身はできないが、この古い文字を解読できる専門家がいる。江戸時代なら曇り、雪と記録がある。これを天気情報としてデータ同化する。江戸で雨の場合、低気圧が江戸にあって、離れた位置で高気圧があり、と辿っていく。気圧から、風の流れなどもある程度計算できる。現代の最先端テクノロジーと、こういう古文書のような、ものすごくレトロなデータを組み合わせる研究を進めている。

3点目として、復元したプロダクトの精度をしっかり検証する必要がある（図5-1-17）。現在、実際の天気予報の情報は充実しているが、そこから、先ほどの江戸時代の日記程度のデータだけを取り出して、そのデータから気圧分布を算出することで、手法の検証を試みている。右下の図が再現結果だが、低気圧、高気圧の配置が近くなっている。



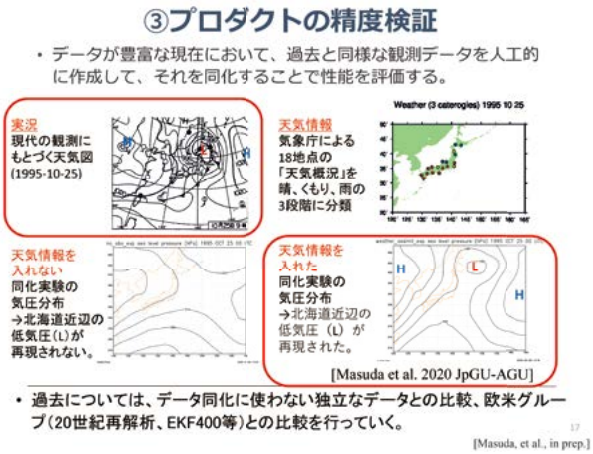




**図5-1-16　古天気データ同化**　　**図5-1-17　プロダクトの精度検証**

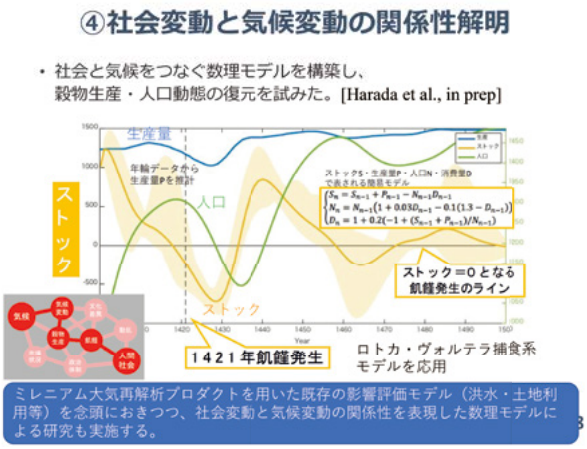



**図 5-1-18　社会と気候変動の関係性解明**

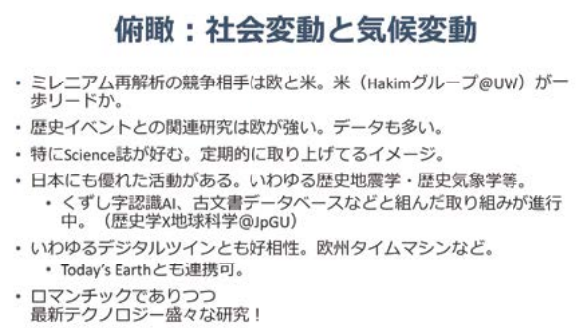



**図 5-1-19　社会変動と気候変動の俯瞰**

4点目は、これまでの内容を使って、社会変動と気候変動の関係性を解明したい（図 5-1-18）。

社会と気候をつなぐ数理モデルがまず必要となる。これまでの多くの研究では、ヨーロッパで寒かった時期にアジアで飢饉が起きた、といった水準で留まっていた。それよりも、より詳しく気候情報も社会も明らかにしたい。

現在、ロトカ・ヴォルテラ捕食系モデルという、微生物研究、食物連鎖などで使うモデルを用いた分析を試みている。気候変動で穀物生産量が変わったときの人口とストックの変化を解析した。ストックがゼロになった時代に飢饉が起きただろうと調べたところ、フランスの1421年の飢饉がうまく表現されたのが図5-1-18だ。このように大気再解析プロダクトを使って、過去1000年の生産量などのデータを導き出していきたい。

図5-1-19に、この話題の俯瞰を示す。社会変動と気候変動というくくりでは、欧米でもミレニアム再解析を行っている。欧州は歴史が長いので、データも多く、歴史イベントの関連研究に強い。学術雑誌によって、実は嗜好があるが、この研究はサイエンス誌が好んでいる。

日本でも優れた研究がある。歴史地震学や歴史気象学という分野の研究グループでは、古文書を読み、過去にあったイベントを解析している。最近では、崩し字を読むことができるAIが発達し、古文書データベースの整備も進んでいる。

最近、デジタルツインと盛んに言われている文脈においても、適合する。欧州タイムマシンとは、歴史ある古いものをしっかりデジタル記録で残そうという構想だ。海面上昇によって、イタリアのベニスの街が消えていくという危機感もある。 Today's Earth も連携している。 Today's Earth を過去に伸ばし、過去1000年間の Today's Earth ができれば面白い。ロマンチックな研究だが、最新技術ともつなぐ要素がある。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：天と地と人とにまたがる素晴らしい研究だ。洪水予測で、空振りの課題があった。このような課題は他の分野にも存在する。警報を出さずに実際に洪水が起きる見逃しの外れと、警報を出したが洪水が起きない空振りの外れという、どちら側かに必ず振れる。どちら側に振れるほうがベターという状況か。

A：見逃しを減らすほうが、まずは大事だ。そのため、空振りが多くなってしまっている。しかし、やはりインパクトとしては見逃しのほうがよくないと考えている。

Q：図5-1-7の、LSTM、機械学習を用いて観測不足流域での洪水予測を当てに行く話題で、2つ質問する。1つ目はなぜ当たるのか。人間がこれまで培ってきた物理法則や確率統計的な知見が、そんなに軟弱

だったのだろうか。

2つ目は、図5-1-8以降で、機械学習がよく当てる裏にある法則が、完全なブラックボックスなので、明らかにしようとする件について伺う。ニュラールネットワークやLSTMを振り分けて、効いている記述子は近似になるかもしれないが、説明性を持たせようと解読している。そこで、これまで研究者の間で注目されていなかった因子や、未知だった因子が出てきているか、さらに伺いたい。

A：1つ目の、何で当たるのかという質問については、対になる見方で、何で当たらないのかという着目すると分かりやすい。水文学の研究では、川の動きにしても私たちが全く考慮できていない要素がある。例えば人間が川の中にいる効果、小石がある効果といった、そういったことはモデルの中には全く入れられない。また、水文学者が想像、把握しきれて小さなスケールの現象もAIは一部見ていると思われる。例えば、空間分布が実は複合的に想像を超える効果を出していて、小さい現象が多く積み重なって、実際の現象に反映される効果も、AIは一部で統計的に処理しているのだろうと想像する。

2つ目、どういうことが分かりたいか、分かるかという点について回答する。図5.1.10の事例では、針葉樹林と広葉樹林で場合分けしている。一方、私たちの研究グループでも降水、降雨モデル結果をより観測に近づけるAIをつくっていて、それで得た知見を紹介する。例えば降雨予測だと、インプットとなる情報が、風や気温となる。 AIの言葉でいうと、フィーチャーベクター、特徴量にあたる。それがどれぐらいのフットプリントを持っているのか調整していくのだが、大きくし過ぎても、小さくしすぎても全く的外れになる。そのスケールで、我々が知らない物理現象が隠れているだろうことまでは理解ができる。それをモデルに反映させる方法論まではまだ成立できていない。

Q：AI解析でも、どのパラメーターを使うのかが非常に重要だと思う。今、触れられたよう、どのようなパラメータを選ぶかにより、どの影響を見落としているか、どの影響を過小評価していたのか、過大評価したのかということが出てくると考えられるがどうか。

A：その点は、いわば力わざでの検討になっている。どの変数をどのぐらい入れるか、いわゆる過学習問題なども考えながら試行錯誤で行っている。それもAIで対応できないかと思うのだが、そういうところまではできていない。いわゆるハイパーパラメーターや、インプットとして入れる情報、ディープラーニング、LSTMだとニューロンを何個にするのか、CNNだとレイヤーを何層にするのかといった点は統一された最適な方法が見つかっておらず、今は研究者それぞれの対応になっている。数をこなせば何とかなる面もある。今後、現象に関して、そのプロセスがどうやってどのくらい効いているのかを明らかにできる可能性はある。

Q：図5-1-2の右の図で、洪水のシームレス予測について、空間スケールは、複数の解像度がすでに実現していると伺った。時間スケールについて詳しく伺いたい。大体1日以上から数日が対象だと理解したが、より長い時間の数か月スケールも予測可能な対象と理解してよいか。

A：スケールにより、狙う対象が変わり、それに合わせることとなる。急峻な日本の河川が対象だと、数か月の時間スケールの流出予測は考えなくてよい。一方、大陸の長大な河川では、流れ出るのに数か月以上かかるものがあり、数か月予報の意味がある。また、最近、地球科学の分野で、大気海洋相互作用がもたらす、月単位で予測可能性がある現象も知られてきている。たとえば、南米ペルー沖でエルニーニョ現象が起こると、その約半年先に東南アジアのタイで雨が少なくなるといった大気海洋相互作用がもたらす現象がかなり分かってきている。グローバルの予測では、そういった情報をあわせて使って、干ばつや洪水が起こりやすくなるという情報として数か月予報を役立てられるのではないかと考えている。

# 5.2 情報社会における気象データとその利活用

越塚 登（東京大学／WXBC）

※講演日：2021年6月22日

最初に自己紹介を兼ねて簡単にデータ分野のお話をする。2つ目の話題として、気象ビジネス推進コンソーシアム（WXBC）の活動を説明する。気象データがビジネスや社会的なアクティビティーの中で有効に使われているケーススタディーなどを紹介する。3つ目の話題として、デジタル計算や情報処理に理論的な関心をもっているコンピューター分野の専門家として、気象に関する仕事を行っている中で感じたことをお話しする。大きく3つ、Issueとして話題提供する。

**はじめに**

私は気象ビジネス推進コンソーシアム（WXBC）の会長を務めているが、私の専門は気象ではなく、コンピューター屋だ（図5–2–1）。私は気象そのものはそこまで分かっていないのだが、気象データのビジネス利用に関して、様々に間に立って活動している。気象そのものの本当に専門的な内容は木本昌秀副会長（国立環境研究所理事長）に御教示いただいている。

現在、デジタル分野で最大の競争領域はやはりデータになってきている。データに関する活動は非常に重要だ。データ利活用に長く携わっていると、気象データは社会にとって極めて重要だとわかる。その割には、まだビジネスで意外と使われていない。様々な生産工程で機械学習などを使って最適化や効率化を産業界でさんざん進められているが、どうしても予測が十分な予測精度が出ない悩みがあるそうだ。そこでも気象データはまだ使われていないそうで、活用されていけばもっと予測精度が上がって一致するようになるのではないかといった話をしている。そういった状況で、データ分野や産業界の観点からみても、気象はポテンシャルのある分野と考えている。 WXBCの会長の役目を引き受けて、関係の仕事を実際にやればやるほど気象に面白みを感じている。

東大での所属は情報学環は、理系、文系といったくくりをまたぐ学際のはしりのような組織で、今年で20年を迎えた情報系の大学院である。私自身はコンピューター屋で、TRONで著名な坂村健先生が私の師匠にあたる。坂村先生のもとTRONプロジェクトで、オペレーティングシステム（OS）をつくる仕事を行ってきた。コンピューターと一口に言っても、いろいろな分野がある。狭く深い分野もあるが、OSはコンピューターシステム全部を知らないとできない分野で、非常に幅が広い。競争領域がだんだんOSからソフトウエア、サービス、そしてデータと移り変わってきたが、もともと広く扱わなければいけないOS分野の出身だった背景もあって、データに関しても、様々な分野を広く行ってきている。

そういった背景から、WXBC以外でもフォーラムや社団法人、政府関係の仕事も受けている。最近、情報分野でとくに関心がもたれるのは地域の課題である。地方自治体とも協定を結びながら、情報やデータのテクノロジーが地域課題の解決に資するよう取り組んでいる。話題となっているデジタル庁の創設にも携わっている。データ戦略が非常に重要だ。公共システムをどうするかという課題もあるのだが、情報通信政策としてデータ政策がデジタル庁の所管になってきた。データ戦略の中の重要な1つとして、気象も入ってくる。

繰り返しだが現在はデータの時代であると、コンピューター屋として捉えている。デジタル分野の大体の歴史感をお話しする（図5–2–2）。1930年代にコンピューターが生まれてから、多くのパラダイムチェンジがあった。大体20年に1回ぐらい、テクノロジーにせよ、ビジネスモデルにせよ、大きく様変わりすることを繰り返してきている。1960年代の大型計算機の時代から、1980年代のマイクロコンピューターの時代、2000年代のインターネットの時代になっていった。インターネット時代は、物理的なケーブルをいかに効率よくどこまでつなげるか、といったまさに物理層の話が大事だった。2000年ぐらいからインターネットがドット・バブルと言われるような、社会的に非常に大きな影響を与え始めていた。そこから実はもう20年たっており、新たな

フェーズになっている。テクノロジーとしてはIoTやAI　などがあるのだが、競争領域はだんだんとデータになってきた。現在は、2000年の物理層の話をしていた時代と対照すると、とうとうデータ層の話までレイヤーが上がった。一番上の階層まで上がってきた。IT分野ではこういった歴史観を持っている。

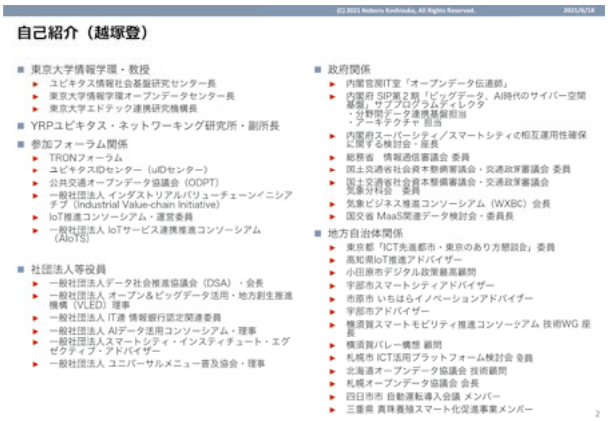



図5-2-1　自己紹介

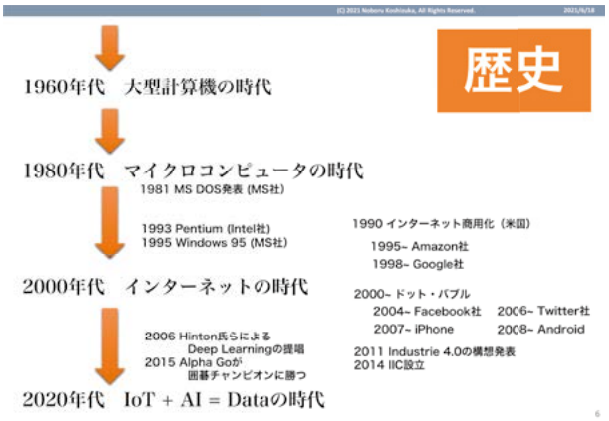



図5-2-2　IT分野の歴史観

**Issue 1. IoTとデータ駆動型社会**

IoTについての話題に移る。気象に限らず、様々に公共的な仕事に関わってきている。まず、TRONプロジェクトについて、もう少しお話しする。1980年代から世界的に先駆けてIoTを研究していた（図5-2-3）。1980年代、小さいマイクロコンピューター（マイコン）が日本の産業界は非常に得意だった。今は凋落したが、当時は世界を席巻していた。当時から、マイコンを身の回りの様々なところに埋め込んでいくと、どのようなことが実現できるだろうと考えていた。まだIoTという言葉は登場しておらず、インターネット自体もまだレイヤーにはない時代で、どこでもコンピューターと呼んでいた（図5-2-4）。今では、ユビキタスコンピューティングやM2M、アンビエントインテリジェンスといろいろな言葉があるが、IoTが一般的になってきたと捉えている（図5-2-5）。

実世界からデータを自動的に機械仕掛けで収集し、それを分析・解析してインテリジェンスにして、またリアルにフィードバックをかけるサイクルを回していくのがIoTの重要なポイントだ（図5-2-6）。言い換えると、実世界の多種多様な情報を集めてきて、誰でも使えるような形で基盤化したものを提供して、様々なアプリケーションで使えるようにしていきましょうという全体像だ。

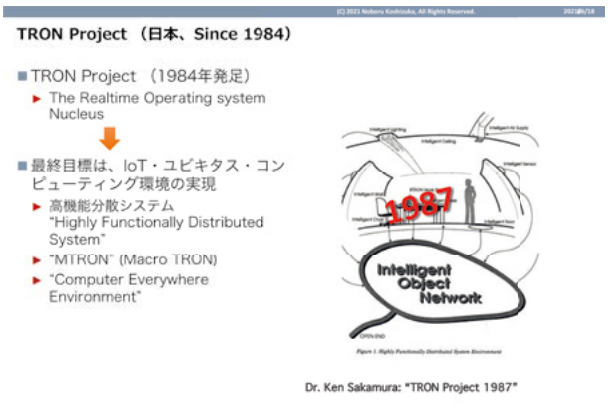



図5-2-3　TRONプロジェクト

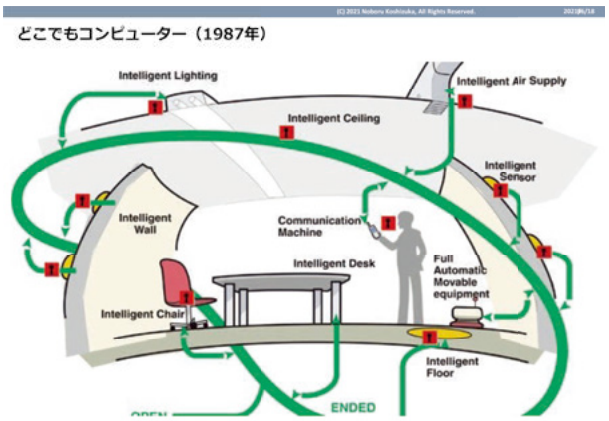



図5-2-4　どこでもコンピューター

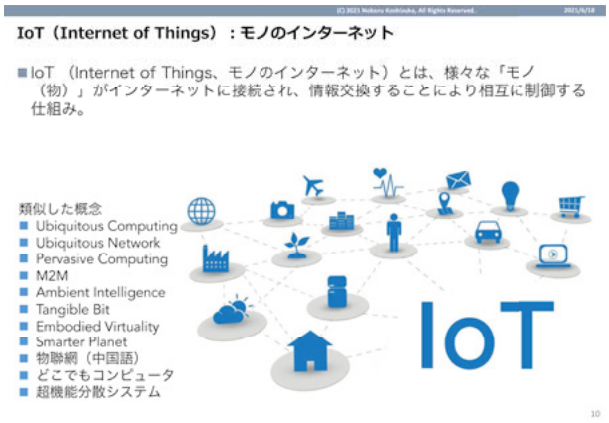



図5-2-5　IoTとは

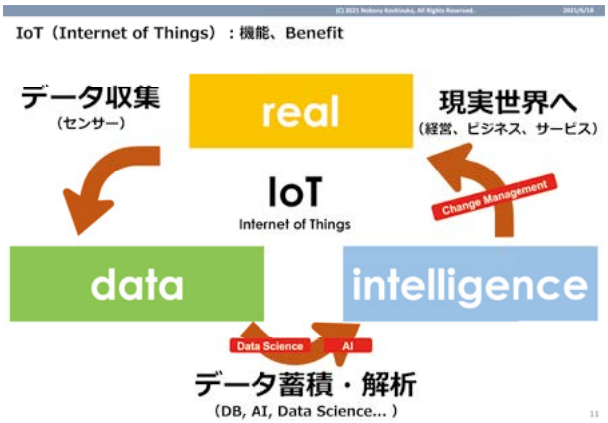



図5-2-6　IoTの機能

IoTの技術では、データ収集から、データをどう利活用していくかというレイヤーにだんだん競争領域が移ってきている。こういったアーキテクチャーでは、データ連携基盤のようなものに自然と考えが及んでくる。そういう意味で、こういった実空間情報基盤は最近、デジタルツインと言われている。一例として、リアルな国土のデータを集めてきて基盤化すると、そこはもう電子的な国土だ。一種のサイバー空間上の国土と言えるものの基盤をつくってく取り組みも進めている。

東大の中にもUTODCという略称のオープンデータセンターをつくった[1]。そこでも分野ごとに、ばらばらとデータがたくさんあるものをしっかりと連携させていこうとしている。

こういったアイデアまでは良いのだが、これを実際に進めていくには、たいへん地道にいろいろと整備していかなければならない。その1つとして、日本政府のデータを出していくにしても、ユーザー側は何があるかわからない。もう10年ほど前になるが、data.go.jpと命名したデータカタログサイトの構築に携わった（図5-2-7）。日本という国のレベルでのデータ基盤については、この時期から携わり始めた。

図5-2-7　DATA.go.jp[2]

1　東京大学情報学環オープンデータセンター（UTODC）
http://webpark5033.sakura.ne.jp/wp8/?page_id=45 （2021年10月アクセス）

2　日本政府データカタログサイト「DATA●GO.JP」
https://www.data.go.jp/（2021年10月アクセス）

地方創成については、VLEDと略すオープンデータ、ビッグデータを推進する社団法人をつくり、理事を務めている[3]。地方公共団体は現在、日本全国で1,788ある。そのデータのオープン化していく基盤を整える活動を行っている。

そういった活動の一環で約2年前にDATA-EX構想を出した。かなりざっくりと言うと、日本の中のザ・データ基盤をつくろうというものだ。内閣府から支援もいただき、これを推進するデータ社会推進協議会（DSA）という社団法人を今年の4月に立ち上げ、会長となってビジョンやミッションを設定した[4]。様々な分野ごとにいろいろな基盤が既にあるので、データ基盤といってもどこか1か所にデータを全部集めるのではなくて、既存の基盤を緩やかに粗結合型でつないだ連邦型のアーキテクチャーを掲げている（図5-2-8）。

図5-2-8　連邦型のデータ連携

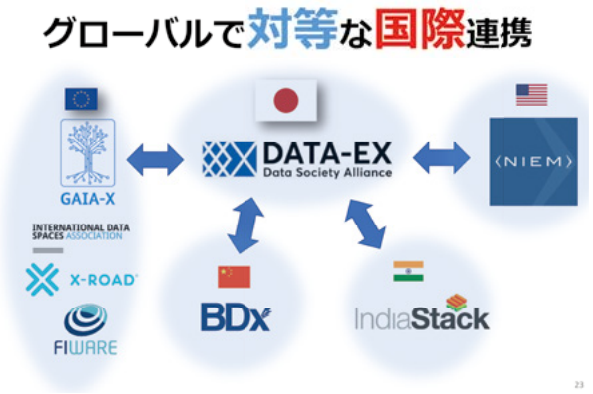



図5-2-9　グローバルで対等な国際連携

多様な分野の基盤を緩やかにつなぎ、物理的には分散していても、ロジカルには一つのデータ基盤に捉えられる水準の技術開発を行う。その運用も含めてしっかり整える。海外のデータ基盤とも国際的な連携も行っていく（図5-2-9）。DSAには現在、100社ほど加入していただいた。

今年、2021年6月にデジタル社会の実現に向けた重点計画が閣議決定された[5]。その中で分野間のプラットフォームは私の提唱したDATA-EXで推進していくと書いていただいた。今年3月に閣議決定された第6期科学技術・イノベーション基本計画でも、分野を超えたデータ基盤は、DSAが中核として推進していくことを書いていただいた。

こういうデータに関する活動に最近、非常に注力している。このDATA-EXの活動を行う以前から、WXBCをお引き受けしていたのだが、このデータ推進の活動の中でも、たいへん重要なパートの位置づけだ。私自身、熱心に行っている。

### Issue 2. 気象ビジネス推進コンソーシアム

あらためて気象ビジネス推進コンソーシアム（WXBC）について、もう少し詳しく御紹介させていただきたい。2016年度に立ち上げ、あまり体制は変わらず、5年度目の活動に入っている。事務局は気象庁の総務部が担っ

3　一般社団法人オープン&ビッグデータ活用・地方創生推進機構（VLED）
http://www.vled.or.jp/（2021年10月アクセス）

4　一般社団法人データ社会推進協議会（DSA）
https://data-society-alliance.org/（2021年10月アクセス）

5　内閣官房情報通信技術（IT）総合戦略室包括的データ戦略（案）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/dgov/data_strategy_tf/dai7/siryou8-1.pdf（2021年10月アクセス）

ている。気象の専門知見に関しては副会長の木本先生に全面的に頼らせていただいている。

主な活動は２つあり、対応するワーキンググループを作っている。１つが気象のデータを行政や産業界等でしっかり利活用できる人材をとにかくしっかり育成しよう人材育成ワーキンググループだ。執行部は、田原座長と、気象予報士会の岩田副座長に務めて頂いている[6]。田原座長は今までも非常に熱心にIT系の人材育成活動されて成果を上げてきた方だ。気象データを使う講習会には、様々なレベルがあるが、きめ細かく設定して、気象データを利活用できる人材育成を行っている。

もう１つが新規気象ビジネス創出ワーキンググループだ[7]。気象データをどうビジネスに役立てて新しいビジネスをつくるか、ないしはマネタイズしていくか。執行部は三菱総研（MRI）の村上座長、富士通の菅波副座長だ。企業の方々に活躍していただいている。定例的な活動以外に、毎年、総会とシンポジウムを開催している。

いろいろなニーズを持っている方とシーズを持っている方との間でうまくマッチングさせ、気象をどうビジネスに役立てているか。そういった事例紹介、共有が非常に多く行われている

会員企業はどんどん増え続け、400社を超えている。ビジネスWGは成果の１つとして、活用事例集をWXBCのホームページで公開しているので、ぜひ御覧いただきたい[8]。

また、気象データを使う側だけでなく、実は提供する側もビジネスになる。気象データに関するAPIサービスとして、こんなデータサービスが今提供されていますよ、と分かりやすくカタログにして示している[9]。

事務局の気象庁の方々が大変熱心に頑張ってくれていて、WXBCのYouTubeチャンネルも開設している[10]。講習会をはじめ、シンポジウムでの出展、ビジネス活用のショートな紹介など、100以上の動画を公開している（図5-2-10）。高いアクティビティーをご理解いただけると思う。

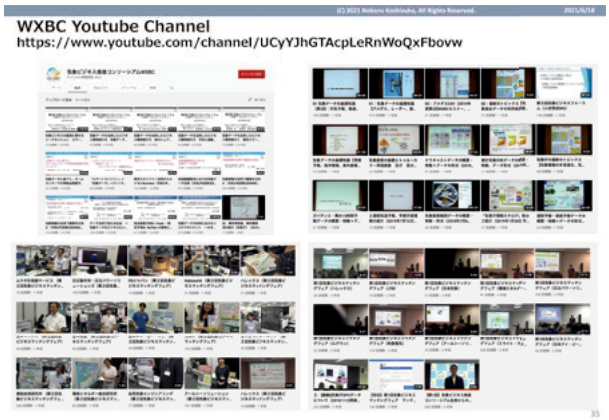



**図5-2-10　WXBCユーチューブチャンネル**

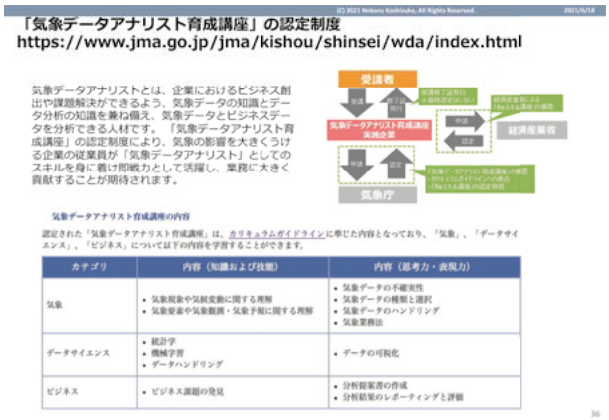



**図5-2-11　気象データアナリスト育成**

6　人材育成WG
https://www.wxbc.jp/wgintro_jinzaiwg/（2021年10月アクセス）

7　新規気象ビジネス創出WG
https://www.wxbc.jp/wgintro_bizwg/（2021年10月アクセス）

8　気象データのビジネス利活用事例
https://www.wxbc.jp/bizcasestudies/（2021年10月アクセス）

9　気象データに関するAPIサービス
https://www.wxbc.jp/bizcasestudies/#api（2021年10月アクセス）

10　WXBC YouTubeチャンネル
https://www.youtube.com/channel/UCyYJhGTAcpLeRnWoQxFbovw（2021年10月アクセス）

人材育成ワーキンググループでは、気象データアナリスト育成講座の認定制度を今年度から開始した[11]（図5–2–11）。気象データアナリストと言っても資格ではなくて、一般的な名詞だ。気象データを様々に分析して、それを扱って、社会課題の解決やビジネスに役立てるスキルを持った人材を指している。気象の知識・スキルと、データサイエンスのスキル・知識、ビジネスのスキルの3分野の内容をしっかり修めて初めて社会で気象データ利活用できる。この3分野の基礎的なスキルをもった方々を育成するカリキュラムのガイドラインをつくった。このガイドラインに沿って、民間の人材育成企業や専門学校、大学などがカリキュラムを作ることで、気象データを利活用できるスキルをもった人材育成が可能となるフレームワークである。幾つかの企業では既に気象データアナリストコースをつくっていただいている。

こういった活動が認められて、2021年度の気象庁長官表彰をワーキンググループの座長をはじめとする皆様が受賞した。今後もますます熱心に頑張っていこうという状況である。

**気象データ**

みなさまご存知のよう、気象データは非常に膨大なデータが公開されている（図5–2–12）。日本政府が公開している公的データは様々あるが、その中でも気象庁と国土地理院が最も多くデータを出している組織だ。非常に膨大なデータのホルダーとして、社会的に重要な基盤となるデータを随分出している。そういった膨大なデータの標準化や技術体系について、一概には言えない面がある。しっかり整えられているところもあるが、気象方言のようなところ、もともとITを専門としている方々にとっては扱いにくいところもある。WXBCの気象データアナリストのような人材育成活動を通して、そういったギャップを少しずつ埋めていければと考えている。

**図5–2–12　非常に膨大な気象データ**

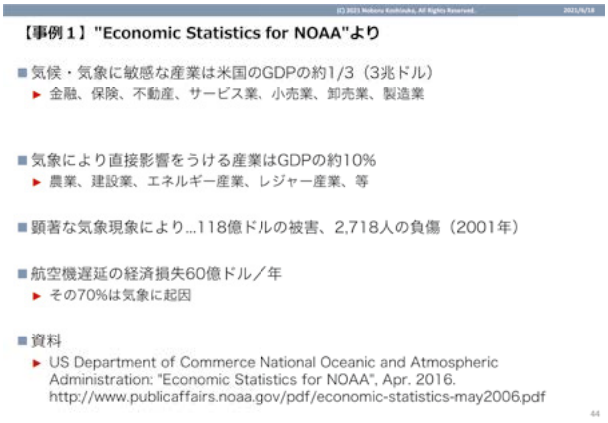



**図5–2–13　米国での気象に敏感な産業の規模**

**気象と経済の相関関係**

ここから、気象とビジネスについていくつか事例を交えてお話する。まず、全般論からお話しする。先ほどご説明したよう、私自身は気象そのものよりデータが専門で、その社会実装や産業界と随分かかわってきている。ここでは、経済となるが、その観点から見ても気象はかなり重要で、非常にインパクトがある。気象と経済の相関は古くからよく知られているのだが、それはマクロだけでなく、ミクロに見ても非常に重要だ。

それを示すデータや研究成果は様々な機関から、いろいろと出されている。

事例の1つ目として、米国海洋大気庁の2016年の統計がある（図5–2–13）。米国における気象や気候に



11 気象庁「気象データアナリスト育成講座」の認定制度について
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shinsei/wda/index.html（2021年10月アクセス）

敏感な産業の規模はおよそ３兆ドル、米国のGDPの約３分の１ほどもある。これは金融、保険、不動産、サービス、小売、卸売、製造業などは非常に気象に影響を受ける産業分野の合計だ。気象のデータをうまく使えば、こういった産業でのビジネスに生かすこともできる。

もっとダイレクトに影響を受けてしまう産業に限ってもGDPの10%ほどもある。農業は理解しやすいだろう。建設業は雨が降ると工事が進められず労働者がお休みになることを思えば、直接の影響があると理解できる。エネルギー産業も太陽光などの再生可能エネルギーがさらに普及していくなかで、気象そのものが発電にも影響する状況になっている。レジャー産業、観光は当然のように直接的に影響する。顕著な気象現象で受ける経済被害もあるが、如実に気象の影響が損失として表れるのが航空機産業だ。航空機の遅延による損失額はかなり大きく、70%は気象に起因すると言われている。気象は経済にとってこのぐらい大きな影響がある。もっと社会の中で着目されてよいのではないかと思っている。

２つ目の事例で、もう少しミクロな経済現象の話題を紹介する。平成19年だが、経済産業省が「個人消費に影響する気象など各種の要因」という面白い調査を実施している[12]。要は、雨や雪が降ったり、気温が上がったり下がったりすると国民の支出がどのぐらい変わるのか調査されている。気象のパラメーターと経済活動の相関関係だ。

中身を見ていくと大変面白い。雨が降ると消費支出はやっぱり減るらしい。では、具体的にどのぐらい減ったか。まず通年のデータを見ると、洋服や履物が、かなり顕著に減っている（図5-2-14）。保健医療を見ると、逆に0.72と増えている。このように雨でも増える産業も若干ある。交通・通信を見ると、−0.43とわずかな減少だ。これらを合わせて、１mm以上の雨が降る日が１日増えると、１人当たりの消費支出が約300円減少すると分析されている。

気象パラメータと経済活動の相関関係
http://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/bunseki/consum.html

| 被説明変数＼説明変数 | ①全期間 降水量1mm以上日数 係数 | （円／日） | t値 |
|---|---|---|---|
| 消費支出 | ▲ 0.870 | ▲ 286 | ▲ 2.52 |
| 01食料 | ▲ 0.053 | ▲ 17 | ▲ 0.97 |
| 02住居 | ▲ 0.074 | ▲ 24 | ▲ 0.49 |
| 03光熱・水道 | ▲ 0.033 | ▲ 11 | ▲ 1.62 |
| 04家具・家事用品 | ▲ 0.081 | ▲ 27 | ▲ 1.85 |
| 05被服及び履物 | ▲ 0.126 | ▲ 41 | ▲ 2.76 |
| 06保健医療 | 0.036 | 12 | 0.72 |
| 07交通・通信 | ▲ 0.072 | ▲ 24 | ▲ 0.43 |
| 08教育 | ▲ 0.101 | ▲ 33 | ▲ 1.16 |
| 09教養娯楽 | ▲ 0.093 | ▲ 30 | ▲ 1.07 |
| 10その他の消費支出 | ▲ 0.197 | ▲ 65 | ▲ 1.37 |

**図5-2-14　通年の降水と消費支出の相関**

気象パラメータと経済活動の相関関係
http://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/bunseki/consum.html

| 被説明変数＼説明変数 | ⑥4、5、6月 降水量1mm以上日数 係数 | （円／日） | t値 |
|---|---|---|---|
| 消費支出 | ▲ 1.526 | ▲ 503 | ▲ 2.00 |
| 01食料 | 0.014 | 5 | 0.12 |
| 02住居 | 0.363 | 120 | 1.15 |
| 03光熱・水道 | ▲ 0.027 | ▲ 9 | ▲ 0.54 |
| 04家具・家事用品 | ▲ 0.263 | ▲ 87 | ▲ 2.28 |
| 05被服及び履物 | ▲ 0.081 | ▲ 27 | ▲ 1.03 |
| 06保健医療 | ▲ 0.289 | ▲ 95 | ▲ 2.25 |
| 07交通・通信 | ▲ 1.310 | ▲ 432 | ▲ 3.01 |
| 08教育 | ▲ 0.186 | ▲ 61 | ▲ 1.20 |
| 09教養娯楽 | 0.161 | 53 | 0.69 |
| 10その他の消費支出 | ▲ 0.098 | ▲ 32 | 0.78 |

**図5-2-15　春の降水と消費支出の相関**

季節ごとの差も随分ある。特に４月から６月、春先から梅雨にかけて、雨が降るとかなり支出が減る（図5-2-15）。家具・家事用品、保健医療、交通・通信などが大きく減る傾向が顕著に出ている。図5-2-16にそのほかの影響例もまとめている。平日と休日とでどのように影響が変わるか、明確に傾向が違うものや、はっきりしないことも分析されている。こういったデータ分析でビジネスの上手な方法もみえてくる。

12　経済産業省「個人消費に影響する気象など各種の要因（平成19年年間回顧発表）」
https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/bunseki/consum.html（2021年10月アクセス）

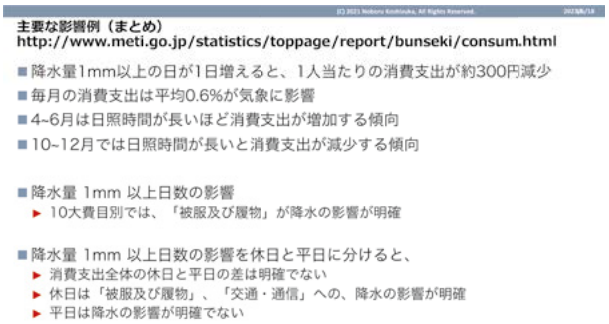



**図5-2-16　　主要な影響例**

顕著に支出が変わってくることがわかると、実は気象に応じて生産調整をしたほうがいいといった知見につながる。実はコンビニ業界などでは既にそういったケアも行うようになってきていることが、WXBCの中でも事例紹介されている。

3つ目の事例で、JETROアジア経済研究所が2013年に出した気候と経済発展の内容を紹介する[13]。これもなかなか断言した批評はしにくい研究成果で、気温と経済発展に大分相関があるのではないかという内容だ。かなり暴論に近いところもあって、私もそのまま信じているわけではない。議論の正しさは別として、こういう議論がある、成り得るということでお聞きください。

この研究の中の仮説では、寒冷だと経済発展に有利で、温暖・湿潤だと経済発展には不利というものだ。時間の経過とともに財がなくなっていく、時間コストという考え方がある。この時間コストが気象によって全く違うと述べている。要は、暖かいとすぐに財が腐ったり、壊れたりしてしまう。冷たい、寒いところだと比較的保存性がよいので、なかなか財が壊れない。ストックを考えると、暖かいところはかなり不利ではないか。寒冷な気候の欧州が、温暖湿潤な気候のアジアと比べ経済発展に有利ではないかという主張だ。この観点だけで経済発展をすべて考えて結論付けてよいのかという疑問があるのだが、議論としては面白い。

温暖な地域は時間コストが高い。例えば温暖湿潤気候だと、食べ物も刈り取ってしまったらすぐに腐っていく。コストの意味では、償却の時間は早い。建物やハードウエアのような設備に関しても、強い直射日光でがんがん温められていると、寒冷な地域より償却は非常に早い。それを単純にストックにあてはめて考えると、長年積み重ねられていくと、どんどん富の格差が広がるのではないかという話になる。

この仮説でさらに話が進められている。気温が1度上昇すると、経済成長率を0.36から5%減少させてしまう効果があると試算している。先ほどからの疑問をもちつつ読んでいくと、もしこの話が合っていたとしたなら、国や地域による差から、さらにいろいろと言える。ヨーロッパは日本やアジア諸国と比較して短い時間の労働時間でもクオリティーオブライフが維持できている。その背景には、この時間コストがかなりあるのではないかと述べている。日本では寒冷地域ほどストックが長持ちしないので、豊かにしようと新しいバリューをたくさんつくっていかないといけない。日本の労働時間の長さの背景として、こういった気候からの推定が結論のところで述べられている。

4つ目の事例は、もっとマクロかつ長期的な、気候変動に関するものだ[14]。気候変動は、当然だが、地球規模で大きな経済リスクとなる。カーボンニュートラルは気候変動をできるだけ抑え、経済リスクを少なくしていこうとする取組だと、経済の側から見れば考えることができる。



13　JETROケオラ・スックニラン「気候と経済発展―西欧の環境は本当に過酷か―」
https://www.ide.go.jp/Japanese/IDEsquare/Overseas/2013/ROR201308_001.html（2021年10月アクセス）

14　気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書 第一作業部会「気候変動の自然科学的根拠」（2013年）
https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/（2021年10月アクセス）

経済の中では、リスクをどうするかということにとりわけ機敏な金融分野がある。気候変動のリスクを担保する天候デリバティブのような金融商品は今後どんどん出てくるだろう。それ以外にも、環境ファイナンスのようなビジネスも出てきている。そういった金融商品は、気象データがあって初めて成り立つ。金融界の新しいビジネスにとっても、気象データは極めて重要だ。

天候デリバティブは、エンロン社が1997年に新しい金融商品として開発した。2001年に同社は不祥事で破綻したが、天候デリバティブは金融商品として1999年にはシカゴ・マーカンタイル取引所（CME）に上場され、今も取引されている。日本でも東京の天候が取り扱われている。1999年から日本の損保企業などが取扱いを開始している。こういった事例をとって見ても、金融界にとっても気象データは非常に重要だ。

**ウェザーテックの事例**

ここから、気象のデータや関連知見をビジネスに利活用していく事例について幾つか紹介していく。最近ではウェザーテックと随分言われているが、実現するために必要なスキルのシェアや、育成を図るのがWXBCの活動の中核で、多くの事例を紹介いただいている。

例えば、WXBCの第１回コンソーシアムで、幹事会員のローソン社に発注システムへの気象データ活用事例を御紹介いただいた。ほかのコンビニ企業でも同様の取り組みを行っていると思う。国内コンビニ各社の発注オペレーションは、かなり洗練されている。発注システムを支援するAIシステムは、大体どの企業も持っていて、様々な販売データ、POSデータや、近隣でのイベント情報、暦などを入れて、明日何をどれだけ仕入れたらよいという予測やアドバイスが出るシステムを使っている。その中でも気象データが非常に重要だ。気象によって売れるものや売れ方が変わってくる。コンソーシアムで気になって聞いたのだが、特に食品は随分違いがあり、たとえば、おそばが変動が大きいそうだ。夏の暑い時期には飛ぶように売れるそうで、欠品となると販売機会の損失なので、できる限り入荷量を増やしておきたい。逆に、梅雨の時期で少し気温が下がってくると売れなくなる。余ってしまうと、日持ちがしないので捨てることになる。これは損失になるので、入荷量を押さえておきたい。おそばは気温や天候の状況に応じて、きめ細かく入荷量を変えないと、経営として苦しいということだった。一方で、おにぎりやサンドイッチはどんな気温でも同じように売れて気象があまり関係ないそうだ。日用品だと、雨が降ると傘が売れる。ただし、傘は食品と違って腐らないので、日持ちを気にせず、欠品を気にしていればよい。やはり、日持ちしない食品関係で気象に大きく左右される商品の発注が関心事だという話だった。

天気データを入力したAI発注オペレーション支援システムのサポートで、仕入れる量を決めていくわけだが、日本全国のコンビニエンスストアの規模となると、かなり大きな変動になって、おそばを作る食品加工工場側はたまらない。ある日は100万、でも翌日は5,000と言われても、対応のしようがない。これに応じようとしたら、店舗単位のオペレーションだけでは無理で、生産や流通のリソースも気象データに応じて最適化しないといけない段階にまで実は来ている。こういった販売システムの効率化は、もはやそのレベルまで洗練されてきている。気象データに応じて販売、生産、流通のリソース、社会リソースをいかに最適化していくか。これはある意味で、社会全体のカンバン方式が求められている段階だと言える。

同様な事例で、ゑびやという地域で有名な食堂での活用事例をお話しする。和風食堂だが、明日どのぐらいお客が来るかによって、原材料の仕入れ量、御飯を炊いておく量、店員を確保しておく人数などちょうどよい数量にしておきたい。お客が来ない日は食事だけでなく、店員も仕事がない。お休みを取ったり、働き方改革を進めたりしたい。そこで、明日のお客の数や、何が売れるかなどの予測をしっかり分析する小売店用のビジネスインテリジェンス（BI）のシステムをつくっている。その中でも気象データはやはり重要で、どんどんインプットしていくということだった。三重県の有名食堂だが、このようなITを生かした取り組みで赤字からV字回復して、さらに作ったBIシステムを外販もしている。

次に、第１回気象ビジネスフォーラムで御紹介いただいた事例もお話する。自動販売機の商品でホット飲料とコールド飲料を切り替える時期についての話題だが、いつ切り替えるのがビジネスとして適当か。全国の自

動販売機の台数は膨大だ。設定の切り替えには、数週間がかかる。うまく切り替えが間に合わないと販売の機会損失が増える。その実験を気象庁と飲料水企業が行い、結果がプレスリリースされた[15]。その内容を紹介していく。まず、図5–2–17だが、縦軸が東京都での7日間の販売指数、横軸が7日間の平均気温の散布図である。かなりくっきりと傾向が出ていて、だいたい22℃を超えるとホット飲料の売上が落ちてくる。こういった検討結果をもとにビジネスとして考えていくと、天気予報のデータを見ながら、22℃になったから切り替えるのでは遅い。気温がだんだんと上がってくる季節には、来週や2週間後から22度を超えていきそうだという予報、気温が下がってくる季節には、22℃を下回っていきそうだという予報が知りたい。より確実な早期の気象予報に基づいて、切り替えるタイミングを早く見極めたい（図5–2–18）。こういった共同研究も進んできて、販売機会を増やすために欲しい気象情報がだんだんと確かめられてきている。

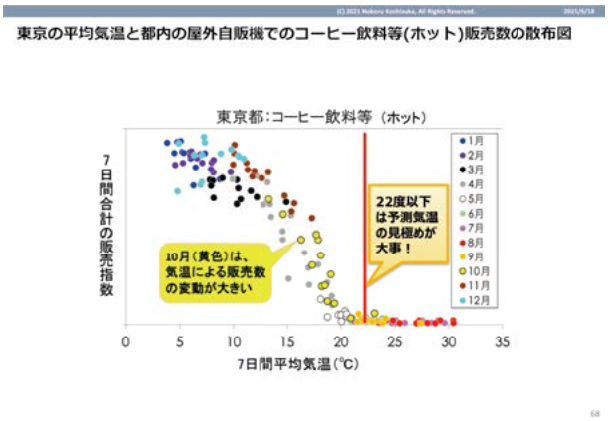



図5–2–17　平均気温とホット飲料販売数

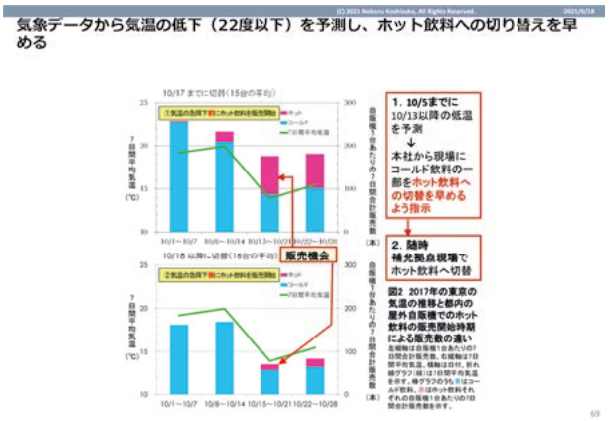



図5–2–18　気温予測による自販機の飲料切替

こういった商品の切り替えの課題は、自動販売機だけに限らない。家電量販店の店頭で冷房と暖房の機器をいつ切り替えるかというビジネスの課題も同様だ（図5–2–19）。この課題でも、天気予報のデータを見ながらパラメーターを決めておき、あらかじめ決めていた気温の低下が予測されたタイミングで一斉に切り替える。実際は、切り替えた日以降に暑くなる日もあるかもしれないが、販売機会をしっかり確保できる。気温予測のビジネス利活用に向けた研究がだいぶ進んできている。



15　気象庁プレスリリース平成30年6月26日「清涼飲料及び家電流通分野で気温予測データの有効活用事例を創出」http://www.jma.go.jp/jma/press/1806/26b/kikourisk201806.pdf（2021年10月アクセス）

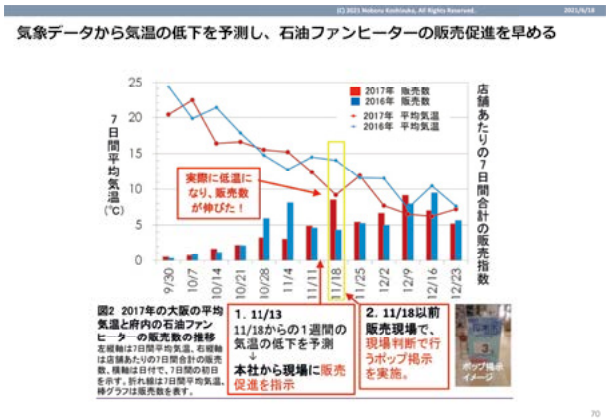



図5-2-19　気温予測による暖房の販売促進

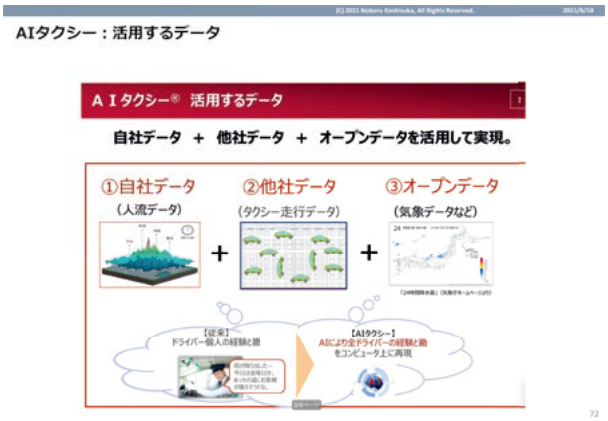



図5-2-20　AIタクシーの気象データ活用

IT分野では有名だが、ドコモが手掛けているAIタクシーでの気象データ活用事例もある（図5-2-20）。梅雨の季節は非常に重要で、ゲリラ豪雨があると、そのエリアではタクシーのニーズが急激に上がる。ゲリラ豪雨がありそうだという予測に基づいて、そのエリアにあらかじめタクシーを振り向けておくという気象データ利活用である。もちろん、タクシーの急激なニーズの上昇は、気象以外にも、鉄道が止まった、東京ドームでの試合終了時といったものがある。そういった多様な人流データの情報を、ドコモは多く持っているので、そこにタクシーの走行データや気象データを入れ込んでいる。

500 mメッシュに区切った範囲ごと、10分ごとにお客がいそうだというリアルタイム予測している。タクシーの乗車数予測も実は長年行われていたが、最近かなり精度が上がってきたので、こういったサービスが商用化されるようになってきた。これはタクシー側も乗客側もメリットがあって、まさしくウィン・ウィンのビジネス応用だ。

こういった気象データのビジネス応用は農業でも生かされている。アメリカではスタートアップのThe Climate Corporationが気象データを活用した農業保険を事業化し、2013年にモンサントが約11億米ドルで買収された話題がある。日本でも十分に余地がある。農業は気象に直接的な影響を受ける。なので、私は農業の現場で気象データは相当使い込んでいるだろうと思っていたのだが、いざ共同研究を始めてみると、全くと言ってよいほど気象データを活用できておらず驚いた。逆に言えば、まだまだブルーオーシャンだと思った。

国内のデータ駆動型農業の国内の事例として、最近、ナスの出荷予測にAIを使う話を伺った。経験的に、400℃日という言葉がある。一日の平均気温が例えば20℃だったら20日、10℃だと40日と、気温と日数の掛け算が400になると、だいたい成熟するという、経験則だ。いろいろな経験則がある中で、かなりいいかげんな経験則といってよい方法に基づいて栽培されている。もしかすると研究はなされているかもしれないが、厳密な分析はまだ現場には全く届いていない。そういう状況なので、収量の増加や品質の向上、出荷数や出荷時期などをデータ分析して予測する余地がかなりある。いろいろな生育データは既にあるのだが、ここでも気象データがやはり重要だ。まだまだ潜在的にデータ活用できる余地がたくさんある。

世界で最も園芸農業が盛んなオランダと比べると日本は、単位面積当たりの生産量で4倍ぐらいの差をつけられてしまっている。今、日本のデータ駆動型農業は本当に後進国になってしまったと認識される。ビニールハウス栽培だと、日本では、まだ単に温かくしておけばいいだろう、という感覚のまま、ビニールハウスの温度管理が俗人的経験によって行われている状況だ。オランダとの差にはさまざま理由はあるが、データ活用の違いは大きな1つだ。オランダのデータ駆動型農業は二酸化炭素量のコントロールだけでなく、温度や日射量などの天気予報をあらかじめ見ながら、水やりを行うタイミングなどもコンピューターでコントロールして厳密に行っている（図5-2-21）。もっとも気象が関係する農業分野だが、日本での気象データ活用はまだまだブルーオーシャンだ。

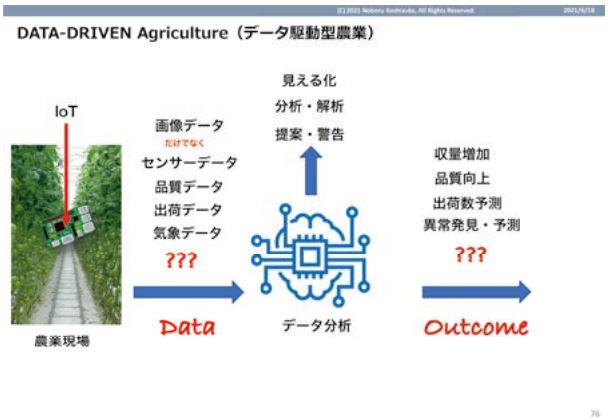



**図5-2-21　　データ駆動型農業**

### IoTと気象データと防災

気象データが非常に重要な分野として、当然だが防災分野もある。自然の災害は気象災害だけではなく、地震や津波などもある。そういった自然災害に関するデータも気象庁で取っている。現業では、それらの警報に生かしているが、避難のためのシミュレーションなどにもデータが生かされている。先進的な自治体では、津波の避難警報が出たときの避難経路をリアルタイムでナビゲーションできるようデータを活用する取り組みを行っている。自動車での避難だと、道路が通行可能か寸断されているかは重要な情報だ。

気象ではないのだが、地震のような大災害でのこういった活用策は、やはり3.11を受けて本格的に検討されるようになった。2016年の熊本地震ではトヨタのナビゲーションシステムでは、3時間後には通行可能な道路データを表示できたという進展があった。

豪雪は気象分野だが、地震での活用事例と類似で、除雪車にGPSをつけ、その通行実績をオープンデータにしてリアルタイム提供するサービスを米国シカゴ市ですでに社会実装されている。防災分野でのデータ利活用は世界的に重要だ。アプリケーションやサービスにして社会実装していく検討が進んでいる。

### Issue 3.　今後の課題：未来にむけて

ここから、3つ目の話題、未来に向けた課題を申し上げる。キーワードとしては「気象データ2.0」、オープンな気象データ利活用の促進、という視点からお話しする。

### 3-1　IoTと気象データ
### 〜気象データのオープンな流通環境へ〜

私自身は気象やデータ分析そのものはあまり専門ではない立場なので、専門の方は大目に見て頂ければありがたい。

これまでの気象データは、気象庁のような機関、言わばお上が観測、収集して、一般の方に使ってもらう形だった。しかし、今後は気象の在り方や気象データの扱いをもっとオープンにしていく必要があろうと思っている。

そう思う理由をお話しする。気象データの扱いには法的に厳しい規制が多くある。気象予報業務は気象予報士が何人いて、許認可がなければ実施してはいけないという規制がある。気象観測する際にも技術上の基準を満たさなければならない。気象データの公開にも規制がある。たとえば、気温が何度だと公に告知していくことは許可を必要とする。災害などの非常に重要な位置づけのものが含まれているので、間違った気象データが出てくると社会的な混乱や被害が非常に大きいことが背景だろう。一方で、今後、多くの方に気象データに関わっていただき、オープンに広げていこうという観点から見ると、かなり大きな障害にもなっている。

これをどううまく解決していくかが1つ目の課題だ。社会的混乱を起こさないことは大切だ。その一方、現在はIoTの時代であり、誰もが安価に気象データを計測し、かつ流通させることができる。厳しすぎる規制は、それをできなくしてしまっている。社会として、IoTの利点を生かしながら、いかにうまくデータ流通させ、活用するかは大きな課題だ。

例えば、すでに気象センサーは相当いろいろな種類が開発されている。しかし、それを国内で設置して、その測定値を無許可でインターネットで公開してはいけないという規制がある。先ほど述べたよう、誤った気象データ、災害データは特に社会に与える影響が大きいことが背景だ。ただし、現在、これだけセンサやIoTが普及していく中、うまくデータ流通できる制度は、しっかり検討すれば作れるのではないか。そういった制度的な課題についても、かなり提言している。

これまでは、どちらかと言えば、高い信頼性のあるスモールデータだった。現在、すでにそこそこの信頼性のビックデータが社会に多くある。これはどちらか一方が良いという話ではなく、どちらとも使い道がある。品質の違うデータをいかに上手に混合していくかという課題だ。実は、この2種類のデータの課題は気象以外の分野でも随分いろいろと議論されてきている。そういった検討、知見も使わせてもらうのがよい。規制にしっかりと合致して認証された方法による信頼性の高い高品質データだけを使うのではなくて、誰もが簡単に計測できる通常品質のデータも分けて使って、誰もが簡単に計測できるものもある程度流通できるようにしていくという方向だ。そのための社会制度をどうするか、まだいろいろ議論の余地はあろうかと思う。しかし、すでにIoTの時代に突入しており、こういった方向で、うまく信頼性も担保しながら開放していくことが必要だ。

### 3–2　AIと気象データ
### ～AIと気象予測、不確実性との戦い～

次の課題に移る。天気予報にAI、特に機械学習のテクノロジーを入れていこうという話を最近、随分と見かける。 AIや気象予測に携わらせていただいると、やはり気象データの本質的なテーマは不確実性である。社会の中でどうやって不確実性と戦っていくのか、しっかり検討していくことが必要だと非常に感じている。

複雑かつ不確実な気象現象は、100%完全な予測はできない。必ず不確実性が残る。したがって、2つのアプローチが必要だ。1つは、それでも不確実性を科学によって下げていくアプローチだ。気象予測精度を向上させる。そのためにはプロフェッショナルな観測網をどう整えていくかという課題もあるが、先ほど述べたよう、精度が低くてもIoTを使って観測点を増やし、ビッグデータ化することで精度を上げていく技術も検討すべきだろう。予測については、マシンラーニング、特にディープラーニングの導入で不確実性を下げる技術も検討されている。ややもすると、風が吹けば桶屋がもうかる的な統計的な処理になり、今までの力学的な法則に基づいたシミュレーションをベースとしたような予測ではないのだが、うまく新しい技術を導入していくのがよいだろう。

もう1つのアプローチは、不確実な未来への正しい対処方法である。不確実性が残るのは確実だ。意思決定の方法やポートフォリオ、リスクマネジメント、保険、デリバティブといった課題でも実は数理的な手法が非常に重要だ。不確実な未来に対して数理的アプローチが取れるデータアナリストやデータサイエンティストといったプロフェッショナルが必要だ。気象データはこのアプローチを進める上でも非常に重要だ。

**不確実性を下げるために**
**気象予測精度の向上**

不確実性を下げると言っても、複雑系の問題に関しては解析的に解けないケースがやはり非常に多い。複雑系の問題は気象予測に限らず、社会や自然、生命、経済と様々な分野にある。要素還元的にシミュレーションすると、計算量が爆発する。短期予報では何とか上手くいっても長期予報では難しい。要素還元主義には限界がある（図5–2–22）。

要素還元を追求していく方法もあるが、要素還元主義を超える、または違う手法が必要だと複雑系分野で

言われ続けてきた。機械学習やディープラーニングが進展してきたことが我々に問いかけていることは、ある意味で要素還元でシミュレーションしてきたことの対極にあたるところだ。

**図 5-2-22　要素還元主義の限界**

**図 5-2-23　機械学習とホーリズム**

機械学習はホーリズムと言われる、要素還元主義ではないアプローチで、従来シミュレーション型の要素還元主義とはもう180度違う（図5-2-23）。統計的なインプットとアウトプットだけで物事を処理して推定、予測するので、極端な言い方をすれば、中のメカニズムはどうでもいいというようなところがある。要素に分解して、また積み上げるやり方ではないのだが、数理的手法には基づいてはいる。もしかすると、ホーリズムの唯一の実用的手法なのかもしれない。気象のような複雑系の問題に対して、科学哲学的に言えば要素還元主義を乗り越える方法が、昔はなかったと思う。昔は要素還元以外の方法は机上の空論や実際には使えない方法しかなかっただろう。しかし、現在は、マシンラーニングが要素還元しない割には、それなりに実用的な結果をそこそこ出してきている。今後は両者をいかにうまく組み合わせていくかが鍵だろう。

こういう新しい技術をどう使っていくかというところに入って来ている。AIの活用についても、まだよちよち歩きの段階で、当然さらによくしていく必要があるが、複雑系を乗り越える具体的な方法論として、どう取り入れていくか。従来のシミュレーションとAIをうまく組み合わせていく検討がやはり重要だろう。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：気象業務の規制について、ご質問したい。規制には白黒はっきりしたものとグレーゾーンがあるものの2種類があると思う。もし後者だと、たとえば、SNSで勝手に天気を書いていても、グレーゾーンな状態なのではないかと想像した。そういったグレーゾーンがあると、ビジネスでの活用や、集合知のような情報として使っていくには、課題が生じると思う。さらに詳しくお伺いしたい。

A：規制の知見はあまり正確に持ち合わせていないのだが、気象観測や公表は定義、技術基準などがかなりしっかり定められている。研究教育のための気象観測は規制に含まないといった例外事項もしっかり定められている。

特殊な環境で個人や企業が気象を観測するのはよいが、基準を満たす測定方法でなければ発表は認められていない。したがって、もしSNSで温度や湿度を基準外の方法で測って認可を得ずに出していたら、違法で問題だとなる。

やはり、ビジネス利活用にあたり、かなり制約のある規制になっている。例えば、植木鉢などのIoTプランターを作っている農業ベンチャー企業があり、気象に応じて水やりコントロールする機械を販売している。気象センサーがついているので、それをネットワークに組み入れて、活用できたらよいのだ

が、それが自由にできない。

人間が見ると社会的混乱があるということが規制の趣旨なので、マシンリーダブルな形での情報流通は開放して、ヒューマンリーダブルだけで規制すればいいのではないか。利活用する側はヒューマンリーダブルな形式でデータがほしいわけではなく、利活用できるデータがほしい。そういったことを可能にする技術と工夫が、よい落としどころだと考えており、もう少し規制緩和したほうが良いと私自身、省庁に提案している。

Q：コンビニの事例では、昔からあったポイントオブセールスの格段の進化をご教示いただき、感謝する。気候変動分野の知見で、食べられずに廃棄された食品でも、生産や流通で温室効果ガスが排出している問題がある。おそば以外の食品でも売れる量をできる限り適量の生産、流通して、廃棄されてしまう食品の温室効果ガス排出を減らさないといけない。その点で、さらにアイデアやご状況、ご見解などをお伺いしたい。

A：気象に加え、気象以外も含めた社会全体のアクティビティーのパラメーターが多くある。それが大きく変わっていくのをしっかり鑑みながら、コントロールしていく余地がまだまだある。

流通も生産も調整しようとする小売店の事例はアイデアをかき立てられる。似たような例は、太陽光発電所の快晴の話など多くある。その効率化やリスクマネジメントの課題を数理的に進めることがまだ大分できると考えている。気象のような自然環境の不確かさも、一部で見るのではなく社会的なリスクをみて、それを下げることに数理やデータサイエンスの活躍する余地がまだ多くある。保険商品としてリスクマネジメントを金融業界だけが担っているような役割の幾つかは、社会全体として置き換え可能と思うが、社会としては良い方向だろう。

そうやって究極的に考えていく際、参照として昔、社会主義経済論争があったことを紹介する。社会主義は計画経済で全てやっていこうとするが、計画とおりに動かないので破綻する。実は1900年代の初め頃、どこまでデータがあれば計画は破綻しないのかと議論がなされていた。その頃の議論そのものは今から見るとかなり幼稚なものだが、議論されていたぐらいのデータ量は現在十分にある。社会そのものの計画化が進むとデータは主義によらず出てくる。資本主義でも経済循環の良い面、悪い面ともにある。大きな視点で無駄になっているところを無くしていけば、自然環境への負荷を減らすことにも最終的につながってくる。そこでも気象データが寄与できる側面は非常に大きい。

Q：様々な利活用の事例をご教示いただいた。どちらかと言えば、近い将来のものという印象だったが、もう少し先の5年、10年先の予測や利活用、ニーズはいかがか。

A：データを使って直接できることは気象を含めて、世界中の賢明な人たちがだいたい既に考えついている。5年、10年後に、今全く考えていないアイデアが出てくるかと言えば、そんなことはなく、すでにおおかた出そろっているという印象だ。

データ分野でこれからまず進むとみられるのが、金融の仕組みとデータの結び付きだ。その利活用やビジネスモデルが発達していく雰囲気がある。最近、データのコストを証券化して売買するデータ債権のようなことができるとデータ分野では気づいてきている。債権を売って得たお金がデータをつくるときの費用に使える。そのデータを使ってコスト削減できたら、そのお金を原資にして配当も出せる。今はデータと言えば、単にオープンにする、そのデータをいくらで売り買いするといった形だけだが、金融とデータの在り方は、さらにもっと洗練されていくだろう。金融でもまだ未開の領域が多くあり、少しずつアイデアが出されており、5年先には状況が変わっていると予想される。

実はそう思う背景がある。現在のデータの最大の難関が、データを扱うときのコストだ。そのコストを一体どこから捻出するか。例えば、各省庁がデータを扱うといって予算を申請しても、財務省から予算はつかないだろう。では、データをどうやってファイナンスするかとなる。データの利活用と言って

いるので、この問題が非常に大きなボトルネックだと分かっていない状況だ。民間でもまだまだニーズがあるし、これから開拓が進むとみている。

Q：講演を伺い、データそのものが価値を非常に持ち始めている中で、気象データはオープンでうまく回った良好事例だとあらためて感じた。一方、データが囲い込まれている問題や、なかなか出てこない分野の話も聞く。そういった分野でのアプローチなど、ご教示いただきたい。

A：データが出てこない理由は、一般的な理由だけでなく、データの種類により、それぞれ理由がある。例えば個人データだと、プライバシーの問題がかなり大きく、その解決策が難しい。世代や環境ごとにプライバシーの感覚も違っていて、利便性との兼ね合いの側面もある。

産業データに関しては、しっかり保護する仕組みがないことが問題だ。不正利用を妨げるようなことが技術的にできない。ただし、これは正当なデータだ、これは正当ではないデータだと区別させる技術は可能だが、まだ実用レベルまで至っていない。会社にとっては、正当ではないデータを使うとモラルハザードとして顕在化する。それだけでも多くの会社では問題としてとらえ、効果が見込めるので、こういう技術の実用化はしっかり進めるべきだろう。

囲い込まれて出てこないデータが多くあると私も思っている。逆に言えば、グローバルなメガプラットフォーマー企業が持っていない、死蔵されているデータが世界にまだ山のようにある。世界でこうしたプラットフォーマーがデータを独占していると言われているが、彼らからすると、もうデータが取れなくて困っている。データの経済的なポテンシャルはまだ非常に高い。

Q：農業データを最もよく使っているのは穀物相場の投機筋と耳にしたことがある。小麦やトウモロコシの先物相場で取引しているような投機筋は、人工衛星で見た作物の収穫具合の直接的な画像データに加え、作付けの変化や収穫量を予測するために気象データもビッグデータとして使うと聞いたことがある。彼らは囲い込んだデータは隠すと思う。それに加えて、彼ら独自の解析モデルで処理しているとみられる。こういった方面も含めると、今後どう進めていくのが良いか、可能な範囲でご見解を伺いたい。

A：なかなか申し上げにくいが、投機筋はある意味で社会の必要悪と思われる側面もある。不確実性、リスクに対する担保を金融的に洗練していく役割を果たす面で、そこは理解できる。しかしながら、リスクを本当に担保しているとよいのだが、彼らだけの莫大な収益だけになっているとなると、本来あるべき仕組みや意図と違っている。データ活用が将来さらに進み、リスクマネジメントをデータだけである程度できるようになれば、金融の中のそういう無駄な部分も減らせるようになっていくと思う。

Q：データ基盤とDATA-EXについてさらに伺いたい。 DATA-EXの中に気象や気候も入るか。規制の課題についてご教示いただいたが、データ基盤やデータセットについて、何か特殊性や独自ルールでうまく進まない課題があるか。

A：図5.2.8では紙面の都合で描かれていないが、気象ももちろんDATA-EXの範疇だ。日本は分野ごとにはそれなりにデータ基盤はできている。しかし、日本はかなり縦型社会だ。縦割りは悪い側面だけでなく、縦についてはよくできている。しかし、縦を超えると途端に駄目になる。これは気象についてもいえる。気象の中だとすごくしっかりやられている。その他とどうつないでいくか、が他と同じで大きな課題だ。 DATA-EXは横につなぐところを進めていきたいという基本的な考え方だ。どこかがいい、どこかが悪いというのでは全くない。

DATA-EXでデータがつながるために一番重要なことだが、データのネットワークができる前に、実は人間のネットワークができていないといけない。20、30年前になるが、インターネットがなぜいっせいに広がったかと言えば、その前からコンピューターネットワークをやりたい人たちのネットワークが既にできていたからだ。データも同じで、業界を超えた人の集まり、人的ネットワークがあることが

必要だ。私が社団法人を設立した意図はそういった点からで、人のつながりを広げていきたい。

アメリカや中国とか日本が状況が違う点だが、アメリカと中国はIT産業が株式時価総額の一番上にいて、そういった企業が言うことをみんな聞く構造にもうなっている。日本は、産業構造としてそうなっていない。弱いITと思っており、いかに横串を通していくかという生き方だ。アメリカや中国と大分違う在り方を目指さないといけないなと考えている。

Q：情報科学やデータ分野の研究者にとって、応用分野として気象分野はチャレンジングな対象になっているか伺いたい。先生からみて若い研究者の方にはどういう状況か感触も伺いたい。

A：例えば複雑系として見れば最大の対象が地球環境全体を扱う対象であり、きわめて難しいからこそとても魅力的だ。どうしようもないくらいの大規模なので、最先端のスパコンを持ってきても、単にパラメーターを増やしていくと、すぐに計算が破綻してしまう。要素還元以外のアプローチを講演で述べたが、それを創成していかないと駄目なのか、それとも、要素還元でやはり突き詰めていかないといけないのか。このあたりは私からみても非常に興味深く、やりがいのある分野だろうと思う。

私の分野でも地球や自然環境をどうするかと興味を持つ若手研究者はいる。しかし、いま述べたよう課題が難し過ぎる。地球環境の複雑系と比べると、ビジネス利活用のほうがよほど簡単だ。 IT分野で機械学習を回して、売上げがちょっと上がったという話が流行っているが、それはデータ分野の研究者からみれば、ひと月勉強したら誰でもできるような簡単なレベルだ。若い方がその程度の感覚で、気象の複雑系の対象に入るとよくない。もっとしっかりした人でなければいけないが、そういう良い方ほど魅力がわかって入ってくると期待する。

Q：気温や日照量、降水量、湿度といった程度の気象データでも、機械学習である程度のことが企業のビジネスに利活用できるという基本的な認識がある。一方で、さらに企業から求められる気象データがないだろうかと思う。例えば、大気の高層のデータや、気象庁が過去の気象を再解析しているデータなどまで使うことを考える取り組みがもしあれば、可能な範囲で、ご状況をご教示いただきたい。

A：今述べられたような、利活用する企業からすると高度な気象データについては、あまり具体的な事例、着目しているか、行っているかという情報を持ち合わせていない。たとえば、漁業関係者からすると、陸上の気象データよりも海水温など海のデータのほうが重要なはずだ。これはまだあまり着目されておらず、利活用が進んでいない。

防災分野では、今までの限られた範囲内での観測データで例がない災害をどう扱うか、に議論が及んでいる。気象災害でも、過去に経験がない、観測史上の新記録と言った災害がどんどん出るが、地震でも3.11はそうだった。大学の地震を研究する先生方は歴史文献をたどって、何か知見が得られないかと研究されている。データとして難しいポイントだが、広く構えてみることが防災は重要な分野だ。

# 5.3 熱帯泥炭生態系の炭素動態に与える人為攪乱の影響

平野 高司（北海道大学／農業気象学会）

※講演日：2021年6月10日

泥炭について3つの話題を提供する（図5.3.1）。その後、日本農業気象学会の活動と、気候変動に関した北海道での研究も少し紹介する。

図5-3-1　講演について

図5-3-2　生態系サービス関連研究

**熱帯泥炭とは？**

陸域生態系の「息づかい」、つまり光合成や呼吸を大きなスケールで測り、地球環境に与える影響を評価する研究を行っている（図5-3-2）。

まず泥炭について説明する。泥炭は、地下水位が高い嫌気的な条件で、一般的には湿原と言われる環境状況で、植物遺体が分解せずに数千年かけて堆積して形成された有機質の土壌である。全陸地面積の約3%、約400万 $km^2$ 存在する。土壌有機物として蓄積されている炭素量は世界で270～370 Gトンと推定され、全土壌炭素の約30%に相当する。全陸地面積3%で全土壌炭素の30%を高密度に蓄積している。つまり、泥炭は巨大な炭素貯蔵庫になっている。泥炭の分解が進むと大量の $CO_2$ が排出されると懸念されている。泥炭は「炭」という字が入っていることから分かるように、乾燥すると燃える。昔から燃料に利用されている。ウイスキーの香りだが、じつは大麦の麦芽、モルトを乾燥させるときに泥炭を燃やしていて、そのときのフレーバーがついている。

泥炭地の分布だが、基本的には北半球の中緯度・高緯度に分布する。冷涼な気候、すなわち気温が低いと有機物の分解が進まないため蓄積される。北海道は、北半球の泥炭の分布の南限に当たる。8割以上がそうした冷涼な気候条件で存在する。冷涼な気候と比べると少なくなるが、温度の高い熱帯にも泥炭は分布している。それが熱帯泥炭だ。

そうした泥炭地の多くが既に農地や植林地に開発されている。国別で泥炭地が開発された面積を調べると、北方域のスカンジナビア諸国などでは気温が低く、農地に適さないので植林地にかなり転換されている。熱帯の東南アジア諸国では、インドネシアでは泥炭地の47%、マレーシアも44%が農地に開発されている。ともに熱帯泥炭地だ。

熱帯泥炭地は、もともと森林が発達していた土地だ。開発の際に森林は邪魔になるので伐採されてしまう。また、地下水位が高いので排水も行われる。すると泥炭が乾燥化する。泥炭に酸素が入ることで、泥炭が好気的な分解を進める。また、乾燥することで燃えてしまう。そうなると、非常に大量の $CO_2$ が排出され、温

暖化を促進するので、泥炭地は国際的に注目を集めている。

泥炭地を農地や植林地に開発した場所では、大きな地盤沈下が起きる。スウェーデンでの報告では、1848年に植林地にされた泥炭地は約4 mも地盤沈下している。地盤沈下は、圧密、収縮といった物理的な過程と、微生物による有機物の分解という生物化学的な過程が合わさって生じている。後者の過程が$CO_2$の排出につながり、問題になっている。

熱帯泥炭は主に赤道アジアの島しょ部、アフリカのコンゴ盆地、アマゾン川上流域に分布している。総面積は58万$km^2$で、炭素蓄積量は105 Gトンと推定されている。東南アジアでは、熱帯泥炭林が湿地林と共存している。主にインドネシアとマレーシアの低平地に広く分布し、総面積は21万$km^2$と推定されている。熱帯泥炭は、森林の樹木が分解せずに蓄積したものなので、木質系の泥炭という特徴がある。1万4,000年ぐらいかけて低湿地に堆積している。大ざっぱな推定だが、東南アジアの熱帯泥炭は平均で厚さ5.5 m、最大20 mとかなり密に堆積している。

**熱帯泥炭地の炭素動態**

ここから、熱帯泥炭地の炭素動態を説明する。図5–3–3で一般的な泥炭地の炭素収支を示す。泥炭の上に植物が存在する。北方ではミズゴケ、スゲ、熱帯では樹木といった植物だ。植物は光合成で$CO_2$を吸収する一方で、呼吸して、泥炭の好気的分解も起きるので、$CO_2$を排出する。このやり取りが$CO_2$収支となる。さらに、泥炭の嫌気的分解によりメタンが放出される。メタンの炭素も考慮する必要がある。泥炭地は水が多いので、溶脱によって、例えば溶存有機炭素や粒子状有機炭素が系の外に流れていく。炭素収支はこれら全ての過程を考慮する。炭素収支ΔCを評価して、正ならば正味の炭素吸収となり、泥炭が堆積されていく。一方、負の場合には炭素の放出、泥炭の消失が起きていく。ただし、メタンは別途評価する必要がある。炭素収支の面ではメタンは濃度が低いのであまり大きなインパクトはないが、メタンの温室効果が$CO_2$の約28倍大きいためだ。

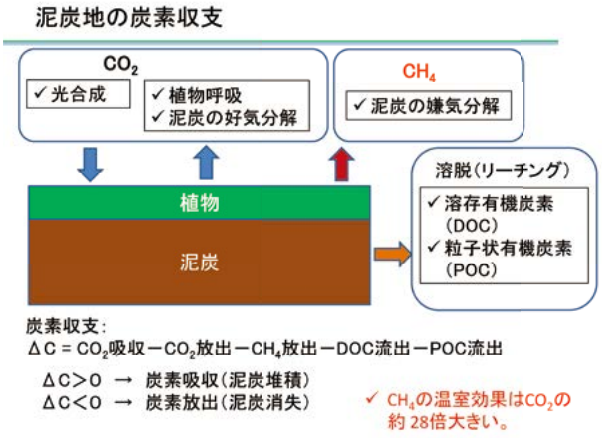



**図5–3–3　泥炭地の炭素収支**

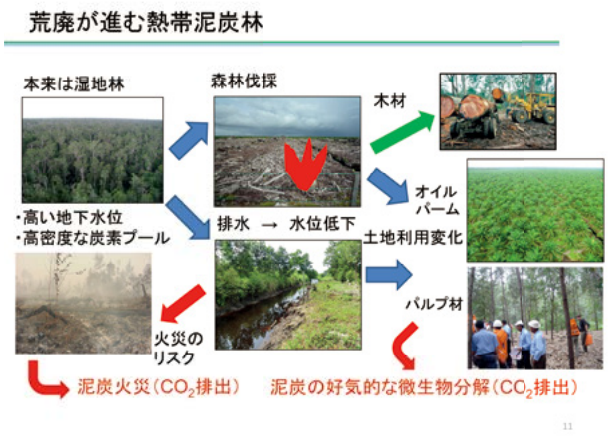



**図5–3–4　荒廃が進む熱帯泥炭林**

熱帯泥炭林の荒廃が進む様子を図5–3–4で紹介する。熱帯泥炭林は、湿地林なので地下水位が高く、大量の炭素を含んでいるので、高密度な炭素プールといえる。熱帯泥炭は、森林伐採と地下水を排水されて、オイルパーム（アブラヤシ）やパルプ材（アカシア）の大規模農地（プランテーション）に開発されている。一部の上物の木材は利用されていたが、既に有用な木材は切り出されており、ほぼ利用されていない。排水で地下水位が低下して乾燥すると泥炭の好気的な微生物分解が起こり$CO_2$が排出される。乾燥するので大規模火災のリスクが高まる。特にエルニーニョ現象が生じた年にはよく泥炭火災が発生している。簡単な処分

方法として、森林伐採後の有機物の残渣の焼却もまだ行われているようで、好ましくない。

ボルネオ島での我々の研究について紹介する。ボルネオ島で7地点の観測サイトを設置した。ボルネオ島にはインドネシア領、マレーシア領、ブルネイ領がある。インドネシアの中部カリマンタン州では国立公園の未排水の泥炭林と、排水路が作られ地下水位が下がっている泥炭林、泥炭林の火災跡地、泥炭地が開発されたゴム園の4地点。マレーシアのサラワク州でも国立公園の未排水の泥炭林と、有用な材が既に伐採された泥炭林の2次林、既にオイルパームに転換された場所の3地点だ。

ここで大気－生態系間の$CO_2$とメタンの交換量を観測した（図5-3-5）。森林にタワーを建て、そこにメタン濃度計や、$CO_2$や水蒸気、3次元の空気の流れを測るセンサーを設置した。連続した計測によって、森林を含む生態系と大気の間の$CO_2$やメタンの交換量を評価できる。土壌から直接排出される$CO_2$やメタンも、自動開閉チャンバーを使って観測した。土壌から大量に$CO_2$が出てくる中には植物の根から出てくる$CO_2$が含まれている。泥炭の好気的分解を正確に評価するためには、根からの排出を除外する根切りなどもしっかり行ってから観測している。

**図5-3-5　大気－生態系間$CO_2$–$CH_4$交換量測定**

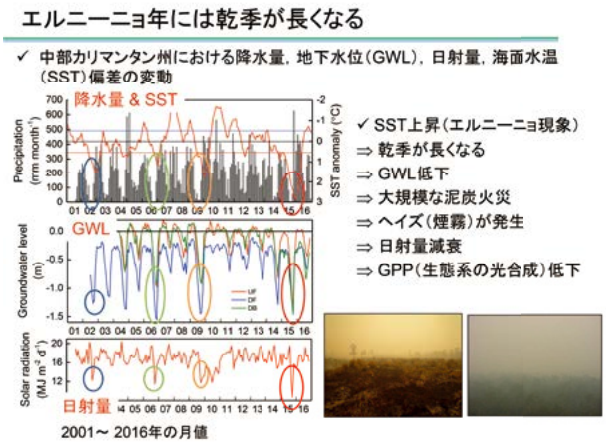



**図5-3-6　エルニーニョ年の変動**

中部カリマンタン州での観測結果を示す（図5-3-6）。エルニーニョ現象が起きた年は、降水量が大きく変動することを紹介したい。上のグラフでは降水量を黒色の棒グラフ、赤色の線でエルニーニョ監視海域の海面水温の偏差を示している。真ん中のグラフは地下水位、下のグラフは日射量の観測データだ。3つのデータともに、2001年から2016年の各月の値を示している。

4か所、丸で囲っている年でエルニーニョ現象が起きた。エルニーニョ現象が起きると海面水温が上がる。逆の言い方もできて、海面水温が上昇するとエルニーニョ現象が起きている。すると乾期が長くなり、降水量が減り、地下水位が下がる。泥炭が乾燥して大規模な泥炭火災が発生する。煙がたくさん出るのでヘイズが発生して、日射量が減衰して、生態系の光合成が減り、$CO_2$の吸収量が低下する。地下水位の低下は、泥炭の分解速度の上昇にもつながるだろう。

生態系スケールの$CO_2$のフラックスと地下水位の関係を説明する（図5-3-7）。左から順番に中部カリマンタン州での3つの観測地点（未排水の泥炭林、それから排水された泥炭林、火災跡地）それぞれのデータを並べている。上から順番に$CO_2$の放出、吸収、正味の放出量である。放出は、植物の呼吸に加えて、泥炭の分解で排出される$CO_2$の量だ。吸収は光合成に起因する。正味の放出量は、放出から吸収を引いた量である。

この9個のグラフすべて、横軸は各月の地下水位の値だ。地下水位に対して、縦軸に$CO_2$の値をプロットしている。予測通りの結果だが、地下水位が下がると$CO_2$の放出量が上昇していた。光合成による$CO_2$吸収量は地下水位が下がっているとおおむね低下する。これは、ヘイズが発生していることで日射量が減少したこ

となどが関連したとみられる。正味の$CO_2$の放出量をみると、よりはっきりと地下水位が下がったときに上昇する傾向が見て取れる。単純な線形の形にならないので、モデル化も検討した。

図5-3-8で、土壌からの$CO_2$の放出量の観測結果を示す。植物の根の影響のない観測地として、火災跡地と根切りしたゴム園での観測結果だ。横軸が地下水位、縦軸が泥炭の分解によって発生した$CO_2$の量を示す。地下水位が下がると好気的な分解が増えることは知られているので、$CO_2$の放出量は上がるだろうと予測された通り、実際の観測結果は、かなりきれいな相関が出た。このモデル化も行った。

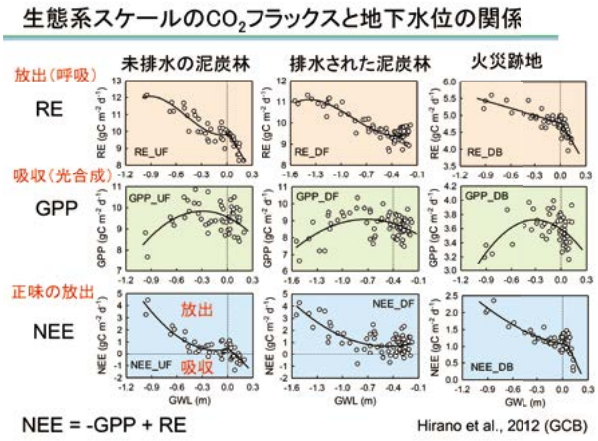



図5-3-7　$CO_2$の交換量と地下水位

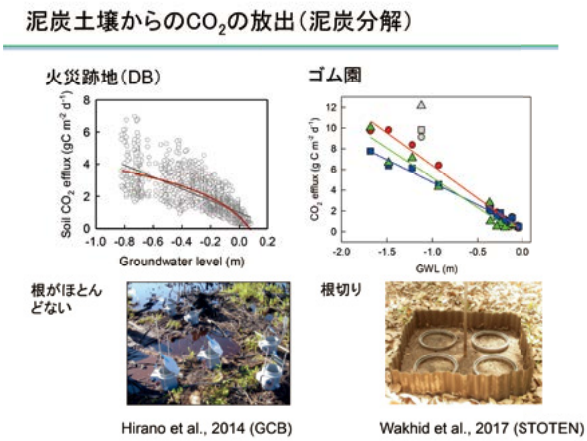



図5-3-8　泥炭土壌からの$CO_2$の放出

未排水の森林、排水された森林、焼け跡の3つの観測地点での、生態系スケールでの1年間の正味の$CO_2$の放出量を比較した結果も紹介する（図5-3-9）。値が大きいほど1年当たりの$CO_2$の放出量が大きい。人為的な攪乱が強い地点ほど放出量が大きくなった点は予測通りだった。

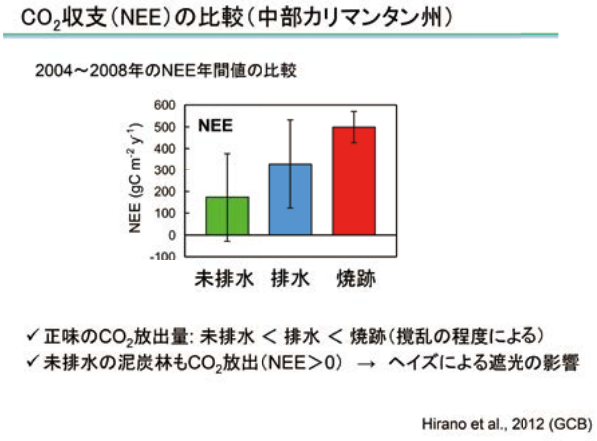
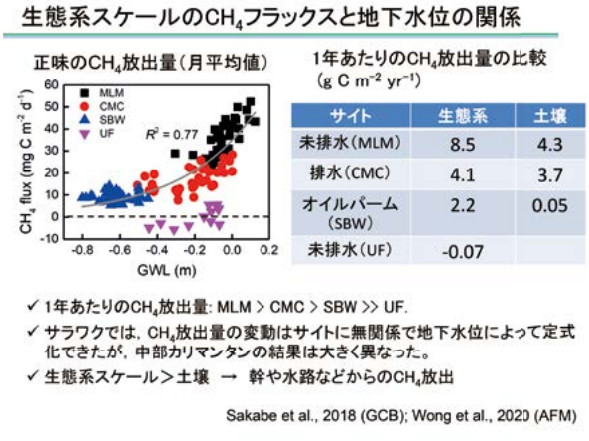



図5-3-9　観測地ごとの$CO_2$の放出量の比較




| サイト | 生態系 | 土壌 |
|---|---|---|
| 未排水（MLM） | 8.5 | 4.3 |
| 排水（CMC） | 4.1 | 3.7 |
| オイルパーム（SBW） | 2.2 | 0.05 |
| 未排水（UF） | -0.07 | |

図5-3-10　メタンの交換量と地下水位

一方、未排水の地点が予想外の結果だった。あまり人の手が加わっていない森林なので、正味で$CO_2$の吸収源になると予測していたが、排出源になっていた。いくつか理由は考えられる。周囲の森林が燃えてヘイズが発生したことで日射量が低下して光合成が減少した影響などがあげられる。

メタンの観測結果を紹介する（図5–3–10）。左側のグラフは、4つの観測サイトの結果を載せている。黒色の■がマレーシアの未排水の森林、赤色の●がマレーシアの2次林、青色の▲がマレーシアのオイルパームのプランテーション、ピンク色の▼がインドネシアの未排水の森林でのデータだ。横軸が地下水位、縦軸が各月のメタンの生態系スケールでの放出量である。インドネシアの観測地でのデータが外れ値をとっているが、マレーシアの3つの観測地のデータだけを見ると、指数関数で近似できる。マレーシアの熱帯泥炭地では地下水位からメタンの放出量がある程度推計できることを示せた。

インドネシアでの観測値が随分異なる理由だが、泥炭の質が違うこと、生えている植物もやや違うことなどが考えられ、継続して原因を究明中だ。

右側の表では1年当たりのメタンの放出量の比較結果を示している。4つの観測地点は左側のグラフと同じ並びだ。生態系と書かれたほうの数字は森林も含めた生態系スケールでのメタン放出量で、土壌は、土壌表面から放出されたメタンの量である。明らかに生態系スケールからのメタン放出量のほうが大きい。メタンは土壌の中で作られていて、植物の中で作られているわけではない。一部のメタンが植物の根から水と一緒に植物体に取り込まれて、それが例えば幹から放出されていく流れが報告されている。また、観測地の森林やプランテーションには水たまりや排水路がある。そういった水があるところは非常に大きなメタンの放出源になる。生態系スケールは、それらの放出源を含むので、土壌表面からの放出よりも大きくなっている。この結果から、土壌のメタンをチャンバー法という小規模で測る従来法は簡便で良いのだが、本来のメタンの放出量を評価できないことが示された。

土地利用変化の結果として、熱帯泥炭地の多くが既に主にプランテーションに置き換わっている。1990年以降、最近までを見てもパルプ材向けのアカシアや、オイルパームのプランテーションがかなり増加している。プランテーションの増加は、排水の増加、泥炭の分解の促進、$CO_2$排出の増加という流れになる。

泥炭分解による$CO_2$排出量は、大まかに推定されている。1990年から2015年までの25年の平均の年間排出量が0.1 Pgだが、右肩上がりに増えている。2015年には0.15 Pg（$=0.15\times10^{15}$ g）排出されたと推定され、かなり大きい。これは何かを特に燃焼させたり、特に悪質なことをしたりているわけではない。普通にプランテーションを管理しているだけで排出されてしまう。

**図5–3–11　泥炭火災の様子**

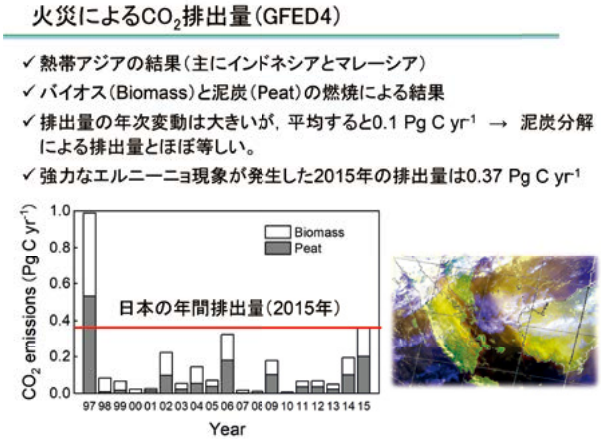



**図5–3–12　火災による$CO_2$排出量**

次に、泥炭火災の影響を紹介する。（図5–3–11）。左上の写真では農地で草が燃えている。乾期が終わりそうだ、そろそろ雨季が来そうだという時期に、雑草の防除や雑草の燃え残りを肥料に使う目的で、農民が火をつける。通常の年だと1週間ぐらいで雨季が来てくれて、所定の場所だけ燃えて、鎮火する。しかし、エ

ルニーニョ現象の年はなかなか雨季が来ないので、この火災が制御不能になり、拡大する。延焼が拡大した2次林の様子が右上の写真だ。地面から煙がもこもこと出ているのは、地下で泥炭が直接燃えているためだ。

左下の写真は観測タワーから撮ったものだ。100 mぐらいまで火災が近付いたが、現地の共同研究者たちが消火に成功して、被害を免れた。右下の写真は人が深さ2 m以上あるくぼ地に立っている。もともと、このくぼ地はなく、真っ平らだった。火災で泥炭が燃えてこのくぼ地ができた。その炭素が$CO_2$となって大気に放出された。

こういった泥炭火災による$CO_2$排出量も評価しており、その結果を紹介したい（図5–3–12）。主にインドネシアとマレーシアで、バイオマスの燃焼と泥炭の燃焼による$CO_2$排出量の年次の見積もりを棒グラフで示している。排出量の変動はエルニーニョ現象の影響が大きい。平均では0.1 Pgと、先ほどの泥炭分解による排出量とほぼ同じ量だ。強力なエルニーニョ現象が発生した2015年は0.37 Pgと、さらに多く排出されている。

注意点として、火災起因の$CO_2$放出は通年の現象ではなく、9月、10月の2か月ぐらいで排出されていることだ。こういった点からも先に述べた通り、熱帯泥炭地は、21世紀における生態系の脆弱な炭素プールであると国際的に認識され、注目を集めている。

**熱帯泥炭地の開発**

ここから、熱帯泥炭林が開発される様子について、詳しく紹介する。図5–3–13はスマトラ島の熱帯泥炭地がアカシアのプランテーションに開発されていく様子だ。左下の写真のように排水路が掘られ、右上の写真のようなアカシアの苗が植えられる。

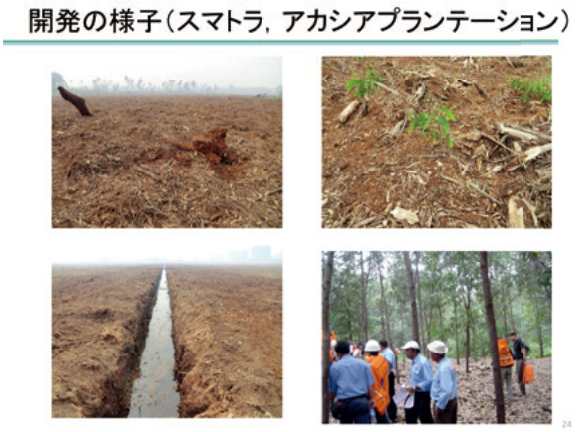



**図5–3–13　熱帯泥炭の開発の様子**

**図5–3–14　オイルパームのプランテーション**

管理されているオイルパームのプランテーションの様子を図5–3–14に示す。オイルパームは房状に実がつく。右下が切り落とした実の写真だ。左下のオイルパームの写真をみると、幹が傾いているのがわかる。泥炭地は土壌があまり固くないので傾きやすい。これは栽培管理上の大きな問題になっているということだ。オイルパームの原産地はじつは東南アジアではなく、西アフリカだ。果実の種子と果肉から2種類の油が取れる。食品、燃料、化粧品などの原料としても使われている。他の主要な油糧作物、例えば大豆やナタネと比べて単収が非常に高い。栽培のコストが低いため収益性が高い。そういった特徴から、近年、栽培面積がさらに増えている。

主要な油糧作物の栽培面積と植物油の生産量の経年変化を調べると、2017年の時点で、栽培面積では、オイルパームは第5位だが、植物油の生産量では第1位だ。世界全体で約19万$km^2$のプランテーションがあ

る。北海道の2倍以上にあたる面積だ。その90%以上がインドネシアとマレーシアにある。その両国ではオイルパームは非常に重要な産業である。マレーシアでは50リンギットという紙幣の裏面にオイルパームが描かれている。

一方、国際的な環境問題の観点では、このオイルパームへの土地利用変化は、非常に嫌われている。ネイチャー誌は、”A MAKEOVER FOR THE WORLD’S MOST HATED CROP”（世界で最も嫌われている作物の模様替え）と題した記事を掲載している。その理由は、オイルパーム栽培の適地が、ちょうど熱帯林が存在する気候にあたり、オイルパームの栽培を広げるため熱帯林が伐採され、生物多様性の劣化が起きている問題がある。先に述べたよう、熱帯泥炭林が開発されると$CO_2$が大量に排出される問題もある。

今後もパームオイルの需要は増加していくと予測されているが、遺伝子技術で高収量品種ができれば、栽培面積を増やさずに増収できて環境影響を抑えられるという期待もある。

実際に熱帯泥炭林がオイルパームへ転換されている様子を写真で紹介する（図5–3–15）。マレーシアのサラワク州の熱帯泥炭林の2次林で、40 mの観測タワーを建てたところから2017年5月に撮影したのが、左上の写真で、既に伐採のための道が造られている。2017年10月、右上の写真で、森林が全て伐採された。地面に切り倒された木材がマッチ棒のような形で残されている。排水路と作業用の道路もできている。2018年3月、左下の写真は、火を入れられて一部燃えた後になる。次が右下の写真で、燃え残った植物の残渣が列状に積まれ、オイルパームの苗木を植えている。こういった形で開発が行われる。

現在、マレーシアの政府機関のアブラヤシ庁やサラワク州の熱帯泥炭研究所と共同研究を実施中だが、COVID–19の影響で日本から現地に出張できず、マレーシアの人たちもロックダウンで現場に行けない状況が続いている。今後の展開としては、他の研究機関とも共同で現地の観測のネットワーク化を進めて統合解析を計画中だ。目標は、熱帯泥炭林のオイルパーム農園への転換・拡大が炭素蓄積量や温室効果気体の収支などに与える影響を定量化するとともに、気候システムに与える影響を定量化・モデル化することだ。最終的に$CO_2$排出を軽減するための栽培管理方法を提案したい。

まとめを図5–3–16に示す。特に、メタンと$CO_2$がトレードオフ関係にある点を強調しておきたい。排水するとメタンの放出量は減少するが、$CO_2$の排出量が増加する。しかし、$CO_2$の増加量はメタンの減少量で相殺されるものではなく、排水は正味で温室効果気体の増加につながる。

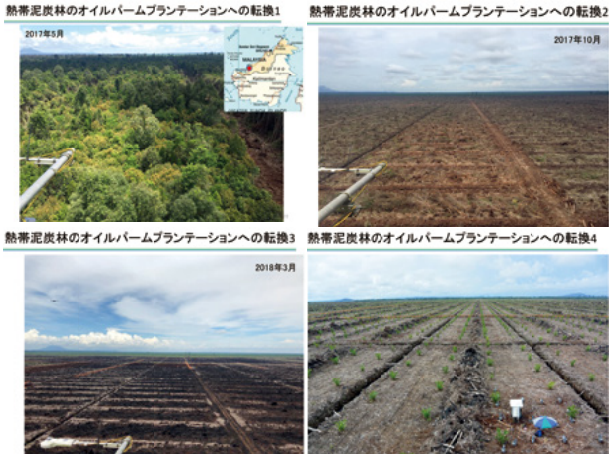



図5–3–15　熱帯泥炭のオイルパームへの転換

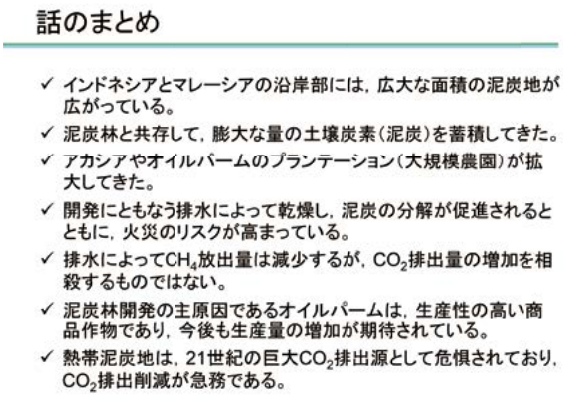



図5–3–16　まとめ

**日本農業気象学会の活動**

簡単に日本農業気象学会の活動について紹介する（図5–3–17）。日本農業気象学会は、農業生産と気象の関係、農耕地における気候・微気象、耕地・施設環境の改善・調節などに関する知識の向上と普及を目的

に活動を行っている。農業生産と気象の関係ということで、気候変動、地球温暖化に関係する研究はかなり昔から行ってきている。

2019年には、学会創立75周年記念として、「Adaptation to Climate Change in Agriculture」を出版した。当学会の若手中堅会員が編集して、日本及び東アジアの研究事例を紹介しているので、ぜひ、シュプリンガーのWebサイトから検索して閲覧いただきたい。

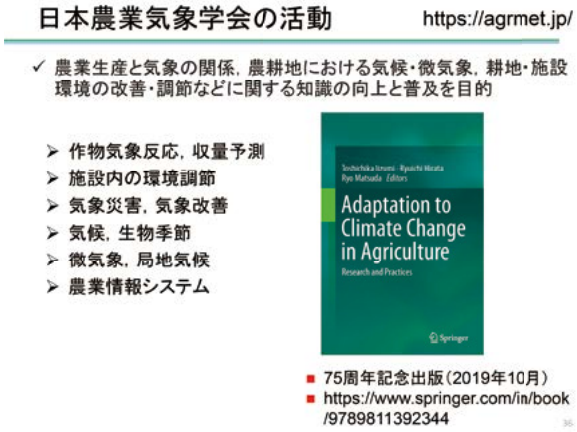



**図5-3-17　日本農業気象学会の活動**

### 北海道での気候変動への対応技術の研究

最後に、北海道の十勝地方での気候変動に関係した研究事例の話題を紹介する（図5-3-18）。

**図5-3-18　十勝地域での研究事例**

（九州大学・広田知良教授提供）

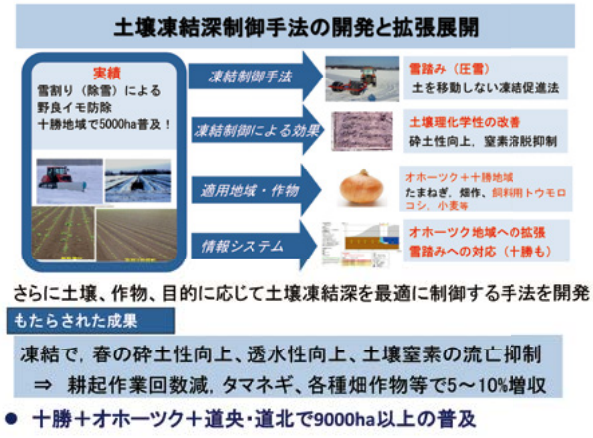



**図5-3-19　土壌凍結深制御手法の開発と拡張**

（九州大学・広田知良教授提供）

これはローテクだが、省エネ、省力化の点で良い技術だ。雪割りによる土壌凍結深制御での野良イモ対策である。十勝地域は畑作地帯で、連作障害を防ぐために年ごとに作目を変えている。例えばジャガイモ、テンサイ、小麦と植える作物のローテーションを行っている。その中で野良イモという問題が起きていた。十勝は、もともと雪が少なく、土壌がよく冷えていたので、ジャガイモを掘り残していても、自然と枯れ果てて、次の

年に影響はなかった。ところが近年、冬の初めにまとまった雪が降ることが多くなり、雪が断熱材として働いてしまい土壌が凍らなくなった。すると掘り残しのイモの繁殖能力が維持されたまま残ってしまい、次の年に雑草として生えてくる問題が起き始めた。この野良イモの防除を農繁期に行わなければならず、非常に大変だった。この問題への上手な対処として、冬の間に、農業機械を使って除雪をするという、たいへん単純な手段を確立した。単純な除雪といっても、除雪する時期や頻度、どの程度まで必要かといった指標を気象データを使ってモデル化して、開発した。

この技術をさらに発展させて、土壌、作物、目的に応じて土壌凍結深を最適に制御する方法の開発もできた（図5–3–19）。土壌を凍らせることで、春の作業性の向上や透水性の向上、土壌窒素の流亡抑制につながり、耕起作業回数の減少や、タマネギなどの各種畑作物の増収につなげられた。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：輸入国の日本での浅い理解だと、オイルパームは天然のように見えて環境に良いような表面的な印象で捉えがちだが、実際には温暖化や生態系への問題があることを理解した。現地でも、離れた日本のような輸入国でも持続可能にしていく方策が必要だと痛感した。現地の人々にとっては貴重な経済資源にもなっており、単純に森林保存が良いとも言えない絡み合った複雑な問題だ。その点でより良いと考えられている方策など、さらに聞かせてほしい。

A：地球温暖化という点で考えると、泥炭地のオイルパームやアカシアのプランテーションが重要になってくる。現地では、やはり地下水位を下げて栽培する。それで生産性が上がると信じているような面がある。例えばオイルパームだと年平均マイナス60 cmまで下げましょうといった指針まである。本当にそれが生産性の上からも正しいのかと、最近、現地でも考え出している。本当はもう少し地下水位を上げても大丈夫ではないか。地下水位を上げると、それだけ泥炭分解が抑制される。トータルで環境に優しい栽培方法をマレーシアは強く意識し始めている。

その背景の1つとして、そういった形でオイルパームを作らないと、世界的な市場から排除されるという流れもできつつある。特にヨーロッパあたりが先導して、認証制度を作り、それに合わないと輸出できないという形になってきている。そういう国際的な流れもあって、かなり意識はされている。今後、例えば地下水位を10 cm上げれば温室効果気体の排出量をこのぐらい抑えられるといった科学的な知見を創出して、それを発信したいと考えている。

Q：泥炭は、1万年スケールで徐々に出来上がっていくということで、相当に時間がかかると思うが、新たに形成されていく泥炭はどの程度か。もちろん、多分燃えてしまったりする量があまりにも多くて、もう無視されるような規模感だとは思うんですけれども。

A：少し前までは、インドネシアの場合1年間当たり1 mmずつ泥炭の厚さが増えているという研究報告があった。しかし、現時点では新しく泥炭が形成されていくことはないと考えらる。森林伐採が行われなくても、エルニーニョ現象で火災が起き、その煙で光合成が低下して$CO_2$の吸収量の減少が起きてしまう。

また、長い年月で泥炭の層が厚くなっていくため、泥炭の水文学的な特性が変化する。ある程度以上厚くなると、水が地上まで行かなくなると考えられ、さらなる泥炭の堆積が期待できなくなる。

Q：いかに今ある泥炭を保全していくか、燃えないようにするかという観点が重要かと理解した。

A：基本的にはその通りである。

Q：本日は熱帯泥炭を中心に教えていただいたが、寒冷地の泥炭についても、伺いたい。例えば、地球温暖化で永久凍土の融解が問題になっているが、その永久凍土地帯よりも少し南に泥炭地帯が分布して

いる。その冷涼な気候地帯での泥炭が、温暖化に伴って、今後どうなっていくかという研究は、どのような状況か。

Ａ：その研究もなされている。植生が変わってくることはよく言われている。平均気温が上がる変化もあるが、人間活動が盛んになって富栄養化が進み、大気からの窒素の沈着量が増える変化などもある。すると、例えば、温度が低いのでミズゴケしか生えなかった地帯でも、維管束植物などが入ってきて育つように変わっていく。そうすると泥炭の蓄積速度も低下するといった研究もなされている。温度が上がれば、有機物の分解速度も上がるので、温室効果気体の排出量及び泥炭の損失が増えていく。

# 5.4 熱中症をサイエンスする

永島 計（早稲田大学／生気象学会）

※講演日：2021年6月7日

本日は大きく3つの話題を提供する（図5.4.1）。最初に、熱中症研究の展開を紹介する。次に、熱中症は体温の病気のように言われているが、飲水が大きく関係している。予防には飲水が大事だ。そのメカニズムは1980年過ぎにやっと科学的に検証され始めたものだ。体温調整や熱中症に関して飲水が果たす役割を説明する。最後に最近の研究と日本生気象学会の活動について紹介する。

1. 体温調節の基礎．基本的な体温調節の知識、こども（発達）、老化、運動時の体温調節の特殊性
2. 飲水の罠 熱中症の予防には飲水は欠かせないものです。 飲水が大事なのか、現場の指導者たちが陥りやすい“飲水の過信”についての問題提起。
3. 最近の研究について、日本生気象学会の活動

**図5-4-1　　講演について**

**熱中症の分類**

日本での熱中症の分類は救急医学会の指針を基にしている（図5-4-2）。症状によってI度からIII度に分類されている。ただし、これは症状による分類だ。熱中症は、実は診断基準がないのが一番大きな問題だ。例えば、糖尿病は血糖値が高いとそれだけで糖尿病と診断される。しかし、「熱中症って何？」と聞かれると決まった診断基準がない。

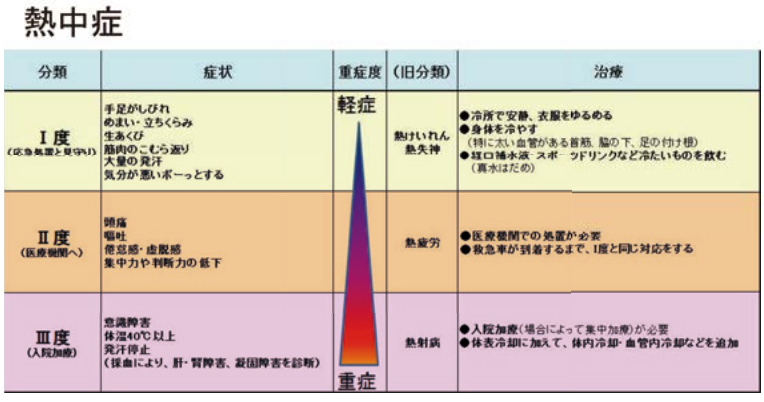



**図5-4-2　　熱中症の分類**

例えば、子供が暑いなかスポーツしていて倒れてしまった、それで熱が高い、という情報があれば「熱中症」とすぐ診断がつくだろう。しかし、どこかで誰かが倒れていたら、診断のつけようがなく、状況証拠で見ざるを得ない。熱中症は簡単なようで結構難しい病気である。

アメリカの分類をみると、かなり細かい[1]。米軍の研究者の著書だが、かなり研究が進んでいる。熱中症を大きく2つに分けている。1つは、乳幼児や高齢者が被害者になる古典的な熱中症である。平年の平均気温より2、3℃高い気温が2、3日続く状態が熱波だ。熱波のような環境要因が大きい熱中症が、この分類だ。もう1つは、学生さんや労働者のような方が運動を起点として倒れるような労作性熱中症だ。この2つに分けて考えていく国際的な流れがある。

東京都では消防庁が熱中症救急搬送車数の統計をまとめている。平成29年夏の統計で年齢別内訳を見ると、65歳以上の高齢者が半分を占めている。高齢者を74歳以下の前期高齢者、75歳以上の後期高齢者で分けると、その7割以上が後期高齢者だ。母数でみれば、64歳以下の若い方が半分だが、やはり高齢になるほど熱中症被害者になりやすいことが示されている。

6歳から12歳の子どもの170件の熱中症の発生場所をみると、公園等の屋外が3分の1程度でもっとも多い。しかし、全年齢では、住宅等の居住場所が半分近い。これは高齢者の熱中症を反映している。つまり、高齢者は家で、若年者は外で熱中症になるという特徴がきれいに統計に出ている。環境あるいはアクティビティの違いで、熱中症の発生も大きく変わってくる点を理解いただけたと思う。

**体温調節の基礎**

デスクワークで仕事をしている人の一日の消費エネルギーは2,000キロカロリーぐらいだ。よく運動している人やオリンピック選手が競技で消費するエネルギーはもっと多いので、摂取エネルギーはもっと必要になる。デスクワークの方の場合、消費エネルギーの約60%が基礎代謝だ。呼吸や心臓の拍動など、人間が生きていく上で基本的に必要なエネルギーにあたる。身体活動の消費エネルギーは約30%で、意外と少ないという印象をもたれる。残りの約10%が食事誘発性熱産生で、御飯を食べているだけで燃えてしまい、代謝にも運動にも使われない。

人間の体温は、食事で得たエネルギーで維持されている。では、何%が体温の維持に使われているか概算する。基礎代謝のほとんど熱に置き換わる。食事誘発性熱産生もそのまま熱に移る。2つをあわせて約70%。身体活動のなかでも多くの活動で体に熱が溜まる。それも足すと、接種エネルギーの約80%になる。人間は非常に熱を生み出しやすく、熱を籠もりやすい動物だ。

運動すると代謝が上がる。恒温動物の酸素消費量や基礎代謝量は、体重ではなく、体表面積に比例して増加する。標準的な表面積として1.7 $m^2$の人では、座読の代謝エネルギーが95ワット。これをmetという便宜上の運動の強さの単位の基準とする。座読が1 metに対し、平坦地を時速3.2 km/hで歩行すると2 met、テニスは4 met。睡眠時なら0.7 met。これらが最終的には熱に置き換わる。我々は熱をつくる一方で、熱を逃がして生きている。熱が逃げなくなると、体温調節ができず、かんたんに熱にやられてしまう。環境要因と、強い運動負荷がリスク要因になる。人間と環境のやり取り、相互作用の体系化が大事になる。地球温暖化や都市ヒートアイランドの影響もあり、重大な問題である。

体温のことをより御理解いただきたいと思い体温の等高線を描いた（図5–4–3）。人間の体温は深部から表面にかけて均一ではない。赤で描いた体の中心の温度を専門分野では核心温と呼ぶ。別名で、「深部体温」や「core温」とも呼ばれている。核心温の一番大事な目的は、脳の温度を保つことだ。ほかにも、心臓や肝臓といった我々の重要な臓器の活動をベストな状態に保つために核心温が大事で、高過ぎても低過ぎても駄目だ。我々がふだん安静にしていても、軽作業でも体温は37℃ぐらいだ。驚くべきことに、核心温の個人差は1℃も違わず、すばらしくコントロールされている調節系だ。

実際に測ると分かるが、体の中心の核心温と体の表面の温度は全然違う。手先なら28℃、腕は32℃、脚は31℃。実は体の周りの温度は核心温ほど高くない。体温計を脇の下に挟んだり、レストラン等で額や腕で

1 Lisa R. Leon, “Pathophysiology of Heat stroke,” (2015) ISBN:9781615046836

体温を測ると35℃と表示される、と言われるかもしれない。実のところ、それは補正された数値が表示されている。

なぜ体の中心の核心温と表面の温度でそんなに違うのか。その間には筋肉や皮下脂肪がある。この組織がとても強い断熱材として働き、核心温を逃がさないようにできている。体の中枢のために、熱を溜めたい動物だといえる。

では、どうやって37℃を保っているのか（図5-4-4）。体温調節は熱を得る作用と逃す作用で釣り合っている。図の左側「Heat gain」は熱を得る作用だ。主に代謝と、外の高温環境や強い太陽光といったものだ。図の右側「Heat loss」が熱を逃がす作用だ。逃がし方はたくさんある。放射、伝導、対流、蒸散といった物理法則に従って熱を逃がしている。

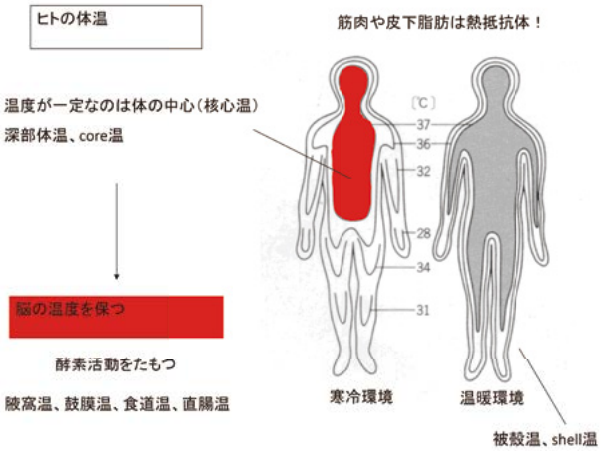



図5-4-3　ヒトの体温

図5-4-4　体温調節

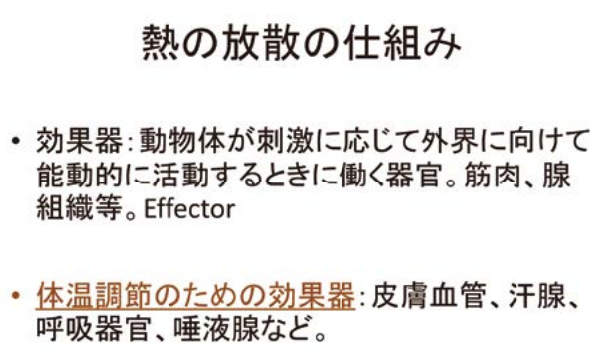



図5-4-5　体温調節の効果器

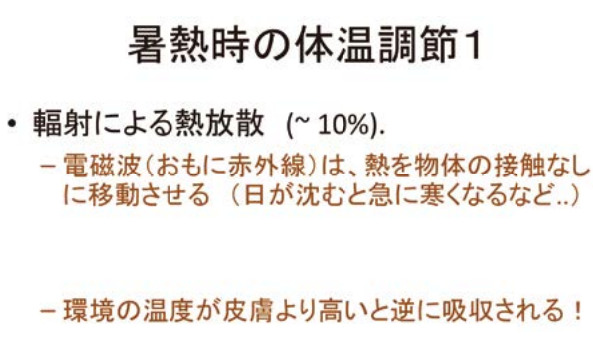



図5-4-6　輻射による熱放散

熱を逃がすための体の道具を、生理学、医学用語で、体温調節のための「効果器」と呼んでいる（図5-4-5）。面白いことに、動物によってかなり違いがある。ヒトの場合は、体温調節、特に皮膚の血管と汗腺を使っている。犬の場合は、呼吸器官。ネズミの場合は唾液腺。動物によって多種多様で非常に面白い。

暑い時に、輻射によって熱の逃す方法でも体温調節している（図5-4-6）。環境とも関係して、出入りする。晴れた日に日向ぼっこしていると暖かいが、夕日が沈むと途端に寒くなると感じのは太陽光からの電磁波の影響だ。逆に、人間も、電磁波を使って外に熱を逃がしている。ただし、これはマイナーで10%もない程度だ。

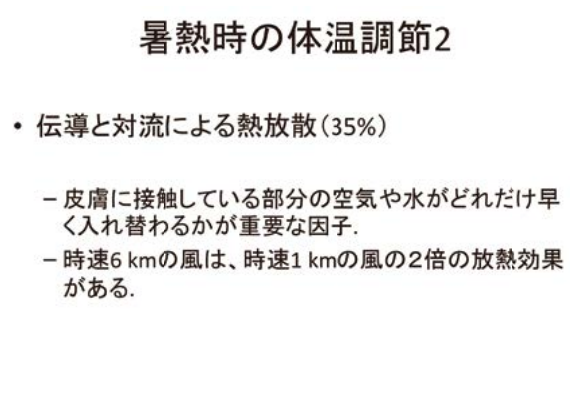



図5-4-7　伝導と対流による熱放散

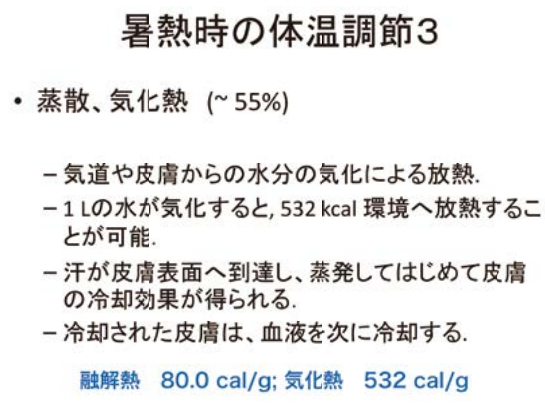



図5-4-8　蒸散、気化熱

伝導と対流で熱を逃す方法もある（図5-4-7）。伝導は冷たいものを触ると手が冷たくなる、対流は風が吹くと熱が逃げて行って涼しい、寒い、といった感じられるものだ。

我々がもっとも熱を逃している方法が「蒸散」だ（図5-4-8）。特に運動時は蒸散が大事で、汗に依存している。つまり、汗が気化するときに熱が奪われる気化熱の仕組みで、体温調節の半分以上を占めている。

ここまで、いろいろな方法で熱が出ていく、いろいろな方法で入ってくることを紹介した。

人間の活動に依存した体温調節の影響は「基礎代謝による熱産生」と「筋収縮による熱産生」の2つのみである。運動すると基礎代謝に筋収縮が加わってくる。そのほかは様々な環境要因だ。太陽光の輻射熱や風による対流、地面の太陽光の反射、地面が発する赤外線。気温は、そのまま影響を与える。我々は熱をつくる動物であると同時に、環境との相互作用で体温調節に大きな影響を受けながら日々生きている。

環境から受ける影響について、皮膚の血管の知見を紹介する。人間の皮膚の中にはち密に血管があり、温かい血が流れている。つまり、皮膚表面に流れる血管が体温調節もしている。皮膚に流れる血はふだんはそれほど多くないが、暑くなると多くなる。例えば、お風呂に入った際、顔が真っ赤になることを想像してほしい。これは体温の上昇に伴って、血管が拡がり、皮膚の血流が増加したのを反映している。人間の皮膚血管は、拡がったり縮まったりしながら体温調節している。

次に、発汗に関する知見を紹介する（図5-4-9）。人間の皮膚には汗を出すため汗孔という穴があるが、かなり小さい。若くて視力が良い人だと、かろうじて汗が出始めるときに輝いているのがわかるくらいだ。皮膚の内部でつくられた汗を体外に出して、蒸発させている。その気化熱によって熱を逃がしている。

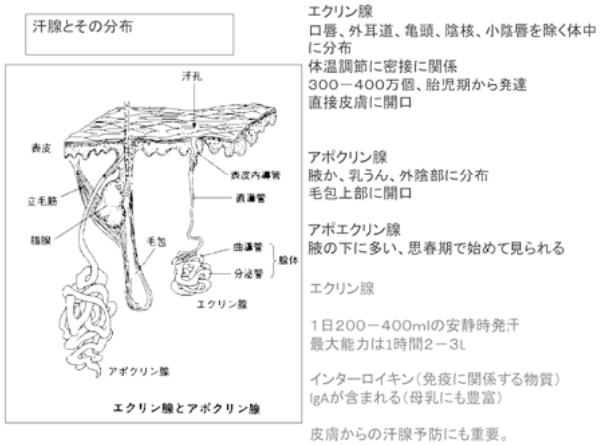



図5-4-9　汗腺について

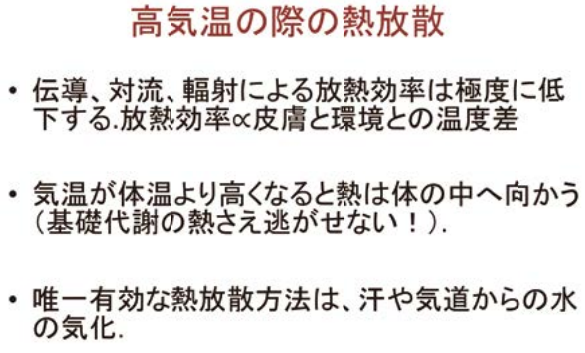



図5-4-10　高気温の際の熱放散

汗腺にはエクリン腺とアポクリン腺の２種類がある。アポクリン腺は思春期に発達する。毛穴から脂っぽい成分を出す腺で、体温調節にはほとんど関係していない。

エクリン腺が、体温調節に関係する汗腺だ。我々が胎児のときから発達して、お産のときにはほぼできている状態だ。何もしていなくてもエクリン腺から１日に200から400ミリリットルの汗をかいている。汗かきの人だと、最大で１時間に2、3リットルも水分を出すと言われている。

汗腺をさらに拡大して見ると、体の内部側には汗の分泌腺細胞、皮膚表面側には汗のNaClの再吸収細胞が順に並んでいる。暑いときには水だけでなくスポーツドリンクを飲みなさい、塩飴を舐めなさいと言われるかと思う。その理由として、汗は最初に体液と同じNaCl濃度で作られる。体液の半分から３分の１程度のNaClが再吸収されるが、残りは汗となって喪失している。

我々は、皮膚の血管をどのようにコントロールしているのか。１つ目は自律神経による自律性体温調節だ。自律神経には交感神経と副交感神経があるが、体温調節は交感神経が担っている。

２つ目が我々の行動による行動性体温調節だ。服を着たり脱いだり、うちわであおいだり、空調をつけたりする、これらはすべて行動性体温調節である。我々は地球温暖化で体温調節に危機を与えられている一方で、体温調節のために空調を使って地球温暖化を加速している面もあるという不思議な循環がある。

高い気温のときの熱放散を図5–4–10に示す。いろいろな方法で我々は体温調節するのだが、最も大きな方法は、やはり発汗だ。熱中症の問題は、気候変動や都市ヒートアイランドに加え、我々の自律性体温調節である発汗と、空調がキーワードになってくる。

我々の体温調節は、端的に言えば汗に頼り切っているが、とりわけ苦手な問題がある（図5–4–11）。湿度が高いと気化が妨げられて、発汗が体温調節の役に立たなくなる。

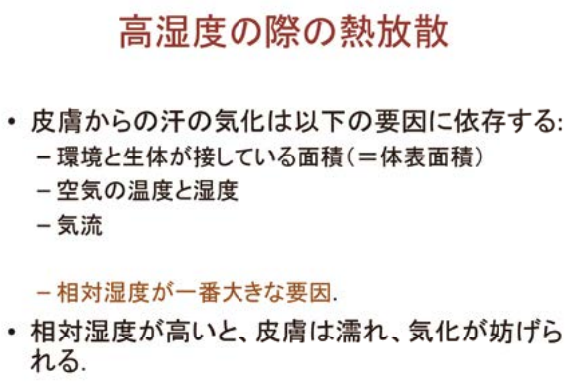



**図5–4–11　高湿度の際の熱放散**

**図5–4–12　体温調節が無効になる時**

体温調節が上手くいかない場面をまとめる（図5–4–12）。行動要因での問題は強い運動時だ。環境要因は高気温も問題だが、最も問題なのは高湿度だ。そして、脱水だ。汗をかくためには水が必要だが、脱水状態では汗がかけなくなる。とりわけ、高強度の運動、高湿度の環境、自分の脱水の３つが熱中症に関する高いリスクファクターになる。

環境要因を見る方法は後程詳しく紹介するが、WBGT温度計で、いわゆる暑さ指数を使う流れがある。気温だけで判断せず、湿度、日射の影響も見る温度計だ。環境省の熱中症アラートで、使用されている。

次に、こどもの体温調節についてお話しする。　子供は熱中症に非常に弱い。なぜかというと、成人と比べて「発汗の絶対量」、「単位表面積あたりの発汗量」、「深部体温（直腸温度）の上昇に対する発汗量」が

少ないという3つの理由がある[2]。ある運動時の発汗量を大人と比べると、子供は小さいから当然、発汗量そのものが少ない。では、表面積当たりで補正するとどうか。それでもやはり低い。深部体温が上がったときにどれだけ汗をかけるかを比べても子供のほうがかなり低い。つまり、体温が上がっても汗にする反応が鈍い。汗をかく能力が子供は大人に比べて少ないので、環境要因にとても影響を受けやすい（図5–4–13）。

高齢者の体温調節についても紹介する。高齢者の発汗機能を若年者と比べるとどうか。暑熱に応答する汗腺を体の部位ごとにみると、応答はしているのだが、発汗量が少なくなっている部位が多くみられる。とくに、背中、そして大腿で発汗できていない。

皮膚血流でも若年層と比べてみる。暑熱として、60分運動を続けていく際の皮膚の血流量の変化をみた報告がある[3]。若年層は運動するとぐっと血流量が増えている。高齢者の胸部や太腿の皮膚血流量を見ると、運動を続けても血流量が少ししか増えていかない。温かい血を体の表面に送って、対外に熱を逃がす機能が、高齢者でやはり少ない。60分間連続して動ける高齢者はあまりいない。つまり、この実験の高齢者はかなり運動能力の高い人なのだが、その人ですら、体温調節能力は劣る。ほとんどの高齢者はもっと体温調節能力が低い。やはり、高齢者では、若年者と比べて全ての体温調節機能が劣っているというのが結論となる。

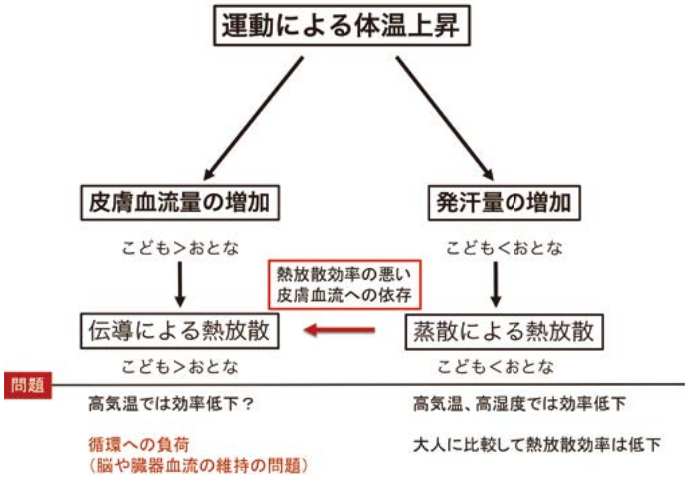



**図5–4–13　　こどもの体温調節**

**飲水の罠**

熱中症予防に水は欠かせない。なぜ飲水が大事なのかは、研究成果の裏打ちを紹介したい。加えて、現場の指導者が陥りやすい“飲水への過信”についてもお話しする。

脱水状態で人間の体温調節がどうなるか調べた報告がある[4]。我々が普通どれぐらい脱水に耐えられるか。実はかなり脆弱だ。体重の3%ほど、たとえば体重が60 kgの人だと1.8リットルの脱水で、へろへろな状態になってしまう。この報告は、脱水が体重の0、3、5、7%の状態から運動を始めた際の深部体温と発汗量を調べたという、過酷な実験だ。運動により、発汗も深部体温もあがっていく。0%の脱水で運動を始めた人は、300g/（$m^2$・h）の発汗で始まり、運動の終了時も450g/（$m^2$・h）としっかり発汗できている。この発汗の単位は補正のため体表面積で割っている。7%の脱水の人は運動の出だしですでに38℃の体温で、発

2　Inbar O et al.,Physiol(2004)89:691–700
3　Y. Inoue et al., Eur J Appl Physiol(1996)74: 78–84
4　Sawka M etal.,J Appl Physiol, 59,5, 1394–1401(1985)

汗が200g/（m²・h）以下だ。そこから運動を行うと、39℃にあがり、300g/（m²・h）程度しか発汗できていない。

脱水状態では、発汗できなくなり、体温調節が無茶苦茶になる。脱水予防のために飲水が大切だという報告が出始めたのも、たかだか30年ほど前の話だ。

ランニング運動する際の気温、湿度の影響を調べた報告もある。当然の結果だが、寒くて乾い環境と、暑くて高湿度の環境では、同じスピードで走っていても暑くて湿度が高いほうが多く汗をかいてしまう。

次に、「暑熱順化」を紹介する。これは、暑さに慣れた状態のことだ。いろいろな方法があるが、典型例は、生まれてからずっと暑い地域に住んでいる方だ。インド南部や東南アジアの高湿高温地域に住んでいる方々は、それだけで暑熱順化している。我々も、運動習慣をもっていて、少し暑くなり始めた時期に積極的に運動しているような人は、暑熱順化される。

古い実験だが、暑熱順化の影響を調べた報告がある。暑熱純化した人としていない人で、2時間以上の運動し続けてもらい、その際の深部体温を比較している。暑熱順化した人の深部体温は30分ほどすると、大体安定している。運動したからといって、必ず熱中症になるわけではない。次に、暑熱順化していない人の測定結果をみると、暑熱順化した人と比べ、0.2℃ほど深部体温が上がっている。逆に言えば、暑熱順化している人は、その体温上昇が抑えられている。この報告では、さらに脱水状態での調査も行われている。脱水状態だと、暑熱順化している人もしていない人もともに38.5℃くらいに深部体温があがっている。脱水状態では、暑熱順化していても、熱中症リスクがかなり上がる。

現在では、こういった知見から、暑い環境で運動していると、水をたくさん飲むように言われる。そうやって飲んだ水だが、体内で吸収される場所は、胃ではなく小腸である。胃袋に一旦入ってから、小腸に抜けて初めて吸収される。少量、中程度、多量の水を飲んだ時の消化管の比較調査も過去に行われている。水を多く飲めば飲むほど、胃から小腸に抜けていく水の量も増えている。引き算したのが白いところでございます。これは飲んだ水がどれだけ残っているかを示したわけです。約1.8リットル飲んだ場合、胃には約16%だけ残っているが、ほとんど小腸に運ばれて吸収されている。一気に約3.5リットル飲んだ場合、約33%と胃にかなり残ってしまっている。水を大量に飲めば飲むほど熱中症予防、脱水予防になるかというと、そうではなく、人間の体には限界があることが示されている。飲水は重要だが飲水だけしていれば良いということではないことが理解いただけたかと思う。

ここまでのまとめを図5-4-14で示す。

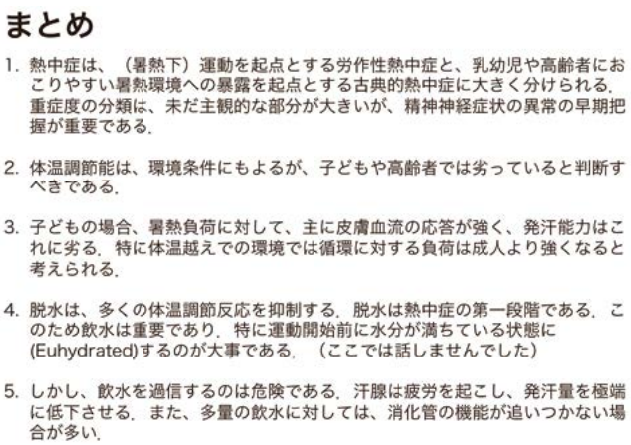



**図5-4-14　まとめ**

**生気象学会の活動紹介**

生気象学会について簡単に紹介する（図5-4-15）。生気象学は割と新しい学問といえる。生気象学は、「大気の物理的、化学的環境条件が生体に及ぼす直接、間接の影響を研究する学問」と定義されている。これまで説明した熱中症以外に、電磁波やオゾンホール、環境破壊などによる生体への影響なども範疇である。会員は600名程度であまり多くないが、世界的には多くの研究者がいる。日本では、特に住環境、熱中症がトレンドだ。会員の専門は医学が多い。住環境に関する工学が専門の方もいる。工学と気象学の中間や、労働に関係するので、農学と気象の影響を研究している農学部の研究者もいる。もともとホームグラウンドがある方が学際的な研究を生気象学会で行うようなスタイルだったが、最近では生気象学をメインに研究する方も出てきている。時代の要請に合致した学問になってきたと感じている。

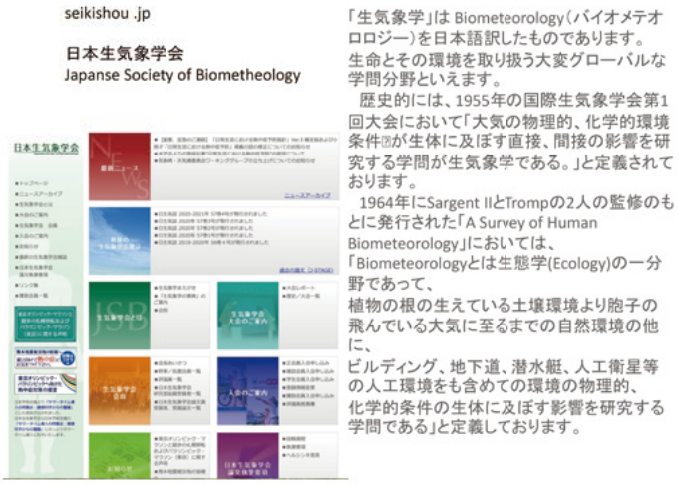



**図5-4-15　　生気象学会について**

ご説明した通り、熱中症の被害は高齢者が多い。高齢者が家にいるときの熱中症を予防する指針として、「日常生活における熱中症予防指針」も作り、更新を重ねている。住環境やリスクファクターに分かっていないことも多いため、生気象学会メンバーが中心となって研究を積み上げている。

運動による熱中症については、2019年に一般にも話題となったが、東京オリンピックのマラソンコースが札幌に変更となった。この仕事には日本生気象学会も貢献した。実際のコースで、あらゆる時間でWBGTでしっかり測定した。どう時間をずらしても、どう対処しても暑さ対策にならないという結論が出た。

今後の注目テーマとして、気象病・天気痛委員会ワーキンググループをつくろうとしている。気象病とはもともとは気圧変動に起因する、耳の平衡感覚や内耳機能に関係するものが対象だった。リウマチの人が低気圧になると手が痛くなるといったものだ。最近、視野をさらに大きくして、かなり短時間の間での気圧の変動も含めていこうとしている。気圧変化が徐々にではなく、急に高気圧から低気圧に移行する現象があり、それに人の体が対応できず痛みが起こるといった現象も研究しようという動きがある。

**【質疑応答・ディスカッション】**

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

Q：熱中症や脱水症状の予防で、よく塩飴が良いみたいなことも聞く。飲水の総量と必要な塩分濃度は、専門家からみて、どのように考えるとよいかご。

A：汗の塩分濃度は大体1リットル当たり3グラムとかなり高い。3グラムの食塩を接種するのはかなり難

しい。必要な塩分量を塩飴だけで取ろうと思うと、その塩飴はたいへん塩辛くなって、とても摂取できないものになる。確かにスポーツドリンクにはそれぐらいの塩分が入っているが、あまり飲み過ぎると消化管症状が出る。それらで塩分摂取することは大事だが、汗を大量にかいたときに単独で補うのはなかなか難しい。人間の体には塩のリザーブ機能があり、ご飯をしっかり食べて、溜めておくことが大切だ。

Q：気象病や天気痛に関する国内研究会が立ち上がったが、海外の状況は如何か。気候変動関連研究は欧米のほうが日本より全体的な関心が高く、進んでいるのではないか。

A：日本では海外より天気痛の注目が高い。気象に関する愁訴というと、痛みの専門家が研究しているだけの状況で、広がりを持って進めている海外と比べ遅れている。実際に研究が進んでいるかという点だが、全般的な問題にはまだアプローチできていない。内耳障害との関係の仮説などはあるが、実際あまりよく分かっていない。世界を見ても、今後の研究課題だ。

Q：室内の熱中症は建築学分野で工学系アプローチの研究もあるが、医学系アプローチならではのサイエンスの強みをご教示ください。

A：医学の立場から見ると、工学ではどうしても基準という観点が強い。例えば、高齢者と一口に言っても、個人差が非常にある。医学として個人レベルで基準を切り分けていくのが難しい。 WBGTの指標は若い人向けには良い数字だが、高齢者向けでは、同じ室内温度でも個人個人のリスク要因で変わる。個人レベルの評価をしていくための観点や、上手な生体モニタリングを考えるのが医学側の強みと思う。

Q：機器が高度化して、測定が多様化してきた背景のなか、ホットな医工学連携の研究開発課題だが、どのような状況か。

A：どのパラメータを使ったらいいのかが難しい。我々も温湿度だけでWBGTを予想する方法を検討しているが、やはり宿主側の影響の評価が難しい。やはり外部環境測定だけでは駄目だ。どうしても個人に何かつけるか、どこかからモニタリングするかが必要だ。ハイリスクの独居生活の高齢者に対して、適した方法は、さらなる工夫が求められている状況だ。

Q：暑熱順化について、体温調節、恒常性機能は生き物の根源的な機能の１つなので、環境が変わっても、生物としては大きな変化しなさそうな想像する。しかし、例えば、世代間では生まれ育った環境の変化で体温調節機能が少し変わっているようなことはあるか。生まれたときから快適な空調設備がある環境で生活している若い世代と、高齢世代との世代間で医学的な違いが見られることはあるか。

A：実証はされていないが、非常に古い研究がある。日本がまだ帝国主義だった時代の研究だが、汗腺の発育はどうやら小学校に入る前ぐらいに決まっているという報告がある。汗腺の数やどのくらい発達するかが、そのときの環境によるという内容だ。汗腺の数についていえば、遺伝学的要因よりも幼年期の環境要因が強い。

　その観点からは、今の若い人たちの多くは空調が整っている中で育っているので、空調が無かった高齢世代と比べて汗腺が脆弱な可能性はある。ただし、横断的な研究で、比較検証はなされておらず、実証するのも難しい。汗腺の数だけでの話なので、より正確にはもっと難しい。

Q：熱に対する耐性は基礎代謝量が多く影響しているように個人的に感じている。私は運動していた若い頃は平熱が37.2℃ぐらいあったが、今は36℃すれすれぐらいに落ちてきた。基礎代謝は、年齢とともに落ちてくる。運動強度と基礎代謝量の比が、発熱や、その熱を奪うための汗の量が、血液の循環に効いてくると思われる。基礎代謝量との比例関係や、深部体温との比較研究は如何か。

A：実は、しっかり深部体温を測ると加齢後も37℃前後でコントロールされていて、一定になっている。

運動習慣がある人では、熱の放散、発汗するための血流量が上がる。また、基礎代謝そのものが運動習慣と割とつながっている。一概には言えないが、アスリートでは基礎代謝量が上がると、熱を生みだしやすい。体温調節能はかなり上がる。しかしながら、熱帯等で暑熱順化している人の基礎代謝が、実はかなり低いことが見出されている。そのような知見から、基礎代謝と体温調節能のリンクはまだはっきりとしていない。

Q：汗の役割が重要だと認識した。汗の蒸発を促す衣服や素材が開発されていると思うが生気象学会とのかかわりはあるか。

A：気象病や熱中症のような研究会はないが、被服関係の会員がいる。熱中症の委員会にも被服関係の方が入って、活動している。

Q：イヤフォン型センサーで生体情報を取る研究について詳しく伺いたい。

A：しっかりとした体温の議論には深部温度を測らないといけない。ちょうど鼓膜の裏側に脳に行く血管の細い分岐が走っている。昔から、その温度をしっかり測れれば深部体温が測れると知られており、その測定を目指して研究室でイヤフォン型センサーをデザインして、作ってもらった。耳をあまり塞がない形状に工夫していて、輻射熱を測っている。

Q：イヤフォン型センサーでどのくらいの情報が取れるているか教えてほしい。心拍センサーと組み合わせた実験も行われているが、組み合わせが必要な理由は何か。

A：イヤフォン型センサーは割ときれいに深部体温が測れている。しかし、熱中症は深部体温が上がってしまったときにはもう遅い。危険の回避のための、アラートのタイミングとしては遅い。そのため、心拍センサーを組み合わせる検討を始めた。

運動していると心拍数が上がる。脱水は熱中症の重要なリスクファクターだ。脱水状態だと体内の血流量が少なくなってくるので、安静にしていても運動をしていても、心拍数がだんだん上がってくるん。まだ実験室レベルだが、深部体温と心拍数を同時に測れば、熱中症リスクを早期に見つけられるのではないかと考え、検証を始めた。耳だけで心拍数もとれるのならよいが、なかなか難しく、いまは組み合わせて検討している。

**ワークショップ企画・報告書編纂メンバー**

| | | |
|---|---|---|
| 佐藤 順一 | 上席フェロー | （環境・エネルギーユニット） |
| 中村 亮二 | フェロー／ユニットリーダー | （環境・エネルギーユニット） |
| 松村 郷史 | フェロー | （環境・エネルギーユニット） |


**俯瞰ワークショップ報告書** **CRDS-FY2021-WR-06**

# 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー

令和 4 年 2 月　February 2022
ISBN 978-4-88890-772-9

**国立研究開発法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター**
**Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency**

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町
電話　03-5214-7481
E-mail crds@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/crds/

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。
著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
This publication is protected by copyright law and international treaties.
No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.
Any quotations must be appropriately acknowledged.
If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

ISBN 978-4-88890-772-9

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY

https://www.jst.go.jp/crds/