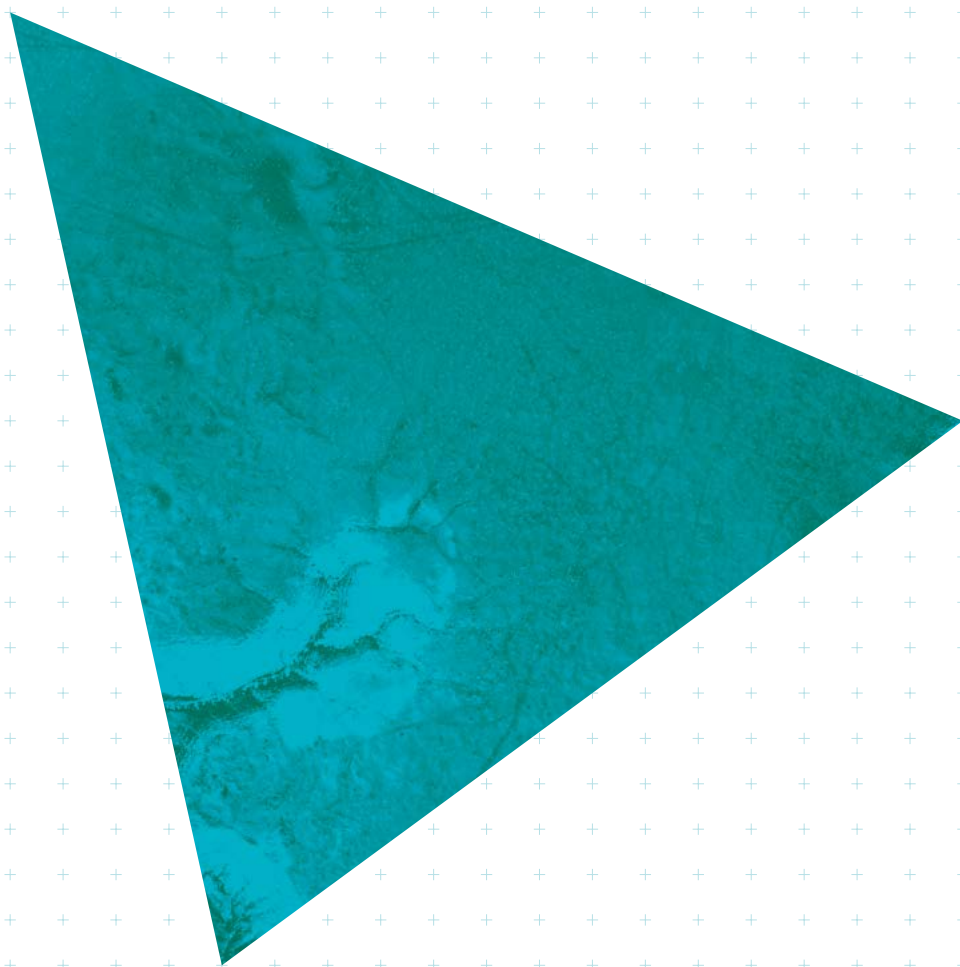


科学技術未来戦略ワークショップ報告書

中長期の自然災害・気候変動 リスクに対応する 気象・気候予測の今後



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2020年11月2日（火）に開催した、科学技術未来戦略ワークショップ「中長期の自然災害・気候変動リスクに対応する気象・気候予測の今後」での議論の内容をとりまとめたものである。

豪雨、洪水、熱波や寒波などの自然災害がもたらす社会的・経済的損失は極めて大きく、現代社会にとって依然として重大な問題となっている。昨今はそうした自然災害をもたらす極端気象が気候変動により頻発化、激甚化する可能性も指摘されている。こうした事態は我が国にとって深刻な問題であるのみならず、SDGsの達成に向けた世界の取組みにも大きな障害となる。加えて産業界には、気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）の提言への対応として、気候関連リスクの財務上の影響を把握・開示することも期待されている。こうした背景から、自然災害および気候変動に伴うリスク（特に物理的影響）を可視化し、それらを対策立案や意思決定、行動変容に繋げていく必要性が認識されている。

リスクの可視化には予測技術の高度化が必要である。昨今は、集中豪雨や台風の兆候をより早期に探知・予測し対策につなげる「数分～数日」のスケールと、各種産業や行政の戦略策定や計画策定等に必要な「数週間（季節内）～10年規模」のスケールの予測に関するニーズが高まっている。現象理解、観測技術、計算機器、計算手法等の大幅な進展によって予測精度は大きく向上しているが、これらのニーズを満たすには更なる精度の向上が求められている。特に後者の「季節内～10年規模」の予測はいわゆる初期値問題と境界値問題が交差する時間スケールであり、従来は時間スケールごとの予測精度向上が主流だが、欧米ではそれらをシームレスにカバーするような次世代の予測モデルに関する研究開発の動きも見られる。日本としてもこの分野にどう取り組んでいくべきかについて早急な検討が必要である。

以上を踏まえ、本ワークショップでは「季節内～10年規模」の予測精度向上に注目し、今後国として取り組むべき研究開発の方向性や具体的な課題、その推進方策について議論を行った。

議論は、「季節内～10年規模」の予測を行う「気候予測」、得られた予測情報を使って生態系や人間社会への影響を予測・評価する「影響予測・評価」、ならびに基盤となるデータ、人材、異分野連携、産官学連携などの「基盤・横断」の3つのセッションに分けて行った。また予測対象としては台風、降雨／干ばつ、猛暑、漁場を仮設定し議論した。

以下ではワークショップでの議論の概要をまとめる。

〈季節内～10年規模の予測〉

■主なアプローチ

① 数年～10年規模予測

- ・ 全球モデルを用いた予測とダウンスケーリングによる高解像度化
- ・ 地球システムモデルを用いた予測（例：CO₂濃度予測、気候変化の要因分析）
- ・ 短寿命気候強制因子（SLCFs）に関するモデルを組み込んだ予測
- ・ アンサンブル実験に基づく確率的な情報の作成（ハザードの将来変化を解析可能な「d4PDF」のようなデータセットの作成）
- ・ 過去データを使った解析（例：再解析データの作成、疑似温暖化実験）

② 季節内～季節スケールと数年～10年規模スケールの予測を組み合わせたシームレス予測

- ・ 全球雲解像度モデルと気候モデルの相互乗り入れによる予測（例：季節スケールの予測）

■必要な研究開発課題例

- ・各時間スケールで重要となる自然変動（内部変動）のプロセス解明（例：太平洋十年規模変動や大西洋数十年規模変動）
- ・内部変動のプロセス解明に必要な観測データの収集・解析（例：海洋の3次元データ）
- ・地球システムモデルを構成する個々のモデル（陸面、海氷、エアロゾル、オゾン、波浪等）の高度化、気候予測への影響解明（参考：WCRP ESMO）
- ・ラボ実験、現場観測、人工衛星観測、数値モデル開発の統合的推進による大気中の粒子系（エアロゾル・雲）の気候変動への影響をシームレスに表現する数値モデルの開発
- ・気候予測、地域規模の影響評価、影響緩和シナリオ作成の一体的推進
- ・膨大な予測データを効率的・効果的に利活用するための情報処理技術開発、システム構築
- ・スーパーパラメタリゼーション（グリッド内の物理過程の雲解像モデルへの置き換え）
- ・物理プロセスの表現の精緻化（例：大気－海洋－陸面系のエネルギー・運動量交換、乱流－雲－放射相互作用）
- ・初期値問題から境界値問題への変化への対応（例：山岳表現・陸面モデルの精緻化、雲微物理スキームの高度化、マルチスケールモデル）

■現状

- ・時間的には10年規模の予測スキルは数年先までが現状。現業のエルニーニョ予測も1年程度。空間的には気温では全球規模で一定の再現性と予測スキルがあるが、地域規模は海盆の規模（数十km）くらいまでというのが現状。10年規模予測の精度や解像度は発展途上段階にある。
- ・10年規模予測へのニーズは高いが、予測情報を実際にどう利用できるのか（どのような社会的対応・対策に繋げられるのか）は研究者側も利用者側も十分に掘り下げられていない。何が予測できそうで、どう利用できるのかのすり合わせが必要。
- ・100年規模の気候変動と比べて近未来の予測は一般的に変化のシグナルが弱く、これまで影響予測・評価の研究対象になっていなかった。どのように進めていくかの検討が必要。
- ・予測結果のダウンスケーリングやバイアス補正など、影響予測・評価に必要なデータ処理を誰が担うかが不透明。

〈予測情報の利活用（影響予測・評価）〉

■季節内～10年規模予測の潜在的な応用分野

- ・洪水災害：10年規模の自然変動（内部変動）の影響予測・評価、気候変動による長期トレンドとの相互作用解明
- ・台風：数年～10年規模の自然変動（内部変動）による台風外力の定量的評価、変化する都市・中山間地・森林域への影響の予測・評価
- ・海洋生態系・水産資源：海洋の物理過程（特に水温）の季節～10年規模変動と長期的なトレンドの予測、海洋酸性化等の指標である溶存酸素濃度に影響を及ぼす生物化学過程の季節スケールの変動の予測
- ・水資源：降水量やダム流入量の季節～数年先予測
- ・猛暑：農業と健康（熱中症）への影響予測

■必要な研究開発課題例

- ・影響予測・評価における時間スケール毎およびスケールを跨いだ物理・化学・生物プロセスの考慮
- ・影響予測モデルの高度化（例：気候予測モデルと影響予測モデルのシームレスな結合）
- ・災害リスク低減方策に関する研究開発：脆弱性の回避（例：生態系を活用した防災・減災：EcoDRR、

流域治水、グリーンインフラ、グリーンボンドなど民間資金の活用)、ばく露の低減(例:ハザードマップ、規制・制度インセンティブ開発)

- ・多様なセクターとの協働を目指した研究開発:多様なステークホルダーを念頭に置いた情報基盤の在り方検討、気候変動リスクへの対応・対策の学問的深掘り(これまでは自治体やコミュニティ向けの手法論や考え方、あるいは分析や計画が中心)

〈基盤的・横断的事項〉

■数理科学・情報科学技術分野と気象学・気候学分野の連携促進に向けた課題

- ・分野間の価値観や専門性の違いの相互理解と交流の促進
- ・応用数学分野で流体力学・力学系・偏微分方程式論を扱う研究者などをハブとした連携関係構築
- ・カオス、トポロジカルデータ解析、機械学習、確率微分方程式などの研究
- ・ボトムアップで提案される連携研究を横断的に支援する仕組み・体制の構築(短期)
- ・分野を超越した普遍的テーマの解決に向けた連携研究を横断的に支援する仕組み・体制の構築(中長期)

■必要な研究体制・人材

- ・季節内～季節スケールのモデル研究と数年～10年規模スケールのモデル研究が相互乗り入れするシームレスな地球環境予測を実施可能にする分野横断的な体制の構築(参考:気候システム研究センター)
- ・気候モデル、影響評価モデル、統合評価モデルをカバーできる研究者の連合体
- ・10年規模予測におけるR2O(Research to Operation)・O2R(Operation to Research)体制強化(参考:気候研究プラットフォームとしてのNOAA Climate Testbed)
- ・気象・気候予測情報の社会利用を繋げる研究分野の育成、連携の場の構築(例:ステークホルダー会議)
- ・気候予測と影響予測・評価の連携強化を促進するプログラム設計の工夫(例:FS期間の設定によるプロジェクト参加者間の共通認識強化)
- ・国際プロジェクトへの参加を通じた国際貢献と、国内プロジェクトによる機動的かつ国内還元に注力した取組みのバランス
- ・30代研究者の確保・育成、挑戦的研究の奨励、専任教員(テニユアポスト)への積極的登用
- ・モデル開発者の人材育成(気象・気候の物理過程の理解を持つモデル開発者)
- ・情報科学分野の研究者・技術者の参入促進

■データ基盤

- ・インターフェースになる部分でのメタデータの形式の統一化と汎用ツール群による管理・処理(参考:欧州コペルニクスプログラム)

以上の議論を踏まえ、今後は、課題を整理した上で戦略プロポーザルとしてとりまとめを行う予定である。

目次

1	開催趣旨	1
1.1	開催概要	1
1.2	趣旨説明	1
2	気候予測セッション	7
2.1	10年規模気候変動予測：現状と今後の挑戦	7
2.2	「季節内～10年規模(S2D)予測」の国際研究の動向と期待	16
2.3	次世代地球システムモデルによる シームレス気候予測に向けて	22
2.4	短寿命気候強制因子(SLCFs)による気候変動の予測	28
2.5	議論	33
3	影響予測・評価セッション	39
3.1	気象予測と水災害の軽減	39
3.2	超多時間スケールでの 自然災害ハザード影響予測・リスク評価	49
3.3	日本の気候変動影響評価研究状況からの考察	56
3.4	「季節内～10年規模」の気象予測を想定した 社会形成と研究設定	62
3.5	議論	69
4	基盤・横断セッション	75
4.1	気候変動予測データ基盤について	75
4.2	数理科学・情報科学技術分野と気象・気候分野の 連携による可能性、連携促進のために望ましい方策	84
4.3	保険事業と気候予測・気象予測	88
4.4	議論	94
付録1	プログラム	98
付録2	参加者リスト	99

1 | 開催趣旨

1.1 開催概要

日時：2021年11月2日（火）13：00-18：00

場所：オンライン

主催：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（CRDS）
（プログラム、参加者リストは付録に記載）

1.2 趣旨説明

中村亮二（JST CRDS）

自然災害は依然として人類社会にとっての大きな脅威である。図1-2-1の左側のグラフにあるように、気候関連の災害は全体の4分の3にも上る。加えて気候変動による極端気象の頻発化や激甚化によりこうした損失は今後も増加の見通しと言われている。また気候変動は、こうした極端気象を介してのみならず幅広く社会に影響を及ぼすという点も見逃せない。こうしたことから、自然災害と気候変動の影響に対する対応強化の必要性はますます高まっている。政策的にも気候変動関連の政策、第6期科学技術・イノベーション基本計画や革新的環境イノベーション戦略のような科学技術関連の政策において対応に関する記述がなされている。

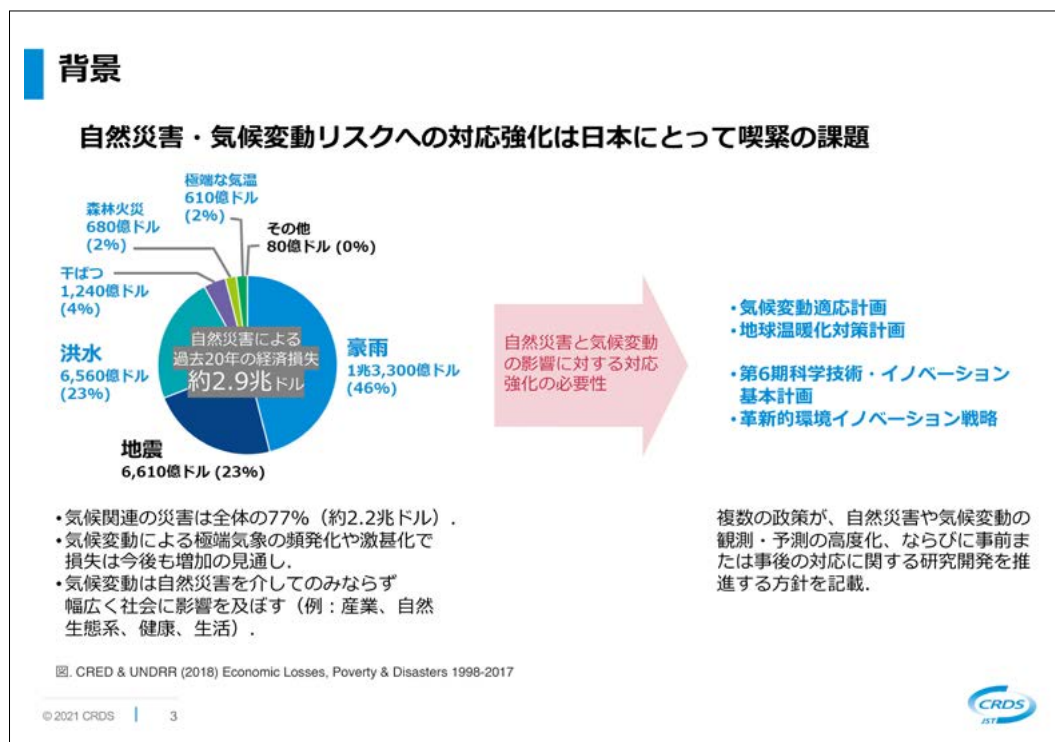


図1-2-1 背景（1）

自然災害や気候変動リスクへの対応強化に対する科学技術の貢献として重要になるのは、予測の高度化である（図1-2-2）。高度化には予測精度自体の向上と、その予測結果の活用最大化の2つが考えられる。また予測には、気候予測と、その気候予測から得られる予測情報を使った影響予測・影響評価がある。これらを経たものを対策立案や様々な意思決定に用いていくという大きな流れがある。なおこのフローの中で観測やモニタリング、あるいはデータ基盤や計算基盤も一体的に考える必要があることは言わずもがなである。

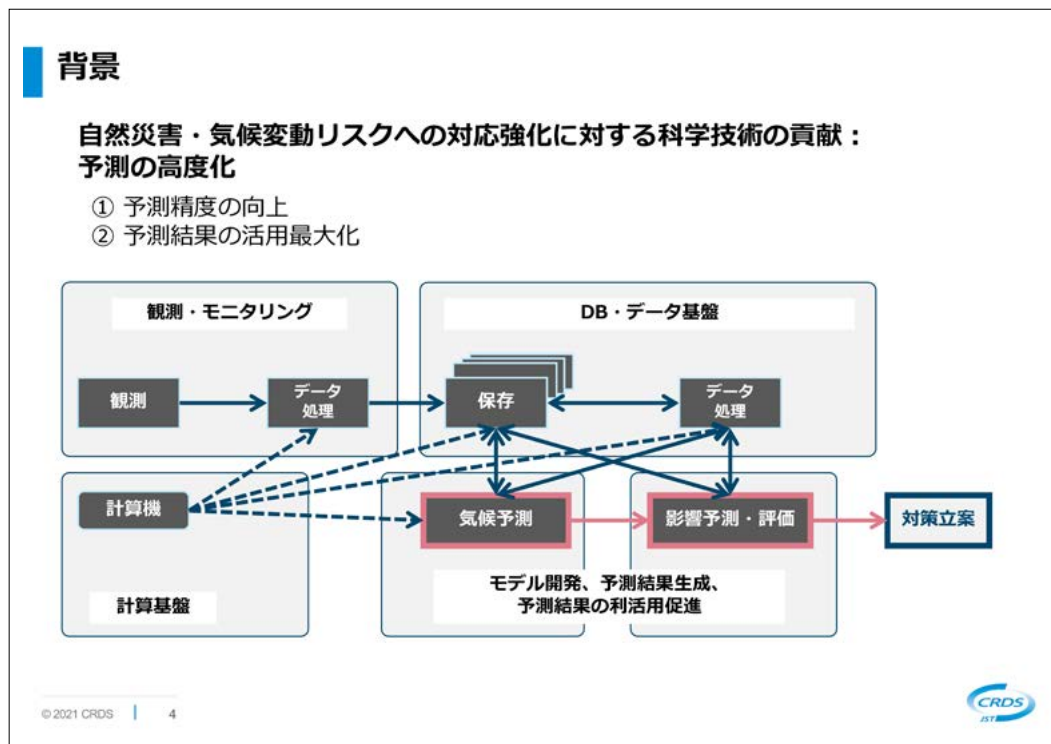


図1-2-2 背景（2）

こういった予測にフォーカスするかという点について、大きく2つのターゲットに着目している（図1-2-3）。早期探知・早期予測と、季節内～10年規模の予測である。いずれも昨今ニーズが高まっているものの現象解明や技術開発が発展途上にあり、予測のさらなる向上が期待されているエリアと考えられる。早期探知や早期予測は、集中豪雨などに対応するため分単位での探知、予測が検討されている。もう一つが今回ワークショップで注目する季節内～10年規模の予測である。季節内～10年規模は、数週間から10年規模までを含むものであり、従来の気象予報とIPCCレポートで活用されるような気候変動予測の間にある時間スケールとなる。

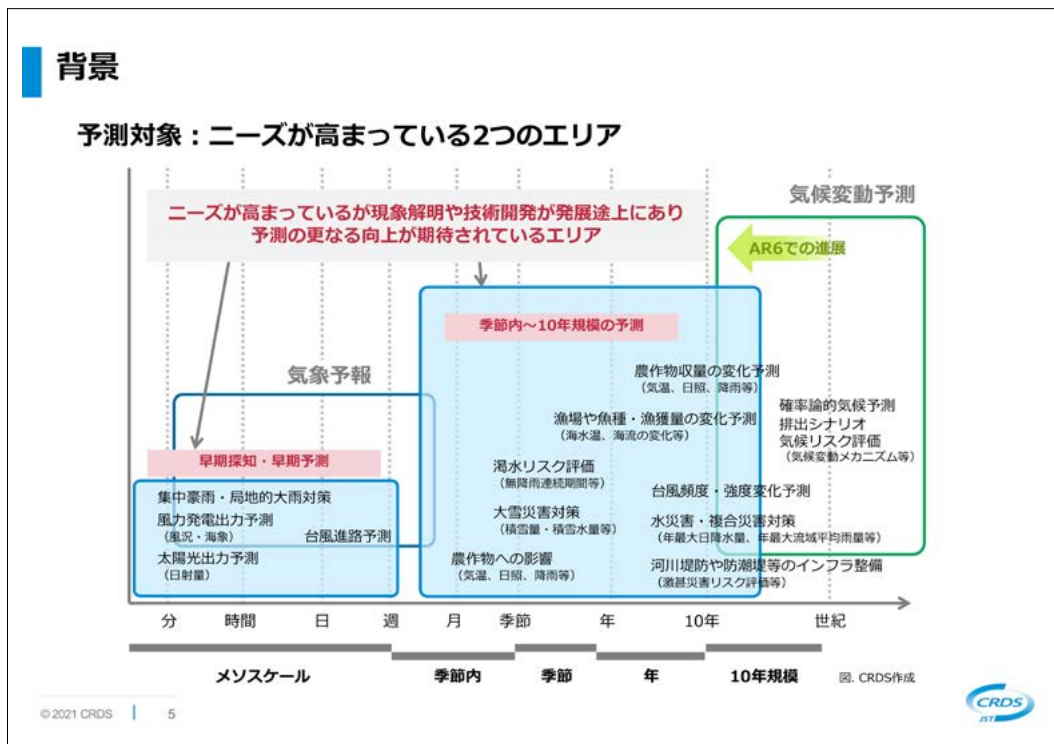


図1-2-3 フォーカスする予測のターゲット

季節内～10年規模の予測にフォーカスをする理由は3つある（図1-2-4）。

1つ目は、気候変動の緩和や適応の実施に必要な予測情報としてのニーズの高まりである。例えば季節内から季節のスケールは従来「予測可能性の砂漠」とも言われるような対象だったが、そこに挑戦する動きがある。IPCCの第6次評価報告書でも10年規模の変動予測が取り入れられている。我が国においても、対策側からの要望としてこういう時間軸へのニーズが既に指摘されているところである。

2つ目は、予測の高度化を支える科学技術の進展及び新しい潮流である。モデルの高度化はもちろん、AI技術の活用、データ同化手法をはじめとする数理科学や計算科学手法の活用も進んでいる。計算機「富岳」の稼動もある。

3つ目は、まさにこの季節内～10年規模予測をターゲットとした挑戦的な取組が欧米で始まっているということである。アメリカではプリンストン大と大気海洋庁GFDL（地球物理流体力学研究所）による連携プロジェクトがこの時間スケールを対象にした新たな地球システムモデルの開発を開始しているとのことである。欧州ではマックスプランク気象研究所の主導により、Horizon2020の中の国際プロジェクトとして新たな地球システムモデルの開発が始まっている。

こうした海外動向も踏まえると、我が国においても季節内～10年規模の予測を高度化させ、その予測情報の利活用を進めるべく、今後国として取り組むべき研究開発の課題や戦略的な推進の在り方について早急に検討を深める必要があるのではないか。

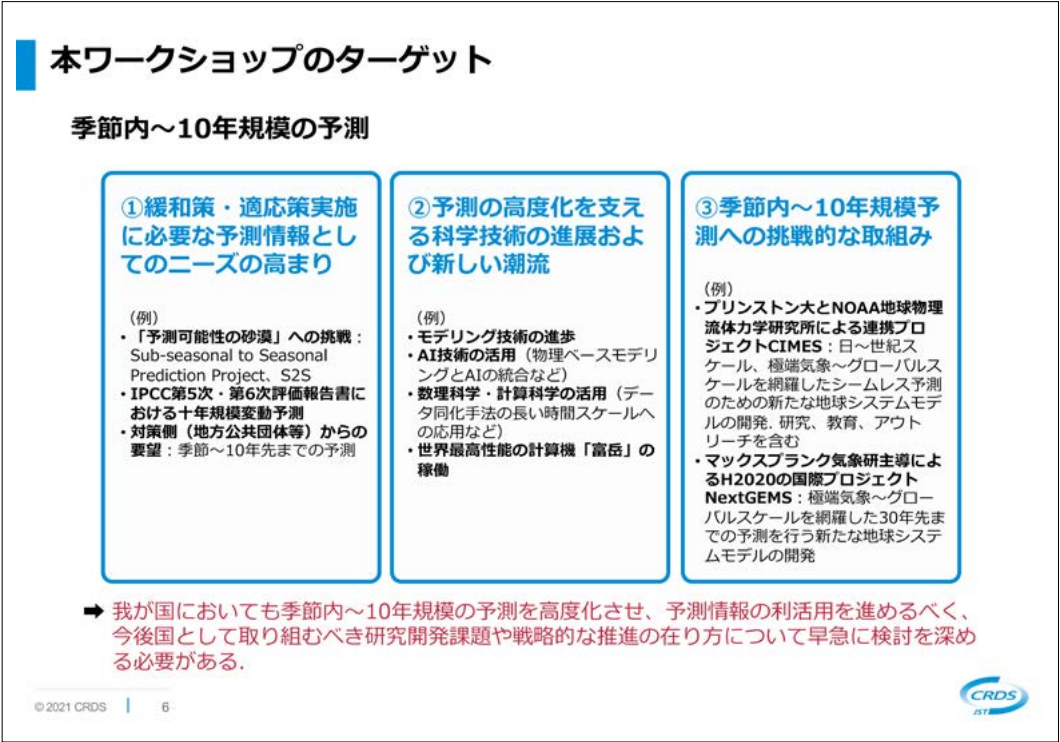


図 1-2-4 本ワークショップのターゲット：季節内～10年規模の予測

以上の背景を踏まえ、今回のワークショップでは季節内～10年規模の予測精度向上に向けて今後国として取り組むべき研究開発の方向性や具体的な課題、その推進方策について議論を行いたい（図 1-2-5）。図に示しているようにナショナルフラッグシップとも呼べそうなプログラムも既に存在するが、これらに限定せず、幅広く今後の研究の方向性について議論をしていきたい。

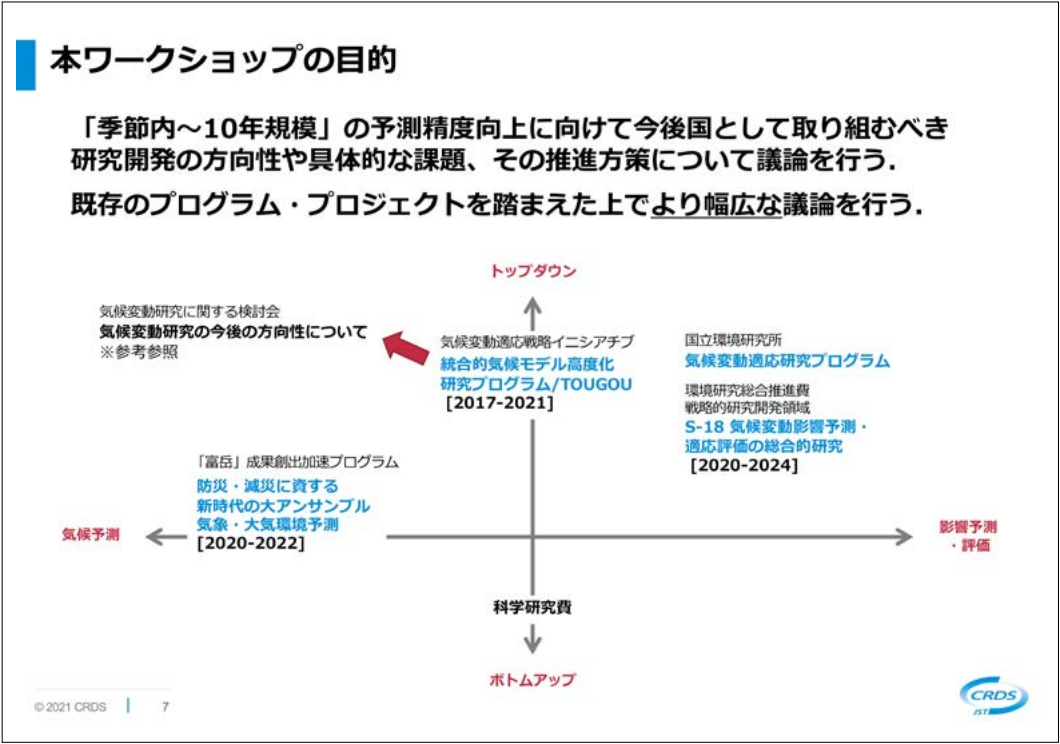


図 1-2-5 本ワークショップの目的

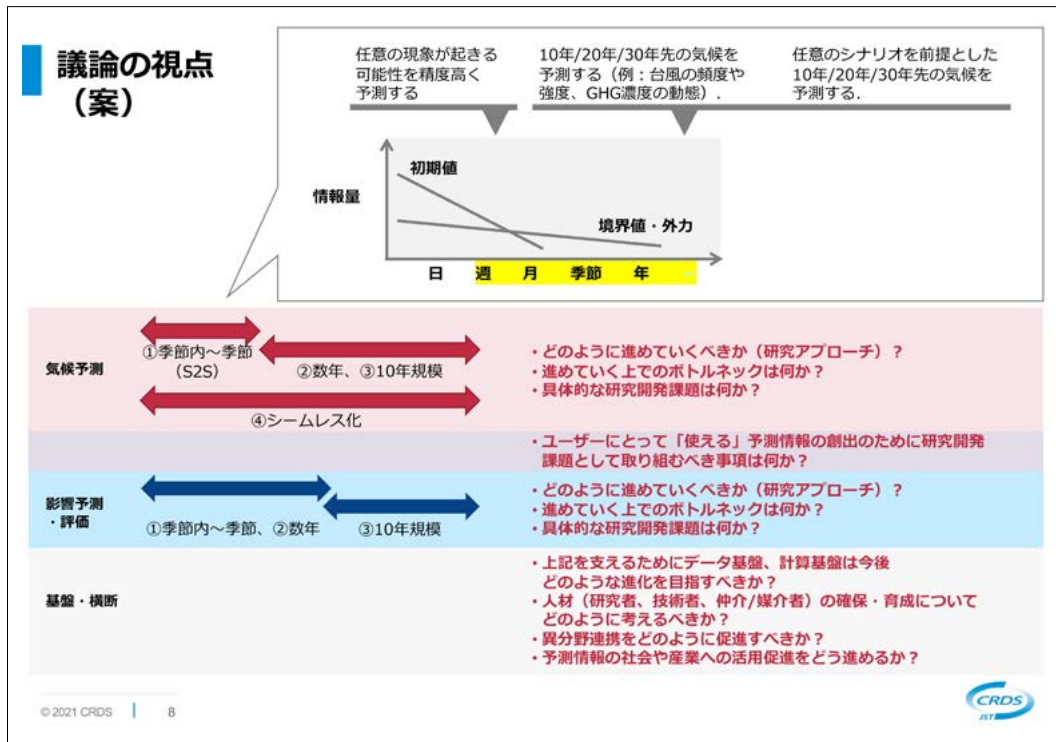


図1-2-6 議論の視点

ワークショップでの議論の視点の案についてご説明したい(図1-2-6)。ワークショップの目的に沿った議論の視点案を赤字で示している。これらの視点から議論できればと考えている。

2つの整理の軸を御説明させていただきたい。1つ目は、左端にあるように気候予測と影響予測・評価の連携をどう強めるかという視点である。基盤・横断的な視点、すなわちデータ基盤や計算基盤、人材、分野連携などの観点もある。

2つ目の軸は時間的な整理である。日・週単位の予測では初期値が持つ情報が重要になり、いわゆる初期値問題と言われる。それに対して月あるいは季節と時間スケールを伸ばしていくと、初期値よりも水温のような海面や陸面の状態、すなわち境界値から大気が強制されることによって状態が変化していくことが予測にとって重要になると言われている。ゆえに、今回対象とする季節内～10年規模予測は初期値問題と境界値問題が交差するような部分にあるとも言える。こうした、時間スケールによって問題の捉え方が異なる側面を考慮しながら議論を整理することが重要と考えている。

以上のような議論の視点を持ちながら、第1部、第2部、第3部、それぞれについて議論をさせていただきたい。なお想定する予測現象は台風、降雨/干ばつ、猛暑、漁場と仮置きして議論を進めたい(図1-2-7)。また、向こう5年程度で早急に取り組むべき課題と、中長期、10～15年先を見据えて取り組んでいく課題を念頭に置きながら課題の整理を考えたい。さらに日本はどういうところに強み・弱みがあるか、国際連携で進めることが良いのはどのような点かという観点も議論の中で折に触れて確認していきたい。

ワークショップの進め方

(敬称略)

13:00-13:20 開会挨拶・趣旨説明・事務連絡 (20分)

13:20-14:55 第1部 気候予測セッション (95分)

- ・話題提供・質疑応答：渡部 (15分)、高谷 (10分)、三浦 (10分)、竹村 (10分)
- ・議論 (50分)
- ※最後5分程度でラップアップ (小坂)

14:55-15:00 休憩 (5分)

15:00-16:35 第2部 影響予測・評価セッション (95分)

- ・話題提供・質疑応答：沖 (15分)、竹見 (10分)、花崎 (10分)、竹之内 (10分)
- ・議論 (50分)
- ※最後5分程度でラップアップ (花崎)

16:35-16:45 休憩 (10分)

16:45-17:55 第3部 基盤・横断セッション (70分)

- ・話題提供・質疑応答：河宮 (10分)、齊木 (10分)、浦嶋 (10分)
- ・議論 (40分)
- ※最後5分程度でラップアップ (CRDS)

17:55-18:00 閉会挨拶

■本WSでは予測したい現象 (案) を

- ・台風
- ・降雨/干ばつ
- ・猛暑
- ・漁場

と設定し、これらのいずれかに関する「季節内～10年規模」の予測の高度化について議論する。

■提案された研究開発課題案はその後、

- ・向こう5年程度で早急に取り組むべき課題
- ・10～15年先を見据えて取り組むべき課題

に区別して整理する。

■議論においては、

- ・研究開発上の日本の強み・弱み
- ・国際連携により進めるべき課題

についても確認する。

© 2021 CRDS | 9



図 1-2-7 ワークショップの進め方

2 | 気候予測セッション

2.1 10年規模気候変動予測：現状と今後の挑戦

渡部雅浩（東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系 教授）

季節内から10年までの様々な時間スケールには多様なニーズがある（図2-1-1）。ステークホルダーも自治体から民間企業まで様々だ。予測を行ってきた主体は国内で大きく2つある。短い時間スケールは気象庁の現業予測、現業予報として実施されている。長い時間スケールは温暖化予測に繋がっていくもので、大学・研究機関がCMIP（結合モデル相互比較プロジェクト）という国際プロジェクトで行っている。対応する国際研究プログラムとして、現業予報ではS2S、長い時間スケールではCLIVARとDCPPがある。DCPPはCMIPの中の一つのサブプログラムで、10年規模気候変動予測を行う。

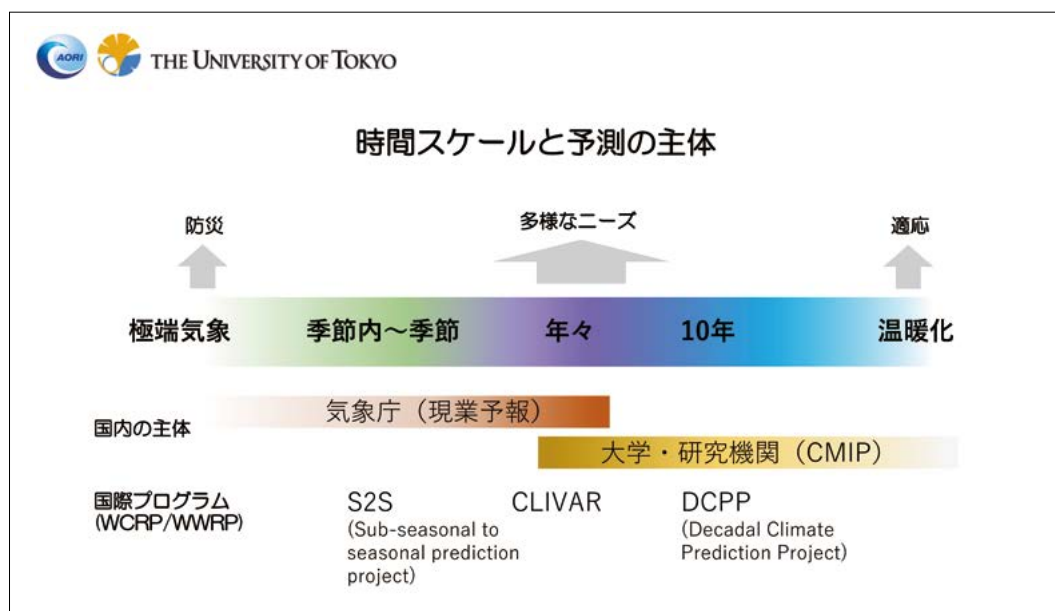


図2-1-1 時間スケールと予測の主体

中長期の気候変動予測は、IPCCへの貢献を目的として、大学・研究機関が文科省の温暖化研究プログラムで進めてきた（図2-1-2）。これまで4期あり、最初が20年前の共生プログラム、今は統合プログラムの最終年度にあたる。3つの世代のCMIPプログラムにシミュレーションデータを出し、IPCC報告書に貢献してきている。

10年規模気候変動予測のDCPPはCMIP5で始まった。国内では革新プログラムの時期だった。そのあとの創成、統合と3つのプログラムにまたがって15年近く実施してきた（図2-1-3）。MIROCという大学・研究機関のコミュニティー気候モデルのようなものを使い、メンバーも変わりながら近未来予測を行ってきた。

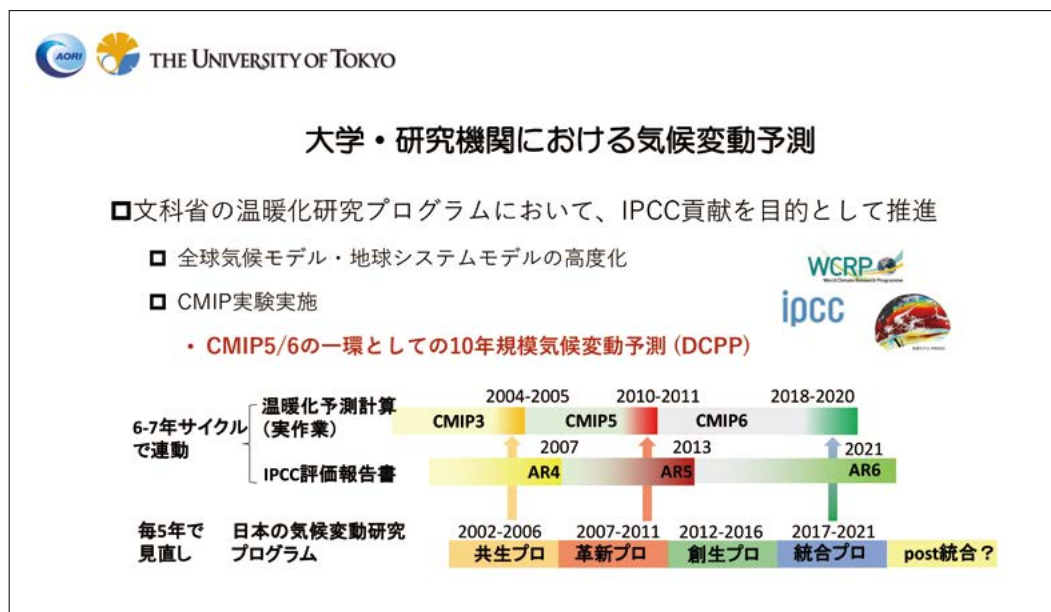


図2-1-2 大学・研究機関における気候変動予測



図2-1-3 これまでの近未来気候変動予測

最初の革新プロでは、とにかく試行錯誤だったため10年規模予測はうまくいかなかった。このスケールの気候予測では初期値化が重要になる。初期値化を行うために、モデルに観測データを与えてデータ同化を行う。全球気温の時間変化で、観測と同化データがよくそろっているところを見つけ、それを初期値にして予測の計算を始めたが、あっという間にドリフトしてしまう問題があった。これを解決しようと、年々の変動はしっかりモデルに同化するが、平均値はモデルのくせが多少あるのでそのままにした形で、モデルになじませた初期値から始める試みをした。しかしそれでもまだ駄目だった。さらに同化の強度を変えたり、同化システムを再調整したりと試行錯誤の繰り返しで改良して、ようやくモデルのトラジェクトリーに沿った予測計算ができるようになった。その後、アンサンブル10年規模予測を始めた。現在統合プロで実施されている近未来気候予測までには、そういった苦勞の道のりが大分あったが、発展を遂げてきている。

モデルの高度化により予測のスキルが上がってきている（図2-1-4）。国際連携も進んでいる。例えば、イギリス気象庁がリードしているもので、事後予測ではなく本当の将来予測を、最新の初期値からマルチモデルで行う国際研究が進められている。日本から我々のグループも参加している。今年からは2025年までの地表気温の予測結果などが公開されている。また世界気象機関（WMO）がリードする形で、10年規模気候予測の現業化が始まっている。これには今のところ日本のMIROCグループと気象研グループが手を挙げているが、イギリスほど実施体制が整っておらず課題になっている。

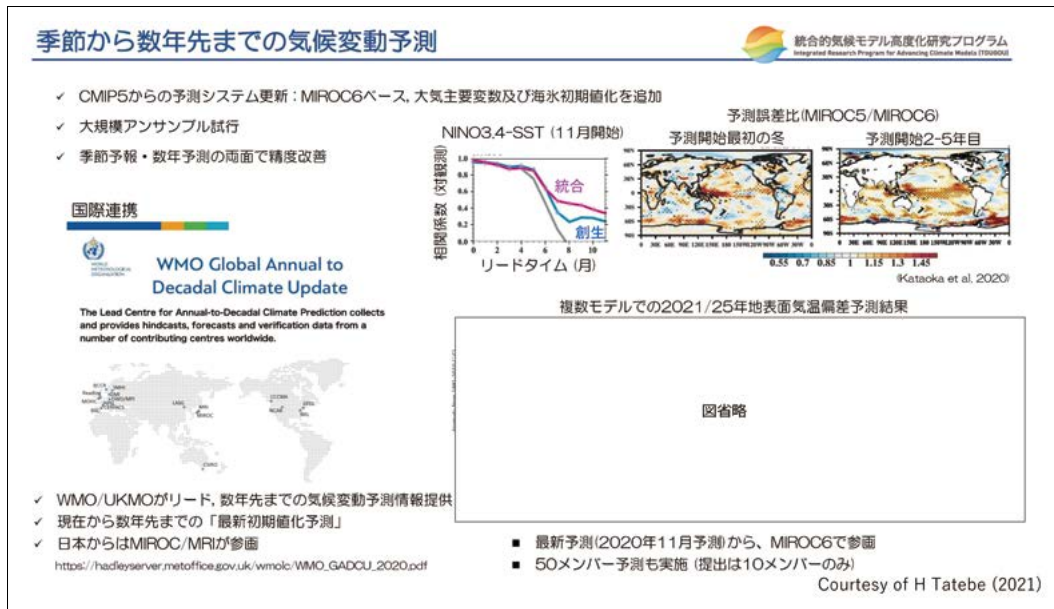


図2-1-4 季節から数年先までの気候変動予測

ここから、むこう5年ぐらいで短期的に取り組むべき課題について説明する。現在の近未来予測は全球モデルを使っており、あまり解像度が高くない。そのため、例えば、温暖化予測で行っているようにダウンスケーリングをするという方向性は一つ考えられる。図2-1-5は、統合プロのテーマCで実施している海洋のダウンスケーリングの計算である。これ自体はどちらかといえば温暖化予測のダウンスケーリングで、日本近海の海洋のシミュレーションを高解像度で行って、漁業や水産資源のステークホルダーに向けた貢献を検討している。10年規模予測からこういったダウンスケーリングを行うことはまだ取り組んでおらず、今後の課題になる。

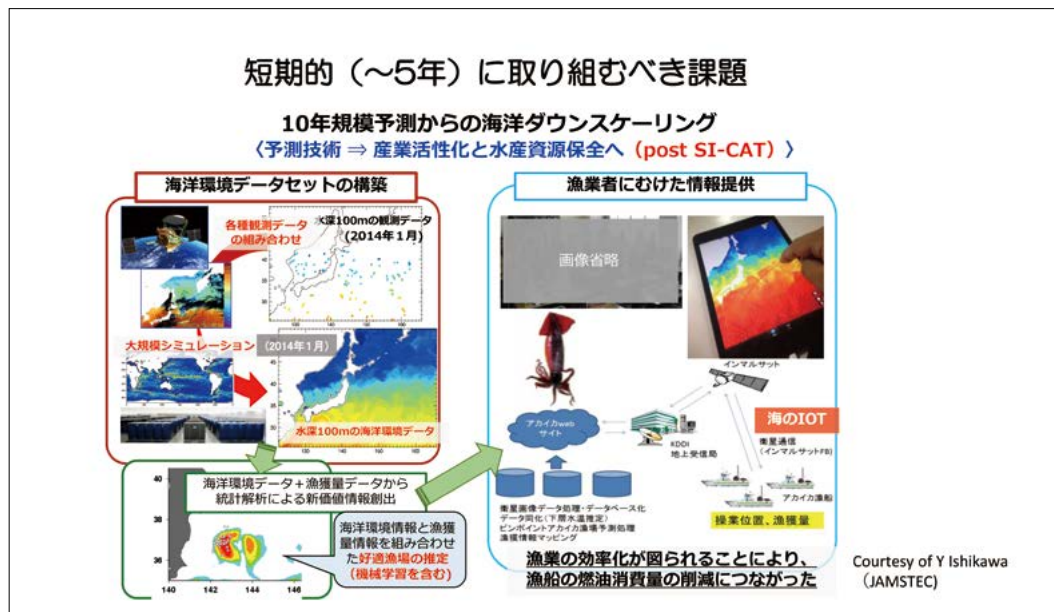


図2-1-5 短期的（～5年）に取り組むべき課題（1）

統合プロではテーマAとBが連携して、現状の気候モデルを使った近未来予測ではなく、地球システムモデルを使った予測を始めている（図2-1-6）。従来との違いは何かというと、自然の炭素循環なども予測できることになり、将来の大気中CO₂濃度が予測対象に入ってくる。しかし、これは言うだけならば簡単なのだが、そういうシステムを組み上げるのはなかなか難しい。我々の研究もまだプロトタイプ的なものだが、国際的にかなり注目されているエリアだ。海外でも幾つかの機関がプロトタイプの計算を始めており、それを比較した論文が出た。左が海、右が陸での大気、海洋間CO₂フラックスがどれだけ予測できるかというグラフである。縦軸が予測のスキル、横軸が予測期間だ。MIROCの結果も含まれているが、どのモデルでも海であれば6年ぐらいの予測スキルがある。一方、陸のスキルが低いのが課題である。また現在はCO₂濃度を与えているが、CO₂の排出量を与えて予測を行うのが望ましいシステムだ。

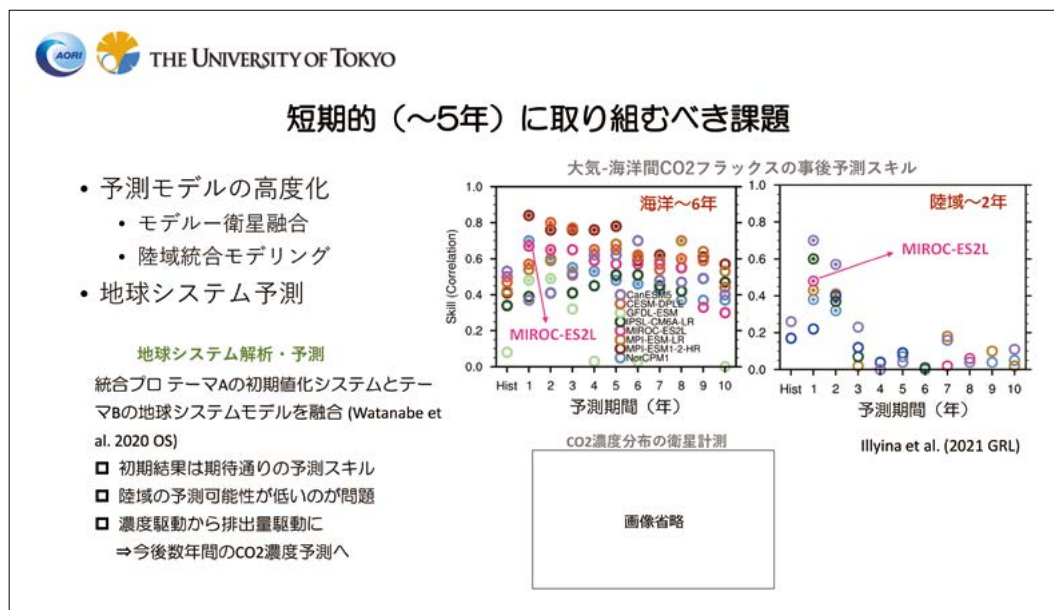


図2-1-6 短期的（～5年）に取り組むべき課題（2）

基盤技術として地球システムモデル（ESM）は応用範囲が非常に広い（図2-1-7）。統合プログラム、あるいはポスト統合プログラムでESMの開発を続けていくことは可能だが、そこではやはりIPCCへの貢献や、緩和への情報提供といったものが主要なターゲットになっていく。しかしそこでは取り組み切れない基盤的課題がまだ沢山ある。例えば古環境や生態系との相互作用である。人材育成も重要だ。大学にはモデルを持っていないが地球システムのプロセスを研究している多様な分野の研究者がいる。その力を借りながら、人主導でこういった基盤的な課題に取り組んでいくプロジェクトがあるとよいと考えている。海外では、今お話ししたような課題に対応する新しいプログラムが始まっていて、私のグループにも人材募集が来ている。国内でもしっかりとこういった課題を立てておかないと、良い人材がどんどん海外に取られてしまう懸念もある。

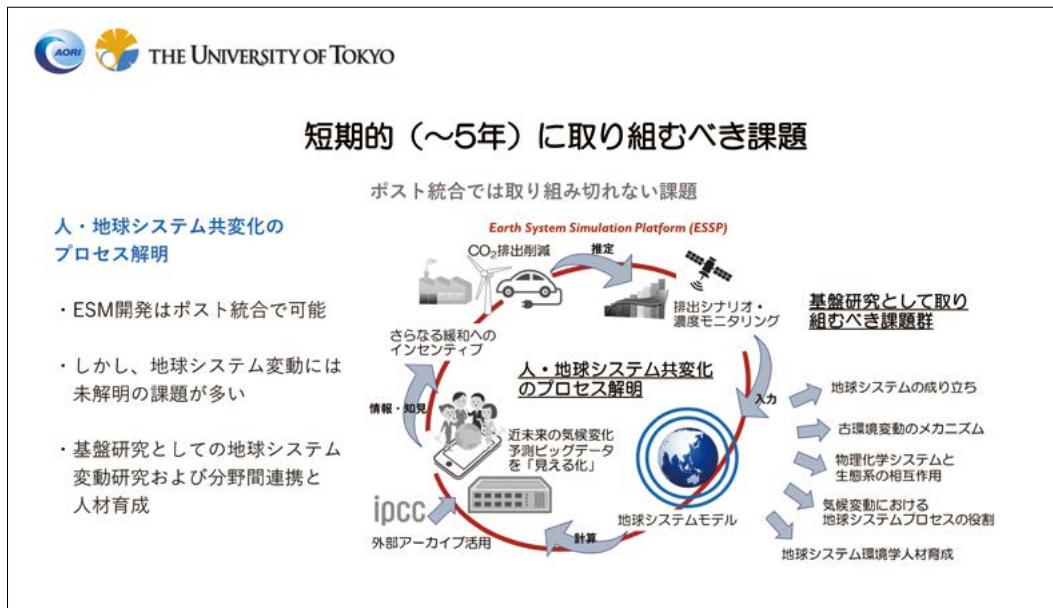


図2-1-7 短期的（～5年）に取り組むべき課題（3）

国際的なプログラムは、今はCMIP6が終わったところだが、次にWCRP（世界気候研究計画）がライトハウスアクティビティーを立てている（図2-1-8）。この新しい研究体制の中で「予測と理解」という課題がある。これがまさに、私が統合のテーマA代表として目指してきたものであり、かつ、これから強化していきたい研究課題にもしっかり対応している。

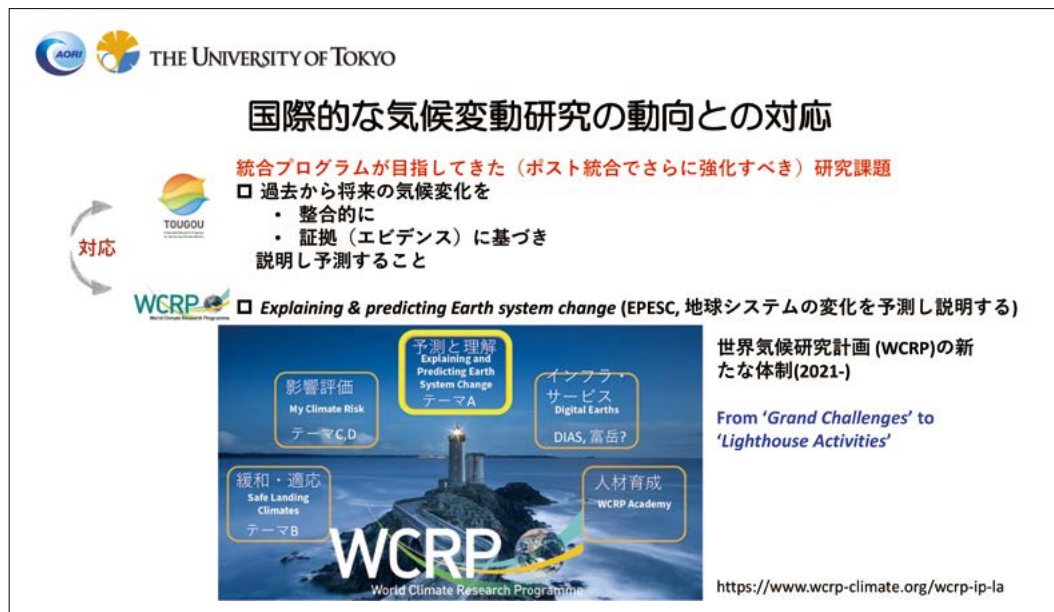


図 2-1-8 国際的な気候変動研究の動向との対応

(WCRP Lighthouse Activities URL、<https://www.wcrp-climate.org/lha-overview>、2022 年 2 月アクセス)

具体的には、過去から将来の気候の変化を、エビデンスに基づいて整合的に説明して予測することが重要だ（図 2-1-9）。予測するだけでなく、説明するというのが非常に大事だ。例えば、もう終わったのだが、温暖化の停滞という状況が 15 年ぐらい続いていた。予測できるかどうか以前に、そういった状況になること、なぜそうなっているのかを説明しなくてはならない。IPCC の第 6 次評価報告書（AR6）でも、近未来の地域規模の気候の変化に対しては自然の変動の影響が無視できないことが明記されている。このあたりが、今の近未来気候変動予測を活用しながら研究を深化しなければいけないエリアだろうと考えている。

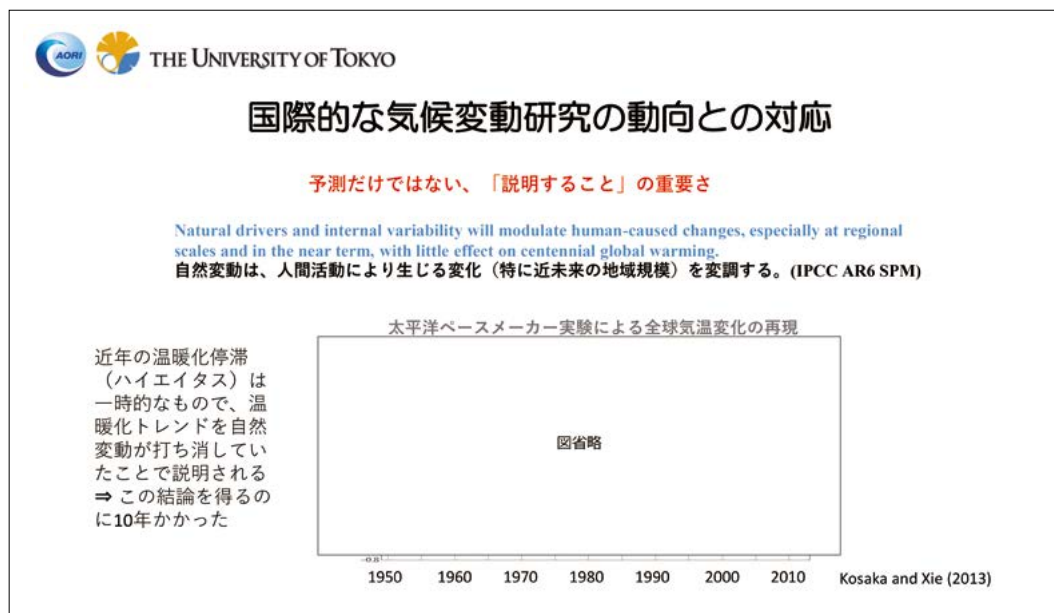


図 2-1-9 国際的な気候変動研究の動向との対応

先月、このライトハウスアクティビティーの国際ワークショップがあり、色々と議論された（図 2-1-10）。

一つはオペレーショナルアトリビューションを目指すということ。このアトリビューションとは要因分析で、まさに先ほどお話しした「説明できる」という説明可能性のことだ。ざっくりとした例えだが、気象庁が行っている異常気象分析検討会を気候変動スケールに持っていったようなものだと思っていただいてもよい。これと予測技術の高度化とがセットで発展しなければいけない。そのアウトカムとして、例えば新しいハザードリスク評価を目指すといった議論があった。



図 2-1-10 国際的な気候変動研究の動向との対応

より先を見据えて時間をかけて取り組むべき課題は、大切なのはやはり研究体制だ（図 2-1-11）。個人的に願望している体制という意味で、まず「松」と書いた。例えば、真鍋効果をフルに活用して、オールジャパンでバーチャルな拠点をつくる。今、各省庁が予算を獲得して研究をサポートして頂いているが、それはそのまま、このソフトな傘の下で連携しやすくする。この良い点は、シームレスな地球環境予測がいつでも実施できる体制が作れることだ。データを利用しやすい形でステークホルダーに提供できるという夢のような話である。

これが難しい場合、現状想定できる研究プログラムの範囲で可能な連携体制を強化していく「竹」という体制を書いた（図 2-1-12）。文科省のポスト統合プログラムの検討などでも、内外の連携はもちろんある。今までに既に行われている気候予測データセットに関する文科省と気象庁の連携や、気象庁のモデル開発懇談会のようなところで大学・研究機関が協力している。特に季節内～10年規模までシームレスにつなげていくには、R2O（Research to Operation）とO2R（Operation to Research）の流れをしっかりと構築するのが不可欠だ。現在、短いところは気象庁、長いところは大学・研究機関という住み分けがある。そのため協力体制が現場レベルでしかできていない。これが大きな課題だ。



先を見据えて取り組むべき課題：研究体制

松

「真鍋効果」を活用、パーチャルな組織「気候変動予測・対応研究拠点（仮）」を関係省庁相乗りで立ち上げ、All Japanの体制をそのソフトな傘の下で構築

- ポスト統合、DIAS（一部）
- 気候変動適応センター
- 気象庁（一部）
- JAXA（一部）
- ほか

シームレスな地球環境予測を随時実施、データを利用しやすい形で提供

図 2-1-11 先を見据えて取り組むべき課題（1）



先を見据えて取り組むべき課題：研究体制

竹

現状想定可能なプログラムの範囲で、可能な限り連携体制を構築

- 文科省のプログラム（ポスト統合）と内外の連携維持強化
- 気候予測データセット、報告書を継続して文科省プログラムと気象庁の連携を強化
- 気象庁「数値モデル開発懇談会」経由で、2030年までのモデル開発に大学・研究機関が協力
- Decadal outlookは気象庁に大学・研究機関が協力してoperationalに（R2O）、かつ次世代の近未来予測を大学・研究機関に気象庁が協力して研究開発（O2R）

図 2-1-12 先を見据えて取り組むべき課題（2）

まとめを図 2-1-13 に示す。今まで近未来予測という分野は、国際的にはCMIPの枠組みの中で、MIROCと気象研モデルを用いて実施されてきた。国際的にもWCRPの重点分野になっており、さらに研究を強化すべきだ。今後について、R2O、O2Rの強化が不可欠である。これを応用するとハザードリスク評価などができる。大学にいる立場からみて、この分野の人材育成がやはり喫緊の課題だ。



まとめと議論のポイント

- これまでの近未来予測（10年規模気候変動予測）はCMIP DCPDとして実施(MIROC, MRI)
- 国際的にもWCRP Lighthouse Activityの重点分野
- 今後はR2O, O2Rの強化が重要
- 時間平均物理場（水温、気温など）の予測可能性だけでなく、地球システム変数の予測やハザードリスク評価につながる研究が今後のチャレンジ
- 近未来予測のデータは特に大量なので、情報の縮約をどうするかは課題
- 人材育成は喫緊の問題

図2-1-13 まとめと議論のポイント

【質疑応答・コメント】

Q：10年規模の予測は大気海洋結合モデルで再現できるか。

A：空間スケールによる。外部強制も与えているので、全球規模の気温ならば、かなりの再現性と予測スキルはある。地域規模だと、まだまだ心もとない。具体的に言うと、エルニーニョを超える時間スケールで本当に使えるスキルはまだあまり得られていない。

Q：エルニーニョの再現はどのような状況か。例えば、仮に1960年の初期値から積分していったとして、1983年はすごいエルニーニョが起きたといった程度まで、できるか。

A：現業のエルニーニョ予測がまだ1年ぐらいで、その時間規模までは現状は無理だ。

Q：現業の予測はそのくらいだろうと思っている。では、10年予測で何ができるか。

A：10年予測と呼んでいるのは、最長で10年という意味になる。10年の計算を行っているが、予測のスキルが10年あるという意味では必ずしもなく、数年ぐらいまでだろうと考えている。ただし、地球システムモデルを使うことなどによって、気象予測としては予測できないのだが、地球システムの炭素循環のような今まであまり注目していない要素が見えてくるといった期待はある。

Q：それはそうだろう。しかしながら、例えば、エルニーニョの予測もできないのに、炭素循環が入ったからといって、2年先ができるようになるというようには考えにくいだろうか。

A：エルニーニョ予測のスキルは、毎月毎月の大気や海洋の状態が本当に予測できるかということとの見方をしている。それに対して10年規模予測では、例えば将来の3年平均値が予測できるかというような見方であり、予測と言ってもかなり違う面がある。そのため、平均する時間を長く取れば取るほどスキルは出てくる。

Q：その点は理解した。そうすると、地域の規模としては、どのぐらいまで現在できているか。

A：空間スケールは、現状だと、まだ海盆の規模ぐらいだ。太平洋高気圧の動向が予測できるかということ、まだ無理だろう。その点では将来に向けた課題がある。

2.2 「季節内～10年規模（S2D）予測」の国際研究の動向と期待

高谷祐平（気象庁 気象研究所 全球大気海洋部 主任研究官）

10年規模の予測は渡部先生が詳しく紹介されたので、私は季節内予測を中心に説明する。

ハイレベルな国際動向として、国連海洋科学の10年（2021年～2030年）や、仙台防災枠組、IPCCなどの取組がある。気候変動の予測は重要だが、激甚化する気象に備えるためには、もう少し短い時間スケールでの正確な温暖化予測が重要だ。適応策のためにも、季節予測や季節内の予測が期待されている。

そういった顕著現象の予測に資するため、国際的には、世界気象研究計画（WWRP）と世界気候研究計画（WCRP）との合同で、季節内から季節予測プロジェクト「S2S」（<http://s2sprediction.net/>）が実施されている。このプロジェクトでは、各国の気象機関から季節内予測データを集めて、それを広く研究者にリアルタイムで提供している。これまでこういったデータは外部に提供されておらず、研究者が使いたくても使えなかった。過去予報、ハインドキャストと呼ばれる過去の予測データも提供している。様々な要因分析に使ったり、予測可能性の研究に使ったりできる。この国際協力プロジェクトには現在12のモデルが参加している（Vitart et al., 2017, Bull. Amer. Meteorol. Soc.）。多くのモデルは大気海洋結合モデルだが、気象庁の参加しているモデルは現業と同じ大気モデルを使っており、今後の技術革新が期待される。このプロジェクトは2013年から始まり、2023年まで行う計画だ。現在はフェーズ2と呼ばれる後半の5か年にあたる。

こういった国際的なプロジェクトを通して各国でも独自の研究がどんどん進んでいる。例えばアメリカでは、「SubX」という、S2Sと同じマルチモデルの季節内予測研究プロジェクトが進んでいる（図2-2-1）。ただしこちらは時限的な研究プロジェクトである。米国海洋大気庁（NOAA）の研究助成で推進されており、SubXの後継となる研究助成も2022年から予定されている。現在アメリカではS2Sに関連する研究プロジェクトは15ぐらい個々に動いている状況だ。なお日本の気象庁には、NOAAと同様の、気象予測をターゲットとしたような研究助成制度はない。気象予測、気候予測の研究助成については日米で仕組みの違いがある。

米国における季節内予測の研究推進

10

- 米国ではS2Sと同様に、季節内予測の **SubX プロジェクト** (<http://cola.gmu.edu/subx/>) が実施されている。（Pegion et al. 2019, Bull. Amer. Meteorol. Soc.）
- SubX は 米国海洋大気庁（NOAA）の気候研究プラットフォーム（Climate Testbed）の活動の一環。（NOAAから特定分野の研究費助成がある。）
NOAAのModeling, Analysis, Predictions and Projections (MAPP) Programにおいて、2016-2019にS2Sのプロジェクト（S2S Prediction Task Force）が実施された。
<https://cpo.noaa.gov/Meet-the-Divisions/Earth-System-Science-and-Modeling/MAPP/MAPP-Task-Forces/S2S-Prediction-Task-Force>
（参考）NOAA研究助成金（産学官連携の推進）
<https://cpo.noaa.gov/Funding-Opportunities>

2022年はNOAA Weather Program Officeより、S2S研究を含む研究公募が行われている。
<https://wpo.noaa.gov/NOFO>

MAPPプログラムによる支援先のマップ（省略）

<https://cpo.noaa.gov/Meet-the-Divisions/Earth-System-Science-and-Modeling/MAPP/FY20-Footprint>

日本の気象庁には直接の研究費の助成制度はない。

図2-2-1 米国における季節内予測の研究推進

先ほど渡部先生からお話があった近未来予測については、WMO（世界気象機関）の中で現業の予測の試みが進んでいる。体制については、先ほどお話があったように研究機関が参加機関に多く含まれており、現業

的に持続していくためには、こういった活動をより持続的なものにしなければいけないという課題がある。

世界の研究の方向性については、WCRPのライトハウスアクティビティーの中にS2SやS2Dの予測に関係する項目が入っている（図2-2-2）。WCRPは世界の気候研究の大きな研究計画だ。その中でも予測の研究があって、比較的大きな比重を占めている。それぞれのプロセスの研究も大事だが、それを予測する活動が大きなコアの一つとして位置づけられている。

一方、国内では、CMIPなどで温暖化予測は行っているが、初期値化した季節内の予測や季節予測は現実的な活動、気象庁が行う活動のような位置づけにある。そのため研究と現業機関の連携がもっと進むと良いと思っている。

そのためのツールの一つとしては地球システムモデルが挙げられる。地球システムモデルでは海洋や陸面、化学、エアロゾルといった複雑なモデルを使って色々な予測をしていく活動が必要である。そういった研究を進めるため、WCRPでは、Earth System Modeling and Observation（ESMO）と呼ばれるコアプロジェクトが新しく提案されている。その中で、これまでWCRPの中で様々な時間スケールのモデルを対象としていた作業部会と、WGCMやWGNE、WGSIPといった母体が連携しながら、より幅広い時間スケールでモデル開発を連携して行っていくという流れになっている。

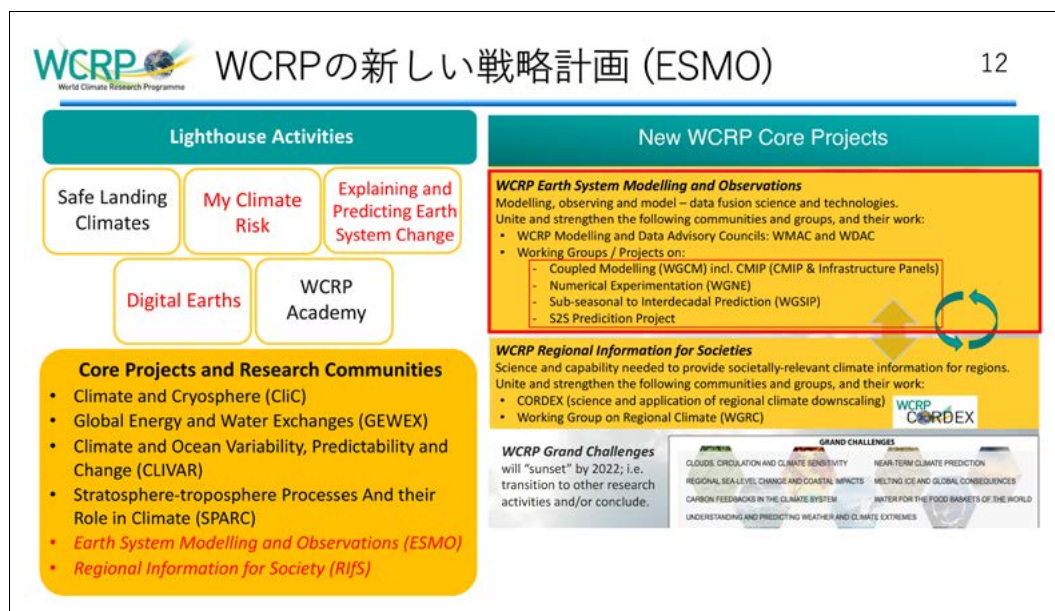


図2-2-2 世界の研究の方向性

ここから、季節内～10年予測のシームレス予測の方向性を示す（図2-2-3）。先ほどモデル開発のことについて述べたが、初期化した予測を行うには現時点での地球環境、地球の状態を知らなければいけないため観測とデータ同化の研究も非常に重要になる。10年規模は別だが、温暖化研究は基本的に初期化をする必要がないことから、この分野は短期予報で盛んに研究されてきた。ただし、短期予報で使うモデルは多くが大気モデルで、地球システムのコンポーネントを用いたようなデータ同化の研究はまだ少ない。そのため、この部分を強化していく必要があると考えている。

また、予測理解のプロセス、予測可能性の理解という意味で言えば、従来の気候研究は、いろいろなメカニズムを明らかにしていくことが主眼にあった。予測を行うときに、そのプロセスがどれぐらい実際の変動に寄与しているか、どれぐらい予測ができるのか、といったところが重要なポイントになる。予測可能性という一つの研究分野ができているが、これをもっと季節内～10年規模のスケールでも行っていかなければいけないと考えている。

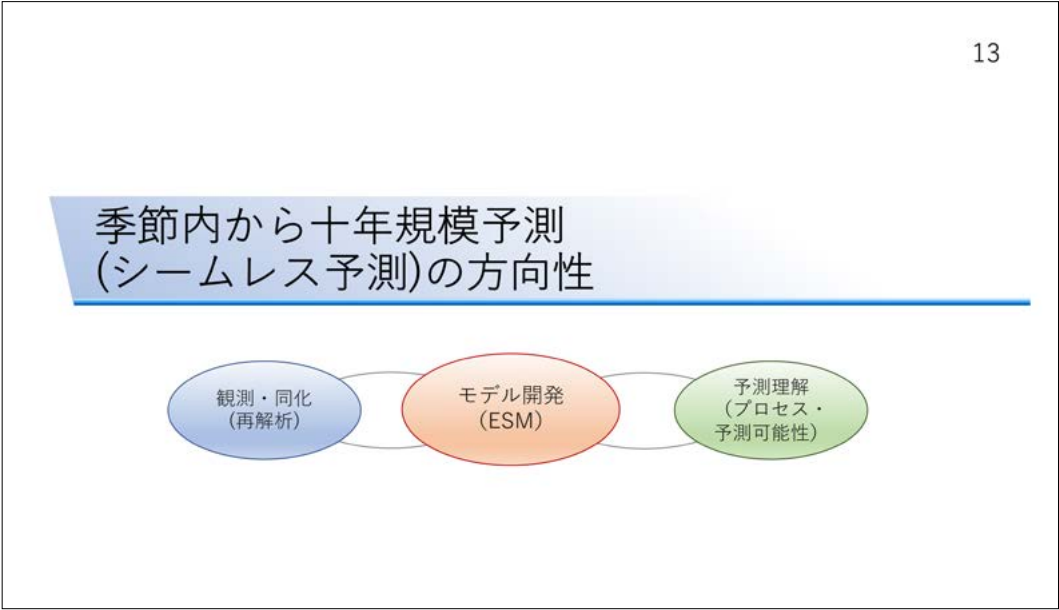


図2-2-3 季節内から十年規模予測（シームレス予測）の方向性

S2S予測で期待される応用分野についてお話しする（図2-2-4）。気象に近い分野では異常天候の早期予測がある。エネルギー分野では再エネや需要予測がある。その他にも健康分野や水資源の管理、農業といった分野などでの応用が期待される。海外では様々なプロジェクトが進んでおり、従来の単なる気象・気候予測ではなく、どうやって利用していくかという研究が進められている。国内でもそういった研究を進めるために分野横断的な取組が必要である。最近、S2Sのプロジェクトの中でも、リアルタイムにこういった特定分野の実用性を示すプロジェクトや、応用分野をターゲットにしたサブプロジェクトも立ち上がっている。

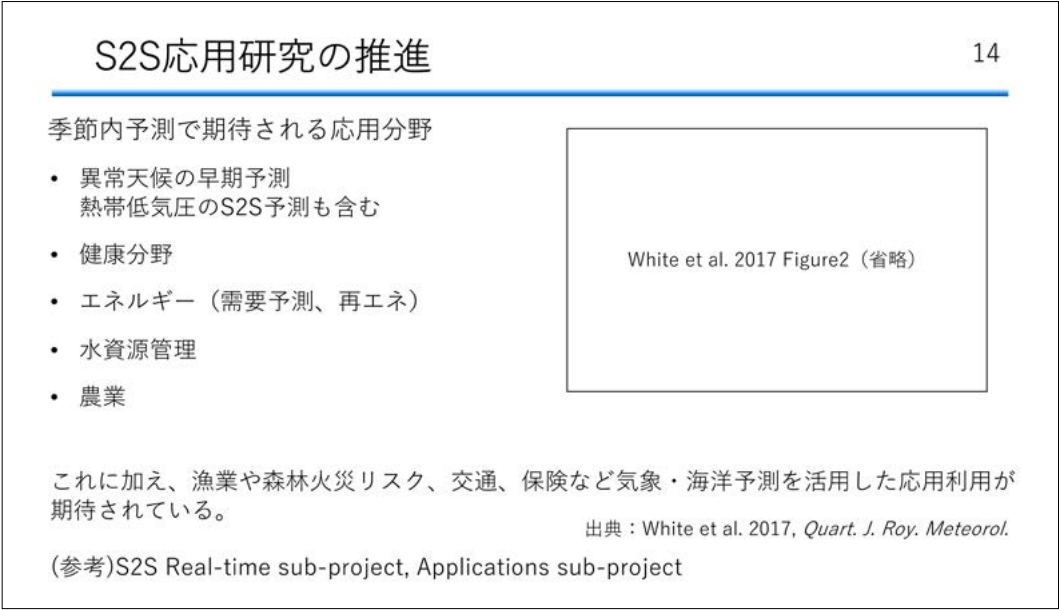


図2-2-4 S2S予測で期待される応用分野

研究を推進するにあたり、どう戦略的にアプローチしていくか（図2-2-5）。まず、分野横断的にやらなければいけない大きなプロジェクトには集中的な資源の投資が必要と考える。分野の垣根を越えた連携はもちろん必要である。モデルの分野においては、これまでは短期予報のモデル、温暖化予測のモデルと分けられる傾向があった。それを横断的な時間スケールで、それぞれのモデルを相互乗り入れしていく形で研究を進めるのが良いと考えている。

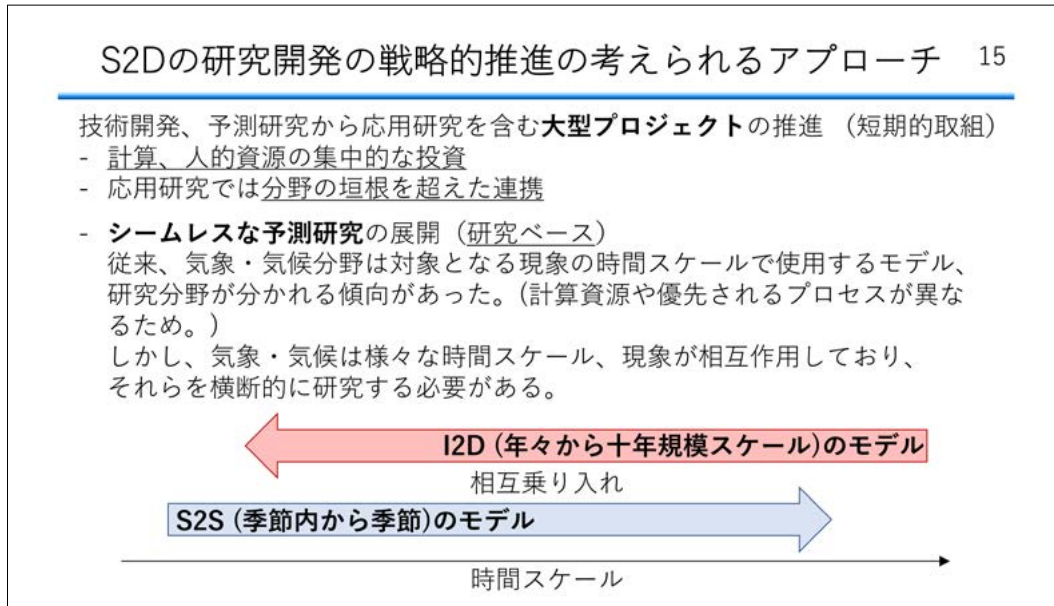


図2-2-5 戦略的推進のアプローチ

気象庁でもこういった取組は続けている。図2-2-6は気象庁の2030年に向けた数値予報の重点開発計画としてまとめられたものである。その中でも、階層的な地球システムモデルによる開発、それに基づく季節内予測や季節予測といった研究開発が重要であると書かれている。

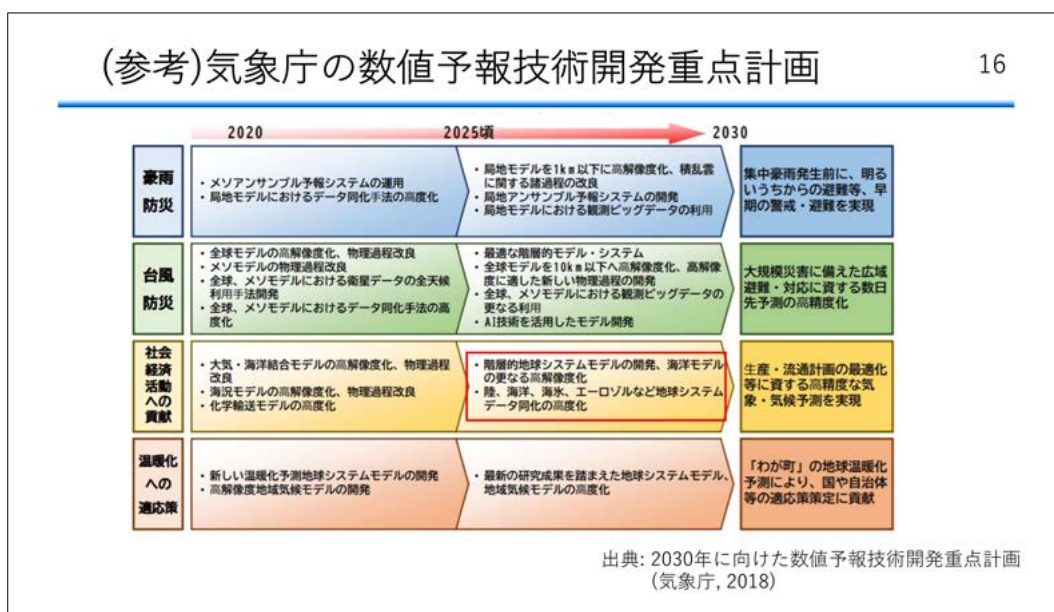


図2-2-6 気象庁の数値予報技術開発重点計画

地球システムモデルの中には様々なコンポーネントがある（図2-2-7）。海や大気だけでなく、陸面や海氷、エアロゾル、オゾン、波浪などの分野がある。それぞれの分野でモデルの精緻化が必要である。モデルが非常に複雑化してくるので、現業モデルとしてはそれぞれのコンポーネントの有効性を確かめながら一つずつ取り込んでいく研究も必要となる。

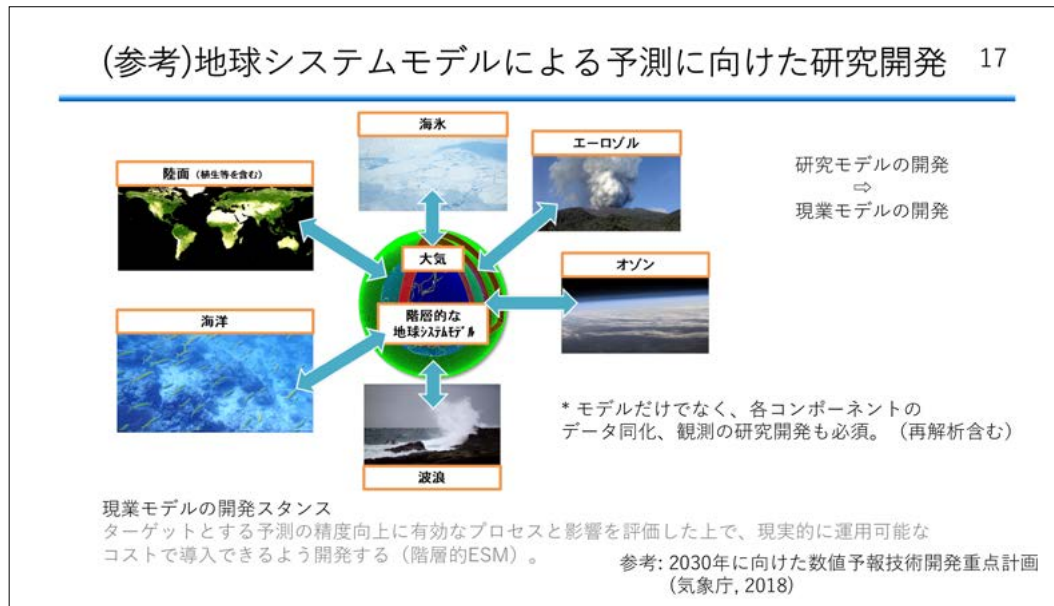


図2-2-7 地球システムモデルによる予測に向けた研究開発

中長期的には、地球システムモデルの開発がやはり重要である（図2-2-8）。モデルにはまだ不十分なところが沢山ある。特にモデルバイアス・ドリフトの問題が積年の課題である。そういった問題に対する取組も世界的に行われている。地球システムの結合、同化の分野も重要である。地球システムコンポーネントの予測影響の理解について、波浪やエアロゾル、オゾンなどが、どのように予測可能性を生むのか、まだ理解が進んでいない部分であると考えている。

モデル開発者の人材育成は極めて重要だ。気候モデルの発展なしに気候研究のプロセスの発展の未来はない。一方、モデルが複雑化する中で、研究者や開発者のリソースは限られている。特に気象・気候モデルは単なるプログラムではなく物理過程に基づくものであり、プログラマーだからモデルを開発できるということではない。やはり専門的な知識を持つ若い人材育成が重要だ。

今年、眞鍋先生がノーベル物理学賞を受賞されたが、その大気海洋結合モデルが開発されてから半世紀ほど経っている。現在、まだその技術が日々の天気予報の分野までは強く導入されていないが、その大気海洋結合モデルが天気予報、季節内予測の分野において実際に社会に役立つ段階はもうすぐのところまで来ていると思っている。大気モデルから地球システムモデルへのパラダイムシフトが起こりつつあると期待している。

S2D予測を取り巻く課題：挑戦的な研究/技術開発

18

研究課題、技術課題（中長期課題）

- **地球システムモデルの開発**（S2Sを含むシームレス予測）（Merryfield et al. 2020, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*）
モデルバイアス・ドリフトの問題（6th Systematic Error WS, 2022 Nov. @ECMWF）
- **地球システムの観測と同化**
大気-海洋(+ α)結合同化（Penny et al. 2017, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*）
地球システムの観測（Weatherhead et al. 2017, *Earth's Future*）
- **地球システムコンポーネントの予測影響理解**
波浪、エアロゾル、オゾン等

モデル開発者の人材育成

- **気候モデル開発は気候研究の重要な柱**
「気候モデルの発展なしに気候研究(温暖化予測、季節予測、プロセス研究)の未来はない。」
モデルは複雑化。研究者、開発者のリソースは限られる。
- **モデル開発者の人材育成が課題**
「気候モデル、気候モデルの開発者」≠「プログラマー」

眞鍋淑郎先生が大気海洋結合モデルを初めて開発されて約半世紀。その技術は天気予報技術の
パラダイムシフト(大気モデル → 地球システムモデル)を起こしつつある。

図 2-2-8

まとめ

2.3 次世代地球システムモデルによるシームレス気候予測に向けて

三浦裕亮（東京大学 大学院理学系研究科 准教授）

地球シミュレータができてもう20年ほどになるが、私はその恩恵をダイレクトにうけた世代と言える。松野太郎先生が、世界に先駆けて、とにかく雲を計算しろという話をされて、それを富田浩文氏の努力でプログラムとして実現された雲解像モデルがNICAMである。これを用いて現実的な計算をし、衛星画像で見る実際の雲の画像とも割と合うシミュレーションが可能となったのが2007年頃である（Miura et al., 2007, Science）。このようなNICAMで10年以上前に行ったような計算を欧州や米国で最近できるようになり（Bauer et al., 2021, Nature Comput. Sci., Voosen, 2020）、もっと次のことをやろうと言っている状況が2020年という認識。我々の分野では、国の科学技術政策のおかげで10年以上のアドバンテージをもらっていたわけだが、2020年段階ではもう追いつかれたというのが正直なところである。

渡部先生からも紹介のあったWCRP（世界気候研究計画）のLighthouse Activitiesのうち、「Explaining and Predicting Earth System Change」に関しては、国内ではMIROCを始めとする気候モデルがあり統合プログラムを通じて支援されている。「Digital Earths」は、NICAMのようなモデルが出てきたことによりこうした項目ができた。これに関連するものとして国内では科研費学術変革B「DNA（Deep Numerical Analysis）気候学への挑戦」があり、そちらでは1km解像度の気候モデル開発を行っている（図2-3-1）。NICAMによる気候をやるべきだと小玉氏が言い、その他の30名くらいの人たちもやりましようと言ってくれたことをきっかけに申請し採択された。DNA気候学の名称は升本先生が提案された。



図2-3-1 WCRP Lighthouse Activitiesと全球雲解像モデルNICAMの関係性

（WCRP Lighthouse Activities URL、<https://www.wcrp-climate.org/lha-overview>、2022年2月アクセス）

1km解像度の気候モデルという夢の道具ができるのであれば、天気予報から気候予測までまとめてできるだろうという想像が可能になる。気候予測と天気予報が基本とする物理コンポーネント、少なくともミクロな物理コンポーネントは共通であろうというのが根拠である。ただ様々な拘束のある非線形系であり、解が好む場所というのはそれぞれに異なってくるため、実際はそれほど簡単ではないだろう。しかし、長い時間軸の中でNICAMのようなタイプのモデルによって、マッデン・ジュリアン振動（MJO）のような2週間から1か月

ぐらいの現象が、今までの気候モデルよりずっとよくなり、ある程度の成功を収めてきたのも事実である。中緯度の天候への影響なども今でも盛んに研究されている。MJOの研究については日本の若手研究者が良い結果を出している（図2-3-2）。

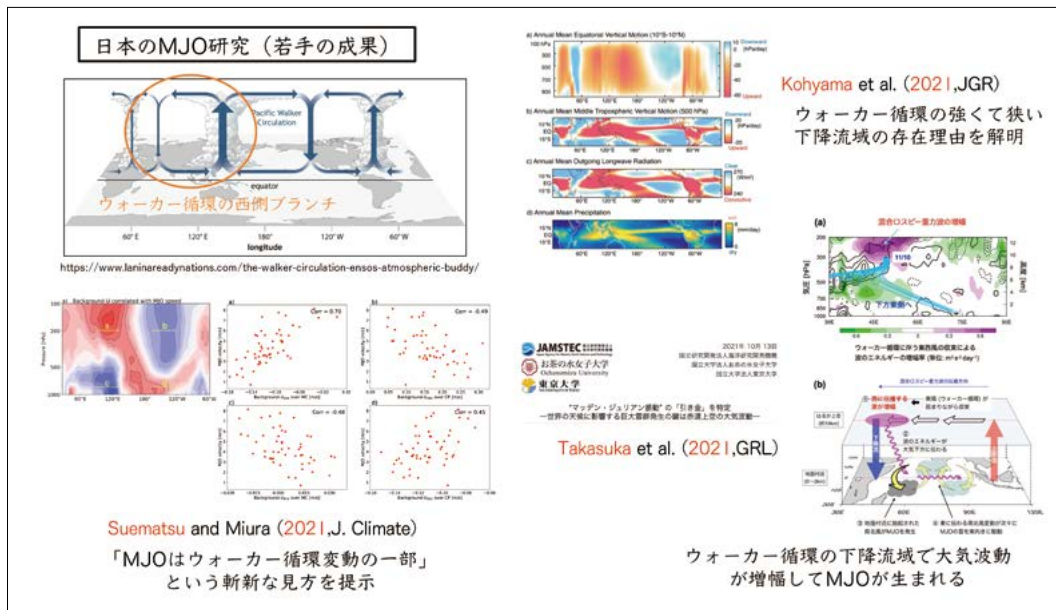


図2-3-2 日本のMJO研究における最近の成果

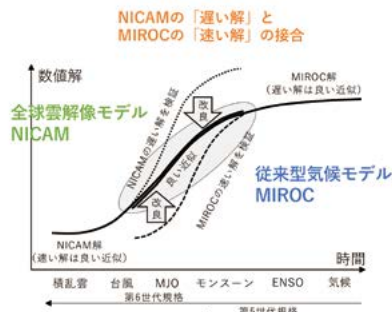
図2-3-3に示すとおり、NICAMのような全球雲解像モデルで気候予測はできるのかというのが今日の本題である。同じ物理なのだから可能だろうと思われるかもしれないが、そう簡単にはいかんというのが現場の感覚である。MJOの予測など、30日ほどまでは雲微物理や地表面過程のチューニングによりできそうと思われる。90日ほどまで割とよく合う場合があることも末松環（東京大学大気海洋研究所）らにより報告されている。またBSISO（北半球夏季季節内振動）の予測についても、既存モデルよりよくなりそうという結果も出てきている。しかし、このような季節内振動の時定数を超えて気候までいけるかということ、それほど簡単ではないだろう。MIROCとNICAMのそれぞれに苦手な部分というのがちょうど台風やモンスーンの辺りで重なるので、お互いに得意なところを参照することで季節スケールの問題をなんとか解決できないかというのが、いま学術変革Bで行っている研究の骨子である。

天気予報のように、今ある水蒸気をデータ同化で一生懸命教えて、解像度を細かくしていき、雲微物理を正しくすることで正しく雨を降らせられるようになる。こちらのほうは当面、よくなっていくと思われる。問題は、雨が降った後に大気中に水蒸気がどのくらい残るかの計算であり、大気放射を介して循環が正しく駆動できるかどうかというのが、温暖化や気候の研究では重要になるが、ここが難しい（図2-3-4）。雲解像モデルは水蒸気を上手に貯められないのである。これは長い時間スケールでは表現すべき傾きが変わるからである。

「全球雲解像モデルで気候予測はできるのか？」

NICAMの経験

- MJOの予測はできる（雲微物理・地表面過程をチューニングすれば）
- BSISOの予測はできそう（雲微物理・地表面過程をチューニングすれば）
- ハドレー循環？ ウォーカー循環？ アジアモンスーン？ 梅雨前線？ 中高緯度？



physics-dynamics coupling

- 力学過程と物理過程のミスマッチ
 - 解像度不足による“遅い”流れ（格子サイズの鉛直/水平比）
 - 実験室パラメータの雲微物理

「DNA（Deep Numerical Analysis）気候学への挑戦」

NICAMとMIROCの協働により
季節スケールの克服を目指す

図2-3-3 全球雲解像モデルで気候予測はできるのか？

気候研究へ向けて克服すべき課題

“全球雲解像モデル”はメソモデルで検証された物理モデルの
全球化にすぎない（ハドレー循環一周回までは悪くない）



Giga-LES (100-mメッシュシミュレーション)
(Garrett et al. 2018)

- 水蒸気→雨は（今の所）どんどん正しくなる
（雲解像モデルは水蒸気を上手に“使える”）
- 雨が降った後に大気中に残る水蒸気？
（雲解像モデルは水蒸気を上手に“貯められない”）

長い時間スケールでは表現すべき“傾き”が変わる
（非線形系の特徴）

雲を集めて気候を計算できるか？



空気分子を集めて熱力学を計算できるか？

別のアプローチが必要なのは？

図2-3-4 気候研究へ向けて克服すべき課題

近い将来に向けては、まずは今のアプローチで行くのが一つである（図2-3-5）。NICAMに海をくっつけたようなモデルを動かして、なんとか1年計算できたというのが今年である。ここから、大気が3.5kmメッシュで、海洋は渦を解像できるような解像度で、NICAMの高解像度のところで10年積分するというのが近い将来の目標として達成できそうと言える。計算機的にも「富岳」世代のコンピュータで達成可能という感覚である。

しかしこれだけでは水蒸気のコントロールに対して解決になっていないため、何か別のアプローチの探索も必要である。現在取り組んでいるのは、MIROCタイプのモデルのグリッドの中の物理過程を雲解像モデルに置き換えるスーパーパラメタリゼーションというアプローチである（図2-3-6）。技術的に高度であるが、学生が1年かけて実装し、例えばウォーカー循環について既存のMIROCよりも良くなるという結果を見ている。

NICAMタイプのモデルがヨーロッパやアメリカでどうなっているかという、天気予報よりも研究側の機関に対して手厚く資金が提供されているように思われる。米国エネルギー省のE3SMプロジェクトは別格だが、米国NSFのEarthWorksやMPASのプロジェクト、欧州のNextGEMSやESiWACE2などは数億～10億円ほどの規模である。

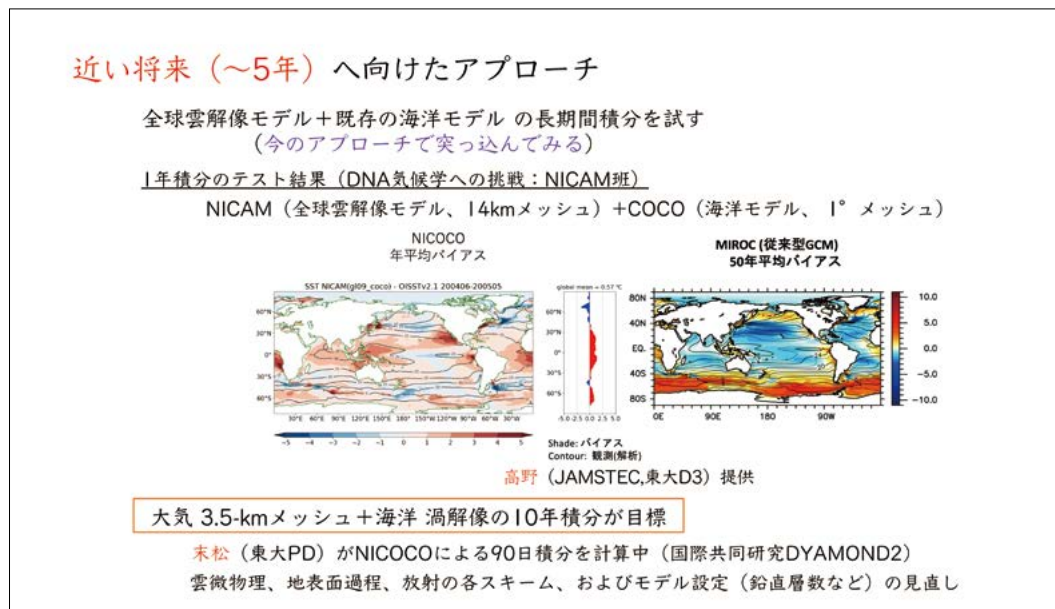


図2-3-5 近い将来（～5年）へ向けたアプローチ（1）

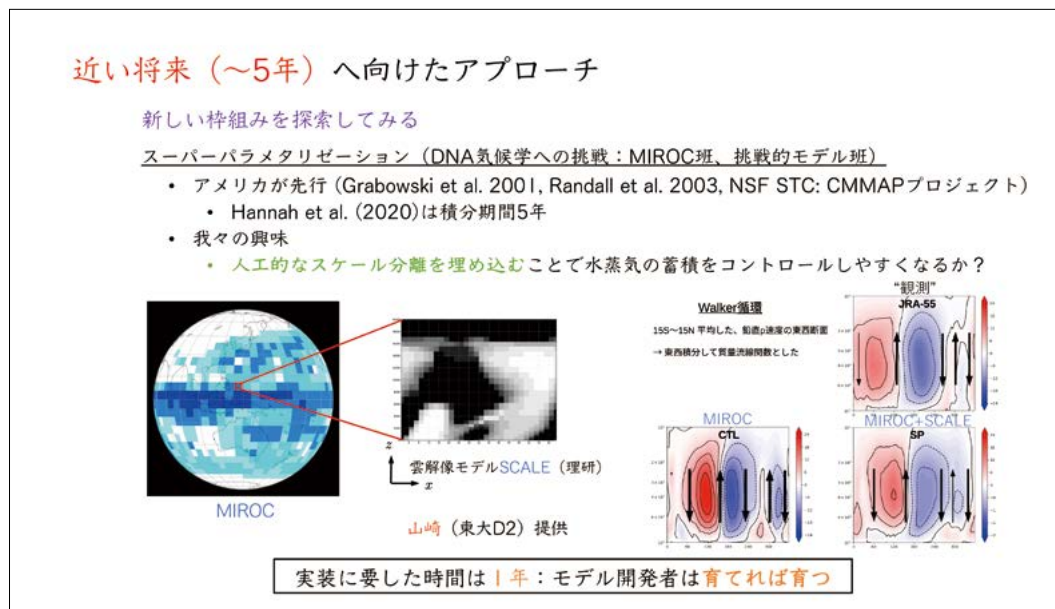


図2-3-6 近い将来（～5年）へ向けたアプローチ（2）

将来に向けては人材育成がとくに重要である (図2-3-7)。我々の業界で最も深刻なのは人材育成である。現在、基幹技術を保持しているのは40～50代であり、速やかに技術や権限を委譲し、次世代を担う人材の育成を始めなければいけない。最近では准教授レベルになれるのは40歳頃である。本来なら落ち着いて研究できるはずの人が研究できていないという現状を深刻に受け止めている。

最後に、米国ではしばらく前から教育にも力を入れてきている。気候分野を活性化するためには教育の部分も重要になる。

- 自由対流圏の水蒸気量の物理
 - 目の前の気象現象より残差（高次の効果）が本質的に重要
- 物理プロセスの精緻な表現
 - 大気－海洋－陸面系のエネルギー・運動量交換
 - 乱流－雲－放射相互作用
- 問題の質的变化への対応（初期値問題から境界値問題へ）
 - 境界条件：山岳表現の精緻化（NICAMの大きな弱点）、陸面モデルの精緻化
 - 背景場：放射スキームの高度化（例えば、3次元放射スキーム）
 - 残差水蒸気：雲微物理スキームの高度化（例えば、超水滴法）、マルチスケールモデル
- 計算コストの軽減、新しい計算機設計への対応
 - 高次の残差を評価するため長期積分が必須
 - 大気－海洋モデルの格子構造共通化（例えば、正20面体格子：独、米）
 - GPUの有効活用
- 最も重要なのは次世代を担う人材の育成（速やかな技術・権限の委譲）
 - 現在、基幹技術を保持しているのは40代～50代
 - そろそろ本気で間に合わない？（例えば、放射スキーム）

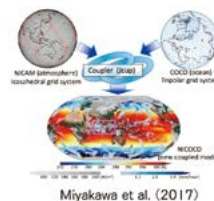


図2-3-7 将来（～15年）へ向けたアプローチ

二、林業生產上之森林結構動態測測與預測

【林分調查—森林現況調查】 林分調查之目的在於瞭解林分之現況，以作為林業經營之參考。 林分調查之方法可分為： 1. 目視調查法 2. 儀器測量法	【林分調查—林分生長調查】 林分生長調查之目的在於瞭解林分之生長狀況，以作為林業經營之參考。 林分生長調查之方法可分為： 1. 目視調查法 2. 儀器測量法	【林分調查—森林資源調查】 森林資源調查之目的在於瞭解森林之資源狀況，以作為林業經營之參考。 森林資源調查之方法可分為： 1. 目視調查法 2. 儀器測量法	【林分調查—森林生態調查】 森林生態調查之目的在於瞭解森林之生態狀況，以作為林業經營之參考。 森林生態調查之方法可分為： 1. 目視調查法 2. 儀器測量法
--	--	--	--

森林結構動態測測與預測之重要性

森林結構動態測測與預測之重要性在於：能瞭解森林之現況、生長、資源及生態狀況，以作為林業經營之參考。

森林結構動態測測與預測之方法可分為：
 1. 目視調查法
 2. 儀器測量法

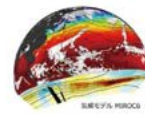
森林結構動態測測與預測之重要性在於：能瞭解森林之現況、生長、資源及生態狀況，以作為林業經營之參考。

森林結構動態測測與預測之方法可分為：
 1. 目視調查法
 2. 儀器測量法



<https://www.todainavi.jp/feature/14262/>

東京大学気候システム研究センター



http://www.jamstec.go.jp/toukou/event/houkoku/2019/slides/slide_A_m.pdf

(文部科学省資料)

- ・ デジタルアースの基盤技術研究
 - ・ サイバー空間を活用したリスクコミュニケーションと合意形成
- ・ 理工学の専門研究からの脱皮
 - ・ 理学系、農学系、大気海洋研、生産研、先端研、教育学
- ・ テンユアトラック制度を活用した**安定雇用の前借り**（CCSRを参考にするなら10人分）

文部科学省 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

デジタルアース(俯瞰型情報基盤)による
「知の統合」の研究拠点の形成 H24-H28 (新しいアイディアでは無い・・・)

図 2-3-8 分野横断的な研究機関

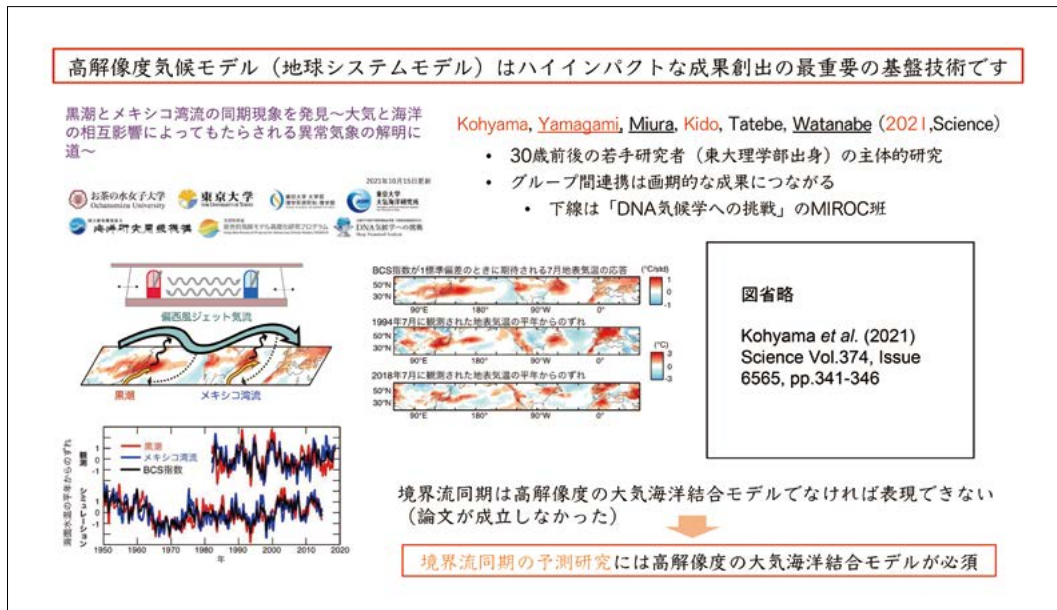


図2-3-9 ハイインパクトな成果の創出に貢献する高解像度気候モデル

（プレスリリースURL、<https://www.ocha.ac.jp/news/20211015.html>、2022年2月アクセス）

2.4 短寿命気候強制因子（SLCFs）による気候変動の予測

竹村俊彦（九州大学 応用力学研究所 主幹教授）

今の気候変動を起こしている主な物質はもちろん二酸化炭素だが、最近は短寿命気候強制因子（SLCFs：Short-Lived Climate Forcers）もかなりフォーカスされてきている。IPCCの報告書等でも一つの章として成立していることから分かれるとおり、かなり注目度が高い。主な物質としてはエアロゾル、そしてメタンやオゾンなど二酸化炭素以外の温室効果ガスである。SLCFsとその前駆気体まで含めて全体を見渡すと、非常に複雑な関係にあり、かつ、気候変動に与える影響も温める効果から冷やす効果まで様々である。また、健康被害を直接的に及ぼすものや農作物の収量に影響を及ぼすものなど、気候変動の影響を評価する上でかなり複雑で多岐にわたっている。

さらに、この短寿命物質の多くは大気汚染物質でもあり、年間700万人が早死にしているという試算もある。この数は、今回のコロナで亡くなった人と同程度か少し多いぐらいの規模である。そのような現状があり、国際的にはSLCFs対策はCo-benefitになり得ると認識されている。

サイエンスとしても、このエアロゾルによる気候変動のメカニズムについてはまだよく分かっていないところがある。太陽の光を散乱したり吸収したりすることによるエネルギー収支の変化、そして雲の核となることによる雲の性質の変化に伴う放射収支の変化が挙げられる（図2-4-1）。特に氷雲の核になるところは実は物理的にも現状の気候モデルではほとんど再現できていない。再現できていないというよりも、そもそも表現ができていない状態で、非常に簡単なパラメタリゼーションで何とか疑似的に作っている状態である。

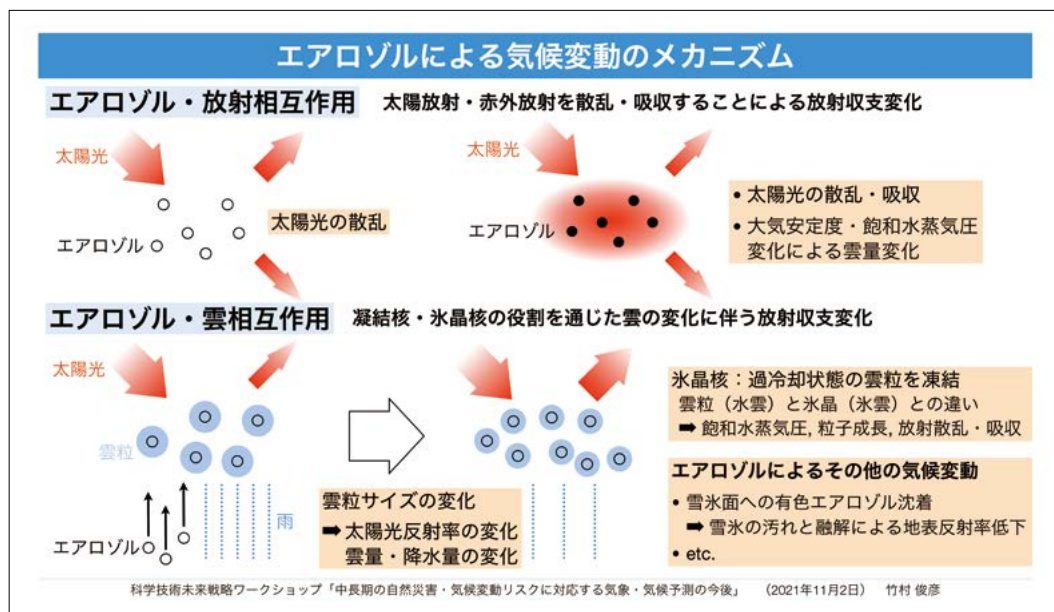


図2-4-1 エアロゾルによる気候変動のメカニズム

私が大学院時代から開発しているSPRINTARSというモデルはMIROCやMIROC-ESM（地球システムモデル）といったものに組み込まれ、現在、標準的に使われている。この中では、エアロゾルに関わる物質がどこから発生して、大気中でどのように輸送されて、それから化学反応を起こしてといったプロセスや、湿性沈着、降水、重力落下といったものの計算を行う（図2-4-2）。また気候モデルなので、エアロゾルによる気候変動の評価も、この数値モデルの中で表現できるようになっている。このMIROC-SPRINTARSを用いたPM_{2.5}の予測を一般向けに公開しており、報道機関や自治体の環境業務などで使われている（図2-4-3）。

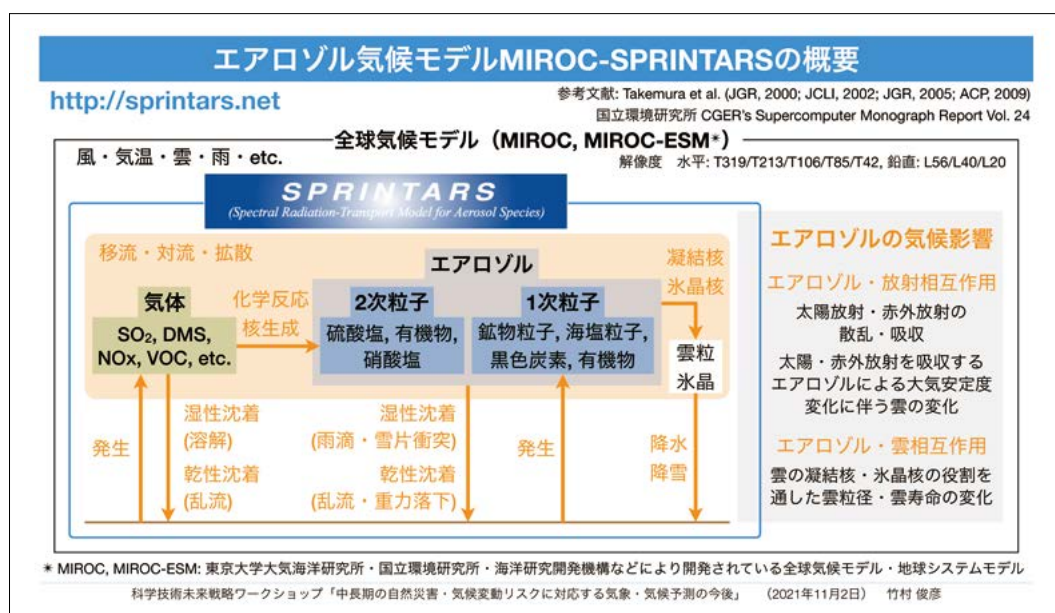


図2-4-2 エアロゾル気候モデルMIROC-SPRINTARSの概要

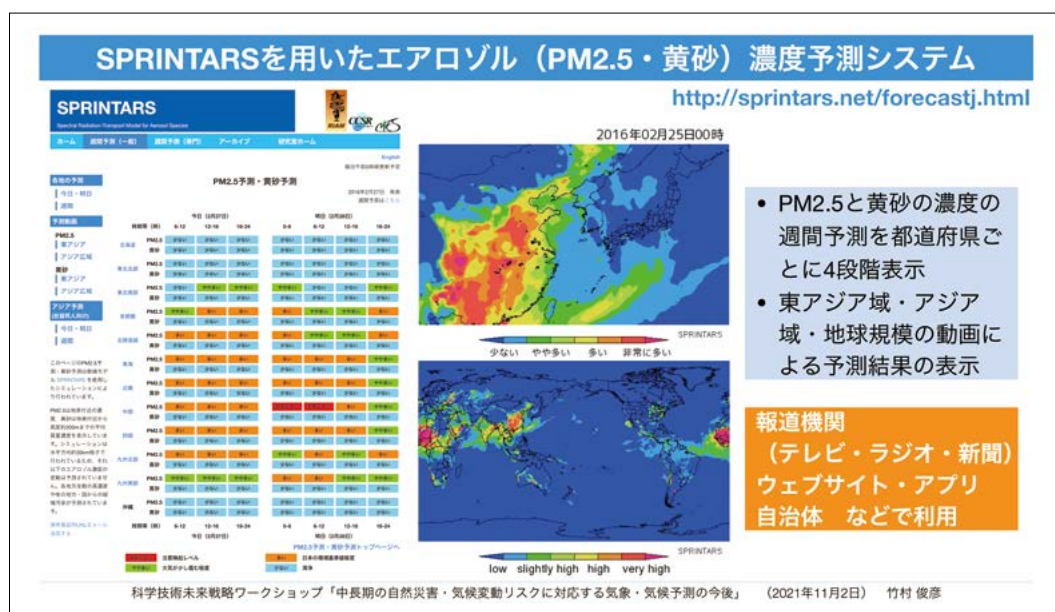


図 2-4-3 SPRINTARS を用いたエアロゾル濃度予測システム

これまでの地球平均の温度変化がどのコンポーネントによってもたらされているかを示した図がIPCC第6次評価報告書のSPM (Summary for policymakers) に掲載されている(図2-4-4)。図に見られるとおり二酸化炭素が一番大きい、その他はほとんど、メタンからブラックカーボンまで、いわゆる短寿命物質である。メタンやエアロゾル、二酸化硫黄(エアロゾルの前駆物質)等が定量的にかなり大きいことが示されている。ただし、エラーバーはどれも大きい点に注意したい。放射強制力と呼ばれるエネルギー収支の変化を見ると、これも、二酸化炭素のプラスの放射収支の変化と比べても、短寿命物質の効果は量的に大きいということが分かる。従って、コンポーネントとして短寿命物質を入れ込まないと正しい気候変動予測はできないと言える。むしろ、短寿命物質なしには正しい予測はもう絶対できないと言っても過言ではない。

この図の気温変化は、実は大気海洋結合モデルを使って直接的にそれぞれのコンポーネントの評価をした

わけではなく、エネルギー収支の変化から単純なモデルを介して気温変化に焼き直しているだけである。今後は、大気海洋結合モデルを使った直接的な組成ごとの気候変化の推定・評価をしなければならないと考える。

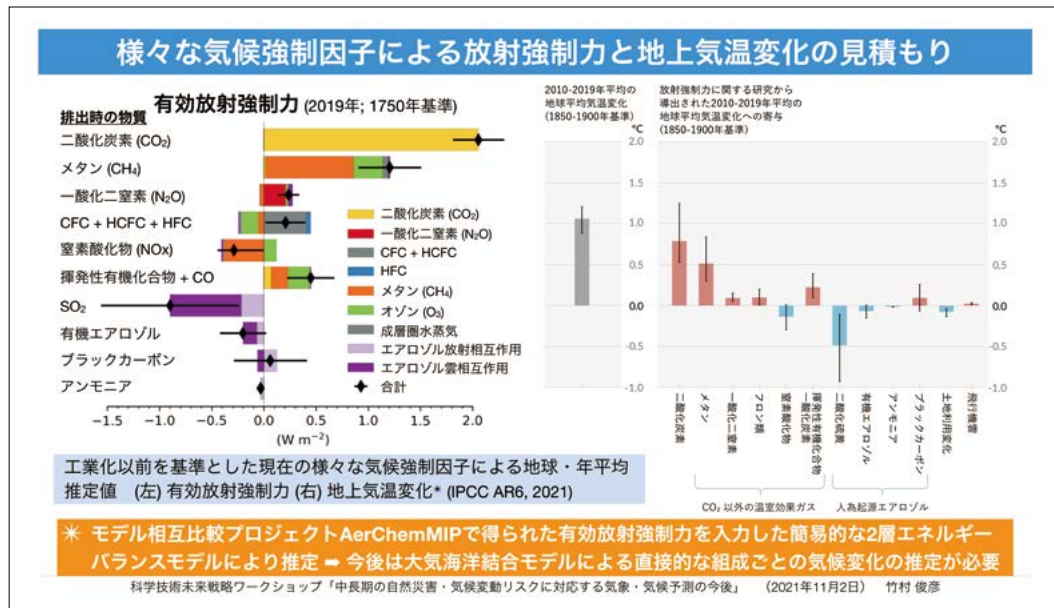


図2-4-4 様々な気候強制因子による放射強制力と地上気温変化の見積もり

(左図: IPCC AR6 WG1 Technical SummaryよりFigure TS.15を転載、右図: IPCC第6次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約 暫定訳 (文部科学省及び気象庁) より図SPM.2を転載)

科研費基盤Sのプロジェクトでは短寿命気候強制因子に関する階層的数値シミュレーションに取り組んでいる (図2-4-5)。ここでは、MIROCに結合しているエアロゾルのモデルと、名古屋大学の須藤健悟教授らが開発したCHASERという大気化学をより詳細に計算する数値モデルを結合した形のものを使う。また、全球雲解像モデルNICAMとSPRINTARS、CHASERの結合、新たに理化学研究所が中心となり開発しているSCALEという個々の雲を表現できる高い分解能を持った気象ライブラリーの組み込み等の開発も進めている。これらの様々な時空間分解能の気候モデル・気象モデルのフレームワークに同じコンポーネントの短寿命物質のモデルを組み込むことで、様々なスケールの計算ができるように今整備している段階である。

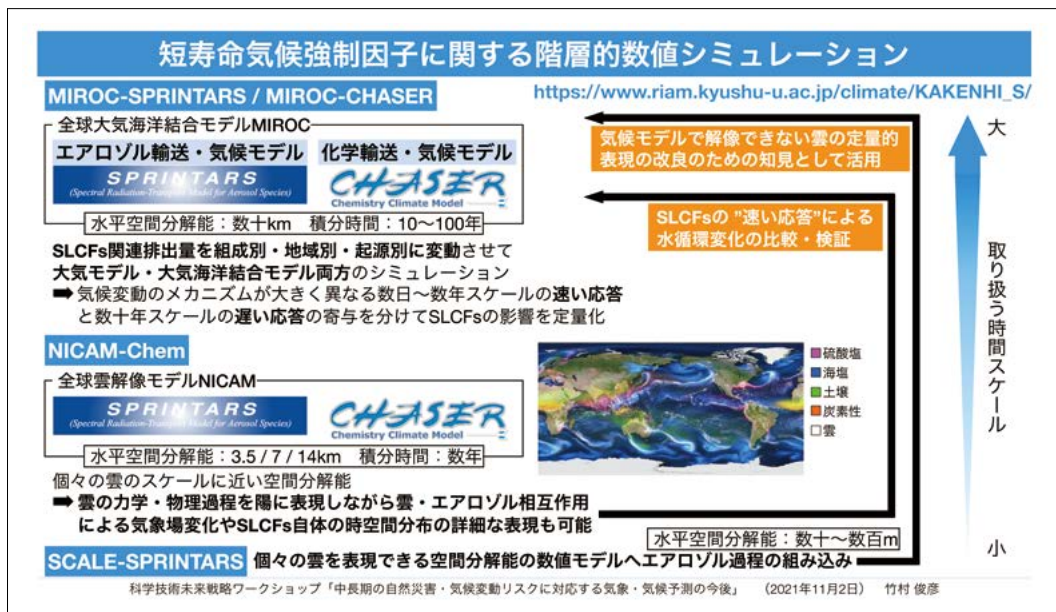


図2-4-5 科研費基盤Sで取り組む短寿命気候強制因子に関する階層的数値シミュレーション

基盤Sと平行して、環境省推進費S課題（S-20）において、健康影響、農作物、水循環の変化などの影響評価、またそれらを統合して最適な緩和シナリオを作成するといったことを行うような、統合的パッケージとしてのSLCFs対策の研究を進めている（図2-4-6）。あとでまた議論させていただければと思うが、この課題は影響評価までやることにしているため、テーマ1やテーマ2で計算したものをテーマ3で使い、それをまた戻すという作業になり、時間的に難しいところがある。そこをどう工夫するかという点がプロジェクトを進める上では重要と認識している。

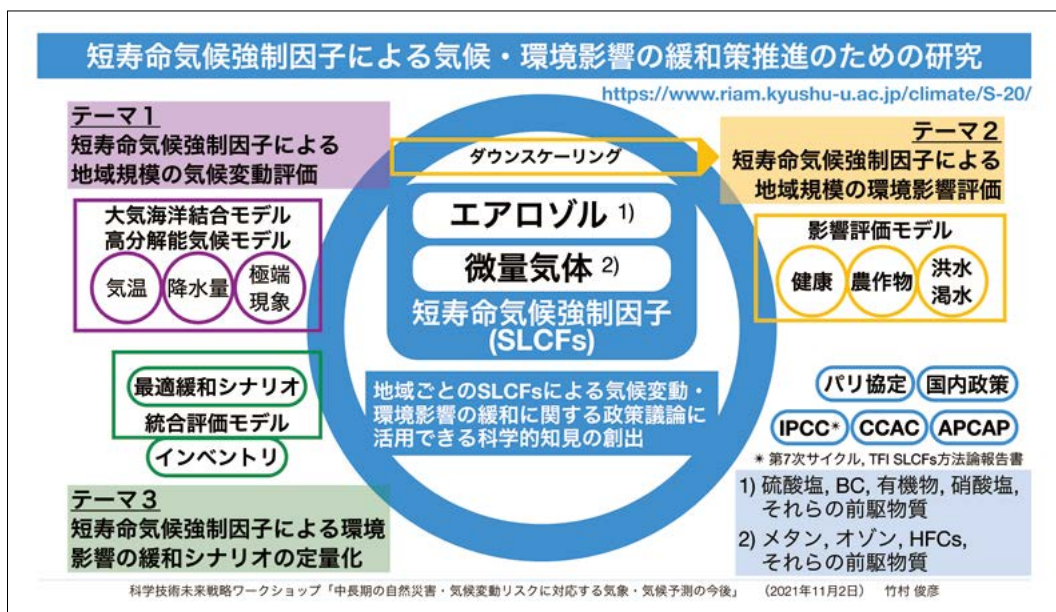


図2-4-6 推進費S-20で取り組む短寿命気候強制因子による気候・環境影響の緩和策推進のための研究

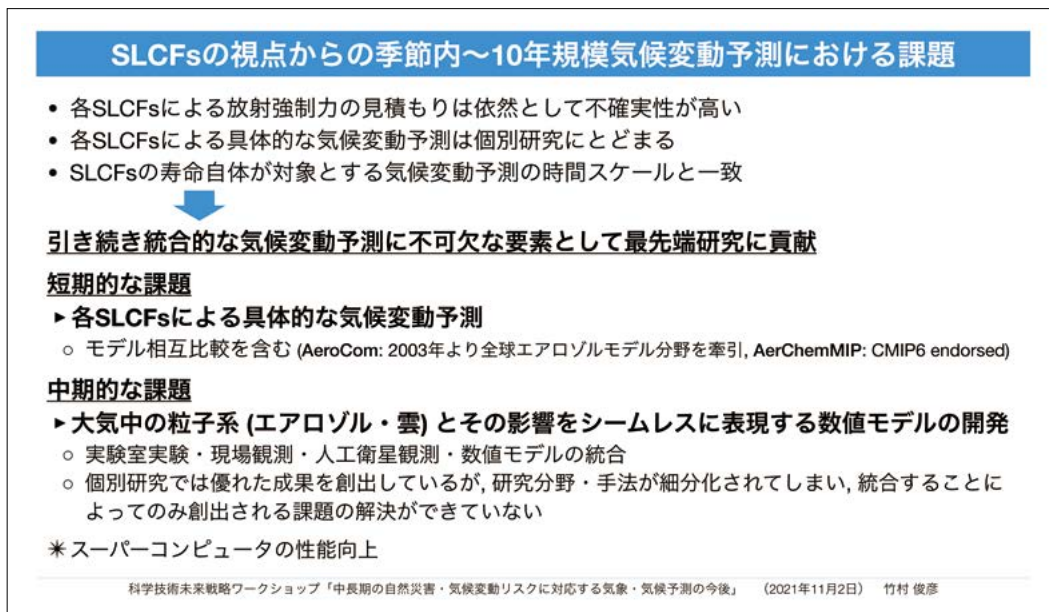


図2-4-7 季節内～10年規模気候変動予測における今後の課題

科学的には放射強制力の見積もりはできているが不確実性が高い。また個別研究に留まっている。サイエンスとしてSLCFsについて研究すべきことがまだ多くあるということを意味し、とりわけ、雲とエアロゾルの表現は非常に不確実性が高く、これからの課題である（図2-4-7）。

また、今回のWSが対象としている時間スケール（季節内～10年規模）はSLCFsの寿命とマッチしている。そのような適合性があり、二酸化炭素以外の物質への国際的な認識が高まっている中で、SLCFsについては引き続き研究を進めていかなければいけないと考えている。短期的にはモデル相互比較を含む各SLCFsによる具体的な気候変動予測を進めるなど、IPCCに直接つながるような先端研究に取り組む必要がある。

中期的な課題としては、大気中の粒子系（エアロゾル・雲）とその影響をシームレスに表現する数値モデルの開発が挙げられる。雲は気候変動の大きなコンポーネントだが、エアロゾルと雲は粒子であるという微物理的な観点で研究を進めると、その粒子が物理的にどういう散乱・吸収を起こすかというところまでかみ砕いて解釈・表現できるようになるだろう。そうすることで不確実性を低減していくという、かなり直接的で大変なアプローチであるが、実験室実験・現場観測・人工衛星観測・数値モデルの統合、そしてスーパーコンピュータの性能向上などにより達成できるのではないかと考えている。

2.5 議論

単寿命物質と10年規模予測

Q：短命のエアロゾルと温室効果ガスが温暖化に対してどう影響しているかという話題について、10年規模の振動に広域の大気汚染が効いているという話もあるが、その辺りを専門家はどのように捉えているのか印象を伺いたい。

A：短寿命物質の排出量を大きく削減すれば、その排出している領域の気候が変わるというイメージをされる方が多いだろう。それも一部あるが、やはり気候感度が極域で高いのと同様に、極域に対する影響というのが大きそうだということが分かってきている。例えばエアロゾルの場合にはその冷却効果により全体的に冷却されているわけだが、排出量の削減によりそのたがが外れ温暖化が加速する。その加速具合は結局のところ極域が高い。CO₂濃度をそのままにSO₂の排出量だけ削減すると極域の温度上昇が高くなることが分かってきている。したがって、様々な時間スケールにおいても短寿命の物質というのを当然考慮しなければならない。これは気候変動の研究者としては世界的な常識になってきていると思う。

ポイントは、短寿命の物質は、排出量の削減をすればすぐ大気中の濃度は下がるので、対策としてはやりやすいことである。ただし、冷却効果のある物質だけ濃度を下げた場合と逆効果（＝温暖化が加速する）なので、具体的な対策として統合的なパッケージをつくるのはとても難しい。まだ不確実性が高い部分もあり、科学者としてはそこを詰める作業をやらなければならないと考える。

Q：冷却効果をもたらす大気汚染物質の削減はトレードオフという言い方をする場合もあるのか？

A：基本的にはそうだろう。ただ、SO₂などは、日本も含めて国際的には大気汚染物質として考えられてきて、先進国はそれだけを減らすということをしてきてしまった。本来は、いわゆるプラスの強制力を持ったものも同時に減らさなければならなかったけれども、そうしてこなかった。そのため温暖化への影響の問題が顕著に出てきてしまっているのが現状だろう。気候変動だけでなくトータルのパッケージとして環境問題に対する対策ということで取り組むというのが様々な意味で望ましいのではないかと。

C：10年規模予測では、温暖化に加えて10年規模の気候の内部変動を予測できるかどうかが大問題なわけだが、この10年ほどで、特に欧米の研究者の認識が変わってきたと感じる。それまでは、気候の内部変動は大気と海洋の力学が作り出しているのだという先入観のようなものがあったが、だんだん、エアロゾルの長期的な排出減などによって10年規模の気候変動が実際にドライブされているらしいというエビデンスが増えてきた。Lighthouse Activitiesの議論を聞いていても、これからの10年規模予測というのは必ずしも初期値だけでなく、将来的に、例えば中国のエアロゾルの排出がこう減っていったらというような見積もりも積極的に取り込み、少しでも予測情報が出せるなら出すという方向に変わりつつあると感じた。

我々からすると、やはり大事なものはアジアの排出量の変化だろう。これが西太平洋などの気候変動にどう影響しているかについては、実は研究がすごく少なく、よく分かっていない。したがって、予測研究以前に、まずはメカニズム研究をもっとやらないといけないと思う。

Q：黄砂や、広く言うと砂じんダストなどの気候への影響が考えられるが、元は土地利用に依存するだろう。したがって、結局社会シナリオで温室効果ガスに加えてエアロゾルをどう排出するかや、土地利用がどうなっているかといったことも考慮しないと、10年スケールの予想ができないということになるだろう。これはもうシナリオでやるしかないのだろうか？

A：そうだろう。10年規模変動予測という観点ではなく、かなり基礎的な気候変動の理解という観点のほうでダストは大事である。そもそもダストは自然由来の氷晶核としての役割が大きいだろう。ダストは主要な物質であるというふうには考えられているが、そもそも定量的に表現するモデルができていない。

ダストの状況が変われば、恐らく氷晶核を介したエネルギー収支の変化が起こればと考えられるが、その定量的評価は現状ではそもそもできない状態にある。この辺は、明らかにサイエンスとして取り組まなければならない課題である。

C：それにはモデルばかりでなく、観測や、室内実験なども必要だろう。

A：国際的には室内実験を行っているグループは結構ある。また、国内でも気象研のグループが取り組んでいる。まさにこういう微物理的なところからの解明をしなければならない。観測や実験室系のグループとの共同研究はすごく大事だと思っている。

Q：極端現象についてはどう考えるか。10年、20年前と都市のエアロゾルを比べてみると、雲の状況がどうもエアロゾルの状況によって違う。大気汚染が進むと弱い雨が減って強い雨が增えるというような報告もあったと思うが。

A：議論が分かれるところである。物理的な表現を気候モデルに組み込むと、エアロゾルのいわゆる間接効果によって、大気汚染が増えれば弱い雨が增えると予想されるが、必ずしもそうではないというのが最近MIROCのグループから報告が出てきた。単純な定性的な理解から定量的な理解というものに今まさにシフトしている段階だろう。まだ何か計算すれば出てくるというレベルではなくて、もう少しサイエンスとしての取り組みが必要だと考えている。

Q：MIROCを用いるのとNICAMを用いるのとで、話がだいぶ違うのか？

A：恐らく違ってくるだろう。まさに今行っているプロジェクトでその違いを明確に示そうとしているところである。

現業機関と大学の役割・橋渡し

Q：高谷様の発表でS2D(seasonal to decadal)の戦略的推進について考えられるアプローチとして「シームレスな予測研究」とあったが、これは、研究ベースでは、時間スケールに跨るモデル研究を相互乗り入れでやっていくべきという意見と理解した。これは三浦先生の学術変革Bの取組とイメージとしては近いのか。

A：そのとおりである。従来では解像できないような粗いモデルを使った気候モデルと、細かいモデルを使った季節内予測であるとか10年規模予測というのを、両方やっていくべきである。

このときの一番のネックは計算資源だと考えている。もちろん細かいモデルが動かせばいいのだが、たくさんのアンサンブルを動かすのが難しいこともあるので、お互いの良さを活かしながら理解を進めていくのが大事だと思う。

C：その点に関しては少し違う意見である。私はR2O(research to operation)やO2R(operation to research)が大事だということを何回も申し上げたつもりである。計算資源で解決する問題ではもうなくなってきているなという実感がある。国際的には、10年規模予測はDecadal outlookという名前で現業化の方向に行きつつあるが、気象庁は防災などに手一杯で、現状、人も資源も何もついていないため対応できない。研究機関はというと、最初だけなら可能かもしれないが、ルーチン化してそれを続けるというのは、プロジェクトの年限もあり不可能だろう。UKやドイツなどでは、現業化を意識して現業機関と研究機関が一緒にやっているのに、このまま放っておくと日本は取り残されることになる。したがって、現場でどうこうならない話が結構大きいと感じている。リサーチとオペレーションの橋渡しを何とかうまく支援しなければというのが、私からすると計算資源以上に重要な課題だと感じる。

C：R2O、O2Rは大事だと思うが、何をやればできるかというところはまだ具体的に示し切れていない。研究のモデル開発と現場のモデル開発に大きなギャップがあり、本当はそこを橋渡ししなければいけないと考えているが、現業寄りのモデル開発というのは得てして研究者にとってあまり魅力がないため、なかなか橋渡しが難しい。そこを埋めようとしているのが、例えばNOAAのファンドである。NOAA

の現業に研究成果を取り入れるようなファンドのつけ方をしている。

英国では、例えばハドレーセンターの英国気象局のモデルを使って研究をしてくださいといったような、少し縛りがつく形の気候研究プロジェクトもたくさんある。もちろん、それが果たして良いかどうかというのは議論があるところだろう。日本ではどういう形にするのがみんなハッピーなのか考える必要がある。

- C：気象庁は非常に責任感があるので、2030年までにという計画で全部自前でやるかのように書いているが、それは結構大変だろう。せっかく大学でいろいろ研究を進めている人がいるのだから、その力を借りられれば、それに越したことはない。大学の人間からしても、これは自分たちの研究の社会実装であり、そういう形で出ていけば、研究者としてもハッピーなわけである。みんなそう望んでいる。
- C：人材の話については、少なくとも大気モデルの側については、私の知る限り、モデルが好きで頑張っている若手の人というのは、そもそも枯渇に近い状況である。R2O、O2Rの流れに行くと大学と気象庁とがそのうち融合し、似たようなことをやっているという未来になってしまう。本来、大学というのは、モデルでも何でもよいが、もっと最先端の科学・技術に突っ込んだ人がいるべき場所だと考えている。それは人材配置をもっと大学の側がしっかりしろということだと思うが、人の流れに対して若い人は納得していないというのを感じている。大学は失敗を恐れずもっとちゃんと新しいことに挑戦していくべきだと思っている。
- C：人材育成が課題であることに異論はない。しかし、どういう人材を育てたいかというビジョンは多分一人一人違っていると思う。例えば、今後10年でやらなければいけないシームレスな予測システム、あるいは予測のモデルの開発というのは、別に大学が学生を育てて行う必要があるかどうかは分からない。気象庁でそういう人材がきちんとプールされていればいいという見方もできる。大学はむしろ、そこではできない新しい何か、もっと尖ったことをモデル化する人材を育てればいい、などの意見はいろいろあっていいのではないかな。

モデリング研究拠点の必要性

- C：私はCCSR（東京大学 気候システム研究センター）のときに大学院生だった。私たちの世代が自分で手を動かしてできている世代で、その後がなかなか育っていないという厳しい状況にあると認識している。
もともとCCSRというのはモデリングセンターをつくるということで、松野先生や住先生中心になってくれ、まさにその機能を実際果たしてきたわけである。このような組織は結構大事だと思う。内容的にソフト的にどういう人材をそろえるかといったビジョンももちろん大事だが、やはりその中心となる組織というものをきちんと明確化しておく必要が絶対にあると考える。今はそれが失われつつあるので、そこにすごく危機感を覚えている。
モデル開発に適性がある人材は若手でも大勢いるので、そういう人をいかに集約して、集中的にそういう研究に携わらせてモデルを高度化していくかという、そういう仕組みづくりが必要である。こういったものを文部科学省やJSTの動きによって何とか構築できないかと思っている。
- C：そのような拠点がフィジカルであるかバーチャルであるかは問わず、バーチャルのほうがまだつくりやすいので、それでもいいと考えている。ただし、人材のリソースはやはり大学にしかない点に注意したい。例えば温暖化研究は、国研など含め様々な研究機関での取り組みがあるが、そこに次世代の人材を送り出せるのは大学だけである。そういう意味で、研究プログラムとより結合した形の人材育成の予算支援が大学に必要である。
- C：別に物理的に建物として集める必要はなく、バーチャルでもいいと思う。もう今の時代、シミュレーション屋さんは別にどこにいたって研究できる。ただし、今はもう完全に個別研究室ごとに何とか対応しているだけになっているので、そのモデルを開発する部隊をある程度バーチャルに集約させるという仕組み

みは絶対に必要である。

- C : CCSRはとても強力かつ成果もものすごく出した組織で、その機能を戻してほしいというのが外から見ても希望としてはっきりとある。

国際連携のポイント

- Q : S2Sなどの国際プロジェクトでは、現状としては、各国のモデルの予測結果を持ち寄って、その相互比較や、あるいは各国のデータを持ち寄って、研究資源としてお互い使おうという取り組みが主流に見えるが、そういう理解でよいか。例えばモデル開発などのアカデミックな研究の場面において、何かこういうテーマで国際連携をやると日本にとってもメリットがありそうだというポイントがあれば示唆いただきたい。

- A : 各国の予測モデルを持ち寄ることで、現状のその国の予測精度とかいうのは大体明らかになるが、やはり現象をちゃんと調べるにはモデルの比較実験が重要である。S2Sのフェーズ2と呼ばれる後期の5年間に於いては、例えばエアロゾルのモデル比較実験が行われている。

CMIPの比較実験と違うのは、ターゲットが初期化した予測にあるので、そこに対してエアロゾルがどのように効いているかというのを観測と突き合わせながら比較するわけである。大きな技術的なギャップもあり難しい部分ではあるが、そういう活動は重要だと思っている。

- C : 私مエアロゾル関係など、2003年から20年近く、モデル相互比較のプロジェクトに携わっているが、IPCCなどに貢献していくためには、日本単独のプロジェクトで個別で論文を書いて出すというよりも、やはり相互比較プロジェクトを通じて世界的な業界に対してある程度束になって出していかなければいけないという側面が強くある。

それに頼って独自性が出にくいのではという懸念もあるかもしれないが、それはそれで、例えば日本に対する貢献として、日本に特化した解析などの形で携わることができると思う。国際貢献という立場からは、もっと広く、もっと多くの研究者が国際プロジェクトに携わっていくという姿勢を見せないと、なかなか日本のプレゼンスというのは上がっていかないだろう。ぜひそういうところを意識させるようなプロジェクトや仕組みを何かつくられればと思う。具体例は持ち合わせていないが、国際貢献を志向することを明記することはすごく大事だと思う。

- C : 気候や気象の分野は古くから国際連携はできているので、それ自体は全然問題なく、むしろ連携の御利益のほうが非常に大きい。ただ一方で、CMIPみたいなものは、大規模で多数の研究機関が参加するだけに、ワンサイクル始めるのに時間がかかる。具体的には、一番新しいCMIPでは、実際に観測データを使ってシミュレーションしたのが2015年までのデータで、2021年までの6年分というのは、将来のシナリオに基づいたプロジェクションとして計算されているわけである。これはそれだけデータの準備に時間がかかるということを表している。今、2030年など、より近未来のターゲットが重要になってきているので、もう少し迅速にデータを集めてシミュレーションをする必要性があると感じる。こういった動きは、国際連携よりも国内で可能であり、国内のチームでまず取り組んでみるということに意義があるだろう。国際連携はもちろん続けるが、国際連携ではスローになってしまう部分を、独自にそういうシステムを持って行うというイメージだろう。

未解明の現象プロセス

- Q : 内部変動の初期化にどのぐらいの価値があるのかということが議論の中心にあったように思う。例えば季節内であれば予測をもたらすのはMJO（マッデン・ジュリアン振動）やBSISO（北半球夏季季節内振動）、経年変動であればENSO（エルニーニョ・南方振動）などの変動モードが重要である。同じように10年規模予測では、太平洋十年規模変動や大西洋数十年規模変動など、そういう内部変動が初期化によってどのぐらい将来の時間発展を拘束できるのかということが重要だろう。そもそも予測

できるものなのかどうかすらよく分からないというのが現状で、モデル開発だけでなく現象のプロセス理解も同じく進めていかなければならないだろう。

現状ではそういう解析をする人も足りないし、何しろ10年規模変動の観測データも全然足りない。モデルシミュレーションでは海洋の3次元データをダウンロードしてくるだけでとてつもない時間とストレージが必要になり、それにかかる労力が非常に大きいにもかかわらず人が足りていないのであまり研究が進んでいない。これは日本に限らず、世界的に見てもそうだと思うのだが、そういう事情があるので、解析をするプロセスの理解も同じように大事だと思うがどうか。

- A：そのとおりである。そのプロセスの理解のためには、予測のシステムだけではなく、いま世界中に広まっているペースメーカー実験のような気候モデルを使った現象の再現、切り分け、要因解明、そういった様々な数値実験が非常に役に立つと思う。具体的に、同化するどの変数にどのぐらいのメモリがあって、どれだけそれが予測できて、その波及効果がどのぐらいあるのか。「十何年やっているのに、まだ分からないのか」と言われるかもしれないが、まだ分からないのが現状。
- C：こういう状況のこういうスケールのものだったら予測はできるが、こういうものについては原理的に難しいとか、そういう条件的なことをきちんと進めるのが科学として大事だろう。それがまさに、無駄なことに多くの資源をつぎ込まなくて済むようになるのではないかという気がする。私のように年寄りか「無理だ」というのは大体間違いなので、若い人には「そんなことない」とぜひ挑戦していただきたいなど思っている。
- A：「分からない」とは言ったが、ざっくりした部分は大体の研究者たちは認識していて、海洋の循環や蓄熱量などの海洋内部の量というのは結構長いメモリがあって、場合によっては、二～三十年ぐらい予測可能であるということは分かっている。ただ、問題は海面水温に影響してくれないと大気場が全然予測できないことである。そこがまだよく分からないところかと思う。

気候予測と影響予測・評価の接続

- Q：気候予測を影響予測・評価につなげる部分について、プロジェクトメイキングの視点から、この2つを一緒にやるということについての工夫があれば、教えてほしい。
- A：これは永遠の課題だと思っている。IPCCでも同じ問題がワーキンググループ間の問題としていまだに残っている。IPCCの第1作業部会が少し上流側にあり、その成果を第2作業部会や第3作業部会が使って何か出すという構造である。しかしこれらと同じタイムラインで動かすと、第2作業部会、第3作業部会は、一つ前の世代の研究成果を使って研究したもので成果を出していくという形になるわけである。そうすると、例えば、5年のプロジェクトでどれも最新のものを使って一貫してやろうと思うと、なかなか難しいわけである。上流側がどんどん先にやらないと、第2、第3、下流側の研究はなかなか進まず、待たなければいけないというような状況が起こり得る。
- 私がS-20を行った際には、まずフィージビリティスタディー（FS）の期間が1年あり、そのときに異なる研究分野の間の意思疎通を図った。このプロジェクトではこういう年次計画で、上流側がいつまでにこれをやるから、下流側はそれまでにこういうことをして、それで実際に新しい研究成果をこのプロジェクト期間内で使ってやりましょうというような設計を立てるのである。このように、まずFS期間で事前に本プロジェクトが始まる前の段階で具体的な計画を立てていくのが大事だろう。
- プロジェクトが採択されることを前提として計画を立てていくということが本当に重要だと思う。そうしておけば、1年目が準備期間ではなく、1年目からスムーズに本格的なスタートが切れるという状況を作ることができる。プロジェクトの期間内で全て一貫してやろうと思うとそういう設計が大事だと考える。FSの代わりに研究期間を長くするという考え方もあるかもしれないが、そうすると、だらだらやるという可能性も出てくるため、やはりFS期間というものを明確に設けるのがよいだろう。

議論の振り返り

C : 10年規模変動に対する短寿命気候強制因子（SLCFs）の影響について、SLCFsの排出削減は、その周辺地域の気候だけではなく極域増幅などの大きな空間スケールでの影響ももたらす。寿命が短いので対策の影響が短時間であるが、冷却効果をもたらす物質だけ減らすと温暖化が加速してしまうという問題があり、パッケージで考える必要がある。また不確実性も依然として大きいので、引き続き研究が必要。

10年規模予測にとって気候内部変動が重要だが、その内部変動と思っていたものにも、実はエアロゾル影響の重要性が示唆され、そういう証拠が近年増えてきている。実は強制因子が10年規模予測にとって重要なのではないかという情報も含めて予測を向上させていこうという方向に向かっている。一方で、アジアの排出が、例えば太平洋の短期的な変化、10年規模の変化にどう影響しているかは、まだ研究が全く足りていない。これは必ずしも「ポスト統合」の外でないとできないということではなく、中でもある程度研究はできるだろう。黄砂などの影響、砂じんダストの影響、特にそれが土地利用に依存するのかなどについては微物理からの検証が必要。都市で大気汚染が増えると弱い雨が増えると以前言われていたが、必ずしもそうではないことが分かってきた。定性的な理解から定量的な理解への過渡期にあり、さらなる研究の進展が必要という段階。

S2SとS2Dをつなぐシームレス予測のボトルネックは計算資源であるという指摘があったが、国際的にはここで現業化の流れがあり、計算資源というよりは研究と現業の橋渡しのほうが重要ではないかという意見もあった。そこをつなぐ枠組みも含め人材不足が大きな問題で、研究と現業が同じようなことをやるよりは、大学はもっと最先端を目指すべきではというコメントがあった。ただしそれはどういう人材を目指すかにもよる。

モデルをつくる組織は必ずしもフィジカルなものでもなく、バーチャルでもよいので、そういう組織が重要。教育プログラムというよりも、研究プログラムとカップルした人材育成のサポートが必要である。

国際連携については、各国の予測モデルを持ち寄るだけではなく、モデル比較実験をすることが重要である。日本単独のプロジェクトとして貢献するだけではなく、相互比較プロジェクトなどの世界的な業界に対して論文を出していくような取組も重要。日本がそういうプロジェクトに積極的に関わるような姿勢を見せられる仕組みも重要である。一方で、CMIPのような取り組みは時間がかかるので、国内では早いサイクルで進めるようなこともできるのではないか。

プロセス理解の重要性、特に10年規模予測に対する10年規模変動の重要性がよく分かっていない。どういうスケールのどういう予測ができて、どういうことができないのかという条件をはっきりさせることが科学としては重要である。できない、できないと言っていないで、若者にも挑戦してもらいたいというコメントがあった。

IPCCの第1作業部会と第2・第3作業部会の関係のように、上流側の研究が進まないと下流側の研究が進まないという点は課題。研究プロジェクトが始まる前のFS期間の段階で研究の計画をちゃんと立てて、1年目から動き出すという工夫も重要であるとのコメントがあった。

3 | 影響予測・評価セッション

3.1 気象予測と水災害の軽減

沖大幹（東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授）

自然災害の状況について、国連防災機関（UNDRR）が今年出したレポートによれば、20世紀の最後の20年間で21世紀の最初の20年間で報告された災害の数は1.7倍程度に増えた。人口はこの間に1.4倍程度増えている。報告数は増えたが災害による死者数はほとんど増えておらず、影響人数は人口が増えたほどには増えていない（約1.2倍）。防災はうまくいっているが、経済被害は1.8倍ということで、自然災害は人命の問題というよりも経済問題になっている。災害の種類別に見ると、地震、噴火など温暖化という地球規模の環境変動と関係ないものが1.2倍で、これをベースラインとした時に干ばつはそれよりも増えている（約1.3倍）。暴風雨は1.4倍、山火事は1.5倍、洪水は2.3倍、熱波に至っては3.3倍であり、気候変動による自然災害と思われるものが結果としてかなり増えていることが分かる。

日本では死者数が非常に減っており、年間の死者数が200人を超えるような風水害は近年ほとんどない。しかし経済被害はむしろ増え続けており、昨年も2兆円であった（図3-1-1）。やはり日本でも経済被害というのが目立ってきている。

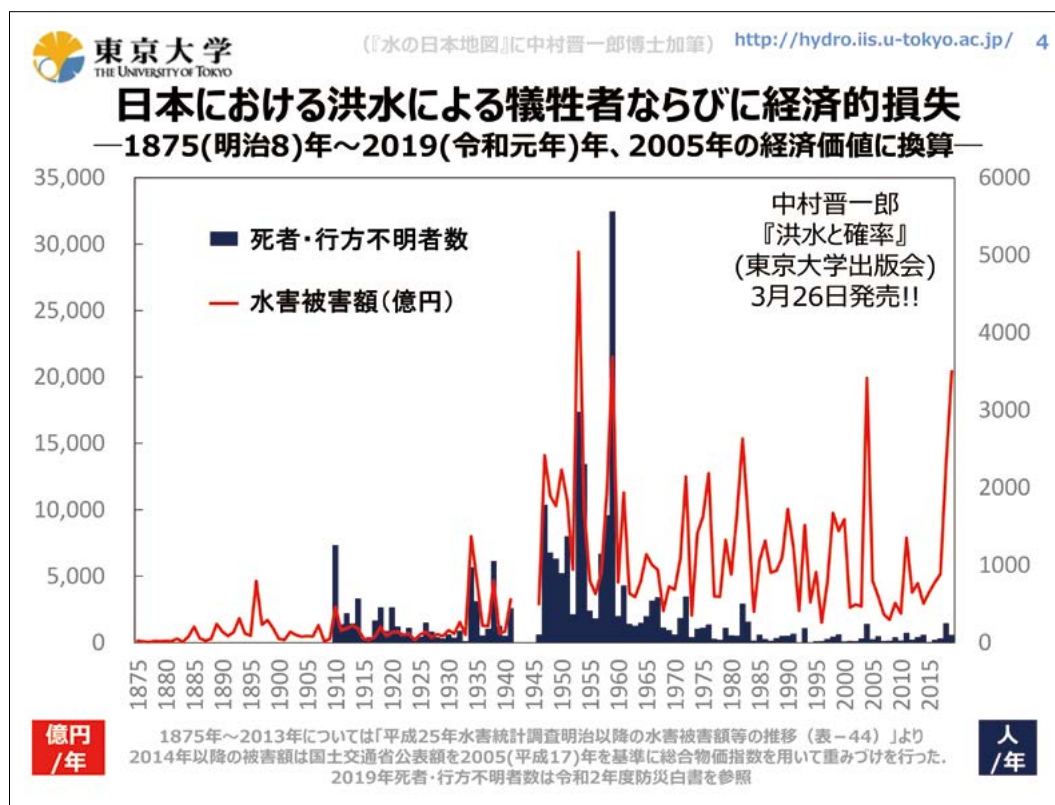


図3-1-1 日本における洪水による犠牲者ならびに経済的損失

損保協会の保険金の支払いを見ても、台風1つで1兆円の損保の支払いがある（図3-1-2）。被害額はこれの倍ぐらいはあると思ってよいのではないかと。こうして見ると規模としては台風が大きく、予測対象として台

風を考えることはリーズナブルだろう。なお地震の損保の支払額は東日本大震災では1兆3,000億円程度だが、他は第3位でも1,000億円程度であり、最近の損保の関心対象は地震よりも風水害である。



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

<https://www.sonpo.or.jp/report/publish/gyokai/0003.html> <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/> 5

ファクトブック2020「日本の損害保険」

主な風水害等による保険金支払例（損保協会調べ）							
順位	発生年月日	災害名	地域	支払保険金（見込みを含む）（単位：億円）			
				火災・新種	自動車	海上	合計
1	2018.9.3～5	平成30年台風21号	大阪・京都・兵庫等	9,363	780	535	10,678
2	2019.10.6～13	令和元年台風19号 （令和元年東日本台風）	東日本中心	5,181	645	-	5,826
3	1991.9.26～28	平成3年台風19号	全国	5,225	269	185	5,680
4	2019.9.5～10	令和元年台風15号 （令和元年房総半島台風）	関東中心	4,398	258	-	4,656
5	2004.9.4～8	平成16年台風18号	全国	3,564	259	51	3,874
6	2014.2月	平成26年2月雪害	関東中心	2,984	241	-	3,224
7	1999.9.21～25	平成11年台風18号	熊本・山口・福岡等	2,847	212	88	3,147
8	2018.9.28～10.1	平成30年台風24号	東京・神奈川・静岡等	2,946	115	-	3,061
9	2018.6.28～7.8	平成30年7月豪雨	岡山・広島・愛媛等	1,673	283	-	1,956
10	2015.8.24～26	平成27年台風15号	全国	1,561	81	-	1,642

地震では東日本大震災(12,749億円)、熊本地震(3,753億円)、大阪北部地震(1,072億円)以外は1,000億円未満。→損保にとって地震より水害リスクが重大

自然災害被害による2019年度の損害保険金の支払総額1兆2200億円

図3-1-2 主な風水害等による保険金支払い例（損保協会調べ）

なぜ気象予測が風水害の防止に必要なかについて説明する。雨の観測から洪水のピークまでを予測する場合、物理的な制約がある。雨が降ったというデータを取り、予測の計算をし、その情報を使うという流れよりも長いリードタイムがなければいけない。水循環の予測だけではリードタイムがあまり取れないが、気象予測によるリードタイムを足すと何とか実用に堪えるようなリードタイムが取れることになる（図3-1-3）。

例えば日本の典型的なハイドログラフは図3-1-4に示すように6時間とか12時間、大きい利根川で2日目にくいかかないかという程度で雨のピークから洪水のピークになる。大陸の大規模な河川になるとその間隔は広がる。例えばアマゾン川では雨のピークから流量のピークまでが3～4か月程度である（図3-1-5）。なおこの図で数値モデルの推計値は予測とはずれているが、この計算をやった20年前当時は、熱帯降雨観測衛星 TRMM が打ちあがった直後くらいだったため、良い降水量データがまだ無かった。そのため境界条件として与えられる雨の情報にバイアスがあり、どの数値モデルの予測も一様に外れたということである。

なぜ気象予測が必要なのか？

$$T_{LH} > T_D + T_C + T_U$$

- 💧 T_{LH} : 水文 (降雨流出) 予測によるリードタイム
- 💧 T_D : 予測のためのデータ収集に必要な時間
- 💧 T_C : 予測計算に必要な時間
- 💧 T_U : 予測情報を有効利用するのに必要な時間

$$T_{LH} < \text{洪水ピーク到達時間}$$

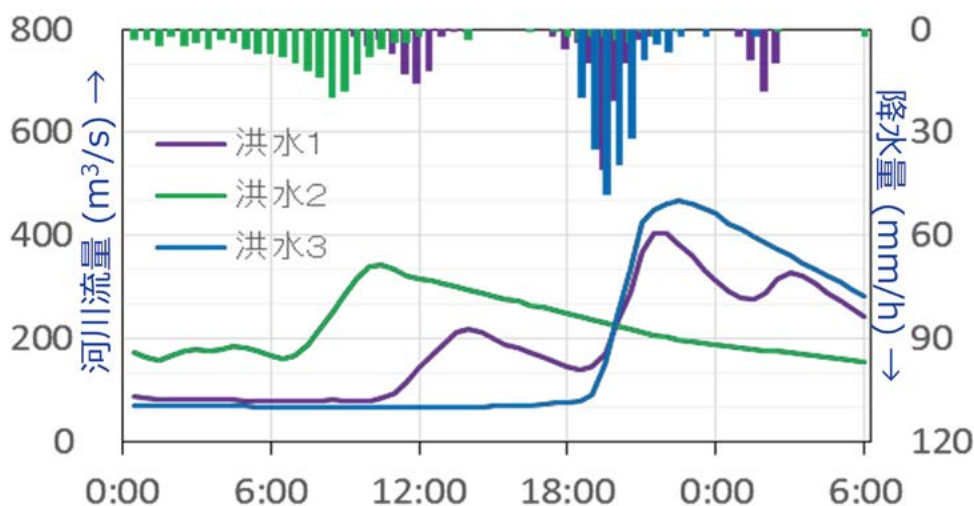
$$\rightarrow T_{LH} + T_{LM} > T_D + T_C + T_U$$

- 💧 T_{LM} : 気象予測によるリードタイムの導入

図3-1-3 なぜ気象予測が必要なのか

典型的な日本のハイドログラフ

〇〇川 〇〇地点 流出計算結果



https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/06_sankousiryoku.pdf

図3-1-4 典型的な日本のハイドログラフ

(図出所：国土交通省 気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言～参考資料～)

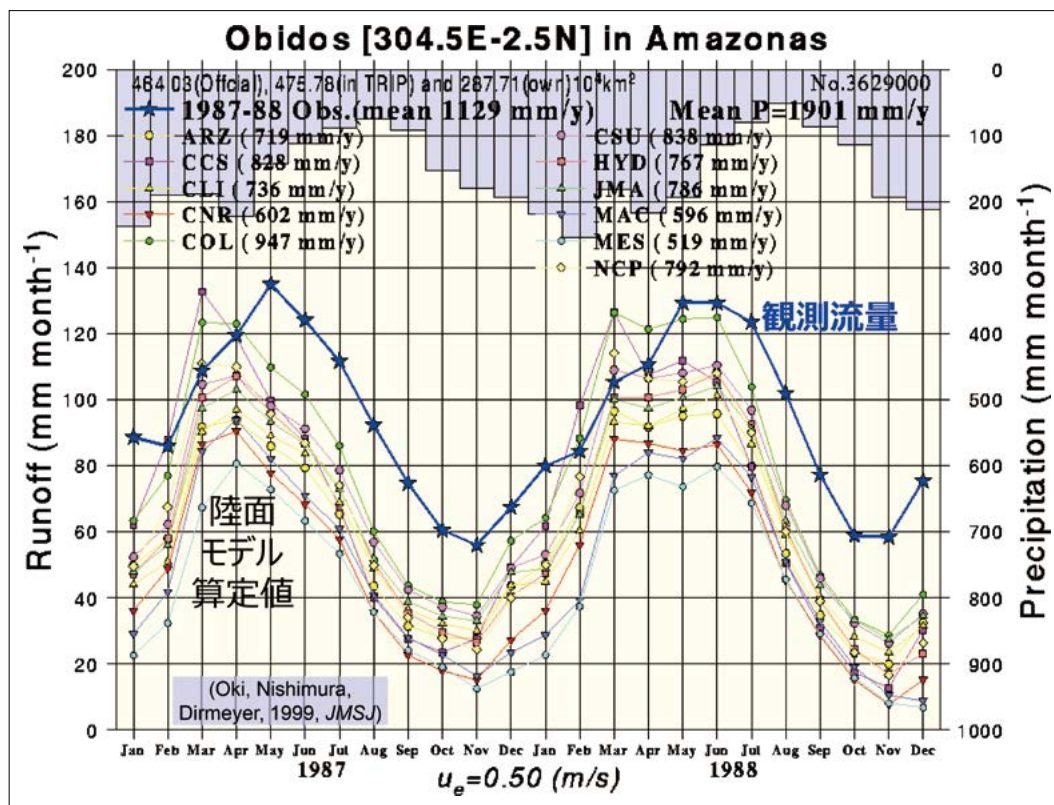


図3-1-5 アマゾン川でのハイドログラフ

3

影響予測・
評価セッション

予測情報の利用に必要な時間がどのくらいかについては、例えば都市の雨水排水、すなわち内水氾濫やいわゆるゲリラ豪雨に対して出来ることとして、ポンプの排水準備、水門や樋門・樋管のゲート閉鎖による逆流防止、バックウォーター防止等は30分前に分かると何とか準備が出来る(図3-1-6)。フラッシュ洪水や土砂崩れであれば3時間ほど前にしっかり分かれば避難をしたり、あるいは止水板の設置、アンダーパスの通行止めをすることまでは出来る。貯水池操作においては、横浜・川崎を流れる鶴見川のような小さな流域と利根川、あるいは大陸河川とでは全然異なるが、天気予報や季節予報による事前の知らせがあれば、安全を確認し、事前放流して、貯水池をより効率的に使うということも出来る。半日から数週間前に分かればだいぶ出来る対策が増える。

渇水対策には3か月ぐらいあるのが望ましく、日本でいうと4月に、6、7、8月の降水量が平年比どのくらい違うかといったことが分かると使える。実際に、本日の「気候予測セッション」で議論が出たエルニーニョの予報が南米の太平洋側の降水量にはかなり効くことは明らかであり、半年後ぐらいまではよく当たるため、それに応じて作付けする農作物の種類を変えろといった対策が実際行われていると聞く。そこから先、社会基盤の施設計画は30年先くらいが分かる必要があり、本日のテーマである10年が分かって何が出来るかは疑問なところ。しかし温暖化でどうなるかを知るのには原理的に非常に大事だと考える。

予測情報の利用に必要な時間は？

$$T_{LH} + T_{LM} > T_D + T_C + T_U$$

- 💧 都市の雨水排除：～30分？ ←ポンプ排水準備
- 💧 都市のフラッシュ洪水警報、土砂災害：～3時間？
→避難。止水板設置、アンダーパス通行止め
- 💧 洪水に対する貯水池操作：数時間～数ヶ月？
→天気予報。事前警告、安全確認、事前放流、…
- 💧 渇水に向けた事前対策：3ヶ月？
→季節予報。灌漑面積縮小、節水、作付け変更、…
- 💧 社会基盤施設計画：30年？
→地球温暖化等を考慮した気候展望。

図3-1-6 予測情報の利用に必要な時間

地形性降雨では、大気現象の時空間スケールよりも長い時間スケールや細かい空間スケールで地形の影響が支配的になる（図3-1-7）。天気予報のような初期値依存から境界条件も発展するような気候予測までの間では、ENSO（エルニーニョ・南方振動）やMJO（マッデン・ジュリアン振動）といった特定のモードで発展するような、現象がしっかりしているものが良い。そこで80年代にTOGA-COAREデータワークショップがあって海洋の観測が進み、エルニーニョのモデル化も出てきた。その後、今度は陸面で海面水温と同じような予測情報を持っているものはないかということになり土壌水分の観測やモデル化がかなり進んだが、これは1か月程度の時定数を持つ。10年規模となったときに何が予測を拘束する情報を握っているのかというのは依然として不明である。

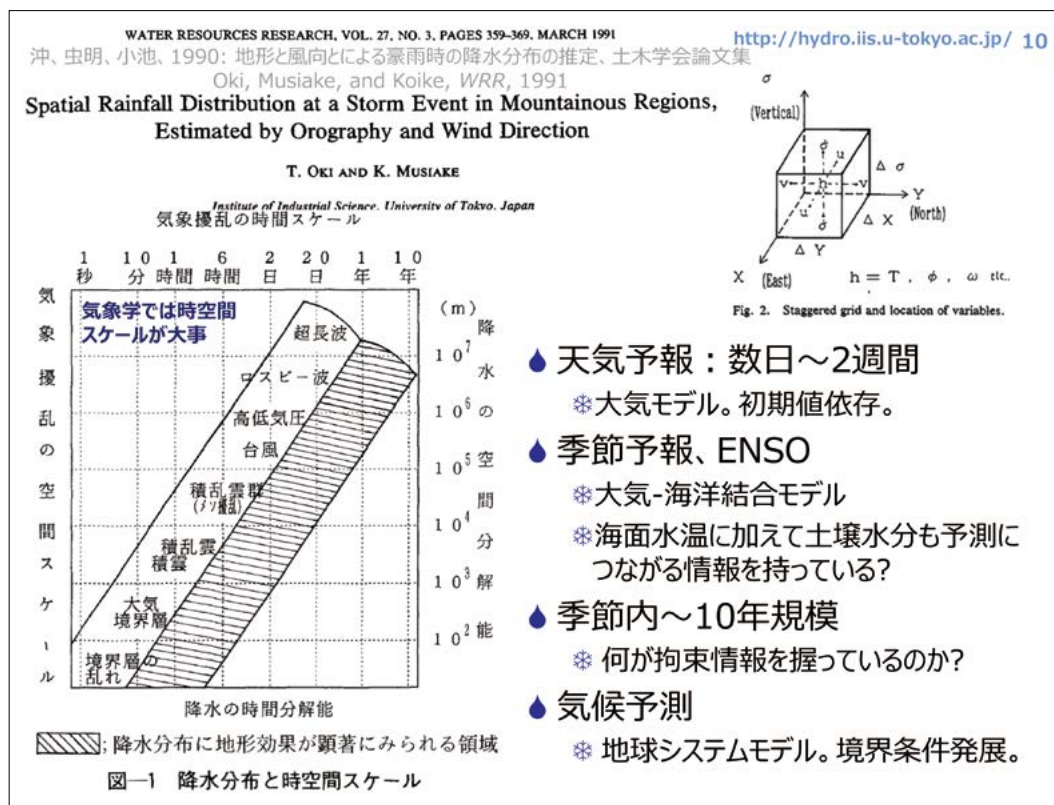


図3-1-7 地形性降雨の推定

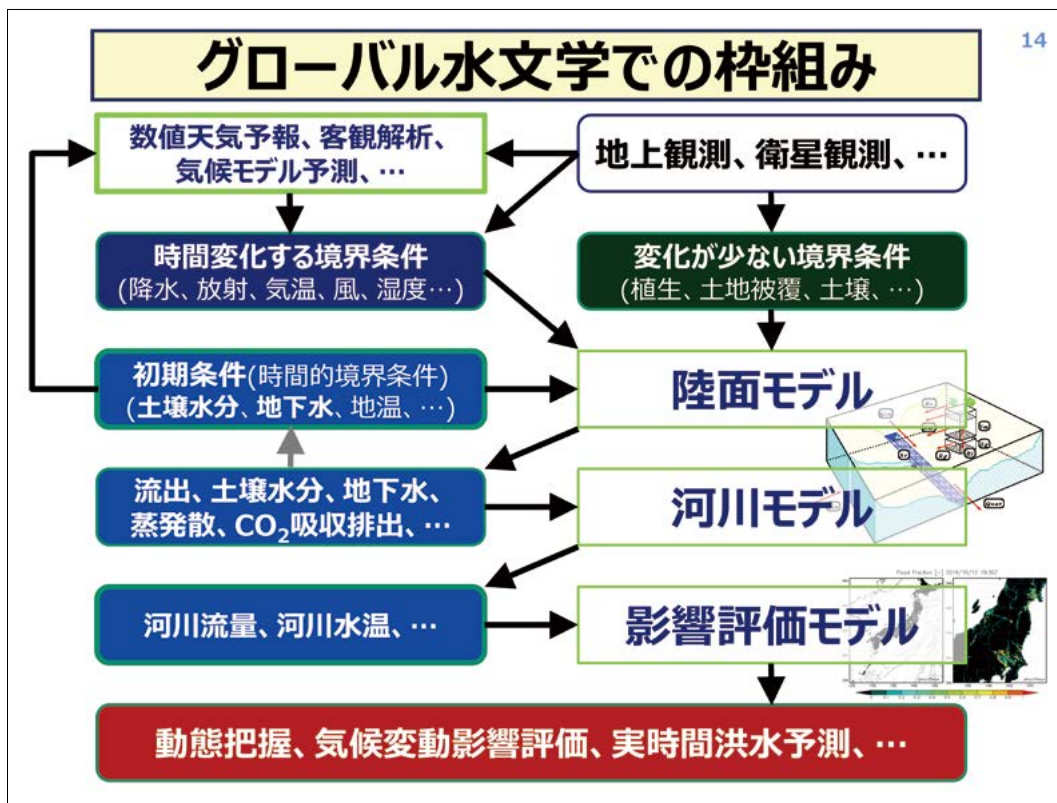
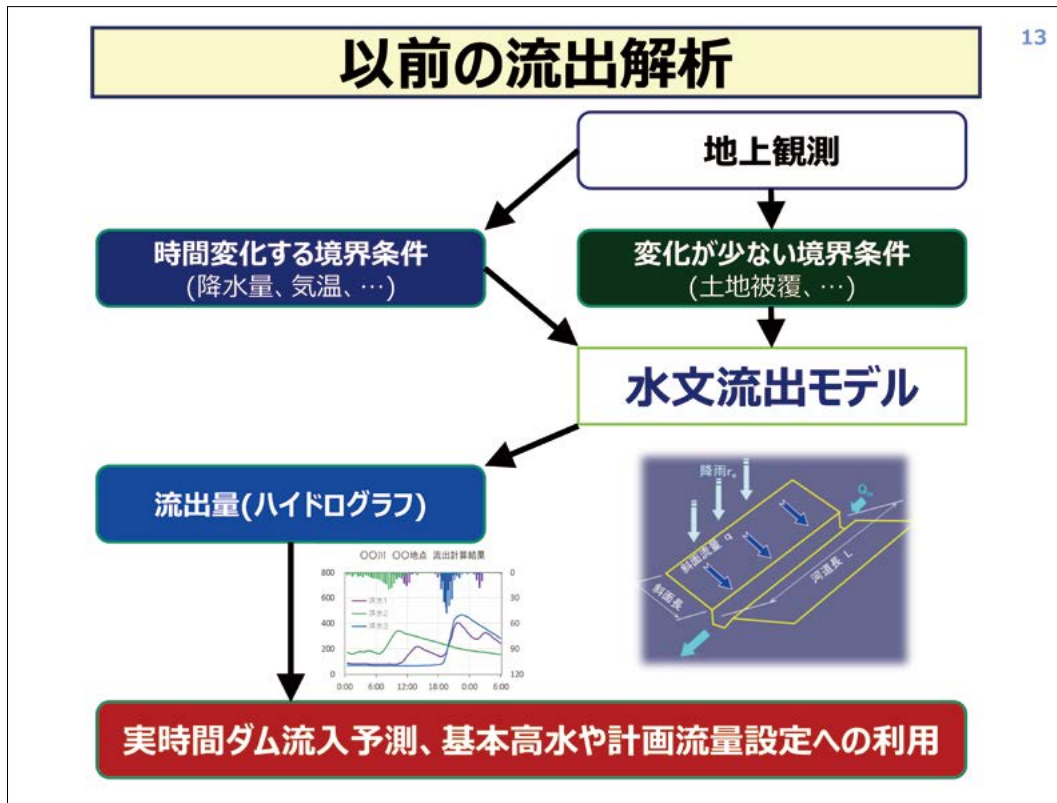
3

影響予測・
評価セッション

真鍋先生のノーベル物理学賞の受賞の意義は、一つは、基本原理の理解だけではユニバースを理解したことにはならないということを示した点にある。根本原理が理解できれば全てが分かり、全てが説明できるはずだというのが物理学の信仰だったと思うが、真鍋先生は、何か新しい原理を発見したというよりは、熱力学あるいは流体力学といったもの、既に分かっているものから何が実際に起こるか、どんな現象が発現するのか、基本原理だけからは想像もしないような現象があるということを示し、それが表彰されたということに価値があると思っている。

1990年に出されたIPCC第1次評価報告書の頃の気候変動予測は、私から見れば水が循環しておらず、川も考慮されていなかった。その部分を日本のグループが研究してきた。以前のエンジニアリングの水文学は、地上観測の雨や気温のデータから水文流出モデルというのを走らせて流出量が出ますということをやっていた(図3-1-8)。

これに対し、観測には地上観測に加えて衛星観測も含め、また時間変化する境界条件は観測から持ってきて良いし、数値天気予報や客観解析、将来予測から持ってきて良いとまず変えていった(図3-1-9)。また陸面モデルと河川のモデルを分離した。陸面モデルからは土壌水分のように気候に対して予測可能性を持つようなものもしっかりと推計し、必要に応じてそれを初期条件として返すようにした。河川モデルも、河川流量、水温、土砂、あるいは地球システムモデルに必要な栄養素も運んで、これらを影響評価モデルに入れていくことが可能になった。これらが過去約20-30年の発展だと思う。



そうした成果を地球上の水文循環量と貯留量として2006年にScience誌で報告した。今年の8月に出たIPCCの第6次評価報告のワーキンググループ1でも、ようやく第8章として水循環の変化という章ができた。水の循環を意識した図を出して、地下水涵養量や淡水・塩水の地下水流出、海に直接出るものも入っており、より包括的な水循環が気候システムの一部として評価されるようになった。

モスらの論文（Richard H. Moss, *et al.*, Nature, 2010）の図にあるように、気候システム、地球システムだけをやっているだけではもう足りない。さきほど第2のCCSR（気候システム研究センター）をとという議論もあったが、IPCCのワーキンググループ1が扱う気候モデル、影響評価モデル、統合評価モデルの3つをカバーできるような研究者の連合体が必要であり、水というのはその中心にあると思う。

最近、水文学の分野でソシオハイドロロジー（社会水文学）が勃興している（図3-1-10）。水循環が社会に影響し、逆に社会も水循環に影響を与え、両者がコ・エボリューション（共進化）するシステムを対象とする。地球システムモデルで気候と生態系のコ・エボリューションが扱われるようになってきているが、水に特化したところではもっと緊密な繋がりがあり、それを対象にしようという学問が育ちつつある。

水文学研究の社会への貢献というのは、信頼のおける水循環情報でよりよい水マネジメントをしよう、というものである。本ワークショップは、主にどうやって良い予報精度を出していくかという話になると思うが、どう使うかという観点からも見る必要があると思う（図3-1-11）。

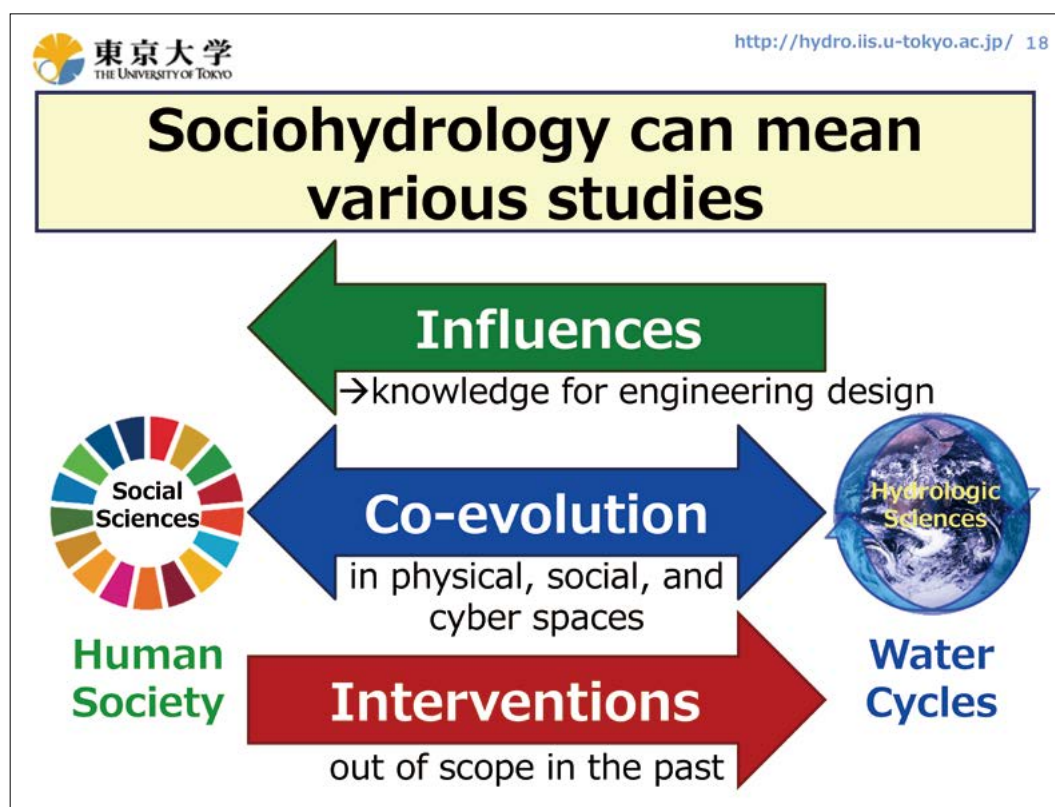


図3-1-10 ソシオハイドロロジー



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/> 19

水文学研究の社会への貢献

- 💧 信頼のおける水循環情報→より良い水マネジメント
 - ❄ 水循環の観測・推計、予測技術の開発・改良・普及
- 💧 水災害リスクマネジメント
 - ❄ 過去から現在、未来に向けた水循環推計→計画
 - ❄ 高解像度(グローバル1km/日本域100m)準実時間予測→警戒
- 💧 水から見通す将来ビジョン
 - ❄ 社会変化や気候変動を考慮した水リスク・水需給の将来推計
 - ❄ 土地計画と統合的水資源マネジメント、水インフラの整備、水処理技術や水使用効率の向上、仮想水交易、…
- 💧 水と持続可能な社会構築
 - ❄ 水温水質、物質・土砂の流れ、生態系や地形との相互作用、…
 - ❄ 水—食料—エネルギーのネクサス、水食料エネルギー安全保障
 - ❄ 科学的根拠に基づく国際的な政策構築への情報提供

(Slide substantially revised in 2019)

図3-1-11 水文学研究の社会への貢献

季節内～10年規模の予測精度の向上には、何をどういう精度でまず観測すると精度向上につながるのかを問い続けることが必要。計算機資源を細かくして、雲解像モデルで全てのプロセスを入れてやればできるという話では無いと思う。メカニズムについても、何が未解明だから予測が難しいのかということも分かっていない。渡部先生に少し教えていただいたが、どういう時空間分解能であれば予測が可能だということはある程度分かっているとすると、その外側は無理なのか、をはっきりさせていく研究が必要だと思う。季節内～10年規模の予測精度が向上すると、どんな社会的な対応が可能になるのかというのを議論しなければならない。もし研究が非常に進み、今から5年後の7月の降水量は平年比2割増し、空間スケールとして、例えば関東地方で2割増しという情報が出たときに何ができるのか、と考えた上で、どの程度の精度をどういう空間スケールで、どのくらい積分した時間でやるかを議論していくことが必要だと思う（図3-1-12）。



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/ 20

おわりに

💧「季節内～10年規模」の予測精度の向上には

- ❄️何をどう精度で観測すると精度向上につながるのか？
- ❄️どういうメカニズムが未解明なのか？
- ❄️どういつ時空間分解能の予測が原理的に可能なのか？

💧「季節内～10年規模」の予測精度が向上すると

- ❄️どういつ社会的な対応が可能になるのか
- ❄️「2026年7月降水量は平年比2割増」情報の意義は？



図3-1-12 おわりに

3.2 超多時間スケールでの自然災害ハザード影響予測・リスク評価

竹見哲也（京都大学 防災研究所 気象・水象災害研究部門 教授）

我々は現在、文科省の統合プログラムの領域テーマD「統合的ハザード予測」において自然災害のハザード影響予測とリスク評価に統合的に取り組んでいる。近年、水災害や土砂災害が全国の色々なところで頻発している状況である。温暖化の影響が顕在化し始めているのではないかと想像される。また、季節内、季節、年々、といった自然変動の範囲で生起する極端な天候場に長期トレンドとしての温暖化影響というのが加算されて、災害レベルを超える極端気象が起こっているだろうという認識である。我々は台風、豪雨、高潮、高波、洪水といった災害ハザードと、それにより影響を受ける森林、水産、水資源、海浜といった資源を対象に、統合プロ・テーマDで取り組んでいる。

図3-2-1に示しているのは気象研の気候モデルMRI-AGCMによる150年ランの計算結果で、梅雨前線の位置が北上するような長期的な変動を分析した結果である。梅雨前線の北上に伴って日本陸域では豪雨災害が起こるだろうと考えられる。グラフでは時々非常に大きな変化が見られる、そのためこの先10年どうなるかということが、温暖化適応計画を今確定するために非常に大事になるだろう。

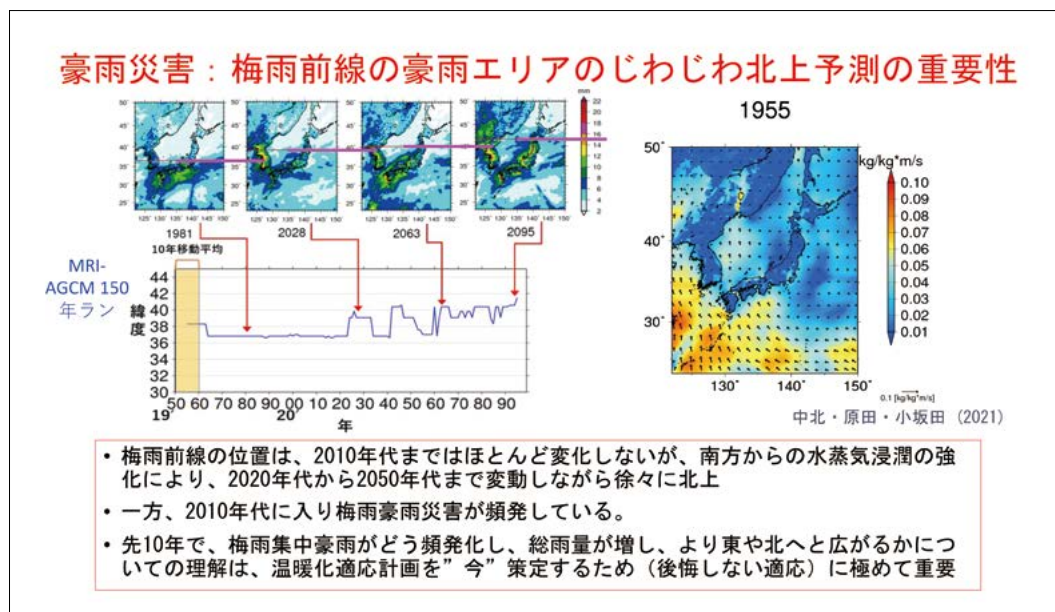


図3-2-1 梅雨前線の豪雨エリアのじわじわ北上予測の重要性

こうした豪雨に伴って洪水災害が起こるが、現状は、例えば大規模アンサンブル予測データ、d4PDF（地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース）やd2PDFのようなデータを使って予測の不確実性も含めて確率的な災害影響評価を行っている（図3-2-2）。しかし実際には温暖化に伴う長期的なトレンドに加えて自然変動、内部変動のようなものがあり、災害としてはそういうピークがあったときに災害レベルを超えることになる。こういった振れ幅も正確に評価した上で、いかにして災害を抑止する施策につなげるか、その取組みが大事だと考えられる。

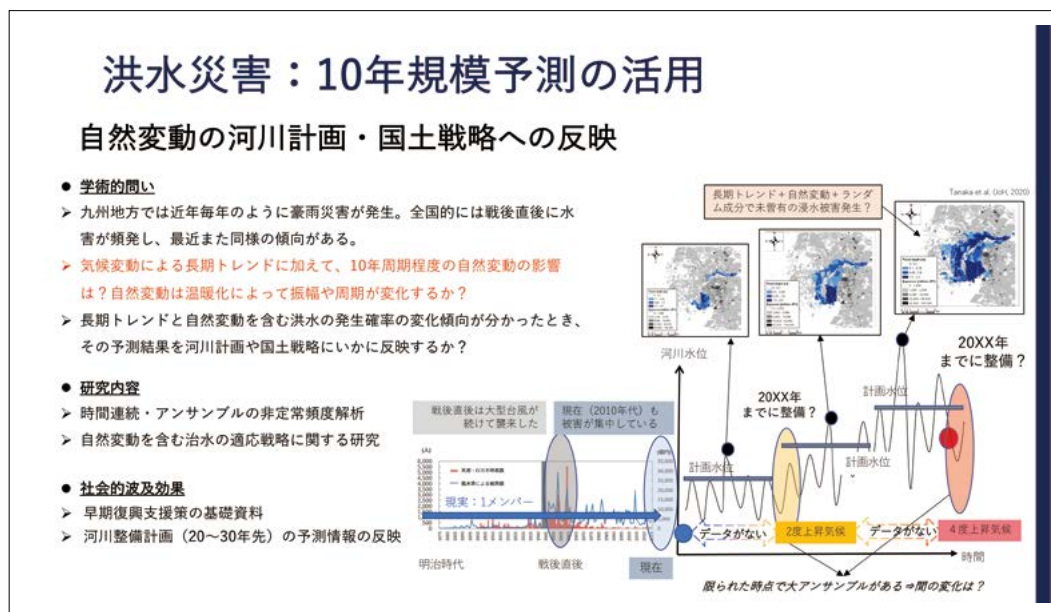


図3-2-2 洪水災害に対する10年規模予測の活用

今回の話で、台風が一つのターゲットになっているが、台風災害ということで見ても、近年、台風による暴風、豪雨の災害というのが全国各地で起こっている（図3-2-3）。例えば関西地方で言うと2018年の台風21号は損保支払額で1兆円を超える被害額になっている。この台風は、例えば最大瞬間風速の記録に照らし合わせてみると観測史上第1位の1934年の室戸台風、第2位の1961年の第二室戸台風に次ぐものとなる。こういった、最大クラスの台風というものが、長期的なトレンドだけではなく、数年から10年規模の単位の変動の中で起こっているだろうと考えられる。数年、10年単位というのを都市で考えると、都市の再生する時間スケールにも呼応する。そうすると、脆弱性という意味でも、被害の形態も変わってくるであろう。

災害をもたらすような自然変動、台風外力を定量的に評価することが大事になるが、都市域だけではなくて森林域でも、樹木レベルから林分単位、地域スケールまで、季節スケールから10年単位まで、影響を及ぼしていることになる（図3-2-4）。マルチな時間・空間スケールの中で、樹木レベルの被害が林分スケールの影響につながり、ひいては地域スケールの影響にもつながってくるという観点が大事になってくる。豪雨・暴風による倒木・流木、これが10年規模で生態系へ影響することを考えると、将来を見据えた予防的な森林管理というのも大事になっていくだろうと言える。都市構造の変化の時間サイクルや、中山間地、森林域での災害、こういったものが連鎖的に起こるという観点から、気象スケール、都市スケール、あるいは森林スケールにシームレスな接続をしていくことも大事になるだろうと考えられる（図3-2-5）。



図3-2-3 台風災害による都市・中山間地・森林域への影響（1）



図3-2-4 台風災害による都市・中山間地・森林域への影響（2）



図3-2-5 台風災害による都市・中山間地・森林域への影響 (3)

台風は、高潮・高波といった沿岸災害という意味でも非常に大きな外力となる(図3-2-6)。長期的なトレンドとしては台風の中心気圧がどんどん強まって下がってくるということになるが、実はその変動幅というもの、トレンドによる強化ぐらいの振れ幅がある。また沿岸域に関しては海浜の保全という意味では数年規模から10年規模の長期変動の影響が非常に鮮明に表れることになる。その点で、数年、10数年、10年単位の気象外力、台風外力、あるいは平均的な変動がどうなるかの理解が大事になる。



図3-2-6 沿岸災害・沿岸域の保全

漁業にとっては、季節スケールの海面水温あるいは数年から10年規模の年々変動、水温の長期的なトレンド等の予測が漁業資源という観点から非常に大事になる(図3-2-7)。また、海洋酸性化等の指標である溶

酸素濃度が生物活動の影響を受けるという意味では、生物化学過程の季節スケールの評価や影響予測も大事になる。

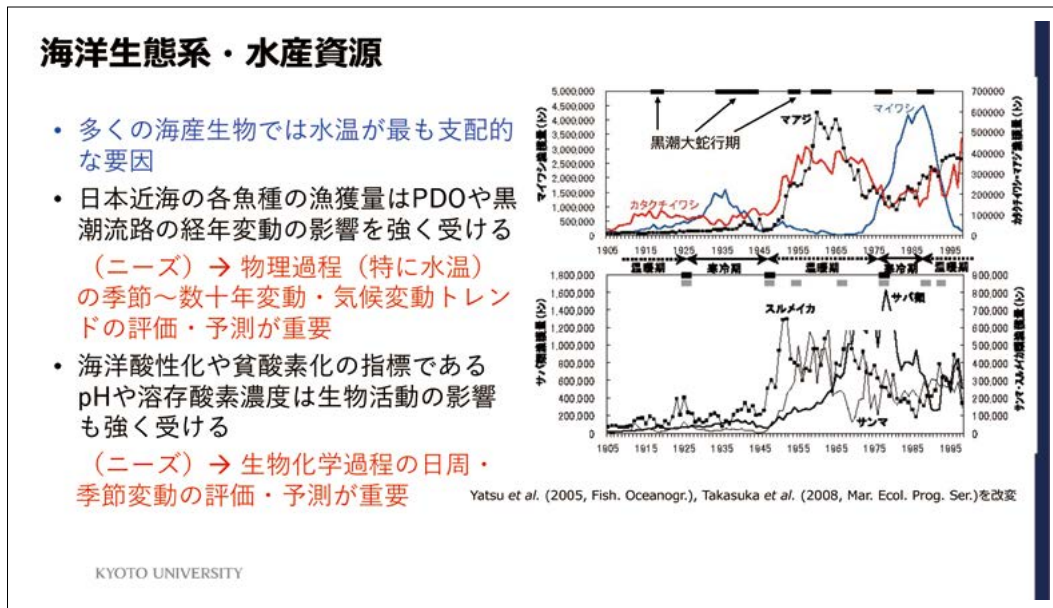


図3-2-7 海洋生態系・水産資源

季節スケールの予測情報は、水資源の観点からも非常に大事な予測情報になる。図3-2-8はタイと日本国内のダムの出水予測結果を示している。タイの方は長期的な変動を示しているが、2011年に季節スケールの予測が的中し、満水状態を回避できた。日本国内のケースは3月から9月までの気候モデル出力データの解析をした結果である。これは満水状態の予測だけでなく、季節スケールの予測でいかにして渇水対策ができるかということを示している。越年貯留を考慮した運用も今後大事になってくるという意味で水資源対策にも非常に重要で大きなニーズがある。

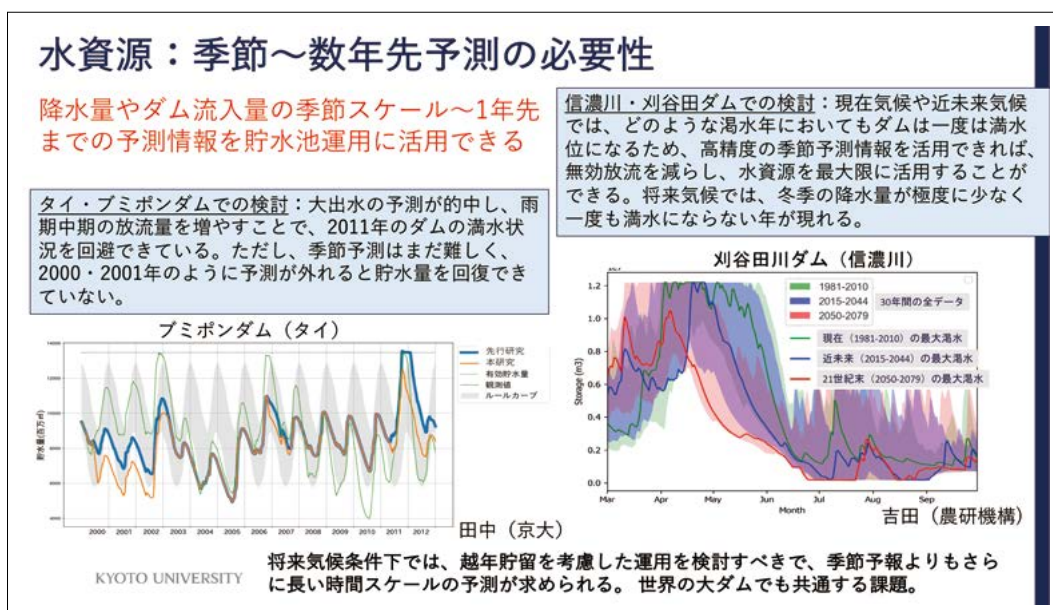


図3-2-8 水資源管理における季節～数年先予測の必要性

気象スケールの影響予測がカバーしている時間的・空間的な範囲をプロットした（図3-2-9）。短時間からより長期の時間スケールまで、長寿命の現象までをプロットしているが、気象現象としては、入れ子構造になるようなコヒーレントな構造がある中で、非常に広い範囲で影響を及ぼすことになる。時間・空間スケールのインタラクションの中でこういうことが起こる。

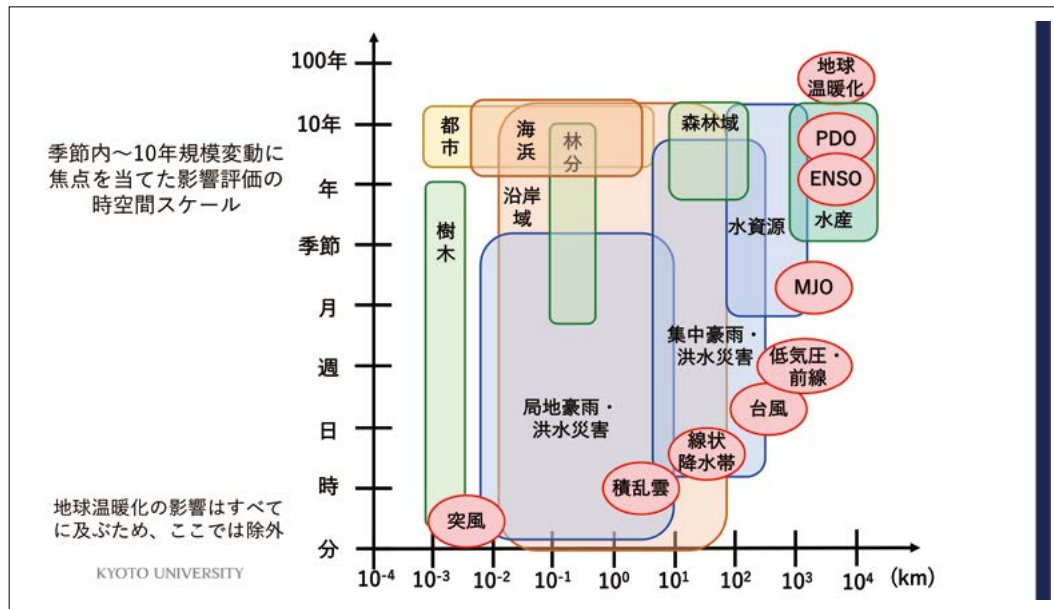


図3-2-9 季節内～10年規模変動に焦点を当てた影響評価の時空間スケール

今後に向けて、季節内～10年規模変動で災害・水資源・生態系への影響を評価するためには、影響予測モデルの高度化に加えて、大気・海洋・陸面の相互作用を考慮したシームレスな影響予測モデルの構築と、リアルタイムでの季節内～季節での影響予測、あるいは予防的な災害管理・水資源管理への接続の視点が重要である（図3-2-10）。また、気候モデル開発のコミュニティーだけではなく、ユーザーサイドとの協力を推進することによって、よりの確な予防的な適応策に貢献することを目指していくような、様々なセクターとの協力を旨とした研究開発が大事である。

今後に向けて

- 季節内～10年規模変動による災害・水資源・生態系への影響について、時間スケール毎の物理/化学/生物プロセスとともに、各時間スケール間の連続的影響を考慮した定量的予測
 - 非定常性を考慮した影響予測モデルの高度化
 - 大気・海洋・陸面の相互作用を考慮した影響予測モデル開発
 - 短期気象予測と気候変動予測の両者の知見を活用し、リアルタイムでの季節内～季節での影響予測、予防的な災害管理・水資源管理
- 様々なセクターとの協同を目指した研究開発
 - 大気・海洋結合モデルに、影響予測モデルをシームレスに結合
 - 脆弱性変化を考慮し、予測データのユーザーとの協同を推進
 - 季節内～10年規模変動の適応が、長期的気候変動への適応にも資するような取り組みとするため、予防的な適応策への貢献

KYOTO UNIVERSITY

図3-2-10 今後に向けて

3.3 日本の気候変動影響評価研究状況からの考察

花崎直太（国立環境研究所 気候変動適応センター 気候変動影響評価研究室 室長）

グローバルスケールの水資源の研究をしているが、今回は、所属する気候変動適応センターで行っている仕事を踏まえた考察を基に話題提供したい。気候変動適応センターの中で気候変動影響評価に関する研究室に所属しており、ここで日本のいろいろな影響評価のプロジェクトのコーディネートなどを行っている。

まずここでの考察の前提をご説明したい（図3-3-1）。従来は、気候変動の予測が100年規模で行われて、そこから影響評価が行われる。気候変動の予測がそのまま気温や雨の情報として社会の気候変動の対策に使われる場合もあるが、例えば米の収量がどうなるか、水資源や洪水の評価がどうなるかといったものは、一度、影響評価をかまさなければならない。これと同様のロジックを仮定して、10年規模あるいは季節単位の気象・気候の予測から影響評価にその情報が渡り、それがどうやって社会の気候変動などの対策につながるのかということを、日本国内で2031年までの予測ができるとした場合で考えてみた。

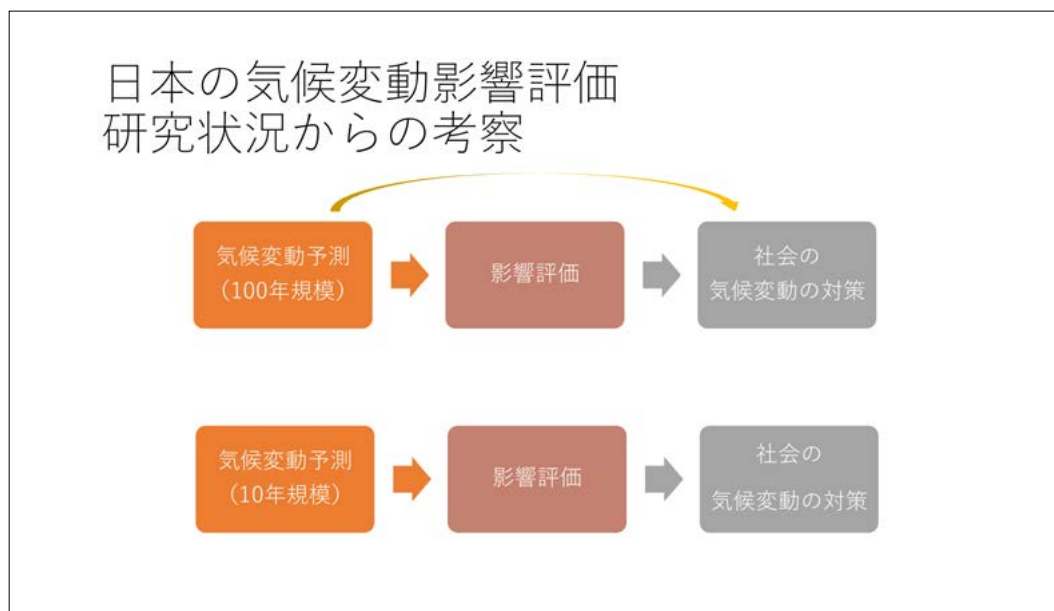


図3-3-1 前提とするロジック

現在の日本の気候変動影響評価の研究体制としては大きなプロジェクトが3つ走っている（図3-3-2）。一つが文科省の統合プロジェクトで、本日、竹見先生が御紹介になった領域テーマDである。もう一つが環境省の総合推進費のS-18で、三村先生がヘッドになられているテーマである。もう一つが、国立環境研究所の所内プロジェクトである気候変動適応研究プログラムで、約2億円の研究予算で所内の約3～4割の研究者が参画しているかなり大規模な影響評価のプロジェクトである。

これらのプロジェクトの違いについて、統合プログラムが極端現象や防災を主に研究しているのに対して、S-18や国立環境研究所のプロジェクトは防災以外の例えば生態系や水環境が長期的にどう変わっていくのかというところに主眼がある。S-18と国立環境研究所のプロジェクトは強く連携している。また研究結果の外部への発信については、国立環境研究所にはA-PLATというウェブシステムがあり、そこから情報を発信しているが、統合プログラムは恐らくDIASが中心になってデータを提供している。このDIASとA-PLATの連携も今始まろうとしているところである。このような研究体制がある中、今後、10年規模でやることになった場合、現在の気候変動の影響評価との連携や切り分けが一つのポイントになってくる。

1 日本の気候変動影響評価の研究体制



図3-3-2 日本の気候変動影響評価の研究体制

続いてこの温暖化影響評価のプロジェクトの中で具体的に何が研究されているのかをお話したい。気候シナリオが使われるのだが、2つの研究プロジェクトで使われている気候シナリオが大きく異なる（図3-3-3）。なお現在使われている、或いは現在までにつくられた気候シナリオについては、気候変動適応センターがまとめた表があるので別途参照いただきたい。

統合プログラムは、極端現象と防災を中心とするということで、中心に使われているのはd4PDF（地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース）が気象研究所の力学的ダウンスケールのどちらかと思われる。特徴は、d4PDFは多アンサンブルであり、気象研究所の力学的ダウンスケールは高解像度である点。これらに強いバイアス補正をかけることなく、タイムスライスで20年ぐらいの期間を中心に影響評価が行われていると伺っている。これに対してS-18や国立環境研究所の方では、長期変化と防災以外を研究対象にしているということから、中心になって使われているシナリオは全く異なる。農研機構や国立環境研究所が策定した気候シナリオが使われている。これは、驚かれるかもしれないが、全球モデルから統計的なダウンスケールの手法を使って1km、日単位の日本の気候シナリオが作られている。特徴として、統合プログラムは気象研究所のモデルが使われているが、こちらは世界の複数の全球モデルが使われている点が挙げられる。また、かなり強いバイアス補正がかけられており、過去の期間が厳密に観測と合うようになっている。加えて、21世紀を連続して計算することができる。このように、2つのプログラムはかなり違う気候シナリオが使われている

どちらもに共通している点は、近未来、例えば2030年ぐらいまでの影響評価にはなっていない。その理由として気候変化のシグナルがはっきりしないという背景がある。他にも影響評価にはダウンスケールやバイアス補正が必要であり、そこをどうするかという点も短中期の気候・気象の予測を影響評価につなげるときの課題になる。

2 研究対象（気候シナリオ）

統合プロ

- 極端現象・防災
- 中心的シナリオ
 - d4PDF
 - 気象研力学的ダウンスケール
- 特徴
 - バイアス補正なし
 - タイムスライス(2076-2095)
 - 多アンサンブル・高解像度モデルでダウンスケール

S-18, NIES

- 長期変化・防災以外
- 中心的シナリオ
 - 農研機構地域気候シナリオ
 - NIES気候シナリオ
- 特徴
 - バイアス補正あり
 - 長期連続(21世紀全体)
 - 全球モデルから統計的にダウンスケール・多モデル



近未来は影響評価の中心になっていない。↔気候変化がはっきりしない
影響評価にはダウンスケールとバイアス補正（と長期連続性）が必要。

図3-3-3 使用されている気候シナリオの違い

次に、台風、降雨／干ばつ、漁場や猛暑のこれまでの影響評価での扱われ方を紹介する（図3-3-4）。影響評価は非常に幅広く、健康、農業、防災まで広範であるため私から何か専門的に話せることはないのだが、台風については基本的に統合プログラムで扱われてきたと思う。河川氾濫や高潮の予測は最重要の課題であったと思う。一方、S-18や国立環境研究所のプロジェクトでは台風の農業影響などは行われていたかもしれないが、少なくとも中心的に取り組まれてはこなかった。

干ばつは、S-18や国立環境研究所のプロジェクトではほとんど取り上げられておらず、そもそも国内の干ばつの頻度や強度がどれくらい上がるのか、どれくらい深刻なのかというところから検討が必要と思われる。漁場に関しては、季節内や10年規模の予測への期待は非常に高いと思われる。最後に猛暑に関しては、特にS-18や国立環境研究所の方では、農業と健康（熱中症）の影響に関して中心的な問題となるため非常に関心が高いと思われる。地方公共団体でも気候変動適応法ができて対策が進んでいるが、特に防災と農林水産業と健康（熱中症）は、地方公共団体の関心事になっている。

このように、予測情報を使って社会実装に展開していくのであれば、影響予測の研究プロジェクトは非常に高いニーズがあるではないかと思われる。事例として、JSTの共創の場支援事業で領域再解析を作ることになっているが、これの10年規模予測版や季節予測版というものをやるというのは大変しっくりくるような印象を受ける。しかし、モデルを使った影響予測の研究となると展開するのが少し難しいと思っている。ここはどういう情報があると何ができるのかをそれぞれの専門家ともしっかりと掘り込んで検討しなければならない。

「台風」「降雨／干ばつ」「漁場」「猛暑」のこれまでの影響評価での扱われ方

- ・ 影響評価は対象が広いので、あくまで個人的な印象。
- ・ 台風
 - ・ 基本的に統合プロで扱われてきた。河川氾濫・高潮予測は防災の最重要課題
 - ・ S-18, NIESではほとんど取り上げられてこなかった。
- ・ 干ばつ
 - ・ S-18, NIESではほとんど取り上げられてこなかった。
 - ・ そもそも国内の干ばつの頻度・強度は上がるのか？
- ・ 漁場
 - ・ 水産の研究は特に現場に近いという印象。
 - ・ 現場のニーズは直近の不漁の原因説明や産業の振興全般にある模様。
 - ・ 季節内～10年規模予測への期待は高いのでは？
- ・ 猛暑
 - ・ S-18, NIESでは猛暑は農業や健康（熱中症）の中心的課題。
 - ・ 地方公共団体での気候変動適応でも「防災」「農林水産業」「健康（熱中症）」は最大の関心事。

モデルを使った予測研究を展開するのか？どう学術研究として展開するか？
予測情報を使った社会実装を展開するのか？（例：領域再解析のJST共創の場）

図3-3-4 台風、降雨／干ばつ、漁場、猛暑の影響評価での扱われ方

気候予測と影響評価、そして最終的なエンドユーザーの間でどう連携を取るのかについては、とても難しい問題で、国立環境研究所はこの問題の専門家会合「気候変動予測及び影響評価の連携推進に向けた検討チーム」を主催し検討している（図3-3-5）。既に第1期、第2期があり、現在は事実上の第3期となり、6年間続いてきている。座長は気象研究所の高萩出氏である。

第1期は、気候の予測と影響評価の研究者が一つに集まって、どういう課題があるのかを共有した。第2期ではもう少し広げて、研究者に加えて地方公共団体の情報利用者の方にも来てもらい、連携推進のための課題を重みづけして優先順位を検討したり、それぞれの理想像の共有を行った。第3期では、情報発信機関であるDIASの専門家や事業者の方として保険業界の方などにも来ていただき、さながらステークホルダー会議のような形で、どのようにしたら連携が進むのかということを議論している。

3 気候予測・影響評価・利用者の連携

国立環境研究所主催の専門家会合

https://adaptation-platform.nies.go.jp/plan/institute/expert_review_team/index.html

気候変動予測及び影響評価の連携推進に向けた検討チーム（第1期）

- ・ FY2017-2018 座長：高萩出
- ・ 気候予測・影響評価研究者：課題の共有

気候変動予測及び影響評価の連携推進に向けた検討チーム（第2期）

- ・ FY2019-2020 座長：高萩出
- ・ 気候予測・影響評価研究者＋「地方公共団体の情報利用者」：課題の重みづけ、工程・理想像の共有

適応策推進のための気候変動予測・影響評価に係る連携ワーキンググループ

- ・ FY2021-2022 座長：高萩出
- ・ 上記＋情報発信機関（DIAS等）＋事業者：～ステークホルダー会議

図3-3-5 気候予測・影響評価・利用者の連携

図3-3-6に示しているのは先ほどの第2期の検討チームにおける検討結果であり、図3-3-5に示したウェブサイトに掲載されている「将来のあるべき姿からのバックキャスト」である。「今やっていることは何ですか」、「5年後までに実現したいことは何ですか」、「それ以上先に実現したいことは何ですか」と気候予測、影響予測、利用者それぞれに質問し、それに対する答えをまとめたものになる。

この中で、気候予測の専門の方には、この季節予報や10年規模変動予測と50－100年の長期予測の融合は、恐らく向こう5年、10年でなくて、もっと先だろうと考えられている。その一方で利用者からは、現場のニーズとして、過去の現象の要因分析や季節予報、10年規模予測は常に出てくるものであり、ここに少しギャップが見られる。つまり今やってほしいというユーザ側のニーズと、実現はずっと先になるというサプライヤー側の見立てにギャップがある。

ちなみに5年先、10年先何がしたいかについて利用者に質問してみると、全然ぴんとこないというのが回答であった。なぜかと言うと、利用者としては5年後にどのような情報が出てくるのかということが全く予告されていないため、利用のための準備ができないというのが理由だった。当然、利用者は、5年後には何をしよう、10年後には何をしようといった計画も持ち合わせていないということになる。こうしたことから、提供の開始前からユーザー層と対話することが大事である。



図3-3-6 気候予測・影響評価・利用者間のギャップ

最後に、現在実施中の第3期について紹介したい。情報のフローを考えると、気候の予測、影響の予測が行われ、それらの結果をDIASやA-PLATが展開して行政が使う、または事業者（注：ここではコンサル）が行政の手伝いをして最終的に国民に伝わっていく、という流れになると理解されている（図3-3-7）。この情報の流れの中で、それぞれの担い手の代表的な方を集めてきて何ができるのかということ話をしている。また事業者の方、気候・気象のデータの提供をされる事業をされている方や保険業界の方に来ていただいているのだが、非常に動きが活発で、大きな新しい流れになっていると思っている。

5 情報の流れと当事者

適応策推進のための気候変動予測・影響評価に係る連携WG

気候変動予測情報の創出と利用に係る全ての主体が集まり、
予測情報の流れとその実現に係る課題を共有する。

▶ 予測情報の流れ
あるべき情報共有

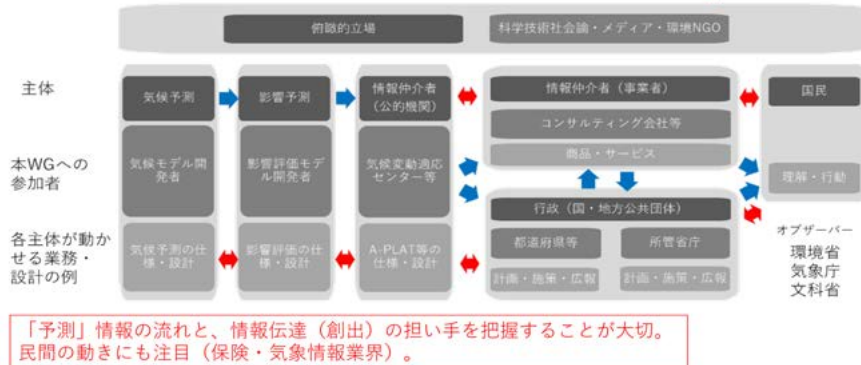


図3-3-7 第3期における検討概要

まとめると、取組の際のポイントとしては、まずこの10年規模予測は、現行の気候変動影響評価研究とはそれなりに距離があると思われる。出てくる気候変動のシグナルの大きさは恐らくそれほど大きくなく、またバイアス補正やダウンスケールが必須の問題として立ちはだかるので、これを誰がどうやるのかというところが課題になる。次に、気候や気象学者と影響評価研究者の相互理解が必要となる。特に影響評価の研究といっても多様であるため、多くの関係者との対話が必要である。更に、気候変動の取組みはもはや研究者だけで閉じていない。いわゆる「ステークホルダー会議」が必要で、エンドユーザー側や事業者の方との対話や情報交換が必要になる。

取り組むべき課題として挙げられている台風、漁場、猛暑に関しては、現場のニーズが高いと思われる。逆に干ばつに関しては、恐らくニーズの発掘から必要になると思われる。

最後に、影響の研究、特に予測・シミュレーションの研究に関しては、すぐに動けるかというのは必ずしも自明ではないが、基礎的・継続的な取組みがあれば突発的な問題に対しても対応力や機動力が出てくると思われる。

3.4「季節内～10年規模」の気象予測を想定した社会形成と研究設定

竹之内健介（香川大学 創造工学部 講師）

本ワークショップでは、これまでに気象予測モデルの話や、社会利用、利用者視点、エンドユーザーの話があったが、どのようにそれらをつなげていくかという議論の部分が私に求められていると思っている。そこで「季節内～10年規模」の気象予測を想定した社会形成、政策に関する課題整理を行った。私自身は、普段はどちらかというと短期予報を対象とした、地域や小学校・中学校等の学校など、現場レベルでのフィールド研究を行っている。

ポイントは4つある。気象予測、エンドユーザー側の社会利用、その間を仲介する気象情報、課題整理の4つである。それぞれの分野の研究自体も重要だが、それぞれの研究側から見たときに相手側に対してどのようなアプローチができるのか、そのアプローチの中から何か新しい議論ができないかということを考えた。

まず「各種政策と気象予測」について、図3-4-1は横軸がいわゆる気象の予測時間で、縦軸が水平解像度を表している。赤い点は現業運用されている気象庁のモデルのプロットである。文科省の創生プログラムや統合プログラムで議論されたd4PDFの力学的な予想をした20キロは青い円の辺りに位置する。今回議論の対象としている領域はオレンジの部分になる

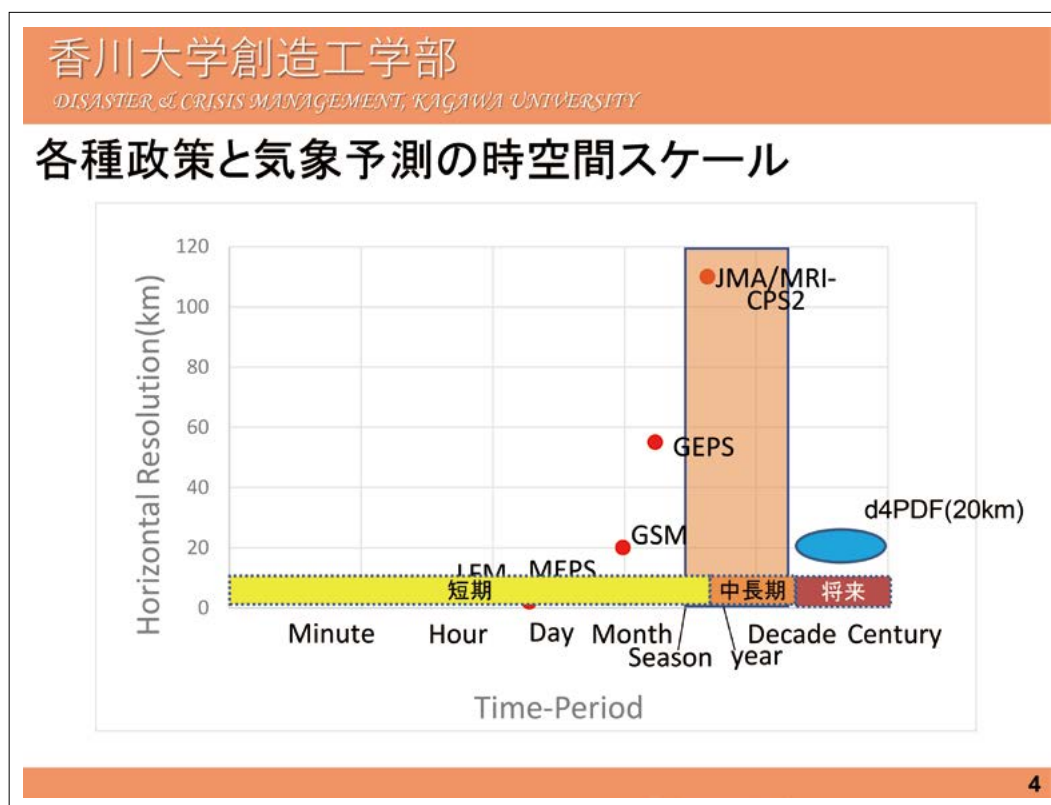


図3-4-1 各種政策と気象予測の時空間スケール

この図の中で、利用者側から見たときにどこが議論の対象になってくるかというと、一般的には解像度の細かいローカライズされた情報が求められるのだが、その中でも特に1年以内というのは各年度の短期目標の設定に関わる部分である。一方で、今回のオレンジの部分は、中長期の計画に属し、従来の50年や100年スケールでの将来予測と比較したときに、比較的現場の中長期的な計画に合わせた形での利活用が一つ想定

される。

こういった時空間スケールの議論をする場合、気象予測モデルの研究者側としては、やはり計算機能力や予測精度をどこまで持っていくのか、ある現象に特化するのであればその再現性などの議論が時空間スケールの設定要因として影響してくるが、社会的な要求、いわゆる利用者側の視点に立つと設定要因が変わってくる(図3-4-2)。例えば社会活動ならばどのような活動をするのかによって変わってくる。その活動がいつ行われるのか、そのタイミングによっても求められるものが変わってくる。また、影響要因として、いわゆる通常の自然科学的な要素以外に何か新しいインデックスが必要だろうか等のこともある。これらが議論の中心になってくる。馬場先生らは8つの要因があるのではないかといった議論をされている。このように、気象予測の時空間スケールの設定視点からは、社会要求に対する部分との間にギャップがある。そのギャップに対して予測側からどのようなアプローチがあるのかという議論が一つ挙げられる。

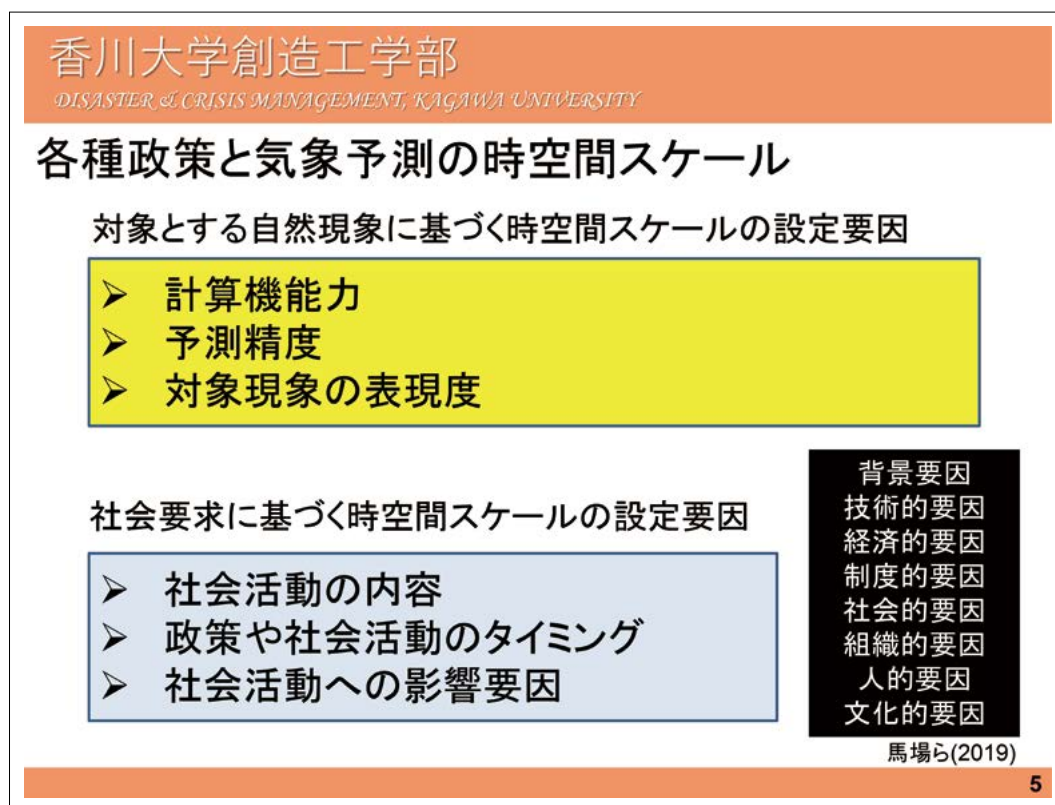


図3-4-2 時空間スケールの設定要因

次に「気候変動リスクと社会的適応」について、これは現在の私の研究テーマに近い話になる。従来、気候変動リスクに対する適応アプローチに関しては色々な議論がされている。図3-4-3にあるように、インタラクティブアプローチやコミュニティ・ベースド・アダプテーション等、SI-CATや地域適応コンソーシアム事業が主体となって文科省や環境省がベースプロジェクトを組み立てて、研究側もそれに寄り添うような形でこれまで議論が進んできたという背景がある。しかしステークホルダーが幅広いということもあり、やはり多くの議論が手法論や考え方、分析や計画にとどまっている傾向がある。そのため研究としては、気候変動リスクコミュニケーションや地球温暖化リスクコミュニケーション等に関して、自然科学の専門家とその利用者の両者の関係性をどう学問的に構築するかという点の議論を深めていく必要がある。

香川大学創造工学部

DISASTER & CRISIS MANAGEMENT, KAGAWA UNIVERSITY

気候変動リスクに対する適応アプローチ

多くの議論は、手法論や考え方、分析や計画に留まる。

自治体が適応を効果的に進めていくためには、①リスク評価と優先順位づけ、②既存施策と適応の統合、③リスクコミュニケーションの構築、④ソフトとハード対策を組み合わせた低コストの実現が鍵となる。(肱岡, 2016)



自治体やコミュニティ向けにコミュニケーション手法が開発されてきた。

- (例) ➤ インターラクティブアプローチ(市橋・馬場, 2015)
 ➤ コミュニティ・ベースド・アダプテーション(気候変動の地元学)(白井ら, 2017)
 ➤ ロールプレイシミュレーション(馬場ら, 2018)
 ➤ コデザインワークショップ(岩見ら, 2018)
 ➤ 統合型将来シナリオ構築手法(馬場ら, 2021)

7

図3-4-3 気候変動リスクに対する適応アプローチの議論

例えばリスクコミュニケーションの考え方として理解促進、相互理解、共同構築、仕組みの構築、象徴を通じた意識変化等、様々なアプローチ方法があるが、これらに対して、例えば10年予測を考えたときにどういった特徴が表れるかというポイントがある(図3-4-4)。理解促進の観点に立てばおそらく100年後よりも10年後のほうが中長期計画に見られるように現実的な関心は高い可能性がある。また相互理解という点からも政策や計画が議論しやすく親和性が高い。またその他の3つは恐らく100年スケールでも共通する話題になるが、リスクコミュニケーションの中で誰と誰が何を構築するのかや仕組みをどうするのかといったことは共通の課題として挙がってくると思われる。

まとめると、10年先の社会やライフスタイルとの関係において、気候変動への適応期、いわゆる10年スケールの適応に向けた期間として、気象予測を基にどのようなリスクコミュニケーションを描いていくのか、これは従来にはなかった視点になるので、より議論が必要かと考えている。

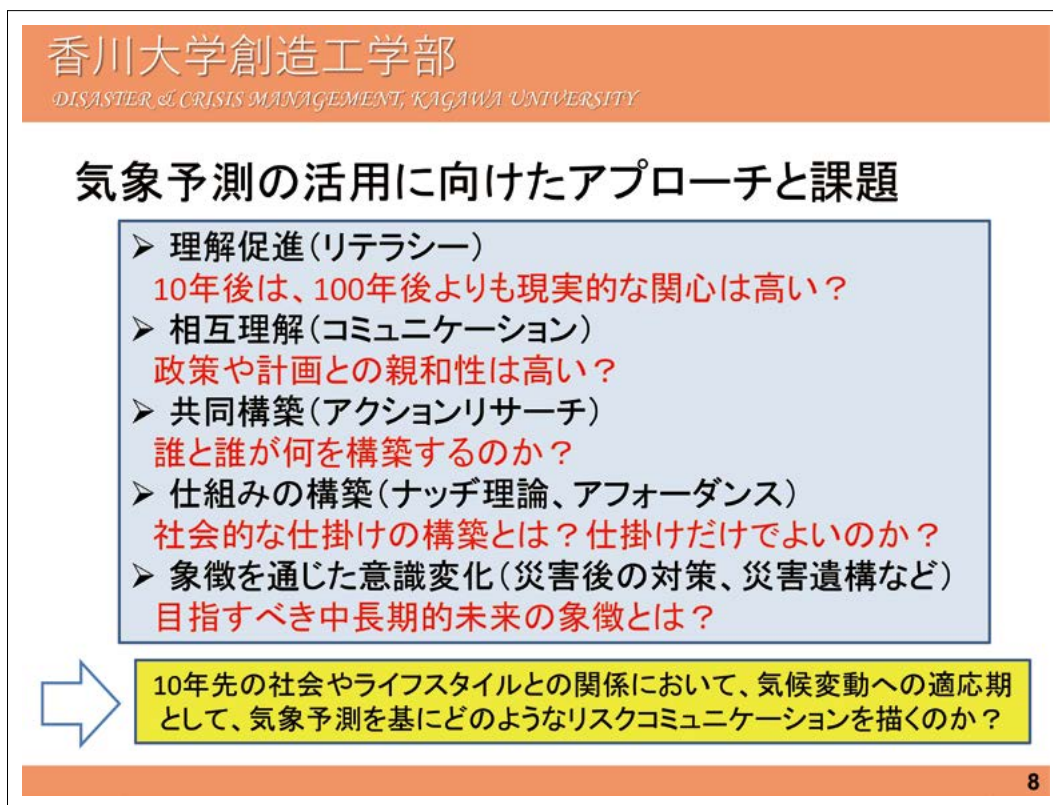


図3-4-4 気象予測の活用に向けたアプローチと課題

「気象情報と社会」について、一般的に気象情報に関してはこれまでも色々なアプローチが行われている（図3-4-5）。対象期間、解像度、現象、異常度等あるが、ポイントとしては気象予測を基としている気象情報に関しては自然現象を対象としているため、出てくる情報はあくまで自然科学的な情報になっていることが多い。当然、社会もそれを利用するのが大前提になるわけだが、結果として、やはりそういった気象予測モデルの結果を社会利用につなげるという点でのアプローチとしてはまだ十分ではない。これは以前から様々な議論が行われているところで、情報としてはエビデンスベースドなアプローチを取ろうということで議論はされているのだが、まだ議論が深まっていないという印象を受けている。

香川大学創造工学部
DISASTER & CRISIS MANAGEMENT, KAGAWA UNIVERSITY

気象情報のアプローチと社会利用

- 予測精度
精度向上により、安定的な対応や中長期計画の見通しが改善する
- 対象期間
中長期予測により、行動予定や対策構築が現実的なものとなる
- 解像度
高解像度化により、対象者が限定される
- 現象
予測対象とする現象の特定により、対象者が特定される
- 異常度
統計値からのずれの大きさにより、異常時の対応を促す

➡

気象予測を基とする気象情報は自然現象を対象としており、社会利用はそれを前提としている。結果、社会利用視点でのアプローチは十分ではない。

10

図3-4-5 気象情報のアプローチと社会利用

では気象情報に求められているものは何かというと、基礎データの充実、また利活用の視点をうまくつなぐ役割としての情報、特に中長期計画に関しては土地利用であったり産業構造や品種改良等、かなり大規模な計画に寄与する情報になってくるため、そのための基礎データの充実が気象予測モデル側としては重要になってくると考えている（図3-4-6）。

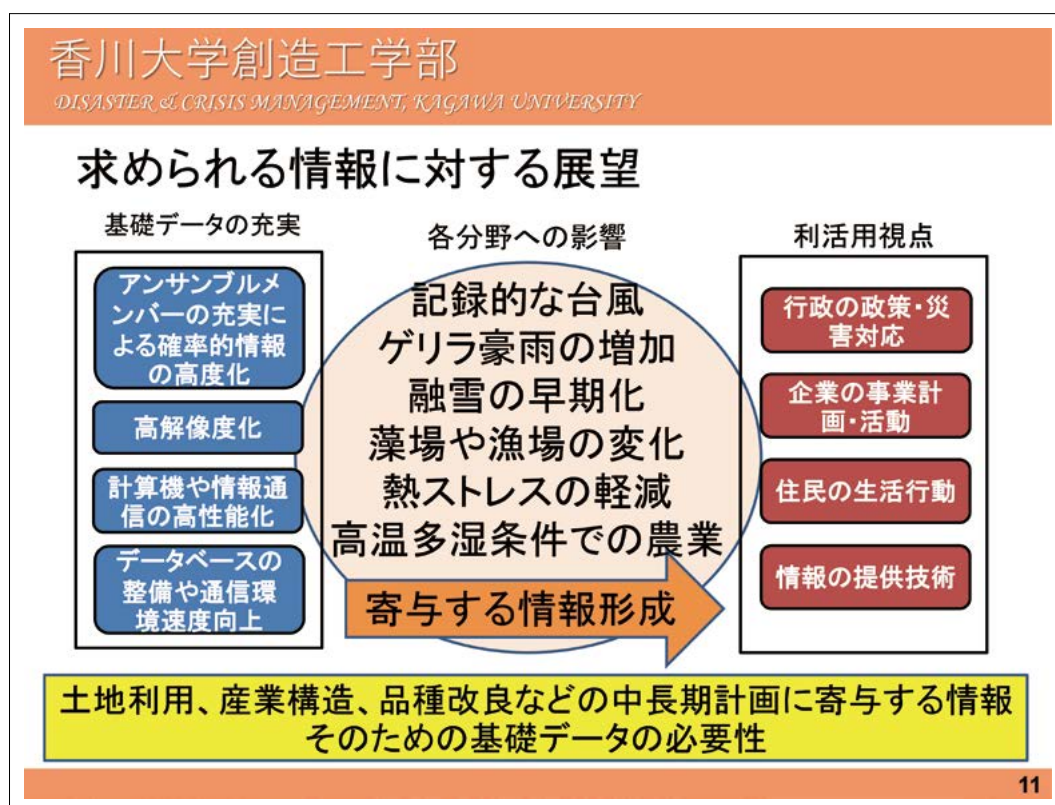


図3-4-6 求められる気象情報

最後に「課題整理」を行う（図3-4-7）。気象予測モデル側としては、季節内～10年規模に特化した社会需要とは何か、これは社会需要を研究すべきというよりは、やはり連携の中でそういった視点を少し考慮するということが求められる。また、予測時間、今回は季節内～10年規模だが、それ以外に求められる計算条件というのは何なのかを考えること。

リスクコミュニケーション側としては、地球温暖化コミュニケーションというのは、以前は不確実性のコミュニケーションと言われていたが、今は適応という段階に入り、変わってきている。その中で、この10年規模ということをつめた時に、新しいリスクコミュニケーションの手法の議論が必要になってくると考える。

気象情報としては、異常気象に対する早期警戒の情報も今は出るようにはなっているが、10年規模のスケール、例えば年当たりで何か情報を出していくのか、それは確率論的な情報なのか、事例的な情報なのか、色々な議論があると思う。仲介する情報としての議論、民間の気象会社も関係すると思うが、その辺りの議論が必要と考える。

最後に研究環境と人材について、特に気象予測モデルの開発者も不足している状況だと思うが、気象予測のいわゆるエビデンスベースな社会利用、この辺りをつなげる連携体制と研究分野の育成もまだまだ不足しているような状況で、この辺りの議論も進めていく必要があると思っている。

香川大学創造工学部

DISASTER & CRISIS MANAGEMENT, KAGAWA UNIVERSITY

課題整理

(各種政策と気象予測)

- 「季節内～10年規模」に特化した社会需要とは何か？
- 予測時間以外に求められる計算条件は？

(気候変動リスクと社会適応)

- 「季節内～10年規模」の気象現象に社会が順応する手法は？

(気象情報と社会)

- 「季節内～10年規模」の気象予測から得られる結果をどのような情報として提供するか？

(研究環境と人材)

- 気象予測と社会利用を結びつける連携体制と研究分野育成をどのように進めるのか？

13

図3-4-7

課題整理

3.5 議論

影響予測・評価において意味のある予測情報の時間スケール

Q：何をターゲットとするかによって求める予測情報の時間スケールが異なる点について、適応研究ではシグナルが小さいと扱いにくいいため100年先ぐらいの予測を使わざるを得ないと花崎先生はおっしゃっていた。以前はそうだったと思うが、例えば第6次評価報告書（AR6）の中でメディアがまず取り上げようとしたのが1.5度上昇のタイミングであり、これは近未来。20年ごとの確率評価である。地域スケールの適応研究でも時間スケールとして近未来の予測情報がより重要になっているという情勢の変化はないか。

A：おっしゃるとおり現場に近ければ近いほど近い未来の情報が欲しいという状況。特に民間企業は、色々と対策を進めておられるが多くは10年位先のことであり「2030年の情報はないか」と聞かれる。そういう意味で、現場はおそらく2030年の情報が欲しいが、影響評価の研究者にとってはちょっと扱いが難しいタイムレンジであるという状況と思う。

ただ適応の研究も、今何が起っていてどう変化しつつあるのかというところをやっている監視の分野と予測の分野がある。モデルを使った予測の分野はどうしても50年先、100年先という設定になってしまう。一方、今何が起っているのかを扱う監視の分野と近未来予測は連携できるのかもしれないと思っている。

Q：数名の先生がご発表で「10年ではなく30年だ」と言われたように、社会基盤の計画などを考えると10年先の予測は近過ぎるか。

A：近いと変化が小さいため30年後など先のことが分かったほうが役に立つ。あまりに先過ぎると今から準備しなくてもいいということになる。準備の施設を造ることを考えれば、30年後くらいではないか。

Q：先に行けば行くほど将来のシナリオに依存して不確実性が増すがその点はどう考えるか。

A：しかし10年後というのは年々変動の範囲内であり、10年後に平均気温がこうなりますと言われても実際に平均値で推移するわけではないためあまり意味があるとは思わない。1.5度という数字がマスコミで取り上げられるのは、平均気温上昇が1.5度を超えると大変なことになるというアジェンダ設定をしたからではないか。

今あり得ないことが頻発するというのは大変なことである。しかし例えば過去10年にあったぐらいのことが今後観測される確率が1.1倍になるとなった場合、現実的には、アンサンブルがないため、組織的に対応するほどの検知となるのは統計的に難しいと思う。

A：10年後という未来を描くと具体的に何ができるかというのは、ハード対策という意味では、やはり時間的には非常に差し迫っているという感覚がある。ただ、例えば災害を考えると、自然変動の中でどういった極端な天候場や気象場が起こり得るかということの何らかの確率的な評価があれば、例えばソフト的な対策をどうするかを考えることがあり得る。10年というより身近な将来になり、具体的な適応でどういうことをやるかという意味では、意外と対策を練りやすいような気がしている。自治体の方々も、むしろそういうことの方を必要としているのではないかという気がしている。

Q：30年先位のところの予測される平均的な状態や変動の統計量がやはり重要となった場合、現在10年規模変動予測で盛んに行われている初期値問題とはちょっと変わる気がした。初期値化は割といいかげんで良く、むしろ100年後の予測をする場合と同じようなシナリオでやっていって、アンサンブルを沢山やって30年後のところの統計情報をしっかり得ておくという、そちらのアプローチになるという印象を受けたがどうか。10年規模変動というときに、皆さんが頑張っている初期値化の役割が少し分かりづらくなったという印象を持った。

A : JST-CRDSが今回こういうテーマにした背景には、10年規模変動が何かに載っていて解釈を難しくするということが言われ、ヨーロッパ、アメリカでもその辺をちゃんとしていこうという動き、より具体的に言えばハイエイタスが21世紀の最初にあったことで温暖化のシグナルが若干弱まって見えて、なかなか社会の理解を得るのが難しかったということがあると思う。これは温暖化懐疑論と戦っている立場の人にとっては非常に重要だが、社会の適応や対策を考えるときには長期的には温暖化が進行している中で自然変動で行ったり戻ったりすることに一喜一憂する話ではないのではないか。

先ほどの渡部先生の話では10年規模の変動をぴたりと予測することは時空間スケールを大きくしないとなかなか難しいとのことであった。それならば、社会応用を考えるのであれば、30年後、80年後の話で十分ではないかと思う。例えば10年後の前後5年ぐらいは台風が少なく、その後15年、20年後の前後5年は台風が多いということが分かったときに、果たして何か意味のある社会的対応ができるのかというのは、考えれば出るかもしれないが、個人的にはすぐには思いつかない。そういう意味では着実に長期の気候変動の予測をやっていくのが良いのではという気がするがどうか。

あるいは、10年先をどう適正に当てるかということをやること自体が気候のメカニズム理解につながり、それは30年後、100年後の予測の信頼性を上げるのにも効く、あるいは人間活動の影響がむしろそういうところに効く、例えば人間活動は温室効果ガス排出以外にエアロゾルに効くなどのことがあり、それをやるのがやはり地球システムモデルの信頼性を上げるのだといったことがあればやる価値は非常にあると感じた。

A : どういう分野を考えるか次第という面もある。例えば森林生態系を考えると倒木や流木によって生態系が大きく変わるというイベントがある。あるいは、そういったことが例えば10年後起こり得るとなった場合に、予防的に何らかの管理を行うということはあると思う。

また初期値問題に関する御指摘について、リスクという意味で言うと、10年後にどういう確率で起こりやすいかという確率的な評価になってくる。従って例えば2030年の夏はこうですよというよりは、10年後の2030年、あるいは30年後の夏の天候場、気象場がどうなるかという確率的な情報が実際には大事になるのではと思う。

Q : 気候というものの本質的な時定数からして30年から100年後の計算を着実にするほうがよいというのは確かにおっしゃるとおりで、高解像度の気候モデルになったら解決するという問題ではない。1キロ解像度で恩恵があるかどうかを科学的にまず確かめなければならないラインは、恐らく季節予測、MJOをもう少し長く、せいぜいモンスーンまでうまくできるかということが現状だと思われる。一方で、MIROCとNICAMでの我々の経験としては、温暖化を想定するような計算をしたときに気候感度の傾向が逆であるとか、エアロゾルへの応答の符号が逆であるとか、従来型のGCMと高解像度の雲を直接計算するようなモデルでは応答が逆だということを見ている。台風や豪雨の表現でも、恐らくはMIROCのほうがマイルドな結果になって、NICAMのほうは現実にこんなことあるのかなというぐらい極端な結果を出してくるのではと思う。そのようなモデルの現状であるので、d4PDFのような計算をもしもNICAMのようなモデルでできるようになったときに、それが現状の従来型の気候モデルとどのように違って、どちらのほうが信用できるのかということは確かめていかないと、30年後や100年後の計算を従来型のモデルでやっていったからといって、信用できる情報になっているかどうか分からないのではないかという懸念があるように思うがどうか。

A : 正しかったかどうかはすぐに分かる向こう10年ぐらいをきちんとできるようにしていくということが信頼性を上げることにつながるではないかと思う。

地域気候変動適応センターの現状およびニーズ

Q : このワークショップの背景の一つとして、社会的ニーズが災害対策、気象災害の対策をしないといけない、またそのための科学的な材料、知見が必要であるという点にあると思う。そうすると社会的な

要請としては、各自治体レベル、本当にいま対策の仕事を実際にしなければならないというところの部署からすると、まさにここ数年、10年ぐらいの対応をどうすれば良いかということのを恐らく求めていると思う。先ほどの話にあったように現象論的にはややシグナルが得づらいところ。サイエンスとしては確からしい成果を出すにはもう少し長いスケールの時間のものを重点的にやったほうが良いかもしれないが、そこ社会的ニーズにギャップが若干あるような気がする。結局はそれなりの時間スケールのものが必要で、それを落とし込んで数年や10年スケールの材料を提供することになるのかもしれないが、対策の側から見るとそのくらいの時間スケールの情報が欲しいという状況になっているのだと思う。そのような考え方の下で質問したい。地域の気候変動適応センターが立ち上がってきていると思うが、そういうところに気候変動に詳しい者は誰もおられない場合がある。自分たちだけではどうしたらいいか分からず、例えばA-PLATの情報は得られるが実際どう使って、どう理解したらよいか分からないなどのことがあるため、そのアドバイザーを頼まれている。時折講演をしたりして、主には気候変動の仕組みなどの基本的なところの理解を深めたり、自分たちがやっている仕事はどういう意味があるのかというところの意識づけを行ったりということをやらせていただいている。現場はそういう状況。そういった方々に、いかに科学的なところから出てきた気象情報や気候変動の情報を活用していただくか、という部分を先生方が実際にどう考えられておられるのかお聞きしたい。社会に役立つ研究という観点からすると、どういう研究を今後していくと良いかについての示唆もそこに含まれてくると思う。

A：10年先を対象とした予測モデルへの需要ははっきり言って高い。というのも、私も広域協議会等に入らせていただいているが、例えば市民啓発にしろ、事業者さんへの啓発にしろ、50年、100年という議論をしたときに、やはりぴんとこない。と同時に、では何をしていけばいいのかというのが当然議論になるが、なかなか進まない現状がある。一方で行政のほうも先ほどのお話のような状況であるため、明確な方針が出にくい状況もある。ただしちょっとした気温の変化で大きな影響が出るような農業分野では盛んな議論が行われている。

10年先の予測が出せる大きなメリットとしては、例えば地域レベルでの気候変動適応計画の議論は環境基本計画の中で定めているところが多いもののあまり具体的な議論が進んでいないが、もし5年、10年というスケールでの何か情報提供が明示できるようであれば、その辺りの議論を促進できる可能性がある。また行政のみならず事業者や市民レベルでも、50年、100年ではなくて、例えば5年間隔でどういった変化が生まれていくか、例えば7月に梅雨が明けたあとに猛暑日がどれぐらいあるのかということが議論になるのと同じように、それぞれの事業の中で影響が出る日がこの5年スパンでどの程度あるのかについての情報があれば、当然、全く出ないあるいはほとんど微々たるものであるというような分野もあると思うが、大きな影響が出てくる部分はあると思う。

この点については、現象として確率論的な議論をする必要があるのか、それとも状態変化なのかによって変わってくると認識している。例えば確率論的に頻度が変化するというのであれば、現在においても発生し得るわけで、状態変数とは扱いが変わってくる部分があると思われる。どのような変数がその分野に影響するかというのを考慮しながらとなるが、少なくとも5年、10年の情報があるというのは、この適応計画を進める上でも非常に強いツールになってくるのではないかと考えている。

A：地域適応センターは非常に多様で、色々な形態がある。非常に多いのがいわゆる環境部局に設置された場合で、その場合はおっしゃるとおり専門家の方が全くいないという問題がある。さらに深刻かもしれないのは、そこから農業の部署や土木の部署に話をもちかけても、なかなか話が通じないという問題だ。農水省や国交省といった国の省庁の方を見てしまうため、環境部局が横から来ても対応できないということがあるように見える。従って特に環境部署が適応センターになっている場合には、国の省庁からの協力や理解が必要で、時間をかけてしっかりと全体が意思疎通するようになっていかないとはいえないと思う。

2年ローテーションの問題や気象の専門家が環境部局にいないという問題は地方公共団体の方と話す

と必ず出てくる問題で、専門家を雇ったり、もう少しローテーションを長くして専門家を養成しないといけないというのは必ず言われる。しかし具体的にそれが国のどういう仕組みで実現されるのかというのは分からない。

- C：1点補足だが、インデックスの話、いわゆる各分野においてどれぐらいの温度でどういう影響が出るかというのがよく一覧表になっていたりと思うが、行政の方々は専門家ではないので、そこを求めるというよりは、その仲介役のような役割を果たすようなものがやはり求められるところが強いと思う。例えばそのインデックスを見て何ができるのかという議論を皆でするのは一つの方法だと思う。しかし相談している方がどこまで深く対策を考えられているか、求められているかなどによって、場合によっては専門家につなげる必要性が出てくると思う。「A-PLATを見てください」だけではなかなか難しい部分が多いと私も思う。御参考まで。

影響予測・評価のためのモデル開発における研究課題

- Q：影響予測に関する研究の方向性の一つとして、JST 共創の場形成支援事業で進められているような領域再解析があるとのこと指摘があった。同時に影響予測研究は非常に多様であるとのこと指摘もあった。後者に関して、個々の影響予測、影響評価に係る研究、モデル開発などにおける技術的な課題について補足をお願いできれば。
- A：文科省の統合プロで取り組みつつあるが、気候モデルと影響評価モデルを結合して気候予測と影響予測を同時にやろうということが進められている。従来は気候予測モデルを走らせて、その出力データを利用して影響予測を行うという流れになっており、どうしても時間的なギャップが生じることが問題点として指摘されていた。そのギャップを埋める取組みとして、一つはモデル間、気候モデルだけではなく影響予測モデルもカップルして同時に影響予測するというアプローチがとられている。こうしたアプローチでより短い時間スケールに落としていくことができれば、例えば季節内から数年規模、10年規模変動の影響予測ができるようになるのではと思われる。

リスクコミュニケーション、行動変容などに関する研究

- Q：竹之内先生からの話題提供では10年先の予測情報に対するリテラシーやリスクコミュニケーションなどにチャレンジングな研究空白部分があるということをお指摘いただいた。この部分に関連して人文社会科学系の分野の研究要素にはどのようなものがあるか補足をお願いできれば。
- A：これまでの気候変動適応の議論は、どちらかというと理解ベースの議論が主流であった。エビデンスベースで予測モデルの結果を理解して、自分たちはどうすべきなんだろうかということを考えるというのがメインになっている。5年先、10年先は事業者さんにとってかなり現実的な話である。住民にとっては1年ごとの変化のほうがより実感として伝わるかもしれない。これらについてのコミュニケーション手法の検討は、従来の気候変動関連の研究とはまた違った議論ができるのではないかと考えている。一方、例えば防災であったらリスク認識が時間スケールの違いでどれくらい変化していくのかという研究が必要と思われる。規模にもよるが、一般的には災害が起きて数年経つと実感が薄れてしまうと言われている。そのようなリスク認識が時間スケールによってどういうふうに異なるのかというところを研究ベースで議論が必要である。
- チャレンジングな社会的取組としてナッチや行動経済学があるが、なかなか難しい。例えば東京駅の前に気候変動を象徴するオブジェを置いたら人の認識が変わるのかといった検討が可能だと思われる。最近だと電気自動車について各事業者、製品側が色々なことを検討されていると思うが、見えないところでのアプローチが実際に利用者、購入側に理解されているのかというのがある。ナッチの議論は、そういうものに気づかずにそういうふうな行動をしてしまうというのが一つの売りにはなっているが、実際それが効果的に進むのかというのは、10年先の予測に限らず、50年先、100年先の予測でも同じよ

うな議論ができると思う。各研究者でもっと社会的効果を深めていく必要がある。

- C：ユーザーを考えすぎると研究開発は若干難しいところがあると思っている。一般の方に話を聞くと温暖化の予測も1キロメッシュで欲しいとおっしゃるが、100年後の予測を1キロメッシュでやってみて、例えばあるメッシュと次のメッシュで100年に1度の豪雨の雨量が1.5倍違いますという結果が出たときに果たしてそれを本当に計画に使うかという非常に疑問がある。

コミュニケーションの話も、天気予報からのアナロジーで言うと、夕方から雨が降りますよと朝の時間に言われれば、確率が高ければ必ず傘を持つと思う。従って、今はリスクコミュニケーションが必要な理由があやふやだが、現在の天気予報並みに予測精度が上がれば、皆それに従ってきちんと行動できるようになるのではないかと。今はまだそこまででない中で曖昧な情報をどうやって使っていいかわからないと言っているような状況ではないか。

もう一つ、第4次評価報告書（AR4）の頃から書いてあるが、現状のリスクに対して十分準備できていないところはまずそれに対して準備をすることが必要にも関わらず温暖化がどうなるかというところにしか関心を持たないというのは防災の観点からは不十分な点と思われる。議論のはじめのほうでご意見あったとおり、シグナルが低いと、例えば5年後には今に比べて1.5倍猛暑日が増えますといったときに、どういう社会的な対応ができるか。相手は知りたいと思って見るが知ったときに何ができるかというのは実際難しい。2週間後に台風が東京に来ますと分かっても2週間前からできることは限られている。さらにそこには不確実性が大きいとなったら、やはり皆さん様子を見る。その辺も考えながらターゲットを絞らないと、10年スケールになったらどのぐらいの誤差でという空間スケールの予報が可能になるかということ無しに議論はできないのではないかと思います。

- C：おっしゃるとおり。結局のところ、ユーザー側もしっかり分かっている。「じゃ、その精度ってどれくらいあるの」という議論は当然出てくる。一方で、例えば事業者にしる一般住民にしる、ベネフィットの部分も結構気にされている方が多い。リスクコミュニケーションの分野でよくある例だが、1万円損するのと1万円もらえるのとではどちらが影響を受けるかという議論をすると損失に対して過敏な人が多く出る。今の議論は、どちらかという自然情報ベースで気温が何度上がります、こういうことが起きますということが議論されているが、今の気象情報でもかなり不確実性があるので、5年先、10年先の予測が実際に精度がどうなのかということも踏まえながら、自分たちが気にするようなことをまずは軸に考えることが必要。この辺りはリスクコミュニケーションの基本になってくるが、その中で社会的な議論を進めていくしかないのではないかと考えている。

基本はそれぞれの分野でどういうことができるのかを考えることが重要。仲介するようなものをうまく構築できると両方の研究がうまく進むのではないかと考えているが、その辺りはもう少しよく考えていく必要がある。

議論の振り返り

- C：10年先くらいの近未来の予測情報が影響評価に使えるかについて、どう使えるのか分からないという意見があった。また社会基盤施設の設計などをしようとするならば10年というのはリードタイムが短か過ぎて使えないが、各種ソフト的な対策としては使えるだろうという話があった。

仮に30年ぐらいの変動の統計量が大事だとしても、では30年の予測をやりましょうという単純な話にはならず、初期値問題か境界値問題かで全く問題が異なるのではという指摘があった。

結局ポイントとしては、10年先の予測ができたときに社会的にどういう意味をもたらすのかというところをもう少しきちんと考える必要があるという点だった。ただし10年先をきちんと予測するような技術があれば、それを目指して気候科学を発展させると、それは必ず社会的、長期的な面から見ても非常に大きな恩恵を社会は受けるだろうということだった。

その他、最後のほうの議論としては、リスクコミュニケーションについて、社会に情報が出ていった時

にどうするか、どうなっていくのかということでは、天気予報並みに当たれば行動につながるだろうという意見があった。一方で現実はそのまでの精度になっていないため簡単にユーザーはそれを見抜くだろうということだった。どれくらいばらつきのある情報なのかということはユーザー側ですぐに分かってしまう。そのため情報が出たときにきちんと社会が受け取れるように仲介をするような人を用意するのが重要だというご指摘があった。

3

影響予測・ 評価セッション

4 | 基盤・横断セッション

4.1 気候変動予測データ基盤について

河宮未知生（海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター センター長）

計算基盤、データ基盤についてと依頼いただいたが、今回はデータ基盤を中心とした話となる。前半は、DIASとA-PLATの現状を共有する形となる。花崎室長の話提供と相補的なものになればと思う。

私自身は必ずしもデータ基盤の専門家ということではなく、温暖化予測の分野の研究者として文科省の統合プログラムに関わっている。特に炭素循環などに関わるところで代表を務めている（図4-1-1）。

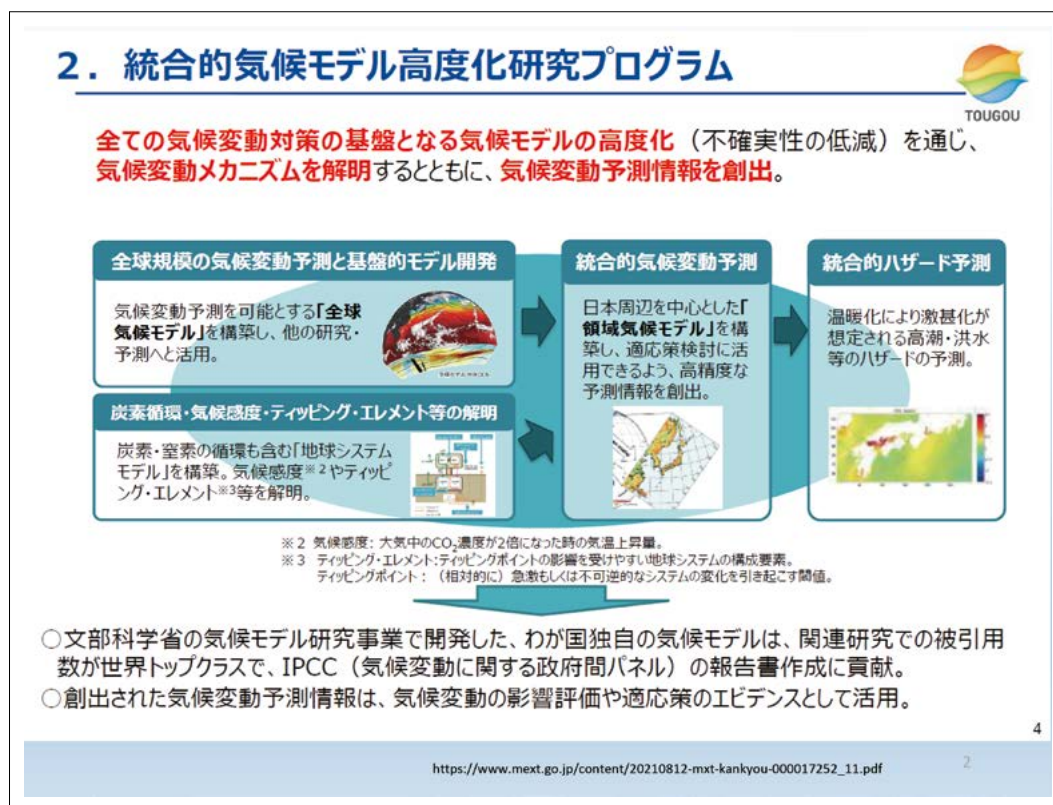


図4-1-1 統合的気候モデル高度化研究プログラム

統合プログラムはCMIP（結合モデル相互比較プロジェクト）やIPCCに向けた温暖化予測が一つの大きな目標だが、気候変動適応に向けたデータセットの創出でも大きな成果がある。それは「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）」と名づけられた影響評価用のデータセットである（図4-1-2）。

このデータセットは全地球用のモデルと日本付近に着目した領域モデルを併用して確率情報も含めた将来予測データをデータベース化している。気象学や気候学分野以外の研究者にも非常に多く使用されている。気候変動で何が起こるかといった情報に転換したものは実際の政策立案にも活用されており、特に水文分野・水管理の分野で進捗が著しい。また、利用される中で追加情報の要望があれば更なる気候予測のモデル開発

に生かされていくという循環が出来上がっている。領域モデルともタイアップしているため、流域ごとの将来の最大降水量の変化のような非常に細かな情報も出せるようになってきている。

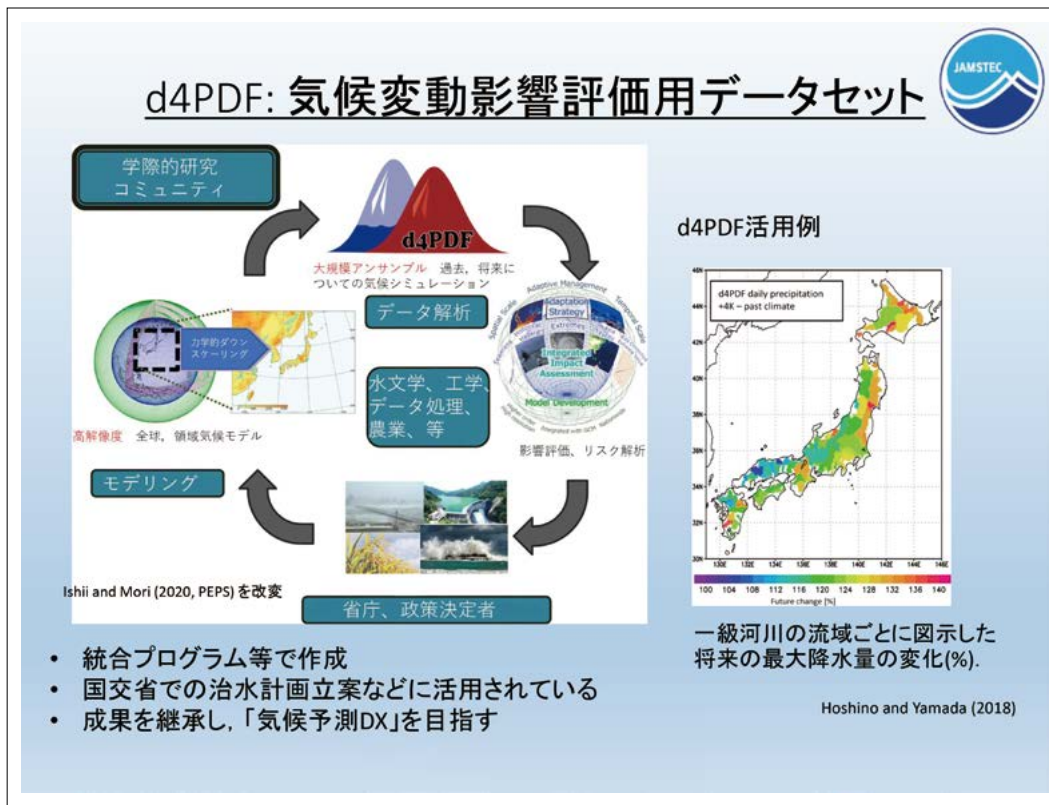


図 4-1-2 d4PDF

このd4PDFを発信しているのがデータ統合・解析システム（DIAS）で、これは大規模ストレージ、サーバーなどの非常に充実した技術基盤を擁しながら研究開発コミュニティに環境データを発信していくシステムである（図 4-1-3）。またアプリケーション開発もDIASの枠内で行っており、単なるストレージというよりは知識創造空間として機能することを目指してきたシステムである。

DIASは今年度から研究寄りからオペレーショナル寄りにシフトする方針となり、従来の東大、京大をはじめとした大学・研究機関中心で運営してきた体制から、海洋研究開発機構（JAMSTEC）が運営機関となって運営を担当する体制に変更した。

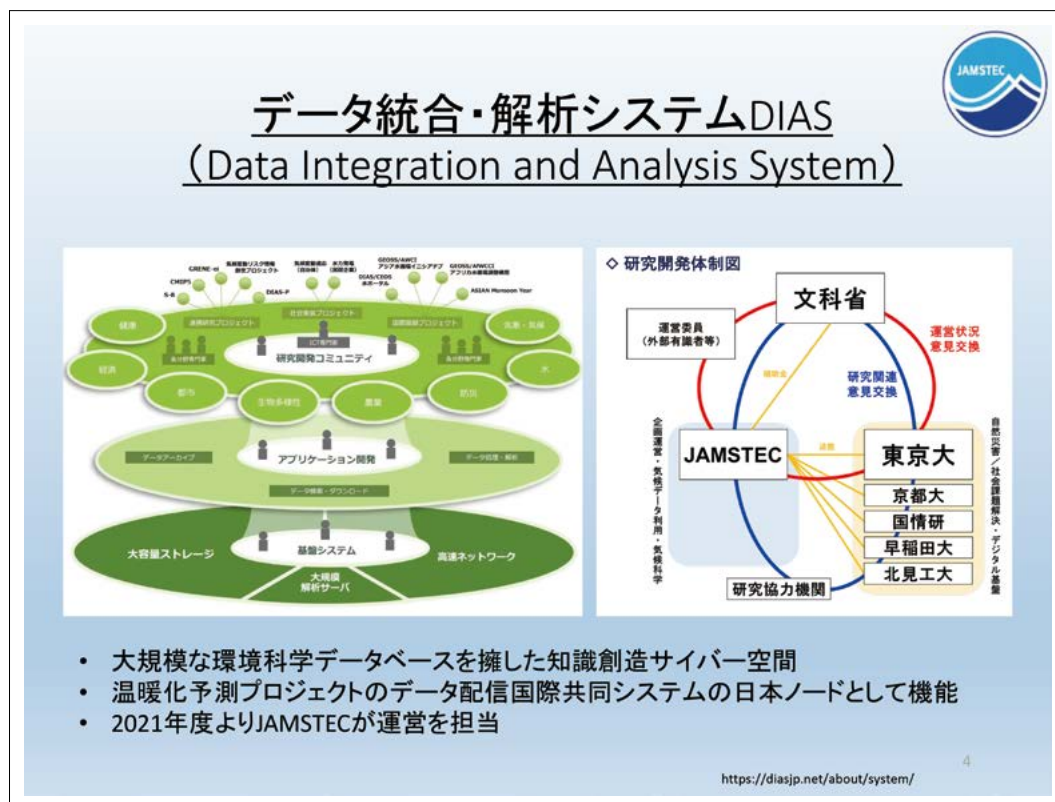


図4-1-3 DIAS

d4PDFを含めた影響評価用のデータセットを2022年に新しく公表してDIASから配信するという話になっている（図4-1-4）。ただ地方公共団体の方が使用するには少しハードルが高い部分があると想定しており、国立環境研究所の気候変動適応センターに翻訳的な作業の協力を仰いでより広い分野の人に利用いただけるよう準備している。

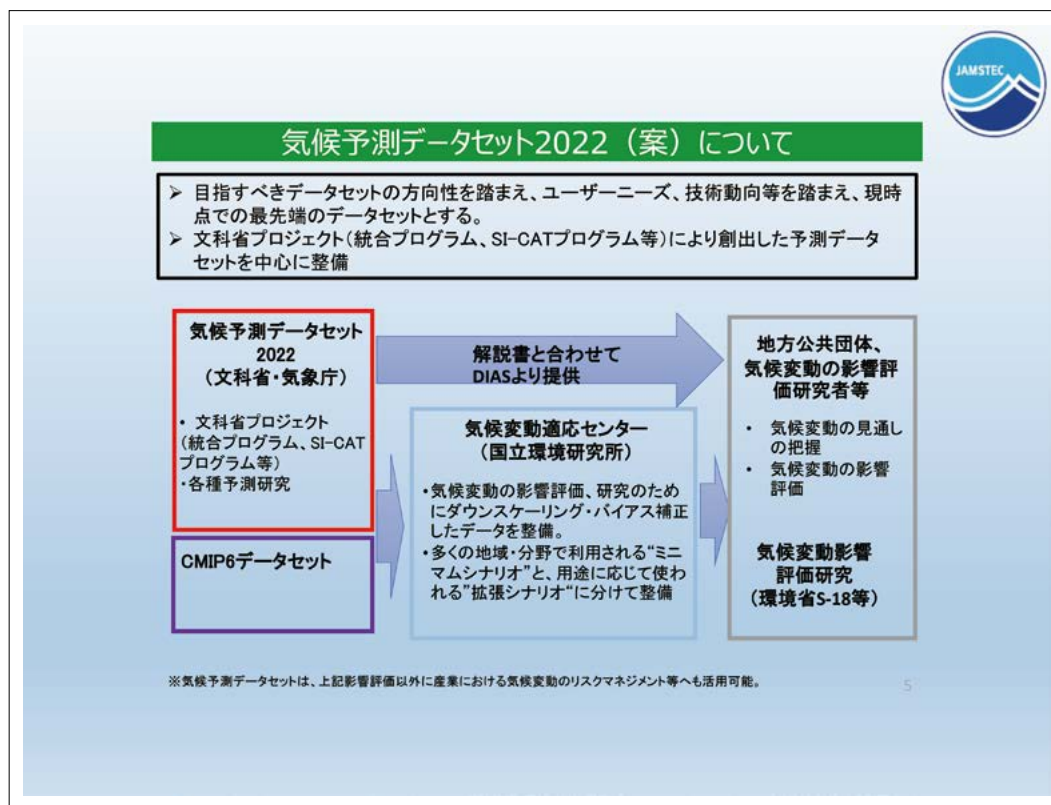


図 4-1-4 気候予測データセット2022（案）

気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）では、実際に使用し適応の行動を起こそうとする人々に対して膝を突き合わせてデータの使い方などを助言しながら、自らもデータ基盤の充実を図っていくということをやられるのだと理解している（図 4-1-5）。データセンターではないという立場だと理解しているが、一方で地表面気温の変化や降水量の変化など、基本的な予測データについてはかなり充実したものができていると思う。

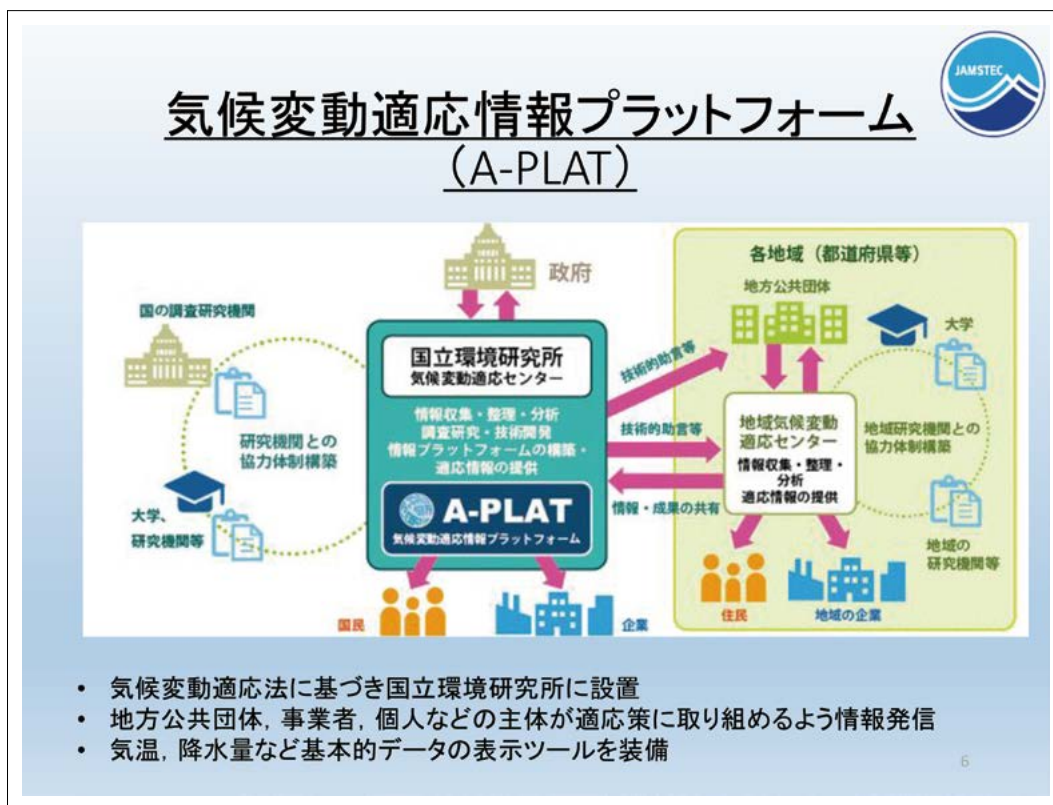


図4-1-5 A-PLAT

今回のワークショップの主なテーマは季節～10年規模変動ということだが、10年規模変動に対するデータ基盤というものは今の段階では出来上がっていないと考えている。基本的な気候変動に関するデータ基盤について皆さんと情報共有しながら、どのようにしていけばよいのか議論していきたいと思っている。

先ほど話題とした統合プログラムが今年度で終わり、現在は次期の計画について話をしているところである。次期は、図4-1-6で示されているように、気候変動対策のDX化、デジタルトランスフォーメーション化が一つの大きなキーワードになると思われる。一般の実務者の方々にとってDIASはA-PLATよりも“向こう側”に位置するものと思うが、気候変動予測によって得られるデータが一般の人々の行動につながるようなデータでなければならないという認識は行政も研究者の側も持っている。その認識がこのDXというキーワードの中に含まれていると理解している。



図4-1-6 統合的気候モデル高度化研究プログラムの次の方向性

DXを起こすために具体的にどうしたらよいか。デジタルトランスフォーメーションと聞くと言葉だけが踊り、よく意味が捉えられないが、何かしらのIT技術により業界の構造変革を起こすというのが漠然とした私の理解である。それを起こすためにどうしたら良いかを具体的に考えてみた。

今までは、DIASには色々な種類の環境データが保管されているが、大きく異なるデータ設定がある場合、それらが違うものとして格納されているのが現状である（図4-1-7）。すると、A-PLATの担当者が色々な実務者に対応するときに、基本的なところのデータセットは揃っているが、一部欠けているものがあるという状況になっているのではないかと。また台風についての情報が欲しいときにDIASのデータも見てみようとなったとしても、A-PLATの担当者も万能ではないので、例えばd4PDFにはなじみはあるが全球規模のCMIPのデータは見たことがないといったケースもある。データへのアクセスに関してムラがあるような状態である。

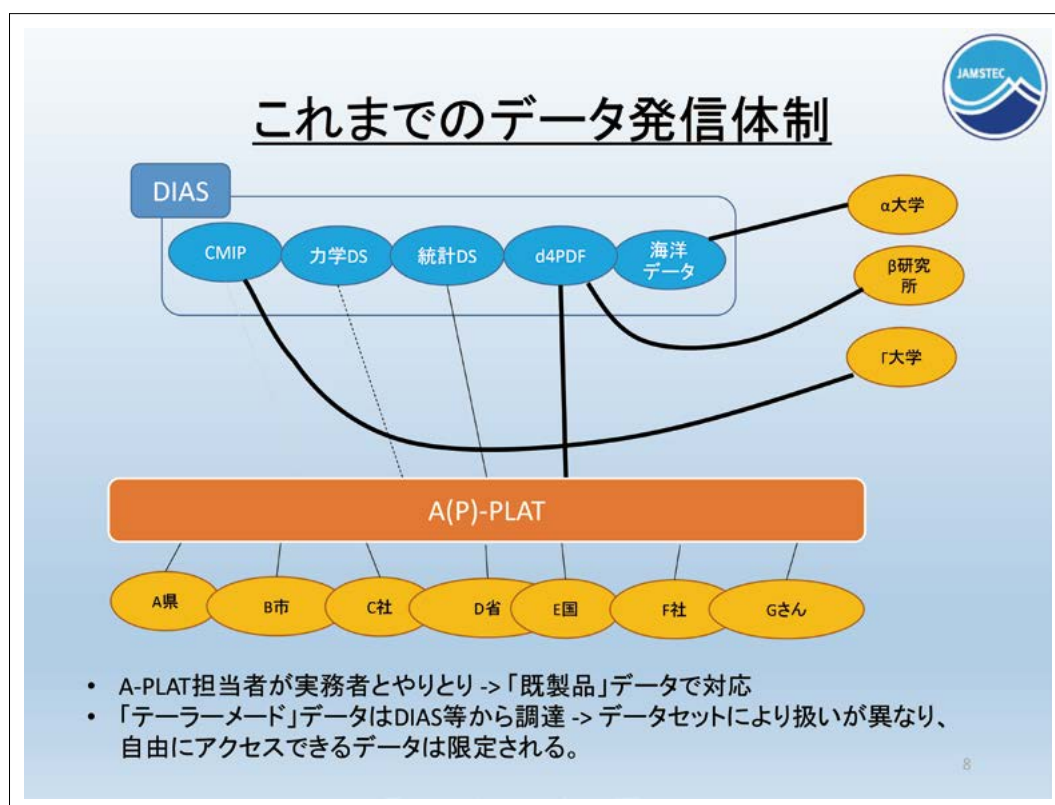


図 4-1-7 これまでのデータ発信体制

こういった状態を技術的に統一すること、必ずしもデータを全部統一する必要はないが、特にインターフェースになる部分でメタデータの形式、あるいはデータ形式のようなものがきちんと統一されており、汎用性の高いツール群として扱うことができるようになると良い（図 4-1-8）。そこにアクセスできれば全てのデータにアクセスできるようになることを意味するため、データのアクセスの幅が広がり、実務者の方々が予測データも過去の観測データと同じぐらいの次元で扱って政策の立案に役立てていくといった一種の構造変革が起こるのではないかと考えている。

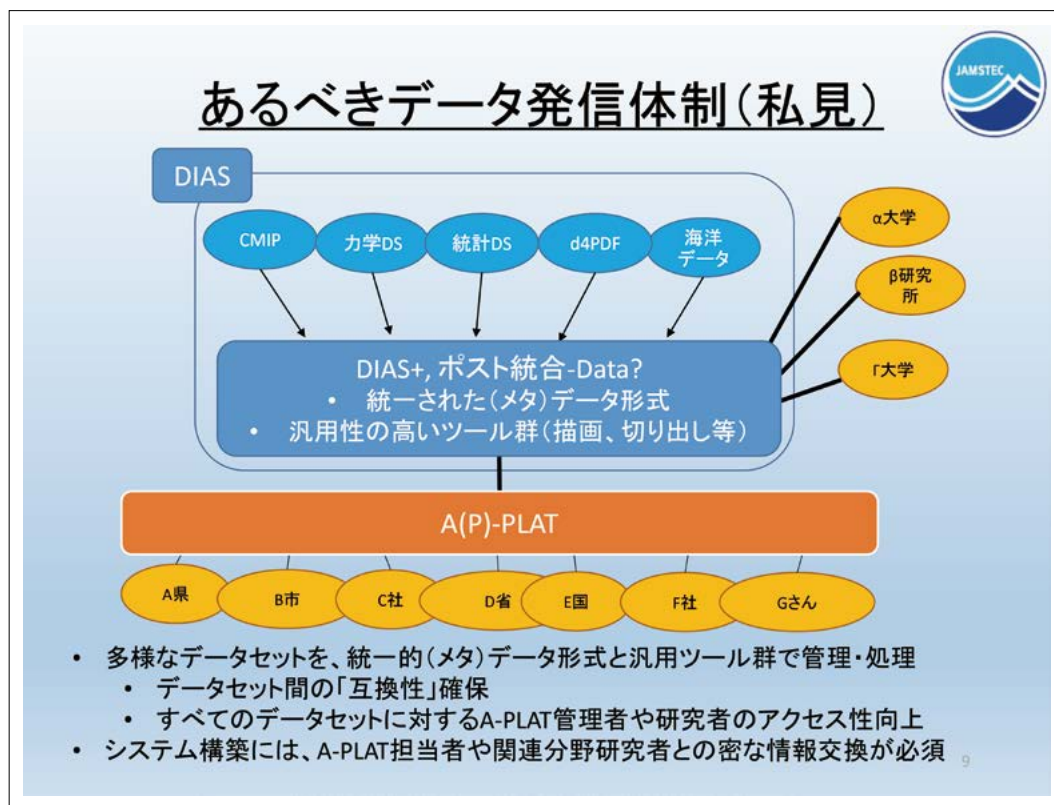


図4-1-8 あるべきデータ発信体制（河宮氏私見）

欧州ではコペルニクス・クライメート・チェンジ・サービス（C3S）というサービスが展開されており、これは先ほど述べたことを実現しようとしていると感じる（図4-1-9）。ウェブポータルに色々な種類のデータがあることをユーザー層から統一的に捉えられるようになっている。計算機資源も入っており、ダウンスケールの計算なども行った上で色々なデータが統一されたデータポータルから出ていくといった構造がこの枠組みの中で出来つつあるという印象を持っている。

ただし、これで全てオーケーかというとは無論そうではない。C3Sは欧州向けのデータが多い印象である。これは運営主体がEUだからではないだろうかと思われる。地理的な偏りがあり、かつまだ依然としてラージスケールのデータに偏っているところがある。こういった事例を参考にしつつ日本でも良いシステムをつくり上げていければ、気候変動予測やDXも実現可能と思っている（図4-1-10）。

C3Sのような統一されたレイヤー、統一されたやり方でデータを扱えるようなレイヤーをつくるためには人が必要であり、そこにはキャパシティビルディングの問題もあるが、この点は日本が少々弱いのではないかと。情報科学の人に気候科学や環境科学に興味を持ってもらうような働きかけも少し弱いと思われる。C3S以外にもESGF（Earth System Grid Federation）というプラットフォームがあるが、そこでは情報科学の素養を持った人が積極的に気候科学の分野に参入してきている。色々な分野を渡り歩く一環として気候科学を捉えており、そういう人たちが活躍してシステムを構築している印象がある。そういうダイナミックな構造を日本でもつくり上げる必要があると思っている。



海外の例: Copernicus Climate Change Service (C3S)

C3Sサイトの図（省略）

<https://climate.copernicus.eu/climate-data-store>

Climate Datastore:

- 様々な分野のデータユーザーを想定し、統一されたプラットフォームを提供。
- 計算基盤も包含
- ポータルサイトからあらゆるデータが検索、ダウンロード可能。

具体的なデータ:

- <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>
- 海洋・水産データやCMIP6解析データも含めた多様なデータ群
- 欧州向け、亜大陸以上のスケールのデータに偏り気味？

C3Sサイトの図（省略）

<https://climate.copernicus.eu/climate-data-store>

図 4-1-9 Copernicus Climate Change Service
(C3S、<https://climate.copernicus.eu/climate-data-store>、2022年2月アクセス)



まとめ

- **統合プログラムによるデータ創出**
 - 影響評価用データベースd4PDFを作製
 - Dataset2022 の主要コンテンツに
 - 10年規模予測データや台風予測にも潜在可能性
- **「気候変動予測DX」への発展を目指して**
 - 現状: 個別データセットごとに取り扱いが大きく異なる
 - あるべき姿: 統一された(メタ)データ、汎用ツール群、ユーザーインターフェース

→「A-PLAT層」と現DIASの間に「DIAS+ 層」を構築

11

図 4-1-10 まとめ

4.2 数理科学・情報科学技術分野と気象・気候分野の連携による可能性、連携促進のために望ましい方策

齊木吉隆（一橋大学 大学院経営管理研究科 経営管理専攻 教授）

私の専門は応用数学で主に力学系やカオスの研究をしている（図4-2-1）。その他に時系列解析や最近では機械学習などもやっている。気象学との関連で言えば流体力学に近いことにだいぶ携わってきた。指導教員は京大・数理解析研究所の所長をされていた山田道夫先生で、流体力学会の会長もされていた流体力学の専門家である。山田先生には地球惑星分野の共同研究者も数人おり、耳学問として気象の話聞いていた。

大学院生の頃には向川均先生を招聘して若手の夏の学校の幹事をやり、北大の数学科で助教を勤めた時には稲津将先生の呼びかけの下で開催された数学・気象連携の交流会で具体的な話を聞いたことがある。さらにその交流会で三浦先生らと知り合ったことで、機械学習を用いた季節内タイムスケールの気象モデリングなどに関わることになった。力学系関係の共同研究者のジェームス・ヨークさんなども、所属のメリーランドで気象・数学連携のグループにいる。これらの経験から私なりの意見を述べさせていただく。

自己紹介

専門：応用数学 [力学系 (カオス・準周期), 現象数理 (流体・経済), 機械学習, 数値計算, 時系列解析]

所属：学生 ①東大教養学部基礎科学科 B ②東大数理科学研究科 M, D
 PD ③慶應理工学部数理科学科 ④京大数理解析研究所 (学振)
 教員 ⑤北大理学部数学科 A ⑥一橋大商学部商学科 AP, P
 (⑥の一部期間中 ⑦JST さきがけ 数学協働領域 ⑧Univ. Maryland, Institute for Physical Science and Technology を兼任)

気象・気候・惑星科学分野との交流歴 (赤は数学・数理科学・情報科学系, 青は気象学・気候学・惑星科学系) :

②指導教員 山田道夫氏(京大, (数理解析研究所所長, 日本流体力学会会長, 京大防災研APを経る))[流体力学・応用数学]
 回転球面上流体研究
 (with 余田成男氏(京大), 石岡圭一氏(京大(東大数理APを経る)), 竹広真一氏(京大数理解析研究所)[地球惑星科学]他)
 気象学におけるウェーブレット解析の導入とその応用 (1992 日本気象学会堀内基金奨励賞)

②流体若手夏の学校2002世話人代表
 (講師：向川均氏(京大)[不安定定常解によるブロッキング現象の理解]← Itoh&Kimoto の研究記事を目にしたことがきっかけ)

⑤Maet(北大数学気象学連携) (2011-) (with 稲津将氏(北大)[気象], 中野直人氏(京大)[粉流体数学, 偏微分方程式],
 坂上貴之氏(京大)[流体数学, 偏微分方程式, 数値計算], 米田剛氏(一橋)[流体数学, 偏微分方程式],
 荒井迅氏(中部大)[力学系, トポロジー]) → 三浦裕亮氏(東大)[気象], 三好建正氏(理研)[気象]らと研究会で交流
 稲津氏, 中野氏, 橋岡誠一郎氏(京大)[確率論]らとの共著論文 (2018), 他のメンバー間でも数編の論文が出版済

⑥[現在進行中] 機械学習を用いた季節内(2週間~3か月)タイムスケールの気象モデリング (2020-)
 三浦裕亮氏グループ[気象], 中井孝吾氏(東京海洋大)[流体数学, 機械学習], 米田氏[流体数学]らとの共同研究
 このプロジェクトに関しては現時点で研究費を確保出来ておらず、研究人員は不足気味

⑧E. Kalnay氏, K. Ide氏, B.R.Hunt氏[力学系], J.A.Yorke氏(共同研究者)[力学系]のメリーランド気象学数学連携グループと交流

図4-2-1 気象・気候・惑星科学分野との関わり

まず海外の気象・数理科学連携例としては、私の周辺に限った例のためあまり多くはないと思うが、数学の業界、とくに偏微分方程式の分野で非常に有名なマイダさん (A. Majda, Courant Institute) のグループが挙げられる (図4-2-2)。流体の偏微分方程式で有名な結果を出された方で、私が稲津先生や三浦先生と研究交流する際にしばしばマイダさんのグループの研究が話題にあがり、気象の話においてもかなり活躍されておられたようだった。力学系の私の共同研究者もポスドクでこの方のグループにお世話になった。残念ながらマイダさんは今年亡くなられたが、その周辺に色々な研究者がいらっしゃるようなので、今後も関係は続いていくと思われる。もう一人はカルネーさん (E. Kalnay, Univ. Maryland, Institute for Physical Science and Technology) という方が関わっている、私がサバティカルで2年間行ったメリーランド大の気象・数学連携が代表的な例と思われる。

そこまで例が多くないのは何故かこの機会に考えてみた。気象・気候分野は大変魅力的な複雑数理現象の宝庫と感じるが、巨大自由度、多重スケールで、しかもその現象理解には様々な物理的考察が必要という三浦先生のお話が示唆的である。共同研究やディスカッションでも物理的直感が出てきて、門外漢には非常についていきにくい部分があるのが障壁と考えられる。一方で、数学・数理学者の特徴は分野を問わず似たような数理構造を串刺しして統一的に考えるところが得意な点であるので、活躍できる場所とも思っている。ただ他分野の研究者との共同研究に慣れている数学者はあまり多くなかったり、他の分野の方が思うほど専門が広くない面がある。「数学者にこれを聞けば解決してくれるのではないか」といったアプローチはうまくいかないことも多いと思う。

その上で連携にはどういったことが必要かと考えると、やはり分野間の価値観の違いを理解し、対話を可能とするハブとなる研究者が必要だろうと思っている。それは専門でいうと流体力学や力学系分野の研究者と考えている。本来、先ほどの物理的直感の話もしたが、物理学者が活躍すべきなのではないかと思う面もあるのだが、特に日本では物理学の中で流体力学が疎外されている傾向があるように思っている。量子や素粒子や物性などの方面に中心が行きがちで結果、応用数学で流体力学が多いという印象がある。

1) 数理科学、情報科学技術分野と 気象・気候分野の連携による可能性

海外の気象学・数理科学連携例：

故A. Majda (Courant Institute)[数学者：偏微分方程式流体解析の大家]グループ
偏微分方程式の縮約→マクロダイナミクスを記述する確率微分方程式の導出 など

E. Kalnay (Univ. Maryland, Institute for Physical Science and Technology)[気象学者]グループ
データ同化

数理科学者、情報科学者による気象・気候分野参入障壁：気象・気候分野は魅力的な複雑現象の宝庫だが、巨大自由度、多重スケールで、現象理解にはさまざまな観点における物理学的考察が重要など

数学・数理科学者の特徴：各分野の問題を統一的に取り扱い、統一的に考える
(ネガティブな特徴：共同研究が苦手、専門が狭い)

連携には分野間の価値観の違いを理解し、対話を可能とするハブとなる研究者の存在が重要か？
流体力学・力学系が橋渡しになりやすい(流体力学が物理学から疎外されているので受け皿の応用数学分野がポイント)

図4-2-2 海外の気象学・数理科学連携例

これまでの気象学・数学連携の例では、私の周りではカオスの研究があったと思う(図4-2-3)。50年くらい前から定期的にローレンツカオスの話が出ている。伊藤先生、木本先生、向川先生やジルなど、その辺りの数学・数理科学と近い研究もされている方々は、数学・数理学との連携・交流を持ってこられたようである。しかし最近、おそらくここ20年くらいは、交流がやや途絶えているのではないかと感じる。一方で、その間にも、気象で出てくる面白い現象を種に数学者は研究を地道に進めてきている。例えば高次元カオスの知見が蓄積されてきたり、偏微分方程式の厳密数学解析による乱流の研究、トポロジカルデータ解析や機械学習、確率微分方程式を用いて乱流統計法則を証明する研究などが盛んに行われてきており、今こそ相互交流を復活させるとお互いまた良いことが出てくるのではないかと期待している。

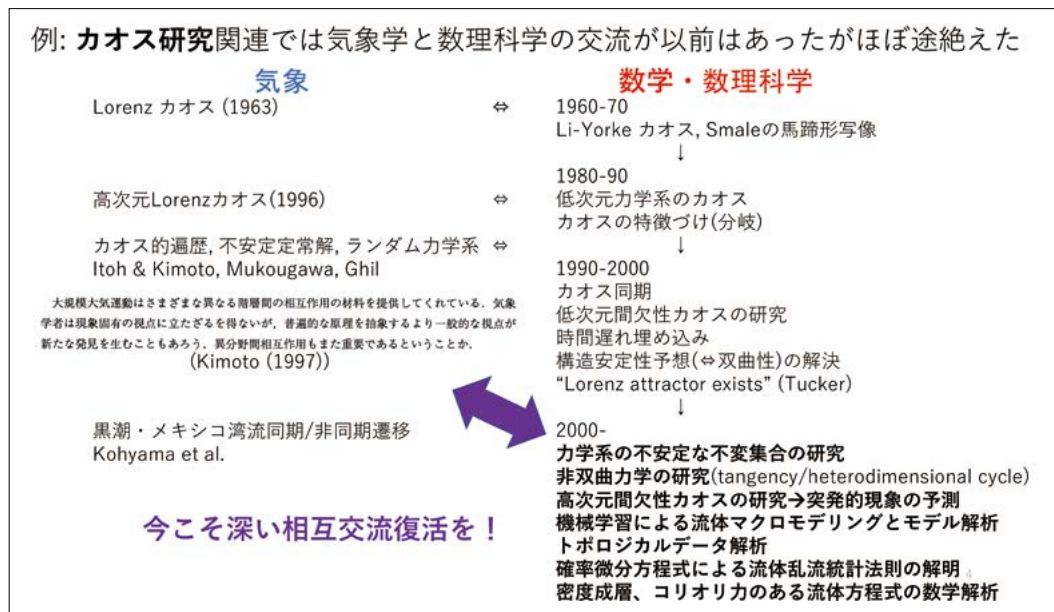


図4-2-3 国内の気象学・数理科学連携例

ここまでカオス周りに限定してお話したが、その他、統計などの分野でも種々出てくることを期待している。この辺りで分野間交流においてキーワードとなる概念を考えてみたが、例えばクロージャーだろう（図4-2-4）。先ほど、どのようなタイムスケールが重要かという議論があったが、あるタイムスケールの現象をモデリングするためにそれ以外のところからの効果をどのように取り込むかといった面は色々な分野で苦労していると思う。こういった点は物理でも数学でも普遍的だと思うため、そういう観点で串刺しで見てみると良いと思われる。突発現象も各分野で重要と思うが、数学でもそういった現象が最近研究されている。色々な観点から串刺しでの分析を行い総合的に発展させることが可能ではないかと思う。

1) 数理科学、情報科学技術分野と 気象・気候分野の連携による可能性

分野間連携において鍵となると期待される数学・数理科学概念

- ・「多重スケール現象の縮約, クロージャー」
(繰り込み群, パラメタリゼーション, 機械学習, 確率微分方程式)
- ・「高次元カオスに由来する間欠性現象, カオスの遍歴現象, 同期・非同期のメカニズム解明と予測, 突発性現象の予測」
- ・「不安定な双曲型不変集合とその安定/不安定多様体による複雑現象にみられる秩序構造の解明（特に発生と消失）と予測」
- ・「トポロジー解析による流れの分類」 Uda, Sakajo, Inatsu, and Koga (2021)
- ・「構造保存数値解法」
- ・「レイイベントの数理解」
- ・.....

図4-2-4 分野間連携で鍵になると期待される数学・数理科学概念

連携促進のために望ましい方策を考えた（図4-2-5）。まず短期的に成果を上げたい場合には、ボトムアップでほかの数学者や気象学者が簡単に交流を始められるような研究の種を積極的にサポートする体制や仕組みがあると一気にその研究が促進される可能性があると思う。

長期的に見て重要と思う点は、まず数学は人材が実験装置であると思っている。たまたま凄い人がいてもその人が一発で当てることは滅多に無く、小粒・中粒くらいの人材も集まっていると誰かが良いことをやってくれる、といった分野だと思っている。そういう意味で緩い長期的交流や連携が必要である。価値観のすり合わせや、このような問題には誰々がやっていることが役に立つといった観点の広がりや連携が長期的には大きな成果を生むのではないかと考えている。そのような意味で、東大を例に出すと、数学は駒場に校舎があり、ほかの多くの分野の校舎は本郷にあるのは少々残念なシチュエーションだ。最近はオンラインミーティングなど盛んになっているため、この景色が今後変わっていくことを期待している。

緩い長期的交流に関しては、アメリカを例にとるとランチタイムミーティングのような、30分程度で誰かが話題提供をし、全然違う分野の人が話を聞き、自然に他の分野の研究が耳に入る機会が結構あると思うが、そういった機会は日本では少々少ないと感じている。そのような緩い交流も長期的な交流連携に効いてくるのではないかなと思う。

長期的成果を生み出すためには、まず第1段階で数年間かけて分野を超越する普遍的テーマ解決に向けた個別研究を推進し、定期的にグループ間交流の機会を持つ。うまくマッチングした場合には、そのグループ間で分野超越的な連携などに向けて進んでいく。こういった長い目で見た共同研究というのが重要であると思っている。

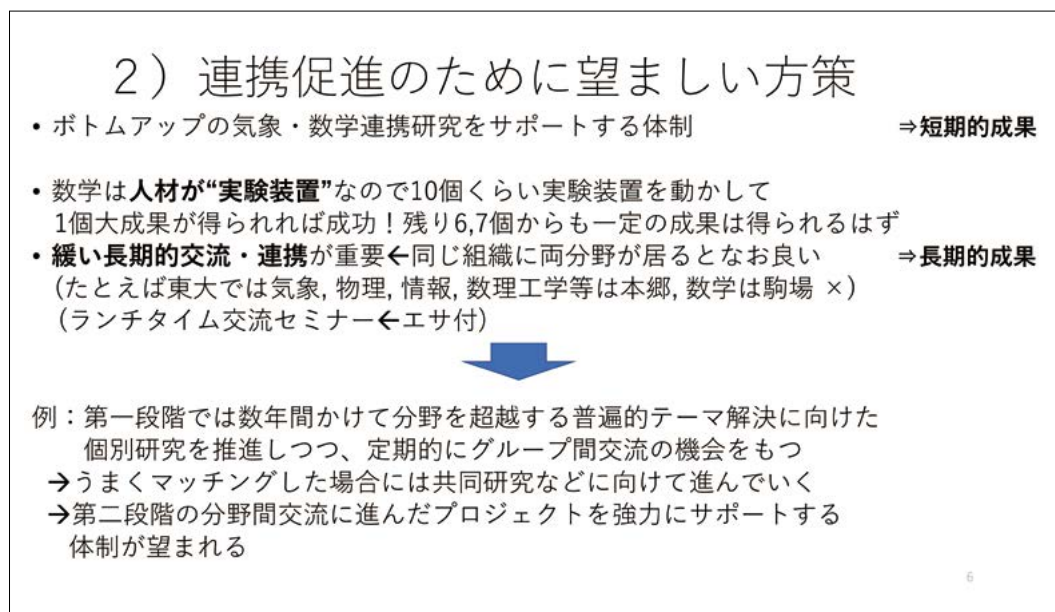


図4-2-5 連携促進のために望ましい方策

4.3 保険事業と気候予測・気象予測

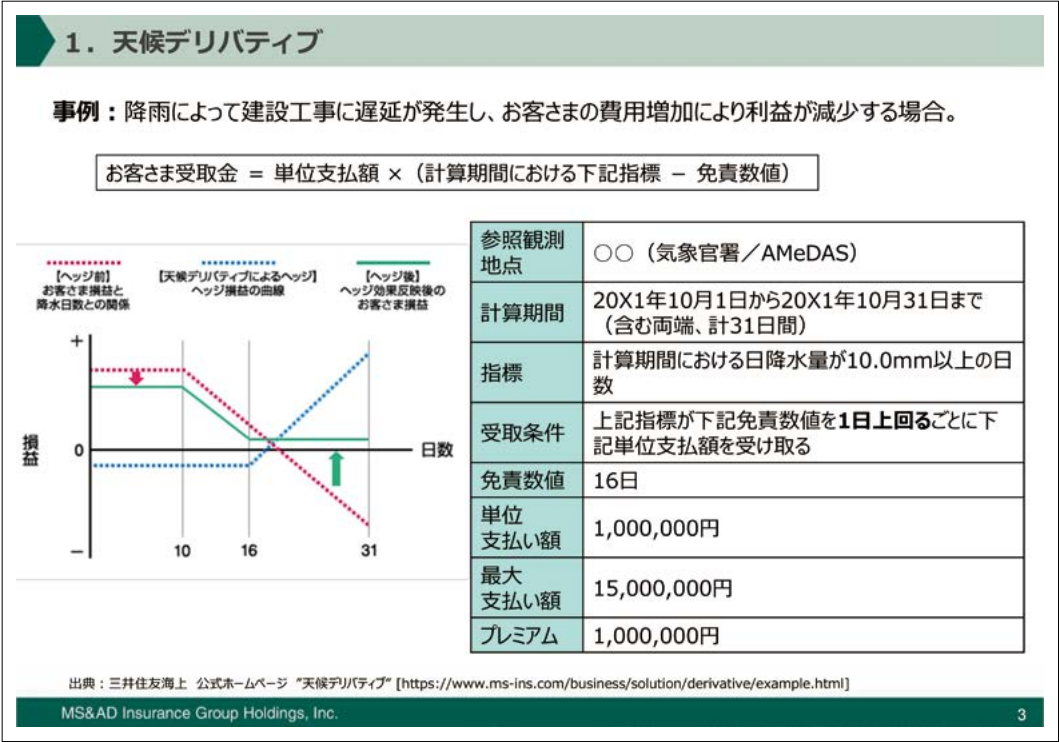
浦嶋裕子（MS&AD インシュアランス グループホールディングス株式会社
総合企画部 サステナビリティ推進室 課長）

損害保険会社も、この気候変動、異常気象が原因で多額の保険金支払が発生している。2018年、2019年と損害保険会社で1兆円を超える支払いを行っており、自然災害の頻発化は大きな問題となっている。

今日のテーマと関連が深い3つの話題提供をさせていただきたい。

最初は天候デリバティブについてで、これは顧客に対して提案する商品である(図4-3-1)。季節内のスケールで代表的な事例と思うが、例えば雨が続くことによって工事が遅れることによる顧客の損失をどうやってリスクヘッジするかということ扱う。日降水量10ミリ以上の日数で見たときに、10日を境にして、何もなければこのままどんどん損をし続けるというものに対し、キャップをかける形で損を食い止める。

これが気候予測、気象予測が精緻化することによってどうなるかというと、精緻化が進めば究極的にはこうした商品は要らなくなる。例えば「今年は暖冬である」とか「寒い」と分かり、それに対して具体的な何らかの手段が取れる場合にはリスクヘッジは不要になる。一定の不確実性があるからこそ保険というものが成り立つという、非常に逆説的なものである。例えば今は2週間前の予測があるため契約は2週間前までとなっているが、これが1か月前からかなりはっきりとした気象予測が出るのであれば契約は1か月前までになる、といった影響があるだろう。



等の条件に対して、実際どういったハザードが発生確率としてあるのか、一定のハザードの強度によってどれだけの損害が出るのかを示す脆弱性モジュール、そして免責等の条件に基づいて、顧客に保険金を支払った結果、保険会社が被る損失を、全体として管理している。

ここに気候変動影響をどう織り込んでいくかが、ハザードモジュールは、イベントカタログを作り、実際にその対象地点の条件を考慮してハザード強度を推定している（図4-3-3）。しかしこれはあくまでも過去の観測データである。従って、今後は過去とは全く違う気象条件になるということがなかなか現在では織り込むのが難しい状況である。試みとして例えばd4PDFを加味していくことは考えてはいるが、今のメッシュ（解像度）ではかなり強度算定が難しく、対象地点の考慮が難しい。

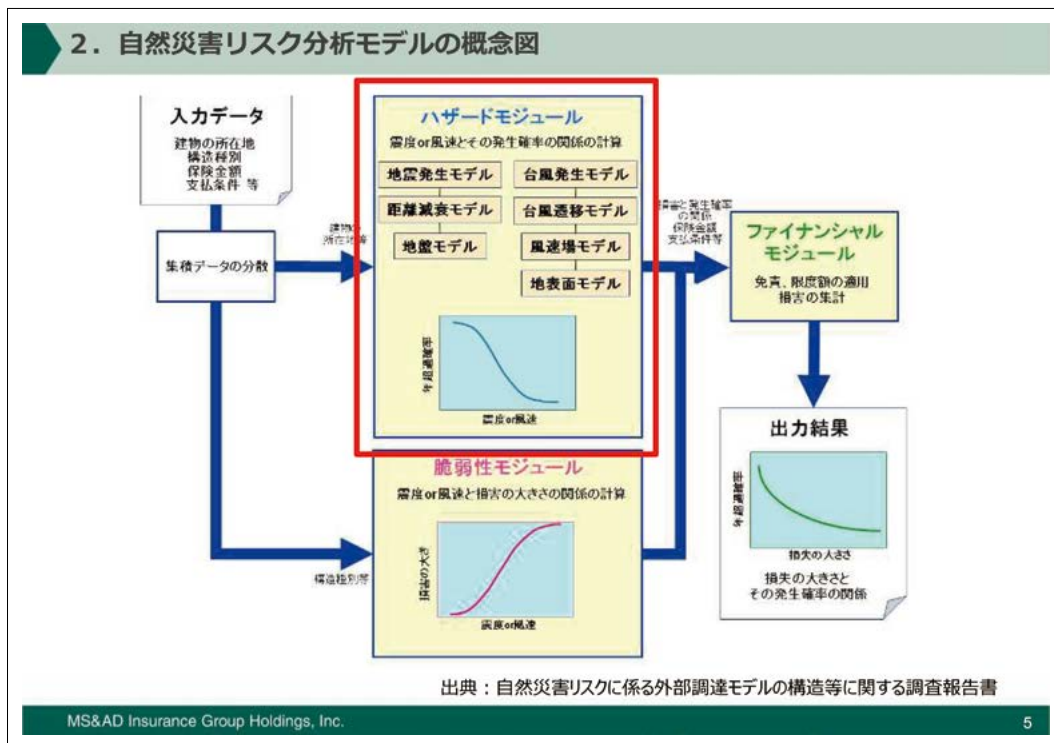


図4-3-2 自然災害リスク分析モデルの概念図（1）

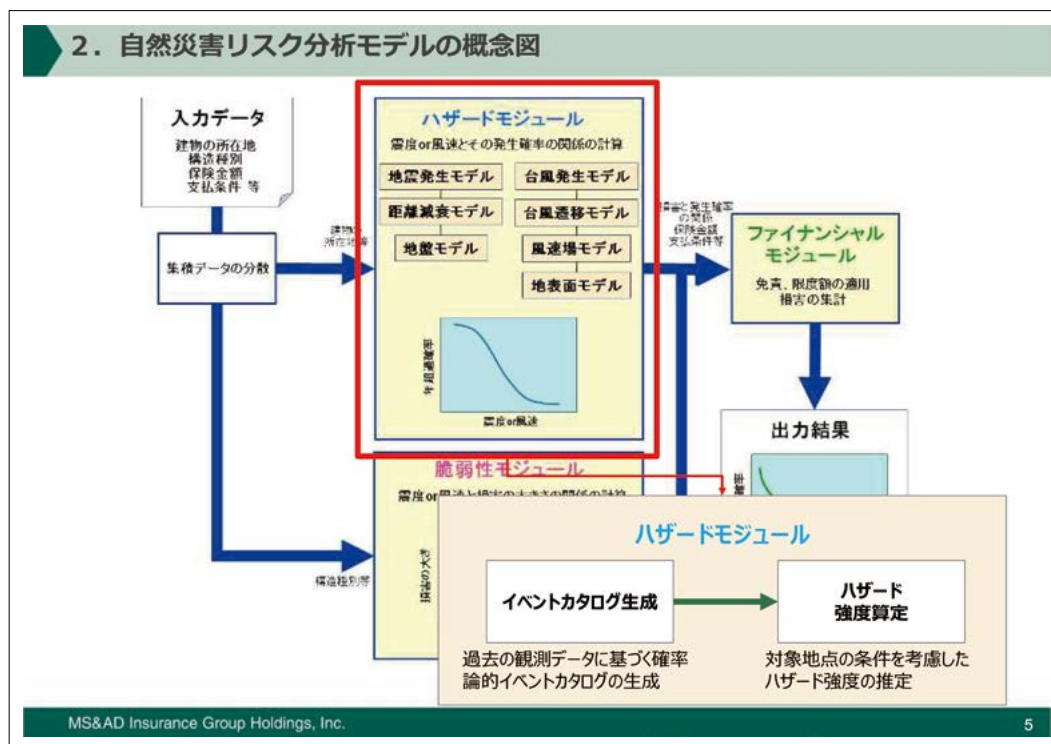


図4-3-3 自然災害リスク分析モデルの概念図（2）

もう一つ、JSTの共創の場事業にて、ClimeCOREプロジェクトの一環として疑似温暖化実験をやろうと思っている。現在気候に対して疑似温暖化実験をするというもので、領域気象モデルをCMIP6を使って実際のハザードの風速分布を出す。実際再現してみた状況での風速と、疑似温暖化させた状況での風速を自然災害リスク計量モデルに入れて、現在の気候であれば総額としてどれだけの支払保険金になるのか、これが温暖化した状態ではどれだけ支払保険金が膨らむか、こうしたストレステストをかけることによって、財務基盤の安定性の確認をやろうとしているところである。（図4-2-3）

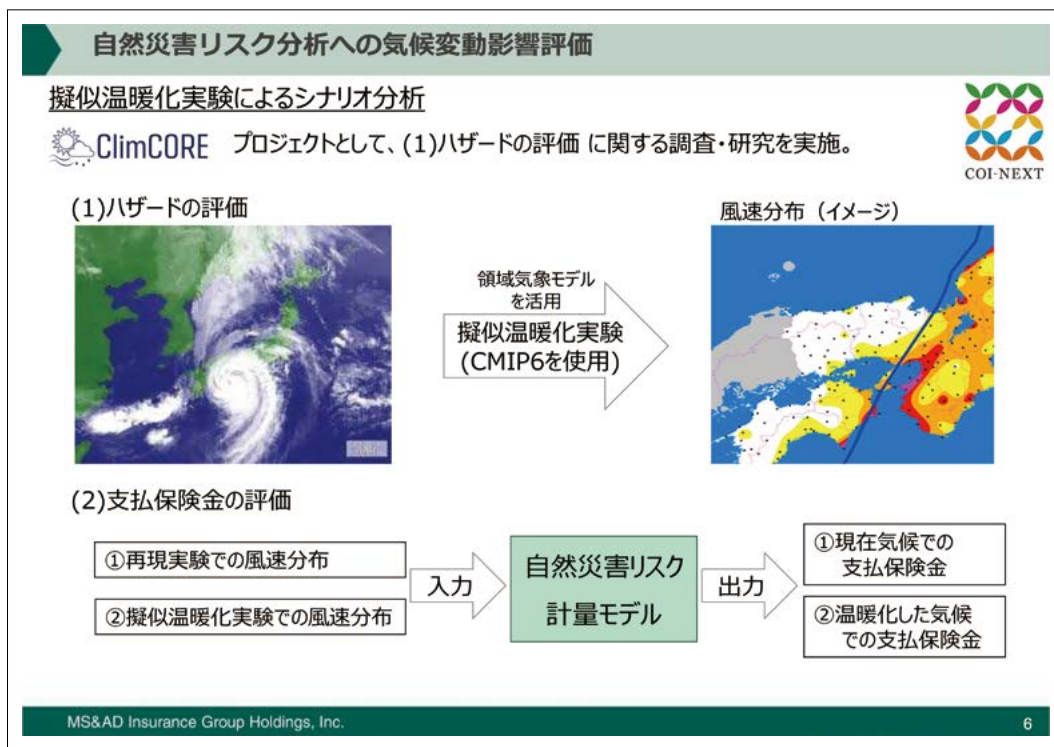


図4-3-4 自然災害リスク分析への気候変動影響評価

TCFD（気象関連財務情報開示タスクフォース）のように気候変動がファイナンスと大きな関係を持つことが最近の非常に大きな変化になってきている（図4-3-5）。金融庁により東証一部の上場企業がプライム市場に残るためには気候変動による企業の財務影響を開示しなければいけないと義務づけられたことで一気に様相が変わってきている。移行リスクもあるが、物理的リスクがどうなるか、特に急性、慢性的に気候が変わることによってどれだけその企業のビジネスが変わるか、それが売上げやコストに変わるか。更にそれを踏まえた上で企業がどれだけレジリエントな経営戦略を持っているか、それを如何に投資家に説得力を持って説明できるかがポイントとなる。リスクが正しく精緻に評価されていることも大事であるが、重要なのはそれらのリスクを受けた経営戦略になる。

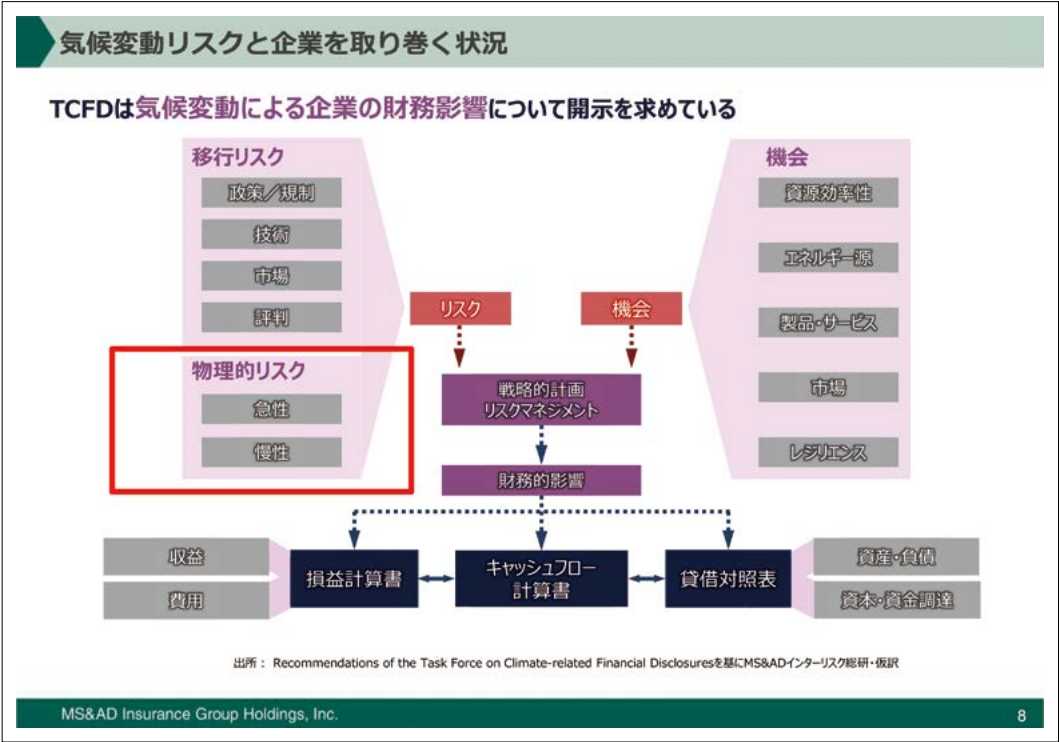


図4-3-5 気象変動リスクと企業を取り巻く状況

そこで、現在、顧客に提供しているサービスとして、アメリカのスタートアップのジュピターインテリジェンスと組んで、CMIP5、CMIP6のモデルを使い、AIを活用して90メートルグリッドまでスケールダウンした洪水、熱波などの自然災害定量評価を行っている（図4-3-6）。これにより、「これだけの財務損失が出る可能性があり、それに対して、これから10年間どういう経営戦略で経営していくか」ということを企業は立案し、それを投資家に開示するということである。これはそのサンプルデータであるが、90メートルグリッド被害の状況をダッシュボードで可視化したものを活用しながら顧客にリスク分析をしているところである。

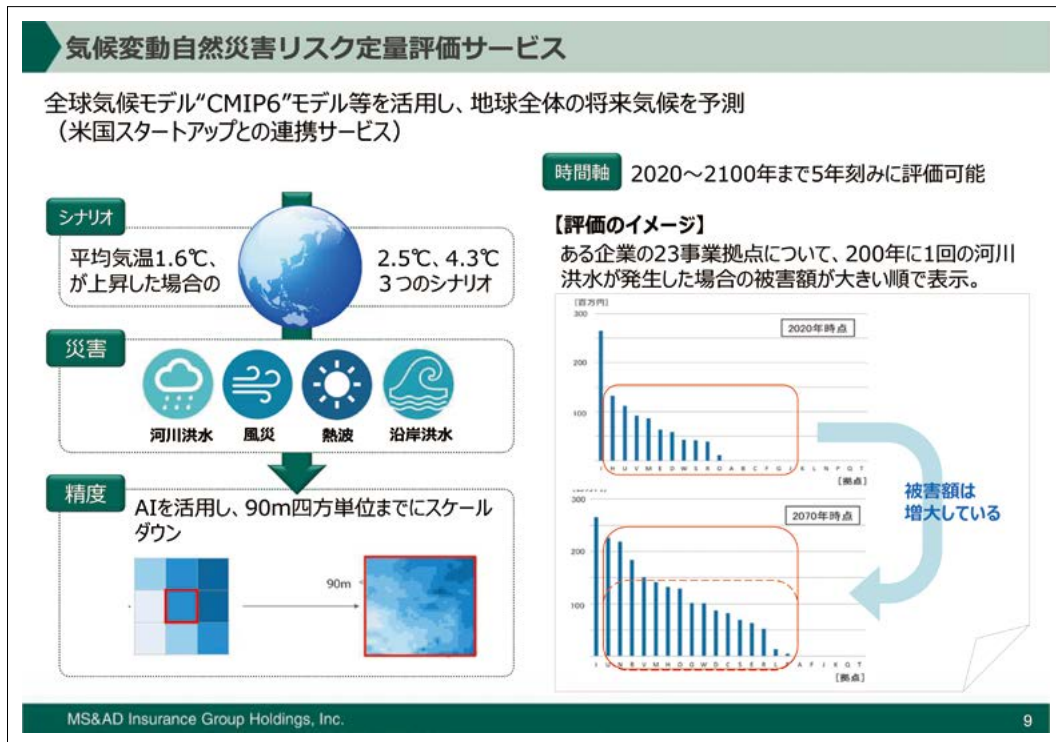


図 4-3-6 気象変動自然災害リスク定量評価サービス

4.4 議論

機械学習の予測への応用

Q：ディープラーニングでうまく答えを出すのは上手にやればできると思うが、それは果たして「分かった」ことになるのか。また、予測にディープラーニングを使う場合、例えば先ほどの浦嶋様の発表にあったような地形に依存するような高解像度化には良いと思うが、何度上がるかといったところに使う場合は、果たしてその不確実性はどのぐらいになるのか、あるいは自信を持って予測と言えるのか等についてどうお考えか。

A：我々がやっている機械学習はディープラーニングではなく単層のレザバーコンピューティングというもので、どちらかという中身を掌握しやすい機械学習で、代わりにニューラルネットの次元を高くする。一般的に機械学習、ディープラーニングでは遡って中のパラメーターを決定していくことになるが、これは事前に大きいニューラルネットを与えてごく一部だけを合わせにいく、最適化していくという仕組みのものである。そのメリットは、仮に流体力学であってもモデリングし得るような、多様な構造を生み出し得るという点である。それで理解したことになるかと言われると、私も元々は懐疑的だった。しかしメリーランドに行っていた頃にブライアン・ハントなど力学系の中心人物たちがやり始めており、自分もやり始めた。

力学系的な構造に関して、単にデータを食わせればモデルを作ってくれるというものではない。どのくらいの次元のダイナミクスに興味があって、それをモデル化するにはどのくらいのニューラルネットが必要でというのを考える。データも、背後にあるダイナミクスの次元がこのくらいなので観測データを何個使う、足りない分はターゲットとなるアトラクターの次元を超えるぐらいまで時間遅れ座標で付加させる等を考える。そうした手続きを踏んでモデルを作っていく。そのため相手を知らないとモデル化に成功しない。中身を理解する補佐的な役割もあるが、中身のある程度理解していないとモデル化できないという側面もある。

もう一つ、作成したモデルがトレーニングデータそれ自体から見出されないような力学系の不変集合、不動点や周期点等、そういうものも再現し得るということを、われわれ力学系の研究者グループで最近明らかにして論文にしている。従って単に時系列を当てるというレベルではなく背後にあるダイナミクスの構造を当てるということになる。そういう意味で、流体力学でいうとミクロのナビエ・ストークスは分かるがその上のややマクロなダイナミクスはモデル化できない等、クロージャーの難しさもよく知られているが、そういう辺りのところでは活躍すべきアプローチではないかと思われる。

民間企業における予測の不確実性の捉え方

Q：TCFD（気候関連財務情報開示タスクフォース）に関する動きについて、我々も何か情報を提供できるのではないかと考えて関心を持っている。お話を伺った限りでは、企業の側でも色々と予測を行うが、大事なものは、当たるかどうかよりも説得力であるとかきちんとやっているということと感じた。予測する側からは「不確実性は不確実性として捉えてください。どこが真ん中とかありません」と言いがちである。しかし、例えばIPCCの報告書では気候感度の最尤値をものすごく努力して出して、とりあえずベストな推定値は何度ですと示している。不確実性をそのまま捉えてくださいというアプローチよりも、むしろそちらの方が使いやすいのではないか。色々なところで不確実性をそのまま捉えてくださいと言いがちだったが、ちょっと直したほうがいいのではないかという印象を持ったがどうか。

A：不確実性の話はよく出るが、組織の中で話が上層部へと上がっていくにつれて「その不確実性って何なの」というような反応はある。我々も、サービスの中で「こういう不確実性がある」ということはもちろん御説明はする。しかしそれを受け取ったお客様がそれをどう踏まえて、どう経営戦略を立ててい

くかというところになるとなかなか難しいところもある。大事なことは、色々なシナリオに基づいてきちんと備えていくということではないかと思っている。こういうシナリオだった場合にどうする、こういうシナリオだったらどうすると。

また、こうしたことは必ずしも気候変動だけの問題ではなく、それによってどう政策が変わるか、気候変動が進むことによって急に政策が厳格化した場合に自分たちの市場がどうなるかといった視点もあり、気候の予測だけではなかったりもする。そうなると気候予測だけを精緻化していればよいという話でもなくなると個人的には思っている。

Q：説得力が重要ということであれば、例えば気象学者、気候学者の側が「これがベストな推定値です」というものを出せば不確実性のことをあまり考えずにそれだけに依存してやっていくことができ、それはそれで良いとなるのではないかと感じたため伺った。それがいいかどうかという問題もあるが。ただ、回答を伺っていると、やはり不確実性の幅で上へ行ったときどうなるか、下へ行ったときどうなるかをきちんと見ながらやるのが説得力につながるというお話と理解した。

A：そういうことだと思う。

新しい気候予測データセットへの期待

Q：物理リスクは実際にハザードの予測情報等に基づいて行われている。例えばある企業が海外のある場所に工場を持っていたとすると、そこで極端気象が将来どう変わるか等の情報は損得に関わる情報になるのではないか。その場合、TCFDへの対応という観点からは、CMIPのSSP（共有社会経済シナリオ）のようなグローバルな計算からダウンスケーリングしていくもので当面はよさそうなのか。あるいは日本国内で新しくこういうデータセットを作れたら活用できるのといったご意見が産業界からあるのかどうか伺いたい。

A：現在いくつかの企業がそういった物理リスクに関するサービスを提供している。例えばこのシナリオだと10年後、30年後に浸水深がこれくらいといったようなもの。我々のサービスは90メートルメッシュの予測を2020年から5年刻みで出しており、GCM（全球気候モデル）からの情報を使う仕組みでやっている。このモデルよりもこのモデルのほうが良いといった精緻化の度合いはあまり分かっていない状況。そこは企業とサイエンスの違いと思う。これから投資をして20年間で投資回収をする工場をどこに建てるかといったときに、洪水の被害がなく使いたい資源がそばにある場所がどこかを示すのは現状難しい。このモデルではなくこちらのモデルが良いといったことを議論するほどに気候モデルに詳しくないというのが現状ではないか。

C：専門の立場から見ると100キロメッシュの全球モデルから一気に90メートルメッシュに持っていくのは無理があると感じた。

C：そこはおっしゃるとおりと思う。その部分をより細かくできるようになれば、どこにどう備えていくべきなのかといったようなことがより確度高くできるようになるだろうと思う。

C：第1部の話と繋がるが、カーボンニュートラルの話など、2050年までにどういう気温変化があって2100年にはどうかといった、2000年代後半を基準とする温暖化の研究と企業の求める情報というのはやはり乖離している。企業は近未来、直近30年にどうなるかという情報のほうがやはり比重として重いというのを特に感じる。

物理リスクの話は、確率情報が企業のリスクハザード等の部分にどうしても大事になってくる。環境研究総合推進費S-18でも出されているが、直近30年で、例えばd4PDF的なハザードがどういう確率で変化していくのか。S-18はCMIPベースでありアンサンブルベースでないと思うので、例えばd4PDFのようなもので近未来のものがあるというのが、恐らく企業にとっては興味が出るようなものなのではないか。企業のほうはお金を出してシミュレーションを回すということは現実的に不可能だと思われる。従ってサイエンス側で科学としての成果を出したいということと、企業側で欲しい時間スケ-

ルのデータをどういふにコミュニケーション、コラボレーションしていくかということが、企業とサイエンスと一緒にやっていく上で大事な点ではないかと考えている。

- C：リスク管理領域の業務の観点からは、やはり将来予測の部分の不確実性が大きいので、例えば2050年に数値がどのくらい増加するかという情報が得られたとしても、それをforward-lookingな視点で経営判断に使っていくための手法は確立されていない。

現在取り組んでいる疑似温暖化実験では、あくまで一災害を激甚化させたというシナリオベースでの研究を試行しているところ。企業の財務の健全性評価に使う場合には例えばd4PDFのようなデータセットを使って確率論的に評価するといったアプローチが重要になってくると思っている。そういったアプローチに資するような高度なデータセットが整備されていくのであれば産業界としても大変ありがたいと思う。

- Q：気象庁と文科省が合同で作成中の「気候予測データセット2022」の次の話ではd4PDF型のラージアンサンブルをタイムスライスではなく時間連続で作るという話が進んでいるかと思うが、2022には入っていたかどうか。

- A：分からないがd4PDFのダウンスケールとは別の話だったかと思う。

アンサンブルでダウンスケールというのは非常に求められるところである。全球モデルからいきなりキロメートルスケールのダウンスケールというのは、統計的なダウンスケールであっても非常に問題が大きいため、ある程度物理的なところまでダウンスケールすることが重要と思う。疑似温暖化についても同様である。

- C：さきほどの議論で、それぞれ別個で進めているようなものが最終的に統合して一つのデータセットになっていくという方向性が想像できた。具体的には長期間タイムスライスではなく、近過去から将来までのラージアンサンブルをダウンスケーリングする。かつ、それをグローバルで始めるときにきちんと初期値化する。そういう計算は今のところまだできていないが、もしそれができると、2050年まで、今後30年の予測をすることにサイエンスとしての意味も出てくると思う。

水災リスクを下げる対策の検討：Eco-DRR、流域治水、グリーンインフラ

- C：TCFDへの対応は始まったばかりという状況である。企業の持っているアセットやプロパティーに対してどうやって物理リスクを評価するのか、世界展開している企業であれば色々な場所にあるものをどうやってというのは現状手探りな状態。そのため、強引なところはあってもまずはやってみるということで現在サービスを提供している。これをどのようにしてより精緻な経営判断に資するものにレベルアップしていくかを経済界とアカデミアと一緒にこれからやっていければ良いと思っている。

もう一点、さきほどの話の続きになるが、社会の水災リスクをどうやって下げるかという問題に取り組む研究開発に関わっている。保険というのは経済的な負担を小さくすることしかできないわけで、保険会社の目指すべきビジネスモデルとすれば、リスクを見つけてお伝えし、できれば保険がお支払いするような事故や災害による損失が出ないようにする、リスクの発現を防ぐ、影響を小さくするというところが重要だと思っている。そうすると脆弱性を回避するか、ばく露を減らすかということになってくるが、現在、総合地球環境学研究所の研究プロジェクトの「制度インセンティブサブグループ」に参加し、Eco-DRR（生態系を活用した防災・減災）でどういうことが考えられるかということを検討している。ばく露を回避するためには水災リスクの高い地域をできるだけ回避することが重要になるが、海外では土地開発規制などが行われ、水災料率が細分化されていたり、その議論が進められていたりする。その際、その精緻化をどこまで社会が許容できるのかに課題がある。例えば自動車事故で事故をたくさん起こす人の保険料は高いということは保険加入者は認識できると思うが、リスクが高いからということで先祖代々住んでいたところの保険料が急に高くなることは、やはりいろいろと社会的に課題があると思われる。

一方で、どのように脆弱性を改善するかということでは、いわゆる旧来の「グレイインフラ」だけではなく最近「流域治水」や「グリーンインフラ」といったものも出てきている。海外ではそういったものに対するグリーンボンドみたいなことも進められており、必ずしも公的な財源だけではない取組が進んできている。グリーンインフラであれば10年というタームの中で地域の災害リスクを減らせるのではないかと、そのためにどういうふうな評価ができるのかという視点も必要と思う。例えば海外ではサンゴ礁の保険、米国における森林火災を防ぐための森林レジリエンスボンドなど、官と民のお金を交ぜながらこういったことに手当てするというファイナンスの仕組みが始まっている。またそこで色々なステークホルダーが協働するときのベースとなる、コミュニケーションの基となるのがリスク評価であった。自然災害のリスクがどれだけあるのかということが大変重要だということを感じた。

気候科学を開かれた分野に

Q：河宮様の話でDIASがオペレーション段階に入ったとあったが、データをきちんと集め、アカデミアや社会に提供していくというインタフェースの部分は一般的に日本が苦手なところと思われる。どういう対応が必要か。

A：話の中でも述べたが欧米は人の動きが大変ダイナミック。気候科学に元々興味を持っていて情報科学の仕事もちゃんとできる人や、情報科学やITの素養を持って色々な分野で仕事しているような人がIT分野に沢山いる。そういう人たちがたまたま気候科学にも仕事があるというのでわっと寄ってきて、わっといいシステムをつくってまた散っていくといったダイナミクスがあるような気がする。

日本ではこれまでは気候科学の仲間内でITにも詳しい人にそういった仕事をどんと任せるといった形が多かったのではないかと。今後は分野として開かれた存在になっていくことが必要で、IT分野の人たちとの交流もできるようになっていくのではないかと。気心の知れた人とは限らない人たちと付き合っていくことになるため、ある意味で勇気が要ることではあるが、そのところが一つ鍵になるのではないかと考えている。

議論の振り返り

C：まず機械学習を取り入れることに関して、演繹的なアプローチではないアプローチで「理解した」ことになるのか、信頼性はどうかという指摘があった。しかし実際には機械学習をやる場合でも現象をある程度理解しないとモデル化ができないということであった。現象を理解する上で補佐的な役割も果たすので、やはり応用することに可能性があるといった議論があった。

TCFDへの対応など民間企業の経営判断に予測情報を利用するにあたって、不確実性の捉え方が難しいため、むしろベストな推定値を示したほうがよいのかといった議論があった。基本的には複数のシナリオを検討して備えをすることが大切であり、そこで不確実性の幅の情報が重要になるのではないかと。といった議論があった。

続いて気候予測データセットについての議論があった。企業の財務の健全性評価などに利用できるような、d4PDFのような高度なデータセットがあるとよいというニーズが示された。またそうしたデータセットを作っていくにあたっては、サイエンスとしても意味があり、かつ産業界としても意味のあるようなところをすり合わせていけるよう産と学がうまく連携していくことが必要との意見があった。TCFDへの対応は始まったばかりでありこれからが重要との指摘があった。

リスク評価をベースとした対応策に関して、Eco-DRRの可能性についても情報提供があった。海外では制度の検討やグリーンボンドのような官と民の資金が交ざったようなファイナンスの仕組みも始まっているとのことであった。

最後にDIASの今後についての意見があった。欧米に学び、情報科学系などの分野の人材も入ってくるような開かれた分野にしていくことが重要との指摘があった。

付録1 プログラム

- 13 : 00–13 : 20 開会挨拶・趣旨説明・事務連絡 (20分)**
- 13 : 20–14 : 55 第1部 気候予測セッション (95分)**
- ・ 話題提供・質疑応答 :
 - 渡部雅浩 (東京大学) (15分)
 - 高谷祐平 (気象庁) (10分)
 - 三浦裕亮 (東京大学) (10分)
 - 竹村俊彦 (九州大学) (10分)
 - ・ 議論 (50分)
 - ラップアップ 小坂優 (東京大学)
- 14 : 55–15 : 00 休憩 (5分)**
- 15 : 00–16 : 35 第2部 影響予測・評価セッション (95分)**
- ・ 話題提供・質疑応答 :
 - 沖大幹 (東京大学) (15分)
 - 竹見哲也 (京都大学) (10分)
 - 花崎直太 (国立環境研究所) (10分)
 - 竹之内健介 (香川大学) (10分)
 - ・ 議論 (50分)
 - ラップアップ 花崎直太 (国立環境研究所)
- 16 : 35–16 : 45 休憩 (10分)**
- 16 : 45–17 : 55 第3部 基盤・横断セッション (70分)**
- ・ 話題提供・質疑応答 :
 - 河宮未知生 (海洋研究開発機構) (10分)
 - 齊木吉隆 (一橋大学) (10分)
 - 浦嶋裕子 (MS&AD インシュアランスグループホールディングス株式会社) (10分)
 - ・ 議論 (40分)
 - ラップアップ 松村郷史 (JST CRDS)
- 17 : 55–18 : 00 閉会挨拶**

付録2 参加者リスト

〈招聘有識者〉(敬称略、五十音順)

浦嶋 裕子	MS&AD インシュアランスグループホールディングス株式会社 総合企画部 サステナビリティ推進室 課長
沖 大幹	東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
河宮 未知生	海洋研究開発機構 環境変動予測研究センター センター長
小坂 優	東京大学 先端科学技術研究センター グローバル気候力学分野 准教授
齊木 吉隆	一橋大学 大学院経営管理研究科 経営管理専攻 教授
澁谷 亮輔	三井住友海上火災保険株式会社 ビジネスイノベーション部 課長代理
高谷 祐平	気象庁 気象研究所 全球大気海洋研究部 第二研究室 主任研究官
竹之内 健介	香川大学 創造工学部 講師
竹見 哲也	京都大学 防災研究所 気象・水象災害研究部門 教授
竹村 俊彦	九州大学 応用力学研究所 大気海洋環境研究センター 気候変動科学分野 主幹教授
花崎 直太	国立環境研究所 気候変動適応センター 気候変動影響評価研究室 室長
三浦 裕亮	東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 准教授
渡部 雅浩	東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系 教授

〈傍聴登録〉 ※2021年11月1日時点 (敬称略、順不同)

服部 正	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 環境科学技術推進官
南 敦	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 専門職
小田切 美穂	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課 総括係長
宮下 裕次	文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発戦略室 専門職
大久保 秀克	MS&AD インシュアランスグループホールディングス株式会社 リスク管理部 課長
植原 啓太	MS&AD インシュアランスグループホールディングス株式会社 リスク管理部 主任
河田 裕貴	MS&AD インシュアランスグループホールディングス株式会社 リスク管理部 担当
吉川 圭子	国立環境研究所 気候変動適応センター 副センター長
大濱 隆司	JST 研究プロジェクト推進部 部長
加藤 豪	JST 研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ 調査役
幡野 尚宏	JST 研究プロジェクト推進部 主査
石原 毅	JST 研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ 主任調査員
古川 雅士	JST イノベーション拠点推進部 調査役
中田 希衣	JST イノベーション拠点推進部 共創の場グループ 主査
辻本 広行	JST イノベーション拠点推進部 主任調査員
津野 誠司	JST イノベーション拠点推進部 共創の場グループ 主任調査員
服部 文秀	JST イノベーション拠点推進部 共創の場グループ 主任調査員
原田 千夏子	JST 未来創造研究開発推進部 副調査役
粕谷 直	JST 未来創造研究開発推進部 主査
川口 健一	JST 未来創造研究開発推進部 主任調査員
佐藤 正樹	JST 国際部 調査役
安藤 菜穂子	JST 国際部 副調査役

村田 朋	JST 国際部 SATREPS グループ 主査
田中 春彦	JST 国際部 主任調査員
穴沢 一夫	JST 国際部 主任調査員
相馬 司	JST 国際部 主任調査員
豊福 薫	JST 国際部 事業実施グループ 調査員
牧山 ゆう子	JST 国際部 事業実施グループ 調査員
茅 明子	JST 社会技術研究開発センター フェロー
吉脇 理雄	JST CRDS フェロー
桑原 明日香	JST CRDS フェロー
長谷川 景子	JST CRDS フェロー

〈JST CRDS 検討チームメンバー〉

佐藤 順一	JST CRDS 環境・エネルギーユニット 上席フェロー ※チーム総括責任者
中村 亮二	JST CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー ※チームリーダー
有本 建男	JST CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット 上席フェロー
上野 伸子	JST CRDS 連携担当、環境・エネルギーユニット兼務 フェロー
嶋田 義皓	JST CRDS システム・情報科学技術ユニット フェロー
勝田 博志	JST CRDS 戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ 主任調査員
松村 郷史	JST CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー
八木岡 しおり	JST CRDS 海外動向ユニット フェロー

総括責任者	佐藤 順一	上席フェロー	環境・エネルギーユニット
リーダー	中村 亮二	フェロー	環境・エネルギーユニット
メンバー	有本 建男	上席フェロー	科学技術イノベーション政策ユニット
	上野 伸子	フェロー	連携担当、環境・エネルギーユニット兼務
	嶋田 義皓	フェロー	システム・情報科学技術ユニット
	勝田 博志	主任調査員	戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ
	松村 郷史	フェロー	環境・エネルギーユニット
	八木岡 しおり	フェロー	海外動向ユニット

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

CRDS-FY2021-WR-08

中長期の自然災害・気候変動リスクに対応する 気象・気候予測の今後

令和 4 年 3 月 March 2022

ISBN 978-4-88890-776-7

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.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>