CRDS-FY2016-WR-06

俯瞰ワークショップ報告書

環境分野の研究開発の概況

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

目　次

1. サマリー …… 1

2. 趣　旨 …… 5

3. 気候変動区分 …… 7
3.1　気候変動（影響及び適応）の俯瞰
原澤英夫（国立環境研究所 理事） …… 7

4. 環境汚染・健康区分 …… 27
4.1　環境影響　内分泌かく乱物質：問題提起から 20 年
井口泰泉（横浜市立大学　客員教授）…… 27
4.2　環境化学の進展と課題
柴田康行（国立環境研究所　環境計測研究センター　フェロー）… 39
4.3　環境汚染・健康区分における研究
human ecology（人間集団 ⇄ 環境）の立場から
渡辺知保（東京大学　大学院医学系研究科　教授）…… 59

5. 生物多様性・生態系区分 …… 73
5.1　環境分野の生物多様性研究　現状と課題
矢原徹一（九州大学 大学院理学研究院 教授） …… 73
5.2　生物多様性と生態系サービスに関する最近の研究動向
中静透（東北大学 大学院生命科学研究科 教授） …… 86

6. 循環型社会区分 …… 105
6.1　循環型社会区分（LCA）の過去・現状・今後について
菊池康紀（東京大学 「プラチナ社会」総括寄付講座
特任准教授／ CRDS 特任フェロー） …… 105
6.2　気候変動下において、持続可能でレジリエントな社会の構築に貢献する
水循環研究のあり方
小池俊雄（東京大学　大学院工学系研究科　教授）…… 118

付　録…… 141
開催概要・プログラム…… 141

1. サマリー

2017 年に発行予定の「研究開発の俯瞰報告書」では、環境分野を気候変動区分、環境汚染・健康区分、生物多様性・生態系区分、循環型社会区分の 4 区分で構成することを検討している。各区分を先導してきた代表的な研究者による講演と討論を行い、研究開発の歴史や経緯、現状と課題、今後の方向性を把握した。得られた主な知見は以下の通りである。

■気候変動区分

＜気候変動の影響及び適応＞

温暖化の影響が顕在化しているかが当初の重要な研究テーマであったが、これまでの研究の結果、現在は全ての大陸と海洋で自然と人間のシステムに温暖化の影響が出ていることが示されている。

気候変動の影響研究は気候モデルの予測値を基に行うため不確実性が伝搬するが、今後は、研究事例の増加による不確実性の低下が期待される。解像度を高くしてデータを詳細に示すダウンスケーリング技術も進展している。農林水産業と自然災害の分野では比較的知見が充実しているが、それ以外の分野では不足している。今後は気候変動に関する政府間パネル（IPCC）への貢献と、それを通じて国の適応計画を推進する研究や仕組みが求められる。さらに、自治体の影響評価や適応策への支援が重要となる。

■環境汚染・健康区分

＜内分泌かく乱物質の環境影響＞

かつては DDT など毒性が強い単独の物質を対象に研究が行われ対策が実施されてきた。しかし、低濃度でも内分泌のかく乱を起こす物質がある可能性が提言され、様々な取組みが行われてきている。

未解決の課題として、単独の化学物質では影響は無くても、複数物質では影響があるのではないかという複合影響が挙げられる。また、化学物質の影響が次世代に伝播する経世代影響がある。これらの課題については、再現の難しさ、長い研究期間、高額の資金の必要性が研究・対策のボトルネックとなっている。今後は、化学物質による曝露から影響が出るまで、体内でどのような現象が起こり有害性につながるかの機構を解明する AOP（Adverse Outcome Pathway）の研究が必要とされている。

＜化学物質管理と環境化学＞

化学物質の分析の観点では、毒性がある物質を見逃さないことが大きな目標である。また、化学物質の管理の観点からは、どの物質がどの程度発生し、どう移動するかを示すモデルを構築することが大きな目標である。

規制対象物質の増加や、多地点・長期間・連続的な把握の必要性という課題に対し、全ての化学物質を一斉に分析できるノンターゲット分析の取り組みが進んでいる。また、無機物質や同位体の研究が進展しており、MIF（Mass-Independent Fractionation，質量非依存性分別）を活用した元素の環境動態の把握や、加速器質量分析（AMS）を用いた長寿命放射性核種による環境変化の把握などが行われている。今後は、高解像度、高信頼性のデータ取得や、毒性データとの関連付けが必要である。

＜環境による健康への影響＞

地球規模の環境問題による健康影響の研究が現在進められている。かつての高レベルの単一要因による影響から、低レベルの複数要因による影響へと課題が遷移してきている。こうした変化を受け、特定の要因に対する研究から、全体を調べて要因を拾い出す研究が増加してきたと思われる。具体的には、大規模データを活用した研究である。人の移動を考慮した大気汚染や温熱への曝露に関する研究、土地利用の特徴と感染症との相関把握研究などが行われている。今後は、地域差、遺伝要因、腸内細菌叢などの影響、死亡やがん以外のエンドポイントの探索、個人や集団の「健康力」を捉える指標の設定などが課題として挙げられる。

■生物多様性・生態系区分

＜生物多様性研究＞

生物多様性の研究では、この 5,6 年で大きな 3 つの新展開が見られる。第一に、ビッグデータ化と情報処理技術の活用が挙げられる。様々なデータベースを連結し使いやすく構築することが行われている。また、装置の小型化などの技術進展により追跡が容易になり、そこから得られるデータの活用も進んでいる。第二に、ゲノム科学の急速な進展がある。樹木と根圏微生物のネットワーク解析や、水から DNA を採取し生息する生物を把握する環境 DNA 研究などが行われている。第三に、生態系全体を扱うマクロ生態学がある。この 3 つの動向について、日本は優れた研究を行っているが、世界の動きも非常に速い。今後は、日本らしいプロジェクトで世界と競っていく必要がある。

＜生態系サービス研究＞

生態系研究は、90 年代までは生物学・生態学の中で、90 年代からは地球環境問題として、2010 年以降は社会学や経済学との統合の中で行われてきた。2010 年以降、生態系サービス（生態系から得られる有益なサービス）の価値を経済に反映するために、経済評価が各地で実施されている。

生態系は土地利用変化の影響が大きく、生態系サービスの評価には地理情報が重要である。生態系を基盤とした防災･減災（Eco-DRR）や生態系の機能を活かした気候変動への適応（EbA）といった災害に関する研究も行われている。今後は、上記のほか、ビッグデータの利用、気候変動・社会経済シナリオとの統合、社会経済的側面の強化、政策・企業との協働（ツール開発）が求められている。

■循環型社会区分

＜ LCA ＞

1969 年に飲料メーカーが容器の環境影響を定量化したことで、環境影響を検討するには、製造から廃棄後までの全体を見る必要性が認識され研究が始まった。日本の LCA 研究はその後開発されたソフトの購入から始まった。

研究の動向の 1 つに温室効果ガス（GHG）の削減貢献量の評価がある。例えば、パソコンの省エネ化に貢献しているパソコンの構成要素を明確にするものである。様々なテーマが学会で議論されているが、日本は GHG に研究が集中している。国際的には、社会性の評価を含む持続可能性評価が進められている。今後は、蓄電池や太陽光パネルなどの技術評価における

LCA、マテリアルフロー解析、法制度との連携、人材育成、データベース維持管理のサポートが必要である。

＜水循環＞

水循環の研究は災害レジリエンスや持続可能な開発、気候変動の国際的な取り組みと切り離せない。こうした動きの中で、地理的、空間的、分野を超えた連携や、科学と社会との連携が要求されている。環境情報基盤であるDIAS（データ統合・解析システム）を通じて、こうした様々な連携が進められている。

DIASを用いると衛星観測データから、降水量や蒸発散量、土壌水分、地下水が計算できる。この計算結果は地上データで検証することができる。データが無い場合はモデルによる予測を行う。これらの情報は統合的水資源管理に利用することができる。今後は人々がこの情報を用いて様々な活動が行えるような情報の作り方が不可欠である。

上記の知見は、研究開発の俯瞰報告書における環境分野の総括に活用すると共に、各区分の下に分析単位として設定する研究開発領域の構成の検討に活用する。

2. 趣　旨

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）は、国内外の社会や科学技術イノベーションの動向及びそれらに関する政策動向を把握、俯瞰、分析するとともに、これに基づき課題を抽出し、科学技術イノベーション政策や研究開発戦略を提言し、その実現に向けた取組を行うことを任務としている。

各分野の俯瞰活動のアウトプットとして発行する「研究開発の俯瞰報告書」は、研究開発分野の歴史、現状、今後の方向性、主要な研究開発領域ごとの国際比較について取りまとめた研究開発戦略立案の基礎資料である。2017 年に発行予定の「研究開発の俯瞰報告書（環境・エネルギー分野）」では、環境分野を気候変動区分、環境汚染・健康区分、生物多様性・生態系区分、循環型社会区分の 4 区分で構成することを検討している。そこで、各区分の過去・現在・未来の概況を把握することを目的として、2015 年度から 2016 年度にかけて、研究開発を先導してきた代表的な研究者による講演を行い、研究開発の歴史や経緯、現状と課題、今後の方向性の把握と討論を行った。本報告書はその内容をまとめたものである。

本活動により得られた知見は、「研究開発の俯瞰報告書」の作成に活用すると共に、各区分の下に分析単位として設定する研究開発領域の構成の検討にも活用する。

3. 気候変動区分

3.1 気候変動（影響及び適応）の俯瞰

原澤 英夫（国立環境研究所 理事）

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）（図 1）では次の第 6 次評価報告書（AR6）に向けた体制が構築された。2020 ～ 21 年に発行するとのことで、これまで 7 年程度かかっていた作業を 5 年程度で仕上げることになる。これから AR6 の目次立てを行うが、日本から多くの執筆者を出すことや、日本の研究を IPCC に取り上げてもらうことが重要である。論文やレビュー報告書を IPCC 事務局や執筆者に送ることなども効果があると考える。

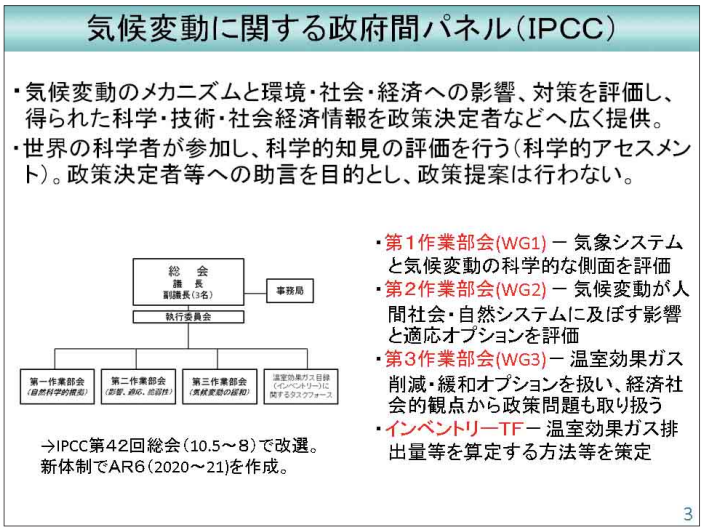


図 1

1994 年に IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Impacts and Adaptation を英国の研究者らと 2 年程度をかけて作成した（図 2）。最近では評価報告書作成が終わると特別報告書が作成されるが、その特別報告書の第 1 号になる。当時は自由な雰囲気があり、様々な研究者が協力して作成した。94 年頃、影響や適応がキーワードになってきて、どのような研究が必要かという議論も行った。図 2 右上の影響・適応の統合アプローチが示すように、当時から統合評価モデルのような話があった。また、影響・適応アセスメントの 7 ステップということで、環境アセスメントのようにステップに応じた手順書のようなものを作成した。このように、影響や適応について、以前より国際的には研究が始まっていたが、日本では認知度が低く、とくに適応という言葉は認知度が低いと思う。

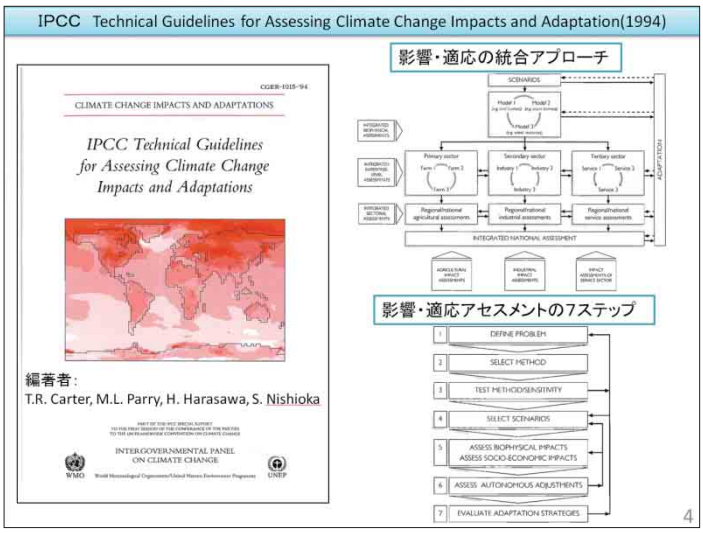


図２

図 3 は IPCC 報告書の経緯である。IPCC が 1988 年に設立され、90 年に第 1 次評価報告書（FAR）が公表された。実は、FAR がやや不十分だったということで、1992 年に補足報告書が出ている。第 1 作業部会が、気候変動のメカニズム、第 2 作業部会が影響、第 3 作業部会が対策という仕分けができつつあった中で、先ほど紹介した 1994 年のガイドラインを作成した。

日本の影響・適応評価は歴史的には長くやっていたと思うが、1997 年に「地球温暖化の日本への影響 1996」という報告書を作成した。これは、ある出版社が本にしたいとのことで、少しタイトルは変わったが単行本を出した。さらに、2001 年に改訂版である「地球温暖化の日本への影響 2001」が作成された。その後、第 2 期科学技術基本計画がスタートし、ライフサイエンスと情報、環境、ナノテク・材料の 4 分野を重点的にやろうということになり、2002 年には地球温暖化イニシャティブが開始された。2003 年に「地球温暖化研究の最前線－環境の世紀の知と技術 2002」を作成し、これも単行本を発行した。地球温暖化イニシャティブは第 2 期科学技術基本計画と足並みをそろえてスタートし、それなりの成果を出したが第 3 期には継続されなかったのは残念である。

その後、2009 年には統合レポートと呼んでいる「日本の気候変動とその影響」を、気象庁、文部科学省、環境省が、最新の研究成果をまとめる形で作成した。IPCC にこのようなレビュー報告書を英訳して送ることが非常に有効である。2013 年に 2012 年版を作成した。中央環境審議会地球環境部会に影響評価小委員会ができ、2015 年に「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について（意見具申）」を作成した。これは現段階の日本における温暖化の影響に関する全体像と分野ごとの知見であり、これを踏まえ 2015 年に適応計画が作成され、11 月に閣議決定されている。今後、5 年おき程度にレビューされることを期待しているが、分野によっては進展に差がある。

このように、日本も影響・適応に関しては、認知度は低いとはいえ、世界に互していろいろな活動をしてきている。図 4 は最新の第五次評価報告書（AR5）の主要ポイントである。

IPCC報告書の経緯

年	評価報告書	温暖化の科学的知見	日本の影響・適応評価
1988	IPCC設立(WMO,UNEP)		
1990	第1次評価報告書(FAR)	人為起源の温室効果ガスは気候変化を生じさせる恐れがある。	
1992	第1次評価報告書補足報告書		
1994	影響・適応評価のIPCC技術ガイドライン(特別報告書)		
1995	第2次評価報告書(SAR)	識別可能な人為的影響が全球の気候に表れている。	1997「地球温暖化の日本への影響1996」(環境庁地球環境問題検討委員会)
2001	第3次評価報告書(TAR)	過去50年に観測された温暖化の大部分は、温室効果ガス濃度の増加によるものだった可能性が高い(66%以上)	2001.4「地球温暖化の日本への影響2001」(環境省) 2001.4～第2期科学技術基本計画(ライフ、情報、環境、ナノテク・材料) 2002.4～地球温暖化研究イニシャティブ開始 2003「地球温暖化研究の最前線－環境の世紀の知と技術2002」(総合科学技術会議環境担当議員・内閣府政策統括官(科学技術政策担当)共編:総合科学技術会議・地球温暖化研究イニシャティブ・気候変動分野報告書
2007	第4次評価報告書(AR4)	温暖化に疑う余地がない。20世紀半ば以降の温暖化のほとんどは、人為起源の温室効果ガス濃度の増加による可能性が非常に高い(90%以上)	2009 気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」(文科省、気象庁、環境省)
2013～14	第5次評価報告書(AR5)	温暖化に疑う余地がない。20世紀半ば以降の温暖化の主要な要因は、人間の影響の可能性が極めて高い(95%以上)	2013 気候変動の観測・予測・影響評価に関する統合レポート「日本の気候変動とその影響(2012年度版)」(文科省、気象庁、環境省)
			2015.3「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について(意見具申)」(中央環境審議会) 2015.11「気候変動の影響への適応計画」(閣議決定)

5

図３

WG2 AR5(影響、適応、脆弱性)の主要ポイント

- ここ数十年で、すべての大陸と海洋において、気候変動が自然及び人間システムへの影響を引き起こしている。
- 気候システムに対する危険な人為的干渉による深刻な影響の可能性として、主要なリスクが8つあげられた。
- 第3次評価報告書で示された温暖化や人々、経済、及び生態系にとっての適応の限界を意味する5つの懸念の理由が更新された。
- 適応は一部の計画に組み込まれつつあり、限定的ではあるが、実施されている適応策もある。
- 適応は、地域や背景が特有であるため、すべての状況にわたって適切なリスク低減のアプローチは存在しない。

出典:IPCC WG2 AR5報告書　6

図４

影響は比較的新しい研究領域である。例えば気象は長い歴史があり、気候モデルの開発や予測がある。影響は、農業、自然災害、熱中症、健康の問題であり、分野毎や横断的な特徴を持っている。

研究の視点を図５に記載した。まず最も重要であるのは、温暖化の影響が本当に出ているかについて長い間議論があった（影響の検出)。なぜ影響のモニタリングや影響の検出をしなければいけないか。当時は、気温の上昇を見ていればそれが温暖化の影響の１つの大きな指標であるので、例えば個々の生物がどうなるかや人間活動がどうなるかは関係ないといった話もあった。しかし、そうではなく、温暖化の影響が科学的にも出ており、それを統合するのが大事だということで、当初は温暖化の影響が本当に顕在化しているかが非常に重要な研究テーマであった。

平均的な気温上昇のほか、極端現象の影響がやはり重要ということで、IPCC がハザード、脆弱性、リスクという新しい見方でまとめ特別報告書にしている。

IPCC の３つの作業部会に関わるのが不確実性の問題である。気候予測は非常に多くの実測値と研究成果があるため、それを踏まえ、確率で何％正しいということが言えるが、影響につ

いてはそこまで言えないということで、IPCC はいろいろ検討して、結果的に専門家の判断を重視した指標を用いて今日まで来ている。

適応策は影響と対になる考え方で、影響があるのであれば対策を行う必要がある。適応策として継続的に取り組んできたが、途中で様々な議論があり、適応策だけでよいという意見や、そうではなく、CO_2 を下げる削減努力と影響に対する対策を今からやっておく適応策が必要だという意見があった。そして、両方が大事であると意見が現在の流れである。

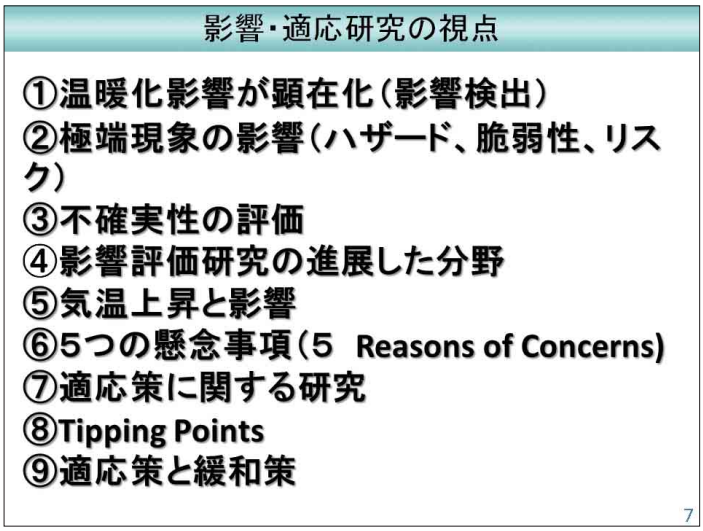


図５

図 6 は地球温暖化と影響の顕在化（図 5 ①）ということで、本当に影響が出ていることを示すためによく用いるものである。非常に関心が高かったのは、右上のヨーロッパの熱波である。当初は3万5千人程度が亡くなったということであったが､その後データを収集し解析した結果、6 万～ 6 万 5 千人が亡くなったという話になった。日本でも 2010 年には 1,700 人の方が熱中症で亡くなっている。本当に熱中症で亡くなったかどうかという議論はあるが、温暖化の影響が実際にヨーロッパで起こり、かなりの人が亡くなった。ヨーロッパ、特に英国やドイツなどは気候変動研究の先進的な国だが、自分たちの地域でこのような影響が出てしまい、温暖化が関わっていそうだという論文がネイチャーに出たりしたため、影響や適応とは何かといった話がヨーロッパで再認識されたきっかけになった。他、ハリケーン・カトリーナにより米国で研究の必要性等が強調されたり、北極海の海氷が年々に減っているという話もある。

このような現象が本当に温暖化の影響なのかということで、第 4 次評価報告書には図 7 のような地図が掲載された。温暖化の影響が科学的に出ていると判断される地点に丸がついている。日本は残念ながら、京都に 1 つ丸がついているだけだが、研究が無いのではなく、IPCC に取り上げられた論文が 1 つや 2 つしかなったということである。

この時ほとんどの海洋・大陸で温暖化の影響が出ているという判断をしたということである。次の第 5 次評価報告書には、図 8 の通り、全ての大陸と海洋で自然及び人間システムへの影響が顕在化しているということが示された。これで影響の顕在化の問題にケリがついたような印象だが、影響はいろいろなところに出てくるため、影響のモニタリングとその検出の研究はまだ重要性が高い。

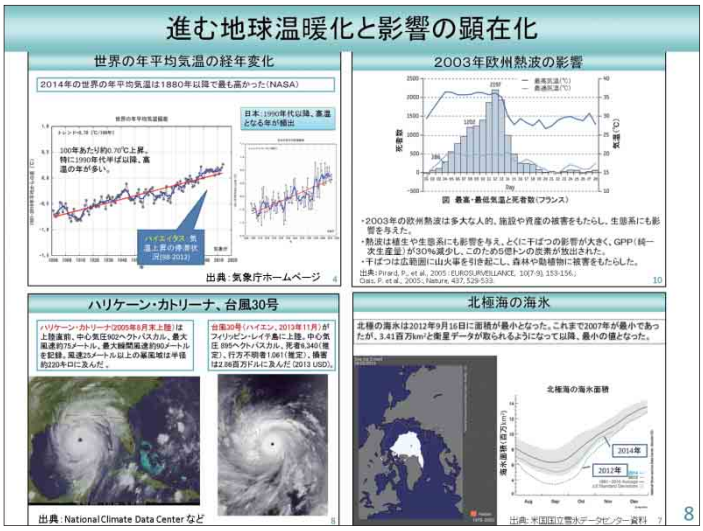

進む地球温暖化と影響の顕在化
世界の年平均気温の経年変化
2014年の世界の年平均気温は1880年以降で最も高かった（NASA）
日本：1990年代以降、高温となる年が頻出
100年あたり約0.70℃の上昇。特に1990年代半ばの以降、高温の年が多い。
出典：気象庁ホームページ
2003年欧州熱波の影響
図 最高・最低気温と死者数（フランス）
・2003年の欧州熱波は多大な人的、施設や資産の被害をもたらし、生態系にも影響を与えた。
・熱波は植生や生態系にも影響を与え、とくに干ばつの影響が大きく、GPP（純一次生産量）が30%減少し、このための5億トンの炭素が放出された。
・干ばつは広範囲に山火事を引き起こし、森林や草地植物に被害をもたらした。
出典：Pirard, P. et al., 2005：EUROSURVEILLANCE, 10(7-9), 153-156.；Gois, P. et al., 2005.; Nature, 437, 529-533.
ハリケーン・カトリーナ、台風30号
ハリケーン・カトリーナ（2005年8月末上陸）は上陸直前、中心気圧902ヘクトパスカル、最大風速約75メートル、最大瞬間風速約90メートルを記録。風速25メートル以上の暴風域は半径約220キロに及んだ。
台風30号（ハイエン、2013年11月）がフィリピン・レイテ島に上陸。中心気圧895ヘクトパスカル、死者8,340（推定）、行方不明者1,061（推定）、損害は2.08百万ドルに及んだ（2013 USD）。
出典：National Climate Data Center など
北極海の海氷
北極の海氷は2012年9月16日に面積が最小となった。これまで2007年が最小であったが、3.41百万km²と衛星データが取られるようになって以降、最小の値となった。
北極海の海氷面積
2014年
2012年
出典：米国国立雪氷データセンター資料
8

図６

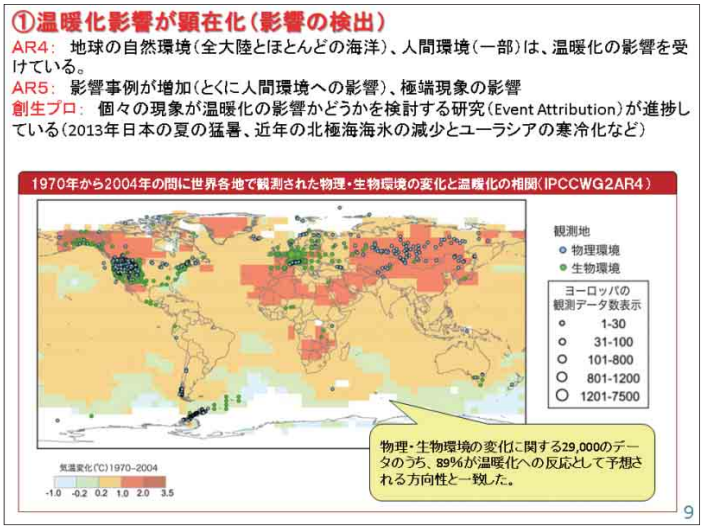

①温暖化影響が顕在化（影響の検出）
AR4： 地球の自然環境（全大陸とほとんどの海洋）、人間環境（一部）は、温暖化の影響を受けている。
AR5： 影響事例が増加（とくに人間環境への影響）、極端現象の影響
創生プロ： 個々の現象が温暖化の影響かどうかを検討する研究（Event Attribution）が進捗している（2013年日本の夏の猛暑、近年の北極海海氷の減少とユーラシアの寒冷化など）
1970年から2004年の間に世界各地で観測された物理・生物環境の変化と温暖化の相関（IPCC WG2 AR4）
観測地
物理環境
生物環境
ヨーロッパの観測データ数表示
1-30
31-100
101-800
801-1200
1201-7500
物理・生物環境の変化に関する29,000のデータのうち、89%が温暖化への反応として予想される方向性と一致した。
気温変化（℃）1970-2004
-1.0 -0.2 0.2 1.0 2.0 3.5
9

図７

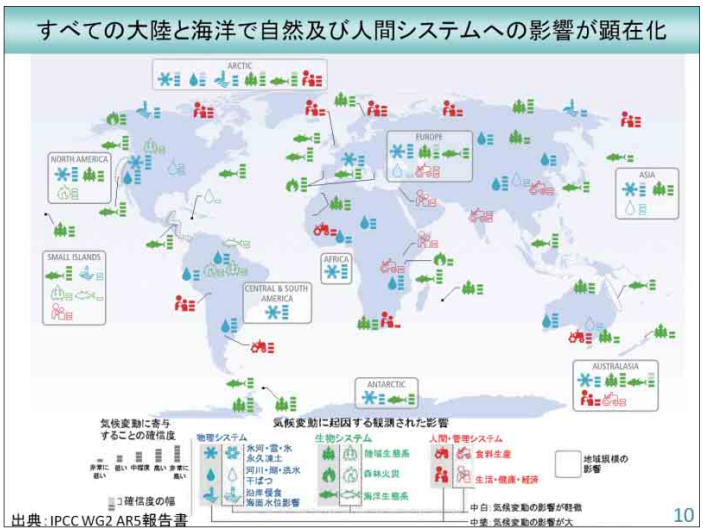

すべての大陸と海洋で自然及び人間システムへの影響が顕在化
ARCTIC
NORTH AMERICA
EUROPE
ASIA
SMALL ISLANDS
AFRICA
CENTRAL & SOUTH AMERICA
ANTARCTIC
AUSTRALASIA
気候変動に寄与することの確信度
気候変動に起因する観測された影響
物理システム
生物システム
人間・管理システム
地域規模の影響
確信度の幅
中白：気候変動の影響が軽微
中塗：気候変動の影響が大
出典：IPCC WG2 AR5報告書
10

図８

極端現象の影響（図５②）とは、いわゆる熱波や豪雨、台風などの問題である。気象関係では、台風が温暖化により数は減るが強くなるという結果があるが、どこまで強くなるかという情報がない。影響研究には、気候予測を使うが、平均的に何度上がるか、降雨がどのようになるかということ以外に、台風がどうなるかの異常気象シナリオがこれまで無く、最近ようやく使えるようになった状況であるので、この分野はこれから研究が必要である。気温上昇が２度または４度の場合どうなるかという研究は気候変動リスク情報創生プログラムで実施している。そこでは災害リスクのシナリオのような従前とは異なるシナリオを作り影響研究を進めており、その辺りは世界的にも日本がトップランナーである。このような研究成果をどんどん発信すれば、第６次評価報告書に掲載され、日本の貢献になると思う。（図９）

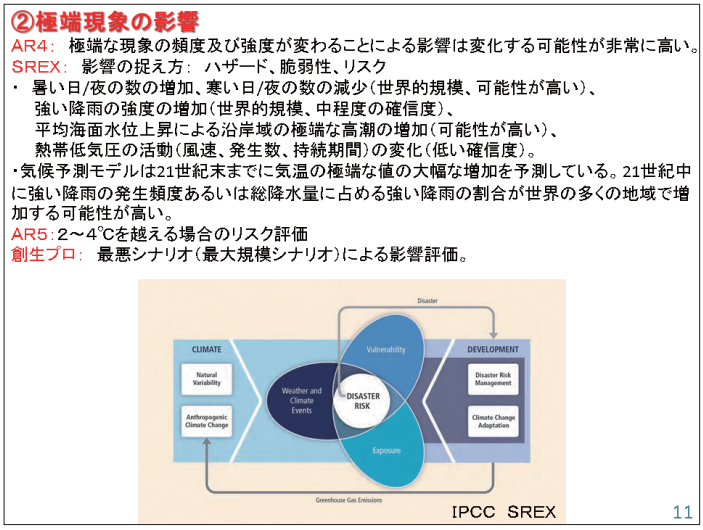


図９

図 10 に極端現象の過去及び将来の変化を示している。AR4 の時から研究が進むにつれ、極端現象の可能性が上がっていることがわかり、赤で示している。特に寒い日や暑い日の増加は可能性が非常に高いという結果だが、熱帯低気圧についてはまだ確信度が低く研究の知見が足りないということである。

極端現象の過去および将来の変化　AR4→AR5

現象及び傾向	20世紀後半に起きた可能性	人間活動の寄与の可能性	将来の傾向の可能性
寒い日と寒い夜の頻度減少	可能性が非常に高い	可能性が高い→可能性が非常に高い	ほぼ確実
暑い日と暑い夜の頻度増加	可能性が非常に高い	可能性が高い（夜のみ）→可能性が非常に高い	ほぼ確実
熱波の頻度が増加	可能性が高い→いくつかの地域で可能性が高い	どちらかといえば→可能性が高い	可能性が非常に高い
大雨の頻度が増加	ほとんどの陸域で可能性が高い→増加地域が減少地域より多い可能性が高い	どちらかといえば→確信度が中程度	ほとんどの陸域で可能性が非常に高い→中緯度と熱帯湿潤域で可能性が非常に高い
干ばつの影響を受ける地域が増加	多くの地域で1970年以降可能性が高い→いくつかの地域で可能性が高い	どちらかといえば→確信度が低い	可能性が高い→地域～地球規模で可能性が高い
強い熱帯低気圧の数が増加	確信度が低い	確信度が低い	可能性が高い → 北西太平洋と北大西洋でどちらかといえば
高潮の発生が増加	可能性が高い→可能性が高い（1970年以降）	どちらかといえば→可能性が高い	可能性が高い → 可能性が非常に高い

出典：IPCC AR5 WG1報告書 12

図 10

不確実性の評価（図５③）について、気象関係では様々なデータや研究があるため可能性を確率で示せるが、影響研究は気候モデルの予測値を基に行うため不確実性が伝播する。すなわち、不確実性が高い分野である。しかし、研究事例は着実に増えており、今後は不確実性が下がるだろう。（図 11）

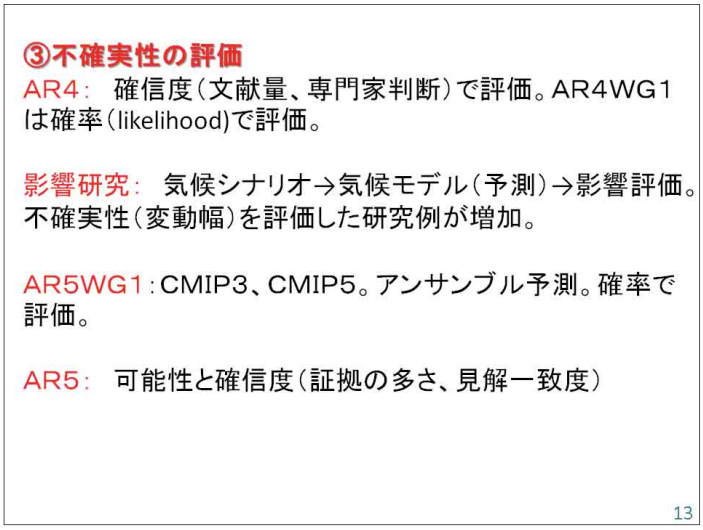


図 11

よく使われる「可能性が極めて高い、95%以上」という結果は、データが存在し明確に判断できるという評価だが、影響研究はそこまで到達していない。モデル、解析、あるいはある意見の正しさについて専門家の判断に基づく不確実性の程度を「確信度」で表す。具体的には様々なデータや文献を集めて読み解くが、報告数が非常に少ない場合は専門家の判断で補う。IPCC の要約部分には確信度の低いものは載らないため、要約に記載されるのはかなり確信度の高いものとなる。（図 12）

影響研究の進展した分野（図５④）に関し、影響の深刻さ、理解の進展の程度、信頼性の向上度合いのそれぞれについて、IPCC ではなく研究論文による判断では図 13,14 の通りとなっている。分野によって進展に差があるが、全般的に研究が進んでいる。

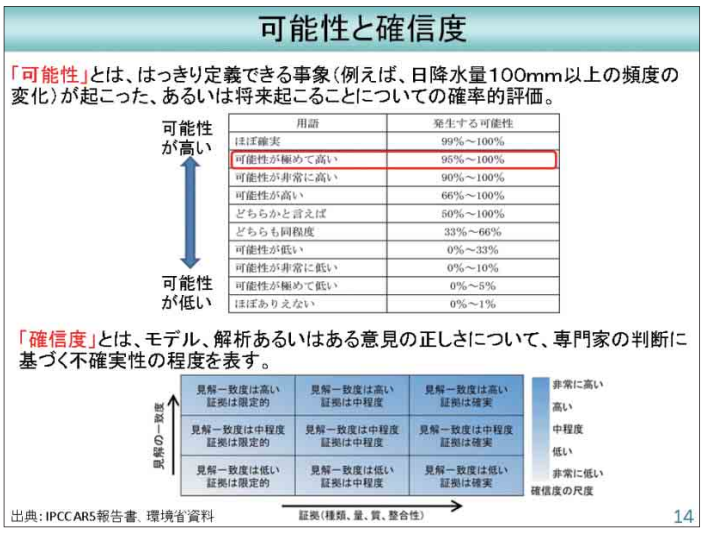


図 12

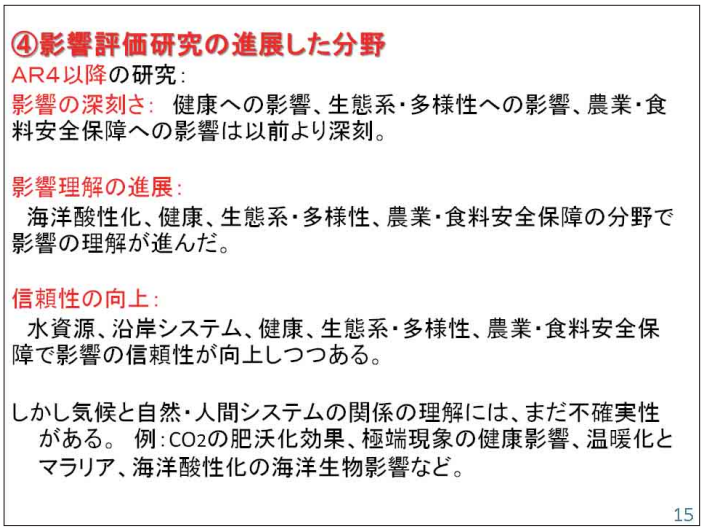


図 13

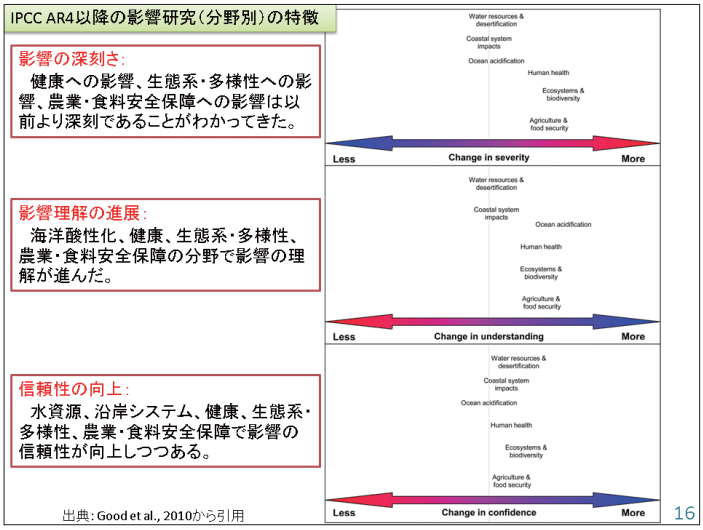


図 14

気温上昇と影響（図 5 ⑤）について。気温上昇に応じた形の影響が出ているが、IPCC でも全球レベルでの影響をどのような表現でまとめるかが AR4 でも AR5 でも非常に問題になっている（図 15）。図 16 は AR4 のときに平均気温が何度上がったら各分野でどんなことが起きるかを一目でわかるように表したものである。日本の影響もこれに倣い同様のまとめ方をしている。影響研究は多くの論文を読み IPCC の報告書のようにまとめることが大事だが、一般の方々にわかりやすくする工夫も必要である。

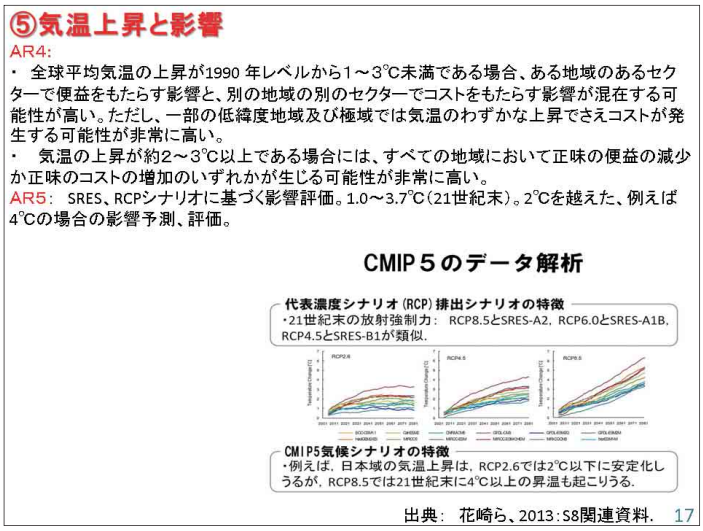


図 15

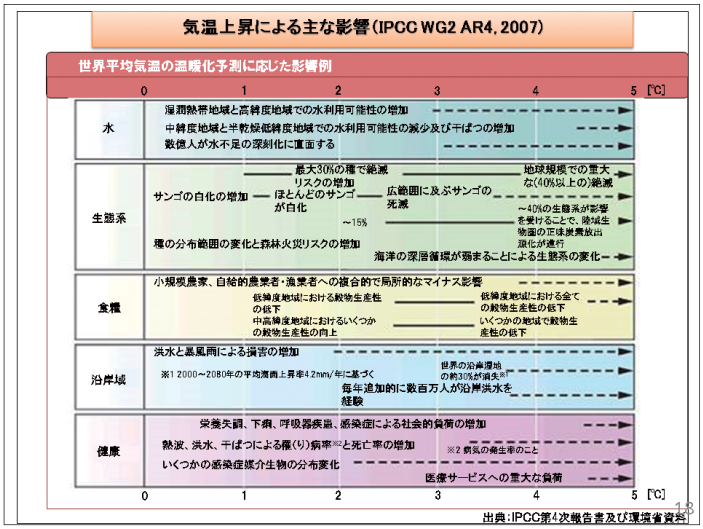


図 16

5 つの懸念の理由（図 5 ⑥）とは、気温が何度上がったら 5 つのレベルでどのような影響が出るかを見るものである。図 17 は、AR3 でまとめた温暖化の全球的な影響評価である。AR4 ではアップデート版を作成したが総会で落とされてしまったが、AR5 では復活した（図 18）。5 つのレベルとは、例えばユニークかつ絶滅の恐れのあるシステム（生態系や文化など）がある。生態系が一番弱く、図 17,18 で赤く示す通りすぐに影響が出る。右に行くほど世界総合的な影響や大規模な特異現象のレベルとなり、Tipping Points のような話となる。温度が上がるほど様々なレベルで影響が出てくることをわかりやすくまとめている。

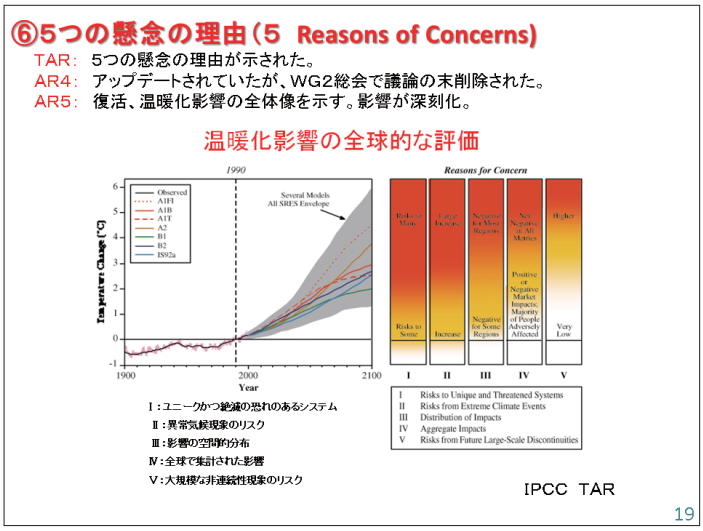


図 17

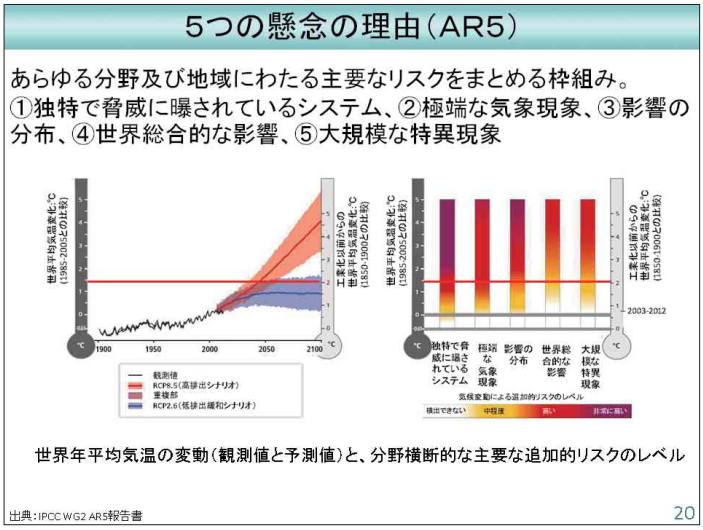


図 18

適応策に関する研究（図 5 ⑦）について（図 19）。影響と適応は対であるが、適応に関する研究は少し遅れている。温暖化自体は地球規模で起こるが、適応策は地域的な話であり、スケールが異なることが遅れにつながる。しかし、影響研究者は適応策をも考えながら進めている。

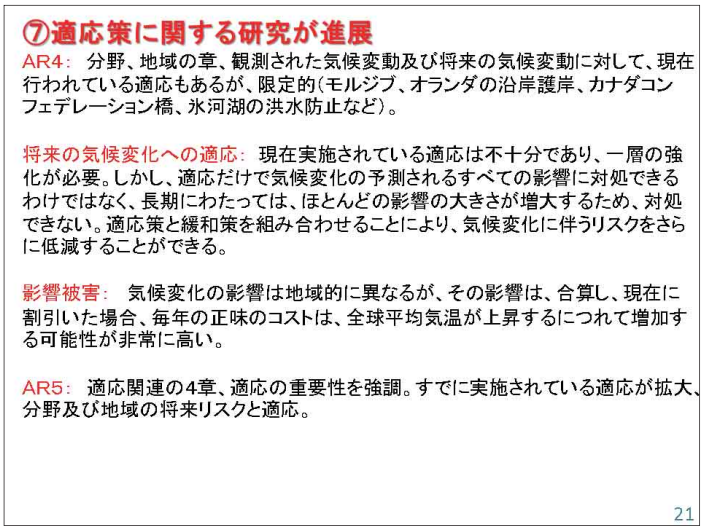


図 19

AR5 では、適応に関連する章は 4 つあり、適応と緩和策をどう統合していくかという章もある。適応策は既に一部の計画に組込まれ、限定的ではあるものの実施されている状況である。今まで行っていた政策に適応的な要素も入れる取り組み（主流化）が既に存在することが報告書に記載されている。（図 20）

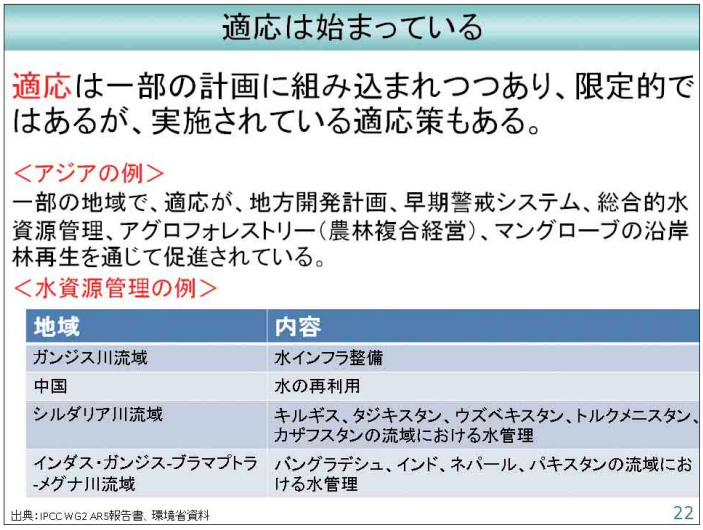


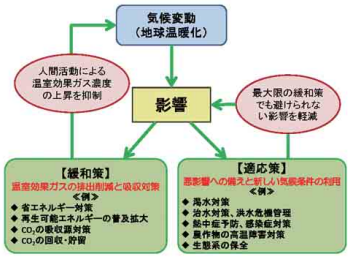
図 20

緩和策と適応策は異なる（図 21）。環境省の環境研究総合推進費で「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究（S-8）」が実施された。S-8 では、災害外力の上昇が温暖化の 1 つの特徴とすると、その外力を下げることが緩和策であり、影響を受けるインフラや脆弱性を減らすのが適応策ということで、両方を組み合わせることで社会的な影響を少なくできるとした（図 22）。また、適応には予見的適応と事後的適応がある（図 23）。

図 24 は主要国の影響、適応計画の状況である。よく取り上げられるのが英国と米国である。

緩和策と適応策

- 緩和策は、省エネルギーや再生可能エネルギー導入に代表される種々の対策による温室効果ガスの排出削減や森林等の吸収源の増加などで温暖化に対する人為的影響を抑制する対策。
- 適応策は、温暖化がもたらす水資源、食料、生物多様性、都市や農村、人々の生活や活動等への様々な影響に対して人や社会、経済システムを再構築することで影響を軽減しようという対策。



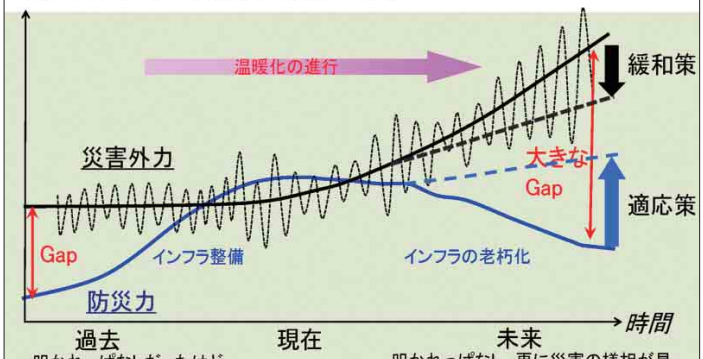
気候変動への緩和策と適応策

出典：文科省・気象庁・環境省「気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート、2012年度版」 23

図 21

適応策と緩和策の関係

・適応策と緩和策はどちらか一方だけで十分というものではなく、統合的に行うことで効果的に実施できる。



出典：環境省環境研究総合推進費S8資料 24

図 22

表　予見的適応と事後的適応（IPCC TAR、2001）

		予見的適応	事後的適応
		影響予測の結果を受けて、あらかじめ影響低減の対策をうつ。	温暖化影響が発生した後に、被害を低減するよう対策をうつ。
自然生態系			・成長期間の変化 ・生態系構成要素の変化 ・湿地の移動 ・動・植物の移動（高緯度、高地方向への移動）
社会経済システム	個人	・保険の購入 ・嵩上げした家屋の建設	・農耕法の変更 ・保険掛金の変更 ・空調設備の設置
	公共	・早期警報システム（洪水熱波） ・新たな建築基準や設計標準 ・再配置のインセンティブ	・保証金、補助金 ・建築基準の施行 ・養浜

25

図 23

主要国の影響、適応計画の現状

国	経緯	影響・リスク評価	適応計画
英国	1997 UKCIP開始 2008.11 気候変動法：英国の気候変動リスク評価を5年毎に実施し、それに基づき国家適応計画(NAP)を5年毎に策定	2012 英国全体の気候変動リスク評価(CCRA)	2013.7 国家適応計画(NAP)
米国	1990 地球変動研究法に基づき地球変動研究プログラムを開始 2009 省庁間気候変動適応タスクフォース(TF)設置	2000 第1回国家気候評価 2009 第2回 2014 第3回	2011 TF報告 2013 省庁別適応計画 2013.6大統領気候行動計画（適応を含む）
ＥＵ	2009 適応白書を策定 2010 欧州議会で白書採択 2013.4 EU気候変動適応戦略 2013.5 欧州の適応報告書	2008 欧州気候変動影響報告書 2012 欧州気候変動、影響、脆弱性報告書	EU各国が適応計画を策定 2012.3 適応情報の欧州気候適応プラットフォーム（Climate Adapt)開始
ｵﾗﾝﾀﾞ	国家適応・空間計画プログラムを実施	2004-気候変動空間計画 2008-気候ナレッジプロジェクト	2007 国家気候適応・空間計画戦略
ﾌｨﾝﾗﾝﾄﾞ	2001 国家気候計画 2005 欧州で最初の適応国家戦略を策定	2004- FINADAPTプロジェクト	2005 気候変動適応の国家戦略 2009 戦略実施評価レポート 2015 国家戦略2020
ド イ ツ	2005 政府は、気候保全プログラムに適応戦略を位置付け	2005 ドイツの気候変動：気候に敏感な分野の脆弱性と適応	2008 気候変動適応のドイツ国家戦略 2011 ドイツ適応戦略行動計画

26

図 24

英国はいつもお手本にしているが、1997 年に気候影響プログラム（UKCIP）をスタートし、2011 年にその活動の評価報告書を出した（図 25）。UKCIP は開始当初は影響を中心としており適応が入っていなかった。しかし、98 年に英国の著名な影響専門家であるマーティン・パリー教授が温暖化の影響が深刻であり適応策を打つべきという議論を Nature に掲載した。影響研究者の多くはそれほど影響は大きくならないので適応策を考える必要はないという論調であった。影響研究者でさえも影響がこれだけ深刻化することを予測していなかった。

その後、様々な影響が出始めたことから、英国は 2008 年に法制度をつくり、リスク評価（影響評価である CCRA）を 5 年ごとに実施し、それを踏まえた国家適応計画を 5 年ごとに策定することを定め実施している。ポイントは、影響評価をしっかり行わないと適応の重要性がわからないことから、UKCIP の限られた予算と人員の中でも影響研究を進めたことである。また、研究者も研究に終わらせることなく、その結果を意思決定者や政策担当者に伝える活動も行った。さらに、影響評価のツールやデータなどの様々な情報をホームページを通して提供し、関心があれば誰でも影響評価や適応策が検討できるようにした点も見習うべき点だと思う。米国の状況は図 26 の通りである。

英国の影響評価と適応策

1997年 気候影響プログラム（UKCIP: UK Climate Impacts Programme)を開始している(UKCIP、2011)。当初適応は入っていなかった。
1998年頃 英国のマーチン・パリー教授： 温暖化の影響の深刻さと適応の必要性に対する認識が、当時温暖化研究者の間でも、非常に低く、温暖化が進んでも*その影響は軽微であり、適応は必要ない*といった意見もあった。また、適応の必要性を説く研究者は、defeatist(敗北主義者）と批判された(Parry, M., et al., Nature, 395)
2008年11月には世界に先駆けて英国政府が気候変動法を制定：英国の気候変動リスク評価（CCRA）を5年毎に実施し、それに基づき国家適応計画（NAP）を5年毎に策定する。
2009年 英国気候予測2009(UKCP09：UK Climate Projection 2009)を作成。世界に先駆けて、気候シナリオの確率評価を実施
2012年 英国気候変動リスク評価政府レポート等を公表
2013年 適応計画を策定

うまくいったポイント
①影響から適応へ：緩和策によっても避けられない影響が発生することから適応を重視
②研究者から意思決定者へ情報提供し、影響、適応に関する研究成果が政策立案に役立ったこと
③法制化を後押しこと
④国民や企業などの関心を高めるべくツール開発など種々工夫したこと

27

図 25

米国の影響評価と適応策

1990年　地球変動研究法に基づき米国地球変動研究プログラムは、定期的に気候変動の米国への影響を評価し、大統領及び議会に報告することとされ、最初の国家気候評価は2000年に、第2回は2009年に策定され、第3回は2014年に策定。

2009年　大統領府の環境諮問委員会、科学技術政策局、米国海洋大気局が共同議長となり、20以上の省庁からなる省庁間気候変動タスクフォースを設立。同年10月、オバマ大統領がタスクフォースに対し、１年以内に国内外における気候変動影響への適応に関する勧告を作成するように指示（大統領令13514）。

2010年 3月タスクフォースによる中間報告が公表され60日間のパブコメが実施された。
10月タスクフォースが、適応に関する政策目標と原則的な考え方を内容とする国家適応戦略の根拠となる活動をオバマ大統領に提出。

2011年10月　タスクフォースが主要分野における進捗状況をまとめた報告書を公表。

2012年12月　米国における気候変動指標の報告書を公表。

2013年　省庁別の適応計画を公表。7月には大統領の気候変動行動計画（適応を含む）を公表。

28

図 26

影響・適応に関する国際的なネットワークとして、中心的な IPCC の他、例えば PROVIA というプログラムを UKCIP グループと IPCC の影響関係のグループが実施している。こうした様々なしくみができてきたということは、重要性が認識され始めているからではないか。次回の Adaptation Future の開催は日本に期待されており、日本で影響・適応の国際会議が開催されるかもしれない（図 27）。

影響評価は、環境アセスメントと同じような枠組みだと思っている。技術的なツールやデータが必要ということで、様々なガイドラインが出来ており、ガイドラインに従えば、影響評価や適応策が立案できるということになっている。途上国の持続可能な開発に適応策を入れ込むガイドラインも出来ている。

国際的ネットワークと技術情報

○ 世界各地で温暖化の影響が顕在化していることから、IPCC関連の影響研究者が影響、適応の具体的な取り組みや国際的ネットワークの構築を行っている。COPではさまざまな基金を設定しており、それに基づき途上国における影響、適応策の立案を進めるための、国際的ネットワークを構築している。

- 気候変動の脆弱性、影響、適応研究プログラム
  (PROVIA :Programme of Research On climate change Vulnerability, Impacts, Adaptation)
- アジア太平洋適応ネットワーク（UNEP）
- 全球適応ネットワーク（GAN）
- 全球気候変動適応パートナーシップ（GCAP）
- 気候変動に対する適応・レジリエンスネットワーク(ARCC CN)
- Adaptation Future 2016(オランダ)、次回は日本で開催（環境省）

○ 影響、適応評価では気候シナリオ、影響モデル、適応策等のさまざまな情報やモデル等の方法やツールが必要、そのための技術ガイドラインも作成されている。以下は主要な技術ガイドライン。

- IPCC気候変動影響・適応評価の技術ガイドライン（IPCC、1994）
- UNDP 適応政策フレームワーク(2005)
- 意思決定のためのリスク管理フレームワーク（2011）
- 適応能力構築のためのコミュニティベースガイドライン（2008）

29

図 27

ここからは現在について話す。影響研究は、低炭素社会づくりの中核的な部分を担っていると思う。いわゆる安全安心の社会づくりの重要な要素である。従来持続可能な社会をつくるために、循環型社会や低炭素社会、自然共生社会を別々に目指してきたが、国立環境研究所では2016年4月から第4期中長期計画が始まり、これらを総合的に目指す必要があるということでスタートした。（図28）

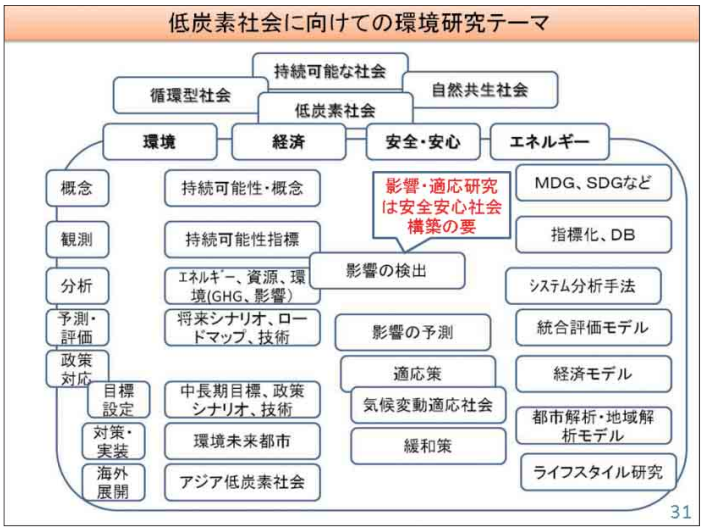


図28

日本の気候変動研究プロジェクトの全体像を図29左に示す。気候変動研究には様々なフェーズがあり、フェーズごとに大きな研究プログラムが連携しながら進んでいる。10年前の影響研究は、気象庁の気候モデルの予測結果しか使えるものが無く広がりがなかったが、気候変動リスク情報創生プログラムやその前の革新プログラムで質の良い気候シナリオが出来た。今度はデータが多過ぎて何を使ったらよいかわからないという状況になってはいるが、影響の研究者と気候モデルの研究者が一緒に実施する研究プロジェクトになってきたということで、最近は気象研究者も影響の計算をし始めたりしている。

また、多様な気候モデルの予測データが利用可能になったことで、第5期結合モデル相互比較計画であるCMIP5（現在6が動いている）において、日本では気象研と東大が協力したり、最近はモデルを何千回と動かす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）のような確率評価ができるようになった。これは非常に先進的なものではないかと思う。ダウンスケーリング技術について、気象モデルでは解像度60kmが概ね標準だが、20kmや5kmまで進歩している。地域の影響をみるには1kmは欲しい。リスク情報については、物理的な被害の影響と経済的な被害の影響なども計算できるようになってきている。そして、影響・適応研究が他分野に展開しつつある。自然災害、水資源、生態系が中心となっているが、国民生活や企業活動、経済活動なども研究が進んでいる。

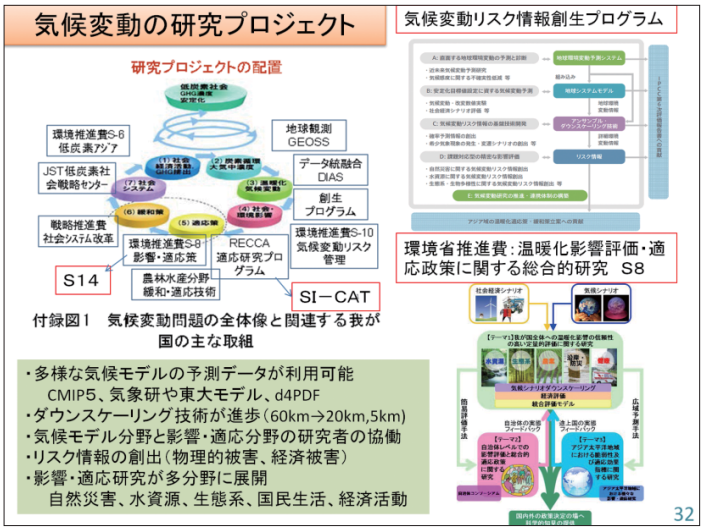


図 29

国として注目すべき方向については、昨年、国の適応計画が策定された。適応計画の基本戦略として、政府の施策の中に適応を組み込む（主流化）。既存の対策に適応の考え方を組み込むことで、将来起こる影響を低減できるのではないか。地方ではこの考え方が非常に重要であり、また、国が主導しないと地方は動けないところがあるが、埼玉県などは、既存の政策で適応に近いものを潜在的な適応策というような名称をつかって取り組んでいる。また、科学的な知見の充実が必要だということと、気候リスク情報をどのようにつくり、共有して伝えるかが研究者にとっても重要なことである。研究成果を実装する地域での適応の推進では、地方自治体や住民との関わりが必要で、この辺りは研究者にとっては難しいところではあるが、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）のような形で、影響評価・適応から実装まで行う研究も進むと思う。

図 30 は影響評価の結果として各分野の重大性、緊急性、確信度を示したものである。比較的研究成果あるいは論文や知見が充実している分野に農林水産業と自然災害があるが、それ以外はまだ不足しており、今後はこれらの分野の研究を行う必要がある。特に経済活動や国民生活、都市生活にどのような影響があるかを今後しっかり見ていく必要があるだろう。企業にもこの取りまとめに入っていただいた。企業は独自に対応しているので適応策は不要だという話があるが、次の影響評価では企業を巻き込み企業への影響も取りまとめる必要がある。また国民生活への影響についても、身近な影響として捉えるようなまとめが重要ではないか。しかし、論文も少なく、特に企業が持っている情報が入手できないことなどから、企業が参加した影響評価が必要と思う。

農林水産省は独自に早くから対応し（図 31）、国土交通省は自然災害に関してかなり先進的な取組みをしている（図 32）。

気候変動影響評価結果の概要
出典：中環審地球環境部会（第126回、2015.8.12）資料

図 30

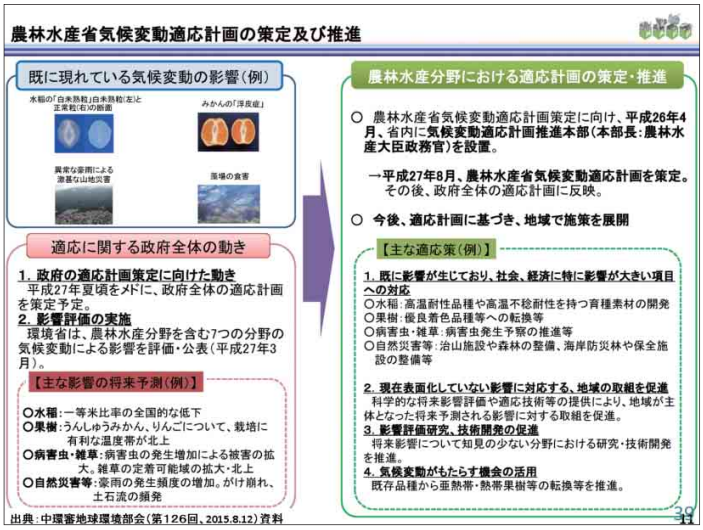

農林水産省気候変動適応計画の策定及び推進
既に現れている気候変動の影響（例）
適応に関する政府全体の動き
農林水産分野における適応計画の策定・推進
出典：中環審地球環境部会（第126回、2015.8.12）資料

図 31

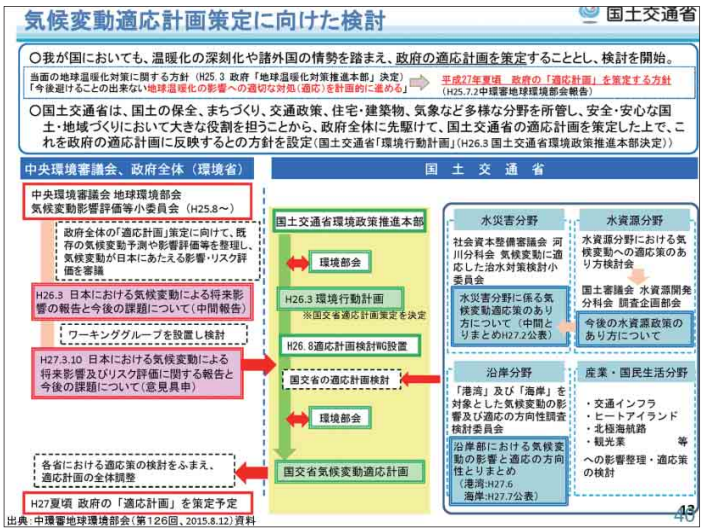

気候変動適応計画策定に向けた検討
国土交通省
中央環境審議会、政府全体（環境省）
国 土 交 通 省
出典：中環審地球環境部会（第126回、2015.8.12）資料

図 32

図 33 に温暖化影響・適応の情報システムの例を示す。研究で得られた成果や様々な知見を共有する必要がある。ヨーロッパはこのような動きが非常に早く、Climate-ADAPT は様々な情報をワンストップで提供するものである。似たような取り組みを国立環境研究所と環境省でも計画しており、気候変動適応オフィス（仮称）を作り情報を集め積極的に発信しようとしている。環境研究総合推進費 S-8 では、法政大学の先生方が地域適応フォーラムを設置し地域の情報も含め発信している。このような情報提供も研究の範囲に入ってきている。国立環境研究所では、熱中症の情報システムをつうじて最新の情報を提供している。救急搬送データを自治体からもらい、それを集め表示したりしている。この熱中症情報システムのアクセス数が一番多く、一般の方々も含めて知りたがっているということだと思う。

図 33

今後の展開としては、国の適応計画の推進をサポートする研究や仕組みが求められ、情報プラットフォームや 5 年ごとの影響・適応評価、IPCC の AR6 への貢献が必要である。IPCC への貢献は国の適応計画にもフィードバックすると思うので、まずは IPCC への貢献をサポートする必要がある。次に、地球温暖化対策計画ができる予定だが、既に適応計画が存在し、今のままでは独立した二本柱になってしまう可能性もある。適応と緩和の両方をうまく統合して進めることが必要である。研究面では、国のプロジェクトは 5 年で終了するため、成果が出ても中身を変える必要があり、研究が途切れてしまう側面がある。しかし、既に良い研究者ネットワークが形成されているため、それを活用しつつアプライしていく。現在、実装を念頭に置いた研究プロジェクトが進んでおり、影響研究だけでなく、気候予測とダウンスケーリングも含め、分野を超えた形で進められている点は非常に良い方向性である。そして、今後は自治体の影響評価や適応策への支援が重要になる。地方の環境研究所は人手不足で検討ができないということで、現在進行しているプロジェクトの研究者がサポートしていく必要があるのではないか。最後に、Future Earth という大きな国際プログラムが動いている。ステークホルダーとの対話が必要ということで、英国などでは地域住民と対話しながら適応計画を作成する取組みが実際に行われている。ステークホルダー側に寄った研究も進めていく必要があるのではないか。

影響、適応に関わる研究課題

① 国の適応計画の推進
適応情報プラットフォーム
5年ごとの計画の見直し（影響や適応評価）
IPCCAR6への貢献
② 影響・適応研究の推進
気候シナリオ、ダウンスケーリングと影響・適応研究
観測、気候予測との連携、緩和策・低炭素社会づくりとの連携
推進費研究、創生研究、SI―CATなど
③ 自治体の影響評価、適応策への支援
地域特性に応じた影響評価と適応策
気候シナリオ、ダウンスケール、影響評価モデル
情報共有のプラットフォーム
④ Future Earth
種々のステークホルダーとの対話による影響、適応研究の推進

44

図 34

【質疑応答】

Q：日本における影響・適応研究で、進んでいる分野と遅れている分野の大まかな傾向は。

A：影響では、農業はかなり進んでいる。実際に米への影響が出ているため、既に適応策を打っている実績もある。農林水産省が昨年適応計画を策定している。自然災害の分野も進んでいる。防災の中で適応策を考えていこうとしており、気候変動リスク情報創生プログラムでは京都大学の中北教授のグループは、国土交通省から必要な情報を聞き、研究側はそれに合ったデータを出すような行政と研究の連携を行っている。健康に関しては、熱中症は環境省の領域のようだが、産業や国民への影響では少し研究が遅れている。

国際的には、見直されているものとして、例えば二酸化炭素の肥沃化効果がある。一時、大気中の二酸化炭素が増えると生産量が増えるという話もあったが、必ずしもそうではないという。また、極端現象の健康影響、温暖化とマラリアについてもかなり議論が残っているという話もある。海洋酸性化が生物にどのような影響を与えるかなどの海洋関係の影響評価は少し遅れている印象がある。農業、食料分野、水資源、海面上昇の影響などは結構進んでいるのではないか。

分野の他、地域でも進展の程度が異なる。アジアの影響研究は比較的少なく、ヨーロッパとアメリカは多い。すなわち、途上国における影響評価と適応策の知見が不足しており、IPCC の第 6 次評価報告書では、特に途上国の執筆者を多く入れ、途上国の情報を充実させること、また、地域のアセスメントをしっかり行うことになってきているようである。

Q：生態系への影響は、分析も難しいと思うが、実際に人間が何かできるのか。どのように進めるのか。

A：図 23 は 2001 年のものだが、自然生態系の予見的適応に斜線が引いてある。将来の温暖化を見越した生態系への適応策はないという判断をこの時はしていた。しかし、研究が進むにつれ、そうではなく、やはり生態系に影響が出るのであれば、特別な保護区域の設定なども適応策になるという議論が出てきた。例えば、事後的適応では成長期間を変化させて考えればいいのではないかとか、湿地の移動をしてはどうか、動植物が移動するのであれば移動しやすいようにしたらどうかなどである。生態系の適応策は研究として出てきているということで、気候変動リスク情報創生プログラムの中でも実施している。しかし、米

の場合は高温耐性品種を作るとか水のやり方を変えるとか非常にわかりやすいが、生態系の場合は温暖化の適応策だけではなく、希少種や外来種などの問題、人間活動の影響とセットになっている側面がある。特に愛知目標では、温暖化の影響が当然あるが、侵入種等の他の課題もあるので、可能であれば同時解決する対策が適応策になると思う。

4. 環境汚染・健康区分

4.1 環境影響　内分泌かく乱物質：問題提起から 20 年

井口 泰泉（横浜市立大学　客員教授）

本日はまず、歴史的な背景や WHO ／ UNEP、OECD の動向を話す。また、自身はこれまでマウスを中心に基礎研究を実施してきたが、発生途上の生物に、外からホルモンなどの化学物質が入ってくると、その生物は元に戻ることができない。例えば、子宮がんや膣がんに向かう病変が起こる。なぜそのようなことが起こるのか、ホルモンや化学物質に対して、非常にセンシティブなところはどこなのかを中心に研究してきた。

ホルモンの受容体について。例えば、女性ホルモンをネズミに投与すると子宮がんや膣がん、乳がんになる率が上がる。その女性ホルモンを受け取るのが女性ホルモン受容体というタンパク質である。その女性ホルモン受容体の動物種による違いを基礎研究として対象としてきた。

それから、ミジンコやワニなどの生物は、性別が遺伝子で決まっていない。ミジンコは通常メスしかいない。メスがメスを生むが、環境が悪くなるとオスを産む。生まれたオスとメスが交尾すると、乾燥に耐えられる卵ができる。これが田んぼの中にたくさん残っているため、干からびた田んぼで春先に水が入ると、ミジンコが沸いてくる。また、秋になるまでに乾燥に耐えられる卵ができ、土の中に残る。では、どのように環境を悪くすると、どのようにオスができるかは誰も再現できていない。そこでよく調べてみると、1 つのホルモンが体の中でたくさんでき、その物質が卵に渡され、その卵がオスになるように運命づけられていることがわかった。

ワニは、卵が 33℃程度で育つとオスになる。ところが、30℃程度だと全てメスになる。温度で性が決まる。そのメカニズムがつい最近わかってきて、温度を感知するタンパク質がワニの発生中の胚の中にでき、33℃程度だとその温度刺激を受けオスになる遺伝子が発現するとことがわかってきた。

歴史的には、化学物質というと、必ずレイチェル・カーソンの『沈黙の春』が出てくるが、本が出版されたのは 1962 年であるため、50 年以上前である。非常に毒性の強い物質、例えば、その中でも筆頭にあげられる DDT が野生生物あるいは人間の体内に入ると母乳からも出てくるということで、DDT は使用も製造も禁止になり日本も使っていない。かつては毒性の強い物質が非常に高濃度で使われたので、単独の物質を相手にしていればよかった。ところが、その約 30 年後、『奪われし未来』という本で提言されたのは、毒性が強い物質は禁止されたが生物の個体数は回復していないことから、濃度が低くても悪さをする物質がある可能性がある。しかし、それは単に毒性だけを評価したのではわからない。ホルモンの受容体に勝手にくっついて余計な情報を出すことで、シグナルの撹乱が起こっているのではないかということであった。

それを受けて、1996 年以降、世界的な対応がとられた（図 1）。OECD や WHO もそれに対応して、現状に関する文献調査などを行った結果を 2002 年と 2012 年に報告書として出ている。この報告書には私も作成に関与した。OECD 関連国やその他の国も含めて様々な取り組みが行われている。

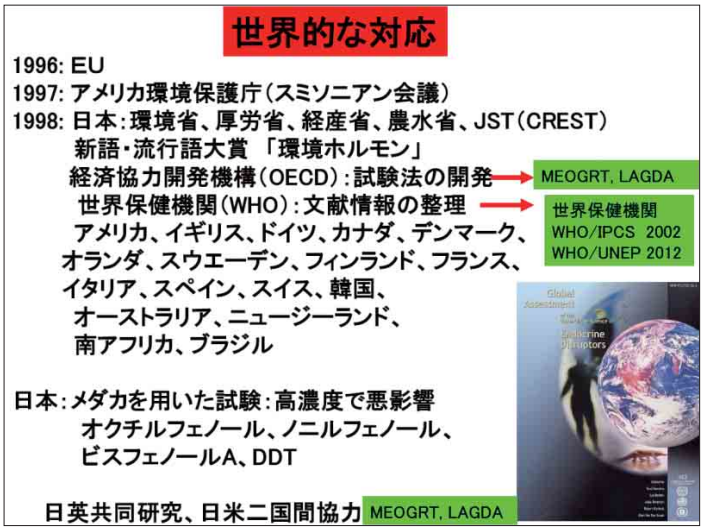


図 1

化学物質による生殖異常として、船底防腐塗料によるメスの巻き貝のオス化や、ピルとして飲まれる排卵抑制剤のエチニルエストラジオール（合成女性ホルモン）による魚の精巣での卵形成などがある。この排卵抑制剤はヨーロッパで一般的に使われており、ヨーロッパの河川では数 ng/L というレベルで検出できる。そのレベルを維持すると、コイ科のローチではメスしか生まれない。本来オスになるものが性転換してしまうようなこともある。また、閉経後の女性は女性ホルモンが減少し骨粗しょう症になりやすいため、エクイリンという医薬品を塗布したパッチを貼り付ける。このような医薬品が尿から排出され、下水処理できないため河川に流れ出る。その他、紫外線吸収剤により動物に様々な影響が見られることがわかってきた。こうした物質は我々が少しずつ、どのようなメカニズムでそのような現象が起きるのかを調べてきた。（図 2）

図 2

解決されていない非常に重要な問題として、低用量の化学物質の影響がある。用量が低ければ単独の物質による影響はゼロだが、物質を 10 種類足すと影響が出るという論文もある。また、足し算的に影響が 0.1 の物質を 10 個足すと 1 になるという形で影響が出るのかどうかもわかっておらず、解決していない。また、同じような作用をするものを足し合わせると複合影響があるのではないか。同じ作用メカニズムのものを、単純に足しただけで影響があるのか。こういった研究が必要である。(図 3)

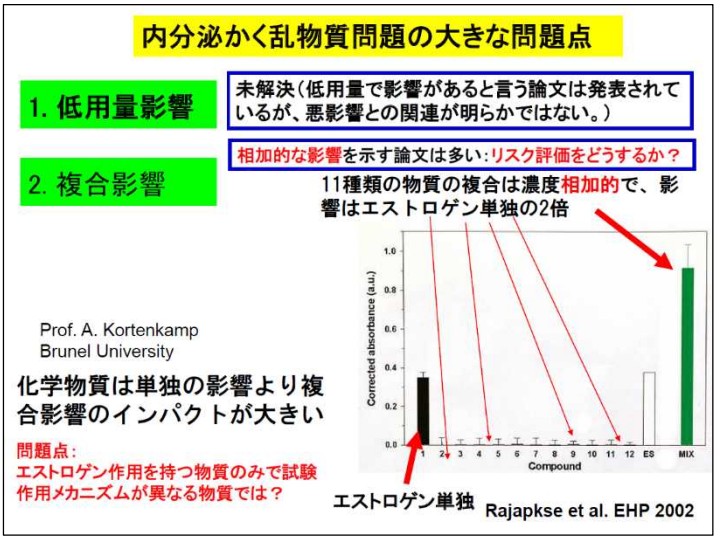


図 3

化学物質の影響を受けた場合、影響はその個体で留まり、生殖細胞を通して次世代に伝搬しないという考えが発生学の常識であった。また、メチル基が遺伝子に多くつくメチル化が起こると（図 4)、その遺伝子がほどけないため、mRNA によるコピーができず、その遺伝子が設計図となるタンパク質がうまくできない現象が起こる。このような遺伝子のメチル化は次世代につながることはないとされていた。ところが、Skinner 氏らは、妊娠したネズミに化学物質を大量に投与し生まれてきたオスを調べたところ精子が減少した。まだ生殖能力があるため正常なメスと交配したところ、次の子供のオスには同じように精子が少ないという現象が起こった。さらに正常なメスと交配すると同様であった（図 5)。特定の遺伝子のメチル化状態も世代を超えてつながっていた。すなわち、数世代前のネズミの曝露による影響がつながり、ひ孫にも影響が出る。これは、再現が非常に難しく、この現象を肯定する人と否定する人がいる。ラットを用いて 4 世代にわたる実験が必要なため、再現しようとすると数年を要し資金も非常にかかるため、国を挙げてプロジェクトをつくり、経世代影響の有無をきちんと評価することが必要ではないかと思う。

同様に、妊娠したネズミにスズを曝露し、生まれてきた子供を正常な個体と交配し続けると、特定の遺伝子の発現状態が世代を超えて継続され、少しずつ太るという性質がずっと伝わっていくという報告もある（図 6)。

以上のように、世代を超えた影響の伝搬があり得るというこのような証明が出てきている。

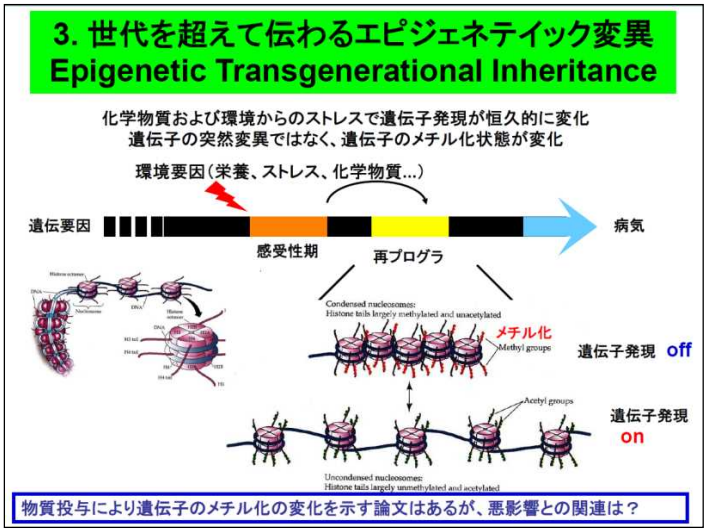

3. 世代を超えて伝わるエピジェネテイック変異
Epigenetic Transgenerational Inheritance
化学物質および環境からのストレスで遺伝子発現が恒久的に変化
遺伝子の突然変異ではなく、遺伝子のメチル化状態が変化
環境要因（栄養、ストレス、化学物質…）
遺伝要因
感受性期
再プログラ
病気
メチル化
遺伝子発現 off
遺伝子発現 on
物質投与により遺伝子のメチル化の変化を示す論文はあるが、悪影響との関連は？

図４

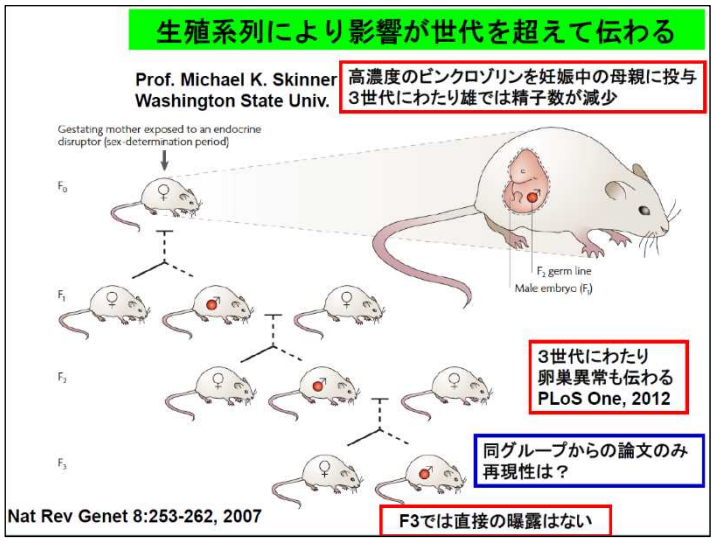

生殖系列により影響が世代を超えて伝わる
Prof. Michael K. Skinner
Washington State Univ.
高濃度のビンクロゾリンを妊娠中の母親に投与
3世代にわたり雄では精子数が減少
Gestating mother exposed to an endocrine disruptor (sex-determination period)
3世代にわたり
卵巣異常も伝わる
PLoS One, 2012
同グループからの論文のみ
再現性は？
Nat Rev Genet 8:253-262, 2007
F3では直接の曝露はない

図５

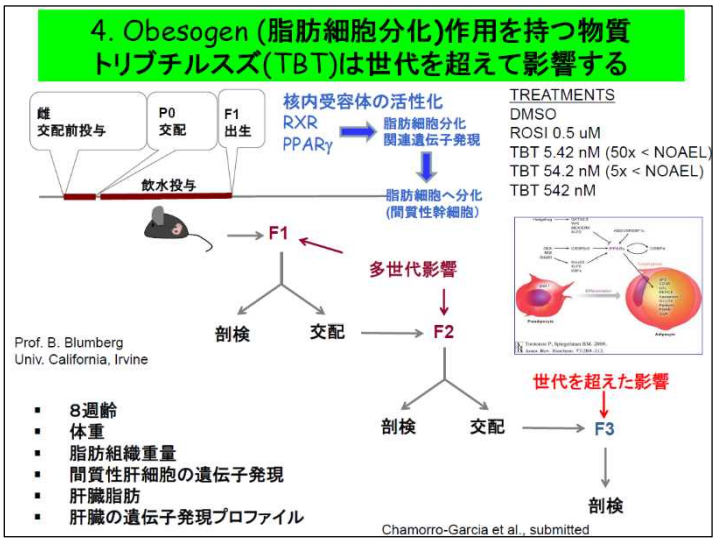

4. Obesogen (脂肪細胞分化)作用を持つ物質
トリブチルスズ(TBT)は世代を超えて影響する
雌
交配前投与
P0
交配
F1
出生
飲水投与
核内受容体の活性化
RXR
PPARγ
脂肪細胞分化
関連遺伝子発現
脂肪細胞へ分化
(間質性幹細胞)
TREATMENTS
DMSO
ROSI 0.5 uM
TBT 5.42 nM (50x < NOAEL)
TBT 54.2 nM (5x < NOAEL)
TBT 542 nM
F1
多世代影響
剖検
交配
F2
Prof. B. Blumberg
Univ. California, Irvine
世代を超えた影響
剖検
交配
F3
剖検
8週齢
体重
脂肪組織重量
間質性肝細胞の遺伝子発現
肝臓脂肪
肝臓の遺伝子発現プロファイル
Chamorro-Garcia et al., submitted

図６

可塑剤やビスフェノールA以外にも、医薬品も含め様々な物質が現在問題になっている（図7）。

ビスフェノールAはポリカーボネートの材料であり、缶詰の内側のコーティングにも使われている（図8）。日本では缶詰から漏れ出ることがわかった際、企業は重合法を変更し、缶からの検出は非常に減少した。また、ガラスの哺乳瓶への変更運動があり、現在ポリカーボネートの哺乳瓶は売っていない。よって、日本ではあまり問題がないと思う。ビスフェノールAは、遺伝子の発現にどのように影響し、その影響が世代を超えてつながるのかは、まだよくわかっていない（図9）。

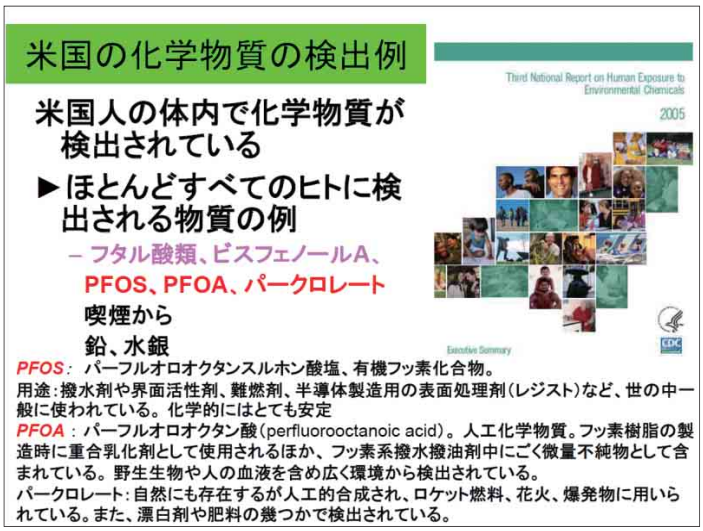


図７

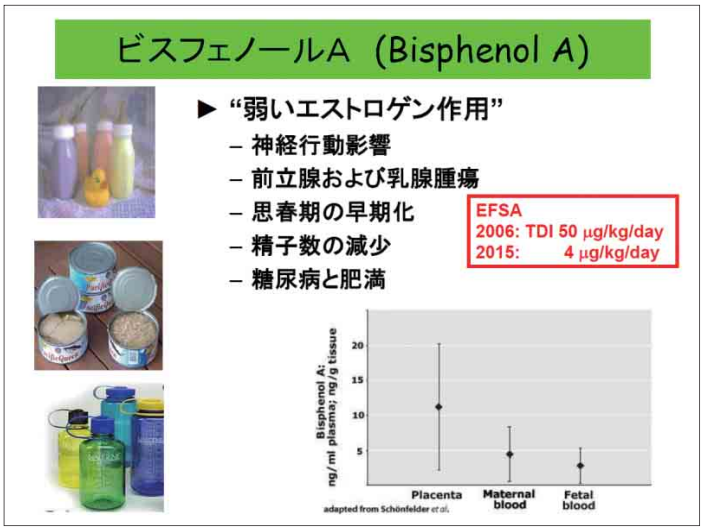


図８

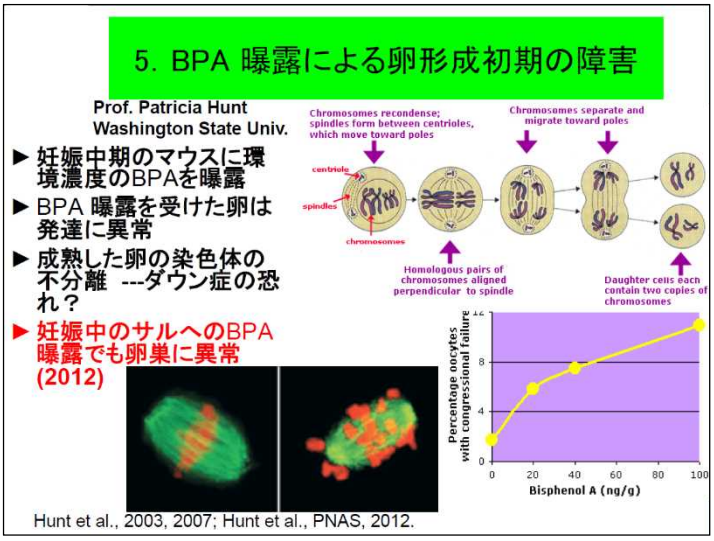


図９

また、我々の体の中には様々な物質が入っている。図 10 はアメリカの例だが、210 物質について尿や血液を測ると、Baltz さんからは 106 物質検出された。我々はいろいろなものを食べ、薬を飲んでいる。その複合的な影響は大丈夫なのかという話である。

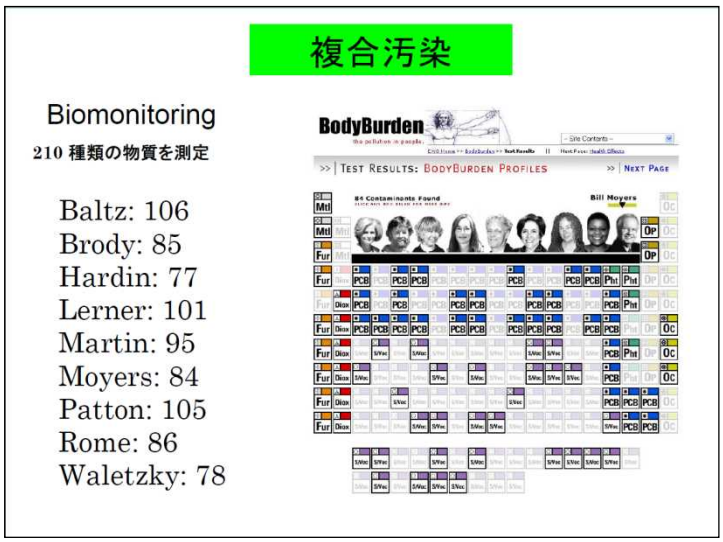


図１０

図 11 は可塑剤の例である。可塑剤はプラスチックを柔らかくするために使われており、手で握ると重合していないためもれ出てくる。点滴を静脈から入れると可塑剤の成分が血中に入る。生きるか死ぬかという病気の方が気にする必要はないが、何か影響が出てくるのではないか。生まれた男の子の肛門とペニスの間の距離が短くなる現象はメス化として捉えられ、人間でも影響が出ているのではないかという懸念がある（図 12）。図 13 は可塑剤が妊婦さんや子供の体に検出された報告である。

フタル酸類の暴露源
点滴
玩具
食べ物の包装材
化粧品（香水、ローション、ヘアスプレイ）
エアフレッシュナー
フローリング、壁紙、塗料、コーティング剤
フタル酸ブチル、フタル酸ジエチルヘキシル、フタル酸ジメチル、フタル酸ブチルベンジル

図１１

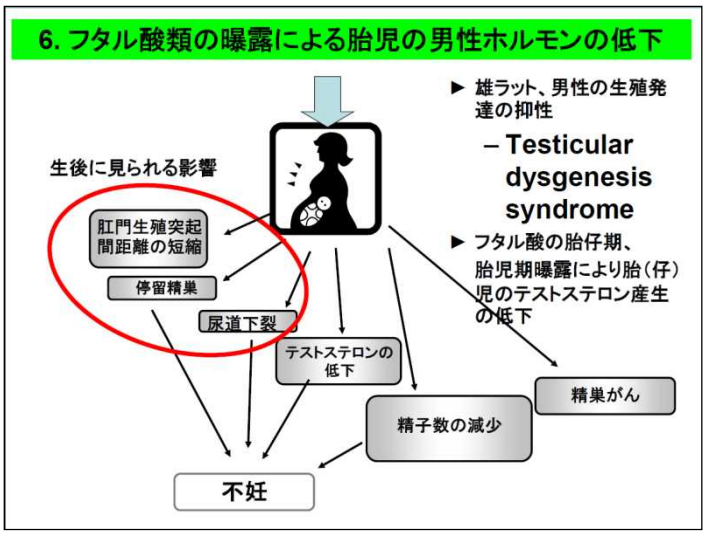

6. フタル酸類の曝露による胎児の男性ホルモンの低下
▶ 雄ラット、男性の生殖発達の抑性
– Testicular dysgenesis syndrome
▶ フタル酸の胎仔期、胎児期曝露により胎（仔）児のテストステロン産生の低下
生後に見られる影響
肛門生殖突起間距離の短縮
停留精巣
尿道下裂
テストステロンの低下
精巣がん
精子数の減少
不妊

図１２

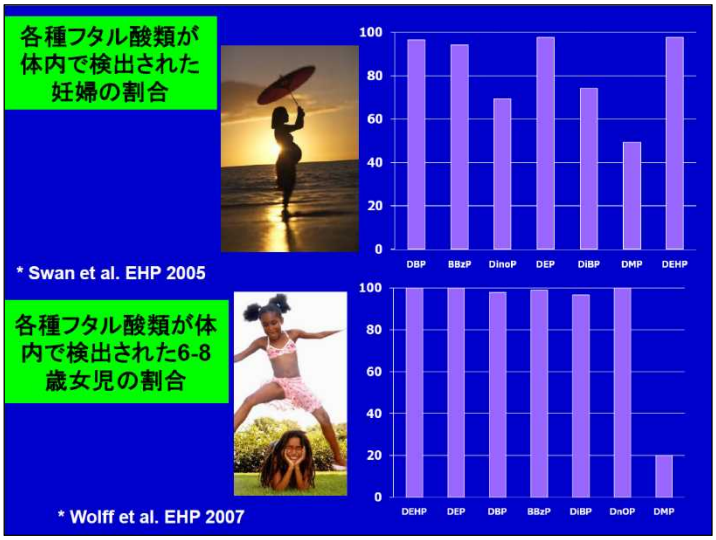

各種フタル酸類が体内で検出された妊婦の割合
100
80
60
40
20
0
DBP
BBzP
DinoP
DEP
DiBP
DMP
DEHP
* Swan et al. EHP 2005
各種フタル酸類が体内で検出された6-8歳女児の割合
DEHP
DEP
DBP
BBzP
DiBP
DnOP
DMP
* Wolff et al. EHP 2007

図１３

カナダでは 58 個の湖を実験に使ってよいことになっている。図 14 の 8ha の湖に女性ホルモンをまき濃度を 5ng/L になるようにし、ファットヘッドミノーという魚への影響をみた 7 年間の国家プロジェクトがある。最初の 2 年間は基本データを取り、次の 3 年間はエチニルエストラジオール（EE2）という合成女性ホルモンを添加し、添加を止めた後まで影響をみるものである（図 15）。

女性ホルモンをまき始めた次の年は稚魚の数が激減した。卵があまり産まれていなかったのであろう。すなわち女性ホルモンが入ってくると生殖が大幅に減少する。添加を止めた次の年も稚魚は極めて少なかったが、3 年後には回復してきた。絶滅する前に合成女性ホルモンの添加をやめれば魚の個体数が回復する可能性があるということである（図 16）。

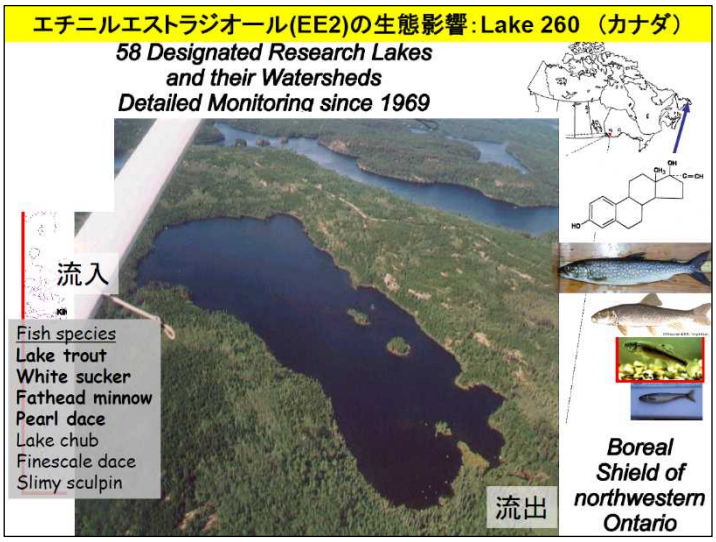


図１４

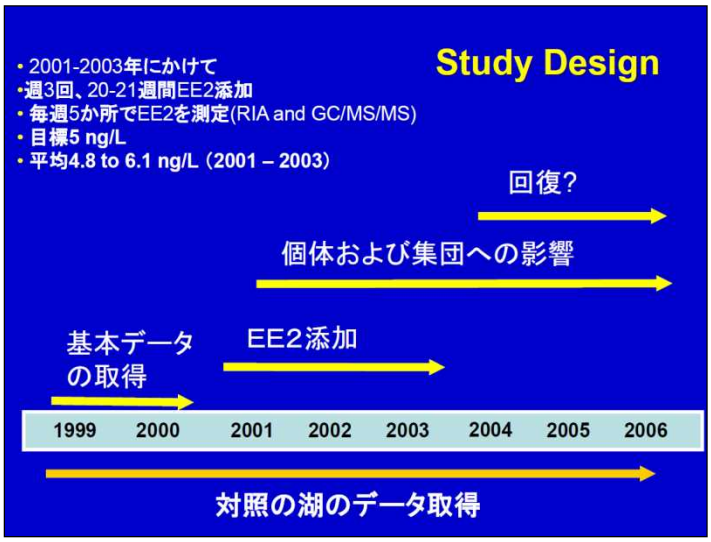


図１５

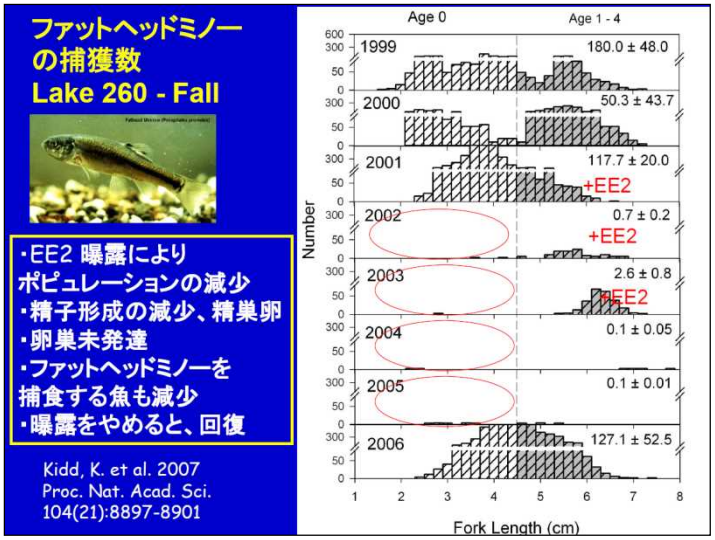


図１６

環境省のプロジェクトで日英共同研究を実施し、英国のローチというコイ科の魚を使い研究した（図 17）。ローチの胆汁にどんな物質が入っているかを調べたところ、動物が作れない人間が使った合成女性ホルモンが検出された。その他、界面活性剤や、魚が作れないエクイリンという妊娠した馬の尿由来の女性ホルモンも入っていた。これは、ヒトに使用された医薬品由来であることがわかった。

図 18 は、EE2 の濃度を英国の河川濃度より高めの 4 ng/L にした水槽実験である。EE2 が含まれないコントロールの水槽では､卵巣､精巣を持った個体がおおよそ 6:4 程度であったが、4 ng/L の水槽はすべてメスになっており、性転換したに違いないという結果となった。

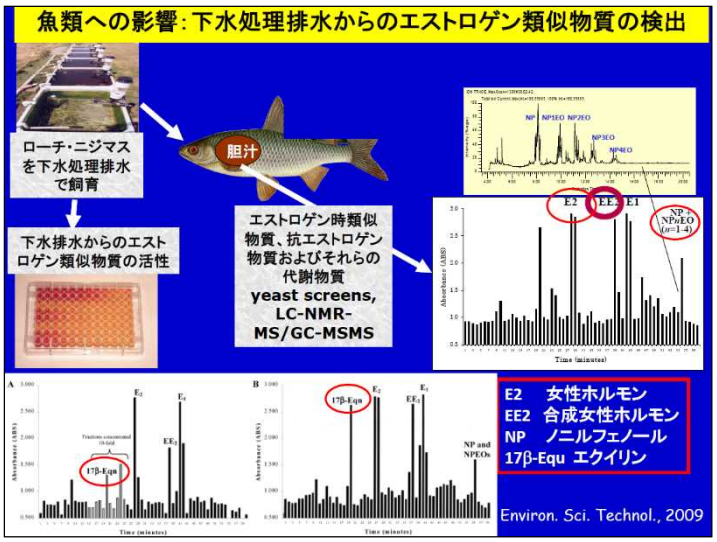


図１７

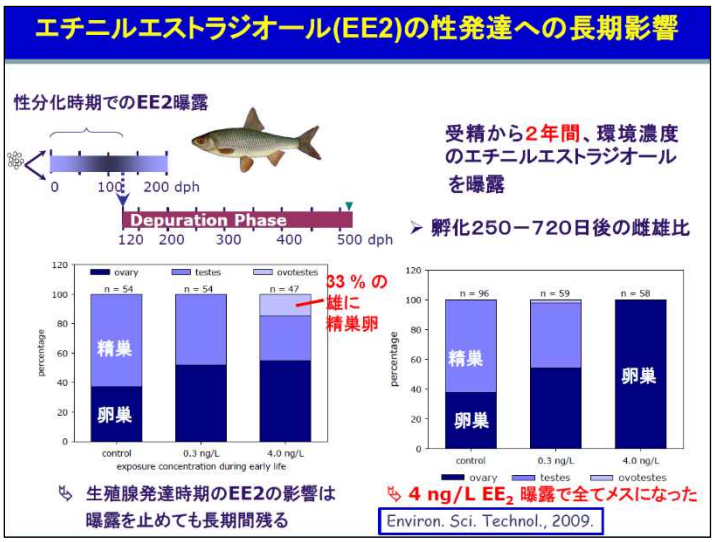


図１８

こうした動きの中で、内分泌かく乱に関し、アメリカ内分泌学会による科学的提言や、WHO や UNEP による様々な報告書が作成された。2012 年に WHO は様々な文献を調査しまとめた「内分泌かく乱物質」および「内分泌かく乱物質と子どもの健康」という報告書を作成した。

重要なのは、化学物質の影響は、大人では肝臓で分解されるなどして元に戻ることができる。しかし、発生の途中で影響を受けると、性が変わったり、精子がつくられなかったりという不可逆的な影響が起こることである。かつては PCB や DDT、ダイオキシンなど、非常に少ない数の物質を対象に議論していた。しかし、我々が一般的に使うもの、例えば難燃剤はパソコンやテレビなど様々なものに使われ漏れ出る。それが実際に人間の体から検出されるということで、多種多様な物質や医薬品を研究しなければならないという方向性になっている。

今後の課題として、複合影響、経世代影響、化学物質による遺伝子発現の可能性などがある。また、これまで化学物質による影響のメカニズムまでは見ていなかったが、メカニズムを理解する必要があるとして、AOP（Adverse Outcome Pathway）がトレンドとなっている。曝露から影響が出るまで、体内でどのような現象が起こり有害性につながるかの機構を理解するものである。（図 19）

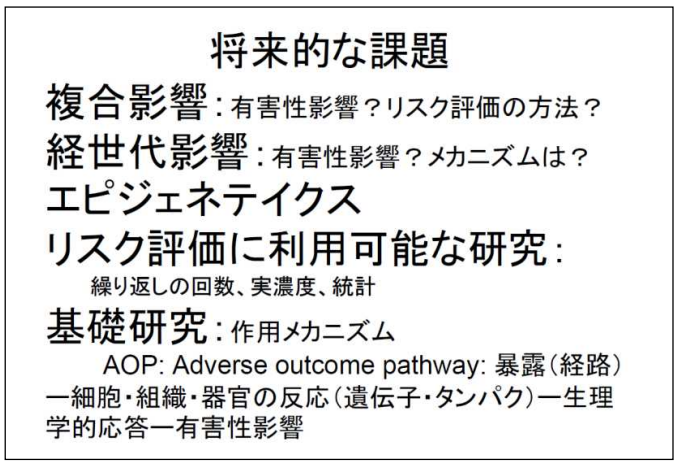


図１９

［質疑応答］

※Q は質問、A は回答、C はコメント。

同日に講演された国立環境研究所の柴田フェロー、東京大学の渡辺教授のご発言も記す。（敬称略）

Q：環境ホルモンは、発生段階の不安定な細胞に影響すること、経世代で影響することが非常に重要であるということか。

A（井口）：その可能性があるということであり、それが本当であれば重要である。しかし、どこまで本当か自信を持って言えるデータが無い。論文を書き続けているのは、Skinner 氏のグループのみといっても過言ではない。4 世代にわたる動物への影響を調べる必要があるので、再現実験のようなことも現在行われていない。理由として、お金がかかること、長期間論文が出なければ学位取得が難しいことなどがある。

Q：原因がわからない場合の規制はどうするのか。

A（井口）：まだ規制の方針はない。物質が決まれば、日本ではメダカやミジンコ、アフリカツメガエルを使い、どんな影響がどの濃度で出るかを見る。日本も協力して、メダカ、アフリカツメガエル、ミジンコを用いた OECD の試験法を作ってきたので、これらの試験法を用いて試験した結果を用いて規制の必要性の有無が検討される。産卵数の低下は悪影響と捉えている。環境濃度と影響濃度を比べ、環境濃度が影響濃度に近い物質があれば規制しなければならない。高濃度下で影響がある物質でも、環境濃度と影響濃度の乖離が極めて大きければ、規制の対象にしなくてよいであろう。

一方、EU では、有害性影響とは何かという議論に戻っており、話が進んでいない。実験をしても、何を見たら有害性になるかという最終的な結論がない。よって、ヨーロッパは非常に遅れている。

もう 1 つの問題点は、日本や米国はリスク評価を行うため、ある特定の物質の濃度を変えて曝露し、長期曝露した場合に、たとえば、どの濃度で産卵数が低下するかをみる。また、この濃度なら影響しないという無影響濃度を出し、影響しない一番高い濃度の 100 分の 1 程度を規制値として設定する。しかし、ヨーロッパは基本的に動物実験に反対であるため、全ての実験を試験管内での試験に切り替えようとしている。動物愛護の力が非常に強く、OECD でも必ず動物愛護団体が出席し、実験への動物の利用を厳しく制限している。そのためハザードアセスメントを行う。この物質はこの濃度でこんな影響がありそうだという論文がたくさん出ていれば、それを元にした予防原則のようなものを取り入れようとしている。すると、曖昧な部分が多く、ある濃度を設定しようとするとその濃度を出した論文の信憑性が問題になる。また、業界側の反対と、政府側の低濃度での設定とでせめぎ合いになり、この状態が 10 年程度続いている。今後それが解決されるかはやや怪しい状況である。すなわち、ヨーロッパは日本やアメリカがどうするかを見ながらリスク評価も必要だという方向性に戻ってきているが、どちらか一方にはすることはできない状態となっている。今後、日本が動物実験を継続できれば、ある程度きちんとしたデータを出して対応できるのではないかと思う。日本ぐらいしかきちんとしたデータを出せなくなる可能性はある。

Q：生物の個体間には感受性の違いがあるため、絶対的な安全の閾値は決められないような気がするが。

A（井口）：ネズミでも同じメスで 100 倍程度感度が違うことがあり、最も感受性が高いものを使うべきである。

Q：どの程度の感受性が本当の閾値を決めるために重要かを、どのように決めているのか。

A（井口）：基本的にわかっていない。例えば人間でも許容範囲がわからないため、とりあえず

動物実験でみる。さらに、ある一定の閾値のレベルがある時、リスクとベネフィットの関係で使用を止めるべきかどうかの判断がある。例えば、ビスフェノールAという物質ではプラスチックの容器に使われる。非常に便利で、落としても割れない。しかし、20年も使うと漏れ出てくる。そこで、5年使ったら新しくするなどすれば漏れ出る前に対処できる。動物実験では、OECDでようやく同じ由来の動物を使おうということになってきた。同じ学名の動物を使って各国が出したデータが大分ずれている。ということは、同じ実験をしても、もともとの生物の反応が大分違う。違っても感度のいいもので決めようとしている。ご指摘のとおり、完全なものはもちろんできないと思う。

Q：エコチル調査では、こういった物質についても、10年以上の長いスパンで大規模に見ているが、何かわかってくることがあるか。

A（井口）：エコチル調査では、10万人の妊婦さんに協力いただき血液を保存している。しかし、我々評価委員がこれを測ってくれと言うことはできず、担当する先生方が子供を13歳まで追跡調査し、何かおかしいことがあれば、関係している可能性がある物質を測ることになる。最初から100ないし200物質を一気に測るというプロジェクトではないと思う。10万人を20～30年追跡し、おそらく何もないというのが正解だろう。問題は、遡ることができても、保存量が血液では10mL程度であることである。

C（柴田）：エコチル調査は私も少し関わっているが、保存量は2mLである。分析用としては10mLだが、それは現在予定している分析項目の主なものを測定するにも足らない程度である。これまでの環境ホルモンなどの研究から、ある現象を引き起こす危険性が高い物質は、統計的に意味があるような結果になるように母集団を構成しようとしている。

また、13歳まで追跡調査する過程で、例えば自閉症などの特定の疾患が出てくるグループがあるときに、胎内での様々な化学物質による暴露の違いを他のグループと比較する。あるいは、5、6歳の段階でその違いがあったかを調べることなどが全体の構造になっている。あらかじめプライオリティをつけた調査と、観察しながら違いが出てきた場合の調査の2つの考え方に大きく分かれている。遡って測れるようにするための長期保存用血液は2mLであるが、10mLでも現在の分析法では測れる項目が非常に限られる。そこで、この次に話をするが、多くの物質をターゲットを決めずに網羅的に測定できる手法を開発している。後で影響が生じ、その影響がある化学物質による影響かもしれないことがわかれば、次の毒性研究にフィードバックされ研究が進展するような構造になることを期待している。ただ、現在使われている化学物質に大きな健康影響を及ぼすものがないことが確認できれば、それが一番いい結果かもしれない。

C（渡辺）：100万人に1人のリスクをどう見るかについて。自身は重金属を研究していたが、ヒトを対象とした研究が多い。閾値を決めるのが非常に重要だが、ベンチマークドーズという考え方がある。ある程度のメチル水銀が入ってくると中枢神経に働きパフォーマンスが下がる。IQ低下などで、ある意味で異常とみなされる人の数が増える。しかし、水銀がなくても一定割合はそのような人がいる。そこで、水銀の曝露でこれだけ異常が増加する。では、その増加分をどの程度増やしていいか（水銀がない場合に比較して2倍まで認めるか，あるいは10%までか）。それは科学の判断ではなく、むしろ社会の判断で行う。そのような考え方でリスクとベネフィットのバランスをとっていく方法も徐々に増えてきていると思う。最近の水銀の問題で議論されているのは、非常に微量な水銀の影響であり、そのようなレベルになると化学物質かく乱物質と同じような話になってくると思う。

4.2 環境化学の進展と課題

柴田 康行（国立環境研究所　環境計測研究センター　フェロー）

今から 10 年ほど前に書籍『実験化学講座』の環境化学の巻で冒頭の章を書かせていただく機会があり、そこで自分の思いをまとめたことがある。環境化学では、人間活動の環境に与える影響を化学的に把握し、被害の発生を未然に防ぎ、あるいは最小限にとどめ、持続可能な社会の構築に資することが中心的な課題となる。このとき、化学の中でも分析化学を主要な柱の 1 つとするが、分子や原子の振る舞いの原理的な理解に基づく分析手法の発展、体系化の流れを一方の軸とし、もう一方の軸では、対象となる環境あるいは生物、生態系をシステムとして把握し、その状態や機能について評価を行うための監視･分析手法を発展、体系化していきながら、その 2 つのせめぎ合いの中で発展を遂げてきた、と書かせていただいた。

基本的に対象とする環境や生物をどのようにシステムとして把握すればよいのかを考えながら分析を構築していきたいと考えていたが、現実にどこまでできているかといわれると、厳しいところがある。

図 1 は我々が実施している重金属や化学物質の分析を簡単にまとめたものである。環境モニタリングの役割として、1 つは人間の社会経済活動を監視し、そこからどのような化学物質が環境中に排出されているのかを把握する作業である。そして、排出されたものが、地球規模あるいは国や地域などの規模で、大気や水の流れによってどのように環境中を動き、最終的に人や生物に曝露されていくのか、さらには人や生物に取り込まれた物質がどのように代謝され、ヒトや生物の健康に影響を及ぼしていくのかを調べ、理解していくのが環境分析の大きな役割と考えられる。

その理解したことをフィードバックする先は人間の社会経済活動であり、こうした活動を通じて社会を持続的に営んでいくための施策の構築に資することが我々の使命だと考えながら研究を続けてきた。

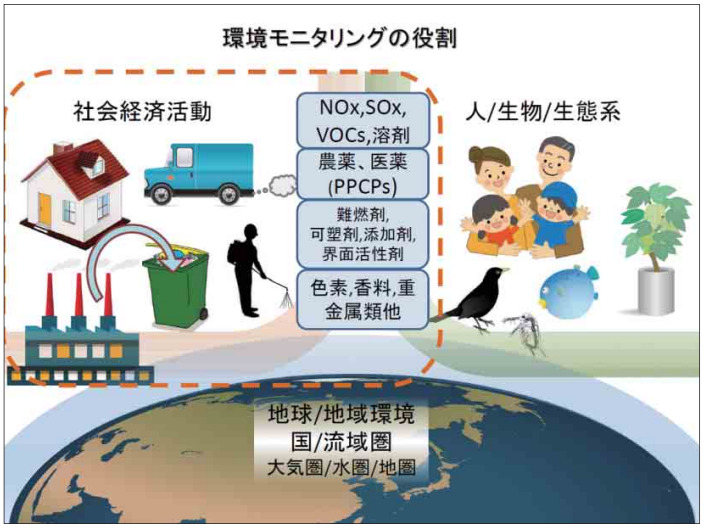


図 1

図２は、現在の日本における化学物質の管理体系を簡単にまとめたものである。一般には、新しい化学物質が市場に出る際は、あらかじめその物質の残留性や生物濃縮性、毒性などを一定の基準に基づいて評価した結果を委員会にかけて承認をもらい、製造や使用が始まるという形になる。一方で、残留性及び生物濃縮性、毒性が認められた物質は、第一種特定化学物質として基本的に製造中止あるいは限定的な使用しかできないという形で管理される。農薬関係については、農薬取締法によって同様の管理がされている。製造された物質は様々な形で使われ、最終的に廃棄処分あるいはリサイクルされる。その過程で様々な化学物質が環境中に出ていく。

実際には使ってしまってから問題が見つかり、後で規制がかかるようなケースもしばしばある。そのような物質については、例えばリスク評価に基づき排水基準あるいは環境基準を設け、基準以下になるように管理していく。

図２の「人の健康、野生生物の保護」をどのように評価するのかが実は大変難しい。分析側からすると、毒性があるといわれた物質に基準を設けて計測しているのが現状であり、いかに毒性があるものを見逃さないようにしていけるかが大きな課題だろう。そのために多くの基礎研究が進められている。

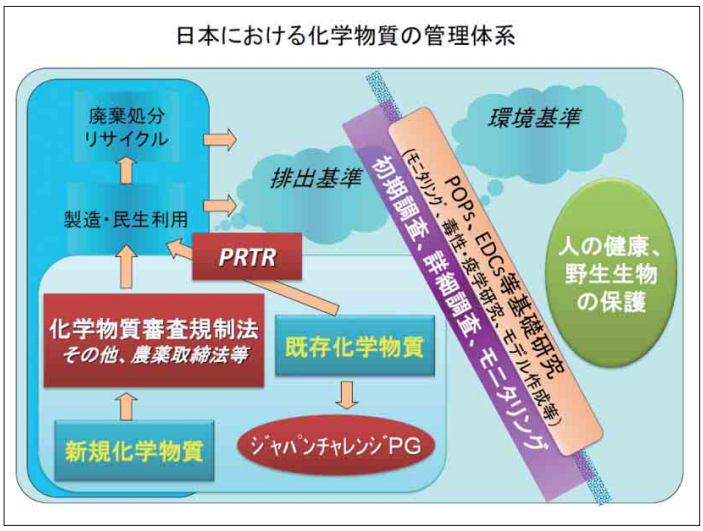


図２

一方で、管理をしっかり行うために、どこからどれだけのものが発生しているかを把握し、理想的にはそれをモデル化し、そのモデルが十分に役に立つものであれば、モデルの結果からどのような対策でどれだけ削減できるはずだということを勘案しながら、効率的、効果的な管理、政策につなげていくことも、研究として重要な課題である。図３はそれを簡単な模式図に示したものである。製造、使用から廃棄にわたるマテリアル（サブスタンス）フローから、特に環境中に出ていくものに関するインベントリを作成する。環境動態モデルも勘案しながら、実際に環境中への排出をうまく示せるモデルを作れるかが１つの大きな目標になる。

ヒトあるいは野生生物への毒性情報と曝露情報からリスク評価を行い、それを元に規制の基準を作成する。規制が満たされているかどうかをモニタリングして監視するとともに、モニタリング結果を環境動態モデルやインベントリ整備などにフィードバックしてゆき、より信頼性の高い管理体制を構築していくことが今日の環境行政における環境モニタリングの役割と考えている。環境問題への対処にあたっては実態把握がまず基本である。適切なモデルを組み合わせて管理する体系を作ることができれば、漏れのない未然防止につながると考えている。

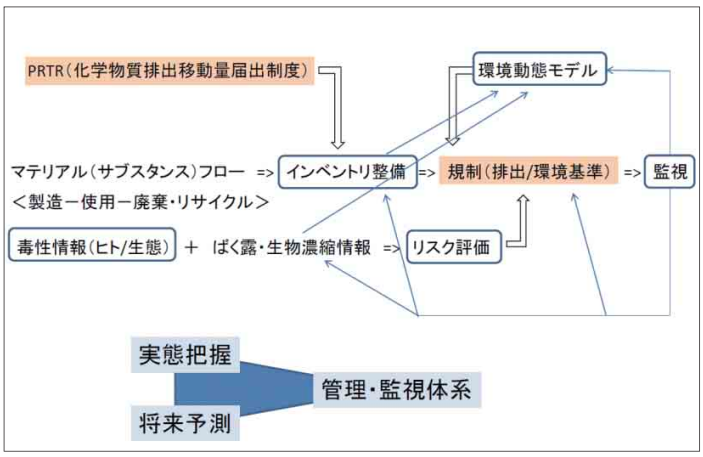


図３

わかりやすい例として、日本におけるダイオキシン特別措置法のもとでの環境モニタリングがある。ダイオキシンの問題が1990年代の半ば辺りから日本で非常に大きな問題になってきた。98年度にダイオキシン特別措置法がつくられ、それに基づき現在監視が続けられているが、図4の左側が、ダイオキシンを排出している業種や量、種類を徹底的に調べて発生量を見積もったものである。毎年実測を含めて発生量を見積もりながら、一方でその発生の削減を図る排煙処理などの技術的な対処を進めていった。それに対し、実際に本当にそうなっているかを確認するために、例えば大気では、全国で1,000カ所以上のサンプルサイトを設け、環境中のレベルを調べ続け（図4右）、発生量の変化の見積もりと実際の環境中のレベルがきれいに対応しているとことを示してきた。このように、ダイオキシン問題では、発生源調査に基づき、主要発生源ごとの発生量の見積もりと効果的な削減対策の立案、実施が行われ、施策の有効性が実際の環境レベルの変化の監視から定量的に確認されている。

環境省はこのような取り組みを長く続けている。最初の環境モニタリングは1974年、環境庁ができてすぐに始まっている。78年からは特に残留性の高い、いわゆる第一種特定化学物質に相当するような物質の環境モニタリングを開始した（図5右上）。例えば、生物試料中のDDTでは、70年代の後半から80年代辺りはかなり濃度が高かったが、現在では非常に低いレベルになってきている。右端の点の間隔があいているのは、ほとんど変化がなくなってきたので、数年に一回しか計測していないためである。同様に底質も1980年代の半ば辺りから測定を始めているが（図5右下）、底質中の別の農薬クロルデンを見ると、DDTと同様、最初の頃に比べて急速に濃度が下がり、現在ではほとんど変化がなくなってきている。このように、日本では実態把握をモニタリングで行い、現状を把握しながら政策を実施してきたという経過がある。

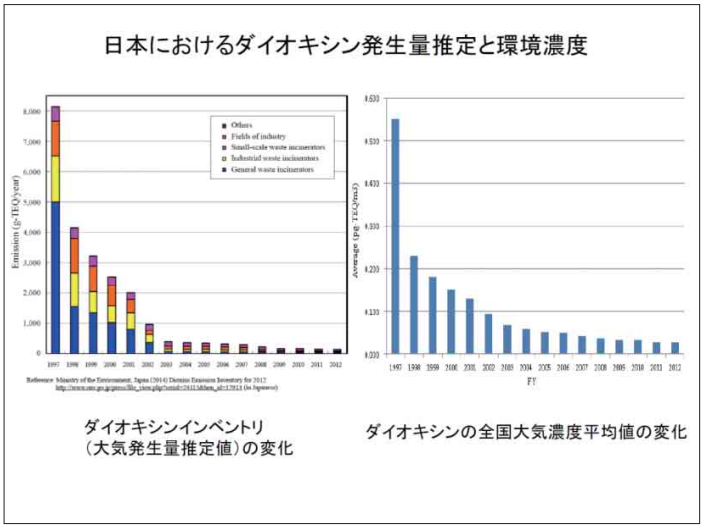


図４

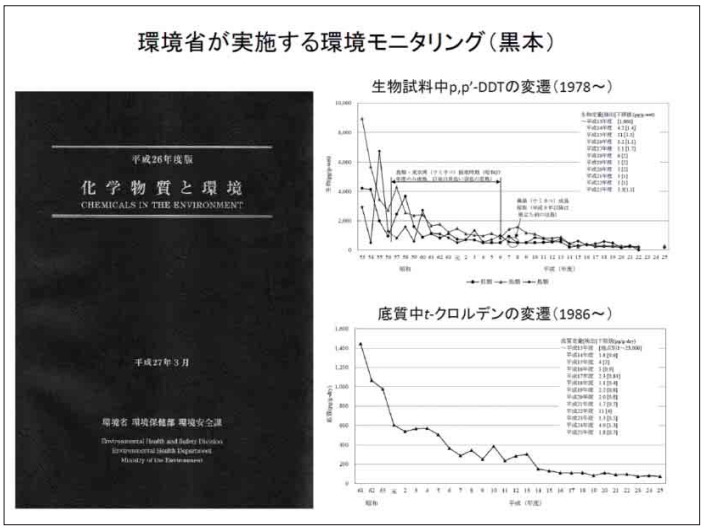


図５

ストックホルム条約という国際条約がある。ストックホルム条約では、DDT を含め、PCB やダイオキシンなど、残留性の高い有機汚染物質について、国際的な協調のもとで禁止や削減を図る活動を行っている。条約が有効に機能しているかどうかを確認するために環境モニタリングデータを定期的に持ち寄り、その結果を踏まえて条約の有効性を評価する条文（16 条）がある。私も関係しているが、世界の環境モニタリングデータを集める委員会があり、日本が非常に真面目に対応している。沖縄の辺戸岬にあるモニタリングステーションで大気を月に 3 日ずつ捕集し、データをとり続けている。例えば、ヘキサクロロシクロヘキサンという昔よく使われていた農薬や、クロルデンという日本では随分昔に基本的に使用禁止になり世界的にも現在ほとんど使われていないはずの物質なども、いまだに環境中に残っており、暖かい夏には高くなり、冬になると下がるという季節変化を繰り返している。年を超える大きな変動はあまり見えなくなってきている。時々高いデータがあるのは、沖縄本島の中に発生源があるらしく、その空気が通ったときに高くなるようである。基本的にこのような季節変化は見られるが、ほとんど年変化はなくなってきている（図 6）。

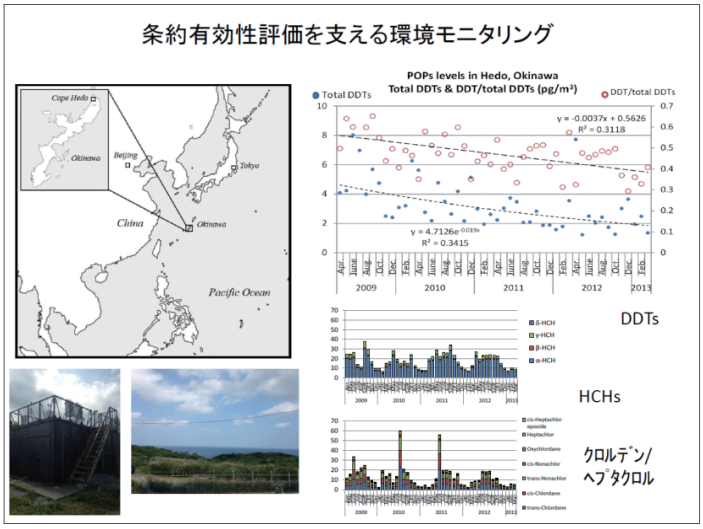


図６

DDT は、ストックホルム条約の対象にはなっているが、世界的には実は未だ製造、使用が許されていて、附属書の B という分類に入っている。例えばマラリア対策のための蚊の退治にはどうしても DDT が必要だということで、途上国を中心とした使用が今も続いている。また、中国も一時的にジコホルと呼ばれている別の農薬の製造原料として DDT を使うことを条約に求め、条約のもとで製造し使っても構わないということになった。

ここ数年の変化を見ると、DDT はきれいに全体のレベルが下がっている。また、親物質の DDT が全体に占める割合が減って分解物の DDE や DDD の割合が増えてきている傾向があり、明らかに新規の DDT の環境中への負荷がここ数年の間に減っていることが見えてきた。調べたところ、中国がジコホル中での DDT 残留量を減らすための研究を進めたり、条約上は除外項目になっていない船底塗料への DDT の混入がわかってその削減のための努力をこの数年やってきたという経緯がある。結果的に真面目に実施している日本の環境モニタリングの結果に、中国の努力がきれいに見えてきたのがこの沖縄のデータらしいと考えている。現在、条約の有効性評価の第 1 回目を行っているが、一番大きなトピックスになりそうである。

このようなモニタリングを今後続けていく上で、いくつかの課題がある。

図 7,8 は、ストックホルム条約に掲載されている化学物質を、工業製品、農薬類、非意図的生成物質の 3 つの分類に分けたものである。条約ができたときには、全部で 12 種類の物質（黄色）が条約の対象になっていた（2001 年）。2004 年に発効した段階でも 12 物質であったが、この条約には対象物質を増やすことができるというしくみがあり、わずか 10 年程の間に、多くの物質が提案され審議を経た上で対象として認められた（橙色）。現在、対象物質が 12 から 26 に増加し、4 物質（無色）が審議中である。さらに増えていく状況になってきている。

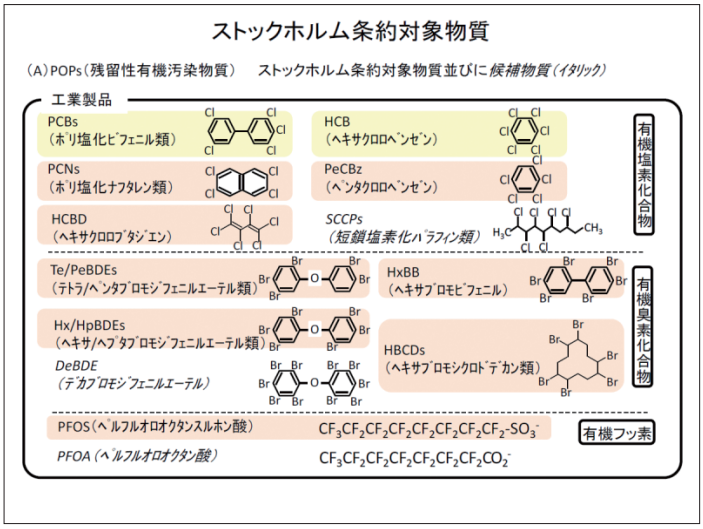


図 7

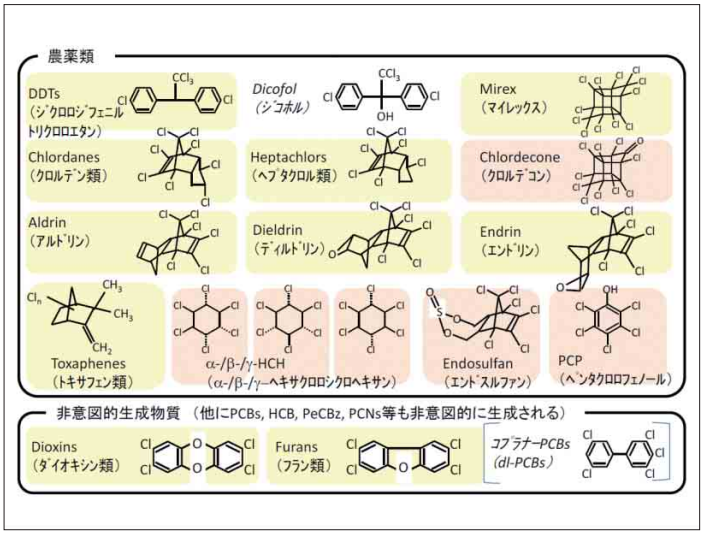


図 8

図 9 は分析の立場でよく対象とする物質を並べたものである。これでも全てを網羅しているはとても言えない。また、全て本当に毒性があるかどうかもよくわからない。こうして見ると、医薬品や農薬のように、もともと毒性がありしっかり管理すべきものが環境問題を引き起こしているケースに加え、まったく違う目的で製造し使用したものが毒性を持つことが後でわかり、規制の対象になっているものも少なからず存在する。一体どこに的を絞り分析すればいいのか難しいところがある。

分析は労力がかかる。図 10 は例として生物試料中の PCB の測定法を環境省のレポートから引用したものである。まず生物試料の水を除き溶媒で時間をかけて抽出する。次に別の溶媒に溶かし直した上でカラムにかけ、目的とする PCB だけを集め、他の物質を極力除く作業を行う。脂質が多い場合は、さらに他の作業を追加して脂質を除く必要がある。途中で値段の高い安定同位体ラベル標準物質などを加え、長い工程の中で試料から PCB が失われてしまった部分を補正するようなことも行いながら、非常に手間暇かけて精度の高い分析が実施されている。

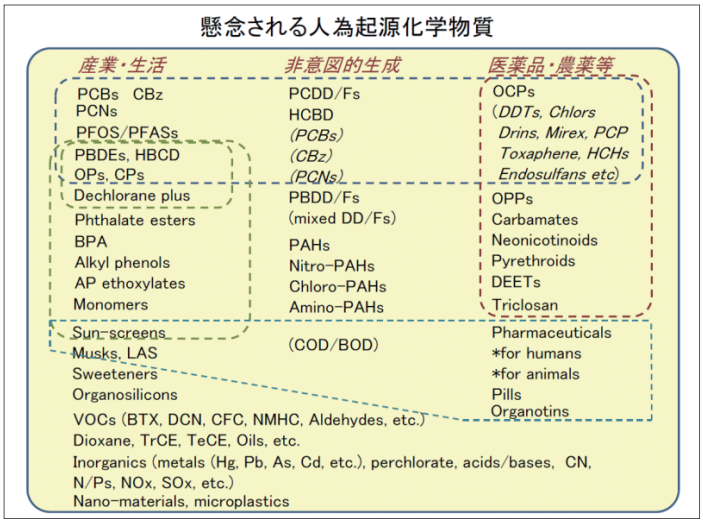


図 9

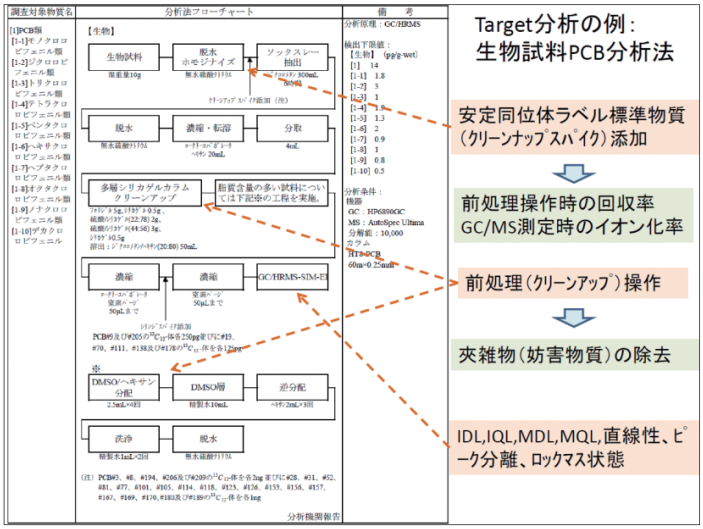


図 10

このような作業を、例えば 26 種類の物質についてそれぞれ行うことは非常に大変である。これまでのような個別分析の組み合わせでは本当に立ち行かなくなってきており、何とか一斉に測りたい。さらには、環境中にあるものが全て測れる方法が作れれば一番良いということで、実際に取り組んでいる。

今までの方法は環境基準等を満足しているかどうかを明らかにするために非常に感度や精度が高いことを重視してきたが、それだけではなく、モデルと組み合わせるための発生源情報（インベントリ）を調べることになると、多くの場所で多くのデータをとる必要がある。あるいは、先ほどの大気のように長期間、連続的に調べ変動を見ていくことに対応できなければならない。さらに、主要な発生源を明らかにして的確に対策をとるためには、発生源毎の違いを調べられるような、いわゆる環境トレーサーを開発する必要がある。分析は、これまでの積み上げではなく、次のステップに進まなければならない状況になってきている（図 11）。

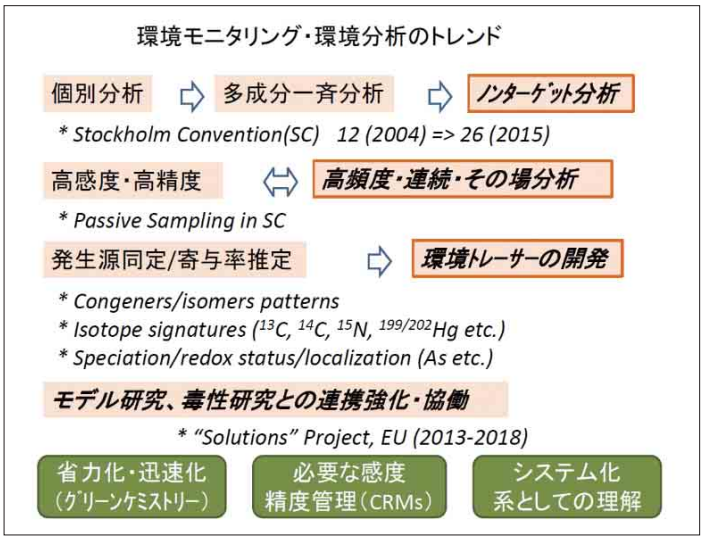


図 11

現在我々は、分析対象を決めずに全ての化学物質を一斉に分析できるノンターゲット分析手法の開発に取り組んでいる（図 12）。特に GC × GC と呼ばれる二次元のガスクロマトグラフを使い、そこから出てくるものを一斉に分析することで、環境中の膨大な化学物質を一斉に測れる方法を開発している。

GC × GC のポイントは二次元に分けられるということである（図 13）。通常のガスクロでは 1 本のカラムの中で、基本的に沸点毎に物質を分けていくものであり、一次元方向に化合物の沸点の違いにより分類していくという原理である。一方、二次元ガスクロでは、たとえば一次元目に沸点で分け、二次元目では極性カラムを用いて構造の違いで分け、2 つの異なる性質により高度な分離を行う。すると、非常に多くの化学物質を性質毎に二次元に展開して分けることができ、万を超える物質を分析した報告もある。このような方法で環境中に存在する数千を超えるような化学物質を一斉に把握しようとしている。

また、TofMS という方法により、以前ダイオキシンなどを分析していた装置よりはるかに小さく安い値段で、ほぼ同等の性能で、より多くの物質が測れる手法の開発の目処が立ってきた（図 14）。実際にこの手法で排ガス中のダイオキシン濃度や湖の底質中のダイオキシンや PCB 濃度を測定し、参照値と比較し、定量性や信憑性が高いデータが出せることも確認している（図 15）。

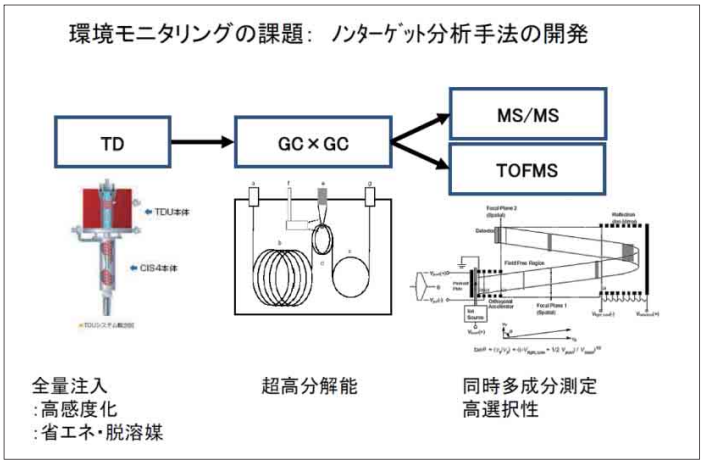

環境モニタリングの課題： ﾉﾝﾀｰｹﾞｯﾄ分析手法の開発
TD
GC×GC
MS/MS
TOFMS
全量注入
:高感度化
:省エネ・脱溶媒
超高分解能
同時多成分測定
高選択性

図 12

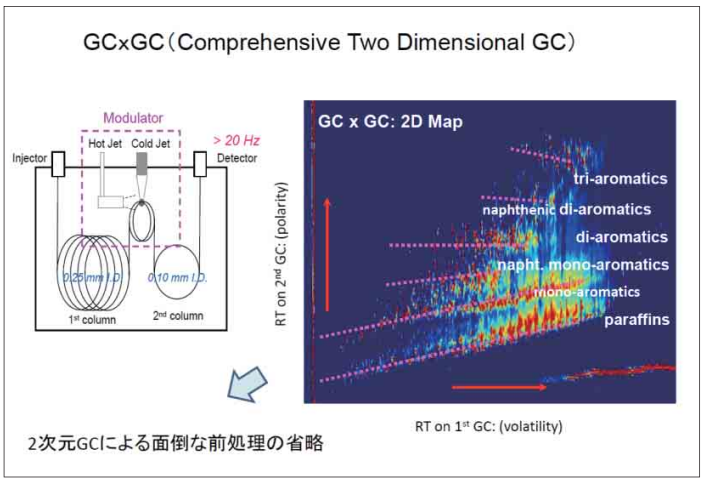

GCxGC（Comprehensive Two Dimensional GC）
Modulator
Hot Jet
Cold Jet
> 20 Hz
Injector
Detector
1st column
2nd column
GC x GC: 2D Map
tri-aromatics
naphthenic di-aromatics
di-aromatics
napht. mono-aromatics
mono-aromatics
paraffins
RT on 2nd GC: (polarity)
RT on 1st GC: (volatility)
2次元GCによる面倒な前処理の省略

図 13

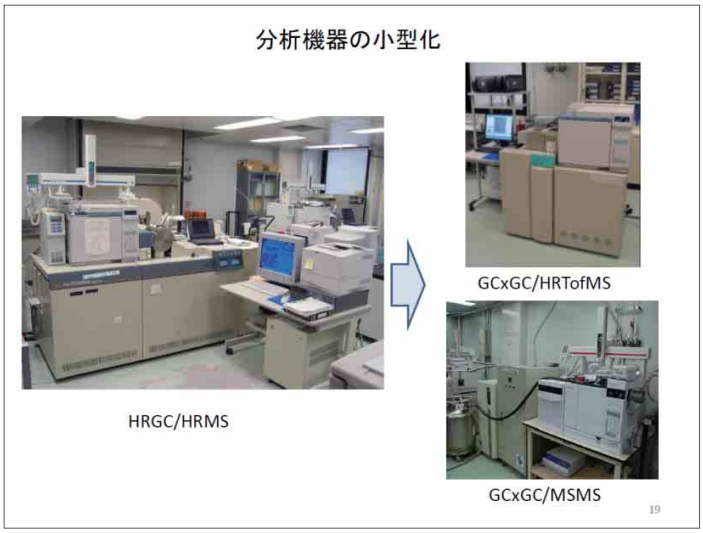

分析機器の小型化
HRGC/HRMS
GCxGC/HRTofMS
GCxGC/MSMS

図 14

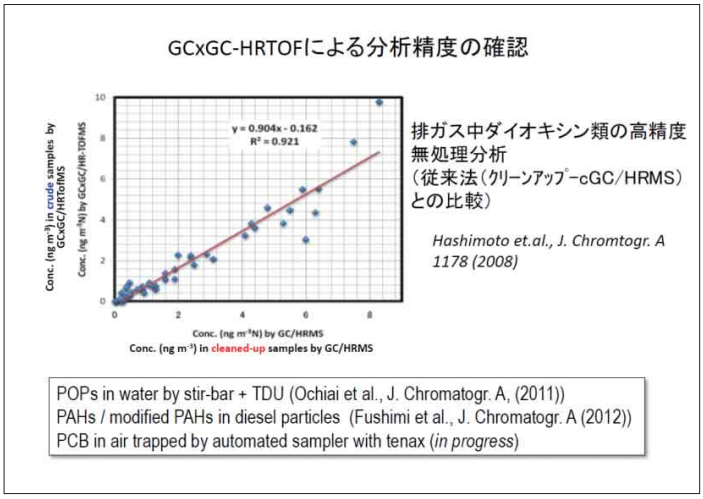


図 15

これらの方法の大きな問題は、イオン化できない物質は質量分析で分析できない点である（図16）。例えば、ナノ粒子やアスベストを含むナノ繊維がある。これらは非常に特殊な性質を持つ。細胞壁を通過し細胞内や核に入ってしまうことが実験的に示されているが、現実に使われているナノ物質が本当にそのようなことを引き起こしているのかどうか、また、環境中、生物中に人為的な活動により出たナノ物質がどのくらいあるのかもわからない。分析のしようがないというのが現状である。また、検出はできても毒性があるかどうかを調べることは難しい課題である。しかし、毒性情報が出てくるまで待てばいいわけではない。たとえば大規模出生コーホート調査であるエコチル調査では、母親や子供の化学物質ばく露の状況（生体試料の網羅的な分析結果）と、実際に何らかの健康影響が認められた集団とを比較することで、新しい毒性物質（あるいは混合物）が見つかるかもしれないと考えている。こうした毒性、有害性に関する情報を蓄積しながら、環境中で検出された物質の適正管理にむけて、どのように物質間の優先順位づけをすればよいかが大きな課題である。また、一度に数千を超える物質が検出できるようになった場合に、それぞれの物質が正しく同定・定量できているかの精度管理も非常に大きな問題である。現在いろいろな議論をしながら少しずつ基礎研究を進めているところである（図 17）。

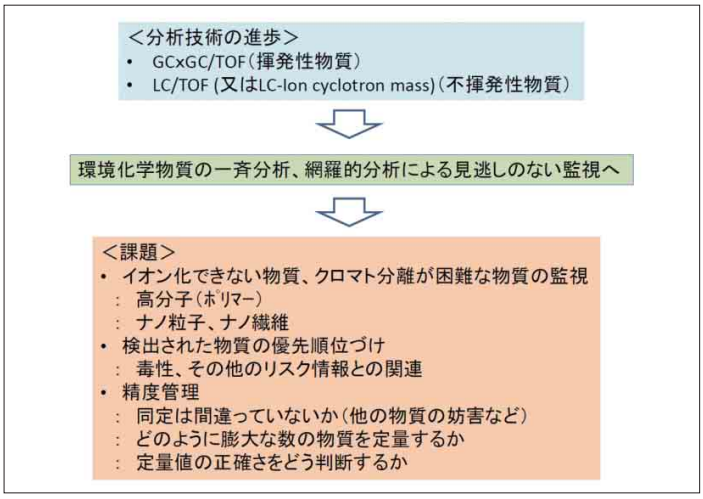


図 16

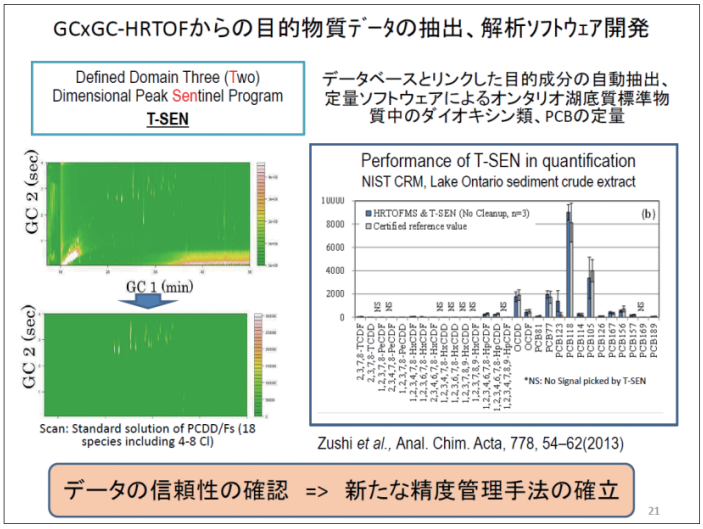


図 17

以上は有機物を対象とした取り組みだが、無機物質、元素、同位体についても研究が進展している。無機物の場合にも、基本的には有機物と同様に、次元の数を増やす、すなわち単なる濃度情報だけでなく、それ以外の情報も含めた形で環境中の存在を調べる研究が進んでいる。

図 18 は環境中でのヒ素の動態を簡単にまとめたものである。ヒ素は三価と五価の 2 つの酸化還元状態を持ち、非常に多くの化学形態をとることが知られている。単純なメチル化だけでも多くの種類があり、水に溶けた形、大気中の飛散性のある形もある。また、海の生物が、海水中に溶けているヒ素から非常に複雑な形態のものを合成していることもわかってきた。それも非常に多くの種類があることがわかってきている。ヒ素が生物を介した形で形態を変えながら環境を動いている様子がわかってきた。

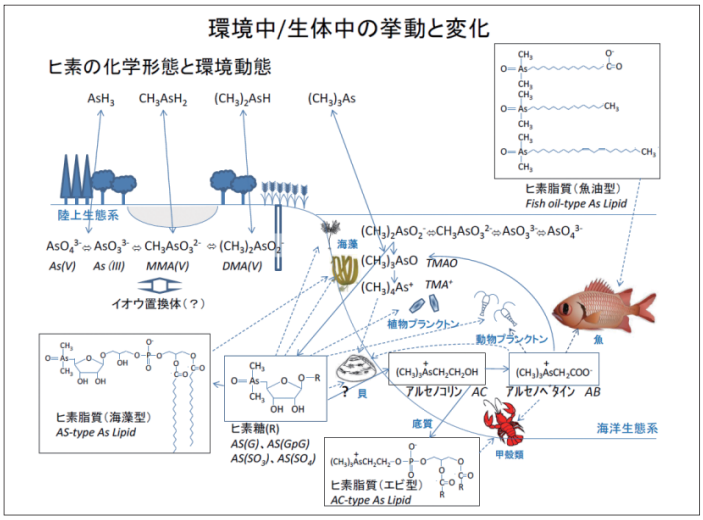


図 18

最近の我々の課題の 1 つに、茨城県の神栖市で起きたジフェニルアルシン酸（DPAA）による地下水汚染の事案があった。第二次世界大戦で嘔吐剤と呼ばれる化学兵器の中間原料であった物質ではないかと思われている。実際にその地下水を飲んだ方がめまいや震戦（手が震えてとまらない）などの症状を示し、明らかな神経症状が出た。数は少ないが小児の発達障害も発

生した。胎児期あるいは幼児期の曝露は非常に大きな問題であり、疫学的な影響で起きているということで現在研究が進んでいる。図 19 の左の図は、ネズミに DPAA を 28 日間連続して飲ませた結果である。後で体内の様々な組織の濃度を測定したところ、最も濃度が高い組織は脳であった。脳には前脳や中脳などがあるが、ほぼ全体的に最も蓄積する部位であり、血液脳関門を簡単に通過し、脳の中に残ってしまう性質があることがわかってきた。また、ネズミの頭にマイクロプローブを刺し、生きた状態で動物の脳内に入り込んだ低分子の物質を測定すると、飲んでから 15 分程度から DPAA が検出され、1 時間半程度で脳内レベルが最も高くなり、その後 2 時間程度の半減期で下がっていくこともわかった。これらの現象がどのようなメカニズムで起きているのか、このような性質の物質が他にもあるのかなどが大きな課題である。

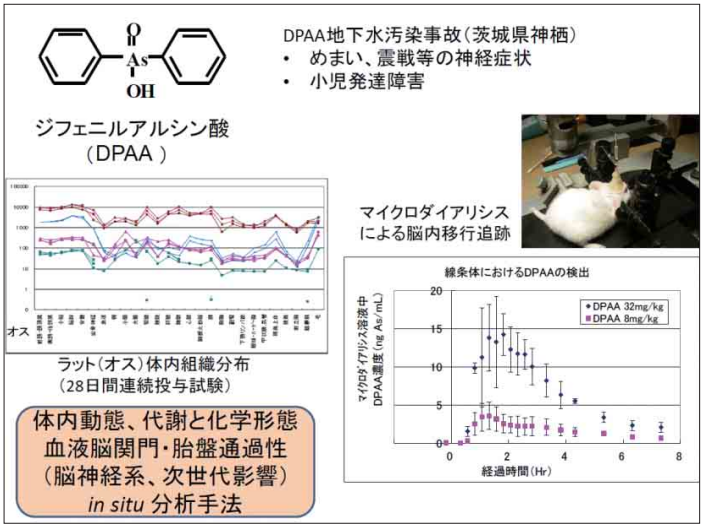


図 19

水銀も大きな研究課題である。2013 年に水俣条約が成立し、今後条約が発効すると同時に環境研究も進めていかなければならないが、日本では既に水銀の発生源と環境中の動態の基本的な状況把握を進めている（図 20）。世界的にも水銀に関するこれまでの長い研究を基に、UNEP で Mercury Assessment を発行し、その結果を踏まえ環境中の水銀の動態を考えている。水銀は火山など自然的な発生源も多いのではないかと考えているが、取りまとめの結果を見ると人為的な水銀の発生量の方が自然起源より多い（図 21）。また、地表に沈降し（Wet Deposition あるいは Dry Deposition）最終的に海に流れ込んだあと、還元されてガス状のゼロ価水銀に戻って再度蒸発し、大気に戻る量が非常に大きいと推測されている。そのような動きをしっかり見る必要がある。まずは図 20 のような全体像をしっかり描き、モデルを構築し、そのモデルを検証しながら、実際の有効な対策、基準等を作っていくことが今後の課題と考える。

こうした水銀の環境動態を濃度だけで追跡するのは難しい。水銀にはおもしろい性質がある。7 つの同位体が存在するが、図 22 の表のうち、奇数の 199 と 201 に Nuclear Spin が記載されている。有機体の水銀は、太陽の光を浴びると水の表面でメチル水銀が壊れたり水銀が還元されて大気中に出ていったりするが、その際に非常に特異的にこの奇数の番号を持っている水銀だけが水中に残って生物に濃縮されることがわかってきた。この現象は MIF（Mass-Independent Fractionation、質量非依存性分別）と呼ばれるが、この MIF を見ることで水銀の環境中の動態を把握することができるのではないかと考え、現在研究を進めている。

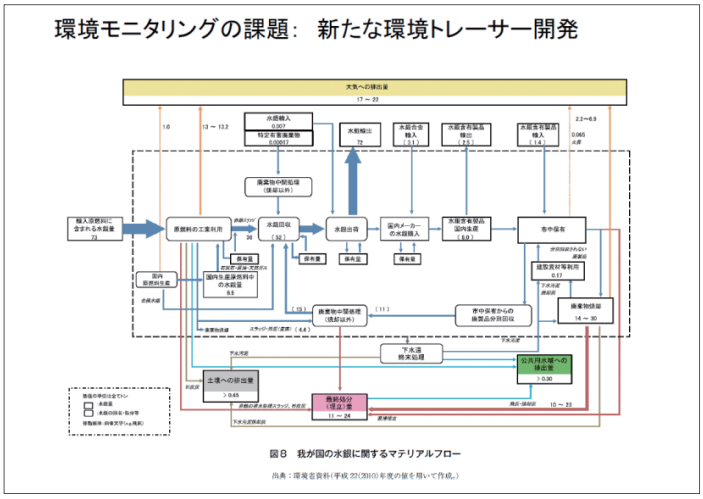

環境モニタリングの課題： 新たな環境トレーサー開発
図8 我が国の水銀に関するマテリアルフロー

図 20

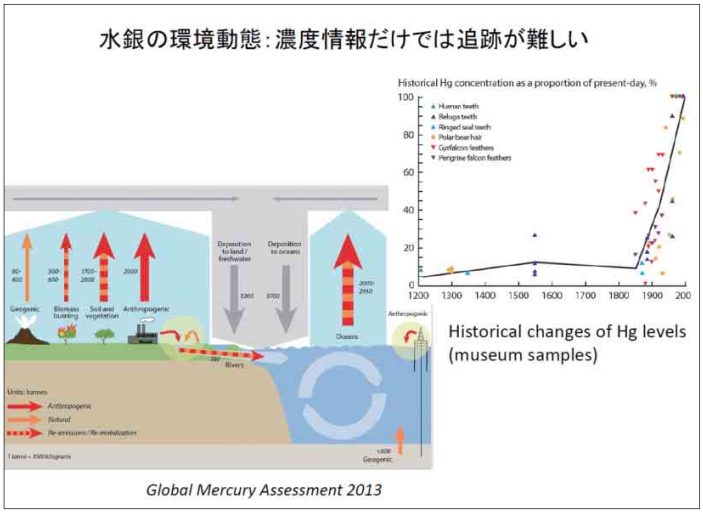

水銀の環境動態：濃度情報だけでは追跡が難しい
Historical Hg concentration as a proportion of present-day, %
Human teeth
Beluga teeth
Ringed seal teeth
Polar bear hair
Gyrfalcon feathers
Peregrine falcon feathers
Historical changes of Hg levels
(museum samples)
Global Mercury Assessment 2013

図 21

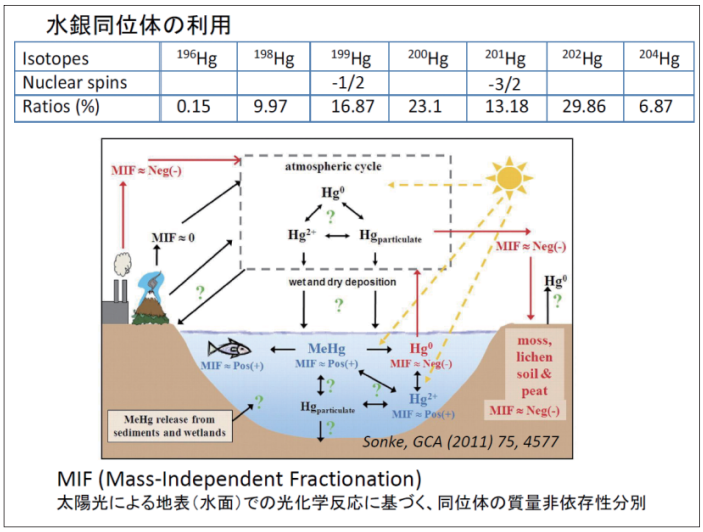
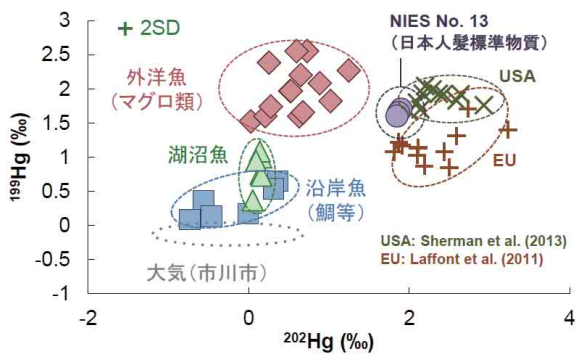

水銀同位体の利用
Isotopes | 196Hg | 198Hg | 199Hg | 200Hg | 201Hg | 202Hg | 204Hg
Nuclear spins | | | -1/2 | | -3/2 | | |
Ratios (%) | 0.15 | 9.97 | 16.87 | 23.1 | 13.18 | 29.86 | 6.87
atmospheric cycle
MIF ≈ Neg(-)
MIF ≈ 0
wet and dry deposition
MeHg
MIF ≈ Pos(+)
moss, lichen soil & peat
MeHg release from sediments and wetlands
Sonke, GCA (2011) 75, 4577
MIF (Mass-Independent Fractionation)
太陽光による地表（水面）での光化学反応に基づく、同位体の質量非依存性分別

図 22

図 23 の縦軸が MIF のずれに相当する。水銀の摂取源としては海の魚が大きいことがこれまでの調査でわかってきているが、沿岸の魚と外洋の魚を比較すると、外洋の魚で MIF のずれが非常に明確に見えてくることがわかる。例えば人の水銀の主な摂取源が外洋の魚か、それとも沿岸あるいは陸域起源のものなのかを、MIF と横軸の MDF のずれの両方を使い細かい検証をすることができる。このように、地球規模での同位体分別を利用した解析も、1 つの大きな研究になりつつある。



環境中での水銀の同位体分別（横軸；MDF（δ^{202}Hg、縦軸；MIF（Δ^{199}Hg）

図 23

加速器質量分析（AMS）に関してあわせて紹介する。絶えず宇宙から降り注いでいる宇宙線の影響により、大気中で様々な核反応が起き、中性子ができ、幾つかの長寿命の放射性核種がつくられる。特に多いものは大気中の ^{14}N に中性子が当たり ^{14}C ができる反応である。^{14}C は年代測定に使われている。その他、酸素やアルゴンのような気体に中性子がぶつかると、それが壊され小さいものが作られる過程で、^{10}Be（ベリリウム）や ^{26}Al（アルミニウム）、^{36}Cl（塩素）などの長寿命の放射性核種が生成され、これらが環境研究に使えることがわかっきた。さらに、中性子は地表にまで届き、地表、特に鉱物でも同様な現象が起こる。例えば、水や氷で覆われていた場所が地形が変わり水や氷が無くなった時や、土で覆われていたところが崖崩れや地震の断層で地表に出てくる時に、長寿命放射性核種が生成され始めることを利用して、地表の環境変化の研究にも使えることがわかってきた。

^{14}C は生成されたあと、大気中の CO_2 pool に入り、植物に吸収され、動物が食べて、一部は大気に戻り、残りは地中を経て海に流れ出たり地中に留まる。^{14}C は年代測定のみならず、海水循環を追いかける指標としても使える。50 年代から 60 年代にかけて、大気圏核実験が盛んだった頃、大量の ^{14}C が大気中にまかれて、一時的に大気中の ^{14}C 濃度が自然レベルのほぼ倍になった。現在はほぼ元に戻っているが、もとに戻るということは ^{14}C が環境中に分配されていったということを示しており、^{14}C を追いかけることで炭素がどのくらいのスピードで環境中を動いているのかを見ることが出来る。^{14}C は温暖化の研究において、地球上の炭素循環の指標としても利用されている（図 25）。

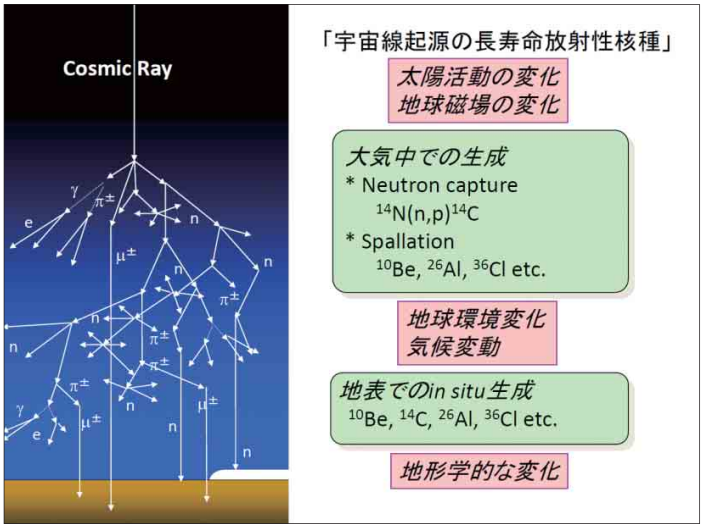


図 24

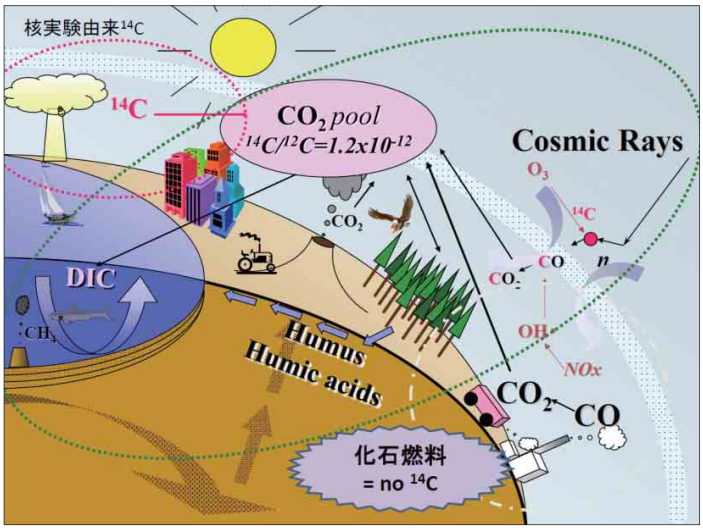


図 25

同位体は表層地球環境における物質循環の解明に非常に役に立つことが分かってきた一方で、無機分析には難しさが残っている。特に環境中の存在状態を明らかにするのはまだ難しい。また生物中の元素や同位体の研究にも多くの課題が残されている。例えば核などの各細胞区画での酸化還元状態がどう変化し、元素の分布や体内動態、その生理的役割にどのように影響していくのかは大変難しい課題で、まだまだ基礎研究が必要な段階である。また、環境中の粒子状物質やナノ粒子に関する健康への影響評価などの基礎研究が大きな課題だが、そのような物質の分析も難しい課題である（図 26）。

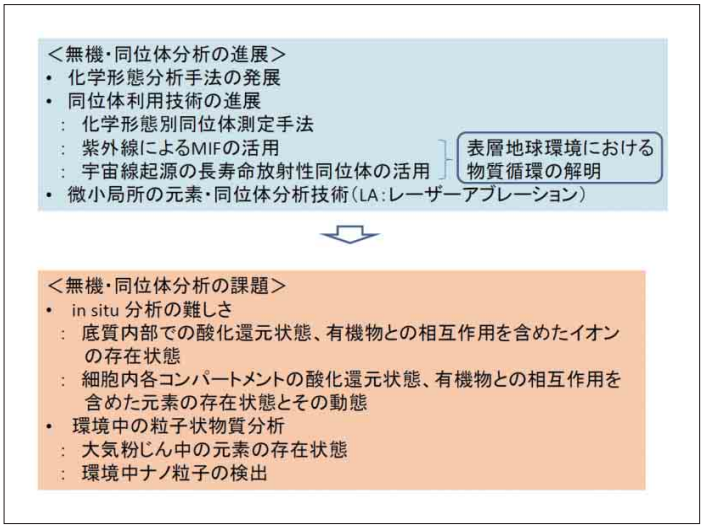


図 26

昨年 9 月に 5 か国の化学会が集まる国際会議に参加するためライプチヒを訪問した。昨年の課題は Chemistry and Water であり、議論の結果は「Challenges and Solutions」という報告書にまとめられて報告されている。その会議の直前に、ライプチヒの研究機関を訪問し、ヨーロッパの非常に大きな研究プロジェクトである Solutions のコーディネーターに会うことができた。会議にも Solutions の参加者の 2 名がドイツ代表として参加した。Solutions は、基本的に環境水中の有害化学物質をもう 1 回調べなおそう、現在の科学技術を集結してもう 1 回評価し直そうという形で進められているもので、50 種類以上の短期毒性評価法とノンターゲット化学分析手法をうまく組み合わせ、環境中に実際にある化学物質の中から毒性のあるものをもう 1 度拾い直すという作業を行っている（図 27）。リスク評価では、Adverse Outcome Pathway（以下、AOP）という考え方に沿って、最初の分子反応から最後の毒性発現に至るまでのステップを追いかけながら、各ステップ毎に原因物質のスクリーニングに使えるような短期毒性試験法をそろえて、できるだけ網羅的に毒性評価が行える体制を整えている。

Solutions では Effect-Directed Analysis と呼ばれる手法を重要なキーワードとしている。生物影響を見ながら試料を分画して、最終的に毒性のある化学物質を見つけようとしている。例えば特定のホルモン様作用を持つ化学物質が環境中にどれだけあるのかを確認しながら環境試料を分画し、毒性がある物質の存在が確認できれば、それを最終的に精製して同定するところまで行い、新たな分析・規制対象を見つけようという作業をヨーロッパの河川を対象に行っている。

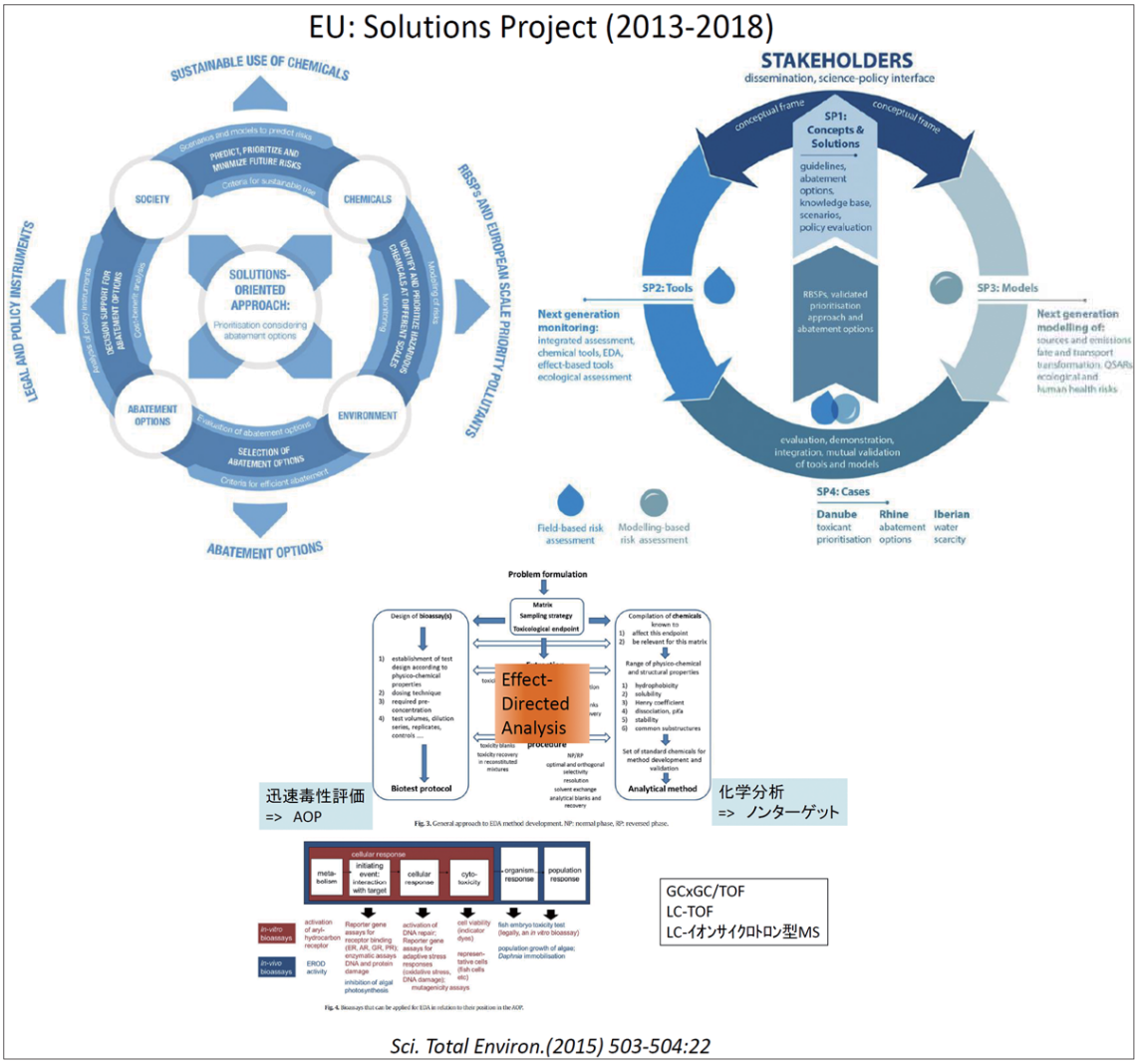


図 27

今後の進展と課題について。分析の項目数が増えてきているが、次世代の環境分析研究において特に現在取り組んでいるのは次元を増やすこと、つまり、異なる軸を増やし、多次元的にものを見ていこうとしている。例えば、高解像度、高信頼性のデータをとっていくことが１つの大きな流れかと思う。また、特に毒性とモデルをうまくリンクしながら、毒性の優先順位付けの考え方を整理しつつ研究を進めたいと考えている。

その一方で、不十分さ、曖昧さをどう扱うのか。我々自身考え方の整理ができているわけではないが、世の中の動きを見ると、例えば、ヨーロッパでは少しでも危ないという情報があると、確からしさを確認したり定量的な部分を詰める作業をする前に、より危険性が少ない代替物質を使う方向に動かしていくのが環境行政での１つの大きな流れになってきている。それらを学ぶ一方で、日本の環境の特殊性やこれまでの環境研究の蓄積、日本の科学技術の特徴もあろう。最終的には見逃しがないということ、未然防止を実現することが最も大きなテーマになる。同時に曖昧さを減らすような研究を進めることができればと考えながら仕事をしている。

＜環境化学の進展と課題＞

＊ 項目数の増加
=> 多次元・高解像度・高信頼性
＊ 他分野との連携強化
=> 対象となる環境，生体、生態系の
システムとしての把握
・*What is life ? What is ecosystem ?*
＊ 優先順位付けの考え方整理
=> 脳神経系影響、次世代影響等の把握
・*Quality of life*
＊ 不十分さ、あいまいさの認識と当面の対処
=> *Precautionary Approach*（予防原則）
=> *WET（Whole Effluent Toxicity）*

「見逃しのないこと、未然防止を是としつつ、優先順位をつけて取り組みながら、全体的なあいまいさ（＝安全率）の低減を図る」

図 28

［質疑応答］

※ Q は質問、A は回答、C はコメント。

同日に講演された横浜市立大学の井口客員教授、東京大学の渡辺教授のご発言も記す。（敬称略）

Q：人体への毒性影響が何十年後でないとわからない場合、加速試験や短時間で影響を見るための方法はあるのか。

A（柴田）：AOP では、最初の段階から最後の悪影響が出るまでの途中段階を出来るだけ明確にし、そのつながりを理解することで、最初のきっかけの部分である短期毒性試験を実施してスクリーニングする考え方だと思うので、全体のつながりが把握できれば可能かと思う。

C（井口）：まさにその通りである。一連のことがわかれば、最初のツーステップかスリーステップまで毒性試験を行い、そこで決断するのが AOP の考え方である。

A（柴田）：ヒトは非常に難しい。一方で、膨大な数の野生生物が存在し、どれが代表種であるかは、割り切った方がいいと思うが、個体差も含めて難しい問題が残っている。

C（井口）：基本的にはラットを中心にしてヒトを考える。野生生物のうち、鳥類の研究は米国ではほぼ止めてしまった。他、魚類、無脊椎動物、両生類がある。無脊椎動物はたくさんあるが基礎研究がなく、魚かカエルかラットが中心的となる。ラットは 2 年程度生きるため、実験としても大変である。ラットは普通 2 カ月程度で実験が終わるが、2 年程度かけて様々なイベントが起こる時期をきちんと調べて理解しようという試験法の提案もある。しかし、それを 1 回行うためには億単位のお金が必要になる。メダカでも二世代を調べると約 5,000 万円である。そのためなかなか進まない。

日本と米国の違いは、日本は化学物質で問題があると政府が中心になって対応する。一方、米国では試験法は政府が作るが、ある特定の物質をその会社が売り続けたい場合は、その試験によるデータを要求し結果を政府側が評価して判断する。すなわち、試験の実施は業者が行う。日本も政府が中心となって問題のある物質のデータをとり続けるのがよいのか考えていかないと、予算が幾らあっても足りなくなる。

Q（柴田）：米国の場合は、National Academy of Sciences が 2007 年の Toxicity testing in the 21st century で、動物実験をやめて細胞系に寄せていく方向性を示したように聞いたがその後はどうか。

A（井口）：Tox21という、21世紀に向けて毒性評価をどうするかという取り組みでは、特定の細胞に物質の濃度を変えて曝露し遺伝子発現がどう変化をするかを、多くの物質について試験し結果を集めている。それによって評価するという大前提で動いているが、その数日間の遺伝子発現で本当に健康影響につながるといえるかどうかはまたギャップがあり過ぎる。影響とのつながりの途中段階のものが何もない。影響がありそうだということはわかるが、どこに落とし込むのかをずっと見ているが、それ以上の進展はない。

C（渡辺）：ヒト集団では、がんが出てくるまでを見ると非常に時間がかかるため、前駆的にあらわれるバイオマーカーなどを見ようという動きはたくさんある。しかし、「バイオマーカー」とがんのつながりが曖昧という場合もある。現在、例えば生活習慣病のリスクがわかる前駆的な物質に関する研究が行われているので、そのような物質を事前のスクリーニングに用いて見ていこうという動きもある。

Q：水銀などの有害な化学物質が人体に影響を与える局面をどう把握するのか。

A（柴田）：水銀では、最も量が大きい産業界の水銀のフローを把握した上で、環境に出ていくものがどの程度かをまず把握する。その後、分析等で確認できれば、対策に進む。しかし、水銀は現在のフロー以外に過去の排出量が多い点が課題である。産業革命以降、現在に至るまでの間に、環境中に動き回っている水銀レベルは、少なく見積もっても人間活動の影響で3倍以上に増えたというのがおおよそのコンセンサスになっている。研究者によってはさらにさかのぼって有史以前との比較を行い、数十倍にまで増えたという方もいる。過去の資料を使って推計するしかないが、人の活動によって既に出てしまった部分をどう抑え込めるか。一方で、人の摂取経路を明らかにすれば、そこを抑え込むことで人に対する影響を遮断しつつ全体的にレベルが下がってくるのを待つことができる。そのためにも環境中の水銀の動きをモデル化する必要がある。人間の活動から環境中に出ていく可能性がある部分をモデルで表現しているが、実際に環境中に動いている水銀がどのように動いているかを精密につくった上で、最終的にどのような経路で人に曝露されるかを調べることが必要になってきたと思う。

Q：水銀のフロー図は非常に細かく、これを様々な物質毎に描くのは大変な作業だと思う。

A（柴田）：日本の環境省は、厳密に、情報をしっかりまとめて現状把握から入るのがこれまでの対応策かと思う。ダイオキシンなども同様のレベルのことをしている。例えば産業廃棄物の焼却炉も幾つか実測し、発生量の全国の見積もりを行いながらフローを描き、どこを減らせば環境中への放出も減るかを見ている。しかし、水銀は過去の放出量がかなり大きいため、フローを描いて対策を打ってもそこだけとは限らない。

Q：過去に規制があり使用を中止した化学物質であれば低減していくが、今でも使用や製造を続けている場合は蓄積あるいは分解する可能性もある。時間まで入れると四次元まで考える必要がある。

A（柴田）：ご指摘の通りである。分析が現状のままでは立ち行かなくなるという点も、別の言い方をすると、この辺りをきちんと対応できるようにするにはどうすればいいかというところでもある。一方で、思いがけない毒性がわかったときの対応を分析法から構築することも1つの大きな課題だと思っている。

Q：毒性試験の効率や課題を乗り越える新しい手法の開発は難しいか。

A（井口）：AOPで流れをしっかり構築できればおおよその将来予測ができる。その実現のためには、長いスパンでの研究が必要である。最初に、全体像の設計として、パーツに分けてそれらを組み上げることで全体を構築する。そして、試験法や考え方を統一し、メダカやラッ

トで何物質かを例に毒性試験を実施してみる。その結果から何が見えるかを検証する枠組みが必要ではないか。こうした取り組みは大学の個別研究ではできない。

現在のAOPは、論文のデータを利用しているだけである。用いる動物種も方法も異なるが、おおよそこんなことが起きていると言っているだけなので、統一して行う必要がある。

C（柴田）：その通りである。体の外から障害を与えるような物質が入ってきたとき、それを防御するために動くものが当然ある。それがうまく働いて終わる場合もあるし、うまく働かず悪い方向に進む場合もある。しかし、実際のAOPを見ていると、現実には最初の反応をそのまま使って終わりにしているので、必ずしも1対1で毒性が影響につながっているわけではないという印象を持っている。酸化物が体内に入ってきたときの分解反応をそのまま最初の反応としているケースもある。環境ホルモンの研究からリセプターとの結合について構造の活性相関研究が発展し、どのような化学物質がどのような毒性を持つかの議論は随分進んだと思うが、それでも難しい。リセプターも意外と間口が大きく、我々が思っていた以上に物質の認識が甘く、いろいろなものが影響してしまうことがわかってきた。いろいろな情報が蓄積してきたところをもう一度きちんと整理し直し、次のステップを考えていかなければいけない。

4.3 環境汚染・健康区分における研究 human ecology（人間集団 ⇄ 環境）の立場から

渡辺 知保（東京大学　大学院医学系研究科　教授）

日本では 1950 年代半ばから典型的な公害問題群が報告され、欧米では 1940 年代から既に大気汚染問題が知られていた。現在につながる環境保健問題の登場と考えられる。環境と健康との関連についての研究領域として、90 年代の後半から社会疫学（Social Epidemiology）と呼ばれるものが起こってきた。それまでは主に環境の物理・化学的要因を対象としていたが、この領域では様々な社会要因を対象とし、例えば、人とよくつき合う人、いわゆる社会参加の機会の多い人は健康でいられるとか、ストレスへの対処法をよく知る人が元気だとか、あるいは、経済的な地位や社会的な地位と健康は関係があるという観察を実証するような研究が数多く手がけられている。相前後して 80 年代半ばからは、内分泌かく乱の問題、温暖化を始めとする様々な地球環境問題が取り上げられ、健康との関係も考えられるようになってきた。

これらの流れを大まかにまとめると、公害をめぐって化学的環境の影響への研究が進んだ時期、社会要因の影響がクローズアップされた時期があり（現在もクローズアップされているが）、さらに地球規模の大スケールあるいは世界各地で頻発する環境問題の健康影響を研究する時期に突入したということになる。Lancet という有名な医学雑誌が 2015 年 Planetary health という特集を組み、人間の健康と地球の健康を一体で考えていかなければならないという方向性を主張したしたのは、こうした流れの中と考えられる。

自然科学的要因（物理・化学的要因）と健康の関係について言えば、かつての単一要因への高レベルの曝露から、複数要因への低レベル曝露へと問題の中心がシフトしてきた。すると、影響も当然見えにくくなり、非特異的、慢性的な影響、次世代影響などの問題も取り上げられるようになった。また、環境汚染で問題となる化学物質の毒性影響は何かという基本的な問題以外の図式が出てきたことも最近の特徴と言える。例えば、CO_2 を出せば温暖化が起こり、温暖化が起こると気候変動により感染症の分布が変わるという形で健康に影響する、あるいは、化学肥料を耕地に過剰投入した結果、周辺環境に富栄養化が起こるなど、間接的で、かつそのインパクトが決して小さくないような影響がクローズアップされてきた（図 1）。そのような傾向を考えると、本日は「環境汚染・健康区分」での検討ではあるが、「生態系」や「気候変動」、「循環型社会」など他区分とも研究を関連させながら進めることが今後必要なのは間違いない。

① 研究開発の歴史・経緯：
＊公害時代（産業・環境保健）→[社会要因]→“自然”環境要因.
・ 典型的な公害問題群：水俣病（熊本'56・新潟'64），イタイイタイ病('55-社会的報道)，四日市喘息（'60s）；cf. 欧米の大気汚染事例（ロサンゼルスなど．'30s-'40s)
・ [90'後半～ 社会疫学： Social determinants of health]
・ 近年の問題群：内分泌撹乱化学物質（'80s)，地球環境問題（'92＝環境と開発に関するUN会議＝リオ・サミット），“Planetary health” (Lancet, 2015)

単一要因への高レベル曝露→複数要因への低レベル曝露→見えにくい影響（非特異的・慢性的・曝露との距離）
“環境汚染＝化学物質（毒性）影響” 以外の図式（俯瞰図）
・ 温暖化/気候変動→感染症
・ 富栄養化→生態系影響→生活被害
・ （抗生物質） →（耐性菌）感染症

図 1

環境と健康の関連を扱う主な分野である環境疫学と毒性学における過去四半世紀の変化をまとめてみると（図 2 上)、環境疫学の分野では大規模化が起こっている。現在、一流の学術誌に掲載される疫学論文では、十万人規模の研究が少なくない。また、生物統計を用いた分析技術も進展し、影響検出の精度があがった。meta-analysis と呼ばれる、多数の疫学研究の既報データを束ねて全体で (universal に) 何が見えるか再評価する手法も盛んである。一方で属性・遺伝・地域が違えば、研究結果が違ってくるのは当然であるので、個別化こそが重要だという立場もあり、ここはある意味で両立しながら進んでいくのではないか。エンドポイントについては、かつては死亡数やがん発症数に焦点が当たっていた。これらは今でももちろん重要だが、それ以外のエンドポイントの重要性も認識されるようになった。例えば、多くの慢性疾患や精神疾患ではすぐに命にかかわるものではないが、様々な社会的な負担がかかる。WHO の疾病負荷研究（Burden of Disease、初回は 2004 年）に代表されるように、そのようなものも全て同じ尺度の上で評価しようという研究が主流になってきている。

毒性学では、ここでは一つ一つ言及できないが、様々な形でウェット面での技術的進化があった。特に －omics（genomics や metabolomics）あるいは －ome（genome, proteome, transcriptosome など）の研究が盛んであるが、ヒトの健康・ヒトへの影響という目でみると、これらの情報と最終的に観察される毒性との関連が、すぐにはわからないことも多い。豊富なデータが出てくるのは確かなので、それを活用するための手法の開発が課題であるのは間違いなく、pathway 分析なども出てきているが、まだまだ不足しているのではないか。

全体として見ると、特に人間集団では、突出した単一要因が重篤な問題を引き起こすことは減り、多くの要因が相互に作用しあって健康に影響を与えているのが現状であり、それだけに、より探索的な研究が多くなってきたのではないか。要するに、これまでは「危ないと疑われるもの」に目星をつけておき、それについて仮説検証するような研究であったのが、まず全体を調べ、そこからシグナルを拾い出そうという研究が増えてきたと感じている。この目的にあった新たな手法の開発や、他の学問分野との連携が非常に重要になってきているとも言える (図 2)。

① 研究開発の歴史・経緯：

＊関連する研究分野の進展（過去四半世紀くらい）

- **環境疫学**：大規模化，生物統計学/統計分析技術
  meta-analysis　vs.　個別化（属性・遺伝・地域 etc.）
  死亡やガン以外の影響（疾病負荷研究 etc.）
- **毒性学**：技術的進化　–omics/-ome，pathway の分析
  →より探索的な研究.
  - “Adverse outcome analysis”
- **他分野との連携**
  情報科学，工学，環境科学，社会（科）学

図２

研究開発の現状として、様々な領域でデータベースが整理され、それらの入手可能性も随分拡大してきたことから、ビッグデータの使用、例えば地球観測データや大規模モニタリングデータの使用が、健康分野でも重要になってきた。

環境側のデータとしては、広範な大気汚染あるいは暑熱環境などについて、特に衛星画像に基づくデータが増え、その空間的な分解能が上がって、健康データとの関連も解析できるようになってきた。また、将来予測についても downscaling の手法が進んでローカルな予測が少なくともモデル的には可能になってきた。化学物質についても汚染の現状を捉える国際的な取り組みが始まり、例えば Global mercury observation system（GMOS）という、地球上の水銀分布を把握するプロジェクトが実施され、それが水俣条約のような国際的な取り組みを実践していく際の基礎情報となる。これらの背景には、気候変動の問題など地球規模環境問題の解決という緊急課題があるが、それらの成果を健康の研究に利用できる状況になりつつある。

健康側についても、エコチル調査に代表される大規模データが出てきている。小児における環境保健における類似のプロジェクトとしては、アメリカで NIH が主導した National Children’s Study があったが 2014 年に中止されてしまった。EU の類似のプロジェクトとしては、HELIX というプロジェクトが進められている（後述）。エコチル調査はこれから 10 年以上続く予定であり、その意味では世界的にも注目を集めていると言えよう。

このように、環境側と健康側の両方で大規模データが蓄積されつつあり、それらを突き合わせると何がいえるかという研究が盛んになってきているのが現状と言えよう（図 3）。

② 研究開発の現状と課題:

＊データベースの整備と入手可能性の拡大
ビッグデータ・地球観測データ利用，大規模モニタリング

・環境側
ー大気汚染　Lelieveid　et al., Nature2015
暑熱；Laaidi et al., EHP2012
ーGlobal mercury observation system (GMOS)　EUプロジェクト
http://www.gmos.eu　(プロジェクトは2015.10月終了)
→“水俣条約に基づく施策へのインプット”
#気候変動研究の進展

・健康側
ーエコチル調査（2011～；　胎児期～13歳　母子10万組）
cf.　National Children's Study (USA, EPA/NIEHS) 2014 “cancel”,
ー　Human Early Life Exposome (HELIX)調査（EU）

図３

その一例として、世界的にみた場合の大気汚染の健康影響はどの程度のものかを推定した論文が、昨年 Nature に発表された（図 4)。様々な排出インベントリや大気循環モデルなどを組み合わせて、大気汚染物質への曝露量を推定し、既知の曝露–影響関係に基づいて健康影響を見積もった。この研究では、マラリアやエイズによる死亡より多くの人が大気汚染により亡くなっていると推定された。多くの仮定に基づいているものの、これなどは大規模なデータが使えるようになって初めて可能となった研究だといえる。

大気汚染の世界的インパクト

More people die from air pollution than Malaria and HIV/Aids, new study shows

More than 3 million people die prematurely each year from outdoor pollution and without action deaths will double by 2050

Chinese parents hold their young children receiving treatment for respiratory illness caused by smog in Hangzhou city. Photograph: Imaginechina/Corbis

More than 3 million people a year are killed prematurely by outdoor air pollution, according to a landmark new study, more than malaria and HIV/Aids combined.

“New study” = Lelieveld et al. (2015) Nature

図 4.　Nature の記事より

図 5 は衛星画像に基づく暑熱（地表面温度）の空間分布データである。2003 年にパリが熱波に襲われたときに、多くの方が亡くなった。人工衛星から昼と夜の地表温度（熱波のあった 10 日間の平均値）を見ると、夜のヒートアイランド現象がはっきりと見えてくる（Laaidi et al., *Environmental Health Perspectives,* 2012）。この研究グループは、夜の地表面温度が高齢者の死亡率と非常によく相関したということを見出している。これも、地球観測データがそろって初めて可能になった研究であり、現実的な対策にも直結し得るという点でも重要性がある。

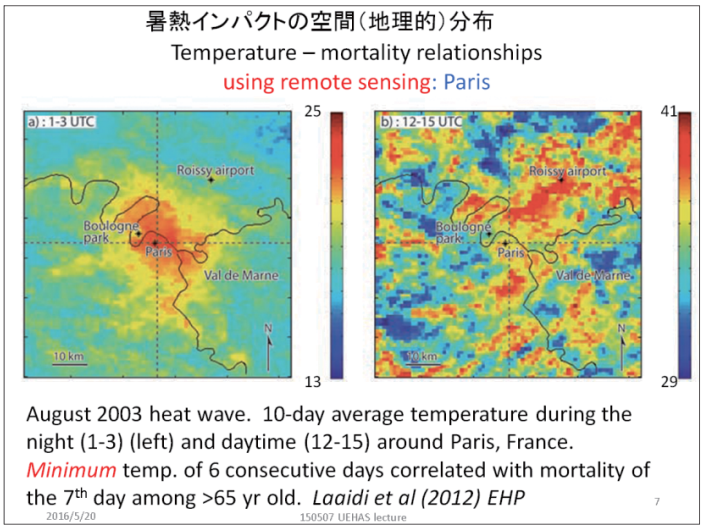


図 5. 衛星情報を健康情報と組み合わせる（Laaidi ら，Env Health Perspect 2012）

また、人の行動データを活用した研究も始まった（図 6）。従来の疫学のほとんどは、地域毎にどの程度の汚染があるかを把握し曝露評価を行って、地域毎の健康指標との関連を見ていた。実際には、人は 1 日中自宅にいるわけではなく移動する。特に都会周辺では、都市部に通勤や通学で移動する人の割合が高い。例えば、都心部は周辺部に比較して大気汚染の程度が強いことが多いので、移動を考慮するかしないかでは曝露が異なるだろう。Dhondt ら（2011）は、ベルギーでの大気汚染への曝露について曝露推定を行った（図 7）。窒素酸化物とオゾンについてみると、移動を考慮するか否かによって、地域によっては 15%程度の曝露の差が出てきたことを報告している。

② 研究開発の現状と課題:

＊人間の行動データを活用する

ーベルギー:大気汚染物質への曝露　Dhondt et al. (2011)
通勤・通学などに伴う移動を考慮すると，どれだけ曝露が増えるか？

ーバングラデシュ:温熱への曝露　（Yasumoto et al. 投稿中）
都心の地理的なヒートアイランド→
曝露された人々の分布に基づく“ヒートアイランド”

ーケニア:マラリアの伝播　Wesolowski et al.（2012）

ーラオス:〔行動の結果としての〕土地利用と疾病
（Tojo et al, 執筆中）

図 6. 人間の行動データを活用した研究の例

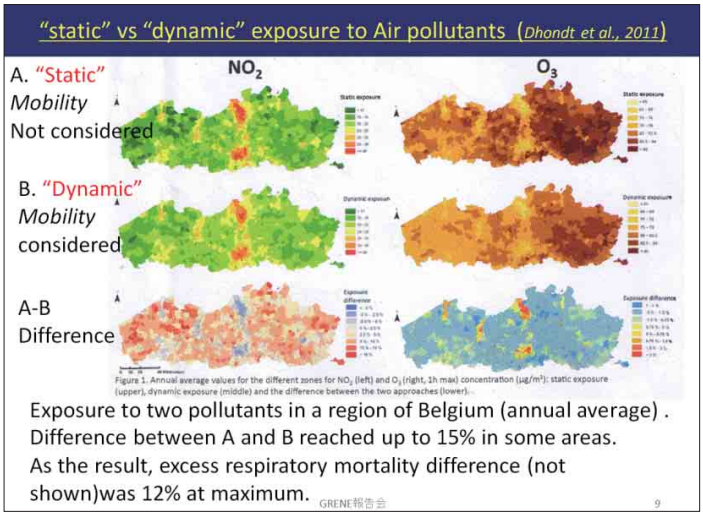


図 7. 移動を考慮した場合としなかった場合の大気汚染曝露の差（Dhondt et al., 2011）

衛星画像情報の一つの強みは地上観測網が未整備な途上国についても、多くの情報を得ることができる点にある。我々は、GRENE Network of Excellence（GRENE）で支援された研究の中で、バングラデシュにおける暑熱曝露について、上記の大気汚染と同様の研究を行った(Yasumoto et al., 投稿中)。図 8 左上はバングラデシュの首都ダッカの住民の 1 日の移動パターンを、東大の空間情報科学センターが person trip 調査から再構築したもの（実際は動画）で、周辺部から多くの人が通勤や通学で都心部にやってくることがわかる。図 8 左下は衛星画像でみるヒートアイランドの位置で、人の集まる都心部にヒートアイランドが存在している。周辺部に住んでいる人は通勤・通学で都心部に移動することによってヒートアイランドの影響を受け、居住地の気温がそれほど上がらなくても実際の暑熱曝露レベルは高い。地理的空間基づくヒートアイランドを、人間の曝露という観点で捉え直すと、ヒートアイランドは周辺部にも広がりを持ち、それだけ潜在的な影響は大きいことがわかる。次の課題として、ダッカは大気汚染も深刻であるので、それが周辺住民も含んでどの程度のインパクトを持つのか検証する。上述の移動データには person trip 調査（約 2 万人のデータ）を基礎にしているが、移動データに携帯電話の通話位置記録（数十万人規模で最大数ヶ月のデータ）を用いる予定で、これによっ

て推定の精度を上げることが可能になると期待している（後述）。

土地利用の分布は、過去の人間活動の累積とみなすこともでき、その意味で土地利用データも広い意味で人間行動のデータと言える。図 9 はラオスにおける土地利用とマラリアの発症に関する研究の例で、これも GRENE の取り組みの中で行った、衛星画像による環境データと健康データを組みわせて、新たな情報を得ようという試みの一つである（Tojo et al., 投稿中）。この解析では、ラオスの一地方における森林分布とマラリア発症数の空間分布との関係を検討した。これまでにも類似の解析はあるが、この研究では、森林をその活用度との関係で累計に分けていること、また、森林分布だけでなく人の居住の分布も考慮にいれている点がユニークであり、これらを考慮することで土地利用の特徴とマラリア発症との間に相関関係を見出している。このように人間活動を考慮した土地の分類（この例では森林＋人口）を行ったものは、Biome にかわる Anthrome（ヒトが手をいれた Biome という意味）として 2008 年にアメリカの研究者によって提唱された概念で、論文も数多く引用されているが、健康分野への適用はまだ例が少ない。

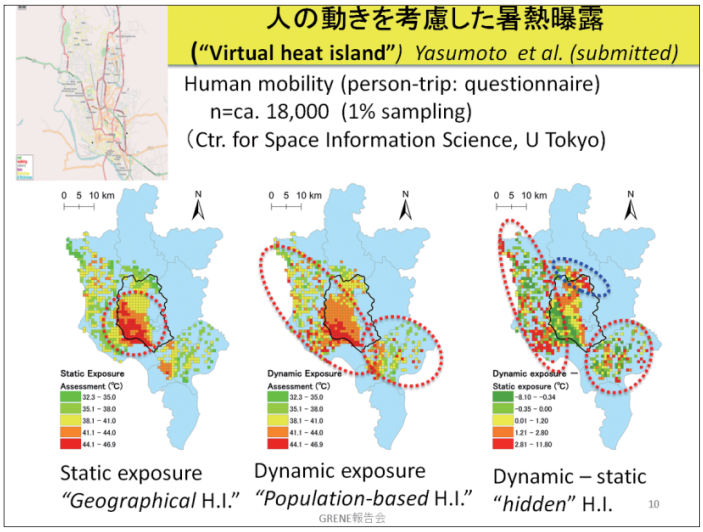


図 8. 移動を考慮した場合としなかった場合の暑熱曝露の差（Yasumoto et al., 投稿中）

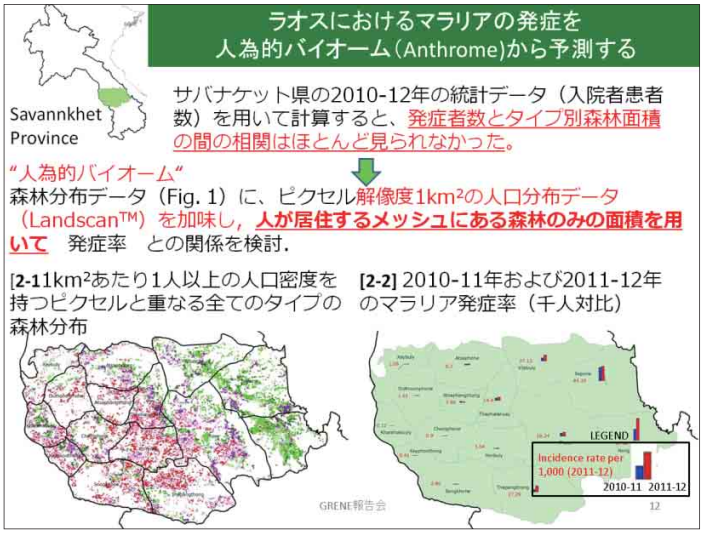


図 9. 人為的バイオーム（anthrome）とマラリア患者の分布（Tojo et al., 投稿中）

東京大学の空間情報科学センターでは、携帯電話の通話位置情報を使った研究を実施している。携帯電話で人々が発信した際（発信しなくてもGPS情報からの特定も可能であるが）、その人の地理的な存在位置がわかる。この情報自体も人々の移動パターンを把握したものであるので、既述した通り、暑熱や大気汚染情報と組み合わせて有用な知見を生み出せるが、同センターではさらに進めて、通話位置情報から、携帯電話を持たない人を含む全ての住民の移動パターンを推測することを試みている。途上国ではセンサスさえも十分でないところが結構あり、人々がどこにいるのかを推定できるだけでも非常に意味がある。人がどこにいるのかという情報を健康情報と統合することによって、将来計画にも活用できる新たな知見を生み出す可能性は高いだろう。このような研究を進める上での大きな問題にはプライバシーの問題があるが、研究がもたらすベネフィットとのバランスが重要であり、ケース毎に検討が必要である。

最後に、環境–健康領域研究の将来の方向性について、環境要因への曝露とその健康影響という基本的図式に沿って考え、曝露・影響のそれぞれについての課題を挙げておきたい（図10）。

環境要因への曝露に関しては、地域差あるいは遺伝要因などが、化学物質などの健康影響を修飾することがわかっているが、これらの影響をどのように評価に入れていくのかが課題となるだろう。最近話題になってきたものでは腸内細菌叢があり、これが毒性を修飾するという報告も出てきている。従来の実験研究ではノイズでしかなかったこれらの実験条件を、研究の直接対象となる環境要因への曝露条件とともにどう設定するかが重要になってくるだろう。「地域差」の中身は様々であろうし、「遺伝要因」について実験動物の系統比較を行った研究は古くからあるものの、ヒト集団における遺伝子多型が毒性の個人差をどの程度説明するのかといった、より一般化された、リスク評価上重要な課題に答える研究はまだ始まったばかりだ。また、後でもう一度触れるが、複合曝露や混合物曝露についてどうアプローチするかという課題は未解決である。

影響における課題としては、既に触れたように、死亡やがん、生活習慣病まで含めてもそれは健康現象のごく一部に過ぎないことを十分に認識し、これら以外のエンドポイントを用いた研究を展開する必要がある。（患者に限定されない）一般集団を対象に調査をしていると、人が死ぬとか病気になることはもちろん問題であるが、その前に個人あるいは集団レベルで、コミュニティのレジリエンスに相当するような「健康力」のようなものが測れないかと考えることがある。WHOがプッシュした「主観的健康感」は、「あなたはどのぐらい健康ですか」という非常に単純な質問によって、その後の疾病リスクの予測ができるという。個人のストレス対処ストラテジーが健康と関連するという研究もある。これらは個人レベルの指標だが、集団レベルで「健康力」をうまく捉える指標を設定できると様々に活用できるだろう。

③ 将来の方向性：

＊曝露における課題
・“ノイズ”再考
”実験条件”の重要性ー地域差・遺伝要因・腸内細菌叢
・複合曝露（混合物曝露）
ダイオキシン・有機リン農薬
→共通のエンドポイント （*HELIX*のアプローチ）

＊影響における課題
- 死亡・がん以外のエンドポイント（e.g., 疾病負荷研究）
予測力のあるバイオマーカー
- 「健康力」（個人レベル・集団レベル）の表現
(疾病　はあくまで 結果)
ー“主観的健康感”, ストレス対処能力　etc.

図 10. 環境ー健康領域における研究の将来的課題

図 11 左は Nature に今年掲載された記事である。動物実験における動物の飼育環境や餌の種類の問題は新しいものではなく、実際に研究の結果を大きく左右する場合がある。図 11 右はマウスにひ素を投与すると、腸内細菌叢を撹乱し、腸内細菌による代謝にも影響が検出されたというものである。それがマウスの健康にどう結びつくかについてはこの論文では定かではないが、（環境要因としての）腸内細菌の存在も今後無視できなくなってくるのは確かだろう。

図 11. 実験的研究の「条件」は本質的な問題を抱えている
（左 Nature，右 Environmental Health Perspectives の記事）

図 12,13 は、ヨーロッパにおける HELIX（Human Early-Life Exposome）というエコチル調査と同様の大規模な調査である。Exposome とは、環境中に存在する様々な物質全てへの曝露を網羅的に評価していこうという考え方である。全ての包括的な曝露を可能な限り把握するとともに、それに対しどのようなレスポンスが起こっているのかを評価する。興味深いところは、-omics や -ome などの生体側の反応、すなわち遺伝子発現やタンパク質の発現、メタボローム など膨大なデータから、どんな物質への曝露があったのかを逆に推測しようと考えている点で、ちょうど気象モデルにおける逆問題を解くイメージである。実現可能性は未知で、Exposome と健康アウトカムの関連を特定できるような新しい統計手法が必要だとしているが、それがどのようなものかまでは触れられていない。

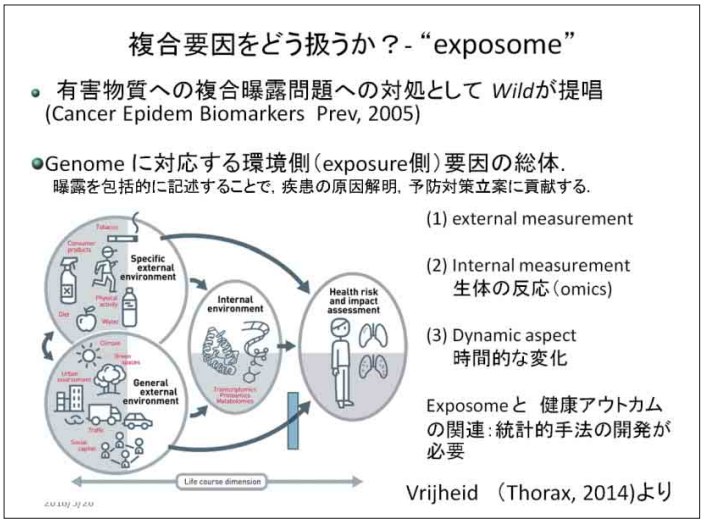


図 12. 曝露側の –omics: “exposome” という考え方（Vrijheid, Thorax, 2014）

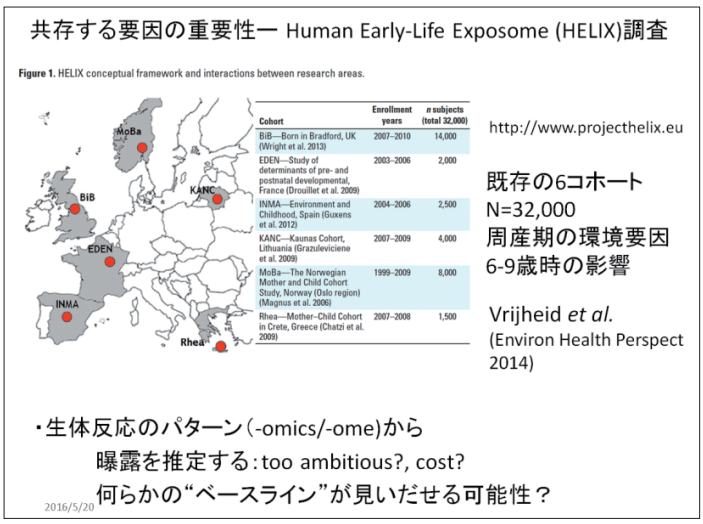


図 13. Exposome を取り入れた HELIX 調査
（Vrijheid ら , Environ Health Perspect 2014）

現在は、地質時代区分ではおよそ 1 万年続いている holocene（完新世）であるが、最近になって人が環境をコントロールする Anthropocene（人新世）に移りつつあるという議論がある。時代区分がどう決着がつくかは別として、そのような時代であることを踏まえて環境と健康の関係を研究していく必要がある。つまり、ここまで述べてきたように複合曝露の問題や、どんなアウトカムを使うかという問題に加えて、どのようなスケールで考えるのかも重要である。化学汚染を考える場合、今後は汚染の起こっている局所（locality）だけでなく、地球全体も視野にいれなければならない。Planetary boundaries は、人間活動の結果として生ずる重大な環境変化（気候変動など全部で 9 領域）について、その許容範囲を推定したものである（Rockstrom et al., Nature, 2009）。化学物質による環境汚染・大気汚染はそれぞれ 1 領域として挙げられていて、その許容範囲を推定しようという研究も始まっている。環境に人間が与えるインパクトは非常に大きくなっている。そのインパクトと、環境から人間へのインパクトとの両方を扱えるようなモデルを今後は考えていかなければならないだろう。

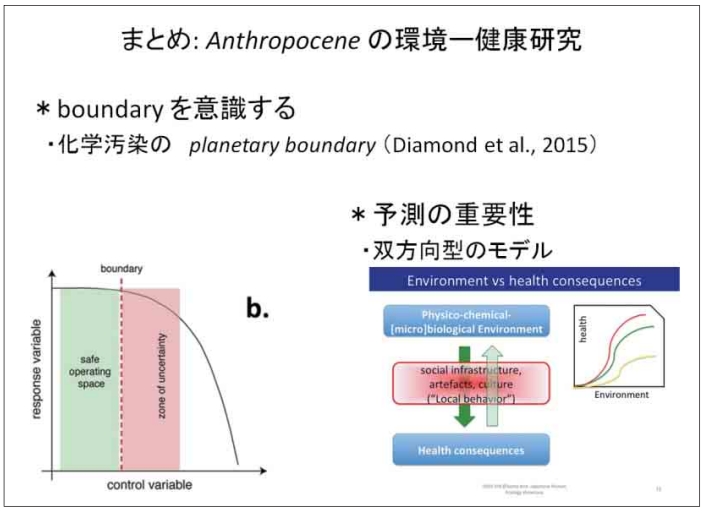


図 14. Anthropocene における環境ー健康研究とは？

［質疑応答］

※ Q は質問、A は回答、C はコメント。

同日に講演された横浜市立大学の井口客員教授、国立環境研究所の柴田フェローのご発言も記す。（敬称略）

Q：医療関係で取り組まれている薬物などの情報で、環境分野に非常に有用なものはあるか。

A（渡辺）：薬物と毒に関しては直接的にはそれほどリンクしないと思う。全体的に薬はメカニズムが比較的はっきりしている。薬関係の情報自体は毒性学に非常に役立つが、量的な話になると随分異なると思う。

Q：医療と環境の両方の視点を行われている研究は非常に少ないと考えてよいか。

A（渡辺）：医療と環境では少ないが、公衆衛生の観点ではやられている。しかし、公衆衛生全体の中の一部という位置付けである。

Q：この分野特有の研究開発における難しさは何か。例えば、新しい評価手法を提案しても採用されなければ使われない難しさがあると考えられるが、どのように研究開発されているのか。

A（柴田）：研究していて最も感じるのは、明確に解明された部分が少ないことである。急性の

公害問題の時代に比べ、現在は、長期間の蓄積曝露、あるいは複数の化学物質の低量曝露によって何か影響があるかもしれないという課題に移っている。動物実験でも明確にすることは難しく、ましてや人間でもはっきりさせることができないが、人が死ぬまで待つわけにはいかない。どのような対応をすればいいかをこの分野に関わってきた方々皆が迷いつつ、自分なりの研究経過を踏まえ、ここまでは言えるだろうと考えながら発言していると思う。

自分たちが提案するものが一般的な方法、標準法として採用されることは、この分野では1つの大きな重要な意義になる。日本だけがある方法を用い他の国は用いていない場合、日本が出すデータをなかなか信用してもらえない側面がある。よって、できる限り、OECDを含め様々な国際的な場や学会に出向き、もちろん論文などを出し、国際的な連携を絶えず保ち、国による違いも考慮しながら仕事をしていくことになると思う。

実態の把握はやはり一番大事なことである。推測だけでものを言ってはならず、ある程度きちんとした根拠に基づいて議論することが大切である。

そして、複雑な状況下で、単に物質の元データだけがあっても、人間にとってリスクかどうか判断できない。また、1つの物質だけのデータでは全体のリスク評価はできないため、どのように全体像を把握し、基礎を組み立てながら議論を進めていくかが非常に重要である。

Q：大気汚染、環境ホルモン、洗剤なども含め、受け入れ不可能なリスクに関し議論は行われているのか。その基準は国によって、また国の経済状態によっても変わってくると思う。

A（井口）：例えば、現在問題になっている物質が原因で1万人のうちの1人が死んだということすら言えない状況であるため、そこまで突き詰めた議論をやりようがない。現在ようやく出来るようになったこととして、実験動物で、ある量では影響がないがある量を超えると影響が出るのでそこをどうにか守ろうという程度である。それは環境濃度との乖離で見るため、乖離が例えば1万倍もあれば見なくてもいいだろうと捉えている。

Q：生死は極端な例だが、それ以外の考え方はあるか。

A（渡辺）：多くの物質には閾値がある。その閾値を求めるのが重要であり、閾値と現状を比べる。しかし、ものによってはその閾値がない。

Q：リニアモデルで考えるなどはあるか。

A（渡辺）：リニアモデルの原理でいくと、ゼロにしなければならないが、現実的にはどこか目安が必要である。受け入れられるかどうかの議論は、研究者の範疇を超えているといわれている。しかし、デフォルト的には10-5（10万人に1人）が1つの目安と考えられている。これは社会が決めることと考えられていると思う。

Q：研究レベルではどこまでを行うのか。

A（渡辺）：1つは、生死に関して経済換算してしまう。この程度の対処にはコストがこれぐらい、一方で人が死ぬということはこのくらいの経済価値で，という計算をしている人もいる。そのような観点にたった研究報告はかなり出ている。

Q：国の経済状態なども関わってくると思うが。

A（井口）：例えば、フランスではポリカーボネート材料を食べ物に触れる容器に使ってはいけないと法律で決めてしまった。缶詰の内側にビスフェノールAをコーティングし重合させたものはフランスではもう売ってはいけない。しかし、代替で使ったものの方が危ないかもしれない。その根拠を聞いても、決めた人たちもよくわかっていない。問題になっているから止めたという、極端な国ではそのようなところもある。

A（柴田）：規制も国によって異なる。ダイオキシンの規制を決める際、実験や毒性試験の結果を基にするが、国によって計算法が異なると少しずつ数字がずれ、どれを使うべきかとい

う議論が随分あったと思う。また、現在話題になっているものとして、例えばフッ素系の界面活性剤であるPFOSと呼ばれる物質がある。これは早々とストックホルム条約に載ったが、条約上では使用が必要であるため用途を限定して残すという形になっており、現在も使用が続いている。規制を設けている国もあり、米国は非常に早い段階で飲料水の暫定的な基準をつくり、200ppt程度という濃度レベルとした。しかし、ヨーロッパが最近つくった環境基準は0.65pptという非常に低いレベルである。実は測定するのも大変な数字が急に出てきてしまっている。周囲は非常に驚いた。計算過程で特別なことをしているというよりは、安全側からみてこのぐらいの数字になったという程度の計算である。現在のヨーロッパは懸念されるような情報があった場合に、懸念されるレベルがどの程度でどんなリスクがあるのかという基礎研究を積み上げて何かを決めるより、そんなことする暇があるなら、懸念が消えるように代替を促した方がよいという意識が環境関係の動きにあるような印象を持っている。ストックホルム条約なども、ヨーロッパ側が次から次へと物質を挙げてきている状態になっている。ただし、OECDなどの議論を聞くと、必ずしもそうでもないような感じでもある。

C（井口）：ハザードだけでなくリスクのデータが必要だということをヨーロッパ側でも言い出したが、基本的には懸念される情報があれば、危ないから止めて、安全と決まればまた戻せばいいという考え方が中心のようである。動物実験をして基準を決めて動物愛護と闘うより、そちらの方が楽であることもあると思う。動物実験廃止の流れが強まってきている。

Q：環境汚染・健康区分の研究開発領域の設定について、化学物質リスク管理における分析とリスク評価の位置付けは。

A（井口）：スクリーニングからリスク評価という一連の流れは、例えばOECDではコンセプチャーフレームワークというものを作っている。5段階に分かれており、第1段階は文献調査あるいは各国がモニタリングしたデータを拾い上げる。第2段階がin vitro試験である。試験管の中に細胞を入れ曝露すると何か起こるかという単純な試験である。第3段階では、少し動物実験を行う。例えば魚にある物質を曝露し、女性ホルモン作用があればオスが通常作らない卵黄タンパクを作るかどうかなどの、1つのpathwayをみる。第4段階は、3週間程度ある物質を成体に曝露し、産卵数がどう変化するかをみる。そこで影響があれば、その物質にある特定の影響があるかどうかを見るためにかなり高い濃度を使う。そして、最終的に確定試験を行う。確定試験は環境濃度と、影響があるだろうと思われる濃度までの段階的な濃度で長い試験を行う。そこから影響濃度と無影響濃度が出るため、無影響濃度を使いながら100分の1程度に基準を設定して使う。

新たな開発として必要なことに、トランスジェニックなどがある。遺伝子改変して特定の受容体が働かないときにどうなるか、あるいはある物質が入ってくると光るような実験である。それをカエルや魚で作製しており、餌を食べるまでの動物とみなさない期間に評価できればヨーロッパでも使える。3、4日で勝負できるようなものがあれば、長い試験をする前にどんな作用があるかを見るためにこれを使えばよい。それがうまくいったら、OECDに公定法として認めてもらう。実現すれば日本発の世界が使える試験方法、スクリーニング試験になる。それを分析側とうまく組み合わせることもできる。

C（渡辺）：この分野での新しい手法といった場合、必ずしも新しいものとして提案するわけではないが、新しい考え方やアプローチに関する技術開発が非常に重要である。すなわち、物質側からのアプローチと、影響側からのアプローチの両方がありうる。例えば、環境データあるいは健康データの膨大な情報から何かを見つけるアルゴリズムの開発は非常に大き

な研究になると思う。

C（井口）：医薬品開発では、ターゲットの分子にくっつく薬剤を注入する。それをうまく環境に応用すれば、この物質が環境中に出ているということがいえる。今あるものをうまく利用して環境影響を見るということできる。医薬品開発をしている方は、環境に目を向けることはないので、意外とつながりは悪いと思う。

Q：連携すれば何かブレークスルーがあるかもしれないか。

A（井口）：1つは、膜表面に出てくるリセプターにくっつく薬として開発されているものを環境に応用にすると、下水処理水からこのリセプターにくっつくものが出ている。それは薬として使っているから当然だが、そのようなものが検出されるとは誰も知らなかった。患者さんには必要で環境には出てほしくないものがあれば見ていく必要がある。それらがめぐりめぐって水道水に戻ってくるかもしれない。

5. 生物多様性・生態系区分

5.1 環境分野の生物多様性研究　現状と課題

矢原 徹一（九州大学　大学院理学研究院　教授）

生物多様性研究のうち、特に種多様性や遺伝子レベルでは、ここ 5、6 年で非常に大きな展開があると思う。

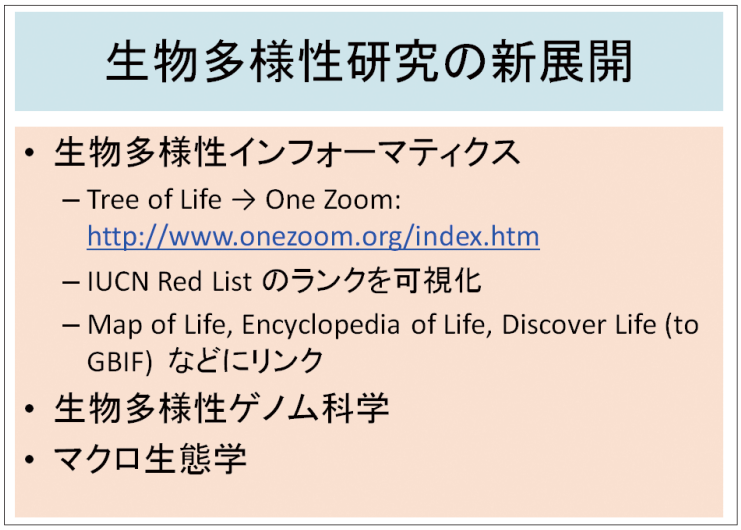


図 1

一つはビックデータ化であり、インフォーマティクスと結びつきが非常に強くなってきている。それを象徴するインタフェースとして、One Zoom を紹介したい。これは Tree of Life という全生命の系統樹を DNA に基づいて調べるというプロジェクトの成果をベースにしている。全生命の系統樹上で知りたい生物群（たとえば哺乳類）をクリックすると、哺乳類の系統樹がズームアップされる。さらに霊長目をクリックすると、霊長目の系統樹がズームアップされる。こうして、系統樹をたどり末端の種（たとえばゴリラ）まで進んでいくことができる。末端の種までいくと、全生物種の情報のデータベース化を目指す Encyclopedia of Life のページへのリンクが設定されている。たとえば One Zoom でゴリラをクリックして Encyclopedia of Life のページに行くと、ゴリラの各集団の個体数や平均体重などの生態学的情報が得られる。また、GBIF とリンクして分布情報を見せる Discover Life というサイトへのリンクがあり、ゴリラの分布図を見ることができる。DNA データベースとのリンクもあり、配列情報が得られる。IUCN レッドリストのページへのリンクを使えば、保全上の情報が得られる。また Wikipedia へのリンクもある。

このようにして、様々な努力で作られてきたデータベースを全てつなぎ、マッシュアップするだけでなく、非常にわかりやすいアトラクティブなインタフェースに作り込む動きが進展しており、我々が日本から GBIF に提供するデータもこれらの中に入っていくという状況にある。

Map of Life はウォルター・ジェッツがイエール大学で作成しているものである。彼は非常に優秀な統計の能力を持っており、DNA の系統樹情報と生物の分布情報を統合した解析的な先

端研究をしているが、一方でプログラマを雇いこのようなウェブサイトを作成している。クロツラヘラサギという九大近くの干潟にやってくる絶滅危惧種の鳥がいるが、Map of Life のページに行けば、系統樹に基づく進化的なユニークさや、エッジスコアという絶滅リスクのスコア、分布面積などの情報が得られるようになっている。

日本では樋口広芳先生が鳥の衛星追跡の研究をされているが、そのようなデータを使った新大陸の鳥の渡りを可視化したサイトがある。18 種類の鳥はかなり同調して北へ上っていき、寒くなると帰ってくる様子などを上手に可視化しているサイトである。現在衛星でかなり多くの鳥が追跡されているので、随時このような動きを見ることができる。

トラッキング技術も進展している。かつてはかなり大きな鳥しか機器を装着できなかったが、様々なロガーが開発されており、かなり小型の鳥も追跡できるようになってきた。そのような衛星データを使い個体群動態を追跡する計器もある。追跡データをもとに、生態系サービスを評価するような研究も進んでいる。ゴリラでは社会行動の追跡にも使われている。温度ロガーを付けて、動物の生理生態が野外でどのように変化しているかという研究もされており、動物のトラッキングデータを使った研究は今後急速に進むと思う。

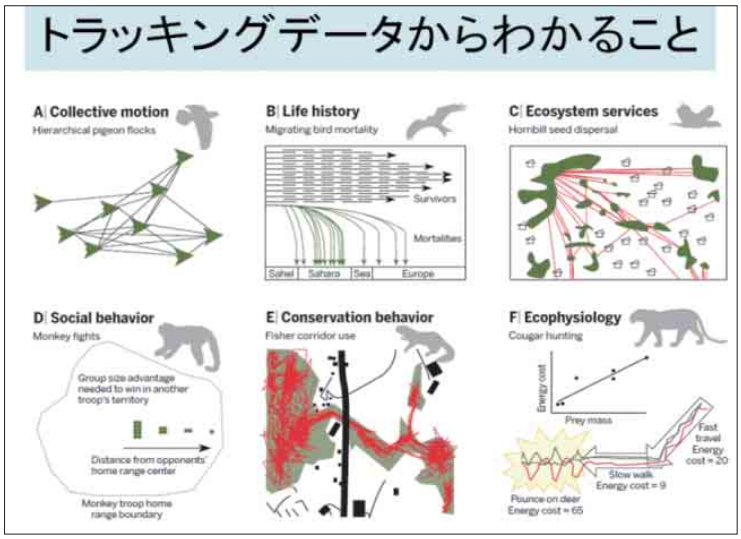


図２

環境研究総合推進費 S9 で私自身が関わってきたことを少し紹介させていただく。欧米でよく行われるアプローチだが、ハーバリウム（植物標本）にあるラベル情報から分布モデルを作り、東南アジアの樹木の種多様性がどの地域で高いかを推定してみると、マレーシアのサラワク州辺りが非常に高いという結果になる（図 3）。しかし、標本点数の地図（図 3 右）を見ると、インドシナ半島などは非常に少ない。

そのため、５年間かけて同じ方法で多様性評価を進めてみると、確かにサラワク州は高いが、スマトラの多様性とボルネオの多様性はほぼ変わらない。要するに標本点数が少ないから過小評価されていただけである。また、ベトナム南部なども非常に多様性が高い地域があり、少し標高が高いところで 341 種あるため、標高を考えるとボルネオやスマトラの低地と多様性は変わらない（図 4）。

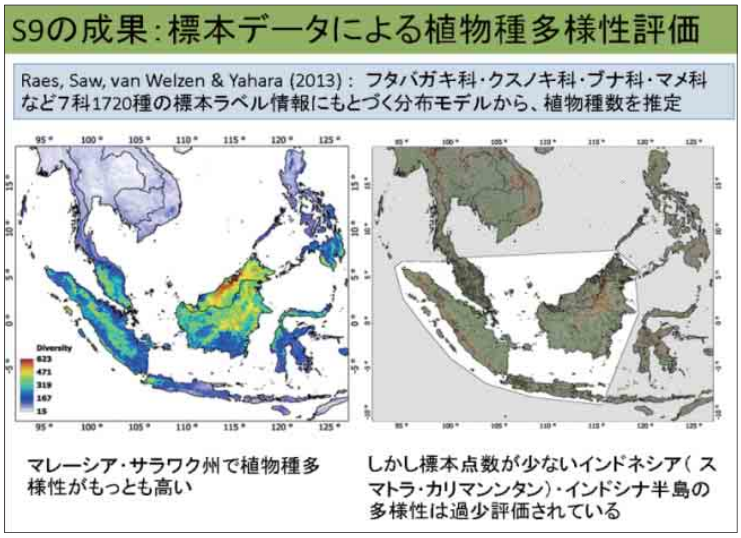


図３

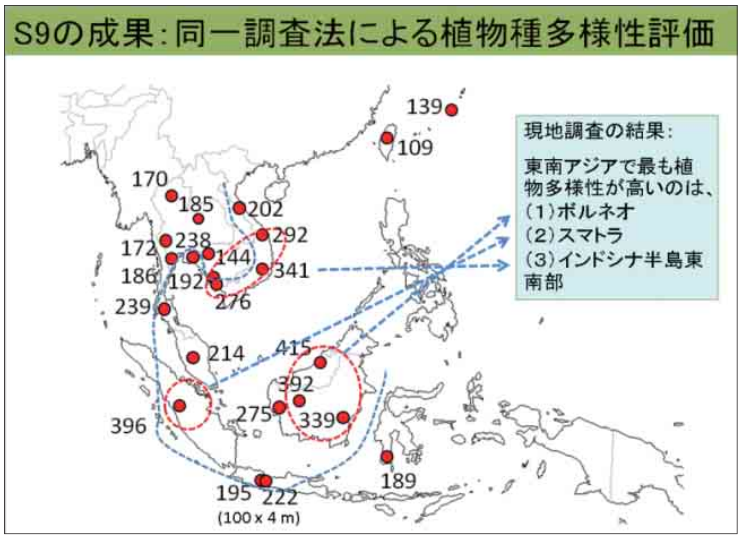


図４

この 5 年間で 2 万 3,000 点を超える標本を集め、全てについて画像のデータベースも作り、DNA の配列決定も進めている（図 5）。このようなアプローチを体系的に実施しているところはあまりなく、昨年、Barcode of Life の国際シンポジウムで基調講演を行った。今年の 8 月にはチューリヒで行われる国際会議に招待講演で呼ばれている。アジアにおけるこのような研究は国際的にもかなり高い水準にある。

また、新種が山のようにある。今までは花や実を確認しなければならなかったが、現在は DNA を使って芽生えの状態でも新種とわかるようになってきており、クスノキの仲間で少なくとも 100 種、おそらく 300 種程度新種があることがわかってきている（図 6）。図 7 はクスノキ科シロダモ属の新種の割合だが、現時点で 57%が新種という状態である。ボルネオやスマトラは調査が遅れており、そこが一番種の多様性が高い地域であるため、そこを加えると種の数がおそらく 3 倍程度になるという状況である。

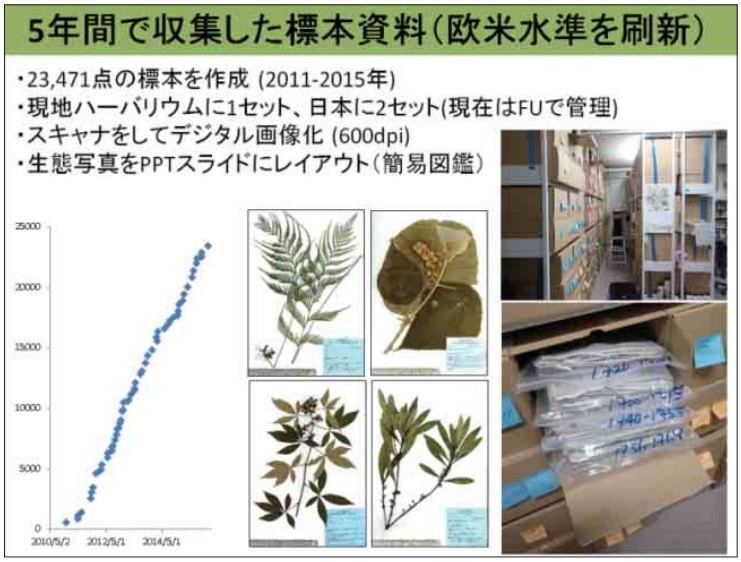

5年間で収集した標本資料（欧米水準を刷新）
・23,471点の標本を作成 (2011-2015年)
・現地ハーバリウムに1セット、日本に2セット(現在はFUで管理)
・スキャナをしてデジタル画像化 (600dpi)
・生態写真をPPTスライドにレイアウト（簡易図鑑）
25000
20000
15000
10000
5000
0
2010/5/2
2012/5/1
2014/5/1

図５

方法：DNA配列＋分類学的研究→新種判定
例：タブノキ属の場合
全既知種のチェックリスト作成
Plant List
タイプ標本（K, P, L, BO etc）との比較
分類学的文献の記載チェック
新種判定：形態＋DNA
記載論文発表

図６

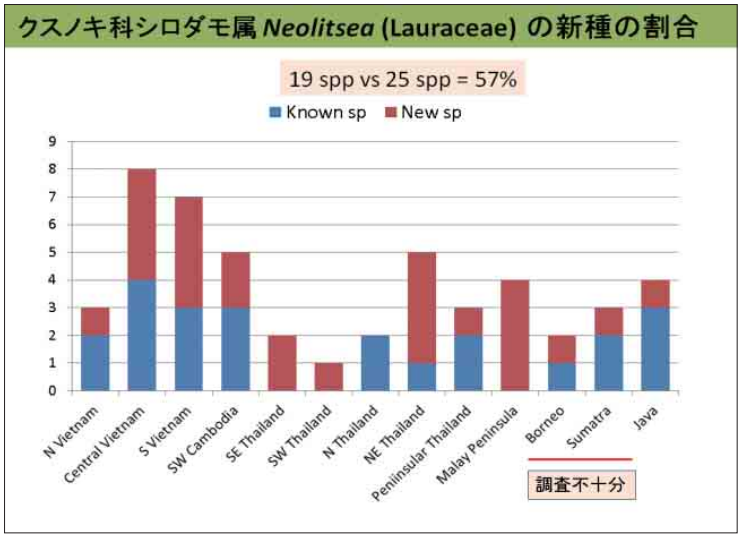

クスノキ科シロダモ属 Neolitsea (Lauraceae) の新種の割合
19 spp vs 25 spp = 57%
Known sp
New sp
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
N Vietnam
Central Vietnam
S Vietnam
SW Cambodia
SE Thailand
SW Thailand
N Thailand
NE Thailand
Peninsular Thailand
Malay Peninsula
Borneo
Sumatra
Java
調査不十分

図７

ゲノム研究がどんどん進んでおり、野生生物でも少し頑張れば全ゲノムを決められる時代になった。全ゲノムを使って野生生物の研究を行い、環境評価にも役立てるという方向性になっている。図 8 は Nature に発表されたアマモの全ゲノムに関する論文である。アマモは沿岸域の生態系サービスに非常に重要である。花が咲く植物が海の中に入っていったわけだが、海の中に入っていくことでどのような遺伝子の変化が起きたかを、このゲノム情報により手にとるようにわかってきた。アマモの遺伝的多様性が高いと、その沿岸域の生態系サービスも高いというようなデータがある。ゲノム研究と関連付けた研究も進むと思う。

生物多様性ゲノム科学

A Genome Scan for Genes Underlying Microgeographic-Scale Local Adaptation in a Wild *Arabidopsis* Species

Shosei Kubota, Takaya Iwasaki, Kousuke Hanada, Atsushi J. Nagano, Asao Fujiyama, Atsushi Toyoda, Sumio Sugano, Yutaka Suzuki, Kouki Hikosaka, Motomi Ito, Shin-Ichi Morinaga

Published: July 14, 2015 • DOI: 10.1371/journal.pgen.1005361

LETTER

OPEN

doi:10.1038/nature16548

The genome of the seagrass *Zostera marina* reveals angiosperm adaptation to the sea

Jeanine L. Olsen[1*], Pierre Rouzé[2], Bram Verhelst[2], Yao-Cheng Lin[2], Till Bayer[3], Jonas Collen[4], Emanuela Dattolo[5], Emanuele De Paoli[6], Simon Dittami[4], Florian Maumus[7], Gurvan Michel[4], Anna Kersting[8,9], Chiara Lauritano[5], Rolf Lohaus[2], Mats Töpel[10], Thierry Tonon[4], Kevin Vanneste[2], Mojgan Amirebrahimi[11], Janina Brakel[3], Christoffer Bostrom[12], Mansi Chovatia[11], Jane Grimwood[11,13], Jerry W. Jenkins[11,13], Alexander Jueterbock[14], Amy Mraz[15], Wytze T. Stam[1], Hope Tice[11], Erich Bornberg-Bauer[8], Pamela J. Green[16], Gareth A. Pearson[17], Gabriele Procaccini[5*], Carlos M. Duarte[18], Jeremy Schmutz[11,13], Thorsten B. H. Reusch[3,19*] & Yves Van de Peer[2,20,21*]

図 8

図 9 は京大で実施されている研究だが、吉田神社のシラカシやヤマザクラなど、いろいろな木の根の表面の根圏微生物を採取し、ネットワークを調べたものである。植物の根と菌類が様々な共生関係を結んでおり、植物の養分吸収も助けているが、どの菌類とどの樹木がネットワークを構築しているか、次世代シークエンサーを使ってわかるようになってきている。膨大な数の微生物との相互作用について、樹木の成長や、環境の変化に、どのように関わっているかが次々にわかってくる時代になっている。

このような研究が、腸内微生物や皮膚の微生物についても進んでおり、今まで無用の長物だと思われていた盲腸（虫垂）が実は腸内フローラをコントロールする重要な器官だということがわかってくるなど、意外な発見が相次いでいる。現在日本各地でシカが増加して様々な植物を食い荒らし、次々に新しいものを食べるようになっている。有毒な植物を平気で食べるようになっていることについて、腸内細菌がどう変化しているかも調べられる時代になっている。

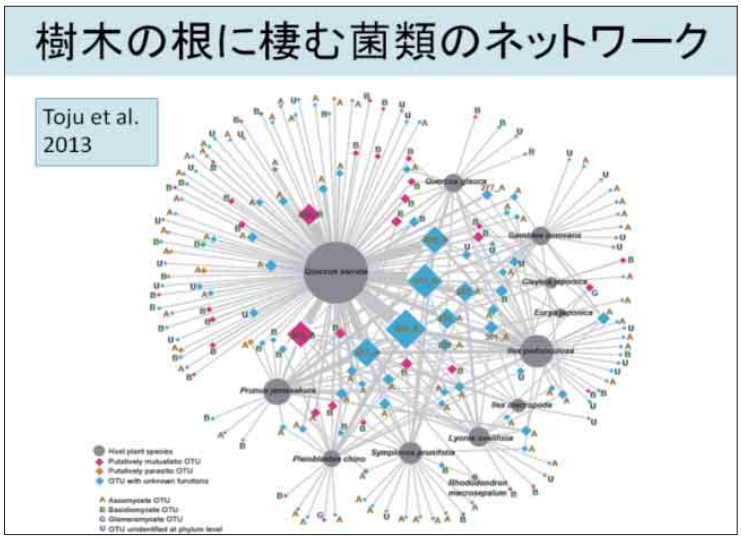


図９

環境 DNA（eDNA）といって、水から DNA を採取し魚の種類を決める研究も実施されている。エアコンのフィルターからトイレの汚れまで、あらゆるところから DNA を採取し、そこでどのような変化が起きているかを追跡できる。

私がおもしろいと思ったのは、イギリスで行われている市民参加型の研究である（図 10）。イギリスの多くの地域で市民に水をとってもらい、その水からホクオウクシイモリの DNA を採取し、生息数を推定する。一方で、市民に実際に生息数を数えてもらうと、たくさんいると報告されたところでは DNA のスコアでも高い値が推定される。このようなアプローチは先端技術を市民にフィードバックして、市民が学ぶ機会にもなる。それがまた保全の行動にもつながるという点で、今後非常に有望だと思う。日本でもタンポポ調査などを同様の形で実施しているが、タンポポのゲノムも決めようと思えば決められる時代なので、そのようなツールを使っていくのは非常に有望なアプローチだろうと思っている。

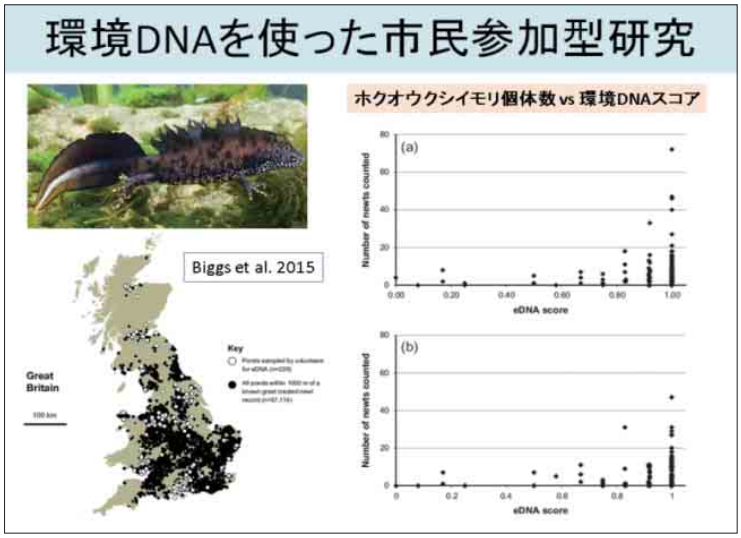


図 10

最後にマクロ生態学について。生態学は生態系全体を扱わなければならない。九州大学の保全緑地として残したエリアの中には、カスミサンショウウオもいれば、ニホンアカガエルもいるし、さまざまな鳥類もいる。保全の効果として絶滅危惧種のカスミサンショウウオやニホンアカガエルが増えてきたが、そうするとサギ類が頻繁にやってくるようになり、今度は食べられて減っていくなど、様々な生態系の変化がある。ウェブカメラやセンサーを置いて、生態系全体の変化を同時計測する調査が、世界中でかなり体系的に行われるようになってきている。九大も LAN が飛んでいるので、無線であらゆる情報をとれる環境になっている。

九大のキャンパスが造成される前、生物多様性オフセットは国際的に提唱される前だったと思うが、同様の考え方でノースピーシズロス、ノーフォレストロスという考え方で、種や森林面積を減らさずにキャンパスをつくる計画を立てた（図 11）。最初に造成されたエリアで、13km にわたり 10m ごとに種をリスト化する調査を行った。生態系の中での種の出現頻度は非常にきれいな等比級数に従うことは昔からわかっているが、1,300 地点中で最も多かった種は 950 地点程度に生息し、次に多かった種が 650 地点程度であった（図 12）。このグラフを見ると、実は 400 種のうち 200 種程度、約半分は 1,300 地点中 5 地点以下にしか出現しない。非常に絶滅しやすく、少し注意を怠ると消失しやすい。ノースピーシズロスという目標を達成するために、このような地域内希少種の分布地点を特定し、徹底した保全対策をとっている。

図 13 のように重機を使って森林を土壌ごと大規模に移植することが技術的に可能になっており、ノースピーシズロス、ノーフォレストロスのポリシーに基づき実施し、その後の効果を調べている。10 年程度経過すると、移植した森林が大きくなり、樹木が開花するようになってきている。

そのような場所の花と虫のネットワークを分析し、ネットワーク解析の手法を使ってモジュールハブやコネクター種を特定した。その結果、初夏のモジュールハブであるサンゴジュという木は 3 個体しかない。生態系の中で個体数の点では非常にマイナーな存在だが、集客力が高く、様々な昆虫を呼び寄せ、生態系ネットワークのハブになり、他の植物のポリネーション（受粉）も支えている。非常に優秀な零細企業のようなものである。そのような存在がわかってきている（図 14,15,16）。

図 11

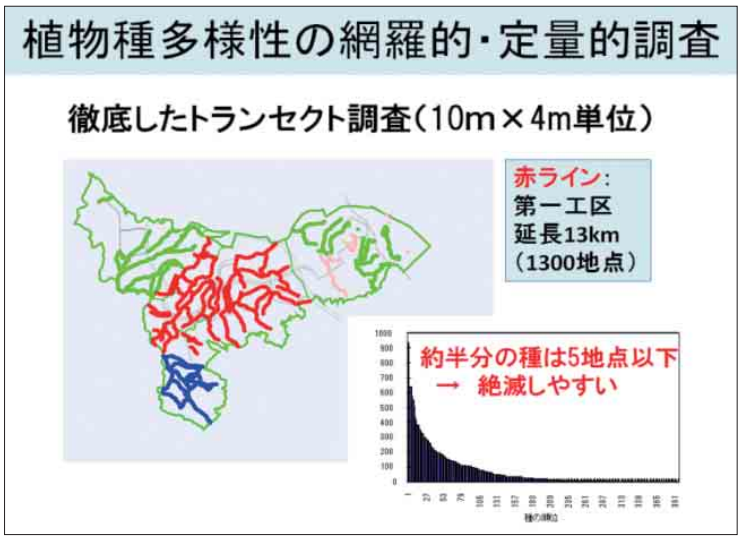

植物種多様性の網羅的・定量的調査
徹底したトランセクト調査（10m×4m単位）
赤ライン：
第一工区
延長13km
（1300地点）
約半分の種は5地点以下
→ 絶滅しやすい

図 12

専用重機による森林移植（林床移植）

図 13

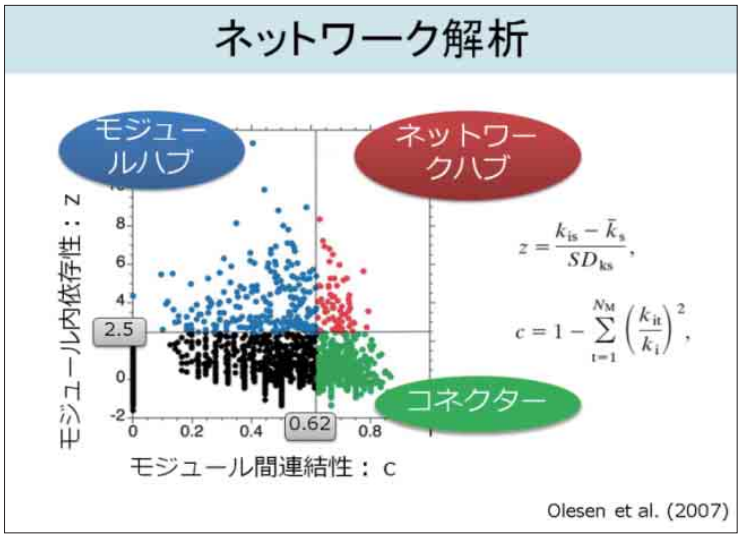

ネットワーク解析
モジュールハブ
ネットワークハブ
コネクター
モジュール内依存性：z
モジュール間連結性：c
2.5
0.62
$z = \frac{k_{is} - \bar{k}_s}{SD_{ks}}$,
$c = 1 - \sum_{t=1}^{N_M} \left(\frac{k_{it}}{k_i}\right)^2$,
Olesen et al. (2007)

図 14

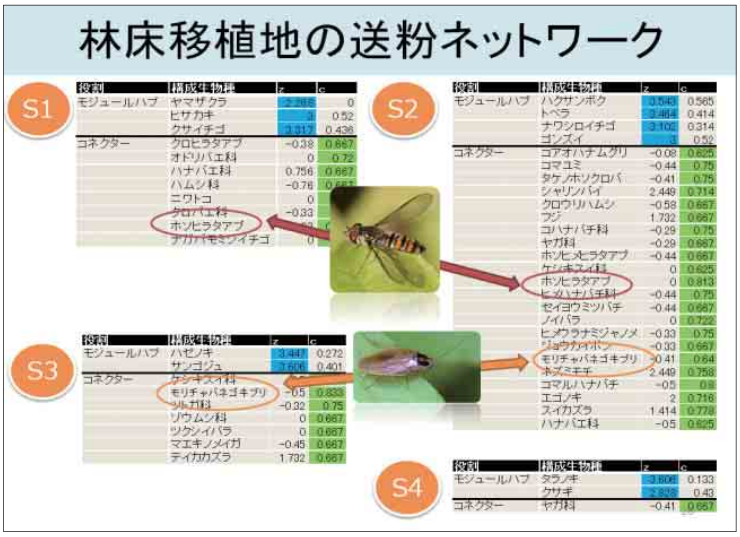


図 15

図 16

まとめると、生物多様性インフォーマティクス、生物多様性ゲノム科学、マクロ生態学のそれぞれの分野で非常に大きな革新が進んでいる（図 17）。その中で日本もそれなりの存在感を持っているが、世界の動きも非常に早いので、日本らしいプロジェクトで世界と競っていかないとあっという間に置いていかれる時代になっていると思う。

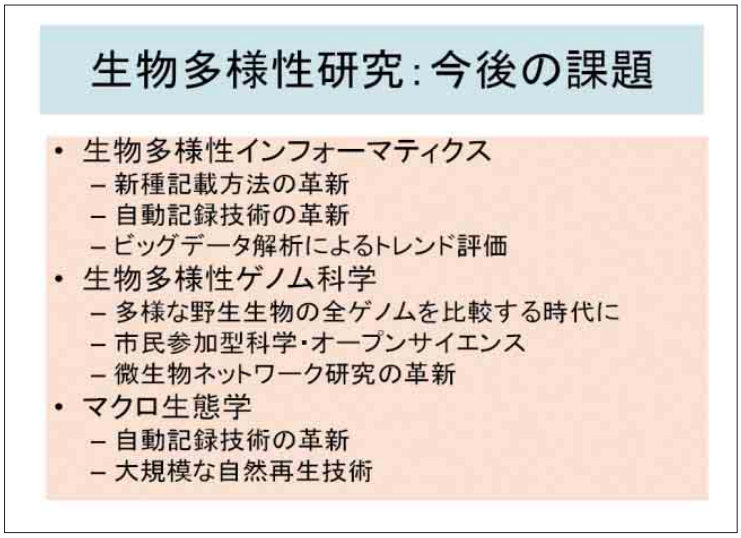


図 17

［質疑応答］

※Q は質問、A は回答、C はコメント。

同日に講演された東北大学の中静透教授のご発言も記す。（敬称略）

Q：ゲノムを使って非常に緻密に全体像がわかるようになっていく一方で、多様性の面の広がりをどう見るか。衛星を使うのが一つの方法かもしれないが、広い視点と深い視点をどうつなげていくのか。

A（矢原）：最初に紹介したような様々なデータベースが出来てきている。生物の分布情報は基本的に非常にピンポイントで得られているので、その情報を元にモデル化する。衛星あるいは様々な地図情報の精度が上れば上るほど、詳細な分布モデルが作れる。

Q：データベースなどはどこが資金を出しているのか。

A（矢原）：GBIF は日本もかなり資金を出していた。

A（中静）：今は環境省に移ったが、その前は JST が GBIF の日本の分担金を負担していた。

Q：この分野では共通化や標準化の動きはあるか。

A（矢原）：先ほど紹介したように、幾つもの特色のあるサイトができていて、それを全部つないだのが One Zoom である。

A（中静）：最近は統合化が非常に進んできている。最初は鳥は鳥だけ、菌は菌だけというような感じであった。統合化した方がお互いにメリットがある。

Q：追跡技術が非常に進んできているということだが、フィールド調査は引き続き重要であり、その労力を減らすような技術も一方で進んでいるかと思うが、そのような技術の動向はいかがか。

A（矢原）：今までは、例えばサギを見ようと思ったらサギのみ、また、1 地点しか見られなかった。しかし現在は、カメラを何十台と置いて、複数地点を一度に見ることができる。そのような点で一人の人間ができることが広がっており、マンパワーという点でも効率が良くなっている。しかし、例えば長期間観測しようと思うとカメラのレンズを時々拭きに行ったり、時々倒れたりするのをケアしに行くなど、マンパワーの部分はやはり無くせない。しかし、自動化が間違いなく進んでいる。その気になれば 100 地点、1,000 地点を見られるようになっているのはものすごい変化だと思う。

Q：陸域や水域、あるいは植物や動物など様々な領域があるが、どれが難しいか。

A（矢原）：一番難しいのは間違いなく土壌である。水は物理的にかなり単純だが、土壌は大きさが異なる粒子が混ざっており、さらに、粒子でも粘土と石英では全く性質が異なる。イオンが表面に付着する力も全く異なる。物理的に極めて複雑なので、土壌は最後のフロンティアだと思う。

Q：研究開発を俯瞰する際に、陸域や陸水、沿岸、海洋に分ける必要はあるか。境がなくなってきているような印象も受けた。コミュニティは陸域や海洋では異なる手法を使い、違う人たちがやっているのか。

A（中静）：外洋は道具だてがかなり必要である。例えば船が要るし、観測装置もかなり大がかりでお金もかかる。しかし、陸から沿岸辺りまでに関していうと、陸と海がつながっているという発想も一般的になってきたので、森から農耕地、川を通じて海までという研究は最近非常に多くなった。チームを形成して研究しているので、一人が全部やっているのではないが、一貫したコンセプトで研究するのがかなり重要になりつつある。

A（矢原）：解析手法は共通化してきている。ウミガメのトラッキングと渡り鳥のトラッキングは基本的に同じ方法で解析する。S9 でも陸の研究を行っていた研究者が、今では海のデータ解析の中心人物の一人になっている。また、植物の絶滅リスクの解析をしていた研究者が今は水の解析を担当し成果を上げている。

A（中静）：大量のデータを扱える研究者でないと研究できない時代になりつつある。昔は個人で採取できる程度のデータを処理していたが、今は世界中の人たちがとったデータを分析することが多くなってきているので、そのようなデータをどう拾ってくるか。マイニング、処理、分析ができないと難しい時代になってきた。

Q：陸域、陸水、沿岸という場所のアプローチがある一方で、動物、植物、昆虫、鳥というアプローチがある。どのようなアプローチがよいか。

A（矢原）：両方必要である。全体を見られる人が必要になってきており、そのような人が育ってきているように思う。例えば Map of Life をつくったウォルター・ジェッツも元々は鳥専門だが、統計やプログラミングが得意で、今は鳥に限らず全生物の Map of Life というプロジェクトを進めている。

A（中静）：結局どのような方向のアウトプットを目指すかによって切り口は異なると思う。例えば、絶滅危惧種の保全や特定の種の保全では、どうしても分類群に特異的な興味や問題点があるため、そこを見ざるを得ない。生物多様性を利用するという立場に立つと、その生物と関わりを持つ他の生物も研究しなくてはならならず、特定の生物群に区切ると研究が進まない。

C：お金の価値として考える方法は非常にわかりやすい。アウトプットで何を求めるかは大事な話と思う。

A（中静）：例えばある地域で生物多様性の保全も利用も考えなければならないときに、モデルで分布マップを作り、貴重な生物がいる確率を推定できるようになっているので、その結果を考慮しながら計画を進めるのは一つの方法である。保全する立場と利用する立場の両方から情報を集積し、地域計画なり利用方法を考えることがかなり現実的な世界になりつつある。

Q：それは非常に大事なことだと思う。「社会とこんな関連がある」ということを表せると、この研究の意義について世の中の理解がもっと進む。その辺りが非常に大事なのではないか。

A（中静）：生物多様性の保全は、保全そのものも重要だが、例えば珍しい生物を利用した観光

（エコツアー）もある。開発側では、従来型の事業アセスメントから戦略アセスメント型に移りつつある。戦略アセスメントの際は、事前に情報があればあるほど場所を選びやすい。例えば工場立地では、情報がたくさんある場所から最も影響が少なく、最も効率的な場所が選べる。

Q：バイオ燃料を作っていたときに、間接土地利用による CO_2 を評価しようという話が一時かなりあったが、１つの評価指標では難しいというのが正直な感想だった。何か他に新しい手法や考え方は出てきているか。

A（中静）：考え方というよりどこを基準に考えるかである。強いスタンダードがあるとそちらに流れてしまうところがあり、日本の企業もヨーロッパ中心のスタンダードに流れつつある。しかし、日本のスタンダードを作りたいと思っている方はたくさんいる。生物多様性をスタンダードに組み込む日本発の LIME（LCA の中に入っている）がある。例えばサプライチェーンの中で生物多様性に対しどの程度影響を与えたかを、支払い意思額のような形で推定する。しかし、生物多様性の評価はお金も時間もかかってしまうため、なかなかスタンダードにならないところもある。よって、生物多様性では、細かいところまで評価するより、もう少し粗いところで評価するもう少し簡単なものや、あるいはどのような努力をしているかという点でのスタンダードが最近の傾向である。REDD+ でも、途上国はすぐにでもお金が欲しいので､スタンダードが細かくできる前に二国間クレジット制度（JCM）で開始されていく。そこでは、かなり粗い基準、例えば住民の権利に対してこれぐらい配慮しているとか、このような法律があるとか、アセスメントに関して法律があるとか、そういう観点でスタンダードができる傾向があり、生物多様性や生態系に関する技術の積み上げでスタンダードになっていない部分が少しある。

Q：日本には環境省の国環研や文科省の JST などがある。先生方から見て、両者の課題や期待などはあるか。

A（中静）：基本的に基礎科学の情報は非常に大事である。生物多様性では特に大事である。日本国内ではかなり生物多様性情報が充実してきていると思うが、東南アジアでは情報が全然足りないところがあり、そのベースアップを行う必要がある。基礎から積み上げているものが無いと、アプリケーションがなかなか出来ないところが非常にある。その部分が担保されていないと、このような分野の研究はなかなか進まないと思う。SATREPS はそのような観点があり、国のレベルを少しずつアップして、新たな仕組みを導入する形でやっていると思う。

A（矢原）：JST で是非音頭をとってもらいたいのは、例えばインフォーマティクス系と生物系を橋渡しするようなイニシアティブである。大学の中も縦割りになっているので、すぐ近くに情報系の先生方がいてもなかなかつながらない。競争的資金のようなイニシアティブがあり、そこで必ず一緒にやりなさいというしくみがあると、非常に進むと思う。日本では、孤軍奮闘というところがあり、One Zoom のようなものを作るのは決定的に遅れている。ただ、能力は十分ある。うまくつながっていない気がする。

A（中静）：RISTEX は社会科学を重視しているが、RISTEX よりもう少し技術寄りの部分を充実するといいと思う。要するに社会的な要請や技術的な要請はあるが、それに対してもう少しサイエンスの部分でできるところは、JST にやってもらいたい。

Q：これまでのお話を聞くと、俯瞰区分の分け方としては、基礎の共通する技術をしっかり見る領域と、目的別の応用研究を俯瞰する領域がよいか思うがどうか。

A（矢原）：陸域、陸水、海域という整理はかなりなされていると思うので、今後はそれらをつ

なぐ統合的なアプローチをどう見たらいいのかという観点でまとめるのが必要な時代と思う。その場合、空間スケールがすごく大きな問題だと思う。ウミガメや渡り鳥、マグロは１種でも地球規模の話になる。一方で、微生物の世界は土のひとすくいの中で膨大な宇宙があるので、当分の間、地球規模でどうこうというのは難しい気はする。一方で、微生物は鳥以上に地球規模で飛び回っている。人間の移動に伴い膨大な微生物が世界中を移動しているがその実態は把握できていない。特定の病原微生物を除けば全然把握できていない。

Q：One Zoom などがスポンサーを説得できた理由を知りたい。何が大事なのかということを、お互い理解するための最も大事なキーワードは何か。

A（矢原）：欧米のナチュラルヒストリーの伝統だと思う。国際的な研究拠点であるキュー植物園やロンドン動物園を擁しており、世界の生物を自分たちが認識してきたという自負のようなものがある。世界のレッドリストの評価なども、そういうところが中心になってやっている。その歴史と自負に支えられていると思う。

Q：民間の財団による寄附も大きいか。

A（矢原）：そのようなところもお金を出している。キュー植物園やロンドン動物園は相当な資金を持っている。

Q：その辺りが日本は大分違うか。

A（矢原）：はっきり言って違う。日本は一流の後進国という感じである。

5.2　生物多様性と生態系サービスに関する最近の研究動向

中静 透（東北大学　大学院生命科学研究科　教授）

生物多様性の歴史について簡単に紹介する。80 年代までは余り動きが無く、90 年代に入り活発になった。1991 年には DIVERSITAS という国際的な生物多様性の研究枠組みが発足した。国際科学会議（ICSU）が実施しており、日本学術会議が対応している。1992 年には Ecological Foot Print の概念が提唱され、1993 年には生物多様性条約（CBD）が発効した。1997 年の Costanza の論文は、生態系サービスの経済評価を初めて世界中で行った論文である。1998 年の Resilience Alliance とは、生態系がどの程度安定しているかを検証した研究である。

2000 年代に入ると、地球規模生物多様性情報機構（GBIF）という、生物多様性に関するデータ収集と全世界的な利用を目的とする国際的なプロジェクトが開始された。前述の DIVERSITAS はセカンドフェーズに入り、人間活動に目を向け始めた。全球地球観測システム（GEOSS）も始動した。そして、大きな動きとして国連が主導した MEA 報告書（Millennium Ecosystem Assessment）という世界の生態系サービス評価がある。同じ時期に、今まで無料と思われてきた生態系サービスに対して支払うシステム（PES, Payment for Ecosystem Services）を考えようという論文が発表された。GEOSS の一環として、生物多様性を観測する GEO-BON が発足した。2010 年には Tipping Point（重大な変化が起きる転換点）の概念が提唱され、生態系サービスや生物多様性を経済評価するレポート（TEEB レポート）や、世界中の生物多様性の概況を見るレポート（GBO3）が出た。

2010 年以降はその流れが一層加速し、生物多様性条約の中で世界中の生態系や生物多様性を評価する組織（IPBES）ができた。気候変動でいう IPCC に相当する組織であり、2018 年に最初のレポートを出すということで、現在、矢原先生や私も関わっている。

社会・経済的には、これまで無料であった生態系サービスを会計システムの中に組み込もうという動きが出てくる。2012 年には、GDP ではなく、自然資本と生産資本、人的資本との 3 つでもって世界中の経済成長を図るという、Inclusive Wealth に関する最初のレポートが出る。2013 年には、ステークホルダーを巻き込んだ領域横断的な研究が必要だということで、Future Earth が活動を開始した。2015 年には持続可能な開発目標（SDGs）が掲げられた。このような流れの中で研究開発が進んでいる。

以上を大まかにまとめると、生物多様性科学は、90 年代までは生物学・生態学で、90 年代からは地球環境問題として、2010 年以降は社会学や経済学との統合の中で行われてきたというのが特徴である。

生物多様性・生態系関係の研究背景（2000年まで）

年	保全	情報	観測	生態系機能サービス	社会・経済	そのほか
1950s	代償ミティゲーション					
1960s	RDB (IUCN)					
1970s						
1980s	Hot Spot (Mayers)					
1991	日本版RDB					DIVERSITAS
1922					Ecological Foot Print	リオサミット
1993					森林認証制度（FSC）	CBD UNFCCC
1994				Tilman 論文 Ecotoron論文		
1995		Tree of Life				生物多様性国家戦略
1996						
1997	EIA（日本）				Costanza論文 MSC	京都議定書
1998				Resilience Alliance		
1999						
2000	Hot Spot (CI)					

図 1

生物多様性・生態系関係の研究背景（2001-2010年）

年	保全	情報	観測	生態系機能サービス	社会・経済	そのほか
2001		GBIF Catalogue of Life	IBOY	MEA		DIVERSITAS II
2002			GEOSS（GS提案）			
2003			モニタリングサイト1000			
2004	外来生物法（日本）	Barcode of Life			BBOP	
2005			GEOSS10年計画	MEA報告書	PES (Wunder論文)	
2006					Stern Review	
2007					REDD	IPCC AR4
2008	生物多様性基本法		GEO-BON Living Planet Index		TEEB中間レポート JBIB	
2009			JBON, APBON			
2010	JBO1			Satoyama SGA, Tipping Point	TEEB最終レポート WAVES	CBD COP10, GBO3

図 2

生物多様性・生態系関係の研究背景（2011年以降）

年	保全	情報	観測	生態系機能サービス	社会・経済	そのほか
2011	SEA（日本）			IPBES		
2012					Natural Capital Coalition Inclusive Wealth Report 2012	
2013						Future Earth
2014					Inclusive Wealth Report 2014	IPCC AR5
2015			GEOSS第2期		SDGs	日本の気候変動適応計画
2016	JBO2					
2017						
2018				IBPES Assessment Report		

図 3

図 4 は国際的な研究がどのように結びついているかを示している。MA（Millennium Ecosystem Assessment）では、生態系サービスにどのようなものがあるかを初めて整理し、最近の約 50 年における生態系サービスの変化を評価し、生物多様性や生態系サービスのシナリオ分析を行った。気候変動のシナリオ分析とやや趣が異なるが、一応こうした分析が可能になった点は重要である（図 5 ～ 8）。

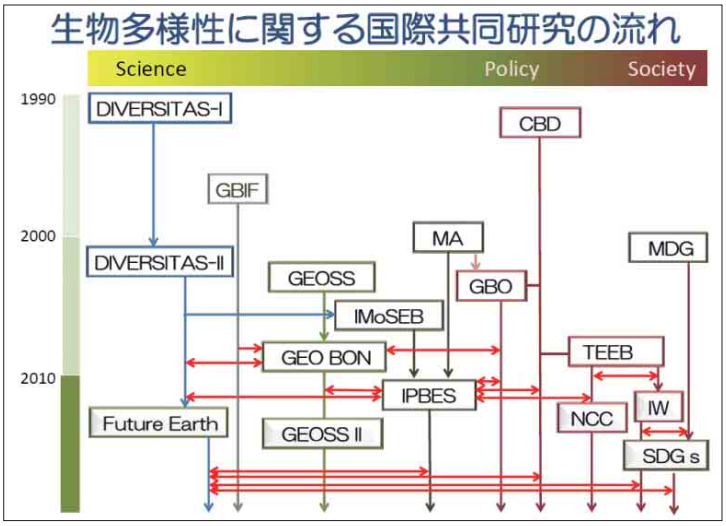


図４

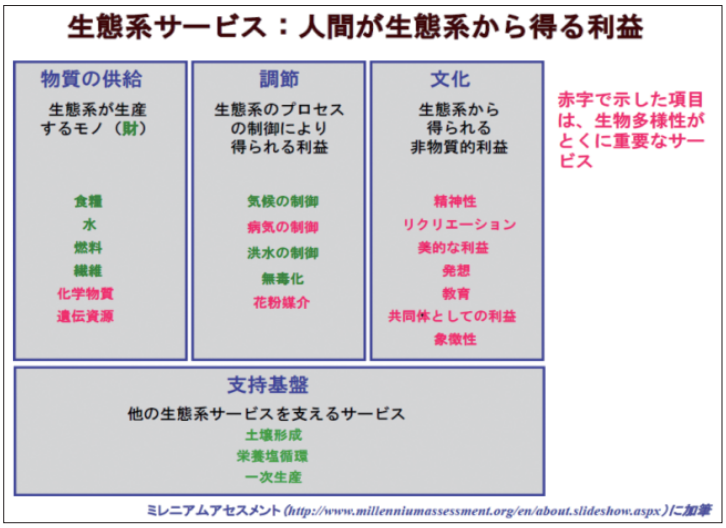
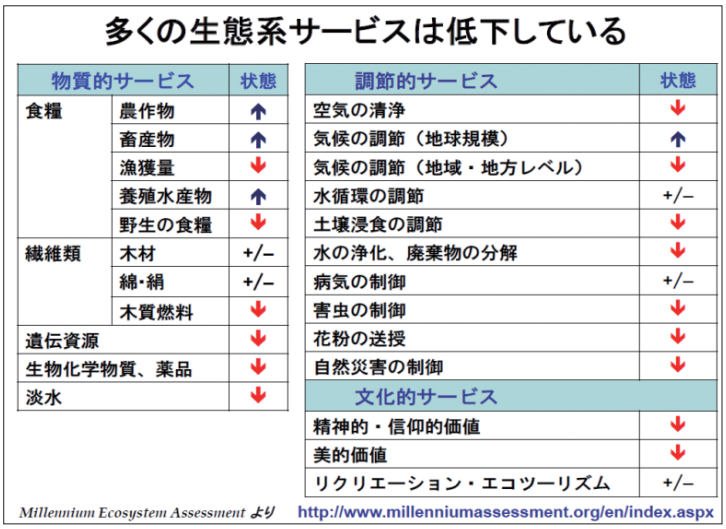


図５



多くの生態系サービスは低下している

物質的サービス		状態
食糧	農作物	↑
	畜産物	↑
	漁獲量	↓
	養殖水産物	↑
	野生の食糧	↓
繊維類	木材	+/–
	綿・絹	+/–
	木質燃料	↓
遺伝資源		↓
生物化学物質、薬品		↓
淡水		↓

調節的サービス	状態
空気の清浄	↓
気候の調節（地球規模）	↑
気候の調節（地域・地方レベル）	↓
水循環の調節	+/–
土壌浸食の調節	↓
水の浄化、廃棄物の分解	↓
病気の制御	+/–
害虫の制御	↓
花粉の送授	↓
自然災害の制御	↓
文化的サービス	
精神的・信仰的価値	↓
美的価値	↓
リクリエーション・エコツーリズム	+/–

Millennium Ecosystem Assessment より　http://www.millenniumassessment.org/en/index.aspx

図６

図７

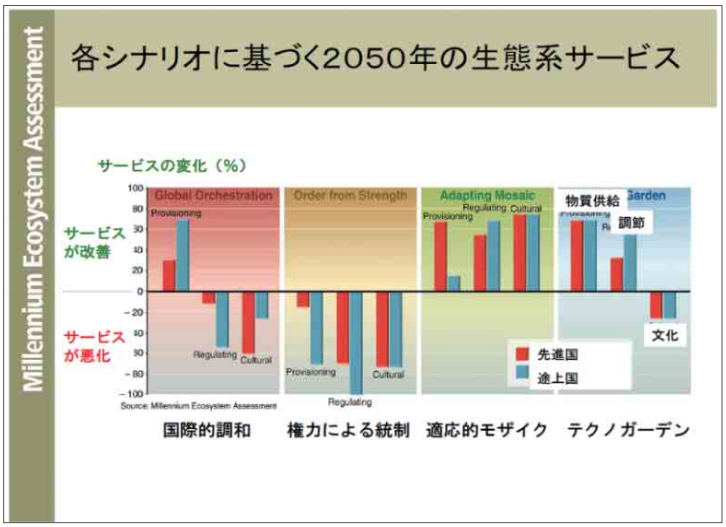


図８

経済評価について。日本の森林では年間約 70 兆円、熱帯雨林では全世界で年間約 982 兆円の価値があるというデータがある（図 9）。経済において生態系サービスはこれまで外部化されていたが、内部化していく動きが増えていった。しかし、内部化を行うには生態系サービスを定量化し経済評価をしなければならないということで、2010 年以降、世界中で様々な生態系サービスの評価が進んでいる（図 10）。図 11 はその評価のための計算方法である。コンジョイント分析など、今まで市場経済に乗ってこなかったものも評価できるような仕組みを、経済分野の方々が考えてきた。そして、沿岸生態系は熱帯雨林よりも経済的にはかなり評価が高いといった図 12 のような結果が出てきた。また、土地利用について、実は湿地は農地に変えるより、そのまま保全した方が社会的な利益が大きいという結果が出てくるようになっている（図 13）。

森林の生態系サービスの評価

◆ 大規模な生態系サービスの価値の評価事例

出所：環境省「平成22年版 図で見る環境・循環型社会・生物多様性白書」から抜粋、筆者が再編集

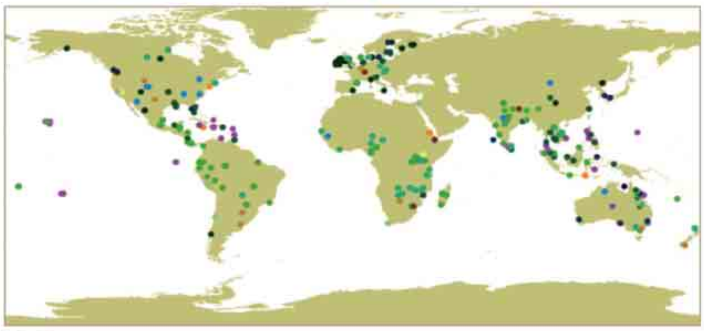
項目	生態系サービスの価値	試算者
地球全体*	年間約33兆ドル（栄養分循環が半分）	ロバート・コスタンザ氏、英科学雑誌ネイチャー、1997年
日本の森林	年間約70兆円（半分以上が防災）	日本学術会議、2001年
米国の森林（*の試算方式を適用）	年間636億ドル（気候、浄化、食料で75%）	米国原生自然保護協会、2001年
世界各地の森林の生態系サービス（熱帯雨林と温帯林で、木材、水、レクリエーション、生物多様性など機能ごとに評価）	熱帯雨林では木材（年間200～4400ドル/ha）と炭素貯蔵（360～2200ドル/ha）が大半。温帯林も同様の傾向	デビッド・ピアス氏、2001年
地中海の森林（18カ国）	年間1ha当たり約133€	クロイトル氏、2007年
熱帯雨林	年間1ha当たり約54万円、全世界で約982兆円	国際自然保護連合、2009年
森林生態系の劣化	2050年には約220兆円～500兆円の経済的損失	生態系と生物多様性の経済学（TEEB）中間報告、2008年

香坂「森林の価値はいくらか？自然資本の定量評価が進む」
日経BP環境経営フォーラム編（2012）「森で経済を作る」日経BP社

図９

生態系サービスを計算した生態系

Figure 4 Location and represented biomes of value estimates



Biomes

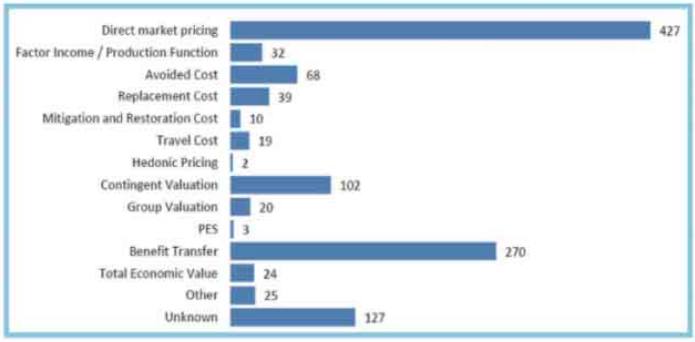
- Forests (Temperate and Boreal)
- Grasslands
- Fresh water
- Coastal
- Multiple ecosystems
- Tropical Forest
- Cultivated
- Inland wetlands
- Coral Reefs
- Urban
- Woodlands
- Desert
- Coastal wetlands
- Marine

McVittie A., Hussain S. S. (2013) The Economics of Ecosystems and Biodiversity - Valuation Database Manual

図 10

生態系サービスの計算方法

Figure 8 Numbers of value estimates by valuation method



McVittie A., Hussain S. S. (2013) The Economics of Ecosystems and Biodiversity - Valuation Database Manual

図 11

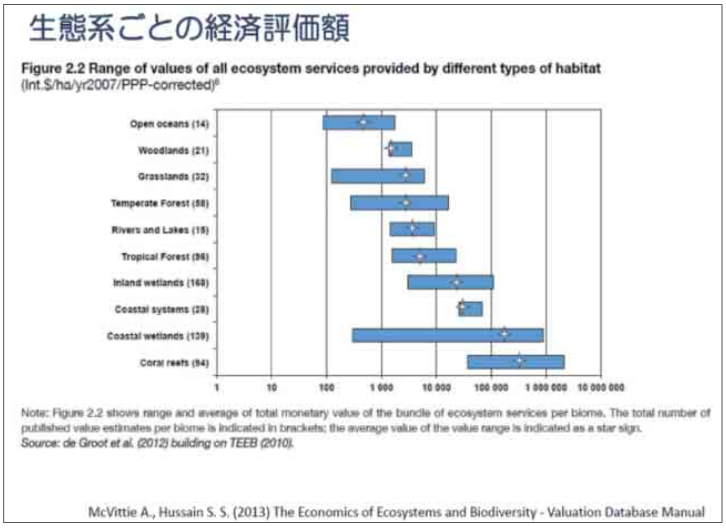


図 12

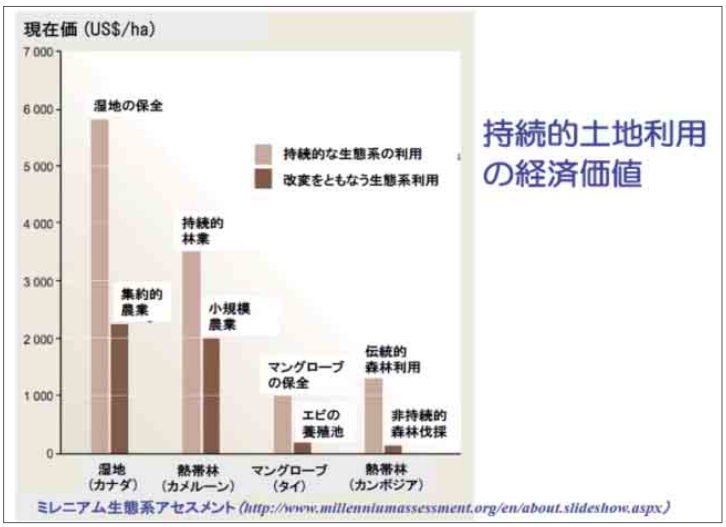


図 13

企業はこれまで生態系サービスや生物多様性をあまり考えてこなかったが、しっかり考えようという動きが出てきている。図 14 は、水と温暖化ガスをサプライチェーンのどこで一番消費しているかを見たものである。CDP（Carbon Disclosure Project）が企業にアンケートを送り、どのようなリスクを認識し、どのようなリスク対策をしているかを把握する活動をしているが、生態系サービスに対してどのような負荷をかけているかを、サプライチェーンを遡って測る内容であり、非常に大変な作業である。

生態系サービスを生む生態系を資本として考える動きが進んできている。WAVES は TEEB から派生してできた団体だが、国単位で自然資本をどれぐらい保有しているのか、あるいは上手に使えているのかをみている。

Inclusive Wealth（包括的富または新国富）の中に組み込まれている生態系サービスは、今のところ非常に単純で計算しやすいものしか入っていない。しかし、国別に Inclusive Wealth を計測すると、中国や途上国は GDP では成長しているが、実は自然資本を食いつぶしているのがわかる。とくに多くの途上国は、包括的富からいうとマイナスである（図 15）。このような

考え方をしていかないと、持続的な世界にたどり着かないだろうというのが Inclusive Wealth の考え方である。

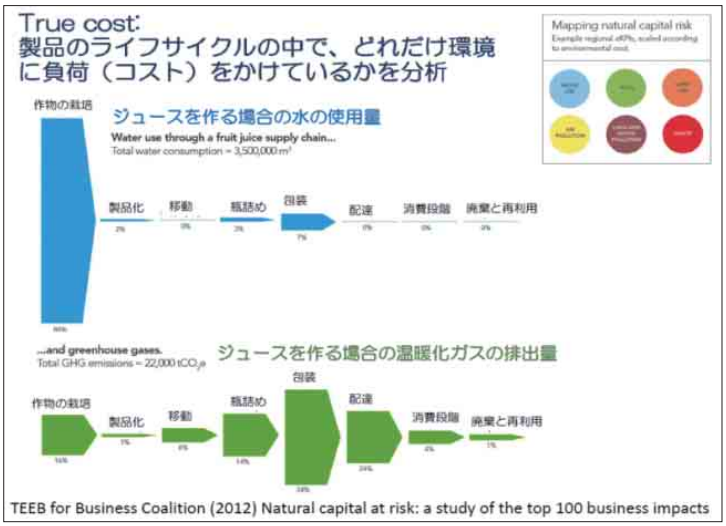


図 14

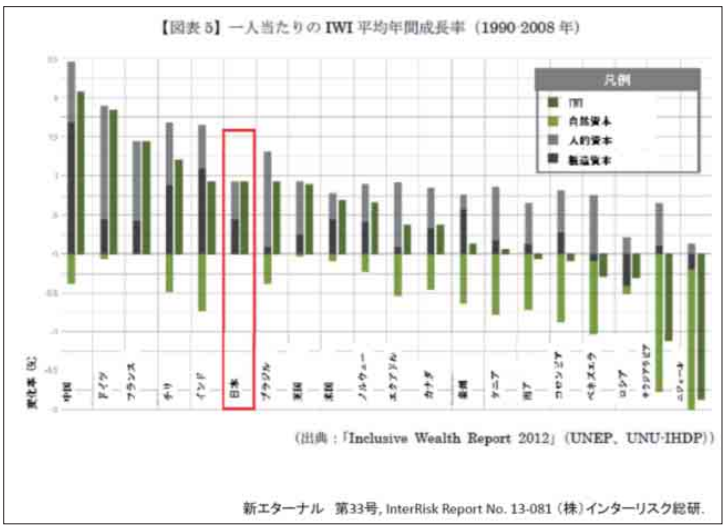


図 15

この考え方を既に取り入れている日本の自治体もある。北海道の下川町では、生態系サービスの評価を自然資本の中へ組み込んだうえで町の今後を考えている（図 16）。それを実現する一つの方法は、生態系サービスに対する支払い（PES）を考えることである。例えば現在の森林の伐採方法は生態系サービスをあまり重視しておらず、収入は増えているが生態系サービスが減っている。そこで、生態系サービスを重視した切り方にすると、収入は減るが生態系サービスが増え、社会コストも減るという構図である（図 17）。

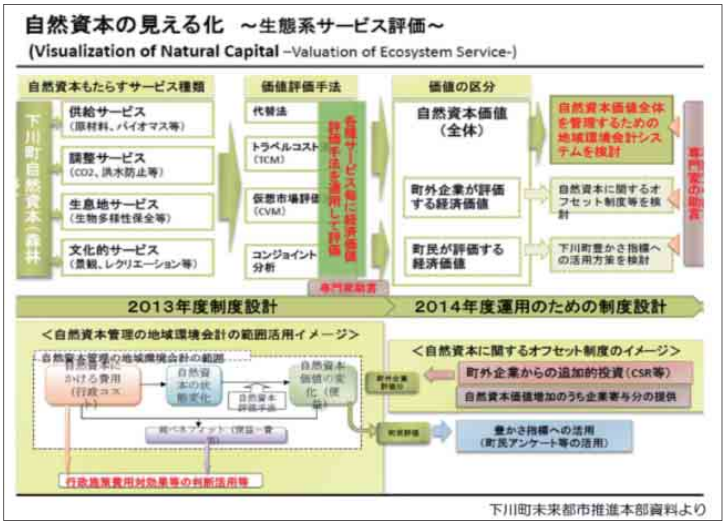


図 16

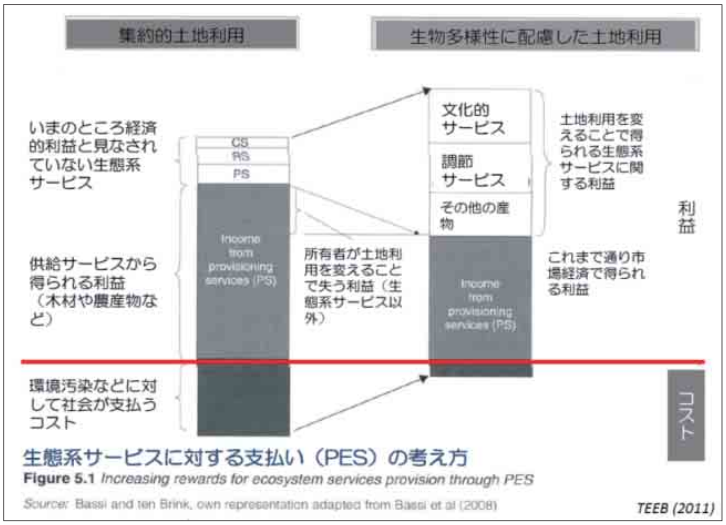


図 17

これが PES の基本だが、システムの構築は簡単でなく、様々なトレードオフもある（図 18,19）。片一方の生態系サービスを追求すると片一方が減るトレードオフもあるし、受益者とコスト負担者が異なるということも起こる。さらには他の資源とのトレードオフもある。そこで、Future Earth では、水とエネルギーと食料のネクサスの中に生態系サービスを入れる必要があるとも考えている。

生態系サービスの受益者やコスト負担者は、空間スケールが異なる場合がある。例えば、気候変動は世界中でマイナスを被り、二酸化炭素はみんなが出しているので非常にグローバルな問題だが、水や空気の汚染はローカルな問題である。すると誰がどのようにコストを負担するかは大きな問題になるので、スケールのメカニズムも含めて研究する必要がある（図 20）。

図 21,22 のように、生態系サービスの対価の支払い方法も考えなければならない。例えば、森林認証制度といって、生態系サービスを重視した収獲を行うことでラベルが張られ、消費者がそれを選択的に購入することができるシステムがかなり広がっている。しかし、様々な問題点がある（図 23）。

生態系サービスのトレードオフ
• 生態系サービス間：
Service trade-offs: Manage for one service - lose another
• 空間的：スケールミスマッチ
Spatial trade-offs: Benefit here - costs there
• 時間的：
Temporal trade-offs: Benefit now - costs later
• 利益者間：
Beneficiary trade-offs: Some win -others lose
TEEB (2010)

図 18

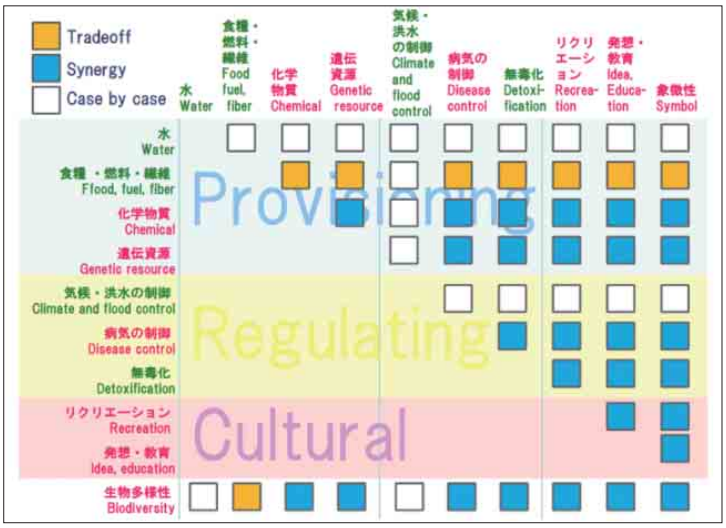

Tradeoff
Synergy
Case by case
水 Water
食糧・燃料・繊維 Food fuel, fiber
化学物質 Chemical
遺伝資源 Genetic resource
気候・洪水の制御 Climate and flood control
病気の制御 Disease control
無毒化 Detoxi-fication
リクリエーション Recrea-tion
発想・教育 Idea, Educa-tion
象徴性 Symbol
Provisioning
Regulating
Cultural
生物多様性 Biodiversity

図 19

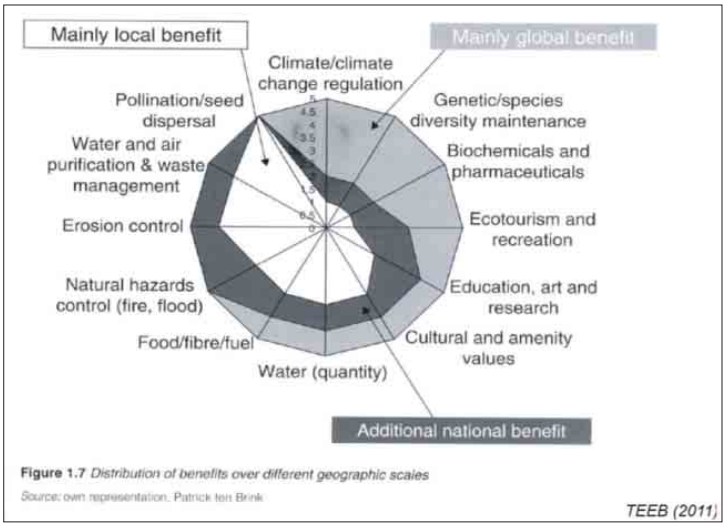

Mainly local benefit
Mainly global benefit
Climate/climate change regulation
Genetic/species diversity maintenance
Biochemicals and pharmaceuticals
Ecotourism and recreation
Education, art and research
Cultural and amenity values
Water (quantity)
Food/fibre/fuel
Natural hazards control (fire, flood)
Erosion control
Water and air purification & waste management
Pollination/seed dispersal
Additional national benefit
Figure 1.7 Distribution of benefits over different geographic scales
Source: own representation, Patrick ten Brink
TEEB (2011)

図 20

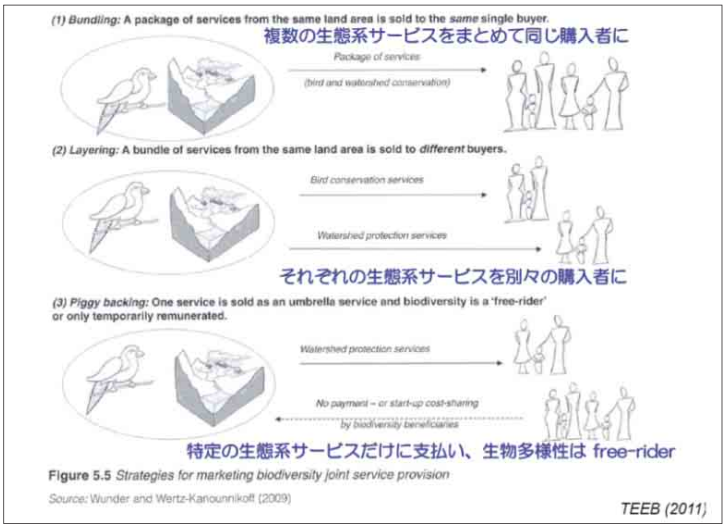

(1) Bundling: A package of services from the same land area is sold to the same single buyer.
複数の生態系サービスをまとめて同じ購入者に
Package of services
(bird and watershed conservation)
(2) Layering: A bundle of services from the same land area is sold to different buyers.
Bird conservation services
Watershed protection services
それぞれの生態系サービスを別々の購入者に
(3) Piggy backing: One service is sold as an umbrella service and biodiversity is a 'free-rider' or only temporarily remunerated.
Watershed protection services
No payment – or start-up cost-sharing by biodiversity beneficiaries
特定の生態系サービスだけに支払い、生物多様性は free-rider
Figure 5.5 Strategies for marketing biodiversity joint service provision
Source: Wunder and Wertz-Kanounnikoff (2009)
TEEB (2011)

図 21

革新的資金メカニズム
Innovative Financing Mechanisms: IFM
• PES
• 認証制度
• REDD+ （Reducing Emission by Deforestation and Degradation）
• 生物多様性オフセット
生態系サービスの経済評価・定量的評価

図 22

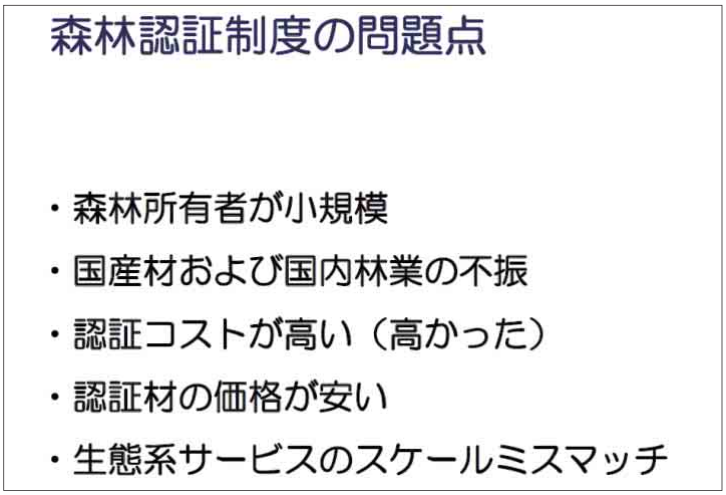

森林認証制度の問題点
・森林所有者が小規模
・国産材および国内林業の不振
・認証コストが高い（高かった）
・認証材の価格が安い
・生態系サービスのスケールミスマッチ

図 23

森林環境税・水源税も、日本では既に 30 県以上が導入している（図 24）。流域の人々に県が税金をかけ、森林管理に使うシステムも動いている。しかし、それにも幾つか問題点がある（図 25）。

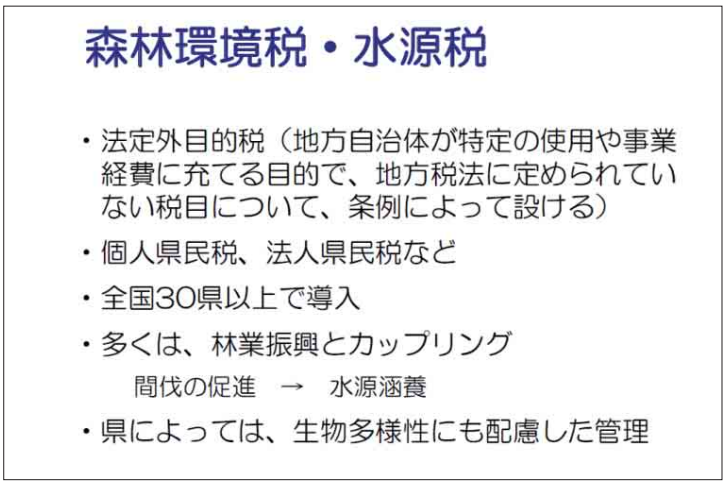


図 24

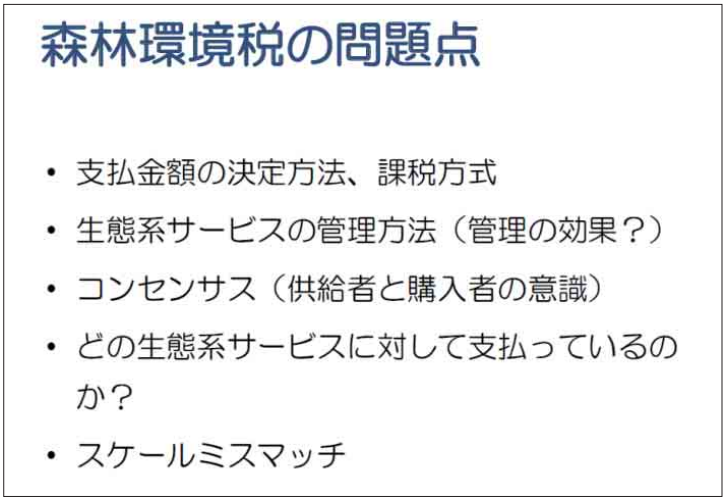


図 25

木を植えて二酸化炭素を吸収するカーボンクレジットという考え方がある。植えた木が吸収する量よりも、森林が伐採されて出ていく量のほうがが多いとなると、切らないことに対してお金を払おうという発想になる（REDD+）（図 26）。生態系サービスや地域住民のことも考えなければかえってマイナスになることがあるため、REDD+ がパリ協定の中でも具体化されてきた。しかし、REDD+ にも問題点がある（図 27）。

生態系サービスをどう考えるかについて国際スタンダードを作る動きが既にあり、やや定性的ではあるが CCB Standards（図 28）が用いられている。日本はスタンダード作りが下手で遅れている面がある。

REDD Plusと生物多様性

- 森林の減少や劣化による二酸化炭素放出量は、温室効果ガスの排出量の１／５を占め、植林による吸収量を上回る
- 森林の減少や劣化を防ぐことは、有効な温暖化緩和策であるだけでなく、森林のもつ他の生態系サービスや生物多様性の保全にもつながる (co-benefit)

図 26

REDD+の問題点

- 「森林劣化」の定義
- 参照レベル
  - 消失，劣化を防いだことの評価
- 「+」の評価
  - どんな生態系サービスを対象とするのか？
- 測定・報告・検証（MRV）の技術
- 評価の単位
- クレジットの方式
- 生態系サービスのスケールミスマッチ

図 27

CCB Standards

The Climate, Community & Biodiversity Alliance
Climate, Community and Biodiversity
Project Design Standards

- 温室効果ガスの削減だけでなく地域社会、生物多様性にもプラスの効果をもたらす土地利用プロジェクト設計のための認証
- 生物多様性に関する基準
  - 実質上プラスの効果
  - プロジェクトゾーン（対象地域外を含む）への影響
  - 影響のモニタリング
- 参照シナリオに基づく、生物多様性・生態系サービスへの影響を記述
- REDD+のセーフガードなどにも利用

図 28

生物多様性オフセットとは、ある場所の生態系を壊したら、それと同等のものを他の場所で復活させることにより開発を可能にする考え方である（図 29）。リオ・ティントという鉱山会社は鉱山開発において生物多様性オフセットをすでに実施している。愛知県でも近いことを始めており、開発によって生態系を失った場合に、県が持っている土地で復元させ、同時に生態系のネットワーク作りを促進させようという考え方である（図 30）。しかし、生物多様性オフセットにも技術問題も含めていろいろな問題がある（図 31）。

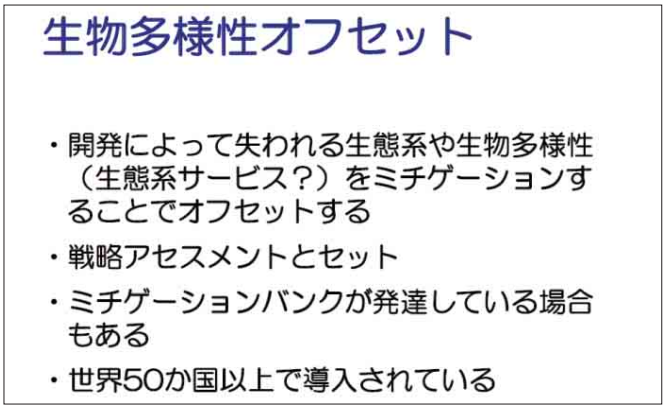


図 29

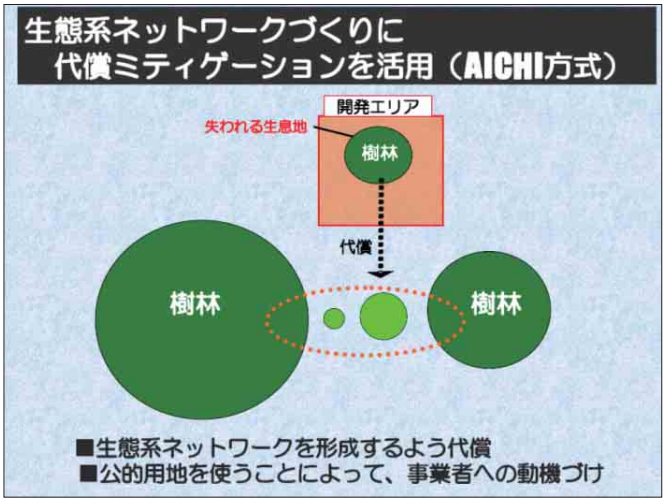


図 30

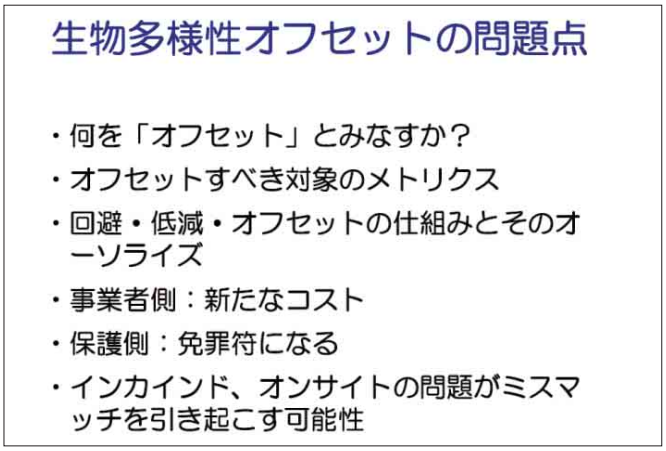


図 31

生物多様性と生態系サービスの評価には地理情報化が必要である。図 32 はスタンフォードが作成した InVEST というソフトだが、これを使うとどこの生態系がどの程度のサービスを供給しているかについての地図が作成できる。そして、シナリオ分析により、どのような開発すると生態系サービスがどうなるかを分析できる（図 33）。生態系サービスを地理情報化することにより、コストとベネフィットの明確化、土地利用計画や PES 設計への利用、意思決定ツールとしての利用など、多くのメリットが出てきている。花粉を運ぶという生態系サービスと土地利用の関係や、樹木の病気が発生・拡散しやすくなる条件などの予測マップもできるようになってきた。

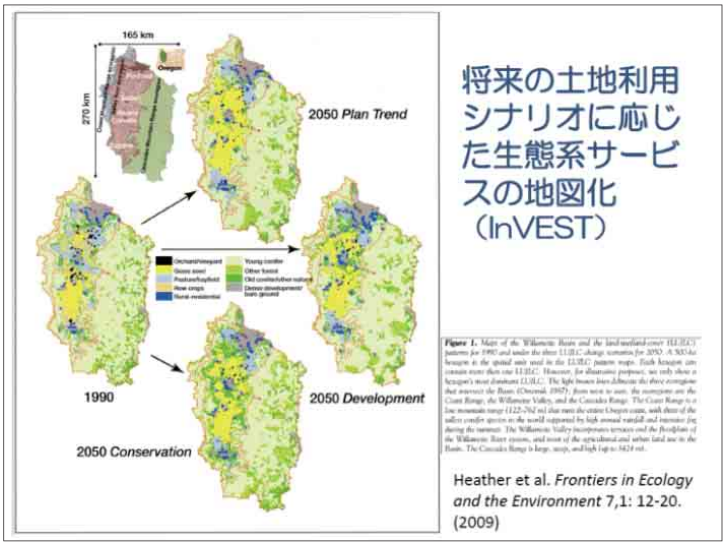


図 32

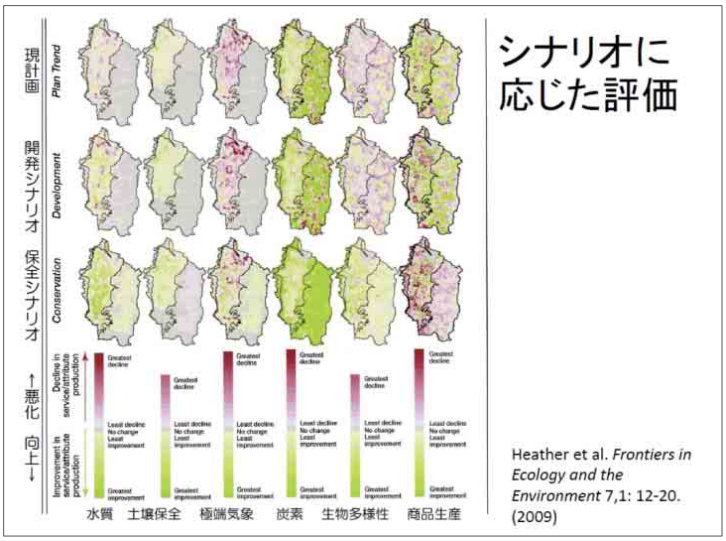


図 33

森林があると地下水涵養量が増えるということで日本の地下水涵養量（図 34）、光合成速度や分解速度などの地図化もできるようになってきている。また、原生林のような場所を伐採し、二次林化したときに、どのように機能が変化するかも推測できる。これらの予測により、どのような土地利用変化が生態系サービスの変化を起こしているかも分析できる（図 35）。

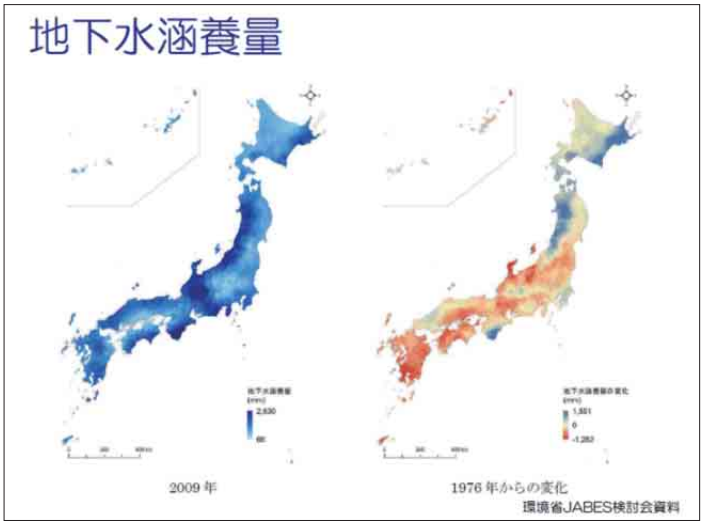


図 34

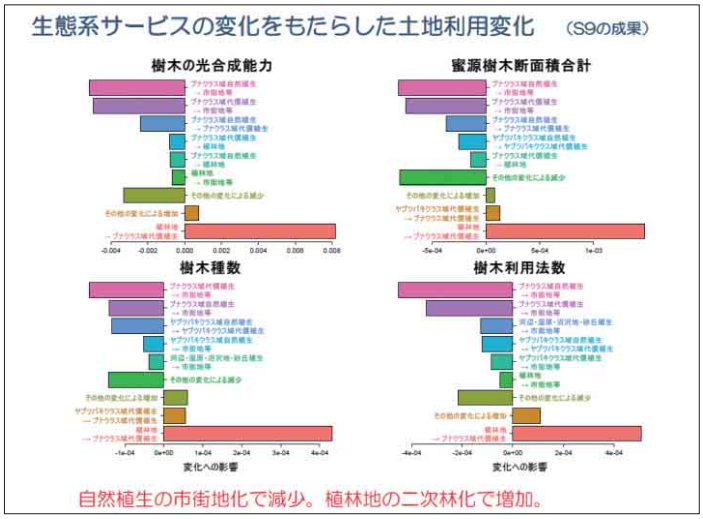


図 35

気候変動については、さまざまな生態系の分布変化がシミュレーションできるようになった。例えば、タケの潜在分布域の予測も可能になってきている。現在、さまざまな生物が生息できる環境が 100 年後どう変化するかを予測するモデルに取り組まれている。

過去と現在の空中写真を分析すると、気温が上がっているため、高山帯の下限標高が上っている。しかし、そのスピードは温度から予測されるものよりはるかに遅いこともわかってきた。また、どの場所が危ないかも予測できる。気候変動と土地利用の両方を統合したシナリオで予測していかなければいけない。生態系の場合、土地利用変化の影響が非常に大きいため、それと気候変動の両方を組み合わせた形で予測していくことが必ず必要になる。逆に言えば、上手に土地を利用すれば適用策にもなり得る。そのような視点で研究をしている人もいる。

図 36 は、生態系の温暖化影響に関する研究で問題になっている点を整理したものである。気候変動シナリオでは、解像度が 20km またはせいぜい 5 km 程度しかないものが多く、生態系の問題を考えるためには粗い。

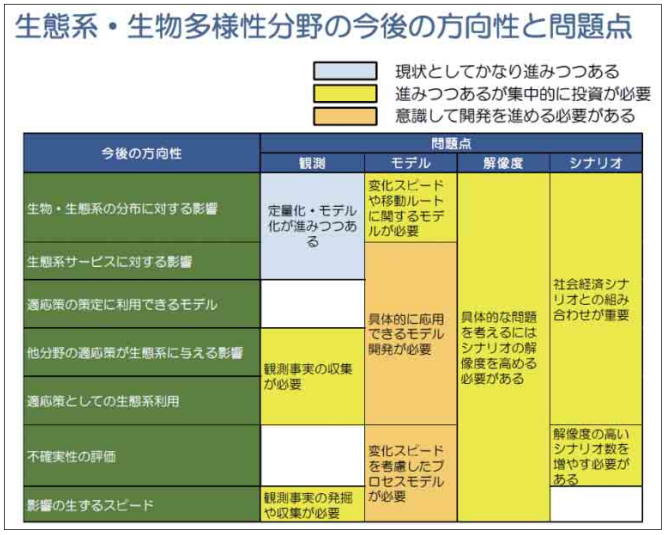


図 36

災害と生態系に関する研究動向もある。Eco-DRR（Ecosystem based Disaster Risk Reduction）は、防潮堤や河川堤防などのハード面での防災に対し、森林や海岸砂丘などの自然生態系を保全・復元することで災害リスクを下げるという技術である。また、EbA（Ecosystem based Adaptation）は、気候変動で海水面が上昇したり、洪水頻度が増加したりするときに、生態系を利用して対応するというものである（図 37）。ハード面での対策よりこれらの対策の方が維持費も含めコスト的に低いだろうという議論があり、平時の生態系サービスの両方で見ると人工構造物だけで考えるより利益が大きいのではないかという議論がなされている。例えば、国土強靭化委員会からスピンアウトした民間主導の財団などで、そのような議論が少し始まっており、グリーンレジリエンスという言い方をしている。

図 37

生態系サービス研究の現状を図 38 に、今後の研究の方向を図 39 に整理した。国内では情報が多いが、アジアへ行くと少なくなる。国内では地理情報や気候変動シナリオとの連携もできるし、環境経済の分野の方々もたくさんおり、日本の強みだと思う。

課題としては、生態系サービス研究の研究者が少ないこと、また、社会的認識が十分育っていないことが問題である一方、ビックデータの利用も可能性として期待されている（図 40）。

生態系サービス研究の現状

- サービスによって生物多様性との関連性の強さが異なる
- 生態系サービスのトレードオフが重要
- 生態系サービスの経済評価やその手法開発が進んでいる
- 生態系サービスに対する支払（PES）が動き始めているが問題点も多い
- 生態系サービスの地理情報化が進み、さまざまな応用の方向が出てきた

図 38

今後の生態系サービス研究の方向

- 地理情報の効率的利用
- ビッグデータの利用
- 気候変動・社会経済シナリオの統合
- 社会経済的側面の強化
- 政策・企業との協働（ツール開発）
- Eco-DRR, EbA

図 39

日本の生態系サービス研究

強味
- 国内的には情報が多い
- 地理情報、気候変動シナリオとの連携
- 環境経済学との連携

課題
- 研究者数が少ない
- 生態系サービスについての社会的認識が弱い
- ビッグデータなどとの連携
- ステークホルダとの連携
- 欧米以外での基礎情報のベースアップ

図 40

［質疑応答］

※Q は質問、A は回答、C はコメント。
同日に講演された九州大学の矢原徹一教授のご発言も記す。（敬称略）

Q：経済評価をするときに、経済学の方々と科学技術の方々との連携が必要と思うが、科学技術側としては生態系の状態をしっかり把握するところがまだできていないのか。

A（中静）：生態学的な点では把握できていても、サービスという点からはできていない部分がある。一方、経済評価では、評価対象の生態系について全く知識がない状態で評価する場合と、かなり知識がある状態で評価する場合とで、評価額が違ってくる。また、それぞれの機能やサービスごとに評価ができるようになってきているが、機能量が明らかになっているかいないかで、支払意思額が変わってくる側面があり、そこは両者で一緒に取り組まなければならないと思う。

Q：変化を追いかけているが、そのスタート地点は現状か。または理論的な理想値があるのか。

A（中静）：シナリオを考える場合のスタートは現状である。地理情報化をともなった様々なシナリオを考えると、過去に戻していくシナリオも可能となるので、自然に近い状態に戻すシナリオも可能である。シナリオに沿って、どのような生態系サービスがどれくらい良くなるということは推計できるので、その総計が計算できるが、理想というより、それぞれの地域が選択するという側面が強いだろう。

Q：戻していくシナリオで、誰にどのような影響があるか、誰がその受益者かもわかるか。

A（中静）：住んでいる場所や、所有者などの情報が入れば知ることができるだろう。例えば、ある町の計画で、土地利用を広げ工場を誘致するような工業化した生活を選ぶか、もう少し自然を豊かにして観光客を増やしたり、農業などの一次生産中心の生活としたり、どのオプションを選ぶか、それぞれのオプションで生態系サービスの受益者とコスト負担者を考えていくとことはできる。

Q：環境は規制でははくベネフィットで考え、全体をシステムで捉えようという流れになっているということか。

A（中静）：そのように出来かかっているということである。

Q：ベネフィットで考えると、エネルギーでは使うベネフィットもあり、環境面のベネフィットもある。視点がかなり異なる中で、うまく融合できている状況か。

A（中静）：特に二酸化炭素など測りやすいものに関しては、再生可能なエネルギーを使うか否かで、ベネフィットとリスクに関する理解がだいぶ進んでいると思う。生物多様性や生態系サービスに関しては、何がベネフィットに結びつくのか、その前にリスクも正しく認識されていない状況であるので、その認識をもう少し強めないとこのような動きは本格化しないだろう。

Q：REDD+ と生物多様性について、ベネフィットをもう一度説明していただけるか。

A（中静）：森林を植えるのも大事だが、今ある森林をできるだけ切らないようにする。例えば、切られていく森林は物理的に分断化されていくので、それを上手につなぎ、分断化しないように森林を残してやれば、生態系サービスを守れる。そうすれば温暖化も防げるし、連続性の高い広い森林は温暖化した場合の生物多様性保全にも有効なため、適応策にもなる。温暖化に対する対策と生物多様性の保全とを一緒に考えることができるという意味である。

Q：木が CO_2 を吸収することを利用してエネルギーを使うという考え方は今後揺らぐことはないのか。

A（中静）：ないと思う。人工林のような場所には重要な地域ももちろんあるが、生態系サービ

スや生物多様性として重要な地域は余りないので、むしろ資源としての重要性できちんとゾーニングすることが大事になっていくと思う。資源として持続的に利用する部分と、環境として残しておく部分を分けて対応しないといけないだろう。それにはそれぞれの森林が持つ生態系サービスの評価が必要である。一方では、バイオマスのカスケード利用も重要になるだろう。

Q：生態系サービス研究というのは、生態系に関する情報を多く持つ国が強いのか。

A（中静）：確実にそうだと思う。欧米は非常に進んでいる。例えばイギリスは、生態系サービスについて厚い報告書が存在するが、東南アジアなどの途上国に行くと生物多様性の情報もないし、森林に関する研究情報も少ないので、評価は難しい。我々は衛星を使って植生図を簡単に作れる状態にあるが、途上国だとそのようなこともままならない。かなり粗い分類でないとできない。途上国になればなるほど情報不足は大きい。我々は生態系サービスの地図を東南アジアでも作ろうとしているが、日本でつくる地図の細かさや情報の多さから比べるとかなり劣る。原生林と二次林程度しか区別できないとか、林のタイプも日本ならブナ、シイ、カシ林などと分けられるが、東南アジアでは熱帯雨林か乾燥雨林、半落葉林のような4つか5つ程度の大きなくくりでしか分けられない。研究の進展は情報量に完全に依存する。

Q：我々の俯瞰報告書は5つの地域（日本・アメリカ・ヨーロッパ・中国・韓国）で国際比較をしているが、それ以外で注目すべき国や地域はこの分野にはあるか。

A（中静）：研究力という面ではそれらの国が強いだろうが、必要性という点では別だ。生態系サービスやナチュラルキャピタルなどは途上国の方が深刻な状況にある。GDPは増えているが国力が減っているような国が、このような研究を一番やらなくてはならない。

A（矢原）：ラテンアメリカはかなり強い。メキシコ、ブラジルなど。

A（中静）：コスタリカも。

Q：湿地帯（八郎潟など）は、生物が多いだけでなく、CO_2を吸収する能力もあると聞いたことがある。その辺りの評価は既に海外の様々な場所でされているのか。

A（中静）：されている。湿地は二酸化炭素の吸収もするが、むしろメタンの発生も問題になっており、単位面積当たりの数字に関しては世界中でかなり研究されているので、気候条件と植生タイプがわかれば、原単位程度は計算できるのが現状である。

6. 循環型社会区分

6.1 循環型社会区分（LCA）の過去・現状・今後について

菊池 康紀（東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座　特任准教授／ CRDS 特任フェロー）

本日は循環型社会区分、特に LCA についてお話しする。

「循環型社会」という言葉は、循環型社会形成促進基本法が始まりで、法律を作る過程で生まれた。「循環型社会」の英語は存在せず、「3R」も日本発のものである。これらは国際的な言葉ではない。

循環型社会に関する日本の歴史として、まず、環境基本法の前の公害対策基本法は局所的な対応であったが、それでは追いつかなくなってきたことから、総合的な推進を目指す環境基本法になった。そして、廃棄物の埋立地不足からゼロエミッションが唱えられたが廃棄物は全く減らず、「循環型社会」という言葉を作り、リサイクルを推進しようというところから始まり進められてきた（図 1）。

図 1

海外での取組みの始まりとして、1969 年のコカ・コーラ社の容器に関する環境影響の定量化が挙げられる。コカ・コーラ社が容器を瓶からペットボトルに変更したが、消費者団体から問題視された。当時は、五大湖のヘドロが問題になり、石油が悪者扱いされていた時代であった。しかし、容器の変更により、輸送エネルギーの減少や、瓶が割れるロスの低減が期待でき、石油消費量が減るはずである。そこで、当時は LCA という言葉は無かったが、LCA のようなことを行い、どちらの容器が環境に良いかを定量的に示し、ペットボトルを認めさせた。これを受けて、モノは作る過程や廃棄後までの全体を見ないと本当の環境影響はわからないということになり、米国や欧州で研究された。そんな中、SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) の中で本格的な LCA 研究が始まり、LCA という言葉が出来上がった。1991 年に LCA のソフトウェア「SimaPro」が開発・販売が開始され、日本における LCA 研究はソフトを購入するところから始まった。それまで日本国内で LCA 研究は報告されていない。海外の方が LCA に関しては圧倒的に早く始めていた。歴史的には日本はかなり後追いであった。

海外に起因する歴史：研究者の視点

1969年	コカ･コーラ社が異なる容器の環境影響を定量化
1970年	アメリカおよびヨーロッパでREPA (Resource and Environmental Profile Analysis)手法が研究され始める
1979年	SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)が設立され本格的なLCA研究が開始
1991年	世界的に使用されているLCAソフトウェアSimaProが開発･販売開始
1992年頃	日本国内でLCA研究が開始
1993年	ISO/TC207によるLCA標準化の作業が開始
1995年	日本LCAフォーラム設立
1996年	ISO14040が発行
1998年	LCA国家プロジェクトの開始
2000年	ISO14042が発行
2002年	UNEP/SETAC Life Cycle Initiativeが設立
2003年	第1期LCAプロジェクト終了、第2期LCAプロジェクト開始
2005年	日本LCA学会発足
2006年	ISO見直しに伴いISO14044が発行

図２

現在の CRDS の環境分野の俯瞰図（暫定版）では、様々な言葉が記載されている（本報告書には掲載していない）。まず、「ゼロエミッション」では埋立処分される廃棄物を減らすための議論の中で盛んに使われた言葉である。「環境配慮設計」や「クリーナープロダクション」は、LCA を実施した結果を受け、応用先として行われるものである。「環境配慮設計」は「Design for X」と言われているものの 1 つであり、やり方が決まっているわけではない。「サプライチェーンマネジメント」は LCA と同じように使われるが、在庫管理、生産効率やコスト削減に近い言葉であり、異なるものである。動脈が中心であり、静脈も見る必要があるというのが LCA の主張である。

LCA で最も大きな国際組織は UNEP（国連環境計画）と SETAC が協同で作っている Life Cycle Initiative である。主な国内学会、国際学会は図 3 の通りである。雑誌はいろいろあるが、EST（Environ Sci Technol）が環境学系で IF が最も高い（5.3 程度）、ACS（American Chemical Society）の雑誌である。EST での議論が Science や Nature、USEPA などにも使われており、LCA の論文も使われるようになってきている。

主な組織・学会・雑誌

- 国際組織：UNEP/SETAC Life cycle initiative
- 国内学会
  - 日本LCA学会、環境科学会、廃棄物資源循環学会、鉄鋼協会、環境政策学会
- 国際学会
  - SETAC、ISIE、IIOA、EcoBalance、EcoDesign
- 雑誌
  - Environ Sci Technol, Int J LCA, J Ind Ecol, Resour Conserv Recov, J Clean Prod, Environ Prog Sustain, J Environ Manag

図３

本分野のトピックスとして、日本 LCA 学会の特別セッション（学会側が設定）を紹介する（図 4）。最近話題なのは温室効果ガス（GHG）の削減貢献量の評価である。例えば、多くの構成要素からなるパソコンのエネルギー消費量が下がったとき、パソコンの中の何が貢献しているのかをはっきりさせ、消費量低下につながった構成要素を提供した川中産業の貢献を明確化するようなものである。これまでの LCA の評価方法では不可能であった。世界中でその評価方法を作っている。企業 LCA/LCM は、例えば、Scope3 という、企業のサプライチェーン全体で GHG 排出量を見るものである。その他、環境情報の活用、フットプリント、消費者行動など、LCA をどう活用するかが議論されている。

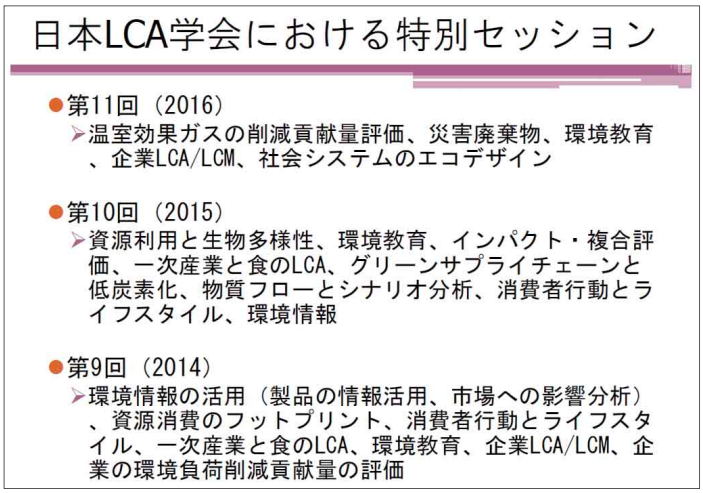


図 4

図 5 は論文情報で「LCA」を検索しクラスター化した結果である。水とエネルギー、バイオマス、廃棄物、一次産業などがほとんどである。車や電子機器などは、研究の数としては非常に少ない。全体として、現在の状態の評価が多く、今後どうするかに踏み込む研究はほとんど無いのが現状であり、それをどうにかしなければならない。

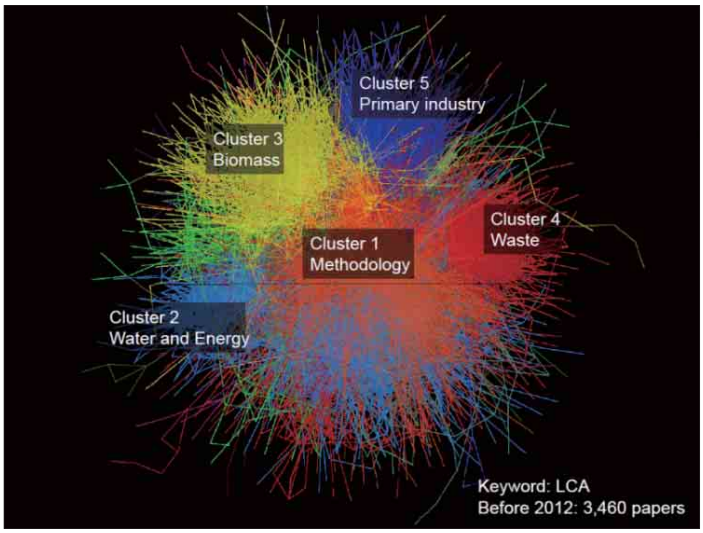


図 5

ISO14040 で定義されている LCA の枠組みは、おおよそ図 6 のようになっている。ISO や JIS を勉強して実施していくのが大方の流れである。

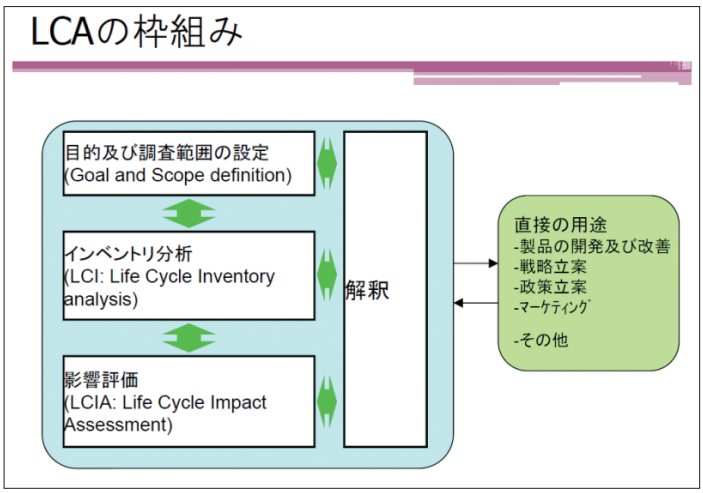


図 6

インベントリ分析での課題は、フォアグラウンドデータとバックグラウンドデータの全てのデータが必要なことである（図 7）。企業は、自身のデータ（フォアグラウンドデータ）はあるが、電気なども含めた全てのデータを、実際に使用している電力・製品についてインベントリを入手することはほぼ不可能に近いため、日本の平均値を使う。これはバックグラウンドデータを使う、ということになる。比較をするのに耐えうるデータセットをそろえる必要があり、データのそろえ方に LCA の専門知識が必要であるが、設定に不備があるような LCA も Web 上などには散見される。

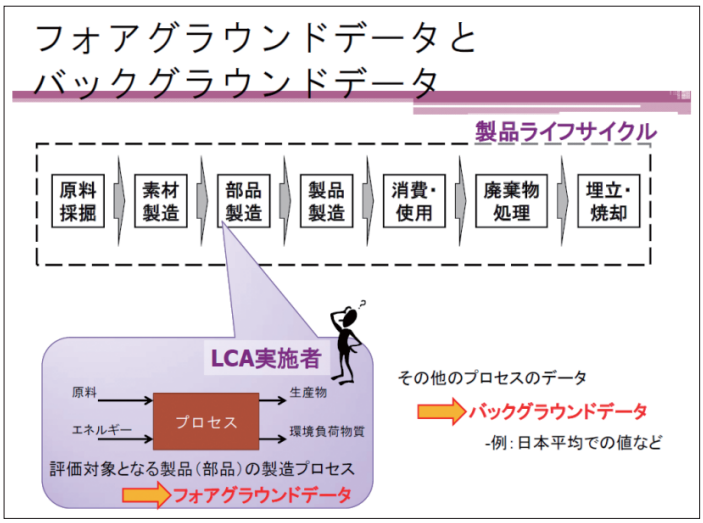


図 7

一つのプロセスで複数のものを作る場合も評価が難しいといわれている。製油所は特に難しい。同じ分留塔から出てくるものをどのように配分するかも LCA 手法の開発である（図 8）。

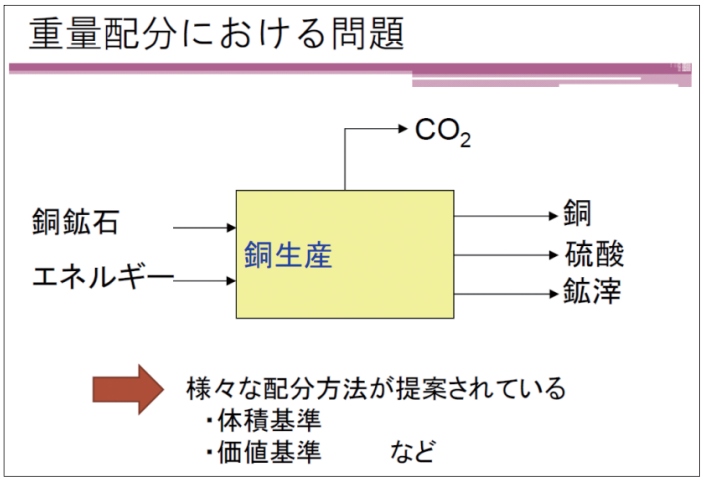


図 8

インベントリデータベースには、方法論に基づいてアロケーション（配分）を行った後のデータが入っていることが多い。データベースの構築や維持はお金がかかる。世界で最も大きいデータベースは、スイスで作っている ecoinvent である。スイスは自国に入ってくる製品のフォアグラウンドデータを全て取得することを目指しており、有料ではあるが、誰でも閲覧することが出来る。一方、日本のデータベースは、資金や人材などの援助が必ずしも十分ではなく、維持が難しくなっている。過去のデータが含まれていたり、登録されている品目に限りがあったり、など、課題は多い。

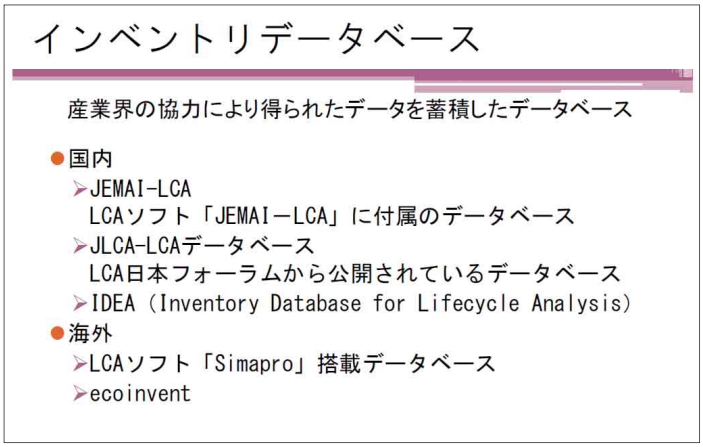


図 9

ここまではインベントリの話であったが、影響評価も重要な研究である。日本ではLCAはGHG評価であると思われることが非常に多いが、地球温暖化はたくさんある項目の中の1つでしかない（図10）。LCAは影響評価後に、保護対象の被害評価を行い、それを統一的に貨幣換算するところまでを行うが、あまり理解されていなかったり、つなぎの部分にまだ不確実性があったりする。研究としてやることはたくさんある。

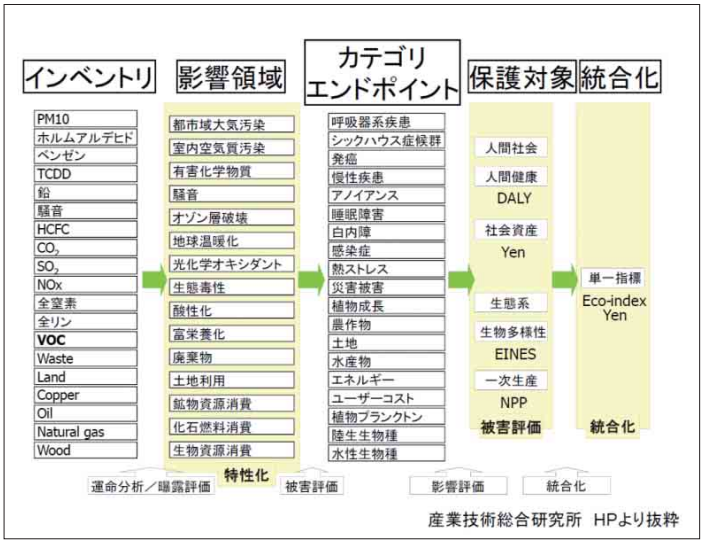


図10

図11はUSEtoxという化学物質の運命を追うモデルに室内暴露評価モデルを組み込んだものである。室内曝露評価において、どのように物質が拡散し、どのような被害をもたらすかを定量化するモデルであり、このようなモデル作成が環境影響評価で重要になっている（図12）。

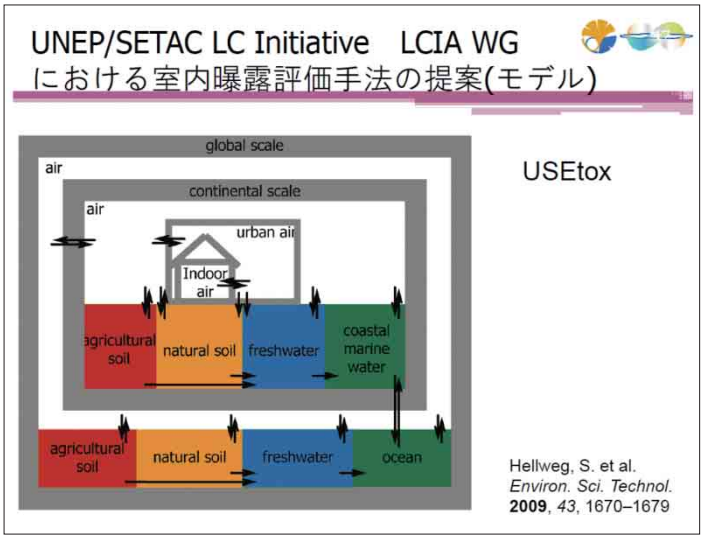


図11

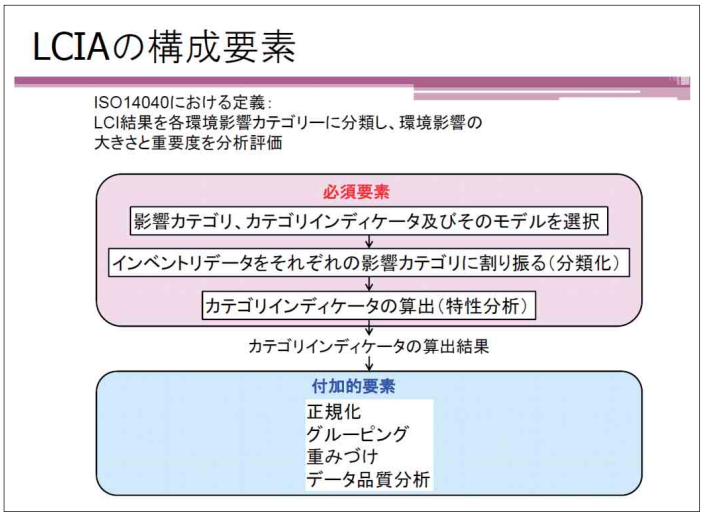


図 12

持続可能性評価も必要との認識が高まり、社会性を評価する方法も国際的に議論されており、国内からも参加している研究者がいる（数は必ずしも多くない）。子どもの労働や女性の雇用、地域への貢献、社会性維持、伝統と文化と相反していないか等の要素をどのように評価するかの話である（図 13）。

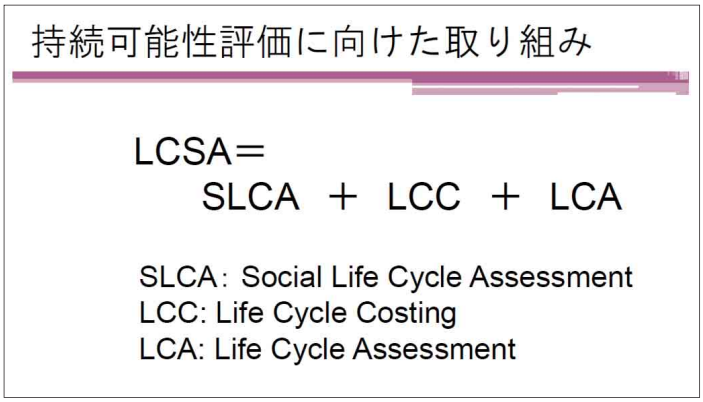


図 13

事業や製品が社会性に反していないかを評価する方法を作っていこうという活動が進んでいる。実際に定量化が出来るようになってきている。例えば、子供の労働に関することは、途上国などで子供の労働があるような製品が作られ、先進国に輸出されていた場合、その製品を先進国で消費することは、見かけ上、子供の労働を促進しているようにも見える。しかし、もしその製品を先進国が消費しなくなった場合、子供から労働（生活していくために必要な収入源）を奪うことにもつながりうる。そのため、単純な指標で議論することはできず、一方的な評価で物事を決めることはできない。非常に難しいものを評価しているが、そこまで踏み込まないとビジネスの社会性を評価できない。そのような研究領域がある。（図 14, 15）

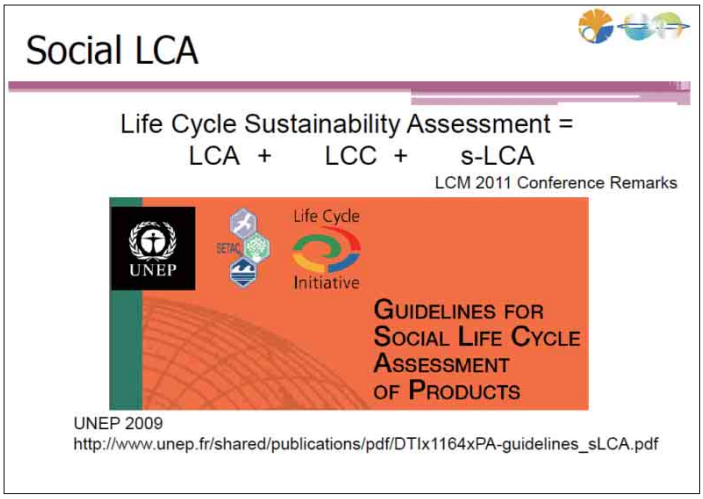


図 14

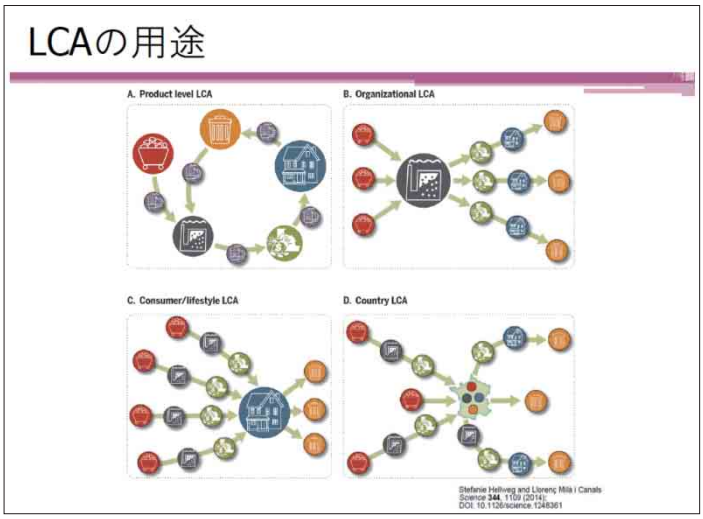


図 15

最近では、LCA に関する論文も Science に投稿すると通るようになってきている。LCA の用途には 4 種類あるといわれている。製品、組織、消費行動、国の活動を環境性の視点から評価できるといわれている（図 16）。

製品のライフサイクルは原料採取から廃棄物処理までである（図 17）。プラント等に関しては建設や管理の計画があるが、消費の計画はどうなっているか。

消費については、Sustainable consumption のための LCA の活用がある。例として、レジ袋とマイバッグの比較がある。その他、割り箸とマイ箸なども同様である。これらの例のように、細かいライフサイクル全体が明確化しないと、環境によいとして選択したことが本当に環境によいかがわからない。しかし、エアコンなど使用段階でエネルギーを消耗する家電製品は買い換えたほうが良い場合もある（図 18）。

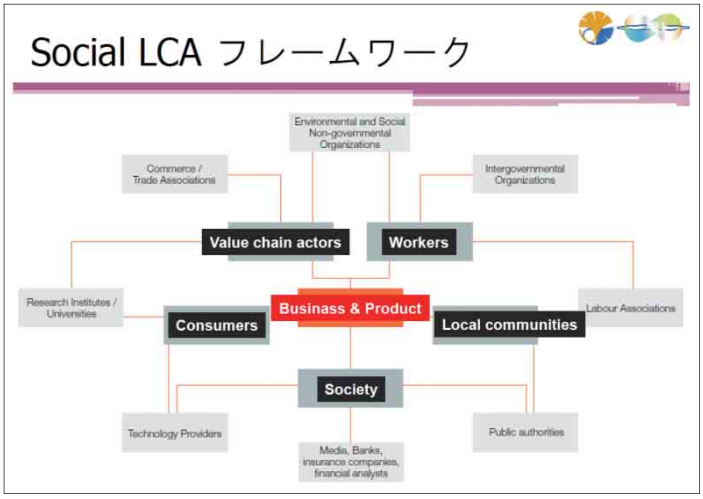

Social LCA フレームワーク
Environmental and Social Non-governmental Organizations
Commerce / Trade Associations
Intergovernmental Organizations
Value chain actors
Workers
Research Institutes / Universities
Consumers
Businass & Product
Local communities
Labour Associations
Society
Technology Providers
Media, Banks, insurance companies, financial analysts
Public authorities

図 16

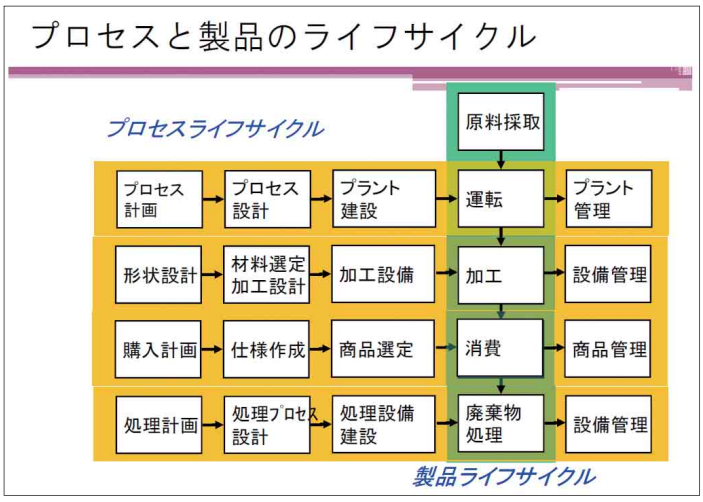

プロセスと製品のライフサイクル
プロセスライフサイクル
原料採取
プロセス計画
プロセス設計
プラント建設
運転
プラント管理
形状設計
材料選定 加工設計
加工設備
加工
設備管理
購入計画
仕様作成
商品選定
消費
商品管理
処理計画
処理プロセス設計
処理設備建設
廃棄物処理
設備管理
製品ライフサイクル

図 17

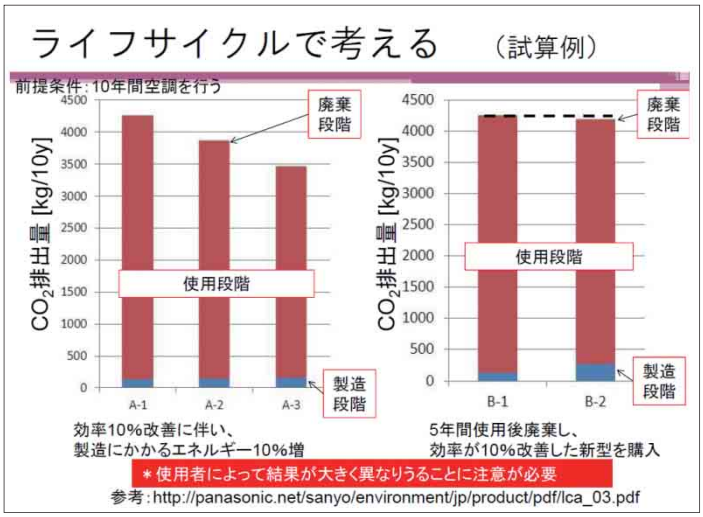

ライフサイクルで考える （試算例）
前提条件：10年間空調を行う
CO2排出量 [kg/10y]
廃棄段階
使用段階
製造段階
A-1
A-2
A-3
B-1
B-2
効率10%改善に伴い、
製造にかかるエネルギー10%増
5年間使用後廃棄し、
効率が10%改善した新型を購入
＊使用者によって結果が大きく異なりうることに注意が必要
参考：http://panasonic.net/sanyo/environment/jp/product/pdf/lca_03.pdf

図１８

例えば、自動車のLCAについて、公開されている情報がある。リーフ（電気自動車）は、走行距離によりLCAの結果が異なり、一定の走行距離を越えないと普通自動車を上回らないため、場合によっては、逆効果になりうることもある（図19）。環境にいいかどうかは使い方次第である。

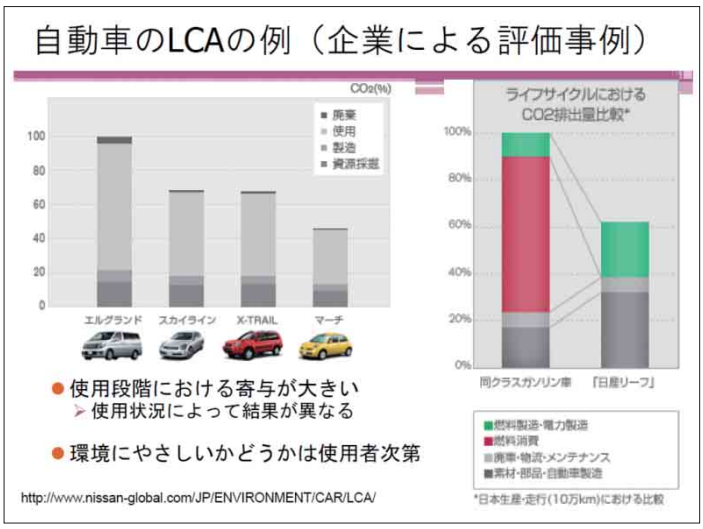


図19

次に課題について（図20）。

LCAは廃棄物が関係するため法制度を無視できない。製品の寿命が長いかどうかで廃棄に関する責任者が分かれている。ペットボトルは寿命が非常に短いため生産者側がリサイクル費用を持っている。一方、家電は数年使うもので消費者の負担になっている。そのような法律の解釈であるが、賛否両論で意見が割れている。プラスチックの生産者は、リサイクル費用を考えてプラスチックの量を減らすために紙を混合したりする。しかしそうするとリサイクルができず、焼却処理になってしまい、結果的にリサイクルの効果が下がってしまう場合がある。法制度やLCAで分かっている現実と、実際の経済活動の間で折り合いがまだついていない。

また、GHGの議論に集中してしまっていることも課題である。人材については専門家が不足している。現状では、分析に特化したLCA研究が多いが、製品に必要な工学などを含めてLCAの結果を解釈しないと、実際の行動につながらない。

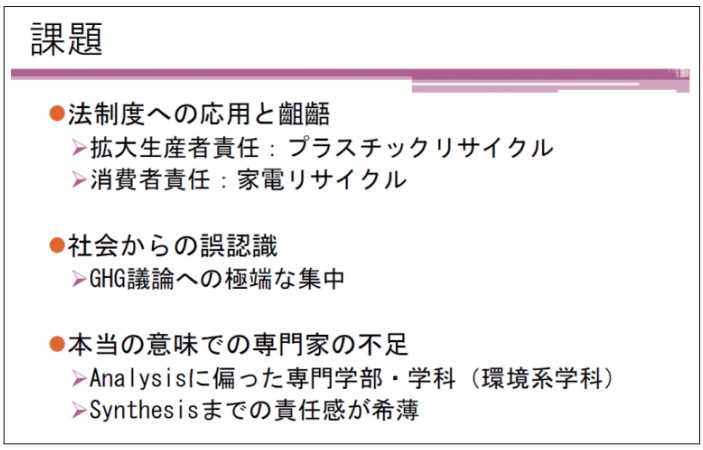


図20

日本ではカーボンフットプリントやカーボンオフセットが流行ったが、海外はそれだけでは十分ではないとされ、エコロジカルフットプリントに移行している。エコロジカルフットプリントでは、カーボンは一部に過ぎず、全体を見ないと製品のフットプリントにならない。全体を見るのが国際的な常識になっている。その乖離が広がってきてしまっている。

国として実施すべき研究開発について、技術評価における LCA が進んでいないことが挙げられる。現状では、蓄電池の LCA をまともに実施できていない。情報が入手できないためわからない。電池を作成して利用し終わった後まで手が回っていない。蓄電池のカスケード利用まで視野に入れた LCA を行うべきだができていない(甑島の例はある)。人材も不足している。また、太陽光パネルはいずれ大量に廃棄されるがどうするか議論できていない。風力やバイオマス発電も同様である。炭素樹脂も利用が進むがしっかりリサイクルするプロセスを準備する必要がある。(図 21)

マテリアルフロー解析も必要である。物質がどう流れてストックするのかの可視化が重要だが非常に難しい。主に利用するのは産業連関表だが、国毎に定義も行数も異なり合わない。それを合わせる研究がある。国際産業連関表を作る研究プロジェクトは、国内では国立環境研究所など限られた組織でしか実施されていない。国内ではその重要性が十分に認識されていない側面がある。

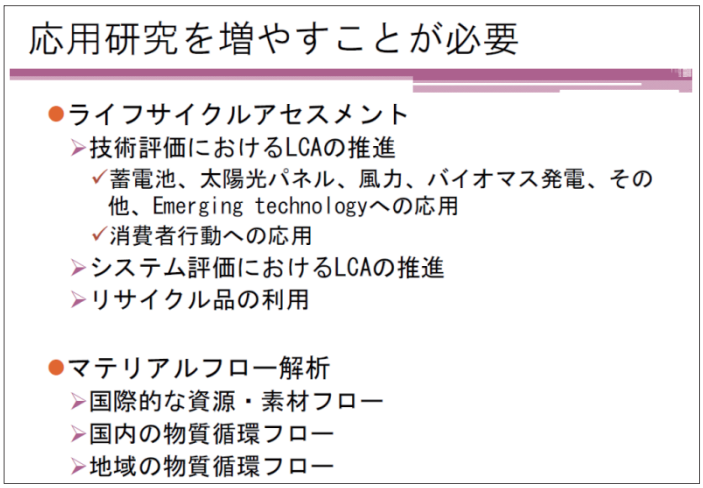


図 21

PMMA（液晶テレビの導光板）は、地デジ化により一気に出荷量が増加し、今後その廃棄が予測され、政策が不連続な波を起こした。必ず廃棄されるが、遅れてやってくる廃棄物の山をどう処理するかの議論がされていない。日本で対応しきれないと東南アジアなどに流れてしまう恐れがある。しかし、リサイクル事業者を増やすと廃棄が減少したときにつぶれてしまう。(図 22, 23)

同様の話として木質バイオマスがある。日本は森林も高齢化している。森林の持続可能な管理には、かなり伐採する必要があるが実施されていない。バイオマスはフローとストックを見る必要があり、40~50 年単位で伐採・植樹の必要があるが、管理が出来ていない（図 24)。

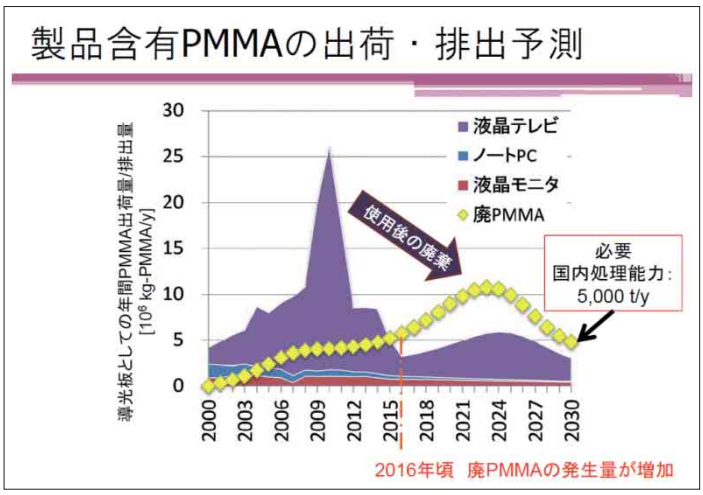

製品含有PMMAの出荷・排出予測
導光板としての年間PMMA出荷量/排出量
[10⁶ kg-PMMA/y]
30
25
20
15
10
5
0
2000
2003
2006
2009
2012
2015
2018
2021
2024
2027
2030
液晶テレビ
ノートPC
液晶モニタ
廃PMMA
使用後の廃棄
必要
国内処理能力：
5,000 t/y
2016年頃　廃PMMAの発生量が増加

図 22

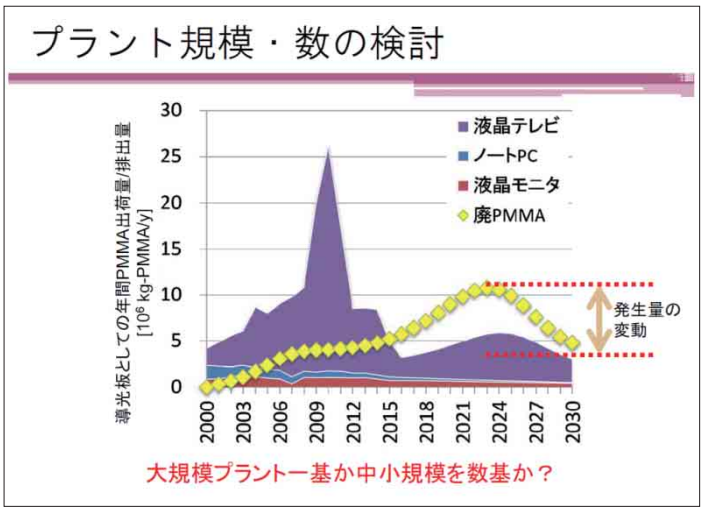

プラント規模・数の検討
導光板としての年間PMMA出荷量/排出量
[10⁶ kg-PMMA/y]
30
25
20
15
10
5
0
2000
2003
2006
2009
2012
2015
2018
2021
2024
2027
2030
液晶テレビ
ノートPC
液晶モニタ
廃PMMA
発生量の
変動
大規模プラント一基か中小規模を数基か？

図 23

持続可能な森林管理へ
60～100年
＝1サイクル
60年生～
55年生
45年生
35年生
25年生
20年生
～10年生
伐らなくても、伐り過ぎても持続不可能

図 24

国として実施すべきことをまとめると、フローの研究の実施とそれを意思決定に活用すること、法制度との連携のための学術を推進すること、人材を育てること、データベースの維持管理のサポートをすることである。

［質疑応答］

Q：難燃剤の臭素のように、微量だが必要だから入れているものがリサイクルを邪魔していることがある。どのように考えられているのか。

A：臭素系の難燃剤の性能が高いのでやめられない現状がある。安全性は循環型社会とは別に議論する必要がある。燃やさずに別の方法で使い道を作る発想がされている。機能を維持した形でリサイクルを探索する取組みもされている。

Q：しかしそれではストックが増えてしまう。

A：量的には対応しきれていない。埋め立ても出来ないので、ハロゲンを燃やし急速冷却が出来る場所で燃やすしかない。

Q：プラスチックのリサイクルは一生懸命実施したが結局難しかった過去がある。全て燃やして熱回収した方がいいのではないか。ペットボトルに関しては上手くいっているところもあるが、その他はかなり少ない。

A：容器包装リサイクル法は過剰包装抑制に関して企業へのプレッシャーにはなる。リサイクルは止めるわけにはいかないが、集まってきたものをどうするかが課題である。しかし固形燃料（RPF：Refuse Paper & Plastic Fuel）としてのお金の流れも出てきている。

6.2　気候変動下において、持続可能でレジリエントな社会の構築に貢献する水循環研究のあり方

小池 俊雄（東京大学　大学院工学系研究科　教授）

環境分野にとって、昨年は仙台防災枠組、持続可能な開発目標、そして、パリ協定と、非常に特別な年であった（図 1）。地理的、空間的、あるいは、分野を超えた連携や、科学と社会との連携が要求されている。

図 1

これらの動きを水循環の観点からみると、まず、水循環と気候変動は相互に影響を与えており切り離せない。また、持続可能な開発目標の中には水が 1 つの目標として挙げられているが、災害についても触れられている。持続可能な社会をつくるために、災害レジリエンスが重要である。災害リスクを管理し、減らす努力をしなければならないというのが仙台防災枠組の精神である。災害リスクを減らし、レジリエントな社会をつくるということは、事が起きる前に実施する必要があるため、科学技術的な判断や情報が不可欠である。さらに、教育として浸透しておかなければ、リスク低減やレジリエントな社会の構築はできないということで、そのような議論に深く関わらせていただいた 1 年であった。

そのような中で、今日の水循環研究のあり方として、全体像を作成した（図 2）。

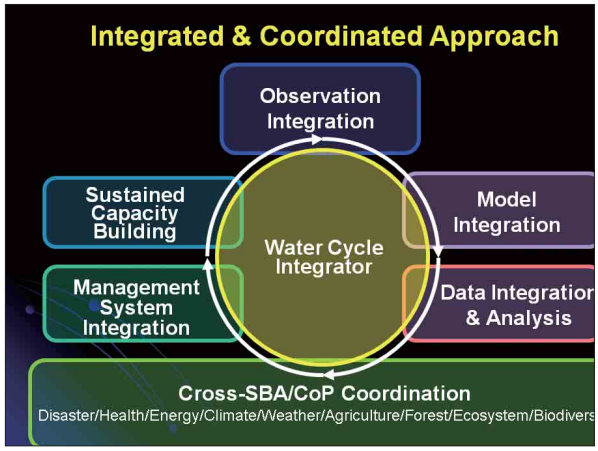


図 2

東京大学には小宮山元総長時代に複数の連携研究機構が設置され、小宮山先生ご自身が機構長のサステナビリティ学連携研究機構の次にできたのが地球観測データ統融合連携研究機関（EDITORIA）である。2006 年、第 3 期科学技術基本計画が始まる際に DIAS というデータ基盤を国家基幹技術の一環として開発することとなり、それを受ける東京大学の組織として EDITORIA がつくられた。その機構長を最初の 4 年間やらせていただき、次の 4 年の喜連川教授の機構長時代を経て、現在は柴崎教授に移ったところである。また、ユネスコの後援のもとで土木研究所に設立された水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）のセンター長を 2014 年 10 月からクロスアポイントメントという形で引き受けている。

EDITORIA では、統合化したデータと様々なモデルを分野を超えてつないでいる。東大の理学、工学、農学、医学の研究者が集まり、データ基盤の構築を中心に連携している。そのような環境の中で本日お話しする内容が実現するということである。

一方 ICHARM では､研究開発の成果を国際的な枠組みの中で社会に実装する活動をしている。ユネスコのセンターであるため、実装の際のローカルな話、例えばコミュニティや州、国などをつなぐような活動がしやすい。

水分野ではどのようにものを考えるか（図 3）。まず、水循環と気候システムは不可分である。地表面が受け取る太陽エネルギーの半分以上は水の循環で大気の過熱に使われ、最終的には宇宙に戻る。海洋と陸域では、海洋の方が太陽熱をよく受け陸域の方が少ないため、陸域の上の大気は冷たく海洋の上の大気は温かい。これが循環することで、海洋で蒸発した水蒸気が陸域に流れ、そこで凝結して雨を降らせる。雨になるときには凝結熱を出す。このように気候システムはでき上がっている。そこに人間が水資源管理システム、あるいは、水災害を防御するシステムを作ってきた。これらには生態系や農業、健康、エネルギーが関わっている。気候の変化により、例えば梅雨前線が北上し日本付近で雨が降らなくなるというようなレジームシフトや、台風の巨大化やゲリラ豪雨などの極端事象が頻発するという変化が生じる。変化に対応するためには、各分野の協力が必要であり、協働できる環境をつくらなければならない。それにより緩和（mitigation）も適応（adaptation）もできる。

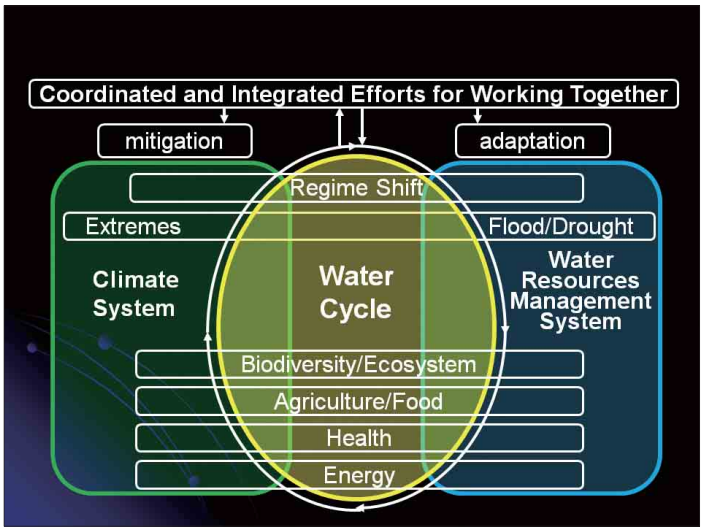


図 3

これをどのように実現するかということに、1990 年に IPCC の最初の報告が出たあたりから関わらせていただいた。河川・水資源計画や管理の分野では、最初は関心を示してもらえなかったが、2000 年過ぎあたりから、科学技術、すなわち理解や予測が水管理や水災害の防御に不可欠という意識が出てきて、水循環を気候との関連で考えるようになった。2008 年に IPCC の第 4 次評価報告が出た後すぐに、国土交通大臣に気候の変化と水の管理を合わせて考える必要があるとの答申をした。その後、政権が変わり進展が無かったが、昨年 9 月に再度提出し、内容が色濃く反映した施策が進み始めている。

それを科学技術からどう支えるか。まず、衛星や地上からの観測がある。次に、モデルの統合がある。例えば、大気から陸域を水が循環するモデルや、農業や都市での水の分配モデルの統合などである。そして、データの統合と分析を行うようなシステムが必要になる。（図 4）

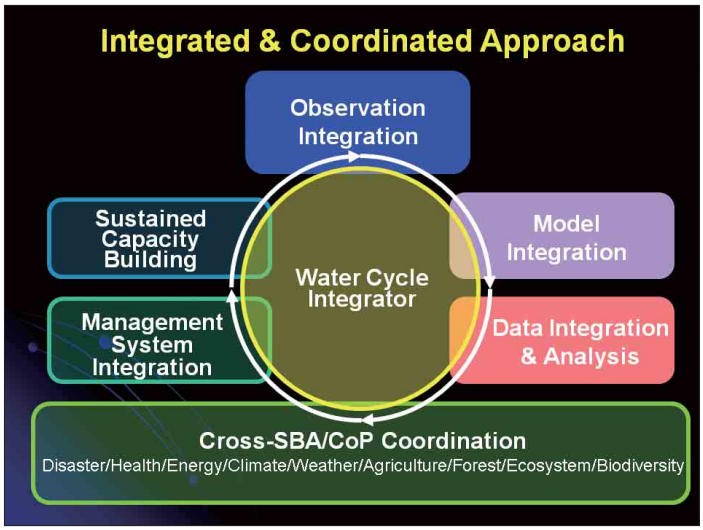


図 4

日本も国際的にも縦割りの傾向があるが、水を管理するシステムの統合は非常に重要な部分で遅れていると思う。システムを社会実装するには、統合する能力を持続的、継続的に高めていかなくてはいけない。もう 1 つ、分野間連携が必要である。水分野と災害、健康、エネルギーなどの分野を連携である。分野間をつなぐメカニズムを作らなければならないが、情報科学の最先端で活躍する喜連川先生とパートナーを組んで、DIAS というデータ基盤を構築し、その後国家プロジェクトになったが、個人の研究者ではとてもできないようなことができるようになり、研究が進み始めている。（図 5）

DIAS には様々な地上データや衛星データ、数値モデルなどが、26 テラバイトのハードディスクアレイに入っており、それをマネジメントするシステムがある。データが整理されすぐに取り出せるようになっている。第 5 期科学技術基本計画の中に DIAS を地球環境情報プラットフォームに使うという記述も書いていただいている。

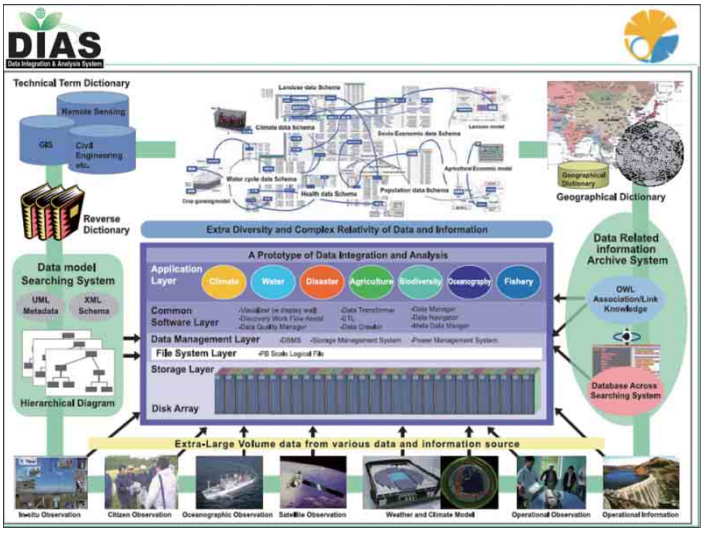


図５

水循環計測の衛星観測としては、可視光、近赤線、マイクロ波、重力のデータが衛星機関との連携でアーカイブされている（図 6）。しかし、地上データは集めにくい。雨まではいいが、流量は各国の資源データでありなかなか入手できない。地下水も同様である。現場のデータを集めるためには、システムを利用する国や機関がメリットを受けることが大事であり、システムが計画立案やその実施、監視に使えることを理解してもらう。アジアあるいはアフリカと共同の枠組みをつくり、普通では手に入らないようなデータが DIAS にはアーカイブされている。

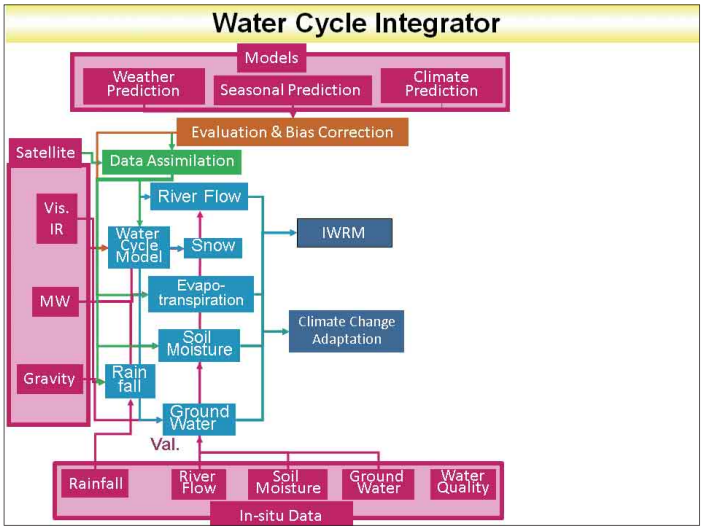


図６

上記のようなシステムがあると、衛星データで降水量や蒸発散量、土壌水分を出すことができる。地下水も衛星の重力センサーで出せる。結果が本当に正しいかを地上のデータで検証することもできる。蒸発散や雪は、地上データがあまり無い。川の流量も地上データがあまり無く衛星でもきちんと出てこない。川の水位を高度計で測って出す試みがされているが、大河の場合はある程度可能だが、中小河川（大河でない場合）はなかなか使えないところがあり、水循環を表現するモデルに情報を入れて推定することになる。また、気象のモデルの出力を入れ

ることで予測ができる。そこにはモデルが正しいかどうか、また、バイアスがあればそれを補正することも DIAS では可能となる。

さらに、データ同化という手法が 1990 年代初めから随分発達してきた。データ同化とは、モデルの結果と観測値を物理的に整合するように表現することである。衛星の場合は、例えば電磁波を出したままで観測する物理則と、大気の中で雨ができたり蒸発したりする物理則を組み合わせ、両方のつじつまが合うように初期値を決めたり係数を決めたりする。計算機やデータ同化のアルゴリズムが発展したことで可能となった。

予測と衛星データを加えることで、水循環に必要なパラメータが非常に精度よく出るようになった。

このような情報を統合的水資源管理（IWRM : Integrated Water Resources Management）に利用する。水資源管理の対象として、洪水と渇水、電力用の水と農業用水、あるいは都市用水がある。また、水と関わりのあるものとして健康や、生物多様性・生態系も関係する。国際的にはジェンダーも非常に大きな問題である。水を統合的に管理して、様々なステークホルダーや相互関係の問題を解いていくことを統合的水資源管理というが、そこで必要となる包括的な情報を提供することができる。

もう 1 つ大きな項目として、少し時間スケールが長い気候の変化に対する適用がある。重力センサーは小さな 2 つの衛星で飛ばしている（タンデムという）（図 7）。ある地点の重力が大きいと、前の衛星は重力が大きいので加速され、2 つの衛星の距離が広がる。その距離を正確に計測する。後ろの衛星がその地点に到達すると加速され、距離が縮まる。重力は地下水や土壌中の水分量、ダムの貯水量が増えると上がる。地表面と土壌水分と地下水のトータルの水の増減が把握できる。ただ、空間分解度は粗く、100km や 150km の平均しかわからない。河川を見る場合、100km × 100km で 1 万 km2 の流域になるが、河川の水の流れは下流端で測っている。その積分情報は河川管理に実は非常に役に立つ。衛星観測の地下水観測は分解能が粗いから管理に使えないという方もいるが、私は十分使えると思っている。我々は川の至るところで流量を測っているわけではないのでモデルで把握しているが、計測値は積分値でも十分価値が高いことを考えればご理解いただけよう。

重力のセンサーの計測では、表面と土壌水分と地下水が全て入っているが、半乾燥帯では表層水はほとんど無いため土壌水分と地下水のみとなる。土壌水分はマイクロ波で十分把握できるので、私は国際的に土壌水分を衛星で計測する専門家と見られている。JAXA の全球の土壌水分のアルゴリズムは私のアルゴリズムである。

表面と土壌水分と地下水のトータルから土壌水分を引いた変動が地下水の変動になる。引き算をすると図 8 のようになる。これを現地の地下水の井戸のデータと組み合わせると合致する。地上データで検証ができる。衛星による観測手法は広域の地下水をよく把握することが出来るということで、非常に役に立つ手法である。

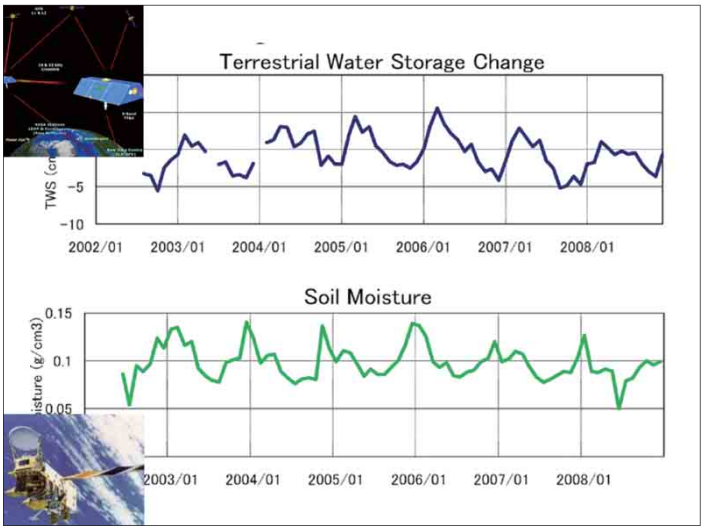


図７

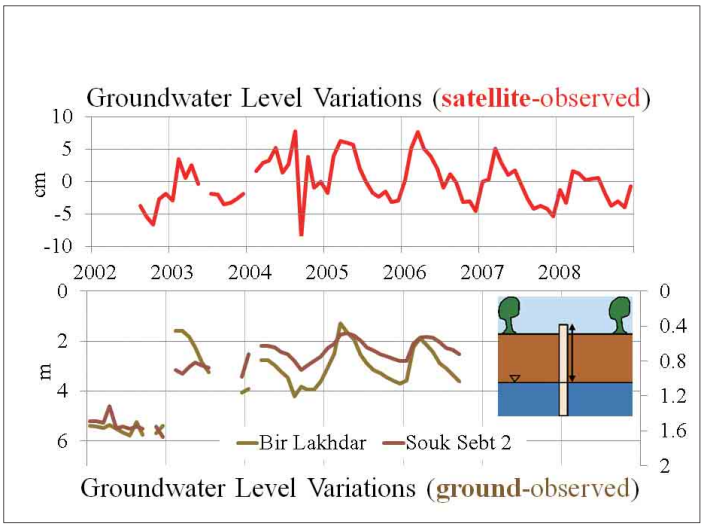


図８

様々な使い方がある。図 9 の青線は日本のモデルで計算した地下水の変動で、赤線が 2 つの衛星を組み合わせた手法による観測値である。1 年間の変動の様子をよく表すことができている。モデルの側からこれだけ整合していれば十分と思う。このモデルに気候変化の 100 年間の予測の結果を入れると、100 年間の地下水のデータが予測できる。2011 年から 2100 年まで計算すると、これは北アフリカの例であるが、変動はあるものの減少傾向を示している。赤道で上昇して亜熱帯高圧帯で沈降するハドレー循環という現象があるが、温暖化するとハドレー循環が強化されるといわれている。北アフリカから中央アジアにかけてはその循環の下降域である（緯度が 18 度か 20 度あたりの亜熱帯高圧帯）。ハドレー循環が強化されると下降流が増えるため雨が降らなくなる。その影響が地下水に現れてくると物理的には理解できる。水管理は 1 日や 2 日でできるものではないため、長期的な水資源管理に非常に有用な情報である。

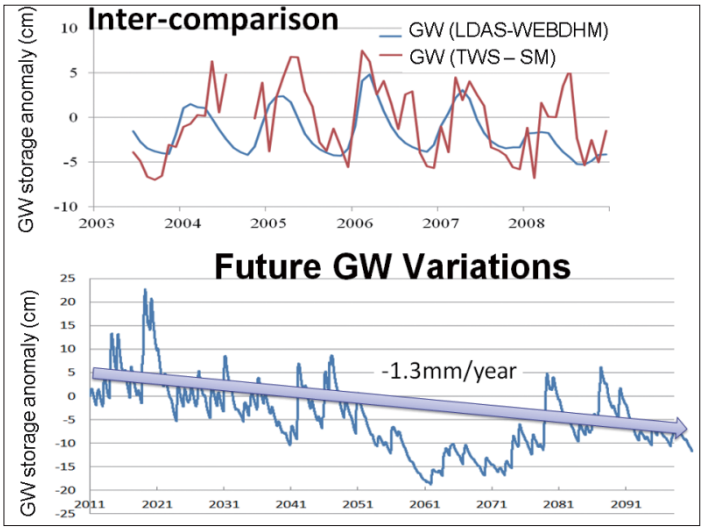


図９

モデルを組み合わせるとこのようなことが出来る。水の情報は、都市や農業、生物多様性など様々な分野で使われるため、EDITORIA で一生懸命連携を促した（図 10）。各分野ではそれぞれモデルを持っているが、ほとんどが水の情報を必要としている。衛星情報や気象情報も必要としている。そこを連携するところが他に無く、DIAS 上で取り組んでいる（図 11）。

具体例として、都市の下水道のモデルと河川のモデル、非常に強い雨の観測値や予測値を統合して、都市の洪水や川の氾濫の結合モデルができ、幾つかの川で動いている。水資源の利用にも役立ち、農業生産のサポート情報にもなる。

こういったシステムは非常に役に立つと思うが、それを政策に使う部分で壁がある。例えば、どれだけの経済的な価値があるか、GDP にどれだけ貢献するのか、ロスをどれだけ賄えるのか、ということを示す必要がある。また、その情報を使って避難したり防災行動をとれるかも非常に重要で、そこも組み合わせることでしっかりした河川管理ができる。河川の管理ではなくて、流域全体の管理ができるということである。

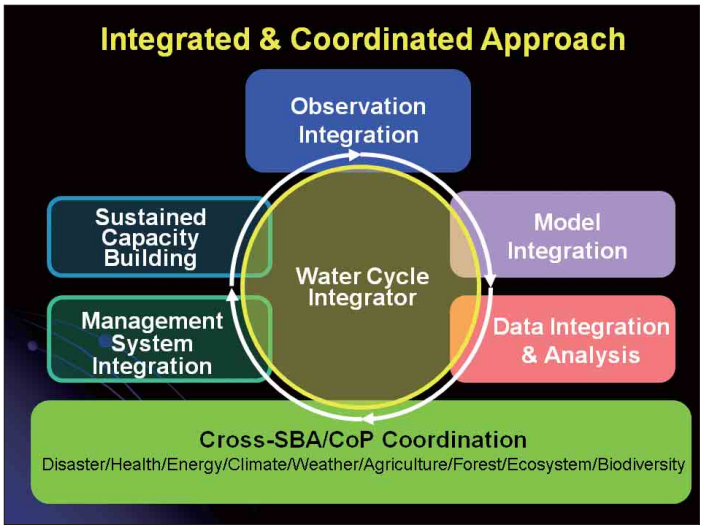


図 10

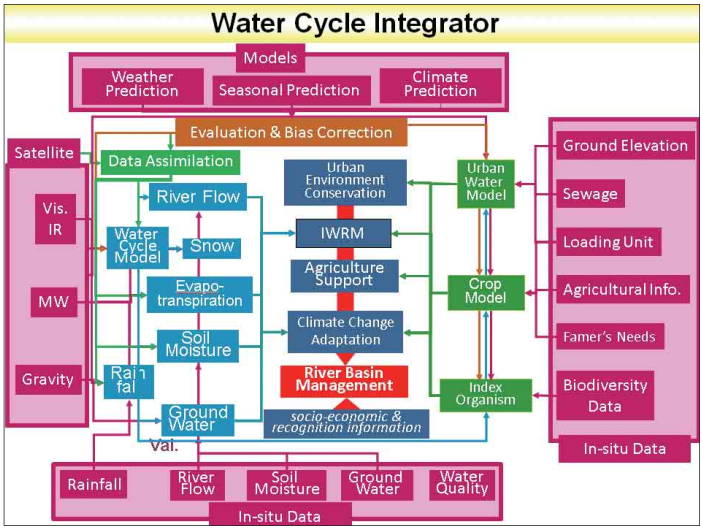


図 11

図 12 は、北アフリカにおける農業と水のモデル結合の例である。緑色は、この結合モデルで出した穀物の葉の量（LAI：Leaf Area Index、葉面積指数）を約 20 年計算して、平均値からどの程度ずれているかという偏差を出したものである。オレンジ色は、チュニジアの穀物生産高の統計をとり偏差を出したものである。1988 年と 89 年、94 年と 95 年は大渇水であったが、穀物の生産高も大きく減っており、水の情報と穀物の情報を組み合わせることで、国の農業生産高の情報に変換できる。

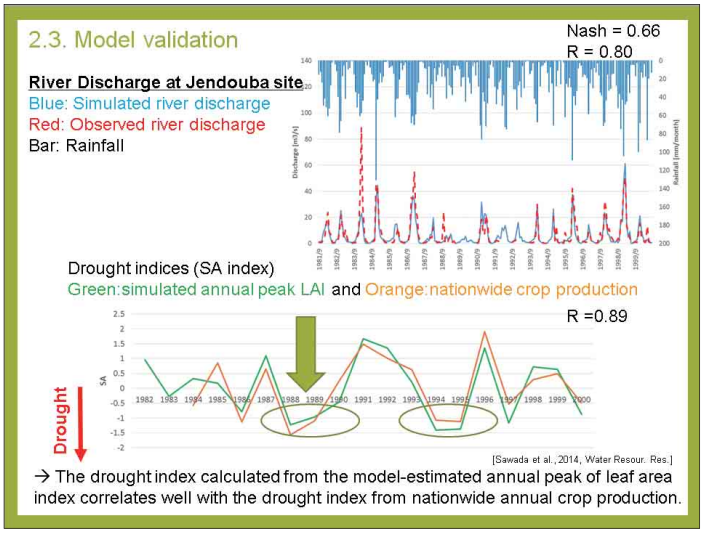


図 12

過去の解析も予測に使う。DIAS はリアルタイムのデータ管理ができるので非常に強い。図 13 のグラフはソマリアの雨量を示し、黒線が 2010 年より前の約 10 年間の雨量、青線が 2010 年と 2011 年の 2 年分の月毎の雨量である。青線が非常に少ない。2 年間続いた大渇水でソマリアは非常に大きな飢饉に見舞われた。こういったことが予測できれば、根本的な解決にはならないが、飢饉対策や難民対策などが打てる。

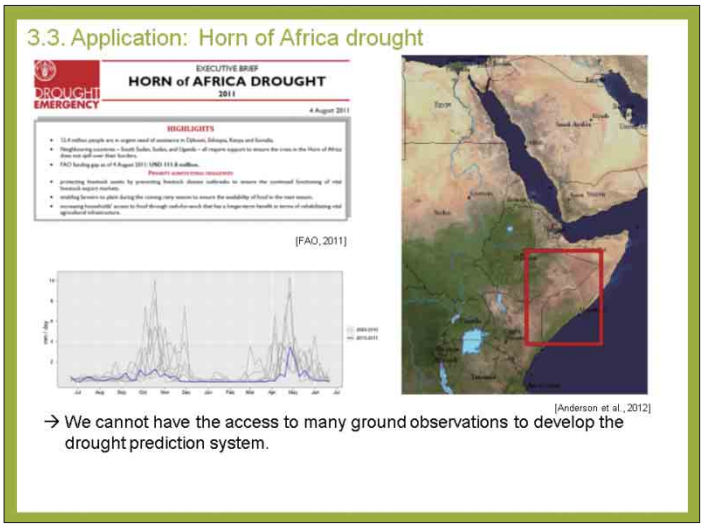


図 13

データ同化について。マイクロ波を使った計測では表面付近の土壌水分量しかわからない。作物の根付近にある土壌水分量が必要だがそこまでは見えない。しかし、マイクロ波では植物は立っている水として見え、そこには根に水があるはず、ということになる。このように、作物生育のモデルと、土壌水分量の動態モデルと、そこを電磁波が伝播していく別の方程式を組み合わせ、整合するように初期値をつくれば非常に正確な初期値となる。土壌が湿っていれば雨が多少降らなくても作物は育つが、乾いていたら多少降っても効果が無い。よって、正確な初期値を算定することで、図 14 のように、3 カ月予測、6 カ月予測、10 カ月程度の予測ができる。

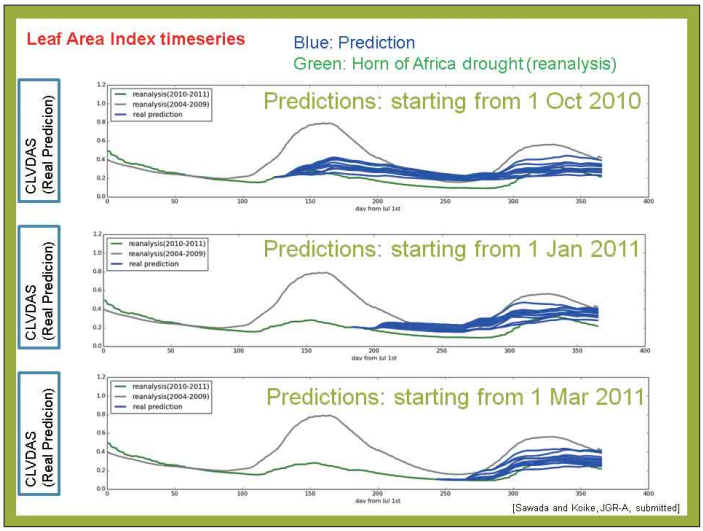


図 14

これだけ精度が良くなった理由は気候変動予測にある。IPCC の第 5 次評価報告では近未来予測（20 年予測）を実施した。予測には初期値が必要になるため、初期値づくりのために科学が進展し、その結果として季節予測が進展した。その季節予測と土壌水分量の初期値の把握により、ある程度の渇水予測ができるようになってきている。対策につなげるところまではいっておらず、それぞれの個別要素が研究開発段階である。

次に経済について。図 15 は京都大学の経済のグループが一般均衡モデルを使ってその国の GDP や社会格差を表現するモデルを作っている。我々が開発している洪水予測モデルが出す氾濫域の面積やその水深を、彼らの経済モデルの中に組み込む。この成果を持続可能な開発目標に入れることを目指し、約 3 年間京都大学のグループと開発を行った。

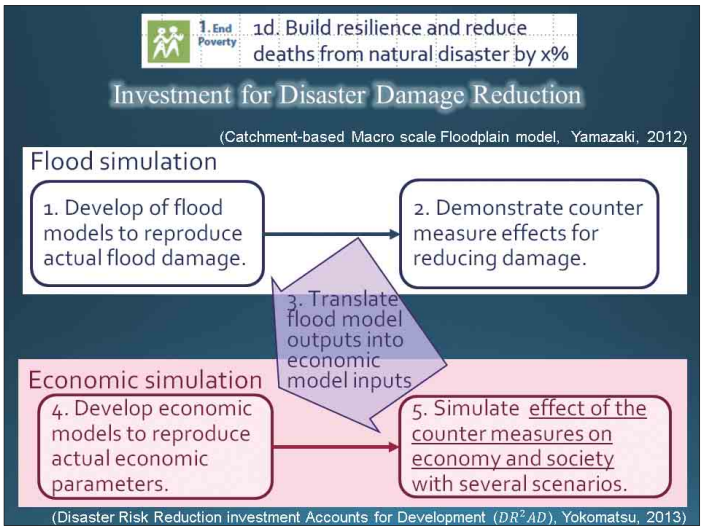


図 15

この取り組みは非常に進展し、予想外の結果が得られた。

気候予測のデータを使い、インダス川の中流部だけに堤防をつくり氾濫を抑えた場合と、下流部だけに堤防をつくり氾濫を抑えた場合の 2 つのケースを計算した（図 16）。青が中流部、ピンクが下流部である。GDP では中流部につくった方が若干よいという結果になる。通常 GDP が上がると社会の格差は広がり、貧富の差は広がる。どのようにしたら、GDP も上がり社会の格差も広がらないかは経済学的には非常に重要な課題であるが、その方策はわからない。そこで中流部と下流部につくる場合を検証した。すると、中流部につくるとジニ係数は下がり、下流部につくるとジニ係数は上がるという結果が出た。中流部につくると GDP も上がり社会の格差も減るという解があることが初めてわかった。なぜそうなっているかというと、中流域に中～貧困層の人が多く住んでいる。一方、下流域は富裕層が多く住んでいる。よって、下流域を守れば GDP は上がるが、下流域の富が増えて中流域は下がるため、ジニ係数が上がってしまう。しかし、中流部は農業地帯であり、そこを守ることで農業生産高が大きく上昇し農業被害額が減るので、GDP が上がり教育費も増える。これは一般均衡モデルであるため、教育にどれだけ投資するとどれだけ労働人口が生まれるかも全て計算している。中流部を守ることでジニ係数が下がる。非常に意外な結果であった。

管理システムの統合について（図 17）。国土交通省や気象庁と協力して、様々な観測データや予測をリアルタイムで提供していただいている。気象庁のひまわり 8 号も国交省の XRAIN というレーダーのデータもリアルタイムで使うことが出来る。

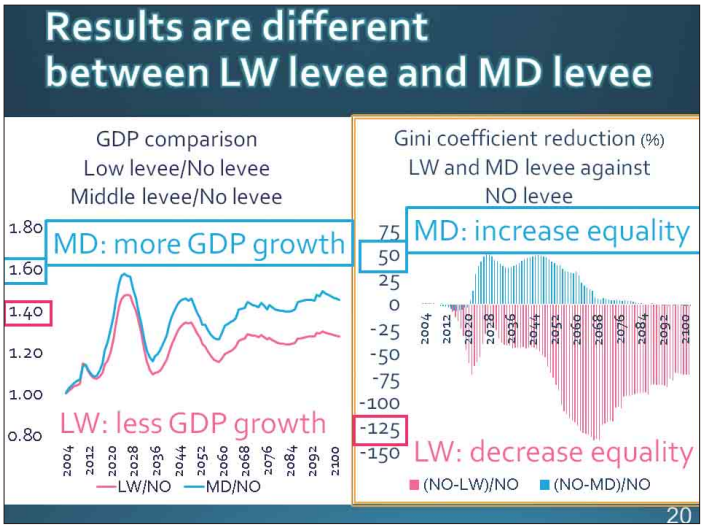


図 16

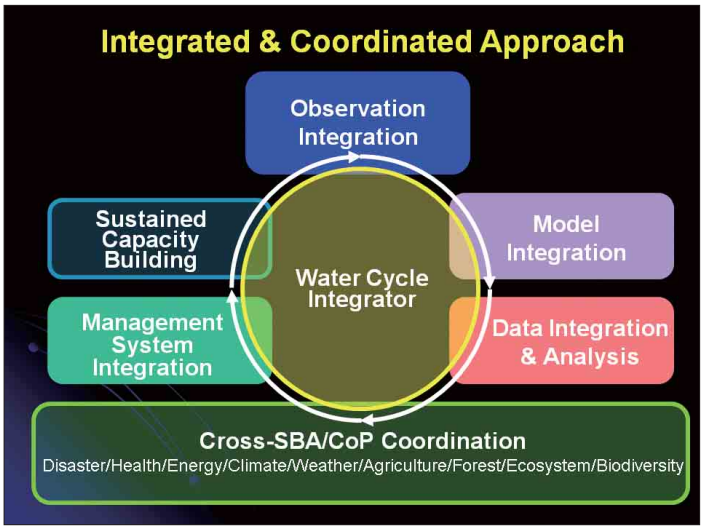


図 17

我々の水循環モデルは、リアルタイムのデータと毎日の気象データを使い、毎十分ごとに土壌水分や河川の流量を出している。なぜそれが必要かというと、流域が乾いている状態で雨が降ってもそれほど水は出てこないが、流域が湿っている状態で雨が降ると非常に大きな洪水になる。予測の初期値を出すために必要である。まず、気象庁の数値予測が大雨を予測する。15時間前から現在までを予測した数値と現在の観測値を使い、現在までの数値予測の精度を評価すると誤差がある。その誤差を反映して雨の予測に幅を持たせる。これはアンサンブル予測という。そのアンサンブル予測の雨のデータをこのシステムに入れれば、初期値が把握できているため洪水のアンサンブル予測ができる。このシステムを国交省と気象庁と協力して完成させた。（図 18, 19, 20）

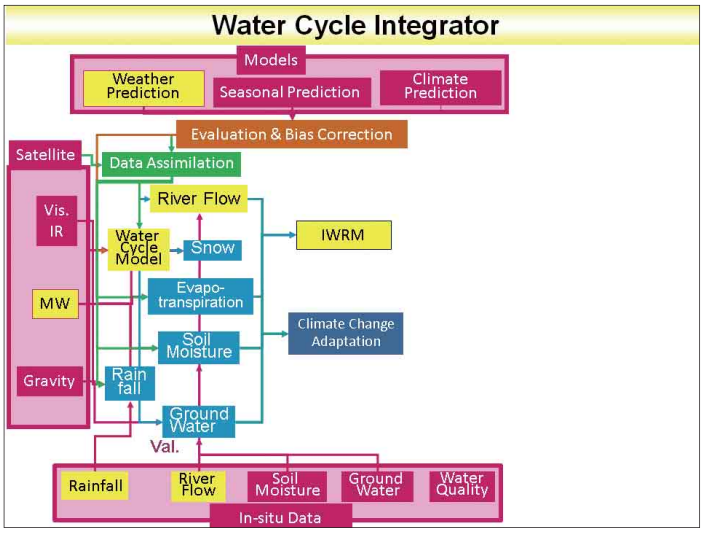

Water Cycle Integrator
Models
Weather Prediction
Seasonal Prediction
Climate Prediction
Evaluation & Bias Correction
Satellite
Data Assimilation
River Flow
Vis. IR
Water Cycle Model
Snow
IWRM
MW
Evapo-transpiration
Climate Change Adaptation
Soil Moisture
Gravity
Rain fall
Ground Water
Val.
Rainfall
River Flow
Soil Moisture
Ground Water
Water Quality
In-situ Data

図 18

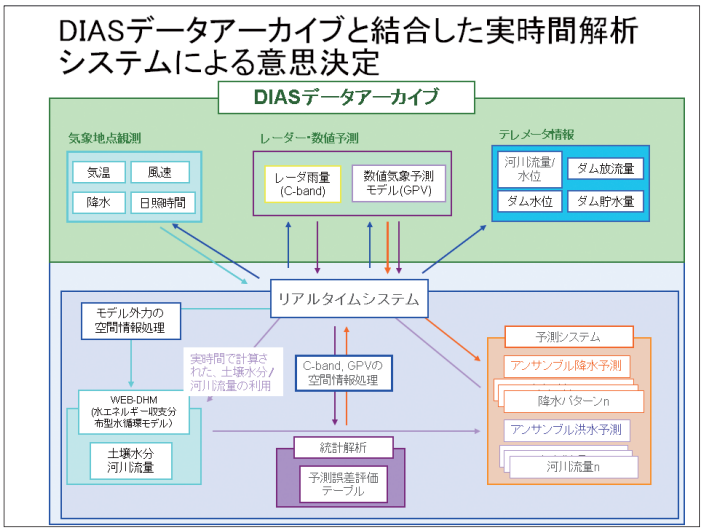

DIASデータアーカイブと結合した実時間解析システムによる意思決定
DIASデータアーカイブ
気象地点観測
気温
風速
降水
日照時間
レーダ・数値予測
レーダ雨量 (C-band)
数値気象予測モデル(GPV)
テレメータ情報
河川流量/水位
ダム放流量
ダム水位
ダム貯水量
リアルタイムシステム
モデル外力の空間情報処理
実時間で計算された、土壌水分/河川流量の利用
C-band, GPVの空間情報処理
WEB-DHM (水エネルギー収支分布型水循環モデル)
土壌水分
河川流量
統計解析
予測誤差評価テーブル
予測システム
アンサンブル降水予測
降水パターンn
アンサンブル洪水予測
河川流量n

図 19

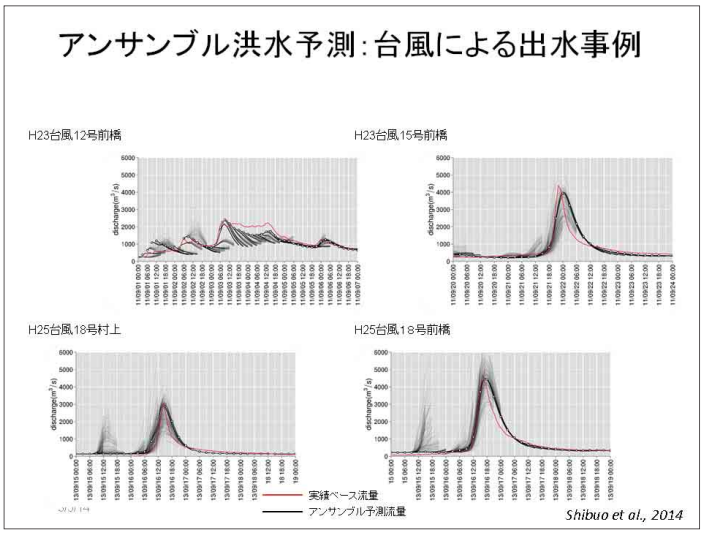

アンサンブル洪水予測：台風による出水事例
H23台風12号前橋
H23台風15号前橋
H25台風18号村上
H25台風18号前橋
実績ベース流量
アンサンブル予測流量
Shibuo et al., 2014

図 20

気象庁の数値予測の精度も非常に上がっており、15 時間予測をすると流量の非常に強いピークがわかる。3 時間ごとに更新されるため、ピークが落ちることもわかる。もちろん誤差はあるが、十分河川管理に使えるということがわかってきており、予測データを使ったダムの最適管理や、避難勧告を早目に出すといったことを実施に移そうと現在国土交通省と協力している。しかし、人の命がかかっているためなかなか難しい。リアルタイムでデータを継続的に DIAS から関東地方整備局に提供しているが、使い切れない状態が続いている。

確かにその通りで、どう使ったらいいかの技術開発が十分にできていない。そこで次期 DIAS では電力会社と協力した取り組みを始めている。紀伊半島での台風 12 号による大災害（深層崩壊などが起こった）では、電力会社があらかじめダムを放水していれば洪水を少しでも防げたが、ダムが満杯のときに水が来て放水したために非難された。それを契機に電力会社は安全に水を流下させつつ電力のための水をどう保つかに腐心していた。中部電力と東京電力にお声がけして、このシステムを使ったダム操作の最適化に関する技術実証試験をこれから始めるところであり、技術の確立を目指す。（図 21）

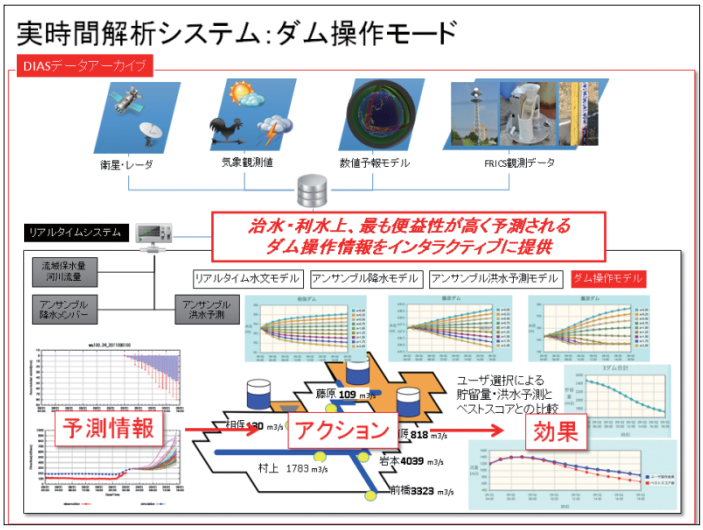


図 21

最後に能力開発である（図 22）。いろいろな切り口があるが、我々は、いくつかの地域で協議の場を持っている。こちら側の統合的な情報を住民の方々に渡して考えてもらうと、もう少しこのような情報を出して欲しいという要求が来るのでそれに応える。また、我々からもこういうことを考えたらいいのではないかという提言もする。そして、皆さんでこのように水の使い方を変えようという議論がされ、どれぐらいの効果があるかを評価する。そのようなサイクルを四国 4 県、新潟県の河川、東京都八王子市、北海道黒松内町で継続的に実施している。国外ではフィリピン、カンボジアでも進めている。（図 23）

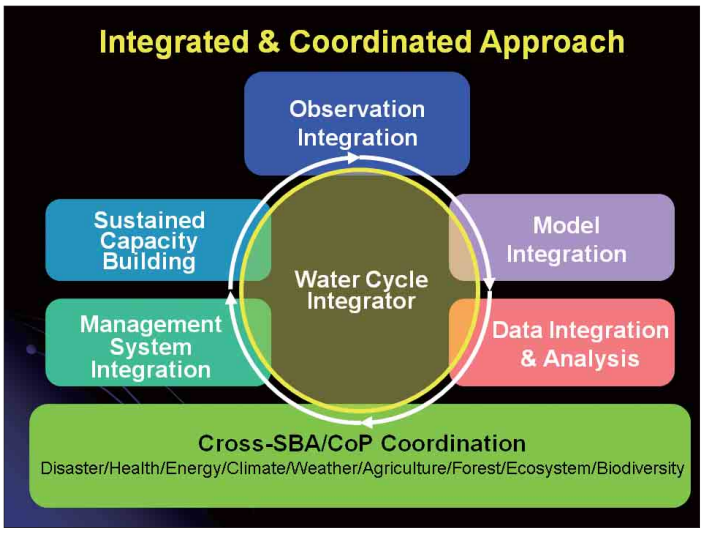


図 22

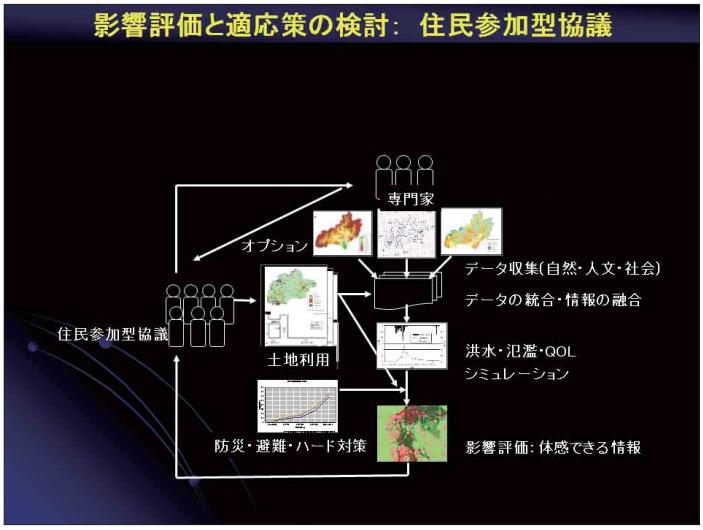


図 23

気候変動への適応では、まず、気候変動予測モデルから洪水や渇水の情報を出す。そして、それが人間世界にどのような影響を与えているかを把握し、その適応策としてどのような対策をするかのメニューを示し、決めていく。（図 24）

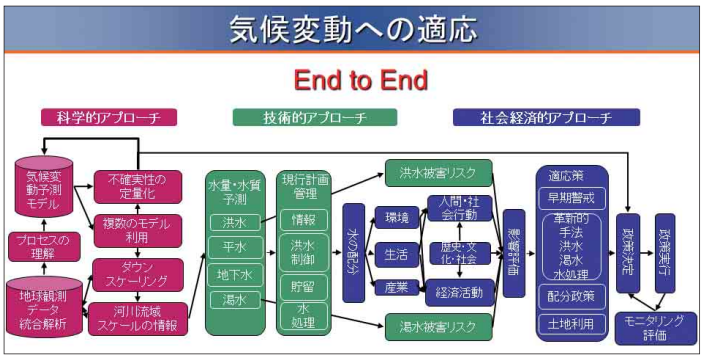


図 24

このような科学的・技術的・社会経済的なアプローチを組み合わせていかなければならないが、気候変動予測モデルで、地域の気候を予測してもモデルのメッシュが粗い。実際の観測におけるグリッド 1 つ分の面積毎の予測になる。そこで地上データと組み合わせて補正する。この補正システムは DIAS に実装されており、いろいろな方が手軽に補正ができるようになっている。（図 25）

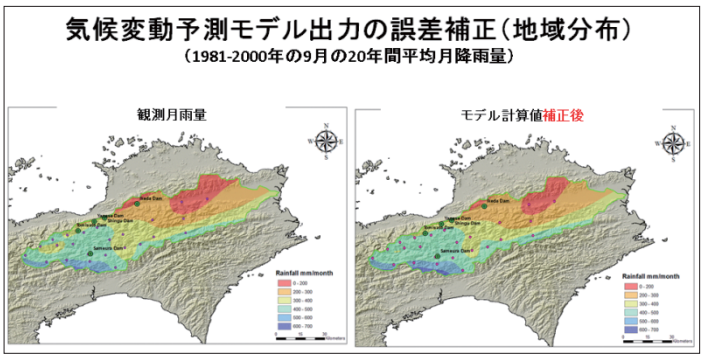


図 25

図 26 は、この補正を先ほどの水循環モデルに入れ、現在（1981-2000）と将来（2046-2065）の各 20 年間で起きる洪水の上位 20 位を、現在気候と将来気候で比較したものである。8 つのモデルが選ばれているが、全てのモデルで洪水が激化している。渇水の場合でも同様に比較すると、渇水の平均値はそれほどでもないが、極端に厳しい渇水が発生する可能性が高いという結果が出てくる（図 27）。

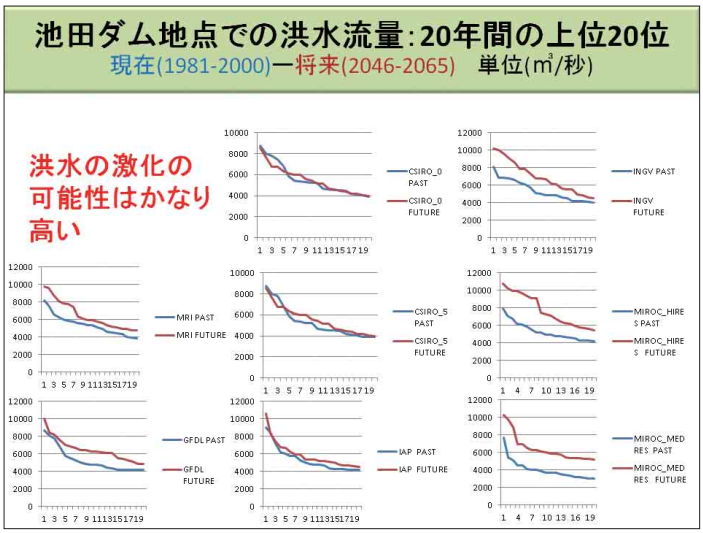


図 26

早明浦ダム地点での渇水流量の変化
（青：豊水傾向　赤：渇水傾向）

厳しい渇水が発生する可能性が高い

気候変動予測モデル	渇水流量の平均値			渇水流量を下回る日数の平均		渇水流量を下回る日数の最大		1／10に相当する渇水流量	
	現在	将来		現在	将来	現在	将来	現在	将来
CSIRO_0	2.96	3.00	↑	15	14	34	41	1.21	1.10
CSIRO_5	2.97	3.00	↑	14	14	35	41	1.21	1.10
INGV	3.23	3.13	↓	13	14	32	35	1. 10	1.24
IAP	3.51	3.57	↑	16	16	20	22	1. 22	1.26
MIROC_H	4.35	3.18	↓	20	13	79	33	1.28	1.22
MIROC_M	3.14	3.17	↑	14	14	39	41	1.22	1.21
GFDL	4.77	3.8102	↓	24	17	113	59	1.26	1.26
MRI	3.14	3.17	↑	14	14	39	41	1.28	1.23

図 27

図28は四国の非常に重要なダムである早明浦ダムの、過去20年分、将来20年分の水位である。黒線が過去の平均値で、赤線が将来の平均値であり、将来水位が大きく減ることがわかる。

非常に危険なのが洪水時の満水（オレンジ色破線）で、これを超えるとダムが操作不能になる。過去ではそのようなことは無いが、将来ではそのような事態が起きかねない。さらに、6月から9月の渇水期は水需要期だが、その時期にダムが空になる頻度が増えることがわかる。

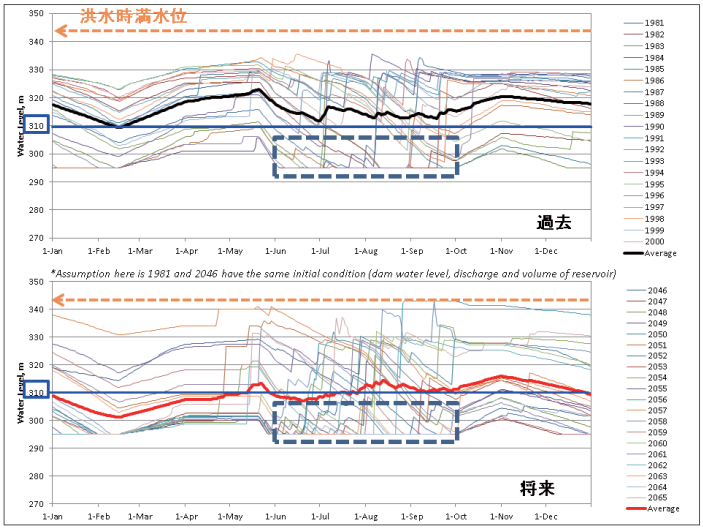


図 28

このダムは高松市まで水を運んでいる。このモデルの予測では2060年に非常に厳しい渇水がある。そのため、2060年に高松市の水の需要がどの程度かを予測する。そして、吉野川の早明浦ダムを操作して導水し、不足する量が図29のオレンジ色の部分である。その結果、高松市の経済被害を計算できる。127億円の被害で、208万トンの水が52日数不足することになる（図30）。それを補うためには、ダムをつくるのが一番早いが、日本ではほとんどダムを作れないため、水資源の有効利用や節水でどこまで対応できるかを計算する。そのような情報も含めて住民や市の方と相談すると、「これをまず頑張ってみようか」ということになる。また、現在ある

ダムをもう少し補強すると貯水量が増えるなどの検討がなされる。私自身はこういうことが本当に効果的なのは農業開発ではないかと思う。

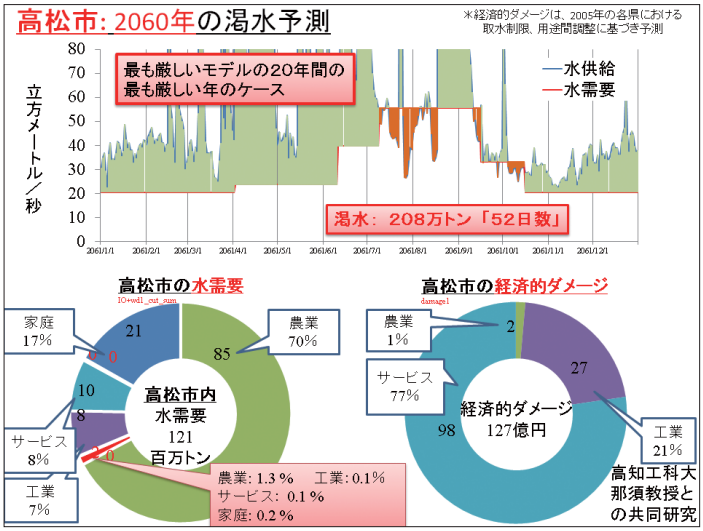


図 29

● 渇水量 208万トン(52日間)
● 経済的ダメージ 127億円
➡ 経済的損失 6,106円/トン

気候変動の適応策の検討

			計算条件	渇水量 208万トン 渇水軽減効果（万トン）	対策後の渇水量（万トン）	経済的ダメージ 127億円 経済的ダメージの軽減効果（億円）	対策後の経済的ダメージ（億円）	費用（億円）	経済的被害計（億円）
水資源の開発	新たな水源の開発	ダム(椛川ダム)	緊急水の112万トンが利用可と仮定 (費用) 工事費3.5億円/年×50年 維持管理費0.13億円/年	112	96	68.3	58.6	3.7	62.7
		宝山湖	渇水時100万トンが利用可と仮定 (費用) 調整池5.08億円/年×50年	100	108	61.0	65.9	5.0	70.9
		海水の淡水化	0.29(トン/秒)で52日間稼働 (費用) 工事費2.8億円/年×50年 維持管理費28.9億円/年	130	78	79.5	47.4	31.7	79.1
	既存の水源施設の活用・保全	ため池、地下水		-	-	-	-	-	-
		ダムオペレーション		-	-	-	-	-	-
		水源林の保全		-	-	-	-	-	-
水需要の抑制	水資源の有効利用	3R(産業)	52日間のみリサイクル率を3%向上 (費用) 152円/トンの経費、設備費除く	98	110	67.1	59.8	1.5	61.3
		漏水量の削減		-	-	-	-	-	-
		雨水利用の促進（協力率30%）	1世帯年間7,000トン雨水貯蔵量見込み ＊非渇水時の雨水貯蔵量を、ダム等に溜めておけると仮定 (費用) 200＄帯量：約8万円	32	176	19.7	107.2	-	(107.2)
		（普及率100%）		108	100	65.8	61.1	-	(61.1)
	節水の推進	節水意識の啓発		-	-	-	-	-	-
		節水機器の普及（普及率30%）	節水製機器により、1人1日0.48トン節水渇水時の52日間の効果 (費用) 洗濯機10万円、トイレ30万円	32	176	19.2	107.7	-	(107.7)
		（普及率100%）		105	103	64.1	62.8	-	(62.8)
		水道料金の値上げ	水道料金を5%up(142→149.1円/トン) ＊単価を5%upすると、使用量が3%削減されると仮定。市民には負担と不満も。	22	186	13.3	113.6	-	(113.6)

高知工科大那須教授との共同研究

図 30

このようなものを動かすには、非常に膨大で多様なデータを高度に情報処理する必要がある。我々の分野の研究グループでは不可能だが、喜連川先生のグループが担っており、我々はその上に分野間連携のモデルを構築し、データを相互に利用して、様々なプロジェクトを進めながら価値を生み出していく活動をしている。(図 31)

大変ありがたいことに、第 3 期科学技術基本計画では国家基幹技術と位置づけていただき発展し、第 5 期科学技術基本計画では共通的基盤システムとして DIAS という名前も入れていただいた。利用と開発を続けていく必要がある。それによりレジリエントな社会ができて、その中に持続可能な開発が生まれるということを目指したい（図 32)。

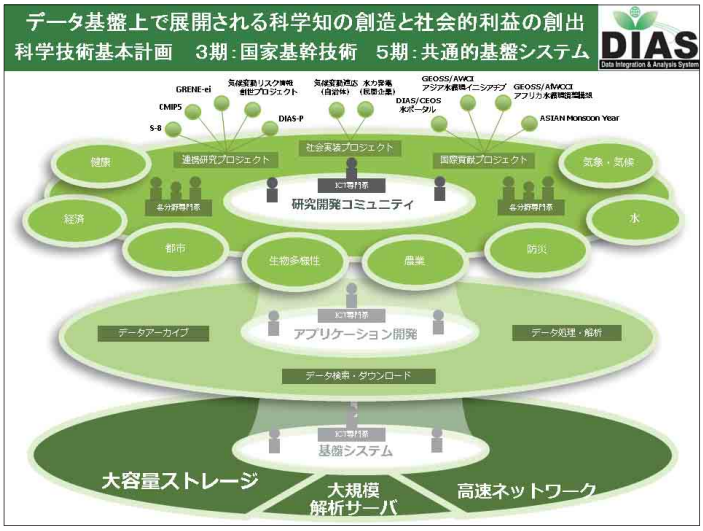


図 31

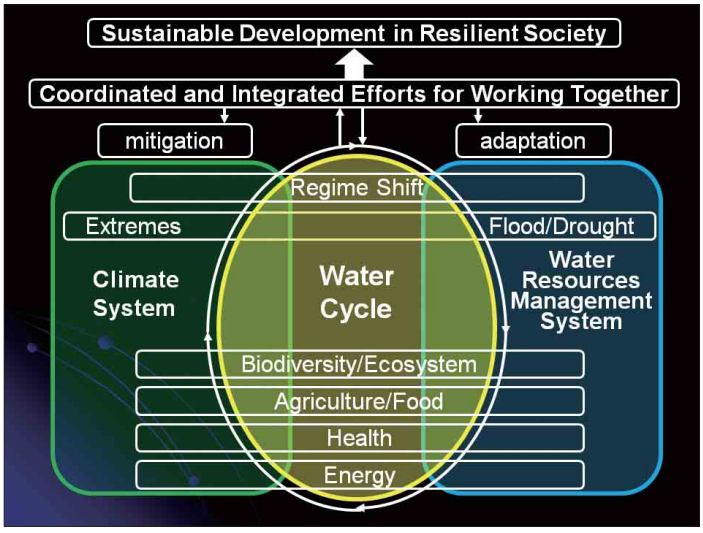


図 32

最後に、昨年 9 月 17 日に皇太子殿下、妃殿下が DIAS を視察いただきまして、ご説明をさせていただいた。皇太子殿下は昨年 11 月 18 日に国連の総会ホールで 40 分のご講義をされたが、DIAS の絵を出し、水や大気の非常に大規模なデータを DIAS に統合化して使っていくことが大事だとおっしゃってくださった。そして、さらに、災害の情報の意味を人々が受け取り適切に行動できる社会をつくることが重要であるとお話しになられた。この言葉に象徴されていると思うが、最終的に人々に届き、人々が行動を起こせるような情報をつくっていくことが不可欠と思っている。

［質疑応答］

Q：衛星のグリッドの大きさは。

A：衛星搭載マイクロ波放射計で見る土壌水分量の単位はまだ粗く、現在 60km キロである。植生は 25km 程度である。

Q：ゲリラ豪雨や非常に局地的な雨はどのように見ているか。

A：XRAIN（X バンド MP レーダー）がある。2008 年に神戸の都賀川で急な増水で流された事件があった。同年、東京雑司ヶ谷で下水道工事をしていた 4 人が流され、岡崎と金沢でもゲリラ豪雨災害が 4 件起こった。そこで緊急の対策委員会がつくられ、私が主査として提言したのがこの X バンド MP レーダーである。250m の空間分解能、1 分単位のレーダーである。通常は地上の雨量計とレーダーによる補正が必要だが、マルチパラメータであるため補正なしで使える。この全国配置を提言し、翌年すぐ実行に移されて、現在 39 基が日本の主要な場所に入っている。このデータは、国土交通省が使っているが、リアルタイムで DIAS にも入ってきており、水防モデルを組み合わせた対策になっている。

気候変動予測に使われる大気 - 海洋結合モデルの空間分解能で現在最も細かいもので 60km である。そのダウンスケール、すなわち細かな空間分解能に落とすという手続きを 1 つ入れる。そうすると、空間分解能の補正もできたデータを提供できる。

Q：データとモデル、そのモデルを組み込んだ予測ソフトウェアの 3 つは誰がどこまで利用できるのか。

A：難しいところである。利根川では、情報を 10 分ごとに地方整備局に流している。河川管理者がそれを参考にしながら何らかの意思決定をすることは全く問題ない。しかし、我々がこの情報を公的に出すと、気象法の観点や河川管理の観点から問題になる。よって、河川管理者が使うということがまず第一である。しかし、なかなか出来ない。すなわち、どのようなレベルまで使ったらいいかという技術開発ができていない。私は社会資本整備審議会の河川分科会の会長をしているが、人の命がかかることなので難しい。現場の方々がなかなか使えないのは理解できる。

下流の洪水を避けるためには予め放流しておけばよい。ダムの容量が空くので、そこで洪水を食い止めることができ、安全になる。しかし、電力側にとっては水を捨てる、すなわち発電の財産を減らすことになる。発電という事業の観点から損することはあっても、得することはない。しかし、そのような管理が社会的に必要である。そのような技術を確立したい。

もう一つ、洪水期はこれ以上水位を上げてはいけない、洪水用に容量を確保しておかなければいけないというように、運用規則で決めることができる。しかし、発電の財産を最低限に管理できる技術が確立すれば、河川の治水の観点からやっても良いということになるかもしれない。そのような技術開発をすれば、電力側にとっても治水側にとっても助かる。そのようなことが可能になって初めて、技術が使えると思う。

また、確実な情報ではなく参考情報ということであれば、一般市民の方にいつ頃増水するかを知らせる形で情報が使えるかもしれない。現在 XRAIN はそのような形で皆が使っている。ただ、XRAIN は観測値であるためそのままでよいが、モデルを走らせるとどうしても誤差が入る。それをきちんと認識した上で使われるならよいが、誤差をどこまで無くすことができるかには時間がかかる。市町村がそれを参考にして自分達の判断に使うことは全く無い。現在、電力会社と協力して、リアルタイムで動かす情報を、最終的には市町村レ

ベルで使えるような形にしていこうとしている。

Q：日本はこれから渇水期に入るのか。

A：わからない。基本的に世界中の多くの地域で洪水が激化するということは明白に出ている。

Q：洪水の起きやすいところが激化するのか。

A：ほとんど全てのところでそうである。

渇水については、ひどくなる地域と緩和される地域の両方がある。渇水は高気圧がどれだけ長時間とどまるかに応じて発生する。海洋温度の分布がある特定の分布になったときに、そのような現象が発生する。異常な高気圧の停滞が起こると、その地域は渇水がひどくなり、そこが高圧帯になるということは、他は低圧帯になるということであるので雨が降る。よって、地域的な差が出てくるのはあり得ることである。

Q：日本国内でもそのような地域的な差が出てくるのか。

A：日本は、おおむねの予想であるが、渇水が激しくなる傾向である。

ただし、このままだと平均的には渇水が激しくなる傾向にあるが、洪水が増えるため大雨の頻度が増える。川が自然のままであれば渇水はひどくなるが、日本のほとんどの川にはダムがあり、大雨の頻度が増えるということはダムがなかなか空にならないということになる。そこを考慮すると渇水は緩和傾向にある。どんな容量の貯水池がどれだけあるかに依存する。さらに、流域のどの程度の面積を占めているかにも依存している。したがって、ばらばらである。ダムのモデルも入っているので全て計算できるようになっている。

現在様々な検討が行われているが、そこまでは検討されていないので、「おおむね」渇水傾向という答えになっているが、気候が変化して渇水が激しくなり、大雨がところにより激しくなると、ダムの貯水容量をどちらに配合し直すかが非常に大きな課題である。洪水制御側に配合するということは夏の水位を下げるということで、利水容量が減る。しかし、うまく操作することで両方を制御できる可能性はある。

Q：観測の中でサテライトのデータとXRAINのデータが洪水の視点から非常に大きな役割があるが、例えば、別のデータがあれば農業用に広く展開できるというような、今後必要になるモニタリングデータはあるか。

A：国内は、雨についてはレーダーという武器がある。さらに空間分解能が250 mのXRAINが登場し、非常に整ってきたと思う。しかし、ローカルな気象のデータである風や気温のデータはそうでもない。よって、地域的に、極端に高温または低温になるような現象の場合には、ローカルな気象データの収集が必要である。現在NTTデータなどが基地局に気象観測装置をつけ、非常に細かな空間分布を出す取り組みが行われている。極端な現象が作物や人間の健康に影響するため重要になる。モデルや、現在の気象庁が持っているようなネットワークではカバーできない。

Q：モデリングで、時間分解能や空間分解能が異なる観測データを使う際は、自動的に補正してくれるシステムが組み込まれているのか。

A：必要な分解能に内外装するシステムが組まれている。

Q：穀物のモデルや、生物多様性のモデル、都市の水のモデルなどがプラットフォーム上で統合されるという話であったが、半自動的に統合されるのか。

A：いいえ、そのようなプロトタイプができたという程度である。DIASの第3期では、水のアプリケーションについて1つ応募課題があり、先程紹介した洪水のアンサンブル予測について申請した。これを様々な場面できちんと使えるようにDIAS上に組み込む作業になる。

現在利根川について作っている。これをいろいろなところで使おうとすると、要素モデルに分解し、きちんとメンテナンスできるようにしなければならない。また、研究を目的につくっているため、変なデータが来ると止まってしまう。しかし、実際の運用では止めてはいけない。品質管理のシステムがあり、データをきちんと補正して、モデルが止まらないようにする。それは、我々の研究の領域を超えているため、民間の企業に委託して進める形にしている。汎用化されていくと言ってもよい。現在、大井川と信濃川の上流を対象とし、汎用化できるようなシステムとして開発することにしている。

Q：先ほど住民参加型の協議の話があったが、このような話はどちらから持ち上がってくるのか。

A：研究者側からである。このようなものがあり、このような結果が出せるからやってみないかということで、市が住民を集めて取り組んだという形である。

Q：様々な技術が進展し、高度なことができるようになっていることに驚いたが、ボトルネックになっていることや、ここが進展するともっと発展するということはあるか。

A：やはり雨である。日本はXRAINでほぼ解決したが、国際的には雨のデータをリアルタイムでとる方法が極めて難しい。日本はトップを走っており、JAXAのGSMaPという衛星降雨データがある。毎時間ごとに観測30分後に（現在30分後に出るのはアジアだけだが）全球の衛星降雨データが出る。しかし誤差が大きい。空間的に強いところと弱いところは出るので、地上の雨量計が幾つかあれば補正ができる。現在、カンボジアに7台、スリランカに4台入れ、これからスリランカにはさらに3台、パキスタンに7台、フィリピンに7台入れる。それをモバイルフォンや近くのインターネットに飛ばし、リアルタイムでDIASに持ってくる。GSMaPのデータが30分で来るので、リアルタイムで補正して配信する取り組みを、実施するところである。カンボジアではすでにやっている。

そのようなことをしなければいけないが限りがある。衛星に搭載できる定量的な降雨観測には2つの課題がある。まず、雨はそれほど様々な場所で降らない。面的に雨が降っているところは狭く、しかも時間が短い。1個の積乱雲のライフタイムは40分である。それが重なることで2時間、3時間降るが、やはり短い。短いうえに非常にローカルなものを衛星で測るのは苦手である。衛星の数を増やす以外にない。衛星の数を増やすことが1つの重要な課題である。

もう1つは、XRAINのように高性能レーダーで測るとそのままデータが使えるが、測る幅を広げるとマイクロ波で行わざるを得ない。マイクロ波で測った場合、大気の情報を見て雨のデータを出しているが、その背景には陸がある。背景の陸の情報と、雨が降っている場所の情報は周波数が違うため、その2つをうまく組み合わせて正確な雨のデータを出すという研究開発が動いている。マイクロ放射計の高度な利用という研究開発である。その研究開発は、例えば、マレーシア、タイ、ベトナム、フィリピン、インドネシアなどで、レーダーを積んだ衛星を自分達のお金で1基上げないかと声をかけている。各国が1基ずつ上げて全部で8基程度になると十分に使えるというプログラムを、JAXAが各国と協議しながら一生懸命立てようとしている。そのようなプログラムが動くと数は増えていく。

Q：アジア圏は日本がリーダーをとってやっているか。

A：はい、この分野は圧倒的に日本が強い。世界的にも同様である。世界の水ODAの4割は日本である。日本の水分野での貢献は、科学技術の面だけでなく国際貢献の面も非常に強い。日本の強みを支える科学技術と思っている。

Q：ウォーターサイクルインテグレーターとして、このような状況まで持っていきたいという

絵は描いているか。

A：はい。アジア水循環イニシアティブでは、アジアの 11 カ国と協力し、DIAS を使って各国の気候変動による水資源への影響、洪水への影響を見る枠組みをつくってきた。アフリカは 4 流域でその枠組みをつくり成果が出てきた。先ほどの渇水予測は、実はごく最近の成果であり、今年の 3 月に我々の学位を修了した方の成果だが、これは世銀がぜひ使いたいと言っており、3 月から協議を開始している。目標としては、グローバルに使えるデータ、リアルタイムに使えるデータがあり、それを各国が使いながら各国の管理や計画に使えるような枠組みが、国際協力の中でつくられていくような絵を描きたい。渇水と洪水の両方について。

Q：そうすると、それを支える基盤的な要素から、実際的な社会マネジメントでどう費用分担をするかなどの議論になるか。

A：そうなっている。現在、内閣府の宇宙戦略室の中で、水循環のデータ利用に関する国際的な枠組みをつくる委員会を設置し、昨年度はその実現性について、米国の NASA や NOAA、インド、ヨーロッパでヒアリングをし、何となく全体として前向きだということがわかった。そこにプライベートセクターがどのように関われるかを今年度協議をしながら進めていく。

Q：DIAS の仕組みに感心しているが、どのようにつくり上げてきたのか。

A：例えば、DIAS にはハードディスクのお化けのようなものがある。5 年後にはこの 1 個の躯体は 3 分の 1 の値段になり、データのニーズがこの程度あるので、今年度と来年度はこれぐらいのレベルに抑えておき、その分、サーバーやネットワークのところに投資をしよう、というようなデザインをきちんと行いながら開発している。また、ソフトウェアは、使う側が何をやりたいかを示し、デザイン側が作成する。デザイン側は、汎用的なベースラインを構築しつつ、この部分を変えたら水や生物多様性にも使えるというような戦略を打って開発する。一番良かったのは、代表者として自身がそこに全く口が出せなかったことである。出さなかったことではなくて、出せなかったことである。そこは彼らの世界最先端のエキスパタイズでできたということだと思う。

Q：これは農業経済の予測にも使えないか。

A：それも随分話があったが難しいという結論で着手しなかった。農業のグループはいるが、農業は投機的なものなので、どこまでできるのか。限られた期間の中で、成果を出し、その成果によって次に進む必要があったため、様々な選択をした中で、まだ手は出せないという判断をした。

Q：20,30 年前に衛星が 2 波長で作物のでき具合を監視するようになり、小麦やトウモロコシが随分変わった。ソビエトの小麦ができていないはずなので価格が上がるなどいろいろなことが起きた。

A：米もできるようになりつつある。
経済モデルも対象として面白ければ当然経済のモデル屋さんと一緒にやるが、これまでの 10 年のフェーズはやらなかった。これからの 5 年は公費のみにはよらない DIAS ということなので、民間セクターの資金が入ってきてその部分をやる可能性は十分にある。

Q：次期計画では課金システムにしていくのか。

A：必ずしも課金システムではない。DIAS で情報を生み出し、その情報を SaaS 形式で売っていく。要するに、データを使うことに課金することはまず無理だろうというのが我々の判断である。結果を売る。民間がお金を出して一緒に開発したいと言えば、これからの枠組みでは十分に先ほどの投機的なことも起こり得るし、保険などの分野もあり得る。

付　録

付録　開催概要・プログラム

● 気候変動区分

日時：2016 年 4 月 20 日（水）10：30 ～ 11：30

場所：JST 東京本部別館　4 階会議室 A

プログラム（敬称略）：

10：30 ～ 11：30　講演　原澤英夫（国立環境研究所　理事）

● 環境汚染・健康区分

日時：2016 年 4 月 25 日（月）14：00 ～ 16：30

場所：JST 東京本部別館　4 階会議室 E

プログラム（敬称略）：

14：00 ～ 14：05　開会挨拶
　佐藤順一（CRDS　環境・エネルギーユニット　上席フェロー）

14：05 ～ 14：15　趣旨説明
　松本麻奈美（CRDS　環境・エネルギーユニット　フェロー）

14：15 ～ 14：45　講演①
　井口泰泉（横浜市立大学　客員教授）

14：45 ～ 15：15　講演②
　柴田康行（国立環境研究所　環境計測研究センター　フェロー）

15：15 ～ 15：45　講演③
　渡辺知保（東京大学　大学院医学系研究科　教授）

15：45 ～ 16：30　全体議論

● 生物多様性・生態系区分

日時：2016 年 2 月 4 日（木）10：30 ～ 12：00

場所：JST 東京本部別館　4 階会議室 E

プログラム（敬称略）：

10：30 ～ 10：40　趣旨説明　　松本麻奈美（CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー）

10：40 ～ 11：10　講演①　　中静透（東北大学 大学院生命科学研究科 教授）

11：10 ～ 11：40　講演②　　矢原徹一（九州大学 大学院理学研究院 教授）

11：40 ～ 12：00　全体議論

● 循環型社会区分 (1)

日時：2016 年 3 月 30 日（水）17：00 ～ 18：00

場所：JST 東京本部別館　2 階セミナー室

プログラム（敬称略）：

17：00 ～ 18：00　講演　菊池康紀（東京大学「プラチナ社会」総括寄付講座 特任准教授／ CRDS 特任フェロー）

● 循環型社会区分 (2)

日時：2016 年 4 月 8 日（金）16：00 ～ 17：00

場所：JST 東京本部別館　4 階会議室 A

プログラム（敬称略）：

16：00 ～ 17：00　講演　小池俊雄（東京大学　大学院工学系研究科　教授）

■ワークショップ企画・報告書編纂メンバー■

倉持　隆雄	センター長代理	
佐藤　順一	上席フェロー	（2016 年 3 月～）
松本麻奈美	フェロー	
大平　竜也	フェロー	（2016 年 4 月～）
緒方　　寛	フェロー	（～ 2016 年 3 月）
尾山　宏次	フェロー	
鹿園　直毅	フェロー	（～ 2016 年 3 月）
島津　博基	フェロー	
鈴木　康史	フェロー	
関根　　泰	フェロー	
松田　一夫	フェロー	

※お問い合せ等は下記ユニットまでお願いいたします。

CRDS-FY2016-WR-06

俯瞰ワークショップ報告書

環境分野の研究開発の概況

平成 28 年 12 月　December 2016
ISBN 978-4-88890-530-5

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
環境・エネルギーユニット
Environment and Energy Unit,
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（代表）
ファックス　03-5214-7385
http://www.jst.go.jp/crds

© 2016　JST/CRDS

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。
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-530-5