

6. 新しい大気科学の方向性について

—地球環境研究との接点—

中 島 映 至*

要 旨

本稿では近年の大気科学を取り巻く情勢について分析し、その中で大気科学に求められている方向性について検討する。そして、持続可能社会構築のために何をすべきかを提案したい。また、その実施に関する問題点として、我が国の技術移転システムの脆弱性を指摘したい。

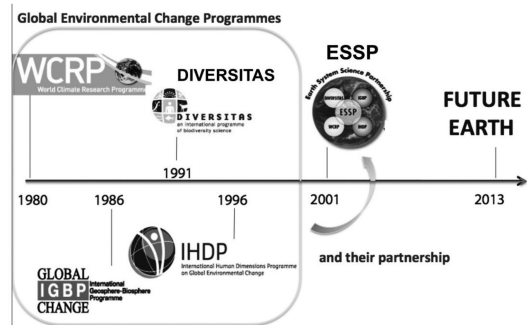
1. はじめに

人間社会の問題と環境問題への対応のために開かれた国連持続可能な開発会議 (Rio+20) では、持続可能社会の構築に向けた科学のより積極的な関与が提案された。ノーベル賞科学者の Paul Crutzen による「Anthropocene」(人類紀) という表現が生まれたように、人間活動の爪痕は地球スケールでも現れている (King *et al.* 2008)。人類もまた環境変化と貧困などの問題を抱えており、その解決のために科学がより積極的に関与することが求められ始めた。Actionable Science (実践可能科学) という言葉も使われ始めた。「IPCC の報告書をいくら積み上げても、地球温暖化問題は解決していない」という社会からの声がある。その中でフューチャーアースなどの取り組みが始まろうとしている。このような新しい流れの中で、大気科学がどのように展開してゆくべきかを議論することは重要である。

2. 2013年以降の地球環境変化研究

国際科学会議 (ICSU) のもとで発達してきた地球環境変化研究 (Global Environmental Change Programmes : GEC) プログラムは、世界気候研究計画 (WCRP)、地球圏・生物圏国際協同研究計画

(IGBP)、地球環境変化の人間社会側面に関する国際研究計画 (IHDP)、生物多様性科学国際計画 (DIVERSITAS) から成るが、2001年からは地球システム科学パートナーシップ (ESSP) を形成して、地球環境問題の解決に向けた共同の取り組みを行って来た (第1図)。しかしながら、この仕組みが機能していないという声があげられるようになり、2013年から新たな枠組みとして ICSU・国際社会科学評議会 (ISSC)・ベルモントフォーラム・ユネスコ・国連環境計画・国連大学・世界気象機関 (WMO) が連携するフューチャーアース枠組みが生まれた。ベルモントフォーラムとは、地球変動問題出資機関国際グループ (IGFA) の運営会議である。2012年1月に総合地球環境学研究所で開かれたベルモントフォーラムでは、フューチャーアース関連の国際共同研究公募 (淡水資



第1図 地球環境変化プログラムの進展。

* 東京大学大気海洋研究所。

teruyuki.nakajima@aori.u-tokyo.ac.jp

© 2015 日本気象学会



第2図 世界気候研究計画 (WCRP) の2013年以降の新しい組織図。4つのコアプロジェクト (GEWEX・CLIVAR・SPARC・Clic) を横断して6つのグランドチャレンジ課題に挑戦する。

源の安全保障、沿岸の脆弱性) が開始された。順次このような課題解決型の公募がかかる予定である。このような動きは、科学者のみの活動では、社会の問題を解決するには限界があるという認識から発している。そのために、新しいフューチャーアース枠組みでは、ステークホルダーと政策策定者を巻き込んだ学際的な連携を推進する戦略が取られる。この点が第1図に示すGECプログラムの進展における大きな変化である。

このようなフューチャーアースの時代には、持続可能な開発目標 (SDG) によって設定された目標である、(1) 生命や生活の豊かさ、(2) 持続可能な食糧の確保、(3) 持続的な水資源の確保、(4) クリーンなエネルギーの普及、(5) 健全で生産的な生態系、(6) 持続可能な社会のためのガバナンスの実現に向けた貢献が重要な課題になっている。SDGは2015年に期限を迎える国連ミレニアム・サミット (2000) で設定されたミレニアム開発目標 (MDGs) を引き継ぐために設定された。これらの目標は、地球の持続可能性に必要な、持続可能な資源・清浄な空気・栄養サイクル・水サイクル・生態系の修復・生物多様性・気候の安定の健全な維持に関わっているものが多い。

既存のGECプログラムのIGBP・IHDP・DIVERSITASは解体されてフューチャーアースに再編され

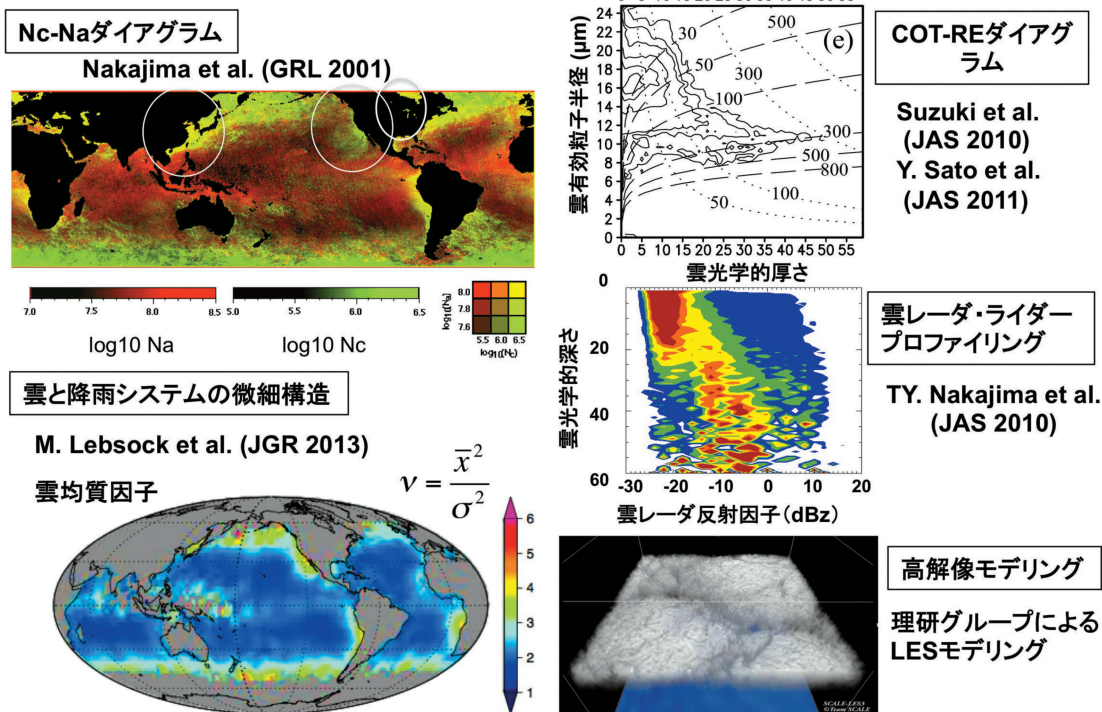
るが、各国気象機関の国際母体であるWMOと政府間海洋学委員会 (IOC) がICSUと協力して作ったWCRPは2013年以降も存続する。そもそもWCRPは気象現業組織にも基盤を持っているために、フューチャーアースの枠組みに適していると言う側面も大きい。しかしそれでも、GEC研究を取り巻く大きな変化のなかで気候に係る研究もより一層、社会対応の方向性を打ち出す必要性が生まれている。第3回世界気候会議 (WCC-3) では気候サービスのための全球枠組み (GFCS) の設置が謳われた。2011年にデン

バーで開かれたWCRP公開科学会議では、第2図に示すような世界気候研究の新しい方向性と2013年以降の組織案が議論された (中島 2011a, b)。まず、プログラム全体が関わるモデルとデータを検討するための協議会が設置された。さらに既存のコアプロジェクトであるGEWEX・CLIVAR・SPARC・Clicを改組して、陸域-大気相互作用・海洋-大気相互作用・対流圏-成層圏相互作用・雪氷圏-大気相互作用に関するコアプロジェクトをスタートさせる。これによって、社会対応では許されない抜けの無い体制が構築されようとしている。さらに、5年から10年の期間で実践可能な6つのグランドチャレンジ課題がコアプロジェクトをまたがって設定された。すなわち、(1) 領域気候情報、(2) 領域海水準、(3) 雪氷圏の変化、(4) 水資源変化、(5) 雲・循環・気候感度、(6) 極端気候を複数のコアプロジェクトにまたがって研究する。

3. 持続可能社会構築のために何をやるか

前節で述べたようにフューチャーアース時代における活動はすでに始まっている。それでは、われわれは何をやるべきか？

大気科学と気候研究の物理学的側面に関する活動は明確であると思う。WCRPのグランドチャレンジについては、基礎科学への貢献と同時に、環境問題への



第3図 エアロゾルと下層雲の相互作用の理解。衛星搭載イメージャー、雲レーダ、ライダーから得られる雲粒子数(Nc)、エアロゾル粒子数(Na)、雲光学的厚さ(COT)、有効雲粒子半径(RE)、雲レーダ反射因子、雲均質因子などから雲層内で起こっている雲の微物理過程を推測するための道具を示す。その高解像度モデリングが始まったところである。

対策に貢献ができることは明らかである。例えば、筆者が関わる雲とエアロゾルの相互作用の研究は、人為起源の大気汚染が引き起こす気候変動を理解するために重要であるが、第3図に示すように問題を理解するための道具が揃い、着実に進展している。

またWCRPの目的が示すように、地球観測データセットの作成、モデルによる人間影響の理解と予測を進めてゆかなければならない。これらは、防災・減災や低炭素社会構築などへの応用が期待されている。さらに、気候サービスの育成を社会全体で行う必要がある。そのためには、気象・環境機関・研究機関・ビジネス間のパスウェイを作る事が必要であろう。このような方向に沿って、すでに防災・減災・環境問題対策に関する業務が気象庁・国土交通省・環境省などによって始まっている。例えば、従来の所掌業務を超えて、農業や防災に必要なリスク管理情報を国内外に発信してゆく取り組みが行われている(国土交通省2011)。

むしろ問題は、IGBP・IHDP・DIVERSITASの改組によって作られる新しい枠組みで何をやるかと言う点である。WCRPが基盤とする物理気候研究の側面に比べて、これらの分野においては、生態系や人間圏が関わる複雑な問題が多い。また、将来予測のためには、人間の意思決定を含むプロセスを扱う必要があるという根源的な難しさがある。そのために、フューチャーアースでは、上述したように研究成果の直接的及び間接的な利害関係者であるステークホルダー(国際機関、中央・地方政府、研究助成機関、国際協力・開発援助機関、産業界、市民社会、メディア等)を研究プロセスに参画させ、協働して新しい知見を創っていく「トランスディシプリナリー研究」(横断的学際研究)を推進する戦略を取ろうとしている。その場合、第一原理からくみ上げるタイプの理学的研究では、トランスディシプリナリー型の研究は苦手とするところである。従って、目標設定や新しい概念の提案から求心力を生み出してゆく工学系研究と文系研究の

融合（工文融合）を進めながら、理学系研究がその基盤を作るという連携が必要だと思う。この意味でフューチャーアースを誰がリードするかという点を良く考える必要があると思う。

さらに、戦略作成に当たって科学の中立性と独立性をどのように確保するのかという点も考える必要がある。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では、気候変動の評価は政策に役立つ（policy relevant）ものであるべきであり、政策に規定される（policy prescriptive）ものではないという原則を設定して、この中立性と独立性を確保している。そうでなければ、社会的な利害が対立する問題に対する科学的評価は、社会から信頼を獲得することはできないだろう。このことは、クライメート事件などの温暖化批判に関する一連のできごとから明らかである。

4. 技術移転システムの脆弱性

以上述べて来たように、変化する世界的な流れに対応しながら、大気科学と気候研究に関わる諸課題を解決し、我が国の研究と関連事業を健全に進める必要がある。しかし、そのための障害として、我が国には技術移転システムの脆弱性があることを指摘したい。すなわち、大学や研究機関で創成される最先端研究の成果を、所掌官庁における現業システムに効率よく活かす技術移転システムがうまくできていない。少なくとも欧米における大気科学の分野では、国の各部分が連携しているように見える。例えば、雲レーダ・高波長分解能ライダー・放射収支計・多波長イメージャーを搭載する欧州宇宙機関（ESA）とJAXA共同のEarthCARE衛星ミッションにおいては、科学的成果物（レベル2プロダクト）の作成プロジェクトに大学のみならず、各国の気象機関と環境機関が積極的に関与している。このような新しい衛星のデータ解析には、ECMWFや欧州各国の気象局の経験豊富なチームが支援をしており、得られた研究成果が研究コミュニティおよび欧州全体の気象業務に利用される仕組みになっている。英国では、自然環境研究評議会（NERC）のもとで地球システムモデリング戦略が作られており、イギリス気象局と研究コミュニティの間におけるモデルコンポーネントの開発分担と連携が行われている（NERC web site[†]）。ここでは、気象局の強力な現業気象モデリングのインフラを中心に、研

究コミュニティの力を結集することによって、国全体として気象・気候モデリング研究を推進するという戦略が見て取れる。米国の場合にはNASA・NOAA・空軍・海軍の間に、衛星データ同化に関する共同センター（JCSDA）が作られている。

日本の場合はどうだろうか？ 地球シミュレータを利用する文部科学省の人・自然・地球共生/21世紀気候変動予測革新/気候変動リスク情報創成プログラムや、気候変動適応研究推進プログラム（RECCA）、環境省の地球環境研究総合推進費・戦略研究プロジェクトでは、研究機関・大学・環境省・気象庁が協力して気候変動モデリング研究が行われている。また、プログラム間の研究交流会も開かれている。また、我が国の地球観測プロジェクトであるGPM・GCOM-W・GOSATなどでは、ユーザー利用を促進するために現業機関や研究コミュニティに積極的にデータを供給する仕組みができています。

このように我が国でも機関間・グループ間で連携する努力が行われているが、技術を移転して我が国全体のインフラを積み上げるシステム作りがもっと必要だと思う。そうでなければ、社会貢献の色彩が強いフューチャーアース時代において、大学や研究機関が現業的な作業にも深く巻き込まれて疲弊してしまい、本来のミッションである最先端研究の推進にも障害が出るだろう。また現業機関も最先端研究の成果を順次取り込みながら発展することができないだろう。例えば、次世代の静止衛星ひまわり8・9号の時代には、16波長のAHIイメージャーから500m～4kmの空間分解能のデータが1年間1.4テラバイトも得られる。そのデータは様々な社会応用に利用できる可能性があるが、豊富な情報量を十二分に活用することは気象庁だけでは無理で、衛星観測に豊富な経験を持つJAXAや研究コミュニティからの技術を利用するシステムが必要である。

別の例として、「気候と大気清浄化に関する国際枠組み」（CCAC）への対応がある（中島 2013）。温室効果ガス削減交渉が暗礁に乗り上げているなか、削減が比較的容易な黒色炭素エアロゾル・オゾン・メタンなどの短寿命気候汚染物質（SLCP）を早く削減することによって、0.5°C程度の温暖化緩和をまず確保すべきという提案がある（UNEP 2011）。これを受けて、SLCP削減を目指したCCACが2012年に我が国も参加して調印された。しかし、寿命の短いSLCPは領域依存性が非常に大きく、その気候影響は複雑で

[†] <http://www.nerc.ac.uk>

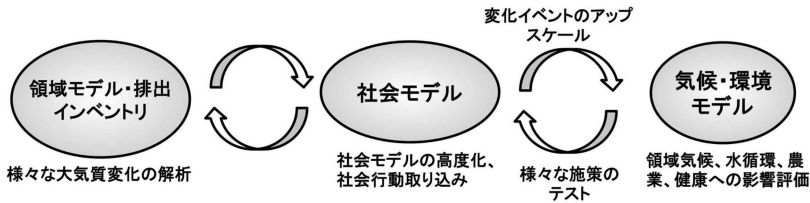
あることが知られている。従って、領域モデル・排出インベントリ・社会モデル・気候環境モデルをつなぐことによって、領域スケールの現象をアップスケールしなければ全球の影響評価が難しい(第4図)。政策策定者が柔軟に評価を行うためには、このような複雑なモデル群をシステム化する必要がある。そのためには、過去に作られた個々のモデルを技術移転してイン

フラ化しなければならない。

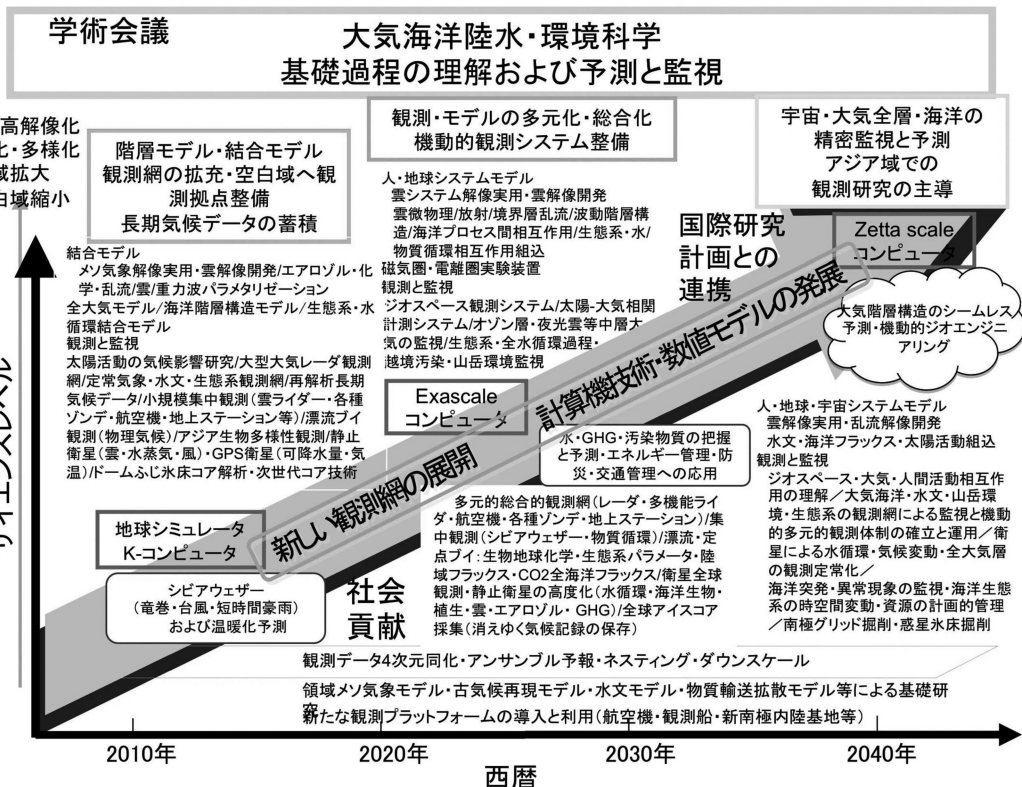
大気科学の研究資産を技術移転して、有効利用できる近年の重要課題としてはその他に、福島第一原子力発電所事故による放射性物質による環境汚染問題や、再生可能エネルギーに関わる様々な評価などがある。

5. 結語

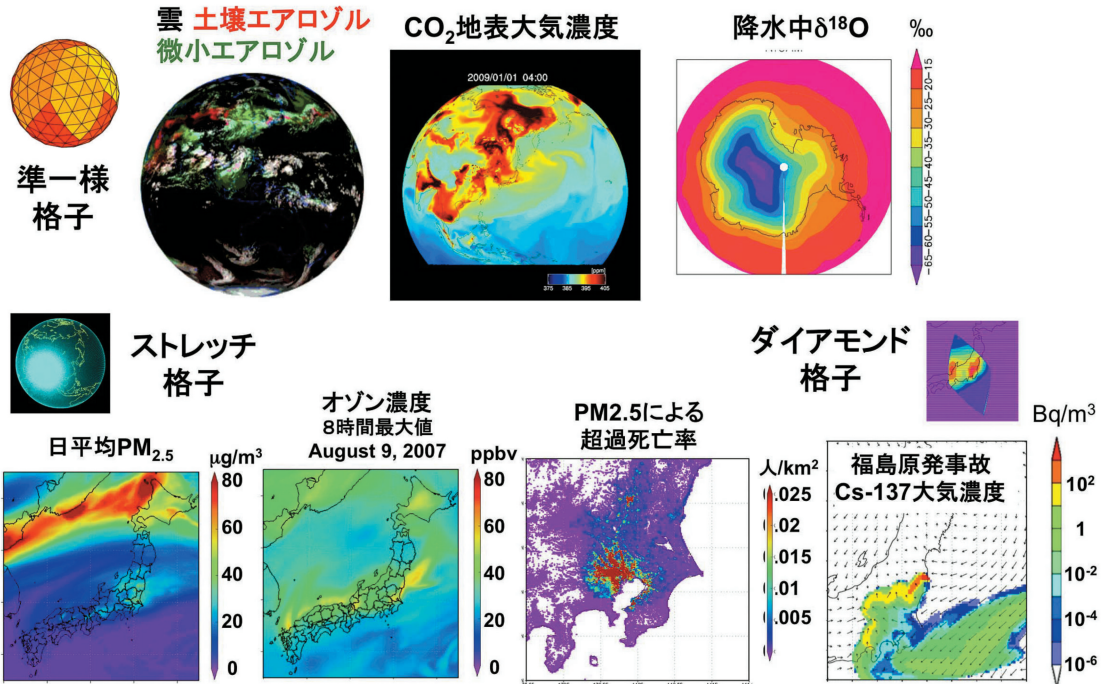
GEC 研究へのステークホルダーの失望によって、フューチャーアース枠組みが作られた。しかし、そもそも気候変動枠組条約締約国会議(COP)による温室効果物質の削減プロセスが国家間の利害によって暗礁に乗り上げていることをみても、問題は科学の側にあるのではなく、ガバナンスの側にあるのではない



第4図 短寿命気候汚染因子(SLCP)の削減パスに関する評価システムの構想、様々なSLCP排出シナリオが提案されているが、最適な削減パスを決定するには、汚染状況や削減対策の効果を領域ごとに把握し、その知見を社会モデルに組み込む必要がある。こうしてできた社会モデルを介して、大気汚染や削減対策が全球的に起こったときの状況を作り出し(アップスケール)、気候・環境モデルを用いて全球影響評価を行う。



第5図 地球惑星科学に関するロードマップ(日本学術会議 2011)。



第6図 次世代型非静力大気モデル NICAM を用いた様々な物質輸送モデリング。NICAM には全球準一様格子、特定領域の格子点の密度を高めるストレッチ格子、ある領域のみに計算資源を割り当てるダイヤモンド格子が装備されているので、様々な空間スケールのモデリングをシームレスに行うことができる (SALSA 2013)。

だろうか。それでも、科学がガバナンスと協力して問題解決への努力をフューチャーアース時代にも続けてゆくことは必要だと思う。社会が重要な問題に対して意思決定するために必要なのは、現象を理解するための詳細な科学的知見とその信頼性を高めるための長い検証努力だからである。それをできるのは科学コミュニティだけである。地球温暖化問題について見てみると、IPCCによる20年間を超える検証努力が社会を動かしたと言える。

さらにその先には何が必要か？ 学術会議が取りまとめた今後30年の地平に関する夢ロードマップ（日本学術会議 2011）によると、ますます多圈的な研究が結び合わさって行くこと、環境管理が始まること、そのために様々な空間スケールと時間スケールの観測的研究とモデリング的研究が創成されてゆく世界が描かれている（第5図）。これらを実現するためには、気象学会等の個々の学会で専門的研究を深めるとともに、それらを結びつける多圈的な研究の発展が必要である。そのために、様々な分野の研究者が集う地球惑星科学連合の場が役立つと思われる。大気水圏科学セ

クションには現在、約1,700名の会員が参加しており、2013年度の大会では大気化学、衛星地球観測、NASA セッション、原発事故問題などのセッションにおいて活発な議論が行われた。

モデルの多圈的利用の可能性を示唆する例として第6図に、次世代型非静力学大気モデル NICAM に、エアロゾルモデル SPRINTARS と大気化学モデル CHASER を組み込んだ様々な環境モデリングの例を示す (SALSA 2013)。気候変化のシミュレーションのみならず、様々な環境物質や、それと相互作用する雲の変化や健康被害のシミュレーションが可能になっている。また、福島第一原発事故による放射性物質の拡散も再現されつつある。さらに同位体の輸送計算によって水循環や古環境研究への応用が広がっている。様々な分野の研究者にこの図を見てもらったら、いろいろなアイデアが生まれるかも知れない。

参考文献

King, M.D., C.L. Parkinson, K.C. Partington, R.G. Williams, 2008: Our Changing Planet- The View from

- Space. Cambridge University Press. ISBN: 9780521828703 (日本語訳: 中島映至・井上豊志郎監訳, 2009: 変わりゆく地球 衛星写真にみる環境と温暖化, 丸善, 384pp).
- 国土交通省, 2011: 交通政策審議会 第18回気象分科会資料. 2011年12月22日. http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/kishou00_sg_000039.html
- 中島映至, 2011a: 世界気候研究計画 (WCRP) の現状と気候研究の方向性. 天気, 58, 810-812.
- 中島映至, 2011b: 世界気候研究計画 (WCRP) 公開科学会議の報告と所感. 天気, 58, 1087-1089.
- 中島映至, 2013: 広域大気汚染の問題と大気清浄化に向けた努力. 科学, 83, 433-438.
- NERC web site: NERC and Met Office Strategy for Earth System Modelling. http://www.nerc.ac.uk/research/funded/programmes/esm/nerc_mo_esm_strategy.pdf
- 日本学術会議, 2011: 報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」. 日本学術会議, 2011年8月24日.
- SALSA, 2013: 文科省気候変動適応研究推進プログラム (RECCA) 大気環境物質のためのシームレス同化システム構築とその応用 (SALSA) 報告書, 2013年3月.
- UNEP, 2011: Summary for decision makers of the integrated assessment of black carbon and tropospheric Ozone. Twenty-sixth session of the Governing Council/Global Ministerial Environment Forum, Nairobi, 21-24 Feb. 2011, UNEP/GC.26/INF/20.