

人為起源温室効果ガスによる地球温暖化現象と気候変動の問題について



中島映至

本稿では、人為起源の温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化現象と気候変動に関わる諸問題を俯瞰する。検討課題は、現象の科学的理解の現状、予測の不確実性を低減するために必要な研究、影響緩和に必要な対策への貢献である。

1 はじめに

2019 年は、国際地球物理学・測地学連合 (IUGG)、国際気象学・大気科学協会 (IAMAS) と言った地球科学に関わる国際学会組織の前身が生まれて 100 年にあたるが、その歴史を振り返ってみると、地球温暖化現象と地球気候変動の問題に関する科学的理解と対策への応用能力は、この 100 年間に急速に進歩したことがわかる。Richardson による気象予報計算が失敗した 1920 年代からわずか 50 年後には、Manabe, Wetherald (1967 年, 1975 年) によって最初の地球温暖化に関する気候モデル計算が行われている^{1,2)}。その間、国際地球観測年 (1957 ~ 1958 年) を機に、Keeling らによるマウナロア山頂における二酸化炭素 (以下 CO_2) の長期モニタリングが開始された (図 1)³⁾。さらに、TIROS

や NIMBUS と言った気象・地球観測衛星が打ち上げられ、人類が地球を外側から見られるようになったことも重要な発展である。特に 1975 年には地球放射収支計を搭載した NIMBUS-6 衛星が打ち上げられ、太陽放射に対する地球の反射率が当時考えられていた値より小さいことが判明して、モデル計算への大きな拘束条件を提供した。

そして、1988 年には気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が組織されて、人為起源の地球温暖化現象に関する詳細な組織的評価活動が開始された。そこでは、変動の自然科学的理解のみならず、生態系と社会への影響評価や将来予測に必要な軽減策と言った問題についての社会科学からの知見の評価も行われている。このことは、地球温暖化の問題が、自然科学と社会科学の両者にとっての重要な問題のひとつであると同時に、両者の連携を励起する壮大なテーマであることを示している。

Keeling らによる観測が始まって約 60 年後の現在、 CO_2 濃度の全球分布が GOSAT 「いぶき」衛星等によって得られるようになった⁴⁾。

● なかじま・てるゆき ●

1950 年生まれ。東北大学大学院理学研究科修了。理学博士。所属：国立環境研究所 (NIES) 衛星観測センター (SOC)。専門：大気科学、リモートセンシング。著書：『正しく理解する気候の科学—論争の原点に立ち帰る』(技術評論社、2013) ほか。

キーワード：地球温暖化 (global warming), 気候変動 (climate change), 人為起源温室効果ガス (anthropogenic greenhouse gases)

著者連絡先：nakajima.teruyuki@nies.go.jp

補助資料 (カラー図) : <http://www.jsa.gr.jp/04pub/2021/202106nakajimashiryo.pdf>



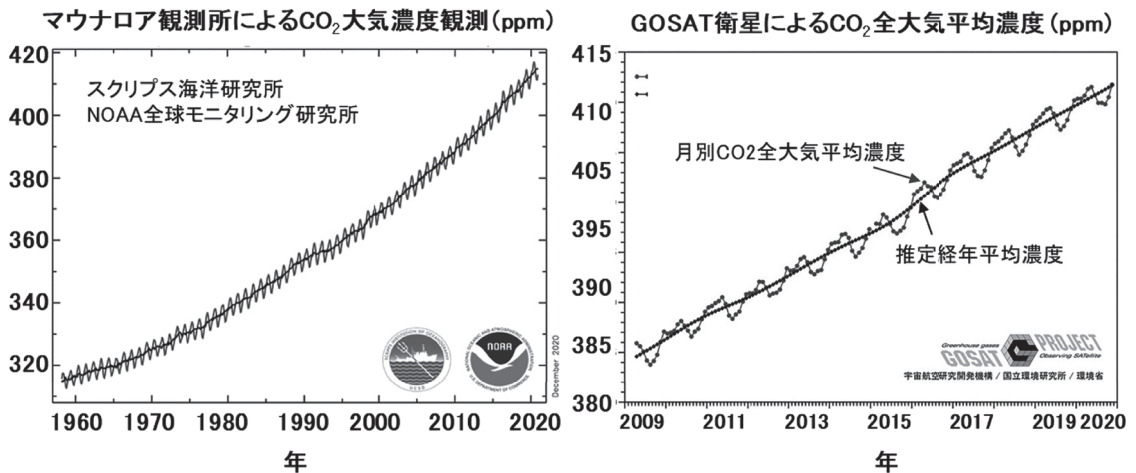


図1 スクリプス海洋研究所・アメリカ海洋大気庁（NOAA）のマウナ・ロア観測所（MLO）における二酸化炭素の長期観測データとGOSAT「いぶき」衛星による二酸化炭素の全球平均濃度の推定値
左図：NOAA 2020年文献3，右図：GOSATプロジェクト2020年文献4.

図1に示すように、2016年には、その全球平均濃度が400 ppmを超えた。人為起源の温室効果ガスの増加問題は、このように、人ひとりの人生のスパンで見ても大きな変化が伴う全球的現象になっている。近年では、ハリケーン・カトリナ等の大型の熱帯性低気圧の発生に象徴されるように、極端な気象現象が多発するようになってきた。その被害も甚大で社会の関心も高まっており、緩和策と適応策の社会実装が急速に進み始めた。特に、気候変動枠組条約（UNFCCC）第21回締約国会議（COP21、2015年）のパリ協定によって、産業革命以降の地表気温上昇を2℃に抑える目標と1.5℃の努力目標が設定されて、地球温暖化の緩和に向けた極めて大きな社会の努力がスタートした。我が国では気候変動適応法が2018年に施行され、2020年10月26日には、菅首相の臨時国会所信表明演説で、国内の温暖化ガスの排出を2050年までに全体としてゼロとするカーボンニュートラルの方針が表明された。

しかし、一方で、温暖化現象と気候変動のメカニズムは複雑であり、将来予測にも大きな不確実性があることがIPCC評価活動等に

よって明らかになっている。従って、急速に展開しつつある温暖化対策への取り組みが、効率良く、かつ健全で持続的に進むためには、これまでになく科学界による研究活動とその知見の普及・教育が求められている。以下、現象の把握の現状、そのために必要な地球観測システムの構築、そして科学的知見をどのように対策に利用するべきかについて検討する。

2 地球温暖化現象の科学的理解

以下3節まで、拙著⁵⁾を、若干改訂しつつ書き留める。

地球温暖化現象に関する人類の認識は19世紀に始まる。Fourierによる温室効果の考案、Tyndallによる赤外線的气体吸収測定などを背景に、Arrheniusは工業活動による二酸化炭素の増加で温暖化が起こることを示した（1896年）。その後、20世紀初頭に量子力学と分子分光学が発達して、大気組成と太陽放射（以下日射）や熱赤外地球放射（以下熱放射）の相互作用が厳密に算定できるようになり、温室効果理論の基礎が築かれた。

しかし、実際の地球気候は様々な外部要因

と内部相互作用を通して複雑に変化しており、人間活動の影響を把握するためには、まず、気候の変化メカニズムを研究する必要があった。特に、氷期が繰り返される現象の理解は重要であった。1920年代には Milanković によって、地球軌道と自転の歳差運動の永年変化のために北半球高緯度の日射量が定期的な減少し、氷期が訪れるとする地球軌道要素説が提案された。約2万年、4万年、10万年周期の存在が示されたが、当初、説の支持は少なかった。しかし、1950年代に入って同位体元素の計測技術が開発され、海洋底堆積物や地質学的データに正確な時間と温度のスケールが付けられると、気温がこれらの周期で変動していることが明らかになり、ミランコビッチ説が注目され始めた。ただし、この説では10万年周期変動は小さいはずだが、観測では逆に最も卓越しており、その理解にはその後の研究が必要であった（中島：1980年、Abe-Ouchi ら：2013年）^{6,7)}。

氷期サイクルのもうひとつの問題は、軌道要素変化で起こるわずかな天文学的半年や年積算日射量変化で氷床が発達するかという疑問であった。1960年代に入ると Budyko によって、地球気候系には水蒸気フィードバックとアイス・アルベド（雪氷による反射）フィードバックが存在するために、単純な黒体に比べて地表気温変化が大きく、また、わずかな積算日射量変化でも気温低下が起き、氷床が発達することが示された（1969年）⁸⁾。また氷床が発達すると、今度は日射が増加しても、元の気候に戻りにくいという気候状態の多重平衡解が発見された。

1970年代に3次元大循環モデルが開発されると、CO₂増加によって気温分布や大気海洋循環がどのように変化するかが調べられ始めた。Manabe, Wetherald (1975年)²⁾によって大循環モデルを用いた最初のCO₂倍増シ

ミュレーションが実施された後、Hansen らは、大気圏外日射量・火山起源の成層圏エアロゾル・人為起源CO₂の時間変化を大循環モデルに与えることにより、過去100年間の気温変化の再現に成功した（1981年）⁹⁾。それによると、日射や火山活動による気候変化が主要な自然起源の外部要因であるが、20世紀末から人為起源の温暖化が卓越し始めると予測された。この指摘は現代的な観点からも正しかったが、当時は検証するすべもなく、むしろ、20世紀中頃に起こった日射の減少と大規模火山噴火による寒冷化に関心が集まった。筆者の記憶では、初代の映画「ゴジラ」でも気候の寒冷化の話が出てきたと思う。

1988年に気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が設置されると、地球温暖化現象の評価活動が本格化した。1990年に第1次評価報告書が発表されたが、この時期には世界の複数の大循環モデルの比較が可能になり、高緯度や大陸内部での高温傾向などの特徴が明らかになってきた。しかし一方で、二酸化炭素倍増シミュレーションにおける全球地表気温のモデル評価（平衡気候感度）は1.9℃から5.2℃まで大きな不確実性があることも明らかになった。この時代の大気モデルは水平分解能がせいぜい250 km程度であり、外部要因に対する応答が複雑な雲等を表現するにはパラメタリゼーションと呼ばれる様々な半経験的仮定が必要だった。

それでも1990年代になると、温暖化シミュレーションは地表気温の観測を過大評価する傾向が明らかになってきた。これを熱のミッシングシンク問題と言う。そのため、冷源としてエアロゾルの気候効果が提案された。大気汚染によってエアロゾルと呼ばれる大気微粒子が増加すると、日射を宇宙に反射する日傘効果を起こして地表付近が冷やされる。Mitchell らによるシミュレーションで

は、1995 年までに温室効果ガスのみでは地表気温が約 0.9°C 増加するが、エアロゾルの冷却効果で約 0.4°C が相殺される¹⁰⁾。しかし、問題は複雑なために、その議論は以降、紆余曲折を経ることになる。

まず、2000 年代になると、エアロゾル中の黒色炭素の日射加熱のために、日傘効果は Mitchell らの評価の半分しか無いことが明らかになってきた。そこで、残りの冷源としてエアロゾルの間接気候影響が提案された。すなわち、エアロゾルは雲粒子の生成核としても働くために、下層雲粒数の増加を招き、雲の太陽放射の反射率が増加して日傘効果を引き起こすという説である。これによって大気汚染の激しくなった第二次世界大戦以降、徐々に雲の反射率が大きくなっていると考えられる。

3 地球システムの理解

地球温暖化現象自体の理解と共に、地球・生物・人間・宇宙が複雑に関与する多圏システムとしての地球システムとの関係も研究され始めた。

その一つは物質循環の理解である。21 世紀に入ると、生物地球化学データと地球システムモデルの結果が豊富に使えるようになり、大気汚染物質や炭素・窒素の循環、植物応答も扱えるようになった。温暖化懐疑論の例によく出てくる、高温期のあとに CO_2 が増大する現象もモデルで説明できるようになってきた。また、20 世紀の大問題である CO_2 のミッシングシンク問題にも回答が与えられつつある。初期の評価では、 CO_2 の大気濃度の増加率を説明するには、人為起源 CO_2 の排出量と比べて、大気・海洋・陸域の吸収量の和は年間 1 ギガトン以上不足していた。しかし、炭素同位体計測とモデルによる発生・吸収源推定が進むと、陸域植生の光合成の増大

の寄与が大きいという評価が示されて、不足分を説明できるようになってきた。

もう一つの問題に、地表気温が 2000 年代からあまり上昇しないハイエイタス（中断）問題がある。その一因として指摘されたのは、日射の減少による寒冷化である。最近 2 回の太陽黒点 11 年周期では、極小期に黒点が全く消えてしまう非常に静かな太陽活動になっており、それに伴って日射が減っている。このような現象は過去にも起こっており、17 世紀後半のマウンダー極小期は 70 年間続いた。この時期は小氷期と呼ばれる欧州の寒候期と時期を同じくしている。しかし、今回の静かな周期で観測されている日射の減少は 0.3 W/m^2 程度で、ハイエイタス現象の一部しか説明できない。

日射量変化以外の太陽影響を唱える研究者もいる。その一つが銀河宇宙線説である (Svensmark, Friis-Christensen, 1997 年)¹¹⁾。太陽活動が弱まると、高エネルギー銀河宇宙線が太陽地球磁場をかいぐり易くなり、地球大気に入射して大気分子と衝突することにより、多くのイオン核が生成されるために下層雲粒数が増え、雲の日傘効果が増加するという説である。しかし、長期の衛星雲量データからは、説を支持するような宇宙線強度と低層雲量の間の顕著な相関は最近は見られていない。また、多数の地球起源エアロゾルが存在する下層大気で宇宙線起源のイオン核が雲粒子まで成長することを説明することが難しい。

別の説明として、大気・海洋相互作用メカニズムがある。Kosaka, Xie (2013 年) や Watanabe ら (2014 年) によると、ハイエイタス期間中は太平洋 10 年規模変動において偏東風が強く、熱が海洋深層に輸送され易い時期であったことが観測とモデル計算で示唆された^{12,13)}。そのために、地表気温の上昇が

抑えられる。海洋観測によると海洋貯熱量は増え続けており、前出のハイエイタス現象の状況も解消され、気温増加が再開する可能性がある。実際、ごく最近のデータでは気温上昇は再び顕著になっている。このように、大気の貯熱量は海洋の1000分の1であり、大気の気温変化の話は全体のごく一部であることを認識しなければならない。今後、気候系を構成する各部分系にどのように熱が蓄積されているかについてのモニタリングが重要となっている。

また、気候感度の問題も残っている。水平格子サイズ25 kmのモデルが登場したIPCC第5次評価報告書(2013年)に至っても、気候感度のモデル依存性はあまり小さくなっていない¹⁴⁾。主原因は雲モデリングの難しさである。これを抜本的に解決するには、より空間分解能の高い気候計算ができる次世代スパコンを待つ必要があり、現在進行形の研究課題である。我が国では、世界有数の地球シミュレータ、HPCI京計算機、富岳が開発されており、気候計算でも利用が進んでいるので、計算能力を必要としているより現実的な雲モデルを含んだ気候モデリングへの貢献が期待できる。現在、編纂が進んでいるIPCC第6次報告書でも新しい知見が示されるだろう。

100年スケールを越えて、数百年～千年スケールの気候変動の研究も進んでいる。この問題には、グリーンランド氷床の融解や海洋熱塩循環¹⁵⁾の変化が重要である。さらに氷期サイクルの理解も進んでいる。Abe-Ouchiらは、大陸氷床結合大循環モデルを用いて、ゆっくり寒冷化し、急速に温暖化するノコギリ波状の10万年周期が、日射変化とそれに追従する大陸氷床の重量による地殻の弾性体応答の組み合わせによって発生することを示した(2013年)⁷⁾。大きな氷床が無かった温

暖な更新世前半期(250万年～100万年前)では、4万年周期が卓越していたこともわかってきた。

4 最近の話題

地球温暖化問題の緩和を達成するためには、長寿命の温室効果ガス的大幅な削減が必要であるが、問題は、すでに大量に大気に放出されている二酸化炭素等は寿命が長く、削減による緩和効果は次の20年間程度では顕著に現れないことである。そのために併用すべきもう一つの緩和策として、黒色炭素、対流圏オゾン、メタンなどの短寿命気候汚染物質(SLCP)(あるいは短寿命気候因子SLCF)を削減する案が国連環境計画(UNEP)等から提案されている(2011年)¹⁶⁾。これらの提案によると、SLCPは短寿命であるためにその削減効果は短時間で現れ、0.5℃程度の気温低下が期待できるとされている。パリ協定の1.5℃や2℃の目標達成にとって、この0.5℃という数値は極めて大きい。図2にIPCC(2018年)の1.5℃特別報告書による全球平均地表気温変化の評価を示すが、2℃達成のためには、長寿命温室効果ガス的大幅な削減と同時にSLCPの削減も必要であることがわかる¹⁷⁾。そのために、健康被害を引き起こす大気汚染の改善と同時に温暖化対策にも貢献する「気候と清澄大気のための国際枠組み(CCAC)」が2012年に発足し、日本も参加している。編纂中の第6次報告書でもSLCFの章が設けられている。

しかしながら、最近の研究によると、このようなSLCPの気候影響は極めて複雑であり、その評価における不確実性が大きいことが指摘されているので、正確な削減効果の評価のためには、より一層の研究が重要になっている。Takemura, Suzukiによる研究によると、黒色炭素を削減すると、大気安定度が

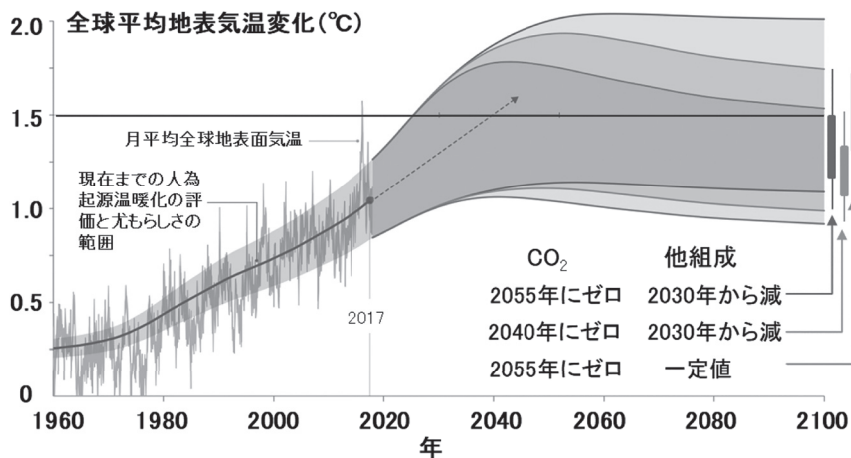


図2 IPCC1.5度特別報告書による全球平均地表気温変化の時間発展の評価
 IPCC 2018年 文献17. 2017年以降の将来予測の存在範囲は、温暖化物質の削減シナリオに分けて示す。削減シナリオの説明を筆者が追加した。

減少するために上層雲が増えて、その温室効果が黒色炭素削減による冷却を相殺するために、結果的に顕著な地表気温低下には繋がらない可能性があることが示唆された（2019年）¹⁸⁾。また、対流圏オゾン削減のために過度な窒素酸化物の削減を行うと、メタン寿命が伸びるために、その結果、メタン濃度が増加して対流圏オゾンの削減効果を相殺してしまうために、これもまた有効な冷却にはならない可能性がある。これらの研究が意味することは、有効な SLCP 削減の処方箋は、大気組成間の様々な間接効果や気候系への影響を勘案しながら、複数の組成の削減を適切に組み合わせる必要があることを意味している。そのようなシナリオ作成例として、図3に Nakajima ら（2020年）によって提案された削減シナリオによる2040年代のアジア域の地表気温変化を示す。図によると削減対策を取らない Ref シナリオでは、人為起源温室効果ガスの増加によってアジア全域で1℃を超える昇温が起こる。さらに、大気汚染改善のために工場の排出口対策（エンドオブパイプ対策）を最大限にとった A2 シナリオでは、エアロゾルの日傘効果が減るために、Ref シ

ナリオから更に0.4℃程度の気温上昇が起こってしまう。一方、様々な SLCP 削減技術（再生可能エネルギー導入、建物電化、輸送電化）を、長寿命温室効果削減（2℃目標対策）と最適に組み合わせた B1c シナリオでは、0.4℃程度の上昇低下が期待できる。それでも、大気汚染の激しい地域ではエアロゾルの日傘効果の減少の方が大きいために、気温が上昇するパッチ状のホットスポットが見られる。これらの地域では暑熱による健康被害の対策を並行して施す必要がある¹⁹⁾。

ただし、この方向の対策検討には、もう一つの新しい不都合な真実が起こり得る可能性がある。すなわち、最近の雲場を陽に計算することができる高分解能大気モデリングや、エアロゾルと雲の鉛直観測が可能な衛星搭載ライダー（レーザー光反射の観測）や雲レーダーが運用されるようになり、エアロゾルが引き起こす低層雲への間接気候効果もこれまで言われてきたことと違って、小さいかあるいは負（エアロゾルが増加すると低層雲が減る）である可能性が示唆され始めた。もしこれらの新説が正しいならば、地球温暖化を40%程度緩和すると考えられてきたエア

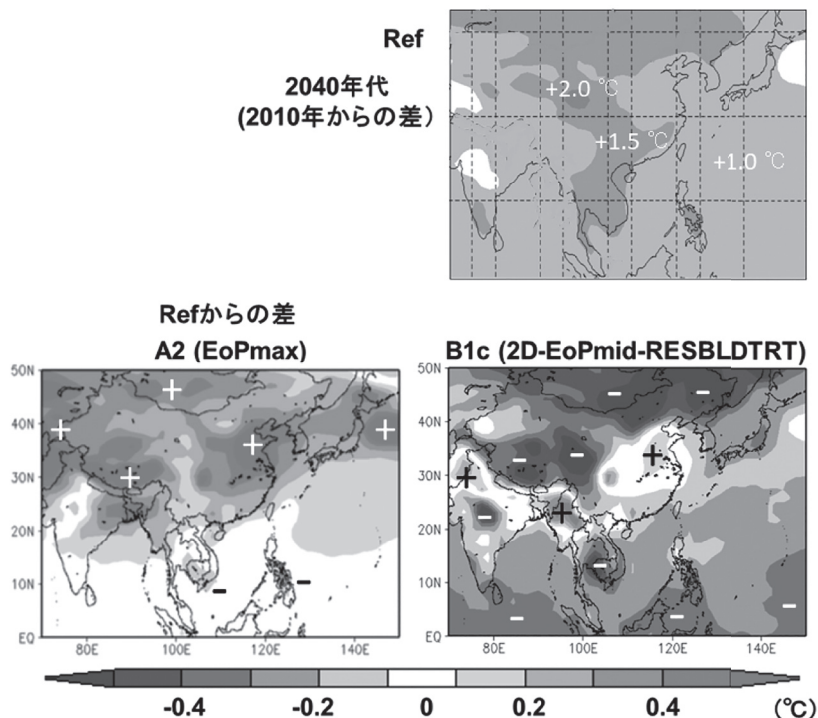


図3 Nakajima らによって提案された人為起源長寿命温室効果ガスとSLCPの削減シナリオによる2040年代(2040-2049)におけるアジア域の地表気温変化(文献19)
Refシナリオの値は2010年からの差(概数), A2とB1cシナリオの値はRefシナリオからの差。

ロゾルの直接・間接効果はずっと小さいことになる(Sato, Suzuki, 2019年)²⁰⁾。そうすると、これまでの定説である地球温暖化を相殺する「エアロゾル」冷源説では、観測された地表気温のトレンドを説明できなくなってしまう。その不整合を緩和するには、モデルの気候感度をもっと大きくしなければならず、大問題となる。従って、このような新説にまだ問題があるのか、それとも新たな未知の冷源探しが必要なのかを、今後の研究によって明らかにしなければならない。

5 地球観測の課題

これまでの節で示したような新しい諸課題を解くための解決法は、考えてみると、そもそもこれらの問題を提起するために使われた新しい高分解能大気モデルや地球システムモデルを、改善して使い込んで行くしか無いのか

と思われる。例えば、気候感度と雲の間接効果の問題については、高分解能全球大気モデルも計算格子点間隔が10 km程度に小さくなってきたこともあり、これまでの気候モデルでは、半経験的なパラメタリゼーションによって表現されてきた雲核形成過程を、より物理法則に基づいて再現できるようになってきた。従って、雲の間接効果の不整合問題も解決への糸口が早晚、見つかるだろう。

このような新しい研究にとって極めて重要な役割を果たすのが、大気・地球表層系の様々な観測であるが、それを可能にする多様な地球観測が実現されつつあることも指摘したい。例えば、CLOUDSATとCALIPSO衛星による雲レーダーとライダー観測は、これまで多く使われてきた受動型センサーでは見えなかった詳細な大気の鉛直構造のデータを提供できるようになって、気候モデルの不備が

見えてきている。将来は、日欧協力によるドップラー速度計測機能付きの EarthExplorer/EarthCARE 衛星に引き継がれる予定である。受動型センサーの方も改良され、温室効果ガスを含むガス組成、雲、エアロゾルの観測精度が上がっている。Himawari-8/9 号や GOES-R などの第 3 世代の静止衛星はより多くの波長と 1 km 解像の観測が可能になっている。また GCOM-C/SGLI では偏光観測や近紫外波長の観測が高解像で可能になってきた。新しい衛星センサー (GOSAT「いぶき」シリーズや、センチネル 5/TROPOMI など) からは、CO₂ と短寿命のガス組成、粒子組成が空間解像度は高くないものの同時観測されるようになった (図 1)。次期衛星 (GOSAT シリーズの GOSAT-GW) では、CO₂、メタンとともに、大気汚染にとっての良い指標である二酸化窒素 (NO₂) の同時観測が行われる予定である。

さらに、TEMPO (米国)、センチネル 4 (欧州)、GEMS (韓国) による静止衛星による全球大気化学監視網が形成される予定である。これらの地球観測衛星システムから提供される全球データによって、大気化学輸送モデルによるデータ同化を含めた詳細なデータ解析が期待できる。

6 おわりに

日本学術会議の夢ロードマップ (大気水圏科学分野) (図 4, 2020 年) によると、今後、発展が期待される研究分野は、シビアウェザーの予測・レジリエントな地下水利活用 (2020 年期)、気象・海象変動と気候変化の予想精度向上、水資源・エネルギー資源管理・防災・交通管理への応用 (2030 年期)、持続可能で夢のある社会の達成のための環境監視・適応/緩和技術による地球温暖化等の気

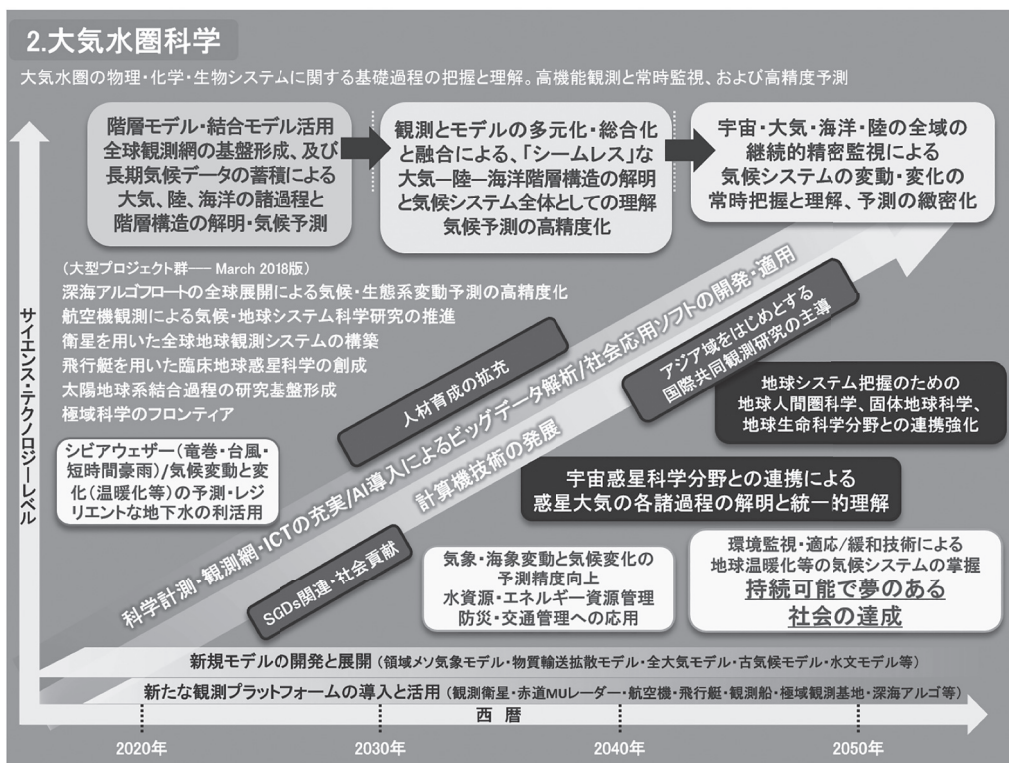


図 4 地球惑星科学分野における科学・夢ロードマップ (改訂) 2020 (大気水圏科学分野, 文献 21)

候システムの掌握（2050 年期）が挙げられている²¹⁾。つまり、地球システムの理解と社会に影響する課題の解決がより総合的に結びついて行くことを期待している。実際、筆者が知る範囲でも、このような進展が起り始めている。例えば、動き出した富岳計算機の利用研究を発掘するために実施された文部科学省のポスト「京」重点課題プロジェクトでは、革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災、シームレス気象・気候変動予測、総合的な地球環境の監視と予測がサブ課題化されて、モデル開発が進んでいる。

ただ、筆者が課題として感じるのは、このようなモデル群が実利用されるためには、見てきたような将来の地球観測衛星システムからの膨大なデータを準リアルタイム的に収集・解析する基盤を整備しなければならない。それが不足しているので、データ利用基盤の充実も並行して行われなければならない。また、観測能力が実証されつつある GOSAT シリーズ等の二酸化炭素観測衛星からのデータを UNFCCC の排出量算定に公式に利用する国際合意が未だに作られていない点も問題である。衛星からのデータをパリ協定で定められた定期的な温暖化対策評価作業（グローバル・ストックテイク）で積極的に利用すべきである。さらに、植生圏や水圏の観測データの収集も変化のモニタリングのために継続する必要がある。このような地球観測データをタイミング良く利用することに恩恵を受ける省庁と機関が増えているので、多機関の共同利用システムを模索するべきであろう。これは富岳が分野をまたがって利用されている状況を見ても当然である。同時に、物理法則に基づいたモデルで説明できる現象は未だに大きくない状況のもとで、AI・ICT 技術と地球科学の連携の深化も必要である。

見て来たように、気候変動には多様なメカニズムがあり、その確度の高い理解にはさらに研究が必要である。しかし、研究の最大の難しさは、その中に我々が住んでおり、物理学的手法の強みである再現可能な実験や追試を行なうことができない点である。そのために、最新の知見をできるだけモデル化し、同時に観測によってモデル値が妥当かを監視するという地球科学的手法によって、問題を統計的に把握するしかない。このような特殊性のもとでは、いわゆるクライメートゲート事件²²⁾のような批判が起りやすく、IPCC でも評価システムの改善のための改革が 2010 年に行われている。今後は、科学的知見をさらに社会による対策に生かしてゆく段階にかかるわけであり、そのためには仮説の十分な検証作業と知見に含まれる不確実性についての社会への説明もより厳密に進める必要がある。

注および引用文献

- 1) Manabe, S., and R.T. Wetherald : Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, **24**, 241-259 (1967).
- 2) Manabe, S., and R.T. Wetherald : The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1-15 (1975).
- 3) NOAA: Monthly average Mauna Loa CO₂ (2020). <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- 4) GOSAT プロジェクト「いぶき」の観測データに基づく全大気中の月別二酸化炭素濃度一速報値 (2020). <http://www.gosat.nies.go.jp/recent-global-co2.html>
- 5) 中島映至 : 「地球温暖化研究の 30 年」『パリティ (廃刊)』**30**, 27-29, 2015-04 (2015).
- 6) 中島映至 : 「地球軌道要素の変動と気候」『気象研究ノート』**140**, 503-536 (1980).
- 7) Abe-Ouchi, A., et al. : Insolation-driven 100, 000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature*, **500**, 190-193 (2013).
- 8) Budyko, M.I. : The effect of solar radiation variation on the climate of the earth. *Tellus*, **21**, 611-619 (1969).
- 9) Hansen, J. : Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science*, **213**, 957-966 (1981).
- 10) Mitchell, J.F.B., et al. : Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature*, **376**, 501-504 (1995).
- 11) Svensmark, H., and E. Friis-Christensen : Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—A missing link in solar-climate relationships. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **59**, 1225-1232

- (1997).
- 12) Kosaka, T, and S.-P. Xie : Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, **501**, 403-407 (2013).
 - 13) Watanabe, M., et al. : Contribution of natural decadal variability to global-warming acceleration and hiatus. *Nature Climate Change*, **4**, 893-897 (2014).
 - 14) IPCC: Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p.1535 (2013).
 - 15) 海水の密度は、温度と塩濃度に依存するので、これによって海水の表層深層間の全球的循環が起こる。
 - 16) UNEP and WMO : Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone : Summary for decision makers. UNEP, ISBN: 978-92-807-3142-2 (2011).
 - 17) IPCC : Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty (2018).
 - 18) Takemura T., and K. Suzuki : Weak global warming mitigation by reducing black carbon emissions. *Sci. Rep.*, **9**, 4419 (2019).
 - 19) Nakajima, T., et al. : A Development of reduction scenarios of the Short-Lived Climate Pollutants (SLCPs) for mitigating global warming and environmental problems. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, Article no.33 (2020).
 - 20) Sato Y., and K. Suzuki : How do aerosols affect cloudiness? *Science*, **363**, 580-581 (2019).
 - 21) 日本学術会議:報告「地球惑星科学分野における科学・夢ロードマップ (改訂)」(2020).
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-h200515.pdf>
 - 22) イースト・アングリア大学の気候研究ユニット (CRU) からの電子メール流出事件. 気温時系列に関する故意のデータ操作を示唆する内容が含まれていたとして、主研究者が休職処分を受けた。しかし、その後の英王立協会と科学評価パネルの調査の結果、データ操作は無かったと結論された。