

提言

我が国の地球衛星観測のあり方について



平成29年（2017年）7月14日

日本学術会議

地球惑星科学委員会

地球・惑星圏分科会

この提言は、日本学術会議地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会地球観測の将来構想に関する検討小委員会での審議結果を踏まえ、地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会

委員長	藤井 良一	(第三部会員)	情報・システム研究機構長、名古屋大学名誉教授
副委員長	大谷 栄治	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科教授
幹事	佐藤 薫	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
幹事	福田 洋一	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科教授
	大久保修平	(第三部会員)	東京大学地震研究所教授
	木村 学	(第三部会員)	東京海洋大学特任教授、東京大学名誉教授
	奥村 晃史	(連携会員)	広島大学大学院文学研究科教授
	久家 慶子	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科准教授
	佐々木 晶	(連携会員)	大阪大学大学院理学研究科教授
	津田 敏隆	(連携会員)	情報・システム研究機構理事、京都大学生存圏研究所特任教授
	永原 裕子	(連携会員)	日本学術振興会学術システム研究センター副所長
	中村 卓司	(連携会員)	情報・システム研究機構国立極地研究所副所長、教授
	中村 正人	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授
	新野 宏	(連携会員)	東京大学大気海洋研究所教授
	花輪 公雄	(連携会員)	東北大学理事
	原田 尚美	(連携会員)	国立研究開発法人海洋研究開発機構研究地球環境観測研究開発センター長代理
	日置 幸介	(連携会員)	北海道大学大学院理学研究院教授
	松井 孝典	(連携会員)	千葉工業大学惑星探査研究センター所長、東京大学名誉教授
	山岡 耕春	(連携会員)	名古屋大学大学院環境学研究科教授
	山形 俊男	(連携会員)	京都大学宇宙総合学研究ユニット特任教授、国立研究開発法人海洋研究開発機構アプリケーションラボ特任上席研究員、東京大学名誉教授
	山岸 明彦	(連携会員)	東京薬科大学生命科学部教授

日本学術会議地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会 地球観測の将来構想に関する検討小委員会

委員長	佐藤 薫	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
副委員長	高薮 縁		東京大学大気海洋研究所教授

副委員長	早坂 忠裕		東北大学大学院理学研究科教授
幹 事	松本 淳	(連携会員)	首都大学東京教授
幹 事	今村 剛		東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
	中村 尚	(第三部会員)	東京大学先端科学技術研究センター教授
	藤井 良一	(第三部会員)	情報・システム研究機構長、名古屋大学名誉教授
	沖 大幹	(連携会員)	東京大学生産技術研究所教授
	中島 映至	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構第一宇宙技術部門地球観測研究センター(EORC)センター長、東京大学名誉教授
	福田 洋一	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科教授
	安岡 善文	(連携会員)	国立環境研究所理事、東京大学名誉教授
	井口 俊夫		国立研究開発法人情報通信研究機構特別招へい研究員
	江淵 直人		北海道大学低温科学研究所教授
	岡本 幸三		気象庁気象研究所室長
	沖 理子		国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、第一宇宙技術部門地球観測研究センター研究領域上席
	佐藤 正樹		東京大学大気海洋研究所教授
	下田 陽久		東海大学総合科学技術研究所教授
	中島 孝		東海大学情報理工学部教授
	中島 英彰		国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センター気候モデリング解析研究室主席研究員
	本多 嘉明		千葉大学環境リモートセンシング研究センター准教授
	横田 達也		国立研究開発法人国立環境研究所地球環境研究センターフェロー

本提言の作成にあたり、以下の方々に協力をいただいた。

岩崎 晃	東京大学先端科学技術研究センター教授
隈 健一	気象庁気象研究所長
祖父江真一	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、第一宇宙技術部門・宇宙利用総括付ミッションマネージャ、主幹研究開発員
林田佐智子	奈良女子大学理学部教授

本提言の作成に当たっては、以下の職員が事務を担当した。

事務	石井 康彦	参事官（審議第二担当）
	松宮 志麻	参事官（審議第二担当）付参事官補佐
	駒木 大助	参事官（審議第二担当）付審議専門職付

要 旨

1 作成の背景

宇宙から地球を観測する人工衛星は、様々な科学研究や、国民の快適で安全な社会生活に必須の情報供給源の一つである。衛星観測を含む全球的な大気計測データを用いて作られる過去数十年の再解析気候データは、気候の変動や遠隔結合の理解に大きく貢献し、測地データは地殻変動の検出を通し巨大地震の発生メカニズムの解明に貢献した。このような科学的研究成果は、今後の災害の予想と対策にとってきわめて有効である。また、リモートセンシング技術の開発研究に支えられた静止気象衛星による雲の連続観測は、スーパーコンピュータを用いた気象予測に、GNSS 測位は、スマートフォン等の実利用に不可欠である。

長期にわたる環境監視も重要である。地上と衛星による連続的な観測によるオゾンホールが発見後、メカニズム解明のために一丸となった研究がフロン使用に関する国際的な政策を導き、紫外線から生物を守る地球のオゾン層が消失するといった事態が回避されたことは記憶に新しい。これは、人間活動による技術進歩が地球規模環境に重大な影響をもたらした事実と、衛星による環境監視の重要性を再認識させる経験であった。

しかし一方で、地球衛星観測の計画策定やデータ利用に関する問題も浮上している。そこで地球・惑星圏分科会では、「地球観測の将来構想に関する検討小委員会」を設置して、地球衛星観測の現状、問題点、及びあるべき姿について集中的に審議し、本提言をとりまとめた。

2 現状及び問題点

現在の我が国の地球衛星観測には、計画策定と実現、データ利用の様々な側面において大きな問題が生じている。宇宙観測とは異なり、地球衛星観測は複数の機関が測器開発に関与し、利用者も諸外国を含む科学者・政府機関・民間企業・一般社会と広きに亘る。また、衛星観測網や衛星コンステレーションへの参加等、国際社会の日本への期待に適切に応えてこそ、諸外国の衛星データも享受できる。したがって、地球衛星観測の中長期計画には、国際的な視野からのトップダウン的要素と、開発者・利用者から発せられる未来に向けた技術開発要素を含むボトムアップ的要素との双方が含まれるべきである。複数計測の相乗効果が高い衛星観測においては、戦略のグランドデザインも求められる。また、衛星観測は予算的にも国家規模の駆動力が必要である。しかしながら、我が国の地球衛星観測の現状は、策定と実現の仕組みは不明瞭で、円滑に進められているとは言い難い。将来の計画を担う人材育成、大量な取得データのアーカイブの作成と維持、環境監視のための均質データベース作成等に必要な国家体制も不十分である。

3 提言

(1) 地球衛星観測の戦略的計画推進の必要性

我が国の地球衛星観測による科学の発展と社会的利益を持続的に享受できるよう、空

白期間のない地球衛星観測ミッションの維持と持続的な技術開発を国家規模で行う必要がある。我が国に強みのある、高性能な降雨、陸面・海面のレーダやマイクロ波放射計観測、大気・海洋・陸域のイメージャ観測、温室効果気体やオゾン化学に関わる大気微量成分の分光放射計観測等は、災害や気候問題対策のインフラとして国際的な期待も大きい。これらは、国際学術計画や他国の宇宙機関との連携からも、適切なタイミングでトップダウン的に推進すべきものが多い。そのため、文部科学省においては、地球観測推進部会と宇宙開発利用部会を連絡調整する「地球衛星観測委員会（仮称）」を設け、衛星計画のグランドデザインと各ミッション案の審議を行うべきである。また、宇宙政策委員会の下に「地球観測小委員会（仮称）」を設けて、「地球衛星観測委員会（仮称）」の審議結果を受け、複数計測の相乗効果も加味した衛星観測に関する政策を議論し、宇宙基本計画に反映させて実現する場を確保するべきである。

(2) 地球衛星観測コミュニティの強化とピアレビューの導入

衛星観測に関する長期的戦略の議論の場として、大学・研究機関、関係省庁、民間企業等が有機的に協力する包括的地球衛星観測コミュニティの強化が必要である。このコミュニティは、公平性・透明性・客観性を担保しつつ衛星ミッションの具体的な立案とグランドデザインの「地球衛星観測委員会（仮称）」への提案を行う。立案には科学的研究成果を速やかに技術移転する方策も組込むこととする。コミュニティからの提案にはボトムアップ計画も含まれうる。「地球衛星観測委員会（仮称）」においては、ピアレビューによる計画評価と、トップダウン計画との相乗効果も含む審議を行うべきである。

(3) 観測データアーカイブ体制の構築と利活用の促進

地球環境や気候の長期監視と変動メカニズムの解明を行い、高精度な将来予測につなげるため、「地球観測データ電子図書館（仮称）」を確立して、観測とデータアーカイブのリアルタイム連携が可能な計算機システム環境を構築すると共に、過去の衛星観測及び関連データのアーカイブも効率化し、利活用の促進を図るべきである。これには、利用者の視点や要望を柔軟に取り込む仕組みと、高い永続性、堅牢性、国際性、可用性が求められ、また、データのオープン化に関する検討が必要である。

(4) 人材育成の体制強化と地球観測リテラシーの向上

地球衛星観測における技術力の維持と高度化を担う人材の育成強化のため、多様な研究者・技術者からなる産官学の英知を結集したチームを作り、若手人材の積極的参加を促すと共に、航空機や気球による検証実験を教育の場として活用する必要がある。また、社会基盤を支える衛星観測の仕組みと意義を正しく理解し情報活用能力を高めるために、初等・中等・高等教育での地球観測リテラシー教育の拡充を図るべきである。

目 次

1	はじめに.....	1
(1)	地球衛星観測の歴史.....	2
(2)	科学および実用における地球衛星観測の利用.....	4
①	気象・海洋・気候の研究と予測.....	4
②	地球環境と地殻変動の監視と災害対策への応用.....	5
③	産業・行政への貢献と安全保障.....	6
2	我が国の地球衛星観測の現状と課題.....	7
(1)	日本の現在の活動とアドバンテージ.....	7
(2)	日本の活動の問題点.....	9
①	地球観測衛星ミッションの決定プロセスの現状と取り巻く環境.....	9
ア	JAXA、大学、各省庁との関係、ISAS 等宇宙科学コミュニティとの連携.....	9
イ	研究者コミュニティとの関係.....	11
②	データアーカイブの現状と課題.....	13
③	人材育成の現状と課題.....	13
ア	イノベーションと実用性の調和に関する問題.....	13
イ	分業体制に起因する問題.....	14
ウ	大学教育現場の抱える問題.....	14
エ	国民的理系リテラシーの後退と理科教育の問題.....	14
3	我が国の地球衛星観測の今後のあり方.....	15
(1)	国際的な連携の強化.....	15
(2)	社会への貢献と発信.....	16
(3)	地球衛星観測コミュニティの充実と衛星観測ミッション実現への道筋.....	17
(4)	データアーカイブのありかた.....	18
(5)	人材育成と理系リテラシー向上.....	19
①	ミッションチームの学際性.....	19
②	センサ開発における航空機観測・大気球等の活用と若手研究者の育成.....	19
③	初等・中等・高等教育の拡充による国民的地球観測リテラシーの向上.....	19
4	提言.....	20
(1)	地球衛星観測の戦略的計画推進の必要性.....	20
(2)	地球衛星観測コミュニティの強化とピアレビューの導入.....	20
(3)	観測データアーカイブ体制の構築と利活用の促進.....	20
(4)	人材育成の体制強化と地球観測リテラシーの向上.....	20
	<参考文献>.....	21
	<参考資料 1>地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会審議経過.....	23
	<参考資料 2>地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会地球観測の将来構想に関する検討 小委員会審議経過.....	24

＜参考資料３＞「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」の経緯.....	25
＜参考資料４＞我が国の地球衛星観測に関する組織図.....	27

1 はじめに

地球衛星観測は、電波や光を用いて受動的または能動的に軌道から地球を観測し、大気や海洋の動きや温度、組成、表層環境、位置等の情報を取得するものである。宇宙から地球を観測する人工衛星は、1960年に米国によって打ち上げられた TIROS-1 による気象観測以来、人類に多くの科学的知見を与えると共に、我々の快適で安全な生活への情報供給源として不可欠な社会基盤となっている。気象衛星観測によってとらえられる雲の分布とその動きは、スーパーコンピュータを用いて行われる気象予測に必須であるし、全球測位衛星システム GNSS による測位情報はカーナビゲーションやスマートフォンに組み込まれ様々な用途に利用されている。また、衛星観測は地球科学の進歩にも大きく貢献している。台風や集中豪雨などの顕著現象や、長期的な気候変動の仕組みの解明に役立てられているだけでなく、東日本大震災をもたらした巨大地震の発生メカニズム解明には GNSS によってとらえられた地殻変動情報が重要な役割を果たした。このように気象や地震のメカニズムの解明は、今後起こりうる災害を予測し有効な対策を立てる上で不可欠である。

長期にわたる衛星による環境監視も重要である。地上と衛星による連続的なオゾン層監視観測によってオゾンホールが発見され、純粋な科学研究によるメカニズム解明とフロン使用に関する国際的な政策により、有害な紫外線から生物を守る地球のオゾン層消失の事態が回避できた。この出来事は、人間活動による技術進歩が、社会生活の向上に資するだけでなく、予期せぬ過程を経て地球規模の環境に重大な影響をもたらす可能性を顕わにし、地球衛星観測による長期環境監視の重要性を再認識させるものであった。

一方、地球観測衛星計画の策定や利用に関して様々な問題を指摘する声もあがっている。たとえば、平成 20 年に宇宙基本法が制定され、内閣府に宇宙政策委員会と宇宙開発戦略推進事務局が設置されて、我が国の宇宙開発・利用の推進体制が確立したが、その新しい体制のなかでの地球科学の扱いが十分であるかどうかについては議論の分かれるところである。このような宇宙開発・利用の転換点にある中、地球衛星観測が我々人類の社会活動と地球科学の基礎研究の双方において不可欠な存在となっている事実をふまえ、あらためて我が国の地球観測のこれまでの成果を検証し、現状と問題点を洗い出して、あるべき将来構想についての議論を集約し、高い視点からの提言をとりまとめたい。

まず、地球衛星観測の歴史を振り返り、衛星観測の科学利用や実用における貢献を4つの分野に分けて記述する。科学的成果と実用的成果は性格的には分けるべきであるが、地球衛星観測において両者は不可分であり明確な区別は難しい。両者を区別した記述の試みについては第 22 期における地球惑星科学委員会、地球・惑星圏分科会の「記録」¹を参照されたい。本提言では、「地球観測衛星」は地球を宇宙から観測する人工衛星の全てを指し、科学が主目的の衛星に加えて気象衛星等の実用衛星も含めることにする。また、地球観測衛星による観測を「地球衛星観測」と呼ぶ。

¹ <http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/3-140905-1.pdf>

(1) 地球衛星観測の歴史

人工衛星による地球観測は、50 年以上の歴史を有する。1960 年にはアメリカが打ち上げた衛星 TIROS-1 に搭載されたビジコンカメラ²で撮影された雲の映像が地上に伝送されている。そして、全球をカバーする地球観測データを用いた国際的学術研究が自然に発展してきた。1964 年に打ち上げられた初の大気科学観測衛星 Nimbus-1 には赤外分光放射計が搭載され、台風の日や周りの雲頂温度が観測されている。1969 年にはフーリエ変換型の高分解能赤外分光放射計による観測が、1972 年には赤外サウンダによる気温の鉛直分布観測が行われている。衛星搭載可視・赤外放射計の技術は、現在もなお大きく進化し続けている。

1978 年から観測を開始した NOAA 衛星は、長年にわたって可視・赤外イメージャ AVHRR による観測および赤外とマイクロ波のサウンダ TOVS による気温、水蒸気の鉛直分布の観測を行ってきた。また、1978 年に打ち上げられた Nimbus-7 搭載の TOMS と SBUV によって地球規模のオゾン分布が明らかになった。以降、一時中断があったものの、後継機によるオゾン層監視が継続されている。陸域や海域を対象とした衛星では、高空間分解能の可視・赤外センサを有する LANDSAT 1 号が 1972 年に打ち上げられ、現在も 8 号が運用中である。また、最初の合成開口レーダは 1978 年打ち上げの SEASAT 衛星に搭載された。1980 年代になると、衛星観測・地上観測・海洋観測に関する現業ネットワークが整備され始め、1992 年には世界気象機関 (WMO)、ユネスコ政府間海洋学委員会 (IOC)、国連環境計画 (UNEP)、国際科学会議 (ICSU)³により地球観測システム (GCOS) が、2007 年には WMO を主体とする統合全球観測システム (WIGOS) が確立された。並行して NASA の Mission to Planet Earth が始まり、米国では EOS 計画が、日本では ADEOS 計画が、ESA では ENVISAT 計画が整備されて、日本の ADEOS (みどり) が最初に打ち上げられ、米国の EOS-Terra と欧州の ENVISAT が続き、大気・海洋・陸面・固体地球に関する様々な人工衛星による地球観測が始まった。また、この時期には気候変動に関する政府間パネル (IPCC) がスタートし、気候変動研究のための長期的な衛星データベースの構築が始まった。地球観測衛星は大型化し、複数のセンサを搭載するようになった。A-Train のように同一軌道上を数分遅れで様々なセンサを搭載した複数の衛星が周回し、同時に多くの観測情報を得るコンステレーションシステムなど、手法も高度化してきた。また、大気観測衛星においてもレーダやライダーなどの能動的センサが運用されるようになった。

我が国では、1977 年に静止気象衛星 GMS-1 (ひまわり 1 号) が打ち上げられた。その後、後継機が次々と打ち上げられ現在まで途切れることなく運用されている。一方、宇宙航空研究開発機構 (JAXA、旧宇宙開発事業団 NASDA) ではロケットの開発に主眼が置かれ、地球観測衛星の開発は遅れたが、1987 年に可視、赤外、マイクロ波放射計を搭載した海洋観測衛星 MOS-1 (もも 1 号) が我が国初の地球観測衛星として打ち上げられた。

² 人工衛星で画像を撮影、伝送する技術の一つ。テレビ技術を利用することにより、人工衛星で地球の画像を撮影し、地上にその画像を送ることができる。

³ World Meteorological Organization, Intergovernmental Oceanographic Commission, United Nations Environment Programme, International Council for Science

その後、1992年にLバンド合成開口レーダ⁴を搭載した資源探査衛星 JERS-1（ふよう1号）が、1996年には本格的な地球観測衛星「みどり」が、また、2002年にADEOS-II（みどり2号）が打ち上げられた。1997年には我が国が開発した降雨レーダを搭載した熱帯降雨観測衛星 TRMM がH-IIロケットで打ち上げられ、2015年4月まで運用が続けられた。その後継機である GPM 衛星は2014年3月に観測を開始した。我が国が開発した多周波マイクロ波イメージャ AMSR シリーズは、AMSR、AMSR-E に続き、現在、GCOM-W1（しずく）に搭載された AMSR-2 が A-Train シリーズの一環として運用され、水蒸気、雲、降水、海面水温、海氷の観測を行っている。大気化学分野では、「みどり」に搭載された ILAS および「みどり2号」に搭載された ILAS-II が、極域におけるオゾン破壊の定量化や極成層圏雲⁵とオゾン破壊の関連の解明に貢献した。同じく「みどり」に搭載された IMG は、直下観測型 FTS⁶として現在に至るも最高の性能を誇り、多くの大気微量成分の観測に成功した。また、世界初の温室効果ガス観測衛星 GOSAT（いぶき）が2009年に打ち上げられ、二酸化炭素やメタンの濃度の全球分布を明らかにした [1]。

政府主導の「しずく」や「いぶき」は中型衛星のカテゴリに入るが、近年では、民間参入も可能な安価で打上げコストの低い小型衛星が開発され、コンステレーションを組むことで観測頻度を上げる、新たな地球観測のスタイルも生まれつつある。これは地上観測網のない地域での森林火災、洪水などの異常の早期発見等に有効である。降雨などの気象観測においても実証段階にきている⁷。しかし、一般に小型衛星は高精度や長寿命は目指しておらず、中型衛星に搭載された高精度観測との相補利用が必要である。

商用衛星のデータを同化技術によって気象予測に活用する試みも始められている⁸。しかし、商用衛星による高精度情報は、セキュリティ関連に偏る傾向がある上、多くが高価格なため、オープン・フリーで高精度な地球環境観測衛星データを基本とする気象業務や気候監視に対しては、安定かつ大規模に利用できる状況にない。本提言は、持続的な地球環境を維持するために不可欠な基本データを取得する地球観測衛星の計画が危機的状況にあることに対するものであり、商用衛星についての議論は行わない。商用衛星と異なり、地球環境観測衛星のデータは短期的な経済利益をもたらさないが、国境を越えた地球環境の現状把握と気候変動メカニズムの理解の深化を通して、オゾン破壊をもたらすフロンや、地球温暖化をもたらす温室効果気体の規制等に代表される国家横断的な施策に資するものである。

⁴ 人工衛星や航空機の移動により、仮想的に大きなアンテナを持つような効果を利用したレーダ技術。軌道上の複数の異なる位置におけるレーダ観測を一つの大きなレーダシステムと見なして解析することにより、より細かい空間分解能の画像を取得することができる。

⁵ 冬季極域に発生する下部成層圏の雲。硝酸、硫酸、水で構成される液体または固体の雲である。極成層圏雲の粒子の表面では、フロン起源の硝酸塩素や塩化水素から、塩素分子が生成され、春季極域成層圏で起こる大規模なオゾン層破壊をもたらす。

⁶ Fourier Transform Spectrometer

⁷ 例えば、NASA JPL の Raincube が2017年8月に打ち上げの予定である。

<https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/raincube.php/>

⁸ 例えば、アメリカ海洋大気庁（NOAA）による Commercial Weather Data Pilot,

<http://www.space.commerce.gov/business-with-noaa/commercial-weather-data-pilot-cwdp/>

(2) 科学および実用における地球衛星観測の利用

① 気象・海洋・気候の研究と予測

衛星地球観測は、毎日の天気予報にも温暖化に伴う気候変動対策にも欠かせない社会インフラである。高度約 36,000 km の静止軌道にある気象衛星「ひまわり」の雲画像はテレビの天気予報に頻繁に登場する。「ひまわり」の画像から得られる雲風ベクトル・晴天輝度・台風の情報は、スーパーコンピュータを用いた高精度な数値予報に利用されている。一方、地上数百 km の低軌道衛星は、静止軌道に比べ高機能で高解像度の観測が可能であり、たとえば NOAA による気温や水蒸気量の鉛直分布も数値予報に重要である。また、数値予報には、気象衛星以外の多くの低軌道衛星の観測データも利用されている。気象庁のメソ数値気象モデルにおいては、2003 年に米国軍事衛星 DMSP 搭載 SSM/I と熱帯降雨観測衛星 TRMM 搭載 TMI、2004 年に Aqua 搭載 AMSR-E による水蒸気量・降水強度の利用を、全球数値モデルにおいては、2006 年に SSM/I と TMI、AMSR-E の輝度温度の利用を開始し、予報精度を大幅に改善できた。これらの低軌道衛星観測には、降水や化学組成、植生、海面水温など、気象衛星では捉えられない情報や、解像度の優れた情報が含まれるからである。海上も含め地球全体をカバーする衛星観測は、現実大気状態の把握に重要である。これらの観測データは気象の科学研究にも利用され、その成果は気象予測モデルのみならず、地球温暖化や気候変動を予測する気候モデルの精度向上にも役立てられており、気候問題に取り組むための不可欠な情報となっている [2][3]。気象衛星は世界気象機関(WMO)が中心となって国際協力の下で運用されているが、その他の低軌道衛星観測においても、複数の衛星をほぼ同時に同じ軌道を通過させて多様な物理量を総合的に観測する方法 [4] や、10 機程度の低軌道マイクロ波放射計観測衛星により全球の降水を高密度で観測する方法等の様々な形態の観測が、各国の宇宙機関等の国際協力のもとで進められている。

海洋分野においては、地球観測衛星搭載の可視放射計・マイクロ波散乱計・高度計・マイクロ波放射計による植物プランクトン現存量、海上風ベクトル、海面高度と波高、海氷分布データが、海洋大循環変動の研究や炭素循環の評価等に用いられている。

また、長期に亘る気候監視のため、最新技術による過去の観測データの再処理を行って得られる長期再解析⁹データが各国の気象機関等で作成されている。再解析には地上観測や気象衛星観測だけでなく、それ以外の各種地球観測衛星のデータも使われており、気候データの大きな品質向上をもたらしている。

これらのデータは、エルニーニョ/南方振動などの気候変動のメカニズムの解明、地球温暖化の影響評価などに活用され、その予測を通して地球サミットにおける気候変動枠組条約などの国際的な取り組みに役立てられている。

⁹ 天気予報サイクルにおいて予報値に観測値を同化した格子点データを蓄積したものを解析データと呼ぶ。現業の予報では、最新の数値モデルを利用するため、モデルの変遷により解析データの品質も変化する。そこで、長期間の均質な解析データを生成するために、同一の数値モデルを利用し、現業では利用しなかったデータも含んだ観測データを利用して長期間の解析データを新たに作成したもの。

② 地球環境と地殻変動の監視と災害対策への応用

地球衛星観測における環境監視は、新しい技術開発により観測対象を拡充しながら、長期の均質かつ持続的な観測による火山噴火・地震・水害などの突発的に起こる災害と、温暖化や都市化などのゆるやかな環境変化の検知と把握に用いられ、これに基づく予測と対策に役立てられている。

地球衛星観測は、対流圏オゾンや PM2.5、黄砂、火山灰など健康被害や交通障害等の社会的影響を及ぼす大気微量成分やエアロゾルやその前駆気体の広域分布を捉える上で重要である。これらの情報は国際的枠組みに基づき共有され、

大気輸送モデルによる予測等を通じて、社会や住民の様々な対策に活用されている。モデルそのものの開発や精度向上においても衛星観測データによる検証が必要である。また、高分解能分光器やリトリーバル手法¹⁰の開発が進み、長い間技術的に困難とされてきた二酸化炭素やメタン等の温室効果気体の全球分布と変動も「いぶき」などによる観測が開始され、排出源や吸収源の特定を含む全球的な収支推定が可能となった。地球衛星による長期大気質監視の好例は成層圏オゾン観測である。1982 年の南極オゾンホールが発見以降、成層圏オゾンと関連する微量化学成分の衛星観測によりオゾン破壊過程の詳細が解明され、1987 年の「モントリオール議定書」に始まるフロン排出規制に対して決定的な役割を果たした [5]。現在も、衛星によるオゾン層の監視が継続され、2011 年の北極の大規模オゾン層破壊や、2015 年の南極オゾンホールの過去最大規模への拡大を捉え、その解明に貴重なデータを提供している (図 1)。

地球衛星観測データは地球表層変動の検出にも極めて有用である。1972 年の米国 LANDSAT の打ち上げ以来 40 年以上に亘る高解像度の全球地表データが蓄積されており、都市環境変化、森林伐採や砂漠化などによる植生変化、氷河・氷床の消長等、地球環境の劇的な変化の様子が的確に記録されている。これらは、地球環境の成り立ちや変化の要因の理解と、必要な対策の立案・実施に大きく貢献している。

測地分野においては、GNSS は基盤技術の一つと位置付けられている。東日本大震災の際には、この技術により東北地方で水平 5m、垂直 1m の地殻変動が検出されたのは記憶に新しい [6]。陸域観測技術衛星 ALOS-2 (だいち 2 号) においては、可視波長センサーによる立体視や、合成開口レーダの干渉解析により空間解像度約 2m の精緻なグローバルな標高情報が得られつつある (図 2)。これは地震や火山に伴う地殻変動の科学研究や、巨大災害時の被害状況把握などに利用されている。衛星による海面高度や

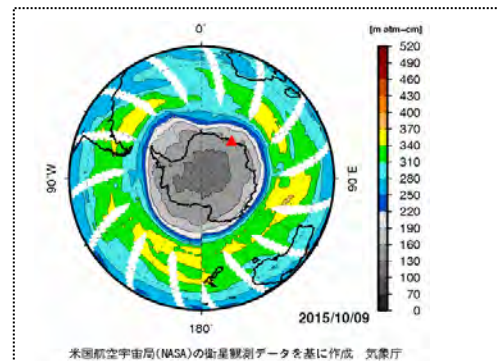


図 1 2015 年 10 月 9 日の南極オゾンホール

(出典) 気象庁「オゾンホールの状況 (2015 年)」

¹⁰ 人工衛星で観測される電磁波の強度を物理量に変換する手法。人工衛星で観測されるのは紫外から電波までの多様な電磁波であり、これらを理論計算値と比較することにより、気温、水蒸気、雲、海面水温等、大気、海洋、地表面の様々な物理量を推定する。

重力の時間変化の観測は、海域の詳細な重力異常や海底地形の調査、mm オーダーでの海面上昇や津波、陸水貯留量、極域の氷床融解や変動の検出に役立てられ、全球水循環の質量バランスの解明が進んでいる。また、これらの基盤となっているのは高精度な測地座標系であり、その維持には1986年に打ち上げられたEGS（あじさい）をはじめとする測地実験衛星が貢献している。

③ 産業・行政への貢献と安全保障

地球衛星観測データは、監視や予測を介してだけでなく、産業や行政に直接的な便益をもたらしている。「しずく」による全天候海面水温分布や高解像度海面水温・海色等を用いて漁海況情報が作成され、沿岸・遠洋漁業者や漁業組合等のエンドユーザに利用されている。また、降水や土壌水分、日射、植生指数等の情報は、世界の主要穀倉地帯の作付面積把握や穀物生育予測、干ばつの早期警戒情報発信に用いられ、食料安全保障の確保に役立てられている。日射情報は、太陽光発電等再生可能エネルギーの立地・運用に有効である。GNSSによる測位情報は、

運輸産業や通信産業はもとよりスマートフォン等の位置情報源としても広く利用されている。また、米国 Terra 衛星搭載の日本の ASTER による可視バンドステレオ観測や、ALOS（だいち）搭載の PRISM によるパンクロバンド3方向視観測は、全球規模のデジタル標高モデル（DEM）の作成を可能とし、離島の地形図の精緻化に利用されている。地震や火山活動に伴う地殻変動の広域推計は、速やかな災害対策に役立てられている。

近年、温暖化に伴う海氷減少や海面上昇、豪雨の増加、PM2.5 などの大気質の劣化など、地球環境の変化が各方面で顕在化している。地球衛星観測は地域規模から全球規模にわたる地球環境変動を定常監視できるほぼ唯一の手段である。そのため、多くの国が地球観測衛星を打ち上げ、特長の異なる測器の観測データを組合せた解析と検討がなされている。今後、結ばれるであろう気候変動枠組条約¹¹や生物多様性条約等の議定書の検証手段としても、地球衛星観測はさらに重要性が増すものと考えられる。

こうした状況に対して、我が国独自の観測手段を有することは広い意味での国家安全保障につながっていることも重要な視点である。換言すると、独自の観測手段を持たない場合、多くの局面で相手側の言いなりになる懸念がある。国家安全保障の面からも、複数の地球観測衛星を継続的に保持することが重要である。

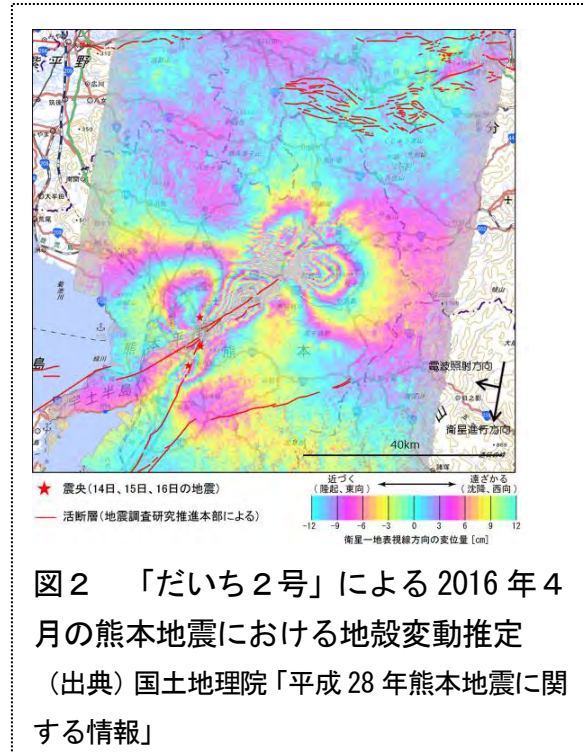


図2 「だいち2号」による2016年4月の熊本地震における地殻変動推定
(出典) 国土地理院「平成28年熊本地震に関する情報」

¹¹ United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

2 我が国の地球衛星観測の現状と課題

(1) 日本の現在の活動とアドバンテージ

日本は以下に述べる分野において地球衛星観測に関する高い技術力を保持している。2015 年 12 月現在、運用中の日本の地球観測衛星は、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」、地球環境変動観測ミッションの第一期水循環変動観測衛星「しずく」、全球降水観測計画・主衛星 GPM、陸域観測技術衛星「だいち 2 号」である。熱帯降雨観測衛星 TRMM は設計寿命を大きく超え 2015 年まで 17 年間運用された。このうち TRMM と GPM は日米の共同ミッションである。

我が国は、衛星搭載アクティブセンサ、つまり、降水や雲、地表面、海面による散乱、吸収、反射を高精度で検出する衛星搭載レーダの開発技術を持ち、降雨レーダからの降水強度の推定や L バンド合成開口レーダ (SAR) のアルゴリズム開発において世界を牽引している。

衛星搭載の降雨レーダは日本が世界に先駆け開発し、TRMM においてその技術を実証した [7]。このレーダはフェーズドアンテナによる高速電子走査を行う。TRMM 衛星の成功を受け、GPM 計画では、雪の観測も可能な二周波降水レーダが開発された (図 3)。降水観測衛星搭載レーダは世界でこの 2 機のみである。GPM 計画の

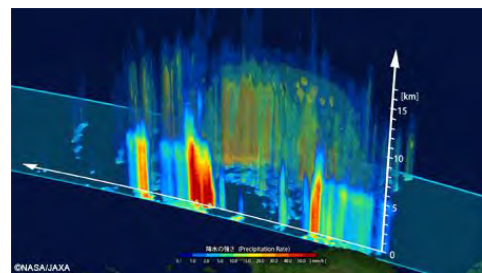


図 3 GPM による平成 26 年台風 10 号に伴う降水の 3 次元分布の観測

(出典) JAXA「地球が見える 2014 年」

一環として、衛星全球降水マップ (GSMaP) がリアルタイムで作成され、これを用いて開発された洪水や土砂災害の予警報システムが、ユネスコやアジア開発銀行などの資金により、地上観測が不十分なアジア諸国への導入が進められている。

雲を観測するレーダとしては NASA の CloudSat がある。日本は雲レーダの開発にはやや遅れたが、2018 年度打ち上げ予定の EarthCARE 衛星には初めてドップラー速度の計測を可能にした日本の雲レーダが開発され搭載される予定である。

我が国はまた、「ふよう 1 号」-SAR、「だいち」-PALSAR、「だいち 2 号」-PALSAR2 と世界唯一の L バンド SAR を打上げ、特に PALSAR2 は技術的にも世界のトップに位置づけられる。陸域観測技術衛星「だいち」および「だいち 2 号」については、大学を中心とした 20 機関以上によるボトムアップ的なコンソーシアム PIXEL¹²が組織されている。この中でデータやソフトウェアの共有と定期的な講習会・研究会等が進められ、一部の大学・研究機関に限られていた干渉 SAR (InSAR) を用いた研究の裾野が大幅に広がった。

衛星搭載パッシブセンサにおいても日本は高い技術力を持っている [8]。マイクロ波を用いた降水や水蒸気の観測に日本は長い歴史を持つ。「もも 1 号」、MOS-1b (もも 1 号

¹² : PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface]
(<http://pixel.eri.u-tokyo.ac.jp/>)

b) に始まり、「みどり 2 号」、Aqua（米国）、「しずく」搭載の AMSR、AMSR-E、AMSR2 はその高分解能と安定性で国際的評価が高い。「しずく」搭載の AMSR2 では、海洋上の鉛直積算水蒸気量や雲水量、海面水温、海上風速、海水密度、陸域積雪量や土壌水分量等の推定アルゴリズムが改良された。また東海大学を中心に衛星海面フラックスデータセット（J-OFURO）が作成され、1998 年以降のデータセットを国内外に公開している。

静止気象衛星「ひまわり」シリーズは、1980 年から安定的に世界の現業気象予報に貢献してきた。2014 年 10 月に打ち上げられた「ひまわり 8 号」は、可視赤外域における観測チャンネル数の圧倒的な増加と高頻度観測を可能にし、WMO の提唱する高性能イメージャを搭載した世界初の第 3 世代静止衛星として注目されている [9]。

気候分野監視関係では、2009 年打ち上げの「いぶき」がある。このプロジェクトでは近赤外波長域の太陽反射光を用いて大気中の二酸化炭素及びメタンの気柱総量¹³を科学利用に資する精度で推定することに世界で初めて成功した。国内外からの公募研究によって、二酸化炭素やメタンの高精度観測、地域別の炭素収支解析、植生クロロフィル蛍光の検出などが進められている。目標を大きく越えた観測精度を達成し、当初困難視されていた長寿命温室効果ガスの衛星観測技術の基盤を築いた。その後、米国が 2014 年に同様の衛星を打ち上げ、欧州、中国でも計画が進んでいる。我が国では性能向上を図った GOSAT-2 を 2017 年度に打ち上げる予定である [10]。

また、成層圏オゾン関連の活動としては、短命に終わったものの、改良型大気周縁赤外分光計 II 型 ILAS-II や温室効果気体センサ IMG などの近紫外域から赤外域にかけての高分解能分光センサは、我が国の技術力の高さを示した。また、超伝導サブミリ波リム放射サウンダ SMILES は国際宇宙ステーションを利用し、成層圏から下部熱圏までの広範囲にわたる大気中微量成分を高精度で測定し、オゾンを破壊する化学過程の反応の解明など国際的に高い評価を得た。

宇宙との境界領域の超高層大気についても衛星観測がなされてきた。特に、1989 年と 1992 年に打ち上げられた磁気圏観測衛星の EXOS-D（あけぼの）と GEOTAIL は、太陽活動の完全な 1 サイクル（約 22 年）¹⁴の観測や、サブストーム¹⁵などの磁気圏現象の巨視的構造¹⁶の時間変動など、プラズマ物理学における微視的過程¹⁷と巨視的構造の関係の理解を深める科学的成果を収めてきた。国際宇宙ステーションからの地球観測も、SMILES の他、超高層大気撮像観測 IMAP、雷放電の高速測光撮像 GLIMS などにより進められた。

¹³ 単位面積あたりの鉛直気柱内に存在する気体の総量。

¹⁴ 太陽放射や太陽表面の爆発現象などの太陽活動は約 11 年周期で変化しているが、南北の磁極の極性は、この約 11 年毎に反転するので、約 22 年で完全に元に戻る。したがって、約 22 年が完全な 1 サイクルとなる。

¹⁵ 地球磁気圏におけるエネルギー蓄積・解放現象。太陽風中の磁場の働きによって磁気圏に磁場のエネルギーが蓄積され、それが何らかのきっかけでプラズマの運動エネルギーに変換される。これに伴って磁気圏から電離圏に至る電流系が形成され、オーロラの活発化など様々な擾乱を引き起こす。

¹⁶ プラズマを構成するイオンの旋回運動のスケール（100m～100km。場所によって異なる）よりも十分大きく、電磁流体力学近似のもとに流体力学で扱えるような磁気圏プラズマの運動・構造。

¹⁷ プラズマを構成するイオンの旋回運動のスケール以下で、流体力学ではなくイオンの粒子としての振る舞いが卓越するような現象のこと。そのような微視的過程が磁力線のつなぎ替えなどで重要な役割を果たす。

(2) 日本の活動の問題点

国際的な地球衛星観測の奔流の中、前節で述べたように、日本での地球観測衛星のミッションは様々な科学研究と社会貢献に役立てられてきた。しかしながら、他方で、内在する問題点も顕在化している。

地球観測衛星ミッションは、当初は単体で実施されてきた。しかし、その有用性が明らかとなるにつれ、新たな技術開発に加えて継続のニーズが高まり、衛星のシリーズ化が図られるようになった。現在では、現業気象予報や気候変動対策においても継続するこれらのミッション自体が重要なインフラとなっている。一方、宇宙の開発及び利用の一貫性を確保するため、2008年、わが国では宇宙基本法が制定され、地球観測衛星ミッションも新たな宇宙開発体制の下で実施されることになった [11]。現在、この体制下での地球衛星観測のあり方に関する議論が行われているが、個別の衛星計画ごとの予算措置では隣接科学分野を超えた衛星計画を進めにくく¹⁸、これに対処するため、JAXA/EORC は「水循環・生態系」、「生態系・気候モデル」など分野横断型の横軸研究の創出努力をしている。今後より広く、地球科学コミュニティとして議論を深め、新しい宇宙開発利用体制にふさわしい地球衛星観測を推進する仕組みが必要である。継続的な衛星観測実現のため、さらなる効率化とデータの有効利用を進めることも重要である。

しかしながら、国の経済状況と社会・産業構造の変化を反映して、プロジェクト型研究の予算的な継続性の問題や、企業体力の低下が顕著になり、我が国の地球衛星観測の将来展望は不透明である。そのため、若手研究者に対する地球観測衛星ミッションの魅力が低下し、衛星搭載センサの制作メーカーにおける技術者の確保も難しくなっており、これまで培ってきた我が国の高い技術力の維持が困難な状況に陥りつつある。また、最先端センサからの一次データ処理アルゴリズムの開発、作成されたデータの検証、地上観測と連携した高度なデータの利活用においては、推進体制を含めてまだ努力の余地がある。

日本の地球観測衛星ミッションの現状と問題点を①ミッションの決定プロセス、②データアーカイブ、③人材育成の視点から、以下に順に述べる。

① 地球観測衛星ミッションの決定プロセスの現状と取り巻く環境

ア JAXA、大学、各省庁との関係、ISAS 等宇宙科学コミュニティとの連携

大学等の研究者がボトムアップで地球観測衛星ミッションを実現する場合、「提案」→「科学的観点からの審査」・「技術的観点からの実現性確認」→「政策的観点からの予算決定」の4プロセスが機能することが必要である。このうち中間の2つのプロセスは並行して行われる。また、ミッションの採択や評価においては、各分

¹⁸ 現在PIのチーム及びサイエンスチームは衛星毎に作られている（日本ではサイエンスチームとPIのチームは別のことが多い）。JAXAの場合は、PIが集まるワークショップは、GCOM、GPM、EarthCAREは一緒に開催されているが、ALOS、GOSATは別になっており、互いの交流はほとんどない。また、ASTER（経産省）のPIワークショップも独立に開催されている。そのため、たとえば、研究対象が植生の場合、GCOM、ASTER、GOSATを組合せる研究も考えられるが、実行は難しい現状がある。

野の専門家が参加する透明性の高い独立したシステムが必要である。

現在、プロジェクト化されている衛星ミッションは、宇宙開発委員会に設置された地球観測特別部会(2004年11月)の調査・審議を経て取りまとめられた報告(2005年4月)に基づく。その提案は、1995年に設置されたNASDA/EORCの地球環境観測委員会が中心となり国内の地球観測コミュニティの意見を集約したものである。NASDA(後のJAXA)は、各ミッション提案に技術的観点からの検討および省庁における政策的観点からの予算化の調整役として関わった。4プロセスについては、ミッション毎に外からの見え方に濃淡はあるが、概ねうまく機能していた[11]。

他方、内閣府に設けられた総合科学技術会議(当時)では我が国の地球観測に関する研究開発や、地球観測サミットにより設置された地球観測に関する政府間会合(GEO)による「全球地球観測システム(GEOSS)10年実施計画」(2005～2015年)など国際協力計画等の推進に資するため、「地球観測の推進戦略」が関係大臣に対する意見具申として2004年12月に決定された。これに基づき、文部科学省の科学技術・学術審議会に統合的な推進組織として地球観測推進部会が設置され、関係府省・機関との緊密な連携・調整の下、この推進戦略に従い、かつ、関係予算状況を踏まえた我が国の地球観測に関する具体的な実施方針が毎年策定された¹⁹。

こうして科学技術政策としての地球観測計画が調整される一方、2008年5月に成立した宇宙基本法は、我が国の宇宙開発体制を大きく変革した。現在、同法に基づき、内閣総理大臣を本部長とする宇宙開発戦略本部が設置され、同本部が宇宙基本計画を作成することとされ、初版の宇宙基本計画が2009年6月に決定された。宇宙基本法の下、利用省庁によるトップダウン的な宇宙・地球観測の予算化が可能となった。これに対し、ボトムアップの地球観測衛星計画については、地球科学等の科学コミュニティからのミッション提案と実現を可能とする「提案・審査・確認・決定」の4プロセスの仕組みを再構築する必要性が指摘されている。これにはJAXAの独立法人化時に廃止された地球環境観測委員会の機能も含まれる。

「地球観測の推進戦略」策定後10年の経過を受け、2015年6月には総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)環境ワーキンググループによって地球観測等事業の進捗状況のレビューが行われた²⁰。そして、地球観測推進部会により2015年9月に「今後10年の我が国の地球観測の実施方針」が示された[12]。これは「GEOSS10年実施計画」の後継となる「GEO戦略計画」における主導的国際協力を視野にしている。この方針では、「課題解決型の地球観測」の重要性が謳われ、地球観測衛星はその主要な観測手段の一つとして確認されている。地球システムの包括的理解を目指した地球観測による科学研究は、将来起こりうる潜在的課題を見出し早期に対応する上で重要であること、また、取得されたデータや創出された知見の社会での活用を重視して、科学的に重要な地球観測と課題解決や政策的な観点から重視さ

¹⁹ http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/kankyousu/shin/detail/1285021.htm

²⁰ 「地球観測の推進戦略」策定以降の我が国の取組状況に基づく地球観測等事業の進捗状況のレビュー」(平成27年6月)

れる地球観測を結びつける必要があることが謳われている。

しかし²¹現時点においては、2017 年度打ち上げ予定の GOSAT-2 以降の地球環境観測衛星の予算が手当されていない。地球観測衛星ミッションは計画から打上げまで最低5年を要するため、観測の空白期間が生じる可能性がある。長期の地球環境監視において後世まで負の影響を及ぼす可能性があり、可及的速やかに次世代へ続く戦略的な地球観測衛星ミッションを計画し、実行する必要がある。地球衛星観測ミッションは、フューチャーアース²²・WCRP 等の国際学術計画や NASA・ESA 等の他国の宇宙機関との連携等、国際的動向と関連することも多く、国家プロジェクトとして適切なタイミングで推進していくべきものでもある。

ボトムアップのミッション提案の審査・確認・決定という仕組みを作る上でも、技術の有効利用という意味でも、宇宙科学との連携は重要である。JAXA 宇宙科学研究所では、地球の超高層大気や、月、惑星、太陽などの天体を対象とする探査・観測ミッションを実施してきた。宇宙科学においては研究者による選挙で選ばれた委員で構成される宇宙理学委員会が新規ミッションの公募・審査を行い、実施すべきミッションを宇宙科学研究所長に推薦する。ミッションの優先順位づけなどの議論は学会等でも活発に行われている。このような仕組みは、新規技術開発やデータ利用を科学者コミュニティが主体的に進める上で重要な役割を果たしている。これに対し、地球衛星観測では、基礎科学に加え社会貢献や政策の視点も重要で、ボトムアップ的ミッションもトップダウン的ミッションとの協力が必須であることが多く、利用者コミュニティが大きい点でも宇宙科学とは異なる。しかし、宇宙観測と地球観測の技術には共通点も多く、今後連携を深めるのが望ましい。

海洋分野では、海洋基本法（2007）と海洋基本計画（2008）の下、海洋環境の保全、海洋空間の持続的かつ円滑な利用、資源の確保、国家の安全保障等の海洋ガバナンスを実現する目的から、沿岸域・排他的経済水域・公海等の広域情報を即時的かつ立体的に掌握可能な衛星観測の活用が求められる。JAXA においては、海洋・宇宙連携委員会が設けられ、「環境・水産」、「海底エネルギー・海底資源」、「海運・海洋セーフティ」、「海洋セキュリティ」の4分野で、実利用を中心とした幅広いニーズを網羅した提言がまとめられている。この提言に基づくミッションの実現はまだないが、今後の衛星計画の中で、戦略的に位置づけるべきである。

イ 研究者コミュニティとの関係

アで述べたように 1980 年代には地球環境観測委員会が中心となり、地球観測衛星計画が立案・精査され、今日に至るまで着実に実現されてきた。この間、「みど

²¹平成 25 年度および 26 年度版「宇宙開発利用予算配分方針のフォローアップ」参照

²² 国際科学会議（ICSU）等が推進する地球環境変動分野の 4 つの国際研究計画（地球圏・生物圏国際協同研究計画：IGBP、地球環境変化の人間の側面国際研究計画：IHDP、生物多様性科学国際協同計画：DIVERSITAS、世界気候研究計画：WCRP）、及びそれらの共同イニシアチブとしての地球システム科学パートナーシップ（ESSP）を統合し、学術と社会の間の垣根も超えて地球規模の持続可能性を実現することをめざす 2013 年から 10 年間の国際研究計画。

り」が1997年に、また「みどり2号」が2003年に、技術的問題から当初計画よりもはるかに短期間で運用終了となったこともあり、JAXAでは、衛星観測の信頼性・堅牢性の視点での見直しが行われた。これらの事故による喪失感もあってか、多くの研究者が次第に地球観測衛星ミッションから遠ざかっていった。予算上の制約も、大規模な地球環境観測委員会の運営維持を困難にした。

その後、日本の地球観測計画は先に述べた国際計画である「GEOSS 10年実施計画」に対し、気候・水・災害の3分野に集中して対応するとともに、「宇宙基本計画」に定められた、「A アジア等に貢献する陸域・海域観測衛星システム」および「B 地球環境観測・気象衛星システム」の構築に向け、実施されてきた。しかし、新たに変革された政府の宇宙開発体制のもと、2018年度以降の気候問題に取り組むための地球観測衛星計画が立案されていない（2011年時点）状況が生じた。これを受け、JAXA 理事長の諮問委員会である地球圏総合診断委員会が設立され、海域、大気、陸域、および国際宇宙ステーションの四つの分科会が設置されて、地球観測の将来ミッションに関する意見集約、特に若い研究者からの意見集約が行なわれた。

他方では、2010年頃から、宇宙政策委員会からの要請を受けて、宇宙利用のあり方や地球衛星観測の意義と役割についての議論を深めて各種施策に提言することを目的とした「今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合」（TF）が設置され、コミュニティの構築が図られた。これは、日本リモートセンシング学会、日本写真測量学会、日本地球惑星科学連合をはじめとする23の関連学会の研究者が参加する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」に発展し、我が国の地球衛星観測の将来計画に関するボトムアップの議論や、提言・幹事会声明の発出がなされている（参考資料3）。2013年10月には、「新成長戦略に貢献する我が国の地球観測の今後の進め方」[13]が、2015年9月には、「我が国の地球観測の将来計画に関する提言」が発出された。現在TFでは、「地球科学研究高度化ワーキンググループ」と「実利用連絡会」の2つのグループでの議論により、最先端科学と実利用を両輪としての地球観測衛星ミッションとロードマップを検討し、衛星観測に関連する社会基盤の維持と産業創成のシナジーを追求している。2016年5月には「地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析」がまとめられた[14]。これらの活動を通じ、地球衛星観測に係る科学コミュニティから、解明すべき科学的課題および重要な衛星観測システムに関するボトムアップの提案が議論・検討されている。

このように学協会横断型の意見集約の場が設けられ、研究者コミュニティとして具体的な提言をボトムアップで作成できるようになったことは、我が国の地球衛星観測分野における大きな進歩である。しかしながら、現状においては、研究者、政府、産業界、JAXAを有機的に繋ぐ地球観測衛星計画の包括的な実施体制は十分とはいえず、その時々々の国の財政事情や社会情勢に大きく影響されており、長期的戦略に基づく計画の策定は難しい。

② データアーカイブの現状と課題

地球観測衛星の観測データは膨大な量となる。例えば 2015 年に運用開始した気象観測衛星「ひまわり 8 号」のデータ量は毎日 430 ギガバイトである。他の地球観測衛星からも、雨・雲・微粒子・地表面・温室効果ガス等の大気に関する大量データが日々取得されている。将来にわたり広くかつ長く活用されるべき“今”の地球の姿を記す観測データは、一度失われると取り戻せない。データアーカイブシステムには永続性と堅牢性が必要である。防災・減災の観点からは、容易なリアルタイムのデータアクセスが必要である。地上観測データやモデル出力との統合・解析の機能も重要である。

現存する多くのシステムには上記の要請が必ずしも確保されていない。また、衛星やセンサの開発機関が独自にアーカイブ化を行うため、衛星データを組合せて解析する場合、利用者は個別にデータを取得することになる。その際、データ形式や利用ポリシー等が異なる²³など、利活用におけるハードルが高いことが多い。GEOSS では世界に分散する衛星データベースを統合管理する試みが行なわれており、我が国では「GEOSS10 年実施計画」の下、データ統合・解析システム（DIAS）等が整備運用されてきた。DIAS では、「ひまわり 8 号」のリアルタイムアーカイブ作成、各種補正や切り出し機能を備えたデータ提供、データ利用の支援、衛星等、各種地球観測・予測データの統合と解析機能の開発が行なわれてきた [15]。しかし、永続運用可能な体制、データ利用制限の明確化、利用者の視点や要望を柔軟に取り組む仕組み、リアルタイム連携が容易な計算機環境の構築は今後の課題である。このようなデータアーカイブシステムの構築は、「GEOSS10 年実施計画」後継の「GEO 戦略計画」において我が国が主導的役割を果たす上で重要であるとともに、新しい価値を持つサービスの創出にも繋がる。衛星データの利活用の促進には、オープンデータ化の議論と対応が必要であり、我が国におけるオープンサイエンスの流れを加速する意味でも重要である [16]。

③ 人材育成の現状と課題

ア イノベーションと実用性の調和に関する問題

衛星からの地球観測には、バス系とセンサ系²⁴のハードウェア開発技術、データ分析のソフトウェア技術などの高度な技術が必要である。宇宙観測と異なり、地球観測においては、一方では、イノベーションによる計測精度・範囲・頻度・分解能の向上が求められるが、他方では気候研究や社会的実用性のため長期に亘り安定し

²³ 現在の主な衛星データアーカイブは下記のとおり。

・DIAS：主に検索のみ。配布は原則行っていない。

・Geo-Grid：経産省関連のセンサデータのアーカイブ。最新データの配布は Landsat8 のみ。フォーマットは GeoTIFF が主。

・JAXA-G-Portal：JAXA 衛星のうち、高分解能データ以外の配布。フォーマットは HDF が主。高分解能データは民間より有料配布。

・環境研：「いぶき」データの配布。無料。フォーマットは HDF5、テキスト、NetCDF。

これとは別に千葉大、東海大等から受信データの無料配布が行われている。

²⁴ バス系とは人工衛星に搭載される電源・通信機器・姿勢制御装置・熱制御装置など衛星本体の運用に関わる構成要素のこと。センサ系とは地球や宇宙の調査対象を観測するための装置群のこと。

たデータの継続的取得も求められる。地球観測の技術開発にはリスクの高いイノベーションだけではなく、技術応用や技術更新を重ねることが中核となることも多い。そのため、イノベーションを追究する工学系分野でも、データを利用し新しい知を探究する理学系分野でも、地球衛星観測のための技術開発を担う人材育成が難しい。

イ 分業体制に起因する問題

一般に地球観測においては、センサの設計者、開発者、ユーザといった分業体制がとられることが多い。衛星に関しては、設計者は JAXA、開発者は企業ということになる。経済成長期には企業の高い技術開発意欲に支えられていたが、現在では国際的な通商問題もあり、営業利益の上がらない宇宙・衛星産業への参入は開発を担当する企業にとって負担が大きい。その結果、技術開発にかかわる人材の育成も困難な状況にある。しかし、技術開発への投資なしには将来を担う人材育成は難しい。

ウ 大学教育現場の抱える問題

地球衛星観測のデータは多様で、その利用には高度な専門知識を要することから、国民の誰もが自らの手でデータを解析できるわけではない。地球衛星観測に関わる分野で学術的指導力を発揮できる大学教員は多くはない。国立大学は法人化以来、運営費交付金の漸減が続き教育資金が不足しており、外部資金獲得が必須となっている。しかしながら、継続性の薄い外部資金は教育には適さず、資金獲得に費やす教員の努力と時間は、教育の劣化につながりがちである。多忙な大学教員と接し、ポストクなどの期限付雇用の常態を目にして、研究教育職や高度な技術職へのあこがれや期待が若者から急速に失われつつあり、人材育成の道が狭まる恐れがある。

エ 国民的理系リテラシーの後退と理科教育の問題

人材育成をさらに困難にするのが、国民的理系リテラシーの低下と初等・中等教育における地球科学教育の問題である。遠い宇宙にあこがれる好奇心はあっても、スマートフォンに供されている GNSS 技術そのものに目を向ける若者は少ない。これはよく言えば、地球衛星観測が社会に広く浸透していることの裏返しでもある。

地球衛星観測についての科学・技術・社会生活との関わりを理解することは、エンドユーザが自らの判断により正しく衛星データを利用することに繋がる。そのため、大気・海洋・水文・地震・測地・地理等、地球科学全般に関する基礎教育が不可欠である。しかし、初等・中等教育において「地学」を専門とする教員数は、1970 年代以来減少の一途をたどっており²⁵、学習指導要領の改訂によって履修率が 1 割程度という危機的状況からは脱したものの依然として低迷している²⁶。

²⁵ 地学教員の新規採用数は、物理、化学、生物と比べて 20 分の 1 強である。

²⁶ 例えば、日本地球惑星科学連合 2014 大会「次期学習指導要領における高校地学教育のあり方」講演要旨集 (http://www.jpogu.org/meeting_2014/downloads/2014_002.pdf) 参照のこと。

3 我が国の地球衛星観測の今後のあり方

ここでは、国際的な連携の強化、課題解決型研究による社会への貢献、地球観測データの統合化、人材育成の視点から、今後の地球観測衛星ミッションのあり方を議論する。これは、地球観測推進部会が2015年9月に示した「今後10年の我が国の地球観測の実施方針」とも調和的であり、本提言はその実現のための重要な指針の1つとなるはずである。

(1) 国際的な連携の強化

地球観測に関する国際連携は、全球をカバーする観測データを有効利用するために、必然的に発達してきた。国際科学会議（ICSU）の地球環境変化研究（GEC）プログラムとして1980年には世界気候研究計画（WCRP）がスタートした。その中で地球衛星観測データの利用は大きな柱である。その後スタートした地球圏・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）では、生物学、生態学、医学などの広い分野で衛星データが利用され、重要な知見を生み出して来た。1980年代末にはIPCC評価活動が開始され、気候変動研究のために長期継続的な衛星データ取得に必要なシステム構築が提案された。

21世紀に入り形成されたGEOSSでは、衛星観測に関する活動が国際連携のもとに実施されている[17]。同時にGECプログラムも改組され、より社会に役立つ地球科学的知見の創出のためフューチャーアースの枠組みが生まれた[18]。ここでは、持続可能な開発目標（SDGs）の実現に向けた貢献が重要課題の一つである。第3回世界気候会議（WCC-3）では、この方向に沿う気候サービスのための全球枠組み（GFCS）の設置が謳われた。並行して、WCRPではコアプロジェクトを改組・発展させ、陸域-大気相互作用（GEWEX）・海洋-大気相互作用（CLIVAR）・対流圏-成層圏相互作用（SPARC）・雪氷圏-大気相互作用（CLIC）に関するコアプロジェクトをスタートさせた。さらに、4つのコアプロジェクトを横断する5～10年のグランドチャレンジとして、(1) 領域気候情報、(2) 領域の海水準、(3) 変化する気候での雪氷圏、(4) 水資源変化、(5) 雲・循環・気候感度、(6) 極端気候の6つの課題が定められた。この国際プログラムの改組の方向からは、単に社会からの要請への対応にとどまらず、純粋科学および実用科学としての地球科学的視点から抜けの無いマトリックス型の研究体制の構築が目指されていることが読み取れる。そのなかで地球衛星観測を含む各種観測データの利用もより組織的かつ多面的となることが期待されている[19][20]。

我が国の地球観測衛星ミッションは、これまでも国際プロジェクトと連携して実施されてきたが²⁷、今後も国際協力の流れに沿ったグランドデザインと長期的戦略の策定が

²⁷ これまでの国際共同で行われた地球観測衛星ミッションの主なものを以下に挙げる。

- ・「みどり」：衛星、打ち上げともJAXA。TOMS、NSCAT（以上NASA）、POLDER（CNES）を搭載。
- ・「みどり2号」：衛星、打ち上げ共JAXA。SeaWinds（NASA）、POLDER（CNES）を搭載。
- ・TRMM：衛星はNASA、打ち上げはJAXA。PR（JAXA）を搭載。
- ・EOS-Terra：衛星、打ち上げ共NASA。ASTER（経産省）を搭載。
- ・EOS-Aqua：衛星、打ち上げ共NASA。AMSR-E（JAXA）を搭載。
- ・GPM：衛星はNASA、打ち上げはJAXA。DPR（JAXA）を搭載。

必要である。地球衛星観測の場合、測器の組合せによっては、相乗効果が生まれ、得られる情報の価値が高まることも視点に加味する必要がある。相乗効果はトップダウンとボトムアップの計画の組合せによっても期待され、衛星ミッションの実施に向けた審議では、これらを同時に議論する必要がある。従来、我が国の国際連携では、個々の研究者の努力に頼る部分が大きかったが、日本および諸外国の経済状況を考慮すれば、衛星ミッションの実施における国際協力の重要性はますます高まっており、国際連携強化のため専門の衛星観測コーディネーターの設置が必要である。最近発展しつつある小型衛星や商用衛星の利用等も視野に入れる必要がある。

観測データの有効活用の方策についても、衛星ミッション実現前の十分な検討が必要である。衛星観測データは地球科学的基礎研究のみならず、広く防災・減災や低炭素社会構築などにも利用される。このような多面的なデータ利用を視野に、GEOSS や DIAS のような整備が進んでいる。今後、さらに社会の隅々までデータ利用を浸透させるため、気象・環境機関・研究機関・ビジネス間の交流が必要となる。データアーカイブの問題については別側面から 3 (4) で改めて触れる。

以上述べてきたように、変化する世界的な流れに対応しながら、地球科学研究に取り組み、地球環境にかかわる諸課題の解決に向けて、我が国の地球観測衛星ミッションと関連事業を着実に進め、国際貢献に資する必要がある²⁸。

(2) 社会への貢献と発信

気候サービスにおいては、2009 年の第 3 回世界気候会議 (WCC-3) において全球枠組み (GFCS)²⁹ が取り決められた。我が国でもこれに基づき、気象・環境に関する行政機関、研究機関、民間企業をつなぐ道筋を形成し、地球衛星観測データ等の各種データを利用した気候サービスの育成を行う必要があるが、技術移転システムの脆弱性が障害となっている。すなわち、大学や研究機関で生まれる最先端の研究成果を所掌官庁の現業システムに速やかに技術移転するための方策が不十分である。欧米における大気・気候科学の分野ではこのような問題は少ない。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・環境機関が積極的に関与している。また、新しい地球衛星観測のデータ解析には、ECMWF や欧州各国の気象局の経験豊富なチームの支援があり、最先端の研究成果が欧州全体の気象業務に利用される仕組みがある。米国では、

・ EarthCARE (2018 年度打ち上げ予定) : 衛星、打ち上げ共 ESA。CPR (JAXA、NICT) を搭載。

²⁸例えば、衛星による温室効果ガス観測に関しては、米国が中心となって、日本の GOSAT 関連研究者をはじめとする世界の関連研究者と連携した大気中二酸化炭素の衛星観測 (Atmospheric CO₂ Observation from Space ; ACOS) グループを組織している。また、衛星からの温室効果ガス濃度を中心とした大気微量成分の検証のための世界の先進諸国に配置された地上設置の高分解能フーリエ変換分光器の観測網である「全量炭素カラム観測ネットワーク (Total Carbon Column Observing Network: TCCON)」を国際連携の下に構築している。このような動きに乗りつつ日本の研究と事業の発展を図るのが重要である。

²⁹ GFCS : Global Framework for Climate Services

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）が存在する。欧州におけるコペルニクスプログラムは EC が担い、産業創成まで話が進んでいる。このように、技術移転システムと現業・研究コミュニティの協働の仕組みがあつてこそ、学術研究は社会への貢献に有効に機能する。現在の我が国の体制ではこれらが未整備のため、担当の行政機関や研究グループが疲弊しがちである。持続的かつ高効率に衛星データを利用できる社会となるためには、この問題を解決する必要がある。

連続性が確保された地球観測データは、環境監視に活かされ、かつ社会の基盤要素となる。したがって、地球衛星観測情報は安定して供給されねばならず、ミッションの継続性の担保が重要である。そのため、公平で透明かつ客観性の高いミッション決定のスキーム構築が必要である。特に、気候問題に取り組むための地球観測衛星計画は 2018 年以降未定となっており、喫緊の課題である。ミッション策定の評価基準に入れるべき観測データの価値の捉え方も広い視点から行なう必要がある。観測データは自由な発想で手軽に利用される中で、新たな価値が生み出される可能性も高い。データの無償利用による事業創成の道筋も事業としてとらえる戦略が大切である。

(3) 地球衛星観測コミュニティの充実と衛星観測ミッション実現への道筋

3 (2) で述べた今後構築すべき地球観測衛星ミッションの決定スキームにおいては、2 (2) ①アで述べたように「提案」→「科学的観点からの審査」・「技術的観点からの実現性確認」→「政策的観点からの予算決定」の 4 プロセスが健全に機能する必要がある。そのためには、大学や国の研究機関、関係する各省庁、民間企業等が有機的に協力できる地球衛星観測コミュニティの早急な形成が望まれる。このコミュニティは、長期的戦略を意識した課題設定とミッション策定、そしてこれを具体化したグランドデザインの提案を進めることが期待される。コミュニティの担う一連の流れの最初のプロセスは、国際的な視野に立った科学的意義や社会ニーズと継続性を考慮しながら、長期戦略に基づく課題の設定を行うことである。したがって、その議論には新規性の高い技術開発を含むボトムアップ的計画だけでなく、国際協力の視点から日本の強みを生かしつつ継続的に発展させるべきトップダウン的計画も含まれるべきである。継続性は、技術の継承と安定した発展、観測データの連続性、社会基盤としての安定性を担保する。研究者と関係各省庁の協力により、これまで困難だった一つの地球観測衛星ミッションに対する相互理解も容易となることが期待され、日本の衛星観測に関するグランドデザインの構築が可能となる。研究レベルから実用レベルへの速やかな技術移転の方策も生まれるだろう。また、グランドデザインの形で長期戦略を明らかにすることで、民間企業の投資意欲を刺激し、地球衛星観測を支える優れた民間の技術者層の維持と人材育成も期待できる。

グランドデザインに含まれる地球観測衛星ミッションの実現性の確認については、JAXA 並びに民間企業を含む開発チームが研究者との協力の下に十分な時間をかけて検討するプロセスが肝心であり、そのためのスキームの確立が必要である。衛星打ち上げ後の運用については、データの質の均一性の確保の視点から、地球観測衛星の想定寿命

を超えた後でも、センサの機能が劣化しない限り、長期連続運用が望まれることが多い。そのような柔軟な運用システムの構築が重要である。

コミュニティから提案されたグランドデザインを審議し、地球観測衛星ミッションを策定する際には、これまでの学術研究の成果を吟味し、かつ、社会性や国際性を含む多角的視点から審査を行うために、コミュニティとは独立した組織が必要である。ここでは、地球衛星観測の特質であるトップダウン計画とボトムアップ計画の相乗効果を加味した議論を行う必要がある。そのため、文部科学省において地球観測推進部会と宇宙開発利用部会を連絡調整する「地球衛星観測委員会（仮称）」を設け、衛星計画の長期戦略に関するグランドデザインと各ミッション案の審議を行なうことを提案する。このプロセスにおいては、公平性、透明性、客観性が担保されることが重要である。そして、「地球衛星観測委員会（仮称）」で審議されたグランドデザインについては、宇宙政策委員会の中で政策的観点からの議論を経て、宇宙基本計画に組み入れ、予算策定がなされるのが衛星ミッションの実現への道筋となろう。そのためには、宇宙政策委員会の中には、地球衛星観測を扱う「地球観測小委員会（仮称）」を設ける必要がある。

また、観測データ解析においては、衛星ミッションの主任研究者だけでなく、利用が想定される関連省庁の支援を含める仕組みを導入することで、最先端の科学的研究成果の速やかな社会還元につなげられよう。実用重視の気象衛星等については、最先端技術の観測データを地球科学研究者にも解放することで、科学研究の大きな進展が期待できる。さらに、地球観測衛星ミッションの策定段階でデータ公開やデータアーカイブのあり方について検討を詰めることで、複数の地球観測衛星データや関連する地上観測、再解析気候データ等を組合せた研究を効率化するデータアーカイブの実現も可能となる。

(4) データアーカイブのありかた

地球観測データは変わりゆく地球の歴史そのものであり、証人とも言える。しかし、2 (2) ②で述べたように我が国のデータアーカイブ及び利用促進の体制は、未だ十分ではない。その解決のため、これまで個別に開発され利用されてきた様々なデータアーカイブ手法や利用者サポートなどの機能を発展的に集約し、データを責任管理する「地球観測データ電子図書館」機能の確立とその継続的運用が必要である。この電子図書館は、永続性、堅牢性、可用性、国際性等を担保する必要がある。くわえて、データ利用者からのフィードバックを反映できる柔軟性を兼ね備えることが重要である。衛星観測データには利用者から校正値等の変更が提案される可能性が常にあり、全データを再処理・更新する作業がしばしば生じるからである。バージョン管理も適切に行う必要がある。また、データの実利用においては、データの利用制限がボトルネックとなることが多い。利用ルールの明確化、あるいは、オープンデータ化を促進する必要がある。さらに、様々な属性を持った多くのデータの有効な活用をユーザに促すため、図書館で図書館司書が活躍するように、電子図書館では常勤の技術者がデータ・コンシェルジュとなり強力かつ秀逸な利用者サポートを提供する必要がある。

(5) 人材育成と理系リテラシー向上

① ミッションチームの学際性

2 (2)③アに述べたが、地球観測衛星に関わる科学技術の現場では、イノベーションと実用性の両立が困難であるために生じる人材育成上の問題がある。地球衛星観測コミュニティからの長期戦略の明確な提示により企業の開発意欲が戻れば解決に向かうと予想されるが、直接的な方策も必要である。例えば、ユーザの多い理学系とイノベーションを追求する工学系との融合チームに関係分野の多様な研究者を加え、産官学の英知を総結集してセンサおよびアルゴリズムの研究開発ができる体制は効果的である。若手研究者や大学院生の積極的参加を促し、高い専門性ととともに学際性が要求される地球衛星観測分野の将来を担う人材育成の場ともなろう。

② センサ開発における航空機観測・大気球等の活用と若手研究者の育成

衛星搭載センサの高度化した近年では、机上の計算から直ちに目的性能を得るのは難しい。NASA では、衛星センサの工学モデルを航空機³⁰に搭載して様々な試行実験を行うシステムが確立されている³¹。工学モデルのデータはセンサ開発に有用のみならず、擬似データとしてアルゴリズム開発にも利用できる。センサの設計・開発段階から衛星に搭載して観測データを得るまでには相当な時間を要するため、航空機を用いた地上検証実験は、大学院生や若手研究者・技術者にセンサに接しデータを手にする機会を与えることになり、教育効果も高い。日本における研究用航空機の導入とその継続的な運用を支える体制の構築が望まれる。大気球等の積極的活用も有効である。

③ 初等・中等・高等教育の拡充による国民的地球観測リテラシーの向上

地球衛星観測の技術とここから得られる観測情報は、防災や環境問題など、国際的な視野が必要な身近な社会問題にも大きく関連する。21 世紀の社会基盤を支える衛星観測の仕組みと意義を正しく理解し、情報を活用する能力をリテラシーとして普及させる必要がある。そのためには、初等・中等・高等の各教育レベルにおける地球観測に関する教育の拡充が求められる。これらの素養を与える地球科学教育に関する体制強化を、指導要領の改訂や教員数の確保を通じて行なう必要がある。

³⁰ 航空機観測は、温室効果気体の濃度やエアロゾル・雲・降水の微物理量の高度分布・立体構造を観測可能な、唯一の観測手段である。これらの観測は、大気科学の重要なプロセスの理解に不可欠であり、広域を長期間観測する人工衛星観測と相補的である。

³¹ 例えば、NASA のエイムズ研究センター、ジェット推進研究所 (JPL) と EROS データセンターが共同開発した MODIS/ASTER 航空機シミュレータ (MASTER: MODIS/ASTER Airborne Simulator) は、衛星センサ ASTER・MODIS 用のアルゴリズム開発や校正・検証に関する科学チームの支援を目的としている。本質的に MODIS クローンである MASTER だが、ASTER にも適用可能に設計されている。衛星との同期観測など、1998 年以来実施の多くの実験データを公開している (<http://master.jpl.nasa.gov/data/>)。この他、JPL が開発したハイパースペクトルセンサである航空機搭載可視赤外イメージ分光器 (AVIRIS; Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer) は、走査光学系と 4 つの分光器により 224 の波長でスペクトル画像が取得可能であり、過去の各世代の AVIRIS のデータは公開されており (http://aviris.jpl.nasa.gov/alt_locator/)、2020 年頃打上げ予定の衛星搭載センサ Hypispi 用のシミュレーションにも用いられている。

4 提言

(1) 地球衛星観測の戦略的計画推進の必要性

我が国の地球衛星観測による科学の発展と社会的利益を持続的に享受できるよう、空白期間のない地球衛星観測ミッションの維持と持続的な技術開発を国家規模で行う必要がある。我が国に強みのある、高性能な降雨、陸面・海面のレーダやマイクロ波放射計観測、大気・海洋・陸域のイメージャ観測、温室効果気体やオゾン化学に関わる大気微量成分の分光放射計観測等は、災害や気候問題対策のインフラとして国際的な期待も大きい。これらは、国際学術計画や他国の宇宙機関との連携からも、適切なタイミングでトップダウン的に推進すべきものが多い。そのため、文部科学省においては、地球観測推進部会と宇宙開発利用部会を連絡調整する「地球衛星観測委員会（仮称）」を設け、衛星計画のグランドデザインと各ミッション案の審議を行うべきである。また、宇宙政策委員会の下に「地球観測小委員会（仮称）」を設けて、「地球衛星観測委員会（仮称）」の審議結果を受け、複数計測の相乗効果も加味した衛星観測に関する政策を議論し、宇宙基本計画に反映させて実現する場を確保するべきである。

(2) 地球衛星観測コミュニティの強化とピアレビューの導入

衛星観測に関する長期的戦略の議論の場として、大学・研究機関、関係省庁、民間企業等が有機的に協力する包括的地球衛星観測コミュニティの強化が必要である。このコミュニティは、公平性・透明性・客観性を担保しつつ衛星ミッションの具体的な立案とグランドデザインの「地球衛星観測委員会（仮称）」への提案を行う。立案には科学的研究成果を速やかに技術移転する方策も組込むこととする。コミュニティからの提案にはボトムアップ計画も含まれうる。「地球衛星観測委員会（仮称）」においては、ピアレビューによる計画評価と、トップダウン計画との相乗効果も含む審議を行うべきである。

(3) 観測データアーカイブ体制の構築と利活用の促進

地球環境や気候の長期監視と変動メカニズムの解明を行い、高精度な将来予測につなげるため、「地球観測データ電子図書館（仮称）」を確立して、観測とデータアーカイブのリアルタイム連携が可能な計算機システム環境を構築すると共に、過去の衛星観測及び関連データのアーカイブも効率化し、利活用の促進を図るべきである。これには、利用者の視点や要望を柔軟に取り込む仕組みと、高い永続性、堅牢性、国際性、可用性が求められ、また、データのオープン化に関する検討が必要である。

(4) 人材育成の体制強化と地球観測リテラシーの向上

地球衛星観測における技術力の維持と高度化を担う人材の育成強化のため、多様な研究者・技術者からなる産官学の英知を結集したチームを作り、若手人材の積極的参加を促すと共に、航空機や気球による検証実験を教育の場として活用する必要がある。また、社会基盤を支える衛星観測の仕組みと意義を正しく理解し情報活用能力を高めるために、初等・中等・高等教育での地球観測リテラシー教育の拡充を図るべきである。

＜参考文献＞

- [1] 笹野泰弘、他、2013：我が国の今後の衛星観測について、 天気、 60、433-444.
- [2] 増永浩彦、2009：次世代地球観測衛星を用いた気象学研究の展望、天気、56、426-433
- [3] 高薮縁他、2014：TRMM/GPM の科学的背景と期待 信学技報 2014-30, 49-52.
- [4] Stephens, G. L.、他、2002：THE CLOUDSAT MISSION AND THE A-TRAIN. Bull. Amer. Meteor. Soc. 83, 1771-1790, doi: 10.1175/BAMS-83-12-1771.
- [5] Newman, P. A.、他、2009：What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? Atmospheric Chemistry and Physics, 9(6), 2113-2128. <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a003500/a003586/index.html>
- [6] 水藤尚、他、2012：東北地方太平洋沖地震に伴う地震時および地震後の地殻変動と断層モデル、地震2、65、96-121.
- [7] 井口俊夫、2016：衛星搭載降雨レーダによる降雨観測手法の開拓～主に TRMM 搭載降雨レーダのアルゴリズム開発について～、天気、63、381-392.
- [8] 中島孝・沖理子、2007：気象と気候研究で利用される衛星搭載可視赤外イメージャとマイクロ波センサ、天気、54、701-704.
- [9] Miller, S. D.、他、2016：A Sight for Sore Eyes-The Return of True Color to Geostationary Satellites. Bull. Amer. Meteor. Soc. 0, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00154.1.
- [10] 今須良一、2015：大気と陸域生態系間の炭素循環をつなぐ衛星観測の進展、天気、62、247-252.
- [11] 福田徹、2011：日本の地球観測衛星計画 30 年 日本リモートセンシング学会誌 31、159-167.
- [12] 文部科学省・科学技術・学術審議会/研究計画・評価分科会/地球観測推進部会、2015：今後 10 年の我が国の地球観測の実施方針
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/021-5/houkoku/1362066.htm

- [13] 「今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合・リモートセンシング分科会 (TF)」TF コミュニティ、2013：新成長戦略に貢献する我が国の地球観測の今後の進め方について、提言書、5pp.
- [14] 「今後の宇宙開発体制のあり方に関するタスクフォース会合・リモートセンシング分科会 (TF)」TF コミュニティ・地球科学研究高度化ワーキンググループ、2016：地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析、94pp.
- [15] 北本朝展、他、2015：地球環境情報統融合プログラム DIAS、データ共有に基づく社会課題解決、情報管理、58、413-421. doi: <http://doi.org/10.1241/johokanri.58.413>.
- [16] 日本学術会議 オープンサイエンスの取組に関する検討委員会、2016：オープンイノベーションに資するオープンサイエンスのあり方に関する提言、提言、28pp.
- [17] WMO/CBS、2009: Vision for the GOS in 2025、Recommendation 6.1/1、CBS-XIV、25 March-2 April 2009、Dubrovnik、pp. 7.
Available at <https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/gos-vision.html>
- [18] 中島映至、2014: 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-、天気、62、275-281.
- [19] 中島映至、2011：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.
- [20] 木本昌秀、2015：世界気候研究計画 (WCRP) 合同科学委員会 (JSC) ー第 36 回会合の報告と所感ー、天気、62、813-817.
- [21] 早坂忠裕、中島孝、2013：地球観測衛星研究連絡会 2013 年度春季大会報告、天気、60、767-768.
- [22] 沖理子、他、2015：日本地球惑星科学連合 2015 年大会「最新の大気科学：衛星による地球環境観測」セッションの報告、天気、62、723-724.

＜参考資料 1＞地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会審議経過

平成 26 年

4 月 7 日 地球・惑星圏分科会（メールによる意見交換）

○提言書案に関する議論と今後の予定

7 月 4 日 地球・惑星圏分科会（メールによる意見交換）

○記録案に関する議論

平成 27 年

12 月 25 日 地球・惑星圏分科会（第 23 期・第 2 回）

○提言案に関する議論

平成 28 年

7 月 29 日 地球・惑星圏分科会（第 23 期・第 4 回）

○提言改訂案に関する議論

12 月 26 日 地球・惑星圏分科会（第 23 期・第 5 回）

○提言案に関する議論・承認

平成 29 年

6 月 23 日 日本学術会議幹事会（第 247 回）

提言「我が国の地球衛星観測のあり方について」について承認

**<参考資料2>地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会地球観測の将来構想に関する検討
小委員会審議経過**

平成 25 年

- 10 月 2 日 日本学術会議幹事会（第 179 回）
地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会
地球観測の将来構想に関する検討小委員会設置及び同小委員会委員決定
- 12 月 27 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（第 22 期・第 1 回）
○審議事項、今後の進め方について

平成 26 年

- 2 月 20 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（第 22 期・第 2 回）
○提言書目次案と執筆分担についての議論
- 3 月 14 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（第 22 期・第 3 回）
○提言書案に関する議論と今後の予定
- 4 月 14 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（メールによる意見交換）
○提言書案改訂に関する議論
- 4 月 21 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（メールによる意見交換）
○提言書案改訂に関する議論
- 5 月 11 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（メールによる意見交換）
○記録案の今後の進め方についての議論
- 7 月 3 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（メールによる意見交換）
○記録案の今後の進め方についての議論

平成 27 年

- 3 月 27 日 日本学術会議幹事会（第 210 回）
地球惑星科学委員会地球・惑星圏分科会
地球観測の将来構想に関する検討小委員会設置及び同小委員会委員決定
- 6 月 9 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（第 23 期・第 1 回）
○審議事項、今後の進め方について

平成 28 年

- 3 月 14 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（第 23 期・第 2 回）
○提言案改訂に関する議論
- 12 月 15 日 地球観測の将来構想に関する検討小委員会（第 23 期・第 3 回）
○提言案改訂に関する議論・承認

＜参考資料３＞「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」の経緯

現在のコミュニティ形成に至るまでの経緯について以下に記す。

2010年4月2日～3日に『第1回 今後の宇宙政策の在り方に関する有識者会議（新成長戦略に向けたタスクフォース会合）』（座長 松井孝典）が開催された。この会合では新成長戦略として提案すべき施策案に関しての議論を行なった。

2011年5月13日に開催された『第2回 今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合」』では、宇宙開発戦略本部会議の下にある専門調査会の議論に反映させるため、宇宙開発関係者の叡智を結集する議論が行われた。

2012年9月23日に開催された『第3回 今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合」』では、サステイナブルな宇宙開発を進める上での課題に着目し、個人の立場でアイデアを集結する活動を実施した。

2012年11月3日に、これまでの議論をリモートセンシングに特化させた『第1回 今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」』が開催された。本会議では、リモートセンシング分野に特化したシナリオ、および予算規模と期待される成果について政策委員会が判断できる具体的な材料について議論を行った。

2013年3月13日には、2010年頃からの長年の議論を集約発表するシンポジウム、『社会課題解決に向けたリモートセンシングデータ利用拡大に関するシンポジウム』（主催 日本リモートセンシング学会）が開催された。引き続き同日開催された『第2回 今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」』では各種フォローアップが行われた。

2013年5月24日には『第3回 今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」』が開催され、学協会横断型のコミュニティ構築の提案と調整が行われた。

2013年7月13日の『第4回 今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」』では、より深化した議論を学協会学会横断型で実施するための本分科会を母体としたコミュニティ設置の確認などが行われた。本コミュニティからは「新成長戦略に貢献する我が国の地球観測の今後の進め方について」（2013年10月7日付）が政府機関等に対して提出されている。

2014年3月15日に『第5回 今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」』が開催された。

2014年11月に『第6回 今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」』が開催された。新宇宙基本計画（案）と今後に向けた地球観測のロードマップの議論が実施された。「先進光学衛星への期待」（2014年12月25日付）が幹事会として政府機関等に対して提出されている。

2015年7月28日（火）に幹事会が開催された。「我が国の地球観測の将来計画に関する提言」の科学研究高度化分科会、実利用分科会の提言および概要が議論された。

2015年9月、「我が国の地球観測の将来計画に関する提言」が政府機関等に対して提出された。

2016年1月7日、6月10日にも幹事会が開催され、提言書の根拠となる各分科会の提言書の見直しおよび世界の地球観測の動向分析が科学研究高度化分科会により作成、説明された。

2016年7月9日に『第7回今後の宇宙開発体制のあり方に関する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」』が開催された。

<参考資料 4> 我が国の地球衛星観測に関する組織図

