

(別記様式)

記 録

文書番号	SCJ第22期-260905-22641200-043
委員会等名	日本学術会議 地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会
標題	我が国の地球衛星観測のあり方について
作成日	平成26年(2014年)9月5日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。
掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、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、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	大久保修平	(第三部会員)	東京大学地震研究所・教授
副委員長	奥村 晃史	(連携会員)	広島大学大学院文学研究科・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	佐々木 晶	(連携会員)	大阪大学大学院理学研究科・教授
	中島 映至	(第三部会員)	東京大学大気海洋研究所・教授
	永原 裕子	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科・教授
	荒井 章司	(連携会員)	金沢大学理工研究域・特任教授
	大谷 栄治	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科・教授
	河野 長	(連携会員)	東京工業大学名誉教授
	木村 学	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科・教授
	高橋 栄一	(連携会員)	東京工業大学大学院理工学研究科・教授
	津田 敏隆	(連携会員)	京都大学生存圏研究所・教授・所長
	富樫 茂子	(連携会員)	独立行政法人産業技術総合研究所 ・名誉リサーチャー
	中村 正人	(連携会員)	独立行政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・所長
	西山 忠男	(連携会員)	熊本大学大学院自然科学研究科・教授
	花輪 公雄	(連携会員)	東北大学・教授・理事
	日置 幸介	(連携会員)	北海道大学大学院理学研究院・教授
	福田 洋一	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科・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
	松本 淳	(連携会員)	首都大学東京 大学院都市環境科学研究科・教授
	山形 俊男	(連携会員)	独立行政法人海洋研究開発機構 アプリケーションラボ・所長、東京大学・名誉教授
	坂本 尚義	(連携会員)	北海道大学大学院理学研究院・教授

報告書及び参考資料の作成にあたり、以下の方々に御協力いただきました。

沖 大幹 (連携会員) 東京大学生産技術研究所・教授

中村 尚	(連携会員)	東京大学先端科学技術研究センター・教授
安岡 善文	(連携会員)	東京大学・名誉教授
井口 俊夫		独立行政法人情報通信研究機構電磁波計測研究所・所長
今村 剛		独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所・准教授
岩崎 晃		東京大学先端科学技術研究センター・教授
江淵 直人		北海道大学低温科学研究所・教授
沖 理子		独立行政法人宇宙航空研究開発機構第一衛星利用ミッション本部地球観測研究センター・主幹研究員
隈 健一		気象庁福岡管区気象台長
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
高薮 縁		東京大学大気海洋研究所・教授
早坂 忠裕		東北大学大学院理学研究科・教授
林田佐智子		奈良女子大学大学院自然科学系・教授
本多 善明		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		国立環境研究所地球環境研究センター衛星観測研究室・室長

要 旨

1 作成の背景

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、人類に様々な多くの科学的知見を与えると共に、我々の社会生活に情報供給源として必須の存在となっている。気象衛星観測によってとらえられる雲の分布と変動は、スーパーコンピュータを用いた気象予測に不可欠であると同時に、台風や温帯低気圧の物理学的知見を深めるのに積極的に利用されている。GPS を用いた衛星測位は、スマートフォンやカーナビゲーションに組み込まれ様々な用途に利用される一方、東日本大震災の際に地殻変動を検出し、巨大地震の発生メカニズムの解明に大きく貢献した。そして、このような気象や地震のメカニズム解明は、今後起こりうる災害を予想し対策を立てる上で有効である。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監視観測によってオゾンホールが発見され、一丸となった基礎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オゾン層が地球から失われる事態を回避できた。このことは、人間活動による技術進歩が、社会生活の向上に資する一方、地球規模の環境に重大な影響をもたらす力を持つことを示し、地球衛星観測による環境監視の重要性を再認識させるものであった。このように、地球科学は、純粋科学的側面と実用科学的側面を併せ持つ基礎科学であり、その発展において、衛星観測の位置づけは、近年ますます重くなってきている。このような中、地球衛星観測計画の策定や利用に関する問題も徐々に浮き彫りになってきた。地球衛星観測が我々人類にとって身近な存在になった今、現状を振り返って問題点を明らかにし、あるべき姿を展望する必要がある。

このような背景の下、地球・惑星圏分科会は、平成25年10月に「地球観測の将来構想に関する検討小委員会」を設置し、同小委員会において集中的な審議が行われ、以下の2及び3に示す見解が小委員会として取りまとめられた。しかしながら、小委員会設置後に十分な審議日程が確保できなかったこと等により、地球観測衛星に関連する広範なステークホルダーの意見等を十分にくみ取りきれていない可能性も指摘されたことから、小委員会の見解をもとに、分科会として審議の中間まとめとして、本報告を作成した。次期の日本学術会議や地球観測に関わる省庁等で、引き続き地球観測の将来構想について検討されることは望ましいことであり、その場合の議論の出発点として本記録が活用されることを望む。

2 現状及び問題点

上記のように、地球衛星観測は、基礎科学の発展と応用技術による社会生活の向上の両者に貢献しており、両者は密接に繋がっていることが特徴である。このため、宇宙観測とは異なり、利用者コミュニティがステークホルダーを含め巨大であり、多くの場合開発者と利用者は同一ではない。たとえば気象衛星では、技術開発は民間企業が、リアルタイムのデータ利用による天気予報は気象庁が、台風の力学や数十年規模の気候変動などの科学

研究は研究機関が行っており、その利益を享受するのは国民さらには人類全体である。このように地球衛星観測は様々な情報と利益をもたらすため、一つの衛星に対して、単一の目的を与えにくく、関係する機関の連携は複雑となり、コミュニティ間における科学的価値、社会的効果、国際貢献についての認識に違いが生じやすい。また、観測機関とデータ利用機関とが異なることも多いこと、及び、得られるデータが大量であることから、維持費も含めたデータアーカイブについての課題も少なくない。これには、地球環境の長期監視に必要とされる複数の異なる衛星観測データをつないだデータアーカイブの作成と維持の問題も含まれている。このように地球衛星観測は、小さなコミュニティで維持できる規模を超えており、必要な予算規模も大きいことから、その立案と実行には国家規模の大きな駆動力が必要である。さらに、地球観測衛星の観測対象は地球全体であるため、国際協力も意識して推進する必要がある。これには、静止気象衛星による観測領域の分担だけでなく、各国の分担による衛星観測ネットワーク（コンステレーション）への参加に加え、科学的視点を含めた地球規模での社会的課題に取り組むための計画的な人材育成やデータベース作成についても我が国の役割が強く求められている。

3 今後の展望

(1) 地球衛星観測の科学的価値・社会的価値の確認

我が国の地球衛星観測は世界を先導する技術により気象学、海洋学、大気化学、地理・水文学、測地学等において数多くの地球科学や生物学の進歩をもたらしている。さらに、地球衛星観測は、気象予報業務、環境実況監視、環境長期監視、産業・行政への基礎情報の提供、災害復興支援等を通して社会に欠かせない基盤技術に成長している。この科学と実用は密接に連携している。社会がその科学的価値と社会的価値を継続的に享受するためには、空白期間のない地球観測ミッションの維持、持続的な技術開発、及び、連続的な地球計測を国家規模で行う必要がある。

(2) 日本の先導分野と継続的な国際貢献の重要性

我が国は、衛星搭載の各種レーダによる降雨、陸面、海面の観測やマイクロ波イメージャによる大気海洋の観測、高分解能分光放射計による温室効果の観測等で強みを有する。これらの強みを活かしつつ、フューチャーアース¹やWCRP等の国際プログラム及びNASAやESA等の他国の宇宙機関と密接に連携して、戦略的なミッションの計画・遂行を継続的に行なうことにより、地球科学の進展や社会的課題の解決に国際貢献することが望まれる。

¹ 国際科学会議（ICSU）など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）、およ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。

(3) 観測データアーカイブ体制の構築

地球環境の長期監視と変化・変動のメカニズムの解明を行い、精度の高い未来予測につなげるため、過去のデータも含め、衛星観測データのアーカイブ（データ特性の記述と整理）を効率的に進めて、利用促進を図る必要がある。そのために、永続性、堅牢性、国際性、可用性、柔軟性、及び利用者サポート機能を有する「地球観測データ電子図書館」（仮称）の設立が考えられる。

(4) 地球観測コミュニティの連携強化

研究者コミュニティと関係各省庁との緊密な協力関係の下、我が国の強みを活かしながら公平性・透明性を確保しつつ、科学的意義と社会的意義に基づいた地球観測の長期的戦略を策定する必要がある。そのためには、大学・研究機関、関係各省庁、民間企業等が有機的に協力できる地球観測コミュニティを構築し、具体的なミッションの立案、実現、運用および利用を推進することが重要である。そこには科学研究の最先端の成果を速やかに実用に活かすための技術移転の方策を組み込む必要がある。また、公平性・透明性・客観性を担保し、地球衛星観測ミッションの採択や評価を行うための新たなシステムの導入が必要である。その採択や評価は、各分野の専門家が参加する科学コミュニティと連携して進められる必要がある。

(5) 人材育成の体制強化と理系リテラシー向上

地球衛星観測の一層の高度化を担う人材育成のため、関係する多数の理工系分野の多様な研究者からなる産官学の英知を総結集したチーム作りを行い、若手研究者・技術者や大学院生の積極的な参加を促すべきである。その際、研究用航空機や大気球等を活用した地上検証実験を積極的に推進し、若手が直接センサ機器に接する機会を増やすことなどが考えられる。身近で社会に不可欠となった地球衛星観測の意義を正しく理解し、これを将来担う人材育成を図るには、国民全体の地球科学に関する理系リテラシーの向上も重要である。そのためにはウェブサイト等からの情報発信の一層の充実に加えて、初等・中等・高等教育の各レベルにおける地球科学および周辺分野の理工系教育の拡充が求められる。

目 次

1	はじめに	1
2	地球衛星観測の歴史と科学のおよび実用的成果	1
(1)	地球衛星観測の歴史	1
(2)	科学的成果	3
(3)	実用的成果	5
3	我が国の地球観測衛星の現状と課題	9
(1)	日本の活動	9
(2)	日本のアドバンテージ	10
(3)	日本の衛星観測の決定プロセスの現状	11
(4)	データアーカイブの現状と課題	14
(5)	人材育成の現状と課題	15
4	我が国の地球観測衛星の今後の在り方	16
(1)	国際的学術研究との連携	17
(2)	社会への貢献と発信	18
(3)	成熟した地球衛星観測コミュニティの形成	19
(4)	データアーカイブのありかた	20
(5)	人材育成と理系リテラシー向上	21
5	今後の展望についてのまとめ	22
	<参考文献>	24
	<参考資料>	
	地球惑星科学委員会・地球・惑星圏分科会審議経過	24
	タスクフォース会合の経緯	25

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、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、我々の生活に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、GPSを用いた衛星測位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、長期にわたる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GPSによってとらえられた地殻変動が重要な情報となった。このような気象や地震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、一丸となった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オゾン層が地球から失われる事態が回避できた。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、予期せぬ過程により地球規模の環境に重大な影響をもたらす力を持つことをあぶりだし、地球衛星観測による長期にわたる環境監視の重要性を再認識させるものであった。

地球衛星観測計画の策定や利用に関して様々な問題を指摘する声も、一方からあがっている。たとえば、平成20年には宇宙基本法が制定され、内閣府に宇宙政策委員会と宇宙戦略室が設置されて、我が国の宇宙開発・利用の推進体制が確立したが、その体制のなかでの地球科学の扱いが十分であるのかどうかについては議論の分かれるところである。

本記録の目的は、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り、かつ、宇宙開発の転換点にある現在、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審議された議論を集約し、高い視点からの提言をとりまとめる際の重要な基礎を与えることである。

2 地球衛星観測の歴史と科学のおよび実用的成果

この章では、まず地球観測衛星の歴史を簡単に振り返り、これまでの主要な科学的成果と実用的成果を述べる。先に議論したように、地球衛星観測において科学と実用は不可分であり、両者を明確に区別することは難しいことが多いが、整理のために節を分けて記述することにする。

(1) 地球観測衛星の歴史

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4月にはアメリカが

打ち上げた衛星 TIROS-1 に搭載されたビジコンカメラ²から雲が写っている映像が地上に伝送された。その後、全球をカバーする地球観測データの有効利用のために、国際的学術研究が必然的に発展してきた。1964年8月に打ち上げられた大気科学観測を目的とした初の衛星 Nimbus-1 には赤外分光放射計が搭載され、これによって台風の目や周りの雲の雲頂温度が観測されている。1969年に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、また、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が、その基礎は40年以上前に確立されたともいえる。

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、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。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されて以来、後継機によって地球のオゾン層は継続的に監視されている。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号が運用されている。また、最初の合成開口レーダは1978年6月に打ち上げられた 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体制が整備され始め、1992年には地球観測システム (GCOS) が確立し、現在の WIGOS に発展している。並行して NASA の Mission to Planet Earth が始まり、欧州では ENVISAT が打ち上げられて、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研究が始まった。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開始された。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ながら地球を観測し、同時に多くの情報を得るなど、観測の方法も高度化してきている。また、大気観測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 が我が国初の地球観測衛星として打ち上げられた。その後、1992年に L バンド合成開口レーダ³を搭載した資源探査衛星 JERS-1 が、1996年には本格的な地球観測衛星 ADEOS が、また、2002年に ADEOS-II 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、現在

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 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。

も運用されている。その後継機であるGPM衛星は今年2月に打ち上げられ、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、海面水温の観測を行っている。大気化学分野では、ADEOSに搭載されたILASおよびADEOS-II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PSCs（極成層圏雲⁴）とオゾン破壊との関連解明に貢献した。同じくADEOSに搭載されたIMGは直下観測型FTS⁵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技術衛星GOSAT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（笹野他、2013）。

(2) 科学的成果

① 気象分野

気象分野において、静止衛星や低軌道衛星の観測により得られる可視・赤外・水蒸気画像は、地球の雲と雨に関する多くの発見をもたらしている⁶。また、台風の発生、発達、経路に関する情報は、メカニズムの解明と予測に大きく貢献した。

マイクロ波放射計は雲水量や降雨強度のほか、雲が存在する条件下でも気温、水蒸気、海面水温を観測することができる。特にマイクロ波サウンダによる気温の鉛直分布は、気象の数値予報の精度向上に大きく貢献している。

日本が開発した衛星搭載降雨レーダは、宇宙からの降雨の立体観測を初めて可能にし、降雨の仕組みに関する多くの科学的発見をもたらした⁷。気候モデルや雲解像モデルの降雨量の検証はもとより、マイクロ波イメージャでは困難な陸域での衛星観測による降雨量推定を可能にしたこと、降雨による大気加熱量の3次元分布を定量化したことも重要である。

② 海洋分野

海洋分野では、可視・赤外放射計、マイクロ波放射計、マイクロ波散乱計、マイクロ波高度計、合成開口レーダなどを搭載した衛星が活躍している。海面水温、日射量、水蒸気量、降水量、海上風速・風向、海面塩分、海面高度、表層流速、波高・波向、植物プランクトン現存量、海水分布などのパラメータが全球海洋上で観測され、海洋循環や大気海洋相互作用、エルニーニョ／南方振動⁸、熱帯低気圧（台風）のメカニズ

⁴ 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。

⁵ Fourier Transform Spectrometer

⁶ たとえば気候決定に重要な雲量は、かつては50パーセント程度と言われていたが、高感度の赤外観測により、今では約70パーセントと理解されている。

⁷ 熱帯降雨観測計画（TRMM）衛星データ利用の査読付論文数は世界の学術雑誌で累計6600編（題名又は要旨検索で1285編）に及ぶ。

⁸ 赤道域太平洋の暖かい表層水は、通常熱帯の偏東風とつりあい、西部太平洋に偏っている。数年に一度、暖水偏差が東太平洋まで広がり数か月以上持続することがある。これをエルニーニョ、逆向きの偏差をラニーニャと呼ぶ。現在、この現象は赤道太平洋の対流活動および大気東西循環の中心の東への移動を伴う大気海洋相互作用として理解されているが、対応する大気気圧偏差を南方振動と呼んだ歴史を踏まえ、合わせ

ム、極域環境変動、海洋生物環境、生物生産と炭素循環などの研究に活用されてきた。また、高分解能の衛星観測データにより中緯度の海流が雲・降水系や海上風に与える影響が特定された。最近では、海洋大循環数値モデル研究に、衛星観測による循環の駆動力の推定値が利用されるほか、海洋大循環モデルへのデータ同化やシミュレーション結果の検証用に衛星データが用いられている。このように衛星観測データは、海洋変動・気候変動のメカニズムの解明と予測、地球温暖化の影響評価と予測などに積極的に活用されている。

③ 大気化学分野

大気化学の分野では、オゾン全量分光計による南極オゾンホール⁹の発見以降、成層圏微量成分の衛星観測により、多角的にオゾン破壊過程の詳細が解明された。一方、対流圏微量成分⁹の衛星観測技術は、1990年代以降、地球環境問題への関心の高まりと共に飛躍的に進歩し、大気汚染物質である二酸化窒素 (NO₂)、二酸化硫黄 (SO₂)、ホルムアルデヒド (HCHO) など数多くの微量成分、およびエアロゾルの観測が実現した。これによって、アジア地域や半球規模での越境汚染¹⁰、アフリカなどにおけるバイオマス燃焼が地球規模での環境に及ぼす影響などが明らかになった。さらに、欧州機関の短波長赤外での観測により、地上付近の微量成分、例えばメタンの全球分布が解明された。

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日本実験棟曝露部を利用して、成層圏から下部熱圏までのこれまでにない広範囲にわたる大気中の微量分子を高感度で測定し、オゾンを破壊するハロゲン系や水素系化学種の化学過程の反応を解明するなど、その成果は国際的に高い評価を得ている。

高分解能分光器の開発やリトリバル手法¹¹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の推定も可能となった。日本のGOSAT (いぶき) によって、世界で初めて本格的に二酸化炭素のグローバル観測が始まり、排出源や吸収源の特定を含む二酸化炭素のグローバルな収支の推定が行われている。

④ 地理・水文分野

地理・水文分野では、40年に及ぶ可視・近赤外波長による地表面観測により、都市の拡大とヒートアイランドや大気汚染などの都市環境変化、耕地の拡大、森林伐採や砂漠化などによる植生変化の検知、積雪面積や氷河・氷床の消長等、劇的な変化を遂げつつある地球環境変化の様子が的確に記録されてきた。これらは地球環境の成り立ちや変化の要因の理解を進め、変化に対する対策の立案・実施に大きく貢献した。また、ALOSに搭載された可視波長センサ (PRISM) による立体視や、合成開口レーダ (PALSAR)

てエルニーニョ南方振動と呼ぶ。

⁹ 窒素、酸素以外の大気中に含まれる微量な成分。オゾン、水蒸気、二酸化炭素、メタン、フロンなど。微量ではあるが、温室効果や太陽放射を吸収する性質があるため、地球大気の温度構造に大きく影響する。

¹⁰ 汚染物質がその発生源から遠く離れた地域まで国境を越えて運ばれることによって生じる大気または水質の汚染。

¹¹ 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。

によるインターフェロメトリ（干渉）などによって、グローバルな標高情報が、空間解像度 5m 程度にまで精緻化されて整備されようとしている。詳細な地形解析のみならず、可視・近赤外観測と組み合わせた地下の地質解析や、全球河道網、水面データセットの構築、巨大災害時の被害状況把握など、実用にも結びついた科学的成果が得られている。さらに、雲を透過しての地表観測が可能なマイクロ波放射計による観測が加わって、地表面土壌水分量や、積雪水量、植生量や水面面積割合などが準リアルタイムかつ高精度で推定可能となり、大気陸面相互作用や陸面変化への人間活動の影響等に関する科学研究が飛躍的に進捗しつつある。

⑤ 測地分野

測地分野において、全地球航法衛星システム（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。また、GNSSと音波で船と海底の点との距離を測る音響測距によって、31mの海底地殻変動が観測された。また、GNSSは、地殻変動だけでなく、水蒸気や電離層全電子数（TEC）など大気・電離層観測にも欠かせない存在となっている。

干渉合成開口レーダ（InSAR）はGNSSと異なり地上機器の設置を必要とせず、面的な観測が可能であり、地震や火山に伴う地殻変動、地滑り、さらに、氷床変動、大陸氷河流動など広い分野で利用されている。特に、波長の長いALOSのL-bandセンサは植生の影響を受けにくく、干渉SAR解析の技術導入によって、地殻変動の研究に大きく貢献してきた。

衛星高度計による海面高測定は、海域の詳細な重力異常や海底地形を明らかにした。また、mmオーダーでの海面上昇も継続的に監視している。同じ地点に3日毎に戻るICEモードの観測は極域氷床変動の研究にも大きく寄与した。

NASA衛星GRACEは、重力の時間変化を測定することで、陸水貯留量や極域氷床変動などを質量変化として捉えることができる。これによりグリーンランドでの氷床融解の加速や南極氷床変動、全球水循環の質量バランスなどが明らかになった。また、後氷期回復¹²や地震による重力変化から地球内部の粘弾性的情報も得られている。

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「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) 実用的成果

① 気象予報業務

数値予報の精度向上には、精緻な数値予報モデルと現実の大気状態をできる限り正確に反映した初期値が必要である。海上も含め地球全体をカバーする衛星観測は、現実大気状態の情報源として特に重要とされている。

気象衛星観測には、静止衛星と低軌道衛星の2種類があり、数値予報に利用されて

¹² 最終氷期が終了した約1万年前以降の後氷期に生じた大陸氷床の融解に伴う陸上加重の減少に伴う地表面の隆起。北アメリカ北部やスカンジナビア半島などで特に著しい。

いる。静止衛星からは、可視・赤外のイメージャによる観測が行われており、大気追跡風や水蒸気チャンネルの晴天放射輝度温度が作成されている。低軌道衛星には、可視・赤外のイメージャに加えて、赤外やマイクロ波のサウンダが搭載されており、数値予報に特に有効な大気温度や水蒸気の鉛直プロファイルに関する情報が得られる。世界気象機関（WMO）では、国際協力により静止衛星6機、及び太陽同期極軌道衛星3機を運用し、全世界の観測を統合的に行うことを要請している（WMO 2009）。

低軌道衛星については米国のNOAA衛星が午前軌道、午後軌道の双方を担当してきたが、2006年以降は午前軌道を欧州のMetop衛星が担当することとなった。Metop衛星にはイメージャやサウンダの他、マイクロ波散乱計や全球測位衛星システム（GNSS）掩蔽観測装置、ハイパースペクトル赤外サウンダが搭載されており、数値予報の精度向上に寄与している。

一方、TRMM、GPM、COSMIC、Terra、Aqua、Auraなどの地球観測衛星によって現在の気象衛星では得られない様々な物理量や高解像度のデータが取得されている。これらの衛星データは、データ同化¹³技術の発達に伴って数値予報の初期値作成にも利用が進みつつある。また、数値予報モデルを高度化するための検証データとして、数値予報に必要な植生分布や海面水温などの境界条件を与えるデータセットとしても、有効に利用されている。

また、台風的位置・強度の実況把握においては、静止衛星のデータが主に利用されているが、マイクロ波のイメージャや散乱計等の地球観測衛星のデータが補完的に使われている。波浪、海氷等の実況把握においても、地球観測衛星が活用されている。

気候監視のため各国の気象機関等で作成されている長期再解析¹⁴においては、過去の地上観測や気象衛星観測によるデータに加えて、AMSR-EやTMIなどの各種地球観測衛星のデータが使われている。過去のデータの多くは最新技術により再処理され、高品質の気候データ作成に寄与している。

② 環境実況監視

環境の実況監視には、対象とするイベントの発生を検知しその後の経緯を把握するために、常時または高頻度で観測する必要がある。これには国際的な枠組みによる複数の静止衛星や低軌道衛星による観測システム（コンステレーション）による観測データが用いられている。

大気微量成分やエアロゾルの中には対流圏オゾンや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ものがある。これらやその前駆気体の広域観測として衛星観測は重要な役割を果たしており、微量成分やエアロゾルの分布の実況

¹³ 数値モデルの予報データに観測データをなじませて修正すること。予報ルーチンの中の初期データ作成のために行われるが、蓄積された出力は解析データとしても利用される。近年の手法としては4次元同化およびアンサンブルカルマンフィルタが利用されている。

¹⁴ 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む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。

監視やそれに基づく数値モデルを用いた予測等を通じて、社会や住民の様々な対策に活用されている。たとえば、火山灰は航空機のエンジンに重大な影響をもたらすが、その情報は国際的枠組みのもとで提供されている。黄砂等のダスト、大規模森林火災に伴う煙についての情報は、視程低下に伴う交通機関への影響や健康被害等の対策に活用されている。成層圏オゾンに関しては、地上に到達する紫外線が人体に及ぼす影響の度合いを示すために、オゾン観測データに基づいた紫外線情報等の提供に活用されている。

③ 環境長期監視

長期間にわたる均質な衛星観測データは、地球表層の緩やかな変動の検出に極めて有用である。米国が1972年に打ち上げたLANDSAT衛星は、7~9の可視・赤外波長帯を用いて、数十メートルの解像度での地球の地表面状態に関する鮮明な情報を提供してきた。以来40年以上のデータが得られており、都市化に伴う土地被覆の変化や砂漠化、森林破壊等に伴う植生変化等の長期変化のモニタリングも可能となっている。NOAA衛星のAVHRRセンサによる観測も継続されており、解像度が1km程度とやや落ちるものの、1日2回の地球観測でデータ量も多くないことから、地球での地表環境モニタリングに広く活用されている。熱赤外センサによる観測データは、地表面のみならず、地下の熱環境や、海面水温の分布から海流変化やエルニーニョ・ラニーニャの強度監視に利用されている。

大気質の観測としては、Nimbus衛星に搭載されたSBUVおよびTOMSセンサは成層圏でのオゾン量の把握を可能にした。この観測によりオゾンホール状況の把握と成因解明がなされ、1987年の「モントリオール議定書」とその後の段階的なフロン排出規制の強化に対して決定的な役割を果たした。現在は、地球衛星観測衛星がこれを後継しており、2011年に起こった北極の大規模オゾン層破壊の把握や、南極オゾンホールの経年変化を含めオゾン層の監視を続けている。MODISによるエアロゾル観測データは、黄砂などの高濃度エアロゾルの飛来に関する輸送モデルの結果の実証データとして役立てられ、モデルを用いた予報に活用されている。

④ 産業・行政への貢献

地球観測衛星によるデータは、予測や監視を通じた間接的な寄与だけでなく、産業や行政に直接的な便益をもたらしている。漁業情報サービスセンター（JAFIC）では、漁場把握による操業効率向上・コスト削減、計画的漁獲調整等を目的とし、GCOM-W1に搭載されているAMSR2等の観測に基づく全天候海面水温分布や多波長光学放射計観測に基づく高解像度海面水温・海色などを用いた漁海況情報を毎日作成・提供している。JAFICや各水産技術センター等の配信情報には、沿岸・遠洋漁業者、漁業組合などを中心にエンドユーザが多数存在し、効率的な漁業の実現、省エネルギーに役立っている。

また、衛星データを基に作成される降水量・土壌水分量・日射量・地表面温度・植生指数等は、世界の主要穀倉地帯の作付面積の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。さらに、森林火災

の探知にも衛星データが用いられているほか、着火条件・延焼予測・植生回復状況のため乾燥度・植生状況等の情報が利用されつつある。そのほか、鉱産資源の探査にも活用されており、日射量等の情報は、太陽光発電等再生可能エネルギーの立地、運用に有効利用されている。

GPS 衛星による測位は、運輸産業や通信産業に不可欠な情報を提供し、産業活動に利用されるだけでなく、カーナビや航空路表示、スマートフォンの位置情報提供等の情報源としても広く利用者に活用されている。

米国が打ち上げた Terra 衛星に搭載された日本の ASTER センサは近赤外バンドでの直下視と後方視のステレオ観測を、日本が打ち上げた ALOS に搭載された PRISM センサは、パングロバンドでの直下視、前方視、後方視の三重ステレオ観測を行っている。これらによって、全球規模でのデジタル標高モデル (DEM) の作成が可能となり、日本の国土地理院でも離島の地形図を PRISM 画像により修正する等の活用がなされている。

⑤ 災害対応への貢献

発災前後の合成開口レーダ情報の干渉処理によって地震や火山活動に伴う地殻変動が速やかに広域に推計され、災害対策に役立てられている。また、2011 年の東日本大震災時の地盤沈下に伴う浸水域やタイ王国のチャオプラヤ川での洪水に伴う氾濫域とその時間変化も衛星からの地球観測によって逐次監視され、実時間でのおすみやかな対策立案実施に役立てられた。

全球降水観測 (GPM) 計画に向けて日本が開発した衛星全球降水マップ (GSMaP) は、毎時、世界中の降水量分布を 4 時間遅れで提供している。日本ではユネスコのカテゴリ 2 センターである土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) や、国際洪水ネットワークの事務局である国際建設技術協会などで GSMaP を入力とした洪水や土砂災害の予警報システムやツールが試行的に開発され、GPM 実現後の現業化が期待されている。特に地上観測が不足している地域において有効であるため、ユネスコやアジア開発銀行などの資金によって、バングラデシュ、フィリピン、ベトナム、パキスタン等で洪水の予測や河川管理のための取り組みが進んでいる。

衛星の測地機能は、地震前後や火山噴火前後における地上施設の地殻変動の監視に利用されている。また GPS 波浪計としても機能するため、沖合いでの津波情報の取得に活用されている。

⑥ 安全保障

近年、地球環境の変化が各方面で顕在化している。温暖化に伴う北極海氷の減少、大規模サイクロンの発生、我が国における豪雨の増加、PM2.5 などによる大気環境の悪化などはこれらの典型例といえる。地球観測衛星はこのような地域レベルからグローバルレベルにわたる地球環境の変動を定常的に監視するほぼ唯一の手段である。

現在、これらの現象を観測するために、多くの国が地球観測衛星を打ち上げている。しかし、一つ一つの現象を取り上げてみれば、その観測に適した衛星の数はそう多くはない。したがって、いくつかの地球観測衛星を組み合わせさせた観測の実施がなされて

いる。今後、気候変動枠組条約（UNFCCC）¹⁵、生物多様性条約等に関わる幾つかの議定書が結ばれることが予想されるが、これら議定書における検証手段としても、地球観測衛星は重要性が増していくものと考えられる。

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。逆に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。

3 我が国の地球観測衛星の現状と課題

(1) 日本の活動

2014年3月現在運用中の我が国の地球観測衛星は、熱帯降雨観測衛星（TRMM）、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」（GOSAT）、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」（GCOM-W1）、全球降水観測計画・主衛星（GPM）である。このうちTRMMとGPMは日米の共同ミッションである。これらのミッションと蓄積された過去の衛星観測データを利用して、以下のような活動が行われている。

まず海洋関係としては、GCOM-W1に搭載されたマイクロ波放射計 AMSR2 の観測データを中心に用いる GCOM-W1 サイエンスチームが構成され、海洋上の鉛直積分水蒸気量や雲水量、海面水温、海上風速、海氷密接度、陸域の積雪量や土壌水分量などの標準プロダクトの精度検証や推計アルゴリズムの改良が行われている。また東海大学を中心としたグループでは「衛星海面フラックスデータセット（J-OFURO）の作成」が行われ、1998年以降現在までのデータセットを作成し公開している。

大気・気候分野関係の活動としては、GOSAT プロジェクトが挙げられる。ここでは国外の研究者も多く含めた100件以上の研究課題が公募によって採択され、主要な温室効果ガスである二酸化炭素やメタン濃度とその変動の高精度観測、それらを用いた地域別の炭素収支解析、更には植生クロロフィル蛍光の検出など新たな科学利用研究が進められている。

陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS）については、大学を中心に20機関以上によるボトムアップ的な「PIXEL: PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface」（<http://pixel.eri.u-tokyo.ac.jp/>）が組織され、ユーザ拡大も目指した活動が行われている。その一環としてデータやソフトウェアの共有、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ることとなった。

宇宙との境界領域である超高層大気についてもいくつかの衛星観測がなされてきた。特に、1989年と1992年にそれぞれ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（22年）¹⁶の観測を達成し、サブストーム¹⁷

¹⁵ United Nations Framework Convention on Climate Change

¹⁶ 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。南北の磁極の極性の変化を考慮すると約22年の周期であり、これが完全な1サイクルとなる。

などの磁気圏現象の巨視的構造¹⁸の時間変動など、プラズマ物理学における微視的過程¹⁹と巨視的構造の関係の理解を深める科学的成果が上げられてきた。国際宇宙ステーションからの地球観測も、サブミリ波放射計 SMILES、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ている。

このように、日本での地球観測衛星ミッションは、様々な科学研究と社会貢献に役立てられてきた。そしてその活動を通して、以下のような問題点を指摘する声も、一方からあがっている。まず、次の節でも述べるように、日本の地球観測は、これまでの開発努力により、マイクロ波放射計、L-バンド合成開口レーダ、降雨レーダ、温室効果ガス観測センサなど、世界最高レベルの観測技術を有している。これらのミッションは、従来は単体で実施がされてきた。しかし、地球衛星観測の有用性が明らかとなるにつれ、継続性のニーズが高まり、衛星のシリーズ化など継続性の確保に対する努力がなされるようになった。一方、わが国では宇宙基本法が制定され、地球衛星観測も新たな宇宙開発体制の下で実施されることになった（福田 2011）。この新体制の中での地球衛星観測のあり方に関する議論が現在行われている。ただ、これまでの仕組みの単なる継承では不十分なところもある。たとえば、多くの予算が、個別の衛星計画ごとに構成されているため、利用する衛星やセンサが異なると隣接科学分野においても交流が限定的となる場合が多い²⁰。これに対処するために、JAXA/EORC においては「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がされている。今後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を確立する必要がある。特に持続的な衛星観測を実現するためには、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。

(2) 日本のアドバンテージ

日本は世界に先駆け衛星搭載の降雨レーダを開発し、熱帯降雨観測計画 (TRMM) においてその技術を実証した。このレーダはフェーズドアレイアンテナを使った高速電子走査が可能である。TRMM 衛星搭載の降雨レーダ (PR) の成功を受け、全球降水観測 (GPM) 計画においては、同種のレーダを二つの周波数で運用する二周波降水レーダが開発された。世界において、この2つのレーダ以外に降水を観測する衛星搭載レーダは存在しない。

¹⁷ 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。

¹⁸ 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。

¹⁹ 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。

²⁰ 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。

雲を観測するレーダとしてはNASAのCloudSatがある。日本はこの種のレーダの開発にやや遅れたが、2016年度打ち上げ予定のEarthCARE衛星にはドップラー速度の計測が可能な雲レーダが開発され搭載される予定である。

マイクロ波を用いた受動的観測器による降水や水蒸気の観測でも日本は長い歴史を持っている。MOS-1、MOS-1bに始まり、ADEOS-II、Aqua、GCOM-W1に搭載されたAMSR、AMSR-E、AMSR2はその高分解能および安定性で高く評価されている。

また、Lバンドの合成開口レーダ（SAR）に関しては、JERS1-SAR、ALOS-PALSAR、ALOS2-PALSAR2と世界唯一のLバンドSARを打ち上げてきており、特にPALSAR2は技術的にも世界のトップに位置づけられる。

このように、我が国は、降水や雲、地表面、海面による電波の散乱、吸収などの効果を見積り、利用者の要求を満たす衛星搭載観測器の設計を行える高い技術を持っており、降水観測器のデータから降水強度を推定するアルゴリズム開発やLバンドSARの解析アルゴリズムにおいて日本は世界を牽引している。

また、2009年に打ち上げられた「いぶき（GOSAT）」衛星においては、近赤外波長域の太陽反射光から大気中の二酸化炭素及びメタンの気柱総量²¹を算定する手法の開発に世界で初めて成功した。二酸化炭素の気柱総量の誤差は現時点で2ppm程度であり、当初期待された観測精度目標を大きく越えた性能を發揮して、当初困難視されていた長寿命温室効果ガスのリモートセンシング技術の基盤を築いた。現在では、米国、欧州、中国でも同様のミッションを掲げた衛星計画が進んでいる。我が国では性能向上を図ったGOSAT2号機を2017年度に打ち上げる計画がある。

さらに、寿命は短かったが、ADEOS-II衛星に搭載された全球イメージャ（GLI）、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分光センサは高い性能を發揮しており、我が国の技術力の高さを示している。

しかしながら、経済状況と社会構造の変化に関連して、近年は、我が国の地球観測衛星の将来展望が不透明（プロジェクト型研究の選択と集中による予算の継続性の問題、産業構造の変化による企業体力の低下など）となっている。そのため、若手研究者が夢をもてない状況が生じ、これらのセンサを作り出したメーカーにおいても、技術者の維持が難しくなるなど、これまで培った高い技術力の維持が難しい状況に陥りつつある。また、衛星のバス側やロケットの開発技術は世界トップレベルに肩を並べるようになったが、衛星ミッション側のアルゴリズム開発や観測データの検証、地上観測と連携した高度なデータ活用においては、ロジスティクスも含め、まだ努力の余地が少なくない。

(3) 日本の観測衛星の決定プロセスの現状

① 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

大学等からのボトムアップで地球観測衛星のミッションの立ち上げを行う場合に

²¹ 単位面積あたりの鉛直気柱内に存在する気体の総量。

は、本来、「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つのプロセスが機能することがあるべき姿である。このうち中間の2つのプロセスは並行して行われることになる。

現在、プロジェクト化されている衛星は、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）に基づいている。その提案は、1995年に設置されたJAXA EORCと地球環境観測委員会で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（後にJAXA）は、集約された意見に基づくミッション提案について、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てきた。4つのプロセスについては、ミッションごとに外からの見え方に濃淡はあるが、おおむね機能していた（福田，2011）。

一方、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GEOSS（全球地球観測システム）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27日に決定された。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部会が設置され、関係府省・機関との緊密な連携・調整の下、本戦略に従い関係予算の状況を踏まえ、我が国の地球観測に関する具体的な実施方針を毎年策定することとなった²²。

このようにして科学技術政策として地球観測計画が調整される一方で、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するものであった。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、同戦略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は2009年6月に決定された。宇宙開発基本法のもとでは、利用省庁による、いわば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。一方、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ボトムアップのミッション提案とフィージビリティスタディも可能とする「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。これはJAXAの独立法人化時に廃止された地球観測委員会が担っていた機能も含まれる。

²³現時点では平成29年度打ち上げ予定のGOSAT-2より後の予算が手当されていない状況にある。地球観測衛星ミッションは計画から打ち上げまでに最低5年が必要であるため、今のままでは、観測の空白域が生じる可能性がある。これは長期の地球環境監視において後世まで負の影響を及ぼしうる可能性があるため、できるだけ速やかに、次世代へと続く戦略的な地球衛星観測ミッションを計画し、実行していく必要がある。

また、ボトムアップのミッション提案を受けて、その審査・確認・決定という仕組みを作るに当たり、かつ、技術の有効利用という意味でも、宇宙科学との連携は今後重要である。JAXA宇宙科学研究所では、地球の超高層大気や、月、惑星、彗星、太陽、

²² http://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/kankyousuishin/detail/1285021.htm

²³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

太陽系外の天体を対象とする観測ミッションを実施してきた。ここでは、全国の宇宙科学研究者による選挙を通して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してきた。ミッション間の優先順位などの議論は学会などでも活発に行われている。このようにボトムアップでミッションを実現する仕組みは、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。純粋科学的要素の大きく、比較的小さなコミュニティで実施する宇宙科学ミッションと、基礎科学の要素に加え社会貢献あるいは政策の視点も必要で、そのため、利用者コミュニティが大きな地球衛星観測ミッションは、これまで異なる体制で実施されてきた。しかしながら、地球衛星観測ミッションの新たな実施体制の構築にあたり、宇宙観測のボトムアップのミッション実施の仕組みは参考になるだろう。また、同じ宇宙開発という点で、宇宙観測と地球観測の技術には共通するものがあり、今後、連携を深めるのが望ましい。

一方、海洋分野では、海洋基本法（2007）、海洋基本計画（2008）の下で、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で、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ている。海洋と宇宙の連携も重要であり、その意識から「海洋・宇宙連携委員会」が JAXA によって設けられ、「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。まだ、この提言に基づいたミッションは実現されていないが、宇宙からの海洋観測についても今後の地球観測衛星計画の中で、戦略的に位置づけられていく必要がある。

② 研究者コミュニティとの関係

1980年代に国内の多くの研究者が参画した地球環境観測委員会が中心となり、多くの地球観測計画が立案、精査され、今日に至るまで着実に実現されてきた。この間、ADEOS が1997年に、また ADEOS-II が2003年に異常運用終了したこともあり、JAXA では、衛星観測の信頼性、ロバスト性の視点での見直しが行われた。そして、これらの事故による喪失感もあり、次第に多くの研究者が地球衛星観測から遠ざかっていった。予算に制約も生じ、大規模な地球観測委員会の運営が維持できなくなった。

その後、日本の地球観測計画は、地球観測サミットにおいて策定された「GEOSS 10年実施計画」（2005～2015年）に対して、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、政府の新たに変革された宇宙開発体制のもと、2011年時点において、2018年度以降の地球観測衛星計画が立案されていないことを受け止め、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た。ここでは、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を設置し、地球観測の将来ミッションについて特に若い研究者からの意見集約を行っている。

一方、研究者側は、2010年頃から、宇宙利用の在り方や地球観測衛星の意義と役割についての議論を深化させ、各種施策に提言することを目的としたタスクフォース会合を設けて、コミュニティの構築を図った。現在、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・大気水圏科学セッションをはじめとする多数のリモートセンシング利用関連学会が参加する「タスクフォース会合・リモートセンシング分科会」において活発な議論が継続されている。我が国の地球衛星観測の進め方に関する意見を集約した提言書「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」はその活動の一環である（参考資料2）。同提言書は2013年10月7日付で政府機関等に提出されている。このような学協会横断型の意見集約の場が設けられ、具体性のある提言をボトムアップで作成できるようになったことは、我が国の地球観測衛星分野における大きな進歩である。しかしながら、関係する学協会の数が多いこともあり、これらの学術研究コミュニティと政府およびJAXAとの協力体制は未だ十分とは言えない。

以上のように、研究者、政府、産業界、JAXAを有機的につなぐオールジャパンとしての地球観測衛星計画の実施体制は現状では不十分であり、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、長期的戦略に基づいた計画の策定と実施が難しい状況にある。

(4) データアーカイブの現状と課題

地球観測衛星からは日々膨大な観測データが送られてくる。例えば現行の静止気象衛星「ひまわり7号」は1日あたり11ギガバイト、2015年に運用が始まる「ひまわり8号」以降は毎日430ギガバイトのデータ量となる。このような気象衛星以外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成分に関する大量のデータが日々取得されている。科学と技術の高度化や産学官におけるデータニーズの高まりに伴って、空間解像度やセンサの波長分解能が上がり、取得されるデータ量は増加傾向にある。これらは、気象や気候の研究、環境の監視と分析、防災や減災、低炭素社会の構築等に向けて、広くかつ長期にわたり活用されることとなる貴重なデータである。

“今”の地球の姿を記述するこれらのデータは、一度失われると二度と取得できないため、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。さらに、データの可用性を高めるために、データアクセスが容易かつ高速であることも重要である。しかし、現存する多くのデータアーカイブシステムには永続性と堅牢性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、それぞれ独自にアーカイブを行っているため、異なる衛星センサのデータを統合して解析する場合、利用者は別々のアーカイブからデータを取得する必要がある。そのとき、データ形式や利用ポリシー等が相互に異なる²⁴など利活用のハードルが高く、また頼るべきサポート体制も十分ではない。

²⁴ 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

衛星データを統合管理する試みとして、世界に分散する衛星観測データベースを結びつける全球地球観測システム (GEOSS) 10 年実施計画 (2005～2015 年) がある。GEOSS で用いられる個々のデータベースは、それ自体が使いやすいものであることが要請される。我が国では、GEOSS の下、データ統合・解析システム (DIAS) や地球観測グリッド (GEO Grid) が整備運用されているが、いずれも研究提案に基づく有期の研究費で賄われており、永続的な運用が担保されたものではない等の課題をかかえている。

(5) 人材育成の現状と課題

① イノベーションと実用主義：「間隙のジレンマ」

衛星からの地球観測には、バス系とセンサ系²⁵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。宇宙観測とは異なり、地球観測においては、学問的には物理量の計測精度、範囲、頻度、分解能等の向上、並びに長期にわたるデータの蓄積を通じて学問の進展を目指しており、かつ社会的な実用性や観測の継続性も求められる。天気予報や台風の進路予想といった高度な実用的要求にも長期安定的に応える使命があることから、その技術開発はリスクの高いイノベーションではなく、既存技術の応用やその技術更新を重ねることが中核となる。このため、宇宙観測のように研究者が自らセンサを開発するのではなく、地球観測においては設計者・製作者・ユーザ三者の分業体制が確立されている。このような状況下では、(1) イノベーション技術を追究する工学系分野だけでは地球観測に特化したハードウェア技術の人材を育成できない、(2) データ利用者側の理学系分野では、既存のハードウェアから得られる情報の分析に終始し、新たな情報取得を目指す技術開発のための人材が育成できない、という技術イノベーションと実用主義との間に生じる「間隙のジレンマ」による人材育成上の問題がある。

② 分業体制の問題

分業体制をベースとした地球観測衛星分野では、JAXA と企業とユーザの関係そのものに頼らざるを得ない。右肩上がりの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ものの、現在では営業利益の上まらない宇宙・衛星産業への参入は企業にとっても大きな負担になっている。国際調達やスーパー301 条の適用等の問題もあり、地球観測衛星事業では利益が見込めず企業側の取り組みも消極的であり、人材育成も期待できない。しかしながら、将来を見越した技術開発に投資をしなければ、将来を担う人材の育成はむずかしい。

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 : GOSAT データの配布。無料。フォーマットは HDF。

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。

²⁵ 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。

③ 少ない人的資源と大学の研究現場の抱える問題

地球観測衛星によって取得されるデータは多様で、その利用には高度な専門知識が求められることから、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。通常は気象庁などの所掌官庁の専門技術者等が解析した結果を利用することになる。

なお、地球観測衛星に関わる分野で学術的指導力を発揮できる大学教員は全国に散在しているものの、その数は多くはない。国立大学は法人化以来、人材育成に関する問題に直面している。運営費交付金の漸減が続くなか、大学院の教育等にかかる人材育成のための資金が不足しており、その確保のための自助努力による外部資金獲得が不可欠となっている現状がある。しかし、継続性の薄い外部資金は人材育成のための教育には適さないし、教育の継続性を担保するための資金獲得に対する教員の努力は、教育の時間そのものの劣化につながりがちである。また、ポストクなどの期限付雇用が常態化しており、また、多忙な大学教員に接する中で、研究職や教育職、高度な技術職へのあこがれや価値が、学部生や大学院生等の若者から失われつつあり、今後、人材育成の道がさらに狭まる恐れがある。

④ 国民的理系リテラシーの後退と理科教育の問題

子供の理科離れ、国民的理系リテラシーの低下が人材育成をさらに困難にしている。遠く宇宙にあこがれる好奇心はあっても、スマートフォン等の実用に供されている地球観測衛星そのものの技術に目を向ける者は少ない。「はやぶさ」を知っている若者は多くても、たとえば「GOSAT (いぶき)」を知る者ははるかに少ない。

人材育成をさらに困難にするのが、中等教育における地球科学教育の問題である。地球観測衛星に関する科学や技術に対する興味や基礎的な理解、および、社会生活とのかかわりを広く国民に浸透させるためには、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知識の理科教育が不可欠である。しかし、これを担うべき高等学校の「地学」を専門とする担当教員数は、1970年代以来、減少の一途をたどり²⁶、地学教員の総数が一桁である都道府県も少なくなく、履修する高校生数も低迷し続けている。多くの大学で「地学」が受験科目から外されていることもその大きな要因のひとつである。

4 我が国の地球観測衛星の今後の在り方

ここでは、国際連携、社会貢献、コミュニティの形成、データアーカイブ、人材育成と理系リテラシーの各視点からの今後の地球観測衛星のあり方について述べる。なお、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、人材育成と長期的な地球観測の重要性などの点で本報告に示す地球観測衛星の今後の在り方は「平成26年度の我が国における地球観測の実施方針」(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、2013年7月29日)と調和的である²⁷。

²⁶ 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。

²⁷ http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gi_jyutu/gi_jyutu2/shiryo/attach/1339305.htm

(1) 国際的学術研究との連携

地球観測に関する国際的学術研究は、全球をカバーする観測データの有効利用のために、必然的に発達してきた。現在では衛星観測技術の発達に伴って、気象衛星や測地衛星を含む様々な地球観測衛星による大気・海洋・陸面・固体地球に関する情報が取得されている。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）がスタートしたが、その中で地球観測衛星データの利用は大きな柱になっている。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、物理化学、生物学、生態学、医学などの多面的な研究のために衛星データが利用されて、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たこともあり、気候変動研究のために長期にわたる継続的な衛星データ取得に必要なシステム構築の提案がなされた。

21世紀に入ると、全球地球観測システム（GEOS）が形成され、世界全域を対象として既存及び将来の人工衛星や地上観測など多様な計測システムが連携した包括的な地球観測システムを2005年から2015年の10年で構築する計画が提案された。その衛星観測に関する活動は、地球観測グループ（GEO）のタスクフォースの一つとして国際連携のもとに実施されている。さらに、より社会に役立つ地球科学的知見の創出のために、GECプログラムが改組されフューチャーアースの枠組みが生まれつつある（中島、2014）。ここでは、持続可能な開発目標（SDG）の実現に向けた貢献が重要な課題の一つとなっている。第3回世界気候会議（WCC-3）では、この方向に沿った気候サービスのための全球枠組み（GFCS）の設置が謳われた。また、WCRPでは、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た。さらに、5~10年の期間で実践可能な4つのコアプロジェクトを横断する6つのグランドチャレンジ課題が設定された。すなわち、(1) 領域気候情報、(2) 領域の海水準、(3) 変化する気候の中の雪氷圏、(4) 水資源変化、(5) 雲・循環・気候感度、(6) 極端気候の6つのグランドチャレンジである。これらの国際プログラムの改組の方向から明らかなことは、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が構築されようとしていることである。そのなかで地球観測衛星からの情報を含む各種観測データの利用もより組織的・かつ多面的になって行くことが期待されている。

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²⁸、今後も上記の国際協力の流れに沿って、長期的戦略を持って策定する必

²⁸ 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。
・ADEOS：衛星、打ち上げともJAXA。TOMS、NSCAT（以上NASA）、POLDER（CNES）を搭載。
・ADEOSII：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。
・EAS-Aqua：衛星、打ち上げ共NASA。AMSR-E（JAXA）を搭載。

要がある。また、衛星ミッションだけでなく、その観測データの有効活用の方策についても事前に良く検討しておく必要がある。データは地球科学的基礎研究のみでなく、広く防災・減災や低炭素社会構築などにも利用されることになる。このような多面的なデータの利用を視野に置いて、GEOSS や DIAS のようなデータ整備が進んでいる。今後、データの流れを、さらに社会の隅々まで浸透させるためには、気象・環境機関・研究機関・ビジネス間の道筋を作る事が必要となる。すでに防災・減災・環境問題対策に関する業務は、気象庁・国土交通省・環境省などによって始まっている。尚、データアーカイブの問題については、別の側面での課題があるため、4 (4) に改めて述べる。

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²⁹。

(2) 社会への貢献と発信

2009 年には、第 3 回世界気候会議 (WCC-3) においては、気候サービスのための全球枠組み (GFCS : Global Framework for Climate Services) が取り決められた。我が国でもこれに基づいて、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、地球観測衛星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。

しかし、その障害として、我が国には技術移転システムに脆弱性があることを指摘しておく。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における現業システムに速やかに技術移転するためのシステムが不十分であり、連携が必ずしもうまく行っていない。少なくとも欧米における大気科学の分野ではこのような問題は見られない。たとえば、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、各国の気象機関や環境機関が積極的に関与している。また、新しい地球観測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の支援があり、その支援活動を通して、最先端の研究成果が研究コミュニティだけでなく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、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要素の開発分担と連携が行われている。そこでは、気象局の現業気象モデリングのための強力なインフラを中心に、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

・GPM : 衛星は NASA、打ち上げは JAXA。DPR (JAXA) を搭載。

・EarthCARE (2016 打ち上げ予定) : 衛星、打ち上げ共 ESA。CPR (JAXA、NICT) を搭載。

²⁹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。

象・気候モデリング研究を推進する戦略が見て取れる。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）が存在する。また、天気予報等の気象業務を主目的とした気象衛星も高機能化しており、基礎科学研究への積極的な利用も視野に入れた研究者コミュニティとの連携が見られる。欧州におけるコペルニクスプロジェクトはEUが担うことにより、すでに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ことになる。現在の我が国の体制ではこれらが未整備のために、担当の行政機関や研究グループは、疲弊してしまいがちである。持続的かつ高効率に衛星データを利用する社会となるためには、この問題を解決する必要がある。

また観測データの価値の与え方に対しても様々な方策が考えられる。観測データは有償で利用者に提供するのが最良とは限らない。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ある。そして、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必要である。政府の宇宙開発戦略においてもこのような観点を入れる必要がある。さらに、前に述べたように、地球観測データは連続性が確保されているからこそ環境監視に生かされるのであり、また、社会の基盤要素である衛星観測情報は安定して供給される必要があることから、衛星による地球観測の中断は一時的でも避けなければならない。そのためには、地球観測衛星ミッションの継続性を担保する、公平で透明で客観的な仕組みの構築が重要である。過去の経験から地球観測衛星ミッションの実現には提案から最低でも5年を要していることを考えると、2018年以降未定となっている地球観測プログラムを開始するための早急なシステム構築が必要である。

(3) 成熟した地球衛星観測コミュニティの形成

人工衛星を用いた地球観測は、人類共通の課題に応えるための重要な情報をもたらす。特に、地球温暖化問題や自然災害への対応、大気汚染問題、食糧問題に至るまでその貢献は多岐にわたる。また、最先端技術である地球観測衛星は国力を示すものでもあり、外交・安全保障の観点からも重要である。

地球観測衛星ミッションの策定と実現には、先に述べたように「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つのプロセスが健全に機能することが必要である。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観測衛星コミュニティを早急に構築することが望まれる。長期的戦略に基づく課題設定、ミッション策定から実現、運用、そしてデータ利用までの地球衛星観測に係る一連の過程が効率よく進められことになる。

この一連の流れの最初のプロセスは、将来を展望し、国際的な視野に立った科学的意義や社会ニーズ、そして、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。このうち継続性は、民間も含めた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。また、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、民間で地球観測衛星を支える優れた技術者層の維持と人材育成が期待できる。日本はすでに地球観測衛星に関する豊富な経験と国際的にも優位な技術を持っている。これらを生かし、かつ継続的な発展につながるミッションは、国際協力の意味でも重要となろう。一方、若手研究者の育成という意味では、新しい発想から生まれる挑戦的な技術も育てていく必要がある。また、一つのミッションに複数の意義が与えられることの多い地球観測衛星の性格から、研究者と関係各省庁が協力することが不可欠となろう。このような長期戦略の中で新しい地球観測衛星ミッションの提案がなされることが望まれる。

提案された地球観測衛星ミッションの策定には、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プロセスが必要である。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。

策定された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必要となる。このプロセスには具体的な検討のためのハードウェアの開発も含まれる。この一連の実現性の検討を行うためのスキームの確立も必要がある。

次に、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から、地球観測衛星の想定寿命を越えた後でも、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。そのような可能性も加味した柔軟な運用システムの構築が重要である。また、データ解析においては、地球観測衛星の PI の研究者だけでなく、将来その利用が想定される関連省庁の支援を含める仕組みが必要である。こうすることで、最先端の科学成果の速やかな社会への還元が可能となる。逆に、気象衛星等の実用性重視の地球観測衛星については、最先端技術の観測を地球科学研究者にも一部解放することで、科学研究の大きな進展が期待できる。

さらに、これまでなかなか実現が難しかった、複数の地球観測衛星の最新データや関連する地上観測データ、再解析気候データなどを組み合わせた研究を効率よく進めるため、地球観測衛星の策定段階において、データ公開やデータアーカイブの方策についても計画を詰めておく必要がある。

(4) データアーカイブのありかた

衛星観測データは変わりゆく地球の歴史そのものであり、証人である。3 (4) で述べたように、世界中で活用されるべき貴重な財産であるのに対して、我が国のデータアーカイブ及び利用促進の体制はいまだ十分ではない。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」の設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」を兼ね備えていることが重要である。なぜならば、衛星観測データに

は利用者から校正值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。この場合、データのバージョン管理を適切に行う必要がある。また、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：「間隙のジレンマ」の軽減・克服に向けて

3(5)①に述べたように、地球観測衛星に関わる科学技術の現場では、技術イノベーションと実用主義との間に生じる「間隙のジレンマ」による人材育成上の問題がある。衛星観測の精度と信頼性へのユーザからの要求が今後一層高まることを考えれば、このジレンマの軽減・克服は喫緊である。そのためにはユーザの多い理学系と技術イノベーションを追求する工学系との融合が必須であり、ミッションチームにはなるべく多くの関係分野から多様な研究者を集め、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作りが求められる。こうしたチームに若手研究者や大学院生が参加することによって、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さらなる高度化と、それを担う人材の育成に寄与することができる。その一方で、様々な分野で衛星観測データを活用した解析ができる研究者・技術者の育成も不可欠である。

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

我が国では現在まで、新規開発したセンサを直ちに衛星に搭載して成功を収めてきた。しかし、センサが高度化するにつれ、机上の計算から直ちに目的の性能を得るのは難しくなってきた。このような状況に対応するため、NASA では、衛星センサを航空機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。このシステムの利用により、センサの発想段階においては、新しい計測方法の有効性を確かめる実験ができる。次の開発段階においては、センサの工学モデルを航空機に搭載して装置の性能を検証可能である。工学モデルのデータは、さらなる性能向上のための検討や、校正および処理アルゴリズムの開発に活用できるし、衛星打上げ前における代替的な研

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・検証においてサイエンスチームの支援を目的としたものである。本質的に MODIS クローンである MASTER だが、ASTER にも適用できるよう観測波長の変更が可能である。衛星との同期観測など、1998 年以來実施した多くの実験データを公開している (<http://master.jpl.nasa.gov/data/>)。この他、航空機搭載可視赤外イメージ分光器 (AVIRIS; Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer) がある。これは、JPL が開発したハイパースペクトルセンサで、走査光学系と 4 つの分光器を用いて 224 の波長でスペクトル画像を取得できる。1980 年代から数世代の AVIRIS が開発され、そのデータが公開されている (http://aviris.jpl.nasa.gov/alt_locator/)。2020 年頃打ち上げ予定の衛星搭載センサ Hypsiri 用のシミュレーションにも用いられている。

究データとしても利用できる。

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かなりの時間を要する。この作業の初期段階に関わった大学院生が衛星搭載後の観測データを手にする前に卒業し、離れてしまうことも多い。したがって、航空機を用いた地上検証実験は、教育上も有効であり、学生や若手研究者・技術者にセンサに身近に接する機会を与えることにもなり人材育成に大きな寄与が期待できる。我が国においても、衛星搭載機器の開発と教育のため、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。また、同様な観点から、大気球等の積極的活用も有効である。

③ 国民的理系リテラシーの向上と理工系教育の拡充

今後、地球衛星観測は高度化が進み、その観測データには多種多様な情報が含まれることになる。このような情報を一般国民が有効に活用できるようにするために、JAXA や気象庁など地球観測衛星に関わる機関はウェブサイトの一層の充実を図り、より解りやすい情報発信を推進することが必要である。また、低迷する初等・中等・高等教育の各レベルにおける地球科学の教育の充実も推進する必要がある。

地球観測衛星の技術とここから得られる観測情報は、純粋科学としての地球科学に加えて、防災や環境問題など、国際的な視野も持って扱われるべき身近な社会問題にも大きく関連している。21 世紀を生きる国民にとって不可欠なこれらの素養を与えるのが地球科学教育である。地球科学教育の体制強化は、それを支える理学・工学関連の基礎教育の充実と併せ、国民的理系リテラシーの向上のために必要である。指導要領の改訂や教員数の確保を通じた地球科学教育や理工系教育の拡充が必然的に求められる。

5 今後の展望についてのまとめ

(1) 地球衛星観測の科学的価値・社会的価値の確認

我が国の地球衛星観測は世界を先導する技術により気象、海洋、大気化学、地理水文、測地等において数多くの地球科学の進歩をもたらしている。さらに、地球衛星観測は、気象予報業務、環境実況監視、環境長期監視、産業・行政への基礎情報の提供、災害復興支援等を通して社会に欠かせない基盤技術に成長している。この科学と実用は密接に連携している。社会がその科学的価値と社会的価値を継続的に享受するためには、空白期間のない地球観測ミッションの維持、持続的な技術開発、及び、連続的な地球計測を国家規模で行う必要がある。

(2) 日本の先導分野と継続的な国際貢献の重要性

我が国は、衛星搭載の各種レーダによる降雨、陸面、海面の観測やマイクロ波イメージャによる大気海洋の観測、高分解能分光放射計による温室効果の観測等で強みを有する。これらの強みを活かしつつ、フューチャーアースや WCRP 等の国際プログラム及び NASA や ESA 等の他国の宇宙機関と密接に連携して、戦略的なミッションの計画・遂行を継続的に行なうことにより、地球科学の進展や社会的課題の解決に国際貢献することが

望まれる。

(3) 観測データアーカイブ体制の構築

地球環境の長期監視と変化・変動のメカニズムの解明を行い、精度の高い未来予測につなげるため、過去のデータも含め、衛星観測データのアーカイブ（データ特性の記述と整理）を効率的に進めて、利用促進を図る必要がある。そのために、永続性、堅牢性、国際性、可用性、柔軟性、利用者サポート機能を有する「地球観測データ電子図書館」（仮称）の設立が考えられる。

(4) 地球観測コミュニティの連携強化

研究者コミュニティと関係各省庁との緊密な協力関係の下、我が国の強みを活かしながら公平性・透明性を確保しつつ、科学的意義と社会的意義に基づいた地球観測の長期的戦略を策定する必要がある。そのためには、大学・研究機関、関係各省庁、民間企業等が有機的に協力できる地球観測コミュニティを構築し、具体的なミッションの立案、実現、運用および利用を推進することが重要である。そこには科学研究の最先端の成果を速やかに実用に活かすための技術移転の方策を組み込む必要がある。また、公平性・透明性・客観性を担保し、地球衛星観測ミッションの採択や評価を行うための新たなシステムの導入が必要である。その採択や評価は、各分野の専門家が参加する科学コミュニティと連携して進められる必要がある。

(5) 人材育成の体制強化と理系リテラシー向上

地球衛星観測の一層の高度化を担う人材育成のため、関係する多数の理工系分野の多様な研究者からなる産官学の英知を総結集したチーム作りを行い、若手研究者・技術者や大学院生の積極的な参加を促すべきである。その際、研究用航空機や大気球等を活用した地上検証実験を積極的に推進し、若手が直接センサ機器に接する機会を増やすことなどが考えられる。身近で社会に不可欠となった地球衛星観測の意義を正しく理解し、これを将来担う人材育成を図るには、国民全体の地球科学に関する理系リテラシーの向上も重要である。そのためにはウェブサイト等からの情報発信の一層の充実に加えて、初等・中等・高等教育の各レベルにおける地球科学および周辺分野の理工系教育の拡充が求められる。

<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] 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>
- [3] 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 vol. 31 No. 2, 159-167.
- [4] 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、 投稿中.
- [5] 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、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) 平成25 年10 月7日

<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3回)
○提言書案に関する議論と今後の予定
- 4月7日 地球・惑星圏分科会 (メール審議)
○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 (メール審議)
○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 (メール審議)
○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 (メール審議)
○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（メール審議）
○記録案の今後の進め方についての議論
- 7月4日 地球・惑星圏分科会（メール審議）
○記録案に関する議論
- 7月5日 地球惑星科学委員会（第7回）
○記録案に関する分科会報告と議論

＜参考資料2＞タスクフォース会合の経緯

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。