

我が国の地球観測の将来計画に関する提言

-科学的側面-

平成 27 年 9 月

タスクフォース会合・リモートセンシング分科会 (TF)

地球科学研究高度化ワーキンググループ

1. はじめに

将来の地球観測衛星に関して、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）」コミュニティ（以下、TF）の呼びかけに呼応して、73件におよぶ地球観測提案が13の学会および地球惑星科学連合から提出された。このことは、地球科学と地球環境問題に関わる社会対応には様々な衛星観測の要望があることを示している。しかし、すぐにでも実現できる提案から、実現が非常に難しい提案までが混在しており、我が国の地球観測の将来を持続可能で有効なものとするためには、その優先順位を含めた様々な観点からの検討による将来計画の策定が必要である。このような将来計画は従来、有識者の意見を集約する形で、文部科学省などのそれぞれの所掌においてとりまとめられて来ることが多かったが、宇宙基本計画（H27年1月9日宇宙開発戦略本部決定）4. 我が国の宇宙政策に関する具体的アプローチ(2) 具体的取組 ii) 衛星リモートセンシングの項目に「新たなリモートセンシング衛星の開発及びセンサ技術の高度化に当たっては、我が国の技術的優位や、学術・ユーザーコミュニティからの要望、国際協力、外交戦略上の位置づけ等の観点を踏まえ、」とあるように、また、リモートセンシング法や宇宙活動法の整備が進められて行く中、所管を越え横断的にアカデミックなコミュニティ全体で議論し、学術的な重要性を発信していく体制が必要となっている。一方、科学技術イノベーション総合戦略2015（平成27年6月19日閣議決定）第2部 科学技術イノベーションの創出に向けた2つの政策分野第2章 経済・社会的課題の解決に向けた重要な取組 I. クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現 ii) 地球環境情報プラットフォームの構築においては、3. 重点的取組（1）地球環境観測・予測技術を統合した情報プラットフォームの構築【総務省、文部科学省、国土交通省、環境省】の中で ①取組の内容・衛星搭載センサ等の性能向上と海洋・極域を含む地球観測の推進及び新たな観測技術の開発【総務省、文部科学省、環境省】が挙げられるなど、衛星観測についての重点的取り組みも政府で実際に進められている。本報告は、TF地球科学研究高度化ワーキンググループ（以下高度化WG）において提案を分析し、高度化WGとしての将来計画の提言をまとめたものである。なお、付録に提言のベースとなる分析結果を示している。

提案は、軌道に関しては静止衛星・極軌道衛星・低傾斜角衛星、手法に関しては紫外から可視・赤外にかけてのイメージャー・赤外からマイクロ波にかけてのイメージャーあるいはサウンダー・レーダとライダーを用いた能動型センサを含む（表1）。

2. 地球観測衛星の果たしてきた役割と将来へ期待される役割

我が国の地球観測衛星は、地球環境のモニタリングにおいて、これまで大きな役割を果た

してきた。その能力はセンサの性能向上と新たな機能の実現によって、気象・大気圏・海象・陸水・氷雪圏・生物圏・人間社会、そして太陽・宇宙から地球への影響に関する様々な事象の実態把握に役立っているものである。さらに、近年の地球環境モデリングの発展と計算機能力の向上によって地球観測衛星の役割はさらに重要になっている。すなわち、モデリング技術の発達によって地球環境の様々な部分の状態と変動について、一定の客観性を持った定量化が行えるようになり、様々な現象の理解と将来計画などに利用されている。しかし、このような地球環境の諸モデルは複雑な非線形性を持っているために、その解は統計的にしか決まらないものであり、また、シミュレーションを実施する際の初期値や境界条件に強く依存する。そのために、その実施には、地上や人工衛星による観測データが非常に重要な役割を果たしている点を忘れてはならない。モデルが発展するにつれて、ますますその重要性は増している。

地球観測衛星はこれまで災害監視や地球環境のモニタリングに大きく貢献してきたが、今後はこれらに加えて、我々の社会にとって解決すべき地球温暖化や地球環境変化への対応としてグローバルな地球観測データの高度利用をさらに進めて行く必要がある。ミクロかつ緊急課題としては、例えば、水蒸気の増加や地球規模の大気循環の変化により、各地での極端降水による災害の増加等が挙げられる。その評価と予測に用いられる現在の数値気象・気候モデルは克服すべき多くの課題を抱え、衛星観測データによる実態把握との緊密な連携が必要である。マクロかつ重要な課題としては、たとえば、地球環境全体の大規模な変化が懸念されている現在、大気と海水の化学組成や物理構造、さらに陸域と海洋の生態系までもが、互いに影響を与えあい、全体として変化して行く過程を予測する必要がある。そのような過程をシミュレーションできる地球システム統合モデルや環境モデルの開発が各方面で進められているが、その実施には様々な長期的な衛星観測データが必要である。

もうひとつの重要な方向性は、世界的に多くの地球観測衛星が打ち上がる状況において、各衛星ミッションからのデータと地上観測データ、そして数値気象・気候モデルを効率良くつないだ総合的な地球観測サイバーシステムの創出である。3次元24時間で実データを与える地球観測サイバーシステムは宇宙を活用した新産業・新サービスの創出にむけて産業界からの要請も高いものである。このため、衛星ミッションの開発と運用は、複数の衛星を組み合わせた地球観測サイバーシステムに対して最適化されているべきものであり、国際連携を進め、世界が広く薄く負担する体制で実現する必要がある。そのためには、宇宙機関と世界の地球環境問題に関わる機関・コミュニティが協力して、共同の衛星地球観測計画と分担案を創出する必要がある。災害監視においては、大規模災害などで緊急の衛星ミッションの必要が生じたときに、速やかに対応できる仕組みを国際協力の枠組みとして構築する事も有効である。多くの経験と技術を有する日本はそのなかでリーダーシップを発揮しなければならない。そのためにも、我が国の個々の衛星ミッションが世界最高レベルであることが求められ

ている。

これらの状況および学会からの提案に対する分析に基づいて、地球観測衛星の将来像に対する提言を行う。

3. 我が国の優れた技術の展開（提言1）

地球観測衛星は様々な目的に利用できるという大きな特徴を持っており、我が国においても最先端技術と実用を兼ね備えたミッションを遂行してきた。将来の地球観測衛星において高いレベルのミッションを実現するためには、まず、我が国が世界をリードしているセンサ群の活用を優先することを踏まえて検討する必要がある。

<静止気象衛星>

気象衛星ひまわりは、アジアオセアニア諸国への衛星観測分野での主導的な貢献をしている。平成27年度から運用が開始されるひまわり8号はさらに機能が大幅に増加されており、他の環境問題にも利用可能になる。従って、このシリーズを推進すべきである。中国と韓国の気象衛星計画も進んでいるので、アジアにおける一層の国際連携を推進するために我が国が積極的に貢献する必要がある。

<周回軌道衛星>

我が国では高分解能可視（AVNIR/AVNIR2/先進光学シリーズ）、中分解能可視・赤外（OCTS/GLI/SGLIシリーズ）、マイクロ波放射計（MSR/AMSR/AMSR-E/AMSR2シリーズ）、LバンドSAR（JERS-1 SAR/PALSAR/PALSAR2シリーズ）、降雨・雲レーダ（PR/DPRシリーズ、CPR）などを推進してきており、それぞれにおいて技術的にも科学的にも世界をリードしてきた。これらのミッションの利用範囲は非常に広く、地表面の状態（地形、構造物、植生等）のみならず、地球温暖化問題と関連の深い雲やエアロゾルの情報から降水や海洋の情報に至るまで抽出することが可能であり、応用分野も災害監視・気象・運輸・農業・漁業などの広い分野で利用され、さらに観測性能の向上により、その利用は着実に広がっている。

これらの技術は今後も推進してゆくべきものであるが、さらにそれらを有機的に複合利用（例えば、マイクロ波センサと光学センサ、能動センサと受動センサ）し、情報の価値を高めることが利用拡大につながる。

GOSAT衛星は、世界初の気柱二酸化炭素濃度のリモートセンシングに成功して以来、着実にそのデータを蓄積している。現在、米国のOCO2等、第2世代の衛星が実施中、あるいは計画中である。この状況において、我が国の優位性を維持するためには、観測機能を高め、同時に大気汚染の観測ができるGOSAT2の実施が望まれる。

また、現在直面している気候変化と環境変化の問題に社会が対応するためには長期の気

候・環境データの取得が重要である。気候分野では基本気候変数(EGVs: Essential Climate Variables)の取得を国際共同で進めており、それらの地球環境モデルの高精度化への貢献が重要である。

これらのミッションは、観測を継続する事により我が国の科学的・技術的なリーダーシップをとれる基幹ミッションとして位置づけられるが宇宙基本計画の工程表ではこれらが記述されていない分野（主に大気観測分野）があり、本提言ではそれらを補完する形で以下の基幹ミッションを提案する。

① マイクロ波放射計ミッション：2012年5月打ち上げ後定常観測中の GCOM-W/AMSR2 の設計寿命 5 年を考えると、後継機の開発が最優先の急務である。AMSR2 は前号機である AMSR/AMSR-E からの世界最高性能かつ継続的な観測により、世界的なリーダーシップを取り、気象学・水文学・海洋学の研究を通じて、地球温暖化評価、災害監視、気象予測に大きな力を発揮する。

② 降水観測レーダミッション：地球温暖化において最も社会へのインパクトの大きい降水の能動センサ（レーダ）を用いた高精度観測ミッションを継続する。レーダデータはマイクロ波放射計による降水観測のリファレンスとなるほか、マイクロ波放射計では捉える事ができない降水プロセスの温暖化による変化を抽出するポテンシャルを持つ。衛星搭載レーダ技術は世界でもトップランナーであり、開発を発展的に継続し、その優位性を保つべきである。

③ 中分解能光学観測ミッション：EOS/MODIS や ADEOS-II/GLI のデータは応用範囲が広く地球観測に係る様々な分野で利用されており、GCOM-C/SGLI とその後継ミッションの推進は重要である。

④ 高解像度観測ミッション（先進光学、先進 SAR 等）：高い分解能（分解能 1m 以下）と広域性（観測幅 50km 以上）を両立する光学衛星や極めて広い観測幅（350km）を持つ SAR 衛星を実現することは、我が国の強みを継続的に維持する観点において重要である。

これらについて、ミッションを立ち上げる場合、ボトムアップ（研究者・技術者提案）とトップダウン（国家の施策）の両方のニーズからの提案をもとに、それを内閣府と学術コミュニティ・学術会議で徹底的に議論して決めるのがあるべき姿であるため、上記のミッションを実施する場合にも明確な選定・レビュープロセスが必要であると考え。さらに、次節で述べるような地球観測衛星の特性を最大限に活かせるミッションへと展開させてゆく必要がある。

4. 複数衛星の有機的な運用（提言2）

前章において示したように地球観測においては様々なセンサの組み合わせ（マイクロ波と光学、能動と受動センサ等）が有効であり、複数衛星の有機的な運用を提言したい。特に、我が国の衛星システム運用は、他国に比べ成功率が高い。この長所を活かして、静止衛星と極軌道衛星の統合的な運用、および極軌道衛星のコンステレーション運用を有機的に結びつける運用を目指して整備してゆくべきである。Joint トレイン（J-トレイン）ともいうべき、例えば 10:30 軌道を国際共同で行うのは有効である。このような運用では、先頭の軌道にある衛星観測情報を利用して、後続の衛星観測の最適化を図れるほか、静止衛星の高頻度観測を用いることにより時間方向にも連続的なデータを得るといった利点が考えられる。さらに日本の宇宙産業の技術水準の底上げの観点においても、コンステレーションを形成する上でロケットと衛星に関する高い管制技術の向上やコストダウンにつながる部品の共通化などにおいて貢献できる。このようなシステムにすれば、アジア諸国からの参入が期待でき、日本を中心としたアジア域での衛星による地球観測体制の構築（費用分担による効率化、観測協力による地球観測データの高度化など）が可能となる。

J-トレイン型の観測システムにおいて鍵となるセンサとしては、例えば先頭で運用されるセンサは刈り幅の広い方が優位であるので、実績があり、応用範囲が広い中分解能可視・赤外（OCTS/GLI/SGLI シリーズ）センサ搭載衛星が有望である。この場合、陸上植生（作物を含む）のモニタリングには多方向反射関数の変化を考慮する必要があるが、極軌道上の光学センサでは観測頻度から雲スクリーニングの点で有効なデータ数が極端に少なくなり、その補正が難しい。従って、静止衛星による高頻度観測と SGLI の多方向観測と併せた利用が、新しい領域を切り開くと期待できる。

一方で、雲・降水観測と気象災害対策においては、マイクロ波を用いた観測が有効である。降水については、イメージャーによる降水システムの面的な情報と降水レーダによる 3 次元構造に関する情報の組み合わせが有効である。また、サウンダーによる水蒸気のプロファイルと雲・降水レーダによる 3 次元構造の観測と鉛直方向の速度（ドップラー速度）を組み合わせた観測は、現在地球温暖化とともに増加傾向にある極端降水現象の理解およびモデル化に大きく貢献できる。雲や降水の観測では日変化の情報を取得することも非常に重要であり、トレイン型のミッションにするとともに、太陽同期軌道でない軌道を考える必要がある。

長期的な視点に立つと、常時観測のできる静止衛星からの観測技術を発展させる必要がある。ただし、高水平分解能のセンサのように多方面の利用が考えられるものと同時にライダーや雲・降水レーダのように利用は限られるものの不可欠なセンサもあることにも留意すべきである。我が国の地球観測静止衛星は、スーパー 301 で規定される商用カテゴリーになる気象庁のひまわりのみで、我が国の技術力を延ばす開発研究が行なわれていない。しかし、

欧米のみならず、中国・韓国においても静止衛星による様々な地球観測の試みが実施・提案されており、この流れにおける我が国の競争力の向上を行なうべきである。

5. 効率化（提言3）

地球観測の特性や我が国における観測実績から、以下の3点において更に効率化を図るべきである。

まず第1にこれまでの JAXA の地球観測衛星の寿命を10年以上に延ばす必要がある。そのためには衛星本体の技術安定性を確保する必要がある。米国の TERRA/AQUA 衛星は15年の継続運用実績がある。TRMM も米国の衛星によって長寿命が維持されている。1機の衛星を10年のスパンで考えることにより、計画的な開発が可能になるとともに長期的にはコスト削減につながる（これまでの JAXA での開発期間を考えると衛星寿命が5年では衛星打ち上げ後の技術評価が後続のミッションにされないまま新規ミッションを実施することになる）。

第2に複数衛星の有機的な運用により効率的な観測を実現すべきである。GCOM-W, C の計画のようにシリーズ化する事により、個々の衛星を単独で開発するのではなく、後続の数機分をまとめて開発する計画を立てる事により、設計や部品等の共通化で人件費、材料費などを画期的に下げる工夫をすべきである。ひとつの目標として、打ち上げ費用を除いて1機あたり50億円程度を実現する衛星製造効率化手法の確立が必要である。

第3に小型・超小型衛星開発・併用することが重要である。小型・超小型衛星は打ち上げの機会が多く、技術的な挑戦にも適している。例えば、イメージングスペクトロメータで環境健康負荷物質の発生源を1km級の空間分解能での検出や、多数のレーダやマイクロ波放射計を搭載した小型衛星群による高頻度な降雨観測など、目的を特化した小型センサの技術開発を行うことにより、新しいブレークスルーが期待できる。これにより、これまでコスト面で参入できなかった研究機関・民間会社の参加も促進できるほか、アジア諸国などとのセンサ共同開発なども期待できる。ただし、センサの概念設計、評価、解析、科学的成果までコミュニティで一貫して自前で行える実力をつけていくことが必要となるほか、地球観測衛星全体における基幹ミッションと小型・超小型衛星の位置づけを明確にしておく事も必要である。また、ミッション選定においてはレビュープロセスの透明性や競争性を確保する必要もある。

以上の技術開発のもとに高性能な衛星を他国に比して安価に提供でき、例えば J トレインにおいて基幹ミッションとの連携により高効率データ取得、他衛星データとの複合解析で高次解析が実現できれば、アジア諸国からの参入が見込め、地球環境問題への貢献という大目標にも大きな貢献ができる。このような観点からも、アジア諸国の科学コミュニティと産業との連携が必要である。

6. 将来取り組むべき新しい技術の開発（提言4）

各学会から提案のあったミッションは、表1にまとめられているが新規性の高いものとしては、以下が挙げられる。

①植生ライダー：正確な地盤高や植生を高精度（10cm）で計測することは、食料生産や洪水などの基礎データとしてグローバルに必要であるが、まだ計測が達成されていない。走査型ライダーはこのニーズに応える事ができるほか、海氷や積雪などの把握にも有用である。

②ドップラーライダー：気象予報精度を飛躍的に向上させるには、観測の少ない海上での風速測定が最も有効である。そのために、晴天時などで風速計測可能なドップラーライダーは有効な手段である。

③イメージングスペクトロメータ：現在のマルチスペクトルのセンサを高波長分解能でかつ連続的に観測することを実現させることにより、ターゲットの性質・物性を示す反射率の情報をよりの確に取得する事が可能となり、植生や沿岸域の観測や雲・エアロゾルの観測に大きな威力を発揮することが期待されている。分光センサの高解像度化も進められている。水平分解能1km程度、走査幅250km、周波数分解能0.1nm程度でNO₂やオゾン、エアロゾルなどを観測することで、大気汚染の小さなホットスポットを捉えより正確なインベントリや予測を行うことが可能になる。これは大気汚染と健康被害や作物被害との関連づけにおいて重要な観測である。

これらのほかにも、各学会からは重力観測ミッション、海面高度計、走査型雲レーダ等（表1参照）が提案されており、上記のミッションも含めて、ミッション決定プロセスにおいて徹底的に議論すべきである。

7. 衛星観測データ利用促進と新産業創出のための高度なデータ解析力の強化（提言5）

地球観測衛星利用としては、①科学技術利用、②実利用、③商用利用の3種類が考えられるが、地球観測特有の多様なニーズに応えるためには高度な科学技術的な基盤が必要であり、その基盤のもとに社会的な（公共性の高い）意味合いのある実利用や商用利用などへ発展してゆくことになる。

前述のように今後益々の進歩が予想される地球環境モデリング技術の向上や計算機性能の向上に伴って、地球観測データは気候変動や気象災害、森林・農業といった様々な分野の地域や経済活動においてモデルと実社会との隙間を埋める役割を持つものであり、かつ、将来の気候などの変化予測におけるモデルの検証にも重要な役割を持つ。今後さらに進んでゆくビッグデータ利用においては、地球観測衛星データはグローバルかつ偏りのない情報を有していることから重要度は増してくるため、地球観測衛星データを中心としたビッグデータ解

析力をつけることは人材育成も含めて急務である。これらにより、いわゆる衛星観測データと社会実装や政策へのスムーズな連結が可能となり、地球観測衛星の継続的な利用・発展のサイクルが生まれてくる。

8. 予算計画について（提言6）

宇宙基本計画におけるリモートセンシング衛星のカテゴリーに分類される衛星地球観測は、予算が圧迫され、その中での「集中と選択」という流れが起こっている。しかし、世界的に見ると、地球規模課題の解決のために、各国とも地球観測への貢献を打ち出す状況であり、このままでは我が国がこれまで長年かけて培って来たリーダーシップと貢献が損なわれることが危惧される。この観点から、地球観測衛星への適切な予算配分が必要である。一方で、地球観測ミッションの選定におけるレビュープロセス・競争性を明確にした上での開発予算の精査を図る事も必要となる。また、衛星開発で培った技術を民間へ移行してゆくスキームを早急に検討し、スムーズに新規ミッションを立ち上げるサイクルを構築する必要がある。

表 1. 学会・団体からのセンサ提案リスト

	種類	波長	分解能 m	観測頻度	達成時期	提案学会
光学	VIS/NIR/SWIR	VIS/NIR	1-5	1-2時間ごと	継続	RSSJ、海洋、雪氷、気象、シ農、SICE
			10-30	毎日	継続	RSSJ、海洋、雪氷、気象、シ農、SICE
			100-1000	毎日	継続	RSSJ、海洋、雪氷、気象、シ農、SICE
			100-1000 (静止)	毎日	2019	RSSJ、海洋、雪氷、気象、シ農、SICE
TIR	TIR	5-30	1-2時間ごと		RSSJ、海洋、雪氷、気象、シ農、SICE	
		50-100	毎日		RSSJ、海洋、雪氷、気象、シ農、SICE	
	光学イメージャー (紫外から赤外)		8000		2029	気象、SICE
	ハイパー	UV->TIR	5-30	毎日		RSSJ、海洋、雪氷、気象、シ農、SICE
マイクロ波	L-SAR・タンデム	L	0.5-1, 10, 100	1-2時間ごと	継続	RSSJ、海洋、雪氷、気象、シ農、SICE
	干渉SAR、海面高度計(干渉型)	X	0.5-1	毎日	2018	RSSJ、海洋、雪氷、気象、SICE
	降水・雲レーダ	Ku, Ka, W	1000-50000		継続	気象
	海面高度計	Ku, Ka, C				海洋、SICE
	放射計(イメージャー、含塩分濃度)		1000-50000	1-2時間ごと	継続	RSSJ、海洋、雪氷、気象、SICE
	サウンダー					気象、SICE
	散乱計	Ku	25000	毎日	2025	海洋
そのほか	FTS		1000-10000	数日	継続	気象
	グレーディング分光計		5000	1日		気象
	LIDAR(走査型ライダー)				2020	雪氷、SICE
	ドップラーライダー		10000-100000	1-1.5時間ごと	2023	気象、SICE
	多重散乱計ライダー		1000		2023	気象、SICE
	GPSえんぺい		5000			気象
	サブミリ波(SMILE S F/O)					気象、SICE
	赤外・近赤外分光・太陽えんぺい法		1000		2018	気象
	DPR/CPR(降水観測)	Ku, Ka	5000	1日	継続	気象
	可視光(雷観測)		8000		2029	気象
	重力センサ		3000000			雪氷、SICE

付録：提案の分析

下記に、TF の呼びかけに呼応して提案された 73 件の提案を分析する。

1. 高分解能地球表面観測

地球表面の数十メートル以下の詳細な観測要求は各学会から出ている。高分解能の地表面状態の把握は、植生や水資源、鉱物資源探査や、災害監視と対策、船舶ナビゲーションなどに必要であり、基礎科学から生産活動、生活防衛までの幅広い分野で今後も発展することが期待される。学会からの提案をまとめると次のような点が上げられる。

- ①AVNIR-2 等の VIS-NIR (以下、紫外域を UV, 近紫外域を NUV, 可視域を VIS, 近赤外域を NIR, 熱赤外を含む赤外一般を IR, マイクロ波域を MCW と記述する) イメジャー型センサの要求が多い。水平分解能 1cm 級の提案もあるが、作物の生育管理に用いられる 1~10m 分解能がターゲットと考えられる。
- ②上記に熱赤外チャンネルを加えた ASTER 等の VIS-IR イメジャー型の要求も多い。IR で水平分解能 50m は実現可能だろう。
- ③MCW 提案も多い。究極的には水平分解能 100m 付近まで分解能を上げることの要求が多い。
- ④詳細な物質特性の把握のためにハイパーイメージング要求もある。提案で出ている数 cm は非常に困難であるが、分光手法のひとつとして考えても良い。この場合、空間分解能と波長分解能のトレードオフが必要で、水平分解能 15m 程度の要求を実現するためには、それほど高い波長分解能は実現できない。そのために、利用ニーズを考慮しながらフィルター型と競合を検討して案を決める必要がある。従って、作物の生育管理などの利用を念頭においてハイパーイメージングに特化する場合には小型の研究衛星とすべきである。
- ⑤能動型では PALSAR2 等の L-band SAR (PALSAR) 型の要求は、雨季を持つ地域の植生管理において非常に多い。要求水平分解能は 1-10m 程度である。
- ⑥パッケージングの観点からは、ALOS シリーズで行われている、VIS-NIR または VIS-IR 型イメジャーと Lバンド SAR の組み合わせの要求が非常に多く、TERRA/ASTER や ALOS シリーズの実績の基盤の上に我が国の優位性を発揮する衛星として、ひきつづき技術改良を続ける必要がある。

2. 中分解能極軌道観測

極軌道による 100 メートル以上の水平分解能での地球表面と大気の観測は、全球をカバーする必要のある気候研究などの分野で必須である。しかし 1 機の極軌道衛星では 1 日 2 回の観測に制限されるために、時間分解能をあげるために複数機が必要となり、国際共同による

プログラム化とそのための観測仕様の標準化が必要である。地球温暖化や環境問題に関する科学と対応のために世界的にも多くの衛星計画があり、我が国もその一端を担っており、将来の発展が非常に重要である。学会からの提案をまとめると次のような点が上げられる。

- ①VIS-IR イメジャーについては SGLI 後継の要求が多い。水平分解能は VIS-NIR 100m~250m, IR 500m 程度が要求であり、この技術仕様と目的に合わせた他の条件との組み合わせによる高い性能を実現する必要がある。この観点で、NUV-VIS-NIR に波長域を絞って 2 方向視するのが現実的である。
- ②低価格を実現した CAI2 や、IR にマイクロボロメータアレイを使った MSI などのような新しい試みを今後も推進する必要がある。MWC イメジャーは我が国が優位性を持つ技術であり、その開発を推進すべきである。その代表的なものに AMSR-E, AMSR2 があり、その後継要求が多い。水平分解能 1km 要求があるが、5~20km 程度のターゲットを追求する必要があるだろう。
- ③MCW サウンダー観測（気温、水蒸気量の鉛直プロファイル）は、今後地球温暖化に伴う極端降水の増加に関する影響評価と対策において重要度が増してくる。
- ④大気分光型（サウンディング型）の要求も多い：UV-VIS を回折格子で（水平分解能 1~数 km）、IR をフーリエ分光（FTS）で行うと言う案がある。UV か NUV かで分解能は大きく変わるので、目的に合わせた仕様を設定する必要がある。太陽放射の地表面反射を利用する GOSAT/TANSO 型の FTS 要求もある。グレーティング方式の CO2 のデータが出始めた所であり、今後、詳細な比較が必要である。
- ⑤パッケージの観点からは、すべてを組み合わせる大型衛星の要求もあるが、それぞれのターゲットに合わせた衛星パッケージングをトレイン型で組み合わせる構成が有効であると考えられる。多目的型の VIS-IR イメジャーの衛星要求が多い。分光手法は化学種ごとに変わる。TANSO 型のポインティング型の FTS と簡易型のイメジャーの組み合わせが最適である。分光技術は世界的に技術革新が早い分野であるので、世界レベルを維持するためにハイパーイメージング型の技術衛星も必要である。

3. 低傾斜角熱帯観測

熱帯域の早く変化する大気状態を観測する低傾斜軌道の衛星要求がある。これは、台風等の発生を包括的・高頻度に観測し、数値モデルと組み合わせる事により、それらの予測を飛躍的に向上させるポテンシャルをもつ。ミッションとしては、数値モデルとの組み合わせ効果を最大化するためにライダー、レーダ、イメジャーをすべて組み合わせる提案となっている。しかし、他の地球観測要求のなかでの優先順位の議論が必要である。

4. 地球表面観測中分解能

比較的的水平分解能と時間分解能による陸面観測要求に、L-band 放射計による塩分観測（水平 100km, 1 回/3 日）がある。海面高度計と海面散乱計は 5km 程度の水平分解能がターゲットとなっている。地表面観測には陸面の詳細な地形・植生測定のためにレーザー高度計の要求がある。

5. 大気能動型観測

我が国の技術的優位を持つ技術として衛星搭載レーダがある。TRMM, GPM に搭載された PR, DPR, EarthCARE に搭載される CPR が我が国で開発されている。雲・降水システムでは立体観測が不可欠であり、我が国はこの雲・降水の立体的（3次元）な情報を衛星搭載レーダによりほぼ独占的に提供しており、我が国が引き続きリーダーシップをとるべきミッションである。CPR についてはドップラー機能の改善や走査機能の付加が技術開発項目となっている。

ライダーは多波長化、走査機能、多重散乱測定機能、周波数（波長）測定機能と技術開発として有望なものがあるが、衛星搭載型については我が国の経験は極めて限定的ではある。3つの波長のレーダの搭載要求は、ライダーとの組み合わせ要求がある。後者については、A-Train 上の Cloudsat/Calipso, 同時搭載 EarthCARE 衛星で実現されているが、複数を搭載する場合は衛星が大型化するので、トレイン型にするかどうか、プログラム化段階で最適化を図る必要がある。

6. 掩蔽観測

成層圏観測と対流圏の水蒸気や降水・降雪の観測のための掩蔽観測が提案されている。VIS-IR, サブミリサウンダー, GPS によるものがある。極軌道と低傾斜角の要求があるが優先順位の議論が必要である。

7. 重力観測

測距型センサによる重力観測要求があるが、国際連携の観点からの優先順位の検討と我が国の技術優位性の確保の検討が必要である。

8. 静止衛星

要求が増えている要求に静止衛星による地球環境や災害対策などのための高頻度観測がある。これは従来の気象衛星とは異なる技術仕様を実現する必要があるが、欧米、中国、韓国においてこのような次世代の静止衛星計画が多く提案されており、我が国の衛星利用の優位性を維持するためにもその開発を推進すべきである。

- ①日本のひまわり 8 号・9 号をかわきりに、米国、欧州では第 3 世代の静止気象衛星に突入する。中国と韓国も新しいセンサ（マイクロ波や可視光など）の計画が実施されつつある。静止衛星からの地球観測の要求は大きい。ひまわり 8,9 号の後継として位置付けるとすると 2030 年移行が考えられる。
- ②気象衛星イメージャーAHI に 1.24 ミクロンなどのチャンネルを追加する要求もあり、これはひまわり後継として有力な案である。
- ③中分解能 VIS-IR イメージングは、海色や陸域観測、大気観測のために要求があり、応用範囲は広い。水平分解能 VIS-NIR 100m, IR 1km がターゲットになる。現在の第 3 世代気象衛星では 1km 程度の分解能がやっと実現されたところであり、100m の実現にはポイントング機能を含めた高い技術が必要である。
- ④中分解能ではハイパースペクトル UV-VIS イメージング（回折格子型）の提案がある。水平分解能 7km 程度で大気化学や越境汚染観測が可能になる。
- ⑤サウンディング機能のために IR（FTS 型）や MCW サウンダーの提案がある。2016～2020 打ち上げ予定の FY4-MCW 衛星はサブミリ MCW, コニカルスキャン型である。静止軌道からはサブミリ領域をまずターゲットにすべきであろう。この技術は我が国の強い分野であり、国際競争に勝つには推進する必要がある。1km という提案があるがまず、水平分解能が数 km から 10km をターゲットにすべきである。それでもマイクロ波は困難である。
- ⑥高分解能 VIS-IR イメージングの提案が海洋や災害監視のためにある。水平分解能は VIS 5m, IR 10～30m であるが、この分解能ではタスキングコントロールによる特定領域へのポイントング機能が必要である。
- ⑦雷観測は静止衛星からは高頻度観測が可能になるために災害対策のためのナウキャストイングのために有望である。水平分解能 8km 程度の要求がある。
- ⑧パッケージングの観点では、気象衛星センサの改良あるいは相乗りによる案がひまわり 8, 9 号後継時期に必要なことになる。その場合は、比較的軽量の VIS-IR イメージャーをターゲットにすべきである。高分解能 VIS-IR は望遠鏡のサイズ、マイクロ波センサはアンテナサイズを考慮すると単独衛星とするべきであり、デュアルユースなどの持続的計画の検討が必要である。

9. その他の提案

- ①小型雷センサ提案があるが、静止衛星と優先順位の検討が必要である。
- ②時間間隔を短くするために、2 機以上体制を要求する提案が多い。これは優先順位の検討が必要なことと、同時に国際共同提案として、CEOS, WMO 等のプログラミングが必要である。また、そのためにコンポーネント、仕様の標準化・共通化提案が無いと、持続可能な地球観測とならない。

- ③トレイン型の運用のために衛星の管制技術の向上も重要な課題である。
- ④地球観測の観点から準天頂衛星の有用性を，他の衛星提案と比較すべきである。

10. まとめ

上記の分析から次の点が見えてくる。

- ①既に実績のある，高分解能可視（AVNIR/AVNIR2/先進光学），中分解能可視・赤外（OCTS/GLI/SGLI シリーズ），マイクロ波放射計（AMSR/AMSR-E/AMSR2 シリーズ），L-バンド SAR（PALSAR シリーズ），降雨・雲レーダ（DPR/CPR）などに要求が集中している。
- ②これらのセンサは既に世界をリードするレベルにある。
- ③これらのセンサの設計・製作・運用，アルゴリズム開発，精度検証などの技術を継承・発展させるためには，ミッションの継続が必要不可欠である。
- ④ミッションの継続と相互検証によって気候データ（特に ECVs）の作成に貢献する点も重要な要求である。
- ⑤民間・産業利用を拡大するためにも，ミッションの長期的な継続を保証することが必要不可欠である。
- ⑥これらのセンサを搭載した中型衛星ミッションを2～3年間隔で打ち上げることを要望する。それぞれのセンサについて，それまでの実績に基づいた改良と高機能化を図る。さらに，センサ開発を含む衛星製作過程の効率化につながり，衛星製作費用の低減が実現され，結果的に日本の宇宙産業の国際競争力強化につながる。
- ⑦宇宙基本計画の工程表によると，地球観測に資する衛星計画は，ひまわり，先進光学，レーダ衛星，温室効果ガス観測技術衛星であるが，このうち，AMSR2/GCOM-W（2012年），DPR/GPM（2014年），SGLI/GCOM-C（2016年），EarthCARE（2018年）に関係する重要な観測項目をカバーする衛星計画は，2018年（平成30年）以降，空白となっている。一方，欧米・中国では，地球温暖化等の気候変動，人間活動に伴う環境変化，生活安全保証のための対策に利用すべく多くの地球観測衛星計画が建てられており，これらの国際情勢から考えても，我が国の平成30年以降の地球観測計画は極めて不十分である。

以上