

報告書

地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析

2016. 5. 31

地球観測 TF 地球科学研究高度化 WG

目次

1. はじめに.....	4
2. 総論.....	5
3. 各論の要点.....	10
以下、各論で得られた要点をまとめる。.....	10
(1) 高解像センシング.....	10
(2) 全球光学イメージング.....	12
(3) 全球マイクロ波センサ.....	14
(5) ライダ.....	18
(6) 大気化学.....	19
(7) 温室効果ガス.....	20
(8) 静止衛星.....	21
(9) 散乱・測地・重力・GPS.....	22
4. 各論.....	25
4.1. 高解像センシング.....	25
4.1.1. センサのミッション	25
4.1.2. 現状分析	26
4.1.3. 技術動向	28
4.1.4. 将来ミッションの在り方	29
4.2. 全球光学イメージング.....	31
4.2.1. 全球光学センサ概要	31
4.2.2. 分野における重要な科学的課題	34
4.2.3. 望まれる全球光学センサの仕様（観測頻度、観測波長、空間解像度など）と周 辺システム開発、その達成時期（2040年まで）	35
別途資料1 Jトレイン型 複数衛星の有機的な運用	37
4.3. 全球マイクロ波センサ.....	39
4.3.2. 現在のマイクロ波放射計	39
4.3.3. 利用の現状	40
4.3.4. 将来方向	40
4.3.5. 日本の強み	41
4.3.6. 構想	42
4.3.7. 工程	42
4.4. 降雨・雲レーダ.....	45
4.4.1. はじめに	45

4.4.2.	現状分析と展望	45
4.4.3.	想定されるシナリオ	47
4.5.	ライダ	55
4.5.1.	はじめに	55
4.5.2.	現状分析と展望	55
4.5.3.	想定されるシナリオ	57
4.6.	大気化学	61
4.6.1	大気化学分光センサ	61
4.6.1.1.	これまでの歩みとこれからの方向性	61
4.6.2.	静止衛星からの大気環境観測：Geostationary Monitoring of Air Pollution(GMAP)-Asia	64
4.6.3.	低軌道周回衛星（ISSを含む）からの大気環境計測：APOLLO、uvSCOPE 提案	66
4.6.4.	まとめ	69
4.7.	温室効果ガス	73
4.7.1.	はじめに（経緯、現状）	73
4.7.2.	現在進行中の計画	73
4.7.3.	科学的目標（観測ターゲット）	74
4.7.4.	技術的目標	75
4.8.	静止衛星	78
4.8.1.	背景	78
4.8.2.	日本の静止気象衛星計画	78
4.8.3.	現行「ひまわり8・9号」搭載観測測器	79
4.8.4.	今後の計画	79
4.8.5.	次期静止気象衛星「ひまわり10・11号」に向けての仕様検討	80
4.9.	散乱計・測地・重力・GPS	83
4.9.1.	散乱計	83
4.9.2.	高度計	84
4.9.3.	重力・測地	85
4.9.4.	GPS	87
5.	分析作業部会 名簿	93

1. はじめに

タスクフォース会合・リモートセンシング分科会（以下、TF）では、23 の学会から参加をいただいて、衛星による地球観測の将来計画に関する様々な案件に関するボトムアップの議論を行い、提言や幹事会声明を出してきた。最近では、「我が国の地球観測の将来計画に関する提言」が2015年9月に出された。このような活動や学術会議地球観測小委員会、文科省地球観測戦略コミュニティにおける議論を通して、コミュニティとして、何を科学的課題として追求するか、どのような衛星観測システムが重要かに関するメッセージが出始めた。TFでは、現在、内閣府をはじめとする各省庁・関係機関に、このようなボトムアップ提案の説明に回っている現状である。

さて、今後、早急に議論すべき課題は、世界 55 機関で 131 の地球観測衛星計画が企画されている状況の中で、重要な科学的課題と日本の強みを活かした有効な我が国の衛星計画と国際連携を構築してゆくことである。宇宙基本計画の新工程表には「水循環変動観測衛星」の後継機の検討項目がやっと加えられたものの、相変わらず、「その他のリモセン衛星」の将来計画は空白のままであるため、具体的に、これらの将来像を描くことが非常に重要である。世界でも、目下、2020-2040 年期の地球観測計画が盛んに検討されている。

そこで、TF のワーキンググループの一つである「地球科学研究高度化ワーキンググループ」では、ボトムアップで議論してきた科学提案と、世界の地球観測計画を分析することによって、具体的に、何が足りないのか、何が冗長なのか、時期も鑑み何が日本貢献として重要なのか、国際分担はどうあるべきかを検討した。そのために、地球観測衛星のハードウェアとサイエンスの両面に深い知見を持つ有識者に集まっていただき、本報告書を作成した。

地球科学研究高度化 WG

中島映至・本多嘉明

2. 総論

下田陽久、中島映至、本多嘉明、笠井康子、若林裕之、中村健治、高橋暢宏、杉本伸夫、今須良一、操野年之、江淵直人

地球観測センサは高分解能センサと中分解能のグローバルセンサ、静止軌道センサに分けられる。このうち高分解能センサは更に光学センサと SAR に、中分解能センサはシステム観測（監視）、すなわち主に基本気候変数（Essential Climate Variable: ECV）を対象とするセンサと、プロセス研究を対象とするセンサに分かれる。なお、以下では触れないが、これらのセンサは地球科学だけではなく、地図作成、地質調査、減災、インフラ監視、農業、林業、漁業、気象予測、森林火災、火山爆発、更には公衆衛生等多くの実利用分野でも利用されている。

高分解能光学センサでは、分解能と観測幅がトレードオフの関係にある。観測頻度を上げようすると、観測幅を広げることになるが、データ伝送レートの制約などから分解能はそれほど上げられない。また、この分野では国（地域）が開発するセンサと商業衛星が存在する。商業衛星が主として高分解能に特化して価値を高めようとしているのに対して、国が担当する分野は、商業化が難しい広観測幅や高頻度機能を提供する必要がある。このような衛星計画には Landsat、Sentinel-2、我が国の先進光学衛星の計画がある。Landsat は 15/30m、Sentinel は 10m の分解能で持ち、観測幅はそれぞれ 180km、290km となっている。一方、我が国の先進光学衛星は 0.8/3.2m の分解能、70km 観測幅を設定している。この選択は、欧米が目指すオープン・フリーなデータポリシーを持つ衛星より分解能で優り、観測幅で劣っている。今後の方向としては、観測頻度を上げるため、より広観測幅とするか、あるいは、複数衛星、海外との協力などを考慮すべきではないかと思われる。

SAR に関しては、他国の SAR が C あるいは X バンドであるのに対し、現在唯一の L バンド SAR は我が国の PALSAR2 のみである。今後、米国が NISAR に L バンド SAR を搭載する計画であるが、我が国としては今後とも L バンド SAR に傾注すべきであろう。L バンドの分解能は電波の制約から現在ほぼ限界に達しているが、観測幅の拡大、S/N、S/A の改善等が求められる。

中分解能センサでは、我が国の技術的優位性を保つのが第一の戦略であるが、加えて、新規技術への挑戦も必要である。全球光学センサでは、米国が MODIS の後継として NPP 及び JPSS 搭載の VIIRS、欧州が Sentinel-3 及び、METOP-SG の METImage、3MI のシリーズがある。これらに対して、GCOM-C1 の SGLI は近紫外チャンネルの搭載、高分解能、偏光観測機能の搭載などの面で上回っており、より高性能な後継センサを継続的に上げていくことにより、優位性を継続できる。また、これを中心としてより多くのセンサによる同時観測を目指すコンステレーションも重要な選択肢になっている。

マイクロ波放射計はイメージャとサウンダに分かれる。前者は高分解能、及び様々な周波数での観測を行うのに対して、後者は主として気温と水蒸気の鉛直分布の導出に特化した周波数で観測する。イメージャに関しては、米国に SSM/IS、GMI、欧州に METOP-SG の MWI の計画があるが、我が国 AMSR-2 の性能が圧倒的に高い。この分野でも継続性が極めて重要なため、AMSR-2 後継機の早急な打ち上げが必要である。更にこの優位性を継続するため、較正の高度化、アンテナの大型化等が期待される。サウンダに関しては、米国の ATMS、METOP の AMSU、METOP-SG の MWS 等があり、我が国に開発実績が無いことも踏まえ、海外センサーの利用戦略が良いのではないかとと思われる。

雲・降水レーダは我が国が優れている分野である。降水レーダは我が国のみが保有する技術で有り、降水の 3 次元観測、陸域の高精度観測などを成功させてきた。これらは気象・気候・地表面の監視の観点で継続することが国際的にも要望されており、後継機の開発が必要である。また、気象庁が数値気象予報に取り入れたことを考慮すると、観測幅の拡大、小型降水レーダのコンステレーションによる観測頻度の増大などが期待される。雲レーダに関しては、NASA について 2 機目の開発であるが、ドップラー観測機能の付加、アンテナ開口の拡大等により、最高性能の雲レーダを開発している。今後は 3 次元雲レーダの開発が期待される。また、この分野では、雲、降水レーダの同時搭載が求められているが、太陽同期か非同期かなど、軌道の問題もあり、更に議論が必要である。

ライダに関しては、現時点で成功しているのは米国だけで有り、CLIPSO 搭載の CALIOP 及び ISS 搭載の CATS が運用されている。何れもエアロゾル観測を目的としたミーライダである。その他、米国では、ISS 搭載樹高観測ライダの GEDI 及び氷床観測用の IceSat-2 が計画されている。欧州では風観測用のドップラライダ、ALADIN/ADM-Aeolus とエアロゾル観測用の EarthCare 搭載 ATLID が計画されている。我が国では MDS 搭載 ELISE が開発途中で開発打ち切りとなり、その後計画がなかったが、現在 ISS 搭載 MOLI の研究が始まっている。ライダは重要な宇宙技術で有り、我が国としてもこの機会を逃さず、MOLI を開発すると共に、今後のドップラライダ等の開発も進める必要がある。

大気化学センサは 1970 年代から成層圏オゾン層破壊と気候変動の監視を目的として世界各国で数多くの衛星が打ち上げられた。これらの多くは寿命を迎え、軌道上において現存しているのは、カナダの SciSAT 搭載 ACE、米国 AURA 搭載 MLS、スウェーデン・カナダの Odin 搭載 SMR/OSIRIS 衛星である。世界的な今後の動向は大気汚染監視に向いており、AURA 搭載 OMI、TES 及び NPP 搭載 OMPS が運用されている。今後の計画では、JPSS-1 及び 2 に OMPS が搭載される予定の他、24 時間の日変化がモニタできる静止衛星が中心となってきた。米国では静止衛星搭載大気化学ミッションとして TEMPO、欧州では MTG に Sentinel-4、アジアでは韓国の GEMS が 2018~2019 年の打ち上げを予定している。また、低地球軌道 (LEO) 衛星においては欧州 ESA が気象衛星シリーズとして Sentinel-5P、その後、METOP-SG に IASI-NG と

Sentinel-5 を打ち上げる予定である。我が国では、ILAS、ILAS2、IMG、SMILES 等、90 年代末から 2000 年代初頭にはオゾン層破壊観測を主目的としたセンサが実績を上げてきたが、アジアの大国であるにも関わらず大気汚染実態把握に関する打ち上げ計画に予算配分されていないのが現状である。今後、我が国としては、センサの小型化による多数展開や静止軌道の利用により、時空間的に細やかな汚染大気の実態把握と予測を行って行くべきである。

温室効果ガスセンサに関しては、我が国が GOSAT 搭載 TANSO-FTS で最初の専用センサを開発し、二酸化炭素 (CO₂) 及びメタン (CH₄) の観測で、高精度を達成している。その後米国で OCO₂ が上がり、OCO₃ も ISS 搭載で計画されている。欧州では CarbonSat が採択されず、CNES が microCarb の開発を計画している。それに対し我が国は、GOSAT-2 の開発を開始しており、更に後継機が続く予定である。海外のセンサをみても、GOSAT の性能が最高であり、今後も海外衛星の標準となり続けられると思われる。GOSAT により、二酸化炭素とメタンの気柱量やクロロフィル蛍光の観測が可能であることが世界で始めて実証され、世界的に唯一、6 年以上の衛星データが取得されている。今後、全球光学センサとの組み合わせで炭素循環の理解がより進展すると期待される。将来の開発要素としては、観測ポイント数の増加、更なる S/N の増加などがある。赤外サウンダに関しては、米国が NPP、JPSS に CrIS、欧州が METOP の IASI、METOP-SG の IASI-NG が計画されており、長期の観測が可能となっている。わが国でも GOSAT の TANSO で赤外観測可能ではあるが、海外に比べて観測点数が圧倒的に少ない。今後検討するのであれば、静止衛星用であろう。

マイクロ波散乱計に関しては米国の ADEOS 搭載 NSCAT、ADEOSII 搭載 SeaWinds、QuikScat 搭載 SeaWinds、ISS 搭載 RapidScat の Ka バンド散乱計、欧州の METOP 搭載 ASCAT の C バンド散乱計が運用中である。欧州では更に METOP-SG に ASCAT 後継の SCA が搭載される予定である。これ以外にはインドが Oceansat-2 に Ka バンド散乱計を搭載したが、運用中止となった。インドは今後も Ka バンド散乱計を上げる予定である。欧州の散乱計は棒アンテナを用いるため、観測幅が狭いが、米国、インドは回転式のパラボラを用いているため、1 日でほぼ全球の観測が可能である。今後も欧州、インドで最低 2 機の散乱計が運用されれば、実用的な地球観測システムが構築されると思われ、我が国での新たな開発の優先順位は低いと思える。

高度計に関しては、JASON シリーズの精度が高く、更に今後も継続する計画であるため、高精度観測には問題が無い。更に、若干精度は落ちるが欧州の Cryosat2、Sentinel-3 の SRAL 等が有り、直下型高度計の観測システムは充実している。一方、合成開口技術を用いた面 (2 次元) で観測する高度計の開発が行われている。米国は SWOT を 2020 頃打ち上げの予定で有り、我が国でも COMPIRA の研究が行われている。観測幅はそれほど大きくないが、漁業等には有効利用される可能性がある。

重力観測に関しては NASA の GRACE が大きな成果を上げた。今後、後継機が計画されているが、将来的にはより精度の高い重力観測が行われると思われる。現時点で我が国には重力観

測の経験はほとんど無いが、将来の高精度観測に必要な要素技術は有しているため、将来的には国際共同開発の可能性もある。

GPS 掩蔽に関しては、台湾と NOAA の共同により、12 基の衛星が打ち上げられる予定である。このほか米国、欧州の一部の衛星にも搭載される。気象庁もこれらのデータを使用するため、我が国としても、一部の衛星に搭載すべきではないだろうか。

静止衛星は、連続観測という周回衛星にはない特性を有している。全球をカバーするためには 5 基程度の衛星が必要であり、我が国ではひまわりがその国際分担の役割を果たしている。気象観測に関しては、WMO が高性能イメージャ、赤外サウンダ、雷センサを推奨している。このうち高性能イメージャに関してはひまわり 8 号が、世界初の搭載衛星となった。この後、米国の GOES-R、欧州の MTG も同様のセンサを搭載する予定である。しかし、サウンダと雷センサはひまわりに搭載されておらず、今後の開発が必要である。一方、気象以外の分野では、高分解能光センサ、マイクロ波イメージャ、ミリ波、サブミリ波観測、降水レーダ、大気化学センサ等の要望が挙がっている。中国は静止気象衛星を予備機 1 機を含めて常時 3 機運用しており、韓国でも 2011 年以降、静止気象衛星を運用しており、その他、インド、ロシアも静止気象衛星を運用していることから、アジア・オセアニア地域に 関しては、世界的 により充実した観測網が維持できることが期待される。この観点でどのような国際分担をするかの国際議論が必要である。

以上の分析から得られる結論と提言をまとめる。

地球観測センサは、社会に貢献するために社会的使命をもつ観測と、地球システムの未解明課題に挑戦する研究に資する科学的観測を併せて行ってきた。例えば、地球温暖化などの気候変動問題では、その科学的解明と対策のために、継続的な観測は欠かせない。

本分析結果から、我が国がリーダーシップをとって観測を継続すべきセンサと新たに取り組む価値のあるセンサや基礎技術が浮かび上がってきた。

我が国が優位性をもって継続すべき（国際的な責務もある）センサとしては、広幅観測の高分解能光学センサ、L バンド SAR、中分解能センサ、マイクロ波イメージャ、（雲）・降水レーダ、温室効果ガスセンサ、大気化学センサが挙げられる。また、新たに取り組むべきものとしては、ライダー、高度計などのセンサ技術が挙げられる。静止気象衛星は日常の気象予報に定着している一方で高分解能化・多チャンネル化の流れが加速すると考えられたため、高機能化を図りながら継続して観測するべきである。さらに、低軌道衛星でのみ可能であった技術もその進展と効果を考慮したうえで静止衛星への移行も検討すべきである。センサの小型化は重要な技術課題であり、GPS のように多数の衛星に搭載することにより地球科学に貢献することは可能であるが、センサによっては原理的に小型化が不可能なものもある。それぞれのセンサの国際社会での優位性・有用性や我が国の衛星戦略における重要性の詳細については各論を参照されたい。

これらのセンサによる観測を実施することを提言する。これらを組み合わせて 2020 年～2040 年期の衛星開発のロードマップを早急に作るべきであるべきである。我が国の体力と世界からの期待に対応するためには、2～3 年に 1 機の打ち上げ努力が必要である。

これらの計画を持続可能にするためには、小型化等により開発コストをこれまでの 8 割程度に抑えることや、JAXA 以外の資金の活用および国際協力ミッションの更なる推進が必要である。また、このような長期計画にとって衛星の長寿命化の努力が重要である。TRMM は 17 年を超えて運用している実績がある。

3. 各論の要点

以下、各論で得られた要点をまとめる。

(1) 高解像度センシング

- ・ 高解像度センサは精細なデータ取得が可能であるため、多目的なミッションを有する。
- ・ 森林や氷河などの把握においては、高解像度データは不可欠のものとなっている。
- ・ 世界各国で、災害、安全保障、農業などの利用を継続的に実施するために整備計画が立てられているが、衛星の寿命が5年から10年程度に延びていることもあり、2020年代の計画はこれからである。
- ・ オープン・フリーデータを供給する衛星として、Landsat や Sentinel が登場している。
- ・ 観測頻度の向上は農業利用を中心として強い要望が出されており、重要な仕様となっている。
- ・ 超小型や小型の衛星を多数用いることによって、観測頻度を向上させるプロジェクトがいくつかの民間企業で進められている。
- ・ 解像度を高くした場合、刈幅が小さくなるため、観測頻度が低いことが問題となるが、コンステレーションや衛星の組み合わせによって解決されている。どのような観測システムを開発するかは、各国の戦略が問われるところである。機数、コンステレーション、高刈幅化の組み合わせを議論する必要がある。
- ・ 実利用においては、地球科学上の社会実装が求められる。最も細かいスケールのデータ利用として、最も産業に近い場所に位置する。とりわけ、農業、国土管理、地域防災、社会基盤は有力な適用分野である。
- ・ 光学センサ技術については、パンクロマチック及びマルチスペクトルを基本構成とし、目的に合わせたバンド追加が行われている。
- ・ 熱赤外観測を行うセンサは多くはない。波長数を非常に多くしたものとしてハイパースペクトルセンサがあるが、現時点では実証目的段階にある。
- ・ 光学センサの刈幅を広くするためには軸はずし三枚鏡方式、分解能を高めるためにはコルシュ方式が採用されている。
- ・ 三次元情報はステレオ視によって得られるが、全球の標高データベースが整備されつつあるので、災害時の地形把握や気候変動に伴うデータベースの更新が主目的になりつつある。機能のフル実装、低解像度実装、短基線実装、複数機実装などを比較検討する必要がある。
- ・ 大型光学望遠鏡で静止軌道から観測することで常時観測が可能であり、コストと利便性の面で戦略検討を行う必要がある。
- ・ 合成開口レーダ（SAR）技術では、高分解能化、広観測幅、多偏波観測、複数衛星を使用した干渉 SAR としての性能向上が考えられる。

- ・ 日本に期待されている SAR はその実績から L バンド SAR であり、L バンド帯で使用可能な帯域 85MHz が高分解能化の制限となる。衛星進行方向については衛星視線方向とのアスペクト比を考慮してアンテナサイズを決定し、さらなる高分解能化はスポットライトによって実現する。森林モニタリングや干渉 SAR による地盤変動の観測継続、極域の海水や氷河の高分解能モニタリングなどにおいて期待が大きい。
- ・ SAR によって広い観測幅を実現するためには、従来は衛星視線方向のアンテナビームを切り替えることによって観測幅を分割する方式 (SCANSAR) が使われてきたが、衛星進行方向の分解能が低下するという問題があった。次世代の SAR においては、衛星進行方向の分解能を犠牲にしないデジタルビームフォーミング技術 (DBF) によるアンテナ多ビーム化が新技術として期待される。
- ・ SAR の多偏波観測は、観測対象の散乱メカニズムを把握するために有効な観測手段である。
- ・ 将来の高分解能衛星は、高品質データと高頻度化がキーワードとなる。そのため、基幹衛星と小型衛星の組み合わせが好ましい。
- ・ 基幹衛星のデータ量は増大方向にあるため、データダウンリンクも含めた宇宙システムとしての検討が必要である。

(2) 全球光学イメージング

- ・ 気候変動影響の顕在化の把握と対処が人類社会の共通の目的であり、そのためには、地球システム統合モデルが必須であり、その性能向上には主要気候変数（ECV）の長期継続観測値が必要不可欠である。
- ・ ECVの取得には全球光学センサでは不可能な高空間分解能、高波長分解能の光学センサが不可欠であり、我が国の全球光学センサは世界最高水準にある。
- ・ 世界の全球光学センサの多チャンネル化、高解像度化が進んでいるが、この方向性は我が国のGLIなどの全球光学センサが作ったといってもよい。
- ・ 全球光学センサは、全球気候変動監視、全球陸域生態系監視、陸域の熱赤外観測などに役立つ。学術的な分野では、生態学、水産学、海洋学・海洋生態学・生物地球化学、大気（雲、エアロゾル）、雪氷学（積雪、海氷）など実に多岐に渡って役立つ。そのために欧米諸国は、途上国との国際問題や地球環境問題における国際的主導権を確保のためにも、全球光学センサによる継続的な観測を計画している。
- ・ アクティブセンサ、マイクロ波センサなどの観測データとの複合的な観測は、地球システム統合モデルの飛躍的な進展に繋がると期待される。従って、積極的複数衛星運用（Jトレイン型：別途資料1参考）による観測を実現する戦略が重要である。その中心機能を全球光学センサ搭載衛星が備えることで、このような観測分野で世界最先端を目指すことができる。
- ・ 地球システム統合モデルの高精度化に資する長期観測が必要である。
- ・ 積極的複数衛星運用による詳細データが物理量（クロロフィル蛍光、形質、高精度バオマスなど）の精度を飛躍的に向上させることが期待できる。
- ・ 恒常的な地表面温度観測は、大規模森林火災、植物の水ストレス、農業生産や公衆衛生の支援情報などに役立つ。
- ・ 海洋環境と生態系の時空間的变化、資源管理に資する情報を取得し、持続可能な水産資源の利用につなげる必要がある。
- ・ 生物多様性・窒素循環などの課題に大いに役立つ情報が得られる。
- ・ 気候変動予測において最大の不確定要素となっている雲の詳細観測が重要である。具体的には、雲種別分布とその量、雲成長プロセスの解明に繋がる雲特性変化の詳細観測などが必要である。
- ・ 地球の放射収支において不確定性を有している大気中微粒子（エアロゾル）の分布とその量、種類の観測、雲成長プロセスへの影響過程の解明に繋がるエアロゾル観測が重要である。

- ・ 近年の地球温暖化に伴いグリーンランド氷床のアルベド低下と融解域の拡大が進行しており、長期継続した極域雪氷の監視と北極海氷融解との関連解明が重要な課題となっている。
- ・ 我が国の地球観測資産を考慮すると、積極的複数衛星運用（Jトレイン型：別途資料1参考）の実現に向けて我が国が主導的役割を果たせると考えられる。全球光学センサ工程表に示すように2030年までは世界最高水準のGCOM-Cシリーズの継続で長期継続観測を実現し、その中で積極的複数衛星運用の基幹衛星および随伴衛星の製造技術を育成し、運用技術の試験開発を行う戦略が有効である。
- ・ 静止衛星軌道の地球観測（気象観測を含む）と光データリレー衛星と積極的複数衛星運用を実現し、アジア諸国の参加を促し、日本の宇宙ビジネス拡大に貢献する。

(3) 全球マイクロ波センサ

- ・ イメージャ、サウンダは成熟したセンサとなっており、その現業利用のために、米国、ヨーロッパ、ロシア、中国でシリーズ化されつつある。
- ・ 日本の AMSR、AMSR-E、AMSR2 シリーズは世界最高水準の性能を有している。
- ・ AMSR2 の高い空間分解能と 6、7GHz チャンネルはユニークかつ貴重である。
- ・ 近い将来のセンサの大きな変更は考えにくい。より大型あるいは周辺メッシュ型アンテナ、受信機の小型化など、AMSR2 の改良型を目指すべきである。
- ・ 低周波（L バンド、P バンド）の放射計は土壌水分や海面塩分濃度の測定に有効であり、
- ・ 開発研究を進めるべきである。AMSR2 後継の一部としても考えられる
- ・ 地球気候と環境変動の検出では、長期にわたる安定したデータが必要である。このため、校正は非常に重要である。日本では AMSR 以来、地道な努力が積み重なっており、これは強みである。しかし、他のマイクロ波との相互校正は遅れている。マイクロ波イメージャコンステレーションを主導するならば、この方面の努力が必要である。
- ・ コンステレーションに寄与できる小型マイクロ波放射計も開発すべきである。
- ・ 1 台の観測では不十分である。観測頻度を上げるために、各国のマイクロ波放射計（イメージャー）のコンステレーションを前提とすべきである。これは精度の高い地球環境データを得るためとともに、短期予報、防災にとっても重要である。
- ・ コンステレーションのコア（reference standard）として AMSR2 後継機を位置づけることが適当であろう。
- ・ 大気観測では太陽非同期軌道が望ましいが、この場合は極域とくに北極海が観測できなくなる。また他のマイクロ波放射計との相互比較のためには、コア衛星は太陽非同期軌道上の方が同時観測が可能となり良い面がある。。
- ・ しかし、これまでの観測の継続、極域の観測を考えると、これまで通りの太陽同期軌道が適当であろう。大気は小型マイクロ波放射計を含めたコンステレーションによることが適当であろう。
- ・ 大きな流れとしてモデルとの融合がある。特に素過程についてはモデルによる研究が不可欠である。
- ・ サウンダについては日本は遅れているが、従来型のサウンダは成熟しているので新たに参入することは適切ではなからう。
- ・ 静止軌道からのイメージャを開発目標として挙げておくべきである。
- ・ イメージャは大気については降水レーダ、雲レーダとのトレイン観測が望ましい。
- ・ ミリ波・サブミリ波は対流圏の氷雲、水蒸気の観測のフロンティア技術として期待がかかる。受信機の小型化などに向けて開発を進めるべきである。
- ・ ミリ波・サブミリ波の静止軌道からの観測は将来に向けての大きな開発目標となる。

- ・ 掩蔽法（GNSS occultation）の受信機開発は大きな開発要素は無く、また国際協力により成果が期待できるので開発を進め、各種の衛星に搭載すべきである。

(4) 降雨・雲レーダ

- ・ 降水レーダも雲レーダも TRMM(1997-2015)、GPM(2014-)、EarthCARE(2018-)において技術的に世界をリードしており、特に降水レーダの技術的には成熟している。
- ・ これらのミッションは日米・日欧、または国際的な連携で実施しているが、中心センサ(レーダ)は日本に依存しており、将来的にも日本への期待が高い。
- ・ TRMM や GPM 搭載の降水レーダは全球の降水推定、特にマイクロ波放射計の推定精度の高精度化に大きく貢献し、それが全球降水マップ(GSMaP)の実現と利用拡大に結びついた。
- ・ TRMM、GPM 観測は、全球スケールの降水観測データの標準として気候研究、科学研究に既に広く利用されている。
- ・ 降水と雲に伴う非断熱加熱は、大気大循環を決める基本要素のひとつであり、RMM/PRにより初めて3次元潜熱加熱推定が実現された。
- ・ 雲レーダによる技術はEarthCAREにおいて世界初のドップラー速度観測の実現を目指しているが、将来的にもドップラー速度観測、偏波観測の技術開発は必要になる
- ・ 雲レーダ技術は、現在、米国のNASA/JPL(CloudSat)と日本のみで技術を有しており、地球温暖化に伴う放射収支の評価のためにも継続観測が日米に期待されている。
- ・ 現在、最新の技術を衛星搭載降水レーダに応用するだけで、GPM 搭載レーダの倍の走査幅でかつ10倍から100倍の感度は達成可能である(DPR-2)。
- ・ 降水観測ミッションの1つの方向性は、TRMM-GPMと続いた成熟したレーダ技術をベースに小型化・低価格化を実現することであり、海外展開が期待できる。
- ・ GSMaPの降水推定をマイクロ波放射計から、将来の高機能レーダによる推定へ転換することにより高精度化に実現でき、防災・農業・公衆衛生などのニーズに応えられる。
- ・ 将来は静止衛星にレーダを搭載する技術も実現可能となり、宇宙からの常時観測により現業気象予報モデルへの直接的な入力値としての利用も実現できる可能性がある。
- ・ 人工衛星搭載の雲・降水レーダによる観測は、地球温暖化問題などにおける雲・降水の全球情報の標準となり、数値気候モデルとともにこの分野の研究を支えることができる。
- ・ 数値モデルへのレーダデータ同化は技術的な難しさがあったが、最近ではGPM/DPRの同化も気象庁の数値予報で利用され始めており、さらなる発展が期待される。
- ・ 地球温暖化により今後増加が予想される極端気象(豪雨・スーパー台風・洪水・干ばつなど)の監視や予測にとって、衛星からの雲・降水の観測は欠かせない。
- ・ 地球の放射収支の評価において、生成条件や環境場により大きく放射特性が変化する氷晶(雪結晶)等の観測には、EarthCARE等の継続的な雲レーダ観測が必要である。
- ・ 米国ではDecadal surveyに向けて3周波レーダを搭載したCloud and Precipitation Processes Mission(CaPPM)の検討を進めている。これは、気候予測に大きなインパクトがある雲からの降雨生成プロセスを主目的としているが、日本としても、CaPPMへのレーダ

提供等による参画等を視野に入れるべきである。

- ・ 雲レーダと降水レーダ等の融合は、衛星観測による従来型の物理量推定から、物理量を組み合わせた素過程の診断への発展を可能にする。数値気候モデルの評価においても、「パフォーマンス志向」から本質的に物理素過程を検証する「プロセス志向」への変化が見られ始めた。
- ・ 雲・降水レーダの組み合わせは、雲放射加熱と降水潜熱加熱の双方を同時に推定可能にするため、気候学研究に非常に有用である。
- ・

(5) ライダ

- ・ 宇宙からのライダ観測はスペースシャトルによる 1994 年の LITE に始まり、氷床高度の測定を目的とした GLAS/ICESat(米 2003-2010)、雲・エアロゾル観測を主目的とする CALIOP/CALIPSO(米 2006-)へと引き継がれてきた。現在、CALIOP と宇宙ステーション搭載大気ライダ CATS が運用中である。
- ・ CALIOP は約 10 年を経過した現在でも良好な観測を継続し、従来、短寿命と考えられていたライダ観測技術に革新をもたらした。その利用は、雲・エアロゾル研究に大きなインパクトをもたらした。
- ・ CALIOP に続き、風観測ライダ ALADIN/ADM-Aeolus (欧)、雲・エアロゾルライダ ATLID/EarthCARE (欧日)が計画されている。また、GLAS/ICESat の後継として ATLAS/ICESat2(米)が計画されている。
- ・ CALIOP の後継が必要とされる中で、雲・エアロゾル・放射観測ミッションが計画されているが、それ以降の計画は具体化していない。
- ・ GLAS は植生観測にも利用されたが、植生観測を主目的として、ISS 搭載植生ライダ MOLI(日)と GEDI(米)が進行している。MOLI は近接するマルチビームを用いて地面の傾斜を推定し、樹高やバイオマスの計測精度を向上するユニークなライダである。
- ・ MOLI はライダによる宇宙からの地球観測の日本の最初のミッションとなるもので技術的観点から重要である。MOLI は大気観測の機能を持たないが、後継ミッションで後方散乱ライダとしての大気観測機能を持たせることは可能であり、植生観測と同時に CALIOP の後継としての役割も果たすことが期待される。
- ・ コヒーレント・ドップラーライダによる風の 3 次元測定や差分吸収ライダによる二酸化炭素などの温室効果ガスの測定についてもライダ手法の利点が期待され、米国、欧州、日本で技術的な検討が進められている。

(6) 大気化学

- ・ 大気中に存在する微量成分の衛星観測はこれまで、オゾン層破壊、地球温暖化、大気汚染などの地球環境問題の現象実態把握とそのプロセスの理解のために行なわれることが多く、常に国際的施策と共に歩んで来た。
- ・ 1970 年代後半からオゾン層破壊の問題が発生すると、TOMS, GOME などの衛星直下視型の可視紫外分光観測が盛んに行われ、これらにより「オゾンホール」が捉えられた。1987 年のモントリオール議定書成立後はプロセス研究が盛んになり、太陽掩蔽観測センサ（可視紫外、赤外、マイクロ波）によるオゾン破壊物質の衛星観測の黄金期を迎えた。ESA の Envisat 衛星搭載の MIPAS, SCHIYAMACHY、NASA の AURA 衛星搭載の MLS、カナダの SciSAT 搭載 ACE、米国 AURA 搭載 MLS、スウェーデン・カナダの Odin 搭載 SMR/OSIRIS 衛星など世界で 20 を超える。また、NPP 搭載 OMPS が運用されている。今後の計画では、JPSS-1 及び 2 に OMPS が搭載される予定である。
- ・ オゾン層破壊現象の観測センサにおいて、わが国では ADEOS 搭載の ILAS（赤外掩蔽）、ILAS-II（赤外掩蔽）、IMG、国際宇宙ステーション搭載の SMILES（サブミリ波）、など 4 機のセンサ技術を保有している。いずれも分光スペクトルの美しさ（縦軸横軸のキャリブレーション精度など）では世界トップ技術を誇る。
- ・ その後、日本は世界でもいち早く温暖化問題に舵を切り、地球温暖化では CO₂、CH₄ を観測する GOSAT 衛星を 2009 年に世界で初めて打ち上げた。熱赤外バンド（TIR）と短波長赤外バンド（SWIR）の両バンド搭載は GOSAT だけである。
- ・ 大気汚染施策について、現在、世界では国連環境計画 (UNEP) の主導のもと、世界各国の首脳クラス、環境大臣級会合とともに短寿命気候汚染物質削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ (CCAC) 施策が進んでいる。
- ・ 世界では米国 NASA の AURA 搭載 OMI（可視紫外 Nadir）、TES（赤外放射 Nadir）、ESA の Envisat 搭載 SCHIYAMACHY（可視紫外近赤外 Nadir-Limb）が科学観測衛星として汚染大気観測の先鞭をつけた。今後の計画では、JPSS-1 及び 2 に OMPS が搭載される予定である。
- ・ 今後の計画では、24 時間の日変化が観測できる静止衛星が主流である。米国では静止衛星搭載大気化学ミッションとして TEMPO（可視紫外近赤外）を 2018 年に、欧州では Meteosat Third Generation satellites 搭載の Sentinel-4、アジアでは韓国の GEMS（可視紫外近赤外）が 2018～2019 年の打ち上げを予定している。
- ・ LEO においては欧州 ESA が気象衛星シリーズとして Sentinel-5P、その後、METOP-SG に IASI-NG と Sentinel-5 を打ち上げる予定である。
- ・ 大気汚染衛星観測分野では我が国は大きく遅れており、打ち上げ計画に予算配分されていない。国際宇宙ステーションミッション uvSCOPE が存在するのみである。
- ・ 今後、我が国としては、小型センサの多数展開や静止衛星などを利用し、時空間的に細や

かな汚染大気の実態把握と予測をしていくべきである。

(7) 温室効果ガス

- ・ 二酸化炭素(CO₂)の衛星観測は、熱赤外バンド(TIR)による上空濃度観測が最初である。その後、短波長赤外バンド(SWIR)による鉛直平均濃度観測が行われた。両バンド搭載はGOSATだけである。
- ・ CO₂、メタン(CH₄)に特化した衛星はGOSATが世界初である。続いてOCO-2(ただしCO₂のみ)も観測された。
- ・ GOSATは、データ数は少ないが、圧倒的な高精度観測により、他国衛星の校正規準となっている。今後も、S/N向上などによりトップ精度を維持、サングリント以外の海上、低照度の高緯度への観測域の拡大等を進めて行く必要がある。
- ・ GOSATの最大の目標は、亜大陸規模でのCO₂発生・吸収量推定の誤差の半減であり、一部地域ではこの目標をすでに達成している。
- ・ GOSATは、太陽光励起クロロフィル蛍光(SIF)を初めて捉えた。
- ・ 他国の計画がメガシティー域からのCO₂排出量監視に重点を置く中、GOSAT-2は、それに加え、陸域生態系によるCO₂吸収量の把握を目指すべきである。SIFの利用、陸域生態系モデルの高度化)などの同時利用が我が国の強みになると考えられる。
- ・ GOSATとGCOM-C、GCOM-Wなど日本の他の衛星との複合利用により、SIF、渇水ストレス(WST)、熱放散(PRI)などの植物生理生態学情報を総合的に得ることにより、GPP、NPP推定の高精度化が期待できる。
- ・ 炭素同位体(¹³C)などの測定により、人為・自然起源のCO₂の分離を目指す。
- ・ GOSAT-2では、雲域回避用ダイナミック(インテリジェント)ポインティングなどの新技術が導入される。
- ・ さらなる新技術として、1次元・2次元のアレイ素子を用いたイメージングFTS(GOSAT-I)、可動部の無いスタティックFTS(GOSAT-S)、静止衛星からの温室効果ガスの常時監視を目指す(GOSAT-G)を検討すべきである。

(8) 静止衛星

- ・ 静止衛星軌道からの地球観測は、特に衛星搭載の可視・赤外放射計による観測においては、放射計の多バンド化、高解像度化、高頻度化の技術革新が遅れており、その用途が気象観測に留まっていたが、近年の技術革新により、数年の内に、可視・赤外放射計のみならず、赤外サウンダ及び雷検知装置等、低軌道の地球観測衛星で実現された技術が静止衛星軌道で実現する。
- ・ 静止衛星軌道からの観測により、高緯度地域を除く全球を観測するためには同じ仕様の衛星を5～6機程度、等間隔に配置する必要がある。これに加えて、極軌道衛星による高緯度地域での観測の重なりを利用することで、多バンド・高解像度・高頻度観測を全球で実現することが可能となる。
- ・ 高解像度、高頻度、多ビット数、多バンドなどの観測の高精度化に伴い、観測データ量が飛躍的に増大することが予想され、衛星本体の観測仕様だけではなく、衛星から地上へのデータのダウンリンクについても併せて検討する必要がある。
- ・ 日本の静止気象衛星計画は、NASDA（当時）が静止気象衛星 GMS（Geostationary Meteorological Satellite）初号機を1977年に打ち上げたことにより開始され、現行の「ひまわり8号」は、2016年中に打ち上げを予定している同一観測仕様の「ひまわり9号」と共に、東経140度赤道上で相互バックアップの観測体制を確立し、2029年まで観測を継続する予定である。
- ・ 現行「ひまわり8号」に搭載された高性能可視・赤外イメージャは、他の静止気象衛星運用機関に先駆け、16バンドの波長帯／500m（可視）・2km（赤外）の空間分解能を有し、全球を10分毎に観測することが可能となっている。
- ・ 静止気象衛星による全球観測は、世界気象機関（WMO）が定めた全球観測計画のベース・ラインに準拠した観測仕様の実現が求められており、2025年を指向した要求仕様では、“高性能イメージャ（High-resolution multi-spectral Vis/IR imagers）”による観測の継続と併せて、“赤外ハイパースペクトラル・サウンダー（IR hyper-spectral sounders）”及び“雷検知（Lightning imagers）”の搭載が期待されており、次期静止気象衛星（「ひまわり10・11号」）での実現可能性についても、今後、検討が開始される予定である。

(9) 散乱・測地・重力・GPS

<散乱計>

- ・ 米国では、QuikSCAT/SeaWinds（1999-2009）の成果を受け、2014年のISS/RapidScat以降、後継ミッションの計画はない。
- ・ 欧州では、現業気象衛星 Metop シリーズに ASCAT 散乱計が搭載され、気象予報を主目的とした観測が行われており、今後も後継ミッションが継続する見込みである。ただし、ASCAT は観測幅が狭いため、時間サンプリングが足りないという欠点を持つ。
- ・ インドでは、ScatSat が計画されている。米欧の研究機関の協力によって全球観測が実現し、また観測データの質も著しく向上する見込みである。
- ・ 中国では、HY シリーズに散乱計が搭載される。しかしながら、現在運用中の HY-2A のデータは一般研究者には入手が難しい。今後もデータの公開やその質には疑問が残る。
- ・ 日本では ADEOS、ADEOS-2 に NASA の散乱計（NSCAT、SeaWinds）を搭載した経験があるが、独自開発・運用の実績はない。新たに独自開発に着手しても国際的な優位性を獲得することは難しいと考えられる。
- ・ ADEOS-2 の成果などから、マイクロ波放射計との同時搭載は、研究利用・実利用の両面で意義が極めて高いことが示されている。
- ・ 現実的な方向性としては、米欧やインドなどとの国際協力により散乱計センサ提供を受け、AMSR シリーズの後継機との同時搭載を目指すことが考えられる。

<高度計>

- ・ 直下型タイプの高度計は、計測精度の向上と SAR による高解像度化を目指したもので Cryosat-2（EU）、Sentinel-3（EU）、Jason-CS（EU/USA）などが計画されている。
- ・ 干渉型タイプの高度計は、新技術である 2 次元高解像度観測を行うもので SWOT（US/FR）、COMPIRA（日本）などの計画がある。干渉型は、直下以外のある程度の観測幅を持つことができるため大幅に時間空間解像度を向上させることができ、より高い時空間分解能を必要とする漁業や沿岸海況監視等に利用が広がることが期待できる。
- ・ 欧州や米国で開発運用されている直下型タイプを日本でゼロから開発するのは優位性が持てない。
- ・ これまで JERS-1 や ALOS-1/2 等で培ってきた日本のレーダ衛星技術を活用した干渉型タイプの高度計（COMPIRA/ SHIOSAI）に向けた技術開発を進めるべきである。
- ・ 先行して開発が始まっている米国 SWOT ミッションと利用技術の開発や観測範囲について連携して進めることが効果的である。
- ・ 海面高度計は数値モデルを介した利用で最も大きな力を発揮するため、衛星ミッション単体ではなく、日本が運用中のアルゴバイや船舶観測と共に海洋数値モデルで統合的に活用するといった海洋統合観測システムとして構築するのが望ましい。

<重力・測地>

- ・ 現在稼働中の重力ミッションは双子衛星 GRACE のみで、GRACE では L-L SST にマイクロ波測距および電磁式加速度計が用いられている。
- ・ 現在、2017 年中の打ち上げを目途に、GRACE の後続ミッション（GRACE-F0）の準備が進められている。
- ・ GRACE-F0 の後、2020 年代には実現するであろうレーザー干渉計を用いた衛星重力ミッション（仮に GRACE-II と呼ぶ）では、GRACE に対して 2～3 桁の精度向上が期待されている。
- ・ 2020～2040 年の時期では、重力ミッションの要素技術は、マイクロ波測距、電磁加速度計から、レーザー干渉技術、原子干渉計へと移っていくものと予想される。
- ・ 衛星の小型化や国際協力による複数衛星ミッションの連携が重要である。
- ・ 我が国では、月重力場測定の経験はあるものの、地球での重力ミッションの経験が無いことから、すべて独自のミッション開発を実施することは必ずしも得策ではない。
- ・ 一方、重力場測定で必要とされるレーザー干渉技術は、LISA や DECIGO など、宇宙重力波望遠鏡で必要とされるレーザー干渉技術と共通するもので、また、光衛星間通信も重要な要素技術であるが、これらについては優れた技術を有している。さらに原子干渉計についても、基礎的な研究が実施されている。
- ・ 我が国では、これらの要素技術を利用し、国際協力のもとに地球観測への応用を探ることが効果的と思われる。
- ・ 重力場に限らず地球衛星観測データの高度利用にとっては、解析技術や数値モデリングとともに、その根幹となる高精度な地球基準座標系の維持も重要である。1986 年に打上げられた「あじさい」は、今なお世界の測距局から追尾観測が続けられており、もっとも測距データの多い衛星の 1 つである。
- ・ 地球衛星観測で、地球基準座標系の恩恵を多く受けている我が国では、新たな測地衛星の投入を含め、地球基準座標系への国際貢献も重要な課題の一つである。

<GPS>

- ・ GNSS 掩蔽観測は我が国が獲得すべき小型・安価・高精度な地球観測計測技術であり、既に気象庁により気象予測精度の改善に実用されており、気象コミュニティ等から要望されている。今後も COSMIC 後継群の運用が予定されており、我が国の掩蔽観測への国際的貢献が望まれる。
- ・ 我が国の高精度電離圏計測技術は、COSPAR・URSI 傘下の国際標準電離層タスクグループからも要望されており、その場観測との組合せによる高精度電離圏計測が可能となる（SSA という観点でも重要）。
- ・ 我が国の実現可能な小型・超小型衛星群ミッションとして、掩蔽観測と我が国の国際的

に評価の高い電離圏計測技術による、海洋を含む地圏－大気圏－電離圏総合観測ミッションが提案されており、気象予測精度向上、科学研究、地震前電離圏変動検証への貢献が期待される。

- ・ 情報収集衛星 10 機体制下では、衛星システムの小型・超小型化が継続観測の唯一現実的解と思われる。

4. 各論

4.1. 高解像度センシング

若林裕之（日大）、土田聡（産総研）、岩崎晃（東大）井上吉雄、石塚直樹（農環研）

高分解能センサは光学および合成開口レーダ（SAR）に分類される[1]。前者は Ground Sampling Distance (GSD)が1m以下の Very High Resolution (VHR)、それより GSD の大きな High Resolution (HR) および中分解能のセンサ（ほとんどは Open&Free データ用もしくは実験衛星）に分けられる。後者は用いる電波の周波数でほぼ解像度が決まってくる（帯域も関係する）。

4.1.1. センサのミッション

高解像度センサは精細なデータ取得が可能であるため、多目的なミッションを有する。代表的なミッションの例を下記に記す。実利用に重きをおくもの、地球科学に重きをおくものに分類されるが、互いに密接な関係があるため、単純に分離できるものではない。

- ・ 基盤情報（土地被覆、地形、標高）
- ・ 防災・減災（変化抽出、地盤変動、浸水、不法投棄）[2]
- ・ 農林水産業（精密農業、食料安全保障、森林、漁業）[3]
- ・ エネルギー（地質、埋蔵量、資源管理、汚染監視）
- ・ 気候変動（氷河、流水、洪水）[4]
- ・ 環境（沿岸環境、炭素ストック）

これらのうち、どのミッションに重きをおくかによって、センサの仕様が決定される。図 4. 1. 1 に東日本大震災直後における高分解能センサによる観測実績を示す。そもそもミッションの性質が異なるセンサを用いても、災害状況の把握には十分貢献できる。これが、高分解能衛星センサの多目的なところである。一方、観測頻度やデータ入手時間などには改善の余地がある。

高解像度データは精細な地表面情報を供給し、地球科学にも大きく貢献する。とりわけ、高頻度でベースマップを作製することで、中解像度センサと相補的に理解を含めることができる。例えば、森林や氷河などの把握において、高解像度データは不可欠のものとなっている。

日	2011/3/11	2011/3/12	2011/3/13	2011/3/14	2011/3/15
光学	地震発生 14:46:18	ALOS/AVNIR-2 ALOS/PRISM FORMOSAT-2 RapidEye*2 LANDSAT-7 IKONOS SPOT-5 WorldView-2 ASTER (TIR) THEOS	FORMOSAT-2 RapidEye LANDSAT-5 GeoEye-1 SPOT-5 QuickBird EO-1	ALOS/AVNIR-2 FORMOSAT-2 RapidEye*2 GeoEye-1 SPOT-5 WorldView-1, 2 ASTER HJ KOMPSAT-2 CARTSAT-2 EROS-B	ALOS/AVNIR-2 FORMOSAT-2 IKONOS SPOT-4 WorldView-1,2 EROS-B
合成開口 レーダー	衛星画像はなし	DMC*2 CosmoSkymed*4 TerraSAR-X RADARSAT-2	ALOS/PALSAR CosmoSkymed*4 TerraSAR-X RADARSAT-2	ALOS/PALSAR CosmoSkymed TerraSAR-X RADARSAT-2	ALOS/PALSAR CosmoSkymed*3 TerraSAR-X RADARSAT-2

*2 複数機の衛星による観測回数を示す

図 4. 1. 1 東日本大震災直後の衛星観測

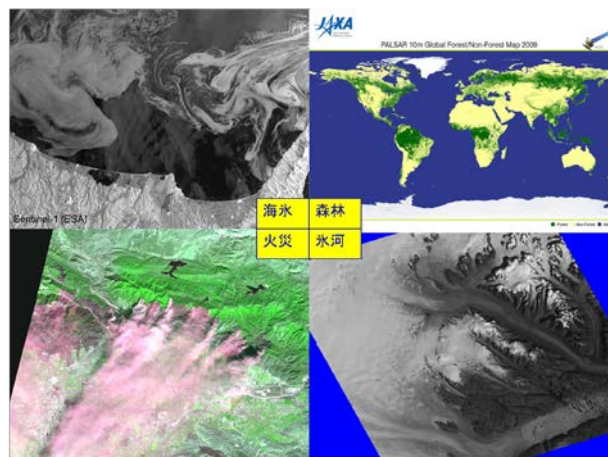


図 4. 1. 2 高分解能衛星のサイエンスへの貢献

4.1.2. 現状分析

これらのセンサは世界各国の宇宙機関および企業が盛んに運用しているため、すべてを列記することは困難であり、代表的なものを議論する。また、長期整備計画についてはあまり議論されていないのが現状である。ただし、災害、安全保障、農業などの利用を継続的に実施するために、整備がなされている。解像度を高くした場合、刈幅が小さくなるため、観測頻度が低いことが問題となるが、コンステレーションや衛星の組み合わせによって、解決されている。

センサの開発にあたっては、ミッションを達成すべく、解像度（GSD）、情報量（波長数：光学、偏波数：SAR）、観測波長、刈幅、回帰日数、観測頻度（姿勢マヌーバ）、三次元情報、機数、などの性能が価格とともに検討される。

近年、Open&Free データを供給する衛星として、Landsat や Sentinel が登場し、前者は 16 日、後者は光学センサの Sentinel-2 が 2 機で 5 日の観測頻度を達成している。これらのデータは陸域全域をカバーし、無料であるために、基本データとして利用することが期待される。また、超小型や小型の衛星を多数用いることで、観測頻度を向上させるプロジェクトをいくつかの民間企業が進めている。

図4. 1. 3に高分解能衛星のロードマップを示す[5]。衛星の寿命が5年から10年程度に延びていることもあり、2020年代の計画はこれからであるといえる。その時期に、どのような仕様のセンサを開発するかは、各国のセンスが問われるところである。

とりわけ、観測頻度の向上は農業利用を中心として強い要望が出されており、重要な仕様となっている。機数の増大、コンステレーション、高刈幅化のバランスを取ることで、ユーザ要求に沿ったセンサシステムを検討する必要がある。

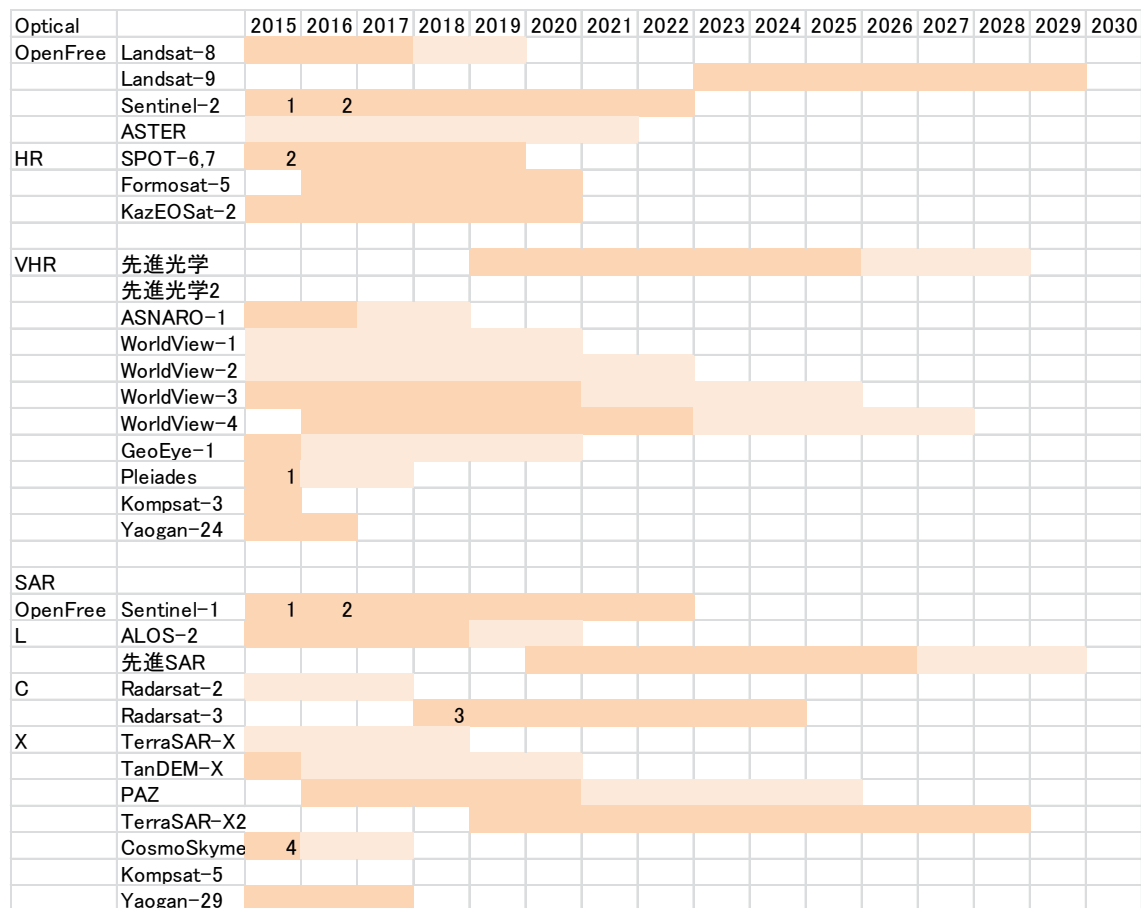


図4. 1. 3 高分解能衛星のロードマップ

実利用においては、地球科学の上に社会実装が求められる。最も細かいスケールのデータとして、最も産業に近い場所に位置する。このため、国際的・地域的な課題を解決するための政策での利用、ビッグデータとしての地理空間情報における高付加価値化、生活を豊かにするサービス提供、という形での利用が期待される。とりわけ、農業や国土管理、地域防災、社会基盤は有力な適用領域である。

4.1.3. 技術動向

4.1.3.1. 光学センサ技術

基本的な構成は、パン＋マルチスペクトルであり、マルチスペクトルでは赤緑青＋近赤外が基本形である。Red Edge などの有用な波長帯が次に選ばれる。波長数の増大や赤外波長の取得のために、可視近赤外＋短波長赤外域は、検知素子を平行に並べた構成を取る。刈幅／GSD は検出素子数になるが、限界があるためにいくつかのパッケージをスタガーにして用いる。高分解能広刈幅は高速のデータが取得されるため、圧縮技術とデータ伝送技術の進歩も望まれる。ショットノイズ支配では、信号ノイズ比は GSD の 1.5 乗に反比例するので、高分解能化に伴って大きな口径の望遠鏡が必要となるが、Time Delay Integration (TDI) 検出器を用いると信号量を増やせる。短波長赤外は雲と氷雪の区別に有効であり、雲なしモザイクの作成などの際に威力を発揮する。一方、熱赤外観測を行うセンサはそれほど多くはない。波長数を非常に多くしたものとしてハイパースペクトルセンサがあり、100 以上の波長で資源探査などの用途が期待されるが、二次元検出器を用いるために、刈幅には制限が多く、現段階では実証目的となる。従って、有効な波長を見出し、マルチスペクトル観測にフィードバックすることになる。

刈幅を広くするためには軸はずし三枚鏡方式、分解能を高めるためにはコルシュ方式が採用される。観測頻度を増やすために、刈幅、姿勢マヌーバ、機数の増大（ホステッドペイロードを含む）が用いられる。全球を被覆するためには、姿勢マヌーバは問題となるが、災害の緊急観測には必須である。一方、全球観測を諦めて、限定的な軌道のみを用いることも可能である。三次元情報はステレオ視によって得られるが、全球の標高データベースが整備されつつあるので、災害時の地形把握や気候変動に伴うデータベースの更新が目的となる。基本的には周回軌道衛星が用いられるが、静止軌道から観測することで常時観測が可能となる。距離が 60 倍程度離れるために、解像度を上げるには工夫が必要になる。

4.1.3.2. 合成開口レーダ技術

合成開口レーダ (SAR) については、センサ単体の性能向上として基本性能の向上に加えて高分解能化、広観測幅、多偏波観測が考えられる。また複数衛星を使用した観測として干渉 SAR としての性能向上が考えられる。

基本性能の向上とは、より小さい雑音等価後方散乱係数 ($NE\sigma_0$) の実現と高い信号対アンビグイティ比 (S/A 比) の実現である。 $NE\sigma_0$ の向上はより暗いターゲットの検出につながり、S/A 比の向上はゴースト低減化につながるのので、どちらも SAR 画像の画質に大きく影響するものである。 $NE\sigma_0$ の向上については、ハードウェアにおいては送信機の高出力化およびアンテナの高利得化により、S/A 比の向上については、適切なパルス繰り返し周波数 (PRF) の選択、衛星視線方向のアンテナパターンやチャープ変調方式の工夫が考えられる。

高分解能化については、衛星進行方向についてはアンテナの小型化とスポットライト技術が必要となり、衛星視線方向については送信チャープ信号の広帯域化が必須である。他国で開発されている SAR の動向を考慮すると、日本に期待されている SAR は L バンド SAR であり、L バンド帯で使用可能な帯域は 85MHz という制約があるため、地上分解能は入射角 35° において 3m 程度となり、L バンド帯における高分解能化の目標値となる。なお、衛星進行方向については衛星視線方向とのアスペクト比を考慮してアンテナサイズを決定し、さらなる高分解能化はスポットライトによって実現する。

広観測幅観測は地上ターゲットの高頻度観測につながる。広い観測幅を実現するためには、従来は衛星視線方向のアンテナビームを切り替えることによって観測幅を分割する方式 (SCANSAR) が使われてきた。しかし、分割された各観測幅からの信号がバースト状になるため衛星進行方向の分解能が低下するという問題があった。そこで、次世代の SAR においては、衛星進行方向の分解能を犠牲にしないデジタルビームフォーミング技術 (DBF) によるアンテナ多ビーム化を新技術として採用する。

多偏波観測は観測対象の散乱メカニズムを把握するために有効な観測手段である。多偏波観測を行うためには、送信波の偏波を水平偏波と垂直偏波を交互に切り替え、受信は水平と垂直偏波を同時に受信するため複数台必要になる。前述の DBF 方式も多偏波観測も、高速なデータ転送が必須になるため、データ転送の高速化も課題となる。

4.1.4. 将来ミッションの在り方

将来の高分解能衛星は、高品質データと高頻度化がキーワードとなる。そのため、基幹衛星と小型衛星の組み合わせが好ましい。

光学センサにおいては、頻度を増やすために数機での運用が求められる。先進光学の長寿命化が達成され、先進光学 2 とのコンステレーションが必須となる。小型衛星や Open&Free センサが取得した異種のセンサデータの融合技術により、センサデータの組み合わせ方法が進歩することが求められる。ベースマップを作製する基幹衛星データは全地球をカバーし、データアクセスハブとなり、災害対策やサイエンスに貢献する。日本が得意とする常時立体視機能は、フル実装、低解像度実装、短基線実装、複数機実装などを比較検討することで、実現するのが妥当である。

合成開口レーダにおいては、日本が得意とする L バンドでの実績を活かし、森林モニタリングや干渉 SAR による地盤変動の観測継続が求められている。また、観測の全天候性を生かした極域の海水や氷河の高分解能モニタリングについても大きな期待が寄せられている。PALSAR-2、先進 SAR のコンステレーションは観測頻度を増やすとともに、組み合わせ運用による観測待機時間の低減が期待される。全天候の高頻度観測は、災害後の状況把握や様々なサイエンスの分野に貢献できる。センサ単体では、高分解能化と広観測幅がキーワードとなる。両者を兼ね備えた DBF については、大きなアンテナが必要となるため、構造系の研究開

発とフェーズを合わせた取り組みが必要である。

どちらのセンサも、基幹衛星のデータ量は増大方向にあるため、データダウンリンクも含めた宇宙システムとしての検討が必要である。

参考文献

1. J. B. Campbell, R. H. Wynne, Introduction to Remote Sensing, 5th ed., Guilford Pr., 2011.
2. J. A. Richards, Remote Sensing with Imaging Radar, Springer, 2009.
3. Steven E. Franklin, Remote Sensing for Sustainable Forest Management, CRC Press, 2001.
4. J. S. Kargel, et al. (Ed.), Global Land Ice Measurements from Space, Springer, 2014.
5. <https://directory.eoportal.org/>

4.2. 全球光学イメージング

本多嘉明（千葉大）・中島孝（東海大）・村上浩・菊池麻紀・木村俊義（JAXA）・森山雅雄（長崎大）・奈佐原顕郎（筑波大）・早坂忠裕（東北大）

4.2.1. 全球光学センサ概要

気候変動影響の顕在化が懸念される現在、その結果が人類社会に及ぼす影響は世界全体に及び、地球規模の食料需給や公衆衛生などの問題が発生し、我が国だけの問題ではない。これらの問題の解決や軽減は我が国の国民の福祉に貢献するのみならず全人類の福祉に貢献するものである。この分野で世界をリードできれば我が国の外交にも優位な情報を得ることができる。幸い、我が国の地球システム統合モデル研究は世界最高水準にあるが、この優位な立場を維持、さらに優位にするためにはさまざまな項目（地球表層物理量）、主要気候変数（ECV）の長期継続観測値が必要不可欠になる。そのためには全球光学センサによる世界最高水準の高頻度長期継続観測が不可欠である。

全球光学センサは1979年から運用されたAVHRRシリーズが始まりと考えてよく、当初は可視、近赤外、中間赤外、熱赤外におおの広い帯域幅の1チャンネルずつの4チャンネルでエアロゾル、雲、地表面温度、海表面温度、海氷、正規化植生指数などの25種のデータ

（物理量を含む）を生産したが、その精度に問題があった。しかしながら気候変動の影響が懸念され始めた1980年代後半になると全球に対して16kmに平滑化された正規化植生指数の長期時系列データがNASAによって生産されることにより、大陸スケールの植生活動が把握され、1990年には世界で初めて衛星データのみから作られた植生図が発表された。広域あるいは全球の環境状況が時系列で把握されるように地球環境変化のモニタリングが現実のものになり始めた。

1984年に発表されたNASAのアースシステムサイエンスと気候変動による地球環境への影響が懸念される中、1992年の環境と開発に関する国際連合会議いわゆる地球サミットを機に地球環境問題への取り組みが加速された。地球規模の純粋な科学的課題としての一面もさることながら先進諸国の世界戦略の思惑も相まったものであったことは、後の排出権取引に関わる炭素市場の誕生を見ても容易に理解できる。さらに先進国による発展途上国との二国間外交に地球環境問題の関わりを通じて2ndトラック外交が展開されたことも想像に難くない。これらの環境下でより高精度の地球表層の環境情報に関わる物理量（ECVを含む）への要望が高まり、それに伴い全球光学センサの性能向上が図られた。このことは過去の主な全球光学センサ（AVHRR、OCTS、SeaWiFS、VEGETATION、MODIS、GLI、MERIS、VIIRSなど）の性能変遷を見ると明らかである。以下に全球光学センサの性能向上の流れを簡単に説明する。

地球環境問題の高まりとともに地球表層の物理量（雲、エアロゾル、クロロフィル、地表温度、バイオマスなど）を衛星データから求める科学研究が急速に進展し、それに伴いセンサ仕様に対する科学研究からの要求が高まり、それに基づいて全球光学センサが計画・製造・運用されるようになった。図4. 2. 1に示すように、より精度の高い地球表層の物理量（ECVを含む）を求めるために中心波長の選択を行いつつ多バンド化、大気吸収帯に配慮した狭帯域化、高感度を維持した高分解能化、観測値の精度と高頻度観測を考慮した観測幅などが検討され順次実現されたことが見て取れる。このように目的を達成するために多バンド化、狭帯域化、高解像度化が世界の趨勢になった。

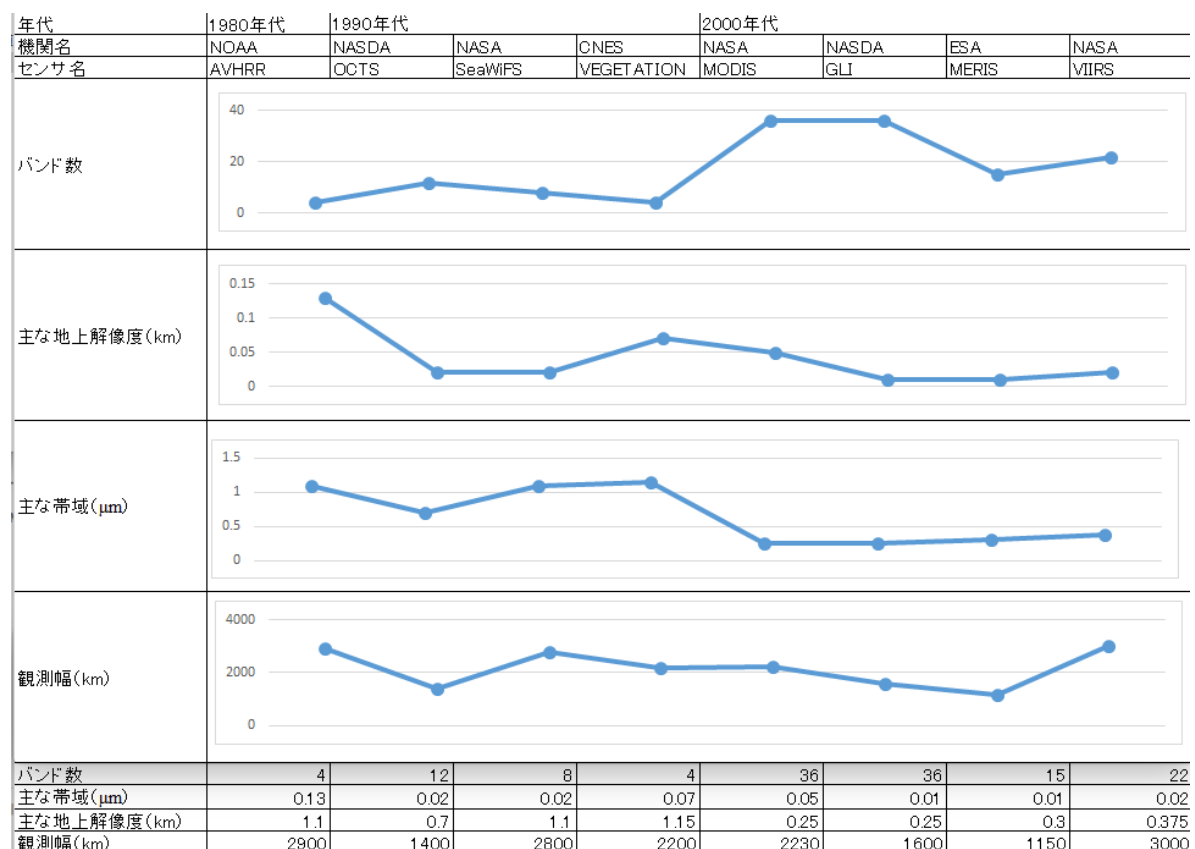


図4. 2. 1 全球光学センサの発展

ここで注目すべき点は、日本の全球光学センサが多バンド化、高解像度化の流れをリードして世界の趨勢を形成してきたことである。たとえば、日本のOCTSは、それまでの米国のAVHRRの5バンド、地上解像度1.1kmを12バンド、地上解像度700mと一挙に高性能化を実現し、GLIの計画情報と相まってGLIと同時期に計画された諸外国の全球光学センサの多バンド化や高解像度化に影響を与えた。さらに日本のGLIは地上解像度250mとその後の全球光学センサの高解像度化に決定的な方向性を示した。我が国の全球光学センサOCTS、GLIは世界の全球光学センサの方向性をリードし、世界の全球光学センサの基準に多バンド、高解像度

(250m) 化が反映されたといっても過言ではなく、この分野で最も利用されているMODISの仕様と相互に影響を与えた。

日本は高感度の250m地上解像度を世界で初めて達成し、世界をリードしていると言え、日本のSGLIに備えられる近紫外バンドや多角偏光観測により様々なプロダクトに利用できる大気補正情報が取得できる。特に、近紫外バンド情報の取得は日本独自のものであり、他の追従を許さない状況にある。日本の新しい全球光学センサSGLIは世界最高水準を維持できる。SGLIの基本性能は米国のVIIRS、欧州のMERISと比肩する。特に欧米が多方向観測に特化したMISRや偏光多方向観測を実現したPOLDERは、新しい科学的知見をもたらしたが、観測幅や解像度などの問題があり広く利用されなかった。SGLIはこれらで得られた知見を活かすとともに問題を同時に克服することで次世代の全球光学センサの先駆的な役割を果たすことが期待されている。

これまで見てきたように、我が国の全球光学センサは技術的・科学研究的には世界最高水準にあり、世界の全球光学センサの方向性に影響を与えてきた。それぞれの国の全球光学センサの利用に関しては欧米諸国がそれぞれの国の地球環境問題を軸にする国際関係を形成する際に2ndトラック外交を含む形で世界戦略の一環として継続的に実施する計画を有している。翻って、この分野の利用に関して我が国の戦略は極めて乏しいといえる。

一方で、全球光学センサの性能向上と観測データの蓄積に伴い、全球気候変動監視、全球陸域生態系監視、陸域向け熱赤外観測などに役立ち、学術的な分野では生態学、水産学、海洋学・海洋生態学・生物地球化学、大気（雲、エアロゾル）、雪氷学（積雪、海氷）などの多くの分野で理解や利用が進んでいる。なお、これらの分野の科学的な重要課題は次の節（2）にあげる。

欧米の思惑とは別に、地球全体の理解という観点から全球光学センサの継続的な観測は不可欠である。しかし、昨今の全球光学センサに対する科学的要求が高く、技術的難易度が高く、米国のVIIRS開発のように開発が遅れるのが常在化しているのが現状である。途切れのない高精度な長期継続観測には国際協調が不可欠であることも事実である。

日本は全球光学センサ分野での世界最高水準を維持しつつ、将来のこの分野の方向性を形成できるように継続的な計画を立てる必要がある。継続的な計画は後の節（3）で説明する。さらに、全球光学センサでは不可能な超高空間分解能、高波長分解能の光学センサ、アクティブセンサ、マイクロ波センサなどの観測データと複合的な観測は地球システム統合モデルの飛躍的な進展を促す観測データや知見を提供でき、データの複合利用は進みつつある。これらの利用はさらに積極的な複数衛星運用による観測（Jトレイン型：別途資料1参考）により効率的に実現できる。その中心的な機能を全球光学センサ搭載衛星が備えることで、このような観測分野で世界最先端を目指すべきである。

4.2.2. 分野における重要な科学的課題

前節で紹介した分野における重要な科学的課題について以下に列挙する。地球全体の理解を進めるための地球システム統合モデルの性能向上に対して重要な課題でもある。

全球気候変動監視では

- ・高精度校正センサによる気候変動監視に資する長期観測や地球システム統合モデルの高精度化に資する長期観測が挙げられる。

- 複数衛星観測による詳細データで物理量精度の飛躍的進展（クロロフィル蛍光、形質、高精度バイオマスなど）が挙げられる

陸域向け熱赤外観測では

- ・恒常的な地表面温度観測により、大規模森林火災、植物の水ストレス、農業生産や公衆衛生の支援情報の取得などが挙げられる

水産学では

- 海洋環境と生態系の時空間的シフト、資源管理に資する情報を取得し、持続可能な水産資源の利用を可能にすることなどが挙げられる

海洋学・海洋生態学・生物地球化学では

- 生物多様性・窒素循環などの課題に大いに役立つ情報が挙げられる

大気に関する学術分野では

- ・雲に関することでは、気候変動予測において最大の不確定要素となっている雲の詳細観測が重要で全球光学センサとマイクロ波やライダーによる観測が重要である。具体的には、雲種別分布とその量、雲成長プロセスの解明に繋がる雲特性変化の詳細観測などが挙げられる。

- エアロゾルに関することでは、地球の放射収支において不確定性を有している大気中微粒子（エアロゾル）の分布とその量、種類の観測。雲成長プロセスの解明に繋がるエアロゾルの観測などが挙げられる。

雪氷学においては、

- 近年の地球温暖化に伴いグリーンランド氷床のアルベド低下と融解域の拡大が進行しており、長期継続した極域雪氷の監視と北極海氷融解との関連解明が重要な課題となっている。また、北半球積雪域の縮小も進んでおり、北半球の水循環や気候形成メカニズムの解明が挙げられる。

4.2.3. 望まれる全球光学センサの仕様（観測頻度、観測波長、空間解像度など）と周辺システム開発、その達成時期（2040年まで）

全球光学センサ工程表に示すように2030年まではGCOM-Cシリーズの継続で長期継続観測を実現し、その中で積極的複製衛星運用を目指した全球光学センサおよび衛星（積極的複製衛星運用中心機能を有した基幹衛星として）の製造技術を育成し、運用技術の試験開発を行う。

2030年以降の全球光学センサの仕様は概ね以下のとおりである。

- ・ 観測頻度：観測幅2000-3000km（併進衛星の利用検討：別途資料2参照）
- ・ 観測波長：340nm~12umに非吸収バンドを中心に30バンド程度、大気用には観測波長：近紫外から熱赤外にかけての大気の窓領域、酸素吸収および水蒸気吸収帯
- ・ 空間解像度：250~100m
- ・ 低輝度～高輝度まで広いレンジを一つのチャンネルでカバーできる受光部
- ・ 校正機能：拡散版、拡散版校正、月校正、スキャン角度で光路が変わらない光学系（他センサのベンチマークとなりえる高精度な校正）

□ 時期：GCOM-Cシリーズのデータとの継続性担保

□ 時期：20年以上の長期観測（衛星寿命を7年として、例えば2022、2029、2036に打ち上げ）

さらに、地球観測衛星の観測データは高解像度、高頻度、高ビット、多バンドなどの高度化にともないデータ容量が飛躍的に増大することが予想されている。これは大きな問題になる。

衛星から地上への大容量データのダウンリンクはレーザーを使った光通信が有望であるが、地上付近の雲やヘイズが妨げになり随時通信ができる訳ではない。そこで考えられているのが、地上の受信局を晴天率が高い地域を複数選り設置し、上空に妨げがない地域の受信局を選択的に選り送信することで、全体としては随時通信が確保でき、グラウンドラインを通じて全データを集めることである。どこが通信可能な受信局なのかは静止気象衛星の情報で判断し、静止光データリレー衛星から地上の然るべき受信局に送信することを提案する。静止軌道衛星がシステムの一部になることにより、極軌道衛星の運用に静止衛星を加え、さらに高度な有機的運用を行い、高緯度では極軌道衛星、中低緯度領域では静止軌道衛星の観測で、全体として高頻度観測の実現を目指す。

これらの複数衛星群が生み出す大容量の観測データを静止気象衛星と静止光データリレー衛星をつかってストレスフリーで地上にダウンリンクする有機的な静止・極軌道衛星群運用

を実現することが、アジア諸国が我が国の衛星ビジネスに参加する強い動機になると考える。

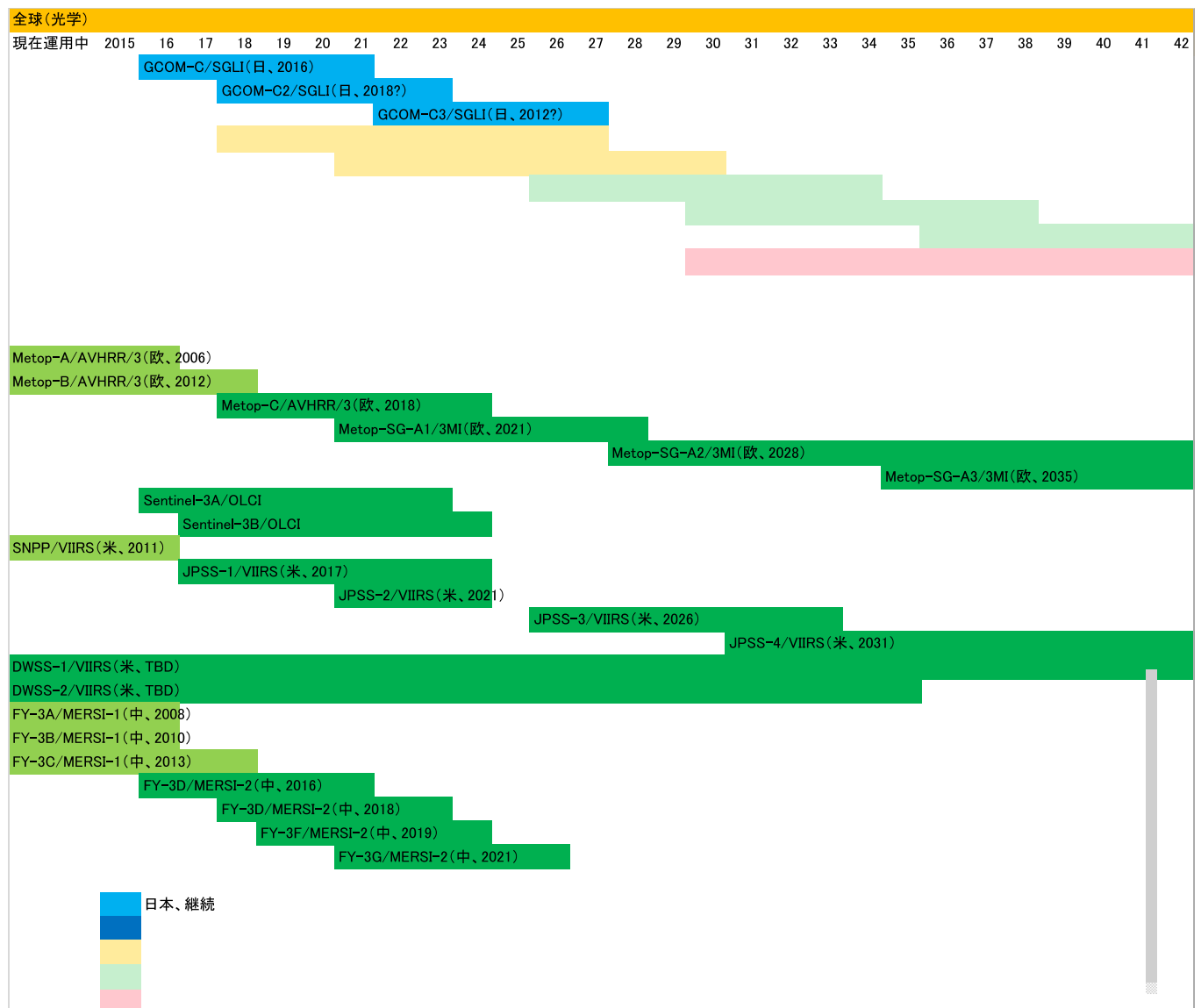


図4. 2. 2 全球光学イメージングミッションのロードマップ

別途資料１ Jトレイン型 複数衛星の有機的な運用

前項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。例えばJトレインともいふべき 10:30 軌道を国際共同で行うのは有効である（図１）。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の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る。

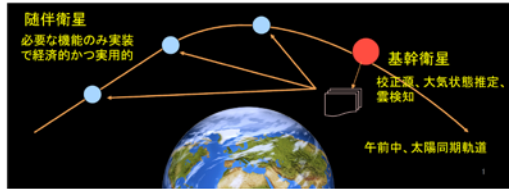
Jトレイン型の観測システムを考えると先頭で運用されるセンサは刈り幅の広い方が優位であるので、実績があり、応用範囲が広い中分解能可視・赤外（OCTS/GLI/SGLI シリーズ）センサ搭載衛星が有望である。この場合、陸上植生（作物を含む）のモニタリングには多方向反射関数の変化を考慮する必要があるが、極軌道上の光学センサでは観測頻度から雲スクリーニングの点で有効なデータ数が極端に少なくなり、その補正が難しい。従って、静止衛星による高頻度観測と SGLI の多方向観測と併せた利用が、新しい領域を切り開くと期待できる。

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。

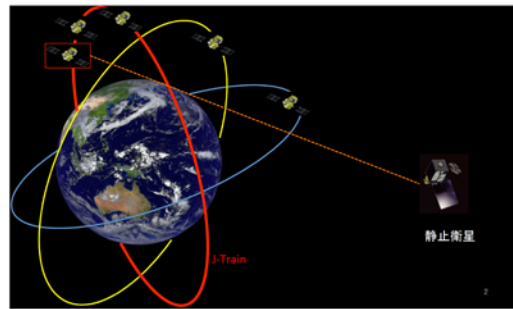
長期的な視点に立つと、常時観測のできる静止衛星からの観測技術を発展させる必要がある。ただし、高水平分解能のセンサのように多方面の利用が考えられるものと同時にライダーや雲・降水レーダのように利用は限られるものの不可欠なセンサもあることにも留意すべきである。我が国の地球観測静止衛星は、スーパー 301 で規定される商用カテゴリーになる気象庁のひまわりのみで、我が国の技術力を延ばす開発研究が行なわれていない。しかし、欧米のみならず、中国・韓国においても静止衛星による様々な地球観測の試みが実施・提案されており、この流れにおける我が国の競争力の向上を行なうべきである。

J-train (Joint Train)

- ・同一軌道上に、時間をずらして複数の衛星を配置し、基幹衛星から随伴衛星へのデータ提供により、少ない資源で、より高精度、高次の地球観測プロダクトの作成を目指す観測形態。一他機関への積極的な売り込みにより、高精度、多種のプロダクトの作成、およびより高度なプロダクトの開発プラットフォームを目指す。(2ndトラック外交の活用)



J-Train, 静止及び他国も含む他のミッションとの連携で観測頻度向上と高度情報取得を目指す



基幹衛星の情報活用

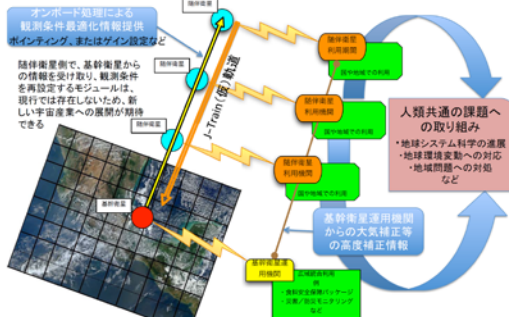


図1 Jトレインのコンセプト

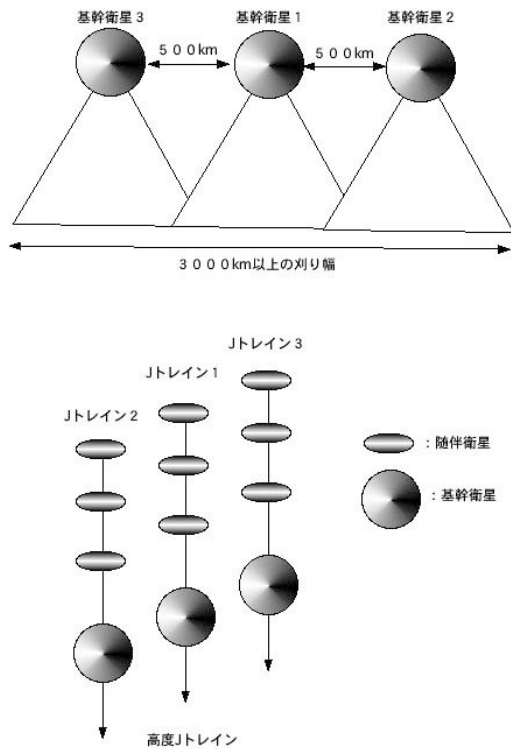


図2 Jトレインにおける軌道設計

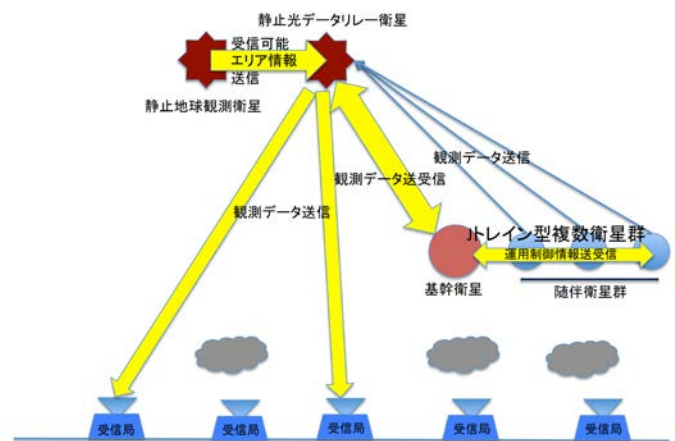


図3 複数衛星群と静止光データリレー衛星の利用

4.3. 全球マイクロ波センサ

中村健治（獨協大）・江淵直人（北海道大）・沖理子・可知美佐子・久保田拓志（JAXA）・青梨和正（気象研）・沖大幹（東京大）・早坂忠裕（東北大）・今岡啓治（山口大）

4.3.1. マイクロ波放射計のおおよその歴史

マイクロ波放射計は多周波、多偏波により多くのチャンネルを持つ。マイクロ波放射計による観測は、1972 年に打ち上げられた米国の Nimbus 5 号に搭載された ESMR (Electrically Scanning Microwave Radiometer) が最初である。ESMR はチャンネルは一つであったが海水の分布や、海上の雨域を把握できることを実証した。多チャンネル化は 1978 年に米国が打ち上げたシーサット (SEASAT) に搭載された多チャンネルのマイクロ波放射計でなされた。SEASAT は名前のとおり海面観測を目的とした衛星であり、この SEASAT には多チャンネルのマイクロ波放射計以外にも世界初のレーダ高度計、合成開口レーダ、マイクロ波散乱計、可視・赤外放射計が搭載された。これらは後にすべて実用化された。

マイクロ波放射計は物質から温度と射出率に応じて放射されるマイクロ波帯の電磁波を受信する。受信すること自体は技術的には困難ではないが、その精度と確度を保つことが重要である。このため放射計では校正の重要性が非常に高い。マイクロ波放射計は米国においてその後も、SMMR、SSM/I と開発されてきており SSM/I で一つの型が決まった。SSM/I では地表面走査のためアンテナを回転させるが、回転の途中で温度の分かっている校正源を常に見るようにしている。

観測目標は、大気については、気温プロファイル、水蒸気プロファイル、降水強度、大気微量成分、陸面は土壌水分、雪氷域、等、海洋では、海面水温、海面塩分濃度、海上風、海水などがある。また、方法は異なるが、GNSS (GPS) 掩蔽法による気温、水蒸気プロファイル測定は衛星マイクロ波電波利用としては忘れてはならないものである。これは受信機のみが必要で、かつ大きなアンテナを必要とはしないので、小型測器となる。

4.3.2. 現在のマイクロ波放射計

(1) イメージャ

100GHz 以下の周波数帯の衛星搭載マイクロ波放射計はほぼ確立された測器といってよい。SSM/I シリーズ、すでにミッションは終了したが TRMM 衛星上の TMI、GPM 主衛星上の GMI (Draper, 2015) 等、SSM/I の周波数帯（おおよそ 10、18、23、30、89GHz）を基本としている。すべて低軌道衛星上にある。また conical 走査として、地表面入射角を一定としている。GMI では降雪観測のために 120GHz、180GHz 帯が付加されている。

TRMM、GPM 主衛星、Megha-Tropique（搭載の MADRAS は不具合のため運用できず）の例外を除いて太陽同期軌道の衛星上にある。土壌水分量、海面塩分濃度は低周波（L バンド、P バン

ド) が有効であり、NASA の Aquarius では L バンドの放射計が搭載されている。

(2) サウンダ

60GHz 帯、120GHz 帯、180GHz 帯の中に細かいチャンネルを持つことにより気温プロファイル、水蒸気プロファイルを得ている。AMSU シリーズなどがあり、これらも現業予報モデルに同化され実用化されている。

(3) ミリ波、サブミリ波

国際宇宙ステーション (ISS) 上において超伝導サブミリ波サウンダ SMILES による実証がなされている。しかし、機械式冷凍機の不具合などで観測が中断するなど、実験段階にある。

4.3.3. 利用の現状

(1) イメージャ

世界の大きな流れとしては減少傾向にある。これには米国を始め、利用者から大きな懸念が寄せられている。GCOM-W 後継が強く望まれているところである。科学ミッションとしては継続観測による気候変動の検出が大きな目標である。ここでは測器の校正が大きな課題であるが、SSM/I 以来の測器の絶対校正法の進展、また GPM 計画の中での測器間校正技術の進展がある。

日本では、実利用また民間利用も、漁業関係や北極海海氷監視などで進んでいる。また降水レーダ、降水コンステレーションのデータによる全球降水マップ (GSMaP (Kubota et al., 2007) など) も実用に供されている。

さらに、全球数値予報システムおよびメソスケール数値予報システムにおいて、主に輝度温度のデータを用いてデータ同化が行われている。

(3) サウンダ

実用測器としてシリーズ化されている。また、サウンダの輝度温度データも全球数値予報システムおよびメソスケール数値予報システムにおいてデータ同化に用いられている。

(3) ミリ波、サブミリ波

開発要素が大きい、高周波数の窓領域はフロンティアである。

4.3.4. 将来方向

中大型衛星上の高性能の放射計と小型衛星上の放射計の二つの大きな流れがある。

(1) イメージャ

大型衛星が望み薄の状態の中、小型、超小型衛星搭載型の検討が進んでいる。この場合必要空間分解能を得るためアンテナサイズが問題となる。1 m 以下のアンテナサイズで、高周波数を使うことになる。高分解能を得るためには合成開口法も検討対象となる。L バンド、P バンドの利用も一つの方向であり、大口径のアンテナが一つの大きな開発目標となる。AMSR2

後継の一部として考えることもできる。

(2) サウンダ

ここでも小型衛星が検討されている。同時搭載ではないが 90、113、180、206GHz のサウンダ、また radio occultation も検討されている。

(3) ミリ波、サブミリ波

周波数が高いので小型衛星への搭載が検討されている。対流圏の水蒸気と氷雲を目標とし 240、310、670GHz 帯を使う TWICE (Tropospheric Water Vapor and Cloud ICE) の構想がある。雲レーダとの同時観測が望ましい。

4.3.5. 日本の強み

(1) イメージャ

AMSР、AMSР-E、AMSР2 の実績が大きい。AMSР2 は 100GHz 以下では現在もっとも高性能、高精度の放射計であるといえる。必要な地表分解能を得るため 2m とアンテナサイズが大きく、この方面でも技術蓄積がなされている。2m アンテナによる高空間分解能と、6-7GHz 帯による海面温度観測、特に低水温域の観測は貴重である。6-7GHz 帯は他には 2003 年打上げの Windsat しかない。これまで培ってきた校正技術も高いレベルにある。校正は地味ではあるが、長期にわたる trend を検出する上では必須の技術である。この部分での日本の技術力は高い。しかしながら他の衛星上のマイクロ波放射計との相互校正は米国が先行している。

今後の方向として、小型衛星搭載型と GCOM-W 系の両方であろう。前者は複数を、後者は単独あるいは train 型であろうが、reference standard としての意義もある。日本の強みである降水レーダと合わせると強力な reference standard となる。気候変動の検出という 科学目的のためには高精度長期のコンステレーション型の観測が必要であるが、このコアとして働く力がある。技術開発としては、AMSР2 f/o は多チャンネルの観測継続を考えると、展開アンテナの利用などの大きな変更は考えにくい。受信機の小型化、校正機構の改良、アンテナの外周メッシュ化など地道な開発となろう。

静止軌道上のマイクロ波放射計も構想としてはあり得る。2040 年まで考えると可能性は十分であろう。

(2) サウンダ

これは残念ながら実績に乏しい。小型実証実験衛星が最初に必要であろう。

(3) ミリ波、サブミリ波

SMILES の超伝導受信機の技術的実績がある。SMILES は質量が 500kg あり、今後は小型衛星に向けて軽量化の方向に努力すべきであろう。

4.3.6. 構想

将来の衛星観測は、単独衛星は実験的・実証的なもの以外は考えにくく、複数の衛星による観測となろう。そしてデータの融合が重要となろう。モデルによる同化は一つの大きな方向である。その一方、同化手法ではなく、衛星データからの直接的な物理量抽出の方向もある。両者を並列に双方の結果の差異から新たな進展を目指すことが必要であろう。後者のためには全球を高時間空間分解能で観測する必要がある。

実用のため、また水蒸気トレンドと降水トレンドとの差異など気候の長期変動をとらえるためには全球の定常観測が必要である。科学研究における、プロセススタディはモデルとの連携で、モデル内での解明に期待できよう。衛星側はバルク（マクロ）の観測により、気候的シグナルをとらえる。

（１）コンステレーション

地球気候システムの長期変動監視という大きな科学目的と実用を兼ねて、マイクロ波放射計の長期にわたる観測体制を考え、Japan-led microwave radiometer constellation の方向があり得よう。

システム

Japan-led Train : 太陽同期

主衛星 : 2m 級 AMSR2 後継センサ搭載

これまでの観測の継続から極域を含む長期にわたるデータセットの作成を第一目標とする。また reference standard としての役割も持たす。

大気現象では太陽非同期軌道が望ましいが、これは副衛星群（constellation）で観測する。

副衛星 : 国際協力

多数の小型衛星

静止気象衛星の可視・赤外

（２）静止軌道上のマイクロ波放射計

技術的には可能性がある。イメージャ型とサウンダ型の合体とする。

（３）ミリ波、サブミリ波

静止軌道からの観測も可能性があるだろう。

4.3.7. 工程

主ラインは（太陽同期）Japan-Train を作ることにおく。

Japan-Train の測器

AMSR2 後継、ミリ波・サブミリ波、他

(1) イメージャ

各衛星、測器の寿命は7年を想定。1年のoverlapを想定。

2020-2027 : AMSR2 後継 (GCOM-W2?)

2026-2033 : AMSR2 後継、Ku レーダ、小型衛星

2032-2039 : AMSR2 後継、Ku レーダ、小型衛星

(2) 静止軌道

2025-2028 : チャンネルを限った高軌道実証衛星

2030- : 静止軌道実証衛星

2035- : 実用衛星

(3) ミリ波・サブミリ波

2023-2026 : 小型実証、他のミッションとの相乗りとする。

2026- : 観測



図 4. 3. 1 全球マイクロ波センサのロードマップ

参考文献

Draper, D. W. et al., 2015: The Global Precipitation Measureent (GPM) Microwave

Imager (GMI): Instrument overview and early on-orbit performance. IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(7), 3452–3462, 10.1109/JSTARS.2015.2303303.

Kubota, T. et al., 2007: Global precipitaton map using satelliteborne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 45, 2259–2275.

Maeda, T., Y. Taniguchi, and K. Imaoka, 2016: GCOM-W1 AMSR2 Level 1R Product: Dataset of brightness temperature modified using the antenna pattern matching technique. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 54(2), 770–782.

4.4. 降雨・雲レーダ

高橋暢宏（名古屋大）・岡本創（九州大）・高荻縁・鈴木健太郎（東京大）・大野裕一（情報通信研究機構）・可知美佐子・久保田拓志・沖理子（JAXA）

4.4.1. はじめに

衛星搭載雲・降水レーダに関しては1997年に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星（Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM、トリム）に搭載された降雨レーダが世界最初の降雨レーダである。その後継ミッションである全球降水観測計画（Global Precipitation Measurement: GPM、ジーピーエム）の主衛星は2014年に打ち上げられ、そこには二周波降水レーダを搭載している。これにより、降雨の立体的な観測が可能となった。これまでの衛星搭載降水レーダ開発実績を有するものは日本のみである。

一方、雲レーダによる雲の鉛直内部構造の観測は、地球温暖化に伴う放射収支変化の評価に欠かせないツールとなっており、2006年にNASA/JPLが世界で初めて雲レーダを搭載したCloudSatを打ち上げた。日本では、CloudSatよりも感度を10倍程度向上し、さらに世界で初めて雲内部の鉛直流の情報を衛星から取得できるドップラー速度観測が可能なレーダを開発した。このレーダはESAと共同のEarthCARE衛星に搭載し、2018年打上げ予定である。このような衛星観測の急速な発達によって、雲・降水システムの様々な物理量が同時に得られるようになり、それら複数の物理量の組み合わせによって雲・降水の物理プロセスを観測的に診断できる新しい時代に入りつつある。このような雲・降水プロセスに関する観測情報は、地球温暖化に伴う放射収支や降水の変化をモニターするために不可欠であるだけでなく、温暖化予測に用いられる数値気候モデルを素過程レベルで評価し、その信頼性を質的に向上させる上でも非常に有効である。したがって、現在から将来へわたる気候の監視と予測のためには、雲・降水システムの継続的な観測が必要不可欠である。

また、こうした科学的要求を満たすための技術の観点でも、ドップラー化とその高度化、電子走査（雲レーダ）、偏波化などへの展開が進みつつある。

4.4.2. 現状分析と展望

<降水レーダ>

- TRMM(1997-2015)、GPM(2014-)による降水観測において世界をリード、技術的に成熟している。
- 全球の降水推定の高精度化に大きく貢献、熱帯の降水システムの理解を飛躍的に進展、マイクロ波放射計観測精度の向上による全球降水マップ（GSMaP）の実現と利用範囲の拡大といった成果を上げている。
- TRMM、GPM 観測は、全球スケールの降水観測データの標準として気候研究、科学研究に既

に広く利用されている。

- TRMM は日米共同ミッション、GPM は国際共同ミッションであり、国際的にも期待度の高い観測である。また、その中で日本のレーダ技術が中心的な役割を果たしており、この分野で世界をリードしている。
- 降水と雲に伴う非断熱加熱は、大気大循環を決める基本要素のひとつであり、TRMM/PR により初めて 3 次元潜熱加熱推定が実現された。

<雲レーダ>

- EarthCARE (2018-)において世界初のドップラー速度観測を実現予定
- 地球の放射収支を精度よく評価するためには不可欠な観測（地球全体をカバー、レーダとライダーによる雲・エアロゾルの定量的な観測）
- ドップラー速度観測により、これまで衛星からは得られなかった雲・降水システムの動的な情報を取得可能となり、未解明部分が多い雲や降水の形成過程のプロセス研究が大きく進展する

<外国の動向>

米国では、Decadal survey に向けて、3 周波レーダを搭載したミッション（Cloud and Precipitation Processes Mission : CaPPM）の検討を行っている。これは雲と降雨を同時に測ることで、気候予測において大きな不確実要因である雲からの降雨生成プロセスを調べようとするものである。実際に CloudSat と同じ周波数帯での固体素子の開発を行い、これまでこの周波数帯では難しかった走査型のレーダ（フェーズドアレイレーダ）への道筋を付けている。降水観測については、CubeSat に搭載するレーダの開発に関しても検討を行っている。

ヨーロッパでは、ESA のファンドで CloudSat と同じ周波数帯でのドップラーレーダ開発の検討を行っているほか、CNES のファンドでは同様に降水レーダと同様の周波数を用いたドップラーレーダ開発の検討を行っているが、これらは概念的な検討に留まっており要素技術開発にも着手していない。

<展望>

- 人工衛星搭載の雲・降水レーダによる観測は、地球温暖化問題などにおける雲・降水情報のグローバルの標準となり、数値気候モデルの研究とともにこの分野の研究を支えるものとなる。
- 雲・降水レーダの組み合わせは、雲放射加熱と降水潜熱加熱の双方を同時に推定可能にするため、気候学研究に非常に有用である。
- 数値モデルとの連携の道筋としては、データ同化がある。最近では GPM/DPR のデータ同化も気象庁の数値予報で利用され始めているが、さらなる発展の可能性が大きい。
- 技術的にはドップラー速度の高精度化、降雨レーダの高感度化、走査幅増大の方向性に

進んでいる。

4.4.3. 想定されるシナリオ

<科学的・社会的展開>

降水観測に関しては、世界中の降水を把握することのニーズは潜在的に高かったが、GSMaPの開発によりそのニーズに応えられるようになってきた一方で、更なる高精度化が求められてきている。高精度の全球の降水マップは世界中の防災・農業・公衆衛生などの分野に広く利用されるとともに、地球温暖化による気候変動に関して注目されている降水の変化の評価には欠かせないものとなっている。

降水推定の高精度化には、降水システムの精確な科学的理解が欠かせない。TRMM、GPM 搭載の降水レーダによる降水システムの立体観測とその膨大な蓄積は、降水システムの科学的理解を大きく発展させ、降雨に伴う大気の潜熱加熱の 3 次元推定データセットの作成や（例 Shige et al. 2004, 2007, 2008; Tao et al. 2001）、積雲対流の湿度依存性の理解の進展（例 Takayabu et al. 2010）などを通じ、大気の数値モデルによる降水再現の達成目標も大きく進展させた（例 Tao and Moncrieff, 2009; Hirota et al., 2011）。また、降水と雲に伴う非断熱加熱は、大気大循環を決める基本要素のひとつであり、レーダによる降水と雲の 3 次元観測は非断熱加熱 3 次元分布の推定に重要な情報を与え、TRMM の降雨レーダを用いた 3 次元潜熱加熱推定は実現している。雲・降水レーダの搭載により、同一システムの雲放射加熱と降水潜熱加熱の双方を推定可能にすることで、地球の気候形成に関して非常に重要な知見を抽出することが可能になる。

地球温暖化予測とその評価については、全球の数値気候モデルの進展が欠かせないが、中でも雲・降水の表現は最も不確実性の大きいものの 1 つであり、その検証・改良のために人工衛星からのレーダ観測（雲・降水の 3 次元構造の観測）が欠かせないほか、今後増加が予想される極端気象（豪雨・スーパー台風・洪水・干ばつなど）の監視や予測にとっても雲・降水の観測は欠かせない。TRMM 降雨レーダによる雨の立体観測は、極端降水をもたらしシステムとその大規模環境について新たな知見をもたらし（Schumacher and Johnson, 2005; Sohn et al. 2013; Hamada et al. 2015）、現在および将来の降水災害に社会が備えるための重要な科学的知見を与えている。

雲観測においては、EarthCARE に大きく期待するところであるが、継続的な雲レーダによる観測が望まれている。2006 年の CloudSat/CALIPSO 衛星の打ち上げ以降、衛星搭載雲レーダとライダーの観測は、雲の正確な巨視的特性把握（Hagihara et al., 2010）、雲微物理特性の把握（Okamoto et al., 2010, Sato and Okamoto 2011）、そして気候モデルの検証と改良（Hashino et al., 2013, Seiki et al., 2015）において、非常に有効なものであると認識

されている。ドップラー速度観測の雲物理特性抽出や対流特性把握における有効性は、地上・航空機観測によって示されてきたが (Heymsfield et al., 2008, Sato et al., 2010)、EarthCARE 衛星計画において初の衛星ドップラー観測が実現する事で、CloudSat からさらに大きな前進が見込まれている。氷晶（雪結晶）は生成条件や環境場により形状が大きく変わりそれに伴って放射特性も変化するため、雲レーダ観測は地球の放射収支の評価には欠かせない。さらに雲レーダとライダの組み合わせは、受動型センサでは不可能な高精度雲鉛直分布把握だけでなく、雲・エアロゾル相互作用という気候変動予測の不確定性の中心的課題に観測データから迫る事の可能な唯一のツールであり、これらの衛星観測が途切れる事があってはならない。

降水プロセスの研究においては、雲と降水の両方を観測する必要がある、雲レーダと降水レーダの融合が必要になってきている。このような複数センサ・複数プラットフォームによる観測体制の確立によって、衛星観測は従来の物理量の推定から、物理量を組み合わせて素過程を診断できる新しい時代を迎えつつある。このパラダイムシフトは数値気候モデルの評価の方法にも質的な変化をもたらしつつあり (例えば Suzuki et al. 2015)、物理量の再現性を問う従来の「パフォーマンス志向」のモデル評価から、より本質的に物理素過程を検証する「プロセス志向」のモデル評価への興味が国際コミュニティにおいて高まっている (Stephens et al. 2015)。この流れは今後の衛星計画によってさらに促進されると予想される。また、このような新しいモデル評価による雲・降水素過程の改良は気候モデルの信頼性を質的に高め、温暖化に伴う極端気象の予測精度向上にも大きく貢献すると期待される。

<ミッションについて（図 4. 4. 1、図 4. 4. 2）>

降水観測ミッションについては、GPM の利用検討委員会において研究者および利用者からのニーズをもとにロードマップを作成している。上述のように GSMP に対するニーズに応えられるミッションとして小型レーダを搭載した小型衛星のコンステレーションを考えている。これは、TRMM-GPM と続いた成熟したレーダ技術をベースに小型化・低価格化を実現することにより日本以外の国（アジア諸国を想定）が小型衛星を所有できる衛星を開発することであり、国際協力によりレーダによるコンステレーションを形成することにより、GSMP の高精度化を図るものである（現在の GSMP はマイクロ波放射計が中心であるが、それをレーダに置き換えることにより大きな改善が見込まれる）。これが実現できるとレーダ開発における日本の役割はある程度達成できたことになる。

一方で、諸外国の動向をみていると判るように、TRMM-GPM と継続した降水観測ミッションについては日本に期待している節がある。日本としても、「京」をはじめとした世界最先端の計算機によって実現した数値気象モデルの発達には GPM タイプの降水観測の継続と高度化は不可欠なものとなっている。実際、現在の技術を GPM 搭載降水レーダに応用するだけで GPM

搭載のレーダ（DPR）の倍の走査幅でかつ 10 倍から 100 倍の感度は達成可能である（DPR-2）。感度向上に関しては昨今の窒化ガリウム（GaN）素子の発達とパルス圧縮技術によるものであり、走査幅拡大に関しては TRMM のミッション終了時の特別実験において軌道上実証実験がなされた（Takahashi et al., 2016）。ここまで技術が進むと、科学的にも雲から降水へのプロセスの理解に必要な雲・降水システムの観測が可能となり、本質的な素過程レベルでの数値気象モデルの評価が可能となる。具体的なミッションとしては、米国で計画中の雲・降水プロセスミッションである CaPPM へのレーダ提供による参画等の国際協力を視野に入れるべきである。

このような技術的な進歩があると、究極的には静止衛星にレーダを搭載することも現実味を帯びている。静止軌道からの観測を行うと、ほぼ常時観測が可能となり、数値気象モデルへの貢献として現業気象予報モデルへの直接的な入力値としての利用も見えてくる。これが実現すると、例えば台風の初期段階での内部構造が把握でき、現在予測が難しいとされている台風の急速な発達なども予測が可能になり、防災的な観点からの貢献も大きくなる（台風に関しては、温暖化によりスーパー台風と言われる強力な台風の増加が懸念されている）。また、雲・降水観測に時間軸の情報が加わることで、時間的に変化する雲降水の物理プロセスを直接追跡することが可能となる。このような観測情報は、数値モデルにおけるプロセス表現を著しく発展させることが期待される。ただし、静止衛星からの観測では高緯度観測などに問題があるため、周回軌道の衛星に対するニーズも残る。

雲観測に関しては、EarthCARE において高感度のレーダと高スペクトル分解ライダーを併用した観測の有効性を評価する必要があるが、現状、米国の NASA/JPL と日本のみ が技術を有しており（また、現状はそれ以外の国では概念検討に留まっている）、EarthCARE 後についても地球温暖化に伴う放射収支は重要な評価項目であり、継続した観測を国際的に分担して実施する必要がある。米国の CaPPM が実現するのであれば、CaPPM へレーダの提供等の参画等を検討すべきであろう。我が国としては CaPPM 後を見据えたミッションを検討し、基礎技術開発を行っておくべきである。または、CaPPM に参画して技術的な協力関係を進めることを検討すべきである。CaPPM との連携については、降水観測ミッションについても同様であり、このようなスキームはコストの観点および国際的な協力・分担の観点から有効である。CaPPM 後のミッションの可能性として、雲・降水プロセスと放射収支を同時に観測するミッションについて検討すべきである。現在の気候モデルでは、雲・降水のミクロプロセスと雲の放射影響のマクロプロセスとが整合的に連動していないことが指摘されている（Suzuki et al. 2013）。素過程の理解に根ざした信頼性の高い気候予測を行うためには、このギャップを適切に埋める必要がある。

Simpson, J., R. E. Adler, and G. R. North, 1988: A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite,” *Bull Amer. Meteorol. Soc.*, vol.69, pp. 278-295.

Kozu, T., T. Kawanishi, H. Kuroiwa, M. Kojima, K. Oikawa, H. Kumagai, K. Okamoto, M. Okumura, H. Nakatsuka, and K. Nishikawa, 2001: Development of precipitation radar onboard the tropical rainfall measuring mission satellite,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 39, pp. 102-112.

Hou, A. Y., R. K. Kakar, S. Neeck, A. A. Azarbarzin, C. D. Kummerow, M. Kojima, R. Oki, K. Nakamura, and T. Iguchi, 2014: The Global Precipitation Measurement (GPM) mission., *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95(5), 701-722.

Hamada, A., Y. N. Takayabu, C. Liu, and E. J. Zipser, 2015: Weak linkage between the heaviest rainfall and tallest storms. *Nat. Commun.*, Vol. 6(6213), doi: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7213>.

Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Watanabe, M. Kimoto, 2011: Precipitation reproducibility over tropical oceans and its relationship to the double ITCZ problem in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Climate*, 7, 4859-4873.

Schumacher, R. S., and R. H. Johnson, 2005: Organization and Environmental Properties of Extreme-Rain-Producing Mesoscale Convective Systems, *Mon. Wea. Rev.*, 133, 961-976.

Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and D. E. Johnson, 2004: Spectral Retrieval of Latent Heating Profiles from TRMM PR Data. Part I: Development of a Model-Based Algorithm. *J. Appl. Meteor.*, vol.43, 1095-1113.

Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and C.-L. Shie, 2007: Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part II: Algorithm improvement and heating estimates over tropical ocean regions. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 1098-1124.

Shige, S., Y. N. Takayabu, and W.-K. Tao, 2008: Spectral retrieval of latent heating profiles from TRMM PR data. Part III: Estimating apparent moisture sink profiles

over tropical oceans. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 620–640.

Sohn, B. J., Ryu, G.-H., Song, H.-J. & Ou, M.-L., 2013: Characteristic features of warm-type rain producing heavy rainfall over the Korean Peninsula inferred from TRMM measurements. *Mon. Wea.* 141, 3873–3888.

Takayabu, Y. N., S. Shige, W.-K. Tao, and N. Hirota, 2010: Shallow and deep latent heating modes over tropical oceans observed with TRMM PR Spectral Latent Heating data, *J. Climate*, 23, 2030–2046

Tao, W.-K., S. Lang, W. S. Olson, S. Yang, R. Meneghini, J. Simpson, C. Kummerow, E. Smith, and J. Halverson, 2001: Retrieved vertical profiles of latent heat release using TRMM products for February 1998, *J. Appl. Meteorol.*, 40, 957–982, doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0957:RVPOLH> 2.0.CO;2.

Tao and Moncrieff, 2009: Multiscale cloud system modeling modeling, *Rev. Geophys.*, 47, RG4002, doi:10.1029/2008RG000276.

Takahashi, N., M. Kachi, T. Kubota, and K. Furukawa, 2012: Conceptual study of the future cloud-precipitation observation mission from space, *Proc. of SPIE Vol. 8528* 85281G 1–8.

Takahashi N. H. Hanado, K. Nakamura, K. Kanemaru, K. Nakagawa, T. Iguchi, T. Nio, T. Kubota, R. Oki, and N. Yoshida, 2016: Overview of the End-of-Mission Observation Experiments of Precipitation Radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission Satellite, *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing* (accepted).

<雲レーダ関係>

Illingworth, A. J., H. W. Barker, A. Beljaars, M. Ceccaldi, H. Chepfer, N. Clerbaux, J. Cole, J. Delanoë, C. Domenech, D. P. Donovan, S. Fukuda, M. Hiraoka, R. J. Hogan, A. Huenerbein, P. Kollias, T. Kubota, T. Nakajima, T. Y. Nakajima, T. Nishizawa, Y. Ohno, H. Okamoto, R. Oki, K. Sato, M. Satoh, M. W. Shephard, A. Velázquez-Blázquez, U. Wandinger, T. Wehr, G.-J. van Zadelhoff, 2015: The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and

Radiation. Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 96, issue 8, pp. 1311–1332.

Hagihara, Y., H. Okamoto, and R. Yoshida (2010), Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, J. Geophys. Res., 115, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344.

Okamoto, H., T. Nishizawa, T. Takemura, K. Sato, H. Kumagai, Y. Ohno, N. Sugimoto, A. Shimizu, I. Matsui, and T. Nakajima (2008), Vertical cloud properties in the tropical western Pacific Ocean: Validation of the CCSR/NIES/FRCGC GCM by shipborne radar and lidar, J. Geophys. Res., 113, D24213, doi:10.1029/2008JD009812.

Okamoto, H., K. Sato, and Y. Hagihara (2010), Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals, J. Geophys. Res., 115, D22209, doi:10.1029/2009JD013383.

Sato, K., and H. Okamoto (2011), Refinement of global ice microphysics using spaceborne active sensors, J. Geophys. Res., 116, D20202, doi:10.1029/2011JD015885.

Sato, K., H. Okamoto, M. K. Yamamoto, S. Fukao, H. Kumagai, Y. Ohno, H. Horie, and M. Abo (2009), 95-GHz Doppler radar and lidar synergy for simultaneous ice microphysics and in-cloud vertical air motion retrieval, J. Geophys. Res., 114, D03203, doi:10.1029/2008JD010222.

Heymsfield, A. J., A. Protat, R. Austin, D. Bouniol, R. Hogan, H. Okamoto, K. Sato, G. Zadelhoff, D. Donovan, and Z. Wang (2008), Testing and evaluation of ice water content retrieval methods using radar and ancillary measurements, J. Appl. Meteorol. Climatol., 47, 135–163, doi:10.1175/2007JAMC1606.1.

Okamoto, H., K. Sato, S. Otomo, Y. Hagihara, R. Yoshida, K. Iwanami, T. Maesaka, M. Murakami, N. Orikasa, M. Nakazato, H. Yamauchi, H. Inoue, Multi-wavelength radar algorithm, with Doppler function for the retrieval of cloud microphysics with precipitation, Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2008), Proc. International Radiation Symposium, Foz do Igassu, Brazil, 3–8 August 2008, (2009), 307–310

Sato, K., H. Okamoto, T. Takemura, H. Kumagai, and N. Sugimoto (2010), Characterization of ice cloud properties obtained by shipborne radar/lidar over the tropical western Pacific Ocean for evaluation of an atmospheric general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 115, D15203, doi:10.1029/2009JD012944.

Hashino, T., M. Satoh, Y. Hagihara, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno, and H. Okamoto (2013), Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 7273–7292, doi:10.1002/jgrd.50564.

Seiki, T., C. Kodama, M. Satoh, T. Hashino, Y. Hagihara, and H. Okamoto (2015), Vertical grid spacing necessary for simulating tropical cirrus clouds with a high-resolution atmospheric general circulation model, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4150–4157, doi:10.1002/2015GL064282.

Suzuki, K., J.-C. Golaz, and G. L. Stephens, 2013: Evaluating cloud tuning in a climate model with satellite observations. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4464–4468, doi:10.1002/grl.50874.

Suzuki, K., G. Stephens, A. Bodas-Salcedo, M. Wang, J.-C. Golaz, T. Yokohata, and T. Koshiro, 2015: Evaluation of the warm rain formation process in global models with satellite observations. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3996–4014, doi:10.1175/JAS-D-14-0265.1.

Stephens, G. L., C. Jakob, and G. Tselioudis, 2015: The GEWEX process evaluation study: GEWEX-PROES. *GEWEX News*, 4–5.

<米国 CaPPM>

CaPPM white paper: <http://pmm.nasa.gov/cappm>

4.5. ライダ

杉本伸夫、西澤智明（国立環境研）、水谷耕平、石井昌憲（情報通信研究機構）、岡本創（九州大）、林真智（国立環境研）、佐藤薫（東京大）、菊池麻紀、木村俊義（JAXA）

4.5.1. はじめに

宇宙からのライダ観測はスペースシャトルの 1994 年の LITE に始まり、その成果は氷床高度の測定を主目的とした GLAS/ICESat (2003–2010)、雲・エアロゾル観測を主目的とする CALIOP/CALIPSO (2006–) へと引き継がれてきた。中でも CALIOP は打ち上げから約 10 年を経過した現在でも良好な観測を継続している。CALIOP のデータのインパクトは非常に大きく、雲・エアロゾル研究においては不可欠と言っても過言でない。また、エアロゾル気候モデルの同化など、運用ベースの利用の検討も進んでいる。GLAS は植生観測にも利用され、氷床・植生観測の後継として ATLAS/ICESat2 の 2017 年の打ち上げが予定されている。また、植生観測を主目的とした、ISS 搭載植生ライダ MOLI（日）と GEDI（米）が進行している。ESA では、高スペクトル分解ライダ手法を気象分野へ応用し、風観測を主目的としたドップラライダ ALADIN を搭載した ADM-Aeolus 衛星の打ち上げを 2017 年に予定している。

CALIOP/CALIPSO の後継と考えられているのは、2018 年に打ち上げが予定されている EarthCARE 衛星搭載 ATLID である。ATLID にも高スペクトル分解ライダ手法が採用され、より定量的な雲・エアロゾル観測が行われる。現在、この他に国際宇宙ステーション（ISS）搭載 CATS が運用されている。CATS は、技術的にも観測データにおいても CALIOP と EarthCARE を繋ぐ役割が期待されている。CALIOP/CALIPSO ではマルチ縦モードレーザーが使用された。一方、ISS-CATS、ALADIN/ADM-Aeolus、ATLID/EarthCARE ではシングル縦モードの単一波長レーザーが使用されている。世界的に衛星搭載ライダは、レーザーの単一波長化とともに、より高機能なライダへと向かっている。

4.5.2. 現状分析と展望

雲・エアロゾル観測

CALIOP/CALIPSO および ISS-CATS が現在運用中で、その後継として ATLID/EarthCARE が運用される。CALIPSO 衛星は、雲レーダを搭載した CloudSat 衛星や、分光イメージャ MODIS や赤外サウンダ AIRS 等を搭載した AQUA 衛星等と A-Train 衛星群を構成して同期観測を行うことで、複数センサによるシナジー観測を実現している。特に、雲レーダとライダのシナジー観測は、水雲、氷雲、そして霧雨を含む降水の包括的な全球観測を実現するとともに、雲微物理特性に関するより高度で詳細な情報の取得を可能とした (Okamoto et al., 2010)。これらライダを中心とした観測からは雲に関する情報だけではなく、雲とともに地球の放射収支の評価に不可欠なエアロゾルの情報も得られてきた。これらの情報の活用により、気候変動に

において重要な雲・エアロゾルの相互作用についての解明も進みつつある。EarthCARE 衛星には、ATLID と共に高感度の雲レーダも搭載される (Illingworth et al., 2015)。よって、CloudSat-CALIPSO に比して、より高精度な雲微物理特性の抽出が期待できる。なお、ATLID の開発は欧州だが、データ解析では、日本でも独自の解析アルゴリズムを開発しデータプロダクトを提供する。

ATLID/EarthCARE の後は、米国の ACE プロジェクトで高機能な大気観測ライダの搭載が検討されているが具体化していない。鉛直方向に解像した雲の正確な情報は、ライダないし雲レーダ以外の測器では得られないことが、MODIS や ISCCP (国際衛星雲気候計画) と CloudSat-CALIPSO の比較研究によって示されている (例えば、Hagihara et al., 2010)。ATLID/EarthCARE 以後の具体的な雲・エアロゾル測定ライダ計画が現状では無い。宇宙からの雲・エアロゾル測定ライダ観測の継続が強く望まれる。

高度計測・植生観測

高度計測では、GLAS/ICESat の後継機 ATLAS/ ICESat2 の打ち上げが 2017 年に予定されている。ATLAS は、低パルスエネルギーで高繰返し周波数型のレーザー (波長 532nm、出力 1mJ、繰返し周波数 10kHz) をマルチビーム (6 方向、ビーム間隔 3.3km) で送信し、複数のピクセルをもつ検出器によるフォトンカウンティング直接検波方式で氷床高度を計測する。

さらに GLAS や ATLAS は、植生の観測にも利用される。GLAS の観測波形データを解析することで、樹高やバイオマス (樹木の乾燥重量) といった森林の特徴量が抽出されている。その精度は現地計測による精度に匹敵し、衛星による森林観測に革新的な進展をもたらした。特に、バイオマスの半分は炭素の重量であるため、近年の地球温暖化研究に関連して、森林の炭素貯留量分布を高精度に計測できるツールとして大きな期待が寄せられている。

一方、ライダを植生観測に利用する上での欠点として、①観測点 (フットプリント) が離散的なため面的に全ての点を観測できないこと、②急傾斜地では計測精度が低下すること、が挙げられる。ATLAS では、①の欠点を補うためにマルチレーザービームでフットプリント数を増やしている。植生観測を主目的としたライダとして、米国の GEDI と日本の MOLI があり、いずれも ISS への搭載が計画されている。GEDI は 3 つのレーザー (波長 1064nm、出力 17mJ、繰返し周波数 242Hz) によるマルチレーザービーム送信を行い (7 方向×2、ビーム間隔 450m)、直接検波方式によって樹高を計測する。ATLAS と同様に、マルチレーザービームによりフットプリント数を増やすことで上記①の欠点を補っている。MOLI は近接するマルチビームを用いて地面の傾斜を推定し、樹高やバイオマスの計測精度を向上することで上記②の欠点を補おうというユニークなライダである (Asai et al., 2012)。GEDI と MOLI は、観測期間を一部オーバーラップしつつ連続して観測をおこなう計画である。しかし、植生の観測においては長期間にわたるモニタリングが本質的であるため、GEDI や MOLI で培われた技術を利用した後継

のライダー計画への期待は非常に大きい。

風・温室効果ガス観測

ライダーの優位性が明確な観測に、ドップラー風ライダーによる風速測定とメタンやCO₂などの温室効果ガスの測定がある。気象要素の観測について、現在の衛星観測システムは温度と水蒸気関連の測定に偏重しており、全球的な風の観測が望まれている。現在、衛星からの全球ベクトル風観測はマイクロ波散乱計と赤外放射計により行われており、1層もしくは2, 3層を高度分解能 2-4 km、水平分解能 4km でベクトル風が抽出されている。抽出される風は、ラジオゾンデによる高層気象観測に対し、 <2 m/s のバイアス、 >4 m/s の二乗平均平方根ベクトル差を持つ、また、その推定高度も悪い。このような高分解能観測で捉えられる構造については地衡風近似が成り立たないので、温度や気圧から風を推定することは難しく、その意味でも風ベクトルの直接観測が必要である。

欧州では、直接検波方式（インコヒーレント方式）のドップラーライダーである ALADIN/ADM-Aeolus（2017 年に打ち上げ）が計画されている。ALADIN の空間分解能は、高度分解能 0.5-2 km、水平分解能 <100 km であるが、風計測は視線方向のみであるため、ベクトル風は得られない。ALADIN では、アイセーフ領域である紫外域の単一波長レーザー（波長 355nm、出力 80mJ、繰り返し周波数 50Hz）が用いられる。米国でも、直接検波方式によるドップラー風ライダー 3D wind の検討が行われているが、まだ計画は具体化していない。

温室効果ガスの測定については、メタン観測を目的とした光路積分差分吸収ライダー（IPDA）MERLIN が欧州 DLR-CNES で開発され、2020 年頃の打ち上げが計画されている。一方、米国では、ASCENDS においてライダーによる CO₂ 測定のフィージビリティスタディが複数の方式について行われたが、衛星計画は具体化していない。

日本では、光ヘテロダイン検波を用いるコヒーレント方式のライダー技術の開発が NICT で継続的に行なわれている（Ishii et al., 2010）。赤外の単一波長レーザーを用いるコヒーレント方式により、小・中型衛星にも搭載可能なドップラー風ライダーが実現可能である。NICT では、衛星搭載コヒーレントドップラー風ライダーのシミュレータを開発し風観測の性能評価を行うとともに、観測の数値予報への効果を定量的に評価するためのシミュレーション（OSSE）を行っている（Ishii et al., 2016）。コヒーレントドップラー風ライダーのレーザー技術、光検出器技術は温室効果ガスの計測にも共通するものであり、波長 $2\mu\text{m}$ の差分吸収ライダー（DIAL）の研究も NICT で同時に進められている（Ishii et al., 2010, 2012）。

4.5.3. 想定されるシナリオ

衛星搭載ライダーの様々な提案がなされているが、継続的な観測とセンサの改良によってデータ利用が深化すると期待される分野と技術実証あるいは単発の研究観測ミッションは分け

て考える必要がある。前者については、例えば大気分野では CALIOP/CALIPSO の発展的継続が望まれる。また、ISS 搭載 MOLI の後継として実利用のための植生ライダの長期運用が望まれる。この他、温室効果ガスの継続的な観測の中でライダの利用による高精度化の可能性も期待されている。

技術的観点からは、大気観測のうち後方散乱ライダについては、植生ライダと一体化することが可能であると考えられる。後方散乱ライダに求められる最小限の機能は、1 波長の後方散乱と偏光解消度である。これらは雲の相識別、微物理特性の抽出、雲・エアロゾル気候モデルの検証、同化に定量的に利用可能である（例えば、Sekiyama et al. 2010）。また、高度計としての運用やマルチビーム、スキャン等も、植生・大気ライダの発展型に取り込むことができると考えられる。日本のライダの継続的ミッションとして、現時点では、MOLI および後継の植生・大気ライダに集中して開発を進めることが重要であろう。一方、温室効果ガスの測定については技術的な課題が多いが、GOSAT 後継への搭載を目指したライダの開発が継続されることが望まれる。

ドップラー風ライダについては 2024-27 年頃に米国と日本で連続して複数を打ち上げることが提案されている。これによって、光ヘテロダイン検波方式と直接検波方式によるドップラー風ライダの技術的な検証を行い、さらに数値天気予報等へのインパクトを科学的に検証し後継ミッションに発展することが期待される。

ライダ技術の基幹はレーザー技術にあり、その技術発展は今後のライダ衛星計画において不可欠である。衛星搭載大気ライダ計画 ELISE において宇宙用レーザーの試作等が行われたが、実現には至らなかった。ISS 搭載植生ライダ MOLI は、その開発途上のレーザー技術を実用にまで昇華することが課されており、日本の衛星ライダ計画を未来へ繋ぐ重要な架橋となっている。MOLI で開発される宇宙用レーザー技術は、植生・大気ライダ、GOSAT 後継、そしてドップラー風ライダで必須となる。特に、より高度なレーザー技術を必要とする GOSAT 後継やドップラー風ライダでは、レーザー技術のさらなる発展が遂げられ、その技術は、その他のエアロゾル・雲の多波長高スペクトル分解ライダ、多重散乱ライダ、水蒸気ライダ（上部対流圏、下部成層圏の水蒸気）、2 波長を必要とする差分吸収ライダ等のより高機能なライダに共通する技術として、研究観測ミッションに継承される。

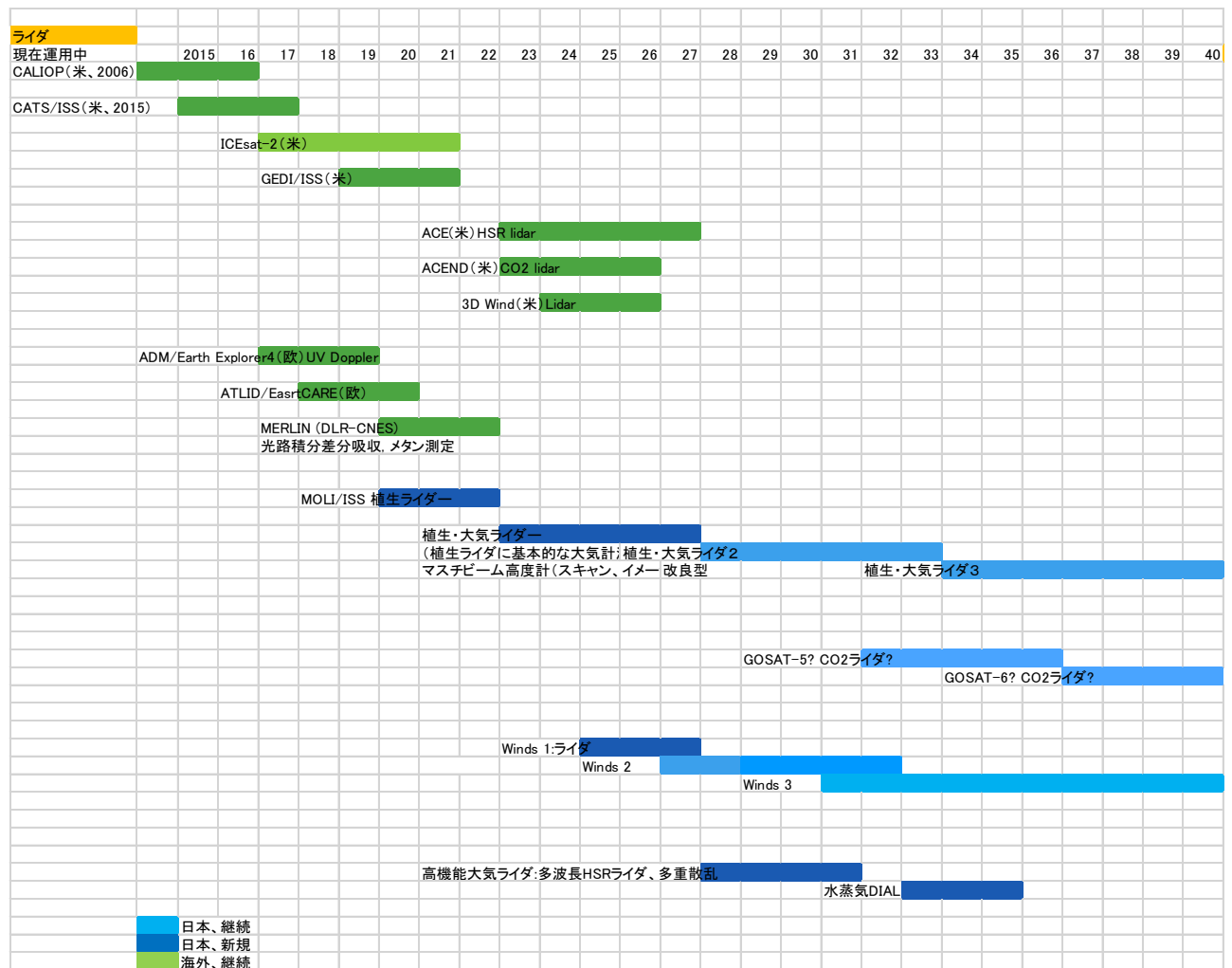


図 4. 5. 1 ライダミッションのロードマップ

References

Asai, K., H. Sawada, N. Sugimoto, K. Mizutani, S. Ishii, T. Nishizawa, H. Shimoda, Y. Honda, K. Kajiwar, G. Takao, Y. Hirata, N. Saegusa, M. Hayashi, H. Oguma, H. Saito, Y. Awaya, T. Endo, T. Imai, J. Murooka, T. Kobayashi, K. Suzuki, R. Sato, iLOVE: iss-jem Lidar for Observation of Vegetation Environment, Proc. of SPIE Vol. 8526, 85260K, 2012, doi: 10.1117/12.981326.

Hagihara, Y., H. Okamoto, and R. Yoshida (2010), Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, J. Geophys. Res., 115, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344.

Illingworth, A. J., H. W. Barker, A. Beljaars, M. Ceccaldi, H. Chepfer, N. Clerbaux,

J. Cole, J. Delanoë, C. Domenech, D. P. Donovan, S. Fukuda, M. Hiraoka, R. J. Hogan, A. Huenerbein, P. Kollias, T. Kubota, T. Nakajima, T. Y. Nakajima, T. Nishizawa, Y. Ohno, H. Okamoto, R. Oki, K. Sato, M. Satoh, M. W. Shephard, A. Velázquez-Blázquez, U. Wandinger, T. Wehr, G.-J. van Zadelhoff, 2015: The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 96, issue 8, pp. 1311–1332.

Ishii S., K. Mizutani, H. Fukuoka, T. Ishikawa, B. Philippe, H. Iwai, T. Aoki, T. Itabe, A. Sato, and K. Asai, 2010: Coherent 2- μm differential absorption and wind lidar with conductively-cooled laser and two-axis scanning device. *Appl. Opt.*, 49, 1809–1817.

Ishii S., K. Mizutani, P. Baron, H. Iwai, R. Oda, T. Itabe, H. Fukuoka, T. Ishikawa, M. Koyama, T. Tanaka, I. Morino, O. Uchino, A. Sato, and K. Asai, 2012: Partial CO₂ Column-Averaged Dry-Air Mixing Ratio from Measurements by Coherent 2- μm Differential Absorption and Wind Lidar with Laser Frequency Offset Locking. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 29, 1169–1181.

Ishii S., K. Okamoto, P. Baron, T. Kubota, Y. Satoh, D. Sakaizawa, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, K. Yamashita, S. Ochiai, K. Gamo, M. Yasui, R. Oki, M. Satoh, and T. Iwasaki, 2016: Measurement performance assessment of future space-borne Doppler wind lidar. *SOLA.*, 12, 55–59.

Okamoto, H., K. Sato, and Y. Hagihara (2010), Global analysis of ice microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of specular reflection in lidar signals, *J. Geophys. Res.*, 115, D22209, doi:10.1029/2009JD013383.

Sekiyama T. , Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi, 2010: Data assimilation of CALIPSO aerosol observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 39–49.

4. 6. 大気化学

笠井康子(情報通信研究機構/東工大)・林田佐智子(奈良女子大)・金谷有剛(JAMSTEC)・北和之(茨城大)・入江仁士(千葉大)・齋藤尚子(千葉大)・今須良一(東大)

4. 6. 1 大気化学分光センサ

4. 6. 1. 1. これまでの歩みとこれからの方向性

大気中に存在する微量成分の衛星観測は、これまで主に、オゾン層破壊、地球温暖化、大気汚染など各種グローバル環境問題の「実態把握」とその「現象プロセスの理解」を大きな目的として実施されて来た(図4. 6. 1) これらの大気衛星観測は常に環境政策と共にある。

1970年代後半において人為起源のフロン等によるオゾン層破壊問題が台頭してきたころはTotal Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)などの太陽光後方散乱紫外線分光計

によるオゾン全量観測が主力であり、これらにより「オゾンホール」を捉え、世界に大きなインパクトを与えたものである。1987年のモントリオール議定書成立後はオゾン破壊現象のメカニズム研究が盛んになるが、衛星観測ではオゾンとその破壊物質を観測するLimb観測センサ(可視紫外、赤外、マイクロ波)によるオゾン破壊物質観測の黄金期を迎えた。図4. 6. 2に示すようにLimbセンサの観測周波数帯は多岐に渡り、太陽光散乱可視紫外遠赤外分光計、赤外放射分光、太陽赤外光掩蔽分光、マイクロ波分光などほぼ既存の衛星における全分光周波数帯を

カバーし、打上衛星数は1978年から2010年の間に世界で20にもものぼった。これらオゾン層破壊現象の観測センサにおいて、日本ではADEOS搭載のILAS(赤外掩蔽)、ILAS-II(赤外掩蔽)、国際宇宙

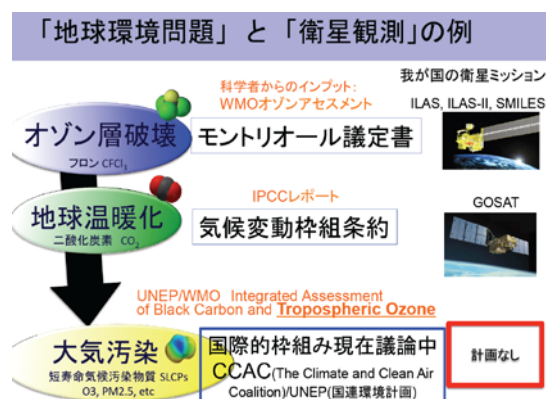


図4. 6. 1 地球環境問題と衛星センサ

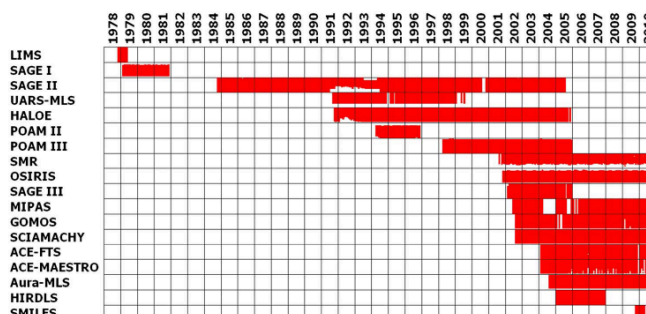


Figure 1. Available ozone measurement records between 1978 and 2010 from limb-sounding satellite instruments participating in the SPARC Data Initiative. The red filling of the grid boxes indicates the temporal (Jan-Dec) and vertical (300 to 0.1 hPa) coverage of the instruments.

図4. 6. 2 オゾン層破壊微量成分などを計測するLimb観測センサ。(S. Tegtmeiere et al., 2013, JGR, 118, 12, 229, doi:10.1002/2013JD019877)

ステーション搭載の SMILES（サブミリ波）、3機のセンサ打上実績がある。これらはいずれも分光スペクトルの正しさと美しさ（縦軸横軸のキャリブレーション精度確度など）では世界トップの技術を誇る。

温暖化問題衛星観測に関して日本は世界で最も早く実装を行ない、それ故に現在でも世界を牽引する立場にある。地球温暖化に関連し CO₂、CH₄ を観測する GOSAT 衛星を世界で初めて打ち上げ(2009 年)たが、温暖化物質観測衛星において熱赤外バンド（TIR）と短波長赤外バンド（SWIR）の両バンド搭載は GOSAT のみである。これについては別途項目があるので詳細は割愛する。

近年、大気汚染による健康被害が深刻化しており、WHO(World Health Organization) 2012 年の報告によると年間 3700 万人の人間が大気汚染により死亡していると見積もられ、室内室外を含めると世界の 8 大死因の一つに上げられている。国際的には、短寿命気候汚染物質削減のための気候と大気浄化の国際パートナーシップ（CCAC）閣僚級会合が定期的に開催されており、政策的にも重要な側面を持つ。これらの大気汚染物質の衛星観測は、2000 年代当初に打ち上がった米国 NASA の AURA (2004 年打上げ) 搭載 OMI（太陽光散乱可視紫外線分光計 Nadir）TES（赤外放射分光計 Nadir）や、ESA の Envisat (2002 年打上げ) 搭載 SCHIYAMACHY（太陽光散乱可視紫外近赤外線分光計 Nadir-Limb）などが科学観測衛星として汚染大気観測の先鞭をつけたものである。

現在では、大気汚染天気予報のように、汚染大気を時々刻々と追跡して時空間的に密に観測することの重要性から ESA、NASA、KARI（韓国）のそれぞれが静止衛星計画を進めている。そのうち ESA ではの Sentinel4 は Meteosat Third Generation satellites シリーズにおける太陽光散乱可視紫外線分光計搭載の静止衛星であり、Sentinel5 は同様の測器を搭載した低軌道衛星である。NASA は静止衛星軌道上に TEMPO（太陽光散乱可視紫外線分光計）を 2018 年に打上予定。さらにアジア域では、韓国が静止衛星軌道上に GEMS（太陽光散乱可視紫外線分光計）を 2018 年に打上予定である。日本は大気汚染衛星観測分野では世界に大きく遅れをとっており、搭載計画は国際宇宙ステーションミッション uvSCOPE のみである。

大気化学観測衛星に関しては、これまで「日本大気化学会」の下部組織である「大気環境観測衛星検討会」が平成 18 年度からとりまとめて検討してきている。u

4.6.1.2. 背景

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 8 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）に報告されている通り、進行中の地球環境の大規模な変化においては、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っており、大気の化学組成の変動を監視することは極めて重要な地球観測要素の一つと認識されている。また、同提言の 6 章「将来取り組むべき新しい技術の開発（提言 4）」には、イメージング分光計について、

「水平分解能 1 km 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。」と記述されている。

これらの大気汚染物質の成分は粒子状物質 (PM)、オゾン (O₃)、二酸化窒素 (NO₂)、二酸化硫黄 (SO₂) などであり、その発生源は工場、自動車、森林火災、家畜など多岐に渡る。これら大気汚染物質は長距離輸送による越境汚染の影響が大きいことが特徴である。特にアジアでは、中国・インドをはじめとする新興国の経済発展がめざましいが、その反面大気汚染による環境悪化が大きな問題となっており、越境汚染として近隣諸国あるいは北半球全体の大気環境に影響を及ぼしつつある。日本でも地表オゾン(オキシダント)濃度がほとんどの地域で環境基準超過の状態であり、光化学スモッグ注意報が発令される高濃度となる地域や頻度が増加しつつある状況が続いている(図 4. 6. 3)。これは中国大陸や朝鮮半島付近から放出されている大気汚染物質の影響であると強く疑われている。しかし、中国・朝鮮半島と日本の間の海上において常時大気汚染監視を実施することは現実的には困難であり、衛星からの実態把握に強い期待が持たれる。

4.6.2. 静止衛星からの大気環境観測：Geostationary Monitoring of Air Pollution(GMAP)－Asia

アジアにおける大気汚染の実態把握に最も有力と思われるのは、静止衛星をアジアの赤道上に打ち上げ、大気汚染物質の空間的・時間的変動を常時監視することである。静止衛星からの観測の特徴として、軌道衛星と異なり、24 時間常時連続した観測が可能であることが挙げられる。従って、短寿命化学種の速い動態変化の検出が可能である。静止衛星による大気化学種の観測は、いわば気象衛星「ひまわり」の大気汚染版である。静止衛星からの大気環境観測に期待する項目は様々であるが、特にオゾンとその前駆物質の観測が重要である。

オゾン観測にあたってまず留意すべき点として、鉛直分布を高度によって分離して観測する必要性が挙げられる。境界層から対流圏下部においては、オゾンは直接人体や生態系へ悪影響を及ぼす。一方、上部対流圏オゾン増加は地球温暖化に重要な影響を与える。

静止衛星によるアジア上空のオゾン観測によって、オゾンの環境影響を定量的に示すとともに、我が国への流入量、アジ

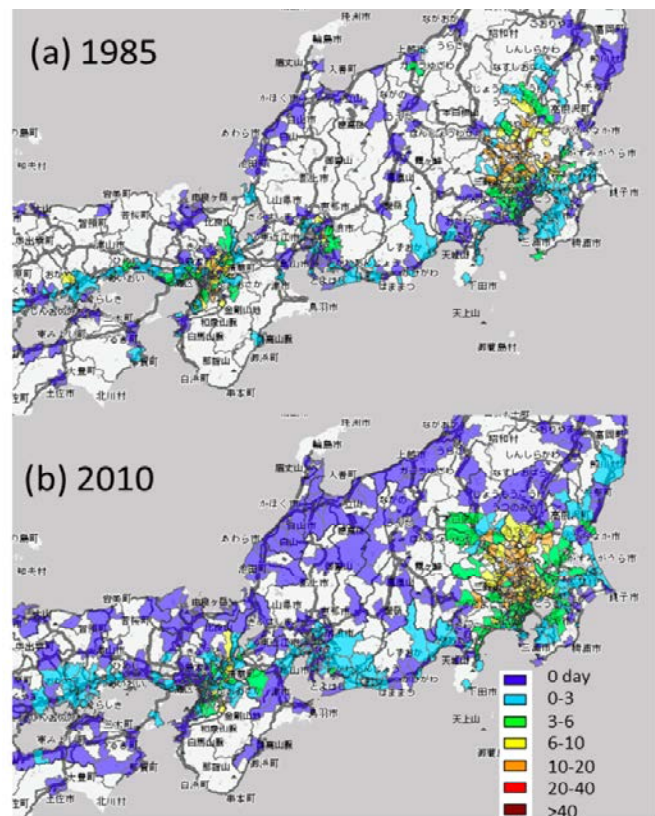


図4. 6. 3 地表オゾン濃度1時間平均値が120ppb を越えた日数。(a)1985 年および(b)2010 年。(環境省 web サイトより)

また、前駆物質からの対流圏オゾン生成プロセスの定量的理解を進めることが可能であり、またモデルと組み合わせ、アジア域でのそれら前駆物質の発生源分布とその変動についての知見を大きく向上させることができる。

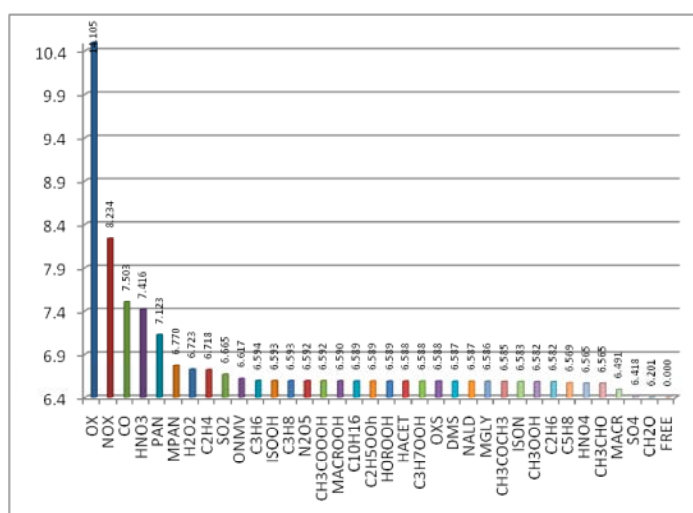


図 4. 6. 4 オゾンはじめ様々な物質の静止衛星観測値を同化できたときの、東アジア地表オゾン濃度の予測精度改善率(%)。(大気環境観測衛星検討会での検討資料) pb を越えた日数。(a) 1985 年および (b) 2010 年。(環境省 web サイトより)

静止衛星観測によって、対流圏オゾンあるいはエアロゾルが高濃度となっている気塊が、時々刻々輸送され、越境汚染の状況が一目でわかるであろう。

また対流圏オゾン・エアロゾルとその前駆気体の観測値をモデルに同化することで、それらの変動の数値予測精度を大幅に向上させ、大気環境状況や越境汚染の精度の高い予測が可能となると考えられる(図4. 6. 4)。すなわち「化学天気予報」である。

大気環境観測衛星検討会がまとめた静止大気環境観測計画 GMAP-Asia との観測要求と仕様要求（表4. 6. 1、表4. 6. 2）を示す。表4. 6. 1

時間分解能	<u>1—6 時間（目的に応じて選択可能）</u> 東アジアの大気質観測では、1-2 時間が望ましい。イベント観測（光化学スモッグ・森林火災・火山噴火）時などは 1 時間程度が望ましい。	
時間カバー	<u>24 時間/日（紫外/可視光観測は昼間のみ）</u>	
空間カバー	アジア広域・東アジア全域・大都市上空を目的によって選択。	
水平分解能	<u>1x1 km—50x50 km（目的に応じて）</u> 東アジアの大気質観測のためには 10x10km が望ましい。航路、放出源や都市大気質観測を行う場合は、1x1 km—2x2 km 程度が望ましい。	
鉛直分解能	<u>対流圏-成層圏分離</u> 全ての化学種について、境界層（0-2km）の分離が望ましい。	
プロダクト	標準	オゾン（O ₃ ）・二酸化窒素（NO ₂ ）・一酸化炭素（CO）・エアロゾル光学的厚み（AOT）・HCHO・輝度温度・SO ₂
	拡張	境界層 O ₃ ・HNO ₃ ・PAN・CH ₄ ・CH ₃ OH・CH ₃ CHO・H ₂ O ₂ ・HCN・NH ₃ ・CHOCHO・エアロゾルタイプ分類・CO ₂ ・エアロゾル量・水蒸気

これに加えてさらにサブミリ波分光センサも搭載することで、成層圏-対流圏分離がより容易になり精度が向上できる。

表 4. 6. 2

センサ	紫外/可視ハイパースペクトルイメジャー	赤外ハイパースペクトルセンサ
観測波長（波数）域	$O_3 \cdot SO_2 \cdot NO_2 \cdot HCHO$ およびエアマスファクター導出に必要な O_4 などの観測バンドをカバーするために、観測波長域は 280—580 nm とする。	気温・水蒸気・ $O_3 \cdot CO \cdot HNO_3$ などの観測バンドをカバーするために、観測波数域は $700\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ および $1600\text{--}2250\text{ cm}^{-1}$ とする
波長（波数）分解能	観測対象物質等の吸収構造を十分に分解して計測するために 0.4 nm 程度	対流圏カラムが分離できる程度の鉛直分解能を実現するため 0.6 cm^{-1} 以下
時間分解能（対象域カバーに要する）	1-2 時間程度	1 時間程度
空間分解能	2-10km 程度	10km 程度
感度・S/N 比	波長 330nm にて $S/N > 500$ 波長 500nm にて $S/N > 350$	波数 $1030\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ にて $S/N > 200$ 波数 $2160\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ にて $S/N > 30$

このようなアジア域における静止衛星からの大気環境観測については、韓国が GEMS (Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer) と命名された装置を静止衛星 GEO-KOMPSAT2B に搭載し、2018 年に打ち上げ予定である。このことは、韓国が日本上空の大気汚染情報を把握することを意味する。我が国の安全保障の観点からも、我が国が独自の静止衛星観測を展開することが将来の課題であろう。

4.6.3. 低軌道周回衛星（ISS を含む）からの大気環境計測：APOLLO、uvSCOPE 提案

低軌道からの衛星観測では、静止軌道や高度約 700km の太陽同期極軌道からの観測の場合と比べて、空間解像度向上の利点が高く、水平分解能で 1km 四方（従来面積比で約 100 倍の分解能）までの大気汚染分子観測が可能と見込まれている。このことにより、空間的な不均一さの大きい発生源分布を解像し、正確なインベントリや予測を行うことが可能となる。また、ホットスポットを明らかにして、健康・作物被害を起こす大気汚染に関して個別発生源への対策を導くことが可能になる。

その際、地上約 400km を飛行する国際宇宙ステーション (ISS) は利用価値が高い。こうした解像度の向上だけでなく、我々が提唱する「ISS 地球観測所」構想では、マルチセンサによる同一分子の多波長計測から高度分布を導出したり、多数の大気汚染分子やエアロゾル等の情報を複合的に解析に用いたりすることも期待される。

ISS 搭載大型ミッションとしては Air POLLution Observation (APOLLO) ミッション提案が存在している。これは紫外可視・熱赤外（下方視）とマイクロ波（リム）による「多波長オゾン計測」によって、成層圏と対流圏（オゾン全カラム濃度の約 1 割）の大別だ

けでなく、対流圏分をさらに高度方向に 3 層分離して計測する（図 4. 6. 7）。このことにより、温暖化影響の大きい上部対流圏での量 (UT)、大陸間長距離輸送に強く関与する中部対流圏量 (LT)、健康影響に直結する下部対流圏・境界層での量 (LMT) を分離した解析が可能とな

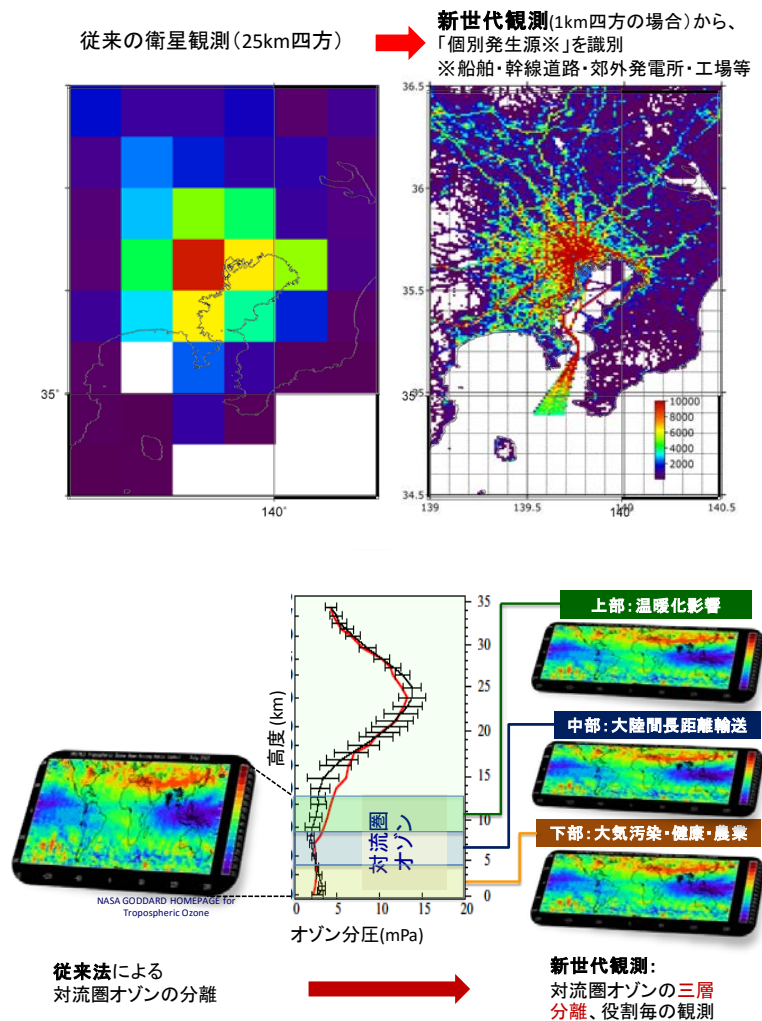


図 4. 6. 6 低軌道衛星・国際宇宙ステーションからの観測による「高解像度化」(上、関東での NO_2 の大気汚染分布観測イメージ) と「高度分解観測」(下、対流圏オゾンの 3 層分離)。

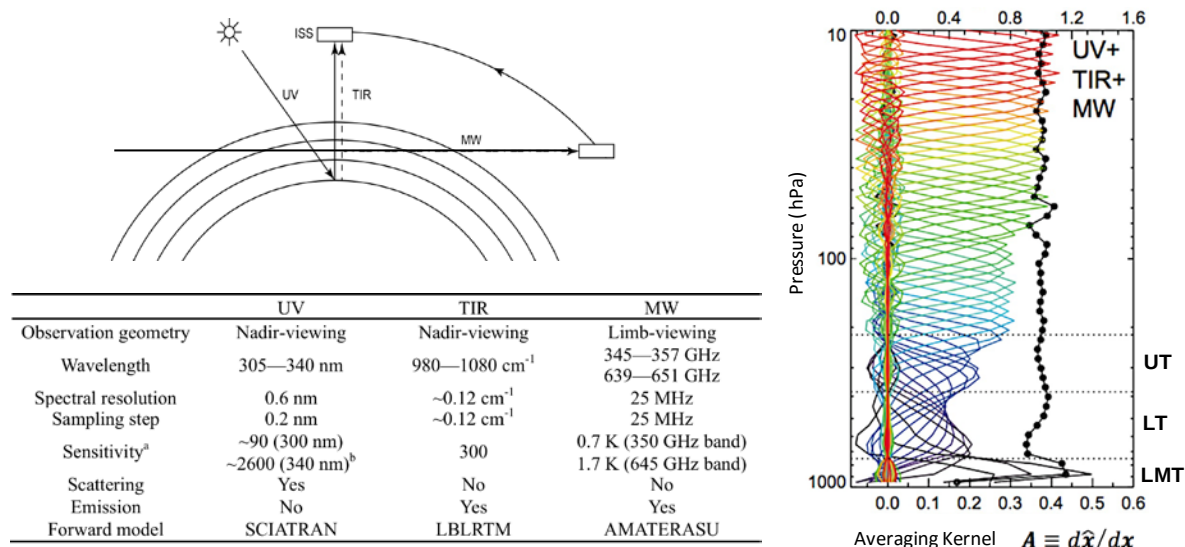


図 4. 6. 7 APOLLO で検討したオゾンの多波長観測計測のジオメトリ（左上）、観測条件（左下）とシナジーリトリバルでのアベレーシングカーネル例（右）。対流圏を LMT, LT, UT の三層に分離できる。

る。また、APOLLO では下方視紫外可視センサに回折格子を用いたイメージング分光計を採用し、最重要な大気汚染分子である NO_2 について面的に連続で、かつてなく高い水平分解能 (1–2km 四方) で計測できるものである（具体的には、都市域でのカラム濃度を十分に計測できる検出下限値 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ を達成するための必要な S/N 比は 500–1000 程度 (425–450nm) であること、アパチャーサイズ等を最適設計すると、仕様を満たすセンサが実現可能であり、その際、2次元検出器のうちの1次元を分光に費やすが、残りの1次元の空間方向（アクロストラック方向）は同時計測する。走査幅として 200km が実現可能）

これは、従来の数十 km 四方の観測では見逃されてきた、船舶・幹線道路・郊外発電所・工場等の「個別発生源」の識別が可能となることを示す。また、これらの発生源からの窒素酸化物の排出が、オゾン・PM2.5 エアロゾル等の二次汚染にどのように結びついているかを解明することができ、必要な対策を導くことができる。合わせて、土壌や雷、森林火災等の自然起源からの NO_x 排出の役割についても高い精度で解析することが可能となる。さらに、 NO_x 排出源付近では、大気化学の非線形現象を解明することができる。具体的には、対流圏大気化学の根幹とも呼ぶべき HO_x ラジカル化学の非線形性に由来して、オゾンの生成についても NO_x 制限・VOC (揮発性有機物) 制限のレジームが存在することが理論予測されているが、こうした理論の検証や現象解明に取り組める。

ISS の軌道は太陽非同期であり、計測範囲はおよそ北緯 50 度～南緯 50 度に限られ、定点あたりの観測地方時は一定しないこととなる。しかしながら、上記の条件で東京付近の緯度では定点あたり十数日に一度観測機会があること、一度のスナップショット観測によっても発生源分布や発生源周辺の非線形化学の解析が可能となることなどから、十分な意義が見出されると結論されている。また、さまざまな時刻の観測の集積によって、発生源強度や光化学反応の日変化に関する情報も得られ、太陽同期軌道からの観測と合わせてデ

ータ同化に用いる意義が高いこと、北緯 50 度付近の都市（例えばロンドン）では高密な観測機会が得られ詳細な解析が可能となることも新たな特徴と言える。全球での 1km 四方分光観測ではデータ量が膨大となるが、優先解析地域の選定や軌道上処理により、データ量を妥当な範囲へ抑えることは可能である。

uvSCOPE はイメージング分光計による下方視紫外可視センサを単独に抽出したもので、サイズが 738×460×300mm 程度、質量が 50kg 程度であり、与圧部でのセンサ輸送による ISS 中型ミッションでも十分に成立する。国産検出器で NO₂ を計測することを検討した場合の仕様を表 4. 6. 3 に示す。ハードウェアとして国産でチップ化可能な CMOS 検出器を用いることができ、国際競争力の維持・発展が見込まれる。

また、uvSCOPE は小型衛星への搭載の可能性がある。小型衛星を多数展開することで、高い空間分解を保持したまま、さらに時間的に密な観測を行うことが可能となる。これにより、都市スケールの大気汚染状況の速報が可能になるであろう。

4. 6. 4. まとめ

大気化学組成の変動を監視することは衛星観測の将来計画を設計する上で、極めて重要な観測要素である。しかしながら、過去 20 年の間に世界的に大気化学組成の観測が進んだ状況下であって、我が国は海外に大きく遅れをとっているのが現状である。韓国の GEMS の例に見られる通り、我が国の安全保障の観点からも憂慮すべき事態である。

日本においては大気環境観測衛星検討会の場で、静止衛星、低軌道衛星、および小型衛星搭載装置について詳細な検討を行われ、その検討結果を報告書や論文として出版されてい

表 4. 6. 3 uvSCOPE にて検討したイメージング分光計の仕様。

460–490nm イメージング分光計	
波長範囲	460nm–490nm
分光分解能	0.42 nm または 0.2nm ※
前置光学系	±14 または ± 21 deg ※
検出器	国産 CMOS 2048 × 2048 素子
素子数	6.5 μm × 6.5 μm
素子サイズ	または CCD 1252(H) × 576(V) 素子 22.5 × 22.5 μm
観測対象	標準プロダクト:NO ₂ , O ₄ (エアロゾル・雲判定情報導出のため)
寸法(mm)	490X320X290 (分光器本体部分)
F 値	3.5
検出器の SNR	約 500 @460–490 nm
データレート	約 3MBps (優先解析地域を調整)

る。さらに小型衛星搭載を念頭に、さらなる小型 UV-VIS 分光器による大気化学観測についても実現可能性がある。

UV-VIS 分光観測で対象とするオゾンや NO_2 、 SO_2 、 HCHO などの化学種は、大気中での寿命が短いため、高い時空間分解能が要求されることが特徴である。静止衛星は同じ領域を観測することが可能であるため、軌道衛星に比べて時間分解能に優れるが、軌道が高いための制約がある。一方、従来の周回軌道衛星では、同じ場所に対して一日一回程度の観測となり、日変化をとらえられない。ISS などの低軌道プラットフォームは空間分解能を細かくできる利点があり、APOLLO では水平分解能で 1km 四方を目指しているが、観測軌道が不規則となり、同じ地点を継続的に観測するには不備な点もある。一方で、我が国の環境監視を優先するのであれば、静止衛星観測を中心に小型衛星を補助的に活用する戦略も考えられる。

これらの複合システムの概念を図 4. 6. 8 にまとめた。技術的には、UV-VIS 分光系は比較的小型化が容易であり、静止気象衛星への搭載と様々な低軌道飛翔体への搭載を組み合わせることによって、効果的な環境監視が可能になるであろう。



図 4. 6. 8 大気化学種観測のための複合システムのイメージ図

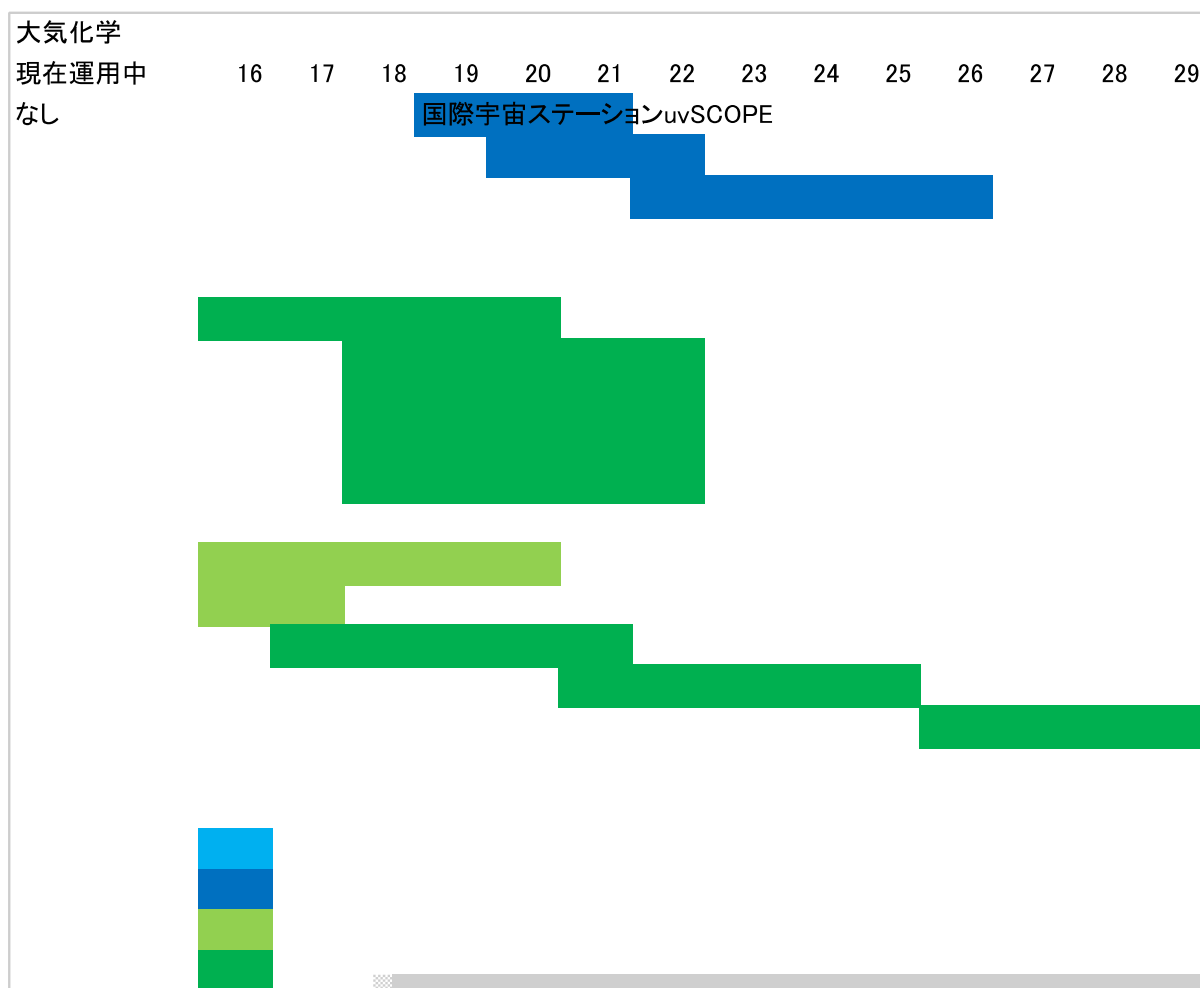


図4. 6. 9 大気科学ミッションのロードマップ

関連論文など

- Hayashida, S., Liu, X., Ono, A., Yang, K., and Chance, K.: Observation of ozone enhancement in the lower troposphere over East Asia from a space-borne ultraviolet spectrometer, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 9865–9881, doi:10.5194/acp-15-9865-2015, 2015.
- Irie, H., K. F. Boersma, Y. Kanaya, H. Takashima, X. Pan, and Z. F. Wang, Quantitative bias estimates for tropospheric NO₂ columns retrieved from SCIAMACHY, OMI, and GOME-2 using a common standard, *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 2403–2411, 2012n.
- Itahashi, S., Uno, I., Irie, H., Kurokawa, J.-I., and Ohara, T.: Regional modeling of tropospheric NO₂ vertical column density over East Asia during the period 2000–2010: comparison with multisatellite observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 3623–3635, doi:10.5194/acp-14-3623-2014, 2014.
- Kanaya, Y., Irie, H., Takashima, H., Iwabuchi, H., Akimoto, H., Sudo, K., Gu, M., Chong, J., Kim, Y. J., Lee, H., Li, A., Si, F., Xu, J., Xie, P.-H., Liu, W.-Q., Dzhola, A., Postlyakov, O., Ivanov, V., Grechko, E., Terpugova, S., and Panchenko, M.: Long-term MAX-DOAS network observations of NO₂ in Russia and Asia (MADRAS)

during 2007-2012: instrumentation, elucidation of climatology, and comparisons with OMI satellite observations and global model simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 7909-7927, doi:10.5194/acp-14-7909-2014, 2014.

Miyazaki, K., Eskes, H. J., and Sudo, K.: A tropospheric chemistry reanalysis for the years 2005-2012 based on an assimilation of OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8315-8348, doi:10.5194/acp-15-8315-2015, 2015.

Science Plan for Geostationary Mission for Meteorology and Atmospheric Pollution in Asia (GMAP-Asia), Committee on Atmospheric Environment Observation Satellites, Japan Society of Atmospheric Chemistry, pp.77 (2012).

Tanimoto, H., K. Ikeda, K. F. Boersma, R. J. van de A., S. Garivait, Interannual variability of nitrogen oxides emissions from boreal fires in Siberia and Alaska during 1996-2011 as observed from space, *Environ. Res. Lett.*, 10, 065004, doi: 10.1088/1748-9326/10/6/065004, 2015.

Yumimoto, K., Uno I., and Itahasi S.: Long-term inverse modeling of Chinese CO emission from satellite observations. *Environ. Pollut.*, 195, 208-318. /doi:10.1016/j.envpol.2014.07.026, 2014.

Yumimoto, K., 2013: Impacts of geostationary satellite measurements on CO forecasting: An observing system simulation experiment with GEOS-Chem/LETKF data assimilation system. *Atmos. Environ.*, 74, 123-133. /doi:10.1016/j.atmosenv.2013.03.032

環境省・光化学オキシダント調査検討会、光化学オキシダント調査検討会報告書 ―今後の対策を見ずえた調査研究のあり方について―，2012年3月。

その他

<http://apollo.nict.go.jp/document.html>

ドキュメント

- [Science Plan for Geostationary Mission for Meteorology and Atmospheric Pollution in Asia \(GMAP-Asia\)](#)
- [静止大気環境衛生の実現を目指して 2008年3月](#)

雑誌記事

- [月刊「化学」2013年（68巻）3月号 【解説】越境大気汚染の実像に迫る，金谷 有剛](#)
- [大気汚染と気候変化の新たな関係：地球温暖化のもうひとつの原因，谷本浩志，国立環境研究所ニュース 31巻5号 平成24年（2012年）p.3-5](#)

4.7. 温室効果ガス

今須良一（東京大）・横田達也（国立環境研）・松永恒雄（国立環境研）・齋藤尚子（千葉大）

4.7.1. はじめに（経緯、現状）

人工衛星搭載センサによる大気中二酸化炭素（ CO_2 ）測定の歴史は比較的浅い。それは、 CO_2 の大気中濃度が極めて安定的に一樣であることから、熱赤外（TIR）域の CO_2 吸収帯は、より変動の大きい気温測定に用いられてきたからである。しかし、Chedin ら¹⁾は、米国 NOAA 衛星搭載の TOVS/HIRS センサと気象ゾンデにより測定された気温の差異の長期トレンドが、 CO_2 の濃度変動と一致することから、熱赤外（TIR）センサによる CO_2 測定の可能性を示した。それを皮切りに、IMG²⁾（日本）、AIRS³⁾、TES⁴⁾、CrIS⁵⁾（米国）、IASI⁶⁾（欧州）などの赤外サウンダにより、対流圏上部の CO_2 濃度が解析され、それらのデータを輸送モデル計算と組み合わせるインバース解析に利用することで、大陸規模での CO_2 の排出・吸収強度を求めることに成功した。

一方、 $1.6\sim 2.2\mu\text{m}$ の短波長赤外（SWIR）域にある CO_2 の吸収帯では、対流圏下部の CO_2 濃度に感度があり、炭素循環研究の観点からは TIR よりも有用な情報を得られることから活用が望まれていた。しかし、2000 年初期まではセンサ感度が十分でないことから、 CO_2 濃度の解析が難しいとされてきたが、SCIAMACHY⁷⁾により反射率の高い陸上での解析が可能なが示された。これを踏まえ、また、社会的なニーズに応える形で、2009 年、GOSAT⁸⁾（図 4.7.1）が打ち上げられ、海上（主にサングリント）を含め、現在も CO_2 とメタン（ CH_4 ）の気柱平均濃度の計測が続けられている。特に、GOSAT は SWIR と TIR のバンドを同時に搭載する唯一の衛星であり、これらの統合解析により、対流圏下層のガス濃度の推定が可能となる。2009 年に打ち上げに失敗した米国の OCO は、日本側から提供された GOSAT データの解析により次号機の打ち上げに備え、2014 年に OCO-2⁹⁾の打ち上げに成功した。

4.7.2. 現在進行中の計画

GOSAT の後継機である GOSAT-2 は、センサ感度の向上、晴天域を能動的に選定して観測する



図 4.7.1 GOSAT

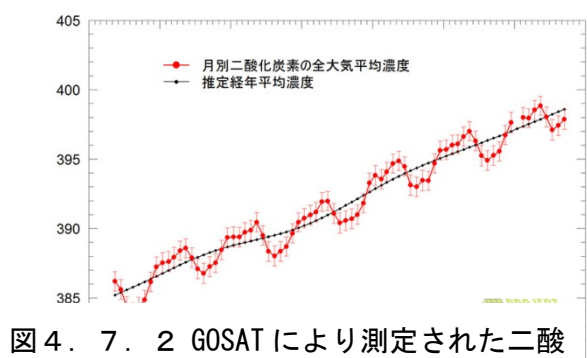


図 4.7.2 GOSAT により測定された二酸化炭素濃度（月平均値）

インテリジェントポインティングの採用により、データ数と測定精度を向上させ、2018年の打ち上げを目指している。OCO-2の後継機であるOCO-3は、2018年以降に国際宇宙ステーション(ISS)に搭載される予定である。また、OCO-2と同じ方式でほぼ同等の性能を有する中国のTanSat¹⁰⁾も2016年夏に打ち上げられる。空間分解能と広域性の両立を目指した欧州のCarbonsatミッションは採択されないことがほぼ決まり、代わって大都市などをターゲットにした高空間分解能なMicroCarb¹¹⁾(CNES)が2020年の打ち上げを目指して計画を進めている。Sentinel-4ミッションとして、静止衛星MTG-S¹²⁾に搭載がされる熱赤外サウンダであるIRSもCO₂やCH₄などの温室効果ガスをターゲットにしており、欧州のIASIや米国のCrISなどと伴に、長期シリーズ化することがほぼ確実となっている。これらの熱赤外サウンダは、幅広い波長域をカバーするフーリエ分光器(FTS)であることから、CO₂やCH₄と同時に、オゾン、CO、SO₂、NO₂、アンモニア、ギ酸、ホルムアルデヒドなど¹³⁾といった化学種も同時解析することが可能であり、大気環境の監視などの役割も期待されている。

4.7.3. 科学的目標(観測ターゲット)

GOSAT初号機の最大の目標は、亜大陸規模でのCO₂の排出・吸収の推定誤差を半分にすることであり、一部の地域でそれが実現できたことが確認されている。そのことを踏まえ、GOSAT-2では、より高精度、広域(高緯度)の観測により、国レベルに近い規模での吸収・排出の制度向上を目指す一方、メガシティなどの大規模発生源の集中観測を可能にすることを目指している。また、GOSAT初号機で実証された植物の太陽光励起クロロフィル蛍光(SIF)測定¹⁴⁾の感度向上により、陸域植生におけるCO₂吸収量(GPPやNPP)推定の精度向上を目指す。GOSAT-2のサイエンスプランでは、CO₂については、1)CO₂収支解析におけるトップダウン手法とボトムアップ手法の統合、2)陸域生態系モデルの高度化とインバージョン解析への統合、3)ホットスポットの特定と早期検出、4)REDD+に資する情報提供などを掲げている。CH₄については、1)温暖化に伴う湿地からのCH₄放出、2)パイプラインからのリーク監視、3)農業起源のCH₄発生量の監視、4)長期増加率変動のメカニズム解明などを目指している。

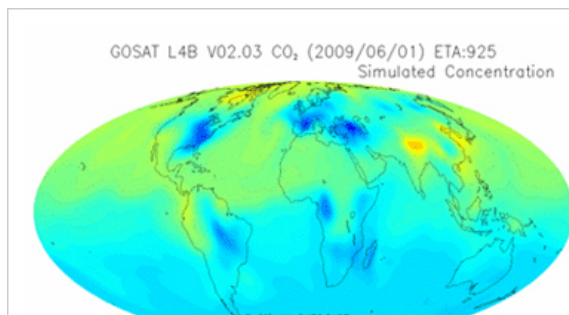


図4.7.3 GOSAT Level 4B データ

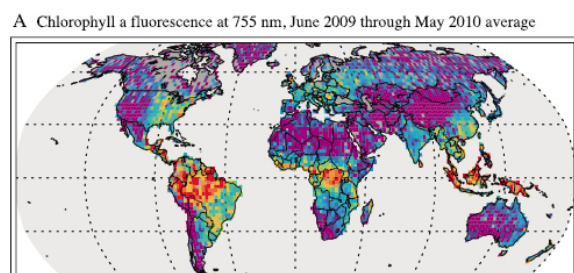


図4.7.4 GOSATにより測定された太陽光励起クロロフィル蛍光(SIF)の全球分布 (Frankenberg, and Coauthors, 2011)

世界的には、衛星観測による大都市からの CO₂ 排出量監視に重点を置こうという方向性が伺える。例えば、米国インディアナポリスにおいては、電気自動車導入による CO₂ 削減効果を、タワー観測と衛星データから検証しようという計画が進行中である。しかし、人為起源の CO₂ 排出量推定の高精度化を目指す一方で、陸域植生や海洋への吸収など、自然起源の炭素循環に関する衛星プロジェクトの位置づけが明確でない計画も多い。このような中、GOSAT シリーズでは、クロロフィル蛍光(SIF)などの陸域植生に関する情報の同時取得と併せ、熱的放散指数(PRI)や水渇水ストレストレンド(WST)といった植物生理生態学的なデータの統合的な利用により、陸域生態に関わる炭素循環研究の高度化を目指す。これらは、GCOM-C や GCOM-W など日本の他の衛星との複合利用により、実現されることが期待される。また、センサ感度の向上により、これまで検出が難しいとされてきた安定炭素同位体 (¹³C) 比の解析が可能になることで、人為起源と自然起源の CO₂ 変動の寄与の分離が可能になることも目指している。

4.7.4. 技術的目標

雲域回避のためのダイナミック（インテリジェント）ポインティング、SNR 向上によるサンプリング以外の海上や低照度の高緯度への観測域の拡大が当面の技術開発課題である。

これまで、GOSAT は観測点数の点では SCIAMACHY や OCO-2、他国の将来センサなどと比して劣るとされつつも、0.5%以上という圧倒的に高い絶対校正精度において、他のセンサよりも優れているとされてきた。この点においては、SNR の更なる向上と校正技術の改良により、GOSAT データの優位性を保ち、他のセンサの規準となる高い精度の観測を続けていくことが何よりも期待されている。

一方、雲回避と大都市における大規模発生源の特定を可能にする瞬時視野（IFOV）の向上と同時に、1次元・2次元のアレイ素子を用いたイメージング FTS の開発が検討されている。また、欧州では可動部の無いスタティック FTS¹⁵⁾を用いた地上実験も実施され、ある程度の実用化に目途がついてきた。今後、これらの技術を用いた高空間分解能・広域・高感度な FTS を用いた赤外サウンダの開発が進んでくるものと考えられる（例えば GOSAT-3 への搭載）。これらの技術が発展、確立すれば、最終的には静止衛星に搭載し、高時間分解能な観測を目指すことが期待される。



図 4. 7. 5 温室効果ガス観測センサのロードマップ

引用文献

- 1)Chédin A. et al., J. Climate, 15, 95–116, 2002.
- 2)Kobayashi et al., Appl. Opt., 38, 6801–6807, 1999.
- 3)Chahine et al., Geophys. Res. Lett., 32, doi: 10.1029/2005gl024165, 2005.
- 4)Kulawik et al., Atmos. Chem. Phys., 10, 5601–5623, doi:10.5194/acp-10-5601-2010, 2010.
- 5)<http://npp.gsfc.nasa.gov/cris.html>
- 6)Crevoisier et al., Atmos. Chem. Phys., 9, 4797–4810, doi: 10.5194/acp-9-4797-2009, 2009.
- 7)<http://www.sciamachy.org/>
- 8)Yoshida et al., Atmos. Meas. Tech., 6, 1533–1547, doi:10.5194/amt-6-1533-2013, 2013.
- 9)Crisp D. et al, J. Appl. Remote Sens., 2(1), 023508.
- 10)<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tansat#references>

- 11) <https://microcarb.cnes.fr/en/MICROCARB/index.htm>
- 12) http://www.star.nesdis.noaa.gov/star/documents/meetings/2015JPSSAnnual/dayFour/08_Session7b_Tjemkes_MTGIRS-L2_processor%20for%20JPSS-STAR.pdf#search='MTGS+Sentinel+IRS'
- 13) Van Damme et al., Atmos. Chem. Phys., 14, 2905-2922, 2014
- 14) Frankenberg, C., and Coauthors, 2011, Geophys. Res. Lett., 38, L17706.
- 15) Frank Brachet et al., SPIE 7100, doi:10.1117/12.797686, 2008.

4.8. 静止衛星

操野 年之（気象庁）・笠井康子（NICT/東工大）・本多嘉明（千葉大）・中島孝（東海大）・村上浩・可知美佐子（JAXA）・平田貴文（北海道大）・石元裕史（気象研）

4.8.1. 背景

地球観測衛星に対しては常に観測の高解像度化、高頻度化が要求されるが、両者は必ずしも両立せず、特に極軌道衛星による観測において高頻度観測を実現するためには複数個の同じ観測仕様の衛星を投入する必要がある。一方で近年の技術革新により、近い将来に静止衛星軌道からの100～300mの空間分解能の観測が現実味を帯びてきている。事実、現行の静止気象衛星「ひまわり8号」の可視（赤）バンドは既に500mの地上解像度を実現している。そこで、高緯度地域は極軌道衛星の観測の重なりを利用し、中低緯度地域は静止衛星を利用して高頻度観測を全球で実現することを考えるべきである。ただし、極軌道衛星の直下は観測対象との相対角度が一般的な観測になるのに対して、静止衛星では直下から外れるに従って観測角が大きくなるため解析に工夫が必要になるが、これは極軌道衛星と同じ時刻の静止衛星の観測データを利用して補正情報を作ることによって克服できる。

さらに、地球観測衛星による観測データは高解像度、高頻度、高ビット、多バンドなどの高精度化に伴いデータ容量が飛躍的に増大することが予想され、これは大きな問題になる。衛星から地上への大容量データのダウンリンクはレーザーを使った光通信が有望だが、地上付近の雲やヘイズが妨げになり随時通信ができる訳ではない。そこで考えられているのが、予め晴天率が高い地域を複数選んで地上の受信局を設置し、上空に妨げがない地域の受信局を選択的に選んで送信することで、全体としては常時通信を確保し、地上回線を通じてデータを集める方法である。その際、どの地域が通信可能な受信局なのかは静止気象衛星で判断し、静止光データリレー衛星から地上の然るべき受信局に送信することにより実現する。

静止地球観測衛星（気象観測を含む）とJトレインが生み出す大容量の観測データを静止気象衛星と静止光データリレー衛星を使ってストレスフリーで地上にダウンリンクする有機的な静止・極軌道衛星群運用を実現することが、アジア諸国を我が国の衛星ビジネスに参加してもらう強い動機になると考えられる。

4.8.2. 日本の静止気象衛星計画

日本の静止気象衛星計画は、1978年～1979年に実施された「第1回 GARP 全球実験 (FGGE)」において、全球を5機の静止気象衛星を用いて同時に観測する計画が提起され、それに貢献すべく、欧米の宇宙機関（NASA、ESA）と連携して NASDA（当時）が静止気象衛星 GMS（Geostationary Meteorological Satellite）初号機を1977年に打ち上げたことにより開始され、現在に至っている。

GMS 初号機から GMS-5 までは“スピン安定”方式の衛星で、MTSAT 以降は“3軸安定”方式に変更され、より高性能の観測測器の搭載が可能となっている。現行の「ひまわり8号」は、2016 年中に打ち上を予定している同一観測仕様の「ひまわり9号」と共に東経 140 度の赤道上で相互バックアップの観測体制を確立し、2029 年まで観測を継続する予定である。

(日本及び欧米の次世代静止気象衛星整備計画を図 4.8.1 に示す)

4.8.3. 現行「ひまわり8・9号」搭載観測測器

(日本及び欧米の次世代静止気象衛星搭載高性能イメージャの仕様及び他の極軌道気象衛星等との比較を表 4.8.1 に示す)

4.8.4. 今後の計画

静止気象衛星による全球観測は、現在、6 機程度の静止気象衛星によりカバーすることで実現されており、今後についても、世界気象機関(WMO)が定めた全球観測計画のベース・ラインに準拠した観測仕様の実現が求められている。2025 年を指向した要求仕様が、WMO が組織する「衛星システムに関する専門家チーム(ET-SAT)」における検討をふまえて、「ET-SAT2025 (Vision for the Global Observing System in 2025)」として既に策定されており、現在、それをベースに、2040 年を指向する観測要求仕様を検討中であり、将来的に「WIGOS2040」として答申される予定である。

「ET-SAT2025」では、“経度で約 60 から 70 度間隔に配置された 6 機程度の静止気象衛星”により観測体制を継続することが求められており、構成する個々の静止気象衛星に搭載される共通の観測仕様及び抽出される物理量は以下のとおりである；

(1) High-resolution multi-spectral Vis/IR imagers

- cloud amount, type, top height/temperature
- wind (through tracking cloud and water vapor features)
- sea/land surface temperature
- precipitation
- aerosols
- snow cover
- vegetation cover
- albedo
- atmospheric stability
- fires
- volcanic ash

(2) IR hyper-spectral sounders

- atmospheric temperature, humidity
- wind (through tracking cloud and water vapor features)
- rapidly evolving mesoscale features
- sea/land surface temperature
- cloud amount and top height/temperature
- atmospheric composition

(3) Lightning imagers

- Lightning (in particular cloud to cloud)
- location of intense convection

日本の静止気象衛星「ひまわり 8・9号」では、「ET-SAT2025」の要求仕様のうち、High-resolution multi-spectral Vis/IR imagersのみ搭載している。ちなみに2016年10月に打ち上げ予定の米国 NOAA/NESDIS の次期静止気象衛星 (GOES-R シリーズ) では High-resolution multi-spectral Vis/IR imagers 及び Lightning imagers が搭載される。欧州 EUMETSAT の次期静止気象衛星 (MTG シリーズ) では、2019 年に High-resolution multi-spectral Vis/IR imagers 及び Lightning imagers を搭載した MTG-I を打ち上げ、更に IR hyper-spectral sounders を搭載した MTG-S を 2022 年に打ち上げる計画がある。中国 CMA の次期静止気象衛星 (FY-4 シリーズ) は 2017 年に実験衛星を打ち上げる予定で、順次、High-resolution multi-spectral Vis/IR imagers、Lightning imagers 及び IR hyper-spectral sounders、マイクロ波イメージャを搭載する計画を表明しているが、詳細は不明である。韓国 KMA の次期静止気象衛星 (KOMPSAT-2A) は「ひまわり 8・9号」と同じ High-resolution multi-spectral Vis/IR imagers を搭載して 2018 年に打ち上げられる予定となっている。

4.8.5. 次期静止気象衛星「ひまわり 10・11号」に向けての仕様検討

衛星調達開始から打ち上げまでには5～6年程度を要することから、日本の次期静止気象衛星（「ひまわり 10・11号」）の仕様検討は2020年頃までには開始する必要がある。具体的には、「ET-SAT2025」のガイドラインに沿って現行の「ひまわり 8・9号」に搭載されている“高性能イメージャ (High-resolution multi-spectral Vis/IR imagers)”による観測の継続と併せて、“赤外ハイパースペクトラル・サウンダー (IR hyper-spectral sounders)”及び“雷検知 (Lightning imagers)”の搭載の可能性について検討することになるが、同一仕様の2機体制による観測を前提とするならば、イメージャと赤外ハイパースペクトラル・サウンダーの2つの測器を同一衛星バスに搭載することは、衛星バスの大型化が必要となり現時点では実現が困難なことから、イメージャとハイパースペクトラル・サウンダーを統合した (“2in1”型) 観測測器の開発 (調達可能となっていること) が求められる。なお、その際のサウンダー観測機能としては、イメージャによる10分間（「ひまわり 8・9号」による

観測頻度を踏襲することを前提として）の観測フレームの中で、晴天域と判別された領域のうち、大気的不安定領域や数値予報モデルの誤差が大きい領域に対してスポット的に観測するような仕様が想定される。雷検知についても、米国 GOES-R あるいは欧州 MTG に搭載されるものを更に小型化した上で同一衛星バスに搭載するための検討が必要である。

なお、ハイパースペクトラル・サウンダー機能の搭載により、観測中の衛星の姿勢変動を極力小さくする必要があることから、衛星バス自体の姿勢安定精度を現行よりも 1 桁程度向上させることが必要である。

また、“宇宙環境モニター（SEDA）” による観測は、WMO の推進する“宇宙天気”における利用を前提として「ひまわり 10・11号」においても継続する必要があるが、その仕様については、今後、別途、定められる要求仕様に準拠したものの搭載を検討する必要がある。

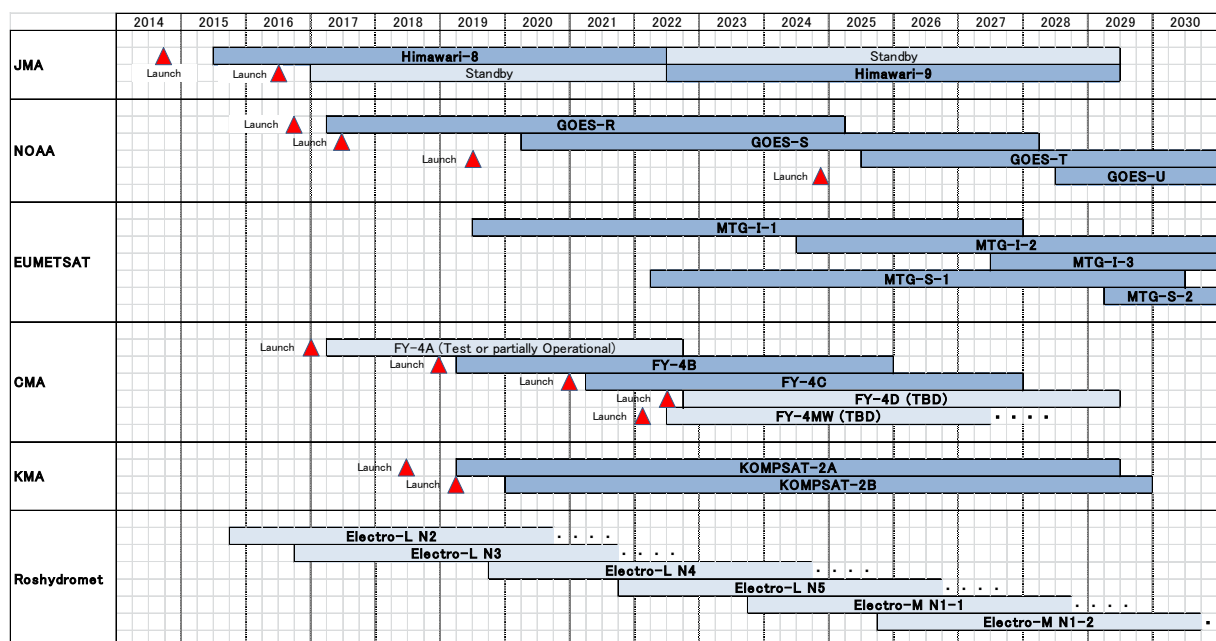


図4. 8. 1. New generation of geostationary meteorological satellites の計画

表4. 8. 1. Geo-Leo Corresponding VIS-IR Imagery Bands (μm)

#	Himawari-8/ AHI	MTSAT-2/ IMAGER	MSG/ SEVIRI	MTG/ FCI	KOMPSAT-2A/AMI	FY-4/ AGRI	GOES-R/ABI	GOES-15	GOES-11	SNPP,JPSS/ VIIRS	Terra, Aqua/ MODIS	GCOM-C/SGLI	NOAA/ AVHRR
1	0.47			0.444	0.455	0.47	0.47			0.488 (M03)	0.488	0.490 (VN4)	
2	0.51			0.510	0.511					0.555 (M04)	0.531	0.530 (VN5)	
3	0.64	0.68	0.635	0.640	0.642	0.65	0.64	0.65	0.65	0.672 (M05) 0.64 (I01)	0.667	0.6735 (VN7,VN8,P1)	0.630
4	0.86		0.81	0.865	0.860	0.825	0.86			0.865 (M07) 0.865 (I02)	0.870	0.8685 (VN10, VN11, P2)	0.862
				0.914							0.905		
				1.380	1.38	1.375	1.38			1.378 (M09)	1.375	1.380 (SW2)	
5	1.6		1.64	1.610	1.61	1.61	1.61			1.610 (M10) 1.61 (I03)	1.640	1.630 (SW3)	1.61
6	2.3			2.250		2.25	2.26			2.250 (M11)	2.130	2.210 (SW4)	
7	3.9	3.7	3.92	3.80	3.85	3.75	3.90	3.90	3.90	3.70 (M12) 3.74 (I04)	3.750		3.74
8	6.2	6.8	6.25	6.30	6.24	6.25	6.15	6.55	6.75		6.715		
9	6.9				6.95	7.1	7.00						
10	7.3		7.35	7.35	7.34		7.40				7.325		
11	8.6		8.70	8.70	8.60	8.5	8.50			8.55 (M14)	8.550		
12	9.6		9.66	9.66	9.63		9.70				9.730		
13	10.4	10.8	10.8	10.50	10.43	10.7	10.3	10.70	10.70	10.763 (M15)		10.8 (T1)	10.80
14	11.2				11.20	11.0	11.2			11.45 (I05)	11.030		
15	12.4	12.0	12.0	12.30	12.30		12.3		11.95	12.013 (M16)	12.020	12.0 (T2)	12.00
16	13.3		13.4	13.30	13.30	13.5	13.3	13.35			13.335		

4.9. 散乱計・測地・重力・GPS

江淵直人（北海道大）・村上浩（JAXA）・磯口治（RESTEC）・児玉哲哉（JAXA）・福田洋一（京都大）

4.9.1. 散乱計

4.9.1.1. はじめに

マイクロ波散乱計は、海面におけるマイクロ波の風速・風向依存性を利用して、ECV である海上風ベクトル（風速・風向）を計測するセンサである。全球の海面上で高空間分解能、高時間頻度で観測される海上風データは、気象学・海洋学・気候学などの科学研究利用の他、気象予報や海上交通などの実利用にも供されてきた。1991 年打ち上げの ERS-1/AMI から複数の散乱計ミッションの観測データで作成されてきた全球海上風ベクトルのデータは、25 年の長さに及んでいる。最近では、海上風ベクトルだけでなく、植生や土壌水分などの陸域観測や海氷、氷山、氷河・氷床などの雪氷域観測にも利用が拡がりつつある。

4.9.1.2. 現状分析と展望

米国では、QuikSCAT/SeaWinds（1999–2009）の成果を受け、Senior Review において現業化の提言が出たにも関わらず、現時点で散乱計ミッションの現業化は実現していない。後継の散乱計ミッションとして、2014 年に ISS に RapidScat が搭載され、現在も運用が続いているが、まもなく運用が終了する見込みで、その後の後継ミッションの見通しは立っていない。

欧州では、現業気象衛星 Metop シリーズに ASCAT 散乱計が搭載され、気象予報を主目的とした観測が行われており、今後も後継ミッションが継続する見込みである。ただし、ASCAT は、観測幅が狭いため、時間サンプリングが足りないという欠点を持つ（Liu et al., 2003）。

インドでは、Oceansat-2 衛星に搭載した散乱計ミッション（2009–2014）が成功し、その後継機として、ScatSat を計画している。米欧の研究機関の協力によって全球観測が実現し、また観測データの質も著しい向上を見せている。Oceansat-2 散乱計ミッションの後半には、現業気象予報用の準リアルタイムデータ配信も行われた。

中国では、HY シリーズに散乱計が搭載される。しかしながら、現在運用中の HY-2A のデータは一般研究者には入手が難しい。欧州の研究機関との協力関係はあるようだが、今後もデータの公開やその質には疑問が残る。

日本では、ADEOS、ADEOS-2 に NASA の散乱計（NSCAT、SeaWinds）を搭載した経験があるが、独自開発・運用の実績はない。

4.9.1.3. 想定されるシナリオ

散乱計に関しては、日本での開発・運用の実績はなく、これから独自開発に着手するのは現実的ではないと思われる。しかしながら、ADEOS-2 の成果などから、マイクロ波放射計との同時搭載の研究利用・実利用の両面での意義は極めて高いことが示されている (Ebuchi and Liu, 2005)。現実的な方向性としては、米欧やインドなどとの国際協力により散乱計センサ提供を受け、AMSR シリーズの後継機との同時搭載を目指すことが考えられる。

References

Liu, W.T., 2003: Scientific Opportunity Provided by SeaWinds in Tandem. JPL Publications 03-12, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 38 pp.
<http://airsea.jpl.nasa.gov/publication/paper/Liu-etal-2003-tandem.pdf>.
Ebuchi, N. and W.T. Liu (eds), 2005: Synergism of SeaWinds and AMSR. 33pp,
<http://airsea.jpl.nasa.gov/publication/paper/SeaWinds-AMSR-synergism-s.pdf>.

4.9.2. 高度計

4.9.2.1. はじめに

海面高度計は衛星からマイクロ波を海面に発射し、その反射強度と時間を計測することにより、衛星と海面との間の距離や海面形状の情報を得るセンサである。衛星-海面間距離からジオイド高や風波・潮汐等を除くことで海面力学高度が得られる。海面力学高度からは海洋力学モデルを通じて海流の情報が得られるため、海況監視、漁場探査、航路選択等の研究や現業に広く用いられている。また海面高度自体の変化はエルニーニョ等の広域の大気海洋場の変動や地球温暖化に伴う海面水位上昇の面的分布の把握にも用いられている。

また、正確な地表面高度の計測を通じて、沿岸や陸水、災害監視や、海底地形や重力場の観測などへの利用拡大が始まっている。

4.9.2.2. 現状分析と展望

現在の海面高度計の計画には直下型タイプと干渉型タイプがある。直下型タイプの計画は、計測精度の向上と SAR による高解像度化を目指したもので Cryosat-2 (EU)、Sentinel-3 (EU)、Jason-CS (Sentinel-6) (EU/USA) などがある。直下型タイプは欧米を中心に複数センサが運用中で、昨今は SARAL (CNES/ISRO (インド)) や HY-2 (CNSA (中国) /CNES) も打ち上げ・運用を行っている。直下型タイプは観測原理上その観測範囲 (走査幅) が限られるため、高精度の相互校正をした複数ミッション (今後 3-4 機) で観測網 (時間・空間) を分担しており、複数機あればそれだけ時空間分解能を上げることができる。

干渉型タイプの計画は、新技術である 2 次元高解像度観測を行うもので SWOT (US/FR/CA/UK)、COMPIRA (日本) が挙げられる。直下以外のある程度の観測幅を持つこと

ができるため大幅に時間空間解像度を向上させることができ、より高い時間空間分解能を必要とする漁業や沿岸海況監視等に利用が広がることが期待できる。ただし、この干渉型タイプを十分に活用するためには、高解像度の潮汐やジオイドなどの補正情報や、非地衡流を表現できる力学モデルの開発等の利用技術の向上が必要である。

4.9.2.3. 想定されるシナリオ

欧州や米国で開発運用されている直下型タイプを日本でゼロから開発するのは優位性を持ってないため、これまで JERS-1 や ALOS-1/2 等で培ってきた日本のレーダ衛星技術を活用した干渉型タイプ高度計 (COMPIRA/ SHIOSAI) を開発するべきである。やや先行して開発が始まっている米国 SWOT ミッションと利用技術の開発や観測範囲について連携して進めることが効果的である。

海面高度計は数値モデルを介した利用で最も大きな力を発揮するため、衛星ミッション単体ではなく、日本が運用中のアルゴブイや船舶観測と共に海洋数値モデルで統合的に活用するといった海洋統合観測システムとして構築するのが望ましい。この統合観測システムにより、海洋国家として世界をリードする衛星・現場海洋データとその利用技術を保持することが可能となる。

References

市川 香、21 世紀初頭の衛星海面高度計海の研究, Oceanography in Japan, 23 (1), 13–27, 2014

SWOT: Surface Water and Ocean Topography

COMPIRA: Coastal and Ocean measurement Mission with Precise and Innovative Radar Altimeter

SHIOSAI: SAR Height Imaging Oceanic Sensor with Advanced Interferometry

Jason-CS: Jason Continuity of Service

4.9.3. 重力・測地

4.9.3.1. はじめに

衛星による地球重力場の測定が実現したのは、21 世紀に入ってからのことである。この内、米・独の GRACE と ESA の GOCE は重力場測定に特化されたミッションで、特に、GRACE は、重力場の時間的变化を測定することで、これまで全く不可能であった陸水貯留量や氷床質量変動のモニターを可能とし、全球的な水質量収支に関する拘束条件から、海水質量増加の直接的な証拠を与えた。さらに、スマトラ、チリ、東北沖地震などでは、海域を含む広域の重力変化を検出し、地震発生機構に関する全く新しい知見を提供した。この他、GRACE の利用研究は、基礎科学から応用分野まで多岐に及び、過去、最も成功した地球観測ミッショ

ンの一つと言われている。

一方、GOCE は、短波長の静的な重力場データを与えることで、波長 100km で 1cm 精度のジオイドを得ており、海面高度計データとの組合せで、絶対値として高精度な力学的海面高度を与えることに成功した。また、高精度ジオイドは、全球的な高さ基準の統一に不可欠なものであり、地球基準座標系 (ITRF) の維持と共に、地球観測基盤として重要である。

これらの成功をみると、衛星重力ミッションは、今後の地球観測に欠かせない重要な位置を占めることは確実であり、我が国として、中・長期的にどのように関わっていくかを真剣に検討する必要がある。

4.9.3.2. 現状分析と展望

衛星による重力場の測定方法は、基本的には H-L SST (High-Low Satellite to Satellite Tracking) と呼ばれる GNSS による衛星軌道の高精度追跡と、GOCE のような衛星搭載の重力勾配計 (Gradiometer) による測定、あるいは、GRACE のような L-L SST (Low-Low Satellite to Satellite Tracking) と呼ばれる衛星間の精密距離測定との組み合わせにより実現される。ところで、L-L SST は、衛星間測距による 1 成分の重力勾配計と見なすことができるので、衛星による重力場測定は、基本的には長波長重力場測定のための衛星軌道追跡と短波長重力場測定のための重力勾配計との組み合わせとも考えられる。さらに、地球重力場以外の加速度成分を測定するための加速度計、また、これらのデータを組み合わせた重力場データ抽出のための精密軌道追跡を含む解析技術も重要な要素技術である。

現在稼働中の重力ミッションは双子衛星 GRACE のみで、GRACE では L-L SST にマイクロ波測距および電磁式加速度計が用いられている。2002 年に打ち上げられた GRACE は、設計寿命はすでに過ぎており、何時停止してもおかしくない状況から、現在、2017 年中の打ち上げを目途に、後続ミッション (GRACE-F0) の準備が進められている。GRACE-F0 では、GRACE による観測の継続性を最優先に、ほぼ、GRACE と同様の仕様が踏襲されるが、注目すべきはレーザー干渉計による L-L SST の実証実験装置 (Laser Ranging Interferometer) が搭載されることである。GRACE-F0 の後、2020 年代には実現するであろうレーザー干渉計を用いた衛星重力ミッション (仮に GRACE-II と呼ぶ) では、GRACE の 2~3 桁の精度向上が期待されている。GRACE-II は、大気の運動による質量変化を捉えるのに十分な感度を有するが、単一ミッションでは時間・空間分解能の限界が障壁となる。このため、時間・空間分解能の向上を目指し、さまざまなフォーメーション・フライトや複数衛星ミッションのシミュレーション研究が行われている。

重力場計測での最近の話題は、原子干渉計 (Cold Atom Interferometry) で、地上では、原子干渉絶対重力計が既に実用の段階に入っており、今後 10~20 年には絶対重力計の主流になるものと期待されている。衛星搭載型の原子干渉重力偏差計についても、すでに幾つか

のプロポーザルがあるが、原子干渉計の最大の利点は、加速度の絶対値が測定されることで、直流（DC）成分まで全く精度の劣化がない、すなわち発散しない加速度計が実現されることである。将来的には、レーザー干渉計とこれらの技術を組み合わせたフォーメーション・フライトや複数の小型衛星ミッションにより、時間分解能・数日、空間分解能・2～300 km程度での大気・海洋変動現象のモニタリングが可能になると期待される。

4.9.3.3. 想定されるシナリオ

2020～2040 年のタイムスパンで考えると、重力ミッションの要素技術は、マイクロ波測距、電磁加速度計から、レーザー干渉技術、原子干渉計へと移っていくものと予想される。さらに、衛星の小型化や国際協力による複数衛星ミッションの連携が重要である。我が国では、月重力場測定の経験はあるものの、地球での重力ミッションの経験が無いことから、すべて独自のミッション開発を実施することは必ずしも得策ではない。一方、重力場測定で必要とされるレーザー干渉技術は、LISA や DECIGO など、宇宙重力波望遠鏡で必要とされるレーザー干渉技術と共通するもので、また、光衛星間通信も重要な要素技術であるが、これらについては優れた技術を有している。さらに原子干渉計についても、基礎的な研究が実施されている。我が国では、これらの要素技術を利用し、国際協力のもと、地球観測への応用を探ることが効果的と思われる。

重力場に限らず地球衛星観測データの高度利用にとっては、解析技術や数値モデリングとともに、その根幹となる高精度な地球基準座標系の維持も重要である。1986 年に打上げられた「あじさい」は、今なお世界の測距局から追尾観測が続けられており、もっとも測距データの多い衛星の 1 つである。しかし、地球基準座標系の高精度維持には、既存の測地衛星とは軌道高度が異なり、かつ高精度な測距観測が可能な測地衛星を多数投入することが望まれている。地球衛星観測で、地球基準座標系の恩恵を多く受けている我が国では、新たな測地衛星の投入を含め、地球基準座標系への国際貢献も重要な課題の一つである。

References

Roland Pail, Thomas Gruber, 2015, Future Gravity Missions: An integral component of the Global Geodetic Observing System, Österreichischer Geodätentag, Velden, 05.05.2015.

NASA, Cold Atom Gravity Gradiometer for Geodesy Project, NASA TechPort. DECIGO パスファインダーワーキンググループ, 2014, 小型重力波観測衛星 DECIGO パスファインダー (DPF) ミッション提案書, 2014 年 2 月 28 日

4.9.4. GPS

重要な科学的課題と⇒地球科学最後の聖杯である地震予知^{1,2,3,4,5)}。そのためには先行現象の

徹底的検証が必要不可欠⁶⁾・国際的に地上一衛星連携観測が主流となっている⁷⁾

- ・我が国が実施した地震フロンティア研究により国際的に研究進展、IUGG に EMSEV 設立⁸⁾
- ・ CNES の地震電磁気観測衛星：DEMETER による統計的な先行現象の報告⁹⁾・中国は中国地震局主導でイタリアと協力し地震電磁気観測衛星群を構築予定¹⁰⁾
- ・我が国の（予知という言葉が消えた）地震予知研究計画にも大学連携で電磁氣的観測が進展中^{11, 12)}
- ・地震電離圏先行現象が立証されればプレートテクトニクスの出現に匹敵する地球科学上の大発見につながる¹³⁾



図4. 9. 1 衛星リモートセンシングの可能性と S-NET への期待（中須賀，2014）

日本の強みを活かした⇒国際的に評価された電離圏研究者・電離圏計測技術&GPS 掩蔽観測×内閣府最先端研究開発支援プログラムで生まれた超小型衛星の機運¹⁴⁾

- GNSS 掩蔽観測：我が国が獲得すべき小型・安価・高精度な地球観測計測技術¹⁵⁾・既に気象予測精度の改善に実用されており¹⁶⁾、各種コミュニティが要望^{17, 18, 19, 20)}
- 電離圏計測技術：国際標準電離層 WG から要望される高精度プローブ²¹⁾
- 宇宙環境計測：衛星開発の基礎データ。ALOS-2 以降 TEDA が搭載されなくなりデータの継続性が危ぶまれる。近年は安全保障（SSA）という観点も²²⁾
- GNSS 海面反射による海洋研究²³⁾・NASA はハリケーン進路予測に CYGNSS という GPS 海面反射観測小型衛星群を今年打上げ²⁴⁾

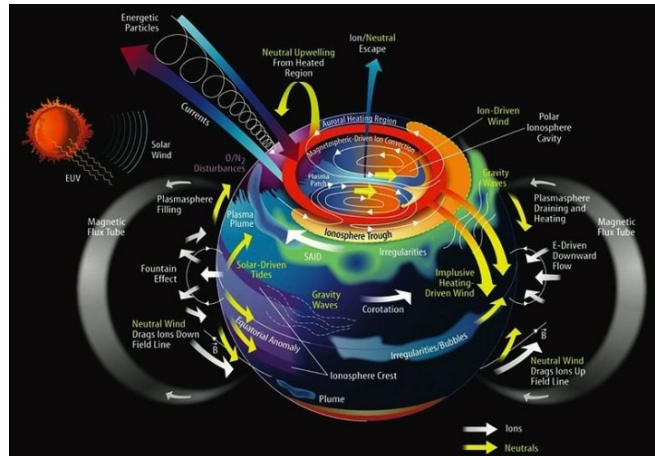


図 4. 9. 2 信頼できる地震先行現象の検証⇨大気圏－電離圏変動の総理解
＝まさに Earth System Science

有効な我が国の衛星計画⇨小型・超小型で多様なミッションを実現し、
ロケット・宇宙科学・地球観測・相乗り衛星の全分野で良い循環

- 10 年に 1 度の数百億衛星より 1 年に 1 度の数十億規模の衛星 ^{25, 26)}
- 宇宙政策が安全保障・産業振興にシフトしていく現状では、小型・超小型が論理的
解 ^{27, 28)}
- IGS10 機体制により人材は更に偏在（もとにもどすには絵に描いた餅を作るしくみ
が必要） ^{29, 30)}

もしそんなしくみができるなら

ミッションを背負った・提案コミュニティ間の相互評価による・オープンなミッション選定
を実施 ^{31, 32, 33, 34, 35, 36, 37)}

参考文献

- 1) 佐久田・山本，地震予知計画をわが国のアポロ計画に，日本総研，1997
- 2) Utkin，火星探査より地震予知を，アエロスペースクーリエ Vol.3，1999
- 3) 我が国における宇宙開発利用の基本戦略，総合科学技術会議，平成 16 年 9 月 9 日
- 4) 提言 4：地上技術と宇宙技術を融合したオールジャパン体制による地震予知のための R
& D の推進，大震災における宇宙インフラの有効性，東京財団，2011
- 5) プラズマ科学と大地震前兆現象の関係解明の研究、震災復興に向けて応用物理が取り組む
べき 技術課題の提言について，応用物理学会，2012
- 6) 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来，地球電磁気学・地球惑星圏学会，2013

- 7) Kodama, Earthquake Prediction Research as National Defense, 29th ISTS, 2013
- 8) 上田, 地震予知研究の歴史と現状, 学士会会報, No. 865, 2007
- 9) 鴨川, 地震の短期予測の現状と評価～電磁気学的観測, 地震予知連絡会会報第 91 巻, 2014
- 10) Shen, The Experimental Satellite on Electromagnetism Monitoring, Space Science Activities in China, 2014
- 11) 上田他, 地震予知研究計画への提言 I: 短期予知, JPGU, 2012
- 12) 上田他, 地震予知研究計画への提言 II: 衛星観測, ibid
- 13) 中須賀, 衛星リモートセンシングの可能性と S-NET への期待, 内閣府宇宙戦略室 スペース・ニューエコノミー創造ネットワーク (S-NET) 東京エリア準備会合, 2015
- 14) 学術コミュニティの多様なニーズの実現へ向けた超小型衛星の研究開発と軌道上実証, 第 22 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン, 2014 年 3 月 12 日
- 15) 津田他, GPS 掩蔽による 気温・水蒸気変動解析, 地球観測システム構築推進プラン 課題 22-03, 2008
- 16) 配信資料に関する技術情報 (気象編) 第 324 号 ～COSMIC 衛星網 GPS 掩蔽観測データの全球解析での利用開始～, 気象庁予報部, 2010
- 17) 21 世紀の地球電磁気学, 日本学術会議, 2005 年
- 18) アピール「GPS リモートセンシングデータの利用推進に向けて」, 天気, 56, 8, 2009
- 19) GPS WG, IMAP WG, MTI WG 準備チーム, ELMOS WG などの有志, GPS 掩蔽観測の提案, 地球圏総合診断委員会大気圏分科会, 2012 年 1 月 12 日
- 20) 大気化学分野における高精度鉛直気温 (気圧)・水蒸気データの必要性, 地球圏総合診断委員会新規ミッション検討会, 2012
- 21) Letter of Support for SeismoSTAR, IRI Task Group, 2009
- 22) 「宇宙開発利用の持続的発展のための“宇宙状況認識 (Space Situational Awareness: SSA)” に関する国際シンポジウム」成果報告書, 日本宇宙フォーラム, 2012
- 23) 海老沼・安田, GPS 反射波を利用した海面高度の計測, 日本航海学会論文集 119, 2008
- 24) Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS)
- 25) 宇宙予算と原子力予算, 科学, 2014. 5
- 26) 小坂田, 日本の科学技術政策失敗の原因, 2000
- 27) 児玉・鈴木・小山・渡部, 小型衛星群: ELMOS Constellation の現状ー小型地球観測衛星シリーズの提案ー, 第 1 回小型科学衛星シンポジウム, 2011
- 28) Mini satellites prove their scientific power, Nature, 508, 2014
- 29) Oda, Maintaining science culture in Japan, Nature, 391, 1998
- 30) The Space Economy at a Glance 2014, OECD calculations based on Scopus Data,

Elsevier, 2014

- 31) リソースの配分とプロジェクトの計画, 宇宙開発事業団評価委員会軌道上技術部会評価報告書, 1998
- 32) 玉真, 日本の宇宙政策見直しと安全保障の今後, DRC 年報, 2002
- 33) 中島, 衛星による大気観測の将来, 天気 52, 8, 2005
- 34) 小原, 郷に入ったら郷に従うのくだり, ISAS メールマガジン第 274 号, 2009
- 35) 安西, 宇宙開発利用政策に関する政府の体制構築への意見 (その 2), 第 16 回宇宙開発戦略専門調査会, 2011
- 36) 牧野, スパコン開発とエビデンス, 第二回ワークショップ「ファンディングプログラムの運営に資する科学計量学」, 2012
- 37) 畚野, TRMM 開発の歴史, Space Japan Review, No. 85, 2014

5. 執筆者名簿

氏名	担当章	所属
青梨 和正	4. 1, 4. 3	気象庁気象研究所
石井 昌憲	4. 5	情報通信研究機構
石塚 直樹	4. 1	農業環境技術研究所
石元 裕史	4. 8	気象庁気象研究所
磯口 治	4. 9	リモート・センシング技術センター
井上 吉雄	4. 1	農業環境技術研究所
今岡 啓治	4. 3	山口大学
今須 良一	2, 4. 6, 4. 7	東京大学
入江 仁士	4. 6	千葉大学
岩崎 晃	4. 1	東京大学
江淵 直人	2, 4. 3, 4. 9	北海道大学
大野 裕一	4. 4	情報通信研究機構
岡本 創	4. 4, 4. 5	九州大学
沖 大幹	4. 3	東京大学
沖 理子	4. 3, 4. 4	宇宙航空研究開発機構
笠井 康子	4. 6, 4. 8	情報通信研究機構
可知 美佐子	4. 3, 4. 4, 4. 8	宇宙航空研究開発機構
金谷 有剛	4. 6	海洋研究開発機構
菊池 麻紀	4. 2, 4. 5	宇宙航空研究開発機構
北 和之	4. 6	茨城大学
木村 俊義	4. 2, 4. 5	宇宙航空研究開発機構
久保田 拓志	4. 3, 4. 4	宇宙航空研究開発機構
操野 年之	2, 4. 8	気象庁
児玉 哲哉	4. 9	宇宙航空研究開発機構
齋藤 尚子	4. 6, 4. 7	千葉大学
佐藤 薫	4. 5	東京大学
下田 陽久	2	東海大学
杉本 伸夫	2, 4. 5	国立環境研究所
鈴木 健太郎	4. 4	東京大学
高橋 暢宏	2, 4. 4	名古屋大学
高薮 縁	4. 4	東京大学

土田 聡	4. 1	産業技術総合研究所
中島 孝	4. 2, 4. 8	東海大学
中島 映至	2	宇宙航空研究開発機構
中村 健治	2, 4. 3	獨協大学
奈佐原 顕郎	4. 2	筑波大学
西澤 智明	4. 5	国立環境研究所
早坂 忠裕	4. 2. 4. 3	東北大学
林 真智	4. 5	国立環境研究所
林田 佐智子	2, 4. 6	奈良女子大学
平田 貴文	4. 8	北海道大学
福田 洋一	4. 9	京都大学
本多 嘉明	2, 4. 2, 4. 8	千葉大学
松永 恒雄	4. 7	国立環境研究所
水谷 耕平	4. 5	情報通信研究機構
村上 浩	4. 2, 4. 8, 4. 9	宇宙航空研究開発機構
森山 雅雄	4. 2	長崎大学
横田 達也	4. 7	国立環境研究所
若林 裕之	2, 4. 1	日本大学
以上		