

今後の気象衛星の搭載センサーに関する考察

～ ひまわり 8号・9号の後継衛星に向けて ～

平成 31 年 3 月 5 日

静止衛星データ利用技術懇談会

静止衛星データ利用技術懇談会 委員名簿

(平成31年1月1日現在)

牛尾知雄 首都大学東京システムデザイン学部教授

沖 理子 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター研究領域上席

○ 小池俊雄 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター長

下田陽久 東海大学情報技術センター客員教授

高薮縁 東京大学大気海洋研究所教授

中北英一 京都大学防災研究所教授

中島孝 東海大学情報理工学部情報科学科教授

◎ 中島映至 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター参与

早坂忠裕 東北大学大学院理学研究科教授

本多嘉明 千葉大学環境リモートセンシング研究センター准教授

※ ◎は座長、○は副座長

※ 五十音順 敬称略

概 要

わが国の静止気象衛星は、昭和 52 年（1977 年）のひまわり初号機から 40 年以上にわたって観測を行っており、台風をはじめとする現象の監視・予測や気候変動監視等に大きな役割を果たしている。そして、世界気象機関（WMO）の世界気象監視（WWW）計画の一翼を担い、アジア・太平洋諸国の自然災害の防止等にも大いに貢献している。現行のひまわり 8 号・9 号は 2029 年に設計上の寿命を迎えることから、後継機を 2028 年に打ち上げることが必要とされている。

ひまわり 8 号・9 号の後継機に関する今後の検討に資するため、搭載の可能性が考えられ得るセンサーについて、最新の科学技術の動向を踏まえ、学術的な利用者及び専門家の見地から考察した。考察にあたり、気象業務のみならず幅広いデータ利用の観点から、どのようなセンサーが必要で、それによってどのようなミッションが実現できるか、また、静止衛星と低軌道衛星の組み合わせ等による利用のしやすさも勘案しつつ、現時点で可能な範囲内で分析した。気象庁における来年度以降のさらなる検討の一助となることを期待する。

【10 年～20 年先のデータ利用を見据えた搭載センサーの方向性】

●国際的な趨勢

- ・世界気象機関（WMO）が推奨する 2040 年頃の静止気象衛星観測としては、現行のひまわり 8 号・9 号のような高頻度・高解像度のイメージャに加えて、ハイパースペクトル赤外サウンダ、雷光センサー、紫外・可視・近赤外サウンダが搭載されていることが望ましいとされている。

- ・中国は、上記のセンサーに加え、マイクロ波サウンダを搭載した静止気象衛星を打ち上げる計画を持っている。

●データ利用の方向性

- ・現行のひまわり 8 号・9 号の整備の際に謳われた地球環境観測もさることながら、最近の極端な気象現象による災害の頻発を踏まえ、これまで以上に防災に役立つ衛星観測を実現することが強く求められるものと考ええる。
- ・近年におけるわが国の災害は、線状降水帯に代表されるように対流圏下層の水蒸気の流入によって引き起こされるものが多い。これはモンスーン地域に特有の要素であるとも言える。このため、大気を鉛直方向に観測できるサウンダ、とりわけ雲の下まで透過して観測できるマイクロ波サウンダに期待するところが大きい。
- ・データ利用の観点からは、静止気象衛星と低軌道衛星の互いの長所を活かしつつ、これらを組み合わせた形で利用することが今後一層重要となってくると見込まれる。このため、静止気象衛星と低軌道衛星の観測バンドをできるだけ共通化するなど、利用のしやすさに配慮した計画を立てていくことが望まれる。

●センサー技術としての実現可能性

- ・イメージャは既に現行衛星に搭載されているので多少の改良を加えることは実現可能性が高いと考えられる。
- ・ハイパースペクトル赤外サウンダや雷光センサーは既に欧米等の一部の衛星で搭載あるいは計画されている。また、紫外・可視・近赤外サウンダは欧州や韓国が打ち上げる計画となっており、実現可能性は高いと考えられる。

- ・一方、マイクロ波サウンダについては、中国が計画を持ってはいるものの、開発要素が高く、相当にチャレンジングなセンサー開発になることが必至と思われる。

【来年度以降の検討に向けて】

- ・気象庁のみならず、関係機関との連携を模索することが肝要ではないか。静止軌道に置くことのできる衛星の位置は限られているので、有効に活用するための相乗り等の方策は考えられな
いか。
- ・ハイパースペクトル赤外サウンダなど新規センサーを搭載する場合は、気象業務及びそれ以外の分野での利活用の方法について一層分析するとともに、費用対効果に照らしていくことも肝要であろう。
- ・マイクロ波サウンダについては、後継衛星よりももっと先の将来衛星といった長いスパンで開発の可能性を考えていくことが必要である。

目次

1. はじめに
2. ひまわり 8号・9号のデータ利用の現状と課題
 - (1) イメージャの機能
 - (2) 低軌道衛星との組み合わせによる利用
3. 10年～20年先のデータ利用を見据えた搭載センサーの方向性
 - (1) 国際的な趨勢
 - (2) データ利用の方向性
4. 各センサーの利用方法と技術的な実現可能性
 - (1) イメージャの改良
 - (2) ハイパースペクトル赤外サウンダ
 - (3) 雷光センサー
 - (4) 紫外・可視・近赤外サウンダ
 - (5) マイクロ波サウンダ
 - (6) その他のセンサー
 - ①降雨レーダー
 - ②超高解像度イメージャ
5. 来年度以降の検討に向けて

検討作業の経過

1. はじめに

わが国の静止気象衛星は、昭和 52 年（1977 年）にひまわり初号機を打ち上げて以来、現行のひまわり 8 号・9 号に至るまで 40 年以上にわたって観測を継続している。この間、衛星の観測センサーも時代のニーズに応じて性能が向上し、現在では台風をはじめとする現象の監視や数値予報さらには気候変動監視に大きな役割を担うようになっている。

現行のひまわり 8 号・9 号は 2029 年に設計上の寿命を迎えることから、後継機を 2028 年に打ち上げる必要がある。気象衛星の製造には 5 ヶ年程度要することから、2023 年には後継機の製造に着手する必要があるとされている。このため、今後 3 ヶ年程度をかけて後継機に関する検討を進め、どのような利用目的のために、どのような衛星を整備していくかを定めていく必要がある。

本懇談会は、これまで 10 ヶ年にわたってひまわり 8 号・9 号の準備段階からデータ利用に関する検討・助言を行ってきたところである。そこで、本懇談会としても、これまでの知見を踏まえ、後継機への搭載の可能性が考えられ得るセンサーについて、学術的な利用者及び専門家の観点から考察を加え、今後の検討に資するための一助とすることとした。

このため、本懇談会の下に作業グループを設けて、平成 30 年度（2018 年度）後半に 3 回の会合を行う等考察を重ね、本懇談会で委員によるさらなる議論を経て本稿をとりまとめた。考察にあたっては、気象業務のみならず幅広いデータ利用の観点から、どのようなセンサーが必要で、それによってどのようなミッションが実現でき得るか、また、静止衛星と低軌道衛星の組み合わせ等による利用のしやすさも勘案しつつ、現時点で可能な範囲内で分析したものであ

る。本稿が気象庁における来年度以降のさらなる検討の一助となることを期待する。

2. ひまわり 8 号・9 号のデータ利用の現状と課題

ひまわり 8 号・9 号は平成 21 年（2009 年）に製造を開始し、それと時を同じくして本懇談会を立ち上げた。ひまわり 8 号・9 号に搭載された世界最高性能のイメージャによるデータを産官学で十分に活用できるようにすべく、本懇談会の助言のもと、これまでに様々な活動がなされてきた。まず、気象庁におけるデータ利用のための技術開発に助言し、あるいは気象衛星センターと大学との共同研究の成果を現業システムに組み入れた。これにより、台風や積乱雲、黄砂や火山灰、海面水温や海氷といった様々な現象の一層の把握を可能としたほか、数値予報精度が向上した。また、（一財）日本気象学会と気象庁の共同による気象研究コンソーシアムにおいて、ひまわり 8 号の軌道上試験中のサンプルデータや高頻度観測データの学術研究者への先行的な提供を行った。さらに、多様な学術研究者による研究活動に資するため、本懇談会の助言に基づき、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）によるサイエンスクラウド「ひまわりプロジェクト」、東京大学等によるデータ統合・解析システム DIAS、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）による「JAXA ひまわりモニタ」、千葉大学等によるクラウドサービスにより、多くの学術研究者へのデータ提供を可能とする仕組みを構築した。加えて、本懇談会の下に「大気」及び「陸域・海洋」の 2 つの作業部会を設け、学術研究者による研究に対する助言を行ってきた。こうした 10 年間の活動の成果が目に見える形になったものの一つとして、平成 30 年（2018 年）に日本気象学会発行の「気象研究ノー

ト」や「気象集誌」でひまわり 8 号・9 号データを用いた研究成果の特集号が組まれるなど、各種学会等で多くの研究発表がなされるようになってきた。また、産業界においても、平成 29 年より「気象ビジネス推進コンソーシアム (WXBC)」のセミナー等を通して利活用が広まりつつある。加えて国際的には、本懇談会の中島映至座長が運営委員会委員を務める「アジア・オセアニア気象衛星データ利用者会議」等により、アジア太平洋諸国等での利活用も進められている。

このように、ひまわり 8 号・9 号のデータは、国内外の産官学での利活用が広まっていて、今後さらに利活用の幅が広がっていくと期待される。

一方、ひまわり 8 号・9 号のデータを使っていく中で、以下のような改善すべき事項も明らかになってきている。

(1) イメージャの機能

ひまわり 8 号・9 号の観測バンドについて、現行の 16 バンドは有効であるが、さらに幾つかのバンドを追加することにより、より気象・気候の監視・予測に有効になる。0.38 μm を追加することにより吸収性エアロゾルや火山噴煙を雲と容易に分離して観測することが可能になる。1.38 μm を追加することで、現在は識別が難しい巻雲の識別が容易になる。1.24 μm の追加は積雪粒径のリトリバルに有効であり、積雪面からの放射強制力の推定に役立つ。また、水平分解能のさらなる向上も期待される。特に、近赤外バンドの分解能を 500m に向上することで、植生指数 (NDVI) の日変化の把握が可能となる。さらに、海色の検出精度の向上 (S/N 比、ビット数の向上) も望まれる。

(2) 低軌道衛星との組み合わせによる利用

ひまわり 8 号・9 号は、低軌道衛星とりわけ「しきさい (GCOM-C)」との親和性が高く、静止気象衛星と低軌道衛星の長所を組み合わせたプロダクトの開発が進んでいる。現在、海面水温、エアロゾル、光合成有効放射量 (PAR)、クロロフィル濃度、林野火災、雲の光学的厚さ、雲タイプが、GCOM-C 搭載の SGLI のアルゴリズムを用いて、JAXA により「ひまわりモニタ」として生成されている。

このような利用方法は今後益々重要になってくるものと見込まれ、後継衛星についても GCOM-C の SGLI の後継ミッションとの親和性を図ることが肝要と思われる。可能であればバンドパスフィルターが共通になればよいだろう。

3. 10 年～20 年先のデータ利用を見据えた搭載センサーの方向性

(1) 国際的な趨勢

世界気象機関 (WMO) は統合全球観測システム (WIGOS) において 2040 年頃の静止気象衛星に搭載されていることが望ましいセンサーを推奨しており、その中で、現行のひまわり 8 号・9 号のような高頻度・高解像度のイメージャに加えて、ハイパースペクトル赤外サウンダ、雷光センサー、紫外・可視・近赤外サウンダが盛り込まれている。

実際に諸外国の静止気象衛星の状況は以下のとおり。

- ・米国は、現行の GOES-R シリーズ (GOES-R、-S、-T、-U) にイメージャと雷光センサーを搭載しているが、ハイパースペ

クトル赤外サウンダは搭載していない。このシリーズは今後 15 年程度続くものと見られる。

- ・ 欧州は、次期の MTG シリーズはイメージャ衛星 2 機とサウンダ衛星 1 機の体制を計画しており、イメージャ衛星にはイメージャのほか雷光センサーを搭載し、サウンダ衛星にはハイパースペクトル赤外サウンダが搭載される予定である。加えて、コペルニクス計画で開発された sentinel-4 という紫外・可視・近赤外サウンダを搭載することが予定されている。
- ・ 中国は、現行の衛星にイメージャのほか雷光センサー及びハイパースペクトル赤外サウンダを搭載している。加えて、マイクロ波サウンダを搭載した静止気象衛星を打ち上げる計画も持っている。さらに、紫外・可視・近赤外サウンダについても検討している模様である。
- ・ 韓国は、平成 30 年 12 月に打ち上げた GEO-KOMPSAT-2A にひまわり 8 号・9 号と同等のイメージャを搭載している。今後、海色センサーと紫外・可視・近赤外サウンダを搭載した GEO-KOMPSAT-2B が予定されている。

(2) データ利用の方向性

現行のひまわり 8 号・9 号は「静止地球環境観測衛星」ということで予算化されたことに象徴されるように、地球環境の監視にも役立つことが謳い文句とされた経緯がある。一方、最近は極端な気象現象による災害が頻発しており、線状降水帯をはじめとするシビア現象の監視・予測に対する期待が高まってきている。このため、後継衛星に対してはこれまで以上に防災に役立つ機能の強化を実現することが強く求められるものと考えられる。

近年におけるわが国の災害は、線状降水帯も然りであるが対流圏下層の水蒸気の流入によって引き起こされるものが多い。これはモンスーン地域の特徴であるとも言える。このため、大気を鉛直方向に観測できるサウンダを導入すれば、大気の3次元的な把握やデータ同化により数値予報の精度向上が期待される。ハイパースペクトル赤外サウンダも一定の効果が期待されるが、雲の下まで透過して観測できるマイクロ波サウンダに期待するところが大きい。ただし、静止軌道でのマイクロ波サウンダの開発は技術的な実現可能性が不明確であり、この点については次章で詳しく述べる。

また、静止気象衛星と低軌道衛星を組み合わせた形で利用することが今後一層重要となってくると見込まれる。実際、ひまわり8号・9号のイメージャとGCOM-C（「しきさい」）に搭載されたSGLIはデータ解析において親和性が高く、SGLI用に開発されたアルゴリズムがひまわり8号・9号のデータ処理にも適用できる場合が多い。全球を常時観測できる静止気象衛星と、高解像度の観測ができる低軌道衛星の、それぞれの長所を活かすことによって、高度なプロダクトを生成することができる。このため、ひまわり後継機とSGLI後継ミッションの観測バンドをできるだけ共通化するなど、利用のしやすさに配慮した計画を立てていくことが望まれる。

4. 各センサーの利用方法と技術的な実現可能性

(1) イメージャの改良

i) 期待される利活用の方法

現行のひまわり 8号・9号のイメージャは世界最高性能であり、既に多くの研究等で利活用されていることに鑑みれば、後継衛星においても同等またはそれ以上の性能を有することで、大気、陸域、海域、雪氷圏に関する各種物理量の抽出、データ同化による数値予報の精度向上及びナウキャストへの利用等が期待される。具体的には以下のとおり。

① 大気の状態の監視・予測

1) 気象状態の俯瞰

主に雲分布の時系列を得ることにより、天気の推移を俯瞰する。特に熱帯低気圧の追跡には必須。

2) 水蒸気分布の把握

水蒸気バンドの利用により広範囲の水蒸気分布を把握できる。線状降水帯の把握などに有効。水蒸気の鉛直分布の把握が降水予報に非常に有効。対流圏下層のみならず、対流圏中層の湿度の分布も重要。

3) 風の中の把握

大気追跡風 (AMV) の算出により、風の中を 3 次元的に把握することが可能。特に風の中の情報が少ない洋上におけるデータ同化により数値予報精度向上に有効。また、台風周辺の下層の AMV を用いた台風解析により精度の向上に有効。

4) データ同化による数値予報精度の向上

大気追跡風 (AMV)、晴天輝度温度 (CSR)。将来的には全天輝度温度として有効。

5) 降水強度と時間発展の把握

GPM（降雨レーダー、マイクロ波放射計）と複合利用することにより、ひまわりの複数の赤外波長を用いて降水強度を把握することがある程度可能。降水システムの分布と時間発展の把握が可能。数値モデルの降水表現の評価と改善に有効。

6) エアロゾル、大気汚染物質、黄砂の追跡

大気汚染物質、火山噴火の噴煙、森林火災の煙、黄砂などのエアロゾルを詳細な時系列で追跡が可能であり、航空機向けの予報・警報等に有効。火山噴火では陸上における降灰範囲の把握にも有効。

7) 雲、エアロゾル等の物理量の推定

雲とエアロゾルの光学的厚さや粒子半径を推定することにより、詳細な雲、エアロゾルの状態を把握することが可能。後に述べる日射の推定に必要。物理量の推定により、雲による長波短波の放射加熱の3次元分布の推定が可能になる。数値モデルの雲表現の検証・改良に有効であるとともに、放射強制力は気候予測の改善にも有効。

8) 日射情報

再生可能エネルギー（日射量、PV発電量）、健康被害に関係する紫外線、光合成有効放射(PAR)の準リアルタイム把握に有効。

9) 雲の成長過程の追跡

孤立した積雲発達を追跡できる。2.5分毎の観測は積雲急発達の観測に特に有効。雲解像モデルやBin法モデルにおける雲成長モデルの検証データとしても有効。ただ

し、雲クラスターなどに組織化して発達した組織雲の内部構造と時間変化は、高い層状雲に覆われて把握が困難。

② 陸域の状態の監視・予測

1) BRDF に基づく土地被覆変化や植生の変化

他衛星による初期値が与えられることや変化抽出部の確認などの複合利用でより効果的。

2) 火災検知

熱赤外や煙の高頻度感知は火災の延焼予測にも役立つ。これも他衛星との組み合わせでより効果的となる。

3) 水ストレス検知による農作物の作況、延焼危険度

上記 2) と組み合わせ、他の衛星との複合利用でより具体的な把握に役立つ。

4) 除雪対象となる積雪の予測

積雪モデルや他の衛星との組み合わせでアスファルト上の積雪深を早期把握。除雪計画に反映できる。

5) 日射情報

太陽光発電量、地上の情報と合わせて健康被害に係る紫外線の情報に役立てることができる。

6) 地表面温度変化による火山噴火予測

他の衛星とひまわりの高頻度観測が有効。上記 2) と組み合わせると大陸規模な火山噴火で役立つと考えられる。

7) 火山噴煙の分布把握

他の衛星とひまわりの高頻度観測が有効。

③ 海域の状態の監視・予測

1) 海面水温

数値予報の境界値。海況監視（潮流、渦、湧昇流）。漁業。現状では精度が低軌道衛星に比べて若干悪く、S/Nの向上などにより、精度の向上が期待できる。なお、渦の監視には現在よりも高解像度な水平分解能 250m が良い。

2) クロロフィル-a

炭素循環（海洋の炭素固定）の理解、漁場の把握など漁業支援に有効。

3) CDOM（色の付いた有機物）

海況監視（河川から海洋への流入・トレーサー）、漁業支援情報として有効。

④ 雪氷圏の状態の監視・予測

1) 積雪域

数値予報の境界値として利用が想定される。また、実況監視としても有効。

2) 積雪粒径

放射収支の推定・把握に有効。

3) アルベド

放射収支の推定・把握に有効。

4) 雪氷面温度

数値予報の境界値として利用が想定される。

5) 海氷

数値予報の境界値として利用が想定される。放射収支の推定・把握に有効。また、実況監視としても有効。

ii) センサーとしての技術的な実現可能性

打ち上げ計画を世界的に見れば、今後少なくとも 15 年間程度は、欧米や中国でもひまわり 8 号・9 号と同等のイメージャが計画されていて、それ以上のレベルの開発は特に予定されていない。このため、各国の開発スケジュールを勘案すれば、ひまわり後継機のタイミングでのイメージャ機能の改良は小ぶりのものになると思われる。とはいえ、以下の点については多少の改良が可能ではないかと考えられる。

(改良を検討すべき項目)

- バンドの追加
 - ・ 0.38 μm (吸収性エアロゾル、火山噴煙)
 - ・ 1.38 μm (巻雲)
 - ・ 1.24 μm (積雪粒径) : ただし、優先度は低い。
- バンドの波長帯
 - ・ SGLI 後継機との共通化 (バンドパスフィルター)
- 水平分解能の向上
 - ・ 0.865 μm (現状 1km を 500m への向上)
 - ・ 1.6 μm (現状 1km を 500m への向上)
(近赤外のバンドを 500m にすれば植生がよく分かる)
- 海色精度の向上
 - ・ S/N 比の向上
 - ・ ビット数 : 可視・近赤外の 11 ビットを 12 ビットへの向上
- 校正システムの向上
 - ・ 機上 : 拡散板に加えて光源 (LED)、可変温度の黒体の搭載
 - ・ 地上 : 地上試験における校正データ提供を仕様に明記する

(2) ハイパースペクトル赤外サウンダ

i) 期待される利活用の方法

ハイパースペクトル赤外サウンダは晴天域及び雲よりも上側の大気を鉛直方向に細かく観測できる特長があり、欧州の次期衛星で計画されているほか、中国の現行衛星に搭載されている。このセンサーを搭載することにより、以下のような利活用が期待できる。

① 気象の予測

- 1) 雲頂高度の推定がイメージャよりも高精度に行えるので、イメージャ観測から導出される大気追跡風 (AMV) の高度の推定が向上する。また、晴天域での水蒸気の変化 (移動) に基づいて、これまで以上に3次元の風速・風向が導出できる。これらの観測情報をデータ同化することによって、数値予報の精度向上が期待できる。
- 2) 鉛直方向に高分解能な大気プロファイルによって、大気安定度や逆転層の解析に有効 (全球のみならず、日本付近を集中的に観測できれば、メソモデルへ高頻度に同化することにより、大気不安定度の予測が向上)
- 3) 水蒸気フラックス、及びその収束・発散場から、雲、降水が始まる前の降水システムの形成が推定可能 (前線や高低気圧の位置の解析にも有効)
- 4) 水蒸気画像による上昇流の推定から積乱雲の発達及び豪雨の予測が可能 (水蒸気プロファイルの面的分布から鉛直風プロファイルを推定可能)
- 5) 台風予測精度の向上

- 6) 既に発達した降水システムの観測から移動方向を推定可能
- 7) 水蒸気と気温のデータ同化による数値予報の精度向上
(水・氷雲の情報も)
- 8) 大気質の予測

② 気候変動の監視

- 1) アジアンモンスーン
- 2) ENSO
- 3) 干ばつ
- 4) 水循環
- 5) 地球放射収支
- 6) バイオマスバーニング
- 7) 温室効果ガス

ii) センサーとしての技術的な実現可能性

欧州が MTG に搭載を計画している IRS は、画素 160×160、鉛直分解能 1km、水平分解能 4km、気温の精度 1K、水蒸気の精度 10%。ただし、バンドの端でスペクトル応答が劣化するので観測精度は波長帯の中心と端で異なる。PCA（主成分分析）によりデータ圧縮を行う。なお、ILS（検出器の波長応答を求めるもの）は熱真空試験中にレーザーで測定する。水平分解能 4km で晴天域の上空の風が分かることが特長と言える。なお、欧州の IRS はイメージャのバックアップとして用いることを想定されていない。

米国が以前に GOES-R シリーズに搭載しようとして途中まで開発していた GIFTS は、鉛直分解能 1～2km で、イメージャの

バックアップとすることも想定されていた。イメージャに比べれば観測頻度は落ちるが赤外の水平分解能 4km であれば MTSAT シリーズ並には用いることができるだろう。画素は 120 画素。EM (エンジニアリングモデル) までは作成された。

このような欧州等の海外における先行的な技術開発の状況を踏まえると、以下のような観測性能が見込まれる。

(基本的なセンサー技術)

- イメージング FTS

(基本的なスペック)

- 水平分解能 : 4km (直下で)
- スペクトル分解能 : 0.625cm^{-1}
- ランダム誤差 : 0.1-0.2K
- 波数 : $700\text{-}1210\text{cm}^{-1}$ 、 $1600\text{-}2175\text{cm}^{-1}$
- 128×128 画素又は 160×160 画素
- 1 スキャン : 10 秒
- step & stair 走査

なお、さらに温室効果ガスを測定するのであれば、下記の追加も考えられる。

- スペクトル分解能 : 0.3cm^{-1}
- 波数範囲
 - ・ $700\text{-}1200\text{cm}^{-1}$
 - ・ $1200\text{-}2175\text{cm}^{-1}$
 - ・ $4200\text{-}5200\text{cm}^{-1}$
 - ・ $5900\text{-}6400\text{cm}^{-1}$
 - ・ $12950\text{-}13250\text{cm}^{-1}$

(要素毎の精度)

- 水蒸気：1-2km 高度分解能、算出精度：10-20%
- 気温：1-2km 高度分解能、算出精度：1K>
- 風速：2km 高度分解能、算出精度：4m/s>
- CO：高度方向 2 層、算出精度：10%>
- オゾン濃度：高度方向 4 層、算出精度：10%>
- 表面温度：算出精度 0.3K（海洋）、1K（陸上）
- 雲：雲頂高度、光学的厚さ、微物理特性
- xCO₂：0.15ppm
- xCH₄：10ppb
- xCO：6ppb
- SIF：10%以下

(赤外サウンダ開発上の検討課題)

- 観測機器の調達費用
- 冷凍機
- 多量のデータをダウンリンクするためのオンボードデータ圧縮の技術開発
- 正確な 2 次元ポインティングミラー（含黒体・深宇宙観測）
- GOSAT のヘリテージの活用

(3) 雷光センサー

i) 期待される利活用の方法

雷光センサーは、宇宙から雷の光を昼夜を問わず観測するもので、米国や中国の現行衛星に搭載されているほか欧州の次期衛星

でも計画されている。このセンサーによって以下のような利活用が考えられる。ただし、米国では未だ現業的には使っていない模様である（現業数値予報では用いられていない）。一方、インドネシアのような熱帯地域では雷による災害が多いので、こうした国への国際貢献は期待できると思われる。上層雲の下にある対流発域が識別できるので、雲解像モデルにどれだけ役立つかもポイントとなる。

① 雷の監視・予測（防災）

雷の危険性の時空間的把握。雷雨予測。航空路警報。山林火災（ワイルドファイヤー）の警戒に有効。

② 対流活動の監視・予測

1) 竜巻の予報

米国ではトルネードのタッチダウン予測の精度向上が期待されている。当初、竜巻発生 of 40 分前に発生予測することが期待されていた模様である。

2) 高度の高い激しい対流の検出

データ同化によりハリケーンの強度の予測精度の向上が期待されている。上昇流や霰数濃度としてデータ同化する研究もある。

3) 降水特性の判定（降水量/発雷頻度）

4) 豪雨の特性把握・予測

例えば、九州北部豪雨（背の高い雲が卓越）と平成 30 年 7 月豪雨（背の低い雲が卓越）では雷の発生の仕方が違っていたという研究結果がある。

5) 孤立積乱雲とメソスケールシステムの区別

6) 対流のライフステージの特定

7) 数値予報モデルの検証・改良に有用

ECMWF では、雷光密度 (Lightning density) を、数値予報モデルの対流スキームの出力 (大気中の水蒸気の種類、CAPE、雲低の高さの関数) と比較し、感度解析に用いている。

8) 気候変動

③ 雲微物理特性の情報の取得

雲解像モデルの検証・改良に有用。

ii) センサーとしての技術的な実現可能性

米国等の海外における先行的な技術開発の状況を踏まえると、以下のような観測性能が見込まれる。

(米国の GLM)

- 質量 : 114kg、電力 : 290W、サイズ : 81×66×150cm
- 光学系 : 開口 : 12cm、f : 1.2
- 波長 : 777.4nm
- 検知器 : CCD : 1372×1300 (水平分解能 8~14km)、500fr/sec
- データ伝送 : 7.7Mbps
- 検知確率 : 70% (昼間) ~ 90% (夜間)
実検知率は上記計画よりも向上
- オンボード処理有り

(GLM のオンボード処理の方法)

- ・画素の過去のデータに対しある閾値を超えた画素を抽出
(1/1,000 秒毎のデータを画素毎に雷の有無の識別をオンボードで処理して、雷の有る画素のみ地上に降ろす。)
- ・この処理には 5Gb/s の速度が必要
- ・イベントが発生すると、64bit データを生成。時刻、画素位置、背景に対する強度、背景値そのもの。

- ・これらの処理により、12Gb/s のデータを 6Mb/s 以下に圧縮オンボード処理。

(欧州の次期衛星 MTG の雷センサー)

- 波長 777.4nm
- GSD : 4.5km (nadir)
- 4 台のカメラを使用することで、水平分解能 4.5km を実現
- 1 台の画素数は 1170×1000 画素。4 台で地球をカバー

(国際宇宙ステーションに搭載されていた日本の雷センサー)

- 搭載していた期間 : 2012-2015
- 搭載センサー
 - ・ CMOS カメラ、762±5nm、765-830nm
 - ・ FOV : 28.3°×28.3° (400km×400km)
 - ・ フォトメータ、6ch.、150-280、600-900、316、337、392nm
 - ・ VLF : 1-40kHz、fs=100k
 - ・ VITF : fs=70-100MHz
- 開発は ISAS。予算 : 3 億
- オンボード処理は行われない

(雷センサー開発上の検討課題)

- 観測機器の調達費用
- オンボードデータ処理の開発

(4) 紫外・可視・近赤外サウンダ

i) 期待される利活用の方法

紫外・可視・近赤外サウンダは、大気化学センサーであり、対流圏オゾンやNO₂といった大気汚染物質の長距離輸送の状況を静止軌道から常時監視することが可能となる。韓国、米国、欧州はこのセンサーを搭載した衛星を打ち上げる計画を持っている。また、中国も同様に計画を考えている模様である。このセンサーにより、自動車等の排出源に関する国際交渉や、酸性雨によるインフラ施設の劣化の対策に資することが期待される。また、健康被害に関する研究調査等への活用も考えられる。10分毎の時間分解能は不要と思われ、1時間毎のデータがあればよいと思われる。これらの利用目的について気象業務への反映がどの程度あるかは微妙であるが、黄砂・紫外線予測や大気汚染監視のために利用できる可能性はある。また、将来、オゾンを数値予報のデータ同化に用いる可能性もあり得る。

ii) センサーとしての技術的な実現可能性

回折格子による分光計を用いるので寿命が長い。なお、日本ではADEOSシリーズに搭載していたILASシリーズ以降は開発していない。韓国が打ち上げる予定なので、そのデータを入手することができるのであれば、日本が打ち上げる必要性は低いものと思われる。

(5) マイクロ波サウンダ

i) 期待される利活用の方法

わが国はモンスーン地帯にあり、下層の水蒸気の流入・収束等に伴って線状降水帯をはじめとする豪雨災害が顕著である。また、台風の監視・予測においても下層の水蒸気は重要である。マイクロ波サウンダは、雲の中や下もある程度観測できるので、下層の水蒸気に伴う気象現象の把握・予測には極めて効果的である。すでに極軌道衛星のマイクロ波センサーは数値予報の精度向上に大きく寄与しているので、もしも静止軌道から常時観測できるようになれば、災害に直結する気象現象の監視・予測に大いに貢献することだろう。

しかし、次項 ii) で後述するように、静止軌道からのマイクロ波センサーには技術的な問題点が大きく、実現性において困難を伴う。そこで、フルスペックのセンサーでなくとも、水蒸気のバンドに限定して観測できるセンサーの開発でもよいのではないか。この場合、下記のようにせいぜい対流圏を 3 層、水平分解能 118km と粗いので、数値予報に使えるか否か微妙であるが、それでも既存の観測網よりは水平解像度において密になる。ちなみに、極軌道衛星のマイクロ波サウンダの水平分解能は 20km である。

(限定的に行う場合の観測要素と観測バンド (波長帯) 等)

➤ 水蒸気 : 160GHz に加えて、183±1、±3、±7GHz

180GHz 帯の 6 バンドの観測により、6 層の鉛直分解能。(対流圏 : 3 層 (4km、8km、10km)、成層圏 : 3 層)

なお、水蒸気ウィンドウと水蒸気吸収帯の 2 つが必要なので、上記の 160GHz 帯と 183GHz 帯の両方が必要。

- アンテナ開口 50cm の場合の IFOV : 118km
- 回転速度 1r/m で 50 分で全球観測

※ 気温の観測のためには 50GHz が有効であるが、しかし、静止軌道からのマイクロ波観測における 50GHz は空間分解能が極めて悪くなるので、非現実的と思われる。搭載するなら 118GHz だが、これでも有効か否かは判断できない。

ii) センサーとしての技術的な実現可能性

静止軌道からのマイクロ波センサーの開発にあたっては、低軌道衛星に搭載する場合に比べてアンテナ口径が極端に大きくなるという問題を抱えている。なお、干渉計であれば駆動部が無いので寿命は長くなる。その他、以下のような問題点が考えられる。

(静止軌道のマイクロ波サウンダ開発にあたっての検討課題)

- アンテナの口径の大きさと衛星への搭載
- 水平分解能は 120km と数値予報の精度向上へのインパクト
- 2次元走査方式
- 50cm のアンテナの回転速度 1~2r/m (スピン衛星並み) で潤滑剤は問題ないか。静止軌道でアンテナを回した経験は無い。仮に壊れないとしてもトルクが悪くなると他に擾乱を与えることとなる。
- LNA
- 新規開発となるため開発費用

米国 NASA/JPL は GOES 衛星用にマイクロ波サウンダ GeoSTAR を開発しようとしたことがあり、50GHz のバンドについてこうすれば試験的に作ることができるという段階まで進ん

だが、その後の進展は無いようである。なお、水平分解能は 50km であった。

日本は低軌道衛星においてマイクロ波イメージャ（GCOM-W 搭載の AMSR-2）の実績があるので、せめて水蒸気バンドだけでも静止軌道から観測できるようなマイクロ波センサーを開発する可能性は潜在的にあるのではないかと思われる。ただし、仮に開発するとしても 10 年よりももっと長い開発期間が必要となってくるかもしれない。なお、低軌道衛星のマイクロ波サウンダは回転アンテナを用いるのが主流だが、もしも静止衛星に搭載するのなら振動が大きくなってしまうため、干渉計で駆動部が無いものを開発する必要があると思われる。

一方、米国 NASA では、必ずしも静止軌道にこだわらず、低軌道の超小型衛星にマイクロ波センサーを搭載して複数機により観測網を構築すること（TROPICS 計画）を民間ベンチャーにより実施できないかと考えている。

（TROPICS 計画の概要）

- 超小型衛星：6 機にマイクロ波サウンダを搭載
- 重量：80kg
- 寿命：1 年 3 ヶ月
- 軌道傾斜角：30 度（TRMM と同じ）
- アンテナ：8cm
- 観測バンド：92GHz、118GHz、183GHz、206GHz
- 観測幅：2,000km
- 水平分解能：2～3km
- 気温の精度：1.2K
- 水蒸気の精度：20%

上記のような 110GHz よりも上の波長帯であれば、超小型衛星でも観測は実施可能と思われる。ただし、データ利用の観点からは、観測精度において S/N 比が不十分と思われるし、6機のキャリブレーションも難しいと思われる。寿命が短いので気候値には向いていないだろう。とはいえ、低軌道衛星または静止衛星を主衛星として、このような超小型衛星を複数機で周回させて観測すれば、現行の低軌道衛星複数機と同等レベルの観測データセットが得られる可能性があるかもしれない。

(6) その他のセンサー

① 降雨レーダー

静止軌道から降雨レーダーによる観測を行うことで、高頻度に広範囲の降水を観測することが可能となる。海上の台風の監視に有効であるほか、特に地上レーダーの観測範囲外となる海上や島嶼国の防災に有益である。開発には技術的な課題が多く、長期間（20年～30年）が必要と思われる。

② 高解像度イメージャ

静止軌道からの水平分解能 7m～10m の高解像度イメージャ観測が実現することで、火山監視や土砂災害等に有効と思われる。また、雲の発達過程の解明に役立つ。ランドサットが 30m なので、一昔前の周回衛星と同等の性能となる。開発には 10 年以上の期間が必要となる可能性がある。なお、中国が分解能 70m の高頻度狭領域観測静止衛星 Gao Fen-4 を打ち上げているが、気象業務に有効か否かは不明。

5. 来年度以降の検討に向けて

本稿は、現時点において収集できた限られた情報の中から考察を加えたものであり、来年度以降のさらなる技術動向調査によって内容的にもアップデートする必要があるとともに、それに応じて考察の結果も自ずと変わってくるが見込まれる。

後継衛星の検討にあたっては、気象庁のみならず、関係機関との連携を模索していくことが肝要ではないか。静止軌道に置くことのできる衛星の位置は限られているので、静止位置という資源を有効に使うために相乗り等の方策は考えられないか。

また、ハイパースペクトル赤外サウンダなど新規センサーを搭載する場合は、気象業務のみならずそれ以外の分野での利活用の方法についてか一層の分析を行うとともに、費用対効果に照らしていくことも肝要であろう。

マイクロ波サウンダについては静止軌道からの観測が望まれるものの、開発要素が大きく、チャレンジングである。後継衛星というよりももっと先の将来衛星といった長期的なスパンで考えていくことになるのではないか。

本稿が今後の気象庁における検討にあたっての一助となることを望むものである。

検討作業の経過

○ 第1回（平成30年10月2日）

- （1）基本的な視点
- （2）諸外国等の動向

○ 第2回（平成30年11月30日）

- （1）各センサーの利用方法
- （2）イメージャの改良

○ 第3回（平成31年2月6日）

- （1）来年度以降に向けて
- （2）とりまとめ（案）

※ 検討作業チーム：

下田陽久委員（主査）、沖 理子委員、高藪 縁委員、中島 孝委員、
本多嘉明委員、佐藤正樹（東京大学大気海洋研究所教授）

略語集

ADEOS	地球観測プラットフォーム技術衛星「みどり」
CAPE	対流有効位置エネルギー
ECMWF	ヨーロッパ中期予報センター European Centre for Medium-Range Weather Forecast
FTS	フーリエ変換分光計
GCOM-C	気候変動観測衛星「しきさい」
GEO-KOMPSAT	Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite
GOES	米国の静止気象衛星 Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES)
ILAS	改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS)
JAXA	宇宙航空研究開発機構
LNA	低雑音増幅器 Low Noise Amplifier
MTG	欧州気象衛星開発機構が運用する静止気象衛星 Meteosat Third Generation
NASA	米国航空宇宙局 National Aeronautics and Space Administration
NASA/JPL	NASA/Jet Propulsion Laboratory
TRMM	熱帯降雨観測衛星 Tropical Rainfall Measuring Mission