
解 説

ひまわり 8・9 号後継衛星検討のための ハイパースペクトル赤外サウンダの数値予報インパクト調査

岡本 幸三¹・大和田 浩美²・藤田 匡³・別所 康太郎²・高橋 昌也²・
太田 芳文⁴・計盛 正博⁴・大塚 道子⁵・瀬古 弘¹・石田 春磨⁶・
上清 直隆⁷・石元 裕史¹・林 昌宏⁸・安藤 昭芳⁹・横田 寛伸²

要 旨

静止気象衛星ひまわり 8 号及び 9 号の後継衛星の検討のため、静止衛星に搭載可能なハイパースペクトル赤外サウンダ (GeoHSS と記す) の観測性能や海外機関における計画・運用状況を調査した。さらに GeoHSS の数値予報へのインパクトを詳細に調査するため、観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を全球及びメソ同化システムを用いて実施した。複数の事例において、環境場や台風進路予測、空間スケールの比較的大きな豪雨の予測が改善することが確認できた。一方、線状降水帯の予測では改善がほとんどみられなかったため、その要因や改良について引き続き調査が必要である。最後に中国の FY-4A 衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダ (GIIRS) が観測する実データの品質調査を行ったところ、GIIRS は時間変化する複雑なバイアスを持ち、同化システム内ではそのバイアスへの対応が困難であることが判明した。

1. 背景と目的

1.1 静止気象衛星ひまわり

気象庁の静止気象衛星ひまわりの初号機は 1977 年 7 月に打ち上げられ、静止気象衛星 GMS

シリーズとして合計 5 機が活躍した。GMS-5 の後継機として、2005 年からは運輸多目的衛星新 1 号 (MTSAT-1R) が運用され、2010 年には MTSAT-2 に運用を引き継いだ。2014 年には世界初の第 3 世

¹ 気象研究所 気象観測研究部

² 情報基盤部 気象衛星課

³ 気象研究所 気象予報研究部

⁴ 情報基盤部 数値予報課

⁵ 気象大学校

⁶ 気象衛星センター データ処理部 (現 気象研究所 気象観測研究部)

⁷ 気象研究所 気象観測研究部 (現 情報基盤部 数値予報課 地球システムモデル技術開発室)

⁸ 気象研究所 台風・災害気象研究部

⁹ 情報基盤部 気象衛星課 (現 青森地方気象台)

(令和 3 年 3 月 5 日発行)

代の静止気象衛星としてひまわり 8 号が打ち上げられ、2015 年より運用を開始した。2016 年に打ち上げられたひまわり 9 号は、2022 年頃に 8 号から観測を引き継ぎ、2029 年頃に運用を終える予定である (Bessho *et al.*, 2016)。

静止気象衛星における観測測器として、ひまわりは初号機以来、継続的に可視赤外放射計 (イメージャ) を搭載している。現在のひまわり 8 号及び 9 号に搭載されている世界最先端の観測性能を有する可視赤外イメージャ (AHI) では、可視 3 バンド、近赤外 3 バンド、赤外 10 バンドの合計 16 バンドで観測し、その分解能は可視で 0.5 km、赤外で 2 km となっている。また、フルディスクの観測を 10 分ごと、日本域観測及び 1,000 km×1000 km ほどの任意の領域を観測する機動観測を 2.5 分ごと、及び、東西 1,000 km×南北 500 km ほどの任意の領域を観測する高頻度機動観測を 30 秒ごとを実施している。

気象庁では、ひまわり 8 号の観測データを大気現象の実況監視のほか、数値予報における同化や台風の強度推定、火山灰の監視、海面水温の推定などに用いている。また、民間でも天気情報の作成に活用されているほか、アジア太平洋諸国の気象業務にも貢献している。

このように、ひまわりは初号機より 40 年以上にわたって、気象業務だけでなく、国内外で広く利用されており、重要な社会基盤となっている。今後も宇宙からの気象観測体制を切れ目なく維持していくために、ひまわり 8 号及び 9 号の後継衛星が必要とされている。加えて、最近の豪雨災害の現れ方に照らして、最新の技術を導入することにより気象観測・予測能力を飛躍的に向上させて自然災害の防止に寄与することが喫緊の課題となっている。

1.2 宇宙基本計画と工程表

宇宙開発利用に関する施策を総合的かつ計画

的に推進するため、内閣総理大臣を長とする宇宙開発戦略本部が設置されている¹⁰。宇宙開発戦略本部では、宇宙開発利用の推進に関する基本的な方針や、宇宙開発利用に関し政府が総合的かつ計画的に実施すべき施策等を定める宇宙基本計画の閣議決定案の作成等を行っており、2020 年 6 月 30 日には、第 6 期となる宇宙基本計画が閣議決定されている¹¹。同計画では、宇宙政策に関する具体的アプローチとして、気象衛星について下記のように記述されている。

2022 年度をめどに、現在運用中の「ひまわり 8 号」に代わり、現在軌道上に待機中の「ひまわり 9 号」の運用を開始する。台風・集中豪雨の監視・予測、航空機・船舶の安全航行、地球環境や火山監視等、国民の安全・安心の確保を目的とした、切れ目のない気象衛星観測体制を確実にするため、2029 年度めどの後継機の運用開始に向け、2023 年度をめどに後継機の製造に着手する。後継機には高密度観測等の最新技術を取り入れ、防災気象情報の高度化を通じて自然災害からの被害軽減を図る。

また、宇宙基本計画に基づいて、2009 年より宇宙基本計画工程表が宇宙開発戦略本部により作成され、毎年更新されている。2020 年 12 月 15 日に同本部で決定された同工程表では、ひまわりは第 1.1 図のような線表となっている¹²。

このように宇宙基本計画及びその工程表でも、自然災害からの被害を軽減するために、ひまわり 8 号及び 9 号の後継衛星については防災気象情報の高度化を可能とするよう、その検討や製造、運用・利用が時期とともに明示されている。

令和 2 年度 (2020年度)	令和 3 年度 (2021年度)	令和 4 年度 (2022年度)	令和 5 年度 (2023年度)	令和 6 年度 (2024年度)	令和 7 年度 (2025年度)	令和 8 年度 (2026年度)	令和 9 年度 (2027年度)	令和 10 年度 (2028年度)	令和 11 年度 (2029年度)	令和 12 年度以降
ひまわり8号の運用・利用 [国土交通省]		ひまわり9号の運用・利用 [国土交通省]								後継機の運用・利用 [国土交通省]
後継機の検討 [国土交通省]		後継機の製造 [国土交通省]								打上げ [国土交通省]

第 1.1 図 宇宙基本計画工程表に記載されたひまわり 8 号及び 9 号と、その後継機の工程表。

¹⁰ <https://www8.cao.go.jp/space/hq/about.html>, 2020 年 7 月 15 日閲覧

¹¹ https://www8.cao.go.jp/space/plan/kaitei_fy02/fy02.pdf, 2020 年 7 月 15 日閲覧

¹² https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy02/kaitei_fy02rev.pdf, 2020 年 12 月 15 日閲覧

1.3 2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方

国土交通省交通政策審議会気象分科会は 2018 年 8 月 20 日に、2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方を提言として取りまとめた¹³。その中では、重点的な取組事項の一つとして観測・予測精度向上のための技術開発が謳われており、気象・気候に関わる具体的な目標として、「半日前からの早め早めの防災対応等に直結する（線状降水帯の発生・停滞等に伴う集中豪雨の）予測精度の向上」や、「数日前からの大規模災害に備えた広域避難に資する台風・集中豪雨などの予測精度向上」が掲げられている。さらにこれらの目標を実現するための具体的な取組内容として、気象衛星を含む気象庁の基幹的かつ総合的な観測網について、更なる充実・高度化を進めることとされている。

Kato (2020) は、線状降水帯が発生しやすい六つの条件を指摘している。大量の下層水蒸気の流入は、6 条件のうちの一つであり、大雨のもととなる水蒸気を供給すること、大気を不安定にすることなどから、線状降水帯の発生に重要な要因である。また、台風についても、暖かい海面から供給された水蒸気が凝結して雲粒になるときに放出される熱をエネルギーとして発生・発達する。このため、線状降水帯がもたらす集中豪雨や台風の予測精度を向上させるには、どの層にどれだけの水蒸気が溜まっているのか、気温と水蒸気の鉛直分布に関わる大気の不安定性はどうか、そしてどの層の風がどのように吹いているのか等の大気の諸要素の詳細な情報を高頻度で観測することが必要となる。

残念ながら、ひまわり 8 号及び 9 号による観測では、これらの気温・水蒸気の鉛直分布を十分に把握することができない。このため、新機能の搭載に向けて技術的に検討を進める必要がある。

1.4 Vision for WIGOS in 2040

我が国も加盟している世界気象機関 (WMO) では、衛星を含む様々な観測を統合的に取り扱う WMO 統合全球観測システム (WIGOS) を推進している¹⁴。WMO が取りまとめた Vision for WIGOS in 2040 では、2040 年頃の静止気象衛星への具備が望ましいセンサとして、高頻度観測機能を備えた多バンドの可視赤外イメージャや、ハイパースペクトル赤外サウンダ、雷センサ、紫外・可視・近赤外サウンダを列挙している¹⁵。

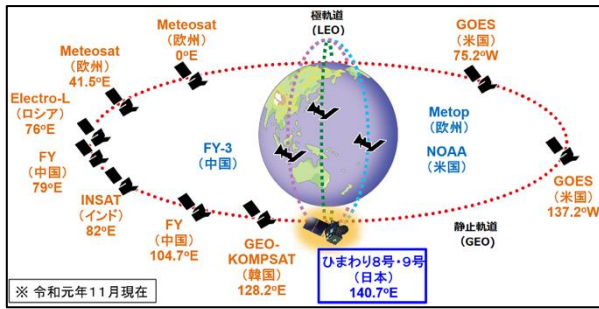
このうち、ハイパースペクトル赤外サウンダ（以降、本稿では HSS と記す）は、大気や雲・地表面などからの赤外放射を高い波数分解能で測定し、気温や水蒸気などの大気の鉛直構造を観測するセンサである。第 2 章で詳述するが、赤外サウンダは最初にフィルター式のもので実用化され、低軌道衛星に搭載された。近年では、回折格子やフーリエ変換分光計を用いた HSS が低軌道衛星に搭載されている。この HSS を静止気象衛星に搭載することが、Vision for WIGOS in 2040 で推奨され、実際に中国の静止気象衛星 FY-4A に搭載されているほか、欧州気象衛星開発機構 (EUMETSAT) の第 3 世代静止気象衛星 MTG でも搭載が予定されている。また、米国でも GOES-R の次の世代の静止気象衛星での搭載の検討が始まっている。静止衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダ（以降、本稿では GeoHSS と記す）は、まさにひまわりの後継衛星に求められる機能を実現するための有力な選択肢と考えられる。また、2020 年に開催された第 48 回気象衛星調整会議 (CGMS) において、ひまわりを含む各国の静止気象衛星が GeoHSS を搭載することにより、全球の気温・水蒸気のプロファイルが得られ、数値予報精度の更なる向上が期待できることが広く理解された。この GeoHSS による観測で「地球を取り囲んだ状態」(GeoRing. 第 1.2 図はその模式図) を目指すことが CGMS の重点事項として盛り込

¹³ <https://www.mlit.go.jp/common/001262849.pdf>, 2020 年 7 月 15 日閲覧

¹⁴ <https://public.wmo.int/en/about-us/vision-and-mission/wmo-integrated-global-observing-system>, 2020 年 7 月 15 日閲覧

¹⁵ https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21716, 2020 年 7 月 15 日閲覧

まれたことも考慮すべき点となっている。



第 1.2 図 静止気象衛星で地球を取り囲んだ状態 (GeoRing) の模式図。

1.5 GeoHSS の後継衛星への搭載の検討

気象庁では、宇宙基本計画とその工程表に従って、ひまわり 8 号及び 9 号の後継衛星を整備すべく、2018 年に気象衛星整備検討委員会を庁内に設置した。その検討の中で、前述の 2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方を実現するためには、Vision for WIGOS in 2040 でも搭載が推奨されている GeoHSS を後継衛星に搭載することが解決策の一つと考えられた。このため、その実現の可能性や、気象業務、特に数値予報に与える効果を調査することとした。

2019 年には後継衛星の性能や仕様等の多様な事項の検討の基礎とするため、気象衛星課を中心として、国内外の衛星本体やセンサ、地上処理システム等に関する技術動向調査を実施し、その中で GeoHSS の実現の可能性も調査した。その結果、GeoHSS の製作には複数の潜在的事業者が存在していること、及び衛星本体への取付けも含めて、後継衛星の製作工程に間に合わせる事が可能であることがわかった。

その一方、GeoHSS が気象業務、特に数値予報に与える効果を評価するには、GeoHSS を後継衛星に搭載したことを想定した実験を行う必要があると判断された。

1.6 観測システムシミュレーション実験等の実施

HSS については、当庁ではこれまで米国の極軌道気象衛星 NOAA や欧州の極軌道気象衛星 Metop に搭載されている CrIS や IASI などについて、数

値予報への入力データの一つとして取り扱ってきた。その一方、GeoHSS については、知見も少なく、また数値予報への入力データとして利用した場合の数値予報に与える効果も未知数である。一般に新しい測器の製造や運用、そのデータの処理・利用には、多大な予算と人的資源が必要となるため、それに見合う効果が気象業務で得られるのかをあらかじめ調査しておく必要がある。

気象衛星整備検討委員会の下での気象衛星整備技術検討グループの第 2 回会合が 2018 年 7 月 24 日に開催され、GeoHSS による観測データが数値予報に与える効果を見極めるため、観測システムシミュレーション実験 (OSSE) 及び観測システム実験 (OSE) を行うことが決定された。本活動は、気象庁技術開発推進本部で承認された上で、同本部モデル部会衛星グループにおいて進捗管理・報告を行うこととなった。また、この活動を効果的に実施するため、本稿の著者でもある気象庁の旧予報部及び観測部・気象研究所・気象衛星センターの専門家をメンバーとする「ハイパースペクトル赤外サウンダに関する技術検討チーム」を設置した。本検討チームの活動期間は 2 年間とされ、2019 年度末までに結論をとりまとめた。

GeoHSS の数値予報へのインパクト調査は、台風などを対象とした全球同化システムを使った調査と、線状降水帯が引き起こす豪雨などを対象とするメソ同化システムを使った調査が実施された。一方、中国の FY-4A 衛星には GIIRS と呼ばれる GeoHSS が搭載されている。本検討チームでは、将来の GIIRS データを用いた OSE に備えて、GIIRS の実観測データの調査もあわせて実施した。

本稿では、まず HSS の国際的な動向を第 2 章で記述し、OSSE の概要とその結果を第 3 章から第 5 章で詳述する。そして、GIIRS データの利用に向けた実観測データの調査結果を第 6 章で紹介する。第 7 章ではまとめと今後の計画について述べる。なお、本検討チームの活動の一部については、OSSE の概要や平成 30 年 7 月豪雨に対する GeoHSS の全球・メソのインパクト調査の初期結果として、Okamoto *et al.* (2020) で既に報告している。

本稿は、後継衛星の整備に関する技術的な検討の記録の一つとして、検討チーム全体の活動の成果と、OSSE 処理の詳細やその他の重要な事例調査についてまとめたものである。第 1 章は別所、第 2 章は高橋、第 3 章は第 1 節は岡本、第 2 節は大和田、第 4 章は第 1 節と第 3 節は大和田、第 2 節と第 4 節は岡本、第 5 章は藤田、第 6 章は太田と石田、第 7 章は岡本、付録は太田が主に執筆し、他の著者が文章や図表を補った。本稿の最後に、本文中に登場する略語を略語一覧としてまとめたので、必要に応じ参照していただきたい。また本稿では参考文献及び略語一覧を除き、特定の衛星に搭載される測器の固有名詞の英語表記については斜体で記載し、測器の種類等一般名詞の英語表記と区別をしている。

2. 静止衛星搭載ハイパースペクトル赤外サウンダの概要

2.1 多波長赤外観測技術の発展

宇宙からの気象観測は、低軌道衛星で培われた技術が静止衛星に適用されるという流れが一般的であり、赤外サウンダによる気温や水蒸気の鉛直情報の観測も、その例に漏れない。衛星搭載赤外サウンダの歴史の詳細は Menzel *et al.* (2018) を参照いただきたい。本章では、1990 年代後半から盛んに採用されている、HSS の運用や計画の動向を紹介する。当該観測では、回折格子やフーリエ変換分光計 (FTS, 干渉計とも呼ばれる) を用いることで、千を超える超多波長チャンネルによる、地球大気吸収線を解像するほどの高分解能な赤外スペクトルデータを得ることができる¹⁶。超多波長チャンネルによる観測では、従前のフィルター分光による 20-30 チャンネルの観測よりも高精度な気温や水蒸気の鉛直情報が得られるほか、オゾンやメタン等の大気微量成分を算出することも可能になる。

低軌道衛星搭載の HSS としては、1996 年に宇宙開発事業団 (NASDA) (現 JAXA) が打ち上げた

ADEOS 衛星に搭載の *IMG* にて干渉計が採用された。2002 年に打ち上げられた NASA の *Aqua* 衛星には回折格子を採用した *AIRS* が搭載されたが、その後の低軌道衛星搭載の HSS には干渉計の採用が続いており、EUMETSAT が 2006, 2012, 2018 年にそれぞれ打ち上げた *Metop-A*, *-B*, *-C* 衛星には *IASI* が、NASA 及び NOAA が 2011 年及び 2017 年にそれぞれ打ち上げた *Suomi-NPP* 及び NOAA-20 (JPSS-1) 衛星には *CrIS* が搭載されている。これらの HSS による赤外放射観測データは、各国の数値予報や大気環境監視、気候解析等で幅広く利用されているほか、静止衛星に搭載された可視赤外イメージャ等の赤外相互校正の基準 (Hewison *et al.*, 2020) としても活用されている。ほかにも、中国気象局 (CMA) が 2017 年に打ち上げた *FY-3D* 衛星搭載の *HIRAS*、ロシア水文気象局 (ROSHYDROMET) が 2014 年に初号機を打ち上げた *Meteor-M N2* シリーズに搭載の *IKFS-2* 等でも干渉計が採用されている。

これら低軌道衛星での開発・運用の経験と実績を基に、GeoHSS も開発が進められてきた。第 2.1 表に運用中、又は搭載が予定・提案されている GeoHSS 及び極軌道衛星搭載 HSS の諸元を示す。これらは全て干渉計であり、二次元に配置された赤外検出器の「step-stare (移動-凝視の繰り返し)」により観測が行われる。凝視の時間及び一回の凝視で観測する範囲はセンサによって異なるが、例えば *MTG-S* 衛星搭載の *IRS* では、160 個×160 個の 2 次元アレイ検出器を用いて、約 10 秒間凝視することで観測を行う。静止軌道からの step-stare 観測は、低軌道衛星と比べると凝視の時間が長く、より大きな光量を得ることができるため、水平分解能を高くすることができる。例えば、*IASI* や *CrIS* の水平分解能は十数 km であるが、*IRS* のそれは 4 km×4 km であり¹⁷、このようなセンサはイメージング FTS とも呼ばれている。各センサの観測波数域 (第 2.1 図) を比較すると、*GIIRS* や *IRS* では *IASI* のような波数方向に連続した広帯域観

¹⁶ 回折格子や FTS の観測原理については深堀 (1999) 等を参照願いたい。

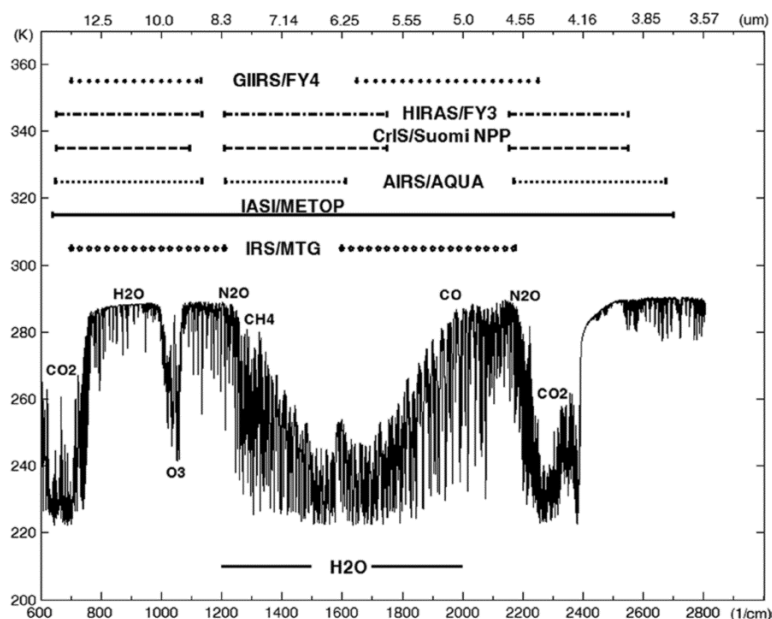
¹⁷ 検出素子の衛星直下における地上分解能。欧州上空では約 7 km

測は行えないものの、観測波数帯を適切に配置することで、気温や水蒸気に加えて、オゾン等の大気微量成分の観測も可能な設計になっている。次節以降では、中国の *GIIRS*, 欧州の *IRS*, 及び米国における *GeoHSS* の運用, 開発, 検討の状況を紹

介するが、2030年以降にはロシア等にも同様の計画がある（例えば *ROSCOSMOS and ROSHYDROMET (2020)*）ことに触れておく。なお、以下に記す各種計画は2020年8月末時点のものであることに留意願いたい。

第 2.1 表 静止衛星及び低軌道衛星に搭載された赤外サウンダ（フーリエ変換分光計又は干渉計）の仕様。IRS は EUMETSAT (2018a), *GIIRS* は Yang *et al.* (2017) 及び Zhang *et al.* (2019), *ABX* は Glumb and Griffith (2019), *IASI* は Hilton *et al.* (2012) 及び EUMETSAT (2019), *CrIS* は Goldberg *et al.* (2013), NOAA (2018) 及び Tobin *et al.* (2013) による。*IRS* について、観測波数域のうち 680–700 cm⁻¹ 及び 2175–2250 cm⁻¹ は「Extended」と定義されており、校正精度等への要求値は存在しない。波数分解能（サンプリング間隔）は今後 0.625 cm⁻¹ より高分解能になる可能性があり（Coppens *et al.*, 2019）、その際にはチャンネル数は増加することになる。LAC は、MTG 計画で定義されるフルディスクを 4 分割した領域。*GIIRS* の波数分解能及びチャンネル数は文献によって異なるが、ここではより多くの文献に記されている Zhang *et al.* (2019) の値を採用した。*CrIS* のチャンネル数や波数分解能は Full Spectral Resolution (FSR) の値。

センサー名	IRS	GIIRS	ABX	IASI	CrIS
搭載衛星	MTG-S	FY-4A	—	Metop-A, -B, -C	Suomi-NPP JPSS-1 (NOAA-20)
打ち上げ年	2023	2016	—	2006, 2012, 2018	2011, 2017
運用機関	EUMETSAT	CMA	—	EUMETSAT	NOAA
水平分解能 (衛星直下)	赤外: 4 km	赤外: 16 km 可視: 2 km	赤外: 4 km 可視: 0.6 km	赤外: 12 km	赤外: 14 km
チャンネル数	1738	1650	1600以上	8461	2211
観測波数 (波長) 域					
長波長赤外 (LWIR)	680 – 1210 cm ⁻¹ (8.26 – 14.70 μm)	700 – 1130 cm ⁻¹ (8.85 – 14.29 μm)	680 – 1120 cm ⁻¹ (8.93 – 14.70 μm)	645 – 1210 cm ⁻¹ (8.26 – 15.50 μm)	650 – 1095 cm ⁻¹ (9.1 – 15.4 μm)
中波長赤外 (MWIR)	1600 – 2250 cm ⁻¹ (4.44 – 6.25 μm)	1650 – 2250 cm ⁻¹ (4.44 – 6.06 μm)	1210 – 1750 cm ⁻¹ (5.85 – 8.26 μm) または1650 – 2250 cm ⁻¹ (4.44 – 6.06 μm)	1210 – 2000 cm ⁻¹ (5.00 – 8.26 μm)	1210 – 1750 cm ⁻¹ (5.7 – 8.4 μm)
短波長赤外 (SWIR)	—	—	—	2000 – 2760 cm ⁻¹ (3.62 – 5.00 μm)	2155 – 2550 cm ⁻¹ (3.9 – 4.6 μm)
可視	—	0.55 – 0.75 μm	パナクロマティック Day/Nightバンド追加可能	—	—
波数分解能 (サンプリング間隔)					
LWIR	0.625 cm ⁻¹	0.625 cm ⁻¹	0.625 cm ⁻¹ (他にも選択肢有り)	0.25 cm ⁻¹	0.625 cm ⁻¹
MWIR					
観測領域・頻度	フルディスク 60分毎 またはLACを 15分毎	中国上空5000 km四方の 領域を60分毎 (より小領域・高頻度の 観測モードも存在)	フルディスク30分毎+ 領域観測2.5分毎	8秒/スワス スワス幅2200 km	8秒/スワス スワス幅2200 km
放射量校正精度 (仕 様値または要求値)	0.5 K以下@280 K	1.5 K (3σ)	0.5 K@300 K	0.5 K	LWIR: 0.45 %, MWIR: 0.58 %, SWIR: 0.77 % @287 K (1σ)



第 2.1 図 静止衛星及び低軌道衛星に搭載されたハイパースペクトル赤外サウンダ（MTG/IRS は 2023 年打ち上げ予定）の観測波数域及び、IASI による、大気上端における典型的な輝度温度（Menzel *et al.*, 2018）。

2.2 中国

2016 年 12 月に CMA が打ち上げた新世代静止気象衛星 FY-4A には、可視赤外イメージャ (*AGRI*) と雷センサ (*LMI*) に加えて、中国で独自に開発された世界初の GeoHSS である *GIIRS* が搭載されている。当該衛星は現業運用されているものの、FY-4 シリーズの初号機ということで研究開発の位置づけになっており、観測データの品質には改善すべき点が多い（第 6 章参照）。ただし、現業衛星として 2021 年及び 2022 年に打ち上げ予定の FY-4B や FY-4C には、観測機能・品質ともに改良・高度化された *GIIRS* が搭載されることになっている（CMA, 2020）。

2.3 欧州

EUMETSAT の第 3 世代静止気象衛星 MTG ミッションでは、現行の MSG 衛星に搭載された可視赤外イメージャ (*SEVIRI*) による、高頻度・高水平分解能・多チャンネル観測の継続を第一の目的としている。さらに、HSS (*IRS*)、雷センサ (*LI*)、

紫外・可視・近赤外分光計 (*UVN*) による新しい観測機能の追加や、機能向上した可視赤外イメージャ (*FCI*) の搭載により、ナウキャストや数値予報の精度向上への貢献が図られている。MTG シリーズは、*FCI* と *LI* によるイメージング観測を行う MTG-I 衛星¹⁸ と、*IRS* と *UVN* による探査計観測を行う MTG-S 衛星に分かれており、各衛星は、軌道上試験¹⁹ を含んで 8 年半以上の運用が計画されている。MTG-I は、1 機が *FCI* によるフルディスク（静止軌道から観測可能な地球）及び *LI* による観測を、もう 1 機が他方のバックアップ且つ *FCI* による欧州域の高頻度（ラピッドスキャン）観測を担い、合計 4 機による 20 年以上の観測運用が計画されており、初号機の打ち上げ予定は 2022 年末となっている。MTG-S はバックアップ衛星無しの 2 機による計画で 15 年半以上の観測運用を見込んでおり、初号機の打ち上げ予定は 2023 年末となっている。なお、両衛星ともに、春秋の食期間には太陽光のセンサへの入射を防ぐために衛星を南北方向（ヨー (*yaw*) 軸方向）に 180

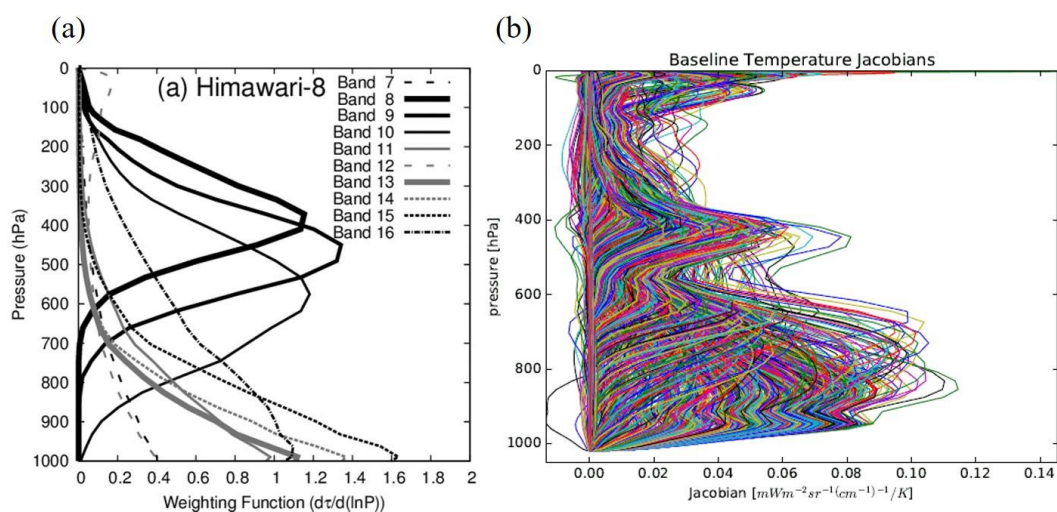
¹⁸ データ収集システム (DCS) による地上気象観測などのデータ中継機能や、GEOSAR による遭難者等の捜索救難機能も有する。

¹⁹ MTG-I, -S とともに、初号機は 1 年、2 号機以降は 6 か月の試験期間が想定されている。

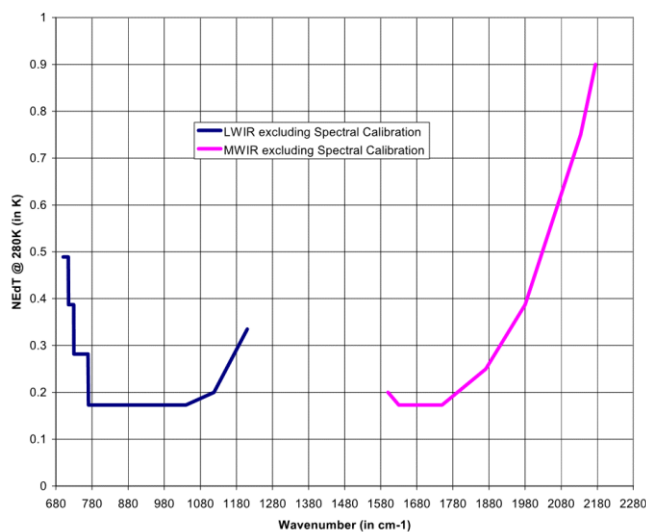
度反転させる「yaw flip」が計画されており、本制御によって半日程度の観測休止の可能性ある (EUMETSAT, 2018a).

IRS の仕様は、2003 年から 2006 年に行われたミッション概念の検討 (Pre-Phase A) にて、分光方式 (回折格子又は干渉計)、観測波数域、雲識別や位置合わせのための可視観測機能 (イメージャ) 搭載等が検討され (Bensi, 2005; Tjemkes, 2006)、第 2.1 表に示す仕様が策定された。第 2.2 図に、ひまわり 8 号搭載の可視赤外イメージャ (AHI) と IRS の荷重関数を示す。10 個の赤外バンドを有

する AHI は「サウンドに準ずるデータ利用も可能」と言われることがあるが、IRS のように高波数分解能 (高鉛直分解能) なセンサと比べると、観測される大気鉛直方向の情報量には明瞭な違いがあることがわかる。IRS は、中波長赤外 (MWIR) と長波長赤外 (LWIR) 用に 160 個×160 個の 2 次元アレイ検出器を 2 個有し、各検出素子 (ピクセル) の水平分解能は衛星直下では 4 km である。第 2.3 図には、IRS のノイズ等価輝度温度差 (NEdT) への要求値を示す。



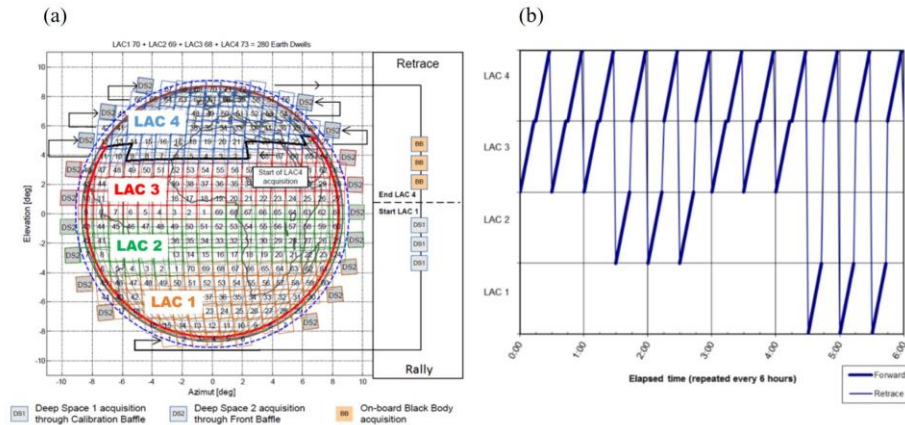
第 2.2 図 衛星搭載センサの荷重関数。各波長帯 (チャンネル) によって観測される放射輝度の、感度の高度分布を表す。(a) ひまわり 8 号搭載可視赤外イメージャ (AHI) の赤外バンド (Kazumori, 2018)。(b) IRS (EUMETSAT Website, 2020 年 8 月 1 日参照)。



第 2.3 図 IRS のノイズ等価輝度温度差 (NEdT) に対する要求値 (Aminou et al., 2009)。スペクトル校正 (センサ応答関数の校正) のノイズを含まない値。

2次元アレイ検出器による毎回の凝視観測(160地点×160地点)の単位は dwell と呼ばれ、フルディスクを4分割した LAC, 放射量校正のための深宇宙, 及び, 黒体の観測が順々に行われる(第2.4図). 一つの LAC の観測には約15分を要し, 2018年末時点では, 欧州や北アフリカの LAC 4 という領域は約30分ごとに, フルディスクは約5時間ごとに観測する計画になっている(第2.4図b). 各 dwell で素子ごとに得られる干渉光強度の生データであるインターフェログラム(interferogram)は, リサンプリング, 非線形補正, データ圧縮といった機上処理の後, 地上にダウンリンクされる. 地上処理システムでは, 放射量校正, スペクトル校正, 幾何校正, アポダイゼーション(apodization)処理²⁰, センサ応答関数の均一化²¹, 主成分スコアの計算等によりレベル1プロダクトが作成された後, レベル2プロダクトの作成等が行われる(Coppens *et al.*, 2019). 凝視の前後には, イメージャモードと呼ばれる分解能1.3 kmのサブピクセル観測も実施され, 雲等による各ピクセルの不均質さの計算や, 位置合わせ処理での利用が検討

されている(Theodore, 2019). レベル1プロダクトは, 観測後15分以内に主成分スコアが商用通信衛星によるデータ配信(EUMETCast)やインターネット経由等で配信される予定だが, 主成分スコアを算出する前の全チャンネルの放射輝度データも, アーカイブデータとして公開されることになっている. 1日あたりのデータ容量は, 主成分スコアが103 GB, 全チャンネルの放射輝度データが735 GBと見積もられている(EUMETSAT, 2018b). 気温・水蒸気・オゾンの鉛直プロファイル, 大気不安定指数, 雲プロダクトといったレベル2プロダクトについては, 主要な数値予報センターにおける現業的な同化利用の計画はなく(August, 2019), ナウキャストでの利用を主目的として, 観測後30分以内の配信が計画されている(August *et al.*, 2019). なお, EUMETSAT(2018b)やEUMETSAT Website上に記載はないが, 気温・水蒸気・オゾンのレベル2プロダクトを入力とした風の鉛直プロファイル算出も検討されており(Borde *et al.*, 2019), ナウキャスト等での利用が期待される.



第2.4図 (a) IRSの観測パターン(EUMETSAT Website, 2020年8月1日参照). LACの中に記された各数字が dwell. 宇宙空間に記された DS1, DS2 及び図の右側に記された BB は, 放射量校正のための深宇宙観測と黒体観測をそれぞれ表す. (b) 運用で計画されている, IRS による各 LAC の観測パターン(EUMETSAT, 2018a). 太線部分が実際の観測(dwell), 細線部分は異なる LAC への移動を表す.

²⁰ インターフェログラムをフーリエ変換してスペクトルを得る際に, 疑似的なフィルター関数(アポダイズ関数)を畳み込む処理. アポダイゼーションにより, スペクトル分解能は FTS 本来の値から劣化してしまうが, FTS 本来の分光応答特性(sinc 関数)が持つ負の副極等を緩和し, より物理的に解釈しやすい分光スペクトルを得ることができる.

²¹ 検出器ごと・バンドごとに異なり, かつ時間変化し得るセンサ応答関数を均質化(uniformization)する処理. これにより, 利用者はフォワードモデルを更新する必要がなくなる.

2.4 米国

NOAA の静止気象衛星 GOES シリーズでは、1980 年打ち上げの GOES-4 から 2010 年打ち上げの GOES-15 にかけて、水平分解能 10 km 前後、チャンネル数 20 程度の、*GOES Sounder* と呼ばれるフィルター分光式赤外サウンダが採用されてきた。1990 年代後半には、現行の GOES-R シリーズの検討が始まった。米国の 3 企業が *HES* と呼ばれる *GeoHSS* の検討を進めていたが、予算上の都合により、2006 年 9 月に GOES-R シリーズへの搭載の中止が決定された。なお当時は、分光方式として *FTS* と回折格子の両方が検討されたことに加えて、可視チャンネルによる海色観測機能の搭載も提案されていた (GAO, 2006; Suskind, 2011)。NASA においても、1995 年に始まったニュー・ミレニアム計画²²の一つとして、*GIFTS* と呼ばれる *FTS* を採用した *GeoHSS* が検討されていたが、こちらも 2006 年に中止が決定された。なお、米国の *GeoMetWatch* 社は、商用サービスとして *GIFTS* と同等の *GeoHSS* を検討している (Revercomb, 2012)。

GOES-R シリーズは 4 機による計画で 2030 年代後半まで運用予定であるが、2019 年に始まった *GEO-XO* 計画の下で、GOES-R シリーズの「次」が検討されている (Sullivan *et al.*, 2020)。本計画では、2030–2050 年の NOAA の静止軌道より高高度の衛星 (長楕円軌道や太陽-地球系のラグランジュ点の一つである L1 点からの観測) が対象になっている。静止衛星としては、現行の可視赤外イメージャや雷センサに加えて、*HSS*、夜間の可視観測 (*Day/Night* イメージング)、海色や大気微量成分の観測、低軌道衛星のコンステレーションによる全球観測も検討対象に入っており、2019 年 10 月には、企業からの提案を募るための *Broad Agency Announcement (BAA)* が発出された (*JPSS* シリーズの後継ミッションに関わる、低軌道衛星に関する *BAA* も同時に発出された)。2020 年 4 月以降、静止衛星に関連する計画としては 16 個の提案が採用され、各々半年の期間で検討が行われている。*HSS* については 5 件の提案が採用された

が、その一つが上述の *GeoMetWatch* 社のセンサであり、もう一つが第 2.1 表に記した *L3Harris* 社の *ABX* である (Glumb and Griffith, 2019)。*L3Harris* 社は、*AHI* や *GOES-R/ABI*、*CrIS*、*GOSAT-2/TANSO-FTS-2* といった、衛星搭載気象観測センサの多数の開発実績を有する。*ABX* では、*AHI* や *ABI* の光学システムの 85% を再利用し、後部光学系に *CrIS* や *TANSO-FTS-2* の干渉計を利用すること、大きな新規技術の導入無しでの早期の製造が可能とされており、*L3Harris* 社は、2025 年までの実証試験の実現を提案している。*ABX* では、30 分ごとのフルディスク観測中に 2.5 分ごとの領域観測が可能なることに加えて、夜間の可視観測機能の追加や、*MWIR* 域として *CrIS* に近い $1,210\text{--}1,750\text{ cm}^{-1}$ が選択できるなど、*IRS* と比した優位性が謳われているが、2020 年 9 月時点では、実証試験を含めた具体的な打ち上げ計画は存在していない。

3. OSSE の概要と疑似観測シミュレーション

3.1 OSSE の概要

OSSE では、仮想的な観測システムや同化システムを用いて、観測やモデル、同化システムの評価を行う。本研究で行った OSSE は、観測データを疑似的に作成し、データ同化システムを用いて数値予報の改善にどのように寄与するかを評価することで、その観測のインパクトを調査するものである (石橋, 2013)。本研究では、*GeoHSS* 疑似観測データを作成し、現業全球・メソデータ同化システムと同等のシステムを用いて同化する。本章では、まず本研究における OSSE について説明した後、*GeoHSS* 疑似観測データの作成について紹介する。第 4 章と第 5 章では、それぞれ全球及びメソデータ同化システムにおける *GeoHSS* 処理方法や同化結果について述べる。

OSSE による一般的な研究では、高精度な数値予報モデル出力を仮想的な真値場 (NR) とし、この NR から観測データを全て作成し、検証もこの NR に対して行う。このような OSSE を本稿では NR-OSSE と呼ぶ。NR-OSSE は、NR の特性 (分解

²² <https://www.jppl.nasa.gov/nmp/>, 2020 年 10 月 1 日閲覧

能や要素など)に応じた様々な疑似観測システムを構築でき、NR という真値に対して検証を行うことが可能という利点がある。一方で、NR を真実とするために、対象とする疑似観測だけでなく既存観測データ全てを、誤差の時空間相関などの誤差特性も含めて表現(再構築)する必要がある。

一方、本研究では仮想的な真値場として、ECMWF の第 5 世代再解析 (ERA5 ; Copernicus Climate Change Service, 2017; Hersbach *et al.*, 2020) を疑似的な真値場と見なし、これを使って GeoHSS 疑似観測値を計算する (Okamoto *et al.*, 2020)。これは、ERA5 が高精度であることに加え、本 OSSE で用いる気象庁現業システムと独立しているという仮定に基づく。本研究ではこの OSSE を RA-OSSE (RA は Reanalysis の略) と呼ぶ。このように高精度な解析場を疑似真値場とした OSSE の先行研究としては、随伴モデルを用いて予測誤差を減少させる解析場を作成し疑似真値場とする SOSE (Marseille *et al.*, 2008 ; Okamoto *et al.*, 2018) がある。RA-OSSE では、疑似真値場が実観測を用いて作成され実況を反映しているため、NR-OSSE と異なり既存観測を再構築する必要はなく、実観測データをそのまま同化できるという大きな長所がある。さらに RA-OSSE は、同化結果の検証においても、実観測データを用いることができる。NR-OSSE でも実観測を用いた検証は可能だが、それは NR が実況を忠実に再現している場合のみである。

RA-OSSE の実施に当たり、ERA5 が気象庁の解析・予測よりも精度が高い事例を選ぶ必要があることに注意が必要である。さもなければ、ERA5 から作成した疑似観測データを同化しても、解析・予測場の改善は期待できないためである。さらに、ERA5 出力の時空間分解能 (1 時間間隔・約 31 km の水平分解能) よりも細かい分解能や、エーロゾルなどの ERA5 の出力気象要素以外の観測要素に関わる疑似観測を作ることはできない²³。同化実

験の設定や評価は、これらの制約を踏まえて行う必要がある。

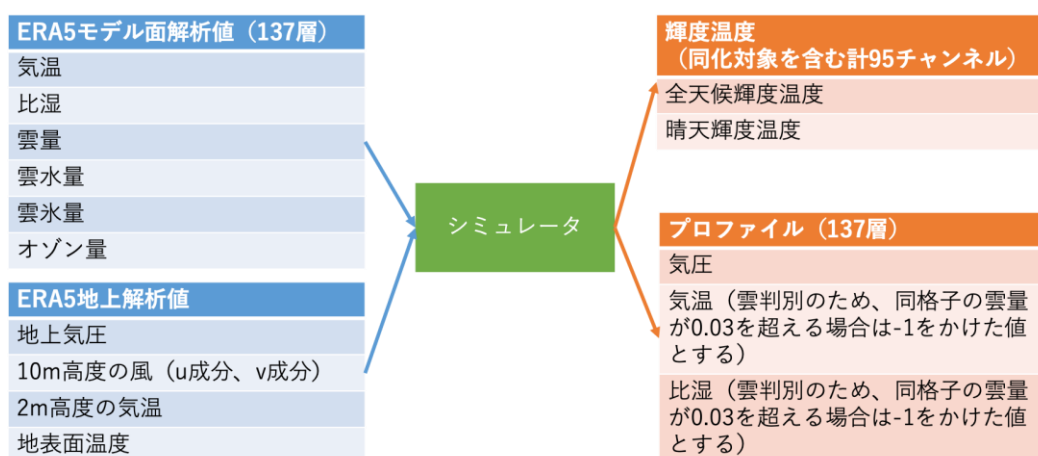
3.2 GeoHSS 疑似観測の作成

GeoHSS 疑似観測輝度温度データは、欧州で計画されている MTG-S 衛星搭載の IRS がひまわりに搭載されることを仮定して作成した。この GeoHSS 疑似観測データを作成する処理 (プログラム) をシミュレータと呼ぶ。シミュレーションには高精度な放射伝達モデルとその入力値となる疑似真値場が必要であり、放射伝達モデルには RTTOV12.2 (Saunders *et al.*, 2018) を、入力値には前節で述べたように ERA5 データを使用した。第 3.1 図は構築したシミュレータの入力と出力の要素についてまとめたものである。疑似観測輝度温度は、主に気温に感度を持つ 14 μm 付近の計 68 チャンネル、雲域判定用として 10.21 μm と 11.85 μm の 2 チャンネル、水蒸気に感度を持つ 5-6.25 μm の計 25 チャンネルについて算出した。個々の疑似観測点は ERA5 の格子点の位置としたため、疑似観測の水平分解能は ERA5 のそれ (約 31 km) に相当する。また、ERA5 は毎時の解析値であるため、時間分解能は 1 時間である。疑似観測輝度温度は、雲による散乱を考慮して計算した輝度温度 (全天候輝度温度) と雲がないと仮定 (雲混合比や雲量をゼロに設定) して計算した輝度温度 (晴天輝度温度) の両方を準備した。これは、全球データ同化システムによる OSSE (全球 OSSE) で、各チャンネルにおける雲域か否かの判定に、晴天と全天候の輝度温度の差を参照することにしたためである (第 4.1 節参照)。シミュレータの性能の確認のため、全天候輝度温度についてひまわり 8 号の実観測画像との比較を行った (第 3.2 図)。ERA5 の水平分解能は約 31 km のため、ひまわり 8 号の分解能 (2 km) と比べると画質は粗いが、雲域のパターンを的確に表現している。第 3.3 図は、ある特定のプロファイルに対して GeoHSS

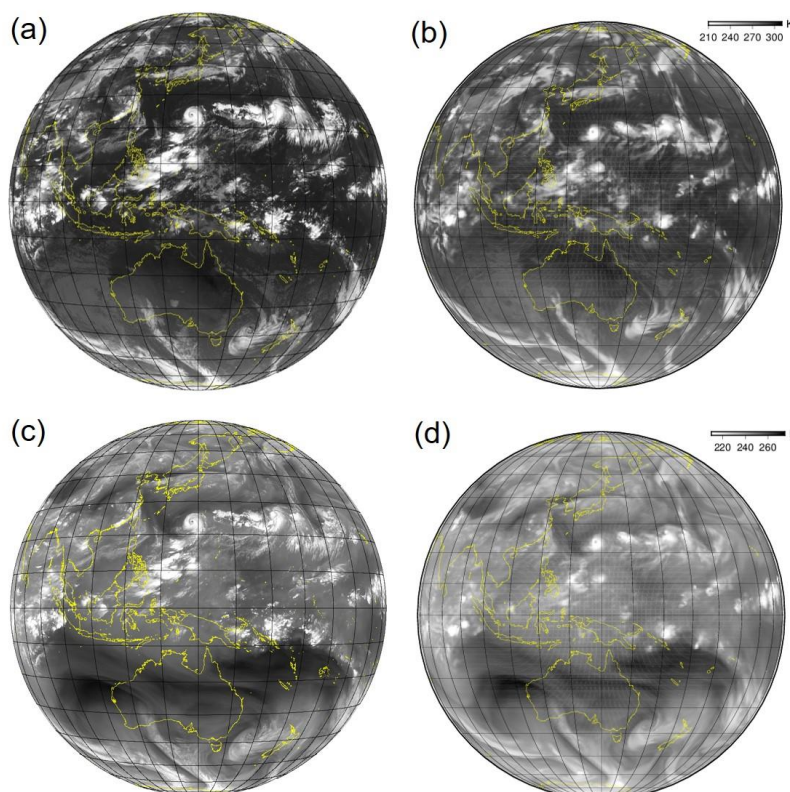
²³ これらは RA-OSSE の実行を大きく制約するものではあるが、同様の制約は NR-OSSE にもあてはまる。すなわち、実際に起こった現象に対する予測精度を議論する場合は、NR が忠実に再現できた現象を選ぶ必要がある。また分解能や気象要素も NR の分解能・要素以上のものは利用できない。

の全チャンネルの全天候輝度温度を計算し、プロットしたものである。GeoHSS は、チャンネル 1-817 で LWIR、チャンネル 818-1,738 で MWIR と

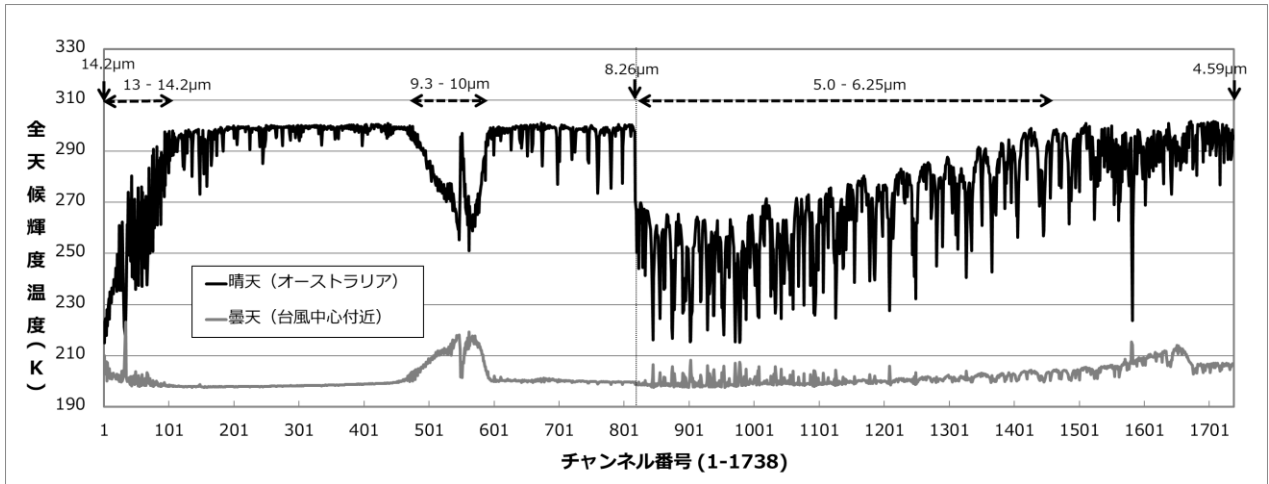
いう 2 種類のバンドによる観測から構成されているため、この二つのバンドの境界で輝度温度にギャップが生じている。



第 3.1 図 GeoHSS シミュレータの入力と出力の要素。疑似観測輝度温度は、主に気温に感度を持つ 14 μm 付近の計 68 チャンネル、雲域判定用として 10.21 μm と 11.85 μm の 2 チャンネル、水蒸気に感度を持つ 5-6.25 μm の計 25 チャンネルについて算出した。疑似観測輝度温度は全球データ同化システムによる OSSE で、疑似観測プロファイル (137 層の気温と比湿) はメソデータ同化システムによる OSSE で使用した。



第 3.2 図 ひまわり 8 号について、実観測画像と ERA5 解析値から RTTOV12.2 によりシミュレートした画像の比較。(a) はバンド 9 (中心波長が 6.9 μm) の実観測画像、(b) はバンド 9 のシミュレーション画像、(c) はバンド 13 (中心波長が 10.4 μm) の実観測画像、(d) はバンド 13 のシミュレーション画像である。



第 3.3 図 GeoHSS 疑似観測の全天候輝度温度の例. ERA5 を入力とし RTTOV12.2 で計算を実施. 典型的な晴天 (黒色線), 曇天 (灰色線) の格子点それぞれについて, 1,738 チャンネル全ての計算輝度温度をプロットした.

メソデータ同化システムによる OSSE (メソ OSSE) では, 本実験実施時の現業同化システムでは HSS を利用していないため, ERA5 の気温, 水蒸気のプロファイルを直接同化することとした (第 5 節, 付録 1 参照). このため輝度温度のシミュレーションの過程で, 計算結果である輝度温度を出力するのにあわせて, 入力である ERA5 のプロファイルも出力した. メソ OSSE での雲域判定に使用するため, ERA5 の最上層から確認して雲量が 0.03 以上の場合はその格子に雲があるとし, その情報も出力した.

NR-OSSE では, シミュレートされた疑似観測は測器誤差を持たないと仮定しているため, この疑似観測値をそのまま同化するとインパクトを過大評価する恐れがある. そのため, シミュレーションの結果に想定される測器誤差を付加して疑似観測データを作成し, それを同化する. 一方で, 本調査で実行している RA-OSSE では, 疑似真値場である ERA5 自体が解析誤差を持つため, シミュレーション結果をそのまま同化することが可能である. しかし, より現実的なインパクト評価を行うため, 測器の特性を反映した誤差を考慮してシミュレーション結果を修正 (摂動を付加) した実験も併せて行った. この摂動の計算方法は, 第 4.1 節と第 5.1 節で紹介する.

4. 全球 OSSE

4.1 同化処理と実験設定

本章では, 全球同化システムにおける, GeoHSS 疑似観測の同化処理手法とそのインパクト調査結果について紹介する. まず第 4.1 節で同化処理, 特に GeoHSS あるいは本 OSSE のために導入した処理や実験設定について詳述する. GeoHSS の同化のインパクトを確認するため, 設定の異なるいくつかの同化実験を実施した. それぞれの実験は, GeoHSS を利用しない現業システム相当の全球同化実験 (実験名: CNT) に対して, GeoHSS の利用を追加した同化実験を実施した. 第 4.2 節では, 平成 30 年 7 月豪雨事例に対して GeoHSS 同化のインパクトを調査した結果を紹介する. さらに, 異なる観測パターンを想定して GeoHSS 疑似観測を作成し, そのインパクトを調査した. その結果を第 4.3 節で紹介する.

GeoHSS の同化処理は, 品質管理も含め, 基本的には現業利用されている極軌道衛星搭載の HSS (ここでは簡便のため, 単に現業 HSS と記す) の利用方法 (岡本, 2011; 岡垣, 2015) に倣って実施した. しかし, いくつかの項目については OSSE の利点を活かす方法を取り入れるなど, 現業 HSS とは異なる品質管理を GeoHSS に対してのみ導入した. 現業 HSS の利用には変更は加えていない. GeoHSS に対して行った設定は以下のと

おりである。

(1) チャンネル選択

14 μm 付近の気温サウンディングチャンネルの使用については、現業 HSS の AIRS, IASI, CrIS のそれぞれの使用チャンネルの波長に一番近い GeoHSS の 36 チャンネルを選択した。本 OSSE では現業利用されていない水蒸気チャンネルも利用したが、これには Duruisseau *et al.* (2017) を参考に、25 チャンネルを選択した。選択した全 61 チャンネルの一覧は Okamoto *et al.* (2020) を参照されたい。

(2) 雲域の判定

当初は現業 HSS の品質管理処理をそのまま適用し、その結果晴天域と判定された全天候輝度温度を同化していた。しかし、全天候輝度温度の値は入力である ERA5 の雲情報（雲量、雲水量、雲氷量）に大きく依存することから、本 OSSE において、実観測のための雲域の判定処理を利用することは適切でない。また、現業 HSS の雲判定では第一推定値の輝度温度を用いるため、モデルバイアスの影響を受けやすい。これらのことから、GeoHSS を同化しても必ずしも明瞭な改善が得られなかった。そこで、GeoHSS 疑似観測値として出力している晴天輝度温度を利用し、各チャンネルにおいて晴天と全天候の疑似観測輝度温度の差が小さいもの（差が 1 K 未満）を晴天と判定し、疑似観測晴天輝度温度を同化することにした。現実の同化処理においては、晴天輝度温度観測値は不明であるため、この晴天判定処理を適用することは不可能だが、今後同化処理やモデルバイアスが改善し、雲判定処理がより高精度に行われることをここでは仮定している。

(3) 荷重関数の値による品質管理

地面付近に感度のあるチャンネルの観測は、放射伝達モデルや入力となる地表面温度の精度に大きく影響を受けることから、それを適切に利用することは難しく、基本的に利用しない。現業 HSS の品質管理では、波数が 680 cm^{-1} より小さいチャンネルを地面付近に感度がない成層圏チャンネルとしてすべて同化し、 680 cm^{-1} 以上の波数のチャンネルは晴天海上のみ同化している。GeoHSS

は 700 cm^{-1} 以上の波数のチャンネルで構成されるため、現業 HSS の手法をそのまま適用すると晴天海上の観測しか利用されないことになる。本 OSSE では地面付近の感度の指標として、放射計算の出力にある大気透過率から各チャンネルの荷重関数を算出し、陸上では規格化した荷重関数の最下層の値が 0.01 を超える場合は不使用とした。海上については同化対象の晴天輝度温度の精度がよいと考えられることから、荷重関数の最下層の値は参照せず、他の品質管理を通過した観測は全て使用することにした。

(4) 測器誤差としての摂動の付加

第 3.2 節で述べたように、本 OSSE ではシミュレータの出力の結果をそのまま同化する実験（実験名：EXP）のほかに、測器の誤差特性を考慮した実験（実験名：PTB）も実施した。測器誤差（摂動）は、Aminou *et al.* (2009) で報告されている NEdT をもとに計算し、それをシミュレータの出力の輝度温度に付加して疑似観測値を作成した。摂動を加えた疑似観測値を Y_{PTB} 、シミュレータの出力の輝度温度を Y_{EXP} 、NEdT を σ_m とすると、 Y_{PTB} は下記の式で表すことができる。

$$Y_{PTB} = Y_{EXP} + \sigma_m \times r$$

ここで、 r は平均ゼロ、標準偏差 1 の正規分布を仮定した乱数である。乱数は fortran のサブルーチン random_number により発生させたが、このサブルーチンに与える seed を固定にすることにより発生される乱数の制御を行い、実験の再現性を確保した。

(5) 観測誤差の設定

GeoHSS の 14 μm 付近の気温サウンディングチャンネルについては、現業 HSS で使用されているチャンネルの波長に一番近いチャンネルを選択して利用したことから、その観測誤差は現業 HSS の観測誤差と O-B 統計（観測値と第一推定値の差の標準偏差）の関係をもとに、GeoHSS の O-B 統計から設定した。5-6.25 μm の水蒸気サウンディングチャンネルについては現業 HSS の利用がないことから、GeoHSS の O-B 統計をそのまま観測誤差とした。GeoHSS の O-B 統計は EXP と PTB で異なるため、GeoHSS の観測誤差はそれぞれの

実験で設定した。第 4.1 図は GeoHSS の使用チャンネルについて、EXP と PTB のそれぞれの観測誤差をグラフにしたものである。摂動を含む PTB の観測誤差値の方が EXP の観測誤差値より大きい。水蒸気サウンディングチャンネルは気温サウンディングチャンネルと比較して NEdT の値が小さいため、両者の差は小さい。

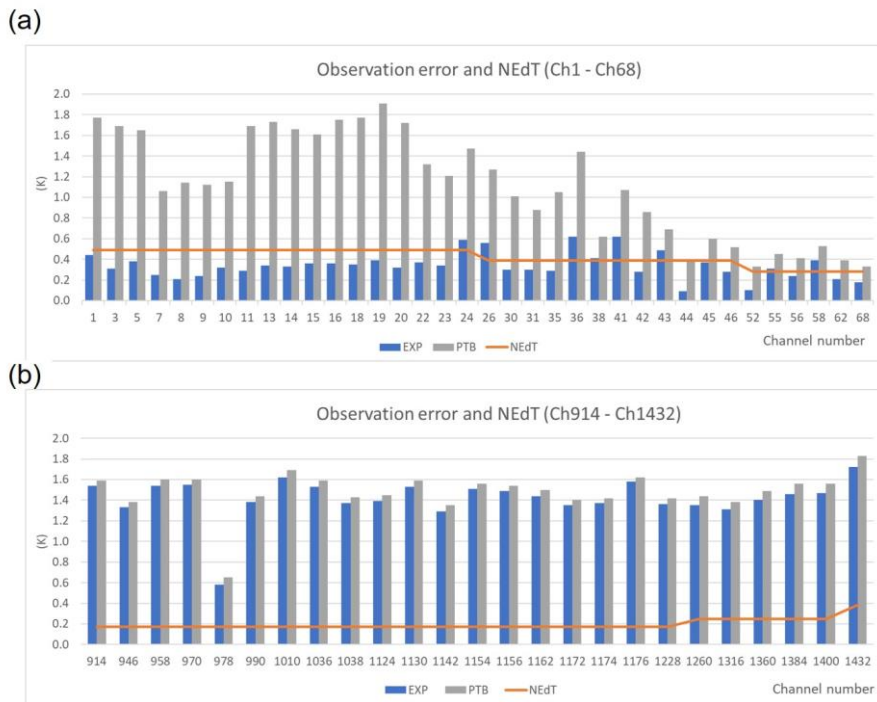
最終的に同化処理で用いられる観測誤差値には、現業システムにおける輝度温度同化処理に倣って、上記の設定値を膨張させた値を使用した。気温サウンディングチャンネルは現業 HSS と同様に 3 倍、水蒸気サウンディングチャンネルは現業マイクロ波水蒸気サウンダと同様に 4.5 倍とした。

(6) 観測パターンの検討

GeoHSS 疑似観測データは、ERA5 が毎時の解析値であるため時間分解能は 1 時間である。EXP と PTB では、ひまわりが毎時のフルディスク観測を実施し、それを同化した場合のインパクトを確認した。本研究の目的の一つは、様々な観測パターンによる数値予報へのインパクトを評価し、それを根拠に実際の運用計画の策定につなげるこ

とである。このため、3 時間ごとのフルディスク観測を実施した場合（実験名：PTB3h）と、北半球は毎時で南半球は 3 時間ごとの観測を実施した場合（実験名：PTB3hS）の実験を行い、毎時のフルディスク観測を実施した場合と比較した。これらの実験設定を下記にまとめる。

- CNT : GeoHSS を利用しない現業システム相当の同化実験。
- EXP : CNT をベースに GeoHSS のシミュレータの出力をそのまま同化した実験。毎時のフルディスク観測を同化した場合を想定。
- PTB : EXP に対し GeoHSS の測器の誤差特性を考慮した実験。NEdT をもとに測器誤差を計算し、シミュレータの出力に付加したものを同化。毎時のフルディスク観測を同化した場合を想定。
- PTB3h : PTB と同じ。ただし 3 時間ごとのフルディスク観測を同化した場合を想定。
- PTB3hS : PTB と同じ。ただし北半球は毎時、南半球は 3 時間ごとの観測を同化した場合を想定。

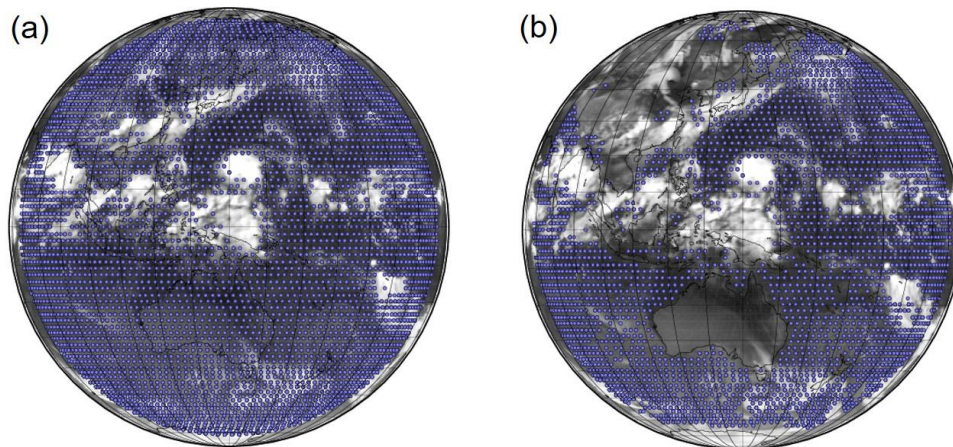


第 4.1 図 GeoHSS の使用チャンネルの観測誤差と NEdT。EXP は測器誤差を含まない実験の設定値で、PTB は測器誤差を含む実験の設定値。(a) は 14 μm 付近の気温サウンディングチャンネルの 36 チャンネル、(b) は水蒸気サウンディングチャンネルの 25 チャンネル。

4.2 平成30年7月豪雨事例

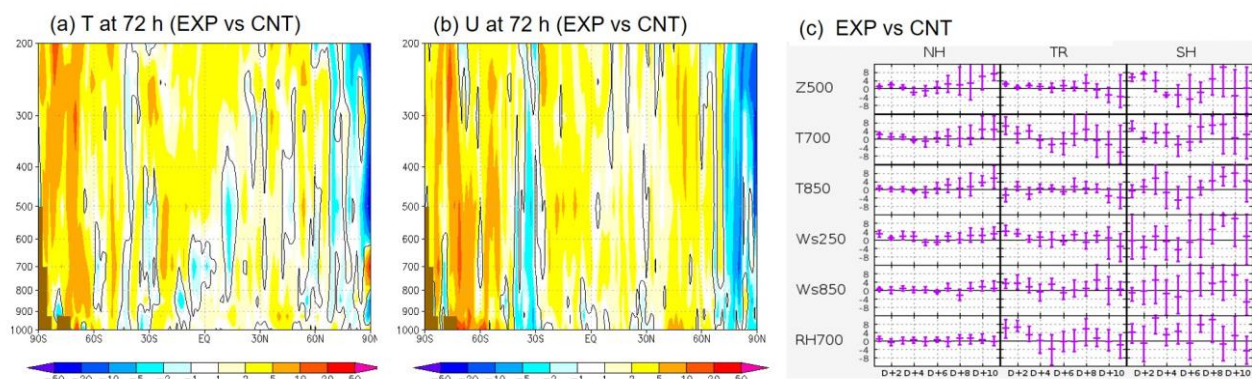
平成30年7月豪雨は、2018年6月28日から7月8日にかけて、西日本を中心に全国的に広い範囲で記録的な豪雨を記録したものである。停滞した前線や台風第7号によって供給された暖湿気が、九州北部や中国地方、四国地方など多くの地域で観測史上第一位となる大雨や河川の氾濫、土砂災害をもたらし、死者224名にも及ぶ甚大な災害となった。本事例においては、台風第7号の進路や西日本への暖湿気と豪雨に着目して、全球・メソOSSEを実行したので、それぞれの結果を本節と第5.2節で紹介する。全球同化実験では、2018年6月15日00UTCから7月8日18UTCまで、6時間データ同化サイクルを実行した。予測は1日4回実行し、12UTCの解析時刻では、264時間予測を、その他の解析時刻からは132時間予測を行った。

第4.2図は、2018年7月6日00UTCの解析で用いられたGeoHSSのチャンネル3(以下ch3)とch1400のデータ分布である。ch1400の荷重関数のピークはch3よりも下層にあり、雲の影響を受け易くなるため、雲判定の品質管理(QC)などにより利用データは減少する。しかし依然として広域で大量のデータが利用されていた。ここでは同化窓6時間(7月5日21UTCから7月6日03UTC)の間のQCを通過したデータをプロットしたが、1時間ごとの各タイムスロットにおいても類似の分布が得られた。

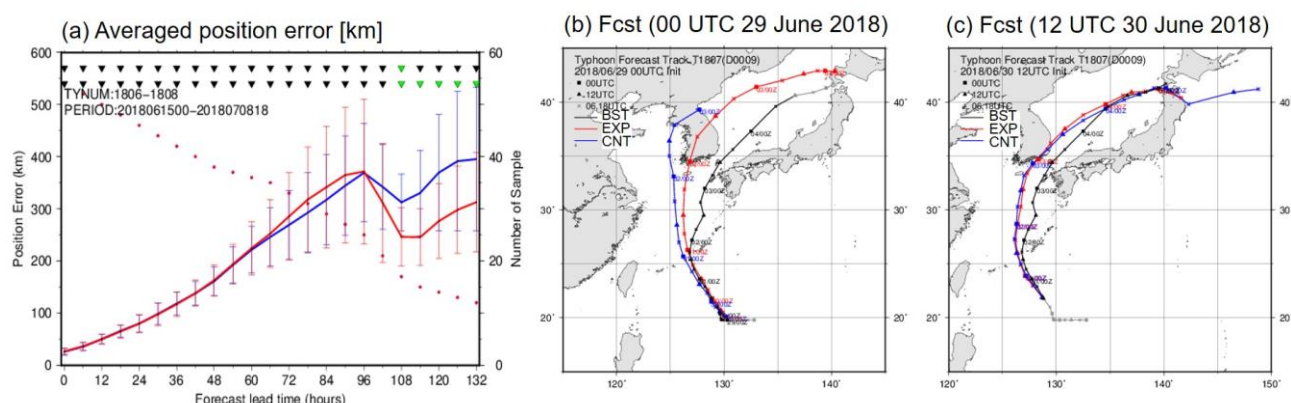


第4.2図 GeoHSS疑似観測データ分布(青丸)。(a)チャンネル3(波長14.260 μm 、250 hPa付近の気温に感度を持つ)、(b)チャンネル1400(5.092 μm 、800 hPa付近の水蒸気に感度を持つ)について、2018年7月6日00UTCの全球解析の間引き・QCを通過したデータをプロット。

第4.3図は、CNTに対するEXPの予測誤差の減少率(以下、改善率と呼ぶ)を期間・空間平均したものである。ここで予測誤差は、英国気象局(UKMO)の初期場に対する平方根平均二乗誤差(RMSE)で計算したが、ERA5や米国環境予測センター(NCEP)の初期場に対してRMSEを計算しても同様の結果が得られた(図略)。第4.3図a、bから、GeoHSS同化は、北半球高緯度を除いて、ほぼ全緯度帯・高度で予測を改善したことが分かった。特にこの改善は南半球高緯度で顕著であった。同様の改善は相対湿度でも見られた(図略)。また、GeoHSS疑似観測から放射伝達過程を通して直接関係づけられる観測情報である気温・相対湿度だけでなく、GeoHSS観測と直接的な関係は無い風速も顕著に改善していたことは注目に値する。これは、背景誤差相関やデータ同化サイクル、及び4次元変分法によるトレーサー効果(高頻度な水蒸気観測から移流の情報を抽出すること: Peubey and McNally, 2009)によって、気温・水蒸気場の改善効果が、風速場へも伝搬したためと考えている。第4.3図cは、複数の代表的な気象要素に対して、11日予測までの改善率を示したものである。この図より、GeoHSSは2日以内の短期予測において、北半球、熱帯、南半球のいずれも、500 hPa高度場や250 hPa風速を始めとして多くの要素で統計的に有意な改善をもたらすことが分かった。



第 4.3 図 (a) EXP 実験の気温の 72 時間予測の改善率の全球帯状 (経度方向) 平均. 改善率は, CNT 実験の RMSE と EXP 実験の RMSE の差を CNT 実験の RMSE で規格化したもので定義し, 暖色が EXP の RMSE の減少, すなわち GeoHSS が予測を改善したことを意味する. RMSE は英国気象局の解析場に対して計算した. (b) 東西風速に対する改善率. (c) 500 hPa 高度 (Z500), 700 hPa 気温 (T700), 850 hPa 気温 (T850), 250 hPa 風速 (Ws250), 850 hPa 風速 (Ws850) に対する, 北半球 (左列), 熱帯 (中央列), 南半球 (右列) の, 11 日先までの予測に対する改善率. 改善率は, ラジオゾンデに対して検証した RMSE から (a) と同様に計算し, 正值が改善を表す. 95 %信頼区間をエラーバーで示す.



第 4.4 図 (a) 2018 年 6 月 15 日から 7 月 8 日に存在した台風の中心位置予測誤差 (km). 赤線 (青線) が EXP (CNT) 実験の進路誤差 (左軸) を, 赤点が統計に使ったデータ数 (右軸) を示す. 誤差に対する 95 % 信頼区間をエラーバーで示す. 図上側の三角記号は, 両実験の差に統計的有意性がある場合に緑で塗りつぶしている. 有意性の計算の際に, 時間相関を考慮した場合の結果を上側に, 考慮していない場合の結果を下側に記す. (b) 2018 年 6 月 29 日 00UTC 初期値, 及び (c) 2018 年 6 月 30 日 12UTC を初期値とした進路予測図. EXP, CNT, 気象庁ベストトラックをそれぞれ, 赤線, 青線, 黒線で示す.

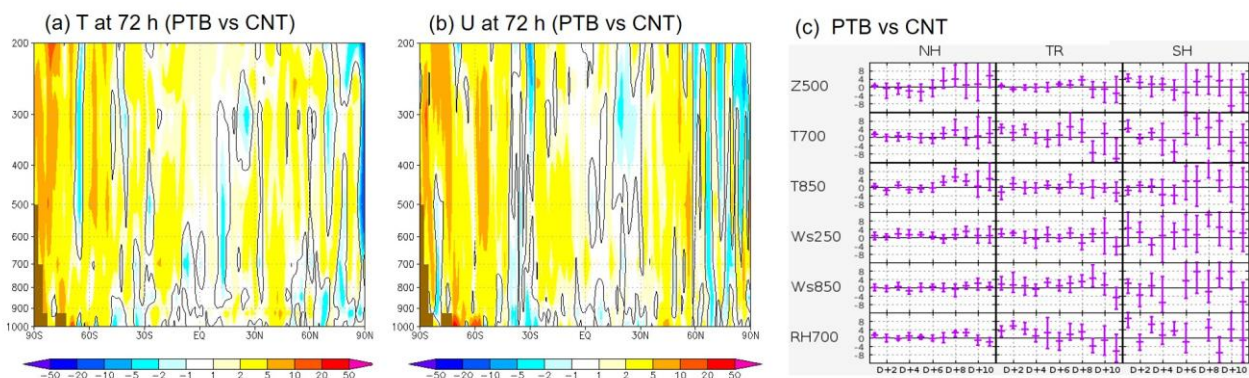
第 4.4 図 a は同化実験期間中に存在した三つの台風 (台風第 6 号 Gaemi, 台風第 7 号 Prapiroon, 台風第 8 号 Maria) の, 中心位置の平均誤差を表す. 108 時間予測以降では有意な改善が見られたが, これは台風第 8 号の進路予測誤差の減少が大きく寄与していた (図略). なお台風強度予測の平均誤差については, GeoHSS の有無による大きな

違いは見えなかった (図略). 第 4.4 図 b, c は, 平成 30 年 7 月豪雨に直接影響した台風第 7 号の進路予測を気象庁ベストトラックと比較したものである. 台風第 7 号の発生初期の予測精度は, ECMWF と気象庁を含む世界の多くの数値予報センターで低かった. 例えば, 台風第 7 号は実際には北東進したにもかかわらず, 2018 年 6 月 29 日

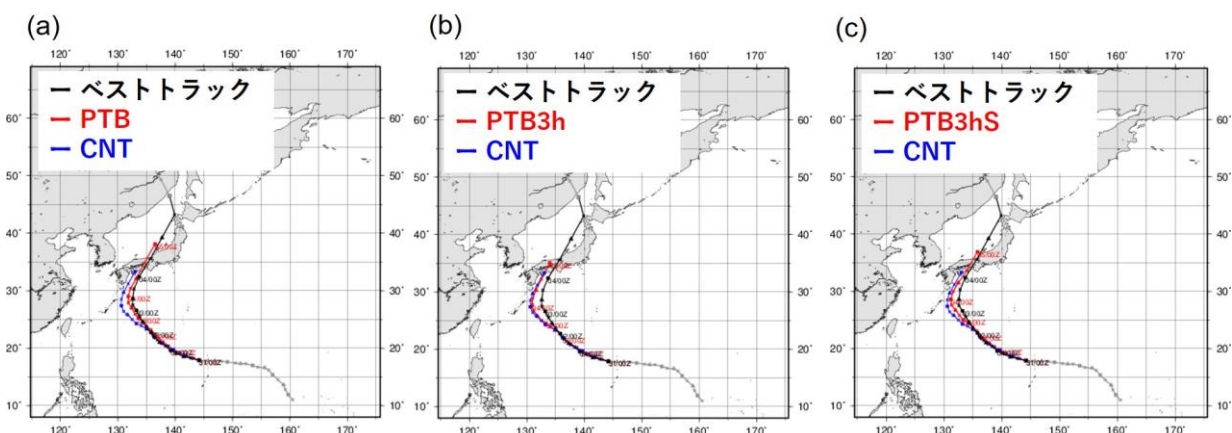
00UTC を初期値とする予測では北上していた (第 4.4 図 b)。これは、予測では台風初期の発達が悪かったため、対流圏下層南風が指向流として働いたが、実際の台風はもっと発達して対流圏中層の南西風の影響を受けたためと考えている (Enomoto, 2019)。CNT と比較して EXP は台風の渦を若干強めに予測しており、中層指向流の影響を受けベストトラックにやや近い進路をとった。台風が日本に近づくと、気象庁と ECMWF の解析・予測の違いはほとんどなくなり、GeoHSS 同化による台風進路予測への効果はほとんど見られなかった (第 4.4 図 c)。なお、第 4.3 図で示した GeoHSS の同化による大規模スケールの予測改善は、太平洋高気圧をやや西寄りに張り出し九州西部で南西風を強める予測として現れており (図略)、これが境界条件としてメソ同化の改善をも

たらしたと考えている (第 5.2 節)。

最後に、観測値に摂動を加えて測器誤差を拡大した実験 (PTB) の結果を簡単に紹介する。PTB の帯状平均改善率 (第 4.5 図 a, b) を、摂動無し実験 EXP (第 4.3 図) と比べると、気温、東西風速に対する GeoHSS のインパクトが減少した。すなわち、北半球高緯度の改善は減少したものの、その他の領域の改善量も減少した。その他の気象場や予測時間別の改善率を見ると、特に予測初期の有意な改善が小さくなった (第 4.5 図 c)。しかし、いくつかの要素 (例えば上層風速 Wsp250) では、改善量としては小さくなったが、有意な改善が依然として確認された。以上より、現実的な測器誤差を考慮した実験においても、GeoHSS は大規模スケールの現象の予測を概ね改善することが分かった。



第 4.5 図 第 4.3 図と同じ。ただし PTB 実験の改善率。



第 4.6 図 2018 年 8 月 31 日 00UTC 初期値の台風第 21 号の進路予測。赤線が GeoHSS を利用した場合、青線が GeoHSS を利用しない場合 (CNT)、黒線が気象庁ベストトラックを意味する。(a) は PTB, (b) は PTB3h, (c) は PTB3hS。

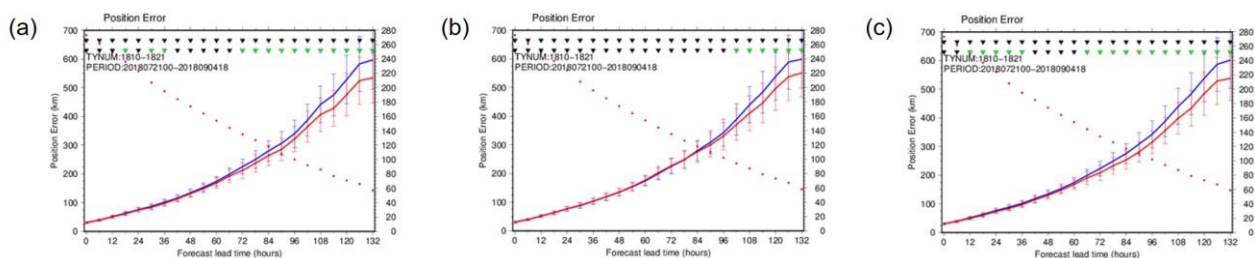
4.3 観測パターンを検討するための実験

第 4.2 節では特定の事例を対象とした実験結果を報告したが、ここでは第 4.2 節より期間を長くとり、2018 年 8 月の 1 か月間に対して実施した実験結果について報告する。実験はすべて GeoHSS の NEdT に基づく摂動を測器誤差として与えたもので、PTB、PTB3h、PTB3hS の 3 種類の観測パターン（第 4.1 節参照）に対して実施した。実験対象期間は 2018 年 7 月 21 日から 9 月 4 日であり、予測に対して行う統計は 8 月 1 日から 31 日を対象とした。

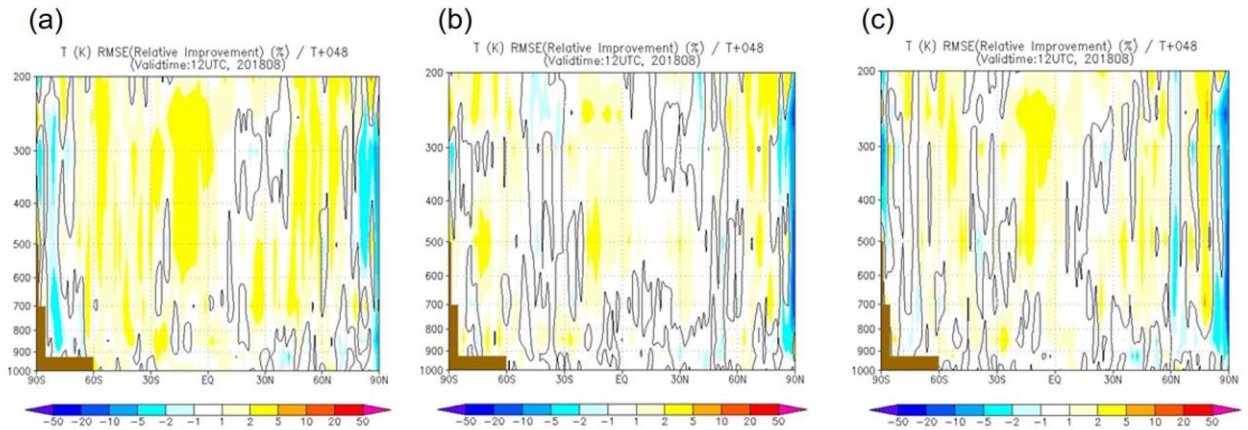
この実験期間中に存在した台風には、強風によりタンカーが関西国際空港連絡橋に衝突したことで注目された、台風第 21 号がある。台風第 21 号は 8 月 28 日に南鳥島近海で発生し、日本の南を北西に進み、9 月 3 日には向きを北寄りに変えて、4 日 12 時頃に非常に強い勢力で徳島県南部に上陸した。その後、4 日 14 時頃には兵庫県神戸市に再び上陸し、速度を上げながら近畿地方を縦断して日本海を北上し、5 日 9 時には間宮海峡で温帯低気圧に変わった。本調査では、台風第 21 号の発生初期の進路予測について、観測パターンによる違いを調査した。第 4.6 図は 2018 年 8 月 31 日 00UTC の台風第 21 号の進路予測である。CNT はベストトラックより西側で転向する予想であるが、PTB と PTB3hS は CNT よりベストトラックに近いコースを予想している。これは台風の東に位置する太平洋高気圧の表現の違いによるものであり、CNT は太平洋高気圧の西への張り出しが強く、PTB と PTB3hS では弱かった。PTB3h も

CNT よりベストトラックに近い表現となっているが、その差は PTB や PTB3hS ほど明瞭ではない。第 4.7 図は実験期間中に存在した全台風（台風第 10 号から第 21 号）の進路予測誤差の統計である。三つの実験全てで進路予測の改善が見られたが、PTB3h は他の二つの実験より改善が小さい。PTB と PTB3hS は、北半球は毎時の GeoHSS を同化しているが、PTB3h は 3 時間ごとである。そのため、GeoHSS の北半球の観測頻度の違いが、台風進路予測に影響したと考えられる。

第 4.8 図は、気温の 48 時間予測について CNT からの改善率を緯度帯ごとに鉛直断面図で示したものである。ここでは NCEP の解析値を真値とした。三つの実験それぞれで、どの高度、どの緯度においても概ね改善となっており、GeoHSS の利用の効果が表れている。PTB3h は他より GeoHSS の利用データ数が少ないことから、改善率は小さいものになっている。興味深いのは、PTB と PTB3hS は両方とも毎時の北半球のデータを同化しているので北半球の改善率は同程度だろうという予想に反し、PTB は PTB3hS より北半球において改善率がより大きいという点である。これは、全球解析では、時空間的に偏りのあるデータを同化するよりも、広く密に分布したデータを同化した方が、精度の高い初期値が得られ、それが予測の改善につながることを示唆している。ここでは気温の 48 時間予測のみを示したが、他の要素や他の予測時間においても、同様な結果となった（図略）。



第 4.7 図 実験期間中に存在した全台風（台風第 10 号から第 21 号）の進路予測誤差の統計。横軸は予測時間であり、赤色が GeoHSS を利用した場合、青色が GeoHSS を利用しない場合（CNT）を意味する。(a) は PTB、(b) は PTB3h、(c) は PTB3hS。それぞれのグラフ上方の三角形が緑色の場合は、予測誤差の差が 95 % の信頼度で統計的に有意であり、黒色の場合は有意ではないことを示す。上段がデータ系列の相関を考慮した結果であり、下段が相関を考慮しない結果である。



第 4.8 図 気温の 48 時間予測について、CNT からの改善率 (RMSE の差を CNT の RMSE で割った値) を緯度方向に鉛直断面で示した図。2018 年 8 月の統計結果であり、真値としたのは NCEP の解析値。暖色が改善，寒色が改悪を意味する。(a) は PTB，(b) は PTB3h，(c) は PTB3hS。

4.4 まとめ

GeoHSS 疑似輝度温度データを全球データ同化システムで同化するための処理を開発し、いくつかの事例・設定でそのインパクトを調査した。同化処理方法は現業 HSS を踏襲しつつも、GeoHSS をより効果的に同化するため、水蒸気チャンネルの追加、OSSE の特性を考慮した晴天判定への変更、陸域対流圏チャンネルを積極的に使うための地表面判定の導入などを行った。さらに GeoHSS 導入有無の同化実験 (CNT, EXP) に加え、測器誤差を考慮した PTB 実験や、観測頻度を変更した PTB3h 実験、PTB3hS 実験を実施した。

平成 30 年 7 月豪雨を対象とした同化実験では、ほぼ全緯度帯・高度で気温、相対湿度、風の予測場が改善した。太平洋高気圧の張り出しや九州西部の南西風の表現も改善しており、これが豪雨をもたらす環境場の予測の改善につながった。また PTB は、EXP には劣るものの、CNT よりも大規模場の予測を改善した。

2018 年 8 月を対象とした 1 か月の同化実験においても、GeoHSS を同化した PTB, PTB3h, PTB3hS は、CNT に対して、気温や風の大規模場や台風進路予測を改善した。また観測頻度を 3 時間に落としても GeoHSS による予測改善が確認で

きた。さらに南半球は 3 時間間隔とするものの北半球は毎時観測を維持した EXP3hS が、北半球の予測精度が PTB よりも劣ったことから、フルディスクでの高頻度観測の重要性が改めて確認できた。

5. メソ OSSE

ここでは、メソ同化システムを用いたメソ数値予報における GeoHSS のインパクト調査の結果を報告する²⁴。

5.1 同化処理

(1) 疑似観測データ

現業メソ数値予報システムにおいては、現在、低軌道衛星も含めて HSS の観測データを同化していない。このため、どのような疑似観測データを用いるかについての検討が必要になる。

メソ数値予報での HSS 輝度温度の直接同化については、現業運用の水準で行うための知見は十分に得られていない。実際、その可能性について事前に検討したところ、バイアス補正等で対応が難しい問題があることが判明したため、本調査においては断念した (付録 1 参照)。また、領域数値予報での GeoHSS OSSE の先行研究として、真値

²⁴ 本調査では気象庁数値予報課が開発したメソ数値予報システムの数値解析予報実験システムを用いた。

場から一旦輝度温度をシミュレートし、さらに、シミュレートした値からリトリーブ（推定）した気温と相対湿度の鉛直プロファイルを疑似観測として同化した例がある（Jones *et al.*, 2017 ; Li *et al.*, 2018）. しかし、これには信頼性の高いリトリーブアルゴリズムの整備が必要となる。

本調査では、輝度温度やリトリーブ量への変換の影響調査は今後の課題とし、GeoHSS から得られる大気の情報として、疑似真値場である ERA5 の気温、相対湿度の鉛直プロファイルをそのまま疑似観測データとして使用した.NR-OSSE では真値場には全く誤差が無いと仮定するため、疑似観測値を作成する際には何らかの観測誤差を付加しなければ、過剰に正のインパクトを示すなど、非現実的な実験となる可能性がある（第 3.1 節参照）. 一方、本調査で採用した RA-OSSE では疑似真値場として用いた ERA5 自体に誤差があるため、このような問題は起きにくいと考えられる. しかし本来は、測器誤差やリトリーブ処理に伴う誤差を付加して疑似観測値を作成すべきであり、将来的にはこれらの誤差を推定して付加することや、リトリーブ処理の導入などを検討している。

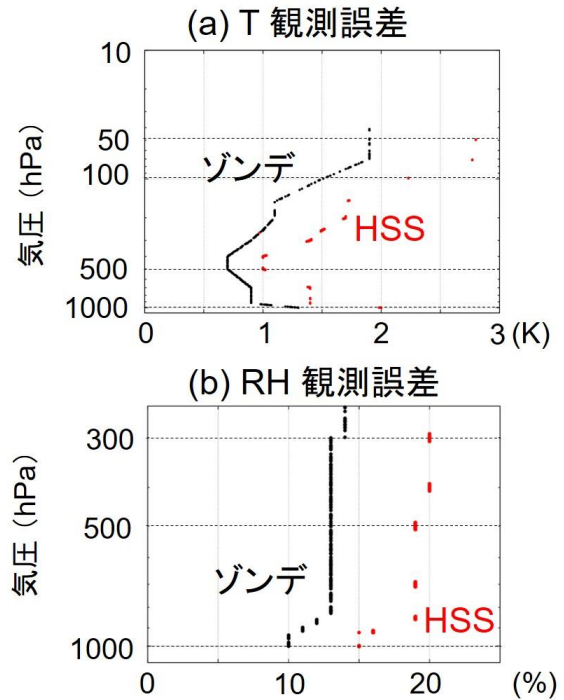
(2) 前処理

疑似観測データの元となる ERA5 は、水平格子間隔約 31 km、鉛直 137 層（最上層 0.01 hPa）、1 時間ごとの格子点データとして提供されている。

QC としては、現業メソ数値予報システムの従来型観測データと同様に、グロスエラーチェック（第一推定値からの乖離の監視）と空間整合性チェック（周囲の観測値からの乖離の監視）を行った（JMA, 2019 ; Onogi, 1998）. これらのチェックでは、第一推定値の空間変動率や時間変動率を考慮する動的 QC（Onogi, 1998）を適用した. また、GeoHSS 観測で赤外の波長帯の電磁波が雲の影響を強く受けることを考慮し、雲頂より上層の疑似観測のみを使用した。

同化システムに入力する前に、疑似観測データに間引きを適用した. 水平方向には、現業メソ解析で用いている他の衛星観測を参考に約 45 km 間隔に間引いた. また、鉛直方向には、過去にサウンダ ATOVS のリトリーブデータの同化(大和田,

2007) で用いていた気圧高度 (1,000-50 hPa の 13 高度) 付近に観測値を与えた (相対湿度については、1,000-300 hPa の高度のみを使用した). 観測誤差は、現業メソ解析におけるゾンデ観測の観測誤差の 1.5 倍の値に設定した (第 5.1 図).



第 5.1 図 メソ OSSE GeoHSS 疑似観測の観測誤差 (赤). ゾンデの観測誤差 (黒) もあわせて示す. (a) 気温, (b) 相対湿度.

(3) データ同化システム

データ同化システムとしては、2020 年 3 月まで数値予報現業メソ解析で用いられていた、気象庁非静力学モデル (JMA-NHM; Saito *et al.*, 2006, 2007) に基づくデータ同化システム (JNoVA ; Honda *et al.*, 2005) を使用した. JNoVA では 3 時間同化ウィンドウのデータ同化サイクルを 4 次元変分法で行い、現業メソ解析で用いる全観測に加えて、GeoHSS 疑似観測データを同化した. 計算領域は日本とその周辺を覆う東西 4,080 km × 南北 3,300 km とし、アウトモデルの水平格子間隔は 5 km、鉛直 48 層 (モデルトップ約 22 km)、インナーモデルの水平格子間隔は 15 km、鉛直 38 層 (モデルトップ約 22 km) とした。

GeoHSS の同化によるインパクトは、このデー

タ同化サイクルで得られた解析値から、現業メソ数値予報で用いられている予報モデル *asuca* (Ishida *et al.*, 2009, 2010) による水平格子間隔 5 km, 鉛直 76 層 (モデルトップ約 22 km) の予測を行って調べた。

(4) 実施した実験

以下の三つの実験を行い、予測結果を比較した。

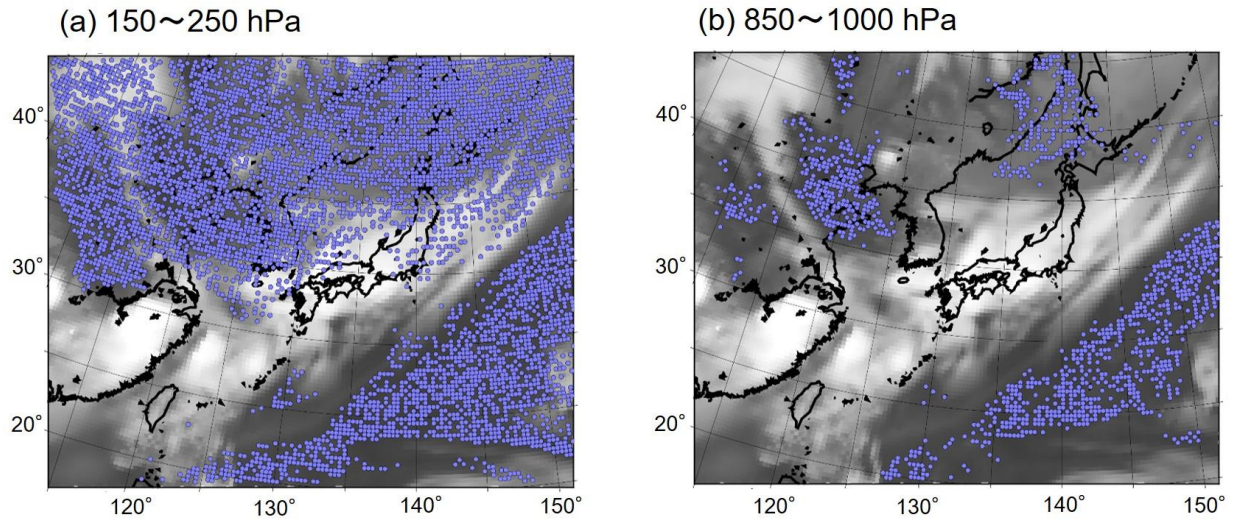
- CNT : GeoHSS 疑似観測を同化しない実験。側面境界値も, GeoHSS 疑似観測を同化しない全球実験の CNT (第 4.1 節参照) によるものを用いる。
- EXP : GeoHSS 疑似観測を 1 時間ごとに同化する。側面境界値は, 全球実験の EXP (第 4.1 節参照) によるものを用いる。
- BND : メソデータ同化においては GeoHSS 疑似観測を同化しない。一方, 側面境界値は, 全球実験の EXP によるものを用いる。これは, 全球同化システムでの GeoHSS 導入が先行して行われる場合を想定した実験である。

5.2 平成 30 年 7 月豪雨事例

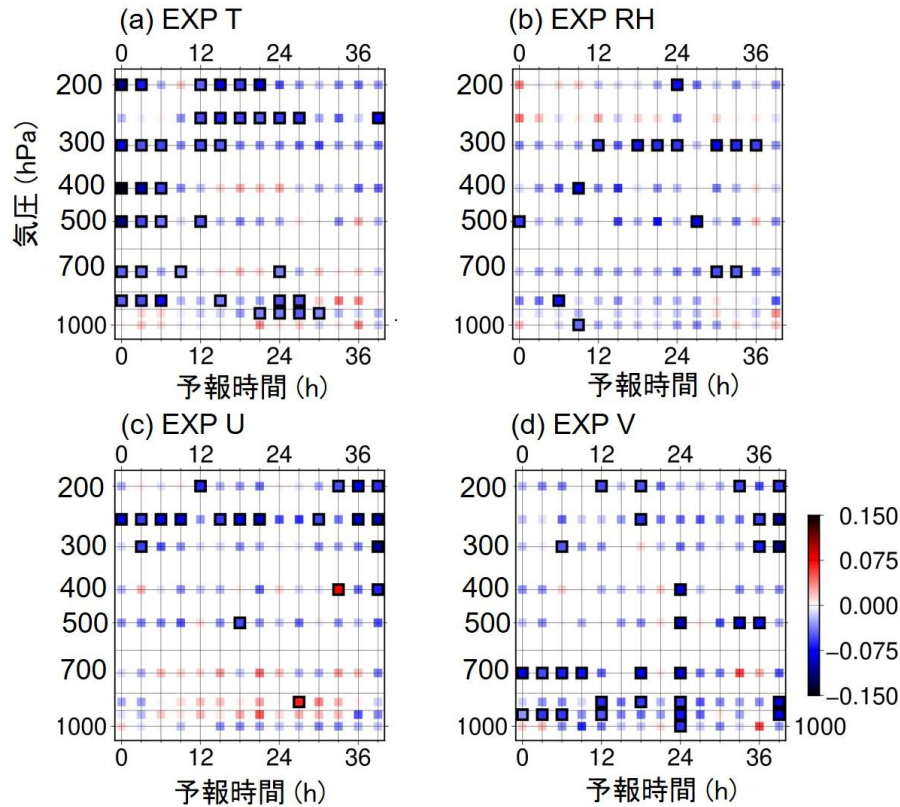
本節では, 第 4.2 節で取り上げた平成 30 年 7 月豪雨を対象に, 主に西日本域での大雨に着目して, メソ数値予報における GeoHSS のインパクトを報告する。

(1) 疑似観測データの分布

データ同化サイクルを実施した 2018 年 7 月 1 日 00UTC から 7 月 7 日 21UTC の期間のうち, 2018 年 7 月 6 日 00UTC の解析(第 4.2 図に対応)で, EXP で同化した疑似観測データの分布を第 5.2 図に示す。疑似観測データ自体はメソ解析の領域全体に分布するが, 下層になるほど雲頂の下となる領域が広くなり, QC を通過した有効な疑似観測データの分布は減少する。対流が活発な中国南東部から東シナ海や, 前線の停滞する西日本を中心とする本州付近にかけて雲が広く分布していて, 有効な疑似観測データが少ない領域となっている。



第 5.2 図 メソ OSSE EXP 2018 年 7 月 6 日 00UTC の解析で同化した HSS 気温疑似観測の分布。(a) 150-250 hPa, (b) 850-1,000 hPa. 背景は ERA5 からシミュレートしたひまわり 8 号バンド 13 の輝度温度。



第 5.3 図 EXP の対高層観測 RMSE の CNT からの改善率 $((RMSE(EXP)-RMSE(CNT))/RMSE(CNT))$ 。2018 年の 7 月 2 日 00UTC 初期値から 7 月 7 日 21UTC 初期値の統計 (48 初期値)。青が改善を示す。(a) 気温 (T), (b) 相対湿度 (RH), (c) 東西風 (U), (d) 南北風 (V)。枠付きの大きい記号は、改善/改悪が有意である場合を示す。

(2) 対高層観測検証

第 5.3 図にデータ同化サイクルから予測を実施した期間の 2018 年 7 月 2 日 00UTC から 7 日 21UTC 初期値の予測について、対高層観測検証の結果を示す。気温 (第 5.3 図 a) については、上層から下層までの広範囲で RMSE は有意に CNT から減少している。予測時間が進むにつれて、インパクトは弱まる傾向があるものの、上層 (250 hPa 付近)、及び、下層 (700-1,000 hPa) で 24 時間を越えても有意な改善がみられる。また、相対湿度 (第 5.3 図 b) では、有意でない高度、予測時間も多いものの全体的に RMSE は減少傾向であり、特に 300 hPa では広範囲の予測時間で有意な減少がみられる。

GeoHSS 同化によるインパクトは、直接観測値を同化していない風の場合にも及んでいる。上層 (200-300 hPa) で東西風 (U)、南北風 (V) に改善傾向がみられ、特に 250 hPa では広範囲の予測時間で U が有意に改善している (第 5.3 図 c, d)。下層 (700-1,000 hPa) については予測前半を中心に V (第 5.3 図 d) に有意な改善がみられる。これらは、GeoHSS 疑似観測による気温や相対湿度の場の改善がデータ同化サイクルや予報モデルを通して伝搬しているものと考えられる。

Okamoto *et al.* (2020) では、本調査の EXP と同様の設定²⁵で、2018 年 7 月 2 日から 7 日の 00UTC 初期値のみの予測 (6 初期値) による対高層観測検証を行い、本調査と同様に EXP で CNT からの

²⁵ ただし、2020 年 3 月に更新される前の気象研究所スーパーコンピュータで実験を実施した。このため、本調査との差には計算機システムの違いによる影響も含まれる。

改善がみられたが、統計サンプルを増やした本稿の検証では、相対湿度や上層の風などについても有意な改善がより広い範囲で見られている。

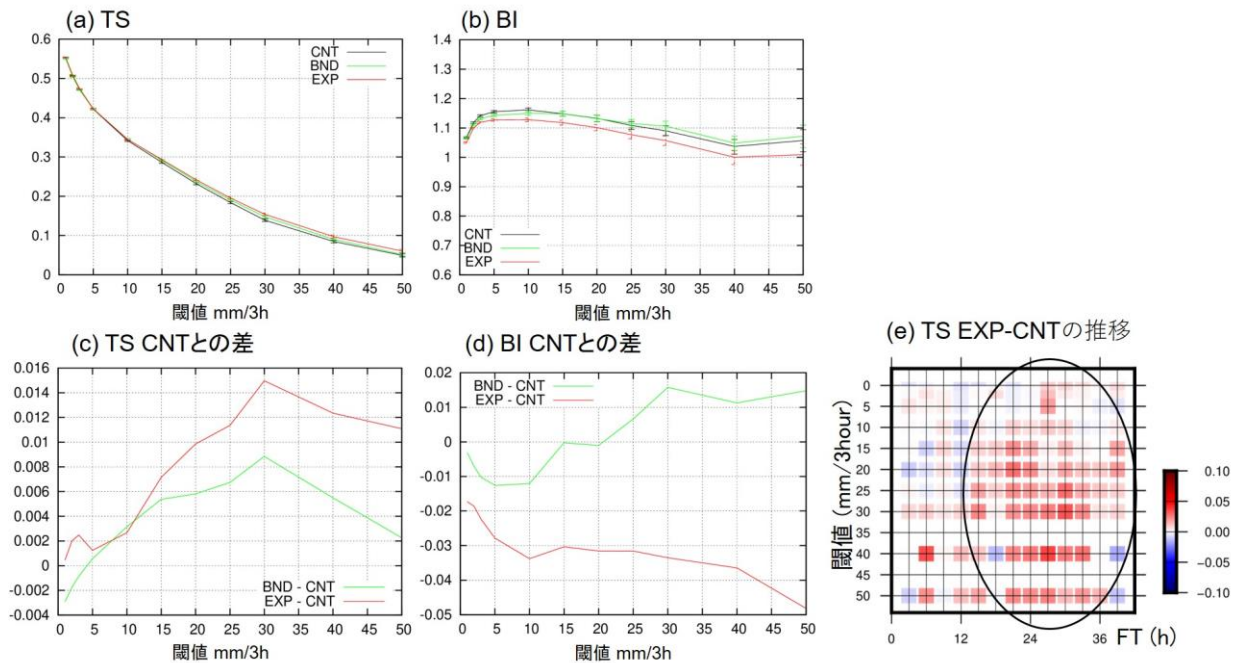
(3) 対解析雨量検証

第 5.4 図にデータ同化サイクルからの予測を実施した期間 (2018 年 7 月 1 日 00UTC から 7 月 7 日 21UTC) における、予測時間が 0-39 時間の 3 時間積算降水量の、解析雨量に対する検証結果を示す。EXP によるスレットスコア (TS) (第 5.4 図 a) は、全閾値で CNT を上回っている (第 5.4 図 c)。またバイアスコア (BI) (第 5.4 図 b) も CNT の降水過多を緩和して、全閾値で 1 に近づいている。予測時間による推移をみると、EXP の TS の CNT からの改善は予測の後半に多く (第 5.4 図 e 黒実線楕円)、GeoHSS 疑似観測データの同化は、予測のリードタイムを延ばす効果を持つ可能性が示唆される。

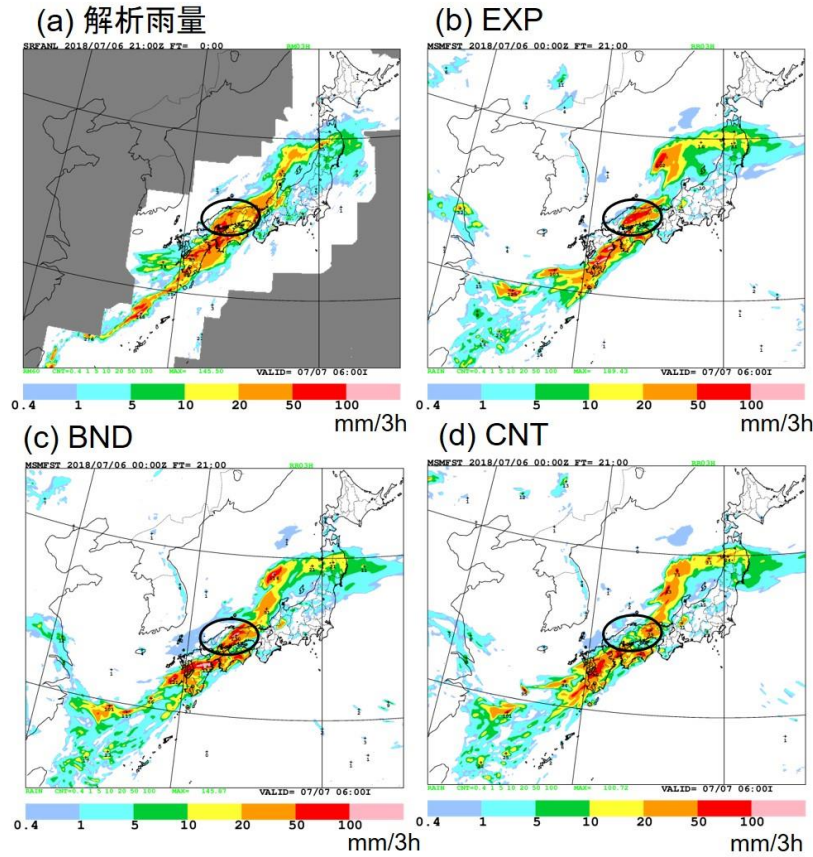
BND では、3 mm/3 h 以下の低い閾値では、TS

は CNT を若干下回るものの、それ以外の閾値では CNT を上回る結果である (第 5.4 図 c)。また、BI については (第 5.4 図 b, d), 20 mm/3 h 以下の低い閾値では、EXP 同様に CNT の降水過多を抑える傾向である。一方、25 mm/3 h 以上では CNT の降水過多よりもさらに過剰に降水を予測する結果であるが、95%信頼区間が重なり (第 5.4 図 b), 有意な結果ではないと考えられる。このように、概ね EXP と同様に改善の傾向であるが、改善幅は EXP より小さい。

なお、Okamoto *et al.* (2020) の 6 初期値による検証でも、本調査と同様、GeoHSS 同化による改善のインパクトがみられた。BI については、すべての閾値で BND のほうが EXP より降水過多を緩和していたものの、有意性については確認できていなかった。それに対し、本調査の 48 初期値に統計サンプル数を増やし、信頼区間を考慮した検証では、EXP に改善がみられている。



第 5.4 図 3 時間積算降水量の対解析雨量検証。20 km 検証格子平均，2018 年 7 月 2 日 00UTC から 7 月 7 日 21UTC 初期値 (48 初期値)，39 時間予測までの統計。(a) スレットスコア，(b) バイアスコア，(c) CNT のスレットスコアとの差，(d) CNT のバイアスコアとの差。赤：EXP，緑：BND，黒：CNT。エラーバーは、95%信頼区間を示す。(e) スレットスコアの差 (EXP-CNT) の推移。横軸は予測時間 (h)。縦軸は閾値 (mm/3 h) を示す。



第 5.5 図 2018 年 7 月 6 日 21UTC の前 3 時間積算降水量。(a) 解析雨量。(b から d) 各実験の 2018 年 7 月 6 日 00UTC 初期値の 21 時間予測値。(b) EXP, (c) BND, (d) CNT.

(4) 事例の検討

第 5.5 図に、本期間において GeoHSS 疑似観測の同化により改善がみられた典型的な事例として、2018 年 7 月 6 日 21UTC の前 3 時間降水量の分布を示す。この時間帯は、前線が本州付近に停滞し、西日本を中心とする広い範囲で大雨となった。特に中国地方付近で強い降水がみられた(第 5.5 図 a)。7 月 6 日 00UTC 初期値 21 時間予測値を見ると、CNT(第 5.5 図 d)では、この中国地方における強雨が表現されていない。その一方、EXP では実況と対応して広島県付近を中心とする強い雨を予測している(第 5.5 図 b)。また、BND(第 5.5 図 c)でも、EXP よりやや範囲が狭く、強雨域が北東にずれているものの、EXP 同様に中国地方における強い降水を表現している。

第 5.6 図 a, b に 7 月 6 日 15, 18UTC の EXP の海面更正気圧と CNT との差分を示す。黒楕円で示すように、EXP では 7 月 6 日 00UTC 初期値

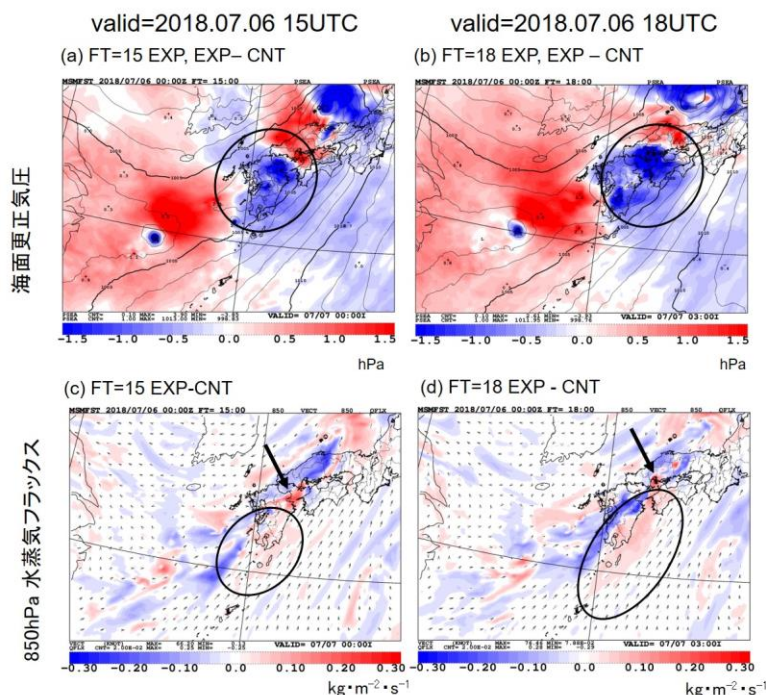
FT=15 h に、九州北部に CNT では表現されていない低圧部を表現しており(第 5.6 図 a)、これは FT=18 h に瀬戸内海西部の広島県付近に達する(第 5.6 図 b)。この低圧部は対象時刻の直近の予測でも表現されており(図略)、その存在の信頼性は高いものと考えられる。また、低圧部の通過に対応して、EXP(第 5.6 図 c)の FT=15 h では、瀬戸内海西部への南西からの下層の水蒸気フラックスが CNT より強まっている(黒矢印)。これは FT=18 h に広島付近(第 5.6 図 d)に達し、降水の強化に寄与している。九州の南東海上から西日本に流入する水蒸気フラックスも CNT よりも強まっている(第 5.6 図 c, d 黒実線楕円)。この低圧部の通過に伴う水蒸気フラックスの強まりにより、中国地方の降水表現が強化されたとみられる。

また、気象庁(2019)は、この時間帯には、上空のトラフが急速に深まりながら南下して西日本

に接近し、付近の対流活動を強めていたと報告している。第 5.7 図に 7 月 6 日 18UTC を対象時刻とする 500 hPa の気象場の予測値 (FT=18 h) を示す。EXP (第 5.7 図 a) では CNT (第 5.7 図 b) と比較してトラフが中国地方付近により接近している。また、太平洋高気圧もやや西に張り出していたため、EXP では CNT より中国地方付近の等圧線が混んで風速が強まり (図略)、EXP (第 5.7 図 a 黒実線

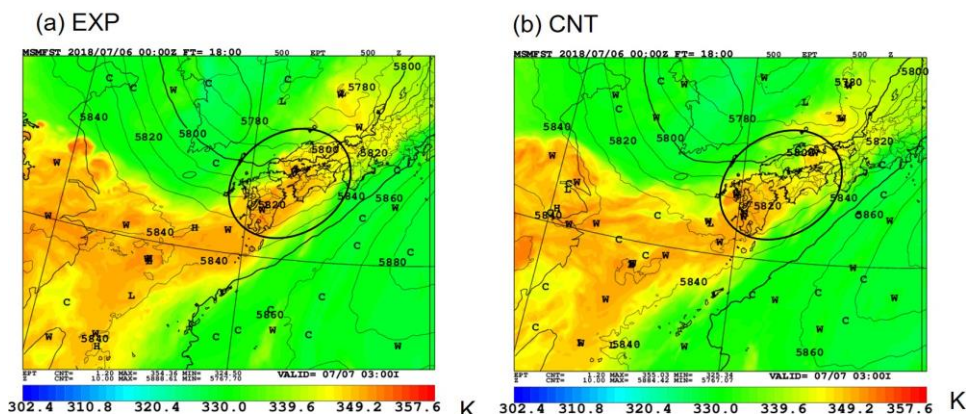
楕円) では、暖湿気を吸入する北東への流れも CNT (第 5.7 図 b 黒実線楕円) より強まっている。このことも、EXP における中国地方の降水の強化に寄与していると思われる。

このように、GeoHSS 疑似観測データ同化により解析サイクルを通じて、風を含む上下層の気象場の改善がもたらされ、降水表現の改善につながったと考えられる。



第 5.6 図 海面更正気圧と 850 hPa 水蒸気フラックスの推移. 2018 年 7 月 6 日 00UTC 初期値の予測. (a) FT=15 h の海面更正気圧の差 (EXP-CNT) を着色で、EXP の海面更正気圧を等値線 (間隔は 1 hPa) で示す. (b) (a) と同じ. ただし FT=18 h. (c) FT=15 h の 850 hPa 水蒸気フラックス (単位は $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) の差 (EXP-CNT) を着色で、EXP の風ベクトルを矢印で示す. (d) (c) と同じ. ただし FT=18 h.

Z, EPT 500hPa FT=18



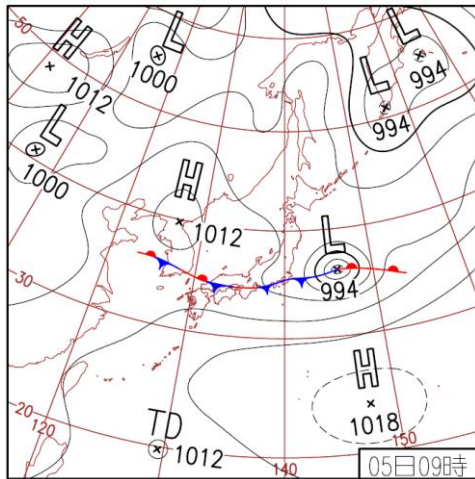
第 5.7 図 500 hPa の予測場. 2018 年 7 月 6 日 00UTC 初期値の FT=18 h. (a) EXP の高度 (等値線), 相当温度 (着色), (b) (a) と同じ. ただし CNT. 等値線の間隔は 10 m.

5.3 平成 29 年 7 月九州北部豪雨事例

本節では、GeoHSS を平成 29 年 7 月の九州北部豪雨に適用した結果を中心に記述する。具体的には、データ同化サイクルを 2017 年 7 月 1 日 00UTC から 7 月 7 日 21UTC まで実行し、7 月 2 日 00UTC から 7 月 7 日 21UTC の 3 時間ごとの初期値からの予測により評価を行った。

(1) 気象の概況

平成 29 年 7 月九州北部豪雨については、気象研究所 (2017)、気象庁 (2018)、Kawano and Kawamura (2020) などに詳しい解析が示されている。第 5.8 図に 7 月 5 日 00UTC の地上天気図を示す。九州北部豪雨発生前後を含む 7 月 2 日から 7 月 7 日は、前線が中国東部や黄海付近から朝鮮半島、本州にかけて停滞していた。前線の南側では、太平洋高気圧が西へ強く張り出し、東シナ海にまで勢力を広げていた。東シナ海を北上した台風第 3 号が 4 日に西日本を縦断して東海道沖を進み、5 日朝には関東の東海上に抜けて温帯低気圧となった。また、7 月 4 日から 8 日にかけて、高気圧が中国北東部から朝鮮半島に南下して前線の北側にとどまり、日本海をゆっくりと東進した。このような状況の中、5 日から 6 日には、太平洋高気圧の縁辺から前線に向かって暖湿気が流入し、九州北部地方や中国地方で大雨となった。特に九州北部地方では線状降水帯が発生して長時間とどまり続けた。このため、多いところで日降水量が 500 mm を超えるなど記録的な豪雨となり、甚大な被害をもたらした。



第 5.8 図 2017 年 7 月 5 日 00UTC の気象庁天気図。

(2) 対解析雨量検証

平成 30 年 7 月豪雨事例 (第 5.2 節) と同様に、同化サイクルから予測を行った。2017 年 7 月 2 日 00UTC から 7 月 7 日 21UTC の期間の初期値からの予測を用いて対高層観測検証を行ったところ、風も含めた各要素で場の改善がみられた (図略)。

次に、第 5.2 節の第 5.4 図と同様に、3 時間積算降水量の解析雨量に対する検証結果を示す (第 5.9 図)。EXP の TS は、すべての閾値で CNT を上回り (第 5.9 図 a, c)、BND においても、EXP よりは低いものの、40 mm/3 h 以上の閾値を除けば CNT を上回った。一方、EXP の BI は 15 mm/3 h 以下の閾値で CNT を下回り、降水をさらに過少にした (第 5.9 図 b, d)。BND も、5 mm/3 h 以下の閾値で EXP と同様、CNT の降水過少傾向を強めている。このように、前節と同様に、TS は EXP、BND とともに CNT から概ね増加し、EXP でインパクトがより大きく、BI は低い閾値で CNT よりも低下するという結果となった。ただし、本期間では低い閾値での降水過少傾向は CNT よりさらに強まった。

EXP の TS は主に予測後半で CNT よりも向上し (第 5.9 図 e)、前節 (第 5.4 図 e) と同様、予測のリードタイムを延ばす効果が得られている。ただし、本期間の予測後半の検証では台風第 3 号の寄与が大きく (図略)、その降水予測特性を強く反映した結果とみられる。

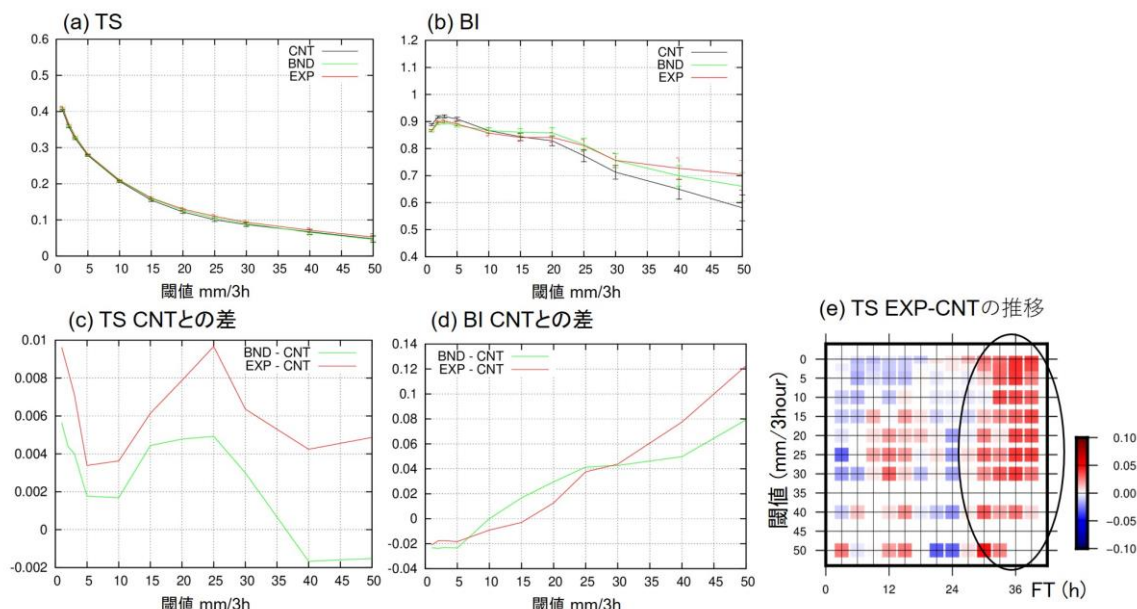
(3) 事例による検討

平成 29 年 7 月九州北部豪雨においては、環境場の特徴として、上空に強い寒気が入り、強い成層不安定が持続していたことが指摘されている (気象研究所, 2017; 気象庁, 2018)。400 hPa の気温について、直近の予測では EXP、CNT とともに九州北部地方付近に接近する寒気を表現するものの、初期値をさかのぼると寒気は弱まり東進も遅れていた (図略)。しかし、FT=36-12 h 程度で EXP (第 5.10 図 a) では GeoHSS 疑似観測データの同化により、CNT (第 5.10 図 b) よりも寒気をより強く表現する傾向がみられた (第 5.10 図 c)。

また、気象研究所 (2017) や気象庁 (2018) が指摘していた「東シナ海まで勢力を広げた太平洋

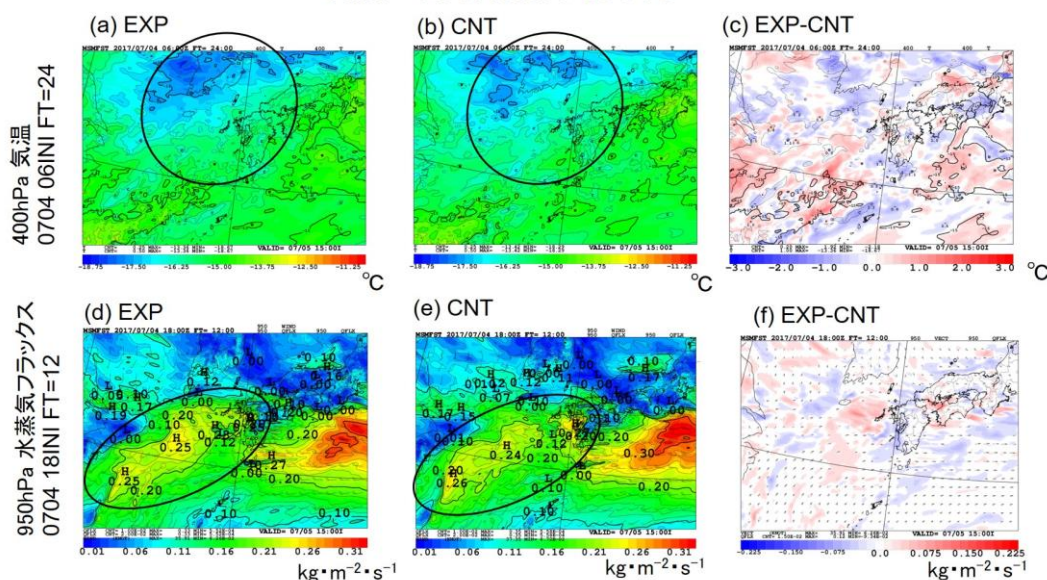
高気圧の縁辺流による九州に向かう下層の南西からの暖湿気流（950 hPa の水蒸気フラックス）」について、EXP, CNT とともに、実況直近ではこの暖湿気の流れを表現するものの、初期値をさかかると流れの集中や全体的な強度が弱まってい

た(図略). しかし、FT=18-12h 付近では、EXP (第 5.10 図 d) に CNT (第 5.10 図 e) よりも九州北部地方に向かう暖湿気の流れを強める傾向がみられた (第 5.10 図 f).



第 5.9 図 第 5.4 図と同じ. ただし 2017 年 7 月 2 日 00UTC から 7 月 7 日 21UTC 初期値 (48 初期値).

valid = 2017.07.05 06UTC

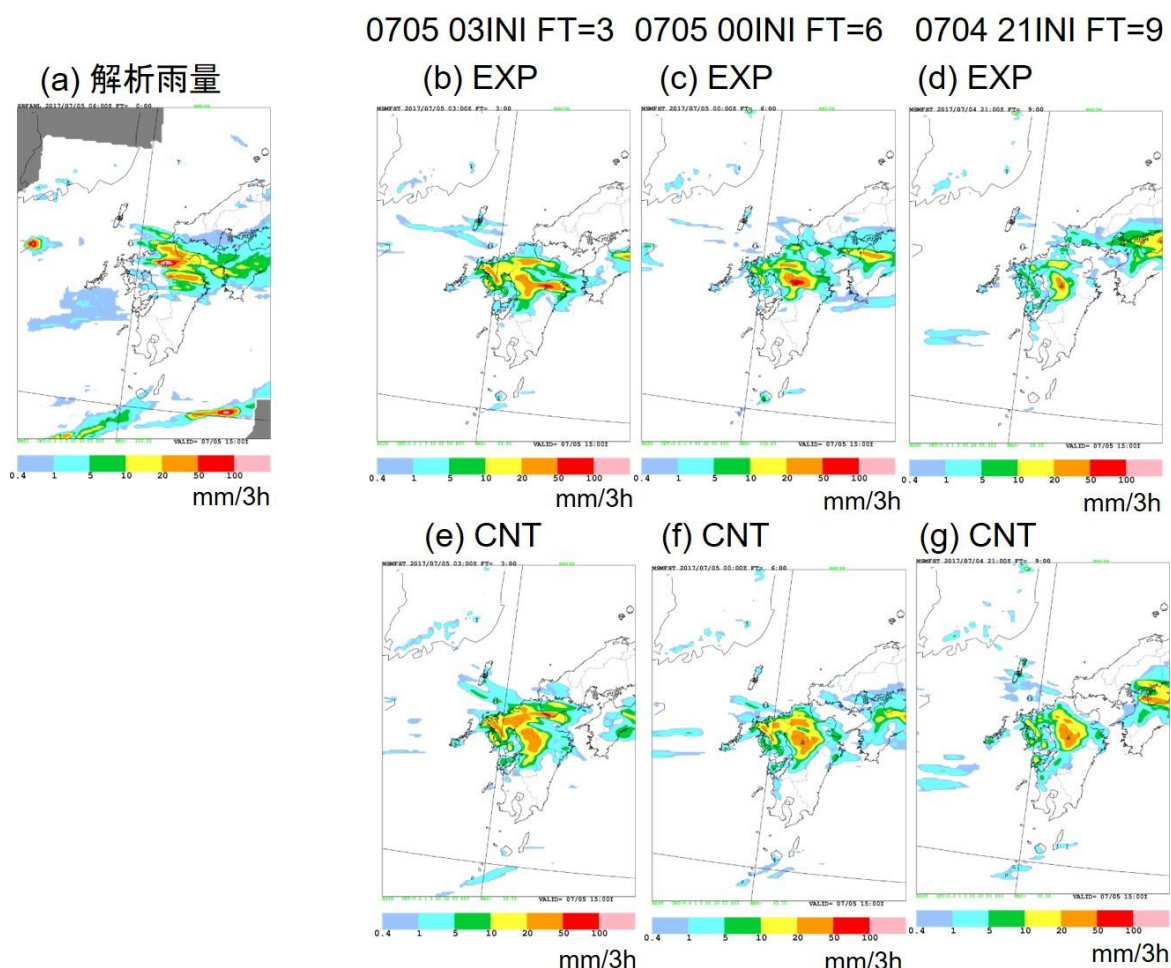


第 5.10 図 2017 年 7 月 5 日 06UTC を対象とする 400 hPa の気温の 24 時間予測値 (7 月 4 日 06UTC 初期値) と 950 hPa の水蒸気フラックスの 12 時間予測値 (7 月 4 日 18UTC 初期値). (a) EXP の気温, (b) CNT の気温, (c) 気温差 (EXP-CNT) (着色), EXP の気温 (等値線). (a, b) の等値線の間隔は 1°C, (c) の等値線の間隔は 0.5°C. (d) EXP の水蒸気フラックス (着色), 風 (矢羽根), (e) CNT の水蒸気フラックス (着色), 風 (矢羽根). 等値線の間隔は 0.02 kg · m⁻² · s⁻¹, 矢羽根の長い羽根は 10 kt, 短い羽根は 5 kt, ペナントは 50 kt. (f) 水蒸気フラックスの差 (EXP-CNT) (着色), EXP の風ベクトル (矢印).

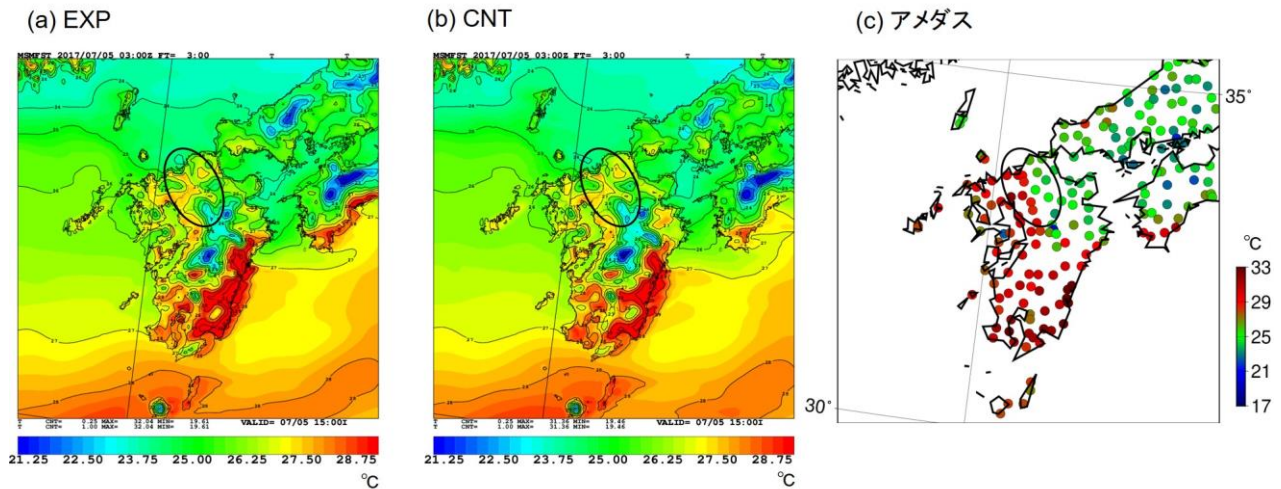
これらのように、豪雨発生時の環境場として上層の寒気や下層の暖湿気流入については、EXPではGeoHSS疑似観測同化の効果によって初期値更新の過程で予測の修正がCNTより早い、つまりリードタイムを長くする傾向がみられた。

第5.11図に、九州北部で降水が激しかった時間帯である7月5日06UTCの前3時間降水量の直近の三つの初期値 (FT=3 h, 6 h, 9 h) からの予測を示す。実況 (第5.11図a) では、朝倉市付近の狭い範囲に集中する強雨を示しているが、EXP (第5.11図bからd) ではCNT (第5.11図eからg)

より降水の集中が強まる傾向がみられるものの、実況と比較すると両者とも強度は弱く、ピーク位置もずれている。また、初期値による変動も大きい。九州北部豪雨では、強い降水域の空間スケールは小さく、降水の集中や持続には詳細な地形の効果が寄与している可能性も指摘されている (竹見, 2018; 気象研究所, 2017)。細かな水平格子でしか表現できない強い降水域や地形のため、本調査で用いた格子間隔5 kmの数値予報モデルでは、局地的な降水の集中や長時間の持続の表現は困難であったと考えられる。



第5.11図 2017年7月5日06UTCの前3時間積算降水量。(a) 解析雨量。EXPとCNTの5日03UTC初期値のFT=3 h (b, e), 5日00UTC初期値のFT=6 h (c, f), 4日21UTC初期値のFT=9 h (d, g)。



第 5.12 図 2017 年 7 月 5 日 06UTC の地上気温. (a) EXP の 03UTC 初期値の FT=3 h, (b) CNT の 03UTC 初期の FT=3 h, (c) アメダス観測値. (a, b) の等値線の間隔は 1°C.

この豪雨の形成時には、九州北部の線状降水帯の発達に伴って南北方向に延びる顕著な温度傾度帯が形成・維持されていたことが気象研究所 (2017) や欠畑・白山 (2018) により報告されている. 第 5.12 図 c に示すように、実況では 30 °C 程度から 24 °C 程度に変化する東西方向の急激な地上気温の水平勾配がみられた (黒実線楕円). それに対し EXP (第 5.12 図 a), CNT (第 5.12 図 b) とも、直近の初期値においても西側の高温域, 東側の低温域いずれも表現していない. 大きな気温勾配についても、より細かい数値予報モデルの水平分解能や地形、さらに温度傾度帯西側の海岸から福岡県西部付近での日照による昇温に関わる雲域の詳細な表現、先行降水や線状降水帯による冷氣外出流をはじめとする影響なども考慮すべきであり、本調査では温度分布は十分表現できなかった.

本事例については、上層の寒気や南西からの水蒸気フラックス等の環境は改善が見られた一方、降水量や地上気温分布は再現できなかった. これは、本調査で用いた疑似観測データ、データ同化システムや数値予報モデルの分解能では、本事例の線状降水帯のメカニズムの詳細を表現するには限界があるとみられる. すなわち、本メソ OSSE システムを用いて GeoHSS 疑似観測を同化するのみでは現象の再現には至らず、より高分解能のシ

ステムによる検討などが必要と考えられる.

5.4 まとめ

本章ではメソ数値予報システムにおける GeoHSS のインパクトを調査した. 対高層観測の検証では予測の改善が確認され、平成 30 年 7 月豪雨や平成 29 年 7 月九州北部豪雨の複数の事例で ERA5 を疑似真値場として用いることの妥当性が示唆された. 特に、疑似観測を直接同化していない風についても、同化サイクルや予測を通じたインパクトがみられた. 降水検証は概ね改善の傾向を示した. インパクトは予測後半でより強く、予測のリードタイムを延ばす傾向がみられた.

平成 30 年 7 月豪雨事例では、GeoHSS を同化した 21 時間予測に改善がみられた. 西日本がかかる、大規模な降水帯の中で発生した低圧部の通過に伴う下層暖湿気流入の強まり、また、上層のトラフの位置の改善により、中国地方の降水の強化の表現が向上した. 同化サイクルや予測、側面境界値を通じた気象場の改善の効果が降水予測にも及んだものとみられる.

平成 29 年 7 月九州北部豪雨事例については、線状降水帯の環境場において、上層の寒気と、下層の暖湿気流入について、それぞれ 36-12 時間予測、18-12 時間予測程度で、GeoHSS 同化により予測を改善する傾向がみられた. 一方、局地的な降

水の集中・持続と、それに伴う温度傾度帯など、小さいスケールの現象は、直近の初期値でも表現されず、本 OSSE での GeoHSS 疑似観測の同化のみでは予測の改善はみられなかった。より高分解能、高頻度の観測データ²⁶、高分解能の同化システム、予報モデルによるインパクトの調査は、今後の課題である。

6. FY-4A 衛星搭載 *GIIRS* の調査

6.1 はじめに

2016年12月11日にCMAの静止気象衛星FY-4Aが打ち上げられた。CMAはこれまで静止気象衛星FY-2シリーズを運用してきたが、FY-4シリーズは観測性能を高度化した次世代の静止気象衛星である。その初号機であるFY-4AはFY-4シリーズの正式現業化に向けた研究・開発段階の気象衛星と位置付けられており、中国で独自に開発され、先進的な観測性能をもつイメージャ、雷センサ、HSS等が搭載されている(Yang *et al.*, 2017)。搭載測器のひとつである*GIIRS*はHSSであり、静止気象衛星に搭載されて実運用されたGeoHSSとしては世界初の測器となる。

一方、FY-4Aの静止軌道は中国大陸上空である東経105度であり、*GIIRS*は日本列島を含む日本の西側領域を主に観測する。*GIIRS*が観測する多波長の赤外放射輝度スペクトルデータには大気の気温・水蒸気の鉛直分布に関する観測情報が含まれ、静止軌道からの同一領域の高頻度観測により、日本の西側領域の3次元的な気温・水蒸気場の観測情報が得られる。後続となる現業衛星FY-4Bも*GIIRS*を搭載し、FY-4Aと同じ東経105度の静止軌道に配置される予定である。そのため、*GIIRS*データは日本付近の総観気象場の数値予報にとって非常に有益な観測情報となることが期待される。

FY-4A/*GIIRS*の実観測データである放射輝度スペクトル(Level 1, L1)データの公式配信が、2019年1月28日より開始された。また、2018年12月

25日にはCMAは全球・領域数値予報解析システム(GRAPES)において*GIIRS*L1データの現業同化利用を開始している。*GeoHSS*として世界初の実観測データであること、及び上述の地理的な特性から*GIIRS*データの潜在的価値は非常に高いと考えられる。本章では、*GIIRS*の実観測データの特性と品質、及び全球解析において同化利用するために必要な技術についての調査結果を報告する。なお、本章執筆時点では*GIIRS*に関する公式な技術文書はほとんどまとまった形では公開されておらず、本章で述べる内容には、著者が2019年5月にCMA主催の*GIIRS*に関するワークショップに出席して得た情報など、個別に入手した情報に基づいている部分が多いことをご容赦いただきたい。

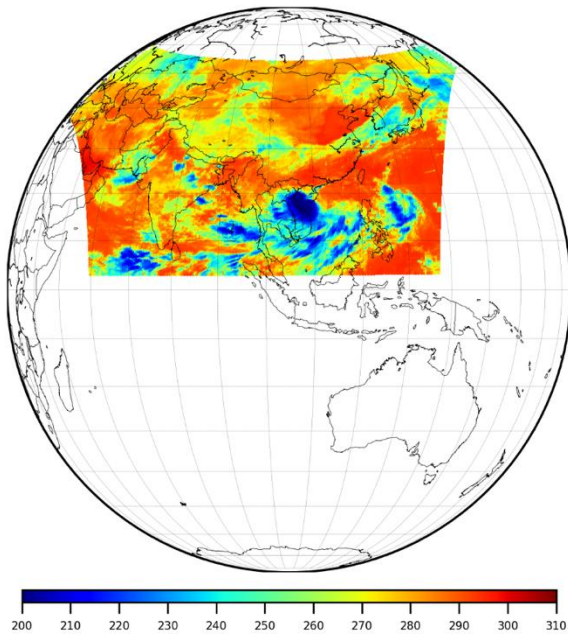
6.2 *GIIRS* の観測性能

*GIIRS*は2次元アレイ赤外検出器を備えたFTSであり、検出器は128個(南北方向32×東西方向4)の画素からなる。1画素あたりの瞬時視野は衛星直下で直径約16kmの円形の大きさで、この検出器を使って東西・南北方向に走査観測することで、*GIIRS*は約5,000km×5,000kmの領域を観測することが可能となっている。*GIIRS*の走査観測にはいくつかの観測モードが存在するが、通常は東西方向に連続的に行う59回の走査観測を基本とし、それを南北方向に7段行うことで中国大陸を中心とする北半球領域の観測を行う(第6.1図)。東西方向の走査に要する時間は15分で、南北方向の7段の観測には合計で1時間45分が必要となる。その後には*GIIRS*は赤外校正のための観測(深宇宙・恒温黒体観測)を15分かけて行い、通常の観測モードでは*GIIRS*の1シーンの観測時間は2時間が基本単位となる。

*GIIRS*の分光性能(公称値)はYang *et al.*(2017)の文献にまとめられている。しかし、実際にCMAから配信されているL1データはそれよりも若干高い仕様となっている。配信データの波数分解能

²⁶ GeoHSSの実観測で想定される分解能(4km程度)は、本調査で用いた疑似観測データの元となるERA5の分解能(約31km)より高い。

(サンプリング間隔)は 0.625 cm^{-1} であり、分光分解能だけで言えば、*GIIRS* は欧州が 2023 年に打ち上げを計画している *MTG-S* 衛星搭載の *IRS* (第 2 章参照) と同等の観測性能を有していることになる。一方、*GIIRS* の観測チャンネル数は *LWIR* ($700\text{-}1,130 \text{ cm}^{-1}$) では 689 チャンネル、*MWIR* ($1,650\text{-}2,250 \text{ cm}^{-1}$) では 961 チャンネルであり、*CMA* から配信されている *HDF* 形式の *L1* データには全 1,650 チャンネルのデータが格納されている。*GIIRS* は *FTS* であることから、各チャンネルの分光応答関数は原理的には *sinc* 関数に近い関数形をしていると考えられるが、その詳細なデータは公開されていない。また、配信されている *L1* データには、基本的にアポダイゼーション (*apodization*)²⁷が適用されていない。



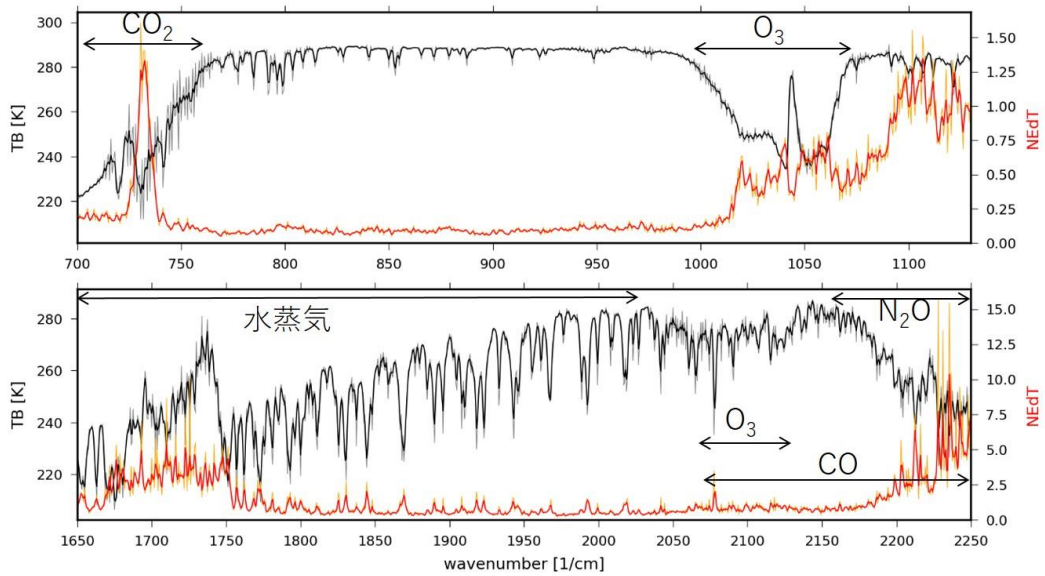
第 6.1 図 FY-4A/*GIIRS* の通常観測領域。*GIIRS* の波長 $10.2 \mu\text{m}$ における窓チャンネル (ひまわり 8 号バンド 13 の帯域内にある *GIIRS* の 1 チャンネル) の観測輝度温度 [K] をプロットした。観測値は 2019 年 8 月 29 日 00-02UTC に観測されたもの。

6.3 *GIIRS* *L1* データ特性

GIIRS の 1 画素が取得した観測輝度温度スペクトルの典型例を第 6.2 図に示す。黒・灰線は *GIIRS* の観測輝度温度スペクトルであり、黒線は *Hamming* アポダイゼーション (*Barnet et al.*, 2000) を適用したスペクトル、灰線はアポダイゼーションを適用していない配信 *L1* データそのものを示している。*Hamming* アポダイゼーションは極軌道衛星搭載の *HSS* (*IASI*, *CrIS* 等) で広く用いられているアポダイズ関数である。波数分解能 (サンプリング間隔) 0.625 cm^{-1} 程度では個別のガス吸収線を解像する観測は難しいが、波長 $15 \mu\text{m}$ (波数 $700\text{-}760 \text{ cm}^{-1}$) 付近の二酸化炭素 (CO_2) の吸収帯、波長 $9.6 \mu\text{m}$ 付近 (波数 $980\text{-}1,080 \text{ cm}^{-1}$) のオゾン (O_3) の吸収帯及び *MWIR* (波数 $1,650\text{-}2,000 \text{ cm}^{-1}$) の水蒸気吸収帯など、それぞれのガス吸収帯の広帯域を観測することができる。また第 6.2 図からは、 CO_2 吸収帯ではアポダイゼーションの有無によるスペクトル形状の違いが顕著に現れており、輝度温度にして 10 K 以上の違いが生じるチャンネルが多いことが分かる。

一方、*GIIRS* *L1* データにはノイズ等価放射輝度差 (*NEdR*) のデータも格納されており、第 6.2 図の赤・橙線はそれをチャンネルごとにノイズ等価輝度温度差 (*NEdT*) に換算して表示したものである。赤・橙線はそれぞれ *Hamming* アポダイゼーションの有無を表す。*GIIRS* の *NEdT* は特定のチャンネルで大きくなっており、特に波数 $720\text{-}740$, $1,010\text{-}1,130$, $1,670\text{-}1,760$, $2,200\text{-}2,250 \text{ cm}^{-1}$ 付近のチャンネルで顕著になっている。これらのチャンネルでは観測輝度温度の値が 400 K を超えることもあり、*NEdT* の値以上に *GIIRS* 固有の大きなノイズ・バイアスが発生するチャンネルであることが分かっている。*CMA* の *L1* データ校正担当者の説明によると、軌道上で衛星に照射する太陽光がこのノイズ (バイアス) の成因となっているようで、*GIIRS* (あるいは *FY-4A* 衛星本体) の設計に起因する、放射校正でも取り除くことができない問題があるようである。

²⁷ アポダイゼーションについては第 2 章を参照。詳細は、例えば *Barnet et al.* (2000) を参照。



第 6.2 図 *GIRS* 観測輝度温度スペクトルの例 (全 1,650 チャンネル). 上図は LWIR (689 チャンネル), 下図は MWIR (961 チャンネル) を表す. 波数分解能 (サンプリング間隔) は 0.625 cm^{-1} . 黒・灰線は観測輝度温度, 赤・橙線はノイズ等価輝度温度差 (NEdT) を表し, 単位はどちらも [K]. 黒・赤線はアポダイゼーション (Hamming apodization) を適用したスペクトル, 灰・橙線はアポダイゼーションを適用する前のスペクトルを表す. スペクトルの形状から, 晴天に近いシーンの観測例と考えられる (第 3.3 図参照).

第 6.1 表 2019 年 12 月までの *GIRS* L1 データのバージョンとその特性.

期間	バージョン	アポダイゼーション	特性
2019/1/24 ～ 8/13 02UTC	V1	なし	・放射校正が明らかに不十分 ・異常値が多い
2019/8/13 02UTC ～ 8/29 02UTC	V2	あり (Hamming関数)	・放射校正がV1より改善 ・異常値は大幅に減少 ・アポダイゼーションが正確に適用されているか疑わしい
2019/8/29 02UTC ～ 10/25 04UTC	V2	なし	・スペクトルシフトあり ・時間変化バイアスあり
2019/10/25 04UTC ～ 11/7 04UTC	V2	なし	・分光校正が若干改善 ・スペクトルシフトあり ・時間変化バイアスあり
2019/11/7 04UTC ～	V3	なし	・スペクトルシフトが修正された ・時間変化バイアスがV2よりも顕著

L1 データの配信が開始されて以降, データ品質の改善に向けて様々な改良が加えられており, 配信データのバージョン更新や公式アナウンスの無い変更が度々行われている. 本章執筆時点では

V1, V2, V3 のバージョン (版) の L1 データが配信されており, それぞれについて把握しているデータ特性を第 6.1 表にまとめた. データ配信が開始された最初のバージョンである V1 版では, 観

測輝度温度の水平分布が帯状に不連続となる等の異常値が多く見られ、明らかに放射校正が不十分であることを確認している。V2, V3 版では放射校正精度が大幅に改善し、データ品質が比較的安定しているが、次の点に注意が必要である。

- ・アポダイゼーションの有無
- ・スペクトルシフト
- ・時間変化バイアス

アポダイゼーションについては、GIIRS 本来の分光応答関数のデータが公開されていないことから、L1 データを利用する際にはユーザーが自前でアポダイゼーションを適用し、分光応答関数の不確かさを低減する必要がある。しかし一方で、配信されていた L1 データには、Hamming アポダイゼーションが適用されていた期間があることが分かっている²⁸。そのため GIIRS の L1 データを取り扱う際にはアポダイゼーションの有無に注意する必要があるが、それを識別するフラグ等の情報は配信データには付加されておらず、アポダイゼーションの有無による違いが顕著に現れる波長 15 μm 付近の CO₂ 吸収帯のスペクトルの形状（第 6.2 図）を確認するなど、経験的に判断する方法しかないのが実情である。

スペクトルシフトは、GIIRS の L1 スペクトルの形状が理論計算スペクトルの形状と比べて波数方向に全体的に約 0.3 cm^{-1} 程度ずれている問題で、GIIRS の観測波数チャンネルが意図した波数と異なる波数の赤外放射を観測していることを表している（例えば、Kan *et al.*, 2020）。その原因としては、GIIRS の生観測データである干渉光強度 (interferogram) を測定する際の光路差のサンプリング精度に問題があると考えられ、配信されている L1 データだけを用いた補正は困難である。スペクトルシフトは UKMO や ECMWF による V1 版データの品質調査の中で発見されたが、米国ウィスコンシン大学の研究者らのその後の調査によってスペクトルシフトの補正方法が考案され

た。V3 版ではその修正が適用され、V3 版データの配信以降はスペクトルシフトの問題は大幅に改善されている。

GIIRS の L1 データには時間変化するバイアスがある可能性が指摘されている (Yin *et al.*, 2020)。このバイアスは CMA での現業同化に向けたデータ品質調査の中で発見されており、日中・夜間に対応して時間変化・日変化するバイアスであることが報告されている。後述のとおり、この時間変化バイアスはその傾向を正確に把握して補正することが難しく、本章執筆時点では GIIRS L1 データを定量的に利用する上で大きな障害となっている。

6.4 GIIRS データの同化利用に向けた品質管理手法の検討

本節では GIIRS L1 データの全球同化利用を試みた調査の結果について述べる。

6.4.1 GIIRS に対応した放射モデル

輝度温度データの品質調査・管理にはその測器の分光特性に対応した放射伝達モデルが必要である。しかし GIIRS の分光応答関数は公開されていないことから、GIIRS 用の放射伝達モデルを独自に構築することは容易ではない。GIIRS に対応した放射計算を行うために、CMA は放射伝達モデル RTTOV (Saunders *et al.*, 2018) による放射計算を実行する際に必要となる GIIRS 用ガス吸収係数データを独自に開発している (Di *et al.*, 2018)。Di *et al.* (2018) による GIIRS 用ガス吸収係数データは公開されており、インターネットから取得して利用することができるようになっている。本調査ではこれらのモデル・データを利用した。

6.4.2 チャンネル選択

極軌道衛星搭載 HSS では、同化利用に適したチャンネルの L1 データのみを格納したファイル

²⁸ 2019 年 8 月 13 日 02UTC から 8 月 29 日 02UTC の期間の L1 データには Hamming アポダイゼーションが適用されており、それ以外の期間の L1 データにはアポダイゼーションは適用されていないことを確認している。

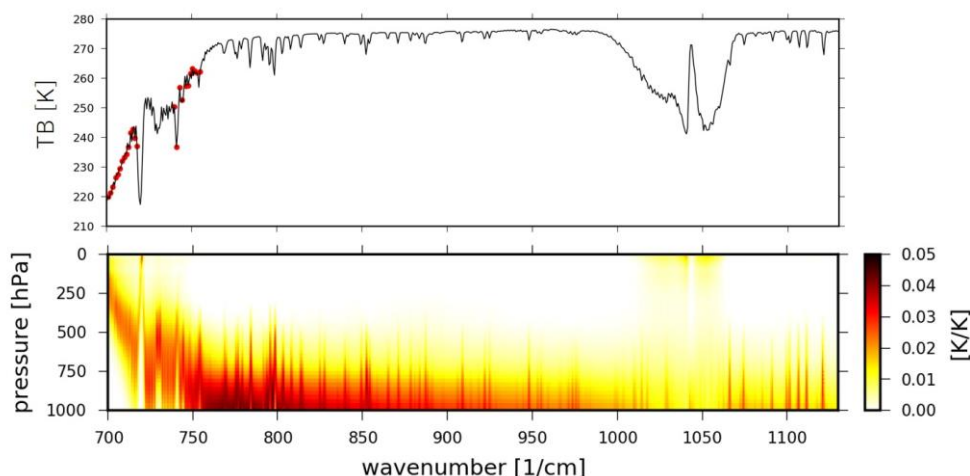
配信する仕組みがあるが、本稿執筆時点では、*GIIRS* L1 データは全チャンネルのデータが格納されたファイルのみが配信されている。そのため、*GIIRS* L1 データの同化利用にあたってはまず利用するチャンネルを選択する必要がある。チャンネルの選択手法はその目的や方針によって様々な方法があるが、*GIIRS* の場合はデータ品質について測器に起因する様々な懸念があることから、本調査では以下の方針で優先的に利用すべきチャンネルを選択した。

- ・オゾンによる吸収があるチャンネルを除き、気温（及び CO_2 濃度）のみに感度のあるチャンネルを、波長 $15 \mu\text{m}$ （波数 $700\text{-}760 \text{ cm}^{-1}$ ）付近の CO_2 吸収帯から選択する。
- ・NEdT が周辺よりも高いチャンネルを除く（第

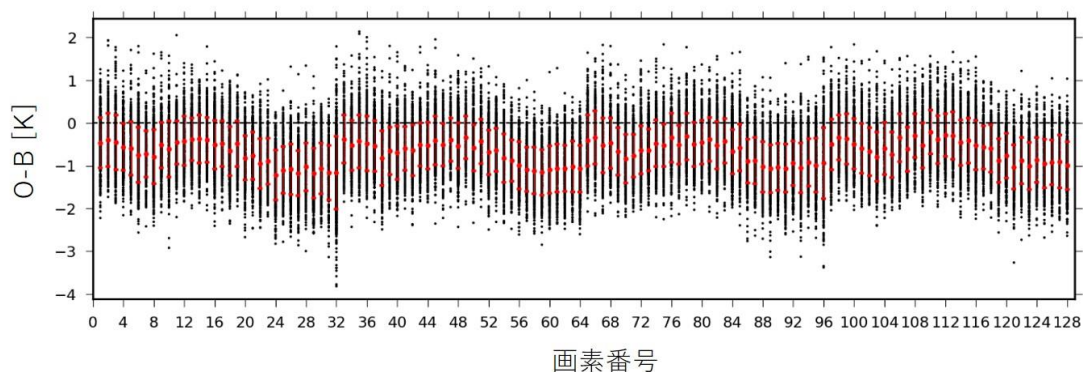
6.2 図）。

- ・アポダイゼーションに起因するチャンネル間誤差相関の効果を低減するため、隣接したチャンネルの利用を避ける。

選択した気温チャンネルを第 6.3 図に示す。波長 $15 \mu\text{m}$ 付近の CO_2 吸収帯には *GIIRS* 固有のノイズ（バイアス）があり、その影響を受けるチャンネルを避けて気温チャンネルを選択する必要がある。そのため、対流圏中下層に感度をもつチャンネルの多くが選択できず、気温チャンネルを利用する上で *GIIRS* 固有のノイズは大きな制約であることが分かる。選択した気温チャンネルは 25 個で、すべて対流圏中層から上層の高度に感度をもつ。



第 6.3 図 標準大気プロファイルを仮定して RTTOV で計算した *GIIRS* LWIR の輝度温度スペクトル（上図）と気温ヤコビアン： $\partial T_B / \partial T$ （下図）。赤丸は同化利用の検討のために選択した 25 個の気温チャンネルを表す。

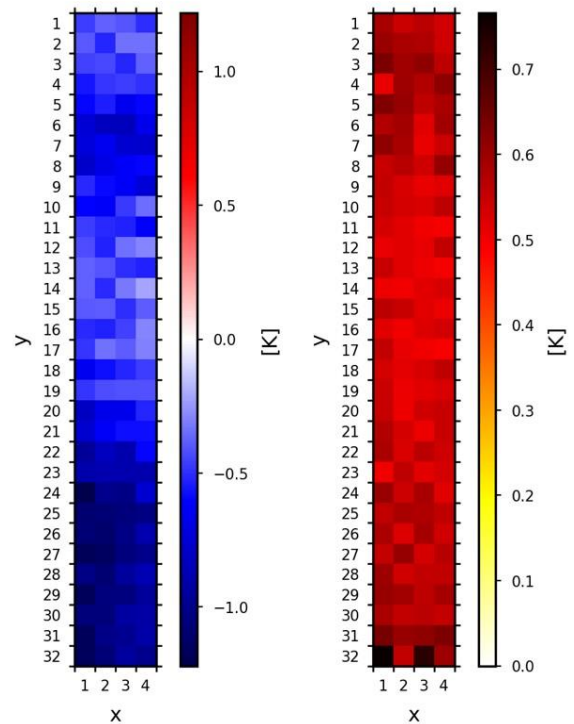


第 6.4 図 画素（横軸）ごとに見積もった *GIIRS* 観測輝度温度と第一推定値との差（O-B，縦軸）。2019 年 9 月 1 日から 15 日に海上で観測されたチャンネル 20 のデータを用いた。黒点は全ての O-B 値を表し、赤点と誤差棒は O-B 値の平均値と平方根平均二乗誤差を表す。

6.4.3 瞬時視野に依存した観測誤差

第 6.2 節で述べたとおり, *GIIRS* は 128 個の画素からなる 2 次元アレイ赤外検出器でフーリエ変換分光のための干渉光強度を測定する. 画素が 32×4 という矩形の配置であることから, 直感的に考えて, 干渉光強度測定のための光軸調整が各画素で均等であるとは考えづらい. そのため, 128 個の画素ごとに観測誤差の特性が異なる可能性がある. また, 極軌道衛星搭載 HSS ではクロストラック方向の走査観測において, 衛星天頂角に依存したバイアス誤差 (スキャンバイアス) が生じることが多い. *GIIRS* も走査観測によって広域を観測するため, 衛星天頂角に依存して観測誤差特性が変化することが予想される. これらの誤差特性を調査するため, *GIIRS* 配信データの品質が比較的安定し始めた 2019 年 9 月のデータ (V2 版) を用いて, *GIIRS* 輝度温度データと第一推定値との差 (O-B 値) を調査した. 調査対象は晴天域のみのデータとし, 雲判定処理は現業同化利用している極軌道衛星搭載 HSS (*IASI*, *CrIS*) と同様の処理 (亀川ほか, 2017; 岡垣, 2015) を用いた.

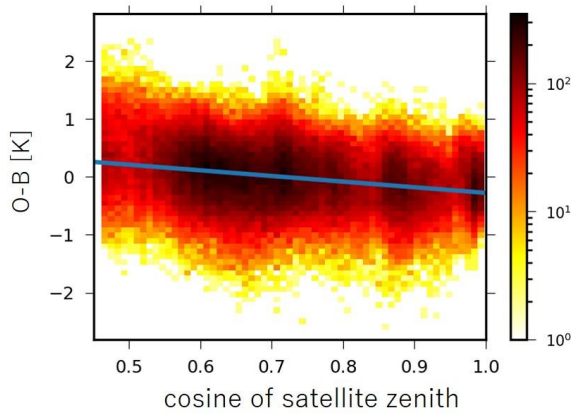
GIIRS の 128 個の画素について, 画素ごとに見積もった O-B 値を第 6.4 図と第 6.5 図に示す. 調査結果としては, 予想どおり画素の配置に対応して O-B 値の平均値 (バイアス) が異なることが分かった. 大きな傾向としては, 画素 32 個ごとにバイアスが大きな周期をもっている様子が確認でき, 南北方向に検出器が 32 個ずつ配置されていることとよく対応している. 画素 32 個ごとに, 東西方向に隣接する画素を比較した場合でも, バイアスの大きさが微細に振動していることや, 各画素に個性があることが確認できる. 第 6.4 図は対流圏上層に感度をもつチャンネルの一つについての結果を示しているが, その他のチャンネルでも同様の特性が見られることを確認している. 画素ごとにバイアス特性が大きく異なることから, 128 個それぞれの画素についてバイアス量を見積もって補正する必要がある (画素バイアス補正). 一方, O-B 値の RMSE の大きさについては, 32 番目と 96 番目の特定の画素で若干誤差が大きいことを除いて, 画素の配置に依存した傾向は特に見



第 6.5 図 画素ごとに見積もった *GIIRS* 観測輝度温度と第一推定値との差の平均値 (左図) と平方根平均二乗誤差 (右図). 図はそれぞれ第 6.4 図の赤点, 誤差棒の大きさを模式的に表したものである. 横軸 x は東西方向, 縦軸 y は南北方向の画素の配置を表す.

られなかった (第 6.5 図 (右図)). しかし, チャンネルによっては y 方向の中央部分よりも両端の方で誤差が大きくなる傾向が見られた (図略).

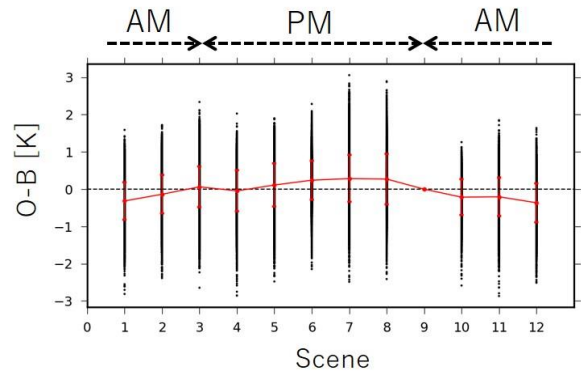
画素バイアス補正を適用した後, 衛星天頂角に対する O-B 値の傾向を調べたところ, 極軌道衛星搭載 HSS と同様に衛星天頂角に依存するバイアスが *GIIRS* でも見られることが分かった (第 6.6 図). チャンネルごとにその大きさは異なるものの, 衛星天頂角の余弦に対して線形に近い分布となる傾向はチャンネルによらず同様であった. そのため, 衛星天頂角の余弦を変分法バイアス補正 (佐藤, 2007) の説明変数に加えることで, 本バイアスは補正可能と考えられる.



第 6.6 図 衛星天頂角に対する *GIIRS* 観測輝度温度と第一推定値との差 (O-B) の分布. 分布の色はデータ数を表し, 青線は衛星天頂角の余弦についての回帰直線を表す. 2019 年 9 月 1 日から 15 日に海上で観測されたチャンネル 20 のデータを用いた. O-B 値は画素バイアス補正を適用した後, 全画素のデータを用いて見積もった.

6.4.4 時間変化バイアス

画素バイアス補正を行ったデータに対して, 時間変化バイアスの調査を行った. *GIIRS* の観測時間は 2 時間が基本単位となるため, その観測単位を 1 シーンと呼ぶことにし, 1 日あたり全 12 シーンについて O-B 値を調べた (第 6.7 図). 図から明らかのように, *GIIRS* L1 データには最大で ± 0.4 K 程度の時間変化バイアスがあることが分かる. 衛星軌道時刻について見ると, 日中から午後の時間帯に O-B 値が上昇して正バイアスとなり, 夜から朝方にかけて O-B 値が減少して負バイアスとなる傾向がある. この時間変化バイアスの成因は明らかではないが, 第 6.3 節で述べたように *GIIRS* は軌道上での太陽光の照射に起因するバイアスがあることが分かっており, 衛星軌道時刻とバイアス値変化の対応から考えても, 衛星コンポーネントの温度が太陽光照射による昇温と夜間の放射冷却による降温によって変化しており, その熱制御に問題がある可能性が高いと考えられる. また, 第一推定値に含まれるモデルバイアスの可能性を排除するために, ひまわり 8 号搭載 *AHI* のバンド 13 (波長 $10.4 \mu\text{m}$) の放射輝度データと, *AHI*



第 6.7 図 1 シーンの観測ごとに見積もった *GIIRS* 観測輝度温度と第一推定値との差 (O-B). 1 シーンは 00UTC を基準として 2 時間ごとの時間単位を表し, 1 日あたり全 12 シーンからなる. 2019 年 9 月 1 日から 15 日のチャンネル 20 のデータについて, 品質管理を通過し, 画素バイアスを補正した全データを用いた. 黒点は全ての O-B 値を表し, 赤点と誤差棒は O-B 値の平均値と平方根平均二乗誤差を表す. 図上部の点線は, 衛星軌道時刻での午前・午後の時間帯の目安を表す. シーン 9 の時間帯 (16UTC-18UTC) は, *GIIRS* は観測を休止しているためデータが存在しない.

の応答関数で積分した *GIIRS* の当該観測チャンネルの観測値の比較も行なった. 比較の結果, *AHI* データに対しても *GIIRS* データは同様の時間変化バイアスがあることを確認している (図略). この時間変化バイアスの補正は容易ではないと考えられるが, 1 シーン単位で事前に見積もることは可能なので, 画素バイアス補正と同様のデータ期間・方法でシーンごとに見積もったバイアス値を用いて補正を試みることにした (時間変化バイアス補正).

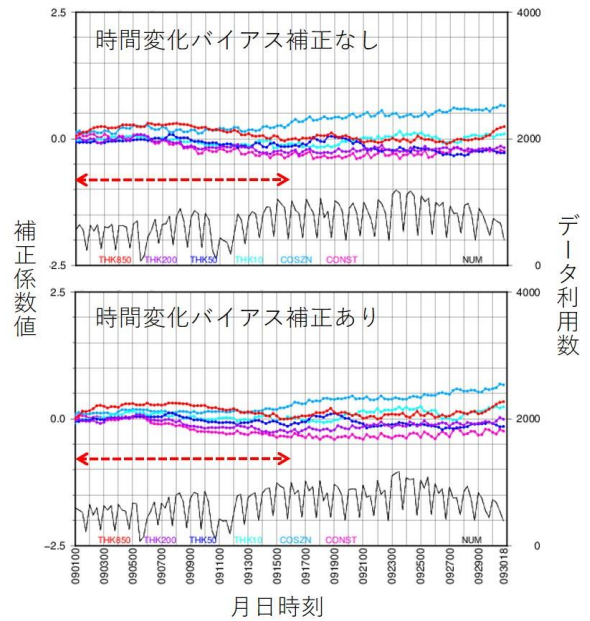
6.4.5 全球解析での *GIIRS* データ同化の試み

これまでに述べた品質管理方法を基にして, 全球解析での *GIIRS* L1 データの同化利用を試みた. 使用した同化解析システムは 2019 年 9 月時点の現業相当の全球同化解析システム (NAPEX G004) で, すでに同化利用している極軌道衛星搭載 HSS

(IASI, CrIS)と同様の品質管理(亀川ほか, 2017; 岡垣, 2015)を基本として, 上述の *GIIRS* 固有の品質管理処理を組み込んだ。ただし, 現業処理では陸域の対流圏チャンネルは同化利用していないが, *GIIRS* の観測領域のほとんどは陸域であるため, 同化利用データを増やす目的で陸域の対流圏チャンネルも同化利用することとした。そのために, 第一推定値をもとにして計算した大気的全透過率を参照して, 地表面の影響を受けないチャンネルを動的に選択する処理を組み込んだ。また, 静止衛星による観測では地球周縁付近のデータは斜視の効果が顕著となり定量的に利用することが難しいため, 静止気象衛星晴天輝度温度データを同化する際に用いている衛星天頂角 62.5 度を閾値として, 地球周縁付近のデータは利用しないこととした。

全球同化解析システムで *GIIRS* L1 データを同化するためには変分法バイアス補正が適切に機能することが必要であり, そのための補正係数を生成する必要がある。*GIIRS* データのための変分法バイアス補正の説明変数には, 層厚 ($Z_{300-850}$, Z_{50-200} , Z_{5-50} , Z_{1-10}), 衛星天頂角, 及び定数を用いることとした。画素バイアス・時間変化バイアスを見積もり補正した 2019 年 9 月の L1 データを用いてその補正係数を得ようと試みたが, 以下のような問題が生じた。第 6.8 図に, 当該期間で同化サイクルを行わずに *GIIRS* L1 データを全球同化した場合の, 変分法バイアス補正係数の時系列を示す。第 6.8 図で特に定数項に着目すると, 時間変化バイアスを補正しない場合では補正係数が解析時刻ごとに振動して安定化しない様子が見られる。一方, 時間変化バイアスを補正することで, その時間変化バイアスを見積もったデータ期間(9月1日から15日)では比較的補正係数は安定して推移し, 時間変化バイアスを適切に補正できていることが分かる。しかし, 9月後半では再び定数項の補正係数が解析時刻ごとに振動する様子が見られ, 時間変化バイアスが適切に補正できていないことを示している。また, これによって *GIIRS* L1 データの時間変化バイアスは日変化する特性をもっており, その大きさが日々変化

することが分かった。そのため, 事前にバイアスを見積もる方法では時間変化バイアスを適切に補正することは難しく, 日々変化するバイアスに動的に対応できる補正方法を考案する必要がある。しかし, 日々の変化傾向を説明できるパラメータを見いだすことは難しく, L1 データを定量的に同化利用する上で大きな障害となっている。



第 6.8 図 *GIIRS* L1 データを全球同化した場合の, 変分法バイアス補正係数(左縦軸)と利用データ数(右縦軸)の時系列。上下図はそれぞれ時間変化バイアス補正を適用しない場合とした場合を表す。2019 年 9 月 1 日から 30 日のチャンネル 20 のデータを同化サイクルを行わずに利用した。THK850, THK200, THK50, THK10 は層厚(それぞれ本文中での $Z_{300-850}$, Z_{50-200} , Z_{5-50} , Z_{1-10} に対応する), COSZN は衛星天頂角, CONST は定数についての補正係数を表す。赤点線は, 画素バイアス・時間変化バイアス補正値を見積もるために使用した従属データ期間を表す。

6.5 課題

前節までに述べたように、*GIIRS* L1 データには時間変化バイアスが存在することが分かっている。配信されている最新の V3 版の L1 データでも時間変化バイアスが存在することを確認しているが、V3 版データではさらにその変化幅が V2 版データよりも顕著になっている。*GIIRS* L1 データを同化利用するためには時間変化バイアスの補正方法を検討する必要があるが、そのバイアス特性は *GIIRS* や衛星本体の設計に起因するところが大きいと考えられ、配信されている L1 データのみを用いて時間変化バイアスの傾向を正確に把握することは、現時点では困難であると結論づけざるを得ない。データ提供元である CMA での放射校正において適切な処置がなされ、バイアスが改善することに期待したい。

一方、*GIIRS* データの取得に関して今後検討が必要となる事項について整理する。CMA から配信されている L1 データは全チャンネルのデータが 1 ファイルに格納されていることもあり、1 日当たりのデータ量は約 10 GByte で、同化利用する衛星観測データとしては最大級のデータ量となっている。データを取得して品質を調査するだけでも相当のストレージ容量が必要となるため、データの取得方法（間引いて取得する等）やアーカイブについては、*GIIRS* をはじめとする GeoHSS データを利用する上で共通の検討課題と言える。データの取得はインターネットを經由して CMA のサーバから直接データをダウンロードしているが、データ転送速度の帯域制限が厳しく、1 時間分の観測データを取得するのに約 40 分の時間を要する。そのため、他衛星データの取得タイミングとの調整が難しく、何らかのトラブルで *GIIRS* データを取得できなかった場合には、過去に遡ってデータを再取得することは難しいのが現状である。同化利用に適したサブチャンネルのみのデータセットが配信されるようになれば状況は少し改善すると考えられる。現業同化利用を

行う場合にはデータ取得が安定していることが前提となるので、大容量データの安定取得についてはさらに工夫が必要と考えられる。

FY-4A は研究・開発段階の衛星ということもあり、*GIIRS* の技術情報はほとんど公開されていない。本章執筆時点では、*GIIRS* L1 データの HDF 形式ファイルの書式について記述している L1 データフォーマットが唯一の *GIIRS* の公式技術文書となっている。本章の冒頭でも述べたとおり、本章の内容の多くは著者が CMA 主催の *GIIRS* に関するワークショップに出席して得た情報など、個別に入手した情報をもとになっており、*GIIRS* データの調査を行うにあたってそれらの情報は非常に有用であった。*GIIRS* データを利用する上では国際会議等での情報収集や CMA をはじめとする関係者とコミュニケーションをとる努力が必要であり、今後もさらに努力する必要があるだろう。

6.6 まとめ

本章では *GIIRS* L1 データの品質調査と全球解析での同化利用の試みについて述べた。*GIIRS* のデータ品質については、同化利用の視点からはまだ十分な品質とは言えず、L1 データを作成する際の放射・分光校正に課題があると考えられる（測器、衛星本体の設計上の問題の可能性も否定できない）。しかし、調査の過程で得られた画素バイアス、時間変化バイアス等の特性は、GeoHSS データの品質管理を検討する上で有効な知見となった。時間変化バイアスの補正は容易ではないと考えられるが、日本の西側領域（上流域）という地理的な特性から *GIIRS* データの潜在的価値が高いことには変わりはなく²⁹、その特性を活かすためにも、より高度なバイアス補正方法を検討する必要がある。

GIIRS は世界初の GeoHSS であることから世界的にもその実観測データへの関心は高く、ECMWF、UKMO 及び米国ウィスコンシン大学は

²⁹ 一方で、FY-4A の静止軌道からは北西太平洋や熱帯域を十分広く観測することができないことから、*GIIRS* は台風や太平洋高気圧の監視には必ずしも向いていないという短所をもつことも認識しておく必要がある。

GIIRS データの品質改善に非常に積極的に協力しており、GIIRS データの利活用方法の検討が世界的に活発化している。今後はこれらの国際的な動向に留意しつつ、GIIRS が搭載される現業衛星 FY-4B の動向にも注目していく必要があると考えられる。

7. まとめと今後に向けて

気象庁は、ひまわり 8・9 号の後継衛星へ搭載するセンサとして、可視赤外イメージャや雷センサと並んで、HSS の可能性を検討している。2018 年度夏から 2019 年度の 2 年弱にわたり、GeoHSS の国内外での技術的開発状況や数値予報へのインパクト、中国の FY-4A 衛星搭載 GIIRS の観測特性などを総合的に調査した。その調査結果を包括的にまとめたのが本稿である。

GeoHSS の検討は、宇宙基本計画、2030 年の科学技術を見据えた気象業務のあり方の提言、Vision for WIGOS in 2040 において、最新技術を用いた衛星観測の必要性・重要性が指摘されていることに基づく。令和 2 年 7 月豪雨など、大きな災害をもたらす線状降水帯に伴う集中豪雨や台風の予測精度向上のためには、気温や水蒸気の鉛直分布の観測が重要であり、GeoHSS は広域・高頻度な鉛直分布観測を実現できる現在導入可能なものとしては唯一の有効な観測手段である。実際、世界の主要な現業宇宙機関においても、GeoHSS の検討・開発が進められている。そのため、中国、欧州、米国における GeoHSS 仕様や実現状況について、詳細に調査した（第 1 章及び第 2 章）。

GeoHSS の数値予報精度へのインパクト調査は、ひまわり 8 号とほぼ同位置に MTG/IRS 相当の HSS を配置すると仮定して、全球並びにメソデータ同化システムを用いた RA-OSSE を実施して行った。GeoHSS 疑似観測データは、ERA5 を疑似真値場として作成し、全球同化システムでは放射伝達計算によって得られた晴天域輝度温度を、メソ同化システムでは ERA5 の晴天域の気温・相対湿度プロファイルと同化した。全球同化実験では、代表的な気象要素の平均場や台風進路予測の改善を、メソ同化実験では、平成 30 年 7 月豪雨において、

暖湿流の強化及びそれに伴う広島付近の豪雨の予測の改善が GeoHSS の同化によってもたらされたことが確認できた。さらに、MTG/IRS は毎時観測が予定されているが、観測頻度と効果の関係を見るために、観測頻度を毎時から 3 時間ごとに落とした実験や、想定した測器精度を考慮した実験も実施した。いずれの実験も予測の改善量は減少したものの、GeoHSS の同化による改善が得られた。これらは、現在の観測システムでは得ることのできない、高頻度・広範囲の気温・水蒸気鉛直情報を GeoHSS が提供したためである。一方、平成 29 年 7 月九州北部豪雨を対象としたメソ同化実験では、GeoHSS は大規模な環境場の予測に対しては早い初期値から実況に近づけるといふ改善をもたらしたものの、線状降水帯の予測に関しては改善が確認できなかった。この要因としては、RA-OSSE の制約（疑似真値場である ERA5 の水平分解能や精度など）に加え、予報モデルや同化システムの課題（分解能や晴天域だけの同化、水物質の取扱い、予報モデル自体の線状降水帯の表現能力など）などいくつかの要因が考えられるため、更なる調査が必要である（第 3 章及び第 5 章）。

FY-4A/GIIRS の観測データの特性・品質を注意深く調べたところ、徐々に品質の向上は確認できたものの、2018 年時点では時間変化バイアス等対応が困難な問題が存在することが判明した。そのため本稿執筆時点では、現業システムでの同化に向けた開発は中断し、今後の更なる品質改良や FY-4B/GIIRS のデータを待つこととした（第 6 章）。

本稿では GeoHSS のインパクトに関する包括的な初期調査を記述したが、詳細かつ専門的な調査研究や、GeoHSS の技術動向調査、GIIRS の品質・利用調査は継続する。例えば、上述した線状降水帯改善に向けた調査や、HSS 観測データをより有効に利用するための同化処理の開発（HSS のチャンネルをより多く利用する方法や、全天候域での輝度温度同化など）は、GeoHSS に限らない同化処理・数値予報システムの高度化にも寄与するため、継続することが重要である。

また本プロジェクトのように、将来の観測システムの効果を全球・メソの同化システムを用いて

総合的に調査したのは、気象庁を始めとした国内の機関で過去に例が無く、将来の観測システムを今後検討する上で重要なステップとなると考える。気象庁の他の観測システムや JAXA 等において検討されている新規の大型衛星、現在民間企業や大学が次々と参画しつつある小型衛星の検討にも、本研究で得られた知見は有効と考えられるので、これらへの応用や関係者との意見交換を進めていきたい。そして、本稿がひまわり 8・9 号後継衛星の整備に向けた技術検討の一助となることを期待する。

付録 メソ同化システムにおける輝度温度同化の試み

メソ解析における GeoHSS の OSSE では、第 5.1 節で述べたように、衛星観測値として輝度温度を直接同化するのではなく、衛星輝度温度から算出（リトリブ）される大気プロファイルを想定し、ERA5 の気温・水蒸気プロファイルを同化することで観測のインパクトを調査した。本節では、輝度温度を直接同化する方針をとらなかった背景について簡単に述べる。

本調査実施時点での現業メソ解析システムは、気象庁非静力学モデル (JMA-NHM; 気象庁予報部, 2003) に基づく非静力学メソ 4 次元変分法 (JNoVA; 気象庁予報部, 2010) を用いている。JNoVA は輝度温度データの直接同化が可能な仕様となっているが、HSS データの同化については十分な検証が行われておらず、標準では同化利用しない設定となっている。本調査にあたり、JNoVA での HSS データの挙動を確認したところ、雲判定等の解析前処理については、全球解析と同様の方法で概ね意図どおりのデータ品質管理が行えることを確認した。全球解析との大きな違いとしては、JNoVA は全球解析よりもモデル高度上端が低いいため、上部成層圏よりも高高度に感度を

もつチャンネルが同化利用できないことである³⁰。また、輝度温度データの直接同化においては特に変分法バイアス補正 (Dee, 2005; Harris and Kelly, 2001) が重要な役割を果たすが、JNoVA では解析処理の中で変分法バイアス補正係数を最適化せず、全球解析で得られた変分法バイアス補正係数をそのまま利用する仕様となっている。

一方、全球解析では解析処理の中で変分法バイアス補正係数を最適化し、後続の同化サイクルでそれを用いて観測値と第一推定値との差に含まれるバイアスを補正する (佐藤, 2007)。HSS データの場合、CO₂ 吸収帯のチャンネルを気温チャンネルとして同化利用する際には、変分法バイアス補正の説明変数として層厚 ($Z_{300-850}$, Z_{50-200} , Z_{5-50} , Z_{1-10}) と定数を用いている。第 A.1 図及び第 A.2 図に、それぞれ Metop-1 衛星搭載 IASI と Suomi-NPP 衛星搭載 CrIS の気温チャンネルについて、変分法バイアス補正係数の約 3 年分の時系列を示す。示した気温チャンネルは対流圏中部から上部の気温及び CO₂ 濃度に感度をもち、感度高度は約 400 hPa である。図からは、定数項の補正係数が 1 年周期で振動しながら年々上昇している傾向³¹がどちらのセンサについても見られる。その値はどちらのセンサについても正で、極大値が現れるのは 4-5 月付近、極小値は 9-10 月付近に現れている。その特徴は、対流圏中層の CO₂ 濃度の季節変動の様子を表したキーリング曲線 (例えば、Keeling *et al.*, 1976) とよく似ている。全球解析でのデータ品質管理では、この定数係数を輝度温度の観測通報値に加算することでバイアス補正を行っており、輝度温度観測値を正の方向に修正している。モデルの気温にバイアス誤差がないと仮定すると、この修正は CO₂ 濃度を下げることに相当する。つまり、輝度温度の第一推定値を計算する際の CO₂ 濃度の値が、実況の CO₂ 濃度よりも小さいことになる。実際、全球解析で固定値として

³⁰ JNoVA では第一推定値の放射計算を行う際にモデル上端よりも高高度に標準大気プロファイルを接続して計算する。そのため、高高度に感度をもちチャンネルの第一推定値は標準大気プロファイルの寄与が大きくなり、バイアス誤差が顕著になる。

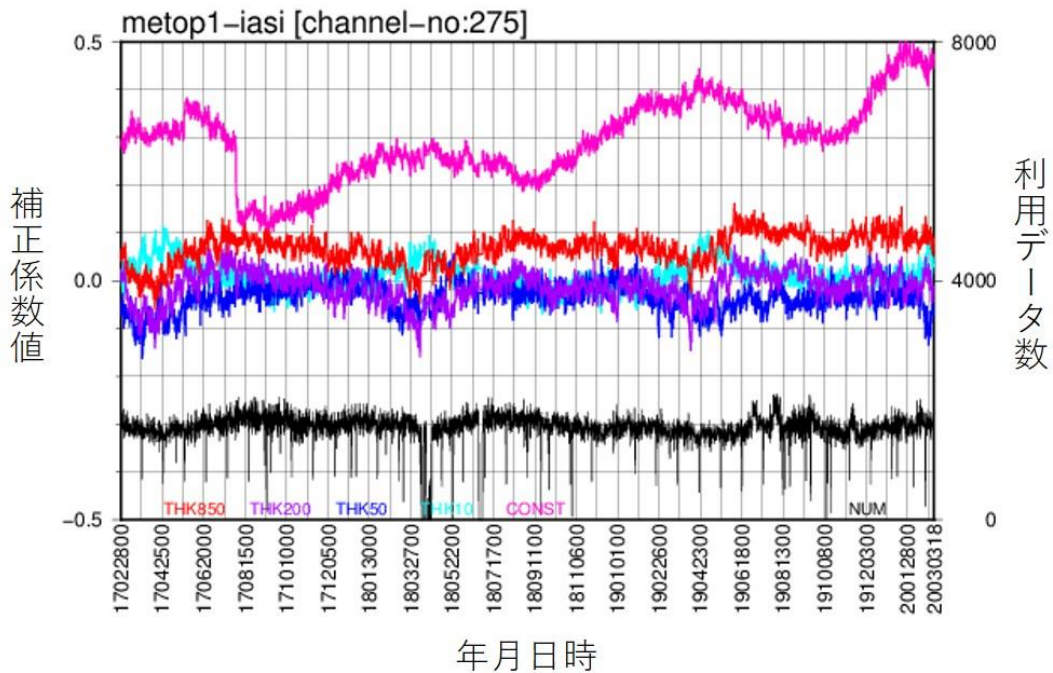
³¹ 所々にみられる補正係数値の不連続なジャンプは、衛星データ校正処理の更新に伴うデータ品質の変化に対応していると考えられる。

与えている CO₂ 濃度の値³²は実況よりも小さく、変分法バイアス補正の定数項は CO₂ 濃度を補正する役割を果たしていると考えられる。層厚の係数についても明瞭な 1 年周期の特徴が見られ、各大気層の CO₂ 濃度の季節変動に対応した動きをしている可能性が高い。補正係数の値は全球代表値なのでその解釈は難しいが、補正係数が CO₂ 濃度の変動に対応して変化することは、Engelen and Bauer (2014) によっても報告されている。

上述のように考察すると、HSS の気温チャンネルの同化利用において、全球解析の補正係数をメソ解析でそのまま用いることは適切ではないと考えられる。少なくとも CO₂ 濃度の値は北・南半球で異なり、また中国大陸の東シナ海沿岸部は人為起源の大きな CO₂ 排出域であることから（例えば、Niwa *et al.*, 2011）、メソ解析領域内の CO₂ 濃度を全球平均の CO₂ 濃度で代表することは難しいと考えられる。実際、全球解析の補正係数をメ

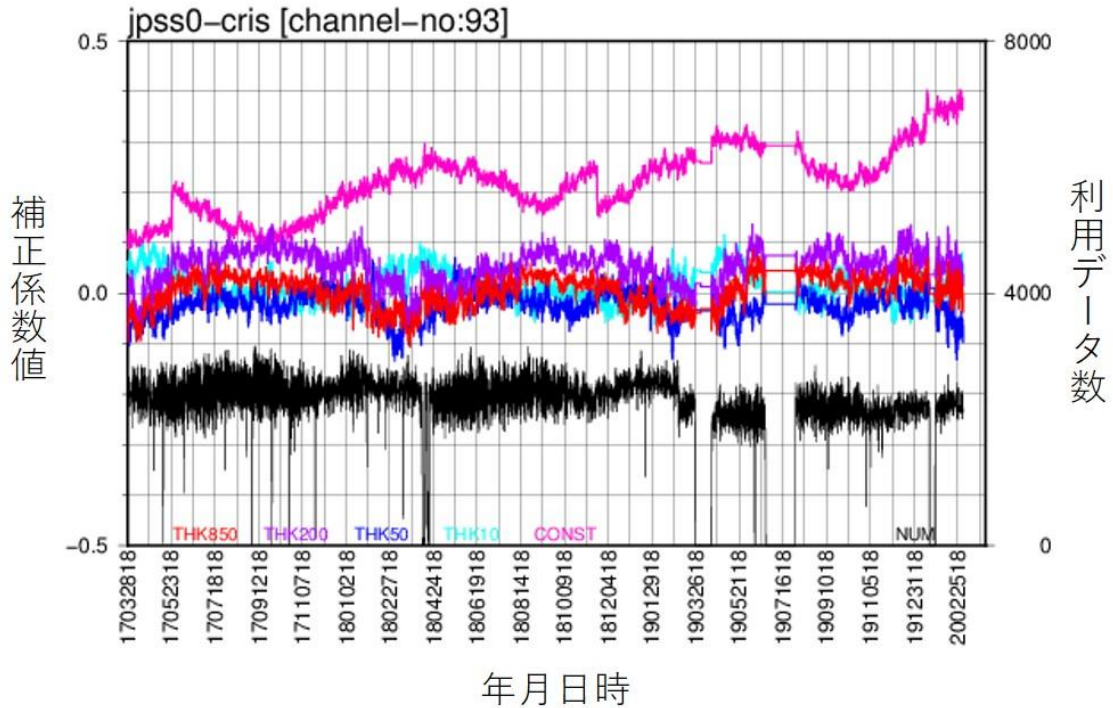
ソ解析 (JNoVA) で使用する実験を試みたが、CO₂ 濃度に起因するバイアスを適切に補正することはできなかった。

この問題を根本的に解決するためには、メソ解析に変分法バイアス補正を導入して解析処理のなかで補正係数を最適化する必要がある。しかし、この処理の実装をひまわり後継衛星の検討という時間制約のある状況下で行うことは難しく、メソ解析での輝度温度同化を見送る判断に至った。なお、2020 年 3 月には非静力学モデル *asuca* に基づいた 4 次元変分法によるメソ解析が現業化され（気象庁予報部, 2020）、メソ解析での変分法バイアス補正による補正係数の最適化が可能となった。そのため、本節で述べた問題の解決の糸口は開かれ、GeoHSS のデータを輝度温度で直接同化することによるインパクト調査の実施が可能となっている。



第 A.1 図 変分法バイアス補正係数 (左縦軸) と利用データ数 (右縦軸) の時系列: Metop-1 衛星搭載 IASI のチャンネル 275 の場合。2017 年 2 月 28 日から 2020 年 3 月 3 日までの約 3 年分のデータを示している。THK850, THK200, THK50, THK10 は層厚 (それぞれ本文中での $Z_{300-850}$, Z_{50-200} , Z_{5-50} , Z_{1-10} に対応する), CONST は定数についての補正係数を表す。

³² 気圧高度 400 hPa の CO₂ 濃度は、IASI では約 383 ppmv, CrIS では約 398 ppmv を固定値として設定している。



第 A.2 図 第 A.1 図と同様。ただし Suomi-NPP 衛星搭載 CrIS のチャンネル 93 の場合で、2017 年 3 月 28 日から 2020 年 2 月 25 日までの約 3 年分のデータを示している。

参考文献

○第 1 章

Bessho, K., K. Date, M. Hayashi, A. Ikeda, T. Imai, H. Inoue, Y. Kumagai, T. Miyakawa, H. Murata, T. Ohno, A. Okuyama, R. Oyama, Y. Sasaki, Y. Shimazu, K. Shimoji, Y. Sumida, M. Suzuki, H. Taniguchi, H. Tsuchiyama, D. Uesawa, H. Yokota, and R. Yoshida (2016) : An Introduction to Himawari-8/9—Japan’s New-Generation Geostationary Meteorological Satellites. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 151-183. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-009>.

Kato, T. (2020) : Quasi-stationary Band-Shaped Precipitation Systems, Named “Senjo-Kousuitai”, Causing Localized Heavy Rainfall in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 485-509. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-029>.

Okamoto, K., H. Owada, T. Fujita, M. Kazumori, M. Otsuka, H. Seko, Y. Ota, N. Uekiyo, H. Ishimoto, M. Hayashi, H. Ishida, A. Ando, M. Takahashi, K. Bessho, and H. Yokota (2020) :

Assessment of the Potential Impact of a Hyperspectral Infrared Sounder on the Himawari Follow-On Geostationary Satellite. *SOLA*, **16**, 162-168. <https://doi.org/10.2151/sola.2020-028>.

○第 2 章

Aminou, D. M., D. Lamarre, H. Stark, P. Blythe, G. Fowler, S. Gigli, R. Stuhlmann, and S. Rota (2009) : Meteosat Third Generation (MTG) Status of Space Segment definition. *Proceedings of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Bath, UK, Sept. 21-25, 2009.

August, T. (2019) : Summary on the leading entities of European regional NWP consortia, as well as NOAA, to know about their plans to assimilate L2 products. 8th IRS Mission Advisory Group (IRS-MAG), Darmstadt, Germany, 18-19 Nov. 2019.

August, T., T. Hultberg, and C. Goukenleuque (2019) : Feedback of the L2 studies – interaction with

- the user community. 8th IRS Mission Advisory Group (IRS-MAG), Darmstadt, Germany, 18-19 Nov. 2019.
- Bensi, P. (2005) : Status of Meteosat Third Generation (MTG) Pre-Phase A System Architecture Studies. DLR and DWD National User-Workshop on Future Operational Earth Observation Missions, Walberberg, Germany, 7-9 Nov. 2005.
https://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Resources/dokumente/RE/V06-Status_of_MTG_Pre-Phase_A.pdf, accessed 2021-02-21.
- Borde, R., M. Carranza, O. Hautecoeur, and K. Barbieux (2019) : Winds of Change for Future Operational AMV at EUMETSAT. *Remote Sens.*, **11**, 2111.
<https://doi.org/10.3390/rs11182111>.
- CMA (2020) : CMA Progress in Hyper-spectral Sounding. Plenary Session of the 48th Meeting of the Coordination Group for Meteorological Satellites, 25-26 Aug. 2020.
- Coppens, D., B. Theodore, T. August, T. Hultberg, C. Goukenleuque, and J. Grandell (2019) : MTG-IRS: Scientific Improvements For a User-Friendly Mission. The 22nd International TOVS Study Conference (ITSC-22), Saint-Sauveur, Québec, 31 Oct. -6 Nov. 2019.
<http://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/itsc/itsc22/presentations/5%20Nov/14.01.coppens.pdf>, accessed 2021-02-21.
- EUMETSAT (2019) : IASI Level 1: Product Guide. EUMETSAT website.
- EUMETSAT (2018a) : MTG End-User Requirements Document. EUMETSAT website.
- EUMETSAT (2018b) : MTG Products Distribution Baseline. EUMETSAT website.
- 深堀正志 (1999) : 光を用いた受動型測器. 気象研究ノート, **194**, 183-205.
- Hewison, T. J., D. R. Doelling, C. Lukashin, D. Tobin, V. O. John, S. Joro, and B. Bojkov (2020) : Extending the Global Space-Based Inter-Calibration System (GSICS) to Tie Satellite Radiances to an Absolute Scale. *Remote Sens.*, **12**, 1782.
<https://doi.org/10.3390/rs12111782>.
- Hilton, F., R. Armante, T. August, C. Barnet, A. Bouchard, C. Camy-Peyret, V. Capelle, L. Clarisse, C. Clerbaux, P.-F. Coheur, A. Collard, C. Crevoisier, G. Dufour, D. Edwards, F. Faijan, N. Fourrié, A. Gambacorta, M. Goldberg, V. Guidard, D. Hurtmans, S. Illingworth, N. Jacquinet-Husson, T. Kerzenmacher, D. Klaes, L. Lavanant, G. Masiello, M. Matricardi, A. McNally, S. Newman, E. Pavelin, S. Payan, E. Péquignot, S. Peyridieu, T. Phulpin, J. Remedios, P. Schlüssel, C. Serio, L. Strow, C. Stubenrauch, J. Taylor, D. Tobin, W. Wolf, and D. Zhou (2012) : Hyperspectral Earth Observation from IASI: Five Years of Accomplishments. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 347-370.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00027.1>.
- GAO (2006) : Geostationary Operational Environmental Satellites: Additional Action Needed to Incorporate Lessons Learned from Other Satellite Programs.
<https://www.gao.gov/products/GAO-06-1129T>, accessed 2021-02-21.
- Glumb, R. J. and P. C. Griffith (2019) : Agile GEO IR Hyperspectral Sounder. 2019 Joint Satellite Conference, Boston, MA, 28 Sept. - 04 Oct. 2019.
<https://ams.confex.com/ams/JOINTSATMET/videogateway.cgi/id/505074?recordingid=505074>, accessed 2021-02-21.
- Goldberg, M. D., H. Kilcoyne, H. Cikanek, and A. Mehta (2013) : Joint Polar Satellite System: The United States next generation civilian polar-orbiting environmental satellite system. *J. Geophys. Res.*, **118**, 463-475.
<https://doi.org/10.1002/2013JD020389>.
- Kazumori, M. (2018) : Assimilation of Himawari-8

- Clear Sky Radiance Data in JMA's Global and Mesoscale NWP Systems. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96B**, 173-192.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-037>.
- Menzel, W. P., T. J. Schmit, P. Zhang, and J. Li (2018) : Satellite-Based Atmospheric Infrared Sounder Development and Applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 583-603.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0293.1>.
- NOAA (2018): Joint Polar Satellite System (JPSS) Cross Track Infrared Sounder (CrIS) Sensor Data Records (SDR) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Full Spectral Resolution. NOAA/NESDIS/STAR website.
- Revercomb, H. (2012): Update on GEO Hyperspectral Sounders: GIFTS and GeoMetWatch "Storm". 5th Meeting THORPEX DAOS, Wisconsin, MA, 19-20 Sept. 2012.
- ROSCOSMOS and ROSHYDROMET (2020): Russian FTIR Spectrometer (IKFS-2) for Meteorological Satellites: Flight Experience and Further Development. Plenary Session of the 48th Meeting of the Coordination Group for Meteorological Satellites, 25–26 Aug. 2020.
- Sullivan, P., F. Gallagher, S. Boukabara, D. Lindsey, and E. Grigsby (2020): GEO-XO Introduction. NOAA-ABOM-JMA Technical Interchange Meeting,
https://cimss.ssec.wisc.edu/training/TIMApril2020/GEO-XO_Intro_Lindsey_6apr2020.pptx, accessed 2021-02-21.
- Susskind, J. (2011) : Results of NASA/NOAA HES Trade Studies. Satellite Hyperspectral Sensor Workshop, Miami, FL, 29-31 Mar. 2011.
<https://www.star.nesdis.noaa.gov/star/documents/meetings/Hyper2011/dayTwo/0900Q4-Susskind.pdf>, accessed 2021-02-21.
- Theodore. B. (2019): Heterogeneity with imager mode. 8th IRS Mission Advisory Group (IRS-MAG), Darmstadt, Germany, 18–19 Nov. 2019.
- Tjemkes, S. (2006) : Meteosat Third Generation (MTG) IRS. 3rd Annual Advance High Spectral Resolution Infrared Observations Workshop, Madison, WI, 26-28 Apr. 2006.
https://www.ssec.wisc.edu/hsr/meetings/2006/Presentations/Day%203%20M/MTG-IRS.StephenTjemkes_final.pdf, accessed 2021-02-21.
- Tobin, D., H. Revercomb, R. Knuteson, J. Taylor, F. Best, L. Borg, D. DeSlover, G. Martin, H. Buijs, M. Esplin, R. Glumb, Y. Han, D. Mooney, J. Predina, L. Strow, L. Suwinski, and L. Wang (2013) : Suomi-NPP CrIS radiometric calibration uncertainty. *J. Geophys. Res.*, **118**, 589-600.
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50809>.
- Yang, J. Z. Zhang, C. Wei, F. Lu, and Q. Guo (2017) : Introducing the New Generation of Chinese Geostationary Weather Satellites, Fengyun-4. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1637-1658.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0065.1>.
- Zhang, P., Q. Lu, X. Hu, S. Gu, L. Yang, M. Min, L. Chen, N. Xu, L. Sun, W. Bai, G. Ma, and D. Xian (2019) : Latest Progress of the Chinese Meteorological Satellite Program and Core Data Processing Technologies. *Adv. Atmos. Sci.*, **36**, 1027-1045.

○第 3 章

- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS).
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>, accessed 2021-02-21.
- Hersbach, H, B. Bell, P. Berrisford, *et al.* (2020) : The ERA5 global reanalysis. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- 石橋俊之 (2013) : 観測システムシミュレーション実験 (OSSE). *天気*, **60**, 831-833.
- Marseille, G. J., A. Stoffelen, and J. Barkmeijer

- (2008) : Sensitivity Observing System Experiment (SOSE) - a new effective NWP - based tool in designing the global observing system. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **60**, 216-233.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00288.x>.
- Okamoto, K., T. Ishibashi, S. Ishii, P. Baron, K. Gamo, T. Y. Tanaka, K. Yamashita, and T. Kubota (2018) : Feasibility Study for Future Space-Borne Coherent Doppler Wind Lidar, Part 3: Impact Assessment Using Sensitivity Observing System Simulation Experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 179-199.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-024>.
- Okamoto, K., H. Owada, T. Fujita, M. Kazumori, M. Otsuka, H. Seko, Y. Ota, N. Uekiyo, H. Ishimoto, M. Hayashi, H. Ishida, A. Ando, M. Takahashi, K. Bessho, and H. Yokota (2020) : Assessment of the Potential Impact of a Hyperspectral Infrared Sounder on the Himawari Follow-On Geostationary Satellite. *SOLA*, **16**, 162-168.
<https://doi.org/10.2151/sola.2020-028>.
- Saunders, R., J. Hocking, E. Turner, P. Rayer, D. Rundle, P. Brunel, J. Vidot, P. Roquet, M. Matricardi, A. Geer, N. Bormann, and C. Lupu (2018) : An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geosci. Model Dev.*, **11**, 2717-2737.
<https://doi.org/10.5194/gmd-11-2717-2018>.
- 第4章
- Aminou, D. M., D. Lamarre, H. Stark, P. Blythe, G. Fowler, S. Gigli, R. Stuhlmann, and S. Rota (2009) : Meteosat Third Generation (MTG) status of space segment definition. *Proceedings of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Bath, UK, Sept. 21-25, 2009.
- Duruiseau, F., P. Chambon, S. Guedj, V. Guidard, N. Fourri , F. Taillefer, P. Brousseau, J.-F. Mahfouf, and R. Roca (2017) : Investigating the potential benefit to a mesoscale NWP model of a microwave sounder on board a geostationary satellite. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2104-2115.
<https://doi.org/10.1002/qj.3070>.
- Enomoto, T. (2019) : Influence of the Track Forecast of Typhoon Prapiroon on the Heavy Rainfall in Western Japan in July 2018. *SOLA*, **15A**, 66-71.
<https://doi.org/10.2151/sola.15A-012>.
- 岡垣晶 (2015) : ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第61号, 気象庁予報部, 43-46.
- 岡本幸三 (2011) : ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第57号, 気象庁予報部, 25-36.
- Okamoto, K., H. Owada, T. Fujita, M. Kazumori, M. Otsuka, H. Seko, Y. Ota, N. Uekiyo, H. Ishimoto, M. Hayashi, H. Ishida, A. Ando, M. Takahashi, K. Bessho, and H. Yokota (2020) : Assessment of the Potential Impact of a Hyperspectral Infrared Sounder on the Himawari Follow-On Geostationary Satellite. *SOLA*, **16**, 162-168.
<https://doi.org/10.2151/sola.2020-028>.
- Peubey, C. and A. P. McNally (2009) : Characterization of the impact of geostationary clear-sky radiances on wind analyses in a 4D-Var context. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1863-1876.
<https://doi.org/10.1002/qj.500>.
- 第5章
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki (2005) : A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: formulation and preliminary results. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3465-3475.
<https://doi.org/10.1256/qj.05.132>.
- Ishida, J., C. Muroi, and Y. Aikawa (2009) : Development of a New Dynamical Core for the Nonhydrostatic Model. *CAS/JSC WGNE Res.*

- Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **39**, 05.09-05.10.
- Ishida, J., C. Muroi, K. Kawano, and Y. Kitamura (2010) : Development of a New Non-hydrostatic Model ASUCA at JMA. *CAS/JSC WGN Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **40**, 05.11-05.12.
- Japan Meteorological Agency (2019) : Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. *Appendix to WMO Technical Progress Report on The Global Data Processing and Forecasting SYSTEM (GDPFS) and Numerical Weather Prediction (NWP) Research*, Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 229 pp.
<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/index.htm>, accessed 2021-02-21.
- Jones, T. A., S. Koch, and Z. Li (2017) : Assimilating synthetic hyperspectral sounder temperature and humidity retrievals to improve severe weather forecasts. *Atmos. Res.*, **186**, 9-25.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.004>.
- 欠畑賢之, 白山洋平 (2018) : 事例調査 : 平成 29 年 7 月九州北部豪雨. 平成 30 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 48-53.
- Kawano, T. and R. Kawamura (2020) : Genesis and Maintenance Processes of a Quasi-stationary Convective Band that Produced Record-Breaking Precipitation in Northern Kyushu, Japan on 5 July 2017. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 673-690.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-033>.
- 気象庁 (2018) : 平成 29 年 7 月九州北部豪雨及び 6 月 7 日から 7 月 27 日までの梅雨前線等による大雨等. 災害時自然現象報告書 2018 年第 1 号, 気象庁, 230 pp.
- 気象庁 (2019) : 平成 30 年 7 月豪雨及び 5 月 20 日から 7 月 10 日までの梅雨前線等による大雨等. 災害時自然現象報告書 2019 年第 2 号, 気象庁, 328 pp.
- 気象研究所 (2017) : 平成 29 年 7 月 5-6 日の福岡県・大分県での大雨の発生要因について. 報道発表資料, 平成 29 年 7 月 14 日, 気象研究所, 8 pp.
- Li, Z., J. Li, P. Wang, A. Lim, J. Li, T. J. Schmit, R. Atlas, S.-A. Boukabara, and R. N. Hoffman (2018) : Value-added Impact of Geostationary Hyperspectral Infrared Sounders on Local Severe Storm Forecasts—via a Quick Regional OSSE. *Adv. Atmos. Sci.*, **35**(10), 1217-1230.
<https://doi.org/10.1007/s00376-018-8036-3>.
- Okamoto, K, H. Owada, T. Fujita, M. Kazumori, M. Otsuka, H. Seko, Y. Ota, N. Uekiyo, H. Ishimoto, M. Hayashi, H. Ishida, A. Ando, M. Takahashi, K. Bessho, and H. Yokota (2020) : Assessment of the Potential Impact of a Hyperspectral Infrared Sounder on the Himawari Follow-On Geostationary Satellite. *SOLA*, **16**, 162–168.
<https://doi.org/10.2151/sola.2020-028>.
- Onogi, K. (1998) : A Data Quality Control Method Using Forecasted Horizontal Gradient and Tendency in a NWP System: Dynamic QC. *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 497-516.
https://doi.org/10.2151/jmsj1965.76.4_497.
- 大和田浩美 (2007) : ATOVS リトリーブデータの同化. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 71-74.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki (2006) : The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298.
<https://doi.org/10.1175/MWR3120.1>.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda (2007) : Nonhydrostatic Atmospheric Models and Operational Development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271-304.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.85B.271>.
- 竹見哲也 (2018) : 平成 29 年 7 月九州北部豪雨の

- 発生要因と予測可能性. 季刊: 消防防災の科学, **132**, 17-21.
- 第6章
- Barnet, C. D., J. M. Blaisdell, and J. Susskind (2000) : Practical methods for rapid and accurate computation of interferometric spectra for remote sensing applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **38**, 169-183.
<https://doi.org/10.1109/36.823910>.
- Di, D., J. Li, W. Han, W. Bai, C. Wu, and W. P. Menzel (2018) : Enhancing the Fast Radiative Transfer Model for FengYun-4 GIIRS by Using Local Training Profiles. *J. Geophys. Res.*, **123**, 12583-12596.
<https://doi.org/10.1029/2018JD029089>.
- 亀川訓男, 計盛正博 (2017) : 全球解析における Suomi-NPP/CrIS 輝度温度データの利用開始. 数値予報研修テキスト第 50 巻, 気象庁予報部, 73-74.
- Kan, W., P. Dong, Z. Zhang, and S. Ding (2020): Development and application of ARMS fast transmittance model for GIIRS data. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **251**.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107025>.
- 岡垣晶 (2015) : ハイパースペクトル赤外サウンダ. 数値予報課報告・別冊第 61 号, 気象庁予報部, 43-46.
- 佐藤芳昭 (2007) : 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 171-175.
- Saunders, R., J. Hocking, E. Turner, P. Rayer, D. Rundle, P. Brunel, J. Vidot, P. Roquet, M. Matricardi, A. Geer, N. Bormann, and C. Lupu (2018) : An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geosci. Model Dev.*, **11**, 2717-2737.
<https://doi.org/10.5194/gmd-11-2717-2018>.
- Yang, J., Z. Zhang, C. Wei, F. Lu, and Q. Guo (2017) : Introducing the New Generation of Chinese Geostationary Weather Satellites, Fengyun-4. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1637-1658.
<https://doi.org/10.1175/bams-d-16-0065.1>.
- Yin, R., W. Han, Z. Gao, and D. Di (2020) : The evaluation of FY4A's Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) long-wave temperature sounding channels using the GRAPES global 4D-Var. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1459-1476.
<https://doi.org/10.1002/qj.3746>.
- 付録
- Dee, D. P. (2005) : Bias and data assimilation. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3323-3343.
<https://doi.org/10.1256/qj.05.137>.
- Engelen, R. J. and P. Bauer (2014) : The use of variable CO₂ in the data assimilation of AIRS and IASI radiances. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 958-965.
<https://doi.org/10.1002/qj.919>.
- Harris, B. A. and G. Kelly (2001) : A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 1453-1468.
<https://doi.org/10.1002/qj.49712757418>.
- Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. E. Bainbridge, C. A. Ekdahl Jr., P. R. Guenther, L. S. Waterman, and J. F. S. Chin (1976): Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*, **28**, 538-551.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v28i6.11322>.
- 気象庁予報部 (2003) : 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194 pp.
- 気象庁予報部 (2010) : 非静力学メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 106 pp.
- 気象庁予報部 (2020) : メソスケール気象予測の現状と展望. 数値予報課報告・別冊第 66 号, 気象庁予報部, 165 pp.
- Niwa, Y., P. K. Patra, Y. Sawa, T. Machida, H. Matsueda, D. Belikov, T. Maki, M. Ikegami, R. Imasu, S. Maksyutov, T. Oda, M. Satoh, and M. Takigawa (2011) : Three-dimensional variations of atmospheric CO₂: aircraft measurements and multi-transport model

simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 13359-13375.

<https://doi.org/10.5194/acp-11-13359-2011>.

佐藤芳昭 (2007) : 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・別冊第 53 号, 気象庁予報部, 171-175.

略語一覧

- ABI : Advanced Baseline Imager (改良型ベースラインイメージャ. GOES-R シリーズの衛星搭載の可視赤外イメージャ)
- ABX : ABI-Based eXtension to hyperspectral sounding (ハイパースペクトルサウンダへの ABI ベースの拡張. ABI の光学システムを再利用した HSS)
- ADEOS : Advanced Earth Observing Satellite (NASDA (現 JAXA) の地球観測衛星)
- AGRI : Advanced Geostationary Radiation Imager (改良型静止放射イメージャ. FY-4 シリーズの衛星搭載の可視赤外イメージャ)
- AHI : Advanced Himawari Imager (改良型ひまわりイメージャ. 静止気象衛星ひまわり 8 号, 9 号に搭載の可視赤外イメージャ)
- AIRS : Atmospheric Infrared Sounder (大気赤外サウンダ. Aqua 衛星搭載の HSS)
- Aqua : (NASA の地球観測衛星)
- asuca : Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere (気象庁の次世代非静力学モデル)
- ATOVS : Advanced TOVS (改良型 TOVS. 15 号以降の NOAA 衛星, Metop 衛星に搭載)
- BI : Bias Score (バイアスコア)
- CGMS : Coordination Group for Meteorological Satellites (気象衛星調整会議)
- CMA : China Meteorological Administration (中国気象局)
- CrIS : Cross-track Infrared Sounder (クロストラック赤外サウンダ. Suomi-NPP 衛星, 20 号以降の NOAA 衛星搭載の HSS)
- DCS : Data Collection System (データ収集システム)
- ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (欧州中期予報センター)
- Electro-L : (ROSHYDROMET の静止気象衛星)
- ERA5 : the fifth generation ECMWF Reanalysis (第 5 世代 ECMWF 再解析)
- EUMETSAT : European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (欧州気象衛星開発機構)

- FCI : Flexible Combined Imager (フレキシブル複合イメージャ. MTG-I 衛星搭載の可視赤外イメージャ)
- FT : Forecast Time (予測時間)
- FTS : Fourier Transform Spectrometer (フーリエ変換分光計)
- FY : FengYun (中国の気象衛星「風雲」. 極軌道衛星には奇数番号が, 静止衛星には偶数番号が割り振られている)
- FY-2 : FengYun-2 (中国の静止気象衛星「風雲 2 号」. FY-2A から FY-2H までの衛星群を指す. 本稿では FY-2 シリーズと記す)
- FY-3 : FengYun-3 (中国の極軌道気象衛星「風雲 3 号」. FY-3A 衛星から FY-3I 衛星までの衛星群を指す. 本稿では FY-3 シリーズと記す)
- FY-3D : FengYun-3D (FY-3 シリーズの 4 番目の衛星. 2017 年に打ち上げ)
- FY-4 : FengYun-4 (中国の静止気象衛星「風雲 4 号」. FY-4A から FY-4G までの衛星群を指す. 本稿では FY-4 シリーズと記す)
- GEO : Geostationary Orbit (静止軌道)
- GeoHSS : Geostationary HSS (静止衛星搭載の HSS の略語として本稿で使用)
- GEO-KOMPSAT : Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite (韓国の静止気象衛星)
- GEOSAR : Geostationary Orbiting Search And Rescue (静止軌道による捜索救難)
- GEO-XO : Geostationary and Extended Orbits (米国の衛星計画. 本計画の下で GOES-R シリーズに続く衛星計画が検討されている)
- GIFTS : Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer (静止赤外フーリエ分光計. NASA が計画していた HSS)
- GIIRS : Geostationary Interferometric InfraRed Sounder (静止・干渉型赤外サウンダ. FY-4 シリーズの衛星搭載の HSS)
- GMS : Geostationary Meteorological Satellite (静止気象衛星. 初号機から 5 号までのひまわり)
- GOES : Geostationary Operational Environmental Satellite (米国の静止現業環境衛星)
- GOES-R : Geostationary Operational Environmental Satellite-R (気象衛星ひまわり 8 号, 9 号と同クラスの米国の静止気象衛星. 打ち上げ後に GOES-16 となった. GOES-R シリーズは同型衛星の R, S, T, U のことを指す)
- GOSAT : Greenhouse gases Observing SATellite (JAXA の温室効果ガス観測衛星)
- GRAPES : Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System (中国気象局の全球・領域解析予報システム)
- HDF : Hierarchical Data Format (階層的データ形式)
- HES : Hyperspectral Environmental Suite (ハイパースペクトル環境センサ. 米国が GOES-R シリーズで計画していた HSS)
- HIRAS : High-Spectral Infrared Atmospheric Sounder (高スペクトル赤外大気サウンダ. FY-3D 衛星搭載の HSS)
- HSS : Hyper Spectral infrared Sounder (ハイパースペクトル赤外サウンダの略語として本稿で使用. 和訳は「超多波長チャンネル赤外鉛直探査計」)
- IASI : Infrared Atmospheric Sounding Inter-ferometer (赤外大気探査干渉計. Metop 衛星搭載の HSS)
- IKFS-2 : Infrared Fourier-spectrometer 2 (赤外フーリエ分光計 2. Meteor-M 衛星搭載の HSS)
- IMG : Interferometric Monitor for Greenhouse Gases (干渉型温室効果ガスモニタ. ADEOS 衛星搭載の HSS)
- INSAT : Indian National Satellite (インドの静止気象衛星)
- IRS : Infrared Sounder (赤外サウンダ. MTG-S 衛星搭載の HSS)
- JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency (宇宙航空研究開発機構)
- JMA : Japan Meteorological Agency (気象庁)
- JMA-NHM : JMA Non-Hydrostatic Model (気象庁非静力学モデル)
- JNoVA : JMA Non-hydrostatic model based Variational data Assimilation system (気象庁非静力学モデルに基づいた変分法データ同化システム)

- JPSS : Joint Polar Satellite System (米国の現業極軌道衛星. 初号機は打ち上げ後に NOAA-20 となった. 計 4 機が計画されている)
- LAC : Local Area Coverage (MTG 計画で定義されるフルディスクを 4 分割した領域)
- LEO : Low Earth Orbit (低軌道)
- LI : Lightning Imager (雷イメージャ. MTG-I 衛星搭載)
- LMI : Lightning Mapping Imager (雷マッピングイメージャ. FY-4 シリーズの衛星搭載)
- LWIR : Long-Wave Infrared (長波長赤外)
- Meteor-M: (ROSHYDROMET の極軌道気象衛星)
- Metop : Meteorological Operational Satellite (EUMETSAT の極軌道気象現業衛星)
- MSG : Meteosat Second Generation (EUMETSAT の第 2 世代静止気象衛星)
- MTG : Meteosat Third Generation (EUMETSAT の第 3 世代静止気象衛星)
- MTG-I : Meteosat Third Generation-Imaging mission satellite (EUMETSAT の第 3 世代静止気象衛星によるイメージングミッション衛星)
- MTG-S : Meteosat Third Generation-Sounding mission satellite (EUMETSAT の第 3 世代静止気象衛星による探査計ミッション衛星)
- MTSAT : Multi-functional Transport Satellite (運輸多目的衛星)
- MTSAT-1R : Multi-functional Transport Satellite-1 Replacement (運輸多目的衛星新 1 号)
- MWIR : Mid-Wave Infrared (中波長赤外)
- NAPEX : Numerical Analysis and Prediction Experiment system (数値解析予報実験システム)
- NASA : National Aeronautics and Space Administration (米国航空宇宙局)
- NASDA : National Space Development Agency of Japan (宇宙開発事業団. JAXA の前身)
- NCEP : National Centers for Environmental Prediction (米国環境予測センター)
- NEdR : Noise-Equivalent differential Radiance (ノイズ等価放射輝度差)
- NEdT : Noise-Equivalent differential Temperature (ノイズ等価輝度温度差)
- NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration (米国海洋大気庁, 又は米国海洋大気庁が運用する現業極軌道衛星)
- NR : Nature Run (真値 (場))
- NWP-SAF : Numerical Weather Prediction - Satellite Application Facility (衛星観測データを数値予報で利用するための研究開発機関)
- OSE : Observing System Experiment (観測システム実験)
- OSSE : Observing System Simulation Experiment (観測システムシミュレーション実験)
- QC : Quality Control (品質管理)
- RMSE : Root Mean Square Error (平方根平均二乗誤差)
- ROSHYDROMET : Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia (ロシア水文気象局)
- RTTOV : Radiative Transfer for TOVS (EUMETSAT の NWP-SAF で開発されている高速放射伝達モデル)
- SEVIRI : Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (スピン走査式可視赤外イメージャ. MSG 衛星搭載の可視赤外イメージャ)
- SOSE : Sensitivity Observing System Experiment (感度観測システム実験)
- Suomi-NPP : Suomi National Polar-orbiting Partnership (米国海洋大気庁が運用する極軌道衛星)
- SWIR : Short-Wave Infrared (短波長赤外)
- TANSO-FTS-2 : Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation (TANSO)- Fourier Transform Spectrometer-2 (温室効果ガス観測フーリエ変換分光計. GOSAT-2 衛星搭載の HSS)
- TIROS : Television and Infrared Observation Satellite (可視赤外観測衛星)
- TOVS : TIROS Operational Vertical Sounder (TIROS 実用型鉛直サウンダ. 14 号以前の NOAA 衛星に搭載)
- TS : Threat Score (スレットスコア)

UKMO : United Kingdom Meteorological Office (英
国気象局)

UTC : Coordinated Universal Time (協定世界時)

UVN : Ultraviolet, Visible and Near-Infrared (紫外・
可視・近赤外分光計. MTG-S 衛星搭載)

WIGOS : WMO Integrated Global Observing System
(WMO 統合全球観測システム)

WMO : World Meteorological Organization (世界気
象機関)