

全球衛星搭載センサー相互校正システム (GSICS) の紹介と  
 ひまわり 8 号可視赤外バンドの校正・評価  
**Introduction to the Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS) and  
 Calibration/Validation of the Himawari-8/AHI Visible and Infrared Bands**

高橋 昌也\*                      奥山 新\*  
 TAKAHASHI Masaya            OKUYAMA Arata

**Abstract**

The Japan Meteorological Agency's new-generation Himawari-8 geostationary meteorological satellite began operation in July 2015 after the completion of in-orbit testing and overall system checking. Himawari-8 features the new Advanced Himawari Imager (AHI), which has 16 bands and double the spatial resolution of its MTSAT-series predecessor satellites. To leverage the full potential of the imager, precise and stable radiometric calibration is critical. On-board calibration of all 16 AHI bands is validated based on inter-calibration and vicarious calibration approaches developed within the framework of the Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS) in conjunction with the Atmosphere and Ocean Research Institute at the University of Tokyo. Estimated calibration biases for infrared bands with the GSICS standard inter-calibration method are less than 0.3 K for standard scenes. Radiance biases for visible and near-infrared bands were reduced via calibration coefficient updates based on solar diffuser observation, but biases of around 5% still remain in bands 5 and 6 in addition to sensor degradation of around 0.5% per year in bands 1 to 4.

**要 旨**

2015 年 7 月 7 日に運用を開始した静止気象衛星「ひまわり 8 号」には、7 号までの「ひまわり」と比べて、運用年数や観測バンド数、時空間分解能等の性能が大幅に向上された可視赤外放射計 Advanced Himawari Imager (AHI) が搭載されている。AHI の機能を最大限に引き出すためには、高精度かつ安定した校正の実現が欠かせない。AHI の全 16 バンドに対して、全球衛星搭載センサー相互校正システム (GSICS) や東京大学大気海洋研究所との共同研究の枠組みで開発されてきた相互校正手法及び代替校正手法を適用し、機上校正の結果を評価した。相互校正により見積もられた AHI 赤外バンドの輝度温度バイアスは、典型的な観測条件下で 0.3 K 以下であった。可視近赤外バンドについては、太陽光拡散板を用いた太陽光観測に基づいて校正係数を更新した結果、放射輝度バイアスは軽減されたものの、バンド 5 及び 6 では 5%近いバイアスが残っている。また、バンド 1 から 4 では年間約 0.5%のセンサー感度劣化が確認された。

1. はじめに

近年、気象衛星による観測データは、大気の実況監視や数値天気予報におけるデータ同化での利用に加えて、ナウキャストや気候監視・研究の分野における利用も盛んに行われている。観測データの定量的な利用、例えば気候変動監視を目的として複数の衛星観測データを数十年といった時間スケールで用いる際には、センサー感度の変化やセンサー特性の違いに起因する変動が適切に考慮された、継ぎ目の無い観測データセットが要求される。

気象衛星に搭載された可視赤外イメージャ (放射計) は、地球からの放射をイメージャ内部の光学系を經由して検出素子へ導き、観測放射量に対応する素子の出力電圧をカウント値として出力する。衛星観測データを物理量として扱うためには、カウント値から放射強度 (放射輝度) への変換が必要になり、これを放射量校正 (以下、校正) と呼ぶ。2015 年 7 月 7 日に運用を開始した静止気象衛星「ひまわり 8 号」には、7 号までの「ひまわり」と比べて、運用年数や観測バンド数、時空間分解能等の性能が大幅に向上した可視赤外放射計 Advanced Himawari

\*気象衛星センターデータ処理部システム管理課  
 (2016 年 9 月 2 日受領、2016 年 11 月 21 日受理)

Imager (AHI) が搭載されている (Bessho et al. 2016, 尾関・佐々木 2016)。AHI では校正に関する機能も従前から大幅に強化され、可視・近赤外バンド (バンド 1-6) と赤外バンド (バンド 7-16) の機上校正源として太陽光拡散板と黒体が AHI に搭載されている。これらと深宇宙の観測とを併用することで、機上校正 (On-board Calibration) と呼ばれる校正処理が行われる。太陽光拡散板は、米国航空宇宙局 (NASA) の Terra 及び Aqua 衛星に搭載の可視赤外イメージャ MODIS をはじめとする地球観測ミッションでは広く利用されているが、静止気象衛星に搭載されるのはひまわり 8 号が世界初であり、今後打ち上げられる各国の次世代静止気象衛星にも搭載される。

高品質の観測データセットを作成するためには、校正処理はセンサーが観測を続ける限り欠かせない作業である。ただし一般には、衛星の打ち上げ後にイメージャや校正源の状態を直接把握することはできない。このため、衛星打ち上げ前の地上試験では、センサー特性を十分な精度で測定するだけでなく、その精度が国際 (または国家) 計量標準に対して紐付けられている (トレーサブルである) 必要がある。その一方で、たとえ地上試験における評価が完璧であったとしても、打ち上げ後にそれらの特性が変化する可能性は否定できず、機上校正とは独立した校正もよく行われる。これを代替校正 (Vicarious Calibration) と呼び、代替校正の中でも他のセンサーによる観測結果と比較する手法 (例えば静止気象衛星搭載可視赤外イメージャの校正において、極軌道衛星搭載の高精度なセンサーを基準センサーとする手法) を相互校正 (Inter-calibration) と呼ぶ。1983 年に開始した国際衛星雲気候計画 (ISCCP: International Satellite Cloud Climatology Project, Rossow and Schiffer 1991) では、NOAA 衛星搭載の可視赤外イメージャ AVHRR を基準センサーとする相互校正を採用しており、再校正済みの衛星観測データから算出された雲量や雲頂高度といった各種雲プロダクトは、研究・現業コミュニティで広く利用されている。

気象衛星センターは、世界気象機関 (WMO) の下に設置された全球衛星搭載センサー相互校正システム (GSICS: Global Space-based Inter-Calibration System, Goldberg et al. 2011) や国内研究機関との協力に基づき、相互校正及び代替校正技術の研究開発にも注力しており (橋本ほか 2008)、その結果を気象衛星センター website などで公開してきた。

本稿では 2 章で GSICS の活動を紹介し、3 章で AHI と機上校正の概要を、4 章及び 5 章では AHI の全 16 バンドに対する相互校正手法及び代替校正手法の紹

介とその適用結果を報告する。最後に 6 章にて、まとめと将来計画を述べる (いずれも 2016 年 8 月時点の状況)。なお、高品質の観測データセット作成には、放射量校正に加えて位置あわせ (INR: Image Navigation and Registration) と呼ばれる幾何校正も欠かせない。ひまわり 8 号の幾何校正に関する詳細は Tabata et al. (2016) や Okuyama et al. (2015) を参照願いたい。

## 2. GSICS

### 2.1 組織と活動の概要

GSICS は、気象衛星及び地球観測衛星に搭載されたセンサーの現業的な相互校正実施を目的とする国際協力の枠組みであり、WMO と気象衛星調整会議 (CGMS) の下で 2005 年に構築された。GSICS 参加機関を付録 1 に示す。EUMETSAT や NASA といった現業、研究衛星機関に加えて、計量標準研究所の NIST も参加機関に名を連ねていることが特筆すべき点である。事務局は WMO が担っており、気象庁はその設立時から活動に参加している。

GSICS では、参加機関が協力して共通の相互校正手法を研究開発するとともに、成果物を GSICS として承認するためのプロセスの標準化や、GSICS の活動で用いる各種ツールの開発などを行っている。具体的には、現時点では計画段階にあるものを含めて、以下のような活動がある (WMO 2016)。

- 基準センサーとの比較による、軌道上の衛星レベル 1 データの監視
- 準リアルタイム利用のための相互校正情報作成
- 過去データ再校正のための相互校正アルゴリズムの提供
- 相互校正による国際標準校正器へのトレーサビリティ (SI トレーサビリティ)
- 地上試験のセンサー特性評価
- 打ち上げ後のセンサー特性評価
- 最先端の校正手法の文書化

上記活動により、GSICS 標準のデータフォーマットやメタデータ、プロダクト承認やデータ保存に関する各種手続き、相互校正の基準センサーや校正で用いる標準数値モデルの選択、相互校正プロダクトの作成や公開に用いるツール、プロダクト開発者や利用者のためのドキュメントなどが成果物として生まれる。GSICS 成果物の利用者としては、大別して 1) 衛星から算出される物理プロダクトや数値天気予報モデルなどを扱う衛星データ利用コミュニティ、2) 衛星データを用いた気候監視 (Dowell et al. 2013)

を初めとする気候監視・研究コミュニティ、3) 衛星運用機関自身、の 3 つが挙げられる。なお、上記 GSICS 活動で記した「国家標準校正器へのトレーサビリティ」は、衛星軌道上からの SI トレーサビリティを謳う NASA の CLARREO ミッション (Wielicki et al. 2013) などによる実現が期待される、GSICS の最終的な目標である。

GSICS の組織図と関連する枠組みを図 1 に示す。GSICS の最上位には、GSICS 参加機関の代表者で構成される執行パネル (Executive Panel) が置かれ、相互校正プロダクトの最終的な承認や今後の方向性の議論、CGMS や WMO への活動報告、GSICS 以外の関連する枠組みとのハイレベルでの調整等を行う。

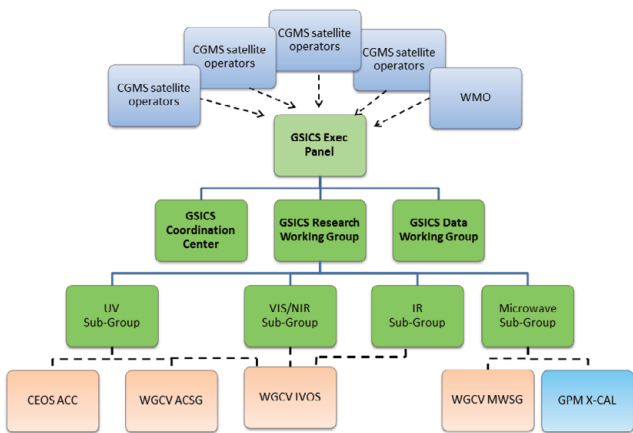


図 1 GSICS の組織図。Hewison (2016) から転載。

研究作業部会 (GRWG: GSICS Research Working Group) 及びデータ作業部会 (GDWG: GSICS Data management Working Group) は、前者が相互校正プロダクトの研究開発を、後者がプロダクトのフォーマット策定やデータ公開のための環境構築などを担っており、GSICS 参加機関の専門家で構成される。GSICS は当初、静止気象衛星に搭載された可視赤外イメージャの相互校正プロダクト開発から着手したが、その後活動の範囲を広げ、現在では GRWG の下に紫外・可視近赤外・赤外・マイクロ波のサブグループが存在する。これらのサブグループは、CEOS WGCV/IVOS や GPM-XCAL といった、GSICS 以外の校正に関する枠組みとも連携して活動している。

GSICS 調整センター (GCC: GSICS Coordination Center) は、GSICS 相互校正プロダクトのカタログ管理、季刊誌「GSICS Quarterly」の発刊、GSICS User Messaging Service と呼ばれる利用者向けメールサービスの管理、利用者要求の調査、GSICS プロダクトの承認プロセス管理、GCC website や GSICS 活動の各種資料が置かれた Wiki ページの管理といった事

項を担っており、NOAA が担当している。

GSICS では毎年の GSICS 活動を CGMS に報告するため、執行パネル会合が CGMS 会合に合わせて開かれる。GRWG 及び GDWG は月に 1 回程度の頻度で両作業部会の活動に関する Web 会議を開くと共に、参加機関の持ち回りで合同の年次会合を開いている。GCC は北米・欧州・アジアの衛星関連国際会議に合わせて、新規利用者や GSICS 活動への利用者要求の獲得を目的とした GSICS 利用者ワークショップを主催している。なお、GSICS に関連する website は付録 2 にまとめている。

## 2.2 GSICS 基準センサーの定義

赤外域では地上試験や航空機観測による校正・評価 (EUMETSAT 2011) を踏まえて、ハイパースペクトル赤外サウンダ IASI (Metop 衛星搭載) と AIRS (Aqua 衛星搭載) が GSICS の基準センサーに位置づけられている。S-NPP 衛星や JPSS 衛星に搭載される CrIS についても、これを GSICS の基準センサーに位置づけるべく、GRWG で上記文書の改訂作業を行っている。可視近赤外域では赤外のような報告書はまとめられていないが、校正に関する既存論文を基に GRWG で議論した結果、Aqua/MODIS の B1 (0.645  $\mu\text{m}$ ) が基準センサーに位置づけられている。可視近赤外域では 0.6  $\mu\text{m}$  帯以外でも基準センサーが必要になるが、例えば Aqua/MODIS の B2 (0.858  $\mu\text{m}$ ) では高輝度域のデジタルカウント値が飽和するという問題があるため、S-NPP/VIIRS も基準センサーに位置づけるための議論が GRWG で行われている。紫外域は、現時点では相互校正プロダクトの開発が行われておらず、基準センサーに関する議論も未実施であるが、マイクロ波センサーに関しては、S-NPP/ATMS や GPM/GMI などがマイクロ波サウンダ及びイメージャの基準センサー候補に挙げられている。

## 2.3 相互校正プロダクトの種類と入手方法

GSICS で作成される相互校正プロダクトとは、校正対象センサーの観測放射輝度を基準センサーに合わせるための補正量 (相互校正係数) のことを指し、これを GSICS Correction または単に GSICS プロダクトと呼ぶ。利用者は、GSICS Correction ファイルに格納されている相互校正係数を校正対象センサーの放射輝度に適用することで、相互校正済みの放射輝度を得ることができる。GSICS プロダクトは、低軌道 (LEO: low earth orbiting) 衛星搭載センサーを基準とする静止 (GEO: geostationary orbiting) 衛星搭載可視赤外イメージャの赤外相互校正プロダクトであれ



ば GEO-LEO-IR、同じく可視近赤外プロダクトであれば GEO-LEO-VNIR というように、「校正対象衛星の軌道－基準衛星の軌道－対象波長域」を並べた略称で分類される。GEO-LEO-IR には、衛星から算出される物理プロダクトや数値天気予報等での準リアルタイム利用を想定した Near-Real Time Correction と、研究利用などを想定した Re-Analysis Correction がある。前者は、例えば校正対象日から前 14 日の、後者は校正対象日の前後 14 日の観測データから相互校正係数が算出される。

GSICS プロダクトには、その成熟度に応じて、実証 (Demonstration)、準現業 (Pre-Operational)、現業 (Operational) と呼ばれる 3 つの段階 (Phase) が存在する。各段階への登録に必要な承認手続きは GPAA (GSICS Procedure for Product Acceptance) と呼ばれ、GSICS に参加する各機関の代表者と GRWG・GDWG 両議長から成る承認手続きチーム (GPAT: GSICS Product Acceptance Team) がレビューを行う。レビューでは、相互校正アルゴリズムと基礎理論に関する文書 (ATBD: Algorithm Theoretical Basis Document) 以外に、提出されたプロダクトファイルが GSICS の規約に従うか否かなどもチェックされる。プロダクトファイルの GSICS 規約は、WMO のファイル命名規約 (WMO 2013) や CF Convention (Gregory 2003) に基づき GDWG が作成している。また、プロダクトの準現業及び現業段階への移行時には、不確かさ (Uncertainty) 評価の実施、利用者ガイドの執筆、プロダクトの定常的な作成・公開なども求められ、現業段階へ移行する際には、GSICS 実行パネルが最終的な承認を行う。

2016 年 8 月時点では、Meteosat-9 及び 10 搭載の SEVIRI に対する GEO-LEO-IR が現業段階に登録さ

れている他、GOES-13 及び 15 搭載の Imager に対する GEO-LEO-IR が準現業段階に、MTSAT-2/Imager の GEO-LEO-IR が実証段階に登録されている。SEVIRI に関しては、GEO-LEO-VNIR も現業段階の登録に向けたレビューが行われている。

GSICS プロダクトとして承認されたファイルは、付録 2 に記した GSICS 相互校正プロダクトカタログにまとめられている。これら GPAT に承認された GSICS プロダクトは、EUMETSAT, NOAA 及び CMA が管理する「GSICS Collaboration Server」上で一般に公開されている他、各衛星運用機関の website でも公開されている場合がある。ひまわりに関しては、6 号以降の相互校正結果や ATBD が、気象衛星センター website で閲覧・取得可能である。

### 3. AHI の概要と機上校正

#### 3.1. AHI の仕様と観測機能

AHI は、NOAA の次世代静止気象衛星 GOES-R に搭載されている可視赤外イメージャ ABI (Advanced Baseline Imager) を基に、観測波長帯の変更などを行っている。表 1 に AHI の仕様と地上試験の結果を示す。AHI では、ABI が持つ 1.3 μm 帯の代わりに、可視域の緑色に相当する波長帯 (0.51 μm, バンド 2) を採用している。これにより AHI では、バンド 1 から 3 の観測画像をカラー合成することで、肉眼で見たものに近い「トゥルーカラー画像」を作成することが可能になっている。

図 2 及び図 3 に AHI の走査鏡と光学系の構成を示す。AHI は内部に 2 つある走査鏡を動かすことで、地球を北から南まで、東西に走査しながら観測する。走査方向は西から東の一方方向である。ひまわり 8 号

表 1 AHI の仕様と地上試験 (中心波長、バンド幅、SNR (信号対雑音比) または NEdT (雑音等価温度差) 及び Dynamic range) の結果。冗長系素子は東西方向に並んでおり、地上試験で評価された、最も品質が良い素子が選択・使用されている。また、検出器の列は主系と従系が存在する。

バンド番号	中心波長 [μm]	バンド幅 [μm]	SNR (バンド1-6) NEdT (バンド7-16)	Dynamic range	検出素子数	冗長系素子列数	量子化ビット数
1	0.4703	0.0407	585@100%albedo	120%	676	3	11
2	0.5105	0.0308	645@100%albedo	135%	676	3	11
3	0.6399	0.0817	459@100%albedo	165%	1460	3	11
4	0.8563	0.0345	420@100%albedo	205%	676	6	11
5	1.6098	0.0409	912@100%albedo	121%	372	6	11
6	2.257	0.0441	688@100%albedo	132%	372	6	11
7	3.8848	0.2006	0.21@300K	401K	332	6	14
8	6.2383	0.8219	0.13@240K	317K	332	6	11
9	6.9395	0.4019	0.039@300K	327K	332	6	11
10	7.3471	0.1871	0.13@240K	327K	332	6	12
11	8.5905	0.3727	0.042@300K	344K	332	6	12
12	9.6347	0.3779	0.052@300K	328K	332	6	12
13	10.4029	0.4189	0.077@300K	371K	408	6	12
14	11.2432	0.6678	0.063@300K	348K	408	6	12
15	12.3828	0.9656	0.087@300K	403K	408	6	12
16	13.2844	0.5638	0.22@300K	410K	408	6	11

の観測運用では、10 分間を基本単位とした「観測タイムライン」を定義している。

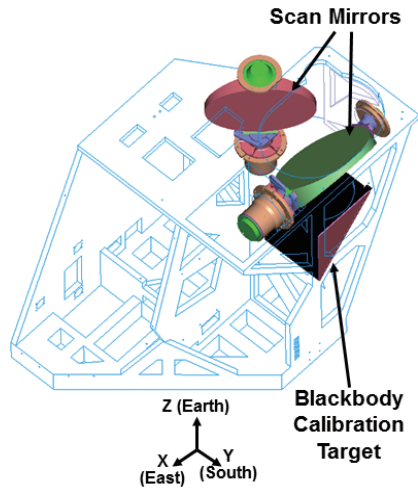


図 2 AHF 内部にある 2 枚構成の走査鏡。Griffith (2015) から転載。スキャンの例 (動画) は気象衛星センターwebsiteに掲載されている。

対象に合わせて東西南北 1000 km 四方の観測を任意の場所で実施することができる (濱田ほか 2016)。残る 2 つは高頻度機動観測域と呼ばれ、東西 1000 km 及び南北 500 km の領域を 30 秒毎に観測する。高頻度機動観測域の主な観測対象は観測画像の位置あわせを目的とした海岸線 (ランドマーク) 画像の取得であるが、深宇宙や後述する月の観測などにも利用されている。また、AHF の観測タイムラインには、定常観測以外に、軌道制御運用や後述する太陽校正用のタイムラインが複数定義されている。

### 3.2. 機上校正

地球からの長波放射や太陽光の地表面などにおける反射放射は、図 3 で示す走査鏡などの AHF 内部の光学系を経由した後、検出素子 (図 3 の VNIR, MWIR 及び LWIR) に届く。検出素子は放射輝度に応じた電圧をカウント値として出力する。

機上校正の例として、カウント値と放射輝度とが線形関係にある場合の、黒体を用いた赤外バンドの校正の模式図を図 4 に示す。黒体とは、赤外バンドの機上校正のために AHF に搭載されている、温度管理された熱源である。黒体の温度が  $T_{bb}$  に管理されている場合、黒体の観測で得られるカウント値  $C_{bb}$  に対応する放射輝度  $I_{bb}$  は、プランクの式から求めることができる。宇宙空間の観測では、検出素子自身の電氣的ノイズや暗電流などにより 0 でないカウント値  $C_{sp}$  が得られるが、ひまわりでは微小な宇宙背景放射を観測できないため、 $C_{sp}$  に対応する放射輝度は 0 とみなされる。これらの情報から、カウント値を放射輝度に変換する校正式が得られる。

なお、以下で述べる赤外及び可視近赤外バンドの機上校正は、「放射計データ」と呼ばれるデータの作成過程にて、各バンドの検出素子毎に適用される。「放射計データ」に含まれる観測ピクセルのカウント値は、同じ放射輝度を観測したとしても検出素子によって異なる。これは、検出素子の特性が素子によって異なるためである。また、「放射計データ」には、次節以降で述べる校正に必要なパラメータが含まれる。これに対し一般の利用者に公開される「ひまわり標準データ」には、「放射計データ」に基づく校正結果 (放射輝度) のみが納められている。放射輝度は、整数値 (カウント値) 及び放射輝度への変換係数 (一次式の係数) の形で格納されている。「放射計データ」と「ひまわり標準データ」は共に観測した情報を整数として表現するが、それぞれのカウント値は異なる意味を持つ。後述の式(A)及び(B)における「カウント」は、「放射計データ」のカウント値を指す。

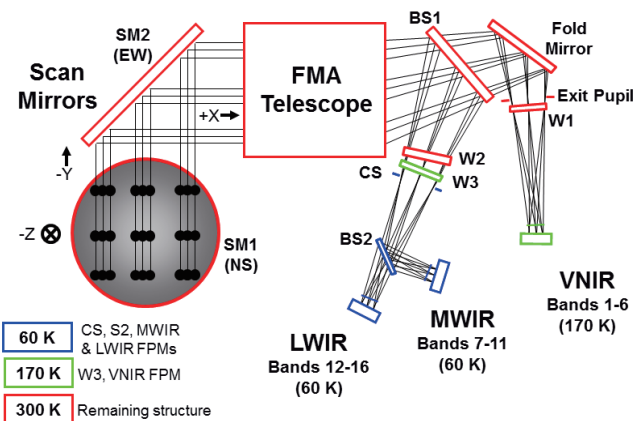


図 3 AHF 分光システムの光路図。Griffith (2015) から転載。VNIR : 可視近赤外、MWIR : 中波長赤外、LWIR : 長波長赤外、SM1 : 南北走査鏡、SM2 : 東西走査鏡。

通常の観測では、この 10 分以内にフルディスク観測と 5 種類の領域観測が行われる。表 1 に示すとおり、AHF の各バンドは南北方向に並ぶ数百から千を超える検出素子で構成されており、23 回の東西方向の走査でフルディスク観測が行われる。2 つの走査鏡による 1 回の走査をスワスと呼ぶ。

領域観測は、5 つのうち 2 つが東西 2000 km 及び南北 1000 km の領域を 2.5 分毎に観測し、その領域は日本付近に固定されている。1 つは機動観測域と呼ばれ、台風や発達した低気圧、火山といった観測

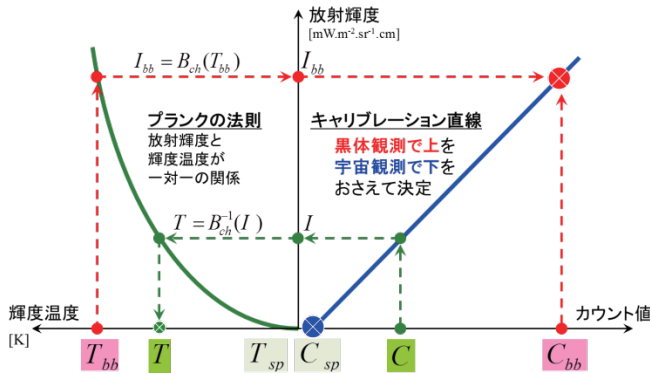


図 4 黒体観測を用いた赤外バンドの機上校正の模式図。

(1) 赤外バンド (バンド 7-16)

AHI 赤外バンドの校正式を式 (A) に示す。

$$R_{obs} = F(\theta, \varphi)(q_n C^2 + m_n C + b_n) - G(\theta)R_{Mns} - H(\theta, \varphi)R_{Mew} \quad (A)$$

ここで、 $R_{obs}$  は地球からの放射輝度、 $C$  はカウント値、 $q_n$ 、 $m_n$  及び  $b_n$  は校正係数 (添え字の  $n$  は検出素子の番号)、 $R_{Mns}$  及び  $R_{Mew}$  は南北及び東西走査鏡の放射輝度、 $\theta$  及び  $\varphi$  は南北及び東西走査鏡への入射角、 $F(\theta, \varphi)$ 、 $G(\theta)$  及び  $H(\theta, \varphi)$  は走査鏡の射出率に関するパラメータを表す。前述のとおり、地球などからの赤外放射は 2 枚の走査鏡を経て検出素子に到達するため、校正式で走査鏡からの放射輝度を考慮する必要がある。

黒体観測は観測タイムラインの最初 (10 分毎) に、宇宙空間観測はフルディスク観測のスワス毎に実施される。AHI のカウント値と放射量の関係は線形となるよう設計されているが、厳密には非線形関係を持つ検出素子が存在するため、地上試験では二次式が用いられている。AHI 赤外バンドの機上校正 (以下、黒体校正) では、 $q_n$  は地上試験で得られた固定値を使用するが、 $m_n$  は 10 分毎、 $b_n$  はフルディスクのスワス毎に更新される。 $b_n$  は、連続する宇宙空間観測を時間方向に線形内挿することで、宇宙空間カウント値の時間変化を考慮している。走査鏡の射出率等は地上試験の結果を用いる。

(2) 可視近赤外バンド (バンド 1-6)

AHI 可視近赤外バンドの校正式を (B) に示す。

$$R_{obs} = \frac{q_n(C - C_{sp})^2 + m_n(C - C_{sp})}{\rho_{ns}(\theta)\rho_{ew}(\varphi)} \quad (B)$$

ここで、 $R_{obs}$  は地球からの放射輝度、 $C$  はオリジナ

ルのカウント値である。 $C_{sp}$  は宇宙空間のカウント値であり、フルディスク観測のスワス毎に実施される宇宙空間観測の値が使われる。 $q_n$  及び  $m_n$  は校正係数 (添え字の  $n$  は検出素子の番号) であり、前者は地上試験の結果が、後者は後述する太陽光観測の結果をもとに決定される。 $\rho_{ns}(\theta)$  及び  $\rho_{ew}(\varphi)$  は南北及び東西走査鏡の反射率、 $\theta$  及び  $\varphi$  は南北及び東西走査鏡への入射角を表す。走査鏡の反射などは地上試験の結果を用いる。

可視近赤外バンドでは、赤外バンドの黒体の代わりに、太陽光を高輝度域の校正源とする。AHI 内に導入された太陽光は、MODIS など採用されている太陽光拡散板 (以下拡散板) で反射され、検出素子に到達する。拡散板は宇宙環境に暴露され続けると、短波長側を中心にその反射率が低下することが知られている。拡散板による太陽光を用いた機上校正 (以下、太陽校正) の精度は拡散板の光学特性に大きく左右されるため、MODIS などでは Solar Diffuser Stability Monitor (SDSM) と呼ばれる拡散板の経年劣化を評価する装置が搭載されている。ただし AHI は SDSM を持たないため、太陽光観測を実施しない時間帯は、拡散板は劣化防止のために太陽光を遮蔽するカバーで保護されている。

現在、太陽光観測は約 2 週間毎に実施している。結果はオフラインで解析され、必要に応じて (B) 式の  $m_n$  に反映される。当該バンドは当初、地上試験に基づく  $m_n$  を用いていたが、ひまわり 8 号が現業運用を開始する前の 2015 年 6 月 8 日に、その値を更新した。新しい校正係数には、同年 3 月 7 日から 5 月 7 日にかけて実施した 7 回の太陽校正で得られた  $m_n$  の平均値を採用した。2016 年 8 月時点では、 $m_n$  の更新はその一回のみである。図 5 に、2015 年 3 月 7 日以降の太陽校正の結果を示す。バンド 1 から 4 では年間約 0.5% のセンサー感度の劣化が見られるが、バンド 5 及び 6 では顕著な変化は見られないことがわかる。なお、本解析では拡散板自身の劣化は考慮していない。



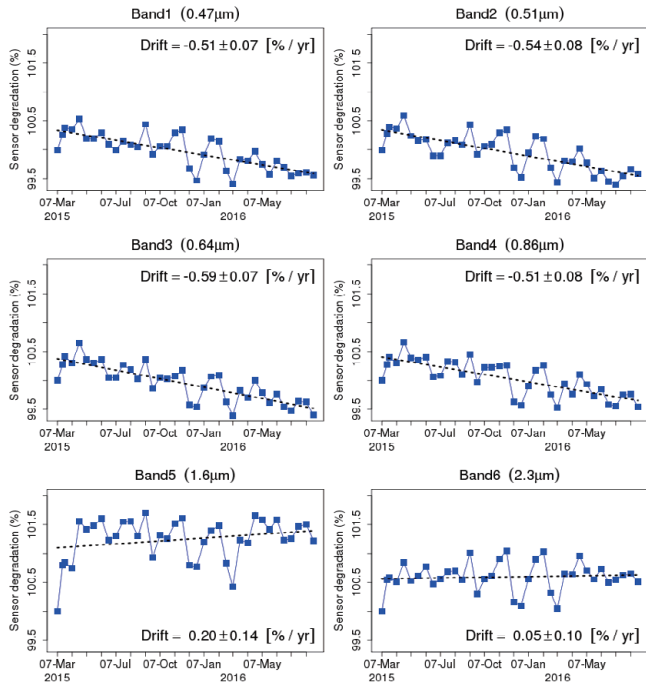


図 5 拡散板による太陽光観測から算出された AHI 可視近赤外校正係数  $m$  の逆数の時系列（センサー感度の変化に相当する）。図に示しているのは各バンドの検出素子に対して得られた  $m$  の平均値。2015 年 3 月 7 日の結果を 100%（センサーの劣化なし）としている。図中に示す Drift の値は線形回帰の結果であり、回帰直線の傾きとその標準誤差を、センサー感度の変化傾向と不確かさとしている。

#### 4. AHI 赤外バンドの相互校正

##### 4.1 相互校正手法

気象衛星センターでは、ひまわり 6 号から GSICS 標準の相互校正手法（Hewison et al. 2013）を導入している。本手法では、極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を基準センサーとする。2016 年 8 月時点では、Metop-A,-B/IASI, Aqua/AIRS, S-NPP/CrIS の 4 つを基準センサーに位置づけている。基準センサーの観測データからひまわりの観測放射輝度をシミュレートし、両者を比較することで相互校正結果（GSICS Correction）を得ることができる。以下では図 6 で示す本相互校正処理の流れに従い、その処理概要を述べる。処理中で用いられるパラメータの詳細は ATBD（JMA 2016）を参照願いたい。

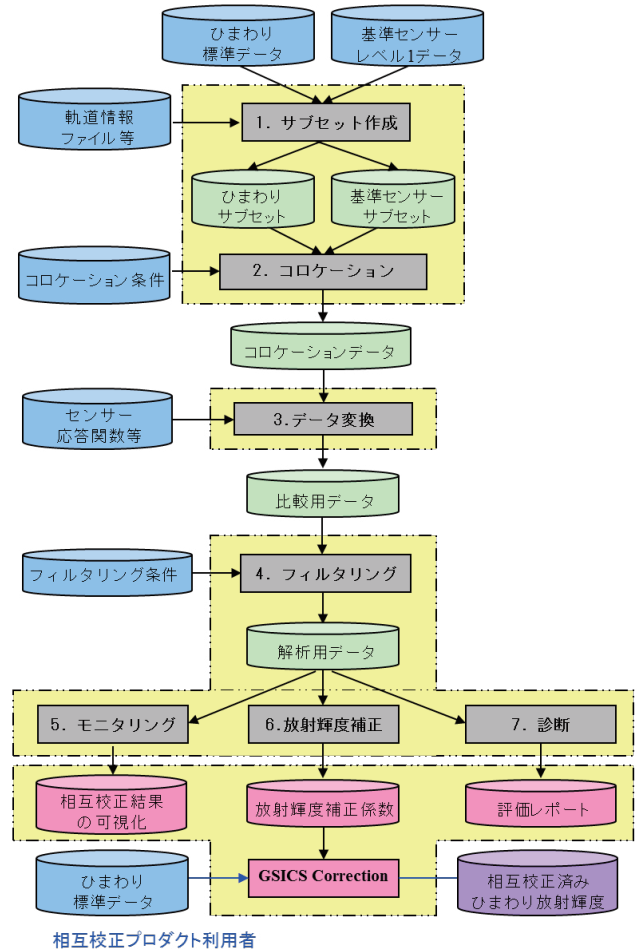


図 6 ひまわり赤外相互校正処理の流れ。

##### (1) サブセット作成

ひまわり及び基準センサーのレベル 1 データから、相互校正で用いる領域を切り出す。気象衛星センターでは、ひまわり静止位置（SSP: Sub-Satellite Point）の東西・南北 30 度の範囲にある基準センサーのレベル 1 データを、NOAA などのインターネット上に置かれたサーバから取得している。

##### (2) コロケーション

ひまわりと基準センサーの観測放射輝度を比較するため、両者の観測が時空間的に近いデータを抽出する。この処理をコロケーションと呼ぶ。

##### a. 観測時刻チェック

ひまわりと基準センサーとの観測時刻が近いことはコロケーションの必須条件の一つであり、下記式を満たす観測データを抽出する。

$$|t_{\text{mon}} - t_{\text{ref}}| < dt_{\text{Max}}$$

ここで、 $t_{\text{mon}}$  と  $t_{\text{ref}}$  は校正対象センサー（ひまわり）と基準センサーの観測時刻、 $dt_{\text{Max}}$  は観測時刻チェ

ックのしきい値である (AHI では dtMax=5 (分))。

**b. 衛星天頂角チェック**

同一観測地点の抽出は、次式の左辺で表す観測地点と衛星間との光路長の差をチェックすることでも行われる。

$$|\cos(SZA_{mon}) / \cos(SZA_{ref}) - 1| < \maxOptPathDiff$$

ここで、 $SZA_{mon}$  と  $SZA_{ref}$  はひまわりと基準センサーの衛星天頂角であり、その値がしきい値 ( $\maxOptPathDiff$ ) 以内となる観測データが抽出される。AHI では晴天域で  $\maxOptPathDiff=0.01$ 、それ以外では  $\maxOptPathDiff=0.03$  を用いるが、水蒸気バンド (バンド 8-10) では観測地点によらず前者を用いる。ここでは AHI バンド 13 (10.4  $\mu m$ ) の輝度温度が 275 K 以上の観測ピクセルを簡易的に晴天域とみなす。

なお、5.2 節で述べる可視近赤外バンドの相互校正とは異なり、赤外バンドの相互校正では方位角に関するチェックを行わない。また、AHI バンド 7 (3.9  $\mu m$ ) のような短波長赤外域のバンドでは、日中は太陽放射の影響を受けることを考慮して、このようなデータは除外される。

**(3) データ変換**

ひまわりと基準センサーの観測放射輝度を直接比較するため、下記 2 項目に関するデータ変換を行う。将来的には、衛星からの視差 (parallax) や、観測時刻差に起因する観測地点の大気状態の違いを補正するためのデータ変換も追加される可能性がある。

**a. スペクトルマッチング**

基準センサーであるハイパースペクトル赤外サウンダの超多チャンネルによる観測データから、次式により AHI 各バンドの放射輝度を合成する。

$$I_s = \frac{\sum_i w_i I_i}{\sum_i w_i} \quad (C)$$

ここで、 $I_s$  及び  $I_i$  はそれぞれ super channel (基準センサーから合成された AHI の各バンド) 及び基準センサーの放射輝度、 $i$  は基準センサーのチャンネル番号、 $w_i$  はオフラインで計算される定数 (Tahara 2008) であり、AHI 各バンドの super channel 作成時の重み係数として使われる。

図 7 に、AHI 赤外バンドのセンサー応答関数 (SRF: Spectral Response Function) と IASI, AIRS, CrIS の観測波長帯を示す。基準センサーが校正対象センサーの SRF を全てカバーできない場合 (例えば CrIS は AHI バンド 7 の SRF を約 40%カバーしている) には、

spectral compensation method (Tahara and Kato 2009) と呼ばれる最適化手法により、super channel 作成に不足している基準センサーの観測放射輝度をシミュレートする。本手法は、例えば AHI バンド 11 のように SRF を数%カバーしているだけの CrIS や AIRS にも適用可能であるが、シミュレートされる放射輝度精度は、spectral compensation method で使われる事前計算された放射輝度データに強く依存する。このような場合は基準センサーに求められる精度を実現できないため、相互校正では利用していない。CrIS と AIRS を基準センサーとする AHI バンド 11 がこれに該当する。

Himawari-8/AHI SRF and spectral coverage of CrIS, AIRS and IASI

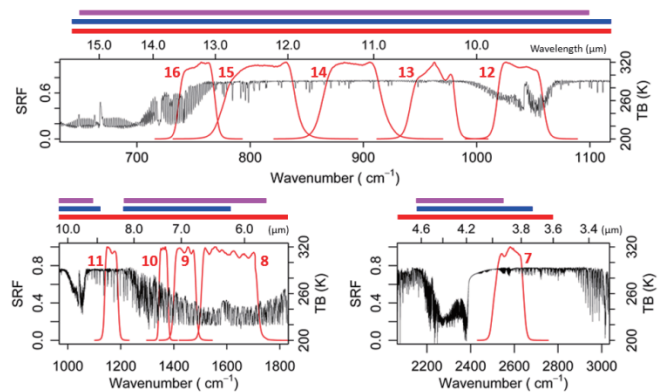


図 7 AHI 赤外バンド (バンド 7-16) の応答関数 (赤線)。赤色の数字はバンド番号。黒線は、米国標準大気について、放射伝達モデル LBLRTM と HITRAN2000 ラインデータベースを利用して計算した、大気上端における外向き放射の輝度温度。ハイパースペクトル赤外サウンダ CrIS, AIRS, IASI の観測波長帯をそれぞれ桃色、青、赤の横太線で示す。

**b. 空間マッチング**

衛星直下付近における基準センサーの瞬時視野 (IFOV: Instantaneous Field of View) は、IASI, AIRS, CrIS でそれぞれ 12 km, 13.5 km, 14 km である。ひまわりとの空間分解能の違いを吸収するため、AHI の放射輝度はコロケーション対象のピクセルを中心とする 7×7 ピクセルで平均する。平均化のための 7×7 ピクセルの領域を、以下では fovBox と呼ぶ。

**(4) フィルタリング**

各センサーの位置あわせ誤差や観測時刻差、観測光路の違いなどに起因する放射輝度の違いを和らげるため、下記 2 項目のフィルタリングにより均質な観測ピクセルを抽出する。



a. 環境場の均質性チェック

次式により環境場の均質性を確認する。

$$STDV(envBox) < maxStdv$$

IASI に対する AHI の envBox は 19 × 19 ピクセルであり、STDV(envBox) は AHI のコロケーション地点を中心とする envBox の放射輝度の標準偏差である。STDV(envBox) がしきい値 maxStdv 以下となるデータを本チェックで抽出する。衛星天頂角チェック同様、晴天域とそれ以外とで異なる maxStdv を用いる。詳細は ATBD (JMA 2016) を参照のこと。

b. 正規性チェック

前述した通り、AHI の観測ピクセルは基準センサーの IFOV サイズにあわせて平均化される。本チェックでは、fovBox 内の AHI 放射輝度が均質性チェックで用いられる環境場 envBox を代表していること、すなわち正規分布に従っていることを確認する。具体的には、下記式を満たすデータを抽出する。

$$|AVE(fovBox) - AVE(envBox)| \times fovSize < STDV(envBox) \times Gaussian$$

ここで AVE(fovBox) と AVE(envBox) は AHI 放射輝度の fovBox 及び envBox における平均値、fovSize は fovBox の一辺の大きさ、STDV(envBox) は envBox

における AHI 放射輝度の標準偏差である。Gaussian は、AHI では水蒸気バンドとそれ以外とで異なる値を採用している。

(5) モニタリング

(4) を通過した AHI と基準センサーのデータは解析に渡される。モニタリングステップでは、両センサーの観測放射輝度の線形回帰結果を、基準センサーに対する AHI の輝度温度バイアスに変換する。放射輝度と輝度温度は非線形関係にあるため、輝度温度バイアスは観測輝度温度に依存する。GSICS では、ある基準センサーに対する複数の校正対象センサー

(例：Metop-A/IASI を基準とする Himawari-8/AHI, Meteosat-10/SEVIRI, GOES-15/Imager) の相互校正結果を直接比較するため、評価の基準となる輝度温度を定義している。具体的には、米国標準大気(1976)、海面水温 15°C 及び海上風速 7 m/s という条件下で、RTTOV や CRTM などの放射伝達モデルを用いて計算された晴天夜間における衛星直下の大気上端の放射輝度を典型的な観測放射輝度(標準輝度温度)と呼ぶ。図 8 及び図 9 に、気象衛星センター website で公開している赤外相互校正結果の一例を示す (URL は付録 2 を参照)。当センターでは、標準輝度温度以外の輝度温度バイアスも可視化し、公開している。

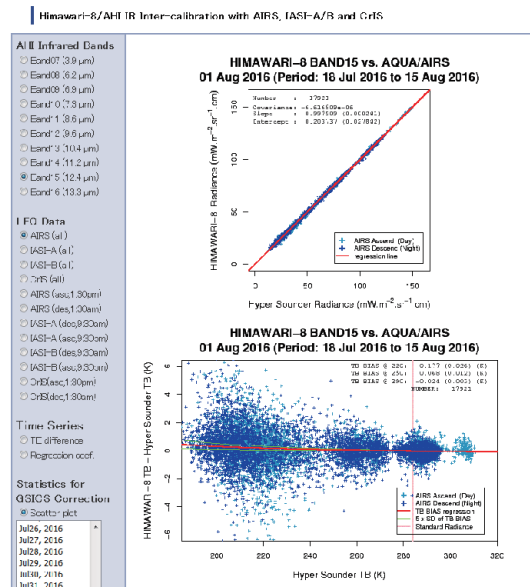


図 8 気象衛星センター website で掲載している、AHI バンド 15 と Aqua/AIRS の相互校正結果。上図：放射輝度の比較(線形回帰)。下図：放射輝度の線形回帰結果を変換して得られた、AHI バンド 15 の輝度温度バイアス[K]。横軸は AIRS の輝度温度 [K]。29 日分のコロケーションデータを用いた解析結果であり、水色は日中、青色は夜間のデータを表す。

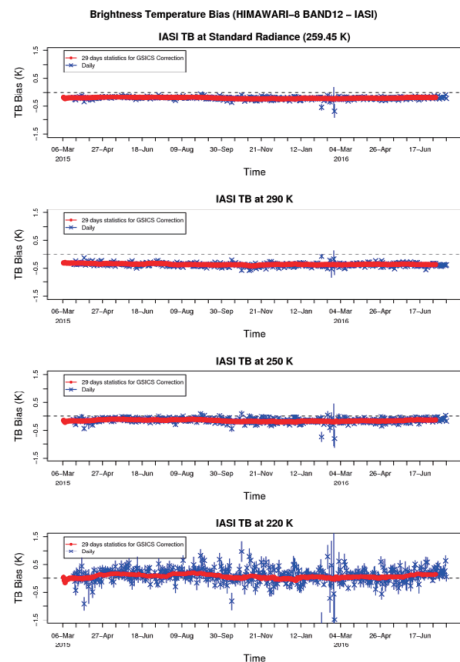


図 9 Metop-A/IASI に対する AHI バンド 12 の輝度温度バイアス時系列。上から標準輝度温度, 290 K, 250 K, 220 K における値。青は 1 日分、赤は 29 日分のコロケーションデータを用いた解析結果。エラーバーは各輝度温度バイアスの標準誤差。

(6) 放射輝度補正

AHI と基準センサーの放射輝度を次式で回帰する。

$$I_{GEO} = a_r + b_r I_{LEO}$$

ここで  $I_{GEO}$  は、図 6 下部で示した「ひまわり標準データ」に格納されている AHI の放射輝度を fovBox で平均した値 (AVE(fovBox))、 $I_{LEO}$  は基準センサーの放射輝度であり、(3) a. の (C) 式における  $I_s$  に対応する。 $a_r$  及び  $b_r$  は回帰係数 (相互校正係数) を表す。基準センサーの観測に相当する AHI の放射輝度を得るためには、相互校正係数を下記式に代入する必要がある。

$$\hat{I}_{LEO} = -\frac{a_r}{b_r} + \frac{1}{b_r} I_{GEO}$$

$\hat{I}_{LEO}$  が補正された AHI 放射輝度であり、図 6 下部の「相互校正済みひまわり放射輝度」に相当する。上記  $a_r$  や  $b_r$  は、線形回帰で得られる不確かさや、それらを変換して得られる輝度温度バイアスなどとあわせて、本ステップにて GSICS Correction ファイル (NetCDF) に格納される。なお現時点では、全基準センサーに対して、Near Real Time Correction では校正対象日から 14 日前まで、Re-Analysis Correction では校正対象日の前後 14 日間のデータが使われる。これは IASI が搭載されている Metop 衛星の回帰日数から決められたが、AIRS や CrIS では Aqua や S-NPP 衛星の回帰日数に応じた値に変更する可能性がある。

(7) 診断

相互校正の結果は、国内外の学会を初めとする各種会議等で報告されている。

4.2 相互校正結果

表 2 に、標準輝度温度における AHI 赤外バンドの輝度温度バイアスを示す。相互校正で見積もられた AHI の輝度温度バイアスは、全基準センサー、全赤外バンドに関して 0.3 K 以下であり、基準センサー間で整合的な結果が得られた。図 9 では、バンド 12 の輝度温度バイアスは時間的に大きく変化せず非常に安定していることを示したが、その他の赤外バンドでもこの傾向は変わらない (図省略)。

図 10 に、ひまわり 7 号と AHI の輝度温度バイアスの日変化を示す。GSICS Correction はコロケーションがとれた全時間帯のデータで統計をとるが、ここでは 1 ヶ月分のデータを 30 分毎のビンで区切り、各基準センサーに対する輝度温度バイアスを評価した。ひまわり 7 号は GOES/Imager と同種の可視赤外イメージャを搭載しており、図 10 左下の IR2 で見られる

ように、春秋の深夜帯を中心として輝度温度バイアスが変化することが知られている (Yu et al. 2013)。一方で AHI は、ひまわり 7 号に見られる顕著な校正精度の日変化は見られず、全バンドで昼夜を通して安定している。ただし細かく見ると、バンド 7, 8, 10, 12 など、夜間を中心に輝度温度バイアス算出値が約 0.2 K 変化しており、原因は調査中である。

表 2 標準輝度温度における AHI 赤外バンドの輝度温度バイアス [K]。括弧内は輝度温度バイアスの不確かさ [K]。2015 年 7 月 15 日を対象とする Re-Analysis Correction の結果。

Band	Standard TB [K]	TB bias at standard radiance [K]			
		IASI/A	IASI/B	AIRS	CrIS
Band7 (3.9μm)	285.95	-0.10 (0.004)	-0.09 (0.004)	-0.02 (0.004)	-0.02 (0.004)
Band8 (6.2μm)	234.65	-0.16 (0.004)	-0.16 (0.004)	-0.25 (0.004)	-0.14 (0.003)
Band9 (6.9μm)	243.85	-0.20 (0.004)	-0.20 (0.005)	-0.30 (0.004)	-0.22 (0.003)
Band10 (7.3μm)	254.59	-0.11 (0.004)	-0.13 (0.004)	-0.18 (0.003)	-0.14 (0.003)
Band11 (8.6μm)	283.82	-0.03 (0.003)	-0.03 (0.004)	N/A	N/A
Band12 (9.6μm)	259.45	-0.20 (0.004)	-0.14 (0.005)	-0.21 (0.004)	-0.20 (0.003)
Band13 (10.4μm)	286.18	0.06 (0.004)	0.09 (0.004)	0.05 (0.004)	0.01 (0.003)
Band14 (11.2μm)	286.1	0.07 (0.004)	0.10 (0.004)	-0.01 (0.004)	0.02 (0.003)
Band15 (12.4μm)	283.78	-0.01 (0.004)	0.02 (0.004)	-0.01 (0.004)	-0.07 (0.003)
Band16 (13.3μm)	269.73	0.10 (0.003)	0.14 (0.003)	0.10 (0.003)	0.04 (0.003)

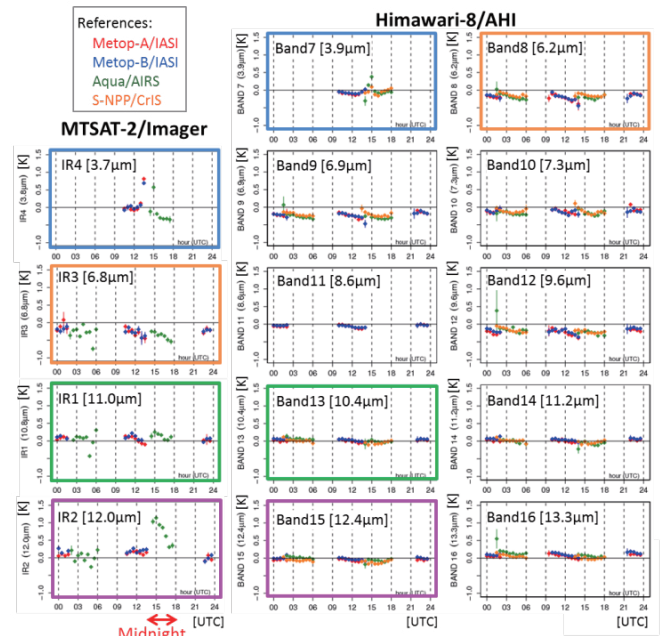


図 10 ひまわり 7 号と AHI の標準輝度温度における輝度温度バイアス。両センサーで対応する波長帯のバンドを同じ色の枠で囲んでいる。2016 年 2 月のデータを 30 分毎のビンに区切った統計結果。

## 5. AHI 可視近赤外バンドの相互校正及び代替校正

可視近赤外域の校正には、赤外相互校正で用いられる観測データの直接比較以外に、砂漠や雪氷面、海面、発達した対流雲の雲頂、月面といった、安定した観測結果が得られる対象物を用いる手法が複数存在する。例えば砂漠や雪氷面、海面に関しては、衛星搭載センサーの校正・評価に適した地点 (PICS: Pseudo invariant calibration sites) が CEOS/WGCV の活動などで選定されている。PICS における地上観測データを用いた放射伝達計算により大気上端の放射輝度を計算し、これを衛星観測値と比較する代替校正は、地球観測衛星のみならず気象衛星でも行われている (例えば Govaerts and Clerici 2004)。上記校正手法は、校正の時間スケールや対象とする輝度、不確かさなどがそれぞれ異なるため、Yu and Wu (2015) は、複数の校正結果を総合的に解析することでより高精度な結果を得ており、GSICS においても、同様の手法を実装するための議論が行われている。

本章では、AHI の相互校正及び代替校正で実装、または開発されている 4 つの手法について述べる。

### 5.1. 放射伝達計算値を用いた代替校正

気象衛星センターは、平成 18 年度から 26 年度にかけて実施した東京大学大気海洋研究所との共同研究において、放射伝達計算に基づくひまわり可視データの校正手法を開発した (橋本ほか 2008、高坂ほか 2012)。以下にその手法と結果を示す。

#### 5.1.1. 手法

本手法では、放射伝達モデル RSTAR6b (Nakajima and Tanaka 1986) を用いて大気上端におけるひまわりの反射率をシミュレートし、それを実際の観測反射率と比較することで、センサーの感度変化を評価する (以下、RSTAR 代替校正)。シミュレーションは、晴天海面及び晴天陸面、水雲、発達した対流雲 (DCC: Deep Convective Clouds) を対象に行うが (高坂ほか 2012)、AHI では開発の都合上、2016 年 8 月時点では晴天海面 (バンド 1, 2 を除く) と水雲の計算のみが実装されている。

放射伝達モデルを用いた代替校正では、入力データに地上観測の結果や大気再解析の結果のみを用いることが多い。一方 RSTAR 代替校正では、Aqua 及び Terra 衛星搭載の MODIS Level1B データからリトリブしたエアロゾルや水雲の光学パラメータを放射伝達計算の入力としており、他の代替校正と比べて相互校正寄りのアプローチをとっている。また、光学パラメータの算出で用いる放射伝達モデルは RSTAR が基になっており、一貫した放射伝達過程が代替校正で考慮されていることも、本手法の特筆す

べき点である。

#### a. 晴天海面を対象とした計算

図 11 に、Himawari-8/AHI, Aqua/MODIS 及び S-NPP/VIIRS の可視近赤外域バンドのセンサー応答関数を示す。晴天海面の放射輝度シミュレーションではエアロゾルの光学パラメータが計算精度の鍵を握るが、RSTAR 代替校正では、REAP (Higurashi and Nakajima 1999) によって算出されるエアロゾルの光学的厚さと、オングストローム指数から変換されるエアロゾルの粒径を RSTAR の入力データに用いる。REAP の計算には、MODIS の B1 ( $0.645 \mu\text{m}$ ) 及び B2 ( $0.858 \mu\text{m}$ ) が使われる。計算対象地点である晴天海面の抽出は、下記チェックにより行われる。

- ・ 海陸マスクデータが海格子
- ・ B31 ( $11.03 \mu\text{m}$ ) と B32 ( $12.02 \mu\text{m}$ ) の輝度温度差が正
- ・ B1 の反射率が 0.1 以下かつ B2 の反射率よりも大きい
- ・ 衛星天頂角、太陽天頂角が 60 度以下かつ AHI と MODIS の方位角差が 90 度以下 (サンダート域を除く)

RSTAR の入力データとして、大気プロファイルは JRA-55/JCDAS を、オゾンには Aura/OMI の Level 3 プロダクト (OMDOAO3e) を使用する。

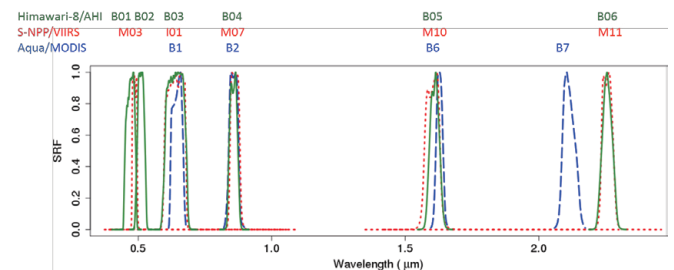


図 11 Himawari-8/AHI, S-NPP/VIIRS, Aqua/MODIS の可視近赤外バンドのセンサー応答関数 (それぞれ緑、赤、青)。MODIS, VIIRS は AHI 可視近赤外バンドの校正で使われるバンドのみを表示している。

#### b. 水雲を対象とした計算

水雲の光学パラメータ算出には CAPCOM (Nakajima and Nakajima 1995) が用いられる。CAPCOM は熱赤外バンド、非吸収バンド及び吸収バンドの 3 バンドデータを入力とすることで、対象地点の光学的厚さや有効半径などを算出する。RSTAR 代替校正では晴天海面同様 MODIS を入力衛星データとして採用しており、熱赤外バンドに B31 を、非



吸収バンドとして B1 を用いる。吸収バンドについては、AHI バンド 5 及び 6 に対しては MODIS B7 (2.13  $\mu\text{m}$ ) を、それ以外のバンドには B20 (3.75  $\mu\text{m}$ ) を用いる。計算対象地点抽出のための幾何学条件は、晴天海面と同様のしきい値が使われる。

なお、CAPCOM が出力する水雲の有効半径は対数正規分布を仮定したモード半径に変換され、RSTAR に与えられる。放射伝達計算で用いる大気プロファイル及びオゾン情報は晴天海面の計算と同じである。

### 5.1.2. 結果

図 12 に、Aqua/MODIS を光学パラメータ算出に用いた場合の、RSTAR 代替校正の結果を示す。全バンドにおいて AHI の観測値とシミュレーション値はよく一致していることがわかる。バンドによっては AHI

の観測放射輝度域をカバーできていないが、例えばバンド 1 及び 2 では、晴天海面の放射伝達計算を行うことで低輝度域をカバーすることができる。そのためには water leaving radiance と呼ばれる海面直上からの放射輝度を考慮する必要があり、実装の準備を進めている。また、晴天陸面 (砂漠) や DCC を対象とする放射伝達シミュレーションの追加も検討しているだけでなく、GOES-R/ABI では偏光感度の調査が行われており (Pearlman et al 2015)、AHI でも今後評価を行った後、必要に応じて偏光計算に対応した放射伝達モデルの利用を検討する。なお、RSTAR 代替校正の結果は、気象衛星センター website にて公開している。

## 5.2. S-NPP/VIIRS を用いた相互校正

### 5.2.1. 手法

本手法は S-NPP/VIIRS を基準センサーとし、VIIRS と AHI の観測放射輝度または反射率を直接比較することで校正結果を得る (以下、VIIRS ray-matching と呼ぶ)。Ray-matching (Doelling et al. 2011) とは、基準・校正対象センサーの両者で、観測対象地点と衛星とを結ぶ線 (ray) を合わせるという意味である。

表 3 に、AHI 可視近赤外バンドに対応する VIIRS のバンド一覧と、両センサーの応答関数の違いを吸収するための係数 (SBAF: Spectral Band Adjustment Factor) を示す。VIIRS はハイパースペクトルセンサーではないため、IASI や AIRS, CrIS のような super channel を作ることはできない。このため、AHI バンド 1 から 5 については、Envisat 衛星に搭載された分光計 SCIAMACHY の観測データから AHI と VIIRS の観測放射輝度をシミュレートし、それらの回帰から得られる係数 (SBAF, Scarino et al. 2016) を VIIRS の放射輝度に乗じることで、AHI とのセンサー応答の違いを吸収する。AHI バンド 6 は SCIAMACHY の観測波長帯外であるため、RSTAR を用いた放射輝度シミュレーションにより SBAF を計算した。

両センサーのコロケーション条件を表 4 に示す。コロケーションの基本思想は赤外相互校正と同じだが、太陽光の地表面や雲などによる反射放射は方位角に依存するため、両センサーの方位角差がコロケーション条件に追加されている。また、現時点では雲域のみを抽出しているが、今後は晴天域を比較の対象に加えることも検討する予定である。

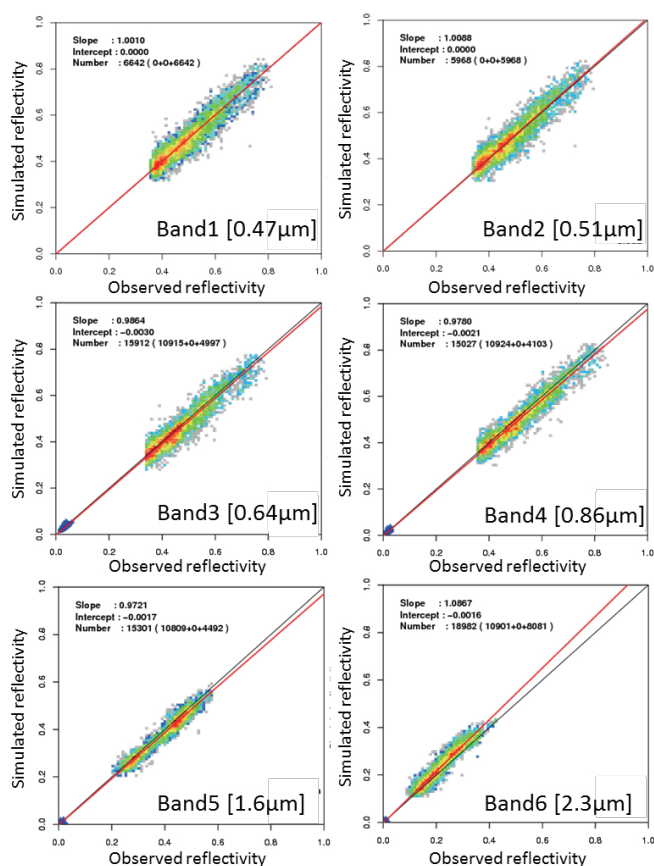


図 12 2016 年 6 月の RSTAR 代替校正の結果。横軸は AHI の観測反射率、縦軸は Aqua/MODIS から算出された光学パラメータを入力として RSTAR でシミュレートした AHI の反射率。反射率 0.1 以上の領域に示された緑～赤色の点は水雲 (2 次元ヒストグラム)、0.1 以下のバンド 3 から 6 に示される青点は晴天海面を表す。赤線は線形回帰の結果。

表 3 VIIRS ray-matching における AHI と S-NPP/VIIRS のバンドの対応及び SBAF (Spectral Band Adjustment Factor)。AHI バンド 1 から 5 の SBAF は NASA が web 上で公開しているツール (Scarino et al. 2016) から得られた値であり、バンド 6 は RSTAR による放射計算結果に基づく。

AHI	Band1 (0.47 $\mu$ m)	Band2 (0.51 $\mu$ m)	Band3 (0.64 $\mu$ m)	Band4 (0.86 $\mu$ m)	Band5 (1.6 $\mu$ m)	Band6 (2.3 $\mu$ m)
VIIRS	M03 (0.49 $\mu$ m)	M03 (0.49 $\mu$ m)	I01 (0.64 $\mu$ m)	M07 (0.87 $\mu$ m)	M10 (1.61 $\mu$ m)	M11 (2.25 $\mu$ m)
SBAF	1.035	0.950	0.997	1.009	1.002	1.000

表 4 VIIRS ray-matching における AHI と VIIRS のコロケーション条件。

AHI-VIIRS Collocation conditions	
Time difference	5 minutes
Diff. of solar/viewing zenith/azimuth angle	10 degrees for each
Cloudy scene extraction	AHI band 13 (10.4 $\mu$ m) radiance < 3 [W/m <sup>2</sup> /sr/ $\mu$ m]

5.2.2. 結果

RSTAR 代替校正及び VIIRS ray-matching による、AHI 可視近赤外バンドの校正評価結果を図 13 に示す。図より、2015 年 6 月 8 日に実施された校正係数の更新にて、全バンドで AHI の観測値が基準値に近づいたこと、バンド 1 から 4 では両校正結果は概ね整合的であることがわかる。これらは同様の手法を用いた Yu and Wu (2016) の結果とも整合する。また、校正係数更新後のセンサー感度の変化傾向は、バンド 1 から 4 では年間約 0.5% の劣化が見られ、バンド 5 及び 6 では感度劣化は不明瞭である。これは図 5 で示す拡散板観測の解析結果とよく一致する。

なおバンド 5 と 6 では、基準値と比べて 4-7% の差異が見られるだけでなく、校正手法間での違いも大きい。一つの理由として、AHI と VIIRS の機上校正で考慮されている太陽照度モデルが異なることが考えられる。今後は反射率での比較も実施し、その放射輝度比較との違いを評価する予定である。

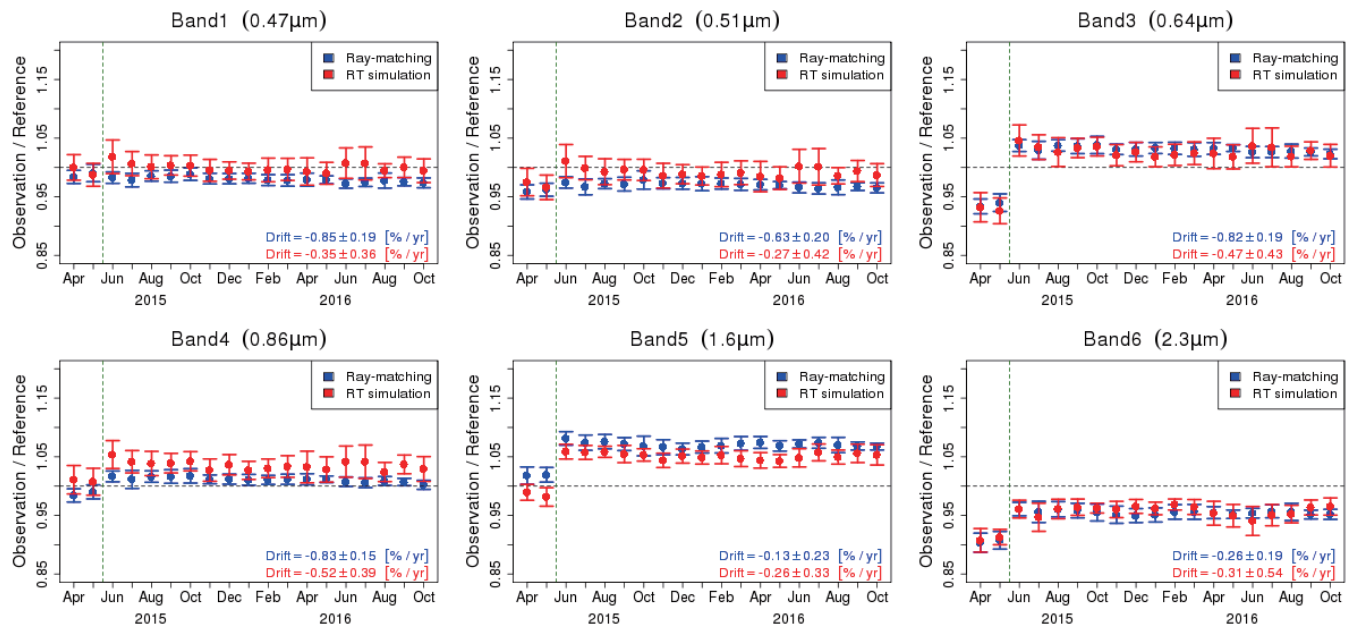


図 13 AHI 観測値と基準値との比 (切片を 0 とした線形回帰で得られる傾き) の時系列。赤は RSTAR 代替校正 (AHI 観測反射率と RSTAR で計算された反射率との比較評価)、青は VIIRS ray-matching (AHI と VIIRS の観測放射輝度との比較評価) の結果であり、丸点は月別平均値を、エラーバーは標準偏差を表す。縦軸の値が 1 より小さい場合、AHI の放射輝度は基準値より小さいことを意味する。緑の縦点線は 2015 年 6 月 8 日に実際にされた、校正係数変更のタイミングを示す。なお混乱を避けるため、2015 年 6 月 1 日から 8 日のデータは当月の統計に含めていない。各図の右下に Drift として示す数値は、2015 年 7 月から 2016 年 10 月の線形回帰結果 (傾き及び傾きの標準誤差)。

### 5.3. 発達した対流雲観測を用いた相互校正

対流圏界面に到達する DCC の滑らかな雲頂における太陽光の反射輝度は非常に安定していると考えられており、DCC は砂漠や雪氷同様、校正に適した観測対象である。本手法では、初めに基準センサーと校正対象センサーによる DCC の観測値(放射輝度またはデジタルカウント値)を  $11 \mu\text{m}$  帯の輝度温度を用いて抽出する。その際、両センサーのコロケーションは必要としない。得られた DCC の観測値は双方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) により天頂方向の値に変換される。このデータを一定期間 (例えば一ヶ月間) 集めてヒストグラムを作成し、ヒストグラムの統計値 (最頻値や平均値) を比較することで校正結果が得られる (Doelling et al. 2013)。以下、DCC 相互校正と呼ぶ)。比較の際には、VIIRS ray-matching 同様 SBAF が適用される。

DCC の雲頂における太陽光の反射特性は時間に因らず非常に安定していると仮定し、成層圏にエロゾルが到達するほどの大規模噴火時などを除くと、校正が適切に行われている基準センサーで得られた DCC の観測統計値は定数とみなすことができる。すなわち、DCC 相互校正は基準センサーが存在しない年代に対しても適用可能なことが大きな利点である。

GSICS では本校正を可視近赤外域における最初の標準相互校正手法に位置づけ、各衛星運用機関にて、Aqua/MODIS の B1 ( $0.645 \mu\text{m}$ ) を基準とする相互校正プロダクトの開発が進められている。ただし、センサーや観測領域によっては DCC の観測統計値に季節変動が見られるため、安定した校正結果を得るためには、校正対象地点の絞り込みや季節変化の除去などが必要になる。また、本手法の  $0.6 \mu\text{m}$  帯以外への適用については、基準センサーの選択をはじめとして、これまで十分に調査・検討されてこなかった。ひまわり 7 号では Aqua/MODIS B1 を基準センサーとする DCC 相互校正を実施したが (Takahashi et al. 2014a)、AHI では VIIRS を基準センサーとすることも視野に入れ、本手法の適用可能性を調査しているところである。

### 5.4. 月観測を用いた校正

衛星と月の間には大気が存在せず、月面の反射特性は時間的に非常に安定しているため、月は校正の対象として非常に適した存在である。ひまわりをはじめとする気象衛星では、センサーが地球を走査する際、地球の縁に近い宇宙空間も観測する。ひまわり 7 号までは、地球の観測時に月が偶然宇宙空間に写りこんだ場合にのみ「月観測」画像が得られてき

た。ひまわり 8 号では、衛星から見た月の位置を予測し、領域観測予約システム (濱田ほか 2016) にその情報を送ることで、高頻度機動観測域を用いた超高頻度の月観測を行うことができる (図 14)。これにより、従来と比べて 100 倍以上の月観測データを得ることができる。なお、地球観測衛星では、姿勢制御により月を観測することが多い。

米国地質調査所 (USGS) が地上からの月観測に基づき開発した ROLO (Robotic Lunar Observatory) と呼ばれる経験的モデル (Kieffer and Stone 2005) は、センサー応答関数と任意の時刻における衛星位置を入力することで、その時刻における月面の放射照度をシミュレートする。衛星による月観測から得られる観測放射照度を、ROLO が出力する計算放射照度と比較することで校正が行われる (以下、月観測データを用いる校正を月校正と呼ぶ)。

現在の ROLO モデルが持つ不確かさは 5-10% と言われており (Stone and Kieffer 2006)、絶対校正に求められる精度 (例えば S-NPP/VIIRS では 2% 以下 (Baker 2014)) を満たしていないが、時間方向の相対的な精度は高いため、センサーの長期的な感度劣化の評価には非常に有用である。このため ROLO を用いる月校正は、MODIS や SeaWiFs といった地球観測ミッションだけでなく、静止気象衛星ミッションでも幅広く利用されてきた (Wu et al. 2006, Eplee et al. 2012, Viticchie et al. 2013)。

これまで、本モデル (ソースコード) は諸事情により一般に公開されておらず、利用者が論文を基に実装してきたが、2014 年に GSICS が USGS 等と協力し、校正コミュニティで共有可能な ROLO モデル (GIRO: GSICS Implementation of the ROLO model) を構築した (Wagner et al. 2015)。

ひまわり 7 号の ROLO を用いた月校正では、RSTAR 代替校正や DCC を用いた相互校正と同様の結果を得ており (Takahashi et al. 2014b)、気象衛星センターでは、同手法の AHI への適用と結果の解析を進めている。

前述の通り、ROLO モデルは月面での反射放射を積分した放射照度を出力する。現在の月校正コミュニティでは当該モデルを用いた月校正が標準的な校正手法に位置づけられているが、近年では新たな月校正手法の研究開発も進められている。例えば JAXA の月観測衛星かぐや (SELENE) の観測データからは、月面の各地点における放射輝度を計算する数値モデルが構築されており、このモデルを用いた月校正が提案されている (Kouyama et al. 2016)。また、AHI の観測値自身から月面の BRDF を構築する試みも行われている (Yu et al. 2016)。



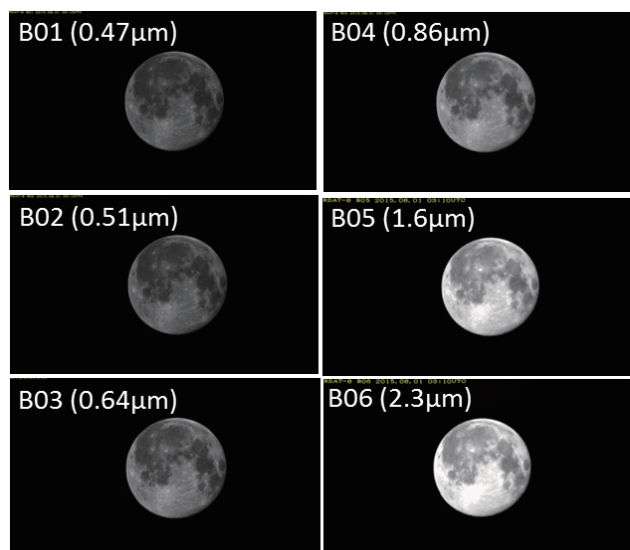


図 14 AHI 月観測画像の例 (2015 年 8 月 1 日 03:03:30 UTC)。反射率を強調して描画している。

## 6. まとめと今後の課題

本稿は GSICS の目的と活動の概要を紹介するとともに、ひまわり 8 号搭載可視赤外イメージャ AHI の機上校正や、GSICS 及び東京大学大気海洋研究所との枠組みで研究開発した相互校正・代替校正手法の AHI への適用結果を報告した。AHI はその観測機能が従前から大幅に強化されただけでなく、静止気象衛星では世界で初めて太陽光拡散板を搭載するなど、校正の観点でも大きな改良が行われている。

GSICS 標準の赤外相互校正手法を用いて AHI 赤外バンドの機上校正を評価したところ、基準センサーに対する全赤外バンドの輝度温度バイアスは標準輝度温度で 0.3 K 以下であり、ひまわり 7 号で見られる輝度温度バイアスの顕著な日変化は確認されなかった。深夜帯を中心に見られる輝度温度バイアスの小さな変化については調査中である。また、相互校正結果を GSICS の準現業段階に登録するために必要な不確かさ評価 (Hewison 2013) も行っている。

さらに GSICS では、複数の基準センサーによる相互校正結果を統合的に解析することで、より小さな不確かさを実現する *GSICS Prime Correction* が提案されている (EUMETSAT 2016)。当該相互校正手法は基準センサー同士の不確かさを *Double Difference* と呼ばれる手法に基づいて評価するため、時間方向に均質な校正精度の実現が可能であり、気候研究・解析で利用される気候データセット (FCDR: Fundamental Climate Data Record) の作成に有用である。気候分野以外の利用者にとっても、基準センサーの違いを気にせず常に最善の相互校正結果を利用

できるという利点があり、当センターでも当該プロダクトの開発を進める予定である。

AHI 可視近赤外バンドに対しては、RSTAR 代替校正と VIIRS ray-matching を用いて校正精度を評価した。太陽校正の結果に基づいて可視近赤外バンドの校正係数を 2015 年 6 月 8 日に更新したことで、両校正手法の基準値に近い値が得られるようになった。一方で、バンド 5 及び 6 では基準値と比べて 4-7% の差異があり、両校正手法の評価結果にも不一致が見られる。両校正手法の見直しを行うだけでなく、より多くの校正手法による総合的な評価を行うため、DCC 相互校正や月校正の開発にも注力している。

ひまわり標準データでは、GSICS の相互校正結果を格納する枠を設けている。可視近赤外及び赤外相互校正プロダクトが GSICS 準現業段階へ登録され次第、ひまわり標準データにも当該相互校正情報を格納する予定である。

## 謝辞

太陽校正の解析にて多大なる協力をいただいた気象衛星センターの伊達謙二氏、RSTAR 代替校正の開発に際して多くのご指導をいただいた中島映至 JAXA 地球観測研究センター長、竹中栄晶氏、福田悟氏に深く感謝する。

## 参考文献

- 尾関 一頼, 佐々木 幸男, 2016: 静止気象衛星ひまわり 8 号及び 9 号の概要. 気象衛星センター技術報告 特別号 (2016), 3-16.
- 高坂 裕貴, 奥山 新, 竹中 栄晶, 福田 悟, 2012: 静止気象衛星可視データの再校正技術の開発と改良. 気象衛星センター技術報告 第 57 号, 39-55.
- 橋本 徹, 奥山 新, 竹中 栄晶, 福田 悟, 2008: *GMS-5/VIIRS* 可視データについての再校正技術の開発. 気象衛星センター技術報告 第 50 号, 61-74.
- 濱田 浩, 田端 将, 守 伸隆, 佐々木 政幸, 2016: 領域観測予約システム. 気象衛星センター技術報告 特別号 (2016), 37-43.
- Baker, N., 2014: Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS Radiometric Calibration Algorithm Theoretical Base Document (ATBD); National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Space Flight Center (GSFC), Greenbelt, MD, USA, 1-195.
- 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.
- Doelling, D. R., D. Morstad, B. R. Scarino, R. Bhatt and A. Gopalan, 2013: The Characterization of Deep Convective Clouds as an Invariant Calibration Target and as a Visible Calibration Technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **51**, 1147-1159.
- Doelling, D., R. Bhatt, D. Morstad and B. Scarino, 2011: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for ray-matching technique of calibrating GEO sensors with Aqua-MODIS for GSICS. Available at [http://gsics.atmos.umd.edu/pub/Development/AtbdCentral/GSICS\\_ATBD\\_RayMatch\\_NASA\\_2011\\_09.pdf](http://gsics.atmos.umd.edu/pub/Development/AtbdCentral/GSICS_ATBD_RayMatch_NASA_2011_09.pdf) (最終アクセス日 : 2016年10月31日) .
- Dowell, M., P. Lecomte, R. Husband, J. Schulz, T. Mohr, Y. Tahara, R. Eckman, E. Lindstrom, C. Wooldridge, S. Hilding, J. Bates, B. Ryan, J. Lafeuille and S. Bojinski, 2013: Strategy Towards an Architecture for Climate Monitoring from Space. Available at [http://www.wmo.int/pages/prog/sat/documents/ARCH\\_strategy-climate-architecture-space.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/sat/documents/ARCH_strategy-climate-architecture-space.pdf) (最終アクセス日 : 2016年10月31日) .
- Eplee, R. E., Meister, G., Patt, R. A. Barnes, S. W. Bailey, B. A. Franz and C. R. McClain, 2012: On-orbit calibration of SeaWiFS. *Applied Optics*, **51**, 8702-8730.
- EUMETSAT, 2016: ATBD for EUMETSAT Demonstration Prime GSICS Corrections for Meteosat-SEVIRI. Available at [http://gsics.atmos.umd.edu/pub/Development/AtbdCentral/ATBD\\_for\\_EUMETSAT\\_Demonstration\\_Prime\\_GSICS\\_Corrections\\_for\\_Meteosat-SEVIRI.docx](http://gsics.atmos.umd.edu/pub/Development/AtbdCentral/ATBD_for_EUMETSAT_Demonstration_Prime_GSICS_Corrections_for_Meteosat-SEVIRI.docx) (最終アクセス日:2016年8月31日) .
- EUMETSAT, 2011: GSICS Traceability Statement for IASI and AIRS. *EUMETSAT Technical Note*, EUM/MET/TEN/11/0157.
- Goldberg, M., G. Ohring, J. Butler, C. Cao, R. Datta, D. Doelling, V. Gartner, T. Hewison, B. Iacovazzi, D. Kim, T. Kurino, J. Lafeuille, P. Minnis, D. Renaut, J. Schmetz, D. Tobin, L. Wang, F. Weng, X. Wu, F. Yu, P. Zhang and T. Zhu, 2011: The Global Space-Based Inter-Calibration System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 467-475.
- Govaerts, Y. and M. Clerici, 2004: MSG-1/SEVIRI solar channels calibration commissioning activity report. EUM/MSG/TEN/04/0024, EUMETSAT, Darmstadt, Germany.
- Gregory, J., 2003: The CF metadata standard. CLIVAR Exchanges, No. 28, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, 4 pp.
- Griffith, P. C., 2015: Advanced Himawari Imager (AHI) Design and Operational Flexibility. *Sixth Asia/Oceania Meteorological Satellite User's Conference*, Tokyo, Japan, November 9-13, 2015, Available at [http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/aomsuc6\\_data/oral/s02-01.pdf](http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/aomsuc6_data/oral/s02-01.pdf) (最終アクセス日 : 2016年10月31日) .
- Hewison, T. J., 2016: Introduction to Mini Conference & GSICS. GSICS Joint Meeting on Research and Data Working Groups. Tsukuba, Japan, February 29-March 4, 2016, Available at [http://gsics.atmos.umd.edu/pub/Development/20160229/1a\\_Hewison\\_Introduction.pptx](http://gsics.atmos.umd.edu/pub/Development/20160229/1a_Hewison_Introduction.pptx) (最終アクセス日 : 2016年10月31日) .
- Hewison, T. J., 2013: An Evaluation of the Uncertainty of the GSICS SEVIRI-IASI Inter-Calibration Products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **51**, 1171-1181.
- Hewison, T. J., X. Wu, F. Yu, Y. Tahara, X. Hu, D. Kim and M. Koenig, 2013: GSICS Inter-Calibration of Infrared Channels of Geostationary Imagers Using Metop/IASI. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **51**, 1160-1170.
- Higurashi, A. and T. Nakajima, 1999: Development of a Two Channel Aerosol Retrieval Algorithm on Global Scale Using NOAA/AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 924-941.
- JMA, 2016: GSICS Himawari-8/AHI infrared inter-calibration guide. Available at [http://www.data.jma.go.jp/mscweb/data/monitoring/gsics/ir/techinfo\\_geoleoir.html](http://www.data.jma.go.jp/mscweb/data/monitoring/gsics/ir/techinfo_geoleoir.html) (最終アクセス日 : 2016年10月31日) .
- Kieffer, H. H. and T. C. Stone, 2005: The spectral irradiance of the Moon. *Astron. J.*, **129**, 2887-2901.
- Kouyama, T., Y. Yokota, Y. Ishihara, R. Nakamura, S. Yamamoto and T. Matsunaga, 2016: Development of an application scheme for the SELENE/SP lunar reflectance model for radiometric calibration of hyperspectral and multispectral sensors. *Planet. Space Sci.*, **124**, 76-83.
- Nakajima, T.Y. and T. Nakajima, 1995: Wide area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurement for FIRE and ASTEX

- regions. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 4043-4059.
- Nakajima, T. and M. Tanaka, 1986: Matrix formulation for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **35**, 13-21.
- Okuyama, A., A. Andou, K. Date, K. Hosaka, N. Mori, H. Murata, T. Tabata, M. Takahashi, R. Yoshino and K. Bessho, 2015: Preliminary validation of Himawari-8/AHI navigation and calibration. *Proc. SPIE 9607, Earth Observing Systems XX, 96072E* (8 September 2015), doi: 10.1117/12.2188978.
- Pearlman, A. J., C. Cao and X. Wu, 2015: The GOES-R Advanced Baseline Imager: Polarization Sensitivity and Potential Impacts. *Proc. SPIE 9613, Polarization Science and Remote Sensing VII, 96130K* (8 September 2015), doi: 10.1117/12.2188508.
- Rossow, W. B. and Schiffer, R. A., 1991: ISCCP Cloud Data Products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 2-20.
- Scarino, B. R., D. R. Doelling, P. Minnis, A. Gopalan, T. Chee, R. Bhatt, C. Lukashin and C. Haney, 2016: A Web-Based Tool for Calculating Spectral Band Difference Adjustment Factors Derived From SCIAMACHY Hyperspectral Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **54**, 2529-2542.
- Stone, T. C. and H. H. Kieffer, 2006: Use of the Moon to support on-orbit sensor calibration for climate change measurements. *Proc. SPIE 6296, Earth Observing Systems XI, 62960Y* (8 September 2006), doi: 10.1117/12.678605.
- Tabata, T., Ando, K. Bessho, K. Date, R. Dojo, K. Hosaka, N. Mori, H. Murata, R. Nakayama, A. Okuyama and M. Takahashi, 2016: Himawari-8/AHI latest performance of navigation and calibration. *Proc. SPIE 9881, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization IV, 98812J* (May 2, 2016), doi:10.1117/12.2240200.
- Tahara, Y., 2008: New Approach to Intercalibration Using High Spectral Resolution Sounder. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, **50**, 1-14.
- Tahara, Y. and K. Kato, 2009: New Spectral Compensation Method for Intercalibration Using High Spectral Resolution Sounder. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, **52**, 1-37.
- Takahashi, M., S. C. Wagner and K. Hosaka, 2014a: Inter-Calibration of the MTSAT-2/Imager Visible Channel Using Deep Convective Clouds. *Proc. of the EUMETSAT Conference*, Geneva, Switzerland, September 22-26, 2014.
- Takahashi, M., B. Viticchie, S. Ch. Wagner and K. Hosaka, 2014b: Visible Channel Calibration of the JMA's Geostationary Satellites Using the Moon Imagers. *Proc. of the EUMETSAT Conference*, Geneva, Switzerland, September 22-26, 2014.
- Viticchie, B., S. C. Wagner, T. J. Hewison, T. C. Stone, J. Nain, R. Gutierrez, J. Muller and C. Hanson, 2013: Lunar calibration of MSG/SEVIRI solar channels. *Proc. of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, Vienna, Austria, September 16-20, 2013.
- Wagner, S.C., T. Hewison, T. Stone, S. Lachérade, B. Fougne and X. Xiong, 2015: A summary of the joint GSICS-CEOS/IVOS lunar calibration workshop: moving towards intercalibration using the Moon as a transfer target. *Proc. SPIE 9639, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIX, 96390Z* (12 October 2015), doi: 10.1117/12.2193161.
- Wielicki, B. A., D. F. Young, M. G. Mlynczak, K. J. Thome, S. Leroy, J. Corliss, J. G. Anderson, C. O. Ao, R. Bantges, F. Best, K. Bowman, H. Brindley, J. J. Butler, W. Collins, J. A. Dykema, D. R. Doelling, D. R. Feldman, N. Fox, X. Huang, R. Holz, Y. Huang, Z. Jin, D. Jennings, D. G. Johnson, K. Jucks, S. Kato, D. B. Kirk-Davidoff, R. Knuteson, G. Kopp, D. P. Kratz, X. Liu, C. Lukashin, A. J. Mannucci, N. Phojanamongkolkij, P. Pilewskie, V. Ramaswamy, H. Revercomb, J. Rice, Y. Roberts, C. M. Roithmayr, F. Rose, S. Sandford, E. L. Shirley, W. L. Smith Sr., B. Soden, P. W. Speth, W. Sun, P. C. Taylor, D. Tobin and X. Xiong, 2013: Achieving Climate Change Absolute Accuracy in Orbit. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1519-1539.
- WMO, 2013: Manual on the Global Telecommunication System. WMO-No. 386.
- WMO, 2016: Introduction to GSICS. *GSICS-RD001 (in preparation)*, will be available on <http://gsics.wmo.int/>.
- Wu, X., T. C. Stone, F. Yu and D. Han, 2006: Vicarious calibration of GOES Imager visible channel using the Moon. *Proc. SPIE-Earth Observing Systems XI, 6296*, doi:10.1117/12.681591.
- Yu, F., X. Shao, X. Xiangqian, M. Takahashi and A. Okuyama, 2016: Effort toward Characterization of Selected Lunar Site for Radiometric Calibration of Solar Reflective Bands. *CALCON Technical Meeting*, Logan, USA, August 22-25, 2016.
- Yu, F. and X. Wu, 2016: Radiometric Inter-Calibration between Himawari-8 AHI and S-NPP VIIRS for the



- Solar Reflective bands. *Remote Sensing*, **8**, 165, doi: 10.3390/rs8030165.
- Yu, F. and X. Wu, 2015: An integrated method to improve the GOES Imager visible radiometric calibration accuracy. *Remote Sensing of Environment*, **164**, 103-113.
- Yu, F., X. Wu, M. K. R. V. Raja, Y. Li, L. Wang and M. Goldberg, 2013: Diurnal and Scan Angle Variations in the Calibration of GOES Imager Infrared Channels. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **51**, 671-683.
- <http://gsics.tools.eumetsat.int/plotter/>  
EUMETSAT の GSICS サーバ
- <http://gsics.eumetsat.int/thredds/catalog.html>  
NOAA の GSICS サーバ
- <http://gsics.nesdis.noaa.gov/thredds>  
CMA の GSICS サーバ
- <http://gsics.nsmc.cma.gov.cn/thredds/catalog.html>  
GCC website (GSICS 利用者向け情報がある)
- <http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/GCC/index.php>  
GSICS Wiki (ATBD や各種会合の資料などがある)
- <http://gsics.atmos.umd.edu/wiki/Home>

#### 付録1 2016年8月時点のGSICS参加機関（アルファベット順）

正式メンバー	
中国気象局	CMA
フランス国立宇宙研究センター	CNES
欧州気象衛星開発機構	EUMETSAT
インド気象局	IMD
インド宇宙研究機関	ISRO
宇宙航空研究開発機構	JAXA
気象庁	JMA
韓国気象庁	KMA
米国航空宇宙局	NASA
米国国立標準技術研究所	NIST
米国海洋大気庁	NOAA
ロシア水門気象環境監視局	ROSHYDROMET
米国地質調査所	USGS
世界気象機関	WMO
オブザーバー	
地球観測衛星委員会 校正・検証作業部会	CEOS/WGCV
中国国家航天局	CNSA
欧州宇宙機関	ESA
ロシア連邦宇宙庁	ROSCOSMOS

#### 付録2 GSICS 関連 website（最終アクセス日：2016年10月31日）

- WMO GSICS Portal (各種 GSICS 関連 website の窓口)  
<http://gsics.wmo.int/>
- GSICS 相互校正プロダクトカタログ  
<http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/GCC/ProductCatalog.php>
- 気象衛星センターのひまわり校正情報  
<http://www.data.jma.go.jp/mscweb/data/monitoring/calibration.html>
- GSICS 相互校正プロダクトの可視化ツール