

静止地球環境観測衛星「ひまわり 8 号及び 9 号」の紹介 Introduction to Himawari-8 and 9

横田 寛伸^{*1} 佐々木 政幸^{*2}
Hironobu YOKOTA and Masayuki SASAKI

Abstract

Himawari-8 and -9 are the latest satellites in the MTSAT series. The Japan Meteorological Agency (JMA) plans to launch Himawari-8 in 2014 and for it to commence operation in 2015. Himawari-9 will be launched in 2016 and enter standby operation in 2017. The Himawari-8 and -9 satellites will be equipped with Advanced Himawari Imager (AHI) radiometers, which will be comparable to the Advanced Baseline Imager (ABI) radiometers found on the American GOES-R satellite series. The functions and specifications of the AHI are notably improved from imagers on MTSATs, so enabling better nowcasting, improved numerical weather prediction accuracy and enhanced environmental monitoring.

要 旨

ひまわり 8 号及び 9 号は MTSAT の気象ミッションの運用を引き継ぐ衛星である。気象庁は、ひまわり 8 号を 2014 年に打ち上げ、2015 年から観測運用を開始する計画である。また、ひまわり 9 号は 2016 年に打ち上げて 2017 年から待機運用を開始する予定である。ひまわり 8 号及び 9 号には、可視赤外放射計 (Advanced Himawari Imager; AHI) が搭載されており、これは米国の次期静止気象衛星 GOES-R シリーズに搭載予定の放射計である ABI (Advanced Baseline Imager) とほぼ同等の機能を有している。AHI の機能や性能はこれまでの可視赤外放射計に比べて改良されており、実況監視精度の向上、数値予報の改善及び環境監視への活用などに利用することが期待されている。

1. はじめに

気象庁は 1978 年から静止気象衛星「ひまわり」の運用を開始し、約 35 年にわたって宇宙からの気象観測を継続してきた。この間、衛星の障害や後継衛星の運用開始遅延によって観測の継続が途絶える危機も何度かあったが、代替手段をとることによって観測が途切れることがなかった。今日では、洋上の台風監視⁽¹⁾にとって重要な観測手段であり、台風の進路予測や集中豪雨の監視・予測などの気象業務を遂行する上で必要不可欠なものである。また、さまざまな気象情報提供手段を通じて「ひまわり」の観測結果は広く一般に提供され、国民の安全・安心にとって重要な役割を果たし、欠かすことのできない情報の一つとなっている。

科学技術の面でも、「ひまわり」の観測データの貢献度は高く、気象、水資源⁽²⁾、防災⁽³⁾など多くの分野で、先端的な科学的知見が数多く創出されている。また、約 35 年にわたって観測データが蓄積されていることから、気候学的な価値も高く、地球温暖化をはじめとする地球環境の監視^{(4) (5) (6)}においても基盤的なデータである。

「ひまわり」の観測データは、初号機より代々運用開始と同時に国際的に無料・無制約で公開しておりアジア・太平洋地域の約 30 の国や地域における自然災害の防止に貢献し、わが国の科学技術外交の重要な一翼を担ってきた。気象庁も、国際協力の一環として「ひまわり」の観測データの利用方法に関する技術協力を積極的に行ってきた。

現在、ひまわり 7 号及び 6 号が軌道上で運用及び

^{*1} 気象庁観測部気象衛星課

^{*2} 気象衛星センターデータ処理部システム管理課
(2012 年 10 月 5 日受領、2013 年 1 月 10 日受理)

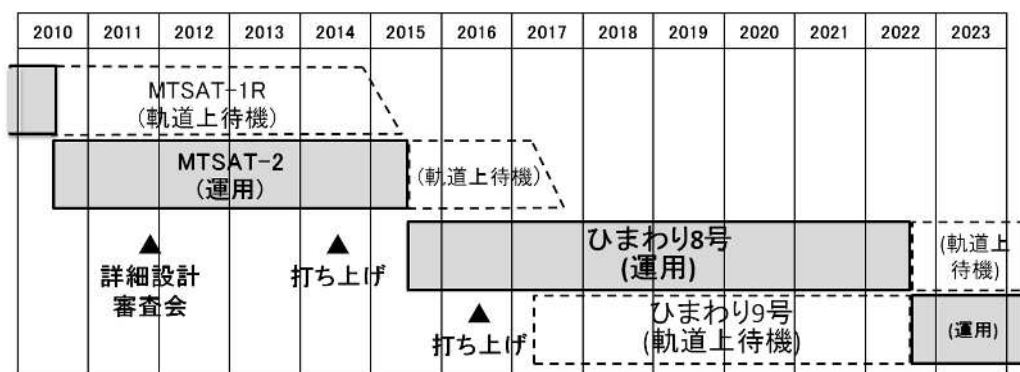


図1 「ひまわり」の運用移行計画

待機運用を行っているが、2015年（平成27年）度にひまわり7号が設計上の寿命に達することから、2014年（平成26年）度には次期静止気象衛星を打ち上げる必要がある。このことを踏まえて気象庁は、2009年（平成21年）から次期静止気象衛星となる静止地球環境観測衛星「ひまわり8号及び9号」の製造に着手した。図1はひまわり8号及び9号の製造から運用に移行するまでを示したもので、衛星本体は2011年に詳細設計審査を完了し製造を進めている。ひまわり8号は2014年の夏期に打ち上げ、軌道上試験や本運用の開始に向けた運用訓練などを行い2015年4月にはひまわり7号から運用を引き継ぐ準備を完了する計画である。

本稿では、静止地球環境観測衛星「ひまわり8号及び9号」のミッション機器を含む衛星本体に関する各機能の説明及び地上で観測データを処理するためのソフトウェア(放射計データ処理ソフトウェア)の特徴について説明する。

2. ひまわり8号及び9号の製造方針

静止気象衛星による観測を行うため、これまでの「ひまわり」の調達では、

- 主たるミッション機器である可視赤外放射計を含む衛星本体の製造、
- 可視赤外放射計の観測データを処理するソフトウェアの製造、
- 衛星と通信を行うための地上通信設備の整備、
- 衛星を監視制御する衛星管制設備の整備、
- 可視赤外放射計の観測データを処理するソフトウェアを動かすための処理設備の整備

などを行ってきた。さらに、衛星の打ち上げ請負発

注や衛星観測データから利用者向けの雲画像等を作成する処理装置の整備も必要である。本稿で説明する可視赤外放射計を含む衛星本体及び放射計データ処理ソフトウェアは、及びに相当し、静止地球環境観測衛星「ひまわり8号及び9号」の製造契約の中で行われ

る。また、この製造契約では、及びの整備に必要な情報を開示・提供することになっている。

、及びの地上の施設や設備の整備、これらの維持・管理及び衛星を含めたこれらの運用については、民間の資金、経営能力及び技術的能力を活用して公共施設等の建設、維持管理及び運用等を行うPFI(Private Finance Initiative)方式^aを導入して「静止地球環境観測衛星の運用等事業」として行うことになった。これら一連の調達に係る方向性は、2008年（平成20年）度に行われた「静止気象衛星に関する懇談会」^bで取りまとめられた。PFI方式によるひまわり8号及び9号の運用事業は、2010年に特別目的会社「気象衛星ひまわり運用事業株式会社」(HOPE)が運用事業者として決定し、運用に向け地上施設・設備の整備などの準備を進めている⁽⁷⁾。

静止気象衛星の調達では、主たるミッション機器となる可視赤外放射計の機能を決定することが最も重要な検討項目である。このため、気象庁は、ひまわり8号及び9号の調達に先だって衛星運用各国が開発している次期静止気象衛星の動向の調査や庁内利用部局及び外部有識者からの意見聴取を行った。特に、「ひまわり」は世界気象機関(WMO)の世界気象監視(WWW)計画の全球的な観測網の中でアジア・太平洋地域の観測を担っており、運用期間中に可視赤外放射計の機能が陳腐化せず各衛星運用国と同じ品質の観測データを提供し続ける必要がある。気象衛星などの運用機関の調整の場である気象衛星調整会議(CGMS)では、次世代静止気象衛星の可視赤外放射計に対して観測波長の多波長化、観測時間の短縮及び空間分解能の改善など高機能を求める方針が示されており、ひまわり8号及び9号でもこ

a. 内閣府 PFI 推進室、「PFI とは」、<http://www8.cao.go.jp/pfi/>

b. 「静止気象衛星に関する懇談会」、http://www.jma-net.go.jp/sat/satellite/kondan/kondan_index.html

の方針に沿った可視赤外放射計の導入を行うことにした。

また、高機能の可視赤外放射計を十分に生かすためには衛星本体に対しても高性能が求められる。特に、画像を地球上の位置と対応づける「位置合わせ」においては、これまで以上に衛星の姿勢安定精度が求められることが想定された。しかし、高性能の姿勢安定性を持つ衛星本体の製造は一般的ではなく、製造費用を増加させる懸念があった。このため衛星本体の姿勢安定性能については一般的な衛星運用を目的とした軌道・姿勢の保持性能だけを求め、地上で行う可視赤外放射計のデータ処理に高精度な位置合わせ処理を行う機能を持たせソフトウェアで位置合わせ精度を高める設計とした。位置合わせ処理に必要な衛星の動きや可視赤外放射計の視線方向などの入力情報は、衛星で正確に測定して地上に伝送することとした。

このように衛星本体に対して高性能を求めず汎用の衛星本体としたことから、放射計データ処理ソフトウェアには位置合わせ精度を高める機能を導入する必要性から大きな開発要素が加わるようになった。位置合わせ処理や校正処理のアルゴリズムについては、気象庁が蓄積した経験を踏まえつつアルゴリズム

を開発できると考えられること及びこれらの基幹的な技術は次々期の 10 号及び 11 号を見据えて気象庁の自前の技術として維持・継承していくことが重要であることから気象庁が作成し整備業者に提供することにした。このように、位置合わせ処理や校正処理などの放射計データ処理ソフトウェアのうち観測データの品質にかかわる中心的な部分のアルゴリズムを気象庁が作成することによって製造経費の削減と観測データの品質及び気象庁の技術力の維持・向上を図っている。

さらに、「ひまわり」の観測データは予報業務や防災などに欠かすことのできないものであることから、観測の欠落のない安定した運用が求められている。したがってひまわり 8 号及び 9 号の製造では、衛星本体と放射計データ処理ソフトウェアが連携して高性能・高精度の観測データを安定して提供できるシステムの導入が重要課題となっている。

3. ひまわり 8 号及び 9 号の概要

ひまわり 8 号及び 9 号は、2011 年 12 月に詳細設計を終えており設計が固まった状態である。ひまわり 8 号及び 9 号は、ひまわり 6 号及び 7 号と同じ 3

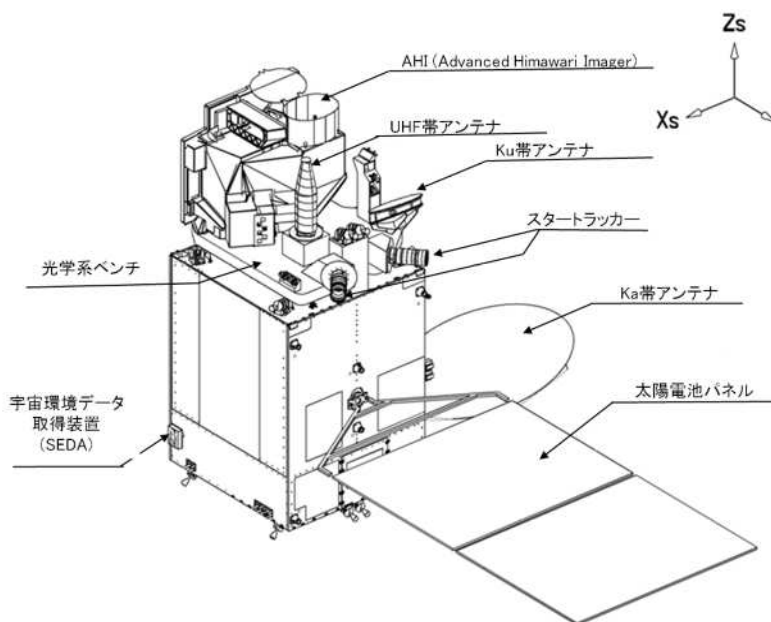


図 2 ひまわり 8 号及び 9 号の外観図



写真 1 製造中の AHI (ITT Exelis 提供)

軸制御の衛星で全長は約 8m (太陽電池パネルを含む) 打ち上げ時の質量は約 3,500kg を予定している。衛星本体の設計寿命は 15 年以上で、そのうちの 8 年以上で観測を行うことができる設計としている。

図 2 に示した外観図から衛星の地球指向面 (Zs 方向) に熱や振動の影響が小さい光学系ベンチがあり、この上に観測に必要な様々な機器が設置されていることが分かる。ひまわり 8 号及び 9 号の目的は 2 つあり、その一つが可視赤外放射計による観測を行うことである。この可視赤外放射計は AHI (Advanced Himawari Imager) と命名しており、米国の次期静止気象衛星 GOES-R シリーズ (2015 年以降打ち上げ予定) に搭載予定の可視赤外放射計である ABI (Advanced Baseline Imager) とほぼ同等の機能を有している⁽⁸⁾。写真 1 は製造中の AHI の外観を写したものである。AHI の詳細を 3.1 章で説明する。もうひとつの目的は、データ収集システム (Data Collection System, DCS) と呼ばれる機能である。DCS は、情報伝送手段の少ない船舶や離島に通報局を設置し観測した気象データ、震度計データ及び潮位データなどを「ひまわり」を中継して地上に伝送し、収集した通報局データを処理し、気象庁をはじめとする利用者に配信する機能である。ひまわり 8 号及

び 9 号でもこの機能は継続しており、これまでの利用者は運用衛星が切り替わった場合でも意識することなく連続した利用が可能である。

ひまわり 8 号及び 9 号の二つの目的を精度よくかつ効率的に行うための機能が衛星本体に備わっている。まず、衛星の姿勢を制御するための機器が光学系ベンチ上に AHI とともに設置してある。スタートラッカー (STT) は、ひまわり 6 号や 7 号のアースセンサと同様の働きをするもので、STT の観測視野にある星の位置から慣性空間における衛星の姿勢を決定することができる。図 2 では見えないが低周波から高周波までの衛星の動きを測定する慣性基準装置 (IRU, Inertial Rate Unit)、高周波レートセンサ (ARS, Angular Rate Sensor)、加速度計 (ACC, Accelerometer) も設置しており、これらと AHI の観測データを組み合わせて姿勢制御や位置合わせ処理を行う。

通信系装置として、観測データの伝送に使用する Ka バンドアンテナ、テレメトリ・コマンドの送受信に利用する Ku バンドアンテナ及び通報局データの中継機能で地上からのデータを受信する UHF アンテナがある。なお、これまでの「ひまわり」シリーズで用いてきた S バンドは利用しない。また、この波長を利用したひまわり 8 号及び 9 号からの直接データ配信も行わない。ひまわり 8 号及び 9 号の静止位置は、これまでの「ひまわり」と同様に東経 140 度付近であり、経度分離により ± 0.1 度の範囲で運用する予定である。ほぼ同じ軌道位置で運用することによって、衛星相互の運用切り替えの簡略化や空中線といった地上設備の共有を図ることができる。

表 1 AHI の特徴

中心波長と半値幅は AHI の応答関数設計値から算出 (気象衛星センターひまわり 8 号及び 9 号ウェブページ)。中心波長は半値波長上限と下限の中心値。

バンド	中心波長 (μm)	解像度 (衛星直下点)	想定される用途
1	0.46 μm	1.0 km	カラー合成雲画像
2	0.51 μm	1.0 km	カラー合成雲画像
3	0.64 μm	0.5 km	カラー合成雲画像
4	0.86 μm	1.0 km	植生、エアロゾル
5	1.6 μm	2.0 km	雲相判別
6	2.3 μm	2.0 km	雲有効半径
7	3.9 μm	2.0 km	霧、自然火災
8	6.2 μm	2.0 km	中上層水蒸気量
9	7.0 μm	2.0 km	中層水蒸気量
10	7.3 μm	2.0 km	中下層水蒸気量
11	8.6 μm	2.0 km	雲相判別
12	9.6 μm	2.0 km	全オゾン量
13	10.4 μm	2.0 km	雲画像、雲頂情報
14	11.2 μm	2.0 km	雲画像、海面水温
15	12.3 μm	2.0 km	雲画像、海面水温
16	13.3 μm	2.0 km	雲頂高度

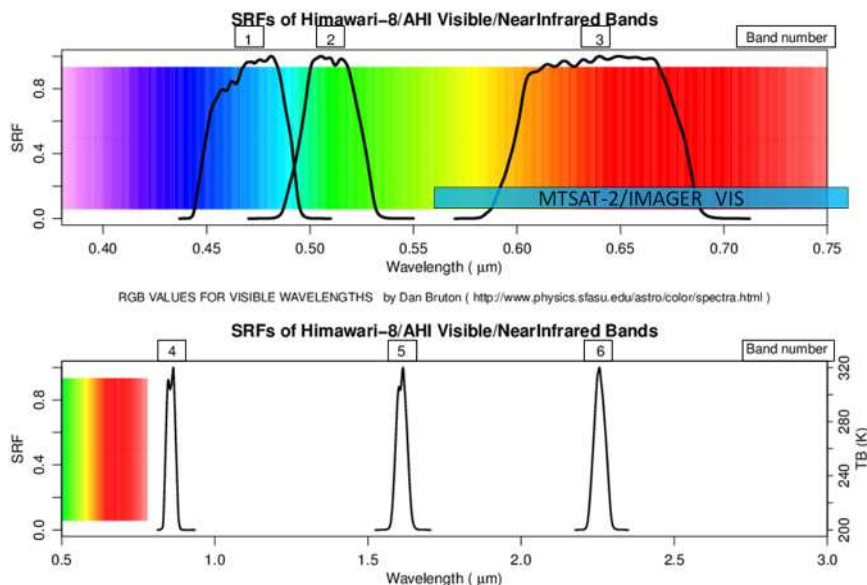


図 3 可視・近赤外域の波長特性

AHI 可視・近赤外域の正規化した波長応答関数を実線で示す。可視域の 3 バンドが青、緑及び赤に対応している。使用したデータは AHI の設計値でひまわり 8 号及び 9 号のウェブページで公開しているものである。MTSAT-2 (ひまわり 7 号) の IMAGER の可視バンドを水色の帯で示す。IMAGER には近赤外域のバンドは搭載されていない。

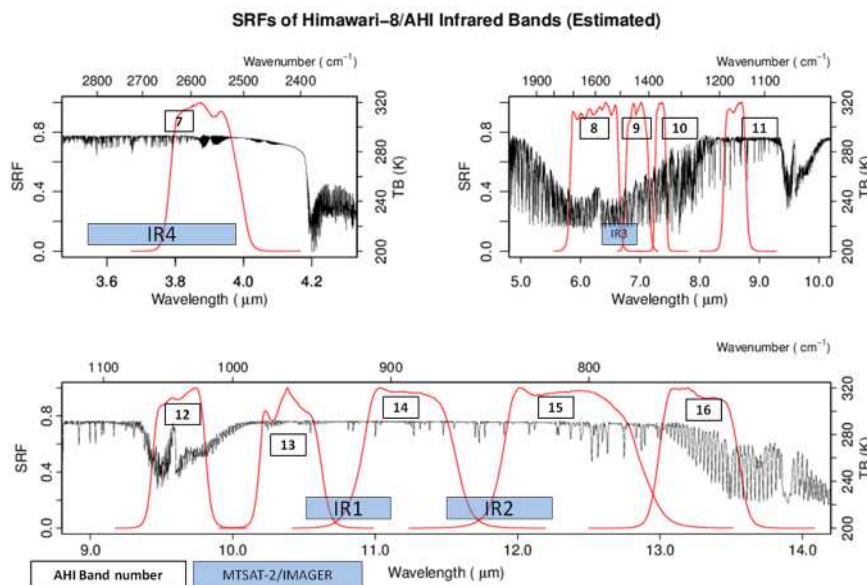


図 4 赤外域の波長特性

AHI 赤外域の各バンド (バンド 7 から 16) の正規化した波長応答関数を赤の実線で示す。黒の実線は、この波長応答関数と 1976 米国標準大気を用いて LBLRTM により晴天時の大気上端の温度 (AHI が観測すると推定する温度) を示したものである。波長応答関数はひまわり 8 号及び 9 号のウェブページで公開している設計値を使用した。MTSAT-2 (ひまわり 7 号) の IMAGER の赤外バンドを水色の帯で示す。

3.1 AHI の特徴

AHI の光学特性を表 1 に示す。AHI は、ABI とほぼ同じバンド構成であるが、ABI にある $1.3 \mu\text{m}$ に替わり $0.51 \mu\text{m}$ (バンド 2) を採用した点が異なっている。AHI のバンド 2 は可視光の緑色に相当する波長でバンド 1 と 3 を加えた 3 バンドから可視光による RGB カラー画像合成画像 (トゥルーカラー画像) の作成が可能となっている (図 3)。また、観測バンド数は運用中のひまわり 7 号が可視 1 バンドと赤外 4 バンドの合計 5 バンドであるのに対し、AHI では、可視 3 バンド、近赤外・赤外 13 バンドの合計 16 バンドに大幅に増加している。AHI で採用したバンドは、これまで極軌道気象衛星や地球観測衛星などに搭載された放射計で使用実績があり、さまざまな分野で利用され成果を上げている⁽⁹⁾。表 2 にひまわり 8 号及び 9 号と GOES-R やひまわり 7 号の機能等の比較を示す。

観測バンド数の増加とともに空間分解能 (画像の解像度) も向上している。これまで衛星直下点で 4km だった赤外の空間分解能が、すべてのバンドで 2km 以下に向上しており、可視のバンド 3 では 0.5km の解像度を実現している。

図 3 と図 4 には各バンドのセンサ波長応答特性 (Spectral Response Function) を示している。このデータについては気象衛星センターのひまわり 8 号及び 9 号ウェブページ^c で公開しており、AHI のデータを利用したプロダクトの開発などに活用できる。今回の公開データは製造中のため実測値ではなく設計値であり、新しいデータが公開されれば直ちにデータを更新する予定である。図 4 には、AHI のセンサ波長応答特性のほか、衛星が晴天時に観測すると推定する単波長の輝度温度を示している。この輝度温度は、1976 米国標準大気⁽¹⁰⁾ を用い LBLRTM⁽¹¹⁾ によって計算した衛星直下点における大気上端の放射輝度の値から求めたものである。また、図 3 と図 4 には、比較のためひまわり 7 号搭載の IMAGER の各バンドの観測波長域も併せて示している。

もうひとつの特徴は、時間分解能 (観測に要する時間) の向上である。ひまわり 7 号までは、全球観測にはどの衛星でも 30 分程度かかっていたが、AHI では、大幅に短縮され約 5 分で観測を終了することが可能である (観測スケジュールや伝送データ量等の問題により全球観測を 5 分毎に連続した観測を行うことはできない)。全球観測は、西から東へ同じ方

表 2 ひまわり 8 号及び 9 号の GOES-R とひまわり 7 号の比較

	ひまわり 8 号及び 9 号	GOES-R	ひまわり 7 号
可視赤外放射計	AHI	ABI	IMAGER
観測波長数	16 バンド 可視 3 (RGB に対応するバンド)、近赤外 3、赤外 10	16 バンド 可視 2、近赤外 4、赤外 10	5 バンド 可視 1、赤外 4
空間分解能 (衛星直下点)	0.5km、1km、2km	0.5km、1km、2km	1km、4km
観測時間・観測間隔	全球観測約 5 分 (10 分毎の観測運用を計画) 最短 30 秒間隔 ($500 \times 1000\text{km}$)	全球観測約 5 分 (15 分毎観測を計画、5 分毎の全球連続観測も実施可能) 最短 30 秒間隔 ($1000 \times 1000\text{km}$)	全球観測 30 分毎 北半球観測 30 分毎
走査方法	西から東の 1 方向観測 (23 回の走査で全球を観測)	西から東の 1 方向観測 (22 回の走査で全球を観測)	東西両方向の折り返し (約 1400 回の走査で全球を観測)
軌道決定	レンジング	レンジング、GPS 搭載	レンジング
姿勢決定	スタートラッカー レートセンサなど	スタートラッカー レートセンサなど	サンセンサ アースセンサ
位置合わせ方法	ランドマークによる補正 (領域観測によるランドマーク観測)	ABI による星観測による補正 (観測スケジュールに組み込み)	ランドマークによる補正

c. 気象衛星センターのひまわり 8 号及び 9 号ウェブページ <http://mscweb.kishou.go.jp/himawari89/index.html>

向に走査し、北から南の順に 23 回走査することで地球の北端から南端までの観測データが得られる。この全球観測を実施しながら、その間に複数の小領域の観測を組み込む機能を有している。図 5 は、全球観測と小領域観測（領域観測 1 から 5）の観測範囲の大きさ示したものである。表 3 は、AHI の観測運用を 10 分間単位として考え全球観測と組み合わせることができる小領域観測の回数を示したものである。

領域観測 1 と 2（東西 2000km、南北 1000km の領域）は、この二つの領域観測を合わせて日本付近を 2.5 分毎に観測することができる。また、領域観測 3（南北、東西ともに 1000km の領域）も 2.5 分毎に観測することができ、観測対象は台風や発達した低気圧などを想定している。これとは別に、領域観測 4 と 5（東西 1000km、南北 500km の領域）は約 30 秒毎に観測することができ、主な観測対象は地球上の特徴的な海岸線(ランドマーク)画像の取得で、ランドマークの予測位置と観測位置の違いを利用して位置合わせ処理を行う予定である。領域観測 3、4 及び 5 の観測位置は観測毎にコマンドによって変更することができる。

AHI による時間分解能の向上では、領域観測 4 と 5 で 30 秒間隔の観測データを取得することができることから新しいプロダクトの期待が広がっている。近年、このような小領域の高頻度の観測を利用した積乱雲検知⁽¹²⁾ や火山噴火の監視などのプロダクトへの利用が注目されており、30 秒間隔の観測データのプロダクトへの利用を検討している。前述のように領域観測 4 と 5 はひまわり 8 号及び 9 号の位置合

わせ処理の精度に大きくかかわる部分であるので、位置合わせ精度が劣化しない範囲で領域観測 5 をプロダクト観測に割り振ることを検討している。当面は、領域観測 5 を観測要求があった場合にプロダクト作成用の観測に割り当てることを検討している。

図 6 は、ここまで説明した AHI の観測機能を踏まえ 10 分間の観測スケジュール（観測タイムライン）

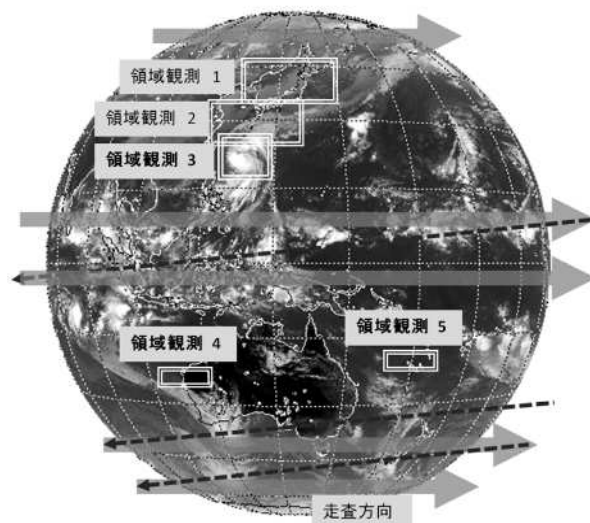


図 5 AHI の観測方法と領域観測

太い矢印で全球観測の方向を示す。西から東方向に観測した後、西端へ戻り（破線）次の観測を行う。23 回の走査で全球をカバーする。実際の観測タイムラインでは、全球観測の走査の間に領域観測 1 から 5 が組み込まれる。領域観測おおよその大きさを二重線枠で示している。観測場所については領域観測 1 と 2（日本領域）以外は可変である。

表 3 AHI が 10 分間に観測できる領域観測ごとの回数

10 分間に全球観測を 1 回と領域観測 1 から 5 の 52 回の領域観測することが可能。

観測種別	最小範囲	観測間隔	観測フレーム内の観測回数	観測対象領域
全球観測		10 分	1 回	全球(衛星から見える地球のすべての範囲)
領域観測 1	東西 2000km × 南北 1000km	約 2.5 分	4 回	日本領域(北～東)
領域観測 2	東西 2000km × 南北 1000km	約 2.5 分	4 回	日本領域(西～南)
領域観測 3	東西 1000km × 南北 1000km	約 2.5 分	4 回	台風領域
領域観測 4	東西 1000km × 南北 500km	約 30 秒	20 回	ランドマーク観測
領域観測 5	東西 1000km × 南北 500km	約 30 秒	20 回	ランドマーク観測及び積乱雲等の観測

の例を示している。この観測タイムラインは、全球観測の各走査や各領域観測の観測時間間隔が均等になるように考えられており、この観測タイムラインにしたがって休むことなく観測を続ける計画である。ただし、衛星運用に必要な軌道制御（東西と南北それぞれ2週間に1回程度）やホイールアンロード等のハウスキューピング運用や太陽校正観測実施時等には、これとは別の観測タイムラインを使用する。観測タイムラインは、地上試験や軌道上試験の結果を反映して決定し、これを基にAHIの観測データを処理する地上処理スケジュールが構築される。

AHI と同等の可視赤外放射計を搭載するGOES-R/ABIでは、15分単位の観測スケジュールによる観測を想定している⁽¹³⁾。ABIは、15分に1回22走査で全球観測を行い、その間に5分ごとに米国を6走査で観測し、30秒ごとに2走査でAHIの領域観測3と同じ程度の領域を観測する計画が示されている。この観測スケジュールのほかにABIでは、小領域の観測を行わず、全球観測を5分ごとに繰り返す

返し15分間に3回全球観測を行う観測スケジュールもできることが示されている。ひまわり8号及び9号では、領域観測の一部でランドマークを観測して位置合わせの処理に使用するが、GOES-Rではランドマークを位置合わせ処理に利用していない。GOES-Rでは、ランドマークを観測する代わりにABIで観測可能な地球周辺の星を観測して位置合わせ処理を行う⁽¹⁴⁾。この星観測は15分のABIの観測スケジュールに組み込まれている。

AHIは、表2に示すように、ひまわり7号に比べて観測波長の増加、空間分解能の向上及び観測回数の増加など観測機能が向上している。図6のような観測タイムラインで1日の観測を行うと、衛星側で編集した観測データは後述する衛星の地上処理で作成する放射計データファイルで換算して1日当たり約0.8TBのデータ量になると推定できる。これはMTSATシリーズの観測データの出力形式であるHRITのデータ量が1日で約12GBであることに比べて格段に大きい。また、「ひまわり」のこれまで約

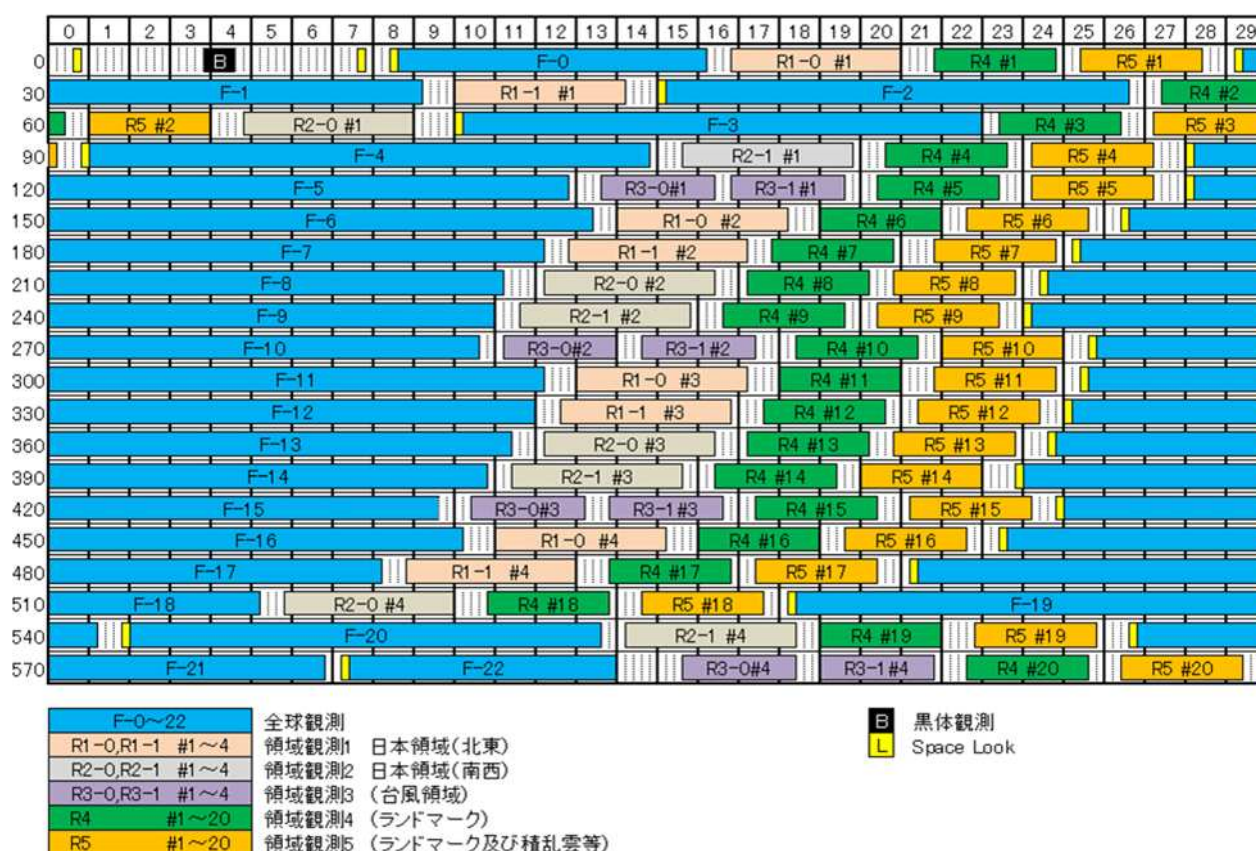


図6 10分間の観測タイムライン

通常時に使用すると想定する観測タイムラインの例。この観測タイムラインを基に、AHI 観測コマンドや地上処理ソフトウェアの起動スケジュールなどを作成する。

35 年間に蓄積したデータ量を約半年で上回る量である。地上での AHI データの処理や保存などについてこのデータ量を処理するシステムを構築することが必要である。

(1) AHI の校正機能

図 7 は、AHI による観測を単純化して示したものである。地球からの放射は、走査鏡などの放射計内部の光学系を經由して検知素子へと導かれ、検知素子の出力した電圧をカウント値に変えた観測データが得られる。地上で衛星から伝送されたデータを編集するとこのカウント値が得られる。プロダクトなどの作成処理で利用するには、カウント値が持つ元の放射の強さである放射輝度に変換する必要がある。この変換係数を求める処理のことを校正処理といい、変換係数のことを校正係数と呼んでいる。

衛星搭載放射計の校正処理では、放射輝度の分かっている校正の基準となる校正源を放射計内部に持つ方法が一般的に採用されている⁽¹⁵⁾。また、検知素子へ入力した放射の強さに比例した出力が得られ、その関係が線形である場合、図 8 のように校正源 (N_t)

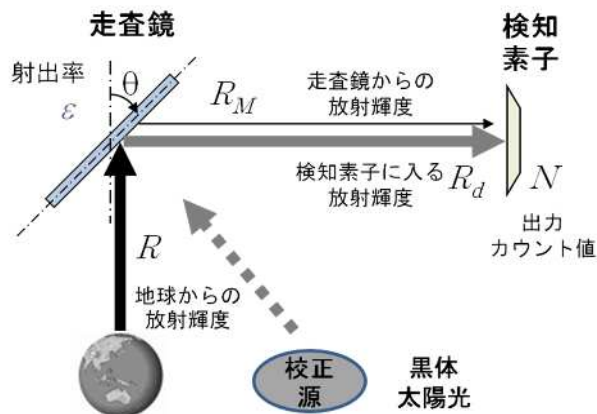


図 7 校正の概念図

放射計に入射する地球からの放射輝度 (R) は、検知素子に到達するまでの光学系路の影響により検知素子に入射する放射輝度 (R_d) に変わる。検知素子は入射した放射輝度に相当する出力カウント値 (N) を出力する。校正は検知素子へ入射する放射輝度と出力カウント値の関係を既知の放射輝度を持つ校正源を用いて明らかにすることである。 N から R を求めるには、光学系路上にある走査鏡からの放射輝度 (R_M) についても考慮する必要があるため、走査鏡の射出率 (ϵ) も必要である。射出率はその角度依存性を含めて地上試験で測定される

と 0 点となる宇宙空間 (N_{sp}) を利用して校正係数を決定することができる。AHI でもこのような校正方法が採用されており、赤外域の校正に使用する黒体と可視域の校正に使用する太陽光による校正源を備えている。校正源の精度は、校正精度に直接影響があり校正源に対する目標精度は表 4 に示すとおりである。このほかに校正処理では、図 7 で示すように光路上にある走査鏡などによる減衰や赤外域の走査鏡などからの放射を考慮する必要があるため、走査鏡の光学特性が必要である。さらに、検知素子の入力エネルギーと出力値との関係やセンサ波長応答特性などのデータが必要である。これらのデータは校正処理では決定できないため、地上試験などで実際に測定して求める。

a . 黒体校正機能

黒体による校正機能は、赤外域のバンド (バンド 7 から 16) の校正に用いられる。赤外域のバンドは、観測対象物の持っている温度に比例した放射の強さ (放射輝度) をカウント値として観測している。校正源となる黒体の温度はリアルタイムで正確に測定

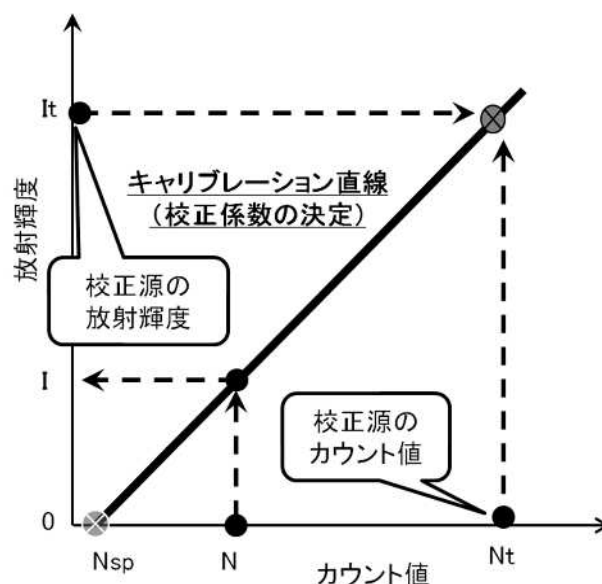


図 8 校正処理の方法

入射した放射輝度と出力カウント値との関係を示す校正係数の決定は、既知の放射輝度を持つ校正源 (カウント値 N_t) と 0 点に相当する宇宙空間 (カウント値 N_{sp}) を利用した 2 点から求められる。この直線の係数を利用することによって、観測したカウント値 (N) から放射輝度 (I) を求めることができる。

表 4 校正処理に用いる情報

項目	説明及び精度要求など
黒体校正源観測データ	赤外域の校正に使用する。AHI 内部に校正源として温度制御した黒体を設置。黒体からの放射輝度は、黒体温度から計算する。黒体の放射輝度を求めるために必要な射出率やテレメトリから黒体温度を算出する係数などは地上試験などで測定する。 黒体のテレメトリから算出した放射輝度は、校正源となる黒体の放射輝度（真値）に対して $100 \pm 0.5\%$ の範囲内。
太陽校正源観測データ	可視・近赤外域の校正に使用する。太陽光を AHI 内部に取り込み反射させる拡散板を使用する。太陽光の放射輝度は開口径によって減衰される。拡散板の光学特性や減衰させた太陽光の放射輝度は地上試験等によって測定する。 減衰させた太陽光の放射輝度は、公称値に対して $100 \pm 5\%$ の範囲内にあり、また減衰させた太陽光の放射輝度の 1 ヶ月間の標準偏差は、公称値の 1% 以下。
走査鏡の光学特性	走査鏡の光学特性（射出率や反射率とその角度依存性など）は、地上試験等で測定する
検知素子特性	検知素子の入力と出力の関係（感度特性）を地上試験で測定する。感度特性の非直線性部分（2 次係数）は校正処理で算出できないためこのデータを校正係数として利用する。1 次係数は校正処理で校正処理毎に更新する。
センサ波長応答特性	各バンドのセンサが観測する波長と感度を示すデータ。地上試験で測定する。観測データの処理にも使用する。

され、その放射特性は地上試験で測定しているため、黒体の温度から黒体の放射輝度を正確に求めることができる。赤外域の校正処理では、この黒体データと 0 点となる宇宙空間を基に校正係数を決めている。黒体校正は必要に応じて行うことができるが、運用では図 6 で示すように観測タイムラインの最初に 1 回、10 分毎に行う計画である。

b . 太陽校正機能

太陽による校正機能は、可視・近赤外域のバンド（バンド 1 から 6）の校正に用いられる。可視・近赤外域のバンドは赤外域と異なり太陽光を反射する強さ（アルベド）に比例した放射輝度を観測している。そこで太陽光を校正源として AHI 内部に取り込み、拡散板に反射させて校正を行う。太陽光は、開口径によって減衰しており、拡散板が反射する放射輝度の公称値は拡散板の光学特性と合わせて地上試験で測定される。太陽校正では、拡散板の光学特性の経年変化が校正精度に大きな影響を及ぼすため、内部校正光源を併用して補正を行う放射計⁽¹⁶⁾もあるが AHI には内部光源は備わっていない。しかし、太陽校正は、観測に要する時間が 1 分程度と短く、観測しない時間帯には太陽光を遮蔽するカバーによって保護されている。運用期間の太陽校正観測回数を考慮した解析では、劣化は小さく要求精度 $100 \pm 5\%$ に対してはるかに小さいとされている。可視校正

は、太陽校正が黒体校正と異なり太陽と衛星の位置関係が決まった状態になった場合、1 日に 1 回（AHI では地方時 6 時から 6 時 15 分の間）だけ可能であること、可視校正源の精度に不確定性があることを考慮した運用が必要である。また、太陽校正の精度を維持するため、拡散板の劣化をモニタする月観測や他衛星との比較も検討している。

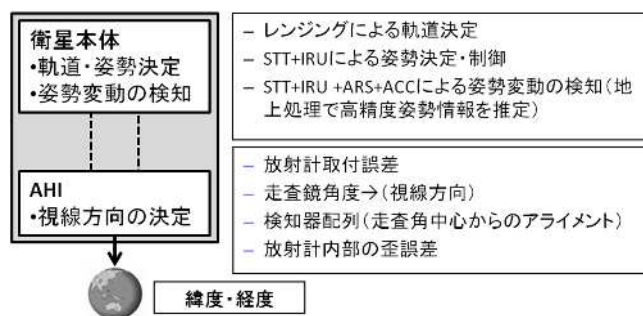


図 9 位置合わせ処理の概要

(2) AHI の位置合わせ機能

AHI の観測データの位置合わせ処理は、観測したデータと地球上の緯度経度との対応付けをする処理である。この処理には、衛星や AHI からのさまざまな情報が必要で、AHI には位置合わせを行うための情報を得る機能が用意されている。

図 9 に示すように衛星の本体に AHI が取り付けら

表 5 AHI の位置合わせに用いる情報

番号	項目	説明及び精度要求など	備考
	衛星の位置（軌道情報）	2 衛星の経度分離（±0.1 度以内）による衛星管制ができること	レンジングによって決定
	衛星の姿勢情報	地上局と衛星管制及び観測データの伝送に支障がないこと	STT と IRU を衛星内で処理して決定
	AHI の姿勢変動検知	1 軸あたり 4 μ rad 以下 10 分間のドリフトが 14 μ rad 0.01 秒以下の間隔	STT、IRU、ARS 及び ACC のデータを地上で解析し、128Hz のデータを高精度姿勢情報として作成
	AHI の走査角検知	東西、南北 4 μ rad 以下 0.01 秒以下の間隔	
	AHI の走査方法に関する情報	走査角から視線方向を求めるための AHI の走査方式の詳細情報	で検知した走査角を AHI の視線方向に変換するために使用
	AHI の各アライメントに関する情報		視線方向の算出の補正量として利用
	アライメントの変化と温度に関する情報	1 日の変動量が ±70 μ rad 以下	解析値が提供され、軌道上で修正を行う

れており、衛星本体と AHI の軌道や姿勢はほぼ同じとみなせる。さらに AHI が見ている方向(視線方向)を決定するには、AHI の走査角の情報や取り付け誤差などが必要である。この位置合わせ処理で使用する、衛星や AHI から得られる情報を表 5 に挙げる。

表 5 の から によって衛星の姿勢を決定し、AHI の視線方向を から 決定することになる。ここで から は AHI ではなく衛星本体に備わった機能で、特に と についてはひまわり 8 号及び 9 号の軌道保持運用や地上局との衛星管制・観測データ伝送を行うための精度を持っているにすぎず、AHI の位置合わせに必要な精度を満たしていない。そこで、位置合わせ処理で観測画像や 以降の情報を利用して AHI のデータ解析に必要な精度を持った位置合わせ係数の算出を行う必要がある。 の AHI の姿勢変動検知については、重力場などによる低周波のものから AHI の走査鏡の動作やホイールの回転などに起因する高周波成分も含めた姿勢変化を検知する。この検知のため AHI の設置面である光学系ベンチ上に置かれた STT、IRU、ARS 及び ACC の姿勢制御系機器のデータを地上で処理し、128Hz までの姿勢変化が「高精度姿勢情報」として作成される。この高精度姿勢情報は、表 5 の で精度要求しているように非常に精度のよいものであるが、 で決定した衛星の姿勢は、 の軌道決定情報の精度などにより地球上の緯度経度に対してバイアスをもつ

たものである。このバイアスは、後述の位置合わせ処理アルゴリズムで説明する観測画像を利用した処理で補正する。

GOES-R のシステムでは、ひまわり 8 号及び 9 号で製造費用の低減のため機能要求していない衛星本体の衛星軌道や姿勢の決定性能についても高性能の機能を持たせた設計を行っている⁽¹⁵⁾。特に、衛星本体へ GPS を搭載し⁽¹⁷⁾軌道決定精度を向上させることや ABI による星観測による軌道と姿勢決定精度の向上を図っており、衛星本体の機能と ABI の観測データを複合した軌道・姿勢決定精度を高める設計を行っている点がひまわり 8 号及び 9 号と異なっている。表 2 にひまわり 8 号及び 9 号と GOES-R やひまわり 7 号の位置合わせ機能に関する比較を示す。

このほか位置合わせに必要な情報として挙げたものについて簡単に説明を加える。 の AHI の走査角検出は AHI の走査鏡の角度を測定する機能で視線方向を求めるために利用する。 の AHI の走査方式によって検出された走査角から視線方向への変換ができる。 のアライメントは、温度環境や取り付け誤差などによる視線方向算出の補正項や姿勢角補正の補正項として利用する。

3.2 通信機能の概要

ひまわり 8 号及び 9 号の通信機能は、AHI の観測データを送信する機能

通報局データの中継機能
 テレメトリ信号の送信とコマンド信号の受信及
 ビレンジング信号を中継する機能 (TT&C)
 を有している。

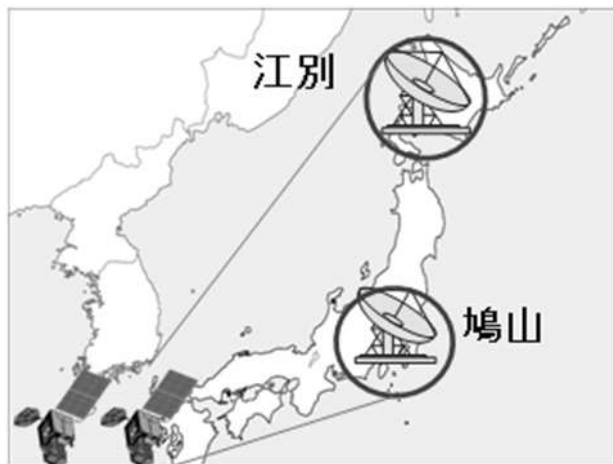


図 10 地上局の配置

地上局はKaバンドの降雨減衰の影響を除外するため関東地方と北海道に置くこととし、埼玉県鳩山町と北海道江別市にPFI事業者が施設を整備している。図中の円はKaバンドの伝送イメージを示したもので、地上局周辺にビームを絞って効率的な伝送を行う設計となっている。

表 6 に、ひまわり 8 号及び 9 号の通信回線と主な用途を示す。AHI の観測データは、Ka (18GHz 帯) バンドを利用して地上に送信する。これまで、「ひまわり」の観測データは S バンドを利用して送信していたが、S バンドでは AHI のデータ量増加に対応するための高速データ伝送に必要な広帯域を確保できないこと、地上設備に大きな空中線が必要となることから Ka バンドを利用することになった。しかし、Ka バンドでは、電波の特性として降雨による減衰があり強雨時には通信障害が発生する可能性がある。Ka バンドの降雨減衰の対策と自然災害発生時の運用継続性を考慮し、2 局によるサイトダイバーシティを行う。2 局の配置は、PFI 事業者によって埼玉県鳩山町と北海道江別市が選定された (図 10)。ひまわり 8 号及び 9 号の Ka バンドのアンテナは 2 ホーン + パラボラ鏡面修正により、選定した 2 つの地上局へ効率よく伝送できる設計となっている。

「ひまわり」は地球を観測する機能のほかに船舶

表 6 ひまわり 8 号及び 9 号の通信回線と主な用途

バンド	周波数帯	用途
UHF	400MHz 帯	通報局データの収集
Ku	12-14GHz 帯	テレメトリ、コマンド、レンジング
Ka	18GHz 帯	AHI データの伝送 収集した通報局データの伝送

や離島で観測された気象データや潮位データなどを中継する DCS を有している。ひまわり 8 号及び 9 号でも、通報局データ中継機能を搭載しており、通報局はこれまで通りこの機能を利用することができる。通報局データは、UHF 帯 (402MHz) で受信し、地上に Ka 帯 (18GHz) で伝送される。UHF 帯のアンテナはひまわり 8 号及び 9 号が地球画像の取得を行っている範囲をカバーするように製作される。また、地上へのデータ伝送は AHI の観測データと同様に Ka 帯を用いることになっており、送信アンテナは共有である。

TT&C は、Ku バンド (12-14GHz 帯) を利用する。このバンドを利用したレンジングによる軌道決定を行う。

3.3 姿勢制御

衛星の姿勢制御は、AHI の位置合わせ機能で説明した姿勢を検知する機器のうち STT と IRU を用いて行うことになっている。STT と IRU のデータは、ARS や ACC のデータとともに地上に伝送され地上で処理する高精度姿勢決定に利用されるが、同時に衛星本体でも処理し姿勢制御のための情報として利用される。ひまわり 7 号の姿勢制御は、アースセンサで地球のエッジを検出することで姿勢制御を行っている。アースセンサは、地球のエッジを検出する部分に太陽などが重なる時間帯では、その検出部分を除外する必要がある。この操作を行うと衛星の姿勢制御に不連続が生じる問題がある。ひまわり 8 号及び 9 号では、STT が姿勢検出の主体となるためアースセンサのような運用が不要で姿勢制御の不連続も生じない。また、アースセンサが不得手であったヨー軸の姿勢角決定が、ひまわり 8 号及び 9 号では STT の導入によって格段に向上しており、表 7 の姿勢制御誤差が小さくなっていることがわかる。

STT では、全球方向すべての星によって姿勢捕捉ができるため時間によらず姿勢の安定化が図れるよ

うになった。この結果、通常運用時ではないが打ち上げ後の姿勢捕捉や万が一の姿勢喪失からの姿勢の再捕捉などに対する制約がなくなった。

三軸衛星では、姿勢制御を内部のホイールによって行っているが、定期的にホイールのアンローディング運用が必要である。ホイールのアンローディングでは、衛星の姿勢が大きく動くため、観測した画像に影響を及ぼす可能性がある。このため、ひまわり8号及び9号の運用では、1日に4回まで、決ま

表7 通常運用時の姿勢制御精度(単位:度)

	ひまわり7号	ひまわり8号及び9号
使用機器	アースセンサ サンセンサ、IRU	STT、IRU
姿勢制御 誤差	0.045(ロール) 0.043(ピッチ) 0.128(ヨー)	0.013(ロール) 0.022(ピッチ) 0.013(ヨー)

った時間にアンローディングを実施することを許可しており、アンローディング実施時間帯の観測は通常のタイムラインによる観測は行わない計画である。

3.4 宇宙環境データ取得装置

ひまわり8号及び9号には、宇宙環境データ取得装置(SEDA)が搭載されている。ひまわり4号まで搭載していた宇宙環境モニタ(SEM)に相当するものである。SEDAは、ひまわり8号及び9号の軌道上の宇宙環境をモニタする目的で陽子線及び電子

線を計測し、衛星のハウスキッピング及び故障解析に用いることを目的に設置している。SEDAは陽子線センサと電子線センサの独立したセンサを有し、陽子線と電子線の独立した環境変化のモニタが可能である。

写真2に示すSEDAの外観で確認できるように、



写真2 宇宙環境データ取得装置の外観

陽子線センサは測定エネルギー感度の異なる8個のセンサを配置し、15MeV~100MeVのエネルギー範囲の陽子線の計測を行う。また、電子線は1個の電子センサに、測定エネルギー感度の異なる8個のプレートを直列に配置し、0.2MeV~5MeVのエネルギー範囲の電子線の計測を行う。SEDAの主な性能を表8に示す

表8 宇宙環境データ取得装置の主要性能

項目	主要性能	備考
計測項目	陽子線、電子線	
センサチャンネル	陽子線: 8ch(8個のセンサ素子)	
	電子線: 8ch(8個のプレートを直列配置)	
計測エネルギー範囲	陽子線: 15MeV~100MeV	
	電子線: 0.2MeV~5MeV	
観測データ更新周期	10秒以上	10秒~3600秒に可変
視野角(FOV)	陽子線センサ: ±39.35度	
	電子線センサ: ±78.3度	
計測量	陽子線: カウント数 2.68×10^8 (Non-Coincident) 3.35×10^7 (Coincident)	28ビットカウンタ 25ビットカウンタ
	電子線: 1.75 nA(最大)	(Low gain channel)
テレメトリデータ量	観測時: 1536bps(最大)	陽子線、電子線データ含む
	メモリダンプ時: 1024 bps(最大)	ダンプデータのみ

4．放射計データ処理ソフトウェア

放射計データ処理ソフトウェア（RDACS, Radiation Data Acquisition and Control Software）は、AHIのデータを地上で処理するソフトウェアである。RDACSは受信して復調したデータを入力として解凍、編集して放射計データファイルを作成することが第一の目的である。放射計データファイル作成までの処理フローは

放射計データパケットの解凍・編集
位置合わせ用パラメータ算出
校正用パラメータ算出
放射計データファイル作成

である。

また、AHIでは全球観測と様々な領域観測を組み合わせた観測タイムラインを用いて観測運用を行う計画である。領域観測の一部は観測位置が可変となっているため、観測位置と観測時間を決定し観測コマンドパラメータを作成する必要がある、

領域観測を設定しコマンドパラメータを作成することがRDACSのもう一つの目的である。

RDACSの処理フローのうち、気象庁は位置合わせ処理、校正処理及び領域観測選定処理の3つの処理の作成を行う。完成した各処理ソフトウェアは、RDACSの一部として衛星製造業者によって統合され、衛星本体と同時に納入される。本章では気象庁が作成した処理アルゴリズムの概要を記述する。RDACSの詳細設計については、気象庁が作成した「放射計データ処理ソフトウェア解説書」に記述している。この解説書については米国ITARに基づき開示できない部分や今後の製造過程で修正を行う可能性がある。ひまわり8号及び9号の運用開始をめどに衛星運用を含めてRDACSの詳細について報告する予定である。この章では、AHIなどから得られたデータの大まかな処理方法と気象庁が付加したアルゴリズムの概略について記述する。

4.1 放射計データファイル

各処理を説明する前にRDACSが作成する「放射計データファイル」について簡単に説明する。本稿執筆時点では、RDACSは作成中であることからフ

ァイルフォーマットの詳細設計は提示せず、特徴のみ説明する。

まず、放射計データファイルは衛星側からの最終出力データ形式であるが、この形式のまま一般の利用者が利用するものではない。放射計データファイルの特徴は、

- 1 走査、1バンドごとに作成されること
- 1 ファイルにデータ処理に必要な校正や位置合わせなどの情報がすべて含まれていること
- 観測した1画素ごとのデータは2バイト整数型に編集しているがデータ値の変換やリサンプリングを行っていないこと
- 各画素の2バイト整数データのうち2ビットの品質情報が付加されていること

などがある。特徴により、作成されるファイルの数は膨大（想定している観測タイムラインでは10分間に1392ファイル）になるが、1つの単位の観測が終了するまで待たずに1走査終了後にデータ処理を行い、データを伝送することができる利点がある。特徴により、利用者向けのプロダクトを放射計データファイルだけで作成できる。特徴により元の観測データの情報が損なわれていないため品質評価や処理アルゴリズムの変更による再処理も可能である。また、校正や位置合わせの各パラメータを作成した生データを入手することにより、さらに詳細な品質評価や処理の再現が可能である。ひまわり8号及び9号の地上局構成がデータ伝送回線の特徴から2局以上の地域冗長構成となっており、それぞれの地上局で放射計データファイルを同時に作成する。気象庁では、それぞれの地上局から伝送されたファイルの品質チェックを画素単位で行い、品質に問題のない1つのファイルに統合することを計画しており、この処理に特徴の品質情報を利用する。

このような特徴をもった放射計データファイルは、気象庁における最終保存形式となることがほぼ確定している。放射計データファイルを基に校正処理、位置合わせ処理及びリサンプリング処理を行った利用者提供データフォーマットについては現在検討中である。

GOES-RのABIの処理では、衛星データの地上処理で校正、位置合わせ及びリサンプリングまでを行った格子点データを作成することが示されている⁽¹⁸⁾

4.2 領域観測選定処理

AHI の機能として図 5 のように、全球観測と領域観測 1 から 5 の観測を組み合わせて行うことになっている。領域観測のうち 1 と 2 は日本付近を観測することで固定化されているが、領域観測 3 から 5 は台風、ランドマーク及び積乱雲などの観測を行うことになっており観測場所は可変となっている。これらの領域観測の観測位置を指定したコマンドパラメータを作成することが領域観測選定処理の目的である。

図 11 は領域観測選定の大まかなデータの流れを示したものである。この図から RDACS の位置合わせ処理から出力される「ランドマークコマンド情報ファイル」と気象庁から入力される「気象庁入力ファイル」の 2 種類が領域選定処理の観測要求情報として入力することが分かる。「ランドマークコマンド情報ファイル」は 30 秒間隔で観測を行う領域観測 4 と 5 の観測位置を指定するもので位置合わせ処理に使用するランドマークの取得に適した観測位置情報が書かれている。また、「気象庁入力ファイル」は領

域観測 3、4 及び 5 を利用した台風、低気圧、積乱雲及び火山などの観測を指示するもので、気象庁の観測要求がまとめられたものである。領域観測選定処理では、この二つのファイルの情報を決められた優先順位によって統合・編集して領域観測に必要なコマンドパラメータファイルを作成する。

領域観測選定処理に入力する 2 種類の観測要求情報は、地球上の緯度経度を用いて観測位置指定を行うことが基本である。しかし、領域観測 4 もしくは 5 を用いて AHI の校正処理をサポートするための月観測や深宇宙観測も行う計画がある。このような観測にも対応するため、地球上の緯度経度を観測要求情報として与えるところ、月観測などでは地球外も観測位置の指定ができるよう AHI の走査角を観測要求情報として与えることかできる設計とした。このように地球上の緯度経度だけでなく AHI の走査角の観測要求情報とするインターフェイスを採用したことで、AHI が観測可能範囲のほとんどの観測要求を領域観測選定処理によって対応することができる。

領域観測で観測するターゲットは、積乱雲、火山、豪雨及び自然火災などの新規プロダクトや災害の監視の目的に利用することを想定しており、領域観測選定処理はこれらのすべての観測要求にもこたえることができるよう設計している。また、月や深宇宙をはじめとする特殊な要求にも対応できる仕組みであり、将来新たな観測要求が出てきた場合でもコマンドパラメータの作成は可能と考えられる。

気象庁情報ファイルについては、RDACS ではなく気象庁側システムで各利用者からの要望を反映し、予め設定した優先度をもとに自動的に利用者間の調整ができるシステムを開発する計画である。

4.3 校正処理

RDACS の校正処理では、3.1(1)で説明した手法を基本として校正係数が決定される。校正係数の決定精度は校正源の精度に大きく依存しており、AHI に特に製造上に問題がなければ特別なアルゴリズムを追加する必要はない。しかし、これまでの「ひまわり」では何らかの補正アルゴリズムが組み込まれており、RDACS にもこれまで「ひまわり」校正処理アルゴリズムで補正処理を追加した設計をしている。

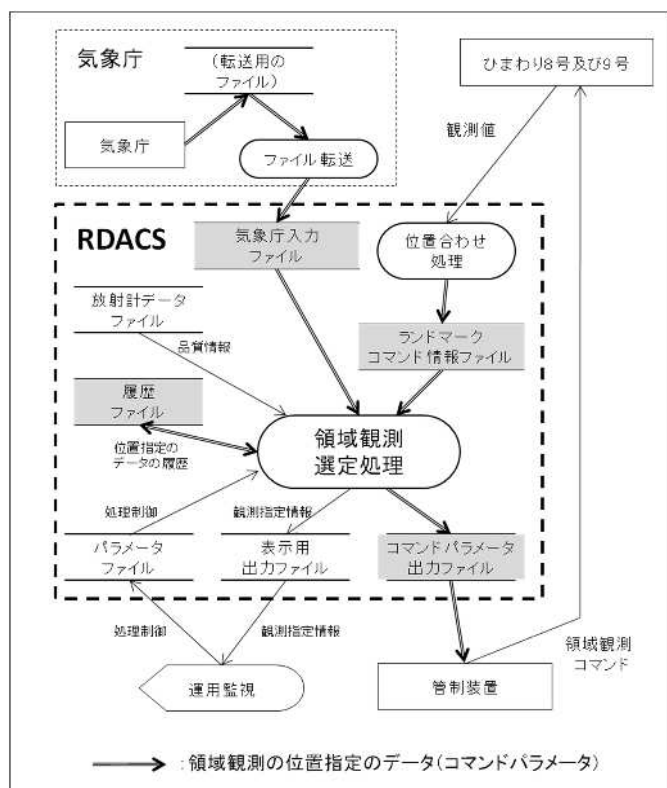


図 11 領域観測選定処理フロー

今後、地上試験や軌道上試験などの評価によって補正処理を追加する可能性はあるが、ここではRDACSの校正処理に導入したアルゴリズムについて簡単に説明する。

(1) 赤外校正

AHIの黒体観測は、観測タイムラインの最初に1回だけ行われるため、黒体校正によって決定した校正係数を観測タイムラインの観測データに適用する方法が赤外校正の基本である。また、必要に応じて全球観測時に観測される宇宙空間データを利用して、校正係数のバイアス補正を行う。

しかし、ひまわり7号のIMAGERでは、1日のうち衛星と太陽が向かい合う時間帯、すなわち地方時の深夜0時を挟む時間帯では、黒体校正では正しい校正係数を決定することができない現象が確認されていた。この時間帯は衛星と太陽が向き合い、走査鏡など放射計内部の構造物の温度が上昇し構造物自体の放射が大きくなる。この時間帯の黒体校正では、黒体からの放射の他に内部構造物からの放射も加わったものを検知素子が観測してしまうため間違った校正係数が算出されてしまう。このような効果は真夜中の時間帯に生じることから「真夜中効果」(Midnight Effect)と呼ばれ、この対策として「真夜中黒体校正補正」(Midnight Blackbody Calibration Correction; MBCC)が用いられている⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。ひまわり7号の校正処理では、MBCCのアルゴリズムが組み込まれている。RDACSでも、同様の補正アルゴリズムを取り入れ、ひまわり7号と同じような現象が発生した場合に適応する準備を行っている。

さらに、ひまわり7号のIMAGERでは、0点となる宇宙空間データが観測毎に大きく変動し、画像に顕著な縞模様として現れていた。この対策として宇宙空間データを平滑化するなどの処理が必要であった。AHIでは、宇宙空間データを用いた0点校正の方法として複数の宇宙空間データも利用できる設計を取り入れている。図6に示す観測タイムラインのように、宇宙空間観測が全球観測に連携して約30秒毎に行われており、前後2つの宇宙空間データを内挿してその間に挟まれた観測データの0点が補正できる。

(2) 可視校正

可視近赤外バンドについては、拡散板を用いた太陽光観測および宇宙空間観測から校正係数が決定できる。しかし、太陽校正を実施できる時間に対する制約があるため1日の可視検知素子の感度変化の傾向が分からないこと、太陽校正を毎日実施することを想定していないこと及び拡散板を利用した校正源に対する精度が黒体に対して高くないことから運用上はリアルタイムでの校正係数の更新は行わない方針である。校正係数の変更には、GSICSの手法⁽²¹⁾に基づくキャリブレーション評価など、オフラインでの処理を行い、必要に応じて校正係数の更新を行う予定である。GSICSでは、月や地表面等を校正源とした校正手法や衛星間の比較による校正手法について検討が行われており、RDACSの処理外(オフライン)で行う校正処理方法を検討する計画である。

4.4 位置合わせ処理

位置合わせ処理では表5で示した衛星の軌道情報や姿勢情報、AHIの姿勢変化、走査角、走査方法、アライメント及びアライメントの変化などに関する情報を利用する。AHIからの情報のうちSTT、IRU、ARS及びACCのデータを地上で解析して高精度姿勢情報が得られる。高精度姿勢情報は128Hzで姿勢角の変化を精度よくとらえるように設計されており、連続した観測画像の相対的な画像ずれは表5の要求精度が示すように非常に小さい。これに対して、衛星の軌道情報と姿勢情報から計算した地球上の緯経度と実際に観測した画像との対応は気象庁が目標とする精度^dには程遠いものである。RDACSの位置合わせ処理では、高精度姿勢情報が持つ地球上の位置と対応付けたときのバイアス成分を取り除いた姿勢情報を出力することが最大の目的である。

ひまわり8号及び9号では、観測した画像の海岸線などを利用したランドマーク処理によって姿勢角の補正を行う。バイアス補正の情報として、パターンマッチングを応用したランドマーク処理によって衛星が使用している軌道情報と姿勢情報(表5のと対応)を基準とした画像のずれ量を求める。この画像ずれ量が最も小さくなるように衛星が使用している姿勢情報を修正し、高精度姿勢角情報のバイアス成分が取り除かれる。

d. RDACSでは、位置合わせ精度に対する精度仕様を明確に定めていない。気象庁は、これまでの「ひまわり」で明文化していないが、1画素以内に画像ずれを抑えることを目標とした処理アルゴリズムの開発を行っている。RDACSでもこの精度を実現することを目標としている。

姿勢角を補正した後、修正した補正角を用いてもう一度ランドマーク処理を行い、ランドマーク誤差の残差を求める。この残差は、姿勢角誤差以外の画像歪成分によるもので表 5 の アライメントの変化と温度に関する情報として AHI の試験データとしても提供される。位置合わせ処理では、ランドマーク誤差を用いた画像歪み処理も導入しており、観測毎にデータを蓄積し、アライメントの変化と温度に関する情報を更新することや必要に応じて画像ごとに歪み補正係数を算出することも可能である。

ランドマーク解析処理は、走査ごとのデータを対象に処理を行う。小領域観測のような狭い領域の観測データを用いてランドマークによるずれを検出するためには、ランドマーク用の小領域観測は、雲のないランドマークの取得に都合の良い領域を観測しなければならない。位置合わせ処理は、ランドマーク解析結果を基に解析に利用した小領域観測が、次のタイムラインでもランドマーク解析を行うべき観測領域であるかを判定する。その結果、次のタイムラインでもランドマーク解析を行うべき観測領域の緯度・経度等を「ランドマークコマンド情報ファイル」に格納する。この「ランドマークコマンド情報ファイル」を図 11 で示す領域観測選定処理がコマンドパラメータ作成のための入力データとして利用する。

5. まとめ

衛星の製造は 2 機一括で 2009 年 7 月から開始されており、2014 年度にひまわり 8 号を打ち上げ、軌道上で機能の確認試験を実施した後、2015 年度から運用を開始する予定である。ひまわり 8 号及び 9 号に搭載する AHI とほぼ同じ性能を持つ GOES-R の打ち上げは、ひまわり 8 号の後に計画されていることから世界中の利用者からも AHI の観測データが注目されている。

ひまわり 8 号及び 9 号は、これまでの「ひまわり」に比べて観測バンド数が大幅に増えた。観測バンドは、可視域について赤、緑及び青に対応する 3 バンドになったこと、新たに近赤外域のバンドが追加されたこと、水蒸気バンドが 3 つに分割されたことなどが大きな特徴である。また、二酸化炭素、二酸化

硫黄及びオゾンの吸収帯のバンドが追加されており、従来の気象観測以外の災害監視や地球環境監視など多方面への貢献が期待されている。ひまわり 8 号及び 9 号に静止地球環境観測衛星と冠したゆえんである。また、観測バンドの空間分解能もこれまでの「ひまわり」が衛星直下点で 4km だった赤外の空間分解能が AHI では 2km に向上し、可視の空間分解能は最も高分解能のバンドでは 0.5km に向上している。さらに観測に要する時間が短縮され 10 分間の観測タイムラインの中で全球観測を実施しながら、複数の小領域の観測を高頻度に行うことが可能となる。

すでにひまわり 8 号及び 9 号は製造工程にあり、AHI や衛星本体の製造が行われている。また、PFI 事業者による地上施設・設備の整備や運用体制についても準備が進められており、気象庁による AHI データの 1 次処理方法、利用者へのデータ提供形式や新規プロダクトについても開発が進められているところである。

参考文献

- (1) 気象衛星センター、2004：気象衛星画像の解析と利用 - 熱帯低気圧偏 -
- (2) 小山 朋子、2000：GMS-5 赤外チャンネルから得られる推定降雨データセットを用いた熱帯域対流活動モニターについての検討、気象衛星センター技術報告、第 38 号、43-51
- (3) 澤田可洋、静止気象衛星「ひまわり」の画像による噴煙観測とその解析に関する研究、2003：気象庁研究時報、55 巻 4 号
- (4) Kazuhiko Masuda, Yuzo Mano, Hiroshi Ishimoto, Masami Tokuno, Yoshito Yoshizaki and Nozomu Okawara, 2002: Assessment of the nonsphericity of mineral dust from geostationary satellite measurements, Remote Sensing of Environment, Volume 82, Issues 2-3, 238-247
- (5) 西田誠、MTSAT-1R 海面水温、2006：気象衛星センター技術報告、特別号、117-120
- (6) 大吉慶、竹内渉、田村正行、2010：運輸多目的衛星 MTSAT データによる地表面温度推定手法の評価、写真測量とリモートセンシング、vol49、No.4、251-259

- (7) 赤石一英、2012 : ひまわり運用事業について、測候時報、第 79 巻、1-2 号、1-14
- (8) T.J. Schmit, M. M. Gunshor, W. P. Menzel, J. J. Gurka, J. Li, and, A. S. Bachmeier, 2005: Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R. Bull. Amer. Meteor. Soc., 86, pp. 1079–1096
- (9) Keiji Imaoka, Hiroshi Murakami, Masahiro Hori, Kazuhiro Tanaka, Toneo Kawanishi and Keizo Nakagawa, 2009: Overview of GLI-AMSR and its Future Perspective, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, Vol. 29, No. 1, 2-10
- (10) United States Committee on Extension to the Standard Atmosphere, 1976: "U.S. Standard Atmosphere, 1976", National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United States Air Force, Washington D.C.
- (11) S.A. Clough, M.J. Iacono, and J.L. Moncet, 1992: Line-by-line calculation of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor. J. Geophys. Res., 97, 15761-15785
- (12) Izumi Okabe, Takahito Imai and Yasushi Izumikawa, 2011: Detection of Rapidly Developing Cumulus Areas through MTSAT Rapid Scan Operation Observations、気象衛星センター技術報告, No.55, 69-91
- (13) Paul Griffith, 2006: ABI Delivers Significantly Increased Capabilities Over Current Imagers, GOES user's conference IV
http://www.goes-r.gov/downloads/GOES%20Users'%20Conference%20IV/Complete%20Posters/GUC4_poster_Griffith.pdf
- (14) K. Gounder, K. Ellis, P. Griffith, E. Hoffman, D. Igli, J. Ogle, and V. Virgilio, 2008: GOES Advanced Baseline Imager – Star Selection and Star Sensing, GOES user's conference V, AMS Annual meeting
http://www.goes-r.gov/downloads/GOES_Users_Conference_V/GUC%20V%20Posters%202/poster_Ellis%2028%20v2.pdf
- (15) Ken Ellis, David Igli, Krishnaswamy Gounder, Paul Griffith, James Ogle, Vincent Virgilio, 2008: GOES-R Advanced Baseline Imager Image Navigation and Registration, GOES user's conference V, AMS Annual meeting
http://www.goes-r.gov/downloads/GOES_Users_Conference_V/GUC%20V%20Posters%202/Poster_Ellis%2027.pdf
- (16) Jack Xiong, Gary Toller, Vincent Chiang, Junqiang Sun, Joe Esposito, and William Barnes, MODIS Characterization Support Team, 2005: MODIS level 1b algorithm theoretical basis document (version 3), NASA
- (17) William Bamford, Luke Winternitz, Curtis Hay, 2005: GPS World, Innovation: Autonomous Navigation at High Earth Orbits, NASA Center, Goddard Space Flight Center, Document ID: 20060012296
- (18) Jonathan P. Ormiston, Jon Blume, Joseph Ring, Jeff Yoder, 2008: Ground Processing Development System, GOES user's conference V, AMS Annual meeting
http://www.goes-r.gov/downloads/GOES_Users_Conference_V/GUC%20V%20Posters%202/Poster_Ormiston%2007.pdf
- (19) Michael Weinreb and Dejiang Han, 2003: Implementation of Midnight Blackbody Calibration Correction (MBCC)
http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/mbcc_implementation.htm
- (20) M.P. Weinreb, M. Jamieson, N. Fulton, Y. Chen, J.X. Johnson, C. Smith, Bremer, and J. Baucom, 1997: Operational Calibration of GOES-8 and -9 Imagers and Sounders. Applied Optics, 36, 6895-6904
- (21) M. Goldberg, G. Ohring, J. Butler, C. Cao, R. Datla, D. Doelling, V. Gärtner, 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, T. Zhu, 2011: The Global Space-Based Inter-Calibration System, Bulletin of the American Meteorological Society, Volume 92, Issue 4 , pp. 467-475