

衛星搭載用多波長光学放射計

岡村 吉彦・田中 一広

Optical Multi-Band Radiometer Onboard Earth Observing Satellite

Yoshihiko OKAMURA and Kazuhiro TANAKA

Earth observation from satellites has been conducted by various methods corresponding to observing targets, wavelengths range, and adopted technologies. Among them, multi-band observation from visible to infrared regions plays an indispensable role for such as meteorological observation and environmental monitoring. The global change observation mission (GCOM) is the next generation earth observation project of Japan aerospace exploration agency (JAXA). The second-generation global imager (SGLI) onboard GCOM satellite is a multi-band imaging radiometer in the wavelength range of near-UV to thermal infrared. This paper describes instrument design of the SGLI focusing on spectrometric technique.

Key words: GCOM, SGLI, multi-band observation

人工衛星からの地球観測は、気象観測、地球環境変動の監視、災害監視等の分野でいまや欠かすことができない技術である。その特徴は、地上や航空機による観測と比較して、広い範囲の観測データを高頻度で繰り返し収集することができるため、地上や大気グローバルな観測を長期にわたって実施することが可能なことである。

1958年に世界初の人工衛星であるスプートニク1号が打ち上げられて以降、世界各国でさまざまな地球観測衛星が打ち上げられてきた。日本でも1987年に打ち上げられた海洋観測衛星1号「もも1号」を皮切りに、近年の環境観測技術衛星「みどりII」(2002年打ち上げ)、陸域観測技術衛星「だいち」(2006年打ち上げ)、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(2009年打ち上げ)まで、さまざまな地球観測衛星が打ち上げられてきた。

人工衛星からの地球観測には、観測対象等の違い、使用する観測波長・周波数、適用する技術等により、さまざまな観測手法がある。中でも可視～赤外の波長帯におけるマルチバンド観測は、気象観測や地球環境の監視等、さまざまな用途で広く行われてきた。

現在JAXAでは、みどりIIの後継ミッションとして、地球環境変動観測ミッション(GCOM: global change obser-

vation mission)計画を推進している。本稿では、GCOM搭載用のマルチバンドセンサーである多波長光学放射計(SGLI: second-generation global imager)の設計について、採用している分光技術に焦点を当てて解説する。

1. 地球環境変動観測ミッション(GCOM)の概要

GCOMは、地球規模での気候変動・水循環メカニズムを解明するうえで有効な物理量(海面水温、土壌水分、植生、雲・エアロゾル等)を全地球規模で長期間(10~15年間)、継続的に観測できるシステムを構築して利用実証するとともに、観測データを気象、漁業等の実利用機関に提供して現業分野への貢献を行うことを目的としたミッションである。

現在JAXAでは、GCOM第一期衛星として、高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)を搭載する第一期水循環変動観測衛星(GCOM-W1)と多波長光学放射計(SGLI)を搭載する第一期気候変動観測衛星(GCOM-C1)の開発を行っている。GCOM-W1は2011年度に、GCOM-C1は2014年度に打ち上げる計画である。GCOM-C1の軌道上外観図を図1に示す。

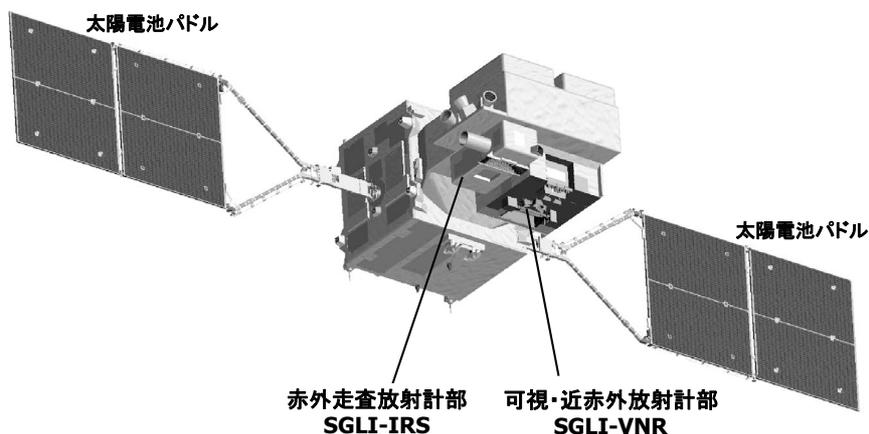


図1 第一期気候変動観測衛星 (GCOM-C1) の軌道上外観図。

表1 多波長光学放射計 (SGLI) の主要性能。

観測波長	表2に示す
観測幅	可視近赤外：1150 km 以上 短波長赤外～熱赤外：1400 km 以上
地表分解能	表2に示す
量子化ビット数	12 bit
校正精度	可視近赤外：≤3% 短波長赤外：≤5% 熱赤外：≤0.5K
設計寿命	5年

2. 多波長光学放射計 (SGLI)

2.1 多波長光学放射計 (SGLI) の主要性能

GCOM-C1 に搭載される多波長光学放射計 (SGLI) は、2002年に打ち上げられたみどりII搭載のグローバルイメジャー (GLI) の後継センサーである。雲・エアロゾル、海色、植生、雪氷等をグローバルに観測するために、これらの観測に対応した帯域として、近紫外から熱赤外域 (380 nm～12 μm) をマルチチャンネル (19チャンネル) で計測する。

SGLIの主要性能および観測チャンネルを表1、表2に示す。SGLIは、入射輝度とセンサー出力の間に高い校正精

表2 多波長光学放射計 (SGLI) の観測チャンネル。

	チャンネル	中心波長	波長幅	分解能		
		VNR, SWI: nm TIR: μm		m		
可視・近赤外放射計部 (SGLI-VNR)	非偏光 観測機能	VN1	380	10	250	
		VN2	412	10		
		VN3	443	10		
		VN4	490	10		
		VN5	530	20		
		VN6	565	20		
		VN7	673.5	20		
		VN8	673.5	20		
	偏光 観測機能	VN9	763	12	1000	
		VN10	868.5	20	250	
		VN11	868.5	20		
赤外走査放射計部 (SGLI-IRS)	SWI 観測機能	P1	673.5	20	1000	
		P2	868.5	20		
		TIR 観測機能	SW1	1050	20	1000
			SW2	1380	20	
	SW3		1630	200	250	
		SW4	2210	50	1000	
		T1	10.8	0.74	500	
	T2	12	0.74			

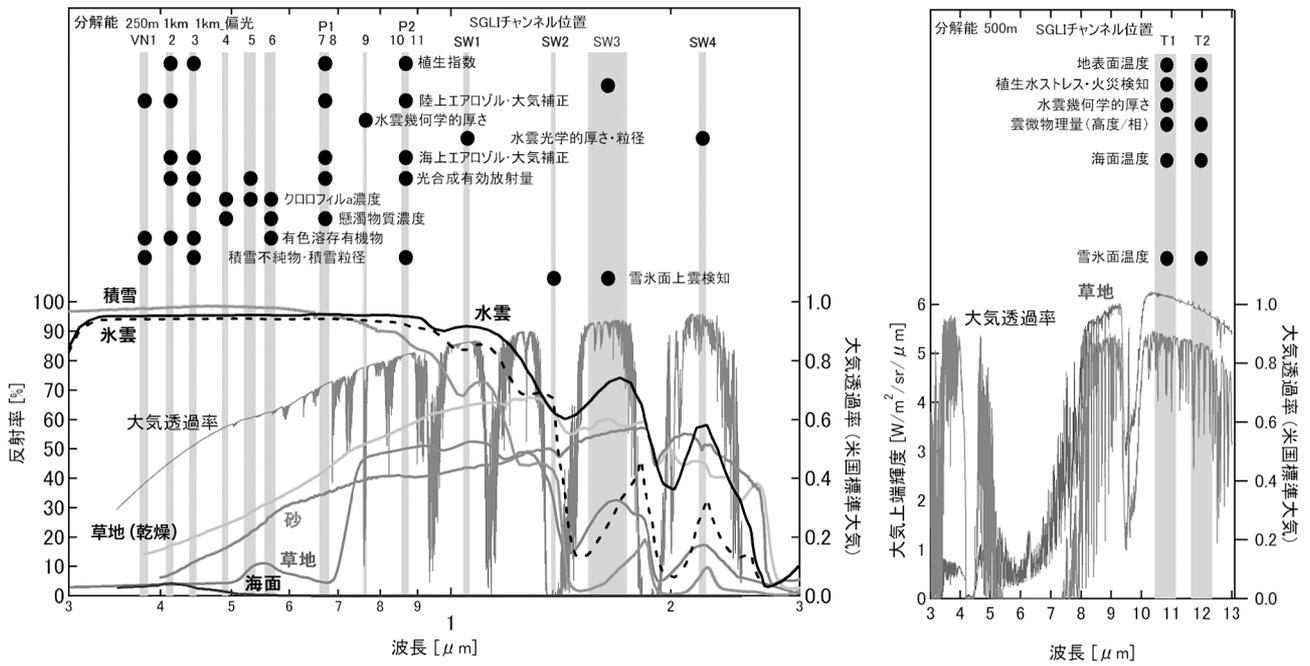


図2 代表的な観測対象物の反射率と大気の透過率。SGLIの観測チャンネルを縦の網掛けで示す。黒丸は代表的なプロダクト導出において直接的に用いられる観測チャンネルを表す。

度と S/N 比が要求されるマルチチャンネルのイメージング放射計である。観測幅として可視近赤外チャンネルでは 1150 km、短波長赤外～熱赤外では 1400 km を確保することにより、中緯度（日本付近）で 2 日に 1 回の観測が可能である。また、GLI に比べ地表面分解能が高い（1 km → 250 m）ことや、陸上エアロゾル等を観測するための偏光・多方向観測機能をもつことが特徴として挙げられる。

SGLI の観測チャンネルと、地球大気の透過率や代表的な観測対象の反射率を重ねて示したものを図 2 に示す。宇宙から地球を観測すると、大気の透過特性や地表面の反射率

により、観測対象に応じたスペクトル形状の特徴をもつ。それらの特徴を、複数の波長帯で観測（マルチチャンネル観測）し、チャンネル間の演算処理を行うことでさまざまな物理量を得ることができる。図 2 の中に代表的な物理量を記しているように、SGLI では 29 個の標準物理量プロダクトを定常的に導出する計画である。

2.2 多波長光学放射計 (SGLI) の観測機能

SGLI は、可視・近赤外放射計部 (VNR: visible and near infrared radiometer) と赤外走査放射計部 (IRS: infrared scanner) の 2 ユニットの放射計から構成される。SGLI の

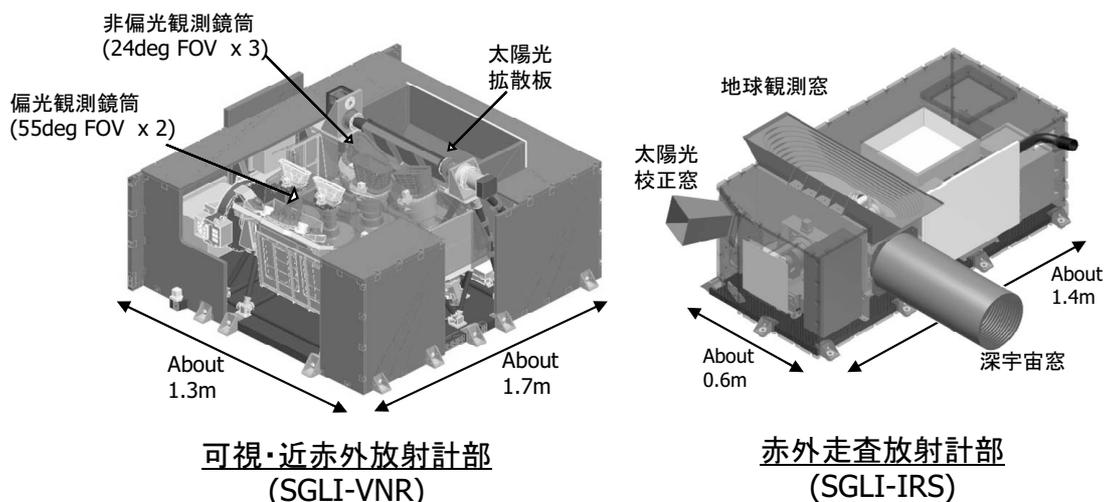


図3 多波長光学放射計 (SGLI) の外観図。

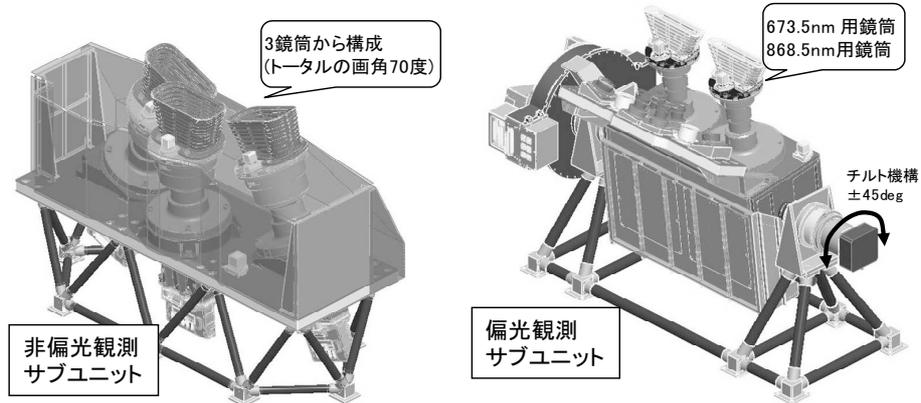


図4 可視・近赤外放射計部(VNR)観測機能の構成。左：非偏光観測機能，右：偏光観測機能。

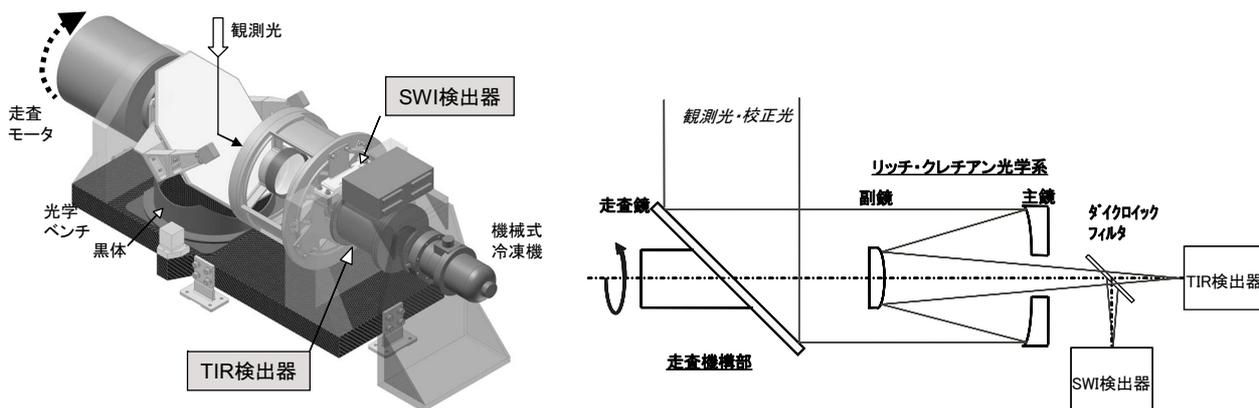


図5 赤外走査放射計部 (IRS) 観測機能の構成。

外観図を図3に示す。2つの独立した放射計に分割することより、380 nm～12 μmの広波長域に対するハードウェア構成の最適化を図るとともに、機能分散によるロバスト性向上を目指した構成とした。

2.2.1 可視・近赤外放射計部 (VNR)

可視・近赤外放射計部 (VNR) は、電子走査方式 (プッシュブルーム方式) の放射計であり、非偏光観測機能 (11チャンネル) と偏光観測機能 (2チャンネル) に大別される。VNR 観測機能の構成を図4に示す。

VNR 非偏光観測機能は、380～868.5 nmの広い波長範囲を11チャンネル (VN1～VN11) で観測を行う放射計である。70 degの広画角かつ250 m分解能を実現するとともに、高いS/N比等の観測性能が求められる。これらの観測要求を実現するため、70 degの画角を3分割し、それぞれ約24 degの画角をもつ3本の独立した鏡筒から構成する設計とした。

集光光学系は、テレセントリック屈折光学系を採用し、広い波長範囲全域にわたり、高い結像性能・透過率、低い偏光感度を実現した。焦点面には、11ライン (×6000画素) のCCDを採用し、短冊状に加工した分光フィルター

を各ライン焦点面直上に配置することで11チャンネルに分光する設計を採用した。

VNR 偏光・多方向観測機能は、673.5 nmと868.5 nmの2チャンネル (P1, P2) で偏光観測を行う放射計である。偏光観測とは、観測光の偏光状態を計測する機能であり、3偏光方位角 (0, 60, 120度) の観測により、ストークスパラメーターの3要素 (I, Q, U) を導出する観測手法を用いる。画角55 degで観測を行い、衛星直下だけでなく、衛星進行方向に対して前後に±45度の多方向観測も可能である。

具体的なセンサー設計としては、P1チャンネルとP2チャンネルを独立した鏡筒で構成し、集光光学系にはF値を暗くしレンズ各面への入射角を抑えることにより偏光感度を抑制したテレセントリック屈折光学系を採用し、短冊状に加工した3偏光方位角の偏光子を3ラインCCDの直前に配置することで、3偏光方位角の観測を行う設計とした。

2.2.2 赤外走査放射計部 (IRS)

赤外走査放射計部 (IRS) は機械式走査方式 (ウィスクブルーム方式) の放射計で、短波長赤外4チャンネル、熱赤外2チャンネルの観測を行う。IRS 観測機能の構成を図5に

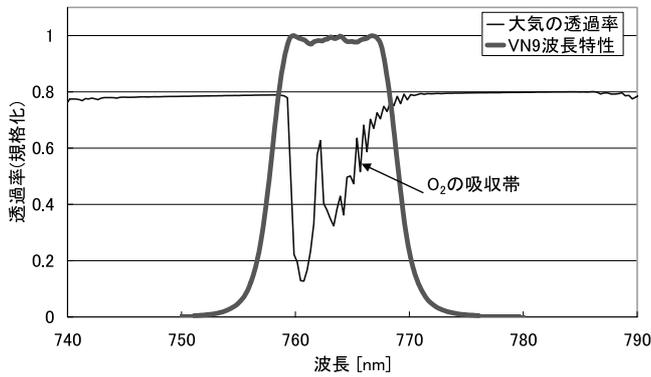


図6 SGLI VN9 チャンネルと酸素の吸収帯。

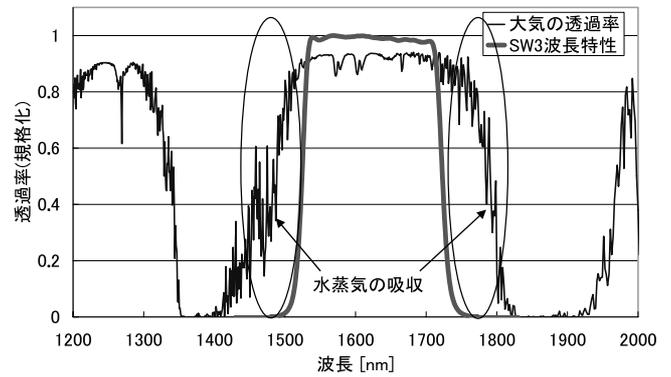


図7 SGLI SW3 チャンネルと水蒸気の吸収帯。

示す。

IRS の走査方式は、走査鏡反射率の入射角依存性が影響しないよう、回転軸に対して 45 度傾けた走査鏡による機械走査方式を採用した。走査鏡から導入された光は、同軸のリッチレチアン光学系を経由し、ダイクロイックミラーにより短波長赤外 (SWIR) と熱赤外 (TIR) に分光され、検出器へ導入される。検出器は、短波長赤外には InGaAs 検出器、熱赤外には光起電力型 (PV 型) の HgCdTe 検出器を採用し、前者はペルチェ素子を用いて -30°C 、後者はスターリング式の機械式冷凍機を用いて 55K まで冷却して使用する。S/N 比の高い検出器を採用したことにより、リレー光学系を使用しない集光・分光方式を実現していることが IRS の特徴である。

2.3 SGLI 分光技術に関するチャレンジ

SGLI で採用されている分光方式は、VNR、IRS とともに観測チャンネルに対応した分光フィルターを検出器の前に設置するという、分光技術としては比較的単純な方式である。

しかし、SGLI のように高い観測性能と校正精度が要求されるマルチチャンネルの放射計では、一般のフィルター用途では問題にならないレベルの中心波長ずれが、観測対象によっては大きな観測輝度の変動になる。例えば、VN9 チャンネルは、雲頂高度等の物理量を導出するため、大気中の酸素の吸収帯の深さを高精度で測定することが要求されたバンドである。図 6 に酸素 (O_2) の吸収スペクトルと VN9 の波長特性を重ねて示したように、波長特性がずれる (もしくは値付け精度が悪い) とセンサー出力から算出される輝度に大きな誤差が乗ってしまうことがわかる。同様に、SW3 チャンネルは、図 7 に示すように観測バンドの両側に存在する水蒸気の吸収帯の影響を避けるよう、高い波長設定精度が要求される。

高精度のマルチチャンネル放射計に対して重要なもうひとつの波長特性は、校正精度の劣化につながる帯域外応答を抑制することである。SGLI では、透過帯に対する帯域外

の応答を波長積分値で 0.1% 以下に抑制することが要求されている。特に、SGLI のように狭帯域で観測を行うセンサーでは、相対的に帯域外の波長帯が広いこと、帯域外特性の抑制が難しい。

SGLI の開発においては、2007 年からブレッドボードモデル (BBM) の試作試験を実施し、分光技術の実現性確認を含めて、VNR および IRS を構成するデバイス・コンポーネントレベルから、組み合わせ試験に至るまでの観測性能の実現性を確認した^{1,2)}。SGLI に適用する分光技術に関しては、下記に示す技術的なハードルを克服した。

- ① 画角全域にわたり高い波長精度を実現し、帯域外応答特性を抑制した分光フィルターの実現 (VNR、IRS)
- ② 広い波長域・画角で反射率を抑制した AR コートの実現 (VNR)
- ③ 広い波長域で高い反射 / 透過率をもつダイクロイックミラーの実現 (IRS)

これらの項目のうち、SGLI の分光技術における最大の技術チャレンジであった、VNR 非偏光の分光フィルターの設計および評価結果について以下に記述する。

2.3.1 中心波長精度の実現

SGLI 非偏光観測用の狭帯域分光フィルターは、11 ライン CCD (長さ約 80 mm) の直上に、短冊状に加工した分光フィルターを配置する方式である。分光フィルターは、膜欠陥が生じにくく耐環境性の高い緻密な膜を構成できる成膜方式 (イオンビームスパッターにイオンアシストを加えた成膜法等) により製作するが、サイズが大きいため成膜むらが原理的に発生しやすい。

BBM 試作試験においては、波長むらを抑制した分光フィルターの試作と物理量プロダクトに与える影響の両面から評価を行った。その結果、物理量プロダクト精度を確保するための分光フィルター製作のめどが得られた。BBM における分光フィルター試作結果例として、VN9 チャンネルの波長特性を図 8 に示す。長さ 80 mm の分光フィ

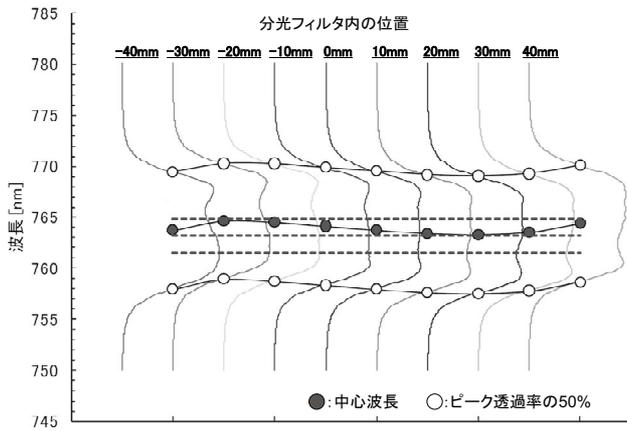


図8 分光フィルター試作結果 (VN9 チャンネル).

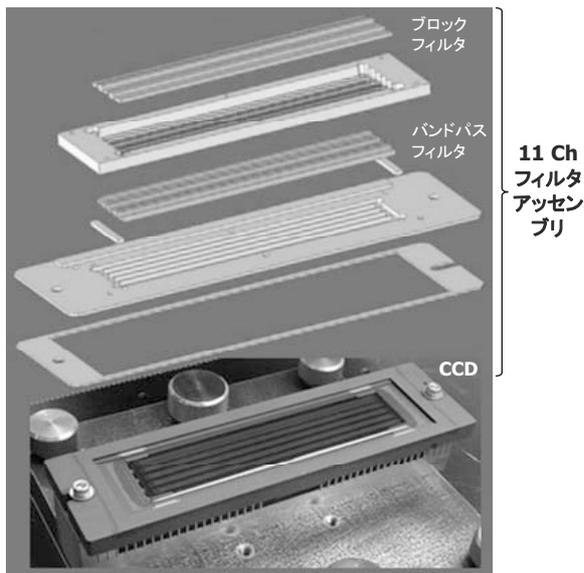


図9 VNR非偏光の分光フィルター部の構成.

ルター長手方向に 10 mm 間隔で測定した波長特性を模式的に重ねて示している。

2.3.2 帯域外特性の抑制

VNR非偏光の分光フィルター部の構成を図9に示す。広い帯域外波長域において透過率を低く抑制するため、分光フィルター部を上下2枚のフィルターから構成し、バンドパスフィルター面以外の3面をブロッキングフィルターとして使用することで、帯域外応答の仕様を実現した。

2.3.3 加工・組立の実現性

VNR非偏光分光フィルターの3つ目のチャレンジは、加工・組立の実現性である。先に述べたように、1 mm ない

しは 2 mm 間隔で並んだ長さ約 80 mm の 11 ライン CCD の直上に、図9に示した2階建て構造の分光フィルター部を配置する方式であり、製作上の難易度が非常に高かったが、BBM 試作試験で精度よく製作できることが確認できた。

GCOM-C1 衛星に搭載される多波長光学放射計 (SGLI) は、近紫外から熱赤外域におけるマルチチャンネルのイメージング放射計であり、入射輝度とセンサー出力の間に高い校正精度と S/N 比が要求される。SGLI の分光方式は、観測チャンネルに対応した分光フィルターを検出器の前に設置するという比較的単純な方式であるが、高い波長精度を実現し、かつ帯域外応答特性を抑制した分光フィルターの実現が、観測性能上非常に重要である。BBM 試作試験の結果、SGLI に適用した分光技術の中で特に技術的な難易度が高かった、VNR 非偏光バンドの分光フィルター実現性を含め、SGLI に要求された高い観測性能の実現性が確認できた。

SGLI は現在、エンジニアリングモデル (EM) の製作・試験を実施しており、SGLI を搭載する GCOM-C1 衛星は 2014 年度に打ち上げる計画である。SGLI のもたらす高精度の観測データにより、地球環境に関連するさまざまな物理量が導出され、気候変動メカニズムの解明や長期気候変動の予測精度の向上に貢献することを期待する。

GCOM 搭載用 SGLI センサーの開発は、NEC 東芝スペースシステム (株) をセンサーシステムメーカーとして、光学系には富士フイルム (株)、昭和オプトロニクス (株)、トプコン (株) 等の協力を得て実施している。SGLI に要求された高い観測性能の実現に向けた、関係者のご尽力に謝意を表します。

文 献

- 1) Y. Okamura, K. Tanaka, T. Amano, M. Hiramatsu and K. Shiratama: "Breadboarding activities of the Second-generation Global Imager (SGLI) on GCOM-C," Proc. SPIE, **7106** (2008) 71060Q.
- 2) K. Tanaka, Y. Okamura, T. Amano, M. Hiramatsu and K. Shiratama: "Development status of the second-generation global imager (SGLI) on GCOM-C," Proc. SPIE, **7474** (2009) 74740N.

(2010年7月12日受理)