



可視近赤外・熱赤外放射計

小野 宏己・成松 義人・平岩 修

日本電気(株)宇宙開発事業部第二機器開発部 〒226 横浜市緑区池辺町 4035

(1985年12月5日受理)

Visible Near-Infrared and Thermal Infrared Radiometer

Hiroimi ONO, Yoshito NARIMATSU and Osamu HIRAIWA

2nd Subsystem Development Department, Space Development Division, NEC Corporation,
4035, Ikebe-cho, Midori-ku, Yokohama 226

1. ま え が き

1972年アメリカ航空宇宙局 NASA によって打ち上げられた地球資源衛星 ERTS-1 (のちに LANDSAT-1 と改称) は、宇宙空間からの地球観測の有効性と応用の広さを実証して、予想以上の成果を収め、リモートセンシングの分野に新しい道を切り拓いた。このように地球およびその周辺を取りまく空間が秘めている情報を探査するリモートセンシング技術は、人工衛星の発達により近年ますます高度になり、重要な地位を占めつつある。

わが国においても、衛星による観測データを利用するための本格的な技術開発が必要となってきており、すでに気象衛星「ひまわり」による観測をはじめ、LANDSAT などのデータの解析、研究によって地球観測の実用化の基礎が着々と築かれつつある。とくに1987年には地球観測衛星シリーズの第1号海洋観測衛星 MOS-1 の打ち上げが予定されており、今後続々と打ち上げられる外国の地球観測衛星に対する国際協力とも相俟って、リモートセンシングは新しい時代を迎えつつある。

リモートセンシングは、広義には非接触計測と解釈され、また、遠隔観測とも訳され、対象とする領域・分野はきわめて広く、用いられる観測法もまた多種多様である^{1,2)}。

ここでは、リモートセンシングを「人工衛星や航空機などのプラットフォームに搭載したセンサーを用いて地表や大気を観測し、得られたデータから、地球の環境や資源、あるいは、気象に関する有用な情報を抽出する技術」と狭義に解釈し、そこで用いられる観測手段につい

て述べる。しかし、それらはきわめて多様で、ここですべてを尽くすことはできないので、そのごく一部の可視・近赤外・熱赤外放射計を紹介するに留める。

2. 衛星リモートセンシングの特徴と搭載センサー³⁾

2.1 衛星リモートセンシングの特徴

もとよりリモートセンシング技術の目的は対象を乱さず、点の観測では知りえない広がりのある現象を、短時間で繰返し観測することであり、非接触性、広域性、同時性、反復性という大きな特徴を有する。これは逆にいえば、リモートセンシングの満たすべき条件であり、あるいは制約である。このことは人工衛星からのリモートセンシングにも当然あてはまることであり、次の特徴がある。

- 1) 非常に広範囲を一度に観測できる。このため今までの手段では観測不可能であった広い領域におけるダイナミックな現象を同時刻的に捕えることが可能となる (たとえば海洋の潮流の動き、地球的規模の気象観測等)。
- 2) 地球表面を一定の周期で繰返し観測することが可能であり、また特定の地域のみを連続的に観測することも可能となる。
- 3) 地球の熱収支の仕組みが宇宙からの観測による研究によって初めて可能となる。
- 4) 地上の観測網の不足をカバーする。
- 5) 無人観測所のデータを収集し地上に中継することができる。

6) 運用効率を上げた経済的な観測手段となりうる。

2.2 人工衛星に搭載されるセンサーの分類

衛星による地球観測のリモートセンシングで取り扱われる電磁波は、紫外線からマイクロ波までの範囲である。ここでは人工衛星に搭載される可視から熱赤外波長域の代表的な光学センサーについて説明する。

2.2.1 可視・近赤外放射計

対象物から反射または放射される可視、近赤外の電磁波をとらえるもので、画面を走査する機能を有する望遠型の分光放射計、すなわちマルチスペクトルスキャナ(MSS*)がほとんどである。

MSS で得られたデータは、各波長帯域ごとのモノクロ写真や、カラー写真の合成によって、ナチュラルカラー写真およびフォールスカラー (false color) 写真に変換され、対象物の種類、状態を判別するための情報となる。また、取得画像がデジタル処理され、パターン認識等により、土地利用区分などの情報となる。

2.2.2 熱赤外放射計

地表からの熱放射を観測するもので、可視、近赤外放射計と組み合わせて使われる場合が多い。熱赤外領域での観測は大別して2通りある。その一つは「大気窓領域」を利用して地表温度を測定するものである。これによって地表面および雲頂の温度分布が得られ、温度差に

よる海水、湧水域、海流、温排水、火山活動域、温泉湧出域などの識別が可能である。もう一つは、大気分子の吸収域を利用して、気体分子などの分布を測定するものであり、気象衛星における垂直温度分布サウンダー⁴⁾等がある。

3. 可視・近赤外放射計とその例

3.1 放射計システムの現状

3.1.1 放射計システム

衛星搭載用放射計システムは、その用途に応じ、各種の機器が既に数多く打ち上げられている。ここでは主要なものとして、最近実用化された機器あるいは打上げ予定の機器について述べる。

最近の放射計システムとしては表1に示すように、LANDSAT の MSS, TM*², SPOT の HRV*³ や MESSR*⁴ 等がある。放射計の方式は大きく分けると、MSS や TM に代表される機械走査式と、MESSR や HRV の電子走査方式とに分けられる。システムの多機能化が容易であり、信頼性の向上も期待できることから、最近の傾向として、検出器の開発状況に伴い、機械走査より電子走査へと移行しつつある。

3.1.2 光学系

放射計の光学系は走査方式により、大きく構成が異なる。

表1 最近の可視近赤外放射計主要諸元

項目	MSS (ランドサット)	TM (ランドサット)	HRV (SPOT)	MESSR (MOS-1)
観測波長 (μm)	0.5~0.6	0.45~0.52	マルチバンド	0.51~0.59
	0.6~0.7	0.52~0.60	0.5~0.59	0.61~0.69
	0.7~0.8	0.63~0.69	0.61~0.68	0.72~0.80
	0.8~1.1	0.76~0.90	0.79~0.89	0.80~1.1
		1.55~1.75 2.08~2.35 10.4~12.5	パンクロマチック 0.51~0.73	
地表分解能 (直下点) (m)	80×80	30×30 熱赤外 120×120	マルチバンド 20×20 パンクロマチック 10×10	50×50
観測幅 (km)	185	185	60	100×2 (2系統)
重量 (kg)	65	244	100	50
電力 (W)	75	335	—	58

*1 MSS: multispectral scanner system.

*2 TM: thematic mapper.

*3 HRV: high resolution visible range instruments.

*4 MESSR: multispectral electronic self-scanning radiometer.

表 2 放射計用光学系の分類

光学系の構成	特 徴	放射計への応用
反 射 光 学 系	画角が狭い 色収差がなく、広波長域に対応可能 面精度が厳しい 材料の種類が少なくてよい	広波長域放射計に適する 機械的走査を必要とする
屈 折 光 学 系	広画角が可能 色収差があり、対応波長域が狭い 多品種の光学材料を要する 材料の入手性の点で大型化が難しい	電子走査に適する 広波長域には向かない
反射屈折光学系	反射系、屈折系の間中間的な特徴を有する	電子走査に適する

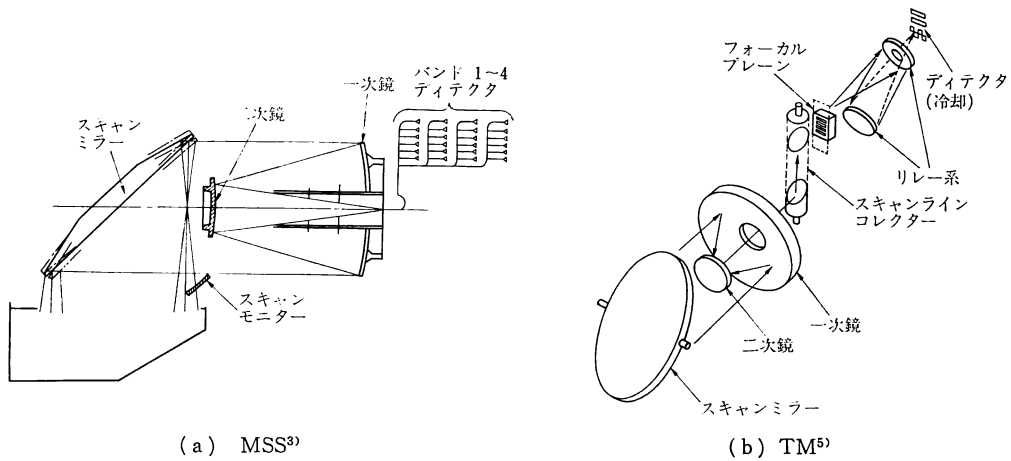


図 1 機械走査方式の光学系

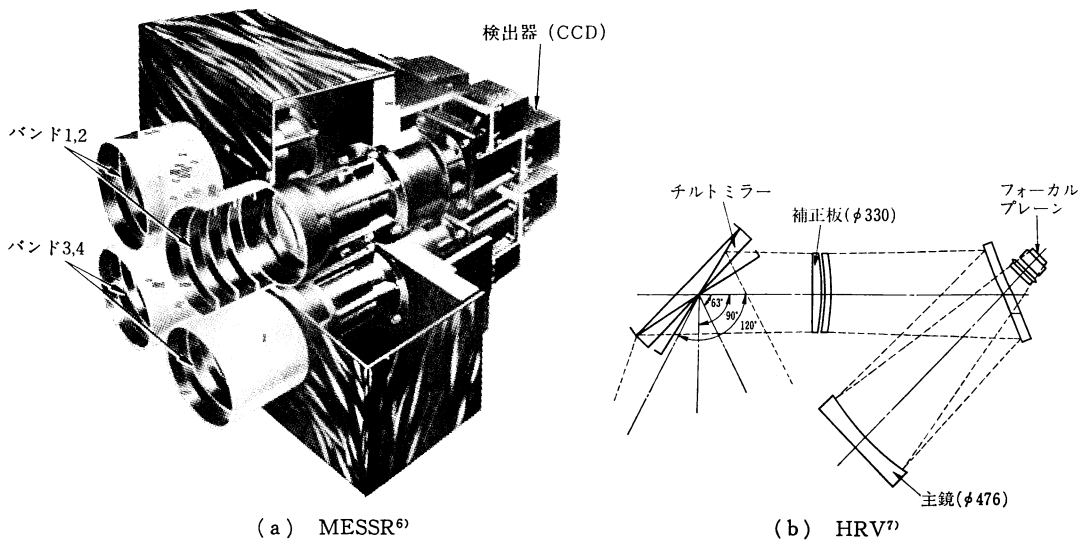


図 2 電子走査方式の光学系

表 3 内部量子効果型検出器の性能概要^{*)}

内部量子効果型 センサーの種類	動作温度 (K)	有効波長域 (μm)	D^* (500 K) ($\text{cm}(\text{Hz})^{1/2}/\text{W}$)	応答時間 (μs)	内部抵抗 ^{*)} (正方形) (Ω)
Si (PV)	295	0.5~1.05	$10^{10}\sim 10^{12}$	1~ 10^3	$0.1\sim 1\times 10^6$
Ge (PV)	295	1~2	$10^9\sim 10^{10}$	1~ 10^3	$0.1\sim 1\times 10^6$
PbS (PC)	295	0.6~3.0	$1\sim 7\times 10^8$	$0.5\sim 5\times 10^2$	$0.5\sim 10\times 10^6$
PbS (PC)	195	0.5~3.3	$0.7\sim 7\times 10^9$	$0.8\sim 4\times 10^3$	$0.5\sim 5\times 10^6$
PbS (PC)	77	0.7~3.8	$3\sim 8\times 10^9$	$0.5\sim 3\times 10^3$	$1\sim 10\times 10^6$
PbSe (PC)	295	0.9~4.6	$0.7\sim 2\times 10^8$	2	$1\sim 10\times 10^6$
PbSe (PC)	195	0.8~5.1	$2\sim 4\times 10^9$	30	$1\sim 5\times 10^7$
PbSe (PC)	77	0.8~6.6	$2\sim 6\times 10^9$	40	$5\sim 10\times 10^6$
PbTe (PC)	77	1~5.4	1×10^9	~5	$3\sim 10\times 10^7$
InAs (PV)	295	1~3.7	$1\sim 3\times 10^8$	~1	20~100
InAs (PV)	195	0.5~3.5	$1\sim 5\times 10^9$	~1	$10^2\sim 10^4$
InAs (PV)	77	0.6~3.2	$3\sim 8\times 10^9$	~2	$10^5\sim 10^7$
InSb (PC)	77	0.7~5.9	$3\sim 10\times 10^9$	1~10	$2\sim 10\times 10^3$
InSb (PV)	77	0.6~5.6	$3\sim 20\times 10^9$	~1	$10^3\sim 10^7$
InSb (PEM)	295	1.3~3.6	3×10^8	~1	10~100
Ge: Au (PC)	77	1~9	$1\sim 3\times 10^9$	~1	$0.1\sim 10\times 10^6$

PC: 光伝導型, PV: 光起電型, PEM: 光電磁型

^{*)} PV では動抵抗値, D^* は 500 K 黒体放射に対する値である点に注意.

る. 電子走査の場合には CCD センサーのような多素子センサーを使うため, 広画面の光学系が要求される. 一方機械走査方式では基本的には単素子センサーのため光電変換部分で光エネルギーを積分できない. そのため, 明るい光学系が必要となる.

放射計の光学系を, 構成方法の面で大別すると表 2 のように 3 種類に分類される. これらの光学系の特徴を利用して, 機械走査方式では反射光学系, 電子走査方式では屈折光学系または反射屈折光学系が用いられている. 図 1 および図 2 に, それぞれの光学系の例を示す.

3.1.3 検出器

3.1.1 項で述べたように, 検出器の開発状況に従って放射計の方式が変遷し, 放射計の中での検出器の機能が增大している. 表 3 に可視近赤外域で使用される受光素子の種類を示す. これらの受光素子は放射計の撮像効率や性能向上を目的として, アレイ形状または CCD^{*)} による多素子化が見られる. ただし CCD としては現在実用化されている Si CCD 以外はまだ開発段階といえる. 図 3 に CCD センサーの例を示す.

3.1.4 信号処理

光学系や検出器の方式・種類が異なっても, 信号処理の基本構成はほぼ同じものとなる. 検出器からの出力は電流または電圧のアナログ信号であり, これを電圧とし

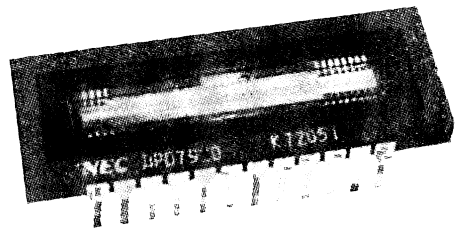


図 3 検出器多素子化の例 (4096 素子一次元 CCD センサー^{*)})

で増幅し, デジタル信号に変換した後, 複数のデータを一つのフォーマットに収めて地上に伝送する方法が取られる. 画像の取得方法やデータ量, その他の制約条件により, 各部での処理の具体的な方式が異なっている. また, 現在は取得した画像データをそのまますべて地上に伝送している場合が多いが, 3.2 項で述べるデータ量の増加に伴い, データの圧縮等のより複雑な処理が要求されつつある.

3.2 将来放射計への展望

3.2.1 機能・性能への期待

衛星搭載用放射計も現在までに数多く打ち上げられ, その有効性が認められるに従い, 機能・性能向上に対する期待も大きくなってきている. また, 大型ロケットやスペースシャトルの使用によって, 大型で複雑な放射計も打ち上げられる背景もあり, 今後の放射計システムに

^{*)} CCD: charge coupled device.

は次のような要素が期待される。

分解能の向上, 狭波長帯化, 広波長域化, 多バンド化, 高 S/N 化等の性能向上とともに, 衛星上でのデータの選択, 圧縮, 編集等の信号処理機能の向上や撮像位置・角度の選定, 波長帯の選択, ダイナミックレンジの選択等の画像データ取得機能の向上が必要である。さらに, 地上へのデータ配布機能の要求や, より高度な画像処理要求が予想される。加えて多くの異なるユーザーのためにマルチ運用が可能なシステムも考える必要がある。

3.2.2 放射計システム構築の条件

上述の性能向上に関して主要な項目について紹介すると次のとおりである。

1) 分解能の向上

分解能は光学系の性能に依存することが多く, 光学系の性能向上が鍵となる。

$$l_2 = l_1 \cdot H / f \quad (1)$$

ただし, f : 光学系焦点距離, l_1 : 検出器画素寸法, l_2 : システムの地表分解能, H : 衛星高度。

(1)式に示すように分解能 l_2 を小さくするためには, H, l_1 を固定すると f を大きくすることになる (l_1 は現在でも限界に近づく, H は衛星運用の点から制約が多い)。つまり, 大型で高性能の光学系が必要になるということである。

2) S/N 比の向上

$$S/N = S / (N_R^2 + N_s^2 + N_c^2)^{1/2} \quad (2)$$

ただし, S : シグナル, N : 総合等価雑音, N_R : 入射光によるショット雑音, N_s : 検知器の等価雑音, N_c : 回路系および量子化の等価雑音。

放射計の S/N は上式で表わされ, その向上には S を大きくするか, N_s, N_c を小さくすることが必要となる (N_R は S により決まる)。

$$S = CH_\lambda l_2^2 F^{-2} t \quad (3)$$

ただし, H_λ : 地表の放射輝度, F : 光学系の明るさ, t : 積分時間 C : 定数。

CCD センサーのような蓄積形検出器の場合の S は (3)式で表わされるが, S を大きくするためには F を明るくするか, l_2, t を大きくする必要がある。 l_2, t は分解能を良くするためにはむしろ小さくしなければならず, F つまり光学系を明るくすることが要求される。また N_s, N_c を小さくするためには雑音のより少ない検出器の開発や低温での使用, 低雑音回路系の開発や量子化ビット数の増加が必要となる。一方検出器の感度向上も S を大きくすることになる。また, N_s, N_c を低く抑

えるには低雑音の検出器や回路系の開発, 検出器の冷却等の対策が必要となる。

3) 波長の狭帯域化

波長の狭帯域化は分光系の高性能化の他に入射光量の減少に伴う S/N の低下につながるため, 上述の S/N 改善の対策が必要である。

1)~3) に示した内容は性能の一部について述べたものであるが, 将来の放射計の構築については高性能大型光学系, 低雑音高感度検出器, 高圧縮多機能データ処理系の開発が主要素となり, これに検出器の冷却技術, 軽量化技術, 小型・低消費電力化技術等が組み合わされた総合技術が必要となる。

表 4 可視赤外放射計の主要諸元

項 目		GMS	METEOSAT
瞬時視野角 (mrad)	可 視	0.035	0.07
	赤 外	0.14	0.14
チャンネル数	可 視	4×2^a	2
	赤 外	2^a	2^a
衛星直下点距離分解能 (km)	可 視	1.25	2.5
	赤 外	5	5
波長 (μm)	可 視	0.55 ~ 0.75	0.5 ~ 1.0
	赤 外	10.5 ~ 12.5	10.5 ~ 12.5
可視 S/N アルベド	100%	50以上	200
	10%	14以上	26
	2.5%	7以上	6.5
検出器の種類	可 視	光電子増倍管	Si 光ダイオード
	赤 外	CdHgTe	CdHgTe
可 視 過 渡 特 性		0.8%以内	0
赤 外 温 度 分 解 能 (K)		0.5	0.5
フレーム時間 (min)		25	25
リトレース時間 (min)		2.5	2.5
南北走査ステップ角 (mrad)		0.14	0.125
	ステップ角精度 (mrad)	0.0035	0.0035
駆 動 機 構		トルクモータ	ステップモータ
主光学系開口直径 (cm)		40	40
構 造 材 料		ベリリウム	インバーおよびセルビット
焦 点 調 整/年		4回	0
総 重 量 (kg)		71	52
所 要 電 力 (W)		24	15

^{a)} 1組は冗長系

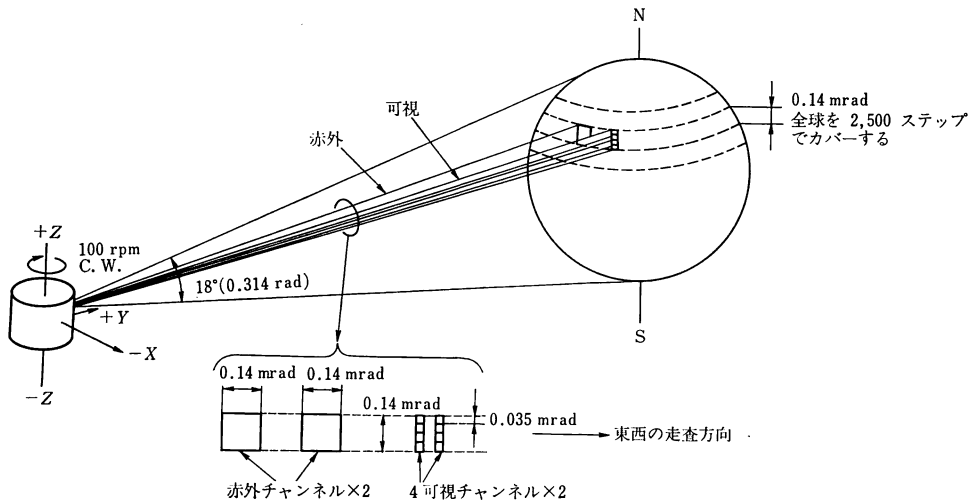


図4 走査方式と可視赤外検出器の配置

4. 可視・熱赤外放射計とその例

4.1 放射計システムの現状

可視熱赤外放射計の特徴は可視域の観測と同時に夜間でも観測可能な熱赤外（ここでは $10\ \mu\text{m}$ 帯の波長帯）の波長帯も有することにある。中高度軌道を周回する地球観測衛星では前項で示したように、LANDSAT の TM⁹⁾ が代表的なものとしてあげられるが、このほかにも気象観測を目的とした TIROS⁹⁾/NOAA¹⁰⁾ シリーズの VHRR*⁷⁾ や AVHRR*⁸⁾ などがある。また静止軌道から気象観測を目的とした GMS, GOES¹¹⁾, METEOSAT の放射計は衛星のスピンの利用した東西方向の走査とステップスキャン機構による南北方向走査を行なう方式であり、表4に示すように可視光領域で地上分解能が $1.25\sim 2.5\ \text{km}$ 、熱赤外で $5\ \text{km}$ の性能を有する。1画面の撮像時間が約25分であり、図4に示す原理で地球のほぼ全表面を撮像する。

視野角は東西 20° 、南北 20° であり、地球全面は可視1万画素×1万画素に、赤外で2500画素×2500画素に解像されていることになる。

これらの放射計の主要な構成部は、光学系、スキャン系、検出器系、冷却系、機械構造物および信号処理系に分けられる。これらを組み合わせた放射計の総合性能のうち、熱赤外の場合温度分解能が重要であり、現状では $0.5\ \text{K}$ が限界であるとされている。

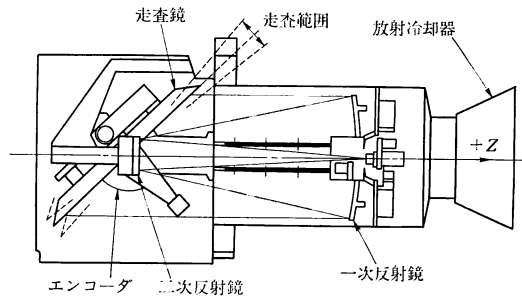


図5 可視赤外放射計断面図(例)

4.2 構成

4.2.1 光学系

可視熱赤外光学系の特徴は可視、熱赤外のエネルギーを同時に取り込むため、大部分は反射光学系を使用している。静止衛星用の可視赤外放射計は図5に示す構成が典型的なものである。METEOSAT の放射計はスキャンミラーがなく、光学系を南北に揺動し、二次元画像を取得している。

4.2.2 検出器

検出器系としては可視と熱赤外のエネルギーを検知するために2種類のデバイスを使用している。可視は観測波長域が $0.5\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 付近で、光電子増倍管や Si フォトダイオードが使用され、入射光エネルギーを電圧信号に変換している。熱赤外は $10\sim 12\ \mu\text{m}$ 帯であり、入射エネルギーとしても非常に低レベルであるため、3種の重金属の組成比により感度分布が変化できる HgCdTe を使用している。現在衛星搭載用として実用に供せられている検出器は、入射光により抵抗が見かけ上変化する

*⁷⁾ VHRR: very high resolution radiometer.

*⁸⁾ AVHRR: advanced very high resolution radiometer.

表 5 赤外線検出器の変遷¹²⁾

	世 代			
	I	II	III	
撮 像 方 式	単素子検出器 + 2次元機械走査	1次元アレイ検出器 + 1次元機械走査	1次元ハイブリッド IRCCD 検出器 + 1次元機械走査	2次元 IRCCD (電子走査)
波 長 帯 (μm)	2~14	2~14	2~5	2~5
技 術 レ ベ ル	実用レベル	実用レベル	試作レベル	研究レベル
素 子 材 料	InSb HgCdTe	同 左	Si ショットキー HgCdTe	HgCdTe

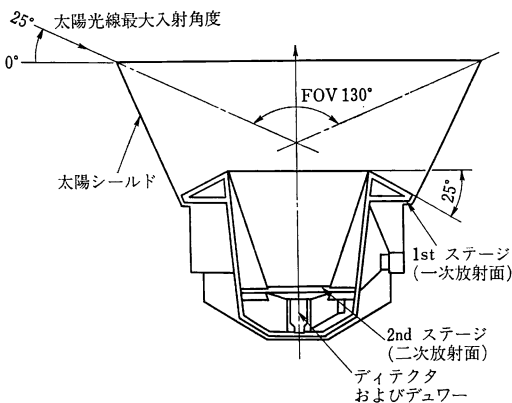


図 6 放射冷却器

光導電型 (PC: photo-conductive) が主流である。

4.2.3 スキャン系

スピン安定形の静止衛星では東西方向の走査は衛星のスピンの利用した走査による画像取得とこれに同期して北から南にスキャンミラーをステップ状に回転する走査を行なう。この場合の走査角精度は $10 \mu\text{rad}$ 以下であり、再現性は $1.8 \mu\text{rad}$ 以下である。

4.2.4 冷却系

熱赤外検出器の動作温度はその特性上一般に 90 K 以下に冷却する必要がある。軌道上でこの温度を維持するために宇宙空間を冷却源とした放射冷却を利用して検出器の冷却を行なっている。図 6 に示す放射冷却器が搭載されており、静止軌道上での季節的な太陽光の入射変化に対し、太陽光入射を避けるために太陽シールドと約 25° 傾けた一次放射冷却面を持つ構造となっている。

4.2.5 機械構造物

放射計の性能維持のために必要な条件の一つに温度に対する安定性がある。GMS の可視赤外放射計の機械構

造物は軽量化のためベリリウムを使用しているが、熱膨張が $\alpha=14 \times 10^{-6}$ とやや大きいので熱設計により温度範囲を狭くしている。一方 METEOSAT 放射計はインバーやセルビット (光学ガラスの一種, $\alpha=0.02 \times 10^{-6}$) 等膨張係数の低い素材を多用している。

4.3 将来放射計への展望

将来の放射計の方式としては、可視近赤外放射計に見られる傾向と同様、電子走査化と広画角、検出器の多素子化の方向である。また、空間分解能、温度分解能に対しても、気象予測の精度向上の目的から熱赤外で 4 km、可視で 1 km、温度分解能は $0.35 \sim 0.4 \text{ K}$ 程度の要求が強まると考えられ、したがってこれらの性能を実現するために放射計の構成要素としてもさらに高い性能が要求される。今後の開発動向の予測は以下のとおりである。

4.3.1 光学系

熱赤外検出器の多素子化とともに光学系の画角の増加が必要となり、一つの試みとして反射光学系タイプで画角の増大を行なうため軸はずしの光学系の開発が進められている。将来は軌道が中高度の衛星からほうきで掃くように走査して撮像するプッシュブルームスキャンに適合した視野角を持った広画角光学系、静止軌道衛星の視野要求 (最大 20°) を満足する反射屈折光学系の出現が期待される。

4.3.2 検出器

赤外領域の検出器の開発は表 5 に示すように三代に分けられ、現在第二世代前半のレベルである。

第一世代は単素子のセンサーとして実用化が進み、表 6 の 2 種の波長域に分けられる。これは地球放射エネルギーの大気窓に相当しており、性能面では BLIP** (背景放射により感度が制限されるようなセンサー) の域まで達しており、耐環境性、信頼性等の向上が要求の

** BLIP: background limited performance.

表6 実用検出器の種類¹³⁾

波長帯 (μm)	検出器の構造		目標温度 (K)
	単素子	多素子	
3~5	InSb (PV) Hg _{0.7} Cd _{0.3} Te (PV) 同 (PC)	InSb (PV) Hg _{0.7} Cd _{0.3} Te (PV) } + CCD	500 } 1000
8~14	Hg _{0.8} Cd _{0.2} Te (PC)	Hg _{0.8} Cd _{0.2} Te (PC) Hg _{0.8} Cd _{0.2} Te SPRITE	~300

中心となっている。

第二世代は光電変換素子とレジスターのハイブリッド化¹³⁾をめざしたものが多く、表5でも示したように3~5 μm のものはすでに実用化の見通しがある。しかしながら8~14 μm のセンサーはレジスターとのハイブリッド技術が確立されていない。一方ある限定された用途には有効な多素子化されたTDI*¹⁰方式ならびにSPRITE*¹¹方式のセンサーが開発されS/Nの高い電子走査素子の実用化へと進んでいる。

4.3.3 冷却系

従来の放射冷却器では熱負荷が増加した場合、放射冷却器の冷却面積も増加し、その効率も低下する。一方赤外センサーの多素子化とともに発熱量も必然的に増加するが、放射計としては冷却器の大型化はシステムの構成上からも避けたいところである。最近、こうした理由から循環型¹⁴⁾の冷却器の使用についてその可能性が見直され、とくにスターリングサイクルを利用した方式は小型で効率も良いことから宇宙用とすべく開発が進められている。現在、地上用の循環冷却器としては負荷1Wで80K程度の温度は十分得られる性能をもっているが、搭載用の信頼性を確保するにはまだ少々時間が必要であり、また放射計および衛星システムに対する機械的な影響、衛星姿勢に対する擾乱についても十分検討する必要がある。

4.3.4 システム構築への条件

可視熱赤外放射計に対し、その使用目的は、気象観測のみならず、農業、鉱物・エネルギー資源探査、防災等多方面に関連があり、また放射計が搭載される衛星の姿勢制御方式から、放射計自体に2軸走査機能を持つ、高分解能、多チャンネル観測波長域を有するシステムが必要となると予測される。しかしながら各構成要素の開発ステップは必ずしも一致しないため、システム性能の向

上が図られる期間が今しばらく続くものと考える。

5. む す び

人工衛星に搭載するリモートセンシング機器のうち、可視・近赤外放射計および熱赤外放射計の概略と、その具体例のいくつかについて簡単に述べた。これらの放射計による観測内容は、衛星規模、搭載条件によりきわめて限定される。また、観測すべき地表の対象は広域にわたる一方、観測対象の特性そのものの一様性が成り立たず、大気効果(大気の透過率や大気による放射、散乱)や太陽光の時間、空間的変動を直接受ける。

このように観測したい情報を電磁波の情報(振幅、位相、波長、偏光など)に結びつけるモデルの確立や精度向上をこれまで述べたハードウェアの開発と並行して進めることが重要である。

さらに現在のリモートセンシングの主役であるMSSは、空間分解能の向上とともに、観測波長域の特殊化あるいは専門化の傾向が見られ、このことはさらに将来衛星上である程度の処理を行ない、目的に合ったデータのみを伝送するスマートセンサーやインテリジェントセンサーの考えにつながることもなるう。

光学波長域で静止軌道上から地球を3mの分解能で監視する望遠鏡衛星、夜明け直前と直後の地球の熱放射率の分布を10mの分解能で測定する2個の衛星からなるシステム—thermal inertia mapper、地上の物質の分類を行なうために、1cmから1mの分解能で地上のテクスチャーを軌道上から観測する光学装置—texturo-meter等、夢は広がる。

日頃ご指導をいただいている宇宙開発事業団の関係各位に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) R. G. Reeves ed.: *Manual of Remote Sensing*, 1st ed. (American Society of Photogrammetry, 1975).
- 2) R. N. Colwell ed.: *Manual of Remote Sensing* (Amer-

*¹⁰ TDI: time delay integration.

*¹¹ SPRITE: signal processing in the element.

- ican Society of Photogrammetry, 1983).
- 3) 和達清夫, 土屋 清, 安田嘉純, 江森康文, 飯坂譲二, 長尾 真: リモートセンシング (朝倉書店, 東京, 1976).
 - 4) S. Twomey: *Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Indirect Measurements* (Elsevier Scientific Publ. Co., 1977).
 - 5) L. E. Blanchard and O. Weinstein: "Design challenges of the thematic mapper," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, **GE-18** (1980) 146-160.
 - 6) 桑野龍士, 奈倉理一, 小野宏己, 成松義人, 平松 優: "海洋観測衛星1号搭載用可視近赤外放射計", NEC 技報, **34**, 4 (1981) 28-33.
 - 7) 石上 博: "SPOT システムについて", 日本リモートセンシング学会誌, **5**, 3 (1985) 71-77.
 - 8) 田幸敏治, 辻内順平, 南 茂夫: 光学的測定ハンドブック (朝倉書店, 東京, 1981).
 - 9) A. Schnap: "The development of the TIROS global environmental satellite system," 20th Aerospace Sciences Conference (1982).
 - 10) N. Steggall: "The NOAA environment satellites," Spaceflight, **24** (1982) 34-35.
 - 11) L. A. Mallette: *9th Commun. Satell. Syst. Conf. 1982* (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1982).
 - 12) 植田陽一, 瀧川 宏: "最近の赤外線センサの展望", 赤外線技術, **8** (1983) 36-42.
 - 13) 植田陽一: "センサ", 日経エレクトロニクス, 2月21日号 (1977) 94-117.
 - 14) W. Zissis: *The Infrared Hand Book* (Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington, DC, 1978).