

2. マイクロ波放射計の観測原理

2. 1 人工衛星搭載観測センサ

人工衛星によるリモートセンシングが世界で最初に行われたのは、米航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration ; NASA) によって打ち上げられた、LANDSAT1 号である。人工衛星搭載観測センサは、物体表面の反射特性や放射特性が物体や周波数帯によって異なることを利用して、陸域、海域、大気各分野に有効なデータを取得するものである。

図 2.1 に、リモートセンシングに利用される電磁波を示す。電磁波は波長の短い方から順に、 γ 線 (原子核の状態の遷移によって発生)、X線 (内殻電子の大きな遷移によって発生)、紫外線 (外殻電子の 2 段階以上の電子遷移によって発生)、可視光線 (外殻電子の 1 段階の電子遷移によって発生)、赤外線 (分子の回転・振動または固体格子の振動によって発生)、マイクロ波 (分子の回転運動によって発生)、ラジオ波 (電磁場中の荷電粒子の運動によって発生) に分類される。リモートセンシングでは、赤外線をさらに、近赤外、中赤外、遠赤外 (熱赤外) と区別することが多い。また、マイクロ波以上の長波長の電磁波を特に電波と呼ぶ。これらの中で、地球観測のリモートセンシングでは主に紫外域からマイクロ波域までが利用される。地表 (陸域、海域) を対象とする場合は、可視域からマイクロ波域が用いられる。大気を対象にする場合には、各種気体の吸収帯 (紫外域、赤外域、マイクロ波域) が用いられる。

図 2.2 に各周波数帯における反射・放射特性の例と、主なセンサの観測周波数帯及び利用目的例を示す。やはり、可視域と赤外域、マイクロ波域が中心である。

人工衛星搭載観測センサには、レーダのように電波を発射してそのエコーを受信する能動型 (アクティブ) センサと、私達が普段使用するカメラのように反射光や放射エネルギーを受信する受動型 (パッシブ) センサがある。

マイクロ波放射計は受動型センサのひとつであり、観測対象の物体から放射されているマイクロ波帯の放射エネルギーを計測する。

すでに運用が終了したマイクロ波放射計としては、電子走査型マイクロ波放射計 (Electrically Scanning Microwave Radiometer ; ESMR)、走査型多周波マイクロ波放射計 (Scanning Multichannel Microwave Radiometer ; SMMR)、マイクロ波放射計 (Microwave Scanning Radiometer ; MSR) がある。現在運用中のマイクロ波放射計には、米国防省気象衛星搭載の Department of Defense Meteorological Satellite Program - Special Sensor

Microwave/Imager (DMSP-SSM/I)、熱帯降雨観測衛星 (Tropical Rainfall Measuring Mission; TRMM) 搭載 TRMM マイクロ波観測装置 (TRMM Microwave Imager; TMI) がある。今後打ち上げ予定のものには、高性能マイクロ波放射計 (Advanced Microwave Scanning Radiometer; AMSR)、改良型高性能マイクロ波放射計 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-E; AMSR-E)、がある。

本研究で使用したセンサデータは、MSR と DMSP-SSM/I のものである。

図 2.3 に、MSR が搭載された我が国初の国産海洋観測衛星 1 号 (Marine Observation Satellite-1; MOS-1) 及びその主要諸元を、また、図 2.4 に MSR のデータ取得概念図及びその主要諸元を示す。MOS-1 は、高度約 909km 上空を 1 周約 103 分で少しずつ西方移動しながら周回し、17 日毎に同じ軌道を通るようになっている。MSR は、直下点を軸にして 10 度の入射角で機械走査方式によりデータを取得する。23.8GHz と 31.4GHz の 2 周波帯あるが、偏波差は入射角 10 度程度ではほとんどないため、偏波の分波をしていない。観測幅は約 320km である。1996 年に運用が終了している。図 2.5 に MSR のエンジニアリング・モデルの写真を示す。写真中、左側にあるアンテナが主反射鏡で、オフセットカセグレン・アンテナを採用している。このアンテナが機械的に回転して地表を観測する。右側に突き出ているラッパ型のものが、温度校正用低温雑音源として宇宙背景輝度温度 (2.7K) を測定するスカイホーンである。

図 2.6 に、DMSP-SSM/I 図を、表 2.1 に、DMSP-SSM/I の性能一覧を示す。DMSP は同型の人工衛星が複数機運用されていて、全世界のデータが頻繁に繰り返し取得できるようになっている。現在 DMSP-SSM/I のデータ入手が可能なのは、F-10、11、13、14 の 4 機である。いずれも高度は 850 km 前後、約 102 分で地球を 1 周している。SSM/I の走査幅は 1400 km である。各機のデータ取得可能期間を表 2.2 に示す。



図2. 1 リモートセンシングに利用される電磁波（「宇宙から地球を見守るリモートセンシング」より）

図中、主に紫外域からマイクロ波域までがリモートセンシングにおいて利用される。地表（陸域、海域）を対象とする場合は、可視域からマイクロ波域が用いられ、大気を対象とする場合は、各種気体の吸収帯（紫外域、赤外域、マイクロ波域等）が用いられる。

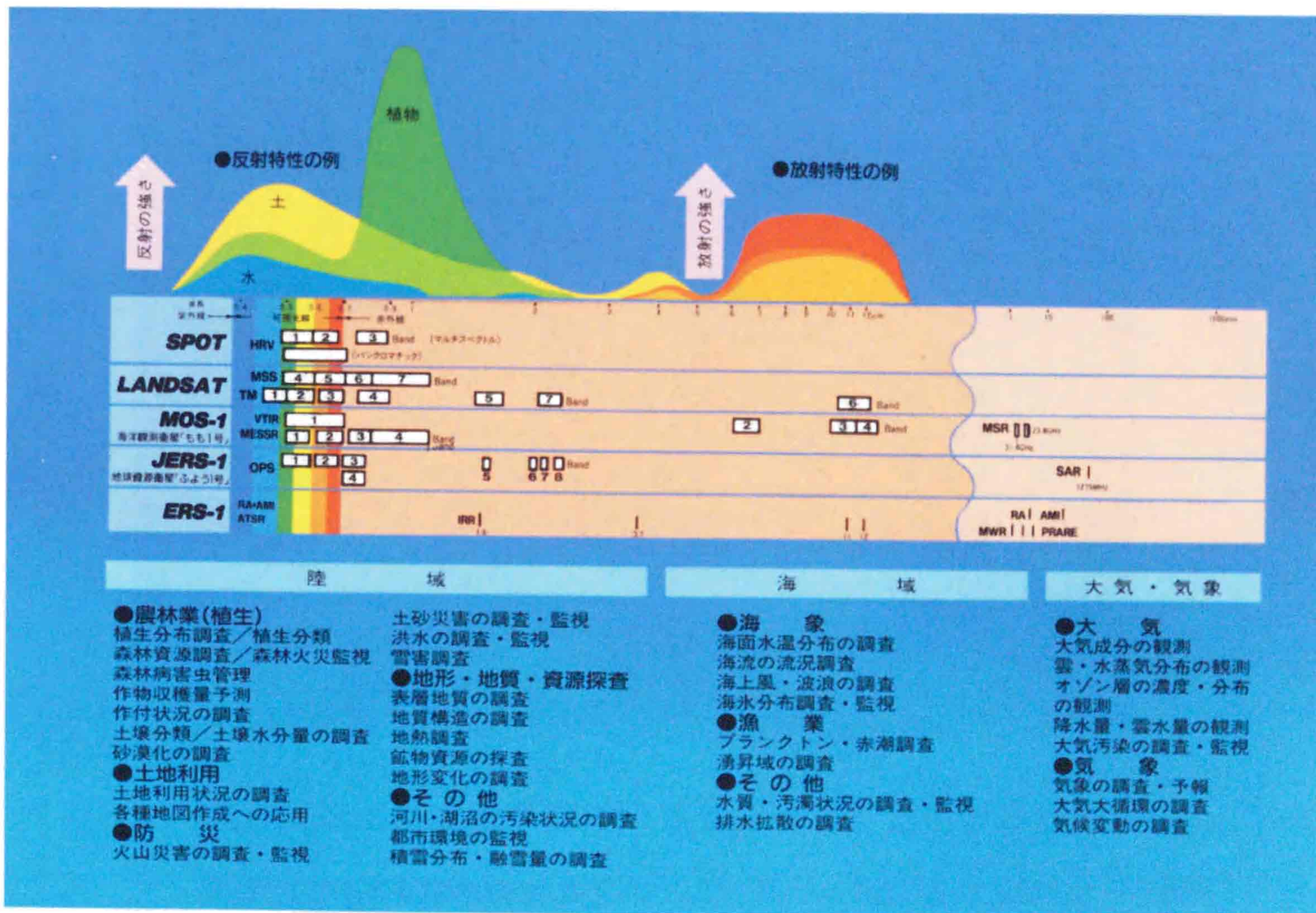
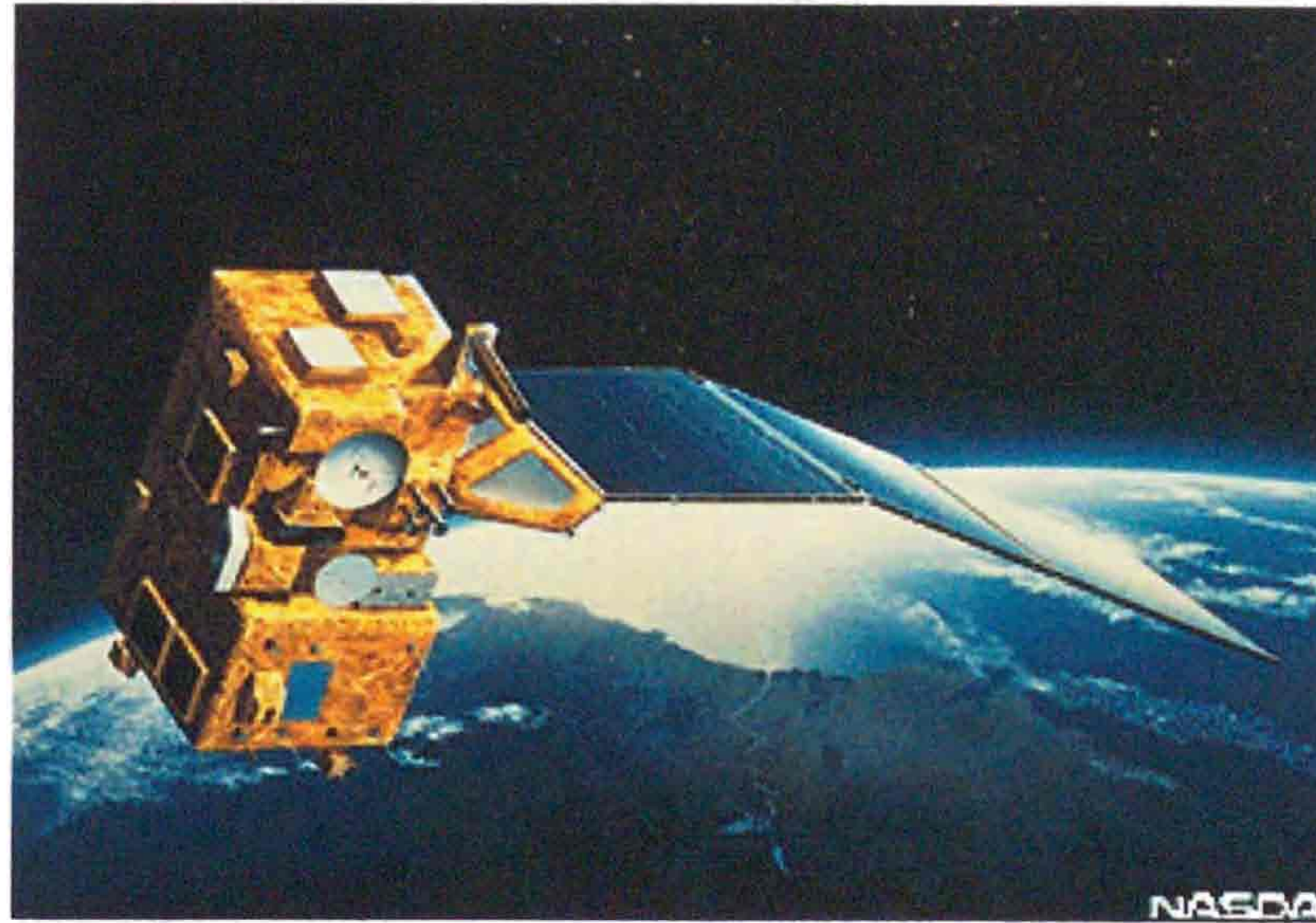


図2. 2 各周波数帯における反射・放射特性と主なセンサの観測周波数帯（「RESTEC」1996、11月版より）

海洋観測衛星1号/1号-b「もも1号/1号-b」
Marine Observation Satellite(MOS)



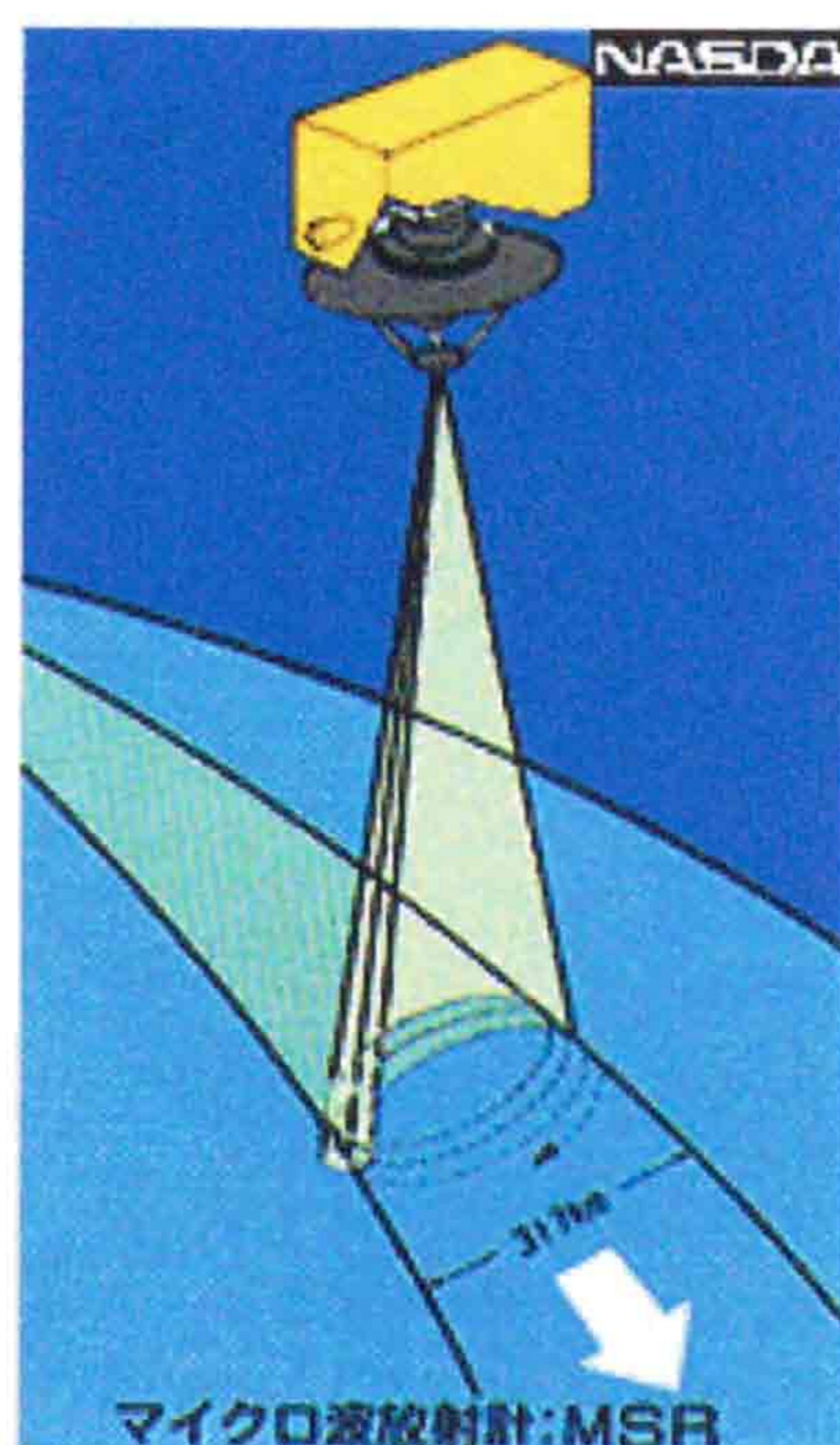
《 主要諸元 》

形状	一翼式太陽電池パドルを有する箱型 本体 約1.26×1.48×2.4(m) 太陽電池パドル 約2.0×5.28(m)	
重量	約740kg	
姿勢安定方式	三軸姿勢制御方式 (コントロールドバイアスモーメント方式)	
設計寿命	2年間	
信頼度	2年後の残存確率 0.5以上	
打上げロケット	MOS-1 / N-IIロケット MOS-1b/H-Iロケット	
打上げ場所	種子島宇宙センター	
打上げ日時	MOS-1 /1987年(昭和62年)2月19日 MOS-1b/1990年(平成2年)2月7日	
運用終了日時	MOS-1b/1996年(平成8年)4月17日	
軌道	種類	太陽同期準回帰軌道
	高度	約909km
	傾斜角	約99度
	周期	約103分
	回帰日数	17日(西方移動)

図2. 3 海洋観測衛星1号及びその主要諸元 (宇宙開発事業団ホームページ

http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/mos_j.html より転載)

マイクロ波放射計 Microwave Scanning Radiometer(MSR)



《 MSR主要諸元 》

観測対象	海面、大気中の水蒸気、海水、積雪
走査方式	機械走査
観測周波数	23GHz帯、31GHz帯
分解能	23GHz帯：約32km 31GHz帯：約23km
観測幅	約320km

図2. 4 マイクロ波放射計データ取得概念図及びその主要諸元（宇宙開発事業団ホームページ http://www.eoc.nasda.go.jp/guide/satellite/satdata/mos_j.html より転載）

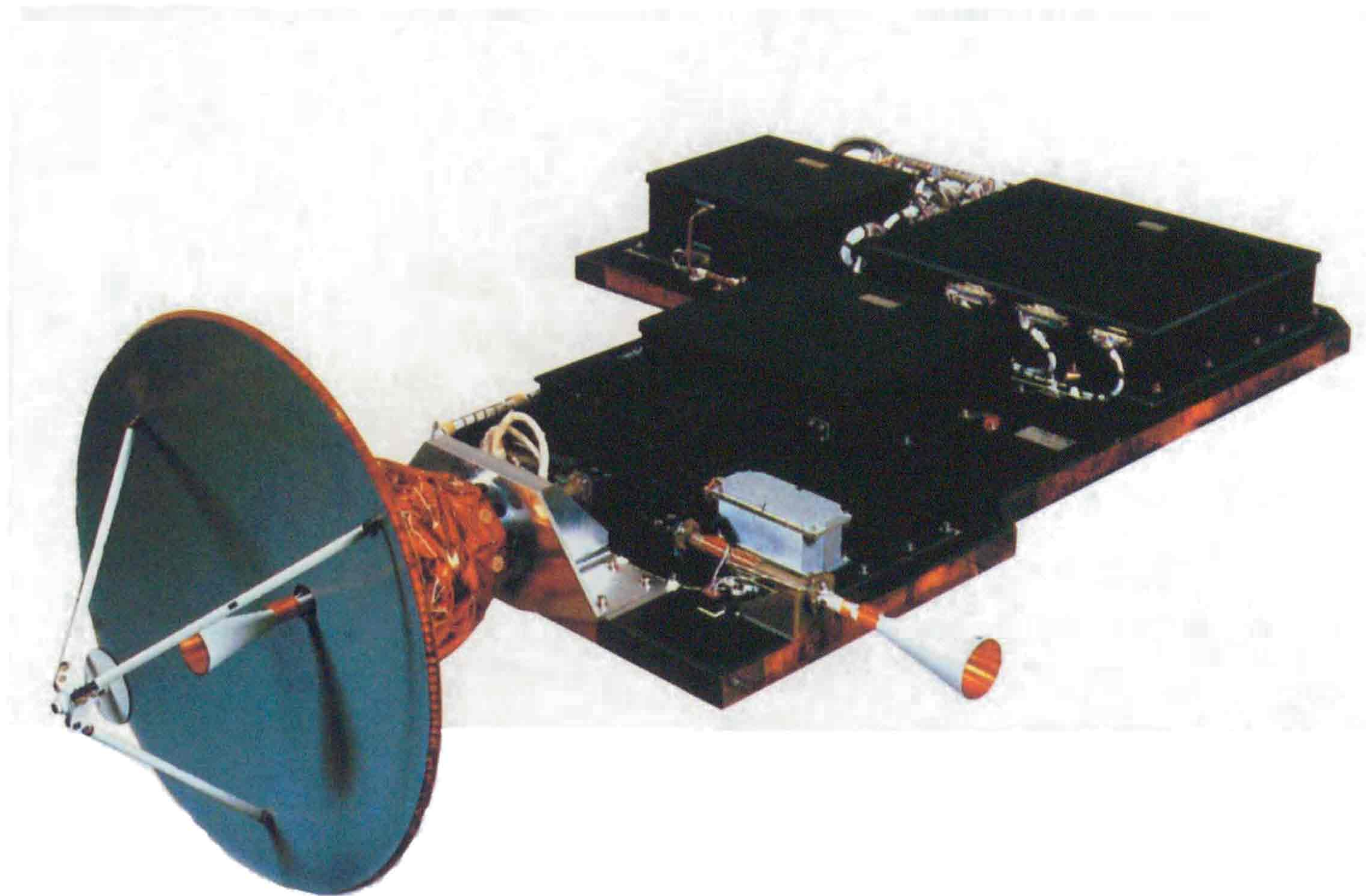


図2. 5 MOS-1 搭載マイクロ波放射計の外観 (エンジニアリング・モデル)

(三菱電機「宇宙開発」1988年、より)

左側のアンテナが主反射鏡で、オフセットカセグレン・アンテナを採用している。このアンテナが機械的に回転して地表を観測する。右側に突き出ているラッパ型のものが、温度校正用低温雑音源として宇宙背景輝度温度 (2.7K) を測定するスカイホーンである。

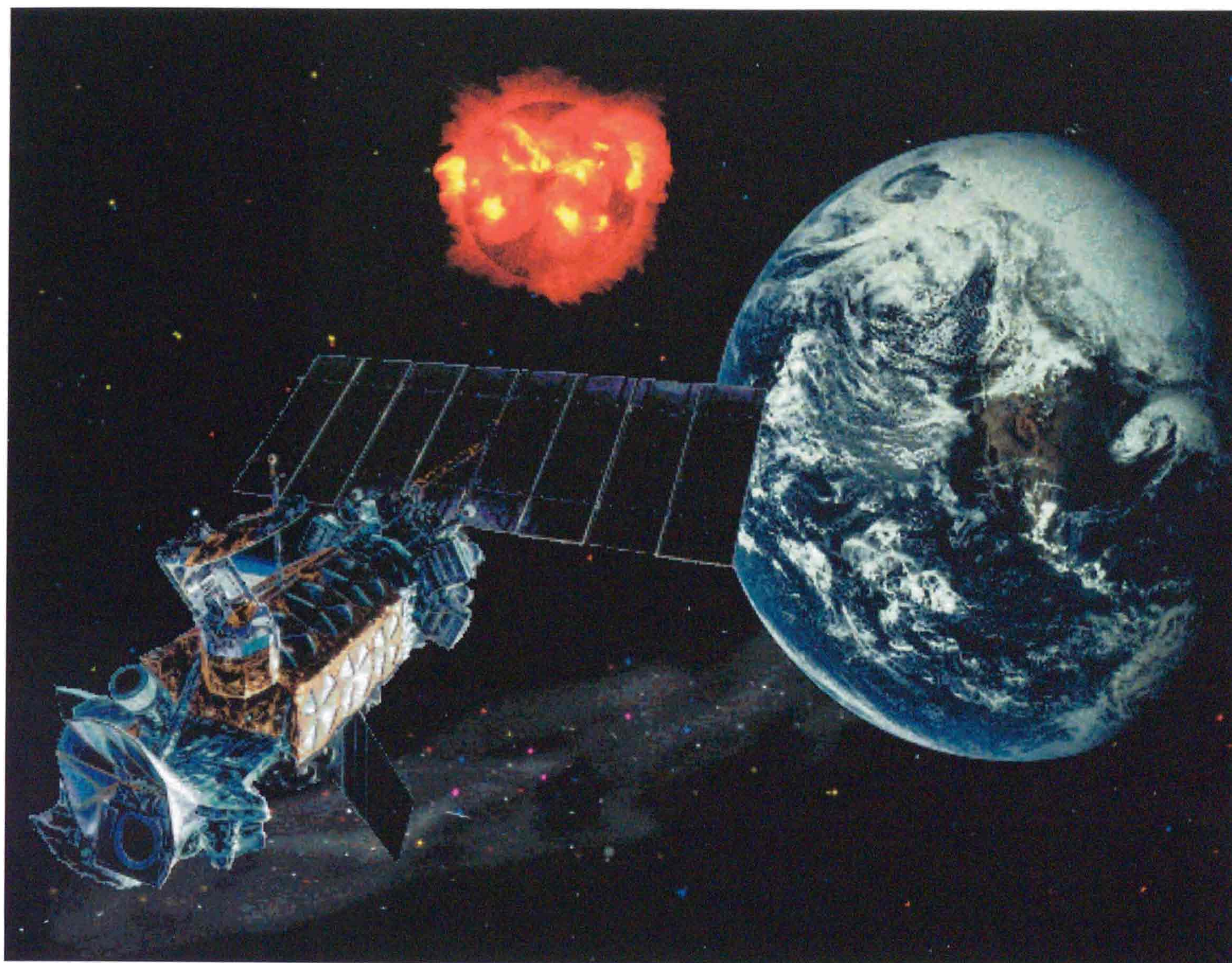


図 2. 6 米国防省気象衛星 DMSP (米国海洋大気庁ホームページ <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/dmsp.html> より転載)

表 2. 1 DMSP-SSM/I 性能一覧

項目	チャンネル							
	19.35		22.23 5	37.0		85.5		
周波数 (GHz)	19.35		22.23 5	37.0		85.5		
偏波	V	H	V	V	H	V	H	
フットプリントサイズ (km) (衛星進行方向) ×(衛星進行垂直方向)	69×13	69×13	60×40	37×28	37×29	15×13	15×13	
1 スキャンあたりの 観測フットプリント数	64	64	64	64	64	128	128	
観測幅 (km)	1400							
入射角 (degree)	51.2							

表 2. 2 DMSP-SSM/I のデータ取得期間

衛星番号	F10	F11	F13	F14
SSM/I データ 取得期間	4/12/92 - 11/14/97	4/12/92 - 4/22/95 4/21/97 - 現在	4/24/95 - 現在	4/28/97 - 現在

注：F12 号機は運用されているが、SSM/I 側に問題があり、SSM/I 以外のデータのみ取得されている。

(米国海洋大気庁ホームページ

http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/descriptions/data_avail.htmlより編集)

2. 2 マイクロ波放射計の観測原理

一般に、有限の温度にある物体は、その温度に対応した熱放射を行っている。 極限の状態として完全な吸収体である黒体 (blackbody) を考えたとき、その黒体放射に関して、次の3つの法則が成り立つ。

(1) シュテファン・ボルツマン (Stefan-Boltzmann) の法則

黒体の単位表面積から単位時間に放射される全波長に亘るエネルギーの積分値である放射輝度 B_{all} は、黒体の物理温度 T の4乗に比例する。

$$B_{\text{all}} = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}] \quad (2. 1)$$

ここで、 σ はシュテファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) である。

(2) ウィーン (Wien) の変位則

物体の温度を変化させた時、熱放射量が最大となる波長 λ_{max} とその温度の積は一定である。

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2.898 \times 10^{-3} \quad [\text{m} \cdot \text{K}] \quad (2. 2)$$

(3) プランク (Planck) の法則

黒体の単位表面積から単位時間に放射される単位波長当たりのエネルギー密度 (分光放射輝度) B_{λ} は、次式で得られる。

$$B_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (2. 3)$$

または、単位周波数帯域幅当たりの表示では、次式のようになる。

$$B_{\nu} = \frac{2\pi hf^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp(hf/kT) - 1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}] \quad (2. 4)$$

ここで、 h はプランクの定数 ($6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)、 c は光速、 k はボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) である。

より実際的には、短波長の時には、 $hc/\lambda kT \gg 1$ と置いた近似式である、ウィーンの近似則が用いられる。 長波長の時には、 $hc/\lambda kT \ll 1$ と置いた近似式である、レイリー・ジーンズ (Rayleigh-Jeans) の近似則が用いられる。

長波長のマイクロ波領域におけるより実際的な黒体放射の法則は、上述のとおり、次の Rayleigh-Jeans の近似則として知られる。

$$B_{bb}(\lambda) = \frac{2k}{\lambda^2} \cdot T \quad (2.5)$$

または、周波数 f で表して、

$$B_{bb}(f) = \frac{2kf^2}{c^2} \cdot T \quad (2.6)$$

ここで、 B_{bb} は黒体の分光放射輝度であり、通常単に輝度 (brightness) と呼ばれ、単位波長当たりまたは単位周波数帯域幅当たりの放射電力を表している。以後、輝度 B は、分光放射輝度のことを指す。

特定の周波数 f について、物体の熱放射の輝度と等しい輝度で熱放射する黒体の温度を、その物体の輝度温度 (brightness temperature) T_b と定義しており、温度 T の通常の物体から放射される輝度 $B(f)$ は次式のように書ける。

$$B(f) = \frac{2kf^2}{c^2} \cdot T_b \quad (2.7)$$

温度 T の通常の物体から放射される輝度 $B(f)$ と、その物体と同じ温度の黒体の輝度 $B_{bb}(f)$ との比が、その物体の放射率 (emissivity) $\varepsilon(f)$ であり、0 から 1 までの値をとる。

$$\varepsilon(f) = \frac{B(f)}{B_{bb}(f)} \quad (2.8)$$

故に、物体の物理温度 T と物体の輝度温度 T_b 及び放射率 $\varepsilon(f)$ との間には、次式の関係がある。

$$T_b = \varepsilon(f) \cdot T \quad (2.9)$$

一般に、放射率は物体の性質として、表面温度、表面の粗さ、含水率、成分組成等によって異なる。また、観測センサ側のパラメータとしては、周波数帯 f の他に、入射角、偏波等によっても異なる。

人工衛星に搭載されたマイクロ波放射計は、それぞれの周波数で輝度 $B(f)$ を検出する。大気に覆われた地球表面からマイクロ波放射計のアンテナに到達する輝度 B_a は、図 2.7 に示すように、地球表面の放射が全大気層を通過して衛星に届いた分の輝度 B_B 、大気からの下向き放射と宇宙背景輝度の合算された分 (B_{down}) が地表で反射し (反射率 = $1 -$ 放射率) 再び全大気層を通過して衛星に届いた分の輝度 (B_{sc})、大気からの上向き放射がその大気層から衛星に届いた分の輝度 (B_{up}) の合計である。

式 (2.9) から明らかなように、輝度と輝度温度は線形である。そこで、輝度を輝度温度で置き換えて図 2.7 の関係を式にすると、次式のように表せる。

$$\begin{aligned}
T_a(\theta, H, \text{pol}, f) &= \frac{1}{L(\theta, H, f)} \{T_b(\theta, \text{pol}) + T_{sc}(\theta, \text{pol})\} + T_{up}(\theta, H) \\
&= \frac{1}{L(\theta, H, f)} [\varepsilon(\theta, \text{pol}, f) \cdot T_s + \{1 - \varepsilon(\theta, \text{pol}, f)\} \cdot T_{down}(\theta)] \\
&\quad + \sec \theta \int_0^H \alpha(z) \cdot T(z) \exp\{-\tau(z, H) \sec \theta\} dz \quad (2.10)
\end{aligned}$$

ここで、 θ は入射角、 H は衛星高度、 pol は偏波（水平偏波もしくは垂直偏波）、 z は鉛直高度方向、 $L(\theta, H, f)$ は大気ロスファクターとして知られている項で、次式で与えられる。

$$L(\theta, H, f) = \exp\{\tau(\theta, H) \sec \theta\} \quad (2.11)$$

また、 $\tau(z, H)$ は高度 z から H までの光学的厚さ（optical depth）と言う量で、位置 z における吸収係数 $\alpha(z)$ を用いて、高度 z_1 から z_2 までの光学的厚さは次式で定義される。

$$\tau(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \alpha(z) dz \quad (2.12)$$

なお、一般に、2点間の透過率（transmittance） Υ は、次式となる。

$$\Upsilon = \exp\{-\tau(z_1, z_2)\} \quad (2.13)$$

式 (2.10) において、右辺第1項は、地球表面の放射が全大気層を通過して衛星に届いた分の輝度温度、第2項は、大気からの下向き放射と宇宙背景輝度温度が地表で反射し再び全大気層を通過して衛星に届いた分の輝度温度、第3項は、大気からの上向き放射がその大気層から衛星に届いた分の輝度温度を示している。

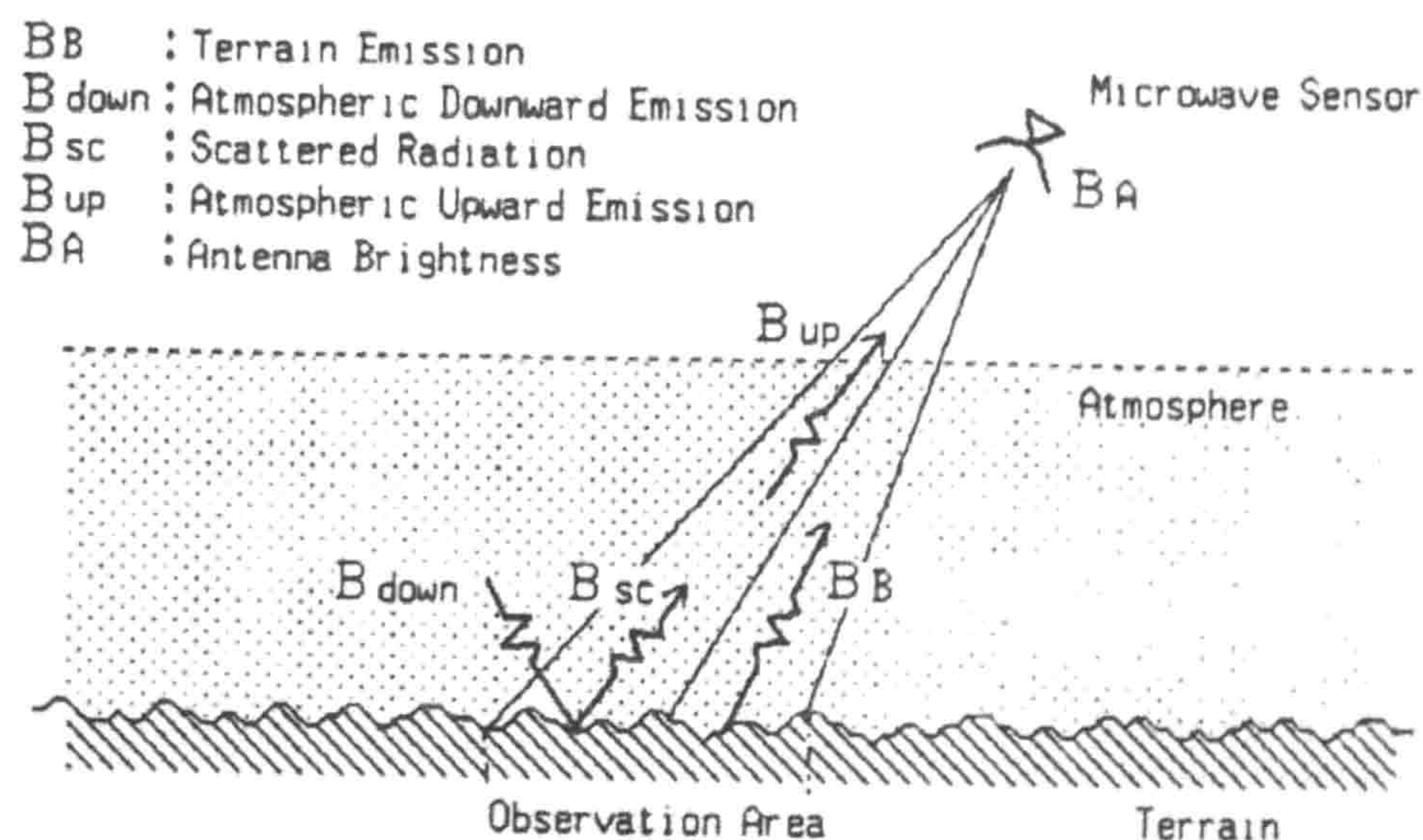


図2.7 アンテナ輝度温度と地表面からの放射との関係

センサに届く輝度温度は、実際にはアンテナが面している全立体角方向に対するアンテナ利得の積算値であり、通常、この値をアンテナ温度 (antenna temperature) と呼んでいる。 MSR の場合、センサデータとして得られたのは、このアンテナ温度である。 従って、MSR データは、陸地と海の境界のように輝度温度に大きく差のある地点では、互いの輝度温度の影響が少なからずあるため、少し誤差を含んでいる、という欠点がある。 サイドローブが拾った輝度温度分を除去し、アンテナ主軸方向であるメインローブのみによる輝度温度を求める補正をアンテナパターン補正と呼んでいるが、DMSP-SSM/I の SDR データは、このアンテナパターン補正済みデータである。 従って、DMSP-SSM/I の SDR データは、アンテナパターンによる輝度温度誤差が改善されている。

人工衛星上のマイクロ波放射計で取得された各種データは電波で地上へ送られ、地上受信局で受信・記録される。 そして各種補正等のデータ処理をしたうえで保存、配布される。 配布されるデータは処理レベルに応じて各種あるが、マイクロ波放射計の場合は、輝度温度データが主である。 水蒸気量や海面温度、海氷、海上風速等の物理量分布データも成果物として得られる。

ところで、観測センサの主要なパラメータの一つに観測周波数帯がある。 一般に、地表を観測するのが主用ミッションである場合は、大気の影響が小さく、透過率が高い波長域を選択する。 従って、大気の窓領域である、 $0.2\sim 1.2\mu\text{m}$ 、 $1.6\sim 1.8\mu\text{m}$ 、 $2\sim 2.5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\mu\text{m}$ 等 (可視域、赤外域) が用いられる。 一方、大気の状態の観測が主用ミッションである場合は、逆に大気の影響の大きい波長域を目的に応じて選択する。 マイクロ波受動観測に適している周波数帯の主なものを表 2.3 に示す。 MSR、DMSP-SSM/I とともに、海面の様子、大気中の水蒸気量、海氷、積雪等の観測が目的で開発されたセンサであるので、水蒸気吸収帯等に当たる周波数帯が用いられている。

表2. 3 マイクロ波受動観測に適している主な周波数と主要マイクロ波放射計の周波数帯

周波数 (GHz)	主な観測対象	主要センサの観測周波数帯 (GHz)			
		MSR	SSM/I	TMI	AMSR
1.4 近傍	土壌水分、塩分				
2.7 近傍	土壌水分、塩分				
5 近傍	河口付近水温				
6 近傍	海面温度				6.9
11 近傍	降雨、雪、湖水、海面状態			10.7	10.65
15 近傍	水蒸気、降雨				
18 近傍	降雨、海面状態、水蒸気、海面温度		19.35	19.4	18.7
21 近傍	水蒸気、水滴			21.3	
22.235	水蒸気、水滴		22.235		
24 近傍	水蒸気、水滴	23.8			23.8
30 近傍	海氷、水蒸気、油もれ、雲、水滴	31.4			
37 近傍	降雨、雲、海氷、油もれ		37.0	37.0	36.5
55 近傍	温度				
90 近傍	雲、油もれ、氷、雪		85.5	85.5	89.0
100.49	酸化窒素				
110.80	オゾン				
115.27	一酸化炭素				
118.70	温度				

(三菱電機技報、Vol. 57、No. 5、p388、1983、をもとに編集)