

第2章 運輸多目的衛星新1号*

2-1 放射の観測

太陽から放射される光(電磁波)は、衛星に到達するまでの間、地球を取り巻く大気中を通る。光は波長によって大気に吸収され衛星まで届かないことがある。大気吸収の少ない波長帯は、大気の影響を受けずに地球表面からの放射を測定できるので“大気の窓”と呼ばれ、一般的にはこうした波長帯が雲や地表面の観測に用いられる。

図 2-1-1 は、放射スペクトルに対する大気中の各吸収物質の吸収率を示し、Y 軸は吸収率(%)を X 軸は波長(μm)を表す。

MTSAT-1R で観測する波長 $0.55\sim 0.90\mu\text{m}$ 帯の可視光線や $3.5\sim 4.0\mu\text{m}$ 帯・ $10.3\sim 11.3\mu\text{m}$ 帯・ $11.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 帯の赤外線は、大気の窓である。

$10.3\sim 11.3\mu\text{m}$ 帯と $11.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 帯の画像は、それぞれ赤外1画像、赤外2画像と呼ばれ、物体から放射される放射量を画像化したものである。通常、赤外画像というときは赤外1画像をさす。

$3.5\sim 4.0\mu\text{m}$ の波長域を観測するセンサーで得られた画像は $3.7\mu\text{m}$ 画像と呼ばれ、日中は太陽光の反射と物体からの放射を、夜間は物体からの放射を画像化したものである。

一方、大気の窓とは逆に、水蒸気による吸収の多い $6.5\sim 7.0\mu\text{m}$ 帯の画像は水蒸気画像と呼ばれ、上・中層の水蒸気の多寡を知ることができる。

また、 $0.55\sim 0.90\mu\text{m}$ 帯の波長域を観測したセンサーで得られた画像は、可視画像と呼ばれ、太陽光の反射を観測したものである。

衛星に搭載されている赤外放射計で計測された

放射エネルギーを、プランクの法則(Plank's Law)を用いて変換した温度を輝度温度または相当黒体温度という。輝度温度(センサーがとらえるエネルギー)は、地表面からの黒体放射をベースとして、太陽の反射光と地表からセンサー間に存在する物体の放射の吸収と再放射の結果としてでてくるが、それぞれのセンサーの波長領域が違うため、同じ物体の放射を測定しても異なる輝度温度が観測される。

赤外画像の波長領域 $11\mu\text{m}$ 帯、赤外4画像の $3.7\mu\text{m}$ 帯はともに地表からの放射が大気を通過する窓領域にある。赤外画像、赤外2画像、水蒸気画像、夜間の $3.7\mu\text{m}$ 画像では、測定された赤外放射量を輝度温度に変換し、それを階調変換して表現されたものである。輝度温度は、黒体に相当すると仮定した物体からの放射温度である。

黒体物質の放射発度 I_B は、ステファン・ボルツマンの法則で表される。

$$I_B = \sigma T^4 \quad (\sigma: \text{ステファン・ボルツマン定数}, T: \text{黒体の絶対温度})$$

黒体でない物質から射出される放射発度 I は、黒体物質からの放射発度 I_B との比である射出率 ε を用いて表される。

$$I = \varepsilon I_B$$

赤外領域では海面や厚い雲の ε は 1.0 に近いが、薄い雲では大幅に変化するので、 ε が分かっていると海面や雲の正確な輝度温度は決定できない。

* 刈田 信敏

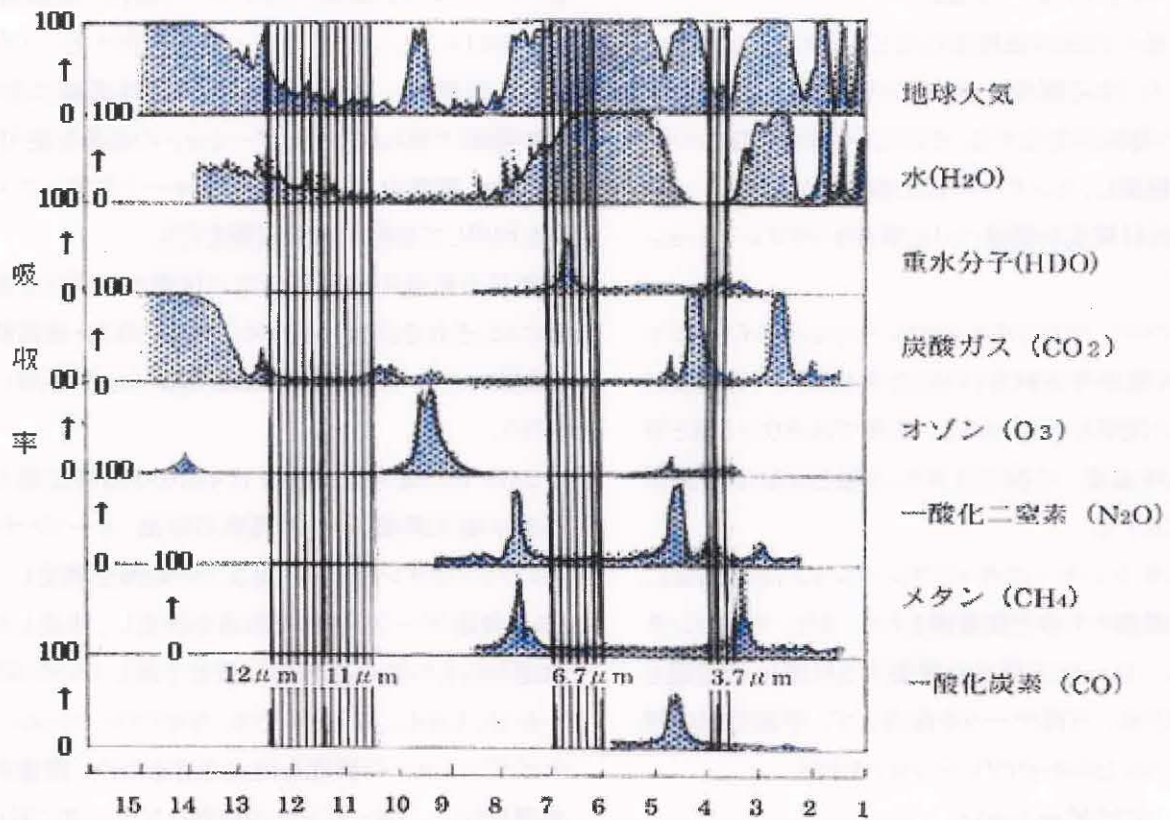


図 2-1-1 放射スペクトルに対する大気中の吸収物質の吸収率 Valley(1965)に加筆

2-2 分解能

GMS-5とMTSAT-1Rに搭載されているセンサーの特性を表2-2-1に示す。GMS-5の水平距離分解能は、衛星直下点で可視画像1.25km、赤外画像5kmであった。直下点から離れるにつれ地球表面を斜めから見ることになり分解能は低下する。日本付近では、およそ可視画像1.8km、赤外画像7kmの分解能になる。また、

GMS-5の画像の階調は、可視画像の場合6ビット(64階調)で、赤外画像では8ビット(256階調)となっており、おおよそ0.5~1.0℃程度の温度分解能となっていた。

MTSAT-1Rでは、階調は可視・赤外とも10ビット(1,024階調)となり、衛星直下点の水平分解能も、表2-2-1に示すように改良される。

表 2-2-1 GMS-5とMTSAT-1Rの各センサーの特性

GMS-5		MTSAT-1R		備考
可視	赤外	可視	赤外	画種
0.55~0.90		0.55~0.90		波長 μm
	10.5~11.5(赤外)		10.3~11.3(赤外)	
	11.5~12.5(赤外2)		11.5~12.5(赤外2)	
	6.5~7.0(水蒸気)		6.5~7.0(水蒸気)	
			3.5~4.0(3.7 μm)	
1.25km	5km	1km	4km	衛星直下点分解能
64	256	1024	1024	階調

2-3 キャリブレーション

衛星の内部は温度変化などのために、センサーの出力である輝度レベル値と放射輝度(エネルギー)の関係が変化する。そのため、輝度が既知の物体を観測し、センサーの出力値を測定して、レベル値と放射輝度を関連づける事をキャリブレーションという。

MTSAT におけるキャリブレーションはイメージャー(可視赤外放射計)の出力するカウント値と放射量との関係に対応づける。赤外ではカウント値と等価黒体温度、可視ではカウント値と反射率の関係を算出する。

赤外センサーのキャリブレーションは観測毎に黒体観測と宇宙空間観測を行う。また、可視センサーは一日一回太陽光を観測する位置に走査鏡を移動させ、可視データを保存して、宇宙空間の輝度レベルとのキャリブレーションを行う。

2-4 ナビゲーション

衛星画像を利用する場合には、画像上の位置と地球座標上の位置との対応を知ることが重要であり、このための作業をナビゲーション(画像位置合わせ)と呼ぶ。ナビゲーションには画像が撮影された時刻における衛星の正確な位置と姿勢を知る必要がある。衛星の位置を知る作業を測距と呼ぶ。MASATの場

合、アースエッジ検出、ランドマーク抽出、星観測及び*HRITレンジングの各データを使用する。イメージャー観測データから作成される地球画像は前時間の観測で得られたナビゲーションの結果を使用する。また、観測中、2分毎にランドマークやアースエッジを利用して姿勢情報の更新を行う。

衛星の軌道や姿勢が所定の位置からずれた場合には、それを回復するための制御(南北・東西軌道制御など(コラム:衛星の軌道制御 60-P参照))を行う。

GMS-5の場合は、まず1日4回6時間毎に地上の3点(埼玉県鳩山町、沖縄県石垣島、オーストラリアのクリブポイント)から衛星までの距離を測定して(3点測距データ)衛星の軌道を決定し、決定した軌道からその後の衛星の位置を予測していた(図2-4-1)。しかし、MTSATでは、キャリブレーションとナビゲーションの精度を向上させるため、画像前処理を行い、イメージャーが取得したデータに対して自律的なリアルタイム処理を採用している。

*HRIT レンジング

CDAS(埼玉県鳩山町)から衛星にデータを送り、その返送されるまでの時間を計って測距を行うこと。

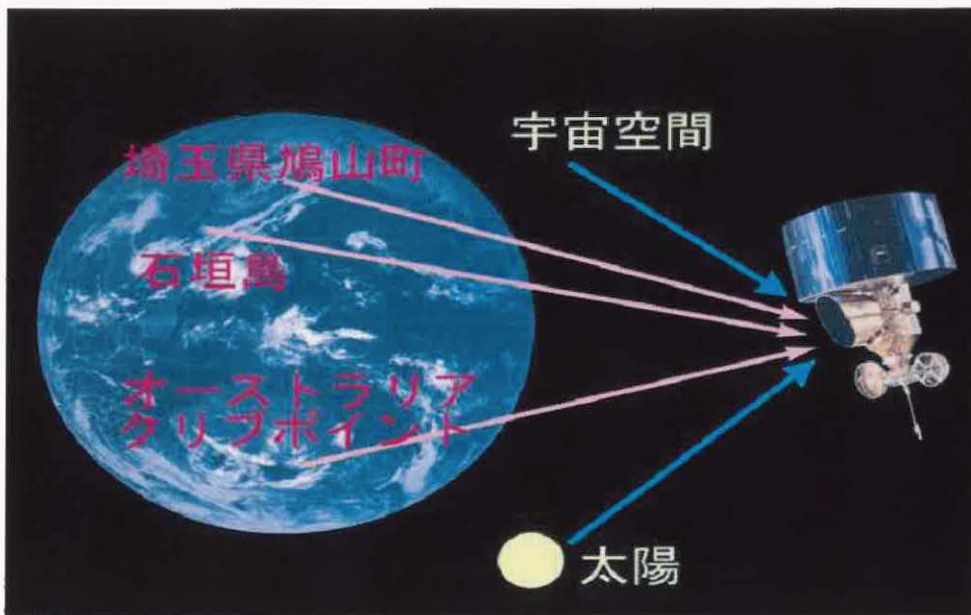


図 2-4-1 GMS-5 で利用していた地上の測距局と気象衛星

(青矢印がキャリブレーション、桃矢印がナビゲーション)

2-5 衛星画像による雲型判別

2-5-1 雲型判別の特徴

衛星は、地表面から目視で雲形を観察する地上観測と異なり、遙か地球の上空から雲頂の様子を観測している。また、衛星に搭載されたセンサーの分解能(GMS-5の場合、可視で約1km、赤外で約5km)は人間の目に比べ粗く、地上観測のような細かな雲形分類は出来ない。このように衛星で判別する雲型は、地上観測の雲形と基本的に別なものであることを認識する必要がある。便宜上、衛星の観測結果に対して、地上観測の雲形と成因や構造的に類似した雲型名を用いているにすぎない。なお、以後衛星から判別する雲のタイプを「雲型」、目視による地上観測から得られる雲のタイプを「雲形」と区別する。

2-5-2 雲型の分類

衛星による雲型判別では、一般に Ci(上層雲)、Cm(中層雲)と下層雲として St(層雲/霧)、Cu(積雲)、Sc(層積雲)、その他の雲として Cb(積乱雲)、Cg:Cumulus Congestus(雄大積雲)の7種類に分類している。

この雲型は、層状性の雲(Ci、Cm、St)と対流性の雲(Cb、Cg、Cu)とに特徴づけられる。Scは層状性雲と対流性雲との中間的な性格を持つ。層状性の雲は、鉛直方向の広がり(雲の厚さ)に比べ水平方向への広がりの方がはるかに大きい。層状性の雲は、「ひとまとまりの広がりを持つ雲域として認識される」「雲の表面が滑らかで雲頂高度の凹凸が少ない」などの特徴を持つ。一方対流性の雲は、層状性の雲に比べ、雲は厚く雲域は小さい。対流性の雲は「独立したセル状の雲域として認識されやすい」「雲域の表面は凹凸している」などの特徴を持つ。

衛星から観測する雲を上・中・下層雲に分類することもできる。この場合、雲底高度によって上・中・下層雲を分類する地上気象観測と異なり、衛星では雲頂高度によって上・中・下層雲に分類するので、留意が必要である。雲頂高度で分類すると、上層雲では400hPa以上、中層

雲では400~600hPa、下層雲では600hPa以下がおおよその目安となる。

2-5-3 雲型判別

通常、雲型判別には赤外面像を用い(昼間については可視画像も補助的に使用)、その他の画像は補助的に使用する。水蒸気画像は、上・中層の流れを理解するのに使われるが、人間の眼による雲型判別には用いない。その理由は、下層雲が見えないこと、上・中層雲の見え方は赤外面像と比べ見え難く、更に特別な情報が得られる訳ではないことによる。水蒸気センサーや赤外センサーの差分画像でも雲型を判別する手法はある。しかし人間の眼でこれらの手法を用いて雲型を見極めるには、相当な熟練を要する。こうした判別手法は、計算機を利用した雲型判別のアルゴリズムに採用されている。

2-5-4 可視画像と赤外面像による判別

可視画像は、反射される太陽光の強さを表す。雲では雲水量が多く厚い雲ほど反射が強い。対流性の雲は層状性の雲に比べ雲粒が多く厚いので、明るく見える。同じ対流性の雲でも雲頂高度が高くなると、雲が厚くなり反射強度が増す。すなわち、CuよりCg、CgよりCbのほうが明るい。下層で形成される雲は雲密度が厚くなることが多いので、上層で形成される雲より明るいことが多い。すなわちStのほうがCiより明るい。しかし、春先に大陸で多く出現する非常に濃密なCi(dense Ci)の場合は雲密度が厚く明るく見えるので、他の雲との区別に注意が必要である。また薄いCiでは、Ciを透過して下に存在する中・下層雲が見えることがある。この場合は下に存在する雲からの反射が加わり、Ci単独より明るく見える。

通常、赤外センサーで捉えた物体の温度情報を人間の眼で見ると、温度の高い物体は明るく白く、温度の低い物体は黒く見える。しかし、気象衛星が捉えた赤外情報は世界の趨勢に倣い、雲等の輝度温度の低いものは白く表現

し、海面や陸面等、温度の高いものについては黒く表現するような階調変換テーブルを使用している。このようにして、赤外面像では、雲頂高度の高い雲は明るく、雲頂高度の低い雲は暗く見えるよう画像化している。

一般に層状性雲の場合、Ci が最も明るく、ついで Cm、St の順の明るさとなる。しかし薄い雲の場合、雲からの放射の他に雲より下からの放射も雲層を透過して観測されるので、実際の雲頂温度より高温となり、雲頂高度の判断を誤ることがある。例えば Ci は薄い雲層であることが多く、赤外面像だけでは Cm と間違えやすい。逆に非常に濃密な Ci は Cb と同程度の雲頂温度を持ち、Cb との識別が難しいことがある。雲頂高度が低い St は、地面温度との温度差が小さく、赤外面像だけでの検出は難しい。対流性の雲では、発達程度は雲頂高度で分類できる。つまり発達した対流性の雲の雲頂高度は Cb が高く、次いで Cg が続き、発達程度が低い Cu は最も低い。

可視画像と赤外面像による雲型判別ダイアグラムを図 2-5-1 に示す。この図は上述した関係を定性的に示したものである。

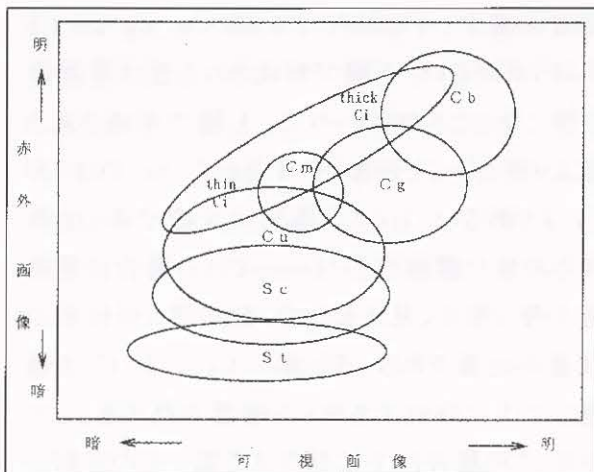


図 2-5-1 雲型判別ダイアグラム

2-5-5 形状による判別

層状性の雲は、一樣な雲頂高度を持つかなりの広がりを持った雲域として存在しやすい。例えば St は一定の雲頂高度をしているので、

雲縁は地形の等高線に沿った形状をすることが多い。Ci は、筋状 (Ci ストリーク)、Cb から吹き出す羽毛状 (アンビル Ci)、流れに直交する小さな雲列 (トランスバースライン) などの特徴的な形状を示す。

対流性の雲は比較的小さな雲の塊として存在することが多い。対流性の雲は発達が進むにつれ、雲の厚みを増したり併合したりするので、衛星から見ると雲域面積は増大する。従って個々の雲の大きさは一般に Cb、Cg、Cu の順となる。対流性雲は、雲列・テーピング状パターン・セル状パターンなどの特徴的なパターンを示す。

2-5-6 様相による判別

可視画像は他の画像に比べ一画素の空間分解能が高いので、雲表面の細かな様相 (texture) を知ることができる。雲表面の状態は、太陽光が斜めからあたっている方が凹凸による影が現れて、わかりやすい。層状性の雲は滑らかで雲の表面は一樣である。一方対流雲の雲の表面は凹凸がありごつごつしている。対流性の雲や下層雲の雲縁は、くっきりと明瞭である。一方上層雲の雲縁は、上層の強い風の影響で、毛羽だったりほつれた様子をしていて不明瞭である。

2-5-7 動きによる判別

大気中では一般に上層ほど風が強いため、上層の雲の動きは速く下層の雲は遅い。従って St、Sc、Cu など下層雲は Ci に比べ動きが遅い。Cb や Cg のように背が高く厚い雲も、おおよそ雲層の平均風速で移動するので、Ci に比べ動きは遅い。

2-5-8 時間変化による判別

対流性の雲はライフタイムが短いので、短時間で雲の形状や雲頂高度が変化する。一方層状性の雲は雲の形状や雲頂高度の変化は小さい。例えば Cb と Ci を比べたとき、形状やパターンに着目して時間変化の少ないほうが Ci となる。