

第1章 基礎*

1.1 気象衛星による観測

1.1.1 気象衛星による観測の特徴

静止気象衛星は、赤道上空約 36,000km の軌道にあって地球の自転と同じ周回周期を持つため、地球上からは赤道上空に静止して見える。静止軌道に位置する衛星の最大の利点は、地球表面の約 1/3 を視野に収めることができる観測範囲の広さと地球上の同じ領域を常に観測できることである。

静止気象衛星は、低気圧や前線に伴う数千キロのスケールを持つ総観規模の雲域から熱雷など数時間で変化するメソスケールの雲域まで、様々なスケールのじょう乱を常時監視できる。図 1-1-1 に、静止気象衛星の観測範囲を示す。雲解析に有効に利用される衛星画像の範囲は、仰角 10~20 度以上の領域 (GMS の場合) である。

極軌道衛星は、南北の極付近を通り赤道をかなり大きな角度で横切る軌道を持つ。これは、低高度 (NOAA の場合は約 850km) を短い周期 (NOAA の場合は約 100 分) で地球を南北方向に周回する

軌道である。この軌道を通る衛星は、地球上のある地点からみると、1日2回程度その地点の近傍上空を通ることになる。静止衛星に比べ低高度を飛行するため、高解像度の画像が得られるが、観測範囲は狭くなる (NOAA の場合、幅約 3,000km)。また極軌道衛星は、静止衛星による観測が難しい高緯度地方 (図 1-1-1 で緯度 60 度以上の極地方) を高頻度で観測することが可能である。

1963 年には、世界気象機関 (WMO) により世界気象監視計画 (WWW : World Weather Watch) が策定され、静止衛星と極軌道衛星とを組み合わせることで地球全体をカバーする気象衛星観測ネットワーク構想が打ち立てられた。それは、5 機の静止衛星と 2 機の極軌道衛星 (NOAA と Meteor シリーズ) を打ち上げることで、全球をくまなく観測しようというものである。米国 (GOES-E, GOES-W)、欧州宇宙機関 (METEOSAT)、日本 (GMS) が 1980 年初めまでに静止気象衛星を打ち上げて以後、現在までにインド (INSAT)、ロシア (GOMS)、中国の静止気象衛星 (FY2) 及び中国の極軌道衛星 (FY1) が加わっている (図 1-1-2)。

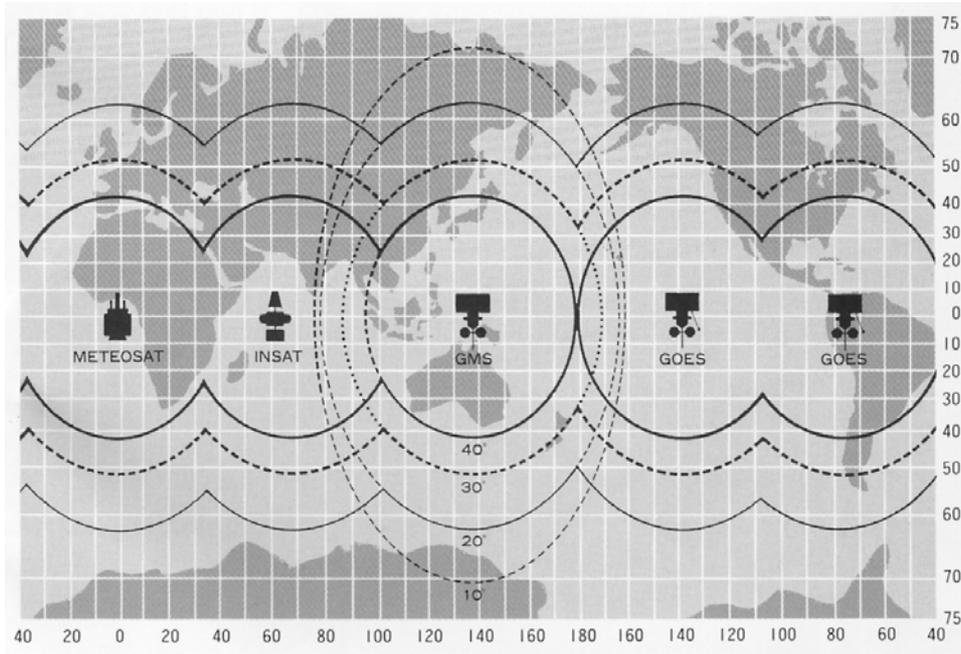


図 1-1-1 静止気象衛星の観測範囲 (衛星仰角) (気象衛星センター、1997)

実線 : 40 度 太破線 : 30 度 細実線 : 20 度 細破線 : 10 度

* 鈴木 和史 (現予報部予報課)

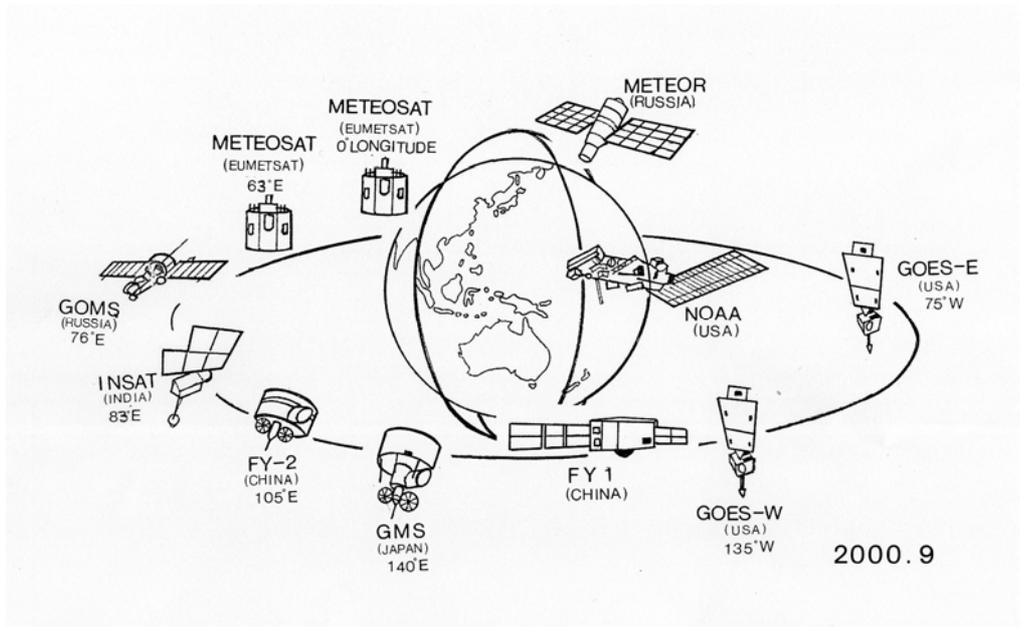


図 1-1-2 気象衛星観測網 (EUMETSAT (2000) に加筆)

GMS (愛称: ひまわり) は、1977年に1号機が打ち上げられて以来、現在までに5機が運用されてきた(表 1-1-1)。GMSの後継となる運輸多目的

衛星(MTSAT-1R)は、平成15年に打ち上げが予定されている。

表 1-1-1 GMSの関連年表

年	月日	事 項
1977	7.14	日本初の静止気象衛星「GMS」打ち上げ
1978	4.6	「GMS」の本格運用(3時間間隔観測)
1981	8.11	「GMS 2号」打ち上げ
1982	4.1	「GMS 2号」運用開始
1984	8.3	「GMS 3号」打ち上げ
"	9.27	「GMS 3号」運用開始
1987	3.1	北半球毎時観測(全球3時間間隔)開始
1989	1.5	全球毎時観測開始
"	9.6	「GMS 4号」打ち上げ
"	12.14	「GMS 4号」運用開始
1995	3.18	「GMS 5号」打ち上げ
"	6.21	「GMS 5号」運用開始

1.1.2 GMSによる観測

GMSはスピン安定方式といって、こまのように自ら回転することで、姿勢を安定させている。

GMSによる観測のしくみを紹介する(図1-1-3)。GMSは毎分100回転、つまり0.6秒で1回転している。GMSから地球を見た時の視野角は約18度で、1回転のうち地球方向を向く時間は、わずか0.03秒である。この短い時間に地球を西から東へ、

赤外センサー画素の大きさ(瞬時視野角)に対応する幅(角度140 μ ラジアン)で走査する。そして、GMSが地球以外を向いている間に、この幅と同じ角度だけセンサーの向きを南に動かす。こうした動作を回転毎に続け、2,500回転で地球の北から南までを観測する。全球の観測時間は25分になる。

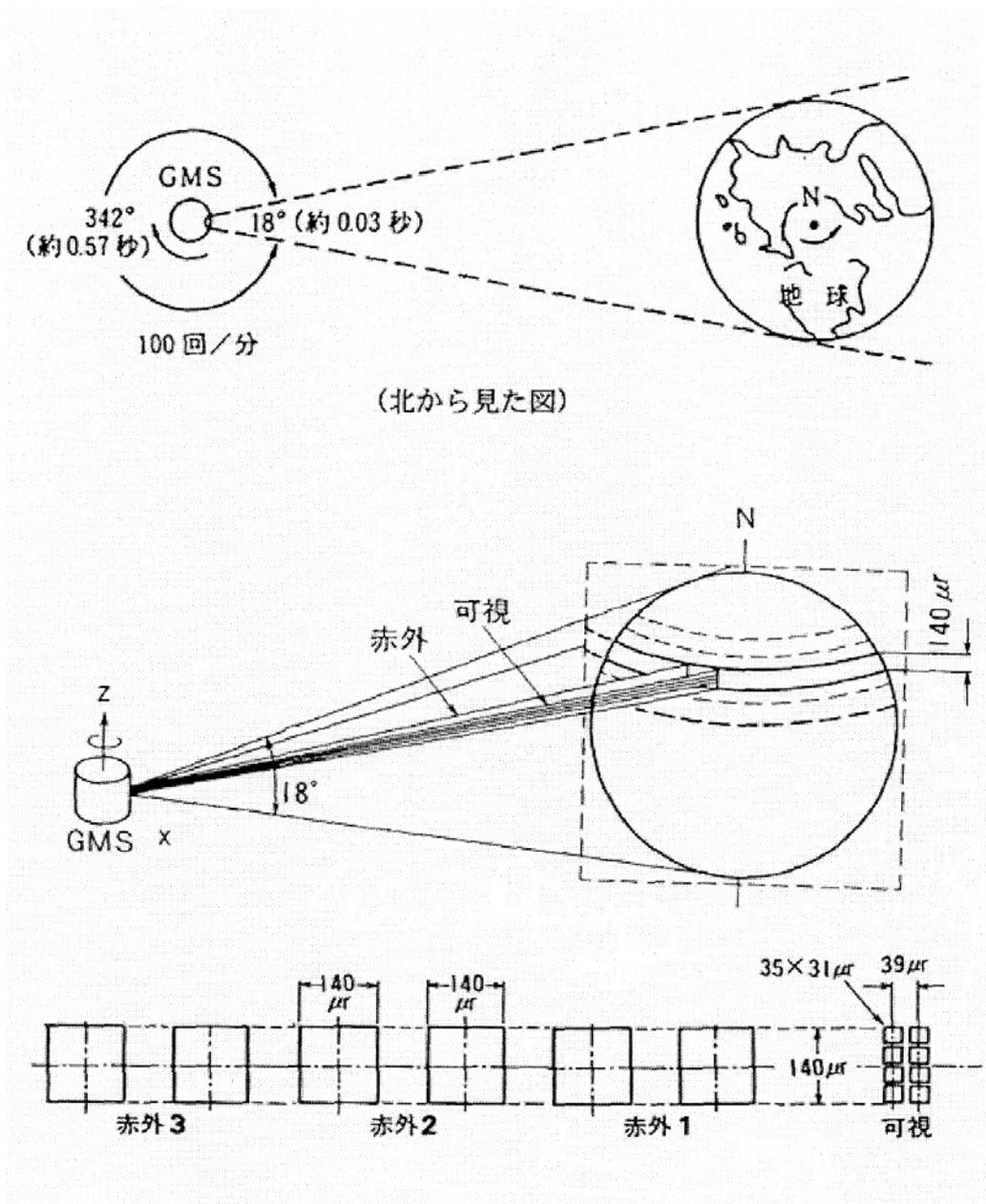


図1-1-3 GMSによる観測の模式図(小平編(1980)、鈴木(2000))

表 1-1-2 GSM-5 のセンサー

	可 視	赤 外	備 考
波 長 (μm)	0.55~0.9		
		10.5~11.5 (赤外 1)	
		11.5~12.5 (赤外 2)	
		6.5~ 7.0 (赤外 3)	
分 解 能	1.25km	5km	衛星直下点
画像階調	64 階調	256 階調	

GMS 5号は、可視・赤外 1・赤外 2・赤外 3の 4チャンネルのセンサーを搭載し、それぞれのセンサーは正・副の 2系を持つ。赤外の 3つのチャンネルセンサーは、 140μ ラジアン $\times 140\mu$ ラジアンの大きさの瞬時視野角を持つ。可視センサーは、赤外センサー（赤外の 3チャンネル）の約 1/4 の大きさになっている。こうした瞬時視野角は、衛星直下点の地球表面では、赤外 5km、可視 1.25km の水平距離分解能となる（表 1-1-2）。

1.2 画像の特性

1.2.1 可視画像

可視画像の特徴は次のとおりである。

- ① 通常のカメラで撮影したモノクロ写真と同じと考えてよい。
- ② 雲や地表面から反射した太陽光の強弱を画像化したもので、海・陸・雲などを観測できる。
- ③ 反射の大きいところは明るく、小さいところは暗く画像化している。
- ④ 雪面や雲は反射率が大きいので、反射率が小さい地面や海面と区別が可能である。

ただし、太陽高度によって見え方が異なることに注意が必要となる。朝夕や高緯度地方では、太陽高度が低くなり太陽光が斜めから当たるため、入射光が少なくなり反射量も少なくなるが、反面、雲頂の凸凹は分かりやすくなる。なお、太陽光の

当たらない夜間は観測できない。

GMS では、可視センサーは赤外センサーより水平距離分解能が高いので、可視画像は赤外画像に比べ、水平スケールの小さな雲や雲列などの識別が容易である。また、雲表面の状態を細かに観測できる。

1.2.2 赤外画像

赤外 1 と赤外 2 の画像は、人間の目による差はほとんどないので、通常、赤外 1 のセンサーから得られた画像を赤外画像として用いている。赤外画像は温度の分布を表すので、太陽光の反射を画像化している可視画像と違って昼夜を通した均質な観測ができる。雲や地面の温度を観測できることから、特に雲頂温度を雲頂高度に変換することによって、雲の発達程度を定量的に把握できる特徴を持つ（P8 のコラムを参照）。

1.2.3 水蒸気画像

水蒸気画像は、赤外 3 のセンサーから得られた情報を画像化したものである。赤外 3 のセンサーも赤外放射を観測しているので、水蒸気画像も温度を表している。同じように温度を測定している赤外画像との大きな違いは、赤外画像が大気による吸収が少ない波長帯（ $10\sim 12\mu\text{m}$ ）を利用してのに対し、水蒸気画像は水蒸気による吸収が多い波長帯（ $6.7\mu\text{m}$ ）を利用していることである。

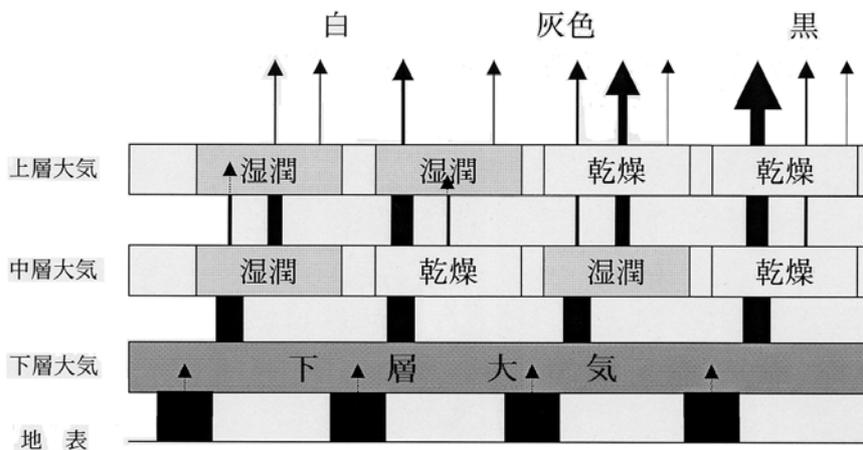


図 1-2-1 水蒸気画像における放射の吸収・射出の概念図
白、灰色及び黒は画像での相対的な明るさ

この波長帯における大気による放射に関しては、気温が高く水蒸気が多いほど射出が多く、また吸収が多いという性質がある。

この特性により、水蒸気画像では上・中層に存在する水蒸気の多寡を表すことができる。

大気を上・中・下層と3つの層に単純化した図 1-2-1 で、水蒸気画像における地表及び各層からの吸収・射出の概念を示す。まず地表からの射出を考える。地表からの射出は多いが、下層では相対湿度が低い状態でも水蒸気の絶対量は多いので、そのほとんどは下層大気に吸収される。次に上・中層大気の状態を4つの場合に分けて考える。

- ① 上・中層大気が湿っている場合（図の左）、下層大気からの射出は中層大気に、中層大気からの射出は上層大気に多くが吸収され、上層大気からの射出は少ない。その結果、衛星で観測される放射量は最も少ない。
- ② 上・中層大気が乾燥している場合（図の右）、下層大気及び中層大気からの射出の多くが上・中層大気を透過する。その結果、衛星で観測される放射量は最も多い。
- ③ 中層大気が乾燥で上層大気が湿潤な場合（図の左から2つ目）、下層大気からの射出の多くは中層大気を透過するが、上層大気により多くが吸収される。中層大気からの射出は少なく、上層大気に多くが吸収される。上層大気からの射出は少ない。その結果、衛星で観測される放射

量は少ない。

④ 中層大気が湿潤で上層大気が乾燥している場合（図の左から3つ目）、下層大気からの射出は中層大気で吸収されるが、中層大気からの射出の多くが上層大気を透過する。その結果、衛星で観測される放射量は多い。

画像では、放射量が多いほど暗く（黒く）、少ないほど明るく（白く）表現される。

このことは、次のようにいい換えることも

できる（図 1-2-2）。赤外3のセンサーで地球を観測するとき、観測経路上の水蒸気がある程度以上多くなるとそれより下層の状態は探知することができない。上・中層で湿っている場合、観測経路は短くなり、上層の状態を観測することになる（上層の温度は低いので、画像では白っぽくみえる）。一方、上・中層が乾燥している場合は観測経路が長くなり、より下の状態を観測することになる（上層に比べ温度は高くなるので、画像では黒っぽくみえる）。

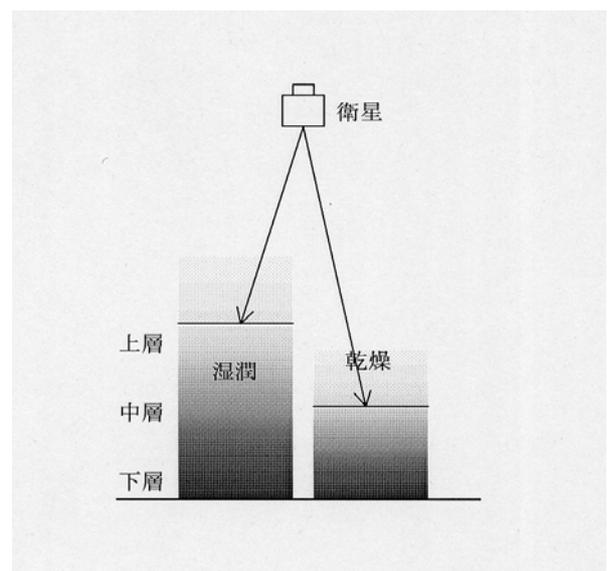


図 1-2-2 衛星が捕らえる水蒸気チャンネルの放射量陰影の濃淡は水蒸気量を表す。

水蒸気画像で、暗く（黒く）表される部分を「暗域」、明るく（白く）表される部分を「明域」と呼ぶ。図 1-2-3 に例を示す。暗域（図中D）は、周りに比べ相対的に暗く（黒く）表されている。明域（図中B）は、白あるいは灰色で表されている。なお、暗域や明域に定量的な基準はなく、画像上で明るい部分や暗い部分を指す定性的な概念である。また、注目している暗域が、時間が経過するにしたがって暗さ（黒さ）が増している場合、「暗化」と呼ぶ。この様な特徴を持つ水蒸気画像では、雲がなくても水蒸気をひとつの指標として上・中層の大気の流れが可視化され、「明・暗域のパターンから、上・中層のトラフ、リッジ、渦、ジェット気流の位置の推定」、「明・暗域の時間変化から上・中層のトラフの深まり／浅まりや沈降の強まり／弱まりの推定」等ができる。

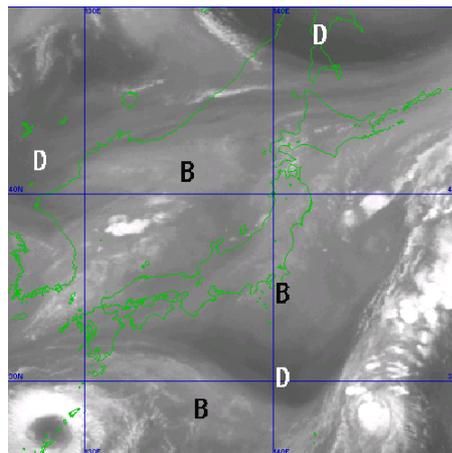


図 1-2-3 2000年8月8日00UTCの水蒸気画像
暗域 (D) と明域 (B)

1.2.4 赤外差分画像

赤外差分画像（スプリット画像とも呼ばれる）は、赤外1の温度から赤外2の温度を差し引き、画像化したものである。赤外1も赤外2も、大気窓と呼ばれる大気による吸収の少ない波長帯を用いているが、水蒸気や石英等（火山灰、黄砂）による吸収や散乱の特性がわずかに異なる。赤外差

分画像はこの特性を利用し、差が大きいほど暗くなるように画像化している（図 1-2-4）。

赤外差分画像の利用の一つは、火山噴煙の監視である。火山灰に含まれる石英は、赤外1や赤外2の波長帯では吸収や散乱の特性が水と逆であるという性質を持つ。水滴や氷晶で構成される雲は差が正かゼロで、画像では黒や灰色に表される。一方、石英物質を含む火山灰は逆に差分は負になり、画像では白っぽく表され、雲との区別が容易になる。

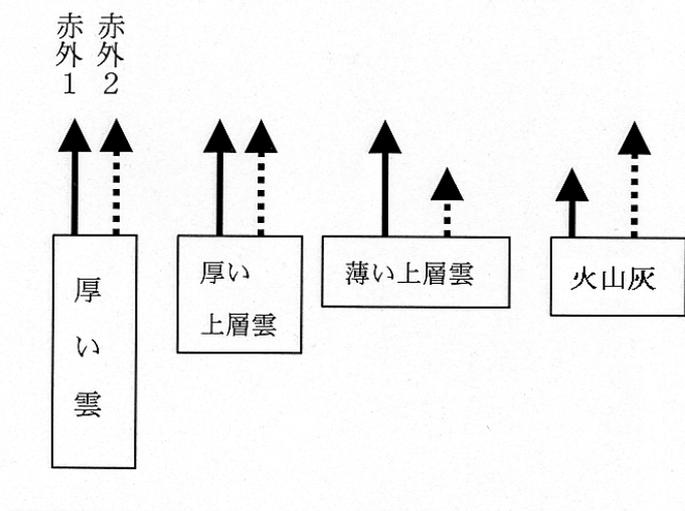


図 1-2-4 赤外差分画像の概念図（気象衛星センター、2000）

1.3 雲型判別

1.3.1 衛星による雲型分類

衛星からの雲の観測は、雲頂を観測していること及び分解能が粗い点が、地上からの雲の観測と異なっている。そのため衛星からの雲の観測（雲型）と地上からの雲の観測（雲形）は別のものである。

衛星画像による雲型判別では、一般に Ci（上層雲）、Cm（中層雲）、St（層雲/霧）、Cb（積乱雲）、Cg（雄大積雲）、Cu（積雲）、Sc（層積雲）の7種類に分類する（表 1-3-1）。

雲型は、生成要因によって層状雲と対流雲に大別される。一般的には上層雲や中層雲は層状雲に分類されるが、粒状の上層雲やトランスバースライン等は例外である。以下、断りが無い限り上記の雲型分類で記述する。

層状雲は、広い範囲にわたる弱い上昇流によって形成される。つまり、鉛直方向への広がり（雲の厚さ）に比べ水平方向の広がりがはるかに大きい。こうして層状雲は、「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」という特徴を持つ。

対流雲は、狭い領域で強い上昇流によって形成される。つまり、水平方向の広がり（雲の厚さ）は同じ程度である。こうして対流雲は、「独立したセル状の雲域として認識される」「雲域の表面が凸凹している」という特徴を持つ。層状雲には Ci、Cm、St が、対流雲には Cb、Cg、Cu が、分類される。Sc は層状雲と対流雲との中間的な性質を持つ。

雲型は、上・中・下層雲にも分類できる。この場合、地表面から見上げて観測する地上観測では雲底高度によって上・中・下層雲に分類するが、宇宙から見下ろして観測する衛星では雲頂高度によって分類する。400hPa と 600hPa がそれぞれを分ける雲頂高度のおおよその目安である。上層雲には Ci、中層雲には Cm、下層雲には St、Sc、Cu が分類される。Cb と Cg は上・中層雲に相当する雲頂高度を持つ。

1.3.2 雲型判別

人間の眼による衛星画像の雲型判別には、可視画像と赤外画像を用いるのが一般的である。日中

表 1-3-1 衛星による雲型分類

雲 型	分 類	
上層雲 Ci	上層雲	
中層雲 Cm	層状雲	
層雲/霧 St	下層雲	
層積雲 Sc		—
積 雲 Cu	対流雲	
雄大積雲 Cg		—
積乱雲 Cb		—

は可視画像と赤外画像を併用し、夜間は赤外画像のみで雲型判別する。雲型判別の概念図を図 1-3-1 に示す。

可視画像は、反射される太陽光の強さを表す。雨粒や雲粒を多く含む厚い雲ほど反射は強くなるので、対流雲のほうが層状雲より白く見える。同じ対流雲でも、発達するほど背が高く厚い雲となるので、反射強度が増し白く見える。層状雲でも、一般的に下層雲のほうが多くの雲粒を含むので、上層雲より明るい場合が多い。

赤外画像は、雲頂温度の低い雲（雲頂高度の高い雲）は明るく、雲頂温度の高い雲（雲頂高度の低い雲）は暗く表される。層状雲の場合は、一般に Ci、Cm、St の順に明るい。St は雲頂高度が低いので海面や地面との明るさの差が小さい。特に雲頂高度がかなり低い St の場合には海面や地面との区別が難しい場合が多い。雲の厚さが薄い場合には、雲頂からの放射に雲層を通して下層からの放射も加わるため、雲頂高度が実際より低く解析される場合があるので注意して見る必要がある。対流雲は、発達程度を雲頂高度で判断できるので、Cu・Cg・Cb の区別は比較的容易である。例外的に春先に大陸で多く出現する濃密な Ci、粒状の Ci 及び停滞する地形性 Ci は、赤外画像でもかなり明るく表されるので Cb との判別が難しい場合がある。その場合には雲の移動速度で判別できる場合が多い。

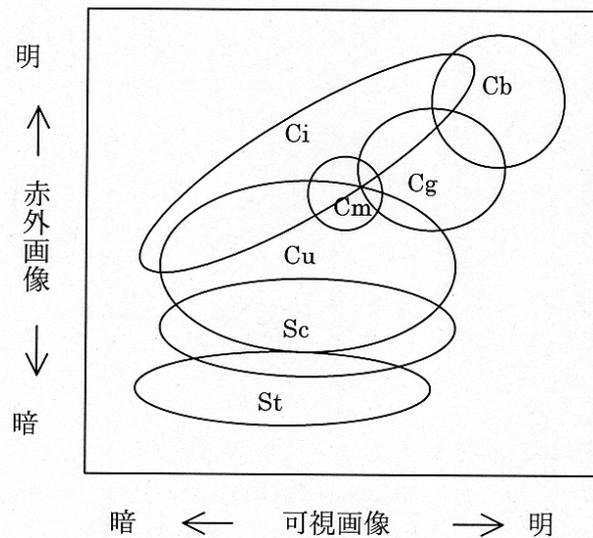


図 1-3-1 可視画像と赤外画像による雲型判別の概念図

TBB、雲頂温度及び雲頂高度

TBB とそれに関する雲頂温度や雲頂高度について、画像上での定性的な見方を説明する。

TBB (T_{BB} と表記される場合もある) とは Equivalent Blackbody Temperature (等価黒体温度) の略称である。観測された赤外線放射量が、黒体から放射されたと仮定した場合の黒体の温度である。Brightness Temperature (輝度温度) ともいう。

GMS-5 号では、赤外 1、赤外 2 及び赤外 3 (水蒸気チャンネル) のチャンネルによる TBB がある。本書では、特に断らない場合、TBB とは赤外 1 の TBB のことを指し、また赤外とは赤外 1 のことを指す。

赤外チャンネルは、上向き放射量の大气による吸収が少ない「大气の窓」の波長帯である。そのため、雲が厚くまた水平解像度以上の広がりを持つ雲の場合、雲頂からの放射がほとんど大气による減衰を受けずに衛星に到達するので、TBB が雲頂温度となる (厳密には、大气による僅かな吸収の補正が必要である)。したがって、上記のような雲の場合には、赤外画像上では「白いほど雲頂温度が低い」とみなしてよい。逆に薄い雲または解像度以下の小規模な雲の集まりの場合には、下方からの放射も衛星に到達するため、雲頂温度より高い温度が観測され、赤外画像上では、雲頂温度に対応する輝度より暗く表現される。

雲頂温度と雲頂の高度における大气の気温が等しいとして、高層観測や数値予報による気温の鉛直分布から雲頂高度が決まる。対流圏では一般に上層ほど気温は低い。すなわち、厚い雲で水平解像度以上の広がりを持つ雲の場合、白いほど雲頂高度は高いことになる。ただし、気温分布は緯度や季節及び気象条件によって異なることに注意が必要である。

このようなことから、赤外画像上で対流雲の輝度が増した場合、「雲頂高度が上昇し (雲頂温度が下がり)、対流雲が発達した」などということができる。

(伊藤 秀喜)