

付録A 雲の判別*

気象衛星による雲の観測は、上空からその雲頂を観測しており、また、その分解能が数 km と粗いという点で、地上から行う目視の雲の観測とは異なる。そのため、衛星から観測した雲(雲型)と地上から観測した雲(雲形)は別のものとして認識する必要がある。衛星画像を利用した雲の判別では、地上観測の10種雲形と異なり、一般に表A-1のように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種類の雲型に分類する。

衛星画像による雲型判別法は、気象衛星画像の解析と利用(2000)に詳しいが、衛星画像解析の基本でありかつ重要であるので、熱帯域の主要な雲であるCiとCbを中心に、その判別法を述べる。

表A-1 衛星画像による雲型分類

雲 型	分 類	
上層雲 Ci	層状雲	上層雲
中層雲 Cm		中層雲
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		—

A.1 各種画像の特徴による雲の判別

(1) 各種画像の特徴

表A1-1に示すように、各気象衛星(MTSAT^{*1}-1R、GMS-5、GOES-9)の同種の画像センサー同士には、観測波長に若干の差がある。しかし、ここで解説する画像解析法では、その特性の違いによる差は小さいと考えて、GMS-5及び米国の気象衛星GOES-9の画像を使用した。本書では、MTSAT-1Rで得られる3.7 μ m画像の解説には、GOES-9の3.9 μ m画像を使用した。

(a) 可視画像

可視画像(図A1-1(a))では雲や地表面で反射された太陽光の強弱を示す^{*2}。反射光が強いほど明るく、弱いほど暗くなり、太陽光のない夜間は利用できない。反射光の強さは、雲の厚さ、太陽光のあたる角度、雲粒の大きさ、密度、雲を構成している物質が水か氷かなどに深い関係がある。太陽高度が低い朝夕には雲頂高度の高い厚い雲の影が周辺の雲頂高度の低い雲に投影されているのが見られることがある。この影により雲の高さを比較することができる。

Ciは雲層の厚さが薄く、それ自体の密度も低いので、下が透けて見えたり灰色に見えたりする。

一方、CbはCiより雲層の厚さが厚く、その密度も高いので、明るく見え、発達した厚い雲ほどより白く輝いて見える。また、雲頂表面の凹凸感は一不均一で、主に風上側の雲縁が明瞭であること

表A1-1 MTSAT-1Rと各気象衛星の画像・センサー特性の比較

各画種の波長[μ m]、衛星直下点での分解能[km]、画像階調を示す。

衛星名 センサー	MTSAT-1R	GMS-5	GOES-9
画種	JAMI	VISSR	IMAGER
可視 (VIS)	0.55-0.90 μ m 1km/1024階調	0.55-0.90 μ m 1.25km/64階調	0.55-0.75 μ m 1km/1024階調
赤外1 (IR1)	10.3-11.3 μ m 4km/1024階調	10.5-11.5 μ m 5km/256階調	10.20-11.20 μ m 4km/1024階調
赤外2 (IR2)	11.5-12.5 μ m 4km/1024階調	11.5-12.5 μ m 5km/256階調	11.50-12.50 μ m 4km/1024階調
水蒸気 (IR3)	6.5-7.0 μ m 4km/1024階調	6.5-7.0 μ m 5km/256階調	6.50-7.00 μ m 8km/1024階調
3.7/3.9 μ m (IR4)	3.5-4.0 μ m ^{*1} 4km/1024階調	—	3.80-4.00 μ m ^{*2} 4km/1024階調

^{*1} 3.7 μ m画像と呼ぶ。^{*2} 3.9 μ m画像と呼ぶ。

*廣畑 雅哉

から判別できる。この凹凸感は太陽光がやや斜めからあたっている朝夕が観察しやすい。太陽高度角の大小により、輝きや凹凸感が異なるので、その発現位置と撮像時刻の関係に注意する必要がある。これに対し、層状雲は雲頂の表面が滑らかで一様である。霧など厚みのない雲は灰色に見える。

(b) 赤外画像

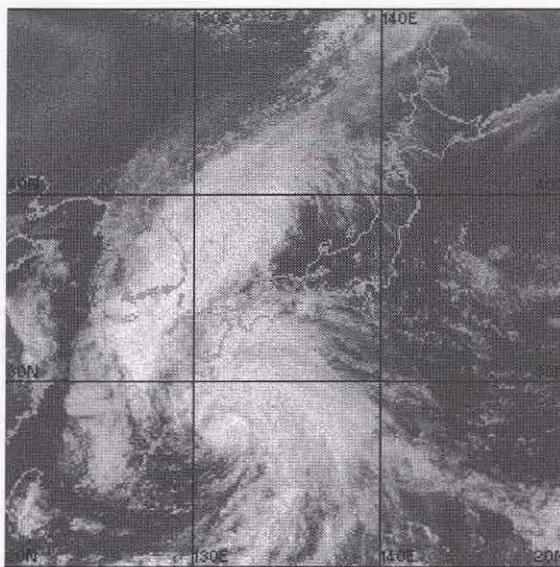
通常、単に赤外画像という場合は、表 A1-1 に示した「赤外 1 (IR1) 画像」のことである。この画像は物体が放射する赤外 1 の波長帯(11 μ m 帯)の放射量を観測し、輝度温度に変換し表されたもので、その物体表面の温度分布を表したものである。輝度温度とは、黒体に相当すると仮定した物

体からの放射温度である(以後、「輝度温度」は単に「温度」と呼ぶことにする)。

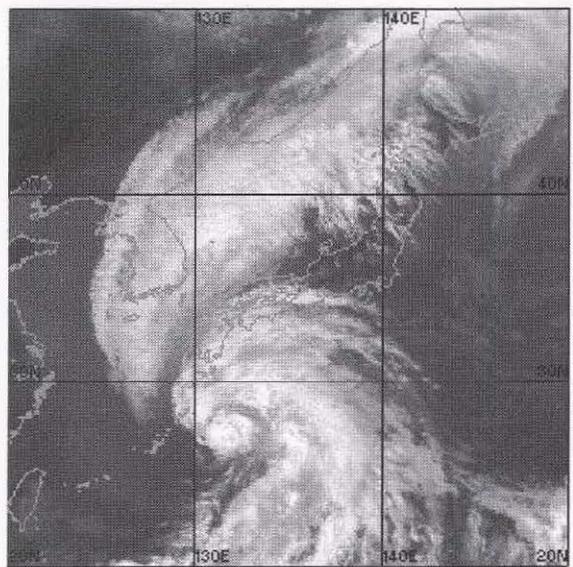
MTSAT-1R の赤外画像の場合、衛星直下の赤道付近で 4 km \times 4 km 領域の平均した温度を表わしている。

一般に赤外画像では、温度の高いものを暗く、低いものを明るく表示している(以後、赤外画像で「暗い(黒い)」とは温度が高いことを、「明るい(白い)」とは温度が低いことを意味する)⁴³⁾。

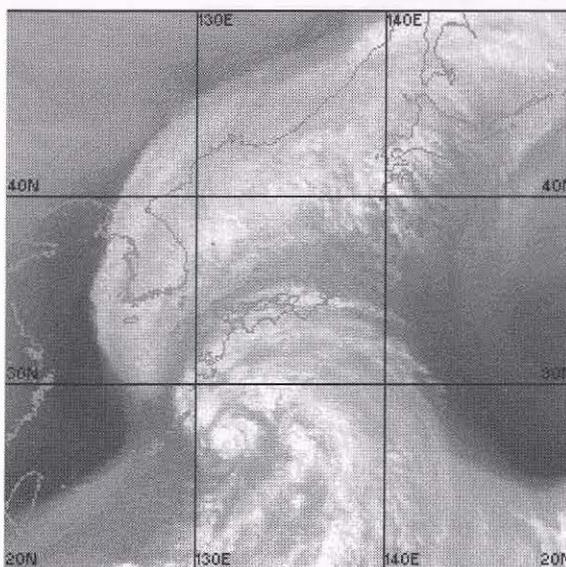
厚い雲の射出率を 1.0 と仮定した場合、赤外画像から雲頂温度を知ることができる。その場所における気温の鉛直構造がわかれば、その雲頂温度を雲頂高度に変換することができる。気温の鉛



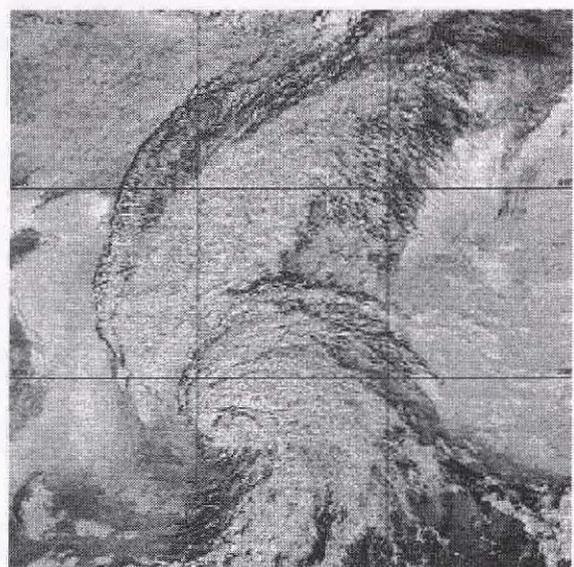
(a) 可視画像



(b) 赤外画像



(c) 水蒸気画像



(d) 赤外差分画像

図 A1-1 GOES-9 による各種画像(次頁へ続く)

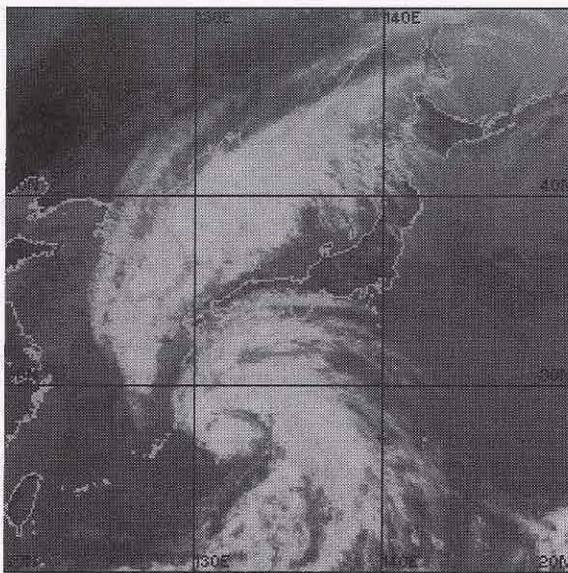
直構造の推定には、数値予報の客観解析値や予報値を用いることが多い。対流圏では一般に上層ほど気温が低いので、雲頂温度が低い雲ほど雲頂高度が高くなる。すなわち、雲頂温度の変化から鉛直方向の発達を監視できる。

図 A1-1 (b) に赤外面像の例を示す。赤外面像では一般的に雲頂高度が高いほど白く見えるので、Ci は白く、筋状(Ci ストリーク)やCb から吹き出す羽毛状(かなとこ巻雲)、流れに直交する小さな波状(トランスバースライン)などの形状を示すことが多い。対流雲(Cu、Cg、Cb)は灰色から白色に見え、発達した対流雲ほどより白く見える。

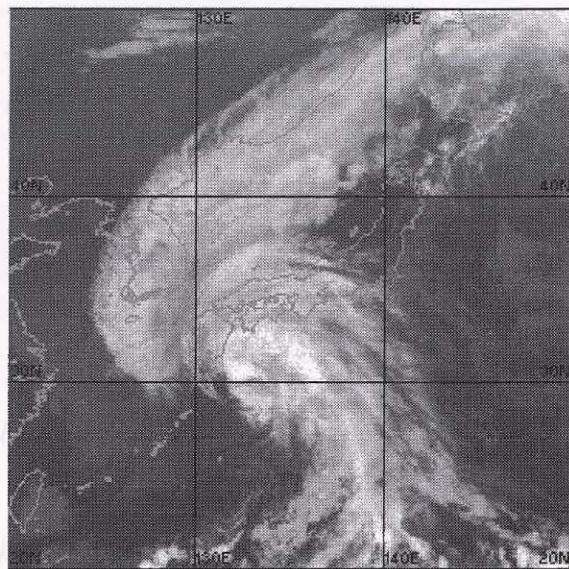
赤外面像は可視画像と異なり昼夜同じ条件で観測ができるので雲域の常時監視に利用できる。

(c) 水蒸気画像

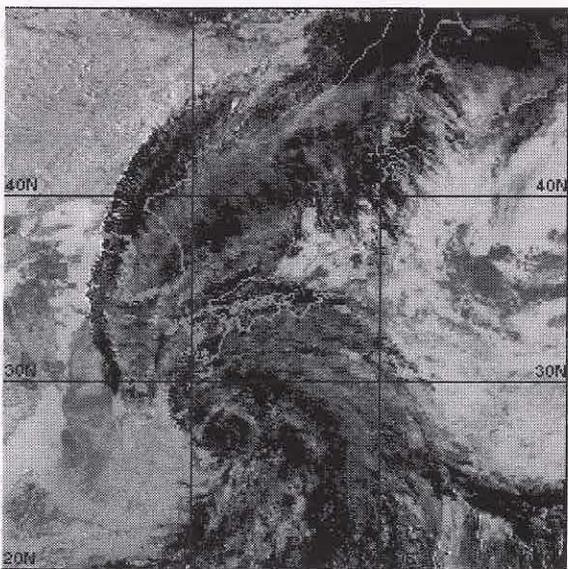
水蒸気画像は赤外面像の一種で、赤外面像と同様に、温度の低いところを明るく、温度の高いところを暗く画像化している。水蒸気による吸収が大きな波長帯(6.5-7.0 μm)を観測する画像であり、画像の明暗は対流圏上・中層の水蒸気が多寡に対応するという特徴をもつ。このため、画像から上・中層の水蒸気の水平分布が推定できる(図 A1-1 (c))。さらに重要なことは、雲のないところでも画像の明暗のパターンやその動きから上・中



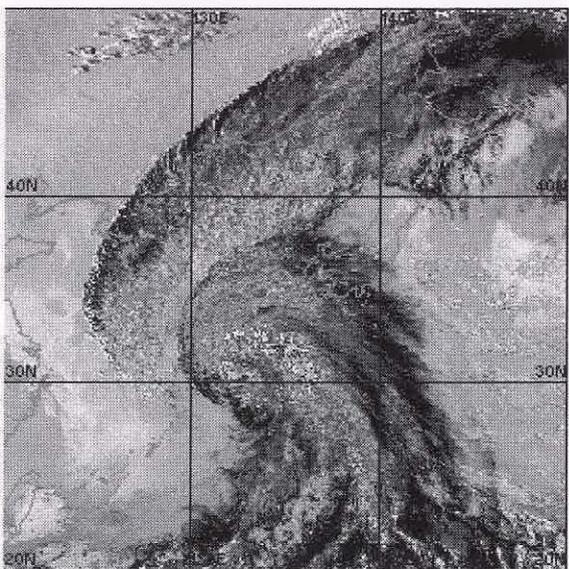
(e 左) 昼間の 3.9 μm 画像



(e 右) 夜間の 3.9 μm 画像



(f 左) 昼間の 3.9 μm 差分画像



(f 右) 夜間の 3.9 μm 差分画像

図 A1-1 GOES-9 による各種画像

(a)~(d) 及び (e 左), (f 左) は 2003 年 5 月 30 日 06UTC、(e 右), (f 右) は同日 12UTC

層の大気の流れが推定できることである。この推定された流れは季節や場所によってもその高度が異なる。平均的な大気放射特性から推定すると250~500hPa程度の高度に相当することが多い。ジェット気流や上層トラフ、UCLの検出にも有効で、上層トラフ後面の下降気流によって生じた上・中層の乾燥域が暗域として検出されることもある。

(d) 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(11 μm 帯)の温度から赤外2(12 μm 帯)の温度を差し引き、その差が大きいほど暗くなるように画像化している。その例を図A1-1(d)に示す。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。

赤外差分画像の特徴は、薄いCiや下層雲の識別に有効なことである。薄いCiは画像上では黒く見えるため、地形性CiとCbの判別などに利用できる。厚いCiの場合は灰色に見える。また、下層雲は赤外1と赤外2では共に黒体に近くその差分は0で画像上では明るく見え、赤外画像では暗く海面と区別できない場合に有効である。

(e) 3.7 μm 画像

3.7 μm 画像は赤外画像の波長帯と同じく大気吸収が小さい大気窓に属する波長帯の放射量の多寡を示したものである。その例をここでは3.9 μm 画像で図A1-1(e左、右)に示す。この画像は太陽光の影響が大きいため、昼間と夜間の画像は区別して利用しなければならない。昼間の画像では反射の大きいところはより白く、逆に小さいところではより黒く表している^{*)}。夜間の画像では赤外画像と似た性質をもち、温度が低いほど白く逆に高いほど黒く表している。

この画像は夜間の霧や下層雲の検出に有効である。

(f) 3.7 μm 差分画像

3.7 μm 差分画像は3.7 μm の温度から赤外1の温度を差し引いて画像化したものである。その例を3.9 μm 差分画像で図A1-1(f左、右)に示す。差が正のとき暗く、負のとき明るく表している^{*)}。

Lee *et al.* (1997)や山崎ほか(1999)によるとこの画像は夜間の霧や下層雲・薄いCiの判別に有

効で、3.7 μm 画像より検出しやすい。氷晶から成るCiに対し、3.7 μm は可視光に近い性質を有し、雲を透過しやすい。夜間は雲頂からの放射に温度の高い地上からの放射が薄いCiを通過して加わり、3.7 μm では実際の雲頂温度よりも高く算出される。このように、3.7 μm では赤外1より透過の効果が大きいので、雲頂温度は赤外1の温度よりも高くなり、両者の温度差は正の値になる。このため薄いCiの領域が識別でき、例えば降水を伴うCbと伴わないかなど巻雲(Ci)との区別が可能となる。

(2) 各種画像の特徴を利用した雲型判別の事例

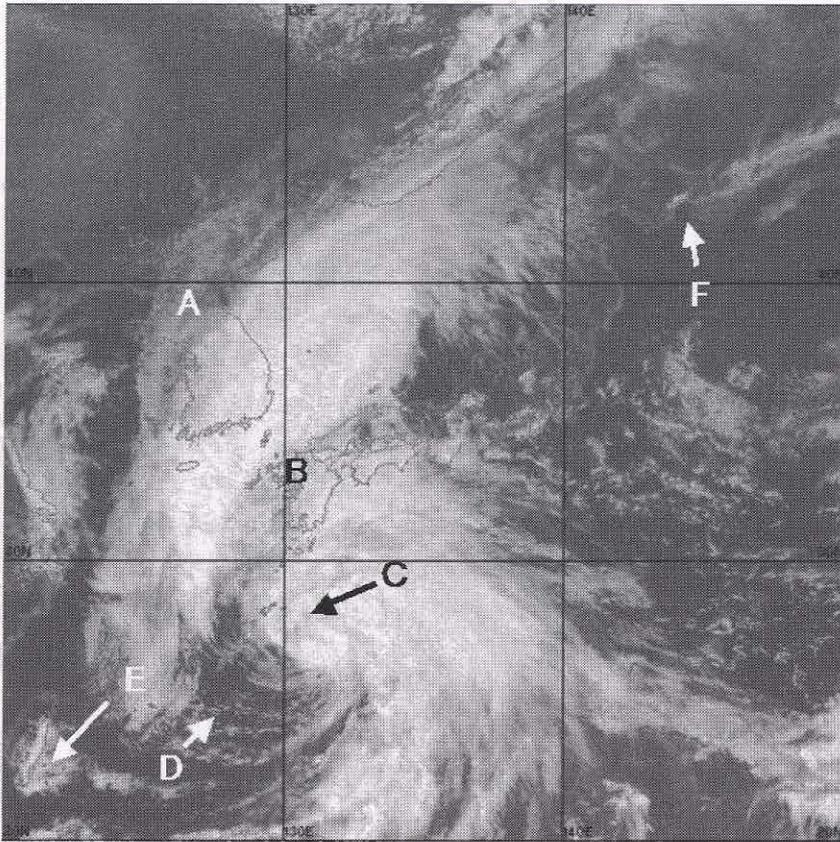
衛星画像から判別される雲型は、層状雲(Ci、Cm、St)と対流雲(Cb、Cg、Cu)とに大別され、Scは両者の中間的な性格をもつ。層状雲は、広い範囲にわたる比較的一様な上昇流によって形成される。したがって、鉛直方向の広がり(雲の厚さ)に比べ、水平方向の広がりが遙かに大きい。層状雲は、ひとまとまりの広がりをもつ雲域として認識され、雲の表面が滑らかで雲頂の凹凸が少ないという特徴をもつ。一方、対流雲は、狭い範囲の強い上昇流によって形成される。そのため、層状雲に比べて雲は厚く、雲域の広がり小さい。対流雲は、独立したセル状、列状またはテーパリング状(人参状)の雲域として認識され、雲の表面が凸凹しているという特徴をもつ。

可視と赤外の画像それぞれで、その雲域の分布・形・輝度又は明度・表面の凹凸感などの見え方を比較しそれらを組み合わせることによって、ほとんどの雲型判別ができる。夜間には、可視画像を利用することができないが、前述の赤外差分画像や3.7 μm 画像、3.7 μm 差分画像が有効な手段となる。

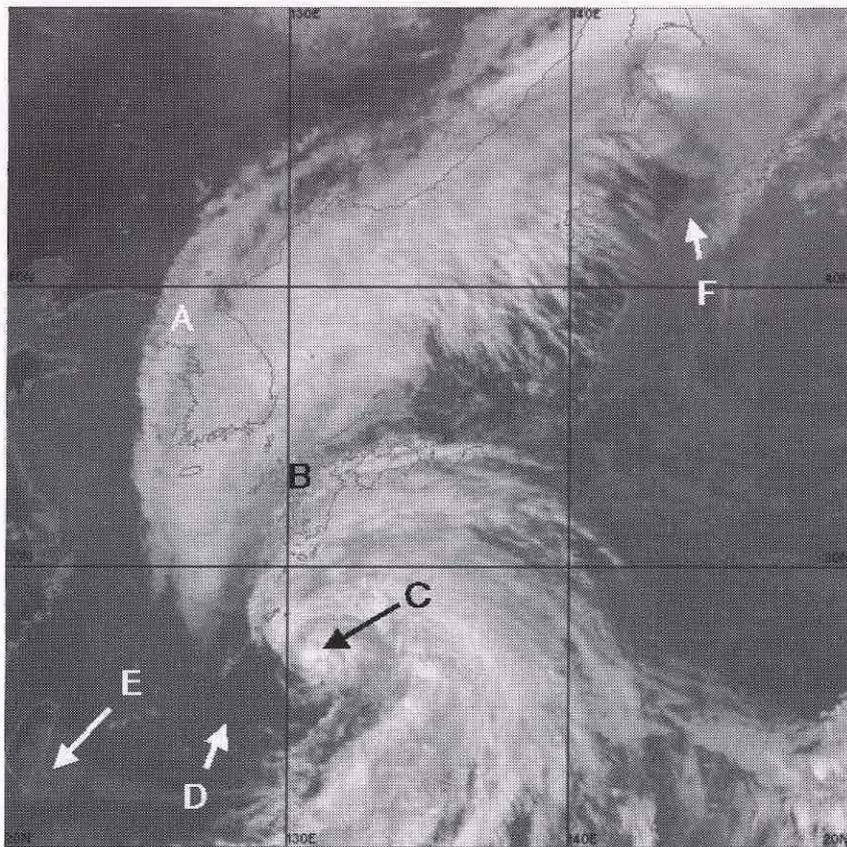
次に、その2種類の画像を用いて見てみる。次頁図A1-2に雲型判別事例を示す。

朝鮮半島北部から沿海州にかかる雲域AはCiである。赤外画像では白い帯のように見える。この雲域の走向は上層の風向に沿っている。可視画像ではCiの下にある下層雲が透けて見える。従って、この雲域は薄いCiである。

九州西海上から九州北部にかかる雲域BはCmである。赤外画像では雲域Aよりも温度が高いため明灰色に見え、一様な広がりがある。可視画像では白く見える。



(a) 可視画像



(b) 赤外画像

図 A1-2 GOES-9 による可視画像(a)及び赤外画像(b) 2003年5月30日 05UTC

奄美諸島の南東海上のある雲域Cは Cb、Cg を含む対流雲域である。一般に、Cb や Cg は赤外面像では白く見え、形状は粒状または塊状である。雲の大きさは数 km のものから Cb の集合したクラウドクラスターと呼ばれる数百 km に及ぶ雲域まで様々である。規模が分解能以下(数 km 程度)のものではやや暗く見える。また、Ci も塊状のものがあり、注意が必要である。両者の判別方法は次節(A.2)で詳しく述べる。可視画像で見た場合、Cb はもっとも白く明るい雲域として確認でき、表面はゴツゴツした感じに見える。朝夕は影が周辺の低い雲に映って見えることがある。

沖縄の南海上にある雲域Dは Cu である。赤外面像ではEの雲域と同様に暗灰色に見え、温度が高い下層の雲であることがわかる。可視画像では明白色に見え、形状も粒状または線状で雲縁は明瞭である。

先島諸島付近及び台湾東岸にある雲域Eは Sc である。赤外面像では暗灰色に見え、Bより暗く、見え難い。温度がさらに高く下層雲であることがわかる。雲域の表面は滑らかに見える。可視画像ではやや凸凹して見える。

北海道太平洋側から千島列島に見える雲域Fは霧または下層雲域である。赤外面像では雲頂の温度が高く、海面とほぼ同じ温度のために区別できない。可視画像では灰色に見え、この図では地形に沿って広がって見える。

以上見てきたように、可視・赤外の両画像を比較することで、雲型判別を行うことができる。しかしながら、夜間には、可視画像を利用することができないので、前に述べた各波長帯の特性を利用した赤外差分画像や $3.7\mu\text{m}$ 画像、さらに、 $3.7\mu\text{m}$ 差分画像が有効な手段となる(図 5-2-1 参照)。

A.2 動画による雲の判別

(1) 動画による雲の判別の特徴

一般に、一定期間の衛星画像の動画を使うことにより、雲型判別や擾乱の検出及びその動向把握が容易になる。動画による雲型判別の利点には次のようなことがあげられる。

- ①数時間の動画により Ci と Cb の判別が移動速度の違いから可能となる。
 - ②数時間の動画により擾乱の移動方向・速度の検出ができる。
 - ③数時間～数日の動画により擾乱の発達・衰弱など推移を捉えることができる。
- また、利用上の注意として次のようなことがあげられる。

- ①可視画像動画は夜間には使えない。
- ②動画画像の時間・空間分解能より小さい現象を捉えることはできない。

(2) Cb と Ci の判別

熱帯域における雲型判別の具体例として Cb(積乱雲)と Ci(上層雲)の判別事例を示す。対流雲に似た粒状の Ci の場合、1枚の画像だけでは Cb との区別が難しい場合がある。Cb の動きは中・下層風に支配されており比較的動きが遅く、Ci は上層風に流されるので動きが速く、その移動方向が両者で異なることが多い。この動きの違いから厚い Ci か Cb かを判断できる。対流雲はほかの雲より比較的長時間変化が激しいことも判断材料の一つになる。また、対流雲の形状はセル状、ライン状などが一般的で、Cb の集合体(Cb クラスター)やテーパリング状になる場合もある。

Cb はかなとこ巻雲(Ci)を伴うことが多い(図 A2-1)ため、Cb か単にかなとこ巻雲のみの領域か

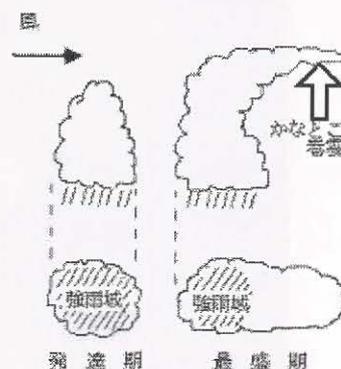
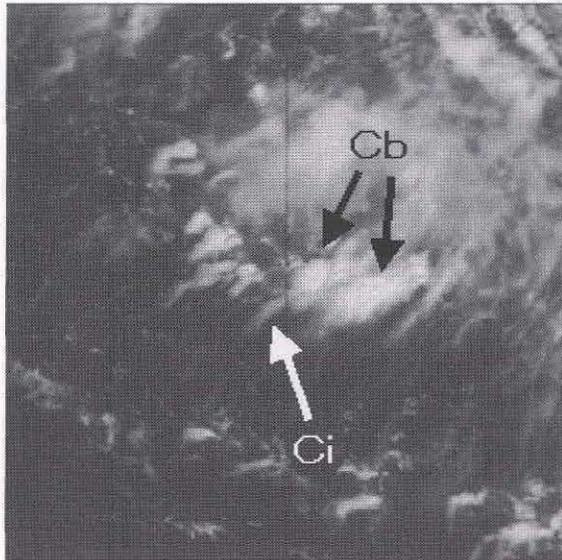
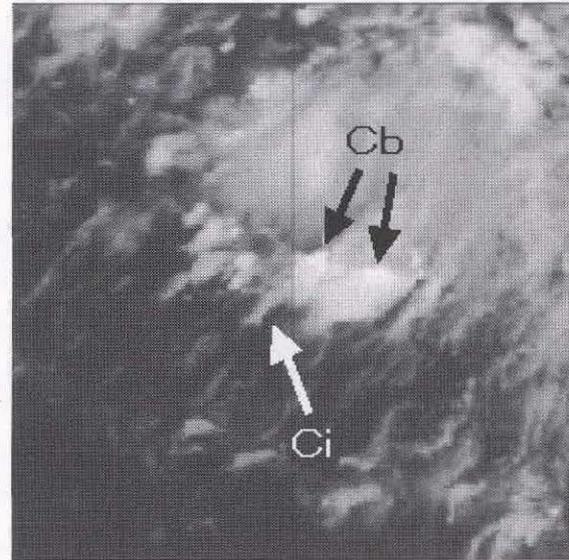


図 A2-1 Cb とかなとこ巻雲の模式図



(a) 可視画像



(b) 赤外画像

図 A2-2 Cb とかなとこ巻雲の可視画像(a)と赤外画像(b) (2003年11月13日 01UTC)

を的確に判別する必要がある。図 A2-2(a)の可視画像に示すように、Cb は凹凸の明瞭なセル状に見えるのに対して、かなとこ巻雲は滑らかな薄い膜またはベール状に見える。さらに、それぞれの動きの違いに着目して、動画を用いて Cb かかなとこ巻雲かを判別することができる。なお、かなとこ巻雲は上層の風下側に限らず、圏界面直下の

風上側にも一部広がることもあるので注意しなければならない。また、(b)の赤外画像では画像の明暗を調節、強調し、動画で見ることにより、非常に濃い白色の Cb の部分と拡大するやや淡い白色域のかなとこ巻雲とに判別が可能な場合がある。

*1 MTSAT : Multi-functional Transport SATellite の略。日本の運輸多目的衛星。航空管制機能と、GMS シリーズ後継としての気象観測などの機能をもつ。

*2 可視画像の分解能は MTSAT-1R の場合、衛星直下赤道付近で $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ であるので、この領域内の平均値が観測される。したがって、反射率の高い雲に隙間があり、その隙間から海面や地面が見えていると、反射率が低くなるので注意しなければならない。

*3 赤外画像の分解能は MTSAT-1R の場合、衛星直下赤道付近で $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ であるので、この領域内の平均の放射量が観測される。したがって、雲に隙間があったり、薄い Ci の場合、下の暖かい海面や地面の放射が隙間や雲の層を透過して到達していれば、温度の高いやや灰色がかった雲頂の低い雲に見えることになるので注意しなければならない。これらの見え方は、可視と同様、雲粒の密度や隙間の有無、厚さ(雲の特徴)に関わっているが、可視画像より分解能が低いいため、面的にならされた画像として見られる。

*4 画像表示の白黒(明暗)は反転させて表示する場合等があるので、その都度画像の表示設定を確認する必要がある。