

気象衛星写真の見方

柴田 宣*

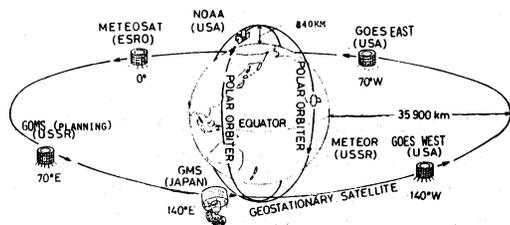
1. はじめに

静止気象衛星 GMS (Geostationary Meteorological Satellite, “ひまわり”) については本誌「天気」1978年4月号に詳細に紹介されているのでこれの一読をすすめたい。GMS からの画像はテレビジョンをとおして一般家庭にとびこんで毎日の天気の変り変りが目にも見えて好評であり、今や欠かせないものとなっている。従来、雲形や雲パターンの認識は地上からの観測によってきた。しかし GMS の雲写真は地球のほぼ半円を1回の観測で上空から撮像するのできわめて広い範囲のものが得られ、また北半球が夏の時に南半球は冬であるので一枚の写真から夏と冬の雲分布と動きを見ることができ、夏と冬の雲を同時刻に見ることが出来るなど不思議な次元の世界である。

2. GMS の歴史的背景と現況および将来

1960年に、初めて軌道衛星 (TIROS, Television and Infrared Observation Satellite) が打ち上げられ、広範囲に観測した雲画像から非常に有効な気象情報が得られることが分かった。1963年、世界気象機関 (WMO, World Meteorological Organization) が全球の気象監視 (WWW, World Weather Watch) で赤道上空に静止気象衛星5個を打ち上げ、また極軌道衛星2個による全球の観測を執行するという基本構想をたてた (第1図)。調査研究部門では全球大気開発計画 (GARP, Global Atmospheric Research Program) の推進で、世界一斉観測による全地球的な大循環の解明をする第1回全球実験 (FGGE, First GARP Global Experiment) がある。

日本は世界から静止気象衛星を開発する技術があると期待され、5個のうち1個を分担し、西太平洋とアジア地区をカバーするための気象衛星システムを開発するこ



第1図 世界気象衛星網。

赤道上空5個の静止気象衛星と極軌道衛星2個による全球観測。

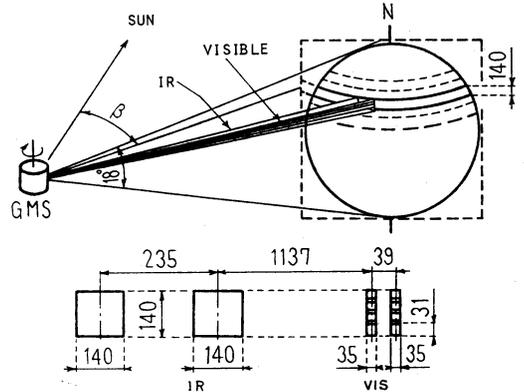
とを強く要請された。1972年、宇宙開発委員会で気象災害の軽減、気象サービスの改善と国益、GARP/FGGEへの参加と国際的要望をふまえて、GMS 開発と打ち上げを決定した。1973年、日本宇宙開発事業団 (NASDA, National Space Development Agency of Japan) が GMS 本体を開発、気象庁が地上系の開発と設置を分担することになった。そして1977年7月14日、米国航空宇宙局 (NASA, National Aeronautics and Space Administration) が協力して GMS は米国のケープカナベラル基地からデルタロケットにより打ち上げられ、国際登録番号1977-065, “ひまわり” となり東経140度の赤道上空35,800キロメートルで静止気象衛星となって現在に至っている。この間、通常は3時間毎の観測だが、台風などの熱帯じょう乱が日本に近づいた時は毎時観測となり、台風の刻々の動きと変化をとらえ、特に発生初期の監視にも大きな威力を発揮し、観測を続けている。

GMS の寿命は3~4年なので1981年8月11日に今度は日本の種子島 (NASDA 種子島宇宙センター) から N-II ロケットで打ち上げられた。2号機は現在の GMS と殆んど同じ機能をもったものである。1981年2月、N-II ロケットによって打ち上げられた技術試験衛星IV

* Nobu Shibata, 気象衛星センター。

第1表 GMS 本体の特性表.

走査	東西	スピン走査	100rpm
		ステップ数	2500
		フレーム時間	25分
距離分解能	赤外 (I)	5 km	
	可視 (V)	1.25km	
波長	赤外 (I)	10.5~12.5 μ m	
	可視 (V)	0.55~0.75 μ m	
大きさ	152×65×79cm		
重量	71kg		
電力	24W		



第2図 GMS の走査方式.

下図は可視・赤外センサーの実効的配置を示す。単位は μ rad.

型「きく3号」の成功は、GMS-2号の打ち上げ成功にとって大きな支えと自信につながっているものと思う。GMS-2は、ひとまず東経160度の赤道上空に静止させ、その後GMSと東経140度で交替させる。1号機は東経160度で寿命のある限り待機気象衛星となる。GMS-2から画像が送られる様になるには種々のテストやチェックが必要で、本運用は1982年4月頃になる予定である。

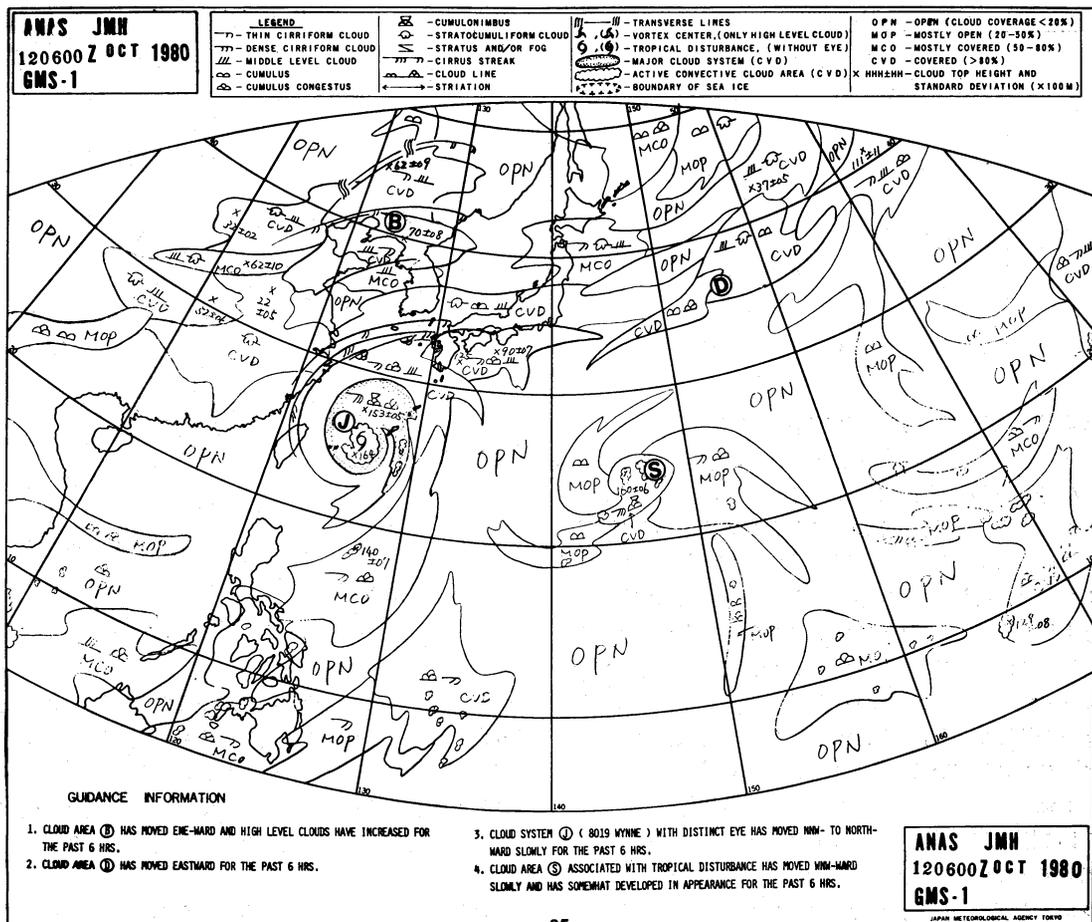
3. GMS からの画像

GMSは毎分100回転のスピン安定方式の衛星で、可視赤外放射計(VISSR, Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)を搭載している。画面の水平走査は、衛星のスピンによって行われる。一方垂直走査は、スピン1回転毎に平面走査鏡を北から南へステップ駆動し、25分間で2,500ステップを走査し、走査し終ると10倍の速度(2.5分間)で走査前の位置にもどる。第2図はVISSRの走査方式を示すもので、1回の走査で可視4チャンネル、赤外1チャンネルの走査線が得られる。VISSR映像信号は可視を6ビット(64階調)、赤外を8ビット(256階調)にデジタル化して1681.6MHzの4相差動位相変調信号で埼玉県鳩山にある気象衛星通信所(CDAS, Command and Data Acquisition Station)へ送られる。これから東京都清瀬市にある気象衛星センター(MSC, Meteorological Satellite Center)にマイクロ波で搬送される。距離分解能は赤道直下では赤外で5km、可視では1.25kmだが、日本付近では斜めからの視野となり画素は当然変形を受け、1.4倍位の分解能低下となる。

MSCに入った信号はコンピュータシステムを経て画

像処理などがなされ、高分解能ファックス(HR-FAX, High Resolution FAX)と低分解能ファックス(LR-FAX, Low Resolution FAX)としてGMSから放送もされる。ここではGMSは通信衛星の役目もする。HR-FAXは中規模利用局(MDUS, Medium Scale Data Utilization Station)で、またLR-FAXは小規模利用局(SDUS, Small Scale Data Utilization Station)で受信することができる。MDUSの受信設備のある処では記録方式はフィルムによる写真画像の受画(602×479mm²のサイズ)である。SDUSでは静電記録方式の受画(220×220mm²のサイズ)で全球を7分割しており、日本付近を取り出した1分割を加えて8分割に分けた放送となっている。前者は設備・人員と多大な経費を要するが後者は比較的経費は小さくすむ。一方、コンピュータシステムを経て画像処理された信号はMSC内に出力され、写真処理やデータ処理、解析処理がなされる。その結果、(a)雲の移動追跡による風ベクトル、(b)雲頂高度、(c)海面水温、(d)雲量分布、などが出力される。また、雲解析図が作成されてJMH(無線FAX放送)で放送される。

さきに述べたHR-FAXとLR-FAXはGMS経由の放送の他に直接気象庁向けにマイクロ波搬送されて気象庁予報部では写真が出力される。気象庁ではこの他にMDUSも設置されており独自にGMSからのHR-FAXも受画できる態勢となっている。現在NHKが気象解説に利用している画像は気象庁で受けたHR-FAX画像の写真と、MSC内のSDUS受画の端末から直接ランドラインで結んだ受画機で受画したものを動的にブラウ



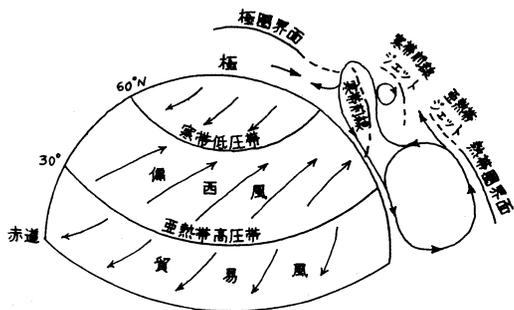
第3図 雲解析図。

雲写真からの全ての情報やコンピュータによる計算値も記入されて国内外に放送される。

ン管に出力させているものとの2種類である。

MSC で処理される VISSR データは赤外で 256 階調と極めて精度の高い情報を持っている。赤外データは赤外放射計による等価黒体温度 (T_{BB}) の観測値であり温度情報なのである。地表面から対流圏上部までの温度域をプラス 30°C からマイナス 80°C とした場合の温度分解能は 0.43°C となる。このためその処理は主にコンピュータによらねばならない。というのは、人間の眼の階調識別能力は精々 7~10 階調なので $11\sim 16^{\circ}\text{C}$ 位の温度差がないと識別ができないからである。可視データは可視センサーによる太陽光の反射輝度の観測値であるので昼間のみの観測となるが、赤外データは昼夜観測が可能である。

一般に赤外写真では温度の低い雲 (高度が高い雲) は白く輝き、温度の高い雲 (高度の低い雲) は灰色で黒色側に近い色となる。雲のない域の海面は黒色に近く夏の地表面も同様に黒色に近い色に見える。冷たい海流も灰色に識別される。海面水温分布、高い雲や低い雲の雲量分布なども赤外データから処理して出力されている。高度が高く冷たい雲 (絹雲など) でも薄い雲の場合は下層からの放射量も透過して積算されるので暖かい灰色側に偏った階調になる。一方、可視写真は物体の太陽による反射輝度を示すので白く輝いた雲でもその高度は低いものもあり、同じ太陽高度なら一般に雲水量の多いものほど白くなる。したがって可視・赤外画像の対照により雲の立体構造も判断することができる。また霧や海水など



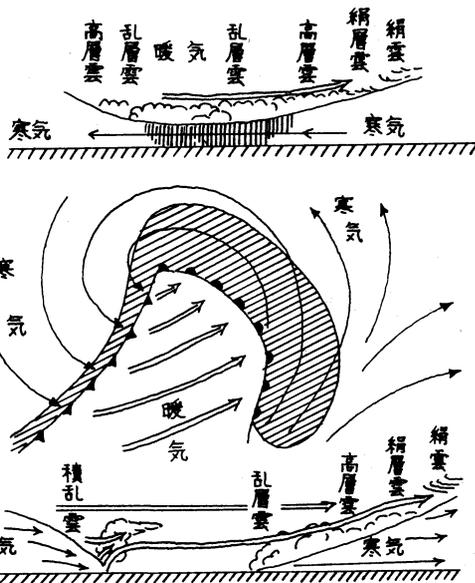
第4図 平均地表風の分布と子午面循環。

は赤外では判らないが可視では明瞭に識別される。

4. 全球画像の動画による観察

地球をとりまく大気は地球の回転にともないながら赤道をはさんで北半球と南半球に分かれて大規模な循環をしており、それがGMS画像の連続写真によって見事に写し出される。太陽が赤道を越えて地球の北半球側に入る時から北半球は春から夏に向かい、反対に南半球では秋から冬に向かう。大気の運動をおこさせる熱源は太陽からの放射であり、地球全体の一年間の熱収支は総体的にバランスしている。平均的な地表風の分布を第4図に示した。

図の断面図は E. Palmén のモデルである。子午面に沿って3つの循環細胞が見られ、その間に2つの主要なジェット気流がある。すなわち、寒帯前線ジェット気流(Jp)、亜熱帯ジェット気流(Js)といわれるものである。Jsの赤道側とJpの極側の2つの直接循環の間には間接循環があり、間接循環の赤道側は熱帯の直接循環と重なり、この地帯では大気集積と下降運動があり亜熱帯高気圧となって天気も良く、赤道に向かう地表の気流は東寄りの風すなわち北東貿易風となる。極向きの気流は西寄りの風を増す。赤道周辺域では繰り返し雲の発生・発達があり、熱帯収束帯(ITCZ, Intertropical Convergence Zone)を形成し、台風が発生したり、それが亜熱帯高気圧の縁に沿って北上する。また熱帯地方からの暖かい湿った空気が中緯度帯に運び込まれる。一方極からの乾いた冷たい空気は南下して中緯度帯の偏西風帯の波動の振幅を深め、寒暖気の南北運動を大きくして低気圧や高気圧の発達をおこさせる。地球自転による偏向力によって空気は北半球では進行方向の右に偏り、南半球では反対に左に偏る。このため北半球の低気圧は反時計廻りに低気圧中心に吹き込み、高気圧は時計廻りに高



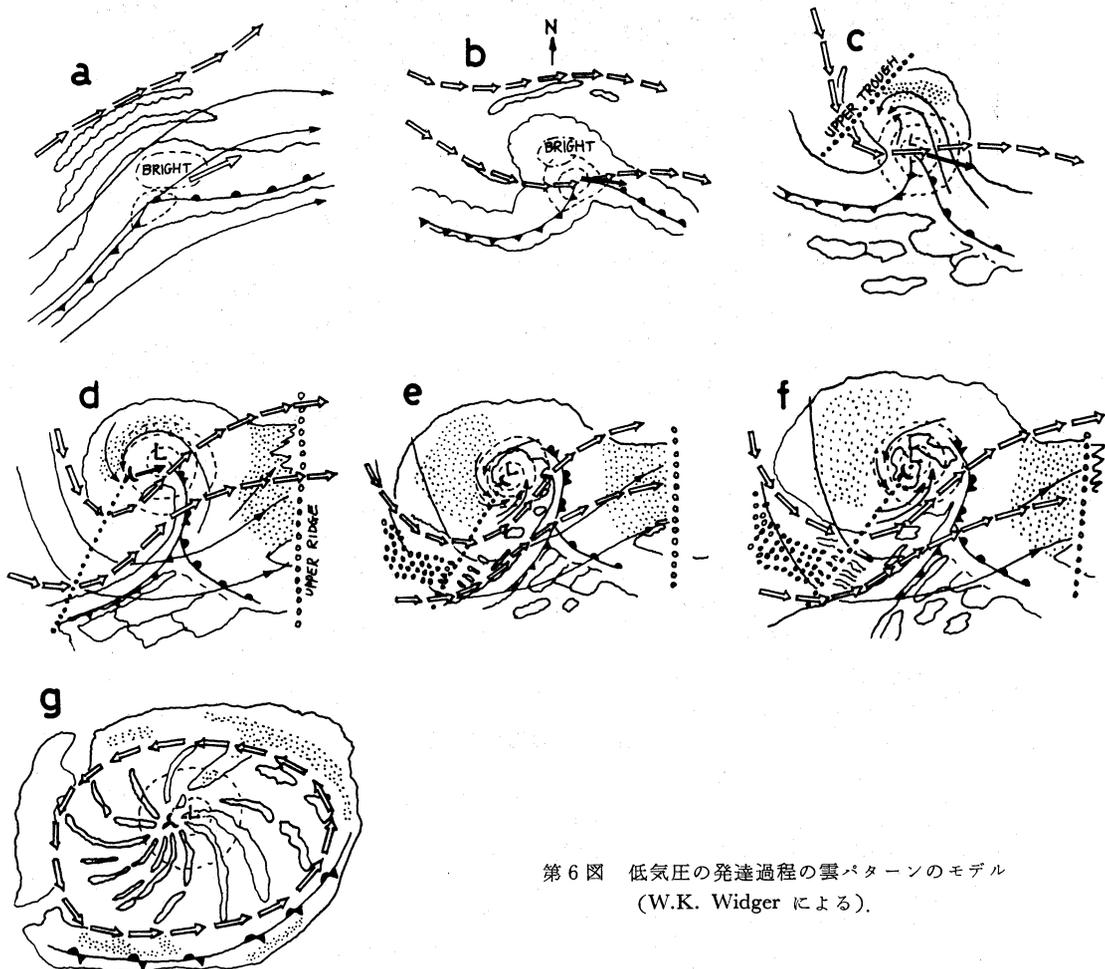
第5図 ビヤクネスの低気圧の模型。

気圧中心から吹き出す。南半球では逆に低気圧は時計廻りに吹き込み、高気圧は反時計廻りに吹き出す。寒気と暖気の気団の境には前線があり、これら両気団内の気流の状況や雲の分布をモデル化したのが第5図である。暖気が安定な時は雲は層状になり、不安定な時は対流の特徴が加わる。

これら地球上の大気の大規模から小規模循環までを反映する雲の動きは全球画像の連続動画によって極めてドラマティックに展開される。次々と発生し、発達する雲、流れ動く雲、消えていく雲、流れて類を呼び大きく発達する雲、雲の色々な生態が観察される。さきに人間の眼の階調識別能力がおとることを述べたが、人間のパターンおよびパターンの変化を認識する能力は非常にすぐれており、動画による雲解析においては重要な役割を果たしている。

5. 気象衛星から見た低気圧の発達過程

日本は偏西風帯の緯度帯にあって、毎日の天気図を見ていると低気圧が発生し発達して雨を降らせ風を吹かせ、天気も西から東へ移り変わる。その模様はまた“ひまわり”の写真からも良くわかる。その雲パターンの代表例として低気圧の発生から発達・消滅までの Widger (1964年)によって提案された雲分布モデルをあげて見よう(第6図参照)。



第6図 低気圧の発達過程の雲パターンのモデル (W.K. Widger による).

a. 前線波動の段階 前線上に波動ができる時には前線帯の雲の幅が広くなったり、ふくれたりする変化が見られる。前線の北側に前線に平行なバンドがあり、周囲より輝いた部分すなわち雲が高く厚い部分が波動のすぐ東に見られる。

b. 閉塞前の段階 この段階では大気下層に循環はあるが500mb層までは達していない。

c. 閉塞の初期の段階 後面に寒気の侵入があるので雲の形は非対称になる。らせん状の雲のすじはうず巻きの様相を呈してくるが、雲のコントラストがないのが特徴である。

d. 閉塞低気圧の段階 乾いた空気が寒冷前線および閉塞前線の後面に侵入し雲の分布は顕著な循環を示す。500mbまで閉じた低気圧であるのが普通で、雲の

うずは地上および500mbの低気圧中心の300km以内にある。

e. f. 完全に閉塞した最盛期の段階 この段階は最盛期直前(e図)と直後(f図)に分けられる。e図では乾いた寒気が中心のまわりをらせん状に取り巻いているのに対して、f図では後面から回り込んだ寒気が湿った暖気のため、らせんが途中で切られて中心付近に乾いた部分が残される。これは上層の流れ(二重矢印)の強い部分(ジェット流)によって切断される。

g. 消滅段階 この段階の特徴は内側の冷たくて乾いた空気が、暖かくて雲でおおわれた空気に取り囲まれていることである。内側のリング状の雲は切離低気圧に対応するもので、うずが消滅するにつれてバンドの数は少なくなり、うず巻きの中心の雲は一層ばらばらにな

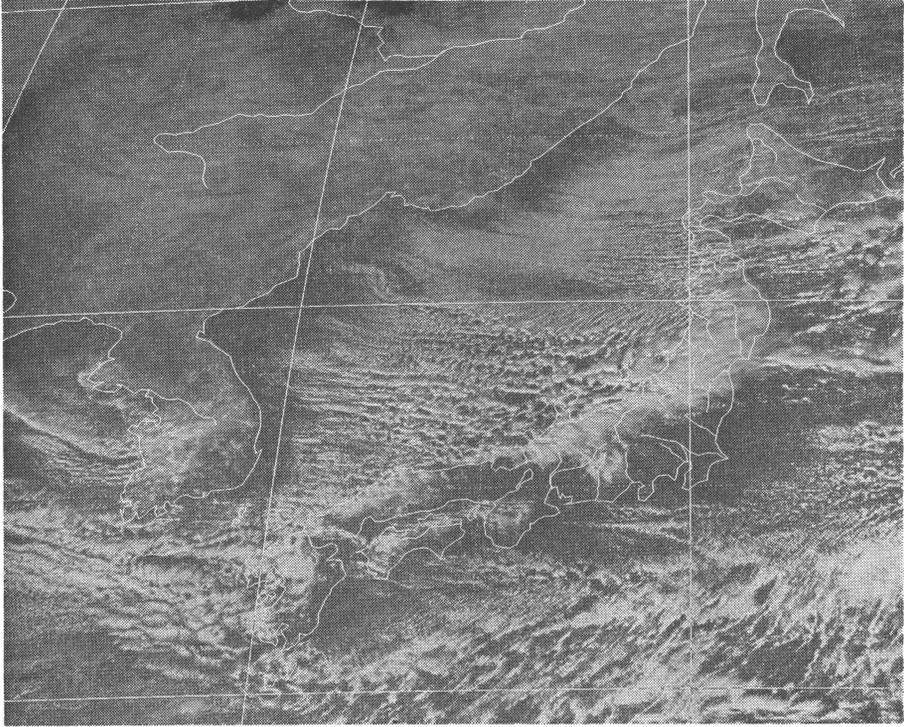


写真1 1980年12月14日12時の可視画像，冬期季節風パターン。

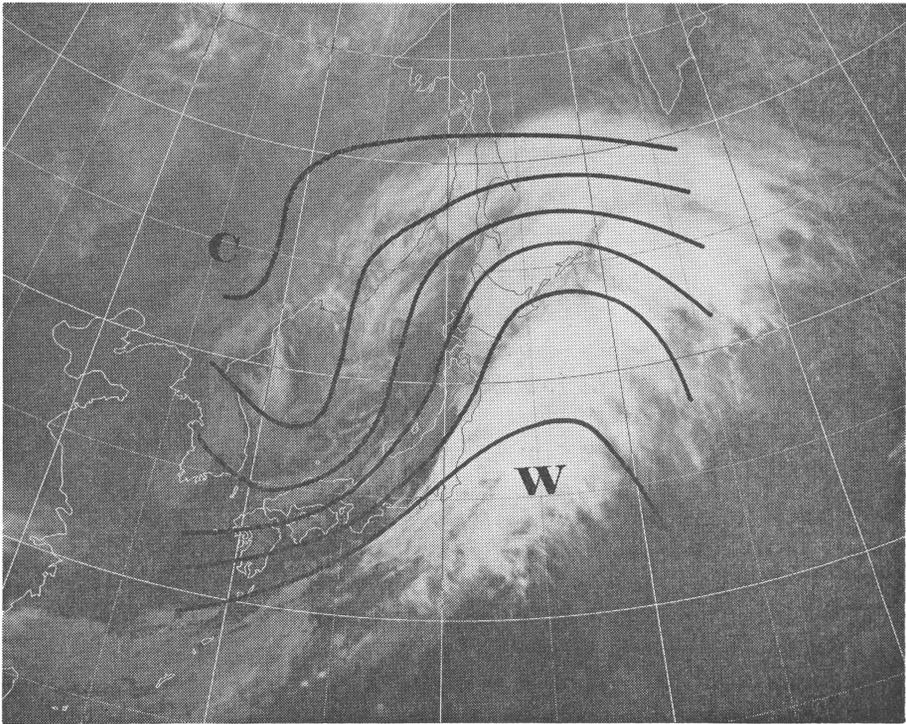


写真2 1981年3月15日9時の赤外画像，春一番の低気圧。

る。この消滅しかけた雲は低気圧が認められなくなっても写真には認められる。

6. 雲パターンと総観気象

地球大気は大規模から小規模にいたるいろいろの流れをしており、この流れに応じて雲パターンや雲の形状が変化をしている。それらを全てここで記述することは出来ないで四季を通じての代表例にとどめる。

(1) 冬期季節風型

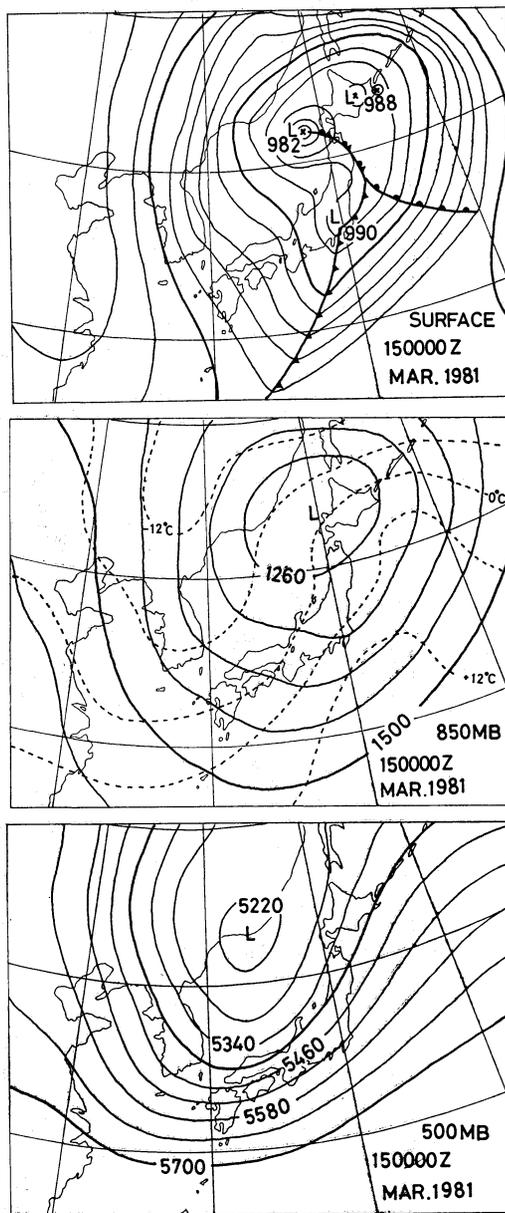
写真1は1980年12月14日12時の可視画像である。日本列島周辺の海上にみられる無数の雲列およびオホーツク海の渦巻きなど見事に観測されている。季節風時の積雲による雲列は、寒冷な空気塊が温暖な水域を吹走るときに水面から受ける熱と水分の補給によって発生する。空気塊と水面の温度差、寒冷な空気塊の水面上の吹走距離などによりその形状が異なると言われている。日本海の北緯40度を境にして北と南側でその形状に違いが見られる。またこれらの雲列は大陸の海岸線の比較的近いところから発生しており、北陸地方から東北地方にかけ日本海側には密な積雲が内陸にまで侵入し大雪を降らせている。

(2) 春一番の低気圧

写真2は1981年3月15日9時の赤外画像である。台風並みに発達した低気圧が日本海を通過した3月15日の昼頃から関東地方を中心に「春一番」が吹き荒れた。千葉県松戸市内では竜巻（或いは突風か）によって屋根がわらが吹き飛ぶなどの家屋被害やけが人もあり、また新幹線も神奈川県下などで架線のつり具が切れかかったりダイヤの乱れがあった。海上ではヨットが傾いて投げ出され一人が行方不明となった。春一番の東京での平均日は2月22日でこの年は可成りおそい出番である。第7図には9時の地上天気図、850mb・500mb等圧面天気図を並べてある。天気図からも低気圧の発達が良く説明されるが、写真の雲パターンは低気圧が発達中の代表的雲パターンである。気圧の谷の後面から西～北西の寒気流が吹き込み、その前面では南～南西からの湿潤な空気が吹き上がって強い上昇流となり雲ができています。写真に重ねた実線は850mbと500mb面の層厚の等しいところを結んだ等層厚線で、この層における寒気と暖気の様子が分かる。雲域は等層厚線に沿っている。

(3) 霧

写真3は1979年6月30日9時の可視画像である。典型的な梅雨パターンの時のもので東西に延びる梅雨前線の



第7図 1981年3月15日9時の地上天気図、850mb・500mb等圧面天気図（上から）。

北側に当たる黄海～日本海～オホーツク海には広大な海霧が発生している。霧は大気中の水蒸気が凝結してできる。水蒸気が凝結するには、凝結核が浮遊していて、蒸気圧が飽和蒸気圧にはほぼ等しくなる必要がある。飽和蒸気圧は気温が下がると小さくなるので霧の発生条件とし

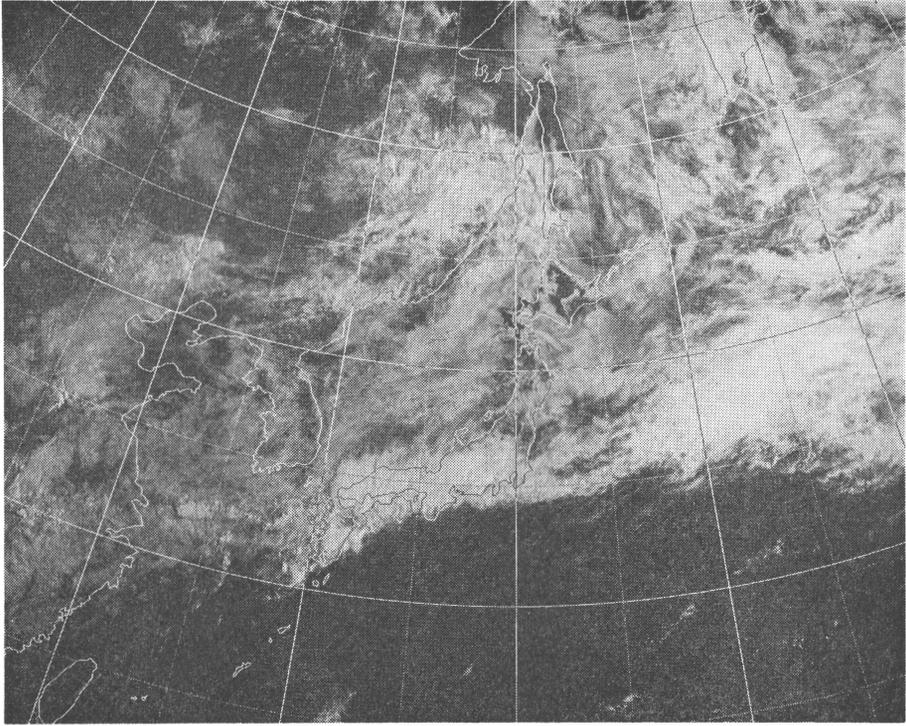


写真3 1979年6月30日9時の可視画像，梅雨パターン。

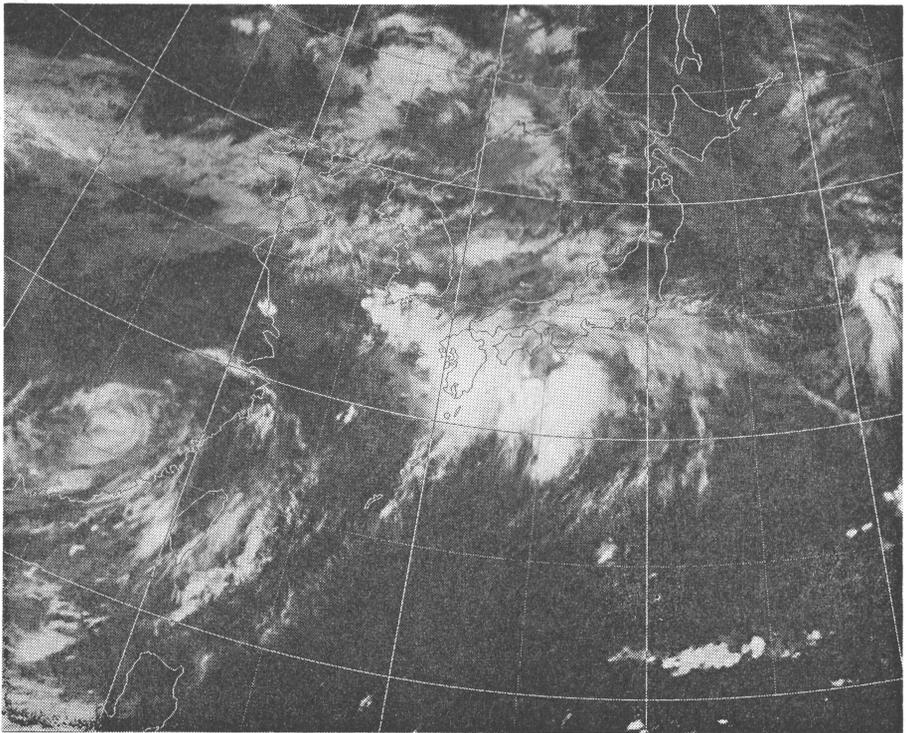


写真4 1980年8月29日9時の赤外画像，大雨の雲パターン。

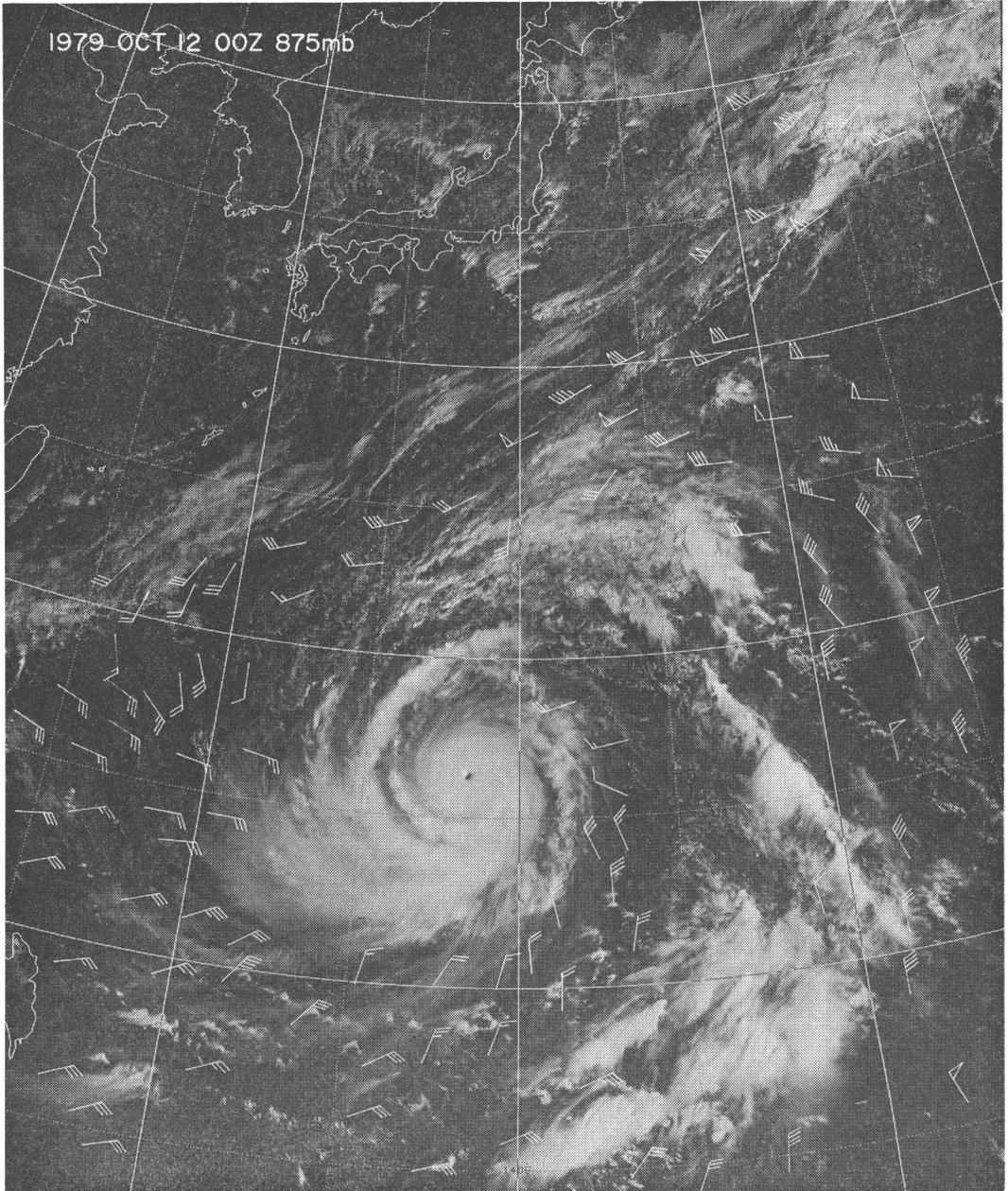


写真5 1979年10月12日9時の可視画像，台風7920号（Tip）の雲パターン，風ベクトルはほぼ圏界面付近の高度における値。

て（1）空気中に凝結核が多く（2）水蒸気量が十分で（3）しかもその空気が冷却されなければ発生しない。

霧は可視画像から鮮明に判別することができる。平坦

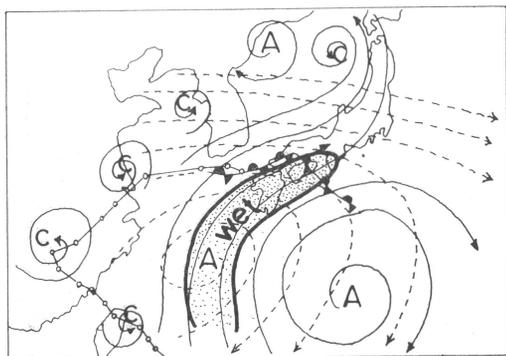
1981年10月

で、しばしば明瞭な縁をもち地形の状態に応じたパターンをしているのが特徴である。霧の上部表面の滑らかさは気温の逆転による安定層に抑えられているためと考えられる。赤外画像での判別が困難なのは、海面（地上）

の温度と霧の上部表面温度との差が小さいため写真上ではコントラストがないからである。

(4) 大雨の雲パターン

1980年8月末、九州中部から北部にかけて大雨による被害があり集中豪雨的に30~60ミリの時間雨量がところどころで観測された。28日夜から30日朝まで約1日半の総雨量は500~600ミリに達する所もあった。写真4は



第8図 1980年8月29日9時における上層・下層の流線解析と湿舌の侵入の様様。

29日9時における赤外画像であり、朝鮮半島南端部から九州および紀伊半島沖にかけて雄大な積乱雲域が連なっており大雨を降らせている。第8図は写真と同一時刻の流線解析と湿舌の侵入している模様を示したものである。台風12号のもたらす湿った暖かい空気も関与している(台風12号の経路は図の中では○-○-○印で結んであり、この時刻には華南の収束域に位置している)。暖湿な空気が太平洋高気圧の縁辺を廻って北上し、西日本に侵入している。偏西風の卓越する日本付近では西から東進する気圧の谷ともなって北から南下する寒気と北上してくる暖気とが相互に干渉し合って天気変化する。

(5) 台風

写真5は1979年10月12日9時の可視画像で、観測史上最低気圧(870mb, 1979年10月12日13時)を記録した台風20号の雲パターンで、写真にはその周辺の上層雲を追跡して求めた風ベクトルを入れてある(風ベクトルはほぼ圏界面付近の高度における値である)。台風には明瞭な眼があって、それを中心に対流圏上部の空気は外側に吹き出している。この台風はマーシャル群島のボナベ、トラック島付近に発生し、グワム島と沖縄の近くを通っ

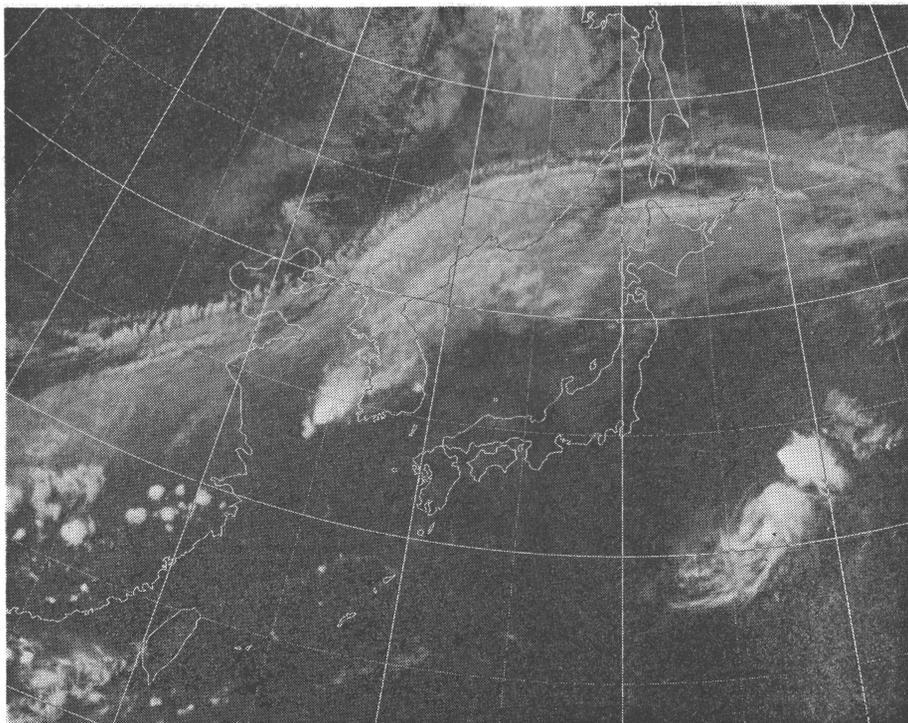


写真6 1978年9月9日15時の赤外画像、トランスパースライン(朝鮮半島南端海上にテイパリングクラウド)。

てから紀伊半島の白浜付近に上陸するという典型的なコースをとった。10日の19時から衛星観測でも眼をとらえるようになり、中心示度の降下とともに台風眼は一層明瞭になった。最盛期に近い12日9時における眼内での T_{BB} の最高値は約 22°C 、中心を取り囲む積乱雲域での最低値は -88°C で、眼の周辺における雲の強い発達がかがわれる。矢羽根はGMSが30分間隔で観測した雲の動きから求めた上層の流れの場、すなわち対流圏上部における発散の場を表わしている。台風の強い渦によって中心部へと吸い集められた空気は渦状の雲列を構成する対流活動で対流圏上部へと運ばれ、そこで発散することによって収支が保たれている。

(6) ジェット気流に伴う雲

衛星写真の雲パターンからジェット気流の走向や位置の決定が可能である。これによって大気の流れの状態がわかり、種々の気象情報が得られる。ジェット気流に伴う雲パターンのうち最も多く見られるのは高気圧性に湾曲した絹雲のひろがり、その極側の境界は鮮明である。また長いバンド状絹雲や絹雲の筋他にトランスバースラインの雲パターンも良く現われる。これは主たるジェット気流や極大風に殆んど直角な規模の小さい雲列として現われ、ジェット気流軸の赤道側では、上昇運動で生じた絹雲が南へ移流され、風速の違いによって軸から離れるに従って流れの速度が減少するので雲列の南端は風上に向かって湾曲する。写真6は1978年9月9日15時の赤外画像で代表的なトランスバースラインは、中国～中国東北区を経て樺太～千島へと伸びている。亜熱帯ジェット気流に伴ったものである。航空機はこの域を通過する時には乱気流に遭遇することが多い。風向・風速の違いが大きい場合に多く現われ、この時のジェット核は100ノット以上のことが多い。

朝鮮半島の西海上には活発な対流性の雲がある。この種の雲には雷雨や突風などはげしい気象現象を伴うこと

が多く、毛筆の先状の雲パターンをしているのでティパリングクラウドと呼ばれている。

7. おわりに

日本のGMSが1978年5月から正式運用に入り、画像を送り届けて3年余、休むことなく観測を続けて現在に至っている。その間FGGEの全球観測(1978年12月～1979年11月)に参加している。これらのデータから幾多の研究や調査もなされ解明された事実も多く、毎日の天気予報は申すまでもなく長期予報その他にも直ちに利活用されている。気象の観測点の少ない、あるいは全くない洋上の気象解析や、特に台風の発生などをいち早く観測しその偉力にまさるものは他にはないと断言できそうである。レーダー観測、アメダス観測値との対応や、気象じょう乱の監視態勢のあり方、短時間予報のための雲情報の伝達等々、改良と工夫をし、さらにGMSデータの利用についての開発は今後も続けられることだろう。

文 献

- 本文の現象の解説には参考文献からそのまま引用した部分も多くあることをおことわりします。
- Anderson, R.K. *et al.*, 1974: Application of Meteorological Satellite Data in Analysis and Forecasting, ESSA Technical Report NES-51.
- 伊藤 博・編: 航空気象, 東京堂.
- 小平信彦・村山信彦・山下 洋・河野 毅: 静止気象衛星 GMS (ひまわり), 天気, 25, No. 4.
- 黒田雄紀: 海霧, 気象, 80-8, No. 280.
- 柴田 宣: 大雨の雲パターン, 気象, 80-11, No. 283.
- : 雲画像による乱気流の予測とティパリングクラウドの監視, 天気, 27, No. 8.
- 土屋 喬: 冬將軍と木枯し, 気象, 81-2, No. 286.
- 渡辺和夫・渡辺征夫・湯山 生・八十科洋・矢田チエ子: 台風7920 [TIP] の一生と衛星観測, 気象衛星センター技術報告, 第2号, 昭和55年.