

静止気象衛星GMS(ひまわり)*

小平信彦

村山信彦

山下 洋

河野 毅**

1. 緒 言

静止気象衛星 GMS (ひまわり) は、昨年7月14日に米国の東部射場ケープカナベラル基地からデルタロケット 2914 により打ち上げられ、7月18日に 140° E の静止軌道に投入された。その後、宇宙開発事業団と気象庁による衛星の機能検査、地上施設との整合試験を終わって予備運用に入り、4月6日からは本格的運用に入っている。

ここでは、GMS の機能、データ処理方式、データの内容や利用にあたっての留意点などについて解説を行なった。

2. 世界の趨勢

GMS の開発は、GARP (全球大気開発計画) と密接な関係があり、全球気象衛星観測網の一つとして FGGE (GARP 全球実験) には重要な役割を分担することとなっている。1960年に、初めて気象衛星 TIROS 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て以来、ESSA, ITOS/N-OAA シリーズの低軌道、および ATS-1, 3 の静止軌道の気象衛星時代を経て、現在に至っている。

FGGE 計画では、第 2・1 図に示すように、5 個の静止気象衛星と 2 個の極軌道衛星を用いて全地球の大気の状態を観測して severe storm などの現状把握と予報精度の向上を行なうことを目的とし、既に、4 個の静止気象衛星—SMS, GOES, GMS, Meteosat が、それぞれ、135°W, 75°W, 140°E, 0°に打ち上げられている。70°E に予定されていたソ連の静止気象衛星 GOMS は、FGGE の期間には間に合わないこととなって、代わりに、静止軌道上で待機している米国の予備衛星を印度洋

上空 60°E に移動させ、本年12月頃よりスペインに設置する CDA を用いて ESA が運用する予定である。

第 2・1 表は世界の静止気象衛星の現況で、ATS-1, 3 は、既に観測機能はなく通信機のみ動作しているので WEFAX のリレーなどの実験に使われているが、1978年12月には終了するとのことである、SMS および GOES は、4 個打ち上げられ、その内 2 個が現用として使用、ほかの 2 個は予備として静止軌道上で待機しており、現用機の障害時に直ちに代わり得る態勢をとっている。また、1980年に予定されている GOES-D, E, F は、スピン安定の衛星であるが、気温の測定を行なう機能を持っており、また、STORMSAT は 3 軸安定方式の次の世代のもので赤外による気温測定のほかマイクロ波放射計により雲の有無にかかわらず気温の測定が可能となっている。インドが計画している INSAT は、気象のほかに通信および放送衛星の機能を持った多目的衛星である。

これらの衛星の主な性能を第 2・2 表に示したが、GOMS および INSAT についての詳しいことは分かっていない。GMS は、機械的ディスパンアンテナ(MDA)を用いている点で、SMS, GOES, Meteosat と異なっているが、GOES-D, E, F では GMS と同じ MDA が使われる予定である。

3. GMS の構造とミッション機器

GMS は、毎分 100 回転のスピン安定方式の衛星で、機械的ディスパンアンテナ方式を用いている。第 3・1 図は、GMS の断面図でディスパン部に送受兼用の UHF と S-band のアンテナが取り付けられている。円筒形の本体は、直径 216 cm, 高さ 116 cm で表面に約 17100 個の太陽電池が貼付されている。

VHF アンテナは、無指向性で主として打ち上げ時の姿勢が決まっていない時に使われるほか、S-band が使えない時に衛星の監視と指令を行なう。ディスパンアンテナと本体の間に VISSR の開口部があり、本体と共に

* On the Geostationary Meteorological Satellite, GMS (Himawari).

** N. Kodaira, N. Murayama, H. Yamashita, T. Kohno, 気象衛星センター.

第 2・1 表 静止気象衛星現況一覧表

衛星名	打上国	打上月日	国際登録番号	軌道位置および月日
ATS-1	米	1966.12. 6	1966-110A	148.7°W (1978.2.6)
ATS-3	〃	1967.11. 5	1967-111A	106.0°W (1978.2.6)
SMS-1	〃	1974. 5.17	1974-33A	105.9°W (1977.10.14)
SMS-2	〃	1975. 2. 6	1975-011A	135.2°W (1978.1.17)
GOES-1	〃	1975.10.16	1975-100A	84.1°W (1977.10.21)
GOES-2	〃	1977. 6.16	1977-048A	75.5°W (1978.1.15)
GMS	日	1977. 7.14	1977-065A	140°E (1978.1)
Meteosat	ヨーロッパ	1977.11.23	1977-108A	0° (1978.1)
GOES-C	米	1978. 5.30	(予定)	(135°Wの予定)
GOES-D,F,F,	〃	1980~1983	—	—
GOMS	ソ	未定	—	70°E
INSAT	印	1979.8頃	—	79°E
STORMSAT	米	1980年代	—	—

第 2・2 表 世界の静止気象衛星特性表

衛星	SMS/GOES	GMS	Meteosat	GOES-D.E.F.	GOMS	STORMSAT
打上国	米	日本	ヨーロッパ	米	ソ連	米
打上年/予定	1974~	1977	1977	1980~1983	未定	1980年代
アンテナディスペン 方式	電氣的	機械的	電氣的及 無指向	機械的	(3軸安定)	(3軸安定)

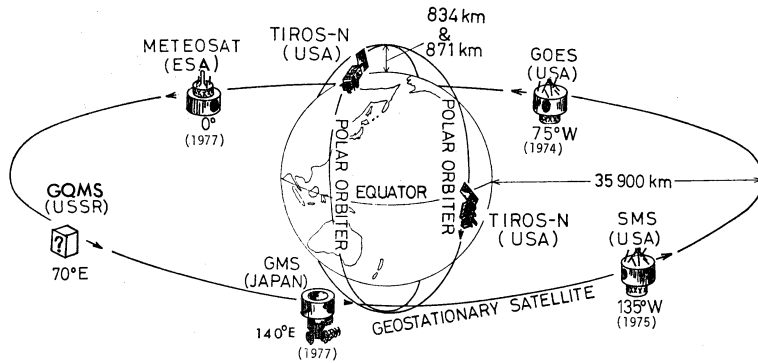
放射計

走査	東	西	スピコン走査 100 rpm				ラスター走査	
	南	北	走査鏡	走査鏡	主反射鏡	走査鏡	走査鏡	
	ステップ数		1820	2500	2500	1820		
	フレーム時間		18.2分	25分	25分	18.2分	1.4~24分	
瞬時視野角 mr	I		0.25	0.14	0.14	0.192	0.125	
	V		0.025	0.035	0.07	0.021×0.025	0.02	
距離分解能 km	I		9	5	5	6.9	10~15	4.5
	V		0.9	1.25	2.5	0.9	2~4	0.72
波長	I		10.5~12.5	10.5~12.5	10.5~12.5 5.7~7.1	10.3~12.1 (*)	10.5~12.5	10.5~12.5 (*)
	V		0.55~0.75	0.55~0.75	0.55~1.0	0.55~0.72		0.55~1.1
検出器			HgCdTe PMT	HgCdTe PMT	HgCdTe Si-Diode	HgCdTe PMT		HgCdTe Si-Diode
大きさ, cm			152×65×79	152×65×79	180×88×72	152×65×79		178×64×64
重量, kg			71	71	54	78.5		81.6
電力, W			24	24	17	30		50

* 気温測定用多チャンネルをフィルターで切り換え測定する。

I: 赤外チャンネル, V: 可視チャンネル

GLOBAL METEOROLOGICAL SATELLITE SYSTEM



第 2・1 図 世界気象衛星網。

第 3・1 表 GMS の主要性能

大 き さ	本体の直径	216 cm	
	高さ (除 AKM)	270 cm	
	太陽電池パネルの高さ	115.6 cm	
重 量	Transfer 軌道	669.5 kg	
	静止軌道 (寿命初期)	315 kg	
	(寿命末期)	281 kg	
設計寿命	3年後の残存確率 50% 以上		
VISSR	第 2・2 表		
宇宙環境 モニター (SEM)	太陽プロトン	1~500 MeV	
	アルファ粒子	8~390 MeV	
	電子	> 2 MeV	
制御シ テム	アンテナ指向精度	$\pm 0.2^\circ$	
	スピン率	100 \pm 1 rpm	
	姿勢安定度	0.6秒	$\pm 3.5 \mu r$
		25分	$\pm 35 \mu r$
	姿勢保持精度	$\pm 0.5^\circ$	
ニューテーションダンパー	フープ型 アルコール		
通 信 系	第 6・1 表		
推 進 系	推進	ヒドラジントタンク容量	40.8 kg
	推 力		2.3 kg
	スラスタ	アキシャル	2
		ラジアル	4
	アポジモータ	Thiokol TE・M・616	
	燃焼時間		39秒
	推 力		3400 kg
	重 量		305 kg

第 3・1 表つづき

電 源 系	太陽電池	2x2 cm	約 17100 枚
	出力 (寿命末期秋分時)		219W
	電 池		3 AHx2
	バス電圧		24.5~28.5V

UHFアンテナ

Sバンド・アンテナ

可視・赤外線放射計
(VISSR)

VHFホイップアンテナ
(8個)

機器搭載シエルフ

二次推進系
タンク (3個)

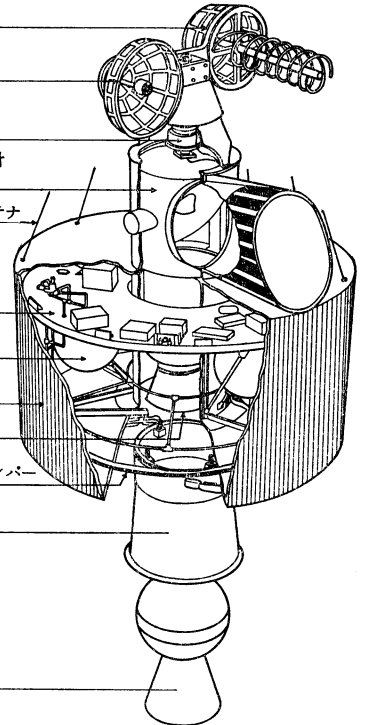
太陽電池パネル

放射冷却器

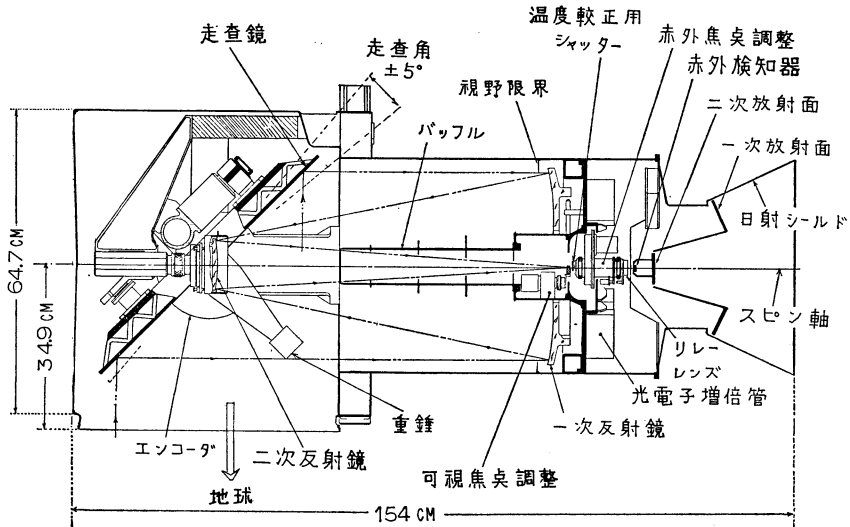
ニューテーションダンパー

アダプター

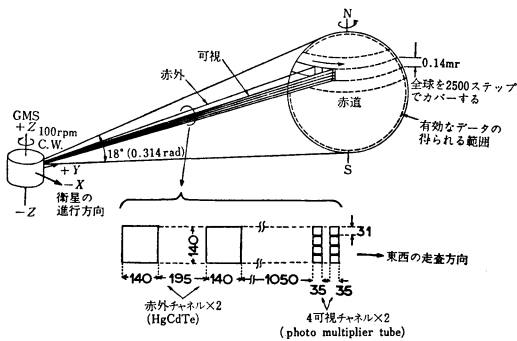
アポジモータ



第 3・1 図 GMS 断面図。



第 3・2 図 VISSR の構造。



第 3・3 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。

100 r.p.m. で回転している。GMS 主要性能を、第 3・1 表に示す。

3.1 VISSR

可視赤外放射計 VISSR (Visible and IR Spin Scan Radiometer) は、第 3・2 図に示すように、開口直径 40 cm のカセグレン型望遠鏡がその光学軸をスピン軸と一致させて衛星本体の中心に配置されている。光学軸に 45° 傾いた 65cm×42 cm の楕円形の平面走査鏡は、トルクモーターで $\pm 5^\circ$ の範囲を衛星 1 回転毎に 0.07 m. rad. ずつ北から南へステップ駆動し、25 分間で 2500 ステップを行なって約 20° の走査を完了する。第 3・3 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。走査し終わると、走査鏡は 10 倍の速度 (2.5 分間) で北へもどる。望遠鏡の焦点面における可視と赤外検知器の実効的配列は、第 3・3 図の下に示すとおり、予備の検知器を一組持っている。

可視センサーは、光電子増倍管 (PMT) を使い、焦点面においたプリズムに取り付けた光ファイバーで 8 個の PMT に導かれる。プリズムは、指令により光軸に沿って僅か動かして焦点調整を行なうことができる。実際には、現在までの所、焦点調整の必要は生じていない。

PMT は、この衛星内で最も高い電圧 約 1000V を使っている。宇宙における高圧電源の取り扱い、地上と異なり、コロナ放電の恐れが多い。GMS では打ち上げ後数ヶ月で #4 と #6 の PMT の高圧電源が不良となったが、現在では予備チャンネルを用いている。PMT の故障は、同じ型の VISSR 88 個について地上試験を含めて第 3・2 表に示す如く 7 個発生している。

ここで、原因は次の三つに分けられる。(A) コロナ放電：高圧回路の絶縁に用いたポットリング材料中の空間にあるガスが、打ち上げ後に徐々にぬけてコロナ放電を発生したと推定される (B) 短絡：機械的に高圧回路の接触による (C) 回路：DC-DC 高圧発生回路の不良によるもの。

GMS では、8 個の PMT を地上からの指令により切り換えて任意の組み合わせが可能にしてあるので、この種の障害に対する信頼性は高い。

第 3・2 表 PMT の故障状況

衛星	発生年月	状況	原因
SMS-1	1974. 6. 21	打ち上げ後 860 時間	C
予備機	1977. 4	試験中 575 時間	B
GOES-2	1977. 8. 3	打ち上げ後 1200 時間	A
予備機	1977. 9	試験中 3500 時間	A
予備機	1976. 11	熱真空試験中 20 時間	A
GMS	1977. 11. 4	打ち上げ後 2708 時間	A
GMS	1978. 3. 8	打ち上げ後 5670 時間	A

赤外は、焦点面からさらにリレーレンズを通して、放射冷却器で約 93°K に冷されている赤外検出器 HgCdTe に至る。HgCdTe の特性として、波長の長い所で急速に感度が低下しているため、フィルターにより波長の短かい方をカットして、半値幅でおよそ 10.5~12.5 μm の窓領域を設定している。

HgCdTe の冷却には、受動型の放射冷却器が用いられている。第 3・2 図に示すように、射出率が 1 に近い放射面を、衛星本体から熱絶縁してさらに太陽光の直射を避けて取り付けると、放射面からは絶対温度の 4 乗に比例した熱が宇宙空間に放出される。放射面の温度は、支持体を通して衛星本体からの伝導、検出器自体のジュール発熱、リード線による伝導、太陽シールドの散乱光の入射などとの平衡点で決められる。検出器の温度は、感度に直接影響を与えるので、放射冷却器で余裕をもって冷却し、動作温度 93.5 ± 0.25°K に電熱器で制御されている。

赤外の焦点調整は、リレーレンズを動かして行なう。また、赤外による温度測定の較正を行なうため、赤外リレーレンズの前に黒体シャッターを指令により挿入して約 300°K の温度を検定する。黒体シャッターによる較正では、走査鏡、主反射鏡および二次反射鏡の反射能の変化はわからない。

この場合、検出器への入力は大部分は黒体シャッターで、その他リレーレンズ系からの放射が僅かに入る。地球を観測する時は、シャッターの代わりに地球からの放射が主となるが、その他望遠鏡各部からの散乱が入るので、各部の温度分布を測定して補正を行なう必要がある。

低温側は、宇宙空間をみて行なうことができる。また前置増幅器には階段状の標準電圧を加え、伝送系、写真操作など一連の作業の基準とする。

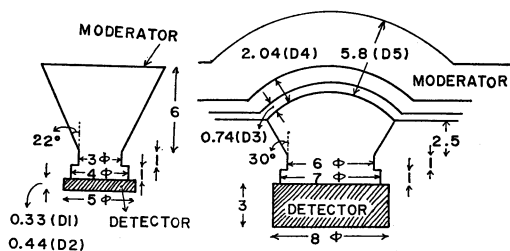
可視系については、赤外の如きシャッターは使えないので、小型プリズムにより太陽光の一部を取り入れ、そ

の強度がちょうど地球のアルベドの 50% になるように設定してある。

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、1681.6 MHz の 4 相差動位相変調信号で CDAS (Command and Data Acquisition Station) へ送られる。

3.2 宇宙環境モニタ (SEM)

SEM (Space Environment Monitor) は、太陽活動に伴って放出される高速の荷電粒子 (陽子, アルファ粒子, 電子) を観測するものである。検出器は半導体検出器を使う。適当なシールド (moderator と呼ぶ) を検出器の前に置いて、測定しやすいスピードに落として測定する。第 3・4 図に示すように、検出器と moderator の組み合わせを 5 組備え、第 3・3 表に示すように、13 のチャンネルに分けて粒子種類, エネルギーを弁別する。各チャンネルは、16 秒ごとに約 1 秒間観測され、コンプレッショ



第 3・4 図 SEM 検出器系配置図。単位は mm

第 3・3 表 SEM 観測項目。各チャンネルの観測時間は約 1 秒。繰り返し時間は約 16 秒。G は幾何学的要素。

チャンネル名	粒子種類	エネルギー (MeV)	G (cm ² ・st)
P 1	陽子	1.2—4	0.0421
P 2	〃	4—8	0.0421
P 3	〃	8—16	0.0421
P 4	〃	16—34	0.389
P 5	〃	34—80	0.389
P 6	〃	80—200	0.389
P 7	〃	200—500	0.389
A 1	アルファ粒子	9—70	0.0421
A 2	〃	30—70	0.0421
A 3	〃	65—170	0.389
A 4	〃	130—250	0.389
A 5	〃	320—370	0.389
E	電子	>2	0.389

ンカウンターと呼ばれる方法である種のコード化を施され、PCM テレメトリで地上へ送られる。こうして、16秒ごとに、陽子、アルファ粒子の微分スペクトルと電子の積分カウントが得られる。検出器視野の中心方向は、スピン軸に直角方向を向いているので、スピンにより地球磁力線にはほぼ直角方向からの粒子を観測することになる。また、観測データのはかに、SEM の状態監視項目として、センサー温度、回路部温度、電源部温度、センサー逆電流および回路電圧が、1メジャフレーム(約2分)に1回モニタされる。

3.3 DCP

離島などの無人観測所、固定ブイ、船舶、航空機等から気象観測値を GMS 中継で自動的に収集する観測所を、ECP (Data Collection Platform) と称する。短波以外に通信手段のないこれらの観測所は、通信回線の数も質も余り良くなく空電等による障害が多かった。

DCP システムには、観測時間になると無人局を1つずつ呼出し観測結果を報告させる呼出方式と、無人局に正確な時計を置いて定刻になると自動的に観測結果を報告する自動送信方式がある。前者は、400 MHz 帯の無線受信機を必要として常時動作状態にしておかねばならないのでそれだけ多くの電力を必要とするが、通信に障害のあった時の再送や、severe storm 時の臨時観測の指令ができる利点があり、また、一定時間により多くの局からのデータを収集することができる。後者は、受信機の代わりに正確な時計を必要とし、その精度により同一周波数の局の間の報告の時間間隔が決められる。このため、一定時間に収集できる局の数は前者より少ないが、装置が簡単で安価となる。

報告用の周波数は、各衛星に共通の局に対しては402.0～402.1 MHz を 3 KHz 間隔で 33 チャネル、各衛星固有の局に対しては 402.1～402.4 MHz を 3 KHz 間隔で 100 チャネル割り当てられている。前者は、船舶や航空機のように、5個の静止気象衛星の通信区域の間を往来する局に対して適用され、後者は、固定局に対するもので各静止気象衛星に固有の局で隣接の静止衛星間では異なる帯域が割り当てられている。

航空機からのデータ収集は、NASA (米国航空宇宙局) が、商業航空路を目標に ASDAR (Aircraft-to-Satellite Data Relay System) Project として開発を進めている。この計画によると、1時間に8回観測することにより通常の航空機で約 125 km 間隔のデータが得られ、衛星による気温や風の観測値の校正点としても重要な役目を果

第3・4表 利用局の性能

		MDUS	SDUS
受信機	中心周波数	1687.1 MHz	1691.0 MHz
	空中線直径	4 m	2.5 m
	利得	>34.8 dB	>30 dB
	受信機 NF	1.7 dB	3.4 dB
記録機	ドラム直径	192 mm	70 mm
	記録方式	写真	静電記録
	記録紙サイズ	602×479mm	220×220 mm
	協同係数	2000	268
	線密度	10.42/mm	3.82/mm
	最高画周波数	21 KHz	1.68 KHz
	送画時間階	12分	3.5分
階	32	16	

たすこととなる。

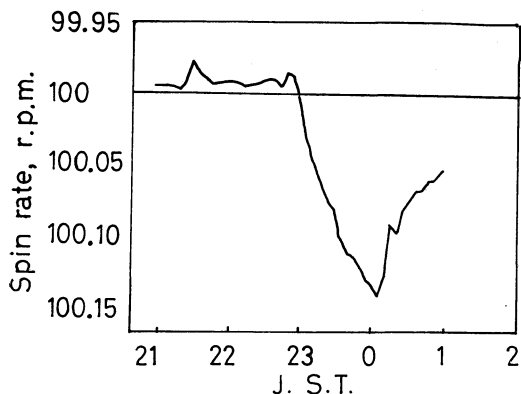
わが国で開発した船舶用 DCP 局は、オーストラリアまで往復の航海に試験運用を行なってよい成績を収めた。

3.4 利用局 (DUS)

VISSR で撮影された画像信号は、DPC で歪の修正、緯度経度線および海岸線の挿入、投影図法の変換を行なった後、高分解能(HR)および低分解能(LR)の Facsimile 信号として GMS 経由で利用局 MDUS および SDUS へ送られる。利用局は、140°E の赤道を中心に GMS の通信範囲内に設置されている(直下点を中心に半径約 7800 km の範囲)。受信に必要な空中線は、MDUS と SDUS でそれぞれ 4 m および 2.5 m でその性能を第3・4表に示す。

4. 蝕の衛星に及ぼす影響

春分と秋分の時に、地球と太陽と衛星が同一平面内に入るので、衛星は毎日夜中の0時を中心に最大72分間地球の影に入って、その間は太陽電池の出力は0となり、2個の Ni-Cd 電池で電源をまかなうこととなる。太陽電池の出力は、寿命初期には約 275W であるが、軌道上での高エネルギー粒子などの影響で次第に性能は劣化し、寿命末期には約 225W となる。衛星に必要な電力は、約 210W であるから十分賄うことができる。蝕の間は、電池よりの電力68Wで最小限の衛星の維持を行ない、特別の事情がない限り VISSR 観測などは実施しない。この間は、夜間で可視は使えないが短時間なら赤外画像の撮影を行なうことができる。



第 4・1 図 スピン速度の熱による変化。

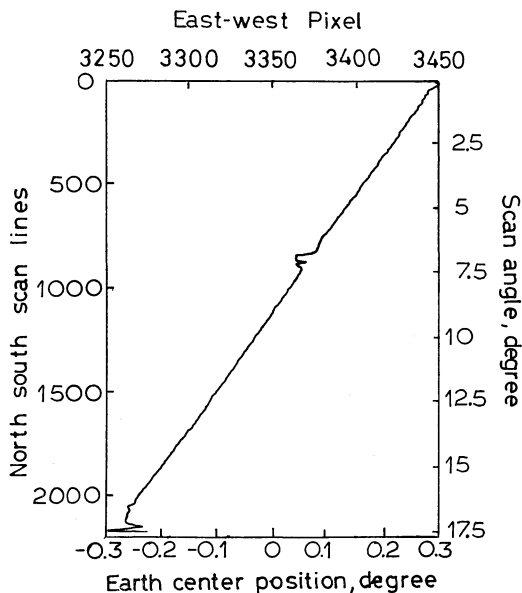
熱の間は、衛星に熱入力はないので衛星の温度は低下する。したがって、衛星本体は収縮し、直径が僅か小さくなるのでスピンは早くなる。第 4・1 図は、熱に入ってからスピンの早くなる様子を示した一例で、熱を出ると共に元に戻る。図の縦軸はスピン率、横軸は日本標準時 (JST) で、衛星は 140° E にあり、JST は 135° を基準にしているので衛星の地方時は JST と 20 分の差がある。

5. スピン軸のずれ

GMS の機能試験中に、スピン軸が機械軸に対して僅かずれていることが判明した。第 5・1 図は、東西方向の走査線が地球の両端を検出した中心を結んだ点の軌跡で、正常な値から約 2° 傾いている。この原因については、製作会社である Hughes 社および宇宙開発事業団で種々の検討が行なわれ、新しい Hoop 型の Nutation Damper が第一の原因で、さらに、姿勢制御用の Hydrazine が傾きを増幅させる第 2 要因となっているのではないかと考えられているが、最終的結論には至っていない。現在まで、数回の東西方向の軌道修正を行なったが、それによってこのずれの値は変化していない。この状態が当分の間は持続し、ずれが大きくなったとしても最大 4° 程度までと考えられている。

このようなずれは、画像の歪を生ずることとなるが、この値が固定したものであれば修正することは容易である。衛星の精密な姿勢と軌道を測定し、修正に必要なパラメータを計算し、その値に従って太陽パルスから VISSR のフレーム開始時刻までの時間間隔を調整して歪の修正を行なう。このような修正を行なうための改造作業が進められており、本年 5 月からは完全な画像が得られる予定である。

スピン軸のずれの原因については、南北方向の軌道修



第 5・1 図 スピン軸のずれ。

正をする時に大量の Hydrazine を消費するので、その時にかなり原因が明らかになることと考えられている。

6. CDAS (Command and Data Acquisition Station)

衛星と直接連絡するのは、埼玉県鳩山村にある気象衛星通信所 CDAS である。ここでは、直径 18m のパラボラアンテナを用い衛星との送信および受信を行なっている。第 6・1 表は、通信系統の周波数、帯域、用途などを示すものである。

また、CDAS の北東約 30 km に視準局 (Colimation Tower) がある。ここには、衛星に相当したトランスポンダーを置き、CDAS のアンテナをこの方向に向けて CDAS の機能の点検を行なう。

CDAS で受信した VISSR 信号は、可視 4 チャンネルと赤外 1 チャンネルが並列に広帯域で伝送されてくるので S/DB (Synchronizer and Data Buffer) においてフレーム同期信号を整え、また、各チャンネルを直列に並べ換えて計算センタ DPC へ送り出す。VISSR のフレーム同期信号は、正確を期するため太陽の位置を基準にして決められる。即ち、衛星から見た太陽の方向から地球の位置は正確に計算できるので太陽の方向を検出するサンパルスを基準にしてフレームの開始時刻が定められる。1 フレームの観測時間 25 分間に太陽は約 6.25° 移動するので、走査線毎に決められたフレーム開始時刻を計算し

第 6・1 表 通信システムの特徴

	周波数 (MHz)		変調形式	帯域幅 MHz
	上り	下り		
VISSR	—	1681.6	14 Mbps QPSK	20
HR-Fax	2029.1	1687.1	FM-FM	1
LR-Fax	2033.0	1691.0	AM-FM	0.26
DCP 呼出	2034.925	468.875	100 bps MC/BPSK	6 KHz/ch
	2034.933	468.883		
	2034.974	468.924		
DCP 報告	402.0~402.4	1694.3~1694.7	100 bps MC/BPSK	3 KHz/ch
三点測距				
MRS	2026.0	1684.0	AM-PM	2
TARS-1	2030.2	1688.2		
TARS-2	2032.2	1690.2		
コマンド	2034.2	1694.0	PCM-FSK/AM-PM	0.02
テレメトリ		1694.0	PCM-FSK/FM-PM	0.2

て画像信号に付加して DPC へ伝送する。

スピンのずれにより生じた画像歪を修正するには、フレームの開始時刻を正規の太陽方向の移動のほかに、画像歪の分を加えることにより実施できる。この補正項は、スピン軸のずれの値、衛星の軌道および姿勢などから DPC において計算し、S/DB に入力される。

CDAS のアンテナは、衛星からの電波を自動追尾して常に衛星の方向を確保している。VISSR 画像データのほかに、通報局報告信号、三点測距データ (TRRR)、テレメトリデータを DPC へ伝送し、DPC よりは、コマンドデータ、通報局呼出信号、HR および LR FAX 送信データが送られ、衛星へ発信される。CDAS の機能を第 7・1 図 a に示す。

CDAS、衛星および太陽が一直線上に並ぶと太陽雑音が CDAS 受信機に入り、雑音レベルが上がって衛星からの信号を受信できない。この間、最大約 10 分間衛星の運用を中断することとなる。

7. CDAS と DPC 間のデータ伝送

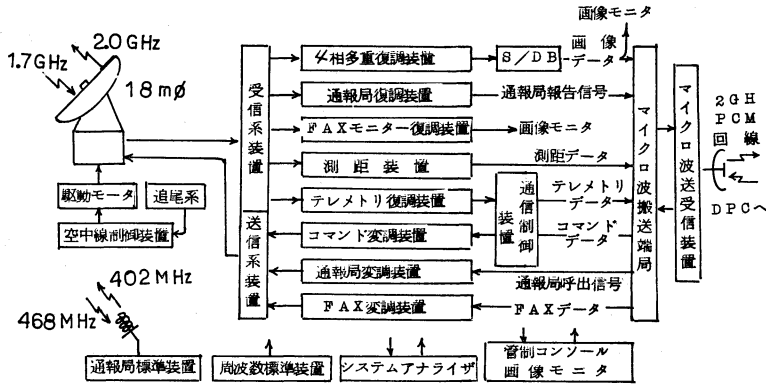
CDAS と DPC の間は、第 7・1 図 a) および b) のように、多重 PCM マイクロ回線で接続されており、DPC から CDAS へは、(1) GMS の観測その他のコマンド信号 (2) DPC のオンライン系で処理された FAX 用の画像信号 (3) 測距信号 (4) DCP の呼出信号などで、また、CDAS から DPC へは、(1) VISSR で撮影し CDAS の S/DB で調整された画像信号 (2) テレメータ信号 (3) 測距信号 (4) DCP の報告などであ

る。さらに、DPC と気象庁の間は見通しがないので筑波中継のマイクロ回線で連絡され、DPC で調整された画像信号の伝送を行なっている。

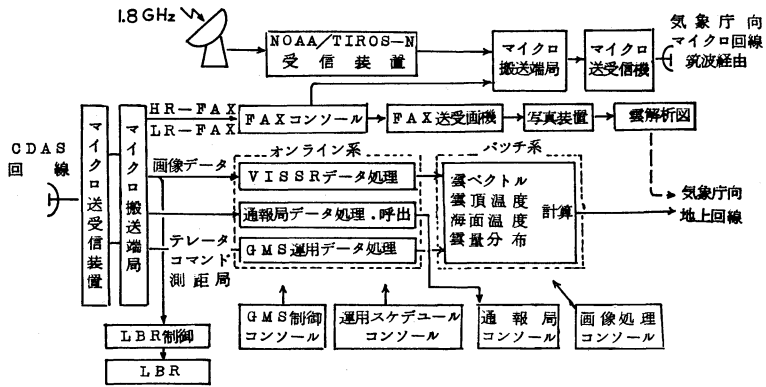
CDAS からの信号のうち低速の DCP 報告 (100 bps) およびその他の信号 (1200 bps) は、マイクロ搬送端局から直接通信制御装置 (CCU) を経て電算機へ入力され、高速の VISSR 画像信号 (750 kbps) は、ビット同期、フレーム同期をとり高速 CCU 経由で入力される。また、VISSR 画像信号は、分岐して磁気テープに記録し、必要に応じてレーザービームレコーダ (LBR) で、ドライシルバフィルムに記録される。このフィルムは、熱現像されるので簡単に画像が得られる特長があるが、長期間の保存には不向きである。LBR の線密度は 20 本/mm で、地球画像を約 50 cm 直径で表わすので可視チャンネルの全分解能を表示でき、赤外は同一走査線を 4 回繰り返して表示する。階調はガンマ補正を行なって 16 階調で表示する。

FAX 送信用アナログ画像データは、DPC の計算機で自動処理され、スケジュール化されて自動的に送出される。FAX コンソールでこれを監視する。テストパターンは FAX 送画機より送出される。FAX の画像信号は、64 レベル以上の階調で量子化が可能であるが、この情報を全部利用局で再現することはできない。

MDUS では、全球画像の地球直径を約 42 cm で表示するので、可視については全分解能の 1/2、部分画像および赤外画像は全分解能で表示でき、SDUS では約 1/5 となる。DPC よりの出力を第 11・1 表に示してある。



第 7.1 図 (a) CDAS 系統図。



(b) DPC 系統図。

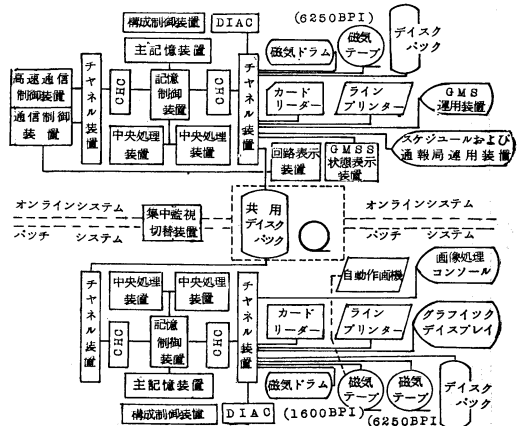
8. DPC の電算機処理のハードウェア

DPC の計算機システムは、オンライン系とバッチ系に分けられる。オンライン系は、CDAS 経由で GMS および気象庁と接続され、VISSR 画像データ、衛星運用管制データ、DPC データなどの集配信、FAX データの作成、DCP データなどの ADESS への送信などの一次処理を即時処理で行なっている。

バッチ系では、衛星の軌道と姿勢の決定と予測、画像データから雲移動ベクトル、海面水温などの気象情報抽出などの二次処理を行なっている。

第 8.1 図に示すように、オンライン系とバッチ系は、CPU 本体周辺の装置が同様で重複構成となっているので、常時は両者それぞれの業務を行なっているが、もしオンライン系に障害が発生して停止したときは、バッチ系がその業務を中止して代替をする。

CPU は、それぞれ FACOM 230-75 2 台ずつの構成で、各 CPU に約 1 MW (1 W=36 ビット) の主記憶装



第 8.1 図 DPC 電子計算機システムのハードウェア構成図。

置があり、チャンネルを通して I/O と外部記憶装置と接続されている。周辺装置には、(1) CCU と通信系の作動状況を表示する回線表示装置 (2) GMS システム状態表示装置 (3) 衛星の運用管制とデータ処理の制御を行なう GMS コンソール (4) GMS 運用スケジュールコンソール (5) 通報局コンソールがある。バッチ系には、画像処理コンソール (IPC) とグラフィックディスプレイがある。

外部記憶装置は、ディスクバックユニット(DPU)(100 Mバイト記憶)と磁気テープユニット(MTU) (6250 rpi /1600 rpi の記録密度)がオンライン系とバッチ系に割り当てられており、両者の受け渡しのための共用ファイル、構成変更のための集中監視切替装置がある。カードパンチャー (CP) と XY プロッタは電算機に接続されていない。

9. DPC 電算機処理のソフトウェア (第9・1図)

9.1 オンライン処理

FACOM 230-75 モニターⅦを使用し、サブモニターとして、運用スケジュールがスケジュールの登録、変更、実行と監視、障害時の処理、電算機の保守、バッチ系とのデータの授受、オペレータとの会話などの管理を行なう。

9.1.1 衛星運用管制

(a) テレメトリ・コマンド処理 コマンドは、運用スケジュールによる自動発信およびコンソールからの手動発信の両者が可能である。テレメトリには、リアルタイム (粗姿勢決定、スピナー計算用のサンセンサーおよびアースセンサーデータ) と PCM (HK, SEM, 指令に対するアンサーバック) の二者がある。

(b) HKデータ処理 衛星の状態監視および VISSR の較正に使われ、編集して保存される。

(c) 衛星情報表示 バッチ系で処理した軌道と姿勢の予測データを受け取り、それをコンソールに表示し、あるいは、オペレータとの会話形式の処理を行なう。

9.1.2 データ集配信

(a) VISSR 画像系データ VISSR の生データに画像パラメータ情報を加え、オンライン処理用に VISSR 画像データファイルとして DPU に、バッチ処理用に VISSR 履歴データファイルとして MTU に記録する。VISSR 画像1枚は可視で 103.3Mバイト、赤外で 16.7 Mバイトとなる。

(b) ファックス画像データ配信 ファックス用画像データファイルからスケジュールに従って送信される。

(c) 衛星運用管制系データ S/DB を運用するための情報の配信を行なう。

(d) 三点測距データ TRRR データはバッチ系で軌道決定予測が行なわれる。

(e) DCP データ コンソールを介して会話形式で処理され、ADESS/GTS へ出力される。

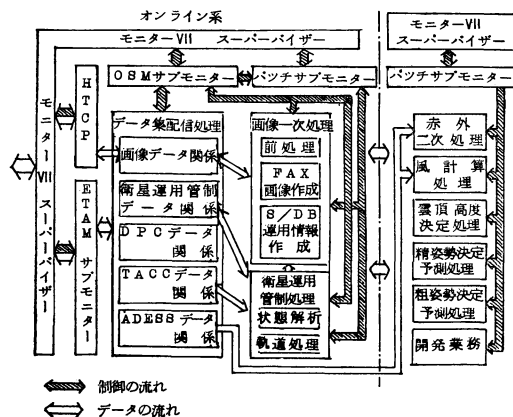
9.1.3 画像一次処理

(a) VISSR 画像取得のため、必要な情報作成編集 S/DB のタイミングに必要なデータおよび衛星の運用モード、VISSR 較正用データ、座標変換データ、軌道予測データなどが用いられる。

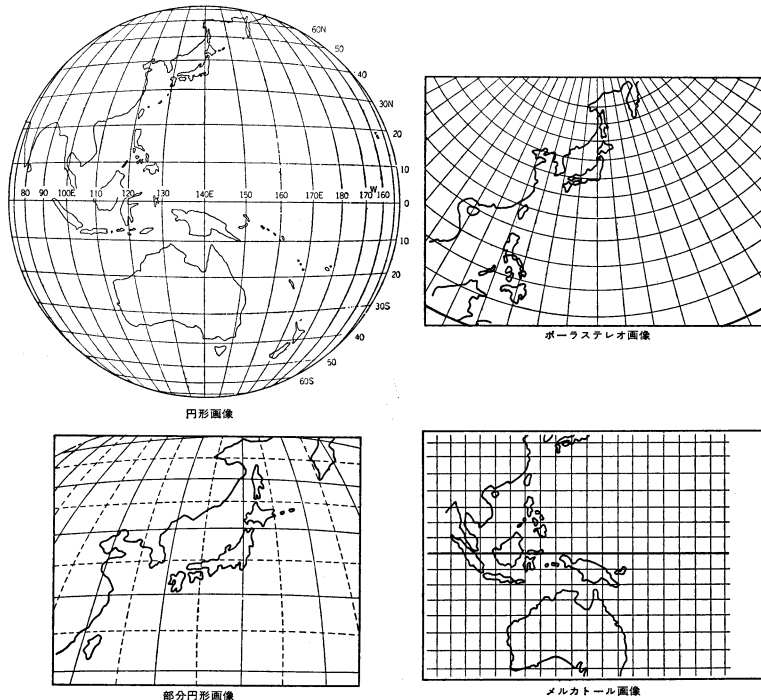
(b) ファックス用画像データの作成 地球円形画像の作成は、生データに含まれている幾何学的歪を修正し、各画素を地球円形像の地理的に正しい位置に対応づけ、検知器感度の調整などの光学的歪の修正、輝度変換テーブルの参照により雲パターンの細部をファックスで最も見易い濃度分布に変換することなどが行なわれている。ポーラステレオ、メルカトルなどの投影変換に際しては、画素の間引きまたは追加を行なう。また、総ての画素を個々に変換処理を行なうには膨大な時間を要するので、いわゆる“ブロック処理”の手法がとられる。また、あらかじめ作ってあるファイルにより、緯度、経度、海岸線、注記(観測日時、画像の種類などの記事)、濃度標本などが挿入される。第9・2図にオンライン系で作成される画像の種類を示す。

9.2 バッチ処理

9.2.1 衛星の軌道の予測と決定 静止衛星の軌道傾斜角は、太陽と月の引力によって僅かずつ変化し、傾角+1°から-1°になるのに約2年かかる。衛星は一日



第9・1図 DPC 電算機システムのソフトウェア構成図。



第 9・2 図 画像の種類。

周期でこの傾角の範囲を南北に移動するので、その範囲を $\pm 1^\circ$ 以内に保つため -1° まで来たときに軌道修正を行なう。また、東西方向は地球の重力ポテンシャルの関係で、 140° E付近では1日当たり約 0.003° 西方へ移動するので、約2カ月毎に東西方向の修正を行なって $\pm 0.5^\circ$ の範囲に保つ。これらの修正は、衛星の正確な軌道の値を基礎にして宇宙開発事業団が行なう。軌道と姿勢の正確な値は、VISSR 画像の処理、特に風計算の精度を高めるためにも重要である。

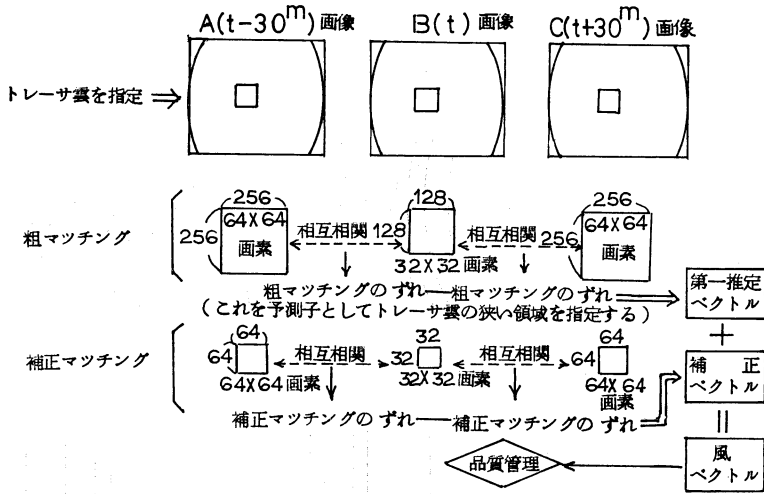
軌道決定予測は、1日4回の三点測距 (Trilateration Range and Range Rate—TRRR) データを使って、衛星軌道の6要素を計算する。軌道修正が行われた直後は正確な軌道の値が分からないので、TRRRにより、CDAS、石垣島、オーストラリアのオローラルバレーの三点と衛星との直線距離、衛星の方位角、高度角および時刻(準ユリウス日の値)を使い、幾何学的軌道決定を行なう。この値を初期値とし、摂動を考慮した衛星の運動方程式を解き10日間の軌道予測を行ない、実測との差が小さくなるようBayesの重み付き最小自乗法を使って初期値を補正してゆく。この決定精度は、衛星直下点(Sub-Satellite Point—SSP)で、可視の1画素1.25km

以内である。

9. 2. 2 衛星姿勢決定予測

テレメトリデータ中のアースセンサとサンセンサの一日分8回の値と軌道予測データを用い、赤道面座標のスピニング軸方向を元期(予測開始時点)から8日先まで10日分計算し粗姿勢決定を行なう。この推定には平方根カルマンフィルタ法などを用い、その決定精度はVISSR視線で視角約 0.1° である。

風ベクトル計算などの画像二次処理には、この程度の精度では不十分なので、画像中の地形を用いた精姿勢決定を行なう。第9・3図に示す如く、地図上の特定のランドマークを含む 64×64 画素の窓(テンプレート)を可視画像上の対応するランドマークを含む 128×128 画素のサーチエリアに対して相互相関によるパターンマッチングを一画面上約10点の教画面分について行ない、精姿勢を決定する。姿勢の予測には、平均技法モデルまたは多項式表現の運動モデルを使い、衛星からの視角 0.008° の精度(SSPで可視4画素以内)で求められ、元期から4日先まで5日分について実施する。パターンマッチング処理には、画像処理コンソールで、人間と電算機の会話型式MM法(Man-Machine法)で処理され



第 9・3 図 風ベクトル算出 MM 法.

る。

9. 2. 3 画像データから気象要素の抽出

MM 法により、(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 などの計算を行なう。(a)は可視と赤外画像を使いその他は赤外画像による。

(a)風ベクトル 雲の移動を追跡して風ベクトルを推定するのは、海上のような観測過疎区域、特に、地衡風近似のできない低緯度帯について重要で、GARP/FGGE の目標として 5° メッシュ毎に 1 点、3 層につき精度 3 m/s で測定することとなっている。手法としては、MM 法とループフィルム法 (LF 法) があり、両者を相補しながら風ベクトルを算出する。

MM 法では、時刻 t を中心とした 30 分間隔の前後 3 枚の時系列画像 $A(t-30分)$, $B(t)$, $C(t+30分)$ であらかじめ位置合わせの済んでいる画像をコンソールに表示し、人間が追跡雲を指定し追跡雲を含む B のテンプレートを C および A のサーチエリア上に動かし、相互相関マトリックスを計算する。テンプレートサーチエリアの区域は、はじめ広い区域について画素数を 1/4 に間引きサンプリングして相関計算を A と B , B と C について行ない、相関マトリックス面での相関値のピークのずれを求め粗マッチングを行なう。これを予測値として、次にこの点を中心としたオリジナル解像度での区域を切り出し同様の計算、補正マッチングを行なう。前者の値第一推定ベクトルに、後者の値補正ベクトルを加え風ベクトル

を求め、次に品質管理を行なって最終出力とする (第 9・3 図)。

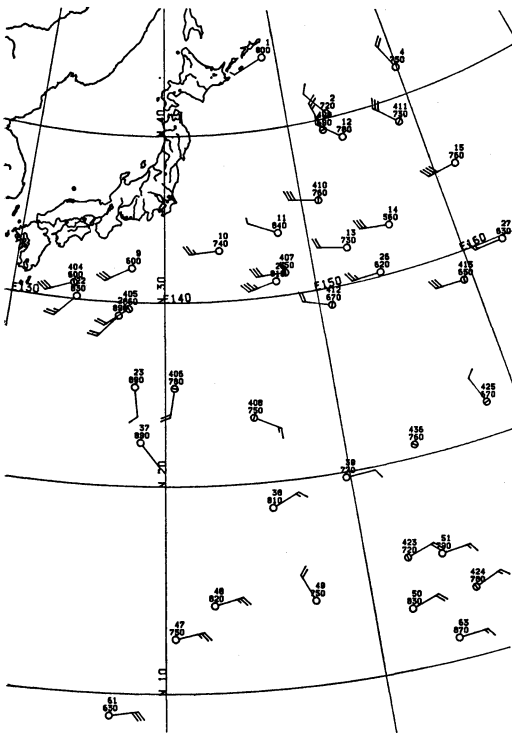
追跡雲の高度は、後述の雲頂高度決定処理と並行して行ない、三層すなわち 600 mb 以下、400~600 mb、400 mb 以上のいずれかに対応させることとしている。品質管理には、あらかじめ試行錯誤実験を通じて決定したしきい値との比較による自動評価と、マニュアル評価がある。前者はマトリックス面の評価で、ピーク値、ピークの鋭さ、ピーク変位の限界値、ピークと二次ピークの差と距離について行なう。また、 $A \cdot B$ 画像、 $B \cdot C$ 画像間の連続性は、風速しきい値とそれぞれの画像の雲の高度差にしきい値を設けて不良のものを取り除く。このほか、抽出ベクトル値の空間分布や近隣のレーウィンによる値との比較なども、グラフィックディスプレイ上でチェックできる。

LF 法は、歪修正済みの HR-FAX の 30 分間隔の 1.5 時間にわたる 4 枚の写真 ($Z(t-60分)$, $A(t-30分)$, $B(t)$, $C(t+30分)$) から、まずループフィルムを作製する。このとき、適当なランドマークを目視で合わせながら 35 mm フィルムに Z 画像約 35 駒、 $A \cdot B$ 画像各 3 駒、 C 画像約 35 駒、合計 76 駒に駒どりしてループフィルムを作る。これを、エンドレス映写器により 1 ミル間隔のワイヤメッシュの入っている投影板上に連続映写し、画像上の画素の位置が数値として分かっているベンチマークと、雲移動の始終点を指定する。これらの位置は、座標数値化装置により読み取られ自動的にカードにパンチさ

れ、電算機で移動ベクトルを計算する。

LF 法の出力も MM 法の出力と同時にグラフィックディスプレイ上に表示して、品質管理できる。また、MM 法の結果を XY プロッターにより地図上に記入し、LF 法の雲パターンを投影した盤上に合致させてチェックすることもできる。第 9・4 図に風ベクトル計算例を示す。

(b)海面水温 赤外画像の $50^{\circ}\text{N}\sim 49^{\circ}\text{S}$ 、 $90^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{W}$ の区域について、 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ (約 100 km 四方)のメッシュで、それぞれ輝度のヒストグラムを作り、広域海面水温分布を求める。輝度の大小が高温と低温に相当し、即ち、海面と雲に対応する(第 9・6 図)。高温域のヒストグラム分布はほぼ正規分布をとるので、このピーク値から等価黒体温度 T_{BB} を計算し、海面水温 (SST) T_S を、 $T_S = T_{BB} + \Delta t$ として求める。ここで、 Δt は補正項で、衛星からの天底角 θ (Nadir angle)、 T_{BB} および可降水量の関数である。厳密に Δt を決定するには水蒸気の鉛



第 9・4 図 風ベクトル計算例。1978年 2月28日 00 Z。○は MM 法、⊙は LF 法により、2桁または 3桁の上段の数字はデータ番号、3桁の下段の数字は気圧を示す。ただし、400 mb 以下のものは日本南東方海上のみを示す。

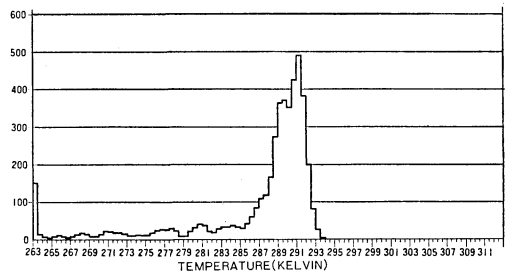
直分布などを知る必要があるが、差し当たって、月別の気団の種類毎に θ と可降水量を指定して T_S を求める。この場合、月別に緯度 5° 毎のデータを統計値として使用し、標準大気データファイル (GMSSA) と称す。このような処理を 1 日 4 回行ない、10 日の平均を求める。第 9・5 図に SST の算出例を示す。SST は、統計的 SST 分布図、船舶の観測値との比較により異常値を排除して品質管理を行なう。

また、日本近海の流れパターンのような狭い区域 ($45^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) の、より詳細な SST 分布を求める場合は、例えば、 $1/4^{\circ}\times 1/4^{\circ}$ 区域の画素数が約 40 個となりヒストグラムに顕著なピークが現われにくく、統計的度数分布から決定できないことが多い。そこで、一法として、隣り合った画素間の差分を計算し、差分値の大きなものを除く。すなわち、雲と海との境界に当たる画素を除くと、残りの画素の輝度のヒストグラムは、低温側の雲だけのものと分離して、高温側に T_S に相当する分布を見出すことができる。

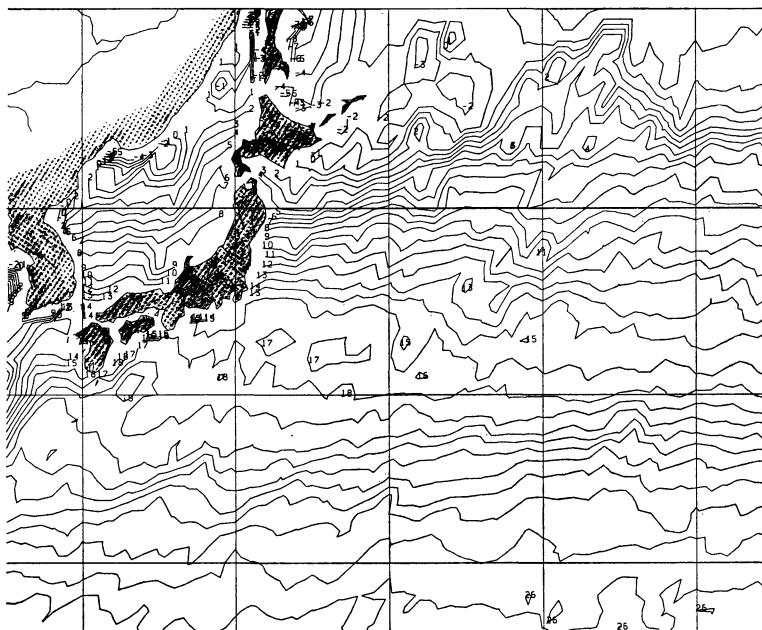
(c)雲頂高度 CTH (Cloud Top Height) 赤外画像を使って総観雲頂高度と局地雲頂高度を求める。前者は広い領域 (約 $100\times 100\text{ km}^2$) 内の輝度の最頻値ないし平均値と標準偏差値、後者は狭い領域 (約 $50\times 50\text{ km}^2$) についての最低値を使う。雲頂温度と観測された輝度値との関係は、放射伝達式で表わされるが、雲が一層の場合は SST データ (一点指定法)、雲が多層の場合は周辺の海または下層雲上面の T_{BB} を求める (二点指定法) ことによって、雲の吸収放射項を決める。また、補正項には天底角 θ と可降水量も考慮している。第 9・7 図に雲量の一例を示す。

10. 写真処理

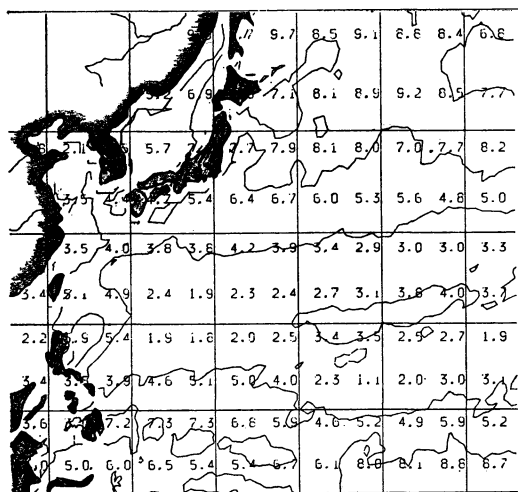
VISSR 画像データのデジタル処理と共に、HR-



第 9・6 図 赤外画像によるヒストグラム解析の例。高温側ピーク値が海面水温候補値となる。



第 9・5 図 広域 SST 処理例, 1978 年 2 月 11 日~20 日. ただし, 日本東方海上のみを示す.



第 9・7 図 半月平均全雲量分布図 (1978 年 2 月 25 日~3 月 1 日).

FAX 画像の写真処理を濃度の均一性に留意して行なう.

10・1 ループフィルム作成

風ベクトル算出用と雲解析用のループフィルムを作成する. 後者は, 通常 3 時間間隔の画像 (異常気象時は 1

時間間隔) により 36 時間または 72 時間のエンドレスフィルムを作成し, 各種の雲システムの移動変化を動画により解析する.

10・2 雲解析用原図作製

HR-FAX フィルムより拡大, 縮小して雲解析用の画像を作成する.

10・3 保存用マイクロフィルム作製

永久保存用として, 多少情報量が低下するが, 容積の小さい 35 mm のマイクロフィルムを作成し, 総ての画像を保存する.

11. データの保存と利用者への提供

DPC で処理された気象情報を第 11・1 表に示す. 一次処理資料は, オンライン系で処理されたものでこれらの配布スケジュールを第 11・1 図に示す. この観測時刻は正常運用時のもので, 臨時観測, 蝕期間, 太陽雑音期間, 軌道修正時などには異なるスケジュールとなる. 第 11・1 表の出力時刻は, 観測時刻 H から処理を終わって出力開始までの時間を示す.

二次処理資料は, バッチ系で処理されたもので雲解析図は 1 日 4 回, 観測より約 3 時間半後に ADESS 経由で気象無線写真通報 JMH により通報される. 風ベクトルと SST は, WMO コード FM88 SATOB にコード変

第 11・1 表 気象衛星センタープロダクト一覧

区分	範囲, 縮尺投影	有効画面サイズ, 内容	距離分解能	観測時刻**	DPC* 出力時刻	FAX	
一次処理資料	円形画像	全地球画像撮像のまま	558mm×457mm 緯経線 海岸線挿入	直下点で VIS 2.5 km IR 5.0 km	VIS (6), 9, 12, 15, (18) ^I IR 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ^I	VIS H+61m IR H+21m	HR
	部分画像(定時)	18°~60°N: 140°E 112°~157°E: 35°N 日本付近で 東西 1/760 万, 南北 1/1100 万,	同上	直下点で VIS 1.25 km IR 5.0 km	VIS 9, 12, 15 ^I IR 1, 3, 6, 18, 21 ^I	H+41m	
	部分画像(臨時)	同上 ただし, 定時画像より狭い範囲のものもある	同上	同上	VIS 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17 ^I IR 0, 2, 4, 5, 20, 22, 23 ^I	H+41m H+41m	
	ポレラオ画像	アジア太平洋天気図相当 60°Nで1/2000万	同上	—	VIS 9, 15 ^I IR {3, 21 ^I 9, 15	H+141m H+81m	
	メルカ画像	22.5°N(S)で1/2000万 36°N~36°S	同上	—	VIS 9 ^I IR 3, 9, 15, 21 ^I	H+141m	
七分割画像	上記円形画像を若干重複させて7分割したもの	209mm×209mm 緯経線, 海岸線挿入	直下点で VIS 5 km IR 5 km	VIS (6), 9, 12, 15, (18) ^I IR 1, 3, (6), (18), 21	H+58m	LR	

* 気象衛星センター出力時刻は運用に入ってから, 若干変更することもありうる。また, 地上施設の保守, 衛星の姿勢・軌道制御等で, 欠測によるスケジュールの変更もありうる。

** (6), (8)^I は季節によって観測不可能のことがある。また, 蝕の関係で 0^I の観測は欠測することがある。

換され, GTS 経由で諸外国の 気象局へも 送られる。また, 風ベクトル, SST, 雲量分布など, 写真資料を除いたほかの資料 (軌道姿勢データ, SEM データなど) と共に, GMS 観測月報 (仮称) として出版される。

1 回の観測の VISSR 画像 (VIS と IR) のデジタル記録には, 高密度 6250 rpi の MT 1 巻を必要とし, 1 日当たり正常時で約 14 巻となり, 長期間の保存は困難であるので, 約 1 年間保存することとしている。長期間の画像データ保存には, 35 mm マイクロフィルムを採用している。マイクロフィルムの解像度は約 100 本/mm であるから, HR-FAX 原図フィルムをオリジナルとすると, IR ではほぼ元の距離分解能のまま記録できることとなる。

FGGE のためには, 二次処理 デジタル 資料として 指定フォーマット (800 rpi) に変換し, Level II-b 資料としてスウェーデンの水理研究所にある資料センターへ送られる。

また, 一般の利用者はこれらの各種資料の複製を一般の気象資料と同様に日本気象協会経由により入手できる。

12. プロダクトの内容と利用上の留意点

GMS の観測は, 1978 年 2 月 5 日 21 z から試験運用期間に入り 8 回観測を実施している。GMS の画像取得は準本格的運用段階に入ったといえる。したがって, 本文は画像取得・資料蓄積を重ねたうえでの記述ではなく, むしろ, どのような計画になっているかの紹介をする。

GMT	0	10	20	30	40	50	60
0	7	IR DISK-0	21	25	LR-VIS-0	58	
1			21	VIS DISK-0	35	47	TRRR 1
2	7	IR MT-0	21	25	VISSR-3	58	
3	7	IR DISK-3	21	25	LR-VIS-3	58	
4	7	LR-TP	21	25			
5	7	TP-JNAL	21	25	VISSR-6	58	
6	7	IR DISK-6	21	25	LR-VIS-6	58	
7			21	VIS DISK-6	35	47	TRRR 7
8	7	IR MT-6	21	25	VISSR-9	58	
9	7	IR DISK-9	21	25	LR IR-9	58	
10	3	VISSR-W 11	30	33	VISSR-W 12		
11	3	VISSR-W 12	30	33	VISSR-12		
12	7	IR DISK-12	21	25	LR IR-12	58	
13						47	TRRR 3
14	7	IR MT-12	21	25			
15				33	VISSR-16		
16	7	IR DISK-16	21	25	LR IR-16	58	
17				33	VISSR-18		
18	7	IR DISK-18	21	25	LR IR-18	58	
19						47	TRRR 19
20	7	IR MT-18	21	25	VISSR-21	58	
21	7	IR DISK-21	21	25	LR IR-21	58	
22	3	VISSR-W 1	30	33	VISSR-W 2		
23	3	VISSR-W 3	30	33	VISSR-0 0		

第 11・1 図 GMS の正常時運用スケジュール。

- IR DISK: 赤外全球円形画像の HR-FAX 伝送
 - VIS DISK: 可視全球円形画像の HR-FAX 伝送
 - IR MT: 赤外メルカトル変換画像の HR-FAX 伝送
 - TP-JNAL: テストパターンと MANAM 放送の HR-FAX 伝送
 - LR-IR: 赤外分割画像の LR-FAX 伝送
 - LR-VIS: 可視分割画像の LR-FAX 伝送
 - LR-TP: テストパターンと MANAM 放送の LR-FAX 伝送
 - P: 毎時観測による赤外部分画像の HR-FAX 伝送
 - VISSR: VISSR 画像データ取得の観測
 - VISSR-W: 風推定用の VISSR 画像データ取得の観測
 - TRRR: GMS による三点測距の観測
- 枠組の前後の数字はそれぞれの開始・終了時刻(分)。枠内の数字はそれぞれの 1 日の一連番号。

12. 1 画像

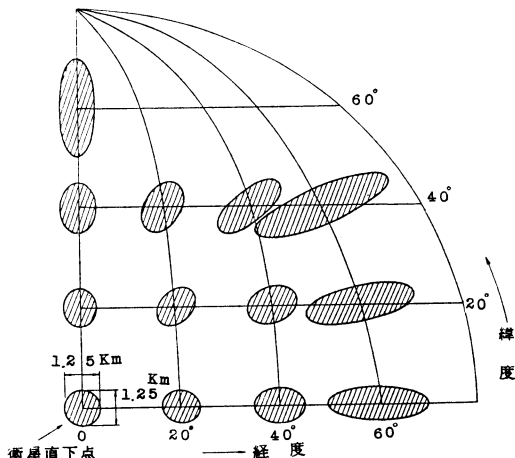
GMS による観測の画像は、GMS の軌道姿勢が観測時刻により相異なることを修正して、高分解能 FAX (写真) として緯経線、海岸線を挿入して出力され (第 11・1 表), gray scale は 32 階調である。各画像の範囲

を图示したのが第 9・2 図である。

ここで距離分解能について説明を要しよう。VISSR が観測する際の瞬時視野は、衛星直下点では円であり、その円内の総放射エネルギーを測定するので円内でのエネルギー分布は識別できない。物体を識別する大きさの最小単位は瞬時視野で決まり、この大きさ (直径) が距離分解能となる。また、画像はこの瞬時視野の計測値で構成されていて画素ともいわれる。したがって、瞬時視野・距離分解能・画素は同一のものと考えてもよい。これらは VISSR の視点が衛星直下点から離れるにつれて当然変形するが、可視放射射の場合を例として示せば第 12・1 図となる。

12. 1. 1 円形画像

GMS から観測されたままの画像であるが、可視画像については、画素をサンプリングして処理するので衛星直下点での距離分解能は 2.5 km になっている。赤外画像は、サンプリング処理していないので衛星直下点での距離分解能は 5.0 km になっている。GMS の VISSR 観測は正常時 3 時間ごとであるが、雲の移動を追跡して高層風を求めようとするループフィルムを作成するため、00z, 12z には 30 分間ごとの 4 枚の連続した赤外画像が得られ、単に風計算のためのみならず時間分解能 30 分で気象現象が解析できる。一例として、第 12・2 図 (口絵) をあげよう。済州島から南々東にカルマン渦列が見られる。この渦列は、しばしば北西季節風下で見られるが、ループフィルムによると、南々東に移動する状態が明瞭に認められる。また、日本海を北西から南東または東南東にのびる雲列の中に、雲列にはほぼ直交する雲



第 12・1 図 緯度別・経度別の瞬時視野の変形。

の筋で形成されるバンドが若狭湾付近から北東にのびている。雲の筋から収束する流れの場を考えがちだが、ループレフィルムによると本州の日本海岸に北西の一般風のり移動している。これは、ステールの写真では判断が不可能であったが、今後いろいろの現象が把握されることになろう。画素の変形は、第 12・1 図により変わり、縮尺は、DPC で出力される HR-FAX 図では、日本付近で東西方向は約 1/2840 万、南北方向は約 1/3560 万となっている。

12. 1. 2 部分円形画像

日本付近を中心として拡大したものであり、可視画像はサンプリング処理していないので距離分解能はオリジナルの値をもっている。縮尺は、東京付近で東西方向は約 1/770 万、南北方向は約 1/1000 万となっており、淡路島、浜名湖、猪苗代湖くらいのものは十分に識別できる。

12. 1. 3 ポーラステレオ投影変換画像

気象庁が使用している天気図・数値解析図の原図であるポーラステレオ投影図 (60°N で 1/2000 万) に、日本を中心に交換した画像である。したがって、画像を天気図・数値解析図と重ね合わせて容易に物理量等との対応関係を求めることができる。円形画像の一部分をこの図法に変換するため、画像のある部分は伸ばし、またある部分は縮めるので距離分解能は第 12・1 図に示す規則的な変化はあり得ない。

12. 1. 4 メルカトル投影変換画像

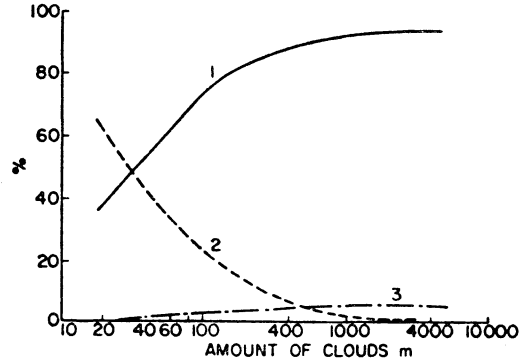
衛星直下点を中心にしてメルカトル投影図 (22.5°N(S) で 1/2000 万) に交換した画像である。GMS の両隣に上がる静止衛星画像と結びつけて解析するには、この図法に変換してあると容易である。たとえば、アメリカの SMS の画像と結びつけると (アメリカはこの投影変換画像の出力は現在ない)、南北両アメリカ大陸西岸からマレー半島に至る太平洋上の ITCZ の全貌が極めて明瞭となる。ポーラステレオ投影変換画像と同様に、距離分解能は第 12・1 図に示す規則的な変化はあり得ない。

各画像ともに、可視画像の白い部分は高反射、黒い部分は低反射を示し、反射輝度は次により大きく変わる。

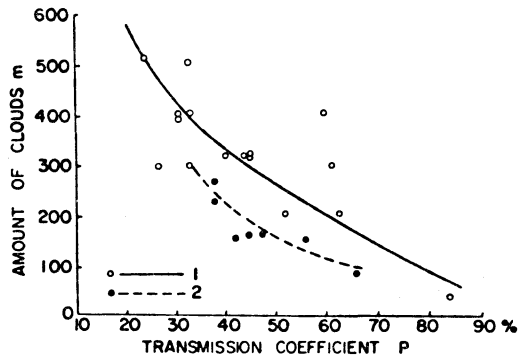
(a) センサーと地球上の雲の位置 衛星から直下点を見るのと地球の端を斜めに見る場合とでは大気中の吸収散乱および距離分解能が異なり、斜めに見る場合には反射輝度は低下する。

(b) 雲と太陽との相対位置 GMS の視野は、赤道で

1978年 4月



第 12・3 図 雲による層別の太陽放射の反射 (1)、透過 (2)、吸収 (3) の割合 (Kondratyev, 1969 による)。



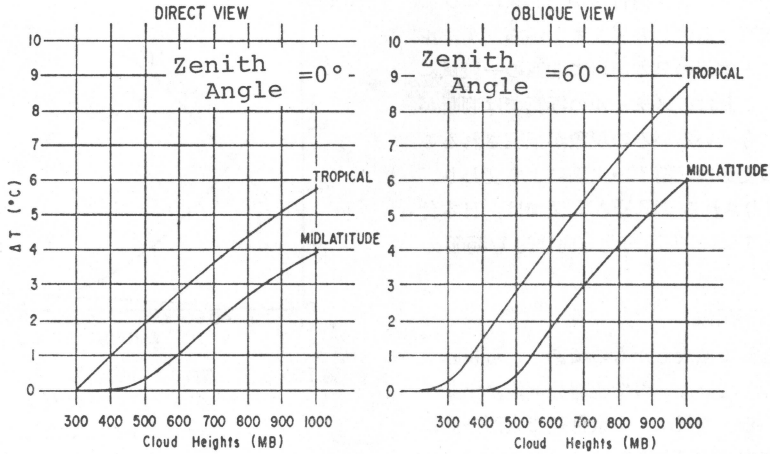
第 12・4 図 層積雲と高積雲の雲厚別の透過率の変化 (Kondratyev, 1969 による)。

東西方向 120 経度あり地方時にして 8 時間の差があり、雲の輝度は地方時の正午に最も強くなる。

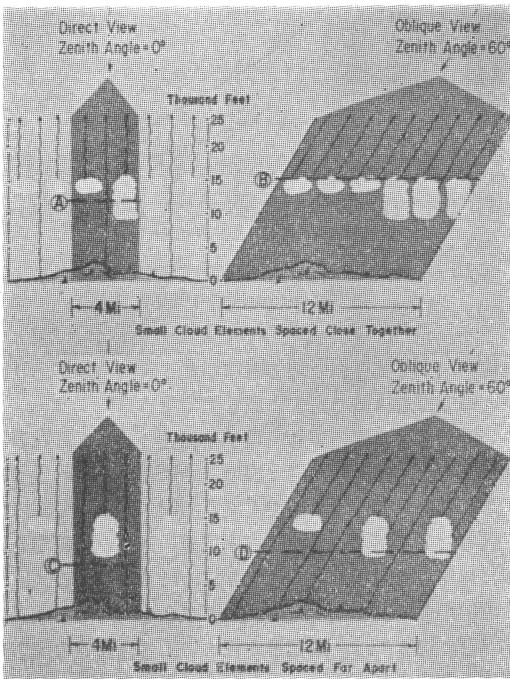
(c) 反射率は雲の厚さ、粒子の相とサイズと分布等によっている。第 12・3 図は雲の厚さにより反射強度が変わることを示した理論値で、雲厚 500~600m ではほぼ一定となる。第 12・4 図は雲厚別の透過率を層積雲と高積雲に対して飛行機観測により求めたものである。図中の曲線からの読み取りでは、雲厚 200m に対して透過率が 17% 違うのは、雲粒子の相・サイズ分布等の違いの反映と解釈されよう。

赤外画像の白い部分は低放射 (低温) 域、黒い部分は高放射 (高温) 域を示し、輝度は次により変わる。

(a) 「大気の窓」の波長帯でも水蒸気による吸収が画像には反映している。第 12・5 図は、軌道衛星 NOAA/ITOS シリーズに適用される図であるが、水蒸気吸収効果を示すものである。すなわち、放射行程と雲頂温度の



第12・5図 放射行程と雲頂温度の誤差(赤外画像上の濃度差)の関係 (Anderson et al., 1974による)。



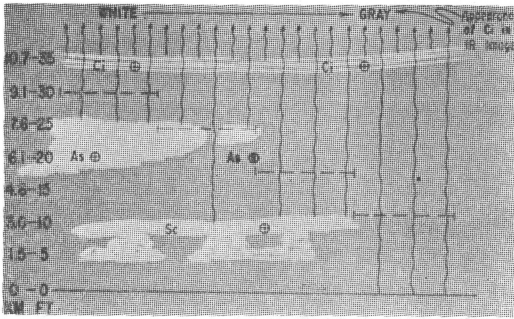
第12・6図 瞬時視野内に小さな雲のある場合の放射エネルギー (Anderson et al., 1974による)。

誤差の関係を、衛星から直下に見る雲と斜めに見る雲について示している。左側の直下に見るときには、300 mbより高い雲では誤差はないが、1000 mbの雲(あるいは

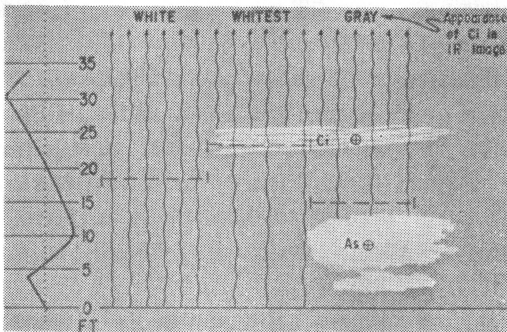
地球表面とみてもよい)では実際よりも中緯度地方で4°C、熱帯地方で6°C低温になり、右側の斜めにみるとときには誤差はさらに大きくなる。GMSから目標点までの積分された水蒸気量の大小が吸収効果の大小となる。

(b)瞬時視野内に小さな雲のある場合 第12・6図に示すように、上段・下段ともに右側と左側の雲分布は同じで、見る角度と瞬時視野のみが異なっている。二種類の雲が近接して共存している上段の場合、雲域を直下に見るときは、放射計は陸地と雲頂を同時に測定するので雲頂高度は低くAに見積もられ、斜めにみるとき(上段右側)は陸地からの放射は測定しないのでAより高くBに見積もられる。下段は、雲の間隔が上段よりも離れている場合で陸地からの放射の影響が大きく、雲頂は実際よりも暖かくなり、高度も上段の場合より低く見積もられる(C, D)。画像の濃度では高く見積もられるほど白くなる。ただし、図中の数値は仮の値である。雲の例をあげたが、海面に対してもサンゴ礁や島の小さなものが散在する場合も同じ結果になる。

(c)網雲を透過する赤外放射 網雲は、11μmの赤外域では半透明で下層から透過してくる放射量の和として測定するので、第12・7図に示すような雲分布の場合は、破線で示す(横の長さは瞬時視野)ように雲頂高度を測定し画像上では濃度差がでてくる。冬期の大陸のように放射冷却のある場合や北日本の東方海上で海霧が出現する場合のように顕著な気温逆転のある場合は、さらに複雑である。第12・8図は、地表よりも暖かい層雲の上に



第 12・7 図 絹雲の下にある雲の状態により赤外画像上に生ずる濃度差 (Anderson *et al.*, 1974による)。



第 12・8 図 第 12・7 図と同じ。ただし、下層に強い逆転がある場合。

レーサーとして 3 次元的に雲がある程度は変形しない必要があるので、画像にあるすべての雲をトレーサーとするわけにはいかない。

この、トレーサーとして具備すべき条件の主なものとは下記の通りである。

- (a) life-time の長い雲であること。
- (b) 雲を流すある高さの一般流を求めるには風の鉛直的な差をできるだけ小さくするため雲の厚さが薄いこと。
- (c) 雲の特徴点をとらえて追跡するので、形状が大きく変化するときには定性的に移動していることは判っても、定量的に追跡することは問題があるので、雲の形状変化の少ないこと。

(d) 山岳波のように停滞している波状雲や arc-line といわれて重力波を示すものはのぞき、大規模な流れの場を示すこと。

(e) 比較的停滞している高度 (気圧) 場の雲を追跡すること。日本付近では 30~40 ノットで移動する擾乱は珍しくないが、これら擾乱に伴う雲を 30~90 分追跡すると擾乱の移動速度を含めることになる。

雲の移動速度を高層風と見なすことはなかなか容認しにくいことと思われるが、アメリカの SMS による 30 分ごとの観測により 6 日間の連続した動画を見ると確かに雲は流れており、逆に、雲を流しているものは何かとなる。それなら、レーウィンで測定する高層風と一致するのかと疑問を持つ。初期の段階では、これらの対応関係を求め LBF (Level of Best Fit) という用語すら文献上でみられた。しかし、これら対応関係を求めていることに対して次のような点で批判がなされた (Hasler, 1973)

(a) 対応関係を求めるにあたり、島のレーウィンの風は半径 150 海里以内、観測時から ± 3 時間以内は変わらないとしているが、時空間の差をなくすこと。

(b) レーウィンの風の測定に及ぼす島の影響 (地形効果) をなくすこと。

(c) トレーサーとしてのバルーンの大きさは 1~10m であるのに対し、雲は 10 km のオーダーであり、追跡時間はレーウィンは 1 分または 2 分であるのに対し、雲の場合は 30~90 分であり、両者には大きなひらきがあり一致するはずがない。

Hasler *et al.* (1977) は、INS (Inertial Navigation System) という位置決定精度のすぐれた機器を搭載した NASA, NCAR の航空機を活用し、フロリダ、プエルトリコ、パナマ、メキシコ湾の熱帯海洋上で雲の鉛直的な

一様な薄い絹雲がある場合で、左の鉛直温度分布は逆転を示している例で、冷たい地表の上にある絹雲は地表よりも白くみえるが、下層雲上の絹雲は下層雲が地表よりも暖かいので地表よりも灰色になる。

画像から見た各種雲型判断のほか、ジェットストリーム、温帯低気圧の発達過程、渦度移流場と温度移流場、地上上空の風向風速の推定、乱気流や severe weather の発生しやすい地域とその程度の推定、海風前線等の識別については、多くの写真と共に詳細な記述のあるテキスト (Anderson *et al.*, 1974; Anderson・Veltishchev, 1973; Finger・McInturff, 1975; 神子他, 1972) によられたい。

12. 2 画像から処理されてくるデータ

12. 2. 1 高層風 (雲移動ベクトル)

測定法については、DPC の電算機処理のソフトウェアで述べられた。MM法にしる LF法にしる、雲を大気の大規模な流れのトレーサーとみだてて高層風の観測をしようとするのである。したがって、30~90分間はトレ

広がり、雲の移動速度、雲を含む周辺の風の測定をした。その結果、40例の積雲の移動速度と雲底の風は非常によく一致しており、両者のベクトル差は1時間以上追跡した雲の例数の67%が1.3 m/s以下であった。同様に、150m 高度、雲の中央部、雲頂の風と比較し、それぞれ1.5, 3.6, 7.0 m/sの差があった、5例の網雲の移動速度と雲層の平均風速の差は、1.6 m/s (標準偏差0.9 m/s)となっている。

上記の観測例では、積雲の雲底は960 mbではほぼ一定しているが、雲頂はおおむね600~700 mbで200 mbに達していたものもあるので、GMSで追跡する雲としては必ずしも良好なトレーサーとは考えられない。このため、雲頂の風とは大きな差が出たのだろう。GMSでは、雲移動ベクトルの高さは雲頂温度から求められているので雲底の高さは判らない。したがって、前述のトレーサーとしての条件(b)に述べたように雲厚の薄いものを選ぶべきである。

12.2.2 海面水温

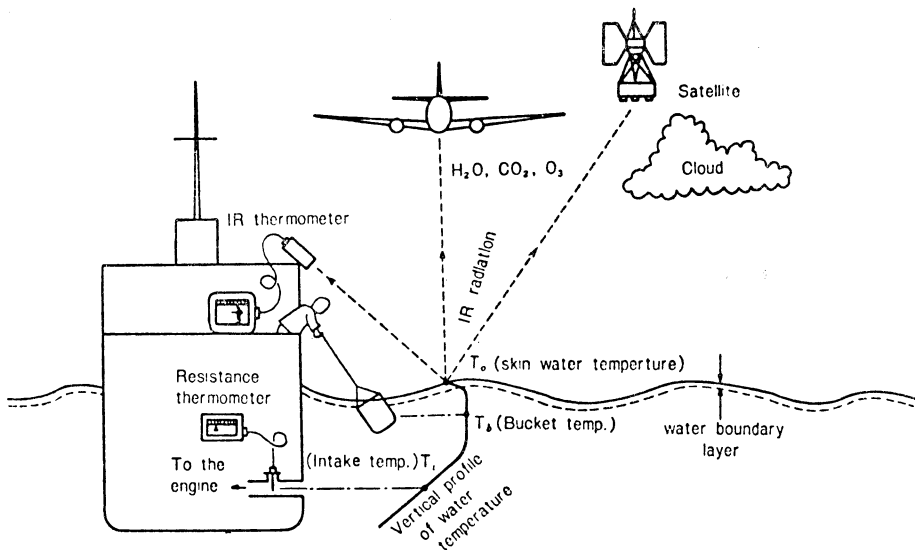
海面水温の各種の観測法は、第12・9図で見ると、舷から水面下数cmの海水をバケツで採水し水銀温度計で測定するか、電気抵抗温度計の感温部を水面下数mの船舶のエンジン冷却水取入口に設置して自記させる方式が一般的である。赤外放射計による海面水温の測定は、水による赤外部の吸収が非常に大きいために水面下わずかに0.02 mm程度の海面の表皮の温度であり、一

般論として図のような水温の鉛直分布があるので、測定深度の点から一致しない。また、船舶の観測は点の観測であるのに対して、GMSでは赤外放射計の瞬時視野(衛星直下点で直径5 kmの円)内の平均値が最小単位である点からも一致しない。

従来の海面水温の観測は船舶によるものが主であったために、大圏コースにのる北太平洋航路や日本から南西に向かう商業航路ではデータが多かったが、これら航路から外れた海域では著しくデータが少なく、データ密度の疎密の差が大きかったのは避けられなかった。雲さえなければGMSでは一様なデータ密度で測定することができる。しかし、停滞性の強い梅雨前線の影響を受ける海域では海面水温の測定は不能になろうし、北海道、東北地方の東方海上の海霧のように海面水温よりも高温な霧の海域は可視画像によりヒストグラムから選別排除しなければならぬし、夜間はこの手法が使えない。また放射エネルギーの大気中の水蒸気による吸収の補正をすることも、荒れた海域では海面上に微小海水滴が浮遊し、海面は泡(空気)を含んでいるのでこれらの補正をどうしたらよいか、絶対値の測定に関しては今後とも技術開発すべき問題点が多い。

12.2.3 雲量分布

海上の観測不足から、海洋上の半月・旬・月別の雲量分布図が得られていなかったが、海面水温を求めめるためのヒストグラム処理を通して求められるようになった。



第12・9図 各種の海面水温観測法 (渡辺, 1969 による)。

現在は、400 mb をしきい値として上下二層および全雲量を $1^\circ \times 1^\circ$ メッシュの区域について出力している。

400 mb より高い雲頂高度をもつ雲は、層状の絹雲もあれば塔状の積乱雲もある。両者の識別は、可視・赤外画像の併用により可能となるが、夜間は可視画像の取得は不可能であるし、日中も地方時の相異から同じ雲でも輝度は同じにならないので、電算機による統計処理は困難である。ポーラステレオ投影変換画像の範囲なら、後述する雲解析図と併用することにより問題はかなり解決がつこう。

12. 2. 4 雲頂高度

雲頂高度を求めるスキームは赤外放射量から黒体としての温度を求め、雲の射出率を考慮して雲頂高度を求め、雲頂高度に相当する自由大気の高さまたは気圧に変換する。このスキームには下記のような問題点がある。

(a)雲の射出率 多種多様の雲はすべてが黒体とはみなせない。各種の雲の射出率は実験的に求められている数値はあるが、雲型が定まれば射出率は一義的に定まるものでもない。画像中の雲の射出率を限られた時間内に求めねばならないので、DPC では第 12・1 表に示すように、雲型と雲厚の組み合わせにより雲の射出率を指定している。雲型判断は、可視と赤外画像により可能となるが、夜間は赤外画像のみなので射出率の推定は一段と困難になる。第 12・1 表にみられるように、対流性の積乱雲のようなものは黒体とみなせるが、絹雲のように射出率の小さな雲で値に幅のあるものについては、厚いものはよいが薄いものは下層の雲や地球表面からの放射エネルギーが加わるので、この補正をしても誤差は大きくなろう。

(b)中間大気吸収効果 (特に水蒸気の分布状況の把握) 「大気の窓」といっても水蒸気による吸収がある。この 3 次元分布は複雑で GMS の視野内における実測も乏しい。即時処理を目標とする限り当面は気候学的可降水量を使用していく以外にはない。しかし、第 12・5 図で示したように積乱雲や絹雲系の雲の場合は影響がない

とみてよい。将来は TIROS-N による水蒸気分布観測値を導入するようになる。また、雲型と雲量分布 (雲解析図) により 1000~500 mb の平均相対湿度を推定する試みがあるが (McClain, 1966), GMS の資料で可降水量を求めて補正する手法も将来は開発されよう。

(c) 雲頂高度を高度または気圧に変換する問題 雲頂高度は自由大気温度に等しいとする仮定は、雲物理を専攻する人には容認し難いものと思われる。しかし、GMS で求めるものは瞬時視野内の雲の上面の平均化された温度であり、また、上記の (a) (b) の問題点を考慮する限りは誤差内の問題として取り上げられよう。

自由大気温度についても GMS の視野内での実測は乏しい。即時処理のために、月別、緯経度 5° ごとに鉛直温度分布の統計値を使用するが、著しい寒気団・暖気団におおわれている領域に対しては、機械的に統計値を使用せず、「気団指定」と称して適合する状態曲線を与えている。「気団指定」により雲頂高度 (高度) と自由大気温度 (高度) の差を $\pm 4^\circ\text{C}$ ($\pm 1000\text{ m}$) 以内に 97% の確率でおさえられる。将来は、TIROS-N の測定する鉛直温度分布資料または数値予報資料を導入するよう技術開発をする必要がある。

これら (a) (b) (c) の諸問題は静止気象衛星打ち上げ国のデータ処理センター共通の悩みといえよう。

なお、総観雲頂高度には切り出し領域約 $(100\text{ km})^2$ 内の画素のヒストグラム処理をしており、雲の上面におけるデコボコの状態の示数として標準偏差を与えているが、もっと適確に表現し得るものは何か、今後の技術開発による。局地雲頂高度は切り出し領域約 $(50\text{ km})^2$ 内の画素の最低温度を高度に変換している。

12. 2. 4 雲解析図

処理範囲は衛星仰角 30° 以上の北半球でポーラステレオ投影変換画像により解析し、観測時から約 4 時間後に気象無線模写通報 JMH で 1978 年 4 月 5 日から 1 日 4 回 (00, 06, 12, 18 z の解析) 通報されている。

内容は、総観規模の現象の解析を国際性・客観性・一貫性・連続性を保持して表現することを目標とするが、マニュアル作業のため、方程式系に基づき計算スキームに因る数値解析のように常時均質にはいかず、解析者の判断の入る余地はある。しかし、以下に述べる各種解析の総合からくるのでやむを得ない。

(a)写真解析 HR-FAX に基づく各種の雲画像を、平常時 3 時間ごと、異常気象時には毎時取得してそれぞれの特徴に応じた解析をする。

第 12・1 表 雲型と雲厚の組み合わせによる雲の射出率指定表

雲厚 \ 雲型	絹雲型	高層雲型	層雲型	積雲型
厚	0.8	0.9	1.0	1.0
並	—	0.7	0.8	0.9
薄	—	—	0.6	0.8

(b)マルチカラーデータ解析 HR-FAX は32階調の gray scale が入っているが、人間の目の識別能力は7～10階調といわれている。画像の濃淡を分割して偽似カラーで与えて強調表示し客観的に定量的に画像解析を行なう。強調表示されたパターンは、記録装置で保存し現象の変化の時系列解析にも用いる。例として、台風7711号(第12・10図口絵)をあげる。画面下にあるカラーバーで左の黒が高温で右にゆくにつれて低温を示している。gray scale で黒体温度 (T_{BB}) の幅が求まるので、gray scale とカラーバーを対応させておくと黒体温度の等値線が容易に求まり、台風周辺の雲分布の特徴およびその変化の把握が容易である。また、海面水温の例(第12・11図口絵)として、ボツ海、黄海、東シナ海で海面水温の差により5色で判定されており黒潮の高温域が黒で示されている。

また、赤外画像を緑の濃淡画像、可視画像を赤の濃淡画像として重ね合わせるにより、容易に雲型の識別を可能とし雲システムの鉛直構造を解析する。例として、台風7709号の場合(第12・12, 13図口絵)をあげる。可視・赤外画像を重ね合わせた図(第12・14図口絵)の、赤の部分は、可視で輝度が強く赤外で輝度が弱く高温(低層)の雲で、緑の部分は可視で輝度弱く赤外で輝度強く低温(高層)の薄い雲をあらわし、黄色の部分は両者の輝度が強くて厚い雲を示し、形状から対流雲と認められる。(第12・15図口絵)は、可視・赤外画像のある輝度レベル以上のもの(上段の輝度レベルで青になっている)が重合している部分を青で強調表示し強い対流雲域を示した。

(c)ループフィルム解析 スチールの画像(写真)では把握できない、または、把握し難い現象を人間の秀れたパターン認識を利用して動画により解析する。赤外の72, 36時間のループフィルムのほか、可視の6～12時間を作成し、雲域の移動により気象擾乱の移動を支配する強風軸や作用中心を識別し、大規模な流れの場の把握から、静止しているか動きの遅い物体(雪、海氷など)と雲の識別まで大小のスケールの現象が解析される。なお、1日2回(00, 12z)の雲移動ベクトルを求めるためのループフィルムは30分間隔4枚の画像によるので、この時間分解能を必要とする現象の解析のためにも有効である。

(d)雲頂高度解析 画像二次処理データとして出力された雲頂高度データを解析し、雲構造を把握する。雲解析図には雲構造を表現するのに適した雲頂高度を選択す

るが、その際に気象学的重要性とデータの代表性の検討とともに航空気象業務など利用者に対する配慮も行なう。

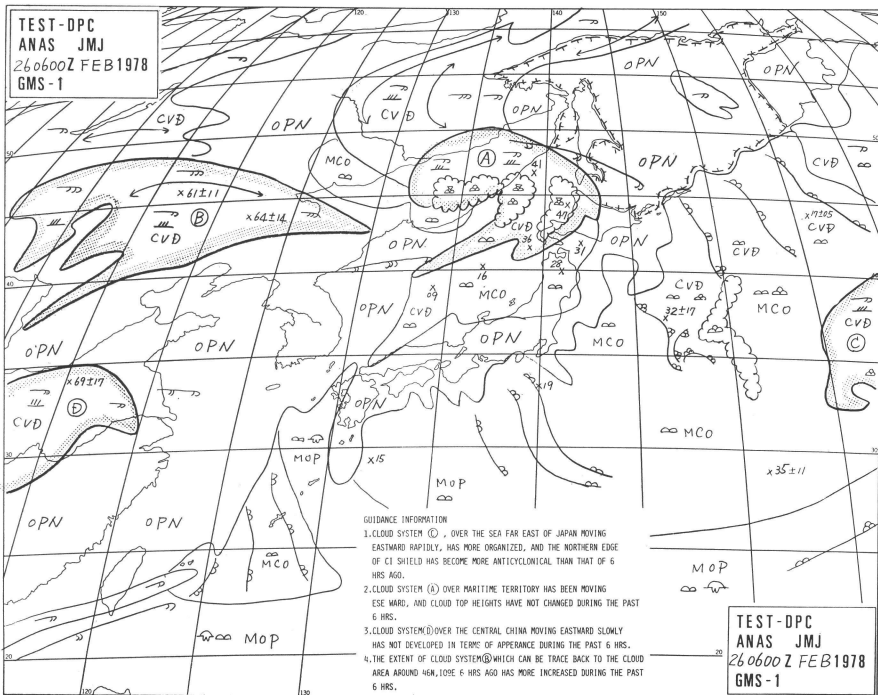
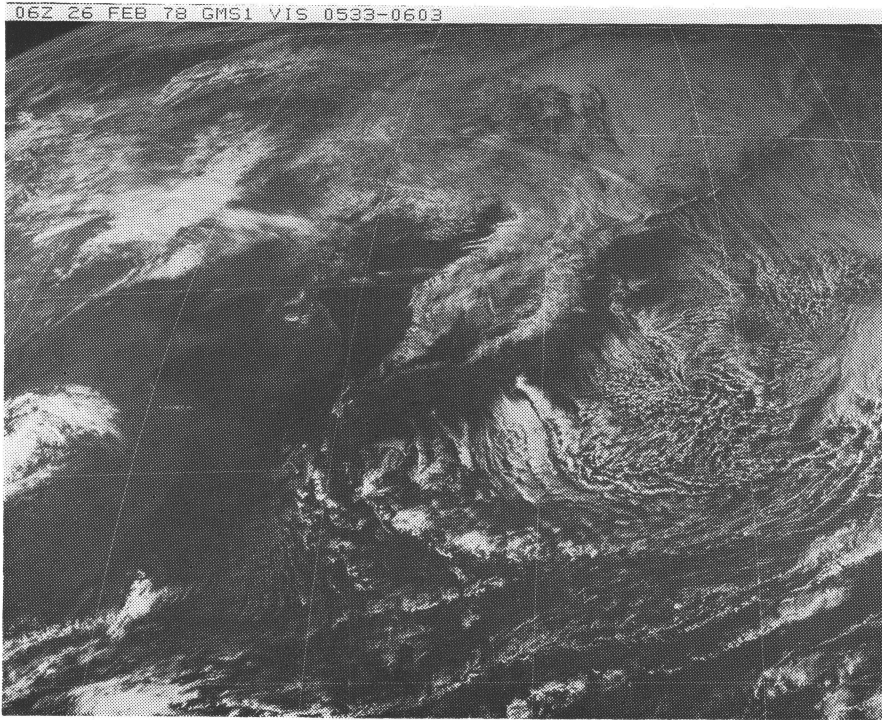
以上を総合して表現するには、第12・16図に示すように、数値、記号、輪郭線を使用するが、これらで不十分な点については平文(英文)でコメントを付している。

このプロダクトは、気象業務用のものとして考えられようが、画像(写真)を人間が目で見える限りは認識し得ない情報を要約したものといえる。TIROS, ESSA時代の雲解析図を利用して得られた研究(例えば、McClain, 1966; Barrett, 1973)もあり、日本でもアメダスやレーダ資料と総合させ、調査研究に供されよう。

13. 宇宙環境モニタ SEM の観測結果

SEM(宇宙環境モニタ)による観測項目は、第3・2表に示す通りである。観測される粒子フラックスは太陽フレアに伴うものであるため、太陽活動度を示す指数のひとつとして利用される。太陽活動と気象との関係についての研究で、従来から使われてきた太陽黒点数や K_p などの地磁気指数は、その定義から物理的意味があいまいであり、相関係数を論じる以外にその関係の物理的メカニズムにアプローチすることが困難であった。太陽フレアに伴う高速荷電粒子フラックスがこの問題をただちに解決するという訳にはいかないのはむろんだが、粒子種類・エネルギーが解っているだけに、必要に応じて量的な取り扱いが可能である。太陽活動度一太陽から出るあらゆる波長の電磁波、荷電および中性の粒子放射、太陽起源の惑星間空間磁場の向きや強さ等の平常値からの変動の大きさと、ここでは考える一を表わすパラメータとして、従来から使われてきた黒点数や地磁気指数に加えて、この粒子データも広く利用されることが可能である。

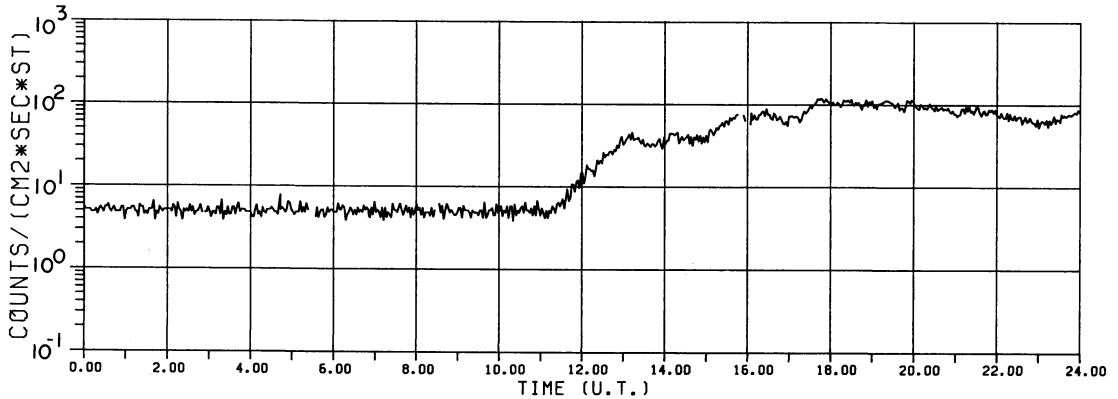
SEM データは、上に述べたように、調査・研究に使われるため、オンラインの即時処理の必要はない。データは、PCM テレメトリに入っているため、オンライン系テレメトリ集信プログラムにより蓄えられた1メジャーフレームのデータに、SEM ファイル 作製プログラムをアクセスし、SEM 関連データを抽出し、バックに書き込む。SEM ファイル(バック)はA系とB系に分かれており、OSM の指示により毎日交互に切り替えられる。切り替えられ、1日分のデータが書き込まれた SEM ファイルはパッチ系に渡され、SEM データ処理プログラムにより、SEM 専用累積 MT に吸い上げられる。



第12・16 図 雲解析図の例と雲画像 (1978年4月5日以降の本格運用では JMJ で通報し、ポーラーステレオ投影変換画像を用いる。数値は雲頂高度で土の数値が付いているものが総観、ないものが局地)。

GMS/SEM TWO-MIN. AVERAGE

P5: 34-80 MEV



1977. 9. 19. (262)

第 13・1 図 1977年 9 月におきたフレア時のデータの一例

この時、Q/D (Quality of Data) 情報により、同期ずれや回線障害等の bad データは、テレメトリからは入り得ない値 (256 以上) をつめる。このようにして、1 日ごとにその日のデータを累積・保管し、必要に応じてバッチ系で詳しい処理・解析が行なわれる。

昨年 (1977 年) 9 月に起きた大きなフレアに対する SEM データの一例を第 13・1 図に示す。

14. 結 言

GMS は、この 4 月中にスピン軸の傾きの修正を行なって正常な運用に入ることとなり、まだ十分の資料が入手できるまでに至っていない。特に、年間を通しての異なる季節のデータの蓄積があって初めて十分の解析が可能となるものと思われる。

GMS の寿命は第 3・1 表に示したように、次の衛星は 1981 年にわが国のロケット N-II により種ヶ島から打ち上げられる予定で、GMS のデータは中断することなく取得していく計画である。

文 献

Anderson, R.K. and N.F. Veltishchev, 1973: The Use of Satellites Pictures in Weather Analysis and Forecasting, WMO Technical Note, No. 124, pp. 275.

Anderson, R.K. *et al.*, 1974: Application of Meteorological Satellite Data in Analysis and Forecasting, ESSA Technical Report, NESC 51.

Barrett, E.C., 1973: Forecasting Daily Rainfall from Satellite Data, Mon. Wea. Rev., 101, 215-222.

Finger, F.G. and R.M. McInturff, 1975: Applications of Satellite Data to Aeronautical Meteorology, WMO Technical Note, No. 142, pp. 93.

Hasler, A.F., 1973: A Verification Experiment Comparing Cloud Motion Wind Estimates with Aircraft Winds, Les Satellites Météorologiques Colloque International, Paris, 21-24 mai 1973, pp. 59-63.

Hasler, A.F., W.E. Shenk and W.C. Skillman, 1977: Wind Estimates from Cloud Motions: Results from Phases I, II and III of an In Situ Aircraft Verification Experiment, J. Appl. Met., 16, 812-815.

神子, 岡林, 土屋, 渡辺, 1972: 気象衛星特集号 (II), 気象研究ノート, 113, pp. 180.

Kondratyev, K. YA., 1969: Radiation in the Atmosphere, Academic Press, pp. 912.

McClain, E.P., 1966: On the relation of satellite-viewed cloud conditions to vertically-integrated moisture field, Mon. Wea. Rev., 94, 509-514.

渡辺貫太郎, 1969: 表面水温における問題点 (総合報告), 海と空, 45, 99-122.