

気象衛星の現状と将来

(第23回 COSPAR 総会に出席して)

小平 信彦*

1. 緒言

去る6月始めにハンガリー・ブタペストで、第23回 COSPAR (Committee on Space Research) 総会が、また3月末に英国 Reading で気候問題に関する COSPAR 特別部会が開催されたので、気象衛星に関する事項を主に会議の様態を報告する。

COSPAR の総会は非常に広い分野のシンポジウムが並行して開かれ、この内、“Symposium on system performance and early results of the global observing system for FGGE” に出席した。1969年の COSPAR で JOC に対して衛星システムを提案してから凡そ10年後によく実現してきた FGGE の状況と結果を持寄って検討することが、今回の COSPAR の主な議題である。会議は、ICSU, WMO, IAMAP, IUGG と共催で Austria の Prof. M.J. Bolle が司会して6月4日から1週間開催された。

COSPAR の習慣として各セッションの座長は、単なる進行係でなく講演と討論を聞いてその論文のレフリーの役をする事になっている。これを知らず岸保教授が欠席され座長の代りをたのまれたとき、日本の気象学会のつもりで気軽に引受けたら、あとでその時の論文が廻ってきてレフリーをさせられたのに驚かされた。

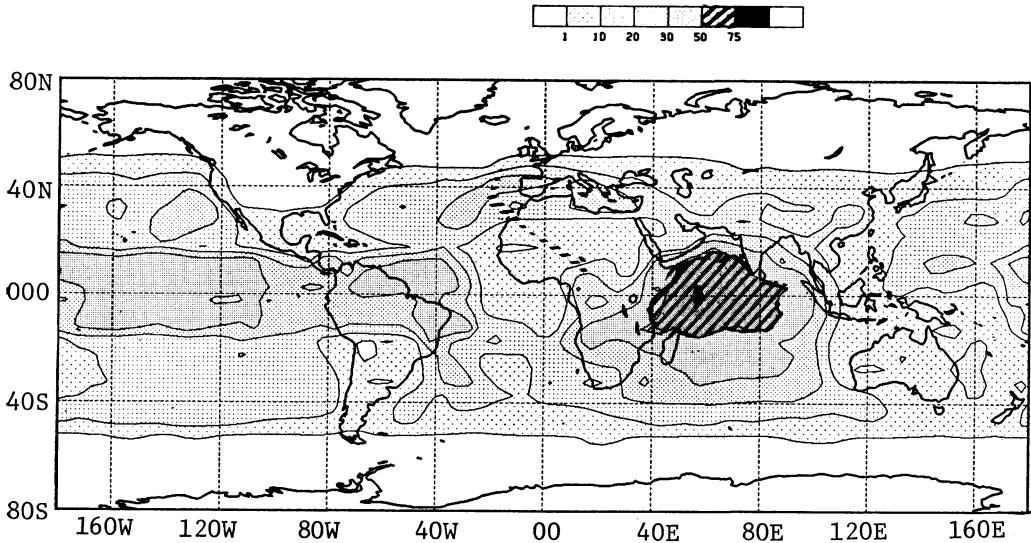
日本の GMS の FGGE に対する寄与は非常に高く評価されている。多くの研究成果が日本で発表されているにもかかわらず COSPAR を始めとして国際的研究集會に発表して討論する機会が非常に少ないが目立っ

た。最近では COSPAR も予算難で日本のような “developed country” に旅費を出す予猶はなくせいぜい帯在費位しか出してくれないのが現状である。

COSPAR の直前5月26日～30日の間にイタリアのベニスで “Oceanography from Space” というシンポジウムがありその概要が報告された。(SEASAT のセンサーについては第3表参照。)

- a) 海面温度の精度：衛星と同時に観測した船の値と比較した精度は平均値として 2.5°K 、研究的には 1.5°K 、ルーチン的には $2\sim 2.5^{\circ}\text{K}$ であるが、大気の測定を正確に行えば、 1°K の精度にする事も可能と考えられる。
- b) マイクロ波レーダ (SEASAT)：合成開口レーダ (SAR) で 25 m の精度が得られ波浪のパターン、海流の観測ができるようになったが、更に海洋の構造の測定が必要である。散乱計 (SASS) では海面の風が 2 m/s 、 25° の精度で求められるが、sea-truth との比較データが殆どない。
- c) 多波長マイクロ波放射計 (SMMR)：海上風について 2 m/s 、海面温度 2.5°K で観測できたが、マイクロ波の干渉が多い。
- d) 高度計 (ALT)：マイクロ波高度計で10秒間の平均をとると $\pm 8\text{ cm}$ の精度が得られ、メキシコ湾などでの海流の観測が実施された。衛星の軌道精度はこれ程よくないので相対的な値であるが、広域の海流の状況を見ることが出来る。
- e) 氷：氷の coverage の精度が従来の15%から2%

* Nobuhiko Kodaira, (財) リモートセンシング技術センター



第1図 衛星による風観測の平均数. 1979年1月26日より2月4日までの10日間の値. 1000 km² における1日の平均観測回数.

まで向上することが可能で、位置の精度は30 m程度となる。

これらの報告に対して NOAA の Dr. Smith から海面温度の精度は利用対象が、気象・気候・海洋で時間と空間の平均が違うので精度を一概に決めることはできないという意見が出された。

2. 静止気象衛星観測網

5本の静止気象衛星で全球をカバーして、1978年12月から1年間観測を行ったことは、明かに FGGE における主要な成果の一つであり、この衛星システムの第1の目的は全球的な雲移動ベクトルからの上層風観測である。

各衛星の風観測の結果は第1表に示す如く、平均して毎日5100の風ベクトルを観測している。1978年12月1日から1979年6月30日までの212日間の少くとも90%は1日2回、8%は1日1回の観測をしておりデータの無いのは僅か2%にすぎない。第1図は1979年1月26日から10日間における衛星による上層風の測定状況を示すもので、1000 km² の区域における1日の観測回数を示す。

各静止気象衛星の運用状況をまとめると次の如くなる(第2図)。

2.1. SMS 及び GOES

米国は現用の衛星を 135°W と 75°W とに配置し、こ

れらの予備の衛星をその中間 100°W 位に打上げ待期させる方針をとっている。第2図に示すように、かなり故障が発生し待期衛星との交替を行っている。1979年の初めに GOES-2 の VISSR が故障し SMS-1 と交替し引続いて SMS-2 と交替した。

SMS/GOES シリーズの故障の一つは、VISSR の走査鏡の玉軸受の潤滑材の固着に原因する走査範囲の縮小である。観測回数が多くなるに従って僅かずつ潤滑材が片方に固まってゆく現象で特に回転角の小さい軸受に発生する恐れのあることであるが、同じ型の GMS では観測回数が SMS の約1/3以下であるためその恐れは少ないとの NOAA の意見であった。GOES-2 以降および GMS-2 の VISSR にはこの対策として潤滑材を改善してあるのでその心配はない。

ソ連が打上げを予定していた印度洋の静止気象衛星は FGGE 期間には間に合わないことが明かになり急遽米国の待期衛星 GOES-1 を印度洋上空 60°E に移動して観測を行った。衛星の制御のため米国にあった予備の CDA 局の一部をスペインの NASA 宇宙基地へ運び ESA がデータの取得を行い、雲ベクトルの計算は米国ウィスコンシン大学 (SSEC)、フランスの気象研究所 (LMD)、ドイツの航空研究所 (DFVLR) でそれぞれ実施した。ルーチン的な雲画像の取得は行わなかった。

この GOES-1 は、1979年3月24日より赤外チャネル

	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
SMS-1	5/17	45°W 75°W		90°W		75°W			Back up for GOES-3								
SMS-2	2/6	135°W			110°W	75°W											
GOES-1		10/16	75°W		135°W	60°W	90°W										
GOES-2			6/16	75°W		90°W		WEFAX Only									
GOES-3				10/13	135°W												
GOES-D								75°W									
GOES-E								135°W									
GOES-F			VAS Experiment														
GOES-G																	
GOES-H																	
GMS			7/14		140°E				160°E								
GMS-2									140°E								
METEOSAT-1				11/3	0°												
METEOSAT-2									0°								
INSAT									74°E								



第2図 静止気象衛星の運用状況及び計画。各グラフの左端の数字は打上げ月日、運用開始はこれより若干遅れている。

に時々不具合が生ずるようになり夜間の観測が不可能となり風観測は1日1回となった。しかし FGGE の強化観測期間には 06 Z と 12 Z (地方時で 10h と 16h) の 2回を可視で観測した。

GOES シリーズの VISSR は GMS と同じ型でその故障は GMS 関係者の心配する処であるが、赤外の現用と予備が同時に故障している処から NOAA では VISSR 以降の通信系統の故障ではないかと考えられている。

2.2. Meteosat

ESA (European Space Agency) の打上げた Meteosat は、1979年11月25日突然電源関係の不具合から雲画像の観測が停止した。現在判明している原因は、電源電圧が低下した時回路を断とする保護回路の誤動作によるもので回復は不可能との事である。安全のために設けた回路が僅かの抵抗の故障から逆にシステムを破壊する結果に

なってしまったことは大変皮肉なことであると ESA の関係者は嘆いていた。

電源の故障までは Meteosat は致命的な問題はなかった。ただ、赤外検知器付近に水蒸気が凝結し、年2回程度加熱蒸発を必要としたことと、衛星表面に蓄積する電荷の放電に起因すると思われる異状指令がかかることがあった。

これらの不具合にもかかわらず観測中止はこの2年間0.5%以内であった。

2.3. GMS

GMS は打上げ後間もなく PMT が2個故障したのと、スピン軸の傾きが問題となったが、その後は大きな故障もなく、静止気象衛星網の中で最も安定した動作を続けている。

GMS の観測は FGGE 期間中1年間で約5100回、欠則は0.69%で、この間1時間間隔の台風臨時観測が259

第1表 静止気象衛星風ベクトル計算実施状況¹⁾

衛星	位置	風ベクトル 作成機関	風測定時刻 GMT	計算範囲		水平分解能	備考
				緯度	経度		
GOES-E	75°W	NESS SSEC	0, 12, 18 17	45°N~45°S 15°N~15°S	150°W~25°W 130°W~20°W	250 km 100~200 km	
GOES-W	135°W	NESS SSEC	0, 12, 18 21	45°N~45°S 15°N~15°S	175°W~85°W 170°W~90°W	250 km 100~200 km	
GMS	140°E	JMA	0, 12	50°N~50°S	90°E~170°W	500 km	日本は SST を作成
Meteosat	0°	ESA	12, 0	50°N~50°S	50°W~50°E	200 km	
GOES-I	60°E	SSEC	10, 22	55°N~55°S	5°E~115°E	250~500 km	IR 故障時は1回のみ
		SSEC	8.30, 20.45	35°N~20°S	30°E~110°E	200~300 km	1979.5.1~8.8
		LMD	16	30°N~35°S	30°E~90°E		1月17~18 2月1~10 5月16~6月30
		DFVLR	8.30, 20.30	20°N~20°S	30°E~110°E		1月5~3月5

註) NESS: National Environmental Satellite Service, NOAA, USA

SSEC: Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin, USA

JMA: 気象庁

ESA: European Space Agency

LMD: Laboratoire de Météorologie Dynamique, France

DFVLR: Deutsche Forschungs-und Versuchsanstalt für Luft-und Raumfahrt e.v, F.R.G.

回(内9回は南半球の台風)であった。

GMS は stretched VISSR システムを持っていないので SMS/GOES のように 30 分間隔の連続運用は実施せず、1日8回観測を標準として台風など severe storm のとき1時間間隔としている。

3. 気象衛星の将来計画

3.1. 米国

米国の静止気象衛星は1985年までは現在の GOES システムを継続し、75°Wと135°Wに現用の衛星を配置し、その中間100°W付近に予備衛星を待期させる方針である。またこの予備衛星を使って新しいシステムの試験、例えば静止軌道からの気温の測定を行う VAS(VISSR Atmospheric Sounder) の実用試験を行う計画がある。

今年の後半に打上げを予定している GOES-D は、打上げに成功すれば、既に4年以上経過している SMS-2 に直ちに交替しなければならない。GOES-F は D, E が成功すれば打上げを多少延期して1984年後半まで地上に保管することになるだろう。

現在は衛星の寿命が延びる傾向にあるので、GOES-G, H では放射計 VISSR も衛星バスと同等の5~7年の寿命に延長することを計画している。衛星の寿命に大きな関係を持っている燃料と衛星の静止位置の許容範囲をどこまで拡張するか、それによる利用局システムをどうするかなどの問題がある。

GOES-D, E, F の VAS は気温観測を頻繁に行うことの効果を試験するもので、画像の撮影と気温の測定は同時にはできないが、多波長の画像と気温の観測が Severe storm の監視にどのように役立つか知ることを目的としている。この結果が良ければ、両者が独立して観測できる次の世代のシステムに反映されることであろう。

3.2. Meteosat

Meteosat-2 は本年11月6日にヨーロッパのアリアンロケット LO3 で打上げられる計画であり、大きな期待がかけられている。Meteosat-1 がもし健在だったならばこの2つで立体観測を試みる予定であった。Meteosat-3 は予算が ESA から利用者である気象機関に移る話が

出て調整に難行しているとの事である。

3.3. GMS

GMS-2 は現用の GMS と殆ど同一の性能で、1981 年夏に種ヶ島より N-2 ロケットにより打上げられる予定で、成功したら運用の GMS を 160°E に移動し待期させ、GMS-2 を 140°E において現用する計画である。更に GMS-3 以降も引続いて打上げて GMS システムを継続してゆきたいと考えている。

3.4. INSAT

印度が計画している通信・放送・気象の多目的衛星 INSAT は、1981年1月に米国から打上げられ 74°E に位置する計画である。衛星は、3 軸安定方式で可視赤外放射計 VHRR は可視2.75 km, 赤外11 km の分解能を持っている。データ通信は 4 GHz 帯を使用する。大型の 3 軸安定方式の衛星からの画像観測、特に風ベクトルの精度がどこまで得られるか注目されている。

この精度が不十分の場合および現在のように衛星が欠如している場合の対策として、低緯度地方の風、海面温度、放射特性などの観測を行うため赤道をまわる低高度衛星を 2 個、±15° の傾斜角で打上げることの提案があったが、データ取得、衛星の制御、費用の分担などの問題があり実現までには長い日時を要するだろう。

4. 観測成果

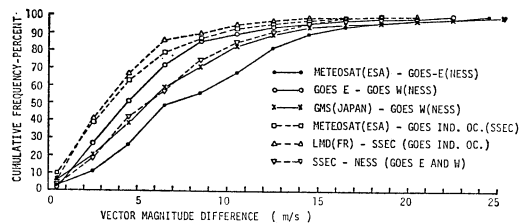
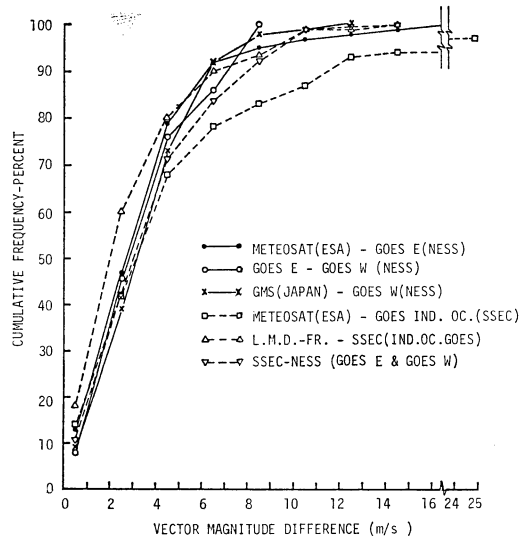
FGGE の大きな成果の一つが静止気象衛星網による雲ベクトルから風の全球的観測を実施した点であることは前に述べた通りであるが、FGGE の中で最大のミスも風ベクトルの高度推定方法を安易に考えた点である。ATS-1, 3 の可視画像から雲移動ベクトルを出し、大変よい上層風の観測方法と考えられたが、赤外を併用しても予想程の高さの精度は得られず、高度の決定からくる誤差が雲ベクトルの測定誤差より遙かに大きく、この点の解決が現在の最大の問題であるという点では皆の意見は一致した。

雲移動ベクトルの計算方法は各機関により異なるにもかかわらず、総てのデータの連続性は良好である。各機関において計算した風ベクトルの差の累積頻度は第 3 図の如く殆ど同じ傾向を示している²⁾。図は 1979 年 1 月 15 日から 2 月 13 日までのデータで、上層の方が差が大きい。

各機関で計算した雲移動ベクトルは統計的には 2 m/s 以内の差であるが、NESS の上層の風は 3 m/s をやや上廻る平均差を出している。

高度差については日本の風が上層下層共に 100 mb 程

1980年 9 月



第 3 図 異なる機関相互の重複した区域における風ベクトルの差の累積頻度分布。上) 下層 下) 上層。

高めにしている。これは雲高度の算出方法の差によるものと思われる。

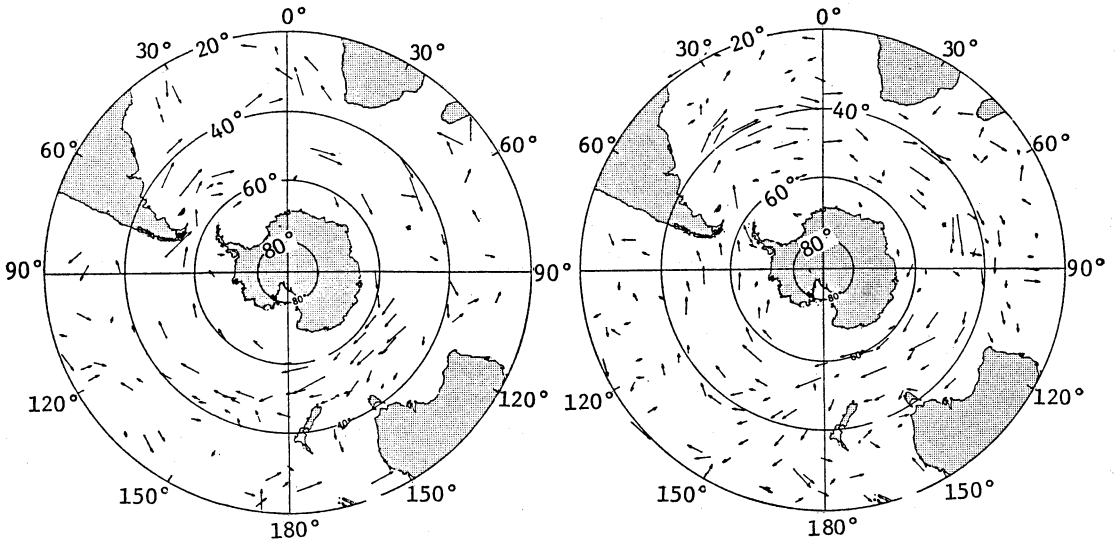
雲ベクトルの高度精度を検討するための方法として、GOES-E, GOES-W, GMS などの組合せで立体観測を行うことが考えられその成果が期待されているが、現業に用いるためには利用範囲が限られ、他の方法を考えねばならない。今のところ各高度の風を全球的に求める決め手はない。

気温測定については、極軌道衛星 NOAA シリーズにより実用化され、よい成果が得られている。気温測定の将来について、極軌道衛星か静止衛星かについて意見を求めた所、Wisconsin 大学の Suomi 教授は、任意の時間に必要な頻度で観測できる点で静止衛星を推せんし、測器の精度の面から距離が40倍、duty factor が20倍以上で合計 10³ の感度の低下を来す静止軌道からの観測は不適當というのが NOAA の Yates 等の意見であった。

第2表 FGGE における極軌道気象衛星の観測

衛星名	型式	打上月日	垂直気温	晴天放射	海面温度	海面風向風速	大気水蒸気量	成層圏気温	データ収集及び位置測定
NOAA-5	第2代極軌道気象衛星	1976. 7. 29	○	○	○				
SEASAT	海洋観測衛星*	1978. 6. 26							
TIROS-N	第3代極軌道気象衛星	1978.10.13	○	○	○		○		○
NIMBUS-7	実験用気象衛星	1978.10.24			○		○	○	
METEOR	実験用気象衛星(ソ連**)	1979. 1. 25	○	○	○				
NOAA-6***	第3代極軌道気象衛星	1979. 6. 27	○	○	○		○		○

* 1978.10.10 に衛星全体が故障
 ** 観測装置故障のため Level-II B set にはデータを期待できない
 *** TIROS-N と同じ型



第4図 浮遊ブイの1979年6月1日現在の位置および1ヵ月間の移動ベクトル。位置の測定およびデータの収集は TIROS-N の ARGOS による。

米国で実験計画が進められている VAS 計画はあくまでも研究目的で、画像観測を中断する必要があるので、ルーチン観測には使う予定はないとの事であった。

5. 極軌道衛星

FGGE に参加した極軌道気象衛星は TIROS-N が主役を演じたが、この他、NOAA-5, NOAA-6, NIMBUS-7, METEOR, SEASAT などで第2表のような観測を

実施した¹⁾。

TIROS-N と NOAA-6 による ARGOS (浮遊ブイや気球の位置の測定と観測データの収集を行うシステム) は、特に南半球のデータの少ない地域で大きな偉力を発揮した。第4図は、FGGE 期間におけるブイ観測点の位置と1ヶ月の海流ベクトルを示すものである³⁾。

SEASAT はレーダを搭載した海洋観測衛星で、1978年6月28日に打上げられてから10月10日故障するまで僅かの観測期間であったが、貴重なデータを送ってきている。主な観測装置は第3表に示す SAR (合成開口レーダ), scatterometer (散乱計), altimeter (高度計), SMMR (多波長放射計), VIHRR (可視赤外放射計) である。

マイクロ波が雲を通してその下を見ることができる点で可視赤外センサーに対して優れているが、波長が長いため分解能が悪い欠点があったが、SAR では可視より高い10~20m という高分解能が得られる点で大きな関心をよせられている。

SAR は地形の観測には大きな偉力を発揮したが、逆に地形により反射強度が異り目標の識別を困難にする反面があり、また、波長、偏波面と反射強度の関係、非常に大きい情報量 (SEASAT の例: 10^{11} bit/s) の高速処理技術、伝送システム、記録システム、大きい消費電力の対策など未解決の問題も多い。

SAR は反射波の位相の変化即ちドップラ速度に注目して高分解能を得るものであるから、雨滴のように風速と落下速度を持つ目標に対してはドップラ速度にバイアスが加わり、また地表面反射と重なると降雨反射は小さいので検出できない。降雨域の観測にはある程度の制約がある。

SEASAT の結果をふまえて NOAA と NASA では、実用衛星として少くとも5年の寿命を持つ NOSS (National Ocean Satellite System) を1986年頃に2個打上げる計画を持っている。しかし、SAR はデータ処理など未解決の問題が多いので搭載を中止したことは大変残念である。NOSS には、マイクロ波散乱計、高度計、海洋カラー観測、大型アンテナ (4.04 mφ) マイクロ波多周波放射計などが搭載される。

6. 将来の問題

各衛星の将来計画については前述の通りであるが、1990年代の長期的な技術動向は今後の衛星システム並びに気候問題を考えてゆく上で重要である。主な項目をあげると、

1) 風

雲ベクトルからの上層風の測定は立体観測により精度を向上させるが、対流圏から下部成層圏に至る総ての高度の風を全球的に測定する唯一の方法は $9.1 \mu\text{m}$ の

第3表 SEASAT 搭載電波センサーの特性

	SAR	ALT	SASS	SMMR
周波数 GHz	1.2748	13.5	14.595	6.6, 10.7, 18, 21, 37
波長 cm	23.5	2.2	2.1	—
アンテナ m	11×2.3	1 mφ		79 cmφ
ビーム幅	1°×6°	1.5°	25°×0.5° 4本	I FOV (km)
観測地域幅	100 km	1.6~12 km	500 km×2	121×79, 74×49
データレート	15 Mb/s	10 Kb/s	2 Kb/s	44×29, 39×25
出力ピーク	800 W	2.5 KW	125 W	21×14
パルス繰返	1700 Hz	1500 Hz	38 Hz	観測温度範囲
実効パルス幅	57 ns	3.125 ns	—	10~330°K
消費電力	600 W	150 W	140 W	精度<1.0°K
重量	220 kg	70 kg	60 kg	60 W
分解能	25 m×25 m	10 cm	50 km×50 km	50 kg

SAR: Synthetic Aperture Radar

ALT: Altimeter

SASS: Scatterometer

SMMR: Scanning Multichannel Microwave Radiometer

Doppler Lidar であろう。問題は発振管の寿命が短いことなどの技術的制約である。

また、太陽反射光の吸収線のドップラ偏移を Lim-scan 方式で観測し、高度 5~70 km の風を 2~5 km の垂直分解能、200 km の水平分解能で 3~5 m/s の精度で測定することも考えられている。

2) 海面気圧

60 GHz 帯のレーダにより海面反射の O₂ の吸収から O₂ の分圧を一定として海面気圧を ±2 mb の精度で測定可能であり、航空機による実験を始める所である。但し降雨域は除外しなければならない。

3) 降雨域

気候の問題としては降雨強度よりもむしろ平均した総水量が必要であるが、極軌道衛星による 1 日数回の観測では積算の代表性に問題が残されている。1970年代には Passive Microwave 放射計 (NIMBUS-5 の ESMR) により ±25% の精度で 10 mm/hr 以下の降雨測定を海上に限り成功している。しかし、陸域の降雨並びに強い降雨に対しては気象レーダを搭載するのが唯一の方法と考えられている。この場合複数の波長を用い、1 cm 付近の 2 波長の減衰の差から降雨強度を求めるのが誤差を少くする方法である。

これらを総合して、将来は 3 軸安定の大型衛星を用い、十分な電力と大型アンテナ並びに大型放射計により分解

能を向上させることが可能であり、高緯度地方向を除いては静止衛星に搭載された複数個のセンサーにより種々の現象を同時に別々に観測して現象の把握を的確に実施できるようになり、低高度の衛星では両極地方の観測と active sensor に主力が注がれるようになるだろう。

これらのミッションの達成には広帯域のデータ伝送と、高速のデータ処理が必要となり、特に極軌道衛星では現在のようにテープレコーダを搭載して CDA 局から見通しのない地域のデータを収集するか、衛星中継でデータを収集するかを選択をせまられている。

衛星システムは計画から実施までに 10 年近い年月を要することを考慮すると、1980 年代の終りから 1990 年代にかけてのわが国の気象衛星のあり方を今から議論しても決して早すぎることはないだろう。

文 献

- 1) Rasmussen, J.L., 1980: FGGE operations and data management, COSPAR XXIII, 資料 No. 4.5.1.
- 2) Mosher, F.R., 1980: The comparison of cloud tracked winds from the United States, European and Japanese Geostationary Satellites, COSPAR XIII, 資料 No. 4.4.5.
- 3) Zillman, J.W., 1980: Impact of FGGE Buoy system data on southern hemisphere meteorology, COSPAR XXIII, 資料 No. 4.6.1.