



天 気

1987年2月

Vol. 34, No. 2

5013 (放射計)

米国・欧州における静止気象衛星搭載用放射計について*

内山 明 博・操 野 年 之**

1. 序

1960年4月に TIROS-1号が打ち上げられ、搭載されたビデオカメラと放射計によって観測が開始されて以来、多くの気象衛星が打ち上げられてきた。気象衛星による観測も他の観測と同様に定量的な解析に耐えうる高精度のデータ取得を目標としている。その目的達成のため気象衛星に搭載される測器は、高空間分解能、高波数分解能、多チャンネル、高頻度観測の方向で改良、機能の追加が行われている。1970年代以降は、極軌道気象衛星からのサウンディング、イメージングにマイクロ波が使用され始めた。マイクロ波の利用においては受動型の測器のみならず、合成開口レーダー (SAR)、マイクロ波高度計 (Altimeter)、散乱計 (Scatterometer) などの能動型の測器も開発されてきている。

気象衛星は従来の「点の観測」から連続した空間的広がりのある観測を可能にし、かつ短時間に広範囲にわたって均質なデータの取得を可能にした。この特徴のため衛星のデータの利用は今後ますます増大すると思われる。そして気象衛星による観測は、現在の画像を主体とした定性的なものから、定量的で質の高い観測も重要になってきている。

現在、1990年代から2000年代初頭における次世代の静止気象衛星計画が米国・欧州で具体化されつつある。「天気」の誌上では、これらの計画に述べられている放

射計について簡単に紹介する。さらに、なぜ米国の GOES-NEXT のような静止気象衛星が計画されているかについての理解を助けるため、気象衛星による観測について現在どのように考えられているかを簡単にまとめた。

2. 気象衛星による観測

大気-地球系の観測の場合の観測項目の例としては、

風向・風速、温度分布、大気成分 (水蒸気、オゾン等)、エアロゾル、降水量、雲量、雲水量、表面温度、雪氷の量・分布、土壤水分、放射収支

などがある。気象衛星でも、これらの要素について可能な限り観測することが要請されている。

衛星による観測は、基本的には観測対象媒体の光学的性質の違いを利用して行われる。すなわち、媒体の放射特性に依存する種々の波長の電磁波を測定することによって観測対象媒体の状態を推定するという方法で行われる。気象衛星による観測も含め、どのような観測に対しても要求されることは、観測対象を十分に記述するのに必要な精度、頻度、空間分解能で測定することである。上記の観測項目をこのような要求を満たしながら気象衛星から測定するには、観測対象に応じて、それぞれ適当な波長域の選択がなされなければならない。

一般に、気象衛星からの観測は以下に述べるサウンディングとイメージングと呼ばれるものに分けられている。

2.1 サウンディング

多波長の観測から大気・雲・地球表面の状態を推定

* Radiometer on Geostationary Meteorological Satellite (GOES-NEXT, METEOSAT)

** Akihiro Uchiyama, Toshiyuki Kurino 気象衛星センター

し、大気-地球系の立体構造についての定量的な情報を得ることをサウンディングと呼んでいる。イメージングが観望望気に対応するものなら、サウンディングは高層観測に対応するものである。気象衛星によるサウンディングは従来の高層観測にある地理的分布・観測頻度の制約等を受けないので、大気科学・天気予報の発展に大きく寄与してきた。サウンディングの技術自体は、1960年以來開発・改良が行われている。現在、極軌道気象衛星においては、全球で鉛直温度・水蒸気分布が約6時間ごとに250 km×250 kmに1個の割合で取得されている。静止気象衛星からはメソスケールの時間・空間スケールの観測を目的に、GOES-VAS (VISSR Atmospheric Sounder) において1986年から米国で行われている。(例えば、台風の進路予測のためのデータ取得; Vetden 他, 1984)

2.2 イメージング

他方、上向き放射の観測値を画像として表示し「可視化」することをイメージングと呼んでいる。現在、イメージングのための波長域として気象衛星では「大気の窓」(大気の影響をあまり受けない波長域; 例えば可視では0.5 μm 付近, 赤外では11 μm 付近) が選ばれていることが多い。大気の窓の波長によるイメージングでは、大気中で起こる凝結過程の結果生じる雲の形・分布を2次的に観測することによって、何が起きているかを解釈することになり、これだけでは主観的かつ定性的になりがちである。

近年は、より多くの気象情報を読み取るために多チャンネルのイメージングが一般化している。ある意味で多チャンネルのイメージングデータの利用はサウンディングを志向していると考えられることができる。すなわち、2～3個の少ないチャンネルの組合せで、観測したい要素のデータの抽出を目指していることになるからである。しかし、チャンネルの数が少ないときには必ずしも十分な精度は得られない。米国の極軌道気象衛星TIROS-N/NOAA 衛星に搭載された AVHRR の赤外チャンネルのうち2～3個のチャンネルを使って月平均の海面水温が精度よく推定されているが、水蒸気が多いときやエアロゾルが急に増えたときには精度が悪くなる。(Strong and McClain, 1984)

3. 静止気象衛星と極軌道衛星

静止気象衛星と極軌道気象衛星は、それぞれ特徴があり、相互に補って地球を観測している。気象衛星による

大気-地球系全体の観測のためには、最低限2つの極軌道衛星と4～5個の静止衛星の体制を維持していく必要があると考えられている。現在、静止気象衛星としてはGMS-3のほかGOES-6, METEOSAT-2, INSAT-1B, が運用されている。通常、米国は2つの静止衛星を運用しているが、1986年現在1つは故障中である。極軌道気象衛星としてはTRIOS-N/NOAA シリーズの衛星2個が一般に利用されている。他にMeteor(ソ連)がある。

3.1 極軌道気象衛星

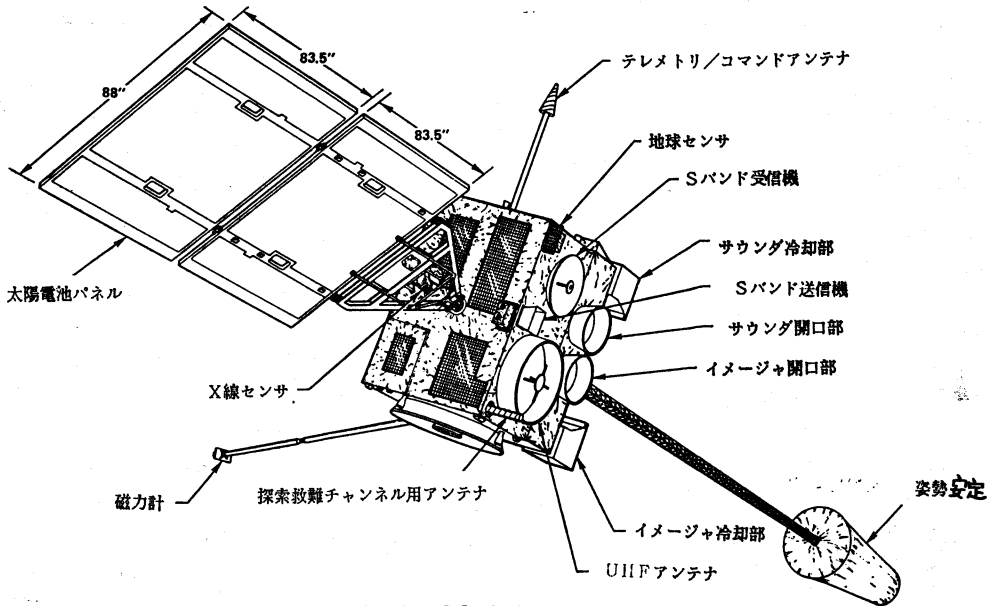
極軌道気象衛星は、同一の測器で全球の観測を行うことが目的の衛星であり、静止気象衛星では観測できない高緯度地域の観測も可能である。すなわち、時間的・空間的に大きなスケールの現象の観測に適している。しかし、極軌道気象衛星は太陽同期衛星(地方時の同じ時刻に赤道上を通過する)であるので、1個の衛星では同じ場所の観測は12時間おきにしかできない。よって、観測時間間隔より短い時間スケールを持った現象、例えばメソスケールの現象(空間スケールで10 km～2000 km, 時間スケールで10分～1日)および日変化を伴う現象の観測には制限を受けることになる。極軌道衛星の数を増やすことによって観測頻度を上げることができるが、30分間隔で観測を行うには、20個程度必要で現実的ではない。

3.2 静止気象衛星

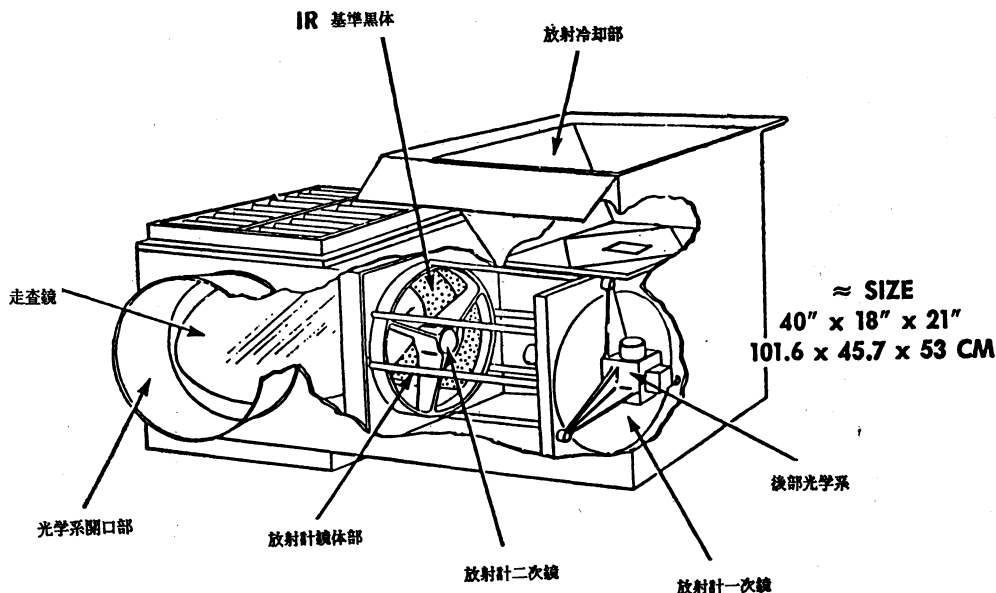
静止気象衛星は、観測領域は限定されるが高頻度の観測が可能である。このため、時間的・空間的にメソスケールの現象、日変化を伴う現象の観測には不可欠である。現在の日本での静止気象衛星データの利用は、画像データが主とされているため、静止気象衛星という画像(イメージング)衛星という考えが定着してしまっているようであるが、上記のようなメソスケールの現象の定量的な解析にはサウンディングによるデータ取得が必要である。静止気象衛星は、極軌道気象衛星に比べて地球から遠くにある(幾何学的距離が遠い)ため、現時点では空間分解能が劣る。しかし、極軌道気象衛星の軌道と静止気象衛星の軌道の間には、途中で地球からの放射を妨げるものがない(光学的距離が同じ)ので、衛星直下点での瞬時視野が同じであれば、同じ情報が得られる。静止気象衛星で問題となる空間分解能も、幾何学的距離が遠くなることによるエネルギーの減衰(S/N比の劣下)をドウェルタイム(同一視野を観測している時間)を長く取ることにより克服できる。逆に、極軌道気

第1表 現行と次世代の GOES の比較

	現 行	次世代
イメージング		
チャンネル数	2 (運用) 3 (プロトタイプ運用)	5 (運用)
観測波長帯(μm)		
可視	0.55—0.75	0.55—0.75
熱赤外	9.7—12.8	10.2—11.2
熱赤外	12.3—13.0	11.5—12.5
THERMAL WINDOW	3.8— 4.0	SAME
IR WATER VAPOR	6.5— 7.0	SAME
空間分解能 (km)		
可視	1	1
熱赤外	8	4
熱赤外	8	4
THERMAL WINDOW	8	4
IR WATER VAPOR	8	8
撮像時間		
全球	20分	20分
3000KM×3000KM	5分 (3CH)	3.1分 (5CH)
サウンディング		
チャンネル数	12	19
空間分解能	14km	8km
観測時間		
50度 (緯度)	5時間	3時間
3000KM×3000KM	2.5時間	40分
運用	画像取得と時分割	画像とは別の測器



第1図 GOES-NEXTの外観



チャンネル	波長帯	等価雑音(S/N)	検出部材質	幾何学的瞬時視野角
可視	0.55—0.75	500:1	Silicon	1km
赤外短波	3.80—4.00	0.07K	InSb	4km
赤外中波	6.50—7.00	0.20K	HgCdTe	8km
赤外 1	10.2—11.2	0.08K	HgCdTe	4km
赤外 2	11.5—12.5	0.10K	HgCdTe	4km
チャンネル間アライメント		14マイクロラジアン (0.5km)		
放射計キャリブレーション		宇宙空間及び290K IR黒体		
信号量子化		10 bits		

第2図 イメージング用放射計と特性

象衛星は、場所を移動して観測するので同じ視野を長く観測するのに限界があるのに対し、同じ場所を続けて観測できるのは静止気象衛星の長所である。

4. 米国・欧州で計画されている静止気象衛星

米国および欧州宇宙機関 (ESA) で計画されている次世代の静止気象衛星の放射計に関するところだけ簡単に紹介する。米国の静止気象衛星 GOES の将来衛星 GOES-NXET (I. J. K/L. M) については、放射計の仕様が発表されている (Schwalb, 1985), ESA の METEOSAT-NEXT については、第13回静止気象衛星調整会議 (1984年4月ジュネーブで開催) で示された計画をもとに紹介する。

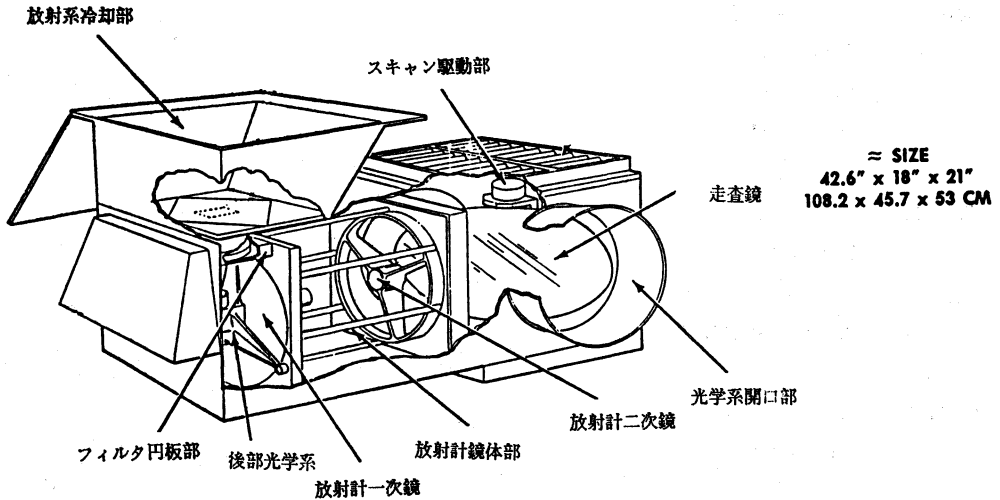
4.1 GOES-NEXT (I.J.K/L.M)

現行の GOES と GOES-NEXT の比較をまとめたも

のを第1表 (Schwalb, 1985) に示した。GOES-NEXT の外観は第1図 (Schwalb, 1985) のようなものである。この衛星の大きな特徴は、三軸安定衛星であること、サウンディング用放射計 (サウンダー) と画像取得用放射計 (イメージャー) が独立していることである。サウンダーとイメージャーは左右対称の関係になっており、センサー部を除いて同じ構造である。サウンダーもイメージャーも光学軸の方向は特定の星を観測することによって決定、較正する。

4.1.1 イメージャー

イメージャーのセンサーと、その主な特性を第2図 (Schwalb, 1985) に示した。赤外較正用の基準黒体は放射計内の光路の外側にあり、地球を観測するのとはほぼ同じ条件で基準黒体を見ることができ、赤外センサーの正確な較正ができる。現行の GMS や GOES では基準黒

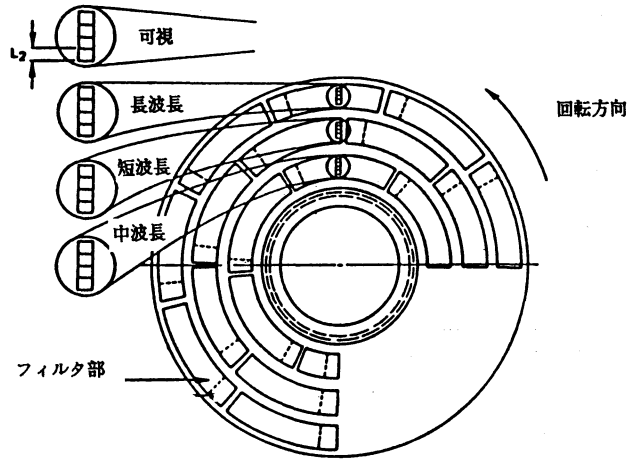


チャンネル	気象学的目的	中心波数 (cm^{-1})	最大輝度温度 (K)	等価雑音 ($\text{mW}/\text{m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$)
1	温度 サウンディング	679.0	255.0	0.19
2		691.0	255.0	0.16
3		700.0	265.0	0.18
4		710.0	278.0	0.17
5		735.0	288.0	0.13
6		748.8	300.0	0.11
7	表面温度/雲検出	832.0	330.0	0.04
8	総オゾン量	907.0	335.0	0.023
9		1035.0	300.0	0.024
10		1225.0	315.0	0.013
11	水蒸気 サウンディング	1365.0	290.0	0.024
12		1467.0	270.0	0.012
13		2190.0	305.0	0.0012
14	温度 サウンディング	2213.0	300.0	0.00122
15		2240.0	275.0	0.0013
16		2275.0	265.0	0.00094
17	表面温度/雲検出	2520.0	340.0	0.00034
18	雲検出	2671.0	340.0	0.00040
19		14367.0	—	0.03% A

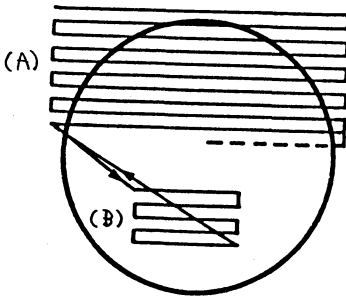
放射計鏡体開口部	直径 30.5 cm
視野サンプリング	E-W 方向10 km 毎に N-S 方向4 視野(第4 図参照)
放射計フィルタ	干渉フィルタ
放射計キャリブレーション	宇宙空間および290K 赤外黒体
幾何学的瞬時視野角	215 μrad
走査鏡ステップ角	280 μrad (直下点: 110 km)
走査鏡ステップ/ドウェル時間	0.1秒
走査能力	地球全球および宇宙空間
サウンディング範囲	60°N-S および 60°E-W の範囲の10 km x 40km の領域
信号量子化	12 bits (全チャンネル共通)
出力データ伝送率	29920 bps

第3図 サウンディング用放射計と特性 (Schwalb, 1985)

- 赤外長波長 11.6 μm - 14.9 μm
7 チャンネル
4 検出器
242 μrad 瞬時視野角
- 赤外中波長 6.3 μm - 11.4 μm
5 チャンネル
4 検出器
242 μrad 瞬時視野角
- 赤外短波長 3.6 μm - 4.6 μm
6 チャンネル
4 検出器
242 μrad 瞬時視野角
- 可視波長 0.67 μm
1 チャンネル
4 エレメント列
242 μrad 瞬時視野角



第4図 フィルター部の配置と特性



- (1) 通常の画像取得モード(A)を中断する。
- (2) 特別設定フレーム(B)へ移る。
- (3) 特別設定フレーム(B)を遂行および繰り返す。
- (4) 中断した通常の画像取得モード(A)の最後にもどる。
- (5) 通常の画像取得モード(A)を続ける

第5図 特別設定フレームによるデータの取得方法

体が放射計の後部光学系側にあるため、開口から放射計内光路の温度傾度などの影響のため、その補正が必要である。

4.1.2 サウンダー

サウンダーの構造と特性を第3図 (Schwalb, 1985) に示した。全部で19チャンネル (赤外18チャンネル、可視1チャンネル) あり、センサーの前に置かれた円板状フィルタを75ミリ秒で1回転させて各チャンネルのデータを取得する。(第4図(Schwalb, 1985) 参照)。放射計の較正のため宇宙空間と基準黒体を一定時間ごとに見るようになっている。

4.1.3 観測方法

現行のスピ安定衛星と違って三軸安定衛星であるので、観測領域は任意に指定することができる。一例を示すと第5図 (Schwalb, 1985) のように正規のデータ取得モード(A)で観測中に割り込んで任意に指定した領域(B)を特別に観測できる。観測時間はイメージャーの場合、全球観測で30分(3000 km \times 3000 km で 3.1分)である。サウンダーの場合、メソスケールの現象の解析

に十分な3000 km×3000 kmの領域で40分(1000 km×1000 kmで4.5分)である。現在のGOESに搭載されているVASに比べると瞬時視野(IFOV)の大きさが、直下点で14 kmから8 km、チャンネル数が12個から19個に高機能化されているにもかかわらず、観測時間が大幅に短縮されている。また、サウンディングのデータ量は、上記の観測(イメージングは全球、サウンディングは3000 km×3000 km)を行った場合でも、イメージングのデータ量の数%程度である。

4.1.4 まとめ

GOES-NEXTの放射計は、イメージャーについてはINSATのVery High Resolution Radiometer(VHRR)とTIROS-N/NOAAのAdvanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR)を発展させたものである。サウンダーの方はTIROS-N/NOAAのHIRS/2を発展させたものである。イメージャーの赤外チャンネルの瞬時視野の大きさがAVHRRより大きい点を除いて、静止軌道上から現在TIROS-N/NOAA衛星で行っている観測と同程度、あるいはそれ以上の観測ができると考えればよい。

さらに将来は、雲が多いところでもサウンディングができるように、受動型のマイクロ波放射計の搭載を考えている。(直径4.4 mのアンテナを使って、瞬時視野30~40 kmで観測を行う提案がなされている)。

4.2 METEOSAT-NEXT

METEOSAT-NEXTは、1995年以降に打上げを予定しているESA衛星で、第13回静止衛星調整会議で示されたものである。

その概要は、衛星に搭載する装置の開発レベルを以下の4つに設定している。

- (a) minimum payload
- (b) baseline payload
- (c) advanced payload
- (d) extended payload

(a)では可視のチャンネルの瞬時視野を2.5 km、部分観測のとき1 kmにする以外は現行と同じである。

(b)の段階では

- 大気のスウンディング用にASRという15チャンネルからなるサウンディング用放射計を搭載する。
- 可視/近赤外を2つに分割する(0.4~0.7 μ m/0.7~1.1 μ m)。
- 可視/近赤外の観測を部分観測のとき1 kmの空間分解能で行う。

- 熱赤外のチャンネルを2つに分割する(10.5~11.5 μ m/11.5~12.5 μ m)。

- 雲と雪の判別のため1.5~1.7 μ mのチャンネルを追加する。

- 赤外、水蒸気、1.6 μ mチャンネルの空間分解能を4 kmとする。

などが考えられている。

(c)の段階では、(b)に加えて

- マイクロ波サウンディング放射計を搭載する。
- 熱赤外のチャンネルを部分観測のとき2 kmの空間分解能で行う。
- 3.7 μ m窓チャンネルを追加する。
- ASRを20チャンネルとする。

などが考えられている。

(d)の段階では、気候又は大気組成の観測用に使える機能を持つ測器とマイクロ波を利用する測器の搭載を考えている。

もちろん、1995年以降の衛星は、最低でも(b)の機能を持ったものになると思われるし、(c)の一部も加えられる可能性が大きい。基本的に、現行のGOES-VASよりも優れたものを計画している。

5. あとがき

静止気象衛星というとGMSのような画像(イメージング)衛星をすぐ考えてしまうが、現実には上で述べたような衛星に近い将来具体化される形勢にある。

近年の急進的な大気科学の発展により、実用的な面でも科学的な面でも定量的なデータがますます必要になってきている。従来のように総観気象の立場のみの画像解析では、大気-地球系の観測に対する要求を満たすことができないのが現状である。

我々は、現在、地球全体を丸ごと観測できる時代にいる。上述のような静止気象衛星は夢物語ではなく、今世紀内に実現するものである。静止気象衛星4~5個による全球の観測体制の維持が望まれている中で、GMSの観測域でも他の衛星とデータの均一性を保つ意味で、歩調を合わせた観測を今後検討する必要がある。

謝辞

この解説資料をまとめるにあたり、有益な助言をいただいた気象衛星センター村山信彦所長に感謝します。

文献

Schwalb, A., 1985: GOES-NEXT Overview, EN-

VIROSAT-2000 Report, NOAA/NESDIS, Washington D.C. 38 pp.
 Smith, W.L., G.A.M. Kelly, 1985: Use of Satellite Imagery and Soundings in Mesoscale Analysis and Forecasting *ESA Journal*, 85/2, 115-124.
 Strong, A.E. and E.P., McClain, 1984; Improved Ocean Surface Temperature from Space-Comparisons with Drifting Buoys, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65, 138-142.

Velden, C.S., W.L. Smith, M. Mayfield, 1984: Application of VAS and TOVS to Tropical Cyclones, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65, 1059-1067.
 WMO, 1984; FINAL REPORT ON THE THIRTEENTH MEETING OF COORDINATION OF GEOSTATIONARY METEOROLOGICAL SATELLITES, 10-13, April, 1984.

素顔 '87

(1)



新たなリーダー J.M. Wallace

全米の中でも一、二を争う Washington 大学の気象学教室を支えている J.M. Wallace に聞いてみました。

問：まず学生時代の事を教えて下さい。

—1962年に、船舶工学（船の設計）を卒業し、MIT に移った。

問：何故、気象学を選んだのですか？

—子供の時から、天気に興味があったのだが、1958年当時には、気象学には職がなかった。そこで、船舶工学に入った。ところが、1960年に、気象学の職が大幅に拡大したために、大学院では、気象学にコースを替えた。

問：その時の adviser は誰でしたか？

—最初は、V. Starr だったが、Newell にも大変世話になった。その頃、Faculty としては、N.A. Phillips や、Sanders、彼には、Synoptic Meteorology を習いました。それから、J. Charney もいた。同級生には、Dickinson、Gillman、Godd 達がいて、今でも親しく

している。その他、Ogura や、T. Murakami も来ていた。少しあとには、Obasi や、Oort も来ていた。多くの visitor にも恵まれていた。

問：あなたの研究の中で最も誇るべきものは何ですか？
 —今は、どの研究の寿命もそれ程長くはないが、その中でも、teleconnection に関するものは life work と云って良い。

問：気象学のどんなところに興味がありますか？

—Teleconnection. それと、大規模スケールの大気—海洋相互作用。それに、数値予報と長期予報、更に、5—10年程度の気候変動に興味がある。

問：日本の気象学に対してどんな印象を持っていますか？

—非常にすぐれた仕事をしている。Prof. Matsuno を始め、若い人も含めて世界の一流だと思う。もし、日本の政府が米国の政府が我々にしているのと同じ程度に援助すれば、米国と同じ様な成果が出て来るだろう。現状は、余りにも post が少ない。事情は、英国も同じだ。

問：今後、どんな事をなすべきだと思いますか？

—数値予報に関連したこと。当面は、数日を目標にし、その後は、メソ・スケールと長い期間（延長予報、及び、気候の問題）をする必要がある。それと、世界的な環境（地球化学や生物学的なことも含めて）問題もする必要がある。

問：若い人達について何か云いたい事は？

—最近の米国では、若く優秀な人が、他の分野（business など）に流れてしまい、気象学や他の科学の分野に入って来ない傾向にあり、若干、問題だと思っている。

教室主任という多忙なスケジュールの中、時間をさいて快く interview に応じてくれた。同様に、多忙の中でも、研究を続けていることなど感心することが多い。

分かり易く、ゆっくりと話してくれる、親日家の J.M. Wallace の今後の活躍を祈念して、第一回を終了することにする。

(住 明正)