

1. 衛星観測による中層大気力学の発展

廣 田 勇*

1. はじめに

気象衛星観測の歴史は1960年のタイロス (TIROS) に始まる。TIROS (Television and Infra-Red Observation Satellite) はその名のとおりテレビカメラと赤外放射計による大気観測の魁をなすものであり、以後40年間、衛星観測は技術的にも運用上でも目覚ましい発展を遂げ今日に至っている。

気象衛星は、その観測目的と軌道設計の点から、およそ3通りに分類することができる。ひとつは「ひまわり」のような主として天気予報のための高々度静止衛星、同じく対流圏天気現象把握を主目的とした低高度軌道衛星、そして実験用軌道衛星 NIMBUS に代表される成層圏中間圏分光観測、である。

これらの様々な衛星観測のうち、ここでは、過去40年間の前半部分に当たる1980年代はじめまでの「黎明期・開拓期」に限定し、成層圏中間圏の大循環・力学の発展に果たしてきた軌道衛星赤外分光観測に焦点を絞ることとする。近年の大気組成観測、GPS による新たな発展および天気予報に直結した雲分布観測については本シンポジウムの他の3名の方々のお話に委ねる。

なお、この要約の一部は、1998年の気象学会秋季大会における理事長講演「新しい現象論—衛星観測のもたらしたもの」(天気1999年1月号解説)と重複していることをお断りしておく。それに加えて、衛星観測の開拓期に直接観測データの解析に関与した体験から得られた教訓についても触れてみたいと思う。

2. 衛星観測の夜明け

1950年代末の国際地球観測年 (IGY) によって地球規模の観測網は急激に進展したが、それでも観測地点の

多くが陸地の多い北半球に偏しているため、広い海洋上、特に南半球の観測は依然として不十分であった。太陽同期の極軌道衛星による観測の特徴は、何よりも第1図に象徴されるように、地球全体を一様かつデイリー (daily) に捉えることが出来る点にある。東西 (経度) 方向の分解能は30度程度であるが、中層大気に卓越するプラネタリースケールの現象を見るには一応満足できよう。鉛直分解能に関しては、初期には特定波長域に限った個々のチャンネル別に、ある厚さの層を平均して見るだけであったが、後にはラジオゾンデデータとの対応 (検証) によって気温の鉛直プロファイルも得られるようになった (たとえば Smith *et al.*, 1970)。

1963年打上げの TIROS7号による観測から、

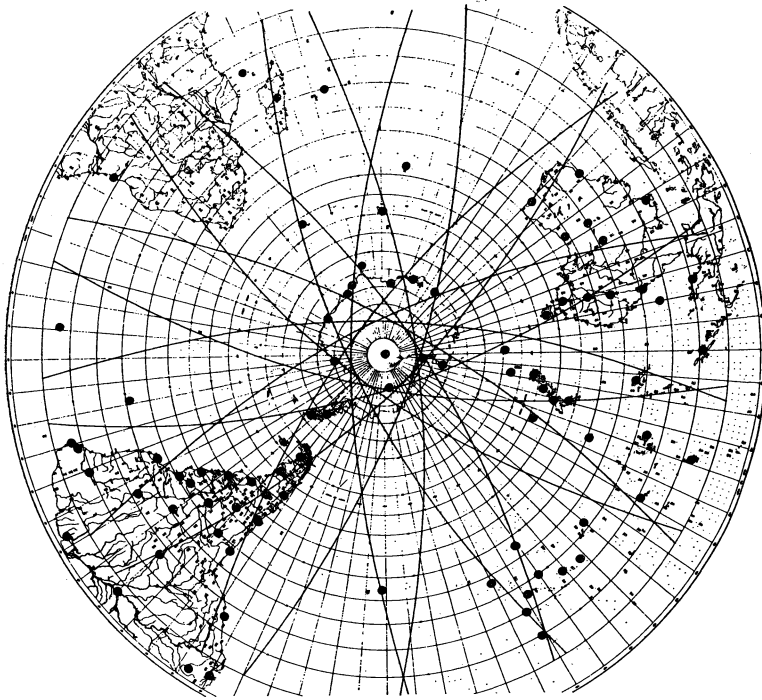
Nordberg *et al.* (1965) や Kennedy *et al.* (1967) は、それまで限られた地点でのゾンデデータの解析によって知られていた下部成層圏の半球規模気温分布 (たとえばベルリン自由大学の成層圏天気図) を全球に拡大して示すことに成功した (第2図)。この観測結果は、冬季成層圏中高緯度に卓越する東西波数1-2のプラネタリー波の構造およびその増幅に伴う成層圏突然昇温等の実態の再確認に留まらず、以後の衛星観測による成層圏力学研究の実り多い発展を約束するものであった。

3. 実験用気象衛星 NIMBUS

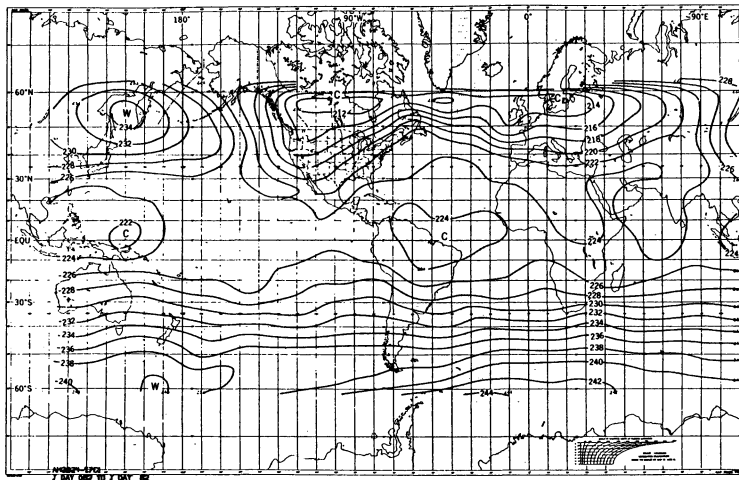
TIROS シリーズに続き60年代末からの NIMBUS3号・4号による赤外分光観測は成層圏循環研究をさらに加速的に発展させた。その中心的指導者は Oxford 大学大気物理学研究室の John Houghton 教授である。1970年打上げの NIMBUS 4号に搭載された SCR (Selective Chopper Radiometer) の測定原理と70~71年冬季北半球の観測例について Barnett *et al.* (1971) は Nature にその成果を発表している。同様に Fritz

* 京都大学理学研究科 (現在: 京都大学名誉教授)。

© 2001 日本気象学会



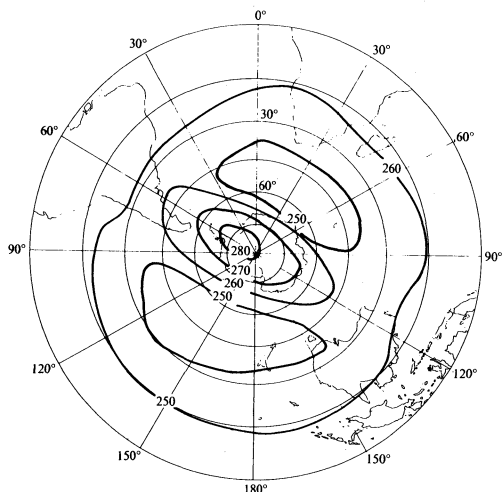
第1図 NIMBUS-IIIの南半球における24時間の軌道. 黒丸はゾンデ観測地点.



第2図 TIROS-VII観測による下部成層圏気温分布 (K). 1963年12月10~19日の平均 (Kennedy *et al.*, 1967による).

and Soules (1970) はその前年の NIMBUS3-SIRS から得られた下部成層圏温度場の全球分布を、南半球プラネタリー波に着目して解析例を提示している。

これら、TIROS および NIMBUS シリーズ初期の成果を、1970年頃、米国滞在中に勉強した筆者は、衛星観測による中層大気研究の将来の発展を感じ取り、



第3図 NIMBUS-V SCRによる南半球上部成層圏温度分布(K). 1971年9月25日の例(Harwood, 1975による).

1972年の「天気」に、衛星赤外分光観測に基づく成層圏循環解析の解説を書いた。これは後日発行された Houghton 教授のテキスト「大気物理学」(廣田・会田共訳: 1981) に比すべくもないが、1970年代の早い時期に NIMBUS に関心を寄せていたため、その後 Oxford 大学から断片的ながら SCR データを送って貰い、綾里ロケットデータと組み合わせて冬季成層圏アリューシャン高気圧の構造と変動に関する解析を行うことができた(Hirota *et al.*, 1973)。(後に Harvey と Hitchman (1996) が客観解析データを用いて類似の解析を行なったが、それは我々の1973年の結果を定量的に再確認したものである。) この解析は、同じ頃 TIROS の改良型衛星 ITOS-D の VTPR (鉛直温度分布放射計) を用いた南半球成層圏波動解析(廣田, 1973)とあわせて、我が国で衛星赤外観測データを活用した最初の仕事であり、たとえ限られた期間にせよ、観測データを自らの手で解析することの重要性を強く実感させてくれた貴重な体験であった。

1970年代における NIMBUS データ解析は、引き続き自家の Oxford 大学グループによって活発に展開された。その頃の主たる成果には、Harwood (1975) による南半球成層圏波数2東進波動の発見(第3図)、Barnett (1975) による北半球成層圏中緯度ロスビー波の赤道域への伝播事例解析、Rodgers (1976) による成層圏5日周期ノーマルモードの検出、などが挙げられる。これらはみな、1980年代以後の中層大気波動力学

の発展につながる重要な出発点であった。

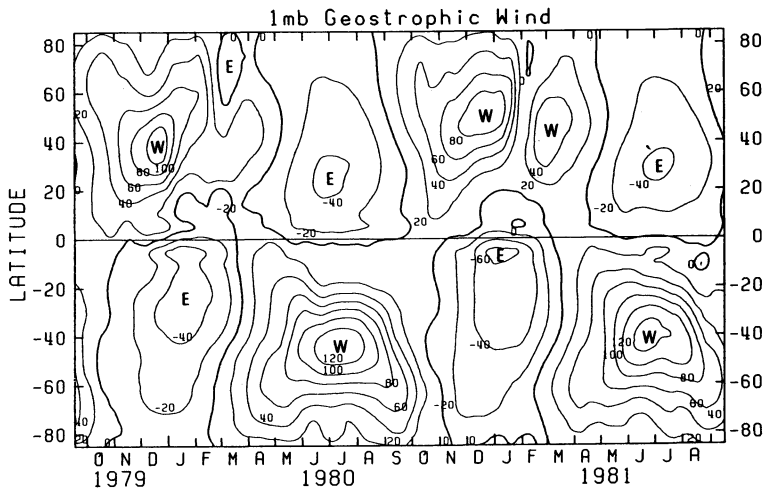
4. 統計解析, さらに気温から風への発展

上に示した1970年代中葉の NIMBUS データ解析は、初期に限られた期間・領域についての Case Study であったが、データの蓄積とともに全球にわたる成層圏波動特性の季節変化の議論が可能となってきた。1975年から Oxford でこのデータ解析を行う機会に恵まれた筆者は、まず、1973~74年の2年間にわたる NIMBUS-5号 SCR の各チャンネルデータ(高度15~45 km の4層の気温)を活用し、南北両半球を含むプラネタリーロスビー波の振幅位相構造と東進西進位相速度の季節特性を CIRA72 の上部成層圏東西風と関連させて統計的に示した(Hirota, 1976)。この解析は、スペクトル分析(MEM)の技術的制約もあり、周期が1週間以上のもに限定されていたが、その後1980年代に廣岡俊彦氏と共同で行ったノーマルモード解析の一連の仕事の原点となるものであった。

1970年代の NIMBUS シリーズの次の大きな発展は、1975年打ち上げの NIMBUS-6 号搭載の PMR (Pressure Modulator Radiometer) による中間圏界面(高度約 85 km)までの観測高度拡大である(Houghton, 1975)。観測直後の1975/76冬季北半球突然昇温に関し、早速 PMR データから、チャンネル2110 (約62 km)、同 3000 (約85 km) のプラネタリー波動パターンとともに、成層圏昇温に対応する中間圏降温をはじめ定量的に示すことができた(Hirota-Barnett, 1977)。

この PMR 観測解析のもうひとつの大きな成果は、従来の赤外分光観測では気温分布のみの議論であったのに対し、ベルリン天気図の30 mb 面を基底として PMR による気温の鉛直分布から静力学近似・地衡風近似を用い、中間圏界面高度までの大規模場の風を求めたことである。精度の上では多少の問題はあったが、これにより突然昇温に伴う中層大気平均東西風の減速を立証することが出来た。この成功により、以後、衛星赤外放射輝度→気温鉛直分布→等圧面高度分布→地衡風(傾度風)の手段による地球規模での中層大気風系解析が可能となった。

この成果をふまえて、京都大学では、神沢 博氏の SCR による突然昇温時の力学解析(1982)、1979年からの NOAA-SSU (SCR の現業化)による1mbまでの全球等圧面高度データを活用した上部成層圏帯状平均東西風季節進行解析(Hirota *et al.*, 1983: 第4図)などの仕事が生まれた。これらは1980年代中葉の



第4図 TIROS-N SSU データに基づく 1 mb (高度約48 km) 平均東西風の緯度季節変化. 単位は m/s. (Hirota *et al.*, 1983による).

Shiotani and Hirota (1985) による南北両半球成層圏の波動平均流相互作用解析, Hirota and Hirooka (1984) 以降のノーマルモード解析などとともに, 中層大気国際共同観測計画 (MAP) 期間における大気力学の発展に寄与するところが大きいものであったと言える。

この時代の SCR 観測のもうひとつの成果として, 赤道東西風半年周期振動 (SAO) に関連した上部成層圏から下部中間圏の高速ケルビン波解析 (Hirota, 1979) がある。これはその前年の赤道域ロケット観測統計解析 (Hirota, 1978) の発展として, 鉛直分解能が必ずしも高くない SCR の3つのチャンネルの放射輝度を組み合わせ, 鉛直2階微分に相当する差分法により鉛直波長約20 km のケルビン波の検出に活用したものである。この仕事もまた, 後続の LIMS データ解析などによる赤道波の研究に先鞭をつけたものであった。

5. 衛星観測に基づく CIRA86の構築

衛星観測時代以前の中層大気の平均図 (climatology) は, 風・気温とも精度の問題以上に, たとえば CIRA72に見られるとおり, 北半球データのみに基づいて1月と7月で冬半球と夏半球を表現していたに過ぎない。

これに対し, MAP 期間に作られた平均図 CIRA86では, 衛星全球観測の威力を生かし, 南北両半球の対比が可能となった。さらに, 月ごとの帯状平均気温・

東西風に限らず, プラネタリー波動の三次元構造およびその季節変化も精度良く表現されるようになった。この New CIRA は基本的に1970年代後半からの NIMBUS の SCR・PMR データ (およびゾンデ・ロケットデータによるその検証) に依存している。

この CIRA86の構築に果たした Oxford グループのうち, 特に John Barnett 博士の貢献は大きい, 赤外分光から東西風の算定を行うに当たっては我々の前駆的解析が重要な根拠となった。この作業で特に問題となったのは, 地衡風近似が直接使えない赤道域の風で, CIRA86の原型の段階では緯度15°N 以内の赤道域が空白扱いであった。しかし, 上述の Hirota *et al.* (1983) で地衡風近似を両半球側から赤道域にまで内挿することの正当性がロケットデータの検証により確認された結果, 地衡風を一段高精度にしたバランス風で現在のような全球東西風が与えられることとなった。

6. おわりに

1980年代以降の衛星観測の進歩は目覚しく, MAP 以後の中層大気力学研究の大きな発展に寄与してきた。それらの成果のまとめは, たとえば Andrews らのテキスト “Middle Atmosphere Dynamics” (1987) に如実に見られるとおりである。さらに, 1990年代の UARS に代表される各種組成観測は, 放射・力学のみならず大規模物質輸送の問題等, 中層大気科学に豊かな実りをもたらしてくれた。

今日では、たとえば NCEP/NCAR 再解析データが世界中で誰でも自由に使えるようになり、もはや「衛星観測」という言葉を表面に出さなくてもよい時代となったが、その隆盛の原点としての、1960年代末から80年代はじめにかけての初期衛星観測解析が開拓した歴史的意義を再確認していただければ幸いである。そしてそれはまた、気象学・大気科学の精神である「観測データを通して現象の特性を自分の目で確かめること」の重要性をも意味しているのである。

参 考 文 献

- Andrews, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987 : Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press, pp489.
- Barnett, J. J. *et al.*, 1971 : Stratospheric warming observed by Nimbus 4. *Nature*, **230**, 47-48.
- Barnett, J. J., 1975 : Hemispheric coupling-evidence of across-equatorial planetary waveguide in the stratosphere, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **101**, 835-845.
- Fritz, S. and S. D. Soules, 1970 : Large-scale temperature changes in the stratosphere observed from Nimbus, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 1091-1097.
- Harvey, V. L. and M. H. Hitchman, 1996 : A climatology of the Aleutian high, *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2088-2101.
- Harwood, R. S., 1975 : The temperature structure of the southern hemisphere stratosphere, August-October 1971, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **101**, 75-91.
- Hirota, I. *et al.*, 1973 : Structure and behaviour of the Aleutian anticyclone as revealed by meteorological rocket and satellite observations, *J. Met. Soc. Japan*, **51**, 353-363.
- Hirota, I., 1975 : Spectral analysis of planetary waves in the summer stratosphere and mesosphere, *J. Met. Soc. Japan.*, **53**, 33-44.
- Hirota, I., 1976 : Seasonal variation of planetary waves in the stratosphere observed by the Nimbus 5 SCR, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **102**, 757-770.
- Hirota, I. and J. J. Barnett, 1977 : Planetary waves in the winter stratosphere—preliminary analysis of Nimbus 6 PMR results, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **103**, 487-498.
- Hirota, I., 1978 : Equatorial waves in the upper stratosphere and mesosphere in relation to the semi-annual oscillation of the zonal wind, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 714-722.
- Hirota, I., 1979 : Kelvin waves in the equatorial middle atmosphere observed by the Nimbus 5 SCR, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 217-222.
- Hirota, I., T. Hirooka and M. Shiotani, 1983 : Upper stratospheric circulation in the two hemispheres observed by satellites, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **109**, 443-454.
- Hirota, I. and T. Hirooka, 1984 : Normal mode Rossby waves observed in the upper stratosphere. Part I : First symmetric modes of zonal wavenumbers 1 and 2. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1253-1267.
- 廣田 勇, 1972 : 気象衛星赤外分光計 (SIRS) 観測資料に基づく成層圏循環解析の最近の話題, *天気*, **19**, 283-292.
- 廣田 勇, 1973 : ITOS-D VTPR 観測資料を用いた南半球循環の解析例, *天気*, **20**, 351-356.
- 廣田 勇, 1999 : 新しい現象論—衛星観測のもたらしたもの. *天気*, **46**, 5-10.
- Houghton, J. T., 1975 : The Pressure Modulator Radiometer (PMR) experiment, Nimbus 6 User's Guide Section 8. NASA.
- Houghton, J. T., 1981 : 大気物理学 (廣田・会田訳) みず書房.
- Kanzawa, H., 1982 : Eliassen-Palm flux diagnostics and the effect of the mean wind on planetary wave propagation for an observed sudden stratospheric warming, *J. Met. Soc. Japan*, **60**, 1063-1073.
- Kennedy, M. S., M. S. Zand and W. Nordberg, 1967 : Circulation patterns of the stratosphere derived from radiometric temperature measurements with TIROS satellite, *J. Atmos. Sci.*, **24**, 711-719.
- Nordberg, W. *et al.*, 1965 : Stratospheric temperature patterns based on radiometric measurements from TIROS satellite, *Space Research*, **5**, 783-809.
- Rodgers, C. D., 1976 : Evidence for the five-day wave in the upper stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 710-711.
- Shiotani, M. and I. Hirota, 1985 : Planetary wave-mean flow interaction in the stratosphere : a comparison between northern and southern hemisphere, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **111**, 309-334.
- Smith, W. L., H. M. Woolf and W. J. Jacob, 1970 : A regression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to Nimbus 3 SIRS observations, *Mon. Wea. Rev.* **98**, 582-603.

Developments of the Middle Atmosphere Dynamics based on Satellite Observations

Isamu Hirota

Department of Geophysics, Kyoto University

108 : 1081 : 5013 (オゾン層, 人工衛星センサー)

2. ILAS による極域成層圏衛星観測プロジェクトの10年

笹野 泰弘*

1. はじめに

フロン等の人工的に作られた化学物質の放出に伴う「成層圏オゾン層の破壊」の問題は、1974年に初めて、モリーナとローランド (Molina and Rawland, 1974) によってその可能性が指摘されたものである。その後、1980年代前半になって、南極上空で春に成層圏オゾン濃度の極端に低い、いわゆる「南極オゾンホール」が発見されるに至り、成層圏オゾン層の破壊が現実のものとして、しかも、モリーナとローランドによって指摘されたよりも早いスピードで進行していることが認識された。

1980年代後半は、これらを受けてオゾン層の保護が声高く叫ばれた時期となった。国際的にはオゾン層保護に関する基本原則を定めた「オゾン層保護のためのウィーン条約」が1985年に採択され、1988年9月に発効した。フロン等の生産量・消費量を国際的に規制するための具体的な行動を定める「モントリオール議定書」が1987年に採択され、1989年1月に発効した。我が国では、これらの国際的な動きを受けて、「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律 (オゾン層保護法)」が1988年5月に制定、公布されている。

ウィーン条約においては、締約国は『研究及び組織

的観測等に協力すること (第3条)』を定めており、また我が国のオゾン層保護法においても、『国は、特定物質のオゾン層に及ぼす影響の研究その他のオゾン層の保護に関する調査研究を推進する (第26条)』ことが規定されている。折しも、宇宙開発事業団 (NASDA) が地球観測プラットフォーム技術衛星 (Advanced Earth Observing Satellite : ADEOS) に搭載するセンサーを公募しており、1988年、環境庁は我が国独自のオゾン層観測衛星センサーの開発・運用に取り組むことを決定し、「改良型大気周縁赤外分光計 (Improved Limb Atmospheric Spectrometer : ILAS)」を搭載センサーとしてこれに応募することとした。

本発表の目的は、このようにして始まった ILAS プロジェクトの全体像と、この10年の流れ (第1表参照) を知って頂くこと、そして比較的大型かつ総合的な衛星観測プロジェクトを我が国の研究者の主導の下に行ってきたことの意義を考えるための材料を提供すること、の2点である。ここでは ILAS プロジェクトの全体像のうち、特に研究者が関与してきた部分を、かいつまんで記していくこととする。

ILAS 機器、観測原理、観測対象気体、観測領域、データ処理運用システム、検証実験、あるいは種々のインタフェース調整会議、サイエンスチームミーティング等々の詳細は、これまでに発刊してきた技術レポート、

* 国立環境研究所大気圏環境部。

© 2001 日本気象学会