

新しい現象論

—衛星観測のもたらしたもの—

廣 田 勇*

1. はじめに

「天気」新年号恒例の巻頭言に代えて、本文では平成10年10月に仙台で開かれた気象学会秋季大会における理事長講演の要約をお伝えすることにする。

第30期理事長を引き受けるにあたって、「学会運営事項は各種委員会担当理事にお任せし、理事長の責務は気象学そのものに基づいた学会の方向性を示唆することである」との理念から、今回のような学術講演を慣例化することのご承認をいただき、その実現をみた次第である。

従って以下に述べる内容は、私自身が過去30年間に関与してきた衛星観測に基づく中層大気大循環の話ではあるが、個人的興味による研究成果のレビューではなく、気象学のあるべき姿の一例として受け止めていただければ幸いである。限られた紙面ゆえ、通常の解説のような詳細にわたる図や文献の引用は省略して話の大筋のみに留めることをお許しいただきたいと思う。

2. 気象学における観測の歴史

気象学の原点は文字どおり大気現象学である。古くは種々の天気俚諺に象徴される個々の現象についての経験則に端を発し、その蓄積のなかから、大気現象に関する素朴ながら力強い自然認識が構築されてきた。その根底には広い意味での「観測」があり、多くの観測事実の提示がその奥にひそむ自然法則の理解へと繋がってきたことは間違いない。

16世紀のヨーロッパにおける近代科学成立から現在に至る数世紀の間に、観測の内容は技術の進歩によって著しい発展を示してきた。地球全域にわたる大気

運動を例にとるなら、大航海時代の経験に基づくハレーの風系図と今日の静止衛星ひまわりの半球画像を比較してみれば、その間の事情は一目瞭然であろう。

同様に、今世紀前半からの気球(ラジオゾンデ)観測からは、地上から高度30 kmまでの大気の立体構造や各種擾乱の振舞いの実態が徐々に明らかにされ、現在の数値天気予報の基盤である気象力学の体系が構築されてきた。

地球規模での大気観測に大きなエポックをもたらしもうひとつの好例は大戦後1950年代末の国際地球観測年(IGY)である。従来観測の乏しかった極域やロケットによる中間圏の観測が大循環論の飛躍的発達をもたらししたことは良く知られているとおりである。

それと同様に、IGY以後1960年代から始まった人工衛星による地球大気観測の果たしてきた気象学への貢献もまた極めて大きい。

この小文では、主として極軌道衛星に焦点をしばり、その観測結果が新しい現象事実の提起を通して中層大気(成層圏中間圏)の大規模現象の解明に果たしてきた役割を概観することとする。

3. 極軌道衛星の特長

両極域を除く半球を連続して総観的に捉える静止衛星との対比において、低高度を飛翔する極軌道衛星観測の特長はおよそ次の諸点に要約できる。

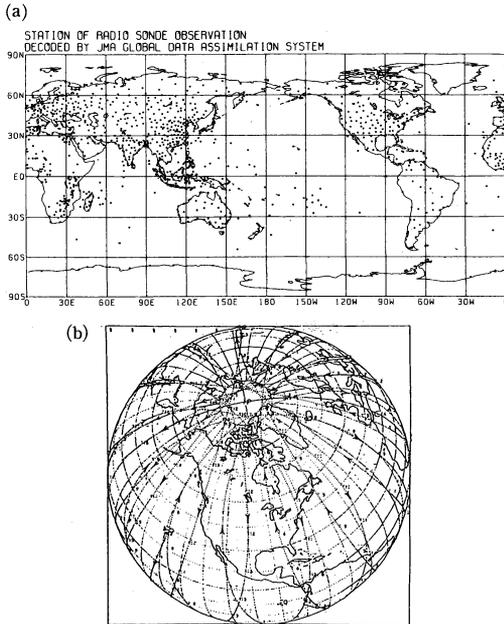
(1) 地球全体を一様に観測できること。すなわち、陸地・海洋の分布に関係なく、かつ南北両半球・赤道域・極域のすべてを視野に入れることが出来ること。このことを一目で理解するため、第1図には、通常のラジオゾンデ観測地点分布とNIMBUS衛星の軌道図を示しておく。

(2) 観測高度領域が広いこと。これは測器の種類にもよるが、一般に、対流圏・成層圏・中間圏の全域を観測対象に出来ること。

* 京都大学大学院理学研究科地球物理学教室。

—1998年11月2日受領—

—1998年11月10日受理—



第1図 (a)ラジオゾンデ観測地点分布と、(b) NIMBUS 衛星の軌道図。

(3) 測定対象量が多様であること。これも様々な測器の開発により、種々の分光観測の結果、大気温度のみならず、各種大気組成分布を知ることが出来ること。

(4) 長期間の連続観測が可能であること。太陽同期衛星の場合、第1図に見られるように、1日に1回の割合で地球全体をカバーし、そのデータが長期蓄積されているため、季節変化・年々変動等の研究に適していること。

4. 衛星観測の発展

本文の目的は軌道衛星の技術的進展を年代順に詳細に列挙することではないので、とりあえず主たる項目を次のように分類しておく（以下、個々の衛星測器の名称やその測定原理の説明等は省略させていただく）。

気象衛星の嚆矢は1960年代初頭のアメリカの TIROS であるが、成層圏を対象とした第一歩は1960年代末からの実験用気象衛星 NIMBUS シリーズで、これは赤外線域長帯の放射輝度測定から成層圏温度を求めたものである。

次いで、1970年末からその発展として、NOAA 衛星によるルーチン観測が行われ、それによる成層圏温度を通常のゾンデ観測と結合させて、成層圏全域の等圧面高度場を求め、更にそれから地衡風近似等による運

動（風）を計算して大循環論に活用されるようになった。

同じころ、やはり NIMBUS 衛星によって地球全域にわたるオゾン全量の測定が行われはじめ、更に新しい測器を搭載した NIMBUS 7号によって中層大気中の各種組成分布やその時間変動の様相が詳しく知られるようになってきた。

1990年代になると、UARS による観測が、組成のみならず、大気運動そのものを直接捉えるようになり、一方、1970年代末からの赤外温度測定データの蓄積を活かした全球にわたる再解析データが欧米の予報センターなどから提供され、大循環論に新しい側面が開かれ始めている。

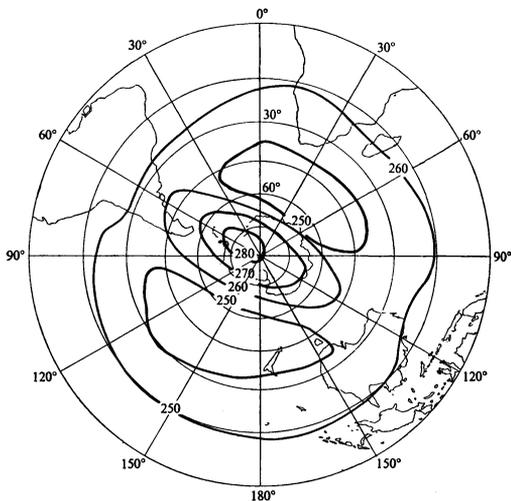
これらの時代的な流れを念頭に置いて、次節では、衛星観測のもたらした新しい現象論の幾つかをその意義づけとともに示すこととしよう。

5. 確認、発見、立証、そして問題提起

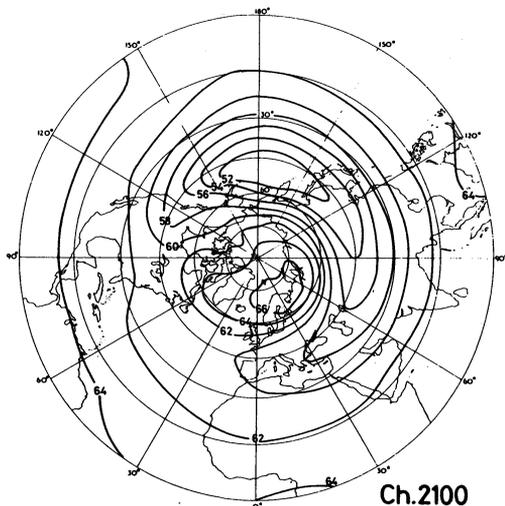
衛星にかぎらず、新しい測器・観測法の開発は、まず既知の現象や数値との比較・検証を通してその有用性を確認するところから始まる。NIMBUS 3号による成層圏気温全球観測はその好例で、たとえば Fritz and Soules (1972) は、従来ゾンデ観測から記述されていた冬季北半球成層圏突然昇温の特徴が衛星から十分良く捉えられることを示した。ここまでは再確認の域を出ないが、その上、全球観測の利点を活かし、冬半球高緯度の昇温が中低緯度および夏半球の降温を伴うことを見出した。つまり、この素朴な段階においてさえ、早くも発見的要素を持っていたことになる。

当時の南半球は、対流圏をも含め、北半球に比べて観測網がきわめて不十分であったが、上に述べた軌道衛星の特長を活かした南半球成層圏の解析から幾つかの新しい発見がもたらされた。第2図はその一例で、海陸分布（従って大規模地形強制力）の異なる南半球独自の波動現象として、東西波数2の東進プラネタリー波の卓越が NIMBUS 4号の観測データから Harwood (1975) によって示された。この波動の発見は、後に順圧不安定現象の具体例として、また波数1の停滞性波動との相互作用（たとえば Hirota *et al.*, 1990）など、南半球成層圏固有の興味ある力学に関する問題提起となった。

同様に、1970年代なかばの NIMBUS 6号の観測からは、それまで知られていなかった中間圏高度におけるプラネタリー波動の振舞いについての新しい事実が



第2図 NIMBUS 4号 SCRにより観測された南半球上部成層圏(高度約45 km)の温度分布. 単位はK. 1971年9月25日の例 (Harwood, 1975).



第3図 NIMBUS 6号 PMRにより観測された北半球中間圏(高度約62 km)の赤外放射輝度分布. 数字の単位は $mWm^{-2} ster^{-1} (cm^{-1})^{-1}$. 1975年12月10日～1976年1月9日の平均 (Hirota and Barnett, 1977).

提示されるようになった (Hirota and Barnett, 1977, 第3図). この解析結果は, 1970年代後半に確立された新しい中層大気力学像 (伝播性波動に伴う運動量フラックスの収束発散が背景流を規定すること) の観測的証拠となった.

このデータ解析のもたらしたもうひとつの新展開は, 気温の鉛直分布をもとに下層の気圧を境界値として鉛直積分を行ない中間圏までの気圧 (等圧面高度) を算定して大規模地衡風を求めたことである. この観測解析の意義は北半球冬季突然昇温現象の事例解析にとどまらず, 1980年代に入ってから南北両半球成層圏大循環統計解析に繋がった点にある.

これらの研究で確立された赤外放射観測の原理と解析手法はその後 TIROS・NOAA シリーズに引き継がれ, 気温→等圧面高度→地衡風(あるいはバランス風)の方法論が一般化して, たとえば第4図に示すような, 南北両半球上部成層圏平均東西風の緯度分布季節変化が定量的に記述可能となった. これはさらに最新の COSPAR 標準大気 (CIRA86) の重要な基礎ともなっていることを指摘しておこう.

このような衛星観測に基づく現象論を成層圏力学へ適用することから生まれた新しい発展は, たとえば各種ノーマルモードロスビー波の検出や, E-P (Eliassen-Palm) フラックス解析による波動の作用論, あるいは赤道成層圏東西風準2年周期振動 (QBO) と南北

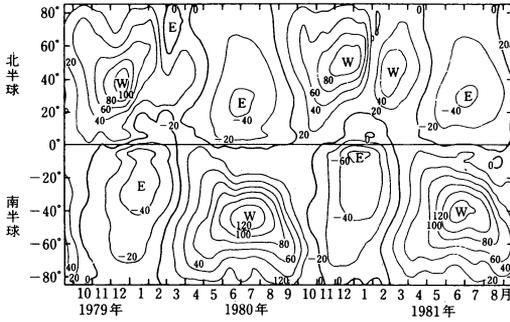
両半球中高緯度大循環の対応など, 枚挙にいとまがないが, 詳細は他にゆずり, ここではこれ以上は触れない. しかし, 大規模力学に話を限っても, 新しい観測が発見と立証の両面から研究の進展に重要な貢献をもたらしたことは十分理解されるであろう. ついでに言えば, 1980年代から始められた中層大気大循環モデル (GCM) の正当性のほとんどが既に衛星観測から得られている現象事実によって支えられていることも忘れてはならない.

6. 大気化学と力学の結合

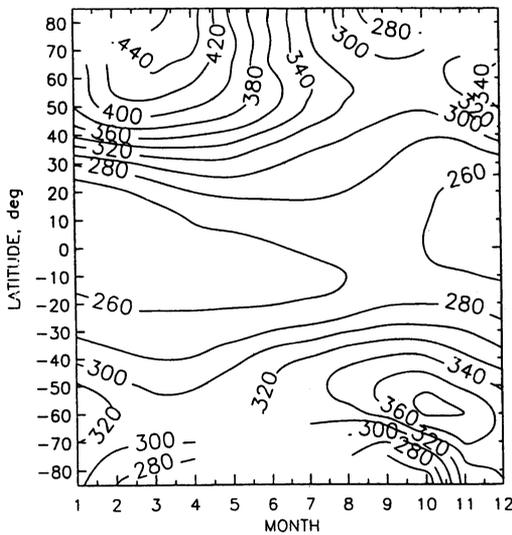
オゾンに象徴される大気微量組成の分布や振舞いを気象学の立場から研究する大気化学は古くから行われていたが, 主として観測技術上の問題から, 対象とする現象は時間的・空間的に多くの制限があった.

たとえば気柱全体に含まれるオゾン全量を地上観測から求め, その緯度季節分布を論じることは既になされていたが, 1970年代末からの極軌道衛星によるオゾン全量の地球観測は, 従前の地上観測の統計結果を再確認するにとどまらず, より信頼性の高い観測事実を優れた時間空間分解能で提示するようになった (第5図). 特にそれは地上観測点の少ない南半球や極域・赤道域において威力を発揮するものであった.

衛星分光観測によりオゾンの全球分布が毎日, しか



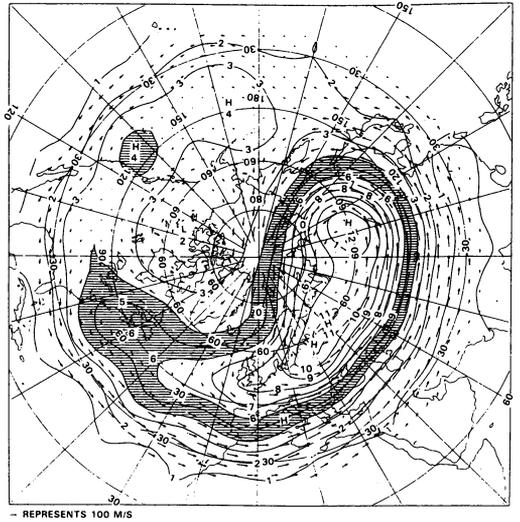
第4図 TIROS 衛星の赤外放射観測に基づき算定した 1 mb 面 (高度約 48 km) 平均帯状流の緯度季節分布. 単位は $m \cdot s^{-1}$. W と E は西風, 東風を表す (Hirota *et al.*, 1983).



第5図 TOMS に基づくオゾン全量の緯度季節分布. 縦軸は緯度 (マイナスが南半球), 横軸が季節 (月). 数字はドブソン単位 (CIRA1996).

も長期間連続して与えられるようになったことから, 1980年代に入って, 化学過程のみならず, 各種組成のグローバル輸送という大気化学と力学を結合させる新しい分野が開花した. 南極オゾンホール問題とは, 南極のみに限定されたものではない. 低緯度で生成されたオゾンがどのように南北両極域に運ばれるのか, その輸送を担う大気運動とは何か, 極域での化学過程を支配する要因のひとつである気温分布を決めているのは何か, 等々の問題提起が生まれてきたわけである.

このような発想は力学解析そのものの発展に大きな



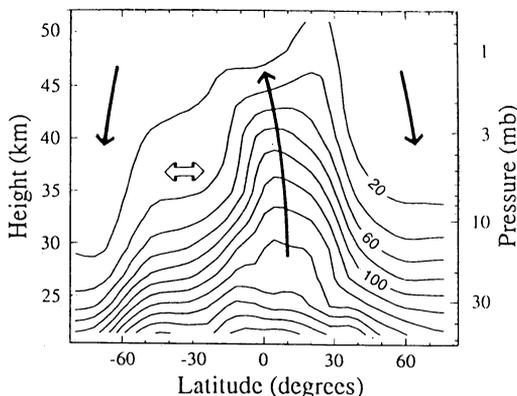
第6図 850 K の等温面 (高度約 30 km) における渦位分布. 矢印は地衡風. 1981年12月4日の例 (Clough *et al.*, 1985).

動機付けを与えることとなった. 第6図に示す渦位解析はそのひとつの好例であり, 温位と渦位がともに断熱不変量であることに立脚して, 等温面 (この図では 850 K, 高度約 30 km) が物質面であること, 気塊はその面上で渦位を保ちながら動くはずであることによってオゾンの移動 (輸送) の実態を知ることができる. このことに関連して, 等渦位線の分布形態とその時間的变化についての現象論的考察から成層圏ロスビー波の作用に関する理解が深まり, たとえば “wave breaking” といった概念が生み出されるに至った.

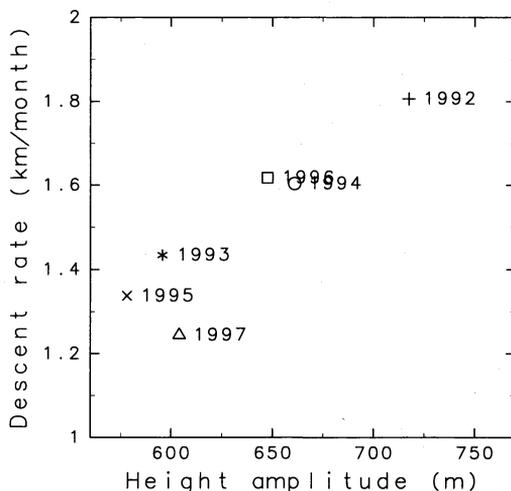
このような成果もまた, 衛星観測がもたらしたものと云って良い.

7. 最近の発展

1990年代の UARS 衛星観測は, オゾンのみならず従来観測の困難であった様々な大気微量組成の分布と動向について, 多くの知見をもたらすに至った. ここでは, その詳細を網羅することが目的ではないので, 一例として, Randel *et al.* (1993) による UARS の観測から得られた N_2O の分布図 (第7図) を示すにとどめよう. 赤道から南北両極に至る N_2O の混合比から, 古典的な Brewer-Dobson 循環と同様な発想で, 子午面内の地球規模物質循環の様相を推定することが出来る. 同様に, Mote *et al.* (1996) は水蒸気やオゾン量の時間変化の解析から, 赤道成層圏における大規模上



第7図 UARS-CLAESによるN₂Oの子午面分布. 横軸は緯度(マイナスは南半球), 縦軸は高度(気圧). 1992年9月1日~20日の平均. 単位はppbv. 実線の矢印は平均子午面循環を, また白抜き矢印はプラネタリー波による水平混合を表す (Randel *et al.*, 1993).



第8図 メタン鉛直分布の変動から見積もった南極域成層圏下降流(縦軸)と60°S, 10 mbにおける波数1の振幅(横軸)との対応. 2月~10月の平均. 6年間の年々変動の中に極域下降流と波動振幅との良い対応関係が見られる (Kawamoto and Shiotani, 未発表論文).

昇流を定量的に見積もることに成功し, これが地球規模物質輸送の痕跡を残す“Tape Recorder”であると表現した. 赤道域の上昇流が, 中高緯度における波動エネルギーの収斂発散に伴う地球規模子午面循環として極域における下降流と繋がっていることは, 概念的には知られていたが, 物質輸送と直結した形での定量的算定はこれまで非常に困難な問題のひとつであった. この問題に関連して, 最近, Kawamoto and Shiotani (未発表論文)は, UARS データに基づき冬季南半球極域におけるメタン鉛直分布の時間変化から下降流の強さを見積もることに成功し, さらにその強さが成層圏中高緯度プラネタリー波の活動度の年々変動と良く対応していることを示している (第8図).

1996年に打ち上げられた我が国の ADEOS 衛星は技術上のトラブルから観測期間が限られてはいるが, その搭載測器 ILAS のデータから, 1996/97年冬季の北極域成層圏における極渦の内側と外側での各種組成分布の明瞭な特徴を記述することに成功している.

もうひとつ, これは現在のところ大気組成の問題とはまだ直結していないが, UARS では運動(風)そのものを衛星から測定するという意欲的な試みもなされている. その成果のうち, 特筆すべきものは, 搭載した HARDI という測器の観測によって高度110 km までの帯状平均東西風の中に, 赤道中間圏界面付近に卓越する QBO が発見されたことである. これは1960年代初頭から良く知られてきた赤道成層圏 QBO とは全

く別の現象であり, その下層の成層圏中間圏東西風半年周期振動(SAO)を通り抜けて80~90 km 高度まで上方伝播する波動の力学を新たに要請する重大な問題提起となっている.

これらは, 最近の成果のごく一部を紹介したに過ぎない. 現在統計解析が進行中の研究も含め, UARS や ADEOS 衛星観測が, 大気組成(化学)と大循環力学とをより強く結びつける具体的・定量的な現象事実を次々と提示していることの意義と重要性はここに述べた事例だけからでも十分理解されよう.

8. まとめ

以上駆け足で過去30年間の軌道衛星観測が我々にもたらした現象論のインパクトの大きさを述べてきたが, 本文の冒頭でも断ったように, これは決して衛星観測に限った話ではない. 観測の手段や方法はそれぞれに違っても, 新しい観測事実がその分野の研究の進展に与える影響の強さは, たとえば雲物理, 境界層, メソ気象等々の各研究分野, さらにルーチン数値予報のような現場においても全く共通した事柄であるに違いない. 近年急速に発展しつつある新しい気候学においても, 現在最も強く要請されていることはその体系構築の方向性を与えるような観測事実の提示であ

る。

たとえ最初は素朴な段階であっても、その中から本質を抽出し物理的理解に到達するためのより詳しい解明の筋道は、すべて観測事実から出発していると言っても過言ではない。これからの気象学の新たな発展を目指すために、いまあらためて現象論の持つ意義の深さを再認識していただきたいと信ずる次第である（なお、ここに述べたような、気象学・大気科学における観測の意義とデータ解析の理念については、本年3月に刊行予定の「気象解析学」（東京大学出版会）に詳しく議論してあるので御一読下されば幸いである）。

謝 辞

最近の UARS, ADEOS 衛星の成果に関し種々ご教示下さった北海道大学の塩谷雅人氏と国立環境研究所の神沢博氏に厚く御礼申し上げます。未発表論文の第8図を使わせて下さった京都大学の河本望さんにも感謝いたします。東京大学の中村尚氏には天気編集委員の立場から原稿の推敲について種々ご助言を頂きました。あわせて御礼申し上げます。

参 考 文 献

以下に示す文献は本文で「たとえば」と断って引用したものであり、必ずしも代表的な文献を選出したものではない。成層圏中間圏の観測解析だけに話を限っても、衛星関連の研究論文の総数は、過去30年間で優に千編を超えるであろう。

Clough, S. A., N. S. Grahame and A. O'Neill, 1985 ; Potential vorticity in the stratosphere derived using data from satellites, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*,

111, 335-358.

Fritz, S. and S. D. Soules, 1972 ; Planetary variations of stratospheric temperatures, *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 582-589.

Harwood, R. S., 1975 ; The temperature structure of the southern hemisphere stratosphere : August-October 1971, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **101**, 75-91.

Hirota, I. and J. J. Barnett, 1977 ; Planetary waves in the winter mesosphere-preliminary analysis of Nimbus 6 PMR results, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **103**, 487-498.

Hirota, I., T. Hirooka and M. Shiotani, 1983 ; Upper stratospheric circulations in the two hemispheres observed by satellites, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 443-454.

Hirota, I., K. Kuroi and M. Shiotani, 1990 ; Midwinter warmings in the southern hemisphere stratosphere in 1988, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 929-941.

Mote, P. W., K. H. Rosenlof, M. E. McIntyre, E. S. Carr, J. C. Gille, J. R. Holton, J. S. Kinnersley, H. C. Pumphrey, J. M. Russell III, and J. W. Waters, 1996 ; An atmospheric tape recorder : The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor, *J. Geophys. Res.*, **101**, 3989-4006.

Randel, W. J., J. C. Gille, A. E. Roche, J. B. Kumer, J. L. Mergenthaler, J. W. Waters, E. F. Fishbein and W. A. Lahoz, 1993 ; Stratospheric transport from the tropics to middle latitudes by planetary-wave mixing, *Nature*, **365**, 533-535.

New Phenomenology—Contributions from Satellite Observations.

Isamu Hirota*

* *Dept. of Geophysics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan.*

(Received 2 November 1998 ; Accepted 10 November 1998)
