

全球気象データからの地球物理学的発見

塩 谷 雅 人
京都大学理学部

人工衛星観測にもとづく全球気象データからの気象学的発見を通して、大容量衛星観測データの取り扱いについて述べる。時間・空間の関数として与えられる大容量の全球気象データを解析するにあたっては、研究目的に応じたデータ量の圧縮が必要である。データの圧縮方法としては、空間構造を固定する方法(たとえば、緯度円に沿ったフーリエ級数展開)、時間構造を固定する方法(たとえば、時系列のスペクトル解析・フィルタリング)があることを示す。さらにムービーなどを用いてデータの情報量を損なうことなく、生に近い形でデータを素朴に眺めることから本当の意味での発見のおこなわれる可能性について述べる。

DISCOVERIES IN GEOPHYSICS USING GLOBAL METEOROLOGICAL DATA

Masato Shiotani
Department of Geophysics, Faculty of Science,
Kyoto University, Kyoto 606, Japan

By using global meteorological data from satellite observations, the way of handling a huge amount of data is discussed according to discoveries in meteorology. It is necessary to reduce the data amount for analyzing such data as a function of space and time. One way of the reduction is to fix the spatial structure of the atmospheric phenomena using a Fourier expansion along latitude circles; the other way is to fix the temporal structure using a spectral analysis or time filtering. The possibility of the use of movie is discussed for discoveries based on such global meteorological data.

1 まえがき

1960年代前半、極軌道人工衛星に搭載された赤外放射分光器によって成層圏の温度を求める試みがはじめてなされた。さらに1960年代後半には、太陽紫外線の後方散乱を用いてオゾンの鉛直分布を求める試みもおこなわれた。以来、数々の衛星搭載測器によって地球大気の大規模観測がおこなわれ、我々が知りうる地球大気に関する情報量は飛躍的に増大し、多くの知見と発見がもたらされた。しかしながらいっぽうでは、人工衛星からの観測はそのデータ量が膨大となることから、優れた測器による観測がおこなわれても気象学的興味でデータが解析されずに眠ってしまうことも多い。

ここではおもに1970年代からルーチン的にデータが得られているいくつかの全球衛星観測データにもとづいて、気象学者が物理法則と照らし合わせながらどのような方法論をもってこれらのデータを取り扱い気象学的発見をおこなってきたかについて述べる。具体的にいえば、対象とする現象の時間・空間スケールを念頭に置きながらどのようにデータ量を圧縮するのかについて考える。こういった情報量の圧縮操作は、とりも直さず現象のうらにひそむ物理過程の抽象化・体系化につながるものである。

2 衛星観測データ

1970年代後半におこなわれた全球的な地球大気観測キャンペーンFGGE (First Global GARP Experiment) 年(1978-79)を契機として、NOAA衛星シリーズに搭載されたTOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) システムが成層圏の赤外放射強度データをルーチン的に収集するようになった。またNimbus 7号に搭載されたSBUV (Solar Backscatter Ultraviolet) は成層圏オゾンの鉛直プロファイル、TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) はオゾン全量の全球観測をおこなった。さらにLIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere) は、わずか7カ月の観測期間ながら、高鉛直分解能のデータを我々に提供している。

これらの衛星観測は $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ から $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 程度の緯度・経度の空間分解能、および1日1回の時間分解能で大気の大気温度やオゾン量などの物理量に関して全球的なデータを提供している。データ量はおおざっぱにいうと1年分で6250BPIの磁気テープ1本程度(100MB前後)のものが多く、最近ではデータ期間が10年を超えるものも多く、その解析をおこなうには研究目的に応じたデータ量の圧縮をおこなう必要がある。その方法としては時間・空間の関数として与えられているデータにおいて、空間構造を固定しその時間変動に注目するやりかた、あるいは時間構造、いいかえると周期性を固定してその空間構造に注目するやりかたがある。

3 空間構造の固定

衛星からの大気観測は、測定方法の限界から測定できる高度範囲に限界があることがほとんどであるが、基本的には鉛直方向にいくつかのレベルでの観測をおこなうことができるようにデザインされている。したがって全球気象データは空間的には3次元データである。しかしながら現実の大気現象を念頭においてこのデータを用いることを考えると、水平方向の分解能に比べて鉛直方向の分解能が足りないことが多い。また明らかにデータの均質さも水平面内の方がよいので、我々はまずある特定の面(等圧面とか等温位面)で物理量の解析をおこなうことが多い。さらに、地球規模の大気波動は、地球回転の影響を受けて緯度円に沿った組織的な構造を持ちやすい。したがってまず最初に、緯度円に沿った構

造を固定することがおこなわれる。具体的には、緯度円に沿って物理量をフーリエ級数展開して、その特定の波数成分について調べる。こうすることによってデータ量も 10 分の 1 程度に圧縮することができる。さらに緯度方向の構造にも注目して球面関数展開をすることもできるが、現実大気複雑性を考えるとあまりに強い空間構造の固定は現象を誤ってとらえる危険性を含んでいる。

NOAA 衛星に搭載された SSU (stratospheric sounding unit) データにもとづく解析から Hirota & Hirooka (1984) と Hirooka & Hirota (1985) が、回転球面上のラプラス潮汐方程式の解として理論的に知られていくつかのモードの自由振動ロスビー波を検出したのはこのよい例であるといえる。彼らは、帯状方向に波数展開したデータにもとづいて、特に地球規模の波動 (帯状波数が 1 と 2) の位相速度と水平および鉛直構造から自由振動ロスビー波を特定した。図 1 は東西波数 1 で 5 日の周期で西進するモードの自由振動ロスビー波である。北半球および南半球中緯度にそれぞれ振幅の最大を持ち、緯度方向にも位相のそろった全球構造を持った波が約 5 日で西進しているのがわかる。この自由振動ロスビー波は対流圏のゾンデ観測にもとづく全球データからそれまで断片的には知られていたが、衛星観測データから成層圏において理論とよく一致する構造がとらえられ、さらに衛星観測データの時間的連続性のよさを生かしていろいろなモードの活動時期についても興味ある解析結果が示されている。

同じような観測例として Nimbus 7 号に搭載された LIMS (limb infrared monitor of the stratosphere) データにもとづく解析がある。LIMS は、わずか 7 カ月の観測期間ながら、高鉛直分解能のデータを我々に提供した。さきの自由振動ロスビー波は鉛直方向に構造を持たない (位相が立っている) ので鉛直分解能がそれほどよくない測器からの観測でもとらえることができた。しかし鉛直スケールの短い大気波動をとらえるには高鉛直分解能の観測が要求される。LIMS データは SSU データより 5 倍程度よい鉛直分解能 (~ 3 km) を持っており、このデータの特性をうまく利用した解析成果として特筆されるのが赤道ケルビン波の検出である。それまで、このケルビン波はロケット観測によって断片的に知られているに過ぎなかったが、Salby et al. (1984) は、LIMS データを用いていくつかのモードのケルビン波を検出することに成功している。図 2 は、おなじ LIMS データを用いてケルビン波の存在を示した Coy & Hitchman (1984) の観測例である。この図では特に帯状波数が 2 の成分について、緯度 0° における値 (フーリエ係数の $\cos$ 成分) を時間と高さの断面で表示することによって大気擾乱が散発的に上方伝播している様子をうまく描き出している。彼らはこの波動の位相速度や空間構造を調べて、この波動が回転球面上で赤道域に局在する赤道ケルビン波であることを明らかにしている。

4 時間構造の固定

全球衛星観測データに関するもう一つの構造の固定の仕方としては時間方向に対する固定、たとえば時間方向の周期解析 (いわゆるスペクトル解析) によって特定の時間スケールに注目するやり方がある。フィルタリングもこの範疇に属する。簡単な方法としてたとえば日々のデータから月平均値を定義して解析するのもある種のローパスフィルターと考えることができる。ここでは、あらかじめ周期性のよく知られている大気現象を念頭において時間構造を固定し、その空間構造を解析した例を示す。

Hasebe (1983) は Nimbus 4 号 BUUV (backscatter ultraviolet) のデータと地上観測のデータを組み合わせてオゾン全量の経年変動について調べた。彼は特に赤道域で顕著な周期性、準 2 年周期 (26-29 カ月) および約 4 年の周期に注目してオゾン全量の空間構造を調べた。準 2 年周期は赤道域下部成層圏の東西風変動がもつ周期性である; 約 4 年の周期は太平洋域の海洋現象として知られるエルニーニョ現象の代表的時間スケールである。図 3 (a), (b) は、約 20-35 カ月と約 34-73 カ月の周期帯を通すバンドパスフ

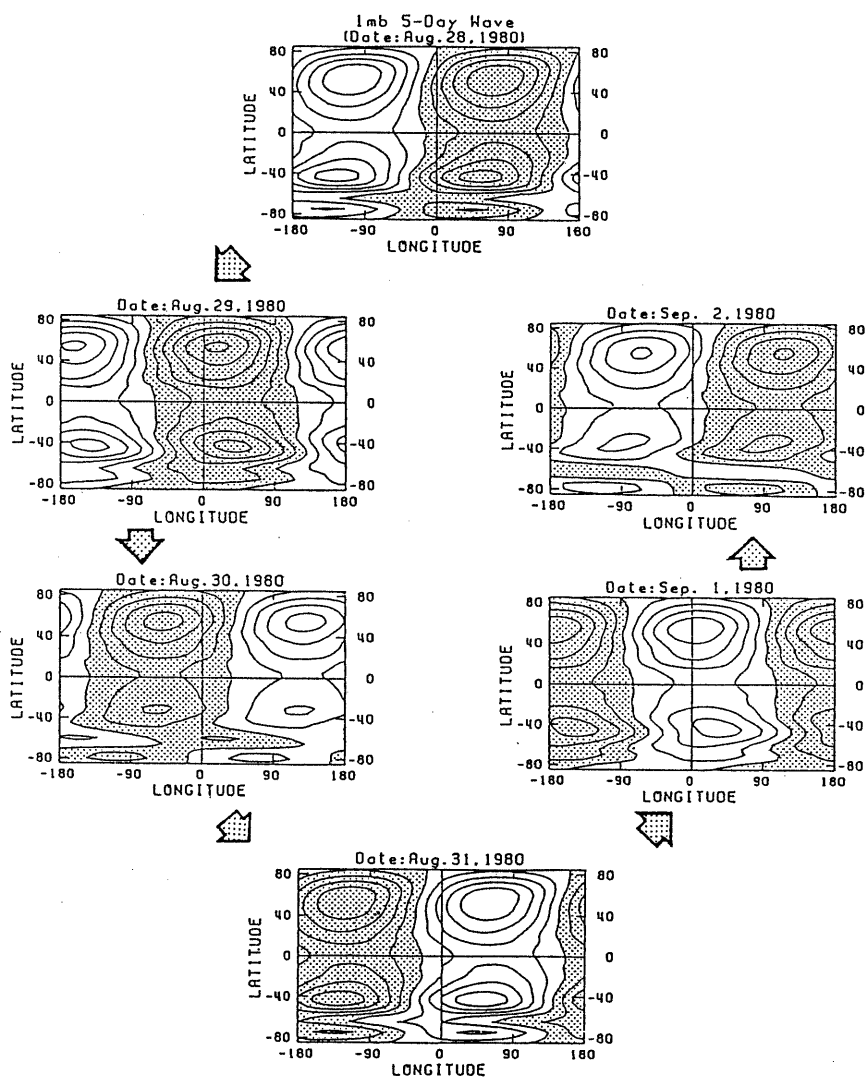


図 1: SSU の観測にもとづく 5 日で西進する自由振動ロスビー波の 1980 年 8 月 28 日から 9 月 2 日わたる 1mb における高度場の全球構造。(Hirota & Hirooka, 1984)。コンター間隔は 20m。負の偏差の部分にはハッチをつけてある。

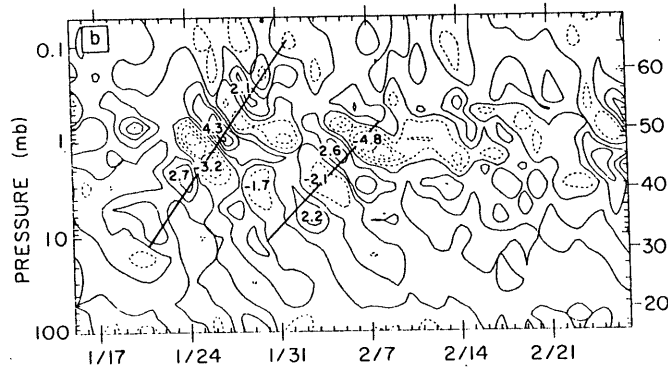


図 2: LIMS の温度観測にもとづく緯度 0° ・経度 0° における東西波数が 2 の成分の時間・高度断面 (Coy & Hitchman, 1984)。コンター間隔は 1K。

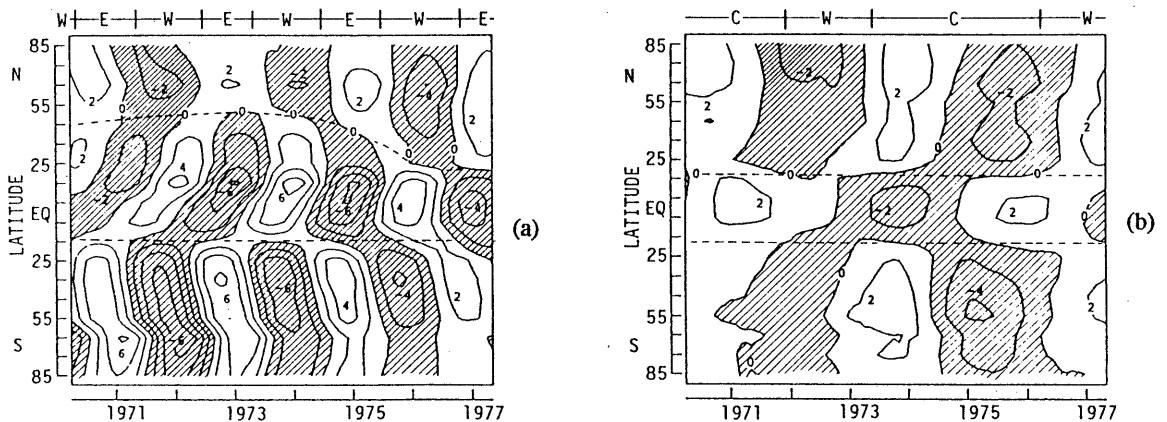


図 3: Nimbus 4 号 BUV データと地上観測データにもとづく、(a) 約 20- 35 カ月周期帯成分と (a) 約 34- 73 カ月周期帯成分の帯状平均オゾン全量の時間・緯度断面 (Hasebe, 1983)。

ルターをかけた帯状平均オゾン全量の時間・緯度断面図である。(a), (b) とも、赤道域と中高緯度帯がほぼ逆相関で変動しているのがよくわかる。彼はさらにこれらの時間スケールの変動について、その経度方向の構造に注目した解析もおこなっている。そしてこれらの変動が、基本的には非常に強い帯状成分を持っていることを示している。

5 まとめ

衛星観測にもとづく全球データをもちいて、気象学者が物理法則と照らし合わせながらどのような方法論をもってこれらのデータを取り扱い気象学的発見をおこなってきたかについて述べた。その方法としては時間・空間の関数として与えられるデータにおいて、空間構造を固定してその時間変動に注目するやりかた、あるいは時間構造、いいかえると周期性を固定してその空間構造に注目するやり方がある。具体的には、空間構造を固定する方法として緯度円に沿ったフーリエ級数展開をおこなうやり方、

時間構造を固定する方法として時系列のスペクトル解析・フィルタリングなどがあることを示した。

しかしながらここで示した解析例は、本当の意味での発見をもたらしたというよりも理論にもとづく検証をおこなったといった方が適切である。つまり、あまりに膨大なデータを前に我々は既存の物理や数学を借りてきて情報量を圧縮しながら、自分たちの興味のある現象を浮き彫りにしてきたものといえる。現実大気が多分に非線形性を持っていながら、上で述べてきた方法が時間的・空間的周期性という仮定に依存していることを我々はよく認識しておく必要がある。

真の発見とはデータ量の多少にかかわらず素朴にデータを眺めることによっておこなわれるものである。たとえば、1980年代最大の気象学的発見の一つである南半球春季下部成層圏で見られるオゾンホールを発見を思い起こせば、この発見のきっかけとなった観測が南極域の地道な地上観測であったという事実にゆきつく。そういった意味でこのような大容量のデータを取り扱う方法として、データの情報量を損なうことなくたとえばムービーなどを用いて変動の姿を生に近い形で素朴に眺めることから本当の意味での発見のおこなわれる可能性があるのではないかと思う。

文献

- Coy, L. and Hitchman, M. H., 1984: Kelvin wave packets and flow acceleration: a comparison of modeling and observations. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1875- 1880.
- Hasebe, F., 1983: Interannual variations of global total ozone revealed from Nimbus 4 BUUV and ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, **88**, 6819- 6834.
- Hirooka, T. and Hirota, I., 1985: Normal mode Rossby waves observed in the upper stratosphere. Part II: Second antisymmetric and symmetric modes of zonal wavenumbers 1 and 2. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 536- 548.
- Hirota, I. and Hirooka, T., 1984: Normal mode Rossby waves observed in the upper stratosphere. Part I: First symmetric modes of wavenumbers 1 and 2. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1253- 1267.
- Salby, M. L., Hartmann, D. L., Bailey, P. L. and Gille, J. C., 1984: Evidence for equatorial Kelvin modes in Nimbus-7 LIMS. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 220- 235.