

参 考 文 献

- Burrage, M. D., R. A. Vincent, H. G. Mayer, W. R. Skinner, N. F. Arnold and P. B. Hays, 1996 : Long-term variability in the equatorial middle atmosphere zonal wind, *J. Geophys. Res.*, **101**, 12847-12854.
- Cheong, H.-B. and R. Kimura, 1997 : Excitation of the 5-day wave by Antarctica, *J. Atmos. Sci.*, **54**, 87-102.
- Eckermann, S. D., D. K. Rajopadhyaya and R. A. Vincent, 1997 : Interseasonal wind variability in the equatorial mesosphere and lower thermosphere : long-term observations from the central Pacific, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **59**, 603-627.
- Forbes, J. M., M. E. Hagan, S. Miyahara, F. Vial, A. H. Manson, C. E. Meek and Y. I. Portnyagin, 1995 : Quasi 16-day oscillation in the mesosphere and lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, **100**, 9149-9163.
- Garcia, R. R. and F. Sassi, 1999 : Modulation of the mesospheric semiannual oscillation by the quasi-biennial oscillation, *Earth, Planets and Space*, **51**, 563-569.
- Hagan, M. E., J. M. Forbes and F. Vial, 1993 : Numerical investigation of the propagation of the quasi-two-day wave into the lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, **98**, 23193-23205.
- Hirooka, T., 2000 : Normal mode Rossby waves as revealed by UARS/ISAMS observations, *J. Atmos. Sci.*, in press.
- 廣岡俊彦, 1987 : 大気中のプラネタリー・ロスビー波, 気象研究ノート, (156), 93-127.
- Hirota, I., 1980 : Observational evidence of the semi-annual oscillation in the tropical middle atmosphere, *Pure Appl. Geophys.*, **118**, 217-238.
- Lieberman, R. S. and D. Riggan, 1997 : High resolution Doppler imager observations of Kelvin waves in the equatorial mesosphere and lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, **102**, 26117-26130.
- Matsuno, T., 1970 : Vertical propagation of stationary planetary waves in the northern hemisphere, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 871-883.
- Miyoshi, Y. and T. Hirooka, 1999 : A numerical experiment of excitation of the 5-day wave by a GCM, *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1698-1707.
- Miyoshi, Y., 1999 : Numerical simulation of the 5-day and 16-day waves in the mesopause region, *Earth, Planets and Space*, **51**, 763-772.
- Plumb, R. A., 1983 : Baroclinic instability of the summer hemisphere. — A mechanism for the quasi-two-day wave? —, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 3030-3036.
- Salby, M. L., 1981 : Rossby normal modes in non-uniform background configurations Part II : Equinox and solstice conditions, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1827-1840.
- Salby, M. L. and R. R. Garcia, 1987 : Transient response to localized episodic heating in the tropics, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 458-498.
- Takahashi, M., N. Zhao and T. Kumakura, 1997 : Equatorial waves in a general circulation model simulating a quasi-biennial-oscillation, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **75**, 529-540.

質 疑 応 答 と 総 合 討 論

1. 宮原会員の講演について

堀之内(京都大学宙空電波科学研究センター) : 渦粘性というものについてうかがいたい。例えば数値として、「成層圏で $10 \text{ m}^2/\text{s}$, その上ではもっと大きくなる」というものの根拠は何なのか。というのは、例えば下部成層圏の、水蒸気分布の「atmospheric tape recorder」が見られる領域では、 $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ ぐらいのずっと小さな値でないといけならしい。「渦粘性」というのは現象毎にその値が違っていいのだろうか。

宮原 : 堀之内会員の言われた通りで、はっきり言って、

物理的根拠は、何もない。本講演で引用した値の根拠は、たとえば、下部成層圏から中間圏上部・下部熱圏まで潮汐波の振幅を観測と合わせるためには、分子粘性や放射過程による減衰以外に、中間圏界面や下部熱圏ではこの程度の大きさの渦粘性が必要である、ということである。つまり、物理的根拠のあるものではなく、散逸のタイムスケールを与える目安である。これが先ほど言及された水蒸気分布等々にもそのまま適用できる根拠はない。なお、私の講演で引用したのは、一応の上限値の鉛直分布である。そういう意味では、

成層圏での値にはそれほど意味はない。

木田 (京都大学理学研究科) : 「物理的根拠がない」という宮原会員の回答は、やや慎重に言っておられるのだと思う。「はっきりわかっているわけではない」というのが、より正確な所ではないか。たとえば、下部中間圏や成層圏では、内部重力波の砕波や、それから発生する乱流が渦粘性になっていることは割合に確かだと思う。

2. 津田会員の講演について

松野 (地球フロンティア) : この予稿集の、15ページにあるスペクトルの図の中で、zonal component だけに周期が1.4日のパワーがある。これはおそらく gravest symmetric mode、要するにケルビン波に近い自由振動と考えられそうだが、検討されているのか。Roper and Salby の流星レーダーのデータにも1.4日周期の成分があるが。

津田 : ここでは示さなかったが、検討は色々行っている。たとえば、クリスマス島・ジャカルタ・ポンティアナの3点の比較も行っているが、それほどコヒーレントではなく、グローバルな広がり有無も判定できていない。Roper and Salby の結果では、周期が1.2日のものと1.4日のものがえられている。我々の信楽流星レーダーの観測結果の中にも両者が時々捕らえられる。しかし、1日周期の潮汐との識別が難しい。

余田 : ピナツボ火山の噴火に対して中層大気が敏感に応答したということだが、その間の具体的なプロセスは議論されているのだろうか。やはり波が媒介しているのだろうか。潮汐波の励起自体がエアロゾルで大きくなり、その潮汐波による平均循環が変わったか、あるいは風系が変わって、重力波の伝播経路が変わったか。

津田 : いまは、観測でこういうことがわかったという段階である。これを実際に解釈する上では色々な話が作れると思うが、定量的に検証するには至っていない。こういう大きな変化が発見されたとき、原因として、まず疑われたのは実は太陽活動だった。そもそも中間圏上部は、上からの影響と下からの影響がせめぎ合うマージナルな領域である。その後にもっと長い時系列が得られて、ピナツボ噴火と関連付けられた。なお、さらに長い期間の時系列には太陽活動の影響らしいものも見えている。

3. 三好会員の講演について

谷貝 (防災科学技術研究所) : 津田会員や三好会員が議論されていた大気潮汐の長期変動についてコメントしたい。以前、JGR に地形によって force される non-migrating tide について書いたが、その時も、地形が直接 force するのではなく雨の降り方によって force するはずだ、と思っていた。最近、ECMWF の再解析データによる降水日変化の解析など、励起源と想像される加熱についての情報が得られてきているので、non-migrating tide も含む大気潮汐の長期変動の研究は今後面白くなると思う。

宮原 : 今日は三好会員は話さなかったが、これについては対流圏の対流活動との関係も含めて色々と解析している。近いうちに詳しい結果を報告できると思う。

4. 総合討論

田中 (筑波大学地球科学科) : ノーマルモードイニシャリゼーションの時に色々な量を鉛直構造関数に展開すると、外部モードと、内部モード1番、2番…とぞろぞろと出てくる。ところが、大気中に観測されるノーマルモードとしては、10-day-wave, 5-day-wave などの外部モードに相当するものだけのようだ。internal mode は観測されないのだろうか。そもそも10-day-wave, 5-day-wave などが外部モードであることは観測的に確認できているのか。

堀之内 : コメントであるが、ノーマルモードイニシャリゼーションなどの際に登場する鉛直構造関数については注意を要する。これらの場合、エネルギーが鉛直に抜けていけない境界条件で固有関数が定義されるので、仮想的な上端と下端にトラップされたモードとしての外部波や、その間に捕捉された内部波というのが出てくる。しかし、現実大気は上端が放射条件であるので、内部波モードに相当するようなモードは上に抜けていってしまうので、出てこない。そういう意味で、内部モードに対応するものが観測で出てこないのは当然である。

座長 : イニシャリゼーションとの関係とは別のもっと現実的な問題として、「例えば赤道波などだと内部波モードというのが見えているのに対して、プラネタリー波の内部波モードがどうして見えないのか」というのが田中会員の質問の基本的な主旨だったと思うが。

廣田 (京都大学理学研究科) : 先ほどの津田会員の講演で、観測結果は専ら1点観測の時系列として示されて

きた。このような見方では、田中会員が興味を持っておられる、いわば Charney-Drazin の言うような意味での(定在波としての)内部波は、全くみえてこない。これを見るには、空間構造を調べる必要がある。そのためには衛星観測が有効である。実際、衛星では内部波がよく見える。

松野：鉛直構造関数についての堀之内会員のコメントに関して、さらにコメントしたい。堀之内会員のコメントは基本的には正しいとおもう。つまり、理想的な大気の鉛直構造方程式を下端で $w=0$ という境界条件で解けば、唯一、外部モードだけが固有関数となる。ただし、現実大気について考えてみる場合、2つの要因を例外として考慮せねばならないと思う。第一は、基本場の影響である。現実大気は等温ではないし、強い東西風も吹いており、その影響によって、ある高度領域で内部波であったモードが別の領域では外部波になることがある。第二の例外は、先ほどの座長の整理にもあった、「もっと現実的な問題」である。熱帯での熱の放出に関連して林 良一さんが最初に wave-CISK を考えた頃、熱の放出を含む不安定モードとしての固有振動(より正確には自励振動)として、一定の、ある特定の equivalent depth に相当するものが、自由振動として存在し得るのではないかということも議論した。最近、高数会員や堀之内会員は、現実の大気や大循環モデルを解析して、色々な擾乱の時空間構造が equivalent depth を 20 m 前後と考えた自由振動として全て解釈できることを示している。もちろんこれは、熱源の影響をパラメタライズして取り入れた話、しかも、熱帯の特定の現象、特定のスケールに限った話であろうから、このシンポジウムで議論されているプラネタリー波にまで拡張可能かどうかは不明である。

佐藤(京大大学院理学研究科)：ノーマルモードの形成について質問したい。例えば先ほどの三好会員の講演でも、熱源が非常に赤道に confine している場合でも、対流圏界面の高度ですでにグローバルなノーマルモードとしての構造になっている。このような、いわばモードの形成過程はどうなっているのか。

三好：正直言って、形成過程については余り調べていない。確かに、数値モデルの中では熱帯域の加熱だけで緯度40度や50度というところまで広がったモードが形成されているが、赤道の熱がどうやって40度とか50度というところまで広がるかに関しては、具体的な答えはまだない。

宮原：内部熱源ではなく下からの強制によるノーマルモードの形成過程については、ForbesらやSalbyらの研究がある。それらの研究では、下からの強制の空間構造として様々な形を与えているが、結局、レスポンスとしてはノーマルモードの形になる。forcingがいずれかのノーマルモードの周期と東西波数にマッチする成分を含みさえすればよいのだろう。

佐藤：そのような見方は、それはそれで正しいとは思う。しかし、たとえば、「熱帯で heating が起こった」という情報を、中緯度や高緯度はどうやって知るのか。実際には、大気中に何か特定の伝播速度を持つ情報の伝達過程が存在するのではないかと思う。だとすると、熱源のすぐそばの応答はきれいなノーマルモードの水平構造は持っておらず、しばらく上に伝播しているうちにノーマルモードとしての全体の構造が形成されていくというイメージも持てる。その辺りはどうか。

宮原：それは、言い換えれば、外部波が全体としてきれいに出来上がるプロセスをちゃんと時間発展として追ってみたことがあるか、さらに、それが物理的にちゃんと説明できるか、ということになるのか。困難の1つには、相手が外部波であるので、群速度など、波動伝播に関する指標がうまく定義できないため、物理的にちゃんとプロセスを追いかけることが難しい、ということがある。佐藤会員の言う信号の伝播の問題について実は以前から考えているが、決定版の答えはまだ用意できていない。

三好：大循環モデルの結果を見ると、5日周期で東西波数1の波について、加熱の5日周期成分がピークになってから5日波の振幅が最大になるまでに何日かかかっている。ただし、5日波の振幅は対流圏界面あたりでは非常に小さいので、このタイムラグの間の経過を大循環モデルで調べることはなかなか難しい。

木田：三好会員の講演で、傾圧不安定波について少し議論されていた。傾圧不安定波といわゆるノーマルモードは通常別々に議論されているようだが、両者が一体となったモードが存在し得るのではないか。

三好：そういう考え方もあり得ると思う。つまり、下からの伝播だけではなく中間圏での励起も考えなければいけない。すなわち中間圏での傾圧不安定によって2日周期、波数3のノーマルモードロスビー波が励起され、維持されるという可能性もあると思う。

堀之内：境界条件の問題について、蒸し返させていたいただきたい。中間圏に見られる「何とか日波」というものは、先ほど議論された水平の境界条件だけでなく上

下の境界条件もちゃんと感じているのであろうか。具体的には、2つの怪しい状況が考えられる。第一に、上下に情報がわたるにも時間がかかるから、下層は地面を感じて「モード」になっていても、上の方は下の構造に対してトランジェントに応答しているだけなのかも知れない。もしそうだとすると、もの見方として、上層に見られるものを「ノーマルモード」と言ってよいかは怪しい。第二に、先ほどの傾圧不安定波との関連においても同じ怪しさがある。傾圧不安定として考えると、(Plumbなどの枠組みでは)上下の境界条件抜きに水平構造が(3, 1)-modeで周期が約2日というものが出てくる。これが三好会員の回答のように、上方のノーマルモードを励起するとすれば、地面の境界条件は関係ないことになる。

宮原:たとえば地面で $w=0$ 、50 kmで $w=0$ にしたなら、上下2つを満たさないといけないので、鉛直構造は変になると想像される。さきほど松野会員が注意された「例外」を除くと、やっぱり下が $w=0$ で上は筒抜けの大気考えた時にはじめて、全体として観測されるものと似た解が出てくる。その意味で、現実のノーマルモードはちゃんと上下の境界条件を感じているといえる。もちろん、zonal windなどによる多少の変形

はある。なおかつ「それでは困る」という意図はどこにあるか、聞かせてほしい。

堀之内:観測と良く似たノーマルモード解があり得るのはわかるが、そういう解ができるまでには、それなりの時間がかかるはずである。で、現実には観測して、「何とかモード」と言っているものが、本当にそういうものなのかということを知りたい。

廣田:今の話について、データを見てる立場から注意しておきたい。たとえば廣岡会員による初期の研究にも出てきた南北対称な、恐竜の背中みたいな形をしたノーマルモードの5-day-waveは、驚くべきことに、生まれた時から Hough mode そっくりである。つまり、「最初は非常に非対称でガシャガシャして10日ぐらいたってからだんだん Hough mode に似てきた」のではなく、最初の8月6日頃に最初のシグナルが見えた時から、8月15日頃に振幅が飽和してくるまで、同じ形で南北両半球対称である。あたかも卵のうちから遺伝子を持っているかのごとく、それはものすごく強い信念である。このように南北構造がきれいなモードの形を保つためには、鉛直構造もちゃんとモードの形をしている必要がある。



2000年度日本証券奨学財団研究調査助成の募集

1. **助成対象者:** 大学において学術文化の研究調査に従事している個人またはグループ。研究代表者またはこれに準ずるものを除いて、研究者の年齢は55歳以下とする。
2. **対象分野:** 法学・経済学・社会学・理学・工学の5部門。うち理学・工学においては、新素材および環境改善に関する萌芽的研究を重視する。
3. **助成金額:** 1件あたり100万円程度(総額5,000万円)。
4. **申請方法:** 財団所定の申請書に記入し2000年8月18日(金)までに提出する。
5. **申請先:** 〒103-0025
東京都中央区日本橋茅場町1-5-8
東京証券会館6階
(財)日本証券奨学財団
募集要項と申請書は気象学会事務局にあります。