

1979年1月の東西波数1の増幅および鉛直伝播について

田中 博*

1. はじめに

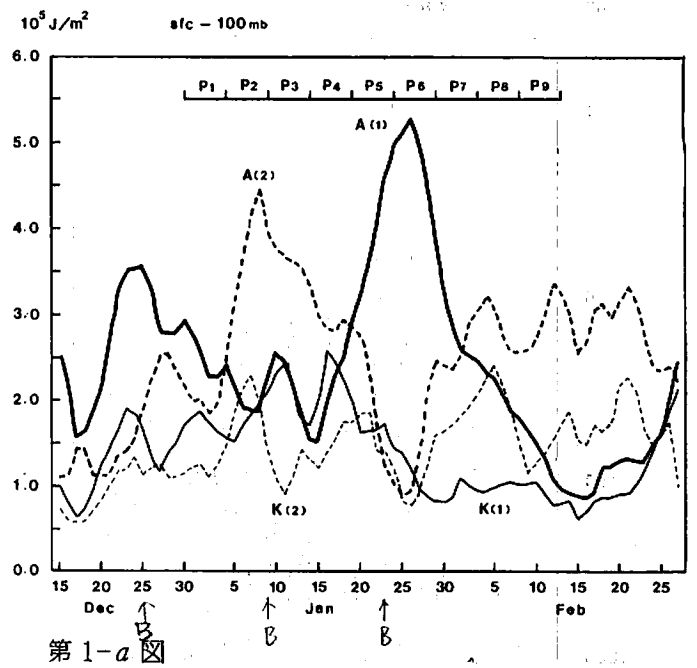
長期予報およびブロッキング現象においてプラネタリー波がなぜ増幅するかは中心課題的に重要な問題であり、多くの説が提唱されている (Egger, 1978 : Tung and Lindzen, 1979 : Charney and DeVore, 1979)。Madden and Labitzke (1981) は、解析的研究により、強制波と自由波の非線形相互作用の重要性を指摘している。これらの研究に対し、観測に基づいて、波数領域におけるエネルギーの流れの時間変化を検討することは、各々のモデルに優劣を与える重要な手がかりとなる。近年、大規模に実施されたFGGEにより得られたデータは上記の問題に解答を与える有力な資料として期待されている。

本報では、1979年1月中旬から下旬にかけて北半球において観測された顕著な波数1の増幅および鉛直伝播に対し、波数領域におけるエネルギーの流れを検討し、増幅の原因をエネルギー的に調べるとともに、増幅した波数1の鉛直伝播に対し、波数1の南北スケールの変化という観点から伝播の原因を検討した。

本報で用いた資料は、1978年暮から行なわれたFGGE level IIIb データのSOP-1 (Special Observation Period 1), GFDL version である。ただし、00Zと12Zのものを用いた。

2. 東西波数1の増幅および鉛直伝播

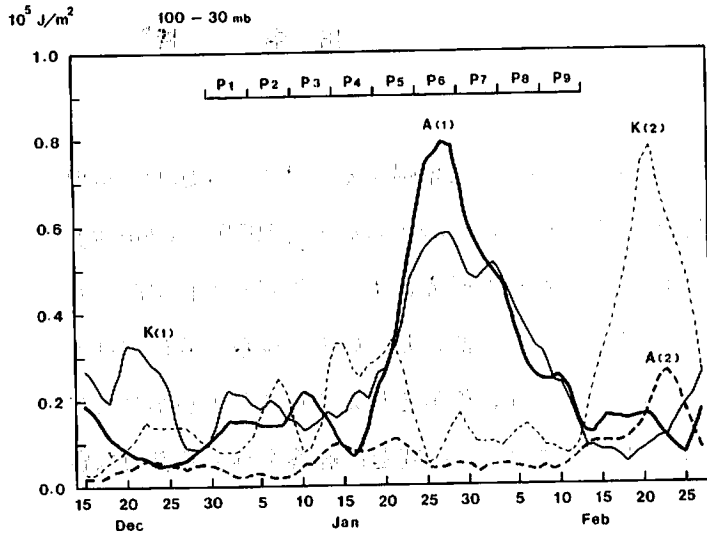
はじめに、1979年1月中旬から下旬にかけての波数1の増幅および鉛直伝播の観測事実を明らかにしておく。北半球の対流圏(地上から100 mbまで)および下部成層圏(100 mbから30 mbまで)における波数1および波数2の運動エネルギー $K_{(1)}$, $K_{(2)}$, 有効位置エネルギー $A_{(1)}$, $A_{(2)}$ の時間変化を第1図に示す。対流圏では、 $A_{(1)}$ は1月15日から26日までの約10日間のうちに $1.5 \times 10^5 J/m^2$ から約3.5倍の $5.3 \times 10^5 J/m^2$ に増大した。ピーク時には渦動有効位置エネルギーの大部分を波数1が占めたわけである。 $A_{(1)}$ の増大に伴い、 $A_{(2)}$, $K_{(1)}$ および $K_{(2)}$ の減少が見られ



e-folding = 16 day

* U.S.A. ミズリー大学大気科学教室

e -folding = 9 day



第 1-b 図

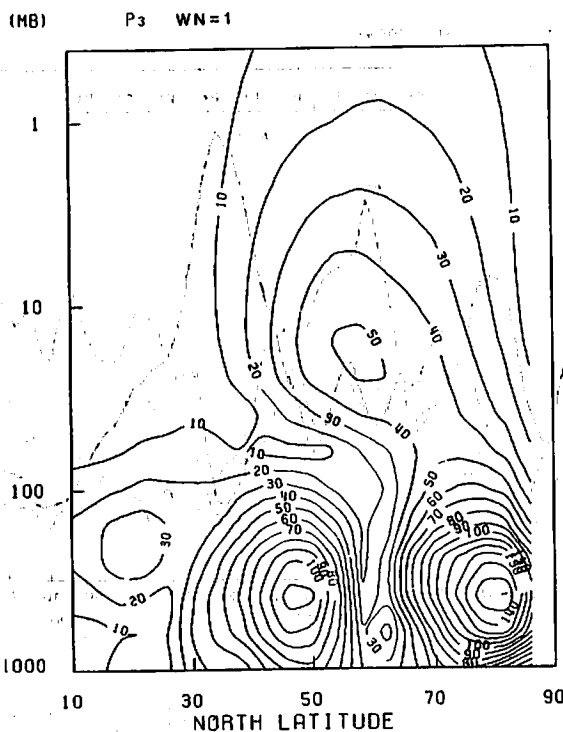
北半球における波数 1 と波数 2 の運動エネルギー $K(1)$, $K(2)$ および有効位置エネルギー $A(1)$, $A(2)$ の時間変化。対流圏(a), 下部成層圏(b)。図中の P_1 から P_9 は本報で定義した期間。

を 5 日間ごとに区分し、各々の期間を順に P_1 から P_9 と命名する。また、1 月 16 日から 25 日までの 10 日間を増幅期、26 日から 2 月 4 日までの 10 日間を減衰期と定義した。

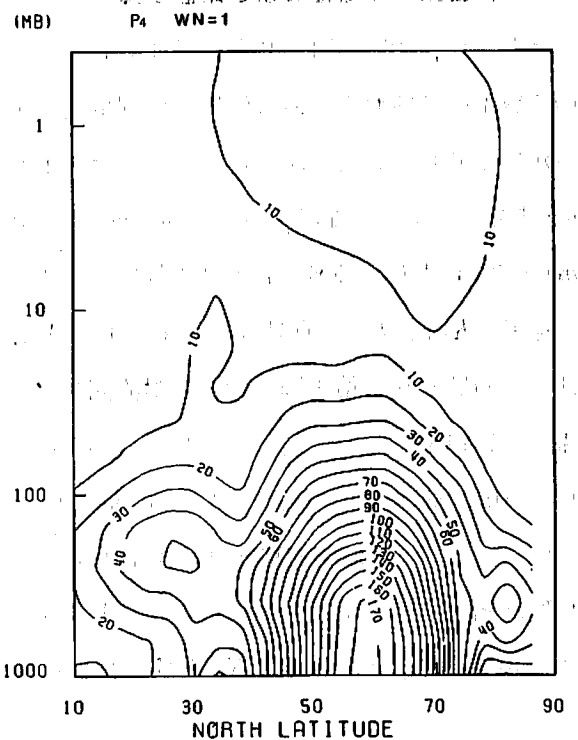
波数 1 の増幅の開始直前の P_3 からピーク P_6 に至るまでの波数 1 のジオポテンシャル高度の振

るが、 $A(2)$ の減少が著しい。一方、成層圏では、対流圏における $A(1)$, $K(1)$ が急増し、1 日遅れの 27 日にピークに達している。ピーク時のエネルギーレベルは、 $A(1)$ に関して増幅前の約 10 倍、 $K(1)$ に関して約 5 倍となっている。この急激なエネルギーの増大に対応して成層圏では、*minor warming* が発生しているが、*major warming* には至らなかった (Labitzke, 1981)。2 月下旬の $K(2)$ の増大に対応して *major warming* が発生しているが、これについては Palmer (1981) の報告があり、1 月下旬の波数 1 の減衰から *major warming* に至るまでの過程は Palmer and Hsu (1983) により報告されている。

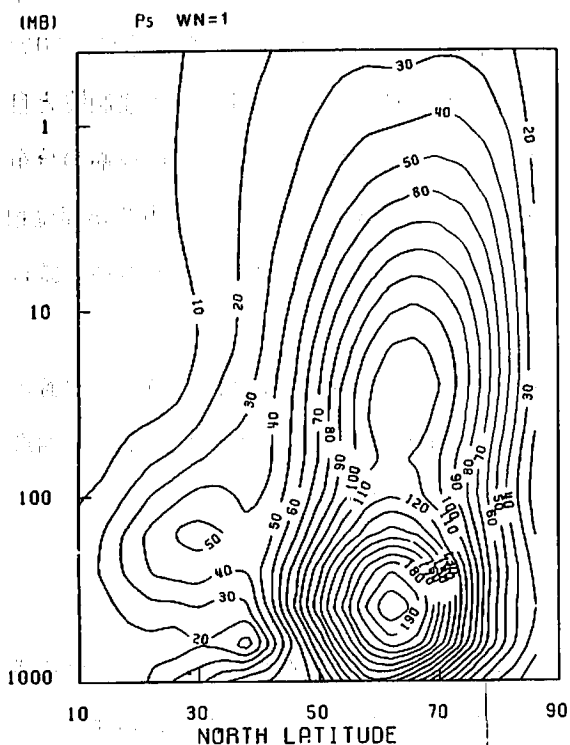
本報では、12 月 30 日以降、2 月 12 日まで



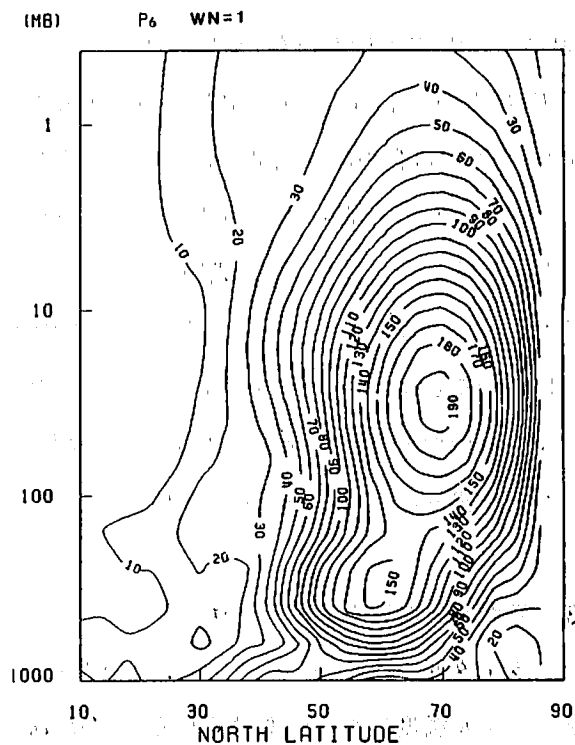
第 2-a 図



第 2-b 図



第 2-c 図

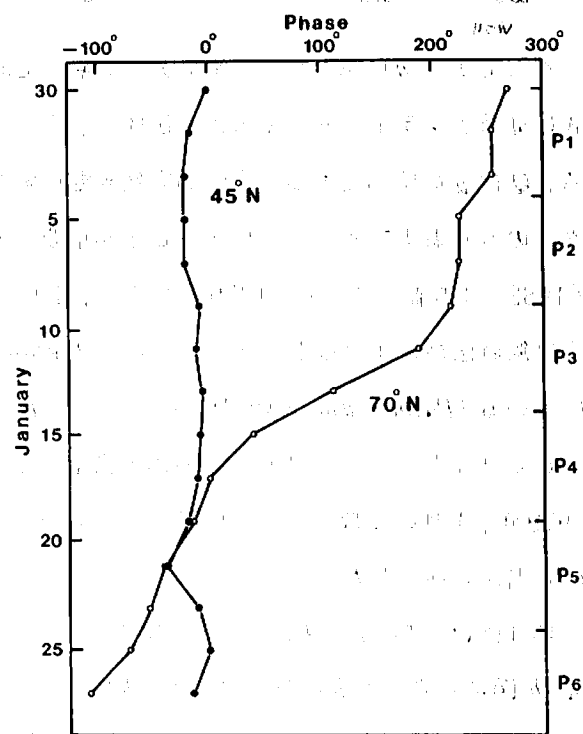


第 2-d 図

5 日平均ジオポテンシャル高度の鉛直子午面分布。ただし、図中の値には $\exp(-z/2)$ が乗じてある。(a)は波数1の増幅直前、(d)は増幅のピークに相当する。単位は (m)。

幅の鉛直子午面分布を第 2 図に示す。ただし、この図の値には $\exp(-z/2)$ が乗じてある (Matsuno 1970)。ここで $Z = \ln(P_0/P)$ である。P₃ では、対流圏において位相の異なる 2 つの振幅の極大が形成された。位相は中緯度の極大で 10°W、高緯度の極大で 170°E であった (第 3 図)。P₄ では、60°N に単一の振幅の極大を持つ分布を呈した。P₅ では、対流圏から成層圏への波数 1 の伝播が開始し、A₍₁₎ のピーク時に相当する P₆ では、70°N の下部成層圏に極大が形成された。対流圏から成層圏への波数 1 の伝播が明瞭である。

複素表示された波数 1 のジオポテンシャル高度を対流圏内で鉛直積分し、その位相の変化を調べた結果を第 3 図に示す。中緯度 (45°N) における位相は 10°W 付近で停滞し強制波としての特徴を示しているのに対し、高緯度 (70°N) における位



第 3 図

45°N および 70°N における対流圏平均ジオポテンシャル高度の波数 1 の位相 (リッジの経度) の時間変化。

相は約 27 日周期で西進し、自由波としての特徴を呈している。Madden and Labitzke (1981) は、 $60^{\circ}N$ について解析を行ない約 16 日周期を見出しているが、第 2-a 図から明らかなように、 $60^{\circ}N$ は P_3 において振幅の最も小さい緯度であるため $70^{\circ}N$ を用いた。 P_3 では逆位相だった強制波と自由波が P_4 では自由波の西進により同位相となった。 $60^{\circ}N$ に単一の極大を持つ波数 1 の振幅の分布 (第 2-b 図) は、強制波と自由波の重ね合わせとしてある程度解釈できる。強制波と自由波が同位相になった時に $A_{(1)}$ が増大し、成層圏への鉛直伝播が開始されている。自由波はその後西進を続けるが、 $A_{(1)}$ がピークに達した P_6 以降は不明瞭となった。

以上のことから、1 月中旬以降に観測された波数 1 の増幅はエネルギー的には波数 1 の有効位置エネルギーの増大として特徴づけられ、増幅および成層圏への鉛直伝播に関し、高緯度における西進波が、中緯度における停滞波と同位相になったことが重要であると指摘できる。

3. 東西流と波数 1 の南北スケール

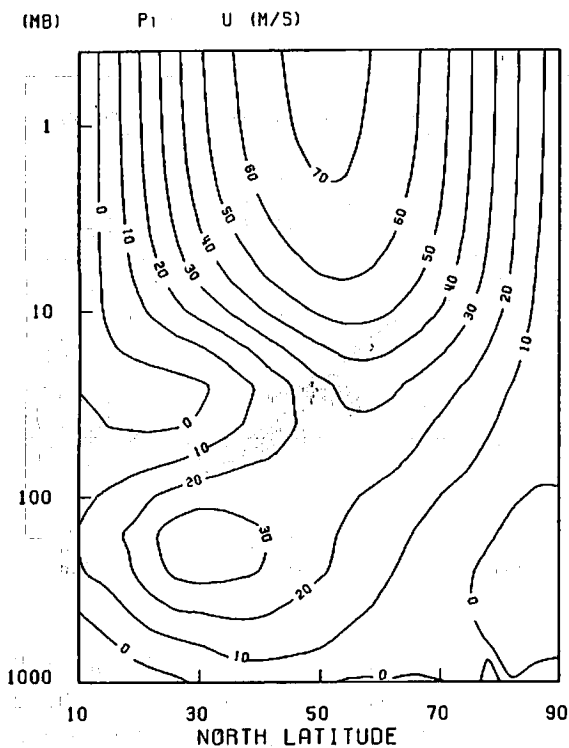
プラネタリー波の鉛直伝播の構造を比較的簡単に、しかも精巧に表現するものとして、松野のポテンシャル渦度保存式があげられる (Matsuno, 1970)。定常の場合の式を以下に書きおろす。

$$\phi(\lambda, \theta, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \psi_m(\theta, z) \exp(im\lambda + \frac{z}{2}) \quad (1)$$

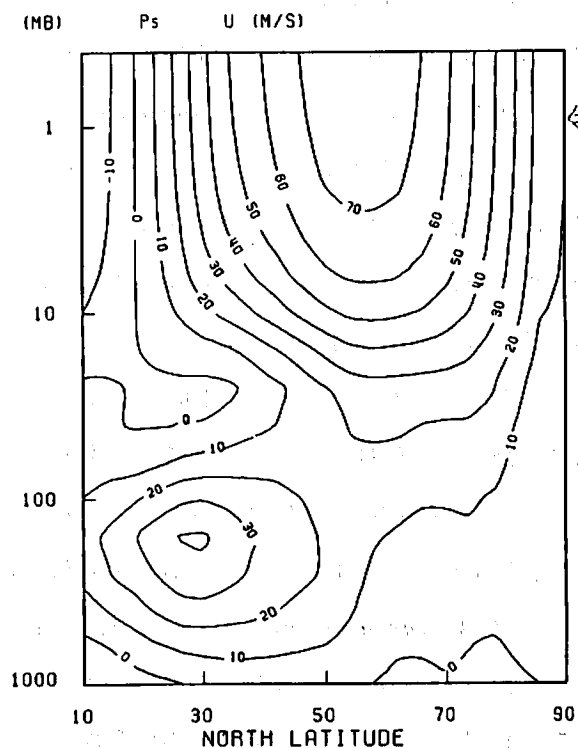
$$\frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\frac{\cos\theta}{\sin^2\theta} \frac{\partial\psi_m}{\partial\theta} \right) + l^2 \sin^2\theta \frac{\partial^2\psi_m}{\partial z^2} + Q\psi_m = 0 \quad (2)$$

ここで $l = 2a\Omega/N$, ϕ はジオポテンシャルである。式の詳細は原論文を参照されたい。この方程式に従うとプラネタリー波の鉛直伝播は、その南北構造および refractive index, Q の分布に依存する。 Q は \bar{u} の関数である。成層圏突然昇温に関し、 Q の鉛直子午面分布の変化により $E-P$ フラックスの方向および強さが変化することが重要であると O'Neill and Youngbuilt (1982), Kanzawa (1982) は指摘している。1979 年の場合、1 月下旬に minor warming をもたらした波数 1 の増幅および鉛直伝播により Q が変化し、これが preconditioning となって 2 月下旬の major warming を導いている (Palmer and Hsu, 1983)。一方、Boyd (1982) はプラネタリー波の鉛直伝播に関して、 Q の変化よりもプラネタリー波の南北構造の変化が重要であると指摘している。そこで、本報では 1979 年、1 月の波数 1 の鉛直伝播がどのような条件のもとで生じたかという問題に対し、この両者の立場から検討した。

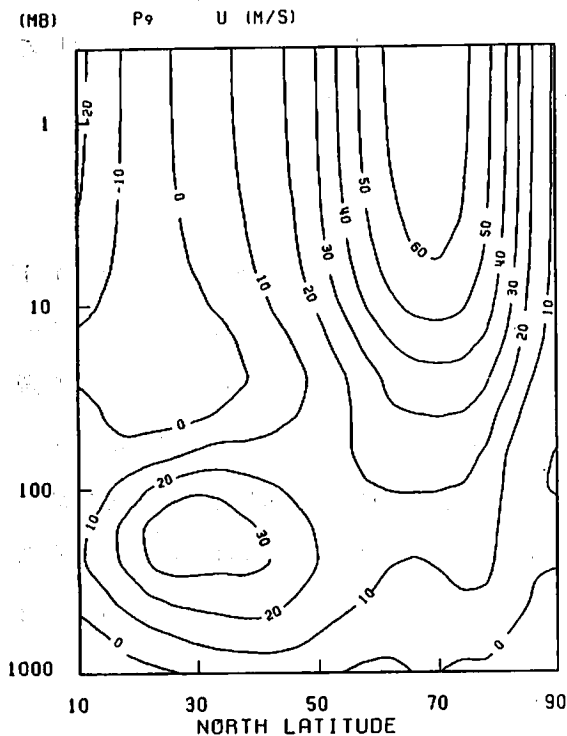
第 4 図は、 P_1, P_5, P_9 の各々の期間における東西流 \bar{u} の鉛直子午面分布を示す。第 4-a 図と第 4-b 図に示された \bar{u} の分布は、その緯度方向の微分も合わせてほぼ同一のパターンを示しているといえる。一方、第 4-c 図に示された鉛直伝播後の \bar{u} の分布からは極夜ジェット約 15° 極方向への変位と衰退が明らかである。この preconditioning として特徴づけられる \bar{u} の分布の変化と 2 月下旬の波数 2 の鉛直伝播の関係については上述した。ここで重要なことは 1 月中旬以降の波数 1 の



第4-a 図



第4-b 図



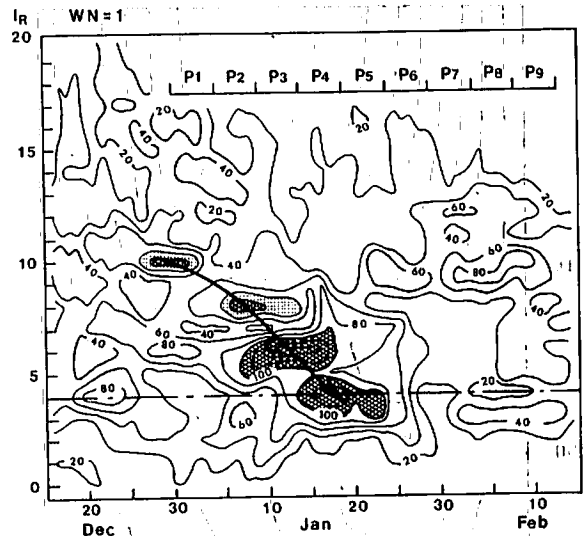
第4-c 図

東西流, \bar{u} の鉛直子午面分布, 波数1の増幅前(a), 増幅時(b), 増幅後(c)。

鉛直伝播に関し, それに先行する \bar{u} の分布に明瞭な変化が見出せないということである。従って Q の変化は1月中旬以降の波数1の鉛直伝播に対して本質的でないと考えられる。

次に, 波数1の南北構造の変化を検討した。第2図から推測されるように, 鉛直伝播以前の波数1の南北スケールは小さく, 伝播の際の南北スケールは大きい。擾乱の空間スケールが大きくなり一定の臨界値を越えた時に鉛直伝播が生じることは良く知られている (Charney and Drazin, 1961)。そこで, 波数1の南北スケールの時間変化を定量的に表現するために, 100 mb までの鉛直平均に対し, Hough 関数展開を行なった結果を第5図に示す。Hough 関数展開に関する詳細は, Kasahara (1976) に準拠した。縦軸に外部ロスビー波に対応する南北モード番号, l_R をとり, 図

中の振幅の単位は (m) で表現してある。12月下旬に $l_R=10$ に出現した 100m を越える大振幅が時間とともに、より低次の *antisymmetric* モードへ移り、 $l_R=4$ に達した1月中旬には波数1の鉛直伝播が開始した。波数1の南北スケールが組織的に伸びたことは明らかである。注目すべきことは、 $l_R=6$ で最大振幅に達した時点では鉛直伝播は生じていないのに対し、 $l_R=4$ が 100m を越えた段階で急激に鉛直伝播が開始されたことである。第4-b 図から中緯度の \bar{u} は圏界面付近で 25m/s であり、球面座標系における鉛直伝播が可能な南北モードは Dickinson, (1968) によると $l_R \leq 4$ である。従って、増幅した波数1の南北スケールが伸びた結果、鉛直伝播が可能な臨界値を越え、伝播が開始されたと解釈できる。



第5図

波数1の外部ロスビー波に相当する Hough モード ($0 \leq l_R \leq 20$) の時間変化。単位は、(m)。図中には鉛直伝播が可能な臨界モードが点線で記入されている。

以上のことから、1月中旬以降の波数1の急激な鉛直伝播は *refractive index* の変化ではなく、波数1自身の南北スケールの伸びが原因であったと指摘できる。この南北スケールの伸びに関しては中緯度における停滞波と高緯度における西進波が同位相となることが重要と考えられる。

4. 有効位置エネルギー収支

北半球の対流圏における波数1の増幅は有効位置エネルギーの増大として特徴づけられた(第1図)。そこで、波数1の有効位置エネルギーがどのような過程により増大したかが問題となる。この問題を明らかにするために北半球の対流圏に関する有効位置エネルギー方程式各項の時間変化を調べた。波数領域におけるエネルギー方程式の詳細は Saltzman (1957), (1970) に従った。ただし、赤道を通過するフラックス項が方程式に考慮されている。FGGE SOP-1, SOP-2に関する地球全体の波数領域でのエネルギー収支は Kung and Tanaka (1983), (1984) により解析され、渦動有効位置エネルギーの大部分がプラネタリー波に含まれていることが明らかにされている。波数1の有効位置エネルギーの時間変化は以下の式で表わされる。

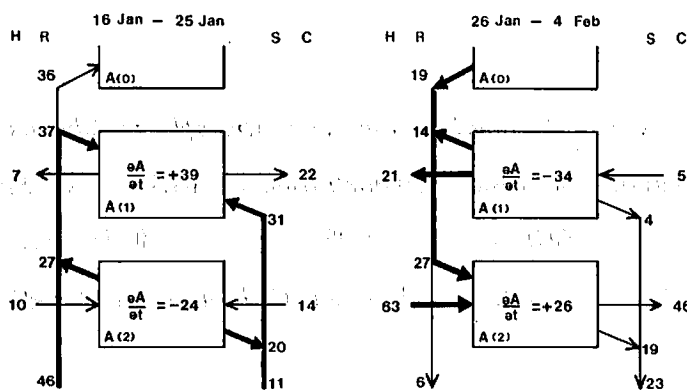
$$\frac{\partial A_{(1)}}{\partial t} = R_{(1)} + S_{(1)} - C_{(1)} + H_{(1)} \quad (3)$$

ここで、 $R_{(1)}$, $S_{(1)}$, $C_{(1)}$, $H_{(1)}$ はそれぞれ *zonal-wave interaction*, *nonlinear wave-wave interaction*, 有効位置エネルギーから運動エネルギーへのエネルギー変換, 非断熱加熱によるエネルギーの供給を示す。また、カッコ内の数字は波数1を示す。方程式の残差として $H_{(1)}$ が求められている。

方程式の右辺各項の時間変化に対し、SOP-1の平均を除去し、さらに10日以下の周期を除去するローパス数値フィルターを適用した結果を第6図に示す。

増幅期には、 $R_{(1)}$ および $S_{(1)}$ が正であることから、波数1の増幅には、*zonal-wave interaction* および *nonlinear wave-wave interaction* が重要であったことが指摘される。 $C_{(1)}$ は急激な $A_{(1)}$ の増大を緩衝させるように作用している。減衰期には $S_{(1)}$ は負に転じ、 $A_{(1)}$ の初期の減少に主要な役割を果たしていることが指摘されるが、その後、再び正に転じている。2月に入ってから正の $S_{(1)}$ は、負に転じた $R_{(1)}$ と打ち消し合い、結果的には $A_{(1)}$ の時間変化に影響を及ぼしていない。減衰の主要な原因はむしろ長期間にわたり負の値を示した $H_{(1)}$ にあると言える。以上のことから、1月中旬以降に $A_{(1)}$ が急激に増大した原因は、 $R_{(1)}$ による $A_{(1)}$ の増大と、 $S_{(1)}$ による $A_{(1)}$ の増大が同時に作用したためと解釈できる。

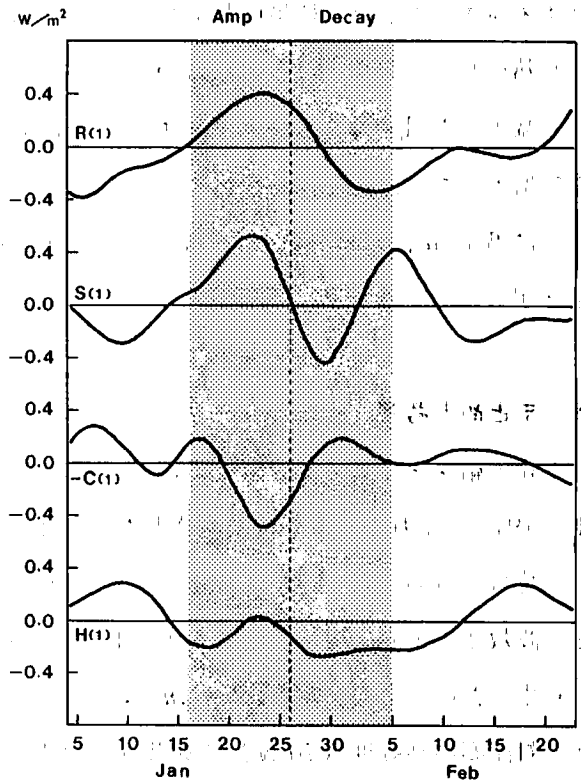
増幅期および減衰期の各々の10日間平均に対する有効位置エネルギー収支を波数2との関係で調べた結果を第7図のボックスダイアグラムに示す。方程式右辺の H, R, S, C に対応する図中の



第7図

対流圏における波数1, 波数2の有効位置エネルギーに関するエネルギーフローダイアグラム。増幅期(a), 減衰期(b)。

図中の値 ($10^{-2} W/m^2$) は SOP-1平均からの偏差で示されている。



第6図

対流圏における波数1の有効位置エネルギー方程式、(3)各項の時間変化。ただし、平均および10日以下の周期を除去するローパス数値フィルターが適用されている。増幅期および減衰期を陰影で示した。

矢印でエネルギーの流れの方向を表現し、大きさを数値で添えた。ただし、図中の値は SOP-1 平均値からの偏差で示されている。エネルギーの時間変化の原因となった項を太い矢印で表現した。波数1の増幅期において、第1図からも推測されるように、 $S_{(1)}$ の増大の多くは波数2からのエネルギーの供給であったことが明らかである。また、 $R_{(1)}$ が増大している際に $R_{(2)}$ が負を示していることから、 $A_{(0)}$ から $A_{(2)}$ に流れるべ

きエネルギーが、 $A_{(1)}$ に集中してしまったと考えられる。波数 1 の減衰期において、 $A_{(1)}$ の減少は非断熱冷却および *zonal-wave interaction* により生じている。また、一旦 *interaction* プロセスにより減少した $A_{(2)}$ は非断熱加熱および *zonal-wave interaction* の増大により元のエネルギーレベルまで増大した。波数 1 が原因と考えられる波数 2 の有効位置エネルギーの減少および増大が、結果的には第 1-a 図に示されたように、Matsuno (1971) の突然昇温モデルの境界条件と同様の変化を引き起こしていることは興味深い。

5. まとめと考察

本報の結果をまとめると以下ようになる。

1. 1979 年 1 月中旬以降に観測された波数 1 の増幅は、波数 1 の有効位置エネルギーの増大として特徴づけられた。運動エネルギーは成層圏では増大したが、対流圏では減少した。
2. 波数 1 の鉛直伝播は、波数 1 の南北スケールが伸びて鉛直伝播可能な条件を満足したことにより生じたのであり、*refractive index* の分布の変化によるものではない。
3. 対流圏の高緯度 ($70^{\circ}N$) で顕著な波数 1 の西進波 (約 27 日周期) が観測され、これが中緯度で停滞する波数 1 と同位相になった時に南北スケールが伸び、増幅および鉛直伝播が生じた。
4. 波数 1 の有効位置エネルギーの増大は、*zonal-wave interaction* および *nonlinear wave-wave interaction* の同時作用により生じた。波数 2 の有効位置エネルギーの貢献が大きかった。また、増幅した波数 1 は非断熱冷却および *zonal-wave interaction* により減衰した。

本報の結果から、プラネタリー波の増幅に関し 1979 年 1 月の波数 1 の増幅においては、観測された波数 1 の西進波 (自由波) と波数 1 および 2 の停滞波 (強制波) との非線形相互作用 (顕熱輸送) が重要と考えられる。また、成層圏への鉛直伝播に関しては、波数 1 の西進波と停滞波の干渉作用が重要と考えられる。波数 1 の西進波に対する今後の一層の研究が望まれる。

謝 辞

本研究は *National Science Foundation (NSF)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, および *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* の *GARP Grant ATM-8108216* の共同支援による総合的 *FGGE* エネルギー解析の一環として進行中のものである。本報の執筆を許可された *U.S.A.* ミズリー大学大気科学教室の *E. C. Kung* 教授には感謝いたします。

References

- Boyd, J.P., (1982): The influence of meridional shear on planetary waves. Part I: Nonsingular wind profiles. *J. Atmos. Sci.*, 39, 756-769.
- Charney, J.G., and J.G. DeVore, (1979): Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking. *J. Atmos. Sci.*, 36, 1205-1216.
- Charney, J.G., and P.G. Drazin, (1961): Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 66, 83-109.
- Dickinson, R.E., (1968): On the exact and approximate linear theory of vertically propagating planetary Rossby waves forced at a spherical lower boundary. *Mon. Wea. Rev.*, 96, 405-415.
- Egger, J., (1978): Dynamics of blocking highs. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1788-1801.
- 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. Meteor. Soc. Japan*, 60, 1063-1072.
- Kasahara, A., (1976): Normal modes of ultralong waves in the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 104, 669-690.
- Kung, E.C., and H. Tanaka, (1983): Energetics analysis of the global circulation during the special observation periods of FGGE. *J. Atmos. Sci.*, 39, 2575-2592.
- Kung, E.C., and H. Tanaka, (1984): Spectral characteristics and meridional variations of energy transformations during the first and second special observation periods of FGGE. (submitted)
- Labitzke, K., (1981): The amplification of height wave-1 in January 1979: A characteristic precondition for the major warming in February. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 983-989.
- Madden R.A., and K. Labitzke, (1981): A free Rossby wave in the troposphere and stratosphere during January 1979. *J. Geophys. Res.*, 86, 1247-1254.
- Matsuno, T., (1970): Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter northern hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 27, 871-883.
- Matsuno, T., (1971): A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, 28, 1479-1494.
- O'Neill, A., and C.E. Youngblut, (1982): Stratospheric warmings diagnosed using the transformed Eulerian-mean equations and the effect of the mean state on wave propagation. *J. Atmos. Sci.*, 39, 1370-1386.
- Palmer, T.N., (1981): Diagnostic study of a wavenumber-2 stratospheric sudden warming in a transformed Eulerian-mean formalism. *J. Atmos. Sci.*, 38, 844-855.
- Palmer, T.N., and C.P.F. Hsu, (1983): Stratospheric sudden coolings and the role of nonlinear wave interactions in preconditioning the circumpolar flow. *J. Atmos. Sci.*, 40, 909-928.
- Saltzman, B., (1957): Equations governing the energetics of the large scales of atmospheric turbulence in the domain of wavenumber. *J. Meteor.*, 14, 513-523.
- Saltzman, B., (1970): Large-scale atmospheric energetics in the wavenumber domain. *Reviews of GeoPhysics and Space Physics*, 8, 289-302.
- Tung, K.K., and R.S. Lindzen, (1979): A theory of stationary long waves. Part I: A simple theory of blocking. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 714-734.