

夏季北半球中高緯度における偏西風帯の季節内変動の 全球的特徴について

寺尾 徹

GLOBAL ASPECTS OF INTRASEASONAL VARIATION ON THE SUBTROPICAL WESTERLY IN NORTHERN HEMISPHERE SUMMER

By Toru TERA0

Synopsis

Through the analysis of the intraseasonal (15 to 60 days period) atmospheric circulation over northern hemisphere mainly in northern summer, wave activity with relatively short zonal wavelength (≈ 4000 km) is found almost everywhere along the subtropical westerly. It oscillates at about 25-day period, and propagates eastward at a considerably slow phase speed of about 2 m/s. Similar wave activity is seen in northern winter as well as in summer.

A gross estimation shows that the typical wave length of this wave activity is consistent with the stationary Rossby wave dispersion relationship. Further studies are necessary to clarify the mechanisms of this wave.

1. はじめに

日々の低気圧や高気圧の周期的な振舞いは、大きな温度勾配を伴った偏西風の不安定（傾圧不安定）の力学で基本的に説明できる。このスケールに属する大気の変動は総観規模現象と呼ばれ、数日～10日の周期を持っている。一方季節の移り変わり（季節変化）は、第1近似としては、太陽高度の季節変化による外力の変動への大気の応答によるものと考えられる。ところが、これらの中間にあたるタイムスケールにおいても大気の変動がみられ、場合によってはかなり組織的な振舞いを見せることがわかってきている。このタイムスケールの変動は季節内変動と呼ばれ、通常10数日～数十日の周期を持つ現象をさす。

組織的な季節内変動は、Madden and Julian (1971)¹⁾によって示された赤道付近の30日～60日周期の変動を契機として注目されてきた。この赤道付近の季節内変動は、30～60日周期変動と呼ばれる。発見のその後、1979年のFGGY観測データに基づく解析などを通じて、30～60日周期変動の特徴が調べられてきた(Lau and Chan 1983a²⁾, b³⁾; Lorenc 1984⁴⁾)。これらの研究によって、赤道付近の積雲活動の活動度が東西の全球波数1の構造を持ち、これが東向きに位相伝播しており、約30～60日の周期を持って地球を一周していることがわかった。このように組織的な振舞いを示す季節内変動は、大気の予測可能性との関係でも大変興味深い。総観規模スケールの変動の決定論的予測については、1～2週間が限度であると見積もられている。しかし、組織的な振舞いを示す季節内変動が存在することは、季節内変動スケールの変動の決定論的予測については、状況が異なるかもしれないことを示唆している。このような意味で、季節内変動の研究は、大気の振舞いを理解する上で重要な分野の一つとなっている。

季節内変動は、赤道ばかりではなく、中・高緯度にも見られる。

● 顕著な赤道の30～60日周期変動による熱帯の対流活動域の変動が、特に冬半球において、中・高緯度

の大気へ影響を与えている (Lau and Phillips 1986⁵⁾)。

- しかし、夏半球においてはこのような関連性は必ずしも顕著ではない (Knutson and Weickmann 1987⁶⁾)。
- また、中・高緯度の応答パターンは必ずしも熱帯の変動に直接支配されるのではなく、中・高緯度自身の基本場の状態に大きく左右される (Simmons et al. 1983⁷⁾)。夏季についても同様の結果が得られている (Lau and Pang 1992⁸⁾; Tsuyuki and Kurihara 1989⁹⁾)。
- 熱帯の対流活動の変動とインドモンスーンの対流活動との間に、かなり明瞭な同期関係が見出される。インドモンスーンの対流活動もやはり 30 ~ 60 日の周期を持って変動しており、位相の北への伝播を伴っている (Yasunari 1981¹⁰⁾)。

などのことが示されてきた。

そして、最近特に注目されている現象として、東西の全球波数にして 5 ~ 6 にあたる東西スケールを持った中・高緯度の波動がある。この波動のタイムスケールは 30 日弱であり、赤道の季節内変動と比較して短い。また、偏西風帯に沿って伝播している。特に北半球の冬季についてのデータ解析に基づく研究などが進められている (Hsu and Lin 1992¹¹⁾; Kiladis and Weickmann 1992¹²⁾)。

筆者は、これまでの研究のなかで、特にアジアの夏季の中・高緯度に注目して、季節内変動を記述してきた。まず、寺尾と村松 (1992)¹³⁾ で、比較的東西波長が短く (東西波数にして約 6 程度)、時間周期の長い (約 30 日前後) 波動が見いだされた。特に 1983 年の夏季のアジア域についての解析では、このスケールの波動が定在波動的な、節と腹を持った波動として見られることを示した。鉛直方向には位相が揃った順圧的な構造を持っていた。更に、寺尾と村松 (1993)¹⁴⁾ は、アジアに見られたこの波動は、高度場の変動でみると主として北から南への位相伝播を伴っていること、また、熱帯の対流活動やインドモンスーンの対流活動との明瞭な相関は見出されないこと、などを明らかにした。

今回の研究は、このような夏季に見られたアジア域の季節内変動に対する理解を、北半球の全球的な偏西風帯の変動のようすを解析することでいっそう深め、一方で、夏季の偏西風帯の波動についての全球的な一般的事実をまとめることを主たる目的とする。特に、夏季においても全球的に波数 5 - 6 の季節内変動が見られるかどうか。見られるとして、それがどのような特徴を持っているか。地域的にその特徴はどう違うか。に注意して解析する。

3. では、全球的に季節内変動が卓越する領域を示し、それと偏西風の強さとの関連性について考察する。4. では、偏西風上の季節内変動の東西方向への伝播特性の図にもとづいて、特徴をまとめた。5. では、典型的な波動である波数 5 - 6 の季節内変動の、個々のケースでの振舞いを示した。6. は、ロスビー波の分散関係式とこの研究の中で得られた波動との関係を主に論じた。7. は結果のまとめである。

2. データと解析方法

データは、1980 年から 1985 年の ECMWF 客観解析データを用いた。解析は主に南北風について着目した。これは、寺尾と村松 (1992)¹³⁾ で示したように、南北風において偏西風帯の季節内変動の特徴がよく表されているからである。

注目したタイムスケールは、約 15 ~ 60 日周期である。30 ~ 60 日周期変動を含み、また同時に、相関規模以下の時間スケールは除きつつ、30 日以下の季節内変動も記述するためである。そのためのバンドパスフィルターとして、15 ~ 60 日の周期を主に通す Lanczos フィルター (Duchon 1979)¹⁵⁾ を用いた。

3. 夏季の北半球における季節内変動の分布

夏季の北半球における季節内変動の空間的分布を調べた。そのために、バンドパスフィルターをかけた南

北風の時系列について、6月から8月にかけてのデータの二乗平均を求めて、この時期のこの領域における季節内変動の強度として定義した。また、特に偏西風の平均的な振舞いと季節内変動の分布との関連性に着目した。

3.1 6年間平均の季節内変動の分布

まず、1980-1985年の平均の結果を、Fig. 1に示す。この図から、季節内変動の卓越した領域をいくつか指摘することができる。

- 中部太平洋からアメリカ大陸にかけて東西に伸びる領域。この波列は、西部熱帯太平洋域の対流活動の変動に関連して励起され、北東へと波束が伝播し、太平洋上を通過してアメリカ大陸に伝わる波動として解析されているものに対応している可能性がある。
- アメリカ大陸の東海岸からヨーロッパを通り、ユーラシア大陸の北をまわる波列状のパターン。
- 地中海付近から東へと伸び、ヒマラヤ高原に至る領域にも弱いながら波列が認められる。

これらの波列パターンの東西波長は、経度にして30度弱である。この図から見てとれる東西スケールから推測できる偏西風帯の波動の波長は、経度にして約60度である。東西波長は、西半球も含めて、全球的にはほぼ共通している。この結果は、寺尾と村松(1992)¹³⁾で解析された偏西風帯上の波動が、全球的に見られる偏西風帯の波動現象の一部であることを示している。

これらの季節内変動の見られる領域は偏西風の平均的な位置ともある程度関連性を持っている。Fig. 2に、同じ期間の東西風の平均図を示す。偏西風は、東半球ではだいたい北緯40度付近に、西半球では北緯45度から50度付近にそれぞれ位置している。太平洋上と大西洋上に、海陸の熱的コントラストに関連して生じるとみられる大規模なトラフ（太平洋のトラフは、MPT: Mid Pacific Trough と呼ばれる）がみられる。また、最も風が強いのは、地中海からアジアにかけての偏西風帯である。

Fig. 1とFig. 2を比較すると、南北風に季節内変動が見られる領域は、多くの場所で偏西風の軸とよく一致している。また、MPTなど、偏西風の強い蛇行域のすこし西側で波列が顕著になっていることも分かる。ただし、最も偏西風の強い地中海からアジアにかけての偏西風帯は、季節内変動が風速の割には弱い領

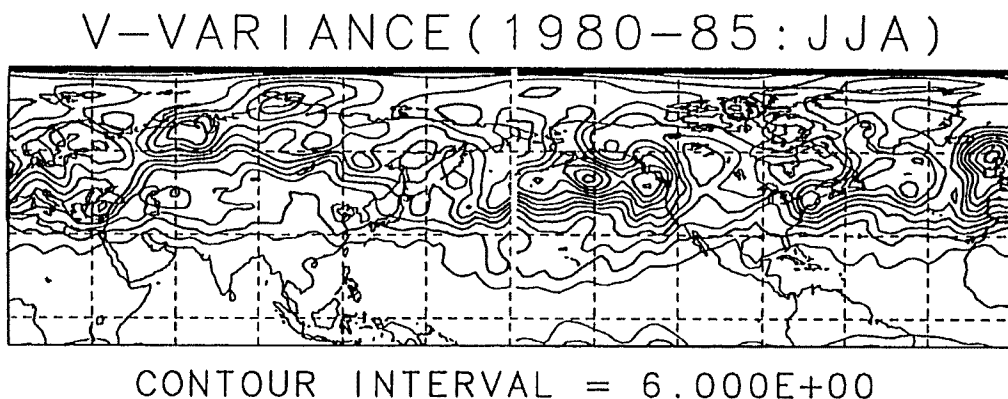
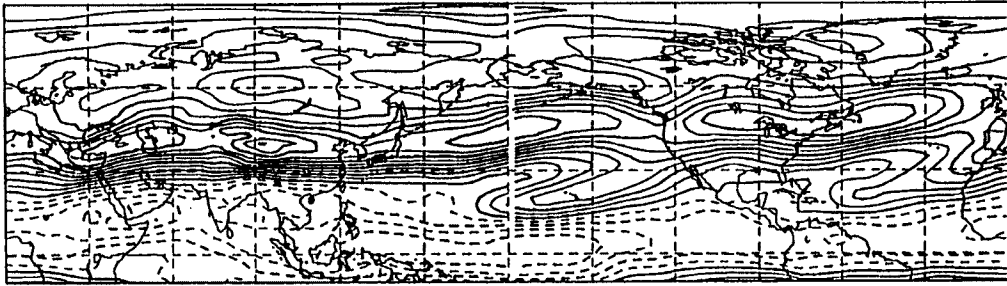


Fig. 1 Variance of intraseasonal variation of meridional wind velocity during summer season (June, July and August), at 300hPa. Contour interval is $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

U-MEAN (1980-85: JJA)



CONTOUR INTERVAL = 2.500E+00

Fig. 2 Time average of zonal wind velocity during summer season at 300hPa. Contour interval is 4 m/s.

域となっている。季節内変動の強度は必ずしも偏西風が強ければ大きいとは限らない。

3.2 冬季との比較

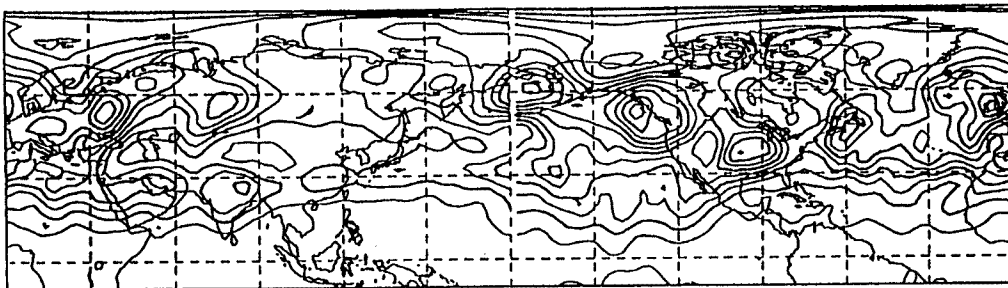
冬季の季節内変動の強度について、夏季と同様に（ただし、12～2月の平均）示す（Fig. 3）。この図からも、やはり夏季と同じように東西方向に周期的な構造が見られる。また、夏季と同じように平均東西風を Fig. 4 に示した。

冬季の場合、波列状のパターンは、

- アフリカ北部からヒマラヤの南を通して日本付近に至る領域
- オホーツク海の北からアメリカ付近に至る領域
- アメリカ東岸からヨーロッパに至る偏西風に沿った領域
- ヨーロッパから北東へのびる領域

などに見られる。南アジアの波列は、Kiladis and Weickmann (1992)¹²⁾ や Hsu and Lin (1992)¹¹⁾ 等の解析から得られたものとよく一致している。

V-VARIANCE (1980-84: DJF)



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01

Fig. 3 Same as Fig. 1, except for winter season (December, January and February). Contour interval is $10 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

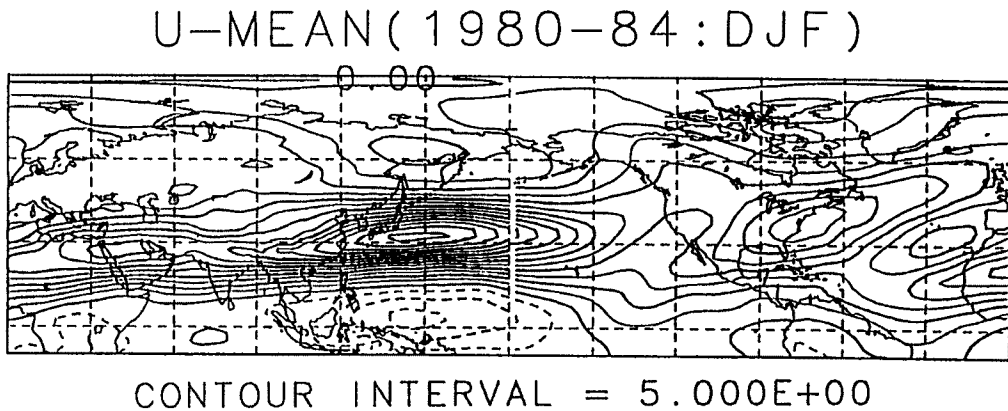


Fig. 4 Same as Fig. 2, except for winter season. Contour interval is 5 m/s.

この結果から、夏季にも冬季とよく似たスケールを持った季節内変動がみられることがわかる。夏季の冬季に対する違いはあまり目立たないが、東西波長は夏季に比べて冬季のほうがいくらか長いように思われる。

4. 東西方向への伝播特性について

3. でしめされた、波数6前後の波動の東西方向への伝播特性を調べるために、南北風の季節内変動成分に関する経度時間断面図を作成した。季節内変動成分が卓越している緯度は経度によって異なるが、大雑把に言って、東半球は40°N、西半球は45°Nあたりなので、東半球と西半球にわけて図を作成した。

Fig. 5, 6 に、1980年-1985年の夏季(6月-9月)の南北風の季節内変動成分の経度時間断面図を東半球について示した。これらから、以下のようなことが言える。

- 基本的に東への位相伝播が顕著であるが、時々西への位相伝播が認められる。特に1980年や1982年の夏などで東進性が顕著である。
- 西向き、東向きの波がほぼ同程度の位相速度を持っている。
- 東西波数は約6-7程度。位相速度は極めて遅い。
- 定在波的になる場合もある。これは特に、1983年の盛夏や1985年の8月以降に顕著である。

どの年についてもほぼ例外なく、東西波長はほぼ一定である。位相速度については、年毎に異なっているが、極端に違う年はない。これらの結果から、基本的には東向きの位相伝播が支配的であり、そこに時おり同じくらいの絶対値の位相速度を持った西向きの位相伝播が加わるという変動をしていることが分かる。時おり見られる定在波的な特徴は、むしろ、西向きと東向きの波が同程度の強さを持った時にあたるように見える。西半球と東半球での違いはあまり大きくない。

同様の時間経度断面図を冬季についてもしらべた (Fig. 7, 8)。冬季についても、多少空間スケールが大きいようだが、基本的に夏季のものと同じような特徴を持っていることが見てとれる。

波動の東向き群速度も興味深い。Fig. 5, 6の1983年の盛夏や1985年の8月以降の顕著な波動が見られる時期などについて北風/南風の極値をたどると、隣あう極地が、東に行くほど遅れて現われる傾向があり、かなり大きな東向きの群速度を持っていると解釈できる可能性がある。この群速度については、典型的事例

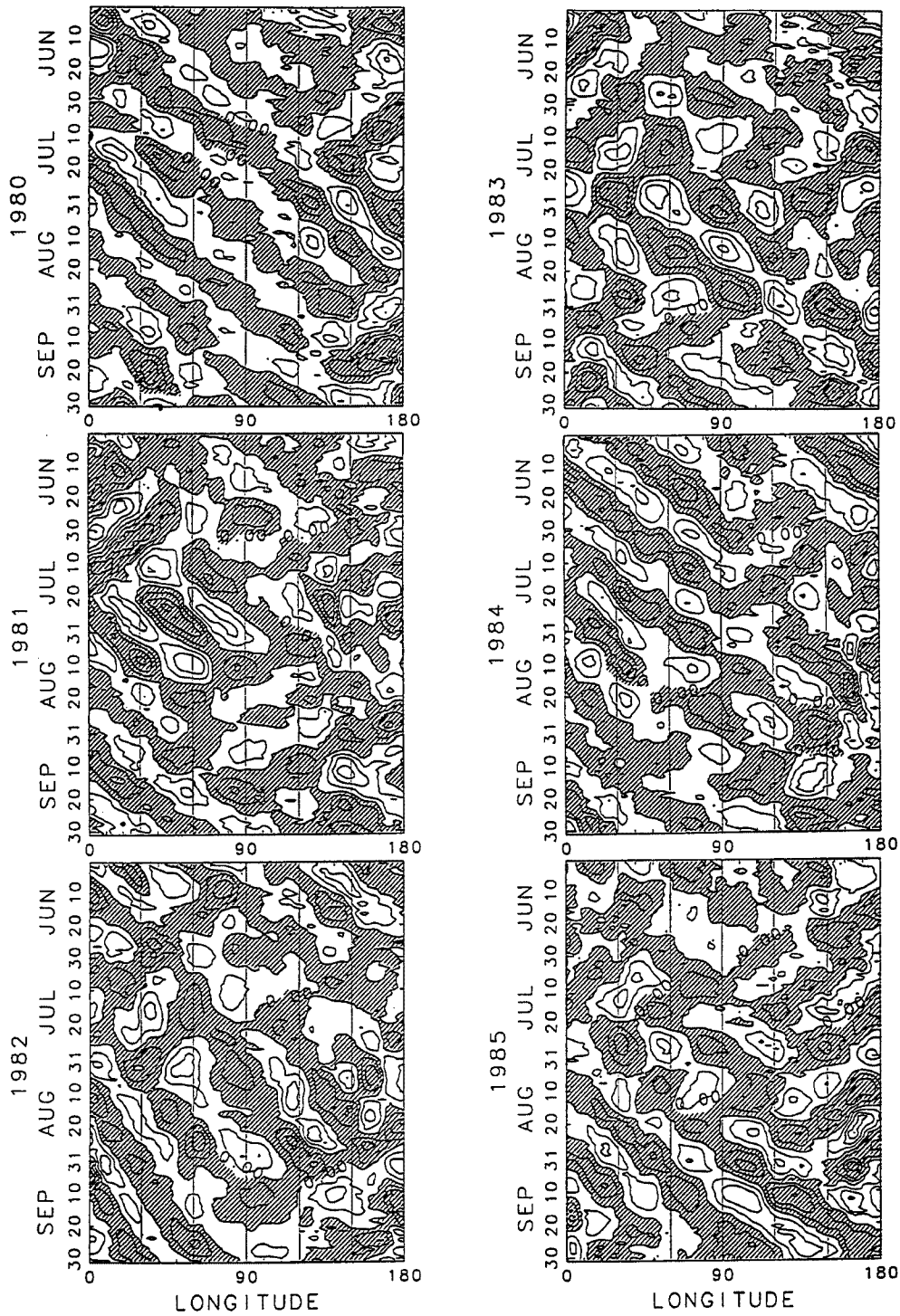


Fig. 5 Longitude-time section of the intraseasonal variation of meridional wind velocity in summer. For eastern hemisphere along 40°N latitude circle. Contour interval is 4 m/s. Negative areas are shaded.

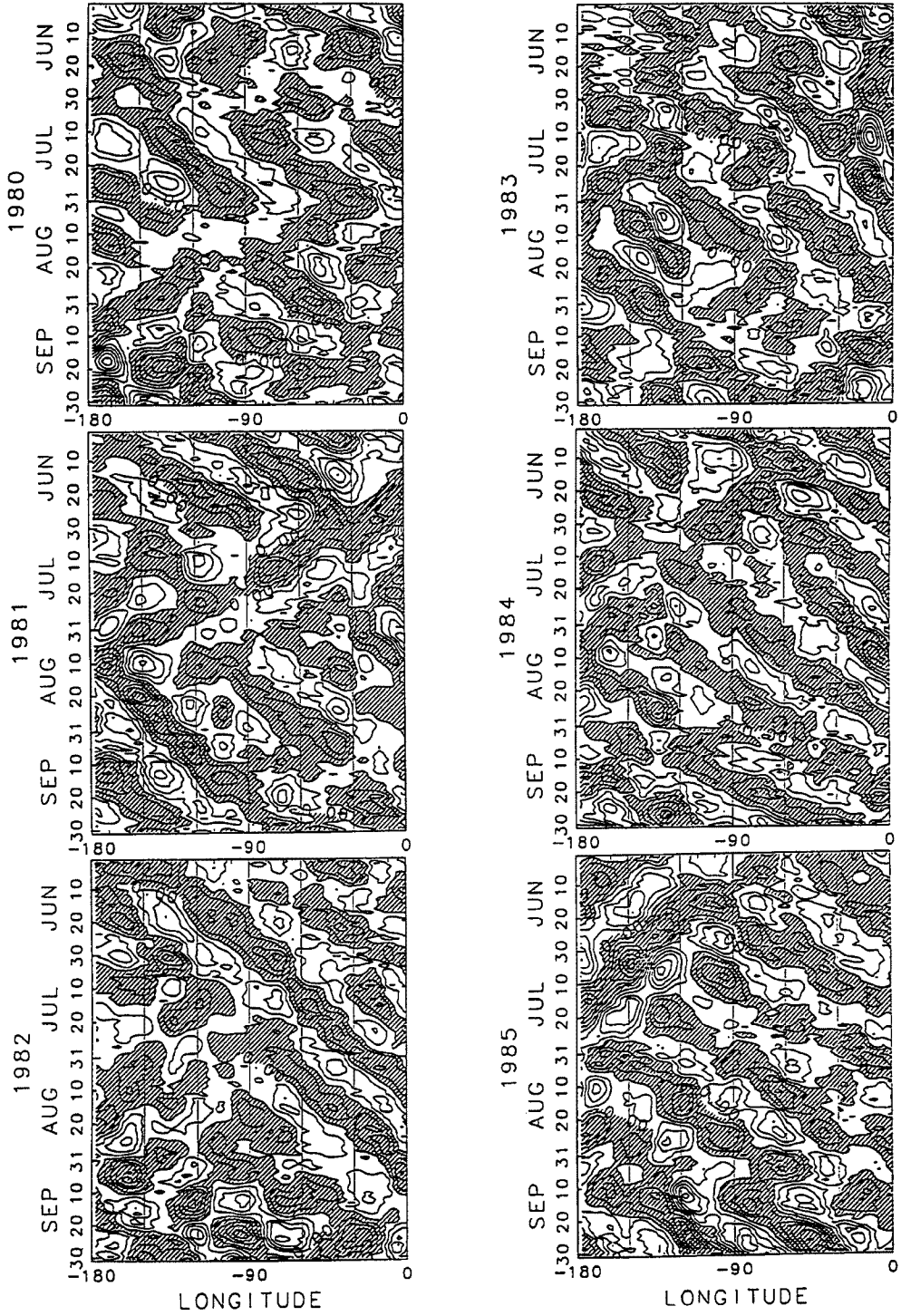


Fig. 6 Same as Fig. 5, except for western hemisphere along 45°N. Contour interval is 4 m/s.

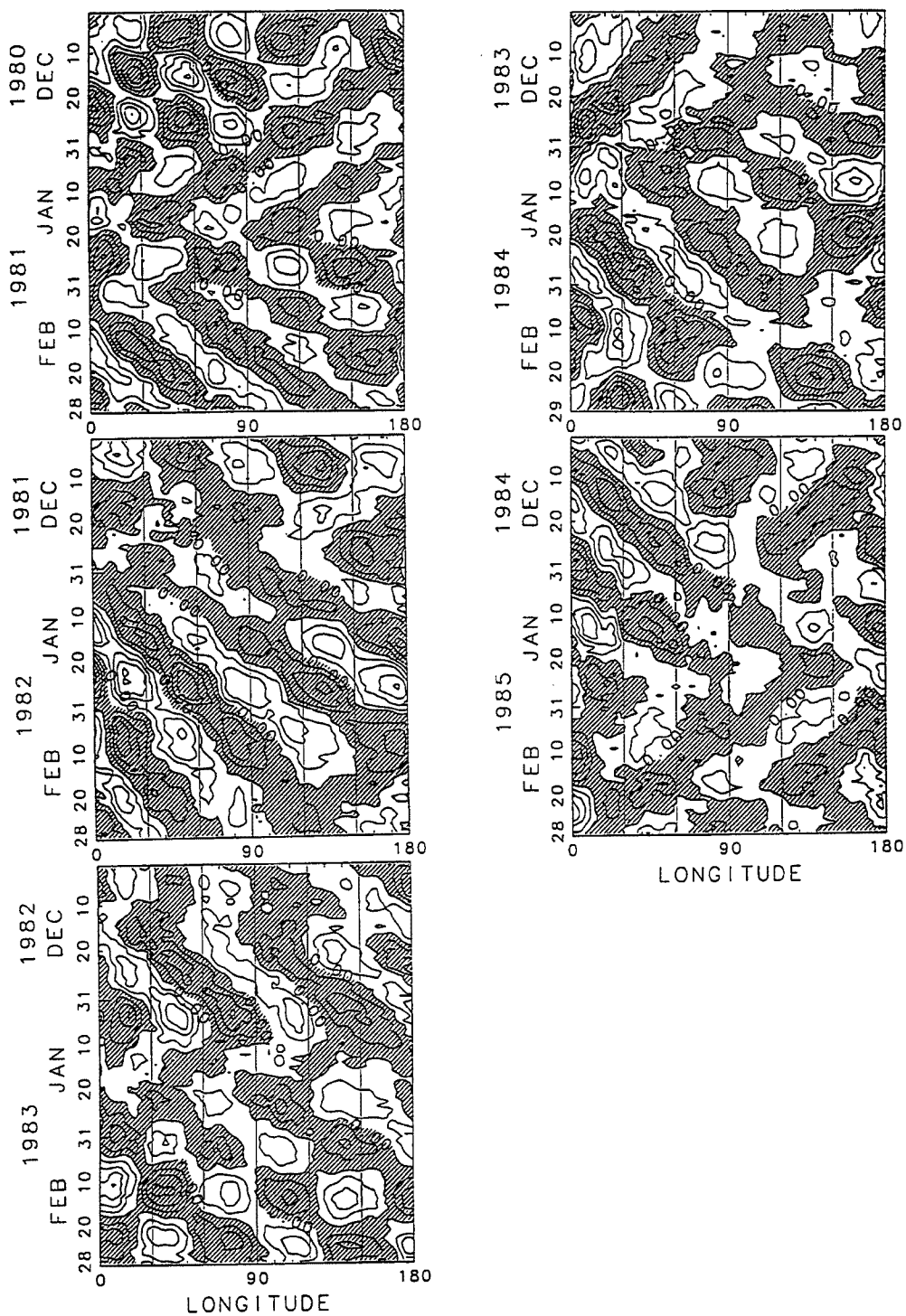


Fig. 7 Longitude-time section of the intraseasonal variation of meridional wind velocity in winter. For eastern hemisphere along 30°N. Contour interval is 4 m/s. Negative areas are shaded.

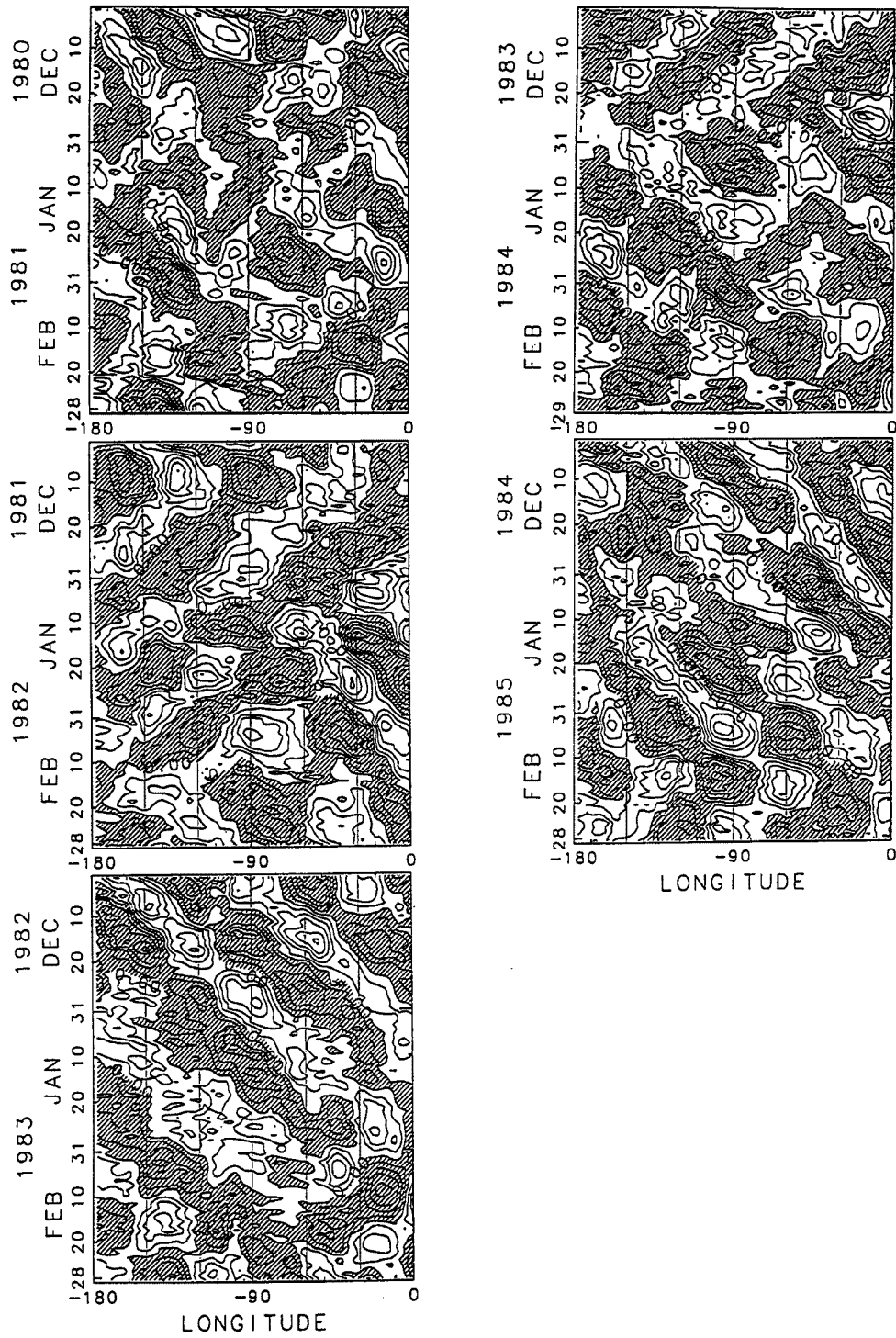


Fig. 8 Same as Fig. 7, except for western hemisphere along 40°N. Contour interval is 4 m/s.

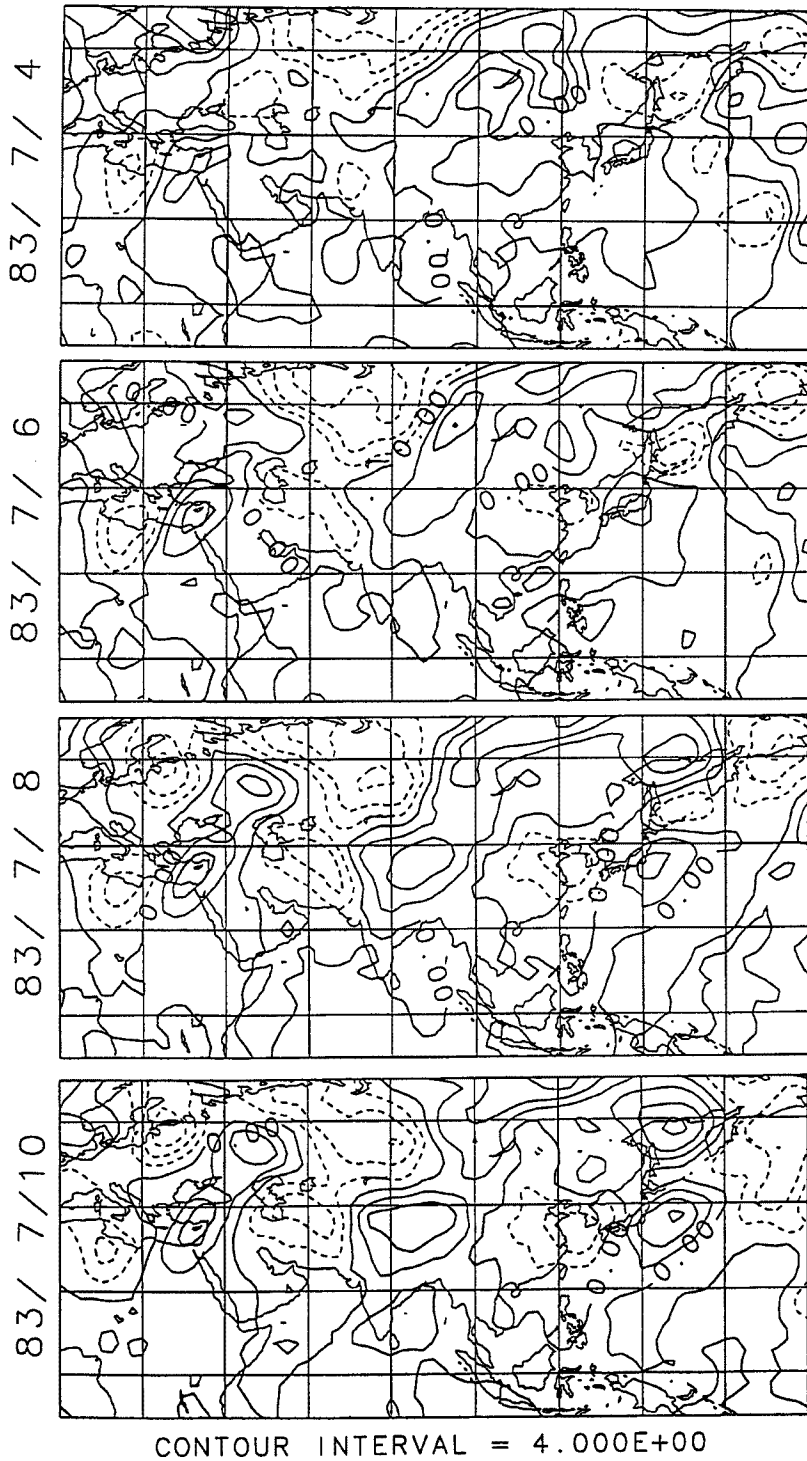


Fig. 9 Spatial distributions of the intraseasonal variation of meridional wind velocity over north-eastern hemisphere. The date of each panels are indicated by the label on the left side. Contour interval is 4 m/s.

をもとにして、5.で見積もる。しかし、これは典型的な場合のみの見積もりであり、これだけでは、一般的な群速度を見積もることはむづかしく、より信頼性の高い値を見積もるためにはいっそうの解析の工夫が必要である。

5. 偏西風帯の季節内変動のケーススタディー

偏西風帯の季節内変動が具体的にはどのように見えるかについて、アジア以外の領域も含めて、具体的事例をいくつか調べた。

5.1 東半球：1983年7月6日-7月12日

Fig. 9 に、東半球のこの期間の南北風の季節内変動成分を示す。夏季の東半球の季節内変動は主に 40°N 付近を流れているので、この緯度帯に注目して解析する。

まず、7月6日の時点では、全体的に波動はみられない。ところが、7月8日になると全域にわたって波が見られるようになる。そして、西の方から急速に波動が強まっていき（7月10日）、日付変更線付近まで波束が達する（7月12日）。

この図を見る限りでは、東西方向の位相の伝播はほとんど見られない。しかし、東への波束の急速な伝播が見られる。この時期の東西風の季節内変動成分についても、これとほぼ対応して値が増加している（図は示さない）。順圧ロスビー波のエネルギーは運動エネルギーのみについて保存するから、この結果から見て、Fig. 9の結果は、エネルギーの東への輸送と解釈できる。東の伝播速度（つまり群速度 c_{gx} ）をこの図から見積もとると、

$$c_{gx} \approx \frac{120 \text{ 度}}{4 \text{ 日}} \approx 30 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。

5.2 西半球：1983年7月2日-7月8日

Fig. 10 に、西半球のこの期間の南北風の季節内変動成分を示す。7月2日から7月8日にかけての南風域・北風域の中心を次々と追って行くと、東半球の場合と異なり、東へと位相伝播している様子がわかる。

Fig. 10 からよみとれる位相速度 (c_x) は大変遅く、

$$c_x \approx \frac{15 \text{ 度}}{6 \text{ 日}} \approx 2 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots(2)$$

程度となる。東西波長 (L_x) はほぼ波数6程度と考えてよいから、

$$L_x \approx \frac{2\pi R}{6} \approx 4000 \text{ km.} \quad \dots\dots\dots(3)$$

(2)、(3)より、周期 (T) を見積もれば、

$$T = L_x/c_x \approx 23 \text{ 日} \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。(1)-(4)の値は、6.で考察する。

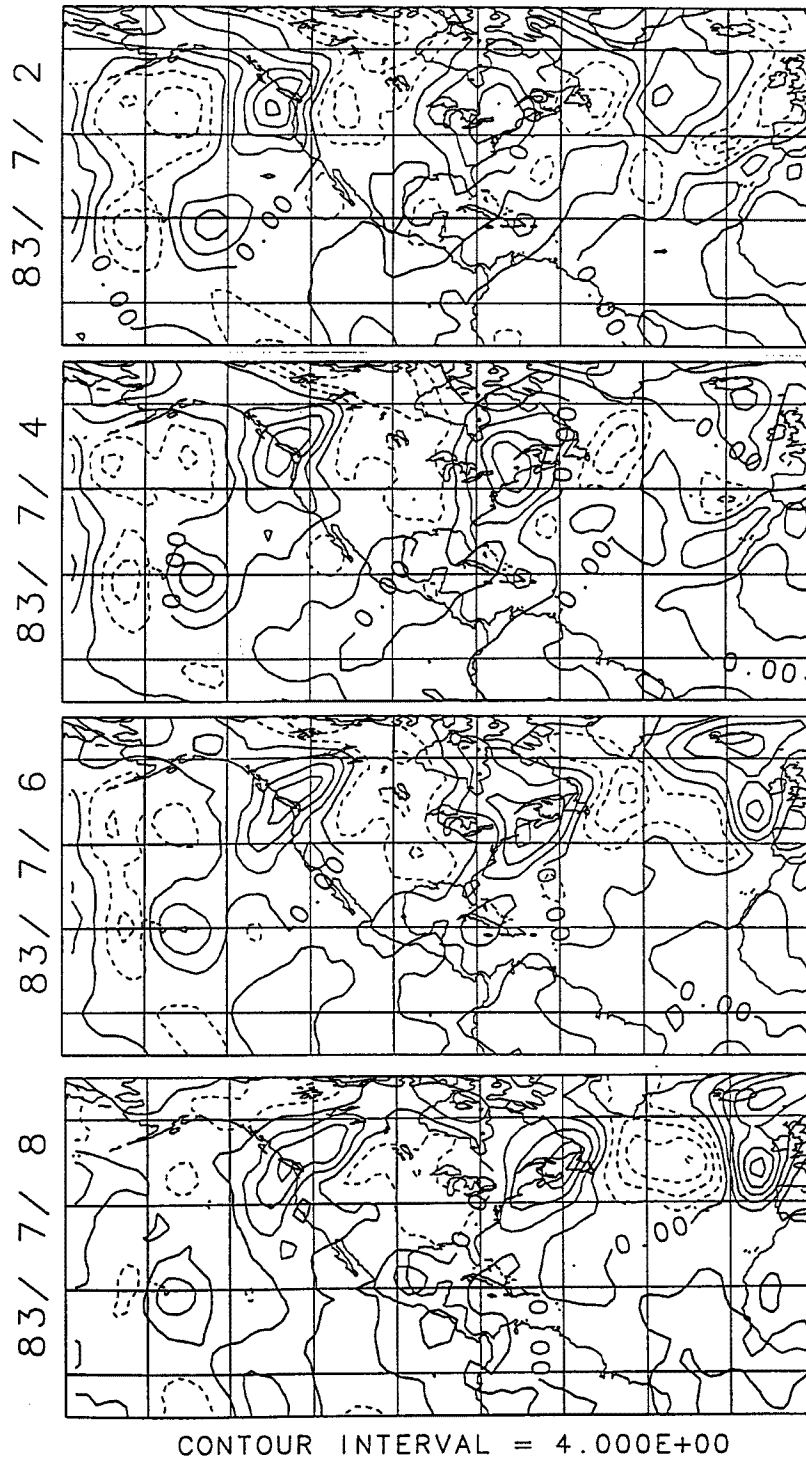


Fig. 10 Same as Fig. 9 except for north-western hemisphere. Contour interval is 4 m/s.

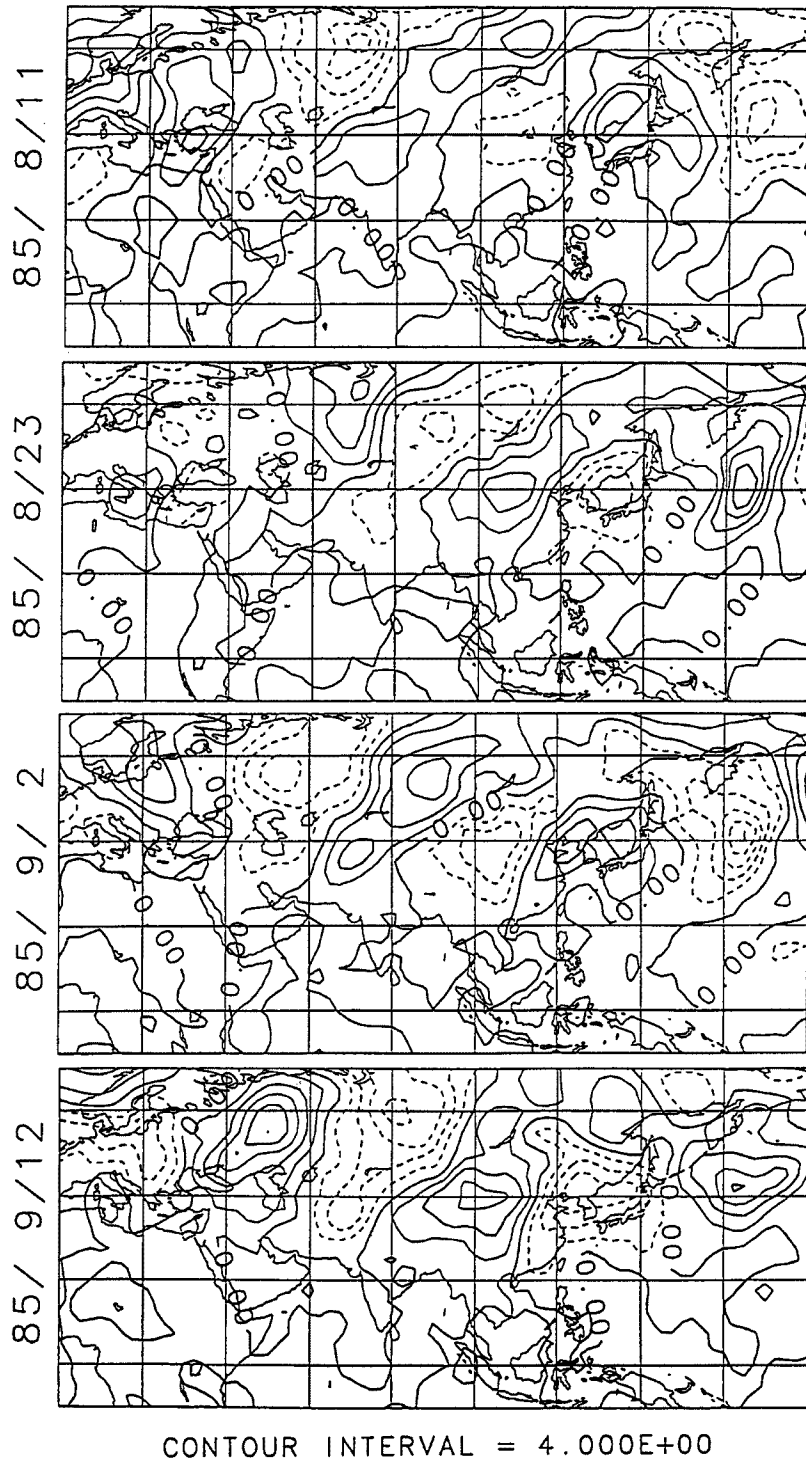


Fig. 11 Same as Fig. 9 except for the date of panels. Contour interval is 4 m/s.

5.3 東半球：1985年8月11日 - 9月12日

東半球のこの期間について、波動がよく見られる時期を選んで並べたのが Fig. 11 である。各図の間の期間は、南北風の季節内変動成分の値は全体として小さい値となっている。

南北風の極値を次々と追って行けばわかるように、60°E から 180° にかけての領域に、4つの値の大きな領域があって、北風・南風とつぎつぎと交替しながら定在波的に変動していることがわかる。この様子は、Fig. 5, 6 にみられた定在波的な波動に対応している。奇妙な特徴は、この定在波的な波動の腹と節の位置が、時がたつにつれて西へとコンスタントに移動しているように見えることである。

6. 議論

中高緯度の季節内変動において、ロスビー波の伝播が重要な役割を果たしていることは、多くの研究で指摘されてきた。そこでここでは、5. で典型的な例について見積もった東西の伝播特性（位相速度、群速度）を用いて、ロスビー波の分散関係式と比較し、メカニズムについての予備的な解析とする。

一様な東西風 U が吹いている時の線形化したロスビー波の分散関係式は、南北波数 $l = 0$ （南北一様）とすると、東西波長 L を用いて以下のようにかける。

$$c = U - \frac{\beta_*}{4\pi^2} L^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 β_* は、基本場の絶対渦度の南北微分である。(2)より、 $U \gg c$ と考えて差し支えない。また、基本場の相対渦度の南北微分を、 U が

$$U = \bar{U} + U_0 \cos(2\pi y/Y), \quad U_0 = 5 \text{ m/s}, \quad Y = 30^\circ$$

を満たすものとし（パラメータはおおよその値を図から読みとった。）、東西波長として(3)を用いて計算すると、

$$U \approx 16 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり、平均的な偏西風の強さにはほぼ対応する。

さらに、ロスビー波の東向き群速度 (c_g) は、 $c_g = 2U - c$ （ここで、 c は、ロスビー波の東向き位相速度。この場合無視できる。）である。その時、(6)を代入して得られる群速度と、(1)とはよく一致している。

Hoskins and Ambrizzi (1993)¹⁶⁾ は、特定の波長のロスビー波は偏西風帯に trap されるとことを示した。当研究で見られた波動も偏西風帯にそってみられることから、偏西風帯に trap されたロスビー波である可能性がある。この Section での見積もりにおいてロスビー波の位相速度や群速度の理論的値と対応する結果が得られたことも、この見解を支持するものである。いっそう定量的な解析を進めることで、波動が基本的にロスビー波の力学を持っていることを確かめる必要がある。

なお、大変遅いけれども安定した位相速度での東への伝播が見られることは、説明が難しい問題として残されている。

7. 結論と今後の展望

夏季の北半球中高緯度に見られる季節内変動について、主に風の南北成分のデータを用いた解析をおこなった。そして、季節内変動は、おおよそ偏西風帯の軸に沿った領域で卓越する傾向があることが示された。偏西風帯に沿ったこれらの季節内変動の構造を見ると、東西波長約 4,000 km の波動が北半球全域に渡ってみられた。周期も固定していて 25 日前後であり、多くの場合波動の東への位相伝播をともなっていた。新しく明らかとなった重要な特徴としては、波動が基本的には東向きに、そして時に西向きに、ゆっくりなが

らきわめて安定した位相速度(およそ2 m/s)で伝播することである。

これらの特徴は、冬季についても同様であった。これは、Kiladis and Weickmann (1992) や、Hsu and Lin (1992) で冬季について得られた偏西風帯に沿った比較的周期と波長の短い季節内変動に対応すると考えられる。夏季にもこのような波動が見られることが確かめられたことから、彼らの示した波動は、夏季もふくめて一般的に見られるものであることが明らかになった。

今後の課題としては、波動の形態についての記述をより客観的なものにするために、定量的な解析をいっそう進める必要がある。また、波動のメカニズムについての予備的な解析結果は、この波動がロスビー波の性質を持っている可能性を支持したが、今後より詳しく解析するなかで、波動の基本的な性質を解明する必要がある。とくに、波動の位相速度は著しい特徴であり、このより分かりやすい記述とメカニズムの解明が重要である。

謝 辞

京都大学防災研究所災害気候部門の村松久史教授には、多大な助言、指導をいただきました。深く感謝致します。また、ECMWFの客観解析データを利用させていただきました。感謝致します。解析にあたっては、京都大学防災研究所防災科学資料センターと、京都大学大型計算機センターの計算機を使わせていただきました。解析や結果の出力にあたっては、地球流体電脳ライブラリを使わせていただきました。お礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Madden, R. A. and P. R. Julian : Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 28, 1971, pp.702-708.
- 2) Lau, K.-M. and P. H. Chan : short-term climate variability and atmospheric teleconnections from satellite-observed outgoing longwave radiation. Part I: Simultaneous relationships, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 40, 1983, pp.2735-2750.
- 3) Lau, K.-M. and P. H. Chan: short-term climate variability and atmospheric teleconnections from satellite-observed outgoing longwave radiation. Part II: Lagged correlations, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 40, 1983, pp. 2751-2767.
- 4) Lorenc, A. C.: The evolution of planetary-scale 200mb divergent flow during the FGGE year, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, Vol. 110, 1984, pp.427-441.
- 5) Lau, K.-M. and T. J. Phillips : Coherent fluctuations of extratropical geopotential height and tropical convection in intraseasonal time scales, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 43, 1986, pp.1164-1181.
- 6) Knutson, T. R. and K. M. Weickmann : 30-60 day atmospheric oscillation: Composite life cycles of convection and circulation anomalies, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 115, 1987, pp.1407-1436.
- 7) Simmons, A. J. and J. M. Wallace and G. W. Branstator : Barotropic wave propagation and instability, and atmospheric teleconnection patterns, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 40, 1983, pp.1363-1392.
- 8) Lau, K.-M. and L. Peng : Dynamics of atmospheric teleconnections during the northern summer, *J. Climate*, Vol. 5, 1992, pp.140-158.
- 9) Tsuyuki, T. and K. Kurihara : Impact of convective activity in the western tropical Pacific on the East Asian summer circulation, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 67, 1989, pp.231-247.
- 10) Yasunari, T.: Structure of an Indian summer monsoon system with around 40-day period, *J.*

- Meteor. Soc. Japan, Vol. 59, 1981, pp.427-441.
- 11) Hsu, H.-H, and S.-H. Lin : Global teleconnections in the 250-mb streamfunction field during the northern hemisphere winter, Mon. Wea. Rev., Vol. 120, 1992, pp.1169-1190.
 - 12) Kiladis, G. N. and K. M. Weickmann : Circulation anomalies associated with tropical convection during northern winter, Mon. Wea. Rev., Vol. 120, 1992, pp.1900-1923.
 - 13) 寺尾 徹・村松久史：アジア・西太平洋の中緯度にみられる夏季の季節内変動について，京都大学防災研究所年報，第 35 号 B-2，1992，pp.305-329.
 - 14) 寺尾 徹・村松久史：夏季のアジア・西太平洋の偏西風帯にみられる季節内変動について，京都大学防災研究所年報，第 36 号 B-2，1993，pp.131-145.
 - 15) Duchon, C. E.: Lanczos filtering on one or two dimensions, J. Appl. Meteor., Vol. 18, 1979, pp.1016-1022.
 - 16) Hoskins, B. J., and T. Ambrizzi: Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow, J. Atmos. Sci., Vol. 50, 1993, pp.1661-1671.