

新しい解析手法による赤道波等 地球規模大気擾乱の機構の研究*

—学会賞受賞記念講演—

林 良 一**

1. はじめに

このたびは突然に学会賞をいただくことになりましてとても喜んでます。日本気象学会の水準の高さは世界的にも定評があり、今回の受賞はとても名誉に思います。

1982年は学会創立100周年記念の年ですが、私が東京大学の大学院を卒業してプリンストン大学に来てから丁度10年目にあたります。

大学院での私の修士論文のテーマは赤道大規模波動の解析 [3], [4]で博士論文のテーマはその発生理論 [5]~[9]でした。プリンストン大学ではGFDLの大循環モデルを使った新しい方式による大規模波動の研究をすることになりました。GFDLでの私の主な研究課題は次の通りです。

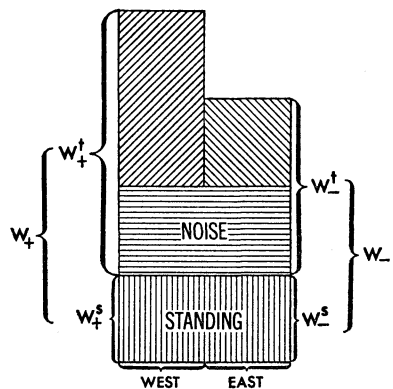
- 1) 時空間スペクトル解析法の発展 [10], [11], [15], [16], [18], [19], [21], [23], [24], [25], [27], [30], [31].
- 2) 大循環モデルの波動解析 [12], [14], [20], [22], [24], [35].
- 3) 比較実験による波動の発生機構の研究 [17], [26], [32], [33], [34].
- 4) 波動の理論的研究 [13], [24].

時空間スペクトル解析方法とその大気波動への応用についてはすでに「気象研究ノート」[1], 「天気」[2]や「気象集誌」100周年記念号 [28]に解説してありますので本文では最新の結果も加えて要旨をなるべく簡潔に述べることにします。数式は省略しました。

2. 時空間スペクトル解析

時空間スペクトル解析は大気大循環モデルや観測のデータを用いて大規模波動の振幅、波長、周期、位相差、コヒーレンス、位相速度、群速度、エネルギー変換、運動量輸送などを求め理論と比較するのに非常に強力な方法である。時空間スペクトルは原理的には二次元フーリエ変換に基づいており、以下の様に発展させられる。

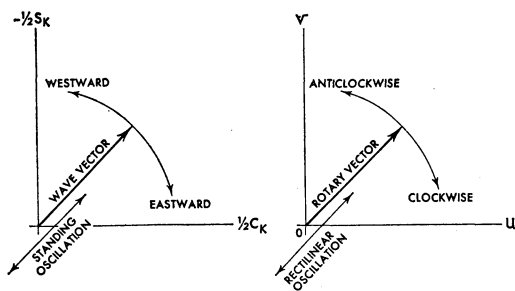
- 1) 時空間 variance や covariance は東進・西進波の波数-振動数スペクトルに分離される, [10].
- 2) 時空間 variance や時間 variance は standing wave と traveling wave のスペクトルに分離することも出来る, [15], [19] (第1図参照).
- 3) 時空間スペクトルは数学的には複素空間フーリエ係数の時間スペクトルであり、二次元速度ベクトルを時計的、反時計的回転成分に分解する回転スペクトルと類比している, [18] (第2図参照).



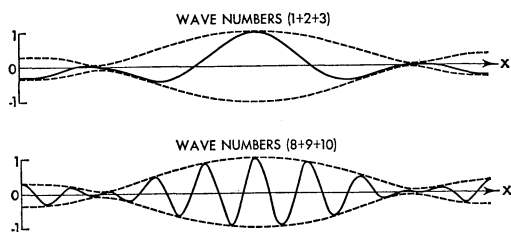
第1図 Standing wave は同じ振幅の東進・西進成分 (W_{\pm}^s) からなり、その成分間のコヒーレンスは1であり干渉する。Traveling waveの東進・西進成分 (W_{\pm}^t) は incoherent であり不規則な noise も含む [19].

* Studies of the mechanism of planetary-scale atmospheric disturbances using new analysis methods.

** Yoshikazu Hayashi, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/NOAA, Princeton University.

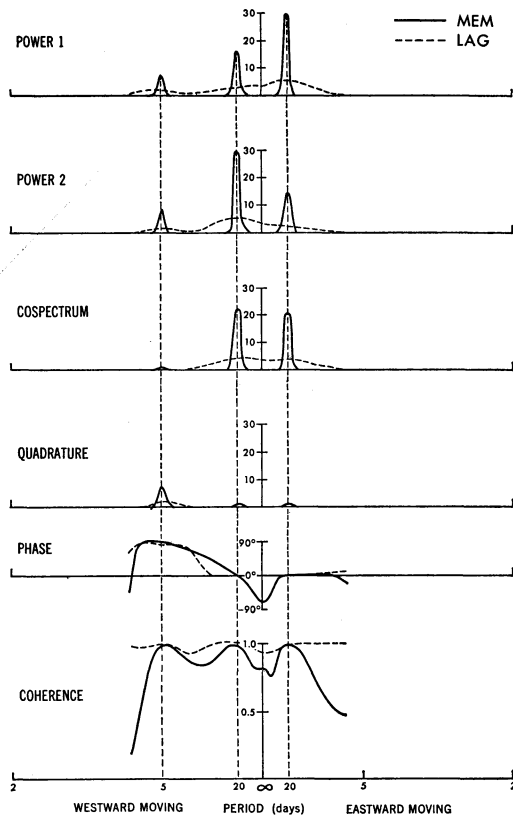


第2図 波動ベクトル(左)の成分は空間 cosine, sine係数で方向角は波動の位相角を表わす. 回転ベクトル(右)の成分は風の東西・南北成分で方向角は回転角を表わす. 東進・西進は時計・反時計的回転に対応する. standing (rectilinear) oscillation は振幅の等しい東進・西進(時計・反時計)成分の干渉から成る [18].



第3図 実線は wave packet $Re \sum_h \exp(ikx)$ 破線は envelope $|\sum_h \exp(ikx)|$ を示す. envelope は ray path に沿って伝播する [2].

- 4) 複数の波数から成る波動を traveling, standing, stationary wave packets に分解し, その ray path をスペクトル解析することも出来る, [19], [24], (第3図参照).
- 5) 時空間スペクトルは時空間スペクトル・エネルギー方程式により支配され, 線型及び非線型エネルギー変換スペクトルにより波数振動数成分間のエネルギーのやりとりが表現される, [21], [27].
- 6) 時空間スペクトルは時系列の長さに応じて相関法, 高速フーリエ変換法, 最大エントロピー法により計算することが出来る, [16], [25] (第4図参照).
- 7) 極軌道衛星による非同時観測データからも時空間スペクトルを正確に求められるように方法を一般化できる, [23], [30], [31].



第4図 最大エントロピー法(実線)と相関法(破線)により求めた時空間クロス・スペクトルの振動数分布(波数1). 与えた波動は波数1, 周期5日と20日の西進波と周期20日の東進波で小さい white noise を混ぜた. データの間隔は1日で期間は30日. 最大エントロピー法ではデータの期間が短かくても鋭いスペクトル・ピークが得られる [25].

3. 大循環モデルによる大規模波動の機構の研究

大気大循環モデルは通常の観測からは得られないような全地球的なデータや直接測定できない大規模上昇流や熱などの情報を与えてくれる. またモデルからいろいろな効果を次々に落して行き, その効果の役目を調べることが出来る. 以下 GFDL モデルの大規模波動の解析および比較実験により得られた主な結果を要約する.

3.1 赤道大規模波動

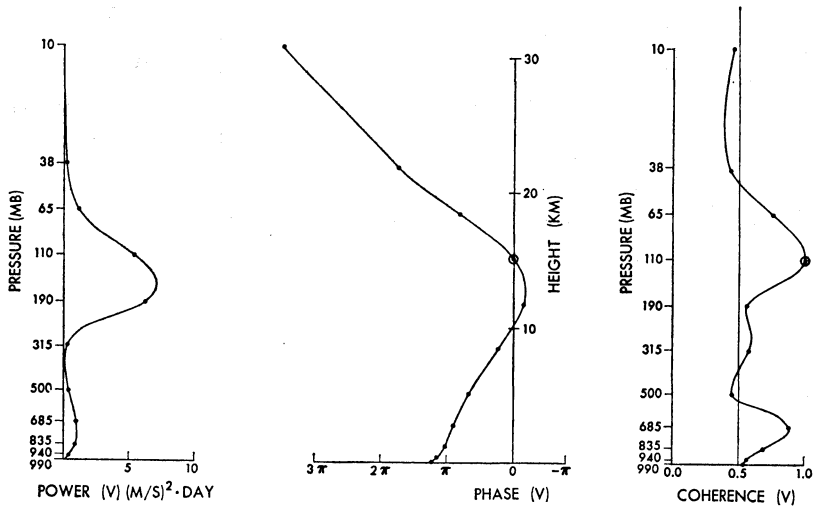
柳井・丸山(1966)と Wallace・Kousky(1968)によりそれぞれ発見された Rossby-gravity wave や Kelvin wave などの移動性赤道大規模波動は赤道成層圏の平均流の準2年振動を理論的に説明するのに重要な役割を果

(a)

MIXED ROSSBY-GRAVITY WAVE (EQUATOR)

WAVE NUMBER=4

PERIOD=4.3 DAYS (WESTWARD)

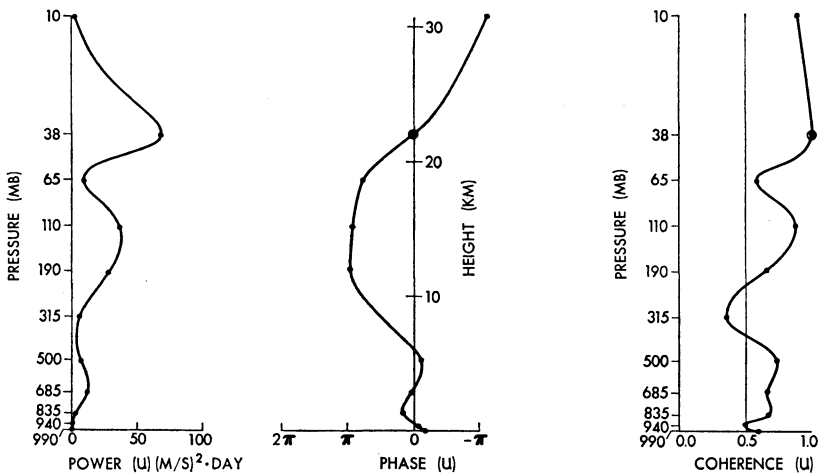


(b)

KELVIN WAVE (EQUATOR)

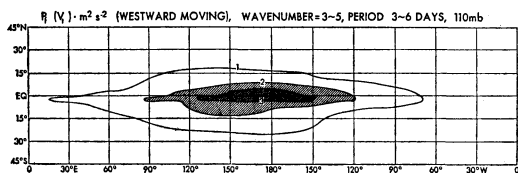
WAVE NUMBER=1

PERIOD=15.0 DAYS (EASTWARD)

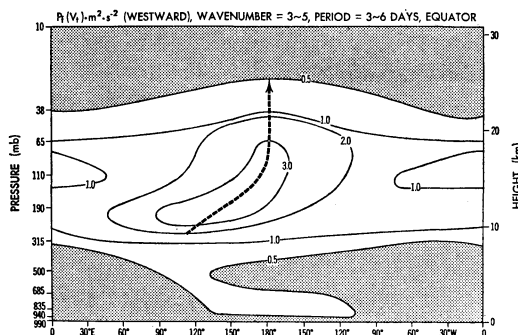


第5図(a) GFDL 大気大循環モデルに現れる Rossby-gravity wave (波数4, 周期4.3日, 西進)の風の南北成分の鉛直構造 [12].

(b) GFDL 大気大循環モデルに現れる Kelvin wave (波数1, 周期15日, 東進)の風の東西成分の鉛直構造 [12].



(a)



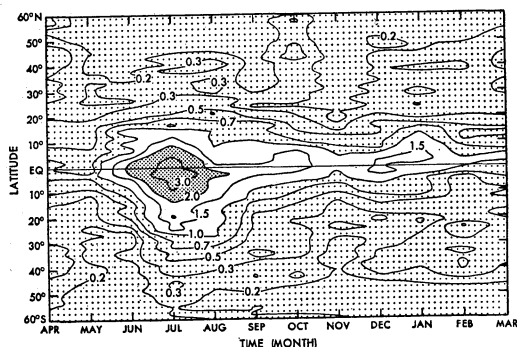
(b)

第6図(a) モデルの風の南北成分の波束(波数3~5)の時間パワー・スペクトル(周期3~6日, 西進成分)の地理的分布 (110 mb, 4~9). Rossby-gravity wave に対応する [28].
 (b) 高度-経度分布. 破線は wave packet の time power spectrum の最大になる経度を示す.

たす. これらの波動の成因については大規模波動による水蒸気の収束と積雲対流による凝結熱放出の相互作用による不安定性(wave-CISK)[5]~[9], 対流圏の random な熱や中緯度からの強制に対する応答[13]などが提案されているが, 波動の選択と構造の両方共は完全に説明できないという欠点がある.

これらの波を大循環モデルで良く表現することが準2年振動を再現するのに重要で, 又これらの波がどのような原因でモデルに発生するかをつきとめるのも波動理論の発展に重要な情報を与える. 従来の11層 GFDL モデル (Manabe *et al.*, 1974) は準2年周期を再現するには層が足りないが, 赤道大規模波動の波数・周期選択性や構造が良く表現されている. このモデルの時空間スペクトル解析により次の結論が得られた.

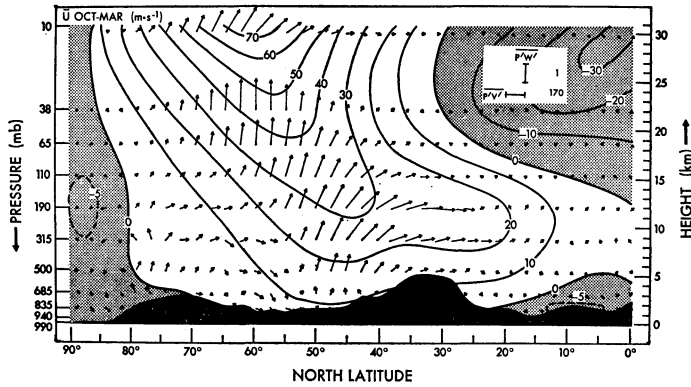
- 1) 赤道地方には主に次の4つの型の移動性大規模波動が存在する. 波数3~5, 周期4~6日で西進する Rossby-gravity wave; 波数1~2, 周期10~20日で東進する Kelvin wave; 波数1~2, 周期10~20日で西進する equatorial Rossby-type wave; 波数8~



第7図 モデルの風の南北成分の時空間パワー・スペクトル(波数3~5, 周期3~6, 西進)の緯度1月分布 (110 mb). Rossby-gravity wave に対応する. 時間スペクトルは maximum entropy method により毎月のデータから計算される [22].

- 10, 周期4~6で西進する easterly wave*, [12].
- 2) Rossby-gravity wave は成層圏で位相線が高度と共に西に傾き, Kelvin wave は東に傾く, [12] (第5図参照).
- 3) Rossby-gravity wave は振幅が太平洋上で最大になり, Kelvin wave は太平洋と大西洋上で最大になる, [12] (第6図(a)参照). Rossby-gravity wave の振幅最大の位置が高さと共に東にずれるのはこの波束の群速度が東向きである為であると思われる (第6図(b)参照).
- 4) Rossby-gravity wave と Kelvin wave は7月に振幅が一番大きくなり, 1月に二番目に大きくなる, [22] (第7図参照).
- 5) Rossby-gravity と Kelvin wave の主なエネルギー源は対流による潜熱放出であるが, 雨のスペクトルにはピークがはっきりと検出されない, [12].
- 6) Rossby-gravity wave は中緯度擾乱をモデルから取り除くと振幅がかなり減り, 対流調節法によりパラメーター化された潜熱放出を除くと消滅する, [17].
- 7) Kelvin wave は中緯度擾乱をモデルから取り除いてもあまり振幅が変化しないが潜熱放出を除くと消

* この差分モデルの easterly wave は西太平洋では観測と異なり周期が約15日になっている. これはモデルの西太平洋の一般流が観測と異なり東向きになっており, 波の位相速度が遅くなる為だと思われる. 最近のスペクトル・モデルでは一般流が西向きになり, 波の周期が観測のように4日程度になった, [20].



第8図 モデルの停滞性超長波(波数1, 10~3月平均)の energy flux ($\overline{p'v'}$, $\overline{p'w'}$) のベクトルと風の東西成分の時間-経度平均の等値線 [14].

減する, [17].

最近の GFDL の40層モデルでは上部成層圏や中間圏の赤道大規模波動も再現できるようになった, [35]. これらの波動の機構や成層圏の平均流の準2年振動, 中間圏の半年振動との関連を調べるのも興味のある課題である.

3.2 中緯度大規模波動

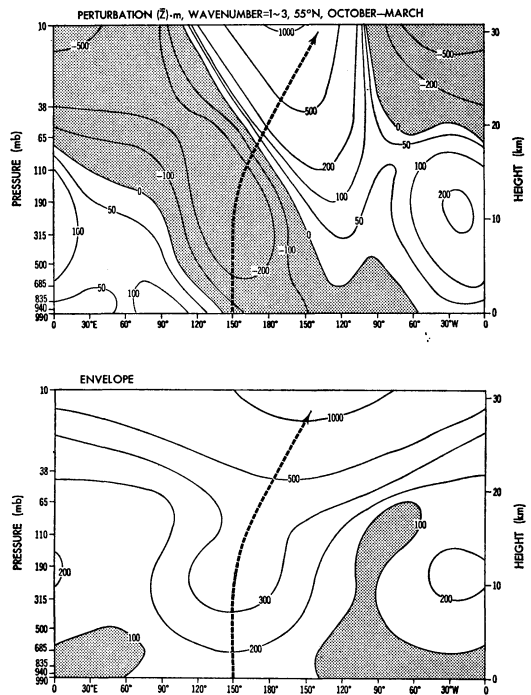
3.2.1 停滞性超長波

中緯度の停滞性超長波は長期予報や気候変動に重要な役割を果たす. GFDL モデルの simulation ではこの波は少し強すぎるが*, 定性的には構造が良く表現されている. このモデルのスペクトル解析から次の新しい結論が得られた.

- 1) シベリア高気圧やアリューシャン低気圧に対応する対流圏の定常超長波は大きな有効位置エネルギーを持っている. 一方チベット高原の東方の強い亜熱帯ジェット気流に対応する停滞性超長波は大きな運動エネルギーを持っている. 波動エネルギーは前者から後者に流入し, 後者で強化の主な原因になっている, [14] (第8図参照).
- 2) 波数1~3から成る停滞波束の envelope は地上付近ではシベリア高気圧とアリューシャン低気圧の間の経度 (150°E) で最大になる. この最大の位置は高度と共に ray path にそって群速度の方向に東

にずれ, 成層圏でアリューシャン高気圧が卓越する原因になっている, [24] (第9図参照).

以上の結論は線型波動伝播理論で説明できる. 停滞性



第9図 GFDL モデルの時間平均(10~3月)等圧面高度の波束(波数1~3)の高度-経度断面(55°N), wave packet (上), envelope (下). 破線は envelope の最大になる経度を示す[24].

* 数値予報では実際とモデル自体の停滞波の構造が異なっていると初期条件の停滞波成分の一部が動いてしまい, かえって停滞波が弱すぎ非停滞波が強すぎるという結果になる.

超長波の発生には非線型効果が重要であると思われるがまだ未解決な点が多い。

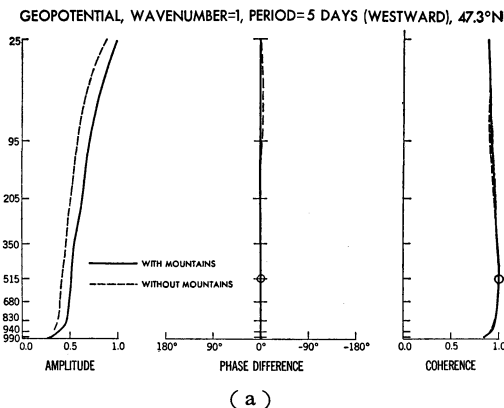
3.2.2. 移動性超長波

中緯度の移動性超長波は振幅が停滞性超長波にくらべて小さいが、準停滞性超長波の振幅や位相の時間変動を起こすので長期予報には重要である。またモデルでこの波の振幅が大きすぎても予報の誤差を起こす。この波の発達は従来の線型不安定理論では良く説明されていない。従来の GFDL モデルの simulation では移動性超長波の振幅がかなり弱すぎるという欠点があったが、現在のスペクトル・モデルではこの点改良された。最近、モデルの時空間スペクトル解析により次の新しい結論が得られた。

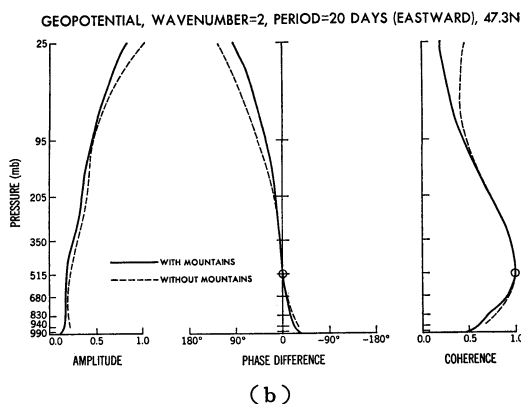
- 1) 西進超長波は対流圏では東進超長波より気圧の振幅が大きい*。西進超長波は位相線が高度と共に傾かないが、東進超長波は西に傾く、[32] (第10図参照)。
- 2) 山や海陸分布がないと西進超長波は振幅が少し減り、東進超長波は少し増えるが本質的には両方とも現れる、[32]。
- 3) 西進及び東進超長波の運動エネルギーは主に有効位置エネルギーからの変換で維持されている、[33]。
- 4) 西進超長波の有効位置エネルギーは運動エネルギーと同程度で、主に有効位置エネルギーの wave-wave transfer により維持されている、[33]。
- 5) 東進超長波の有効位置エネルギーは運動エネルギーより大きく、主に有効位置エネルギーの zonal-wave transfer により維持されている、[33]。
- 6) 以上の結論はモデルから海陸分布を落して stationary-transient wave interaction を無くしても成立する、[33]。

上記の結果によると東進超長波の維持には zonal-wave energy transfer の方が wave-wave energy transfer より重要で、linear baroclinic instability だけで十分説明できるはずだと思われるかも知れないが、現在行っている比較実験によると wave-wave interaction を取り除くと波数2の東進超長波の energy 及び zonal-wave energy transfer が非常に小さくなるという結果を得ている、[34]。また上記の結果は超長波のエネルギーの時間的増幅の説明に直接には適用できない。準停滞波やブロック

* 従来の格子点モデル[14]ではこの逆で観測事実に対していたが、現在の GFDL スペクトル・モデルではこの点改良された。



(a)



(b)

第10図(a) 現在の GFDL スペクトル・モデルに現れる西進超長波(波数1, 周期5日)の等圧面高度の鉛直構造(47.3°N, 3年間平均)。実線と破線は山のあるモデルとないモデルの比較を示す[32]。

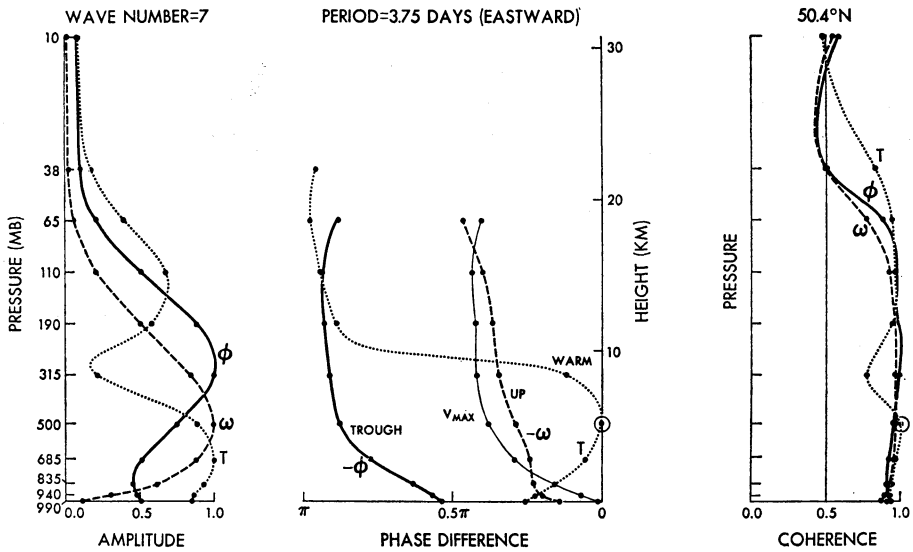
(b) 東進超長波(波数2, 周期20日)の鉛直構造[32]。

ングの時間的増幅の解析も重要な課題である。

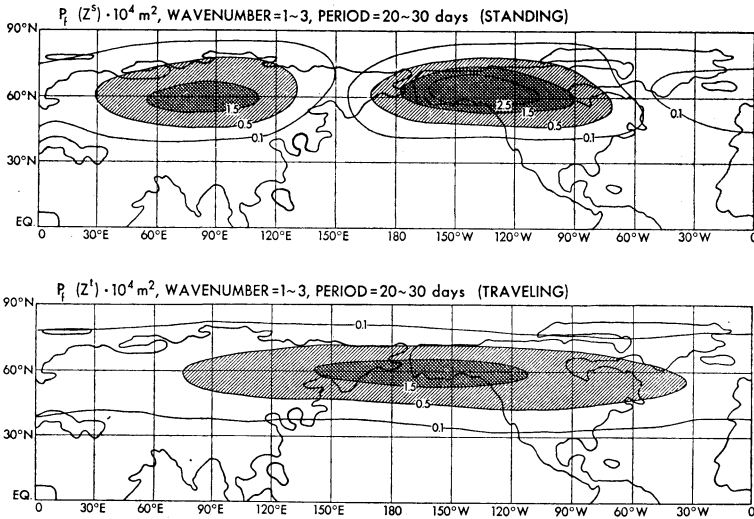
3.2.3. 移動性長波

中緯度移動性長波は短中期予報や平均場の維持に重要な役割を果たす。GFDL モデルの simulation ではこの波は少し弱すぎるが、定性的には構造が良く表現されている。モデルの解析から次の新しい結論が得られた。

- 1) 長波の等圧面高度の振幅は線型理論では地上で最大になるが、非線型モデルでは観測のように対流圏上部で最大になる、[14] (第11図参照)。
- 2) 長波の運動エネルギーは時間平均温度場の南北傾度の最大の経度より 30° ぐらい東で最大になる、[14]。
- 3) モデルの基本場を時間的に固定して潜熱放出を取



第11図 GFDL モデルの東進波 (波数7, 周期3.75日) の鉛直構造 (10~3月, 50.4°N). 位相差とコヒーレンスは500 mb の温度を基準とする [14].



第12図 波数1~3から成る等圧面高度の時間パワー・スペクトル (周期20~30日) の地理的分布 (38 mb, 10~3月). Standing wave (上) は coherent な東進西進成分から成り, 振幅の最大(腹)と最小(節)が見える. Traveling wave は主に東進波から成り振幅の最大は, zonal-vertical ray path が通過する事により生じる.

り除くと長波の振幅がかなり減る。これは主に有効位置エネルギーの zonal-wave transfer が減る為である, [26].

最近, 非線型の長波の研究が盛んになってきたが, zonal-wave interaction, wave-wave interaction や local instability の役割や相対的重要性についてはまだ問題点が多い。

3.2.4. 定常振動性超長波

準停滞性超長波は, 季節変動のみならず zonal-wave interaction により定常振動をしている可能性がある。

GFDL モデルの解析から次の結論が得られた。

- 1) 成層圏では超長波の西進成分が東進成分にくらべて小さいが, これらの成分間の coherence が大きく定常振動が顕著に見られる。[1], [19] (第12図参照)。
- 2) 対流圏では西進成分が東進成分にくらべて小さくないが, coherence が小さく, 周期20~30日程度の定常振動性超長波は見にくい, [1], [15].

3.2.5. 長周期振動

長周期振動は長期予報や気候変動に重要な役割を果たす。季節変動や海陸分布を除いた GFDL モデルの解析から次の結論が得られた, [33].

- 1) 中緯度の周期20~360日の擾乱は主に有効位置エネルギーの zonal-wave transfer と短周期振動からの運動エネルギーの wave-wave transfer により維持されている。
- 2) この擾乱は有効位置エネルギーの振動数間の transfer や運動エネルギーの zonal-wave transfer によりエネルギーを失う。

海陸分布である現実的なモデルでは局地的な barotropic or baroclinic instability により standing wave が発生するかも知れない。又海面温度の変動するモデルは赤道地方から anomaly が wave train として伝播してきて不安定波を更に増幅するかも知れない。multiple wave number-frequency spectral analysis [19] により長周期振動を standing と traveling wave packet に分解して調べてみるのも興味ある課題である。

長周期振動はかなり局所的であるので超長波として扱うのは不適當である。しかも2次元波数では中波数でもその一次元波数成分は高低波数になり得る。観測の長周期振動は定常振動性なので wave packet の東進・西進成分の間の local coherence [19] は大きいはずである。対流圏の定常振動性超長波は長周期振動の一成分と見る

べきかも知れない。

4. おわりに

最近の地球規模観測や気候変動及び高層大気モデルの発達と共に, 私の発展させてきた解析方法が益々大気波動の研究に役立つ事を期待します。

この機会に東京大学で気象力学とデータ解析を指導していただいた柳井迪雄先生, GFDL に招待し大循環モデルを使って自由に研究する機会を与えていただいた真鍋淑郎博士と所長の Dr. J. Smagorinsky, 良き研究協力者であるプログラマーの Mr. D.G. Golder に感謝の意を表したいと思います。

筆者論文リスト

- 1) 時空間スペクトル解析法と大気大循環モデルへの応用, 気象研究ノート, 131, (1977), 61-74.
- 2) 最近の時空間スペクトル解析法の発展と大気大規模波動への応用, 天気, 27, (1980), 783-801.
- 3) Power spectra of large-scale disturbances over the tropical Pacific, J. Met. Soc. Japan, 46, (1968), 308-323 (with M. Yanai, T. Maruyama, and T. Nitta).
- 4) Large-scale equatorial waves penetrating from the upper troposphere into the lower stratosphere, J. Met. Soc. Japan, 47, (1969), (with M. Yanai).
- 5) A theory of large-scale equatorial waves generated by condensation heat and accelerating the zonal wind, J. Met. Soc. Japan, 48, (1970), 140-160.
- 6) Instability of large-scale equatorial waves with a frequency-dependent CISK parameter, J. Met. Soc. Japan, 49, (1971), 59-62.
- 7) Instability of large-scale equatorial waves under the radiation condition, J. Met. Soc. Japan, 49, (1971), 316-319.
- 8) Frictional convergence due to large-scale equatorial waves in a finite-depth Ekman layer, J. Met. Soc. Japan, 49, (1971), 450-457.
- 9) Large-scale equatorial waves destabilized by convective heating in the presence of surface friction, J. Met. Soc. Japan, 49, (1971), 458-466.
- 10) A generalized method of resolving disturbances into progressive and retrogressive waves by space Fourier and time cross-spectral analyses, J. Met. Soc. Japan, 49, (1971), 125-128.
- 11) A method of analyzing transient waves by space-time cross spectra, J. Appl. Met., 12, (1973), 404-408.
- 12) Spectral analysis of tropical disturbances appear-

- ing in a GFDL general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **31**, (1974), 180-218.
- 13) Non-singular resonance of equatorial waves under the radiation condition, *J. Atmos. Sci.*, **33**, (1976), 183-201.
 - 14) Space-time spectral analysis of mid-latitude disturbances appearing in a GFDL general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **34**, (1977), 237-262 (with D.G. Golder).
 - 15) On the coherence between progressive and retrogressive waves and a partition of space-time power spectra into standing and traveling parts, *J. Appl. Met.*, **16**, (1977), 368-373.
 - 16) Space-time power spectral analysis using the maximum entropy method, *J. Met. Soc. Japan*, **55**, (1977), 415-420.
 - 17) The generation of equatorial transient planetary waves; Control experiments with a GFDL general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **35**, (1978), 2068-2082 (with D.G. Golder).
 - 18) Space-time spectral analysis of rotary vector series, *J. Atmos. Sci.*, **36**, (1979), 757-766.
 - 19) A generalized method of resolving transient disturbances into standing and traveling waves by space-time spectral analysis, *J. Atmos. Sci.*, **36**, (1979), 1017-1029.
 - 20) Studies of the tropical general circulation with a global model of the atmosphere, *Proceedings of the Seminar on the Impact of GATE on Large-Scale Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, National Research Council, August 1979, 249-254.
 - 21) Estimation of nonlinear energy transfer spectra by the cross spectral method, *J. Atmos. Sci.*, **37**, (1980), 299-307.
 - 22) The seasonal variation of tropical transient planetary waves appearing in a GFDL general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **37**, (1980), 705-716 (with D.G. Golder).
 - 23) A method of estimating space-time spectra from polar-orbiting satellite data, *J. Atmos. Sci.*, **37**, (1980), 1385-1392.
 - 24) Vertical-zonal propagation of a stationary planetary wave packet, *J. Atmos. Sci.*, **38**, (1981), 1197-1205.
 - 25) Space-time cross spectral analysis using the maximum entropy method, *J. Met. Soc. Japan*, **59**, (1981), 620-624.
 - 26) The effects of condensational heating on mid-latitude transient waves in their mature stage: Control experiments with a GFDL general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **38**, (1981), 2532-2539 (with D.G. Golder).
 - 27) Interpretations of space-time spectral energy equations, *J. Atmos. Sci.*, **39**, (1982), 685-688.
 - 28) Space-time spectral analysis and its applications to atmospheric waves, *J. Met. Soc. Japan*, **60**, (1982), 156-171.
 - 28) Confidence intervals of a climatic signal, *J. Atmos. Sci.*, **39**, (1982), 1895-1905.
 - 30) Generalized methods of estimating space-time spectra from polar-orbiting satellite data, Part I, The frequency transform method, *J. Met. Soc. Japan*, **60**, (1982), December (in press).
 - 31) Generalized methods of estimating space-time spectra from polar-orbiting satellite data, Part II, The wavenumber transform method, *J. Met. Soc. Japan*, **60**, (1982), December (in press).
 - 32) Transient planetary waves simulated by GFDL spectral general circulation models, Part I, Effects of mountains, *J. Atmos. Sci.*, **40**, (1983) (to be published.).
 - 33) Transient planetary waves simulated by GFDL general circulation models. Part II, Effects of non-linear energy transfer, *J. Atmos. Sci.*, **40**, (1983) (to be published).
 - 34) The effects of wave-wave interactions on transient planetary waves; Control experiments with a GFDL general circulation model, 1983 (to be submitted for publication) (with D.G. Golder).
 - 35) Stratospheric and mesospheric Kelvin waves simulated by the GFDL "SKYHI" general circulation model, 1983 (to be submitted for publication) (with D.G. Golder and J.D. Mahlman).