

# 冬季北半球経年変動の卓越パターンに見られる 10 年規模変調 — 線形順圧モデルに基づくモード解析 —

地球フロンティア研究システム 山根 省三  
東京大学理学部 地球惑星科学/地球フロンティア研究システム 中村 尚  
地球フロンティア研究システム 本田 明治

## 1. はじめに

冬季北半球中・高緯度対流圏の大気循環場には、太平洋・北アメリカ (PNA) パターンや東大西洋 (EA) パターンなど、地理的に固定された 1 週間よりも長い時間スケールの変動 (長周期変動) パターンが複数存在することが知られている (例えば, Wallace and Gutzler 1981). これらの変動は、長期にわたって移動性高・低気圧などの日々の天気に関わる 1 週間よりも短い時間スケールの変動の活動や経路に影響を与えるために、これらの変動のメカニズムを解明することは異常気象の理解や季節予報の向上に貢献するものと期待される. 近年になって、このような長周期変動の空間構造やその変動の振幅に 10 年規模の変調が見られることが、過去 100 年の地上観測データを用いた解析から分かってきた (山根ら 2002). この 10 年規模の変調に関しては、北半球中緯度海洋循環の気候変動との関連性が指摘されているが、まだその詳細なメカニズムは分かっていない. ここでは、長期の観測データを用いてこの 10 年規模変調の特徴を調べた結果を示す. そして、線形順圧モデルのモード解析を通してこの変調の力学診断を試みた結果を示す.

## 2. 観測データに見られる卓越変動パターンの 10 年規模変調

期間 1899-2002 年の Trenberth 北半球月平均海面気圧データ (Trenberth and Paolino 1980) と期間 1949-2002 年の NCEP/NCAR 再解析データ (Kalnay et al. 1996) を用いて、冬季北半球大気循環場の卓越変動パターンに見られる 10 年規模変調の特徴を調べた.

図 1 は、解析期間を 22 年毎ずらしながら求めた 11-4 月北半球 20°N 以北月平均偏差場の経験的直交関数系展開第 1 モード (EOF-1) の空間分布を示したものである. 異なる 4 つの期間の海面気圧 EOF-1 (図 1a-d) は、いずれも北極振動、あるいは、環状モードと呼ばれる (Thompson and Wallace 1998, 2000) 北極域と中緯度帯との間の気圧振動パターンを示すが、その中緯度帯の空間構造に期間依存性が見られる. 期間 1929-50 年と 1973-94 年の EOF-1 (図 1b,d) の北太平洋領域の変動シグナルは、他の期間の EOF-1 (図 1a,c) の変動シグナルよりも大きい. また、北大西洋領域では、期間 1929-50 年と 1973-94 年の EOF-1 が北アメリカ東岸とヨーロッパの 2 箇所に比較的大きな変動シグナルを示すのに対して、期間 1907-28 年と 1951-72 年の EOF-1 は北大西洋の中央に変動の極大を示す傾向にある.

上部対流圏の変動においても、同様に、卓越パターン (EOF-1) の構造に期間依存性が見られる. 期間 1951-72 年の 250hPa 高度場 EOF-1 (図 1e) が、北極域と逆符合の変動シグナルを中緯度帯全域に同程度の振幅で示すのに対して、期間 1973-94 年の 250hPa 高度場 EOF-1 (図 1f) は、北太平洋とフロリダ上空の振幅が大きく、太平洋・北アメリカ (PNA) パターンの構造が強調されたものとなっている. 期間 1951-72 年の EOF-1 が環状的であるのに対して、期間 1973-94 年のパターンは波的である.

このような EOF-1 に見られる 10 年規模の変調は、アリューシャン低気圧 (AL) とアイスランド低気圧 (IL) の強度の経年変動の間に見られるシーソー (AL-IL シーソー) 関係の 10 年規模の変調と密接に関連している. 図 2 は、長さを 21 年に固定して計算期間を 1 年ずつずらしながら求めた月平均 AL と IL の経年変動の相関係数を縦軸に各月、横軸に計算期間の中央年を取って示したものである. AL-IL 相関係数は、1930-40 年代の 1 月と 1970-80 年代の 2 月に有意な負の値を示し、この時期に AL-IL シーソー現象が顕著であったことが分かる. このシーソーが顕著な二つの期間は、図 1 で北太平洋上に大きな変動シグナルが見られた期間と一致している. AL-IL シーソーの活発な活動により北太平洋上

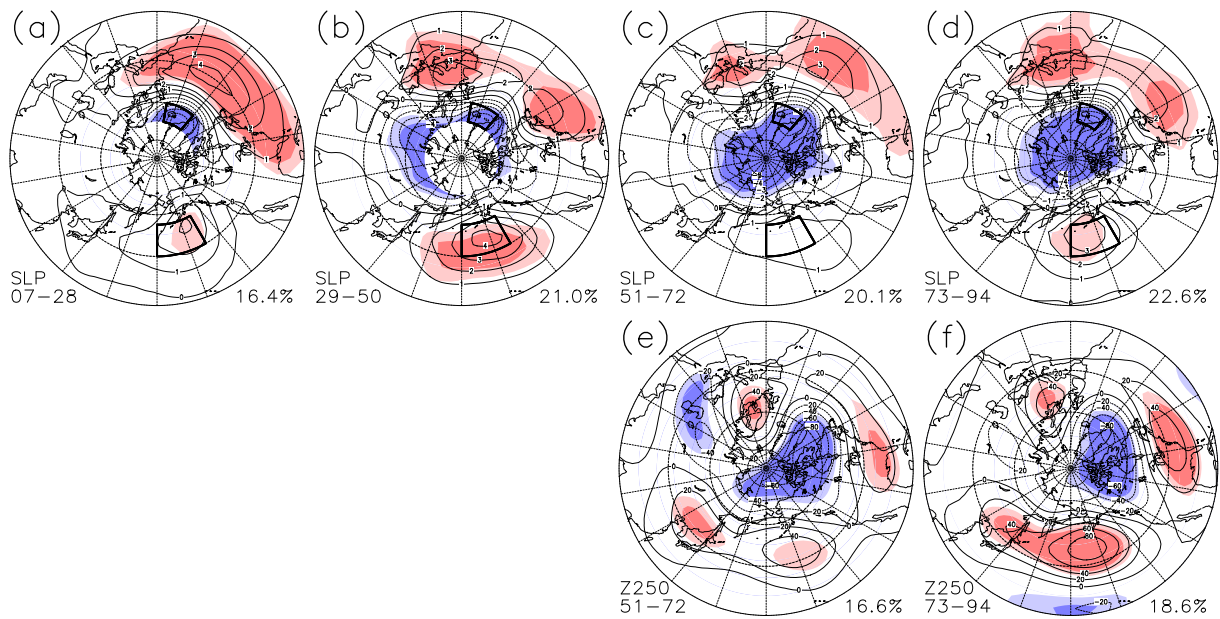


図 1: 冬季 (11-4 月) 北半球 20°N 以北の月平均海面気圧場 (a-d) と 250hPa 高度場 (e,f) の経年変動における EOF 第 1 モードの空間分布. 22 年毎の 4 つの期間について示す: (a) 1907-28 年, (b) 1929-50 年, (c,e) 1951-72 年, (d,f) 1973-94 年. 等値線間隔は, それぞれ, (a-d) 1 hPa, (e,f) 20 m. 変動の有意水準が 95% と 99% を超える領域に, それぞれ, 淡色と濃色を付けた. 図 (a-d) の北太平洋と北大西洋の太線で囲われた領域で平均した月平均海面気圧を, それぞれ, アリューシャン低気圧とアイスランド低気圧の強度の指標として用いた.

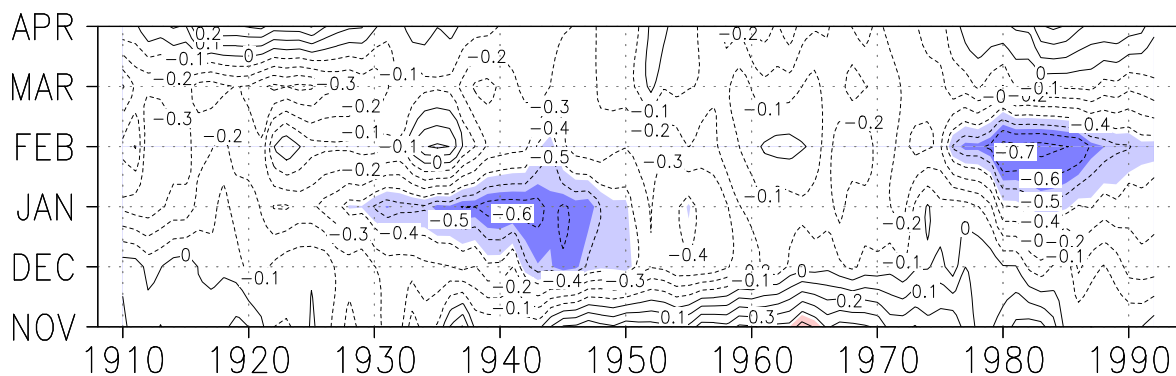


図 2: アリューシャン [40-55°N, 180-150°W] とアイスランド [60-70°N, 40-10°W] のそれぞれの領域 (図 1a-d の太線で囲われた領域) で平均した月平均海面気圧の経年変動の間の相関係数. 冬季の各月 (11-4 月) について長さを 21 年に固定して計算期間を 1 年ずつずらして求めた相関係数を各期間の中央年に対して示す. 相関係数の有意水準が 95% と 99% を超える領域に, それぞれ, 淡色と濃色を付けた.

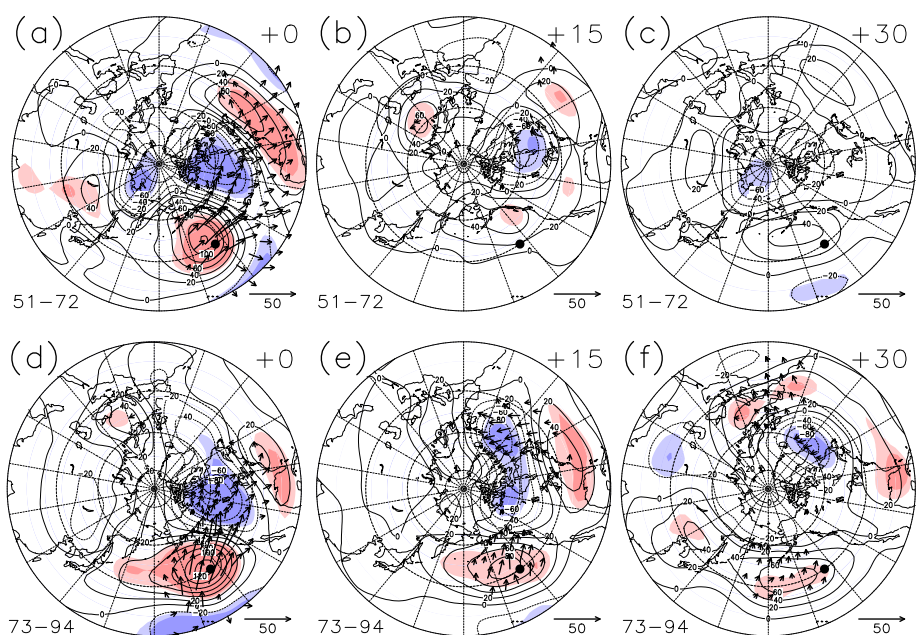


図 3: 北太平洋上の黒丸で示した地点 [40°N, 145°W] の 1 月半ば (1 月 11-25 日) 15 日平均 250hPa 高度の期間 1951-72 年の経年変動に対する北半球各地の (a) 1 月半ば (同時), (b) 2 月初め (1 月 26 日-2 月 9 日), 及び, (c) 2 月半ば (2 月 10-24 日) の各期間における 15 日平均 250hPa 高度場の線型回帰図. 図 (d-f) は, それぞれ, 図 (a-c) と同様. ただし, 期間 1973-94 年のデータに基づく. 等値線間隔は 20 m. 変動の有意水準が 95% と 99% を超える領域に, それぞれ, 淡色と濃色を付けた. 矢印は各期間の平年場を基本場とする線形回帰偏差場の波活動度フラックス (Takaya and Nakamura 2001 による). 図の右下に矢印のスケーリングを示す (単位:  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ ).

と北大西洋上の変動の結びつきが強まり, EOF-1 における北太平洋上のシグナルが強められたものと解釈できる. つまり, EOF-1 の構造に見られる 10 年規模変調は, AL-IL シーズン現象の変調を反映したものと考えられる.

では, 何故 AL-IL シーズンの活動に変調が見られたのだろうか? ここでは, まず, AL-IL シーズンが顕著な期間 1973-94 年とそうでない期間 1951-72 年の擾乱の伝播の様子を比較する. AL-IL シーズン現象は, 上部対流圏の北太平洋上から北大西洋上への準定常ロスビー波伝播によって形成されることが知られている (Honda et al. 2001, Honda and Nakamura 2001). 図 3 は, 15 日平均 250hPa 高度データを基に作成した地点 [40°N, 145°W] の 1 月半ば (1 月 11-25 日平均) の経年変動に対する同時, 及び, 時間ずらし線形回帰図を表す. 期間 1973-94 年の北太平洋上の擾乱は, 初期に PNA パターンに似た波列を形成し, その後, 準定常ロスビー波の伝播を通して, 擾乱の振幅の大きな領域をフロリダから北大西洋上へと移してゆく (図 3d-f). 北太平洋上の擾乱の持続性は高く, ひと月後 (2 月半ば) に AL-IL シーズンが形成される. 一方, 期間 1951-72 年の北太平洋上の擾乱は, 初期に PNA パターンに似た波列を同様に形成するが, その波活動度フラックスの多くは期間 1973-94 年のものに比べて南を向いており, その後に続く北大西洋上を横断する波列は見られない (図 3a-c). 北太平洋上の擾乱の持続性は低く, AL-IL シーズンの形成には至らない. 北太平洋上の初期擾乱の波活動度フラックスの多くが南を向くことは, 擾乱の形状と関係している. 期間 1973-94 年の北太平洋上の擾乱が東西に伸びた構造をしているのに対して, 期間 1951-72 年の擾乱は円形で, 波活動度フラックスを等方的に射出する傾向にある. この擾乱の形状の違いは, 擾乱の持続性にも影響を与えるであろう.

図 3 の解析から, AL-IL シーズン活動の 10 年規模変調の要因として, 北太平洋上に形成される擾乱の形状が変化したことと中緯度帯の準定常ロスビー波の伝播特性が変化したことが挙げられる.

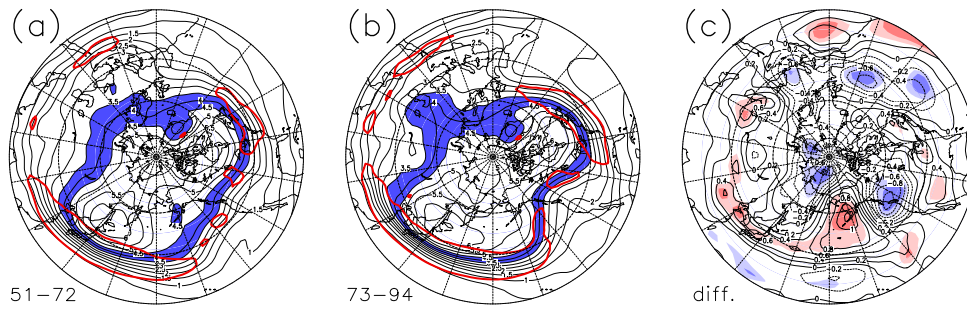


図 4: (a) 期間 1951-72 年, 及び, (b) 期間 1973-94 年で平均された 1 月半ば (1 月 11-25 日) の 250hPa 面上の渦位. 等値線間隔は 0.5 PVU. 青色は 3.5-4.5 PVU の領域. 渦位の水平勾配の大きな領域を赤線で囲う (2 PVU/1000 km 以上). (c) 両期間の平均渦位の差: (b)-(a). 等値線間隔は 0.2 PVU. 差の有意水準が 95%と 99%を超える領域に, それぞれ, 淡色と濃色を付けた.

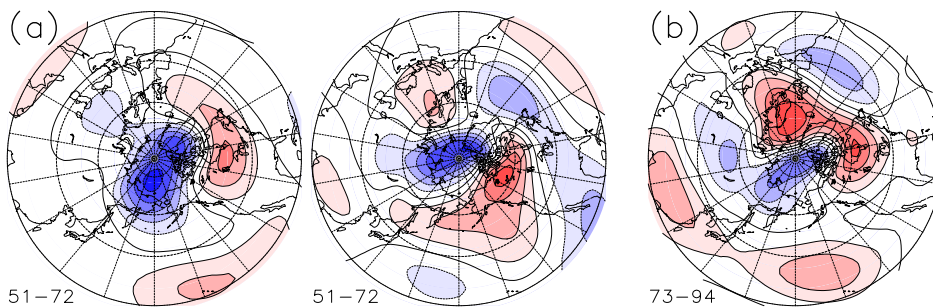


図 5: 1 月半ば (1 月 11-25 日) の 22 年平均場を基本場とする線形順圧モデルの第 1 固有モードの流線関数の分布. (a) 期間 1951-72 年について. 減衰 (*e*-folding) 時間は 8.2 日, 周期は 39.7 日 (複素固有値). 位相が 0 と  $\pi/2$  のときの分布を示す. (b) 期間 1973-94 年について. 減衰時間は 8.5 日, 周期は無限大 (実固有値).

これらの変化が何によって引き起こされたかは明らかではないが, 一つの可能性として, 擾乱が伝わる基本場が変化したことが考えられる. 基本場が 10 年規模で変化したことにより, その上で励起される擾乱の形状が変化し, また, その上を伝わる波の伝播特性が変化したと考えられる. 実際に, 期間 1951-72 年と期間 1973-94 年の 1 月半ばの時間平均場の間には有意な差が見られる (図 4). 期間 1951-72 年のものに比べて, 期間 1973-94 年の太平洋ジェットは北東太平洋からアラスカにかけての領域で大きく蛇行している (惑星波の振幅が大きい). この基本場の違いが卓越変動パターンの空間構造に及ぼす影響を線形順圧モデルのモード解析を通して調べた.

### 3. 線形順圧モデルを用いたモード解析

250hPa 面時間平均場を基本場として線形化した順圧渦度方程式

$$\frac{\partial \zeta'}{\partial t} = -\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \zeta' - \mathbf{u}' \cdot \nabla \bar{\zeta} - r \zeta' - K_H \nabla^4 \zeta' + F \quad (1)$$

を支配方程式とする球面スペクトルモデル (全波数 42 で三角波数切断) を用いて, 期間 1951-72 年と期間 1973-94 年の 1 月半ば (1 月 11-25 日平均) における固有モード, 中立特異モード, 最適モードの計算を行なった. ここで,  $\zeta$  は渦度,  $\mathbf{u}$  は水平風,  $(\bar{\quad})$  は時間平均,  $(\quad)'$  は時間平均からのずれ,  $r$  は緩和係数 (緩和時間を 5 日に設定),  $K_H$  は高次粘性係数 (最大波数での緩和時間を 0.5 日に設定),  $F$  は渦度強制を表す.

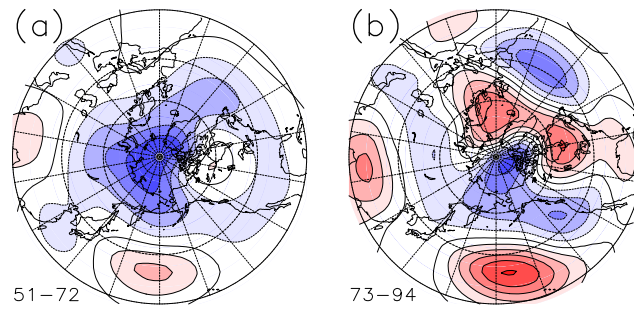


図 6: (a) 期間 1951-72 年と (b) 期間 1973-94 年の 1 月半ば (1 月 11-25 日) の平均場を基本場とする線形順圧モデルの第 1 中立特異モードの分布. 応答の流線関数を示す.

固有モードは, 方程式 (1) の線形作用素 (具体的には, 1848 次の正方行列) の固有ベクトルである. 固有モード  $\zeta'$  の時間発展は, 強制の存在しない状況 ( $F = 0$ ) において, 空間構造を固定したまま, あるいは, 周期的に変化させながら振幅を指数的に変化させることによって特徴づけられる. 今回の計算に用いた散逸項のパラメータ値 ( $r$  と  $K_H$ ) においては, 全ての固有モードが時間とともに減衰する安定なモードであった. ここでは, 減衰率の最も小さな第 1 固有モード (EG-1) に着目する. 減衰の最も遅い EG-1 によって観測される EOF-1 の空間構造の特徴が説明されることを期待する. 期間 1951-72 年の EG-1 は, 北極域をゆっくりと西進する変動パターンである (図 5a). 一方, 期間 1973-94 年の EG-1 は, 位相が固定しており, 中・高緯度帯に大きな振幅を持つ (図 5b). これらの EG-1 と観測される EOF-1 (図 1e,f) の分布とを比較すると, 全体的に EG-1 の方が擾乱の空間スケールが大きい. また, 両者の位相の位置は異なっており, パターンの類似性は低い. しかし, 期間 1951-72 年の EG-1 に比べて, 期間 1973-94 年の EG-1 が中緯度帯により波動的な構造を持ち, また, その位相が時間変化しないという特徴は, この時期の EOF-1 がより波動的な構造を持ち, 北太平洋上の擾乱の持続性が高いという観測事実と矛盾しない.

第 1 中立特異モード (SV-1) は, 方程式 (1) の線形作用素の特異ベクトルであり, 式 (1) の時間変化項  $\partial\zeta'/\partial t$  をゼロとして強制応答問題を考えたときに, ある大きさの様々な強制  $F$  に対する応答  $\zeta'$  の中で最も大きな応答に相当する. 観測される EOF-1 の空間構造の特徴が, 時間的に変動する強制に対する応答の変動として説明されるのではないかと期待する. ここでは, 強制の大きさを全球エネルギーノルムで定義し, 応答の大きさを北半球  $20^\circ\text{N}$  以北  $L_2$  (流線関数の分散) ノルムで定義した. 固有モード解析と違って, 強制や応答の領域を興味のある領域に限ることができることが特異モード解析の利点の一つであろう. 期間 1973-94 年の 1 月半ばを基本場とする SV-1 の応答の分布は, 期間 1951-72 年の SV-1 と比較して, 特に北太平洋上から北大西洋上に渡る領域において, より波動的な構造を示す (図 6). これは固有モードの結果と同様であり, 観測される EOF-1 の変調傾向と矛盾しない.

第 1 最適モード (OPT-1) は, 方程式 (1) の線形作用素をある有限時間積分した行列の特異ベクトルであり, 強制  $F$  をゼロとして初期値問題を考えたときに, ある大きさの様々な初期擾乱の中で有限時間後に最も大きくなる擾乱に相当する. ここでは, 積分時間を 10 日とし, 初期擾乱の大きさを全球  $L_2$  ノルムで定義し, 10 日後の擾乱の大きさを北半球  $20^\circ\text{N}$  以北  $L_2$  ノルムで定義した. 10 日で最も大きくなる擾乱 (OPT-1) によって, 観測される EOF-1 の空間構造の特徴や北太平洋上の擾乱の時間発展が説明されることを期待している. 得られた OPT-1 の空間分布は, 期間 1951-72 年と期間 1973-94 年のどちらも, それぞれ, SV-1 の応答の分布に非常に良く似たものであった. この SV-1 と OPT-1 の類似は, 今回行った線形モードの基本場依存性解析が安定であることを意味しており, 観測される基本場の変化が卓越変動パターンの空間構造にある決まった影響を及ぼし得ることを示唆している.

### 3. 議論

今回行なった線形順圧モデルのモード解析の結果は、観測される卓越変動パターンの変調傾向を示唆するものであったが、変調の構造を十分に説明するものではなかった。そもそも、3つの線形順圧モードの空間構造は、それらの間に類似が見られたが、250hPa高度場 EOF-1の空間構造と似ていなかった。線形順圧モードによって長周期変動の力学がどの程度説明できるかが問題となる。

今回行なったモード解析では、順圧であること、擾乱の発展が線形であること、時間平均場を基本場としていること、傾圧波擾乱の影響を無視していること、強制や初期擾乱の確率分布を一様としていることなど多くのことが仮定されている。個々の仮定が解析結果にどのような影響を及ぼすか把握しておくことは、現実大気との対応関係を考える際に重要である。例えば、我々は、長周期の擾乱が傾圧波擾乱のフィードバック効果によって維持される傾向にあることを知っている。このフィードバック効果を線形順圧モデルに含めれば、得られる固有モードの周期は長くなると推察される。今後は、このような傾圧波擾乱の影響を考慮に入れるなどして、線形順圧モデルのモード解析を発展させてゆくことを計画している。

#### 謝辞

ここで用いた球面スペクトルモデルは ISPACK(石岡 2002) をもとに作成した。描画には GrDAS ソフトウェアを用いた。今回の特定研究集会にあたり、京都大学防災研究所より旅費の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- Honda, M., H. Nakamura, J. Ukita, I. Kousaka, and K. Takeuchi 2001: Interannual seesaw between the Aleutian and Icelandic lows. Part I: Seasonal dependence and life cycle. *J. Climate*, **14**, 1029-1042.
- Honda, M., and H. Nakamura 2001: Interannual seesaw between the Aleutian and Icelandic lows. Part II: Its Significance in the interannual variability over the wintertime northern hemisphere. *J. Climate*, **14**, 4512-4529.
- 石岡圭一, 2002: ispack-0.61, <http://www.gfd-dennou.org/arch/ispack/>, 地球流体電脳倶楽部.
- Kalnay, E. Coauthors., 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Takaya, K, and N. Hisashi, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace 1998: The arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- Trenberth, K. E., and D. A. Paolino, 1980: The Northern Hemisphere sea-level pressure data set: Trends, errors and discontinuities. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 855-872.
- Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784-812.
- 山根省三・本田明治・中村尚・大淵済, 2002: 観測データと数値実験に見られる冬季北半球循環場に卓越する変動の10年規模の変調について. *グロースベッター*, **40**, 88-97.