

タナカ ヒロシ  
田中 博

#### 略 歴

1981年11月 ミズリー大学コロンビア校主任研究員  
1988年09月 アラスカ大学地球物理学研究所助教授  
1991年09月 筑波大学地球科学系講師  
2001年02月 筑波大学地球科学系助教授  
2005年06月 筑波大学計算科学研究センター教授

## 異常気象をもたらす北極振動の解明とその予測 (第3報)

### Analysis and Prediction of the Arctic Oscillation and Abnormal Weather (3rd Report)

In this study, the barotropic S-model at the University of Tsukuba was applied for predicting the Arctic Oscillation Index introducing the ensemble prediction technique. The prediction experiments were conducted for abnormal cold winter of 2005/06 and warm winter of 2006/07. The result suggests some prediction skill for the seasonal forecasting range. Next, the barotropic S-model was integrated for 50 years with an artificial linear trend of the external forcing to excite the Arctic Oscillation. The experiments are repeated for six times with slightly different initial data to construct an ensemble mean of the trend. According to the result, the ensemble mean indicates a reasonable linear trend of the Arctic Oscillation Index (AOI). Apparently, this trend is caused by the external forcing. Superimposed on the linear trend, each member shows considerable amount of the internal variability with a decadal scale. The deviation from the ensemble mean is examined by the EOF analysis to find the dominant mode of the Arctic Oscillation. It is concluded that the decadal variability of the AOI can be explained by the purely internal variability of the barotropic component of the atmosphere.

#### 1. はじめに

北極振動 (Arctic Oscillation: AO) とは、ワシントン大学の Wallace 教授らにより 1998 年提唱された現象で、北緯約 60 度を挟んで南北に海面更正気圧場が逆相関を持つというものである。Namias (1950) による東西指数 (Zonal Index) とほぼ同義であり、古くは Exner (1925) や Walker

and Bliss (1932) にさかのぼって同様の現象の報告を見いだすことが出来る。北極振動は周期的な振動でないため、北半球環状モード (Northern Hemisphere Annular Mode: NAM) と呼ばれることがある。また、AO と北大西洋振動 (North Atlantic Oscillation: NAO) は同義であると考えられる立場もある。古典的な東西指数が北緯 45 度付近の偏西風ジェットの強弱に注目し、亜熱帯ジェットと寒帯前線ジェットを合わせた偏西風ジェットの強弱を見ていたのに対し、北極振動指数は明らかに寒帯前線ジェットと極夜ジェットを合わせた偏西風ジェットの強弱に注目しているという点で、両者は異なっている (Wallace 2000)。

定義の詳細については、本研究の第 1 報で説明したが、北極振動指数 (AO Index: AOI) が正の時には、北極域で低圧偏差、中緯度で高圧偏差が生じる。北極振動指数と世界の異常気象との関係を見ると、北極振動指数が正の時には、ヨーロッパでは偏西風の強化により温和で雨が多くなり、日本付近では温和な天候が続く。逆に北極振動指数が負の時には、気圧場や気温場の正負の符号が反転し、極域で高圧偏差、中緯度で低圧偏差が生じ、ヨーロッパでは晴天が続く、寒気の流入で寒冷化すると同時に日本付近も寒冷化する傾向にある。日本という北半球の 1 地点の天候が、このように北半球規模の異常気象とリンクして発生するという点が、北極振動という現象の特徴である。

北極振動は北半球の海面更正気圧を、統計的な経験直交関数 (EOF) に展開した場合の第一主成分 (EOF-1) として定義され、北極海の作用中心とは逆符号の作用中心が太平洋と大西洋の 2 カ所に見られるのが特徴的である。冬季季節平均場を用いて解析すると、AO が占める分散の割合は 21% に増加する。海洋においてエルニーニョが変動の第 1 モードとして注目されるように、AO は大気大循環の変動の第 1 モードとして注目すべき対象である。大気大循環において AO がいかに重要な研究対象であるかを伺わせるものである。

日々の再解析データに基づく過去 50 年間の北極振動指数の時系列を見ると、近年の地球温暖化に伴い、負から正に増加傾向が見られる。そのトレンドに重なるように、気候シフトと呼ばれる 1976 年の急変と 1989 年の急変が特徴的であるが、1990 年代には正から徐々に負に転じている。近年の北極振動指数を季節平均値 (90 日移動平均) で調べると、1988/1989 年の気候シフトの際には、冬季において北極振動指数は過去最高の正の値となり、寒帯前線ジェットが極端に強まったことが伺える。このように大きな正の北極振動指数は 1989, 1990, 1993, 1995, 2000, 2002, 2003, 2007 年の冬季において発生し、これ等の年はいずれも日本に暖冬をもたらしている。特に、2002 年の暖冬は桜の異常開花をもたらした。本来、関東では入学式頃に満開となるソメイヨシノが、この年には平年より 3 週間も早く卒業式の頃に満開になってしまった。この年の異常気象は、まさしく北極振動が正に大きくふれたことと関係している。地球温暖化が脚光を浴びるようになった 1989 年以降は、ほぼ毎年のように正の値に振れ、暖冬が恒常化したように思えたが、1993 年に久しぶりに負となった後、1998, 2001, 2003, 2004, 2006 年と寒冬が頻発するようになった。興味深いことに、トレンドとしては地球温暖化と並んで北極振動指数は正を示すことが Thompson and Wallace (1998) で報告されたが、10 年スケールの変動においては 1990 年以降、北極振動指数は減少している。これが、北半球平均気温にも影響するかどうかは、今後の課題として注意深く見守る必要がある。

図1は日本海側に記録的な大雪をもたらした2005年12月の大気大循環と海面水温の特徴をまとめたものである。「平成18年豪雪」と命名されるに至ったこの豪雪により死者が134人に達し、1963年(昭和38年)の「38豪雪」に次ぐ戦後2番目の雪による自然災害となった。新潟県津南町では4mを超える積雪、また、太平洋側の名古屋市でも20cmを超える積雪を記録するなど、積雪を観測している全国339地点の内、106地点で観測開始以来の12月の最深積雪の記録を更新した。

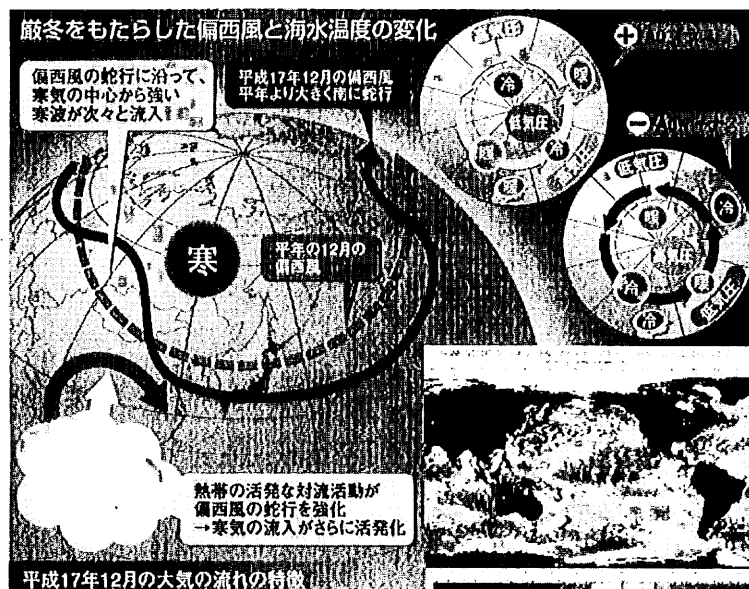


図1 平成18年豪雪時の大気循環と北極振動および海面水温

この時の上空のジェット気流はシベリアにリッジ、日本海付近にトラフを伴って大きく蛇行し、シベリアの第一級の寒気が日本付近に流れ出していたことがわかる。そのため、月平均気温の年平均偏差は東日本で $-2.7^{\circ}\text{C}$ 、西日本で $-2.8^{\circ}\text{C}$ となり、1946年に地域平均の統計が開始されて以来の低い記録を更新した。この年の12月の記録的な低温および大雪の理由として、第1に北極振動指数が負に転じ、これにより北極圏からの寒気の吹き出しが12月中断続的に続いたことがあげられる。北極振動による寒気の南下の一方で、フィリピンやインドネシア付近の熱帯での対流活動が活発化したことも原因のひとつであると気象庁は述べているが、対流活動の活発化は北極振動の結果であるとも考えることもできる。ちなみに、この冬の海面水温偏差はややラニーニャ的であるが、それほど大きな年平均水温偏差を示していたわけではない。したがって、何ゆえに北極振動指数が負に転じたのかを理解し、それを事前に予測することができれば、このような自然災害から多くの生命と財産を救済できたはずである。

一転して、2006/07年冬は記録的な暖冬となった。気象庁によると、冬型の気圧配置は一時的にしか現れず、全国的に気温が高く経過した。秋田、仙台、東京、名古屋、大阪、高松、福岡など63の気象官署で、冬の間平均気温の高い記録を更新した。各地域の気温(年平均差)は、北日本： $+1.6^{\circ}\text{C}$ 、東日本： $+1.7^{\circ}\text{C}$ 、西日本： $+1.6^{\circ}\text{C}$ 、南西諸島： $+1.2^{\circ}\text{C}$ であり、特に東日本と西日本においては、地域平均の統計のある1946/47年の冬以降で最も高かった。全国的に降雪はかなり少なく、冬

の降雪量は北陸地方で平年の9%となるなど、北日本、東日本、西日本日本海側の降雪量は地域平均の統計のある1961/62年以降で最も少なかった。雪のない北陸ではスキーやボードに代わって真冬のゴルフ場の景気が好調となった。東京では暖冬により雪がなく、初雪を観測しないまま桜の開花を迎えると思われたが、3月16日に最も遅い初雪が観測された。このような暖冬の際には北極振動指数は正に転じており、やはり北極振動研究の重要性をうかがわせる事例となった。

## 2. 北極振動のメカニズム

北極振動指数は寒帯前線ジェットの強弱の指標であり、亜熱帯ジェットの強弱とは逆相関を示す。また、偏西風ジェットの偏差の鉛直構造は対流圏下層、上層、成層圏ではほぼ一貫しており、順圧的な構造を持つことが明らかである。北極振動はその順圧的な構造から、地衡風関係式により上空の寒帯ジェットが強まったり弱まったりすることと力学的に同値である。このことから、我々は北極振動を順圧大気大循環モデル(順圧Sモデル)を用いて研究してきた(田中 2002; 2005)。ストームトラックにおける総観規模擾乱を介した波と平均流の相互作用によって、北極振動や南半球環状パターンの時間的変動を解釈する研究が多い(Tanaka and Terasaki 2005)。また、夏の北極振動についても、研究が進んでいる(Yokoyama and Tanaka 2005)。北半球では亜熱帯ジェットと寒帯前線ジェットが合流したり分流したりしてシングルジェットになったり、ダブルジェットになったりするが、その背景にあるものが北極振動である。さらに、半球規模の異常気象の原因となったり、地球温暖化の特徴的な分布を決めているのも北極振動である。このように北極振動は、大気大循環において重要な現象であるが、そのメカニズムはどのようになっているのだろうか。

これらの疑問に答えるために、大気大循環を支配する基礎方程式系(プリミティブ方程式系)の数学的な固有振動を求めてみた。固有振動とは、例えばギター弦の音色のように、与えられた弦の質量や張力の下では、固有の音程(振動数)の音とその倍音が生じるように、与えられた力学系のなかで発生する固有の振動のことである。ギターの弦を指で引いてもピックで弾いても音程は同じ。つまり与えられる外力が何であっても、外力に応答してその力学系に固有の振動が起こる。これが固有振動である。

地球大気の運動形態の中には、地球の半径や重力、自転速度や密度成層などの与えられた条件の下で、固有の波長や位相速度を持った特徴的な構造の固有振動が存在するであろう。方程式系は非線形なので、これを線形化するために時間変化のない基本場に微小ノイズが重なっていると仮定する。これにより、微小ノイズは、時間発展する大気の固有振動の重ね合わせとして理論的に解かれるのである。その無数にある固有振動の中から、最も急激に増幅する解を探すと、それが温帯低気圧を作り出す傾圧不安定波であることが判明する。求められた固有値から位相速度と増幅率が分かり、解の構造から空間的なパターンが描ける。

北極振動もこのような大気大循環の固有解として存在する、との期待をこめて、観測された大気の気候値に微小なノイズが重なっていると仮定して、無数にある固有解の中から北極振動の特徴を

備えたものを探すのである。傾圧不安定波の場合、ターゲットとなる固有解の性質は最も急激に成長する波であるから、固有値から得られる増幅率が最大の波を探すことになる。北極振動の場合、構造は波として伝播しないので位相速度がゼロの固有解を探す。位相速度はゼロで構造が正負の符号をとるような波を定在波という。よって、定在波の中で増幅率が最大の固有解を探すことが基準となる。ただし、粘性や地表摩擦を無視した力学系において増幅率が正の定在波も、粘性や地表摩擦を考慮するとすべてが減衰解となる。傾圧不安定波のように、粘性や地表摩擦に打ち勝って増幅するような強い不安定解は定在波には存在しない。そこで、最も減衰率の小さい定在波を探すことが基準となる。

多くの固有解の中から、位相速度がゼロとなり、減衰率が最もゼロに近い固有解について、その構造を調べた (Tanaka and Matsueda 2005)。理論的に得られた固有解の構造は、北極圏で低圧偏差の時に中緯度で高圧偏差となり、しかもその高圧偏差の中心は太平洋と大西洋の二箇所に現れる。この構造を観測値による北極振動パターンと比較すると、両者はほぼ完全に一致する。このことから、これが北極振動に対応する固有解であると判断できる。地表摩擦がゼロの時、定在固有解には2つの不安定解が得られる。そして、地表摩擦を徐々に上げてゆくと、それらの増幅率は順にゼロとなり、さらに上げてゆくとすべてが減衰解となる。このときの任意の定常外力に対する応答曲線は、増幅率がゼロとなったときに共鳴し、その振幅は無限大となる。この応答関数は、固有値の逆数で与えられるため、定常外力に対しては、固有値がゼロの解が共鳴を起こす。位相速度がゼロで増幅率もゼロとなる固有解は、その固有値がゼロという特殊な解なので、特異固有解と呼ばれる。本研究では、この特異固有解の共鳴応答が北極振動のメカニズムとして重要であることをつきとめた。

北極振動指数が負から正に転じる際に、寒帯前線ジェットが加速されるが、その運動エネルギーはどこから来るのであろうか。運動エネルギー方程式にしたがって、その収支計算を行ってみると、軸対象な寒帯前線を加速するエネルギーは、総観規模擾乱からの波と平均流相互作用によってもたらされていることが分かる。詳細なエネルギー論によると、傾圧不安定により総観規模擾乱に供給された順圧エネルギーが、2次元流体力学の束縛により平均流へ逆カスケードして帯状順圧エネルギーを供給していることがわかる。したがって波による西風運動量は亜熱帯ジェットから寒帯前線ジェットに向けて輸送され、亜熱帯ジェットを弱めると同時に、寒帯前線ジェットを強化するような相互作用を及ぼしている。本研究では、寒帯前線ジェットの傾圧性により増幅する傾圧不安定波：ポーラーモードの存在を明らかにした (Tanaka and Tokinaga 2002)。このような不安定波は平均流に対して正のフィードバックをもたらしている。つまり、寒帯前線ジェットが強化されるとポーラーモードが増幅し、その渦がもたらす運動量輸送の収束により、寒帯前線ジェットがさらに強化される。これでフィードバックのループが完結し、北極振動のパターンに渦が重なると、その渦は特異固有解として存在する北極振動パターンを一層強化する、というメカニズムが明らかになった。

### 3. 北極振動指数の短期予測

本研究では、北極振動の実態解明とそれが発生する理論的な根拠について探求し、ある程度納得の行く解答が得られた。そこで、これらの理解のもとで実際に北極振動指数の予測を試みたので、その結果を以下に紹介する。

AOは長周期におよぶ変動であるため、大気の順圧成分を予測することは有意義であると考えられる。また、前述したように、AOは冬季における北半球の天候と密接に関係しており、日本においても冬季のAOIと天候との関係はよい。したがって、冬季のAOIを予測することは、その冬の天候の傾向を知る一つの手がかりとして重要であると思われる。

中期予報は、大気という非線形流動体のカオスの壁によって妨げられ、数値予報が発達した現代においても2週間を超えて予測することは不可能とされている。しかし、大気の変動成分のうち、プラネタリー波のような動きがゆっくりではほぼ定常に近い成分だけを取り出したときの予測は、総観規模もしくはそれより小さい波動を含むときよりも予報精度がよくなる。AOは長周期変動であるため、それを予報することは非常に有益で価値があるものと考えられる。

Tanaka (2003) では、鉛直構造関数と水平構造関数を基底にとった3次元スペクトルプリミティブ方程式で構成される新しい順圧大気大循環モデルを開発した。このモデルは、大気の順圧成分(つまり鉛直平均場)を予測するものである。この順圧大気大循環モデルは、外部強制項の正確な見積もりが非常に難しいため、外部強制項のパラメタリゼーションがカギとなる。我々は、外部強制項として、地形、傾圧不安定、粘性摩擦、地表摩擦を定式化してブロッキングの数値実験などを行い、観測されるようなブロッキングのライフサイクルの再現に成功している。そのモデルはブロッキング用に作られたので、その頭文字をとって順圧 B-Model と呼ばれる。しかし、このパラメタリゼーションは基本的には外力の線形近似であり、観測値から得られた現実の外力に対しては完璧とはいえなかった。

そこで、Tanaka and Nohara (2001) では、モデルの最適外力を過去の観測値から線形回帰により統計的に求めた。逆問題を解いて外力を統計的 (statistically) に求めているため、このモデルは順圧 S-Model と呼ばれる。詳細については Tanaka and Nohara (2001) に書かれているが、現実大気の順圧成分の予報を行った結果、長周期変動の力学的解明に充分使える順圧大気大循環モデルであるということが示された。また、Tanaka and Nohara (2001) では、外力を観測値から診断的に求めて構築した擬似パーフェクトモデル(順圧 P-Model) が、初期値から100日以上も現実大気と同じ時間発展を示した。つまり、このモデルのカオス性は低い。したがって、外力をより精度よくパラメタライズできれば、順圧 S-Model の予報能力が向上することを示唆している。

本研究では、日本において顕著な寒冬(暖冬)となった近年の冬を対象とし、順圧大気大循環モデルを用いて、その冬のAOIの長期予測が可能であったかどうかを検証した。また、現在は、1

つの初期値からではなく複数の初期値から複数の予測を行い、その平均をとることで予報精度の向上を図る「アンサンブル予報」が主流となっている。順圧大気大循環モデルでは、初期値に誤差を与えてもその時間成長は非常に遅い (Tanaka and Nohara 2001) ことから、従来のような初期値に誤差を与える方法は好ましくない。そこで本研究では、パラメタライズされた外力の誤差を見積もり、その誤差を少しずつ変えていく、従来とは違った Stochastic Physics (確率的物理過程) を応用したアンサンブル予報を行った。本研究で使用したデータは、1950年から2006年までのNCEP/NCAR再解析データである。解析対象として平成18年豪雪のあった2005/06年冬と、顕著な暖冬であった2006/07年の冬を選んだ。AOIが大きく正(負)に振れる約1ヶ月前を初期値として順圧S-Modelを60日分走らせ、現実のAOIと比較して予測ができていたかどうかを検証した。また、モデルの初期値依存性を検証するために、初期値を5日間ずつずらし、数多くの予測実験を行った。

図2aは、2005年7月から2006年3月までの、順圧成分で定義したAOIの時間変化と、丸印で示した2005年10月1日00Zを初期値とした、順圧S-Modelによる60日予測の合成図である。図中の細実線はAOIの実況、破線はコントロールラン、点線は初期値直前のモデルバイアスを考慮した摂動ラン、そして、太実線はアンサンブル平均を示している。これを見ると、どのメンバーとも、この先徐々にAOIが低下していく様子が予測できている。また、メンバー間のばらつきもそれほど大きくはなく、コントロールランおよび摂動ランともに負へ遷移していく予測であり、実況とよく合っている。なお、6日、11日、…と初期値を5日ずつずらしていったときの予測は、1日を初期値とした場合の予測と同様、AOIが負へ遷移していく様子をよくとらえていた。また、メンバー間のばらつきも小さかった。しかし、初期値を11月になると、予報精度が悪くなった。この予報では全体的にはむしろ正へ振れる予想となった。つまり、常に予報が当たるといったものではない。

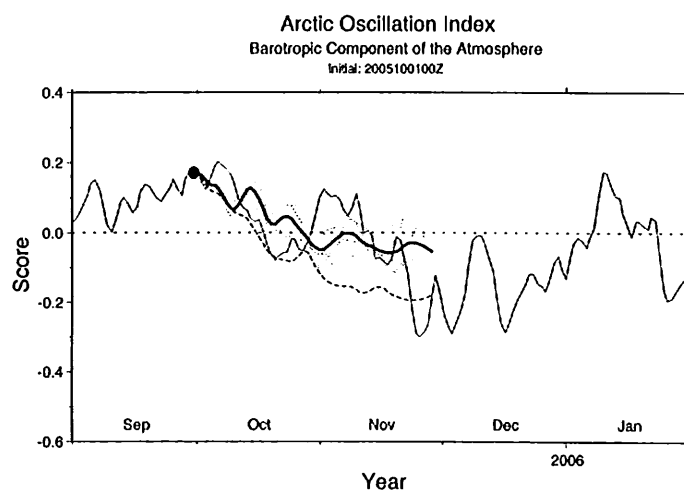


図2a：2005/06年冬の北極振動指数とそのアンサンブル予報。

図 2b は、2006 年 11 月 11 日 00Z を初期値としたときの予報である。順圧成分で定義された AOI の実況をみると、11 月頃から正へと遷移し始め、12 月下旬～1 月上旬にかけては大きなプラスとなった。メンバー間のばらつきは大きいものの、アンサンブル平均では 12 月～1 月にかけての AOI の変動をよく予測できていた。また、コントロールランでは実況とかけ離れた予測であるのに対し、アンサンブル予報ではバイアスがうまく補正されている点が注目すべき部分である。なお、2006/07 年冬の予報実験は初期値をずらしても結果が大きく変わることはなく、どの予報も実況に近い結果となった。

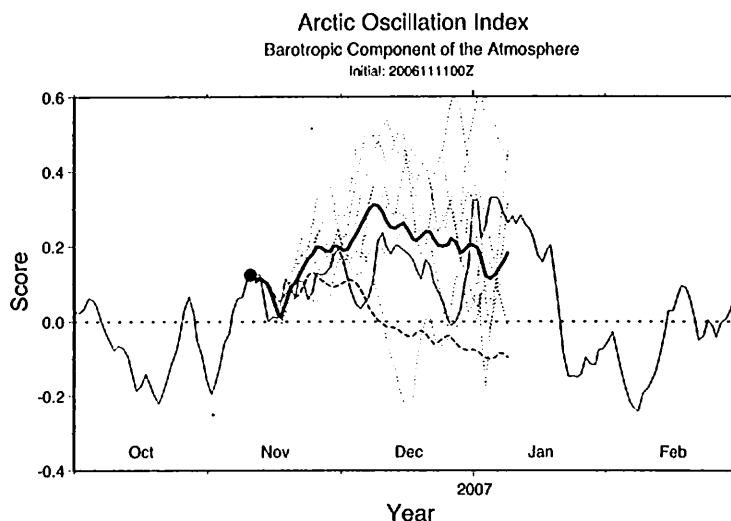


図 2b : 2006/07 年冬の北極振動指数とそのアンサンブル予報。

今研究では客観的な指標を用いて予報精度の検証をしていない。一般に、天気図などの予報精度の検証には RMSE (Root Mean Square Error: 根号平均二乗誤差) やアノマリ相関が用いられるが、本研究では AOI の長期予報をターゲットにしているため、これらの指標を用いることができず、予報精度の評価が主観的にならざるを得なかった。今後は客観的な指標となるものを導入することが必要であると思われるが、AO は長期的な変動であるため、日々の AOI を細かく検証することよりも長期的な AOI の傾向をとらえることのほうが大切であると考えられる。

#### 4. 北極振動指数の長期予測

本研究では、次にこの順圧 S モデルを用いた 50 年間の時間積分を多数行ない、仮想的な外力応答によるトレンドと、それに重なる内部変動の特徴を行本 (2005) の手法で解析した。北極振動の特異固有解理論で導かれる最適外力 (SVD 解析の U ベクトル) を、50 年の積分期間中に負から正にリニアに増加するようにトレンドとして加算し、実験を行った。別の実験では、AO と線形関係にある外力を上と同様に与えて、その応答を調べた。トレンドとして与えた外力は、観測される外力の平均ノルムの大きさを基準とした場合、外力のノルムが 50 年の間に基準値の  $-0.4\%$  から  $+0.4\%$  に変化するように与えた。初期値は 1950 年 1 月 1 日 00Z から 24 時間おきに 6 日 00Z までの 6 通りを与



え、6メンバーのアンサンブル予報実験とした。

図3は、AOと線形関係にある外力を用いた場合の、1950年から2000年までの北極振動指数の時系列の例(図3a)と、全6メンバーおよびそのアンサンブル平均に対する北極振動指数の時系列の合成図(図3b)である。北極振動指数には365日移動平均が施されている。実験の結果から、外力に加えた僅かのトレンドにตอบสนองして、北極振動指数は50年の間に負から正へと増加する傾向がみられ、そこに大きな振幅の10年スケールの変動が重なっていることが分かる。この例をNCEP/NCAR再解析により得られた観測による時系列と比較すると、特徴が良く似ていることが確かめられる。つまり、大気の順圧成分における非線形性で生じる自然変動は、10年スケールでも十分な振幅を持って変動しうることが解る。

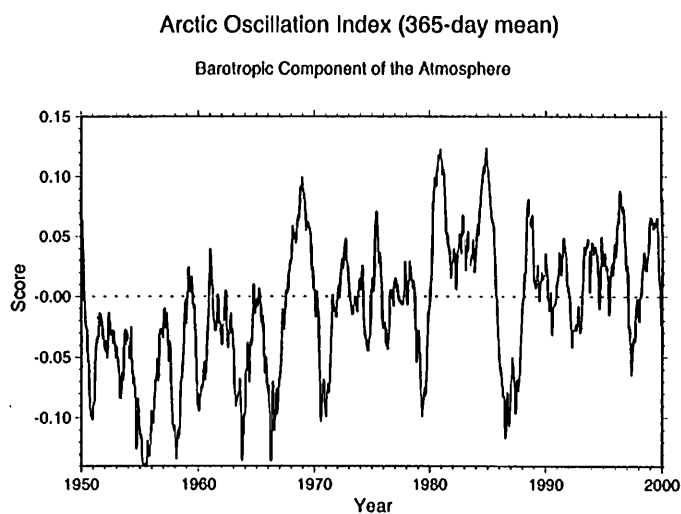


図3a: 順圧Sモデルによる50年ランに見られる北極振動指数。

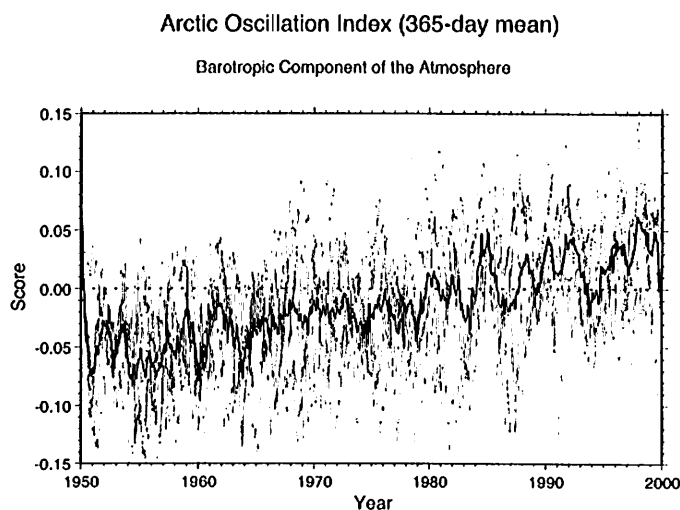


図3b: 北極振動指数のアンサンブル平均と6メンバーの時系列。

すべてのメンバーの合成図とアンサンブル平均の結果では、ゆるやかな上昇トレンドが再現されている。行本 (2005) や大橋 (2007) によると、長期トレンドの部分が地球温暖化により生じる外力強制応答に相当し、そこからの偏差として定義される各メンバーの変動が大気の内変動として理解される。そして、この内変動の卓越モードを調べるために、アンサンブル平均からの偏差場について、各メンバーを継ぎ足した長期データについて EOF 解析を行うと、観測と同様に北極振動のパターンが得られることを確認した。つまり、10 年スケールの変動は順圧成分の内変動ということになる。これは任意の定常外力に対して特異固有解が共鳴応答を引き起こし、自身の正のフィードバックにより長期的に変動した結果であると考えられる。一方、外部強制によるトレンドについて EOF 解析を行った結果、AO と線形関係にある外力の応答は北極振動パターンとなり、SVD 解析の最適外力に対しては PNA を含む構造が現れた。なぜ、そのような応答となるかについては、今後さらに、詳細な研究が必要である。

## 5. まとめと考察

本研究では、北極振動が大気のひとつの固有振動であることを理論的に突き止めた。この固有振動は固有値がゼロとなる特殊なモードであることから、特異固有解と名づけられた。ただし、固有値をゼロとし、準共鳴を発生させるためには、地表摩擦による減衰効果を打ち消す、何らかの正のフィードバックが必要である。その答えは寒帯前線ジェットの傾圧性により増幅する傾圧不安定波：ポーラモードの発見にあった。寒帯前線ジェットとポーラモードの間の正のフィードバックは、北極振動が任意の定常外力に対する準共鳴で生じる、という特異固有解理論を完結させる最後の素材を与えてくれた。北極振動指数が正に振れたとき、北極振動パターンに非定常擾乱が重なると北極振動パターンが一層強化されるということは、北極振動の固有解の増幅率を正にシフトさせることに他ならない。これにより、地表摩擦による減衰率が相殺され、固有値はゼロ付近を行き来し、外力に対する応答曲線の共鳴点に到達する。北極振動の力学的解明というパズルの最後の一枚が、波と平均流の間の正のフィードバックにより埋められたわけである。

本研究では、大気の内変動成分を予測する順圧大気大循環モデルを用いて、北半球の冬の天候の指標である北極振動指数 (AOI) の長期予測が可能であるかどうかを検証した (加藤・田中 2007)。具体的には、記録的な寒冬となった 2005/06 年冬、対照的に記録的な暖冬となった 2006/07 年冬を対象に、それぞれの年の 11 月頃を初期値としてモデルを走らせ、AOI の 60 日予測を行った。そして現実の AOI と比べることで、AOI の長期予測が可能であったかどうかを調べた。なお、モデルによるバイアスを修正するため、初期値直前のある一定期間の平均バイアスを補正したアンサンブル予測を行うことで、予測精度の向上を図った。その結果、AO のような順圧的で長い周期をもつ変動は、大気の内変動成分を予測することで、2 週間を超えて予測できる可能性が示された。一方で、新しい初期値を用いたほうが予測精度が向上するとは必ずしも言えなかった。また、初期値によっては予測が大きく変わることもあり、日替わり予報的な面も見られた。しかし、モデルバイアスを考慮したアンサンブル予測はコントロールランよりも AOI の変化を正確に予測していることが多く、効果があるものと考えられる。今後の課題としては、新たな外力のパラメタリゼーション、および更なるア

ンサンプル予報技術の開発が挙げられる。また、予報精度の評価のためには、客観的な指標を導入する必要があるだろう。

長期的な北極振動指数の振る舞いの実験として、行本 (2005) は気象研究所の大気大循環モデル (MRI-CGCM) の 5 メンバーから、北極振動の長期変化を外部強制応答と内部変動に分離し、外力によるトレンドと長期的な内部変動の双方が北極振動パターンで生じることが示された。大橋 (2007) では、アンサンブル予報を行なっている IPCC の AR4 モデルを用いて同様の解析を行い、内部変動については共通して北極振動パターンが得られることを確認した。しかし、外部強制応答のパターンはモデル間で大きく異なることが示された。本研究の結果では、極めて簡単な順圧大気大循環モデルを用いても、同様な特徴が再現され、北極振動の数十年スケールの長期変動が、大気の純粋な内部変動として十分に説明できることが示唆された。この結論は重要であり、海洋からの熱供給などの特定の外力がなくとも、大気は自律的に 10 年スケールの変動を十分に大きな振幅をもって生じさせることができることが示された。このような長期的な変動はカオス的に変動する部分もあるが、十分に長い持続性も持っている。したがって、予報対象期間の直前の外力のバイアスを平均化して評価し、予報に役立てる本研究の成果は、アンサンブル予報技術の一つの方法として有効である。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、(財) アサヒビール学術振興財団から 3 年間に亘り継続して研究助成金をいただきました。ここに記して感謝いたします。

## 文 献

大橋正宏 2007: 地球温暖化予測モデルに見られる北極振動の解析的研究。

筑波大学自然科学類卒業研究 (作成中)。

加藤真悟・田中博, 2007: 順圧大気大循環モデルによる北極振動指数の予測。気象研究ノート, (印刷中)。

田中博 2002: 順圧大気大循環モデルによる北極振動の数値実験およびその力学的固有解の解析。グロースベッター、気象庁, 40, 1-18。

田中博 2005: 順圧大気大循環モデルによる北極振動の数値実験およびその力学的考察。気象研究ノート, 206, 71-107。

行本誠史 2005: MRI-CGCM2 による 20 世紀の気候再現実験における数十年スケールの北極振動の変動。グロースベッター, 43, 84-92。

Exner, F. M., 1925: *Dynamische Meteorologie*. Wien Verlag von Julius Springer. 415 pp.

(Translated by T. Sato, 1998, Iwanami Books, 338 pp in Japanese)

Namias, J., 1950 : The index cycle and its role in the general circulation. *J. Meteor* 7, 130–139.

Tanaka, H.L. and D. Nohara, 2001 : A study of deterministic predictability for the barotropic component of the atmosphere. Science Report, Inst. Geosci., Univ. of Tsukuba, 22A, 1–21.

Tanaka, H.L. and H. Tokinaga, 2002 : Baroclinic instability in high latitudes induced by polar vortex : A connection to the Arctic Oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 59, 69–82.

Tanaka, H.L., 2003 : Analysis and modeling of the Arctic oscillation using a simple barotropic model with baroclinic eddy forcing. *J. Atmos. Sci.*, 60, 1359–1379.

Tanaka, H. L. and M. Matsueda, 2005 : Arctic Oscillation analyzed as a singular eigenmode of the global atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 611–619.

Tanaka, H. L. and K. Terasaki, 2005 : Energy Spectrum and Energy Flow of the Arctic Oscillation in the Phase Speed Domain. *SOLA*, 1, 65–68.

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.

Walker, G. T. and E. W. Bliss, 1932 : World Weather V., *Mem. R. Meteor. Soc.*, 4, 53–83.

Wallace, J. M., 2000 : North Atlantic oscillation / annular mode : Two paradigms -- one phenomenon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 791–805.

Yokoyama, N. and Tanaka, H. L. 2005 : Analysis of the structure and wave activity flux of the Arctic Oscillation in summer. Proc. GCCA-6, 12-13 December 2005, Tokyo Miraikan, Japan.