

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 9月 アラスカ大学地球物理学研究所助教授
1991年 9月 筑波大学地球科学系講師
2001年 2月 筑波大学地球科学系助教授
2005年 6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

Analysis and Prediction of the Arctic Oscillation and Abnormal Weather

In this study, a numerical simulation of Arctic Oscillation (AO) is conducted using a simple barotropic model that considers the barotropic-baroclinic interactions as the external forcing. The model is referred to as a barotropic S-model since the external forcing is obtained statistically from the long-term historical data, solving an inverse problem. We have integrated the barotropic S-model for 50 years under a perpetual January condition and analyzed the dominant EOF modes in the model. The results are compared with the EOF analysis of the barotropic component of the real atmosphere based on the daily NCEP/NCAR reanalysis for 50 years from 1950 to 1999.

According to the result, the first EOF of the model atmosphere appears to be the AO similar to the observation. The annular structure of AO and the two centers of action at Pacific and Atlantic are simulated nicely by the barotropic S-model. Therefore, the atmospheric low-frequency variabilities have been captured satisfactorily even by the simple barotropic model.

The result suggests that the AO can be understood as the natural variability of the barotropic component of the atmosphere induced by the inherent barotropic dynamics which is forced by the barotropic-baroclinic interactions. The fluctuating up-scale energy cascade from planetary waves and synoptic disturbances to the zonal motion plays the key role for the excitation of the AO.

はじめに

北極振動 (Arctic Oscillation: AO) とは Thompson and Wallace (1998) により提唱された現象で、北緯約60度を挟んで南北に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。北極振動指数が正の時には極域で低圧偏差、中緯度で高圧偏差が生じ、その順圧的な構造から上空のポーラージェットが地衡風関係式により強まった状態になる。この時、ヨーロッパでは偏西風の強化により温和

で雨が多くなる。逆に北極振動指数が負の時には、極域で高圧偏差、中緯度で低圧偏差が生じ、上空のポーラージェットは弱まった状態になり、ヨーロッパでは晴天が続き、寒気の流入で寒化する。

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る立場と区別する立場とが論争となっている (Wallace 2000)。AOは北半球の海面更正気圧を経験直交関数 (EOF) に展開した場合の第一主成分として定義され、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。AOが半球規模のEOF解析から定義されるグローバルな定義なのに対し、NAOはアイスランド低気圧とアゾレス高気圧直下の2地点の気圧の逆相関で定義されるローカルな定義という違いがある。AOは統計的なEOF-1の構造なので、逆符号だからといって逆相関、同符号だからといって正相関になっていないところに問題がある。つまり、NAOが1点相関によるテレコネクションとして物理的な実体を伴うのに対し、AOは必ずしも物理的な実体を伴わず、複数のテレコネクションの合成により統計的に生じた架空の産物であると主張する人も多い。例えば、Deser (2000) や Ambaum et al. (2001) によると、NAOに対応して大西洋と北極海では気圧場が逆相関となる一方で、太平洋と北極海でも気圧場が逆相関となるので、どちらもテレコネクションとして認識される。太平洋と北極海の逆相関のことを北太平洋振動 (North Pacific Oscillation: NPO) と呼ぶこともある。しかし、太平洋と大西洋はほぼ無相関であり、AOがテレコネクションとしての実体のないことを示唆している。同様の統計的検証がItoh (2002) によっても主張されており、Wallace and Thompson (2002) の解釈と対立している。もし、Itohの議論が本当であるとする、NAOとNPOの2つが実体で、北半球環状モード (NAM) は存在しなくてもいいことになる。したがって、NAMが物理的なモードとして存在するという議論とNAMを含むAOは実体のない統計的な産物であるという議論が真っ向から対立する状態になっている。つまり、多くの大気大循環モデルを用いた研究例においても、AOが変動の第1モードとして解析されているが、AOに関しては、まだ力学的に理解されていない要素が多々あるのである。

北極振動は北半球海面更正気圧のEOF-1として定義されるが、この海面更正気圧の時間的変動の原因を力学的に考察すると、それは大気の順圧成分の力学的変動が主な原因となっていることが理解できる。海面更正気圧の時間的変動は気圧座標系の連続の式により、大気の鉛直コラムで質量積分した質量フラックスの収束によって制御される。この鉛直積分は大気の順圧成分と等価であり、それは浅水方程式の質量保存則により後述する順圧高度場の時間変動と等価である事が示される。海面更正気圧で定義した北極振動指数と大気の順圧成分で定義した北極振動指数は、構造も時系列も一致する。したがって、北極振動の本質は大気の順圧成分の力学を調べることにより、その原因を探ることが可能となる。

そこで、本研究ではこのような観測事実を踏まえ、AOをはじめとする長周期変動の力学的問題を解決するために、大気の順圧成分だけを取り出した順圧大気大循環モデルを構築し、まずは観測されるものと同じAOの数値実験を試みた。筑波大学で開発した順圧モデルには、傾圧不安定擾乱が統計的にパラメタライズされていることから、このモデルは順圧Sモデルと呼

ばれている。この順圧モデルを1月固定で50年間走らせ、その卓越モードをEOF解析により調べ、AOを検出した。そして、AOの数値実験が可能となった段階で、モデル大気のエネルギー収支を含む詳細な解析を行い、AOの物理的、力学的解釈を試みた。研究の詳細は 田中 (2002)、Tanaka (2003)、田中 (2004) を参照されたい。

北極振動の空間パターン

はじめに、観測およびモデル大気の長周期変動に見られる卓越モードの構造について比較する。観測およびモデル大気に対する50年間の状態変数について（実際には複素フーリエ係数を実部と虚部に分離して）EOF解析を施すことで、大気の順圧成分の卓越モードを解析することができる。Thompson and Wallace (1998) では季節平均海面更正気圧という一高度一変数のEOF解析により AOが導かれているが、本研究では大気を支配する全ての従属変数に対し全ての鉛直コラムのデータを用い、50年間の日々のデータを解析して卓越するモードが調べられている。はじめから大気の順圧成分を見ているという制限はあるが、仮に3次元大気についてEOF解析を行い、その結果、卓越モードが順圧的な構造をしているとすれば、はじめから順圧成分のEOF解析を行っても同じ結果が得られると考えられる。実際、AOなどの長周期変動は等価順圧的な構造をしていることがこれまでの多くの解析結果から明らかにされているので、本研究で得られる長周期変動の卓越モードは、3次元大気で最も卓越するモードと解釈することができる。

図1は50年間の日々のデータを用いた EOF解析の結果得られる第1モードの高度場を、NCEP/NCAR再解析データと順圧S-モデル大気の数について比較したものである。観測データは夏季も含んだ50年間の時系列に基づいて計算を行っている。NCEP/NCAR再解析データ

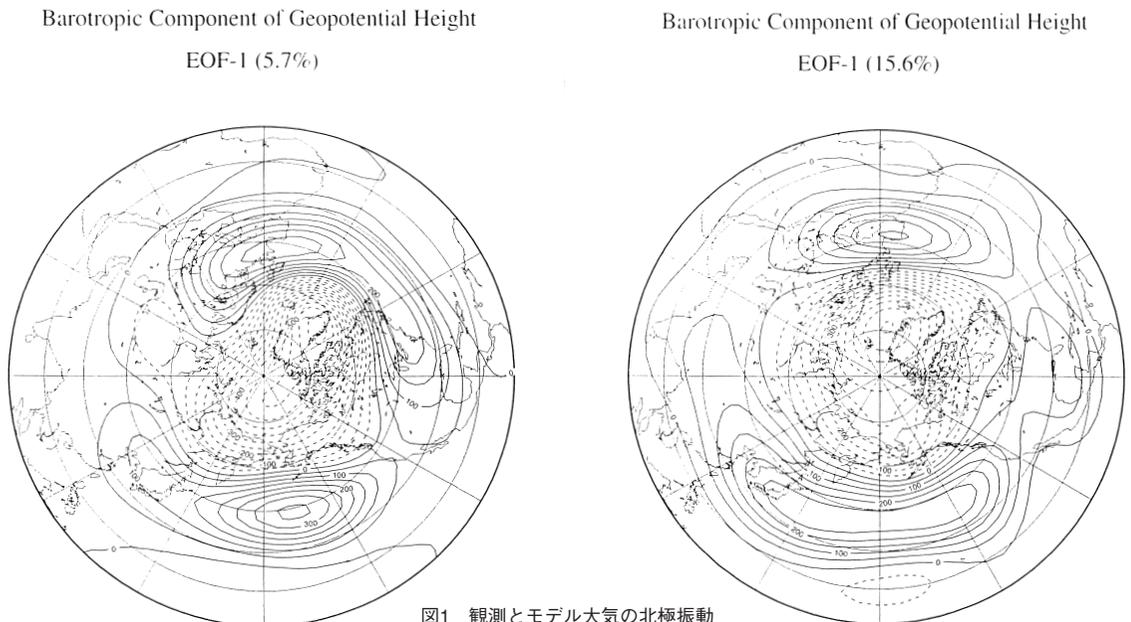


図1 観測とモデル大気の北極振動

の結果 (図1a) を見ると、EOF-1は北緯60° を挟んで極域で負、中緯度が正で、太平洋と大西洋に正の作用中心が見られ、まさしくAOの構造をしている。負の極の中心はやや大西洋にシフトしてグリーンランド上に存在し、この負の領域と大西洋のアゾレス諸島の正の領域とで有意な逆相関を示すことから、NAO (North Atlantic Oscillation) を含んだ構造になっている。北太平洋の正の領域と極域の負の領域の有意な逆相関は、NPO (North Pacific Oscillation) と呼ばれている。北太平洋の正の領域とアゾレス諸島の正の領域の間には有意な相関はないことから、モードの実体を解釈する際には注意が必要である。第1モードが占める分散の割合は5.7%と比較的小さいが、これは活発な総観規模擾乱の分散をあらわに含む日々のデータに基づいた解析結果のためである。むしろ、総観規模擾乱をしのいでEOF-1としてAOが登場する事実は、AOの物理的実体がどうあれ、大気大循環においてAOがいかに関心すべき対象であるかを伺わせるものである。冬季季節平均場を用いて解析し直すと、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、重要な研究対象であることは言うにおよばない。

一方、順圧S-モデルの第1モードの構造を見ると (図1b)、北緯60° を挟んで極域で負、中緯度が正で、太平洋と大西洋に正の作用中心が見られ、やはりAOの構造をしている。太平洋の正の領域が東西に広く伸び、大西洋の正の領域はヨーロッパとアメリカ東海岸の2カ所に分かれているが、本質的なAOの構造の特徴は十分に再現していると言える。第1モードが占める分散の割合は15.6%と比較的大きいが、これは順圧S-モデルの総観規模擾乱が観測に比べて弱いことや夏季の変動を含まないことによる。他の多くの大気大循環モデルを用いた研究例においても、AOが変動の第1モードとして解析されているが、本研究のような順圧大循環モデルを用いても、AOが自然変動の第1モードとして検出されることはAOの力学過程を解釈するうえで注目に値する。

北極振動指数

図2は日々の再解析データに基づく北極振動の時系列 (AOインデックス) であり、365日移動平均が施されている。月平均場で解析しても全く同様の結果となる。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。Thompson and Wallace (1998) で示された地球温暖化に伴うAOインデックスの長期トレンドは、1990年代後半以降はむしろ負になっている。順圧高度場と地上気圧場の時間変動は力学的に等価なので、地上気圧場の最近のAOイン

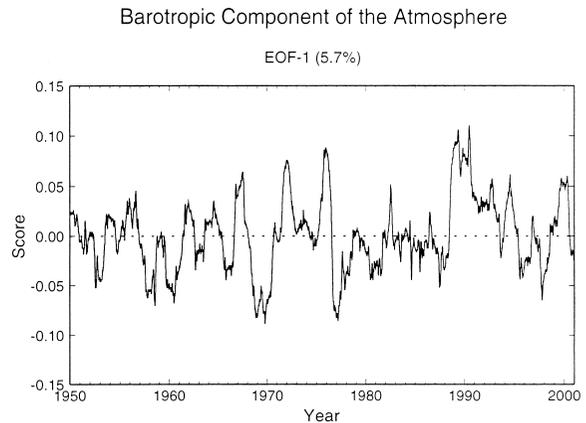


図2 観測された北極振動指数の時系列

デックスも同様に減少傾向になっている。

順圧S-モデルを用いて行った同様の北極振動の時系列（AOインデックス）は、観測と比べて振幅はやや大きめで、周期も短い。しかし、この長周期変動は完全に自然変動であり、順圧大気の内力学がもたらした結果であるが、観測されるAOインデックスを説明するに十分な振幅を持っている。順圧S-モデルを用いて行った実験では、モデルパラメータは1月1日に固定してあるため、AOインデックスに季節性は見られない。しかし、実際に観測されるAOインデックスにはかなりの季節性がある。再解析データにおいてAOインデックスが大きな正の値から負の値に転じている1988年から2002年までの15年間の90日移動平均したAOインデックスの時系列によると、1990年代初期の高いAOインデックスの値は、冬季に毎年のように現れた正偏差が原因である。しかし、1993年に負のインデックスが出現して以降、負の値が頻発するようになった。一般に、日本の冬季の天候はAOが正の時に暖冬、負の時に寒冬となる傾向がある。2001年の日本の寒冬や2002年後半の寒波などは、大きく負に転じたAOインデックスと深い関係にある。1998年から2002年末までの5年間の10日移動平均したAOインデックスの時系列によると、やはり、冬季にスパイク状に変動し、日本の冬は1999/2000年は暖冬、2000/01年は寒冬で春先にも寒波が来ている。2001/02年は12月の寒冬転じて1月以降は暖冬となり、卒業式に桜が満開となる異常開花が話題となったが、AOインデックスの変化と見事に対応している。特に、2002年後半にAOインデックスは大きく負に転じ、北極振動は寒冬傾向を示しているなかで太平洋ではエルニーニョが発生した。気象庁はエルニーニョを重視してこの冬は暖冬予報を出したが、結局、暖冬予報ははずれて北極振動の重要性が一層認識されるようになった。

タイムスペクトル

1950年から1999年までの50年間の日々の再解析データに基づくAOインデックスについて、タイムスペクトルを計算してみた結果を図3に示す。順圧S-モデルのタイムスペクトルには約4カ月周期にピークが見られ、それを挟んで短周期変動はレッドノイズ、長周期変動はホワイトノイズとなっている。時系列がホワイトノイズになるということは、モデル大気はその時間スケールでは過去を全く覚えていない、ということである。それに対し、レッドノイズ領域ではモデル大気は過去のメモリーを持っている。つまり、順圧S-モデル大気は、大気中で最大の自然変動である北極振動のメモリーを4カ月までは覚えているが、4カ月以上のメモリーは持っていないということがこの結果から分かる。

そのような観点で、図3の実現大気のAOインデックスのタイムスペクトルを見てみると、こちらも約4カ月周

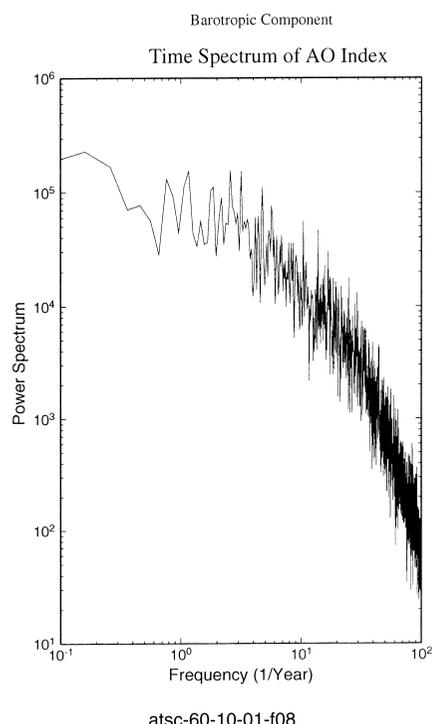


図3 観測された北極振動指数のタイムスペクトル

期まではレッドノイズで、その先はなだらかではあるがホワイトノイズになっているように見える。特に有意なスペクトルピークというものは無い。ただし、約10年周期に弱いスペクトルピークが見られ、気候変動研究で注目されている10年スケールの振動に対応している。この10年スケールの長周期変動が、有意なスペクトルピークを持つとすると、それは順圧大気の内力学で自然発生するものではなく、何かしらの外力の強制で生じていると考えなければならない。

北極振動の力学のまとめと考察

本研究では北極振動（AO）の物理的、力学的解釈を行なう目的で、傾圧不安定擾乱をパラメタライズした単純化順圧モデル（これを順圧S-モデルと呼んだ）を開発し、まずは観測されるものと同じAOの数値実験を試みた。

順圧S-モデルを1月固定で50年間走らせ、その卓越モードをEOF解析により調べた結果、EOF-1として観測とほぼ同様のAOモードが得られた。北極域の負とそれを取り囲む中緯度の正のパターンに加えて、太平洋と大西洋に明瞭な正の作用中心がみられた。EOF-1の時系列（AOインデックス）のタイムスペクトルの特徴として、周期約4カ月まではレッドノイズスペクトルを示し、それより長い周期ではホワイトノイズスペクトルに変化する。特に有意なスペクトルピークは存在しない。つまり、北極振動は約4カ月まではメモリーを持つ順圧大気其自然変動といえる。本研究で用いた順圧S-モデルはAOに対応するEOF-1に限らず、EOF-2からEOF-4までもが、日々のNCEP/NCAR再解析データから得られる長周期変動のEOF解析の結果とほぼ一致することから、このモデルは極めて簡単なものでありながら、観測される大気順圧成分の長周期変動を正しく再現しているものと判断された。

以上の結果に基づき、モデル大気の力学的な特徴を考察すると、以下のメカニズムが考えられる。大気大循環にはAOの構造を持つ力学的な固有モードが存在するに違いない。大西洋のストームトラックにおける擾乱の活動で運動量輸送の向きが変化し、ポーラージェットが強化され、大西洋に正、極域に負の高度偏差が現れると、この大気固有モードが励起されて極域では環状構造が現れる。同様に、太平洋のストームトラックにおける擾乱の活動でポーラージェットが強化され、太平洋に正、極域に負の偏差が現れると、大西洋の場合と同じ固有モードが励起される。これはAOプラスの極性の特徴であるが、AOマイナスの極性については、運動量を南に運ぶ不安定モードの働きが優勢となり、ポーラージェットは衰退する。大西洋と太平洋の二つのストームトラックの活動は独立で、お互いに相関はないが、どの場合においても環状モード（NAM）が励起されることから、統計的なEOF解析を行うと、太平洋と大西洋に2つの作用中心を持つ北極振動（AO）が卓越モードとして得られることになる。

海洋の第1モードがエルニーニョであるように、大気の変動の第1モードは北半球ではAOであることは重要な事実である。最大スケールの軸対称モードは任意の周期の外力に対して励起可能なので、温暖化に伴う強制や火山によるインパクト、Milankovitch周期等に対してもAOが卓越モードとして現れるということが、以上の考察により可能となる。今後の課題として、大気大循環の固有モードの中から、北極振動の構造を持つモードを見つけ出すことが重要である。

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

Ambaum, M. H. P., B. J. Hoskins, and D. B. Stephenson, 2001: Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? *J. Clim.*, 14, 3495-3507.

Deser, C., 2000: On the teleconnectivity of the Arctic oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 779-782.

Exner, F. M., 1925: *Dynamische Meteorologie*. Wien Verlag von Julius Springer. 415 pp. (Translated by T. Sato, 1998, Iwanami Books, 338 pp in Japanese)

Itoh, H., 2002: True versus apparent arctic oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 8, 10.1029/2001GL013978.

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

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.

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.

田中博, 2004: 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, (共著 分担), 51pp.

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.

Wallace, J. M. and D. W. J. Thompson, 2002: The Pacific center of action of the Northern Hemisphere annular mode: Real or artifact? *J. Clim.*, 15, 1987-1991.