

記録的な 2009/2010 年の寒波と北極振動の関係について

下 悠子(筑波大生命環境科学)・田中 博(筑波大 CCS)

1. はじめに

2009/2010年の冬季は、標準偏差の3倍(3σ)という記録的な負の北極振動(AO)指数により、世界的な寒波に見舞われた。寒帯ジェットが極端に弱まり、ブロッキング高気圧が北米とヨーロッパで繰り返し発生したため、極渦が崩壊し、北極気団がアメリカ東海岸、ヨーロッパ、東アジアに流れ出した。そのため、これらの地域では記録的な大雪となった。幸い波数3型ではなかったこと、熱帯の高温偏差の影響で、日本の気温は平年並みとなった。

2009/2010年冬季(DJF)平均の海面更正気圧(SLP)のアノマリ(図1)をAOプラスのSLPの構造(Wallace and Thompson 2002)と比較すると、実況のSLPは北極域で正、中緯度の太平洋と大西洋を中心に負となり、AOマイナスの構造が明瞭である。これまで、北極振動とは大気の有振動のような物理的実体を持つものなのか、それとも経験直交関数展開(EOF)という統計上生じた虚像なのか論争となってきたが、2009/2010年冬季のSLPはまさしく実像であり、統計的な虚像ではない事を示唆する結果となった。

どうしてこのようなAO指数が -3σ という異常気象が発生したかについて、気象庁異常気象検討委員会でも議論された。熱帯の高い海面水温の影響や成層圏での突然昇温などがきっかけで、寒帯ジェットが弱まる一方で亜熱帯ジェットが強まった。そしてブロッキングの発生でAOマイナスが起りやすい状態になった後、大気の内力学によりAOマイナスが一気に加速された。その維持については、AOマイナスが原因となって総観規模擾乱の構造が変化し、擾乱による運動量輸送がAOマイナスを維持した、との説明である。しかし、本当の外的要因はいまだに解らないというのが実情で、大気のカオス的な揺らぎの中で発生したと考えるのが妥当である。気象庁の現業アンサンブル予報モデルによるAO指数の予測は、定量的な -3σ の発生という意味では予測できていない。このような -3σ の異常の原因究明も容易でない中で、近年の温暖化と関係するAO指数の10年スケールの変動の原因を解明することは一層困難なことである。一部では、太陽活動の変化や宇宙線による雲量の変化などが候補と

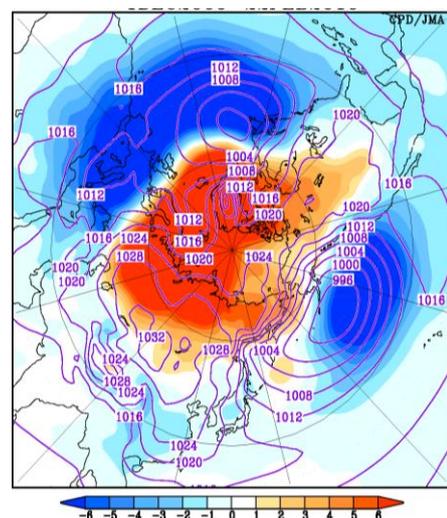


図1 2009/2010年DJF平均 SLP アノマリの分布

して提唱されているが、メカニズムが良くわかっていないので、今後の課題である。本研究では、北極振動指数 (AOI) を予測・診断する方程式を構築し、2009/2010 年冬季の AO 指数 -3σ という異常気象の原因を探ってみた。

2. 北極振動の理論

北極振動に関するこれまでの研究により、我々は以下の結論を見出している。(1) 北極振動は、確率過程のひとつの Realization (実現) としてカオス的に変動する。(2) 北極振動は、固有値がゼロとなる大気の力学的固有解 (特異固有解) が、任意の準定常外力に共鳴して励起される現象である。(3) 特異固有解理論という内部力学で、北極振動による 10 年スケールの内部変動が可能である。詳細については Tanaka and Matsueda (2005) を参照されたい。

我々が考える北極振動は、大気大循環に内在する周期無限大 (固有値ゼロ) の特種な固有振動である。周期性がないので非線形項により自律的に、あるいは準定常外力に反応して任意のタイムスケールで発生する。例えば 100 年平均の基本場の中で 10 年スケールの準定常なアノマリとして、正または負の符号で最も現れやすい現象である。北極振動は中高緯度の海洋、海氷、陸面、雪氷圏、生態系などに広くメモリーを残すことから、これらの気候サブシステムとのフィードバックが重要と考えられる。上述の太陽活動の長期的な変化や宇宙線による雲量の変化などによっても励起は可能である。

20 世紀後半の地球温暖化は AO パターンで進行したが、21 世紀に入ってから温暖化が一時的に止まっている。これは北極振動が AO マイナスにシフトした事と関係していると考えられ、地上気温のトレンドは確かに AO マイナスのパターンで進行している。このような北極振動の長期トレンドの原因を考える際に、まずは、2009/2010 年の -3σ の AO マイナスの原因を明らかにすることは重要である。

3. AOI 方程式

はじめに、北極振動は海面更正気圧 P_s の変動の EOF-1 として定義されるが、 P_s の変動は鉛直積分した風 $V=(u, v)$ の収束発散に支配される。これは大気の順圧成分の風の収束発散に等しい。そして、大気の順圧成分の収束発散は、浅水方程式により順圧高度場 (ジオポテンシャル) ϕ_0 の変動に等しい。

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} \approx -\int_0^{p_s} \nabla \cdot V dp \approx \frac{p_s}{gh_0} \frac{\partial \phi_0}{\partial t}$$

ここで h_0 は順圧大気の等価深度、 g は重力加速度である。

海面更正気圧でなく対流圏中層や成層圏の高度場の EOF-1 として NAM (Northern Hemisphere Annular Mode) が定義されるが、NAM を海面更正気圧で評価したものが北極振動 (AO) である。大気の順圧成分とは、プリミティブ方程式系を鉛直方向も含めて 3 次元スペクトル表記したモデルの鉛直波数 0 成分に等しい。大気上端を開区間とした場合、鉛直スペクトルの基底となる鉛直構造関数の解において、傾圧モードは連続スペクトルになるが、順圧モードだけは常に孤立スペクトルとなる。大気非線形相互作用による Barotropization で、傾圧成分に供給されたエネルギーが順圧成分に溜まると、この部分が 2 次元流体のように自律的に変動するようになり、それがブロッキングや AO といった順圧構造を伴った長周期変動の原因となる。よって、我々は大気の順圧成分の変動に長周期変動の本質があり、それが海面更正気圧に反映されていると考える。大気中層で評価した NAM にはこのような順圧力学が適用されないことから、AO のみが大気の順圧成分の力学と関係する。海面更正気圧 P_s の代わりに大気の順圧成分の EOF-1 を求めると、その構造は AO とほぼ一致し、時系列も AOI とほぼ一致することを確認できる。

従属変数が (u, v, ϕ) のプリミティブ方程式系を、Hough 関数を用いて 3 次元スペクトル表記すると、そのフーリエ展開係数 w_i についての常微分方程式を導くことができる (Tanaka and Matsueda 2005 参照)。

$$\frac{dw_i}{dt} = -i\sigma_i w_i - i \sum_{jk} r_{ijk} w_j w_k + f_i$$

ここで、右辺はそれぞれ線形項、非線形項、外力項で、添え字は 3 次元波数を意味する。これは傾圧モデルであるが、順圧成分だけで方程式を閉じて同形となる。我々はこれを順圧 S モデルと呼んでいる。AO は海面更正気圧 P_s の EOF-1 として定義されるが、高度場と風速を含む複素展開係数 w_i の時系列の EOF-1 は AO とほぼ等しくなる。

図 2 で示した AO 指数 (AOI) は、順圧 S モデルの状態変数 w_i とその時系列の EOF-1 として得られる AO の構造ベクトル z_i の内積

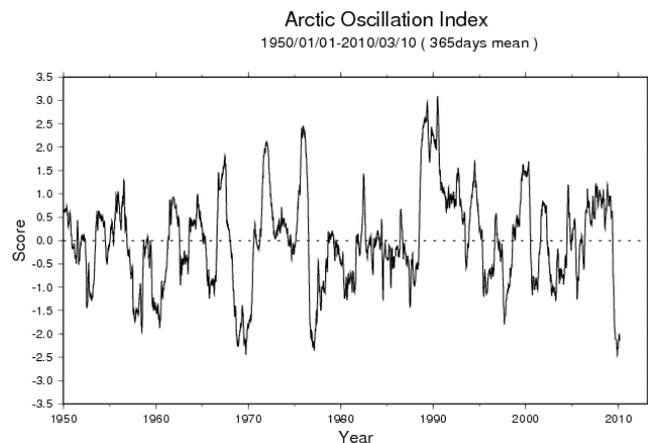


図 2 大気の順圧成分の EOF-1 による 1950-2010 年の AOI の時系列

$\langle w_i, z_i \rangle$ で定義される。この AOI の時系列は P_s で定義した本来の AOI とほぼ等しい。1989 年に正のピークが見られ、2010 年に大きな負の値が見られる。よって、この内積 $\langle w_i, z_i \rangle$ の時間微分をとり、その状態変数の時間変化項に順圧 S モデルの右辺を代入することで、AO 指数の時間変化を与える AOI 方程式が導かれる。

本研究では、特異固有解理論と対比させるために、元の式を 50 年平均の基本場を用いて線形項、擾乱項、そして外力項に分解し、各項と AO の構造 z_i との内積を計算することで、以下の AOI 方程式を導き解析に用いた。

$$\begin{aligned} \frac{d \langle w'_i, z_i \rangle}{dt} = & \langle -i\sigma_i w'_i - i \sum_{jk} r_{ijk} (\bar{w}_k w'_j + \bar{w}_j w'_k), z_i \rangle \\ & + \langle -i \sum_{jk} r_{ijk} w'_j w'_k - i \sum_{jk} r_{ijk} \overline{w'_j w'_k}, z_i \rangle \\ & + \langle f'_i, z_i \rangle \end{aligned}$$

ここで、左辺は AOI の時間変化項、右辺はそれぞれ線形項、擾乱項、外力項を表す。本研究では、線形項が特異固有解と同じ構造を得るために粘性項を線形項に含めて計算した。ただし、地表摩擦は外力項に含めた。この AOI 方程式を用いることで、 -3σ の AO マイナスを生じさせた原因を考察することができる(渋谷亮治 2010; 下悠子 2011 参照)。

4. 結果

図 3 は 2009 年 11 月から 2010 年 2 月までの日々の AOI の時間変化(太実線)、AOI 方程式の線形項(細実線)、擾乱項(点線)、外力項(破線)の時系列である。解りやすくするために AOI の時間変化項ではなく、AOI そのものを重ねてプロットし、10 日移動平均を施してある。よって、AOI の時系列の時間微分が他 3 項の和と一致する。11 月に一貫して時間変化項が負となり、負の AOI が顕在化した。

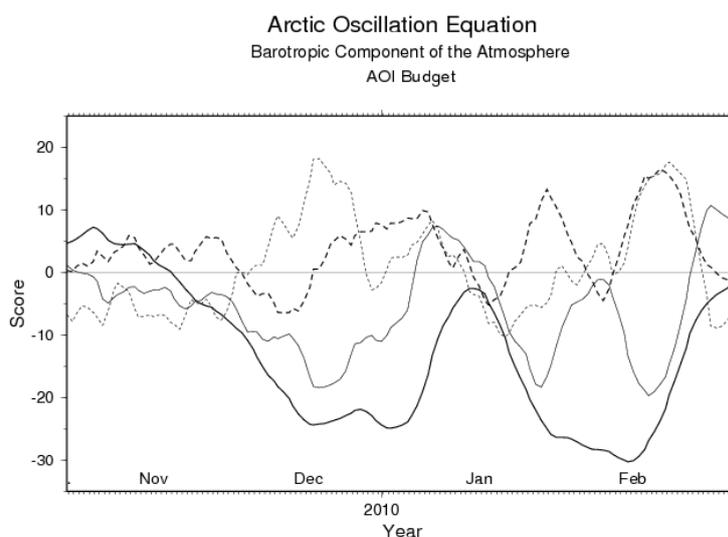


図 3 2009 年 11 月 から 2010 年 2 月の AOI と AOI 方程式各項の時系列 (本文参照)

この時には擾乱項と線形項が負となっている。12月中旬にAOIは第1陣の負のピークに達するが、この時、擾乱項が正に転じる一方で線形項が大きな負となり、負のAOIの維持に寄与した。外力項はAOIを元に戻すように働いている。AOIの時間変化は1月中旬に一旦中休みを生じているが、この時はAOI方程式の線形項の減衰が効いている。1月下旬に第2陣の負のAOIが始まるが、この時も擾乱項と線形項が効いており、外力項はAOIを元に戻すように正の値を示した。負のAOIの最盛期には各項とも一旦ゼロに近づき、第2陣の終わりには擾乱項が正に転じたことが効いている。AOI方程式による解析結果は線形項の重要性を示しているが、擾乱項はトリガーとして重要であったと考えられる。

図4は、比較のために行った1988年11月から1989年2月までの同様の解析結果で、これは過去最高の正のAOIが発生した期間の例である。解析結果をみると、11月から1月にかけて正のAOIをもたらしたのは線形項であり、外力項はAOIを元に戻そうとしている。2月になり正のAOIが終わる時には外力項が大きな負の値を示し、線形項と擾乱項が正となっている。この正のAOIの事例においても、線形項の重要性が示唆されている。

負のAOIを示した2010年のケース(図3)についてのDJF平均の各項の値は、線形項(-5.5)、擾乱項(-0.5)、外力項(2.1)であった。逆に、正のAOIを示した1989年のケース(図4)についてのDJF平均の各項の値は、線形項(8.4)、擾乱項(-3.6)、外力項(-2.0)であり、両者とも線形項が原因となっていることが分かる。本研究では地表摩擦を外力項に含めたが、地表摩擦はレーリー摩擦に相当し、固有解の構造は変えずに増幅率の分だけ固有値をシフトさせるため、A0モードの固有値は正の実数となり固有解は不安定解となっている。よって、線形項はA0モードの固有解が自律的に励起するプロセスを意味する。外力項は地表摩擦を含むので、A0モードの固有解を減衰させる働きがある。一方、擾乱項は線形固有解を自律的に励起させる非線形項としてのプロセスを意味する。

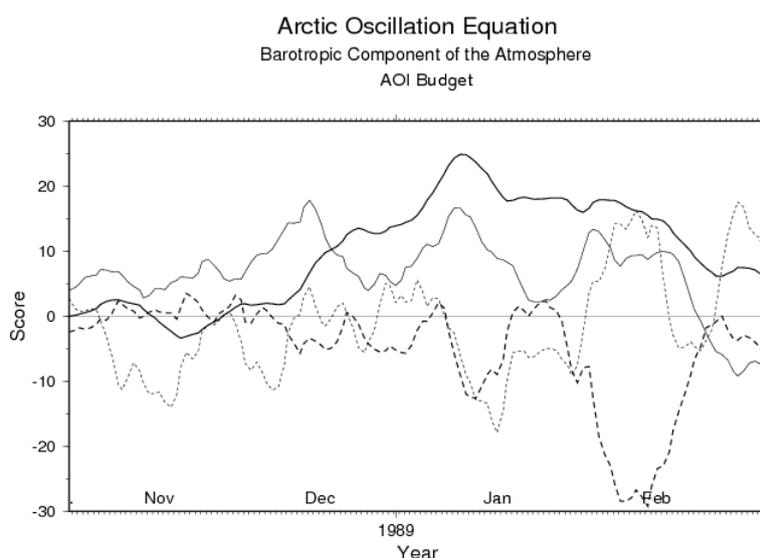


図4 1988年11月から1989年2月のAOIとAOI方程式各項の時系列(本文参照)

5. まとめ

北極振動は地球大気の固有解のひとつと考えられ、その固有値がゼロとなる特異なモードであることから特異固有解と呼んでいる (Tanaka and Matsueda 2005)。これは持続性が極めて高く、任意の準定常外力に共鳴して励起される他、非定常擾乱によっても自律的に励起される大振幅の内部変動である。

本研究では、2009/2010 年冬季の記録的な負の北極振動指数 (AOI) の成因を説明するために、AOI 方程式を導出して、AO 指数が -3σ という異常気象の原因の解明を試みた。解析の結果、負の AOI は非線形擾乱項がトリガーとなって発生し、特異固有解によって特徴づけられる線形項により維持された。これは内部力学の不安定が関係している事を示唆している。一方、外力項は地表摩擦を含むため、大きな負の AOI を元に戻すように働いていた。AOI が記録的な正の値を示した 1988/1989 年のケースでも、線形項が主要な原因となって正の AOI が発生・維持した。これらの解析結果から、AOI の記録的なアノマリは特定の準定常的な外力項により発生したのではなく、内部力学によるカオス的な要因により発生していると結論づけられた。

参考文献

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.

Wallace, J. M., and D. W. J. Thompson, 2002: Annular modes and climate prediction. *Phys. Today*, 55, 28-33.

渋谷亮治 2010: 北極振動の力学的成因に関する研究、筑波大学生命環境科学研究科、修士論文、74 pp.

下悠子 2011: 北極振動方程式を用いた異常気象の解析的研究、筑波大学生命環境科学研究科、修士論文(執筆中).