

# 北極振動の特異固有解理論の検証と考察

— 固有値ゼロのノーマルモードにエネルギーが溜まるわけ —

## Revisit to the Singular Eigenmode Theory for the Arctic Oscillation: Mechanism of Energy Accumulation at the Eigenmode with Zero Eigenvalue

田中 博(筑波大・CCS)

Hiroshi L. TANAKA, University of Tsukuba

FAX: 029-853-6489, E-mail: tanaka(a)sakura.cc.tsukuba.ac.jp

The winter of 2009/2010 was abnormally cold in many places in the Northern Hemisphere. The surface pressure anomaly was characterized by the typical Arctic Oscillation (AO) with the negative phase. The AO can be understood as a singular eigenmode of the atmosphere whose eigenvalue is zero (Tanaka and Matsueda 2005). As the analogy of the AO, we can realize that zonal wavenumber zero contains largest amount of energy, where the eigenvalue of the zonal equation is certainly zero. Similarly, the barotropic component of the atmosphere contains the largest amount of energy, where the eigenvalue of the vertical structure equation is certainly near zero. With this analogy, we consider the mechanism why the AO mode contains the largest variance of the low-frequency variability of the atmosphere, convincing that the AO is certainly the dynamical mode.

### 1. はじめに

世界各地で発生した 2009/2010 年冬季の記録的な寒波は北極振動(AO マイナス)の構造で発生している(気象庁 2010)。北極振動は大気大循環の長周期変動の原因なのか結果なのかについて、研究者により解釈が異なっているようであるが、本研究では原因であると考えられる。

北極振動は地球大気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)。これは考えているタイムスケール(例えば 100 年)の基本場に重なる任意のタイムスケール(例えば 10 年)の準定常外力に共鳴して励起されるほか、非定常擾乱がもたらす準定常外力によっても自律的に励起される最大振幅の内部変動である。この基本場とアノマリのタイムスケールは任意に延長することができ、ひとたび AO が励起されると持続性が極めて高い。

今回の発表では、何故に固有値ゼロの固有解にエネルギーが溜まるかを考える。類似の現象を探すと、現実大気東西波数 0 にエネルギーが溜まるが、これは確かに東西構造方程式の固有値 0 の解である。鉛直方向には順圧成分にエネルギーが溜まる。これも鉛直構造方程式の固有値 0 の解である。3 次元大気線形固有解の中で、固有値 0 の解が北極振動解なので、今回の発表では、AO が力学的モードであることを確信しつつ、なぜこの解にエネルギーが溜まるのかを考察した。

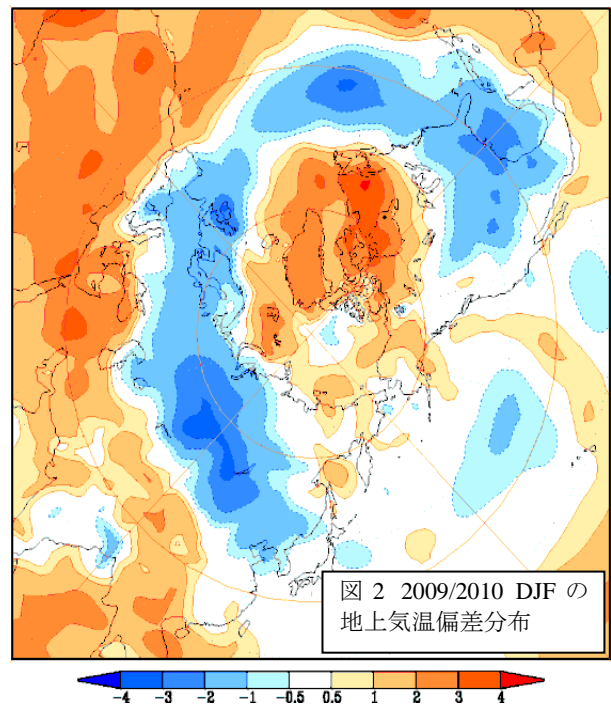
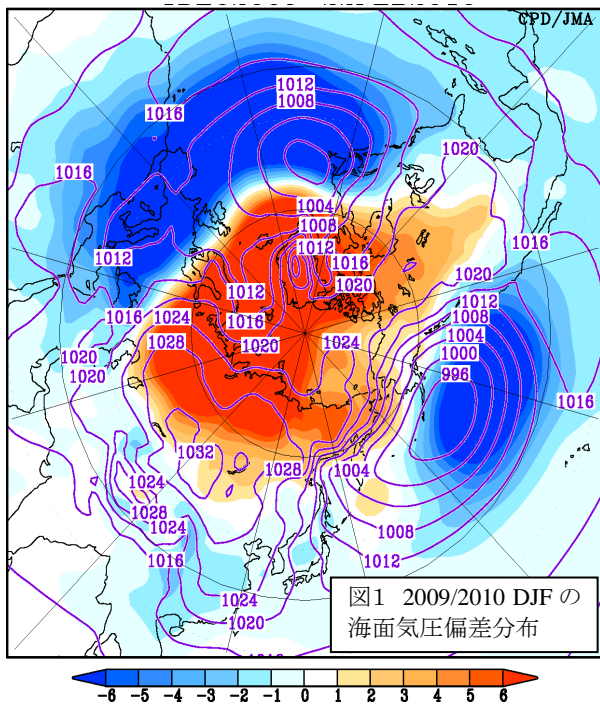
### 2. 2009/2010 年の AO マイナス

図 1 は気象庁による 2009/2010 年の冬季(DJF)平均の海面気圧の平年偏差の分布図である。北極圏に正の気圧偏差があり、それを取り囲むように中緯度に負の気圧偏差が存

在し、太平洋と大西洋の 2 か所に負偏差のピークがある。この偏差パターンは海面気圧の EOF で定義される AO マイナスそのもののパターンであり、北極振動の特異固有解そのものである。北極振動指数(AOI)をもとにした偏差の振幅は標準偏差の 3 倍であり、その正規確率は 100 年に 1 度程度である。

図 2 は同じ DJF の地上気温偏差の分布図である。グリーンランド周辺で正偏差となり、それを取り囲むように地上気温の負偏差が中緯度に存在する。特にアメリカ東海岸から北大西洋、ヨーロッパ、東アジアに強い負偏差が見られ、強い寒波により多くの被害が報告されている。幸い、日本周辺や冬季オリンピックが開催されたバンクーバー付近ではその寒波を逃れることが出来た。この温度分布は AO マイナスで規定される特徴そのものである。

重要な観測事実として、1970–1990 年の急激な地球温暖化は AO プラスの温度偏差分布で生じており、1990–2010 年にはその傾向が反転し AO マイナスのパターンで進行すると同時に温暖化が止まったように見られる。一方で IPCC-AR4 のモデル群による地球温暖化は、アイス・アルベドフィードバックによって特徴づけられる北極圏を中心とする空間分布で進行しており、観測と一致しない。それにも関わらず、IPCC-AR4 のモデル群による 1970–1990 年の全球平均気温の温暖化トレンドは、観測される同時期の急激な温暖化トレンドとよく一致している。観測された AO パターンが本来予測し得ない大気内部変動によるもので、アイス・アルベドフィードバックによる温暖化が人為的な温室効果ガスの増加によるものだとすると、モデルと観測の空間パターンの不一致は、地球温暖化の将来予測に関して、極めて重要な結論を意味することになる(大橋・田中 2009; Ohashi and Tanaka 2010)。



### 3. AOの特異固有解理論に基づく考察

大気大循環を記述するプリミティブ方程式系を3次元スペクトル表示し、その鉛直波数0のモードで方程式系を閉じたのが順圧Sモデルと呼ばれる簡略化した大気大循環モデルである。このモデルを氣候値で線形化し、その固有値問題を解くと、一部に実数固有値(振動数0)の解が得られる。その中で最も減衰率が小さい固有解は北極振動とほぼ完全に一致する構造を持つ。さらに、線形化で無視される擾乱の2次の項と北極振動解との内積の時系列は北極振動指数と正相関を持ち、回帰係数を求めるとそれは上記の減衰率とほぼ一致する(図3)。よって、この擾乱項を考慮すると、実数固有値がほぼゼロとなり、任意の準定常外力と共鳴して励起されるAOの特異固有解が得られる。

定常解の特異値解析(SVD)を行うと、特異値の最も小さいモードが特定の定常外力に対して最大応答を示す。ここで、固有値がゼロのモードの特異値もゼロとなることから、この場合は任意の定常外力に対し、無限の共鳴応答を示すことになる。これがAOの特異固有解理論である。2009/2010年冬季(DJF)には、大気モデルの線形項がほぼゼロとなり、残りの値的に小さな内部変動項と外力項がその時間変化を支配するようになる。多次元位相空間の解軌道を考えると、軌道は特異固有解の周辺をゆっくりと漂い変化する。これが固有値ゼロの固有モードにエネルギーが溜まる仕組みと考えられる。

### 4. まとめ

2009/2010年冬季にはAOマイナスで特徴づけられる半球規模の異常気象が発生した。これはAOの特異固有解が励起され、大気モデルの線形項がほぼゼロとなり、位相空間における解軌道が固有値ゼロの特異固有解の周辺で停滞したことによるものと考えられる。今回の事例に関しては、具体的にどの項がAOを励起したのかは不明瞭であった。具体的な励起プロセスは今後の課題である。

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) Ohashi, M. and H. L. Tanaka, 2010: Data analysis of warming pattern in the Arctic. *SOLA*, 6A, 1-4.
- 3) 気象庁 2010: 北半球中緯度帯に顕著な寒波をもたらした大気の流れについて. 報道発表資料 3月3日. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1003/03a/extreme33.pdf>
- 4) 大橋正宏・田中博 2009: 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. 「天気」、56、743-753.

### AOI and Wave-Wave

3-Months Running Mean

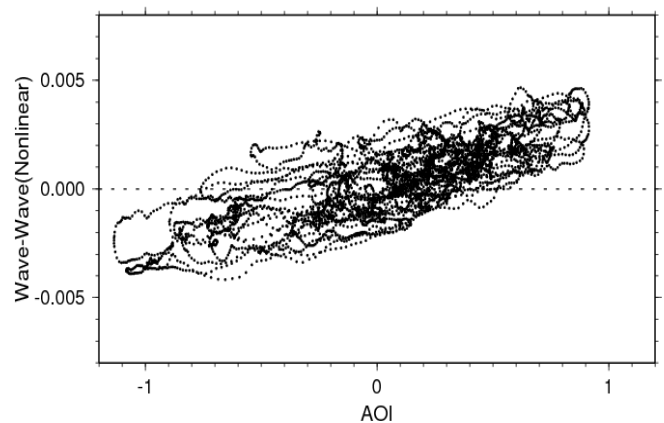


図3 北極振動指数と2次の擾乱項との回帰時系列