

エルニーニョ現象と北極振動

田中博 (筑波大学計算科学研究センター)

1. はじめに

本年度の夏季大学のテーマは「エルニーニョ現象と異常気象」であり、2015年から2016年にかけて発生したエルニーニョ現象を機会に、エルニーニョと異常気象との関係を学ぶことがテーマである。他の講義はエルニーニョ現象の解説を中心に据えているのに対し、本講義では、異常気象をもたらすもうひとつの北の作用中心である「北極振動」の解説を中心に据えて講義を行う。

エルニーニョ現象を時系列で表した南方振動指数(SOI)は、エルニーニョ現象の発現時にスパイク的に指数値が上がり、引き続いてラニーニャに移行するというサイクルを繰り返している。この時系列と北極振動指数(AOI)を見比べると、ほとんど相関はなく、これらは基本的には独立した現象であると考えられている。細かく調べれば両者に何らかの関係を見出すことも可能ではあるが、両者は基本的に無関係である。

したがって、本講義では両者の関係性を分析することを目的とするのではなく、異常気象をもたらす北の作用中心としての北極振動を、エルニーニョ現象との対比で詳しく説明する。異常気象を語る際には、南のエルニーニョ現象だけでなく、北の北極振動にも注目する必要がある、との視点で講義する。

2. 北極振動とは

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 (図 1a)。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。また、北方振動の対比で南方振動が命名されたとの記録がある。

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寒帯ジェットが地衡風関係式により強まった状態になる。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。ただし、NAM は各々の鉛直レベルで定義が可能であり、NAM を地表で定義したものが AO であると区別されている。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と区別する立場とがある (Wallace 2000)。

AO は北半球の海面更正気圧を経験直交関数 (EOF) に展開したときの第一主成分 (EOF-1) として定義され、北極圏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

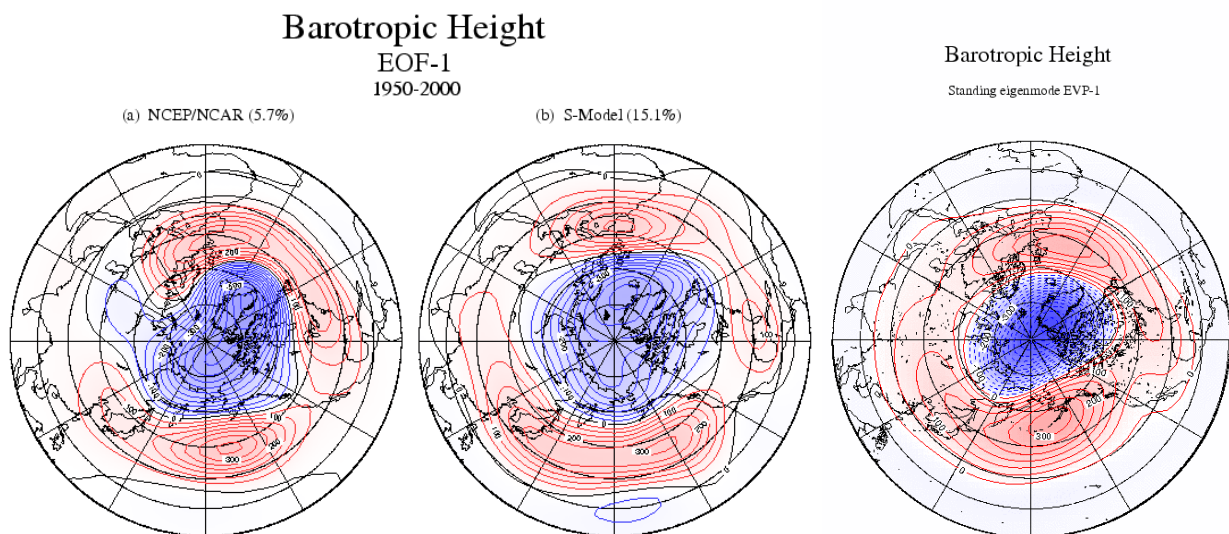


図 1 北極振動(AO)の順圧高度場の水平構造。(a) 再解析データの EOF-1、(b) 順圧 S モデルの EOF-1、(c) 理論的な特異固有解としての AO モード。Tanaka (2003) および、田中 (2009) からの引用。

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。

3. 北極振動指数の時系列

図 2 は日々の再解析データに基づく北極振動指数の時系列(AOI)であり、365 日移動平均が施されている。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、2010 年には -3σ (σ は標準偏差)の負の AOI が生じている。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。2000 年以降は温暖化に反して日本や各地で寒冬が発生しているが、これは大きく負に転じた AO インデックスと深い関係にある。

1950 年以降の 60 年間の日々の AOI について、タイムスペクトルを計算してみると、約 4 カ月周期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、大気はその時間スケールでは過去を全く覚えていない、とうことである。それに対し、レッドノイズ領域では大気は北極振動のメモリーを 4 カ月までは覚えてい

ることが分かる。特に有意なスペクトルピークというものはないが、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。

4. 北極振動は統計的な虚像？

北極振動は統計的な EOF-1 の構造なので、地点間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は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 の議論が正しければ、NAO と NPO (North Pacific Oscillation) の 2 つが実体で、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虚像であるという議論がある。つまり、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といえる。

Arctic Oscillation Index (365-day mean)

Barotropic Component of the Atmosphere

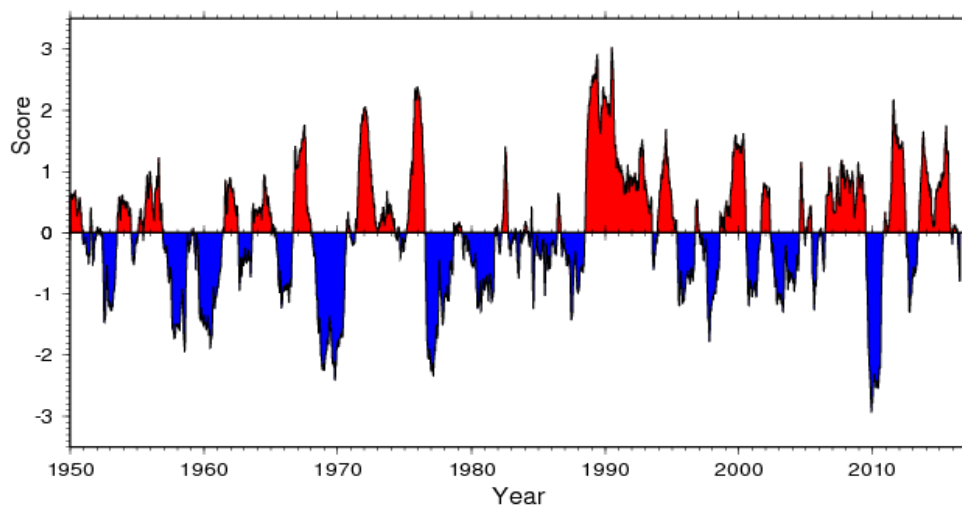


図 2 北極振動指数 (AOI) の時系列。値は日々のデータを 365 日移動平均したもの。

5. 北極振動は力学的な固有解という実像

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。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の順圧成分に供給されたエネルギーが、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。このプロセスの中で、順圧構造をした北極振動やブロッキングなどの長周期変動が自律的な内部変動として励起されている。

そこで、本研究では、北極振動をはじめとする長周期変動の力学を理解するために、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 (Statistical) 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。まずは、このモデルで実際の AO の再現を試みた結果が図 1b に示されている。

AO の数値実験が可能となった段階で、モデル大気のエネギー収支や線形安定性解析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。その結果、モデル大気の力学的な固有解として、AO モードの実体を解明することができた (図 1c)。ここで固有解 (振動) とは、例えばギターの弦の音色のように、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。

北極振動もこのような大気大循環の固有振動として存在する、との仮説のもとに、観測された気候値に微小なノイズが重なっていると仮定して、方程式を線形化する。線形方程式の解は固有解の重ね合わせとして表現できるので、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振動数がゼロの実数固有値を探す。振動数がゼロで構造が正負の符号をとるような解を定在解という。よって、定在解の中で増幅率が最大の固有解を探す。

多くの固有解の中で、増幅率が最大となる定在解の順圧高度場の構造を図 1c に示した。理論的に得られた固有解の構造は、観測値から統計的に得られる北極振動の構造と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。非線形の順圧 S モデルでは、この固有解が統計的な EOF-1 として検出されると考えられる (図 1b)。

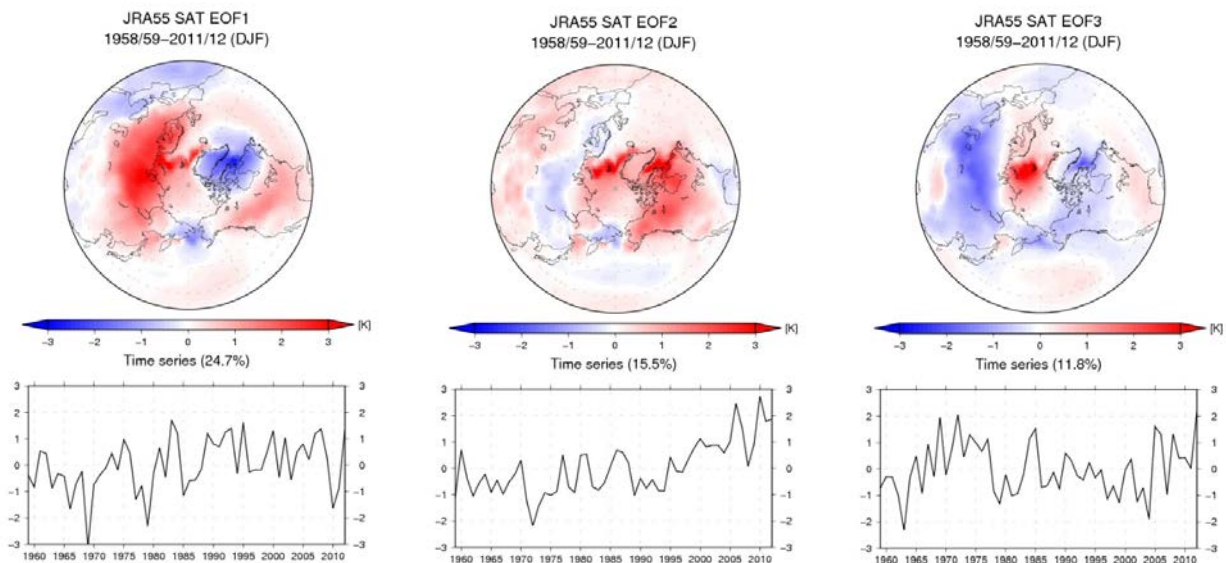


図3 冬季 (DJF) の地上気温の EOF 解析による分布図と時系列。(a) 北極振動(AO)モード、(b) 北極温暖化増幅(A)モード、(c) バレンツ海(B)モード。(Tanaka and Tamura 2016)

したがって、A0 は統計的な虚像ではなく、力学的な実像であると言える。研究の詳細は田中 (2006; 2009)、Tanaka (2003)、Tanaka and Seki (2013) を参照されたい。

Deser (2000) 他は大西洋と太平洋の地上気圧がお互いに無相関であることを示したが、順圧高度場では両者に有意な相関が見いだせる (Suzuki and Tanaka 2007)。この結果は、長周期変動を支配する順圧成分の A0 は実体であるが、それを地上気圧で解析すると、傾圧成分の影響で相関が消えてしまうと考えられる。例えば、台風による地上気圧の同心円構造は、順圧成分では上層の高気圧性循環と相殺して見事に消えてしまう。つまり、見ているものが違う訳で、A0 の本質を捕えているのは、地上気圧ではなく大気の順圧成分なのである。

6. 北極振動指数の温度構造

つぎに、北極振動の温度構造を調べるために、JRA-55 再解析データを用いて冬季 (DJF) の地上気温の EOF 解析を行った結果を図 3 に示した (Tanaka and Tamura 2016)。図の a~c はそれぞれ、EOF-1 (24.7%)、EOF-2 (15.5%)、EOF-3 (11.8%) で、カッコ内は寄与率である。EOF-1 は北極振動 (A0) モードと判別され、A0 指数が正の時にグリーンランドに負、それを取り囲むように中緯度に正の気温偏差が現れる。A0 モードの時系列を見ると、1958 年から 1970 年まで減少、1970 年から 1990 年まで増加、1990 年以降は減少の傾向がみられる。EOF-2 は北極温暖化増幅 (A) モードであり、北極域に大きな正の値があり、時系列はほぼ単調増加となっている。EOF-3 ではバレンツ海に正のアノマリがあり、それを取り囲むように負のアノマリが

見られる。本研究では EOF-3 をバレンツ海 (B) モードと呼ぶ。興味深いことに、この B モードの時系列はプラネタリーアルベドの時系列とほぼ一致しており、大西洋数十年規模振動 (AMO) と高い相関がある。B モードが正に振れると、シベリアや北米で気温の低下が生じ、中緯度に寒波が訪れやすくなる傾向がある。この傾向は負の A0 モードと同様である。これらのモードの時間変化は全球平均気温の時間変化に影響を及ぼす。A モードは地球温暖化にともなう北極温暖化増幅のトレンドと整合的であり、B モードは AMO と関係する数十年規模変動と整合的である。

7. まとめ

北極振動は、大気大循環において最も変動幅の分散が大きい内部変動であり、A0 プラスと A0 マイナスに大きく振れることで、北半球冬季の各地に異常気象をもたらす。そのため、近年、南のエルニーニョ現象と並んで、北の北極振動として注目されるようになった (図 4)。

北極振動は順圧的な構造を持ち、A0 プラスの時には、北極圏で気圧が負偏差、それを取り巻くように中緯度で正偏差となる。特に太平洋と大西洋の 2 か所に作用中心があるが、これは定常プラネタリー波による順圧不安定によって形成されている。この気圧場の特徴は地衡風関係式により、上層の寒帯ジェットを強化し、発達した極渦により北極圏の寒気を極渦内部に閉じ込めるため、極渦内部で低温偏差、極渦の外では高温偏差が生じる。日本付近は暖冬となる。

寒帯ジェットが強い時には、寒帯ジェットの傾圧性によって駆動されるポーラーモードと呼ばれる傾圧不安定波が高緯度で発達し、西風運動量を

亜熱帯ジェットから寒帯ジェットへと輸送する。このように、寒帯ジェットと傾圧性擾乱の間に正のフィードバックが存在しており、これが自律的な大振幅の内部変動をもたらす特徴となる。亜熱帯ジェットと寒帯ジェットが逆相関を持つように変動することが、北極振動の本質的な特徴である。北半球の定常プラネタリー波を基本場にした順圧不安定を駆動力に、大気大循環の定在固有解としての A0 モードが、傾圧性擾乱との正のフィ



図 4 AO プラスと AO マイナスのときの寒帯ジェット、地上気圧、地上気温の水平構造のまとめ。(田中 2009)

ードバックにより A0 プラスをさらに増幅させるのである。

逆に、寒帯ジェットが弱い時には、北極圏に閉じ込められていた第一級の寒気が中緯度に流れ出すために、各地に異常な寒波が訪れる。これが A0 マイナスの特徴である。その寒波が日本付近に南下してくれば寒冬になるが、別の地域に南下するときには平年並みとなる。A0 マイナスではブロッキングが多発するという印象があるが、ブロッキングの頻度は A0 プラスの際にも同様に生じている。ただし、A0 プラスでは低緯度に、A0 マイナスでは高緯度にブロッキングが発生するという違いが見られる。

北極振動と地球温暖化の関係は微妙である。1970 年代から 1990 年代にかけて AOI が負から正に変化しており、これが急激な温暖化と一致したことから、かつては温暖化の 4 割が北極振動と関係していると言われた。しかし、地球温暖化が進行する一方で、AOI は 1990 年から 2010 年にかけて正から負に変化したため、温暖化とは切り離されることになった。しかし、北極振動を後追いするように、2000 年以降の温暖化は停滞した。現在、温暖化ハイエイタスの原因解明が急務となっている。ハイエイタスの原因として AMO や PDO と関係する数十年規模変動に注目が集められ、気候システムの自然変動の重要性が認識されている。A0 は大気最大の内部変動であり、各地に異常気象をもたらすが、温暖化とは無関係に数十年スケールで変動しているようである。自律的に勝手に変動する A0 モードと AMO の変動とリンクして変動するバレンツ海モード(B モード)の双方が、近年の冬季の温和な北極圏と寒冷な中緯度の特徴をもたらしていると考えられる。

2015 年秋、エルニーニョ現象が戻ってきたので、ハイエイタスの議論は終わったようだが、気温が高止まりせず、元に戻る可能性もある。今後数年の気温変化に注目したい。本講義が、好奇心旺盛な受講者にとって有益であれば幸いである。

参考文献

田中博 2006: 異常気象をもたらす北極振動の解明とその予測 (第 1 報) . アサヒビール学術振興財団、2005 年度研究紀要、地球環境科学、113-119.
田中博, 2009: 異常気象をもたらす北極振動の力学。てんきすと, 第 56 号, 2009 年 1 月, 3-5.
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,
Suzuki, I. and H. L. Tanaka 2007: Teleconnections and the Arctic Oscillation analyzed in the barotropic component of the model and observed atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 933-941.
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 S. Seki 2013: Development of 3D spectral linear baroclinic model and the application to the baroclinic instability associated with positive and negative Arctic Oscillation Index. *JMSJ*, 91, 193-213.
Tanaka L. H., and M. Tamura, 2016: Relationship between the Arctic Oscillation and surface air temperature in multi-decadal time-scale. *Polar Science*, doi: 10.1016/j.polar.2016.03.002.
Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, 1998: The arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature. *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.