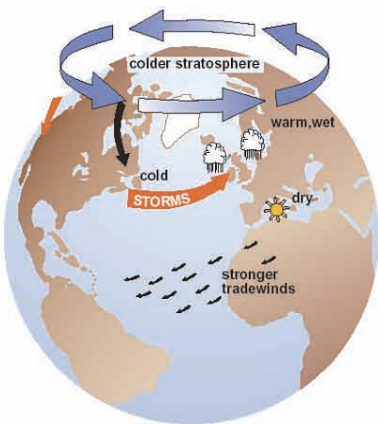


異常気象をもたらす北極振動の力学

田中博（筑波大学計算科学研究センター教授）

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年に提唱された現象で、北緯約60度を挟んで海面更正気圧場が南北に相関を持つというものです（第1図）。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できます。北極振動は周期的な振動ではないため、北半球環状モード（NAM）と呼ばれることがあり、また、AOと北大西洋振動（NAO）は同義であると考えられる立場もあります。古典的な東西指数が北緯45度付近の偏西



第1図 北極振動の概念図 (Thompsonから引用)

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高緯度の偏西風ジェットの強弱に注目しているという点で、東西指数とは異なっています。

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ます。北極振動指数と世界の異常気象との関係を見ると（第2図）、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、日本付近でも温和な天候が続きます。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き、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ります。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的な振舞いです。

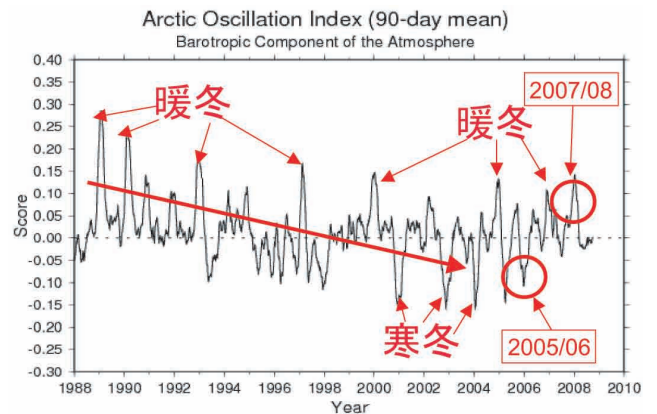


第2図 北極振動と世界の異常気象

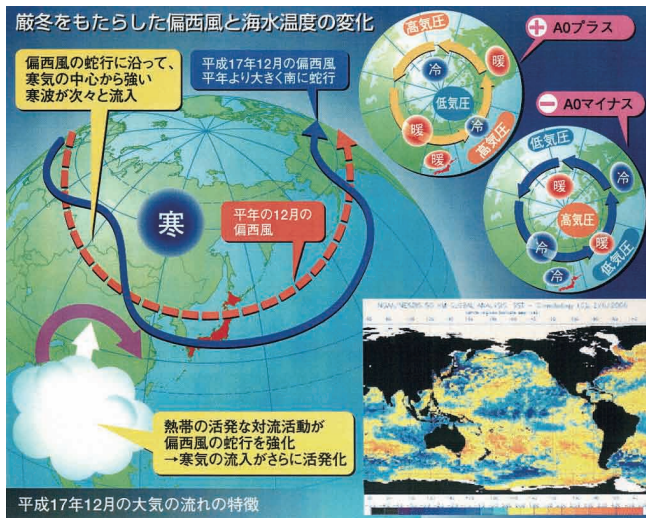
北極振動は北半球の海面更正気圧を、統計的な経験直交関数（EOF）に展開した場合の第一主成分（EOF-1）として定義され、北極海の作用中心とは逆符号の作用中心が太平洋と大西洋の2カ所に見られるのが特徴的です（第6図）。冬季の季節平均場を用いて解析すると、AOが占める分散の割合は21%に増加します。海洋においてエルニーニョが変動の第1モードとして注目されるように、AOは大気大循環の変動の第1モードとして注目すべき現象です。

2. 北極振動と近年の日本の異常気象の関係

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ます。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すが、1990年代には正から徐々に負に転じています。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（第3図）、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ます。このように大きな正の北極振動指数は1989、1990、1993、1997、2000、2002、2003、2007、2008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ます。特に、2002年の暖冬は桜の異常開花をもたらしました。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いました。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ます。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いましたが、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りました。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）で報告されたのですが、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ます。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ります。



第3図 北極振動と日本の異常気象



第4図 北極振動と平成18年豪雪

第4図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す。「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りました。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ました。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ります。そのため、月平均気温の年間偏差は東日本で -2.7°C 、西日本で -2.8°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ました。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ます。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ますが、対流活動の活発化は北極振動の結果であると考えられることもできます。ちなみに、この冬の海面水温偏差はややラニーニャ的でしたが、それほど大きな年間水温偏差を示していたわけではありません。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

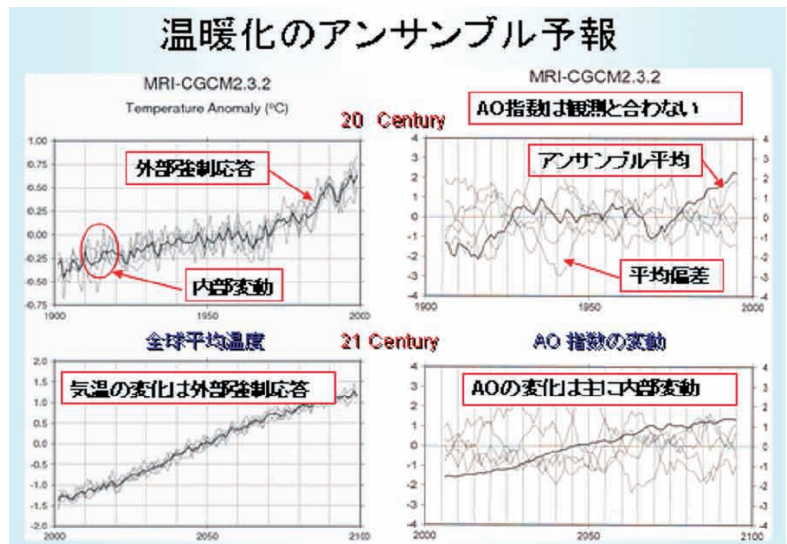
す。一転して、2006/07年冬は記録的な暖冬となりました。気象庁によると、冬型の気圧配置は一時的にしか現れず、全国的に気温が高く経過しました。秋田、仙台、東京、名古屋、大阪、高松、福岡など63の気象官署で、冬の平均気温の高い記録を更新し、各地域の気温（年間差）は、北日本： $+1.6^{\circ}\text{C}$ 、東日本： $+1.7^{\circ}\text{C}$ 、西日本： $+1.6^{\circ}\text{C}$ 、南西諸島： $+1.2^{\circ}\text{C}$ となり、特に東日本と西日本においては、統計のある1946/47年の冬以降で最も高いものでした。全国的に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

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年以降で最も少ないものでした。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り、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ましたが、3月16日に最も遅い初雪が観測されました。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りました。2007/08年については、北極海海氷の激減との統計的な関係から、気象庁や一部の学者の間では寒冬となることが予測されましたが、結果としての北極振動指数は正偏差を示し、寒暖の差が大きい冬になりました。

3. IPCC-AR4 モデルによる北極振動

地球温暖化研究をまとめたIPCCの第4次評価報告では、20世紀再現実験および21世紀将来予測に、アンサンブル予報が導入されています。第5図は気象研究所のモデルの結果ですが、同じ外部強制力の下で異なる初期値から複数の時間積分を行うと、アンサンブル平均として外部強制による応答が見られます。アンサンブル平均からのずれは内部力学により生じた自然変動のゆらぎと考えられます。全球平均した地表気温に対するアンサンブル予報実験の結果は、CO₂の増加という外部強制の下で一貫した時間変化を示し、アンサンブル平均からのずれとしての自然変動は十分に小さいことがわかります。ところが、同様の方法で北極振動指数に対するアンサンブル予報実験の結果を検証すると、変動の大部分は自然変動と認識され、外部強制による応答と考えられる変動の振幅が小さく、しかも20世紀については観測と一致しないことが明らかです。EOF-1の構造はどのメンバーもAOの構造になっているのに、その時系列は全くランダムに変動しています。ただし、21世紀予測には、大きな内部変動に重なって、一貫した上昇傾向が見られました。

以上の結果から、AOの十年スケールの変動は、海洋などの未知の長周期外力に反応して変動するものではなく、内部変動として確率変数のひとつのRealization（実現）として、カオス的に変動する自然変動であり、予測が極めて困難な現象であることが示唆されます。



第5図 IPCCのアンサンブル気候予測気温とAOIとの比較

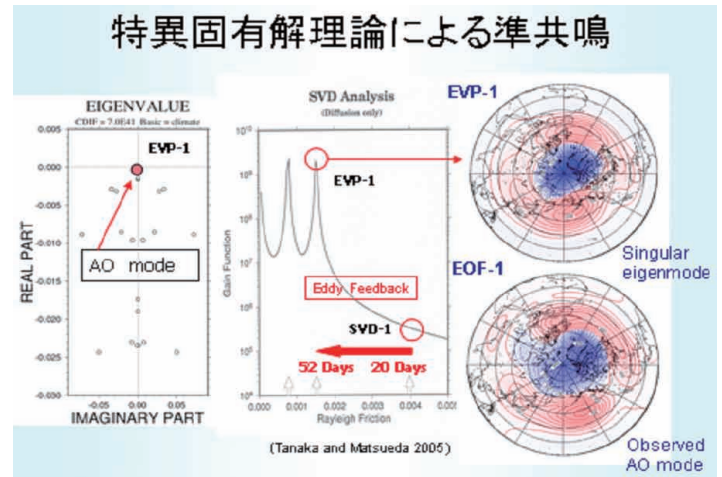
4. 北極振動の理論と予測

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します。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、順圧的な構造を持ちます。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力学的に同値です。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ました（田中2005）。そして、冬季の気候値でプリミティブ方程式を線形化し、順圧成分について固有値解析を行うことで、北極振動が大気のひとつの固有振動である可能性を理論的に突き止めました（Tanaka and Matsueda 2005）。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ました（第6図）。

順圧大気には強い力学的不安定がないため、粘性摩擦や地表摩擦を考慮するとすべての固有解は減衰解となり、固有値の実数部はすべて負になります。固有値は一般に複素数となり、その実部は増幅率、虚部は周期を表します。最も減衰の小さいモードに注目すると、その固有値は実軸上にあり、周期性を持たない定在波であることがわかります。このモード（EVP-1）の構造を調べると、観測による北極振動（EOF-1）とはほぼ同様の構造をしていることが確かめられます。ここで、北極振動は総観規模の非定常擾乱との間に正のフィードバックを持つことから、この効果を考慮してレイリー摩擦を減少させると、ある値で固有値はちょうどゼロとなります。この時、任意の定常外力に対する線形応答は無限大となり、共鳴により北極振動の構造が励起されることとなります。

この特異固有解理論では、北極振動が励起する際に特定の外力の構造は不要であり、固有値がちょうどゼロとなることが重要になります。実際、AOIの変動と外力の変動との対応を調べても、ある特定の外力でAOが励起されるわけではないことが確かめられます。要するに外力は何でもいいのです。SSTや海水の偏差、積雲対流活動、太陽放射、火山など、任意の時間スケールの準定常外力に反応して特異固有解が励起されます。IPCCモデルの例でも見られたように、20世紀における既知の外力を順圧Sモデルに与えてアンサンブル実験を行った結果、個々のメンバーはアンサンブル平均から大きくずれて自然変動します。その自然変動は十年スケールでも大振幅で変動することが確かめられました。そして、そのアンサンブル平均は現実のAOIの長期変動を再現しません。したがって、北極振動の十年スケールの変動は外部強制による強制応答ではなく、特異固有解という特殊な力学モードが確率過程のひとつの実現として、正または負の方向に励起されるものと考えられます。

以上のような理解のもとで、我々は順圧Sモデルを用いて、北半球冬季のAOIの中長期予測がどこまで可能であるかを検証しました（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



第6図 北極振動の特異固有解理論

してモデルを走らせ、AOIの60日予測を行いました。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ました。その結果、AOのような順圧的で長い周期をもつ半球規模の変動は、長期的には予測が不可能である一方、2週間程度なら予測できる可能性が示されています。ただし、初期値によっては予報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ています。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ブル予報技術の開発が挙げられます。北極振動の中長期予報が可能になれば、北陸地方の豪雪の予測がある程度可能となるので、今後の一層の研究に期待が寄せられます。

参考文献

- 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．気象研究ノート、216号、2005/06年日本の寒冬・豪雪、241-252。
- 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。
- Exner, F. M., 1925：Dynamische Meteorologie. Wien Verlag von Julius Springer. 415pp. (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 M. Matsueda, 2005：Arctic Oscillation analyzed as a singular eigenmode of the global atmosphere. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 611-619.
- 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.