

## 「北極は“ゆらく”」 - 北極振動が日本の気候に与える影響

山崎 孝治 (やまざき こうじ)

北海道大学大学院地球環境科学院 気候力学

[yamazaki@ees.hokudai.ac.jp](mailto:yamazaki@ees.hokudai.ac.jp)

URL: <http://www.woa.ees.hokudai.ac.jp/~yamazaki/index.html>

### アブストラクト

北極振動は北極域と中緯度域の海面気圧のシーソー的変動であり、北半球で最も卓越する大気内部変動パターンである。北極振動に伴う偏差は成層圏までほぼそのまま繋がっており円筒状である。北極振動は世界各地の異常気象を統一的に説明し、長期予報の精度向上に役に立つと期待される。気候の長期トレンドや地球温暖化との関係も示唆されている。

### 本文

日本海側で豪雪が降って日本列島が寒波に襲われるころ、炬燵に入ってミカンでも剥きながらテレビを見ているとヨーロッパやニューヨークでも寒波のニュースをやっていたりする。日本では暖冬なのに中東では寒波がやってくることもある。世界の異常気象はばらばらに起こるのではなく、起こりやすいパターンがあるようだ。これまで、エルニーニョのときにアリシューシャン低気圧が深まりカナダで高気圧が強まる「太平洋・北米パターン」といったどちらかといえば地域的でありかつ対流圏だけの変動パターンの研究が主流であった。異常気象が起こったときの説明もエルニーニョ・ラニーニャに押し付けることが多く、エルニーニョ・ラニーニャが起こってないときの説明に窮していた。最近、北半球規模の変動パターンで成層圏まで達する「北極振動」という概念が現れ、気候変動の研究に革新をもたらしつつある。

北半球冬季の月平均海面気圧偏差(偏差とは気候値からのずれ)の最も卓越するパターンを主成分分析で統計的に調べてみると、北極域で負偏差のとき中緯度で正偏差となる変動モードが最も卓越するパターンとなる<sup>(1, 2, 3)</sup>。因みに、2番目に卓越するパターンは「太平洋・北米パターン」である。最も卓越する北極域と中緯度域のシーソー的変動を「北極振動」という。各年各月の実際の気圧偏差と北極振動パターンとの類似度を表す指標が北極振動指数である。慣習上、北極の気圧偏差が負で中緯度が正の場合を指数が正とする。規格化した北極振動指数が1のときの海面気圧偏差パターン(図1)を見ると北極域で負偏差、中緯度で正偏差であるが、特に北大西洋域で偏差が大きいが、冬のアイスランド付近にはアイスランド低気圧が北大西洋中部のアゾレス諸島付近にはアゾレス高気圧が気候学的に存在する。北極振動に伴い両者がともに強まったり弱まったりする。この大西洋域の変動は「北大西洋振動」<sup>(4)</sup>とよばれ欧米では古くから注目されていた。北極振動というネーミングは北大西洋振動を意識したものであろう。北

極振動は大西洋だけでなく太平洋にも正偏差があり、これはアリューシャン低気圧の強さの変動を示している。また負偏差はアイスランド域だけでなく北極域全体に広がっている。北極振動は北大西洋振動をその一部に含む半球規模の変動である。

北極振動は全体的にみると北極で負、中緯度で正であり環状のパターンである。それゆえ「北半球環状モード」とも呼ばれ、この名前のほうが実態をより正確に表している。「振動」というと特定の周期があるようなイメージであるが、北極振動は特定の周期はなく2週間程度の持続性があるだけである。ただし、ひと冬平均として正の年も負の年もある。また、「環状」と訳した英語は annular でありこの言葉には円筒状という意味がある。実際、北極振動は成層圏まで同じ符号の偏差を伴い円筒状の偏差パターンである。さらに南半球にも同様なモードが存在し、「南半球環状モード」または「南極振動」と呼ばれる<sup>(2)</sup>。南半球環状モードのほうがより環状度が強い。これは海陸分布や大規模山岳分布が南半球ではより環状であるためである。ここでは一般によく知られている「北極振動」ということにするが、特定の周期を持つ振動ではないことに注意していただきたい。

北極振動に伴って気温はどうなるだろうか。冬の場合を考える。風は低気圧側を左にみるように等圧線にほぼ平行に吹くので、図1から北欧では西風が強まる。暖かい大西洋からの西風が強まるので暖かくなる。北米東岸でも南風偏差で暖かくなる。一方、地中海・中近東では北風偏差となり冷たくなる。日本付近では南東風偏差で、これは北西の季節風が弱まることを意味し、暖まる。実際に北極振動指数と下層気温の回帰係数(指数が+1のときの気温偏差)を図2に示す。気圧偏差から予想されたようなパターンとなっている。ヨーロッパから東アジアにかけての地域と北米東岸で正偏差でグリーンランド・カナダ北東部で大きな負偏差となる。北極振動が大きなマイナスであれば、図2と逆になり、ニューヨーク、ロンドン、東京は寒波襲来となる。図3に冬の北極振動指数と札幌の気温の経年変動を示す。札幌を例として示したのは北日本のほうがより相関が良いためであり筆者が札幌在住のゆえである。両者は完全ではないがよく似た変動をしていることがわかる。相関係数は0.66で統計学的に十分有意な関係である。北極振動が正であれば日本の冬は暖かくなる傾向にあるということである。

北極振動は西風ジェットの変動を伴っている。気候学的には冬季、日本南岸から太平洋域と北米東岸から大西洋域にジェット気流の強いところがある。北極振動が正であるとこれらのジェットが北偏し、東西平均すれば北緯45度より北では西風が強まり、それより南では西風が弱まる。北極振動が正のときは上空の偏西風はよりゾーナルな流れになる。逆に、北極振動が負のときは、上空の偏西風は蛇行が大きくなり、北極の寒気が中緯度に降り易くなる。テレビの天気予報などで北極の寒気が日本に来るといようなときは北極振動は負になっていることが多い。

なぜ北極振動が卓越するのであろうか。北極振動は基本的には大気内部の自然変動であって、大気外部の強制によって起こる変動(例えば、海面水温の変動によって起こされるとか)ではない。このことは海面水温を固定した気候モデルの数値実験でも北極振動が卓越モードとして現れることから確認できる<sup>(5)</sup>。ではどのようなメカニズムで北極振動モードが生ずるのであろうか。これは平均東西風と波との正のフィードバックに原因がある<sup>(5,6)</sup>。ここで波とは移動性低気圧のような総観規模擾乱や地球規模の偏西

風の蛇行のような惑星波である。仮に平均的西風が北で強く（西風偏差）、南で弱くなったとする（東風偏差）。そこに丸い擾乱があれば、擾乱は平均風偏差により北東 - 南西軸方向に伸ばされるであろう。すると擾乱の南東側で西風偏差が南から北に運ばれ、北西側では東風偏差が北から南へと輸送される。この擾乱による運動量輸送のため、北の西風偏差と南の東風偏差を強め、初期にあった東西風偏差は維持・強化される。このような平均流と波の間の正のフィードバックによって平均場に戻そうとする復元力に抗して北極振動は大気内部で起こりやすいモードとなる。南極振動では惑星波が弱いため総観規模擾乱が主な役割を果たし、北極振動では惑星規模波もモード形成に寄与している。

北極振動は大気内部の自然変動であるので海面水温の変動など外部変動の影響を全く受けないのだろうか。必ずしもそうではない。北極振動と海面水温との相関を調べると熱帯の海面水温とはほとんど関係がないが、北大西洋や北太平洋で弱い相関が認められる。このことは中緯度海面水温の偏差により擾乱の強弱や位置に影響を与え、北極振動に影響を与えると理解される。地球温暖化やオゾン層破壊により平均場が変われば北極振動も変化すると考えられる。気候モデルのシミュレーションによれば、地球温暖化により冬の北極振動は正になると予測されている<sup>(7)</sup>。それが本当であれば、地球一様な温暖化に加え、北極振動指数が正になることにより、ヨーロッパから東アジアにかけての地域や北米東岸では（図2）温暖化はより顕著になることが予想される。北極振動の最初の論文<sup>(1)</sup>が発表された1990年代後半までは確かに北極振動には正のトレンドがあり<sup>(8)</sup>、地球温暖化との関係が注目された。日本でも1989年から1990年代前半までは暖冬が続いた。しかし、それ以降、北極振動指数はやや減少しており（図3）、地球温暖化と北極振動の関係はまだ十分解明されたとは言い難い。

北極振動は長期予報に役立つであろうか。気象庁は1ヶ月、3ヶ月と暖候期・寒候期予報を発表している。しかし大気はカオスの性質をもつため決定論的予測（すなわち3ヵ月後の特定の日に東京は晴れるといった予測）は不可能である。決定論的予測は2週間程度が限度である。そのため、気象庁で発表する長期予報では確率をつけて発表している。「平年より暖かい確率40%、平年並み40%、寒い確率20%」といった具合である。これまで長期予報の根拠は主に熱帯の海面水温変動、すなわちエルニーニョであった。エルニーニョのときは暖冬になりやすく、逆のラニーニャのときは寒冬になりやすい。海洋変動は大気より長い時間スケールをもつため、大気・海洋結合モデルでエルニーニョを予測することは可能である。

一方、北極振動は基本的に大気内部変動で2週間程度の持続性しかないので長期予報にはあまり役立たないと思われるかもしれない。しかし、冬の北極振動は成層圏にまで延びており、成層圏の変動の持続性は対流圏より長い。さらに成層圏の北極振動のほうに先に変化し成層圏の北極振動の正負が2ヶ月にわたって対流圏の北極振動の正負に影響を与えている<sup>(9)</sup>。例えば、成層圏の北極振動が負であれば、その後の2ヶ月、北米東岸・ヨーロッパ・東アジアで寒波・異常低温が起きやすい。これについては本号の向川・廣岡の報告に詳述してある。冬は成層圏の北極振動から1~2ヶ月先までの予報が確率的にできる可能性がある。また、大西洋・太平洋の中緯度の海面水温偏差が北極振動/北大西洋振動の長周期変動と関係しているという研究がある。さらに、インド洋

の海面水温の上昇トレンドが北極振動/北大西洋振動のトレンドと関係しているという研究もあり、長期変動の予測もある程度、可能かもしれない。

これまで冬を中心に述べてきたが、夏の北極振動についても簡単に述べる。夏の北極振動は冬より弱く北極にシフトしたパターンである。また成層圏まで伸びず対流圏で閉じている。日本付近では夏の北極振動が正であるとオホーツク海高気圧が強まる。2003年の夏はヨーロッパで猛暑、日本ではオホーツク海高気圧が発達し冷夏であったが、このとき夏の北極振動指数は大きな正の値であった。夏の異常気象についても北極振動は役に立つ指標である。ただし夏については北極振動と日本の気温との関係はそれほど強くなく、他の要因の影響も大きい。

冬の北極振動と引き続く初夏の北極振動との間には弱いながら正の相関があることが最近わかってきた<sup>(10)</sup>。冬の北極振動が正であるとユーラシアの積雪が減少し、春の雪解けが早まり、ユーラシア大陸を暖め、それが初夏の北極振動を正にするというのが考えられるメカニズムの一つである。もう一つ考えられるのは、冬の成層圏循環の変動により下部成層圏のオゾンが変動し、それが初夏の対流圏極域循環に影響するメカニズムである。いずれにしても冬から夏へのリンクを利用し、冬の北極振動から暖候期予報ができる可能性がある。

北極振動は半球規模の異常気象を説明できる有力な変動である。メカニズムについての科学的理解は南極振動との対比などから急速に進んでいる。成層圏との関係、長期予報、地球温暖化とも関係し、今後、北極振動はエルニーニョと並んで気候に関する主要なキーワードとなるであろう。

## 文献

- (1) D. W. J. Thompson and J. M. Wallace: *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1297 (1998).
- (2) D. W. J. Thompson and J. M. Wallace: *J. Climate*, 13, 1000 (2000).
- (3) 山崎孝治(編):「北極振動」、日本気象学会(2004)、気象研究ノート第206号、181pp.
- (4) J. W. Hurrell ed.: *The North Atlantic Oscillation*, American Geophysical Union (2003) 279pp.
- (5) K. Yamazaki and Y. Shinya: *J. Meteor. Soc. Japan*, 77, 1287 (1999).
- (6) M. Kimoto, F. -F. Jin, M. Watanabe and N. Yasutomi: *Geophys. Res. Lett.*, 28, 737 (2001)
- (7) D. T. Shindell, R. L. Miller, G. V. Schmit and L. Pandolfo: *Nature*, 399, 452 (1999)
- (8) D. W. J. Thompson, J. M. Wallace and G. Hegerl: *J. Climate*, 13, 1018 (2000)
- (9) M. P. Baldwin and T. J. Dunkerton: *Science*, 294, 581 (2001).
- (10) M. Ogi, K. Yamazaki and Y. Tachibana: *J. Geophys. Res.* 109, D20114 (2004)

A0 SLP (hPa) [annual]

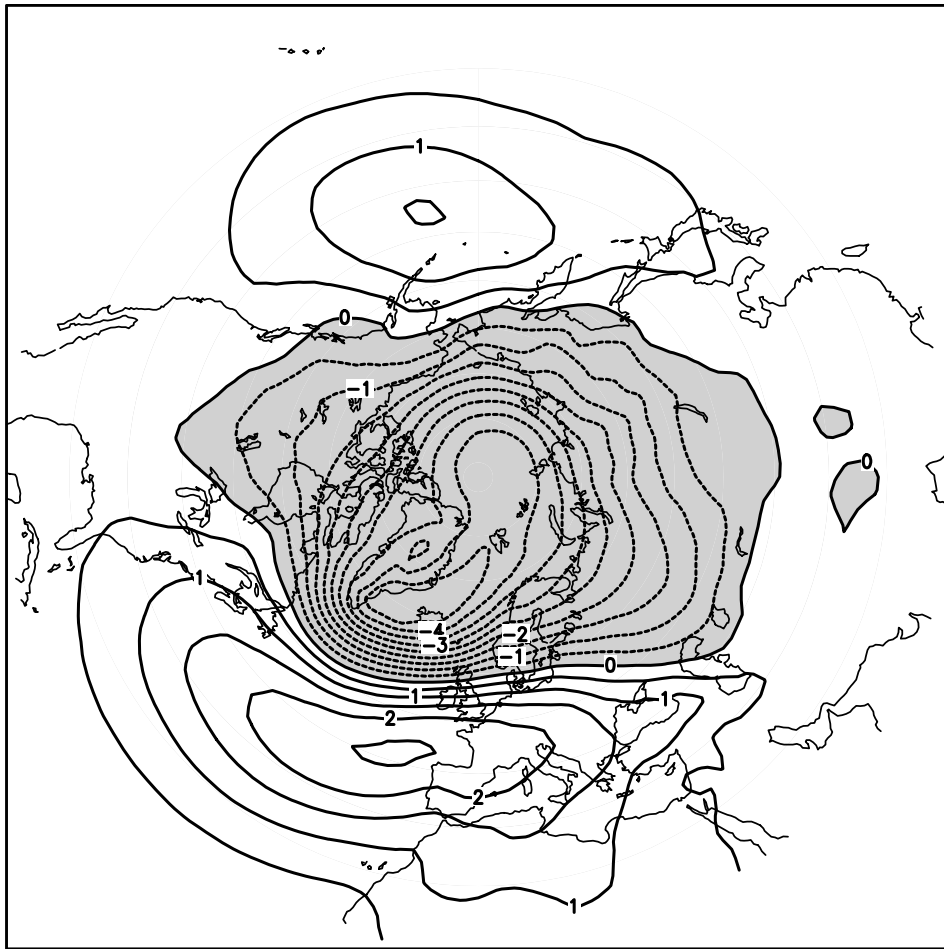


図1 北極振動にともなう海面気圧偏差。等値線間隔は0.5hPa。負の領域に陰影。

A0-regressed Temperature at 925hPa (DJF)

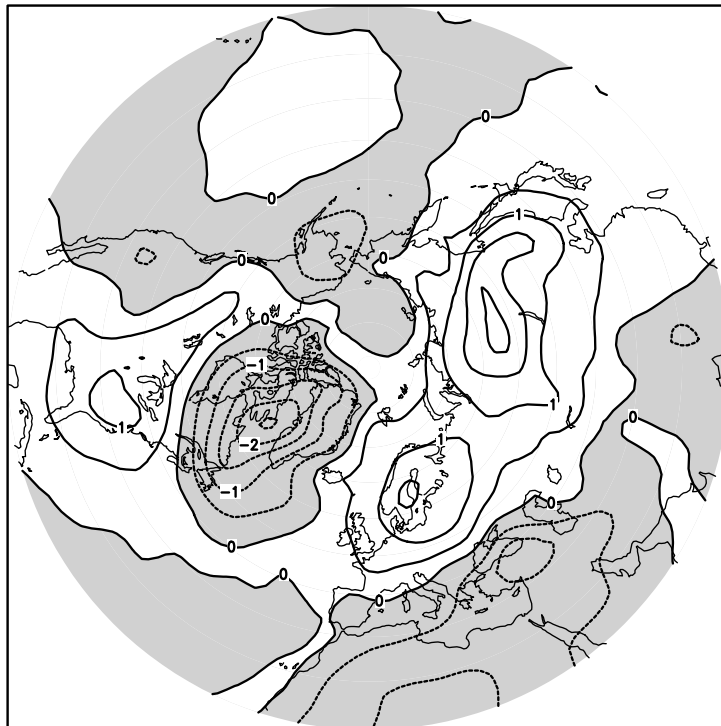


図2 北極振動にともなう冬(12,1,2月平均)大気下層の気温偏差。等値線間隔は0.5。負の領域に影。

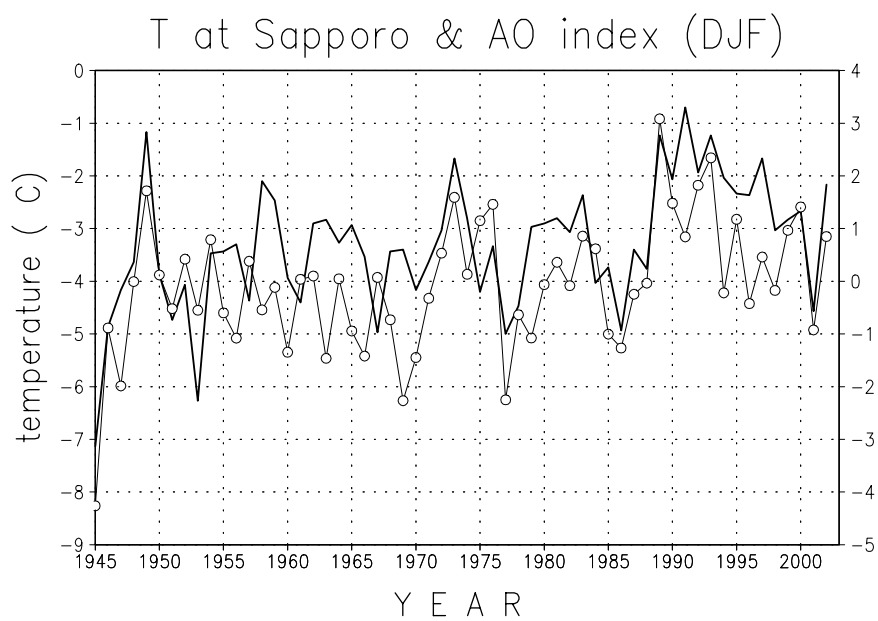


図3 冬(12,1,2月平均)の北極振動指数(つき実線)と札幌の平均気温(太実線)。