

平成 24 年度 卒業論文

近年の北極振動の増幅

Recent Arctic Oscillation amplification

三重大学 生物資源学部

共生環境学科 自然環境システム学講座

地球環境気候学研究室 509354

鈴木はるか

指導教員：立花義裕 教授

目次

要旨

第 1 章 序論

1-1 背景

1-2 目的

第 2 章 使用データ

2-1 NCEP/NCAR 再解析データ

第 3 章 解析手法

3-1 ジオポテンシャル高度

3-2 北極振動

3-3 EOF 解析

3-4 解析期間

第 4 章 解析結果

4-1 1958 年から 2012 年の北極振動

4-2 ジャンプ年の推定

4-2-1 仮説 1 に対する χ^2 検定

4-2-2 仮説 2 に対する χ^2 検定

4-3 ジャンプ前後

4-3-1 EOF 解析

4-3-2 標準偏差

4-3-3 平均場

第 5 章 考察と結論

謝辞

引用・参考文献

要旨

近年、異常気象という言葉を目にする機会が増えた。例として冬季では2005年12月から2006年2月にかけて日本各地に豪雪をもたらした「平成18年豪雪」が挙げられ、夏季では2008年に愛知県岡崎市を襲った「岡崎豪雨」が記憶に新しい。異常気象は日本だけでなく世界中に影響をもたらした。2011年にアメリカは豪雪に見舞われた。地球温暖化が唱えられる一方、寒冬の被害も数多く報告されている。

気象庁の発表によると2012年12月は寒気の流れ込みによって全国的に低温偏差で、日本海側の降雪が多く観測された。さらに2013年2月には東北地方で豪雪となり、青森県青森市酸ヶ湯において現在観測が行われている国内の観測地点では最高記録である556cmもの積雪深を記録した。遡ること2011/2012年冬季(12, 1, 2月)においても低温偏差が観測され、日本海側では「平成18年豪雪」に匹敵するほどの積雪となった。さらに遡ること2010/2011年冬には北・東日本においては暖冬であったものの、西日本においては降雪量が平年と比較して多く、ここ数年において日本の冬季における気候が著しく変化している可能性を示唆している。

北半球の気候を決定付ける要因の一つとして北極振動が挙げられる。北極振動とは冬季北半球において最も卓越するとされる気圧配置で、テレコネクションという気象現象の一つである。日本だけでなく主として北半球中緯度の気候と関連があるとされる。本研究では北極振動の振幅とその水平構造を過去と比較し顕著な差異があるかどうか調べた。

初めに全期間のデータを用いてEOF解析を行い、全期間で最も卓越するパターンを抽出した。時系列の標準偏差が2008年以前と2009年以降で急激に変化していたことから期間を区切り解析を行った。2008年以前と2009年以降のEOF第1モードを比較すると2009年以降の第1モードは地上・上空共に北極振動を示していたが、2008年以前では上空の第1モードは北極振動の構造ではなかったことが明らかとなった。さらに変化を比べると北極振動の振幅が深まっており、水平構造も変化していることから、北極振動の振幅と構造の変化が日本の気候の変化に影響を与えていると考えられる。

さらに構造と振幅の変化について詳しく解析を進めるため2008年以前と2009年以降の各グリッドにおける標準偏差と平均場の変化を計算したところ、北極振動の活動中心域で変動が大きくなっており、平均場も北極振動化していることが明らかであった。

第 1 章 序論

1-1 研究背景

気候を決定付ける要因の一つとして、テレコネクションという概念が挙げられる。テレコネクションとは、空間的に離れた地域で気圧や気温などの気象物理的要素が互いに相関を持って変動するという現象である。1980年代から組織的な研究が始まり、北半球に限定しても十数種類のパターンが定義されている。特に日本の気候に影響を与えるものとして Arctic Oscillation(AO), North Atlantic Oscillation(NAO), Eurasian Pattern(EU), PJ pattern, シルクロード, IOD, ENSO 等が挙げられる。テレコネクションに関する研究を行うことで、気象災害による人的・社会的・経済家気被害の軽減に繋がる。

特に北極振動は異常気象を予測・解明するのに適しており、時系列を用いて地球温暖化、海氷減少や太陽活動周期と関連付けるような研究が進められている。日本の気候との関係は、北極振動が負の場合には寒冬、正の場合には暖冬と言われている(田中 2008)²⁾。

1-2 研究目的

一般的には北極振動指数を計算する場合は過去数十年分のデータを用いて主成分分析を行う。しかしこの方法では過去に卓越していたパターンと近年卓越するパターンの区別をつけることができない。近年の北極振動 index が増加傾向にあることから、地球温暖化・海氷減少・太陽活動など現在ホットな話題である気候システムと作用した結果、冬期に最も卓越するパターンの構造や振幅が変化してきているのではないかと考えた。そこで本研究は北極振動の水平構造と振幅の変化を明らかにすることを目的とした。

第2章 使用データ

2-1 NCEP/NCAR 再解析データ

NCEP/NCAR 再解析データは NCEP (National Center for Environmental Prediction : アメリカ環境予報センター) 及び NCAR (National Center for Atmospheric Research : アメリカ大気研究センター) により作成されたデータで, 世界各地で得られた気象観測値からスペクトルモデルを用いて 4次元データ同化を行い全球の格子点上に編集したものである. 空間分解能は水平方向に 2.5度×2.5度で鉛直方向に 17層を持つ 3次元データである. 1948年以降の海面気圧, ジオポテンシャル高度, 風, 大気湿度, 相対湿度等の気象データが提供されている. 本研究では 1958年から 2012年の日平均と月平均のジオポテンシャル高度データを使用した. 1,2,3,11,12月を対象とした.

第3章 解析手法

3-1 ジオポテンシャル高度

ジオポテンシャル高度 Z とは、重力加速度の鉛直積分で定義されるジオポテンシャル Φ を標準加速度 g_0 で割った量である(式 2.1, 2.2).

$$\Phi \equiv \int_0^z g dz \quad (1)$$

$$z \equiv \frac{\Phi}{g_0} = \frac{1}{g_0} \int_0^z g dz \quad (2)$$

Φ : ジオポテンシャル, g : 重力加速度, z : 高度, g_0 : 標準重力加速度

仮に等圧面でジオポテンシャル高度が低い地点は気圧が低いと言える。ジオポテンシャル高度は気圧と同様に高度に依存するが、密度からは独立しているため便利である。

3-2 北極振動

北極振動(AO : Arctic Oscillation)とは Thompson and Wallace(1998)によって初めて使われた言葉で、北半球 20°N 以北の月海面更正気圧場の主成分分析によって得られた冬季に最も卓越する大気の変動パターンを指す。

近年では 2005/2006 年の寒冬や 2006/2007 年の暖冬など、日本や世界の気候を決定する要因として一般的にも知られてきている。北極振動の index が正の状態ではヨーロッパでは偏西風が強化され温和で多雨となり、日本付近では温和な天候が続く。これはシベリア高気圧の弱化和大西洋からの暖かい西風が強まることで理解される。逆に、index が負の場合には気圧場の正負が反転し、極域で高気圧偏差、中緯度では低気圧偏差が生じヨーロッパでは晴天が続き日本付近では寒気流入によって寒冷化する傾向にある。夏季については 20°N 以北で主成分分析を行っても熱帯の影響で第 1 モードは北極振動の構造をとらない。40°N 以北で主成分分析を行うと北極振動が現れる。また冬季は気圧場の変動が激しいのではっきりと北極振動が現れる。

北極振動は周期的な振動ではないため、北半球環状モードと呼ばれることもあり、北大西洋振動(NAO)と同義であると考えするという説も存在する。

3-3 EOF 解析

EOF 解析(Empirical Orthogonal Function analysis : 経験的直行関数解析)とは主成分解析と同義で多変量解析では代表的な解析手法であり, 最も卓越する空間パターンを定量的に算出することが可能である. 多数の格子点を持つ平面状の変数の時系列データに対して共分散, 固有値固有ベクトルを求める. 一般的に EOF 解析は偏差のデータを用いて行われる. 固有値の最も大きいものを第 1 主成分と呼び, 最も卓越するパターンを表現する. 本研究では回帰図を示す.

3-4 解析期間

現在一般的に用いられている北極振動 index を算出するため、1958 年から 2012 年のジオポテンシャル高度場の月平均データを用いて EOF 解析を行う。本研究では回帰図と時系列を用いて北極振動の構造と振幅について言及する。赤道の影響を除く為に解析範囲を 20°N 以北とし、時系列に対して 21 年間の標準偏差を計算する。結果から構造や振幅変化の生じていると考えられる年を決定する。期間を分けて再び解析を行い、近年の変化を考察する。

標準偏差の結果から 2008 年以前をジャンプ前と 2009 年以降をジャンプ後とし、この二つの期間について解析を行った。

第4章 解析結果

4-1 1958年から2012年の北極振動

月平均データを使用して全期間の冬月(1, 2, 3, 11, 12月)について EOF 解析を行った。計算領域を北半球の北緯 20 度から 90 度とした。ここでは 12 月の結果のみを示す。第 1 モードの回帰図とその寄与率、時系列を Fig.1, Fig.2 に示す。回帰図から 1000hPa 高度場では 60°N を挟み南北に相関を持ち、大西洋・北極域・太平洋に活動中心を持つ北極振動の構造であることは明らかである。寄与率は 22% と高い。500hPa 高度場では環状構造を持つ北極振動が現れた。同様に大西洋・北極域・太平洋に活動中心を持ち、寄与率は 18%。時系列は年々変動が大きくなる傾向にあり、1000hPa と 500hPa の相関は 0.92 と非常に高い。

変動の経年変化を調べるために標準偏差を計算した。基準年を 1968 年から 2002 年とし、時系列に対して基準年±10 年(21 年間)の標準偏差を計算したものを Fig.3 に示す。例を挙げて説明すると基準年 1968 年に 1958 年から 1978 年の標準偏差の値をプロットし、次の基準年 1969 年には計算期間を 1 年繰り上げて 1959 年から 1979 年の標準偏差をプロットした。つまり 21 年間の移動標準偏差を 1 年ずらして基準年 35 年間分計算したことと同義である。

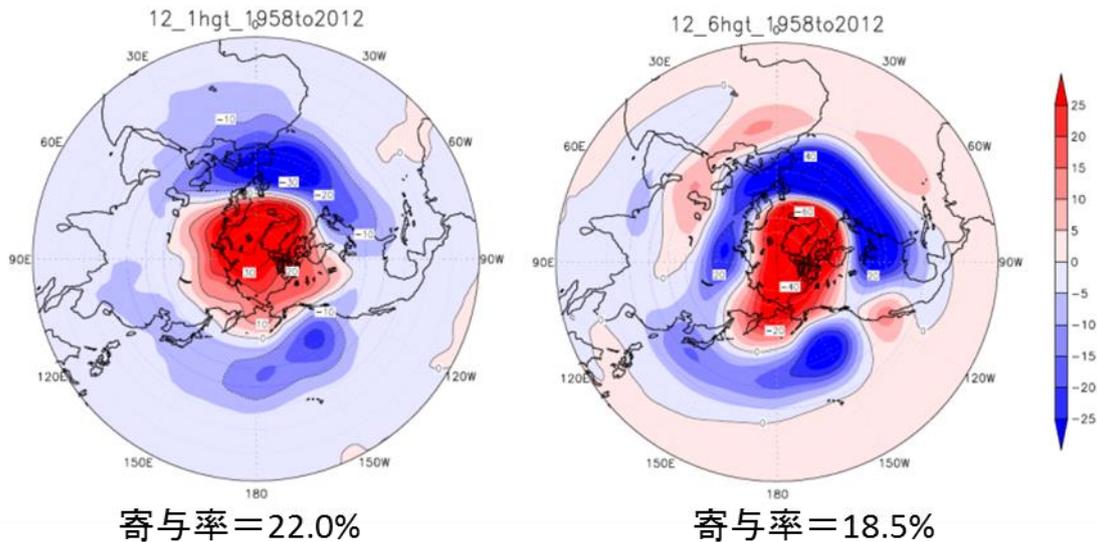


Fig.1 1958年から2012年における12月のEOF第1モード回帰図
(左: 1000hPa, 右: 500hPa)

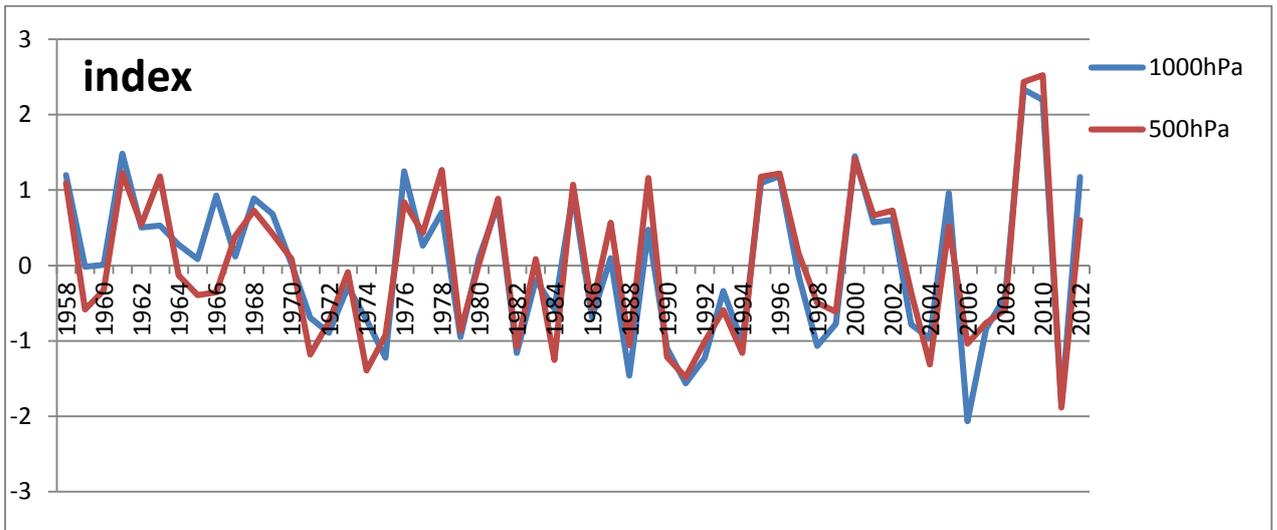


Fig.2 1958年から2012年における12月のEOF第1モード時系列
 横軸：年，縦軸：index

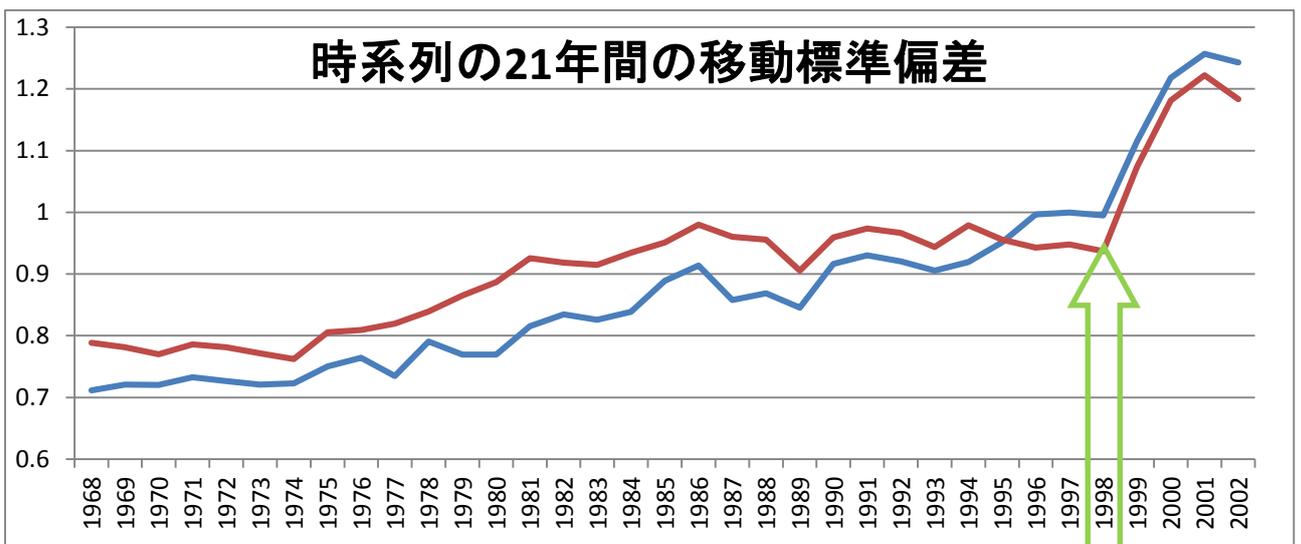


Fig.3 時系列の21年間の移動標準偏差
 横軸：基準年，縦軸：標準偏差

4-2 ジャンプ年の推定

1998 年を基準年とする 21 年間(1988 年から 2008 年)と 1999 年を基準年とする 21 年間(1989 年から 2009 年)の標準偏差に明らかな差が見られた. このことから以下の 2 通りの仮説を立てることが可能である.

仮説 1 : 1988 年から 1989 年で変動に優位な差があった場合

仮説 2 : 2008 年から 2009 年で変動に優位な差があった場合

ここで, 仮説 1 と仮説 2 でどちらが統計的に優位な差と言えるのかを実証するため, Fisher の χ^2 検定を行った. この検定を行うことで母集団と抽出したサンプルの変動に優位な差が見られるかどうかを判断した.

4-2-1 仮説 1 に対する χ^2 検定

仮に 1958 年から 1988 年をジャンプ前, 1989 年から 2008 年をジャンプ後とする(仮説 2 が成り立つ可能性を考慮して 2009 年以降を含めない). Fisher の χ^2 検定の式(3)を用いる.

$$X^2 = (n - 1)s^2/\sigma^2 \quad (3)$$

n : 標本数 s^2 : 標本分散 σ^2 : 母分散

χ^2 の値を求めるためジャンプ前とジャンプ後の分散をそれぞれ s^2, σ^2 とし, 式(3)に代入する. $s^2 = 0.60$, $\sigma^2 = 0.97$, $n=21$ より, $\chi^2=12.37$ となる. ここで χ^2 分布表に従うと $\chi^2_{0.95}(21 - 1) = 10.85$, $\chi^2_{0.05}(21 - 1) = 31.41$ より χ^2 は棄却域に入らず, 5%の有意水準でジャンプが起きている, とは言えない. よって仮説 1 は統計的に不適切であるといえる.

4-2-2 仮説 2 に対する χ^2 検定

仮説 1 に対して行った検定同様, 仮説 2 に対しても Fisher の χ^2 検定を行った. 仮に 1958 年から 2008 年をジャンプ前, 2009 年から 2012 年をジャンプ後とし, 式(3)にジャンプ前後の分散を代入する. $s^2 = 2.82$, $\sigma^2 = 0.78$, $n=4$ とみなすと $\chi^2=10.85$ となる. ここで χ^2 分布表に従うと $\chi^2_{0.95}(4 - 1) = 0.35$, $\chi^2_{0.05}(4 - 1) = 7.81$ より χ^2 は棄却されるので 5%の有意水準でジャンプが起きているといえる.

4-3 ジャンプ年

χ^2 検定の結果から本研究では 2008 年以前と 2009 年以降で北極振動の水平構造・振幅が変化していたと仮定し、ジャンプ前・後に対してそれぞれ EOF 解析を行う。回帰図・時系列・寄与率を求めることでジャンプ前後に卓越するパターンを抽出し、各グリッドにおける標準偏差・大気場の平均場を計算し変動領域と大気場の変化傾向を確かめる。ここまでの解析では月平均データを用いたがここでは標本数を増やすために日平均データを用いた。ジャンプ前と後の変化をより詳しく評価するために差をとった。

4-3-1 EOF 解析

ジャンプ前の 1000hPa 高度場は大西洋・太平洋・北極域に活動中心を持つ北極振動の構造であった。寄与率は 9.7% と高くない。500hPa 高度場では第 2 モードが北極振動の構造をしていた。ユーラシア北西部・アメリカ大陸東部・太平洋と北極域に活動中心を持つ。寄与率は 8.3% と低い値をとった。これは日データを利用していることによる影響だと考えられる(Fig.4)。

ジャンプ後の 1000hPa 高度場は環状の北極振動であった。北極域の活動中心が太平洋側へ伸びるような特徴が見られる。寄与率は 21% とジャンプ前と比較して格段に大きい。500hPa 高度場も 1000hPa 同様、環状の北極振動で北極域の活動中心が太平洋側へ伸びている。寄与率は 22% と月データを用いた全期間の寄与率よりも高い(Fig.5)。

1000hPa・500hPa 高度場におけるジャンプ前後の差の図から北極振動の構造が深まり、太平洋北部における変動が極域と相関を持つことが確認された。中緯度においてユーラシア北東部の振幅が大きく、環状化していることが確認できる(Fig.6)。

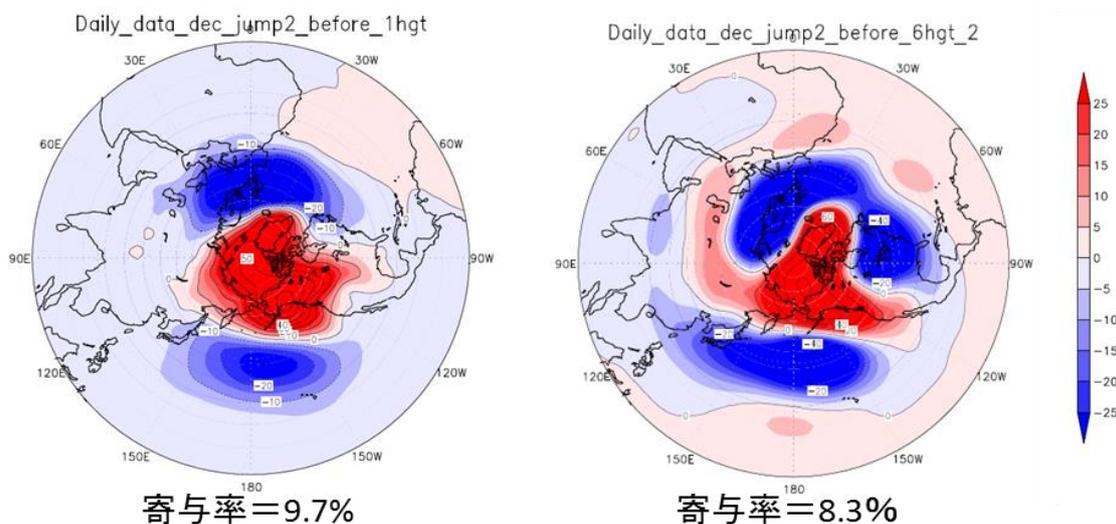


Fig.4 1958年から2008年(ジャンプ前)12月における北極振動の構造
(左: 1000hPa 高度場第1モード, 右: 500hPa 高度場第2モード)

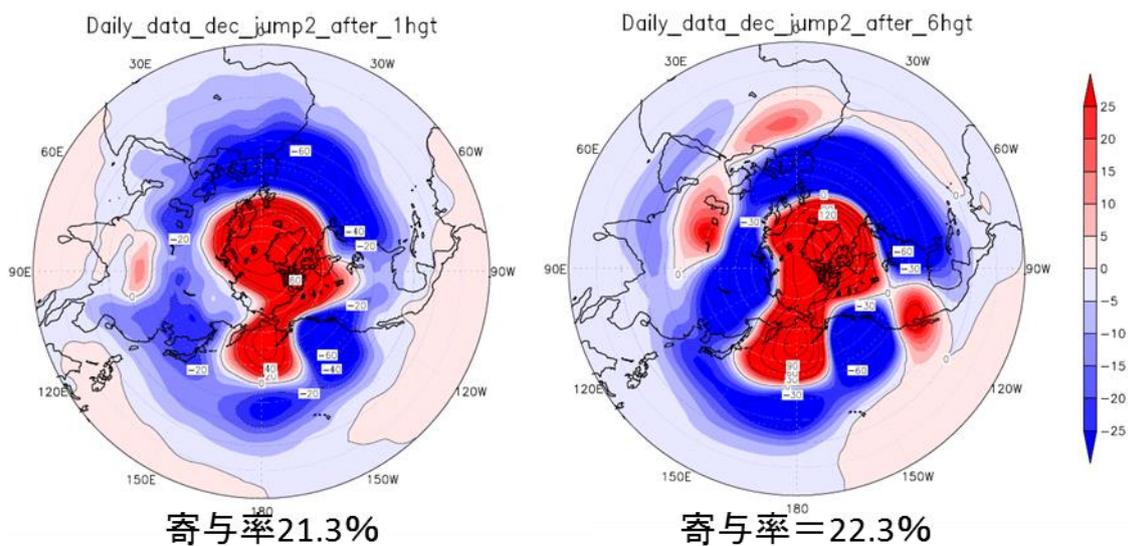


Fig.5 2009年から2012年(ジャンプ後)における12月EOF第1モード
(左: 1000hpa 高度場, 右: 500hPa 高度場)

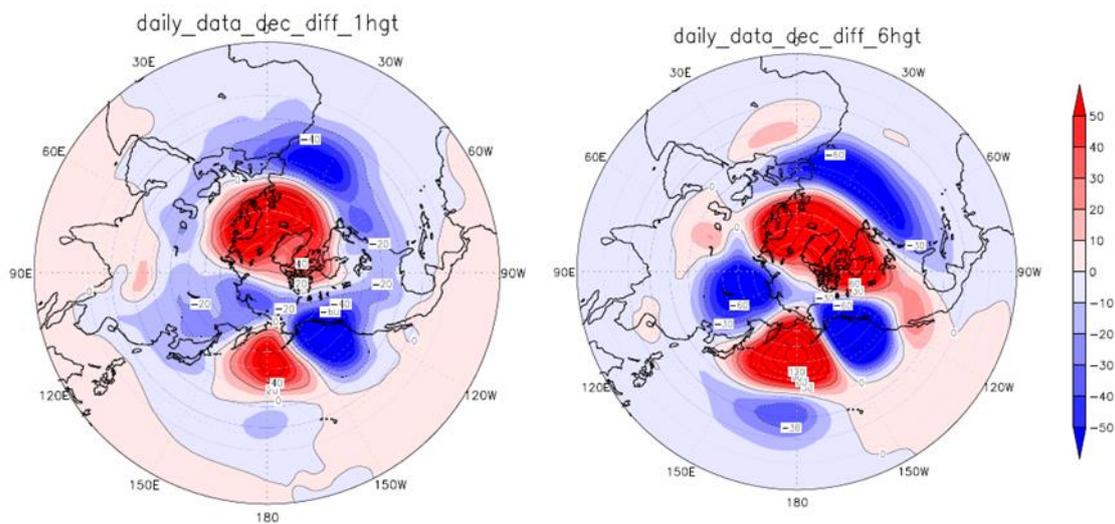


Fig.6 ジャンプ前と後の回帰図の変化
(左: 1000hpa 高度場, 右: 500hPa 高度場)

4-2-2 標準偏差

振幅の大きい場を抽出する為に各グリッドにおける標準偏差をジャンプ前と後で区別して計算した。EOF解析と同様に日平均データを使用し、1000hPa・500hPa高度場に対して行った結果を示す(ジャンプ前：Fig.7, ジャンプ後：Fig.8)。高度に関わらずジャンプ前後に共通する点として太平洋・大西洋域の変動が挙げられる。客観的に前後を比較する為に差を計算した(Fig.9)。

Fig.9より北極振動の3つの活動中心である大西洋・北極域・太平洋における変動が大きくなったことが示された。

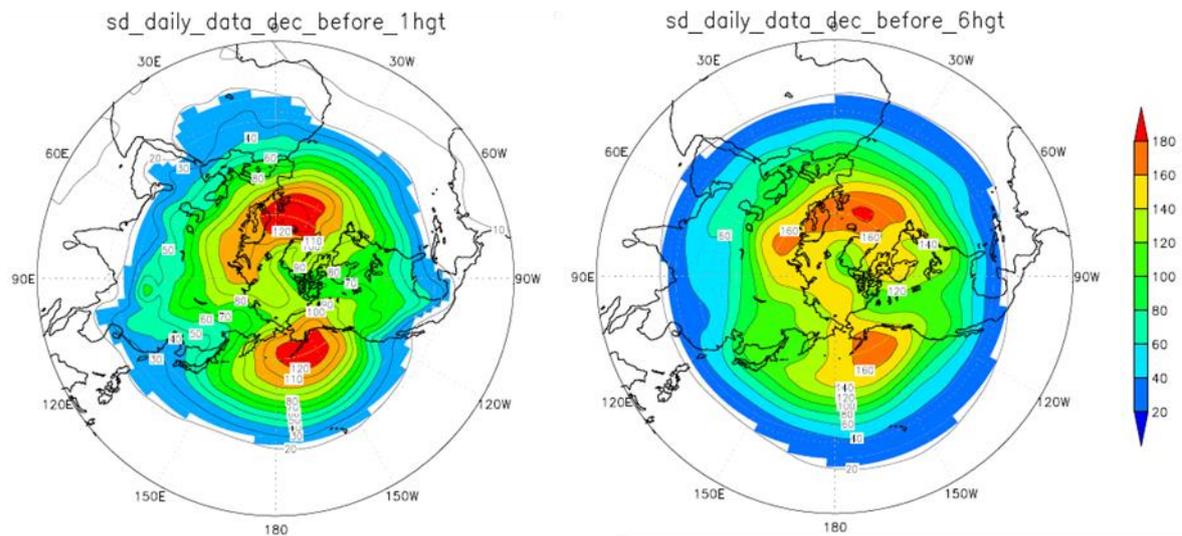


Fig.7 1958年から2008年(ジャンプ前)12月の各グリッドにおける標準偏差
(左：1000hPa, 右：500hPa)

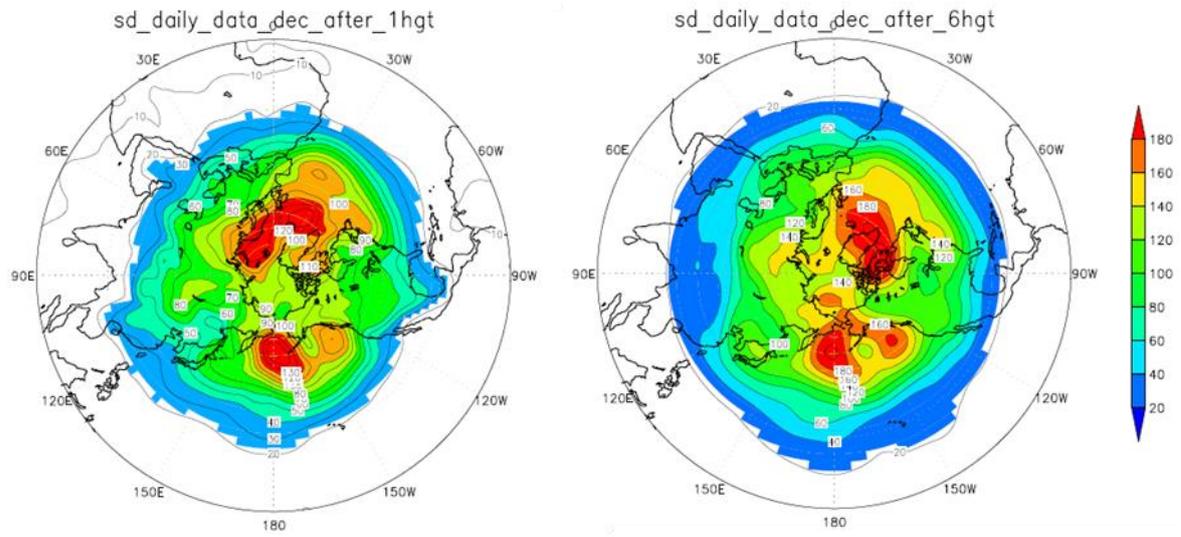


Fig.8 2009年から2012年(ジャンプ後)12月の各グリッドにおける標準偏差
 (左 : 1000hPa, 右 : 500hPa)

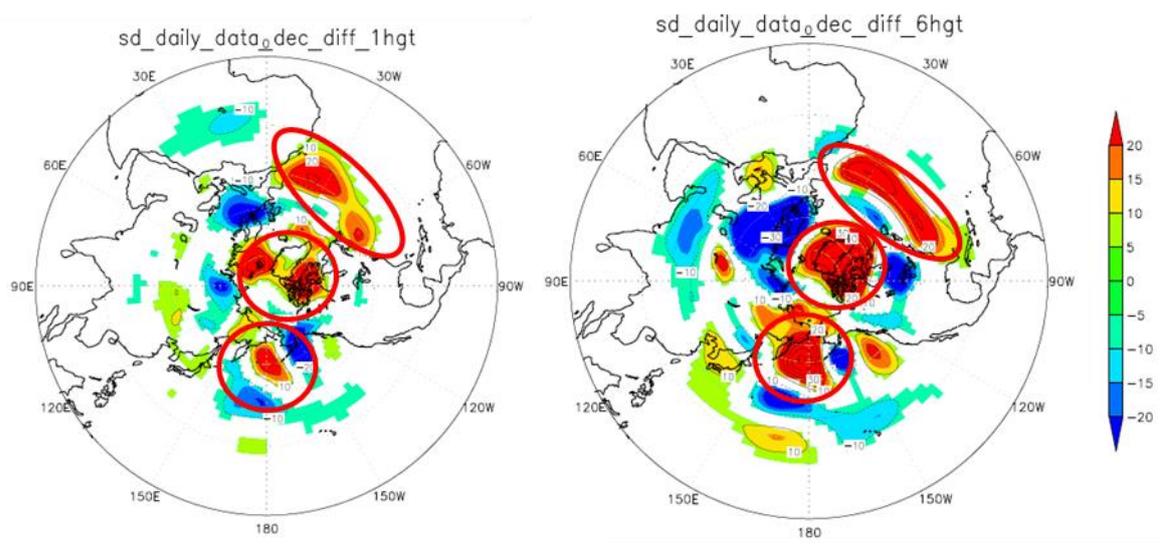


Fig.9 ジャンプ前と後の標準偏差の変化
 (左 : 1000hPa, 右 : 500hPa)

4-2-3 平均場

構造の変化した原因について言及する為にジャンプ前後での気圧の平均場とその差を計算した(ジャンプ前: Fig.10, ジャンプ後: Fig.11, 前後の差: Fig.12). 1000hPa におけるジャンプ前後の平均場は冬型の特徴である西高東低の気圧配置となっている. 500hPa における平均場は北極に低気圧, 中緯度に高気圧が存在する. 差から北極振動の強まりとヨーロッパ西海岸を起源として日本へ向かう波の構造が見られた.

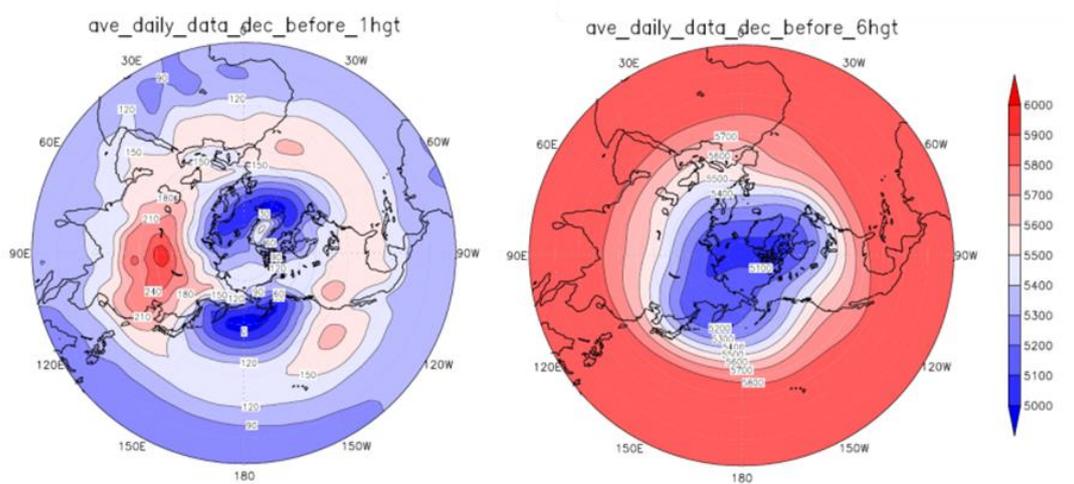


Fig.10 1958年から2012年の12月における大気場の平均
(左: 1000hPa, 右: 500hPa)

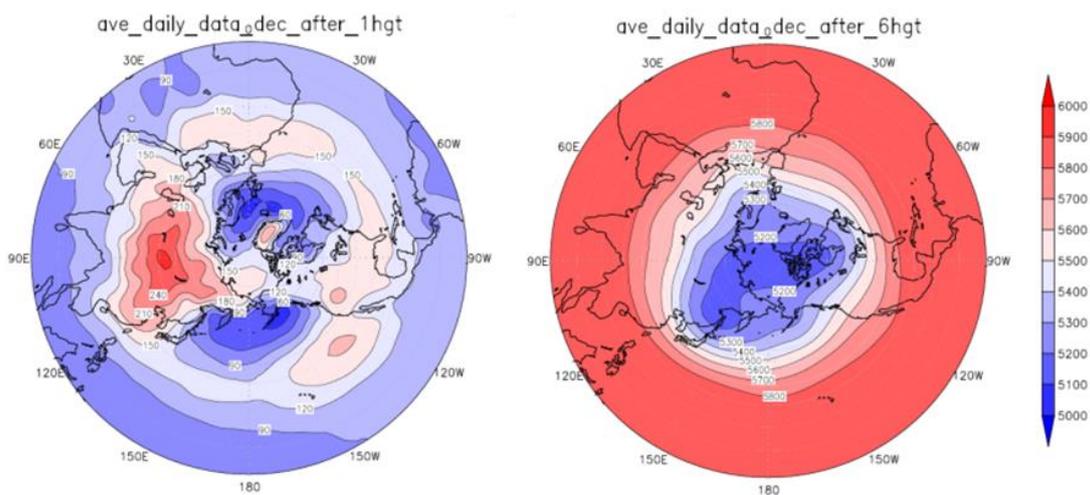


Fig.11 2009年から2012年(ジャンプ後)12月の大気場の平均
(左: 1000hPa, 右: 500hPa)

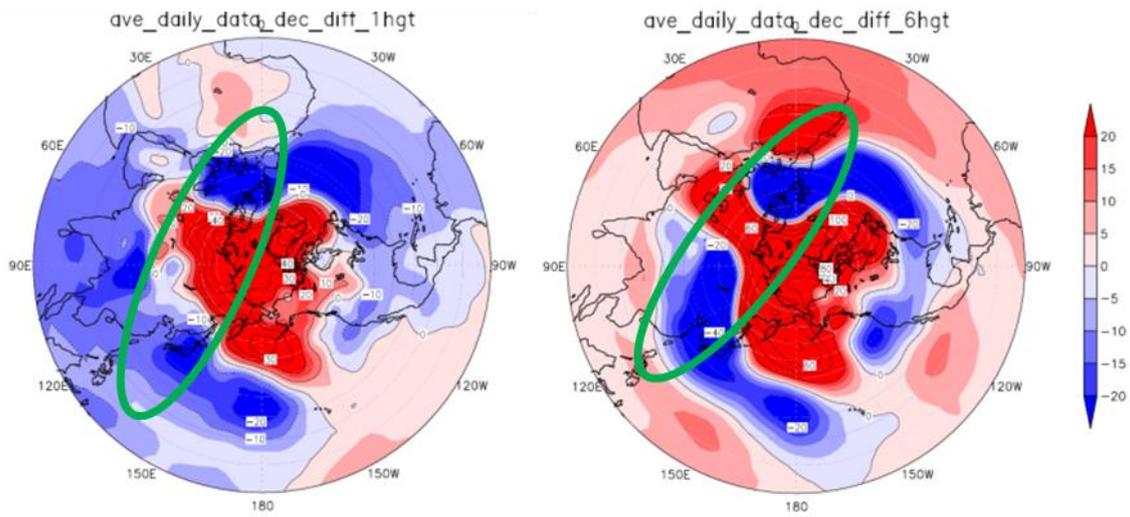


Fig.9 ジャンプ前と後の大気場の平均の変化
(左 : 1000hPa, 右 : 500hPa)

第5章 考察と結論

1958年から2012年12月のEOF解析の結果から北極振動の時系列は年々変動が大きくなっていることが示され、2008年と2009年の間で標準偏差がジャンプしていることが明らかになった。ジャンプ前後での北極振動の変化を見るために期間を分けてEOF解析を行ったところ近年の北極振動と2008年以前の北極振動は構造が異なっていた。近年では中緯度の活動中心は環状的で北極域の活動中心は太平洋側への広がりが見られた。メカニズムは解明されていないが、この太平洋側への構造の広がりが日本の気候の顕著化に一役買っているのではないかと推測する。また気圧偏差のコントラストは激しくなっていることが確認された。つまり北極振動の構造と振幅は変化しており、寄与率も増加したことから北極振動が卓越する傾向にあるといえる。構造や振幅の変化の要因として各グリッドでの変動領域が北極振動の活動中心であったこと、大気の平均場の変化が挙げられる。

引用・参考文献

- 1) 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.
- 2) 田中博, 2008: 日本の異常気象と北極振動の関係. 2008 年度雪氷防災研究講演会報告集, 防災科学技術研究所, 雪氷防災研究センター. 1-6.
- 3) 山崎孝治. (2008). Climate Variations from the Viewpoint of the Arctic. *地学雑誌*, **117**(6), 1051-1062.
- 2) Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784-812.
- 4) NOAA http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/

謝辞

本研究を進めるに当たり、指導教員である立花義裕教授には専門知識や研究手法・方針などを熱心に指導していただき大変感謝しております。また、自然環境システム学講座の先生方には授業で専門的な知識を学ばせて頂いただけでなく、合同ゼミなどでアドバイスをさせていただいたことを深く感謝いたします。

地球環境気候学研究室諸先輩方にはプログラムの書き方や日頃のゼミなど研究に関することだけでなく日常の研究室生活でもご面倒をおかけしました。深く感謝しております。