



## 北極振動と地球温暖化

### 地球温暖化が示す不都合な真実

田中 博

筑波大学計算科学  
研究センター教授

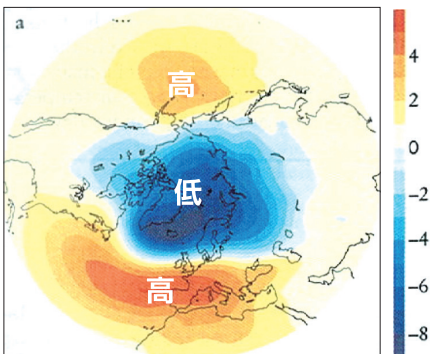


### 1. はじめに

ただ今ご紹介いただきました田中博です。このような記念講演の機会を与えて下さった酒井会長をはじめとする日本気象予報士会理事の皆様感謝いたします。今回の演題にある北極振動(Arctic Oscillation: AO)については、2年前の講演会でもお話をさせていただきました。その内容は「てんきすと」第56号に掲載されています。その後、地球温暖化との関係で北極振動の研究を進めるうちに、1970年代から1990年代に見られた急激な温暖化が北極振動の空間パターンで進行したのに対し、IPCC-AR4(第4次評価報告)の気候モデル群に見られる温暖化はアイス・アルベドフィードバックの空間パターンで進行している、という矛盾が明らかとなりました。この空間パターンの矛盾が示す意味を考察した結果、今回は標記のような「地球温暖化が示す不都合な真実」という挑戦的なサブタイトルを付けることにしました。司会の小西さんによると、この演題にひかれて通常の1.5倍の参加者が集まって下さったとのことで、大変うれしく思います。

### 2. 北極振動とは

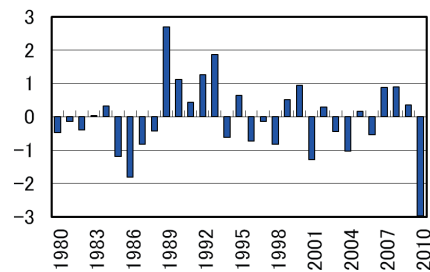
はじめに、北極振動(AO)とはワシントン大学のWallace教授らにより1998年に提唱された現象で、北緯60度を挟んで海面更正気圧場(SLP)が南北にシーソーのように逆相関を持つというものです(図1)。北極域が負のSLPアノマリの時に、太平洋と大西洋に正のSLPアノマリの中心が見られるのがAOプラスの特徴です。鉛直方向には順圧的な構造を持つことから、AOは寒帯前線ジェットと極夜ジェットを併せた寒帯ジェットの強弱と同義であり、北緯30度付近の亜熱帯ジェットとは逆相関を持つという特徴も重要



第1図 北極振動パターン (SLP)  
(Wallace and Thompson 2002)

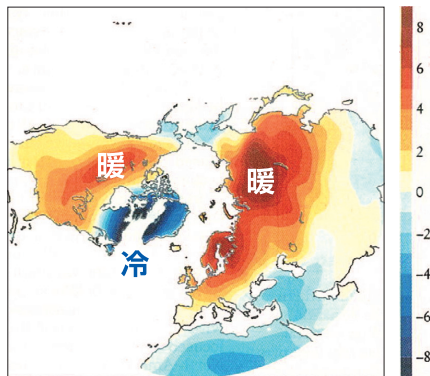
です。気象庁が発表するAO指数(図2)によると、1990年代初期まではAO指数が増大し、これが地球温暖化トレンド

と高い相関を持つことから、地球温暖化と北極振動の関係に注目が集まりました。その後、2000年代に入るとAO指

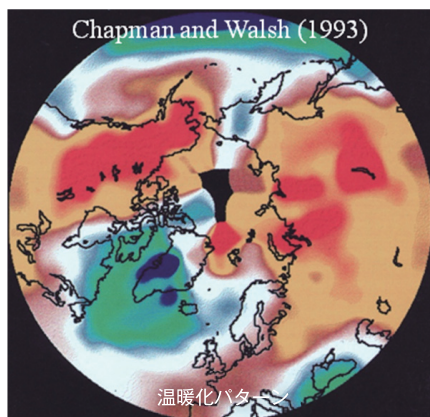


第2図 北極振動 (AO) 指数 (気象庁)

数は明瞭に正から負へと変化し、温暖化との関係が説明できなくなりました。しかし、大気中の二酸化炭素が急増し続ける中で、最近は一時的にも温暖化が止まったかのような観測結果が得られるようになり、AO指数の減少傾向との関係が再び注目されるようになりました。



第3図 北極振動パターン (地上気温)  
(Wallace and Thompson 2002)



第4図 現実大気気温トレンドの分布  
(1961-1990年)

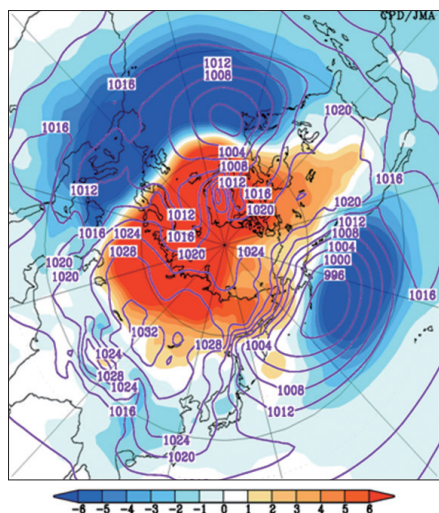
北極振動に伴う温度アノマリの構造(図3)は、シベリアや北米で正の値を示す一方で、グリーンランド付近で負という特徴的な空間パターンを示します。このパターンを、1961年から1990年にかけて観測された急激な地球温暖化の空間パターン(図4)と比較すると、両者がほぼ一致する事がわかります。つまり、20世紀後半の地球温暖化はシベリアや北米で正の値を示す一方で、グリーンランド付近で負というまさに北極振動のパター

ンで生じています。このことから、当時は地球温暖化の約半分は北極振動で説明できると言われました。しかし、その後AO指数は負に転じ、それと対応するかのように最近の温度変化は横ばい状態に入りました。

### 3. 2009/2010年冬季の北極振動

このような背景の中で、図2の右端にあるように2009/2010年の冬にはAO指数が標準偏差の3倍(3 $\sigma$ )の負の値となり、気象庁も認める半球的な異常気象(AOマイナス)が発生しました。2009/2010年冬季(DJF)平均のSLPの

(気象庁異常気象検討会資料)



第5図 2009/2010年冬季のSLPアノマリ(気象庁)

アノマリ(図5)をAOプラスのSLPの構造(図1)と比較すると、実況のSLPは北極域で正、中緯度の太平洋と大西洋を中心に負となり、AOマイナスの構造が明瞭です。これまで、北極振動とは大気

の固有振動のような物理的実体を持つものなのか、それとも

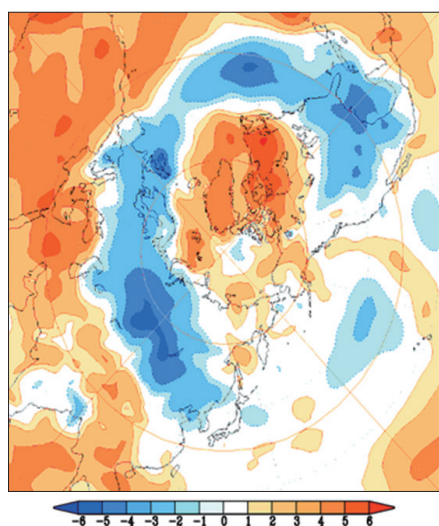
経験直交関数展開(EOF)という統計上生じた虚像なのか

が論争となってきましたが、2009/2010年冬季のSLPはまさしく実像であり、

統計的な虚像ではない事を裏付ける結果となりました。

次に、2009/2010年冬季の地上気温のアノマリ(図6)を、

AOは統計的虚像でなく実像である。



第6図 2009/2010年冬季の地上気温アノマリ(気象庁)

AOプラスの温度アノマリの構造(図3)と比較すると、温度場においてもAOマイナスの特徴が明らかです。AOマイナスに伴う温度アノマリはシベリアや北米で負の値を示す一方で、グリーンランド付近で正という環状的な空間パターンを示します。この冬、米国東海岸ではホワイトハウスが大雪で4日間も閉鎖となり、ヨーロッパや東アジアでも記録的な低温による被害が報告されています。Climate Gate事件も重なり、地球温暖化を疑問視する人が欧米では急増したと聞いております。ただし、低緯度は弱いエルニーニョの影響で高温偏差となり、その影響を受けた日本は幸いにも平常並みの気温となりました。

どうしてこのようなAO指数が-3 $\sigma$ という異常気象が発生

したかについて、気象庁異常気象検討委員会でも議論されました。熱帯の高い海面水温の影響や成層圏での突然昇温などがきっかけで、寒帯ジェットが弱まる一方で亜熱帯ジェットが強まった。そしてブロッキングの発生でAOマイナスが起りやすい状態になった後、大気の内力学によりAOマイナスが一気に加速された。その維持については、AOマイナスが原因となって総観規模擾乱の構造が変化し、擾乱による運動量輸送がAOマイナスを維持した、との解釈がなされています。しかし、本当の外的原因はいまだに解らないというのが実情で、大気のカオス的な揺らぎの中で発生したと考えるのが妥当です。気象庁の現業アンサンブル予報モデルによるAO指数の予測は、定量的な-3 $\sigma$ の発生という意味では予測できていません。このような-3 $\sigma$ の異常の原因究明も容易でない中で、AO指数の10年スケールの変動の原因を解明することは一層困難なことです。一部では、太陽活動の変化や宇宙線による雲量の変化などが候補として提唱されていますが、メカニズムが良くわかっていないので、今後の課題です。

### 4. 北極振動の理論

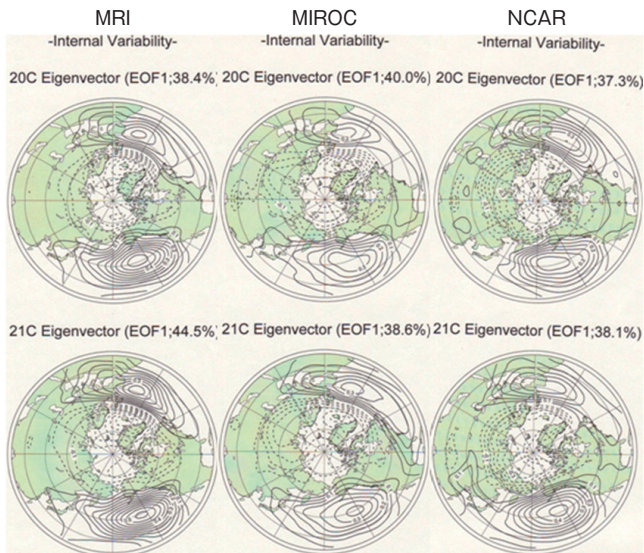
北極振動(AO)に関するこれまでの研究により、我々は以下の結論を見出しています。①北極振動は、確率過程のひとつのRealization(実現)としてカオス的に変動する。②北極振動は、固有値がゼロとなる大気力学的固有解(特異固有解)が、任意の準定常外力に共鳴して励起される現象である。③特異固有解理論という内部力学で、北極振動による10年スケールの内部変動が可能である。詳細につきましてはここでは省略しますが、詳しく知りたい方は「てんきすと」56号、または原著論文のTanaka and Matsueda (2005)を参照してください。

我々が考える北極振動は、大気大循環が内在する周期無限大の特種な固有振動です。周期性がないので非線形項により自律的に、あるいは準定常外力に反応して任意のタイムスケールで発生します。例えば100年平均の基本場の中で10年スケールの準定常なアノマリとして、正または負の符号で最も現れやすい現象であるという事を理解してください。北極振動は中高緯度の海洋、海水、陸面、雪氷圏、生態系などに広くメモリーを残すことから、これらの気候サブシステムとのフィードバックが重要と考えられます。上述の太陽活動の長期的な変化や宇宙線による雲量の変化などによっても励起は可能です。

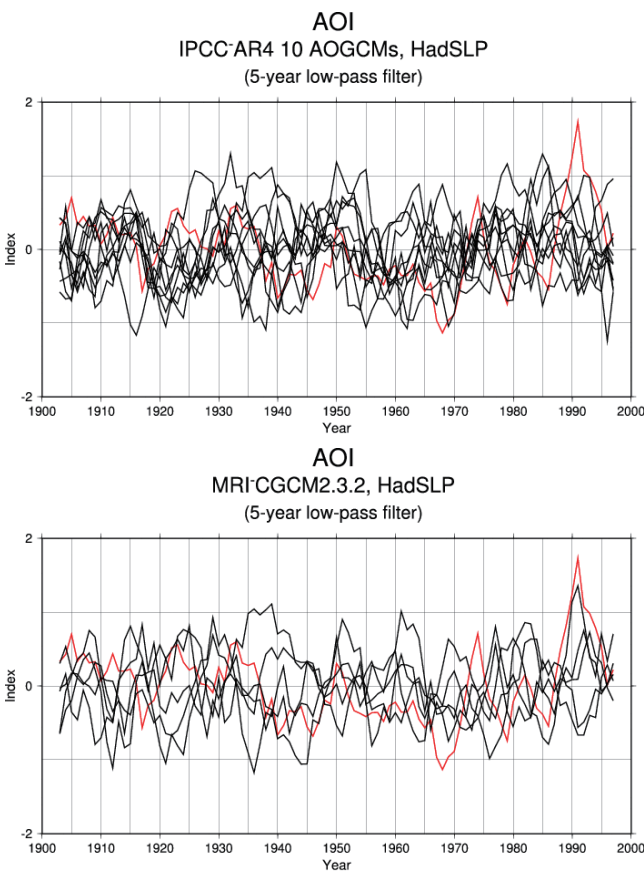
### 5. IPCC気候モデルに見る北極振動

このような北極振動の理解に立ってIPCC-AR4の気候モデル群に見られる温暖化予測を解析しました(大橋・田中2009; Ohashi and Tanaka 2010)。その結果によると、解析したすべての気候モデルに対し、20世紀再現実験も21世紀予測も、最も卓越する大気変動(EOF-1)として北極振動が得られました(図7)。これは観測事実と一致します。

ところが、図8に示したように、各モデルの20世紀再現実験のAO指数の時系列を観測(赤線)と比較すると、どれも合いません。また、MRIモデルによるアンサンブル実験の結果においても、AO指数の時系列を再現できるメンバーはありません。アンサンブル実験なので、同じモデルを僅かに異なる初期値から時間積分した結果、AO指数は内在するカオス性に従いばらばらに予測され、現実を再現できません。この事から、北極振動は確率過程のひとつのRealization(実現)であり、本来予測が不可能な現象である、という上述の理解を再確認することが出来ます。



第7図 IPCC-AR4 モデルの AO パターン (大橋・田中 2009)

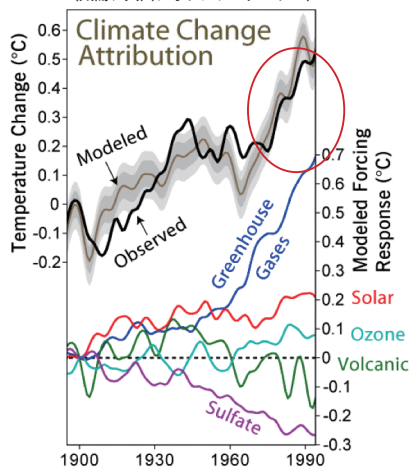


第8図 IPCC-AR4 モデルによる AO 指数の再現。  
上は 10 モデルの再現実験、下は MRI アンサンブル実験。

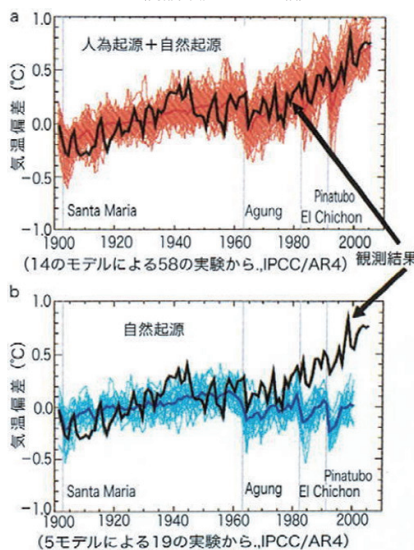
## 6. IPCC による人為的温暖化の根拠

ここで重要な問題として浮上してくる解析事実は、現実大気における1970代から1990年代にかけての急激な温暖化は、図4のように主に自然変動(内部変動)としての北極振動がもたらしたものである、という上述の結果です。北極振動は本来予測が不可能な現象なので、IPCCモデル群はAO指数の時系列を観測と合せる事が出来ません。手持ちの材料である人為的な温室効果ガスの増大や、太陽活動、火山噴火、エアロゾルの時系列などをどのように調整しても、観測されるAO指数の時系列を再現することは不可能なのです。それなのに、IPCCモデル群は観測される全球平均温度の時系列をピタリと再現しており、それがIPCCモデル群の性能評価の根拠になっている

### IPCC-AR4 の根幹をなす説明 (太陽、火山、オゾン、エアロゾル)



### 人為的要因と自然的要因 (内部変動はハッチの幅)



第9図 IPCC モデルによる人為的地球温暖化の検証実験 (近藤 2009)

ではありませんか。

図9はIPCC-AR4の根幹をなす有名な図です。この実験によると、観測される全球平均地上気温を再現するためには人為的温室効果ガスの増加が必須であり、これを覗いた自然起源の外部強制だけでは、1970から1990年代にかけての急激な温暖化を予測することが出来ない(図中の赤丸に注目)。太陽活動や、オゾン、火山噴火、エアロゾルの時系列は温暖化を促進するものではなく、むしろ抑制する効果があり、近年の急激な温暖化を説明できるのは人為的な温室効果ガスの増大のみである。したがって、近年の地球温暖化は人為的な温室効果ガスの増大によって生じたものとほぼ断言してよい(very likely

to be true)。このようにして、過去に観測された温暖化曲線の傾きをほぼ完璧に再現した気候モデルは、将来予測においても信頼に足る性能が保障された、ということになっています。しかし、この部分の温暖化は、本来予測が不可能な北極振動によって生じている、というのが本研究の核心です。

ちなみに、カオス的な内部変動の幅はグレーゾーンで示され、その幅を大きく超える温暖化が実際に生じていることから、内部変動による説明は考察の段階で除外されています。カオス的に変化する内部変動の幅というのは、観測から評価する事が極めて困難なので、IPCCではこの変動幅を、優秀とされるハドレーセンターモデル、GFDLモデル、ハンブルグモデルなどの1000年ランの変動幅から推定しています(近藤 2009)。本当の変動幅が解らないので、モデルの変動幅で推定するという手段は論理的にもおかしい事は明らかです。もし、近年の温暖化の半分が北極振動という内部変動によるものと判明すれば、優秀とされるモデルの変動幅は過小評価だったという結論になります。モデル開発とは、過去に観測された事実を忠実に再現できるようにモデルを改良またはチューニングすることなので、変動幅はもっと大きいという事実が判明すれば、モデルはその変動幅を再現するようにモデル開発の名のもとにチューニングする事でしょう。

(以下次号)