

## 地球温暖化予測モデルに見られる北極振動の解析的研究

大橋 正宏\*・田中 博\*\*

### 要旨

IPCCの第4次評価報告書で実施された10種類の大気海洋結合モデルの気候予測に見られる北極振動(AO)を解析し、地球温暖化時に見られるAOの特徴や成因について調べた。

どのモデルも冬季の海面更正気圧のEOF1には観測されるAOの構造が見られ、全球平均地上気温の変化をよく再現した。次に10年スケールの変動について、内部変動と外部強制応答に分離して解析を行ったところ、内部変動は共通してAOパターンが得られたが、外部強制応答はモデル間や現在気候と将来気候で大きく異なることが示された。また、外部強制応答に対するAO指数(AOI)の時系列は観測と一致せず、それに重なる内部変動のAOIの振幅が十分大きいことが確認された。これらの結果は、AOの10年スケールの長期変動が外部強制応答によるものではなく、カオス的に変動する大気の純粋な内部変動として十分に説明できることを示唆している。

### 1. はじめに

二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの増加など人為的起源の強制に伴い、中高緯度の気候が将来どのように変化するかが注目されている。また、北半球の中高緯度大気的主要な変動として、北極振動(Arctic Oscillation: AO)がある。AOとは北緯約60度を挟んで南北に地上気圧が逆相関を持つ現象をいい、冬季(11月～4月)の北半球(北緯20度以北)海面更正気圧(Sea Level Pressure: SLP)を経験的直交関数(Empirical Orthogonal Function: EOF)展開したときの第1主成分として定義される(Thompson and Wallace 1998)。

第1図(上)は、解析値HadSLP2(Allan and Ansell 2006)によるAOの空間構造である。HadSLP2はハドレーセンターのSLPのデータセットで、全球5度のグリッド間隔で構成されている。AOの構造における気圧偏差の地理的な特徴は北極域で低圧偏

差があり、それを取り囲むように周極域(主に大西洋と太平洋)で高圧偏差が生じることである。このような気圧偏差のときの気温偏差の分布は、グリーンランド付近が低温域、シベリアからヨーロッパにかけてとカナダ北西部が高温暖域となる。日本はシベリアに中心を持つ大きな高温暖域の東部に含まれる。このような分布のときをAO指数(Arctic Oscillation Index: AOI)が正であるという。AOIが負のときは、分布のパターンが全て逆になる。主要な大気変動として古くから知られている北大西洋振動(North Atlantic Oscillation: NAO)に伴って現れる北半球の海面気圧パターンが、太平洋を除けばAOのパターンとよく一致することや、NAOとAOIが有意な高い相関を持つことなどから、NAOがAOの主要部分であるとする見方もある。

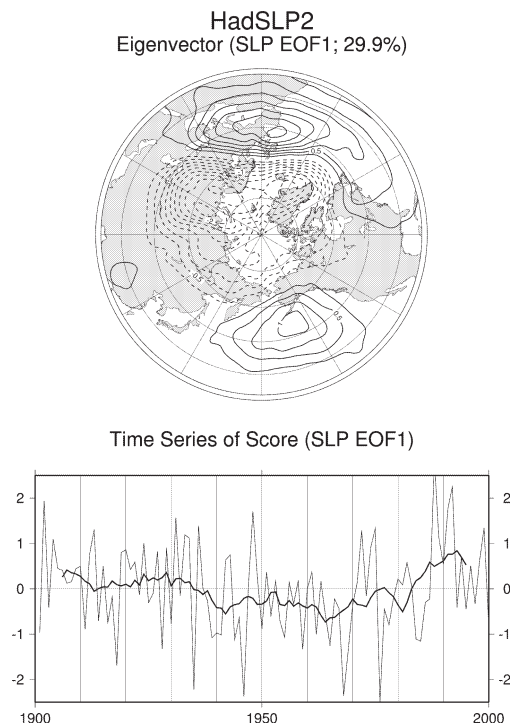
AOは10日程度の短いスケール、年々から10年規模の変動、さらにそれ以上の長期傾向を示す。AOIが20世紀後半において顕著な上昇トレンドを示すことが報告され、その10年スケールの変動と近年の地球温暖化時に見られる気候変動パターンは非常によく対応している。近年の地球温暖化はシベリア付近で最も顕著であり、カナダ北部でも昇温が著しい一方で、グリー

\* 筑波大学生命環境科学研究科。

\*\* 筑波大学計算科学研究センター。

—2008年4月11日受領—

—2009年6月16日受理—



第1図 観測データ (HadSLP2) による北半球 (北緯20度以北) の20世紀冬平均 SLP の EOF1 に対する空間分布と時系列 (細実線) およびその11年移動平均 (太実線). 上が空間分布図であり, カッコ内は寄与率, コンター間隔は0.5 hPa, 下が時系列図である.

ンランド周辺の気温は低下するという特徴的な分布が見られる。これは AO に伴う地上気温のパターンによく一致している (Hori *et al.* 2007)。両者の相関から近年の地球温暖化の約40%が AO の変動として説明できるといわれ (田中 2007), AO の成因を理解することは温暖化研究において重要である。

Miller *et al.* (2006) では, 気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) の第4次評価報告書 (Fourth Assessment Report: AR4) におけるモデル14種類のデータセットの解析から, AOI は温室効果ガスや対流圏硫酸エアロゾルの強制により正のトレンドを示すことが示唆された。また, 観測された AOI の時系列 (第1図の下) を見ると1970年代以降に顕著な上昇トレンドが見られるが, 1990年代以降は逆に下降トレンドとなっており, 大きな振幅の10年規模の変動が含まれている。年々変動より短い時間スケールの AO は,

主に力学的な過程による大気の内変動と考えられているが, 10年規模などの長い時間スケールにおける変動は, 海面水温, 海水分布, 陸面, あるいは人為起源および自然起源の外部強制に対する応答などが寄与していることが示唆されている (Hori *et al.* 2007)。一方で, Miller *et al.* (2006) は, モデル平均が示す AOI は観測に見られる AOI の振幅を過小評価しており, モデルが成層圏の応答を過小評価しているためだと述べている。しかしながらこの結果は, 10年スケールの AOI が外部強制だけでは説明し難いと捉えることもできる。どちらにしても, 内変動と外部強制応答の寄与の定量的評価や詳しいメカニズムの解明は十分なされておらず, 観測に見られる AOI の時系列のうち, 内変動と外部強制に対する応答がそれぞれの程度の割合を占めるかについて, 観測結果からはそれらを分離することが難しいためよくわかっていない。Yukimoto and Kodera (2005) によると, 気象研究所の気候モデル (MRI-CGCM2.3) を用いた複数の気候予測のアンサンブル平均は温室効果ガスの増加という外部強制の応答であり, それが AO パターンになる一方で, そのスプレッドに見られる内変動もまた AO パターンになることが報告されている。

本研究では, Hori *et al.* (2007), Miller *et al.* (2006) を参考に IPCC の AR4 で実施された10種類の気候予測に見られる AO を解析し, Yukimoto and Kodera (2005) の手法で平均的な強制応答パターンと, そこからのばらつきの特徴を解析することで, 地球温暖化時に見られる AO の特徴と成因を明らかにすることを目的とする。

## 2. 使用データおよび解析手法

### 2.1 使用データ

IPCC AR4 で使用された10種類の大気海洋結合モデルにおける20世紀気候再現 (20th Century Climate in Coupled Model: 20C3M) 実験, 温暖化シナリオ (Special Report on Emission Scenarios-A1B: SRES-A1B) 実験結果の月平均の SLP と地上気温のデータを使用した。

20C3M 実験はモデルに19世紀末から20世紀の既知の外部強制力を与えることにより20世紀の気候変化を再現する実験である。また SRES-A1B シナリオ実験は温室効果ガス増加やエアロゾルの成因となる二酸化硫黄による応答を表現しており, グローバル化の進展や急速な経済成長のもとにおけるシナリオ実験であ

第1表 IPCC AR4のモデル群の概要. 左からそれぞれ, モデル名, 国名, 大気部分の解像度, 20世紀と21世紀のアンサンブルメンバー数, 参考文献を示した. 各センターの名称は以下の通りである. CCCMA: Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis. CNRM: Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques. GISS: National Aeronautics and Space Administration (NASA) / Goddard Institute for Space Studies (GISS). INM: Institute for Numerical Mathematics. IPSL: Institut Pierre Simon Laplace. MIROC: Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC). MRI: Meteorological Research Institute. NCAR: National Center for Atmospheric Research. UKMO: Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office.

Model	Country	Atm. Res.	Ensemble No.		Reference
			20C	21C	
CCCMA-CGCM3.1	Canada	T47 L31 TOP=1 hPa	5	2	(Flato and Boer 2001; Scinocca and McFarlane 2004)
CNRM-CM3	France	T42 L45 TOP=0.05 hPa	1	1	(Déqué <i>et al.</i> 1994)
GISS-AOM	USA	T42 L20 TOP=10 hPa	2	2	(Russell <i>et al.</i> 1995)
GISS-EH	USA	4°×5°L20 TOP=0.1 hPa	5	3	(Sun and Bleck 2006; Hansen <i>et al.</i> 2002)
INM-CM3.0	Russia	4°×5°L21 TOP=10 hPa	1	1	(Galini <i>et al.</i> 2003)
IPSL-CM4	France	2.5°×3.75°L19 TOP=4 hPa	2	1	(Hourdin <i>et al.</i> 2006)
MIROC3.2 (Medres)	Japan	T42 L20 TOP=30 km	3	3	(Hasumi and Emori 2004)
MRI-CGCM2.3.2	Japan	T42 L30 TOP=0.4 hPa	5	5	(Yukimoto <i>et al.</i> 2006)
NCAR-PCM	USA	T42 L18 TOP=2.9 hPa	4	4	(Meehl <i>et al.</i> 2004)
UKMO-HadCM3	UK	2.5°×3.75°L15 TOP=10 hPa	2	1	(Pope <i>et al.</i> 2000)

る。

20世紀の20C3M実験, 21世紀のSRES-A1B実験の両者を用いて, 解析期間は1901年から2100年とした. 10種類のモデルの詳細は第1表のとおりである.

## 2.2 解析手法

まず, それぞれのモデルごとに20世紀の北半球(北緯20度以北)の冬(DJF)平均SLPをEOF解析し, そのEOF第1モード(EOF1)を見ることにより, モデルの表現するAOを観測と比較する. これらのモデル実験結果には複数のアンサンブルメンバーがあるが, 全てのランについて解析を行った.

次に, Yukimoto and Kodera (2005)の手法により, AOの10年スケールの変動を外部強制に対する応答と内部変動に分けて解析する. 解析に使用するモデルは20世紀, 21世紀ともにアンサンブルメンバーが3つ以上揃っているGISS-EH, MIROC3.2 (Medres), MRI-CGCM2.3.2, NCAR-PCMの4種類で

ある. これらのメンバー間では内部変動は独立であるが, 外部強制力は共通であるので, 実験のアンサンブル平均が外部強制に対する応答とみなされ, またアンサンブル平均を差し引いた残差は内部変動とみなすことができる. 10年スケールのAOは, Yukimoto and Kodera (2005)に従い次のように定義した. まず, 年平均した北半球(北緯20度以北)SLPから11年のローパスフィルタで11年以上の変動成分を取り出す. さらに, 外部強制に対する応答と内部変動成分とに分離するため, アンサンブル平均とそれからの残差に分け, 残差はメンバー分をつなぎ合わせて1つの長期データとして扱う. EOF1を計算し, それぞれの特徴を解析する. 20世紀と21世紀は別々に計算を行った.

最後にIPCCのモデル群が表現する10年スケールのAOが現在気候をどの程度再現し, 将来気候をどのように予測しているのかを検証するため, 全モデルにおける11年のローパスフィルタを施したSLPのアンサ

ンプル平均とそれを差し引いた残差について同様に20世紀, 21世紀それぞれ EOF1を計算した。複数のアンサンブルメンバーが存在するモデルにおいては, そのうちの1つのメンバーを使用している。

### 3. 結果

#### 3.1 20世紀の冬季 AO の再現性

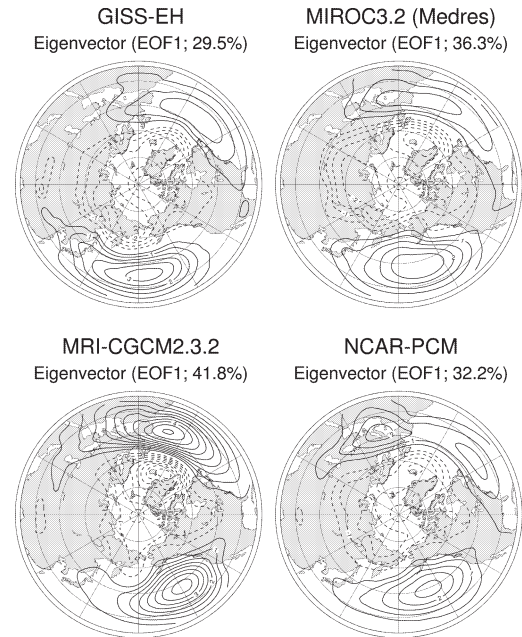
モデルの表現する AO がどの程度現実的かを検証しておくことは, モデルの AO の変動に対する信頼性を評価する上で重要である。第2図に IPCC の AR4モデルにおける, それぞれの20世紀冬平均 SLP 場の EOF1の空間分布を示した。前節の解析手法の第1段落で示した方法で, 10種類のモデルのアンサンブル実験結果から EOF1の計算を行ったが, ここではその中から4種類のモデルの1つのランに対する例を示す。

各々の空間分布を見ると, どのモデルも共通して北極域で負の偏差, その周りの中緯度で正の偏差となった。さらに負の偏差の極大はアイスランド付近にあるものが多く, その南側の大西洋の正偏差とでダイポール構造をなして NAO 的なパターンを示している。一方で太平洋にも正の偏差が見られた。大西洋と太平洋それぞれの正偏差の大きさを比べるとモデル間によって異なっていた。図で示していないものもあるが, GISS-EH, MIROC3.2 (Medres), UKMO-HadCM3は太平洋側に正偏差の極大が見られ, GISS-AOM, IPSL-CM4は大西洋側に正偏差の極大が見られた。NCAR-PCM は太平洋と大西洋の他にヨーロッパ大陸付近にも正の極大が存在していた。また全体的に正偏差の大きさが観測に比べて大きく再現されている。しかしながら, これらの構造の全体的な特徴は観測されるパターンとよく一致し, 10種類のモデルにおける EOF1の空間構造は例外なく現実的な AO パターンとなったといえる。尚, 各々のモデルにおけるアンサンブルメンバー間において構造の違いはほとんど見られなかった(図省略)。

図は省略したがそれぞれの EOF1のスコア時系列を見ると, その年々変動はモデル間やアンサンブルメンバー間でばらばらであり, 観測とは全く異なるものとなっていた。10年スケールの長期変動も再現できていない。観測と似たような時系列を再現したモデルは1つもなく, AOI の再現の難しさが示された。

#### 3.2 全球平均地上気温

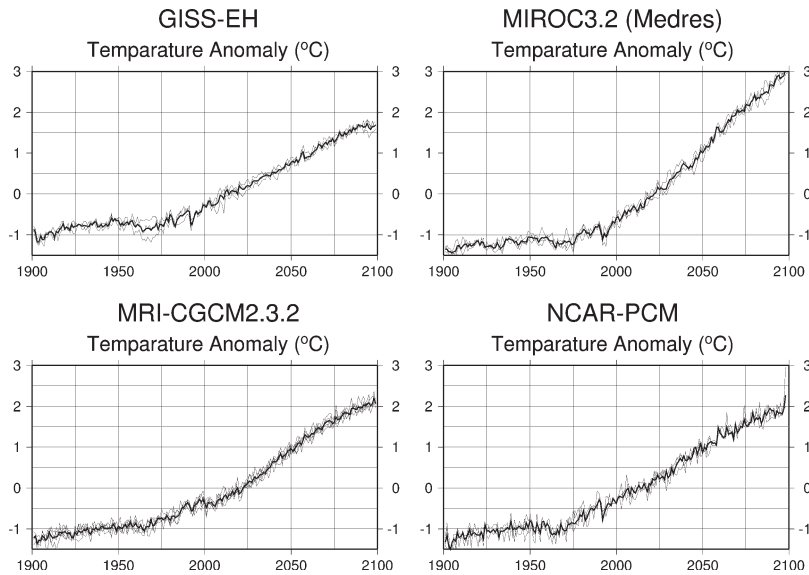
20世紀, 21世紀の気候変化をモデルがどのようにに再



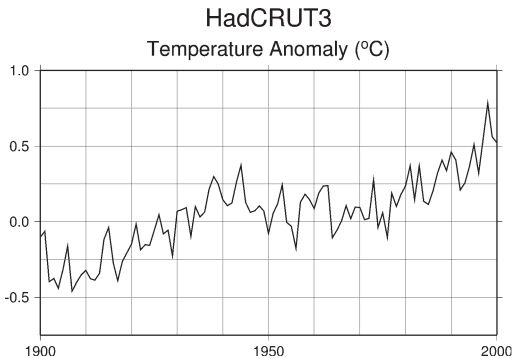
第2図 IPCC AR4モデル群による北半球(北緯20度以北)の20世紀冬平均 SLP の EOF1に対する空間分布。カッコ内は寄与率, コンター間隔は0.5 hPa である。モデルはそれぞれ, 左上が GISS-EH, 右上が MIROC3.2 (Medres), 左下が MRI-CGCM2.3.2, 右下が NCAR-PCM である。

現し予測しているかを確認するため, 最も代表的でかつ観測データの信頼性が比較的高い全球平均地上気温の変化について調べたものが第3図である。20C3M 実験と SRES-A1B シナリオ実験による各メンバーをつなげ, それぞれの気候値(200年平均)からの偏差の時系列およびそれらのアンサンブル平均を示している。また, 観測値としてハドレーセンターの地上気温のデータ, HadCRUT3 (Brohan *et al.* 2006) による時系列も第4図に示してある。

20世紀は, GISS-EH と MIROC3.2 (Medres) で100年間に約0.75°Cの上昇, MRI-CGCM2.3.2と NCAR-PCM で約1°Cの上昇が見られた。また数十年規模の変化傾向としてはどのモデルも共通して20世紀前半に小さな上昇トレンドがあり, 20世紀半ばは上昇がやや停滞し, 1970年代以降に急激な上昇を示している。観測値と比べると, 変化量, 変化傾向ともどのモデルも20世紀の気候変化において, 外部強制応答の大きさおよび内部変動の大きさがほぼ現実的である



第3図 IPCC AR4モデル群による全球平均地上気温偏差（気候値は200年平均）の1900年から2100年までの時系列。細線は実験の各メンバー、太線はアンサンブル平均を示す。モデルはそれぞれ、左上がGISS-EH、右上がMIROC3.2 (Medres)、左下がMRI-CGCM2.3.2、右下がNCAR-PCMである。



第4図 観測データ (HadCRUT3) による全球平均地上気温偏差（気候値は100年平均）の1900年から2000年までの時系列。

ことがわかる。

また21世紀の100年間については、GISS-EHで約2.0°C、MRI-CGCM2.3.2とNCAR-PCMで約2.5°C、MIROC3.2 (Medres)で約3.5°Cの上昇を示しており、上昇幅は20世紀の2.5倍から4.7倍ほど大きく予測している。変化傾向はどのモデルも例外なく単調増加となっており、20世紀に比べてアンサンブル平均からのずれとしての内部変動は少なく、地上気温は

温室効果ガスの増加という外部強制の下で一貫した時間変化を示すことが確認された。

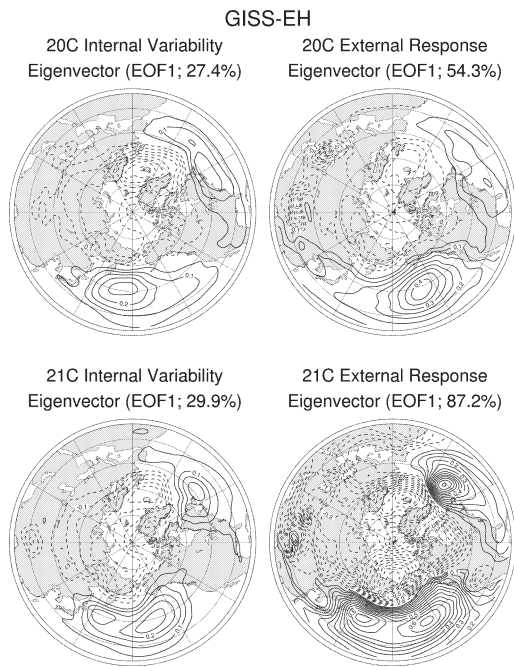
### 3.3 内部変動と外部強制応答

第5図から第12図は、10年スケールのSLP場の内部変動と外部強制応答それぞれにおけるEOF1の空間分布と時系列を示している。空間分布図は左側が内部変動、右側が外部強制応答による分布であり、上段は20世紀、下段は21世紀である。

GISS-EH (第5, 6図)を見ると、内部変動においては20世紀, 21世紀ともにAOパターンとなった。外部強制応答によるEOF1も同様にAOに似た構造が

再現されたが、内部変動に比べ寄与率が高くなっており、特に21世紀ではAOパターンが87.2%という非常に高い割合を占めている。スコア時系列を見ると、外部強制応答においては観測されたAOIの長期変動傾向と1970年以降はおおむね一致しているが、それ以前は再現できていない。内部変動については、各メンバーは独立と見なせるため、当然ながらメンバー間の時系列にはほとんど相関がない。1970年以前の内部変動による振幅は外部強制応答のそれよりも大きく、20世紀半ばまでの10年スケールのAOの変動は内部変動である可能性が高いと思われる。21世紀になると温室効果ガスの増加という外部強制による影響なのかは定かではないが、外力応答に対するAOIの単調増加が見られた。しかしながら、そこに重なる内部変動の振幅も十分大きい。

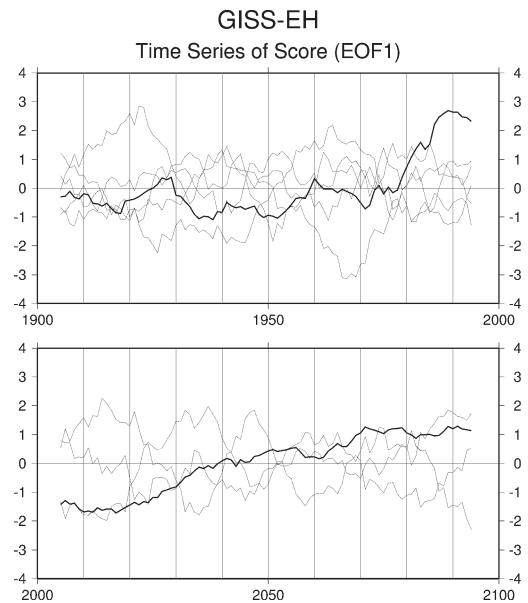
MIROC3.2 (Medres) (第7, 8図)による解析結果からは、内部変動は20世紀, 21世紀ともに極域の負偏差, 大西洋, 太平洋の正偏差の位置からAOに特徴的な循環が現れたことがわかる。一方で外部強制応答はというと21世紀では寄与率が86.0%のAOパターンが再現されたが、20世紀はAOパターンとは言いがたい結果となった。AOパターンとなった21世



第5図 GISS-EHによる北半球(北緯20度以北)の年平均SLPにおける10年スケールのEOF1に対する空間分布. カッコ内は寄与率, コンター間隔は0.05 hPaである. 図はそれぞれ, 左上が20世紀の内部変動, 右上が20世紀の外部強制応答, 左下が21世紀の内部変動, 右下が21世紀の外部強制応答による空間分布を示す.

紀の外力応答によるEOF1のスコア時系列はGISS-EHと同様に単調増加を示し, そこに同程度の十分大きな内部変動の振幅が重なっている.

MRI-CGCM2.3.2 (第9, 10図)も内部変動のパターンは同様に20世紀, 21世紀ともに観測されるAOによく似たものとなっている. 外部強制応答のパターンは20世紀においてはAOに似た環状パターンであり, Yukimoto and Kodera (2005)と同様の結果である. 21世紀になると, 太平洋全域は負の偏差となりAOパターンは崩れてしまう. 一方で20世紀の外力応答のAOの時系列を見てみると, 1970年代以降の上昇トレンド以外は再現できていない. さらにYukimoto and Kodera (2005)によると, この再現できた1970年代以降の上昇トレンドも観測されたAOに比べればその振幅は3分の1程度で, 内部変動の振幅をこれに足し合わせることで観測された振幅に匹敵すると述べられている. つまり, 観測された10年ス



第6図 GISS-EHによる北半球(北緯20度以北)の年平均SLPにおける10年スケールのEOF1に対する時系列. 細線は実験の各メンバー(内部変動), 太線はアンサンブル平均(外部強制応答)を示す. 上は20世紀, 下は21世紀である.

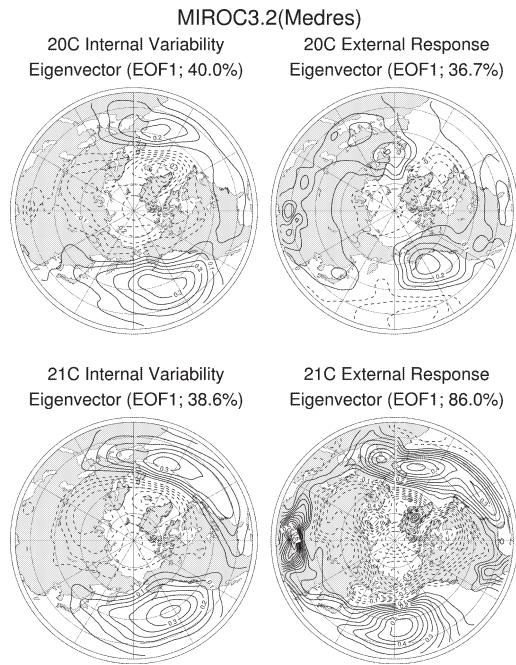
ケールのAOIは外力応答だけでは説明できないことが推測される.

NCAR-PCM (第11, 12図)においては, 他のモデルに共通して内部変動は20世紀と21世紀ともにAOパターンとなる. 外部強制応答の20世紀ははっきりとAOパターンが現れたが, 21世紀はAOの構造は見られなくなっている. また外力応答のスコア時系列を見ると, 20世紀の変動は観測されたAOIとは全く異なるものであることが確認され, 内部変動としてのAOの重要性が示唆された.

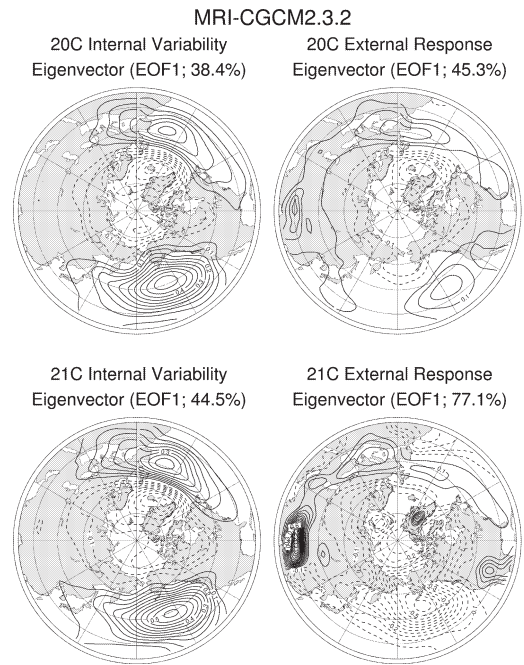
### 3.4 モデル平均のAOI

第13図は10種類のモデルのアンサンブル平均とそれを差し引いた残差に見られるEOF1のスコア時系列の図である.

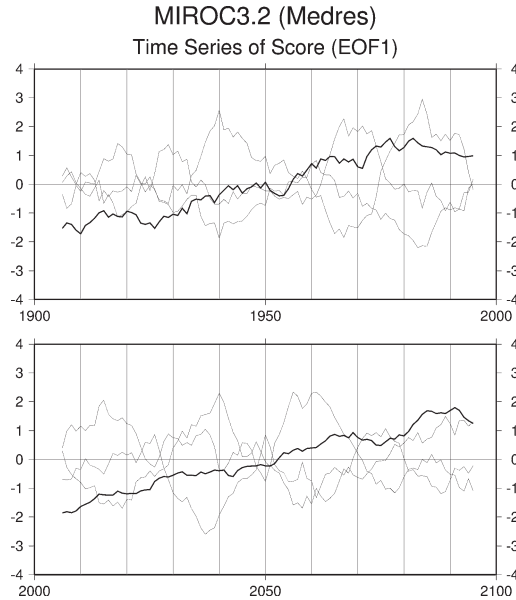
空間分布の図は省略したが, アンサンブル平均からの残差におけるEOF1には, 20世紀, 21世紀ともに共通して極域の負偏差と大西洋・太平洋の正偏差により観測に見られるようなAOの構造が再現された. 一方でモデルのアンサンブル平均も20世紀, 21世紀でAOパターンとなった. 特に21世紀はEOF1の寄与率が88.1%と非常に高い値を示した.



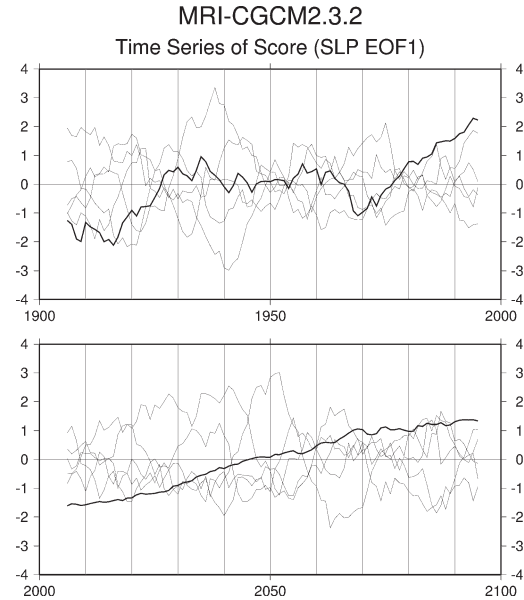
第7図 第5図と同様。ただしモデルはMIROC3.2 (Medres) である。



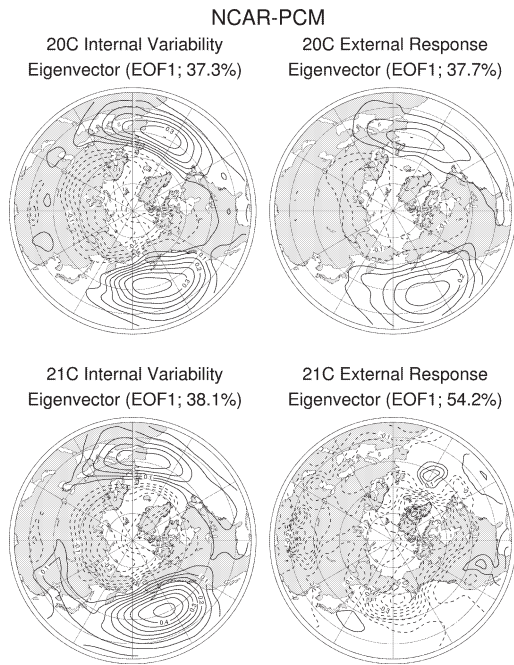
第9図 第5図と同様。ただしモデルはMRI-CGCM2.3.2である。



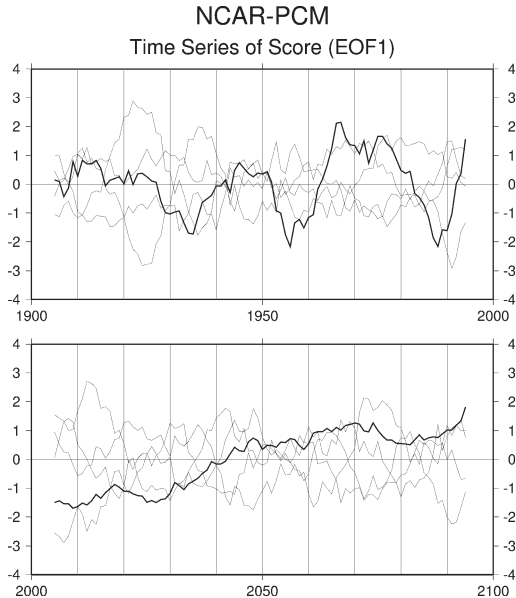
第8図 第6図と同様。ただしモデルはMIROC3.2 (Medres) である。



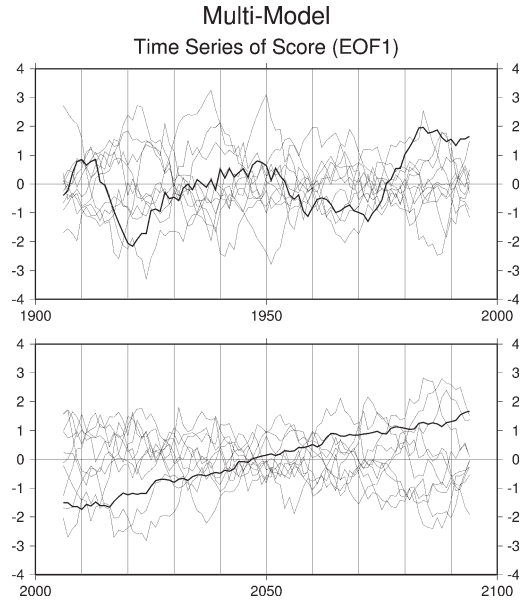
第10図 第6図と同様。ただしモデルはMRI-CGCM2.3.2である。



第11図 第5図と同様。ただしモデルはNCAR-PCMである。



第12図 第6図と同様。ただしモデルはNCAR-PCMである。



第13図 10種類のIPCC AR4モデル群による北半球（北緯20度以北）の年平均SLPにおける10年スケールのEOF1に対する時系列。細線は各モデルにおけるモデルのアンサンブル平均からの残差、太線はモデルのアンサンブル平均を示す。上は20世紀、下は21世紀である。

尚、第13図のAOIの時系列を見るとモデルのアンサンブル平均は、1930年頃から1950年頃までの緩やかな上昇、その後1970年頃まで下降トレンドを示した。20世紀末には大きな上昇トレンドとなり、その上昇トレンドは1980年代前半で止まっている。観測に見られるAOIを完全には再現できていないことがわかる。21世紀になると、モデルのアンサンブル平均が示すAOIは単調増加となった。一方でアンサンブル平均からの残差が示すAOIはモデル間で全く異なる変動となり、これはAOの予測の難しさを示唆する結果である。

#### 4. まとめと考察

IPCCのAR4モデル群における20世紀の冬平均SLP場のEOF1の構造は、北極域で負偏差、大西洋と太平洋で正偏差となり例外なくAOパターンとなったが、現実のスコア時系列を完全に再現しているモデルは1つもなかった。

それぞれのモデルは20世紀に観測された全球平均地上気温の数十年規模のトレンドや変化量をよく再現し



た。21世紀の変化傾向はどれも単調増加を示し、アンサンブル平均からのずれとしての内部変動は十分に小さいことが確認できた。

また、10年スケール変動について内部変動と外部強制応答に分離して解析した結果、内部変動に見られるEOF1の構造は20世紀と21世紀ともに共通してAOパターンとなる一方で、外部強制応答のパターンはモデル間や現在気候と将来気候で大きく異なることが示された。外部強制応答がAOの構造とならない理由に関しては、本研究の結果だけからでは説明が難しい。Shindell *et al.* (1999) は、二酸化炭素倍増に対するAOの応答を調べたGISSモデルの実験において、モデルが成層圏を十分な高さまで表現することが重要であることを示唆している。今回使用したモデルの中で最も高くまで成層圏を表現しているのはGISS-EHであり、唯一外部強制応答が20世紀、21世紀ともにAOに似たパターンになったのもこのモデルであった。これは非常に興味深い結果である。一方で、将来気候の外部強制応答のEOF1の寄与率が現在気候のその約1.5倍から2倍程度あることが見て取れる。これは将来気候の外部強制応答は現在気候に比べ単調であることを示し、そこからその循環パターンは一意的に決まってくるのではないかと考えられる。

スコア時系列においては、外部強制応答の変動が20世紀末から21世紀末にかけて増加トレンドを示すモデルが多く見られた。しかしながら、20世紀の外部強制応答のEOF1がAOを再現する場合でも、そのAOI時系列と観測とが一致しないことや、それに重なる内部変動の振幅が十分大きいことから、AOはその大部分が内部力学で生じた自然変動であると見なすことができる。冒頭に記述したように10年規模の長期スケールのAOが外部強制力に応じて変動するという先行研究が多く見られるが、本研究では内部変動の寄与も決して無視できないほど大きいことが示された。ローパスフィルタで長期スケールを取り出すだけでなく、アンサンブル平均のランを差し引くという手法で外部強制力を除去したAOIの評価により、先行研究とは異なる結果が得られたと考えている。一方で、20世紀の外力応答のEOF1にAOの構造が現れた3種類のモデルのうち2種類のAOIが、観測に見られるような20世紀末の増加トレンドを示した点には注意しなければならない。このことが偶然の一致でないならば、外力応答の寄与も完全には無視できないであろう。

最後に全モデルのアンサンブル平均とそこからの残

差についてEOF解析を行ったところ、両者のEOF1の構造は共にAOパターンとなり、アンサンブル平均に見られるAOIの時系列は20世紀の観測を上手く再現できていないことが確認された。21世紀においてはモデルのアンサンブル平均が示すAOIは単調増加トレンドを示す一方で、そのアンサンブル平均からの残差が示す変動はそのトレンドと同程度の振幅をもち、モデル間で全く異なる変動となることが見て取れた。モデル間の予測のばらつきが大きいということは、予測が極めて困難な現象であることを示唆しており、それはAOがカオス的に変動する内部変動であるからで、前段落と同様の結論となった。

本研究の結果、モデルが再現する地上気温は、外部強制に反応して観測とよく一致していたが、一方でAOIは観測を再現できず、それ故AOの10年スケールにおける変動の大部分が大気の純粋な内部変動により説明できると考えられた。Tanaka (2003) では、順庄大気大循環モデルによりAOが再現できることが示され、その力学的な成因として、Tanaka and Matsueda (2005) において、AOが外力の構造とは無関係に、特異固有モードとして任意のタイムスケールで自然励起されると提唱しており、今回の結果に矛盾しない。

## 5. 結論

本研究ではIPCCのAR4で使用された10種類の気候海洋結合モデルを用いて20世紀、21世紀の地球温暖化時に見られるAOの解析を行った。また10年スケールの変動についてアンサンブルメンバーが20世紀、21世紀ともに十分揃っている4種類のモデルのデータセットを使用し、AOを内部変動と外部強制に対する応答に分離して解析した。

21世紀のSRES-A1Bシナリオのもとでの外部強制応答に対するEOF1のスコア時系列の増加など、地球温暖化に伴う中高緯度の気候変化と大気の長期変動にはよい対応が見られたが、その空間パターンはモデル間や、現在気候と将来気候で大きく異なった。また20世紀にモデルが再現した地上気温は外力応答に対応して観測をよく表現する一方で、AOIは完全に観測を再現できてない部分もある。これらは観測されたAOIの10年スケールの長期変動が外部強制応答でなく、大気の内部変動に大きく寄与していることを示しており、AOの将来予測にはまだ多くの解明すべき課題が残されていることが示唆された。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、筑波大学の本田恭子氏には技術支援において大変お世話になり、心より感謝しております。また気象研究所の松枝未遠氏、筑波大学生命環境科学研究科の近藤圭一氏には研究を進めるにあたり数多くの貴重なアドバイスを、御指導をして頂きました。ここに誠意を表します。

## 参 考 文 献

- Allan, R. J. and T. J. Ansell, 2006 : A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2) : 1850-2004. *J. Climate*, **19**, 5816-5842.
- Brohan, P., J. J. Kennedy, I. Harris, S. F. B. Tett and P. D. Jones, 2006 : Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes : A new data set from 1850. *J. Geophys. Res.*, **111**, D12106, doi : 10.1029/2005JD006548.
- Déqué, M., C. Drevet, A. Braun and D. Cariolle, 1994 : The ARPEGE/IFS atmosphere model : A contribution to the French community climate modelling. *Clim. Dyn.*, **10**, 249-266.
- Flato, G. M. and G. J. Boer, 2001 : Warming asymmetry in climate change simulations. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 195-198.
- Galini, V. Ya., E. M. Volodin and S. P. Smyshlyaev, 2003 : Atmospheric general circulation model of INM RAS with ozone dynamics. *Russ. Meteor. Hydrol.*, **5**, 13-22.
- Hansen, J., M. Sato, L. Nazarenko, R. Ruedy, A. Lacis, D. Koch, I. Tegen, T. Hall, D. Shindell, B. Santer, P. Stone, T. Novakov, L. Thomason, R. Wang, Y. Wang, D. Jacob, S. Hollandsworth, L. Bishop, J. Logan, A. Thompson, R. Stolarski, J. Lean, R. Willson, S. Levitus, J. Antonov, N. Rayner, D. Parker and J. Christy, 2002 : Climate forcings in Goddard Institute for Space Studies SI2000 simulations. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4347, doi : 10.1029/2001JD001143.
- Hasumi, H. and S. Emori, 2004 : K-1 coupled GCM (MIROC) description. Tech. Rep., Cent. for Clim. Syst. Res. (CCSR), Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan.
- Hori, M. E., D. Nohara and H. L. Tanaka, 2007 : Influence of Arctic Oscillation towards the Northern Hemisphere surface temperature variability under the global warming scenario. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 847-859.
- Hourdin, F., I. Musat, S. Bony, P. Braconnot, F. Codron, J.-L. Dufresne, L. Fairhead, M.-A. Filiberti, P. Friedlingstein, J.-Y. Grandpeix, G. Krinner, P. LeVan, Z.-X. Li and F. Lott, 2006 : The LMDZ4 general circulation model : Climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection. *Clim. Dyn.*, **27**, 787-813, doi : 10.1007/s00382-006-0158-0.
- Meehl, G. A., W. M. Washington, C. M. Ammann, J. M. Arblaster, T. M. L. Wigley and C. Tebaldi, 2004 : Combinations of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century climate. *J. Climate*, **17**, 3721-3727.
- Miller, R. L., G. A. Schmidt and D. T. Shindell, 2006 : Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models. *J. Geophys. Res.*, **111**, D18101, doi : 10.1029/2005JD006323.
- Pope, V. D., M. L. Gallani, P. R. Rowntree and R. A. Stratton, 2000 : The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model : HadAM3. *Clim. Dyn.*, **16**, 123-146, doi : 10.1007/s00382005000.
- Russell, G. L., J. R. Miller and D. Rind, 1995 : A coupled atmosphere-ocean model for transient climate change studies. *Atmos.-Ocean*, **33**, 683-730.
- Scinocca, J. F. and N. A. McFarlane, 2004 : The variability of modeled tropical precipitation. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1993-2015.
- Shindell, D. T., R. L. Miller, G. A. Schmidt and L. Pandolfo, 1999 : Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing. *Nature*, **399**, 452-455.
- Sun, S. and R. Bleck, 2006 : Multi-century simulations with the coupled GISS-HYCOM climate model : Control experiments. *Clim. Dyn.*, **26**, 407-428, doi : 10.1007/s00382-005-0091-7.
- 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.
- 田中 博, 2007 : 偏西風の気象学. 成山堂, 174 pp.
- 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.
- Yukimoto, S. and K. Kodera, 2005 : Interdecadal Arctic Oscillation in twentieth century climate simulations

viewed as internal variability and response to external forcing. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03707, doi : 10.1029/2004 GL021870.  
Yukimoto, S., A. Noda, T. Uchiyama, S. Kusunoki and

A. Kitoh, 2006 : Climate changes of the twentieth through twenty-first centuries simulated by the MRI-CGCM2.3. *Pap. Meteor. Geophys.*, **56**, 9-24.

---

## Data Analysis of Arctic Oscillation Simulated by Global Warming Prediction Models

Masahiro OHASHI\* and H. L. TANAKA\*\*

\* *Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan.*

\*\* *Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8577, Japan.*

(Received 11 April 2008 ; Accepted 16 June 2009)

---