

NLBMを用いた北半球大気循環の偏差場形成

安井 壯一郎 (北大・環境科学院)・渡部 雅浩 (東大・気候システム)

1. はじめに

北半球中高緯度における大気循環変動の力学的形成メカニズムを明らかにするため、これまで多くの研究がなされ、その形成要因を「大気の内外部プロセス」と「外部からの強制に対する応答」の双方の見方で説明する試みがなされてきた。外部強制として働く熱帯の海洋や対流活動の変動は、中高緯度大気の大気長周期変動に影響を及ぼしていることは間違いないが、その出現頻度を変化させるという間接的な役割をし、直接的には中高緯度の自律的な内部変動が重要であるという指摘がある (e.g. Horel and Mechoso 1988)。内部要因と外部要因をきちんと切り分けた上で、加熱変動の役割を捉え、どこの加熱強制が大気変動のどのような形成過程における振舞いを特徴付けるのか理解することは重要である。

加熱強制に対する大気応答の研究において、AGCMのような非断熱過程が系の内部変数である場合、降水の予測可能性が低ければ、そこから生成される非断熱加熱の誤差が大きくなり、加熱に対する大気の特性を議論することは難しい。Sugi et al. (1997) は、AGCMを用いて SST が完全に予測された場合の降水の潜在的予測可能性を計算した結果、熱帯太平洋大西洋域の予測可能性は高いが、全球的にみると非常に低いことを示している。そのようなことから加熱強制が循環場へ与える影響をより明快に捉えるためには、誤差の小さい非断熱加熱を外部から直接与えることが有効であると考える。

そこで本研究では、非断熱加熱を内部変数としない、球面上の乾燥大気プリミティブ方程式系で構成されるモデル (以下、NLBM) を用いて、現実的な加熱強制を与えたアンサンブル長期積分を行い、北半球中高緯度における大気長周期変動の振舞いを調べることで加熱変動の役割を明らかにすることを目的とする。

2. モデルによる数値実験

2.1 nonlinear baroclinic model NLBM

NLBMは、CCSR/NIES/FRCGC AGCMの力学に準拠する乾燥大気に関する球面上のプリミティブ

方程式からなる非線形力学コアである。空間解像度は T42L20 である。消散過程は 4 次の減衰時間 1 日の粘性拡散で与え、大気上層にレイリー摩擦を加えた。

地形および非断熱加熱を外部強制として与える。非断熱加熱は JRA-25 再解析データの月平均値から作成し、その構成要素は対流加熱、大規模凝結加熱、短波放射加熱、長波放射加熱からなる。顕熱加熱は地形に強く依存するため、再解析データを用いるよりも、月平均気候値で変化する最下層温度場への強い緩和 (緩和時間 3 時間)、および Mellor-Yamada level 2.0 乱流クロージャで顕熱拡散を表現した。運動量輸送に関しても、地表応力フラックス、乱流クロージャで計算される。また、月平均気候値で変化する東西平均した温度場へ 25 日で緩和するような Newton 冷却を加えた。

2.2 実験設定

加熱変動が大気循環変動に与える影響を調べるため、下記の設定で実験を行った。

- CLIM ... 月平均気候値の非断熱加熱を与える。
- HIST ... 1979/1-2007/12 の非断熱加熱を与える。

CLIM では、加熱の変動によらない大気の内外部力学のみの変動の特徴をみることができ、HIST は CLIM と比較することで加熱変動が循環変動に与える効果をみることができる。CLIM と HIST の積分期間は 29 年 (10585 日) で、初期状態の異なる 10 メンバーのアンサンブル実験を行った。与える非断熱加熱は月平均値を daily 単位に線形内挿し、31 日の移動平均をかけたデータを用い、HIST に関しては 10 年規模変動により生じる技術的なエラーを避けるため、10 年以上の低周波成分を取り除いた。

3. NLBM における冬季偏差場と潜在的予測可能性

NLBM における北半球冬季の循環偏差場を確認するため、10 日の low pass filter をかけた長周期成分とその残差として得られる短周期成分に分け、500hPa 高度場の標準偏差をそれぞれ図 1、2 に示す。短周期成分に関しては多少帯状性が強いが、

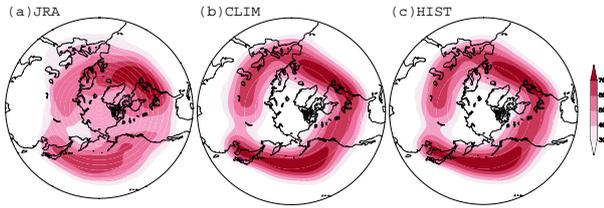


図 1: DJF 平均した 500hPa における短周期成分高度場の標準偏差 [m] (a)JRA (b)CLIM (c)HIST

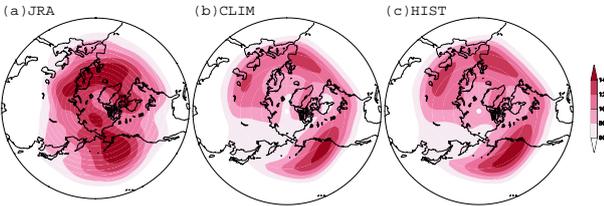


図 2: DJF 平均した 500hPa における長周期成分高度場の標準偏差 [m] (a)JRA (b)CLIM (c)HIST

表 1: 北緯 20 度以北で領域平均した 500hPa 高度場の標準偏差。単位は m。

| | JRA | CLIM | HIST |
|-------|------|------|------|
| 短周期成分 | 41.5 | 38.8 | 39.0 |
| 長周期成分 | 89.6 | 73.3 | 78.0 |

太平洋大西洋域のストームトラックをある程度再現できている。長周期成分に関しては卓越領域は再現できているが、高緯度における振幅を過小評価している。

次に加熱の変動が偏差場の振幅に与える影響をみるため、500hPa 高度場の標準偏差を北緯 20 度以北で領域平均した結果を表 1 に示す。長周期成分について CLIM より HIST の方が大きいことから、加熱の変動が長周期成分の振幅を強めていることがわかる。これが長周期変動に対してのどのような側面への影響の表れであるかという疑問に関しては後述するとして、月平均で変動する加熱からは短周期成分への影響がないことから、長周期成分の振幅の増大は加熱変動の直接的な影響によるものと解釈できる。

次節で冬季卓越変動について詳しく調べる前に、非断熱加熱に強制される 500hPa 高度場の潜在的予測可能性について次のような SN 比を指標に調べた結果を図 3 に示す。

$$P = \frac{\sigma_{EM}^2 - \frac{1}{n}\sigma_{INT}^2}{\sigma_{TOT}^2}$$

ここで、 σ_{EM}^2 はアンサンブル平均の分散、 σ_{INT}^2 はアンサンブルメンバーのスプレッド、 σ_{TOT}^2 は全分散、 n はメンバー数である。

CLIM は加熱強制を加えていないため内部変動による非線形性が強く潜在的予測可能性はほとんどない。一方、HIST は加熱強制によるシグナルが強く表れ、熱帯で帯状性が強くその潜在的予測可能性は 80 % と高い。さらに、中高緯度でも 30 % 以上の地域がみられる。AGCM を用いた SST 強制に対する 500hPa 高度場の潜在的予測可能性について同様の解析を行った Sugi et al.(1997) の結果によると、北緯 30 度以北で 20 % 以下であることから、NLBM を用いた非断熱加熱に強制される潜在的予測可能性は AGCM に比べ中高緯度で高くなることが示される。

外力に対する大気変動の対応関係をより明白に示すことができると言える。

4. NLBM における冬季卓越変動

JRA-25 再解析、CLIM、HIST について月平均 500hPa 高度場に対する EOF 解析を行った。領域を黒枠で囲まれた北太平洋域 (120E-60W, 20N-90N) と北大西洋域 (90W-30E, 20N-90N) にとった結果、CLIM と HIST でそれぞれの領域において卓越する PNA、NAO を第 1 モードで表現することができた (図 4、5)。CLIM で再現できることから、中高緯度大気の自律的な内部変動のみで長周期変動の起源を説明することができる。また CLIM より HIST の方が偏差が強いことから加熱変動の影響が見て取れる。

PNA に伴う短周期擾乱と非断熱加熱の変動をみるために、月平均した短周期成分 Z500 の RMS と鉛直平均した非断熱加熱を HIST の PNA スコア時系数に回帰した結果を図 6、7 に示す。図 6 から、PNA の太平洋域にみられる低気圧性循環に伴いストームトラックが南にシフトしていることがわかる。図 7 から、El Niño (La Niña) 時の加熱強制が正 (負) の PNA に影響を与えていることが示唆される。これは先行研究に整合的な結果である。

以上のことから、図 7 のような加熱偏差が PNA の変動を強めていると言えるが、加熱強制によって加わるプラスは単純な増加という理解ではなく、具体的にどのような過程に影響を及ぼしているか調べる必要がある。

EOF 解析から得た北太平洋域と北大西洋域の固有ベクトルに対し、長周期成分 Z500 を射影した daily の PNA、NAO に関する指標を求め、その指

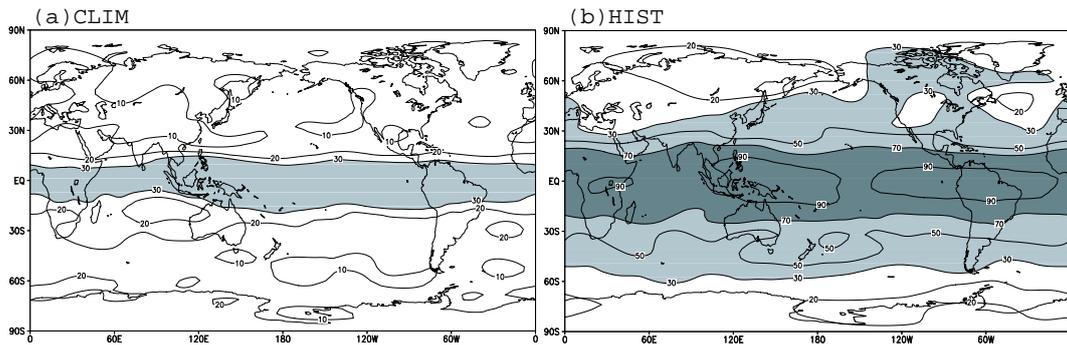


図 3: DJF における月平均 500hPa 高度場の潜在的予測可能性 [%]。30 %以上に淡影、70 %以上に濃影。(a)CLIM (b)HIST

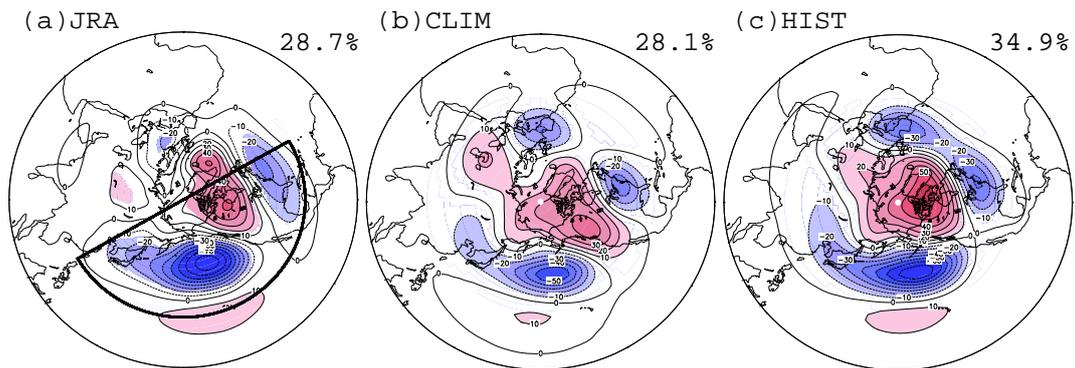


図 4: 月平均 500hPa 高度場の EOF 第 1 モード。領域は黒枠 (120E-60W, 20N-90N) で、PC1 にもとの場を線形回帰した結果 [m](a)JRA 期間は 1980 ~ 2004 年の DJF。(b)CLIM 25 年分の DJF における 10 メンバーに対して計算。(c)HIST 1980 ~ 2004 年の DJF における 10 メンバーに対して計算。10m 以上 (-10m 以下) にカラーを、ただし 95 %の信頼限界で有意な場所のみ塗った。

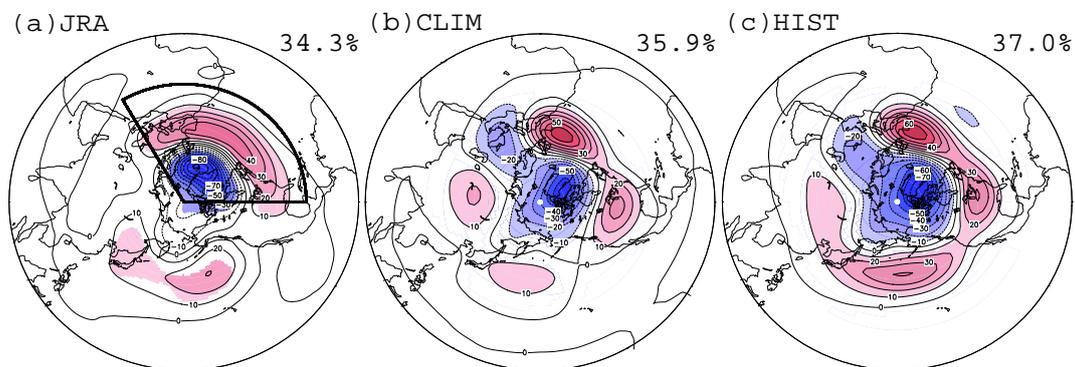


図 5: 図 4 と同様。ただし、領域は黒枠の北大西洋 (90W-30E, 20N-90N)

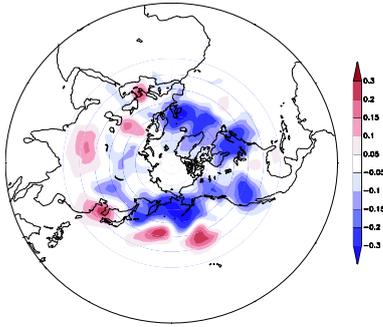


図 6: HIST の PNA スコア時系列に月平均した短周期成分 Z500 の RMS を線形回帰した結果 [m]

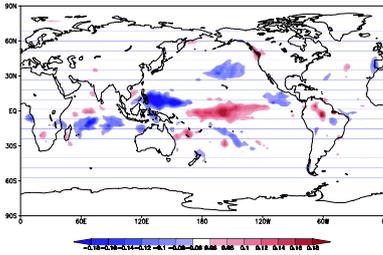


図 7: HIST の PNA スコア時系列に月平均した鉛直平均非断熱加熱を線形回帰した結果 [K/dy]

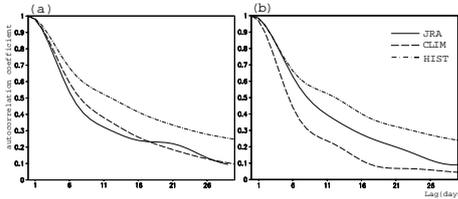


図 9: daily の PNA、NAO の指標に対する自己相関係数。(a) が NAO。(b) が PNA。

標に対し自己相関係数を計算した結果、図 8 のようになった。CLIM より HIST の方が e-folding time が大きいことから、加熱強制が長周期変動の持続性を増大させるような働きをしていることがわかる。

CLIM、HIST について PNA と NAO のスコア時系列を図 8 に示す。HIST はメンバー間の傾向がそろいシグナルが大きく表れていることから、加熱変動が年々変動に強制を与えていることがわかる。内部変動のみの CLIM について注目すべきところは、アンサンブル平均は 0 に漸近するはずであり、アンサンブル平均からの各メンバー間のばらつき (スプレッド) は内部力学に起因した変動の大きさに比例することになることである。スプレッドの時間平均は CLIM で 565.3、HIST で 674.9 であり、内部変動にも加熱強制の影響が表

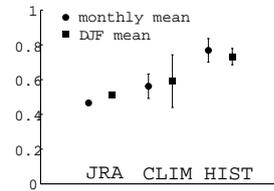


図 10: PNA スコア時系列と NAO スコア時系列の逆相関の強さ。 が月平均時系列に対して、 が DJF 平均時系列に対して計算した結果。

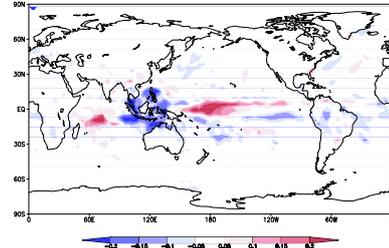


図 11: PNA と NAO の勢力が相関的に強い月における鉛直平均非断熱加熱の合成図 [K/dy]。

れていることがわかる。

次に、PNA と NAO のスコア時系列を比較してみると、それぞれの年々変動に逆相関の関係がみられる。これは、Honda et al.(2001) により提唱されている対流圏で等価順圧的な PNA と NAO が結合し下層へ反映されるアリューシャン・アイスランド両低気圧シーソー現象の表れであるが、この現象に対する加熱強制による観点からの考察を行う。詳しい結果は示さないが、CLIM で、PNA と NAO の勢力が相関的に強い月における daily のラグコンポジット解析を行ったところ、負 (正) の PNA と正 (負) の NAO が極を中心に同位相で成長していることが確認できた。基本的には中高緯度の内部力学でその結合の起源を説明できそうだが、加熱変動によってより連動していることが図 10 からわかる。図 10 は、JRA、CLIM、HIST について PNA と NAO の PC 時系列の逆相関の強さを示した結果である。どのような加熱強制が影響しているか調べるために、HIST の PNA スコア時系数から NAO スコア時系数を引き、1 標準偏差を越えた月における加熱偏差の合成図を図 11 に示す。

これまでの結果から、El Niño 時に持続性の長い PNA が出現することにより、極を中心に NAO と連動しやすくなることが予測される。

5. まとめ

NLBM を用いて、月平均気候値の非断熱加熱を

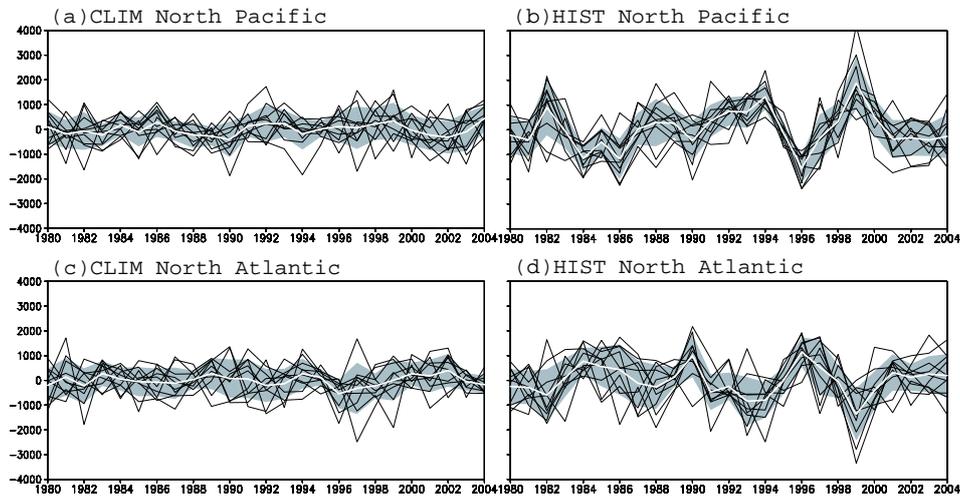


図 8: PC 時系列。領域を北太平洋 (120E-60W,20N-90N) にとった (a)CLIM と (b)HIST の結果。領域を北大西洋 (90W-30E,20N-90N) にとった (c)CLIM と (d)HIST の結果。黒線が各メンバーの時系列。白抜きがアンサンブル平均。塗りつぶしがスプレッド。

与えた CLIM と 1979/1 ~ 2007/12 の現実的な非断熱加熱を与えた HIST のアンサンブル実験を行った。CLIM は加熱の変動によらない大気の内力学のみの変動の特徴をみることができ、HIST は CLIM と比較することで加熱変動が循環変動に与える特徴をみることができる。SST に強制される AGCM よりも非断熱加熱に強制される NLBM の方が北半球中高緯度における 500hPa 高度場の潜在的予測可能性が高いことを示し、非断熱加熱変動による強制が冬季卓越変動に対してどのような影響を与えているか調べた。PNA や NAO などの長周期変動の起源は中高緯度大気の自律的な内部変動のみで説明でき、加熱変動は長周期変動の年々変動への強制や内力学を起源とする変動を強めるという間接的な役割を担っていることを示した。アリューシャン・アイスランド両低気圧シーソー現象で説明されている PNA と NAO の結合も本質的には内力学が重要であるが、加熱変動の影響でより連動することを示した。El Niño 時の加熱偏差による影響から、持続性の長い PNA が出現することにより、極を中心に NAO と連動しやすくなる可能性が指摘される。

最後に、NLBM、いわゆる非線形力学コアは Hoskins and Rodwell(1995) をきっかけに大気循環変動の研究で用いられ、外部強制を診断するためのツールとして活用されてきた (e.g. Jin and Hoskins 1995)。しかしまだまだ手軽なモデルとして普及しているとは言えず、非線形力学コアが数値実験の選択肢として挙げられるように、その魅力を少し

でも示していればと思う。

謝 辞

図の作成には GrADS を用いました。

参考文献

- Jin, F., and B. J. Hoskins, 1995 : The Direct Response to Tropical Heating in a Baroclinic Atmosphere. *J. Atmos. Sci* , **52** , 307–319.
- Honda, M., H. Nakamura, J. Ukita, I. Kousaka, and K. Takeuchi, 2001 : Interannual Seesaw between the Aleutian and Icelandic Lows. Part I: Seasonal Dependence and Life Cycle. *J. Climate* , **14** , 1029–1042.
- Horel, J., D., and C. R. Mechoso, 1988 : Observed and Simulated Intraseasonal Variability of the Wintertime Planetary Circulation. *J. Climate* , **1** , 582–599.
- Hoskins, B. J., and M. J. Rodwell, 1995 : A Model of the Asian Summer Monsoon. Part I: The Global Scale. *J. Atmos. Sci* , **52** , 1329–1340.
- Sardeshmukh, P., D., and P. Sura, 2007 : Multi-scale Impacts of Variable Heating in Climate. *J. Climate* , **20** , 5677–5695.
- Sugi, M., R. Kawamura and N. Sato, 1997 : A Study of SST-force Variability and Potential Predictability of Seasonal Mean Fields using the JMA Global Model. *J. Meteor. Soc. Japan* , **75** , 717–736.