

大気海洋結合モデルに見られる PDO

森正人・木本昌秀・渡部雅浩・安中さやか・今田由紀子 (東大・気候システム)
石井正好 (気象研究所)・建部洋晶 (地球フロンティア)

1. はじめに

「21世紀気候変動予測革新プログラム」の一つの柱として、人為起源の温室効果ガスによる2030年程度までの近未来の気候変化を予測する試みが行われている (Motchizuki et al. 2010; 近本ほか 2009)。温室効果ガスの増加による近未来の気候の応答は排出シナリオやモデル依存性が比較的小さく (Stott and Kettleborough, 2002)、近未来の気候を精度よく予測するためには、全球的な温暖化シグナル (外部強制に対する応答) に加え、十年規模の時間スケールを持つ変動 (内部変動) の予測精度の向上が重要になる。

主要な内部変動の一つとして太平洋10年規模変動 (Pacific Decadal Oscillation, PDO; Mantua et al. 1997) が挙げられる。1977年頃を境に、北太平洋中部 (熱帯域) の水温が持続的な高温 (低温) 傾向から低温 (高温) 傾向に転じたことはよく知られている (e.g., Nitta and Yamada 1989; Trenberth 1990)。我々が近未来予測に用いる大気海洋結合モデル MIROC の中でも、これによく似た変動が自動的に現れる。温室効果ガスの濃度などの外部境界条件を産業革命以前に固定した長期積分実験から、太平洋域における低周波 SST (7年の low-pass filter で定義) の EOF を計算すると、中緯度域では中央太平洋で負偏差、そしてその周辺では正偏差といういわゆる馬蹄形のパターンが、熱帯域では ENSO に似た西太平洋を先端とする楔形の正偏差パターンが卓越モードとして現れ、これらは観測の PDO の特徴とよく似ている (森ほか 2009)。PDO の代表的な時間スケールは、9~12年、15~25年、50~70年など使用するデータや手法の違いによって幅があるが (Mantua and Hare, 2002)、MIROC の PDO は11年と19年にスペクトルピークを持ち (図省略)、周期も比較的観測に近い。

解析の結果、このモードの太平洋域における馬蹄形の変動は、大気のテレコネクションを介した熱帯からのリモートな強制によって形成される成分が大きいことが分かっている (森ほか 2009)。しかしながら、一方で、観測データ (Nakamura et al. 1997; Nakamura and Yamagata 1998) や他の結合

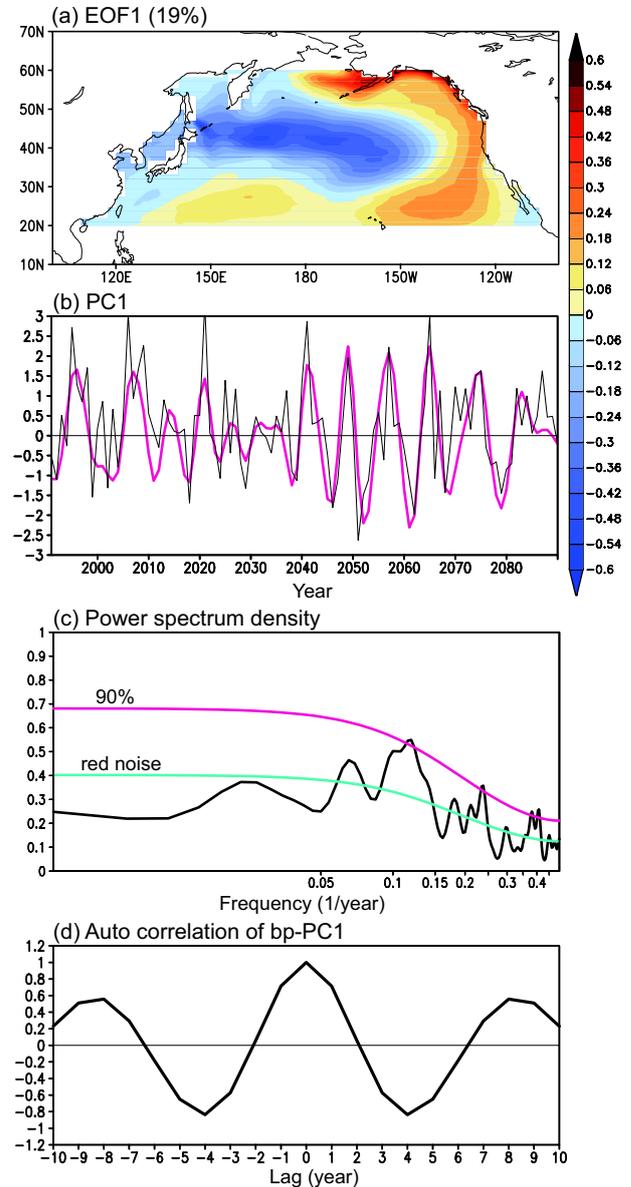


図 1: SST[K] の EOF 第 1 モードの (a) 空間パターンと、(b) 時係数 (黒線)。6年から12年の band-pass filter をほどこした SST の EOF 第 1 モードの時係数 (赤線)。EOF の計算領域は 100°E-70°W、20-60°N。(c)(b) で示した黒線と red noise のパワースペクトル、その 90% 信頼限界。(d)(b) で示した赤線の自己相関関数。

モデルを用いた実験 (e.g., Wu et al. 2003) で、中緯度域で閉じた10年規模変動/PDOの存在が指摘されている。以降で示されるように、MIROC

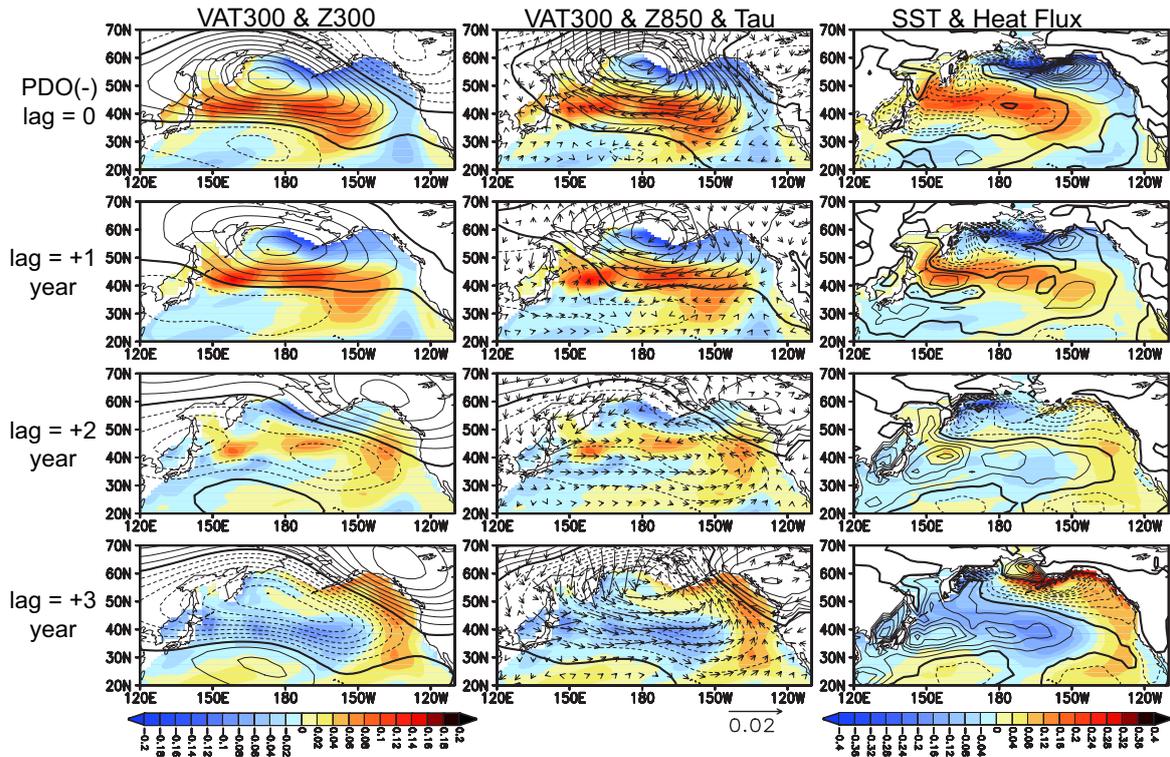


図 2: 図 1b の EOF の時係数 (赤線) と各種変数のラグ回帰係数分布。左; VAT300 偏差 (色、単位 K)、300hPa 高度場偏差 (等値線、間隔 2m)。中央; VAT300 偏差、850hPa 高度場偏差 (等値線、間隔 1m)、風応力 (ベクトル、単位 m/s)。右; SST 偏差 (色、単位 K)、潜熱・顕熱フラックス (等値線、間隔 1K/s)。ゼロ線を太線で、負値は点線で表される。

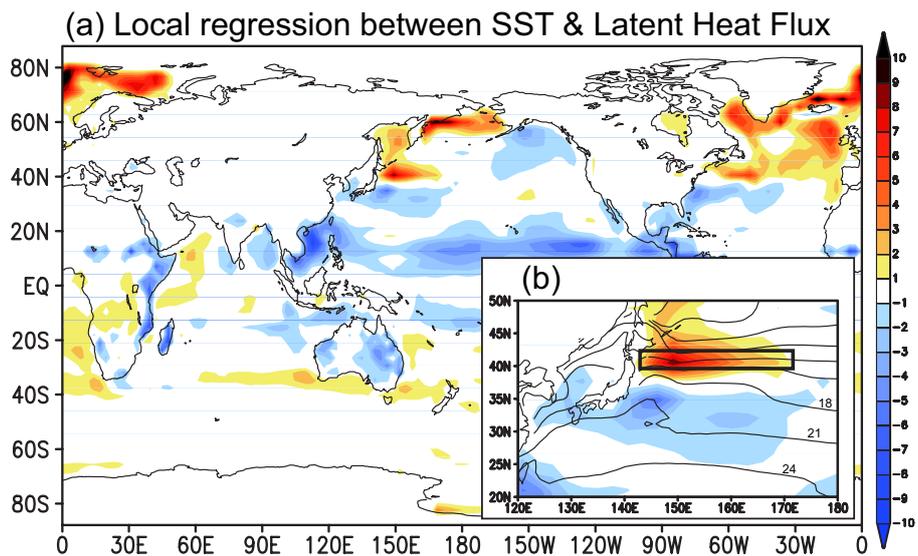


図 3: (a) SST と潜熱フラックスの局所的な回帰係数分布 [1/s]。(a) と同じ、ただし日本周辺を拡大している。等値線は SST の気候値 (間隔 3K)。O2A index の定義領域を黒太枠で示す。

にも、中緯度域に固有な PDO に似た 10 年規模変動が存在することが分かった。そこで本研究では、MIROC に現れる中緯度域に固有な 10 年規模変動のメカニズムを調べることを目的とする。特に、符合反転のメカニズムに注目して解析を行う。モデルに現れる 10 年規模変動 (PDO) の力学を明らかにすることは、予測可能性の向上や、現実の理解につながると期待される。

2. モデルと実験デザイン

使用したモデルは、東京大学気候システム研究センター・国立環境研究所・地球環境フロンティア研究センターが共同開発した大気海洋結合モデル(MIROC3.2)の中解像度版で、大気の解像度はT42L20、海洋は水平解像度約1度×1度の44層である。境界条件を産業革命以前の状態(1850年)に固定して約6000年の積分を行った後(コントロール実験:CTL)、太平洋熱帯域(100E-70W、15S-15N)の水・塩分を気候値へ緩和(10日の時定数)しながら約280年間の積分を行った。以下の解析には、最後の260年分(日平均データは70年分)の冬季(12、1、2月)のデータを用いる。

3. 結果

主要な卓越変動を同定するために、まずSSTのEOF解析が行われた(図1a-b)。熱帯域の変動の影響を取り除いたにも関わらず、第1モードとして北太平洋域にPDOと良く似た馬蹄形のパターンが現れる(図1a)。ただし、同領域で計算したCTL実験のEOF1(寄与率36%)とは若干パターンが異なっており、寄与率もそれより低い(森ほか2009)。時係数(図1b:黒線)のパワースペクトルは、約8年の周期に最も強いパワーを示す(図1c)。そこで、6年から12年のband-pass filterをほどこしたSSTについて再度EOFを計算したところ、同様のモードが同定された(図示せず、時係数は図1b:赤線)。このモードの周期はやはり約8年で(図1d)、これはCTLのPDOの周期(11年と19年)よりも短い。これらの結果は、熱帯起源のモードより変動(周期)は小さい(短い)ものの、中緯度域で閉じた力学で10年規模変動が生じていることを示している。

そこで、このモードがどのようなメカニズムで形成されるのかを調べるために、時係数をkeyにしたラグ回帰解析を行った¹。図2にlag 0(負の極性の極大)からlag+3年までの結果を示す(lag-4~lag-1年はlag 0~lag+3年の符合を逆転させたパターンになることに注意)。まずSST偏差と、0から300mで積算した水温偏差(VAT300)に注目すると、偏差が亜熱帯ジャイアと亜寒帯ジャイアに沿って、それぞれ時計回り・反時計回りに循環しているように見える。またそれに同期して、大気には等価順圧構造を持った、PNAに似た高度場偏差が現れ、時間とともに極性が反転している。lag

0では北太平洋で高気圧性偏差が、lag±4では低気圧性偏差が卓越しており、これはそれぞれジャイアのスピンドウン・スピニアップに対応している。これらの大気と海洋のコヒーレントな関係は、このモードが大気海洋相互作用によって形成されていることを示唆する。

大気にこれほど長いメモリは無く、熱帯からのリモートな強制も無いので、大気の循環偏差は中緯度域のSST偏差によって励起されていると想像される。そこで、どの場所で海洋が大気を強制するのか調べるために、SSTと潜熱フラックスの局所的な回帰係数分布が計算された(図3)。フラックスは上向きを正にとっているため、正(負)の回帰係数を持つ場所で海洋(大気)が大気(海洋)を暖めていることを意味する。太平洋では、日本の東海上とベーリング海に正の値の極大が存在し、日本の東海上の極大域は、モデルの気候学的なSSTの南北勾配が最も強い場所に対応している(図3b)。モデルでは黒潮の離岸位置が少し北へずれるので、場所が観測よりも若干北よりだが、この結果は観測データによる結果(Tanimoto et al. 2003)と整合的である。

そこで、この領域の海洋が大気にどのような循環偏差を強制するのか調べるために、海洋が大気を強制する指標(O2A indexと呼ぶ)を以下のように定義した。SST偏差と潜熱フラックス偏差をSSTフロント域(143-172°E, 40-43°N)で領域平均し、各平均値の符合が一致している時の潜熱フラックス偏差の平均値を指標とした。符合が一致しない時は欠損値として扱う。このO2A indexとSST偏差、300hPa高度場偏差、降水量偏差、300hPa面のストームトラック²との回帰係数分布を示したのが図4である。フロント域でSST偏差が正の時、北太平洋では負の高度場偏差が卓越する(図4a)。この波列パターンは正のPNAに似ており、ジェット気流が平年よりも強化・伸長されていることを示している。また、この高度場偏差に付随する波活動度フラックス(Takaya and Nakamura 2001)とその収束・発散は(図4b)、Rossby波束のソースが日本の下流の中央太平洋域に存在することを示している。この循環偏差に伴う西風(東風)偏差域ではストームの活動が活発化(不活発化)し、フロント域からその下流で降水活動が活発化している様子が分かる(図4c,d)。これらの結果は、

¹以降の解析では6年から12年のband-pass filterがほどこされたデータを用いる。

²10日以下の時間スケールを持つ高度場偏差の標準偏差で定義。

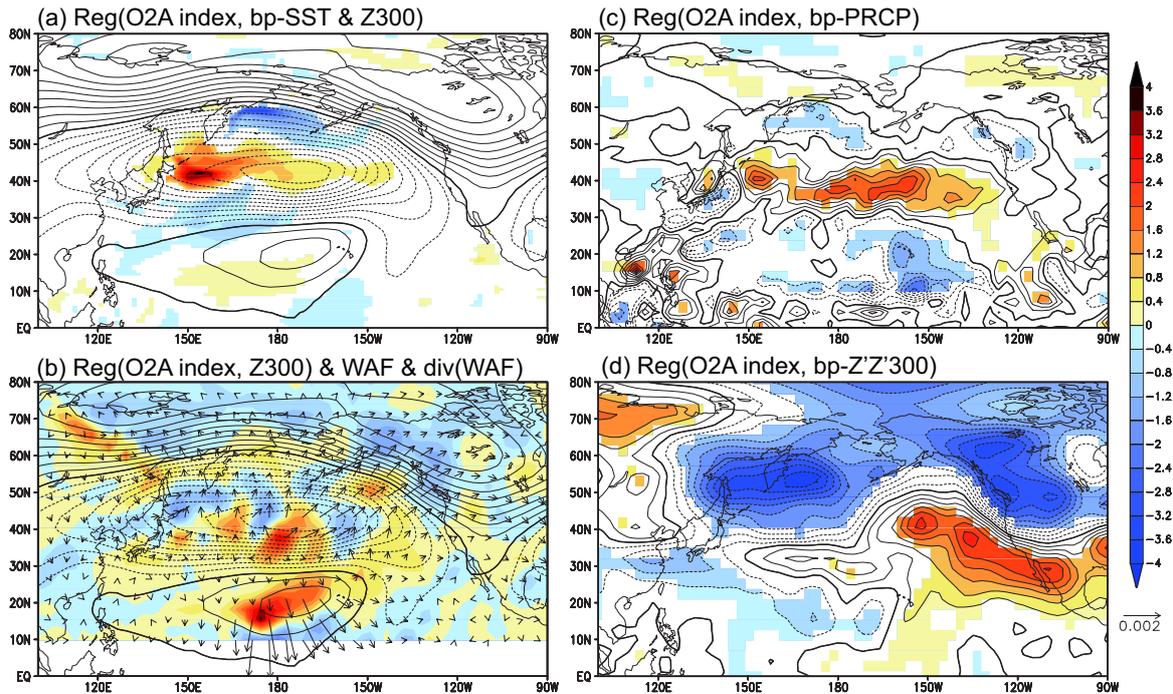


図 4: O2A index と各種変数のラグ回帰係数分布。(a) SST 偏差 (色、単位 $1 \times 10^{-1} \text{K}$)、300hPa 高度場偏差 (等値線、間隔 1m)。(b)(a) の高度場偏差に付随する波活動度フラックス (矢印、単位 $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) とその収束発散 (色、単位 $1 \times 10^{-9} \text{ms}^{-2}$)、(c) 降水量 (単位 $1 \times 10^{-6} \text{kgm}^{-2} \text{s}^{-1}$)、(d) 短周期の 300hPa 面高度場偏差の標準偏差 (単位 m)。ゼロ線を太線で、負値は点線で表される。回帰係数は、90%の信頼限界で有意な所のみ色が塗られている。

フロント上を通過する短周期擾乱が海から潜熱を受け取ることで活発化し、その下流で擾乱に伴う降水 (非断熱加熱) が北太平洋上に PNA-like な循環偏差を励起していることを示唆する。よって、海洋は傾圧擾乱の活動を介して大気を強制していると考えられる。

図 4(a) に示されたように、フロント域で SST 偏差が正の時、北太平洋では負の高度場偏差が卓越するが、潜熱フラックスを key にしているのだから、これは変化傾向を表している。図 2 の時間発展に戻ると、海洋が大気を強制している (SST 偏差と海面フラックスが同符号の) 場所が、lag+1、lag+2 の日本東海上の SST フロント域に見られる。よってこの時、海洋は傾圧擾乱を介して太平洋上に低気圧性偏差を強制していることを示唆される。実際に、この後 (lag+2、lag+3)、北太平洋上に高度場偏差は正から負へ符合を変える。この負の循環偏差はジャイアをスピニングさせ、中央太平洋の SST 偏差を正から負へ変化させていると考えられる。すなわちこれらの結果は、傾圧擾乱を介した大気と海洋の相互作用が、モードの符合を反転させていることを示唆している。

4. まとめと議論

熱帯域の水温・塩分を気候値へ緩和させた実験の結果、中緯度域で閉じた 10 年規模変動が存在し、それは大気海洋相互作用によって形成されていることが分かった。フロント上の SST 偏差が傾圧擾乱を介して大気の循環偏差の極性を変え、循環偏差が SST 偏差の符合を反転させるように働いていることが示唆された。よってこのモードでは、海洋の Rossby 波によるジャイアの調節というよりは、ストームトラックを介した大気海洋相互作用によって符合反転が行われていると考えられる。周期が短いのもそれを反映しているのかもしれない。今後さらに詳細な解析を行う必要がある。

また、ストームトラックの変化に伴う降水活動の変化が、循環偏差の強制力になっていることが示唆されたが、ストームトラックそのものによるフィードバック強制も重要である可能性がある。今後は線型モデル等を用いて検証実験を行う必要がある。また、何が 8 年という周期を決めているのかも明らかではない。今後の課題である。

本研究で同定された PDO は、熱帯起源の PDO に比べて変動が弱い。本研究で示されたような海洋

から大気への強制が観測データの中に存在していたとしても、一般的に S/N 比は小さいはずなので、このモードは卓越変動には成り得ないかもしれない。しかしながら、本研究の結果は、PDO が生じるメカニズムが 1 つではない可能性を示唆しており、非常に複雑な現実の PDO を理解する一助になると期待される。

謝 辞

本研究は「21 世紀気候変動予測革新プログラム」として行われたもので、文部科学省のサポートを受けた。

参考文献

- 近本喜光, 木本昌秀, 渡部雅浩, 森正人, 望月崇, 石井 正好, 2009 : 熱帯大西洋における SST 偏差の南北勾配とその予測可能性平成 21 年度「異常気象と長期変動」研究集会報告書 .
- Mantua, N. J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, and R.C. Francis, 1997 : A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069-1079.
- Mantua, N. J., and S.R. Hare, 2002 : The Pacific decadal oscillation. *J. Oceanography*, **58**, 35-44.
- Mochizuki, T., M. Ishii, M. Kimoto, Y. Chikamoto, M. Watanabe, T. Nozawa, T.T. Sakamoto, H. Shiogama, T. Awaji, N. Sugiura, T. Toyoda, S. Yasunaka, H. Tatebe, and M. Mori, 2010 : Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *PNAS*, in press.
- 森正人, 木本昌秀, 渡部雅浩, 安中さやか, 石井正好, 建部洋晶, 2009 : 大気海洋結合モデル MIROC にみられる十年規模変動平成 21 年度「長期予報と大気大循環」研究集会報告書 .
- Nakamura, H., G. Lin, and T. Yamagata, 1997 : Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, 2215-2225.
- Nakamura, H., and T. Yamagata, 1999 : Recent decadal SST variability in the Northwestern Pacific and associated atmospheric anomalies. *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*, 49-72.
- Nitta, T., and S. Yamada, 1989 : Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **67**, 375-383.
- Stott, P.A. and Kettleborough, JA, 2002 : Origins and estimates of uncertainty in predictions of twenty-first century temperature rise. *Nature*, **416**, 723-726.
- Takaya, K. and H. Nakamura, 2001 : A formulation of a phase-independent wave-activity flux of stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627.
- Tanimoto, Y., H. Nakamura, T. Kagimoto, and S. Yamane, 2003 : An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JC001750.
- Trenberth, K. E., 1990 : Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 988-993.
- Wu, L., Z. Liu, R. Gallimore, R. Jacob, D. Lee, and Y. Zhong, 2003 : Pacific decadal variability: The tropical Pacific mode and the North Pacific mode. *J. Climate.*, **16**, 1101-1120.