

# 90年代後半における太平洋水温シフトの予測可能性

近本 喜光・木本 昌秀・渡部 雅浩・森 正人(東大・気候システム)  
望月 崇・石井 正好(地球環境フロンティア)

## 1. はじめに

10年規模の気候変動はしばしば気候シフトと呼ばれるような急激な変化を示し、地域的な気候にまでその影響が及ぶ。太平洋域では、10年規模の時間スケールで卓越した周期をもつ太平洋10年規模変動(PDOもしくはIPO)の位相が1970年代に逆転し、それに伴う急激な気候変化によってカタクチイワシとマイワシの漁獲高が大きく変化した(Mantua and Hare 2002)。近年では、1990年代後半において太平洋域の海面水温(SST)偏差に急激な気候変化が観測された(Minobe 2002; Tatebe and Yasuda 2005; Sasaki et al. 2008; Chikamoto et al. 2011)。この時期には、台湾に上陸する台風頻度の増加(Tu et al. 2009)や朝鮮半島における夏の季節内スケールの降水量の増加(Kim et al. 2011)、さらには南中国海におけるモンスーンオンセット時期の遅延が報告されている(Kajikawa and Wang 2011)。

一方、北大西洋域においても1990年代中期にSST偏差の急激な増加が観測されている(Sarafanov et al. 2008; Marsh et al. 2008; Grist et al. 2010; Reverdin 2010; Robson et al. 2011)。このSST偏差の増加に伴い、大西洋数十年規模変動(AMO)も負から正へと位相変化した(Enfield et al. 2001; Sutton and Hodson 2005; Knight et al. 2005)。特に北大西洋の亜寒帯循環域において、北大西洋振動(NAO)の位相反転とともに2年間で約1°Cの急激なSST増加が起きた(Robson et al. 2011)。最近の研究は、この急激なSST増加はラブラドル海付近の対流の強化を引き起こし、大西洋南北循環(AMOC)の強化と関係することを示唆している(Reverdin 2010; Robson et al. 2011)。

これら1990年代に起きた太平洋と大西洋の急激な気候変化がお互いに関係しているかどうかよくわかっていない。過去の観測やモデルによる研究は、PDOの数十年規模成分がAMOに対して数年のラグをもって相関することを示している(Zhang and Delworth 2007; d'Orgeville and Peltier 2007)。また、Kucharski et al. (2011)は結合モデルを用いて温室効果気体の増加に伴う大西洋域の水温増加がWalker循環の強化を通して熱帯太平洋域のLa

Nina 応答をもたらすことを示唆した。これらの結果は、1990年代に起きた北大西洋の水温増加が太平洋域の気候変化に影響を及ぼしうることを示唆している。そこで本研究では、1990年代に起きた太平洋と北大西洋の両者の気候シフトの関係について大気海洋結合モデルMIROCを用いて調べた。

## 2. モデルと予測実験

本研究では、解像度の異なる3つのバージョンの大気海洋結合モデルMIROC3m, MIROC4h, MIROC5を用いて、10年規模変動予測実験を行った。MIROC3mはこれら3つの中で最も解像度が荒く大気がT42、海洋が約1°x1°である。MIROC4hは、MIROC3mとほぼ同じ物理課程を用い、解像度が最も高い(大気:T213, 海洋:約1/4°x1/6°)。これらのモデルから物理課程を大幅に改良したMIROC5はENSOの再現性が改善し、解像度が両者の間である(大気:T85, 海洋:約1°x1°)。

これら3つのバージョンのMIROCに、二酸化炭素濃度、エアロゾル、太陽サイクル、火山といった観測された自然および人為起源の外部強制、さらにはIPCC報告書に基づく将来シナリオの外部強制を与え、20世紀再現実験(NoAS)を行った。このNoAS実験を基にモデルの気候値を作成し、観測データを基に作成された客観解析データ(Ishii et al. 2006; Ishii and Kimoto 2009)の海水温と塩分の偏差をモデルへ同化するアノマリー同化実験(ASSM)を行った。さらにこの同化実験を基に1995年もしくは1996年の初期値を求め、全部で19メンバー(MIROC3mが10メンバー、MIROC4hが3メンバー、MIROC5が6メンバー)のアンサンブル予測実験(HCST)を行った。なお、実験の詳細はTatebe et al. (2011); Mochizuki et al. (2011); Chikamoto et al. (2011)に記載されている。

## 3. 結果

1990年代後半に起きた気候変化の再現性を調べるため、1991-95年平均と2000-04年平均との降水およびSSTそれぞれの差を求めた(図1)。1990年代後半において、観測されたSSTは北大西洋域

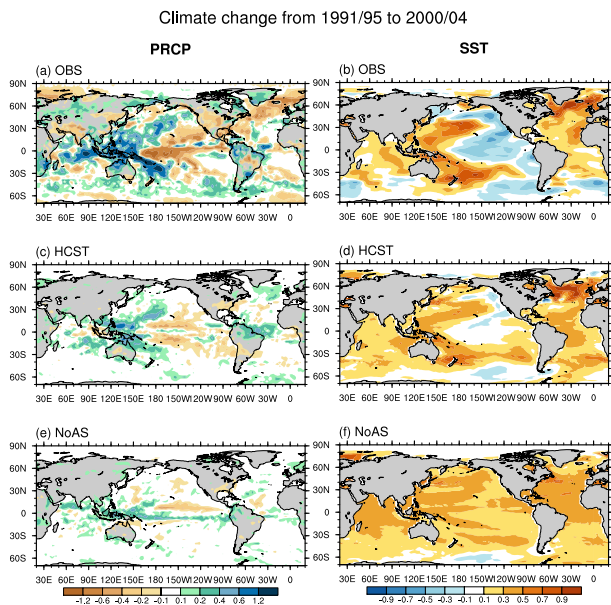


図 1. 1991–95 年平均と 2000–04 年平均との降水 (左図: mm/day) および SST (右図: °C) の差。上から観測値、HCST、および NoAS 実験。降水と SST の観測値は GPCP と Ishii et al. (2006) の客観解析データを使用した。HCST および NoAS 実験では、まずモデル毎にアンサンブル平均し、さらにそれら 3 つのモデルを平均して求めた (つまり、マルチモデルアンサンブル)。

で増加および太平洋域で La Nina のようなパターンを示す (図 1b)。この SST の変化に伴い、観測された降水は赤道太平洋の中部で減少傾向、西部からインド洋にかけて増加傾向にある (図 1a)。この太平洋域における降水の変化は Walker 循環の強化を示している。また、熱帯大西洋域で降水量の増加が観測されており、これは太平洋域における Walker 循環の強化と同じ方向に働いている。

このような観測された降水および SST の変化は、温暖化シグナルのような外部強制力だけのシミュレーション (NoAS 実験) では再現性が低いものの、内部変動も含めた予測実験 (HCST 実験) では再現性が高い。NoAS 実験では SST および降水の変化はどちらも東西一様な変化をする傾向にある (図 1e and 1f)。特に NoAS 実験における太平洋域の SST や降水の変化は、観測値のような東西勾配の変化ではなく、東西一様な水温変化と Hadley 循環の強化を示している。さらに大西洋域における NoAS 実験の SST は、中緯度域で増加するもののグリーンランドの南における昇温傾向は  $0.3^{\circ}$  以下となっていて、観測された SST 変化の特徴とは整合していない (図 1b and 1f)。一方 HCST 実験における SST 変化は、観測と比べて振幅を過小評価しているものの、太平洋域の La Nina パターン

Annual rainfall anomalies from 1991/95

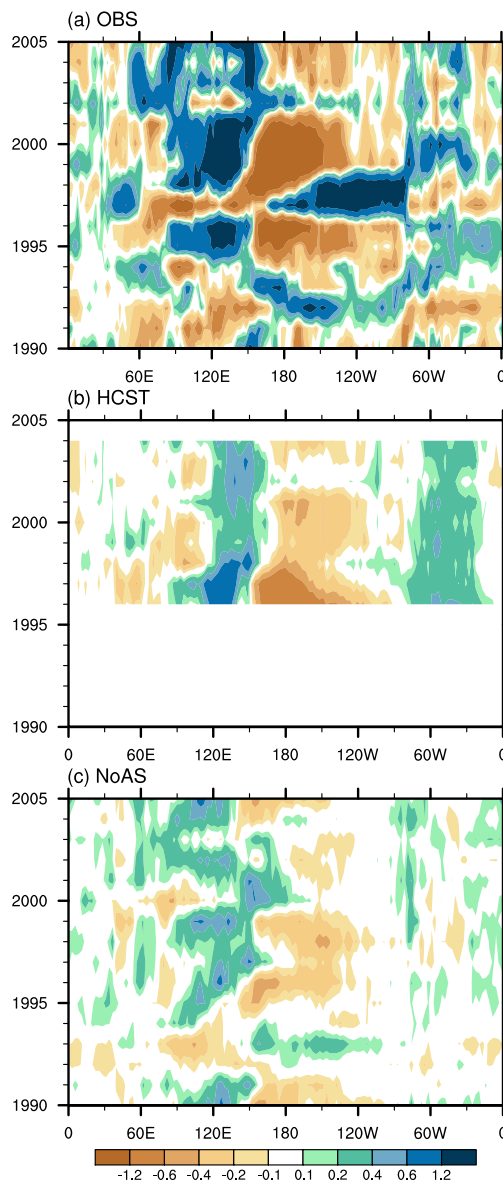


図 2. 赤道域 ( $10^{\circ}\text{S}$ – $10^{\circ}\text{N}$ ) における 1991–95 年平均からの降水偏差の経度時間断面図。上図から観測値、HCST、NoAS 実験。単位は mm/day。

およびグリーンランドの南で  $0.9^{\circ}\text{C}$  を越える昇温といった観測値の特徴をよく再現している (図 1b and 1d)。こういった SST 変化に伴い、HCST 実験における降水の変化も観測値と同様に中部熱帯太平洋域で減少傾向、西部太平洋からインド洋および熱帯大西洋にかけて増加傾向を示している (図 1a and 1c)。

熱帯太平洋域の Walker 循環と熱帯大西洋域の降水変動との関係を調べるため、赤道域における年平均降水偏差の経度–時間断面図を作成した (図 2)。観測された降水偏差は 1995 年に中部太平洋で

減少、西部太平洋からインド洋にかけて増加しており、Walker 循環の強化を示している (図 2a)。この Walker 循環の強化に伴い熱帯大西洋では降水量の増加が現れている。一方、1997 年から 1998 年にかけて太平洋域で 20 世紀最大の振幅をもつ El Nino が発生し、Walker 循環が弱化する。その後、ENSO は La Nina の位相へと戻り、熱帯大西洋の降水量の増加とともに Walker 循環の強化が持続する。この Walker 循環の強化は、北西部および南西部亜熱帯太平洋の急激な SST の昇温と関連し (Chikamoto et al. 2011)、太平洋域では図 1 で示したような馬蹄形の SST 偏差パターンを示す。

観測値と同様、HCST 実験においても熱帯太平洋域の Walker 循環の強化と熱帯大西洋域の降水量の増加とが関連している。我々の予測システムでは ENSO の予測可能性が 1 年程度であるため、1995/96 年初期値の HCST 実験では 1997/98 年の El Nino を予測することができていない。しかしながら、HCST 実験は 2004 年まで持続する Walker 循環の強化と熱帯大西洋における降水の増加を定性的によく捉えている (図 2a and b)。一方で初期値化を行っていない NoAS 実験は全体的に振幅が小さく、熱帯大西洋域の降水偏差も不明瞭である (図 2a and c)。これらの結果は、熱帯太平洋域における Walker 循環の強さの変化と熱帯大西洋域における降水変動とがお互いに関連していることを示唆している。言い換えれば、1990 年代に起きた北大西洋および太平洋の気候変化とがお互いに関連していることを示唆している。

1990 年代中期において、AMO の位相反転とともにグリーンランドの南海上で SST が急激に増加した (図 1)。同時に、この AMO の位相反転は北部熱帯大西洋における SST の昇温を伴い、熱帯大西洋で降水量が増加する。もし熱帯大西洋の降水変動と熱帯太平洋域の Walker 循環の変化とが関連するならば、AMO の変化が太平洋域における SST のシフトパターンを引き起こすかもしれない。そこで AMO と太平洋域における SST のシフトパターンの関係を調べるため、HCST 実験における 19 メンバーの散布図を作成した (図 3)。散布図は正の相関関係 (相関係数 0.54) を示し、これは、1996–98 年の AMO index が大きいメンバーほど 1990 年代後半におきた太平洋における SST シフトパターンが観測によく似ていることを示している。実際に、AMO index が大きく、かつ、太平洋における SST シフトパターンが観測とよく似ている 5 メンバー

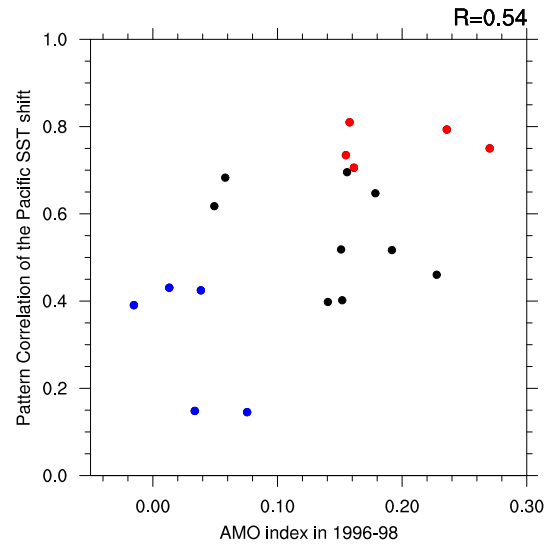


図 3. HCST 実験における 19 メンバーの散布図。横軸が 1996–98 年平均の AMO index。縦軸が 1991–95 年から 2000–04 年にかけての観測値と各メンバーとの太平洋域における SST 変化のパターン相関係数。右上に散布図の相関係数を示す。赤丸が good メンバー、青丸が poor メンバー。

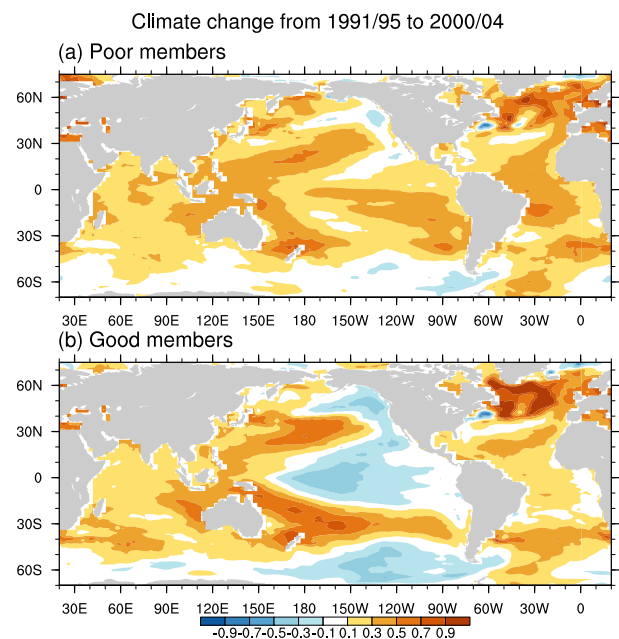


図 4. 図 1 と同じ。ただし、上図が poor メンバー、下図が good メンバーのアンサンブル平均。

をあつめて SST 偏差のシフトパターンを描くと太平洋域における SST の La Nina パターンがよく再現できている (図 4b)。一方で、1996–98 年の AMO index の振幅が小さいメンバーは、グリーンランドの南海上における SST の昇温が観測と比べて小さく、太平洋域における SST の La Nina パターンが不明瞭である (図 4a)。

#### 4. 議論とまとめ

解像度の異なる3つのバージョンの気候海洋結合モデルMIROCを用いて、1990年代後半に起きた太平洋域と大西洋域の気候シフトの関係性について調べた。1990年代後半の観測されたSSTの変化は、グリーンランドの南海上で昇温し、太平洋域でLa Ninaのようなパターンを示していた。このSSTの変化パターンに伴い、観測された降水は熱帯大西洋で増加し、太平洋域でWalker循環の強化に対応する変化を示した。これら観測されたSSTと降水の変化パターンは、温暖化シグナルに伴う外部強制(NoAS実験)だけでは再現性が低いものの、初期値化も行った予測実験(HCST実験)ではよく再現できていた。特に、1996–98年のAMO indexの振幅が大きいメンバーほど、観測されたSSTの変化パターンをよく捉えていた。これらのことは、大西洋における気候シフトが太平洋域の気候シフトへ影響していることを示唆している。

これまでの研究では、ENSOがWalker循環の変化を通して熱帯大西洋の気候に影響を及ぼすことがよく知られていた(Klein et al. 1999; Saravanan and Chang 2000; Chiang and Sobel 2002; Chiang and Lintner 2005; Chikamoto and Tanimoto 2005)。一方で、最近の研究では熱帯大西洋の降水変動がWalker循環の変化を引き起こす場合もあることを示唆している(Kucharski et al. 2011)。本研究においても、1990年代に起きた気候変化において、以下に示すように、Walker循環の変化を通して大西洋から太平洋へ影響が及んだ可能性が考えられる。まず、1995年頃に大西洋域でAMOの位相反転に伴う気候シフトが起きた。このAMOの位相反転は北部熱帯大西洋のSST増加と熱帯大西洋の降水量の増加をもたらし、熱帯太平洋域のWalker循環の強化に寄与する。その結果、1990年代後半に太平洋域におけるSSTはLa Ninaのような変化パターンを示す。こういった太平洋域におけるSSTの変化は気候循環場の変化を通して東アジア域における台風の変化やモンスーンの変化にまで影響するかもしれない(Tu et al. 2009; Kim et al. 2011; Kajikawa and Wang 2011)。

#### 謝 辞

本研究は文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム「高解像度気候モデルによる近未来気候変動予測に関する研究」のもと、地球シミュレータを用いて行われた。

#### 参考文献

- Chiang, J. C. H. and B. R. Lintner, 2005: Mechanisms of remote tropical surface warming during El Nino. *J. Climate*, **18**, 4130–4149.
- Chiang, J. C. H. and A. H. Sobel, 2002: Tropical tropospheric temperature variations caused by ENSO and their influence on the remote tropical climate. *J. Climate*, **15**, 2616–2631.
- Chikamoto, Y., M. Kimoto, M. Ishii, M. Watanabe, T. Nozawa, T. Mochizuki, H. Tatebe, T. T. Sakamoto, Y. Komuro, H. Shiogama, M. Mori, S. Yasunaka, Y. Imada, H. Koyama, M. Nozu, and F. Jin, 2011: Predictability of a stepwise shift in Pacific climate during the late 1990s in hind-cast experiments using MIROC. *J. Meteorol. Soc. Japan*, accepted.
- Chikamoto, Y. and Y. Tanimoto, 2005: Role of specific humidity anomalies in Caribbean SST response to ENSO. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **83**, 959–975.
- d'Orgeville, M. and W. R. Peltier, 2007: On the Pacific decadal oscillation and the Atlantic multidecadal oscillation: Might they be related? *Geophys. Res. Lett.*, **34** (23), L23705.
- Enfield, D. B., A. M. Mestas-Nunez, and P. J. Trimble, 2001: The Atlantic multidecadal oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental US. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2077–2080.
- Grist, J., S. Josey, R. Marsh, S. Good, A. Coward, B. de Cuevas, S. Alderson, A. New, and G. Madec, 2010: The roles of surface heat flux and ocean heat transport convergence in determining Atlantic Ocean temperature variability. *Ocean Dynamics*, **60** (4), 771–790.
- Ishii, M. and M. Kimoto, 2009: Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.*, **65** (3), 287–299.
- Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto, and S. Iwasaki, 2006: Steric sea level changes estimated from his-

- torical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, **62**, 155–170.
- Kajikawa, Y. and B. Wang, 2011: Interdecadal change of the south china sea summer monsoon onset. *J. Climate*, in press.
- Kim, W.-M., J.-G. Jhun, K.-J. Ha, and M. Kimoto, 2011: Decadal changes in climatological intraseasonal fluctuation of subseasonal evolution of summer precipitation over the korean peninsula in mid-1990s. *Adv. Atmos. Sci.*, **28** (3), 591–600.
- Klein, S. A., B. J. Soden, and N. C. Lau, 1999: Remote sea surface temperature variations during enso: evidence for a tropical atmospheric bridge. *J. Climate*, **12**, 917–932.
- Knight, J., R. Allan, C. Folland, M. Vellinga, and M. Mann, 2005: A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20 708.
- Kucharski, F., I. Kang, R. Farneti, and L. Feudale, 2011: Tropical pacific response to 20th century atlantic warming. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L03 702.
- Mantua, N. J. and S. R. Hare, 2002: The pacific decadal oscillation. *J. Oceanogr.*, **58**, 35–44.
- Marsh, R., S. Josey, B. De Cuevas, L. Redbourn, and G. Quartly, 2008: Mechanisms for recent warming of the North Atlantic: Insights gained with an eddy-permitting model. *J. Geophys. Res.*, **113**, C04 031.
- Minobe, S., 2002: Interannual to interdecadal changes in the Bering Sea and concurrent 1998/99 changes over the North Pacific. *Progress in Oceanography*, **55** (1-2), 45–64.
- Mochizuki, T., Y. Chikamoto, M. Kimoto, M. Ishii, H. Tatebe, Y. Komuro, T. T. Sakamoto, M. Watanabe, and M. Mori, 2011: Decadal prediction using a recent series of MIROC global climate models. *J. Meteorol. Soc. Japan, Special Issue*, submitted.
- Reverdin, G., 2010: North Atlantic subpolar gyre surface variability (1895-2009). *J. Climate*, **23** (17), 4571–4584.
- Robson, J., R. Sutton, K. Lohmann, D. Smith, and M. D. Palmer, 2011: Causes of the rapid warming of the North Atlantic Ocean in the mid 1990s. *J. Climate*, submitted.
- Sarafanov, A., A. Falina, A. Sokov, and A. Demidov, 2008: Intense warming and salinification of intermediate waters of southern origin in the eastern subpolar North Atlantic in the 1990s to mid-2000s. *J. Geophys. Res.*, **113**, C12 022.
- Saravanan, R. and P. Chang, 2000: Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño-Southern oscillation. *J. Climate*, **13**, 2177–2194.
- Sasaki, Y., S. Minobe, N. Schneider, T. Kagimoto, M. Nonaka, and H. Sasaki, 2008: Decadal sea level variability in the south pacific in a global eddy-resolving ocean model hindcast. *J. Phys. Oceanogr.*, **38** (8), 1731–1747.
- Sutton, R. T. and D. L. R. Hodson, 2005: Atlantic ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, **309** (5731), 115.
- Tatebe, H., M. Ishii, T. Mochizuki, Y. Chikamoto, T. T. Sakamoto, Y. Komuro, M. Mori, S. Yasunaka, M. Watanabe, K. Ogochi, T. Suzuki, T. Nishimura, and M. Kimoto, 2011: Initialization of the climate model MIROC for decadal prediction with hydrographic data assimilation. *J. Meteorol. Soc. Japan, Special Issue*, submitted.
- Tatebe, H. and I. Yasuda, 2005: Interdecadal variations of the coastal Oyashio from the 1970s to the early 1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **32** (10), L10 613.
- Tu, J., C. Chou, and P. Chu, 2009: The abrupt shift of typhoon activity in the vicinity of Taiwan and its association with western North Pacific-East Asian climate change. *J. Climate*, **22** (13), 3617–3628.
- Zhang, R. and T. L. Delworth, 2007: Impact of the atlantic multidecadal oscillation on north pacific climate variability. *Geophys. Res. Lett.*, **34** (23), L23 708.