

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

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

熱帯大西洋における ITCZ の位置や強さの変化はそのまわりの陸上における降水変動に多大な影響力をもつ。大西洋における ITCZ の位置が気候値よりも北側に寄ると、北東ブラジルでは降水量が減り、逆にアフリカのサヘル地域では降水量が増える傾向にある (Hastenrath and Heller 1977; Folland et al. 1986; Nobre and Shukla 1996; Xie and Carton 2004)。特にブラジルのノルデステ地方における 1958 年の旱魃では、1000 万人の国民がこの地域からの移転を強いられた (Namias 1972)。もし大西洋における ITCZ の南北変移を数年間先まで予測できれば、熱帯大西洋域における降水や旱魃といった水害リスクの評価に大変有効である。

大西洋における ITCZ の南北変移を引き起こすひとつの要因として、過去の観測による研究は熱帯大西洋における SST 偏差の南北勾配 (CESG) に注目している (Xie and Carton 2004)。この CESG は熱帯大西洋における SST 偏差が赤道を挟んで逆符号となる dipole パターンを示すときに最大となる。熱帯大西洋における SST 偏差の dipole パターンは冷たい SST 偏差から暖かい SST 偏差に向かって赤道を横切る南北風偏差を伴い、ITCZ が暖かい SST 偏差側に移動する。この ITCZ の南北変移は SST 偏差に対する単純な大気応答として理解されており、このことは大気大循環モデルにこの SST 偏差の dipole pattern を境界条件として与えた実験において示されている (Moura and Shukla 1981; Watanabe and Kimoto 1999; Okumura et al. 2001)。この熱帯大西洋における SST 偏差の dipole パターンは海上風偏差と蒸発偏差を伴う WES feedback によって維持され、10 年規模の時間スケールで変動する (Carton et al. 1996; Chang et al. 1997; Tanimoto and Xie 2002; Wu et al. 2004)。もし CESG が数年間の予測スキルを持つならば、ITCZ の南北変移もまた数年先まで予測できるかもしれない。

熱帯大西洋における ITCZ の南北変移を予測するために、本研究は大気海洋結合モデルに海洋観測データを同化して CESG の予測可能性を調べる。上で述べたように、熱帯大西洋における ITCZ の

南北変移はほぼ SST 偏差に支配されていると考えられる。このことは、結合モデルに観測された SST 偏差さえ同化すれば結合モデルは観測された ITCZ の南北変移を再現できることを示唆している。ここでは、大気海洋結合モデルを用いることで数年先までの CESG を予測でき、さらにはそれに伴う ITCZ の南北変移もまた数年先まで予測できることを示す。

2. モデルと予測実験

大気海洋結合モデル MIROC に海洋データ同化を組み込んだシステム (SPAM) を用いて、10 メンバーのアンサンブル同化およびアンサンブル予測を実施した。SPAM では中解像度の MIROC (大気: T42, 海洋: 約 $1^\circ \times 1^\circ$) に海洋亜表層における水温偏差と塩分偏差を同化した (アノマリー同化)。このことにより、予測時におけるモデルドリフトは起こらない。結合モデルに大気変数を同化していないため、大気初期値には大きな不確実性を含んでいる。この大気に含まれた不確実性を評価するために、10 メンバーによるアンサンブル同化を行った。この 10 メンバーのアンサンブル同化実験より、1960 年から 2000 年までの 5 年毎の初期値を求め、その初期値から 5 年間の 10 メンバーによるアンサンブル予測を実施した。なお、実験の詳細は Mochizuki et al. (2009) に記載されている。

3. 結果

海洋の水温偏差を結合モデルに同化することで大気変動が再現できるかを調べるため、観測および同化における CESG index に対する回帰係数分布を比較する (図 1)。本研究における CESG index は熱帯大西洋における北部 (EQ.-20N, 60W-0) および南部 (EQ.-20S, 60W-0) で領域平均したそれぞれの SST 偏差の差で定義した。図 1c における黒の実線および破線は観測および同化それぞれにおける CESG index を示す。図 1a および 1b は、これら CESG index に対する回帰係数分布を示す。結合モデルには観測された SST 偏差が同化されているため、CESG index に伴う熱帯大西洋の SST 偏差は

北半球側で暖かく南半球側で冷たくなるという観測と同化ともに同じパターンを示す。CESG index に伴う大気偏差パターンは、結合モデルに大気変数を同化していないにもかかわらず、観測と同化ともに赤道を横切る南北風偏差と熱帯大西洋の北部で正、南部で負の降水偏差を示す。このような降水偏差の dipole パターンは ITCZ の北偏を意味している。ただし、観測値とくらべて同化は北半球側で海上風速が弱く、降水偏差も北半球側で過大評価、南半球側で過小評価傾向にある。今後は、結合モデルの改良により、観測された変動に対する再現性のさらなる改善が望まれる。

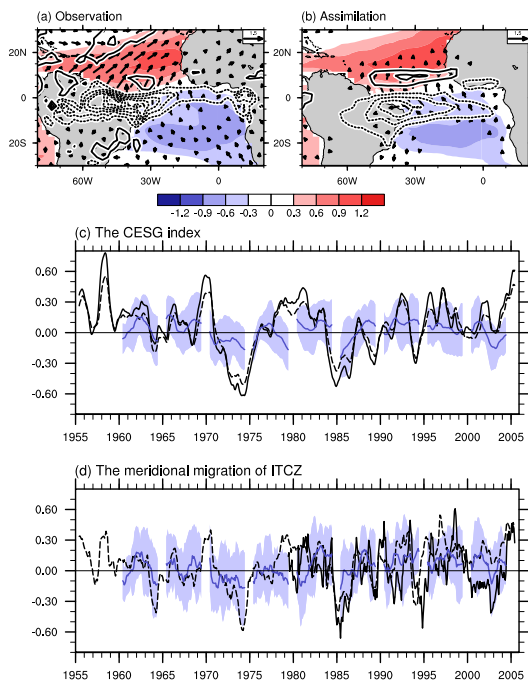


図 1. (a) 観測および (b) 同化実験における CESG index に対する SST 偏差 (陰影) および降水偏差 (コンター)、海上風偏差 (ベクトル) の回帰図. (c) CESG index および (d) ITCZ の南北変移の時系列における観測 (実線)、同化実験 (破線)、アンサンブル予測 (アンサンブル平均: 青線、スプレッド: 陰影) を示す. CESG index および ITCZ の南北変移は熱帯大西洋の北部 (EQ-20N, 60W-0) と南部 (20S-EQ, 60W-0) それぞれにおいて領域平均した SST 偏差および降水偏差それぞれの差で定義した. SST、降水量、海上風の観測値にはそれぞれ Ishii et al. (2006) による客観解析値 (1955-2005 年)、ECMWF (1959-2001 年)、GPCP (1979-2005 年) を使用した. 各変数の偏差場には 12ヶ月の移動平均を施した.

CESG に伴う降水偏差パターンと整合して、熱帯大西洋における ITCZ の南北変移の時系列は観測と同化ともに CESG index と高い相関関係にある。図 1d は、熱帯大西洋の北部 (EQ-20N, 60W-0) および南部 (20S-EQ, 60W-0) で領域平均した降水

偏差の差で定義された、ITCZ の南北変移における時系列を示す。観測値において、ITCZ の南北変移における時系列 (図 1d の実線) は 1 年未満の高周波成分とそれ以上の低周波成分とを含んでいる。このうちの低周波成分は観測された CESG index (図 1c の実線) とよく一致している。実際に、CESG index と ITCZ の南北変移の時系列との相関係数は 0.46 で 99% 以上有意である。一方、同化において、ITCZ の南北変移における時系列は、アンサンブル平均によるフィルター効果により、高周波成分よりも低周波成分が卓越する。同化実験における ITCZ の南北変移と CESG index とは相関係数 0.86 という高い値を示す。また、同化における ITCZ の南北変移は観測値のそれと有意な相関関係にある (相関係数 0.52)。このことは、同化が CESG に伴う ITCZ の南北変移を再現していることを示唆する。以上の結果は、ITCZ の南北変移が SST 偏差に対する大気応答として理解できるとした過去の大気大循環モデルを用いた研究結果とも整合する。

図 1c の青い実線と陰影は 10 メンバーによる CESG index のアンサンブル予測を示す。CESG index の予測はアンサンブルスプレッド内に観測値や同化値を捉える傾向にあり、アンサンブル平均が観測値や同化値と比較的によく一致している。1960 年代前半と後半および 1980 年代前半にみられる CESG index の正位相や 1985 年から 1988 年にかけてみられる負から正への位相反転傾向は予測のアンサンブル平均でうまくとらえられている。このような CESG index を予測している事例では、大西洋における ITCZ の南北変移もまた予測できている (図 1d)。一方で、1992 年、1996 年、1997 年頃の CESG index における正位相のピークといった CESG index の短周期変動はうまく予測できていない。

図 2 は CESG index および ITCZ の南北変移に関する予測スキルを示す。季節平均程度の時間スケールに注目すると、CESG index の予測は持続予測と同様の 1 年以内と短い予測精度を示す (図 2a)。しかしながら、24ヶ月という低周波成分に注目すると、CESG index の予測は 36ヶ月と長い予測精度を示す (図 2c)。この CESG index の予測スキルが高いときは、ITCZ の南北変移に関する予測スキルも高くなる (図 2d)。このことは、大西洋における ITCZ の南北変移のうち、低周波成分は 3 年程度の予測可能性をもつことを示唆している。

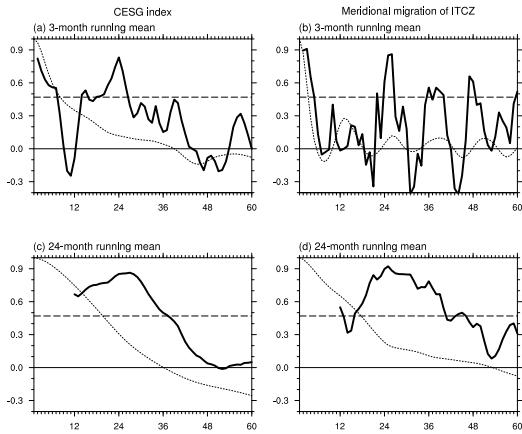


図 2. (a,c) CESG index と (b,d) ITCZ の南北変移における予測スキル. 上段および下段は 3ヶ月および 24ヶ月移動平均で求めた. 予測スキルはアノマリ相関係数で求め、相関係数 0.47 は 95% 以上の有意水準にある. 太い実線および細い破線はそれぞれ結合モデルで求めた予測スキルおよび持続予測を示す.

Chang et al. (2003) は観測された SST 偏差を初期値として、混合層モデルを結合させた大気大循環モデルを時間積分することで、北部熱帯大西洋における SST 偏差が 6-7ヶ月の予測精度を持つことを示した. 我々の結果は、大気海洋結合モデルを用いて、熱帯大西洋における SST 偏差を直接予測することで、ITCZ の南北変移の予測精度が 3 年程度まで改善することを示唆する.

4. 議論

熱帯大西洋における CESG 変動の長い予測精度を説明するために、初期値のメモリがどこにあるかをここでは議論する. これまでの観測データ解析を基にした研究は統計モードとして熱帯大西洋における CESG 変動をどのように特徴づけるかについて意見が分かれている (Xie and Carton (2004) を参照). しかしながら、もし CESG 変動を図 1a-b に見られるように、熱帯大西洋における SST 偏差の赤道を跨いだ南北 dipole モードと捉えるならば、至るところに長期間の予測可能性をもつメモリがあると考えることができる. 例えば dipole モードの維持メカニズムによれば、初期に北部熱帯大西洋で正の SST 偏差が形成されると、この SST 偏差の南北勾配に伴う SLP 偏差の応答として、その場所で負の SLP 偏差が形成される (Lindzen and Nigam 1987). この SLP 偏差の南北勾配に伴い、海上では赤道を横切る南風偏差が生じる. この南風偏差は赤道から少し離れたところでコリオリ力によって曲げられ、熱帯大西洋の北部で南西風偏

差、南部で南東風偏差となる. これら海上風偏差に伴い、北部 (南部) 熱帯大西洋では偏東貿易風を弱め (強め) て蒸発を活発化し (抑制し)、正 (負) の SST 偏差に寄与する. 結果として、SST 偏差の南北 dipole パターンを形成する. 言い換えれば、熱帯大西洋における SST 偏差のうち、北部と南部どちらか一方さえ予測できれば、それに伴ってもう片方の変動も予測できることを示唆する.

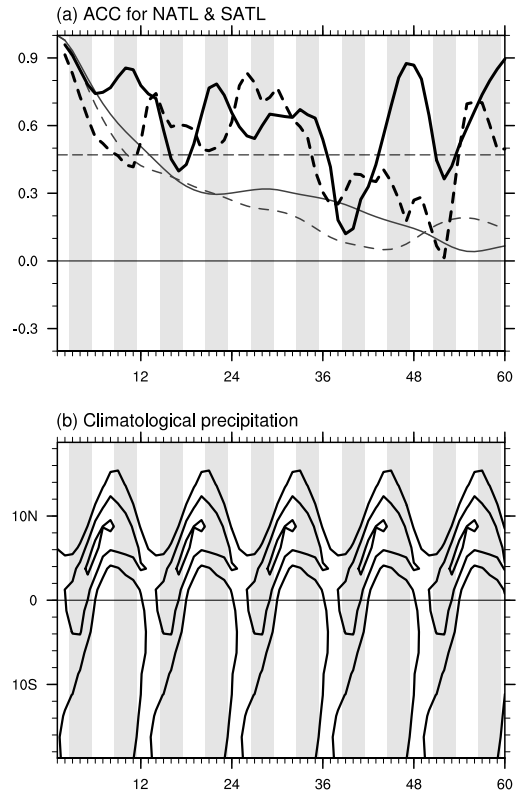


図 3. (a) 図 2a と同じ、ただし、3ヶ月移動平均で求めた北部 (実線) および南部熱帯大西洋 (破線) における予測スキル. 太線および細線はそれぞれ結合モデルで求めた予測スキルおよび持続予測を示す. 北半球の春 (3-5 月) と秋 (9-11 月) を灰色の陰影で示した. (b) 気候学的な降水量の緯度-時間断面図 (コンター間隔: 3 mm/day).

図 3a は北部および南部熱帯大西洋における SST 偏差の 3ヶ月移動平均で求めたアノマリ相関を示す. 予測開始から 12ヶ月までは、SST 偏差の予測スキルが北部熱帯大西洋で維持されるものの南部で持続予測と同様に低下する. その後、気候学的な ITCZ が北上する 12ヶ月から 18ヶ月までの間 (図 3b)、さきほどとは逆に今度は北部で SST 偏差の予測スキルが低下するものの南部で回復する. 再び気候学的な ITCZ が南下する 19ヶ月から 24ヶ月には北部で SST 偏差の予測スキルが回復し、南部で低下する. Okajima et al. (2003) は気候学的な ITCZ

の北上に伴い SST 偏差の南北 dipole mode に対する WES feedback の寄与が弱くなることを示した。本研究の結果はこのような ITCZ の季節進行に伴う予測スキルの低下を北部と南部のどちらか一方で逃れることで、その後の WES feedback を通した予測スキルの回復により熱帯大西洋全体の予測精度低下を防いでいることを示唆している。過去の研究は、熱帯大西洋における SST 偏差の形成に、ENSO や NAO といった熱帯大西洋以外からの外部強制も影響することを示している (Saravanan and Chang 2000; Tanimoto and Xie 2002; Liu et al. 2004; Chiang and Lintner 2005; Chikamoto and Tanimoto 2006)。結果的に、どこかに長期間の予測可能なメモリがあれば、それによって熱帯大西洋における SST 変動の予測可能性も長くなるかもしれない。

5. まとめ

大気海洋結合モデルを用いて熱帯大西洋における ITCZ の南北変移に関する予測可能性を調べた。海洋の観測データを結合モデルに同化することで、結合モデルは観測された熱帯大西洋における ITCZ の南北変移をよく再現する (相関係数 0.52)。このことは、熱帯大西洋における ITCZ の南北変移が赤道を横切る SST 偏差の南北勾配 (CESG) にほぼ支配されていることを示唆しており、過去の大気大循環モデルを用いた研究とも整合する。この同化実験によって得られた初期値を用い、熱帯大西洋における CESG と、それに伴う ITCZ の南北変移に関するアンサンブル予測を行った。アノマリ相関で予測スキルを評価したところ、CESG は季節平均の時間スケールでは 1 年以内に予測精度を失ったものの、24ヶ月の移動平均という長い時間スケールでは 36ヶ月の予測精度を示した。この低周波成分に伴う ITCZ の南北変移もまた CESG と同様の長い予測精度を示す。

熱帯大西洋における CESG の長い予測精度をもたらすひとつの要因として、赤道を挟んだ SST 偏差の南北 dipole モードがある。気候学的な ITCZ の季節進行に伴って北部および南部熱帯大西洋における SST 偏差の予測スキルはそれぞれ低下する。これら両半球における SST 偏差の予測スキル低下を WES feedback によってお互いに補い合うことで dipole モードとそれに伴う降水変動が長期間の予測可能性をもつことを本研究は示唆した。一般的に、降水変動の予測は 1ヶ月の予測期間でさえも困難であるといわれている。しかしながら、本研究は低周波変動に伴う降水変動に注目すること

で数年間という長い予測期間が可能であることを示唆している。過去の観測データによる統計解析の結果からは、dipole モードの存在に関するコンセンサスが得られていないものの、今後の研究によって熱帯大西洋における SST 変動のメカニズム解明が望まれる。

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

- Carton, J., X. Cao, B. Giese, and A. Da Silva, 1996: Decadal and interannual SST variability in the tropical Atlantic Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **26** (7), 1165–1175.
- Chang, P., L. Ji, and H. Li, 1997: A decadal climate variation in the tropical atlantic ocean from thermodynamic air-sea interactions. *Nature*, **385**, 516–518.
- Chang, P., R. Saravanan, and L. Ji, 2003: Tropical Atlantic seasonal predictability: the roles of El Nino remote influence and thermodynamic air-sea feedback. *Geophys. Res. Lett.*, **30** (10), 1501.
- Chiang, J. C. H. and B. R. Lintner, 2005: Mechanisms of remote tropical surface warming during El Nino. *J. Climate*, **18**, 4130–4149.
- Chikamoto, Y. and Y. Tanimoto, 2006: Air-sea humidity effects on the generation of tropical Atlantic SST anomalies during the ENSO events. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L19702, doi: 10.1029/2006GL027238.
- Folland, C. K., T. N. Palmer, and D. E. Parker, 1986: Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901–85. *Nature*, **320**, 602–607.
- Hastenrath, S. and L. Heller, 1977: Dynamics of climate hazards in northeast brazil. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **103**, 77–92.

- Lindzen, R. and S. Nigam, 1987: On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **44** (17), 2418–2436.
- Liu, Z., Q. Zhang, and L. Wu, 2004: Remote impact on tropical atlantic climate variability: Statistical assessment and dynamic assessment. *J. Climate*, **17**, 1529–1549.
- Mochizuki, T., M. Ishii, M. Kimoto, Y. Chikamoto, M. Watanabe, T. Nozawa, T. T. Sakamoto, H. Shiogama, T. Awaji, N. Suiura, T. Toyoda, S. Yasunaka, H. Tatebe, and M. Mori, 2009: Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, submitted.
- Moura, D. A. and J. Shukla, 1981: On the dynamics in northeast brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 2653–2675.
- Namias, J., 1972: Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast brazil. *Tellus*, **24**, 336–342.
- Nobre, P. and J. Shukla, 1996: Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical atlantic and south america. *J. Climate*, **9**, 2464–2479.
- Okajima, H., S. P. Xie, and A. Numaguchi, 2003: Interhemispheric coherence of tropical climate variability: Effect of the climatological ITCZ. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **81** (6), 1371–1386.
- Okumura, Y., S. P. Xie, A. Numaguti, and Y. Tanimoto, 2001: Tropical atlantic air-sea interaction and its influence on the nao. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1507–1510.
- Saravanan, R. and P. Chang, 2000: Interaction between tropical atlantic variability and el nino-southern oscillation. *J. Climate*, **13**, 2177–2194.
- Tanimoto, Y. and S. P. Xie, 2002: Inter-hemisphere decadal variations in SST, surface wind, heat flux and cloud cover over the Atlantic Ocean. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **80**, 1199–1219.
- Watanabe, M. and M. Kimoto, 1999: Tropical-extratropical connection in the atlantic atmosphere-ocean variability. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2247–2250.
- Wu, L., Q. Zhang, and Z. Liu, 2004: Toward understanding tropical Atlantic variability using coupled modeling surgery. *Earth Climate: ocean-atmosphere interaction and climate variability*, **147**, 157–170, geophysical Monograph, AGU, Washington D. C.
- Xie, S. P. and J. A. Carton, 2004: Tropical atlantic variability: patterns, mechanisms, and impacts. *Earth Climate: ocean-atmosphere interaction and climate variability*, **147**, 121–142, geophysical Monograph, AGU, Washington D. C.