SST に対する大気の非線形な応答が ENSO の遷移の非対称性にもたらす役割

*大庭 雅道[1], 植田 宏昭[2]
（筑波大学 [1]陸域環境研究センター [2]生命環境科学研究科）
ooba@suiri.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

熱帯太平洋上で発生するエルニーニョ・南方振動（El Niño and Southern Oscillation; ENSO）は、大気の橋を介して地球上の他の地域へ大きく影響する。これまでに、ENSO の経年変動のメカニズムを説明するために、幾つかの振動モデルが考えられてきた。西太平洋振動子(Weisberg and Wang 1997, JC)、再充填振動子（Jin 1997a,b, JAS）はその理論モデル中でも特に重要な役割を果たすと考えられているものであり、これら振動子理論ではその線形的な発達・衰弱・遷移の振る舞いを説明することに成功している。しかしながら、実際の観測結果では正位相から負位相への遷移は急速に進むのに対し、負位相から正位相への遷移は多くのイベントで停滞する傾向があり(Kessler 2002, GRL)、従来の振動子理論だけでは説明が困難であることが知られている(Hasegawa et al. 2006, GRL)。しかし、現存する気候モデルなどの全球大気海洋結合モデルではENSO イベントの頻度が高くなる (AchutaRao and Sperber 2006, CD) ・線形的な振動をする（Hannachi et al. 2003, CD）など、多くのモデルで修正再充填振動子 (Jin and An 1999, GRL)に代表されるような海洋内部の力学に依存してしまう傾向が見られる。

1999-2001 年に発生した中央アジアでの長期旱魃のように、La Niña の持続は地球規模で水資源に深刻な影響をもたらす(e.g., Hoerling and Kumar 2003, Nature; Ueda and Kawamura 2004, IJC) ことからも、季節予報のスキル向上のために、ENSO 正負位相の遷移システムの非対称性を理解することは重要であると考えられる。しかしながら、ENSO の遷移プロセスの差違に対し、海洋内部の力学的効果に注目した研究はあるものの（An and Jin 2004, JC）、Hoerling et al. (1997, JC) や Kang and Kug (2002, JGR) で述べられているような大気の応答やその非対称性に注目した研究は少ない。そこで ENSO に関連した海面水温(Sea Surface Temperature: SST) 偏差に対する大気（非断熱加熱）の非線形的な応答が ENSO 自身の遷移プロセスにどのような効果がもたらすかを調べた。

2. データとモデル

感度実験には、MRI-CGCM2.3（Yukimoto et al. 2006, JMSJ）の大気大循環モデル（T42, L30）を用いた。大気の診断解析には、ECMWF の再解析データ (ERA-40; Simmons and Gibson 2000) , 海洋には Simple Ocean Data Assimilation (SODA) reanalysis (Carton et al. 2000, JPO) を利用した。また、中央東太平洋の温度躍層厚変動を見積るために、1.5 層海洋モデル(逓減重力モデル：Zebiak and Cane 1987, MWR) を用いた。

3. 結果

図1は正・負位相時における北半球冬（DJF）の Niño 3.4 index に対する SST の片側ラグ回帰（-12～+12 ヶ月）の経度時間断面図である。ENSO 正位相（El Niño）時における中央-東太平洋の SST 正偏差は、北半球冬の成熟後に急速に減衰して負偏差へ転換している（図 1a）。一方、負位相時における SST 負偏差はある程度減衰するものの、次の年に再発達している（図 1b）。このことからも、片側ラグ回帰による解析は、ENSO の遷移の非対称性をある程度捕らえられていると考えられる。

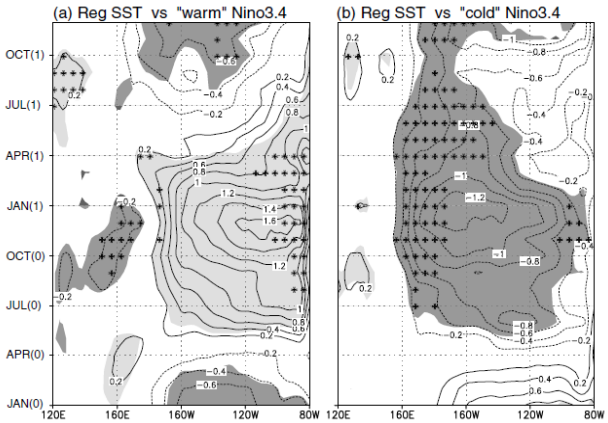

図 1: 赤道太平洋上の海面水温偏差の(a)正と(b)負の DJF Niño 3.4 index に対する片側ラグ回帰の経度時間断面図。

①観測で見られる遷移時の特異性

混合層熱収支の式より、東西移流フィードバック項・温度躍層フィードバック項・非線形項の SST 偏差の発達に対する寄与をそれぞれ見積もった (Vialard et al. 2001, JPO)。ENSO に伴う東太平洋の海面水温の発達には、主にこの三つの項が支配的であることが知られている(An et al. 2005)。

$$\frac{\partial T'_{z=0\sim mld}}{\partial t} \approx -U'\frac{\partial \overline{T}}{\partial x} - \overline{W_h}\frac{\partial T'}{\partial z} + (-U'\frac{\partial T'}{\partial x} - V'\frac{\partial T'}{\partial y} - W'_h\frac{\partial T'}{\partial z})$$

図 2 は正位相、負位相時における北半球冬の Niño 3.4 index に対する温度躍層フィードバック項の片側ラグ回帰の結果である。この項は ENSO を駆動する上で最も大きな役割を果たす要素として知られている。ENSO の衰退・遷移期において、正負位相間において温度躍層フィードバック項は大きな非対称性を見せている。正位相時には成熟期以降に冷水偏差の東方伝播が見られるものの(図 2a)、負位相時では暖水偏差の東進が見られず(図 2b)、躍層偏差の減衰速度がゆっくりしていることがわかる。しかしながら、東西移流フィードバック項・非線形項には遷移の非対称性に関係すると考えられるような大きな差違が見つからなかった(図章省略)。

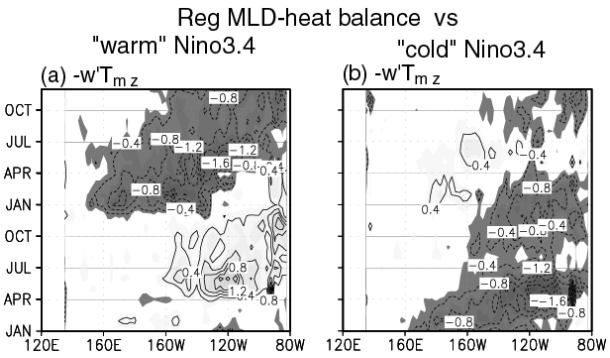

図 2: 赤道太平洋上の温度躍層フィードバック項の (a)正と(b)負の DJF Niño 3.4 index に対する片側回帰の経度時間断面図。

そこで、温度躍層厚の変動に直接影響を与えている太平洋上の赤道風と、温度躍層厚時間変化に対する片側ラグ回帰の結果を示す(図 3)。正位相時において、発達期には赤道中央太平洋に西風偏差が見られる。この西風偏差は成熟期の北半球冬になると急速に減衰し、同時に西太平洋上では東風偏差の流入が見られる(図 3a)。成熟期におけるこれらの赤道東西風の急速な変化は海洋亜表層での冷水ケルビン波の発生(図 3c)の誘因となり、ENSO の遷移を加速させるように働いている(図 2c)。反対に、負位相時における赤道東風偏差は引き続く春まで持続しており(図 3b)、温度躍層厚の回復が少しずつ進むことからも(図 3d)、負位相から正位相への ENSO の遷移を妨げていると考えられる。

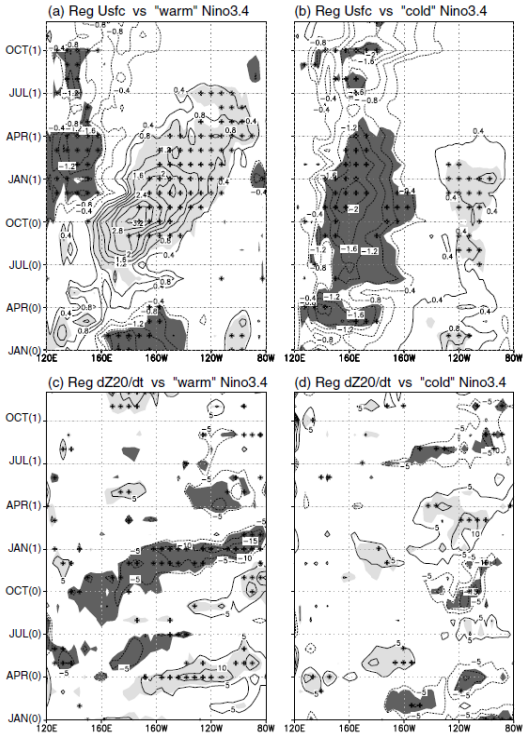

図 3: 赤道太平洋上における表層東西風の(a)正と(b)負の DJF Niño 3.4 index に対する片側回帰の経度時間断面図。(c)と(d)は(a)と(b)と同様、但し、温度躍層厚の時間変化に対する回帰。

このように赤道風偏差には正位相と負位相で大きな違いが見られたものの、再充填振動子理論で指摘されるような海洋内部力学による遷移プロセス(海洋内部の南北熱輸送)は両位相で概ね対称的であり(図章省略)、遷移の非対称性は海洋内部力学ではなく、赤道直下における風偏差の非対称性に依存していると考えられる。そこで、より表層風の詳しい時空間的な差違を見つけるために、非断熱加熱(ここでは対流活動の指標)と表層風の片側ラグ回帰の空間分布を示す(図 4)。この図より、正位相と負位相では三つの大きな違いが存在することがわかる。一つは、正位相時に比べ、成熟期における負位相時の非断熱加熱偏差と表層風偏差の空間分布が中央太平洋から西側に 20° シフトしていることである(図4a, 4b)。また、成熟期後の両偏差の発達が異なる。負位相の減衰期においては、中央太平洋上の非断熱加熱偏差が赤道上に残ってしまっているの

に対して、正位相時ではその空間分布が南側にシフトし、赤道中央太平洋上の西風は北半球冬（DJF）においては赤道をまたぐ北西風へと変化している。これは季節的なダブル ITCZ の発生を引き起こす、冬から春にかけて起こる赤道東部太平洋南側での海面水温上昇と関係している(Vecchi 2006, JC)。そして、三つ目は正位相時にのみ見られる、赤道西部太平洋上に発生する東風偏差である（図4a）。これは ENSO の遷移を促進する効果として働く(e.g., Wang et al. 1999, JGR; Ohba and Ueda 2007, JMSJ)。従って、季節的に発生する対流活動偏差の空間的な差違が ENSO の遷移の非対称性に繋がることが考えられる。

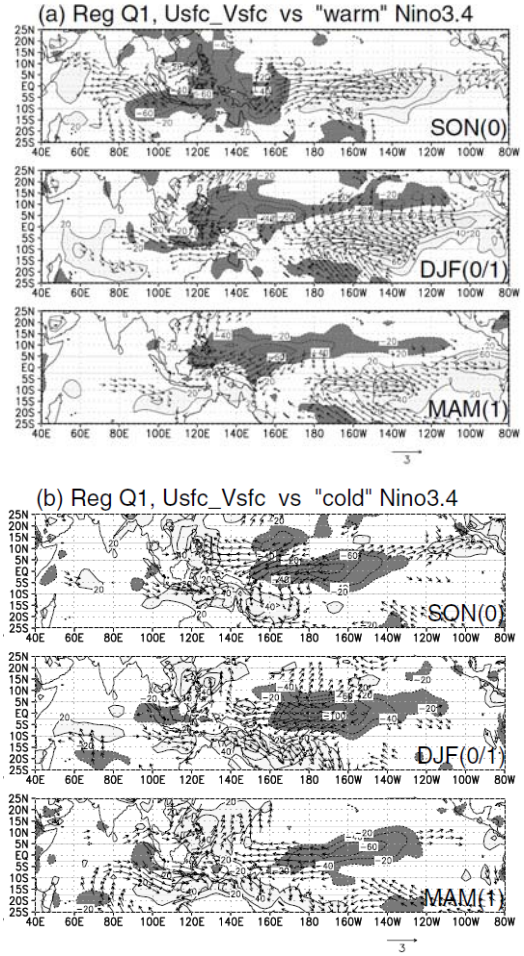

図 4: 非断熱加熱と表層風の (a)正と(b)負の DJF Niño 3.4 index に対する片側ラグ回帰。

②理想化したモデル実験

観測で見られた遷移の特徴をふまえて、大気大循環モデル（AGCM）に ENSO に関連した SST 偏差を 2 年間強制する実験を行った。この強制実験には観測の過去 50 年で最も強かった“5 つの El Niño event” *minus* “ 5 つの La Niña event” の SST 偏差のコンポジットを使用した。このコンポジット SST 偏差を正位相で与える実験（Symmetric Positive run: SP）と負位相で与える実験（Symmetric Negative run: SN）の二つを行った。図 4 に与えた SST 偏差の時間変化を示す。初期値を変えて 15 アンサンブルメンバーで行った。

図 5 はこの SST 偏差の強制に対する赤道太平洋上で東西平均された AGCM の東西風偏差の時間変化である。正負位相で同様の時空間分布の SST 偏差を与えたのにも関わらず、赤道太平洋上の赤道風は非対称の振る舞いを示し、ENSO の遷移の非対称性に影響を与えていることがわかる。つまり、熱帯太平洋の SST 偏差に対する大気場の非線形的な応答は、正位相時の急速な遷移と、負位相時の遷移の遅延をもたらす。

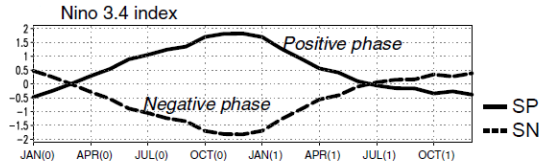

図 4: 強制した SST 偏差の時間変化

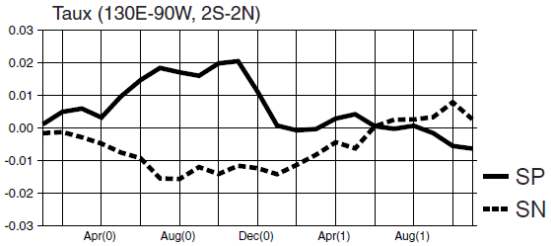

図 5: 赤道太平洋上で東西平均された東西風偏差の SP-run と NP-run に対する応答。

③ハイブリッド線形大気海洋結合モデル

経験的に計算された風の応答モデルを線形 1.5 層逓減重力海洋モデルに線形結合させたハイブリッド線形大気海洋結合モデルを構築し、ENSO に伴う中央-東太平洋の SST 偏差に対する、大気の非線形的な応答の重要性の確認を行った。

i) 線形的な風の応答モデルを使用した場合（図 6a）と ii) 非対称な風の応答を使用した場合（図 6b）の大気海洋結合不安定モードの時間発達を調べた。i)では過去の振動子理論で示されたのと同様の線形的な単振動を示したが、ii) では正位相から負位相への遷移は急速であるにもかかわらず、負位相から正位相への遷移時に 2-4 年遅延する傾向が見られる。この特徴は観測の ENSO の変動とかなり酷似している。このことから、

も、SST 偏差に対する大気の非線形的な応答が ENSO の遷移プロセスの非対称性を理解する上ではかなり重要であることが確認され、大気海洋結合系に内在する不安定モードの時間変化は図 6b のようになると考えられる。

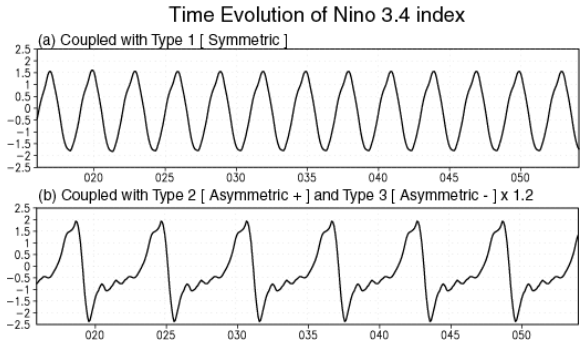

図 6: ハイブリッド線形大気海洋結合モデルにおける Nino3.4 index の応答。大気場の応答に(a)線形回帰モデルと(b)片側線形回帰モデルを使用したもの。

4. まとめ

過去の観測的な研究では、El Niño から La Niña への遷移は振動子理論で説明されるように周期的であるが、La Niña から El Niño への遷移は不明瞭であることが指摘されていた (e.g., Kessler 2002, GRL)。本研究では観測データの解析と各種モデル実験により、この ENSO の遷移の非対称性が主に大気場（特に対流活動域）の応答の違いから来ており、El Niño では冬から春に遷移プロセスが卓越するが、La Niña は再発達しやすいことを示した。

図 7 に本研究で明らかになった ENSO の非対称遷移プロセスの模式図を示した。正位相時（図 7, warm event）では冬から春にかけてフィリピン上の高気圧偏差の南端で赤道東風偏差を励起するとともに、中央太平洋上の西風偏差が南方にシフトすることで海洋亜表層に冷水ケルビン波を励起し、東太平洋上の温度躍層を浅くすることで急速な負位相への遷移を誘発する。一方で、負位相時（図 7, cold event）には赤道中央太平洋上の東風偏差が春まで卓越し、結果的に引き続く遷移を遅延させる。この非対称性は対流活動域の空間分布の特徴からも、北半球冬から春における海面水温基本場、特に対流活動の活発化と関連する 27℃域 (e.g., Graham and Barnett 1987, Science) の空間分布とその季節変化と関連すると考えられる。

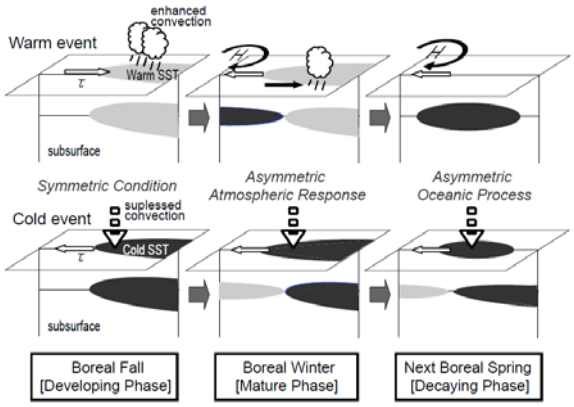

図 7: 非対称の遷移プロセスを示した模式図。（上図）エルニーニョ時、（下図）ラニーニャ時。

Hoerling et al. (2001, JC) では中央-東太平洋の海面水温偏差の年々変動が一標準偏差を超えると大気の空間分布の位相シフト現れること示しており、ENSO の遷移の非対称性は強い ENSO event ではさらに明瞭になると考えられる。これは El Niño の振幅が強いほど遷移しやすいとする過去の研究とも矛盾しない (e.g., Horii and Hanawa 2004, GRL; Hasegawa et al. 2006, GRL)。

また、このような ENSO の非対称の振動は大気の橋を介して中緯度、亜熱帯の海洋亜表層に非対称の影響を残し（An et al. 2007, JC）、南半球の亜熱帯域海面水温の変動を介して太平洋の 10 年規模変動を引き起こす要因の一つとなることも考えられる（e.g., Luo and Yamagata 2001, JGR; Matei et al. 2008, JC）。太平洋 10 年規模変動に関連した大気場の応答が La Niña 時の大気応答と近いことからも(Chen et al. 2008, JC)、この ENSO の非対称性が 10 年規模変動の理解とその予測の鍵になるのではないだろうか。

図は以下の文献より引用

Ohba, M. and H. Ueda 2008: Role of nonlinear atmospheric response to SST on the asymmetric transition process of ENSO. *Journal of Climate (in press)*.