

熱帯の季節変動における大気海洋相互作用の研究*

東塚 知己†

要 旨

ミンダナオドームの季節変動に関する2つの必須要素(発生に重要な冬季アジアモンスーンに伴う局所的なエクマン湧昇と消滅に重要な東方からの暖水の侵入)の変動が, その経年変動をもたらしている。また, このドームの減衰に重要なロスビー波を解析する過程で, 海盆スケールの大気海洋相互作用現象である季節的なエルニーニョ“Annual ENSO”が存在することが明らかになった。そして, この現象と経年的なエルニーニョの強さの違いが10年スケールで変動し, エルニーニョに多様性を与えている。さらに, 大気海洋結合モデルで“Annual ENSO”を再現する重要性を示した。このように, 季節変動は熱帯域の気候変動においても重要な役割を果たしており, 季節変動を良く考えることが, 熱帯域の経年変動や長期変動の理解を深める上で鍵を握ると考えられる。

キーワード: 季節変動, 熱帯域, 大気海洋相互作用, エルニーニョ/南方振動

1. はじめに

熱帯域の気候変動モードであるエルニーニョ/南方振動(ENSO, Neelin *et al.*, 1998)やダイポールモード現象(IOD, Yamagata *et al.*, 2004)は, 世界各地の気候に大きな影響を与えることが広く知られており, その発生, 成長, 減衰を予測することは, 重要な課題の1つである。これらの大規模な大気海洋相互作用現象において, 季節変動が重要な役割を果たしている可能性が, これまでの研究で示されている(Rasmusson *et al.*, 1999)。例えば, Rasmusson and Carpenter (1982)以来, 多くのエルニーニョが, 季節にロックされて発生し, 年末にピークを迎えることが知られている。そして, 季節変動が, エルニーニョの不規則性や季節へのロックにおいて, 重要な役割を果たしていることが簡単

なモデルを用いた研究等から示されている(Tziperman *et al.*, 1994)。しかし, 熱帯域の季節変動に関しては, まだ解明されていない点が数多く残っている。

本稿は, 筆者がこれまで季節変動に着目しつつ行ってきた太平洋熱帯域の大気海洋相互作用に関する研究の概要である。

2. ミンダナオドーム

東京大学大学院理学系研究科の修士課程に進学後, 指導教官である山形 俊男教授より, 初めて与えられた研究テーマが, 海洋大循環モデル(Kagimoto, 1999)の結果を用いた太平洋熱帯域の湧昇ドーム現象(ミンダナオドームとコスタリカドーム)であった(Fig. 1)。湧昇ドーム域は, 海面水温への影響を通して局所的な気候に大きな影響を及ぼすだけでなく, 栄養分が豊富であるため, 豊かな生態系を育む。

双方のドーム域における水温や流速等の図を作成し, World Ocean Atlas 1998 (Antonov *et al.*, 1998)等の

* 2006年8月30日受領; 2006年8月31日受理
著作権: 日本海洋学会, 2006

† 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1
e-mail address: tozuka@eps.s.u-tokyo.ac.jp

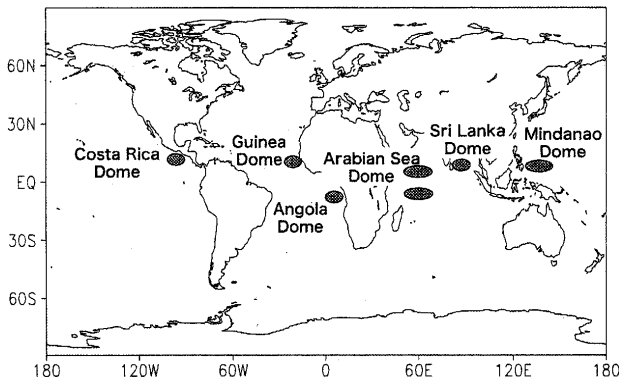


Fig. 1. Oceanic domes over the global ocean.

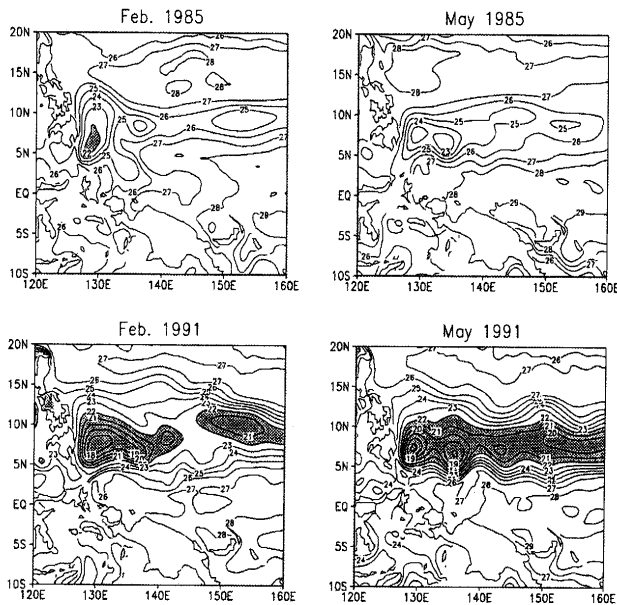


Fig. 2. Interannual variation of the simulated subsurface temperature at a depth of 97 m in February and May. Contour interval is 1 °C. Temperatures less than 22 °C are shaded (adapted from Tozuka *et al.* (2002)).

観測データとの比較を行なった。その結果、ミンダナオドームの季節変動の方は比較的良く再現されているものの、コスタリカドームの方は再現性が悪いことが判明した。これは、このモデルを駆動するのに用いた NCEP/NCAR の再解析データ (Kalnay *et al.*, 1996) の水平解像度が 2.5 度で、コスタリカドームの季節変動において重要な役割を果たしている中米の地峡を吹

き抜ける風 (Umatani and Yamagata, 1991) を解像できないためであると考えられる。

そこで、西太平洋熱帯域に位置するミンダナオドームの季節変動をさらに詳しく究明することにした。この西太平洋熱帯域は、エルニーニョの発現海域であるだけでなく、全球規模の熱塩循環において重要なインドネシア通過流の上流に位置するため、気候変動において特に重要な海域である。解析の結果、ミンダナオドームは、過去の研究結果 (Masumoto and Yamagata, 1991) と一致するように、冬季アジアモンスーンに伴う風の正の回転成分によるエクマン湧昇によって形成され、2月頃に最も発達していた。そして、東太平洋熱帯域からの暖水の侵入によって、ミンダナオドームは夏までに減衰していた。

次に、これまで研究が行なわれていなかったミンダナオドームの経年変動のメカニズムを調べた (Fig. 2)。その結果、ミンダナオドームの経年変動も季節変動の必須要素 (局所的なエクマン湧昇と東方からの暖水の侵入) の変動で支配されていることが明らかになった。例えば、冬季アジアモンスーンが不活発で局所的なエクマン湧昇の弱い年や東方からの暖水の侵入が強い年には、ミンダナオドームは未成熟に終わるが、逆に東方からの暖水の侵入が弱い年には、ミンダナオドームは夏まで残存する。山形教授からは、常に季節変動の意義を考えることの重要性を教わってきたが、このように季節変動の変調によって、ミンダナオドームが経年的に変動していることが明らかになり、季節変動を理解する重要性を改めて感じた。以上の結果は、Tozuka *et al.* (2002) で詳しく述べられている。

また、このドームとその北を流れる北赤道海流の分岐緯度やルソン海峡通過流との関係を解析した。ドームが比較的強いエルニーニョ年には、北赤道海流の分岐緯度が北偏し、ルソン海峡付近を流れる黒潮が弱くなる。その結果、黒潮がルソン海峡に侵入しやすくなり、ルソン海峡通過流の流量も増大することが明らかになった (Qu *et al.*, 2004)。南シナ海と西太平洋の海面水温差は、太平洋赤道域に西風バーストを引き起こす上で重要な役割を果たしていることが Yamagata and Masumoto (1992) で示されている。その南シナ海の熱収支を考える上で、ルソン海峡通過流は重要な要素で

あり、今後さらに研究を進めていきたいと考えている。

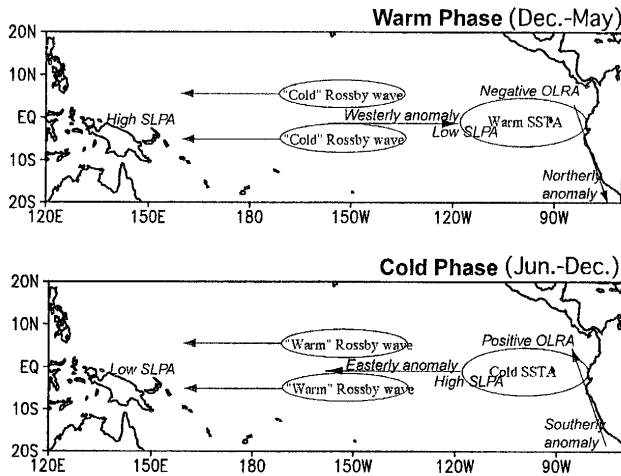


Fig. 3. Schematic diagram of Annual ENSO (adapted from Tozuka and Yamagata (2003a)).

3. Annual ENSO

博士課程に入り、前述のミンダナオドームの減衰過程の詳細を観測データの解析を通して研究していたところ、季節変動の時間スケールで熱帯太平洋全域を包含する ENSO によく似た現象があることに気付いた。机いっばいにいろいろな図を広げて、山形教授に結果を見ていただいたところ、非常に興味を示してくださり、この現象に“Annual ENSO”という名前をその場で付けてくださった。

この“Annual ENSO”を模式的にまとめたのが、Fig. 3 である。まず、年末に発生するペルー沖の正の海面水温偏差(古典的なエルニーニョ)が、一連の季節的な大気海洋相互作用現象をトリガーし、この正の海面水温偏差の西端において対流圏下層の風偏差は収束を示し始める。その結果、赤道上では西風偏差が生じ、赤道湧昇が抑制されると同時に潜熱放出が減少するため、暖水偏差がさらに強化され、西進するようになる。この正のフィードバック機構により、正の海面水温偏差は大気場偏差(西風偏差や負の OLR 偏差)と強め合いながら、さらに西進する。正の海面水温偏差は、同時に海面気圧偏差場にも影響を与えるので、東太平洋

赤道域の海面気圧偏差は、春に極大を示す。その結果、南方振動指数に対応する季節的な海面気圧偏差の東西差は負の値を取る。このことから、春の状態は、季節的なエルニーニョであると見なし得る。また、このような東太平洋赤道域の大気海洋相互作用現象は、その西風偏差によって赤道を離れた海域に冷水偏差をもたらす。この冷水偏差は海洋のロスビー波として西進し、ついには西太平洋の海洋場に影響を与える。ここで、北緯5度付近を西方伝播する冷水偏差と赤道上を西方伝播する西風偏差の間の共鳴が、この冷水偏差の強化において重要な役割を果たす。以上の正のフィードバックは、夏季に南米沿岸沿いに季節的な南風偏差が訪れることで終焉を迎える。年の後半には、ここで述べた大気海洋相互作用現象とは位相の逆転した現象が起こる。そして、この時に赤道を離れた海域に形成される暖水偏差が、ミンダナオドームの減衰過程において重要な役割を果たしている。

次に、上記の“Annual ENSO”が、経年的にどのように変動するのかを解析することにしたが、普遍的な解析方法にしたがって月平均気候値を引いて偏差場を計算しても、“Annual ENSO”の変動を捉えることはできなかった。そこで、月平均値ではなく、年平均値を引いた後に、統計的手法(CEOF 解析)を施したところ、経年変動データから、“Annual ENSO”と経年的な ENSO のモードを抽出することに成功した(Fig. 4, Fig. 5)。そして、この解析から、新しい ENSO の描像が浮かび上がってきた。

まず、正の海面高度偏差(沈降ケルビン波)が西太平洋赤道域で発生し、これが東方伝播することによって、中部・東部太平洋赤道域の温度躍層は深くなるため、赤道湧昇による冷却効果が弱まる。その結果、中部・東部太平洋赤道域の海面水温は上昇し、年末にピークを迎える。しかし、西部太平洋の赤道を離れた海域では、逆に温度躍層が浅くなるために、海面水温は低下し、その上空に高気圧性偏差が発生する。この高気圧性偏差は、西部太平洋赤道域に東風を吹かせるので、湧昇ケルビン波を励起する。そして、この湧昇ケルビン波の到達により、中部・東部太平洋赤道域の海面水温の上昇は、終息する。この一連の大気海洋相互作用を“Interannual ENSO”モードと称することにした。これに対して、“Annual

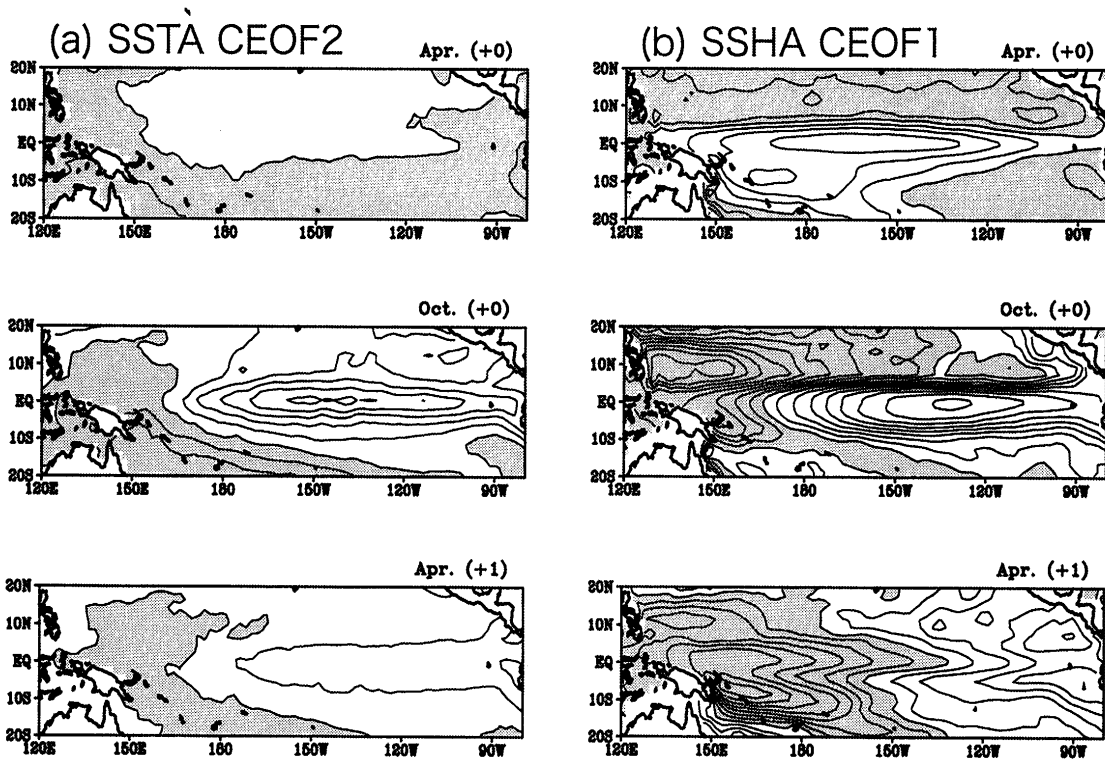


Fig. 4. El Niño composite of reconstructed fields for the “interannual ENSO” mode of (a) SSTA, and (b) SSHA. Variance contributions are 14% and 44%, respectively. Contour intervals are 0.5 °C and 3 cm. Negative anomalies are shaded (adapted from Tozuka and Yamagata (2003a)).

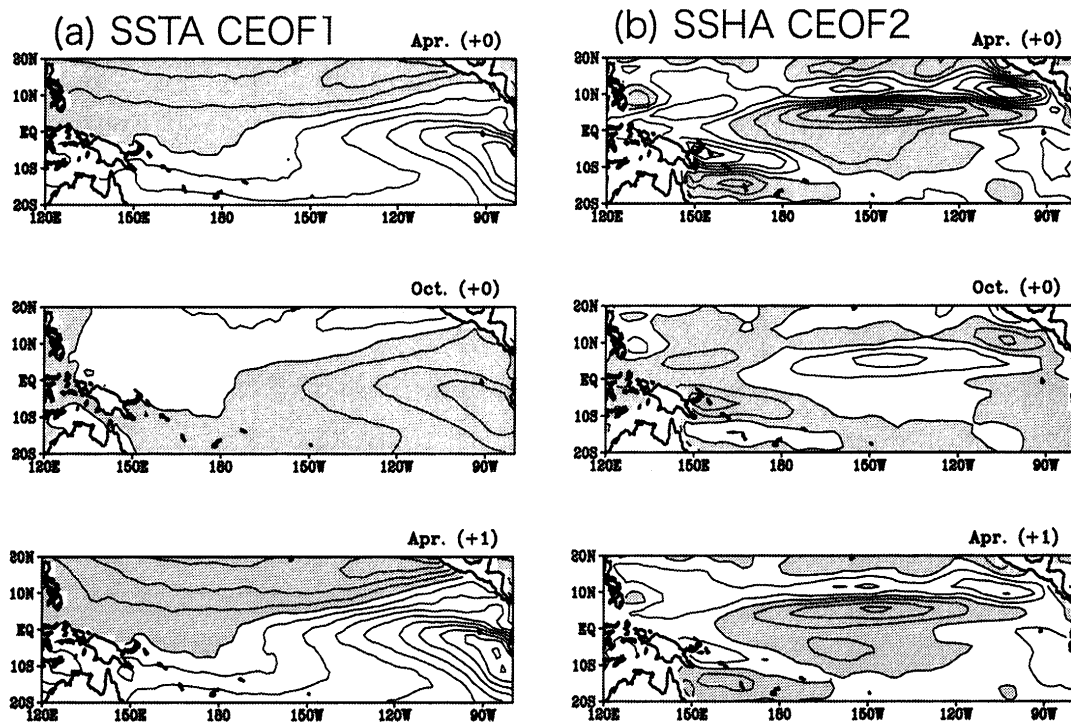


Fig. 5. As in Fig. 4, but for the “annual ENSO” mode of (a) SSTA, and (b) SSHA. Variance contributions are 74% and 15%, respectively (adapted from Tozuka and Yamagata (2003a)).

ENSO”モードの変動は，“Interannual ENSO”モードによって温度躍層深が深くなっているため，秋の冷舌の季節的な発達を抑えられ，春の季節的な冷舌の温暖化が例年以上に顕著になる。したがって，ENSOは，“Annual ENSO”モードと“Interannual ENSO”モードの重ね合わせで表現できることが示された。

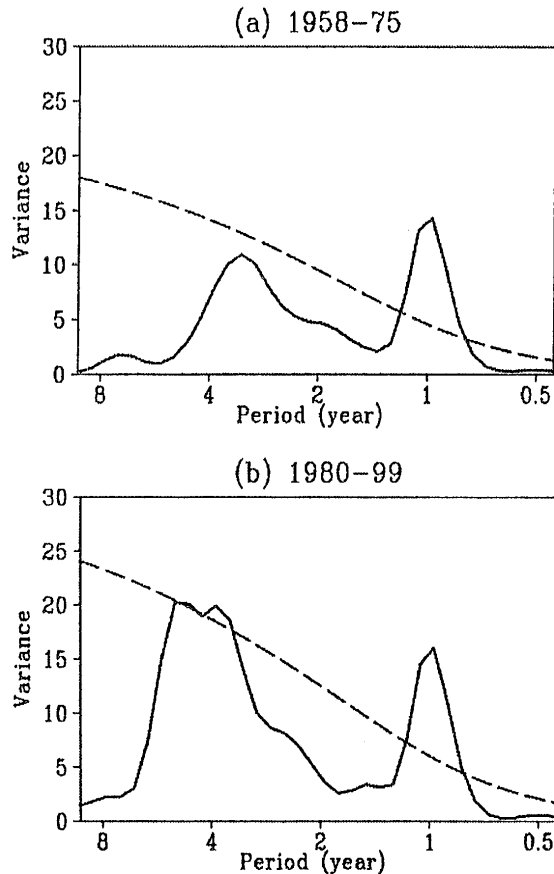


Fig. 6. Normalized global wavelet spectrum of Niño 3 SSTA for (a) 1958~1975, and (b) 1980~1999 (solid line). Also shown is the 95% confidence spectrum (dashed line) (Adapted from Tozuka and Yamagata (2003a)).

また，この研究で得られた新しい視点から，ENSOの伝播特性の十年変動（1970年代後半以前はENSOのシグナルは西方伝播していたのに対し，1970年代後半以降は東方伝播している（Wallace *et al.*, 1998））についても考察した。その結果，1970年代後半以前の期間では，“Interannual ENSO”モードの振幅が弱く，西方伝播する“Annual ENSO”モードの効果が卓越するために，ENSOに伴うシグナルも西方伝播しているように

見える。そして，1970年代後半以降の期間では，逆に東方伝播する“Interannual ENSO”モードの効果が卓越するために，ENSOに伴うシグナルも東方伝播しているように見えるということが新たに示された（Fig. 6）。

以上の成果は，Tozuka and Yamagata (2003a)にまとめられている。また，この研究はアメリカ気象学会機関誌（BAMS）でハイライト研究にも選ばれた（Tozuka and Yamagata, 2003b）。

4. 大気海洋結合モデルで再現された Annual ENSO

これらの結果は，太平洋熱帯域の季節変動を大気海洋結合モデルで再現することが，ENSOを再現し，予報するための重要なステップになることを示唆している。そこで，太平洋熱帯域の季節変動の再現性を結合モデルで議論している論文を多数読んでみた。そうすると，意外なことに，世界のどの大気海洋結合モデルも太平洋熱帯域の季節変動を再現できていないことを知った（Latif *et al.*, 2002）。そこで，新しい大気海洋結合モデル（SINTEX-F1; Luo *et al.*, 2005）の200年積分の結果を調べた。まず，200年間の計算結果から作成した月平均気候場を用いて，“Annual ENSO”の再現性を調べた（Fig. 7）。その結果，正のフェーズの“Annual ENSO”のトリガーとなるペルー沖の古典的エルニーニョに加えて，東太平洋赤道域の海面水温偏差の西進，および，北緯5度に沿った海面高度偏差の西方伝播は，よく再現されていることが判明した。しかし，観測データに見られるような，東太平洋赤道域の海面水温偏差の赤道の北側への拡大や赤道上を西方伝播する東西風偏差と北緯5度付近を西方伝播する海面高度偏差の間の共鳴は，再現することができていなかった。これらは，正（負）の海面水温偏差が赤道の北側へ拡大しようとする時期に，観測に見られない強い湧昇（沈降）ケルビン波が侵入してくるためであった。この湧昇（沈降）ケルビン波は，東太平洋南部で強い負（正）の風の回転成分によるエクマン湧昇（沈降）によって前年に形成されたものが，ロスビー波として西方伝播し，西岸で反射してきたものである。また，海面水温偏差が十分に北進しないために，赤道上の東西風偏差が赤

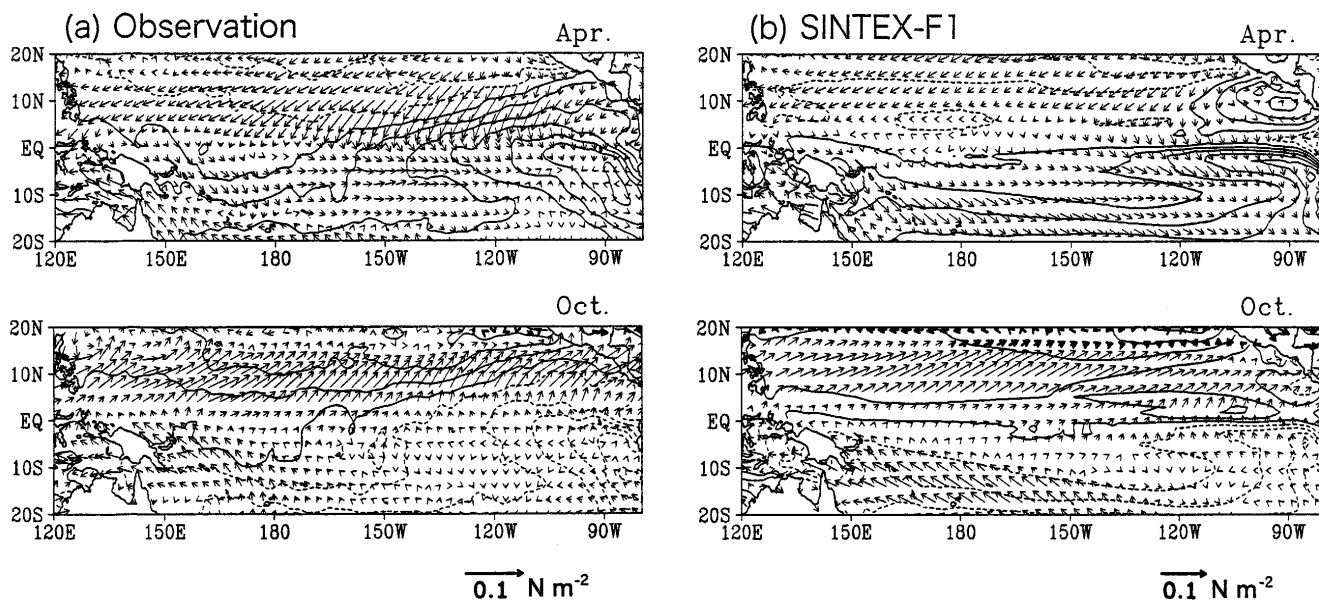


Fig. 7. Annual march of wind stress anomaly fields and SSTA for (a) observation and (b) SINTEX-F1 model data. The magnitude of wind stress anomaly is shown by the vectors drawn below the figures. Contour interval is $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (adapted from Tozuka *et al.* (2005)).

道上の海面水温と結合して西方伝播する現象も再現できないと考えられる。以上は、季節変動を再現するには、風の回転成分の分布や強度も忠実に再現する必要があることを示唆している。

次に、“Annual ENSO”と ENSO の関係を調べた。その結果、エルニーニョに伴って“Annual ENSO”の振幅が、最大で $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 変化していた (Fig. 8)。これは、統計的にも有意な振幅の変化ではあるが、その強度は観測値の約 20% 程度に過ぎない。特に、赤道域での振幅の変化が弱いのは、“Annual ENSO”に伴う偏差の北進が、結合モデル内ではうまく再現されず、赤道上で最も強いシグナルを持つ“Interannual ENSO”モードとの相互作用が弱すぎるためである。したがって、“Annual ENSO”を結合モデル内でより良く再現することが、ENSO そのものを再現する上で非常に重要であることが明らかになったのである (Tozuka *et al.*, 2005)。

この時に得られた指針は、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻大気海洋科学講座で独自に大気海洋結合モデル (UTCM; Tozuka *et al.*, 2006a) を開発する上でも非常に重要な指針となっている。

5. おわりに

このように、季節変動は熱帯域の気候変動においても重要な役割を果たしており、季節変動を良く理解することが、熱帯域の経年変動や長期変動の理解を進める上で鍵を握ると考えられる。このような視点から、最近、“Decadal IOD”というインド洋熱帯域における 10 年スケールの気候変動モードについて調べた。その際、ダイポールモード現象が季節にロックされて発生していることに着目して解析を進めたところ、この気候変動モードが統計処理による幻の現象であることを明らかにすることができた。そして、熱力学的な視点からさらに解析を進め、その実体は、経年的なダイポールモード現象の発生の仕方が、外的な要因 (南インド洋の亜熱帯高気圧の変動に伴う南北熱輸送量の変動、およびエルニーニョに伴うインドネシア通過流の変動) の長期変動によって 10 年スケールで変動することにあることを突き止めた (Tozuka *et al.*, 2006b)。本稿で議論したダイポールモード現象やエルニーニョ/南方振動だけでなく、他の大規模な大気海洋相互作用現象 (南半球亜熱帯域のダイポールモード現象、大西洋のアトランティック・ニーニョやベンゲラ・ニーニョ等) も季節変

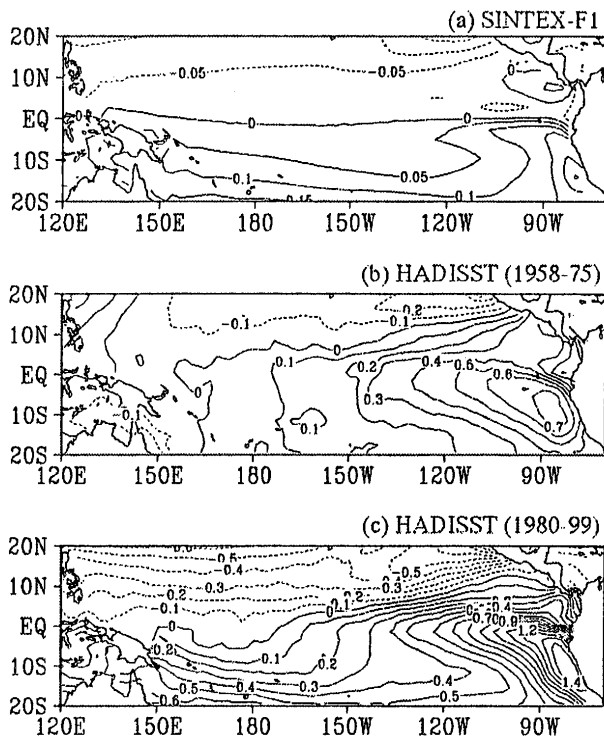


Fig. 8. Difference between the SSTA composite of the “annual ENSO” mode for December (+0) and December monthly climatology of the first CEOF mode for (a) SINTEX-F1 model, (b) HADISST (1958~1975), and (c) HADISST (1980~1999) (adapted from Tozuka *et al.* (2005)).

動と密接な関係を持っており、季節変動に着目した研究は、これらの現象やその長期変動のさらなる解明につながると思われる。

謝辞

この度は、名誉ある日本海洋学会岡田賞をいただき、大変光栄に思っている。推薦、選考いただいた先生方、学会員の皆様に厚く御礼申し上げます。指導教官としてこれまで御指導いただいた東京大学の山形 俊男教授には、心から大変感謝している。東京大学在学中に御指導、御助言いただいた東京大学の日比谷 紀之教授、安田 一郎教授、升本 順夫助教授、ウッズホール海洋研究所留学中に御指導いただいた John A. Whitehead 博士、Claes Rooth 博士に感謝の意を表したい。また、地球環境フロンティアの Swadhin K. Behera 博士、鍵本 崇博士、相木 秀則博士、羅 京佳博士、フランス LODYC の Sebastien Masson 博士、IPRC の Tangdong Qu 博

士、東京大学大学院理学系研究科の皆様には、御協力を賜った。以上の方々だけでなく、筆者の研究を支えてくださった全ての方々に厚く御礼申し上げます。

References

- Antonov, J., Levitus, S., T. P. Boyer, M. Conkright, T. O'Brien, and C. Stephens (1998): *World Ocean Atlas 1998 Vol. 2: Temperature of the Pacific Ocean*. NOAA Atlas NESDIS 28. U.S. Govt. Printing Office, 166 pp.
- Kagimoto, T. (1999): Numerical study on transport variations of the Kuroshio. Ph.D.-thesis, the University of Tokyo, 75 pp.
- Kalnay, E., and Coauthors (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437–471.
- Latif, M., and Coauthors (2001): ENSIP: the El Niño simulation intercomparison project. *Clim. Dyn.*, **18**, 255–276.
- Luo, J. -J., S. Masson, E. Roeckner, G. Madec, and T. Yamagata (2005): Reducing climatology bias in an ocean-atmosphere CGCM with improved coupling physics. *J. Climate*, **18**, 2,344–2,360.
- Masumoto, Y., and T. Yamagata (1991): Response of the western tropical pacific to the Asian winter monsoon: the generation of the Mindanao Dome. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 1,386–1,398.
- Neelin, J. D., D. S. Battisti, A. C. Hirst, F.F. Jin, Y. Wakata, T. Yamagata, and S. Zebiak (1998): ENSO theory. *J. Geophys. Res.*, **103**, 14,261–14,290.
- Qu, T., Y. Kim, M. Yaremchuk, T. Tozuka, A. Ishida, and T. Yamagata (2004): Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the south China Sea? *J. Climate*, **17**, 3,644–3,657.
- Rasmusson, E. M., and T. H. Carpenter (1982): Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 354–384.
- Rasmusson, E. M., M. Chelliah, and C. F. Ropelewski (1999): The observed climate of the 20th century. p. 1–138. In *Modeling the Earth's Climate and its Variability*, edited by W. R. Holland, S. Joussaume, and F. David, Elsevier Science, Netherlands.
- Tozuka, T., T. Kagimoto, Y. Masumoto, and T. Yamagata (2002): Simulated multiscale variations in the western tropical Pacific: The Mindanao Dome revisited. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 1,338–1,359.
- Tozuka, T., and T. Yamagata (2003a): Annual ENSO. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 1,564–1,578.

- Tozuka, T., and T. Yamagata (2003b): Two modes of ENSO. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 1,195–1,195.
- Tozuka, T., J. -J. Luo, S. Masson, S. K. Behera, and T. Yamagata (2005): Simulated annual ENSO in a coupled ocean-atmosphere model. *Dyn. Atmos. Oceans*, **39**, 41–60.
- Tozuka, T., T. Miyasaka, A. Chakraborty, M. Mujumdar, S. K. Behera, Y. Masumoto, H. Nakamura, and T. Yamagata (2006a): University of Tokyo Coupled General Circulation Model (UTCM1.0). *Ocean-Atmos. Res. Rep.*, **7**, 44 pp.
- Tozuka, T., J. -J. Luo, S. Masson, and T. Yamagata (2006b): Decadal modulations of the Indian Ocean Dipole in the SINTEX-F1 coupled GCM. *J. Climate*, in press.
- Tziperman, E., L. Stone, M. A. Cane, and H. Jarosh (1994): El Niño chaos: Overlapping of resonances between the seasonal cycle and the Pacific ocean-atmosphere oscillator. *Science*, **264**, 72–74.
- Umatani, S. and T. Yamagata (1991): Response of the Eastern Tropical Pacific to Meridional Migration of the ITCZ: The Generation of the Costa Rica Dome. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 346–363.
- Wallace, J. M., E. M. Rasmusson, T. P. Mitchell, V. E. Kousky, E. S. Sarachik, and H. von Storch (1998): On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA. *J. Geophys. Res.*, **103**, 14,241–14,259.
- Yamagata, T., and Y. Masumoto (1992): Interdecadal natural climate variability in the western Pacific and its implication in global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 167–175.
- Yamagata, T., S. K. Behera, J. -J. Luo, S. Masson, M. R. Jury, and S. A. Rao (2004): Coupled ocean-atmosphere variability in the tropical Indian Ocean. In *Earth's Climate: The Ocean-atmosphere Interaction. Geophysical Monograph Series*, **147**, 189–211.

Seasonal Air-Sea Interaction in the Tropics

Tomoki Tozuka[†]

Abstract

Using a high-resolution Pacific basin OGCM (Ocean General Circulation Model), the seasonal variation of the MD (Mindanao Dome) was investigated to obtain a more comprehensive understanding of the seasonal cycle in the tropical Pacific and to gain an in depth appreciation of ENSO (El Niño/Southern Oscillation). The MD develops locally during winter owing to the local Ekman upwelling induced by the positive wind stress curl of the Asian winter monsoon. Further, the propagation of a warm anomaly from the eastern tropical Pacific, plays an important role in the attenuation of the MD. The interannual variation of the MD is governed by variations in both the Ekman upwelling forced locally and the downwelling forced remotely in the east.

A detailed analysis of the generation mechanism of the warm anomaly, using various observational data, revealed the existence of a basin-scale seasonal air-sea interaction in the tropical Pacific; i.e. an “annual ENSO”. From a new viewpoint of the “annual ENSO”, the ENSO is interpreted as the interaction between two distinct modes of air-sea interaction, that is, the “annual ENSO” mode and an “interannual ENSO” mode. The decadal variation of ENSO is explained by changes in the relative phase and amplitude of these two modes. Using outputs from 200-year integrations of the SINTEX-F1 model, the “annual ENSO” reproduced in the coupled general circulation model was also investigated.

Key words: seasonal variation, Tropics, ocean-atmosphere interaction, ENSO

(Corresponding author's e-mail address : tozuka@eps.s.u-tokyo.ac.jp)

(Received 30 August 2006; accepted 31 August 2006)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2006)

[†] Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan