

西部北太平洋海洋前線域の十年規模変動

野中 正見（海洋研究開発機構）、中村 尚（東京大学/海洋研究開発機構）、
田口 文明、佐々木 英治（海洋研究開発機構）

1. はじめに

西部北太平洋は太平洋域の（数）十年規模変動の活動中心の一つであり、そこでの大気海洋相互作用がその十年規模変動を引き起こす、或いは強化する役割を持つことが示唆されている（例えば、Schneider and Cornuelle 2005; Qiu et al. 2007）。これに対応する西部北太平洋域での海面水温偏差は、北太平洋の亜熱帯循環域と亜寒帯循環域の境界となる海洋前線帯、いわゆる黒潮-親潮続流域で最も強くみられる（例えば、Nakamura et al. 1997）。また、中緯度の広い海域で見られる大気変動が海面水温偏差をもたらすという関係（例えば Cayan 1992）とは逆に、海洋前線帯においては海面水温変動が大気場の変動をもたらす得ることが最近の研究から示されてきている（例えば Nonaka and Xie 2003）。

そこで、北太平洋における十年規模変動とそれに寄与しうると考えられる中緯度域における大気海洋相互作用に関する理解を深めるために、黒潮-親潮続流域に見られる、黒潮続流前線と亜寒帯（親潮続流）前線という 2 つの海洋前線帯に特に注目し、その経年から十年規模変動の機構とその大気への影響の可能性についての研究を行ってきており、ここではそれらを取りまとめてご紹介する。海洋前線帯は南北規模が小さいため、その長期変動を記述・理解するには十分な解像度を持つデータが必要となる。しかし海洋表層下の観測データは限られているため、本研究では主に、これらの海洋前線帯を良く表現できる渦解像海洋大循環モデルの過去再現積分結果を用いた解析を行う。

2. 海洋大循環モデル OFES

米国 GFDL で開発された Modular Ocean Model version 3 (MOM3, Pacanowski and Griffies 2000) を基に地球シミュレータに最適化するよう多くの改訂を行った地球シミュレータ用高解像度海洋大循環モデル (OFES) を NCEP/NCAR 再解析データ (Kalnay et al. 1996) の 1950~2006 年の日平均値を

用いて駆動した。モデル海域は 75°N/S までの全球で、水平解像度は 0.1°、鉛直に 54 層を持つ。上記再解析データの風応力、水 flux を与え、熱 flux はその大気場とモデル海面水温からバルク法で決定しており、海面塩分は更に月毎気候値へ緩和させた。OFES の詳細は、Masumoto et al. (2004) 及び Sasaki et al. (2008) を参照されたい。年平均気候値の温度塩分場を与えた静止状態から月毎気候値で 50 年積分した場を初期値とした上記 57 年間の積分から、月平均値を用いて解析を行った。

3. 黒潮続流前線と亜寒帯前線の変動とそのメカニズム

3-1. 南北移動と海面・表層下の水温変動

OFES 過去再現積分結果から、西部北太平洋の十年規模海面水温偏差は上記 2 つの前線帯に強く現れ、特に海面水温が強い南北勾配を持つ亜寒帯前線帯に強く現れることが示された。これは前線帯の南北移動が海面水温偏差形成に重要であることを示唆する。実際、水温・塩分の南北-鉛直断面から 1970 年頃の温暖期と 1980 年代中頃の寒冷期の構造を比較すると、寒冷期には 2 つの前線帯ともに南側へ移動していた。亜寒帯前線帯（黒潮続流前線帯）では表層付近（表層下数百 m）で水温・塩分の南北勾配が大きいため、前線帯の南下に伴い表層付近（表層下）に水温・塩分の偏差の極大が現れる (Nonaka et al. 2006)。

このように、2 つの前線帯で南北移動の重要性が示されたが、その 2 つの前線帯での変動は注意してみると必ずしも常に同期してはいない。実際、冬季の海面水温観測データから亜寒帯前線帯での領域平均を指標として西部北太平洋域の経年変動との同時相関を取ると、黒潮続流前線帯、特にその南部の海面水温との相関は低く (Nonaka and Nakamura 2007)、2 つの前線帯は異なる変動を持ち、その変動メカニズムも異なるものと考えられる。

OFES の経年変動積分結果から両海洋前線帯において海面高度偏差の東西-時間分布を描画して

変動の伝播特性を調べると、黒潮続流前線帯においては、北太平洋中央部で風の変動によって励起された Rossby 波が西岸域まで伝播する様子が見られ、これが海盆西部での変動の要因となっていることが分かる (Nonaka et al. 2006)。風に起因する Rossby 波の励起とその伝播だけを取り入れた簡単なモデルによる海面高度偏差と比較すると OFES で見られる偏差をかなりよく再現しており (Taguchi et al. 2007)、上のことが確認される。このことは衛星観測による海面高度変動からも示されている (Qiu and Chen 2005)。

これに対し、亜寒帯前線帯では Rossby 波の西方伝播は海盆西部では不明確で、東方へ伝播するシグナルが示唆される時期がある。亜寒帯前線帯での海面水温偏差を詳しく調べると、親潮の変動と関係が見られることが示された。即ち、親潮が強化すると北海道・東北沖合いに低温偏差が生じ、それが2、3年かけて亜寒帯前線帯を主に移流によって東方へ広がる (Nonaka et al. 2008)。このように Rossby 波伝播とは異なる機構が寄与しうるために、亜寒帯前線帯と黒潮続流前線帯での変動が必ずしも同期しないのではないかと考えられる。

3-2. 黒潮続流の流速変動

黒潮続流域においては南北移動だけではなく、流速にも十年規模の変動が見られ、それはその南側の再循環の強さの変動も伴う (Qiu and Chen 2005; Taguchi et al. 2007)。Taguchi et al. (2007) は、この流速変動が大規模な大気の変動によって励起された南北に大きな規模を持つ海面高度偏差の西方伝播に起因することを示した。一方で、この大きな南北規模の偏差は、前線域に強く捕捉された小さい南北規模を持つ偏差を伴うことも示した。そして、これらのことから、大南北規模の偏差が、何らかの非線形的な過程を通じて、前線規模の偏差を生じさせるという仮説を提案している。

そこで、OFES 過去再現積分結果から黒潮流速の十年規模変動とそれに伴う海洋構造の変化を調べ、上記の小さい南北規模を持つ偏差の形成メカニズムを考察した。ここでは、経度方向の各流速データ点において 30-40°N の範囲で 100m 深の流速が最大となる緯度を黒潮続流の流軸とし、そこでの流速を黒潮続流の流速としてその十年規模変動を調べた。ただし、流速場に予め 37 ヶ月の移動平均を施すことで渦の影響を減らすとともに十年規模

変動を取り出している。

黒潮続流流軸上の流速と南北-鉛直断面上の東向き流速のラグ回帰図から、黒潮続流の強化は、流軸を中心に緯度 2 度程度の南北幅を持ち、主に 600 m 程度より浅い層で生じていることが示された。また流軸上の東向き流の強化はその南側・北側で西向き流速偏差を伴っており、南側・北側の再循環の強化を伴うことが示唆される。同様にして黒潮続流の流速変化に伴う渦位変化を見ると、強化時に流軸の北(南)側に高(低)渦位偏差が見られる。これは、Taguchi et al. (2005) の 1970 年代半ばの変動に関する実験結果とも一致する。黒潮続流の南側の低渦位水とそれに伴う再循環は、低緯度域における低渦位水が北上する黒潮によって輸送されることで生じるものと考えられており、黒潮続流最上流域での流速強化により低渦位水の移流が強化することで南側の低渦位偏差が生じるものと考えられる。

一方の北側の高渦位偏差の要因を考えるために、表層付近の渦位を定義し、その水平分布を描画する (図 1 下) と、黒潮続流の強化に伴い (図 1 上)、伊豆-小笠原海嶺付近で、おそらく地形との摩擦により、高渦位水が生じ、それが黒潮続流の北側へ移流される様子が示された。この渦位偏差は移流によって生じるために、南北方向に小さな規模を持ち、前線規模の流速変動をもたらし得るものと考えられる。以上の結果から、風系変動が励起した大規模な海面高度偏差が黒潮続流上流域を強化し、それが西岸境界域からの渦位移流を強化し、南北の再循環を強化することで、前線規模での黒潮続流の強化が生じる、というメカニズムが示唆される。

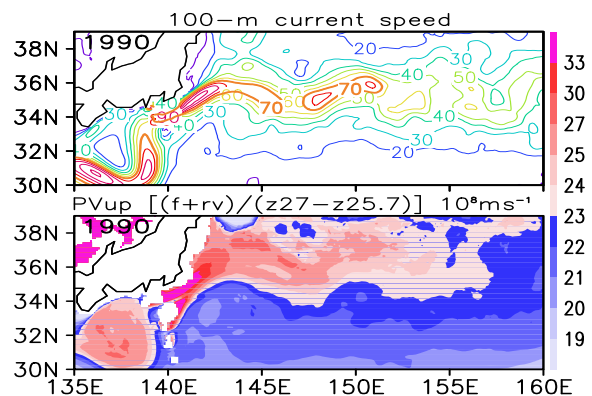


図 1: OFES 経年変動積分における 1990 年 1 月の前後 37 ヶ月で平均した 100m 深流速 (上) と上層 25.7-27.0σ_θ 等密度面間で定義した渦位 $(f+\zeta)/(z_{27}-z_{25.7})$ ($10^{-8}m^{-1}s^{-1}$)

(下)。ここで f と z は惑星及び相対渦度、 z_{27} と $z_{25.7}$ は 27.0 と 25.7σ 等密度面の深さを表す。

4. 海洋変動の大気への影響: 海面熱 flux への影響に注目して

4-1. 海面水温偏差と海面熱 flux 偏差

ここまで見てきたような海洋前線帯の変動は海面水温偏差を伴うが、これに伴う海面熱 flux 偏差は海面水温偏差を減衰させる傾向を持つ (Yasuda and Kitamura 2003; Nonaka et al. 2006)。この傾向は特に海面水温偏差の顕著な亜寒帯前線帯で明確であり、観測データからも示されている (Seager et al. 2001; Tanimoto et al. 2003)。これはこの海面水温偏差が大気からの熱的強制によってではなく、前節までに見て来たように海洋変動によって形成され、それに伴って海面熱 flux を変化させることで逆に大気へ何らかの作用を持つ可能性があることを示唆する。

4-2. 海面水温前線の海面熱 flux 分布への影響

このような海面熱 flux 変動への海面水温場の影響を明らかにするため、海面水温前線を再現する高解像度大気海洋結合モデル (CFES, Komori et al. 2008) における海面熱 flux 分布の形成過程を海陸分布の影響が少ない南インド洋の海洋前線帯に注目して調べた (Nonaka et al. 2009)。

海面熱 flux 分布の形成には個々の大気擾乱の寄与が大きい。冬季 (7 月) の snapshot (図 2) からある移動性低気圧に注目すると、その西側で高緯度側から寒気が移流し、それが海面水温前線を越え暖水側に入ったとたんに、海面水温と海上気温の差が急激に大きくなり、そこで海洋から大気へ大きな顕熱・潜熱放出が生じる。この大きな熱放出は海面水温前線沿いに現れており、海面熱 flux

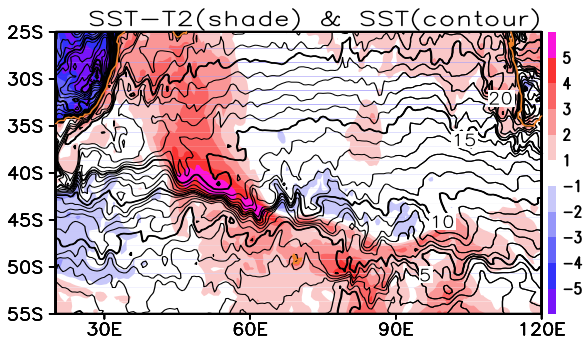


図 2: CFES Case66, 1 年目 7 月 30 日の南インド洋での SST (等値線、間隔は 1°C) と SST-2m 気温 (影)。

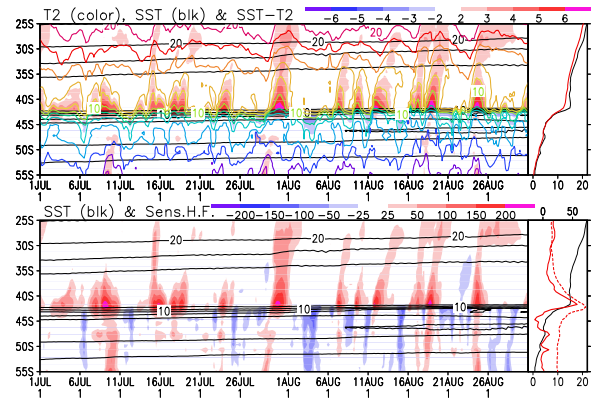


図 3: 55°E での (上) SST (黒線)、2m 気温 (色線)、SST-2m 気温 (影) と (下) 顕熱 (影) と SST (黒線) の緯度-時間断面。等値線は 2°C 毎。右図はこの期間での平均場 (実線) と標準偏差 (破線) の南北分布。SST と 2m 気温が下軸、顕熱は上軸。CFES Case66, 1 年目 7-8 月の結果。

の分布が海面水温前線構造の影響を強く受けることが示される。

図 3 に見られるように、大気擾乱に伴う、寒 (暖) 気移流により冷たい (暖かい) 空気が海面水温前線を越える (左上図) と、強い上 (下) 向きの熱 flux が生じ (左下図)、その冷たい (暖かい) 空気を急激に暖め (冷却し) て元の気温に戻す、というメカニズムが働く。これが繰り返されることによって、海面水温前線を挟んで海面熱 flux に強いコントラストが作られる (右下図赤実線)。また、強い海面熱 flux は大気擾乱に伴って間欠的に生じており、その分散も海面水温前線帯で極大を持つ (右下図赤破線)。

この様に海面水温前線の存在が、海面熱 flux の局在性を作る。同時にこれによって、強い大気擾乱があるにも関わらず海面気温は常に海面水温勾配に緩和されていくことになり、月平均場等で見ると海面水温前線の上には、気温にも強い勾配が維持される (右上図)。このことは大気擾乱の活動を維持することに重要であると考えられる (Nakamura et al. 2004, 2008)。実際に南インド洋のストームトラックは海面水温前線の上空に見られ (Nakamura and Shimpo 2004)、その特徴は CFES でも再現されている。西部北太平洋域においても、領域大気モデルを用いた実験から、海面水温前線の勾配の強弱が海面熱 flux 分布だけでなく、大気擾乱の強さや降水分布にも影響を与えうることが示された (Taguchi et al. 2010)。

このような中緯度海洋前線帯から大気場への影

響を通じて、海洋変動が大気変動へどのように影響しうるのかを、高解像度の観測データや大気海洋結合モデルなどを用いて考えて行くことは今後の重要な課題である。

謝辞：本研究の一部は農林水産省委託プロジェクト研究「環境変動に伴う海洋生物大発生の予測・制御技術の開発 (POMAL)」の研究課題「魚種交替の予測・利用技術の開発 (SUPRFISH)」によって支援されている。

References

- Cayan, D. R., 1992: Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: Driving the sea surface temperature. *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 859-881.
- Kalnay, E., et al., 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Komori, N., A. Kuwano-Yoshida, T. Enomoto, H. Sasaki, and W. Ohfuchi, 2008: High-resolution simulation of the global coupled atmospheric-ocean system: Description and preliminary outcomes of CFES (CGCM for the Earth Simulator), in *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, W. Ohfuchi and K. Hamilton (eds.), chapter 14, pp. 241-260, Springer, New York.
- Masumoto, Y., H. Sasaki, T. Kagimoto, N. Komori, A. Ishida, Y. Sasai, T. Miyama, T. Motoi, H. Mitsudera, K. Takahashi, H. Sakuma, and T. Yamagata, 2004: A Fifty-Year Eddy-Resolving Simulation of the World Ocean -Preliminary Outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)-, *J. Earth Simulator*, **1**, 31-52.
- Nakamura, H., G. Lin, and T. Yamagata, 1997: Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2215-2225.
- Nakamura, H., and A. Shimpo, 2004: Seasonal variations in the Southern Hemisphere storm tracks and jet streams as revealed in a reanalysis dataset. *J. Climate*, **17**, 1828-1844.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto, and A. Shimpo, 2004: Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts. In *Earth Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*, C. Wang, S.-P. Xie, and J.A. Carton (eds.), Geophys. Monogr., **147**, AGU, Washington D.C., 329-345.
- Nakamura, H., T. Sampe, A. Goto, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie, 2008: On the importance of mid-latitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L15709, doi:10.1029/2008GL03410.
- Nonaka, M., and H. Nakamura, 2007: [Are sea surface temperature variations in the Kuroshio Extension and subarctic frontal zones in the western North Pacific Ocean coherent? Proceedings for the International Symposium on the Origin and Evolution of Natural Diversity](#), 201-205.
- Nonaka, M., and S.-P. Xie, 2003: Co-Variations of Sea Surface Temperature and Wind over the Kuroshio and its Extension: Evidence for Ocean-to-Atmospheric Feedback. *J. Climate*, **16**, 1404-1413.
- Nonaka, M., H. Nakamura, Y. Tanimoto, T. Kagimoto, and H. Sasaki, 2006: Decadal variability in the Kuroshio-Oyashio Extension simulated in an eddy-resolving OGCM. *J. Climate*, **19**, 1970-1989.
- Nonaka, M., H. Nakamura, Y. Tanimoto, T. Kagimoto, and H. Sasaki, 2008: Interannual-to-decadal variability in the Oyashio Current and its influence on temperature in the subarctic frontal zone: An eddy-resolving OGCM simulation. *J. Climate*, **21**, 6283-6303.
- Nonaka, M., H. Nakamura, B. Taguchi, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, and K. Takaya, 2009: Air-sea heat exchanges characteristic to a prominent midlatitude oceanic front in the South Indian Ocean as simulated in a high-resolution coupled GCM. *J. Climate*, in press.
- Pacanowski R. C., and S. M. Griffies, 2000: MOM 3.0 Manual, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/National Oceanic and Atmospheric Administration, 680pp.
- Qiu, B. and S. Chen, 2005: Variability of the Kuroshio Extension Jet, Recirculation Gyre and Mesoscale Eddies on Decadal Timescales, *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 2090-2103.
- Qiu, B., N. Schneider, and S. Chen, 2007: Coupled decadal variability in the North Pacific: An observationally constrained idealized model. *J. Climate*, **20**, 3602-3620.
- Sasaki, H., M. Nonaka, Y. Masumoto, Y. Sasai, H. Uehara, and H. Sakuma, 2008: An eddy-resolving hindcast simulation of the quasi-global ocean from 1950 to 2003 on the Earth Simulator. *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, W. Ohfuchi and K. Hamilton (eds.), chapter 10, pp. 157-186, Springer, New York.
- Schneider, N., and B.D. Cornuelle, 2005: The forcing of the Pacific Decadal Oscillation. *J. Climate*, **18**, 4355-4373.
- Seager R., Y. Kushnir, N. H. Naik, M. A. Cane, and J. Miller, 2001: Wind-driven shifts in the latitude of the Kuroshio-Oyashio extension and generation of SST anomalies on decadal timescales. *J. Climate*, **14**, 4149-4165.
- Taguchi, B., S.-P. Xie, H. Mitsudera, and A. Kubokawa, 2005: Response of the Kuroshio Extension to Rossby waves associated with the 1970s climate regime shift in a high-resolution ocean model. *J. Climate*, **18**, 2979-2995.
- Taguchi, B., S.-P. Xie, N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, and Y. Sasai, 2007: Decadal variability of the Kuroshio Extension: Observations and an eddy-resolving model hindcast. *J. Climate*, **20**, 2357-2377.
- Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, S.-P. Xie, 2010: Influences of the Kuroshio/Oyashio Extension on air-sea heat exchanges and storm track activity as revealed in regional atmospheric model simulations for the 2003/04 season. *J. Climate*, revised.
- 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** (C10), 3304, doi:10.1029/2002JC001750.
- Yasuda, T., and Y. Kitamura, 2003: Long-term variability of North Pacific subtropical mode water in response to spin-up of the subtropical gyre. *J. Oceanogr.*, **59**, 279-290.