

306 : 405 : 3 (大気海洋相互作用 ; 水温フロント)

1. 中緯度西岸域における大気海洋相互作用

谷 本 陽 一*

1. はじめに

海面は対流圏の下部境界の一部であり、全球の対流圏循環や気候の形成と変動にとって重要な境界面の1

つである。海面と直に接するのは大気境界層と海洋混合層であり、これら2つの層は海面における熱、淡水、運動量の交換を通して局所的に相互作用する。大気境界層と海洋混合層の地理的分布は、さらに上方の自由大気中の循環と下方の海洋亜表層の循環にそれぞれ影響を与え、より大規模の大気海洋結合系としても

* 北海道大学大学院地球環境科学研究院。

© 2012 日本気象学会

相互作用する。

大規模大気海洋結合系の気候力学は主として熱帯域で詳しく理解されている。赤道太平洋上の Walker 循環と赤道冷水舌を形成する Bjerknes feedback (Bjerknes 1966; 日本語解説は例えば, 安成 1996; 都田 1998) や熱帯収束帯と水温極大を赤道の北側に維持する Wind-Evaporation-SST feedback (Xie and Philander 1994; 日本語解説は謝 1997, 2002) はその代表例である。一方, 中緯度における大気と海洋は必ずしも相互作用系と認識されているわけではない。海洋の亜熱帯循環系や亜寒帯循環系は海盆規模の海面風応力によって駆動されているが, そのような循環系により形成される海面水温分布とその変動場が中緯度の対流圏循環の形成にどのような役割を果たしているかは必ずしも明らかではない (例えば, Lau 1997; Kushnir *et al.* 2002)。

中緯度の大気循環場には総観規模擾乱が卓越しており, 海洋上の大気境界層もこれらの大気擾乱に伴う移流の効果を強く受ける。海洋に対する大気応答の理解にとって, これらの擾乱による効果はノイズとなるため, 大規模大気循環場の応答のみならず, 水温分布に対する局所的な大気境界層の応答についての理解でさえも必ずしも充分ではなかった。

近年, 人工衛星計測とスーパーコンピュータの目覚ましい進展により, 観測データと数値モデリングの高解像度化が進み, 100km 程度の空間スケールを持つ海洋中規模渦や水温前線近傍における海洋から大気への影響が明らかにされてきている。中緯度大気海洋系全般に関する研究の進捗は Small *et al.* (2008), Kwon *et al.* (2010), 谷本・野中 (2007), 田口・野中 (2010) に詳しく解説されている。本講演では, 海面水温分布に対する大気境界層の応答に関する議論として海上風の応答を取り上げ, 主に日本に近い黒潮・黒潮続流域を例として最新の成果を解説する。

2. 水温フロント近傍における海上風応答

2.1 熱帯太平洋域における先駆的研究

大規模な海上風分布は偏西風や貿易風, あるいはモンスーン循環によって決定づけられるが, 水温分布によって空間的な変調を受ける。Lindzen and Nigam (1987) は熱帯の海面水温分布が大気境界層温度の空間変化を通して海面気圧分布を形成する静水圧調節 (あるいは海面気圧調節) メカニズムを提唱した。水温フロント近傍の場合, 海面気圧傾度は冷水上から暖

水上に向き, 最も強い海上風応答は水温フロント上に生じる。一方, Wallace *et al.* (1989) と Hayes *et al.* (1989) は東部赤道太平洋域における海面水温分布が大気境界層内の鉛直混合の空間変化を通して海上風分布を形成する鉛直混合調節メカニズムを提唱した。暖水上における海面付近は静的不安定であり, 大気境界層内の強い鉛直混合は大気境界層上部の大きい運動量を海面まで引き込む。結果として, 水温フロントの暖水側で最も強い海上風応答となることが期待される。

これらの2つのメカニズムは互いに相反するものではないが, Small *et al.* (2003, 2005) は領域大気モデルを用いた海面付近の運動量収支に基づき, 東部赤道太平洋における現実の海上風分布の形成には静水圧調節がより重要であると指摘した。平均風による移流効果が小さい場合, 2つのメカニズムは水温分布と海上風分布の異なる位相関係となって顕在化する。しかし, 現実の東部赤道太平洋域では南東貿易風が卓越しているため, 静水圧調節に伴う海面気圧傾度は下流にずれ, 結果として暖水側で強風となることを示した。しかしながら, Small *et al.* (2005) が自ら指摘しているように, 領域大気モデルにおける鉛直混合は大気境界層の観測結果と比較すると過小評価となっている可能性がある。実際, 東部熱帯太平洋域における現場観測 (Hashizume *et al.* 2002; Raymond *et al.* 2004) は鉛直混合調節による海上風の加速・減速を示唆している。

2.2 中緯度水温フロントにおける最近の研究成果

熱帯域で提唱された2つの海上風調節メカニズムは中緯度における海上風の応答にも適用可能である。水温フロント付近は大気海洋間の温度差・湿度差が大きく, これらに伴う海面熱フラックスが局所的な静水圧調節や鉛直混合調節を生じさせる。

人工衛星による海上風ベクトルの観測データは, 水温フロント近傍における海上風の空間変化を充分に分解している。平均海上風が水温フロントを横切るとき (水温フロントに沿うとき), 海上風の発散成分 (回転成分) がフロントに沿って明瞭に示される (O'Neill *et al.* 2003; Chelton *et al.* 2004; Vecchi *et al.* 2004; O'Neill *et al.* 2005; Park *et al.* 2006)。人工衛星による海上風の計測原理は, 海上風ではなく海上風応力を計測しているため, 水温フロント付近の発散成分や回転成分は単に海上風と海流との差による見かけに過ぎない可能性は残る (Cornillon and Park 2001; Kelly

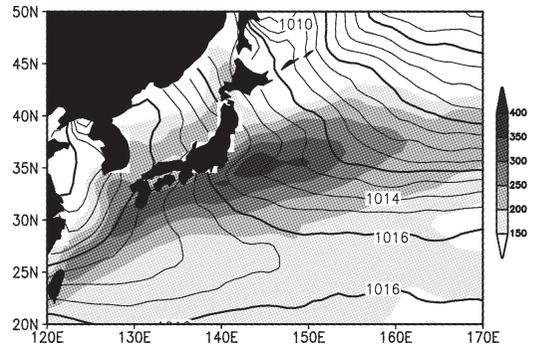
et al. 2001). しかし, 船舶観測資料に基づく海上風分布の解析 (Tokinaga et al. 2005) や黒潮統流やブラジル海流などの強流帯に沿った水温フロント近傍で行われた大気境界層観測 (Pezzi et al. 2005; Tokinaga et al. 2006) は, 静的安定度が大きい (小さい) 海域で鉛直シアーが強い (弱い) ことを示し, 鉛直混合調節と整合的である.

一方で, 静水圧調節を示唆する研究成果も中緯度水温フロント近傍で提示されている. Tokinaga et al. (2009) は船舶資料に基づく海面気圧場に緯度方向のハイパスフィルタを施し, 黒潮統流の暖水側で低圧偏差となることを示した. Minobe et al. (2008, 2010) はメキシコ湾流の暖水側に見られる低圧偏差がより強い対流性降雨を促すことを指摘している.

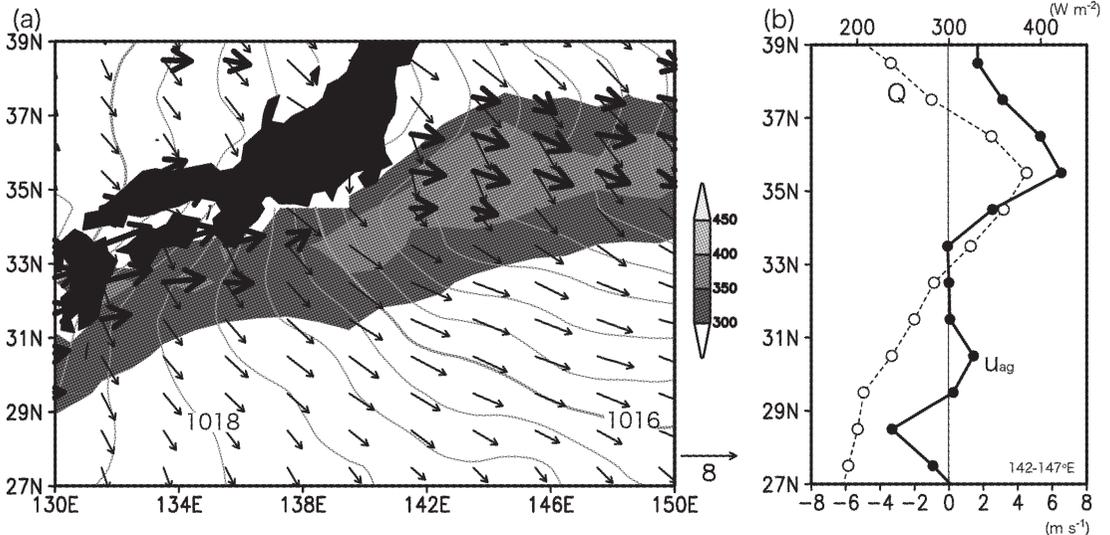
中緯度においても, 静水圧調節と鉛直混合調節は相反するものではないため, それぞれの調節過程に関するこれまでの指摘は矛盾を意味するものではない. 次節では, 数値モデルが介入しない船舶観測資料データの解析と領域大気モデル実験に示される海上風, 海面気圧の分布から, 黒潮・黒潮統流域で静水圧調節と鉛直混合調節がどのように働いているかを考察する.

3. 日本南岸に見られる楔形低圧部

船舶観測資料に基づく, 西部北太平洋域冬季 (1-3月) における海面気圧と海面熱フラックス (顕熱フラックスと潜熱フラックスの和) の気候値 (57年平均) を第1図に示す. 海盆規模の海面気圧はいわゆる西高東低型である. 北西季節風は冷たく乾いた空気塊を西部北太平洋の広い海域に供給するが, 200Wm^{-2} を超える大きい海面熱フラックスは台湾から日本南岸



第1図 船舶観測資料に基づく冬季 (1-3月) における海面気圧 (等値線 1 hPa 間隔) と海面熱フラックス (Wm^{-2} , 陰影) の気候値.



第2図 (a) 船舶観測資料に基づく冬季における海上風 (ms^{-1} , 細矢印) とその非地衡風成分 (ms^{-1} , 太矢印) の気候値. 海面気圧 (等値線 0.5hPa 間隔) と海面熱フラックス (Wm^{-2} , 陰影) を重ねている. 3.5ms^{-1} 以下の非地衡風成分は表示していない. (b) $142\text{-}147^\circ\text{E}$ で平均した西風非地衡風成分 (ms^{-1} , 太実線) と海面熱フラックス (細破線, Wm^{-2}) の気候値の緯度分布.

を通り黒潮続流にかけて形成される水温フロント付近に限定される。海面からの熱放出は大気海洋間の温度差・気温差を減ずるように働くが、海洋力学による水温フロント構造の維持と季節風による断続的な寒気移流が大気海洋間の温度差・湿度差を維持し、水温フロント付近における海面熱フラックスの局在を形成する。

黒潮・黒潮続流域における海面気圧分布を詳細に見ると、海面気圧の等圧線は蛇行して、西向きの楔（くさび）形低圧部が海面熱フラックスの極大に対し緯度約1°南にずれて形成されている。このような楔形低圧部は北西季節風が卓越しはじめる秋季（10–12月）平均気候値にも示される。Tokinaga *et al.* (2009) がハイパスフィルタを用いて低圧偏差を示したように、この楔形低圧部は黒潮・黒潮続流域の大きい熱フラックスに対する静水圧調節であり、水温フロントスケールの海面気圧分布に空間的な変調をもたらしていることを示している。

地衡風バランスから、海上風は楔形低圧部の北側で東風成分、南側で西風成分を持ち、海面摩擦の効果により楔形低圧部の中心へ吹き込む非地衡風成分が期待される。しかしながら、第2図に示すように実際の海上風は楔形低圧部の北側で等圧線を横切る西風の非地衡風成分を持つのにに対し、楔形低圧部の南ではほぼ地衡風的であり、非地衡風成分の分布は楔形低圧部の南北で非対称となっている。これらの非地衡風成分は海面熱フラックスの極大域である楔形低圧部の北側で顕著であり、鉛直混合調節による西風加速の効果を示唆している。

異なる海面水温場を境界条件とした領域大気モデル実験をそれぞれ行った。再解析データから与えている壁面境界条件を含む実験設定は双方の実験で同一である。これらの数値実験は海面熱フラックスが大きかったある特定の冬（2002/2003年）を対象としているが、以下に示すように船舶観測資料に対する解析結果を支持している。

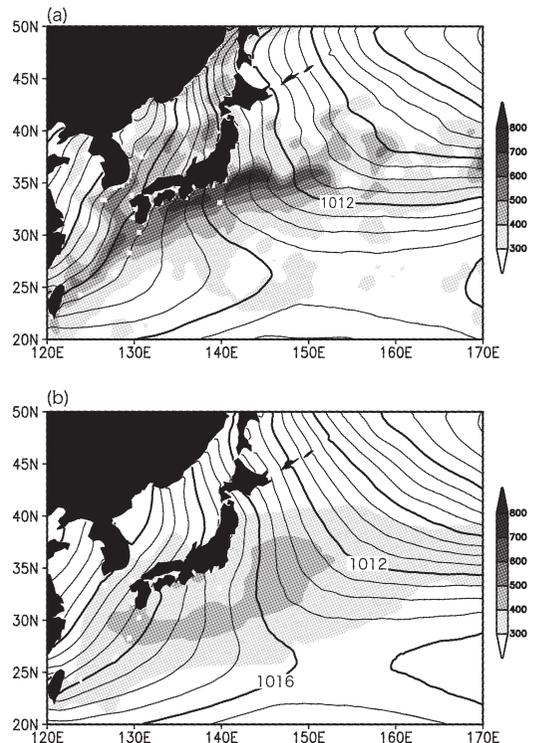
1つめの標準実験では人工衛星計測による高解像度の海面水温場を与えた。この実験では、黒潮・黒潮続流域における楔形低圧部が再現される（第3図a）。一方で、海面水温場を平滑化し、水温フロントに伴う温度傾度を減じた場合、黒潮・黒潮続流域における海面熱フラックスの局在や楔形低圧部の形成は見られない（第3図b）。

標準実験の黒潮続流域における温位の鉛直緯度断面

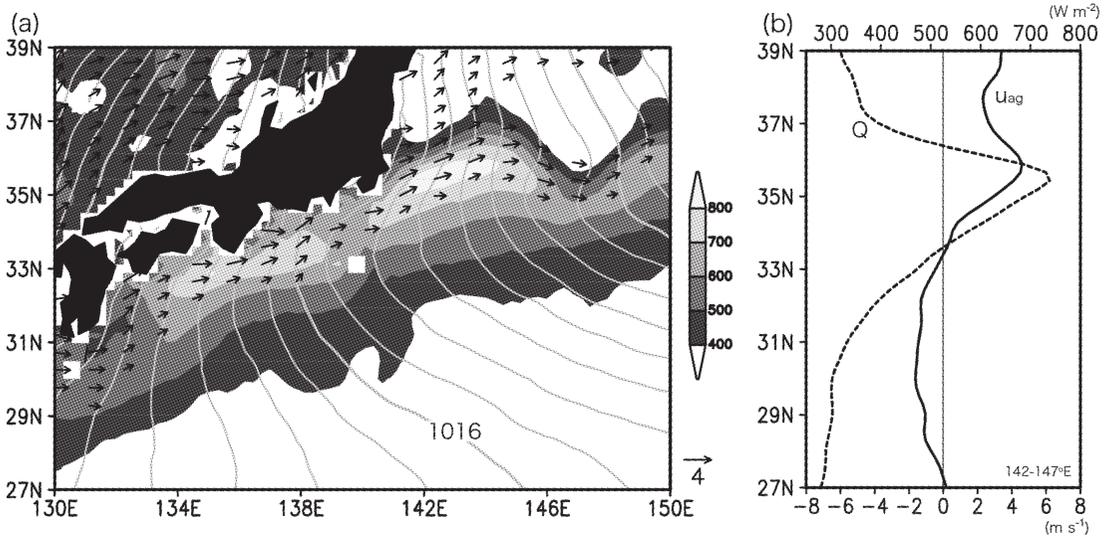
は33–35°Nで正の空間偏差を示し、熱フラックスの極大（35.5°N）に対して1–2°南に位相がずれている。熱フラックスの影響を受けた大気境界層内の温位偏差が北西季節風により南に移流されていることを示す（図省略）。海面気圧の極小は温位の正偏差と同じ緯度に形成され、静水圧調節であることを示す。

標準実験における海上風とその非地衡風成分を第4図に示す。標準実験において、西風成分を持つ非地衡風成分は黒潮・黒潮続流域に沿った海面熱フラックスの極大域に見られる。黒潮続流の蛇行に伴い、水温フロントに伴う熱フラックスの極大は147–148°Eで南下する。非地衡風成分もこの蛇行に従って、この経度帯での南下が見られる。このような非地衡風成分と熱フラックスの極大域の空間的一致は、観測結果と同様であり、鉛直混合調節を強く示唆する。

春季においても、黒潮・黒潮続流域に沿う水温フロ



第3図 領域大気モデル実験における冬季平均海面気圧（等値線1 hPa間隔）と海面熱フラックス（ Wm^{-2} 、陰影）。(a)高解像度海面水温場を与えた実験結果。(b)平滑化した海面水温場を与えた実験結果。



第4図 (a)領域大気モデル実験における冬季平均海上風非地衡風成分 (ms^{-1} , 矢印). 海面気圧 (等値線0.5hPa間隔) と海面熱フラックス (Wm^{-2} , 陰影) を重ねている. 3.0ms^{-1} 以下の非地衡風成分は表示していない. (b)142-147°Eで平均した西風非地衡風成分 (ms^{-1} , 太実線) と海面熱フラックス (細破線, Wm^{-2}) の緯度分布.

ント構造は維持されるため、海面熱フラックスの局在が示される。ただし、その大きさは秋季・冬季に比べて小さい。夏季では、強い日射の影響により、黒潮・黒潮続流域における水温フロント構造は亜表層に隠され、海面には出現しない。春季になると季節風は南から南西方向に向きを変え、経度方向の気圧傾度も東高西低となる。黒潮・黒潮続流域における海面気圧には東向き楔形低圧部が形成される (図省略)。

楔形低圧部は日本南岸に形成されるため、陸地の影響が低圧部の形成に関わっている可能性がある。しかし、楔形低圧部は日本列島の風上側・風下側を問わず形成されていることから、陸地の影響は小さいと考えられる。また、水温フロント構造を減じた領域大気モデル実験で楔形低圧部は形成されず、この結果も陸地の影響は直接的ではないことを示唆する。

4. おわりに

本講演では、黒潮・黒潮続流域における海面気圧と海上風の空間分布から静水圧調節と鉛直混合調節について議論した。観測データの解析からだけでは、それぞれの調節メカニズムの相対的重要性を考察する定量的議論には限界があり、領域大気モデルなどの数値実験に基づく運動量収支解析などがさらに必要である。

一方、数値モデルの境界層構造はモデルに組み込まれるパラメタリゼーションに強く依存する。それぞれの研究手法を活かしつつ、黒潮・黒潮続流域以外にも対象を拡げ一般性を追求することが重要であろう。

ここで議論してきた海上風の調節過程は水温変化に対する局所的な大気境界層の応答であるので、現実の応答時間のスケールはせいぜい数時間程度に過ぎない。総観規模擾乱により大気移流の方向が変化する中で、それぞれの調節過程がどのように働いているか、さらには、海上風の応答が海洋混合層の形成などにどのようにフィードバックしているかを、洋上観測、数値実験の両面から明らかにする必要がある。

中緯度の大気と海洋を結合系と捉えるためには、ここで議論してきた水温フロント近傍の局所的な大気海洋相互作用がより大規模な大気海洋系の平均場や変動場にもどのように関連しているかを考えていく必要がある。水温フロント付近の大気境界層の応答は、総観規模である高低気圧活動の変調を通じて、さらに大きい海盆規模/惑星規模の大気循環場に影響することが指摘されてきている (Nakamura *et al.* 2008; Brayshaw *et al.* 2008; Nonaka *et al.* 2009; Taguchi *et al.* 2009; Iizuka 2010)。さらに、水温フロント域で変調を受けた海上風応力場が亜熱帯/亜寒帯循環系の輸送

量に影響することも指摘されている (Qiu *et al.* 2007; Hogg *et al.* 2009). これら大規模場への影響が結合系としてどのような役割を持つかについての理解はまだ不十分であり, 科学的挑戦に値する研究課題が数多く残されている. 国内では, 大気と海洋の境界領域の研究に新たな“波”を起こすべく, 中緯度大気海洋相互作用を「気候系の Hot Spot」と位置づけた研究計画がいよいよスタートする. 今後, さまざまな境界面に多様な“波”が起こることを期待したい.

謝 辞

本解説の初稿にコメントしてくださった海洋研究開発機構・野中正見博士, ハワイ大学・時長宏樹博士, 総合地球環境学研究所・大島和裕博士に謝意を表します.

参 考 文 献

- Bjerknes, J., 1966: A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, **18**, 820-829.
- Brayshaw, D. J., B. Hoskins and M. Blackburn, 2008: The storm-track response to idealized SST perturbations in an aquaplanet GCM. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 2842-2860.
- Chelton, D. B., M. G. Schlax, M. H. Freilich and R. F. Milliff, 2004: Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds. *Science*, **303**, 978-983.
- Cornillon, P. and K.-A. Park, 2001: Warm core ring velocities inferred from NSCAT. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 575-578.
- Hashizume, H., S.-P. Xie, M. Fujiwara, M. Shiotani, T. Watanabe, Y. Tanimoto, W. T. Liu and K. Takeuchi, 2002: Direct observations of atmospheric boundary layer response to SST variations associated with tropical instability waves over the eastern equatorial Pacific. *J. Climate*, **15**, 3379-3393.
- Hayes, S. P., M. J. McPhaden and J. M. Wallace, 1989: The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Weekly to monthly variability. *J. Climate*, **2**, 1500-1506.
- Hogg, A. M. C., W. K. Dewar, P. Berloff, S. Kravtsov and D. K. Hutchinson, 2009: The effects of mesoscale ocean-atmosphere coupling on the large-scale ocean circulation. *J. Climate*, **22**, 4066-4082.
- Iizuka, S., 2010: Simulations of wintertime precipitation in the vicinity of Japan: Sensitivity to fine-scale distributions of sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **115**, D10107, doi:10.1029/2009JD012576.
- Kelly, K. A., S. Dickinson, M. J. McPhaden and G. C. Johnson, 2001: Ocean currents evident in satellite wind data. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2469-2472.
- Kushnir, Y., W. A. Robinson, I. Blade, N. M. J. Hall, S. Peng and R. Sutton, 2002: Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation. *J. Climate*, **15**, 2233-2256.
- Kwon, Y.-O., M. A. Alexander, N. A. Bond, C. Frankignoul, H. Nakamura, B. Qiu and L.A. Thompson, 2010: Role of the Gulf Stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere-ocean interaction: A review. *J. Climate*, **23**, 3249-3281.
- Lau, N.-C., 1997: Interactions between global SST anomalies and the midlatitude atmospheric circulation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 21-33.
- Lindzen, R. S. and S. Nigam, 1987: On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2418-2436.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.-P. Xie and R. J. Small, 2008: Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, **452**, 206-209.
- Minobe, S., M. Miyashita, A. Kuwano-Yoshida, H. Tokinaga and S.-P. Xie, 2010: Atmospheric response to the Gulf Stream: Seasonal variations. *J. Climate*, **23**, 3699-3719.
- 都田菊郎, 1998: Bjerknes と Walker 循環. *天気*, **45**, 341-348.
- Nakamura, H., T. Sampe, A. Goto, W. Ohfuchi and S.-P. Xie, 2008: On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L15709, doi:10.1029/2008GL034010.
- Nonaka, M., H. Nakamura, B. Taguchi, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida and K. Takaya, 2009: Air-sea heat exchanges characteristic of a prominent midlatitude oceanic front in the south Indian Ocean as simulated in a high-resolution coupled GCM. *J. Climate*, **22**, 6515-6535.
- O'Neill, L. W., D. B. Chelton and S. K. Esbensen, 2003: Observations of SST-induced perturbations of the wind stress field over the Southern Ocean on seasonal timescales. *J. Climate*, **16**, 2340-2354.
- O'Neill, L. W., D. B. Chelton, S. K. Esbensen and F. J. Wentz, 2005: High-resolution satellite measurements of the atmospheric boundary layer response to SST variations along the Agulhas Return Current. *J. Cli-*

- mate, 18, 2706-2723.
- Park, K.-A., P. Cornillon and D. L. Codiga, 2006: Modification of surface winds near ocean fronts: Effects of Gulf Stream rings on scatterometer (QuikSCAT, NSCAT) wind observations. *J. Geophys. Res.*, 111, C03021, doi:10.1029/2005JC003016.
- Pezzi, L. P., R. B. Souza, M. S. Dourado, C. A. E. Garcia, M. M. Mata and M. A. F. Silva-Dias, 2005: Ocean-atmosphere in situ observations at the Brazil-Malvinas Confluence region. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22603, doi:10.1029/2005GL023866.
- 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.
- Raymond, D. J., S. K. Esbensen, C. Paulson, M. Gregg, C. S. Bretherton, W. A. Petersen, R. Cifelli, L. K. Shay, C. Ohlmann and P. Zuidema, 2004: EPIC2001 and the coupled ocean-atmosphere system of the tropical east Pacific. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 1341-1354.
- Small, R. J., S.-P. Xie and Y. Wang, 2003: Numerical simulation of atmospheric response to Pacific tropical instability waves. *J. Climate*, 16, 3723-3741.
- Small, R. J., S.-P. Xie, Y. Wang, S. K. Esbensen and D. Vickers, 2005: Numerical simulation of boundary layer structure and cross-equatorial flow in the eastern Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 62, 1812-1830.
- Small, R. J., S. P. deSzoeke, S. P. Xie, L. O'Neill, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall and S. Minobe, 2008: Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dyn. Atmos. Oceans*, 45, 274-319.
- 田口文明, 野中正見, 2010: 海面水温前線. *天気*, 57, 423-425.
- Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka and S.-P. Xie, 2009: Influences of the Kuroshio/Oyashio Extensions on air-sea heat exchanges and storm-track activity as revealed in regional atmospheric model simulations for the 2003/04 cold season. *J. Climate*, 22, 6536-6560.
- 谷本陽一, 野中正見, 2007: 中高緯度域の大気海洋相互作用. *天気*, 54, 525-528.
- Tokenaga, H., Y. Tanimoto and S.-P. Xie, 2005: SST-induced surface wind variations over the Brazil-Malvinas confluence: Satellite and in situ observations. *J. Climate*, 18, 3470-3482.
- Tokenaga, H., Y. Tanimoto, M. Nonaka, B. Taguchi, T. Fukamachi, S.-P. Xie, H. Nakamura, T. Watanabe and I. Yasuda, 2006: Atmospheric sounding over the winter Kuroshio Extension: Effect of surface stability on atmospheric boundary layer structure. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L04703, doi:10.1029/2005GL025102.
- Tokenaga, H., Y. Tanimoto, S.-P. Xie, T. Sampe, H. Tomita and H. Ichikawa, 2009: Ocean frontal effects on the vertical development of clouds over the western North Pacific: In situ and satellite observations. *J. Climate*, 22, 4241-4260.
- Vecchi, G. A., S.-P. Xie and A. S. Fischer, 2004: Ocean-atmosphere covariability in the western Arabian Sea. *J. Climate*, 17, 1213-1224.
- Wallace, J. M., T. P. Mitchell and C. Deser, 1989: The influence of sea-surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Seasonal and inter-annual variability. *J. Climate*, 2, 1492-1499.
- 謝 尚平, 1997: 熱帯気候の南北非対称性の形成に関わる大気海洋相互作用—1996年度山本・正野論文賞受賞記念講演—. *天気*, 44, 389-398.
- 謝 尚平, 2002: 大気と海洋の多様な相互作用—2002年度日本気象学会賞受賞記念講演—. *天気*, 49, 955-968.
- Xie, S.-P. and S. G. H. Philander, 1994: A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. *Tellus A*, 46, 340-350.
- 安成哲三, 1996: 気候の年々変動をきめるもの. 気候変動論, 岩波書店, 33-68.