

## 海面水温前線

### 1. はじめに

海面水温の顕著な水平勾配で特徴づけられる「海面水温前線」は、海洋上の至る所に様々な空間スケールで存在する。この構造は、海洋の力学によって維持・形成され、大気海洋間の熱交換によっても容易に解消されない。近年、長期間にわたって蓄積されてきた人工衛星データや現場観測、及び高解像度数値モデリングによる研究から、海洋中規模渦スケールの大気海洋相互作用が示され、更には黒潮・メキシコ湾流などに伴う海面水温前線が、大気への影響を通じて、海盆～半球規模の気候形成やその変動に対して重要な役割を担う可能性が指摘されてきている。本稿では、気象学・気候学的に注目され始めた「海面水温前線」の新たな側面を紹介する。誌面の都合から全てを引用できなかったが、2節と3節に関する原著論文については、それぞれ Small *et al.* (2008) と Kwon *et al.* (2010) を主に参照されたい。

### 2. 海洋中規模渦スケールでの大気海洋相互作用

エルニーニョ現象に代表されるような、大気と海洋が力学的に強く結合している熱帯域の気候変動とは異なり、海面水温が比較的低温で大気に深い対流が立ちにくい中緯度域では、海洋は大気に対して受動的な役割しか果たさないと考えられてきた。すなわち、海面水温の変動は大気から海洋への一方的な熱的強制によって生じ、風速（或は乱流熱フラックス）と海面水温は時空間的な負の相関（風速が強いときに海面が冷える）で特徴づけられる。しかし、近年のマイクロ波を用いた人工衛星による海面水温と海上風（応力）の観測から、海洋の中規模渦スケール（海洋の内部変形半径で決まり、中緯度で数十km程度）では逆に、海面水温と風速が正の相関（暖かい海面上で風速が速くなる）となること、つまり海上風が海洋中規模渦に伴う海面水温偏差に応答していることが発見された（例え

ば Xie 2004）。この発見に続いて実施された黒潮続流域における船舶からのラジオゾンデ集中観測により、海面水温偏差に対する大気の応答は、海面近傍の静的安定度に依存し、大気境界層の気温や風速プロファイルに及ぶことが示された。すなわち、暖かい（冷たい）海面上では大気境界層が不安定（安定）となり、鉛直混合が促進（抑制）され、気温・風速の鉛直シアが弱まる（強まる）と同時に海上風（及び応力と熱フラックス）が増大（減少）する。この鉛直混合メカニズムと整合的に、海洋の中規模渦スケールでは、海上風に直交する（沿った）方向の海面水温勾配と風応力の回転（発散）が良い線形関係を示す (Chelton *et al.* 2004, Fig.4, S6)。風応力応答の回転成分は、局所的に海洋を強制し、元々存在する海洋中規模渦の構造に影響しうる点で重要である。また一方で、中規模海面水温勾配は、海面熱フラックスを通じて海面気圧勾配を生む。これに伴い海陸風に似た鉛直循環が生じ、冷たい海面上から暖かい海面上に向かう海上風偏差が生じる。海面気圧勾配によって生じる海上風の収束は、雲形成や降水を伴う上昇気流を促す。この海面気圧調節メカニズムを示唆する、海面気圧のラプラスアンと海上風収束の関係も報告されている。鉛直混合と海面気圧調節の2つのメカニズムは排他的ではなく、その海上風偏差に対する相対的な寄与は、海域ごとに異なる可能性が指摘されている。

### 3. 海洋前線と大規模スケールの大気との相互作用

気候平均場において、海面水温勾配が  $1^{\circ}\text{C}/100\text{km}$  を超える海面水温前線の地理的な分布は、各海盆の西側に集中する西岸境界流や、南極周極流などの強い海流の分布と概ね一致する。西岸境界流は、海面風応力の回転成分に起因する海洋のエクマン収束・発散によって引き起こされる密度躍層深の変動が、海洋長波ロスビー波として伝播し海盆の西側に集中して生じる、幅が狭く強い海流である。西岸境界流は中緯度で西岸を離岸し、続流と呼ばれる東向きの流れとなる。

従って、西岸境界流の続流に伴う水温前線の分布は、表面だけでなく密度躍層の深さに相当する数百m程度の深さに及ぶと同時に、南からの暖水移流と北からの冷水移流により水温勾配が維持されている。

西岸境界流の続流に伴う海面水温前線は、気候平均的な全球南北熱輸送においては、海洋による極向輸送量が大幅に減少し、熱輸送の主体的な担い手が海洋から大気に受け渡される中緯度帯に位置する。中緯度での海洋から大気への熱放出は、南北に幅の狭い海面水温前線帯に集中し、その最大値は年（冬季）平均場で150 (350) W/m<sup>2</sup>にも及ぶ。中緯度海面水温前線帯はまた、頻繁に高低気圧擾乱が通過する大気のストームトラックと分布が概ね一致する。これらストームトラックは、擾乱に伴う南北風と温度偏差の位相関係によって、海面水温前線帯で放出された熱を極向きに輸送する。

ストームトラックに伴う極向き熱輸送は、大気の南北温度勾配を緩和する方向に働く。この傾向は、傾圧擾乱としての高低気圧が発達するのに必要な大気基本場の有効位置エネルギーを減少させ、高低気圧の継続的な発達を阻害する。従って、ストームトラックが維持されるためには、大気の傾圧性（気温の南北勾配）を維持するメカニズムが必要である。最近の高解像度数値モデルを用いた研究から、個々の擾乱の通過によって緩和される南北気温傾度は、海面水温前線を挟んで大きなコントラストを持つ大気海洋間の熱交換によって、1日程度の速い時間スケールで回復することがわかってきた。さらに大気モデルの下部境界条件から海面水温前線を平滑化すると、気温の南北勾配とストームトラックの振幅が著しく落ちることが示された。これらの数値実験の結果は、海面近傍傾圧性の維持と、その上空のストームトラックの配置によって、海面水温前線が不可欠な役割を果たしていることを示している。また一方で、ストームトラックに伴う熱輸送は上空の西風運動量を下方に輸送し、ちょうど海洋前線帯で海上偏西風を強化する。これに伴う風応力の回転成分が西岸境界流を駆動し、その熱輸送によって海面水温前線が維持され得ることから、中緯度気候系において、海面水温前線・ストームトラック・偏西風の間の相補関係も指摘されている（Nakamura *et al.* 2004）。

Minobe *et al.* (2008) や Tokinaga *et al.* (2009) 等で示されたように、海面水温前線の重要性は、大気傾圧性の維持に留まらない。海面水温前線の暖水側か

ら大気に放出される潜熱フラックスと、前線上で強化された降水に伴う非断熱加熱も、個々の擾乱を活性化させ、ストームトラック活動の維持に寄与する。また、高解像度現象及び再解析データを用いて、西岸境界流の続流に伴う海面水温前線に沿った海上風の収束が、季節平均場において、南北に幅の狭い降水帯や雲を上空に固定し、これに伴う鉛直流が大気境界層を越えて自由大気に及ぶことも報告されている。このような鉛直流は対流圏上層に発散場を引き起こし、定常ロスビー波の励起により下流側にまで影響を及ぼす可能性も示されている。

#### 4. おわりに

中緯度海洋前線は、海盆スケールの海面風応力場の変動に応答して、数年から十年規模の時間スケールで、その強さや位置が変動する。この前線変動に起因する海面水温勾配の変動成分が、大規模な大気変動に影響を与え得るかどうかは、北太平洋十年規模変動や北大西洋振動といった自然変動のメカニズムやその予測可能性の理解にとって重要であると考えられるが、その評価については、現在も活発な研究段階にある。

中緯度では日々の気象擾乱に伴う大気の内部分動や熱帯からの遠隔応答を介した影響が大きいために、ゆっくりとした海洋前線変動に伴う大気変動の検出は容易でなかった（例えば谷本・野中 2007）。また従来気候モデルは、海洋前線や海洋中規模渦を解像しないものがほとんどで、海洋前線変動に伴う気候（自然）変動シグナルは過小評価されていた可能性がある。今後、3節で述べた海洋前線スケールと大規模スケールの大気との相互作用についての理解を深めるためには、人工衛星及び船舶・ブイ観測（例えば Tomita *et al.* 2010）及び数値モデルを有機的に活用した研究がますます必要になってくるだろう。

#### 参考文献

- 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.
- Kwon, Y.-O., M. A. Alexander, N. A. Bond, C. Frankignoul, H. Nakamura, B. Qiu and L. Thompson, 2010 : Role of Gulf Stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere-ocean interaction : A review. *J. Climate*, in press.
- 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.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto and A. Shimpo, 2004 : Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts. in *Earth's Climate : The Ocean-Atmosphere Interaction*, Geophys. Monogr., (147), Amer. Geophys. Union, 329-345.
- Small, R. J., S. deSzoek, 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.
- 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, 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.
- Tomita, H., M. Kubota, M. F. Cronin, S. Iwasaki, M. Konda and H. Ichikawa, 2010 : An assessment of surface heat fluxes from J-OFURO2 at the KEO and JKEO sites. *J. Geophys. Res.*, C03018, doi : 10.1029/2009JC005545.
- Xie, S.-P., 2004 : Satellite observations of cool ocean-atmosphere interaction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 195-208.
- (海洋研究開発機構 田口文明・野中正見)
-