中緯度の海洋と大気の相互作用

野中正見 (海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 アプリケーションラボ)

1. はじめに

エルニーニョ現象では、貿易風の弱化によって太平洋赤道域東部の海洋水温躍層が平年よりも深くなり、その海洋構造の変動に伴って海面水温が高くなる。この暖かい海面水温偏差によって、大気の大気対流活発域が平年よりも東よりになり、貿易風を更に弱化させるというフィードバックが働き、エルニーニョ現象が発達して行く。一方で、エルニーニョ現象に伴う対流の偏差によって、大気には大規模な循環偏差が生じ、北太平洋ではアリューシャン低気圧の強化が見られる (Alexander et al. 2002)。この大気循環偏差は海上の偏西風を強化し、海洋から大気への海面熱フラックスの強化と、北側の冷たい海水を南向きに輸送するエクマン移流を強化することなどにより北太平洋域の海面水温に低温偏差をもたらす (Alexander et al. 2002)。

北太平洋の北緯 20 度以北の海面水温に最も卓越する変動である Pacific Decadal Oscillation (Mantua et al. 1997) においても、熱帯太平洋で正の海面水温偏差、北太平洋で負の海面水温偏差が見られる位相では、北太平洋の偏西風が強化する傾向である。このように北太平洋などの中緯度の海洋においては、大規模な大気の変動によって海面水温変動が生じる。つまり、海洋の変動が海面水温偏差を生じさせ、それが大気変動を引き起こすという能動的な熱帯域の海洋に対して、中緯度域の海洋は大気の変動に対して受動的に変動するばかりであるというのが、今世紀の初め頃までの広い認識であった。

ところが、海洋の前線帯や中規模渦に伴う水温構造や水温変動に注目すると、上とは異なる関係性が見えることが今世紀に入って示されてきた。20 世紀末に急速に発達した人工衛星観測とそのデータの蓄積、また特に今世紀に入ってからの計算機の急激な発達に伴う高解像度の大気、海洋の数値モデリングの発達によって、それまでは困難であった高解像度での大気や海洋の変動の解析が可能になった。

日本南岸を流れる黒潮は銚子沖で本州沿岸を離れ、東へ向かう海流となり、黒潮続流と呼ばれる。一方、北太平洋の亜寒帯からは親潮が北海道から東北沿岸へ南下し、やはり東北沿岸から東へ向きを変えて流

れて行く。黒潮や親潮のような海洋の西岸に形成される強い海流を西岸境界流と呼ぶが、このような強い海流に伴って、海面水温に強い水平勾配が見られる海洋前線帯が形成される。また、強い流れに伴って、海洋の中規模渦 (直径 100 km 程度の渦) が活発に形成される。黒潮続流の海域は北太平洋で最も中規模渦の活動が活発な海域となっている。

エルニーニョ現象が生じる太平洋赤道域東部と同様に、海洋前線帯では海流の位置や強さといった海洋構造やその変動が能動的に海面水温の構造や偏差を生じさせる。例えば、黒潮続流が平年よりも少し北側を流れていけば、そこには正の海面水温偏差が生じることになる。同様に海洋渦もその位置や形によって海面水温偏差を生じさせる。このようにして生じた海面水温偏差は、海面での潜熱、顕熱によって減衰させられて行く。すなわち、正の海面水温偏差は、海洋から大気への潜熱、顕熱放出の偏差を生じさせる (Tanimoto et al. 2003)。これは、中緯度の広い海域で知られてきた海面での大気への潜熱、顕熱放出の増加によって海面水温が低下するという関係と逆の関係である。

海面熱フラックスだけではなく、海上風の強さにも逆の関係が見られる。黒潮や黒潮続流では海洋渦に伴う海流の蛇行がしばしば見られる。これに伴って海面水温にも高低の偏差が生じる。海流が南向きに蛇行すると北側の冷たい海水が南へ張り出すことになるので冷たい水温偏差が生じる。このような海面水温の分布の上での海上風速の分布をみると、暖かい (冷たい) 海面水温の上で速い (遅い) 海上風速が見られる (Nonaka and Xie 2003)。上述のように中緯度の広い海域では、海上風が強いときに海洋から大気への熱放出が促され、海面水温が低下する傾向が知られている。しかし、海流の変動が海面水温偏差を生じさせる海域では、海面水温が高いときに海上風が速いという逆の関係が見られるのである。これは大気から海洋への影響とは逆の、海洋から大気への影響が中緯度域でも生じることを示している。

観測データ、再解析データ、大気海洋結合モデルを用いた詳しい解析から、中緯度の海洋前線帯から大気への影響は海上付近の境界層に限られず、その

影響は自由対流圏にも及ぶことが示されている (Tokinaga et al. 2009, Minobe et al. 2008)。

2. 黒潮から大気への影響

上記のように強い海流やその変動に伴う海面水温の構造や変動は大気へ影響を及ぼし得る。日本の気象や気候に対する海洋の影響を考えると、特に黒潮の大規模は変動である大蛇行が大気に及ぼす影響は日本への直接的な影響もあるために注目される。

黒潮の大蛇行に伴って、黒潮と本州の間の海域は平年よりも水温が低下する。この水温低下に伴って、上記のように海上風速の低下が見られるとともに、降水量や雲水量にも低下が見られる (Xu et al. 2010)。また、黒潮大蛇行に伴う海面水温分布の偏差に伴い、冬季の南岸低気圧の経路にも相違が生じる (Nakamura et al. 2012)。黒潮が日本南岸に沿って流れる直進流路の際には、南岸低気圧もより日本南岸に沿う経路を取る傾向があり、逆に大蛇行の際には、南岸低気圧がより沖合を通る傾向がある。これに伴い、黒潮が直進流路の時には、東京で降雪が生じにくいことも指摘されている。一方で、大蛇行した黒潮は伊豆半島付近で再び本州に接近してから東へ向かって流れて行くが、その際に、静岡県沿岸に西向き分岐流が生じていることが高解像度の海面水温データ等から明らかになった (Sugimoto et al. 2020)。この分岐流によって静岡県沿岸には暖かい海水が分布し、それによって海洋から大気下層へ放出された水蒸気が夏季の南西風で関東域へ移流される。こうして生じた水蒸気量の偏差により、下向き長波放射が増加することで、黒潮大蛇行時の夏季に関東域で気温上昇が生じる傾向も示されている (Sugimoto et al. 2021)。

日本南岸の黒潮から大気への水蒸気放出はまだ遙か遠方の南西諸島付近の台風の発達にも影響し得る。特に秋の台風について、大陸から日本上空へ高気圧が張り出し、北上する台風との間に北東風が吹くような場合に、この北東風によって黒潮域での大気下層への水蒸気供給が強化され、更にこの北東風によってその水蒸気が台風の中心部へ輸送される。雲解像モデルを用いた実験で、日本南岸の黒潮域での大気への水蒸気放出を弱めると、台風がまだ遠方の南西諸島に位置していても、その中心部への水蒸気輸送が抑制され、台風の発達が弱くなることが示された (Fujiwara et al. 2020)。

黒潮に伴う海面水温の強い水平勾配が低気圧の前線形成やそれによる豪雨の発生に寄与し得ることも、観測データ等の解析と雲解像モデルを用いた実験から示されている (Hirata et al. 2019)。また、雲解像モデルを用いた一連の研究では、黒潮等の暖流からの潜熱放出が爆弾低気圧の発達に影響することが示されている (Hirata and Nonaka 2021)。

3. 東シナ海から大気への影響

黒潮のより上流域となる東シナ海における海洋から大気への影響についても、梅雨期の降水等に注目した研究が進められている。6 月には東シナ海に梅雨に伴う降水分布が見られるが、高解像度の衛星観測データを用いると黒潮に伴う高海面水温の海域で特に降水が強められていることが分る。領域大気モデルを用いた海面水温分布を平滑化した実験との比較からも黒潮に伴う海面水温分布が6月の東シナ海の降水分布に強く影響していることが示された (Sasaki et al. 2012)。長期平均だけではなく、東シナ海の黒潮に伴う海面水温の水平勾配の経年変動も降水に影響を及ぼしうる。東シナ海の黒潮域と大陸棚域の海面水温の差を水平勾配の指標として、水平勾配が強い年には、6月の東シナ海から西日本の降水が増える傾向が示されている (Sasaki and Yamada 2018)。梅雨前線からは南に離れた位置に、東シナ海の黒潮沿いに降水帯が観測されることもある (Miyama et al. 2012)。月平均場だけではなく、短い時間スケールでも降水分布に黒潮が影響し得ることを示している。

Manda et al. (2014) は特に梅雨末期の7月に九州で豪雨の頻度が高いことに注目し、東シナ海の海面水温の季節進行がそれに影響を及ぼしていることを領域大気モデルに6月から8月の異なる時期の海面水温を与える実験によって示した。更に、今後生じることが推測される海面水温の温暖化によって、より強い豪雨が生じうること、豪雨発生の季節が前倒しになり得ることを示した。

海面水温についても長期的な温暖化傾向が見られるが、東シナ海を含めた西岸境界流の流域では、全海洋での平均に比べて、水温上昇の速度が2倍程度速いことが示されている (Wu et al. 2012)。東シナ海については中国沿岸域と黒潮域で特に水温上昇が顕著であり、黒潮域に関しては、亜熱帯域の風系の長期変化による黒潮の強化が影響していることが示

されている (Sasaki and Umeda 2021)。

4. 北太平洋の大気循環への影響

黒潮続流や親潮の続流に伴う日本東方沖の海面水温の強い南北勾配は、1月の爆弾低気圧の発生にも影響を及ぼすことが示されている (Kuwano-Yoshida and Minobe 2016)。大気大循環モデルの海面での境界条件として、観測された高解像度の海面水温分布を与えた場合と、水平方向に平滑化して海洋前線帯を不明確にした海面水温を与えた場合の比較から、海洋前線帯の存在によって、北太平洋の西部で爆弾低気圧の発達する頻度が多くなっていることが示された。これに伴い、北太平洋東部では等価順圧的な高気圧偏差が生じ、北米西岸域では降水が減少している傾向も見られる。

一方で、強い海流に伴って生じる海洋渦が、降水や大気循環に影響を及ぼす可能性も示されている (Ma et al. 2015)。上記の実験と同様に、北太平洋全域の領域大気モデルの海面での境界条件として、観測された高解像度海面水温分布を与えた場合と、それを水平方向に平滑化して海洋渦の構造を不明確にした海面水温を与えた場合の比較から、海洋渦に伴う海面水温構造が、大気へ及ぼす影響を調べている。海洋渦の構造を平滑化すると、冬季の北太平洋東部において、偏西風とストームトラックが南下し、米国西岸域で降水が増加する傾向が示された。つまり、海洋渦に伴う海面水温構造によって、米国西岸の降水が減少している傾向が示唆される。このような海洋渦の影響は、季節予測システムでも確認された (Siqueira et al. 2021)。海洋渦を解像出来る高解像度の海洋モデルと大気モデルを結合させた季節予測システムにおいては、海洋渦の活動が活発な年と不活発な年を比較すると、不活発な年に米国西岸域での降水が増加する傾向が予測された。一方で、海洋渦を解像出来ない解像度の海洋モデルを用いたシステムにおいては、この傾向は確認出来なかった。このように、北太平洋のストームトラックや偏西風の分布、北米西岸域の降水に関しては、北太平洋の海洋前線帯或いは海洋渦に伴う海面水温構造が影響を及ぼし得ることが示されて来ている。ここで特に海洋前線帯や海洋渦の活動度に強く影響する黒潮続流に関しては、その流速変動と南北のシフト、また、その海域の海洋渦の活動度の間に密接な関係があることが知られており (Qiu and Chen 2005 等)、

大気に対する影響が、海洋渦の活動度か、前線帯の南北勾配の強さか、南北シフトに伴う海面水温偏差によるものかは、特に観測データの解析においてはその切り分けに困難が残っている。

5. 海洋前線帯とストームトラック

Nakamura et al. (2004) は、北太平洋、北大西洋、南大洋の海面水温前線帯に注目し、これらが大気のストームトラックの位置と良く対応することを指摘した。海洋前線帯がストームトラックを固定する働きを持つためにこのような関係が見られるものと考えられる。

海洋前線帯に伴う海面水温の南北勾配は、大気下層との熱交換を通じて、大気下層の気温にも南北勾配を生じさせる。対流圏上層の大気擾乱に伴い、大気下層に南北風が生じたとき、大気下層の気温の南北勾配によって、大気下層に気温偏差が生じる。この気温偏差に対応する渦位偏差は、上層の大気擾乱と相互作用し、大気擾乱を強化する働きを持ちうる (Nakamura et al. 2008)。一方で、大気擾乱に伴う気温の南北移流によって下層大気の気温勾配は弱められるが、海洋前線帯との熱交換により、下層大気の気温には南北勾配が再び形成される (例えば Nonaka et al. 2009)。つまり、海洋前線帯によって常に大気下層の気温の南北勾配が維持されることで、上層の擾乱が下層と相互作用して強化される環境になるということになる。(上層の擾乱は下層からエサを貰って成長するけれども、そのエサは食べても食べてもまた出て来る、という感じの状況である。) このために、海洋前線帯の上空にストームトラックが形成されるものと考えられる。

この海洋前線帯とストームトラックの密接な関係は Ogawa et al. (2012) の数値モデルを用いた理想化実験によってとても明確に示された。そこでは、南大洋の海洋前線帯を想定し、水惑星に南半球の観測データに基づく海洋前線帯を置いて、大気場の応答を調査した。その際、海洋前線帯の存在する緯度を5度ずつずらした実験を行い、海洋前線帯とストームトラックの関係を調べている。この一連の実験により、ストームトラックは海洋前線帯の上空に形成され、海洋前線帯が高緯度側へ移動すると下層のストームトラックも同様に移動することが示された。特に冬季にその傾向が明確に見られる。

この影響は対流圏上層にも達しており、下層に較

べると不明確になるが、上層のストームトラックも海洋前線帯に伴って緯度を変える傾向が見られる。ストームトラックの形成はまた、擾乱と平均流の相互作用によって、上層の偏西風（亜寒帯ジェット）の形成にも繋がってくる。上層の亜寒帯ジェットは海洋前線帯の少し高緯度側に形成され、海洋前線帯の緯度の移動に伴い、上層のジェットが極大を持つ緯度も移動する。但し、あまり高緯度に海洋前線帯が存在する場合には、上層のストームトラックや亜寒帯ジェットの高緯度側への移動は弱まることが示された。大気の大気力学によって決まるそれらの緯度帯から離れた位置に海洋前線帯がある場合には、海洋前線帯の影響が大気に現れにくくなり、海洋前線帯が無い場合と同様の緯度帯にストームトラックや亜寒帯ジェットが形成される。偏西風は大気下層、海上まで達する。海上風は海洋表層の循環を駆動するため、海上の偏西風の分布は海洋表層循環、ひいては海洋前線帯の形成に繋がることにもなる (Hoskins and Valdes 1990)。

6. おわりに

以上、中緯度域の大気と海洋の相互作用に関する研究の概要について、日本の気象・気候への影響に関係するものを中心にしながら、より大きな大気循環への影響に関するものにも触れつつ紹介した。中緯度の海洋は大気の変動に受動的に変動するだけではなく、特に強い海流や渦などの構造により能動的に大気へ影響し得る。このため、海洋に、そして黒潮などの強い海流に囲まれた日本の気象や気候を考える上では海洋からの影響の理解を深めることが重要であることが多くの研究によって示されて来ている。

ここで紹介した研究にごく近年のものも含まれていることから分かるように、中緯度の大気海洋相互作用に関する研究、海洋が日本の気象や気候へ及ぼす影響に関する研究は、今現在も活発に進められている。日本においても、これを主題とした科学研究費補助金新学術領域研究「変わりゆく気候系における中緯度大気海洋 hotspot」（令和元年-5 年度）が、国内の大学、研究機関の研究者総勢 68 名（研究協力者を含めると 139 名）により、更に大学院生や学部生も加わって、進行中である。そこでは、数日の時間スケールから数十年の温暖化の時間スケールまで、様々な角度から、海洋が気象や気候に及ぼす影響、

大気と海洋の相互作用に関する研究を進めている。その内容や成果については、<http://www.jamstec.go.jp/apl/hotspot2> でご紹介している。

このプロジェクトでは、若手育成も大きなテーマであり、参加している若手研究者や院生・学生の育成のための多くの活動を行っている。更に、これから大学院への進学を検討する段階の学部生や高校生に、大気や海洋の研究がどのようなものかを知ってもらうことを目的にした動画の作成なども進めている (http://www.jamstec.go.jp/apl/hotspot2/movies_2.html)。気象に興味を持っている大学生や高校生に見て頂き、研究へ踏み込む一つのきっかけにして頂ければ大変有難く思っております。

参考文献

- Alexander, M. A., and Coauthors, 2002: The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *J. Climate*, 15, 2205–2231.
- Fujiwara, K., Kawamura, R., & Kawano, T. 2020: Remote thermodynamic impact of the Kuroshio Current on a developing tropical cyclone over the western North Pacific in boreal fall. *J. Geophys. Res.*, 125, e2019JD031356.
- Hirata, H., and M. Nonaka, 2021: Impacts of strong warm ocean currents on development of extratropical cyclones through the warm and cold conveyor belts: A review. In *Tropical and Extratropical Air-Sea Interactions: Modes of Climate Variations*, S. K. Behera (Ed.), chap. 11, pp. 267–293, Elsevier.
- Hirata, H., and Coauthors, 2019: Key role of the Kuroshio Current in the formation of frontal structure of an extratropical cyclone associated with heavy precipitation. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 124, 6143–6156.
- Hoskins, B. J., and P. J. Valdes, 1990: On the existence of storm tracks, *J. Atmos. Sci.*, 47, 1854–1864.
- Kuwano-Yoshida, A., and Minobe, S., 2017: Storm-Track Response to SST Fronts in the Northwestern Pacific Region in an AGCM, *J. Climate*, 30, 1081–1102.
- Ma, X. and Coauthors, 2015: Distant Influence of Kuroshio Eddies on North Pacific Weather Patterns?

- Sci. Rep. 5, 17785.
- Manda, A., and Coauthors, 2014: Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon. *Sci. Rep.*, 4, 5741.
- Mantua, N. J., and Coauthors, 1997: A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1069–1079.
- Minobe, S., and Coauthors, 2008: Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, 452, 206–209.
- Miyama, T., and Coauthors, 2012: A striking early-summer event of a convective rainband persistent along the warm Kuroshio in the East China Sea. *Tellus*, 64A, 18962.
- Nakamura, H., Nishina, A., & Minobe, S. (2012). Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, 25, 7772–7779.
- Nakamura, H., and Coauthors, 2004: Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts. *Earth's Climate: The Ocean–Atmosphere Interaction*, *Geophys. Monogr.*, 147, Amer. Geophys. Union, 329–345.
- Nakamura, H., and Coauthors, 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.
- Nonaka, M., and S.-P. Xie, 2003: Covariations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: Evidence for ocean–atmosphere feedback. *J. Climate*, 16, 1404–1413.
- Nonaka, M., and Coauthors, 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.
- Ogawa, F., and Coauthors, 2012: Dependence of the climatological axial latitudes of the tropospheric westerlies and storm tracks on the latitude of an extratropical oceanic front. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L05804.
- Qiu, B., and S. M. Chen, 2005: Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal time scales. *J. Phys. Oceanogr.*, 35, 2090–2103.
- Sasaki, Y. N., and Umeda, C., 2021: Rapid Warming of Sea Surface Temperature along the Kuroshio and the China Coast in the East China Sea during the Twentieth Century. *J. Climate*, 34, 4803–4815.
- Sasaki, Y. N., and Y. Yamada, 2018: Atmospheric response to interannual variability of sea surface temperature front in the East China Sea in early summer. *Climate Dyn.*, 51, 2509–2522.
- Sasaki Y.N., and Coauthors, 2012: Influence of the Kuroshio in the East China Sea on the Early Summer (Baiu) Rain. *J. Climate*, 25, 6627–6645.
- Siqueira, L., Kirtman, B. P., & Laurindo, L. C. 2021: Forecasting Remote Atmospheric Responses to Decadal Kuroshio Stability Transitions, *J. Climate*, 34, 379–395.
- Sugimoto, S., B. Qiu, and A. Kojima, 2020: Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander. *J. Oceanogr.* 76, 141–154.
- Sugimoto, S., Qiu, B., & Schneider, N., 2021: Local Atmospheric Response to the Kuroshio Large Meander Path in Summer and Its Remote Influence on the Climate of Japan, *J. Climate*, 34, 3571–3589.
- Tanimoto, Y., and Coauthors, 2003: An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux. *J. Geophys. Res.*, 108, 3304.
- Tokinaga, H., and Coauthors, 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.
- Wu, L. X., and Coauthors, 2012: Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nat. Climate Change*, 2, 161–166.
- Xu, H., H. Tokinaga, and S.-P. Xie, 2010: Atmospheric effects of the Kuroshio large meander during 2004–05. *J. Climate*, 23, 4704–4715.