

熱帯海洋に依存しない秋季熱帯大西洋の対流活動が 冬季北極域の海氷に与える影響

*平賀 詩之助, 立花 義裕 (三重大学大学院 生物資源学 研究科),

1. はじめに

北極域の海氷減少は、大気循環偏差パターンを励起しユーラシアを寒冷化させる可能性がある (Honda et al. 2009). さらに、北極域の海氷減少は、秋・冬の北極域を温暖化させる可能性がある (Screen and Simmonds 2010). したがって、北極域の海氷変動の要因を探ることは、北半球中・高緯度の気候変動の要因解明や異常気象予測のため、重要である。

海氷変動の要因の一つとして、熱帯の海面水温 (SST) 変動に伴う高緯度へのテレコネクションの影響が挙げられる (Matsumura and Kosaka 2019; Luo et al. 2023). エルニーニョ・ラニーニャに代表される熱帯の SST 変動は直上の対流活動を活発化させ、全球の大気循環に影響を与えることが一般的に知られている。一方で、熱帯の SST 変動と関係なく活発化するサヘル/インド洋の対流活動 (Nakanishi et al. 2021) やオーストラリアモンスーン (Sekizawa et al. 2021) など、テレコネクションを励起する。したがって、海氷の予測精度向上や熱帯から中・高緯度への影響の理解のため、熱帯 SST 変動と無関係の対流活動に着目することは重要である。

上記の先行研究より、熱帯の SST 変動に伴う対流活動は、テレコネクションを介して北極域の海氷に影響する。しかし、SST 変動と関係がない熱帯大西洋の対流活動が海氷に対してどのような影響を与えるかを考察した研究は存在しない。したがって本研究の目的は、SST 変動と無関係な熱帯大西洋の対流活動と海氷との関係を調べ、これらをつなぐメカニズムを調べることである。

2. 使用データ・解析手法

対流活動の指標として、NOAA Interpolated OLR の外向き長波放射 (OLR) を使用した (Liebmann and Smith 1996). 大気場のデータは JRA-3Q 長期再解析データ (Kosaka et al. 2024), SST・海氷密接度のデータは HadISST (Rayner et al. 2003) を使用した。解析期間は 1979 年 6 月 - 2022 年 4 月 (43 年間) であり、それぞれ月平均

データを使用した。図 1 緑枠の領域の海氷密接度・紫枠の領域の OLR を領域平均し、それぞれ、12 月海氷インデックス・10 月 OLR インデックスを作成した。これらのインデックスを用いて、相関分析や、同時・ラグ解析分析を行い、秋の熱帯大西洋の対流活動と冬の海氷との統計的な関係を調べた。さらに、これらをつなぐメカニズムを考察するために、線形回帰分析、ロスビー波ソース、準地衡渦位方程式を用いた。

3. 結果

12 月の海氷インデックスを 10 月の 300 hPa 面ジオポテンシャル高度・OLR に回帰すると、北大西洋から北極へ向かう波列パターンが見られ熱帯大西洋での対流活動が活発であった (図省略)。そこで、10 月の熱帯大西洋の対流活動に着目し、10 月 OLR インデックスを 10 月の 300 hPa 面ジオポテンシャル高度に回帰した結果、同様に北大西洋から北極へ向かう波列パターンが現れた (図 1)。次に、10 月 OLR インデックスと各月の海氷インデックスとの相関係数を求めたところ、10 月の熱帯大西洋の対流活動と冬の海氷との間に有意な関係が見られた (図 2)。

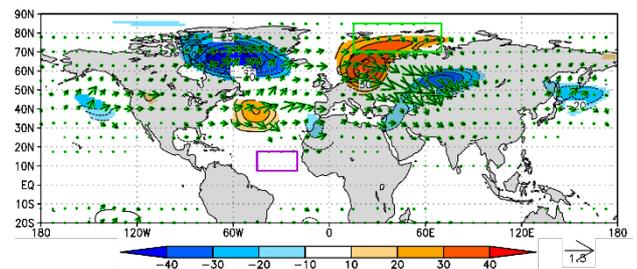


図 1 10 月熱帯大西洋 OLR インデックスと 10 月 300 hPa ジオポテンシャル高度[m]との回帰図。有意水準 10%以下の領域だけを示す。矢印は、波活動度フラックス (Takaya and Nakamura 2001) を示す。

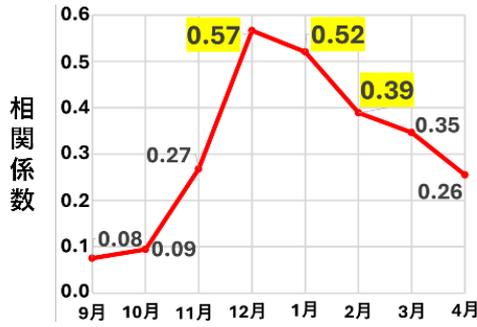


図2 10月 OLR インデックスと各月の海水インデックスとの相関係数. 黄色は有意水準 1%以下の値を示す.

次に, 10月の熱帯大西洋の対流活動と全球の SST との関係性を調べるために, 10月の OLR インデックスを 10月の SST へ回帰した. その結果, 対流活動が活発な領域の直下や, 他の熱帯海洋との関係は見られなかった (図3). 一方, 北大西洋において, メキシコ湾流域, グリーンランドの南, バレンツ海の SST 偏差との関係は見られた.

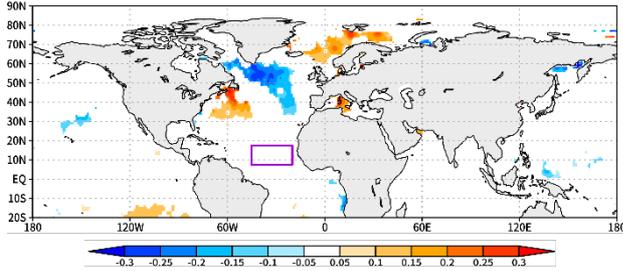


図3 図1と同じだが, SST[K]との回帰図を示す.

次に, ロスビー波ソース (Sardeshmukh and Hoskins 1988) と準地衡渦位方程式 (e.g., Fang and Yang 2016) を計算し, 対流活動が北大西洋の高気圧を形成・維持するメカニズムを考察した. ロスビー波ソース S' は, 発散風 V_χ による絶対渦度 ζ_a のフラックス収束であり,

$$S' = -\nabla \cdot (V_\chi \zeta_a)'$$

$$\approx -\bar{\zeta}_a \nabla \cdot V_\chi' - V_\chi' \cdot \nabla \bar{\zeta}_a - \zeta_a' \nabla \cdot \bar{V}_\chi - \bar{V}_\chi \cdot \nabla \zeta_a', \quad (1)$$

と示される. 上付きバーは月平均, プライムは月平均からの偏差を表す.

月平均偏差に対する短周期擾乱からのフィードバックの寄与を調べるために, 以下のように示される, 準地衡渦度方程式を用いた.

$$\left(\frac{1}{f} \nabla^2 + \frac{f}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \left(\frac{\partial \Phi'}{\partial t} \right)$$

$$= -f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\alpha Q'_{\text{diab}}}{\sigma T} \right) - f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\alpha Q'_{\text{eddy}}}{\sigma T} \right) + F'_{\text{eddy}} + \text{Res} \quad (2)$$

ここで, Φ はジオポテンシャル, p を気圧, α を比容, σ を静的安定度, Q'_{diab} は非断熱加熱の月平均偏差, Res を残差項とする. 短周期擾乱による熱フラックス収束 Q'_{eddy} , 短周期擾乱による渦度

フラックス収束 F'_{eddy} は,

$$Q'_{\text{eddy}} = -\nabla \cdot \bar{V}_g'' T'' - \frac{\partial \bar{\omega}'' T''}{\partial p} + \frac{R}{C_p p} \bar{\omega}'' T'', \quad (3)$$

$$F'_{\text{eddy}} = -\nabla \cdot \bar{V}_g'' \zeta'', \quad (4)$$

と示される. ここで, V_g は準地衡風ベクトル, ω は鉛直風, ζ は相対渦度, R は気体定数, C_p は定圧比熱を示す. ダブルプライムは 7 日移動平均からの偏差を表す. 短周期擾乱からのフィードバック強制的みに着目するため, 式 (2) の右辺第二項と第三項を強制項として準地衡渦度方程式を解き, 左辺のジオポテンシャル傾向を求めた.

図4の陰影はロスビー波ソースを示し, コンターと矢印はそれぞれ 10 月 OLR インデックスに対して回帰した渦度偏差と発散風偏差を示す. 対流活発域の北側, 北緯 25 度付近に低気圧性ロスビー波ソースが存在し, 式 (1) 第一項のストレッチングによる絶対渦度生成に対応する. この低気圧性ロスビー波ソースに伴い, 北緯 20 度付近に低気圧性渦度偏差が生成される. 生成された低気圧渦度偏差に伴い, 渦度偏差の北側の北緯 30 度付近では西風が減速する.

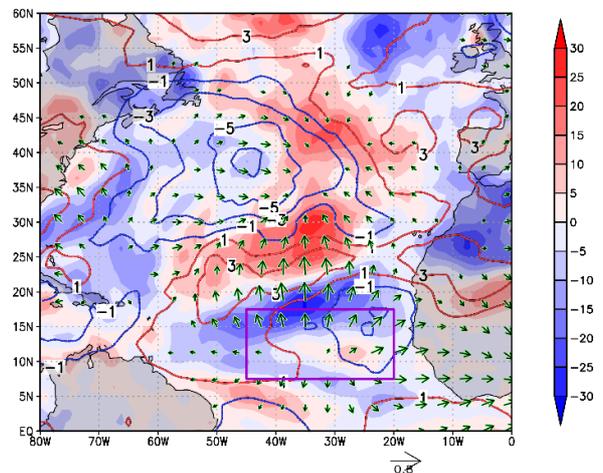


図4 陰影はロスビー波ソース $[10^{-12} s^{-2}]$, コンターと矢印はそれぞれ10月 OLR インデックスに対して回帰した渦度偏差 $[10^{-6} s^{-1}]$ と発散風偏差 $[m/s]$ を示す.

図5aは, 式(2)の右辺第二項と第三項の和で表される, 短周期擾乱からのフィードバックによる強制項である. 図5bは, 図5aの強制項に対して, (1)式左辺のジオポテンシャル高度傾向を計算した結果である. 回帰分析によって得られた北大西洋高気圧の位置(星印)と図5bのジオポテンシャル傾向の位置が概ね一致している. 以下に, 考察される北大西洋高気圧の生成・維持メカニズムを示す. ①北大西洋の亜熱帯の対流圏上層では, 熱帯大西洋の活発な対流活動に伴い, 北向きの発散風が生じる. ②発散風は, 北大西洋の北緯20度から30度付近で収束し, 低気圧性のロスビー波ソースを生成する. 低気圧性のロスビー波ソースによって励起された低気圧性渦度の北側では西風が減速する. ③西風減速域で短周期擾乱からのフィードバックにより, さらに西風が減速する. 北大西洋高気圧の北側では, 短周期擾乱からのフィードバックによりジェットが加速する. ④これらのフィードバックにより北大西洋の高気圧が形成・維持されることが示唆される.

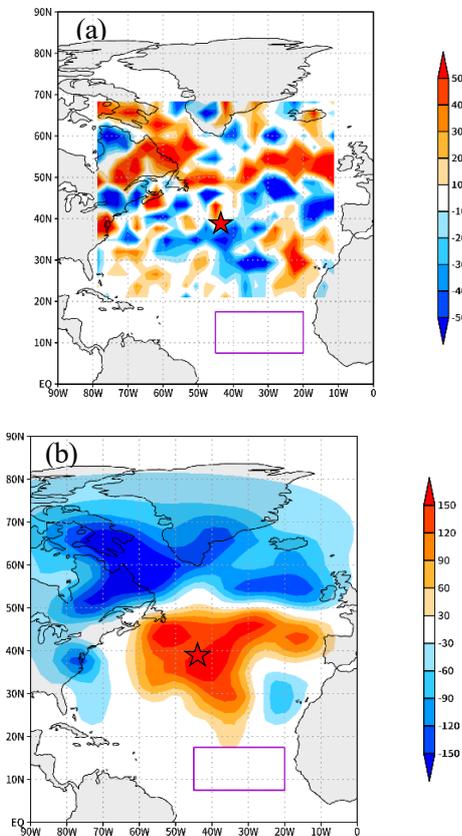


図5 (a) 陰影は式(2)の右辺第二項と第三項の和 $[10^{-12} s^{-2}]$ を示す. 青が高気圧性の強制項, 赤が低気圧性の強制項を示す. (b) 式(2)の左辺のジオポテンシャル傾向を重力加速度で除した, ジオポテンシャル高度傾向 $[m/month]$ を示す. 星印は, 図1における北大西洋高気圧の中心位置を示す.

次に波列パターンが海氷に与える影響を調べるため, 10月 OLR インデックスを10, 11, 12月の SST・海氷密接度に回帰した. 10月から12月にかけて北極域の SST の高温偏差が持続し, 季節が進むにつれ海氷が負偏差となり, 平年より減少した(図6). さらに, 10, 11月には北極へ向かう水蒸気フラックスが見られた(図省略). 海氷の負偏差には, SST 偏差の持続と温室効果が寄与していることが示唆される. これらの大気・海洋偏差は, 図1のスカンディナ비아半島の高気圧偏差に伴う, 暖湿気の高気圧域への流入に関連している.

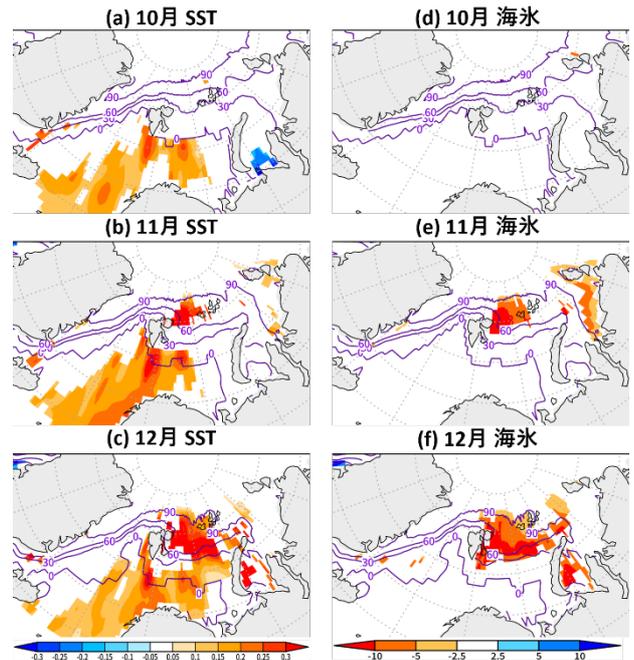


図6 図1と同じだが, (a) 10月 (b) 11月 (c) 12月の SST $[K]$, (d) 10月 (e) 11月 (f) 12月の海氷 $[%]$ との回帰図を示す.

4. 議論

SST と関係なく対流活動が活発になる要因としてサヘルからの水蒸気流入が関連している可能性がある. サヘルのモンスーンの弱体化に伴うアフリカ大陸西部の高気圧偏差から, 熱帯大西洋の対流活発域に向かって水蒸気が流入し, その領域で収

束している (図 7). 今後はサヘルとの関連についても確認する必要がある。

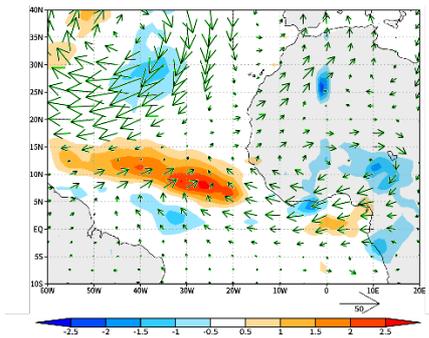


図 7 矢印は 10 月 OLR インデックスに対して回帰した水蒸気フラックス [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$], 陰影はその収束 [$10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$] を表す。

5. 結論

熱帯海洋と関係がない秋の熱帯大西洋の対流活動が、冬の北極域の海氷に影響することが示唆された。本研究では、秋の熱帯大西洋に端を発する季節を超えた海氷予測に着目している。この結果は、海氷変動予測やその理解に新たな視点をもたらす。

一般的に、エルニーニョなどの熱帯 SST 変動は、全球の大気大循環偏差を引き起こすことが知られている。しかし、本研究では、熱帯大西洋の対流活動は、熱帯海洋の変動と独立していることを示し、さらに、熱帯外へのテレコネクションを駆動することを示した。この結果は、熱帯から中高緯度への影響の理解や異常気象予測につながる。

今後は大気海洋結合モデルを用いて、対流活動と熱帯 SST との関係や、海氷への影響を評価する必要がある。

参考・引用文献

- Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707.
- Screen, J. A., and I. Simmonds, 2010: The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, **464**, 1334–1337.
- Matsumura, S., and Y. Kosaka, 2019: Arctic–Eurasian climate linkage induced by tropical ocean variability. *Nat. Commun.*, **10**, 3441.
- Luo, B., Luo, D., Ge, Y., Dai, A., Wang, L., Simmonds, I., Xiao, C., Wu, L., Yao, Y., 2023: Origins of Barents–Kara sea-ice interannual variability modulated by the Atlantic pathway of El Niño–Southern Oscillation. *Nat. Commun.*, **14**, 585.
- Nakanishi, T., Y. Tachibana, and Y. Ando, 2021: Possible semi-circumglobal teleconnection across Eurasia driven by deep convection over the Sahel. *Climate Dyn.*, **57**, 2287–2299.
- Sekizawa, S., H. Nakamura, and Y. Kosaka, 2021: Remote influence of the interannual variability of the Australian summer monsoon on wintertime climate in East Asia and the western North Pacific. *J. Climate*, **34**, 9551–9570.
- Liebmann, B., and Catherine A. Smith, 1996: Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275–1277.
- Kosaka, Y., S. Kobayashi, Y. Harada, C. Kobayashi, H. Naoe, K. Yoshimoto, M. Harada, N. Goto, J. Chiba, K. Miyaoka, R. Sekiguchi, M. Deushi, H. Kamahori, T. Nakaegawa, T. Y. Tanaka, T. Tokuyoshi, Y. Sato, Y. Matsushita, and K. Onogi, 2024: The JRA-3Q reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108**, 4407.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608–627.
- Sardeshmukh, P. D., and B. J. Hoskins, 1988: The Generation of Global Rotational Flow by Steady Idealized Tropical Divergence. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1228–1251.
- Fang, J., and X.-Q. Yang, 2016: Structure and dynamics of decadal anomalies in the wintertime midlatitude North Pacific ocean-atmosphere system. *Climate Dyn.*, **47**, 1989–2007.