Decadal modulation of ENSO and IOD impacts on the Indian Ocean upwelling

張暁琳・*望月崇（九州大学理学研究院）

1. はじめに

海洋の湧昇はインド洋の気候を特徴づける代表的な物理変数のひとつであり、インド洋東部(スマトラ島沿岸域; 0-10S, 90E-110E)や、インド洋西部(2S-12S, 50E-80E)付近で、特に大きな湧昇が観測されることが知られている(Zhang and Han, 2000)。湧昇の重要なプロセスは局所的なエクマンパンピングや海洋ロスビー波伝播であり、海面での風応力変化によって、その年々変動にはエルニーニョ南方振動(ENSO)やインド洋ダイポールモード(IOD)、アジアモンスーンが大きく影響する(Zhang and Mochizuki, 2022)。線形回帰式 $Y(t)=b_0+b_1X_i(t)$で表現される静的線形モデル(Static linear model; SLM)を持ちいれば、湧昇のよいプロキシである海面高度の年々変動 Y(t)に対する ENSO と IOD の指数 $X_i(t)$ (NINO3.4 index と Dipole Mode index)の寄与を簡便に評価できる。Zhang and Han (2020)はこれを拡張したベイズ動的線形モデル(Bayesian dynamic linear model; BDLM)を利用して、海面高度に対する ENSO と IOD の寄与の相対的重要度を議論した。BDLM では $Y(t)=b_0(t)+b_1(t)X_i(t)$ というように回帰係数に時間変化を導入して海面高度をより現実的に表現する。回帰係数 $b_1(t)$の時間変化は数学的処理から算出されるが、そこに何らかの物理的背景を見つけることはできないだろうか。ここでは、回帰係数 $b_1(t)$の時間変化に付随する気候場の変化を明らかにして、ENSO や IOD による海面高度の年々変動における変調傾向の要因を分析する(Zhang and Mochizuki, 2023)。

2. 使用データと解析手法

海面水温は HadISST(Rayner et al., 2003)、海水温や海面高度はECMWF再解析ORAS4 (Balmaseda et al., 2013)を用いた。また大気の対流活動の強さに対応するものとして、NOAA 降水量データ(Xie and Arkin, 1996)も用いた。NINO3.4 index と Dipole Mode index に対して、SLM と BDLM (Zhang and Han, 2020)における $b(t)$と $b_1(t)$の時系列に対応する気候変動場を評価した。

3. 結果

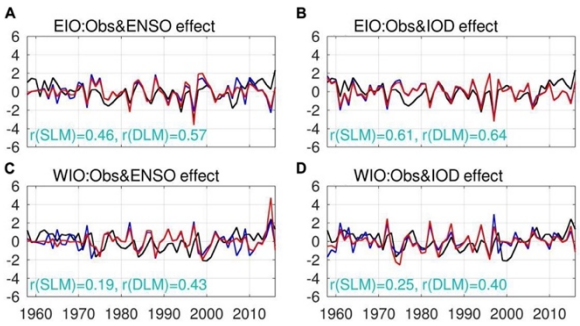

図 1. (A) NINO3.4 index もしくは(B)Dipole Mode index を用いて SLM(赤)と BDLM(青)で表現されたインド洋東部の海面高度[cm]。黒線は ORAS4 の海面高度。(C)と(D)はインド洋西部の海面高度[cm]。

インド洋東部と西部のいずれにおいても、ENSO 指数(NINO3.4 index)や IOD 指数(Dipole Mode index)の線形回帰で表現される海面高度は、確かに SLM よりも BDLM のほうが再解析値に似た年々変動を示す(図 1)。この再現性の向上は、BDLM において回帰係数 $b_1(t)$が時間変化をもつことができるためである(図 2)。

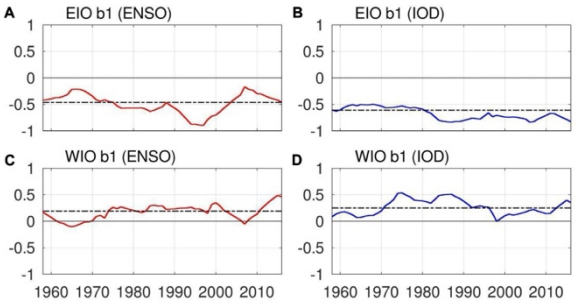

図 2. BDLM における回帰係数 $b_1(t)$の時系列。(A) NINO3.4 index もしくは(B)Dipole Mode index を用いてインド洋東部の海面高度をあらわした場合。鎖線は SLM における回帰係数(定数)。(C)と(D)はインド洋西部の海面高度をあらわした場合。

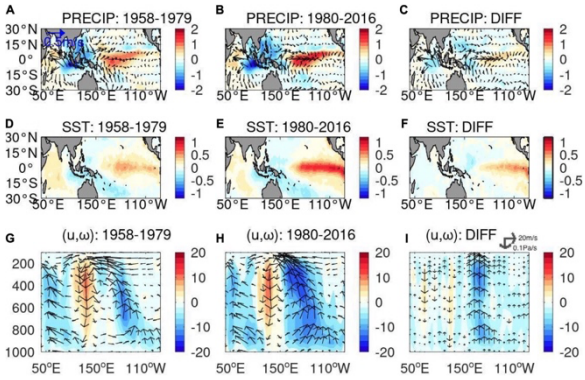

図 3. 秋季(9-11 月)の Dipole Mode index に対する線形回帰図。(左)1958-1979 年、(中)1980-2016 年、(右)差(1980 年以降-1979 年以前)。

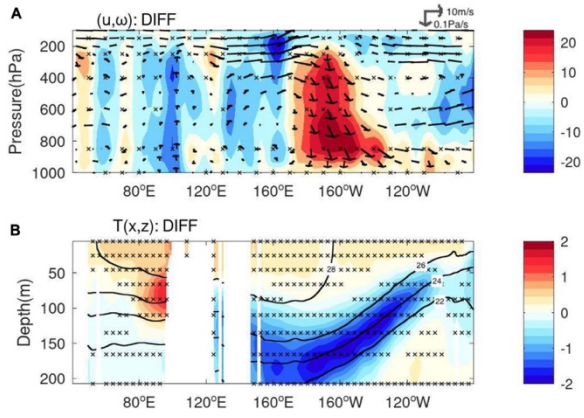

図 4. 1980 年を境にした(A)風と(B)水温の気候値の差(1980 年以降-1979 年以前)。

IOD指数に対する線形回帰でインド洋東部の海面高度をあらわす場合(図2B)、$b_1(t)$は1980年以降にそれ以前よりも大きな負値をとる。このとき、IOD指数に対する海面水温の線形回帰(図3D, 3E)は、赤道インド洋でIODのような東西コントラストをもつ。1980年以降はインド洋全体で海面水温が低く(図3F)、これがIOD指数への回帰であることを勘案すると、東部の海面水温偏差は強く、西部の海面水温偏差は弱い。これに対応してスマトラ島の西側では高気圧偏差が強く、沿岸の南東風も強い（図3C)。インド洋は地球温暖化傾向による昇温が海面近くで特に顕著であり、近年のほうが背景場となる海洋上層での鉛直温度勾配が大きい(図4B)。そのため、風応力の変化に対する海洋上層水温の感度は高いことが期待されるか、回帰係数$b_1(t)$の時間変化傾向はこれに整合的である。

一方、他のケース(図 2A, 2C, 2D)は太平洋十年規模振動の位相変化に対応するような時間変化を示した。インド洋東部と西部の時系列は逆位相傾向を示し、片方の ENSO に伴う変化が大きい年代には、他方は小さくなる傾向がある。太平洋十年規模振動の位相の正/負に応じて、いわゆる EP-ENSO/CP-ENSO がそれぞれより出現しやすいことが指摘されている(Feng et al., 2019)。ENSO 指数への線形回帰は、それと整合的に赤道東太平洋でシグナルをもつ(図 5F)。水温変動の NINO4 海域よりも NINO3 海域での相対的な増大に応じて、海洋大陸付近での下降流の広がりや強さにも変調が生じ(図 5I)、結果的にインド洋の風系変化に変調をもたらしうる。なお、インド洋水温気候場の変化(図 6)は、図 4 に対して相対的に小さい。

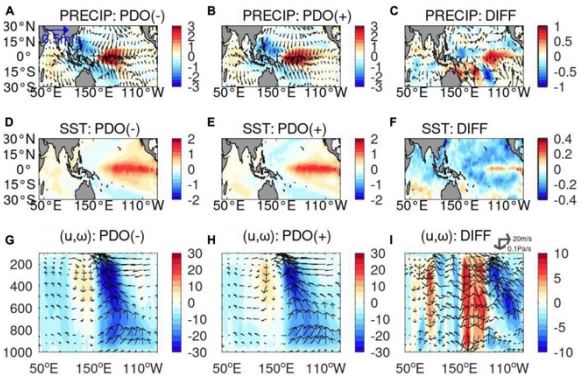

図5. 図3と同じ。ただし、冬季(11-1月)のNINO3.4 indexに対する線形回帰図。太平洋十年規模振動の正/負位相にもとづいて年代をわけている。

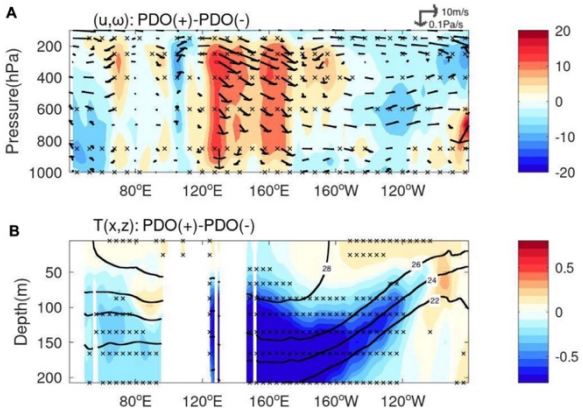

図6. 図4と同じ。ただし、太平洋十年規模振動の正/負位相にもとづいて年代をわけている。

4. まとめ

ENSOやIODの影響の時間変化を表現できるベイズ動的線形モデル(BDLM)を用いると、静的線形モデルよりもインド洋東部および西部での海面高度(や湧昇)の年々変動をより現実的に表現できる。BDLMから得られる回帰係数の年々変動にまつわる変動物理を探求すると、IOD指数に伴うインド洋東部の海面高度変動は、長期的に強まる風応力と海洋上層の安定化に対応するような長期的な変調傾向を示す。一方、ENSO指数に伴う(特にインド洋西部の)海面高度変動は、太平洋十年規模振動に付随するENSOの特徴の変化による十年規模変調を示す。回帰係数の時間変化はこれらの変調傾向に対応する。

謝辞

科研費JP19H05703、および京都大学防災研究所共同研究(令和5年度一般研究集会2023WS-07)から支援を受けた。全ての図はZhang and Mochizuki (2023)からの引用である。

参考文献

[1] Balmaseda, M. A., Trenberth, K. E., and Källén, E. (2013), Geophysical Research Letters, 40, doi:10. 1002/grl.50382

[2] Feng, J., Lian, T., Ying, J., Li, J., and Li, G. (2019), Journal of Climate, 33, doi:10.1175/jcli-d-18-0854.1

[3] Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., et al. (2003), Journal of Geophysical Research, doi:10.1029/2002JD002670

[4] Xie, P.-P., and Arkin, P. A. (1996) Journal of Climate, doi:10.1175/15200442 (1996)009<0840:aogmpu>2.0.co;2

[5] Zhang, X., and Han, W. (2020), Journal of Climate, doi:10.1175/JCLI-D-19- 0386.1

[6] Zhang, X., and Mochizuki, T. (2022), Frontiers in Climate, doi:10.3389/fclim.2022. 1008776

[7] Zhang, X., and Mochizuki, T. (2023), Frontiers in Earth Science, doi:10.3389/feart. 2023.1212421