

# 黒海・カスピ海周辺の 熱的海陸コントラストに対する大気応答

小守信正（慶大 自然セ），山崎 哲（海洋機構 APL），吉田 聡（京大 防災研）

## 1 はじめに

北太平洋の黒潮や北大西洋の湾流など、西岸境界流に伴う海面水温前線が大規模な気候系に与える影響が広く認識されるようになってきた (e.g., Nakamura et al., 2004; Minobe et al., 2008). 一方、海岸線も海陸間の急峻な表面温度前線を形成しており、局所的な気候に影響を与えることが期待される。実際、高分解能の格子化雨量計データ (APHRODITE, Yatagai et al., 2012) や再解析データ (ERA5, Hersbach et al., 2020) において、気候学的な降水量の極大が地中海・黒海・カスピ海の海岸線に沿って見られる (図 1a, c). しかしながら、これらの現象は地形性降水として理解される場合が多い (e.g., Kitoh et al., 2008; Kitoh and Arakawa, 2011).

そこで本研究では、大気大循環モデルを用い、黒海・カスピ海などの内海や五大湖などの湖沼の取扱いを変更した数値実験を通じて、海陸間の熱的コントラストが大気に与える影響を抽出することを試みる。

## 2 数値実験

地球シミュレータ用大気大循環モデル AFES (Ohfuchi et al., 2004; Enomoto et al., 2008; Kuwano-Yoshida et al., 2010) を用いた。解像度は水平 T119 (約 100 km) 鉛直 48 層 (上端は 3 hPa) である。AFES には、内海や湖沼の水温を境界条件として与える代わりに slab model として解く機能がある。CTL では水深を一様に 5 m (既定値) とし、LWD では Global Lake Database ver. 2 (GLDBv2, Kourzeneva, 2010; Kourzeneva et al., 2012; Choulga et al., 2014) の平均湖水深を与えた。ただし、冬季の混合層深を考慮して最大値は 25 m としている。地形を含む他の設定は同一である。

海面水温として NOAA OISST ver. 2 (OISST-v2, Reynolds et al., 2007; Banzon et al., 2016) を与え、1982 年 3 月から 2015 年 2 月まで 33 年間の積分を行った。以下では、1985 年 3 月から 2015 年 2 月まで 30 年間の気候値について解析する。

## 3 結果

冬季 (DJF) 平均の降水量は、CTL に比べて LWD の方が黒海の南縁から南東縁にかけて増大しており、10 m 風の偏差はこの増大域へ向けて収束している (図 1b)。CTL では黒海の熱容量が過小評価され、表面温度の季節変動の位相が観測に比べて早く振幅が過大であったのに対し、LWD ではそれが大幅に改善され、黒海の表面温度が正偏差となる。そのため、大気下層の安定度に周囲の陸域と顕著な差が生じ、黒海上でのみ大気下層が不安定化し鉛直混合が強化されて表層風が加速される (図 2a)。これは、赤道域 (Wallace et al., 1989; Hayes et al., 1989) や中緯度域 (e.g., Nonaka and Xie, 2003) の海洋で SST と表層風に見られるのと類似した現象である。結果として、風上側で発散・風下側で収束の偏差が生じる (図 2b)。

一方、夏季 (JJA) 平均の降水量は、CTL に比べて LWD の方が減少し、10 m 風の偏差は減少域から発散している (図 1d)。冬季とは逆に黒海の表面温度が負偏差となり、黒海上で表層風が減速され (図 2c)、風上側で収束・風下側で発散の偏差が生じる (図 2d)。

黒海の南縁緯度 (41.4°N) に沿った鉛直断面で見ると、これら表層風の収束・発散偏差に対応し、鉛直  $p$  速度の偏差は冬季に上昇風・夏季に下降風となり、その影響は高度 200–300 hPa 付近にまで及ぶ (図 3)。

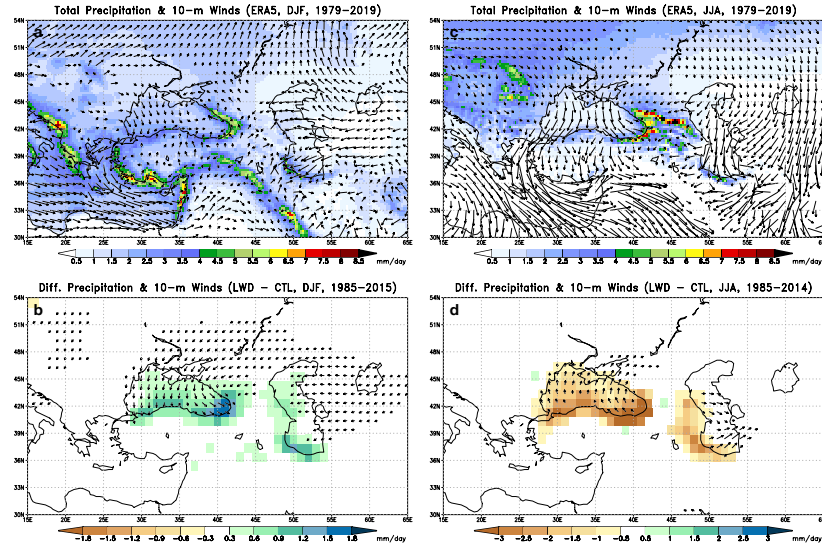


図 1: 降水量 [mm day<sup>-1</sup>] (色) と 10 m 風 (矢印) の気候学的季節平均値. (a, c) ERA5 再解析, (b, d) AFES 実験間の差 (LWD - CTL). (a, b) 冬季, (c, d) 夏季.

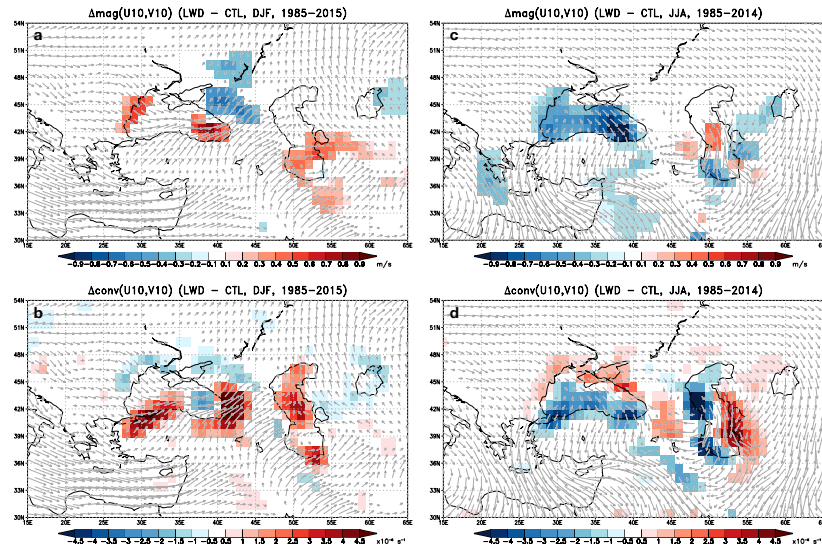


図 2: 10 m 風の (a, c) 大きさ [m s<sup>-1</sup>] と (b, d) 収束 [10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>] の AFES 実験間の差 (LWD - CTL). 灰色の矢印は LWD の 10 m 風. (a, b) 冬季, (c, d) 夏季.

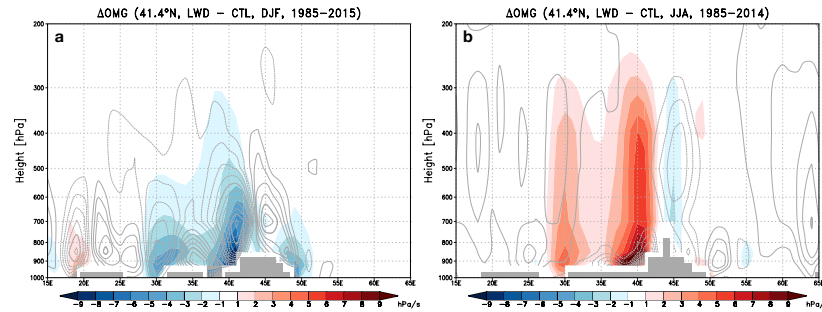


図 3: 黒海の南縁緯度 (41.4°N) に沿った鉛直  $p$  速度 [hPa s<sup>-1</sup>] の AFES 実験間の差 (LWD - CTL). 灰色の等値線は LWD の値. (a) 冬季, (b) 夏季.

夏季には亜熱帯ジェット気流が黒海・カスピ海の上空に位置する。200 hPa 面でのジオポテンシャル高度は、鉛直  $p$  速度の正偏差に対応した黒海・カスピ海直上での負偏差に加え、下流の東アジア域の広い範囲にも負偏差が存在する (図 4a)。また、亜熱帯ジェット気流はやや南偏・蛇行した偏差場となる (図 4b)。

#### 4 おわりに

本研究では、大規模な内海をより適切に取扱うことが、大気大循環モデルの降水バイアス減少に重要であることを示した。これは、より高精度の再解析プロダクト作成にも重要である。AFES を用いた再解析 (ALERA2, Enomoto et al., 2013) では、内海の水深は CTL と同じく一様に 5 m としていたが、これを LWD のように非一様で現実的な値に変更することにより、次のバージョンでは精度が向上することが期待される。

#### 謝辞

OISSTv2 は NOAA/OAR/ESRL PSD のウェブサイト (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>) から、GLDBv2 は淡水湖沼モデル FLake のウェブサイト (<http://www.flake.igb-berlin.de/site/external-dataset>) から取得した。本研究は JSPS 科研費 (JP17K05663, JP19H05701, JP19H05702) の支援を受けた。数値計算には地球シミュレータを利用した。

#### 参考文献

Banzon, V., T. M. Smith, T. M. Chin, C. Liu, and W. Hankins, 2016: A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies. *Earth Syst. Sci. Data*, **8**, 165–176, doi:10.5194/essd-8-165-2016.

Choulga, M., E. Kourzeneva, E. Zakharova, and D. Arkady, 2014: Estimation of the mean depth of boreal lakes for use in numerical weather prediction and climate modelling. *Tellus A*, **66** (1), 21295, doi:10.3402/tellusa.v66.21295.

Enomoto, T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and W. Ohfuchi, 2008: Description of AFES 2: Improvements for high-resolution and coupled simulations. *High Resolution Numerical Modelling of the*

*Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton, and W. Ohfuchi, Eds., Springer, New York, NY, chap. 5, 77–97, doi:10.1007/978-0-387-49791-4\_5.

- Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and S. Yamane, 2013: Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*, S. K. Park, and L. Xu, Eds., Springer, chap. 21, 509–526, doi:10.1007/978-3-642-35088-7\_21.
- 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** (12), 1500–1506, doi:10.1175/1520-0442(1989)002<1500:TIOSST>2.0.CO;2.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146** (730), 1999–2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Kitoh, A., and O. Arakawa, 2011: Precipitation climatology over the Middle East simulated by the high-resolution MRI-AGCM3. *Global Environ. Res.*, **15** (2), 139–146, URL <http://www.airies.or.jp/journal.15-2eng.html>.
- Kitoh, A., A. Yatagai, and P. Alpert, 2008: First super-high-resolution model projection that the ancient “Fertile Crescent” will disappear in this century. *Hydrol. Res. Lett.*, **2** (1), 1–4, doi:10.3178/hrl.2.1.
- Kourzeneva, E., 2010: External data for lake parameterization in numerical weather prediction and climate modeling. *Boreal Environ. Res.*, **15** (2), 165–177, URL <http://www.borenv.net>.
- Kourzeneva, E., H. Asensio, E. Martin, and S. Faroux, 2012: Global gridded dataset of lake coverage and lake depth for use in numerical weather prediction and climate modelling. *Tellus A*, **64** (1), 15640, doi:10.3402/tellusa.v64i0.15640.
- Kuwano-Yoshida, A., T. Enomoto, and W. Ohfuchi, 2010: An improved PDF cloud scheme for climate simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136** (651), 1583–1597, doi:10.1002/qj.660.
- 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** (7184), 206–209, doi:10.1038/nature06690.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto, and A. Shimpo, 2004: Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic

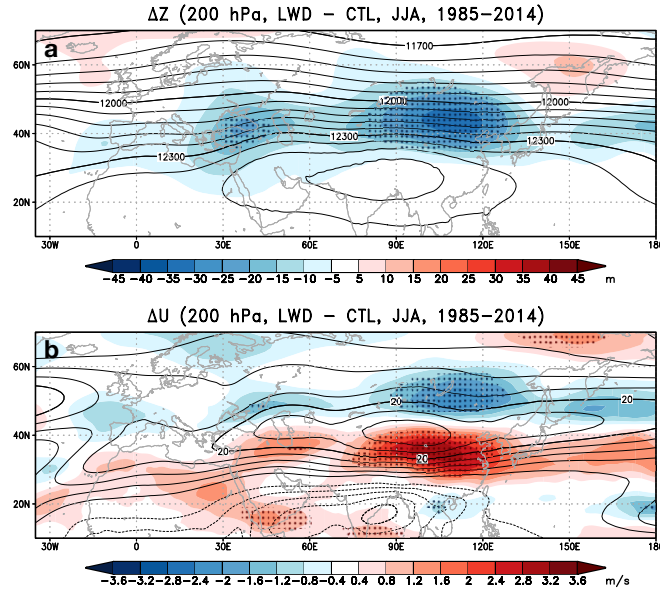


図4: 夏季・200 hPa面でのAFES実験間の差(LWD - CTL). 等値線はLWDの値. (a) ジオポテンシャル高度 [m], (b) 東西風 [ $\text{m s}^{-1}$ ].

fronts. *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*, C. Wang, S.-P. Xie, and J. A. Carton, Eds., Geophys. Monogr. 147, American Geophysical Union, Washington, D.C., U.S.A., 329-346, doi:[10.1029/147GM18](https://doi.org/10.1029/147GM18).

Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93** (9), 1401-1415, doi:[10.1175/BAMS-D-11-00122.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00122.1).

Nonaka, M., and S.-P. Xie, 2003: Covariations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: Evidence for ocean-to-atmosphere feedback. *J. Climate*, **16** (9), 1404-1413, doi:[10.1175/1520-0442\(2003\)16<1404:COSSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1404:COSSA>2.0.CO;2).

Ohfuchi, W., and Coauthors, 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator—Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, **1**, 8-34, doi:[10.32131/jes.1.8](https://doi.org/10.32131/jes.1.8).

Reynolds, R. W., C. Liu, T. M. Smith, D. B. Chelton, M. G. Schlax, and K. S. Casey, 2007: Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, **20** (22), 5473-5496, doi:[10.1175/2007JCLI1824.1](https://doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1).

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 interannual variability. *J. Climate*, **2** (12), 1492-1499, doi:[10.1175/1520-0442\(1989\)002<1492:TIOSSST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1492:TIOSSST>2.0.CO;2).

Yatagai, A., K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi, and A. Kitoh, 2012: APHRODITE: