

2023 年秋の中高緯度の気象海洋相互作用について

中村 哲 (気象庁大気海洋部気候情報課)

1. はじめに

2023 年は前年から続く中高緯度の高い SST に加え、熱帯ではエルニーニョ現象が始まったことから全球平均気温は記録的に高い水準となった。日本の季節平均気温は、春、夏、秋と 3 季続いて最高値を更新した。これには日本海や黒潮続流域を含む近海の高い海面水温 (SST) の影響に加えて、日本の東の海洋上の高気圧が持続的に強かったため、日本周辺の南風偏差による暖気移流や、高気圧の張り出しに伴う日射による加熱が寄与したと考えられる。日本近海の高い SST は、大気擾乱によるフィードバック過程を通して、日本付近のジェット気流の分流を伴う北太平洋上の高気圧と相互作用していると考えられ、持続的な高温と高い SST 環境の維持に影響した可能性がある。本稿は上述したような 2023 年秋の天候の状況についての解析結果をまとめたものである。

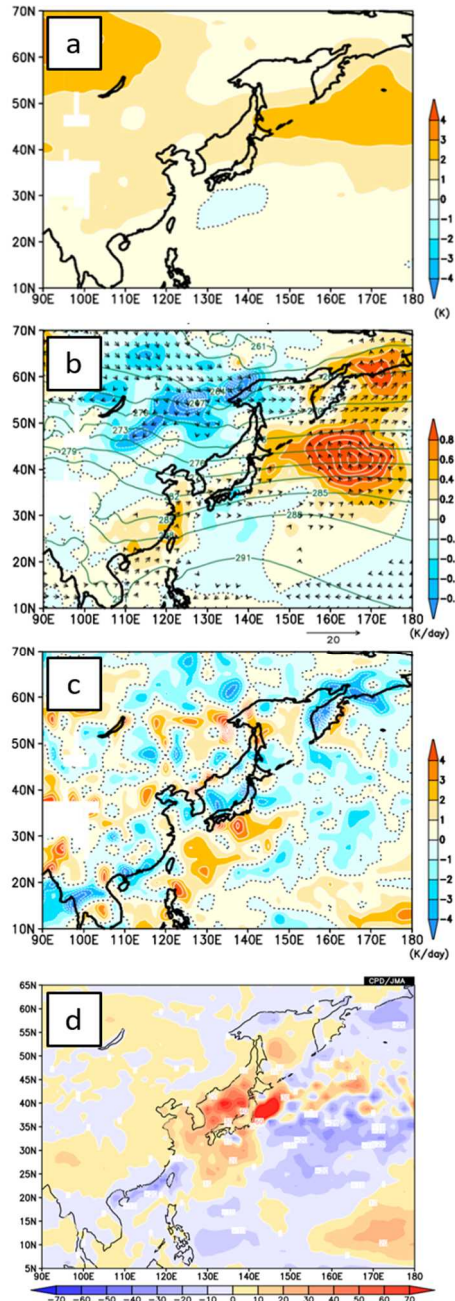
2. 使用データと解析手法

解析に用いた大気および海洋のデータは気象庁第3次再解析 (JRA-3Q, Kosaka et al., 2024) と MGDSST (栗原ほか, 2006) である。特に断りのない限り偏差は月ごとの平年値 (1991–2020 年平均) からの差で定義する。

2023 年秋の記録的に高い SST の影響を評価するため、大気大循環モデル AFES4.3 (Ofuchi et al., 2004; Enomoto et al., 2008) を用いた GOGA 実験、MOGA 実験を行った。2023 年 6 月 5 日初期値から 6 ヶ月積分した 64 メンバーに対し、下部境界条件を気候値 SST から

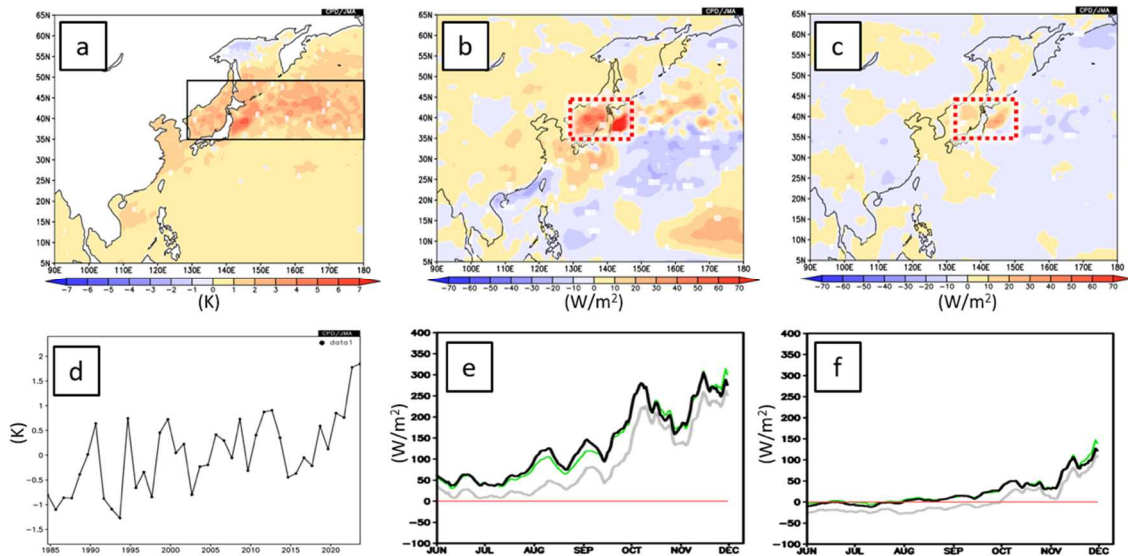
- 2023 年の SST (GOGA)
- 中高緯度のみ 2023 年の SST (20°N 以北、20–30°N 間は線形補完、MOGA)

へと変更した場合の、秋 (9–11 月平均) の大気応答を評価した。



第1図 2023 年秋の気温偏差とその要因

2023 年 9–11 月平均の偏差を陰影で示す。上段から (a)850hPa 気温、(b)850hPa 水平風による平年気温の移流、(c)850hPa 鉛直移流、および (d) 表面乱流熱フラックス (顕熱+潜熱、上向きが正)。(b)の矢印は水平風偏差ベクトルで 20m/s に対応する矢印の長さを下端に示す。等値線は 850hPa 気温。(d)の単位は W/m^2 。



第2図 近海 SST の記録的な高温と、下層大気加熱

2023 年 9-11 月平均の(a)SST、(b)潜熱フラックス、および(c)顕熱フラックスの偏差。(d)日本近海平均(127-180°E、35-50°N、(a)の黒線枠)の1983-2023年期間の9-11月平均SST偏差時系列。(e,f)日本列島北部近海平均(127-145°E、35-45°N、(a)の赤破線枠)の2023年6-11月期間の日平均(e)潜熱フラックス、および(f)顕熱フラックス。緑実線は JRA-3Q の熱フラックス、黒実線はバルク式により推定した熱フラックス、そして灰実線は SST を平年値と仮定してバルク式により計算した熱フラックスを示す。

3. 解析結果

2023 年秋の日本の気温は全国的に高く、特に北・東・西日本でかなり高かった。北・東日本は、1946 年の統計開始以降 1 位の高温だった。850hPa 気温を見ると、北海道の北東から北太平洋北部にかけて高温偏差が広がり(第1図 a)、主に南風偏差による暖気移流が寄与していた(第1図 b)。一方、日本の周辺では水平風による暖気移流の寄与は小さく、日本列島の南部では下降流偏差による断熱昇温(第1図 c)、北部では周囲の海洋からの熱フラックス(第1図 d)が高温に寄与していた。

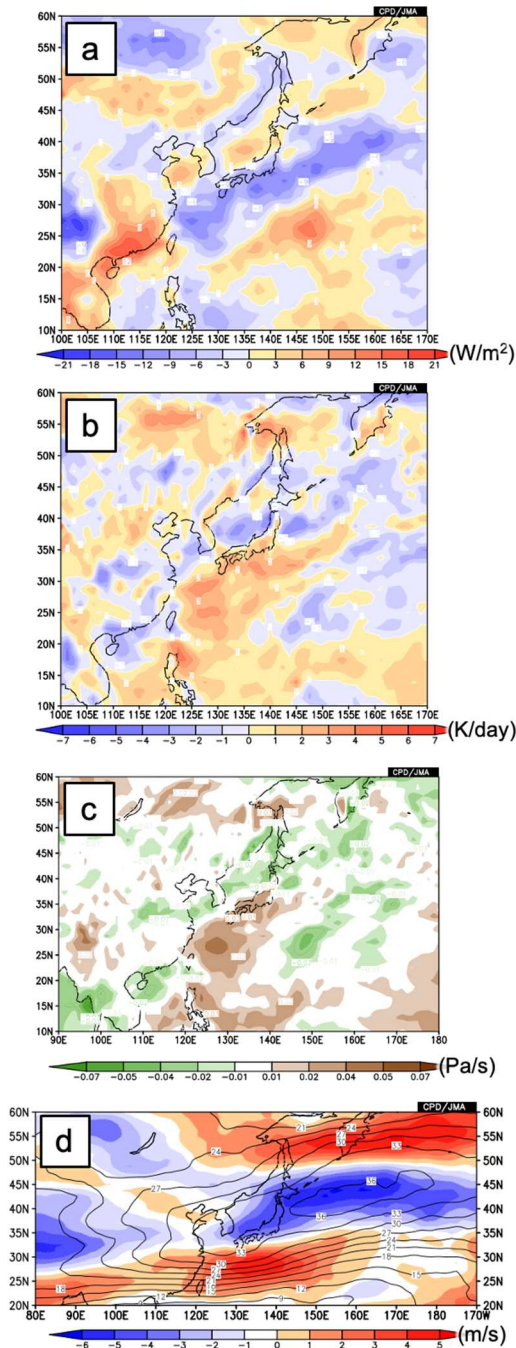
日本近海の海面水温(SST)は、日本海から黒潮続流域にかけて高温偏差が広がっていた(第2図 a)。日本列島北部の周辺では、海からの潜熱(第2図 b)および顕熱(第2図 c)供給が高く、日本近海の SST が記録的に高かったこと(第2図 d)の影響で、大気下層の高温偏差が維持されたと考えることができる。バルク式により推定された熱フラックスを、SST を平年値と見做して得られたフラックス推定値と比較すると、夏

から秋にかけて日本列島の北部では、潜熱フラックスで 40W/m^2 、顕熱フラックスで 20W/m^2 程度の差があり(第2図 e,f)、実際の偏差のほとんどを説明することから、SST の影響が支配的であったことがわかる。

大気循環による高温要因に着目すると、2023 年秋は、日本列島の南部で短波放射の下向き偏差(第3図 a)、および大気下層の断熱加熱偏差(第3図 b)が大きかった。これらの偏差は強い下降流偏差域(第3図 c)と一致しており、下降流の卓越により、断熱昇温と晴天日射の効果で高温となったと考えられる。2023 年秋は日本の上空のジェット気流が分流傾向を示しており(第3図 d)、気候学的な強風軸の南西象限で、ジェット気流の弱화에伴う力学的要請により下降流が卓越したと見られる。

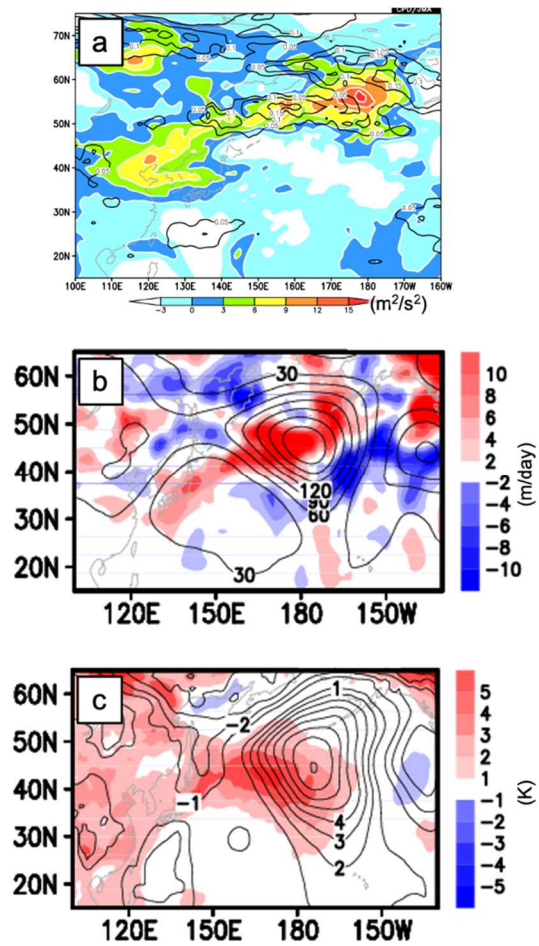
前述のように 2023 年秋の日本近海は記録的に高温な SST が黒潮続流域へ広がっていた。この時、高温水域の北側では下層の南北温度勾配が強まることで擾乱活動が活発化していた(第4図 a)。渦運動量フラックス収束による循環

場への強制を見積もると、北太平洋北部の対流圏上層では擾乱活動により強制された高気圧偏差が卓越していた(第4図 b)。高気圧性循環偏差はその北側の偏西風を強めることから、日本付近のジェット気流の分流傾向にも寄与して



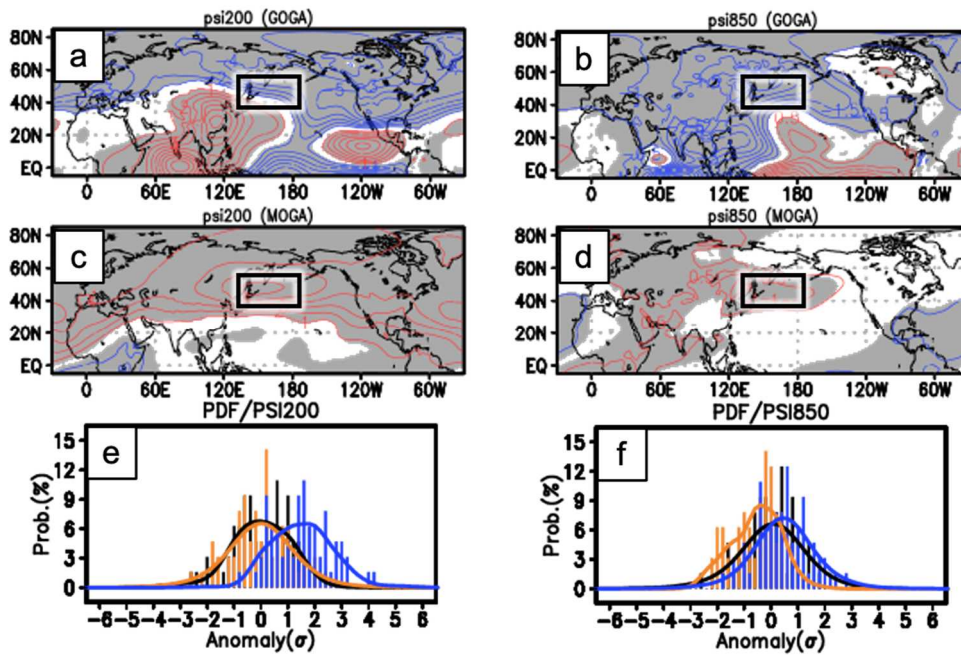
第3図 下降流偏差に伴う断熱昇温と晴天日射
2023年9-11月平均の偏差を陰影で示す。上段から(a)地表面での正味短波放射フラックス(上向きが正)、(b)700hPa面大気断熱加熱、(c)500hPa鉛直気圧速度、および(d)300hPa水平風速。等値線は300hPa風速実況値を示す。

いる。上層の高気圧偏差に同調して大気下層でも高気圧偏差となり、南風偏差の卓越する日本の東の続流域では下層気温偏差も高温となっていた(第4図 c)。この領域の地表乱流熱フラックス偏差は、特に続流域の南で下向き偏差となっており(第1図 d)、南風偏差により移流された暖気が海洋を温め、高い SST の維持に寄与していたと考えられる。このことは、北太平洋北部の高い SST と対流圏上層の高気圧性循環偏差との間には、相互に強化し合う正のフィードバック効果があることを示唆する。



第4図 擾乱活動とそのフィードバック

上段から2023年9-11月平均の(a)短波擾乱の運動エネルギー実況値(陰影)と Eady 成長率偏差(等値線、単位は 1/day、正偏差のみ表示)、(b)300hPa 渦運動量フラックス収束による高度変化率偏差(陰影)と 300hPa 高度偏差(単位は m)、(c)2m 気温偏差と海面気圧偏差(単位は hPa)。



第5図 2023 年秋の SST 強制に対する大気循環応答

上段及び中段には GOGA 実験の(a)200hPa と(b)850hPa、および MOGA 実験の(c)200hPa と(d)850hPa の流線関数応答を等値線で示す(単位は $10^6 \text{m}^2/\text{s}$)。灰色の陰影はアンサンブルスプレッドで評価した統計的有意水準 95%を上回る領域を示す。下段には北太平洋北部平均(120-180°E、40-60°N、(a-d)の黒線枠)の(e)200hPa、(f)850hPa の流線関数のヒストグラム(棒)と確率密度関数(線)を示す。境界条件の SST が気候値(黒)、2023 年(橙)、および中高緯度のみ 2023 年(青)の場合のハインドキャスト 64 メンバーから評価した結果を示す。

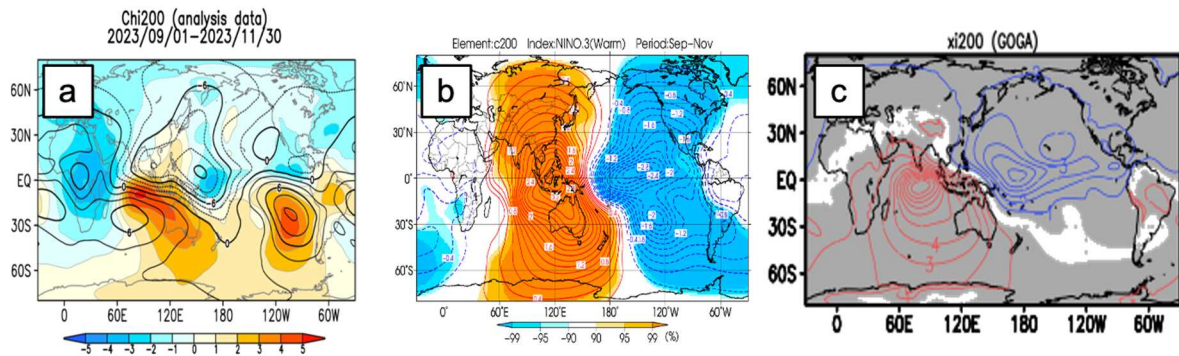
中緯度大気は一般に内部変動が卓越する。また熱帯の対流活動に対する遠隔応答も循環場の偏差の主要因である。これらの切り分けのため、大気大循環モデルのハインドキャストを用いた感度実験を行った(設定は2節を参照)。

2023 年秋の SST 偏差に対する応答を評価した GOGA 実験では、北太平洋北部の循環は上層ではジェット気流の強化(第5図 a)、下層では弱い低気圧性循環を示した(第5図 b)。一方で低緯度域を除いた中高緯度の SST 偏差に対する応答を評価した MOGA 実験では、北太平洋北部の循環は上層、下層ともに高気圧性偏差を示した(第5図 c,d)。アンサンブルメンバーの分布を見ても、MOGA 実験では上層が顕著に高気圧性循環にシフトする一方(第5図 e)、GOGA 実験では下層で低気圧性循環側へのシフトが見られた(第5図 f)。

MOGA 実験の結果は、黒潮続流域の高い SST が北太平洋北部で高気圧性循環を強制し

うることを示す一方、GOGA 実験の結果は 2023 年秋の状況を再現していない。

2023 年秋はエルニーニョ現象が発生していた。この時の熱帯の大規模循環場は、エルニーニョ時の特徴と相違していた(第6図 a,b)。GOGA 実験の大規模循環応答はエルニーニョ現象発生時の特徴と相似している。一般にエルニーニョ現象発生時は、熱帯対流活動の遠隔応答として、北太平洋北部では低気圧循環が卓越する。GOGA 実験では中高緯度の SST が強制した高気圧性循環が、エルニーニョ的な循環応答に相殺されたが、MOGA 実験では熱帯の強制がないため、高気圧性循環が応答として現れたと考えることができる。これらを勘案すると、2023 年秋は熱帯海洋ではエルニーニョが発生しているにもかかわらずその影響が大気循環場に現れにくかったことも特徴の一つであると言える。



第6図 熱帯対流活動に伴う大規模循環偏差

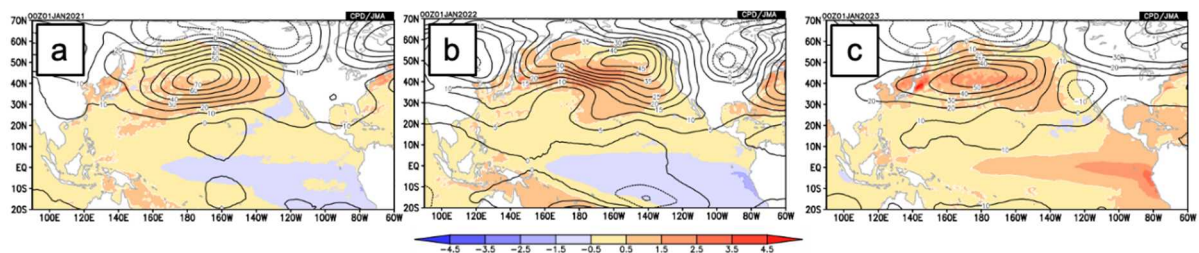
(a)2023年9-11月平均の200hPa速度ポテンシャルの偏差(陰影)と実況値(等値線)を示す。(b)9-11月平均の200hPa速度ポテンシャル偏差のエルニーニョ現象発生時の合成図で、等値線は偏差を示し、陰影は統計的有意水準を示す。(c)GOGA実験の9-11月平均の200hPa速度ポテンシャル応答で、等値線は応答の大きさを示し、陰影は統計的有意水準95%を上回る領域を示す。いずれも速度ポテンシャルの単位は $10^6\text{m}^2/\text{s}$ 。

最後に2023年秋に顕著に見られた北太平洋での大気海洋相互作用の役割について考察する。北太平洋北部での高気圧性循環偏差は、2021年から2023年にかけて長期的に維持されており、同時に日本の近海から黒潮続流域にかけてのSSTも高い状態が続いていた(第7図a-c)。熱帯海洋に着目すれば、2020年夏から断続的にラニーニャ現象が発生していた。ラニーニャ現象に対する遠隔応答として北太平洋北部は高気圧性循環偏差となることはよく知られ、また、この循環偏差により駆動される海洋力学の結果、黒潮続流域は温暖となり、これは太平洋10年規模振動(PDO)に対する強制となる(Newman et al., 2016)。PDOは2000年以降負の位相の傾向が続いていることに加えて、ラニーニャが3年続いたことで、北太平洋は垂表層を含め温暖な水温を維持しやすい状態となっていたと考えられる。このラニーニャ現象のメモリ効果は、大気海洋相互作用により高気圧性循

環偏差と同調し維持される。2023年にはエルニーニョ現象が発生したが、本稿で述べたように2023年秋の特徴の一つとしてその影響が限定的であったことも、ラニーニャ現象のメモリ効果が現れやすかった要因の一つと考えられる。

4. まとめ

2023年秋の日本周辺の天候は、記録的に高い近海のSSTと、上空のジェットの流れ傾向の影響で特徴づけられる。北・東日本では、近海の記録的に高いSSTからの潜熱、顕熱により下層大気の高温が維持され、高温となった。SSTに対応する南北温度勾配の強化に伴い、日本の北で低気圧活動が活発化し、北・東日本に多雨をもたらした。活発な擾乱活動は太平洋北部の対流圏上層に高気圧性循環を強制し、ジェットの分流傾向を形成した。この時の力学的要請として日本列島の南部では沈降流偏差と



第7図 2021年から2023年にかけての太平洋のSSTと大気循環

年平均の海面気圧(等値線、単位はPa)とSST(陰影、単位はK)の平年偏差を示し、左から(a)2021年、(b)2022年、および(c)2023年である。

なり、日射と断熱加熱が季節を通して持続し、西日本の高温をもたらした。

このような 2023 年秋を特徴づける大きな要因となった記録的に高い SST は、PDO の長期的な負傾向と、2020 年夏から 3 年持続したラニーニャのメモリ効果によるものと考えられる。北太平洋域における SST と大気循環のフィードバック効果(大気海洋相互作用)がそのような長期的な変化傾向を維持する一方、春に始まったエルニーニョの影響は、限定的であったため PDO の位相変化や北太平洋上の低気圧性循環をもたらさなかった。

参考文献

Enomoto, T., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, and W. Ohfuchi, 2008: Description of AFES 2: Improvements for high-resolution and coupled simulations. Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2008; pp. 77–97.

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. Tokuhiro, Y. Sato, Y. Matsushita, K. Onogi, 2024: The JRA-3Q Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 102.

Newman, M., Alexander, M. A., Ault, T. R., Cobb, K. M., Deser, C., Lorenzo, E. D., et al., 2016: The Pacific decadal oscillation, revisited. *J. Clim.*, 29(12), 4399–4427.

Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara, K. Ninomiya, 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. Simul.*, 1, 8–34.

栗原幸雄, 桜井敏之, 倉賀野連, 2006: 衛星マイクロ波放射計, 衛星赤外放射計及び現場観測データを用いた全球日別海面水温解析. *測候時報*, 73, S1–S18.