

近年の日本の天候に見られる特徴と十年規模変動の関連 ～Urabe and Maeda (2014), Imada et al. (2017)の続報～

ト部 佑介（気象庁気候情報課）、今田 由紀子（気象研究所）、前田 修平（高層気象台）

1. はじめに

地球温暖化に伴う全球平均気温の上昇傾向は十年から数十年の規模で強弱を繰り返しており（図1）、2000年頃から2010年代初めにかけて上昇傾向が弱まった期間は「ハイエイタス」と呼ばれ、自然科学のみならず社会から広く注目を集めていた。先行研究により、ハイエイタスの期間は海洋のより深い領域への熱の吸収が強まっていたことや、太平洋熱帯域の海面水温分布や東西循環の十年規模変動が全球平均気温の変動に大きく影響していること（Meehl et al., 2013; Kosaka and Xie, 2016; England et al., 2014）が示されており、ハイエイタスの要因として十年規模で生じる気候系の内部変動が重要と考えられている。日本においては、ハイエイタスの期間は夏から秋にかけて気温の上昇が続く一方、冬から春にかけては気温が低下しており、これにも太平洋の十年規模変動が影響していると考えられる（Urabe and Maeda, 2014; Imada et al., 2017）。

2010年代半ば以降、全球平均気温は大きく上昇しており（図1）、ハイエイタスが終了したと考えられる（Su et al., 2017; Loeb et al., 2018）。全球平均気温が上昇に転じて以降の観測データが5年以上蓄積されたことから、十年規模変動の状況を診断し、全球平均気温や日本の天候との関連を考察する。呼称が相応しいか否かはその結果及び今後の経過次第であるが、本報告では便宜的に「ポストハイエイタス」と呼ぶことにする。

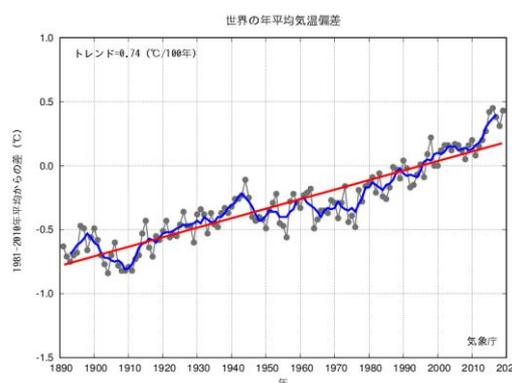


図1 全球平均気温（年平均）の時系列

地上観測及び海面水温客観解析に基づく気象庁の解析。黒線が年平均、青線が5年移動平均、赤線が線形トレンドを表す。

2. データ

海面水温は気象庁の客観解析 COBE-SST（Ishii et al., 2005）、表層水温は気象庁の海洋同化 MOVE-G2（Toyoda et al., 2013）を用いる。世界と日本の平均気温は気象庁の解析結果を用いる。世界平均気温の算出方法については西村（2018）、日本の平均気温の算出方法については気象庁ホームページ¹を参照されたい。大気循環場は気象庁の長期再解析 JRA-55（Kobayashi et al., 2015）を用いる。

十年規模変動の位相や期間について、当庁や国際的な枠組みによる厳密な定義はなされていない。今回は「ハイエイタス」としてUrabe and Maeda (2014) で解析対象とされた1999-2012年の14年間を、「ポストハイエイタス」として2014-2020年の7年間を用いる。ハイエ

¹ https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/clc_jpn.html

イタスの期間平均図及びその評価の多くは Urabe and Maeda (2014) で示されたものに準じているが、個別の引用表記は省略する。

3. 海洋の状況の変化

(1) 海面水温

図 2 にハイエイタスとポストハイエイタスの期間における年平均海面水温偏差の分布を示す。ハイエイタスでは太平洋熱帯域におけるラニーニャ傾向と北太平洋における負の太平洋十年規模振動 (PDO) が明瞭だったのに対して、ポストハイエイタスでは北太平洋において偏差分布が逆転し、正の PDO に相当する分布になっている。太平洋熱帯域の中部から東部においては、北半球側が正偏差に転じる一方、南半球側では負偏差が持続しており、偏差分布が南北対称から南北反対称へ変化している。南北反対称の偏差分布については、後述するとおり海面気圧、海上風と関連している可能性がある。この南北反対称の分布も相まって、ポストハイエイタスにおける海面水温は北半球における正偏差が特に顕著となっている。太平洋熱帯域の海面水温の変動が全球平均に大きく影響することが多いのに対して、2014 年以降は北太平洋の中高緯度が熱帯域と同程度かそれ以上の寄与を示していることが Urabe et al. (2017) により指摘されており、その後 2020 年にかけて同様の傾向が続いていることが分かる。

(2) 表層水温

図 3 に、海面から 300m 深まで鉛直平均した水温偏差の分布を示す。ハイエイタスとポストハイエイタスを比較すると、海面水温と同様、太平洋の東部が負偏差から正偏差へ変化し、西部では正偏差が弱まってフィリピン付近から東方にかけて帯状に負偏差が生じている。図は省略するが、両期間からエルニーニョ現象、ラニ

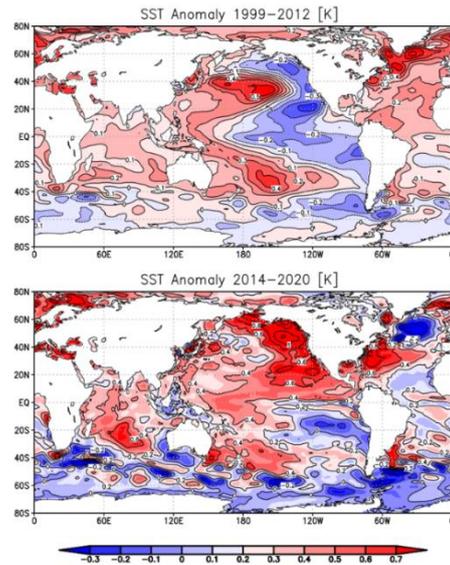


図 2 海面水温偏差の分布

上段がハイエイタス (1999-2012 年平均)、下段がポストハイエイタス (2014-2020 年平均)。偏差の基準は 1981-2010 年平均。

ーニャ現象が 1 事例ずつ発生した期間を抽出して平均しても同様の特徴が見られるため、年々変動としてのエルニーニョ、ラニーニャの頻度の偏りを反映したのではなく、年々変動の背景場に変化が起きていることが示唆される。

図 4 に、ポストハイエイタスとハイエイタスにおける水温の差分を示す。太平洋西部における水温の低下は亜表層で、太平洋東部における水温の上昇は海面付近で生じていることが分かる。図 5 には、全経度の南北 60 度で平均した水温偏差について、深度時間断面図と、50m 深及び 150m 深の時系列を示す。100m 深付近を境に逆符号の十年規模変動が見られ、図 1 に示した全球平均気温の時系列と照合すると、気温の上昇が明瞭な期間 (1980 年代～1990 年代) は 100m 以深の水温が低く、気温の上昇が弱まった期間 (1960 年代～1970 年代、2000 年頃からのハイエイタス) は逆に高くなる傾向にある。これは海洋の内部への熱の吸収によって地上

気温の上昇が抑制される関係(Meehl et al., 2013)を反映していると考えられる。一方、ポストハイエイタスにおいては海面付近の昇温が明瞭であり、全球平均気温が大きく上昇していることと整合する。海面水温(図2)や表層水温の水平分布(図3)に加えて、海洋内部での熱の鉛直分布も大きく変化したことが分かる。

海水の比熱は大気の約4倍であり、単位面積あたりの質量は深さ10mで地上から大気上端までの大気と等しい(海中では10m深くなるごとに1気圧上昇する)。従って、熱容量としては海面から2.5m深までの海水で直上の大気全層と等価、100m深までであれば40倍である。図5で平均した海洋の面積は全球面積の65%程度なので、表層100mで見られている $O(0.1^{\circ}\text{C})$ の変動は、気温に換算すると $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度に相当することになる。地球温暖化に伴う過去100年あまりの気温の変化は100年あたり 1°C 程度であり、海洋の十年規模変動に伴う熱の分布の変化はそれと同程度の規模を有すると言える。

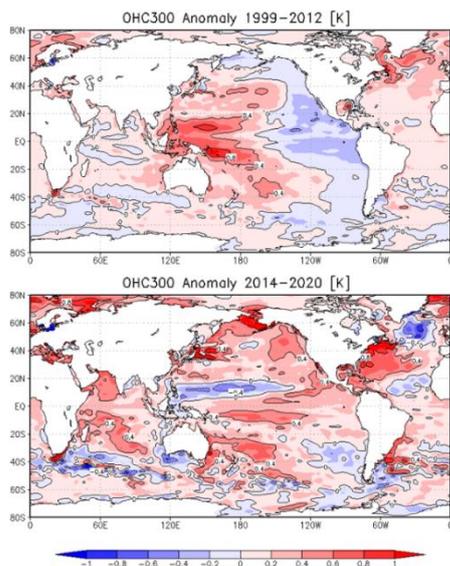


図3 海洋表層貯熱量(海面-300m深の平均水温)偏差の分布
見方は図2と同様。

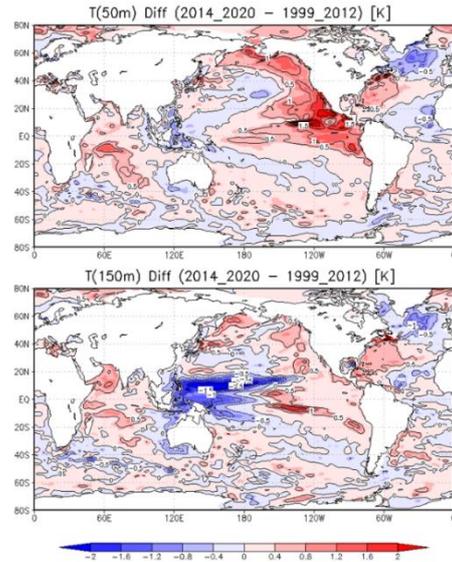


図4 表層水温の差分(ポストハイエイタス-ハイエイタス)
上段が50m深、下段が150m深。

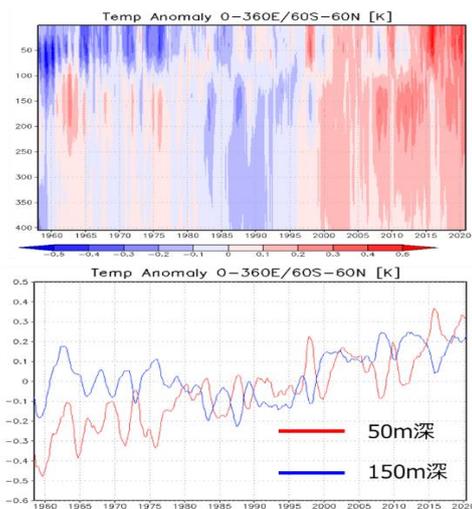


図5 0-360E, 60N-60Sで平均した水温の時間変化
上段が深度時間断面図。下段が50m深(赤)と150m深(青)の時系列。

4. 循環場の状況の変化

(1) 熱帯の大規模循環

図6に、200hPaにおける速度ポテンシャル偏差の分布を示す。ハイエイタスでは海洋大陸付近を中心とする上層発散が明瞭で、大規模な循環場にも十年規模でラニーニャ傾向が現れ

ていたことが分かる。ポストハイエータスでは、上層発散の中心が北半球側の中部から東部に移動している。ラニーニャ傾向の解消とエルニーニョ傾向への遷移が北半球側に偏って生じている点は海面水温と同様である。

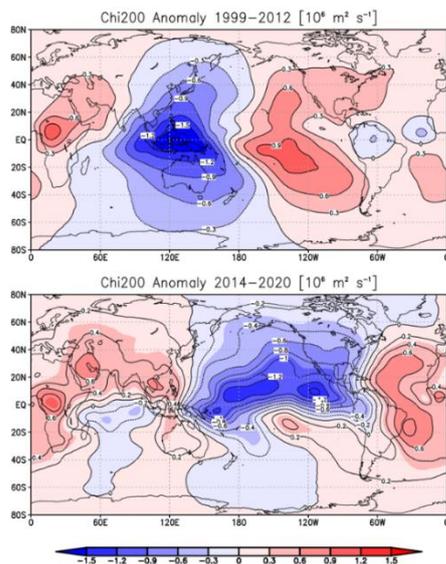


図6 200hPa 速度ポテンシャル偏差の分布
見方は図2と同様。

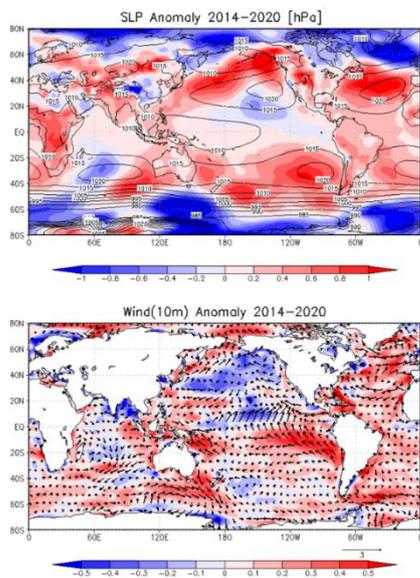


図7 ポストハイエータスにおける海面気圧偏差、海上風偏差の分布
上段が海面気圧偏差（シェード）及び平年値（コンター）。下段が海上風速偏差（シェード）及び海上風偏差（ベクトル）。

(2) 太平洋の海面気圧と海上風（南北反対称の分布）

図7に、ポストハイエータスにおける太平洋の海面気圧と海上風、風速の分布を示す。太平洋東部においては、亜熱帯高気圧が北半球で弱まっており、それと対応して北東貿易風が弱まり、熱帯域の中部を中心に風速が弱まっている。南半球では逆に高気圧が強まり、南東貿易風が強まっている。これは海面水温における南北反対称の偏差分布とも整合しており、Maeda et al. (2016a, b) が指摘した WES (Wind-Evaporation-SST) フィードバックによる形成、維持がポストハイエータスの期間を通じてみられている。

また、北太平洋の中緯度では平年の西風が弱まっており、風速（潜熱冷却）と北からのエクマン輸送の双方が弱まる傾向にある。この点も、海面水温が高い状態と整合的である。

北太平洋の海面水温の上昇については他にも要因があると考えられ、研究が進められている。当庁においても、引き続き監視と調査を続ける必要がある。

5. 日本の天候と十年規模変動

(1) 日本の平均気温

図8に、気象庁が地球温暖化の監視に用いている国内15観測地点のデータを用いた日本の平均気温の時系列を示す。年平均（ここでは前年12月から当年11月までの平均）は全球平均気温と同様に2000年頃からのハイエータスの期間には上昇が不明瞭となっているが、冬から春（前年12～当年5月）と夏から秋（6～11月）に二分して比較すると挙動が大きく異なっている。ハイエータスにおいては、夏から秋の平均気温は継続して上昇している一方、冬から春の気温は低下傾向を示しており、3. で示した太平洋における十年規模のラニーニャ傾向と関連していることが Urabe and Maeda (2014) に

よって指摘されている。2010年代半ば以降は冬から春の気温が大きく上昇に転じており、ポストハイエイタスにおけるエルニーニョ傾向への変化と整合的である。

図9に、Imada et al. (2017)と同様の手法でd4PDFの過去再現実験と非温暖化実験の結果から算出した日本付近での850hPa気温の時系列を示す。図7で示した観測と同様の変動が現れており、各年100メンバーの標準偏差と比較しても冬～春と夏～秋の違いが明瞭である。この結果から、観測された日本の気温の十年規模変動は、海面水温の分布に対する大気場の応答と関連している可能性が高いと考えられる。非温暖化実験の結果と比較すると、夏～秋は地球温暖化に伴う長期トレンドにほぼ従っている一方、冬～春は十年規模変動の振幅が大きいが分かるが、その要因については更なる調査が必要である。

(2) 冬～春で平均した循環場

図10に、冬～春で平均した海面気圧偏差の分布を示す。ハイエイタスと比べてポストハイエイタスでは日本の東海上で気圧が上昇し、ユーラシア大陸北部では気圧が低下している。これは日本付近において西高東低の冬型の気圧配置が弱まる傾向であり、気温の上昇傾向と整合的である。

図11に、冬～春で平均した200hPaの東西風偏差の分布を示す。日本の気温との関連を考察するため、日本の平均気温の観測値に対する回帰分布も示している。西風ジェットは、ユーラシア大陸から日本付近の領域ではハイエイタスで強く、ポストハイエイタスでは弱くなっている。ポストハイエイタスでは北日本からオホーツク海付近にかけて正偏差が見られており、ジェットの北偏傾向が見られる。回帰分布と比較すると、ハイエイタスは低温時の傾向、ポス



図8 日本の平均気温の時系列

気象庁の国内15地点での観測値を平均したもの。灰色が年平均（前年12月～11月）、青が冬季～春季平均（前年12月～5月）、橙が夏季～秋季平均（6月～11月）。5年（前後2年）の移動平均で示している。

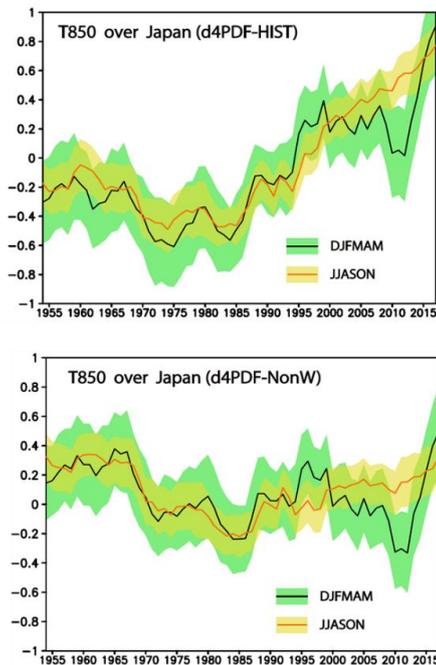


図9 d4PDFによる日本付近（130-147E, 30-43N）で平均した850hPa気温の時系列

上段が過去再現実験、下段が非温暖化実験。黒線が冬季～春季平均、橙線が夏季～秋季平均。網掛けは100メンバーの標準偏差の幅を示す。

トハイエイタスは高温時の傾向と近い分布を示しており、過去の統計と整合的な循環場と気温の変化が現れていることが分かる。

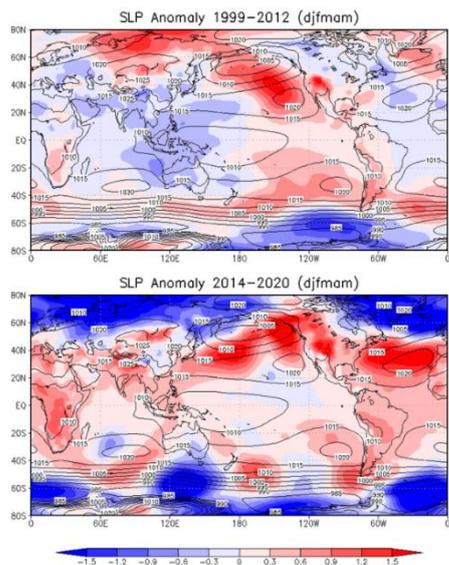


図 10 冬季～春季平均の海面気圧偏差の分布
見方は図 2 と同様。ただし、年平均ではなく前年 12 月～5 月平均で、平年値をコンターで併記している。

6. まとめ

太平洋における海面水温、表層水温の分布はハイエイタス期間のラニーニャ傾向、負の PDO から、北半球側を中心にエルニーニョ傾向、正の PDO へ遷移した。表層水温の分布では、昇温の中心が海洋の内部から海面付近へ変わり、気温の上昇と整合していると考えられる。大気と比べて海洋の熱容量は非常に大きく、2010 年代半ば以降に観測された海洋の状況の変化は、気候システムにおける熱の鉛直方向の分配の大規模な変化と考えることができる。これらの海洋における状況の変化は、十年規模変動の位相が「ハイエイタス」から「ポストハイエイタス」へと遷移したことを示唆する。

ポストハイエイタスにおける海面水温のもう一つの特徴は、北太平洋における顕著な昇温と、負偏差が持続する南太平洋との間で見られる南北反対称の偏差分布である。海面気圧、海上風も海面水温と整合する南北反対称の偏差分布を示しており、Maeda et al. (2016a, b) が提示した WES フィードバックによる偏差の形成、

維持が 2020 年にかけて継続していると考えられる。ただし、これが十年規模の変動であるか否かについてはより詳細な調査が必要である。

日本では、ハイエイタスの期間に低下傾向を示していた冬から春にかけての平均気温が上昇に転じ、海面気圧や上空のジェットの状態も整合的である。ハイエイタスの期間を対象とした先行研究で示された十年規模変動と日本の天候との関連は、ポストハイエイタスにおいても(逆位相となって)現れている可能性がある。

ハイエイタスの期間を中心に、20 世紀後半にわたって太平洋熱帯域の海面水温の東西勾配は強まる傾向(ラニーニャ傾向)にあったものの、気候モデルでは温暖化応答としてエルニーニョ傾向が現れることが多く、再現性は不十分である。Watanabe et al. (2020) によると、20 世紀後半に観測された太平洋熱帯域における海面水温の東西勾配の変化傾向を CMIP5 のモデルによる不確実性の幅はカバーし切れていない。更に、CMIP5 の中で 20 世紀後半のラニーニャ傾向を再現したモデルの結果を抽出すると、将来の全球平均気温の上昇が大きくなることも示されている。これは十年規模でのラニーニャ傾向からの反転を反映していると考えられ、特に低位の温室効果ガス排出シナリオの今世紀前半においてその影響が顕著とされている。「2050 年温室効果ガス排出実質ゼロ」といった今世紀半ばにかけての時間スケールを意識した気候変動対策の動きが活発になる中で、十年規模変動の監視・診断は気候変動の観測事実、将来予測を評価する上で重要な意味を持つと考えられる。

今回、ポストハイエイタスとして解析対象とした期間は 7 年間であり、十年規模変動のシグナルを抽出する上で十分とは言えない。全球平均気温や日本の天候を含め、引き続きデータの蓄積と状況の監視・診断を進める必要がある。

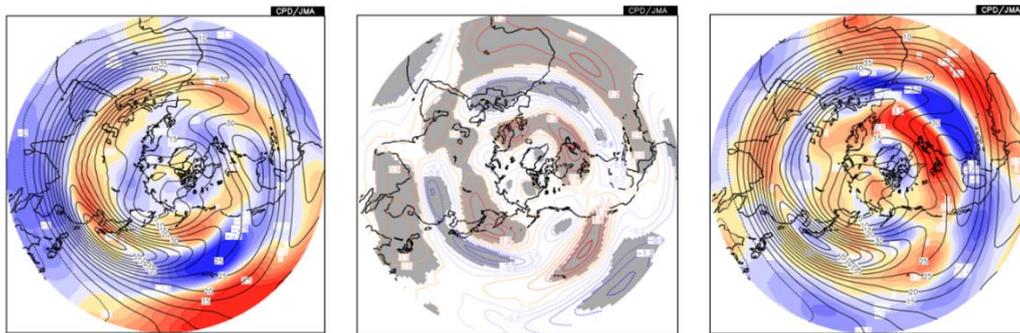


図 11 冬季～春季（前年 12 月～5 月）における 200hPa 東西風偏差と日本の気温に対する回帰
 左図がハイエイタス、右図がポストハイエイタスにおける偏差（シェード）及び平年値（コンター）。中図は日本
 の平均気温に対する回帰係数の分布。回帰分析の統計期間は 1959 年（1958 年 12 月～1959 年 5 月）から 2020 年
 （2019 年 12 月～2020 年 5 月）で、灰色のシェードは信頼水準 90%で統計的に有意な領域を示す。

参考文献

- 西村明希生, 2018: 気象庁における世界平均気温の算出方法. 平成 29 年度気候情報技術開発資料
- England, M. H., S. McGregor, P. Spence, G. A. Meehl, A. Timmermann, W. Cai, A. S. Gupta, M. J. McPhaden, A. Purich, and A. Santoso, 2014: Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat. Climate Change*, **4**, 222–227, <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>.
- Imada, Y., S. Maeda, M. Watanabe, H. Shiogama, R. Mizuta, M. Ishii, and M. Kimoto, 2017: Recent Enhanced Seasonal Temperature Contrast in Japan from Large Ensemble High-Resolution Climate Simulations. *Atmosphere*, **2017**, 8, 57, <https://doi.org/10.3390/atmos8030057>.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865–879, <https://doi.org/10.1002/joc.1169>.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>.
- Kosaka, Y., and S-P Xie, 2016: The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming. *Ngeo*, **9**, 669 – 673, <https://doi.org/10.1038/NGEO2770>.
- Loeb, N. G., T. J. Thorsen, J. R. Norris, H. Wang, and W. Su, 2018: Changes in Earth’s Energy Budget during and after the “Pause” in Global Warming: An Observational Perspective. *Climate*, **6**, 62, <https://doi.org/10.3390/cli6030062>.
- Maeda, S., Y. Urabe, K. Takemura, T. Yasuda, and Y. Tanimoto, 2016a: Active role of the ITCZ and WES feedback in hampering the growth of the expected full-fledged El Niño in 2014. *SOLA*, **12**, 17–21, <https://doi.org/10.2151/sola.2016-004>.
- Maeda, S., Y. Urabe, K. Takemura, T. Yasuda, and Y. Tanimoto, 2016b: Significant Atmospheric Circulation

- Anomalies over the North Pacific Associated with the Enhanced Pacific ITCZ during the Summer–Fall of 2014. *SOLA*, **12**, 282–286, <https://doi.org/10.2151/sola.2016-055>.
- Meehl, G. A., A. Hu, J. M. Arblaster, J. Fasullo, and K. E. Trenberth, 2013: Externally Forced and Internally Generated Decadal Climate Variability Associated with the Interdecadal Pacific Oscillation. *J. Climate*, **26**, 18, 7298 – 7310, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00548.1>
- Su, J., R. Zhang, and H. Wang, 2017: Consecutive record-breaking high temperatures marked the handover from hiatus to accelerated warming. *Scientific Reports*, **7**, <https://doi.org/10.1038/srep43735>.
- Toyoda, T., Y. Fujii, T. Yasuda, N. Usui, T. Iwao, T. Kuragano, and M. Kamachi, 2013: Improved analysis of seasonal- interannual fields using a global ocean data assimilation system. *Theor. Appl. Mech. Japan*, **61**, 31–48, <https://doi.org/10.11345/nctam.61.31>.
- Urabe, Y., and S. Maeda, 2014: The relationship between Japan’s recent temperature and decadal variability. *SOLA*, **10**, 176– 179, <https://doi.org/10.2151/sola.2014-037>.
- Urabe, Y., T. Yasuda, and S. Maeda, 2017: Rapid Warming in Global Sea Surface Temperature since around 2013. *SOLA*, **13**, 25– 30, <https://doi.org/10.2151/sola.2017-005>.
- Watanabe, M., J-L. Dufresne, Y. Kosaka, T. Mauritsen, and H. Tatebe, 2020: Enhanced warming constrained by past trends in equatorial Pacific sea surface temperature gradient. *Nat. Climate Change*, **11**, 33–37, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00933-3>.