

20 世紀における日本周辺域の大きな海面水温上昇メカニズム

戸田 賢希、渡部 雅浩（東大・大気海洋研究所）

1. はじめに

温室効果ガス(GHG)の増加に対して全球の海面水温(SST)が昇温することはよく知られているが、SST の昇温は全球一様ではなく、地域差が大きい。日本周辺の海域では 20 世紀において全球平均よりはるかに大きい昇温が報告されており(日本海域: 1.09K/100yr, 全球平均: 0.53K/100yr, 気象庁)、日本周辺域は温暖化の影響を強く受ける海域であることが示唆されている。日本周辺域の SST 昇温は集中豪雨などの災害リスクを増加させる要因となりうるが(Manda et al. 2014)、日本周辺の大きな SST 昇温のメカニズムは未だに分かっていない。

ここでは全球気候モデルを用いた数値実験と観測・再解析データの解析から強制による 20 世紀後半の日本周辺 SST 長期変化メカニズムの研究結果を報告する。

2. データ・実験設定

本研究では観測データと大気海洋結合モデル MIROC5.2(Watanabe et al. 2014)を用いて解析を行う。本研究では日本周辺域を北緯 25~47 度、東経 120~155 度で定義する(図 1(a)黒枠)。また、研究の対象期間は観測データの信頼性に基づいて 1951 年以降とした。

SST 観測データとしては COBE-SST (Ishii et al. 2005)を用いた。水平解像度は 1 度×1 度である。また、大気場の観測データに相当するものとして再解析データの JRA-55 (Kobayashi et al. 2015)を用いた。水平解像度は 1.25 度×1.25 度、鉛直レベルは 37 層である。

数値実験に用いた大気海洋結合モデル MIROC5.2 の大気解像度は T85L40、海洋解像度は水平解像度 1×0.5 度、鉛直レベルは 63 層

である。この MIROC5.2 を用いて現実再現アンサンブル実験(以下 HIST)を行った。アンサンブル数は 10 メンバーで、積分期間は 1921 から 2015 年、放射強制は CMIP5 historical 実験に準拠している。ただし、2006 年以降は RCP4.5 に基づく放射強制を与えた。解析に使用した期間は観測データに合わせて 1951 年以降とした。

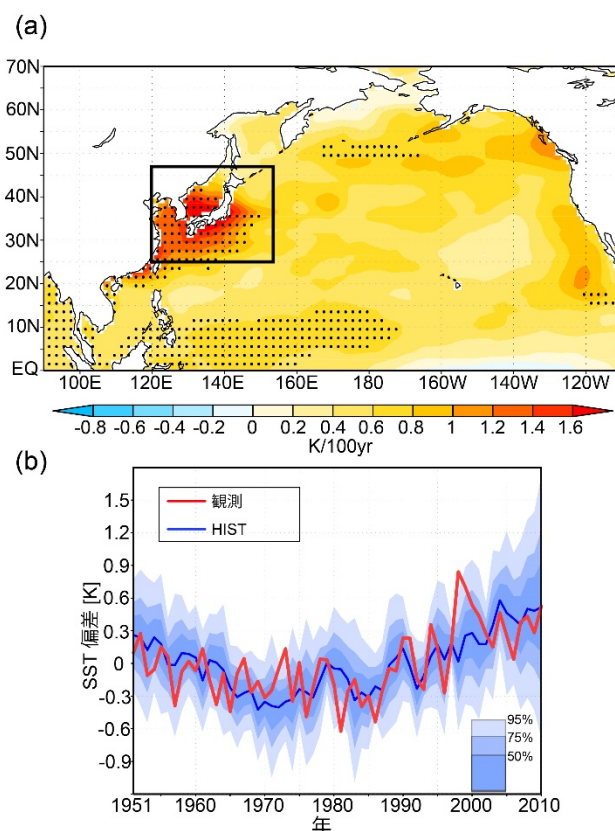


図 1(a)20 世紀の SST トレンド。黒枠は本研究の日本周辺域の定義。ドットは統計的に 95%有意な地点。(b)日本周辺域の SST 偏差時系列 (偏差は 1951-2010 年平均からの差)。赤が観測、青が HIST。シェードは各信頼区間。

3. 観測と HIST の比較

図 1(b)に観測された日本周辺域の SST 偏差時系列を示す (赤線)。観測された SST 偏差は

1951 年から 1980 年にかけて昇温が停滞し、その後大きく昇温するという単調でない SST 長期変化を見せている。この単調でない SST 長期変化は HIST のアンサンブル時系列にも同様に見られる。観測や数値実験の各モデルが強制応答と内部変動の両方を含んでいるのに対し、アンサンブル平均は理想的には強制応答のみを含む。従って、観測と HIST のアンサンブル実験双方で見られるこの単調でない SST 長期変化は強制によってもたらされていることが示唆される。

図 1(b)から HIST は観測された日本周辺の SST 時系列を良く再現している。また、季節性や様々な期間でのトレンド解析(図は割愛)も HIST は観測とよく一致しており、HIST は日本周辺域の SST 長期変化を再現していると言える。以上から HIST の結果を用いて日本周辺の SST 長期変化メカニズムの解析を行う。

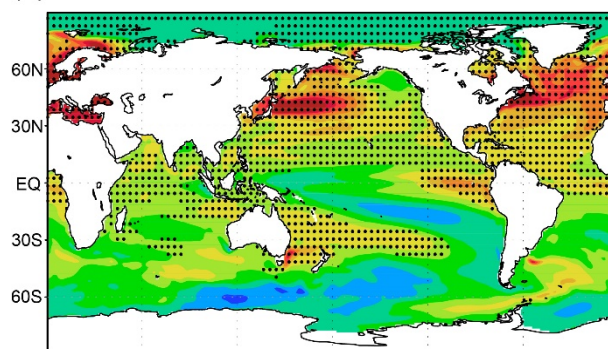
日本周辺域の SST は強制応答だけでなく、Pacific decadal oscillation(PDO)などの内部変動の影響を大きく受ける。日本周辺の SST 長期変化が強制に対する応答として検出可能なほど大きいのか HIST の結果を用いて検証した。アンサンブル平均を強制応答、各メンバーのアンサンブル平均からのずれを内部変動とし、それぞれの強さを時間方向の分散と定義する。その結果、HIST では SST 変化のうち 25%が強制によって説明されることが分かった。我々の興味は SST 長期変化であり、10 年周期以下の高周波の変化を除くローパスフィルタを用いると、その値は 25%から 47%へ増加する。これは日本の SST 長期変化のうちおよそ半分は強制で説明されることを示唆する。また、この値は全球平均の SST 長期変化(40%)よりも大きく、PDO などの強力な内部変動があるにもかかわらず日本周辺域の SST 長期変化には強制応答が検出可能なほど大きいことが示唆され

た。

4.HIST における日本の SST 長期変化メカニズム

ここからは HIST の数値実験結果を用いて日本周辺域の強制による SST 長期変化メカニズムを詳細に見ていく。図 1 で示したように強制された日本周辺の SST 長期変化は単調でないため、SSTトレンドは計算する期間によって大きく変化する。従ってトレンド解析はメカニズム解析には不十分である。そこで、日本周辺域のアンサンブル平均 SST 変化時系列に対する各種回帰分析を行った。ただし、長期変化を取り出すために、この章のすべての解析にはローパスフィルタを適用した結果を使用している。

(a)



(b)

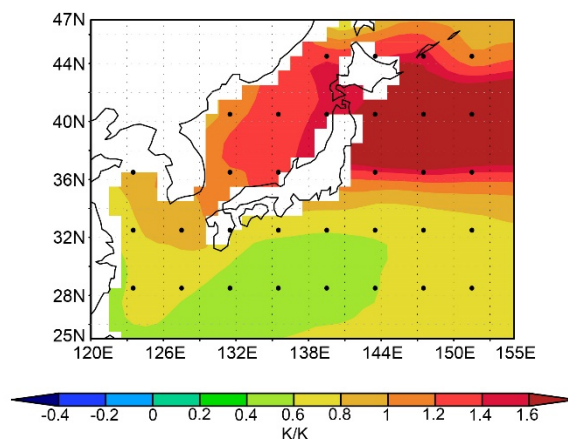


図 2(a)HIST アンサンブル平均の日本周辺域の SST 長期変化に対する全球の SST 回帰マップ。(b)(a)と同様。ただし日本周辺域拡大。ドットは 95%で統計的に有意な地域。

図 2 に日本周辺の SST 変化に対する強制さ

れた SST 変化パターンを示す。これを見ると日本周辺域の特に三陸沖に卓越した昇温があるのが分かる。SST 変化は海洋混合層温度変化とおおよそ近似できるため、海洋混合層熱収支を考える。すると混合層の加熱率の変化は

$$\frac{\partial T'_m}{\partial t} = \frac{Q'_{net}}{\rho C_p H} - \frac{\overline{Q_{net}} H'}{\rho C_p H^2} + E'$$

で表される。ただし、海洋混合層温度を T_m 、大気から海洋への加熱を Q_{net} 、混合層厚を H 、海洋密度を ρ 、海洋比熱を C_p 、その他海洋の要素(水平移流含む)である。バーは気候値で、プライムは回帰を意味する。左辺はゼロとみなせるので、右辺第3項は右辺1項と2項の残差として定義する。右辺第1項は大気からの加熱変化の効果、第2項は混合層厚変化の効果、第3項はそれ以外の海洋変化の効果である。図3(a-c)は日本の昇温に対する大気からの加熱率の変

化、混合層の変化による加熱率の変化、海洋の変化による加熱率の変化の回帰マップである。図3cから、三陸沖の大きな昇温は海洋の変化によってもたらされていることが分かる。混合層の変化は日本を冷却する方向に働いている

(混合層厚は減少し、気候値では海洋から大気へのフラックスが卓越するため冷却しやすくなる。)。大気からの熱フラックスは日本周辺の広範囲を昇温させている。図3(d)に日本平均した3つの加熱率の変化を示す。この結果から海洋の変化による加熱率変化と正味大気フラックスの変化による加熱率の変化は同程度の貢献度であることがわかる。また、正味大気フラックスを4成分(顕熱、潜熱、長波放射短波放射フラックス)に分解すると、特に顕熱の寄与が大きいことが分かる。長波放射による加熱の増加も次に大きい、これは温室効果ガスや水蒸気

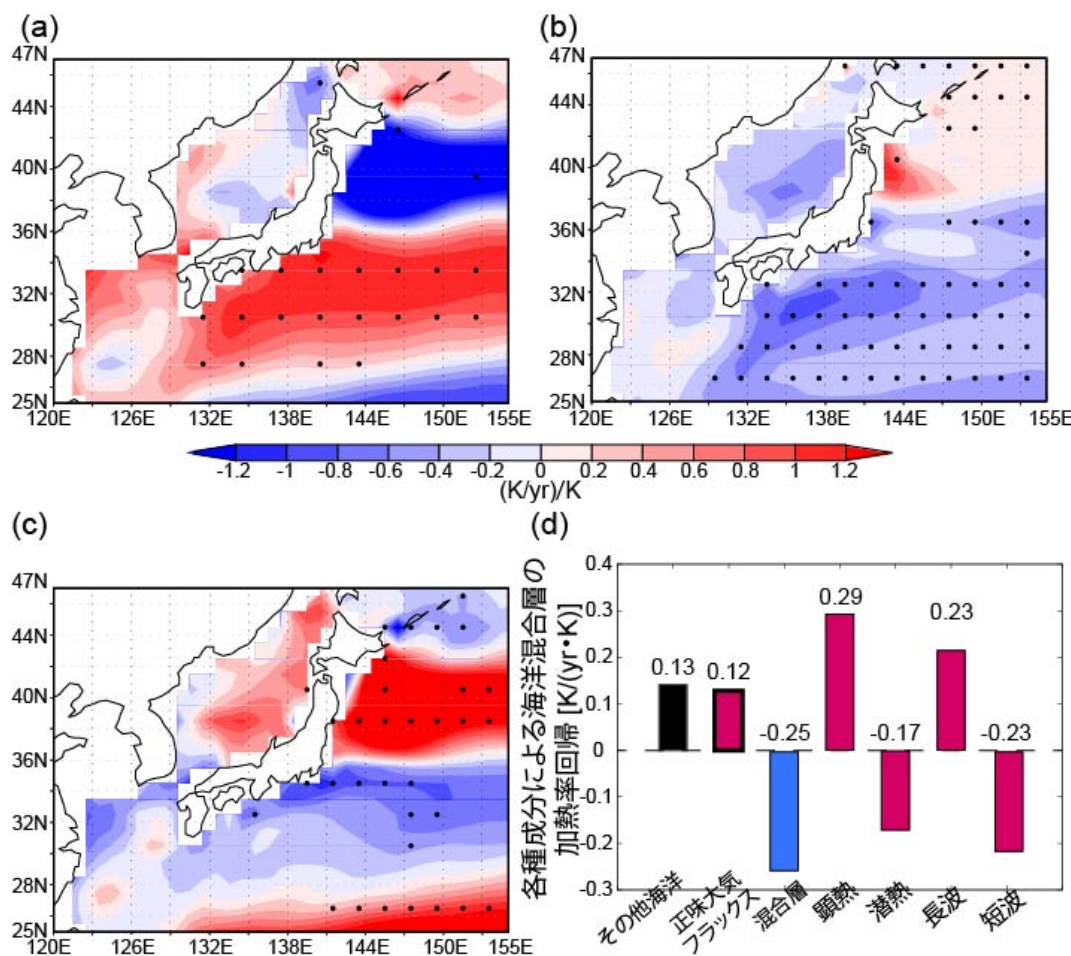


図3(a)-(c) HIST アンサンブル平均の日本周辺域の SST 長期変化に対する各種加熱回帰マップ。(a)大気からの正味熱フラックス変化の効果 (b)混合層厚変化の効果(c)海洋変化の効果。(d)日本平均した HIST アンサンブル平均の日本周辺域の SST 長期変化に対する各種加熱回帰。

の増加などに対応しており、全球平均値(0.25)よりも小さいため日本周辺域の特異な昇温は説明しない。そこで次からは広範囲に加熱をもたらしていた顕熱フラックス変化メカニズムと三陸沖に卓越した昇温をもたらした海洋の変化についてより詳しく見ていく。

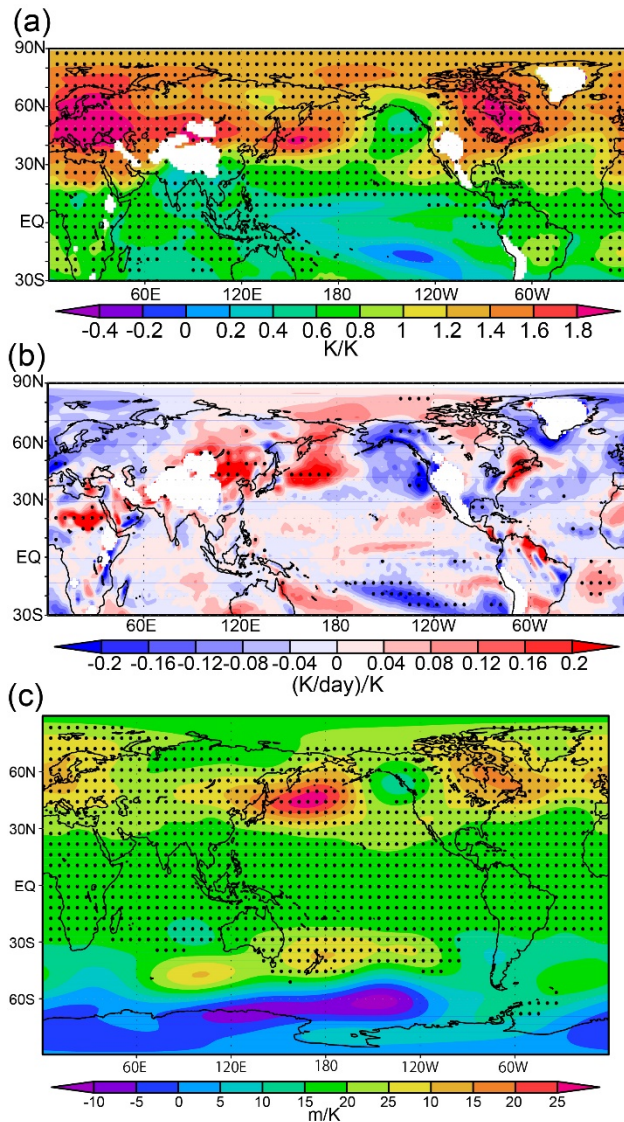


図4 HIST アンサンブル平均の日本周辺域の SST 長期変化に対する各種回帰マップ。(a)850hPa 温度(b)850hPa 水平温度移流(c)500hPa 高度(Z500)

顕熱フラックスによる加熱は大気の昇温が海洋よりも大きい場合に増加する。顕熱フラックスの増加に対応するような大気側の昇温が見られるか調べた。図4(a)に示した850hPa面にお

ける温度の回帰から、日本周辺が昇温したとき確かに顕熱フラックスの増加に対応するような大気下層の昇温があるのが分かる。この緯度帯の850hPaでは水平温度移流による加熱が卓越しているため、850hPa面での水平温度移流を調べた(図4b)。確かに850hPa面の北西太平洋には大きな暖気の移流が見られる。一方北東太平洋には寒気の移流が見られる。これは明らかに北太平洋の高気圧偏差(図4c)による時計回りの大気循環の励起によるものであることが分かる。以上の解析から、強制によって北太平洋の高気圧偏差が励起され、それに伴って北西太平洋に暖気が移流し、日本周辺海域に大きな顕熱加熱をもたらされるということが示唆される。

次に三陸沖に極めて大きな昇温をもたらした海洋の変化について考える。図5aに日本周辺域SSTの気候値と海洋混合層平均した海洋流速の気候値を示す。日本沖には黒潮が確認できる。日本昇温時のSSTと海洋流速の回帰を見ると(図5b)黒潮の軸が北上し、三陸沖まで暖流が流れ込むことで三陸の大きな昇温が起きていることが示唆される。また、図5bに見られる北緯32度以北の時計回りの海洋流速の変化は図4cに示された北太平洋高気圧の負の風応力curlによってもたらされていることが別の解析から示された。以上のHISTの解析から、顕熱に続いて海洋の変化によるSST変化も北太平洋の高気圧偏差によってもたらされた可能性が示唆された。

5. マルチモデル解析と観測の解析に見る日本周辺の SST 変化と北太平洋の気圧変化の関係性

HISTの解析から強制された北太平洋の高気圧偏差によって日本周辺の大きな昇温がもたらされている可能性が示唆された。これは単一モデルの結果であり、マルチモデルでも日本周辺

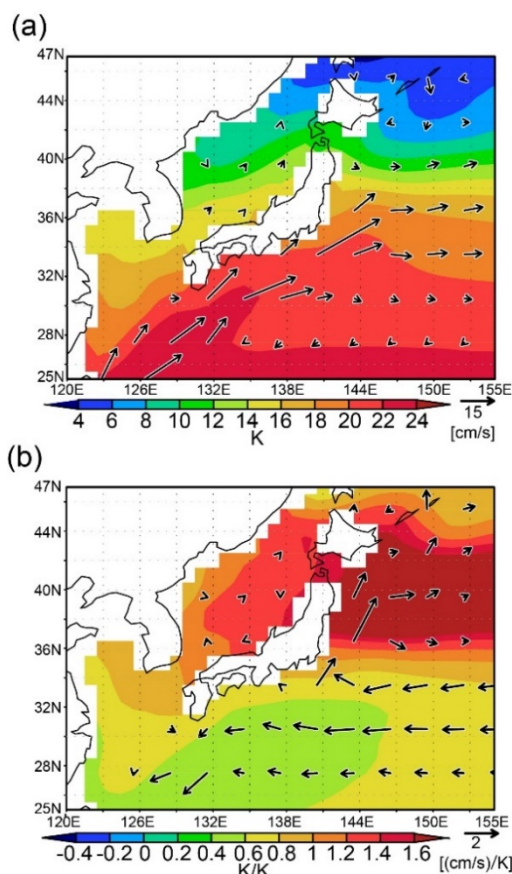


図 5(a)SST 気候値(色)混合層平均した海洋流速 (ベクトル) (b) HIST アンサンブル平均の日本周辺域の SST 長期変化に対する各種回帰マップ。SST(色)海洋流速(ベクトル)

の昇温と北太平洋の高気圧偏差に関連が見られるか確かめるため、CMIP5 に採用された 22 モデルを用いてマルチモデル解析を行った。図 6a に示した散布図は各モデルの北太平洋(北緯 30-50 度、東経 140 度-西経 150 度で定義)の高気圧偏差の強さと日本周辺の SST 昇温偏差の強さの関係性を示す。この結果は内部変動の影響を含んでいるものの、北太平洋の高気圧偏差が強いモデルほど日本の SST 昇温が大きいことが示唆しており、前章の HIST の解析から示唆されたメカニズムをサポートする結果となった。

最後に実際に日本周辺に観測されたような SST 長期変化をもたらさうる気圧変化が北太平洋に観測されたのか再解析データ JRA-55 を用

いて検証した。図 6(b)に JRA-55 と HIST の北太平洋 Z500 偏差時系列を示す。HIST と同様に単調でない数十年規模の気圧変化が北太平洋に見られることが確認できる。PDO などの内部変動の影響も考慮されるべきではあるが、1958 年から 1980 年代までの減少トレンド、それ以降の増加トレンドは明らかに PDO の周期よりも大きく、観測された北太平洋の長期的な気圧変化にも強制応答が多分に含まれている可能性が示唆される結果となった。

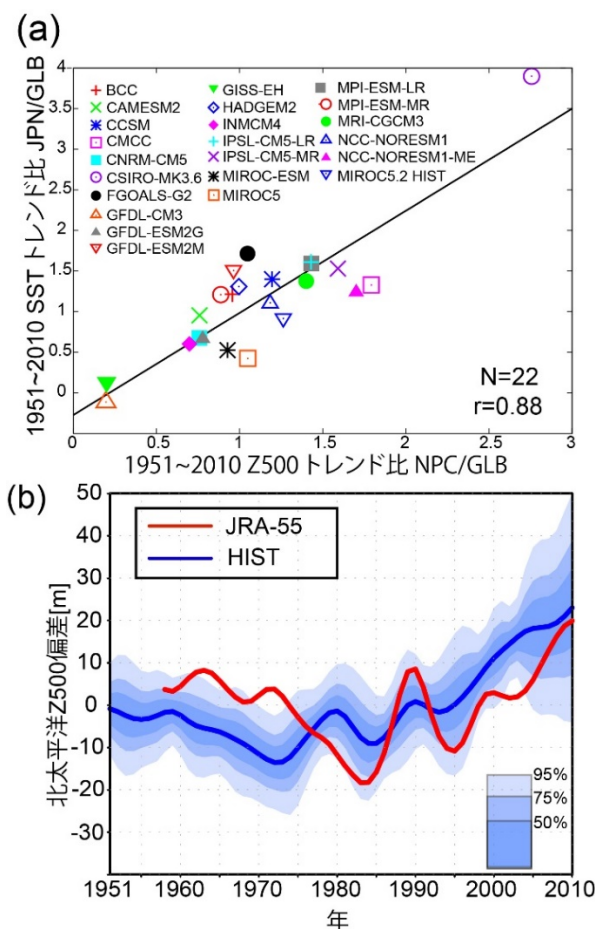


図 6(a)1951-2010 年期間 Z500 トレンド比(北太平洋/全球平均)と SST トレンド比(日本/全球平均)の散布図。マーカーは各 CMIP5 モデル。北太平洋は北緯 30-50 度、東経 140 度-西経 150 度で定義(b) 北太平洋平均したの Z500 偏差時系列 (偏差は 1951-2010 年平均からの差)。赤が観測、青が HIST。シェードは各信頼区間。ローパスフィルタを用いて 10 年周期以下の変動を除いている。

以上からマルチモデル解析からも北太平洋の高気圧偏差と日本周辺域の大きな SST 昇温の

関連が示唆され、再解析データの解析から実際にこのような事態をもたらさうる北太平洋の高気圧化が強制によって励起されている可能性が示唆された。

6. まとめ

本研究では 20 世紀に極めて大きい昇温を見せていた日本周辺海域を対象に、1951-2010 年の期間における強制に対する SST 長期変化メカニズムを調べた。観測された日本周辺の SST は 1951-1980 年にかけて昇温が停滞し、その後大きく昇温するという単調でない長期変化を見せていた。これは強制応答であることが示唆された。MIROC5.2 を用いた現実再現実験 (HIST) の結果から、日本の大きい昇温には顕熱の増加と海流の変化が寄与していることが示唆され、その双方が北太平洋の高気圧偏差によって励起されていることが示唆された。

CMIP5 マルチモデルの解析からも、北太平洋の高気圧偏差が大きいモデルほど日本周辺の SST 昇温が大きいという関係が示された。また、再解析データの解析から北太平洋の気圧変化は内部変動よりも大きい時間スケールで変化しており、日本で観測された SST 長期変化をもたらさうる気圧変化が実際に北太平洋で強制された可能性が示唆された。

今後の課題としては強制による北太平洋の気圧変化メカニズムがある。CMIP3 のマルチモデル平均では温暖化時に北太平洋に高気圧傾向が見られたが (Kimoto 2005)、モデル依存性が大きくメカニズムは不明である。また、エアロゾルによる北太平洋の気圧変化も報告されている (Boo et al. 2015) がそのメカニズムも不明である。

本研究で見られた黒潮北上は先行研究と整合するが (Saenko et al. 2005)、黒潮の温暖化応答の不確定性は大きい。正確な強制応答を得るた

めにはより高解像度の海洋モデルによる数値実験が必要である。

7. 参考文献

- Boo, K.-O., B. B. B. Booth, Y.-H. Byun, J. Lee, C. H. Cho, S. Shim, and K.-T. Kim (2015) Influence of aerosols in multidecadal SST variability simulations over the North Pacific. *J Geophys. Res Atmos* 120: 517–531.
- Ishii, M., and M. Kimoto (2009), Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections, *J. Oceanogr*, **65**, 287-299.
- Kimoto, M., (2005) Simulated change of the east Asian circulation under global warming scenario. *Geophys Res Lett* 32: L16701. DOI 10.1029/2005GL023383.
- Kobayashi et al. (2015), The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **93**, 5-48.
- Manda, A. et al. (2014), Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon. *Sci. Rep.* **4**, 5741.
- Saenko, O. A., J. C. Fyfe, and M. H. England (2005) On the response of the oceanic wind-driven circulation to atmospheric CO₂ increase. *Climate Dynamics* 25: 415-426.
- Watanabe, M., Shiogama, H., Tatebe, H., Hayashi, M., Ishii, M., and Kimoto, M. (2014). Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus. *Nature Clim. Change*, 4, 893-897.