

令和 5 年 4 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01962

研究課題名（和文）日本周辺の顕著な海水温上昇の要因分析と将来変化

研究課題名（英文）Attribution and projection of sea surface temperature changes around Japan from the past to future

研究代表者

渡部 雅浩（Watanabe, Masahiro）

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：70344497

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：地球の気候は徐々に温暖化し、特に最近の30～40年はその傾向が著しい。全海洋の海面水温は過去100年間で0.5℃上昇しており、日本周辺では世界全体に比べ上昇が倍以上も大きい。その理由は不明であった。本研究では、信頼できる観測データが利用可能な20世紀序盤から最近までの日本周辺海域の昇温がどうやって生じたかを明らかにすることを目的として研究を実施した。その結果、近年の日本周辺海面水温変化は、温室効果ガスによる温暖化に加えて、エアロゾルの排出量減少に伴う一時的な昇温で説明できることが分かった。また、ユーラシア大陸の温暖化が日本周辺のような縁辺海の昇温に大きく寄与していたことも明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気および地表の気候の決定要因は海面水温の分布であり、特に地域の気候変化にとって、周辺海域の温暖化が大きな影響をおよぼす。日本周辺で特に海水温の上昇が大きいことは、我が国の水産資源へのダメージや、夏季の高温事象の増加の要因となっていると考えられ、本研究の結果はそれらの温暖化影響を理解する上で重要な知見をもたらす。特に、エアロゾルの排出源による一時的な昇温は、将来は作用しないと考えられる一方、ユーラシア大陸のさらなる温暖化が代わりに海水温の上昇をもたらす可能性が指摘されたことは、我が国の気候変動適応にとって有益な示唆となる。

研究成果の概要（英文）：It is unequivocal that climate has warmed due to human activity and the surface warming is conspicuous over the past 30-40 years in particular. World ocean surface has also warmed with about 0.5 degree per century, and the trend is more than double in the North Pacific around Japan. Because of the impact of regional ocean warming on marine ecosystems and extreme hot weather, it is important to understand the cause of large ocean surface warming around Japan. This study revealed that the recent warming of the ocean surface around Japan was explained not only by the greenhouse gas induced global warming but also by a temporary signature associated with declining atmospheric aerosols that otherwise act to cool the surface. Both radiative drivers acted to heat the ocean surface around Japan via atmospheric heat transport from warming Eurasian continent. The above finding will help decision making for climate change adaptation in Japan.

研究分野：気候力学

キーワード：気候変化 海面水温 全球気候モデル 温暖化予測

1. 研究開始当初の背景

過去 100 年間に地球の気候は徐々に変化し、特に最近の 30 ~ 40 年は地表の気温上昇が著しい。気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) による最新評価報告書 (IPCC, 2021) にまとめられているように、この地球規模の温暖化の主要因が人間活動に伴う温室効果ガスの排出増加であることに疑う余地はない。近年では、長期の気温上昇と短期の異常気象の頻発の関連性に対して社会の関心が強まっており、地域規模の気候変化の理解と予測が科学的な重要課題として浮上している。日本でも、2013 年夏や 2018 年夏の熱波、2016 ~ 2018 年に各地で起きた豪雨と洪水など、極端な気象による災害が多発しているが、それらが近い将来も増えるのかどうかは未だに分かっていない。

温暖化は世界中のどこでも同じように起こるわけではないことがよく知られている。最近までの過去 100 年あたりで、世界全体では 0.73 ~ 0.85 の気温上昇が観測されている一方、日本だけで見ると、都市化の影響を除去しても 100 年あたり 1.2 の昇温と 4 ~ 6 割も温度上昇が大きい (IPCC 2021、気象庁 2022)。北半球の陸域では温暖化が強く現れるため、ユーラシア大陸の東端にある日本も例外ではないと言えるが、日本の場合海洋に囲まれている点で、状況が他と異なる。気候システムのエネルギー収支の観点からは、温室効果ガス増加による余剰な放射エネルギーは多くが海洋を暖めるのに使われ、上昇した海面水温 (sea surface temperature、以下 SST) が地表気温を上げるように働く。実際、全海洋の SST は、過去 100 年間で 0.53 上昇している (気象庁 2022)。ここで重要なのが、日本周辺では気温と同様に世界全体よりも SST の上昇が倍以上も大きい (過去 100 年で 1.1) という事実である。

元来、日本周辺は黒潮の運ぶ熱のおかげで同緯度の他の海域よりも SST が高く保たれており、その恩恵を受けて暖かい海洋性気候が維持されているが、SST が平年よりも高すぎると夏の猛暑を誘発しやすくなる。また、SST が高いことで、北上する台風が勢力を維持しやすい、あるいは冷たい親潮に乗って南下する回遊魚の漁獲が減るなど、負の影響が大きくなる。長期的な SST の上昇が日本周辺で特に大きいことは、日本社会にとって憂慮すべき状況であるが、これに関する研究はほとんどなく、「なぜ日本周辺海域が顕著に温暖化しているのか」「将来もさらに (他海域と比べて) 大きな温度上昇が起こるのか」といった疑問は未解明であった。

2. 研究の目的

本研究では、信頼できる SST データが利用可能な 20 世紀序盤から最近までの日本周辺海域の SST 変化傾向を確認した上で、他海域と比較して顕著に大きな SST の上昇がどのように生じたか (メカニズムの理解) また何によって生じたか (要因分析) を明らかにすることを目的とする。さらに、過去の SST 変化に対する理解をもとに、各国の気候モデルを用いて実施されている温暖化シミュレーションのデータを改めて解析し、日本周辺の将来の気候変化傾向のより確かな予測に向けた知見を得ることを目指す。

日本社会の温暖化に対する適応という観点から、本研究には社会的に明らかな意義がある。学術的には、黒潮流域という海洋西岸境界流が卓越する地域の気候変化メカニズムを明らかにすることで、世界の他の西岸境界流域における気候変化を理解するための有益な知見が得られると期待できる。人為起源の温室効果ガスやエアロゾルに対する気候応答において、ジェット気流やハドレー循環といった大規模な大気循環がどう変化するかは非常に不確実性が大きく、その理由として大気循環の主な駆動源である SST のパターンがどう変化するかがよくわかっていないことが大きい。本研究から得られるであろう SST 変化メカニズムの理解を他の海域にも適用することで、全球的な気候変化予測の不確実性を低減することに貢献できると期待される。

本研究で取り組む科学的疑問に答える研究がほとんどないため、研究課題そのものに新規性があると考えられる。一方、以下に述べるように、既存のデータを解析するだけでは研究目的を達成できないという点で挑戦的な課題でもある。従来、長期的な気候変化のメカニズムは全球気候モデルを用いた気候再現シミュレーションのデータをもとに議論されてきた。現在利用可能なアーカイブは IPCC 第 6 次評価報告書で引用されている第 6 期結合モデル相互比較計画 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6、CMIP5) のシミュレーションデータであるが、そこで用いられたモデルは日本周辺の海流を詳細に表現する解像度がない。一方、地域気候を再現するような高解像度領域モデルは、技術的な制約から大気のみあるいは海洋のみの計算を行うことがほとんどであり、大気海洋結合系で SST の長期変化を調べることが困難である。したがって、本研究では大規模な大気海洋相互作用を表現しつつ日本周辺の海流を解像できるような新たなモデルを用いた感度実験を行い、それとあわせて従来型の気候モデルによる各種の要因切り分けシミュレーションを実施・解析することで、既存のアプローチではできない地域規模の大気海洋結合系における長期変化のメカニズム理解を目指す。

3. 研究の方法

前項で述べた研究目的のために、本研究では各種観測データの解析と全球気候モデルを用いた数値実験を実施する。観測データは、SSTに加えて気象庁 JRA-55 長期再解析による大気データ、英国気象局作成の HadCRUT 地表気温データ、全球海洋の水温データ、日本周辺の潮位データなどを利用する。最も重要な変数である SST には日米英で作成された 3 つの異なるデータセットを用い、観測誤差を考慮して全体の解析期間を定める。予備解析の結果から、どのデータを用いても日本周辺海域の SST 上昇傾向は見られるが、20 世紀序盤はデータ間のばらつきが大きく、観測誤差が無視できないことが分かった（図 2）。そのため、解析期間を 1931 年以降とし、SST 長期変化の季節性、期間依存性、および付随する大気場などの変化を明らかにする。数値シミュレーションには、日本の全球気候モデルである MIROC を用いるが、その実験形態は二つのカテゴリーに分けられる。

一つは、20 世紀から最近までの気候再現実験および、それと比較する放射強制要因切り分け実験である。気候再現実験には既知の境界条件（温室効果ガスや SST など）を全て与えているが、要因切り分け実験ではそのうち特定の要素を産業革命前の条件に固定する（例えば二酸化炭素濃度を固定した実験と気候再現実験の比較から、人為起源温暖化による寄与を定量化できる）。まず、CMIP5 で実施された気候再現実験の 10 メンバー初期値アンサンブルを解析し、強制に対する気候応答（アンサンブル平均で定義される）と気候の内部変動（アンサンブル平均からのずれで定義）のどちらが観測される SST の変化をより説明するかを明らかにする。その上で、強制に対する応答にとって重要な放射要因を切り分け実験の解析から特定する。図 2 から分かるように、日本周辺の SST 変化は長期のトレンドと十年規模の変動からなるので、人為起源の温室効果ガス増加だけでなく、エアロゾルの排出量変化なども重要である可能性がある。一方、上記の要因分析の結果、放射強制に加えて内部変動の寄与が大きいということになれば、内部変動の主要なパターンについて、それがどのように日本周辺を昇温させるのかというメカニズムを明らかにする。

もう一つの気候モデル実験は、詳細な SST 上昇パターンの形成メカニズムを解明することを目標とする。そのために、西岸境界流の構造を解像する高解像度領域海洋モデルを、全球気候モデル MIROC に双方向的に組み込んだ領域ネスト気候モデルを利用して数値実験を行う。このモデルは、気候再現実験に用いる従来型モデルに比して計算コストが大きいいため、長期シミュレーションには不適である。したがって、昇温の小さな時期（20 世紀前半）と大きな時期（21 世紀前半）のそれぞれの放射条件でタイムスライス実験を実施し、例えば SST の上昇が顕著になるときに日本海の海流や黒潮続流の渦活動がどうなっているか、などを明らかにする。それらの詳細な海流の変化による SST 上昇への寄与があれば、その推定を用いて要因分析の結果を修正する。

4. 研究成果

本研究の第一の目的である、日本周辺海洋の特に大きな昇温の要因を明らかにするため、全球気候モデル MIROC を用い、既知の境界条件（温室効果ガスや太陽活動、エアロゾルなど）の変化を全て与えた 20 世紀以降の気候再現実験および、境界条件のうち特定の要素を産業革命前の条件に固定して計算を繰り返す気候変化要因分析実験を行い、結果を比較解析した。その結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 日本周辺の SST は 1980 年頃までわずかな低温化傾向、その後は急激な温暖化傾向を示しており、温室効果ガスの増加が期間を通じた温暖化に寄与する一方で、硫酸性エアロゾルの排出量変化が 10 年規模の水温変化を説明する。
- 2) 気候システムへの強制要素が温室効果ガスかエアロゾルかによらず、システムの応答は大気・海洋双方の変化を通じて日本周辺の SST を全球平均よりも大きく変化させるように働く。大気は、海洋よりも大きく昇温するユーラシア大陸上の暖かい空気を東へ運ぶ一方、海洋は黒潮の流軸が北にずれるように応答することで、どちらも日本周辺の SST を上昇させる役割を果たしていた。

上記の研究から、放射強制に対するユーラシア大陸上の昇温が海洋上よりも大きいことが、縁辺である日本周辺域 SST の上昇に寄与していたことが分かってきたため、研究期間の後半では、さらに広い視野からの発展的研究として、温暖化時の海陸の昇温コントラストのメカニズム解明に焦点をあて、MIROC の理想化温暖化シミュレーションを用いて調べた。地球のエネルギー収支式をもとに、海陸の昇温量に関する新しい包括的な診断手法を構築し、MIROC のデータで手法の妥当性を検証した。これを CMIP6 マルチモデルによる温暖化シミュレーションのデータに適用した結果、従来言われていなかった、CO₂ 放射強制力の海陸間の相違が昇温コントラストに最も寄与していることが分かった。この研究の重要な成果として、時期や将来の排出シナリオによらず、海陸の昇温比がほぼ 1.5（陸上の昇温が 50%大きい）となることが示された点が挙げられる。

上記の成果に加えて、北太平洋域の大気循環の変動をもたらす熱帯太平洋の降水変動に新たな「モード」があることを観測データから見出し、そのメカニズムを明らかにした研究および、日本周辺の SST 分布に大きく影響する黒潮が北大西洋における湾流と 10 年規模で同期して変動することを発見した研究なども、本課題の成果に含まれる。加えて、2019 年 8 月に日本の南海上で SST が 30 を超える特異な高温事象が観測されたため、この要因分析を急遽実施した結果、人為起源温暖化がなければ 1000 年に 1 度のまれな現象であったこと、さらに今世紀中盤にはこ

うした高温事象が2-3年毎に発生する可能性が高いことが明らかになった。

本研究課題を実施した4年間で、学术论文5本、学会発表6件、図書1件、国際共同研究1件の成果が得られた。これらはすべて公表済みである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Toda, M., M. Yoshimori, and M. Watanabe	4. 巻 34
2. 論文標題 New framework to understand mechanisms of land-ocean warming contrast induced by increasing greenhouse gases. Part I: Near-equilibrium state.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 9279-9292
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JCLI-D-21-0302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fukuda, Y., M. Watanabe, and F.-F. Jin	4. 巻 48
2. 論文標題 Mode of precipitation variability generated by coupling of ENSO with seasonal cycle in the tropical Pacific.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2021GL095204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021GL095204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kohyama, T., Y. Yamagami, H. Miura, S. Kido, H. Tatebe, and M. Watanabe	4. 巻 374
2. 論文標題 The Gulf Stream and Kuroshio current are synchronized.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 341-346
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.abh3295	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Toda, M., and M. Watanabe	4. 巻 54
2. 論文標題 Mechanisms of enhanced ocean surface warming in the Kuroshio region for 1951-2010.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Climate Dynamics	6. 最初と最後の頁 4129-4145
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00382-020-05221-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi, M., H. Shiogama, S. Emori, T. Ogura, and N. Hirota	4. 巻 48
2. 論文標題 The northwestern Pacific warming record in August 2020 occurred under anthropogenic forcing.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2020GL090956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL090956	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe, M., J.-L. Dufresne, Y. Kosaka, T. Mauritsen, and H. Tatebe	4. 巻 11
2. 論文標題 Enhanced warming constrained by past trends in equatorial Pacific sea surface temperature gradient.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Climate Change	6. 最初と最後の頁 33-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41558-020-00933-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Toda, M.
2. 発表標題 New framework to understand mechanisms of land-ocean warming contrast induced by increasing greenhouse gases.
3. 学会等名 2021 CFMIP meeting on climate sensitivity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohyama, T.
2. 発表標題 The Gulf Stream and Kuroshio current are synchronized.
3. 学会等名 AGU 2021 Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Watanabe, M.
2. 発表標題 Mode of precipitation variability generated by coupling of ENSO with seasonal cycle in the tropical Pacific.
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Watanabe, M.
2. 発表標題 Attribution of large-scale changes in the atmosphere-ocean system over the past decades
3. 学会等名 8th EU-Japan Workshop on Climate Change Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸田賢希、渡部雅浩
2. 発表標題 20世紀における日本周辺のSST長期変化メカニズム
3. 学会等名 日本気象学会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 戸田賢希、渡部雅浩
2. 発表標題 20世紀における日本周辺のSST長期変化メカニズム
3. 学会等名 気象庁長期予報研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本地球惑星科学連合編	4. 発行年 2020年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 280
3. 書名 地球・惑星・生命	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	塩竈 秀夫 (Shiogama Hideo) (30391113)	国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・室長 (82101)	
研究分担者	建部 洋晶 (Tatebe Hiroaki) (40466876)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(環境変動予測研究センター)・グループリーダー (82706)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	戸田 賢希 (Toda Masaki)	東京大学・先端科学技術研究センター・特任研究員 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------