

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03960

研究課題名（和文）東シナ海の海面水温前線の長期変動とその大気への影響の解明

研究課題名（英文）Long-term trend of the sea surface temperature front in the East China Sea and its effects on the atmosphere

研究代表者

佐々木 克徳（Sasaki, Yoshinori）

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：50604815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：東シナ海における海水温の長期変動を明らかにするための領域海洋モデルを用いた1871～2010年の過去再現実験の結果、海面水温上昇は全域で一様ではなく、黒潮流軸付近と中国沿岸域で全球平均の上昇トレンドより2～3倍程度大きいことを明らかにした。どちらの領域でも海流による温度移流の変動が水温上昇の主要因である。

一方、領域大気モデルを用いて黒潮の大蛇行による海面水温の変化に対する冬季の大気応答を調べた結果、黒潮の大蛇行に伴う日本沿岸の正の海面水温偏差上で海上風の収束、その南の冷水渦上で海上風の発散が生じていた。また日本沿岸の正の海面水温偏差上では降水日数が統計的に有意に増加している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

観測データと高解像度の数値シミュレーションを併用することにより、東シナ海の20世紀全体を通じた温暖化傾向の空間分布とそのメカニズム、特に黒潮の温暖化傾向に対する役割を世界に先駆けて定量的に明らかにすることができた。また黒潮の変動による海面水温変動に対する大気への応答、特に日本周辺における気圧や降水活動の変動について明らかにし、大気と海洋の両面から中緯度大気海洋相互作用についての理解を進めることができた。

研究成果の概要（英文）：To understand a long-term trend of ocean temperatures in the East China Sea, we performed a regional ocean model hindcast experiment from 1871 to 2010. We demonstrated that the warming of sea surface temperatures (SSTs) was not spatially uniform but had a large amplitude along the Kuroshio and the coast of China over the continental shelf. The warmings in both regions were induced by the trend of ocean advection. The wintertime atmospheric response to the SST anomalies associated with the large meander of the Kuroshio was examined using a regional atmospheric model. The results showed that the surface wind convergence and divergence were found over the positive SST anomaly along the southeastern coast of Japan and the cyclonic cold-core eddy, respectively. In addition, the number of rainy days increased significantly over the warm SST anomaly during the Kuroshio large meander period.

研究分野：海洋物理学・気候学

キーワード：黒潮 大気海洋相互作用 領域海洋モデル 地球温暖化 領域大気モデル

1. 研究開始当初の背景

衛星観測の発達や数値モデルの高解像度化により、海洋の黒潮やメキシコ湾流などの西岸境界流に伴う海面水温前線の大気への強い影響が明らかとなった。当初は海面水温前線が大気の平均場に与える影響の研究が中心であったが、近年では海面水温前線の経年変動に対しても大気が顕著に応答することがわかってきている。これらの中で研究代表者は、観測・再解析データを用いて夏季の西岸境界流域の海面水温前線の経年変動が、降水活動に顕著に影響することを示した。すなわち東シナ海の黒潮に伴う海面水温前線が強い(弱い)年には、大気下層の傾圧性が強化(弱め)され、梅雨前線に伴う低気圧の発達を強め(弱め)、東シナ海から九州にかけての降水が増加(減少)する。しかしこの研究の解析期間は赤外衛星観測データが得られる 1982 年以降である。そのため船舶観測データが中心となるそれ以前の期間では、海面水温前線に対する大気応答は明らかになっていない。

また本研究で注目する東シナ海海面水温の長期変動には、興味深い特徴が報告されている。東シナ海の黒潮域を含む、亜熱帯循環の西岸境界流域の 20 世紀全体における海面水温上昇トレンドは、全球平均の水温上昇トレンドより約 2 倍大きく早く温暖化している。この黒潮域での水温上昇は海面水温前線を強化することが示唆されるが、使用された観測データの水平解像度が低く、海面水温前線の長期変動については不明である。また黒潮域で水温上昇が大きい理由も、海流変動の重要性が指摘されているが定性的な研究のみで定量的な理由は不明である。また海面水温前線の長期変動は大気の長期変動に影響にすることが予想されるが、そのような中緯度の大気海洋相互作用系の長期変動はほとんど解明されていない。

2. 研究の目的

本研究では西岸境界流域における大気海洋相互作用系の長期変動を明らかにするために、大気への顕著な影響が報告されている東シナ海を流れる黒潮に伴う海面水温前線とその変動に注目する。観測データと数値モデルによるシミュレーションを併用することで、東シナ海海面水温前線の長期変動のメカニズムの解明と、海面水温前線の変動による海面水温偏差に対する大気応答とその季節依存性を明らかにすることを目的とする。大気応答は特に降水量の変動に着目する。

3. 研究の方法

東シナ海の水温の長期変動のメカニズムを調べるために、観測データに加えて領域海洋モデル ROMS を用いて東シナ海の 1871 ~ 2010 年の状態について過去再現実験を行い、1901 年以降を解析する。このときモデル内の水温の熱収支式の各項をモデル積分と同時にオンラインで計算し、水温変動のメカニズムを明らかにする際に使用する。一方、海面水温変動に対する大気応答を調べるために、衛星データや再解析データ ERA5 とともに、領域大気モデル WRF を用いた数値実験を行う。さらに境界条件である海面水温データを一部入れ替えた感度実験を行うことで、海面水温変動の影響を明らかにする。

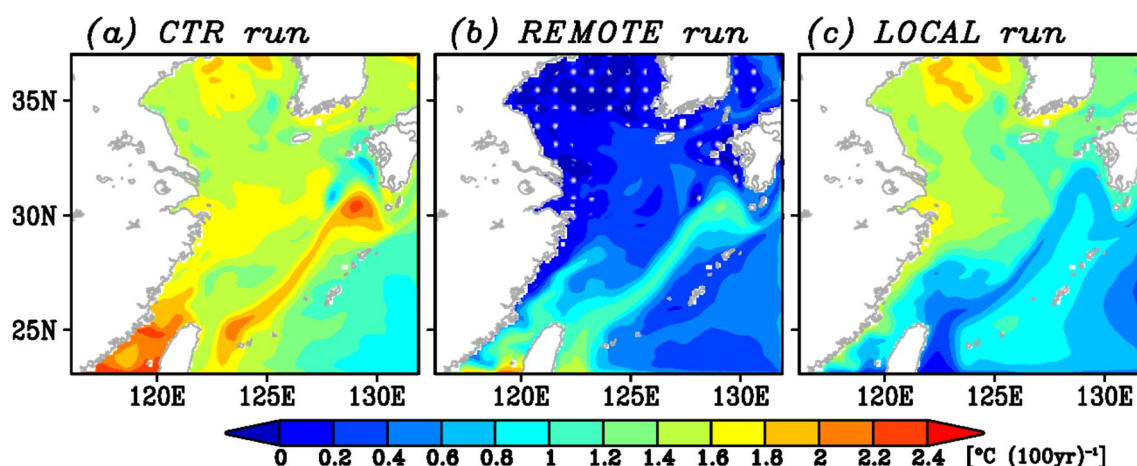


図 1：領域海洋モデルで求めた 1901 ~ 2010 年の海面水温のトレンド。(a)標準実験，(b)表面境界条件を気候値とし、側面境界条件がモデル内のトレンドを生じる実験，(c)側面境界条件を気候値とし、表面境界条件がモデル内のトレンドを生じる実験である。(Sasaki and Umeda 2021 より)

4. 研究成果

高解像度の領域海洋モデル ROMS を用いて、東シナ海と黄海を含む海域について 1871 ~ 2010 年

の過去再現実験を行い、1901年以降について解析を行った。2種類の海面水温の観測データと領域海洋モデルの出力結果の比較から、東シナ海の海面水温の上昇は全域で一様ではなく、黒潮流軸付近と中国沿岸域で大きいことを明らかにした(図1a)。これらの領域での海面水温上昇トレンドの振幅は、全球平均の上昇トレンドよりも2~3倍程度大きい。またこの水温上昇の振幅は顕著な季節依存性を示し、冬季に大きく、夏季に小さい。したがって黒潮に沿った水温前線は温暖化に伴い特に冬季に強化している。この水温上昇トレンドのメカニズムを明らかにするために、数値モデルの出力結果を用いた海洋上層の熱収支の解析と、表面・側面境界条件を気候値に変更した数値モデルの感度実験を行った。その結果、黒潮流軸付近と中国沿岸域のどちらの領域でも海流の変動による温度移流のトレンドが水温上昇の原因として最も重要であることを明らかにした。このうち黒潮流軸付近では上層の黒潮が強化していることにより水温移流が増加している(図1b)。さらにこの黒潮の強化の原因は東シナ海上の局所的な大気変動ではなく、北太平洋上の風応力カールがトレンド成分を持つことによって生じている。これに対して中国沿岸域の水温上昇をもたらす海流変動は、東シナ海上の局所的な大気変動により生じていることが示唆された(図1c)。また潮汐による混合と長江による淡水流入の影響を調べる感度実験も行い、その結果、これらの影響の有無により海面水温上昇トレンドの空間パターンは定性的には変化しないことがわかった。しかしながら中国沿岸域では、潮汐による混合と長江による淡水流入の影響を加えることにより海面水温上昇の振幅は若干小さくなる。したがって、この領域の海面水温上昇を再現するためには潮汐と長江による淡水流入の影響を考慮することが必要であることを示す。

さらにこの高解像度領域海洋モデルによる海面水温データを用いて、20世紀全体を通じた東シナ海の海面水温前線の長期変動に対する梅雨前線の応答と、その変調について調べた。その結果、6月の海面水温前線の強さと東シナ海から九州にかけての梅雨前線に伴う降水量の間に正の相関関係が見られた。この両者の正の相関関係は、これまでも衛星観測による海面水温データを用いた1982年以降の解析では見出されていたが、今回の結果はその相関関係が1981年以前にも成り立っていることを示す。一方、6月以外は海面水温前線の強さと梅雨前線の間に弱い相関関係しか見いだせなかった。

次に日本周辺を流れる黒潮の大蛇行による海面水温の変化に対する大気応答を調べるために、領域大気モデルWRFを用いた数値シミュレーションを行った。2001年~2010年の冬季(12月から2月)について、黒潮が大蛇行した場合の海面水温の変化に対する大気応答をシミュレーションした結果、黒潮大蛇行に伴う冷水渦上で海上風の発散、その北の日本沿岸に位置する正の海面水温偏差上で海上風の収束が生じていることがわかった。この収束・発散に伴う鉛直風は700hPa付近まで続いていて、この海上風の応答は圧力調整メカニズムで説明される。これらの結果は、大気再解析データERA5による結果と整合的である。また、この海上風発散(収束)に対応して降水量は減少(増加)しているが、日本沿岸の正の海面水温偏差上では降水量の増加は見られなかった。しかし降水日数は黒潮大蛇行時には統計的に有意に増加していた(図2)。大気の水収支の変化について詳細な解析を行った結果、黒潮大蛇行の冷水渦に伴う負の海面水温偏差に対応して、蒸発量は減少し、上空の降水量も減少する。下層の風の場合は圧力調整メカニズムが働き高気圧偏差となり発散場になる。しかしながら、下層の水蒸気フラックスの場合は発散ではなく収束となり、蒸発量の減少に伴う降水量の減少を弱めるように働く。この水蒸気フラックスの収束・発散についてさらに詳しく調べると、上述の風の発散に伴う水蒸気フラックスの発散よりも、水蒸気移流による収束の影響が大きいことが分かった。またこの水蒸気移流による収束は、黒潮大蛇行に伴う海面水温の変化が下層大気の比湿に影響を与え、それを平均場の風である北西風が移流するにより生じていることが明らかとなった。

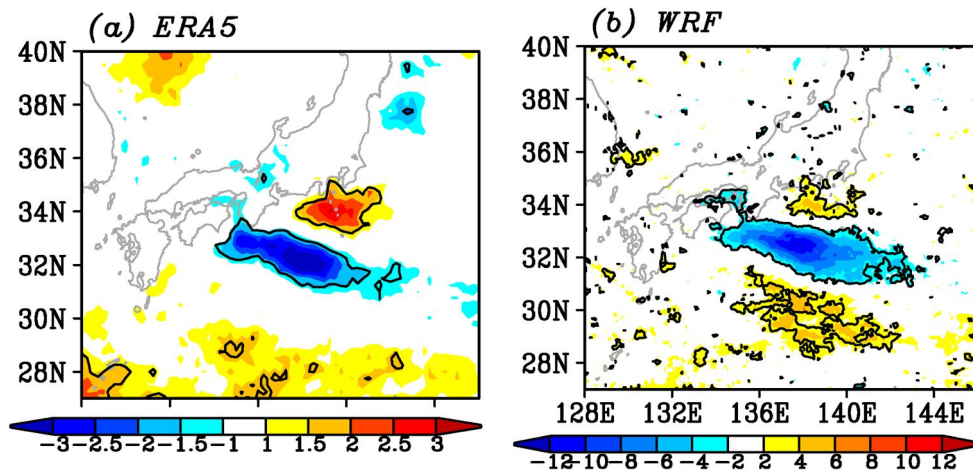


図2: 冬季(12月~2月)の降水日数の黒潮大蛇行期と非大蛇行期の差。(a)大気再解析データERA5と(b)WRFによる数値シミュレーションの結果で、実線は差が信頼度95%で統計的に有意な領域を示す。(Sasaki and Ito 2024より)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kida Shinichiro, Takayama Katsumi, Sasaki Yoshi N., Matsuura Hiromi, Hirose Naoki	4. 巻 77
2. 論文標題 Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 145 ~ 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-020-00563-5	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 Sasaki Yoshi N., Umeda Chisato	4. 巻 -
2. 論文標題 Rapid warming of sea surface temperature along the Kuroshio and the China coast in the East China Sea during the 20th century	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-20-0421.1	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 Sasaki Yoshi N., Ito Ryunosuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Impact of the Kuroshio large meander on local atmospheric circulation and precipitation in winter	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-024-00620-3	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Sasaki, Y. N. and C. Umeda
2. 発表標題 Rapid warming of sea surface temperature along the Kuroshio and the China coast in the East China Sea during the 20th century
3. 学会等名 AOGS 18th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sasaki, Y. N. and C. Umeda
2. 発表標題 Rapid warming of sea surface temperature along the Kuroshio and the China coast in the East China Sea during the 20th century
3. 学会等名 International workshop for mid-latitude air-sea interaction (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sasaki, Y. N. and C. Umeda
2. 発表標題 Rapid warming of sea surface temperature along the Kuroshio and the China coast in the East China Sea during the 20th century
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 克徳, 梅田 千智
2. 発表標題 20世紀における東シナ海の海面水温上昇の季節依存性
3. 学会等名 2019年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sasaki, Y. N., and C. Umeda
2. 発表標題 Sea surface temperature trend in the East China Sea during the 20th century simulated by a regional ocean model
3. 学会等名 JpGU Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木 克徳, 伊藤 竜之助
2. 発表標題 黒潮大蛇行に対する冬季の大気応答についての数値実験
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日本周辺の海の温暖化
<https://www.sci.hokudai.ac.jp/~sasakiyo/research.html#sec4>

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

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
---------	---------