

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03737

研究課題名（和文）過去108年の関東・東海沖水温の構築：沿岸海洋温暖化の実態と日本気候への影響解明

研究課題名（英文）Construction of surface temperatures off the Kanto-Tokai districts over the past 108 years: Coastal warming and its influence on Japanese climate

研究代表者

杉本 周作 (Sugimoto, Shusaku)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：50547320

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：世界中の研究機関から海洋観測データを収集し、日本と黒潮の間の内側域について、100年超水温時系列を作成した。その結果、関東・東海沖内側域は、数百メートルの深さまで顕著に温暖化していることを発見した。そして、世界最新鋭の衛星観測データを用いることで、現在進行形で発生している黒潮大蛇行に伴う関東・東海沖沿岸昇温を明らかにし、新青丸観測航海により沿岸昇温は黒潮分岐流に起因することを見いだした。そして、大気モデルによる数値実験を実施した結果、関東・東海沖沿岸昇温に伴い増加した水蒸気の影響で、関東周辺の夏季気候が高温・湿潤化することを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、地球温暖化に伴う海の変化が気候に及ぼす影響が懸念されている。本研究課題により、水蒸気を介して海洋（関東・東海沖沿岸域）が陸上気候（関東周辺の夏季気候）に影響を及ぼすことを世界で初めて明らかにした。近年、大気中の水蒸気は地球温暖化の進行とともに増加していることが指摘されており、今後、黒潮の流れ方によっては関東周辺は一層厳しい夏になることが懸念される。本研究結果は熱中症のリスクの低減や気候変動適応計画の策定に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：We collected oceanographic data from research institutes around the world and produced the past 100-year temperature time series for the inner region between Japan and the Kuroshio. As a result, we found that the inner region off the Kanto-Tokai district has warmed remarkably down to a depth of a few hundred meters. The world's most advanced satellite observation data and in-situ data from R/V Shinsei-maru revealed the coastal warming off the Kanto-Tokai district associated with the Kuroshio large meander and clarified that the warming is induced by the westward Kuroshio bifurcation. Numerical experiments using an atmospheric model revealed that the increased water vapor associated with the coastal warming in the Kanto-Tokai district causes a hotter and wetter summer climate in the Kanto region.

研究分野：海洋物理学

キーワード：黒潮 大気海洋相互作用 大蛇行 地域気候 水蒸気 温暖化 CMIP6 猛暑

### 1. 研究開始当初の背景

地球の気候システムの解明には大気海洋相互作用系の理解が必須であり、世界最速の暖流である黒潮が流れる日本南方海域はその鍵領域として世界から注目を集めている (Small et al. 2008)。

日本と黒潮の間の『内側域』(図1)の水温は、我が国の貴重な水産資源であるアジ・イワシ等の多くの魚種の生育 (Noto and Yasuda 2003) や日本各地に被害をもたらす温帯低気圧の進路 (Nakamura et al. 2012) に影響する。そして、内側域のなかで、関東・東海沖(図1灰色領域)は黒潮蛇行時に面積が2倍以上に拡大する。それゆえに、関東・東海沖内側域での水温変動のメカニズム解明は学術的興味に留まらず、社会的インパクトが大きい。

関東・東海沖内側域の水温は、大気加熱 (Davis 1976) や黒潮蛇行に伴う下層冷水湧昇 (Ishii et al. 1983) に影響されると提案されている。しかしながら、南北幅約100kmの内側域を分解する格子化データは最近15年分しかないため、その変動特性や要因について定説は未だない。また、内側域海水温の変化は隣接する日本の気候に影響を及ぼすことが予見されるが、内側域水温の振幅・空間構造が不明であるため、その局所大気応答は未解明である。

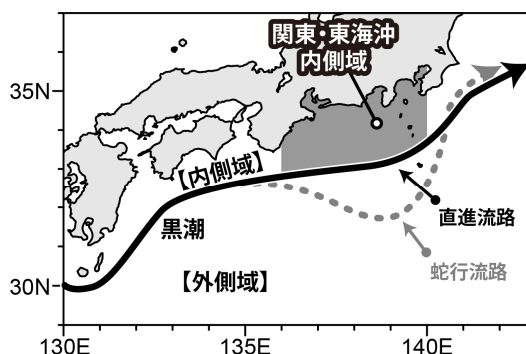


図1. 黒潮流路と関東・東海沖内側域の略図。

### 2. 研究の目的

上記未解明点は、関東・東海沖内側域の海洋データが少ないことに起因する。そこで、本研究課題では、水産研究教育機構・中央水産研究所により近年発掘された1930年以降の水温データを世界で初めて活用し、日本を含む世界各国研究機関所有の水温データとの統合を果たすことで過去100年におよぶ関東・東海沖内側域水温の長期時系列の作成を目指す。そして、世界最新鋭の高解像度海面水温データなどを用いることで内側域水温の変動機構の解明を果たす。さらに、大気モデルによる数値実験を実施することで、内側域水温変化に起因する気候応答を明らかにし、気候学の新パラダイムの創出を実現する。

### 3. 研究の方法

内側域水温の100年時系列の作成には、中央水産研究所所有の水温データ、World Ocean Database 2018 (Boyer et al. 2018)・日本海洋データセンターに蓄積されている水温データ、および海洋研究開発機構のAQC Argoデータの水温プロファイルを用いた。さらに、米国NASAが開発した高解像度海面水温データ (Chin et al. 2013)、我が国と欧州が作成した大気再解析データ (Kobayashi et al. 2015、Hersbach et al. 2020)、および気象庁の地域気象観測システム (AMeDAS) も使用した。数値実験にあたっては気象庁開発の非静力学大気モデル (Saito et al. 2006, 2007) を使用した。

### 4. 研究成果

#### (1) 関東・東海沖内側域の顕著な温暖化

関東・東海沖内側域の長期水温時系列の作成に際し、その沖合を流れている黒潮の混在を避ける必要がある。そこで、200m深水温が15以下を示すプロファイルのみを用いることとした。そして、我々の先行研究で開発した観測地点・観測時期の偏りの影響を除去するアルゴリズム (Sugimoto et al. 2017) を適用することで、過去100年におよぶ内側域水温の時系列を作成した(図2)。結果、内側域は、海面だけではなく海の中でも温暖化が着実に進行していることがわかった。また、200m深水温は最近100年で0.54上昇しており、この上昇率は他の海域と比べても実が大きかった。なかでも、2000年以降の水温上昇が顕著であり、近年にかけて内側域での温暖化が加速している可能性を指摘した。

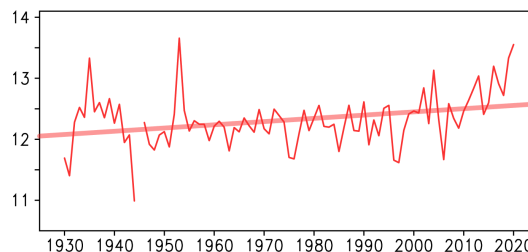


図2. 関東・東海沖黒潮内側域の200m深水温の年平均時系列 [単位は℃]

一連の研究成果は、日本沿岸の海洋内部で起こっている地球温暖化の実態解明に資する重要

な手がかりである。加えて、最近 20 年で顕在化している黒潮内側域の水温上昇が、同海域のアジ・イワシ等の多くの魚種の生育に与える影響は大きい。それゆえに、将来にわたる持続的な水産資源の確保・保全を実現するためには、水産学や生物地球化学との異分野融合研究の展開が必要である。

## (2) 関東・東海沖内側域水温の変動機構解明

関東・東海沖内側域の水温は、黒潮大蛇行に伴う下層冷水湧昇を強く反映しているとされてきた。そのような状況の中、本研究課題実施期間中に、黒潮は 12 年ぶりに大蛇行流路に遷移した。この間、観測技術の進展・同化アルゴリズム手法の改善に伴い、新たな衛星観測データ・新世代大気再解析データが開発された。そこで、世界最新鋭データを用いることで内側域での水温変動を調べた。その結果、2017 年以降の大蛇行期間の海面水温分布(図 3a)には、従来指摘されてきた冷水塊に加えて、関東・東海沖沿岸で大な昇温が発生し、非大蛇行期間に比べて 2 以上も高くなることわかった。

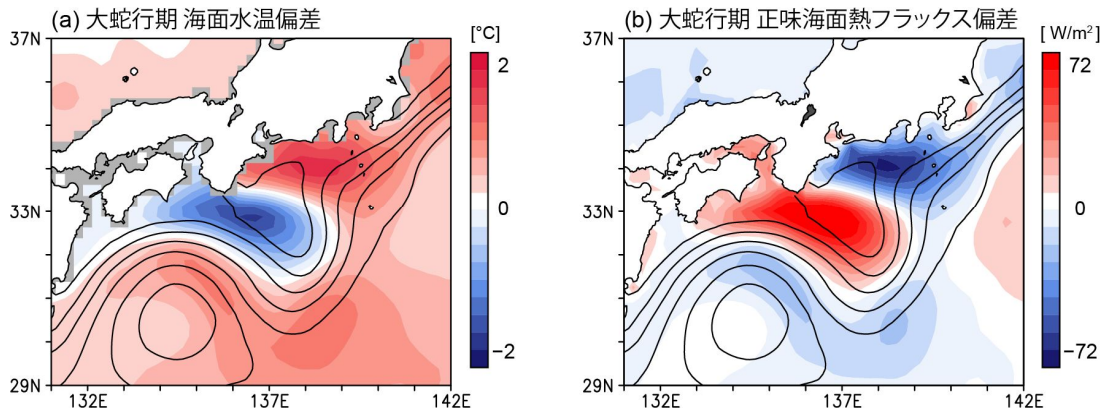


図 3. (a)黒潮大蛇行期(2017 年 8 月～2020 年 12 月)の海面水温偏差分布図 [ °C ]、黒等値線は衛星観測海面高度 [ 0.2m 間隔 ]、(b)(a)と同様、ただし ERA5 正味海面熱フラックス偏差図。正值は下向きのフラックスを表す [  $W m^{-2}$  ]

既存の研究では、中緯度域海面水温は大気との熱交換で決まるとされてきた(Frankignoul 1985 など)。そこで、最新の気象再解析データを用いて大蛇行期間での正味海面熱フラックスを調べた。その結果、熱フラックス偏差は本州南方で明瞭な 3 極子構造をもつことがわかり(図 3b)、これは海面水温偏差(図 3a)の符号反転パターンに類似していた。この符号関係は、水温が高いときほど海から大気への熱放出が多いことを表している。すなわち、本結果は、関東・東海沖沿岸昇温が大気海洋間熱交換を通じて形成されていないことを示しており、既存の概念とは大きく異なるものであった。そこで、沿岸昇温発生をもたらす海洋過程の影響を同定するために、海面流速場と水温・塩分鉛直構造に着目して解析を行った。その結果、東経 140 度・北緯 34 度辺りで関東沖を北上してくる黒潮から分岐した幅 100km 程度の西向きの流れ、すなわち黒潮分岐流による暖水輸送が関東・東海沖沿岸昇温の発生要因であることを発見した。

本研究課題により、黒潮大蛇行に伴う黒潮分岐流の出現が見出された。しかしながら、この黒潮分岐流の強さ、幅、厚さなどの実態は、既存のデータでは時空間解像度の制約で抽出できない。そこで、本研究課題実施期間中に観測航海を申請し、2021 年 5 月に新青丸による黒潮分岐流観測(KS-21-9 次航海)を行った(図 4)。その結果、黒潮分岐流の網羅的観測に成功した。また、本航海では、黒潮分岐流上の大気の鉛直構造観測も実施した。一連のデータは、大気海洋相互作用系の理解の進展に資するものである。

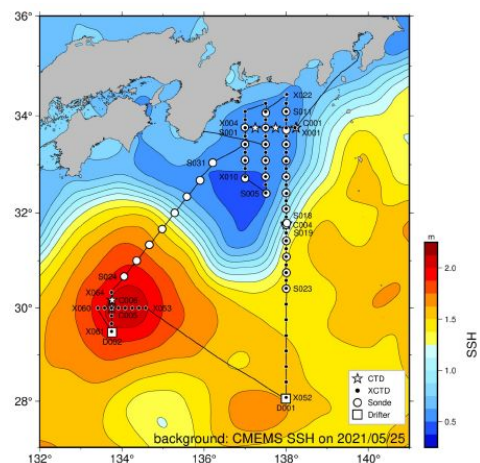


図 4. 2021 年 5 月に実施した学術研究船・新青丸海洋観測航跡図(KS-21-9 次航海)、背景の陰影は、2021 年 5 月 25 日の海面高度を表す [ 単位は m ]

## (3) 内側域水温の日本気候への影響解明

夏の間、日本へは太平洋高気圧に沿って南風(季節風)が吹き寄せる。そのため、黒潮大蛇行に伴う関東・東海沖沿岸昇温は太平洋側諸都市に影響を及ぼすことが予見される。なかでも関東周辺は約 4000 万人が居住する世界有数の人口集中地域であるため社会生活への影響が懸念され



る。そこで、大蛇行と日本気候の関係を理解するために、大蛇行期間での気温偏差を調べた。その結果、沿岸昇温が発生している大蛇行期ほど関東から東海地方にかけて気温が大きく上昇することがわかり、関東地方での気温上昇は約 0.5 度と見積もられた(図 5a)。夏は熱波などの影響で数日のような短い時間スケールで気温が大きく上昇することがある。しかしながら、本研究のように月単位・季節単位等の長い時間スケールを対象とする場合、0.5 度の気温上昇は十分に大きい振幅として分類された。

日本の夏季気候は、太平洋高気圧やチベット高気圧、エルニーニョ現象などの影響も反映して決まる。それゆえに、夏季気候への黒潮大蛇行の影響を抽出するためには、高解像度数値シミュレーションの実施が必要となる。そこで、気象庁開発の非静力学大気モデルを用い、東海沖沿岸昇温が発生した海(標準実験)と発生しない海(冷水実験)で数値実験を行い、それぞれの大気応答を比較することで日本気候への沿岸昇温の影響評価を行った。実験の結果(図 5b) 黒潮大蛇行期に発生する沿岸昇温に対する地上気温応答は関東から東海地方にかけての太平洋側都市で顕著であり、関東地方の気温上昇は約 0.6 度であった。この実験結果は大蛇行期間に観測された気温上昇と同程度であった。そして、関東地方の気温上昇メカニズムとして、黒潮大蛇行に伴う東海沖沿岸昇温により蒸発が盛んになり、関東地方に流れこむ水蒸気が増加し(図 5c) その結果、地表面への下向き長波放射が増加することで気温が上昇するという新たな解釈を得ることに成功した(局所的温室効果)。

気温上昇をもたらした水蒸気は湿度上昇にも寄与する。それゆえに、関東地方は暑い夏になるだけではなく蒸し暑い夏になることが予想され、この蒸し暑さは日々の暮らしで感じる不快さに関係する。そこで、気温と湿度からなる不快指数をもとに、ほとんどの人が不快に感じる 80 以上の日を不快日としてその日数を比較した。その結果、沿岸昇温が発生するときほど、太平洋側で不快日が増え、関東地方では約 6 割も増加することがわかった。

本成果は、関東地方の夏の気候形成に果たす海からの水蒸気輸送の重要性を示したものである。近年、大気中の水蒸気は地球温暖化の進行とともに増加していることが指摘されている。本研究結果を加味すると、黒潮の流れ方によっては関東地方が一層厳しい夏になることが懸念される。今後、熱中症のリスクの低減においては、黒潮の動向、および黒潮に伴う海水温の変化を様々な観測プラットフォームで監視し、その変動メカニズムを理解することが必要になる。

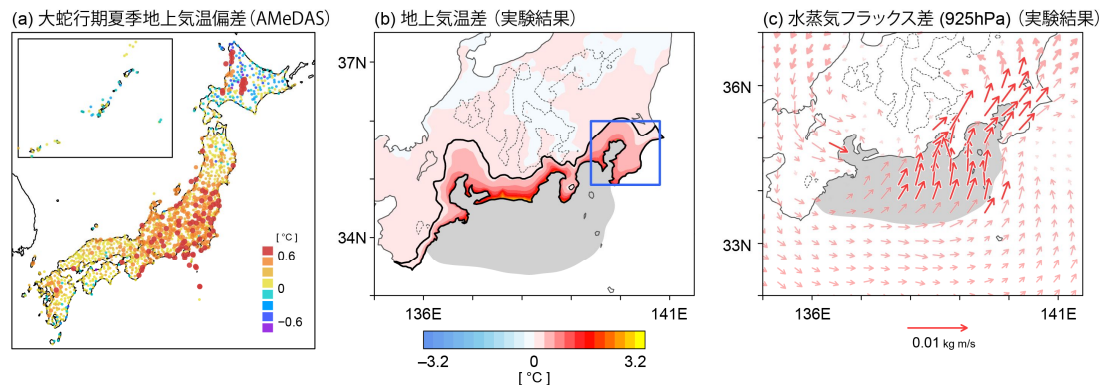


図 5. (a) AMeDAS から得た最近の黒潮大蛇行期間(2017 年～2020 年)の夏季地上気温偏差図。(b) 標準実験と冷水実験の地上気温差。関東・東海沖の灰陰影は実験境界値として配置した沿岸昇温域を、黒実線は 90%信頼区間で有意な領域を表す。(c) (b)と同様、ただし 925hPa 面高度の水蒸気フラックス差。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sugimoto S.	4. 巻 49
2. 論文標題 Decreasing Wintertime Mixed Layer Depth in the Northwestern North Pacific Subtropical Gyre	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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） 10.1029/2021GL095091	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 Kawakami Yuma, Kojima Atsushi, Murakami Kiyoshi, Nakano Toshiya, Sugimoto Shusaku	4. 巻 -
2. 論文標題 Temporal variations of net Kuroshio transport based on a repeated hydrographic section along 137°E	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Climate Dynamics	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） 10.1007/s00382-021-06061-8	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 Sugimoto Shusaku, Qiu Bo, Kojima Atsushi	4. 巻 76
2. 論文標題 Marked coastal warming off Tokai attributable to Kuroshio large meander	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 141 ~ 154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-019-00531-8	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 Qiu Bo, Chen Shuiming, Schneider Niklas, Oka Eitarou, Sugimoto Shusaku	4. 巻 33
2. 論文標題 On the Reset of the Wind-Forced Decadal Kuroshio Extension Variability in Late 2017	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 10813 ~ 10828
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JCLI-D-20-0237.1	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 該当する

1. 著者名 Sugimoto Shusaku, Qiu Bo, Schneider Niklas	4. 巻 34
2. 論文標題 Local Atmospheric Response to the Kuroshio Large Meander Path in Summer and Its Remote Influence on the Climate of Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 3571 ~ 3589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-20-0387.1	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

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Bo Qiu, Shuiming Chen, Niklas Schneider, Eitarou Oka, Shusaku Sugimoto
2. 発表標題 Impact of the 2017 Kuroshio Large Meander on the Decadal Kuroshio Extension Variability
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡英太郎, 西川はつみ, 杉本周作, Bo Qiu, Niklas Schneider
2. 発表標題 最近の持続する黒潮大蛇行が亜熱帯モード水に与える影響。パート1: 分布域全体における形成と移流
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川はつみ, 杉本周作, 岡英太郎
2. 発表標題 最近の持続する黒潮大蛇行が亜熱帯モード水に与える影響。パート2: 四国沖再循環における形成と時間発展
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本周作、Bo Qiu, Niklas Schneider
2. 発表標題 黒潮大蛇行に起因した関東地方の夏季気温上昇
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川上雄真, 中野俊也, 小嶋惇, 村上潔, 杉本周作
2. 発表標題 気象庁東経137度定線における黒潮流量の時間変動
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hatsumi Nishikawa, Eitarou Oka, Shusaku Sugimoto, Bo Qiu, Niklas Schneider
2. 発表標題 Subtropical Mode Water in a recent persisting Kuroshio large meander period.
3. 学会等名 International workshop for mid-latitude air-sea interaction: advancing predictive understanding of regional climate variability and change across timescales (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shusaku Sugimoto, Bo Qiu, Niklas Schneider
2. 発表標題 Local atmospheric response to the Kuroshio large meander path in summer and its remote influence on the climate of Japan
3. 学会等名 International workshop for mid-latitude air-sea interaction: advancing predictive understanding of regional climate variability and change across timescales (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Bo Qiu, Shuiming Chen, Niklas Schneider, Eitarou Oka, Shusaku Sugimoto
2. 発表標題 Interplay of Intrinsic versus Forced Decadal Kuroshio Extension Variability: Observations and Predictability
3. 学会等名 International workshop for mid-latitude air-sea interaction: advancing predictive understanding of regional climate variability and change across timescales (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡英太郎, 西川はつみ, 杉本周作
2. 発表標題 最近の持続する黒潮大蛇行が亜熱帯モード水に与える影響
3. 学会等名 2021年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川はつみ, 岡英太郎, 杉本周作, 川合義美, 小橋史明
2. 発表標題 黒潮大蛇行が遠州灘沿岸域の海象・気象に与える影響 ~新青丸KS-21-9次研究航海速報~
3. 学会等名 2021年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本周作
2. 発表標題 気候への黒潮の役割について
3. 学会等名 2021年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム「中緯度大気海洋相互作用研究の現状と展望」
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 杉本周作
2. 発表標題 大気場への中緯度海洋の役割：気象モデルを用いた研究
3. 学会等名 第23回 非静力学モデルに関するワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本周作
2. 発表標題 関東地方の夏季気温上昇への黒潮大蛇行の影響
3. 学会等名 2021年度長期予報研究連絡会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本周作, Bo QIU, 岡英太郎, 中野英之, 山中吾郎, 瀬藤聡, 中野俊也
2. 発表標題 黒潮加速 ～表層成層強化の影響～
3. 学会等名 東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター共同研究会「黒潮/親潮続流域の力学過程とその学際的応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本周作
2. 発表標題 関東地方夏季気温場への日本南方黒潮流路の影響
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sugimoto, S., B. Qiu, and N. Schneider
2. 発表標題 Influences of the Kuroshio on surface air temperature in Kanto district, Japan
3. 学会等名 Ocean Obs'19
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sugimoto, S.
2. 発表標題 New perspective on air-sea interaction off the east coast of Japan
3. 学会等名 International Joint Graduate Program Workshop in Earth and Environmental Sciences (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sugimoto, S., K. Hanawa, T. Watanabe, T. Suga, and S.-P. Xie
2. 発表標題 Enhanced warming of the subtropical mode water in the North Pacific and North Atlantic
3. 学会等名 6th Argo Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>報道関連情報</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2021年3月4日 テレビ朝日 ANNニュース 「黒潮大蛇行で関東の夏暑く」（出演・解説・研究紹介）</li> <li>2021年6月26日 東京新聞 「黒潮「大蛇行」 関東蒸し暑く 南風、水蒸気運ぶ」（研究紹介）</li> <li>2021年6月29日 河北新報 「黒潮大蛇行で関東蒸し暑く 東北大など分析 夏に不快日6割増」（研究紹介）</li> <li>2022年4月28日 読売新聞 「黒潮大蛇行 観測史上最長」（研究紹介）</li> <li>2022年4月29日 NHK・ニュースウォッチ9 「今年の夏はまた暑い!? 黒潮大蛇行の長期化で広がる影響」（出演・解説・研究紹介）</li> </ol> <p>プレスリリース</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>2021年3月4日 「黒潮大蛇行が関東地方の夏をより蒸し暑く」 東北大学.</li> </ol> <p>アウトリーチ活動</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>杉本周作：黒潮 ～渦に落ちた最強海流の不思議～（一般向講演） JpGU219ショートセミナー，千葉県幕張市，2019年5月28日.</li> <li>素敵な海のお話し（模擬授業） 岩手県洋野町立宿戸小学校 大学模擬授業，宮城県仙台市，2019年6月12日.</li> <li>海と気候変動 ～海が異常気象を引き起こす？～（一般向講演） 令和元年度気候講演会，東京都千代田区，2020年2月1日.</li> <li>変わりゆく日本の気候 ～海から見る温暖化と異常気象～（一般向講演） 第5回山溪会総会 特別講演，山梨県甲府市，2020年2月20日.</li> </ol> <p>ホームページ</p> <p><a href="http://pol.gp.tohoku.ac.jp/sugimoto/index.html">http://pol.gp.tohoku.ac.jp/sugimoto/index.html</a></p>
--

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
研究協力者	福井 真  (Fukui Shin)		

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		
米国	University of Hawaii	International Pacific Research Center	