

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1416 March 2024

東京湾内及び湾口の水温が外洋水の波及から受ける影響

大倉 翔太, 細川 真也, 本間 翔太, 和泉 隆夫, 内山 雄介

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
1.1 東京湾の水温上昇	4
1.2 考えられる水温の変動要因	5
1.3 課題の整理と新たな展開の可能性	5
1.4 本研究の目的	5
2. 使用データ	6
2.1 衛星によるSSTデータ	6
2.2 解析データ	6
2.3 黒潮大蛇行の期間と流路	7
3. 東京湾周辺の水温変動の時間的・空間的特徴	8
3.1 はじめに	8
3.2 方法	8
3.3 結果	9
3.4 考察	11
3.5 まとめ	13
4. 東京湾の湾内と湾口の水温変動に影響する要因	15
4.1 はじめに	15
4.2 方法	15
4.3 結果	16
4.4 考察	19
4.5 まとめ	22
5. 結論	22
6. あとがき	22
謝辞	22
参考文献	23
付録A	25

Influence of open ocean inflow on water temperature at the inside and mouth of Tokyo Bay

Shota OKURA*

Shinya HOSOKAWA**

Shota HOMMA***

Takao IZUMI****

Yusuke UCHIYAMA*****

Synopsis

Water temperature at the inner of Tokyo Bay has been on a long-term upward trend, and one of the factors for this trend is thought to be the influence of inflow of the open ocean. However, none of these findings are based on sufficient verification. Satellite-observed data on sea surface temperature (SST) has been accumulated over a wide area around Tokyo Bay over a long period of more than 20 years. In this study, we examined how and to what extent open ocean affects long-term fluctuation of SST around Tokyo Bay over the 20 years from 2003 to 2022. We focused on the Kuroshio large meander period from July 2004 to August 2005 and from August 2017 to December 2022. In addition, we attempted to identify the factors controlling the temperature increase at the inside and mouth of the bay. The following results were obtained from the analysis. The spatial and temporal characteristics of the annual variation around the southwestern part of Izu Oshima Island in the Tokyo Bay area were characterized by high water temperatures during the Kuroshio large meander. In the analysis focusing on the southwestern part of Izu Oshima Island, an increasing trend in water temperature was observed in many months during the entire period covered by this study, but it was no longer observed in any month except August, excluding for the five-year period from 2018 to 2022, which includes the Kuroshio large meander period. Even when focusing on a single point at the mouth and inside of Tokyo Bay, the appearance of the upward trend changed depending on whether the five years were included or excluded. The temperature fluctuations at the mouth of the bay were related to those at the southwestern part of Izu Oshima Island throughout the year, clearly indicating that the influence of open ocean inflow extends strongly to the mouth of the bay. In the inner part of the bay, the relationship was weaker than that at the mouth of the bay, but it was still possible that the water temperature fluctuations in the southwestern part of Izu Oshima Island influenced the water temperature fluctuations in the inside of the bay. This study is the first report to show that the long-term trend around Tokyo Bay strongly depends on the Kuroshio large meander and the importance of considering the influence of open ocean inflow in understanding the changes in the aquatic environment of Tokyo Bay based on long-term data.

Key Words: Tokyo Bay, open ocean, increase in water temperature, SST, Kuroshio current

* Senior Researcher, Marine Environmental Information Group, Marine Environment Control System Department

** Head of Marine Environmental Information Group, Marine Environment Control System Department
Head of Big data Technology Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department

*** Researcher, Big data Technology Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department

**** Member, Marine Environmental Information Group, Marine Environment Control System Department

***** Visiting Senior Researcher, Professor, Kobe University

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute

Phone : +81-46-844-5107 Fax : +81-46-844-0575 E-mail : ookura-s@p.mpat.go.jp

東京湾内及び湾口の水温が外洋水の波及から受ける影響

大倉 翔太*・細川 真也**・本間 翔太***・和泉 隆夫****・内山 雄介*****

要 旨

東京湾の水温は、長期的な上昇傾向にあることが報告されており、その要因の一つとして、外洋水の波及効果の影響が考えられている。しかし、外洋水の波及と長期的な水温変動の関係は十分に検証されていない。衛星によって観測されている海表面水温（Sea Surface Temperature, SST）のデータは、東京湾及び周辺外洋域を広域的かつ20年以上の長期間にわたって捉えており、東京湾の水温変動が外洋水から受ける影響を検証できる可能性がある。本研究では、2003年から2022年までの20年間を対象として、外洋水が東京湾及び周辺外洋域における水温の長期的な水温変動にどのように、どの程度影響しているかを検証した。この検証の中では、2004年7月から2005年8月までの期間と2017年8月から2022年12月までの期間に見られた黒潮大蛇行に着目した。さらに、湾口及び湾内の水温上昇を支配する要因の特定を試みた。解析から以下の結果を得た。東京湾周辺海域の水温は、伊豆大島南西部付近で大きく年間変動する空間的特徴を有しており、その時間的特徴は、黒潮大蛇行期にこの場所を高水温にさせるものであった。伊豆大島南西部の1点に着目した解析では、本研究の全対象期間において水温が上昇傾向にある月が多く見られたが、その上昇傾向は、黒潮大蛇行期を含む2018年から2022年までの5年間を除けば、8月以外の月で見られなかった。東京湾の湾口及び湾内の1点に着目した場合でも、この5年間を含むか含まないかによって上昇傾向の見え方が変わった。湾口の水温変動は、1年を通して伊豆大島南西部の水温変動と関係する結果が得られ、外洋水の波及の影響が湾口にまで強く及ぶことが明確に示された。湾内においては、湾口に比べてその関係が弱くなったものの、やはり伊豆大島南西部の水温変動が影響している可能性が示された。本研究の成果は、東京湾周辺の水温の長期変動の傾向が黒潮大蛇行に強く依存する事、及び東京湾の水環境の変化を理解する上で外洋水の影響を考慮する重要性を、長期データに基づいて示した初めての報告である。

キーワード：東京湾，外洋，水温上昇，SST，黒潮

* 海洋環境制御システム研究領域海洋環境情報研究グループ 主任研究官

** 海洋環境制御システム研究領域海洋環境情報研究グループ長，インフラDX研究領域ビッグデータ研究グループ長

*** インフラDX研究領域ビッグデータ研究グループ 研究官

**** 海洋環境制御システム研究領域海洋環境情報研究グループ 技術補助員

***** 客員研究官（神戸大学 教授）

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所

電話：046-844-5107 Fax：046-844-0575 E-mail：ookura-s@p.mpat.go.jp

1. まえがき

1.1 東京湾の水温上昇

東京湾は、産業活動等に伴う環境負荷の増大や沿岸部の埋め立て等による水環境への影響が顕在化したため、環境改善の取り組みが進められている海域である（東京湾再生推進会議，2023）。この取り組みの効果は少しずつ現れ始めてはいるものの、環境負荷を原因とする植物プランクトンの大量発生による赤潮は依然として毎年のように起こっている。

周囲を陸で囲まれ外洋に面した半閉鎖性内湾では、陸からの淡水流入や沖合の外洋水の波及の影響を受けて複雑な水塊構造が形成される。東京湾は、慣例的に半閉鎖性内湾の一つとしてカテゴライズされており、やはり複雑な水塊構造が形成されることが知られている海域である。例えば、春から秋にかけては陸から流入する淡水は、外洋水に比べて水温が高く密度が低いことから、湾内では底層に外洋水、上層に淡水が分布する密度成層が形成される（山尾，2004；鈴木，2010）。密度成層が形成されると鉛直混合が抑制され、水質の悪化はより進行しやすくなる。しかし、水質悪化のタイミングは年によって大きく異なり、その予測は難しい。このことから、東京湾では、調査船等による観測や定点観測点での連続観測による水質モニタリングが実施されている（図-1a）。

水温は、いくつかある水質項目の中でも植物プランクトン等の生物の活性に強く影響することから、特に重要な要素である。また、近年では東京湾内の水温上昇によ

る生態系への影響など新たな課題も取り沙汰されている（黒木，2017；林，2017；林・宮山，2019）。一方、水温は、過去にさかのぼり長期間のデータが入手可能であることから、東京湾における水質環境の長期変化を検証しやすい要素の一つでもある。Hosokawa and Okura（2022）によれば、東京湾の表層水温は、2月に最も低く8月に高いピークとなり、1年の中での変動幅は20°C程度ある（図-1b）。また、2月の水温は、湾奥で10°C未満となるのに対し、湾口付近では10°C以上となり、空間的な差が見られる。

東京湾の水温の長期変動の傾向については、既にいくつかの報告があり、様々な場所の傾向が述べられている。以下では、富津岬より北側を湾内、南側を湾口として区分し既往の報告内容を整理する。湾内の水温に関しては、安藤ら（2003）や八木ら（2004）は、多点での調査データに基づき秋季から冬季にかけて長期的な経年上昇傾向がみられることを示している。Nakano et al.（2023）は、調査船による長期間のデータから、1月を除く月に経年の上昇傾向がみられることを示した。また、Akada et al.（2023）は、調査船によるデータから8、9月を除く月に経年の上昇傾向がみられることを示している。湾口の水温に関しては、Nakano et al.（2023）は、上昇傾向が8～10月にみられることを示し、Akada et al.（2023）はこの上昇傾向が3、4、8、10、11月にみられることを示している。これらすべての報告は、湾内及び湾口の経年的水温上昇傾向について示しているものの、その季節性は解析対象とする期間や場所によって異なる。

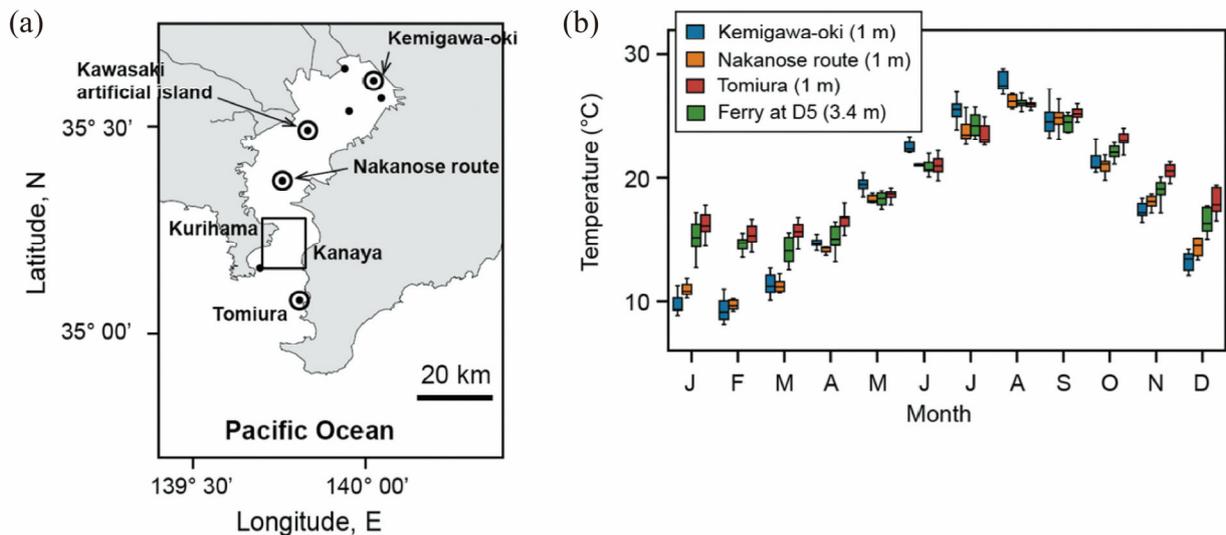


図-1 東京湾における水質モニタリングの場所と水温の季節変動。(a)東京湾における水質の定点観測点と湾口を横断するフェリーの航行範囲（黒枠）、(b)定点観測点及びフェリーによって観測された水温。“Ferry at D5”はフェリー航行範囲のおよそ中央部に位置する。いずれのパネルも Hosokawa and Okura（2022）から再掲。

1.2 考えられる水温の変動要因

東京湾における水温変動のメカニズムについては、海面での大気との熱交換、河川や温排水等の陸からの熱流入、湾口から湾内に波及する外洋水による水平熱交換等の様々な要因が作用していると考えられている。八木ら（2000）は、大気との熱交換及び外洋水による水平熱交換の2つの作用に絞り、閉瀬性水域の霞ヶ浦、開放性水域の鹿島灘、そして東京湾の3つの水域における1年間の熱収支特性についてBOXモデルを用いて比較解析した。この結果、霞ヶ浦の水温変動は大気側の熱輸送に支配されること、鹿島灘の水温変動は水平熱交換に支配されること、東京湾の水温変動は気温が高くなる夏季に霞ヶ浦の傾向にほぼ一致し、気温が低くなる冬季においては鹿島灘のように水平熱交換の寄与が大きくなることを示した。また、八木ら（2000）は、東京湾の湾内と湾口との間での海水交換が湾内における冬季水平熱交換の主要なメカニズムであることを示した。

東京湾に近い相模湾に関して、Kawabe and Yoneno（1987）は、黒潮が典型的な大蛇行流路を取る時に暖水波及の影響を受けて、湾内の水温が高くなることを示した。この相模湾での水温変動メカニズムから、東京湾でも黒潮の流路が水温変動に影響することが推論される。日向ら（2000）は、冬季の湾口において現地観測を行い、外洋から東京湾内へ黒潮系暖水波及が起きた時の湾口付近における水塊構造は、暖水が下層に潜り込みながら湾内へ侵入するものであったことを明らかにした。さらに、この湾口付近の流動を簡略化した外洋と湾内を結ぶBOXモデルにより、黒潮系暖水波及時の外洋から湾内への水平熱フラックスが通常時に比べて約5倍となることを示し、やはり東京湾内の水温変動が外洋水の波及の影響を受ける可能性が示唆されている。

以上から、東京湾の水温変動のメカニズムに関して分かっていることは以下の3つに整理できる：1) 東京湾内の水温変動には様々な要因が作用し、主要となる熱フラックスの要因は季節によって変化するが、2) 外洋水の波及による熱フラックスの寄与は少なくとも冬季に支配的になる。3) 外洋水の湾内への波及のタイミングは、海洋学的な空間スケールでの黒潮流路の変化に依存している。

1.3 課題の整理と新たな展開の可能性

東京湾の長期水温変動の傾向は、上述したメカニズムから十分に説明できるわけではない。このこともあり、前述した過去の東京湾の水温上昇に関する報告は、そのメカニズムが曖昧なまま、地球温暖化と関連付けて述べられているものもある。本節では、これまでの知見が東

京湾の長期水温変動を十分に説明できるわけではない理由について整理し考察する。

まず、八木ら（2000）のBOXモデルを使った研究の課題について考察する。このモデルでは、大気との熱交換及び外洋水による水平熱交換の2つの作用に絞り河川等の陸からの熱流入を無視して熱収支特性を比較している。この点については、湾口から湾内への長期間平均の流入量が河川からの流入量に対して約20倍あるという近年に得られた新たな知見から（Hosokawa and Okura, 2022）、妥当な簡略化と言えるであろう。しかし、密度成層をBOXとして考える仮定は東京湾においてはやや強引である。この仮定により比較的短い時間スケールでの水温変動を説明できたとしても、水塊の空間構造の動的な変化も含めた長期の水温変動を説明できるとは限らない。また、湾内と湾口との間での海水交換を議論しているものの、そもそも湾口の水温がどれくらい外洋水の影響を受けたかについては明らかにしていない。日向ら（2000）の検討は、短期的な黒潮系暖水波及の湾内への影響を定量的に示しているものの、これも東京湾の長期的な水温変動にどれくらい影響したのかを説明するには十分とは言えない。

黒潮の暖水波及が東京湾の湾内の水温の長期変動に影響しているのであれば、それを地球温暖化と関連づけて説明することには無理がある。しかし、これまでの研究は、そのような視点で長期の水温変動を検証していない。その理由として、これまでの時代にはまだ長期的なデータが揃っていなかった事や、当時は海洋学的な空間スケールで起きている黒潮流路の変化を捉える事も技術的に容易ではなかった事が挙げられる。一方で、衛星による海表面水温（Sea Surface Temperature, 以後SST）は、海洋学的な空間スケールの特徴を捉え、かつ長期にデータが蓄積されていることから、黒潮の暖水波及が東京湾の湾内の水温の長期変動に与える影響を検証できる可能性がある。

1.4 本研究の目的

本論文では、東京湾の湾内及び湾口における水温変動に対して、外洋水がどのように、どの程度影響しているのか、を明らかにすることを目的とした。どのように影響しているのか、については黒潮の大蛇行に着目した。

検証には、MODISによって得られた東京湾及びその周辺の外洋域を含めた広域的かつ20年間蓄積された長期のSSTデータを用い、これを統計解析する事により検証した。解析においては、主に水温の変動に着目したが、2017年8月から執筆時現在まで長期間継続している黒潮

大蛇行（気象庁：<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>）に鑑み、長期のトレンドの有無も検証した。

2. 使用データ

2.1 衛星による SST データ

衛星による SST は、センサにより得られた光学情報から特定のアルゴリズムによって間接的に推定されたものであるが、その精度は高く気象学や海洋学において広く活用されている（Walton et al., 1998; Kilpatrick et al., 2015）。衛星 SST は、水深約 0.01 mm の極表層の水温を測定していることから、水深数 m の表層水温とは水温差が生じ、ブイや観測船に取り付けられた観測機器による観測結果から偏ることもある（Donlon et al., 2002; Minnet et al., 2019）。しかし、Okura and Hosokawa (2022) は、東京湾と伊勢湾を対象として、衛星 SST と表層から 1 m の水深で測定された水温を比較し、水温の鉛直構造が顕著になる伊勢湾口を除けば、衛星 SST が半閉鎖性内湾の表層水温を代表するデータとして活用できることを示している（図-2）。衛星 SST は、観測機器の設置が制限されるような場所においてもデータを取得できるため、空間的に広範囲の水温情報を得る方法として非常に有用である。

2.2 解析データ

本研究では、東京湾及び周辺外洋域の水温として、衛星 Terra と Aqua に搭載された MODIS による解像度が約 1

km の SST データ（<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>）を用いた。解析期間は 2003～2022 年の 20 年間とし、東京湾及びその周辺海域を解析領域とした（図-3）。対象海域の空間的特徴を整理しやすくするため、東京湾の富津岬の北側を湾内及びその南側を湾口とし、外洋域として伊豆大島南西部と房総半島の東側（外房）として分類した。さらに、SST の時間変動の解析においては、湾内の 3 地点（In1～In3）、湾口の 2 地点（In4 及び In5）、及び伊豆大島南西部の 1 地点（Out1）に着目した。

SST は、日射量の違いによる水温変動の偏りが大きくなるため（Donlon et al., 2002; Minnet et al., 2019）、昼間のデータは解析対象から外し、夜間（21～2時）のデータのみを用いた。夜間の衛星 SST においても、データ収集時の大気状況やセンサの地表面に対する角度によって、その精度が変わるため（Kilpatrick et al., 2015; Minnet et al., 2019）、クオリティ指標（flags_sst）によるチェックをパスした精度の良いデータを抽出した。ここで、最も精度の良いデータ（flags_sst が 0 となるデータ）だけでなく、沿岸域では十分な精度を有するデータ（flags_sst が 32, 256, 768 となるデータ；Okura and Hosokawa, 2022）を解析対象として採用した。このクオリティチェックをパスするデータは数割程度であり欠測データが多数存在する。欠測データがあれば、後述する時空間解析による検討が難しくなるため、観測のタイミング毎（1日1回）のデータは解析対象とせず、月平均値のデータを解析対象とした。

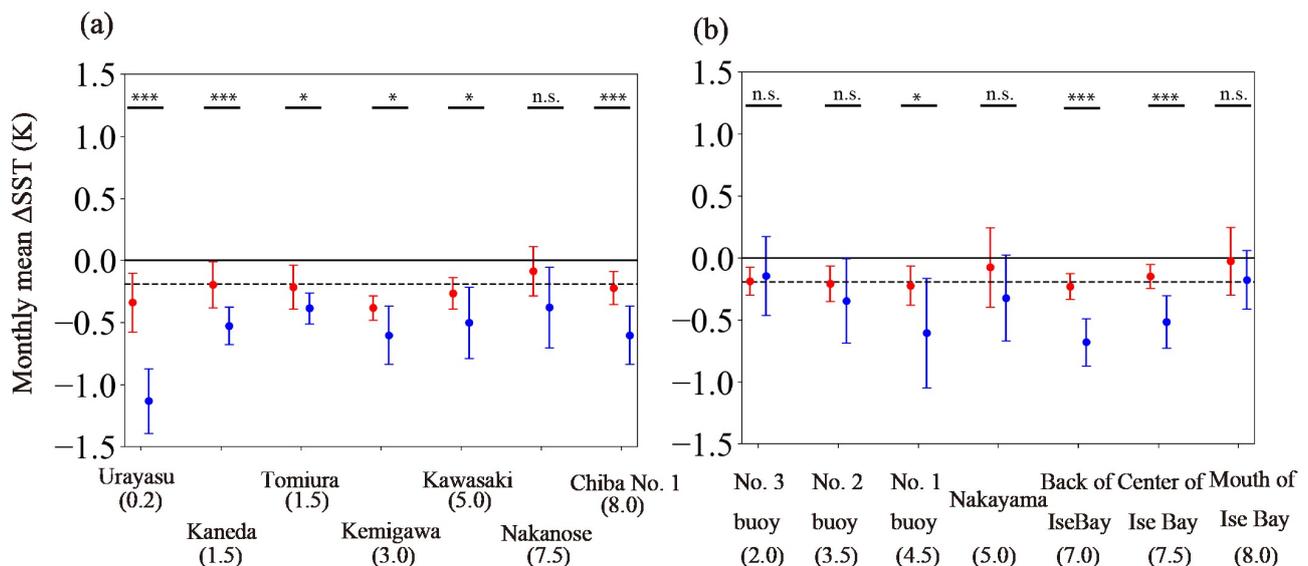


図-2 衛星による SST と現地における定点観測で直接測定された水温の差。(a)東京湾及び(b)伊勢湾の比較結果を示している。各場所のカッコ内の数値は陸からの距離 (km) を示している。赤色は最も精度の高い SST (flags_sst が 0)、青色は比較的精度の高い SST と定点観測点における水温との差である。点線は、外洋における衛星 SST と表層水温の差である。いずれのパネルも Okura and Hosokawa (2022) から再掲。

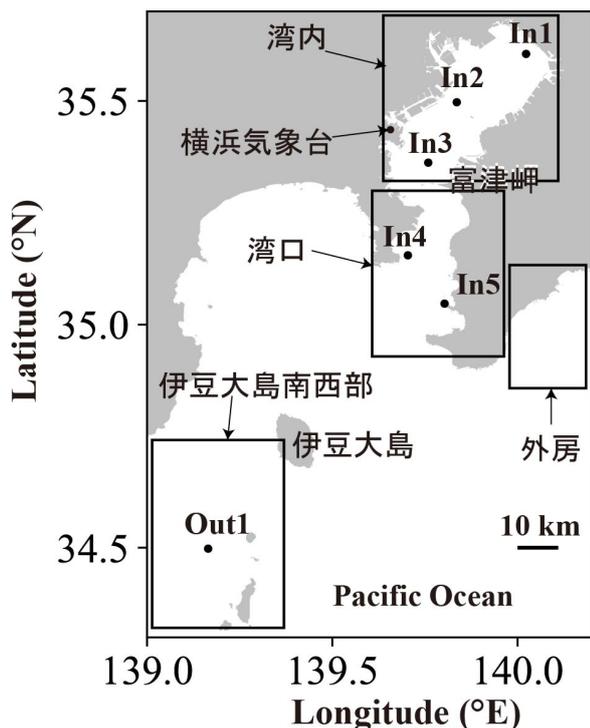


図-3 東京湾及びその周辺の外洋域を解析領域とし、さらに、詳細解析対象として東京湾における抽出地点 (In1～In5) 及び伊豆大島南西部の抽出地点 (Out1) に着目した。

本研究では、東京湾内及び湾口における水温の変動要因として、外洋水の波及、大気から海面への熱輸送、河川からの熱輸送を考慮した。大気から海面への熱輸送の検討では、気温のデータを用いた。ただし、大気と海水温は相互作用することが知られており、測定された場所によっては大気から海面への熱輸送の検討には相応しくない気象台もある。例えば、夏季においては、海水温によって温度が下げられた大気が海風によって輸送されることから (小田ら, 2008), 東京の気象台の気温は今回の検討には適しているとは言えない。一方、夏季における東京湾上の風向は南風が卓越しており (例えば, 細川・大倉, 2021), 東京湾の西側に位置する気象庁横浜気象台 (図-3) であれば、この影響を排除できる可能性がある。また、横浜気象台であれば標高も高く、海面からの影響は比較的受けにくいはずである。このことから、本研究では横浜気象台の月平均気温データ (<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>) を使用した。

河川からの熱輸送の可能性については、国土交通省水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) で公開されている主要4河川 (荒川, 江戸川, 多摩川, 鶴見川)

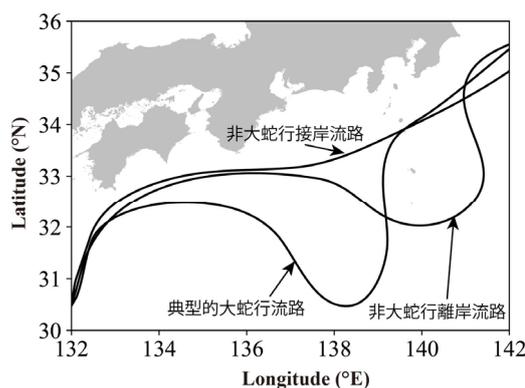


図-4 黒潮の主要な3流路の概略図

の河川流量データを使用した。流量データが公開されていない場合については、2018年の水位-流量関係と各年の観測水位に基づいて河川流量を算出した。

2.3 黒潮大蛇行の期間と流路

黒潮は、日本の南岸を沿って流れる海流であり、様々な流路をとる。川辺 (2003) は黒潮の流路について、典型的大蛇行流路, 非大蛇行接岸流路, 非大蛇行離岸流路の3つに集約した (図-4)。典型的大蛇行流路は、紀伊半島や遠州灘で大きく離岸する流路をとり、海面に関しては三宅島の北側を通過する。非大蛇行接岸流路は、潮岬から東に向かって熊野灘と遠州灘の南側を進み、海面流軸は三宅島の周辺及び少し北側を通過して、房総半島の沖合に進む。非大蛇行離岸流路は、潮岬から東南東に向かい、八丈島の南側を通過してから北北東に転じて房総半島の東方に進む。

黒潮の流路の違いは、東京湾周辺の外洋域の水温変動に影響を与えることが知られている。Kawabe and Yoneno (1987) は、典型的大蛇行流路の時に非大蛇行接岸流路の時に比べて相模湾周辺の水温が高くなることを示している。また、日向ら (2003) は、相模湾における流動観測結果から、伊豆大島南西部から黒潮系暖水が波及された場合に東京湾の湾口部まで到達することを示している。これらのことは、黒潮の蛇行とその波及経路が東京湾の水温を上昇させる要因であることを予想させる。

解析対象である2003から2022年までの20年間で、黒潮流路が大きく変化する黒潮大蛇行が2度起きていた。1度目は2004年7月～2005年8月であり、2度目は2017年8月以降から執筆時の現在までである (気象庁: <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>)。

期間中の黒潮流路について、Global Ocean Gridded L 4

Sea Surface Heights And Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoingの日平均地衡流データを基にした地衡流の月平均値を確認すると（図-5），黒潮大蛇行期間である2004年及び2018～2022年において，典型的な大蛇行流路に近い流路上に流れの強いベクトルが見られる．この地衡流は，気象庁が発表している黒潮大蛇行が伊豆大島南西部に接近していることを裏付けている．一方で，東京湾から大きく離れる流路を取る非大蛇行離岸流路の時も東京湾内の水温はなんらかの影響を受けることが予想されるが，黒潮大蛇行時のように明確な期間は示されていない．また，地衡流を見ても，非大蛇行接岸流路，非大蛇行離岸流路を明確に分けるのは困難であるため，本論文では黒潮大蛇行時と非大蛇行時の二つに分けた検討とした．

3. 東京湾周辺の水温変動の時間的・空間的特徴

3.1 はじめに

本章では，解析対象期間中における東京湾周辺の水温の時空間変動の特徴を抽出した．さらに，外洋に指定した地点と東京湾の湾口及び湾内の水温との相関関係を求めることで，外洋で起きる主要な水温変動の影響が東京湾周辺のどこまで及ぶのか，その影響範囲を検証した．

3.2 方法

(1) 水温の時空間分布

東京湾周辺の時空間変動の特徴を把握するため，着目する3地点における20年間の水温の統計量をまとめるとともに，対象海域の各月の平均水温分布を抽出した．

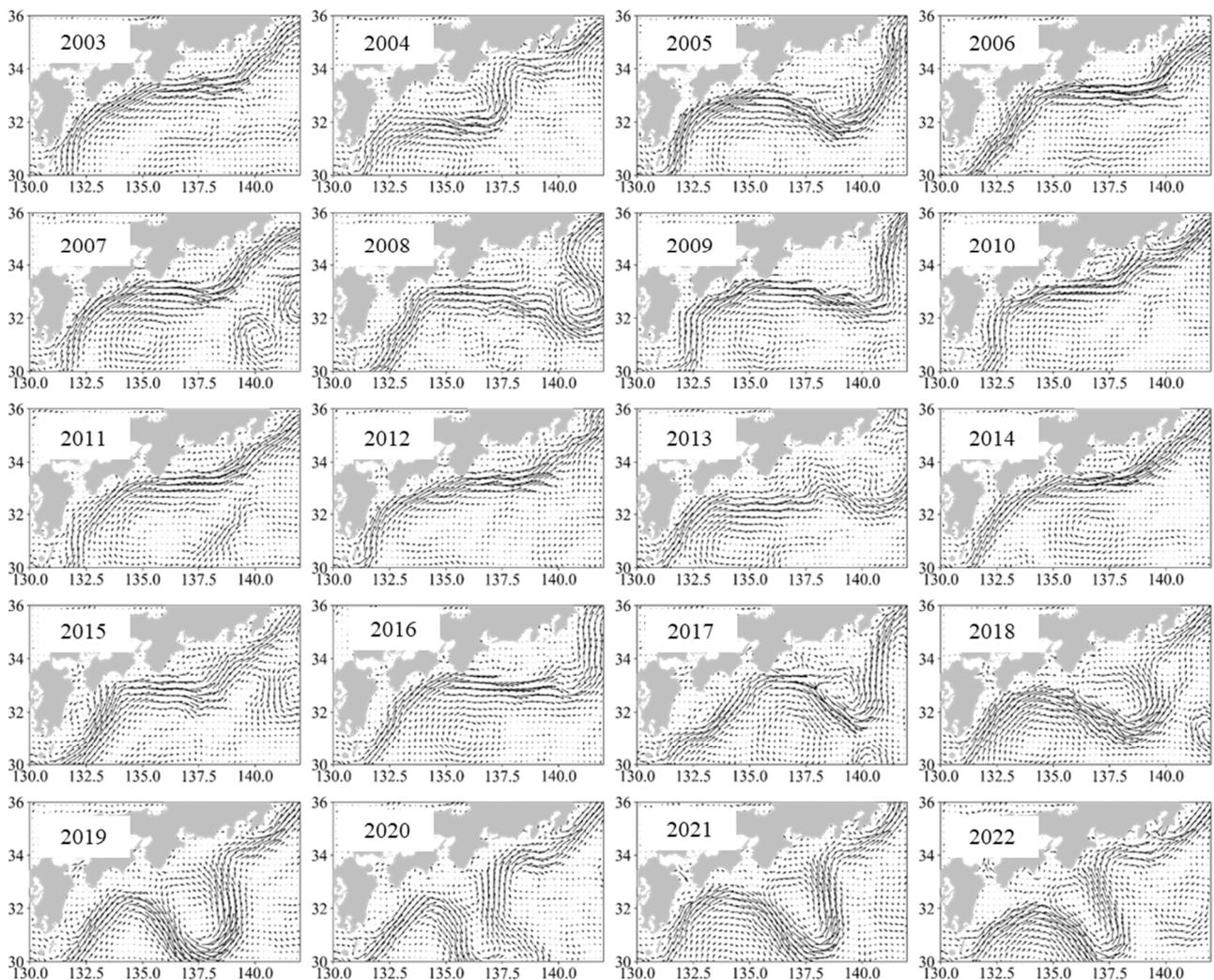


図-5 2003～2022年の各年の7月の地衡流の様子

(2) EOF解析による水温変動の時空間な特徴の把握

水温が変動しやすい場所を把握するため、各メッシュにおける平均から差を対象としたEmpirical Orthogonal Function Analysis（以下、EOF解析）を行った。

EOF解析は、時空間的に変動する対象について、空間成分と時間成分に線形結合できるという仮定の下で、これらの成分を分離する手法である（Lorenz, 1956; Kutzbach, 1967）。海岸工学の分野では、例えば、海水温変動や江線の変動の時間的もしくは空間的な特徴を抽出するために用いられている（内山ら, 2013a；伴野ら, 2016）。具体的には、対象の水温を空間座標 x 及び y と時間 t の成分を持つ $h(x,y;t)$ とし、これを以下のように線形結合できるものとして考える：

$$h(x,y;t) = \sum_{i=1}^n e_i(x,y) \cdot c_i(t) \quad (1)$$

ここに、 $e_i(x,y)$ は空間成分（単位は $^{\circ}\text{C}$ ）、 $c_i(t)$ は時間成分（無次元）であり、これらに n 個のモードがあるものとして考えている。

EOF解析では $h(x,y;t)$ を主成分分析し、その結果として n 個の固有値と固有ベクトルを得る。それぞれの固有値は、各モードの分散であり、すべてのモードの固有値の合計（全分散）に対する各固有値の割合が各モードの寄与率として示される。寄与率の大きさの順にモード1、モード2…とする。本論文では、時間方向に主成分分析を行っており、各モードの固有ベクトルが時間成分であり、空間成分は、固有ベクトルの方向に散らばる成分である。

本論文では、東京湾周辺の解析対象（図-3）を1 kmメ

ッシュに区切った水温の月平均値を用いて、20年の全期間を対象としたEOF解析を行った。さらに、全期間を対象とした解析では1年周期の季節性が経年的な変動を隠して見えにくくすることが予想されるため、季節性を排除する事を目的とした月別のEOF解析も実行した。

解析するデータは、各空間メッシュにおける解析期間の平均からの差とした。このため、時間成分と空間成分ともに正負の値を取り得る。なお、欠測を含むデータは解析対象外となる。

EOF解析で得られた時間成分について、最小二乗法による単回帰分析を行い、有意水準5%の t 検定によりその経年変化の有無を検定した。さらに、気象庁による黒潮大蛇行期間の有無による時間成分の大きさの差について、ウィルコクソンの順位和検定を用いて検定した。

(3) 水温変動の詳細な解析

外洋域の水温変動の影響が及んでいる範囲を把握するため、伊豆大島南西部のOut1とそれ以外の5地点との間の相関係数を求めた。

3.3 結果

(1) 水温分布の時空間的な特徴

東京湾周辺の水温は、季節及び場所によって異なる。伊豆大島南西部のOut1の水温は 16.3°C から 26.1°C の間で季節的に変動し、その変動幅はおよそ 10°C （振幅はおよそ 5°C ）であった（表-1）。東京湾内と周辺外洋域の水温の空間分布は、夏季においては一樣に近い（図-6）。

これに対し、湾内のIn1の水温は 9.1°C から 27.6°C の間で変動していた（表-1）。その変動幅はおよそ 18°C （振幅

表-1 東京湾周辺の地点における 2003～2022 年の月別平均水温の統計値（単位は $^{\circ}\text{C}$ ）

(a)湾内 (In1)

統計値	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
平均値	9.8	9.1	10.7	14.2	18.4	21.7	25.8	27.6	24.7	20.2	16.9	12.9
最小—最大	8.3- 11.3	7.7- 11.0	9.7- 12.5	12.1- 16.9	16.2- 19.7	19.7- 23.6	22.0- 27.5	25.4- 29.2	22.4- 27.9	18.9- 21.8	15.8- 18.5	11.9- 15.0
変動幅	3.0	3.3	2.8	4.8	3.5	3.9	5.5	3.8	5.5	2.9	2.7	3.1

(b)湾口 (In5)

統計値	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
平均値	15.9	14.8	14.7	15.8	18.4	20.5	23.6	25.7	24.8	22.3	20.6	17.8
最小—最大	14.5- 17.5	13.1- 16.8	12.7- 16.7	13.5- 17.5	17.0- 20.2	19.1- 22.7	21.1- 25.2	23.8- 26.4	22.7- 26.5	20.7- 24.3	18.7- 22.7	16.0- 19.7
変動幅	3.0	3.7	4.0	4.0	3.2	3.6	4.1	2.6	3.8	3.6	4.0	3.7

(c)伊豆大島南西部 (Out1)

統計値	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
平均値	17.1	16.3	16.4	17.0	19.5	21.5	24.6	26.1	25.6	23.6	21.8	19.3
最小—最大	14.3- 19.5	13.8- 19.3	13.5- 18.9	14.7- 18.3	17.0- 22.0	19.1- 24.0	20.6- 27.4	23.3- 28.0	23.1- 28.2	21.2- 25.9	19.5- 24.4	16.9- 21.6
変動幅	5.2	5.5	5.4	3.6	5.0	4.9	6.8	4.7	5.1	4.7	4.9	4.7

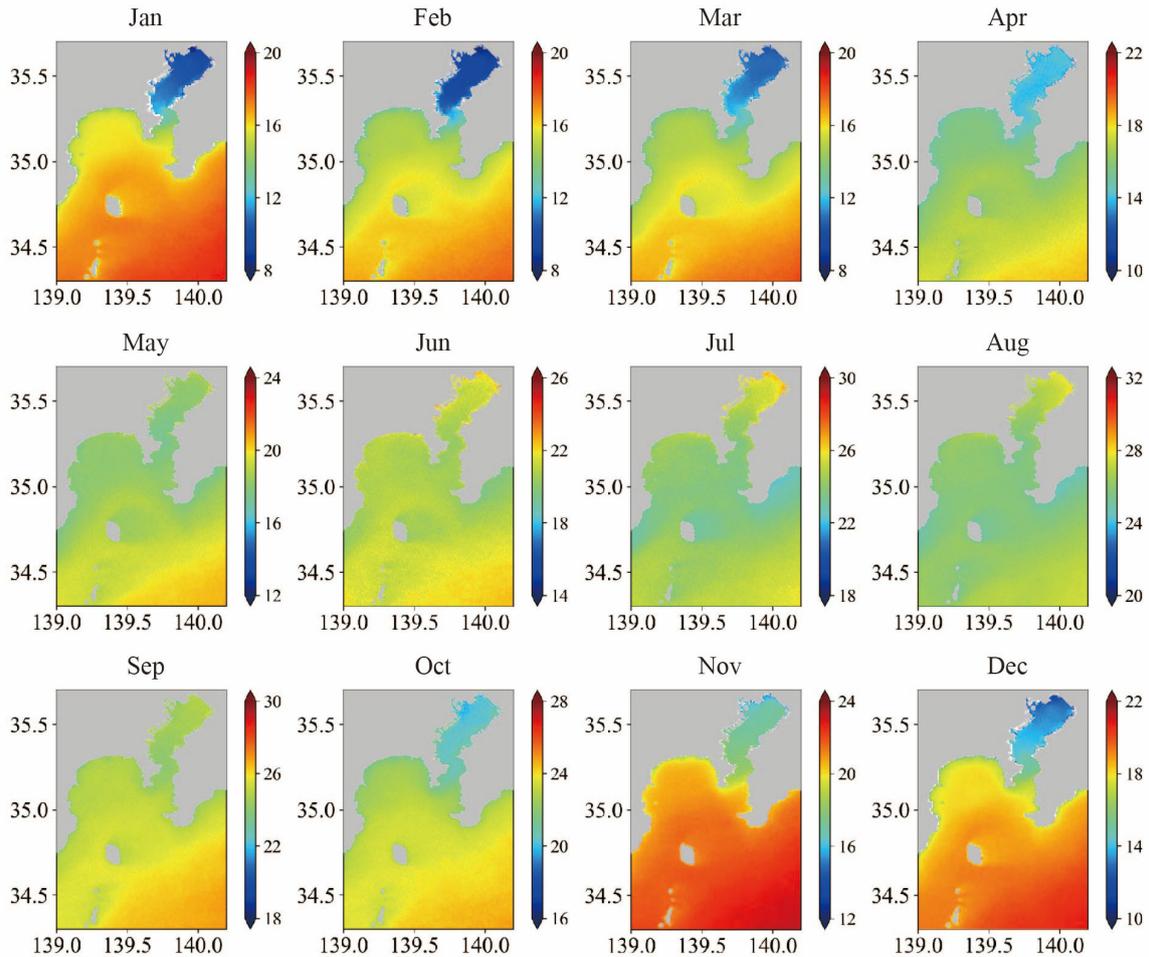


図-6 月別の月平均水温の20年間平均値（単位は℃）

はおよそ9℃）であり、Out1に比べると大きい。その差は、冬季における東京湾内での低水温によって生じている（図-6）。

東京湾周辺の各地点における月別平均水温の年差は、最も大きな伊豆大島南西部のOut1で7月に6.8℃程度であった（表-1）。

(2) 水温変動の時空間的な特徴

東京湾周辺の水温の全期間を対象としたEOF解析によるモード1（寄与率97%）の空間成分は、湾内と周辺外洋域のそれぞれの場所の中で概ね一様であった（図-7a）。モード1の時間成分はゼロ周りに1年の周期で変動しており（図-7b）、モード1は解析領域の季節性の特徴を抽出していることが理解できる。再び、モード1の空間成分を見ると、その絶対値は周辺外洋域よりも湾内で大きい。時間成分の絶対値の最大（およそ0.1）と空間成分の絶対値を掛け合わせたものが水温変動の振幅と理解できるが、In1及びOut1回りにおける振幅は、上述した水温の年内変

動の振幅とほぼ一致する。

モード2（寄与率1%）の空間成分は、伊豆大島南西部で大きな負の成分がみられたのに対して外房で大きな正の成分がみられている（図-7c）。つまり、これらの領域では、逆位相の水温変動がある。その時間成分は季節的な周期性を持つものではなかったが（図-7d）、黒潮大蛇行が発生している期間に統計的に有意に負に偏るものであった（図-7d, ウィルコクソンの順位と検定, $p = 2.8 \times 10^{-16}$ ）。時間成分の負への偏りと伊豆大島南西部における空間成分の負の分布（図-7c）は、この領域で黒潮大蛇行期間に水温が高くなっていることを示しており、その変動幅は概ね1℃程度と見積もることができる。

月別のEOF解析のモード1の全変動に対する寄与率は、最も小さい月でも60%を超えており、伊豆大島南西部において高くなる空間成分であった（図-8a）。この結果は、全期間を対象としたEOF解析のモード2と概ね同じ空間パターンであり、伊豆大島南西部は水温が年によって変動

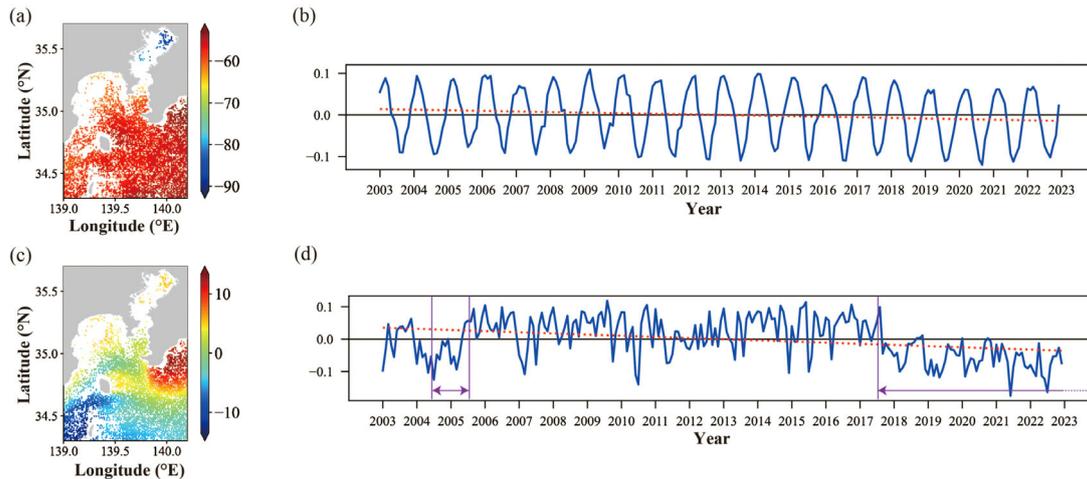


図-7 東京湾周辺の全期間の水温を対象としたEOF解析による空間分布と時間変動。モード1における(a)空間分布，(b)時間変動。モード2における(c)空間分布，(d)時間変動。空間分布で色が塗られていない部分は、欠測を含む地点。時間変動の赤点線は、統計的に有意な傾向である（有意水準5%のt検定）。(d)における紫矢印については、黒潮大蛇行期間を示す。

しやすい場所であることが分かる。

月別のEOF解析によるモード1の伊豆大島南西部周辺の空間成分の強さは、低下しつつも東京湾の湾口にまで及んでいる（図-8a）。各メッシュにおける月平均水温を見ると、やはり、伊豆大島南西部から湾口までの領域は変動しやすい（図-A.1）。東京湾周辺の各地点と伊豆大島南西部のOut1との間の月平均水温相関係数は、季節的な違いはあるものの湾口で高い（図-9）。この結果は、伊豆大島南西部から湾口までの領域で同時に水温変動している可能性を強く示唆している。

一方、湾内の水温は、これらの領域における水温変動とは独立しているように見え（図-A.1）、やはり、湾内と伊豆大島南西部との水温の相関係数は低い（図-9）。

これらの相関係数には、5月に低くなる季節性が見られる（図-9）。5月に着目すると、Out1を含む伊豆大島南西部付近は水温が変動しやすい場所であり（図-8a）、これらの相関係数の低下は、5月に伊豆大島南西部付近の水温変動の影響が湾口及び湾内に及びにくくなっている事を意味している。逆に、7、8月においては、これらの相関係数は湾内の地点でも0.6を超えていた（図-9）。

(4) 水温の経年変化

伊豆大島南西部のOut1における各月の平均水温は、12か月のうち9か月において、大蛇行期間の方が非蛇行期間に比べて有意に高かった（表-2）。また、全解析対象期間の20年間の傾向で見ると7か月で上昇傾向が見られた（表-3）。黒潮大蛇行が長期で継続している2018年から2022年を除く15年間（2003～2017年）では、いずれの月でも長期の変動傾向は見られなかった（表-4）。

東京湾における地点においても、黒潮大蛇行期間において非蛇行期間よりも水温が有意に高くなる月があった（表-2）。これらの場所での上昇傾向は、全解析対象期間では見られたものの（表-3）、黒潮大蛇行を除く15年間ではほとんど見られなくなった（表-4）。湾口における11月の15年間のトレンドに関しては、むしろ下降傾向であった。

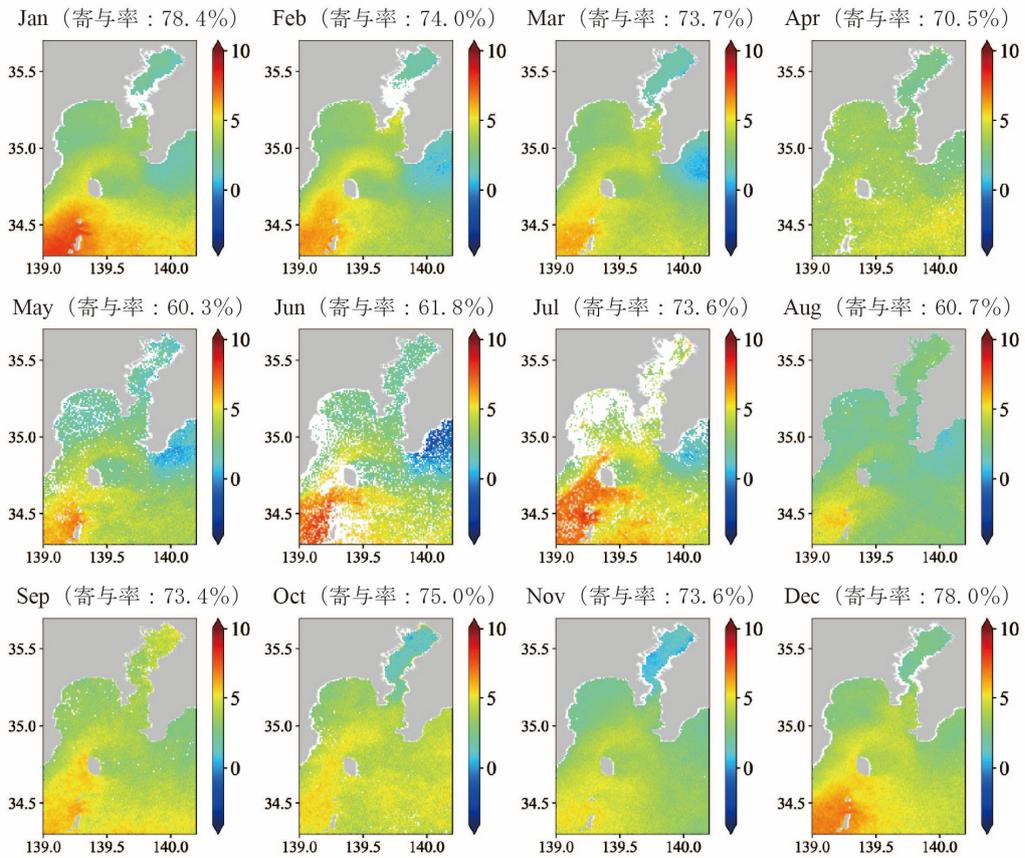
3.4 考察

(1) EOF解析の結果の解釈

全期間を対象としたEOF解析によるモード1の寄与率は97%であり、東京湾周辺の水温変動は季節変動に支配されていることがよくわかる。これは、東京湾周辺では1年の中での変動幅が20℃近くあることが表れている（図-1）。一方で、モード2の寄与率は1%であり、全期間を通じてみるとわずかである。しかし、これは、モード1で表される季節性の変動が季節性を除去した残りの成分に対して非常に大きいためであり、1%だからといって意味のない変動という訳ではない。むしろ、東京湾周辺の経年的な水温変動を理解する上では、このモードが示す意味が重要となる。

月別のEOF解析の全変動の60%以上を占めるモード1の空間成分は、このモード2の空間成分と類似しており、この結果からもその重要性が分かる。伊豆大島南西部のOut1の7月における6.8℃程度の年間の水温差（表-1）は、このモードに反映されていると考えられる。

(a)



(b)

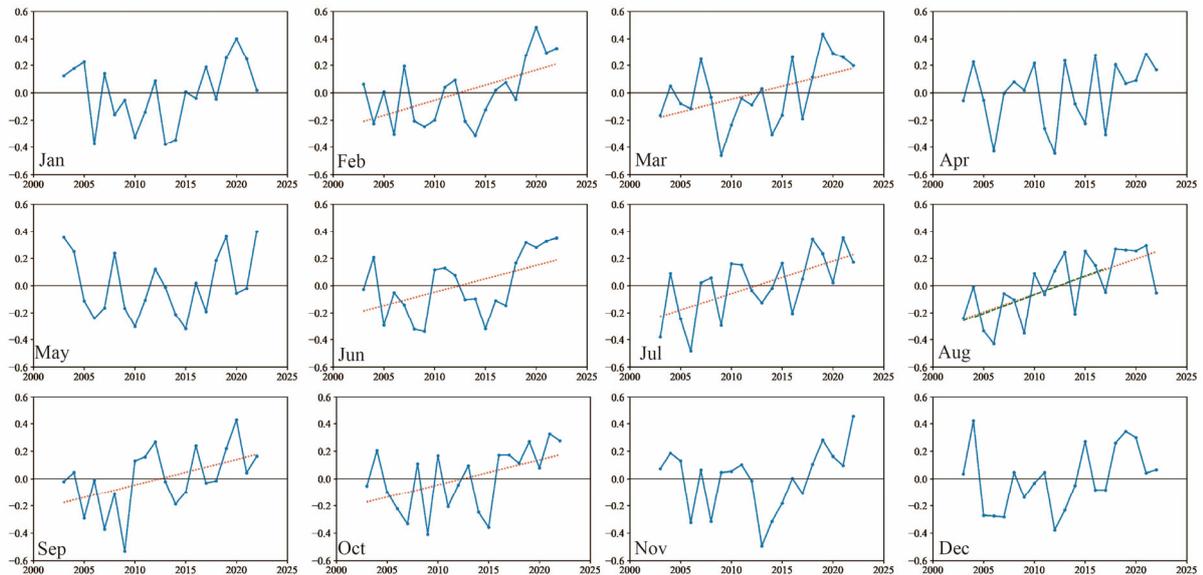


図-8 月別の水温の EOF 解析によるモード 1 の(a) 空間分布, (b) 時間変動. 時間変動は, 有意水準 5% の t 検定で経年的に有意な傾向がみられた場合に回帰直線を赤点線 (期間: 2003~2022 年) と緑点線 (期間: 2003~2017 年) で示している.

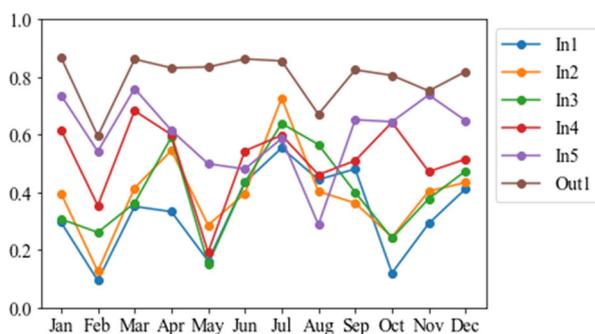


図-9 東京湾周辺の各地点と伊豆大島南西部の Out1 との間の月平均水温の相関係数。

(2) 伊豆大島南西部の水温変動の要因について

月別のEOF解析によるモード1の空間成分（図-8a）は、伊豆大島南西部を中心とした地点で変動が大きい傾向を示した。伊豆大島南西部周辺の水温については、既存研究（Kawabe and Yoneno, 1987）から黒潮流路の影響を受けていると考えられ、実際にOut1の水温は黒潮の大蛇行の有無によって有意に差があった（表-2）。また、水温の変動のしやすさには季節性がみられた（図-8a）。しかしながら、黒潮の流路の季節変動に関しては、著者らの知る限り、直接的に明示した報告例は見当たらず、これが、黒潮流路の変動によって形成されたものとは考えにくい。

伊豆大島周辺海域では、力学的不安定を引き起こすような水塊密度の鉛直分布がある場合に独特な流動構造が形成されることが知られている。すなわち、黒潮がこの周辺に分布する海嶺上を通過する際、黒潮がこの密度分布と相互作用を引き起こして、水塊が鉛直的に混合される（Masunaga et al., 2019; Masunaga et al., 2020）。また、黒潮によって周辺に発生するサブメソスケール渦も水塊の鉛直混合に影響すること、そしてこのサブメソスケール渦は冬季に発達することが分かっている（内山ら, 2013b; 増永ら, 2020）。このような作用が季節的に伊豆大島周辺で作用した結果、月別のEOF解析の時空間分布に季節性が見られたのかもしれない。

(3) 外洋水の水温が湾口水温に影響している可能性

伊豆大島南西部のOut1と湾口のIn5との間の水温の高い相関により（図-9）、伊豆大島南西部にもたらす水温上昇の影響が湾口にまで及んでいることが強く示唆された。暖水が湾口へ波及することについては、これまで既存の研究で言われてきたが（日向ら, 2001; 日向ら, 2003）、本論文の結果は、この現象が突発的な偶然のも

ではなく、いつでも起こり得ること示している。

さらに、これらの間の相関の季節性は、この暖水波及の季節性を示唆している。湾口への暖水波及に関する報告は、夏季や冬季に関するものであり（日向ら, 2001; 日向ら, 2003）、やはり季節性がある可能性がある。そのメカニズムについては、外洋水温の季節変動が支配している可能性や湾内からの影響に季節性がある可能性が考えられるが、実際にはよく分からない。

(4) 外洋水の水温が湾内水温に影響している可能性

伊豆大島南西部のOut1と湾内のIn1との間の水温の低い相関は（図-9）、湾内の伊豆大島南西部の変動との関係が湾口に比べて薄いことを示している。しかし、7、8月の相関係数が0.6を超えていることは、これらの月に黒潮大蛇行の影響が湾内へ波及している可能性を示している。

3.5 まとめ

本章で得た結論は以下のとおりである：1) 季節性を除いた東京湾周辺の水温は、伊豆大島南西部で時間的に大きく変動する特徴を有し、2) 高水温が継続する期間は黒潮大蛇行期間に一致することを明らかにした。また、3) 伊豆大島南西部及び東京湾口の間では水温の空間的な連続性があり、かつ、水温に高い相関がみられた。4) 東京湾内及び伊豆大島南西部との間に水温の相関は、季節によっては湾口と同程度であったが、湾口よりも低い季節が多く見られた。

これらの結果は、黒潮が大蛇行流路を取ることで東京湾周辺の外洋域の水温上昇がもたらされた可能性を示している。また、その影響は、東京湾の湾口にまで強く及び、湾内にも及んでいる可能性がある。これらの可能性については、第4章で考えられる他の候補要因と比較して検証する。

表-2 東京湾周辺の各地点の月平均水温の黒潮大蛇行時 (LM) と非大蛇行時 (NLM) を分けた値のウィルコクソンの順位和検定の p 値 (有意性は p 値<0.05 で判定. 有意性がみられる場合を赤色で色付けしている), LM 時, NLM 時の平均値とその差.

(a)湾内 (In1)

項目	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
p 値	0.779	0.904	0.091	0.207	0.091	0.033	0.261	0.851	0.757	0.588	0.014	0.393
LM 平均値	9.86	9.14	11.32	14.79	19.00	22.51	26.07	27.79	24.59	20.34	17.37	13.17
NLM 平均値	9.79	9.02	10.44	13.89	18.16	21.34	25.61	27.49	24.82	20.18	16.60	12.72
平均の差	0.07	0.11	0.87	0.90	0.84	1.18	0.46	0.30	-0.23	0.17	0.77	0.45

(b)湾内 (In2)

項目	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
p 値	0.602	0.779	0.009	0.353	0.579	0.062	0.058	1.000	0.323	0.699	0.135	0.115
LM 平均値	10.68	9.63	11.60	14.55	18.55	22.11	25.70	26.70	23.97	20.50	17.33	13.84
NLM 平均値	10.32	9.43	10.73	13.97	17.88	21.03	24.61	26.57	24.58	20.17	16.66	13.21
平均の差	0.36	0.21	0.87	0.57	0.66	1.08	1.09	0.13	-0.61	0.33	0.68	0.63

(c)湾内 (In3)

項目	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
p 値	0.968	0.831	0.207	0.179	0.968	0.015	0.241	0.305	0.877	0.699	0.135	0.938
LM 平均値	11.32	10.33	11.78	14.57	17.35	21.40	24.55	26.25	24.05	20.47	17.77	14.33
NLM 平均値	11.24	10.14	11.28	13.82	17.40	20.12	23.74	25.76	24.24	20.39	17.22	14.01
平均の差	0.08	0.19	0.50	0.75	-0.06	1.28	0.81	0.49	-0.19	0.07	0.55	0.32

(d)湾口 (In4)

項目	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
p 値	0.153	0.002	0.036	0.779	0.968	0.062	0.126	0.208	0.699	0.081	0.227	0.183
LM 平均値	15.15	15.01	14.10	14.84	17.49	20.96	24.17	25.72	24.38	21.77	19.45	17.03
NLM 平均値	14.41	13.18	12.88	14.65	17.50	20.21	23.46	25.20	24.16	20.98	18.83	16.24
平均の差	0.73	1.83	1.22	0.19	-0.01	0.74	0.71	0.52	0.22	0.79	0.61	0.79

(e)湾口 (In5)

項目	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
p 値	0.091	0.006	0.076	0.026	0.659	0.091	0.241	0.069	1.000	0.046	0.183	0.081
LM 平均値	16.52	15.82	15.37	16.46	18.65	21.14	24.18	26.00	24.89	22.84	21.01	18.35
NLM 平均値	15.69	14.42	14.40	15.55	18.24	20.17	23.36	25.57	24.72	22.02	20.42	17.43
平均の差	0.83	1.40	0.97	0.90	0.41	0.97	0.82	0.44	0.17	0.82	0.59	0.93

(f)伊豆大島南西部 (Out1)

項目	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
p 値	0.009	0.002	0.006	0.002	0.062	0.051	0.008	0.082	0.002	0.000	0.000	0.000
LM 平均値	18.56	17.81	17.72	17.96	20.44	22.81	25.90	26.82	26.92	25.04	23.05	20.66
NLM 平均値	16.52	15.59	15.78	16.66	19.09	20.97	23.90	25.63	24.82	22.85	21.16	18.51
平均の差	2.04	2.23	1.95	1.30	1.35	1.84	2.00	1.19	2.10	2.19	1.89	2.14

表-3 東京湾周辺の各地点の月平均水温の長期トレンドの傾き (°C/年) (2003年～2022年). 色付きが有意な変動を持つ場合を示す (赤色は上昇傾向, 青色が下降傾向).

地点名	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
In1	0.007	0.012	0.079	0.114	0.140	0.074	0.094	0.076	-0.005	0.013	0.001	-0.036
In2	0.030	0.026	0.069	0.068	0.090	0.072	0.115	0.054	-0.019	0.031	0.001	-0.019
In3	0.004	-0.002	0.035	0.085	0.049	0.072	0.093	0.102	0.019	0.015	-0.013	-0.021
In4	-0.014	0.121	0.084	0.036	0.031	0.033	0.060	0.063	0.034	0.050	-0.006	-0.004
In5	0.037	0.104	0.069	0.067	0.041	0.088	0.127	0.044	0.039	0.088	0.014	0.044
Out1	0.050	0.127	0.097	0.062	0.035	0.145	0.168	0.151	0.138	0.105	0.105	0.112

表-4 東京湾周辺の各地点の月平均水温の長期トレンドの傾き (°C/年) (2003年～2017年). 色付きが有意な変動を持つ場合を示す (赤色は上昇傾向, 青色が下降傾向).

地点名	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
In1	0.007	0.001	0.036	0.111	0.153	-0.033	0.177	0.119	-0.034	0.036	-0.061	-0.088
In2	0.026	0.022	0.029	0.048	0.074	-0.018	0.092	0.087	0.015	0.088	-0.069	-0.072
In3	0.017	-0.025	-0.004	0.068	0.078	-0.038	0.122	0.115	0.037	0.037	-0.081	-0.044
In4	-0.105	0.057	-0.021	0.044	0.030	-0.055	0.014	0.072	0.034	0.026	-0.121	-0.063
In5	-0.014	0.037	0.000	0.012	-0.015	0.011	0.160	0.045	0.048	0.084	-0.091	-0.020
Out1	-0.125	-0.030	-0.051	-0.042	-0.139	-0.024	0.071	0.108	0.046	-0.021	-0.036	-0.019

4. 東京湾の湾内と湾口の水温変動に影響する要因

4.1 はじめに

前章では東京湾周辺の水温が、湾口では外洋と同期して変動し、湾内ではその同期が弱まるものの、外洋からの影響を受けて変動している可能性を見出した。本章では、外洋だけでなく、大気温と河川流量を考慮して、これらの水温変動に影響する要因の特定を試みた。

4.2 方法

東京湾の湾内と湾口の水温として、湾内の3地点 (In1～In3) と湾口の2地点 (In4及びIn5) のSSTを考え、これらを目的変数とした重回帰分析を行った。説明変数としては、外洋水の水温、大気温、そして河川流量を考慮した。外洋水の水温は、伊豆大島南西部 (Out1) のSSTで代表させ、大気温は横浜気象台における月平均気温で代表させた。横浜気象台の大気温を用いた理由については2.2で説明している。河川流量は、水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) の東京湾へ流れ込む主要河川の4つの観測点 (石原, 亀の子橋, 菅間, 流山) の河川流量データの和を用いた。ただし、解析対象としたデー

タは、SSTデータに欠測が多く1日ごとのデータセットが得られないため、目的変数と説明変数のいずれも月平均値を利用した。重回帰分析から分かる説明変数と目的変数の関係性については、本論文では効果として記載した。

重回帰分析は、季節性の影響を除去するため、月ごとに分けて実行した。説明変数については、上述の外洋水の水温、大気温、そして河川流量の同じ月のデータだけでなく、熱輸送に係る時間的遅れを考慮するため、目的変数の月に対して1か月前のデータも考慮した。この時間をずらすことは、前述した海水温から大気温への相互作用の影響を除去する効果もある。

水温、大気温、そして河川流量のそれぞれが目的変数の月と同じ月である場合と1か月前である場合を組み合わせたグループの数は計8つある (表-5)。説明変数を含まない帰無モデルを除くと、各グループの中から、任意の説明変数を選択した組み合わせの数は計7個ある。異なるグループ間でも同じ組み合わせが存在するため、この重複を除くと全組み合わせの数は計26個となる。それぞれの説明変数の組み合わせを1つのモデルとし、帰無モデルも含めた計27個のモデルを重回帰分析した。

それぞれの重回帰分析モデルの良さは、AIC (Akaike's

表-5 東京湾の湾内と湾口の水温変動に影響する要因の検討を目的とした重回帰分析の説明変数の組み合わせパターンと使用した説明変数.

グループ名	説明変数
Group 1	同月の横浜気象台の気温, 同月の Out1 の SST, 同月の河川流量
Group 2	同月の横浜気象台の気温, 同月の Out1 の SST, 1 か月前の河川流量
Group 3	同月の横浜気象台の気温, 1 か月前の Out1 の SST, 同月の河川流量
Group 4	同月の横浜気象台の気温, 1 か月前の Out1 の SST, 1 か月前の河川流量
Group 5	1 か月前の横浜気象台の気温, 同月の Out1 の SST, 同月の河川流量
Group 6	1 か月前の横浜気象台の気温, 同月の Out1 の SST, 1 か月前の河川流量
Group 7	1 か月前の横浜気象台の気温, 1 か月前の Out1 の SST, 同月の河川流量
Group 8	1 か月前の横浜気象台の気温, 1 か月前の Out1 の SST, 1 か月前の河川流量

information criterion; Akaike, 1974) により評価した. AIC は, 本来, 最適なモデルを評価するための規準であり, 評価するモデルの中で最も小さなAICを取るモデルを最適モデルとして評価する. しかし, データ量が十分でない場合や説明変数間の独立性が不確かな場合では, 明瞭な規準として機能しない事もある. そこで, 本論文では, 最適モデルだけでなく, それぞれのモデルにAICの差に応じた重み付けをして平均化させたモデル (以下, 平均モデル; Burnham and Anderson, 2022) も用いて, 説明変数の確からしさを検討した. 平均モデルによる説明変数の選択の解釈は保守的であり, これで有意な説明変数は, その効果の確からしさは強いものと判断できる. 平均モデルは, 例えば, 相関が強い底質の中で, 底生生物の多様性に影響する因子の推定に使われている (Hosokawa et

al., 2021).

4.3 結果

(1) 外洋水の水温, 大気温, 河川流量

外洋の水温は, 季節的に変化があり, 月の中での変動幅は3.6°Cから6.8°Cの範囲となっている (表-1c). 大気温は季節的に変動し, 月の中での分布は4月と6月を除いて箱ひげ図の中に収まっている (図-10a). 河川流量は, 11月以降から冬季にかけて小さく, 春季から10月までにかけて大きい (図-10b). また, 外れ値が見られることも河川流量の特徴である.

(2) 説明変数が有意になる場所と季節

各地点の水温に対して, 外洋の水温との関係が有意になる月の数は, 湾口のIn5で顕著に多く, 湾内, さらには

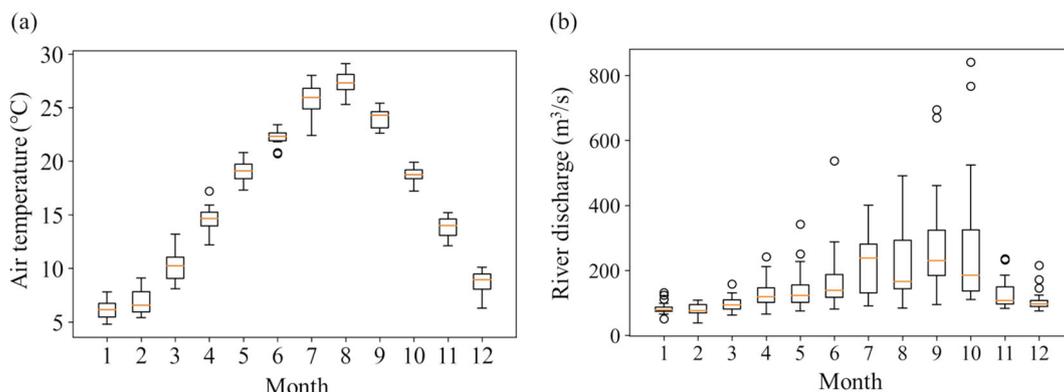


図-10 解析対象期間 (2003~2022年) における(a)横浜気象台の月平均気温の季節変動, (b)東京湾の月平均河川流量の季節変動. それぞれ box-and-whisker plot で分布を描いている.

湾奥へ向かうに従って少なくなっていた（表-6）。その効果は、2月、3月、4月、8月、及び11月では平均モデルでも有意である（表-6）と判断できる。

一方、大気温との関係が有意になる月の数は、湾内の地点で多い（表-7）。また、その効果は多くの月で平均モデルでも有意である。大気温が有意になる月は、湾口ではIn4の方がIn5よりも多い。

河川流量と水温との関係が有意になる月の数は、外洋の水温と大気温が有意になる月の数に比べて明らかに少ない（表-8）。しかし、湾内の地点では冬季に有意になる傾向にあり、平均モデルでも有意になる場合もあった。冬季において効果が見られた河川流量は、水温よりも1か月前のデータであることが特徴的である。

(3) 湾口の水温変動のモデル

外洋の水温の効果は、In5においていずれの月でも最適モデルで選択されており、その効果は正であった（図-11）。また、その効果は、In4においても4月と5月を除く月において最適モデルで正であった（図-12）。

大気温の効果は、In5で4月、7月、9月において最適モデルで外洋水の水温と同程度の効果を有していた。一方、In4におけるその効果は、In5と比べると、外洋水の効果よりも大きな月も見られる。

河川流量は、In4及びIn5で3月と12月に負の効果を持っていた。この結果は、河川流量が多い年に例年よりも水温が低くなったことを意味している。

表-6 重回帰モデルにおいてOut1が有意な説明変数として選択されたケース一覧。同月が選択された場合を○、1か月前が選択された場合を◎としている。赤色は、平均モデルと最適モデルの両方で有意となった場合、黒色は最適モデルでのみ有意となった場合、青色は平均モデルでのみ有意となった場合。

説明変数	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
In1					○	○		○				
In2	○				○	◎		◎				
In3			◎		○	◎	○	○				
In4	○	○	○				○	○	○	○		○
In5	◎	○	○	○	○	○	○	◎	○	○	○	○

表-7 重回帰モデルにおいて気温が有意な説明変数として選択されたケース一覧。詳細説明については表-6を参照。

説明変数	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
In1	○	○	◎	○	○		○		○	○	○	○
In2	◎	○	◎	○	○	○	○	○	○	○	○	○
In3	◎	○	◎	◎	○		○		○		○	○
In4				◎				○	○	◎	○	○
In5				○			○	◎	○			○

表-8 重回帰モデルにおいて河川流量が有意な説明変数として選択されたケース一覧。詳細説明については表-6を参照。

説明変数	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
In1	◎	◎	○			◎				○	◎	◎
In2		◎								○	◎	
In3		◎									◎	
In4			○									
In5			○	◎				◎				○

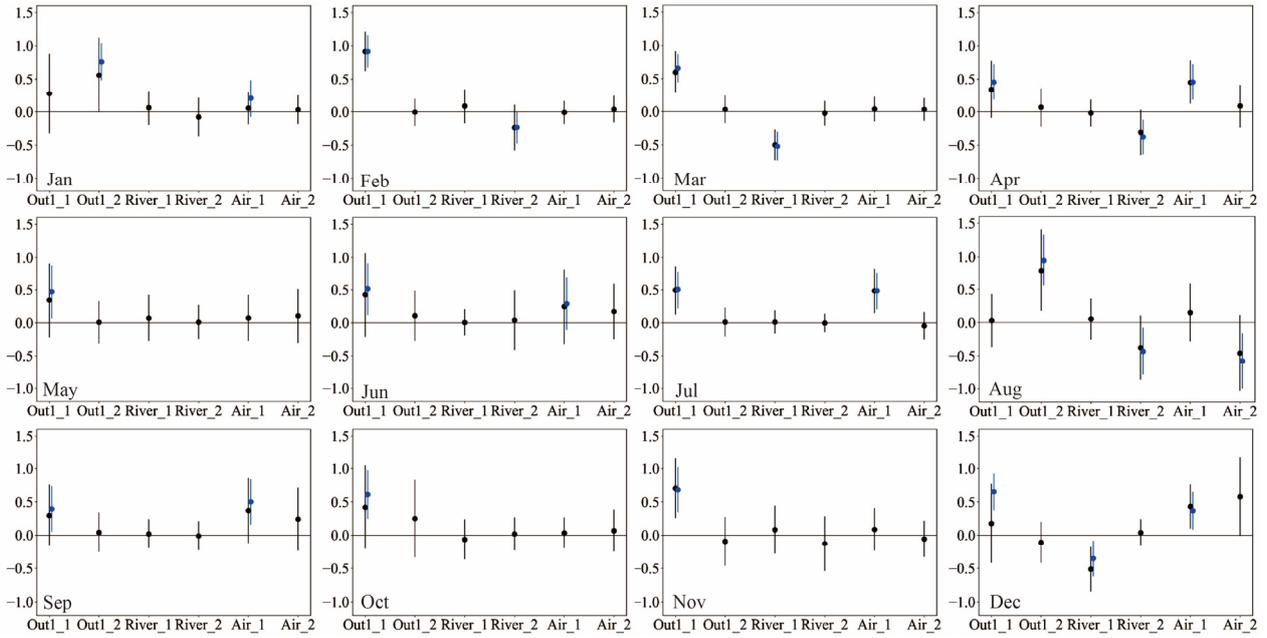


図-11 In5における重回帰モデルの説明変数係数の値. 点は係数の平均, 棒線は平均±1.96SE (標準誤差). 黒が平均モデルの結果, 青がベストモデルの結果. Out1_1: 同月の Out1 の SST, Out1_2: 1 か月前の Out1 の SST, River_1: 同月の河川流量, River_2: 1 か月前の河川流量, Air_1: 同月の横浜気象台の気温, Air_2: 1 か月前の横浜気象台の気温.

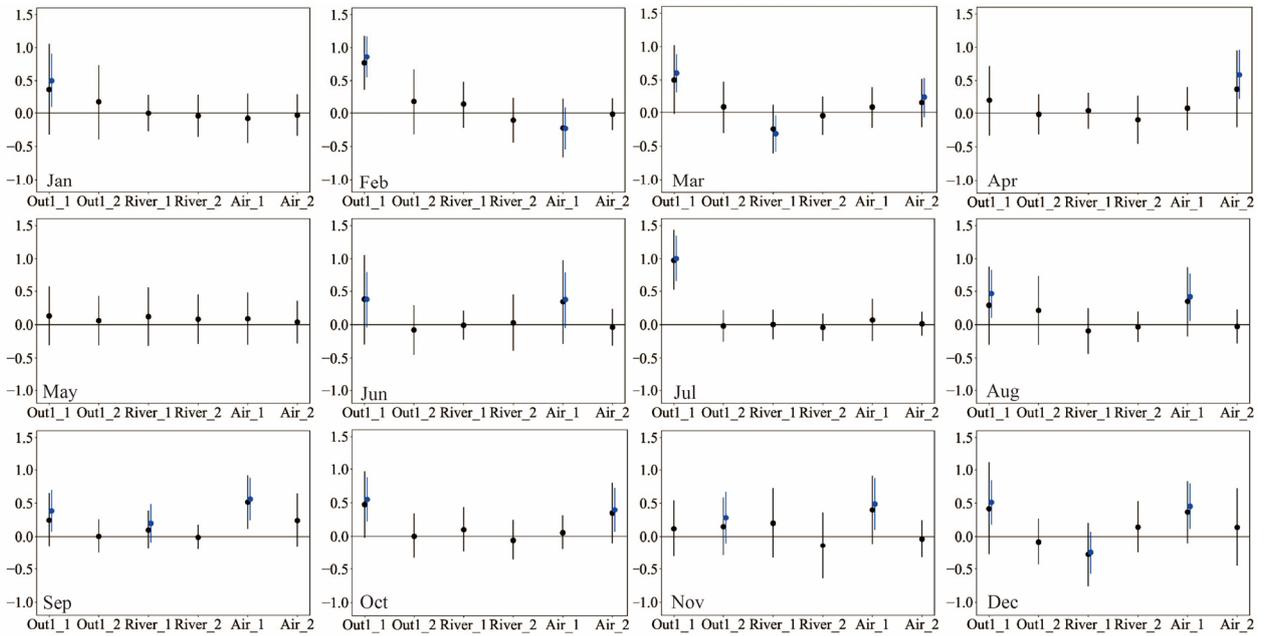


図-12 In4における重回帰モデルの説明変数係数の値. 詳細説明については図-11を参照.

(4) 湾内の水温変動のモデル

湾内における大気温の効果は、最適モデルで正であった (図-13, 14, 15). 湾内の大気温は、冬季においては表層水温よりも低くなるが、夏季ではその差はほとんど見られなくなった (図-16). 外洋水の正の効果もいくつかの月で見られ、In1の7月の最適モデルでは大気温の効果と同等な効果があり、8月の最適モデルでは大気温の効果よりも大きかった (図-13). 河川の効果は、湾内では冬季に正になり、負の効果は6月、8月、及び9月に見られた (図-13, 14, 15). つまり、湾内では、河川流量が多い年では、冬季では例年よりも水温が高くなり、6月、8月、及び9月では例年よりも水温が低くなっていることが統計的に示されている。

4.4 考察

(1) 外洋水の湾口表層水温への影響

重回帰分析は、外洋の水温変動が湾口の水温変動をよく説明できる因子であることを示した。東京湾口付近における外洋水の挙動については、東側から流入することがよく知られており (長島・岡崎, 1979; 八木ら, 2003), 前章では、外洋と湾口の水温が同期して変動していることまでの過程を示した。本章の解析は、さらに、大気温と河川流量と比べても、外洋の水温変動が湾口付近の水温変動に対して支配的であることを明確にしたことになる。また、本解析結果は、この挙動が一年を通し

て起きていることも明らかにした。

東京湾口における外洋水の東側からの流入はコリオリによって説明される。このことから考えると、In5に対して西側に位置するIn4は、外洋水の影響を受けにくい地点である。また、In5に比べると外洋よりもやや離れていることもあり、In4はIn5に比べて外洋の影響を受けにくく、これらの結果、外洋水の水温が影響する月は少なくなったものと考えられる。

(2) 外洋水の湾内表層水温への影響

湾内の地点における重回帰分析の結果は、湾口に比べて外洋水温が選択される月が少ないことを示した。一方で、大気温と河川流量が説明変数として選択される月が湾口に対して増えた。

湾内への湾口域からの流入量は、河川からの流入量に対して少なくとも約20倍あることが知られているが (Hosokawa and Okura, 2022), それにもかかわらず、外洋からの流入が湾内の水質に影響していることを明確に示す知見はほとんどない。その要因の1つとして、東京湾では、三次元的に複雑な水塊構造が形成されていることが挙げられる (山尾, 2004; 鈴木, 2010; 日向ら, 2000). 湾口域から湾内への流入は水深20 mよりも深い水深帯で起きており (Hosokawa and Okura, 2022), この流入が直接波及するのは、湾内の下層である (Yanagi and Hinata, 2004). すなわち、外洋からの流入が湾内の表層に直接波及するわけではない。

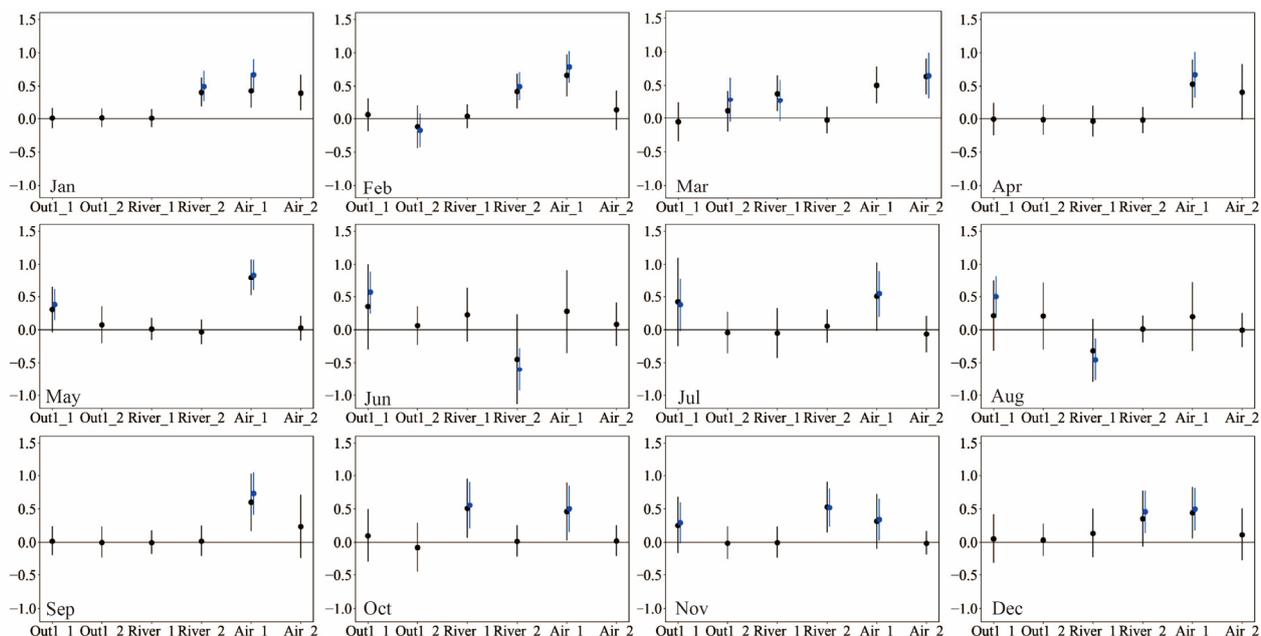


図-13 In1における重回帰モデルの説明変数係数の値。詳細説明については図-11を参照。

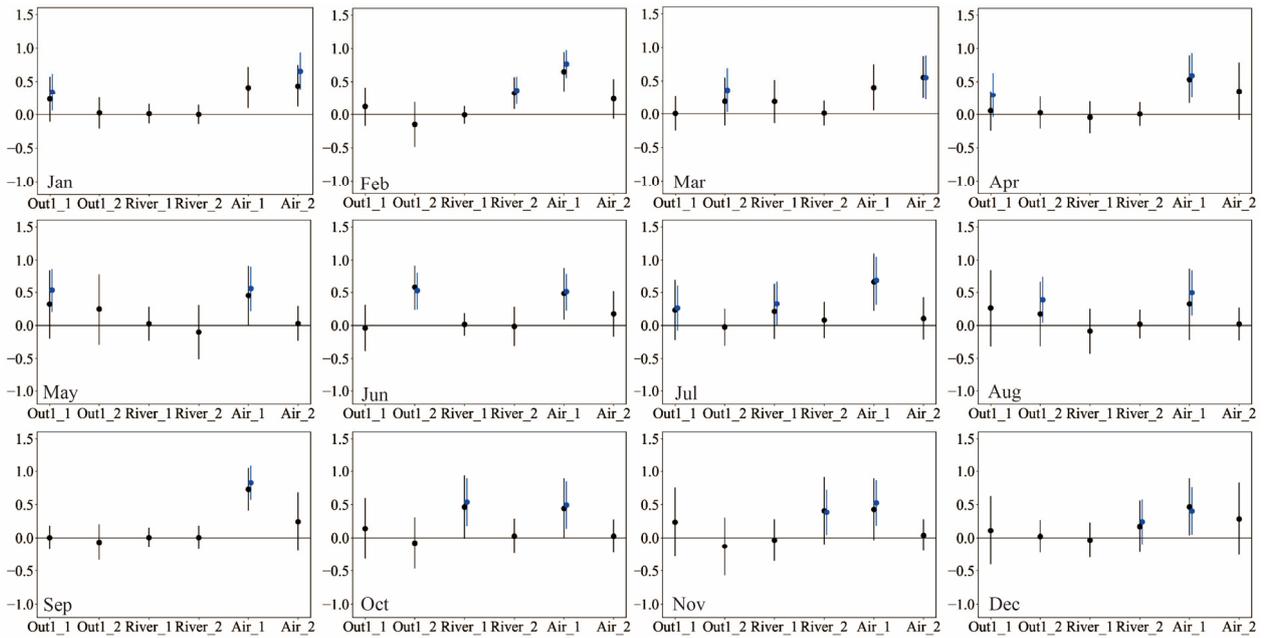


図-14 In2における重回帰モデルの説明変数係数の値。詳細説明については図-11を参照。

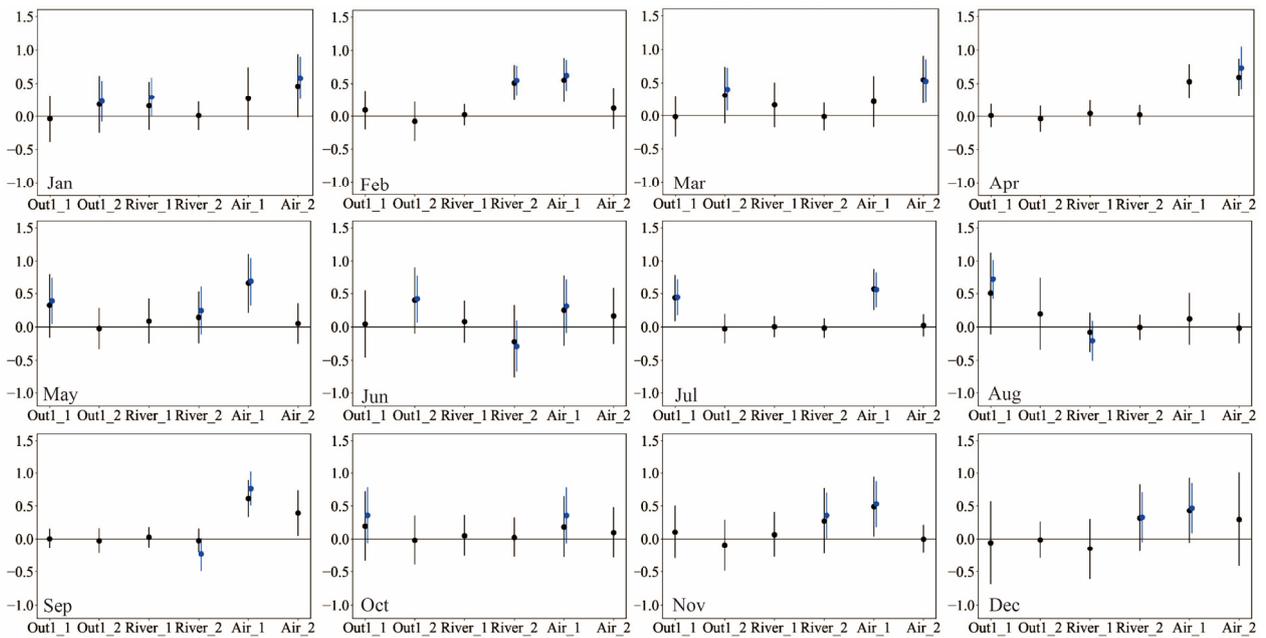


図-15 In3における重回帰モデルの説明変数係数の値。詳細説明については図-11を参照。

湾口から湾内へ流入する外洋水が湾内の表層に影響するのであれば、下層に流入した後に湾内での混合や熱の鉛直拡散により時間をかけて起きていることが予想される。そうであれば、同じ月もしくは1か月前の外洋の水温を説明変数として考慮した本モデルでは、その効果を見出すことはできない。しかし、外洋水の影響が湾内でも検出され、場合によっては大気温と河川流量の効果と同等もしくはそれ以上の効果があることを見出した。このことは、外洋水の湾内への影響を理解する上で重要な点である。

(3) 河川流量の影響

湾内の水温に対する河川流量の影響が季節によって正負が逆転していた結果は興味深い点である。夏季の東京湾内では、表層で温かく底層で冷たくなる水温の鉛直構造が生じる。その構造は、擾乱が起きることで壊されて、表層の水温が低下することはよく知られている（鈴木，2013）。すなわち、夏季に擾乱を引き起こす要因は、表層水温に対して負の効果を持つ。河川流量は一般的に降雨量との相関が強く、台風等の強い降雨と大気擾乱が同時に生起するイベントがある場合は、統計解析に基づく効果を河川からの出水による影響とそれ以外の影響に分離することは難しい。しかし、少なくとも、本論文の夏季のモデルは、この直接もしくは同時に生起した河川出水の結果を反映した可能性が高い。

一方で、冬季で見られた河川流量の効果は正であった。関東周辺における春季から秋季では、河川流量の増大は台風等のイベントに関連して生起し、河川流量の負の効果は、このイベントに伴う他の効果とともに複合的な作用を反映した可能性を考察した。しかし、冬季は、河川流量が春季から秋季に比べて小さく（図-10b）、また、擾乱を引き起こす他の因子と同時に生起することが考えにくい季節である。そもそも、冬季で見られた河川流量の効果は、1か月前の流量によるものであることから、他の因子の効果を反映しているものではなさそうである。このことから、河川流量の効果は、時間遅れで直接的に

影響したと考える方が自然である。しかし、そのメカニズムを示す知見は、今のところ見当たらない。

(4) 大気温の影響

大気温の効果は、湾内ではほとんどの月で見られた。しかし、この「統計的な効果」は、大気から湾内水温への熱輸送の因果関係を表しているとは限らず、湾内水から大気への熱輸送を反映している可能性もある。大気温の効果を選択されたのは、ほとんどが湾内水温と同じ月であり、1か月遅れの大気温が選択されたモデルはわずかであることから（表-7）、この可能性は否定できない。

大気温と表層水温の差には季節性が見られ（図-16）、この季節性は、小田ら（2008）による東京湾内における多点の時系列解析の結果と一致している。冬季において湾内水温が大気温よりも常に高いのであれば、統計的な正の効果は、湾内水から大気への熱輸送を反映している可能性がある。すなわち、冬季では、大気による冷却効果で湾内の水温が下げられている可能性がある。一方、夏季においては大気温と表層水温の差がほとんどないものの、大気温は日内変動が大きく、日中では海水温よりも大気温の方が高くなる（小田ら，2008）。このことから考えると、統計的な正の効果は、大気から湾内水への熱輸送の可能性を否定できない。

表層水温に対する大気温の統計的な正の効果は、これらの間の熱輸送の可能性を残す。しかし、湾内水と大気の両方に影響する共変量がある場合でも、やはり、統計的な効果として反映されてしまう。この共変量として効いている可能性の1つとして、短波放射が考えられる。短波放射は、表層水を温めるのと同時に地表も温める。大気温は、地表の温度の影響を受けることはよく知られた事実であり、短波放射が共変量として働いた結果、表層水温に対する大気温の統計的な正の効果が現れた可能性は十分に考えられる。しかし、それが事実だとしても、その影響を統計的に切り離すことは難しい。

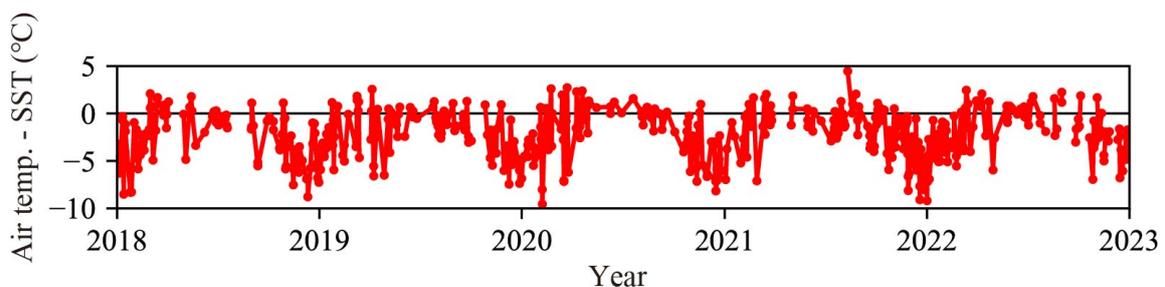


図-16 東京湾内 In1 における夜間の海上気温（Air temp.）と衛星 SST の差分の推移

(5) 湾内の水温変動には結局何が効いているか？

湾内の水温変動に対する大気温の影響については、短波放射などの共変量として働く因子の影響が大きく、それらの効果を分離することは難しい。しかし、少なくとも、月によって見られた外洋水と河川の効果はあると判断してよさそうである。

しかしながら、上で考察したとおり、外洋水の水温が湾内の水温に影響するメカニズムとして、湾内への流入後の混合や熱の鉛直拡散によるものが考えられた。このメカニズムを通じたその影響は、時間をかけて生じるであろう。そうであれば、せいぜい1か月遅れまでしか考慮していない今回のモデルではその影響を考慮することはできない。この定量性の詳細な説明は、数値解析等の手法を用いる必要がある。

4.5 まとめ

本章では、東京湾の湾内と湾口の水温変動に影響する要因の検討を目的とした重回帰分析を行った。その結果得られた本章の結論は以下のとおりである：1) 東京湾口の水温変動は外洋の水温変動によってよく説明されること、2) 湾内の水温変動は、湾口に比べると説明力は下がるものの外洋で説明できることを示した。

5. 結論

本論文では、衛星によって広域的かつ20年以上の長期にわたって観測されている SST を用い、外洋水が東京湾の水温変動に影響する要因について検討した。

第3章では、東京湾周辺の水温の時空間変動の特徴に着目することで、1) 黒潮が大蛇行流路を取ることで、東京湾周辺の外洋域の水温上昇がもたらされた可能性があり、2) その影響は東京湾の湾口にまで強く及んでいることを示した。

第4章では、外洋水の影響の程度を明らかにするため、統計的手法により大気温及び河川流量の影響と比較し、考察を深めた。この結果、3) 東京湾口の水温変動は、やはり、外洋の水温変動の影響を受けている可能性が高い。ここまでの湾口に関する知見をまとめると、東京湾口では、過去20年において水温が上昇傾向にあるものの、これは黒潮大蛇行の影響による可能性が高い。一方で、4) 東京湾内の水温変動は、河川や大気からの熱輸送もしくは短波放射の影響を相対的に強く受けている可能性がある。これらには、地球温暖化と関連している可能性はまだ残る。しかし、外洋の水温変動も影響している可能性は十分に残されている。

6. あとがき

本研究は、20年間蓄積されてきた水温データを統計解析することで、東京湾の湾口と湾内の水温が外洋水からどのように、どの程度影響を受けているのか検証し、上述の結論を得た。東京湾口への外洋水の影響があることを明確に示し、湾内についてもその可能性を示したことは、本論文による初めての成果である。これは、長期に蓄積されてきたデータのお陰である。

また、本論文で解析対象とした SST データが東京湾内の水温変動の解明に寄与したことも重要な点である。本研究の手法は、東京湾だけでなく他の半閉鎖性海域を対象とした水温変動の解明に応用できる。特に、過去に水質観測が行われていない空白域では、その応用は効果的な方法であり、本論文による解析手法は参考になるであろう。

しかし、それでも課題はまだ残る。第3章では、伊豆大島南西部を中心とした流動が季節性を持っている可能性を示したが、その理由については言及できていない。この季節性は、東京湾への外洋水の波及の影響を考える上では重要である。

また、外洋水の直接的な影響が表層水温に表れにくい可能性がある。巨大な人口を抱える東京湾周辺においては、湾内の水環境が最大の関心事であり、外洋水が間接的に影響しているのであれば、それがどのようにどの程度影響しているのか知ることが重要である。東京湾内の水温変動を理解する上では、外洋水の影響を捉えられるよう、解析領域を極力沖合まで広げ、湾内と外洋の相互作用が起きている湾口付近の流動や水質の知見を検証材料として取り入れ、かつ、三次元的な水質・流動構造を長期にわたる再現性して、長期の熱収支をうまく説明できるようモデル化を行うことが鍵になると考えられる。この上では、港湾空港技術研究所が東京湾フェリー株式会社との協力の下で実施している湾口における水質・流動の長期観測の知見 (Hosokawa and Okura, 2022) やデータ (UMI-POCHI, <https://pari.mpat.go.jp/bdhome/>) の重要性が大きいであろう。

(2023年11月6日受付)

謝辞

本研究で扱った衛星データによる海表面水温は、NASA Ocean Color (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) から取得した。大気温データは、気象庁 (<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>) から取得した。地衡流データは、Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface

Heights And Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing (<https://doi.org/10.48670/moi-00148>) のプロダクトを使用した。東京湾の河川流量データは、水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) から取得した。東京湾内の海上気温データは東京湾環境情報センター (<https://www.tbeic.go.jp/MonitoringPost/Top>) から取得した。東京湾の水温変動の要因については、海洋汚染防除研究グループの松本大輝研究官から、議論を通じて有益な知見を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 安藤春夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・山崎正 (2003) : 東京湾における水温の長期変動傾向について, 海の研究, Vol. 12, No. 4, pp. 407-415.
- 内山雄介・西井達也・森信人・馬場康之 (2013a) : 紀伊半島沿岸域における台風通過に伴う海水温低下と海洋構造変化について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69(2), pp. I_481-I_485.
- 内山雄介・石井翔大・宮澤泰正 (2013b) : 黒潮続流フロント域におけるサブメソスケール乱流の発生機構と混合効果. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69(2), pp. I_456-I_460.
- 小田僚子・神田学・森脇亮 (2008) : 直接測定に基づく東京湾海表面温度が都市の気温へ及ぼす影響, 水工学論文集, 52, pp. 283-288.
- 川辺正樹 (2003) : 黒潮の流路と流量の変動に関する研究 (2002 年度日本海洋学会賞受賞記念論文), 海の研究, 12(3), pp. 247-267.
- 黒木洋明 (2017) : 高水温が生物に与える影響について「マアナゴ」, 東京湾の漁業と環境, 第8号, pp. 31-32.
- 鈴木高二朗 (2010) : 連続観測によって観測された東京湾口と湾奥の流況・水質の特性について, 港湾空港技術研究報告, 第49巻, 第1号, pp. 27-63.
- 鈴木高二朗 (2013) : 東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす淡水流入と風の影響について, 東京大学学位論文.
- 東京湾再生推進会議 (2023) : 東京湾再生のための行動計画 (第三期).
- 長島秀樹・岡崎守良 (1979) : 冬季における東京湾の劉協と海況, 沿岸海洋研究ノート, 第16巻, 第2号, pp. 76-86.
- 二宮勝幸・柏木宣久・安藤晴夫 (1996) : 東京湾における水温と塩分の空間濃度分布の季節別特徴, 水環境学会誌, 19, pp. 480-490.
- 林俊裕 (2017) : 水温上昇がのり養殖に及ぼす影響, 東京湾の漁業と環境, 第8号, pp. 22-23.
- 林俊裕・宮山俊 (2019) : 東京湾三番瀬ノリ養殖漁場における秋季の水温変化の特徴, 千葉県水産総合研究センター研究報告, 13号, pp. 27-34.
- 伴野雅之・栗山善昭・武若聡 (2016) : 波崎海岸における汀線の長期的前進傾向, 港湾空港技術研究所資料, No. 1316.
- 日向博文・八木宏・吉岡健・灘岡和夫 (2000) : 黒潮系暖水波及時における冬季東京湾湾口部の流動構造と熱・物質フラックス, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp. 221-238.
- 細川真也・大倉翔太 (2021) : 船用風向風速計の現地における精度検証とキャリブレーション—東京湾口定期航路フェリーによる検討—, 港湾空港技術研究所資料, No. 1382.
- 増永英治・木村和久・小碓大地・張旭・内山雄介 (2020) : 粒子追跡モデルを用いた黒潮から沿岸域への物質輸送過程の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 76(2), pp. I_91-I_96.
- 八木宏・灘岡和夫・内山雄介・日向博文 (2000) : 長期連続観測に基づく東京湾・鹿島灘・霞ヶ浦の年間水温変動特性の比較, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp. 239-254.
- 八木宏・片岡理英子・山口肇・藤原建紀 (2003) : 東京湾の外海水進入特性に関する数値実験, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 931-935.
- 八木宏・石田大暁・山口肇・木内豪・樋田史郎・石井光廣 (2004) : 東京湾及び周辺水域の長期水温変動特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1236-1240.
- 山尾理 (2004) : 強成層期の東京湾奥における水質の短期変動に対する海上風の影響, 海洋情報部技報, Vol. 22, pp. 78-84.
- Akaike H (1974): A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control 6: 716-723.
- Akada H, Kodama T, Yamaguchi T (2023): Eutrophication trends in the coastal region of the Great Tokyo area based on long-term trends of Secchi depth, PeerJ 11: e15764.
- Burnham KP, Anderson DR (2022): Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach, Springer, New York.
- Donlon CJ, Minnett PJ, Gentemann C, Nightingale TJ, Barton IJ, Ward B, and Murray MJ (2002): Toward Improved Validation of Satellite Sea Surface Skin Temperature

- Measurements for Climate Research, *Journal of Climate* 15 (4): 353–369.
- Hosokawa, S, Momota K, Chariton AA, Naito R, Nakamura Y (2021): The use of diversity indices for local assessment of marine sediment quality, *Scientific Reports*, 11: 14991.
- Hosokawa S, Okura S (2022): Long-term observation of current at the mouth of Tokyo Bay, *Coastal Engineering Journal*, 64:4, 648–659.
- Kawabe M and Yoneno M (1987): Water and flow variations in Sagami Bay under the influence of the Kuroshio Path, *J.Oceanogr. Soc. Jpn.*, 43, 283–294.
- Kilpatrick KA, Podestá G, Walsh S, Williams E, Halliwell V, Szczodrak M, Brown OB, Minnett PJ, Evans R (2015): A decade of sea surface temperature from MODIS, *Remote Sensing of Environment*, Volume 165, Pages 27–41.
- Kutzbach, J. E. (1967): Empirical eigenvectors of sea-level pressure, surface temperature and precipitation complexes over North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6(5), 791-802.
- Lorenz, E. N. (1956): *Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction* (Vol. 1, p. 52). Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Meteorology.
- Masunaga E, Arthur RS, Yamazaki H (2020): Baroclinic Residual Circulation and Mass Transport Due to Internal Tides, *Journal of Geophysical Research*, Volume 125.
- Masunaga E, Uchiyama Y, Yamazaki H (2019): Strong internal waves generated by the interaction of the Kuroshio and tides over a shallow ridge, *Journal of Physical Oceanography*, Volume 49, Pages 2917–2934.
- Minnett PJ, Alvera-Azcárate A, Chin TM, Corlett GK, Gentemann CL, Karagali I, Li X, Marsouin A, Marullo S, Maturi E, Santoleri R, Saux Picart S, Steele M, Vazquez-Cuervo J (2019): Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature, *Remote Sensing of Environment*, Volume 233.
- Nakano H, Aikawa T, Hagita R, Hamada H, Hayashi T, Joshima H, Kitade Y, Horimoto-Miyazaki N, Miyazaki T, Nemoto M, Noda A, Sakaguchi M, Sukigara C, Yamada Y & Yoshida J (2023): Hydrographic structures of Tokyo Bay between 1992 and 2019 and evidence of temperature increase; observational results by the training vessel *Seiyo-Maru*, *Journal of Oceanography* volume 79, 281–294.
- Okura S, Hosokawa S (2022): Representativeness and certainty of sea surface temperature from MODIS in semi-enclosed bays, *Coastal Engineering Journal*, 64:3, 428–441.
- Walton CC, Pichel WG, Sapper JF and May DA (1998): The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites, *J. Geophys. Res.*, 103(C12), 27999–28012.
- Yanagi T, Hinata H (2004): Water exchange between Tokyo Bay and the Pacific Ocean during winter, *Ocean Dynamics*, 54, 452–459.

付録A 2003～2022年の各月における月平均SST分布.

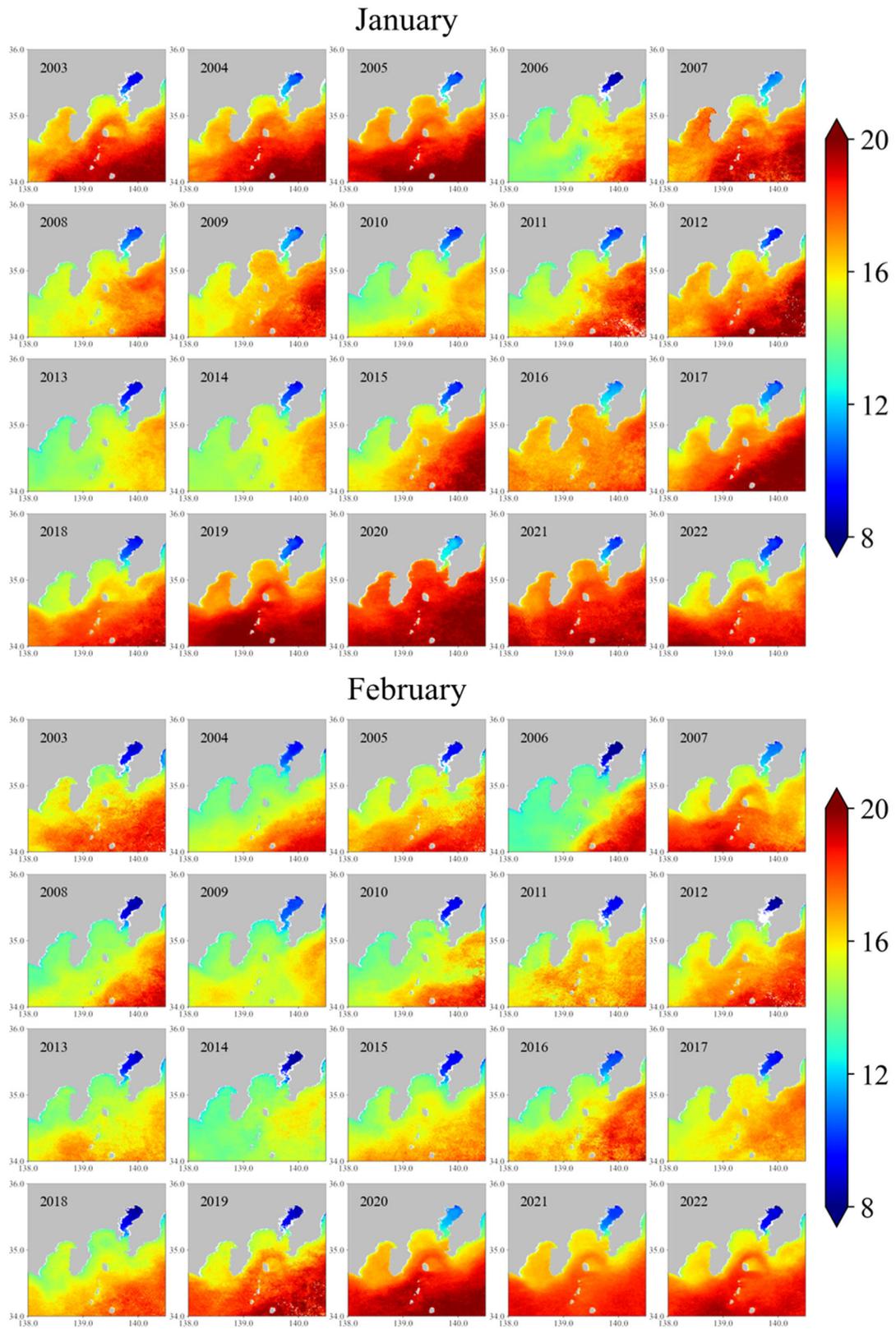


図-A.1 2003～2022年の各月における月平均SST分布 (単位は℃).

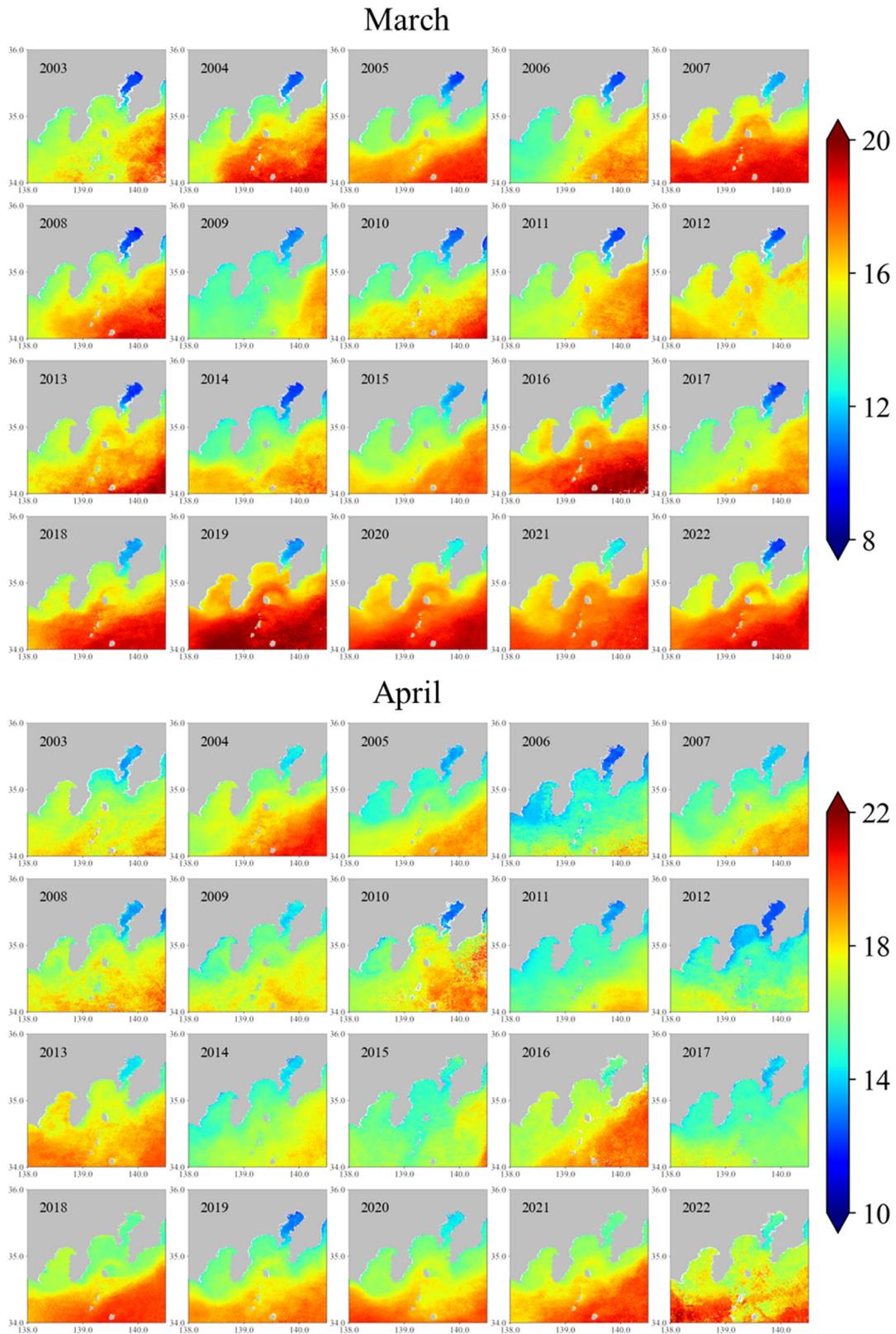


図-A.1 2003～2022年の各月における月平均 SST 分布 (単位は°C).

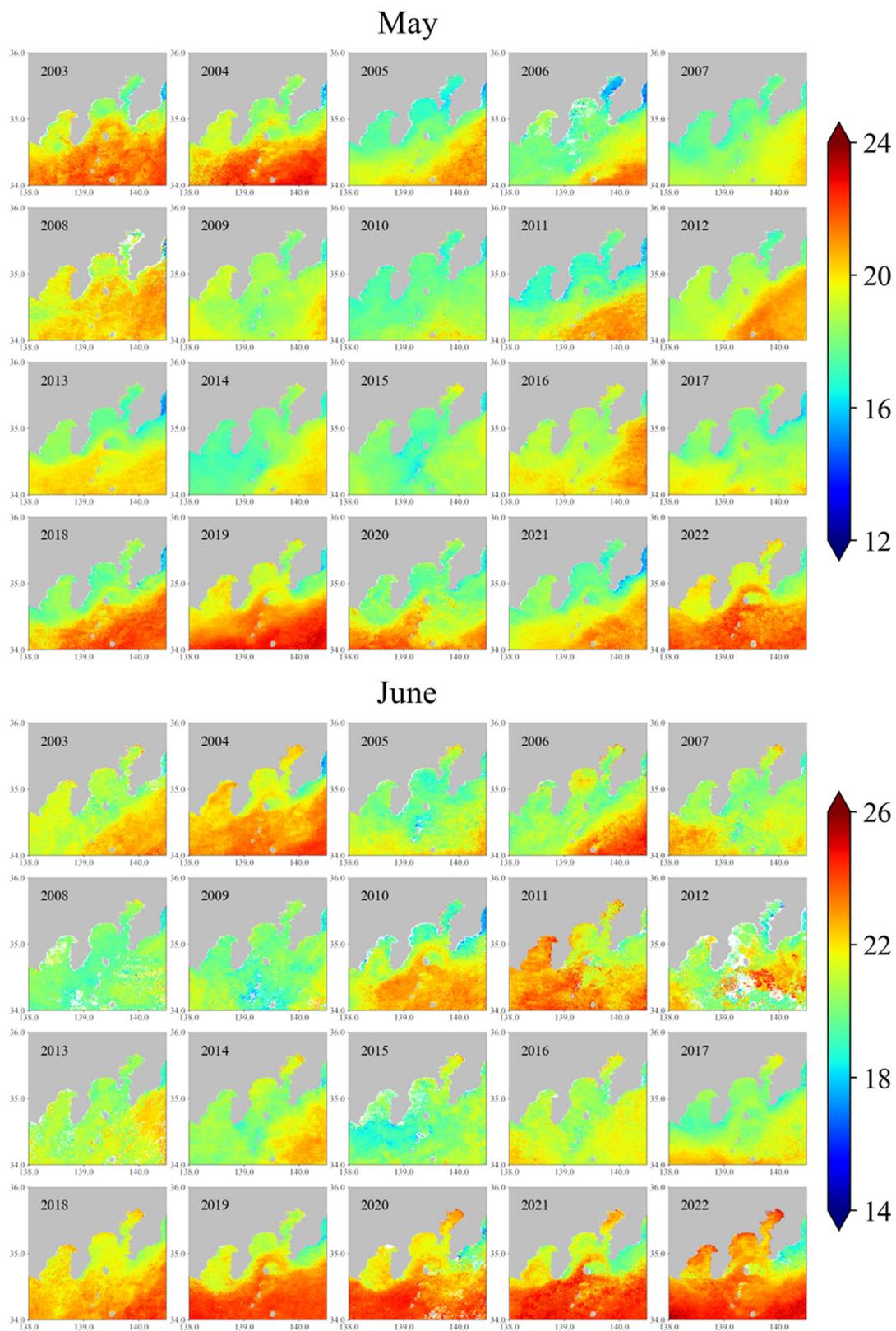


図-A.1 2003～2022年の各月における月平均 SST 分布 (単位は℃).

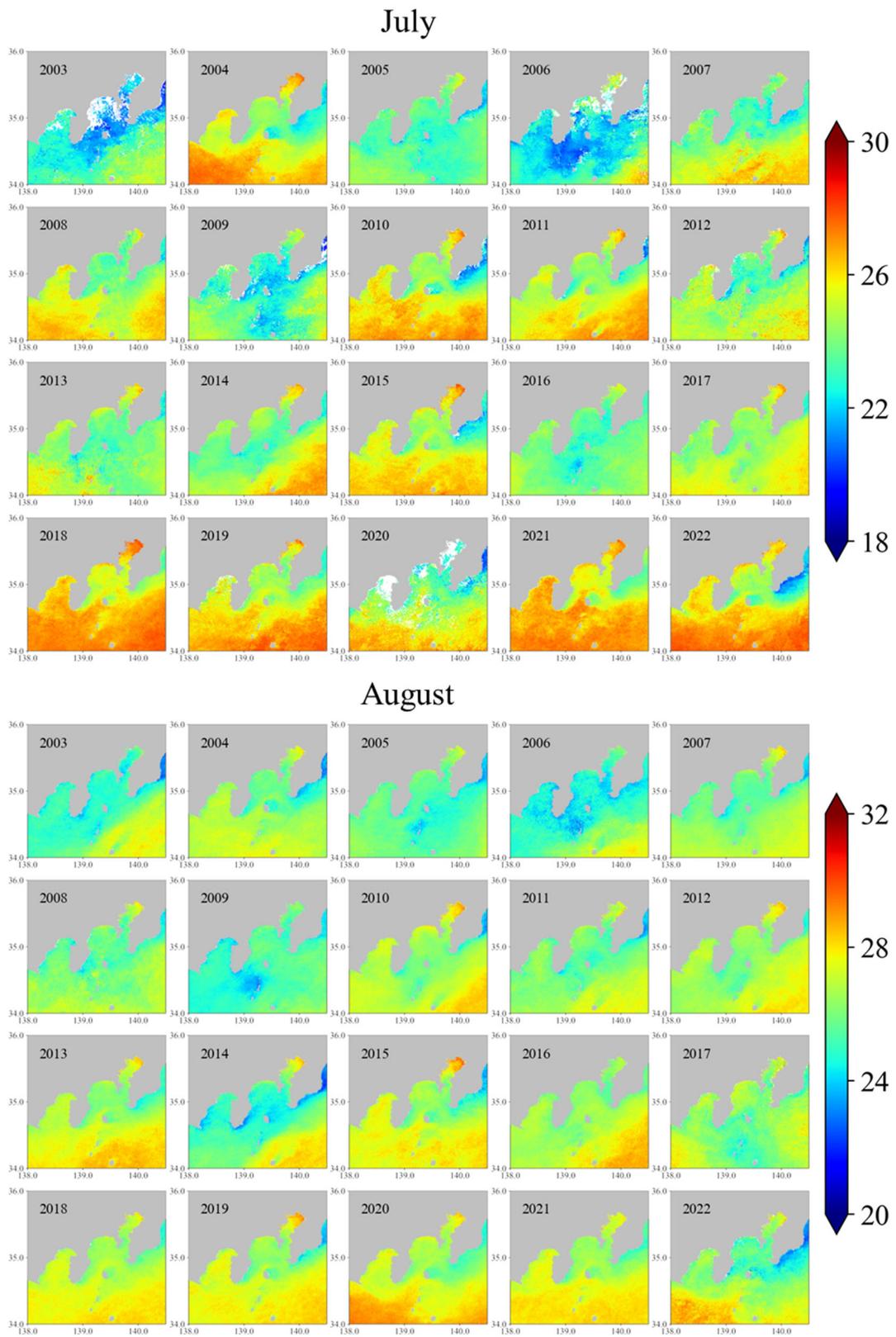


図-A.1 2003～2022年の各月における月平均 SST 分布（単位は℃）.

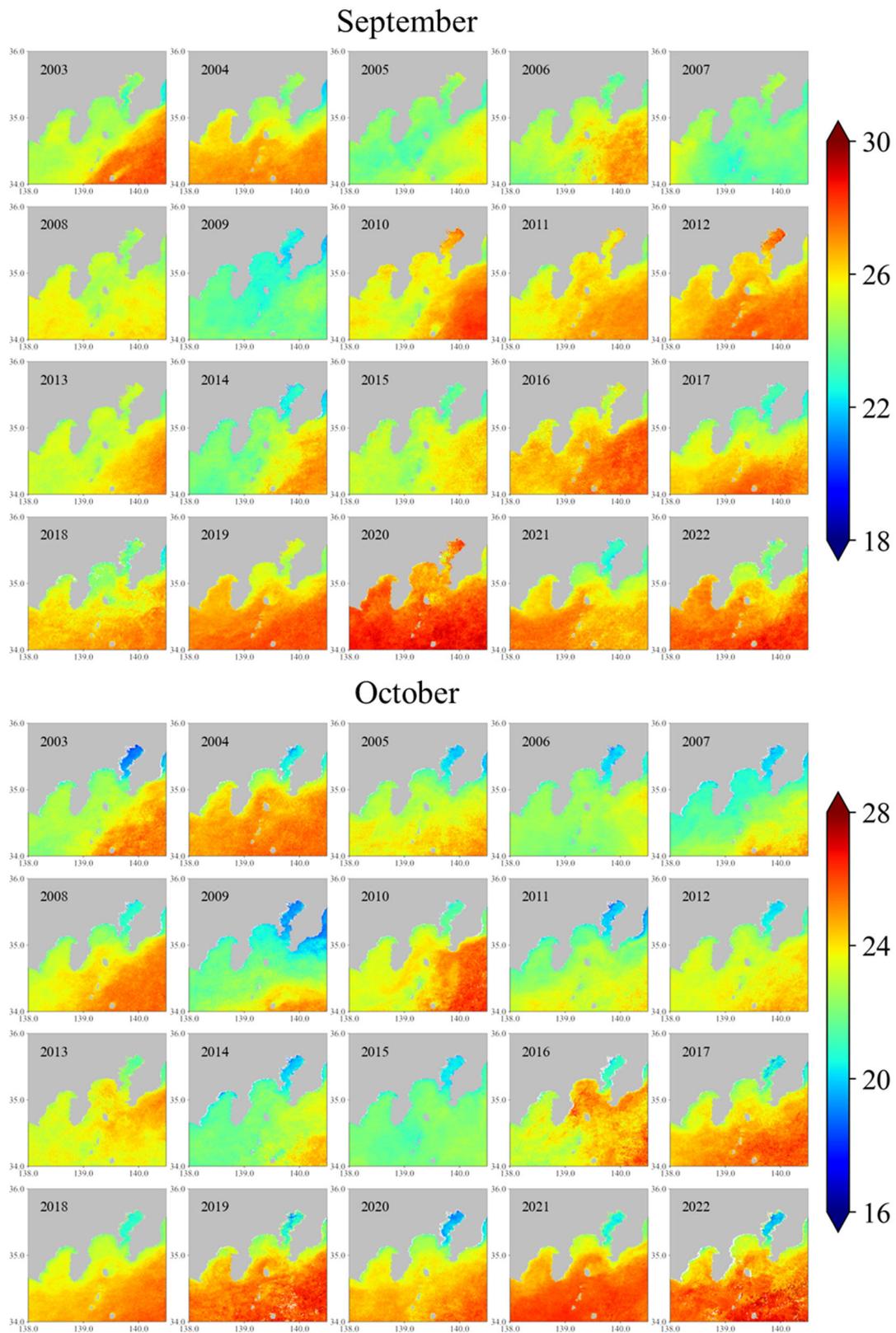


図-A.1 2003～2022年の各月における月平均 SST 分布（単位は℃）.

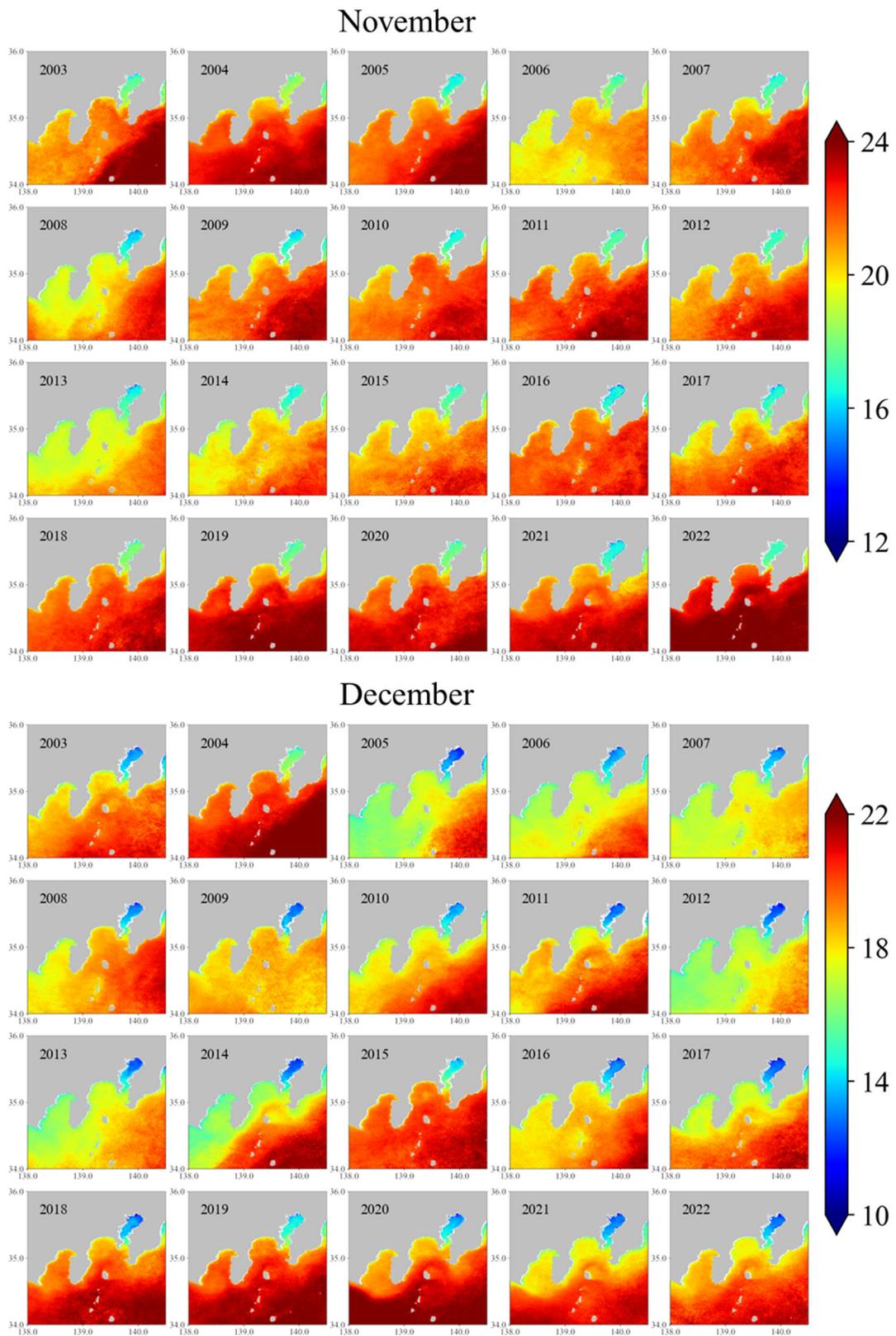


図-A.1 2003～2022年の各月における月平均 SST 分布（単位は℃）.

港湾空港技術研究所資料 No.1416

2024. 3

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <https://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2024) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。