

# 四国から関東沿岸の内湾に対する 黒潮系暖水波及に関する熱フラックス解析

渡辺 萌斗<sup>1</sup>・内山 雄介<sup>2</sup>・張 旭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>2</sup>正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup>Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University (Beijing 100871, P.R. China)

内湾環境を強く支配する水温場に対する外洋影響を定量的に評価するために、3次元海洋流動モデルを用いて黒潮流路変動に伴う大阪湾・伊勢湾・駿河湾・相模湾・東京湾への黒潮系水塊の波及効果を解析した。潮汐や河川の影響を排除し、各湾口断面を通過する熱フラックスを求めることで海流などによる各湾への外洋影響を抽出した。各湾口での熱交換には、季節変動成分を主体する平均熱フラックス (MHF) が渦成分よりも支配的であり、相模湾以東では黒潮本流から分岐した暖水が大島西水道を通過して直接波及し、黒潮接岸期にMHFが強化されることで流路変動と強く相関していた。一方、大阪湾～駿河湾では地形に拘束された水平循環流によって波及効果が弱化し、また、各湾の閉鎖度によって内湾への熱流入・流出傾向に差が生じるなど重要な知見を得た。

**Key Words :** Kuroshio, bay mouths, heat exchange, lateral mean heat flux, JCOPE2-ROMS model

## 1. はじめに

我が国の太平洋沿岸域における沿岸海洋環境を支配する水温場に対する黒潮による暖水波及の影響は極めて大きい。Kamidairaら<sup>1)</sup>は、黒潮周辺に発達するサブメソスケール渦によって黒潮横断方向への熱輸送が促進され、黒潮暖水がその流軸から約150 kmも離れた琉球諸島へ輸送されることを示した。日向ら<sup>2)</sup>は、東京湾では狭隘な湾口を介して湾内外での熱や物質交換が有意に生じ、さらにはその影響が湾奥部にまで達することを示すとともに、湾口での海底直上を含む流動構造の再現性が東京湾数値モデルの成否を左右するとしている<sup>3)</sup>。したがって、内湾環境を精度良くモデリングするためには、湾口部に開境界を設定するのではなく、外洋や黒潮影響を同時に解くように計算領域を極力沖合まで広げるとともに、外洋における3次元的な流動や熱輸送を長期にわたって精度良く再現することが同時に求められる<sup>4,5)</sup>。

加えて、複数の湾が隣接する海域では、外洋から内湾のみならず、ある内湾から別の内湾へと波及する熱輸送も存在することが知られている。日向ら<sup>6)</sup>は、相模湾において暖水流入が強化されて循環流が強化される際に、暖水の一部が東京湾湾口部にまで到達することを示した。そこで本研究では、湾と外洋を統一的に表現する単一の

数値モデルを用いて、これら複数の湾口での熱交換を俯瞰的に評価し、比較することを試みた。具体的には、太平洋に面した五つの湾（東京湾、相模湾、駿河湾、伊勢湾、大阪湾）を対象として、高解像度広域3次元海洋流動モデルによる再解析値を用いて熱フラックス解析を実施した。黒潮から各湾口までを同時に解析することで、黒潮系暖水がその流路から沿岸域、さらには各湾口まで輸送される過程を把握するとともに、地形が熱輸送に与える影響、黒潮流路変動（蛇行・非蛇行）と湾口熱交換との関係を解析し、各湾における黒潮影響の差異を熱的な観点から評価した。

## 2. 研究方法

### (1) JCOPE2-ROMS領域海洋循環モデル

本研究では、JCOPE2海洋再解析データ（水平解像度約10 km）の日平均値を初期条件・境界条件として、領域海洋循環モデルROMSを用いた1-way offlineネスティングにより解像度3 kmのROMS-L1領域へとダウンスケーリングしたJCOPE2-ROMS再解析値を使用した（図-1、表-1）。助走計算期間を除く計算期間は2011年1月～2015年12月であり、このうち2011年1月～2014年11月までの約4

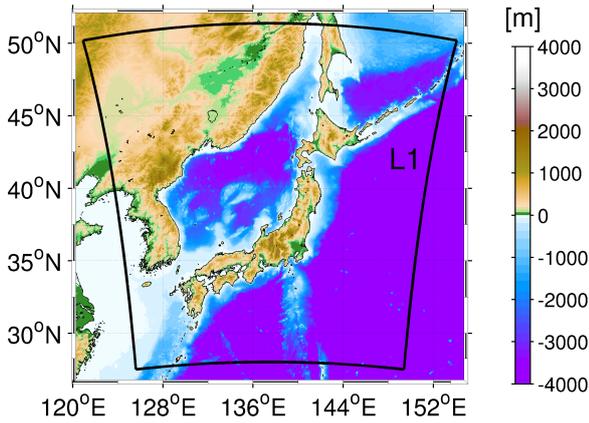


図-1 JCOPE2-ROMS モデル計算領域 (黒枠: 水平解像度 3 km の ROMS-L1 計算領域) と水深分布 (カラー) .

表-1 ROMS モデル計算条件

格子数	784×864 (×鉛直32層)
水平空間解像度	3 km
海上風応力	JMAGPV-GSM (日平均値)
海面フラックス	NOAACOADS (月平均気候値)
海底地形	J-EGG500+SRTM30_PLUS
境界条件	JCOPE2 再解析値 (日平均値)
flux 補正用 SST/SSS	JCOPE2 再解析値 (月平均値)

年間を解析対象とした. 詳細な計算条件や再現性の確認等についてはUchiyamaら<sup>4)</sup>を参照されたい.

本研究では黒潮を主体とした外洋影響による湾口部への暖水輸送を抽出するため, 河川, 潮汐の影響を含めずに計算・解析を行った. また, 図-2に示すように, 四国東岸から関東にかけての五つの湾 (東京湾, 相模湾, 駿河湾, 伊勢湾, 紀伊水道: 大阪湾) を解析対象とし, 各湾の湾口部に検査断面を設定した. さらに, 黒潮流軸変動を評価するため, 沿岸部において海表面高度勾配が最大となる地点を流軸と定義し, 神奈川県城ヶ島 (三浦半島南端), 静岡県御前崎, 高知県室戸岬の3地点からの南方向直線距離を黒潮流軸距離として解析に供した.

## (2) 熱フラックス解析

湾口部における熱交換特性を評価するために, 熱フラックス解析を実施した. まず, 中規模渦・サブメソスケール渦による暖水波及を解析したKamidairaら<sup>1)</sup>を参考に, 水平熱フラックス  $\mathbf{F} = (F_x, F_y)$  に対してReynolds分解を施した. 例えば, 東向き  $x$  成分  $F_x$  については以下のように表される (北向き成分  $F_y$  も同様) .

$$F_x = \rho_0 C_p u T \approx \underbrace{\rho_0 C_p \bar{u} \bar{T}}_{\text{MHF}, \bar{F}_x} + \underbrace{\rho_0 C_p \overline{u'T'}}_{\text{EHF}, F_x'} \quad (1)$$

ここに,  $\bar{\quad}$ : アンサンブル平均成分,  $'$ : 渦成分,  $\rho_0$ : 海水密度,  $C_p$ : 定圧比熱,  $u$ : 水平流速 (東向き成分).

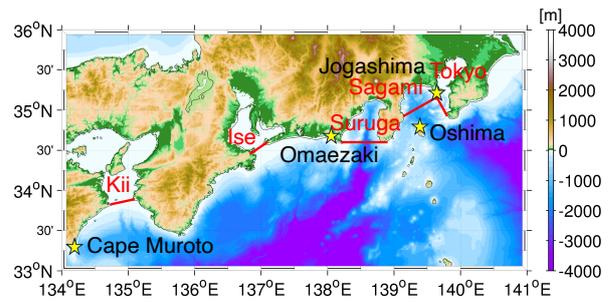


図-2 5つの湾口検査線 (赤線) と水深分布 (カラー) .

$F_y$  では北向き流速  $v$  を用いる),  $T$ : 水温である. 本研究では, Kamidairaら<sup>1)</sup>にならい, 渦成分を抽出するためにカットオフ周期を90日とした周波数フィルターを用い, 交差項は十分に小さいと仮定して平均成分  $\bar{\mathbf{F}}$  (MHF) と渦成分  $\mathbf{F}'$  (EHF) に分離した. なお, 定義よりMHFは一定値ではなく, 長周期変動する点に注意されたい.

また, 熱フラックスの水平分布を解析するために  $\mathbf{F}$  を水深積分した  $\mathbf{F}_v$  と, さらに湾口部での熱交換を評価するために各湾口断面 (図-2) において  $\mathbf{F}$  の断面直交成分  $F_{\perp}$  を求め, これを面積積分したのち断面積で除することにより, 湾口断面通過熱フラックス  $F_M$  を定義した.

$$\mathbf{F}_v = \int_{-h}^{\zeta} \mathbf{F} dz, F_M = \frac{1}{S} \int_S F_{\perp} dS \quad (2a, 2b)$$

ここに,  $h$ : 水深,  $\zeta$ : 水位,  $S$ : 湾口断面積であり,  $F_M > 0$  は湾への熱流入,  $F_M < 0$  は外洋への熱流出と定義した. なお, ROMSの出力は全て日平均値であるが, 以下では全ての変量は月平均値を用いて整理している.

## 3. 解析期間全体の変動傾向

### (1) 湾口周辺での平均熱フラックスMHFの優位

Reynolds分解された熱フラックス各成分の寄与を確認するため, 一例として東京湾湾口部における通過熱フラックス  $F_M$  の時間変化を示す. 渦成分EHFは極めて小さく, 熱フラックスの大部分は平均成分MHFで説明されることが分かる (図-3). EHFが小さいのは湾口の空間スケールや岸からの距離がRossbyの内部変形半径 (15~25 km程度) 以下で, 中規模現象が抑制されるためと解釈される. 岸から十分に離れた海域では水平解像度を向上させることで中規模渦・サブメソスケール乱流混合が適切に表現され, EHFが増大する可能性がある. いずれにせよ, このEHFに対するMHFの卓越傾向は解析領域内の他の湾口部や黒潮流路北側の沿岸域などで広く確認されたため, 以下ではMHFのみ焦点を当てて解析を行うこととした.

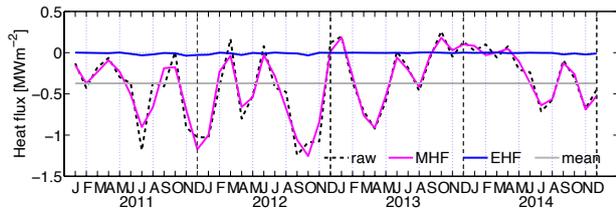


図-3 東京湾湾口における断面通過熱フラックス $F_M$ の時間変化. 黒破線: Reynolds 分解前, マゼンタ: 平均成分 (MHF,  $\overline{F_M}$ ), 青: 渦成分 (EHF,  $F_M'$ ), グレー: 期間平均値.

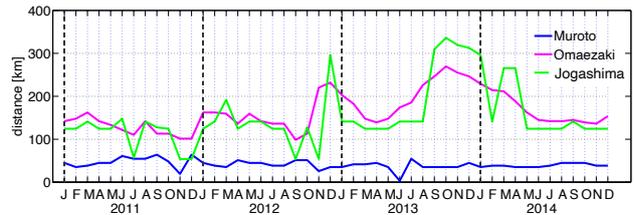


図-4 黒潮流軸位置の時間変化. 青: 室戸岬, 赤: 御前崎, 緑: 城ヶ島からの黒潮流軸までの南方向距離 (km) .

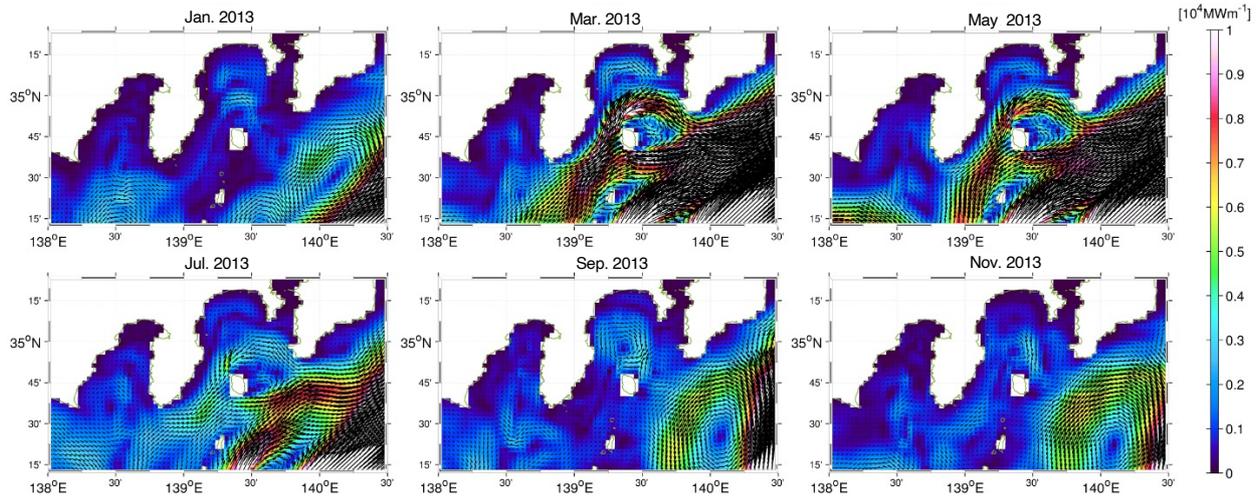


図-5 駿河湾～東京湾沖における水深積分した平均熱フラックス MHF の水平分布. カラー:  $|F_v|$ , ベクトル:  $F_v$ .

## (2) 黒潮流軸変動特性

2.(1)の手順で求めた黒潮流軸変動を図-4に示す. 城ヶ島と御前崎から流軸までの距離は平時は150 km程度であるが, 2012年11月～2013年1月に250 km程度まで離岸したあと一旦接岸し, 続いて小蛇行期の2013年8月～2014年5月には300 km程度まで離岸した. 一方で, 室戸岬からの流軸距離は, 2011年11月, 2013年6月に間欠的な接岸が見られるものの, 解析期間の4年間では概ね50 kmで一定となり, 安定流路をとっていた. したがって, 5つの湾口のうち, 室戸岬に近い紀伊水道では流路変動の影響はあまり受けず, これ以外の4つの湾口部は流路変動の影響をより強く受けていた可能性が高い.

## (3) 駿河湾～東京湾における2013年の水平熱輸送

流路変動が顕著であった2013年に着目し, その影響を強く受ける解析領域の東側海域 (駿河湾～東京湾) における水深積分MHF ( $F_v$ ) の月平均値の空間分布を2ヶ月ごとに求めた (図-5). 黒潮流路は1月～5月に徐々に接岸し, 後半の7月～11月に離岸していく. 黒潮本流の接岸に伴い, 伊豆海嶺周辺で分岐した分支流として暖水が接岸し, 大島西水道を通して相模湾および東京湾湾口部に接するように時計回りに回り込みながら房総半島沖へ

到達し, 黒潮本流に合流するような熱輸送が生じていることが分かる. 以下では, この2013年前半を「黒潮暖水波及期」と呼称することとする.

## 4. 5つの湾口における熱交換特性の比較

### (1) 東京湾

図-5と同様に2013年に着目し, 5つの湾口断面における熱フラックス平均成分 (MHF) の湾口断面直交成分  $F_{\perp}$  の2013年の2ヶ月ごとの月平均値分布を求めた (図-6). 東京湾 (図-6a) では, 外洋からの熱流入 ( $F_{\perp} > 0$ ) は主に湾口中央部の表層混合層内で生じ, 逆に湾口両端部では流出が卓越する. そしてその正負の分布構造は深さ方向におよそ一様である. 強いMHF流入が起こる  $F_{\perp}$  のピーク水深は, 混合層が浅い夏季では水深20 m以下の表層にあるが, 混合層が深い冬季には最大で水深50 m程度まで低下していた. また, 黒潮暖水波及期 (2013年前半) には湾口西側からの流出が全水深で強化された. ただし, 2.(1)で述べたように, 本研究では河川影響を考慮せず, 外洋水の波及に対して湾口がパッシブに応答する理想的な状況を仮定している. したがって実際には, エスチャリ循環に伴って湾口部東岸での熱流入, 西岸で

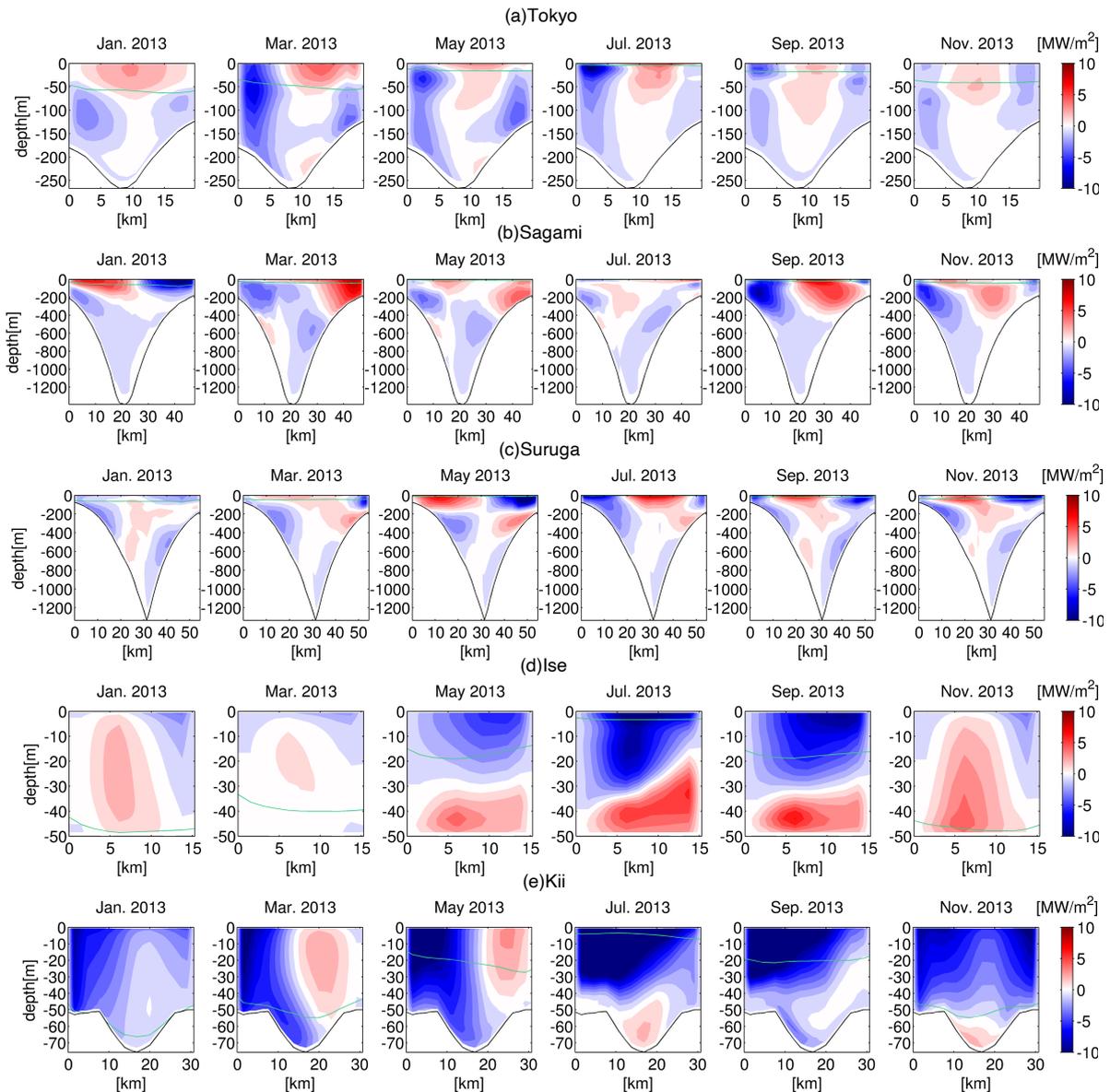


図-6 (a) 東京湾, (b) 相模湾, (c) 駿河湾, (d) 伊勢湾, (e) 紀伊水道 (大阪湾) の各湾口断面における熱フラックス平均成分 (MHF) の湾口断面直交成分  $\overline{F_1}$  の月平均値. 2013 年の 1 年間を 2 ヶ月ごとに表示している. 赤: 湾内への流入 ( $\overline{F_1} > 0$ ), 青: 外洋への流出 ( $\overline{F_1} < 0$ ). 緑線: 表層混合層の下端位置. 湾ごとに湾口距離 (x 軸), 水深 (y 軸) が異なる点に注意. x 軸の左端, 右端はそれぞれ湾口部西端, 東端である.

の熱流出が促進され, さらには高密度の外洋水が低密度の内湾水の中層~底層に貫入するため<sup>2)</sup>, 熱流入のピーク水深はもう少し深い水深に出現するはずである.

次に, 解析期間全体での湾口通過熱フラックス  $\overline{F_M}$  と, 式 (2b) の断面積分に際して  $\overline{F_1}$  を正負で分け, 流入成分と流出成分に分解した  $\overline{F_M}$  を図-7に示す. 東京湾口 (図-7a) では年間を通じて熱流出傾向が卓越しており, 東京湾が平均的に外洋によって冷却されていたことが分かる. 期間を通じて流入  $\overline{F_M}$  はほとんど変化しないが, 流出  $\overline{F_M}$  は黒潮流軸変動に応じて数ヶ月周期で増減している. 後述するように, 相模湾, 駿河湾でも類似した周期変動が見られるが, その振幅はかなり小さく (図-7b, c), また伊勢湾, 紀伊水道では周期が長い (図-7d, e).

つまり, 流出  $\overline{F_M}$  の数ヶ月周期変動は東京湾口の特徴である. 東京湾は, 湾の表面積約 1,380 km<sup>2</sup> に対して湾口幅が小さいため (約 20.9 km) 閉鎖性が強く, そもそも外洋影響が湾内方向に伝播しにくい. その結果, 熱流入と熱流出に不均衡が生じ, 黒潮暖水波及 (図-5) に対応して熱流出のみが周期的に強化されたものと解釈される. また, 流入  $\overline{F_M}$  と流出  $\overline{F_M}$  の絶対値が同時に小さくなる月や, 9月~12月の小蛇行期 (図-4) では, 熱流入・流出が概ね釣り合って正味の流入はほぼゼロになっていた.

## (2) 相模湾

東京湾に隣接する相模湾ではあるが, 湾口幅が変形半径より広く (約 50 km), 湾口水深も深い (最大約 1,400

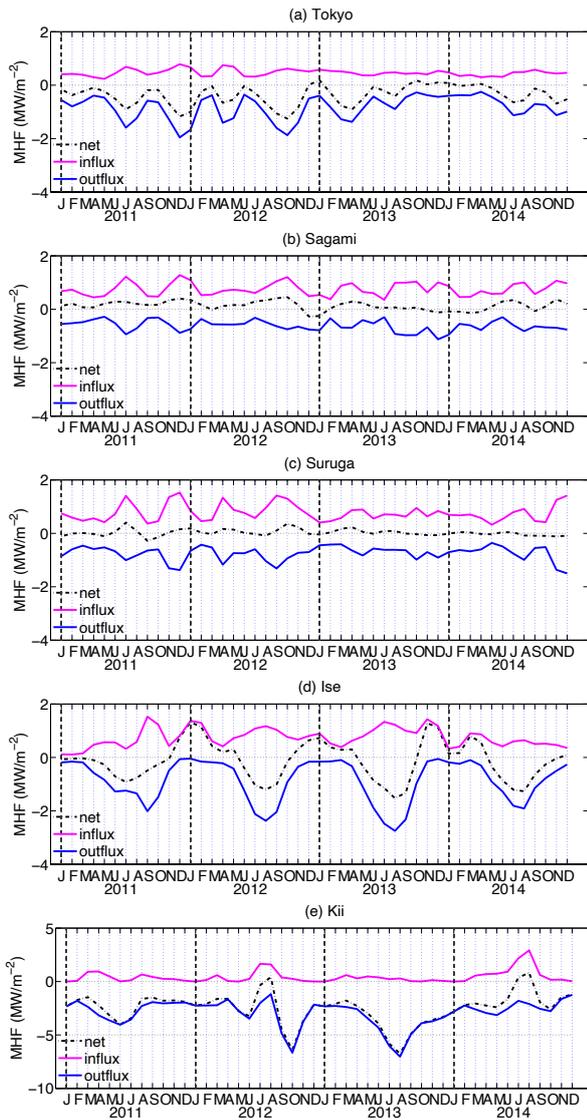


図-7 (a)東京湾, (b)相模湾, (c)駿河湾, (d)伊勢湾, (e)紀伊水道(大阪湾)の各湾口断面における断面積分通過熱フラックス $\overline{F}_M$ (黒破線)と, その流入成分(ピンク線)および流出成分(青線)。

m) ため, 閉鎖度が低く, むしろ開放性の湾である。そのため外洋影響を受けやすく, 例えば黒潮小蛇行期(9月, 11月)には湾口部を含む相模湾の大部分で反時計回りの循環流・中規模渦が発達していた(図-5)。循環流に対応して, 湾口東側では外洋からの熱流入が, 西側では内湾からの熱流出が促進された(図-6b)。2013年後半の暖水波及期でもその傾向は変わらないが, 暖水が流入することで西側の熱流出は抑制されていた。1月は時計回りの循環流が発生したため, 湾口部の熱流入・流出傾向は他の月とは逆であった。また, 湾口断面 $\overline{F}_1$ は混合層よりも深く, 400 m程度まで大きな値を取っていた。このことから $\overline{F}_1$ は順圧的な構造を持つ中規模渦の影響を強く受けていることが確認される。

$\overline{F}_1$  流入の時間変動(図-7b)も東京湾とは異なり,

熱流入・流出は同位相で変動し, それらの絶対値は同程度で均衡し, したがって正味の $\overline{F}_1$ はゼロに近い。しかしながらその期間平均はわずかにプラスであり, 相模湾は外洋によって温められる傾向にあった。

### (3) 駿河湾

湾口幅や湾口水深は相模湾と同程度であるが, 湾口での $\overline{F}_1$ 分布はかなり異なり, 約200 m以浅の表層では湾口断面の東側で熱流出, 中央で熱流入, 西側で熱流出で特徴付けられる(図-6c)。水深200 m以深の亜表層では熱流入・流出構造が変化し, 表層で流入した $\overline{F}_1$ は深くなるにつれ東側に分布領域を広げていた。それに伴って傾圧的な状況が発生し, 特に5月は表層・亜表層での熱流出・流入が鉛直方向に逆位相になっている。

駿河湾での水深積分MHF( $\overline{F}$ , 図-5)は相模湾と比較してかなり小さく, その水平構造も不明瞭であることから, 黒潮本流から分岐した暖水は湾口部へ直接波及しにくいことが分かる。しかしながら,  $\overline{F}_1$  流入の時間変動(図-7b)を見ると, 2011年~2012年は相模湾とよく似ており, 駿河湾でも流入と流出は同位相で変動して相殺し合い, 正味の $\overline{F}_1$ の変動幅を小さく抑えていた。これは相模湾と同様に開放性が高く, 湾内に循環流や中規模渦が存在しやすい地形であることが原因と考えられる。一方, 小蛇行期に入る2013年以降は $\overline{F}_1$ の変動振幅が小さくなることから, 流路が離岸すると暖水波及の影響を受けにくくなることが駿河湾の特徴であると考察される。

### (4) 伊勢湾

湾口幅も水深も小さいため $\overline{F}_1$ 分布は比較的単純で, 温暖期は傾圧性が強くなり上層から熱流出・下層から熱流入する一方で, 寒冷期は混合層が海底に到達して順圧的になる(図-6d)。黒潮流軸から遠いため直接波及の影響を受けにくく, しかも室戸岬沖(図-4)での流軸距離は概ね一定で流路変動そのものが小さく, 湾口での熱交換構造の傾向は期間を通じて維持されていた。図は割愛するが, 紀伊半島東岸の潮岬・伊勢湾間に時計回りの中規模渦が定在し, これが緩衝帯のように黒潮の暖水波及や流路変動の影響を抑制していた。この渦は御前崎沖に定在する中規模冷水渦と対をなして安定的に維持され, 黒潮とは独立して渦内でMHFを保持していた。

熱流出(図-7d)にも黒潮流路変動に起因する変動は見られず, むしろ年周期変動が顕著であった。熱流入は数ヶ月周期で変動するが, 相模湾~東京湾での熱流出とは位相がずれており, 黒潮の直接影響が弱いことが再確認される。また, 熱流入と流出が同時に増減して相殺し合う点は他の湾と共通しているが, 伊勢湾では熱流出の変動振幅が大きく, 毎年8月ごろに強化, 1月から3月に

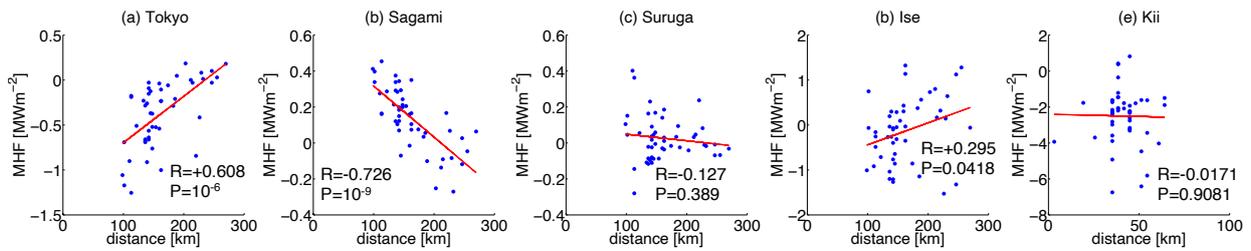


図-8 黒潮流軸距離とMHFの相関 (Rは相関係数, PはP値を示す) (a) 東京湾, (b) 相模湾, (c) 駿河湾, (d) 伊勢湾, (e) 紀伊水道 (大阪湾)。

かけて弱化し, それに対応して正味のMHFは夏に流出, 冬に流入が卓越するように大きく年変動していた. この熱交換の年周期性は他の湾には見られない伊勢湾の特徴である.

### (5) 紀伊水道 (大阪湾)

紀伊水道近くの室戸岬での黒潮流路は安定しており (図-4), 図-6eから, 湾口では全体的に熱流出が卓越するものの, 3月, 5月には室戸岬から剥離するように紀伊水道全体で発達する反時計回りの中規模渦 (図は割愛) によって東側からの熱流入が生じていた. 7-11月は傾圧的な構造となり, 底層で熱流入が強化される傾向が見られる. 図-7eからも熱流出の卓越が顕著であり, 正味のMHFは熱流入ではなく熱流出に支配されていることが確認できる. 2012年と2013年の夏季に熱流出が強化される傾向は伊勢湾と同様であるが, 2014年夏季は逆に熱流入が大きくなる. これは, 閉じた湾を北側に有する他の湾口とは異なり, 複数の湾と接続し, 瀬戸内海通過流の影響を受けるといふ紀伊水道の特有の特徴である.

### (6) 黒潮流軸変動とMHFの相関・閉鎖度の影響

次に, 黒潮流路変動と湾口熱交換との関係の評価するために, 御前崎からの黒潮流軸距離 (図-4) と各湾口での断面平均された正味のMHF流出量 $F_M$  (図-7)の相関を求めた (図-8). 東京湾では黒潮流軸の離岸に伴って流出MHFが増減するため, 相関係数で+0.6程度の正の相関が見られる. 相模湾では流軸が近づくにつれて流入MHFが増加することを反映して, 相関係数-0.7程度の負の相関がある. 一方で, 駿河湾と伊勢湾と紀伊水道では有意な相関は見られなかった. 以上のことから, 東京湾と相模湾は黒潮流路変動に伴う暖水の直接波及の影響を受けやすく, それ以外の湾口は受にくいことが統計的にも担保された. なお, 紀伊水道での相関が有意ではなかったのは, 解析期間において室戸岬・潮岬付近における黒潮流路変動がほとんど生じなかったことも一因である. 大蛇行期には黒潮流路は南下して紀伊水道から大きく離岸するため, この結果は変わる可能性がある.

一方, 湾の閉鎖性の強さを表す閉鎖度指標<sup>7)</sup>から, 東

京湾と伊勢湾は閉鎖性の高い海域に分類されるが, 閉鎖度は湾から外洋への熱流出の促進に関連している. つまり, 両湾では日射等によって加熱された海水が湾内に滞留しやすく, 外洋より高温な内湾水が黒潮波及時などに排出され, 負の湾口 $F_M$ が大きくなったと解釈される.

## 5. おわりに

本研究では, 我が国の太平洋沿岸部に位置する5つの湾を対象に, 黒潮系暖水波及に代表される外洋水の影響を抽出して俯瞰的に比較することを目的に, 非蛇行期・蛇行期を含む2013年を中心とした4年間にわたる湾口周辺での熱フラックス解析を行った. その結果, まず, 黒潮暖水波及は変動周期90日以上平均熱フラックス (MHF) で説明され, 特に東京湾と相模湾の湾口は黒潮とその流路変動の影響を強く受けていることがわかった. 両湾では黒潮から分岐して大島西水道を經由して接岸する暖水が波及し, 閉鎖性が高い東京湾では接岸期に内湾からの熱流出が強化され, 開放性が高い相模湾では接岸期に外洋からの熱流入が強化されていた. その結果, 両湾での湾口正味流入MHFと黒潮流軸距離は有意で高い相関を有していた. 駿河湾, 伊勢湾, 紀伊水道 (大阪湾)の湾口での熱交換に対する黒潮影響は明確ではなく, また, 湾口サイズや閉鎖度によって外洋からの影響の受け方に大きな差が生じることなどが明らかとなった.

これらの知見は, 湾ごとの水質管理を策定する際に一定の指針を与えるものであるが, 本研究では各湾の湾口における外洋影響に対するパッシブな応答を抽出するために敢えて潮汐や河川影響を排除した数値モデルを用いている. 本研究の知見をベースに, 今後は潮汐に伴う湾口での混合と内部潮汐, 河川の導入に伴うエスチャリ循環と外洋水との相互作用, 高解像度化によるより詳細な地形・乱流効果, 計算期間の延長による大蛇行を含む黒潮影響の変動などを順次考慮し, それらの影響を一つ一つ明らかにしていく必要があると考えている.

謝辞: 本研究は科学研究費補助金 (18H03798, 24H00337)

の補助を受けた。

## REFERENCES

- 1) Kamidaira, Y., Uchiyama, Y. and Mitarai, S.: Eddy-induced transport of the Kuroshio warm water around the Ryukyu Islands in the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 143, pp. 206–218, 2017.
- 2) 日向博文・八木宏・吉岡健・灘岡和夫：黒潮系暖水波及時に於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，pp. 221–238，2008。[Hinata, H., Yagi, H., Yoshioka, T. and Nadaoka, K.: Field measurements of currents and material transport at Tokyo-bay mouth in the condition of Kuroshio warm water intrusion in winter, *J. Jpn. Soc. Civl. Eng.*, No.656, pp. 221–238, 2008.]
- 3) 日向博文：黒潮系暖水波及が冬季東京湾湾口部周辺の流動と物質輸送に与える影響について，沿岸海洋研究，Vol.52, No.2, pp. 169–175, 2015。[Hinata, H.: Influences of Kuroshio warm water intrusion on flow structure and material transport in Tokyo Bay mouth in winter, *Bull. Coast. Oceanogr.*, Vol.52, No.2, pp. 169–175, 2015.]
- 4) Uchiyama, Y., Kanki, R., Takano, A., Yamazaki, H. and Miyazawa, Y.: Mesoscale reproducibility in regional ocean modeling with a 3-D stratification estimate based on Aviso-Argo data, *Atmosphere-Ocean*, Vol. 56, No. 4, pp. 212–229, 2018.
- 5) Uchiyama, Y., Suzue, Y. and Yamazaki, H.: Eddy-driven nutrient transport and associated upper-ocean primary production along the Kuroshio, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 122, pp. 5,046–5,062, 2017.
- 6) 日向博文，宮野仁，柳哲雄，石丸隆，粕谷智之，川村宏：大島西水道からの黒潮系暖水流入時における相模湾表層循環流の短周期変動特性，海の研究，Vol.12, No.2, pp. 167–184, 2003。[Hinata, H., Miyano, H., Yanagi, T., Ishimaru, T., Kasuya, T., Kawamura, H.: Short-period Fluctuations of Surface Circulation in Sagami Bay Induced by the Kuroshio Warm Water Intrusion through Oshima West Channel, *Oceanography in Japan*, Vol.12, No.2, pp. 167–184, 2003.]
- 7) 長尾正之，橋本英資，高杉由夫，千葉賢，山形陽一：英虞湾における鉛直混合強度の測定，海岸工学論文集，第52巻，pp. 341–345, 2005。[Nagao, M., Hashimoto, E., Takasugi, Y., Chiba, K. and Yamagata, Y.: Measurement of vertical mixing strength in Ago Bay, *Proc. Coastal Eng., JSCE*, Vol. 52, pp. 341–345, 2005.]

(Received March 14, 2024)

(Accepted July 18, 2024)

## HEAT FLUX ANALYSIS OF KUROSHIO WARM WATER INTRUSION INTO ALIGNED FIVE BAYS ALONG THE PACIFIC COAST OF JAPAN

Moeto WATANABE, Yusuke UCHIYAMA, and Xu ZHANG

Synoptic numerical modeling was conducted to evaluate the open ocean influences on the thermal environment of five aligned embayments (Osaka Bay, Ise Bay, Suruga Bay, Sagami Bay, and Tokyo Bay) along the Pacific coast of Japan. We exclusively focused on the open ocean effects by analyzing the heat flux exchange through each bay's mouth, thereby disregarding contributions from tidal and fluvial influences. The mean heat flux (MHF), predominantly comprising seasonal variations, emerged as a primary driver of seasonal thermal fluctuations, exerting a more significant impact on heat exchange compared to the eddy component. Warm water diverging from the Kuroshio reached the bays east of Sagami Bay through the Oshima West Channel, where the MHF was intensified during the Kuroshio berthing period, correlating with its axis fluctuations. In the Osaka Bay-Suruga Bay region, topographically constrained horizontal circulation mitigated direct intrusion. The direction and magnitude of MHF into and out of the bays varied depending on the degree of closure exhibited by each bay.