

# 瀬戸内海の塩分収支に対する黒潮影響について

松田 和樹<sup>1</sup>・内山 雄介<sup>2</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)

瀬戸内海の流動と水質環境は外洋水の影響を強く受けて形成されている。本研究ではこれを精緻に抽出するべく、保存物質である塩分に着目し、3次元海洋モデルによる長期再解析値を用いて瀬戸内海全域に対する塩分収支解析を行った。地形狭窄部を中心に設定した海峡検査断面における通過塩分フラックスは黒潮流路の影響を受け、通過流量との相関も高く、冬に豊後水道からの流入が増加し、夏に流入が減少もしくは流出する傾向を見出した。瀬戸内海の8つの湾灘における総塩分量変化も塩分フラックスとよく相関し、特に燧灘以西では豊後水道からの流入が多ければ総塩分量が増加し、流出が多ければ減少する傾向にあった。一方、東部海域では塩分フラックス変動が西部よりも弱く、潮汐残差流・黒潮影響ともに小さくなるなど顕著な東西偏差があることを明らかにした。

**Key Words :** Seto Inland Sea, Kuroshio, salinity budget analysis, salinity flux, JCOPE2-ROMS model

## 1. はじめに

瀬戸内海は400種類以上の生物が生息する豊かで多様に富んだ海域であり、古来よりすぐれた自然の景勝地であるとともに、貴重な漁業資源の宝庫であるという恵まれた自然条件を有している。2022年に施行された瀬戸内海環境保全特別措置法では、瀬戸内海の有する価値や機能が最大限に発揮された「豊かな海」を志向し、栄養塩類管理制度等が導入された。したがって、減少傾向にある漁獲量の回復、生態系や生物多様性の保全は持続可能な海域利用を確保するための社会的課題であり、その解決に向けた対策のベースとなる物理環境の把握は重要な工学的課題である。

瀬戸内海は豊後水道と紀伊水道を通じて太平洋と接続しており、そこでの外洋水の流入は内部の流動、物質輸送、ひいては生物環境に多大な影響を及ぼす。例えば、駒井ら<sup>1)</sup>は黒潮流路変動が瀬戸内海通過流量に及ぼす影響は季節変動量の約3~4割に相当すると推定した。また、内山ら<sup>2)</sup>は瀬戸内海への流入流出量の変動が黒潮流軸の離接岸の度合いに強く依存することを指摘した。すなわち、瀬戸内海の評価する上では、河川出水や成層の消長などの内因的な要因だけではなく、内部環境形成の外因となる外洋影響を評価することが不可欠である。

外洋影響については主に各海峡を通過する体積・質量フラックスを用いて評価されてきた<sup>1)2)</sup>。しかし、体積

や質量は水温変動に伴う熱膨張・収縮、河川流入、海面での降雨・蒸発などの影響を受けるため、水収支を解析する上では保存性の面で問題がある。一方、塩分は外洋が唯一の供給源である保存物質であり、瀬戸内海内部への外洋影響を評価するのに最適な変量の1つである。瀬戸内海の塩分環境に関して、例えば金ら<sup>3)</sup>は、黒潮流路位置に応じた広域水位勾配変動によって燧灘を境に東西間の塩分輸送が変化すると指摘している。しかしながら、長期間にわたる広域塩分変動と黒潮流路との関係、各湾・灘への影響を総合的に検討した研究は未だなされていない。そこで本研究では、大蛇行を含む黒潮流路変動と瀬戸内海内部への外洋影響の波及特性を評価するため、3次元流動モデルを用いた長期再解析により、広域塩分輸送過程の解析と湾・灘での塩分収支の評価を試みた。

## 2. 研究方法

### (1) 2段ネストJCOPE2-ROMSモデル

本研究では、瀬戸内海全域を対象領域としたJCOPE2-ROMSダウンスケーリング高解像度3次元流動モデル<sup>4)</sup>による約10年間の海洋再解析データを用いた。本モデルは、黒潮流路変動等の外洋影響を正確に考慮するために、JCOPE2M海洋再解析値<sup>5)</sup>を最外側方境界条件および初期条件とした2段階の1-way offline ネスティングROMSモ

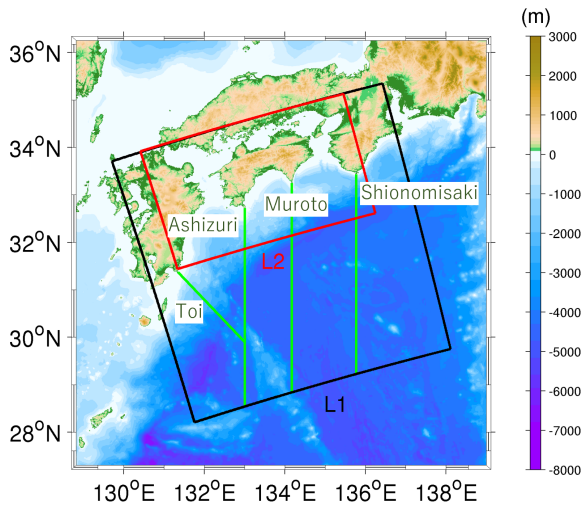


図-1 2段ネスト JCOPE2-ROMS モデルの計算領域。黒枠：ROMS-L1，赤枠：ROMS-L2 の計算領域，緑線：黒潮流軸の検査線（左から順に都井岬，足摺岬，室戸岬，潮岬）。背景カラーは水深と標高 (m)。

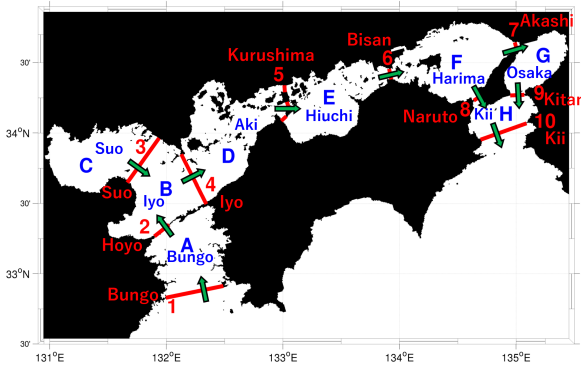


図-2 通過塩分フラックス $F_s$ および総塩分量 $S_{total}$ 計算のための領域分割図。赤線： $F_s$ を求める 10 本の検査断面 (1：豊後，2：豊予，3：周防，4：伊予，5：来島，6：備讃，7：明石，8：鳴門，9：紀淡，10：紀伊)，青字： $S_{total}$ を求める 8 つの湾・灘海域 (A：豊後水道，B：伊予灘，C：周防灘，D：安芸灘，E：燧灘，F：播磨灘，G：大阪湾，H：紀伊水道)。

デルをベースにしており， JCOPE2M (水平解像度約10 km) →ROMS-L1モデル (同約2 km) →ROMS-L2モデル (同約600 m) へと順次ダウンスケーリングを行うことで流動計算の細密化・高解像度化を行った (図-1)。計算期間は2010年2月～2020年4月の約10年間である<sup>7)</sup>。

海面熱収支は COAMPS 型バルク式を用いて評価し，さらに L1 では海面温度・塩分を JCOPE2M の 20 日平均値に弱く緩和させてフラックス補正を行い，長期計算に伴うドリフトを排除した。海面気温，各種海面フラックスの評価には気象庁 GPV-MSM 解析値を用い，潮汐については TPXO 7.0<sup>8)</sup>による主要 10 分潮を L2 開境界において与えた。また，領域内に流入する淡水として一級河川流量の月平均気候値を考慮した。計算期間などのその他の計算条件については表-1 に示す通りである。

表-1 2段ネスト JCOPE2-ROMS 瀬戸内海モデルの計算条件

	ROMS-L1	ROMS-L2
計算期間	2009年3月1日～ 2020年4月30日	2010年2月1日～ 2020年4月30日
格子数	320×320×32層	802×482×32層
水平解像度	2km	600m
境界条件	JCOPE2M (日平均値)	ROMS-L1 (日平均値) +TPXO 7.0
海面フラックス	GPV-MSM (1時間値) + COAMPS バルク法	
SST・SSS	JCOPE2M (20日間平均値)	
河川流量	日本河川協会 雨量・流量データベース (月平均気候値)	
海底地形	J-EGG500+SRTM30 PLUS	

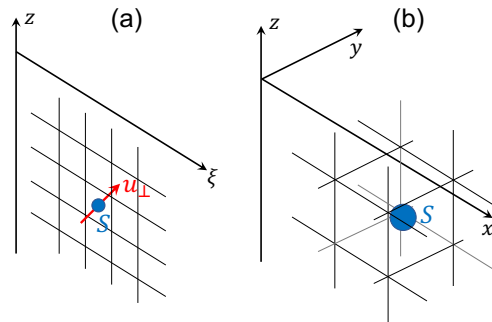


図-3 (a) 検査断面通過塩分フラックス $F_s$ ，(b) 各海域における総塩分量 $S_{total}$ の各計算における変数の定義。

## (2) 塩分フラックス収支解析

河川からの淡水流入の影響により低塩分となっている瀬戸内海内部への外洋影響を評価するために，保存物質である塩分の収支解析を行った。本研究では，図-2に示すように，地理条件に対応させて豊後水道から紀伊水道へ至る 1-10 の検査断面を設定し，検査断面に囲まれた 8 つの湾・灘海域 A-H を定義した。各海域をボックスとみなすと，海域ごとの塩分収支式は，次式で表される。

$$\frac{d}{dt} S_{total} = \sum F_s \quad (1)$$

ここに， $S_{total}$ ：各海域中に存在する塩分の総質量 (以下，総塩分量と呼称する)， $t$ ：時間， $F_s$ ：検査断面通過塩分フラックスである。式 (1) では， $F_s$  の向きは当該海域に流入する方向を正とし，海域に接している全ての検査断面での総和を取る。例えば，B：伊予灘では，検査断面 2-4 から流出入する $F_s$ の合計により海域内の総塩分量変化が生じると考える。各検査断面における $F_s$ は，

$$F_s = \iint S u_1 d\xi dz \quad (2)$$

のように，単位時間当たり検査断面を通過する塩分の質量として求められる。ただし， $S$ ：塩分 (重量濃度)， $u_1$ ：検査断面に直交する水平流速， $\xi$ ：検査断面水平方向座標， $z$ ：鉛直上向き座標であり，鉛直積分の範囲は海底から海面までである (図-3a)。総塩分量 $S_{total}$ は，

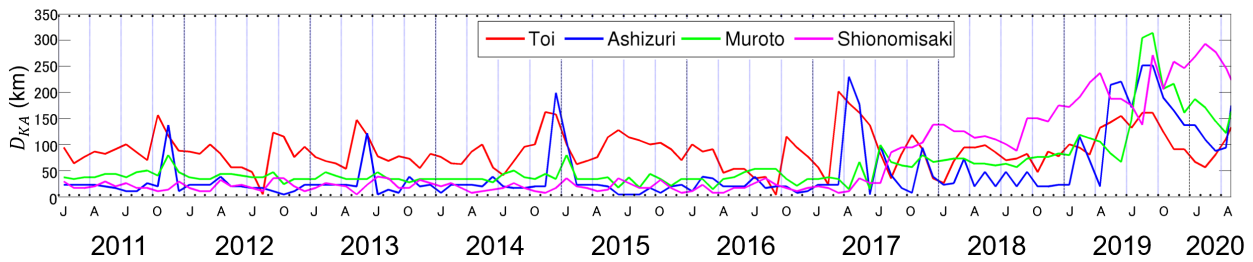


図4 都井岬, 足摺岬, 室戸岬, 潮岬から黒潮流軸までの沖方向距離 $D_{KA}$  (km. 月平均値) .

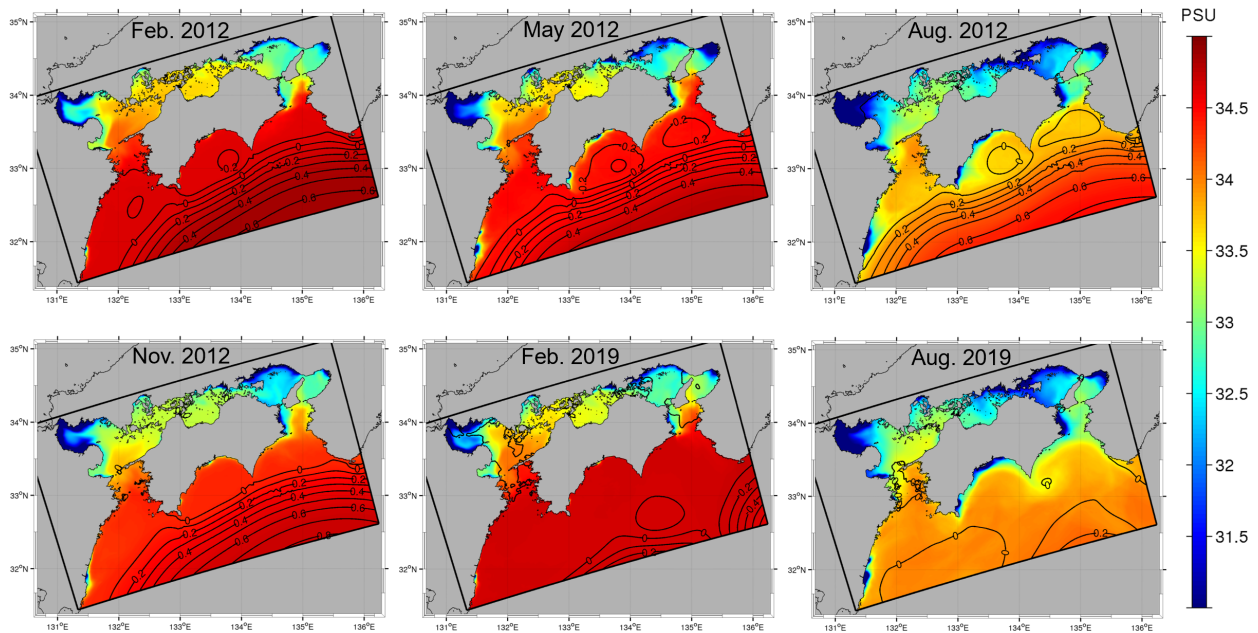


図5 ROMS-L2モデルによる海表面塩分 SSS (psu, カラー) と海面高度 SSH (m, 0.1 m 間隔コンター) の月平均値空間分布. 左上から, 非蛇行期: 2012年2月(冬), 5月(春), 8月(夏), 11月(秋), 大蛇行期: 2019年2月(冬), 8月(夏).

$$S_{total} = \iiint S(\mathbf{x} \in \Omega; t) dx dy dz \quad (3)$$

で求められる. ここに,  $\mathbf{x} = (x, y, z)$ : 3次元空間座標,  $\Omega$ : 当該海域の空間領域である (図-3b). つまり, 各海峡を通じて流出入する $F_s$ の収支として総塩分量 $S_{total}$ 変化が生じるという単純な応答を考える. なお, 本解析では流速, 塩分などの変数には特記なき場合は ROMS-L2 日平均値出力を用い, 潮位変動効果は残差流, 潮汐混合, 残差塩分フラックスなどとして考慮されている.

### 3. 解析結果と考察

#### (1) 黒潮流路変動

最初に, 黒潮流路変動を把握するために, 図-1に示す4つ岬を起点とする検査線 (緑線) 上において (ROMS-L1モデル出力値による) 海面高度勾配が最大となる地点までの沖方向距離の月平均値 $D_{KA}$ を算出し, 黒潮流軸位置の指標とした.  $D_{KA}$ の時系列 (図-4) を見ると, 2016年以前は都井岬や足摺岬からの $D_{KA}$ は小蛇行により散発

的に大きくなるものの, 全体的には岸に近い接岸流路を取り, 都井岬からの $D_{KA}$ を除くと時間変動も比較的小さく, 流路位置は安定していた. しかしながら, 2017年以降は大蛇行モードにシフトし, 岬から200~300 km 以上も大きく離岸する時期もあることが分かる.

#### (2) 非蛇行期・大蛇行期の海面高度と海表面塩分

次に, 瀬戸内海から四国沖にかけての広域の海面状況を確認するため, L2モデル全域の海表面塩分 (SSS) と海面高度 (SSH) の空間分布を解析した. ここでは, 図-4を参考に, 2012年を非蛇行期, 2019年を大蛇行期の例として取り上げ, さらに年内の季節差を見るために複数の月平均値分布を求めた (図-5). 四国沖でのSSHを見ると, 2012年 (非蛇行期) は2019年 (大蛇行期) よりもコンター間隔が密であり, 年間を通じて黒潮が接岸していたことが分かる (図-4も参照). 黒潮流路直交方向のSSH勾配は冬季の方が夏季よりも大きく, 地衡流平衡により発達する黒潮に伴う流れは冬季の方がより強い. また, 土佐湾, 紀伊水道などに閉じた円形のコンターが出現することがあり, これらの海域において地形に拘束さ

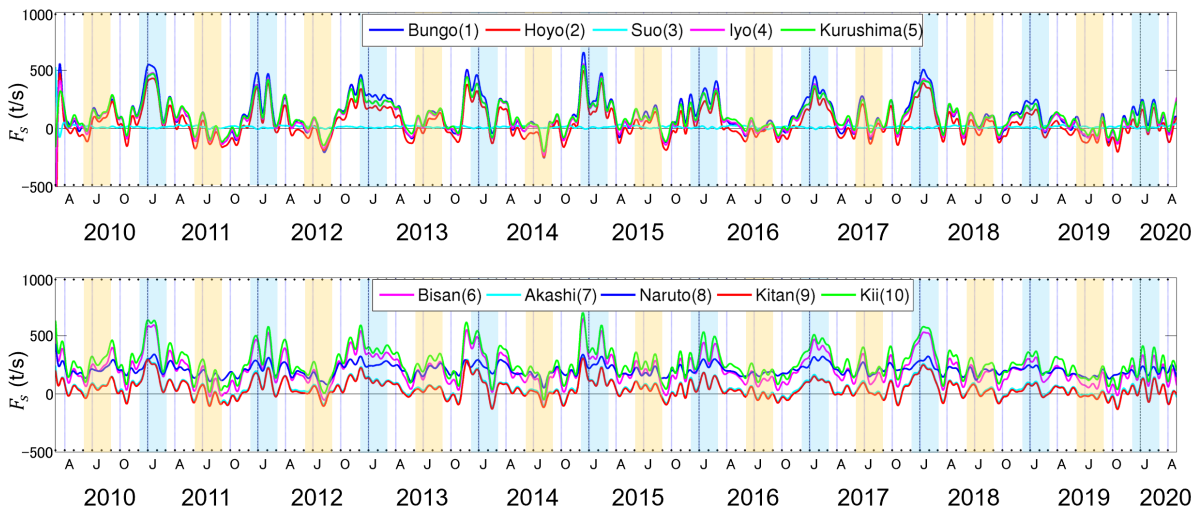


図-6 10ヶ所の検査断面(図-2)における断面通過塩分フラックス $F_s$ の時間変化. ここでは時計回り(豊後水道から紀伊水道に向かう, 図-2の緑矢印の方向)を正と定義し, 30日以下の短周期変動は除去した. 黄背景は夏季3ヶ月間, 水色背景は冬季3ヶ月間を表す. 上段: 瀬戸内海西側海域の検査断面(1~5), 下段: 東側海域の検査断面(6~10).

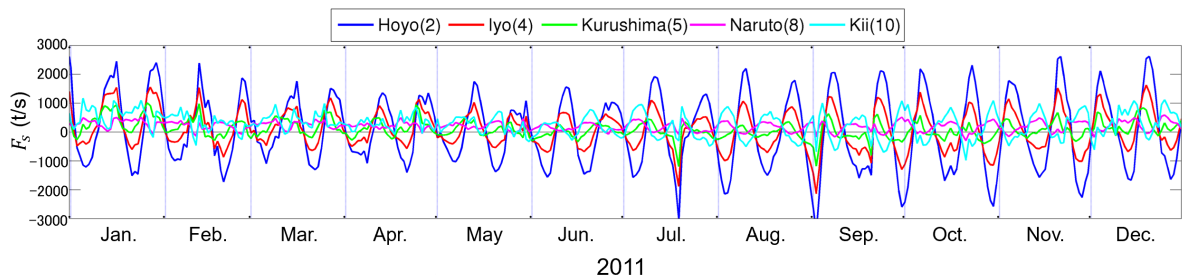


図-7 選ばれた5ヶ所の検査断面(2, 4, 5, 8, 10. 図-2)における短周期変動(日周期以上)を考慮した2011年(非蛇行期)の断面通過塩分フラックス $F_s$ の時間変化. 図-6と同様に時計回り(豊後水道から紀伊水道に向かう方向)を正とした.

れた反時計回り循環流が生じていたことが分かる. 対照的に, 2019年の大蛇行期には黒潮流路は大きく離岸し, 流軸位置は図-5に示すROMS-L2の領域外まで南下した. 大蛇行期のSSHは2月, 8月ともに四国沖から豊後水道・紀伊水道に至るまで平坦であり, 循環流は発生せず, SSH勾配は極めて小さく, したがって両水道における黒潮の直接波及も弱体化していたものと推察される.

SSS分布には明確な季節差が見られ, 2012年, 2019年ともに夏季において全域的にSSSが低下するように季節変動している. 夏季の塩分低下は, 河川からの淡水供給を受ける瀬戸内海内部だけではなく, 四国沖から外洋に至るまで広域的に生じている点が注目される. 大蛇行期2019年8月のSSSは, 非蛇行期8月のSSSよりも外洋域でさらに低下しているが, 瀬戸内海内部には大きな差異は見られない. 冬季(2月)を比較すると, 周防灘, 安芸灘, 燧灘などでは大蛇行期の方が非蛇行期よりもSSSはやや低くなっている. また, この2年に限らず全ての年において来島海峡より西側の伊予灘, 安芸灘でSSSが高く, 東側の播磨灘, 大阪湾で低くなっていたことを確認しており, この東西分布特性は金ら<sup>3)</sup>の結果と整合している.

以上の結果は, 瀬戸内海全域で卓越する四国の北側を時計回りに流れる瀬戸内海通過流<sup>2)</sup>(以下, 単に通過

流と呼称)によって豊後水道から外洋系の高塩分水が流入し, 瀬戸内海内部の塩分分布へ強く関与することを裏付けている. なお, 通過流のルートから外れる周防灘は伊予灘などと比較すると常に塩分が低い.

### (3) 海峡断面通過塩分フラックス

黒潮流路変動の影響を受けつつ季節変動する瀬戸内海内部の塩分場の形成機構を検討するために, 図-2に示した10本の検査断面における通過塩分フラックス $F_s$ の時系列を解析した(図-6). 全ての検査断面において $F_s$ は概ね正值を取っており, 通過流に対応して豊後水道から紀伊水道への時計回りの塩分輸送が卓越していることが分かる. ただし, 通過流から外れる周防灘断面での $F_s$ はほぼゼロであるため, 以下の議論からは除外する. この時計回り塩分輸送は季節的に変化し, いずれの断面でも冬季に時計回り(正)に増加, 夏季に減少もしくは反時計回り(負)となり, 大蛇行期(2017年8月以降)は季節変動振幅が経年的に低下し, 2019年や2020年には冬季の増加幅が極めて小さくなる. また, 西部の豊後水道~来島海峡では $F_s$ は概ね同じ値で変動しており, 図-5で見たように外洋水の影響は四国西岸・北岸に沿って侵入し, 来島海峡を経て燧灘へと流入していくものと考えられる.

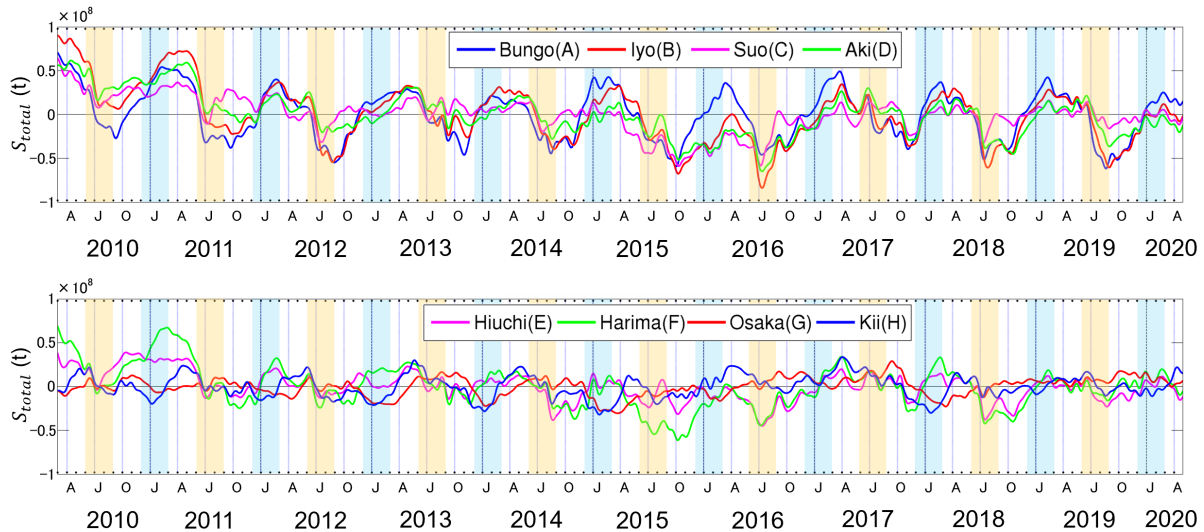


図-8 図-6と同じ。ただし、8つの湾・瀬海域 A-H (図-2) における総塩分量 $S_{total}$ 偏差 (海域ごとの全解析期間平均値からの差) の時間変化。上段：西側海域 (A: 豊後水道, B: 伊予灘, C: 周防灘, D: 安芸灘), 下段：東側海域 (E: 燧灘, F: 播磨灘, G: 大阪湾, H: 紀伊水道)。

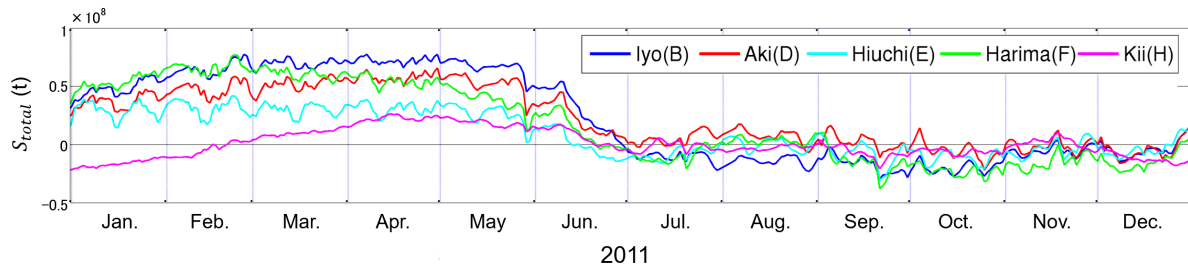


図-9 図-7と同じ。ただし、選ばれた5つの湾・瀬海域 (B: 伊予灘, D: 安芸灘, E: 燧灘, F: 播磨灘, H: 紀伊水道) における2011年 (非蛇行期) の短周期変動成分を考慮した総塩分量 $S_{total}$ 偏差の時間変化。

一方、東部では振幅は減少し、鳴門海峡・明石海峡での $F_s$ は備讃瀬戸よりも振幅も流量も減少し、紀伊水道で再び増加する。播磨灘からの $F_s$ 流出は鳴門海峡・明石海峡に分配され (例えば冬季の分配率はおよそ3:2)、それぞれ紀伊水道と大阪湾へと流入する。また、鳴門海峡の $F_s$ は他の断面よりも季節変化がかなり小さく、明石海峡と紀淡海峡での $F_s$ はほぼ同じ値かつ同期して変動し、他の断面よりもとりわけ値が小さい。したがって、播磨灘より東部の海域では塩分輸送は主に鳴門海峡を通じて行われ、明石海峡から大阪湾に流入した塩分は大阪湾を通過して紀淡海峡を抜け、両者は紀伊水道で合流し、そこで外洋影響を受ける、という構図になっている。

豊後水道での $F_s$ と黒潮流軸位置 (図-4) を比較すると、季節変動成分はほぼ無相関であるが、年平均値で相関解析を行ったところ、4ヶ所全ての岬での $D_{KA}$ と有意な負の相関 (相関係数:  $-0.5 \sim -0.7$ ) が確認された。つまり、長期変動傾向としては、黒潮流路が離岸するに当たって外洋に接する両水道での $F_s$ が減少し、それに伴って通過流による瀬戸内海内部の $F_s$ も少なくなると言える。 $F_s$ の季節変動は流軸位置というよりは外洋での表層塩分変動 (図-5) に対応しており、冬季の海面冷却によって外

洋で混合層が深くなり、強化された鉛直混合によって亜表層～下層の高塩分水が表層水として瀬戸内海に流入する (夏季は逆) ことが原因であると考えられる。

さらに、短周期変動を考慮した場合の $F_s$ に着目し、一例として非蛇行期である2011年の1年分を図-7に示す。この $F_s$ は1日平均値であるため、潮汐残差流の効果を含んでいる。5つの検査断面における $F_s$ は、図-6と同様の季節変動をしながらも約2週間の周期で増減しており、朔望周期変動が卓越している。特筆すべきはその東西差であり、西側の豊予海峡や伊予灘では朔望周期変動振幅が明確であるのに対し、来島海峡では不明確になり、それより東側の鳴門海峡と紀伊水道では振幅が大幅に減少し、西側海域と逆位相になる時期が多い。これらの傾向は瀬戸内海の潮汐分布に概ね対応している。例えば松浦ら<sup>9)</sup>によれば、 $M_2$ 分潮は豊後水道から燧灘へ進行波的に侵入し、紀伊水道から播磨灘へは明石海峡を節とする定在波動的な挙動を持ちながらも西方向へ伝播する。潮位変動振幅は両水道 (特に紀伊水道) で小さく、燧灘や安芸灘で増幅される。塩分フラックス $F_s$ も残差流の影響により西側海域で大きく変動し、東側では振幅が低下する。

#### (4) 8つの湾・灘海域における総塩分量変動

最後に、塩分収支の結果としての総塩分量 $S_{total}$ 変化を図-8に示す。なお、ここでは解析期間平均値からの偏差を時系列表示している。 $F_s$ 変動振幅に対応して総塩分量 $S_{total}$ 偏差にも東西差が見られ、その変動振幅は全体的に西側海域が大きく、東側海域が小さく、夏季に減少して冬季に増加するように季節変動している。すなわち、 $F_s$ 変動で見られた傾向と同様に、外洋に近接する豊後水道と紀伊水道、通過流の上流側に位置する伊予灘や安芸灘では季節変動傾向が明確であるのに対し、燧灘、播磨灘、大阪湾では不明瞭である。ただし西側海域や紀伊水道においても $F_s$ と総塩分量偏差のピーク位相はややずれており、前者が1月ごろであるのに対し、後者は3-4月ごろである。これは塩分収支式(1)において $F_s$ の効果が左辺の非定常項に反映されるまでに相応のタイムラグがあることを意味している。つまり、 $S_{total}$ は $F_s$ に対して直ちに応答するわけではなく、時間積分効果に伴う塩分の蓄積が影響しており、海峡での $F_s$ と海域の体積との関係で応答時間が変化すると推察される。

$S_{total}$ の季節変動が顕著な豊後水道から安芸灘までの西側海域では、期間前半よりも後半で $S_{total}$ 偏差そのものが低下している。これに対して、季節変動が不明瞭な燧灘以東の海域では、大蛇行期の2019~2020年には季節差がほとんど見られなくなる。したがって、 $F_s$ ほど明確ではないものの、総塩分量に対する黒潮影響も一定程度はあると言える。以上の結果から、総塩分量 $S_{total}$ は断面通過塩分フラックス $F_s$ との関係が強く、黒潮を含む外洋の高塩分水の流入による影響を受けて形成されていると考えられる。特に燧灘以西では、豊後水道から瀬戸内海への $F_s$ 流入が大きければ総塩分量が増加し、反対に $F_s$ 流出が大きければ減少する傾向にある。

前節と同様に、非蛇行期である2011年の $S_{total}$ 偏差の短周期変動を確認した(図-9)。短周期通過フラックス $F_s$ (図-7)に見られた朔望周期変動は不明瞭になっており、短周期 $F_s$ は $S_{total}$ にはほとんど寄与していないことが分かる。また、紀伊水道を除く他の4海域では年の前半で $S_{total}$ 偏差が大きく、後半で小さくなるという年周期変動が卓越している。年変動振幅は西側海域の伊予灘、安芸灘の順に大きく、5月頃まで $S_{total}$ が徐々に増加し、6-7月頃に急激に低下してその後は低い値を維持するように変化している。中央海域の燧灘、播磨灘、ひいては東側の紀伊水道では変動振幅が弱まっている。

#### 4. おわりに

本研究では、2段ネスト高解像度領域海洋循環モデルROMSによる瀬戸内海3次元流動の10年分の長期再解析

データを用いて、保存物質である塩分に着目した水収支解析によって瀬戸内海全域に及ぼす黒潮影響を明らかにすることを試みた。まず、高塩分の外洋水が低塩分の瀬戸内海へ侵入・波及する状況を例示し、大蛇行を含む黒潮流路変動、外洋における表層混合状態の季節差に起因する外洋塩分の季節変化、豊後水道・紀伊水道から瀬戸内海内部の燧灘へ向かって伝播する潮汐による残差流の3つの効果について塩分収支解析を行った。

瀬戸内海に10本の検査断面を設けて8つの海域に分割し、それぞれの湾・灘海域での海峡断面通過塩分フラックス $F_s$ の収支およびその結果として変動する各海域の総塩分量 $S_{total}$ を詳細に調べた。 $F_s$ は黒潮の離接岸に応じて長期的に変動し、非蛇行期(接岸期)に強化され、大蛇行期(離岸期)に弱体化していた。 $F_s$ は概ね瀬戸内海通過流に対応して、豊後水道から来島海峡を経て紀伊水道へと抜けていく時計回りの輸送として発現した。また、外洋表層塩分の季節変動に応じて $F_s$ は季節変動しており、その変動振幅は瀬戸内海西部海域で大きく、東部海域で小さく、 $F_s$ は冬季に時計回りに増加、夏季に減少もしくは反時計回りとなり、大蛇行期は冬季の増加幅が小さくなった。また、短周期 $F_s$ には潮汐残差流による朔望周期変動が強く現れ、その振幅は西側海域ほど大きく、来島海峡周辺で位相が反転し、その東側で小さくなっていた。 $F_s$ 収支によって増減する $S_{total}$ は、 $F_s$ と同様に黒潮流路変動や季節変動の影響を受け、瀬戸内海東西海域で異なる応答をしていた。しかし、 $S_{total}$ は $F_s$ の累積効果の結果として消長するため、両者の季節変動のピーク位相には数ヶ月のラグが生じた。また、大きな変動振幅を有する短周期 $F_s$ は、直接的には $S_{total}$ に寄与していなかった。

複雑な地理・海象条件下にある瀬戸内海内部の保存物質の輸送過程に対する黒潮の影響は極めて強く、豊後水道から紀伊水道方向へほぼ一方向的な輸送が卓越している。黒潮流路や外洋の密度構造は気候変動に応じて変化していくため、経年的な温暖化に晒されて生態系が徐々に変遷している瀬戸内海の内部環境に対するインパクトも変化すると予想される。したがって、瀬戸内海に対する外洋影響の把握には今後も注力していく必要がある。

謝辞：本研究はJSPS科学研究費(18H03798, 22H01605, 24H00337)および(一財)港湾空港総合技術センター2024年度研究開発助成(第18-2号)の助成を受けた。

#### REFERENCES

- 1) 駒井克昭, 日比野忠史, 大釜達夫: 黒潮の蛇行・直進が瀬戸内海の流れに及ぼす影響, 土木学会論文集B, Vol. 64, No. 3, pp. 165-179, 2008. [Komai, K., Hibino, T. and Ohkama, T.: Influence of the Kuroshio meander/straight on flow in the Seto Inland Sea, *J. Jpn. Soc. Civil Eng. Ser. B*, Vol. 64, No. 3, pp. 165-179, 2008.]

- 2) 内山雄介, 栗山貴生, 宮澤泰正: 外洋影響を考慮した瀬戸内海周辺海域の流動再現と黒潮流路変動の効果について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I\_441-I\_445, 2012. [Uchiyama, Y., Kuriyama, T. and Miyazawa, Y.: Impact of the Kuroshio Paths on Oceanic and Estuarine Circulations in and around Seto Inland Sea, *J. Jpn. Soc. Civil Eng., Ser. B2 (Coastal Eng.)*, Vol. 68, No. 2, pp. I\_441-I\_445, 2012.]
- 3) 金キョンヘ, 駒井克昭, 日比野忠史: 瀬戸内海の塩分分布に及ぼす境界水位の影響, 海岸工学論文集, Vol. 55, pp.991-995, 2008. [Kim, K., Komai, K. and Hibino, T.: The effect of boundary sea level height on the salinity distribution in the Seto Inland Sea, *Proceedings of Coastal Engineering*, Vol. 55, pp. 991-995, 2008.]
- 4) Uchiyama, Y., Zhang, X., Suzue, Y., Kosako, T., Miyazawa, Y. and Nakayama, A.: Residual effects of treated effluent diversion on a seaweed farm in a tidal strait using a multi-nested high-resolution 3-D circulation-dispersal model, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 130, pp. 40–54, 2018.
- 5) Miyazawa, Y., Kuwano-Yoshida, A., Doi, T., Nishikawa, H., Narazaki, T., Fukuoka, T. and Sato, K.: Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region *Ocean Dynamics*, Vol. 69, pp. 267–282, 2019.
- 6) Miyazawa, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Guo, X., Hihara, T., Kiyomatsu, T., Kachi, M., Kurihara, Y. and Murakami, H.: Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational now-cast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme, *Ocean Dynamics*, Vol. 67, pp. 713–728, 2017.
- 7) 乳原 材, 内山雄介, 小裕大地, 細川真也: マルコフ連鎖に基づく瀬戸内海アマモ場の多世代コネクティビティ解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 79, No. 17, Article ID: 23-17136, 2023. [Ubara, M., Uchiyama, Y., Kosako, T. and Hosokawa, S.: Multigenerational connectivity analysis of eelgrass habitats in the Seto Inland Sea based on a Markov chain, *J. Jpn. Soc. Civil Eng. Ser. B2 (Coastal Eng.)*, Vol. 79, No. 17, Article ID: 23-17136, 2023.]
- 8) Egbert G. D. and Erofeeva S. Y.: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, Vol. 19, No. 2, pp. 183–204, 2002.
- 9) 松浦昇, 佐々木孝, 鈴山宏, 桑木野文章, 長島秀樹: 瀬戸内海シミュレーションモデルの調和解析にもとづく高精度潮流予測, 海洋調査技術, Vol. 18, No. 2, pp. 1-10, 2006. [Matsuura, N., Sasaki, T., Suzuyama, H., Kuwakino, F. and Nagashima, H.: High accuracy tidal current forecasting on the basis of harmonic analysis of model simulation in the Seto Inland Sea, *J. Jpn. Soc. Mar. Surveys and Tech.*, Vol. 18, No. 2, pp. 1-10, 2006.]

(Received May 16, 2024)

(Accepted July 18, 2024)

## INFLUENCES OF THE KUROSHIO ON THE SALINITY BUDGET OF THE SETO INLAND SEA

Kazuki MATSUDA and Yusuke UCHIYAMA

The hydrodynamics and water quality of the Seto Inland Sea (SIS) are strongly influenced by oceanic waters. In this study, we aimed to precisely extract oceanic influences by focusing on salinity as a conservative tracer and conducted a salinity budget analysis for the entire SIS using a long-term reanalysis data set based on a 3D ocean circulation model. The salinity fluxes through the strait transects were influenced by the Kuroshio path and exhibited a high degree of correlation with volume flux. This resulted in an increase in inflow from the Bungo Channel during winter and a decrease or outflow in summer. The changes in total salinity in the eight sub-basins also demonstrated a pronounced correlation with salinity fluxes. In particular, in the sub-basins west of Hiuchi-nada Sea, total salinity was found to increase with the salinity influx at Bungo Channel and decrease with the outflux. In contrast, in the eastern sub-basins, the salinity flux fluctuations were weaker than in the western sub-basins, indicating a notable east-west deviation. This includes smaller tidal residual currents and a lesser influence from the Kuroshio.