

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01972

研究課題名（和文）太平洋から沿岸への栄養塩供給システム；豊後水道の底入り潮の理解

研究課題名（英文）Nutrient supply system from the Pacific Ocean to coastal seas; Understanding of bottom intrusion in Bungo Channel

研究代表者

森本 昭彦（Morimoto, Akihiko）

愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授

研究者番号：80301323

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は九州と四国の間に位置する豊後水道において、夏季を中心に陸棚斜面域の低温で高栄養な水塊が突発的に豊後水道底層へ進入する「底入り潮」の発生メカニズムを係留および船舶観測により明らかにした。2021年に発生した5回の底入り潮については、底入り潮発生直前に起こった表層での黒潮系水の豊後水道への波及により豊後水道内の密度が低下したことで、底層での南北圧力勾配が大きくなり発生したことを明らかにした。また、底入り潮などにより豊後水道へと供給された栄養塩は、瀬戸内海中央部まで輸送されており、瀬戸内海に存在する栄養塩の約6割は太平洋から供給されたものであることを数値モデルにより明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豊後水道南部の陸棚斜面底層の低温で高栄養な水塊が突発的に豊後水道へと進入する「底入り潮」の発生メカニズムを観測データにより明らかにした。底入り潮は、その発生の直前に起こった表層での黒潮系暖水の流入により豊後水道内の密度が低下することで発生していた。底入り潮により豊後水道へと供給された栄養塩は瀬戸内海の広域へと輸送されており、太平洋から供給された栄養塩は瀬戸内海の栄養塩の約60%を占めている。したがって、瀬戸内海の栄養塩および生物生産は外洋からの栄養塩供給の影響を強く受けていることが分かった。

研究成果の概要（英文）：This study used mooring and ship observations to clarify the mechanism of “bottom intrusion”, which occur in the Bungo Channel, located between Kyushu and Shikoku. Bottom intrusion is a phenomenon that low-temperature, high-nutrient water masses around the continental shelf slope suddenly enter the bottom layer of the Bungo Channel mainly during the summer. It was revealed that the five bottom intrusions that occurred in 2021 were caused by a large north-south pressure gradient in the bottom layer due to a decrease in density in the Bungo Channel caused by the intrusion of Kuroshio surface water to the Bungo Channel just before the bottom intrusion occurred. In addition, a numerical model revealed that nutrients supplied to the Bungo Channel by bottom intrusion and other events were transported to the center of the Seto Inland Sea, and that approximately 60% of the nutrients in the Seto Inland Sea were supplied from the Pacific Ocean.

研究分野：沿岸海洋学

キーワード：栄養塩供給 豊後水道 外洋起源栄養塩

1. 研究開始当初の背景

水深が 200m より浅い沿岸域の面積は、全海洋の面積の 3% にすぎないが、沿岸域での植物プランクトンによる一次生産は高く、世界の漁業資源の約 70% が沿岸域に存在する。このような沿岸域の高い生物生産は、豊富な窒素やリンなどの栄養塩の供給によるものである。沿岸域は陸地に面していることから、主に陸から河川を通し栄養塩が海へ供給されていると考えてしまうが、周囲を陸に囲まれた瀬戸内海でさえ、栄養塩の約 60% が太平洋から供給されていると言われている。瀬戸内海の単位面積当たりの漁獲量は世界の他の沿岸域に比べはるかに高いが、これは効率的に外洋の栄養塩を運び込む機能があるためかもしれない。したがって、沿岸域の生物生産やその持続性を考える上で、陸と沿岸の間の栄養塩供給だけでなく、外洋と沿岸の間の栄養塩供給も考える必要がある。

外洋の栄養塩は、外洋と沿岸が接する陸棚斜面から供給される。水深が急激に深くなる陸棚斜面域の底層には高濃度な栄養塩が存在しており、外洋と沿岸間の栄養塩の水平濃度勾配は大きい。黒潮や大西洋の湾流など主要な海流は陸棚斜面に沿って流れている。これらの海流が定常流である地衡流だとすると斜面を横切って流れることはできない。しかし、実際には非定常のため、海流に比べ流速は小さいが陸棚斜面を横切る方向の流れを生じることがある。斜面を横切る方向の栄養塩濃度勾配が大きいため、この弱い流れによる栄養塩のフラックスは大きく、外洋から沿岸への栄養塩供給の大きな部分を担っていると思われる。それゆえ、黒潮域、湾流域、東オーストラリア海流域など、陸棚斜面に沿って海流が流れる世界中の海において、陸棚斜面を横切る流れの力学や、生物生産への影響に関する研究が行われてきた。しかし、陸棚斜面を横切る流れは、人工衛星により時空間変化を捉えることができない底層での現象であり、また、陸棚斜面に沿って流れる強い海流に対し流速が小さいことや、漁業活動により機器の係留が難しいことから、観測によりその時空間変化を捉えられた例は少ない。さらに、この流れは、海底境界層での乱流混合や非線形過程が関わっており、時間変化も大きいことから、斜面を横切る流れの発生メカニズムを特定することは難しい。

瀬戸内海と太平洋の境界に位置する豊後水道では、水道南部の陸棚斜面に沿って黒潮が流れ、底層において低温で高栄養な水塊が陸棚斜面を這い上がり豊後水道内に進入する「底入り潮」という現象が存在する(図 1)。「底入り潮」は前述した強い海流が存在する陸棚斜面域における斜面を横切る流れであり、陸棚斜面に沿って海流が流れる海域において普遍的に起こっている現象の一例であると考えられる。これまでの研究により、底入り潮の発生時期や周期性、底入り潮の発生に伴う低次生態系の応答に関する報告はいくつかあるが、底入り潮の発生メカニズムや 3 次元構造については全くわかっていない。発生メカニズムが分からない主な理由は、豊後水道では底引き網漁が盛んなため測器を長期間にわたり係留しての流速の連続観測が難しく、これまで底入り潮に伴う流速変動がほとんど観測できていないためである。底入り潮は豊後水道という比較的水平的スケールの小さな海峡で起こる現象であるが、その発生メカニズムの理解は、外洋から沿岸域への栄養塩供給システムの普遍的な理解を与えるものとなる。

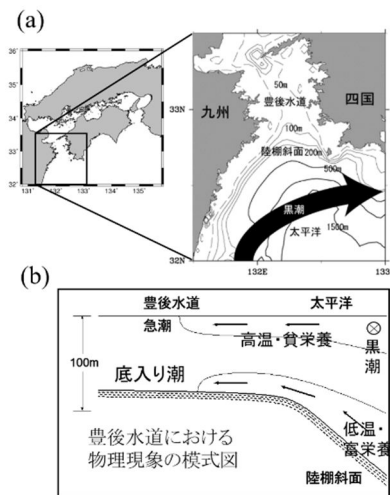


図 1 .(a)豊後水道の地形図。(b)豊後水道における陸棚斜面を横切る方向の物理現象。

2. 研究の目的

本研究では、密度の大きい低温な水塊が、陸棚斜面を這い上がり豊後水道へ間欠的に進入する現象である「底入り潮」の発生メカニズムを現場観測データにより明らかにし、数値モデルにより底入り潮などにより外洋から供給された栄養塩が、豊後水道および瀬戸内海の基礎生産にどの程度寄与しているかを定量的に示すことを目的とする。

底入り潮の発生メカニズム解明については、豊後水道の海底上に複数の超音波多層流速計を係留し、同時に調査船による繰り返し観測を行うことで底入り潮発生時の密度構造を観測する。これらの観測データから運動方程式の各項の時間変化を計算し、底入り潮発生時の力学バランスの変化から発生メカニズムを調べる。外洋から瀬戸内海への栄養塩供給の定量化については、3次元物理低次生態系モデルを開発し、太平洋の栄養塩、河川からの栄養塩、海底堆積物から溶出した栄養塩によるそれぞれの低次生態系をめぐる物質循環を追跡することで、各供給源からの栄養塩の挙動を定量化する。

3. 研究の方法

愛媛大学で開発済みの3次元物理モデルの結果を使い、底入り潮発生時の低水温水塊を粒子とみなし水塊の後方追跡実験を行い、低水温水塊の豊後水道への進入経路を把握したうえで、進入経路上の3か所の海底上に、超音波多層流速計(ADCP)、水温塩分計、圧力計を係留した(図2)。係留期間は、最も北の測点SBは2021年3月4日~10月29日、他2点(SO1, OW4)は2021年5月23日~8月29日。ADCPの測定間隔は20分、鉛直方向には4m毎の水平流速データを測定した。

底入り潮発生時の密度構造の時間変化を把握するため、図2の観測点において船舶観測を連続で実施した。観測期間は2021年7月29日~8月4日と、2021年8月23日~29日である。

太平洋起源の栄養塩を追跡するための数値モデルは、瀬戸内海全域を対象とし水平分解能約1km、鉛直21層とした(図3)。物理過程を再現するため、豊後水道と紀伊水道の南端で主要四分潮による水位と流速変化を与えることで潮汐を駆動、海面では日平均の熱フラックスと風応力を、モデル領域内の1級および2級河川の河口に位置するグリットにおいて河川流量を与えた。さらに、栄養塩、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスを変数とする低次生態系モデルを物理モデルへ結合した。この数値モデルにより太平洋、河川、底質から供給された栄養塩、さらにはその栄養塩を利用したプランクトンなど低次生態系をめぐる物質の追跡計算を行った。

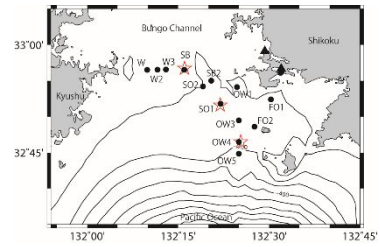


図2. 観測機器係留点(星印)およびCTD観測点(黒丸)

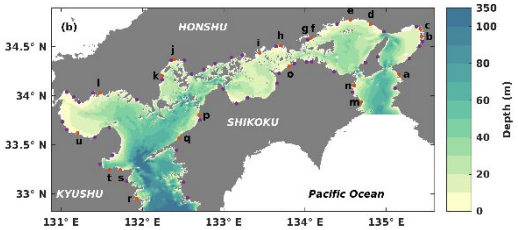


図3. 数値モデルの計算領域。赤丸は河川流量を与えた河口を示している。

4. 研究成果

4-1. 観測データによる底入り潮発生メカニズムの解明

図4に2021年7月15日から8月29日までの、観測点SB(水深95m)、SO1(水深104m)、OW4(水深179m)における海底上2mの水温と塩分の時系列を示す。この期間中に5回、底層水温が急激に低下していたことが分かる。また、水温低下は最初にOW4で起こり、その後SO1、SBの順に起こっていた(図4の赤矢印)。OW4の水温低下からSBでの水温低下までの時間差は平均で68時間であり、伝播速度は10cm/sであった。南から北へと水温低下していること、また、その伝播速度はKaneda et al. (2002)が示した底入り潮に伴う北向き流速と同程度なことから、この水温低下が底入り潮によるものだと判断できる。興味深いのは太平洋の水塊が沿岸域へ進入したにも関わらず、底入り潮発生により塩分が低下していることである。

7月29日~8月4日、8月23日~29日のCTD観測は、2回目と5回目の底入り潮発生前~発生時に対応しており、低水温水塊の豊後水道への進入を捉えることに成功した。図5は、5回目の底入り潮が発生する直前である8月23日と発生中の8月26日の水温断面図である。8月23日の陸棚斜面域の水温は17程度であり、豊後水道内の底層水温は約18であった。3日後の8月26日には、陸棚斜面付近の底層は16以下の水塊で占められ、豊後水道底層の水温も17と低下しており、底入り潮の発生により、陸棚斜面の冷水塊が湧昇し、豊後水道内へ進入したことが示唆される。5回目の底入り潮発生時の3測点の流速の南北方向成分と、海底上2mの水温の時系列を図5に示す。測点SB、SO1では底層水温の低下のタイミングで底層において北向きの流速が見られ、時間とともにその層厚が大きくなっており、底層に冷たい水塊が進入したことを示している。一方測点OW4では、水温低下の前に表層と中層において北向きの流れが発生しているが、水温低下時には底層の流れは南向きとなっていた。

底入り潮発生前後のデータを使い水深80mでの運動方程

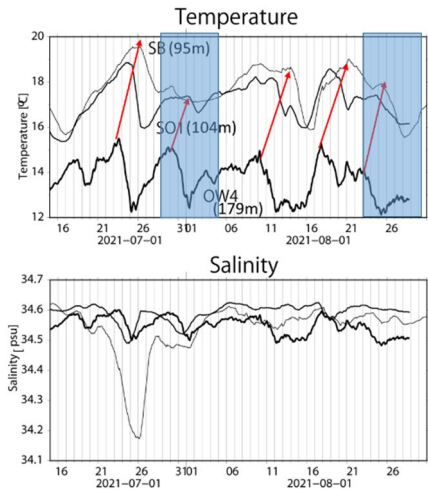


図4. 観測点SB, SO1, OW4の海底上2mにおける水温と塩分の時系列。青色のハッチはCTD観測を実施した期間を示す。

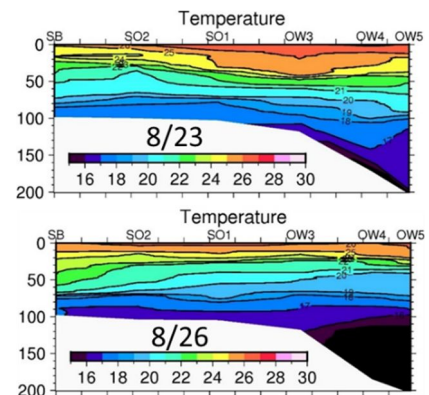


図5. 8月23日と26日の水温の南北断面図。

式の各項の大きさを計算したところ、圧力勾配項の傾圧成分が変化し北向きの応力が増加していたことが分かった。8月23日の水温断面構造とOW4での流速データから、底入り潮発生前に表層に黒潮系の暖水が流入したことで豊後水道内の圧力が低下し、底層での南北の圧力傾度力が増加したことで冷水塊が豊後水道に進入したと考えられる。図4に示されているその他4回の底入り潮発生時の直前にも、OW4の表層で北向きの流れが見られており、同様なことが起こっていたと推測される。このことから、豊後水道の底入り潮は、表層に黒潮系暖水が流入することが発生トリガーとなっていると考えられる。ただし、過去の水温データを調べたところ、底層で水温が低下する前に必ず表層の水温が上昇するわけではないことから、今回示した発生メカニズムとは異なるケースもあると思われる。

4-2. 太平洋の栄養塩が瀬戸内海の栄養塩に占める割合

3次元物理低次生態系モデルにより、瀬戸内海の物理場と低次生態系の時空間変化を再現した。図6に溶存態無機窒素(DIN)と植物プランクトン量を示すクロロフィルaの観測値と計算値の比較を示す。DIN、クロロフィルaの観測値と計算値の相関係数はそれぞれ0.82、0.63であった。DIN、クロロフィルa共に高濃度の領域においてモデル結果は過小となっている。このような差がみられたのは、大阪湾や播磨灘の岸に近い場所であり、本モデルでは工場等から直接放出される栄養塩を考慮してなく、河川のみから栄養塩を与えているためこのような差がでたものと思われる。極めて岸に近い場所を除くと観測値と計算値はよく一致しており本モデルが瀬戸内海の低次生態系をめぐる物質循環を再現していると言える。

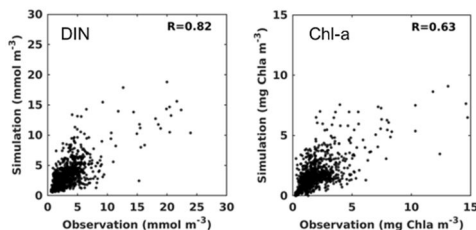


図6 溶存態無機窒素(DIN)とクロロフィルa濃度の観測値とモデル計算値との比較。

太平洋起源、河川起源、底質起源のDINを利用する植物・動物プランクトン、デトリタスの変数を準備し、各起源のDINの追跡計算を行った。図7に瀬戸内海全平均と各湾灘のDINおよび植物プランクトンに対する太平洋、河川、底質それぞれの起源の割合を示す。まず瀬戸内海全平均をみると、DINについては61%が太平洋起源、25%が河川起源、14%が底質起源となっており、植物プランクトンについては太平洋起源が46%、河川起源が35%、底質起源が19%となっている。湾灘毎にみていくと、太平洋に近い豊後水道では太平洋起源のDINが80%以上と高い。瀬戸内海中央部の燧灘でも太平洋起源のDINは40%程度を占めている。東部瀬戸内海では西部に比べ河川起源と底質起源のDINの占める割合が高い。豊後水道と紀伊水道沖のDINを別々の変数として追跡すると、豊後水道沖の栄養塩は備讃瀬戸まで到達していた。このことは、豊後水道から供給される太平洋起源の栄養塩が瀬戸内海の栄養塩および生物生産に大きな影響を与えていることを示唆している。この計算では底入り潮により供給されたDINを直接追跡しているわけではないが、夏季を中心に高い頻度で発生する底入り潮による太平洋起源の栄養塩の豊後水道への供給は、豊後水道の栄養塩だけでなく瀬戸内海のかなり広域の栄養塩環境に大きな影響を与えていると思われる。したがって、底入り潮発生頻度の経年的な変化は瀬戸内海の生物生産力を変化させていると考えられる。

瀬戸内海の低次生態系をめぐる物質循環を再現していると言える。

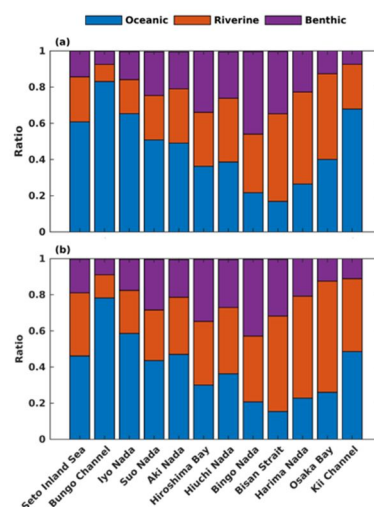


図7 瀬戸内海全域および各湾灘における(a)DINに対する太平洋起源、河川起源、底質起源の割合。(b)クロロフィルa濃度に対する各起源の割合。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Morimoto, A., Dong, M., Kameda, M., Shibakawa, T., Hirai, M., Takejiri, H., Guo, X., Takeoka, H.	4. 巻 9
2. 論文標題 Enhanced cross-shelf exchange between the Pacific Ocean and the Bungo Channel, Japan related to a heavy rain event	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontier in Marine Science	6. 最初と最後の頁 869285
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2022.869285	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 Leng, Q., Guo, X., Zhu, J., Morimoto	4. 巻 20
2. 論文標題 Contribution of open ocean to the nutrient and phytoplankton inventory in a semi-enclosed coastal sea	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 4323-4338
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/bg-20-4323-2023	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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前谷佳奈・森本昭彦・大西秀次郎・郭新宇・美山透
2. 発表標題 2021年の底入り潮の発生状況
3. 学会等名 豊後水道研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本昭彦・前谷佳奈・大西秀次郎・徳田真太郎・郭新宇
2. 発表標題 係留観測と船舶観測による豊後水道の底入り潮の進入過程の解明
3. 学会等名 2022年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 分担 者	郭 新宇 (Guo Xinyu) (10322273)	愛媛大学・沿岸環境科学研究センター・教授 (16301)	

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