

成層期周防灘における伊予灘系水の進入経路と一次生産との関わり

Intrusion route from Iyo nada to Suo nada and its contribution to primary production

中嶋さやか¹・井関和夫²・浜口昌巳³・金山 進⁴・関本恒浩⁵

Sayaka NAKAJIMA, Kazuo ISEKI, Masami HAMAGUCHI
Susumu KANAYAMA and Tsunehiro SEKIMOTO

In recent years, some of researchers have reported that most of nutrients in Suo nada are derived from open ocean through the Bungo Channel and Iyo nada. If these nutrients flow into euphotic zone of Suo nada, they can provide primary production and play an important role in Suo nada. We investigated pathway from Iyo nada to Suo nada by using observation data such as temperature, salinity, density and nutrients. As the result, we confirm existence of inflow from Iyo nada at euphotic zone in Suo nada. However, it is presented that less of contribution to primary production in Suo nada because of low nutrients in Iyo nada.

1. はじめに

瀬戸内海の栄養塩環境において、外洋起源の栄養塩の存在が注目されている。武岡ら(2004)は、精度については検討の余地があるとしながらも、瀬戸内海の栄養塩の3分の2程度は外洋起源であるとの見積もりを示すとともに、本研究の対象海域である瀬戸内海西部に位置する周防灘においても、豊後水道、伊予灘を経て供給される外洋起源の窒素・リンは全体の7割にまで及ぶと述べている。

夏季豊後水道の底層では富栄養の低温水が間欠的に流入する「底入り潮」が報告されており、これが瀬戸内海の栄養塩環境に大きく影響を及ぼすことが推測される。また藤原ら(1997)は、夏季の豊後水道の底層には外洋起源の栄養塩類が高濃度に存在することを示すとともに物質輸送量を計算し、夏季においては、豊後水道から70t/dayの溶存態全窒素が外洋からもたらされていると推定した。このような豊後水道における高栄養塩濃度水は、豊予海峡で混合されたのち、伊予灘そして周防灘へと進入すること、さらにその進入深度によっては、直接に灘内の植物プランクトンの光合成生産(一次生産)をもたらすことが考えられる。事実、伊予灘では、外洋起源の栄養塩類によって支えられる中層クロロフィル極大が報告されている(Takeoka et al.,1993)。小林ら(2006)は、過去30年間の浅海定線調査による水温・塩分の観測結果を用い、簡単な地形モデルから海峡部混合水の灘部への

進入深度の季節変化を調べている。その結果、豊予海峡における混合水の周防灘への進入深度は、4月-7月は中層進入、8月には底層進入となる傾向があることを示している。このことを踏まえれば、豊後水道からの高栄養塩濃度水が伊予灘を經由して周防灘に進入し、周防灘内での生産をもたらしていることが十分に推測される。

このように周防灘では、外洋起源の栄養塩の供給が強く示唆される一方で、過去30年間の山口県周防灘海域における海洋観測データから、アンモニア態窒素やリンなどの栄養塩類が5割程度の減少傾向にあること、さらにクロロフィルa濃度の減少も報告され、貧栄養海域へシフトしていることが指摘されている(和西,2005)。

以上のような背景から、伊予灘を通じての栄養塩の供給やこれに伴う周防灘内における一次生産への寄与についての知見を得ることは重要であると考えられる。そこで本研究では、2005年の春季から夏季にかけて実施された一部伊予灘を含む周防灘海洋観測の結果を用いて、①周防灘内への伊予灘系水の進入について検討するとともに、②伊予灘系水と周防灘内の一次生産との関わりについて考究することを目的とした。

2. 海洋観測概要

2005年5月13-16日、6月13-16日、8月29日-9月1日に(独法)水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所調査船「しらふじ丸」に乗船し海洋観測を実施した。観測点を図-1に示す。多項目センサー型計測器(アレック電子ASTD/500)を用いて、水温、塩分、光量子などの鉛直分布を、また一部観測点(図-1中、●で示す)においては、バンドンまたはニスキン採水装置を用いて水深0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50mおよび海底直上2m, 0.5m(以降、B-2m, B-0.5mと示す。)で採水を行った。DIN

1 正会員 修(農) 五洋建設(株)技術研究所
2 農博 広島大学大学院生物圏科学研究科
3 博(農) (独法)瀬戸内海区水産研究所
4 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
5 フェロー 博(工) 五洋建設(株)技術研究所

(ここでは NO_3+NO_2)は、試水をMILLEX HAフィルターでろ過した後、オートアナライザー(BRAN LUEBBE TRAACS2000)を用いて分析した。クロロフィルaはWhatman GF/Fフィルター上の濾過残渣をN, N'-ジメチルホルムアミド(DMF)で浸出した後、蛍光光度計(Turner Designs TD-700)を用いて蛍光法(Suzuki and Ishimaru, 1990)により求めた。

なお、本研究では伊予灘系水の進入に注目しているため、主に周防灘中央部から灘東部海域および伊予灘を対象に検討を行った。

3. 伊予灘系水の進入経路の推定

一般に、河川の影響が大きい内湾と外洋域などの平面的に塩分勾配が大きい海域間においては、塩分を指標にして、その分布から他海域からの水の進入を推定することができる。その他の手法としては、例えば、藤原ら(2002)は、東京湾を対象に、湾内・外の水平圧力勾配から流れの駆動力を求めることにより外洋水の進入深度を算定している。また、高橋ら(2000)は、伊勢湾と、伊勢湾と外洋を結ぶ伊良湖水道の2つの観測点からT-Sダイアグラムを作成し、伊良湖水道底層の水を外洋系水とした上で、水塊のおよそ8割以上が外洋系水である層を伊勢湾における外洋系水進入層と定義した。

図-2に、観測点全点の水温・塩分のデータを用いたT-Sダイアグラムを示す。東京湾や伊勢湾では、湾内外における水塊の違い、特に塩分濃度差が明瞭に示されるのに対し、周防灘では灘西部は関門海峡を通じて日本海と、灘東部は伊予灘を通じて豊後水道へとつながっているものの他海域を示すような明瞭な水塊の違いは認められなかった。そのため、上述のような手法により進入水を明瞭に示すことは困難であった。そこで、伊予灘に位置するSt.5と周防灘東部から灘中央部にかけて走るライ

ン①上に位置する観測点を抽出し、T-Sダイアグラムに示したところ、伊予灘であるSt.5と周防灘内に位置するSt.8がある水深において同様な水塊を示していた(図-2)。このことは、すなわち、伊予灘系水の周防灘への進入を意味する。そこでここでは、T-Sダイアグラム上でSt.5と交わるものを伊予灘系水と定義した。次に、伊予灘系水の影響を受けていると推測される位置について推定した。ここでは、伊予灘系水と等密度であり、かつ、「進入」の影響を示すような、鉛直的に急激な塩分変化を伴うものを進入水の影響が推測されるものとして定義し、データを抽出した。なお、これらは、St.5との塩分差が0.2 PSU以内であることも基準に判定した。

図-3は、周防灘中央部を横断するライン①ならび周防灘東部を縦断するライン②の密度の鉛直断面図に、上記の方法により判定された伊予灘系水と伊予灘系水の影響が示唆される水塊について示したものである。いずれの観測月においても周防灘東部のSt.8まで伊予灘系水の進入が認められた。伊予灘系水の進入水深に着目すると、5月では水深20-30mと比較的深く、6月、8-9月では、そ

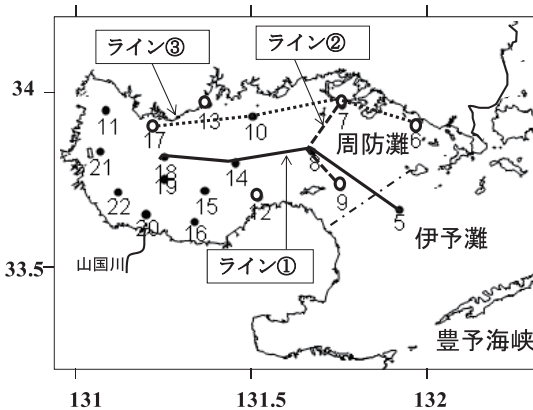


図-1 観測点

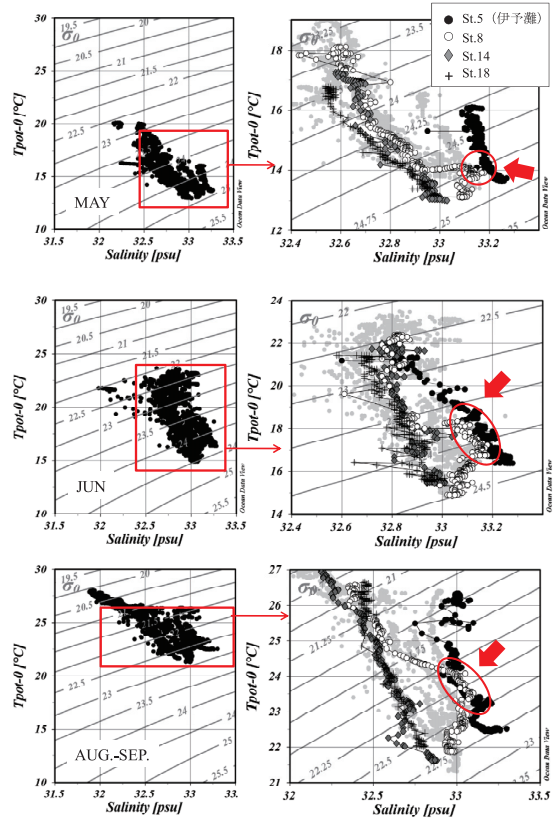


図-2 周防灘におけるT-Sダイアグラム (伊予灘に位置するSt.5も含む)

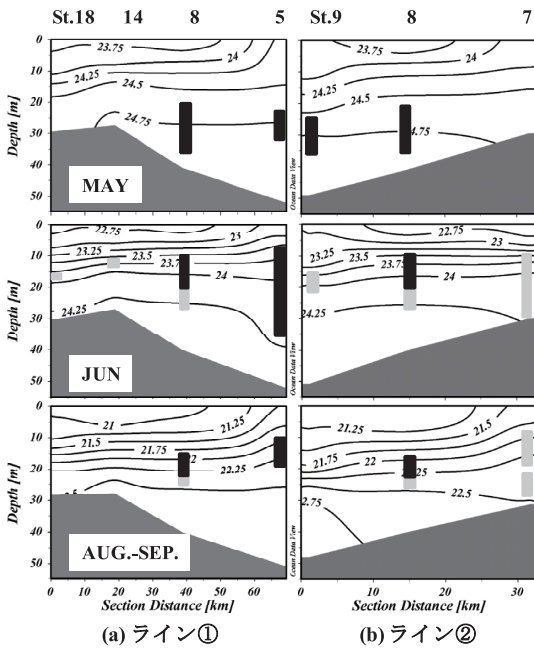


図-3 密度の鉛直断面図と伊予灘系水進入層 (黒: 伊予灘系水, 灰色: 伊予灘系水の影響が認められるもの)

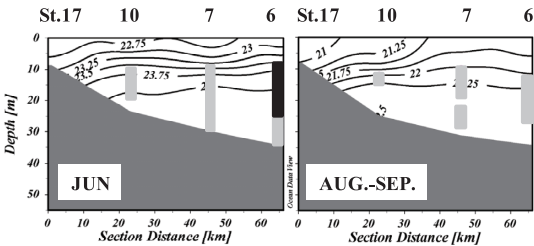


図-4 ライン③における密度の鉛直断面図と伊予灘系水進入層 (黒: 伊予灘系水, 灰色: 伊予灘系水の影響が認められるもの)

それぞれ水深10-20m, 15-20mと中層進入を示し, いずれも密度躍層下層に位置していた. 次に, ライン②より, 伊予灘系水の進入経路について考察する. 5月では, 大分県から灘中央部にかけて, 6月, 8-9月では, 灘中央部を中心としながらもやや山口県側に伊予灘系水の影響がみられた. さらに, これらの月における山口県沿岸を走るライン③での同様の鉛直断面図をみると6月のSt.6には伊予灘系水が存在しており, また, 6月, 8-9月ともに山口県沿岸に沿って, 伊予灘系水の影響が見られた(図-4). 伊予灘から周防灘に進入する水は, 基本的にはコリオリの影響を受けるため, やや山口寄りに進入すると考えられる. 事実, 周防灘表層では, 北部を西流し反時計回りに国東半島から沖へ向かう流れが卓越すること

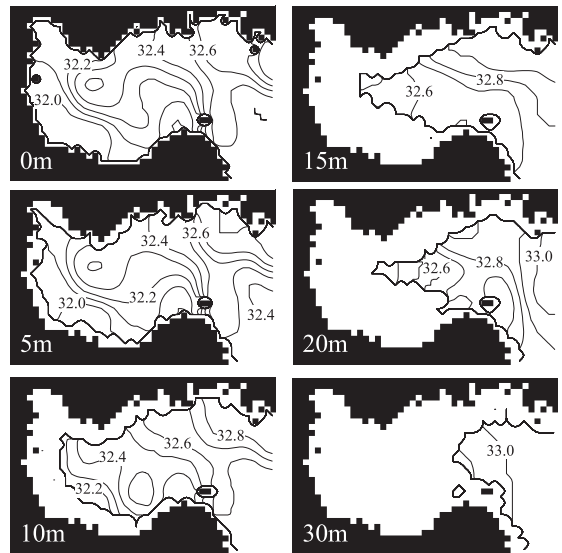


図-5 8-9月における各代表水深の塩分分布

が報告されているほか(柳ら, 1979), Changら(2009)はPrinceton Ocean Model(POM)を用いた計算により, 周防灘の表層ならびに水深10m層では反時計まわりの流れを示している. 図-5には, 代表水深における塩分の平面分布図を示す. ここでは, 一例として8-9月の観測結果を示しているが, いずれの月においても灘東部から山口県側にかけて高塩分水が分布しており, 塩分分布パターンからも山口県寄りの水の進入が推定された. なお, 進入深度が深い5月では, 灘中央部から大分県寄りの進入経路であった. この理由については, まだ不明な点が多く今後の課題である.

4. 周防灘内への伊予灘系水の進入と一次生産との関わり

図-6に, ライン①におけるクロロフィルa濃度の鉛直断面図と伊予灘系水の進入位置を示したものを示す. なお, 補償深度は, 海表面直下入射光量 I_0 の値の1%の光量をもつ水深であり, ここでは橋本ら(1997)に従い, 水深1-3mの消散係数 K_{1-3} と水深2mの入射光量 I_2 を用いた次式より I_0 算出した.

$$I_0 = \frac{I_2}{\exp(-K_{1-3} \cdot 2)} \dots\dots\dots (1)$$

K_{1-3} : 海面直下1~3mの消散係数

I_2 : 海面直下2mの光量

いずれの月も, 伊予灘系水は有光層内に進入していた.

また、クロロフィルa濃度の分布をみると、5月では中～底層で、6月では水深20m以浅、8-9月では水深10-20mでクロロフィルピークがみられ、伊予灘系水の進入水深とクロロフィルピーク水深は概ね一致していた。

次に、この高クロロフィルa濃度と伊予灘系水の進入との関わりについて検討する。図-7に、St.5におけるクロロフィルa濃度とDIN (NO₂+NO₃)濃度の鉛直プロファイルを示す。クロロフィルa濃度は、有光層下層ならびに進入水深あたりでピークを示していた。一方、DIN濃度は、底層では比較的高いものの進入水深では1μM以下と非常に低く貧栄養であった。したがって、密度流として進入する伊予灘系水の周防灘一次生産への寄与は大きくないものと考えられた。また、周防灘内のクロロフィルピーク水深と進入水深の一致は、該水深が躍層下層に位置していることによる粒状懸濁物の集積効果とともに、伊予灘からの移流による影響が考えられた。

藤原ら(2003)は、豊後水道から燧灘にかけての密度流を算出し、その結果、豊後水道底層の栄養塩は豊予海峡において有光層に運ばれた後、伊予灘の水深約10m層を通り、来島海峡から再び下層を通ることを示すとともに、この輸送ルートでは、伊予灘で有光層を通るため、栄養塩は枯渇し、来島海峡から燧灘の下層に入るときには極めて貧栄養となっていることを述べている。この報告と本観測結果を総合して考えると、豊後水道から供給される外洋起源の栄養塩の多くは、豊予海峡で有光層に運ばれた後、多くはその近傍で消費され、無機態として瀬戸内海の広い範囲へ直接的に供給される割合は低いことが考えられる。

本研究では、密度流のみに着目して検討を行ったが、外洋起源の栄養塩がどのようなプロセスを経て各海域に運ばれているのかは未だ不明な点が多く、今後の研究が期待される。

5. おわりに

2005年5月から8-9月にかけて実施した海洋観測から、周防灘に進入する伊予灘系水の進入経路について検討を行った。その結果、5月では水深30m程度の底層で、6月、8-9月では中層において、灘東部までの入り込みが見られた。平面的な進入経路は、底層進入であった5月では大分県寄りの進入を示し、中層進入時では灘中央部からやや山口県寄りの経路で灘内に進入していた。

また、伊予灘系水は、周防灘内の有光層内に進入するものの、進入層における伊予灘系水のDIN (NO₂+NO₃)濃度は非常に低濃度であり、周防灘において直接的な一次生産への寄与は大きくないものと考えられた。

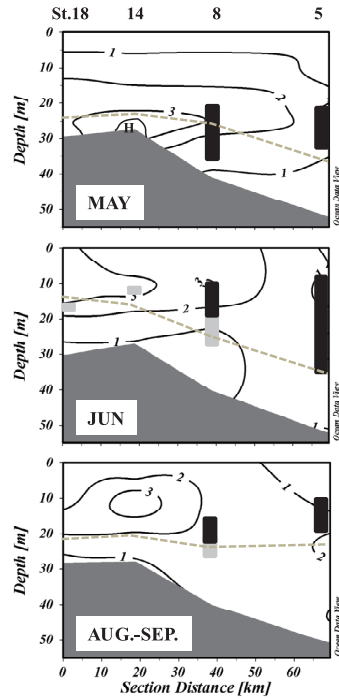


図-6 ライン①におけるクロロフィルa濃度 (µg⁻¹) の分布と伊予灘系水進入層 (黒：伊予灘系水、灰色：伊予灘系水の影響が認められるもの、点線：補償深度)

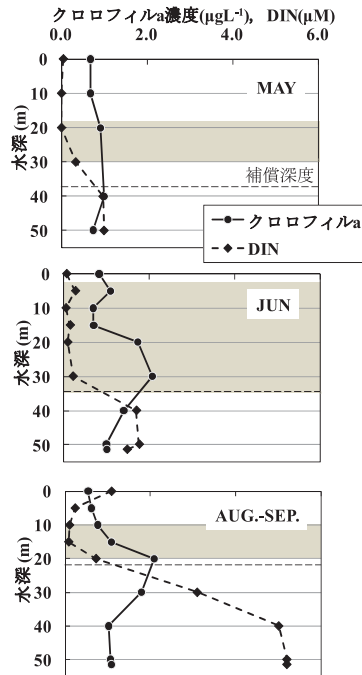


図-7 St.5におけるDIN (NO₂+NO₃)とクロロフィルa濃度との鉛直プロファイル (ハッチングは進入深度を示す.)

参 考 文 献

- 小林志保・藤原建紀 (2006) : 瀬戸内海における海峡部混合水の灘部への進入深度の季節変化, 海と空, 第82巻, pp.1-11.
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一 (2000) : 伊勢湾における外洋系水の進入深度と貧酸素水塊の季節変動, 海の研究, 第9巻, 第5号, pp.265-271.
- 武岡英隆・速水祐一・碓井澄子 (2004) : 周防灘および西瀬戸内海域の物理・栄養塩環境, 瀬戸内海ブロック水産業関係試験研究推進会議生産環境・漁業生産合同部会議事要録, pp.31-37.
- 橋本俊也・多田邦尚 (1997) : 広島湾における海水の光科学特性. 海の研究, 第6巻, pp.151-155.
- 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘 (1997) : 外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1061-1065.
- 藤原建紀・佐々倉 諭・高橋鉄哉・山田佳昭 (2000) : 東京湾における外洋水の進入深度の算定法とその季節変化, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.431-435.
- 藤原建紀・小林志保・高志利宣 (2003) : 瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.951-955.
- 柳 哲雄・樋口明生 (1979) : 瀬戸内海の恒流, 沿岸海洋研究ノート, 第16巻, 第2号, pp.123-127.
- 和西昭仁 (2003) : 山口県周防灘海域における最近30年間の水質変動, 山口県水産研究センター研究報告, 3号, pp.29-40.
- Chang, Pil-Hun, X. Guo and H. Takeoka (2009): A Numerical Study of the Seasonal Circulation in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Oceanography*, Vol. 65, pp. 721-736.
- Takeoka, H., O. Matsuda and T. Yamamoto (1993) : Processes Causing the Chlorophyll a Maximum in the Tidal Front in Iyo-Nada, Japan, *J. Oceanogr.*, Vol.49, pp.57-70.
- Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990) : An Improved Method for Determination of Phytoplankton Chlorophyll using N-Dimethylformamide, *J. Oceanogr.*, Vol.46, pp.190-194.
-