

— 論文 —

成層期の瀬戸内海における各態窒素・リン およびケイ素と栄養塩元素比の分布*

小林 志保[†]・藤原 建紀[†]・
多田 光男[‡]・塚本 秀史[‡]・豊田 利彦[‡]

要 旨

瀬戸内海における栄養塩濃度の変動機構を解明する上で重要な、成層期の栄養塩、クロロフィルおよび粒状態炭素・窒素の鉛直分布を、全域にわたる現地観測によって調査研究した。また、各元素間の比の場所的な違いを調べ、瀬戸内海における化学量論的 (stoichiometric) 研究の基礎資料とした。栄養塩の分布には成層強度の違いが反映され、海峡部では鉛直一様、灘部では上層で低濃度、下層で高濃度となっていた。さらに、成層強度が互いに同程度の灘部の中でも、光環境の違いによって、下層に栄養塩が蓄積される場合と、下層の栄養塩が植物プランクトンによって消費されて減少し、粒状態が多く蓄積する場合とに分別された。このように、夏季に灘部において高栄養塩水・貧栄養塩水が生じることは、秋季以降の瀬戸内海全域における栄養塩濃度の変動機構においても重要な役割を果たすと考えられた。一方、元素比の分布から瀬戸内海中央部 (備讃瀬戸周辺: 133.2°E~134.4°E) に、窒素・リンに対するケイ素の比が大きい領域があることが示された。特に燧灘では、窒素制限もしくはリン制限のために、ケイ素が使われずに残って蓄積することが示された。また、播磨灘東部底層から明石海峡、および大阪湾西部底層では、硝化もしくは脱窒の中間産物である亜硝酸態窒素濃度が高く、硝酸態窒素濃度を上回る領域があった。元素比の比較により、紀伊水道および豊後水道の下層水は、外海水に近い性質を持っていることが示された。

キーワード: 栄養塩元素比, C/N 比, ケイ素, クロロフィル極大層, 底層高濁度層,
瀬戸内海

1. はじめに

瀬戸内海は、太平洋に面した陸棚海域である。九州、四国、本州に囲まれて水路状の半閉鎖性海域となっ

おり、両端に位置する紀伊水道と豊後水道を通じて陸棚斜面に続いている。

瀬戸内海の水質は1970年代以降の環境政策によって改善されてきたが、現在においても富栄養化による赤潮の発生やそれにともなう漁業被害が起きている。一方、瀬戸内海全域では、近年、貧栄養化にともなう漁業問題が発生している。例えば、1994年度以降には、中部から東部瀬戸内海において、栄養塩 (おもに窒素) 不足によるノリの色落ち (色調低下) がほぼ毎年発生し、

* 2005年10月18日受領; 2006年1月6日受理
著作権: 日本海洋学会, 2006

[†] 京都大学大学院農学研究科;

〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町

主著者 e-mail address: shihok@kais.kyoto-u.ac.jp

[‡] 弓削商船高等専門学校;

〒794-2593 愛媛県越智郡上島町弓削下弓削 1000

ノリの生産量に大きな影響を与えている。現在の瀬戸内海では、貧栄養化傾向をベースに富栄養化海域が混在するという、水環境管理の難しい状態となっている。

成層期の瀬戸内海では、低塩分水が内海から外海へ上層を通じて流出し、それを補う形で高塩分水が外海から内海へ下層を通じて流入する密度流が発達して、物質輸送に影響を与えている (Murakami *et al.*, 1985; 藤原, 2001; Kobayashi *et al.*, 2003)。一方、瀬戸内海の水温・塩分の水平分布は、黒潮流路の変動によって変化する (中田・杉浦, 1987)。高志ら (2002) は、瀬戸内海に隣接する外海の上層の貧栄養水と下層の高栄養水が流入する割合は、黒潮の離岸距離によって決まっていることを示した。このように瀬戸内海の内海には、上層流出・下層流入の流れや外海からの流入が大きな影響をおよぼしている。その影響を考慮して栄養塩の変動機構を解明するためには、太平洋に面した東西の入り口から中央部にいたるまでの瀬戸内海全域において、栄養塩などの物質の鉛直分布と蓄積過程を明らかにする必要がある。

本研究では、瀬戸内海の栄養環境の変動機構を解明する上で重要な、成層期における各態窒素・リン、ケイ素およびクロロフィル等の鉛直分布を現地観測によって調べた。また、窒素・リンの存在形態の変化は、植物プランクトンによる栄養塩の消費や有機物の底質での分解によっておきるために、水中の光環境の影響を大きく受ける。そこで、現地調査時に光量子計を用いて瀬戸内海の各海域における光環境の場所的な違いを詳細に調べた。さらに、現地調査の結果から溶存態窒素と溶存態リンの比 (N/P 比)、および溶存態ケイ素と溶存態窒素の比 (Si/N 比) を求めて外海におけるそれらの値と比較し、内海水の性質を詳しく検討した。

2. 方法

現地調査の概要と解析資料については、次の通りである。Fig. 1 に観測点図を示す。黒丸は、2002 年 8 月および 2003 年 8 月に瀬戸内海を縦断する測線において、京都大学と弓削商船高等専門学校が行なった共同観測の観測点である。光量子計を用いて光強度の鉛直分布を測定し、光の強度が表層の 1% となる水深を補

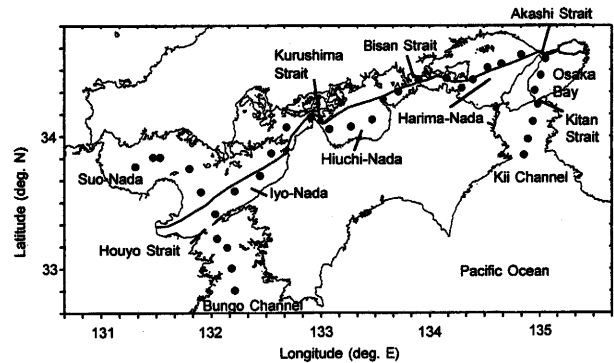


Fig. 1. Map of the Seto Inland Sea. Circles are observation points and the bold line is the ferry track for marine environmental monitoring by NIES-CGER.

償深度と見なして、これより上層を有光層と定義した。また、水温・塩分・クロロフィル蛍光・濁度のデータを Alec 電子社製クロロテック (ACL1180 - DK) により取得するとともに、水深 10 m 間隔で採水を行なった。採取した海水は、直ちにワットマン GF/F フィルターを用いて濾過し、凍結保存した。分析は、溶存態ケイ素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リン、粒状態炭素・窒素、クロロフィル、フェオ色素について行なった。栄養塩類は Technicon 社製 Autoanalyzer による自動分析法、粒状態炭素・窒素はヤナコ社製 CHN Coder、全窒素は三菱化学社製 TN-100 により分析した。クロロフィルはアセトン抽出し、Turner Design 社製蛍光光度計 10-AU を用いて Chlorophyll-a およびフェオ色素の量を算出した。また、播磨灘および燧灘中央の観測点では、500 ml の海水を採取し、グルタルアルデヒド (最終濃度 1%) で固定して、帰港後に板倉ら (1990) の方法により 50 倍に濃縮、検鏡して植物プランクトンの個体数および種組成を調べた。

上記の観測は、2002 年 8 月に備讃瀬戸よりも西部を、2003 年 8 月に備讃瀬戸よりも東部について行なった。水温、塩分、栄養塩の作図にあたっては、香川県、兵庫県、大阪府、和歌山県の各水産試験場による浅海定線調査、および兵庫県による重要水族調査から 2002 年 8 月の観測結果をあわせて用い、2002 年の結果を一つ

の図にした。クロロフィル、粒状態窒素、濁度については、西部は2002年の結果、東部は2003年の結果を用いて作図し、二つをあわせて一つの図とした。

硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リンの分布の作図にあたっては、豊後水道から備讃瀬戸までの範囲は2002年の観測により水深10 m間隔で測定した結果を用い、備讃瀬戸から紀伊水道までの範囲については、2002年8月の浅海定線調査の結果を補間して用いた。浅海定線調査の結果には、播磨灘西部では0 m, 10 m, 30 m, B-1 mの3~4層、播磨灘中央部では0 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, B-1 mの6層、播磨灘東部では0 m, 10 m, B-1 mの3層、大阪湾西部から紀伊水道では0 m, 10 m, 30 m, B-1 mの4層のデータが得られている。層数が4層よりも少ない場合には、水温と栄養塩の関係を用いて、栄養塩の鉛直分布を推定した。その例として、兵庫県の浅海定線調査の結果を用いて推定した水温と硝酸態窒素濃度およびリン酸態リン濃度の関係式を示す (Fig. 2)。水温と栄養塩濃度との関係は、栄養塩が枯渇した高温領域 (白丸) と、水温が低くなるほど栄養塩濃度が高くなる領域 (黒丸) とで異なっていた。高温領域では、その海域内の濃度の平均値を各点の値とした。それ以外の海域では、水温と栄養塩濃度の回帰式を用いて栄養塩濃度を推定した。ただし、水温と栄養塩濃度間の相関係数が0.9を下回る場合には、各層データを線形補間して用いた。

溶存態ケイ素の分布の作図にあたっては、豊後水道から備讃瀬戸までの範囲については、2002年の観測により10 m間隔で測定した結果を用いた。また備讃瀬戸から明石海峡までの範囲については、2002年8月の浅海定線調査の結果を補間して用いた。補間方法については、上に述べた硝酸態窒素等と同じ方法を用いた。明石海峡から紀伊水道までの範囲については、2003年の観測により10 m間隔で測定した結果を用いた。

国立環境研究所地球環境研究センター (NIES - CGER) の地球環境モニタリング事業の一環として、1991年から15年間にわたってフェリーの定期航路を利用した海洋環境のモニタリングが行なわれている (原島・功刀, 2000)。1994年以降には、瀬戸内海を縦断する大阪-別府航路のフェリーによって、水温・塩分の連続データが毎日取得され、栄養塩濃度が2週間ご

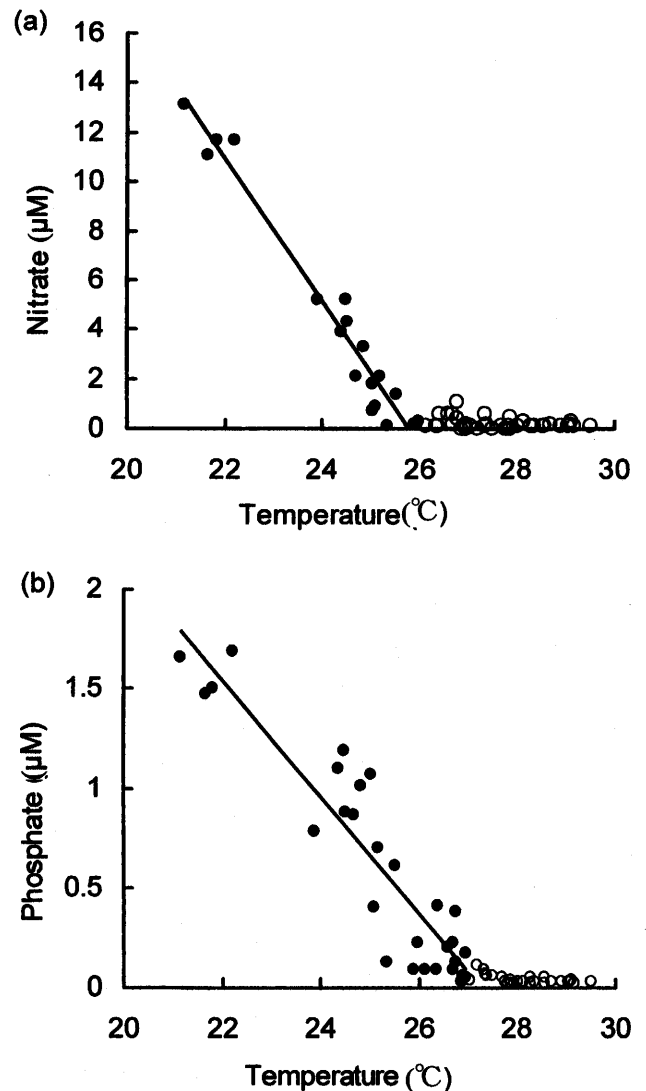


Fig. 2. The scattering diagrams between temperature ($^{\circ}\text{C}$) and concentrations of (a) nitrate (μM) and (b) phosphate (μM) in Harima Nada in August 2002.

とに測定されている。栄養塩分析用の取水は表層 (水深約5 m) から30分間隔で行なわれている。本研究では、1995年から1999年にかけての夏季 (8月) のデータを国立環境研究所ホームページ (<http://www-cger2.nies.go.jp/marine/east/me05.html>) よりダウンロードして解析に用いた。フェリーの航路は Fig. 1 に太線で示している。

環境省は、日本近海汚染実態調査として、大阪湾から太平洋にいたる測線において、水温、塩分、溶存態ケイ

素, 硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素, アンモニア態窒素, リン酸態リンなどを測定している。サンプリングは, 各観測点の水深に応じて5~15層で行なわれている。本研究では, 紀伊水道南部の観測点 (33°51.5'N, 134°56'E) から南端の観測点 (29°56'N, 134°48'E) における, 1990年7月の値を用いた (環境省, 1991)。

3. 結果

Fig. 3 (b) に水温の縦断分布を示す。灘部の上層は高温の海水に覆われて, 成層していた。成層によって鉛直的な熱の拡散が抑えられ, 灘部の下層は低温となっていた。播磨灘と伊予灘の下層には大規模な冷水塊が形成されていた。外海に面する紀伊水道・豊後水道の下層にも低温の水塊が存在した。一方, 海峡部の水温は, 強い潮流混合を受けてほぼ鉛直一様となっていた。特に, 中央部に位置する備讃瀬戸では, 下層の低温水が上層まで広がっていた。Fig. 3 (a) は, 瀬戸内海を縦断するフェリーによって連続観測された表層水温の分布を示す。混合の強い領域の表層水温は, 混合の弱い領域に比べて相対的に低く, 水温極小の位置は海峡部の位置と一致していた。

Fig. 3 (c) に塩分の縦断分布を示す。塩分は中央部で最も低く, 東西に向かって徐々に高くなっていった。大阪湾西部から紀伊水道を含む東部瀬戸内海では, 等塩分線が外海に向かって傾いており, 上層流出・下層流入のエスチュアリー循環流を示していた。同様に, 燧灘における等塩分線も西側に向かって傾いており, 備讃瀬戸から燧灘上層に低塩分水が流出し, 来島海峡から燧灘下層に高塩分水が流入する交互流を示していた。外海に面する紀伊水道・豊後水道の下層には, 高塩分水が進入していた。豊後水道では下層だけでなく表層にも高塩分水が進入し, 中層が最も低塩分になっていた。

Fig. 4 (a) に硝酸態窒素の縦断分布を示す。この図の中の点線は補償深度を示しており, これより上層が有光層である。補償深度は海域によって異なり, 中央部よりも外海側の方が深くなっていた。補償深度は, 最も浅い備讃瀬戸で15 m程度, 最も深い豊後水道では60 mに達していた。燧灘において, ほぼ底まで光が届いていたことが注目される。クロロフィルの極大層が

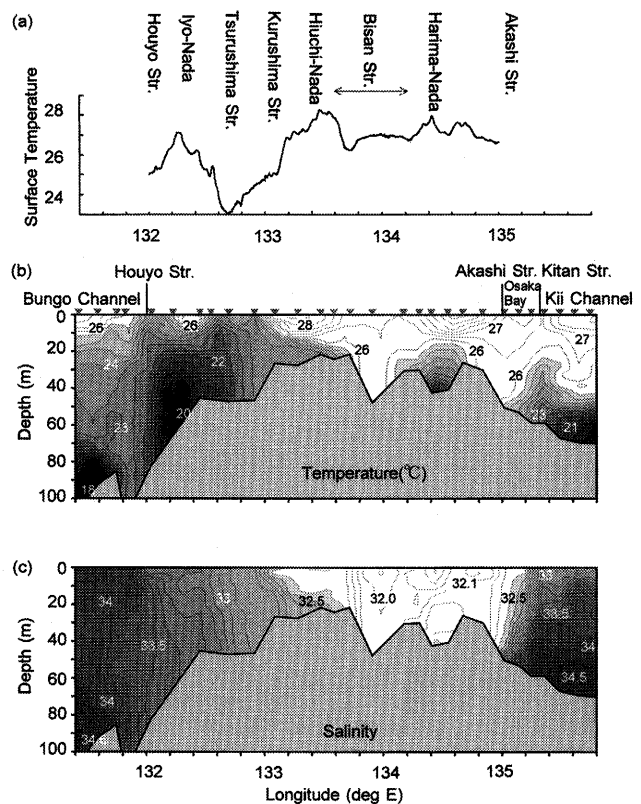


Fig. 3. (a) Longitudinal distribution of surface temperature monitored by the ferry on 1st August 2002. The axial sections of (b) temperature (°C) and (c) salinity in the Seto Inland Sea, observed from 1st to 6th August 2002. Triangles above each figure indicate observation points. Coordinates are indicated in longitude between 132 and 135 degrees East. Outside of this region, distances are converted to longitude on the axial line.

形成されている海域では補償深度が局所的に浅くなっており, 有光層の厚さはその時のクロロフィル濃度の影響を受けて変化していた。

灘部 (播磨灘・燧灘・伊予灘・紀伊水道・豊後水道) の表層では, 硝酸態窒素はほぼ枯渇状態になっていた (Fig. 4 (a))。一方, 潮流混合の強い海峡部 (豊予海峡・釣島水道・来島海峡・備讃瀬戸・明石海峡・紀淡海峡) では, 中層から表層にかけての濃度が灘部表層に比べて高く, これらの海域では上層へ常に栄養塩が補給されていた。特に備讃瀬戸では, 栄養塩濃度がほぼ鉛直一様に高く, 河川からの供給の影響に加え, 栄養塩を

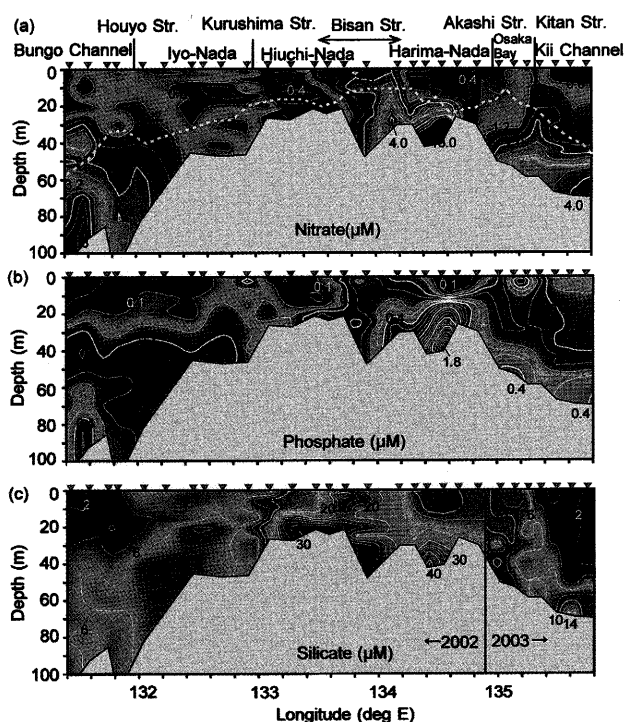


Fig. 4. Axial sections of (a) nitrate (μM), and (b) phosphate (μM), observed in August 2002. Contour lines from the Bungo Channel to Bisan Seto are drawn by using observed data from the training ship "Yugemaru", and others from Harima-Nada to the Kii Channel using interpolated values from raw data observed by the Prefectural Fisheries Observatories of Kagawa, Hyogo, Osaka and Wakayama. The method of interpolation is described in the text. All observations were conducted from 1st to 6th August, 2002. Axial section of (c) dissolved silicate (μM) observed in summer (the left figure is in August 2002 and right figure is in August 2003). Triangles above each figure indicate observation points. The broken line in Fig. 4 (a) is the compensation depth. Coordinates are defined as in Fig. 3.

多く含んだ下層の水が上方に輸送されていることを示していた。備讃瀬戸で上方に輸送された栄養塩は、燧灘上層にも広がっていた。一方、灘部の底層では、硝酸態窒素濃度は隣接する海峡部よりも高かった。特に播磨灘底層には、高濃度の硝酸態窒素が冷水塊 (Fig. 3 (b)) と対応した形で分布していた。紀伊水道と豊後水

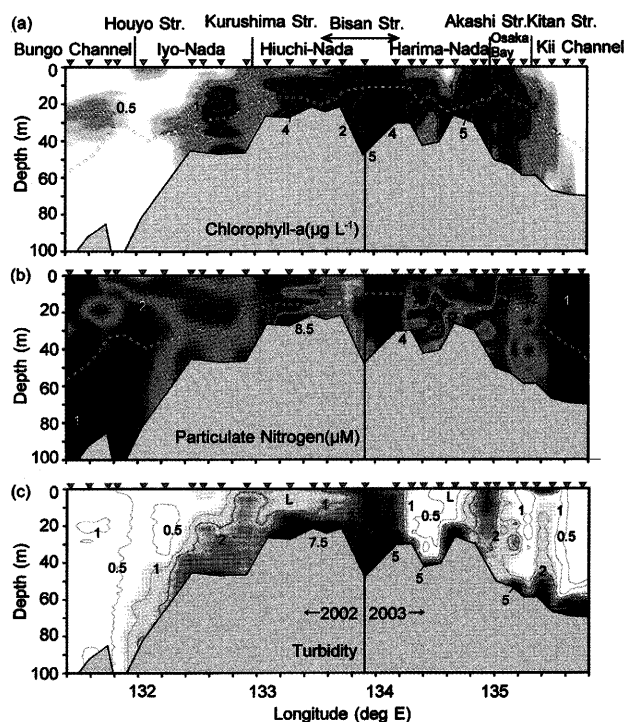


Fig. 5. Axial sections of (a) chlorophyll-a ($\mu\text{g L}^{-1}$), (b) particulate nitrogen (μM), and (c) turbidity (ppm), observed in summer (left figure is in August 2002 and right figure is in August 2003). Triangles above each figure indicate observation points. The broken line in Fig. 5 (a) and (b) is the compensation depth. Coordinates are defined as in Fig. 3.

道の底層でも栄養塩が高く、低温・高塩分の水塊と栄養塩濃度の高い水塊とが対応していた。燧灘では、例外的に底層の栄養塩濃度が低く、硝酸態窒素は表層から底層まで完全に枯渇していた。

リン酸態リンの分布の特徴は、硝酸態窒素とほぼ同じであった (Fig. 4 (b))。Fig. 4(c) に溶存態ケイ素の縦断分布を示す。溶存態ケイ素濃度は、播磨灘および燧灘の底層で高く、また備讃瀬戸から燧灘東部では全層で高かった。紀伊水道と豊後水道の下層でもやや濃度が高かった。ケイ素の分布は、窒素・リンの分布とは異なり、各灘における濃度の鉛直勾配よりも、内海側で濃度が高く外海に向かうにつれて低くなる全域規模の水平勾配が卓越していた。溶存態ケイ素については、中央部 (燧灘～播磨灘) で特に高い値を示したことが特

微的である。

Fig. 5(a) にクロロフィルの縦断分布を示す。潮流混合が強い備讃瀬戸において、鉛直的にも水平的にもクロロフィル濃度が一様に高かった。また、燧灘・周防灘 (Fig. 6(e))・播磨灘・豊後水道では、表層の濃度は極めて低かったが ($\sim 0.2 \mu\text{g L}^{-1}$)、それよりも下層で濃度が高く、亜表層クロロフィル極大層が形成されていた。燧灘では極大層が特に明瞭であり、クロロフィル濃度は最も高いところで $5 \mu\text{g L}^{-1}$ 程度であった。豊後水道の中層のクロロフィル極大層は、内海側から流出する低塩分水と対応していた。

Fig. 5 (b) に粒状態窒素の縦断分布を示す。粒状態窒素濃度はクロロフィル濃度の高い場所では高かった。また、灘部の下層でも濃度が高く、特に、燧灘の底層では粒状態窒素の蓄積が顕著であった。

Fig. 5 (c) に濁度の縦断分布を示す。外海に面した紀伊水道、豊後水道では、濁度は極めて低かった。西部では、外海から内海へ向かう伊予灘底層の斜面に沿って濁度が高くなり、安芸灘から来島海峡では底層から表層まで濁度が高かった。東部では、潮流の強い明石海峡および備讃瀬戸でほぼ鉛直一様に濁度が高かった。一方、隣接する灘部では、上層の濁度は海峡部よりも低く、下層の濁度は海峡部よりもさらに高かった。特に燧灘・播磨灘では、上層の濁度が極めて低くなり、下層には底層高濁度層が形成されていた。図には示していないが、燧灘や播磨灘の底層ではフェオ色素濃度が高く、すでに述べたように粒状態窒素が蓄積していた。

Fig. 6 (a)~(f) に、豊予海峡から周防灘にかけての水温・塩分・硝酸態窒素・溶存態ケイ素・クロロフィル・粒状態窒素の分布を示す。周防灘は強く成層しており、水温躍層が 20 m 付近にできていた。周防灘の下層水温は豊予海峡の混合水よりも低く、伊予灘、播磨灘と同様に底層に冷水塊が形成されていた。等塩分線は豊予海峡に向かって傾き、上層から低塩分水が豊予海峡に向かって流出し、下層から高塩分水が流入する分布となっていた。硝酸態窒素濃度は上層 (15 m 以浅) で低く、それより下層で高かった。栄養塩濃度が高い領域と、水温が 22 度を下回る冷水塊とが一致していた。溶存態ケイ素にも上層で低く下層で高い傾向が見られたが、硝酸態窒素ほど上下層の差が大きくなり、豊予

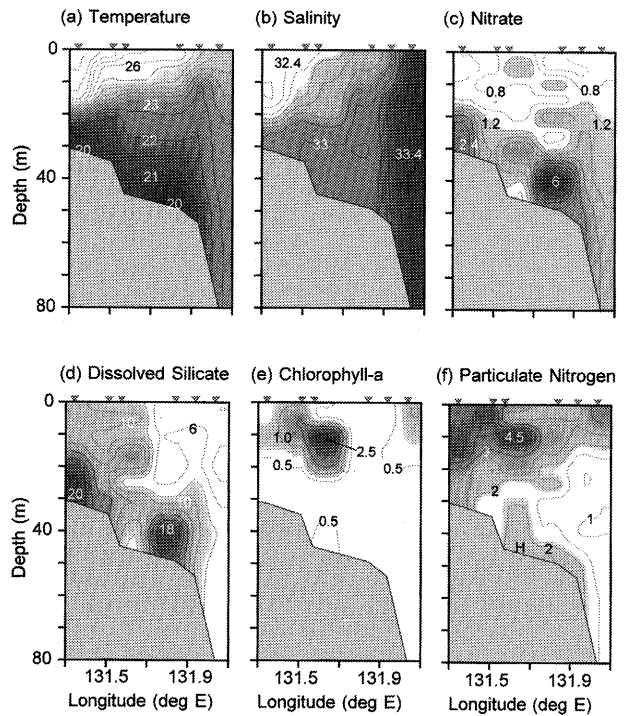


Fig. 6. Axial sections of (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity, (c) nitrate (μM), (d) dissolved silicate (μM), (e) chlorophyll-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) and (f) particulate nitrogen (μM) in Suo Nada, observed on 1st ~6th August 2002. Triangles above figures indicate observation points. Coordinates are indicated in degrees East longitude.

海峡から湾奥に向かって高くなる水平勾配が卓越していた。亜表層 (水深 10 m 付近) にクロロフィル極大層があり、同じ層で粒状態窒素濃度も高かった。粒状態窒素は冷水塊内にも僅かながら蓄積していた。

Fig. 7 (a), (b) は、亜硝酸態窒素濃度の縦断分布および硝酸態窒素濃度に対する亜硝酸態窒素濃度の比 (以下 NO_2/NO_3 比とよぶ) の縦断分布を示す。分母にあたる硝酸態窒素濃度が検出限界 ($0.1 \mu\text{M}$) に近い場合には、比の値の誤差が大きくなる。このため硝酸態窒素濃度が $1 \mu\text{M}$ 以下の領域については斜線で網掛けをし、ここでは誤差が大きいことを示した。亜硝酸態窒素濃度は、大阪湾西部の底層、明石海峡の全層、播磨灘の底層では著しく高濃度であり、特に最も高い播磨灘底層では $2 \mu\text{M}$ に達していた。また、備讃瀬戸でも全層で高濃度であった。西部では豊予海峡から豊後水道の

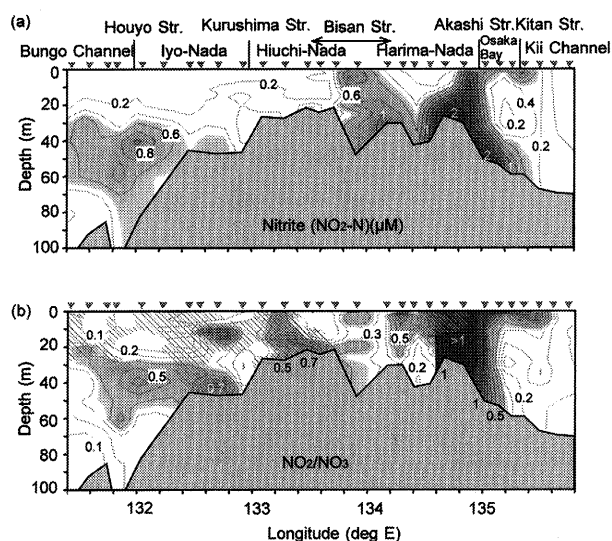


Fig. 7. Axial sections of (a) nitrite (μM) and (b) the ratios of nitrite to nitrate. Contour lines from the Bungo Channel to Bisan Seto are drawn by using observed data from “Yugemaru”, and others from Bisan Seto to the Kii Channel by using interpolated values from raw data observed by the Prefectural Fisheries Observatories of Kagawa, Hyogo, Osaka and Wakayama. The method of interpolation is described in the text. All observations were conducted from 1st to 6th August, 2002.

中層でやや高かった。豊後水道の中層では硝酸態窒素の約5~6割程度にあたる濃度の亜硝酸態窒素が存在した。明石海峡を中心とする亜硝酸態窒素が特に高濃度の領域では、 NO_2/NO_3 比が1を越えており、亜硝酸態窒素が硝酸態窒素よりも多くなっていた。

Fig. 8 (a) は、溶存態リン濃度に対する溶存態無機窒素濃度 (硝酸態窒素濃度, 亜硝酸態窒素濃度, アンモニア態窒素濃度の合計値) の比の分布 (以下 N/P 比とよぶ) を示す。分母にあたる溶存態リン濃度が検出限界 ($0.01 \mu\text{M}$) に近い場合には、比の値の誤差が大きくなる。このため溶存態リン濃度が $0.1 \mu\text{M}$ 以下の領域については斜線で網掛けをし、ここでは誤差が大きいことを示した。備讃瀬戸では N/P 比がやや高かった (16~)。備讃瀬戸の両側 (燧灘および播磨灘) では、N/P 比が低くなり (6~8)、播磨灘、燧灘東部底層、燧灘西部および伊予灘では特に低かった (~6)。燧灘から豊後水

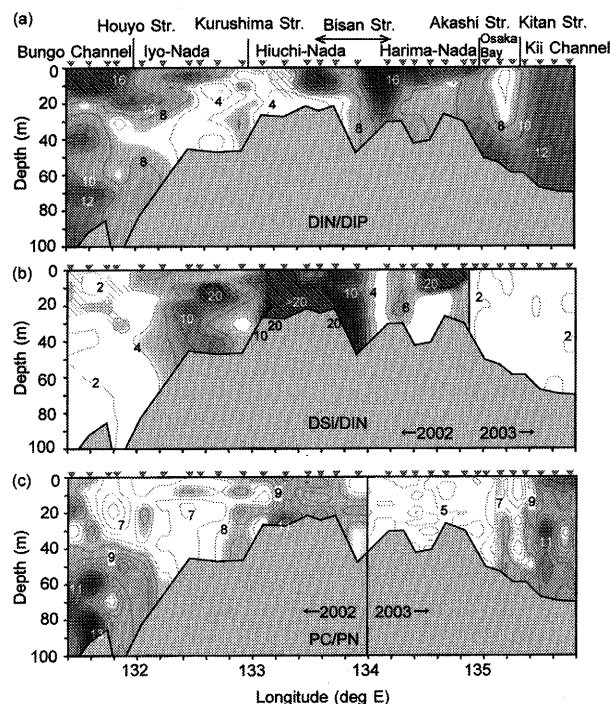


Fig. 8. Axial sections of the ratios of (a) dissolved inorganic nitrogen to dissolved inorganic phosphorus, (b) dissolved silicate to dissolved inorganic nitrogen and (c) particulate carbon to particulate nitrogen.

道にかけて、また播磨灘から紀伊水道にかけては、内海で低く、外海に向かうほど N/P 比が高かった。豊後水道および紀伊水道下層の低温・高塩分の水塊内では比較的高い値 (10~12) を示していた。

Fig. 8 (b) は、溶存態無機窒素濃度に対する溶存態ケイ素濃度の比の分布 (以下 Si/N 比とよぶ) を示す。この図においても、溶存態無機窒素濃度が $1 \mu\text{M}$ 以下の領域の斜線で網掛けをして、誤差が大きいことを示した。Si/N 比は中央部で高く、外海に向かって低くなる傾向があった。Si/N 比は燧灘東部から備讃瀬戸の間の領域 ($133.5\sim 134^\circ\text{E}$) で最も高く、10以上の値を示した。紀伊水道および豊後水道では Si/N 比が低く、とりわけ下層の低温・高塩分水塊内では特に低かった (~2)。

Fig. 8 (c) は、粒状態窒素濃度に対する粒状態炭素濃度の比の分布 (以下、粒状態 C/N 比とよぶ) を示す。粒状態 C/N 比は豊後水道および紀伊水道の下層で高かつ

た(12~13)。また、燧灘底層でもそれらに近い値を示した(~11)。安芸灘から備讃瀬戸の間(132.6~134°E)においても、粒状態 C/N 比は 8~10 とやや高かった。それ以外の領域では、C/N 比は 6~8 程度であり、レッドフィールド比(6.6)に近い値を示した。東部瀬戸内海では、播磨灘から大阪湾西南部、紀伊水道と、順に粒状態 C/N 比が大きくなっていった。西部瀬戸内海においても、伊予灘から豊後水道へと、粒状態 C/N 比が大きくなっていった。

4. 考察

本研究では、豊後水道から紀伊水道に至る瀬戸内海の主水路の物理的・生物化学的性質を明らかにすることを目的としたため、全域縦断面図(Fig. 3~5, Fig. 7~8)には、大阪湾東部や広島湾の点を含めていない。これらの縦断面図に基づいて、前項では、瀬戸内海中央部の備讃瀬戸が淡水やケイ素の流入点となっていることを示した。しかしながら、特に瀬戸内海東部海域では、大阪湾の湾奥から多量の淡水が流入しており、大阪湾東部を含めた場合には、物理的・生物化学的性質の分布はさらに複雑になる。今回は、大阪湾や広島湾などの湾部を除いた瀬戸内海の主水路の物理的・生物化学的性質について議論することにした。

4.1. 窒素・リンの分布と循環

成層期の瀬戸内海では、水温・塩分が鉛直一様となっている混合域と、上層が高温、下層が低温の成層域とが存在した。幅が狭く潮流の早い海峡部は強混合域となっており、幅が広く潮流の穏やかな灘部の多くは強く成層していた。混合域では濁度が鉛直一様に高く、懸濁物が下層から上層まで広がっていることを示していた。一方、成層域の濁度は上層では混合域よりも低く、下層では混合域に比べて高かった。特に海峡部に隣接する領域で底層高濁度層の形成が顕著であることから、混合域で上層まで広がった濁度の成分が、成層域で沈降し、上層から除去されていることが示唆された。底層高濁度層は燧灘および播磨灘で特に顕著であり、備讃瀬戸で上層に運ばれた懸濁物が、隣接する燧灘および播磨灘に入って沈降していることを示唆していた。

夏季の瀬戸内海縦断面線上では、灘部上層の栄養塩濃度が検出限界に近い低い値となっており、植物プランクトンによる消費によって栄養塩が枯渇していると考えられた。一方、河川を通して上層から常に栄養塩が補給されている海域や、海峡部における強い潮汐混合によって下層から栄養塩が供給される海域では、植物プランクトンによる生産活動が夏季においても盛んであった。特に備讃瀬戸においてはクロロフィル濃度が一様に高かった。夏季の備讃瀬戸で植物プランクトンの活性が高いことは、フェリーを用いた表層モニタリング結果からも指摘されている(Harashima *et al.*, 1997)。備讃瀬戸は、瀬戸内海の中でも特に、成層期における生物生産活動が盛んな海域であった。

成層した灘部では、表層では栄養塩が枯渇してクロロフィル濃度も低くなっており、しばしばクロロフィル濃度の極大層が亜表層に存在していた。2002年8月の観測では、亜表層クロロフィル極大が、燧灘、周防灘、播磨灘東部、豊後水道に存在した。これらのクロロフィル極大と海峡部混合水の灘部への進入との関係を明確にするために T-S ダイアグラムを示す。Fig. 9(a)は、豊予海峡付近の観測点と豊後水道中央部の観測点における水温・塩分である。豊予海峡の混合水は、等密度となる豊後水道の 30~50 m 層にもっとも進入しやすいことを示していた。豊後水道における中層クロロフィル極大層は、豊予海峡の混合水の豊後水道への進入層に一致していた。すなわち中層に供給された栄養塩を吸収して植物プランクトンが増殖していたか、もしくはやや高い濃度のクロロフィルを含む内海水が中層から流出していたかのいずれかであると考えられる。また、Fig. 9(b)は、備讃瀬戸の観測点と燧灘中央部の観測点における水温・塩分を示している。備讃瀬戸の混合水は、密度の等しい燧灘の 10 m 層にもっとも進入しやすいと考えられる。燧灘のクロロフィル極大層は、この進入層に一致していた。伊予灘においては、夏季に豊予海峡の混合水が中層に進入し、その中層貫入にそってクロロフィル極大層が形成されることが示されている(Takeoka *et al.*, 1993)。夏季の瀬戸内海灘部においては、表層よりも、亜表層から中層において生物生産活動が盛んであった。

ほとんどの灘部の底層では、栄養塩濃度が高くなっ

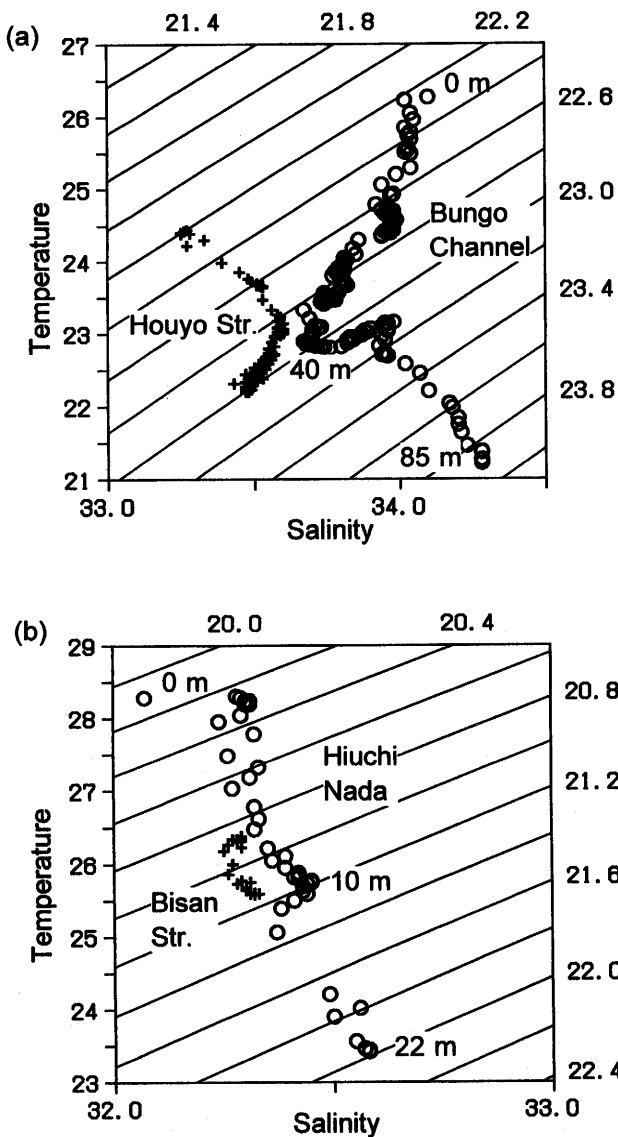


Fig. 9. T-S diagrams in (a) the Bungo Channel (circles) and Houyo Strait (plus), and (b) Hiuchi Nada (circles) and Bisan Strait (plus).

ていた。陸上から流入した有機物および生物生産により生じた有機物が、灘部で底層に沈降し、その後分解されて栄養塩として回帰していたことを示している。光が届かず、海水の交換が少なければ、有機物の分解によって生じた栄養塩はそこに留まり蓄積する。播磨灘の底層では栄養塩が特に高濃度になっており、冷水塊と対応した栄養塩のプールが形成されていた。この水塊は水温が低く、長期間滞留していたことを示してお

り、回帰した栄養塩が、底層の冷水塊内に蓄積されていることが示唆された。播磨灘における低温・高栄養の水塊の形成はこれまでも観測されており、赤潮発生との関連が指摘されている(柳ら, 1997; 坪田・遠藤, 1985)。周防灘底層にも同様な高濃度の栄養塩を含む冷水塊があり、また伊予灘底層でも栄養塩濃度はやや高いことが示された。

一方、海底まで光が届いている海域では、再生した栄養塩は再び植物プランクトンに消費されて粒状態となる。燧灘の底層では栄養塩がほぼ枯渇していたのに対し、粒状態窒素・炭素濃度が高く、またクロロフィル濃度が比較的高かった。燧灘では海底近くまで光が届いていた。燧灘では海底近くにおいても植物プランクトンの生産があるために、溶存態の窒素は吸収されて枯渇し、粒状態として蓄積されていたと考えられる。

また、播磨灘東部周辺海域においては、亜硝酸態窒素濃度が高く、その濃度が硝酸態窒素濃度を越える海域があった。亜硝酸態窒素は、硝化細菌がアンモニア態窒素から硝酸態窒素を生成する硝化過程で生じる中間産物であり、また、脱窒細菌が硝酸態窒素を窒素ガスに還元する過程でも生じる。このことから、播磨灘においては、溶存態窒素の再生もしくは脱窒が盛んに起きていたことが示唆される。

次に、元素比の分布について考察する。備讃瀬戸を除くと、N/P比は内海で比較的低く(6~8)、外海に向かうほど高くなっていった(~10)(Fig. 8 (a))。内海でN/P比が低くなる要因としては、河川から流入する水のN/P比が低いのか、もしくは閉鎖的な内海では脱窒が起きやすく窒素が選択的に除去されることが挙げられる。外海に向かうほどN/P比が高かったのは、陸域の影響を離れ、植物プランクトンの構成元素比(レッドフィールド比, N:P = 16:1)に近い値を持つ外海水の影響を受けたためと考えられる。一方、備讃瀬戸では内海他の海域とは異なり、N/P比が高かった(16~)。この海域に流入する河川水のN/P比が高いことなどが原因として考えられる。

粒状態C/N比は、クロロフィル濃度が高く生物生産が盛んな海域において6~8程度であり、レッドフィールド比(6.6)に近い値を示した(Fig. 8 (c))。一方、豊後水道および紀伊水道の下層や燧灘底層では11以上の

比較的高い値を示した。一般に、堆積物中の典型的な C/N 比はプランクトン中の C/N 比よりもやや高く、有機物の分解に伴って選択的に窒素が固相から溶出していくためと考えられる(川幡, 1994)。上記の海域の下層で粒状態 C/N 比が高いのも、このためであろう。また、一般に陸源の有機物の C/N 比はさらに高く、20 から 200 の範囲に入る(Hedges *et al.*, 1986)。特に燧灘底層では、陸上起源の有機物の堆積も C/N 比に影響を与えていたことが推察される。また、燧灘に隣接する強混合域の安芸灘においても、粒状態 C/N 比は 8~10 とやや高く、巻き上げられた堆積物の影響を受けていたことが示唆される。

4.2. 瀬戸内海におけるケイ素の分布

播磨灘や燧灘の底層では、溶存態窒素・リンに加えて溶存態ケイ素も高濃度になっており、溶存態ケイ素が底層で再生されていたことを示している(Fig. 4 (c))。海洋に河川等から供給された土砂は大部分そのまま堆積してしまいが、いったん溶存態となったケイ素は、植物プランクトンに使われて粒子になり、海底などで再生して、再び生物過程に利用される。海水の交換が少なければ、長い期間滞留する(Harashima *et al.*, 2002)。坪田・遠藤(1985)は、夏季には水温とケイ素の関係を示す回帰直線は海洋の表層と底層では異なり、海底では溶出の影響が見られることを示している。Srithongouthai *et al.*(2003)は志度湾における1年間の溶出実験により、溶存態ケイ素の底泥からの溶出を示している。瀬戸内海では、海底からの溶出が溶存態ケイ素の重要な供給源となっていると考えられる。

燧灘東部(133.4度付近)では、海底付近に溶存態ケイ素濃度の極大層が形成されていた。その形成機構としては、以下のことが考えられる。燧灘の水温・塩分分布は、備讃瀬戸から西に向かって上層を低塩分水が流出し、来島海峡から東に向かって下層を高塩分水が流入する密度流を示している(Fig. 3 (c))。多田ら(2002)の観測によっても、来島海峡から低温で高塩の海水が燧灘の海底に沿って流入していたことが示されている。燧灘では、底層流が底層を摩擦しながら往復運動を繰り返す際に底層濁度極大(エスチュアリー濁度極大(Sanford *et al.*, 2001))が形成されていると考えられる。このよ

うな海域では、海底で分解され底泥の間隙水に蓄積されていたケイ素の溶出が促進されると考えられ、海水中の溶存態ケイ素濃度が高くなる要因となると考えられる。

燧灘東部から備讃瀬戸(133.2°E~134.4°E)にかけては、底層だけでなく全層で溶存態ケイ素濃度が高かった(Fig. 4 (c))。この海域で夏季に毎年溶存態ケイ素が高くなっていることは、フェリー観測による数年分の表層データにも認められる(Fig. 10)。柳・原島(2003)においても、夏季には溶存態ケイ素が134.5度付近(備讃瀬戸)で最も高濃度であることが示されており、高梁川などからの負荷量大きいことが指摘されている。また、燧灘では単位体積あたりの溶存態ケイ素の負荷量は小さいが、備讃瀬戸から西方への水平輸送の効果が大きいことが示されている(柳・原島, 2003)。燧灘東部から備讃瀬戸(133.2°E~134.4°E)では、Si/N比が特に高かった(Fig. 8 (b))。この要因としては、河川から流入する水のSi/N比が高いこと、もしくは、ケイ素が窒素やリンに比べて内海に長い期間滞留し、そのことが比率の上昇につながっていることなどが考えられる。

燧灘東部(133.4度付近)の海底付近では、硝酸態窒素濃度(Fig. 4 (a))とリン酸態リン濃度(Fig. 4 (b))は低いが、溶存態ケイ素だけは高かった(Fig. 4 (c))。この海域では、硝酸態窒素およびリン酸態リンが海底までほぼ枯渇しているために、植物プランクトンの生産が窒素制限もしくはリン制限を受けて、溶存態ケイ素が使われないままに残っていたと考えられる。

瀬戸内海では、高度経済成長期以降、陸域から過剰な窒素やリンが流入し、富栄養化が問題となった。一方、ダムの建設により河川から流入するケイ素の量が減少し、海域の窒素とケイ素のバランスが近年急激に変化して、元素比の変化により有害赤潮が発生した例が世界各地で報告されている(原島, 2003)。ケイ藻の生育に必要なSi/N比の目安には、1~3の値が用いられており(原島, 2003)、ケイ藻類の元素組成から計算されたSi/N比としては2.7程度の値が報告されている(Kudo and Matsunaga, 1999)。伊予灘から播磨灘の間ではSi/N比が4を下回る領域はなかった(Fig. 8 (b))。また、本研究で採取したサンプルを検鏡した結果、播磨灘中層のクロロフィル極大層および燧灘底層の優占

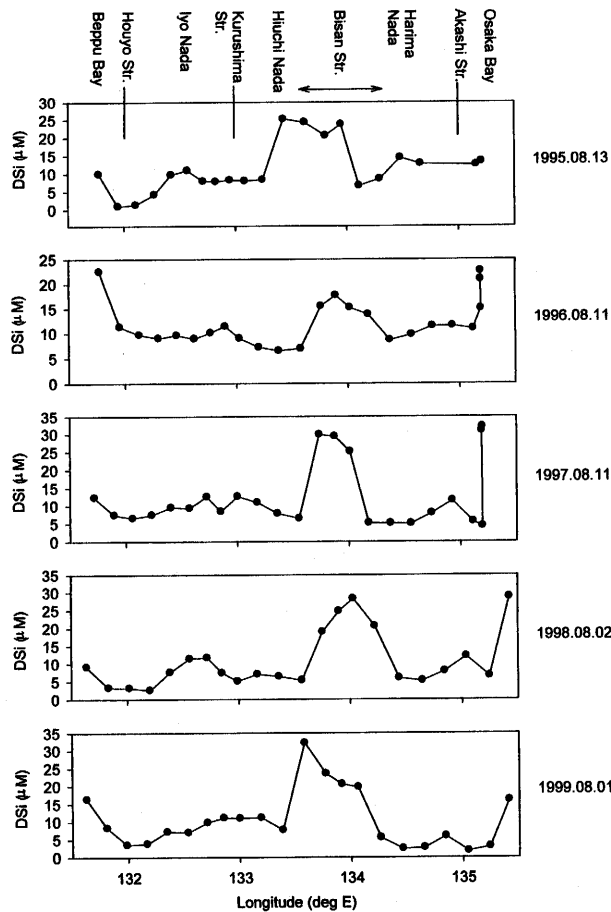


Fig. 10. Longitudinal distributions of the surface concentration of dissolved silicate (μM), obtained from the ferry monitoring data in August from 1995 to 1999.

種はケイ藻であった。観測時においては、伊予灘から播磨灘の間の領域では窒素に対してケイ素が十分にあり、ケイ藻の増殖に好適な条件となっていたと考えられる。

紀伊水道、豊後水道の底層には低温・高塩分の水塊があり、この水塊の中では硝酸態窒素・リン酸態リンが高濃度であったことをすでに指摘したが (Fig. 4 (a), (b)), そこでは溶存態ケイ素も周囲の海水に比べて高濃度であった (Fig. 4 (c))。また、Si/N 比は 2 程度であり、瀬戸内海中央部における値に比べて低かった (Fig. 8 (b))。紀伊・豊後水道の底層冷水中の栄養塩は外海起源

と考えられており、このことについては次節で詳しく述べることにした。

4.3. 外海における元素比との比較

瀬戸内海の各灘部の底層には、低温・高塩分の水塊があり、そこには高濃度の栄養塩が蓄積していた (Fig. 4 (a)~(c))。Fig. 11 (a)~(c) に、環境省の日本近海汚染実態調査 (1990 年 7 月) のデータを用い、外海における水温と各種栄養塩 (硝酸態窒素、リン酸態リン、溶存態ケイ素) の関係を示した。水温は一般に表層で高く、水深が深くなるにしたがって低くなっている。栄養塩は表層では植物プランクトンによる消費の影響を受けて低かった。特に、硝酸態窒素は 20°C 以上ではほぼ枯渇していた。

水温と各種栄養塩 (硝酸態窒素、リン酸態リン、溶存態ケイ素) との間には高い相関があり、水温 T と硝酸態窒素濃度 $[\text{NO}_3]$ の関係は、

$$[\text{NO}_3] = -2.4T + 45.2 \quad (4 < T < 19) \quad (r^2 = 0.96)$$

水温 T とリン酸態リン濃度 $[\text{PO}_4]$ の関係は、

$$[\text{PO}_4] = -0.18T + 3.6 \quad (4 < T < 19) \quad (r^2 = 0.99)$$

水温 T と溶存態ケイ素 $[\text{DSi}]$ の関係は、

$$[\text{DSi}] = -7.8T + 135.4 \quad (4 < T < 19) \quad (r^2 = 0.95)$$

で表されている。いずれも傾きが負であることから、これらの関係式は水温が低くなるほど、すなわち水深が深くなるほど栄養塩濃度が高くなることを示している。ただし水温が 4°C 以下になると、栄養塩濃度は逆に低くなっている。

この水温と各種栄養塩 (硝酸態窒素、リン酸態リン、溶存態ケイ素) との関係は、内海における関係と比較する。まず、播磨灘におけるそれぞれの関係は、

$$[\text{NO}_3] = -2.9T + 74.6 \quad (T < 26) \quad (r^2 = 0.96),$$

$$[\text{PO}_4] = -0.29T + 8.0 \quad (T < 27) \quad (r^2 = 0.85),$$

$$[\text{DSi}] = -7.6T + 212.3 \quad (T < 27) \quad (r^2 = 0.86)$$

であった。すなわち、外海における関係式と同様に、水温が低いほど栄養塩濃度が高かった。播磨灘における水温と各種栄養塩との関係が、いずれの項目についても外海と極めて近いことが注目される。その他の海域については、外海や播磨灘と比べて、直線の傾きの絶対値が小さかった。播磨灘には、有機物の沈降と分解

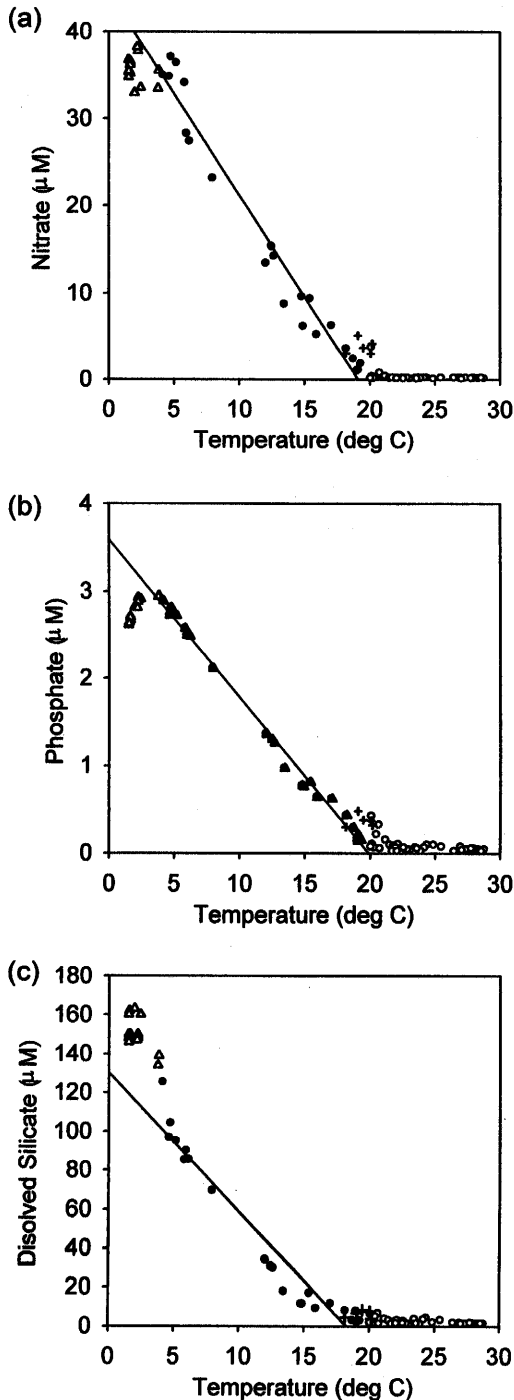


Fig. 11. The relationships between (a) temperature and nitrate, (b) temperature and phosphate, (c) temperature and dissolved silicate. Triangles ($T < 4$), closed circles ($4 < T < 19$) and open circles ($19 < T$) are data from the Pacific Ocean. Plus marks are data from the bottom layer of the Kii Channel and the Bungo Channel observed during August 2002. T is seawater temperature.

生成物の蓄積が促進されやすい点で、外洋と類似した条件があることが示唆される。

また、今回の観測(2002年8月)によって得られた紀伊水道および豊後水道底層の結果を、Fig. 11 (a)~(c)にそれぞれ+印で示した。紀伊水道および豊後水道底層のデータは、外海における水温と各種栄養塩(硝酸態窒素、リン酸態リン、溶存態ケイ素)の関係を示した直線に良く載っている。両水道部底層における水温と各種栄養塩の関係は、外海水のそれに近かった。

さらにまた、両水道部底層における栄養塩元素比は、外海水のそれに近かった。外海のSi/N比は、水温が高くなるほど(水深が浅くなるほど)小さくなり、水温が15度から20度の間では2前後の値であった。外海のN/P比も、水温が高くなるほど(水深が浅くなるほど)小さくなり、水温が15度から20度の間では8~10であった。一方、Fig. 8に示した観測結果(N/P比およびSi/N比)によって、豊後水道および紀伊水道の下層のN/P比は10~12、Si/N比は2前後であり、これらの値は内海中央部とはやや異なっていた。以上のことから、豊後水道および紀伊水道の下層水は、外海水と近い性質をもっていたことが示される。

豊後水道および紀伊水道では、等密度線が内海側から外海側に向かって傾いており、上層流出・下層流入のエスチュアリー循環流の存在を示していた。このように、上層で流出して下層で流入する循環流と、上層において低濃度で下層において高濃度の栄養塩分布が組合わさることにより、外海側から内海への栄養塩の流入フラックスを生じる(藤原, 1997)。これまでの研究によって、瀬戸内海には外海から栄養塩が供給され、その供給量の多寡によって瀬戸内海の栄養状態が変わることが示されている(藤原ら, 1997; 藤原ら, 2003; Takashi *et al.*, 2006)。豊後水道および紀伊水道の下層にある栄養塩は、内海の複雑な地形と潮流との相互作用により生じた鉛直混合によって有光層まで運ばれ、植物プランクトンに取り込まれて粒状態として沈降することによって窒素・リンの正味の輸送に寄与し、内海の水質に影響をおよぼしていると考えられる。

5. 結論

本研究では、瀬戸内海の栄養塩濃度の変動機構を解明する上で重要な、成層期における各態窒素・リン、ケイ素およびクロロフィル等の鉛直分布を現地観測によって調査した。栄養塩の分布には成層強度の相違が反映され、海峡部では鉛直一様、灘部では上層において低濃度で下層において高濃度となっていた。さらに、成層強度が互いに同程度の灘部の中でも、光環境の違いによって、下層に栄養塩が蓄積される場合と、下層の栄養塩が植物プランクトンによって消費されて減少して粒状態が多く蓄積する場合とに分別された。この違いは、両者の秋季以降における栄養環境に影響をおよぼすと考えられる。また、夏季の灘部下層における窒素・リンの蓄積量は、外海の境界条件や河川流量の違いにより、年によって異なると考えられる。このような境界条件の変化の影響を含めて、瀬戸内海における栄養環境の中・長期的変動機構を解明し、変動予測を行なうことは今後の課題である。

謝辞

2002年8月および2003年8月における現地観測は、弓削商船高等専門学校との共同研究によって行なわれた。実習船弓削丸の関係者の皆様に心から感謝する。本研究にあたり、香川県、兵庫県、大阪府、和歌山県の各水産試験場より、浅海定線調査による2002年8月の水温と栄養塩濃度のデータの提供を受けた。各種栄養塩の分析にあたっては兵庫県水産技術センターの指導を受けた。観測・分析は京都大学農学研究科海洋生物環境学分野の院生および学部生各位とともに行なった。また国立環境研究所地球環境研究センター(NIES-CGER)によるフェリーモニタリングの結果、および環境省による太平洋における観測データを引用した。各機関の皆様、心から御礼申し上げる。

References

- 藤原 建紀 (2001): 灘・海峡系における海洋構造と流動. 海と空 **77** (2), 41-45.
- 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, **50**, 951-955.
- 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, **44**, 1,061-1,065.
- 原島 省 (2003): 陸水域におけるシリカ欠損と海域生態系の変質. 水環境学会誌, **26**, 614-620.
- 原島 省, 功刀 正行 (2000): フェリー利用による海洋環境モニタリングおよび関連研究に関する総合報告書, 原島 省, 功刀 正行 編, 国立環境研究所地球環境研究センター, CGER-M007-2000.
- Harashima, A., T. Kimoto, Y. Tanaka, T. Wakabayashi, T. Toshiyasu, E. Ohta, and K. Furusawa (2002): Silica deficiency in the aquatic continuum—A case study in Japan, *Proceedings of a SCOPE Workshop on Land-Ocean Nutrient Fluxes: The Silica Cycle*, Nha Tran, Vietnam, 27-38.
- Harashima, A., R. Tsuda, Y. Tanaka, T. Kimoto, and K. Furusawa (1997): Monitoring algal blooms and related biogeochemical changes by a flow-through system deployed on ferries in the adjacent seas of Japan, p. 85-112. In *Monitoring Algal Blooms*, edited by Kahru, M. and C. W. Brown, Springer Verlag, Berlin.
- Hedges, J. I., W. C. Clark, P. D. Quay, J. E. Richey, A. H. Devol, and U. de M. Santos, (1986): Composition and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. *Limnol. Oceanol.*, **31**, 717-738.
- 板倉 茂, 今井 一郎, 以東 克彦 (1990): 広島湾における赤潮渦鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* 出現密度の季節変化. 南西水研研報, **23**, 27-33.
- 環境省 (1991): 平成2年度 環境庁委託業務結果報告書 日本近海汚染実態調査.
- 川幡 穂高 (1994): 過去の生物生産量はどのようにして推定するのか. 地質ニュース, **475**, 22-33.
- Kobayashi, S., T. Fujiwara, and M. Tada (2003): The impact of anthropogenic and oceanic nutrients on the ecosystem of the Seto Inland Sea. *Proceedings of EMECS 2003*, 303-309.
- Kudo, I. and K. Matsunaga (1999): Environmental factors affecting the occurrence and production of the spring phytoplankton bloom in Funka Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, **55**, 505-513.
- Murakami, M., Y. Oonishi, and H. Kunishi (1985): A numerical simulation of the distribution of water temperature and salinity in the Seto Inland Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 213-224.
- 中田 英昭, 杉浦 健三 (1987): 黒潮大蛇行に伴う瀬戸内海の水況変動. *Nippon Suisan Gakk.*, **53** (11), 1,925-1,932.
- Sanford, L. P., S. E. Suttleles, and J. P. Halka (2001): Reconsidering the physics of the Chesapeake Bay estuarine turbidity maximum. *Estuaries*, **24** (5), 655-669.
- Srithongouthai S., Y. Sonoyama, K. Tada, and S. Montani (2003): The influence of environmental variability on

- silicate exchange rates between sediment and water in a shallow-water coastal ecosystem, the Seto Inland Sea, Japan. *Mar. Pollut. Bull.*, **47** (1-6), 10-17.
- Takashi T., T. Fujiwara, T. Sumitomo, and W. Sakamoto (2006): Prediction of the Intrusion of the Slope Water into the Kii Channel. *J. Oceanogr.*, **62**, 105-113.
- 多田 光男, 塚本 秀史, 二村 彰 (2002): 来島海峡南東部潮汐フロント周辺海域の定点連続観測結果について. *Navigation*, **152**, 83-89.
- 高志 利宣, 藤原 建紀, 住友 寿明, 竹内 淳一 (2002): 外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送. *海岸工学論文集*, **49**, 1,076-1,080.
- Takeoka, H., O. Matsuda, and T. Yamamoto (1993): Processes causing the chlorophyll-a maximum in the tidal front in Iyo-Nada, Japan. *J. Oceanogr.*, **49**, 57-70.
- 坪田 博行, 遠藤 拓郎 (1985): 瀬戸内海の栄養塩, p. 74-86. 瀬戸内海的环境, 小阪 敦編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 柳 哲雄, 遠藤 拓郎, 松田 治, 西島 敏隆, 畑 幸彦, 門谷 茂, 岡市 友利 (1997): 赤潮発生の物理・化学環境, p. 181-198. 赤潮の科学, 岡市 友利 編, 恒星社厚生閣, 東京.
- 柳 哲雄, 原島 省 (2003): 瀬戸内海における溶存態無機リン・窒素・珪素分布の特徴とその要因. *海の研究*, **12** (6), 565-572.

The Distributions of Nitrogen (N), Phosphorus (P), Silicon (Si) and Nutrient Ratios during the Stratified Season in the Seto Inland Sea

Shiho Kobayashi[†], Tateki Fujiwara[†],
Mitsuo Tada[‡], Hideshi Tsukamoto[‡], and Toshihiko Toyoda[‡]

Abstract

The distributions of nutrients, chlorophyll, and particulate matter in the Seto Inland Sea have been investigated by two extensive surveys in August of 2002 and 2003. To establish the basis for stoichiometric analysis in the Seto Inland Sea, the spatial distributions of nutrient ratios were analyzed. The results along a central section in the summer regime showed a highly differentiated pattern of vertical structure, which was caused by the inhomogeneous distribution of tidal mixing. Among straits which were strongly mixed, biogeochemical properties were vertically distributed homogeneously. On the other hand, in most quiescent basins, nitrate and phosphate pools were formed on the bottom, and chlorophyll maxima were formed in subsurface layers. The concentration of dissolved silicate was high from the bottom to the surface in the region between 133.2°E~134.4°E. The concentration of nitrite (NO₂-N), which was generated in the process of nitrification or denitrification, was higher than that of nitrate (NO₃-N) in eastern Harima-Nada, the Akashi Strait and western Osaka Bay. High nutrient concentrations corresponding to a cold pool were observed in the lower layer of the Bungo Channel and the Kii Channel. The comparisons of the DIN/DIP and DSi/DIN ratios between those regions and the open ocean indicates that the bottom waters of the Bungo Channel and the Kii Channel have similar properties to those of the open ocean.

Key words: nutrient ratios, C/N ratio, silicate, chlorophyll maximum, turbidity maximum, Seto Inland Sea

(Corresponding author's e-mail address: shihok@kais.kyoto-u.ac.jp)

(Received 18 October 2005; accepted 6 January 2006)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2006)

[†] Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan

[‡] Yuge National College of Marine Technology 1000, Shimoyuge, Kamishima-cho, Ochi-gun, Ehime, 794-2593, Japan