

瀬戸内海における栄養塩と一次生産力の分布・変動特性

駒井 克昭* ・ 日比野 忠史** ・ 仁子 幸子***
浜走 幸育**** ・ 松岡 純作*****

1. はじめに

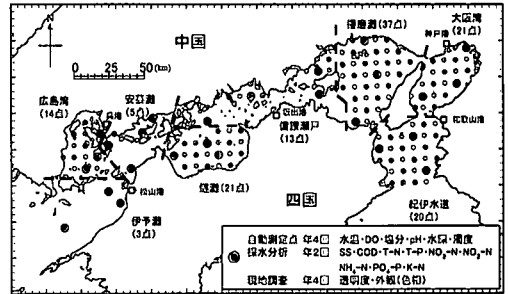
瀬戸内海は多様な生物が棲息する水産資源が豊富で自然豊かな海域である。この環境を維持していくため、環境省などによって COD による汚濁負荷量の総量規制 (1979 年から)、窒素・リンの削減指導など、陸域からの負荷量削減対策が実施されている。一方で、富栄養化・赤潮など解決すべき様々な問題が多く残されている。近年では、海域の自浄能力や内部生産の定量評価の重要性が認められおり、瀬戸内海においても底質を含めた生態系モデルによる水質管理に関する検討がなされている。

国土交通省中国地方整備局では、瀬戸内海の広域的かつ総合的な環境影響評価を目的として、昭和 56 年から継続的に水質調査 (瀬戸内海総合水質測定調査) を行っている。

本研究では瀬戸内海総合水質測定調査データおよび流量年表を用いて瀬戸内海沿岸域での季節的な栄養塩、COD 等と河川流出・外海水位との関連について検討している。瀬戸内海は豊後水道、紀伊水道および関門海峡を通して外海水の流入や 23 の 1 級河川の流入があるため、瀬戸内海の湾・灘では海域固有の水塊特性を有している。ここではまず、河川流出が各海域に及ぼす影響を明らかにするため、河川の流出が多い海域 (東海域) と少ない海域 (西海域) に分け、アンモニア態窒素と (亜) 硝酸態窒素の分布の特性について考察を行った。次に、流入水塊 (外海・河川) の変化に伴う湾・灘での水質変化の特性について検討した。解析では 1982~99 年の各海域における水温・塩分、COD の時系列と外海水温・塩分、河川流量等の関係から栄養塩の変化の特性について考察した。

2. 瀬戸内海総合水質測定調査の概要

本解析では 1982-1999 年の瀬戸内海総合水質調査データを用いる。調査測点 (瀬戸内海全域で 142 点) および調



図一 瀬戸内海総合水質測定調査測点

査項目は図一に示されている。調査は項目別に年 4 回あるいは年 2 回行われ、上下 2 層 (海面下 2 m, 海底上 2 m) で測定されている。データの取得に際しては、各期において数日間から数週間かけて実施されているため、これらのデータから数日間の変化を見出すことは不可能であるが、広域での季節の変動特性を含むデータとしての活用が有用である。

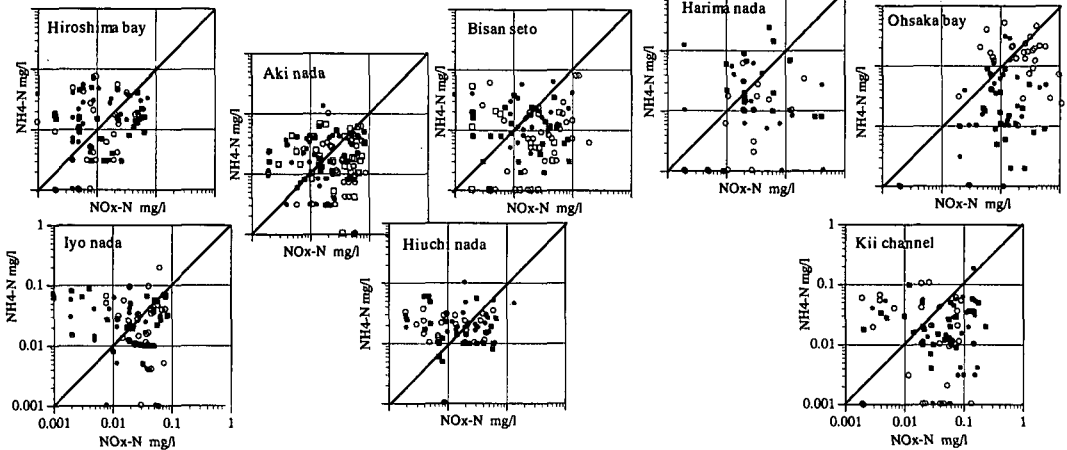
3. 河川流入と制限栄養塩 (DIN) の関係

図一は瀬戸内海の各湾・灘における $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_x\text{-N}$ ($\text{NO}_2\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の和) の関係を示している。

瀬戸内海は東海域で河川流量が多く、東西海域で栄養塩の分布が異なる。燧灘より西の海域では $\text{NO}_x\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ は同程度存在している (豊後水道から直接海水が浸入すると考えられる伊予灘、燧灘では $\text{NH}_4\text{-N}$ の存在率が高い) が、東海域では 2 倍程度の $\text{NO}_x\text{-N}$ が存在している。河川流入の少ない伊予灘、燧灘、安芸灘では夏季下層においても貧酸素化は起こらず、全観測期間中で DIN は 0.2 mg/l, DIP は 0.02 mg/l 以下の値が観測されている。これに対し、河川流入の多い海域では DIN, DIP とも 4 倍程度の値をとる場合がある。

河川流入の多い海域 (主に紀伊水道、大阪湾、播磨灘などの東海域: 年平均流量 50 m^3/sec 超) では、全観測期間中で DIN は 0.1 mg/l 以上の値が観測されており、 $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度が高い傾向にある。これに対し、河川流入の少ない海域 (主に伊予灘、安芸灘、燧灘などの西海域: 年平均流量 50 m^3/sec 未満) では、 $\text{NO}_x\text{-N}$ が 0.1 mg/l を

* 正 会 員 工 修 広島大学助手 大学院工学研究科
** 正 会 員 工 博 広島大学助教授 大学院工学研究科
*** 学生会員 水資源開発公団
**** 学生会員 広島大学大学院工学研究科
***** 国土交通省中国地方整備局

図-2 瀬戸内海（上層）での $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_x\text{-N}$ の関係（シンボルは観測点の相違、値軸の縮尺は全て同じ）

超える値は観測されていない。

海洋では、 $\text{NO}_x\text{-N}$ は主に有光層外（河川・底層水など）からの新入室素であり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は有光層内での有機物の分解・再生によって供給される再生室素であるとされている (Persons ら, 1984)。図-2 に示した DIN の分布特性から、瀬戸内海東海域は河口域、西海域は沿岸域の特性を有しているといえる。すなわち瀬戸内海では $\text{NO}_x\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ を区分して生産力を検討することで河川、外海の影響を見出すことが期待できる。

4. 一次生産と内海水流動の関係

4.1 一次生産の推定法

各海域における、水温、制限栄養塩、透明度から一次生産力の推定を試みた。ここではデータ取得が年2回（2, 8月）であるため、移流・拡散の物理的過程は考慮していない。植物プランクトンの生物過程は主に光合成、呼吸、枯死、動物プランクトン等による摂食から成るが、そのうちの光合成を式（1）～（8）のように定式化した。

$$\frac{\text{Photosynthesis}}{\text{Phy}} = V_{\max} \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot B_3; \text{光合成指数} \quad (1)$$

$$B_1 = \min(\text{NLIM}, \text{PLIM}) \quad (2)$$

$$\text{NLIM} = \frac{\text{NO}_3 + \text{NO}_2}{\text{NO}_3 + \text{NO}_2 + K_N} \cdot e^{(-\psi \text{NH}_4)} + \frac{\text{NH}_4}{\text{NH}_4 + K_N} \quad (3)$$

$$\text{PLIM} = \frac{\text{PO}_4}{\text{PO}_4 + K_P} \quad (4)$$

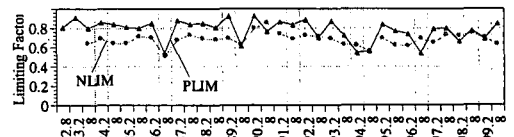
$$B_2 = \frac{I}{I_{\text{OPT}}} \cdot \exp\left(1 - \frac{I}{I_{\text{OPT}}}\right) \quad (5)$$

$$B_3 = \exp(k_1 \cdot T) \quad (6)$$

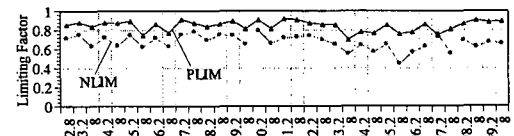
$$I = I_0 \cdot \exp(-k \cdot z) \quad (7)$$

表-1 光合成のパラメータ

$V_{\max}$	0°Cにおける植物プランクトンの最大光合成速度 (day ⁻¹)	0.893
k_t	光合成の温度定数	0.027
K_N	窒素の半飽和定数 (mg/l)	0.014
K_P	リン酸塩の半飽和定数 (mg/l)	$1.55 \cdot 10^{-3}$
ψ	アモニウムの選択吸収係数 (Wrobelvski, 1977)	1.5
I_{opt}	光合成の最適日射量 (MJ/m ² /day)	6.24



(a) 河川流入が少ない海域（安芸灘、伊予灘、澁灘）



(b) 河川流入が多い海域（紀伊水道、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸、広島湾）

図-3 Limiting factor の経時変化

$$k = \frac{1.7}{z_s} \quad (8)$$

ここに、 Phy : 植物プランクトン濃度 (mgC/m³)、 T : 水温 (°C)、 z_s : 透明度 (m)、 z : 水深 (m)、 NO_2 : NO_2 濃度 (mg/l)、 NO_3 : NO_3 濃度 (mg/l)、 NH_4 : NH_4 濃度 (mg/l)、 PO_4 : PO_4 濃度 (mg/l)、 I : 光強度 (MJ/m²/day) である。光合成による一次生産は栄養塩（窒素、リン）、光強度、

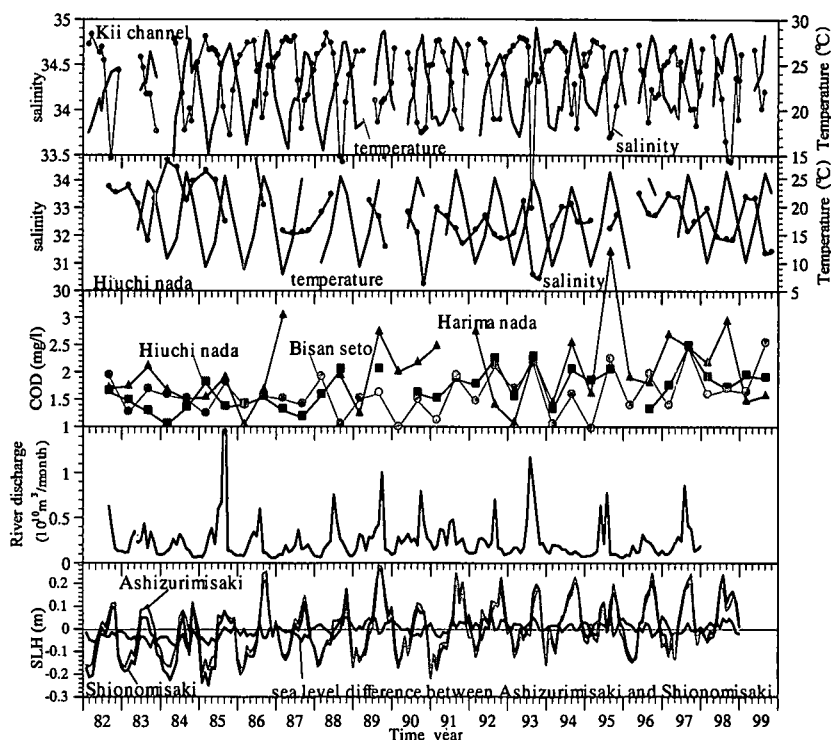


図-4 塩分・水温（紀伊水道，燧灘），COD（燧灘，備讃瀬戸），河川流量（一級河川），水位差（潮岬一足摺岬）の経時変化（紀伊水道：徳島県水産試験場，燧灘：国土交通省中国地方整備局による）

水温を制限要因とし、水温と植物プランクトン濃度に依存するとした。強光阻害の効果については Steele (1962) の式、光強度 I には Lambert-Beer の法則、消散係数 k には透明度による経験式 (Poole & Atkins, 1929) を用いている。植物プランクトンによる窒素利用の優先順位は窒素の酸化の度合いに逆比例しており、アンモニウム塩が優先的に利用される (Conway, 1977) ことを考慮してアンモニウムの吸収選択係数を導入した (Wroblevski, 1977)。

モデルパラメータは、横山 (1993) による生態系モデルを参考にして、瀬戸内海の貧リン、富窒素の特性を考慮して定めた (表-1)。

本モデルを用いて求められた光合成指数の 1982～99 年の平均値は大阪湾 0.051、紀伊水道 0.046、燧灘 0.045、播磨灘 0.043、安芸灘 0.043、伊予灘 0.043、広島湾 0.039、備讃瀬戸 0.038 であり、この値は橋本ら (1997) の ^{13}C 法による値 (瀬戸内海の代表点 10 点で測定した結果、1993 年 10 月、1994 年 1 月、4 月、6 月でそれぞれ 0.016、0.007、0.016、0.012) の 2 倍程度であるが、本手法の妥当性が示唆される。

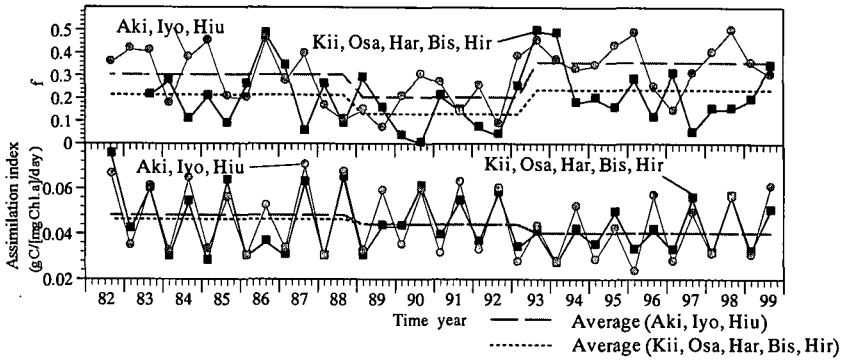
4.2 外海水と内海水質の年変動

図-3 には各海域における Limiting Factor (NLIM, PLIM) の年変動が示されている。図-3 から、瀬戸内海

は主に窒素制限の海域であること、河川流入の少ない海域 (安芸灘、伊予灘、燧灘) では、1990 年頃から栄養塩濃度が低下し、リン制限の状態が現れることがわかる。

図-4 には紀伊水道南端点 (33.3°N, 135.2°E, 水深 10 m) と燧灘での塩分・水温、内海奥海域 (播磨灘、備讃瀬戸、燧灘) での COD、1 級河川からの総河川流量 (河川流量年表より) および潮岬と足摺岬の水位差の経時変化が示されている。

瀬戸内海への流入水塊の水温は黒潮流路の蛇行・非蛇行に伴って低下・上昇する傾向がある (例えば日比野ら, 2000)。紀伊水道では 1988 年頃から冬季の最低水温が上昇 (95 年から顕著) し、99 年では 88 年に比べて約 7°C の水温上昇があり、塩分・水温とも夏冬の差が小さくなっている。一方、瀬戸内海奥の燧灘では、冬季の顕著な水温上昇は観測されておらず (内海の水温低下は長波放射の影響が大きい)、外海 (紀伊水道) の塩分上昇時、塩分が低下する傾向にある。さらに、1986 年頃までの燧灘の塩分は高い状態にあり、80 年代中頃までは燧灘まで外海水の流入が大きいことが予想される。また、80 年代中頃まで潮岬と足摺岬の水位は低い状態 (潮岬より足摺岬の水位が高い) になっており、豊後水道から外海水の流入が起こっている (宮野ら, 2000) ことから、燧灘への外海水の流入が裏付けられる。

図-5 f 比と光合成指数の経時変化（破線は各期間の平均値）

90年代になると外海境界（潮岬，足摺岬）の水位は高くなっており，これに伴ってCODは，瀬戸内海奥（播磨灘，備讃瀬戸，燧灘）で1988年頃から上昇傾向にある。さらに，水位の上昇とともに上述のように92年頃から紀伊水道で水位の上昇が観測されており，紀伊水道への黒潮暖水塊の流入があることがわかる。しかし，燧灘塩分の低い状態が継続しており紀伊水道からの外海水の流入が効率よく行われていないことが予想できる。

4.3 栄養塩循環と一次生産の年変動

瀬戸内海において，図-2で示された「再生産」と「新生産」の概念を適用することで海域特性を検討する。ここでは， $\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$ を利用するものを新生産， $\text{NH}_4\text{-N}$ を利用するものを再生産と仮定し，総生産に占める新生産の割合（ f 比）（式（9））から一次生産力の年変動について検討を行った。

$$f = \frac{\frac{\text{NO}_3 + \text{NO}_2}{\text{NO}_3 + \text{NO}_2 + K_N} \cdot e^{(-\Psi \text{NH}_4)}}{\frac{\text{NO}_3 + \text{NO}_2}{\text{NO}_3 + \text{NO}_2 + K_N} \cdot e^{(-\Psi \text{NH}_4)} + \frac{\text{NH}_4}{\text{NH}_4 + K_N}} \quad \text{..... (9)}$$

図-5は河川流入の多い海域（紀伊水道，大阪湾，播磨灘，備讃瀬戸，広島湾）と河川流入が少ない海域（安芸灘，伊予灘，燧灘）で分類して平均した f 比と光合成指数（Chl.a 1 mg当たりの一次生産量：gC/[mg Chl.a]/day）の年変動および期間別（88年以前，89～93年，94年以降）の平均値を示している。

新生産の割合の平均値は伊予灘16%，燧灘17%，大阪湾22%，広島湾26%，紀伊水道28%，安芸灘28%，備讃瀬戸37%，播磨灘42%となっており，河川流入の少ない海域では新生産の割合は小さく再生産の割合が大きいくことがわかる。

図-4と図-5を比較すると海域の塩分状態（海水流動）と生産力の関連が大きいことがわかる。1980年代中頃までは豊後水道から外海水の流入が強い状態にあり，新生産の割合は大きく，光合成指数は比較的大きい。90年代になると外海水位が上昇するものの，内海固有水塊

の塩分は低下しており（内海・外海水の交換が低下したと推測される），新生産の割合は減少し，光合成指数も減少している。その後，1992年以降には紀伊水道に黒潮系水塊の流入が増加し，新生産の割合は回復しているものの，光合成指数はさらに減少している（豊後水道からの外海水流入が海水交換を効率的に行う）。最近10年（1993年以降）では，新生産は大きく保たれており，有光層外からの栄養塩供給が比較的多い状態にあることがわかる。

以上のことから，光合成指数の年変動は漸減傾向で光合成による一次生産力は小さくなっており，近年の富栄養化に対する水質総量規制の効果は現れていると推測されるが，瀬戸内海奥海域のCOD濃度（図-4）は漸増傾向にあることから，有光層外からの栄養塩供給（ $\text{NO}_x\text{-N}$ ；陸水・底層水などから）により，一次生産が維持されていると考えられる。

5. おわりに

本論文では，瀬戸内海における各湾・灘の無機態窒素の分布と河川流入の関係について考察を行い，無機態窒素の供給源の違いから「新生産」・「再生産」の概念を適用して，海域の一次生産の特性について検討を行った。

この手法に基づき，瀬戸内海における新生産の割合および一次生産力（光合成指数）の年変動について考察を行った結果，80年代には豊後水道からの外海水が瀬戸内海奥にまで流入し，内海の一次生産力は大きかったが，80年代後半～90年代前半には外海水位の上昇とともに内海・外海水の交換効率が悪くなったことが考えられ（内海固有水の塩分は低下），新生産の割合が減少し，一次生産力が低下したことが示された。93年以降は，さらに外海水位が上昇し，光合成による一次生産力はさらに低下しているものの，新生産の割合は大きく，有光層外からの栄養塩供給（陸水・底泥などから）が一次生産力を維持していると推定される。

謝辞：紀伊水道沖合の塩分データは徳島県水産試験場より提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 奥西 武・足立久美子・日向野純也・中村義治・中山哲蔵 (2000): 鹿島灘における一次生産の基本構造, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1021-1025.
- 武岡英隆 (2000): 内湾, 外洋の境界域における定点連続モニタリング—Global 変動と瀬戸内海変動—, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 335.
- 中田喜三郎 (1998): 生態系モデルの定式化, 沿岸の環境圏, pp. 681-697.
- 橋本俊也・山本民次・多田邦尚・松田 治・長末寿宏 (1997): 瀬戸内海の一次生産と海洋構造, 沿岸海洋研究, 第 35 巻, 第 1 号, pp. 109-114.
- 日比野忠史・浅井 正・細川恭史 (2000): 瀬戸内海における湾・灘での水質の季節変動特性, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1036-1040.
- 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.
- 宮野 仁, 日比野忠史, 中山恵介, 岡田知也, 細川恭史, 浅井 正 (2000): 内湾水の水環境に影響を及ぼす物理的要因に関する考察—瀬戸内海総合水質測定調査データによる解析—, 港湾技術研究所報告, 第 39 巻, 第 2 号.
- 横山長之 (1993): 海洋環境シミュレーション—水の流れと生物—, 白亜書房.
- Conway, H. L. (1977): Interaction of inorganic nitrogen in the uptake and assimilation by marine phytoplankton., Mar. Biol., Vol. 39, pp. 221-232.
- Persons, T. R., M. Takahashi and B. Hargrave (1984): Biological Oceanographic Processes, (3rd edition), Pergamon. A more advanced treatment of biological oceanography that emphasizes production processes; minimal mathematics.
- Steele, J. H. (1962): Environmental control of photosynthesis in sea. Limnological. Oceanography., Vol. 7, pp. 137-150.
- Wroblewski, J. S. (1977): A Model of Phytoplankton Plume formation during Oregon Upwelling. Journal of Marine Research, Vol. 35, pp. 357-394.