

エスチュアリー循環と一次生産*

山本 民次**・橋本 俊也**

Estuarine Circulation and Primary Production

Tamiji Yamamoto and Toshiya Hashimoto

広島湾北部海域に対する栄養塩の外部負荷の大きさをソースごとに見積もった。エスチュアリー循環が卓越する同海域では、河川水によって運ばれる溶存態無機リン (DIP) 量とほぼ同等の DIP 量が南部下層から運ばれていることが分かった。溶存態無機窒素 (DIN) では河川負荷の約50%が南部下層からであった。夏季の北部海域上層に対する DIP 負荷量は、河川から12%, 下層から44%, 上層内で有機物の分解によって回帰する量が44%であった。簡単な低次生態系モデルを作成し、DIP の河川水中濃度の増加および南部海域下層濃度の増加に対する一次生産の応答について感度解析を行った。いずれも一次生産は DIP 増加分以上の上昇を示し、これは内部循環 (系内での物質の形態変換) が加速されるためであることが理解された。

Amount of nutrient inflow to northern Hiroshima Bay was estimated for each source. In northern Hiroshima Bay where the estuarine circulation driven by the river discharge is dominating, the amount of nutrient transported from the lower layer of southern area was large. It was estimated that the same amount of dissolved inorganic phosphorus (DIP) was transported from the lower layer of southern area, and was 50% for dissolved inorganic nitrogen (DIN). For the upper layer of northern bay, 12% of DIP was from the river, 44% was from the lower layer, and rest 44% was supplied by regeneration of organic matter in the system. Sensitivity analyses using a simple ecosystem model revealed that increase in DIP concentration both in the river water and in the water of the lower layer of southern area would enhance primary production higher than the amount of DIP increased. This may be due to the acceleration of regeneration in the system.

キーワード: エスチュアリー循環, 一次生産, 広島湾, モデル

1. はじめに

広島湾は1,043 km², 平均水深25.8 m, 容積269億 m³ の閉鎖的な湾であるが, 内部はさらに巖島と西能美島によって挟まれた奈佐美 (ナサビ) 瀬戸によって北部海域と南部海域に分かれており, この意味で二重に閉鎖的である (Fig. 1)。

広島湾北部海域には, 一級河川の太田川以外にも, 瀬野川と八幡川が流れ込んでいるが, これらのうち太田川は総延長600 km, 年間流量27億 ton で最大である。太田川の流域面積は約1,700 km² であり, 他の2河川の流域面積を足した全流域面積のうち約90%を占める (山本ほか, 2000¹⁾)。これは, 北部海域の面積が約140 km² であることとくらべると10倍以上であり, 淡水流入およびその他の物質の負荷の影響が大きいことは想像がつく。

一方, 半閉鎖性内湾に河川水が流入することによって, 河口循環「エスチュアリー循環」が生じることは以前から知られている。これによって湾外下層の海水が引っ張り込まれる。太田川が流入することで引っ張り込まれる海水量は, 河川水流入量に比べて年平均で約7倍, 最大14倍に達することが報告されている¹⁾。

湾内で起こる一次生産に対して, 河川水流入とエスチュアリー循環は重要な2つの外部負荷ソースである。これらに含まれる栄養塩濃度が相対的に高いか低いかによって, エスチュアリー循環の果たす作用が違ってくることは, すでに (山本ほか, 2000¹⁾) がまとめている (Fig. 2)。つまり, 栄養塩濃度が河川水中で高く, 外部下層で低い場合は, エスチュアリー循環そのものは河川水によって負荷された栄養塩を希釈し, 過剰な一次生産が起こるのを抑えるように作用し, 逆の場合は湾の一次生産を促進するように作用する。

広島湾のカキ養殖のほとんどは北部海域で行われており, 一次生産の大小は基本的に植物プランクトン食者であるカキの成長に直結している。以下では, 広島湾北部

* 2006年7月28日受理, 2006年11月9日受理

** 広島大学大学院生物圏科学研究科

連絡先: 山本民次, 広島大学大学院生物圏科学研究科

〒739-8528 東広島市鏡山1-4-4

E-mail: tamiyama@hiroshima-u.ac.jp

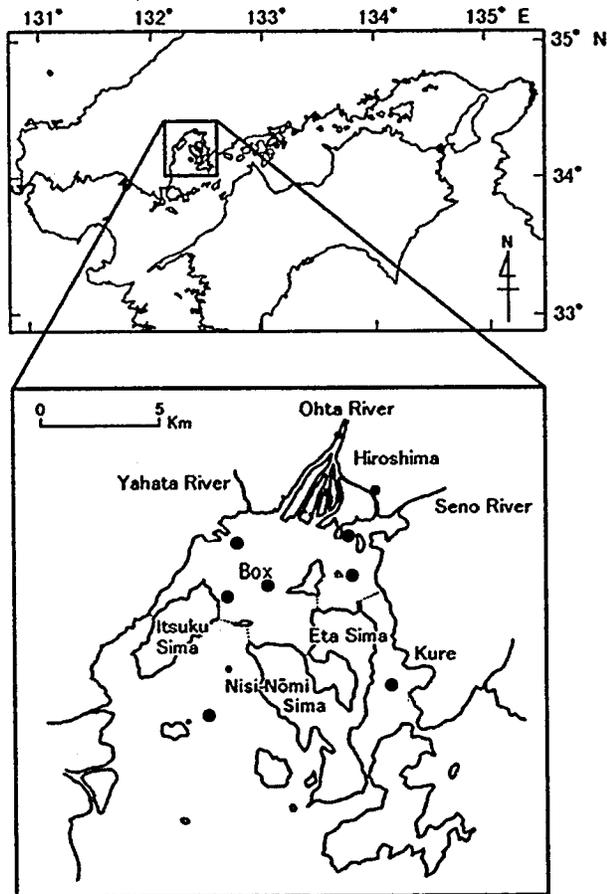


Fig. 1 A map showing geographical characteristics of Hiroshima Bay. Northern Hiroshima Bay surrounded with Itsuku Sima Is., Nishinomi Sima Is. and Eta Shima Is. has highly enclosed feature. Dots are the major sampling stations where water and sediment quality was investigated. Broken lines indicate the demarcation of northern and southern areas.

海域で生じるエスチュアリー循環が一次生産に対して与える影響について定量的解析した結果について紹介し、湾内で行われているカキ養殖に及ぼす影響についても考察する。

2. 広島湾北部海域に対する栄養塩の外部負荷

上述したように、広島湾北部海域に対する栄養塩の外部負荷のソースは、おもに太田川と、それが流入することによって引き起こされるエスチュアリー循環による外部下層からの流入である。ボックスモデル解析によって、これらのいずれが大きいかを次のようにして見積もった。奈佐美瀬戸以北の北部海域を対象とし、夏季に躍層が形成される5 m水深を境にして上下2層に区分し、南部海域と呉湾を外部境界領域として毎月ごとに年間を通して計算した。上層には太田川の流入以外に降雨および蒸発がある。冬季は鉛直混合するため、必ずしも

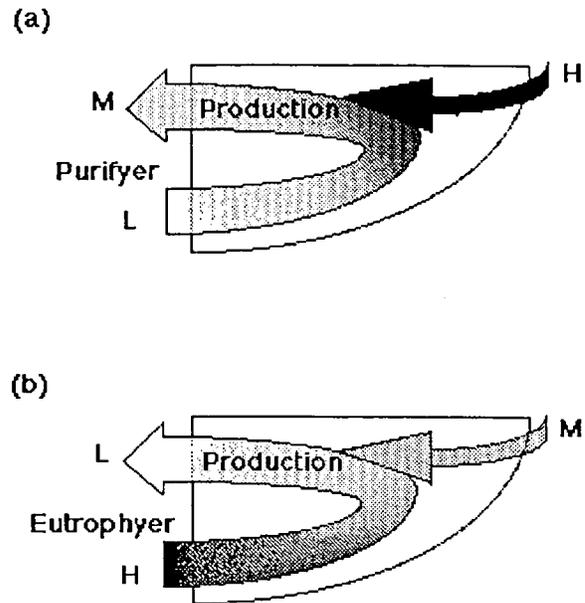


Fig. 2 A schematic diagram showing a characteristic feature of estuarine circulation; (a) in case of high nutrient concentration in the river water and low concentration in the lower layer water out of the bay, and (b) the reverse case. H, L and M denote the level of nutrient concentration, high, low and medium, respectively. Yamamoto *et al.* (2000)¹⁾.

2層に分割する必要は無いが、2層のまま計算した場合、大きな鉛直拡散係数が得られる。逆に冬季のみ1層モデルにするには何ヶ月間を1層にするかという判断が難しく、2層での計算期間と1層での計算期間のあいだにギャップが生じるので良くない。ここでは、一方向の流れ（河川水の流入によって引き起こされるエスチュアリー循環）を移流（advection）とし、潮汐や風による混合など、双方向の海水の動きをすべて拡散（diffusion）として表した。

河川水流量や降雨量は毎時ごとのデータが観測によって得られており、これらに含まれる栄養塩濃度は県環境部のデータ等を引用した。計算対象海域内には広島県水産海洋技術センター（旧水産試験場）が5測点の各層（0, 5, 10, 20, ..., 海底-2 m）で毎月行っている水温、塩分、栄養塩などに関するデータが公表されている。これらについて、1987~1997年の11年間分のデータを用いて、毎月間隔で計算した。

まず、塩分を指標として、拡散係数を求めた。方法に関する詳細は原著（Yamamoto *et al.*, 2005²⁾）に譲る。エスチュアリー循環によって南部海域から流入する海水量は、河川流量に依存するとして、実測値に基づいて得られた回帰曲線から見積もった（山本ほか, 2000¹⁾）。次に、塩分を用いた計算から得られた拡散係数を用いて溶

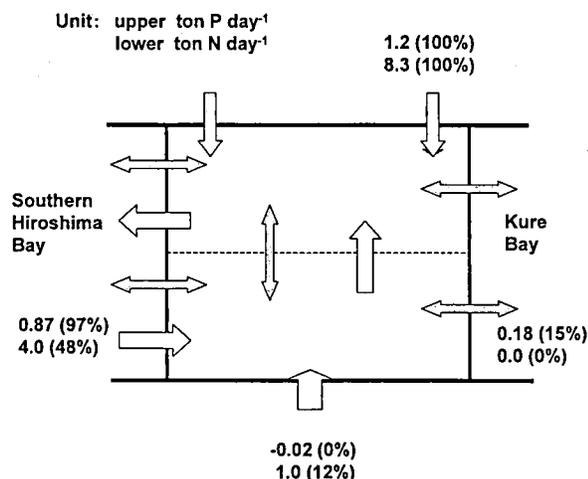


Fig. 3 Estimated inflows of DIP and DIN to northern Hiroshima Bay. Upper: DIP, ton P day⁻¹, and lower: DIN, ton N day⁻¹. Parentheses are percentages of respective sources in comparison to riverine input as 100%. Yamamoto and Hashimoto (2006³⁾) に呉湾とのやり取りを追加.

形態無機リン (DIP) と溶存態無機窒素 (DIN) について、収支計算を行った。

結果を Fig. 3 に示す (山本・橋本, 2006³⁾)。ここで、底泥からの DIP と DIN の溶出フラックスは実測値である (山本ほか, 1998⁴⁾; Yamamoto *et al.*, 2000⁵⁾)。計算の結果、河川からの直接負荷を100%とした場合の南部海域境界領域下層からの負荷は、DIP で97%, DIN で48%であった。つまり、エスチュアリー循環による南部海域の栄養塩ソースは、河川と比べて DIP で同程度、DIN で半分という大きさである。ちなみに、南部海域では外部 (伊予灘) ソースが全リン (TP) で75%, 全窒素 (TN) で90%という見積もりがなされている (橋本ほか, 2004⁶⁾)。これが、陸起源の人為的負荷を一生懸命努力して削減しても、海域の浄化が期待したほど進

まない理由の1つである。

また、底泥からの DIP と DIN の回収量はわずか0% および12%であった。これらは現場からコア採泥したものを船上で疑似現場的な実験系を組んで測定した結果、あるいは底泥間隙水中と直上水中の濃度差から計算したものである (実験方法に関する詳しい記述は原著論文²⁾に譲る)。DIP は還元的な底質中では溶存しても、酸化的な直上水に触れた途端に水酸化鉄などのコロイド表面に吸着される。したがって、水柱底層が還元になる夏季以外は DIP はほとんど水中に溶出しない。また、底泥表面に生息する底生微細藻はこれらを吸収することで水中への溶出量を低減する。年間を通してみると、底層が貧酸素化する夏季に溶出があっても、他の季節にはそれと同程度の吸着・吸収があると考えられるので、底泥から溶出する DIP がゼロになったのは何ら不思議ではない。逆に、底泥が還元的で水中が酸化的な状況での底泥間隙水と直上水の濃度差から計算した値は過大評価のきらいがある。ちなみに、アンモニアも還元的な状態の間隙水中に存在するが、底質表層の酸化層において硝化されてから溶出する可能性が高いので、これも単に濃度差から計算した場合には過大評価となる可能性が高い。一方、硝酸は還元的な底泥内では存在しないので、濃度差から求められるフラックスは下向きになる。また、底泥表面直下では脱窒が行われているので、硝酸の下方フラックスは妥当である。

ちなみに、呉湾からは河川負荷の15%程度の DIP が流入しているが、DIN はほぼゼロであった。つまり、呉湾は DIP においては北部海域に対する負荷源の1つとなっていると言える。

ところで、近年、太田川による DIP 負荷量は Fig. 4 に示したように、大きく減少してきている (山本ほか, 2002⁷⁾)。1980年をピークとして低下の一途を辿

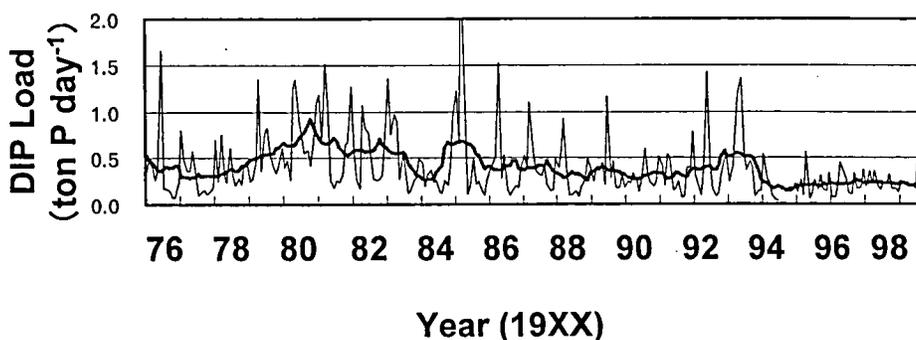


Fig. 4 Long-term variations in estimated loads of dissolved inorganic phosphorus (DIP) from the Ohta River during 1976-1998. Thick smooth curve shows the running average of 13 months. Yamamoto *et al.* (2002).

り、現在では富栄養状態だった時の約1/3である。これは瀬戸内海環境保全特別措置法の成果であることは明らかであり、このことによって海域の赤潮発生頻度は減少した。先の Fig. 2 は1987~1997年の11年間の平均であるので、このような河川負荷の減少を考慮すると、現在ではエスチュアリー循環によって南部海域から運ばれる DIP 量の方が多であろうと推察される。

3. 広島湾北部海域における純生態系代謝量の長期変化

上述の11年間分の計算は、LOICZ ワーキンググループの推奨する方法 (Gordon *et al.*, 1996⁹⁾) に則って行い、DIP の収支からは海域内部における純生態系代謝量 (Net Ecosystem Metabolism) が求まる。詳細は原著論文 (Yamamoto *et al.*, 2005²⁾) に譲るが、要は溶存態無機リンの増減が、移流と拡散といった物理過程による輸送と、海域内部での一次生産と呼吸・分解によって起こると考える。物理過程は塩分を用いて計算されているので、海域内部での DIP の減少は一次生産による吸収であり、増加は呼吸・分解に基づくものである。この計算では、一次生産量と呼吸・分解を分けて計算することはできず、系全体での (一次生産-呼吸・分解) の正味の量が計算される。したがって、「純生態系代謝量」という言い方で呼ばれるわけで、ある時間間隔 (この場合、1 カ月) での Δ DIP が負であれば (一次生産) > (呼

吸・分解) なので、系は “net producer” であり、 Δ DIP が正であれば (一次生産) < (呼吸・分解) なので、系は “net consumer” であるということになる。

実際には、純生態系代謝量はレッドフィールド比 (C/P=106) (Redfield, 1934⁹⁾) を用いて Δ DIP 量を炭素に変換し、炭素量ベースで表される。つまり、水柱内での一次生産の主体は細胞の元素組成がレッドフィールド比である植物プランクトンであり、それらが呼吸・分解によって回帰してくる場合の元素比も同様であるという古典的考えに基づく。これは第一次近似であり、これを否定したらすべては成り立たなくなるが、例えば、植物プランクトン態炭素/クロロフィル比や光合成効率 (assimilation number) などの大きな変化幅と比べれば、十分に妥当な仮定である。

Fig. 5 に1987~1997年の11年間について、5 m 水深を境にして上下2層それぞれについて計算した毎月の値を示した。夏季を中心に、上層で大きな正の値を取り、下層で負の大きな値を取った。これは上層での生産と下層での分解がほぼ同時に起こっていることを示している。1 カ月ごとの解析なので、それより短い時間スケールの議論はできないが、グラフを注意深く見ると、上層の正のピークが初夏~盛夏で、下層の負のピークが盛夏~初秋にかけて現れている年もあり、生産に対する分解が多少の時間差で起こっていることを示唆している。

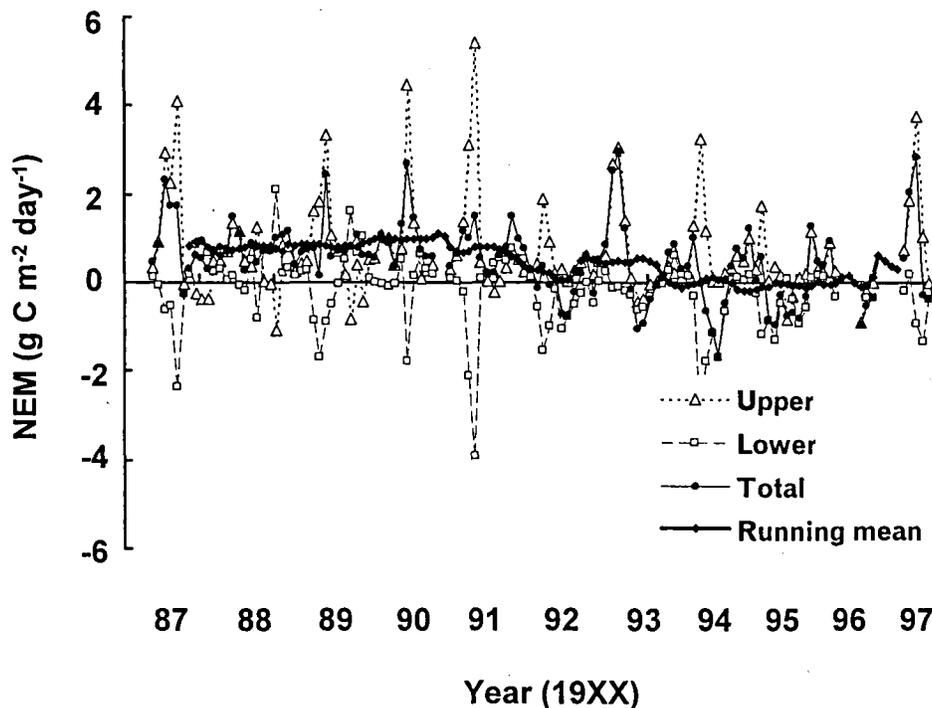


Fig. 5 Yearly variations of estimated net ecosystem metabolism (NEM) in northern Hiroshima Bay during 1987–1997. The thick line shows 6-month running mean. Yamamoto *et al.* (2005).

このことは海域における生産と分解に対して我々が抱いている認識を良く再現している。

計算値の変動がかなり大きい。これは解析に1カ月間隔のデータを用いたため、梅雨期などの河川水のフラッシングがある場合に計算が十分に対応できていないためと考えられる。LOICZワーキンググループは、系内での物質の変化速度が総負荷量の25%以上である場合に、この計算を当てはめることを推奨している。筆者らの別の解析によれば、広島湾北部海域（上層+下層）における春季の親生物元素の平均滞留時間は10日程度であるので（Yamamoto *et al.*, 2004¹⁰⁾、海水交換が大きい梅雨期などでは適切な計算ができていない可能性は否定できない。とは言え、上下層の計算値を足し合わせて全水柱の値にすると（Fig. 5のTotal）、上層・下層それぞれの大きな正と負の値が打ち消されて変動幅が小さくなるとともに、春～夏に生産的で、秋～冬に呼吸・分解が勝るということが示され、これも我々が抱く海域の生態系の生産と分解のサイクルを良く再現している。

さらに、長期変化を見るために、全水柱の値について6カ月の移動平均を計算した（図中太線）。これは上下層の平均のさらにまた時間的平均であるので非常に丸められた値となる。これによると、1990年以前は系全体として0.7 gCm⁻²day⁻¹程度の常に正の値を取って“net producer”であったが、1991年以降は減少傾向にあり、ほぼゼロということも多い。後者の場合、非常に生産性が低くなっていることを示唆している。これは先に示した河川からのDIP負荷量の減少（Fig. 4）と非常に良く対応している。

4. 外部負荷に対する湾内の一次生産の応答

広島湾北部海域に対する外部負荷の2大ソースは、河川とエスチュアリー循環によるものであることが第2節で示された。また、第3節では系内での純生態系代謝量の年変動傾向が理解できた。しかしながら系内における物質循環は不明であり、これを定量的に解析することが、外部負荷による生態系の応答を理解する上で重要である。ここでは、外部からの負荷量が増加した場合に、系内の一次生産がどのように応答するかについて、河川流量が多く、エスチュアリー循環が卓越する夏季について簡単な生態系モデルを用いて解析した結果を紹介する。

第2節と第3節で設定した上下2つのボックスの内部に、栄養塩（N）、植物プランクトン（P）、デトリタス（D）、の3コンパートメントを組み入れた簡単な浮遊生態系モデル（NPDモデル）を構築した（橋本ほか、2006¹¹⁾）。一次生産速度（Pp）は以下の式の通り、

DIP濃度（DIP）、水温（T）、光強度（I）に依存するものとした。

$$Pp = V_{\max} \frac{DIP}{DIP + K_p} \times \exp(kT) \times \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (1)$$

ここで、 V_{\max} ：最大栄養塩比取り込み速度（day⁻¹）、
 K_p ：DIP取り込みに関する半飽和定数（mg m⁻³）、
 k ：光合成の温度依存係数（℃⁻¹）、
 T ：水温（℃）、
 I_{opt} ：光合成最適光強度（μE m⁻² day⁻¹）、
 I ：水柱平均光量（μE m⁻² day⁻¹）、

である。

また、水中内での光強度は水深とともに指数関数的に減衰し、その減衰率（消散係数）は、次のように水分子、植物プランクトン量（クロロフィル濃度）、および植物プランクトン以外の物質の量に依存するものとした。

$$K_e = K_w + K_x + K_c \cdot C \quad (2)$$

ここで、 K_w ：海水自身の消散係数（m⁻¹）、
 K_x ：植物プランクトン態以外の物質による消散係数（m⁻¹）、
 K_c ：単位Chl. aあたりの消散係数（m⁻¹）、
 C ：Chl. a濃度（mg m⁻³）、

であり、 K_w 、 K_x 、 K_c はそれぞれ0.027 m⁻¹、0.16 m⁻¹、0.034 m⁻¹（橋本・多田、1997¹²⁾）とした。

モデル内の3つのコンパートメントの時間変化を表す基礎式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} V_u \frac{d(DIP_u)}{dt} &= R_f + Adv \cdot DIP_L - Adv \cdot DIP_u \\ &- K_z \cdot \left(\frac{DIP_u - DIP_L}{(H/2)} \right) \cdot Az - Kh \cdot \left(\frac{DIP_u - DIP_{ou}}{L} \right) \cdot Ah_u \\ &- Pp_u \cdot V_u + \beta_u \cdot DET_u \cdot V_u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_u \frac{d(PHY_u)}{dt} &= Adv \cdot PHY_L - Adv \cdot PHY_u \\ &- K_z \cdot \left(\frac{PHY_u - PHY_L}{(H/2)} \right) \cdot Az - Kh \cdot \left(\frac{PHY_u - PHY_{ou}}{L} \right) \cdot Ah_u \\ &+ Pp_u \cdot V_u - \gamma_u \cdot PHY_u \cdot V_u - Wp \cdot PHY_u \cdot Az \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_u \frac{d(DET_u)}{dt} &= Adv \cdot DET_L - Adv \cdot DET_u \\ &- K_z \cdot \left(\frac{DET_u - DET_L}{(H/2)} \right) \cdot Az - Kh \cdot \left(\frac{DET_u - DET_{ou}}{L} \right) \cdot Ah_u \\ &+ \gamma_u \cdot PHY_u \cdot V_u - \beta_u \cdot DET_u \cdot V_u - Wd \cdot DET_u \cdot Az \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 V_L \frac{d(DIP_L)}{dt} &= Re + Adv \cdot DIP_{OL} - Adv \cdot DIP_L \\
 &- Kz \cdot \left(\frac{DIP_L - DIP_U}{(H/2)} \right) \cdot Az - Kh \cdot \left(\frac{DIP_L - DIP_{OL}}{L} \right) \cdot Ah_L \\
 &- Pp_L \cdot V_L + \beta_L \cdot DET_L \cdot V_L
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 V_L \frac{d(PHY_L)}{dt} &= Adv \cdot PHY_{OL} - Adv \cdot PHY_L \\
 &- Kz \cdot \left(\frac{PHY_L - PHY_U}{(H/2)} \right) \cdot Az - Kh \cdot \left(\frac{PHY_L - PHY_{OL}}{L} \right) \cdot Ah_L \\
 &+ Pp_L \cdot V_L - \gamma_L \cdot PHY_L \cdot V_L + Wp \cdot PHY_U \cdot Az
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 V_L \frac{d(DET_L)}{dt} &= Adv \cdot DET_{OL} - Adv \cdot DET_L \\
 &- Kz \cdot \left(\frac{DET_L - DET_U}{(H/2)} \right) \cdot Az - Kh \cdot \left(\frac{DET_U - DET_{OU}}{L} \right) \cdot Ah_L \\
 &+ \gamma_L \cdot PHY_L \cdot V_L - \beta_L \cdot DET_L \cdot V_L + Wd \cdot DET_U \cdot Az
 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 V : ボックスの体積,
 Rf : 河川からの DIP 供給量,
 Re : 底泥からの DIP 溶出量,
 Adv : 移流流量,
 Kz : 鉛直拡散係数,
 Kh : 水平拡散係数,
 γ : 植物プランクトンの死亡速度,
 β : デトリタスの分解速度,
 Az : 上層と下層とのボックス間の断面積,
 Ah : 境界領域とのボックス間の断面積,
 H : 水深,
 L : 境界領域との距離,

である。また、植物プランクトンとデトリタスの沈降速度をそれぞれ Wp , Wd として与えた。添え字の U は上層, L は下層を, O は境界海域 (南部) を示す。植物プランクトンの死亡速度 (γ), デトリタスの分解速度 (β) は Kawamiya *et al.* (1995)¹³⁾ にならぬ, 水温に依存するものとした。モデル内で使用したパラメータの値は原著¹¹⁾を参考されたい。計算はタイムステップ0.1日で、定常状態 (150日後) となるまで行った。

結果を Fig. 6 に示す。検証用のデータとして、1991, 1992, 1996, 1997年の4年間の8月の観測データを用いた (1993年と1994年はそれぞれ、記録的な豪雨と渇水の年であったので検証データから除いた。また、1995年は欠測である)。異常年と思われる年のデータを除いて平常年と思われる4カ年のデータを用いたが、それでも年ごとの変動はかなり大きく、計算結果のほとんどはこの範囲内であった。また、レッドフィールド比を用いて、リ

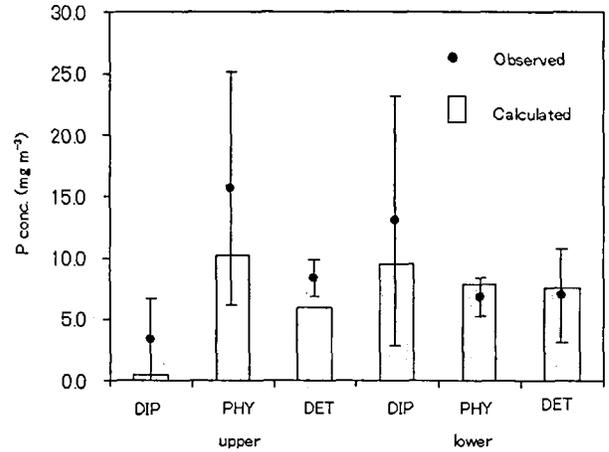


Fig. 6 Comparison between observed and calculated concentrations in respective compartments. Vertical bar denotes the standard deviation. Hashimoto *et al.* (2006).

ンから炭素に換算した一次生産量は約1,370 mg C m⁻² day⁻¹ (上層1,390, 下層1,360) となり、Hashimoto *et al.* (1997)¹⁴⁾が報告している実測値約1,040 mg C m⁻² day⁻¹ にかかなり近い値が得られた。以上、数値モデルによる各コンパートメントの現存量および一次生産量の計算値は、現場の実測における変動幅の大きさを考えると、この程度であれば十分に再現性が高いと考える。

系内部での物質循環の平均像は、Fig. 7 に示すようになる。河川からの DIP 負荷量 (0.62 ton P day⁻¹) は、南部下層からの DIP 負荷量 (1.3 ton P day⁻¹) の約1/2である。第2節で示した値よりもさらにエスチュアリー循環による南部下層からの割合が大きいのは夏季に限定した計算だからである。上層の一次生産に使われる DIP の総量を100%として、それに寄与する割合をソース別に示すと、陸からの流入負荷が12%, 下層からの移流と拡散によるものが44%, 上層中での有機物分解が44%である。下層からの移流・拡散によるものが44%と大きい、これは南部下層から入ってくるものに、さらに北部下層で分解されたものが加わるためである。さらに注意しておきたいのは、上層内部で分解されて帰帰する量がやはり44%もあることである。本稿のテーマはエスチュアリー循環による外部下層からの負荷に焦点を置いているものの、内部での循環が大きいことも忘れてはならない。

次に、外部負荷に対する広島湾北部海域の一次生産の応答を見るために、次の2つの感度解析を行った結果を紹介する。

1. 太田川河川水中の栄養塩濃度の変化 (淡水流量は変化なし)

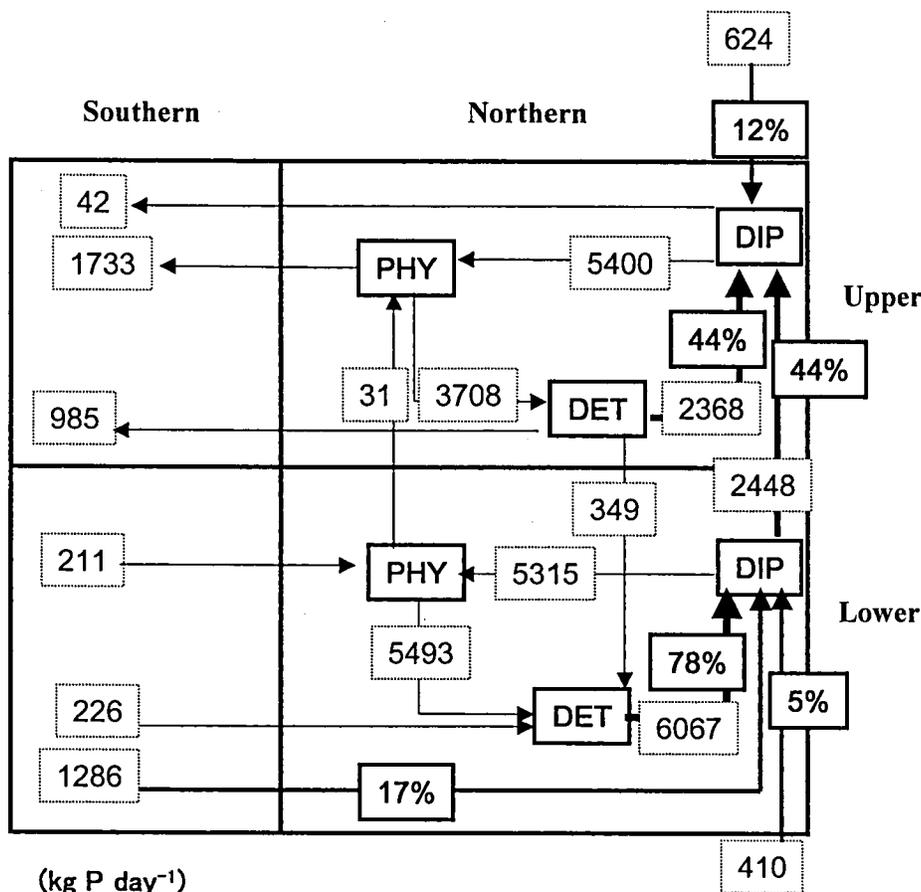


Fig. 7. Average phosphorus cycles in August of northern Hiroshima Bay obtained by the simple ecosystem model consisted of dissolved inorganic phosphorus (DIP), phytoplankton phosphorus (PHY), and detritus phosphorus (DET). Yamamoto and Hashimoto (2006).

2. 南部海域下層の栄養塩濃度の変化

感度解析におけるそれぞれの栄養塩濃度の変化幅は、現状再現で決定した値を基準値とし、先の4年間の値の標準偏差 σ をそれぞれ算出し、 $-2.0\sigma \sim 2.0\sigma$ の範囲で 0.5σ 刻みとした。1の河川水中の栄養塩濃度の変化は人為的な影響を想定したものであるのに対して、2は自然現象的な変化によるものである。基準値は *Adv*, *Rf*, *DIP_{ol}* それぞれ $1.63 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$, $0.62 \text{ ton P day}^{-1}$, 8.4 mg P m^{-3} , σ は *Adv*, *Rf*, *DIP_{ol}* それぞれ $5.89 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$, $0.37 \text{ ton P day}^{-1}$, 3.5 mg P m^{-3} であった。なお、この操作により値がマイナスとなる場合については検討の対象からはずした。

太田川の河川中 DIP 濃度の上昇にともない、上層の一次生産速度は増加し、水柱あたりでも増加傾向が見られた (Fig. 8)。ただし、下層の一次生産速度はわずかに減少傾向になった。河川からの DIP 供給は直接的な負荷というイメージが強いのので、これの上昇は湾内の一次生産の急激な上昇につながりそうな気がする。しか

し、 2.0σ の場合でも全体の負荷に占める割合としては約20%で(基準値は12%)、それほど急激な変化は起こらない。とは言え、正確を期すため補足すると、 2.0σ の場合の河川からの DIP 負荷量の増加 ($0.74 \text{ ton P day}^{-1}$)によって増殖した植物プランクトンは下層に沈降し、分解・無機化されて再び上層の一次生産に寄与し、一次生産に回る DIP の総量は実質上約 $1.7 \text{ ton P day}^{-1}$ に増加する(詳細は省略、山本・橋本, 2006³⁾参照)。結果として北部海域上層の一次生産量は、 2.0σ の場合、約1.3倍 ($1,810 \text{ mg Cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)に増加した。本来ならば、河川負荷量 2.0σ の増加だけでは、一次生産は1.1倍程度にしかならないことを考えると、河川負荷は内部循環(系内での物質の形態変換)を加速し、実質負荷量以上の効果をもたらしていることは注目に値する。下層で一次生産量が低下するのは、植物プランクトン現存量の増加によって下層で光制限が起こるためである。

境界海域下層の DIP 濃度の増加の場合も海域内部の

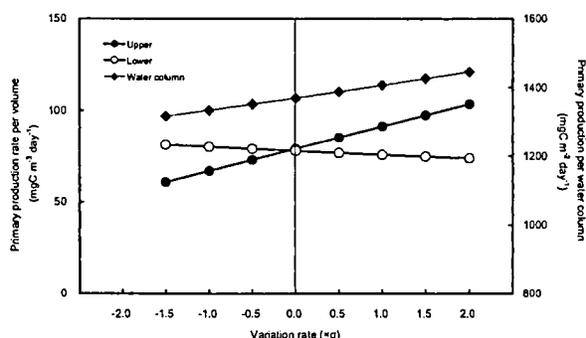


Fig. 8 Responses of primary productivity in northern Hiroshima Bay to increase/decrease in the riverine DIP concentrations. The calculations were made for the standard run (present condition, 0.0) and by 0.5σ between -2.0σ and 2.0σ . Hashimoto *et al.* (2006).

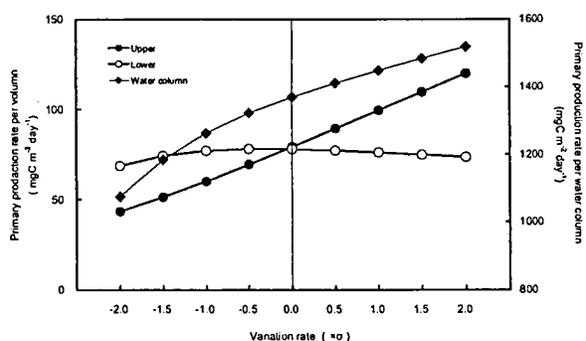


Fig. 9 Response of primary productivity in northern Hiroshima Bay to increase/decrease in the DIP concentrations in the lower layer of the southern area. The calculations were made for the standard run (present condition, 0.0) and by 0.5σ between -2.0σ and 2.0σ . Hashimoto *et al.* (2006).

一次生産を上昇させた (Fig. 9). この場合、上層に対する全 DIP 流入量に対する下層からの流入量の占める割合は先の基準値 (現状) 44% から 55% に増加した. この 11% の増加は大したことないと思われるが、先の河川負荷と同様、DIP の外部からの負荷量の増加が内部の循環量を加速し、上層でのデトリタスから DIP への分解量は $2.4 \text{ ton P day}^{-1}$ から $3.1 \text{ ton P day}^{-1}$ に増加した. その結果、上層の一次生産量は、 2.0σ の場合、約 1.5 倍 ($2,100 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) に増加した. この場合は、本来ならば南部下層からの負荷量の増加は 1.8 倍なので (基準値 $1.3 \text{ ton P day}^{-1}$ に対して $2.4 \text{ ton P day}^{-1}$)、倍率からすれば低いが絶対量としては大きい. 境界海域下層の栄養塩濃度 DIP 濃度が増加するに伴い、光制限のためにやはり下層の一次生産量は低下する.

5. まとめ

広島湾北部海域に対する太田川の影響は大きい、瀬

戸内海環境保全措置法による負荷の削減効果は明瞭で、広島湾の水質は大きく改善されてきた. 今回の定量的な解析で明らかのように、北部海域に対するすべてのソースに占める河川経由の DIP 負荷量は年間平均で約 50% であり、残りは南部海域から供給されている. 河川水の流量が多く、エスチュアリー循環が発達する夏季には、北部上層に対する河川経由の DIP 負荷の寄与率は 12% で、下層から運ばれる DIP 量が 44% と相対的に大きい. したがって、平常年にあり得る範囲の変動幅 ($\pm 2.0\sigma$) で各ソースの負荷量が増加する場合、エスチュアリー循環の変動は河川負荷の変動と同様、広島湾北部海域の物質循環に対して大きな影響を与えることが理解された. これは、陸域からの物質の負荷削減をしても海域の応答が悪いことの大きな理由の 1 つである.

さらにもう一点付け加えておかなければならないことは、内部循環 (系内での物質の形態変換) の大きさである. 北部海域上層に対する総 DIP 供給に占める内部循環による寄与率は 44% で、下層からもたらされる割合と同等である. 河川負荷やエスチュアリー循環などの外部負荷は北部海域の一次生産を上昇させるが、ともに同時に内部の物質循環を加速し、負荷量の単純増加以上の一次生産の増加につながる事が分かった. 北部海域はカキ養殖が集約的に行われている場所であり、一次生産の大きさはカキに対する餌の供給という点で直結している.

以上、本稿ではエスチュアリー循環という、河口域に特有な物理過程に焦点を当てて述べてきたが、河川負荷、エスチュアリー循環、内部循環 (実際にはカキを含む高次の生物群集も経由) が動的に関連しあって物質循環を駆動し、その中で生態系が成り立っていることを十分に理解し、そのプロセスを定量的に把握しない限り、水質のみをコントロールしようという環境施策は成り立たないことは明らかである.

参考文献

- 山本民次・芳川忍・橋本俊也・高杉由夫・松田治 (2000) : 広島湾北部海域におけるエスチュアリー循環過程. 沿岸海洋研究, 37, 111-118.
- Yamamoto, T., A. Kubo, T. Hashimoto and Y. Nishii (2005) : Long-term changes in net ecosystem metabolism and net denitrification in the Ohta River estuary of northern Hiroshima Bay—An analysis based on the phosphorus and nitrogen budgets. p. 123-143, In, Progress in Aquatic Ecosystem Research, ed. A. R. Burk, Nova Science Publishers, Inc., New York.
- 山本民次・橋本俊也 (2006) : 陸域からの物質流入負荷増大による沿岸海域の環境収容力の制御. p. 101-118, 養殖海域の環境収容力, 日本水産学会 (監修), 古谷研, 岸道郎, 黒倉寿, 柳哲雄 (編), 恒星社厚生閣, 東京.
- 山本民次・松田治・橋本俊也・妹背秀和・北村智顕 (1998) :

- 瀬戸内海海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量の見
積もり. 海の研究, 7, 151-158.
- 5) Yamamoto, T., H. Ikeda, T. Hara and H. Takeoka (2000):
Applying heat and mass balance theory to the measurement of
benthic material flux in a flow-through system. *Hydrobiol.* **435**,
135-142.
 - 6) 橋本俊也・奥晋太郎・柳哲雄・林美鶴 (2004): 瀬戸内海にお
ける外洋起源の窒素・リンの重要性. 広島大学大学院生物圏
科学研究科紀要, **43**, 7-13.
 - 7) 山本民次・石田愛美・清水徹 (2002): 太田川河川水中のリン
および窒素濃度の長期変動—植物プランクトン種の変化を引
き起こす主要因として. 水産海洋研究, **66**, 102-109.
 - 8) Gordon, D. C., P. R. Boudreau, K. H. Mann, J. E. Ong, W. L. Silvert,
S. V. Smith, G. Wattayakorn, F. Wulff and T. Yanagi (1996):
LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Report
and Studies, No. 5, 96pp.
 - 9) Redfield, A. C. (1934): On the proportions of organic derivatives
in sea water and their relation to the composition of plankton. p.
177-192, In, James Johnstone Mem. Vol. Liverpool.
 - 10) Yamamoto, T., Y. Inokuchi and T. Sugiyama (2004): Biogeo-
chemical cycles during the species succession from *Skeletonema*
costatum to *Alexandrium tamarense* in northern Hiroshima Bay.
J. Mar. Sys., **52**, 15-32.
 - 11) 橋本俊也・上田亜希子・山本民次 (2006): 下降循環流が夏季
の広島湾北部海域の生物生産に与える影響. 水産海洋研究,
70, 23-30.
 - 12) 橋本俊也・多田邦尚 (1997): 広島湾における海水の光化学的
特性. 海の研究, **6**, 151-155.
 - 13) Kawamiya, M., M. J. Kishi, Y. Yamanaka and N. Suginozawa
(1995): An ecological-physical coupled model applied to station
Papa. *J. Oceanogr.*, **51**, 635-664.
 - 14) Hashimoto, H., T. Hashimoto, O. Matsuda, K. Tada, K. Tamai, S.
Uye and T. Yamamoto (1997): Biological productivity of lower
trophic levels of the Seto Inland Sea. p. 17-58, In, Sustainable
Development in the Seto Inland Sea, Japan—From the Viewpoint

of Fisheries, eds. T. Okaichi and T. Yanagi, Terra Scientific Pub.
Co., Tokyo.

質 疑 応 答

問: 定常計算の場合は, 解を直接に示すことができない
か. (愛媛大 CMES, 郭 新宇)

答: 消散係数とクロロフィル *a* の関係式や河口循環流
流速と河川流量との関係式など複雑な式があり, 解析
解を求めるのは不可能である.

問: 大阪湾の奥や伊勢湾の奥と比較した場合, 広島湾奥
の場合には, 透明度が大きく, 状況が異なると思う.
異なる点を指摘してもらいたい.

(三重大, 関根 義彦)

答: 透明度は高く, 有光層は通常, 上層厚 (5 m) 以上あ
る. そのため下層でも光合成は可能である.

問: 一次生産において, 広島湾南部下層の栄養塩がエス
チュアリー循環流によって上層に運ばれるものの寄与
が大きいとしている. この栄養塩を外海起源としてい
るが, 河口循環流による栄養塩トラップ効果によって
川から運ばれた栄養塩が内部で再度循環するものも考
慮する必要があるのではないのか.

(京都大学農, 藤原 建紀; 愛媛大 CMES, 郭 新宇)

答: 確かにその通りである. 内部で循環する量は南部下
層からエスチュアリー循環で流入する量より大きい.
口頭発表ではテーマを意識して, エスチュアリー循環
過程を強調しすぎたかもしれない.