

宇和海下波湾における基礎生産速度の季節変動

山下亜純¹, 井関和夫², 樽谷賢治³, 小泉喜嗣¹

Seasonal Variation of Primary Productivity in Shitaba Bay of Uwa Sea, Japan

Azumi YAMASHITA^{1†}, Kazuo ISEKI², Kenji TARUTANI³ and Yoshitsugu KOIZUMI¹

Primary productivity in the Shitaba Bay of Uwa Sea was measured by the *in situ* ¹³C tracer method one to three times a month for three years from February 2002 to January 2005, together with the hydrographic observation and chlorophyll *a* and nutrients analysis. The depth-integrated primary productivity ranged from 0.11 gC m⁻² day⁻¹ to 1.83 gC m⁻² day⁻¹ during the observation, and the annual primary productivity was estimated to be about 193 gC m⁻² year⁻¹. The productivity was highest in summer (0.82 gC m⁻² day⁻¹) throughout the year, followed by that of autumn (0.68 gC m⁻² day⁻¹), spring (0.44 gC m⁻² day⁻¹), and was lowest in winter (0.18 gC m⁻² day⁻¹). There was a correlation ($r=0.77$, $p<0.01$) between the primary productivity and depth-integrated chlorophyll *a* (mg m⁻²) throughout the year, and high correlation ($r=0.96$, $p<0.01$) was found in autumn but no correlation was found in summer. The chlorophyll *a* specific productivity generally tend to increase with the surface irradiance, but in summer the chlorophyll *a* specific productivity was considerably variable, probably due to the different nutrient availability. High chlorophyll *a* specific productivity may be linked to the intrusion of bottom water, which may play an important role in supporting the biological productivity of Shitaba Bay.

Key words: primary productivity, seasonal variation, Shitaba Bay, Uwa Sea, bottom intrusion

はじめに

豊後水道東岸域に位置する宇和海は、カタクチイワシやマアジ等の浮魚類の好漁場として知られる一方で、沿岸域では真珠母貝であるアコヤガイの養殖場が盛んに行われてきた。しかしながら、その生産量、生産額は、1994年のアコヤガイ大量へい死以降激減し、2000年度の実産額（約68億円）は、ピーク時（1991年）の実産額（約424億円）の6分の1程度に過ぎず、極めて危機的な状況にある（愛媛農林水産統計協会、1993; 2008）。アコヤガイ大量へい死の主因は感染症とされ（森実ほか、2001）、低水温処理による病気の進行抑制（永井ほか、2002）や耐病性貝の選抜

（内村ほか、2005）などにより、へい死の軽減が図られてきたものの、今なお産業の復活には至っていない。真珠養殖は、魚類養殖に代表される給餌養殖と異なり、自然海域に存在する植物プランクトンを餌料として利用することから、アコヤガイの健全な成長には餌となる植物プランクトン量に見合った適正養殖密度が重要であり（阿保・杜多、2001）、餌不足はアコヤガイの活力低下や感染症などの間接的な原因となる（谷村ほか、2008）。したがって、感染症の蔓延による母貝のへい死に加えて、餌料環境の変化もしくは悪化がアコヤガイの養殖生産量の低迷につながっている可能性も無視できない。

宇和海における植物プランクトン現存量の変動機構については、夏季を中心に発生する急潮によって、貧栄養で植物プランクトンが低密度の海水が流入し、植物プランクトンの現存量が低下すること、一方で急潮後には豊後水道南部の陸棚斜面域の底層から栄養塩の豊富な低温水が流入し、植物プランクトン、特に珪藻類の増殖を促進することなどが明らかにされている（川端・佐竹、1992; Takeoka et al., 2000; 小泉、2002）。また、急潮によって透明度が上昇し、底泥直上まで必要量の光が到達すると、珪藻類の休眠期細胞の発芽を促し、このことが珪藻によるブルームの引き金となっている可能性も指摘されている（小泉、2002）。

2009年12月23日受付、2010年11月16日受理

¹ 愛媛県農林水産研究所水産研究センター

Center for Marine Studies, Ehime Prefectural Research Institute for Agriculture, Forestry and Fisheries, Shitaba, Uwajima, Ehime 798-0104, Japan

² 広島大学大学院生物圏科学研究科

Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8528, Japan

³ 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Fisheries Research Agency, Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan

† yamashita-azumi@pref.ehime.jp

さらに, 速水ほか (2005) は, 宇和海の支湾である北灘湾におけるクロロフィル a 濃度の季節変動について, 11月から4月までは低濃度であったが, 5月から10月までは相対的に高濃度で, 初夏と秋に極大値をとることを示すとともに, ボックスモデルを用いて, その変動機構について検討し, 外海からの栄養塩の供給が湾内の植物プランクトン現存量の変動に大きく寄与していることを指摘している. このように, 宇和海における植物プランクトン現存量の変動機構については, 知見が蓄積されつつあるが, 本海域では, これまでに植物プランクトンの生産速度を測定した報告例はなく, 季節変動などの基本的な知見も得られていない. 植物プランクトンの現存量は, 増殖や加入・集積等の増加要因と動物プランクトン等による捕食や拡散・沈降等の減少要因とのバランスによって決定されることから, 生産速度の変動やその支配要因を明らかにすることは, 植物プランクトン現存量の変動機構に関する研究を深化させるためだけでなく, アコヤガイ等の高次栄養段階にある生物への餌料の供給やエネルギーフローを定量的に評価するためにも必要不可欠である.

そこで, 本研究では, 宇和海の支湾のひとつである下波湾において, 3ヶ年にわたり, 基礎生産速度の測定を行い,

その季節変動の特徴を把握するとともに, その変動に対する環境要因の影響について検証した.

材料と方法

下波湾は宇和海の東部に位置する面積約3 km², 平均水深40 m (最深部60 m) の内湾である (Fig. 1). 同湾には, 二級河川以上の河川は流入していないが, 湾内では魚類養殖とアコヤガイの養殖が盛んに行われている. 本研究における基礎生産速度の測定は¹³C-現場吊下法 (Hama et al., 1983) により, 湾口部 (Fig. 1) の水深23 m地点 (Stn A) において, 2002年2月から2005年1月の間, 月に1-3回の観測頻度で実施した (ただし2002年8月は欠測). 表面海水はバケツ採水で, 水深5, 10, 15 m層の海水はバンドン採水器を用いて採取し, 大型の動物プランクトンを取り除くため, 網目200 μ mのネットで濾過後, 濾液を500 mlのポリカーボネイト製の瓶に入れた. これにNaH¹³CO₃溶液を無機炭酸濃度の約10%となるように加え, 各採水層に吊下し, 正午を挟む5-6時間培養した. 培養後, 各試水をあらかじめ450°Cで4時間熱処理した直径25 mmのWhatman GF/F濾紙で濾過し, 分析まで-30°Cで凍結保存した. 分析直前に, 濾紙は60°Cで48時間乾燥後, 安定同位体質量分析計 (Eu-

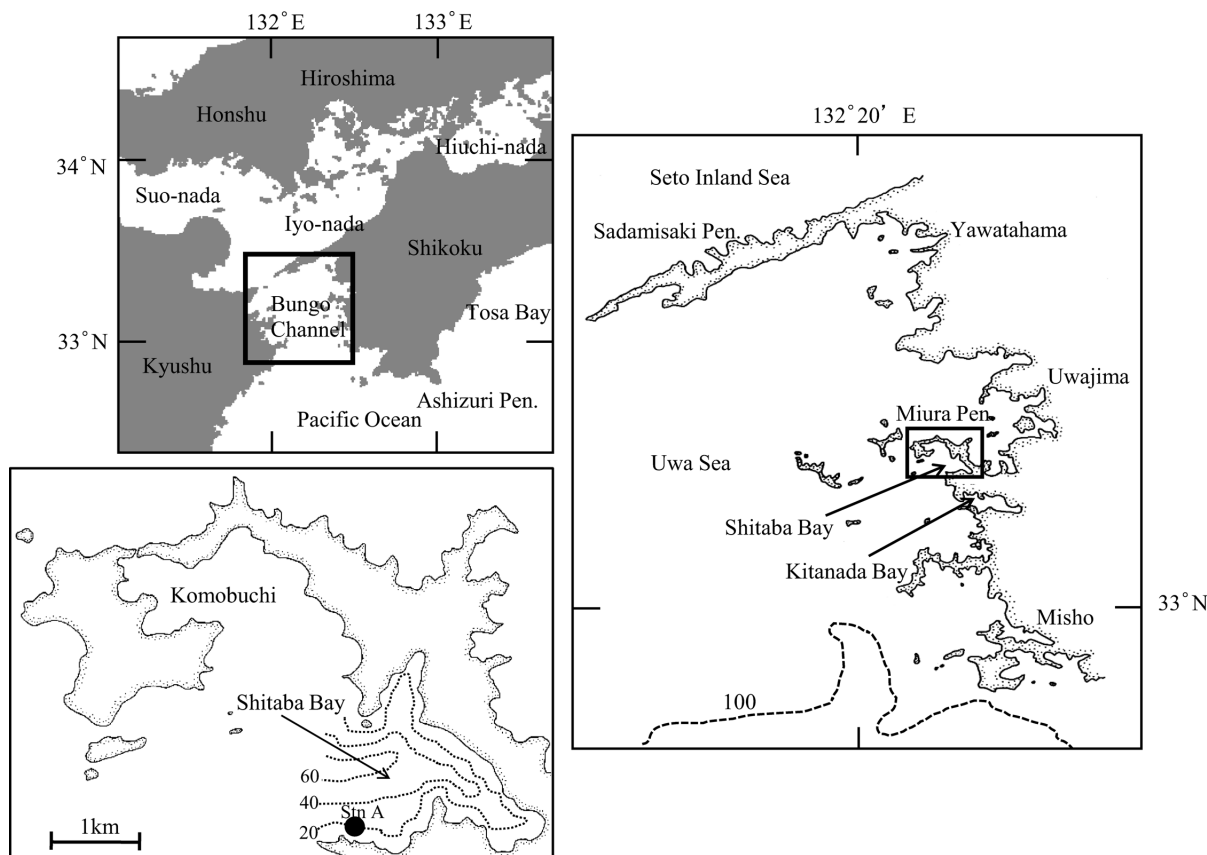


Figure 1. Sampling station (Stn A) in Shitaba Bay, Uwa Sea. Dotted lines with numbers show bathymetrical contours.

ropean Scientific, ANCA-SL) で有機態炭素濃度および ^{13}C atom%を測定した。なお、全炭酸はpHとアルカリ度から推定した (Parsons et al., 1984)。培養中も含めて全観測期間、光量子量の変化は、愛媛県農林水産研究所水産研究センターの屋上に設置した光量子計 (Onset, HOBO Weather Station Logger) で連続測定した。水柱の日基礎生産速度 ($\text{gC m}^{-2} \text{day}^{-1}$) は、上記の方法で得られた各層ごとの基礎生産速度を水柱積算し、その値に日長時間内の積算光量子量に占める培養時間内の積算光量子量の比を除して算出した。ただし、機器の不調により光量子データが欠測している期間については、他の2ヶ年の当該月の平均値を使用した。

Chl *a*は、海水500 mlを直径47 mmのWhatman GF/Fで濾過後、ジメチルホルムアミド (*N,N*-Dimethylformamid) 溶液で抽出を行い (Suzuki and Ishimaru, 1990)、蛍光法で測定した。濾液中の硝酸および亜硝酸塩 ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$; 以下、 NO_x と記述)、溶存態無機リン (DIP)、溶存態ケイ素 (DSi) は、Strickland and Parsons (1972) の方法に準じ、栄養塩自動分析装置 (Bran+Luebbe, TRAACS800 SYSTEM) で分析した。水温、塩分、クロロフィル蛍光および水中光量子量の鉛直観測はメモリー式CTD (アレック電子製, ACL-1151DK) を用いて基礎生産測定時の午前中に行った。また、降水量は気象庁ホームページ上の公開データ (宇和島測候所) を使用した。

さらに、基礎生産測定時には0 m層の海水をバケツ採水後、Sedgwick-Rafter計数スライドを用いて、得られた試水1 ml中の植物プランクトンを光学顕微鏡下で同定、計数した。なお、下波湾では、出現する植物プランクトンの多くが珪藻類、渦鞭毛藻類、微小鞭毛藻類 (査定不能の鞭毛を有する藻類、例えばブラシノ藻類、クリプト藻類など) であることから、本研究ではこれらの分類群のみを対象とした。

結果

水温、塩分、栄養塩濃度の季節変動

水温は、表層で14.6–28.5°C (平均20.7°C)、15 m層で14.6–26.5°C (平均20.1°C) の範囲で変動し、表層と15 m層での水温差は最大で3°C以下であった。水温は1–3月に15°C以下の最低水温が観測された後、4月に入ると16°C以上に上昇し、8–9月にかけて25–29°Cの最高値を示す季節変動を示した (Fig. 2a)。

塩分は、表層で32.4–34.7 (平均34.1)、15 m層で33.6–34.7 (平均34.2) の範囲で推移し、2002年9月2日、2003年6月26日、2004年9月2日を除き、最高塩分は2–3月に、最低塩分は8月に観測され、冬季に高く (34.3–34.7)、夏季に低い傾向 (32.4–34.3) にあった (Fig. 2b)。3度の顕著な塩分低下は、後述するように大量降雨後に観測された。また、図には示していないが、密度の鉛直分布から、5月

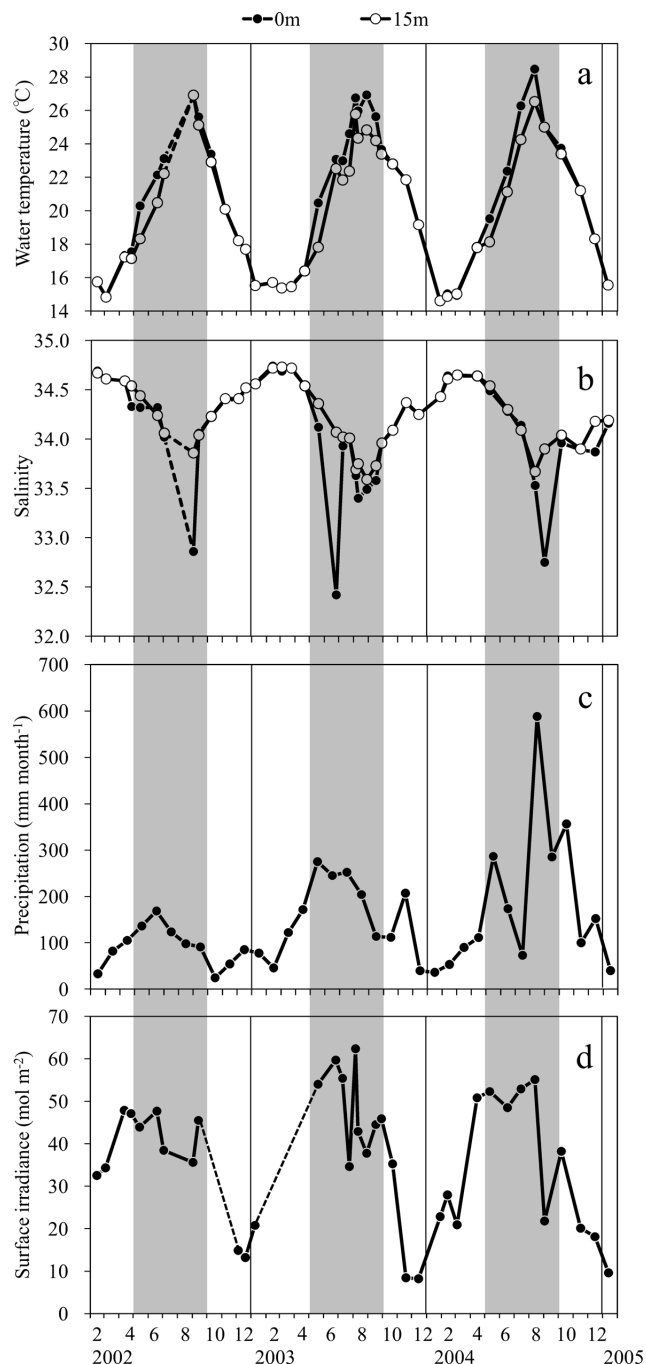


Figure 2. 3-year time series of water temperature (a) and salinity (b) at Stn A in Shitaba Bay. Precipitation (c) observed at Uwajima weather station and surface irradiance (d) measured on the roof of Center for Marine Studies, Ehime Prefectural Research Institute for Agriculture, Forestry and Fisheries were also shown. Value of 0 m (solid circles) and 15 m (open circles) are shown. Dotted lines show the periods which no data was obtained due to no observation or the trouble of the quantum sensor. Shaded areas indicate the periods which bottom intrusion occur repeatedly (from May to September).

から9月にかけて成層が形成され, 10月から4月は鉛直混合が卓越していた。

月降水量は, 24.5–588.5 mm (平均 142 mm) の範囲で推移し, 梅雨期と台風の影響を受ける夏季に増加し, 冬季に低下する傾向を示した (Fig. 2c). 観測期間中, 最高降水量は2004年の8月 (588.5 mm) に観測されているが, これは台風による8月30日頃の大量降雨の影響が大きく, 結果として2004年9月2日に表層塩分の顕著な低下を招いた。また, 2003年6月26日の急激な塩分低下は, 梅雨による6月9日以降の継続的な降雨の影響と考えられる。同様に2002年9月2日の塩分低下も, 観測日前 (8月30, 31日) の大量降雨の影響と考えられる。2002年の年間降水量は1049 mmであり, 1922年以降の宇和島測候所における観測結果の中では, 1994年 (1041 mm) に次ぐ少雨の年であった。一方, 2004年の年間降水量は2305 mmで, 1943年 (2598 mm), 1954年 (2543 mm), 1993年 (2577 mm) に次いで4番目に多雨の年であった。

日積算光子量は, 8.2–62.4 mol m⁻² (平均 37.1 mol m⁻²) の範囲で推移し, 観測日の天候により大きく影響を受けるものの, 概ね夏季の6–8月に最大値, 冬季の12–1月に最小値となる季節変動を示した (Fig. 2d)。

NO_x濃度は, 表層, 水深15 m層ともにほぼ同様の季節変動を示し, 塩分の顕著な低下が見られた大量降雨後の2003年6月26日, 2004年9月2日の表層を除けば, 各年の最大値 (5.0–6.5 μM) は11–12月に, 最小値 (0.2–0.4 μM) は7–8月に観測された。4–9月のNO_x濃度は1 μMを下回ることが多かった (Fig. 3a)。

表層および15 m層におけるDIP濃度は, 検出限界値以下 (ND: <0.04 μM) から0.63 μM (平均 0.31 μM) の範囲で推移し, 塩分が著しく低下した2004年9月の表層を除くと, 最大値は11月に, 最小値は6–9月に観測された。特に2004年の夏季は水柱全体で0.1 μM以下にまで低下し, 7月15日には全層で枯渇状態にあった (Fig. 3b)。

同様にDSi濃度は, 0.8–17.2 μMの範囲で変動し, 夏季に1 μM程度まで減少するなど, NO_xやDIPと類似した変動パターンを示した。2003年6月と2004年9月には, 塩分低下時に表層のDSi濃度が上昇傾向を示し, 降雨の影響を反映した結果と考えられる (Fig. 3c)。

植物プランクトン (Chl a) の現存量と生産速度の季節変動

Chl a濃度は, 11月から3月まで, 鉛直方向にほとんど1 mg m⁻³以下のほぼ一様の分布を示した (Fig. 4a)。水温が20°C以上に上昇し, 成層が発達する6月から8月は, 2004年の7月を除き, 表層に近い水深でChl a濃度が高くなる傾向にあった。水深0–15 mの積算Chl a量 (以下, Chl a現存量と記述) は6.2–56.1 mg m⁻²の範囲で変動し, 3ヶ年の平均値は, それぞれ13.6 mg m⁻² (2002年), 20.8 mg m⁻² (2003年) および21.4 mg m⁻² (2004年) であった

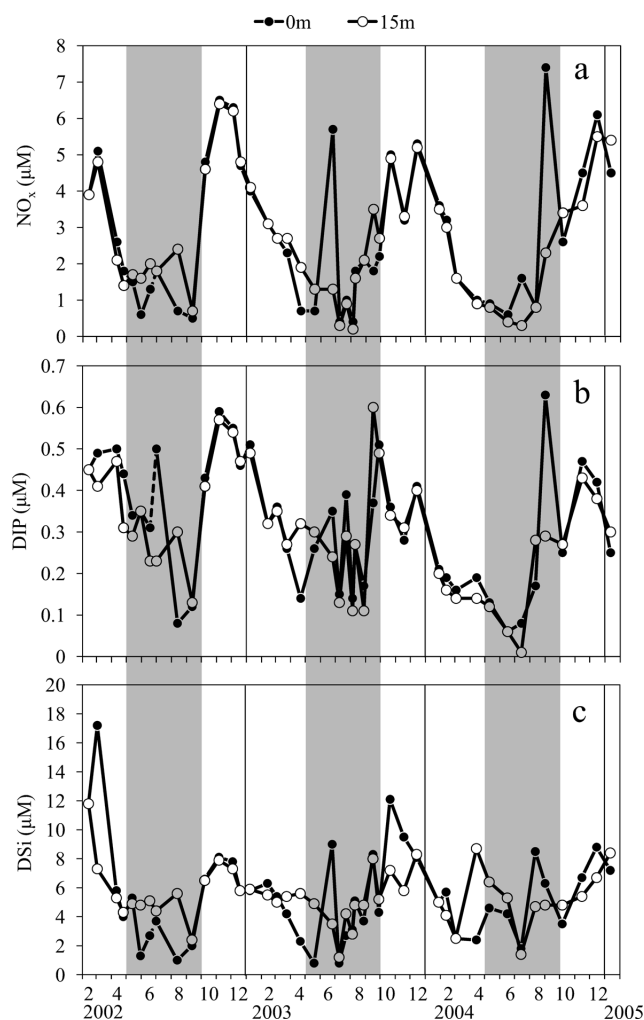


Figure 3. 3-year time series of NO_x (a), DIP (b) and DSi (c) at Stn A in Shitaba Bay from February 2002 to January 2005.

(Fig. 5a)。Chl a現存量は, いずれの年も成層が形成される5月より上昇し, 8月をピークに鉛直混合初期の10月まで20 mg m⁻²以上の値で推移した。また, 5–10月の平均値は, 11–4月の2.6倍に相当した (Table 1)。変動範囲も5–10月の方が11–4月に比べて大きく (約4.2倍), 特に夏季における変動が顕著で, 例えば2003年の最大値 (6月26日, 45.8 mg m⁻²) と最小値 (8月6日, 7.7 mg m⁻²) の間に約6倍の差が認められた (Fig. 5a)。

基礎生産速度も, Chl a濃度と同様に, 11月から翌年3月までは鉛直方向にほとんど5 mg C m⁻³ h⁻¹以下でほぼ一様であったのに対し, 4月以降は, 表層付近で高くなる傾向を示した (Fig. 4b)。水柱積算基礎生産速度は, 0.11–1.83 g C m⁻² day⁻¹の範囲で変動し (3年間の平均値は0.53 g C m⁻² day⁻¹), 各年における年間積算値は, それぞれ168 g C m⁻² year⁻¹ (2002年), 212 g C m⁻² year⁻¹ (2003年) および226 g C m⁻² day⁻¹ (2004年) であり (Fig. 5b), 3年間の

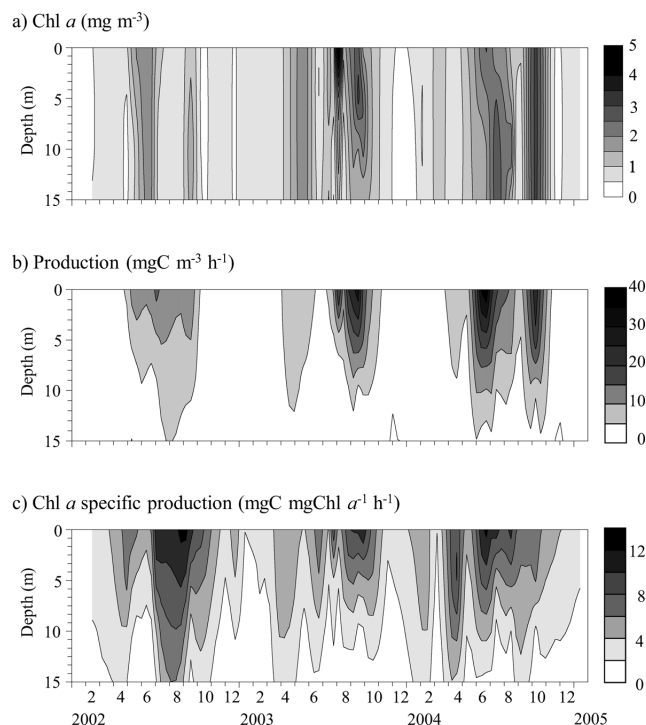


Figure 4. 3-year time series of chlorophyll *a*, primary productivity and chlorophyll *a* specific productivity at Stn A in Shitaba Bay from February 2002 to January 2005.

Table 1. Mean values of depth integrated Chl *a*, primary productivity and Chl *a* specific productivity.

Month	Chl <i>a</i> (mg m ⁻²)	Primary productivity (gC m ⁻² day ⁻¹)	Chl <i>a</i> specific productivity (mgC mg Chl <i>a</i> ⁻¹ day ⁻¹)
Jan (n=3)	10.6±2.4	0.17±0.05	17.4±8.7
Feb (n=3)	9.2±3.4	0.20±0.06	23.5±10.2
Mar (n=4)	12.1±4.5	0.22±0.11	19.7±11.1
Apr (n=4)	13.0±7.2	0.54±0.23	44.1±13.0
May (n=3)	23.8±10.2	0.56±0.12	24.8±6.3
June (n=3)	24.7±14.8	0.90±0.83	35.7±20.8
July (n=4)	25.2±14.9	0.72±0.43	33.9±25.6
Aug (n=4)	31.9±12.0	0.84±0.45	29.3±16.8
Sep (n=5)	25.0±13.9	0.95±0.50	39.4±13.8
Oct (n=3)	27.2±25.9	0.91±0.75	37.8±7.1
Nov (n=3)	8.9±1.6	0.18±0.07	20.1±5.7
Dec (n=4)	8.1±1.6	0.17±0.04	21.6±8.8

平均年間積算値は 193 gC m⁻² year⁻¹であった。基礎生産速度は3年間の平均値で見ると、春季にあたる4月より0.5 gC m⁻² day⁻¹を超え、最大値は年により異なるものの6-10月に高い値を示す傾向にあり、9-10月における基礎生産量は年間基礎生産量の32%に相当した。次いで、6-8月、

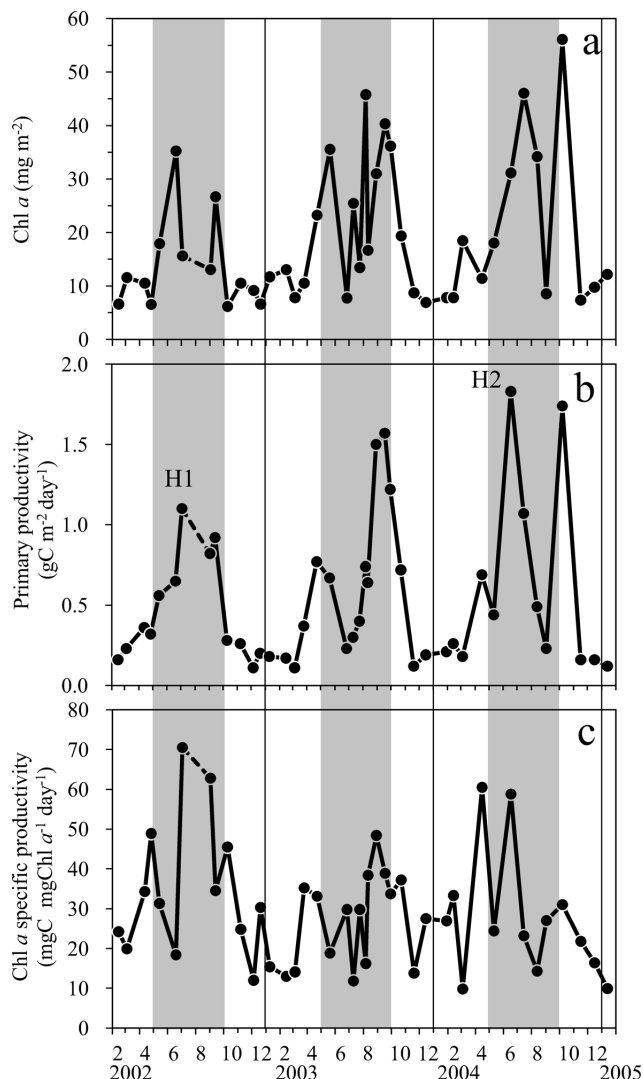


Figure 5. 3-year time series of depth-integrated chlorophyll *a* (a), primary productivity (b) and chlorophyll *a* specific productivity (c) at Stn A in Shitaba Bay from February 2002 to January 2005. Shaded areas indicate the periods which bottom intrusions occur repeatedly (from May to September).

4-5月の順に低下し、11-3月は低い値で推移した (Table 1) また、4-10月の基礎生産速度の変動範囲 (0.23-1.83 gC m⁻² day⁻¹) および平均値 (0.77 gC m⁻² day⁻¹) は、11-3月の値 (0.11-0.37 gC m⁻² day⁻¹, 0.19 gC m⁻² day⁻¹) のそれぞれ6倍および4倍であった。

Chl *a*量あたりの基礎生産速度は、周年を通して表層に近い水深で高い傾向にあった (Fig. 4c)。Chl *a*現存量と基礎生産速度の水柱積算値を基に算出したChl *a*量あたりの基礎生産速度は、9.7-70.5 mgC mgChl *a*⁻¹ day⁻¹の範囲で変動し (3年間の平均値: 28.9 mgC mgChl *a*⁻¹ day⁻¹)、各年の年間平均値は、それぞれ35.1 mgC mgChl *a*⁻¹ day⁻¹ (2002年)、26.8 mgC mgChl *a*⁻¹ day⁻¹ (2003年) および28.9 mgC mgChl

$a^{-1} \text{ day}^{-1}$ (2004年)であった (Fig.5c). 季節的に見ると4-10月に高く (平均 $35.0 \text{ mgC mgChl } a^{-1} \text{ day}^{-1}$), 11-3月は低く (平均 $20.5 \text{ mgC mgChl } a^{-1} \text{ day}^{-1}$), 両期間で1.7倍の差があった (Table 1).

下波湾における植物プランクトン組成

基礎生産調査時における珪藻類, 鞭毛藻類の平均細胞密度は, $275 \text{ cells ml}^{-1}$ ($0-1439 \text{ cells ml}^{-1}$), $322 \text{ cells ml}^{-1}$ ($16-1261 \text{ cells ml}^{-1}$) であり, 植物プランクトン総数に占める珪藻類, 鞭毛藻類の平均占有率は46.1%と53.9%であった. 珪藻類の中では *Chaetoceros* 属の平均組成比が50.0%と最も高く, *Leptocylindrus* 属18.0%, *Pseudo-nitzschia* 属12.5%, *Skeletonema* 属11.7%であった. 一方, 鞭毛藻類の中では微小鞭毛藻類の平均組成比が91.0%と圧倒的に高く, 渦鞭毛藻類の平均組成比は8.9%と低かったものの, *Karenia miki-motoi*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Prorocentrum dentatum* が増殖した際には, その組成比が79.0%, 48.8%, 35.4%まで上昇した.

考察

基礎生産速度の季節変動と他海域との比較

下波湾における年間の平均基礎生産速度 ($0.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) は, 富栄養化が顕著な閉鎖性海域の値と比較すると低い (例えば, 大阪湾, 伊勢湾, 三河湾の0.2-0.4倍) が, 他の沿岸域とほぼ同じ範囲 (例えば, 土佐湾の0.75倍, 瀬戸内海の備後灘, 周防灘の1.4-1.7倍, および瀬戸内海沿岸全体の平均値とほぼ同等) であった (Table 2).

基礎生産速度の季節変動について見ると, 年間基礎生産量に占める夏季 (6-8月) の割合が39%と高く, 秋季 (9-11月; 32%) とほぼ同程度の値を示したことが特徴の一つとして挙げられる. 一般的に, 亜寒帯から温帯の沿岸域では, 春季に植物プランクトンの顕著なブルームが観測され, 秋季にも基礎生産速度の上昇が見られる. 例えば, 我国では, 北海道の厚岸湾 (Taguchi et al., 1977), 噴火湾 (Maita and Odate, 1988) などがこの典型で, 北米西岸

(Stockner et al., 1979) や東岸 (Mouw and Yoder, 2005), フランスのプレスト湾 (Beucher et al., 2004) など多くの海域で同様の現象が知られている.

一方, 黒潮系水の影響を受ける海域, 例えば, 土佐湾の場合, 春季 (2-4月) に加え, 夏季 (6-8月) の基礎生産速度が, 年間の35%を占めている (市川・広田, 2004). また, 相模湾では, 基礎生産速度が $0.18-4.09 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ の範囲にあり, 初夏に最大値を示している (工藤・山口, 2000). このように, 夏季にも基礎生産速度が上昇することは, 黒潮内側域に位置する内湾における基礎生産速度の季節変動に共通する特徴であると推察される.

また, 下波湾における基礎生産速度は, 平均すると夏季 (6-8月) の観測値 ($0.82 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) は秋季 (9-11月) の観測値 ($0.68 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) に匹敵するほど高いものの (Table 1), 短期的な変動も大きい (Fig. 5). つまり, 夏季の基礎生産速度は定常的に高い値が維持されているのではなく, 変動が大きいことも特徴の一つとして挙げられる.

Chl a, 光, 水温と基礎生産速度との関係

基礎生産速度とChl a現存量との関係をピアソンの相関を用いて解析すると, 両者には有意な相関関係が認められた (Fig. 6; $r=0.77$, $n=43$, $p<0.01$). 同様の関係は, 瀬戸内海 (Tada et al., 1998) や東シナ海 (Hama et al., 1997; 古谷ほか, 1998) などでも認められている. しかしながら, 詳細に見ると, 両者の間に高い相関が認められたのは秋季 (9-11月) のみで ($r=0.96$, $n=11$, $p<0.01$), 特に夏季については変動が大きく, 同程度のChl a現存量でも, 基礎生産速度に5-6倍程度の差異が見られた.

基礎生産速度は, 光や水温, 栄養塩濃度などの環境要因の影響を受ける. そこで, Chl a量あたりの基礎生産速度と表層における日積算光子量との関係を調べたところ, 全観測データを用いた場合, 両者の間には有意な相関は認められなかった (Fig. 7; $r=0.30$, $n=37$, $p>0.05$). しかし, Fig. 7の夏季に見られた一部の低い基礎生産速度のデータを除くと, Chl a量あたりの基礎生産速度は光子量の上

Table 2. Comparison of the daily primary productivity ($\text{gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) in various waters of Japan.

Area	Mean	Max	Min	Reference
Shitaba Bay	0.53	1.83	0.11	Present study
Tosa Bay	0.73	1.39	0.27	Ichikawa and Hirota (2004)
Ise Bay	1.36	4.49	0.29	Saijo et al. (1978)
Mikawa Bay	1.45	2.72	0.50	Saijo et al. (1978)
Seto Inland Sea				
All area	0.60	0.97	0.29	Tada et al. (1998)
Osaka Bay	2.66	14.95	0.16	Yamaguchi and Imai (1996)
Bingo-nada	0.33	1.21	0.03	Endo (1970)
Suo-nada	0.38	0.54	0.22	Yamaguchi and Anraku (1984)
Dokai Bay	0.78	3.45	0.03	Tada et al. (2001)

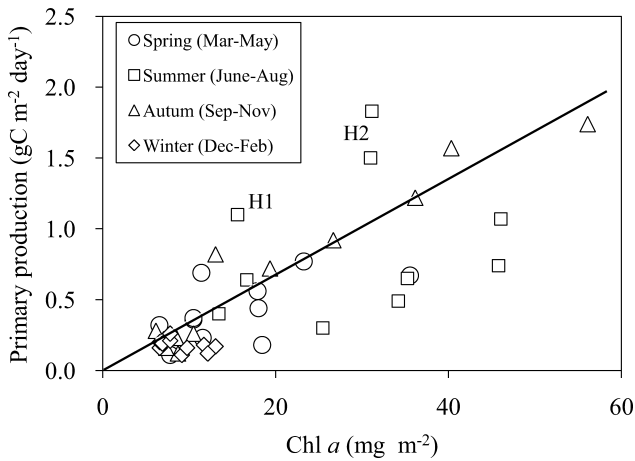


Figure 6. Relationship between chlorophyll *a* standing stock and depth integrated productivity. Values of winter (December to February), spring (March to May), summer (June to August), and autumn (September to November) are shown in different symbols. The solid line indicates the regression line for all seasonal data throughout the observations. H1 and H2 indicates the value of high chlorophyll *a* specific productivity though NO_x was low concentration in Fig. 9.

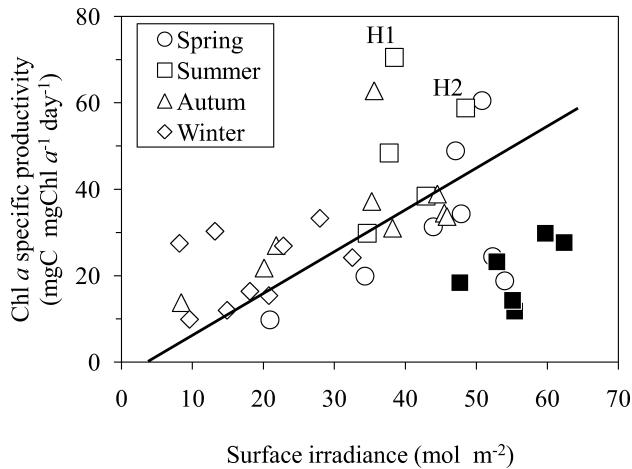


Figure 7. Relationship between surface irradiance and chlorophyll *a* specific productivity. Values of winter (December to February), spring (March to May), summer (June to August), and autumn (September to November) are shown in different symbols. Symbols of solid square denote the low values in summer which are far from the regression line. The solid line indicates the regression line except for these low values in summer. H1 and H2 indicates the value of high chlorophyll *a* specific productivity though NO_x was low concentration in Fig. 9.

昇に伴い有意に増加する傾向が認められた ($r=0.56, n=31, p<0.01$). このように、Chl *a*量あたりの基礎生産速度が光量子量に依存して変動することは、これまでにもさまざま

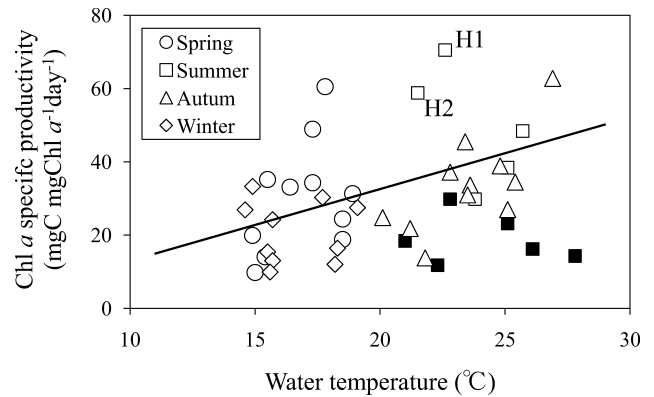


Figure 8. Relationship between water temperature and chlorophyll *a* specific productivity. Values of winter (December to February), spring (March to May), summer (June to August), and autumn (September to November) are shown in different symbols. Solid line indicates the regression line except for low values in summer as shown in Fig. 7.

な海域において報告されている (Eppley et al., 1985; Hama et al., 1997; Tada et al., 2001). 一方、夏季に見られた一部の低い基礎生産速度については、いずれも日積算光量子量が高いことから、一見、強光阻害により光合成活性が低下したように見受けられる。しかし、本研究では現場植物プランクトン群集の光-光合成曲線が得られていないため定量的な解釈は困難であるが、ほぼ同程度の日積算光量子量下においても高い基礎生産速度が測定されている場合があること、また、Chl *a*量あたりの基礎生産速度の鉛直分布を見ると、表層で最も高く、水深の増加に伴って低下する傾向が認められることなどから、基礎生産速度に対して、強光阻害の影響は無い、もしくは小さかったと推察した方が妥当であろう。

水温についても、Fig. 7で低い基礎生産速度を示したデータを除くと、光量子量との関係ほど明瞭ではないが、Chl *a*量あたりの基礎生産速度と水柱0-15mの平均水温との間に有意な正の相関が認められた (Fig. 8; $r=0.49, n=37, p<0.01$). 以上のことから、下波湾における基礎生産速度は、他海域と同様に、表層の積算光量子量および水温が高いほど増加する傾向にあるが、夏季については、光量子量や水温だけでは説明が困難であり、他の環境要因による影響を考慮する必要がある。

栄養塩濃度と基礎生産速度との関係

光量子量および水温以外に、基礎生産を律速する環境要因として考えられるのは栄養塩である。下波湾では植物プランクトンの増殖がいずれの栄養塩によって制限されているか明確に示されていない。そこで、本研究では、海洋において、植物プランクトンの増殖を制限する場合が多く (Hecky and Kilham, 1988)、珪藻類の休眠期細胞の形成 (板倉, 2000) に大きく関与する窒素濃度 (NO_x) に注目し、

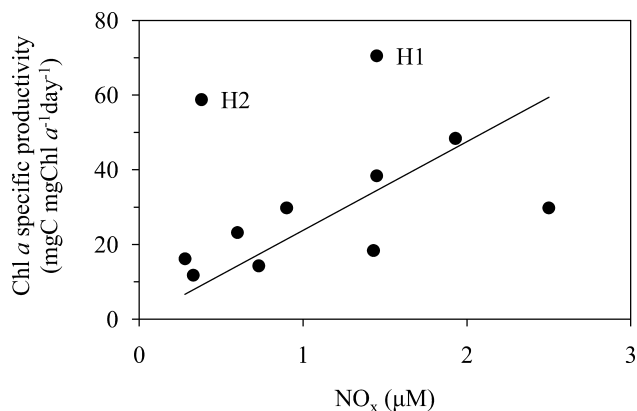


Figure 9. Relationship between NO_x concentrations and chlorophyll *a* specific productivity in summer. Solid line indicates the regression line except for H1 and H2.

夏季におけるChl *a*量あたりの基礎生産速度と栄養塩濃度(NO_x)の関係について検討した(Fig. 9). Chl *a*量あたりの基礎生産速度が50 mgC mgChl a⁻¹ day⁻¹を超える2点(H1とH2)を除くと、Chl *a*量あたりの基礎生産速度とNO_x濃度の間には有意な正の相関が認められた($r=0.68$, $n=9$, $p<0.05$). したがって、栄養塩供給の有無が、夏季の下波湾において、基礎生産速度を左右する主たる要因であると推察される。

黒潮の影響を受ける土佐湾では黒潮非蛇行期に黒潮が足摺岬と室戸岬で接岸すると、湾内に左遷還流が生じ、還流内に湧昇構造が形成され、下層の低水温水中に含まれる栄養塩類が有光層へ供給されることにより、夏季の基礎生産速度が高くなると考えられている(市川・広田, 2004). このような成層期における低水温化と基礎生産速度の上昇との関係は、遠州灘(Shiomoto and Matsumura, 1992)や相模湾(斎藤ほか, 1995)、紀伊半島以東の黒潮内側域(宇野木・海野, 1983)でも報告されている。

宇和海では底入り潮と呼ばれる陸棚斜面由来の冷水塊が5-11月にかけて発生し、栄養塩を間欠的に有光層に供給するため(Kaneda et al., 2002)、夏季でも珪藻類が顕著に増殖すると考えられる。事実、下波湾では、水温低下に伴い珪藻類の細胞数が増加することが夏季の観測で確認されている(小泉, 2002)。下波湾に隣接する北灘湾では(Fig. 1)、湾外における水深60mの水温(7月から9月までの全平均値)の経年変動と湾内外における夏季の表層Chl *a*濃度の間には非常に良い対応関係があり、底層水温が低下するほど表層Chl *a*濃度は高くなっていることから、底入り潮による栄養塩の供給が同湾の生物生産に重要な働きをしていることが示唆されている(速水ほか, 2005)。また、湾内におけるChl *a*濃度の季節変動についてその要因をボックスモデルを用いて解析した結果、栄養塩の供給源として、河川や底泥、魚類養殖場起源だけでなく、底入

り潮の寄与率がかかなり高いことが指摘されている(速水ほか, 2005)。したがって、河川水の直接的な流入のない下波湾では、底入り潮が夏季における栄養塩の供給源として最も重要である可能性が高い。

NO_xが低濃度であったにもかかわらず、高いChl *a*量あたりの基礎生産速度が記録された夏季の2点については(Fig. 9)、その理由を明確に説明することは困難であるが、いくつかの推測を提示することは可能である。一つには、観測の時間的な問題であり、植物プランクトンによって海水中の栄養塩の大部分が利用された直後に実施した観測であった可能性である。すなわち、海水中の栄養塩濃度は低濃度の状態にあったが、植物プランクトンは細胞内に充分量の栄養を保持していたものと推察される。下波湾では、渦鞭毛藻類が赤潮を形成している時期を除くと、珪藻類が優占種として出現する頻度が高い海域であるが、一方の観測時(H2)には、珪藻類(深度5m: 154 cells·m⁻¹)に加えて、渦鞭毛藻類(主に*Prorocentrum dentatum*)が高密度で存在していた(0m: 500 cells·m⁻¹, 5m: 117 cells·m⁻¹)。渦鞭毛藻類は、その鉛直移動能力によって、下層の栄養塩を効率よく利用することが可能である(小泉, 2000)。また、渦鞭毛藻類のなかには、栄養塩だけでなく溶存態の有機物も効率よく利用する種類が多いことから(Yamaguchi and Itakura, 1999; 金ほか, 2007)、低濃度の栄養塩条件下においても光合成活性は高かったとも推察できる。

まとめ

下波湾では4-10月にかけて基礎生産速度は上昇し、年間基礎生産量に占める夏季(6-8月)の割合は、秋季(9-11月)に匹敵するほど高い。また、基礎生産速度は、周年を通して水温や光量子量により律速されていたが、短期変動の大きい夏季は栄養塩濃度(NO_x)も大きく関与していた。本海域では、夏季にも底入り潮によって有光層に栄養塩が供給されるメカニズムが存在すると予想され、このことが短期的な変動が大きいものの、夏季でも高い基礎生産速度が確保される要因になっていると考えられる。つまり、アコヤガイの摂餌活性が高まる夏季に高い基礎生産速度を有することが、当海域でアコヤガイの養殖生産を可能にできた要因の一つであると推察される。

下波湾における植物プランクトンの中心は珪藻類と鞭毛藻類であるが、両者は互いに拮抗した関係にあり、急潮、底入り潮による珪藻類の増殖機構が機能しなければ、珪藻類の増殖が制限され、相反する現象として鞭毛藻類の赤潮が形成されることが明らかにされている(小泉, 2002)。珪藻類は、アコヤガイの餌料として有益であるのに対して、競合種である鞭毛藻類の中には魚介類を斃死させる種類も多く含まれていることから、アコヤガイが健全に育つ環境としては、鞭毛藻類主体よりも珪藻類を主体とした生産構造が宇和海では好ましい生産形態であると判断される。し

たがって、底入り潮による栄養塩供給は、珪藻類主体の基礎生産による生食物連鎖構造を卓越させ、結果として有害・有毒プランクトンも含めた渦鞭毛藻類の増殖を抑制することから、アコヤガイやその他の魚介類の持続的生産に多大な貢献をしていると考えられる。さらに、底入り潮は紀伊水道でも観測されており (Ozaki et al., 2004)、本海洋現象が外洋と接する瀬戸内海の両水道部の生物生産に重要な働きをしていることが強く示唆される。今後、連続観測機器の導入等により、水温や栄養塩濃度、基礎生産速度の測定頻度を高めることにより、数日間程度の海洋現象である急潮・底入り潮と基礎生産との関連性がより詳細に解明されるものと期待される。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、有益なご助言をいただいた広島大学大学院生物圏科学研究科の橋本俊也博士に深く感謝します。また、調査、試料分析には佐賀大学低平地沿岸海域研究センターの速水祐一博士、愛媛大学上級研究員センターの加三千宜博士、愛媛大学の学生諸氏に協力をしていただき深謝します。

引用文献

阿保勝之・杜多 哲 (2001) アコヤガイの生理と餌料環境に基づく養殖密度評価モデル。水産海洋研究, **65**, 135-144.

Beucher, C., P. Tréguer, R. Corvaisier, A. M. Hapette and M. Elskens (2004) Production and dissolution of biosilica, and changing microphytoplankton dominance in the Bay of Brest (France). Mar. Ecol. Prog. Ser., **267**, 57-69.

愛媛農林水産統計協会 (1993) 愛媛農林水産統計年報 (水産編), 100 pp.

愛媛農林水産統計協会 (2008) 愛媛農林水産統計年報 (水産編), 105 pp.

遠藤拓郎 (1970) 瀬戸内海の一次生産に関する研究。広島大学水畜産学部紀要, **9**, 177-211.

Eppley, R. W., E. Stewart, M. R. Abbott and U. Heyman (1985) Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll. Introduction to regional differences and statistics for the Southern California Bight. J. Plankton Res., **7**, 57-70.

古谷 研・濱 健夫・神田穰太・小達恒夫 (1998) 東シナ海における基礎生産。沿岸海洋研究, **36**, 19-28.

Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura (1983) Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope. Mar. Biol., **73**, 31-36.

Hama, T., K. H. Shin and N. Handa (1997) Spatial variability in the primary productivity in the East China Sea and its adjacent water. J. Oceanogr., **53**, 41-51.

速水祐一・扇山 舟・山田正徳・山田政彦・竹村公宏・武岡英隆 (2005) 宇和海・北灘湾におけるクロロフィル *a* 濃度の季節・経年変化。水産海洋研究, **69**, 1-9.

Hecky, R. E. and P. Kilham (1988) Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. Limnol. Oceanogr., **33**, 796-822.

市川忠史・広田祐一 (2004) 土佐湾における基礎生産の季節変動。海の研究, **13**, 259-269.

板倉 茂 (2000) 沿岸性浮遊珪藻類の休眠期細胞に関する生理生

態学的研究。瀬戸内水研報, **2**, 67-130.

Kaneda, A., H. Takeoka, E. Nagura and Y. Koizumi (2002) Periodic intrusion of cold water from the Pacific Ocean into the bottom layer of the Bungo Channel in Japan. J. Oceanogr., **58**, 547-556.

川端善一郎・佐竹宗徳 (1992) 急潮による湾内の物理構造・栄養塩・植物プランクトンの変化。沿岸海洋研究ノート, **30**, 27-36.

金 大一・松原 賢・呉 碩津・島崎洋平・大嶋雄治・本城凡夫 (2007) 八代海から単離した有害渦鞭毛藻 *Cochlodinium polykrikoides* の栄養塩利用特性と増殖動力学。日本誌, **73**, 711-717.

小泉喜嗣 (2000) 植物プランクトンの日周鉛直移。月刊海洋, **21**, 138-142.

小泉喜嗣 (2002) 豊後水道東岸域における急潮と植物プランクトンの増殖機構に関する研究。愛媛水試研報, **10**, 1-91.

工藤善隆・山口征矢 (2000) 相模湾における基礎生産の研究。航海調査報告 (No. 9), 東京水産大学, 161-164.

Maita, Y. and T. Odate (1988) Seasonal changes in size-fractionated primary production and nutrient concentrations in the temperate neritic water of Funaka Bay, Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan, **44**, 268-279.

森実庸男・滝本真一・西川 智・松山紀彦・蝶野一徳・植村作治郎・藤田慶之・山下浩史・川上秀昌・小泉喜嗣・内村祐之・市川 衛 (2001) 愛媛県宇和海における軟体部の赤変化を伴うアコヤガイの大量へい死。魚病研究, **36**, 207-216.

Mouw, C. B. and J. A. Yoder (2005) Primary production calculations in the Mid-Atlantic Bight, including effects of phytoplankton community size structure. Limnol. Oceanogr., **50**, 1232-1243.

永井清仁・岡田昌樹・郷 譲治・瀬川 進・本城凡夫 (2002) 感染症によるアコヤガイ大量斃死への対策 II。真珠の雑誌, **1**-61.

Ozaki, K., S. Uye, T. Kusumoto and T. Hagino (2004) Internannual variability of the ecosystem of Kii Channel, the Inland Sea of Japan, as influenced by bottom intrusion of cold and nutrient-rich water from the Pacific Ocean, and a recent trend of warming and oligotrophication. Fish. Oceanogr., **13**, 65-79.

Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli (1984) *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.

西条八東・八木明彦・三田村緒佐武 (1978) 伊勢湾, 三河湾の水質と基礎生産。沿岸海洋研究ノート, **16**, 57-64.

斎藤和久・渡部 勲・岩田静夫 (1995) 1991年夏季に平塚沖で観測された水質の経時変化。水産海洋研究, **59**, 251-255.

Shiimoto, A. and S. Matsumura (1992) Primary productivity in a cold water mass and the neighborhood area occurring off Enshu-nada in the late summer of 1989. J. Oceanogr., **48**, 105-115.

Stockner, J. G., D. D. Cliff and K. R. S. Shortreed (1979) Phytoplankton ecology of the Strait of Georgia, British Columbia. J. Fish. Res. Bd. Canada, **36**, 657-666.

Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons (1972) *A Practical Handbook of Seawater Analysis*, 2nd ed. Bull. Fish. Res. Bd. Canada, Ottawa, 310 pp.

Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990) An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N,N-dimethylformamide. J. Oceanogr. Soc. Japan, **46**, 190-194.

Tada, K., K. Monaka, M. Morishita and T. Hashimoto (1998) Standing stocks and production rates of phytoplankton and abundance of bacteria in the Seto Inland Sea. J. Oceanogr., **54**, 285-295.

Tada, K., M. Morishita, K. Hamada, S. Montani and M. Yamada (2001) Standing stock and production rate of phytoplankton and a red tide outbreak in a heavily eutrophic embayment, Dokai Bay, Japan. Mar. Pollut. Bull., **42**, 1177-1186.

Taguchi, S., K. Iseki and T. Kawamura (1977) The estimation of annual production by phytoplankton in Akkeshi Bay, Japan. J. Oceanogr.

- Soc. Japan, **33**, 97–102.
- Takeoka, H., Y. Koizumi and A. Kaneda (2000) Year-to-year variation of a kyucho and a bottom intrusion in the Bungo Channel, Japan. In. *Interactions between Estuaries, Coastal Seas and Shelf Seas*, ed. T. Yanagi, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 197–215.
- 谷村 篤・向山礼美・石川 輝・田口和典・今井 直 (2008) 英虞湾におけるサイズ別クロロフィル *a* 濃度の季節分布. 水産海洋研究, **72**, 1–13.
- 内村祐之・西川 智・浜田耕示・兵藤勝也・広瀬琢磨・石原浩二・杉本 学・中島伸佳 (2005) 感染症の症状を軽減した耐病性アコヤガイ系統の開発. 水産育種, **34**, 91–97.
- 宇野木早苗・海野 裕 (1983) 東海・関東沿岸海域における暖候期の低温化現象. 水産海洋研究会報, **44**, 17–28.
- 山口峰生・安楽正照 (1984) 瀬戸内海西部周防灘における基礎生産について. 南西水研研報, **17**, 135–149.
- Yamaguchi, M. and I. Imai (1996) Size fractionated phytoplankton biomass and primary productivity in Osaka Bay, eastern Seto Inland Sea, Japan. Bull. Nansei Natl. Fish. Res. Inst., **29**, 59–73.
- Yamaguchi, M. and S. Itakura (1999) Nutrition and growth kinetics in nitrogen- or phosphorus-limited cultures of the noxious red tide dinoflagellate *Gymnodinium mikimotoi*. Fish. Sci., **65**, 367–373.