

小浜湾における一次生産過程の時空間変化

本田尚美^{1*}, 杉本 亮², 小林志保³, 田原大輔², 富永 修²

Temporal and spatial variation in primary production in Obama Bay

Hisami HONDA^{1*}, Ryo SUGIMOTO², Shiho KOBAYASHI³, Daisuke TAHARA² and Osamu TOMINAGA²

小浜湾には、河川水だけでなく地下水からも栄養塩が供給されている。しかしながら、これらの陸水流入に対する湾内の植物プランクトンの応答は明らかになっていない。本研究では、クロロフィル a (Chl- a) 濃度を実測するとともに、一次生産力ポテンシャル (PP) を温度・光・栄養塩濃度の関数として算出することで、陸水流入に対する一次生産過程の応答の時空間変化を評価した。河川流量が増大する11–2月にかけては、Chl- a 濃度および PP は表層付近で高かった。一方、3–10月にかけては、表層の栄養塩が枯渇しており、Chl- a 濃度および PP は底層付近で高かった。特に5月、湾中央部底層でChl- a 濃度が著しく高くなっていた。この底層Chl- a 極大は小浜平野の地下水が流出すると予想される場所に形成されており、また、6月にはこの付近の底層において低塩分水が観測された。雪解けに起因する地下水流出量の増大が5月に植物プランクトンブルームを引き起こしたと推察された。

Submarine groundwater discharge (SGD) is an important nutrient source for the coastal ecosystems of Obama Bay as well as river water. However, the response of phytoplankton to nutrients supplied from freshwater is unknown. In this study, we evaluated the spatial and temporal variability of primary production from phytoplankton in Obama Bay. From May 2011 to March 2012, we made monthly field observations of Chlorophyll- a (Chl- a) concentration and calculated potential primary productivity (PP) using a simple mathematical model. Chl- a concentrations and PP were each higher in the upper layer from November to February, when the river discharge was high. During the months from March to October, when the nutrients in the upper layer were almost depleted, Chl- a concentrations and PP were higher in the lower layer. In May 2011, we observed significantly higher concentrations of Chl- a ($51.8 \mu\text{g l}^{-1}$) in the bottom layer at an area 2 km offshore from the river mouth. We also observed low-salinity water in the bottom layer at around the same area in June 2011, one week after a notable flood. Together these observations strongly suggest that SGD led to the phytoplankton bloom observed in the bottom layer during the spring.

Key words: Obama Bay, chlorophyll- a maximum, primary production, submarine groundwater discharge

はじめに

沿岸海域は、全海洋の10%未満の面積でありながら、単位面積当たりの一次生産量は外洋の2倍、魚類生産量は全海洋の50%を担うほど生物生産力が高い海域である (Ryther, 1969)。しかしながら、多くの沿岸海域は人間活動による過度なストレスにさらされ、その機能を失いつつあ

る。沿岸海域生態系を持続的に維持・利用していくためにも、一次生産を起点とした生物生産構造の解明は必要不可欠である。

陸域から河川を通じて供給される栄養塩が、沿岸海域の一次生産過程に重要な役割を果たしていることはよく知られている (例えば Lohrenz et al., 1999)。しかしながら沿岸

2016年2月5日受付, 2016年10月7日受理

¹ 福井県立大学大学院生物資源学研究所, 〒917-0116 福井県小浜市学園町1-1

Graduate School of Biosciences and Biotechnology, Fukui Prefectural University, 1-1 Gakuen-cho, Obama, Fukui 917-0116, Japan

² 福井県立大学海洋生物資源臨海研究センター, 〒917-0116 福井県小浜市堅海49-8-2

Research Center for Marine Bioresources, 49-8-2 Katsumi, Obama, Fukui 917-0116, Japan

³ 京都大学フィールド科学教育研究センター, 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

Field Science Education and Research Center, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

* 現所属: 総合地球環境学研究所, 京都市北区上賀茂本山457-4

Present: Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Motoyama Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8047, Japan

† h_honda@chikyu.ac.jp

海域には、外海からも豊富な栄養塩が供給される（藤原ほか, 1997; 佐藤ほか, 2005; Sugimoto et al., 2009）。また、成層層に発生しやすい貧酸素水塊中には、底泥から溶出した栄養塩や有機物分解に起因する再生産由来の栄養塩が高濃度に蓄積され、成層の崩壊に伴って有光層へ輸送され一次生産に利用される（林・柳, 2000; 松村ほか, 2002; Sugimoto et al., 2010）。さらに近年、陸域の地下水が海底から流出する海底湧水も、沿岸海域に多量の栄養塩を供給していることが報告され始めている（Taniguchi, 2002; Moore, 2010）。それぞれの経路から沿岸海域へ供給される栄養塩量は時間的に大きく変化するため、沿岸海域の一次生産過程もまた、時空間的に大きく変化する。それゆえ、沿岸海域における一次生産過程を解明するためには、対象とする沿岸海域への栄養塩の起源に加え、植物プランクトンがどのように応答しているのかまで把握する必要がある。

本研究で対象とする小浜湾は、若狭湾の中央部に位置する半閉鎖性の内湾である（Fig. 1A）。湾の南東部には、一級河川の北川と二級河川の南川が注ぎ、主要な栄養塩供給源となっている（畑・近藤, 1996）。その一方、両河川の下流域に形成された沖積扇状地である小浜平野には地下水資源が豊富にある（笹嶋, 1962）。陸域から小浜湾に流入する地下水は、陸域からの全淡水流入量のうち約23%を占めており、栄養塩供給量についてみると、溶存態無機窒素では約42%、溶存態無機リンでは約65%、溶存態ケイ素では約33%に相当し、地下水由来の栄養塩も無視できない（Sugimoto et al., 2016）。しかしながら、小浜湾内の植物プランクトンが、河川水や地下水に対してどのように応答しているのかは明らかになっていない。

そこで本研究では、小浜湾内の植物プランクトンの現存量の分布およびその季節変化を明らかにすることを目的に、クロロフィル a 濃度と一次生産過程の制限要因（水温、光量子量、栄養塩濃度）をフィールド観測により実測した。海水交換時間の短い小浜湾内の植物プランクトン現存量は少ないため（畑・近藤, 1996）、現存量のみでは一次生産を正確に評価することは困難である。それゆえ、一次生産力のポテンシャルを実測データから算出し、小浜湾内の一次生産過程を植物プランクトン現存量と一次生産力ポテンシャルの両面から評価することを試みた。

材料および方法

対象海域

小浜湾は、面積58.7 km²、平均水深13 m、湾口幅2.4 kmの半閉鎖性海域である。しかしながら、湾口を介した若狭湾との海水交換量は、夏季で約2,000 m³ s⁻¹にもなり、海水の平均滞留時間は4日程度と短い（中村・大竹, 1996）。一方、小浜湾東部の湾奥部には一級河川の北川（流域面積215.0 km²、平均流量12.7 m³ s⁻¹）と二級河川の南川（流域面積215.4 km²、

平均流量12.8 m³ s⁻¹）が流入している（Sugimoto and Tsuboi, 2016）。両河川の総流域面積は小浜湾全体の流域面積の72%に達し、流域に降った降水の多くが小浜平野に集まり、北川と南川の河口を介して湾内へと流入する（Sugimoto et al., 2016）。小浜湾流域の年間平均降水量は2,000 mmを上回る多雨地帯である。

両河川の下流に形成された沖積扇状地の小浜平野は、北川沿いの河川縦断方向に14 km、河川横断方向に1.5 km程度に広がっている（小浜市, 2015）。小浜平野の沖積層は下部礫層・中部泥層・上部砂礫層からなり（Fig. 1B）、上部砂礫層は、平野の自由面地下水（不圧地下水）が流れる帯水層となっている（笹嶋, 1962）。最新の水理地質観測（小浜市, 2015）より、小浜平野には4枚の帯水層が存在し、第1帯水層を除く帯水層（いずれも砂礫層）が小浜湾の海底まで分布していると予想される。また、第2、第3帯水層を流れる地下水は、河口付近で地表に向かう上向き流動と海域方向に向かう水平流動が認められ、地下水流動からも小浜湾海底への地下水の流出の存在が指摘されている（小浜市, 2015）。

現地観測

観測は2011年3月から2012年3月の間に計13回（2011年3月31日、5月6日、6月7日、7月1日、8月1日、8月12日、9月14日、10月12日、11月29日、12月13日、2012年1月18日、2月23日、3月27日）行った。測点は、湾口部から湾奥部の北川河口を結ぶ縦断線上に計13測点を設けた（Fig. 1）。すべての測点において0.1 m間隔で表層から海底までの水温、塩分、溶存酸素濃度（DO）、クロロフィル蛍光をCTD（RINKO-Profler ASTD102, JFEアドバンテック社）を用いて観測した。また5月以降は、CTDにメモリー型の光量子計（MDS-MkV/L, JFEアドバンテック社）と深度計（MDS-MkV/T, JFEアドバンテック社）を取り付けて、1秒間隔で上向き光量子量とその水深を測定した。主要測点（Stns. 1–8, Fig. 1）においては、栄養塩とクロロフィル a （Chl- a ）試料を得るため、2.2 lリゴ- B 号透明採水器と6 lバンドーン水平型採水器を用いて多層採水を行った。硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン、ケイ酸態ケイ素を測定するため、採水した海水を0.80 μ mのセルロースアセテートフィルター（ADVANTEC, 25CS080AN）を用いて船上ですぐに濾過をし、その濾過水を酸処理済みの50 mlポリプロピレン（PP）容器に保存した。アンモニア態窒素を測定するため、未濾過水を酸処理済みの60 mlの褐色PP容器に40 ml保存した。Chl- a を測定するため、未濾過水を100 ml/PP容器に満水になるよう保存した。すべての試料は、船上ではクーラーボックス中で遮光・保冷した。研究室に戻った後、濾過処理を施した栄養塩サンプルはすぐに冷凍保存（-30°C）した。

荒天のため、3月31日のStn. 7より沖側および5月6日のStn. 8においては、すべての観測作業を実施できず、また、

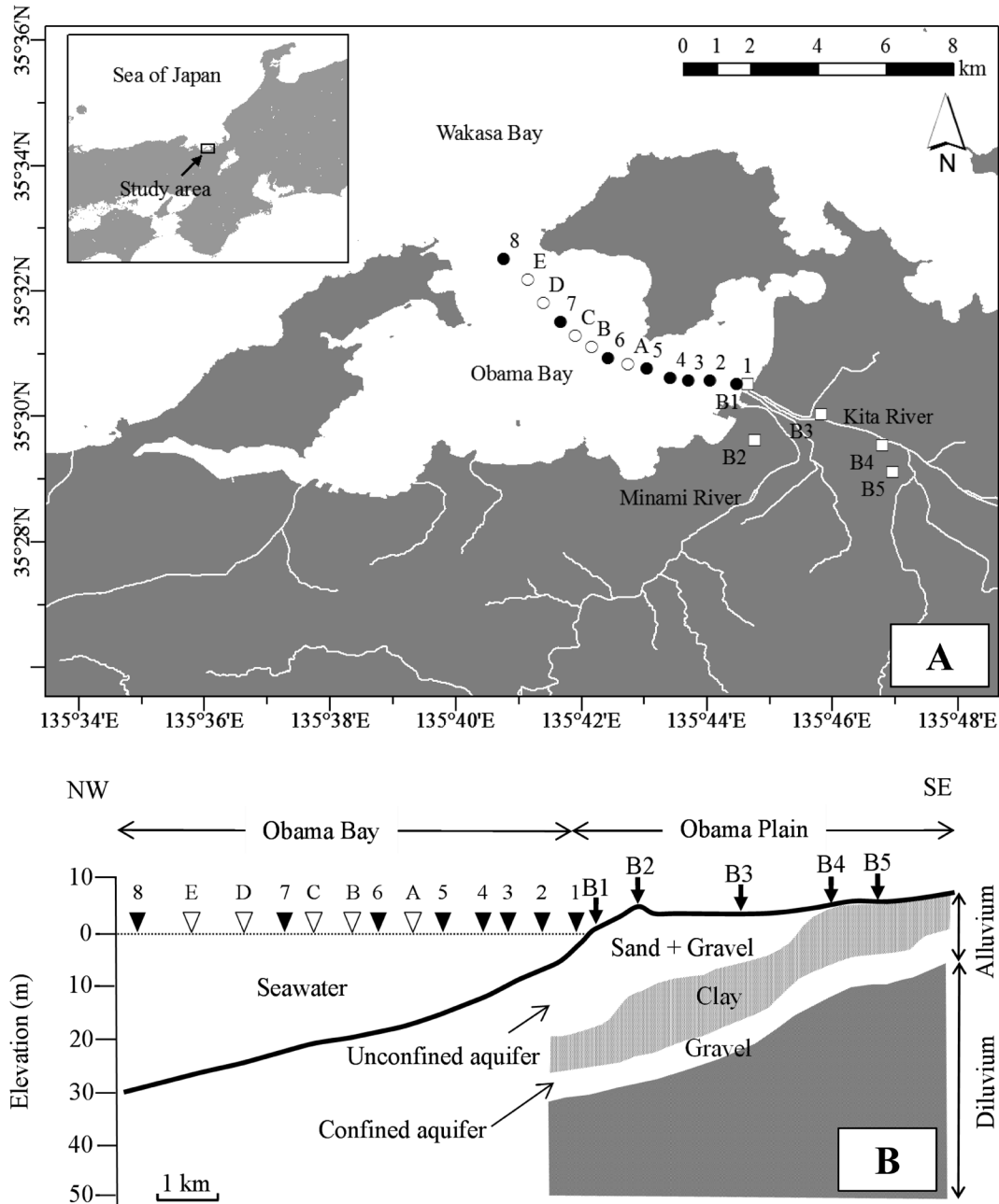


Figure 1. (A) Locations of the study area. Sampling stations are indicated by circles. CTD was casted at all sampling stations, whereas only at Stns. 1–8 (closed circles) water sampling was conducted. Boring points in Obama Plain are indicated by squares (Sasajima, 1962). (B) Geological profile of Obama Plain to Obama Bay (Modified from Sasajima, 1962).

8月1日のStns. 6–8においては採水作業を実施できなかった。12月13日の光量子量データは機器設定不備のため欠測している。

化学分析

Chl-*a*は、あらかじめ450°Cで2時間以上燃焼させたガラスファイバーフィルター (Whatman GF/F, 25 mm) を用いて定量濾過を行い、*N,N*-ジメチルホルムアミド (DMF) 中

で一晩抽出を行った。翌日、蛍光光度計 (Trilogy, Turner Design社) を用いて、Chl-*a*濃度の測定を行った。

アンモニア態窒素は観測日当日に、TrilogyにCDOM/NH₄モジュール (Model 7200-041, Turner Design社) を取り付け、蛍光分析 (Holmes et al., 1999) により濃度を定量した。ケイ酸態ケイ素はモリブデンブルー法 (Strickland and Parsons, 1968) を用いて、TrilogyにSI/ABSORBモジュール (Model

7200-072, Turner Design社) を取り付け, 吸光分析を行った. 亜硝酸態窒素, 硝酸態窒素は, ナフチルエチレンジアミン法 (硝酸態窒素はカドミウムによる還元処理を含む), リン酸態リンは, モリブデンブルー法によりオートアナライザー (TRAACS 800, Bran Luebbe社) を用いた自動分析を行った. 測定されたアンモニア態窒素, 硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素の合計値を溶存態無機窒素 (DIN), リン酸態リンを溶存態無機リン (DIP), ケイ酸態ケイ素を溶存態ケイ素 (DSi) とした.

一次生産力ポテンシャルの評価

藤原ほか (1999) に従い, 2011年5月から2012年3月の実測データ (水温, 光量子量, 栄養塩濃度) をもとに, 一次生産力のポテンシャルを評価した. 光強度を算出するための全天日射量は, 観測日に舞鶴気象台で観測された1時間ごとの値を用いた. 水中光量子量から求めた光の減衰率と1時間ごとの全天日射量の積から水中の光強度を算出した. これらの値を用いて, 1時間ごとに以下の計算を行い, 1日分の一次生産力ポテンシャルを算出した.

光・温度による植物プランクトン増殖の制限項は Steele (1962) に従い以下のように求めた.

$$F_I = \frac{I}{I_{opt}} \times \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (1)$$

$$F_T = \frac{T}{T_{opt}} \times \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) \quad (2)$$

ここで F_I は光による制限項, I は光強度, I_{opt} は最適光強度, F_T は水温による制限項, T は水温, T_{opt} は最適水温である. 栄養塩の制限項は, Michaelis-Menten の式より以下のように表せる.

$$F_{DIN} = \frac{DIN}{(K_n + DIN)} \quad (3)$$

$$F_{DIP} = \frac{DIP}{(K_p + DIP)} \quad (4)$$

F_{DIN} は溶存態無機窒素, F_{DIP} は溶存態無機リンによる一次生産の制限項, DIN は DIN 濃度, DIP は DIP 濃度, K_n, K_p はそれぞれ窒素, リンの半飽和定数を表す. DIN 濃度と DIP 濃度が検出限界以下であった場合, DIN と DIP は, 0.01 と仮定した. 窒素・リンによる制限項のうち値の小さい方を, 栄養塩による制限項 F_N とした. 植物プランクトンの増殖速度 (G) は, 以下の通り3種の制限項と最大増殖速度 (G_{max}) の積とした.

$$G = G_{max} \times F_I \times F_T \times F_N \quad (5)$$

一次生産力ポテンシャル (PP) は G と $Chl-a$ 濃度 (Chl), $Chl-a$ から粒状態有機炭素への変換定数 (C) の積

Table 1. Parameters used in the estimate of primary production.

Parameter	Units	Value
PP	Primary production	$mg\ C\ m^{-3}\ day^{-1}$
Chl	Chlorophyll- <i>a</i> concentrations	$\mu g\ l^{-1}$
G	Growth rate	day^{-1}
F_T	Limitation by temperature	
F_I	Limitation by irradiance	
F_N	Limitation by nutrient	
F_{DIN}	Limitation by nitrogen	
F_{DIP}	Limitation by phosphorus	
T_{opt}	Optimal temperature	$^{\circ}C$ 25
I_{opt}	Optimal irradiance	$W\ m^{-2}$ 104.7
K_n	Half saturation constant for nitrogen	μM 1.7
K_p	Half saturation constant for phosphorus	μM 0.19
G_{max}	Maximum growth rate	day^{-1} 1.05

The values were obtained from the studies of Fujiwara et al. (1999), Yanagi and Onizuka (1999), and Fujii et al. (2002).

$$PP = C \times Chl \times G \quad (6)$$

とした. C には小浜湾で実測された粒状態有機炭素 (POC) と $Chl-a$ の比 (POC/ $Chl-a$) を用いた. POC と $Chl-a$ は, 2009年5月から2011年3月までの間に, 毎月1回から2回 (合計26回) 小浜湾内で測定された. 26回の観測のうち, $Chl-a$ 濃度が $4\ \mu g\ l^{-1}$ 以上であったときの POC/ $Chl-a$ (計6回) の平均値を算出し, POC/ $Chl-a = 55.5\ (\mu g\ C\ l^{-1} / \mu g\ Chl-a\ l^{-1})$ とした (佐藤, 未発表). 式中の各パラメータの値は, 我が国の沿岸域で一般に用いられている値を使用した (Table 1).

結果

物理環境 (水温・塩分・DO) の時空間変化

小浜湾内の水温構造について, 5-9月は水温が表層ほど高い成層状態が, 10-3月は水温が表層ほど低い, または鉛直一様の混合状態が認められた (Fig. 2). 水温範囲は, 2011年3月が $10.2-12.1^{\circ}C$, 5月が $12.8-16.4^{\circ}C$, 6月が $15.7-21.2^{\circ}C$, 7月が $17.9-26.3^{\circ}C$, 8月が $22.9-29.9^{\circ}C$, 9月が $21.7-28.4^{\circ}C$, 10月が $21.4-22.9^{\circ}C$, 11月が $16.0-19.2^{\circ}C$, 12月が $12.5-17.5^{\circ}C$, 2012年1月が $8.8-13.8^{\circ}C$, 2月が $8.5-11.2^{\circ}C$, 3月が $8.8-12.1^{\circ}C$ であった. なお, 最高水温は2011年8月12日のStn. 2表層 (0 m) における $29.9^{\circ}C$, 最低水温は2012年2月23日のStn. 1の表層 (0 m) における $8.5^{\circ}C$ であった.

小浜湾内の塩分構造について, 3-6月は底層 (15 m以深) に高塩分水 (>34) が分布し, 表層と底層の塩分の差が大きかったが, 7-8月は高塩分水が後退し表層と底層の塩分の差が小さかった (Fig. 2). 9月は表層 (10 m以浅) に低塩分水 (<33) が分布し, 10月は湾内全層の塩分が低下していた

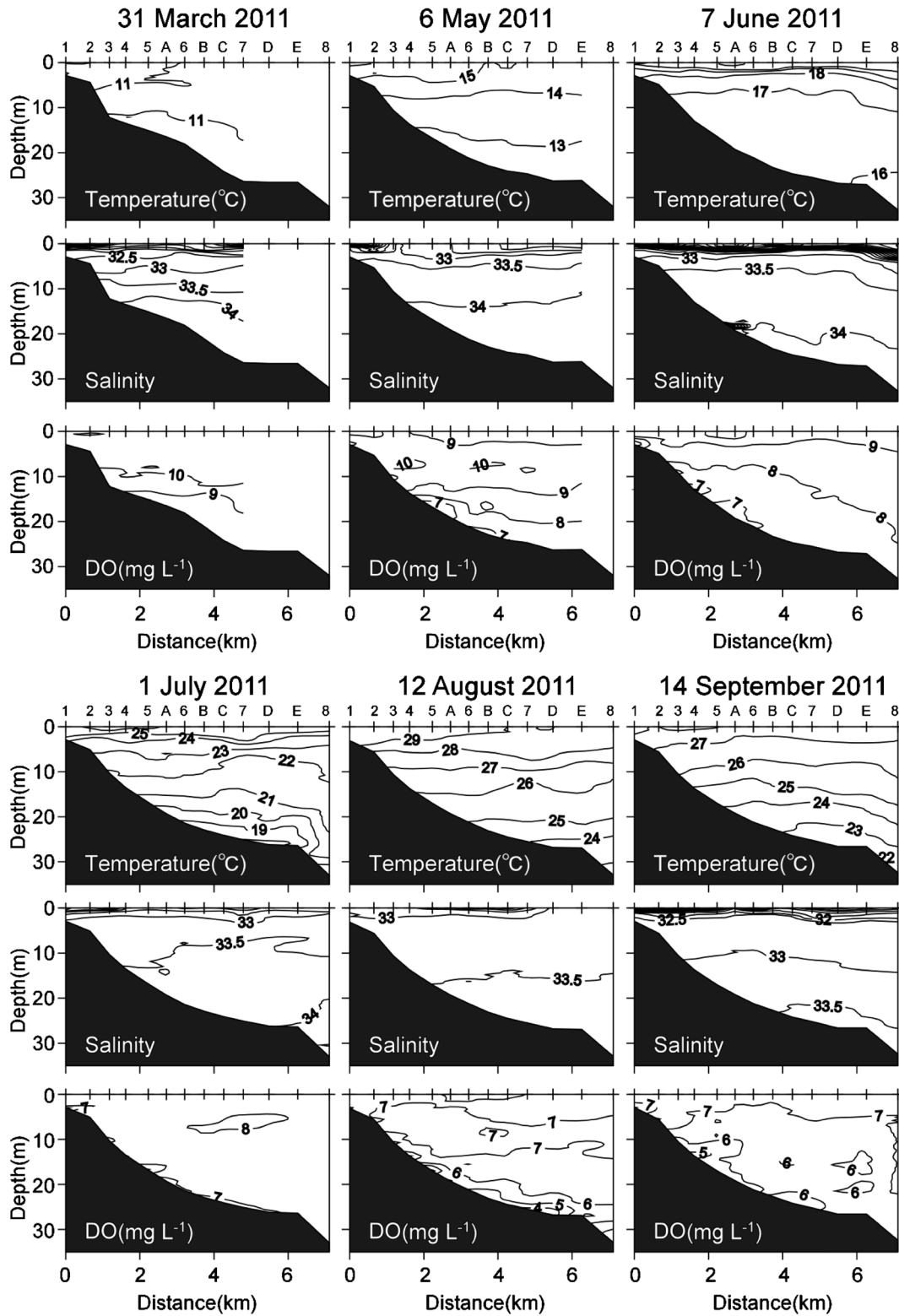


Figure 2. Longitudinal distributions of temperature, salinity and DO observed in Obama Bay on 31 March, 6 May, 7 June, 1 July, 12 August, 14 September, 12 October, 29 November, 13 December 2011, 18 January, 23 February, and 27 March 2012.

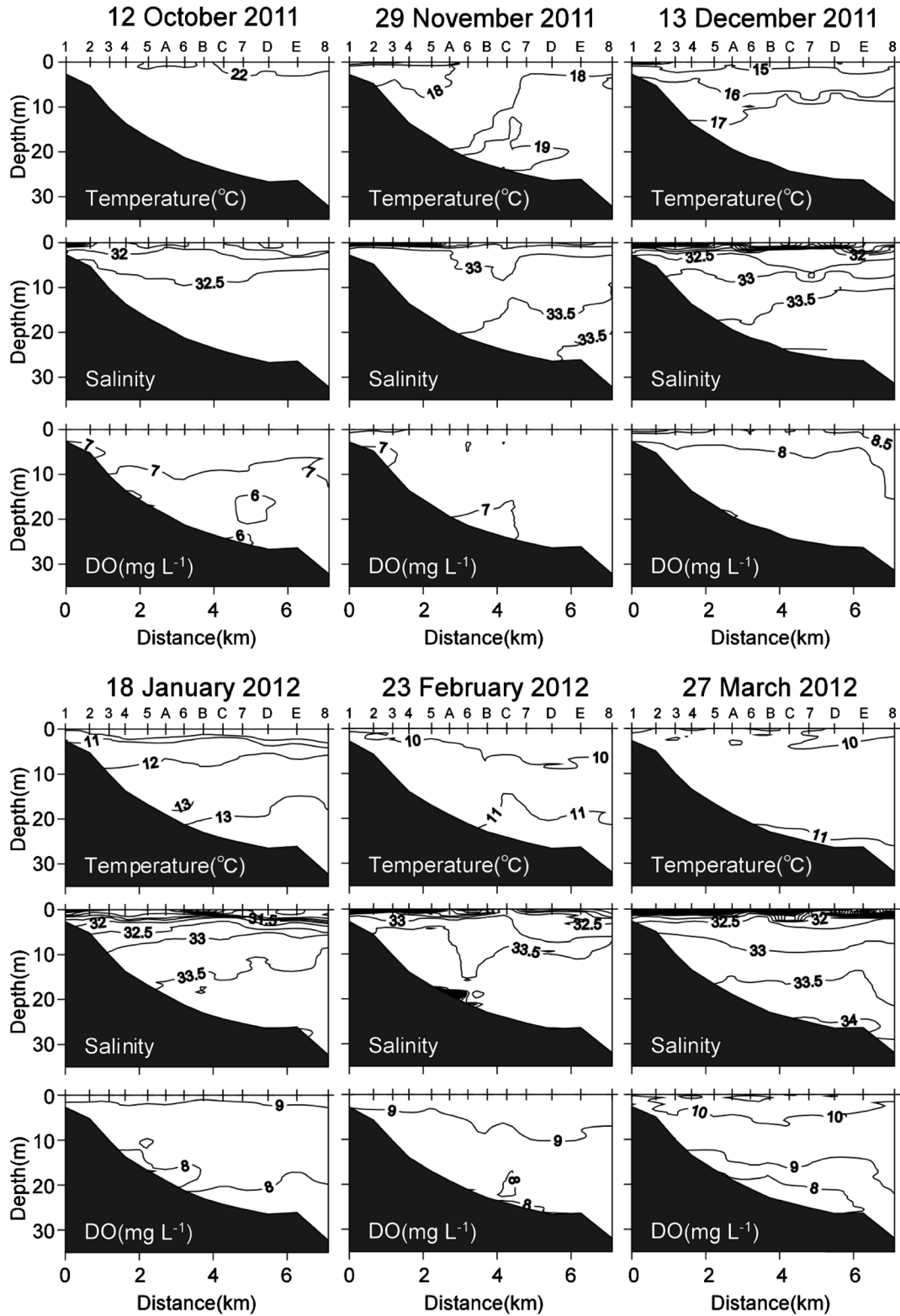


Figure 2. Continued.

(Fig. 2). 11-2月, 2012年3月は表層全体が低塩分水 (<33) に覆われている一方, 湾口側から高塩分水 (>33.5) が入り込んでいる様子が確認された (Fig. 2). 塩分範囲は, 2011年3月が8.4-34.3, 5月が24.9-34.4, 6月が14.6-34.2, 7月が30.2-34.2, 8月が31.1-33.8, 9月が25.4-33.7, 10月が25.8-33.0, 11月が23.1-33.7, 12月が10.2-33.6, 2012年1月が26.6-33.9, 2月が18.6-34.0, 3月が3.9-34.1であった. また, 2011年6月7日には湾中央部 (Stn. A) の底層 (海底上約1.5 m) において低塩分水が観測された (詳細は後述).

小浜湾内のDOは3.3-11.4 mg l⁻¹の範囲で変動し, 最小値は2012年8月12日のStn. Dの底層 (26.8 m) において観測された. 3-7月と10-2月は5 mg l⁻¹以上であり, 湾内のDOは全層でほぼ過飽和であった (Fig. 2). 8月は湾中央部から湾口部付近の底層 (Stn. 6-D) に5 mg l⁻¹以下となる低DO域が形成されていた. 9月には, 8月に観測された低DO域は認められなかったが, Stn. 4の底層 (海底上約1 m) においてDOが5 mg l⁻¹以下となっていた (Fig. 2). DO範囲は, 2011年3月が8.0-11.4 mg l⁻¹, 5月が6.2-10.3 mg l⁻¹, 6月が5.7-10.5 mg l⁻¹, 7月が5.7-8.2 mg l⁻¹, 8月が3.3-7.4 mg l⁻¹, 9月が4.1-7.6 mg l⁻¹, 10月が5.5-7.5 mg l⁻¹, 11月が6.8-8.7 mg l⁻¹, 12月が6.9-9.9 mg l⁻¹, 2012年1月が5.9-9.6 mg l⁻¹, 2月が7.1-10.1 mg l⁻¹, 3月が7.0-10.6 mg l⁻¹であった.

クロロフィルa濃度と栄養塩濃度の時空間変化

各観測日の中から一次生産力ポテンシャルの算出を実施した観測日 (2011年5月6日, 6月7日, 7月1日, 8月12日, 9月14日, 10月12日, 11月29日, 2012年1月18日, 2月23日, 3月27日) について, Chl-a濃度, DIN濃度, DIP濃度, DSi濃度の縦断分布をFig. 3に示す. 観測期間中, ほぼ全層にわたり相対照度が1%を上回っており, 表層から底層までが有光層となっていた.

観測期間中のChl-a濃度は, 0.2-51.8 μg l⁻¹の範囲で変動していた. 2011年5月と9月, 2012年3月は底層に, 6-8月, 10-2月は表層付近または湾奥に高濃度域が形成されていた (Fig. 3). 特に, 2011年5月6日は湾中央部付近 (Stn. 4) の底層 (12 m) に明瞭なChl-a極大が形成されており, 全観測期間中で最も高い値 (51.8 μg l⁻¹) を示した. また少し沖合のStn. 6の底層 (20 m) でも9.8 μg l⁻¹と高かった. 同様に, 2012年3月27日のChl-a分布も, Stn. 4の底層 (13.6 μg l⁻¹) とStn. Aの底層 (10.2 μg l⁻¹) で高い値を示していた.

観測期間中のDIN濃度は検出限界以下から44.2 μM, DIP濃度は検出限界以下から0.5 μM, DSi濃度は検出限界以下から104.3 μMの範囲で変動していた. DINについて, 2011年5月は湾奥表層, 6月と8-10月は湾奥部と湾中央部から湾口部の底層付近に2 μM以上となる高濃度域が形成されていた. しかしながら, 表層 (10 m以浅) の多くの場所では1 μM以下でありDIN濃度は低かった (Fig. 3). 一方で, 11-2月は全層に, 2012年3月は表層全体と湾中央部か

ら湾口部の底層に2 μM以上と高濃度で分布していた (Fig. 3). DIPについて, 2011年5月, 7月, 10月は湾内全体で0.1 μM以下でありほぼ枯渇していたが, 6月と8-9月, 2012年1-3月は湾中央部または湾口部付近の底層で0.2 μM以上となる箇所が認められた (Fig. 3). DSiについて, 2011年5月と10月は湾奥部や表層を除いた湾内全体で5 μM以下であり, ほかの月よりも低濃度であった. 2011年6月と11月は表層に, 7-8月は底層に, 9月と2012年1-3月は表層全体と湾中央部から湾口部の底層に10 μM以上となる高濃度域が形成されていた (Fig. 3).

次に, 縦断分布で明瞭なChl-a極大が形成されていたStn. 4の水溫, 塩分, Chl-a濃度, 栄養塩濃度のイソプレスをFig. 4に示す.

水溫は8.9-30.4°Cの範囲で変化し, 明瞭な季節変化が見られた. 6月頃から表層の水溫上昇が大きくなり, 8-9月には水溫躍層が発達していた. 9月下旬から水溫分布が鉛直一様になり水溫躍層は認められなかった. 1-2月は表層水溫が10°Cを下回り, 最も低かった. 塩分は14.3-34.1の範囲で時空間的に大きく変化していた. 5-9月上旬まで水深2.5 m付近に塩分躍層が発達していた. 2011年10月12日観測時には明瞭な塩分躍層は見られず, 鉛直混合が始まっていた. また, 2011年3月31日, 6月7日, 9月14日と11月以降 (1月は除く) の表層 (2 m以浅) は低塩分水 (<30) に覆われていた. 水溫と塩分の観測結果から, 主に5-9月が成層期, 鉛直混合は9月下旬より始まり10-3月は混合期であるとした.

栄養塩濃度について, DINは検出限界以下から19.9 μM, DIPは検出限界以下から0.2 μM, DSiは検出限界以下から71.1 μMまでの範囲で大きく変化していた. DIN濃度の時空間変化について, 成層期は全層で1 μM以下と低濃度であったが, 2011年8月12日の底層で増加が認められた. このとき, 底層のDOは6 mg l⁻¹以下であり, 周辺よりも低くなっていた (Fig. 2). 混合期は全層で2 μM以上まで増加し, 2011年12月13日と2012年3月27日の表層では15 μM以上に達していた. 一方, 11月下旬から2月下旬までの底層 (10 m以深) では3 μM以上と高い状態が継続していた. DIP濃度の時空間変化について, 成層期は全層で0.1 μM未満でありほぼ枯渇していた. 混合期にDINやDSiのような全体的な濃度増加は認められなかったが, 1月下旬から2月下旬までの底層 (10 m以深) では0.15 μM以上と高い状態が継続していた. DSi濃度の時空間変化について, 成層期は2011年6月7日, 7月1日の表層と8月1日, 12日の底層では10 μM以上に達していたが, これらを除いた期間・場所では5 μM以下となる場合が多かった. 混合期はDIN同様に, 全層で5 μM以上まで増加し, 2011年12月13日と2012年3月27日の表層では70 μM以上に達していた. 一方, 12月中旬から2月下旬の底層 (8 m以深) では10 μM以上と高い状態が継続していた.

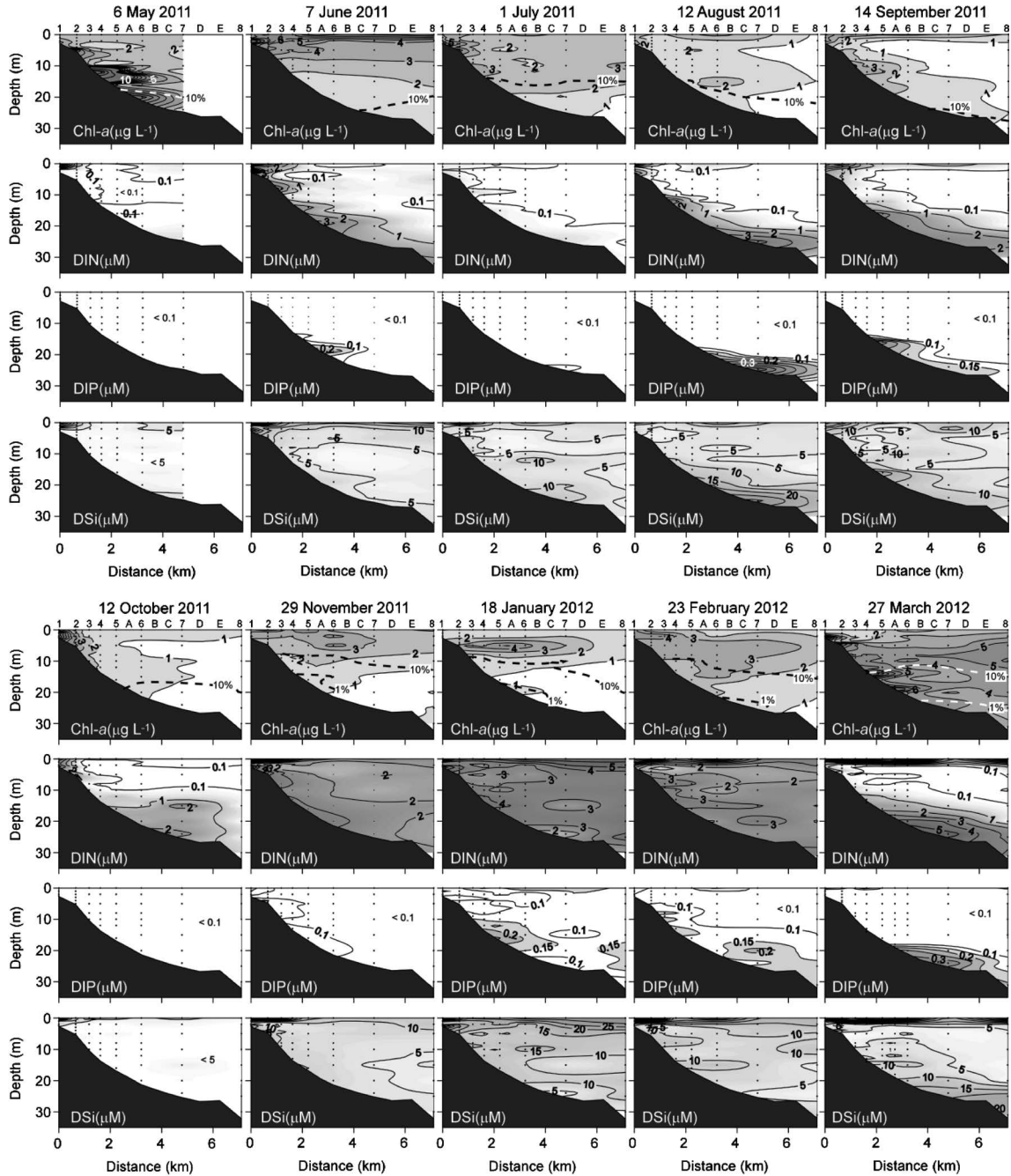


Figure 3. Longitudinal distributions of Chl-*a*, DIN, DIP and DSi observed in Obama Bay on 6 May, 7 June, 1 July, 12 August, 14 September, 12 October, 29 November 2011, 18 January, 23 February, and 27 March 2012. The dashed lines indicate 10% and 1% of the surface irradiance.

Chl-*a*濃度は $0.7\text{--}51.8\ \mu\text{g}\ l^{-1}$ の範囲で変動し、2011年3月31日、5月6日、2012年3月27日の底層に $10\ \mu\text{g}\ l^{-1}$ 以上に達する極大層が形成されていた。成層期は2011年3月31日、5月6日の底層と6月7日の表層を除きほぼ鉛直様に $1\text{--}2\ \mu\text{g}\ l^{-1}$ と低濃度で分布していたが、混合期は亜表層(5 m付近)に $3\ \mu\text{g}\ l^{-1}$ 以上に達する極大層が認められた。

一次生産の制限項と一次生産力ポテンシャルの時空間変化 F_T は F_I と F_N よりも常に大きく、小浜湾の一次生産過程は栄養塩と光の制限を強く受けていた。そこで各観測日(2011年5月6日、6月7日、7月1日、8月12日、9月14日、10月12日、11月29日、2012年1月18日、2月23日、3月27日)の、 F_I 、 F_N と実測データから見積もられたPPの縦断

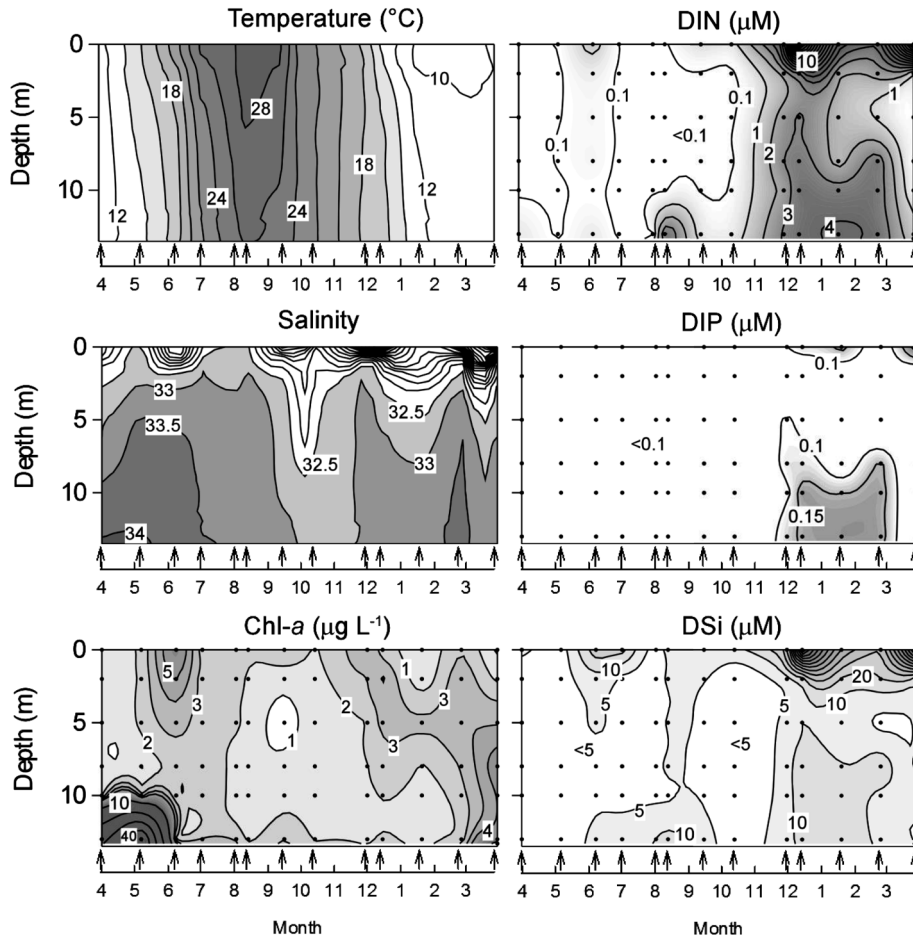


Figure 4. Temporal changes in the vertical structure of temperature, salinity, Chl-a, DIN, DIP and DSi at Stn. 4.

分布を Fig. 5 に示す。

F_1 の時空間変化について、2011年5–10月（9月を除く）と2012年3月は表層から中層で、11–1月は表層から亜表層で $F_1 > 0.3$ である一方、9月は表層（10m以浅）で $F_1 < 0.2$ 、2月は底層（10m以深）で $F_1 < 0.1$ となった。9月の表層では $F_N < 0.1$ であったため、一次生産過程は栄養塩制限下であったが、ほかの月と比較すると光条件は好ましくなかった。2月の底層では $F_N > 0.3$ であり栄養塩制限ではなかったため、一次生産過程は顕著な光制限下にあった。

F_N の時空間変化について、2011年5–7月（6月の底層を除く）は湾内全体で $F_N < 0.1$ となり一次生産過程は顕著な栄養塩制限下であったが、8–10月は底層の低DO・高栄養塩域（Figs. 2, 3）で $F_N > 0.2$ となり栄養塩制限が緩和されていた。一方で、11–2月は湾内全体で、2012年3月は底層で $F_N > 0.2$ となり栄養塩制限にはなっていなかった。

PPの時空間変化について、一次生産が活発になる場所は底層付近に認められる場合と表層付近に認められる場合があった。前者は底層Chl-a極大と一致する場合（2011年5月と7月、2012年3月）と底層栄養塩極大と一致する場合

（2011年6月、8–10月）があった。一方、後者は混合期に河川流入量が増加し、表層付近の栄養塩制限が緩和された状態で認められた（2011年11月、2012年1–2月）。PPの範囲は、2011年5月が $3.6\text{--}331.2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $51.9 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、6月が $18.7\text{--}604.8 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $122.0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、7月が $0.6\text{--}248.5 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $45.6 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、8月が $1.6\text{--}603.1 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $38.1 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、9月が $2.2\text{--}879.9 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $69.8 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、10月が $1.6\text{--}201.0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $32.4 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、11月が $1.7\text{--}801.6 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $203.2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、2012年1月が $5.4\text{--}789.0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $151.0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、2月が $1.5\text{--}488.1 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $81.7 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）、3月が $4.7\text{--}697.3 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ （平均 $91.9 \text{ mg C m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ）であった。

記録的な豪雨の後に観測された底層低塩分水

台風が通過した1週間後に実施した2011年6月7日の観測時に、湾中央部（Stn. A）の水深18m付近に層厚1mに及ぶ塩分極小層が観測された（Fig. 6）。塩分極小層の上端では、クロロフィル蛍光値も明瞭なピークを示していた。こ

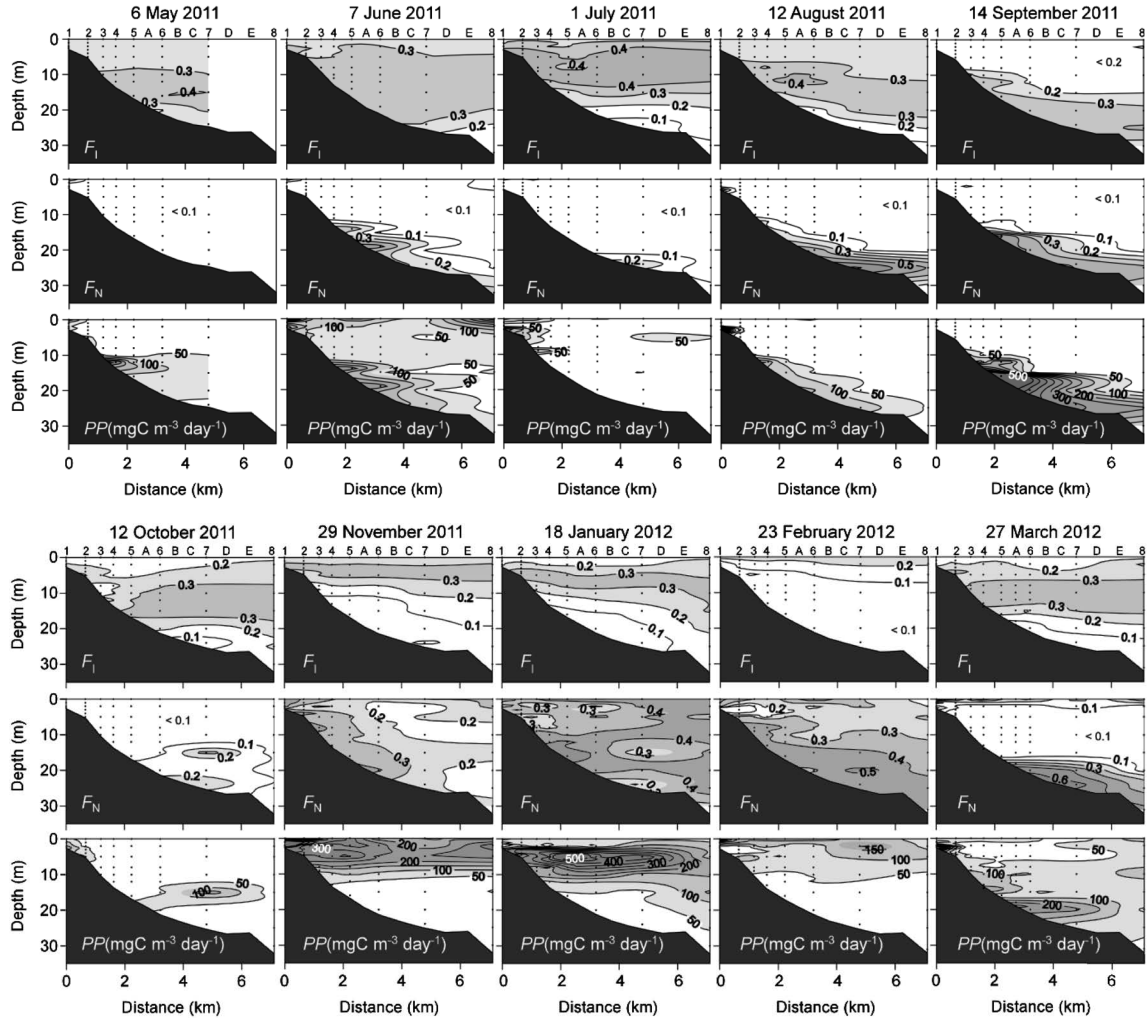


Figure 5. Longitudinal distributions of limiting factors of light (F_L) and nutrient (F_N), and primary production (PP) on 6 May, 7 June, 1 July, 12 August, 14 September, 12 October, 29 November 2011, 18 January, 23 February, and 27 March 2012.

の塩分極小層では、水温の鉛直プロファイルに明瞭な違いは認められなかったものの、DOの鉛直プロファイルは、塩分極小層の上端と下端でわずかに不連続性が認められた。

考 察

一次生産力ポテンシャルの妥当性の評価

畑・近藤 (1996) は、1995年7月に小浜湾中央部の表層 (1 m) と底層 (19 m) で明暗瓶法を用いて一次生産速度を測定している。それによると表層と底層の純生産速度はそれぞれ $37 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, $41 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ と推定されている。また、2013年6–8月に小浜湾東部沿岸域において、 ^{13}C トレーサ法を用いて一次生産速度が測定されている (杉本ほか, 未発表)。それによると、単位時間当たりの一次生産速度は $5.5\text{--}49.5 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (平均 $18.7 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) と推定されている。

本研究の数値計算から得られた6–8月の単位時間当たりの一次生産力ポテンシャルの範囲は、表層 (0 m) では $0.01\text{--}87.7 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (平均 $7.9 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)、底層では $0.01\text{--}94.1 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (平均 $10.0 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) という値を得ている。数値計算には不確実性が含まれるものの、得られた一次生産力ポテンシャルは、現場法で得られた値とほぼ同程度であり、妥当な計算結果が得られていた。

小浜湾に流入する地下水の可能性について

結果で述べたように、小浜湾の湾中央部 (Stn. A) の底層では、2011年6月7日の観測時に、塩分極小層が観測された (Fig. 6)。2012年2月23日にも、6月同様に湾中央部 (Stn. A) の底層に低塩分水を観測した (Fig. 2) が、このときは海底上0.5 mまでの塩分が低下していた。これらの塩分極小層が観測された場所は、小浜平野の浅層地下水が流出すると予想されるエリアとおおむね一致しており、北川の沖合か

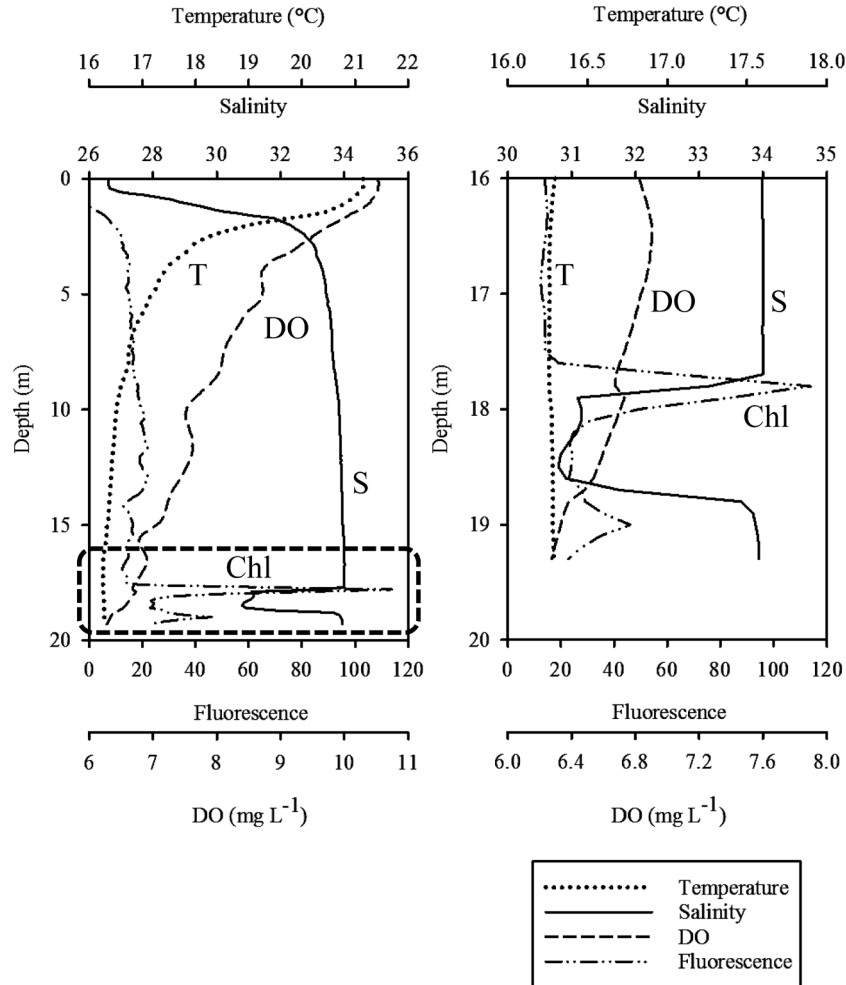


Figure 6. Vertical profiles of temperature, salinity, DO and chlorophyll fluorescence at Stn. A on 7 June 2011. The profile of 16–20 m in depth is enlarged on the right side.

ら流出する地下水を捉えたものと考えられる。海域底層における低塩分水の存在は、富山湾（八田ほか，2005）や別府湾（本田ほか，未発表）など、我が国の沿岸海域でもしばしば観測されている現象である。観測期間中に明瞭な塩分極小層が観測されたのは、2011年6月7日のみである。このときの観測は、5月末に台風2号によってもたらされた猛烈な大雨（小浜市において5月28日12時からの47時間に299.5 mmの降水量を記録）の約1週間後に実施した。底層の塩分低下は、台風による降水量増加によって一時的に地下水位が急激に上昇し、海域への地下水流出の影響が顕著に現れたものと推察される。台風やハリケーンによる激しい降水が地下水湧出量を一時的に増加させる現象は、米国フロリダ州（Hu et al., 2006）や韓国（Gwak et al., 2014）の沿岸海域でも特異的なイベント現象として報告されている。

一次生産過程の時空間変化と光環境

小浜湾では、季節を問わずほぼ全層が有光層であり、表層から底層までの範囲で植物プランクトンは増殖することが可能であった（Fig. 3）。生産層の時空間変化をみると、3–10月は底層、11–2月は表層を中心に一次生産が起っていたが、9月は表層（10 m以浅）、2月は底層（10 m以深）で $F_1 < 0.2$ となり光条件が好ましくなかった。ここでは、一次生産過程の時空間変化と光環境の関係に着目して考察する。

本研究では最適光強度を 104.7 W m^{-2} （Fujii et al., 2002）と設定しており、水中光強度が $0\text{--}4 \text{ W m}^{-2}$ 、または 512 W m^{-2} 以上となった場合に $F_1 < 0.1$ と算出される。観測日当日に舞鶴気象台で観測された一時間当たりの全天日射量の平均値は $0.06\text{--}0.91 \text{ MJ m}^{-2}$ の範囲にあり、2011年5月が 0.74 MJ m^{-2} 、6月が 0.69 MJ m^{-2} 、7月が 0.61 MJ m^{-2} 、8月が 0.68 MJ m^{-2} 、9月が 0.85 MJ m^{-2} 、10月が 0.65 MJ m^{-2} 、11月が

0.34 MJ m⁻², 2012年1月が0.46 MJ m⁻², 2月が0.06 MJ m⁻², 3月が0.91 MJ m⁻²であった。2011年9月14日は2012年3月27日に次いで日射量が多く, 2012年2月23日は最も少なかった。2011年9月14日の表層では, 水中における光の減衰が少なく, 10–15時における水中光強度は, 一部を除いて520 W m⁻²以上となっていた。そのため, 表層の一次生産過程は強光阻害を受けていたと考えられる。一方, 2012年2月23日は観測当日に雨天だったため日射量が少なく, 10–15時における水中光強度は0.1–58.3 W m⁻²と光が弱かったことにより, 底層の一次生産過程は光制限を受けていたと考えられる。

一次生産過程の時空間変化と栄養塩の供給源

5–7月(6月の底層を除く)は, 湾内全体で栄養塩がほぼ枯渇しており, 一次生産過程は顕著な栄養塩制限下にあった。8–10月には, 底層の低DO域に蓄積している栄養塩の影響で, 底層の栄養塩制限は緩和されていたが, 底層付近以外の場所では5月からの栄養塩制限が継続していた。一方, 11–2月には湾内の栄養塩濃度が上昇するため, 栄養塩制限は緩和され, 底層では光が制限要因となっていた。ここでは, 一次生産過程の時空間変化と栄養塩の供給源の関係に着目して考察する。

湾奥部表層には北川と南川が流入しているが, その栄養塩フラックスは河川流量の変動に伴って季節的に大きく変化する(Sugimoto and Tsuboi, 2016)。北川と南川の河川流量は典型的な日本海側河川の特徴を有しており, 9–3月にかけて多く, 7–8月にその流量が最も少なくなる。実際, 表層の塩分は, 台風による出水があった2011年6月7日と9月14日を除くと, 10月以降に低下するのに対し, 7–8月には明確な塩分低下は認められなかった(Fig. 4)。また, 5–10月の表層(10 m以浅)では, 栄養塩がほぼ枯渇しているのに対し, 11–2月には最も河川に近い測点であるStn. 1を中心にDIN濃度が顕著に高くなる傾向が認められた(Fig. 3)。しかしながら, DIP濃度には季節による明瞭な違いは認められなかった。現在の小浜湾の一次生産過程を制限する栄養塩は, 主にリンであるとされている(Sugimoto et al., 2016)。11–2月にかけては表層でChl-*a*濃度とPPが高くなることから(Figs. 3, 5), 河川から流入したDIPは植物プランクトンにすぐに利用され, 常にその濃度が低かったものと推察される。一方, 5–10月にかけては, 表層ではChl-*a*濃度やPPが低かったが, 5月底層ではChl-*a*極大が, 8月底層では栄養塩極大が認められたため(Fig. 3), 河川以外の栄養塩供給源の影響が考えられる。

8月の湾中央部から湾口部の底層栄養塩極大では, DOが低い傾向にあった(Figs. 2, 3)。2011年8月12日のStn. 7の底層水の栄養塩(DIN, DIP)濃度とDOの関係をFig. 7Aに示す。栄養塩濃度はDOが低下すると増加する傾向にあり, DO消費に伴う栄養塩の増加傾向が認められた。有機物(植物プランクトン)がRedfield比(RF比)に従って分解され

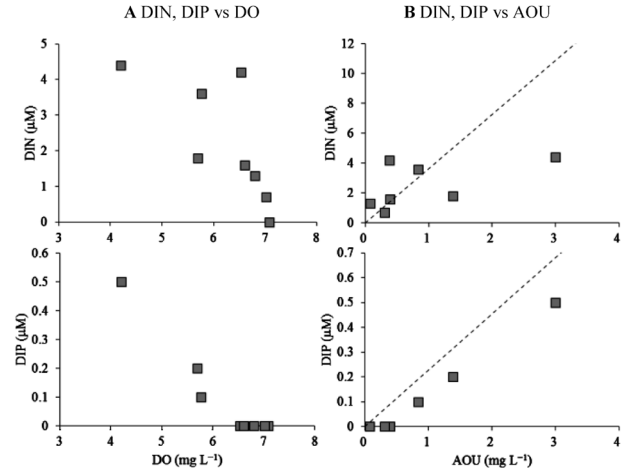


Figure 7. (A) DO vs. DIN and DIP concentrations. (B) Apparent oxygen utilization vs. DIN and DIP concentrations. Dashed lines are theoretical regenerated nutrient concentrations calculated by the Redfield stoichiometry at Stn. 7 on 12 August 2011.

ると仮定した場合, 1 mg l⁻¹の酸素消費でDINは3.62 μM, DIPは0.23 μM増加する(筧・藤原, 2007)。そこで見かけ上の酸素消費量(Apparent oxygen utilization: AOU)に対する栄養塩濃度の実測値とRF比に従って生成された場合の理論値の関係をFig. 7Bに示した。AOUは, 現場海水の水温と塩分から決まる酸素飽和量から実測した酸素量(DO)を差し引くことによって求めた。酸素飽和量は, Foxの式(Fox, 1909)に水温と, 塩素量に換算した塩分を与えて算出した。DOが最も低かったStn. 7底層のDIN濃度とDIP濃度は理論値よりも低く, 理論値と実測値の差はDINのほうが大きかった。DIPは理論値との差が小さく直線的な関係が得られた。Stn. 7の底層は有光層であるため, 生成された栄養塩が消費されたことにより理論値よりも実測値のほうが低くなった可能性も考えられるが, 底層における有機物分解によって再生産栄養塩の蓄積は生じていたものと考えられる。再生産栄養塩の蓄積によって底層では栄養塩制限が緩和されたため, Chl-*a*現存量は多くないがPPが高くなったものと推察される。

一方, 5月の湾中央部の底層Chl-*a*極大では, DIN, DIP共に枯渇しており, 顕著な栄養塩制限状態であったにも関わらず, Chl-*a*濃度が50 μg l⁻¹を超えるほどに高かった(Fig. 3)。5月底層にも若干のDO低下が認められた(Fig. 2)ため, AOUから再生産栄養塩を検討した。Chl-*a*極大が形成されたStn. 4の底層のDOは8.25 mg l⁻¹, AOUが0.41 mg l⁻¹であった。このとき再生産されるDINは1.47 μM, DIPは0.09 μMである。再生産された栄養塩がすべて一次生産に利用された場合に新しく生産されるChl-*a*量を, RF比(C:N:P=106:16:1), POC/Chl-*a*=55.5 (μg C l⁻¹/μg Chl-*a* l⁻¹) (佐藤,

未発表)として計算すると、最大でも $2.11 \mu\text{g l}^{-1}$ となりChl-*a*極大($51.8 \mu\text{g l}^{-1}$)への寄与は5%に満たない。それゆえ、再生産栄養塩では説明できず、ほかの栄養塩供給源の影響が示唆された。

結果で述べたように小浜湾では、イベント的に発生した底層の低塩分水が観測された (Fig. 6) ことから、海底からの地下水の流入があることが示唆された。また、この低塩分水の上端には明瞭なクロロフィル蛍光値のピークが検出されており (Fig. 6)、地下水がもたらす栄養塩が底層付近の一次生産を引き起こす駆動力となっている可能性が高い。

5月には、上述のような明瞭な低塩分水は観測されていないが、湾中央部付近に底層Chl-*a*極大が形成されていた。また、底層Chl-*a*極大は、2011年5月ほど顕著ではないが、2012年3月にも観測されており (Figs. 3, 4)、地下水湧出量の季節変化の影響も示唆される。海底から湧出する淡水性地下水の量は、地下水位と海面水位の水位差によって大きく時間変化することが知られている (石飛ほか, 2005)。松井 (2011) は、小浜平野における被圧地下水の自噴量が、2-4月頃に多く、7-8月に少ないことを報告している。自噴量の変化は、地下水位の変化に対応しているため、被圧帯水層では、冬季から春季に地下水位が上昇していることが分かる。Sugimoto et al. (2016) は、2-3月に淡水性地下水の湧出量が多いことを報告している。このときは、降雪量が多く、海水位が低かったことが湧出量を高めた要因であると指摘されている。積雪地域である小浜湾の集水域では、雪解けによって地下水への涵養量が多くなる春先に地下水位が上昇し、海底に湧出する地下水量もほかの季節に比べると、多いことが予想される。それゆえ、海底からの地下水流出によってもたらされる栄養塩が植物プランクトンに効率的に利用され、明瞭なChl-*a*極大を形成しているものと考えられる。

まとめ

本研究では、小浜湾内の植物プランクトンが河川水や地下水に対してどのように応答しているのかを明らかにするため、Chl-*a*濃度と一次生産過程の制限要因 (水温、光量子量、栄養塩濃度) を実測し、数値計算により一次生産力ポテンシャルを評価した。小浜湾は季節を問わずほぼ全層が有光層であり、表層から底層に至る全層で一次生産が可能であった。5-7月は、全層で栄養塩がほぼ枯渇しており、一次生産過程は顕著な栄養塩制限下にあったが、5月の湾中央部底層に明瞭なChl-*a*極大が形成されていた。8-10月は7月までと同様に表層 (10 m以浅) の栄養塩は枯渇していたが、8月の湾中央部底層の低DO域に再生産由来と考えられる栄養塩が高濃度に蓄積しており、栄養塩制限が緩和されていた。一方、11-2月にかけては河川からの栄養塩流入の増加により、河口域を中心に栄養塩濃度が上昇

し、表層の栄養塩制限が緩和されたためPPも増加していた。

小浜湾では、台風通過後に実施した観測で、湾中央部底層に低塩分水を観測した。これは小浜平野の地下水の流出によるものと推察された。5月の底層では顕著な栄養塩制限となっていたが、海底からの地下水流出に伴う栄養塩供給が底層Chl-*a*極大の形成に寄与していたものと考えられる。

謝 辞

現場観測に多大なるご協力を賜った福井県立小浜水産高等学校 (現福井県立若狭高等学校) の実習船「あおば」の乗組員の皆様に、感謝の意を表します。

引用文献

- Fox, C. J. J. (1909) On the coefficients of absorption of nitrogen and oxygen in distilled water and sea-water, and of atmospheric carbonic acid in sea-water. *Trans. Faraday Soc.*, **5**, 68-86.
- Fujii, M., Y. Nojiri, Y. Yamanaka and M. J. Kishi (2002) A one-dimensional ecosystem model applied to time-series Station KNOT. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **49**, 5441-5461.
- 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**, 1061-1065.
- 藤原建紀・山尾 理・高橋鉄哉・笠井亮秀・杉山陽一・原田一利 (1999) 一次生産量の時空間分布の算定手法. *海岸工学論文集*, **46**, 1211-1215.
- Gwak, Y. S., S. H. Kim, Y. W. Lee, B. K. Khim, S. Y. Hamm and S. W. Kim (2014) Estimation of submarine groundwater discharge in the Il-Gwang watershed using water budget analysis and ^{222}Rn mass balance. *Hydrol. Process.*, **28**, 3761-3775, doi:10.1002/hyp.9927.
- 八田真理子・張 勁・佐竹 洋・石坂丞二・中口 譲 (2005) 富山湾の水塊構造と河川水・沿岸海底湧水による淡水フラックス. *地球化学*, **39**, 157-164.
- 畑 幸彦・近藤竜二 (1996) 3. 小浜湾の水質・底質環境と基礎生産について. 福井県立大学等学術振興基金研究助成事業平成5-6年度報告書「小浜湾の海洋牧場化のための生態環境および生物生産機構の特性解明に関する研究」, 研究代表者: 畑 幸彦.
- 林 美鶴・柳 哲雄 (2000) 伊予灘南部・大阪湾におけるDIN・DIP濃度とN/P比の変遷. *海の研究*, **9**, 133-142.
- Holmes, R. M., A. Aminot, R. Kerouel, B. A. Hooker and B. J. Peterson (1999) A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 1801-1808.
- Hu, C., F. E. Muller-Karger and P. W. Swarzenski (2006) Hurricanes, submarine groundwater discharge, and Florida's red tides. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi: 10.1029/2005GL025449
- 石飛智稔・谷口真人・佐伯憲一・小野恵子 (2005) 駿河湾沿岸における海底地下水湧出量の定量的評価. *地球化学*, **39**, 97-106.
- 筧 茂穂・藤原建紀 (2007) 伊勢湾の栄養塩動態: 非保存的変化の季節変動. *海の研究*, **16**, 437-453.
- Lohrenz, S. E., G. L. Fahnenstiel, D. G. Redalje, G. A. Lang, M. J. Dagg, T. E. Whitledge and Q. Dortch (1999) Nutrients, irradiance, and mixing as factors regulating primary production in coastal waters impacted by the Mississippi River plume. *Cont. Shelf Res.*, **19**, 1113-1141.
- 松井 明 (2011) 雲城水および津島名水 (福井県小浜市) における

- 湧水量の季節変化. 応用生態工学, **13**, 165–169.
- 松村 剛・石丸 隆・柳 哲雄 (2002) 東京湾における窒素とリンの収支. 海の研究, **11**, 613–630.
- Moore, W. S. (2010) The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Ann. Rev. Mar. Sci.*, **2**, 59–88.
- 中村 充・大竹臣哉 (1969) 4. 小浜湾の物理環境について. 福井県立大学等学術振興基金研究助成事業平成5–6年度報告書「小浜湾の海洋牧場化のための生態環境および生物生産機構の特性解明に関する研究」, 研究代表者: 畑 幸彦.
- 小浜市 (2015) 小浜平野地下水観測業務中間報告書.
- Ryther, J. H. (1969) Photosynthesis and fish production in the sea. *Science*, **166**, 72–76.
- 笹嶋貞雄 (1962) 福井県小浜平野の地形・地質と地下水について. 福井大学学芸学部紀要, **12**, 89–115.
- 佐藤博信・高橋研也・柏館信子・野村宗弘・沢本正樹 (2005) 大船渡湾における密度貫入が中層 Chlorophyll-*a* 濃度に及ぼす影響. 海岸工学論文集, **52**, 876–880.
- Steele, J. H. (1962) Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnol. Oceanogr.*, **7**, 137–150.
- Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons (1968) A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd Can.*, **167**, 311 pp.
- Sugimoto, R., A. Kasai, T. Miyajima and K. Fujita (2009) Transport of oceanic nitrate from the continental shelf to the coastal basin in relation to the path of the Kuroshio. *Cont. Shelf Res.*, **29**, 1678–1688.
- Sugimoto, R., A. Kasai, T. Miyajima and K. Fujita (2010) Modeling phytoplankton production in Ise Bay, Japan: Use of nitrogen isotopes to identify dissolved inorganic nitrogen sources. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **86**, 450–466.
- Sugimoto, R., H. Honda, S. Kobayashi, Y. Takao, D. Tahara, O. Tominaga and M. Taniguchi (2016) Seasonal changes in submarine groundwater discharge and associated nutrient transport into a tideless semi-enclosed embayment (Obama Bay, Japan). *Estuar. Coasts.*, **39**, 13–26. doi: 10.1007/s12237-015-9986-7.
- Sugimoto, R. and T. Tsuboi (2016) Seasonal and annual fluxes of atmospheric nitrogen deposition and riverine nitrogen export in two adjacent contrasting rivers in central Japan facing the Sea of Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, doi: 10.1016/j.ejrh.2015.11.019
- Taniguchi, M., W. C. Burnett, J. E. Cable and J. V. Turner (2002) Investigations of submarine groundwater discharge. *Hydrol. Process.*, **16**, 2115–2129.
- 柳 哲雄・鬼塚 剛 (1999) 博多湾の低次生態系に関する数値モデル. 海の研究, **8**, 245–251.