

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

谷村 篤^{1†}, 向山礼美¹, 石川 輝¹, 田口和典¹, 今井 直²

Seasonal distribution of size-fractionated chlorophyll *a* in Ago Bay, central Japan

Atsushi TANIMURA^{1†}, Ayami MUKOUYAMA¹, Akira ISHIKAWA¹,
Kazunori TAGUCHI¹ and Tadashi IMAI²

Concentrations of size-fractionated chlorophyll *a* ($>20\ \mu\text{m}$, $2\text{--}20\ \mu\text{m}$, $<2\ \mu\text{m}$) and physicochemical parameters, *i.e.* temperature, salinity, σ_t , transparency and nutrients (DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_2\text{-Si}$) were investigated in four different periods (April, August and November 2000, and January 2001) in Ago Bay, Japan, a renowned pearl oyster aquaculture ground. Nutrients were low in the entire bay throughout the year. Total chlorophyll *a* concentration was high ($>2.0\ \text{mg}\ \text{m}^{-3}$) in the mouth of the bay in spring and in the innermost area that includes the shallow tributary bays in summer. In contrast, chlorophyll *a* concentration was low in autumn and winter ($<2.0\ \text{mg}\ \text{m}^{-3}$) in the entire bay. However, small-sized phytoplankton ($<20\ \mu\text{m}$) was predominant in all cases, *i.e.* in the entire bay and throughout the year. Thus, although the main size class of plankton found in the bay fits with the prey size usually taken by pearl oysters, their scarcity within the heavily cultured areas of the innermost and tributary bays suggest that food may not be sufficient, especially during the summer when the feeding activity of the oysters reaches a peak.

Key words: size-fractionated chlorophyll *a*, concentration, nutrient, pearl oyster, Ago Bay

はじめに

三重県志摩半島に位置する英虞湾は、面積約25 km²、平均水深10mの浅い内湾である (Fig. 1)。英虞湾は、東西に長い主湾部とそこから派生する複雑に入り組んだ多くの水深の浅い枝湾部からなり、閉鎖性の強い内湾を形成している (中西ほか, 2001)。また、湾内には流入する大きな河川がないため、湾奥でもそれほど塩分が下がることがない (増田ほか, 2004)。このような水利的条件を利用して、英虞湾では湾奥部から入り組んだ海岸線に沿った枝湾水域で真珠養殖が営まれている (Fig. 2)。英虞湾は我が国の主要な真珠養殖漁場として、1890年以降現在まで100年以上にわたって重要な役割を担ってきている。英虞湾では1960年

代にはすでにアコヤガイの過密養殖によって、アコヤガイ由来の有機物が大量に海底に沈降・堆積し、貧酸素水塊や硫化水素の発生などを引き起こし、漁場環境の悪化が指摘されてきた (たとえば、上野・井上, 1961; 上野, 1964)。しかし、英虞湾の漁場環境の悪化は現在も進行しており (中西ほか, 2001; 増田ほか, 2004)、アコヤガイの大量へい死の間接的な要因となっている可能性が指摘されている (阿保・杜多, 2001)。

真珠の養殖は、一般にカゴにアコヤガイを入れ、筏から数メートルの深さに吊下して行う。また、真珠の養殖は当該水域の一次生産に依存した無給餌養殖であるため、植物プランクトンの量のみならず質的な季節変化は究極的には真珠の品質を左右する重要な要因となる (たとえば、関, 1972)。しかし、英虞湾はこれまで真珠養殖漁場として高度に利用されてきたにもかかわらず、湾内の広い範囲にわたった植物プランクトンの質的・量的な季節性についての知見はほとんどない。養殖生物の生産性の維持、とくにアコヤガイの環境収容力を考える上でも、また、英虞湾の環境の保全を図っていく上でも漁場の餌料環境に関する知見は重要である (沼口, 1996)。本研究では、英虞湾全域における海洋環境およびサイズ別クロロフィル *a* 濃度の分布

2007年1月9日受付, 2007年11月30日受理

¹ 三重大学大学院生物資源学研究所 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577

Graduate school of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie 514-8507, Japan. Tel: 059-231-9552. Fax: 059-231-9552.

² みずほ情報総研株式会社 〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3

Mizuho Information & Research Institute, 2-3 Kanda-Nishikicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8443, Japan.

[†] tanimura@bio.mie-u.ac.jp

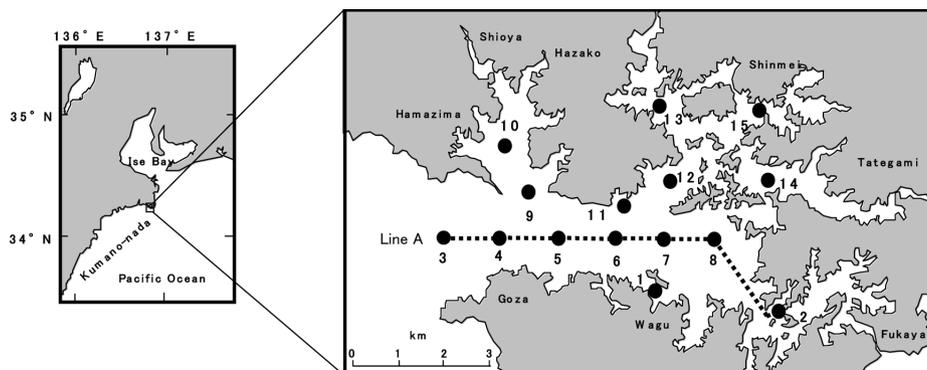


Figure 1. Location of sampling stations in Ago Bay.

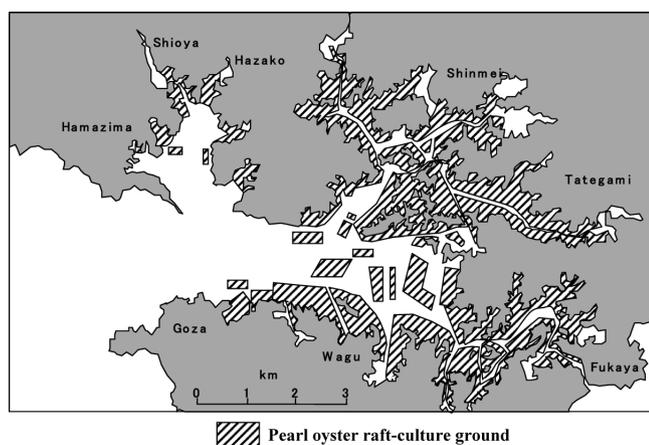


Figure 2. Map showing the approximate distribution of pearl farming grounds in Ago Bay. Shaded areas show the commercial pearl oyster raft-culture grounds.

を季節毎に調査し, 当湾の一次生産構造の特性を明らかにすることを目的とした. また同時にアコヤガイによる一次生産への潜在的な影響力も検討した.

材料および方法

英虞湾の調査は Fig. 1 および Table 1 に示した英虞湾全域に設けた 15 定点において, 2000 年 4 月 21~23 日 (春季), 同年 8 月 11~12 日 (夏季), 同年 11 月 1~3 日 (秋季), 2001 年 1 月 29~31 日 (冬季) の計 4 回実施した. 各観測点における各層採水に加えて, CTD OS2000 (OCEAN SENSOR 社製) による水温, 塩分の測定およびセッキ板を用いた透明度の測定が行われた. なお, 毎回の調査は原則として日中に行われた. 各層採水は, Van-Dorn 採水器 (容量 5 L) を用いて, 表層から底層までの 5 m 間隔で行った. 得られた試水の一部はクロロフィル *a* 濃度の測定に, また一部は栄養塩類の分析に供した. クロロフィル *a* 濃度の測定は, 4 つのサイズ (>20 μm , 10–20 μm , 2–10 μm , <2 μm) に分別して行った. すなわち, 試水 300 ml をメッシュサイズ

Table 1. Positions and depths of sampling stations.

Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Depth (m)
1	34°16.25	136°48.45	11.5
2	34°16.36	136°50.34	17.2
3	34°16.87	136°45.19	15.7
4	34°17.22	136°46.20	20.2
5	34°17.12	136°46.83	27.5
6	34°17.19	136°47.42	29.2
7	34°17.10	136°48.41	20.6
8	34°16.86	136°49.02	16.1
9	34°17.69	136°46.70	6.9
10	34°17.98	136°46.31	13.8
11	34°17.51	136°48.07	13.5
12	34°17.82	136°48.94	21.1
13	34°18.52	136°48.71	14
14	34°17.73	136°49.93	9.7
15	34°18.44	136°49.61	8.3

20 μm のプランクトンネット地で濾過し, その濾液を順次 10 μm のヌクレポフィルター, 2 μm のヌクレポフィルター, GF/F フィルターで濾過した. 濾過後直ちにフィルターをバイアル瓶に移し, DMF (N, N-dimethylformamide) を 7 ml 加えて密栓し, 色素を抽出した. 抽出液はただちに遮光し, 分析まで -20°C で保存した. クロロフィル *a* 濃度の測定は Parsons *et al.* (1984) に準じて, 蛍光法によりターナーデザイン社の蛍光光度計 (10R) を用いて行った. なお本研究では, 10–20 μm および 2–10 μm 画分のクロロフィル *a* 濃度を足し合わせて 2–20 μm のサイズ画分とし, クロロフィル *a* 濃度は 3 つのサイズカテゴリー (>20 μm , 2–20 μm , <2 μm) に別けて扱った. また, 全クロロフィル *a* 濃度は各サイズ別のクロロフィル *a* 濃度の合計から求めた. 栄養塩類分析用試水は, 採水後 GF/F フィルターで濾過し, -20°C で保存し持ち帰った. 後日, これらを解凍し, 亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$) ならびに硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) は, オートアナライザー (Technicon Auto Analyzer II) で測定し,

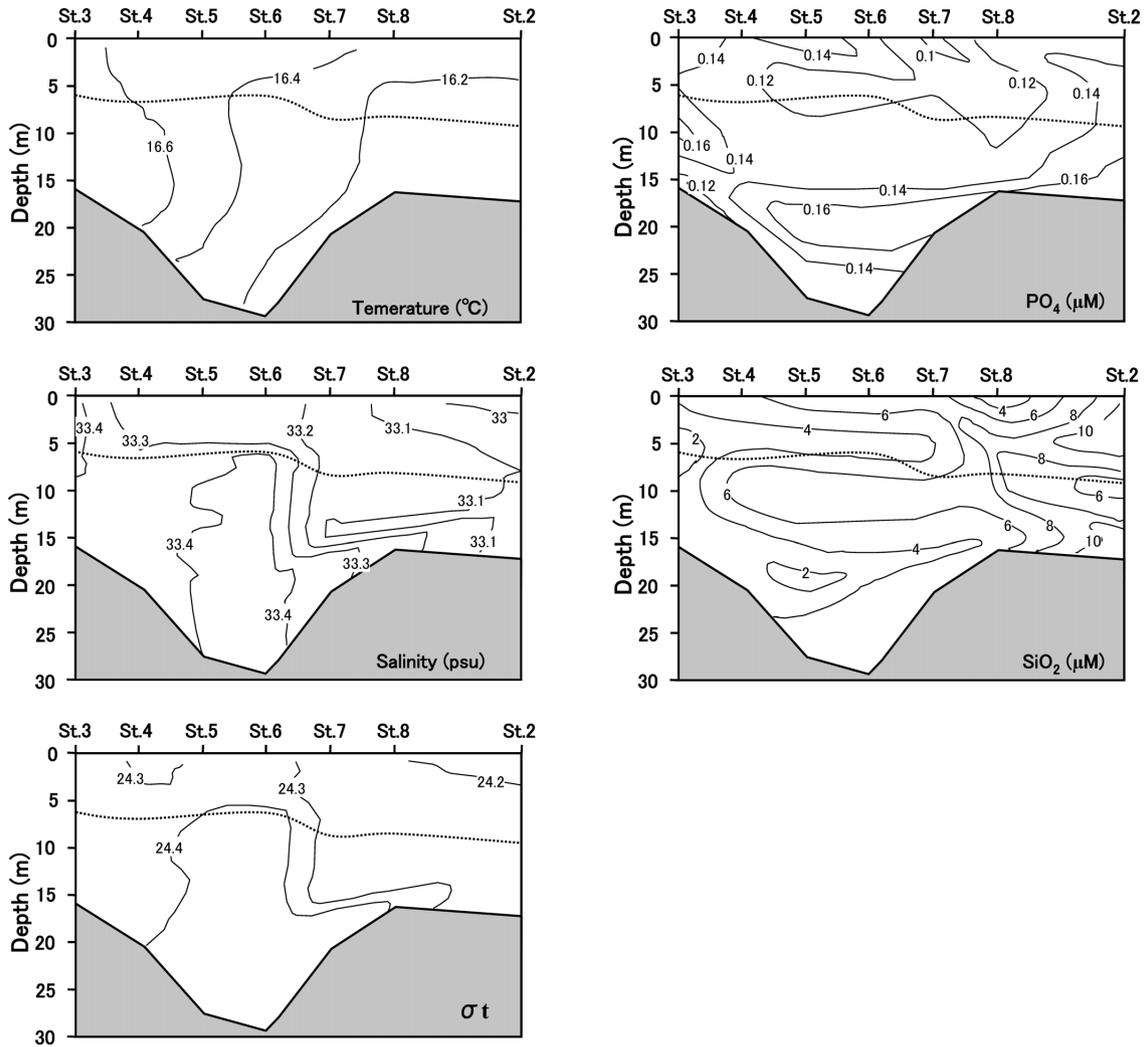


Figure 3. Vertical sections of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (psu), σ_t and nutrients (μM) in the Ago Bay along the Line A on 21–23 April in 2000. Broken lines denote the transparency.

アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$), リン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) およびケイ酸態ケイ素 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) は Parson *et al.* (1984) に基づいて測定した。ただし、2000年4月21~23日の調査においては $\text{NO}_2\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ の測定は行なわなかった。

結果

海洋構造と栄養塩環境

英虞湾の湾口から湾奥にかけてのライン A (Fig. 1 の点線) に沿った各季節の水温 ($^{\circ}\text{C}$), 塩分 (ppt), シグマ t (σ_t), 透明度および栄養塩の分布を Figs. 3~6 に示した。春季の水温および塩分には鉛直的な差はほとんどなく、混合期にあることが推測されたが、地域的にみて湾口部で高温・高塩分、湾奥部で低温・低塩分の傾向を示した (Fig. 3)。夏季になると、暖かい水が湾内の表面を覆い、表面から 10m 深の間で水温および塩分が急激に低下し躍層が形成され、

顕著な成層構造がみられた (Fig. 4)。秋季の湾内の水温は、春季と同様に地域的な変化はほとんどなく、鉛直的にもほぼ一様であった。一方、湾奥部の表層は河川水の流入の影響と思われる低塩分水で覆われていた。こうした状況を反映して、湾奥部では表層に緩やかな密度躍層がみられたが、湾口部から湾中部では混合が活発に起こっていることが観察された (Fig. 5)。冬季になると湾奥浅海域の水温は急激に低下し活発な鉛直混合が起こっていることが推測された (Fig. 6)。また、この時期湾奥の Stn. 6 と Stn. 7 の間に弱いながらもフロントの形成が見られた。

各季節における透明度は、春季には、5.9~9.0m の範囲にあり、湾口から湾奥にいくに従って深くなる傾向にあった。夏季の透明度は 7.6~13.3m の範囲にあり、湾口で深く、湾奥部で浅くなる傾向にあった。秋季および冬季の透明度は、それぞれ 7.3~10.5m, 9.4~11.5m の範囲にあり、湾口

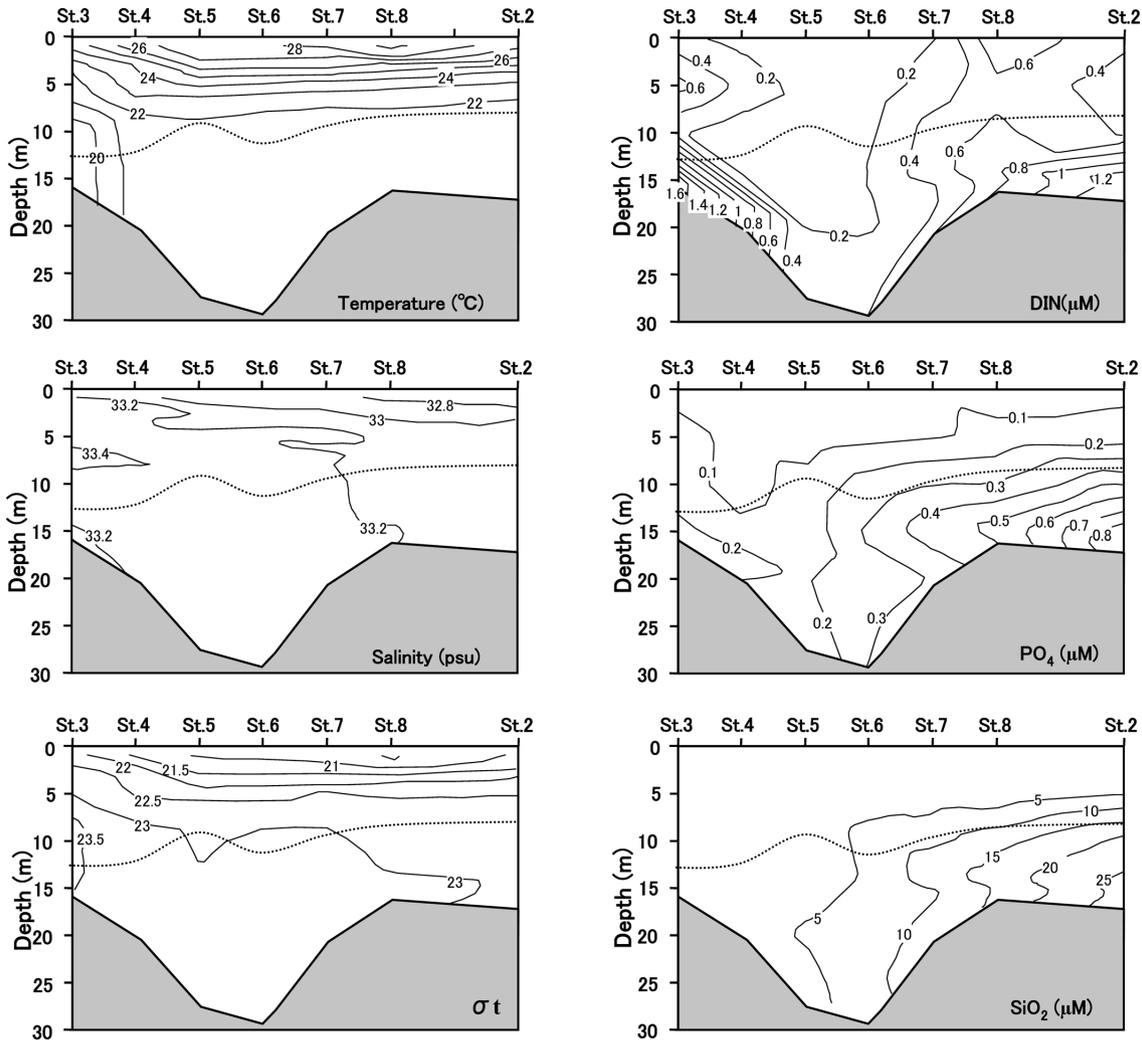


Figure 4. Vertical sections of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (psu), σ_t and nutrients (μM) in the Ago Bay along the Line A on 11–12 August in 2000. Broken lines denote the transparency.

の Stn. 3 で深くなる傾向があったが、それ以外の測点では明瞭な地域的な違いはみられなかった。また、透明度から経験的に求められる英虞湾の有光層の深さは、春季と秋季の湾央の一部をのぞいて、ほぼ湾内全域で周年にわたって水深より深かった。

栄養塩の分布をみると、春季における $\text{PO}_4\text{-P}$ は、湾口および湾奥で高く、湾中央部で低い傾向を示したが、その濃度は $0.2\ \mu\text{M}$ を越えることはなかった (Fig. 3)。一方、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は湾奥部で高く、湾口に行くに従って低くなる傾向を示した。夏季における溶存態無機窒素 ($\text{DIN: NO}_3 + \text{NO}_2 + \text{NH}_4$) の濃度は、湾口および湾奥の底層で $1\ \mu\text{M}$ を越す値 (最大: $1.6\ \mu\text{M}$) が見られたが、湾口から湾奥にかけての表層・中層では $0.5\ \mu\text{M}$ 以下であった (Fig. 4)。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は湾奥の底層で高くなる傾向を示したが、 $1\ \mu\text{M}$ をこえることはなかった。とくに、この時期の湾内の表層の $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は $0.1\ \mu\text{M}$ 以下であった。 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ もまた、湾奥の底層で

最も高く $25\ \mu\text{M}$ 以上を示し、湾中央から湾口にかけて減少し $5\ \mu\text{M}$ 以下となった。秋季になると、上下層の混合によって底層からもたらされたと考えられる $2\ \mu\text{M}$ 以上の濃度の DIN が湾全域の表層に見られた。とりわけ、湾奥の表層で $5\ \mu\text{M}$ 以上の値を示した (Fig. 5)。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度もまた、地域的にも鉛直的にもほとんど変化はなく、ほぼ一様で、 $0.25\sim 0.44\ \mu\text{M}$ の範囲にあった。この時期の $\text{SiO}_2\text{-Si}$ もまた、 DIN と同様、湾奥の表層で高く ($16\ \mu\text{M}$ 以上)、湾奥から湾口に行くに従って濃度は減少する傾向にあった。冬季の DIN の濃度は、鉛直的にはほぼ一様な値を示したが、その濃度は湾央域で高く ($3\sim 5\ \mu\text{M}$)、湾口部および湾奥部で低い ($1\sim 3\ \mu\text{M}$) 傾向にあった (Fig. 6)。 $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の分布は秋季とほぼ似た分布パターンを示した。すなわち、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は、地域的にも鉛直的にもほとんど変化はなく $0.15\sim 0.30\ \mu\text{M}$ の範囲にあった。 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は湾奥部の表層で高く ($12\ \mu\text{M}$ 以上)、湾口部で低い ($9\ \mu\text{M}$ 以下) 傾向

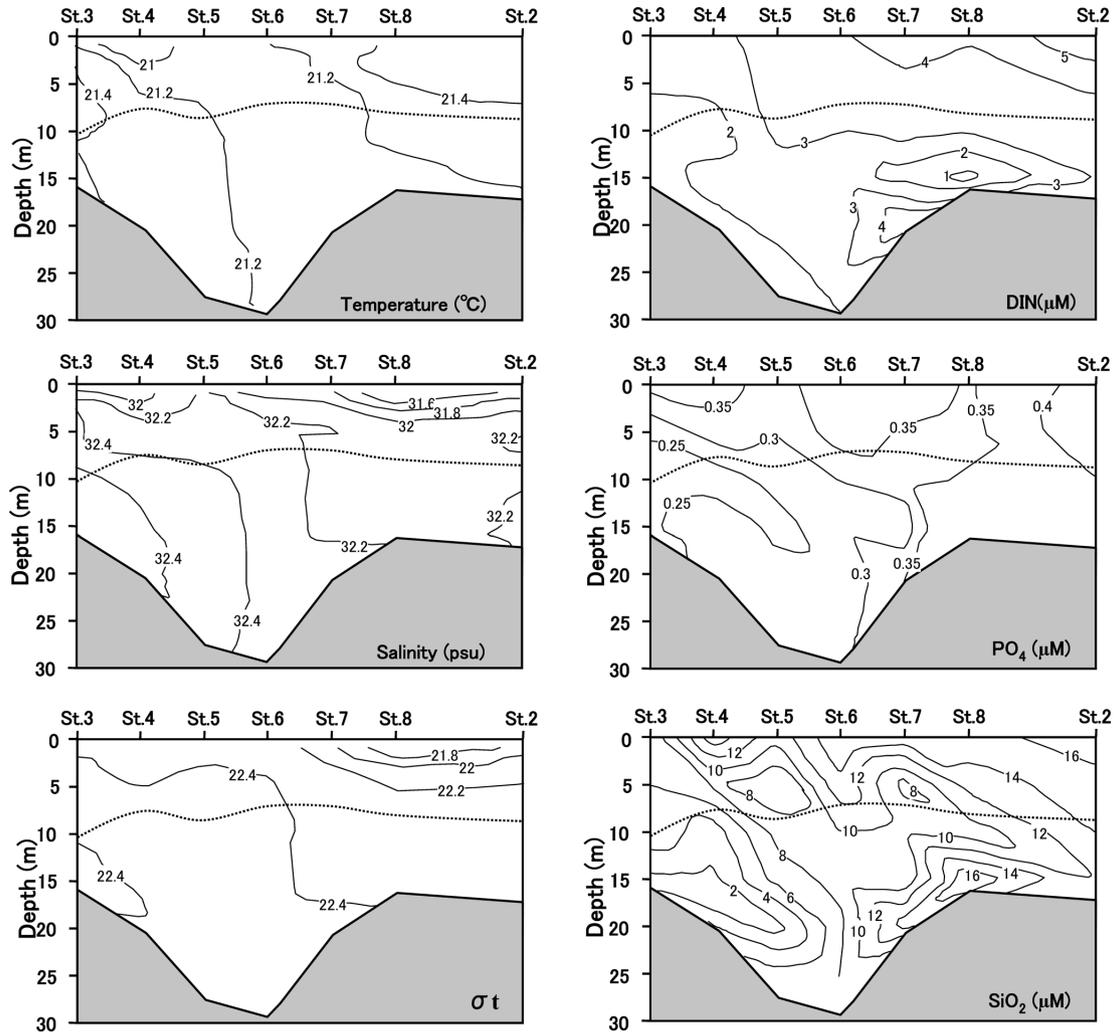


Figure 5. Vertical sections of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity (psu), σ_t and nutrients (μM) in the Ago Bay along the Line A on 1–3 November in 2000. Broken lines denote the transparency.

にあった。

Fig. 7 に春季を除く 3 季節における全観測点の DIN と $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度の関係を示した。夏季の湾内の DIN および $\text{PO}_4\text{-P}$ は、それぞれ $2\ \mu\text{M}$, $1\ \mu\text{M}$ を越えることはなく、N/P 比も、湾奥の表層付近 (10 以上) を除くと、全般的に 4 以下の極めて低い値であった。秋季から冬季にかけて、湾内の海水の混合が活発になるとともに DIN の濃度が増加し、N/P 比も高くなった。とくに冬季には湾口部および湾奥の中・底層を除いて、湾全域で N/P 比は 16 以上を示した。

サイズ別クロロフィル a 濃度の鉛直分布

Figs. 8~11 にライン A に沿った各季節におけるサイズ別 ($>20\ \mu\text{m}$, $2\sim 20\ \mu\text{m}$, $<2\ \mu\text{m}$) のクロロフィル a 濃度の分布を示した。春季の $>20\ \mu\text{m}$ 画分は湾口部の底層付近で最も高い値 ($3.5\ \text{mg m}^{-3}$) を示し、湾奥に行くに従って減少した (Fig. 8)。一方、 $2\sim 20\ \mu\text{m}$ 画分および $<2\ \mu\text{m}$ 画分は、それぞれ湾中央域の 5~10m 層 ($0.7\ \text{mg m}^{-3}$)、湾奥部の 10m 層

付近 ($0.9\ \text{mg m}^{-3}$) に極大が見られた。夏季、3つのサイズ画分のクロロフィル a 濃度は、いずれも湾奥部の水温躍層下の 10m 以深で極大が見られた ($>20\ \mu\text{m}$: $1.4\ \text{mg m}^{-3}$; $2\sim 20\ \mu\text{m}$: $4\ \text{mg m}^{-3}$; $<2\ \mu\text{m}$: $1.0\ \text{mg m}^{-3}$) (Fig. 9)。しかし、各画分のクロロフィル a 濃度は湾中央部から湾口部に行くに従って減少した。秋季の各画分のクロロフィル a 濃度は、この時期の海洋構造に対応して湾口から湾奥までほぼ均一な分布を示した。しかし、全般的に $>20\ \mu\text{m}$ 画分のクロロフィル a 濃度は低く ($0.3\ \text{mg m}^{-3}$ 以下)、相対的に全クロロフィル a 濃度に対する $2\sim 20\ \mu\text{m}$ 画分と $<2\ \mu\text{m}$ 画分の割合は高い傾向を示した (Fig. 10)。冬季における $>20\ \mu\text{m}$ 画分のクロロフィル a 濃度は湾口部で高く ($0.4\sim 0.6\ \text{mg m}^{-3}$)、湾奥部で低い ($0.3\ \text{mg m}^{-3}$ 以下) 傾向を示した (Fig. 11)。一方、 $2\sim 20\ \mu\text{m}$ 画分は湾奥部で高く ($0.6\ \text{mg m}^{-3}$ 以上)、 $<2\ \mu\text{m}$ 画分は湾口から湾中央部で高い ($0.6\sim 1.0\ \text{mg m}^{-3}$) 傾向を示した。

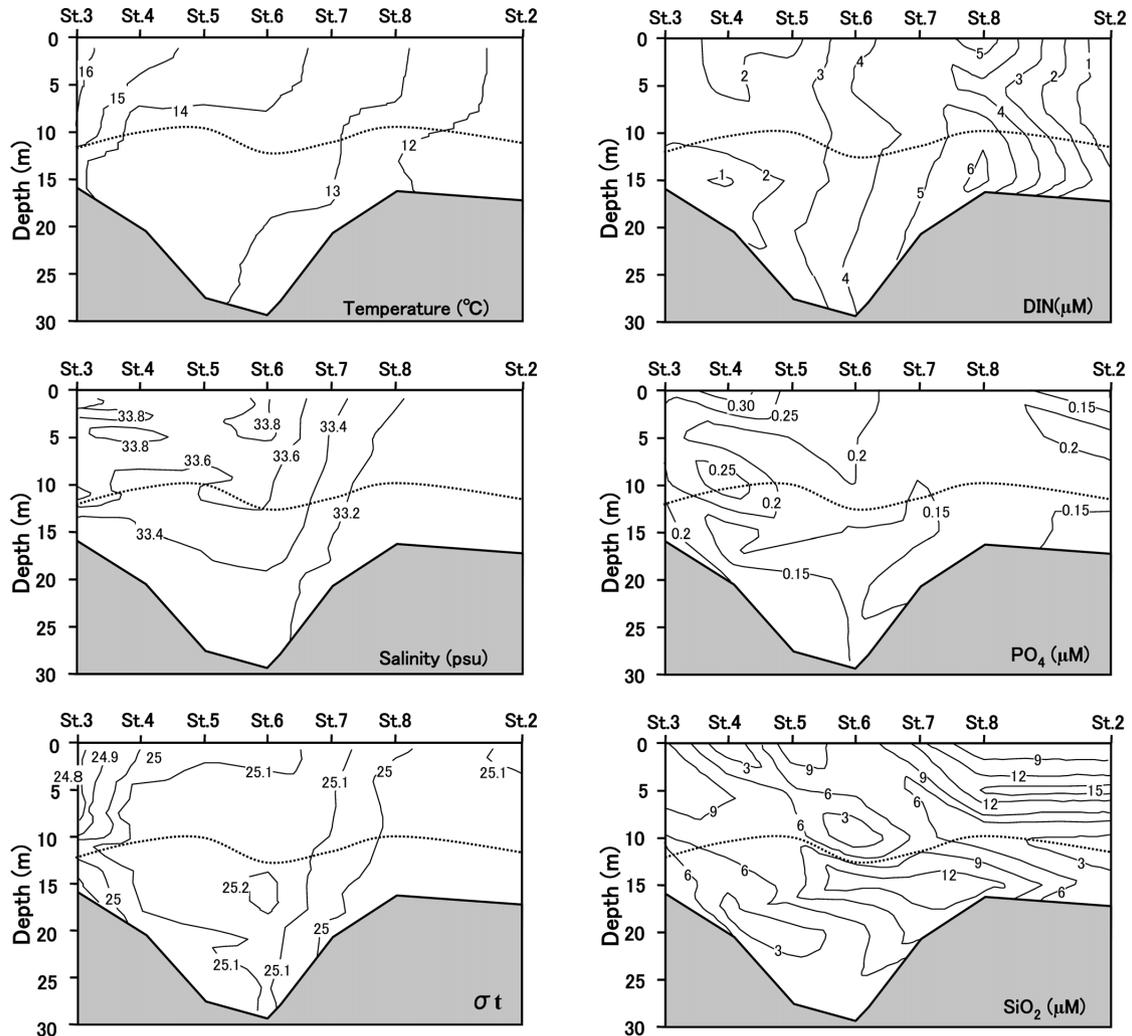


Figure 6. Vertical sections of temperature (°C), salinity (psu), σ_t and nutrients (μM) in the Ago Bay along the Line A on 29–31 January in 2001. Broken lines denote the transparency.

クロロフィル *a* 量の水平分布とサイズ組成の季節変化

Fig. 12 に各季節毎の英虞湾の各観測点における全画分クロロフィル *a* 積算平均濃度 (以下, 全クロロフィル *a* 量と呼ぶ) の分布とサイズ組成 ($>20 \mu\text{m}$, $2\sim 20 \mu\text{m}$, $<2 \mu\text{m}$) を示した. また, Table 2 に各季節における湾内の全クロロフィル *a* 量とサイズ組成別の平均値とその割合をまとめて示した. 春季における全クロロフィル *a* 量は, $0.8\sim 3.9 \text{ mg m}^{-3}$ (平均値 \pm SD: $1.62 \pm 0.88 \text{ mg m}^{-3}$) の範囲にあり, 湾口部の Stns. 3, 4 で高く ($2.9\sim 3.9 \text{ mg m}^{-3}$), 枝湾部を含む湾奥部で低い (1.7 mg m^{-3} 以下) 傾向を示した. この時期の湾口部周辺の高いクロロフィル *a* 量の 70% 以上が $>20 \mu\text{m}$ 画分で占められていた. 一方, 湾奥部では $2\sim 20 \mu\text{m}$ 画分および $<2 \mu\text{m}$ 画分の占める割合が高く, 両者の合計の平均的割合は 87% を占めた. とくに, 枝湾部の測点 (Stns. 1, 2, 13, 14 および 15) では $<2 \mu\text{m}$ 画分だけでも全体の 60% 以上を占めていた. 夏季の全クロロフィル *a* 量は $1.0\sim 5.8$

mg m^{-3} (平均値 \pm SD: $2.47 \pm 1.26 \text{ mg m}^{-3}$) の範囲にあり, その湾内分布は春季と逆の傾向が見られた. すなわち, 夏季の全クロロフィル *a* 量は湾口~湾中部で低く (2.5 mg m^{-3} 以下), 湾奥部で高い傾向を示し, とくに枝湾の Stns. 2 および 13 で 4.5 mg m^{-3} を越える値が見られた. この時期のサイズ組成は, ほぼ $2\sim 20 \mu\text{m}$ 画分と $<2 \mu\text{m}$ 画分の割合が高く, とくに高い濃度を示した Stns. 2 および 13 では全クロロフィル *a* 量の 70% 以上が $2\sim 20 \mu\text{m}$ 画分と $<2 \mu\text{m}$ 画分で占められていた. 秋季および冬季の全クロロフィル *a* 量は, それぞれ $1.0\sim 2.3 \text{ mg m}^{-3}$ (平均値 \pm SD: $1.46 \pm 0.36 \text{ mg m}^{-3}$), $0.9\sim 1.9 \text{ mg m}^{-3}$ (平均値 \pm SD: $1.43 \pm 0.28 \text{ mg m}^{-3}$) の範囲にあり, 両季節とも湾内全域でほぼ均一な分布を示した. 両時期とも全ての測点において $2\sim 20 \mu\text{m}$ 画分と $<2 \mu\text{m}$ 画分の割合が高く, 両者を合わせたクロロフィル *a* 量は全クロロフィル *a* 量の 65% を占めた.

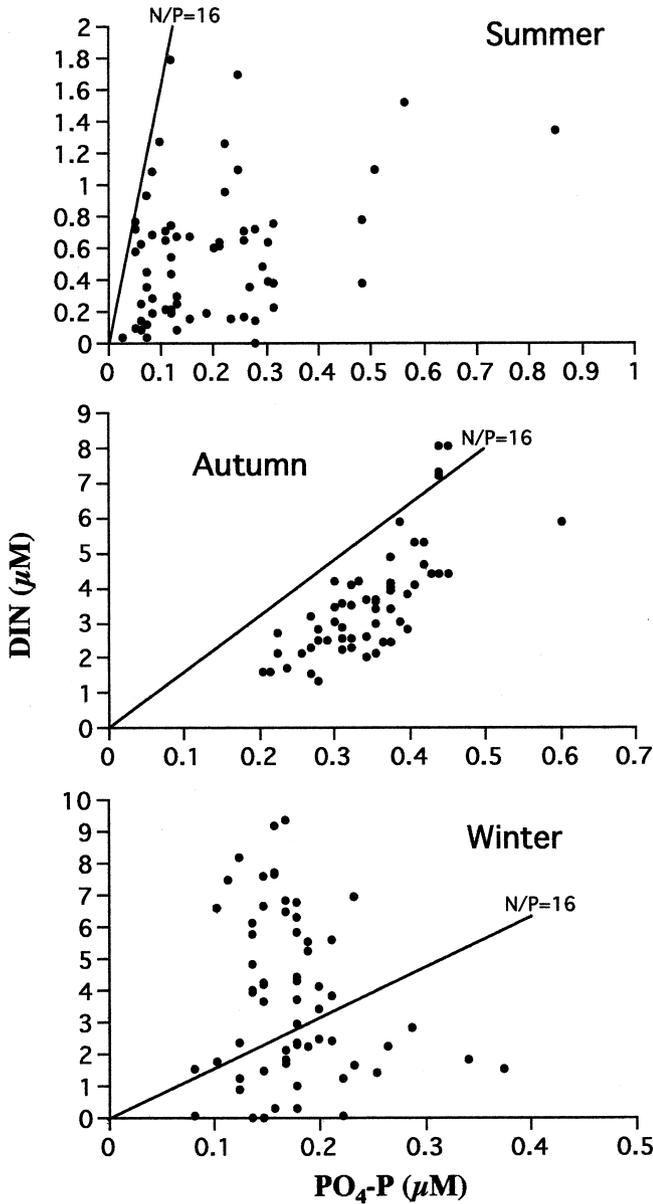


Figure 7. Relationship between DIN and PO₄-P concentrations for each season. Line of N/P=16 (Redfield ratio) is drawn for comparison to data.

考 察

英虞湾の海洋環境

大きな流入河川を持たない英虞湾は、季節や地域による塩分の差は小さい。したがって、湾内の海洋構造は、主に気温の変化に対応して変化する水温によって支配されていると考えてよい(上野, 1964)。湾口部周辺水域は隣接する熊野灘沿岸水の影響を受け(増田ほか, 2004)、夏季はそれほど高水温とならず冬季でも16°C以下に下がることがない。一方、枝湾を含む湾奥部の水温は水深が浅いため、湾口部に比べて気温の上昇・下降にともなって急速かつ大

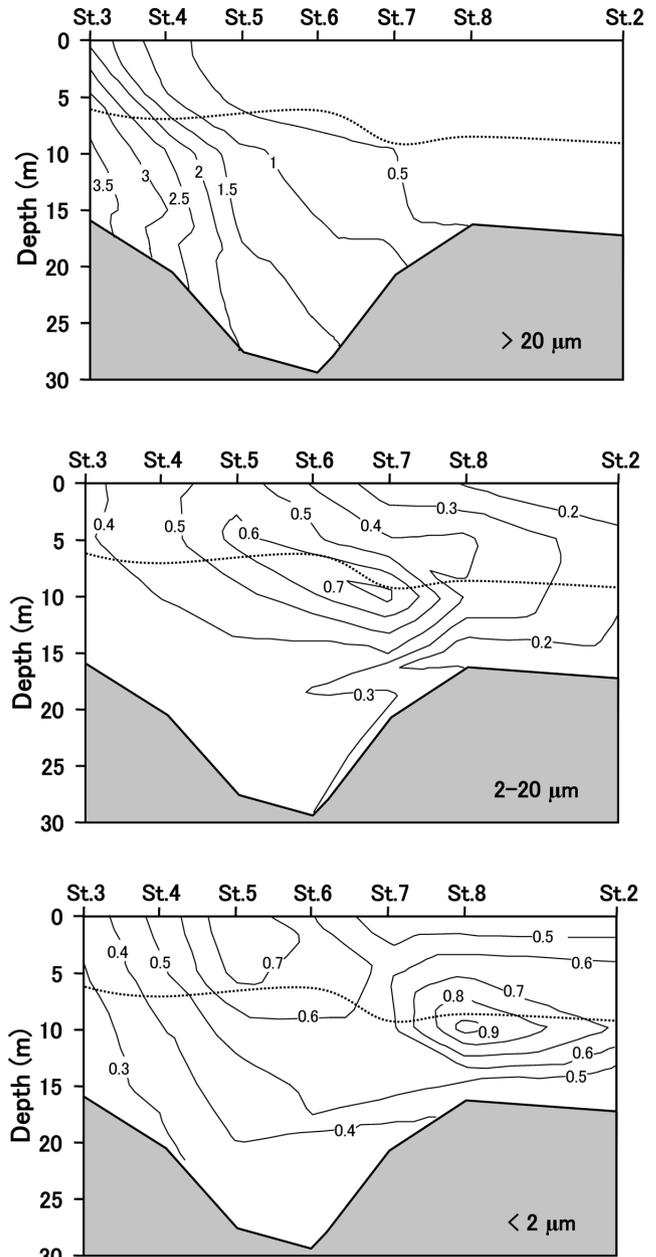


Figure 8. Vertical sections of the chlorophyll a concentrations of the >20 μm, 2-20 μm and <2 μm size fractions (mg m⁻³) in the Ago Bay along the Line A on 21-23 April in 2000. Broken lines denote the transparency.

きく変化する。こうした季節的な加熱・冷却による海水の密度差によって、夏季には顕著な成層化が起こり、表層と中・深層の鉛直的な二層構造を示す一方で、冬季には、湾口部、湾奥・枝湾浅海域の各所で海水が冷却され沈降し、それぞれ湾中央部の深部に流入し、フロントの形成がみられた(Fig. 5)。混合期における湾中央部でのフロントの形成は、英虞湾の湾口部と湾奥・枝湾部間の水平方向の海水の動きを妨げる要因の一つとなっている可能性がある。

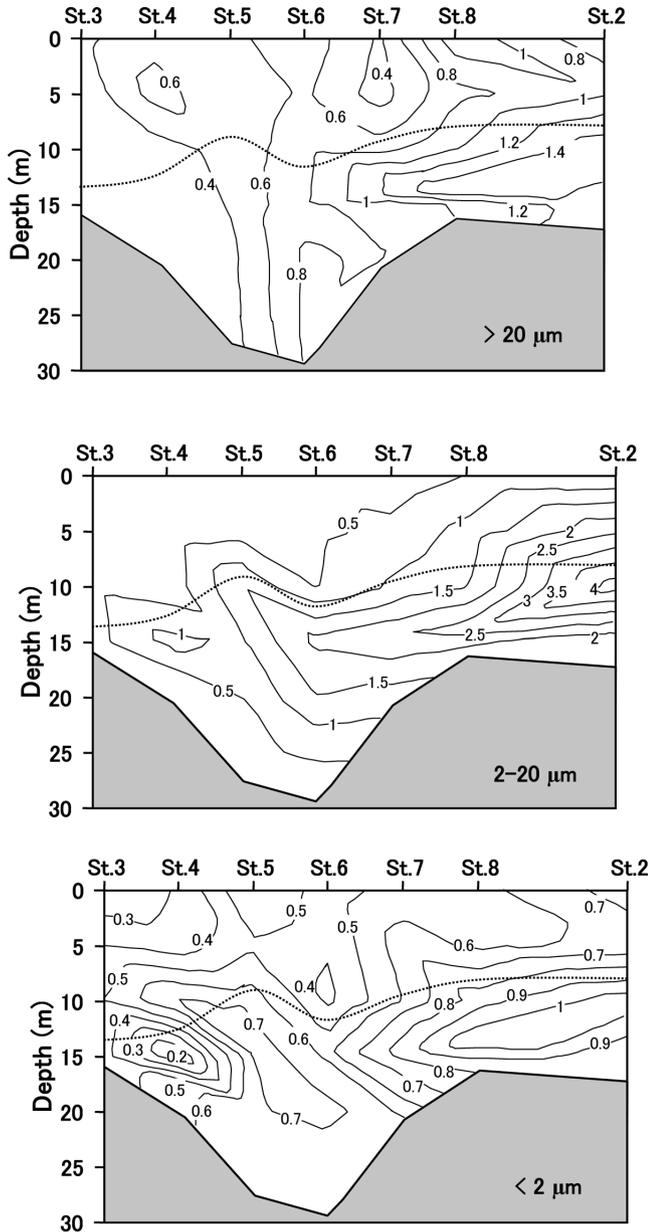


Figure 9. Vertical sections of the chlorophyll *a* concentrations of the $>20 \mu\text{m}$, $2-20 \mu\text{m}$ and $<2 \mu\text{m}$ size fractions (mg m^{-3}) in the Ago Bay along the Line A on 11–12 August in 2000. Broken lines denote the transparency.

英虞湾内の栄養塩の分布は、こうした海洋構造の季節変化に対応した分布を示した。すなわち、夏季の成層期、栄養塩類の分布は表層で低く、下層で高くなる傾向を示した。英虞湾では湾内の栄養塩は、主に底泥中の有機物の分解によって無機化された再生栄養塩によってもたらされる（上野・井上, 1961）。夏季の栄養塩類の上下層の濃度勾配は、成層構造の発達によって栄養塩の底層から表層への回帰が妨げられたために起こったものと考えられる。

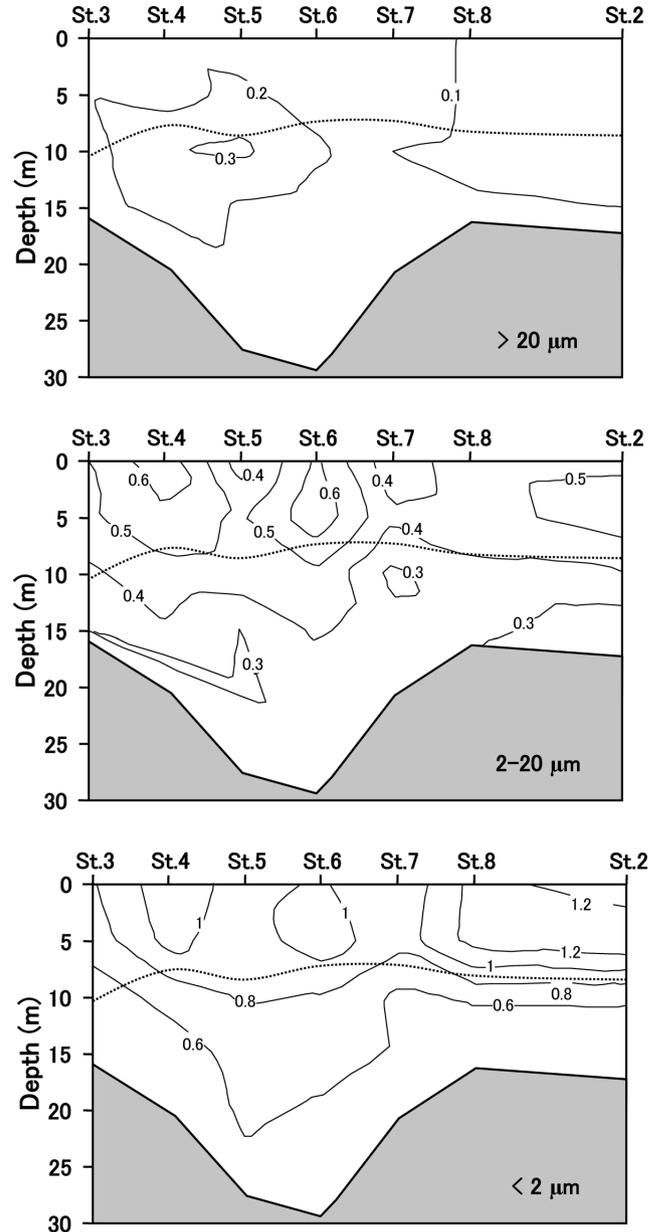


Figure 10. Vertical sections of the chlorophyll *a* concentrations of the $>20 \mu\text{m}$, $2-20 \mu\text{m}$ and $<2 \mu\text{m}$ size fractions (mg m^{-3}) in the Ago Bay along the Line A on 1–3 November in 2000. Broken lines denote the transparency.

秋から冬にかけての表層での栄養塩濃度の高まりは、鉛直混合が活発となるのにもなって、底層に蓄積されていた栄養塩が表層にもたらされたためと考えられた。しかし、湾奥表層に供給された栄養塩は、湾中央のフロント付近で急激に減少していることから、フロントを越えて湾口部まで輸送されることはないのかも知れない。

本研究で検出された夏季の英虞湾内の各観測点での DIN および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は、底層でもそれぞれ $2.0 \mu\text{M}$, $1.0 \mu\text{M}$

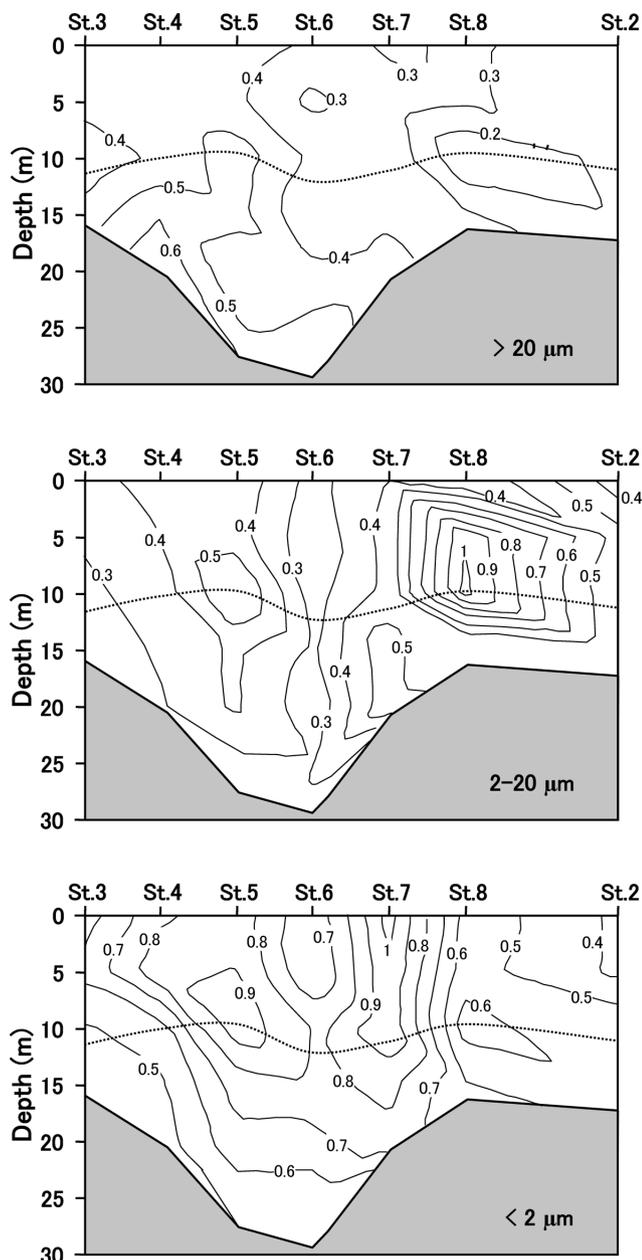


Figure 11. Vertical sections of the chlorophyll *a* concentrations of the $>20\ \mu\text{m}$, $2\text{--}20\ \mu\text{m}$ and $<2\ \mu\text{m}$ size fractions (mg m^{-3}) in the Ago Bay along the Line A on 29–31 January in 2001. Broken lines denote the transparency.

を越えることはなく (Fig. 7 参照), 他の沿岸域, 内湾域から報告されている同じ時期の値に比べて極めて低かった。例えば, 伊勢湾では夏季 DIN の平均濃度が $4\ \mu\text{M}$ 以下になることはなく, $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度もまた $0.5\ \mu\text{M}$ 以下になることはない (津田, 1980; 筧ほか, 2005)。また, 夏季の大阪湾の DIN および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の平均値は, それぞれ $7\ \mu\text{M}$, $0.6\ \mu\text{M}$ 以上の水準にある (林・柳, 2000)。さらに, 近年の東京湾では, DIN および $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は周年にわたって

高く, 夏季でもそれぞれ $30\ \mu\text{M}$, $1\ \mu\text{M}$ 以上にもなることが報告されている (野村, 1995; 1998)。増田他 (2004) もまた, 1982 年から 2002 年の 20 年間にわたる英虞湾内の栄養塩濃度のデータの解析から, 夏季の英虞湾は伊勢湾や東京湾などにくらべ貧栄養な環境にあることを報告している。英虞湾において窒素やリンの濃度が低いのは, 基本的には伊勢湾や東京湾, 大阪湾のように大きな河川がなく大都市に隣接していないため陸域からの栄養塩負荷が小さいことが大きな原因と考えられる。さらに, 隣接する熊野灘沿岸域は貧栄養な環境であるため (西村, 1984), 湾外水の湾内への流入は栄養塩の増加にほとんど寄与していないこともまた湾内の栄養濃度を低くしている原因の一つとなっているものと思われる。

クロロフィルa濃度とサイズ組成の分布特性

春季の全クロロフィルa量は, 湾口部周辺でのみ高く, 湾央・湾奥水域で低かった。熊野灘の沿岸域では, クロロフィルa濃度は4月に50m以浅で年間を通じて最も高くなることや (西村, 1996), 湾口部では, 内部潮汐によってしばしば隣接する熊野灘の沿岸水の影響を受けることがあること (杜多・阿, 1997) から考えて, 湾口での高いクロロフィルa濃度は湾外からもたらされたために起こった局地的な現象である可能性が高い。しかも, この時期の湾内の全域にわたってほぼ同じような低いレベルの栄養塩濃度にあって, 湾口を除く全域でナノ($2\text{--}20\ \mu\text{m}$) ピコ($<2\ \mu\text{m}$) サイズの画分が卓越していたにも関わらず, 湾口部周辺だけマイクロサイズ ($>20\ \mu\text{m}$) の画分が卓越していたことは, 高密度の大型植物プランクトンが湾外から湾内に流入してきた可能性を暗示している。

一般に, 春から夏にかけての急激な水温の上昇に伴った強い成層の形成が表層のブルームを促進するが, 盛夏の成層は表層への栄養塩の供給を妨げ, 植物プランクトン量を減少させる (McCarthy *et al.* 1977)。しかし, 英虞湾では盛夏の成層期にクロロフィルa濃度の顕著な増加が観察された。この傾向は湾奥でとくに顕著であった。この時期の湾奥部で観察された高いクロロフィルa濃度は, 表層ではなく水温躍層下の中・底層で観察され, 栄養塩濃度の分布と一致していた。おそらく, 表層では鉛直混合の停止に伴った栄養塩の枯渇によって植物プランクトンの増殖が妨げられていたのに対して, 成層した湾奥浅海部の下層では底泥から溶出してくる栄養塩の供給 (上野・井上, 1961) と生育に十分な光環境によって, 植物プランクトンの増殖が促進されたものと考えられる。

春季の湾口部におけるクロロフィルaのサイズ組成が $20\ \mu\text{m}$ 以上の大型植物プランクトンからなっていたのと異なり, 夏季の英虞湾奥部の中・底層では, $20\ \mu\text{m}$ 以下のナノ・ピコサイズの植物プランクトンが卓越していた。植物プランクトンのサイズは, 栄養塩の濃度に依存するといわれている (Legendre and Le Fèvre, 1989)。実際, Yamamoto

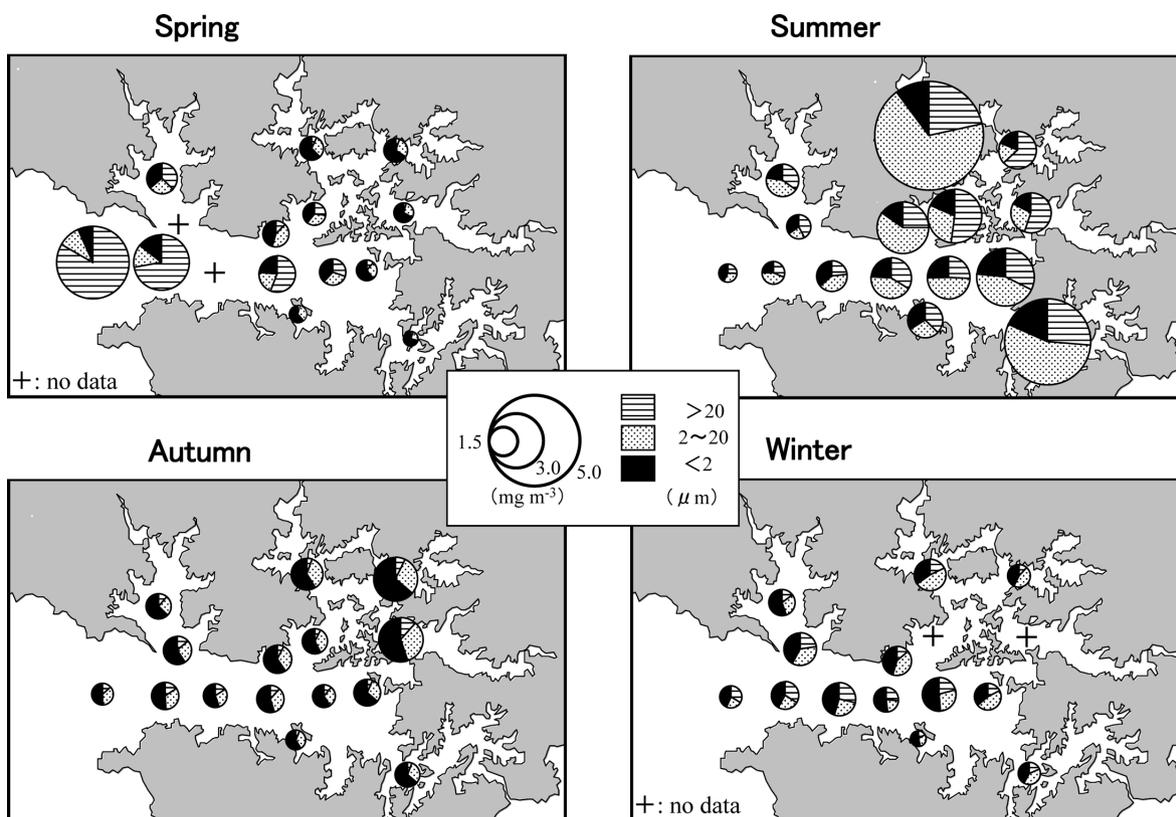


Figure 12. Distribution of mean concentration and composition of size-fractionated chlorophyll *a* (>20 μm , 2–20 μm , <2 μm) (mg m^{-3}) in Ago Bay in spring, summer, autumn and winter.

Table 2. Comparison of mean chlorophyll *a* concentration in each size fraction (mean \pm SD mg m^{-3}) and its percent contribution to total chlorophyll *a* concentration (%) among four investigation periods in Ago Bay.

Period	Size fraction			Total
	>20 μm	2–20 μm	<2 μm	
Spring (n=13)				
Mean concentration (mg m^{-3})	0.66 \pm 0.98	0.38 \pm 0.10	0.58 \pm 0.13	1.62 \pm 0.88
Contribution (%)	40.7	23.5	35.8	
Summer (n=15)				
Mean concentration (mg m^{-3})	0.83 \pm 0.38	1.10 \pm 0.97	0.53 \pm 0.15	2.47 \pm 1.26
Contribution (%)	33.7	44.7	21.6	
Autumn (n=15)				
Mean concentration (mg m^{-3})	0.15 \pm 0.06	0.46 \pm 0.12	0.86 \pm 0.23	1.46 \pm 0.36
Contribution (%)	10.2	31.4	58.5	
Winter (n=13)				
Mean concentration (mg m^{-3})	0.31 \pm 0.12	0.48 \pm 0.17	0.64 \pm 0.14	1.43 \pm 0.28
Contribution (%)	21.7	33.5	44.8	

n indicate the number of data for calculating mean \pm SD.

(1996) は、栄養塩の供給量が多いところでは、大型の植物プランクトンが卓越し、少ないところでは相対的に小型植物プランクトンが卓越することを報告している。先に示したように、夏季の英虞湾は、貧栄養な環境にあり、底層でも DIN および $PO_4\text{-P}$ の濃度はそれぞれ $2\mu\text{M}$, $1\mu\text{M}$ を越えることはなかった。また、この時期の N/P 比はいわゆるレッドフィールド比の 16 (Redfield *et al.*, 1963) を大きく下回っており、その傾向は底層で顕著であった。少なくとも夏季の英虞湾では窒素が大型の植物プランクトンの増殖の制限要因として働いており、そのために小型植物プランクトンが卓越する原因となっているのかも知れない。増田ほか (2004) もまた、夏季の英虞湾では、とくに底層で DIN 濃度が極めて低いことを見い出しており、これが夏季の英虞湾の植物プランクトンの増殖の制限要因となっている可能性を指摘している。

本研究では、植物プランクトンの種組成についての観察はおこなわれていない。しかし、本調査時期とほぼ同じ時期に三重県水産技術センター (2001) が行った植物プランクトン種組成の調査結果によれば、夏季湾奥の中・底層では、珪藻類の *Chaetoceros* spp., や *Skeletonema costatum* や渦鞭毛藻類の *Hetercapsa circularisquarma*, *Karenia* (= *Gymnodinium*) *mikimotoi*, *Prorocentrum dentatum* 等が卓越する。これらの種のうち、*Skeletonema costatum* はより弱光下でも増殖が可能であることが知られている (Yoder, 1979; Langdon, 1987)。さらに、本種は低栄養塩濃度環境でも増殖が可能であることが知られており (Epply *et al.*, 1969; 樽谷・山本, 1994)、上述の中・底層で卓越して出現する植物プランクトン群集の多くは弱い光強度でも生育でき、かつ貧栄養環境でも生育が可能な種であると考えられる。しかし、これらの種の多くは、しばしば長い群体を作り $20\mu\text{m}$ 以上となる。たとえば、*S. costatum* では、その細胞幅は数 μm 以下であるが、数十 μm 以上の長い鎖状の群体をつくること知られており、孔径 $20\mu\text{m}$ のフィルターに捕捉されている可能性がある。したがって、本研究において中・底層でみられた $20\mu\text{m}$ 以下の画分のクロロフィル a 濃度は、もっと別のナノ・ピコサイズの植物プランクトンのものである可能性も否定できない。夏季の中・底層で卓越するナノ・ピコサイズの植物プランクトン組成と海洋環境との関係関係については今後さらなる調査が必要である。

秋季から冬季にかけて湾内のクロロフィル a 濃度は急激に減少した。この時期、鉛直混合によって栄養塩は表層に供給され、植物プランクトンの増殖にとって栄養塩は制限要因となっていないことが示唆される。したがって、この時期の植物プランクトンの減少は、日射量の減少と水温の低下による影響が大きいものと考えられる。この傾向はマイクロサイズの画分で顕著であった。しかし、ナノサイズやピコサイズの画分のクロロフィル a 濃度は、依然として高い値を保っており、これらの植物プランクトンの増殖に

とって、冬季の日射量の減少や水温の低下はマイクロサイズの画分に比べてそれほど決定的な制限要因となっていないのかも知れない。

英虞湾における一次生産構造とアコヤガイの相互関係

英虞湾は湾奥水域を中心に真珠養殖が盛んに行われている。ここでは、英虞湾の植物プランクトンの最大の消費者であるアコヤガイが、卓越して出現するナノ・ピコサイズの植物プランクトンを利用可能であるか否か、またその一次生産者に対するアコヤガイの潜在的な摂食・除去の影響について検討してみることにする。

アコヤガイは、広く有機懸濁粒子を利用する懸濁物食者であり (沼口, 1996)、*Chaetoceros* 属、*Skeletonema costatum*, *Nitzschia* 属、*Thalassiosira* 属などの比較的小型の珪藻類を主要な餌生物とする (豊島ほか, 1958; Chang *et al.*, 1988) のみならず、二枚貝の浮遊幼生やカイアシ類などの動物プランクトンも摂取すること (太田, 1959) が知られている。桑谷 (1965) によれば、飼育条件下で殻高 $4.5\sim 5.5\text{cm}$ のアコヤガイに炭素粒子やプラスチック粒子を与えてその摂取の様子と消化の過程を観察した結果、アコヤガイの消化盲囊細管 (胃腔内) に取り込まれる炭素粒子は $17.5\mu\text{m}$ 以下で、粒径が小さい程その摂取率は高くなる傾向を示した。沢野 (1950) もまたアコヤガイの胃中の餌料は $10\mu\text{m}$ 以下であることを報告しており、アコヤガイはその大きな体サイズの割には、微細な粒子を取り込むことが可能であるらしい。

アコヤガイの食物は、その環境水が外套膜の先端褶の開閉によって外套腔に入って鰓を通過するとき、繊毛によって捕らえられ、口に運ばれたのち、食道を通過して胃に送り込まれる (辻井, 1965)。口に運ばれる食物のサイズは鰓糸と鰓糸の間隔 (鰓窓) の幅に依存しており、鰓窓より大きい食物は鰓糸の繊毛で運ぶことができずに外套腔に落ちて外套膜内面に積もり、外套膜内面の粘液腺細胞から分泌される粘液と上皮細胞の繊毛などによって後方の出水孔付近に運ばれ、最終的に偽糞として体外に排出される (秋山ほか, 1999)。したがって、胃中から見い出される餌のサイズは、鰓での捕捉効率が最も良い小型のサイズで構成されることになる (秋山ほか, 1999)。すなわち、胃腔内に取り込まれた餌のサイズは、必ずしも外套腔にとりこまれた全ての餌のサイズを反映しているわけではない (秋山ほか, 1999)。このことはまた、胃中から見い出される餌のサイズは、必ずしも環境中の粒子サイズを反映しているわけではないことを意味する。少なくとも、アコヤガイによって環境中から外套腔に取り込まれる餌生物のサイズは、数 μm から数百 μm と幅広いことが知られており (太田, 1959; 辻井, 1965; 沼口, 1996)、アコヤガイはむしろ環境中からあらゆるサイズの粒子を捕捉・除去する能力がある生物と考えたほうがよさそうである。

アコヤガイが幅広いサイズの粒子を捕捉する能力がある

ことは、数 μm 以下の微小動物プランクトンをも同時に捕食可能であることを意味する。微小動物プランクトンは、ピコ・ナノサイズの植物プランクトンの重要な捕食者 (e.g. Stoecker and Capuzzo, 1990; 神山, 1999) であり、彼等もまたアコヤガイの摂餌活動によって、夏季の英虞湾から除去されているものと考えられる。このことは、アコヤガイの摂餌活動は、夏季の英虞湾内の小型植物プランクトンの捕食者を除去し、間接的に小型植物プランクトンの増加を促す要因としても働いている可能性を示唆するものであろう。こうしたいわゆるアコヤガイによるトップダウン・コントロール (e.g. Brooks and Dobson, 1965) の可能性についてはさらなる調査が必要であろう。

近年の英虞湾におけるアコヤガイの養殖量は、およそ 5000 万個体程度と推定される (中西ほか, 2001)。アコヤガイの摂餌活動は水温 $22\sim 28^{\circ}\text{C}$ で最も活発になり、このときのアコヤガイ成貝 1 個体の 1 日当たりの濾水量は 250 l \sim 300 l にも達する (沼口, 1994)。したがって、平均水温が 22°C 以上となる 7 月 \sim 10 月 (三重県水産技術センター, 2001) の湾内におけるアコヤガイ全個体群の 1 日当たりの摂餌量は、この時期の平均クロロフィル *a* 濃度を 2.5 mg m^{-3} とすれば、およそ $3.13\sim 3.75\times 10^7\text{ mg chl.}a$ と見積もられる。一方、湾内の養殖筏の設置面積 (養殖漁場漁業権面積) は、湾奥 \sim 枝湾域を中心にほぼ $1\times 10^7\text{ m}^2$ を占める (Fig. 2 参照) (三重県農林水産部漁政課, 1998)。また、アコヤガイの養殖層を表面から 5 m 深とし、湾内の平均クロロフィル *a* 濃度を 2.5 mg m^{-3} とすれば、アコヤガイ養殖筏周辺の植物プランクトン現存量はおよそ $12.5\times 10^7\text{ mg chl.}a$ と見積もられる。したがって、養殖漁場周辺において、海水の交換が全くないと仮定すれば、夏期間 1 日当たりアコヤガイによって消費される植物プランクトン量はその現存量のおよそ 25 \sim 30% と見積もられ、養殖漁場周辺のアコヤガイによる摂食圧は決して小さくはないことが想像される。関 (1972) によれば、夏季、養殖漁場のクロロフィル *a* 濃度が 3.0 mg m^{-3} 以下ではアコヤガイの成長が阻害されことを報告している。また、彼はクロロフィル *a* 濃度が 1.0 mg m^{-3} 以下になると肉重量の維持が不可能となり、衰弱し斃死率が高くなることを見出ししている。このことから、夏季の湾奥 \sim 枝湾域の養殖漁場の広い範囲でアコヤガイの正常な成長を維持するだけの餌が確保できていない可能性があることが示唆される。

まとめ

英虞湾では年間を通して栄養塩濃度が低く、 $20\ \mu\text{m}$ 以下のナノ・ピコサイズの植物プランクトンが卓越する傾向にあった。アコヤガイはこうした小型サイズの植物プランクトンを摂食することができることから、英虞湾はアコヤガイ養殖にとってきわめて好適な餌環境を提供しているものと考えられた。しかし、夏季小型サイズの植物プランク

ンが卓越する英虞湾では、大型の植物プランクトンが優占する海域のように植物プランクトンの現存量の大きな増加は期待できない (Raimbault *et al.*, 1988)。したがって、アコヤガイの摂餌活動がもっとも高くなる夏期間、湾奥 \sim 枝湾域の水深の浅い養殖密度の高い水域では十分な餌が供給されていない可能性があることが示唆された。英虞湾ではこうした餌の供給不足がアコヤガイの活力の低下や、感染症などの病気の間接的な原因の一つとなっている可能性が示唆される。

本研究では、環境とクロロフィルさらにアコヤガイとの関係をマクロな観点からその特徴を捉えようと試みた。季節毎に調査を行ったとはいえ、それぞれ一時期の植物プランクトンサイズ組成の分布をとらえただけで、必ずしも英虞湾の特徴を捉えていない可能性も否定できない。もとよりこうした調査は数年にわたる継続的な調査が必要であり、今後も継続してデータの蓄積を行い、アコヤガイの餌料環境としての英虞湾の一次生産構造の特徴についてさらに解析をしていく必要がある。

謝 辞

本研究は三重大学附属紀伊・黒潮生命地域フィールドサイエンスセンター附帯施設水産実験所を利用して行われた。同水産実験所の木村清志博士および中村弘技官 (当時) には現場での観測および実験室での実験に際し、多大なるご協力をいただいた。記して感謝の意を表する次第である。また、アコヤガイの摂餌生態について有益な助言とさまざまな教示をいただいた三重大学大学院生物資源学研究所岩城俊昭博士に厚くお礼を申し上げる。また、英虞湾におけるアコヤガイ養殖筏の配置図は三重県農水工部水産室より提供していただいた。記して謝意を表する次第である。

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。
- 秋山信彦・伊藤 文・林 繁一・小笠原義光 (1999) アコヤガイ稚貝が捕捉できる粒子の大きさ。水産増殖, **47**, 531-537。
- Brooks, J. L. and S. I. Dobson, (1965) Predation, body size, and composition of plankton. *Science*, **150**, 28-35。
- Chang, M., J. Hong and H. Huh (1988) Environmental conditions in the pearl oyster culture grounds and food organisms of *Pinctata fuscata-martensii* (Dunker) (Bivalvia, Pterioidea). *Ocean Research*, **10**, 67-77。
- Epply, R. W., Rogers, J. N. and McCarthy J. J. (1969) Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, **14**, 912-920。
- 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。
- 筧 茂穂・藤原建紀・山田浩且 (2005) 伊勢湾における栄養塩現存量と収支の季節変化。海の研究, **14**, 527-540。
- 神山孝史 (1999) プランクトン食物連鎖における繊毛虫の地位と役割。日本プランクトン学会報, **46**, 67-69。
- 桑谷幸正 (1965) 炭素粒子投与によるアコヤガイの摂餌機構の解明。日本誌, **31**, 789-798。

- Langdon, C. (1987) On the causes of interspecific differences in the growth-irradiance relationship for phytoplankton. Part I. A comparative study of the growth-irradiance relationship of three marine phytoplankton species: *Skeletonema costatum*, *Olithodiscus luteus* and *Gonyaulax tamaransis*. J. Plankton Res., **9**, 459–482.
- Legendre, L. and J. Le Fèvre (1989) Hydrodynamical singularities as controls of recycled versus export production in oceans. In: productivity of the Ocean: Present and Pasts, eds. W.H. Berger et al., John Wiley & Sons, 49–63.
- McCarthy, J.J., Taylor, W.R. and Taft, J.L. (1977) Nitrogenous nutrition of the phytoplankton in the Chesapeake Bay. I. Nutrient availability and phytoplankton preferences. Limnol. Oceanogr., **22**, 996–1011.
- 三重県農林水産部漁政課 (1998) 三重県における真珠、真珠貝養殖の概況。三重県, pp. 43.
- 三重県水産技術センター (2001) 英虞湾汚染対策調査報告。英虞湾汚染対策協議会, pp. 28.
- 杜多 哲・阿保勝之 (1997) 内部潮汐の sill 越えによる英虞湾への湾外低温水の侵入。海岸工学論文集, **44**, 1162–1170.
- 西村昭史 (1984) 水質からみた熊野灘の海洋構造。三重浜島水試年報, 昭和57年度, 67–76.
- 西村昭史 (1996) 熊野灘におけるクロロフィルの鉛直分布。三重県水技研報, **6**, 7–25.
- 野村英明 (1995) 東京湾における水域環境構成要素の経年変化。La mer, **33**, 107–118.
- 野村英明 (1998) 1900年代における東京湾の赤潮と植物プランクトン群集の変遷。海の研究, **7**, 159–178.
- 沼口勝之 (1994) アコヤガイのろ水率におよぼす水温の影響。水産増殖, **42**, 1–6.
- 沼口勝之 (1996) アコヤガイの餌料環境と摂餌生態。中央水研報, **8**, 123–138.
- 増田 健・山形陽一・畑 直亜 (2004) 英虞湾の水質環境の特徴および長期変動。三重県科技セ水研報, **11**, 23–32.
- 中西克之・増田 健・畑 直亜・山形陽一 (2001) 英虞湾における底質汚染の現状と近年の進行状況。三重県科技セ水研報, **10**, 71–77.
- 太田 繁 (1959) アコヤガイの食性に関する研究 V. アコヤガイに捕食された夏期出現する浮遊仔貝 (二枚貝) の数並びにその大きさについて。国立真珠研報, **5**, 443–449.
- 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.
- Raimbault, P., M. Rodiere, and I. Taupier-Letage (1988) Size fraction of phytoplankton in the Ligurian Sea and the Algeria Basin (Mediterranean Sea): size distribution versus total concentration. Marine Microbial Food Webs, **3**, 1–7.
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards (1963) The influence of organisms on the composition of sea-water. In: The Sea ed. M. N. Hill, vol. 2, Inter Science, New York, 26–77.
- 沢野英四郎 (1950) 真珠貝の地中養殖法の研究。水産研究会報, **3**, 48–57.
- 関 政夫 (1972) 養殖環境におけるアコヤガイ, *Pinctada fucata* の成長および真珠品質に影響を及ぼす自然要因に関する研究。三重県水産試験場報告, **1**, 32–149.
- Stoecker, D.K. and J.M. Capuzzo (1990) Predation on protozoa: its importance to zooplankton. J. Plankton Res., **12**, 891–908.
- 樽谷賢治・山本民次 (1994) 広島湾産 *Skeletonema costatum* のリン酸塩取り込みおよび増殖の動力学。広島大学生物生産学部紀要, **33**, 59–64.
- 豊島友光・谷口忠敬・入江春彦・銭谷武平 (1958) アコヤガイ (*Pinctada martensii* (DUNKER)) の成長度と環境条件について。長崎大学研報, **6**, 97–105.
- 津田平蔵 (1980) 伊勢湾の水質について I. 三重県伊勢湾水試年報, 89–112.
- 辻井 禎 (1965) 捕食と消化機構。「真珠養殖全書」(真珠養殖全書編集委員会編), 全国真珠養殖漁業協同組合連合会編, 東京, pp. 28–42.
- 上野福三 (1964) 真珠漁場における餌料基礎生産と漁場の海洋構造について。II. 海水並びに底泥の性状の季節変化と海底耕耘の効果について。三重県立大学研報, **6**, 145–169.
- 上野福三・井上啓晴 (1961) 真珠漁場における餌料基礎生産と漁場の海洋構造について。I. 密殖と食物連鎖の関係。国立真珠研報, **7**, 829–864.
- Yamamoto, T. (1996) Contribution of micro- and nanoplankton cell carbon to particulate organic carbon in the East China Sea during May 1980. J. Fac. Appl. Bio. Sci., Hiroshima Univ., **34**, 147–160.
- Yoder, J.A. (1979) Effect of temperature on light-limited growth and chemical composition of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae). J. Phycol., **15**, 362–370.