

五ヶ所湾マダイおよびアコヤガイ養殖場における プランクトン群集構造の季節遷移

平川和正^{*1}・坂見知子^{*2}・阿保勝之^{*2}・高柳和史^{*3}・谷村 篤^{*4}

Seasonal succession of plankton community structure in fish and pearl oyster farms of Gokasho Bay, Mie Prefecture, Japan

Kazumasa HIRAKAWA^{*1}, Tomoko SAKAMI^{*2}, Katsuyuki ABO^{*2},
Kazufumi TAKAYANAGI^{*3}, and Atsushi TANIMURA^{*4}

Abstract Seasonal succession in the plankton community was studied based on samples collected monthly from May 2000 to March or April 2001 in the pearl oyster farm (Stn.A) and fish farm (Stn.B) sites of Gokasho Bay, a typical aquaculture ground in central Japan. Chlorophyll *a* in the water-column reached its annual maximum in summer (July) at both stations, but the average value was ca. three times higher at Stn.B (21.4 $\mu\text{g/L}$) than that (7.7 $\mu\text{g/L}$) at Stn.A. The marked summer increase of chl. *a* at Stn.B was due to exclusive predominance of a red tide alga, *Karenia* (= *Gymnodinium*) *mikimotoi*. As a whole, microzooplankton (ciliates) abundance showed its annual maximum in winter (January-February) when mesozooplankton abundance decreased. Copepods were the most abundant mesozooplankton and showed numerically three seasonal peaks at both stations; spring (March-April), summer (June) and autumn (September-October). Major copepod constituents were *Acartia omorii*, *Oithona davisae* and *Paracalanus crassirostris* at both stations. From seasonal changes of biomasses and prey-predator relationships among components of the plankton community, it is assumed that the microbial food chain plays an important role in increasing the *O. davisae* population in the aquaculture ground, especially fish farm site during the stratified summer season.

Key Words : Aquaculture ground, Plankton community, *Karenia* (= *Gymnodinium*) *mikimotoi*, *Oithona davisae*, Microbial food chain

五ヶ所湾は熊野灘に面した半閉鎖性内湾であり、1909年から真珠（アコヤガイ）養殖場として、また1962年からはブリ、更に1970年以降はマダイが加わり魚類養殖場としても高度に利用されている。しかしながら、同時に養殖漁場の悪化による赤潮、貧酸素水塊の発生や魚病の誘発に伴い、養殖業の発展と水産物

の安定供給に資することを目的に1999年に制定された「持続的養殖生産確保法」を契機に、五ヶ所湾魚類養殖場においては漁業者による適正養殖量の設定、生簀の配置や生餌から配合飼料（例えば、エクストロード・ペレット）への転換などが進められている。

このような養殖漁場改善への自主的な取り組みと相

2006年3月23日受理 (Received on March, 23, 2006)

^{*1} 北海道水産研究所 〒085-0802 釧路市桂恋116 (Hokkaido National Fisheries Research Institute, Katsurakoi, Kushiro 085-0802, Japan)

^{*2} 養殖研究所 〒516-0193 三重県度会郡南伊勢町中津浜浦422-1 (National Research Institute of Aquaculture, Minamiise, Mie 516-0193, Japan)

^{*3} 西海区水産研究所 〒851-2213 長崎市多良町1551-8 (Seikai National Fisheries Research Institute, Taira, Nagasaki 851-2213, Japan)

^{*4} 三重大学生物資源学部 〒514-8507 津市上浜町1515 (Faculty of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514-8507, Japan)

まって、五ヶ所湾においては魚類（マダイ）養殖場の浄化機能を適正に評価するうえで、これまでマクロベントスの生態に関する一連の研究成果（Yokoyama, 2002；横山ら, 2002a, b など）が重要な役割を担ってきた。他方、アコヤガイの餌料環境として植物プランクトンの量・質的变化が重要な役割を果たしているにもかかわらず（福島, 1970；Tomaru *et al.*, 2002a, b), マクロベントスと比較するとプランクトンに関する生態学的知見は、赤潮研究（Honjo, 1987；Honjo *et al.*, 1990, 1991；内田ら, 2001）を除けば著しく少なく、本湾におけるプランクトン研究はベントス研究と比べ著しく遅れている。また、生態系と浄化機能との関係についてみると、生態効率が高いことは、環境に放出された栄養塩類や有機物が栄養段階の高い生物群集（系外移出の可能性の高い大型生物）にまで効率よく転換すること、すなわち、浄化機能も高いことを意味する（栗原, 1998）。したがって、ベントス研究の成果にとどまらず、五ヶ所湾におけるプランクトン生態系の構造に関する基礎的知見は、今後アコヤガイ養殖場だけでなく、マダイ養殖場における給餌に伴う有機物フローと生態効率を明らかにしていくために不可

欠である。

本研究では、五ヶ所湾のマダイ（給餌）養殖場およびアコヤガイ（無給餌）養殖場におけるプランクトン食物連鎖構造を把握するため、植物プランクトン、微小動物プランクトンおよびメソ動物プランクトンの出現量と種組成の季節遷移を明らかにすることを目的とした。更に、両養殖場におけるプランクトン群集構造と物理・化学的環境特性を比較することにより、養殖漁場の環境が悪化する貧酸素水塊形成期（成層期）における養殖由来有機物（残餌、糞など）のプランクトン群集への影響とそれに伴うプランクトン食物連鎖構造の特徴について考察した。

試料と方法

太平洋に面する三重県五ヶ所湾において、2000年5月から2001年4月までの期間中、毎月1回 Fig. 1に示すアコヤガイ養殖場の Stn.A（水深：14m）とマダイ養殖場の Stn.B（水深：18m）において以下の調査を実施した。但し、植物プランクトンと微小動物プランクトンの調査は2001年4月には組織運営上の都合によ

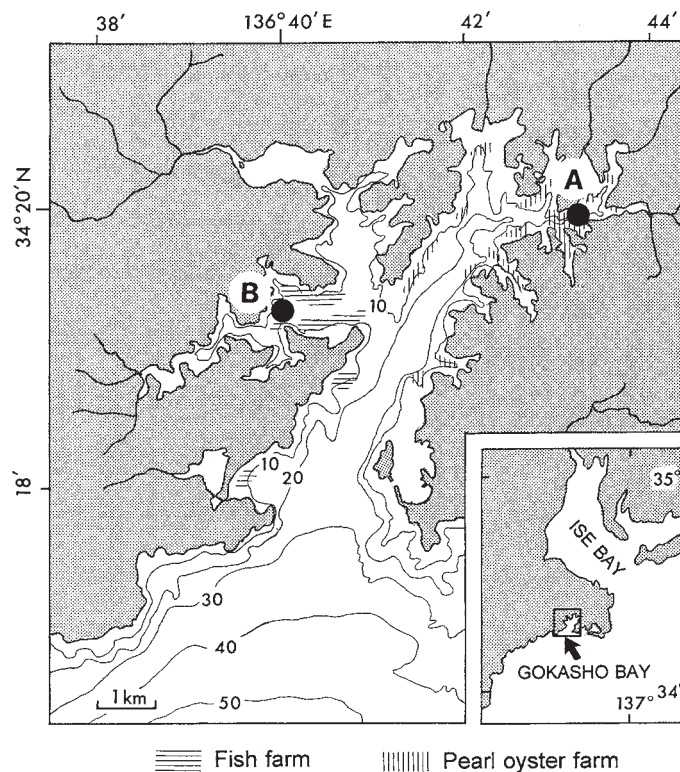


Fig. 1. Map showing the location of Gokasho Bay (lower right panel), and the position of the sampling stations (Stns.A and B) in Gokasho Bay (main panel). Bathymetric contours (10, 20, 30, 40 and 50m) and the areas of the fish farm (horizontal lines) and the pearl oyster farm (vertical lines) sites are also given.

り行えなかった。

植物プランクトン

植物プランクトンの現存量と種組成の月別変化を調べるため、0.5、5と10m深でサイズ別 (>20 μm , 2~20 μm , <2 μm) のクロロフィル *a* 濃度測定用と細胞計数・種査定用の採水をバンドン採水器を用いて行った。採取した各深度の試水1000mLのうち、200mLを直ちに実験室で直径45mmに切った目合20 μm のネット地を用いてろ過し、このろ液を更に孔径2 μm のヌークレポアフィルター、GF/Fフィルター(孔径約0.7 μm)で順次ろ過した。ろ過後、各フィルターをN-Nジメチルホルムアミドに浸漬して色素を抽出し(Suzuki and Ishimaru, 1990)、クロロフィル *a* 濃度の測定に供するまで冷凍庫で保存(-20 $^{\circ}\text{C}$)した。クロロフィル *a* 濃度の測定は蛍光光度計(ターナデザイン社R10)を用いて蛍光法により行った。本研究においては、目合20 μm のネット地上に捕集されたクロロフィル *a* を>20 μm 画分とし、孔径2 μm のヌークレポアフィルターおよびGF/Fフィルター地上に捕集されたクロロフィル *a* を各々、2~20 μm および<2 μm 画分とした。また、本研究では、>20 μm , 2~20 μm および<2 μm 画分のクロロフィル *a* を各々、マイクロサイズ、ナノサイズおよびピコサイズのクロロフィル *a* 濃度とし、これらサイズ別クロロフィル *a* 濃度の合計から全クロロフィル *a* 濃度を求めた。また、残りの試水250mL(2001年2~3月)あるいは500mL(2000年5月~2001年1月)をグルタルアルデヒド(最終濃度:1%)で固定した。植物プランクトンの計数および種査定は、微小動物プランクトン検鏡後、それらの試料を沈殿法により5~8mLに濃縮し、そのうち0.01~0.05mLを生物顕微鏡(400 \times)を用いて検鏡し、行った。

微小動物プランクトン

微小動物プランクトン(体長:20 μm ~0.2mm)のうち、一般に優占群となる繊毛虫類を対象としてその現存量と種組成の月別変化を調べるため、濃縮前(冷暗所で保存)の植物プランクトン検鏡用試料(250mLあるいは500mL)を用いて繊毛虫の計数と種査定を行った。検鏡方法:有鐘目繊毛虫類については可能な限り種の査定を行った。しかし、無殻の少毛目繊毛虫類など収縮または破損によって査定が困難な場合は、大きさと形態によるタイプ分けにとどめた。計数に際しては原則として試料の全量を分析し、個体数の多い種類については適宜分割(1/10~1/50)した。

現存量算定法:種類ごとに細胞またはロリカの長径と短径を生物顕微鏡下(200 \times)で実測し(単位: μm)、各種類に近似した回転体として体積を算出した(佐々木ら, 1989)。ただし、有鐘目繊毛虫類についてはロリカ体積の1/2を原形質の体積とした(一戸, 1992)。比重は全ての出現種類について便宜的に1.0とした(Fenchel and Finlay, 1983)。乾燥重量/生物体体積比は、無殻の繊毛虫類では0.15(Fenchel and Finlay, 1983)、また、殻(ロリカ)を持つ有鐘目繊毛虫類では0.1(佐々木ら, 1989)とした。炭素量/乾燥重量比については、生物群によって大きく異なり、生息条件によっても変化することから、様々な生物群の平均的な値の0.4を用いた(Takahashi and Hoskins, 1978)。これらの設定により、種類ごとに細胞あたりの平均炭素量を以下の換算式を用いて算出し、細胞数を乗じて炭素態現存量を推定した。

無殻の繊毛虫類:

$$\text{乾燥重量}(\mu\text{g}) = \text{生物体体積}(\mu\text{m}^3) \times 10^{-6} \times \text{比重}(1.0) \times \text{乾燥重量/生物体体積比}(0.15)$$

$$\text{炭素量}(\mu\text{gC}) = \text{乾燥重量} \times 0.4$$

有鐘目繊毛虫類:

$$\text{生物体体積}(\mu\text{m}^3) = \text{ロリカの体積} \times 0.5 \text{ (一戸, 1992)}$$

$$\text{乾燥重量}(\mu\text{g}) = \text{生物体体積} \times 10^{-6} \times \text{比重}(1.0) \times \text{乾燥重量/生物体体積比}(0.1)$$

$$\text{炭素量}(\mu\text{gC}) = \text{乾燥重量} \times 0.4$$

メソ動物プランクトン

メソ動物プランクトン(体長:0.2~2mm)の現存量と種組成の月別変化を調べるため、試料は北原式定量ネット(口径:24.2cm, 網目:0.10mm)を用いて海底上1mから海表面までの鉛直曳きにより得た。ネット口部には濾水計を装着し、ネットを通過する濾水量を算定した。採集試料は約10%ホルマリン海水で固定・保存した。これら試料を1/2~1/64に分割し、各副試料を実体顕微鏡下で分類群ごとにソート・種査定し、個体数を計数した。また、動物プランクトン乾重量の測定は大森、池田(1976)の方法を参考に行った。すなわち、試料を60 $^{\circ}\text{C}$ で2時間乾燥後、デシケーターで1時間保管した後、乾重量を測定した。カイアシ類主要属(*Acartia*, *Paracalanus* および *Oithona* 属)の乾重量は各々の属に該当する個体の全長を測定することにより、体長(全長)-体重の関係式(安楽, 1986)を用いて算出した。更に、これらカイアシ類の乾重量から炭素量への換算は乾重量に0.5を乗ずるこ

と(弘田 1981)によって行った。

物理・化学的環境要素

これらプランクトン採集と同時に、海洋の物理・化学的環境特性を明らかにするため、アレック電子社製クロロテック ACL1150-DK を用いて、海面から海底上 1 m まで 1 m 間隔で水温と塩分(電気伝導度より換算)を測定した。また、溶存酸素濃度は溶存酸素計 YSI モデル 58 (YSI 社製)を用いて、海面から海底上 1 m まで 1~2 m 間隔で測定した。

溶存有機態炭素(DOC)、溶存有機態窒素(DON)および細菌現存量の測定は、Sakami *et al.* (2003)の方法に基づき、植物プランクトンおよび微小動物プランクトン採集と同一深度において行った。

結 果

海洋環境

水温、塩分および溶存酸素の鉛直断面の月別変化(Fig. 2)から、両定点共に春から初秋(4~9月)には加熱による昇温(>25℃)と河川水の流入による低

塩分化(<33.0psu)が6月および9月にみられた。特に、9月のStn.Aの表面では低塩分化が著しく、塩分は年間を通して最低値(25.22psu)を示した。晩春から初秋(5~9月)の海洋構造は水温躍層と塩分躍層の形成に伴い顕著な成層構造が発達することで特徴づけられる。しかしながら、両定点共に10月には冷却による鉛直混合が始まり、水塊は翌年春季(3月)にかけて表面から底層までほぼ均一な低温(<20℃)・高塩分(>34.0psu)な水塊によって占められた。この高塩分化は、主に1,2月から4月における外洋水の流入によりもたらされ、Stn.Bの底層ではStn.Aと比べ、水深が4 m 深いため、その影響がより遅く(7月)まで及んだ。また、貧酸素水(溶存酸素:<4mg/L)は両定点共に成層形成期(5~9月)に同調して底層を中心に発達していた。

細菌現存量および溶存態有機物(DOC, DON)の濃度(0.5, 5および10m 深の平均値)の月別変化をみると(Fig. 3)、細菌現存量は両定点共に晩春(5月)から初秋(9月)に多くなったが、年間を通してほぼStn.AよりStn.Bの方が高かった。特に、5月、7月および9月には他の月と比べて定点間の差違がより顕

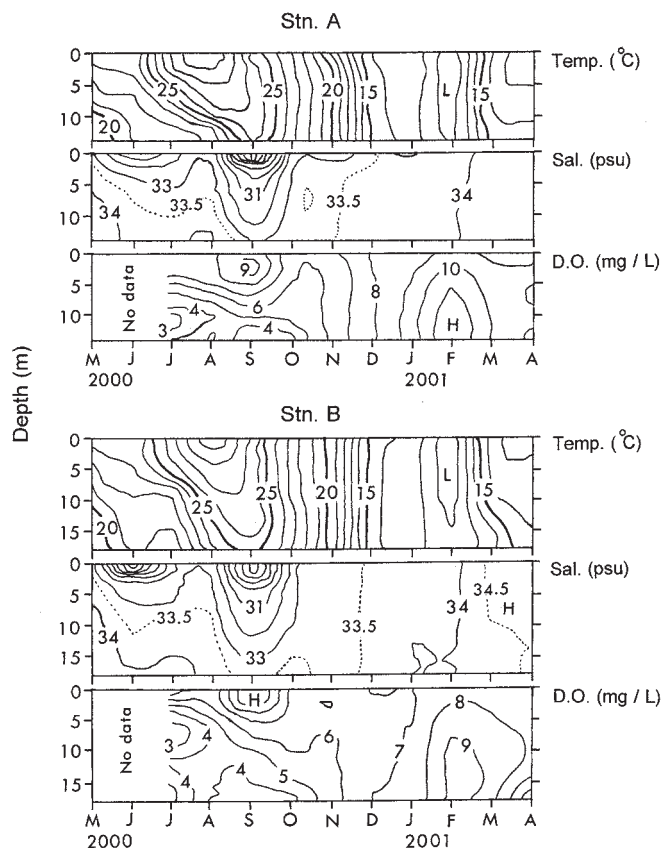


Fig. 2. Seasonal changes in temperature (upper, °C), salinity (middle, psu) and dissolved oxygen (lower, mg/L) at Stns.A and B in Gokasho Bay from May 2000 to April 2001

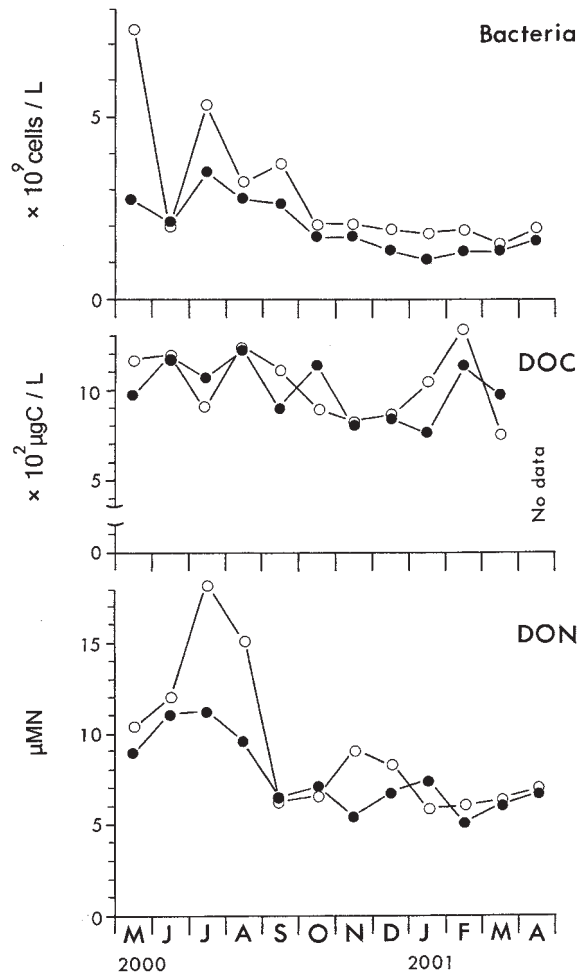


Fig. 3. Seasonal changes in the concentrations of bacteria ($\times 10^9$ cells/L), dissolved organic carbon (DOC, $\times 10^2 \mu\text{gC/L}$) and dissolved organic nitrogen (DON, μMN) averaged through the water column at Stns.A (●) and B (○) in Gokasho Bay from May 2000 to March or April 2001

著になった。溶存態有機炭素 (DOC) の月別変化は、両定点間でそれほど大きな違いは認められなかった。全体として、秋季から12月にかけて減少し、2月に増加する傾向を示した。一方、溶存態有機窒素 (DON) は細菌現存量と同様に年間を通してほぼ Stn.A より Stn.B の方が高かった。特に、夏季 (7~8月) には Stn.A と比べて著しく増加する季節的特徴を示した。

植物プランクトン

クロロフィル *a* 濃度 (0.5, 5および10m 深の平均値) の月別変化 (Fig. 4 上図) を全期間を通しての平均値 (Stn.A : $3.1 \mu\text{g/L}$, Stn.B : $5.6 \mu\text{g/L}$) を基準にしてみると、両定点で共通してみられた平均値以上の濃度は夏季 (7月) と秋季 (9月あるいは10月) に観察され、7月には年間最大 (Stn.A: $7.7 \mu\text{g/L}$, Stn.B:

$21.4 \mu\text{g/L}$) に達した。これらのピークは、いずれも Stn.B の方が Stn.A より高く、夏季ピーク (年間最大) では約3倍を示した。Stn.B では Stn.A と異なり春季ピークはみられなかったが、年平均値以下ではあるものの冬季にもピークが見出された。

クロロフィル *a* のサイズ組成の月別変化 (Fig. 4 下図) をみると、Stn.B では秋・冬季に概してマイクロプランクトン ($>20 \mu\text{m}$) が卓越し、10月には全体の68.0%、2月には50.1%を占め、各々のピークの主要構成群となった。しかしながら、夏季には秋・冬季に比べてマイクロプランクトンの出現割合は低下し、7月のピークは主にナノプランクトン ($2\sim 20 \mu\text{m}$) によって形成された (全体の79.1%)。他方、Stn.A では Stn.B と同様に秋・冬季にマイクロプランクトンが卓越するが、その出現割合は Stn.B と比べて低く、代わっ

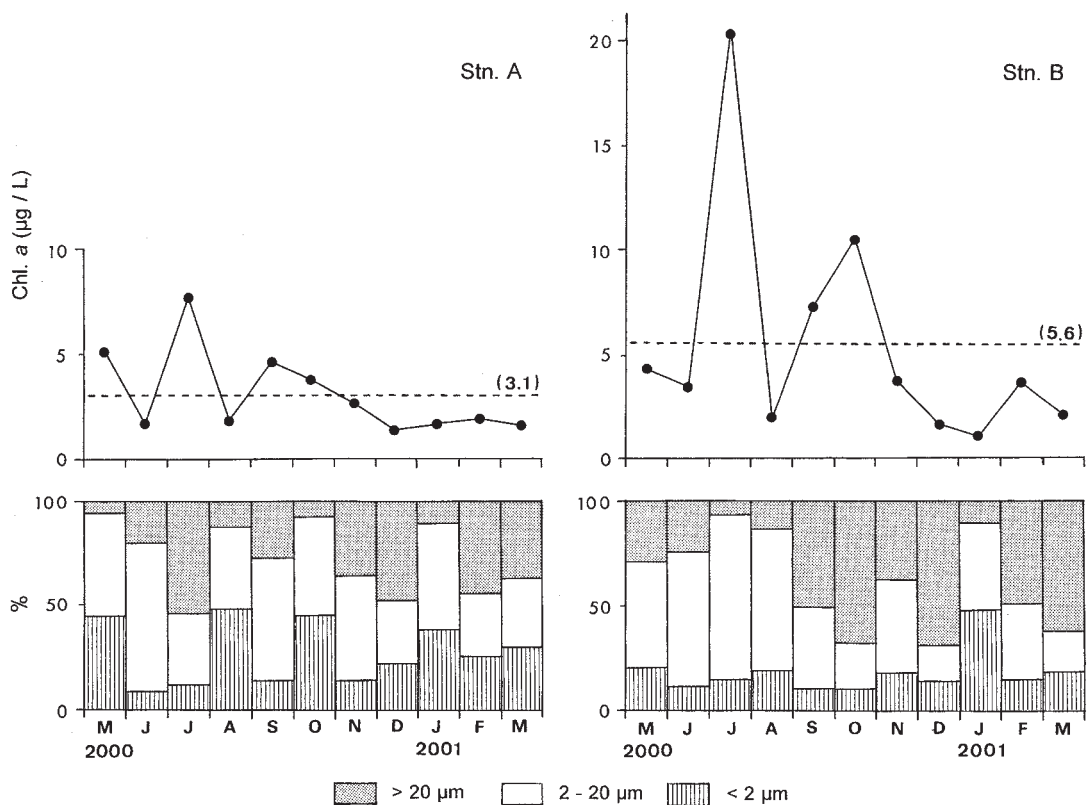


Fig. 4. Seasonal changes in the chlorophyll *a* concentration (upper, $\mu\text{g/L}$) averaged through the water column and their fractional percentage composition (lower) for the three size ranges (<2 , $2-20$ and $>20\ \mu\text{m}$) at Stns. A and B in Gokasho Bay from May 2000 to March 2001. Dotted horizontal lines denote the mean during the study period.

て $20\ \mu\text{m}$ 以下のナノおよびピコプランクトンが増加する傾向を示した。夏季（7月）のピークはStn. Bと異なり主にミクロプランクトン（全体の55.3%）によって構成されたが、秋季ピーク（9月）ではミクロプランクトンに代わりナノプランクトンが主要構成群（全体の58.2%）となった。

植物プランクトンの細胞数（0.5, 5および10m深の平均値）に基づく主要構成群あるいは主要構成種の月別変化をFig. 5に示した。本研究では、主要構成種とは全期間を通しての植物プランクトン平均細胞密度（Stn. A: $127 \times 10^3\ \text{cells/L}$, Stn. B: $198 \times 10^3\ \text{cells/L}$ ）以上を記録した月において、各々の種の合計細胞密度が全体の60%以上を占める上位優占種として定義した。Fig. 5から、両定点共に春・夏季には渦鞭毛藻類、秋季には珪藻類が各々卓越したが、Stn. BではStn. Aと比較して両群が細胞数でより多く出現する傾向を示した。全期間・両定点を通して、植物プランクトンは少なくとも63種・群が出現した（Table 1）。それらのうち、主要構成種の月別変化（Fig. 5）をみると、Stn. A

では春・夏季の渦鞭毛藻類は *Prorocentrum dentatum* によって、秋季の珪藻類は *Rhizosolenia fragilissima*（9月）、*Climacodium* spp.（9月）および Pennales（11月）によって占められた。冬季には渦鞭毛藻類 *Prorocentrum triestinum* とその他未査定微小鞭毛藻類が主要構成種となった。他方、Stn. Bでは夏季の渦鞭毛藻類は専ら赤潮生物種 *Karenia mikimotoi* (= *Gymnodinium mikimotoi*) によって、秋季の珪藻類は *Asterionella glacialis*（9月）、*Chaetoceros* spp.（9~10月）、*Climacodium* spp.（9月）および *Thalassiosira* spp.（9月）によって構成された。また、冬季には *P. triestinum* と珪藻類 *Skeletonema costatum* が主要構成種となった。このように秋季の珪藻類は複数の主要種によって成り立っているが、両定点に共通の主要種は *Climacodium* spp. のみであり、著しく少ないことが分かった。また、冬季においても共通の主要種は渦鞭毛藻類 *Prorocentrum triestinum* のみであった。このように、定点間の主要構成種の類似性は周年を通して低かった。

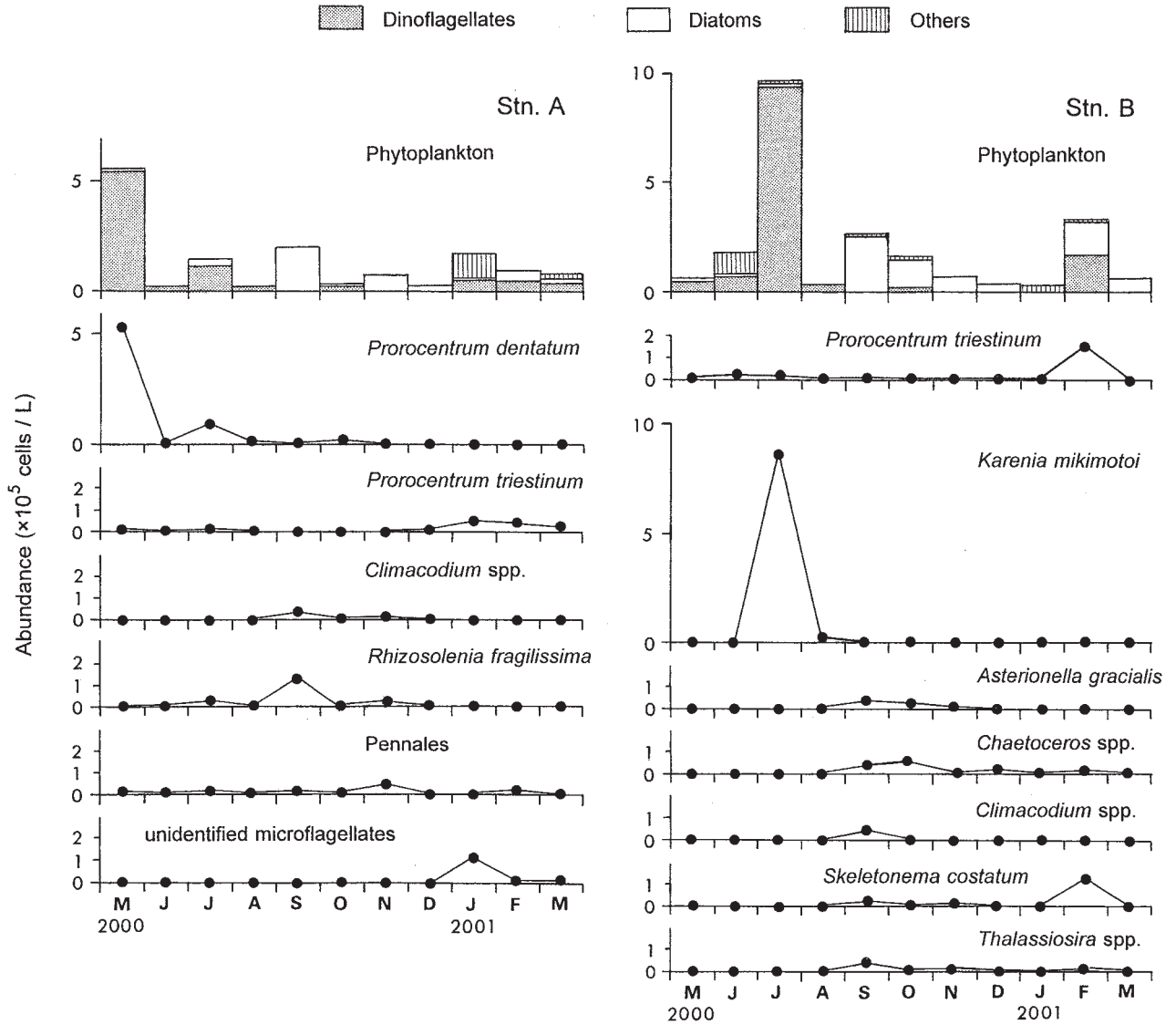


Fig. 5. Seasonal changes in the abundance ($\times 10^5$ cells/L) of three major groups (dinoflagellates, diatoms and others) and the dominant species of phytoplankton averaged through the water column at Stns. A and B in Gokasho Bay from May 2000 to March 2001

なお、クロロフィル *a* のサイズ組成からみると、Stn. B の 7 月に卓越したナノプランクトンでは、その主要構成種としてみなされる *Gymnodinium* 属やクリプト藻類などの未査定鞭毛藻類は混在し著しく凝集しているため、各々に分離しての計数は不可能であった。しかしながら、サイズ範囲ではマイクロプランクトンの範疇に入る *K. mikimotoi* (平均細胞長: $24.3 \mu\text{m}$, 平

均細胞幅: $22.2 \mu\text{m}$) が量的に多かった。

微小動物プランクトン (織毛虫類)

織毛虫類の総個体数 (0.5, 5 および 10m 深の平均値) の月別変化 (Fig. 6) を全期間を通しての平均値 (Stn. A: 1,172 個体/L, Stn. B: 2,084 個体/L) を基準にしてみると、平均値以上の出現個体数は Stn. A で

Table 1. List of phytoplankton species identified in the pearl oyster (Stn.A) and fish (Stn.B) farms in Gokasho Bay from May 2000 to March 2001

BACILLARIOPHYCEAE	<i>Rhizosolenia calcar-avis</i>	<i>Dinophysis fortii</i>
<i>Asterionella glacialis</i>	<i>Rhizosolenia fragilissima</i>	<i>Karenia mikimotoi</i>
<i>Asteromphalus</i> spp.	<i>Rhizosolenia hebetata</i> f. <i>hiemalis</i>	<i>Prorocentrum balticum</i>
<i>Biddulphia</i> spp.	<i>Rhizosolenia setigera</i>	<i>Prorocentrum compressum</i>
<i>Chaetoceros didymum</i>	<i>Rhizosolenia stolterfothii</i>	<i>Prorocentrum dentatum</i>
<i>Chaetoceros</i> spp.	<i>Rhizosolenia</i> spp.	<i>Prorocentrum gracile</i>
<i>Climacodium</i> spp.	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Prorocentrum micans</i>
<i>Coscinodiscus radiatus</i>	<i>Stephanopyxis palmeriana</i>	<i>Prorocentrum minimum</i>
<i>Coscinodiscus wailesii</i>	<i>Stephanopyxis</i> spp.	<i>Prorocentrum sigmoides</i>
<i>Coscinodiscus</i> spp.	<i>Streptothecca tamesis</i>	<i>Prorocentrum triestinum</i>
<i>Cylindrotheca closterium</i>	<i>Thalassiosira</i> spp.	<i>Protoperidinium bipes</i>
<i>Ditylum brightwellii</i>	<i>Thalassiothrix longissima</i>	<i>Protoperidinium pellucidum</i>
<i>Eucampia zodiacus</i>	<i>Triceratium alternans</i>	<i>Protoperidinium</i> spp.
<i>Fragilaria</i> spp.	Pennales	Gymnodiniales
<i>Guinardia flaccida</i>	DINOPHYCEAE	Peridinales
<i>Lauderia annulata</i>	<i>Ceratium furca</i>	CHRYSOPHYCEAE
<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Ceratium fusus</i>	<i>Dictyocha fibula</i> var. <i>stapedia</i>
<i>Licmophora abbreviata</i>	<i>Ceratium kofoidii</i>	<i>Distephanus speculum</i> var. <i>octonarius</i>
<i>Melosira</i> spp.	<i>Ceratium trichoceros</i>	<i>Ebria tripartita</i>
<i>Navicula membranacea</i>	<i>Ceratium tripos</i>	Others *
<i>Odontella</i> sp. (cf. <i>longicuris</i>)	<i>Dinophysis acuminata</i>	
<i>Rhizosolenia alata</i>	<i>Dinophysis caudata</i>	

* including HAPTOPHYCEAE, EUGLENOPHYCEAE and unidentified micro-flagellates

は夏・秋季（8～9月）および冬・春季（1～3月）に、また、Stn.Bでもほぼ同様に夏・秋季（8月、10月）および冬・春季（1～3月）にみられた。両定点共に冬季（1月あるいは2月）に年間最大に達し、春季には減少する傾向を示した。繊毛虫類は裸口目（Gymnostomatida）、少毛目（Oligotrichida）および有鐘目（Tintinnida）などから成り、両定点を通して少なくとも合計36種が出現した（Table 2）。裸口目、少毛目および有鐘目のうち、少毛目が卓越した。Stn.Aでは秋季に *Laboea* spp.（少毛目）が、また、冬季には *Strombidium* spp.（少毛目）および *Stenosemella* spp.（有鐘目）が、更に、春季には *Mesodinium rubrum*（裸口目）が卓越し、各季節的ピークの主要構成群となった。Stn.Bでは季節的ピークは主として *Strobilidium* spp.（少毛目）、未査定少毛目 Oligotrichida および *Strombidium* spp. の3群より構成された。それらのうち、*Strobilidium* spp. が夏季と冬季に、未査定少毛目 Oligotrichida が秋季に、更に、*Strombidium* spp. が冬季に各々卓越した。こ

のことから、*Strombidium* spp. は両定点において冬季に共通して主要群となったが、夏季には冬季と比べて減少し、Stn. Bでは代わって *Strobilidium* spp. が増加し、主要群を形成した。

メソ動物プランクトン

メソ動物プランクトン総個体数（水柱当たりの平均値）の月別変化（Fig. 7）をみると、Stn.Aにおいては総個体数は夏季（6月）から秋季（10月）および春季（3～4月）に増加した。メソ動物プランクトンのうち、Stn.Aではカイアシ類が毎月における総個体数の58.5（5月）～97.6（6月）%（平均：81.0%）を占め、最優占した。他方、Stn.Bではメソ動物プランクトン総個体数は夏季（6月）から秋季（9月）および春季（3～4月）に増加した（Fig. 7）。12月と4月を除き、カイアシ類が全体の57.9（3月）～96.4（6月）%（平均：81.0%）を占め、Stn.Aと同様に最優占した。12月と4月には、これに代わって尾虫類と底生動物の幼生（主に、二枚貝の浮遊期幼生）が全体の50%以上を占め、

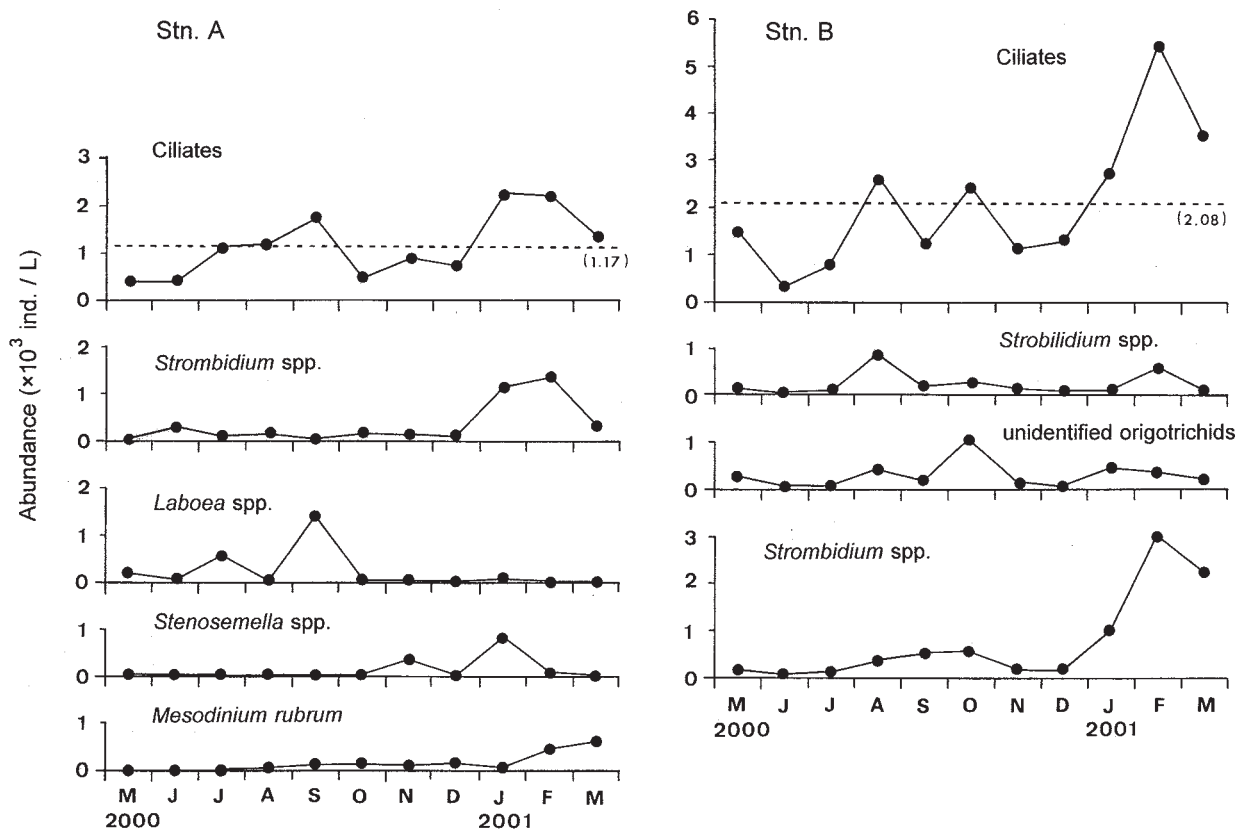


Fig. 6. Seasonal changes in the abundance ($\times 10^3$ ind./L) of ciliates and their dominant species averaged through the water column at Stns.A and B in Gokasho Bay from May 2000 to March 2001. Dotted horizontal lines denote the mean during the study period.

Table 2. List of ciliate species identified in the pearl oyster (Stn.A) and fish (Stn.B) farms in Gokasho Bay from May 2000 to March 2001

Gymnostomatida	Tintinnida	<i>Helicostomella longa</i>
<i>Mesodinium rubrum</i>	<i>Leprotintinnus nordqvisti</i>	<i>Helicostomella subulata</i>
<i>Didinium gargantua</i>	<i>Tintinnopsis aperta</i>	<i>Favella azorica</i>
<i>Tiarina fusus</i>	<i>Tintinnopsis beroidea</i>	<i>Favella ehrenbergii</i>
unidentified Gymnostomatida	<i>Tintinnopsis corniger</i>	<i>Favella taraikaensis</i>
Oligotrichida	<i>Tintinnopsis directa</i>	<i>Amphorellopsis acuta</i>
<i>Srombidium</i> spp.	<i>Tintinnopsis kofoidi</i>	<i>Dadayiella ganymedes</i>
<i>Strombidium</i> spp.	<i>Tintinnopsis mortensenii</i>	<i>Eutintinnus lususundae</i>
<i>Laboea</i> spp.	<i>Tintinnopsis radix</i>	<i>Eutintinnus</i> spp.
<i>Tontonia</i> sp.	<i>Tintinnopsis</i> sp.	<i>Salpingella acuminata</i>
<i>Lohmanniella</i> spp.	<i>Stenosemella nivalis</i>	<i>Salpingella</i> sp.
unidentified Oligotrichida	<i>Stenosemella</i> spp.	unidentified Tintinnida
	<i>Codonellopsis morchella</i>	Others*

* including Heterotrichida and unidentified ciliates

各々最優占した。カイアシ類の両定点を通しての出現種は少なくとも合計25種であった (Table 3)。

このカイアシ類の出現個体数 (水柱当たりの平均値) の月別変化 (Fig. 7) を全期間を通しての平均値 (10,865 個体 / m³) を基準にしてみると, Stn.A では春季 (4月), 夏季 (6月) および秋季 (10月) の3回にわたりピークを示した。春季ピークは *Acartia omorii* と *Oithona davisae*, 夏季ピークは *O. davisae*, 秋季ピークは *O. davisae* と *Paracalanus crassirostris* によって主として構成された。一方, Stn.B における春季ピークは全期間を通しての平均値 (12,244 個体 / m³) 以下を示したが, Stn.A と同様に夏季 (6月), 秋季 (9月) および春季 (3月) の3回にわたりピークを示した。また, 各季節的ピークの主要構成種も Stn.A のそれらと同じであった。しかしながら, *O. davisae* の季節変化が両定点間で異なり, Stn.A では年間最大が春季 (4月) にみられたのに対して, Stn.B では夏季 (6月) にみられたことが特徴的である。カイアシ類のノープリウス幼生は, Stn.A では冬季 (12月) と春季 (3

月) に, また, Stn.B では秋季 (9月) と春季 (3月) に各々増加し, カイアシ類の季節的ピーク, 主として春季ピークの形成に寄与した。

これら主要カイアシ類3種の2000年5月~2001年4月までの1年間にわたる各月の出現量 (個体数, 現存量) の合計を各定点間で比較してみると (Table 4), *Oithona davisae* は両定点において個体数および現存量共に3種の中で最高を示すとともに, Stn.B ではいずれも Stn.A と比べて多かった。*Paracalanus crassirostris* は *O. davisae* の次に多く出現したが, 個体数は Stn.A の方が多かった。また, *Acartia omorii* は両定点において個体数および現存量共に最低を示すとともに, *O. davisae* と異なり Stn.B ではいずれも Stn.A と比べて少なかった。

Paracalanus, *Oithona* および *Acartia* 属の各個体ごとの体長測定から算出された乾重量の3属合計値とメソ動物プランクトン現存量 (乾重量) との月別変化 (Fig. 8) には, 2000年1~4月のデータを補足すると, 両定点共に有意な正の相関が認められた (*t*-検定,

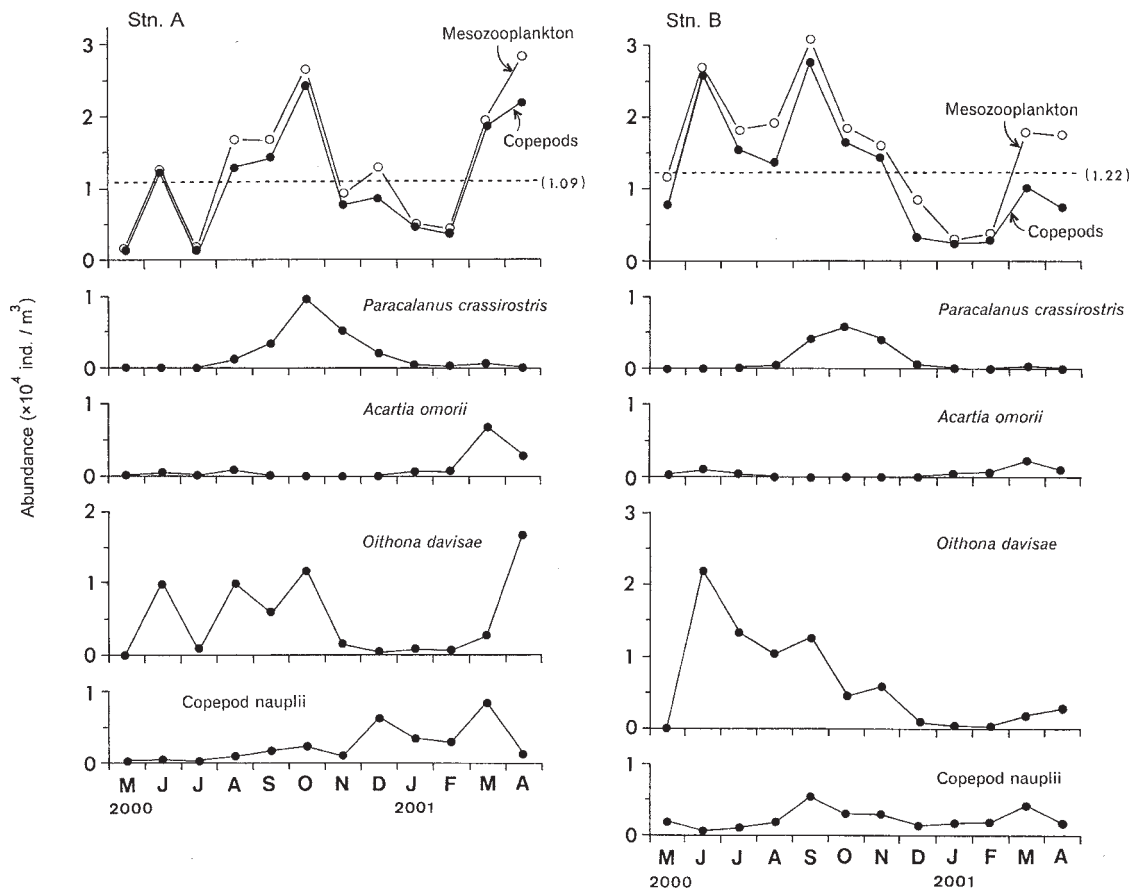


Fig. 7. Seasonal changes in the abundance ($\times 10^4$ ind./L) of mesozooplankton, copepods and their dominant species averaged through the water column at Stns.A and B in Gokasho Bay from May 2000 to April 2001. Dotted horizontal lines denote the mean during the study period.

Table 3. List of copepod species identified in the pearl oyster (Stn.A) and fish (Stn.B) farms in Gokasho Bay from May 2000 to April 2001

Calanoida	<i>Acartia erythraea</i>	Poecilostomatoida
<i>Calanus sinicus</i>	<i>Acartia omorii</i>	<i>Oncaea conifera</i>
<i>Paracalanus crassirostris</i>	Cyclopoida	<i>Oncaea media</i>
<i>Paracalanus parvus</i>	<i>Oithona brevicornis</i>	<i>Oncaea</i> spp.
<i>Acrocalanus gracilis</i>	<i>Oithona davisae</i>	<i>Corycaeus</i> spp.
<i>Calocalanus pavo</i>	<i>Oithona nana</i>	<i>Hemicyclops japonicus</i>
<i>Centropages yamadai</i>	<i>Oithona oculata</i>	Harpacticoida
<i>Centropages</i> spp.	<i>Oithona plumifera</i>	<i>Microsetella norvegica</i>
<i>Temora turbinata</i>	<i>Oithona rigida</i>	<i>Euterpina acutifrons</i>
<i>Eurytemora pacifica</i>	<i>Oithona similis</i>	

Table 4. Annual summed abundance and biomass of the three major copepods at Stn. A and B in Gokasho Bay from May 2000 to April 2001. Percentage to the total (*Oithona davisae* + *Paracalanus crassirostris* + *Acartia omorii*) is given in parenthesis.

	Stn. A		Stn. B	
	Abundance (ind./m ³)	Biomass (mg dry weight/m ³)	Abundance (ind./m ³)	Biomass (mg dry weight/m ³)
<i>Oithona davisae</i>	60,015 (64.8)	30.8 (53.4)	74,028 (78.4)	39.5 (55.5)
<i>Paracalanus crassirostris</i>	20,932 (22.6)	13.8 (23.9)	15,009 (15.9)	23.3 (32.7)
<i>Acartia omorii</i>	11,694 (12.6)	13.1 (22.7)	5,406 (5.7)	8.4 (11.8)
Total	92,641 (100.0)	57.7 (100.0)	94,443 (100.0)	71.2 (100.0)

Stn.A : $p < 0.05$, Stn.B : $p < 0.01$). これらの結果から、アコヤガイ養殖場(Stn.A)およびマダイ養殖場(Stn.B)におけるメソ動物プランクトン現存量の季節変動パターンは主要カイアシ類3種(*Oithona davisae*, *Paracalanus crassirostris* および *Acartia omorii*) の合計現存量によって決定されることが明らかとなった。

植物プランクトン、繊毛虫類と *Oithona davisae* との相互関係

主要カイアシ類3種のうち、*Oithona davisae* は他の2種(*Paracalanus crassirostris* および *Acartia omorii*) と異なり、春季から秋季の長期にわたり出現するとともに、周年を通してStn.BではStn.Aと比較して多量に出現する特徴を示した(Table 4)。このことから、*O. davisae* は魚類養殖場における夏季の物質循環機構を解明するための鍵種の一つになると判断し、被食―捕食関係の視点から本種と植物プランクト

ン、更に、繊毛虫類との相互関係について調べた。本種と植物プランクトンとの相互関係を各々の月別現存量(単位：*O. davisae* : $\mu\text{gC/L}$, 植物プランクトン : $\mu\text{gChl.a/L}$) の対応により解析した結果、両地点共に両者の間には有意な相関は見出されなかった(t -検定, $p > 0.05$)。他方、本種と繊毛虫類の相互関係を各々の現存量($\mu\text{gC/L}$) の月別変化(Fig. 9)の比較から見ると、両者は両地点共に周年にわたり一貫して相反する増減変動を示した。成層期(5~9月)を通してみると、*O. davisae* の平均現存量はStn.BではStn.Aより多かったのに対して(Stn.A : $1.25 \mu\text{gC/L}$, Stn.B : $2.89 \mu\text{gC/L}$)、繊毛虫の平均現存量はStn.Aと比較してより低くとどまった(Stn.A : $2.18 \mu\text{gC/L}$, Stn.B : $1.49 \mu\text{gC/L}$)。繊毛虫類に対する*O. davisae* の現存量は、Stn.Aでは6月と10月に、また、Stn.Bでは6月、7月と9月に他の月と比較して著しく増加する特徴を示した。他方、*O. davisae* の現存量が低減する12~3月の冬季鉛直混合期には、両地点共に繊毛虫の

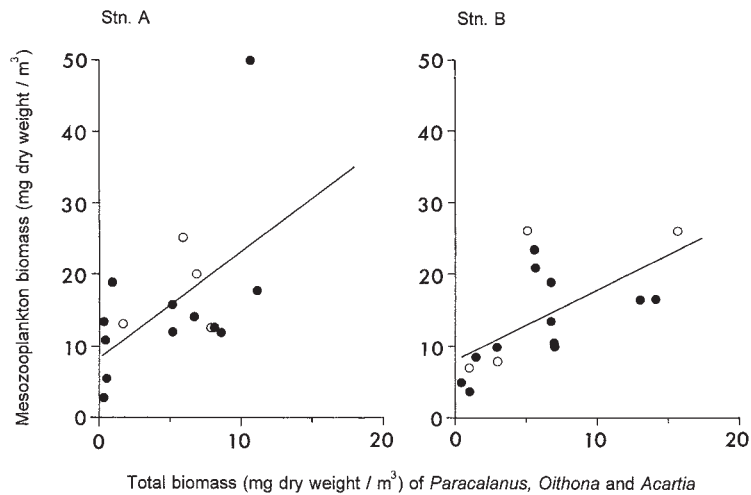


Fig. 8. Relationships between the mesozooplankton biomass (mg dry weight/m³) and the total biomass of the three dominant copepods (*Oithona davisae*, *Paracalanus crassirostris* and *Acartia omorii*) at Stns.A and B in Gokasho Bay from May 2000 to April 2001. Data from January to April 2000 (○) were included in the calculation (see text). Overall regression lines are indicated by solid lines ; Stn.A: $Y=1.49X + 8.58$ ($n=16$, $r^2=0.285$, $p<0.05$), Stn.B: $Y=1.01X + 8.03$ ($n=16$, $r^2=0.402$, $p<0.01$).

現存量が *O. davisae* の現存量を上回った。両者の関係 (Fig. 10) は, Stn.B では Stn.A と比較してより高い負の相関 (Stn.A : $r = -0.41$, Stn.B : $r = -0.74$) を示すとともに, Stn.A と異なり有意であるとみなされた (t -検定, $p<0.01$)。このことから, マダイ養殖場 (Stn.B) ではアコヤガイ養殖場 (Stn.A) と比較し, *O. davisae* と繊毛虫類との負の相関関係がより明確に維持されていることが分かった。

両定点における各月の繊毛虫類の生産量 (P : $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$) および *Oithona davisae* の摂食量 (G : $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$) を以下に示す Ikeda and Motoda (1978) の呼吸量 (R : $\mu\text{L O}_2/\text{animal}/\text{h}$) との関係式を用いて推定した (Table 5)。Ikeda and Motoda (1978) の関係式は後生動物プランクトンだけでなく原生(微小)動物プランクトンにおいても有効であることが立証されている (Hiromi, 1994)。

$$P=0.75R$$

$$G=2.5R$$

$$\log R = (-0.01089T + 0.8918) \log W + (0.02538T - 0.1259)$$

$$\text{mgC}/\text{animal}/\text{h} = \mu\text{L O}_2/\text{animal}/\text{h} \times 12/22.4 \times \text{RQ} (0.8) \times 10^{-3}$$

T : 水温 ($^{\circ}\text{C}$; 各月における0.5, 5, 10m 深の平均値), W : 各月における平均乾重量 (mg dry weight/animal), RQ : 呼吸商

その結果, 繊毛虫類の生産量は両定点共に夏季に増加し, Stn.A では7月に, Stn.B では8月に各々年間最大に達した。Stn.Bにおける年間最大生産量 ($44.5\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$) は Stn.Aにおける年間最大 ($25.4\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$) の約2倍を示した。しかしながら, 秋季から冬季には減少し, 年間を通して最小に達した。*O. davisae* の摂食量は Stn.A では8月に年間最大 ($11.0\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$) を示したが, 10月を除くその他の月では $5\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$ 以下に低下した。これに対して, Stn.Bにおける *O. davisae* では Stn.A の場合と異なり, 6~9月の4ヶ月にわたり高い摂食量 ($8.9 \sim 12.6\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$) が維持された。両定点共に *O. davisae* の摂食量は冬季 (12~2月) には著しく減少した ($1\text{mgC}/\text{m}^3/\text{day}$ 以下)。繊毛虫類の生産量に対する *O. davisae* の摂食量の割合 (摂食圧) をみると (Table 5), Stn.A では6月と10月に, また, Stn.B では6月, 7月と9月に100%以上の値を示した。これらの月は, 前述したように本種の現存量が繊毛虫類の現存量を大きく凌いだ月 (Fig. 9) と一致した。また, Stn.Bでは夏季 (6~8月) に Stn.A と比べて *O. davisae* の摂食圧が高くなる傾向を示した (Stn.A: $2.2 \sim 274.1\%$, Stn.B: $24.7 \sim 530.3\%$)。特に, 7月には繊毛虫類に対する摂食圧は Stn.A ではわずか2.2%を示したのに対して, Stn.Bでは114.2%に達したことから, 両定点間で大きな差異を生じた。その後, 摂食圧は冬

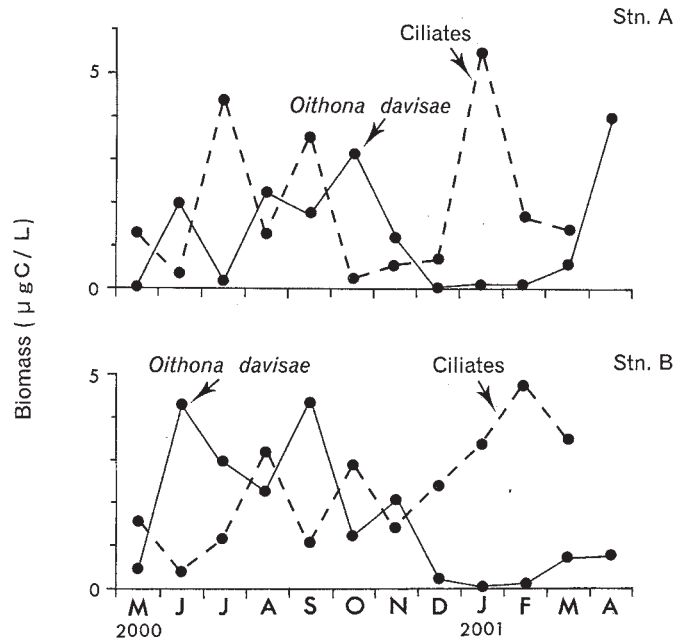


Fig. 9. Seasonal changes in the biomass ($\mu\text{gC/L}$) of *Oithona davisae* (solid lines) and ciliates (dotted lines) averaged through the water column at Stns. A and B in Gokasho Bay from May 2000 to March or April 2001

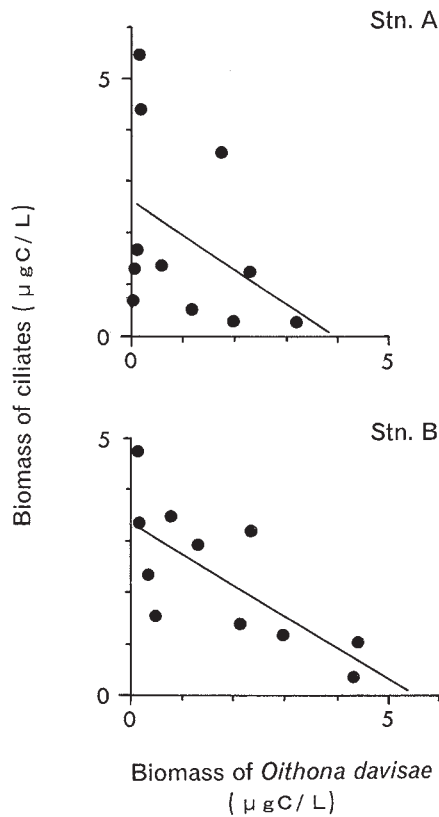


Fig. 10. Relationships between the biomasses ($\mu\text{gC/L}$) of *Oithona davisae* and ciliates averaged through the water column at Stns.A and B in Gokasho Bay from May 2000 to March 2001. Regression lines are indicated by solid lines ; Stn.A : $Y = -0.66X + 2.60$ ($n=11$, $r^2=0.172$, $p>0.05$), Stn.B : $Y = -0.61X + 3.39$ ($n=11$, $r^2=0.553$, $p<0.01$).

Table 5. Estimates* of production of ciliates, and grazing of *Oithona davisae* at Stns.A and B in Gokasho Bay from May 2000 to March or April 2001. Percentage of grazing of *O. davisae* to production of ciliates is given in parenthesis.

	Stn. A		Stn. B	
	Production of ciliates (mgC/m ³ /day)	Grazing of <i>O. davisae</i> (mgC/m ³ /day)	Production of ciliates (mgC/m ³ /day)	Grazing of <i>O. davisae</i> (mgC/m ³ /day)
2000 May	3.883	0.165 (4.2)	6.818	0.468 (6.9)
Jun.	1.568	4.298 (274.1)	1.917	10.165 (530.3)
Jul.	25.447	0.553 (2.2)	7.752	8.853 (114.2)
Aug.	19.673	10.950 (55.7)	44.457	10.978 (24.7)
Sep.	21.423	4.533 (21.2)	10.313	12.568 (121.9)
Oct.	2.122	7.250 (341.7)	14.798	2.468 (16.7)
Nov.	2.090	1.070 (51.2)	3.402	2.498 (73.4)
Dec.	0.569	0.010 (1.8)	2.005	0.168 (8.4)
2001 Jan.	3.452	0.065 (1.9)	2.102	0.038 (1.8)
Feb.	1.723	0.050 (2.9)	4.210	0.035 (0.8)
Mar.	2.144	0.540 (25.2)	5.429	0.568 (10.5)
Apr.	No data	3.903 (—)	No data	0.735 (—)

* calculated by using Ikeda and Motoda's (1978) equations (see text)

季には両定点共に著しく減少した。

考 察

植物プランクトン

五ヶ所湾におけるクロロフィル *a* 濃度 (0.5, 5および10m 深の平均値) からみた植物プランクトン現存量の年間最大は、的矢湾 (今井ら, 1999), 英虞湾 (谷村ら, 2001) および広島湾 (Kamiyama, 1994; 平田, 2000) と同様に夏季にみられた。これら水域は、五ヶ所湾と異なり、カキあるいはアコヤガイなどの代表的二枚貝養殖場であるため、そこでの魚類養殖場における植物プランクトンの季節変化についての知見は見当たらず、両漁場間での比較は行われなかった。一方、五ヶ所湾では魚類養殖がアコヤガイ養殖場の対面に位置しており、そこでのクロロフィル *a* 濃度の全期間を通しての平均値と年間最大値 (7月) はアコヤガイ養殖場でのそれらと比べて高かった。主要構成種のうち、珪藻類 *Skeletonema costatum* は富栄養水域の指標種としてみなされていることから (山田ら, 1980), マダイ養殖場における本種の主要構成種

としての出現はアコヤガイ養殖場と比較してマダイ養殖場ではより富栄養化が進行していることを示唆している。この原因の一つとして、マダイ養殖場では海水交換率の低下 (海水の滞留時間の増加) (Toda *et al.*, 1994) と相まって、夏季植物プランクトン現存量の増加に寄与した赤潮生物 (*K. mikimotoi*) の増殖を促進させる給餌による残餌・排泄物から溶存有機態窒素の負荷が大きく関与していること (西村, 1982) が挙げられる。更に、養殖アコヤガイによる植物プランクトンの摂食 (除去) も相対的にマダイ養殖場における植物プランクトン現存量を高める一因になっているかも知れない。

微小動物プランクトン (繊毛虫類)

本研究では繊毛虫類 (優占群: 少毛目) はマダイ・アコヤガイ養殖場共に夏季より冬季に多量に出現し、その年間最大は植物・メソ動物プランクトン出現量が年間最小を記録した12月から2月の期間にみられた。このような低水温期に増加する季節変化は植物・メソ動物プランクトンの季節変化 (Figs. 4および7) の様相とは対照的である。このことは、繊毛虫類の生

産は冬季に衰退するにもかかわらず、その捕食者である *Oithona davisae* の摂食活動が繊毛虫類の生産に比べて甚だしく低下することによると考えられる。また、本湾における繊毛虫類の季節変化は少毛目が優占したことから、有鐘目が周年にわたり優占し、特に夏季に増加する広島湾における繊毛虫類の季節変化のパターン (Kamiyama, 1994) とは質的に異なることが明らかとなった。更に、東京湾でも有鐘目が優占し、主に5~8月に多量に出現することが報告されている (佐々木, 1996)。本研究では、植物プランクトン現存量 (クロロフィル *a* 濃度) の場合と同様に、繊毛虫類の個体数の全期間を通しての平均値と年間最大値 (1~2月) はマダイ養殖場の方がアコヤガイ養殖場でのそれらと比べて高かった。有鐘目に代わって少毛目が卓越したこと、また、その出現個体数が冬季のマダイ養殖場で多くなった理由として、マダイ養殖場における給餌が影響しているかどうかは本研究では明らかにできなかった。しかしながら、繊毛虫類の生産が夏季にマダイ養殖場で高かったことは、少毛目の餌として知られている細菌 (Fenchel and Jonsson, 1988; Rassoulzadegan *et al.*, 1988) がアコヤガイ養殖場と比較してより多く出現したこと (Fig. 3) などと関係しているのかも知れない。

メソ動物プランクトン

五ヶ所湾における主要カイアシ類3種 (*Oithona davisae*, *Acartia omorii* および *Paracalanus crassirostris*) のうち、東京湾では *O. davisae* は夏季 (7~8月) に、*A. omorii* は冬・春季 (2月, 4月) に各々多量に出現した (穴久保, 村野 1991)。また、Hirota (1979) の報告によれば、広島県向島 (瀬戸内海) においてもこれら両種 (*O. davisae* および *A. omorii* は各々 *O. brevicornis* および *A. clausi* として報告) は東京湾と類似した季節変化を示した。*O. davisae* は広島県福山港 (瀬戸内海) においても同様に夏季に個体数が急増することが知られている (Uye and Sano, 1995)。他の1種 *P. crassirostris* の多量出現期は、東京湾では秋季 (10月) から冬季 (2月) に (穴久保, 村野 1991)、また、瀬戸内海 (*Paracalanus* sp.1 = *P. parvus* f. *minor* として報告) では秋季 (9~11月) にみられた (Hirota, 1979)。したがって、五ヶ所湾におけるこれら3種は東京湾および瀬戸内海においても類似した季節変化のパターンを示すことが明らかとなり、*O. davisae* から *P. crassirostris*, 更に *A. omorii* への季節遷移は日本の温帯内湾域に共通する特徴であるといえる。*P. crassirostris* は、五ヶ所湾においては年間 (各月合計) 出現量でみると、両定点共に *O.*

davisae の次に位置し (Table 4)、高水温期に卓越する *O. davisae* と低水温期に卓越 (冬季に出現, 増加) する *A. omorii* を繋ぎ、動物プランクトンの生産を持続させるうえで重要な意義をもつといえる。

これまでの東京湾および瀬戸内海におけるプランクトン研究では、これらカイアシ類3種の出現量の季節変化を魚類養殖場と二枚貝養殖場の間で比較していないため、給餌に伴う養殖由来物質のカイアシ類群集への影響については明らかではない。しかしながら、五ヶ所湾においては *O. davisae* の年間出現量は他の2種と異なりマダイ養殖場ではアコヤガイ養殖場と比較して個体数および現存量共に多くなることが分かった (Table 4)。また、上述されるように、植物プランクトンおよび繊毛虫類の年平均現存量も共にマダイ養殖場の方がアコヤガイ養殖場より優れていることが分かった。それゆえ、マダイ養殖場において *O. davisae* がアコヤガイ養殖場と比較して多量に出現した理由の一つとして、両養殖場では水温の季節変化はほぼ同じであったことから、マダイ養殖場の方が *O. davisae* にとって十分な餌料供給があったことによると考えられる。

Oithona davisae を巡る食物連鎖構造

Oithona davisae の長期にわたる出現 (春~秋季) は、卵嚢形成により、夏季に形成される中・底層の貧酸素水中に直接産出卵を放出しない産卵様式 (Uye, 1994) の他に、本種個体群を持続させるための一定した餌料確保と密接な関連をもつと考えられる。本種は餌として珪藻類ではなく、鞭毛藻類、繊毛虫類 (少毛目, 有鐘目) および他の動く生物を捕食する摂餌特性を示すといわれている (Uchima, 1988; Uchima and Hirano, 1986)。しかしながら、鞭毛藻類のうち、夏季にマダイ養殖場で卓越する有毒赤潮生物の一種 *Karenia mikimotoi* は有鐘目 *Favella ehrenbergii* に捕食されるが (Nakamura *et al.*, 1996; Kamiyama and Arima, 2001)、何らかの拒食誘発 (化学) 物質の存在が推定され、カイアシ類 (例えば、*Acartia omorii*) の餌料としては好適であるとはいいがたい (Uye and Takamatsu, 1990)。また、Granéli and Turner (2002) は天然プランクトン群集の相互関係についてのメソコズムス実験を行い、*K. mikimotoi* の大部分はカイアシ類 (*Acartia clausi* など4種) によって摂食されなかったと報告している。

一方、繊毛虫類では、*Oithona davisae* の全発育期 (ノープリウス~成体) の個体が少毛目の *Strobilidium* spp. と *Strombidium* spp. を捕食し、また、成体雌が有鐘目の *Tintinnopsis beroidea* と *Favella ehrenbergii*

を捕獲していることがしばしば観察されている (Uchima and Hirano, 1986)。そのため、7月のマダイ養殖場における *O. davisae* の摂食圧 (Table 5) は、豊富ではあるが、餌料として不適切な植物プランクトン (*K. mikimotoi*) に対するより繊毛虫類、例えば、本研究において夏季のマダイ養殖場で優占した *Strobilidium* spp. および *F. ehrenbergii* (本種は個体数では多くなかったものの、現存量で見ると、*Strobilidium* spp. の次に主要構成種として出現) に対してより高まるといえよう。Kamiyama *et al.* (2003) によれば、夏季の広島湾では基礎生産者・細菌から無殻繊毛虫類へのエネルギー転送効率は恐らく *Oithona* spp. による繊毛虫類に対するトップダウン・コントロールによって影響されることが推察された。本研究においては、繊毛虫類の生産量に対する *O. davisae* の摂食量の関係 (Table 5) から、このような *O. davisae* による繊毛虫類に対するトップダウン・コントロールが指摘された。しかしながら、繊毛虫類からのエネルギー供給だけでは *O. davisae* 個体群を到底維持できない場合 (繊毛虫類の生産量に対する *O. davisae* の摂食量の割合が100%以上を示す月) も見出されたことから (Table 5)、その不足分を補給するための餌料源とその生産量を明らかにするとともに、内湾性の本種個体群が獲得した幅広い水温変化に対する代謝ホメオスタシス (Hiromi *et al.*, 2000) の適応意義についても考慮する必要がある。

Sakami *et al.* (2003) は夏季五ヶ所湾マダイ養殖場における水柱当たりの細菌生産の少なくとも9%が養殖由来有機物 (DOC, DON) によって維持されていることを報告した。このことから、給餌に伴う残餌・排泄物からの溶存態有機物負荷の増大は赤潮生物の増殖を促進させる (西村, 1982) だけでなく、繊毛虫 (少毛目) の餌として重要な細菌の生産にも寄与していることが指摘される。したがって、マダイ養殖場では、特に、夏季には養殖由来の溶存態有機物 (DOM) の増加に伴い増殖が促された細菌や、また、突発的に大増殖した有毒赤潮生物に代わってナノプランクトン (恐らく、従属栄養性微小鞭毛虫類を含む) を餌として繊毛虫 (主に、少毛目 *Strobilidium* spp.) が増加し、更に、それら繊毛虫に対する *O. davisae* の摂食圧が他の季節に比べ高まるものと判断される (Table 5)。すなわち、夏季の五ヶ所湾マダイ養殖場における *O. davisae* の個体群増加を支える餌料供給源 (経路) として微生物食物連鎖 (溶存態有機物-細菌-微小鞭毛虫類-繊毛虫-カイアシ類 *O. davisae*) が重要な役割を果たしていることが想定される。

Oithona davisae から更に高次消費者への有機物フローについて考察してみる。五ヶ所湾における6月および9月の仔稚魚 (優占種: イソギンポ *Pictiblenius yatabei*, キビナゴ *Spatelloides gracilis*, シロギス *Sillago japonica* およびハゼ科 *Gobiidae*) の分布 (Table 6) から、それらの出現個体数および種類数は

Table 6. Occurrence of fish larvae collected by ORI net* in the pearl oyster (Stn.A) and fish (Stn.B) farms, and at the mouth of Gokasho Bay in September 2000 and June 2001 (Hirakawa, unpublished)

Sampling date	Occurrence	Stns.		the bay mouth
		A	B	
8 Jun. 2001	No. of inds./haul	19	10	50
	No. of species/haul	6	4	12
	Dominant species	<i>Pictiblenius yatabei</i>	<i>Pictiblenius yatabei</i>	<i>Pictiblenius yatabei</i>
19 Sep. 2000	No. of inds./haul	38	13	535
	No. of species/haul	14	8	40
	Dominant species	<i>Rudarius ercodes</i>	unidentified (broken)	<i>Gobiidae</i> <i>Spatelloides gracilis</i> <i>Sillago japonica</i>

* mesh opening; 1.0mm, mouth diameter; 160cm, length of filtering portion; 600cm

いずれの月においても共に湾口部と比べて湾内養殖場 (Stns.AおよびB)で少なく、特に、マダイ養殖場 (Stn.B)で最低を示すことが分かった。このことは、高水温期における仔稚魚の生息環境として、マダイ養殖場は湾口部、更に、アコヤガイ養殖場と比較しても好ましくないことを意味している。したがって、これら仔稚魚による *O. davisae* (主にノープリウス幼生) への捕食の影響は軽微であり、低次から高次への有機物の転送効率 (生態効率) はマダイ養殖場では低いと考えられる。他方、アコヤガイ養殖場およびマダイ養殖場では夏季に肉食大型動物プランクトンであるミズクラゲ (*Aurelia aurita*) が観察されており、その発生量と集群化は環境条件により時空間的に変動するが、マダイ養殖場付近の方がアコヤガイ養殖場に比べて著しいようである (豊川 私信)。東京湾で示唆されるような *O. davisae* からプランクトン食性魚ではなくミズクラゲへの有機物フロー (Uye 1994) が五ヶ所湾養殖場、特に、魚類養殖場においても機能している可能性が高いといえる。五ヶ所湾のマダイ養殖場の下層には夏季から秋季に沿岸湧昇の発生に伴い湾外水が間欠的に流入することが知られており、この現象が起こると、わずか1日でマダイ養殖場のある迫間浦 (枝湾) の海水の1/3が置き換わるといわれている (阿保 2000)。しかしながら、夏季に湾内で発生したミズクラゲおよび *O. davisae* の個体群自体が湾外水に替わって湾外に流出する湾内上層水とともに湾外に搬出される証拠を得ることはできなかった。

栄養段階の高い生物群集の系外移出には、五ヶ所湾内で生産された有機物が高次消費者 (魚類) に取り込まれ、人為的に湾内で捕獲される場合 (漁獲) と海流により湾外に輸送され、そこで高次消費者に利用される場合に大別される。本湾では、魚類養殖が始まる以前の明治から大正初期 (1913年頃) にかけてカツオ一本釣り漁の生餌として不可欠なカタクチイワシを定置網により採捕するなど、給餌養殖が主体の現在より捕獲漁業が盛んに行われていた (川口 2004)。このような湾内漁業の形態の違いから、湾内における漁獲を介して系外へ移出される有機物量は現在では当時と比較し著しく少ないとみなされ、現在の系外移出は漁獲よりも海流輸送に依存していることが示唆される。

Oithona davisae は日本沿岸の富栄養化した内湾域において温暖期にエネルギーをナノ・ミクロ鞭毛藻類や繊毛虫類 (低次栄養段階) から高次栄養段階へと転送するうえで重要な役割を果たしていることが報告されている (Uye and Sano, 1998)。実際、東京湾 (Hiromi, 1995)、伊勢湾 (Uye *et al.*, 2000) および洞海湾 (Uye *et al.*, 1998) では生食食物連鎖のみならず、微生物食

物連鎖におけるエネルギー転送効率などが調べられ、両食物連鎖の相互関係が明らかにされつつある。今後、養殖場、特に、人為的有機物負荷が加わる魚類養殖場においても *O. davisae* を中心とした微生物食物連鎖による生物浄化機能 (有機物フロー) について湾外への海流による有機物輸送機構を含めて定量的に評価する必要がある。

謝 辞

本稿を終るに当たり、内湾域における微生物食物連鎖について有益なご助言を戴いた日本大学生物資源科学部広海十朗教授に心から感謝の意を表します。また、野外採集調査にご協力戴いた養殖研究所調査船“なんせい”船長山本茂也氏に厚くお礼申し上げます。なお、本研究は水産庁委託事業「増養殖適正化総合調査委託事業」の一環として実施された。

文 献

- 阿保勝之, 2000: 外洋に面した半閉鎖性漁場における貧酸素水塊の挙動に関する研究. 養殖研報, **29**, 141-216.
- 穴久保隆, 村野正昭, 1991: 東京湾における動物プランクトンの季節変化. *J. Tokyo Univ. Fish.*, **78**, 145-165.
- 安楽正照, 1986: 動物プランクトン調査. 「沿岸環境調査マニュアル [底質・生物編]」(日本海洋学会編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.177-216.
- Fenchel T. and Finlay B. J., 1983: Respiration rates in heterotrophic, free-living protzoa. *Microb. Ecol.*, **9**: 99-122.
- Fenchel T. and Jonsson P. R., 1988: The functional biology of *Strombidium sulcatum*, a marine oligotrich ciliate (Ciliophora, Oligotrichina). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **48**, 1-15.
- 福島菊夫, 1970: 的矢湾および五ヶ所湾におけるアコヤガイの異常斃死に関する研究 - 特に餌料生物環境について -. 真珠技術研究会会報, **9**, 1-21.
- Granéli E. and Turner J. T., 2002: Top-down regulation in ctenophore-copepod-ciliate-diatom-phytoflagellate communities in coastal waters: a mesocosm study. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **239**, 57-68.
- 平田 靖, 2000: 広島湾のクロロフィル量変化. 水産海洋研究, **64**, 293-297.
- Hiromi J., 1994: Respiration rates of copepod nauplii

- with a comparison of metazoan and protozoan metabolism. *Bull. Coll. Agr. & Vet. Med., Nihon Univ.*, **51**, 154-157.
- Hiromi J., 1995 : Contribution of cyclopoid copepod *Oithona davisae* population to nutrient regeneration of Tokyo Bay during summer. *Bull. Coll. Agr. & Vet. Med., Nihon Univ.*, **52**, 113-118.
- Hiromi J., Nagata T., and Kadota S., 1988 : Respiration of the small planktonic copepod *Oithona davisae* at different temperatures. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **35**, 143-148.
- Hirota R., 1979 : Seasonal occurrence of zooplankton at a definite station off Mukaishima from July of 1976 to June of 1977. *Publ. Amakusa Mar. Biol. Lab.*, **5**, 9-17.
- 弘田禮一郎, 1981 : 瀬戸内海における主要動物プランクトンの乾燥重量と化学組成. 日本プランクトン学会報, **28**, 19-24.
- Honjo T., 1987 : Growth potential of *Chattonella marina* (Raphidophyceae) collected in Gokasho Bay, central Japan. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **34**, 119-124.
- Honjo T., Yamamoto S., and Yamaguchi M., 1990 : Annual cycle of motile cells of *Gymnodinium nagasakiense* and ecological features during period of red tide development, in "Toxic Marine Phytoplankton" (ed. by Granéli E. *et al.*), Elsevier Science Publication, pp. 165-170.
- Honjo T., Yamaguchi M., Nakamura O., Yamamoto S., Ouchi A., and Ohwada K., 1991 : A relationship between winter water temperature and the timing of summer *Gymnodinium nagasakiense* red tides in Gokasho Bay. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **57**, 1679-1682.
- 一戸直之, 1992 : 東京湾の物質循環に果たす微小動物プランクトンの役割. 日本大学大学院農学研究科水産学専攻修士論文, 40pp (本文のみ), 図 (Figs. 1-18), 表 (Tables 1-2) 及び写真 (Plates 1-2) は別添.
- Ikeda T. and Motoda S., 1978 : Estimated zooplankton production and their ammonia excretion in the Kuroshio and adjacent seas. *Fish. Bull.*, **76**, 357-367.
- 今井 直, 太原英生, 河村章人, 1999 : 養殖漁場としての的矢湾の低次生産環境特性. 三重大生物資源紀要, **23**, 1-12.
- Kamiyama T., 1994 : The impact of grazing by microzooplankton in northern Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea, Japan. *Mar. Biol.*, **119**, 77-88.
- Kamiyama T. and Arima S., 2001 : Feeding characteristics of two tintinnid ciliate species on phytoplankton including harmful species: effects of prey size on ingestion rates and selectivity. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **257**, 281-296.
- Kamiyama T., Arima S., and Tsujino M., 2003 : Characteristics of the distribution of bacteria, heterotrophic nanoflagellates and ciliates in Hiroshima Bay in summer. *Fish. Sci.*, **69** : 755-766.
- 川口祐二, 2004 : 沿岸の漁業, 「南勢町誌」(南勢町誌編纂委員会), 三重県度会郡南勢町, 南勢町, pp. 115-149.
- 栗原 康, 1998 : 共生の生態学, 岩波書店, 東京, 235pp.
- Nakamura Y., Suzuki S., and Hiromi J., 1996 : Development and collapse of a *Gymnodinium mikimotoi* red tide in the Seto Inland Sea. *Aquat. Microb. Ecol.*, **10**, 131-137.
- 西村昭史, 1982 : 魚類養殖漁場の有機汚染が赤潮生物 *Gymnodinium* type-'65 および *Chattonella antiqua* の増殖に及ぼす影響. 日本プランクトン学会報, **29**, 1-7.
- 大森 信, 池田 勉, 1976 : 動物プランクトン生態研究法, 共立出版, 東京, 229pp.
- Rassoulzadegan F., Larval-Peuto M., and Sheldon R. W., 1988 : Partitioning of the food ration of marine ciliates between pico- and nanoplankton. *Hydrobiologia*, **159**, 75-88.
- 佐々木克之, 1996 : 内湾および干潟における物質循環と生物生産 【20】, 海洋と生物, **18**, 327-334.
- 佐々木克之, 梅林 脩, 中田 薫, 松川康夫, 1989 : 東京湾における栄養条件とプランクトン生産の特異性に関する研究. 昭和63年度科学技術振興調整費中央水産研究所報告, 53-1-53-13.
- Sakami T., Abo K., Takayanagi K., and Toda S., 2003 : Effects of water mass exchange on bacterial communities in an aquaculture area during summer. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **56**, 111-118.
- Suzuki R. and Ishimaru T., 1990 : An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**, 190-194.

- Takahashi M. and Hoskins K. D., 1978 : Winter condition of marine plankton populations in Saanich Inlet, B.C., Canada. II. Microzooplankton. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, **32**, 27-37.
- 谷村 篤, 竹中島裕, 高井理加, 2001 : 英虞湾座賀島水道における海洋環境とサイズ別植物プランクトン現存量の季節変動. 内湾環境の物質循環と餌の多様性からみた自然プランクトン群集と養殖生物の相互作用 (課題番号 : 10660177) 平成10・11・12年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C) (2)), 研究成果報告書, 7-23.
- Toda T., Abo K., Honjo T., Yamaguchi M., and Matsuyama Y., 1994 : Effect of water exchange on the growth of the red-tide dinoflagellate *Gymnodinium nagasakiense* in an inlet of Gokasho Bay, Japan. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquaculture, Suppl.*, **1** : 21-26.
- Tomaru Y., Kumatabara Y., Kawabata Z., and Nakano S., 2002a : Effect of water temperature and chlorophyll abundance on shell growth of the Japanese pearl oyster, *Pinctada fucata martensii*, in suspended culture at different depths and sites. *Aquaculture Res.*, **33**, 109-116.
- Tomaru Y., Udaoka N., Kawabata Z., and Nakano S., 2002b : Seasonal change of seston size distribution and phytoplankton composition in bivalve pearl oyster *Pinctada fucata martensii* culture farm. *Hydrobiologia*, **481**, 181-185.
- 内田卓志, 本城凡夫, 松山幸彦, 2001 : 三重県五ヶ所湾における *Gymnodinium mikimotoi* の消長と物理・化学的要因及び生物学的要因との関係について. 日本プランクトン学会報, **48**, 104-110.
- Uchima M., 1988 : Gut content analysis of neritic copepods *Acartia omorii* and *Oithona davisae* by a new method. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **48**, 93-97.
- Uchima M. and Hirano R., 1986 : Food of *Oithona davisae* (Copepoda : Cyclopoida) and the effect of food concentration at first feeding on the larval growth. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **33**, 21-28.
- Uye S., 1994 : Replacement of large copepods by small ones with eutrophication of embayments: cause and consequence. *Hydrobiologia*, **292/293** : 513-519.
- Uye S. and Sano K., 1995 : Seasonal reproductive biology of the small cyclopoid copepod *Oithona davisae* in a temperate eutrophic inlet. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **118**, 121-128.
- Uye S. and Sano K., 1998 : Seasonal variations in biomass, growth rate and production rate of the small cyclopoid copepod *Oithona davisae* in a temperate eutrophic inlet. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **163**, 37-44.
- Uye S. and Takamatsu K., 1990 : Feeding interactions between planktonic copepods and red-tide flagellates from Japanese coastal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **59**, 97-107.
- Uye S., Nagano N., and Shimazu T., 1998 : Biomass, production and trophic roles of micro-and net-zooplankton in Dokai Inlet, a heavily eutrophic inlet, in summer. *Plankton Biol. Ecol.*, **45**, 171-182.
- Uye S., Nagano N., and Shimazu T., 2000 : Abundance, biomass, production and trophic roles of micro-and net-zooplankton in Ise Bay, central Japan, in winter. *J. Oceanogr.*, **56**, 389-398.
- 山田真知子, 鶴田新生, 吉田陽一, 1980 : 植物プランクトンの富栄養段階表. 日水誌, **46**, 1435-1438.
- Yokoyama H., 2002 : Impact of fish and pearl farming on the benthic environments in Gokasho Bay: evaluation from seasonal fluctuations of the macrobenthos. *Fish. Sci.*, **68**, 258-268.
- 横山 寿, 西村昭史, 井上美佐, 2002a : 熊野灘沿岸の魚類養殖場におけるマクロベントス群集と堆積物に及ぼす養殖活動と地形の影響. 水産海洋研究, **66**, 133-141.
- 横山 寿, 西村昭史, 井上美佐, 2002b : マクロベントスの群集型を用いた魚類養殖場環境の評価. 水産海洋研究, **66**, 142-147.