

干潟二枚貝の生産過程と餌料環境

伊藤絹子^{*2}・加賀敏樹^{*2}・佐々木浩一^{*1}・大森迪夫^{*1}

Biological Production Process and Food Environment for Bivalves in Tidal Flat.

Kinuko ITO^{*1}, Toshiki KAGA^{*2}, Koichi SASAKI^{*1}, and Michio OMORI^{*1}

Abstract A combination of ecological research, field experiments and laboratory experiments was carried out to analyze the biological production process and food environment for bivalves in a tidal flat around Sendai Bay. Both field experiments and stable isotope analysis indicated that the important nutritional resources for *Ruditapes philippinarum* and *Nuttallia olivacea* are benthic diatoms, with a lower contribution of detritus. *Macoma contabulata* and *Corbicula japonica*, inhabiting the same site with *Nuttallia olivacea*, are supplied with different resources that up to now have been unknown. The food requirement for *Nuttallia olivacea* is estimated to be about 1500 mg C m⁻² day⁻¹ at a high-density location in the tidal flat of the Natori River in spring. Conditions affecting food availability may be linked with physical environmental conditions, and clarification of the coupling mechanisms between the biological production process and physical conditions is important for the various microenvironments. *Nuttallia olivacea* showed marked differences in growth at each location. Most available conditions are considered to be moderate current velocity with shallow depth, low silt-clay content and high chlorophyll *a* in the sediment, and presence of a wide variety of diatom species with varied size compositions. We propose a fill-in sheet for evaluation of food environment and microenvironment for bivalves at different developmental stages.

Key words: diatom, bivalve, detritus, food resources, microenvironment, tidal flat

豊かな海は生物と環境との巧みなバランスの上になり立っていると考えられる。近年のアサリ資源の減少は深刻な問題であるが、自然は刻々変化するものであり、様々な要因が複雑に絡み合った結果として現場の生態が捉えられること、さらには生物と環境との関係は常に流動的であることから、その原因究明には多くの困難が伴う。アサリ資源の保護・育成は漁業振興の問題だけに留まらず、沿岸域の環境保全の上からも非常に重要である。

イソシジミは低塩分耐性がアサリより強く、河口域に広く分布がみられる種である（伊藤，大方1998）。イソシジミの水管はインガレイ稚魚の主要な食物であること、

捕食された水管は直ちに再生が始まるという事実もわかり（Sasaki *et al.* 2002）、河口域物質循環系に果たす役割が非常に大きいと考えられている。名取川河口では1995年の大洪水でアサリ資源が激減した後、アサリに替わって漁獲されている。

本研究では干潟二枚貝の餌料環境に関して、以下に示すような疑問点や問題点をとりあげ、現在までに明らかになってきたことを整理して考察したい。（1）二枚貝類の餌料は植物プランクトンとデトライタスの一括りで扱われることが多いが、真の栄養源は何か？（2）二枚貝の生産を支えるために必要な食物量はどのくらいか？

2004年1月15日受理（Received on January, 2004）

^{*1} 東北大学大学院・農学研究科（Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University., Amamiyamachi 1-1, Tsutsumidori, Aoba, Sendai 981-8555, Japan）

^{*2} 独立行政法人さけ・ます資源管理センター（National Salmon Resources Center, Nakanoshima 2-2-4-1, Toyohira, Sapporo, 062-0922, Japan）

(3) 場所により成長が異なる主要因は何か？ (4) 物理的環境条件との関係では何が問題になるのか？ (5) 餌料環境はどのように評価すればよいのか？

本研究ではフィールドの一般的な生態調査に加えて、微環境レベルの観測、現場実験、室内飼育実験を組み合わせることにより、生物生産過程と環境との関係を総合的に捉えるように努力した。

最近10年間に亘り、仙台湾周辺水域（名取川河口、広浦、蒲生干潟）を中心に行なわれてきた研究成果をもとにイソシジミ、アサリを中心に紹介する。

材料と方法

1. 仙台湾周辺水域の二枚貝の生態・環境調査

調査水域の概要ならびに調査定点をFig.1に示す。1994年～2002年にかけて、名取川河口域、広浦、蒲生干潟において生態学的調査（分布密度、現存量、胃内容物の検索）と環境調査を実施した。水温、塩分は現場で測定し、底質の粒度、シルト含有率、Chl. *a* 濃度、微細藻類の種類組成についてはサンプルを持ち帰り分析した。底土は底質の深さごとの特性を知るために、直径5cm、長さ20cmのスチロール管をさし込んで、底土を表面から深さ1cmまで、4cmから5cm、9cmから10cmまでの3層に分けたサンプルを実験室に持ち帰った。観察用のサンプルは底土1gを10%中性ホルマリン5mLに懸濁させた。走査型電子顕微鏡用には2.5%グルタルアルデヒドで固定した。微細藻類およびデトライタスの生物顕微鏡用プレパラートについては屈折率を高めて観察をしやすくするために、底土サンプルの懸濁液を、Pleurax（マウントメディア）でスライドガラス上に包埋した。安定同位体分析用サンプルは凍結保存した。

2. 微環境レベルによる生物と環境に関する調査

河口域は河川水や海水の流入の仕方が地形により複雑に変化する。そのため数メートルのスケールで著しく環境の異なる場所が存在する。このような微環境の違いは、そこでの生物過程と密接に関連すると考えられるので、微環境の特性を把握するために一般的な環境観測とは別に、水層を10cm単位で採取するための採水器と、間隙水を採取するための装置を考案した（Fig. 2）。この装置を用いて潮汐に伴う水の流動と栄養塩の関係を調べるため16時間連続観測を行なった。

3. 二枚貝（イソシジミ）の現場成長実験

現場におけるイソシジミの成長速度を測定するために、名取川河口域において、環境の異なる数箇所、マーキ

ングしたイソシジミのケージ実験をおこなった。イソシジミを20個体ずつ、目合4mmのケージに入れて底土中に埋めた。その際、ケージは上面が底土表面と一致するように設置した。ケージのサイズは25×25×15cm（縦、横、高さ）で、形状のゆがみを少なくするために、太さ0.5mmのナイロン製のモジ網を用いた。イソシジミは原則として1～2ヶ月ごとに再捕して、殻長と重量を測定して成長速度を求め、翌日再び放流した。

4. 二枚貝の摂食量と成長に関する室内飼育実験

アサリ、イソシジミの摂食量と成長の関係を求めるために、室内飼育実験を行なった。採集してきた個体は、海砂を敷いた6リットルの円形水槽に入れて数日間馴致させた。個体識別するために飼育は1個体ずつ分けて行なった。1,000mLビーカーに海砂を2cmの厚さに敷き詰め、ろ過海水を500mLずつ入れて、飼育個体を入れた。餌料として培養した珪藻*Skeletonema costatum*（クロロフィル*a* 約1,000 μ g/L）を1回あたり5mL与えた。給餌回数の異なる実験区を設けて、15日間の試験を行なった。それぞれの実験区における試験個体数は7～10個体である。飼育水は毎日交換した。摂食量は与えた食物量と残った食物量のクロロフィル量の差として算出して、摂食量と成長との関係を求めた。

デトライタスを含む自然水域の底土懸濁液を用いた成長実験の場合には、餌料溶液はCODとして50～60ppmになるように調整した。採集場所は蒲生干潟、名取川河口、広浦、貞山運河、砂押川河口である（Fig. 1）。

5. 二枚貝および微細藻類の炭素・窒素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ ）の測定

炭素・窒素安定同位体比は食性解析に有効であると考えられており（Incze *et al* 1982, 和田 1986）、本研究においても二枚貝栄養源の特定のために分析した。名取川河口域、広浦、蒲生干潟より採集した二枚貝、アサリ（*Ruditapes philippinarum*）、イソシジミ（*Nuttallia olivacea*）、ヤマトシジミ（*Corbicula japonica*）、サビシラトリガイ（*Macoma contabulata*）、ソトオリガイ（*Laternula marilina*）を分析直前まで冷凍保存した。サンプルを凍結乾燥した後、脱脂処理を施して、粉末にした後、錫のコンテナに封入後、質量分析計（Finnigan MAT DELTA Plus）により、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ について分析した。水中懸濁物についてはGF/Fフィルターに捕集後、塩酸処理を施し、60℃で乾燥して分析した。底質サンプルについても塩酸処理を施し乾燥後分析した。

安定同位体比による解析で大きな問題は基礎生産者の値である。本研究では現場で培養した珪藻（底生および浮遊珪藻）について $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の分析を行なった（伊

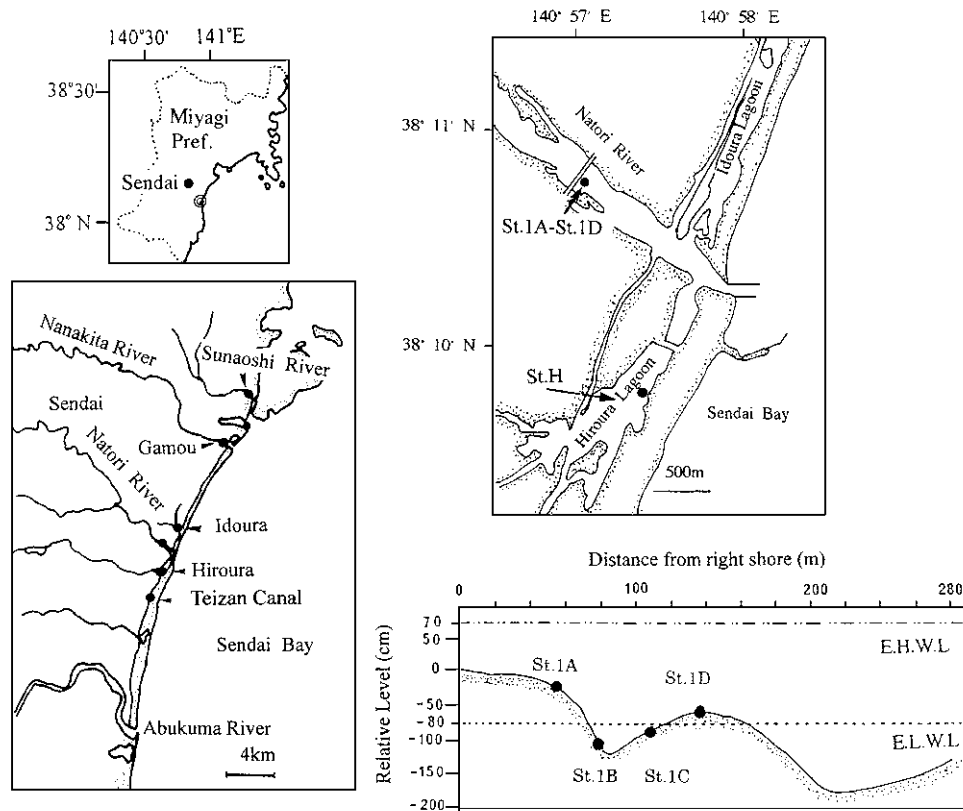


Fig. 1. Map showing the location of the sampling stations and the relative level of the experimental sites. E. H. W. L.: Extreme high water level of spring tide. E. L. W. L.: Extreme low water level of spring tide.

藤2002)。透析膜の性質（光、O₂、CO₂、栄養塩などは透過するが、バクテリアなどの粒状有機物は透過しない）に着目し、出来る限り現場の環境に近い条件のもとで、種別に現場における生育状況を把握した上で、安定同位体比の情報を得ることを試みた。珪藻は宮城県名取川河口域水より単離し、松平培地で継代培養している浮遊珪藻の *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira pseudonana*、底生珪藻の *Entomoneis alata*, *Cylindrotheca closterium* の4種類である。

結 果

1. 干潟二枚貝の餌料について

アサリ、イソシジミ、ヤマトシジミ、サビシラトリガイ、ソトオリガイの胃内容物の観察によれば、摂食物は微細藻類とデトライタスであった。干潟で観察されるイソシジミは生息深度に応じて殻長の違いがみられた。殻長10mm以下の稚貝では、底土表面から深さ5cm以内（貝の前縁部の位置）に生息するが、成長に伴い、より深い層で生活するようになり、殻長25mm以上の個体では深さ15cmまで潜って生活する。イソシジミの摂食行動を現場で観察すると、水管を底表に沿って伸ばしている状態は

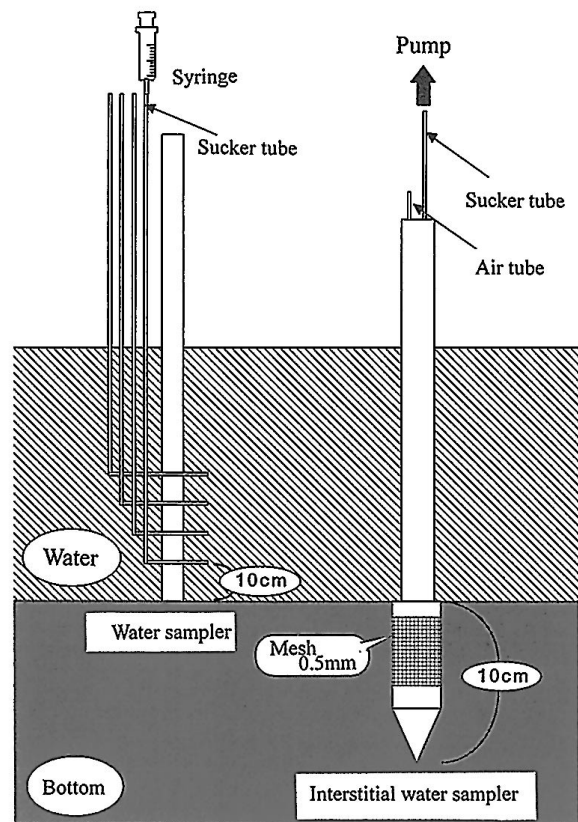


Fig. 2. Diagram of special water sampler for investigating micro environmental conditions near to, and in the bottom bed.

ほとんどみられないが、砂の表面にある水管の穴の周囲には微細な水流ができていて、食物を摂取する様子を肉眼で確かめることができた。サビシラトリガイは、イソシジミよりもさらに深く潜り、長く伸ばした水管を砂粒上に這わせるようにして底土表面の堆積物を摂取している。アサリとヤマトシジミは、殻長程度に潜り、水管の触手のみが底土表面に出ている状態で、付近の懸濁物を摂取する様子を観察することが出来た。

Fig. 3はイソシジミの胃内容物の顕微鏡写真と砂粒上のデトライタスと珪藻の電子顕微鏡写真である。多種多様な底生珪藻が見られるが、浮遊珪藻はほとんど観察されない。イソシジミの胃内容物、海水中の粒状物、底土中の粒状物の出現頻度をFig. 4に示した。胃内容物の組成は底土のものと似ていて、海水中に出現頻度が高い浮遊珪藻の*Skeletonema*などは胃の中にはほとんどみられなかった。これはイソシジミが底土表面付近に懸濁している有機物を摂取する可能性を示している。アサリやヤマトシジミの場合も同様で、*Navicula* spp. *Nitzschia* spp. *Cymbella* sppが多く見られた。粒状物の多くは形状が不定で、デトライタスと呼ばれるものが多く見られるが、二枚貝類の餌料について、種類ごとに特性を見出す事は難しかった。

そこで、安定同位体比による比較を行った。Fig. 5は蒲生干潟と名取川河口で採集した二枚貝類の炭素・窒素安定同位体比である。同じ場所で採集されたものでも、種によって安定同位体比が異なる場合が認められた。名取川河口ではイソシジミとヤマトシジミの $\delta^{13}\text{C}$ は大きく異なる。イソシジミでは -18% 前後、ヤマトシジミは -24% で6%の差が見られた。蒲生干潟ではイソシジミとアサリの安定同位体比はほぼ同じで、 -18% 前後であったが、サビシラトリガイは著しく異なり、 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ ともに、アサリ、イソシジミより重い値を示した。サビシラトリガイは堆積物を摂取しているにもかかわらず、堆積物の安定同位体比とも著しく異なっていた。同じ場所から採集した二枚貝をろ過海水に入れ、それぞれの排泄物の安定同位体比分析を行った結果、どの種も底土有機物の安定同位体比とほぼ同じ値であった(伊藤未発表)。排泄物は未吸収の有機物であるから、底土堆積物を取り入れ、その中の一部分がそれぞれの二枚貝の体物質に同化されているのであろう。この一部分の中身が種により質的に異なると考えられる。

二枚貝が摂取する珪藻類の安定同位体比について検討してみる。Table 1は現場培養実験により求められた種類ごとの増殖速度(μ)、POCおよびPON生成速度、 $\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$ のリストである。 $\delta^{13}\text{C}$ については浮遊珪藻類の場合には5月、7月、9月の値に大きな差異はなく季節による変化は小さかった。*Skeletonema costatum*では-

$19\% \sim -21\%$ 、*Thalassiosira pseudonana*では $-18\% \sim -21\%$ の範囲で変動していた。底生珪藻類についてみると、増殖速度が低かった9月に低下したが5月、7月では著しく高い値を示した。*Entomoneis alata*では $-11\% \sim -18\%$ 、底生珪藻の*Cylindrotheca closterium*では $-13\% \sim -18\%$ であった。一方、 $\delta^{15}\text{N}$ は浮遊珪藻類と底生珪藻類との間に大きな違いは認められず、季節的な変化も小さく、 $6 \sim 9\%$ であった。現場で採集した水中懸濁物、底質サンプル、珪藻の培養実験結果と合わせて考察すると、イソシジミは底土表面付近に懸濁する微細藻類(底生および浮遊珪藻の両者)を、ヤマトシジミはデトライタスを栄養源にしていると考えられる。また、同種であっても生息場所により $\delta^{13}\text{C}$ が異なることがあり、それは基礎生産者やデトライタスの安定同位体比の違いを反映していることが示された。

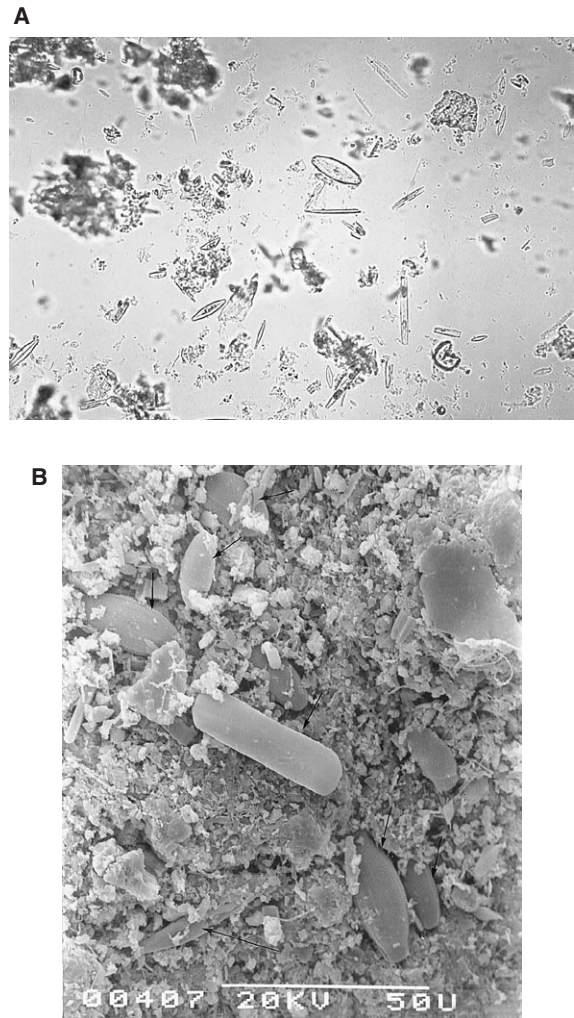


Fig. 3. (A) Light micrograph of stomach contents of *Nuttallia olivacea*. (B) Scanning electron micrograph of particles, such as diatoms and detritus attached to sand collected from the Natori River.

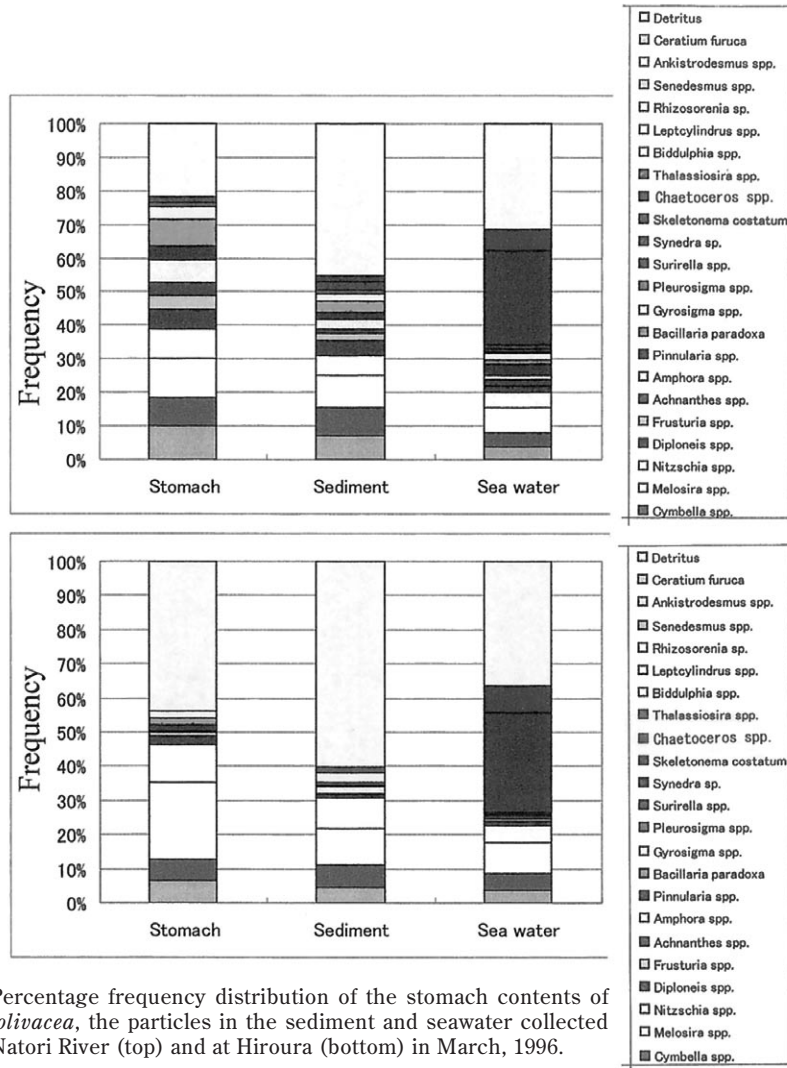


Fig. 4. Percentage frequency distribution of the stomach contents of *Nuttallia olivacea*, the particles in the sediment and seawater collected from the Natori River (top) and at Hiroura (bottom) in March, 1996.

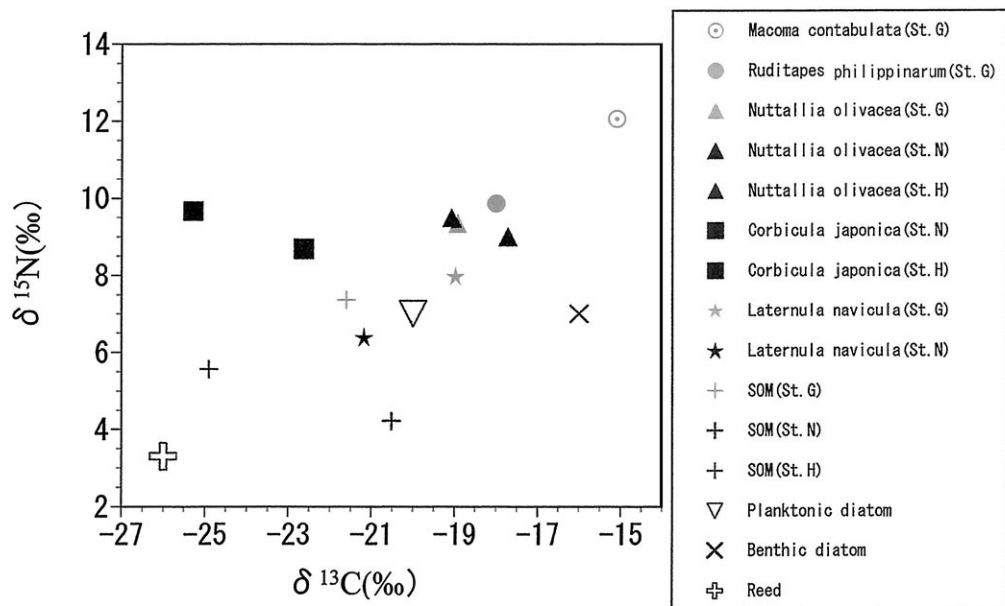


Fig. 5. Plots of average $\delta^{13}\text{C}$ vs. $\delta^{15}\text{N}$ for bivalves and SOM collected in the tidal flat and diatoms cultured in the field. SOM: sedimentary organic matter, St. G: Gamou tidal flat, St. N: Natori River, St. H: Hiroura lagoon.

Table 1 Results of field incubation of planktonic diatoms (*S. costatum* and *T. pseudonana*) and benthic diatoms (*E. alata* and *C. closterium*) using dialysis membrane tubes in the Natori River in 1998.

| Experimental period | Species | Growth Rate(μ) d day ⁻¹ | C Production mg m ⁻² day ⁻¹ | N Production mg m ⁻² day ⁻¹ | $\delta^{13}\text{C}$ ‰ | $\delta^{15}\text{N}$ ‰ |
|----------------------|---------------------------------|---|--|--|----------------------------|----------------------------|
| 27 May - 30 May '98 | <i>Skeletonema costatum</i> | 0.75 | 45.49 | 5.4 | -19.17 | 7.59 |
| | <i>Thalassiosira pseudonana</i> | 0.64 | 44.17 | 5.89 | -18.81 | 7.66 |
| | <i>Entomoneis alata</i> | 0.59 | 42.13 | 5.27 | -13.28 | 8.48 |
| | <i>Cylindrotheca closterium</i> | 0.62 | 30.86 | 3.86 | -15.61 | 8.5 |
| 7 July - 10 July '98 | <i>Skeletonema costatum</i> | 1.42 | 63.58 | 7.49 | -20.86 | 7.1 |
| | <i>Thalassiosira pseudonana</i> | 1.44 | 100.1 | 14.19 | -19.72 | 7.51 |
| | <i>Entomoneis alata</i> | 1.6 | 100.82 | 10.96 | -11.08 | 8.28 |
| | <i>Cylindrotheca closterium</i> | 1.51 | 27.5 | 3.65 | -13.17 | 6.97 |
| 5 Sep. - 8 Sep. '98 | <i>Skeletonema costatum</i> | * | * | * | * | * |
| | <i>Thalassiosira pseudonana</i> | 1.5 | 53.33 | 7.54 | -21.01 | 7.09 |
| | <i>Entomoneis alata</i> | 0.3 | 22.49 | 3.76 | -17.89 | 7.09 |
| | <i>Cylindrotheca closterium</i> | 0.2 | 8.25 | 0.8 | -17.51 | 6.97 |

* No data

2. 室内飼育実験による二枚貝の餌料効果

餌料効果を確かめるための飼育実験結果をFig. 6に示す。デトライタスを含む自然水域の底土堆積物を餌にした実験区については採集場所により二枚貝の成長速度が大きく異なった。蒲生干潟、名取川河口では珪藻を餌とした場合よりは低いが、成長が認められた。一方、貞山運河や広浦の底土では殆ど成長しなかった。有機物量としてはほぼ同じでも質的な違いにより成長は著しく異なることが示された。

3. 二枚貝の生産に必要な餌料の量

まず、アサリ、イソシジミについて珪藻を餌として飼育実験を行い、1日あたりの摂取量を水温サイズごとに求めて、Table 2に示した。20℃の場合、殻長18mm前後で体重1gのアサリはクロロフィルaで約20 μ g摂取する。殻長40mm (体重15g) では134 μ g摂取することが分かる。イソシジミの場合についても、ほぼ同じような値が得られ、殻長20mm (体重1g) は1個体あたり1日28 μ gのクロロフィルaを摂取する。イソシジミについては摂取量と成長量との関係についても求め、Fig. 7に示した。体重増加速度と摂取量は直線関係が得られ、1日6mgの体重増加を支える食物量は約25 μ gのクロロフィルaである。水温20℃になる6月あたりの必要な餌料の量を試算してみる。このときの体重増加速度は約6mg/dayである (伊藤ら2001)。飼育実験による成長と摂食量との関係より、クロロフィルとして25 μ g必要である。摂取量の実験によ

れば体重1gのイソシジミが1日に摂取する量は28 μ gであった。ここではイソシジミ1個体が摂取する餌料量を約30 μ gとして名取川河口のSt. 1Dのイソシジミ現存量 (1500g m⁻²) を用いて試算してみる。クロロフィルaでは30mg Chl. a m⁻² day⁻¹, これを現場の培養実験で求めたC/Chl. a =50, C/N=8を用いて炭素量に換算すると、有機炭素量では1500mg C m⁻² day⁻¹, 有機窒素量では180mg N m⁻² day⁻¹が摂食されていることになる。

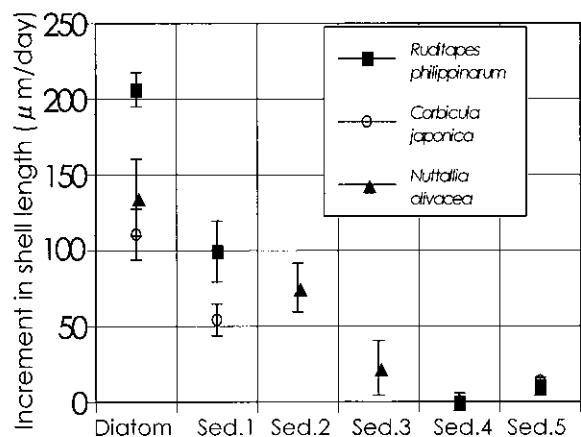


Fig. 6. Average daily increments in shell length of *Ruditapes philippinarum*, *Corbicula japonica* and *Nuttallia olivacea* in the laboratory when fed on various food items at 20°C.

Diatom: *Skeletonema costatum*, Sed: Suspension of natural sediment, Sed. 1: Gamou tidal flat, Sed. 2: Natori River flat, Sed. 3: Hiroura lagoon, Sed. 4: Teizan canal, Sed. 5: Sunaoshi River.

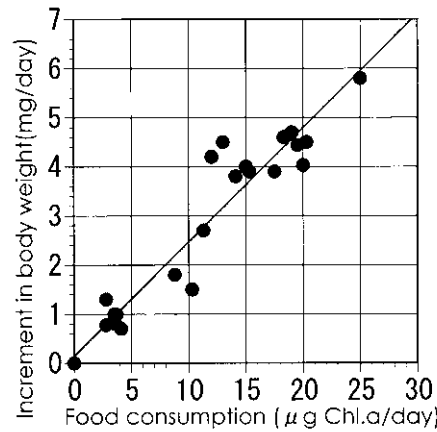


Fig. 7. Relationship between daily increase weight and food consumption of *Nuttallia olivacea* raised in the laboratory on a pure diet of the alga *Skeletonema costatum* at 20°C.

Table 2 Relationship between food consumption and shell size in *Ruditapes philippinarum* and *Nuttallia olivacea* in the laboratory supplied with a pure diet of the alga *Skeletonema costatum*.

| <i>Ruditapes philippinarum</i> | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Water temperature | Shell length 10-20mm | Shell length 20-30mm | Shell length 30-40mm | Shell length 40-50mm |
| 10°C | 14.2(±12.7) | 12.0(±6.2) | 60.6(±12.0) | 67.7(±36.0) |
| 15°C | 26.5(±6.3) | 42.9(±10.8) | 75.9(±3.9) | 152.4(±6.2) |
| 20°C | 20.1(±3.3) | 61.2(±4.2) | 86.2(±3.3) | 134.6(±9.1) |
| <i>Nuttallia olivacea</i> | | | | |
| Water temperature | Shell length 5-10 mm | Shell length 10-20mm | Shell length 20-30mm | Shell length 30-40mm |
| 15°C | 10.2(±8.5) | 15.3(±12.9) | 32.0(±11.2) | 65.6(±13.2) |
| 20°C | 15.6(±6.8) | 27.8(±7.6) | 52.9(±8.6) | 80.6.9(±5.7) |
| 25°C | 20.9(±8.3) | 28.9(±5.3) | 60.2(±10.5) | 90.3(±10.8) |

4. イソジミの成長と物理的環境の関係

イソジミの現場における成長実験の結果をFig. 8に示す。実験開始時の殻長が10mm前後の稚貝の場合、場所による成長の差異が大きい。20-30mmの成貝の場合には環境による差異は少なく、夏季に体重が大きく増加した。殻長は殆ど伸びなかったが、産卵期に向けて体重が増加したものと考えられる。その後の体重の減少率が場所により異なっている事は環境の差異を反映していると考えられる。底質の粒径、クロロフィルとの間には明確な関係はないが、シルトの含有率が高い場所においては成長速度の著しい低下がみられた (Fig. 9)。そこで、食物にシルトを添加して成長実験を行ない、その影響を調べた。シルト0.1%添加で、成長に影響が認められ、0.5%では成長が約1/4に低下することが分かった (Fig. 10)。一方、シルト含有率に違いが見られない場所間でも成長の違いが認められ、これは餌料の質的な違いによるものと考えられる。

そこで、微環境の特性を水の流動のしかた、特に底質中の間隙水と海水（底土直上水）の栄養塩濃度、ここでは硝酸塩濃度に注目して、時間的な変化を場所別に示したのがFig. 11である。川の中心に近いSt. 1Dでは底土直上水の硝酸塩濃度は干潮時に高く（0.25mgN/L）、満潮時に低くなり（0.03mgN/L）、間隙水もほぼ同調していることがわかる。St. 1Cでは下げ潮時（満潮から干潮時にかけて）は底土直上水と間隙水の濃度は同調しているが、上げ潮時に底土直上水の濃度が満潮時に低下しても間隙水では一定濃度を維持していることが分かる。岸側のSt. 1AとSt. 1Bでは底土直上水では干満に伴い大きく変動しているものの間隙水では大きく変動することはなくほぼ一定の濃度を保っている。これは場所ごとの水の流動の仕方、底質の特性の特に粒度の違いによる水の交換速度の違いによるところが大きいと考えられる。

ではここに増殖する微細藻類の組成に注目する。大小さまざまな珪藻類が観察される (Fig. 12)。どの場所に

おいても見られた種類は *Anomooneis sphaerophora* であり、その他の種類の分布の仕方は場所ごとに特性がある。川の中心近くで、イソシジミが高密度でしかも成長がよい場所 St. 1D では、*Amphora ovalis*, *Anomooneis sphaerophora* が多く、また、群体性の *Bacillaria paradoxia* も観察された。そのほかに *Frustaria romboides*, *Cymbella ventoriosa*, *Navicula mutica* がみられる。ここでは、細胞質のある珪藻の割合が高く、被殻のみの個体は少ない。一

方、相対的レベルが高く、干出時間が長い、岸側の砂質域の St. 1A では、*Navicula radiosa*, *Navicula mutica*, *Diploneis splendica* など付着性が強いといわれているものが多く、被殻のみの個体の割合が高い。そしてサイズが小さいものが多い。流れが速く、水深が深い場所 (St. 1B) では長い群体を形成する *Melosira granulata* が最も多く出現し、被殻のみの珪藻の割合は少なかった。

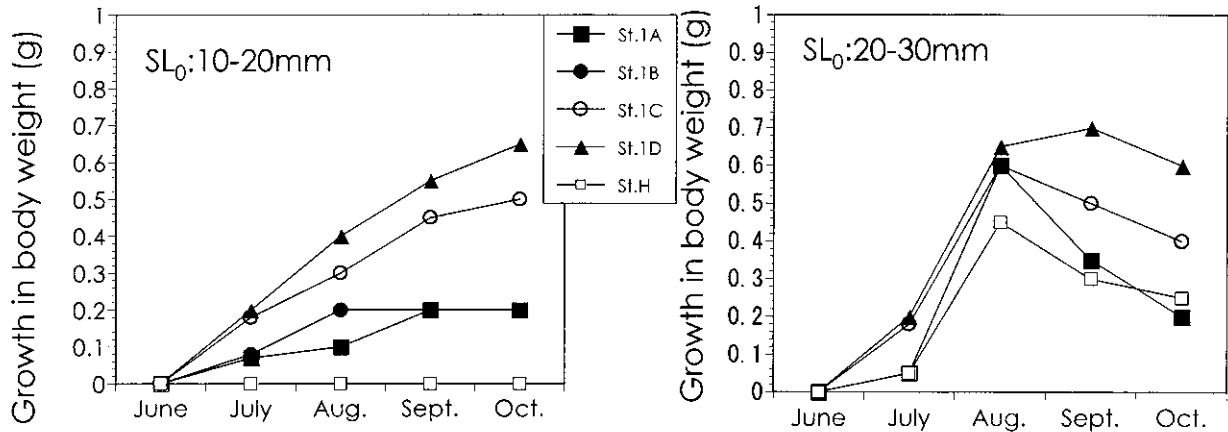


Fig. 8. Growth in body weight of *Nuttallia olivacea* by the caging method at each location in the Natori River from June to October, 1996. Initial shell lengths were 10-20mm (left) and 20-30mm (right).

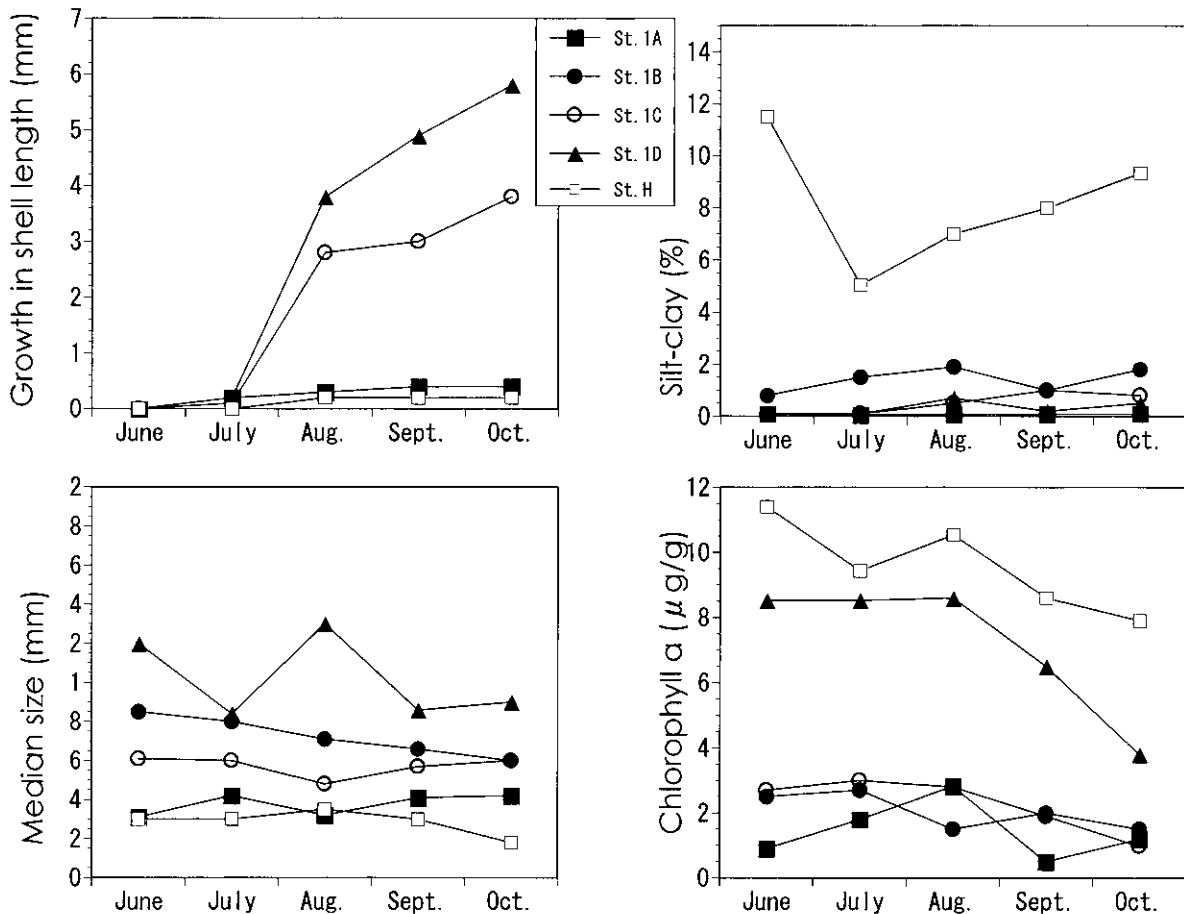


Fig. 9. Growth in shell length of *Nuttallia olivacea* and sedimentary characteristics in the Natori River from June to October, 1996.

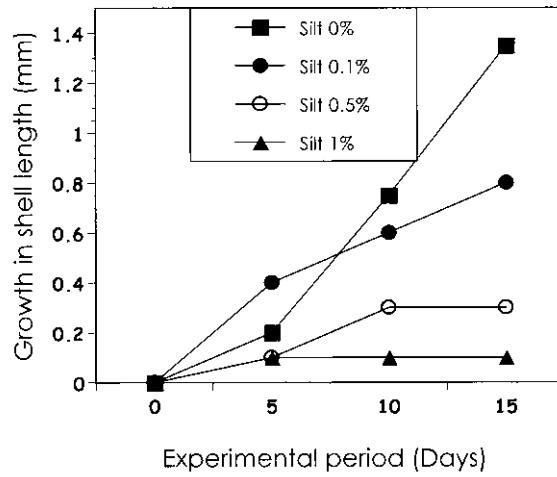


Fig. 10. Growth in shell length of *Nuttallia olivacea* raised in the laboratory on a mixed diet of diatoms and natural silt at 20°C.

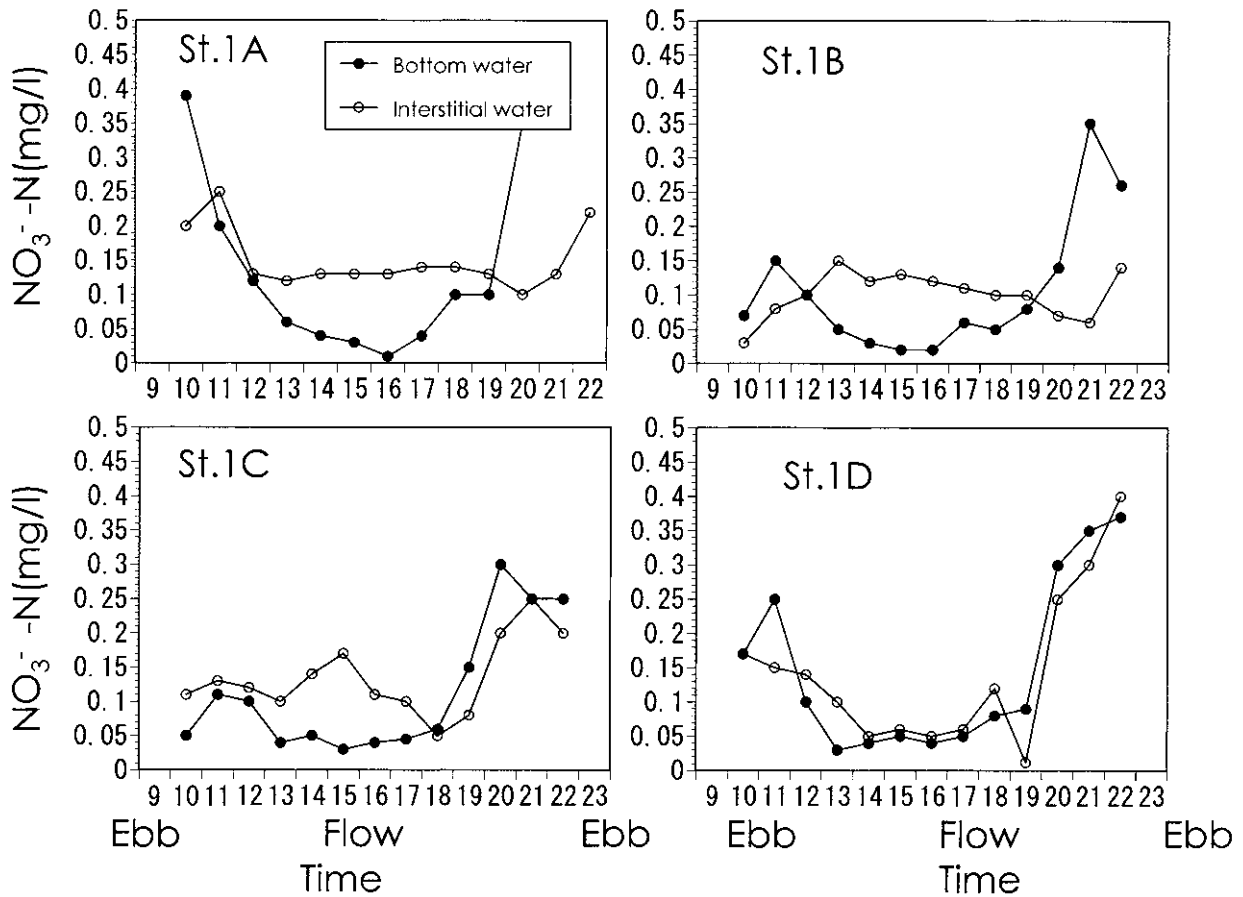


Fig. 11. Changes in nitrate concentration of bottom water and interstitial water collected during a 16-h period from 16 to 17 October, 1996.

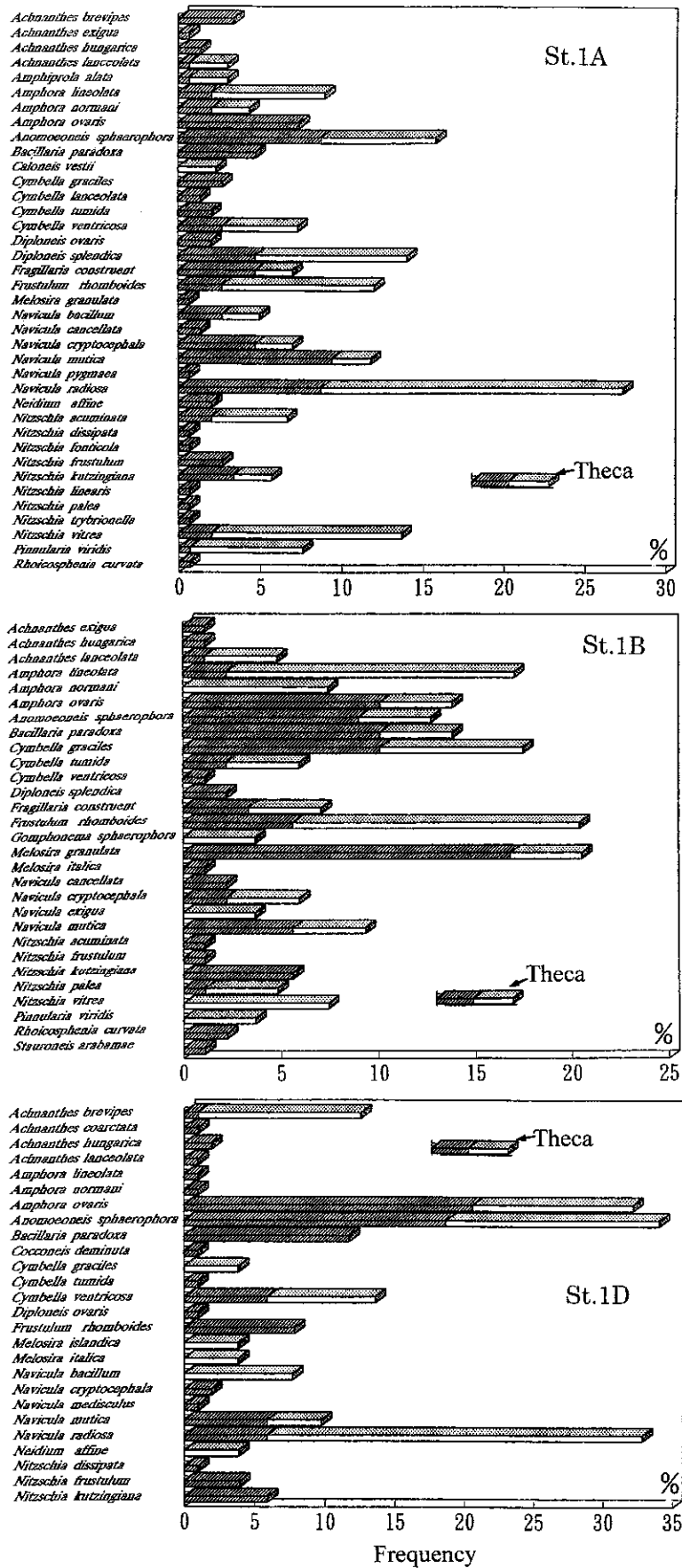


Fig. 12. Frequency distribution of diatom species collected in the Natori River in June, 1995.

5. 二枚貝の生産と餌料環境の総合評価法

餌料環境を評価するためには生物と環境との関係を総合的に捉えること、すなわち生物の情報と環境の項目に分けて重要なファクターを抽出して、総合評価表を作成することが第一段階であろう。一例としてTable 3を作成した。餌料環境項目としては、最適な餌料のサイズ、

種類、要求量など、生息場所の環境項目では水深、流速、底質の粒度、シルト、Chl. *a*、C/Chl. *a*などであるが、その他の環境要因（水温、塩分、溶存酸素量など）の範囲と限界は把握しておき、それぞれの種類ごと、発育段階別に整理することが重要である。

Table 3 Example of a data sheet for evaluation of food environment for bivalves in tidal flat.

| Stage | Available food condition | | | Characteristics of Location | | | Sedimentary characteristics | | |
|----------------------------|--------------------------|---------|-------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------|-------------|
| | Size | Quality | Requirement | Depth | Current velocity | Water quality (Salinity, DC) | Median size | Silt-Clay | Chlorophyll |
| Larva | | | | | | | | | |
| Juvenile (just settlement) | | | | | | | | | |
| Juvenile | | | | | | | | | |
| Adult | | | | | | | | | |

考 察

干潟二枚貝類の生産過程と餌料環境とに焦点をあわせ、数年間の研究を整理してみたが、個々の現象を緻密に精確にとらえることと並行して総合的に見ていくことの難しさと重要性について、再認識した。二枚貝類の餌料は古くから、植物プランクトンとデトライタスであると考えられてきた。実際には二枚貝の胃の内容物中には底生珪藻の方が浮遊珪藻よりも圧倒的に多い。小池ら（1989）はアサリの主要な餌は底生珪藻であることを安定同位体比の解析から考察している。微細藻類の炭素安定同位体比に関して浮遊性と底生性を比較すると、後者がやや重いことが分かっている（France 1995）。珪藻類の現場培養実験結果も同様であった（Table. 2）。したがって、安定同位体比に着目することにより、微細藻類の中でも何が最重要な餌料であるのか推測が可能である。蒲生、及び名取川河口で採取した二枚貝を見ると、同じ場所に生息していても全く異なる安定同位体比を示すものがあった。アサリ、イソシジミがほぼ同じ値で、ヤマトシジミはそれらよりも著しく軽い値、サビシラトリガイは重い値をもっていた。すなわちそれぞれの栄養源も異なっていると推測されるが、この要因として大きく二つの可能性が考えられる。一つは、胃内容物には珪藻とデトライタスが見られるが、消化吸收されるものはこの中の一部であり、体物質へと同化できる物の比率が異なること。もうひとつの可能性は、水管の伸ばし方、摂取方法のわずかな違いによってそれぞれの二枚貝が実際に体内に取り込む粒状物の比率が異なることである。アサリ、イソシジミは境界層付近に懸濁している底生珪藻と浮遊珪藻およびこれらの分解過程にあるデトライタスを取り込んでいると考えられる。

しかし、実際の栄養源への寄与率としては、飼育実験の結果を踏まえると、デトライタスよりも生きている珪藻が高いと予測される。これに対し、サビシラトリガイは堆積物の中でも高次栄養段階の生物の排泄物を栄養源にしているのではないだろうか。ヤマトシジミについては堆積物に付着している硫黄細菌などの影響が考えられるが、今後飼育実験や細菌の安定同位体比に関する研究が不可欠であると考えている。

さて、デトライタスは豊富に存在するが、同化効率は生きている珪藻よりも低いと考えられる。これはクロロフィルが分解するに伴い、餌料価値が低下することを意味していると考えられるが、未解明である。ただ、堆積物中のデトライタスは二枚貝の代謝生理において重要な役割を果たしている可能性があり、生理的機能に関する実験が必要であろう。

次に、二枚貝が必要とする餌料の量について考察する。今回は水温20℃でのイソシジミにおける試算をして、30 mg Chl. *a* m⁻² day⁻¹、有機炭素量では1500 mg C m⁻² day⁻¹、有機窒素量では180 mg N m⁻² day⁻¹が摂食されているという結果を得たが、青山、鈴木（1997）が一色干潟における現場実験により計算した値（マクロベントスによる有機物除去能力）140 mg N m⁻² day⁻¹と近い値であった。透析膜を利用した現場培養実験によれば、夏季の増殖速度が高い時期で底生珪藻の生産力14 mg N m⁻² day⁻¹が最大であった（伊藤2002）。

この値はその種のその場での環境条件における潜在的な増殖能力を示していると考えられる。様々な微細藻類が増殖していると仮定しても、二枚貝類の必要摂食量は不足すると考えられる。したがって、海水によって運ばれてくる浮遊珪藻、堆積物中のデトライタスも餌料として寄与していると推察されるが、それぞれの栄養源とし

での寄与率を試算するには、いくつかの現場実験や室内実験が必要である。今回の試算はひとつの例であり、発育段階、季節による温度などファクターを変えて計算することにより、それぞれの漁場における食物必要量が推定可能となるであろう。

最後に、二枚貝の生産過程と生息場所の物理的条件との関係、特に干潟では微環境を考慮してゆくことが重要であることを論議する。干潟における二枚貝の発育段階ごとの分布状況については Sekiguchi *et al.* (1991) や堤ら (1996) により詳細な報告があり、河川による優占種の違い、また、同種であっても年級群によって分布のしかたが大きく異なることがわかっている。Grant (1990) はヨーロッパガキについて現場実験を行ない、堆積物からの栄養供給が成長に大きく影響を及ぼしていると指摘している。Bricelj *et al.* (1984^a, 1984^b) は底土堆積物の添加がイガイの成長にプラスの効果がある事を指摘しているが、採集場所の底土堆積物の質的な違いを明らかにすることも重要な点である。本研究の自然水域の底土による飼育実験によれば、場所によって成長に大きな違いがみられた。このことは二枚貝の餌料環境を評価するひとつの手段として応用できることを示唆している。また、Grizzle *et al.* (1989) はイガイについて成長実験を行ない、水平的なセストンフラックスが成長と密接に関連していると考察して、水の流速が大きな要因であると指摘している。本シンポジウムの報告においても着底稚貝の発生場所は必ず河川の流入が見られるところであった (黒田 2002)。これは水の流動の問題が大きいかもしれないが、淡水の供給によりもたらされる環境の特性もあるのではないだろうか。すなわち、栄養の供給があり、水の流動があって底質との物質の交換もよく、光も十分到達する場所であって、多種多様な珪藻が増殖できるメカニズムがそのような環境にはあると考えられる、それらが稚貝の食物要求をみたしていると推察される。

自然のしくみを理解し、それぞれの場の特性を活かした二枚貝漁場の保護・設計をするために次のようなことが今後の課題としてあげられる。(1) 餌料環境と物理的環境との関係の解明。種類ごと、発育段階ごとに整理し、とくに微環境レベルの特性を把握しておく。このとき、これまでに集積されている現場の知見を最大限に活用する。(2) 生物側の特性の解明。発育段階ごとの摂食生態の特性の整理、遺伝的な特性の把握、病気などに関する情報の整理、(3) 総合的な評価を基に種類や発育段階に配慮した漁場の保護・設計の試案を作成する。

謝 辞

本研究は主に日本学術振興会科学研究費補助金 (平成

5年度~10年度) と河川環境財団の研究助成金 (平成11, 12年度) の交付を受けて行なわれました。本研究の野外調査に際しましては広瀬名取漁業共同組合ならびに関上漁業協同組合の皆様にご協力いただきましたことに厚く御礼申し上げます。また、研究を遂行する上で東北大学農学研究科・元教授大方昭弘博士には貴重なご助言をいただきました。深く感謝の意を表します。また、同研究科・助手の片山知史博士、千田良雄技官に心から感謝申し上げますとともに、水圏資源生態学研究室の学生諸君の多大なご協力に御礼申し上げます。最後に講演の機会を与えて下さいました独立行政法人水産総合研究センターの方々に御礼申し上げます。

引用文献

- 青山裕晃, 鈴木輝明, 1997: 干潟上におけるマクロベントス群集による有機物除去速度の現場測定, 水産海洋研究, **61**, 3, 266-274.
- Bricelj, V. M. and R. E. Malouf, 1984^a: Influence of algal and suspended sediment concentration on the feeding physiology of the hard clam *Mercenaria mercenaria*. *Marine Biology*, **84**: 155-165.
- Bricelj, V. M., Malouf R. E. and de Quillfeldt C., 1984^b: Growth of juvenile *Mercenaria mercenaria* and the effect of resuspended bottom sediments. *Marine Biology*, **84**: 167-173.
- France R. L., 1995: Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications, *Marine Ecology progress series*, **124**: 307-312.
- Grant, J., Enright C. T. and Griswold A., 1990: Resuspension and growth of *Ostrea edulis*: a field experiment. *Marine Biology*, **104**: 51-59.
- Grizzle, R. E. and Morin P. J., 1989: Effect of tidal current, seston, and bottom sediments on growth of *Mercenaria mercenaria*: Results of a field experiment. *Marine Biology*, **102**: 85-93.
- 伊藤絹子, 大方昭弘, 1998: 砂浜浅海域生産系と河口域生産系の相互連関, 「水産学シリーズ **116** 砂浜海岸における仔稚魚の生物学」(千田哲資, 木下泉 編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 52-64.
- Incze L. S., Mayer L. M., Sherr E. B. and Macko S. A., 1982: Carbon inputs to Bivalve Mollusks: A comparison of two estuaries, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* **39**: 1348-1352.
- 伊藤絹子, 2002: 浮遊性および底生性珪藻類の炭素・窒素安定同位体比について, 日本陸水学会誌, **63**,

- 166-168.
- 伊藤絹子, 佐々木浩一, 大森迪夫, 大方昭弘, 2001: 現場実験法によるイソシジミ *Nuttallia olivacea* の成長速度, 日本ベントス学会誌, **56**, 9-17.
- Ito, K and Okata A., 1995: Functional relationships between benthic animals and their habitat in tidal flat. *Tohoku Journal of Agricultural Research*, **46**, 1, 47-60.
- 小池裕子, 中島徹, 中井信之, 1989: 安定同位体と消化管珪藻分析による干潟食物網の解析について—現生生態学と古生態学の接点—日本ベントス研究会誌, **37**, 1, 1-10.
- Sasaki, K, Kudo M., Tomiyama T., Ito K. and Omori M., 2002: Predation pressure on the siphons of the Bivalve *Nuttallia olivacea* by the juvenile stone flounder *Platichthys bicoloratus* in the Natori River estuary, north-eastern Japan, *Fisheries Science*, **68**, 104-116.
- Sekiguchi, H., Saito H. and Nakao H., 1991: Spatial and temporal distributions of planktonic and benthic phases of bivalves in a tidal estuary. *Benthos Research*, **40**: 11-21.
- 堤康夫, 関口秀夫, 1996: 河口干潟における二枚貝類の着底稚貝と稚貝および成貝の分布. 水産海洋研究, **60**, 2, 115-121.
- 和田英太郎, 1986: 生物関連分野における同位体効果—生物界における安定同位体分布の変動— *Radiotopes*, **35**, 136-146.

質疑応答

司会 「どうもありがとうございます。ただ今の発表に、ご質問、ご意見など、非常に、餌料環境に関することを明解にご説明頂いたと思います。特にあの最後の表に表されたような、生活段階毎にそれぞれのどの条件が重要であるかということが、今後のアサリの漁場評価をするのに、非常に重要であると考えます。」

鳥羽氏 「千葉県水産研究センターの鳥羽です。アサリの餌料の量ですが、単純に水中に浮遊している餌料量では、現在のその成長を維持できるだけの量であるのかどうか、疑問に思っております。しかし、餌料量は海水中よりアサリが棲むような底層では濃いのではないかと思います。それには何らかの濃縮メカニズムがその間に存在しなければいけないと考えますが、それについてご説明願えますか？」

伊藤氏 「ええその通りだと思います。海水のクロロフィルを計っても非常に薄いので、それでは二枚

貝類の成長を補償できないなあと、というのが、最初の疑問でした。そこで、底質直上の1センチぐらいのレベルのところのクロロフィルというものが、実際どうなっているかっていうところまで、実は計測できなかったんですけども、ここの濃度が非常に重要と思います。二枚貝の生産を支えるには、かなりの餌料が必要だという計算になりますが、それは、10センチくらい直上の水を探っても、本当には把握できません。それから、現場培養実験で、珪藻の培養実験をしたんですが、その時の基礎生産力をもても、やはり足りないんですね。そこで、餌料の量の評価というものは、もう少しミクロな、砂と水の境界層あたりの問題で、そこで質的な問題と、量の問題をクリアしていけば、もっと正確なことが言えるというふうに考えています」

鳥羽氏 「特に低層近くの餌料環境と言うことになると、海水の循環による巻き上げというのが、かなり効いてくると思うのですが、この巻き上げというのは、潮下帯に近いようなところだと、潮の高さによってかなり違うと思うので、いつ計るかによって、データがかなり違ってきますね。そういう影響は、今回の実験のなかでは、どのように評価されていますか？」

伊藤氏 「はい、実は、今回お見せしなかったのですが、その潮の干満でかなり組成も変わって来ますし、量も変わっております。その場合の詳しいデータの解析までは、出来なかったのですが、結局、潮流に乗って入ってくるものと、そこで巻き上がるものというものが、地形によって、どのぐらいでバランスするかっていうのは、実はまだ、はっきり押さえてないところで、そこを押さえる必要があると思いますし、場所によって、かなり種類は入れ替わるというのがあります。」

鳥羽氏 「あともう一つ、イソシジミの状態ですが、川の沿岸の方と真ん中の方とで、成長が違うということですけども、それは、貝のサイズによって成長のパターンそのものが違うというのがあるのですか？」

伊藤氏 「一番良い場所は同じなのですが、サイズの大きな貝では、少々、環境がちょっと向いてないかなと思って、そこそこ体重は増加します。そこで、その生物の耐性といっているのかどうか、環境に対する対応力がサイズによってかなり違うような気がしました」

鳥羽氏 「その成長差は、そういうことで説明できるのではないかという」

伊藤氏 「はい、と思っているのですが、ちょっと、そこはまだ分からないところはあります」

司会 「他にどなたか、ございますでしょうか？」

灘岡氏 「東工大の灘岡と申しますが、微環境をしっかりと押さえる必要があると、おっしゃったのは大賛成なのですが、先生の発表の中で、現地では、採水ポイントを鉛直方向にこう並べられて、あと底質の中も同様に調査されてますね。そこで、例えば、底質のシルト含有率の鉛直分布はどう出てきたか、それが場所によって、違いがはつきり出てきたかどうかで分かりますか」

伊藤氏 「それについては調べませんでした。実は、栄養塩の濃度と有機物量とかは調べたんですが、底質のシルト含量とかは調べませんでした。それから、微細藻類についても、その時のデータがなかったので、調べておけばよかったなあと、今、思っているところです。」

灘岡氏 「さっき境界層って言葉をちらっとおっしゃいましたけど、流体力学的なセンスで境界層っていうと、たぶん、数センチから数十センチぐらいの長さスケールがあって、ちょうど、コアのスケールとうまく合ってるものですから、それで質問したんですが、たぶん、こういった状況ですと地形効果はものすごく大きいですね、境界層のでき方も場所によって、ものすごく違って、境界層の中の乱れ強度も当然違う。したがって、先ほどご質問にありました巻き上げも当然違うし、あるいは境界層の外側から、底面に向かう、色んな浮遊物、プランクトンも含めた、そういったものの乱流拡散によって定面向かって運ばれてくる量も違うし、ということで、境界層をしっかりと調べるということは非常に重要だと思います。ですから、まあ、流れそのものは見られないのであって、あとは運ばれる物質を同時観測されるような、観測が計画されると非常に面白いんじゃないかと思うのですが、いかがですか？」

伊藤氏 「私もそこら辺が弱いので、結局その、生物側の成長の違いと、先生が今、おっしゃって下さったような、物理的なミクロな違いとか乱れとか、そういったものを合わせるような調査が、是非やりたいなというふうに思っておりますし、そういうことが各水域で行われていくと、見えてくるものがあるかなという考えでおります。ありがとうございます」

広田氏 「東京大学、広田です。安定同位体比をお使いになって、生産の仕組みをやってらっしゃいま

すけれども、季節によってですね、変動があるので、季節毎にかなり生産構造が違っていているのではないかと思います。さっきおっしゃいましたカーボンとか窒素の量っていうのが、珪藻類、あるいは他の藻類から供給されるという仕組みの他に、デトライタスによる経路っていうのはかなり大きいと思うんですね。そういう経路のところまで、評価しておけば、更に実態に近くなっていくと思うのですけれども、そういう調査の予定はありますか？」

伊藤氏 「実はですね、今日、紹介しなかったのですが、イソジミについては、ステーションの1とHと、Aという所があるのですが、一年間ずっと安定同位体比を追跡しました。そうしましたらこれらの場所では安定同位体比のシフトが見られ、それがきれいに魚までシフトしているっていう現象が一年間を通じて、出ております。そこで、その違いは何か、近い場所でそういうふうにシフトするのは何かっていうことになると、実は浮遊珪藻も底生珪藻もクロロフィルが分解していったデトライタス化すると安定同位体比がわずかに下がっていくということが、分かってきました。そういった検証をしながら、この安定同位体比を使って行きたいと思います。それから、濃縮率の問題があったもので、種類によって違うのじゃないかということもあって思っていて、餌の違いによって貝の濃縮率、Cの方はどうかっていうのを見ると、どうも1パーミルっていうのは当たっているようで、1パーミルで落ち着くというのが分かって来たので、そういった飼育実験を基に現場のことをもっと克明に調べる必要があると考えてます」

広田氏 「私どもも浜名湖のマガキでそういう仕事をしますと、かなり違う、今おっしゃられた、同じような現象が出てくるので、是非、進めて頂きたいと思います」

外丸氏 「あのすみません。瀬戸内水研赤潮環境部の特別研究員の外丸といいます。アサリの研究じゃないのですけれども、貝の餌料としては珪藻類かももちろん主体ですけれども、他に渦鞭毛藻類とか、微小動物プランクトン、たとえば微小珪藻と同じくらの同サイズの鞭毛虫とか繊毛虫、それらも二枚貝にとってかなりいい餌になっているのじゃないかという報告があるので、けれども、今回の研究ではそういう餌生物について観察されていないのでしょうか」

伊藤氏 「そのあたりは実は調べておりませんが、現場

のイソシジミ特に大きなイソシジミをみると、ワムシ類とか胃の中に入っているのですね。ですから、動物性のもも餌として利用していることは十分考えられます。それから別の餌料では、ハプト藻類とかを投与すると、珪藻よりは少し落ちますが、餌料効果はあります。渦鞭毛藻類につきましては今回は調べておりませんが、今後調べる必要はあると考えていますが、

実際、サイズが小さいので餌料価値があるかなっていう疑問もあります。」