

沿岸海洋研究 第35巻、第1号、1997

## 河口汽水域における魚類集団の生産構造と機能\*

本多 仁\*\*・片山 知史†・伊藤 絹子†

千田 良雄†・大森 迪夫†・大方 昭弘††

## Structure and Function of the Production System in an Estuarine Fish Assemblage

Hitoshi Honda, Satoshi Katayama, Kinuko Ito

Yoshio Chida, Michio Omori and Akihiro Okata

沿岸の魚類生産における内湾・河口域の役割を明らかにするため、宮城県南部を流れ仙台湾に注ぐ名取川の河口に位置する汽水性の潟湖である広浦に分布する魚類集団の種組成の季節変化と摂食活動の特徴を解析した。調査期間中に採集した魚類38種を、出現する時期および発育段階などの知見に基づいて、周年出現種、季節的出現種、および偶来種の3グループに類型化した。周年出現種5種は、個体数、重量ともに河口汽水域の魚類の中で周年にわたり圧倒的に高い割合を占め、中核を構成していた。春から秋にかけて河口汽水域に出現する魚種のうち季節的出現種は10種であるが、仔稚魚期に限って出現する魚種が多かった。偶来種は、通常汽水域外に生息し、偶發的に來遊する魚種や個体群サイズが極端に小さな魚種であり、計23種から構成されていた。周年出現種の主要な食物は、マクロペントスで、年間を通してこの場所に豊富に存在する動物群であった。季節的出現種は、春から秋にかけて卓越する動物プランクトンを主な食物とする種が多かった。名取川河口汽水域の魚類集団における生産構造の特徴は、集団内において周年安定した食地位にある周年出現種グループに春から秋にかけて季節的出現種グループが割り込む形となるにもかかわらず、異なる生活型の食物生物を利用する両グループが摂食活動において競合することは少なく、季節的二重構造を示すことであった。

Fish species composition and feeding relations among species inhabiting an estuarine lagoon Hiroura, located northeastern Japan, were analyzed. Fish species were categorized into three types based on the mode of estuarine habitat utility changing with their life history, the resident type, the seasonal migrant type and the occasional occurrence type. Resident type fish took benthos that were abundant in their habitats whole year, but they took also zooplankton from spring to autumn. Seasonal migrant type fish consisted of early life historical stages mainly took zooplankton that were abundant from spring to autumn. Structure of the estuarine fish assemblage of Hiroura was characterized by the coexistence of zooplankton feeders and benthos feeders from spring to autumn.

キーワード：河口汽水域、成育場、魚類集団、出現様式、食地位、生産構造

## 1. はじめに

淡水と海水の混じり合う河口周辺の汽水域は、海域の中でも生産力の高い場所である（オダム、1991<sup>1)</sup>；和田、1988<sup>2)</sup>）。海岸における魚類を中心とした高次生物生産過程における河口汽水域の役割は、内湾・汽水性魚類の生息場所となっているほか、水産上有用な海産魚類や遡河回遊性魚類がその生活史の初期を過ごす成育場として機能していることである（大森・靄田、1988<sup>3)</sup>；Day *et al.*、1989<sup>4)</sup>）。また、河口汽水域は、多くの通し回遊性魚類に

とっても海と川の間の回遊過程における馴化水域であることも知られている（Power *et al.*、1987<sup>5)</sup>；Gross, 1987<sup>6)</sup>；MacDowall, 1987<sup>7)</sup>；Day *et al.*、1989<sup>4)</sup>）。

ところで、沿岸の魚類資源への幼若魚の加入過程を把握することは、適切な資源評価に不可欠の要素である。しかしながら、河口汽水域の成育場への来遊過程や、成育場において生残・成長した個体の資源への加入過程、あるいは沿岸域の成育場が沖合の魚類資源の生産に寄与する質的・量的度合いについてはほとんどが未解明である（大森・靄田、1988<sup>3)</sup>）。したがって、河口汽水域をはじめとする沿岸浅海域の成育場における魚類集団の生産力の把握は、それらの成育場が魚類資源の生産に寄与する度合いを客観的に評価する際の有用な情報となる。

\* 1997年1月10日受領、1997年2月12日受理

\*\* 南西海区水産研究所外海調査研究部

† 東北大学農学部生物生産科学科資源生態学講座

†† 水圈生態研究室

本多 仁・片山 知史・伊藤 純子・千田 良雄・大森 迪夫・大方 昭弘

河口汽水域に分布する魚類集団がこの水域を生活の場として選択することによって得られる利点は、高生残と高成長の二点である（大森・靄田, 1988<sup>3)</sup>）。これはすなわち、河口汽水域には捕食者が少ないと豊富な食物供給が生活史初期の高成長を保障しているという考え方である。成長と生残とは相互に深く関わる生物の内包する本質的な課題である（バロン・後藤, 1989<sup>4)</sup>）。しかしながら、河口汽水域が魚類の生活史初期における成長と生残に有利な場所であるという説明は、未だ仮説の段階にある。したがって、河口汽水域における魚類集団の生産力を把握するためには、魚種間の「食う—食われる」の関係や食物をめぐる競争など、食物関係を軸にした魚類集団の生産構造とその機能的特徴を明らかにし、河口汽水域が食物関係上魚類の生存に利をもたらすという上記の仮説を証明する必要がある。

以上の論点を踏まえ、本研究は、河口汽水域に形成される魚類集団の生産構造を解析し、河口汽水域が魚類生産に果たす役割を解明することを目的とする。

## 2. 材料と方法

### 2.1 調査水域の概要

仙台湾に流入する阿武隈川、名取川や七北田川などの河口付近には、潟湖が各所に形成されている（栗原, 1975<sup>5)</sup>；大森・靄田, 1988<sup>3)</sup>）。このような潟湖の中から本研究の調査対象に選定した水域は、名取川の河口に位置する広浦（宮城県名取市閑上）である。河口汽水域における魚類集団の研究例は数少ないが、広浦についてはこれまでにいくつかの研究例（高橋, 1973<sup>10)</sup>；大森・靄田,

1988<sup>3)</sup>）があり、魚類相についての知見も比較的豊富である。広浦は、Fig. 1 に示すように、幅約300m、奥行き約1,500m、水深は満潮時の瀬筋でも約2～3mと浅く、干潮時には中央部の浅瀬や岸沿いが数十mの幅で干出して干潟となる（本多ほか, 1995<sup>11)</sup>）。広浦の水質は、名取川と増田川からの河川水の流入と潮汐に伴う沿岸水の流入によって塩分は1～30という著しい日周変化を示す（本多ほか, 1995<sup>11)</sup>）。また、底層水温の季節変化も大きく、夏季は24°C前後に上昇するが、冬季とくに2月は3°C台まで低下する。底質は、Went-worthの粒度スケールで表すと極細砂～中砂（鎌田, 1981<sup>12)</sup>）で構成され、干出する場所ではシルト含量が高いが、酸化還元電位（E<sub>a</sub>）がマイナスの還元状態（左山・栗原, 1988<sup>13)</sup>）になることはほとんどない。

### 2.2 魚類の採集方法

魚類の採集は、1991年4～12月の期間、毎月1回、原則として大潮の干潮時の昼間に広浦内に設けた3～5ヶ所の定点において地曳網（片袖網長26m、袋網長6m、袋網の目合5mm）を用いて行った。また、秋以降魚類の成長に伴い減少した採集個体数を補うためと種類やサイズ組成の昼夜比較のために、1991年11月には夜間の干潮時にも地曳網による採集を1回行った。採集した魚類は種名の同定後、体長（標準体長および全長）と体重の計測を行い、消化管内容物の解析に供した。

魚類の食物となっている生物の現存量を明らかにするために、魚類採集と同時に同じ場所において水中の動物プランクトンおよび底泥中のマクロペントスを採集した。動物プランクトンは動物プランクトンネット（口径0.7m、目合330μm、濾水計装着）の作業艇での表層水平曳き（曳網距離約200m）により採集した。マクロペントスは、エクマン・バージ型採泥器（大きさ0.2×0.2m）により一定点当たり3回（合計面積0.12m<sup>2</sup>）採取した泥中から1mmの篩を用いて選別・採集した。

イシガレイとスズキについては、食性に関する河口汽水域と仙台湾沿岸域の成育場間の比較を行うため詳細な消化管内容物調査を行った。両種の成育場は仙台湾沿岸域において河口内外から沿岸浅海域にまで広く分布する（小金沢ほか, 1972<sup>14)</sup>；大方, 1988<sup>15)</sup>）ことから成育場間比較のモデル魚種に選んだ。

河口汽水域の成育場におけるイシガレイ、スズキ両種の消化管内容物の解析には、1992年4月～1993年6月の期間、広浦を中心とする名取川河口周辺において上記の地曳網とこれより小型の地曳網（片袖網長3m、袋網長1m、袋網の目合1mm）、桁網（幅1m×高さ0.3mの鉄製方形枠付、袋網長5m、袋網の目合5mm）および三角押し網（一辺0.7mの三角形枠付、網の目合5mm）を併

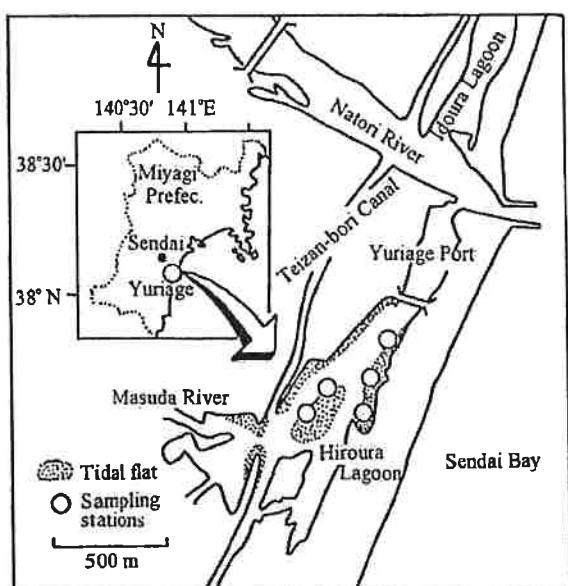


Fig. 1 Map showing the sampling stations.

## 河口汽水域における魚類集団の生産構造と機能

用して採集したものを用いた。魚類の採集頻度は、1992年4月～1993年2月の期間では毎月1回、1993年3～6月の期間はほぼ毎週1回とした。

仙台湾沿岸域の成育場におけるイシガレイ、スズキ両種の消化管内容物の解析には、本研究とは別に、以下のような調査によって得られた標本を用いた。仙台湾沿岸域のイシガレイ稚魚は、東北区水産研究所資源増殖部が採集したものを解析した。これは、名取川河口から約15km南の宮城県亘理町荒浜に位置する阿武隈川河口沖合域、すなわち直接仙台湾に面する砂浜海岸碎波帯の沖側水深3～15mの海域において1991年3月18日に採集したものである。また、仙台湾沿岸域のスズキ未成魚に関しては、1992年10月27日に宮城県亘理町荒浜沖仙台湾の水深約20mの海域で小型底びき網漁船により漁獲された魚体標本を用いた。

### 2.3 魚類の消化管内容物の解析方法

採集した魚類の消化管内容物は可能な限り種まで査定し、食物種類ごとの個体数、重量、および全長を測定した。

得られた消化管内容物の種類組成に基づいて各魚種の食地位を以下のように推定した。食地位の推定に際しては、三尾ほか(1984)<sup>16)</sup>の方法にならい、「捕食順位」を求めた。この捕食順位は、魚種ごとの食物種類組成に基づいて与えられた得点により決められる各魚種の食物連鎖上の順位を意味し、一般的な食地位に相当するものである。捕食順位を決定する基本的な考え方および手順は次の通りである。まず、温帯海域における一般的な食物連鎖のモデル(Ryther, 1969<sup>17)</sup>; Odum, 1971<sup>18)</sup>; 三尾ほか, 1984<sup>16)</sup>)を基本として、各食物生物にその栄養段階に基づいた得点を与えてランク付けを行う。すなわち、各食物生物に対して栄養段階の高い順に高い得点を与えることとする。ここでは、食物項目を6段階に分けることにして、各ランクに属する食物項目及びその配点は、(1)魚類: 6点; (2)エビ類、カニ類、エビジャコ、アナジャコ: 5点; (3)アミ類: 4点; (4)端脚類、等脚類、多毛類、二枚貝類、二枚貝水管: 3点; (5)カイアシ類、クマ類、エビ・カニ類の幼生・枝角類・昆虫類: 2点; (6)藻類、卵、魚鱗: 1点、とする。次に、魚種ごとに、その魚種の全食物項目の消化管内容物出現頻度の積算値を分母として、これに各食物項目の出現頻度を乗じることにより、各食物項目の摂食比率を求める。この食物項目別の摂食比率にそれぞれの食物項目に与えられた上記の得点を乗じてこれを魚種ごとに合計したスコアを求める。この合計スコアが大きい順に捕食順位すなわち食地位は高くなるものとする。

## 3. 結 果

## 3.1 魚種組成の季節変化

魚類採集時の水温は、4月は約15°Cであるが、5月には18°C台にまで上昇し、6月以降8月までは24°C前後の高温を維持した。水温は9月下旬に18°Cを下回ると急速に下降し始め、12月には8°C台にまで低下した。冬季最も水温が低下する2月には3°C台となり、3月以降水温は再び上昇し始める。

ここでは、全調査期間のうち、漁具を統一して行った広浦の1991年4～12月に採集された魚種組成の季節変化を検討した。調査期間中合計9回の昼間調査で採集された魚類は、9目21科38種の合計8,596個体であった(Table 1)。分類群別の種数は、ハゼ科が10種と最も多く、次いでコイ科が5種、その他は各科とも1～2種で

Table 1 Monthly changes in number of individuals of fish collected in Hiroura Lagoon.

Species	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Total(%)
<i>Clupanodon punctatus</i>	0	4	2	7	7	107	1	0	0	128( 1.4)
<i>Herkisichthys zunasi</i>	0	14	4	19	25	3	2	0	0	67( 0.7)
<i>Engraulis japonica</i>	0	0	0	0	0	7	7	474	1	489( 5.1)
<i>Auguilla japonica</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1(<0.1)
<i>Hypomesus transpacificus nippensis</i>	0	0	0	1	0	6	0	0	0	7(<0.1)
<i>Plecoglossus altivelis altivelis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1(<0.1)
<i>Salangichthys microdon</i>	2	3	14	78	5	664	133	26	3	928( 10.8)
<i>Onchorhynchus keta</i>	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3(<0.1)
<i>Rhodeus ocellatus ocellatus</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1(<0.1)
<i>Hemibarbus barbus</i>	0	6	3	7	1	0	2	1	0	20( 0.2)
<i>Tribolodon brandti</i>	11	98	362	173	267	70	29	3	31	1044( 12.1)
<i>Carassius auratus langsdorffii</i>	0	0	1	13	0	8	0	0	0	22( 0.2)
<i>Cyprinus carpio</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1(<0.1)
<i>Hyperoplus intermedius</i>	0	0	0	0	2	0	1	0	0	3(<0.1)
<i>Oryzias latipes</i>	0	0	0	.1	0	0	0	0	0	1(<0.1)
<i>Mugil cephalus</i>	1	3	4	0	0	1	0	2	417	428( 5.0)
<i>Liza carinata</i>	0	0	0	12	9	18	7	13	0	59( 0.6)
<i>Lateolabrax japonicus</i>	0	29	177	182	17	2	0	0	0	407( 4.7)
<i>Leiognathus nuchalis</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1(<0.1)
<i>Terapon jarbua</i>	0	0	0	0	3	15	23	9	0	50( 0.5)
<i>Acanthopagrus schlegeli</i>	0	2	1	1	24	49	7	11	0	95( 1.1)
<i>Ammodytes personatus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1(<0.1)
<i>Acentrogobius pflaumii</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1(<0.1)
<i>Rhinogobius sp.CB</i>	0	0	0	9	5	0	0	0	0	14( 0.1)
<i>Tridentiger obscurus</i>	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2(<0.1)
<i>Tridentiger trigonocephalus</i>	3	1	0	2	7	7	0	2	1	23( 0.2)
<i>Chasmogobius castaneus</i>	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4(<0.1)
<i>Chasmogobius urotaenia</i>	6	7	1	0	4	0	2	2	57	79( 0.9)
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	38	45	68	174	329	422	121	32	22	1251( 14.6)
<i>Acanthogobius latipes</i>	17	35	4	6	268	1436	761	161	335	3023( 35.2)
<i>Eutaeniichthys gilli</i>	0	1	1	1	4	0	0	0	0	7(<0.1)
<i>Leucopspion petersii</i>	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3(<0.1)
<i>Playcephalus indicus</i>	58	17	61	71	25	51	37	12	5	338( 3.9)
<i>Liparis tanakai</i>	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2(<0.1)
<i>Kareius bicoloratus</i>	24	9	14	14	11	7	0	0	0	79( 0.9)
<i>Platichthys stellatus</i>	0	0	5	3	2	0	0	0	0	10( 0.1)
<i>Takifugu niphobles</i>	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2(<0.1)
<i>Takifugu pardalis</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1(<0.1)
Total	164	215	722	775	1018	2880	1135	752	875	8596
(%)	(1.9)	(3.2)	(8.4)	(9.0)	(11.8)	(33.5)	(13.2)	(8.7)	(10.2)	(100)
Number of species	11	16	16	20	21	21	16	15	11	38

本多 仁・片山 知史・伊藤 絹子・千田 良雄・大森 迪夫・大方 昭弘

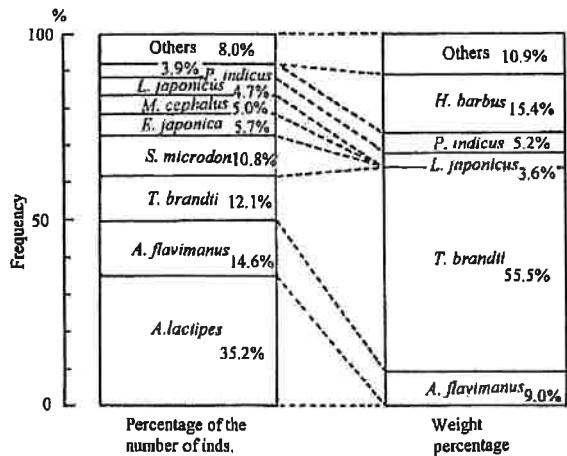


Fig. 2 Fish species compositions in the percentage of the number of individuals and the weight percentage for major species caught in Hiroura Lagoon from April to December, 1996.

あった。出現種数は夏季が20~21種と最も多く、春季と秋~冬季には11~16種が見られた。

調査全期間の採集魚種別個体数および重量割合をFig. 2に示した。個体数ではアシロハゼ *Acanthogobius lacticeps* が最も多く、次いでマハゼ *A. flavimanus*、マルタ *Tribolodon brandti*、シラウオ *Salangichthys microdon*、カタクチイワシ *Engraulis japonica*、ボラ *Mugil cephalus*、スズキ *Lateolabrax japonicus*、コチ *Platycephalus indicus* の順に多く採集されていた。重量割合ではマルタが最も高く、次いで個体サイズの大きいニゴイ *Hemibarbus barbus* が占め、その次にマハゼ、コチ、スズキが続いていた。

調査全期間で総採集個体数が50以上の上位15種を主要種とした。これら15種の採集個体数の季節変化パターンをFig. 3に示した。アシロハゼ、マハゼ、マルタ、シラウオ、コチの5種は、4~12月の間、連続して採集されたが、採集個体数は6月から9月にかけて増大した。その他の魚種は出現する季節が限られていた。すなわち、イシガレイ *Kareius bicoloratus* は4月から9月まで、スズキは5月から9月まで、クロダイ *Acanthopagrus schlegeli* は5月から11月までであった。コノシロ *Chisanodon punctatus*、サッパ *Herklotichthys zunasi*、ボラ、セスジボラ *Liza carinata*、コトヒキ *Terapon jarbua*、ウキゴリ *Chaenogobius urotenia* は比較的の長期間にわたり出現し、時としてかなりの個体数が採集されているが、全体としての採集個体数は上記5種（アシロハゼ、マハゼ、マルタ、シラウオ、コチ）に比べてずっと少なかった。このほか、カタクチイワシは11月に稚魚期の個体が大量出現した。

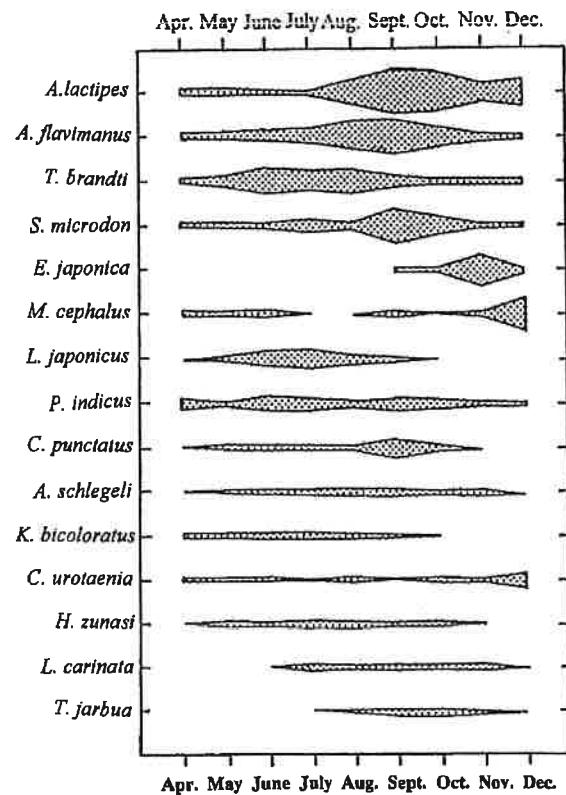


Fig. 3 Monthly changes in abundance in the catch number of individuals for 15 dominant fish species.

### 3.2 魚類集団の出現様式と魚種の類型化

各魚種がこの水域にどの発育段階でどれくらいの期間出現するのかという出現状況を基準としてグループ分けを試みた。ここでは、菊池（1973）<sup>19)</sup>、高橋（1973）<sup>10)</sup>の行った出現状況に基づく類型分類の方法を参考に、後藤（1987）<sup>20)</sup>の淡水魚の区分も考慮に加えて分類・整理した。結論としては、この水域に出現する魚類の合計38種を次の3グループに分けた。

「周年出現種」：毎月多数採集され、かつ発育段階が稚魚期から成魚期にわたり、この水域に周年生息場を持つと考えられる魚種（5種）。シラウオ、マルタ、マハゼ、アシロハゼ、コチ。

「季節的出現種」：春から秋の特定の季節に特定の発育段階の個体が比較的まとまって出現する魚種、とくに、稚魚期に出現する魚種と産卵直前の成熟した状態で出現する魚種があり、また、海水魚が多いことも特徴である（10種）。コノシロ、サッパ、ボラ、セスジボラ、スズキ、クロダイ、コトヒキ、ウキゴリ、イシガレイ、ヌマガレイ *Platichthys stellatus*。

「偶来種」：出現期間が短く、採集個体数も少ない魚種で、海水魚・淡水魚・汽水性の魚など多様な魚種が含まれる（23種）。カタクチイワシ、ウナギ *Anguilla japonica*,

## 河口汽水域における魚類集団の生産構造と機能

ワカサギ *Hypomesus transpacificus nipponenensis*, アユ *Plecoglossus altivelis altivelis*, サケ *Onchorhynchus keta*, タイリクバラタナゴ *Rhodeus ocellatus*, ニゴイ, ギンブナ *Carassius auratus langsdorffii*, コイ *Cyprinus carpio*, クルメサヨリ *Hyporhamphus intermedius*, メダカ *Oryzias latipes*, ヒイラギ *Lepiognathus nuchalis*, イカナゴ *Ammodytes personatus*, スジハゼ *Acentrogobius pflaumii*, シマヨシノボリ *Rhinogobius* sp. CB, チチブ *Tridentiger obscurus*, シマハゼ *Tridentiger trigonocephalus*, ビリンゴ *Chaenogobius castaneus*, ヒモハゼ *Eutaeniichthys gilli*, シロウオ *Leucopssarion petersii*, クサウオ *Liparis tanakai*, クサフグ *Takifugu niphobles*, ヒガソフグ *Takifugu pardalis*.

各グループに属する魚種の一曳網当たりの採集個体数および重量の季節変化を Fig. 4 に示した。前者は夏季に増加し、9月にピークを示している。これは、周年出現種であるアシロハゼの小型個体が多数採集された結果である (Table 1)。一曳網当たりの採集重量の各グループの割合は、春～秋には大きな変化は見られないが、11月に急減して12月には再び急増している。これは、11月にマルタの採集個体数が少なく、12月には逆に全長300 mm以上の大形のマルタが多く採集された結果である。

(Table 1)。調査期間中の全採集魚に占める各グループの割合は、周年出現種が個体数で72%, 重量でも65%を占めていた。

## 3.3 主要魚種の全長組成の季節変化

出現状況によってグループ分けされた各魚種の出現の様子を検討するために、採集個体数が多い周年出現種と季節的出現種の主要種の全長組成を以下に示す。

**周年出現種**: Figs. 5-1, 2 は、アシロハゼ、マハゼ、マルタ、シラウオ、コチの全長組成の季節変化を示している。いずれの魚種も6～9月にかけて新規加入群と見られる小型個体が多数出現していた。アシロハゼでは7～8月の間に全長50mm以上の大型個体が出現しなくなり、代わりに全長約20mmの小型個体に完全に置き換わった。マハゼでは7～9月の間に全長100mm以上の大型個体から全長約30mmの小型群が主体の組成に変化した。アシロハゼとマハゼの両種の夏季に出現した小型群は季節に伴って成長した。マルタの場合も6～9月までは全長30～50mmの小型群の割合が高くなるが、11月以降は夏季に加入した小型群は見られなかつた。シラウオの場合は、4, 5月に全長約100mmの成熟大型個体が採集されたが、6月にはこの大型個体に代わって全長約30mmの小型個体が加入してきた。この小型群はその後成長し、12月には全長約60mmに達した。採

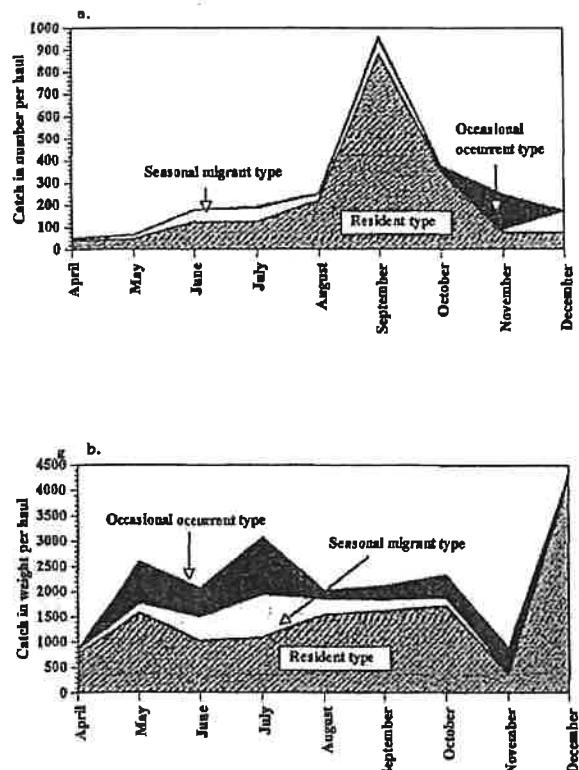


Fig. 4 Monthly changes in the catch in (a) number and (b) weight per haul for the three occurrent types.

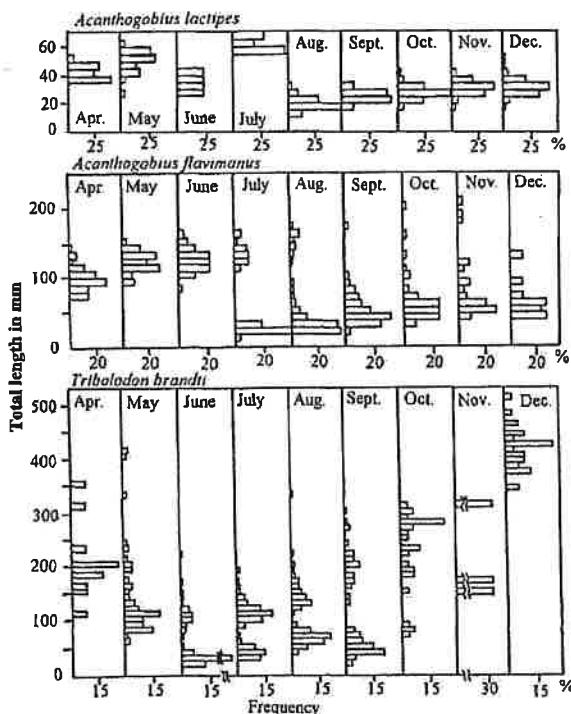


Fig. 5-1 Monthly changes in size distributions of the three species of the resident type.

本多 仁・片山 知史・伊藤 純子・千田 良雄・大森 迪夫・大方 昭弘

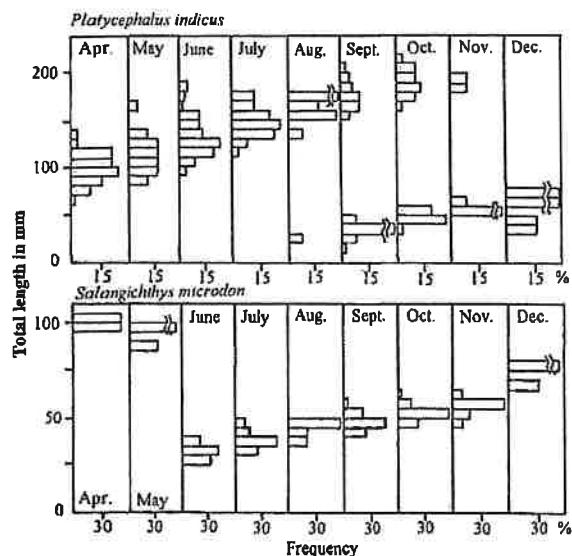


Fig. 5-2 Monthly changes in size distributions of the two species of the resident type.

集されたコチの発育段階は全長10~20mmの稚魚から約200mmの未成魚までであり、全長350mm以上の成熟大型個体は採集されなかった。9月には全長約30mmの小型群の加入が見られた。

**季節的出現種：**季節的出現種の全長組成の季節変化を Figs. 5-3, 4 に示した。出現時期の早いイシガレイは、4月に全長50mm以下の稚魚～幼魚と約150mmの幼魚～未成魚が共に出現した。5月以降、小型個体のモードが夏にかけて大きな方へ移動したが、10月には採集されなかった。スズキとクロダイの場合は、一部のクロダイを除き、まず小型の個体が現れ、その全長組成のモードが経月的に大きな方へ移動している。スズキは5月に全長50mmの稚魚が現れた後、月の経過に伴って全長モードは大きい方へ移動し、8月にはモードが100mmを超えるまでに成長する。9月には採集個体数は激減するが全長150mmの個体が現れる。10月以後は昼間の網にはスズキが入らなかったため図示していないが、11月の夜間の地曳網には全長180~280mmのスズキ未成魚が8個体入網していた。クロダイは、5月から全長100~150mmの幼魚が少數入網したが、8月になると全長約20mmの稚魚が現れた。この稚魚の全長モードは季節に伴って大きい方へ移り、11月の全長モードは70mmになった。サッパも4月から全長100mm以上の大型群が出現するが、8月には全長約50mmの稚魚～若魚群が加入した。セスジボラは、7~11月に全長150~200mmの群と約50mmの小型群が断続的あるいは連続的に現れた。コ

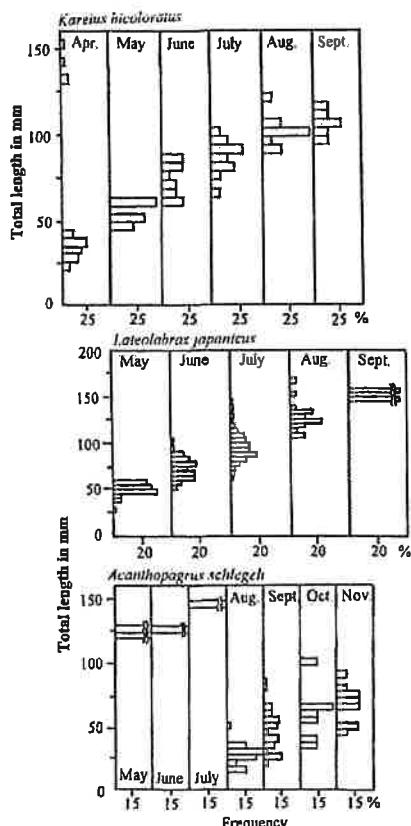


Fig. 5-3 Monthly changes in size distributions of the three species of the seasonal migrant type.

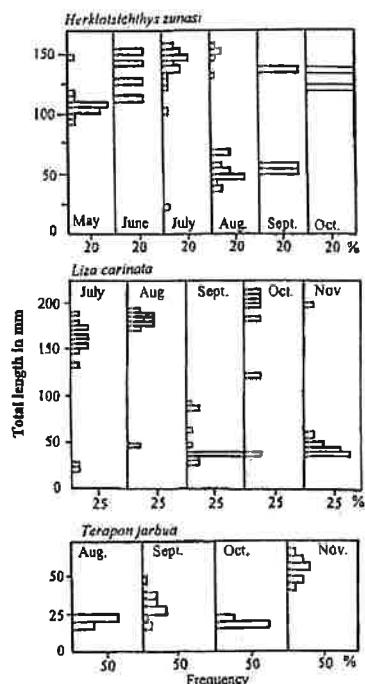


Fig. 5-4 Monthly changes in the size distributions of the three species of the seasonal migrant type.

## 河口汽水域における魚類集団の生産構造と機能

トヒキは、全長30 mm以下の稚魚が夏から秋にかけて現れ、11月にはモードが50 mmを超えた。

## 3.4 主要魚種の食物種類組成

主要魚種の消化管内容物の種類別出現頻度を季節ごとに Figs. 6-1~3 に示した。図では消化管内容物の種類組成に基づいて食地位が高い魚種を上方に配した。

各季節の結果は、

4月 (Fig. 6-1)：周年出現種が主体で、季節的出現種のイシガレイが見られた。魚食性の強いコチと全長130 mm以上のイシガレイを除く他の魚種の食物組成は甲殻類、二枚貝（ソトオリガイなど）や多毛類等のペントスが中心となっていた。全長の小さなイシガレイ稚魚は二枚貝の水管をよく摂食していた。アシシロハゼが摂食していたカイアシ類は、浮遊性種の *Sinocalanus tenellus* や *Pseudodiaptomus inopinus* 等とケンミジンコ目やソコミジンコ目等の底生性の種類が同程度出現していた。

6月 (Fig. 6-1)：ニホンイサザアミ *Neomysis Japonica*などのアミ類やプランクトンを中心とした食生活を営むスズキの稚魚などの季節的出現種が加わった。しかし、周年出現種は相変わらずペントス中心の食生活を行っていた。この時期に出現したマルタの稚魚（全長70 mm以下）は小型の動物プランクトンを摂食していた。

8月 (Fig. 6-2)：動物プランクトンを主に摂食する季節的出現種がさらに増加して、主にペントス食の周年出現種と同時に存在した。コチは魚のほかにエビジャコやヨコエビ類も摂食していた。スズキは6月よりも全長が

大きくなってアミ類やエビ類幼生をよく摂食していた。周年出現種と季節的出現種の間で主要な食物種類の重複は少なかった。

10月 (Fig. 6-2)：この時期から採集されなくなったスズキに代わって、成長したクロダイの食地位が上がった。季節的出現種の減少とともに周年出現種の食地位が上がったが、これらの魚種の主な食物は春から夏までの季節と同様にペントスであった。

12月 (Fig. 6-3)：再び春季のように周年出現種が上位を占める魚種構成に戻った。コチも小型の個体が中心となってアミ類を摂食していたが、全体としてプランクトン性の小型の食物の摂食割合は低下し、ペントス中心の食生活となっていた。

## 3.5 広浦における魚類の食物生物現存量

広浦に分布する魚類の食物となっている生物のうち、水中に分布する動物プランクトンと底泥中に分布するペントスの現存量の季節変化を示した (Fig. 7)。ペントスが周年安定した現存量を示すのに対して、動物プランクトンは春と秋に多く、夏季に減少するという季節変動を示した。

## 3.6 主要魚種の食地位

消化管内容物の解析結果に基づいて、広浦に形成される魚類集団内での各魚種の食地位を高い順に Table 2 に示した。各魚種の食地位は成長や季節に伴って変化した。周年出現種のうちコチは魚食性が強く、広浦内では常にもっとも高い食地位を占めていた。コチと動物プランク

Table 2 Seasonal changes in food niches of the dominant fish species

Rank of food niche	April	June	August	October	December
1	<i>P. indicus*</i> (TL**60-140mm)	<i>P. indicus</i> (TL90-190mm)	<i>P. indicus</i> (TL20-190mm)	<i>P. indicus</i> (TL30-220mm)	<i>P. indicus</i> (TL30-80mm)
2	<i>K. bicoloratus</i> (TL130-160mm)	<i>L. japonicus</i> (TL50-105mm)	<i>L. japonicus</i> (TL100-170mm)	<i>A. schlegeli</i> (TL35-110mm)	<i>T. brandti</i> (TL340-420mm)
3	<i>A. flavimanus</i> (TL60-140mm)	<i>K. bicoloratus</i> (TL60-90mm)	<i>K. bicoloratus</i> (TL90-130mm)	<i>T. brandti</i> (TL70-320mm)	<i>A. flavimanus</i> (TL40-140mm)
4	<i>T. brandti</i> (TL110-360mm)	<i>A. flavimanus</i> (TL80-170mm)	<i>A. flavimanus</i> (TL120-200mm)	<i>A. flavimanus</i> (TL30-210mm)	<i>A. lacticeps</i> (TL15-55mm)
5	<i>K. bicoloratus</i> (TL20-50mm)	<i>T. brandti</i> (TL70-240mm)	<i>T. brandti</i> (TL110-340mm)	<i>A. lacticeps</i> (TL15-45mm)	<i>C. urotaenia</i> (TL20-60mm)
6	<i>A. lacticeps</i> (TL35-55mm)	<i>H. zunasi</i> (TL110-155mm)	<i>A. flavimanus</i> (TL10-100mm)	<i>T. jarbua</i> (TL15-25mm)	<i>M. cephalus</i> (TL20-40mm)
7		<i>T. brandti</i> (TL29-70mm)	<i>T. brandti</i> (TL30-100mm)	<i>S. microdon</i> (TL40-75mm)	
8		<i>A. lacticeps</i> (TL25-45mm)	<i>A. schlegeli</i> (TL10-60mm)		
9			<i>A. lacticeps</i> (TL10-35mm)		
10			<i>H. zunasi</i> (TL30-160mm)		

\* *P. indicus* : *Platycephalus indicus*; *K. bicoloratus* : *Kareius bicoloratus*; *L. japonicus* : *Lateolabrax japonicus*; *A. schlegeli* : *Acanthopagrus schlegeli*; *T. brandti* : *Tribolodon brandti*; *A. flavimanus* : *Acanthogobius flavimanus*; *A. lacticeps* : *Acanthogobius lacticeps*; *C. urotaenia* : *Chaenogobius urotaenia*; *H. zunasi* : *Herklotichthys zunasi*; *T. jarbua* : *Terapon jarbua*; *M. cephalus* : *Mugil cephalus*; *S. microdon* : *Salangichthys microdon*

\*\* TL: Total length

本多 仁・片山 知史・伊藤 絹子・千田 良雄・大森 迪夫・大方 昭弘

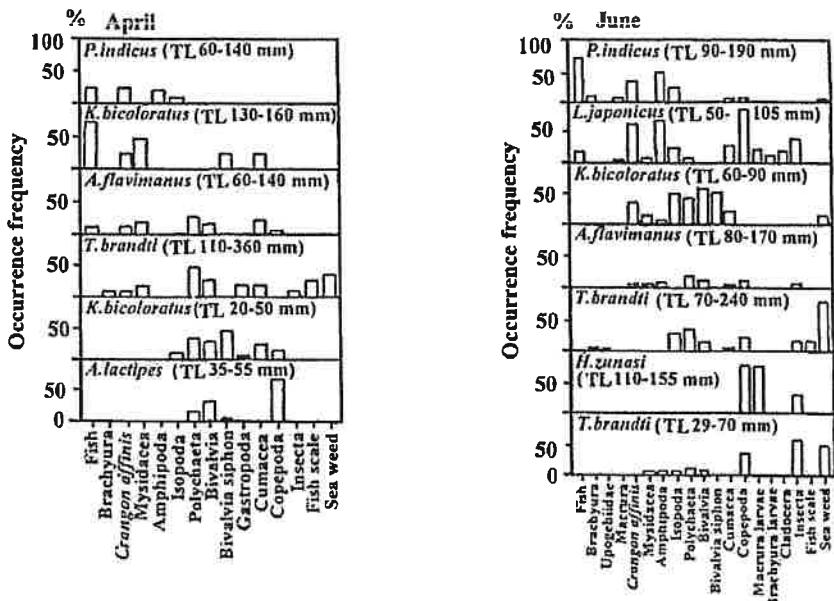


Fig. 6-1 Composition in occurrence frequency of food organisms in stomachs of the six dominant fish species in April and June.

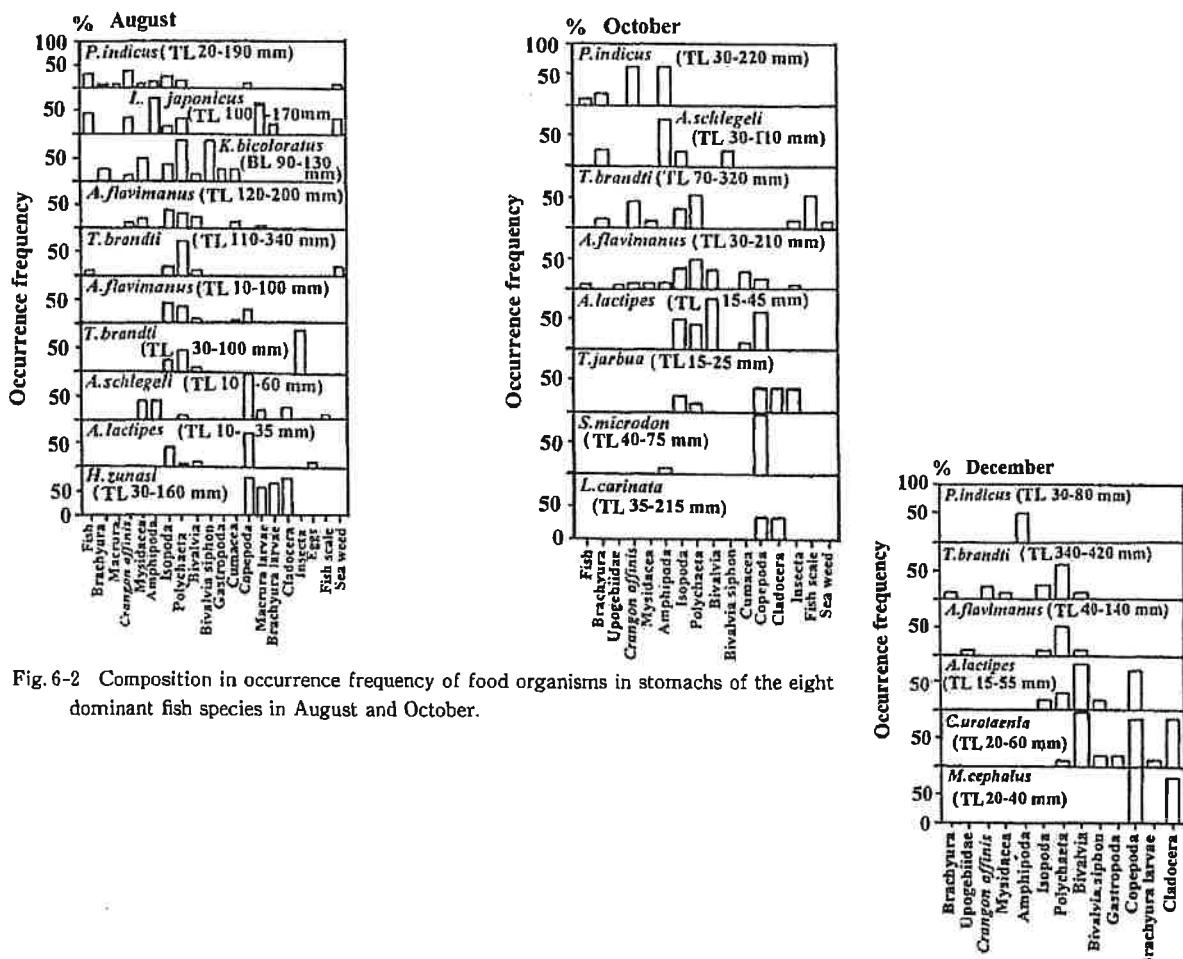


Fig. 6-2 Composition in occurrence frequency of food organisms in stomachs of the eight dominant fish species in August and October.

Fig. 6-3 Composition in occurrence frequency of food organisms in stomachs of the six dominant fish species in December.

## 河口汽水域における魚類集団の生産構造と機能

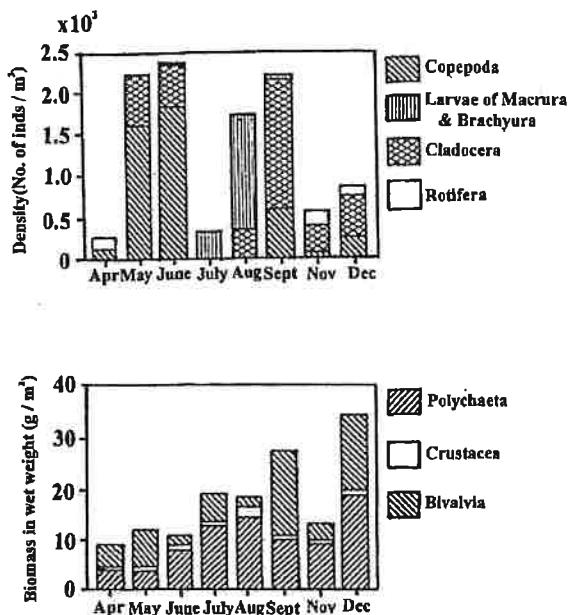


Fig. 7 Monthly changes in abundance of planktonic food organisms (top) and macrobenthos (bottom) for fish in Hiroura Lagoon.

トン食性のシラウオを除く他の周年出現種のマルタ、マハゼ、アシシロハゼの3種はペントスを主に摂食していた。これに対して、春から秋にかけての季節的出現種であるスズキ、クロダイ、サッパ、コノシロ、ボラは同時期に増大する動物プランクトンを主に摂食していた。エビ類やアミ類などの小型甲殻類や稚魚そして比較的大型の動物プランクトンを摂食するスズキやクロダイはコチの次の食地位に位置する。季節的出現種のイシガレイは、春先に、着底直後の稚魚と前年生まれの幼魚が広浦内に混在しているが、稚魚は初夏にかけて広浦内でペントスを摂食し、成長とともに食地位を上げている。

### 3.7 河口汽水域と外洋沿岸域における魚類の食生活の比較

河口汽水域の成育場としての役割を評価するために、生息場所による食生活の違いをイシガレイとスズキに関して検討した。

イシガレイの場合、1993年3～6月の間に広浦を中心とする名取川河口汽水域で採集された当該種稚魚の主要食物種類である多毛類の全長で表した体サイズを、また1991年3月18日に阿武隈川河口沖の仙台湾で採集されたイシガレイ稚魚の主要食物種類である多毛類の全長で表した体サイズを、イシガレイの全長に対してプロットした(Fig. 8)。食物の体サイズを(a)広浦を中心とする河口汽水域と(b)仙台湾沿岸域で比較すると、採集時期と場所が異なるものの、同じ全長のイシガレイでは河口汽水域の方が大きな食物サイズのものを摂食していた。

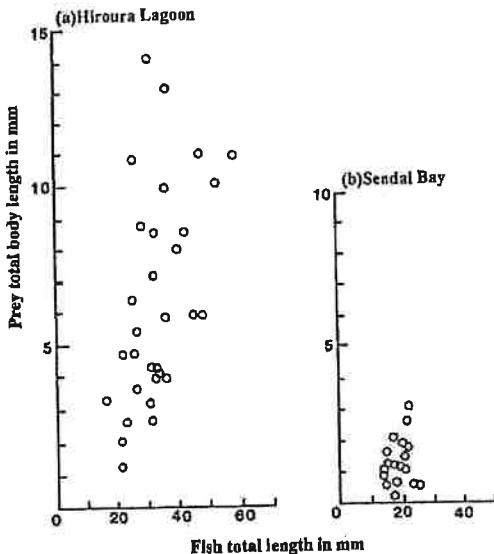


Fig. 8 Relation between total body lengths of prey, Polychaeta, and predator, *Kareius bicoloratus*, in (a) Hiroura Lagoon and (b) Sendai Bay off Abukuma Estuary.

スズキの場合は、1992年4～10月の間で、解析に供した河口汽水域の稚魚～未成魚までの主要な食物種類、および1992年10月に仙台湾沿岸域で採集した全長250mm以上の未成魚の摂食していた魚類、それらの全長で表した体サイズとそれらを摂食していたスズキの体サイズとの関係をFig. 9に示した。河口汽水域に分布する全長約100mmまでのスズキはカイアシ類、アミ類、エビジャコなどを多く摂食しているほかハゼ科稚魚など小型の魚類も摂食していたが、食物サイズは全体に小型でスズキの全長によるその変化は小さかった。しかしながら、全長150mmを超えると河口汽水域のスズキの食物はカタ

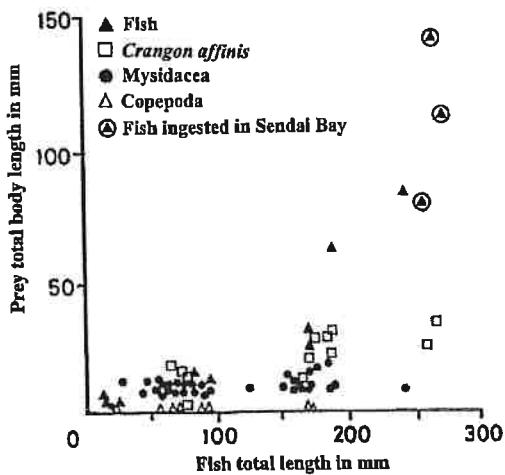


Fig. 9 Relation between total body lengths of prey and predator, *Lateolabrax japonicus*.

本多 仁・片山 知史・伊藤 紗子・千田 良雄・大森 迪夫・大方 昭弘

クチイワシなどの魚類へと変わり、食物サイズも急速に増大した。このようにスズキでは成長に伴い食物種類の変化とともに食物の体サイズも増大した。また、仙台湾沿岸域で採集した全長200mmを超えるスズキ未成魚の胃内から出現した魚類は全長80~140mmのカタクチイワシであった。食物サイズは河口汽水域で見られたものより大きかった (Fig. 9)。

#### 4. 考 察

##### 4.1 魚類相の季節変化

今回得られた結果を、本研究の約20年前に広浦ではほぼ同様の方法により研究を行った高橋 (1973)<sup>10)</sup> の結果と比較すると、本研究の「周年出現種」および「季節的出現種」はそれぞれ高橋 (1973)<sup>10)</sup> の「周年定住種」および「季節定住種」に相当し、「偶来種」は同じ呼称であった。魚種組成はほぼ同様であり、出現パターンによる3つのグループへの類型分けとそれぞれのグループに属する魚種もほぼ一致した。

本水域の魚類全体に占める3つのグループの割合は、周年出現種が個体数・重量ともに過半数を占めていた。周年出現種は、全長組成や発育段階も幅広くかつ連続的であり、複数の発育段階の個体が同じ時期に出現していたので、広浦とその周辺水域を生息場とする魚種グループであると考えられた。したがって周年出現種はこの水域の生物生産構造の骨格を成す種と考えられた。種数、個体数および重量ともに増大して群集構造も複雑になる夏から秋においても、個体数と重量割合が最大を示しているのは周年出現種であった。このグループは小型群の新規加入や個体の成長などによって個体数、重量ともに大幅な増加を示していた。これに対して、同時期に種数が増大する季節的出現種の個体数と重量における各々の割合は高くなかった。また、種数は偶来種が全体の61%の23種と多く、次いで稚魚期や産卵期に現れる季節的出現種が26%の10種であり、周年出現種は5種で13%と少なかった。

水産有用種の中で、周年出現種はマハゼとシラウオの2種であったが、季節的出現種は10種のうちウキゴリを除く9種が有用種であり、偶来種でもクサウオ、クサフグ、ハゼ科の小型種などを除いても有用な魚種が10種と多かった。季節的出現種は、主に稚魚期から幼魚期のものが外海の沿岸域から来遊し、一時的(7~9月)に広浦の生物生産に組み込まれた種であると考えられた。この7~9月は、当水域が最も多様な魚類相を示す時期であり、同時に稚魚の成育場としての機能を最大に發揮する時期でもある。本研究と他の海域の結果(畠中・飯塚, 1962a<sup>21)</sup>, b<sup>22)</sup>, c<sup>23)</sup>; 菊池, 1973<sup>19)</sup>; 木下, 1984<sup>24)</sup>; 大

森, 1984a<sup>25)</sup>, b<sup>26)</sup>)は、沿岸浅海の碎波帯、内湾、入り江、河口汽水域などのごく浅い水域は魚類が初期生活史を展開する場所としてきわめて重要である(Matsumiya, 1982<sup>27)</sup>; 大森・齋田, 1988<sup>31)</sup>; オダム, 1991<sup>11)</sup>)ことを示している。周年出現種のみならず季節的出現種にとっても、河口汽水域は単なる通過水域ではなく、摂食活動を営み、成長し、生き残りを高める機能を有する場所(大方, 1988<sup>16)</sup>; 塚本, 1994<sup>28)</sup>; 原田, 1994<sup>29)</sup>)と位置づけられるものと考える。

##### 4.2 魚類集団の生産構造

広浦に形成される魚類集団の食物関係からみた生産構造の特徴は、周年安定して存在するペントスを個体数で70%以上を占める周年出現種が主に利用し、季節的に増大する動物プランクトンを季節的出現種が主に利用していたという点である。さらに、季節的出現種は、成長に伴って食地位を変化させ、また、周年出現種も新しく加入した小型魚では季節とともに成長して食地位を変化させていた。魚類集団の構造上は周年出現種に対して季節的出現種が春から秋にかけて割り込む形になるが、両者はそれぞれ埋在性のペントスと浮遊性の動物プランクトンという異なる生活型(Tyler, 1972<sup>30)</sup>, 大森, 1975<sup>31)</sup>)の食物を探っているため、季節的に共存が可能になるものと考えられる。

##### 4.3 魚類生産における河口汽水域の役割

当水域が季節的に汽水域を利用する魚種の発育初期の食生活に適した食物を安定して提供していることはイシガレイやスズキで明らかにしたが、沿岸浅海域に比べても河口汽水域の方がより大きな利点を有していた。しかしながら、著しい塩分や水温の日周変化と冬季の低温などの物理的環境条件による生き残りの低下の問題や成長に伴う食物の種類やサイズの変化への対応の面では汽水域の環境条件は厳しい。このため、多くの魚種にとって、年間を通してこの場所に定住するのは困難であり、限られた魚種のみが周年出現種となっていると考えた。本研究は、河口汽水域に周年生息可能な生物の種数は限られるという菊地(1988)<sup>32)</sup>の指摘が、魚類においてもあてはまるこを明らかにした。ただし、魚類の場合は、単に物理的環境条件のみならず食物などの生物的条件も大きな制限要因となっていると考えた。

仔稚魚の成育場となる条件の一つである大型の捕食魚が少ないとや食物生物の出現時期と魚類の摂食活動とのタイミングの合致は、汽水域も外海に直接面した波打ち際を含めた沿岸の浅海域においても同じ条件である。しかし、沿岸域に比べて汽水域の方が食物となる生物の生産力は分布する生物の高い回転率などの要因で高い(本多ほか, 1995<sup>11)</sup>; オダム, 1991<sup>11)</sup>)。各季節に出現する

## 河口汽水域における魚類集団の生産構造と機能

各魚種は発育段階に適した種類やサイズの食物を摂食できることが河口汽水域の食物条件の有利さを裏付けている。また、成育場として機能するためには浅くて静かな入り江など小型個体にとっての棲みやすさの多様な条件が必要であり、この点でも汽水域は優れている。しかし、静穏な水域であっても、水質や食物などの環境変動という面では前述の通り厳しい条件の場所である。また、ある程度成長した個体にとっては、生息空間の絶対的な狭さはマイナス要因となると考える。スズキの例で見たように、河口汽水域では食物の種類や大きさが限られているという点も食物要求の面からマイナス要因として作用する(本多, 1991<sup>33)</sup>)。魚類が成長とともに深みへ移動する現象は多くの海域で報告されているが(堀川ほか, 1991<sup>34)</sup>)、深みへの移動と食物要求の変化には成長と生残という問題を介して密接な関係(パロン・後藤, 1989<sup>35)</sup>)があると考える。河口汽水域で一生を過ごす魚種は少数に限られるが、この水域が多くの魚種の発育初期の成育場として機能している。ただし、その利用の程度は本研究において示した季節的出現種の多くの場合のように時・空間的に限られたものであり、これは温帯域に分布する他の多くの河口汽水域(Day *et al.*, 1989<sup>41</sup>)にも共通する特徴である。

## 謝 辞

本シンポジウムに際して講演の機会を与えてくださったコンピーナーの方々に感謝します。また、調査期間中、魚類の採集に全面的にご協力いただいた名取市閑上の故浜口国治氏に心より感謝申し上げます。比佐一郎氏、相沢富雄氏、比佐明氏をはじめとする名取市閑上漁業協同組合の皆様には本研究の実施に際して多くのご協力をいたきました。水産庁東北区水産研究所の山下洋博士には阿武隈川河口イシガレイ稚魚調査の際の貴重な標本を提供していただきました。本研究の遂行に際しては、東北大大学農学部資源生態学講座の大学院生、学部学生など学兄諸氏の多大なご協力をいただきました。上記各位にはここに厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) オダム, E. P.著・三島次郎訳 (1991) : 基礎生態学, 培風館, 東京, 86-88.
- 2) 和田英太郎 (1988) : 河口・沿岸域の環境特性—化学環境, 栗原康編著, 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー, 東海大学出版会, 東京, 26-31.
- 3) 大森迪夫・鷲田義成 (1988) : 河口域の魚, 栗原康編著, 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー, 東海大学出版会, 東京, 108-118.
- 4) Day Jr., J. W., C. A. S. Hall, W. M. Kemp and A. Yáñez-Arancibia (1989): Estuarine Ecology, Wiley Interscience, New York, 558pp.
- 5) Power, G., M. V. Power, R. Dumas, and A. Gordon (1987) : Marine migrations of Atlantic salmon from rivers in Ungava Bay, Quebec. In Common Strategies of Anadromous and Catadromous Fishes, ed. M. J. Dadswell, R. J. Klauda, C. M. Moffitt, R. L. Saunders, R. A. Rulifson, and J. E. Cooper, American Fisheries Society Symposium 1, Bethesda, 364-367.
- 6) Gross, M. R. (1987) : Evolution of diadromy in fishes. In Common Strategies of Anadromous and Catadromous Fishes, ed. M. J. Dadswell, R. J. Klauda, C. M. Moffitt, R. L. Saunders, R. A. Rulifson, and J. E. Cooper, American Fisheries Society Symposium 1, Bethesda, 14-25.
- 7) MacDowall, R. M. (1987) : The occurrence and distribution of diadromy among fishes. In Common Strategies of Anadromous and Catadromous Fishes, ed. M. J. Dadswell, R. J. Klauda, C. M. Moffitt, R. L. Saunders, R. A. Rulifson, and J. E. Cooper, American Fisheries Society Symposium 1, Bethesda, 1-13.
- 8) パロン, E. K.・後藤晃 (1989) : 繁殖スタイルと初期個体発生. 後藤晃・前川光司編, 魚類の繁殖行動—その様式と戦略をめぐって, 東海大学出版会, 東京, 1-47.
- 9) 栗原康(編) (1975) : 蒲生干潟の環境保全に関する基礎的研究. 宮城県.
- 10) 高橋正憲 (1973) : 汽水域に生息する魚類とその食生活の実態. 東北大大学農学部資源生態学講座修士論文, 253pp.
- 11) 本多仁・千葉俊宏・伊藤絹子・片山知史・千田良雄・大森迪夫・大方昭弘 (1995) : 河口汽水域における多毛類の分布様式. 日本海水学会誌, 49(3), 140-147.
- 12) 鎌田泰彦 (1981) : 日本沿岸浅海域の堆積物-II. 底質試料の採取と粒度分析. 海洋と生物, 3(1), 42-49.
- 13) 左山幹雄・栗原康 (1988) : 底泥の物質代謝. 栗原康編著, 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー, 東海大学出版会, 東京, 32-42.
- 14) 小金沢昭光・石田信正・後藤邦夫・吉田文一・伊藤章・郷古富雄・末永明雄 (1972) : ヒラメ, カレイの稚苗放流と漁場改良による資源培養方式に関する研究—カレイ類稚魚標識放流・放流稚魚の移動・成長—昭和46年度報告, 別粹研究「浅海域に於ける増養殖漁場の開発に関する総合研究(仙台湾周辺漁場)」昭和46年度報告資料集, 東北区水産研究所, 61-76.
- 15) 大方昭弘 (1988) : 魚類群集と生産機構. 水産海洋研究会編, 21世紀の漁業と水産海洋研究, 恒星社厚生閣, 東京, 59-65.
- 16) 三尾真一・田川勝・篠原富美子・山田梅芳 (1984) : 東シナ海・黄海における底魚類の食物関係に基づく群集生態学的研究. 西海区水研研報, 61, 1-221.
- 17) Ryther, J. H. (1969) : Photosynthesis and fish production in the sea. Science, 166, 72-76.
- 18) Odum, E. P. (1971) : Fundamentals of ecology 3rd ed., Saunders, Philadelphia, 574pp.
- 19) 菊池泰二 (1973) : 藻場生態系. 山本護太郎編, 海洋生態系, 東京大学出版会, 東京, 23-37.
- 20) 後藤晃 (1987) : 淡水魚一生活環からみたグループ分けと分布域形成. 水野信彦・後藤晃編, 日本の淡水魚類, 東海大学出版会, 東京, 1-15.
- 21) 畑中正吉・飯塚景記(1962 a) : 藻場の魚の群集生態学的研究—I, 優占種をとりまく魚類の栄養生態的地位. 日本水産学会誌, 28, 1-16.

本多 仁・片山 知史・伊藤 絹子・千田 良雄・大森 迪夫・大方 昭弘

- 22) 畑中正吉・飯塚景記(1962 b) : 藻場の魚の群集生態学的研究—II, 藻場周辺の魚群集. 日本水産学会誌, 28, 155-161.
- 23) 畑中正吉・飯塚景記(1962 c) : 藻場の魚の群集生態学的研究—III, 藻場の魚の生産効率. 日本水産学会誌, 28, 305-313.
- 24) 木下泉(1984) : 土佐湾の碎波帯における稚仔魚の出現. 海洋と生物, 6(6), 409-415.
- 25) 大森迪夫(1984) : 油谷湾における底生魚類相の時空間的変動. 西海区水研研報, 61, 235-244.
- 26) 大森迪夫(1984) : 油谷湾におけるマダイ稚幼魚と他魚種との間の食物及び生息場をめぐる関係. 西海区水研研報, 61, 245-256.
- 27) Matsumiya, Y., T. Mitani and M. Tanaka (1982): Changes in distribution pattern and condition coefficient of the juvenile Japanese sea bass with the Chikugo River ascending. Bull. Japan. Soc. Sci. Fish., 48, 129-138.
- 28) 塚本勝巳(1994) : 通し回遊魚の起源と回遊メカニズム. 後藤晃・塚本勝巳・前川光司編, 川と海を回遊する淡水魚. 東海大学出版会, 東京, 2-17.
- 29) 原田泰志(1994) : 通し回遊進化の生活史モデル. 後藤晃・塚本勝巳・前川光司編, 川と海を回遊する淡水魚. 東海大学出版会, 東京, 186-205.
- 30) Tyler, A. V. (1972) : Food resource division among northern, marine, demersal fishes. J. Fish. Res. Bd. Can., 29, 997-1003.
- 31) 大森迪夫(1975) : 仙台湾における底魚の生産構造に関する研究—I, 生息場および食物をめぐる魚種間の関係. 日本水産学会誌, 41, 615-629.
- 32) 菊地永祐・栗原康(1988) 感潮河川. 栗原康編著, 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー. 東海大学出版会, 東京, 150-160.
- 33) 本多仁(1991) : 海産硬骨魚類とくに底魚類の摂食活動に関する比較生態学的研究. 博士学位論文, 東北大学, 119pp.
- 34) 堀川博史・通山正弘・岸田周三(1991) 底魚類の分布様式と成長移動. 漁業資源研究会議報, 27, 61-78.

## 質疑応答

問: ベントスの現存量に対してベントスフィーダが摂食する割合は、例えばある時間単位を考えてどの程度となるのか。 (資源環境技術総合研究所・中田喜三郎)

答: 本研究では野外での摂食量を定量化するまでは至っていないので直接答えることはできないが、文献としては仙台湾の底魚類のベントス群集に対する摂食圧に関する山本護太郎氏の報告(山本護太郎, 1977, 底生生物群集一生产に於ける二, 三の問題. 西沢敏・石田力一・川崎健編, 海の生物群集と生産, 恒星社厚生閣, 東京, 269-310)がある。また、この問題についてはまさに現在、東北大学の研究グループがイシガレイ稚魚をモデルとして名取川河口域での現場実験を進めているところであり、その結果の発表が期待される。

問: 調査された河口域では動物プランクトンを捕食する魚類は優勢でないような気がするが、実際そうなのか。

(広島大学生物生産学部・上 真一)

答: 広浦のように小規模な河口汽水域では確かに動物プランクトンを摂食する魚類が周年にわたり生息することはできないようと思われる。しかし、面積の大きな汽水域ではワカサギやシラウオなどのように動物プランクトン食の魚種が大きな個体群を維持することができる。

問: 宍道湖・中海のような水域で魚類の現存量を求めるにはどうすればよいか。(地質研究所・山室 真澄)

答: 魚類の現存量推定は水産資源学の大きな課題の一つであり、資源管理の際の重要な指標となっている。しかし、移動性の高い魚類資源の現存量推定は実際にはかなり困難な課題である。具体的な方法としては、標識放流法、計量魚探を用いる方法、底びき網や船びき網等の曳網類を用いてのグリッド調査に基づいた面積一密度法、産卵数から親魚量を推定する方法など多くの方法があり、また、複数の方法を組み合わせる場合も多い。実際には調査場所の環境や生息魚類の生物特性および漁業実態等を考慮して調査方法を検討する必要がある。

## 河口・汽水域生態系における底生微細藻の果たす役割\*

伊藤 絹子\*\*\*・佐々木浩一・南 卓志

The Ecological Role of Microphytobenthos in the Estuarine Ecosystems

Kinuko Ito, Koichi Sasaki and Takashi Minami

宮城県名取川で行われた研究事例をもとに、河口・汽水域生態系における底生微細藻類の果たす役割について考察した。本水域は二枚貝のヤマトシジミやアサリの漁場として、また稚魚の成育場としても重要な水域である。生息している生物群集の胃内容物検索と安定同位体比の解析により、この水域の食物連鎖は、大まかに二つの経路に分けられた。浮遊類に繋がる浮遊系（植物プランクトンを起点）と底生魚類に繋がる底生系（底生微細藻を起点とする）である。採集された魚類の多くが底生魚であることから考えると、河口・汽水域生態系における基礎生産者としての役割は、底生微細藻のほうが植物プランクトンよりやや大きいと推測された。底生微細藻には多様な種類があり、様々な生活様式をもつ種類が同時に成育できる機構があると思われる。そのためサイズや増殖形態における多様性が高くなると考えられる。生産力との関係について考察するため行った現場実験によると、名取川河口域における鑑種のひとつである二枚貝イソシジミの成長速度は夏季から秋季にかけて著しく高いことが分かった。同じ場所で微細藻類の現場培養実験を行った結果では、イソシジミの主要食物生物である底生珪藻の生産速度は夏季から秋季にかけて最大値を示した。これらの事実は、底生微細藻が夏季のイソシジミの高い生産力を支える中核的食資源としての役割を担っていることを示唆している。

We discussed the role of microphytobenthos in estuarine ecosystems based on a case study at the Natori River estuary, where is an important fishery ground of the bivalves such as *Corbicula japonica* and *Ruditapes philippinarum*, and are nursery grounds for juveniles of fishes. Our studies based on the analysis of stable isotopes and stomach content analysis of organisms in the estuary suggested that the trophic structure is consisted of two major pathways. One is the pelagic food chain derived from phytoplankton, and the other is the benthic food chain derived from microphytobenthos. Many fishes collected in the estuary were demersal fishes. Therefore, we assumed that the ecological role of microphytobenthos may be more important than that of phytoplankton as primary producer in estuarine systems. There were many kinds of species and the variety in the life style of microphytobenthos even in the same habitat. They had higher diversity in size and growth form. Field studies on biological production process of bivalve showed the highest growth of *Nuttallia olivacea*, a key species in the Natori River, in summer and autumn. At the same site, the results of culturing experiments indicated the highest growth of benthic diatoms, a major food for *N. olivacea*, in summer and autumn. These results suggest high contribution of microphytobenthos for high production of *N. olivacea* in summer and autumn.

キーワード：底生微細藻、食物連鎖、生物生産力、汽水域、多様性

## 1. はじめに

私たちヒトを含め多くの生物は、太陽の光エネルギー、水と物質の循環に依存して生命を維持している。海洋や河川は水循環の要としての役割を担うと同時に食料資源の生産の場でもある。この生産を支えるのが光合成を行う微細藻類である。最近の研究では浅海域における二枚貝類の食物として、植物プランクトン（浮遊微細

藻）のほかに底生微細藻もまた大切な機能を果たしていることが広く認識されるようになってきた（Pellizzari et al., 2005<sup>1)</sup>; Sasaki et al., 2004<sup>2)</sup>; 伊藤・大方, 1998<sup>3)</sup>）。また干潟に飛来するシギなど鳥類の食物源としての役割も注目されている（桑江, 2008<sup>4)</sup>）。

さて河口・汽水域は河川と海洋を繋ぎ、魚類や底生生物など多種多様な生物が共存し、生産力も高い水域であるといわれている（菊地, 1993<sup>5)</sup>）。また、環境保全に果たす役割が大きい水域である（青山・鈴木, 1997<sup>6)</sup>）。

今回モデル水域として紹介する宮城県名取川河口汽水域（Fig. 1）は、二枚貝のヤマトシジミ、アサリ漁業が盛んであり、サケや天然アユの遡上がみられる水産業上重要な水域である。

\* 2009年1月13日受領、2009年2月24日受理

\*\* 東北大学 大学院農学研究科 水圈資源生態学分野  
連絡先：伊藤絹子〒981-8555 仙台市青葉区堤通雨宮町1-1  
Tel. 022-717-8729 Fax. 022-717-8731  
E-mail : itokn@bios.tohoku.ac.jp

伊藤 紗子・佐々木浩一・南 卓志

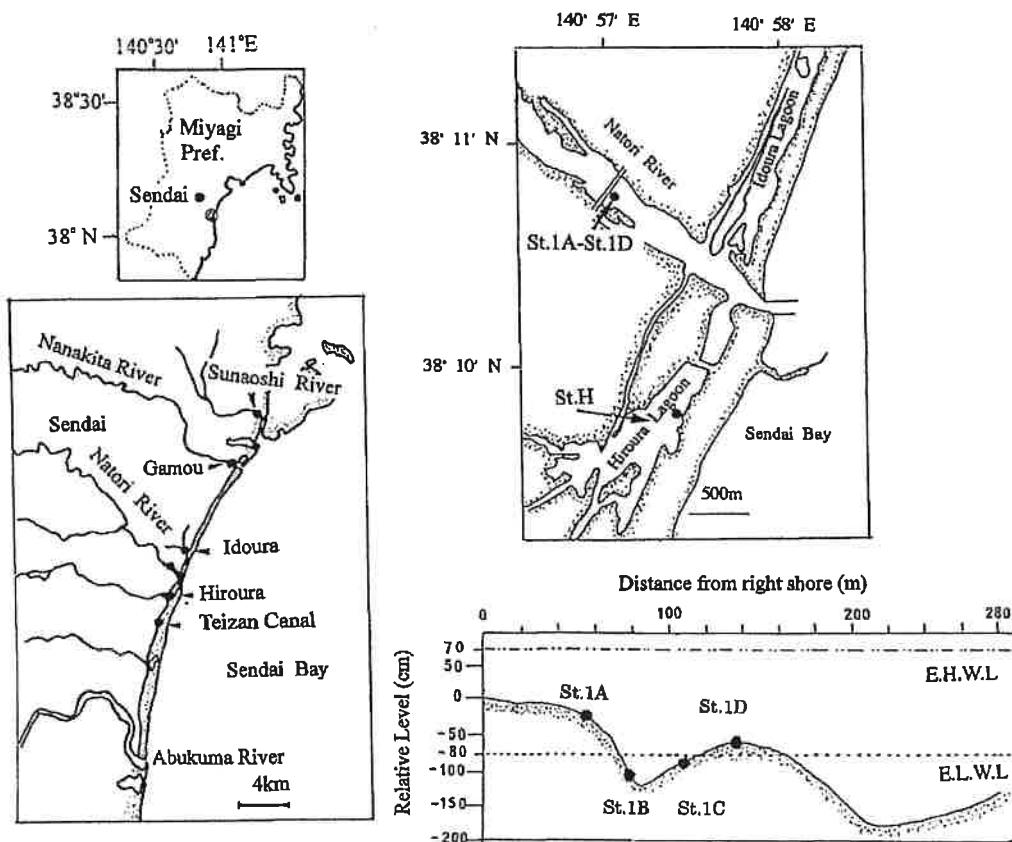


Fig. 1 Map showing the location of the sampling station and the relative level of the experimental site<sup>7)</sup>. E. H. W. S.: Extreme high water of spring tide. E. L. W. S.: Extreme low water of spring tide.

ここで繰り広げられている生物の生産構造を明らかにするために、魚類・貝類・甲殻類など様々な生物群集の生活のしかたや環境との関係について研究を進めてきた。この水域の生態系の全体的な特徴を提示するとともに、食物連鎖の二大起点である植物プランクトンと底生微細藻の生態的特性の違いに注目することにより、底生微細藻類が果たしている役割について論議する。

## 2. 食物連鎖の起点として

### 2.1 基礎生産における二重構造

水域の生産構造は食物連鎖によりその骨格を理解することが出来る。食物連鎖の起点はおもに藻類など基礎生産者であり、最初にこの基礎生産構造の特性について考察する。河口汽水域は浅い水域であるので、水深数メートルの範囲内に水柱環境と底生環境とが存在する。底生環境は海底付近の空間に限られるが、ここに生育している微細藻の二枚貝に対する栄養源としての有効性を示した事例を紹介する。伊藤ほか(2005)<sup>7)</sup>は、培養した珪藻 (*Skeletonema costatum*) と幾つかの海底の堆積物を食物として与えた二枚貝の飼育実験を行った結果、培養

珪藻には及ばないものの、蒲生干潟のように多種多様な底生珪藻が多量に含まれている底土の場合には、高い成長速度がえられた(Fig. 2)。このことは、植物プランクトンだけではなく、底生微細藻も食物源としての役割の一端を担っていることを示唆している。これら底生微細藻は海底面で増殖し、おもに海底付近に分布し、その移動性は小さいと考えられる。

一方、植物プランクトンは水柱に広く分布し、水の流動とともに移動している。伊藤・大方(1998)<sup>3)</sup>は名取川河口域と隣接する海岸域底層水中の植物プランクトン組成の連続調査を行い、植物プランクトンの方は、潮汐による水の流動とともにその種類組成、分布量が大きく変動していることを報告している。このようにみてくると、水の流動とともに変化している植物プランクトンと、海底付近の底生微細藻とは、鉛直方向に分かれて生活していると考えられる。すなわち生態が異なる基礎生産者(ここでは浮遊微細藻と底生微細藻)の分布中心域の分化(二重構造)が認められる。このような二重構造的特性が、生態系全体の構造の特性へと結びついていると考えられる。

## 河口・汽水域生態系における底生微細藻の果たす役割

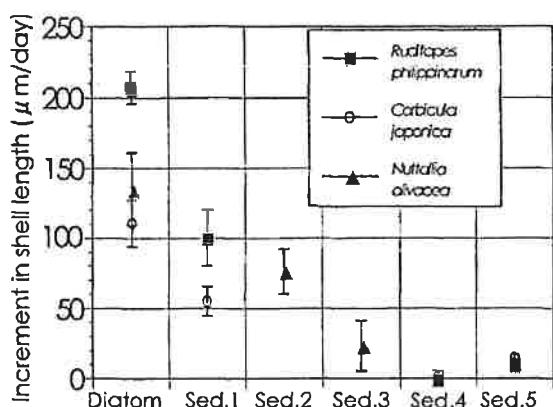


Fig. 2 Average daily increments in shell length of *Ruditapes philippinarum*, *Corbicula japonica* and *Nuttallia olivacea* in the laboratory when fed on various food items at 20°C<sup>1</sup>). Diatom: *Skeletonema costatum*, Sed.: Suspension of natural sediment, Sed. 1: Gamou tidal flat, Sed 2: Natori River flat, Sed 3: Hiroura lagoon, Sed. 4: Teizan canal, Sed. 5: Sunaoshi River.

そこで微細藻類の生態的な違い、とくに生活様式について詳しくみてみよう。

## 2.2 微細藻類の生活様式

底生微細藻のうち主な出現種は底生珪藻である。底生珪藻は付着性珪藻とほぼ同義に使われることが多く、この両者を厳密に区別してはいない。付着性珪藻の生活様式は大きく3つのタイプに分けられる。*Navicula* 属に多くみられる滑走運動を有する滑走型、*Cocconeis* 属によくみられる密着型、*Cymbella* 属に多くみられる直立型である。成育する基質の違いにより、着砂性、着泥性、着岩性、着藻性のように区分されることもある。底生珪藻は多様な種が混在した密集状態で生育している場合や、立体的な構造が構築されていることもある。すなわち、種類やサイズのバリエーションが大きいことや、生活様式・増殖形態(空間の利用のしかた)のバリエーションが大きいことが、底生微細藻の生態的特性として挙げられる。河村(1995)<sup>8</sup>は付着珪藻群落の遷移のメカニズムについて、ある共通的な機構が存在すると考察している。最初に出現するのは、水平方向に付着する運動性のある単体珪藻であり、その後、群体を形成する種類が出現してくるという傾向がある。これは場所や季節などの環境の違いより、付着珪藻の生態的特性に因るところが大きいと推察している。

一方の浮遊性微細藻の場合には立体的に複雑な構造が形成されることは少なく、海水の流動に伴う移動性が大きいのである。このような生態の違いは水中での両者の分布比率の時間的变化をもたらし、一次消費者への食物供給の変化へと結びついている。つまり底生と浮遊性と

の分布比率や種類組成は、水の流動による植物プランクトンの変動の影響を受けて常に変化しているものであり、それぞれの役割も固定的なものではなく、流動的であると推測される。そこで、それぞれの役割をもう少し明確にするためには、別のアプローチが必要であると考えた。

最近、生態学分野で広く利用されている安定同位体比解析は、一つの有効手段として期待できる(南川, 1997<sup>9</sup>; 和田, 1986<sup>10</sup>; France, 1995<sup>11,12</sup>; Deniro and Epstein, 1978<sup>13</sup>; 1981<sup>14</sup>; Michener and Shell, 1994<sup>15</sup>)。生態系のフレームワークを描き、食資源寄与率の試算も可能である。食性の研究において、胃内容物が瞬間の食物を表すのに対して、安定同位体比はある程度の時間の積算値として表現されるメリットがある。また、陸上植物、底生微細藻、浮遊性微細藻それぞれの炭素安定同位体比における差異が大きいことは食物連鎖の起点を判別するのに好都合である。

## 2.3 食物連鎖における二大経路

名取川河口域には様々な魚類や貝類、甲殻類など多様な生物群集の生息がみられる(伊藤・掛川, 1978<sup>16</sup>)。まず、これらの炭素・窒素安定同位体比を分析して、それらの平均値をプロットした(Fig. 3)。横軸(炭素安定同位体比;  $\delta^{13}\text{C}$ )は食物源を、縦軸には栄養段階(窒素安定同位体比;  $\delta^{15}\text{N}$ )を表現している。なお、図中には栄養段階1の候補として、水中の粒状有機物(POM)と堆積有機物(SOM)の  $\delta^{13}\text{C}$  のほかに、現場培養実験で得られた浮遊珪藻と底生珪藻の値(伊藤, 2002<sup>17</sup>)を基に、浮遊珪藻の  $\delta^{13}\text{C}$  をおよそ-20‰、底生珪藻はおよそ-16‰として示した。

魚類の安定同位体比に食性解析に用いられる一般則を適用すると、大まかに二つの経路にわけることができた。シラウオ(*Salangichthys microdon*)やウグイ(*Trichodon hakonensis*)、サケ(*Oncorhynchus keta*)稚魚などの  $\delta^{13}\text{C}$  は-19‰程度で動物プランクトンが主な食物源、食物連鎖の起点は浮遊微細藻であると考えられた。

一方、イシガレイ(*Kareius bicoloratus*)稚魚、ヌマガレイ(*Platichthys stellatus*)稚魚の  $\delta^{13}\text{C}$  は-15‰程度で、ペントス(二枚貝や多毛類などの底棲動物)食であり、起点は底生微細藻であると推察された。本水域において個体数としての分布量が最大であるアシシロハゼ(*Achanthogobius lactipes*)は底生性の経路に属していた。このように浮魚類と底生魚類では食物源が異なり、食物連鎖の起点として、浮遊微細藻と底生微細藻とに大別された。ただし、完全に二極に分離した構造ではなく、浮遊系あるいは底生系経路への偏りの大きさを表しているとみたほうが妥当であり、それは後述する一次消

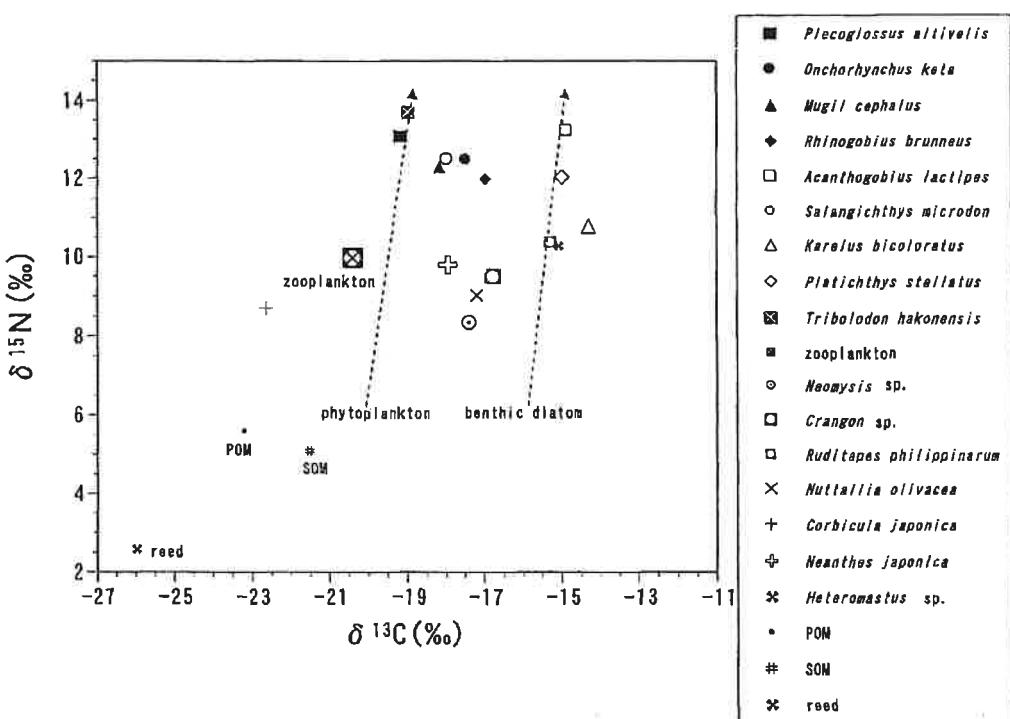


Fig. 3 Plots of average  $\delta^{13}\text{C}$  vs.  $\delta^{15}\text{N}$  for organisms collected from the Natori River estuary during April to May, 2006<sup>16)</sup>.

費者との関係があると考えられる。

さて、魚類の胃内容物の観察結果と照らし合わせてみると、シラウオではニホンイサザアミやカイアシ類、ウグイはニホンイサザアミ、アユ (*Plecoglossus altivelis*) 稚魚ではカイアシ類とアミ類が、シロサケ稚魚ではミジンコ類やカイアシ類が多くみられた。アシシロハゼの場合にはゴカイ、二枚貝のソトオリガイが出現した。イシガレイ稚魚はイソシジミの入水管やゴカイを摂食していた。これらの情報は安定同位体比から推定された食物連鎖系列とほぼ一致していた。本多ほか (1997)<sup>18)</sup>は名取川に隣接するラグーン広浦における魚類生産構造の特色として、周年出現種の魚類の多くはハゼ類などの底生であること、豊富に存在する底生動物がそれら魚類の生産を支えていると考察しており、本研究と同様の傾向が示されている。

以上のこととは、河口汽水域での優占種が底生魚であり、その食物源は底生性への依存率が高いことを示唆している。したがって、底生微細藻が果たす基礎生産者としての役割は、浮遊微細藻と同じかそれ以上であると推測されるが、一次消費者へのつながりをもう少し詳細に検討しておく必要がある。

名取川河口域には二枚貝類、多毛類、甲殻類など様々な種類の生物群が生息しており、これらの多くは河口域

生態系における一次消費者である。安定同位体比ではそれぞれの特徴がみられた。エビジャコの  $\delta^{13}\text{C}$  は高く、多毛類でもヘテロマスタスとゴカイとではヘテロマスタスのほうが高く、底生系にシフトしていた。一方、二枚貝類ではヤマトシジミ (*Corbicula japonica*) は著しく低く、陸上有機物の寄与の高さを示唆している。アサリ (*Ruditapes philippinarum*) やイソシジミ (*Nuttallia olivacea*) は、やや底生系に偏っているが浮遊系と底生系の間に分布していた。イサザアミは中間的な値を示した。つまり、一次消費者の安定同位体比は浮遊系と底生系の間に位置するものが多かった。これは一次消費者の多くは食物源として両者を利用できる生活様式があることを示唆している。そこで、底生微細藻の役割について、一次消費者、中でも二枚貝の生活様式や生産過程との関係に注目して考察する。

### 3. 二枚貝漁場の中核食資源として

#### 3.1 二枚貝（イソシジミ）の生活様式

名取川河口において高密度に分布が認められること、また、その水管（ほとんどが出水管ではなく入水管）がイシガレイ稚魚に高い摂食率で利用されているイソシジミは、本水域における鍵種のひとつとして位置づけられる (Tomiyama et al., 2008<sup>19)</sup>; Tomiyama and Ito,

## 河口・汽水域生態系における底生微細藻の果たす役割

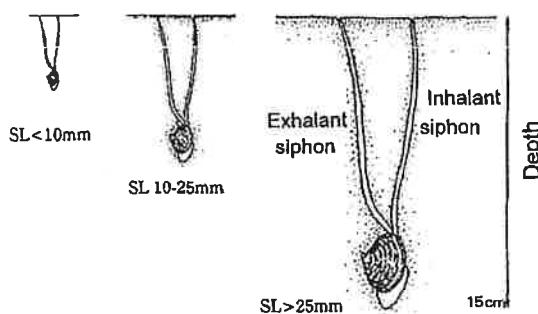


Fig. 4 A schematic illustration of *Nuttallia olivacea*, a key species, in the Natori River estuary. SL; Shell Length, SL<10 mm, SL10-20mm, SL>25mm.

2006<sup>20)</sup>; Sasaki et al., 2002<sup>21)</sup>). このイソシジミの生態から微細藻類との関係について考察してみた。

Fig. 4 に図示したように、イソシジミは長い水管を伸ばして、底土表面数 mm の範囲から懸濁物を取り入れていることが、フィールドの観察と飼育観察により明らかになってきた。すなわち、底土付近の水の流れと自身の水管の先端を旋回させることで水流をつくり、食物を取り込んでいる。

イソシジミの胃内容物の検索結果によれば、*Navicula* spp., *Melosira* spp., *Diploneis* spp. など底生珪藻を多く摂食しており、海水中に多く分布する *Skeletonema*

*costatum*などの植物プランクトン組成よりも底土の組成と似ていた (Fig. 5, 伊藤ほか, 2005<sup>7)</sup>)。また、水柱の微細藻の組成は比較的単純であるのに対し、底土の組成は多様であった。

Pellizzari et al. (2005)<sup>11</sup>は、ホタテガイの食物について調べ、胃内容物が堆積物中の微細藻類の組成を反映しており、海水中的植物プランクトン組成とは異なると記述している。また、海水中的植物プランクトンの組成は季節変化が非常に大きいのに対し、堆積物中の微細藻類の季節変化は小さく、多様で量的にも安定（コンスタント）であることを特性として強調している。多様な種類がコンスタントに存在すれば、量的に安定した食物供給源があり、かつ、食物としての機能の多様性も高くなる。これらのことは、微細藻の増殖機構と二枚貝の生産過程との関係、さらにそれらと物理環境との関係が互いに密接に連関していることを示唆している。そこで、イソシジミの生産過程に注目して、物理環境と成長の関係、食物である微細藻類の増殖特性との関係について検討を進めた。

### 3.2 イソシジミの生産過程と微細環境との関係

河口汽水域では、微細環境レベル（数 m スケール）での環境が著しく異なる場合があり、底生生物の種類組成、分布密度が異なっていた (Tomiyama et al.,

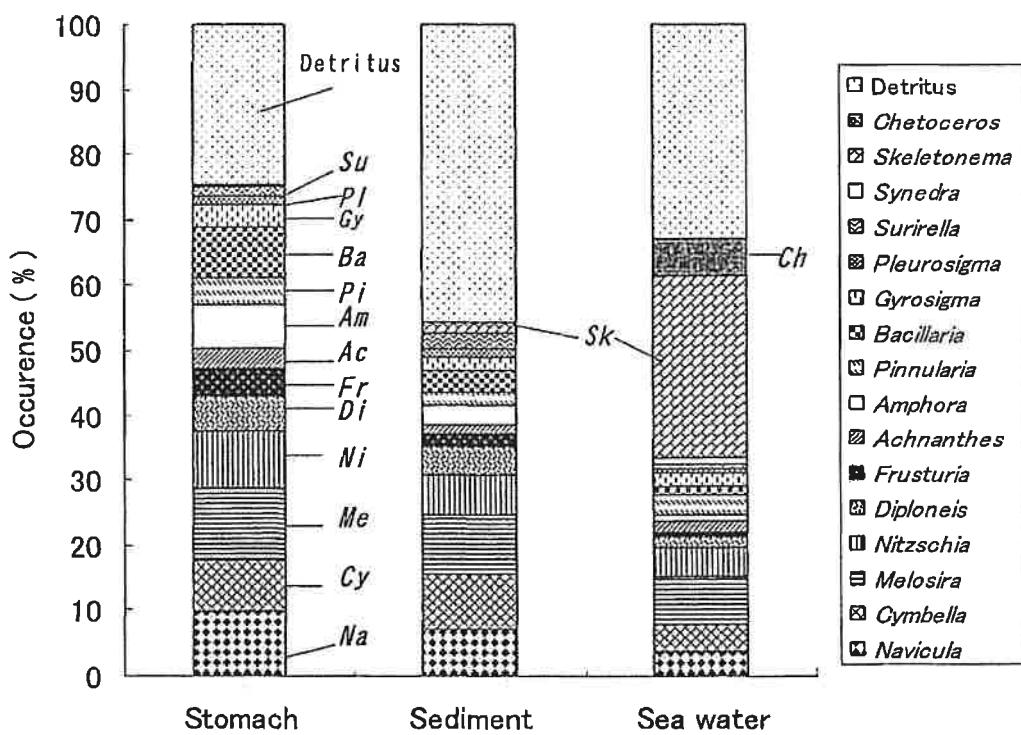


Fig. 5 Percentage occurrence on distribution of the stomach contents of *Nuttallia olivacea*, the particles in the sediment and seawater collected from the Natori River estuary in March 1996<sup>7)</sup>.

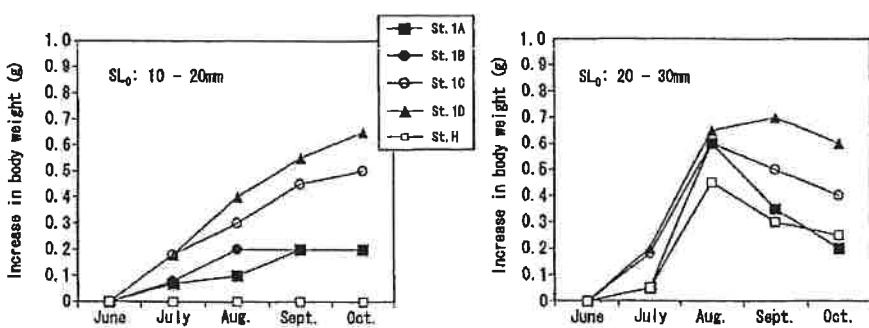


Fig. 6 Increase in body weight of *Nuttallia olivacea* observed by marking-recapture and caging at each location in the Natori River from June to October 1996<sup>17</sup>. Initial shell length (SL<sub>0</sub>) : 10–20 mm (left), 20–30 mm (right).

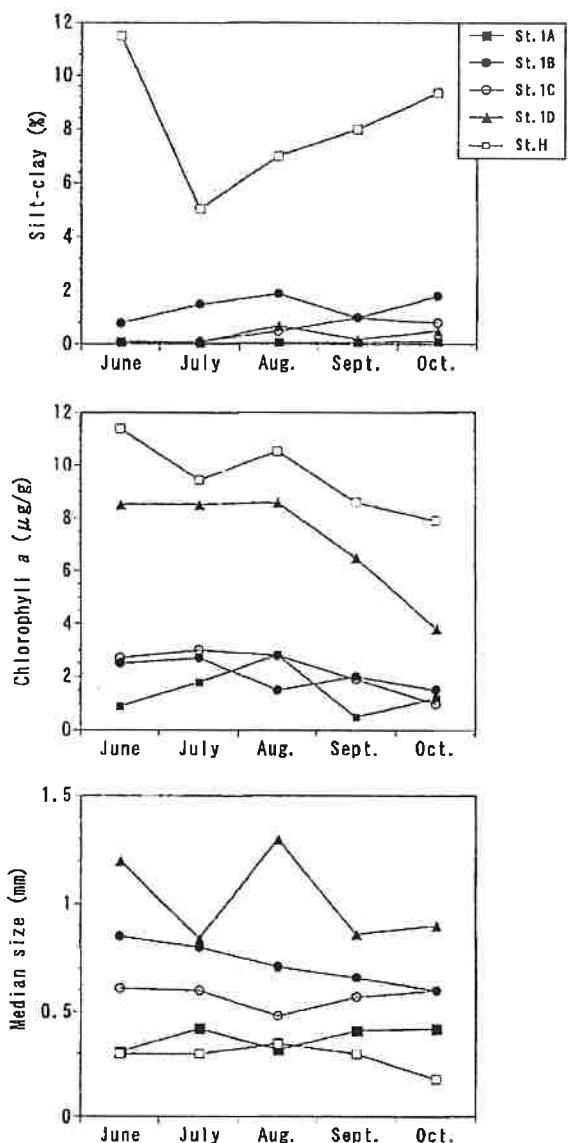


Fig. 7 Sediment characteristics at each location in the Natori River estuary during June to October 1996<sup>17</sup>.

2008<sup>19</sup>）。また、同種であっても環境により成長速度が異なることが予測される。そこで、名取川河口域の定点（Fig. 1）において、イソシジミの成長と環境との関係を調べるために実施された現場実験の結果を紹介する（伊藤ほか, 2005<sup>17</sup>）。

個体識別をしたイソシジミをケージに入れて、ケージ上面が海底面と一致するように埋めた。毎月回収して体重と殻長を測定して、再びフィールドに戻す、という作業を繰りかえした。その結果を Fig. 6 に示す。稚貝の場合には場所による成長の差異がとくに大きい。底質の環境と照らし合わせてみると、シルトの含有率が高い場所（St. H）においては成長速度が著しく低い。これに対して、川の中心に近い St. 1D においてもっとも成長がよい。ここは水深が浅く（満潮時で 2 m 程度）、クロロフィル濃度が高く、シルトクレイは低い場所である（Fig. 7）。

このような環境が形成されるメカニズムについて水の流動状況から考察する。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、時間的変化を場所別に示したのが Fig. 8 である。St. 1D では底土直上水の硝酸塩濃度は干潮時に高く（0.25 mg N/l），満潮時に低くなり（0.03 mg N/l），間隙水もほぼ同調していることがわかる。これは河川水の流入量の変化が直ちに現れていることを示し、直上水と底質水ともに交換速度が速いことを意味している。すなわちそれだけ栄養塩の供給が速やかに行われることを示唆する。

以上のことから、イソシジミの成長との関係を整理すると、シルトが多い場所では、食物と一緒に取り込まれた場合、摂糞として排出されてしまうので、摂食効率は低下してしまう。また、シルトが沈積しやすい場所は流れが緩やかであると推測される。流れが緩やかなところでは、単位時間あたりの食物供給量は低いと推測される。さらには、食物である微細藻類の生産速度を左右する栄養塩供給量にも影響していると考えられる。

## 河口・汽水域生態系における底生微細藻の果たす役割

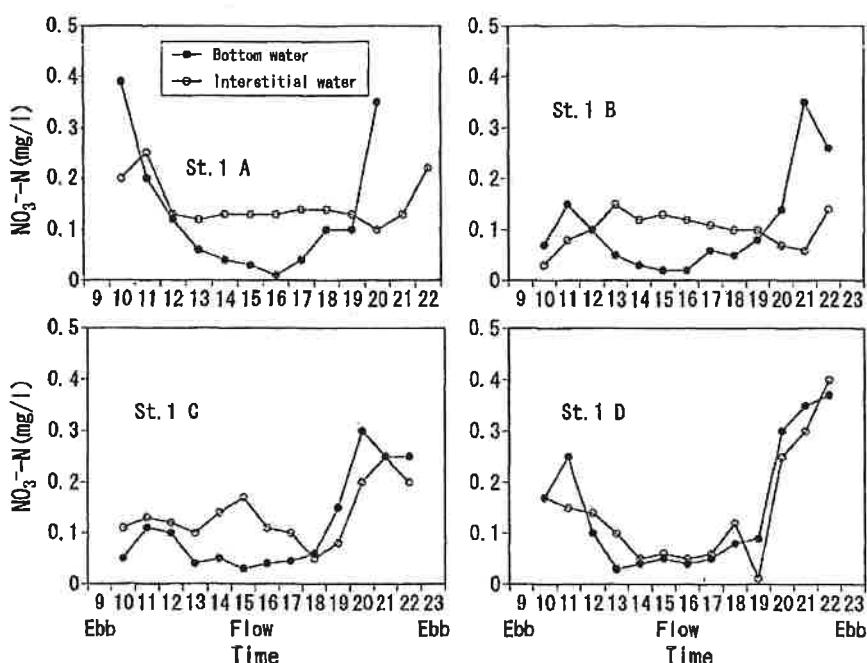


Fig. 8 Changes in nitrate concentration of bottom water and interstitial water collected from the Natori River estuary during a 16-h period from 16 to 17, October 1996<sup>7</sup>.

Grant (1990)<sup>22</sup>は、ヨーロッパガキについて現場実験を行い、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。Grizzle *et al.* (1989)<sup>23</sup>はイガイについて成長実験を行い、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。これらいずれの事象も二枚貝への食物供給と物理的な環境条件との結びつきが深いことを示唆している。

### 3.3 イソシジミの成長速度の季節変化と微細藻の増殖特性

次にイソシジミの生産力の季節的な変化との関係について考察するために、成長が最も良かった場所において、1年にわたり、イソシジミの成長過程を追跡した結果を示す。ケージIは6月に実験を開始、ケージIIは10月に実験を開始した。どちらの場合もイソシジミは冬季間ほとんど成長せず、水温15–25°Cの夏季に大きな成長を遂げた (Fig. 9)。

次にイソシジミの生産を支えるために必要な食物量の試算を行った。1日あたりの摂食量を求めて水温別、ササイズ別にまとめたのがTable 1である。殻長10–20 mmのイソシジミ（体重約1 g）に注目して、水温20°Cの場合についてみると、1日28 μg Chl. a の摂取量であった (Table 1)。大まかな計算をするために、体重1 gの個体は1日に約30 μg Chl. a を摂取しているとして、St. 1 Dのイソシジミの分布量 (1500 g m<sup>-2</sup>) に乘じると、30

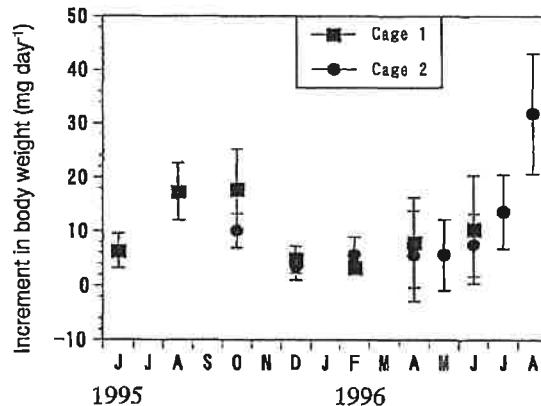


Fig. 9 Seasonal variation of average daily increments in body weight of *Nuttallia olivacea* observed by marking-recapture and caging in the Natori River estuary from June 1995 to August 1996<sup>24</sup>.

mg Chl. a m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>であった（伊藤ほか, 2005<sup>7</sup>）。ここで珪藻の現場培養実験（伊藤, 2002<sup>17</sup>）により得られた結果の C/Chl. a=50, C/N=8 を用いると、有機炭素量では1,500 mg C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 有機窒素量では180 mg N m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>が摂食されていると推定された（伊藤ほか 2005<sup>7</sup>）。これは、青山・鈴木（1997）<sup>6</sup>が一色干潟における現場実験により計算した140 mg N m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>と近い値であった。

食物である微細藻の増殖の季節変化についてしらべる

Table 1 The list of food consumption by *Ruditapes philippinum* and *Nuttallia olivacea* in the laboratory on a pure abal diet; *Skeletonema costatum*. ±: standard deviation, Unit: Chi. a  $\mu\text{g}/\text{day}$ .

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

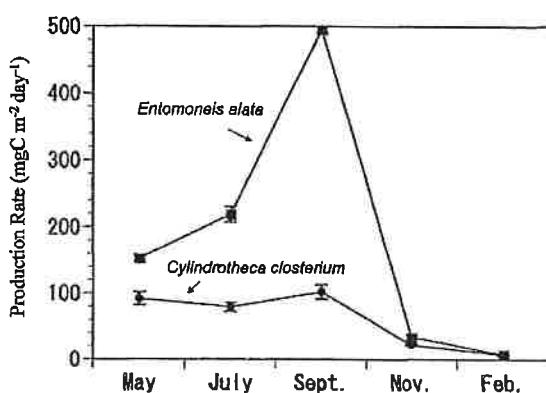


Fig.10 Seasonal changes of production rate of benthic diatoms observed by the field incubation using dialysis membranes in the Natori River estuary in 1999.

ために、同じ場所において、この水域から単離した底生珪藻2種類を用いて、透析膜チューブに入れて培養実験が行われた。その結果、夏季の高い生産力が示された(Fig. 10)。特に*Entomoneis alata*の場合が最大を示した。生産力として $500 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ が最大であった。この値は潜在的な増殖能力を示していると考えられるが、先のイソシジミの生産を賄うにはこの3倍の生産力が必要である。すなわち、同じような増殖能力をもつ微細藻が3種類以上同じ空間に成育するか、水柱の植物プランクトンの供給が必要であることを意味する。

#### 4. 溶存態物質の消費者・供給者として

つぎに、海水中の溶存態物質との関係に注目して、これらの消費・供給者としての役割について記述しておく。

##### 4.1 無機態栄養塩の吸収

河口域には河川上流域からの栄養塩類の流入、堆積物中の有機物の分解により無機化された栄養塩類が存在する。Agatz *et al.* (1999)<sup>25)</sup>は、干潟の底生微細藻の増殖

がN, Pの濃度と関連があり、増殖量は濃度に比例するが、種類の多様性は中間的な濃度の時に最大であると報告している。多様性が維持されるためには、栄養塩濃度とのバランスが重要であることを示唆している。

##### 4.2 有機態溶存物質の排出

微細藻類が合成した有機物の一部は溶存態有機物として、細胞外に排出され、底生珪藻類の場合にはとくに排出量が多いことが明らかにされている。それらは、分解者であるバクテリアの栄養源として利用されていると考えられている(Goto *et al.*, 2001<sup>26)</sup>)。このように底生微細藻は溶存態物質の循環を円滑に進める役割を担っているといえる。

#### 5. おわりに

本テーマの主題である微細藻類は肉眼での観察が困難であり、その生態について広く理解されているとはいえない。なかでも珪藻は種数が非常に多く、世界で2万種以上あるといわれている。ここで注目してきた底生珪藻の場合にも、形態、大きさ、生活様式などのバリエーションがあり、様々な種類が共存し成育している。この微小な生物群が河口域生態系の中で果たしている役割の大きさ、機能の多様性へと結びついているしくみが、少し理解できたようだ。

一方で底生微細藻のうち付着珪藻の中には害藻とよばれる種類もあり(小林・田中, 2006<sup>27)</sup>)、ノリやテンゲサなど水産物に被害をもたらす種類もあることを忘れてはならない。生物にはそれぞれの多様な生活のしかたがあること、密接に環境と関わり合い、絶えず変化している。したがって生態系におけるそれぞれの生物の果たす役割を理解するためには、種ごとの生態的特性に関する理解を深めてゆくことと同時に、他の生物との相互関係における変化のしかた、生産構造全体の結びつき方の変化のしかたを捉えることができるようなアプローチが今

## 河口・汽水域生態系における底生微細藻の果たす役割

後さらに必要であると考えている。

## 謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（平成5年度～7年度、平成8年度～10年度）と河川環境財団の研究助成金（平成11年度～12年度）の交付を受けて行われました。

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閑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、研究を遂行するにあたり、東北大学名誉教授の川崎健博士、大方昭弘博士、大森迪夫博士のご助言を賜りました、ここに深く感謝申し上げます。また、水産総合研究センターの片山知史博士、農学研究科水圈資源生態学研究室の故千田良雄技官、学生諸氏の多大なご協力に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Pellizzari, F. C., A. Borzone, P. R. Pezzuto and L. Z. Alvez (2005) : The contribution of microphytobenthos for scallop *Euvola ziczac* (Bivalvia: Pectinidae) feeding in shallow area of the south-eastern Brazilian continental shelf. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, **85**, 961-967.
- 2) Sasaki, K., A. Sanematsu, Y. Kato and K. Ito (2004) : Dependence of the surf clam *Pseudocardium sachalinense* (Bivalve: Mactridae) on the near bottom layer for food supply. *Journal of Mollusk Study* **70**, 207-212.
- 3) 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、千田哲資・木下泉(編)、水産学シリーズ116、砂浜海岸における仔稚魚の生物学、恒星社厚生閣、東京、pp. 52-64.
- 4) 桑江朝比呂 (2008) : 干潟におけるシギ類の食物源としての底生微生物皮膜、pp. 85-96、安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態、富永修・高井則之編、恒星社厚生閣、東京。
- 5) 菊地泰二 (1993) : 干潟生態系の特性とその環境保全の意義、日生態会誌、**43**, 223-235.
- 6) 青山裕見・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.
- 7) 伊藤絹子・加賀敏樹・佐々木浩一・大森迪夫 (2005) : 干潟二枚貝の生産過程と餌料環境。水研センター研報、別冊3, 1-15.
- 8) 河村知彦 (1995) : 付着珪藻群落の変動機構。月刊海洋、**27**, 591-596.
- 9) 南川雅男 (1997) : 安定同位体による海洋食物網研究。月刊海洋、**29**, 391-398.
- 10) 和田英太郎 (1986) : 生物間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-。 *Radioisotopes*, **35**, 136-146.
- 11) France R. L. (1995) : Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications. *Marine Ecology progress series*, **124**: 307-312.
- 12) France, R. L. (1995) : Differentiation between littoral and pelagic food web in lakes using stable carbon isotopes. *Limnol.*
- Oceanogr., **40**, 1310-1313.
- 13) Deniro, M. J. and S. Epstein (1978) : Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 495-506.
- 14) Deniro, M. J. and S. Epstein (1981) : Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *ibid.*, **45**, 341-351.
- 15) Michener, R. M. and D. M. Shell (1994) : Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs. *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* (ed. By K. Lajtha and R. L. Michener), Blackwell Scientific publications. pp. 138-186.
- 16) 伊藤絹子・掛川武 (2008) : 河口汽水域を利用する魚類の食物源、pp. 70-84、安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態、富永修・高井則之編、恒星社厚生閣、東京。
- 17) 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.
- 18) 本多仁・片山知史・伊藤絹子・千田良雄・大森迪夫・大方昭弘 (1997) : 河口汽水域における魚類集団の構造と機能。沿岸海洋研究、**35**, 57-67.
- 19) Tomiyama T., N. Komizunai, T. Shirase, K. Ito and M. Omori (2008) : Spatial intertidal distribution of bivalves and polychaetes in relation to environmental conditions in the Natori River estuary. *Japan. Estuarine, coastal and shelf science*, **80**, 243-250.
- 20) Tomiyama, T., K. Ito (2006) : Regeneration of lost siphon tissues in the tellinacean bivalve *Nuttallia olivacea*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **335**, 104-113.
- 21) Sasaki, K., M. Kudo, T. Tomiyama, K. Ito and M. Omori (2002) : Predation pressure on the siphons of the bivalve *Nuttallia olivacea* by the juvenile stone flounder *Platichthys bicoloratus* in the Natori River estuary, northeastern Japan. *Fisheries Science*, **68**, 104-118.
- 22) Grant, J., C. T. Enright and A. Griswold (1990) : Resuspension and growth of *Ostrea edulis*: a field experiment. *Marine Biology*, **104**: 51-59.
- 23) Grizzle, R. E. and P. J. Morin (1989) : Effect of tidal current, seston, and bottom sediments on growth of *Mercenaria mercenaria*: Results of a field experiment. *Marine Biology*, **102**: 85-93.
- 24) 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.
- 25) Agatz, M., R. M. Asmus and B. Deventer (1999) : Structural changes in the benthic diatom community along a eutrophication gradient on the tidal flat. *Helgoland Marine research* **53**, 92-101.
- 26) Goto, N., O. Mitamura, and H. Terai (2001) : Biodegradation of photosynthetically produced extracellular organic carbon from intertidal benthic algae. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **257**, 73-86.
- 27) 小林敦・田中次郎 (2006) : 日本産付着珪藻クモノスケイソウの形態と生態。海洋と生物、**166**, vol. 28, 484-488.

## 質疑応答

問：小川原湖ではクロロフィルa濃度が低いのに、漁獲量が多いということであるが、横軸を浮遊プランクトンだけでなく、底生も加えることにより、一次生産量とすべきではないのか？

伊藤 純子・佐々木浩一・南 卓志

(九州大学, 柳 哲雄)

答: 一次生産量については、浮遊性と底生性あわせた両者の考慮が必要であることは確かである。この図で示した漁獲量は魚類だけの合計でワカサギとシラウオがほとんどで浮魚類であり、食物連鎖としては浮遊系の経路に属すると思われる。したがって、水柱植物プランクトン量の指標であるクロロフィルaを指標にしてもよいと思われる。問題はむしろ現存量だけの検討では不十分であることを示唆していると考えられ、生産速度、転換率を考慮してゆくことが重要である。

ただし、底生珪藻の役割は大きいと思われ、動物プランクトンが両者を利用している可能性が高い。たとえば、底生珪藻が剥離して流下したものが摂食されている場合もあるようなので、一次生産量としては、両者をあわせて検討する必要があると思う。

問: 底生珪藻の生産が、他の演者と違って冬に低く、夏に高いのは、調査水域が河川の河口域であり、夏の河川流量が増えて、低塩分になり、冬は逆に高塩分になり泥っぽくなりやすいためと推測するが、ためしてほしい。

(東海大学, 杉本 隆成)

答: 河口域では潮汐の影響が大きく、塩分の流入状況で渦りの状態も変わっていると考えられる。この影響により、藻類の生産力が冬に低下している可能性がある

ので、今後検討したい。

可能性があることとして考えているのは、春~夏は日中に干潮の時間帯が長いことが多い、水深が浅いので光量が多くなり、生産速度が高くなるのではないかということ。また、種類による生産速度の違いも考えられる。今回培養に用いた珪藻が冬季にはあまり増殖しない種類の可能性がある。この点についてもさらに検討したい。

問: イソシジミの生産量を規定する底生微細藻現存量の違いを決定している要因はなにか?

(北海道大学, 門谷 茂)

答: 主に光条件と栄養塩の供給状況であると考えている。これと密接に関係しているのは、水深と水の流動条件と考えている。水深は光の条件を規定していると思われ、また、水の流動条件は底質の条件を規定し、さらには栄養塩の供給量も規定していると考えられる。特に河口域では、陸水からの栄養塩の供給量と、海底面に蓄積していると思われる栄養塩の溶出機構との関係を解析してゆく必要があると考えている。

底生微細藻の場合には、特に海底面における栄養塩の挙動、たとえば、アンモニア態窒素の溶出量は潮汐による水の流動条件との関係が深いと考えられ、これらの点についても検討してゆきたいと考えている。

## 参考論文（抜粋）

## カレイ類稚魚成育場としての河口域の役割

山下 洋

わが国には 30 種を超えるカレイ科魚類（以下カレイ類）が分布しており、魚屋の店頭でよく見かけるマガレイ、マコガレイなど水産的に重要な種類も多い。

## 1. 河口域に出現するカレイ類稚魚

浅海域を稚魚の成育場とするカレイ類には、ヌマガレイ、イシガレイ、ホシガレイ、クロガシラガレイ、マコガレイ、スナガレイなどがあり、前 4 種の稚魚は河口域周辺でもよく見られる。中でもヌマガレイは特異的で、稚魚期から幼魚期まで河川の淡水域にも生息し渓流でヤマメと一緒に観察された例もある。ヌマガレイとイシガレイの稚魚は河口から河川内に進入するが、ホシガレイとクロガシラガレイが河川内に入ることはあまりない。ヌマガレイとイシガレイでは、ヌマガレイの成育場はより上流側に形成され、イシガレイの分布は汽水気にとどまる<sup>1)</sup>。このような河口域成育場の利用様式は、種ごとの稚魚期の低塩分耐性に規定される<sup>2,3)</sup>。ヌマガレイは淡水に耐えるが、イシガレイでは 1ppt（海水の塩分は約 33ppt）、ホシガレイは 2ppt が限界である（図 1）。マコガレイでは 5ppt 前後が限界塩分であるが、河口域の塩分環境は短時間で大きく変化するために、マコガレイの低塩分耐性ではリスクが高いと考えられ、実際に本種稚魚が河口域に出現することはごくまれである。

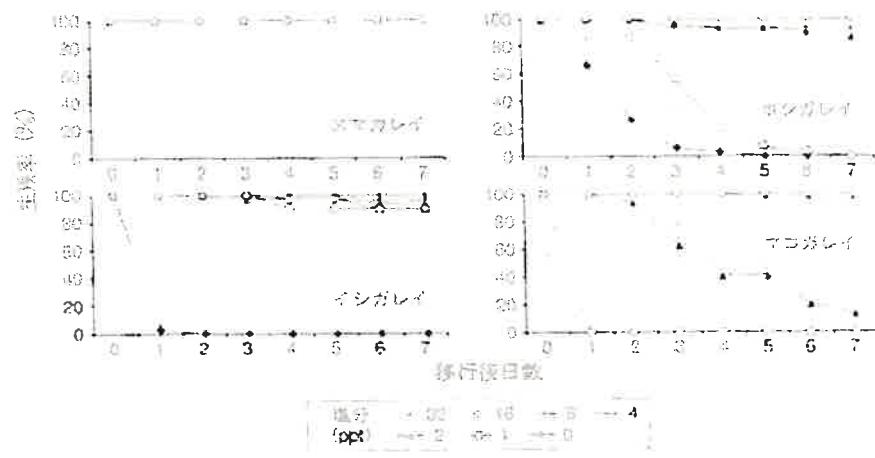


図 1 カレイ科の稚魚期の低塩分耐性  
低塩分移行後における生存率を示す（Wadaほか著述改変）

## 2. 河口域成育場の特性

沿岸海域の生物生産には、陸域からの栄養塩の供給が重要な役割を果たす。河川は陸域の栄養物質を沿岸海域へ輸送するが、栄養物質はまず河口域や付属する潟湖（ラグーン）などに集まるので、河口域はきわめて生物生産力の高い海域となる。このような潟湖を含む河口

域の基礎生産力は、それに続く沿岸域の 10 倍以上高いといわれており、河口域には稚魚の餌料となる小型動物が豊富である。例えば、河口域から河川水の影響を受けない外界の砂浜域までを広く成育場として利用するイシガレイでは、河口域に生息する稚魚のほうが外界浅海域の稚魚よりも餌をたくさん食べ、成長速度も速い(表 1)。

表 1 沿岸域での稚魚成育場としての河口域の特徴(成長と成育場環境の比較)

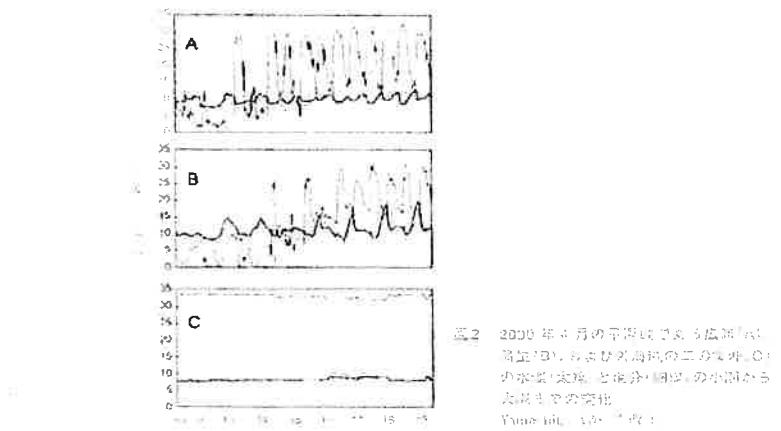
1992 - 1996 年度における成長と成育場環境の比較

種類	年齢	性別	成長率	成長環境	稚魚成長	成育場環境
カレイ	1歳	両性	1.5%	河川水	1.5% → 1.7%	0.3 ~ 5%
イシガレイ	1歳	両性	1.5%	河川水	0.5% → 1.6%	3.8 ~ 10%

成長率は年齢によるもので、成長率は年齢によるもの

一方、稚魚の死亡（滅耗）の主な要因は、被食(捕食されること)である。カレイ類稚魚の捕食者として、エビジャコという肉食性エビ類が世界的に知られている。エビジャコは日本の沿岸域にも普通に見られ、イシガレイやマコガレイ仔稚魚の被食が確認されている<sup>4)</sup>。エビジャコは汽水気にも生息するが、分布密度は外海域よりもかなり低く、しかもカレイ類稚魚を捕食できるような大型の個体はわずかである。エビジャコ以外の捕食者は魚食性の魚類などだが、河口域は以下に述べる通り物理環境が厳しいために、大型の魚類などが侵入しにくい条件を備えている。すなわち、河口域は餌生物が豊富で捕食者が少なく、その結果生存率も高い、非常に好適な成育場環境であるといえる(表 1)。

しかし、河口域を成育場として利用する海産魚類は、必ずしも多いとは言えない。むしろ生活史の中で淡水と海水の間を行き來する通し回遊性魚類の多くが、河口域を成育場としている。この中にはウナギ、アユ、サケ科魚類、カジカ科魚類など、水産的に重要な魚類が含まれる。河口域では潮汐や降雨により、塩分、水温、濁度などが数時間の単位で大きく変化する。一例として、仙台湾に注ぐ名取川と七北田川の河口干潟内の測点における、小潮から大潮へ至る 1 週間の水温と塩分の変化を示す(図 2)。両河口域では、1 日の間に 20ppt 以上、ときには 1 時間に 10ppt を超える塩分変化がしばしば記録された。また、水深の浅い干潟域では気温の影響を受けて 1 日の水温の変動が 5℃を超えることもあった。それに比べると、外海域の成育場となる水深 10m の海底では、水温、塩分ともに安定していることがわかる。



塩分の大きな変化は多くの海産魚類には致命的であり、前述の通り、河口域を成育場として利用できる海産魚種は塩分耐性によって限定される。筆者らが七北田川河口の蒲生干潟周辺でイシガレイ稚魚を採集した際には、多くの稚魚は岸近くのかけ上がりを中心に、潮汐に関係なく比較的同じ場所に分布していた。

おそらく、イシガレイ稚魚は潮汐に対応して一定の塩分の水塊を求めて移動するのではなく、同じ場所で大きな塩分変化にじっと耐えている可能性が高い。生理的ストレスの指標であるコルチゾル濃度は、河口域のイシガレイ稚魚の方が外海域の稚魚よりも4倍ほど高いデータが得られており、稚魚は河口域において、より強いストレスにさらされている可能性が示唆される。しかし、河口域の稚魚のコルチゾル濃度でも、通常の最大ストレス時の5%にも満たず、イシガレイ稚魚が河口域でストレスを感じながら苦労して生活しているわけではないようだ<sup>6)</sup>。河口汽水域は摂餌と被食回避という面では稚魚にとって好適な成育場であるが、不安定な環境変動にたえるような限られた魚種のみが利用できる生息場所であるといふこともできる。

### 3. 河口域における生産力の利用

河口域の基礎生産に用いられる栄養塩の起源は、上流からの栄養塩、河口に堆積した陸域起源有機物の分解物、エスチュアリー循環により底層から運ばれた外海性の栄養塩などに大別される。陸域起源有機物の主体はセルロースやリグニンなどの難分解性物質であり、これを直接食物として利用できる動物は多くない。難分解性物質は、無脊椎動物の摂餌による細粒化と微生物による分解を経て、利用しやすい溶存態に変換される。これを腐食食物連鎖とよび、さらに、植物プランクトンや底生微細藻類の活発な生産を通して生食食物連鎖につながる<sup>6)</sup>。

前述の名取川や七北田川の河口域には、イソシジミという二枚貝が高密度に分布し、河口域のイシガレイ稚魚はこの貝の水管を主食とする。しかし、イソシジミは水管を食べられても死ぬことはなく、短期間に水管を再生する<sup>7)</sup>。すなわち、人間が木から果実を収穫するように、イシガレイは貝の本体を殺さずに水管のみを捕食する。安定同位体比分析を用いて餌の由来をさらに調べると、イソシジミは海底の底生・浮遊性微細藻類を摂餌しており<sup>8)</sup>、イシガレイ稚魚の生産は、河口域における基礎生産に支えられていることがわかる。

#### 4. イシガレイの資源生産における河口域成育場の定量的評価

イシガレイ、ホシガレイ、クロガシラガレイの稚魚は河口域周辺で多く見られるが、河川の影響を直接受けない浅海域にも出現することから、河口域が個体群の資源生産にどの程度寄与しているのかは不明であった。漁業資源を有効に管理するためには、加入資源に対する成育場ごとの貢献度の定量評価が不可欠である。イシガレイ稚魚の耳石中のストロンチウムとカルシウム濃度の比(Sr : Ca 比)を測定したところ、河口域成育場で高く、外海域成育場で低い傾向が認められた<sup>10)</sup>。ストロンチウムの濃度は海水で高く、淡水で低いことから、耳石の Sr : Ca 比は海産魚で高く、淡水魚で低いことが一般的である。しかし、汽水域ではストロンチウムの耳石への取り込みは単純ではない。ストレスは耳石中の Sr : Ca 比を増加させることが知られており、イシガレイ稚魚でみられたストロンチウム取り込みの増大は、前述の河口・汽水域における生理的ストレスによる可能性が考えられる<sup>10)</sup>。

仙台湾では、イシガレイの稚魚は春から秋まで河口域や水深 15m 以浅の外海砂浜域で過ごした後、沖合域へ移動して漁業資源に加入する。そこで、耳石の稚魚期に相当する部位の Sr : Ca 比を用いて、漁獲加入した資源の成育場環境を推定した(図 3)。その結果、漁獲魚の約半分が河口域成育場由来であることがわかった。河口域成育場は、仙台湾のイシガレイ成育場の全面積の数%に過ぎないが、イシガレイ資源の生産においてはきわめて重要な役割を果たしていることが明確になった<sup>10,11)</sup>。これまでに、河口の干潟や潟湖の多くが役に立たない場所として埋め立てられてきた。しかし本研究は、残された河口干潟域がすべて失われると、仙台湾産イシガレイ資源の半分が消失することを示している。ババガレイ、マガレイ、ヤナギムシガレイなど、沖合域を稚魚の成育場とする魚種は、レジーム・シフト(地球規模の気候変動)の影響をうけて、長周期の資源変動傾向を示すのに対して、イシガレイ、ホシガレイ、マコガレイなどの浅海域を成育場とする魚種の資源水準は、長期的に減少傾向にある<sup>12)</sup>。この主な原因は、埋め立てなどによる浅海域成育場の減少と環境悪化にあると考えることができる。

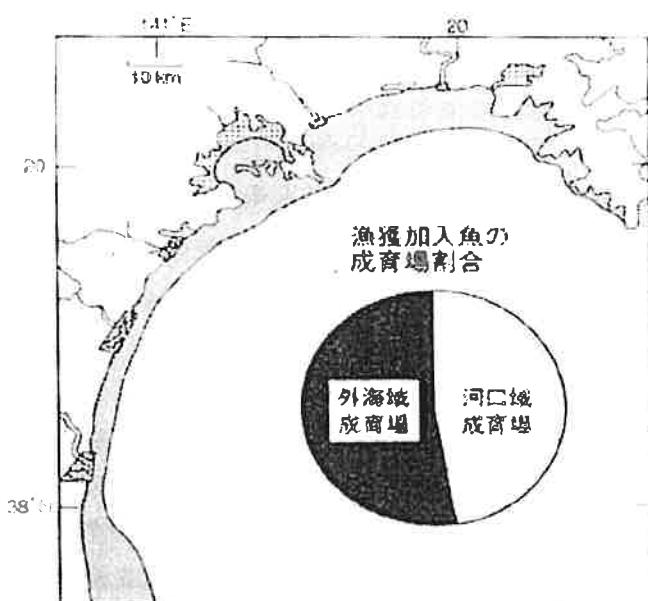


図3 仙台湾におけるイシガレイ稚魚成育場(■は主な河口干潟域成育場、□は外海域成育場)と、耳石 Sr:Ca 比から推定された漁獲加入魚の成育場の割合  
Yamashitaほか<sup>10)</sup>を改変

## 文 献

- 1) 大森迪夫, 鶴田義成: 河口域の魚, In「河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー」(栗原康編), 東海大学出版会, 東京, 108–118, 1988.
- 2) 和田敏裕: 脊椎類の接岸着底機構—カレイ類5種の形態発育と低塩分適応-, *Sessile Organisms*, 24: 81–88, 2007.
- 3) Wada, T., M. Aritaki, Y. Yamashita and M. Tanaka: Comparison of low-salinity adaptability and morphological development during the early life history of five pleuronectid flatfishes, and implications for migration and recruitment to their nurseries. *J. Sea Res.*, 58: 241–254, 2007.
- 4) 山下 洋, 朝日由車: 魚類仔稚魚の捕食者としてのペントス, In「ペントスと漁業」(林勇夫編), 恒星社厚生閣, 東京, 62–70, 2005.
- 5) Yamashita, Y., O. Tominaga, H. Takami and H. Yamada: Comparison of growth, feeding and cortisol level in stone flounder *Platichthys bicoloratus* juveniles between estuarine and inshore nursery grounds. *J. Fish Biol.*, 63: 617–630, 2003.
- 6) 山下 洋, 田中 克(編): 森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産, 恒星社厚生閣, 東京, 147pp, 2008.
- 7) Tomiyama, T. and K. Ito: Regeneration of lost siphon tissues in the tellinacean bivalve *Nuttallia olivacea*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 335: 104–113, 2006.
- 8) 伊藤絹子, 加賀敏樹, 佐々木浩一, 大森迪夫: 干潟二枚貝の生産過程と餌料環境, 水研センター研報, 別冊3, 1–15, 2005.
- 9) 横井 泉, 柳井清治: カレイ未成魚による森林有機物の利用, In「森川海のつながりと河口・沿岸域の生物生産」(山下 洋・田中 克編), 恒星社厚生閣, 東京, 74–88, 2008.
- 10) Yamashita, Y., T. Otake and H. Yamada: Relative contributions from exposed inshore and estuarine nursery grounds to the recruitment of stone flounder estimated using otolith Sr:Ca ratios. *Fish. Oceanogr.*, 9: 328–342, 2000.
- 11) 山下 洋: カレイ類の変態と接岸・着底, 月刊海洋, 27: 740–745, 1995.
- 12) 山下 洋: 生態学的特性に基づいた沿岸資源の管理と増殖, 月刊海洋, 39: 234–239, 2007.

# 河川石面付着物を利用した水銀汚染のモニタリング

## —上田市内河川を対象に—

渡辺 義人・山脇 茂晴

信州大学繊維学部

### Monitoring of Hg Pollution in Rivers by Using "Aufwuchs" on Riverbed Cobble —On Rivers in Ueda City—

Yoshito WATANABE and Shigeharu YAMAWAKI

Fac. Textile Sci. & Technol., Shinshu Univ.

#### はじめに

昭和46年に水質汚濁防止法が施行されて以来、水質保全に対する社会的認識の高まりとともに、かってのような特定の事業所からの重金属排水により、河川が極端に汚染されるという事態はほとんどみられなくなった。しかし、都市地域を中心とした下水処理場の汚泥中にはいまだにかなり濃度レベルの高い重金属が含まれており、特に水銀濃度は販売特殊肥料の規制値2 ppmを越えるところが多く、汚泥の有効利用をさまたげている要因の一つとなっている。また、最近では厨房排水を主とする家庭雑排水から発生する汚泥中にもかなり高い濃度の水銀の存在が報告されている<sup>1)</sup>。このように家庭雑排水由来の水銀が多ければ、当然雑排水が直接流入するような市街地河川の水質に影響のあることが予想される。実際、渡辺ら<sup>2)</sup>は山間地の河川に比べて明らかに市街地河川の方が水銀の濃度はかなり高いレベルであることを報告している。雑排水汚泥中の水銀濃度を高める原因としては、家庭用の水銀体温計や廃棄された水銀乾電池からの水銀の排出などが挙げられるが、十分解明されていない。いずれにしても毒性の高い水銀がいまだにかなりの濃度で身近な小河川に検出されることは水質保全上、無視することはできず、これからも持続的な水銀汚染のモニタリングが望まれる。

河川の重金属汚染のモニタリングには河床の礫に発達する付着物をモニターとして利用するのが有効である<sup>3)</sup>。付着物には河川水中に比べて、 $10^3 \sim 10^4$ 倍の重金属が吸着・濃縮されており、またその重金属濃度はある期間における河川の水質の状態を反映していると考えられる。したがって水銀のように一般に濃度の低い

金属でも容易に分析ができ、また、汚染状況を相対的に判定するのには河川水を直接調べるより有利である。石面付着物は、その主要構成要素である付着性藻類のほかに、バクテリアなどの微生物や生物の遺骸、およびそれらの周囲に沈殿・吸着された有機物や無機物からなる不均一な複合体である。したがってモニターとしての信頼度を高めるためには、付着物の生物学的ないし物理的・化学的性状と、重金属の濃縮・蓄積過程との関係をより明確にしておくことが必要であり特に有機物含量の大小は、有機物自身がリガンドとして積極的に重金属を吸着・蓄積する可能性があるので重要である。

こうした観点から、上田市内河川を対象に、石面付着物をモニターとして水銀汚染の状況を調査するとともに、主に石面付着物中の水銀量と有機物含量との関係について検討した。また石面付着物の主要構成藻類が異なる場合の吸着量の違いについても若干検討を加えた。さらに金属水銀の水質への影響をみるために室内実験によって付着物への吸着状況を調べた。

#### 調査地点

調査した河川は上田市行政区画内の千曲川に流入する矢出沢川、神川、浦野川の3つの支川である。調査地点を図1に示す。千曲川右岸の矢出沢川は小支川を含めて10地点、神川3地点、左岸の浦野川は小支川を含めて6地点の計19地点である。

矢出沢川は上田市の中心部を貫流する典型的な都市型河川であり、中流部から下流部にかけて水質汚濁は極めて顕著である。蛭沢川、黄金沢川の2つ小支川と樹網用水、堀越用水の2つの用水が流入している。蛭沢川も市街地を流れおり、汚染度は高い。黄金沢川

# 渡辺義人他

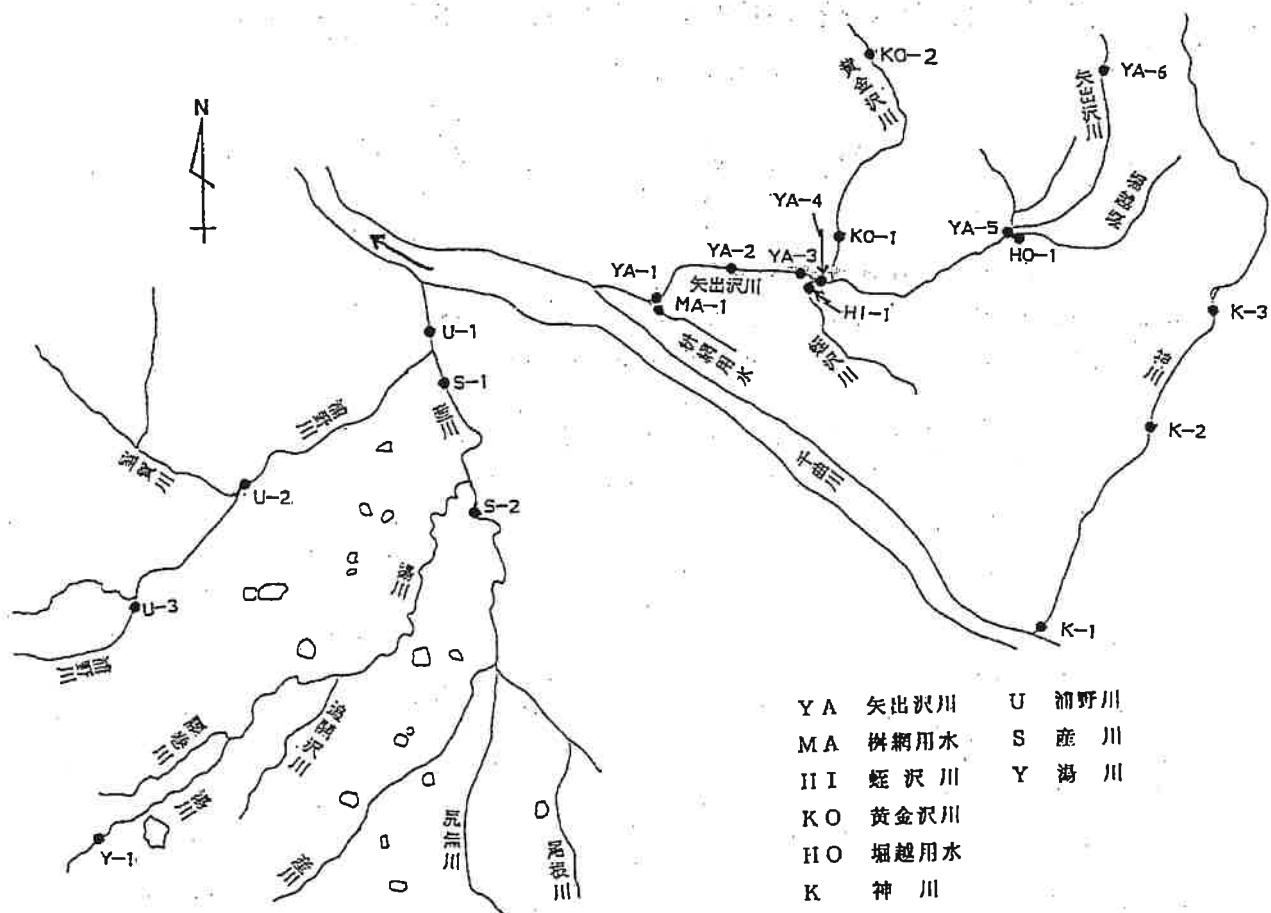


図1. 調査地点

は酸性河川である。樹網用水は千曲川から取水されているがかなり汚れている。堀越用水は神川を源水としている。

神川は菅平高原を源流としており、今回調査した3地点はいずれも下流の上田市地籍内の本流である。水は最下流部を除くと比較的きれいである。

浦野川流域は上田市の郊外にあたる地域で耕地が多い。流入する主要な小支川は産川と湯川である。浦野川本流流域には密集地域が無いので市内河川の中では水は比較的きれいである。産川は住宅の増加などで地点によってはかなり汚染されている。湯川は流量が少ない上に上流にある別所温泉の影響で水の汚濁が目立つ。

調査時期は浦野川水系が1990年11月13日、矢出沢川水系と神川は1991年6月7日である。

## 方 法

**調査方法** 付着物は地点毎に5ないし10個の礫を選び、 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ のコドラートで定量的に付着物を剥

離し、それらを1つに混合し、1地点の試料として採取した。なお、礫を選ぶに当っては、その付着物の主要な構成藻類が珪藻類であるものを対象とした。同じ地点であっても場所によって大型の糸状藻など、主とする構成藻類が明らかに異なる付着物がみられるので、その場合には別途に採取した。

採取した付着物は水を加えて一定濃度の懸濁物液にし、その1部を定量的に取ってグラスファイバー・フィルターで口過し、乾物量とクロロフィル-a量を測定した。残りの懸濁物液は遠心分離機によって分別し乾燥後粉末にして水銀などの化学分析に供した。

**分析方法** 付着物中の水銀の分析は森山ら<sup>4)</sup>の方法に準拠し図2に示した操作手順に従って行った。また銅、亜鉛、鉄は図3の操作手順に従って分析用試料液を調製し、ICP発光分光法で測定した。付着物中の炭素はCHNコーダーで分析した。またクロロフィル-aはUNESCO-SCORによった。

**実験方法** 金属水銀が水中に排出された時の水質への影響をみるために室内実験によって付着物への吸着

## 河川付着物による水銀汚染のモニタリング

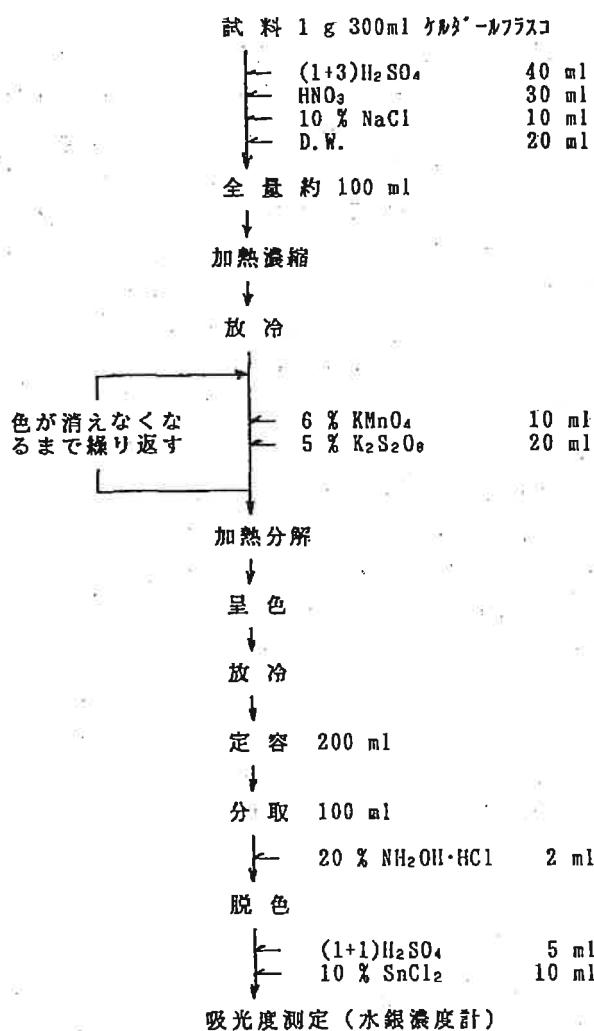


図2. 水銀分析手順のフローシート

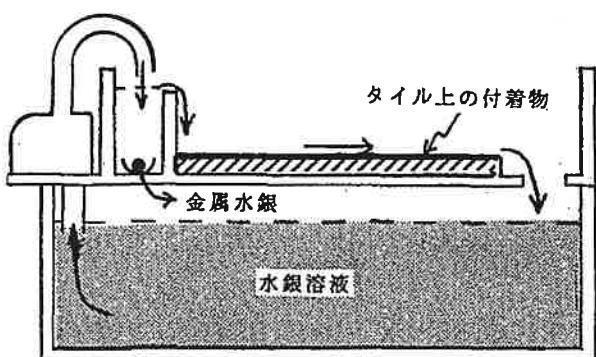


図3. 付着物による水銀吸着実験装置

状況を調べた。実験装置を図3に示す。この実験に用いた付着物は千曲川から分水した水路にアングルで作った台を沈め、その上にタイル板(1枚の面積、0.0041

m<sup>2</sup>)を並べて固定し、40日間生成させたものである。実験は溶存態の水銀(HgCl<sub>2</sub>)の場合と金属水銀の場合の2通り行った。各実験には、ガラス製水槽に千曲川水の口液9リットルを入れ、流路に上記の付着物の着いたタイル板3枚を設置した。溶存態水銀についての実験では、実験溶液の水銀濃度が100ppbになるように塩化水銀を加えた。金属水銀については、図3示したように約10gの金属水銀を蒸発皿の中に入れ流路の手前に置いた。この場合の実験溶液は千曲川水口液のみである。各実験は水温20°C、明期12時間(1000lux)、暗期12時間の条件で、実験溶液をポンプで循環せながら1週間行った。なお、いずれの実験も同時に付着物のない対照区を設け、水槽の壁などへの吸着による損失分を測定した。

### 結果と考察

#### 1. 上田市内河川石面付着物中の水銀含量

まえがきにも述べたように、同じ時期に同じ地点で採取した付着物でも付着物の主要構成藻類の相が異なると石面付着物中の水銀含量も大きく異なることが予測される。表1は同一地点で同時に採取したCladophoraなどの糸状性緑藻を主とする付着物とNaviculaやNitzschiaなどの小型珪藻を主とする付着物の水銀含量を比較したものである。これによるといづれの地点も、水銀含量は小型珪藻を主とする付着物の方が数倍から1桁以上含量が高く、両者に明らかな違いがみられた。このことから調査にあたっては、できるだけ小型珪藻類を主とする石面付着物を選択して採取するように心がけた。

表1. 同地点で採取した主要構成藻類の異なる石面付着物の水銀含量の比較

	糸状緑藻 μg/g*	微細珪藻類 μg/g*
矢出沢川(YA-1)	0.031	0.642
" ( " 2)	0.107	1.066
神川(K-1)	0.043	0.210
" ( " 2)	0.035	0.109

\*乾重量当り

表2は図1で示した上田市内河川の各調査地点における石面付着物中の水銀含量である。いづれも乾物当たりで表示されている。全般的にみると千曲川左岸の浦野川水系は全地点が0.1μg/g前後と低く、これに対し

表2. 上田市内河川の各地点における石面付着物中の水銀含量

調査地点 矢出沢川水系	水銀含量 $\mu\text{g/g}^*$	調査地点 神川	水銀含量 $\mu\text{g/g}^*$
YA-1	0.64	K-1	0.21
" 2	1.07	" 2	0.11
" 3	0.39	" 3	0.18
" 4	0.21	浦野川水系	
" 5	0.09	S-1	0.10
" 6	0.09	" 2	0.07
MA-1	0.57	U-1	0.11
H1-1	0.42	" 2	0.08
KO-1	0.20	" 3	0.10
HO-1	0.42	Y-1	0.11

\*乾重量当たり

て右岸の各河川の方が上流部を除くと左岸より高い傾向にある。中でも矢出沢川の中・下流部で高く、特にYA-2 地点は  $1\mu\text{g/g}$  を越え、浦野川水系各地点のおよそ10倍の水銀含量である。同じ矢出沢川でも上流部のYA-5と6地点の水銀含量はいづれも  $0.09\mu\text{g/g}$  と低く、浦野川水系と同じレベルである。このことは下流付近の矢出沢川で明らかに水銀汚染があったか、ある

いは進行していることを如実に示すものである。

渡辺ら<sup>2)</sup>は、1987年に千曲川をはじめいくつかの上田市内河川の石面付着物による水銀汚染の調査から非汚染地域の  $0.1\sim0.2\mu\text{g/g}$  の範囲であることを報告している。今回の調査においても水銀含量が低い地点で  $0.07\sim0.11\mu\text{g/g}$  の範囲である。これらのことから石面付着物の水銀含量のバックグラウンド値は  $0.01\mu\text{g/g}$  前後と推定される。したがって、石面付着物を水銀汚染のモニターとして利用する場合、付着物の水銀含量  $0.2\mu\text{g/g}$  を汚染の有無の判断に目安として利用するのが妥当と思われる。

## 2. 付着物中水銀量と有機物との関係

水銀に限らず重金属の付着物による蓄積過程には藻類などの生物による吸収・取り込みのほかに付着物の表面への物理・化学的吸着過程が考えられる。もし、表面に配位子を持つ有機物が優占していれば、重金属は有機物に特異的に吸着・蓄積する可能性がある。付着物の主要構成藻類である珪藻の表面も多糖類を中心とする有機物の膜で被うわれていることが報告されているので<sup>3)</sup>、この有機物が配位子機能を有していれば珪藻自身も積極的に重金属を吸着すると考えられる。したがって、このような有機物を多量に含む付着物の場

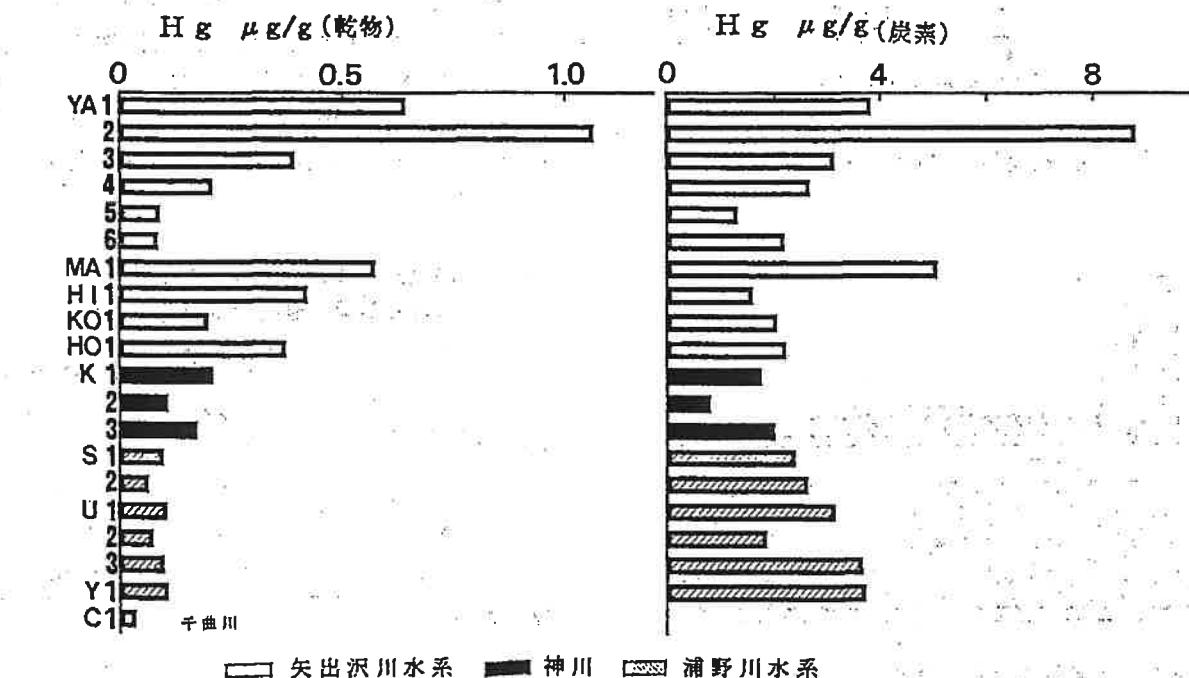


図4. 各調査地点における付着物中の水銀含量（左図は乾物当たり、右図は炭素当たりで示されている）

## 河川付着物による水銀汚染のモニタリング

合水銀量は有機物量と密接に関係してくるので、単純に乾重量当りの水銀含量だけで汚染状況を判断することは難しくなる。そこで今回の調査における付着物乾重量当りの水銀含量を尺度とした水銀汚染のモニタリングの妥当性をみるため、有機物の影響について検討した。

図4は有機物の影響をみる手懸かりとして各調査地点の付着物中の水銀量を単位乾重量当り（左側）と単位炭素重量当り（右側）で示し、地点間の水銀量の相対的大小を比較した。まず、水系毎に比較すると両者の地点間の相対的順位は矢出沢側水系のH-1とK-1が逆転する以外はほとんど変わらない。しかし全地点について相対的にみると、乾重量当りでは最も低いレベルであった矢出沢川YA-6地点や浦野川水系の各地点が、炭素当りではかなり高くなり、特に浦野川水系は神川や矢出沢川の支川の含量を越えている。図5は付着物の炭素含量と水銀含量（乾重量当り）の関係図である。これでみると浦野川水系各地点（○）の付着物の炭素含量はすべて5%以下であり、矢出沢川最上流のYA-6を除き、右岸の各地点に比べて際立って低い。このことからYA-6や浦野川水系の各地点における単位炭素当りの水銀含量が高くなつたのは、これらの地点の付着物中の炭素含量が低いため相対的に水銀量が高くなつたことがわかる。また図5から炭素含量と水銀含量には明確な相関関係は認められない。図6は付着物の炭素含量とクロロフィル-a含量の関係をみたもので、両者に良い正の相関が認められる。こ

のことは付着物中の有機物のほとんどが藻体中の有機物であることを示唆している。

これらの知見から本調査で対象とした付着物には特に水銀を積極的に吸着・濃縮するような有機物の影響はほとんどなく、乾重量当りの水銀含量で評価するのが妥当であることが示された。

### 3. 水銀現存量による水銀汚染の評価

付着物の乾物現存量と水銀現存量の関係から、河川の水銀汚染を相対的に評価する場合の尺度としての水

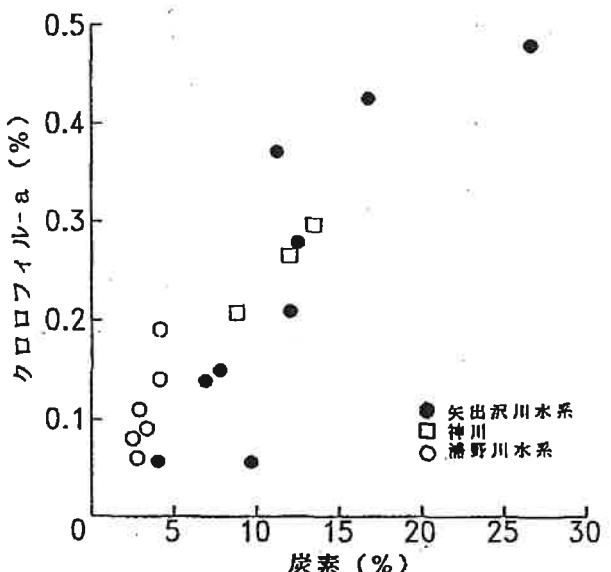


図6. 付着物中の炭素含量とクロロフィル-a含量の含量の関係

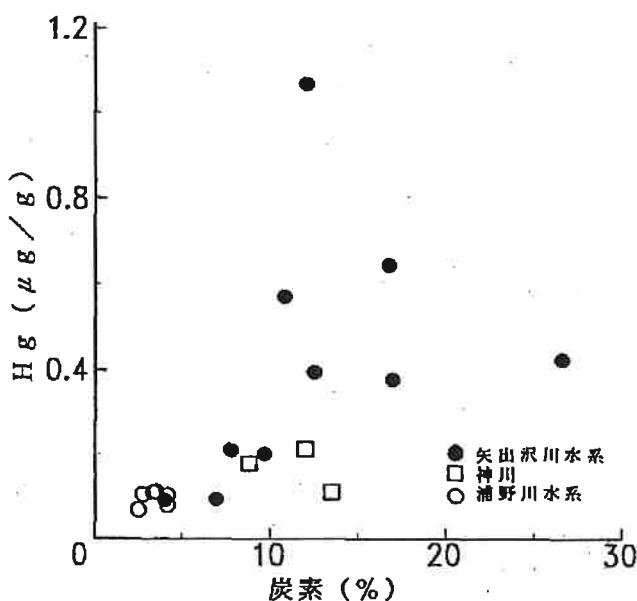


図5. 付着物中の炭素含量と水銀含量の関係

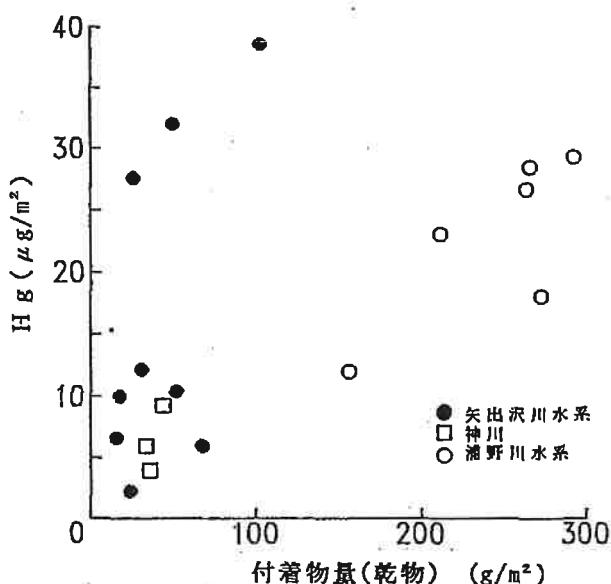


図7. 付着物の乾物現存量と水銀現存量の関係

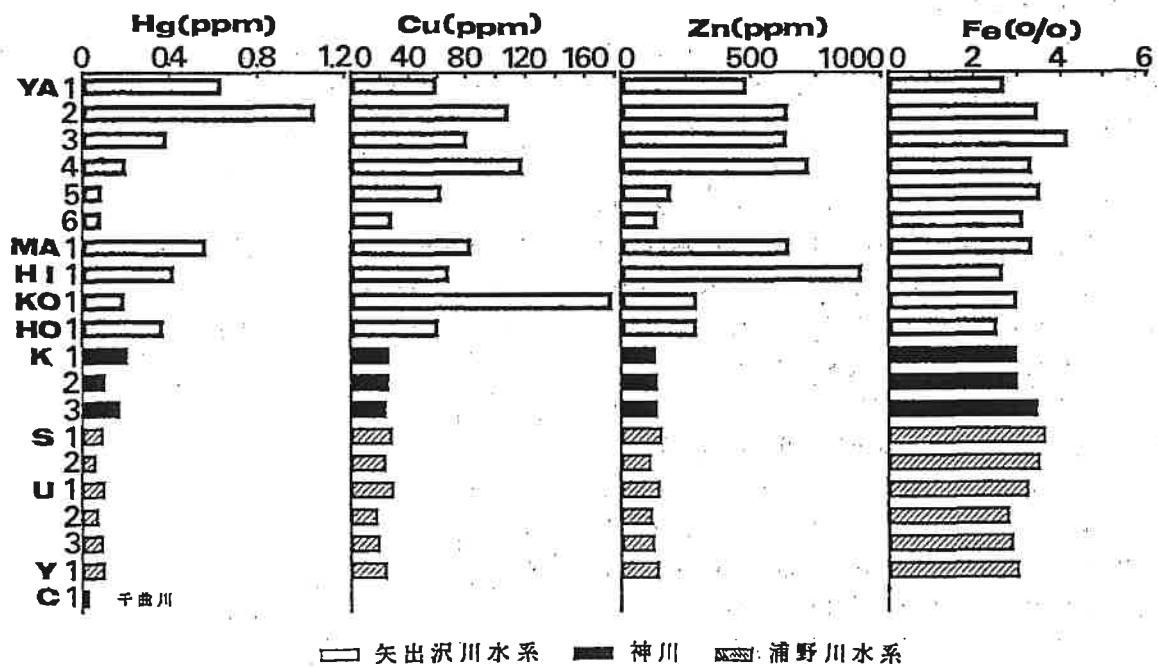


図8. 各調査地点における付着物中水銀含量と他の重金属含量との比較

銀現存量の適否について若干考察を行った。

図7は付着物が生成発達する石面の単位面積当りの付着物量(乾物)すなわち現存量とその付着物に含まれる水銀の現存量との関係を示したものである。水銀の現存量は付着物の現存量にその付着物の水銀含量を乗じて求めた。横軸の付着物現存量をみると右岸の矢出沢川と神川の各地点はいづれも100g/m<sup>2</sup>前後かそれより小さいのに対して、左岸の浦野川水系は各地点とも150~300g/m<sup>2</sup>と右岸の河川にくらべて数倍大きい。縦軸の水銀現存量をみると右岸の各地点については水銀含量が高かった矢出沢川の下流地点などが28~38g/m<sup>2</sup>と大きいものの、そのほかの地点はほとんどが10g/m<sup>2</sup>以下と小さい。一方、水銀含量が非常に低かった浦野川水系の各地点の水銀現存量はおよそ10~30g/m<sup>2</sup>とかなり大きい。これは上に述べたように、浦野川の付着物現存量が極めて大きいことによる。このように水銀現存量の大小は水銀含量のほかに付着物現存量に大きく依存している。付着物現存量は、藻類の生長と水中からの懸濁物の沈積などによって形成される付着物が石面に発達しはじめてから調査時点までのある一定の期間における見かけの累積量であり時間の因子が加味されている。このほかにも、ある地点の付着物現存量をきめる要因には水中の栄養塩濃度や河床の状況流況など数多くある。したがって、精度の面から水銀現存量を水銀汚染の尺度として用いるのは水銀含量に

比べて不適当と思われる。

#### 4. 同地点における付着物中の水銀含量と他の重金属含量の比較

今回は水銀を対象にその汚染状況を調査したが、他の重金属についても付着物をモニターにして各汚染状況を水銀同様に評価することが可能である。

図8は各地点における付着物中の水銀、銅、亜鉛、鉄含量を比較して示したものである。銅、亜鉛についてみると水銀同様、矢出沢川水系は上流の2地点を除くと全般に高く、市街地河川の特徴が伺える。この中で水銀では低かった黄金沢川(KO-1)が銅では全地点中最も高く、亜鉛では蛭沢川(HI-1)最も高い。黄金沢川のCu含量が高いのは、この川の上流域に黄鉄鉱脈のあることが知られているので<sup>6)</sup>、その影響と思われる。蛭沢川の亜鉛含量が高いのは、亜鉛が一般的に生活排水中に多いことから、それだけ水質汚濁が著しいことを裏付けるている。神川と浦野川水系の各地点は銅、亜鉛とも低く、銅が20~30ppm、亜鉛120~160ppmの範囲である。付着物中の鉄含量はおよそ2~4%であり、最大値は最小値の2倍程度と変動は小さい。これは本来、鉄含量のバックグラウンドが高いので、人為的な影響による含量の変化が相対的にそれほど大きく表われて来ないためと思われる。

## 河川付着物による水銀汚染のモニタリング

表3. 塩化第2水銀を用いた実験結果

	付着物の水銀量			
	実験区		対照区	
	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/m}^2$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/m}^2$
実験開始時	0.04	34.7	-	-
実験終了時	8.06	6550	0.10	114

表4. 金属水銀を用いた実験結果

	付着物の水銀量			
	実験区		対照区	
	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/m}^2$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/m}^2$
実験開始時	0.04	50.7	-	-
実験終了時	1.15	850	0.28	77.2

### 5. 室内実験による付着物への水銀の吸着

今回の調査で、市街地河川にかなりの水銀汚染の兆候がみられたが、汚染源についてはまだよくわかっていない。推定される汚染源の一つとして挙げられるのは家庭用の水銀体温計の破損により廃棄された金属水銀である。そこで河川に排出された金属水銀が一部水中に溶けて、どの程度石面付着物に吸着されるのか、水銀の吸着過程についての基礎的知見を得るために、簡単な室内実験を行った。実験結果を表3と表4に示した。表3は参考に行なった塩化第2水銀による実験結果である。これによると実験開始から1週間目で、実験開始時の付着物の水銀含量0.04 $\mu\text{g/g}$ の約800倍の濃度になり急速に付着物に吸着されることがわかった。表4の金属水銀を用いた実験結果をみると実験1週間目で、開始時の17倍の1.15 $\mu\text{g/g}$ と今回の調査で最も水銀含量の高かったYA-2地点の1.07 $\mu\text{g/g}$ に近い値となった。ちなみに、この実験で付着物に吸着した水銀の

総量を計算するとおよそ10 $\mu\text{g}$ である。1本の体温計の水銀量を1gとすると、吸着したこの水銀量は体温計1本の10万分の1に過ぎない。このことは、いかえれば、1本の体温計の水銀が水中に廃棄されると、かなりの長期にわたって、水質に影響をおよぼすことを示唆している。

### おわりに

渡辺ら<sup>1)</sup>は生活雑排水汚泥中にかなりの高含量の水銀を検出し、生活雑排水が流入するような市街地河川にも水銀汚染が見出される可能性を指摘したが、今回の調査においても、水銀のレベルが明らかに市街地河川、特に下流部において、上流部や郊外の河川より高く水銀による汚染状況が確認された。他の重金属でも同様だが水銀は特に毒性が高いので、汚染の傾向が認められる限り、水質保全の立場から等閑視することはできない。そのためには、水銀汚染の長期にわたるモニタリングが必要である。その手段の一つとして今回の調査に利用した付着物をモニターとし、付着物中の水銀含量を尺度に水銀汚染を相対的に評価する手法が有用である。今回は付着物の主要構成藻類が小型の珪藻類である付着物を対象として行ったが、*Cladophora*などの大型の高等藻類をモニターに選択すれば信頼性はさらに高まる。ただし、こうした大型の藻類には珪藻類に比べて、普遍的に存在する種類は少なく、また水銀の濃縮率が低いなどの不利な点もある。

今後、水銀体温計のほかに市街地河川の水銀のレベルを上昇させる汚染源として予測される廃棄水銀乾電池や歯科医の診療室からの排水<sup>2)</sup>などの影響について追及していくことが急務の課題である。

### 文 献

- 1) 渡辺義人・山本満寿夫: 環境科学年報—信州大学. 第13巻, 80~86, 1991
- 2) 渡辺義人・伊藤能子: 信州大学環境科学論集. 第10号, 29~31, 1988
- 3) 渡辺義人・渡辺圭子: 昭和55年度信州の自然環境モニタリングと環境科学の総合化に関する研究. 21~26, 1981
- 4) 森山清・渡辺章・森泰・御園生善彦・荒屋敷秀俊: 下水道協会誌. 261号, 31~41, 1986
- 5) Hecky R.E., K. Mopper, P. Kilham and E.T. Degens: Marine Biology. 19, 323~331, 1973
- 6) 阿久津伊平: 信州大学繊維学部研究報告. 第9号, 114~117, 1958
- 7) 山中すみえ・田中界治・田中久雄・西村正雄: 口腔衛生学会雑誌. 26(4), 307~313, 1977