

2. 河口域生態系の保全に関する基礎的研究

〈はじめに〉

〈方法〉

- A) 環境の構造と機能：
- B) 一次生産者（緑色植物）：
- C) 高次生産者（動物など）：
- D) 分解者（バクテリアなど）：
- E) 上記の各構成要素間の関係：

〈結果〉

- A) 環境の構造と機能
- B) 一次生産者
- C) 高次生産者
- E) 各要素間の関係
- F) 生態系モデル解析

〈モデル解析〉

〈まとめ〉

愛媛大学理学部 水野信彦
愛媛大学理学部 大森浩二

<はじめに>

河川生態系の物質環境について以下に述べる。河川内に流入した無機栄養塩の一部が、直接付着藻類による一次生産（＝有機物生産）に回され、更に、二次生産（＝ベントス・魚類生産）に回される過程で一部は分解され一部は有機物のままで流下していく。この時、物質の一部は魚類等に対する人や鳥類による漁獲や捕食の形で河川より取り出される。また、河川に流入した有機物はその一部が分解され、一部はそのまま流下していく。特に溶存態の有機物は分解の過程でバクテリアにより粒子化が進み食物連鎖に利用され易い形に変換される。このように流入した無機栄養塩類・有機物は太陽エネルギーを元に（有機化←→無機化）のサイクルを繰り返し、一部を河川系外に出しながら流下する。最終的に河口域に流入した無機栄養塩類は、一部が付着藻類・アシ等により有機化・吸収され、残りは沿岸域へ流出する。ここで有機化されたものの一部は、二次生産を経て系外（＝鳥類や人間によるベントスや魚類の捕獲・河口域で生育した魚類稚仔の成長に伴う沿岸域への移動）か永久堆積層へ持ち出される。また、河口域に流入した有機物は、食物の項で述るようにそこで捕捉され堆積する。それ故、河口域は上流から多量の無機物や有機物が流入して堆積し、沿岸域にとっては、これら両物質に対する一種のトラップとなっている。このことは、逆に言えば、河口域が無機物・有機物汚染に曝され易い場所となっていることを意味する。また、河口域は河川と海域との境界に位置していて、ここを通過する両側回遊性生物（塩分耐性の幅が広い生物。親は淡水域で生活するが稚仔は海域に流下し、成長に伴って遡上してくるアユ・ハゼ類やその逆の生活史を持つサケ・マス類など）にとって、いわば保育・生育場所と共に関門の役割も果たしている。従って、汚染されていない健全な河口域の生態系を保全することは、河口域のみでなく、その上流の河川生態系と河口付近の海域の生態系の保全に対しても、大きく貢献することになる。

では、保全すべき健全な河口域生態系とはどのようなものであろうか。ある生態系が健全であるか否かを規定する方法は、いくつか考えられる。一般に、生態系が安定的にしかも有機物汚染（蓄積）のない状態で維持される為には、光合成による有機物の生産と動物や微生物等によるその分解のバランスがとれている必要がある。そして、この分解の過程を自然（生態系）の自浄作用と呼ぶが、この自浄力は生態系の自然状態下での生産力を一般に上回っており、ある程度の人為的な有機物負荷を許容している（Omori et al., 1993）。河口域への無機物負荷についても、河口域での一次生産量の増加を経由した有機物負荷として捉えると同様に人為的な無機物負荷のある程度の許容という見方が可能である。しかし、特に水域の生態系ではその主たる分解の場所である底部への酸素の供給の制限から、人為的有機物負荷量の明確な許容限度が存在する。それは、分解過程が好気的（酸素による有機物の直接的な酸化＝分解）な段階から、嫌気的（酸素以外の硫酸イオン等の酸化体によるまたは、酸化体なしの有機物の直接的な分解）な段階へと移行する有機物負荷量によって示されていると規定できる。この後者の段階に入ると低酸素状態や硫化物の增加等河口域・沿岸域での水質の悪化が起こり生物の生存にとって不利な環境状

態が引き起こされる。少なくとも、有機物汚染（蓄積）という観点から、この人為的有機物負荷の限度内にある生態系は、一応健全であると規定できよう。

河口域生態系の場合において、保全すべき健全な生態系の基準は、その上流から流れてくる有機物等のトラップとしての機能から考えて、「常に冠水している河口底の底泥表層部の大部分で有機物が好気的分解の最大限度内で持続的に分解されていること」が重要な目安となろう。河口底表層で嫌気的な分解のみが行われるようになると、流入した有機物の河口域生態系による消費・分解が流入量に大して不十分となり、河口域と付近の海域の水質汚染をもたらし、それらの生態系を劣悪化させることになる。逆に、健全な生態系が保全されれば、上流域から流入する河川水の水質浄化・改善を行い河口域・沿岸域での水質保全が可能となる。

本研究は、河口底での好気的分解を最大限度内で持続させるためには、河口域にどのような生態系が成立している必要があるか、その中でも最も重要な要素・部分系はなにかなどを定量的に明らかにしようとする試みである。河口域生態系は、生物部分系として、浮遊及び付着藻類・陸生の草本類よりも一次生産者、ゴカイ・カニ・貝等ベントスの低次消費者、魚類・鳥類等の高次消費者、そして、微生物類よりもなる分解者などの要素に、また、環境部分系として、河口域の地形条件・景観、潮汐による海水流動・交換率、流入河川水量、これらの流動に伴う栄養塩類・有機物等の化学物質の動態等の要素によって構成されている。これらの内、例えば、低次消費者である各種ベントスは底質の搅乱等により微生物の活性を高め間接的にも有機物の分解に重要であること、また、高次消費者である魚類・鳥類は河口内に蓄積された有機物の河口域外への移出を促進すること等から、無機物・有機物負荷限度を引き上げる上で重要であることが定性的には予測される。これらの動態を継続的に調査し、数値モデルを構成することによって、どの要素が、また、どの部分系が、上述したような健全な河口域生態系を維持するため重要なのかを定量的に検討することが可能となる。

上記したような重要な要素・部分系は河口域の地形的・地理的条件に大きく依存して変化すると考えられる。特に、日本において見られるタイプは、周年流量の多い大規模河川で河口部の水深が比較的深くて河岸干潟の河口域全体の面積に占める割合が低く河口底の多くが常に冠水しているものから、流水量が少なくしかも季節的な変動が相対的に大きい小規模河川で河川部の水深が浅くて干潟の河口域全体に占める割合は高く河口底の多くが低潮時干出してしまうものまで様々である。潮汐に伴って干出する河口底と常に冠水しているものとでは負荷された有機物の分解に関する機構が異なっていると考えられる。よって、地形的な構造に依存して、健全な河口域生態系を維持する上で重要な要素・部分系が変化すると考えられるが、一般的に健全な河口域生態系の保全に関する基準を明らかにするといったとき、幅広くいろいろなタイプの河口域を調査対象として検討し資料を集積する必要がある。

今回は、河川に対して海域の影響の大きい（相対的に大きな干潟を持つ）、流入水量の変動は比較的大きいが量は少ないタイプの典型である松山市重信川の河口域を調査対象とした。

<方 法>

まず、上流より流入した無機物は、河口域においてその一部が一次生産者（緑色植物）により吸収されて有機物となり、2次生産者を経由して分解される。また、流入した有機物は、一部は直接的に2次生産者（動物など）により分解され、残りの多くは分解者（バクテリア）により分解される。そのバクテリアは、2次生産者に消費されその一部がまた分解され無機物となる。

重信川の河口底で好気的分解を持続させている生態系を明らかにするためには、以下に示すような河口域生態系の構造と機能を調査する必要がある。

- A) 環境の構造の機能 :
- B) 一次生産者（緑色植物） :
- C) 高次生産者（動物など） :
- D) 分解者（バクテリアなど） :
- E) 上記の各構成要素間の関係 :

重信川の河口域全体に渡って、一定間隔で調査地点を設ける。以下の調査は、この始めに設定した調査地点を基としてその一部もしくは全てに渡って実施する。調査は、基本として、月毎に行うこととするが、調査項目によっては季節毎に行う場合もある。

- A) 環境の構成と機能 :
 - * 河口域内における塩分濃度分布とその季節的变化：各季節・各調査地点において試水を採集する。
 - * 河口域内の底質粒度、有機物量の水平分布と時間的变化：河口域内に複数の調査地点を設け、その底質を採集し、一部は乾燥させた後乾式フルイ法により粒度分析を行う。残りの底質に関しては、灼熱減量・CN量測定に供する。CN量については、元素分析計（CNコーダー）にて計測する。
 - * 温度：各調査地点ごとに最高最低温度記録計を設置し計測を行った。
- B) 一次生産者（緑色植物） :
 - * アシの現存量および生産量：中州に設置された調査地点において、各月ごとに枠法を用いて成長過程及び現存量の調査を行う。また、アシ各部ごとのCN含量をCNコーダにより計測し、その現存量の季節的变化よりN固定量を推定した。
 - * 塩性植物の分布：調査地点毎に枠法を用いて各種の被度の調査を行った。
- C) 高次生産者（動物など） : 二次生産量の推定も可能な限り行う。
 - * 小型ベントス群集の種組成と密度の空間的・季節的变化：月毎に各調査地点において、枠法により底質を採集し、1mm目のフルイにてふるい残った残さよりベントスを選別し、同定・計数を行う。
 - * 大型ベントスの種組成と密度の空間的・季節的变化：月毎に各調査地点において、枠法により大型ベ

- ントスを採集し、同定・計数を行う。主要な種については、世代解析を行い生活史および個体群解析を行う。
- * 魚類群集の種組成と密度の空間的・季節的变化：月毎に各調査地点において、投網・タモ網等により魚類を採集し、同定・計数を行う。主要な種については、世代解析を行い生活史および個体群解析を行う。
- * 鳥類群集の種組成と密度の空間的・季節的变化：月毎に、河口域内に生息する鳥類の種類別カウンティングを分布場所の記載を含めて直接観察法により行う。

D) 分解者（バクテリアなど）：

- * 細菌類の調査は今回行えなかった。

E) 上記の各構成要素間の関係：

- * 同位栄養段階間における種間相互作用：C) により求められた、各レベルでの調査結果に基づき、相互作用の見られる種間に於て相互作用に関する実験を行う。大型ベントスの中で既に相互作用の存在が確認されている種（アシハラガニ類）に関しては相互作用解析に関する野外実験を行う。
- * 異なる栄養段階間における種間相互作用：河口域内における主たる高次捕食者は、人間を除いて魚類および鳥類に限定される。そこで次のような方法により河口域内における捕食・被食関係を調査する。
魚類：C) により採取した魚類を採集時にホルマリン原液の腹腔注射を行い、実験室に持ち帰ったのち、胃内容調査を行う。この調査により、餌種の同定、また、その相対的重要度の評価を行う。
鳥類：鳥類に関しては、捕獲することができないため、上記の方法がほとんど不可能であり、主要部分は直接観察法に頼らざるを得ない。ただ、鳥類の標準代謝量の計測より一匹あたりの必要最低限のエネルギー量を計測し、更に河川周辺の鳥類の分布数量および河川利用率より鳥類による河川からの有機物の取り出し量を推定した。ここでは、主たる河川利用鳥類であるサギ類を調査対象とした。
- * 各生物要素と環境要素間における関係性について：A) からE) にかけての調査から求められた情報を、種々の統計的手法を含めて総合的に解析することにより、環境要因を含めた河口域生態系を構成する要素間の関係を明らかにする。と同時に、「河口底での好気的分解を持続させる河口域生態系の構造と機能」に関するモデルの概要を作成し、河口域生態系を健全に維持するための方策を考察した。

＜結 果＞

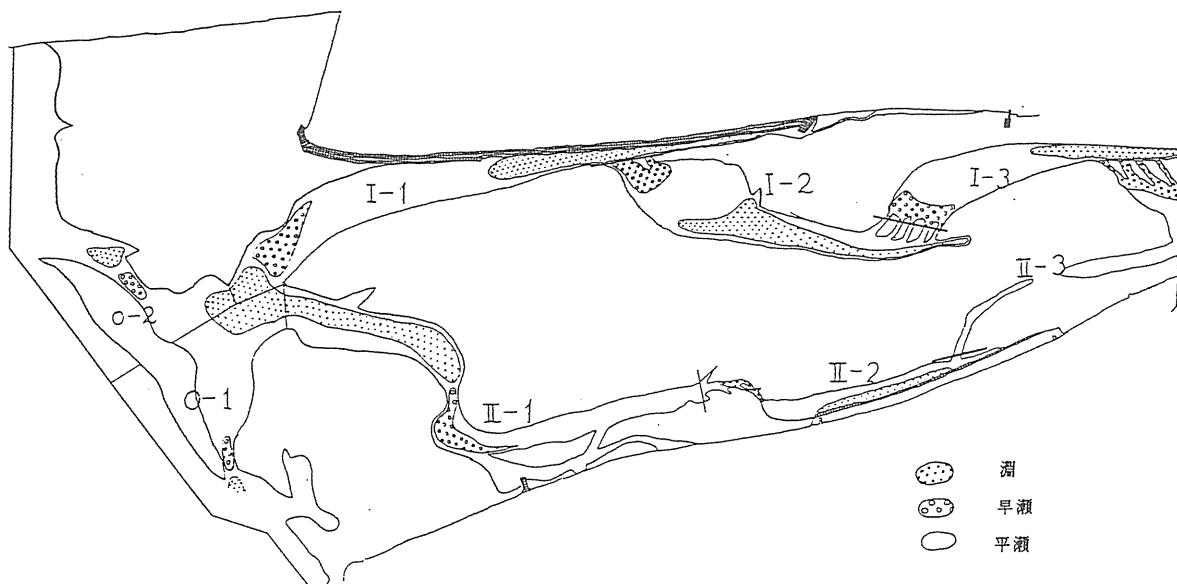
A) 環境の構造と機能

- * 重信川河口域は、海水の勢力の強いタイプで淡水の流入が比較的弱い。干潮時にも冠水している箇所は河口全体に対し10%程度であった。また、満潮時でも冠水しない箇所は30%程度あり、残り60%が

潮の満干にともなって冠水・干出を繰り返す干潟となっている。

干潮時にも冠水している場所の内、本流側では60%が砂れき・転石底で20%が泥質底、残りが砂底となる。支流側では、70%が泥底で20%が砂底で残りが砂れき・転石底であった(図A-1)。

冠水・干出を繰り返す場所では、30%程の砂れき・転石底(その多くがハマサジ等の植物に覆われていた)の他は全て泥質底となっていた。



図A-1 重信川河口域の様子（大潮干潮時）と7つの区域

河口域の河口より川口大橋(河口より1km上流)にかけて中州に沿って6地点を設けた。その含泥率は約10%から35%の幅で変化するが、統計的には有意な差ではなかった(表A-1)。また、有機物含量(灼熱減量)についても約2%から3%の範囲で変化したが同じく有意な差はなかった(表A-1)。

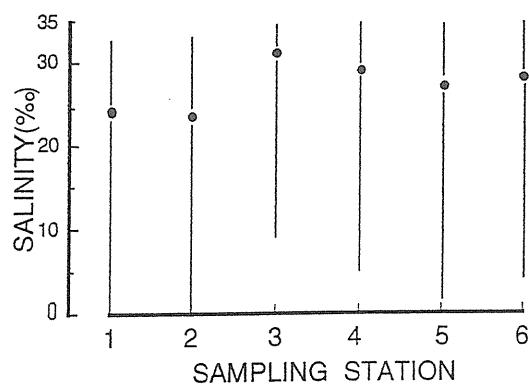
表A-1 Mud content (%) and Organic content expressed in ignition loss (%) of surface sediments along the sampling stations. Number of samples of each station was 3. Difference of mean of two factors between stations was examined by F-test.

Station	Mud content (%) (mean ± s.e.)		Organic content (%) (mean ± s.e.)	
1	19.4	4.11	2.34	.372
2	22.0	4.42	2.67	.334
3	34.2	11.5	2.52	.205
4	9.41	1.99	1.86	.220
5	35.47	6.23	3.21	.181
6	27.58	3.01	2.81	.641

ANOVA	F-value = 2.07, P=.201	F-value = 1.58, P=.238
-------	------------------------	------------------------

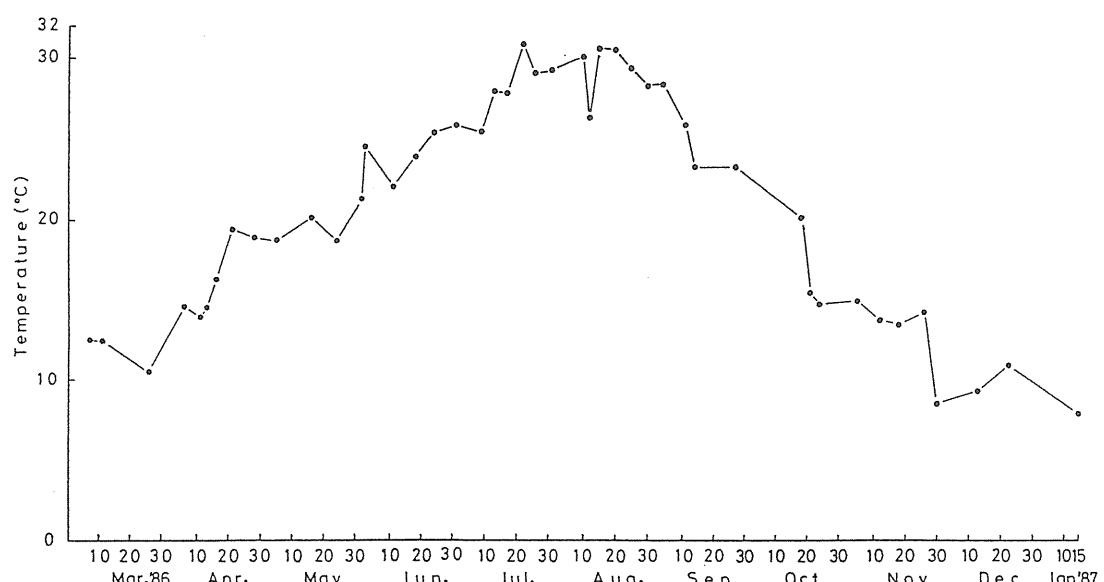
満潮時でも冠水しない場所の内60%がアシ原で残りが砂州とオニシバ・ハマサジ等の塩性湿原植物により占められていた。

* 塩分濃度：塩分濃度の年間変動は大きくほぼ0から30パーミルの間を変動するが（図A-2）、本年は台風が到来しなかった為、変動の時期は、淡水の流入の極端に増加する梅雨期（6・7月）に限られており、この時期河口域上流側は表層底層とともに（満潮時）塩分濃度はほとんど0パーミルに低下し、下流の底層で10数パーミルの汽水がみられるのみとなる。しかし、梅雨期をすぎると上流側の表層がやや低い塩分濃度を示す以外は殆ど海水とかわらない濃度を示していた。季節的に混合域の水平的な位置は変化するものの典型的な混合型の河口域といえる。



図A-2

* 泥温度：平均温度は、年間で8から30度の間を変動する。しかし、最高温度は河口域上流側の泥干瀬で約50度、下流側で45度まで上昇する（図A-3）。最低温度はほぼ0度まで低下する。また、日較差は最大で20度前後に及ぶ。



図A-3 Seasonal changes of the mean mud temperature in the study area from March' 86 to January' 87.

B) 一次生産者

＜海岸砂丘矯生低木群落＞ 植生立地のうちでも最も不安定な立地である海岸砂丘では木本類の生育は非常に困難である。海岸砂丘に分布する木本類はおおむね矯小化し、長い根茎を発達させてこのような環境条件に適応している。

⑤ハマゴウ群落： 海岸砂丘に分布する矯生低木は西南日本ではハマゴウがその主体となっている。ハマゴウは長い匍匐幹と枝を持ち、上記のような草本群落が侵入して砂の移動が低減し立地が安定化に進んだ場所に生育を広げていく。当該区間では右岸のコウボウムギ群落中やその後方部、流路中央の砂洲のやや標高の高い部分などに分布が見られる。調査植分では出現種はハマゴウの他にハマナデシコ・ハマヒルガオ10種の生育が確認されたが、ネズミムギ・ブタクサ・メドハギなどの河川区域外から侵入した代償植生の生育が目立つものとなっている。

3. 海岸断崖地植生：海岸部や河口域でも、砂の移動や海水の直接的な影響を受けないやや小高い風衝地や内陸域との境界部には丈の高いイネ科の種が帶状に密に分布している。

⑥ダンチク群落： 当該区間では右岸の河川敷内にある耕作地と水路部の境界の小崖の縁に沿って帶状に分布している。調査植分ではダンチクが100%の被度で密生した群落を形成しており、他の種はブタクサ・シロザ・カタバミ・ツユクサなど耕作地側から侵入したと思われるいわゆる雑草がごくまばらに生育している程度である。

⑦メダケ群落： 海岸風衝地のうちでも岩石の風化が進んで土壤層の厚い場所や、水辺に近く土砂の堆積が見られる富栄養な立地ではメダケが分布する。当該区間ではダンチク群落の分布する斜面下部低水敷部の河原に流路に沿って帶状に分布している。調査植分はメダケとネザサが混生し、これらが密生した群落を形成している。出現種は7種でこれら以外にヨシ・イタドリ・ノイバラなどが生育しているが、メダケ・ネザサが密生して地面を覆っているため被度はごく低い。

＜塩生湿地植生＞ 波浪の影響が少なくなる河口部では砂丘にかわって河川上流部からの土砂の運搬によって富栄養な泥土が厚く堆積した干潟が形成されている。このような立地には過度の水分条件と高い塩分濃度に適応した特有の植物群落が分布している。これらの植生はわずかな環境条件の差に応じて住み分けており、純群落を形成することが多くそれぞれに特有な分布形態を示している。当該区間では河口海岸部には砂丘が広がっているが、河川区域では流水辺は泥土が堆積して塩生地化しており、塩性湿地植生は調査区間では最も広い分布を示す植生となっている。

⑧ヨシ群落： ヨシは冠水や塩分などに対する耐性が高く、日本ではヨシは塩生湿地を含めて、湿生の立地には最も広い分布を示す植生である。ヨシ群落は砂泥質の底質を持つ河川下流域や池沼では卓越した植生であり、植生の復元力が強いため、河川改修等の人為的な攪乱をうけた二次的な立地でもいち早く侵入して群落を形成する。当該区間では中洲に大規模な群落が分布するほか各所に見られ、ヨシ群落は最も広範囲な分布を示す植生となっている。調査植分はほぼ純群落で100%の高い被度で地表を覆っている。

⑨ハママツナ群落： 干潟の中でも冠水頻度の高い流水辺付近にはハママツナがカーペット状の群落を

形成して地表を覆っているのが見られる。当該区間では中洲を中心にして各所に群落が見られ、その分布は砂丘部にまで及んでおり、ヨシに次いで広い分布を示す植生となっている。調査植分では出現種は3種であり、ハママツナのほか同じ塩生湿地植生であるハマサジ・ナガミノオニシバが生育しているのみである。

⑩ハマサジ群落： ハマサジもハママツナと同じく流水辺の干潟の植生であり、両種は混生していることが多いが、ハママツナでは砂礫の露出した立地により多く見られる。当該区間でもハママツナは流水辺の砂泥の堆積層の薄い砂礫地に主に分布している。調査植分では出現種は8種でありハマサジのほかホソバハマアカザが高い被度で生育している。また、この植分にはシロザ・ギシギシ・ケアリタソウなどの雑草のうちでも湿生地に見られる植生が生育している。

⑪ナガミノオニシバ群落： ナガミノオニシバ上記の2種に比べて冠水頻度の低い干潟後方部に分布する。生育立地はハマサジと同じく砂礫の露出地を適地としている。長い走出枝を出して繁殖するナガミノオニシバは地表を密に覆ってカーペット状の群落を形成する。当該区間ではナガミノオニシバ群落は中洲の流水辺のヨシ群落の外縁部と左岸堤防法尻の干潟にパッチ状の群落が見られる程度で分布は限られている。調査植分はほぼ純群落でハママツナ・ハマサジがごく低い被度で混じる程度であり、被度100%の密生した群落である。

⑫シオクグ群落： シオクグの立地は干潟部のヨシとほぼ共通しており、砂泥の堆積層のある冠水頻度の高い干潟前線部に分布する。当該区間ではシオクグの分布範囲は限られているが、概ねヨシ群落の前縁部に分布している。調査植分はヨシを交えているが地表部はシオクグに覆われており密な群落を形成している。

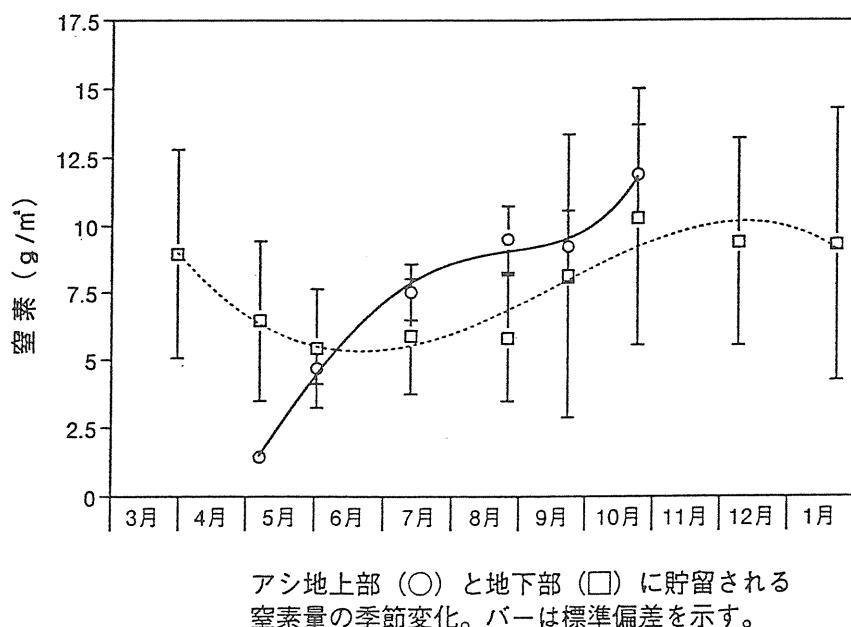
〈河辺冠水草原〉 河川敷に生育する植物群落のうちで、主として多年草本から構成される植生である。当該区間では中洲の中央部や区間上流部の潮汐の影響の見られない部分に分布が見られる。調査区間は河川最下流部の河口域であるが、典型的な急流河川であるため、河床にはこの区間まで砂礫の底質が見られ、本来河川中流域に分布するこれらの植生がこの区間にも見られる。

⑬ツルヨシ群落： ツルヨシは砂礫質の底質を持つ中～上流域の河辺に生育する植生である。ヨシに比べ環境耐性は低く生育範囲は流水辺にほぼ限られるが、発達した匍匐枝によって流水の強い物理的作用に抵抗して生育し、急流河川の多い日本の河川では卓越した植生の一つとなっている。調査区間ではツルヨシ群落は右岸河口域の砂丘後方部に小規模の群落が分布するのみである。この立地は本来海岸砂丘植生の生育の場であるが、群落に隣接してハリエンジュの植林地があり、立地の安定化が進んだため、このような立地にもツルヨシ群落が侵入したと思われる。調査植分では出現種は10種でツルヨシのほかにはコウボウムギ・ハマヒルガなど海岸砂丘植生が生育している。また、ツルヨシは本来の立地ではほぼ純群落を形成しており、これらの特徴から当該区間に見られる群落は非常に特異な分布形態を持つといえる。

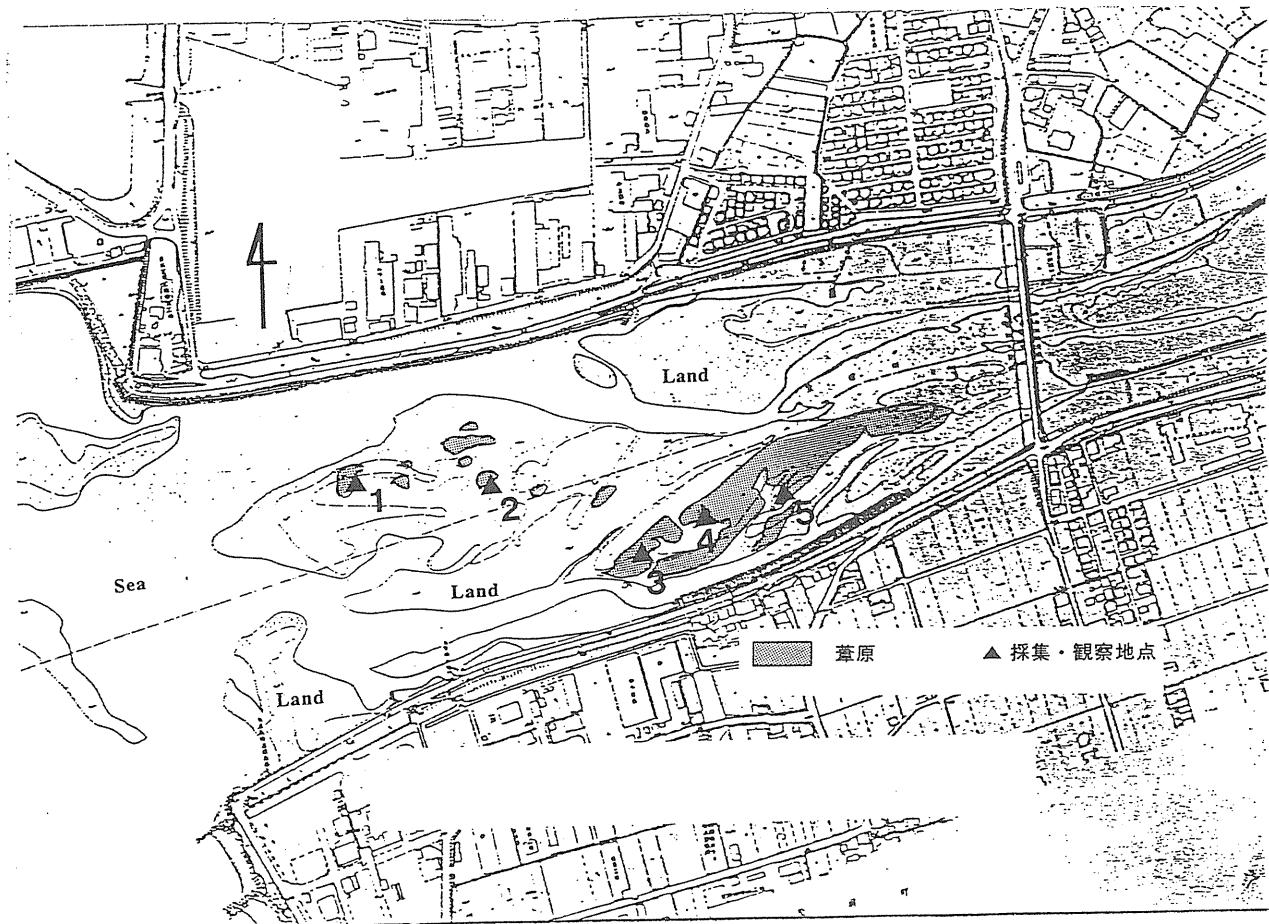
⑭オギ群落： オギは河川中～下流域の砂土の堆積地に分布し、流水の作用や冠水頻度の少ない河原後方部に卓越する植生である。そのため、ツルヨシとはかなり明瞭に分布域を違えている。オギは植生

の復元力が強く刈り取りなどの植生の破壊をうけた後も再び群落を回復し得る。当該区間では右岸区間上流部のおそらく旧堤防の名残りと思われる流路に沿ったやや小高い立地に分布する。調査植分では出現種は8種で、ツルヨシのはかヨモギ・クサヨシ・ギシギシなど湿性地の草本が生育しているが、比較的高い被度でヨシが混生している。

*アシ：アシの地上部は春の芽生えから秋の枯死期にかけて成長し、高さは平均で140cm、秋には茎密度56.5本／m²であり、地上部の現存量が最大になるのは10月で797gDW／m²、同様に地下部の現存量が最大になるのは同じく10月で721gDW／m²であった。また、葉及び茎の窒素含量は、5月にそれぞれ4.4%、3.4%であったが、次第に低下し、枯死期に達する10月には、それぞれ2.1%、1.1%となっていた。これに対し、地下部の根茎は3月に1.7%でその後減少し9月には1.3%程度となるが、12月には1.5%に回復する。これらのデータより単位面積当たりのアシ地上部及び地下部に貯留される窒素量を推定した（図B-1）。地上部に5月の時点で貯留されている窒素量は1.436 g／m²で、10月には11 g／m²まで増加する。地下部は、3月に9 g／m²だったのが、地上部の成長に伴い5月には5.4 g／m²まで低下した。その後増加して12月には9.35 g／m²になる。最終的に、地下部に移流されることなく、枯死体として地上部に貯留される窒素量は、11.04 g／m²/年となる。これは、河口域生態系からの窒素除去の一形態と考えられ、従来河床部の脱窒量として報告されている約20 g／m²/年の約半分程度で比較的大きな能力をアシ群落は持つと結論できる。また、重信川河口域でのアシ群落の分布面積は22,383m²であり（図B-2）、結果として、年間0.254 tの窒素を河口域より除去していることになる。



図B-1



図B-2 調査地（重信川河口域）葦原の総面積は22,383m²

C) 高次生産者

*ベントスの分布：マクロ・メガロベントスとしては、アシハラガニ、ヒメアシハラガニ、ハマガニ、オオユビアカベンケイ、ユビアカベンケイ、ケフサイソガニ、チゴガニ、ヤマトオサガニ、アナジャコ、ヤドカリ類、フジツボ類、ハマトビムシ科。ドロクダムシ科のミコエビ類、ゴカイ (*Neanthes japonica*)、イソミミズ、カキ、アサリ、クチバガイ、ウミニナ類、ホシムシ類、がこれまで定量調査で明らかになっている。

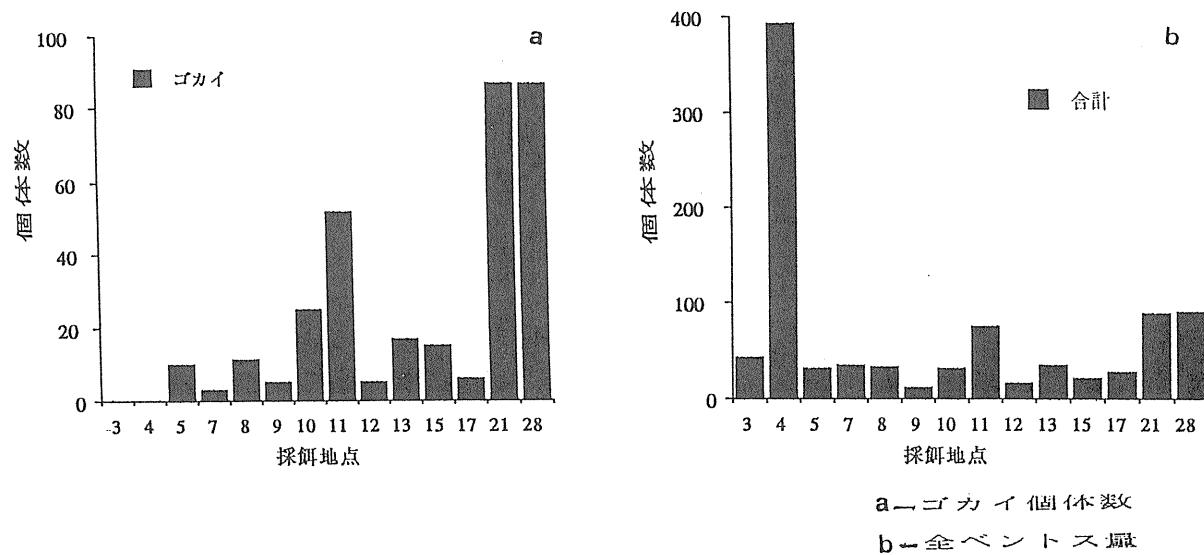
この内、アシハラガニ属2種とハマガニ、ケフサイソガニ、*Neanthes japonica*、イソミミズ、ウミニナ類の7種が河口域の生物量のほとんどを占める主な種といえる。アシハラガニは、河口域の潮間帶上部も含めた全域に分布するが、下流側は密度が低下する。これに対し、ヒメアシハラガニの分布はウミニナ類とともに下流側の潮間帶下部で含水率の高い泥干潟に限定されていた。ハマガニの分布は、アシハラガニと重なるが、より陸側にシフトしている。また、ケフサイソガニの分布は、干潮時でも冠水としている砂れき・転石底に広くわたっていた。*Neanthes japonica*は、ヒメアシハラガニとケフサイソガニの分布に重なる形で分布していた。イソミミズは、冠水していない砂れき・転石浜、または、潮間帶の泥質部分に出現した。

特にシギ類の摂食場所との関係で春・秋・冬の三期に渡りベントス定量調査を行った。春期は干潟内

の合計16地点にて採集を行った。ゴカイ、その他の多毛類・貧毛類、カニ類、ヨコエビ類が多数を占めた（表C-1）。全体の個体数としては、地点4、11、21、28が多く、特に地点4に関してはそのほとんどがヨコエビ類であった。地点11、21、28では、ゴカイがその多くを占めた。ヨコエビ類を除けば河口付近よりも上流側の地点でベントス量が多い（図C-1）。秋期は28地点にて調査を行った（表C-2）。春期と比較して、ホトトギスが地点4、7、8、10において急激に増加している。そのため全個体数で多い地点のほとんどがホトトギスの影響である。ゴカイについては地点7、9、12、14、23で多くなっている。春期に多かった地点11、21、28で急激に減少している。全体として、上流側より河口付近の方がベントス量が多くなっており、春期と全く逆になつてゐる（図C-2）。冬期も同様の結果が得られている（表C-3）。

表C-1 ベントス採集（春）

採集地点	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	15	17	21	28
ペントス	Neanthes japonica	0	0	10	3	11	5	25	52	5	17	15	6	87
個体数	Polychaeta other	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Oligochaeta	0	7	2	1	1	1	1	9	3	0	21	0	0
	Musculus senhousia	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Crassostrea gigas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bivalvia	1	0	4	1	2	0	0	1	0	1	0	0	0
	Batillaria multiformis	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Niotha livescens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Gastropoda	0	25	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	Brachyura	3	1	0	0	5	1	1	1	5	2	0	0	0
	Gammaridea	0	358	9	22	8	2	3	12	1	8	5	1	2
	Balanus reticulans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Gnorimosphaeroma rayi	0	3	2	6	0	0	0	7	0	0	0	0	0
	Pagurus geminus	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Upogebia major	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
	Laomedia astracina	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sipunculoidea	8	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Gobiidae	0	0	0	0	4	0	0	1	0	0	0	1	0
	合計	44	394	32	35	33	11	31	75	17	35	22	29	89
														91

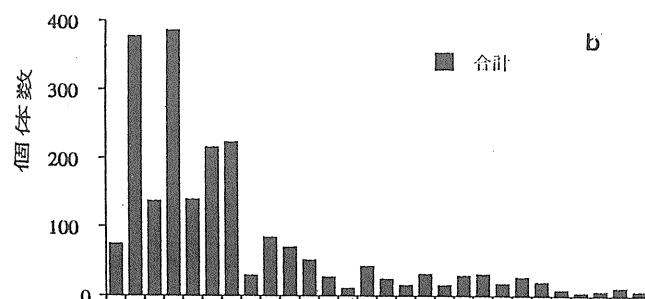
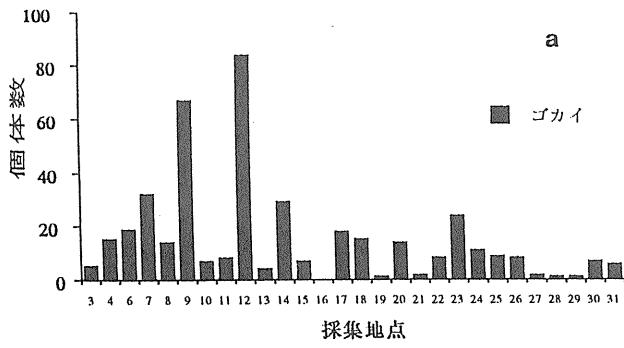


図C-1 ベントス個体数（春期）

表C-2 ベントス採集(秋)

採集地点	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ベントス 個体数											
<i>Neanthes japonica</i>	5	15	19	32	14	67	7	8	84	4	29
Polychaeta other	13	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Oligochaeta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1
<i>Musculus senhousia</i>	0	353	91	300	108	52	178	2	1	12	0
<i>Crassostrea gigas</i>	0	0	0	0	3	0	16	5	0	12	0
Bivalvia	0	7	18	11	1	2	6	1	0	1	0
<i>Batillaria multiformis</i>	35	0	0	24	0	81	0	0	0	0	1
<i>Niotha livescens</i>	0	0	0	16	0	8	8	0	0	0	0
Gastropoda	1	1	3	0	1	0	0	4	0	6	0
Brachyura	2	0	1	2	13	1	3	6	0	31	22
Gammaridea	1	0	0	0	0	1	2	0	0	3	0
<i>Balanus reticulatus</i>	0	0	4	0	0	0	0	3	0	0	0
<i>Gnorimosphaeroma rayi</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pagurus geminus</i>	12	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
<i>Upogebia major</i>	1	0	0	0	0	3	1	0	0	0	1
<i>Laomedia astacina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Sipunculoidea</i>	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Gobiidae	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	75	377	138	386	141	216	223	29	85	71	54

15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
7	0	18	15	1	14	2	8	24	11	9	8	2	1	1	7	6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	12	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	18	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	5	9	13	13	3	17	1	6	16	6	5	3	5	0	1
1	0	0	0	0	0	1	0	4	0	0	3	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	1	1	4	2	0	0	2	1	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	12	43	25	17	32	15	30	32	18	28	20	9	4	6	12	8



図C-2 ベントス個体数(秋期)

表C-3 ベントス採集(冬)

採取地点		1	3	4	5	6	7	9	17	28
ベントス	<i>Neanthes japonica</i>	0	4	40	12	31	110	83	1	5
個体数	Polychaeta other	4	1	1	0	2	0	1	0	0
	Oligochaeta	0	0	0	4	0	0	0	2	0
	<i>Musculus senhousia</i>	3	0	67	1	219	690	0	0	0
	<i>Crassostrea gigas</i>	0	0	0	22	1	4	0	0	0
	Bivalvia	5	0	83	10	20	6	1	0	0
	<i>Batillaria multiformis</i>	1	135	1	1	1	9	44	0	0
	<i>Niotha livescens</i>	1	0	1	0	7	1	0	0	0
	Gastropoda	0	0	0	10	5	6	0	0	0
	<i>Brachyura</i>	0	0	2	3	7	11	2	2	0
	<i>Gammaridea</i>	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	<i>Balanus reticulatus</i>	0	0	0	20	2	1	0	0	0
	<i>Gnorimosphaeroma rayi</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Pagurus geminus</i>	0	2	0	0	1	0	0	0	0
	<i>Upogebia major</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Laomedea astacina</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Sipunculoidea</i>	0	1	0	1	1	1	0	0	0
	<i>Gobiidae</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	合計	14	144	195	85	298	840	137	5	5

* アシハラガニ属 2 種の成長について、野外データ及び実験データの解析を行った。アシハラガニは、今年の春に定着した個体が甲幅12–13mmに達しているのと比較して、ヒメアシハラガニは、10–11mmとやや成長が遅い。しかし、翌年春には後者の多くの個体が産卵に参加するようになるとの比較してアシハラガニは2年目の春より産卵に参加するようになる。また、平均寿命については、アシハラガニが7–8年、ヒメアシハラガニが3–4年と大まかにではあるが推定された。

* アシハラガニ・ヒメアシハラガニ・ハマガニの日周期活動：アシハラガニ及びハマガニにおいて、春から秋にかけて、特に夏期に顕著な日周的水平移動、つまり、夕方から夜明けにかけて巣穴のあるアシ原から近接した川岸への移動がみられた。巣穴の分布する場所と川岸との底泥のC N含量、クロロフィル量等の栄養条件、最高最低泥温、含水量を比較し、日周期的移動の程度との関係をみたが、最低泥温が20度を上回ると活動性があがるという以外は系統的な関連はみられなかった。活動の最盛期に移動個体と非移動個体との胃内容を比較したところ、移動個体のみにゴカイ等の動物性の組織がみられた。このことより、何らかの理由により夏期にアシハラ内の栄養条件が悪化してその補完のために川岸まで摂食のために移動していると考えられる。

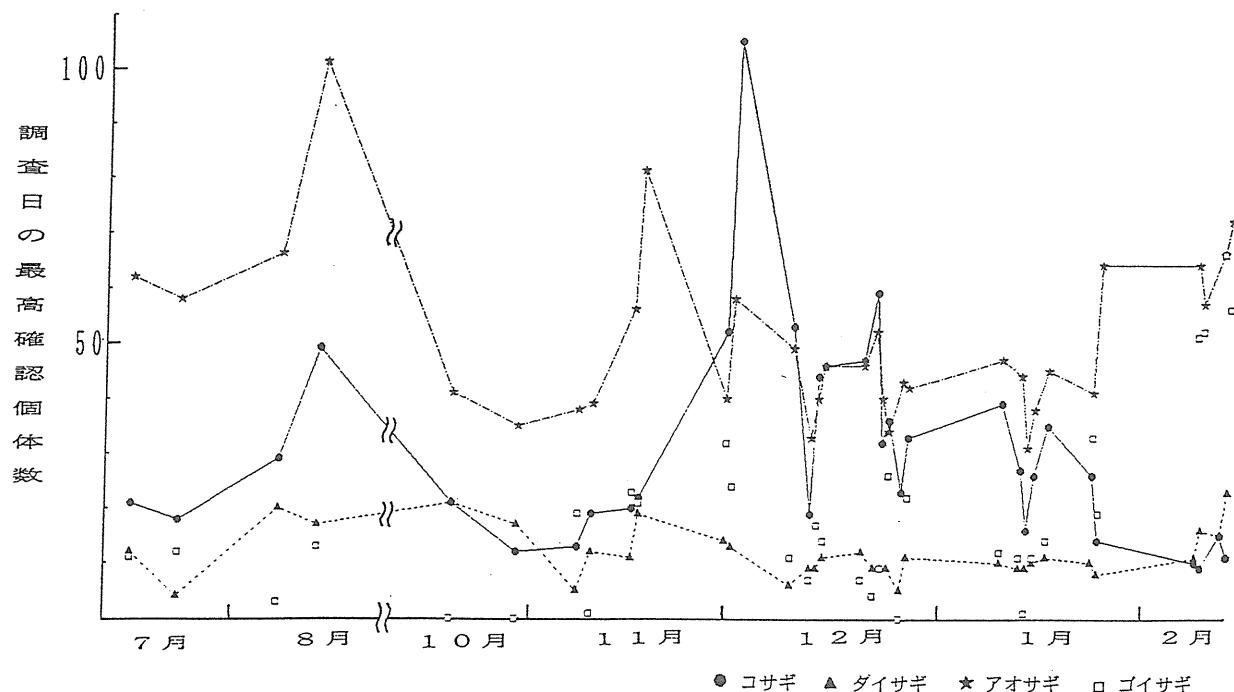
* 魚類群集：周年定住種としてチチブ (*Tridentiger obscurus*)、ヌマチチブ (*T. kuroiwae*)、シモフリシマハゼ (*T. bifasciatus*) のチチブ類、また、ビリング (*Chaenogobius castaneus*)、マハゼ (*Acanthogobius flavimanus*)、アシシロハゼ (*A. lactipes*)、ミミズハゼ (*Luciogobius guttatus*)、ヒメハゼ (*Favonigobius gymnauchen*) 等のハゼ類がみられた。これに対し、稚仔魚期を汽水域で過ごす季節定住種がいる。スズキ (*Lateolabrax japonicus*)、マゴチ (*Platycephalus indicus*)、イシガレイ (*Platichthys (Kareius) bicoloratus*)、クサフグ (*Takifugu niphobles*)、クロダイ (*Acanthopagrus schlegeli*) 等がそれにあたる。また、産卵期に河口域に現れるものとしてアカオビシマハゼ (*Tridentiger trigonocephalus*) がいる。更に、ウナギ (*Anguilla japonica*) も出現した。偶来種として、表C-4に挙げた海産種で13種、淡水種で4種が採集された。

表C-4 重信川河口域での投網により採集された魚種

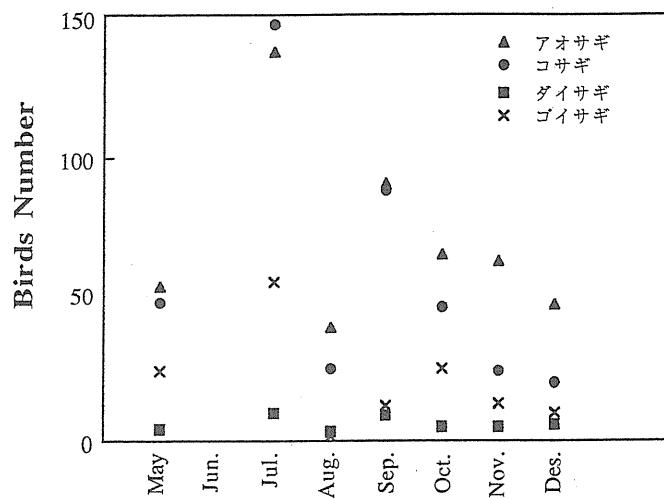
周年定住種 稚仔魚期	季節定住種 稚仔魚期	産卵期	産卵期以外	偶来種 海産	淡水産
ヒメハゼ	スズキ	アカオビシマハゼ	ウナギ	ニシン科	オイカワ
チチブ	クロダイ			サヨリ科	ウグイ
ヌマチチブ*	コチ			アジ科	フナ属
シモフリシマハゼ	イシガレイ			ヒイラギ科	ブルーギル
ビリング	クサフグ			シマイサキ (キチヌ)	
マハゼ				ウミタナゴ科	
アシシロハゼ				シロギス	
ミミズハゼ				ネズッポ科	
				アイナメ科	
				ヒラメ科	
				マコガレイ	
				カワハギ科	

* : おもに淡水に生息

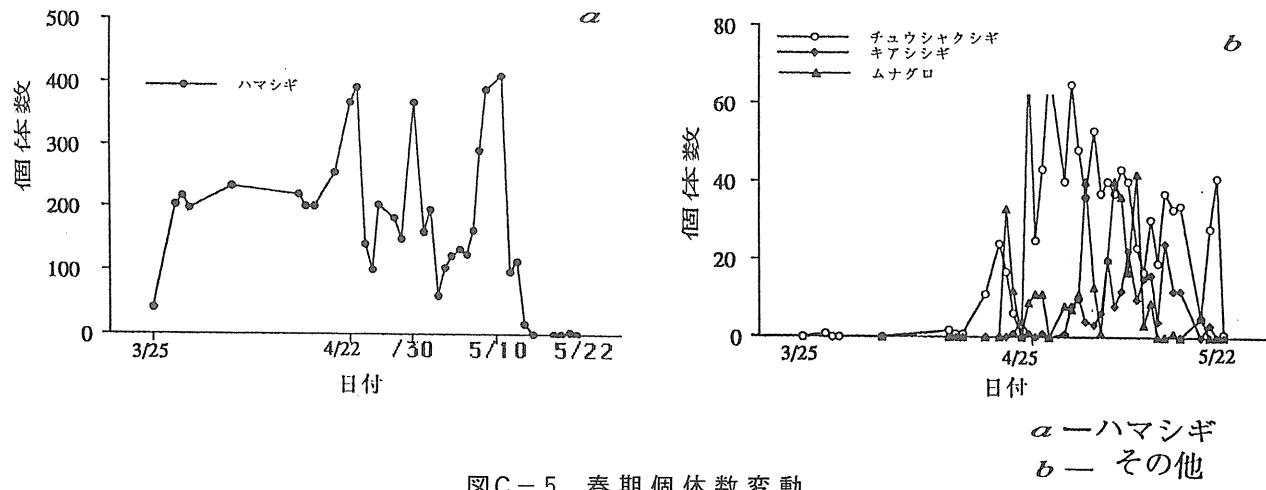
* 鳥類群集：サギ類では、コサギ・アオサギがほぼ周年に渡り河口に出現した（図C-3、4）。ガンカモ類は、ヒドリガモ・オナガガモが10月から翌年4月まで、また、マガモ・コガモが冬期に出現していた。チドリ類では、シロチドリ・ムナグロ・ダイゼン・コチドリが6、7月を除くほぼ周年出現した（図C-5、6）。シギ類では、ハマシギが6、7月を除くほぼ周年にわたり出現した。ソリハシシギも同様のパターンであったが個体数は少なかった。キョウジョシギ・トウネン・チュウシャクシギは、渡り鳥として4、5月と8月から10月にわたり出現した。カモメ類ではウミネコが周年多数が出現していた。ユリカモメ・セグロカモメ・カモメが10月から翌年4月まで出現した。アジサシ・コアジサシは、4月から10月まで出現した。また、ワシタカ類では、トビが周年出現した。



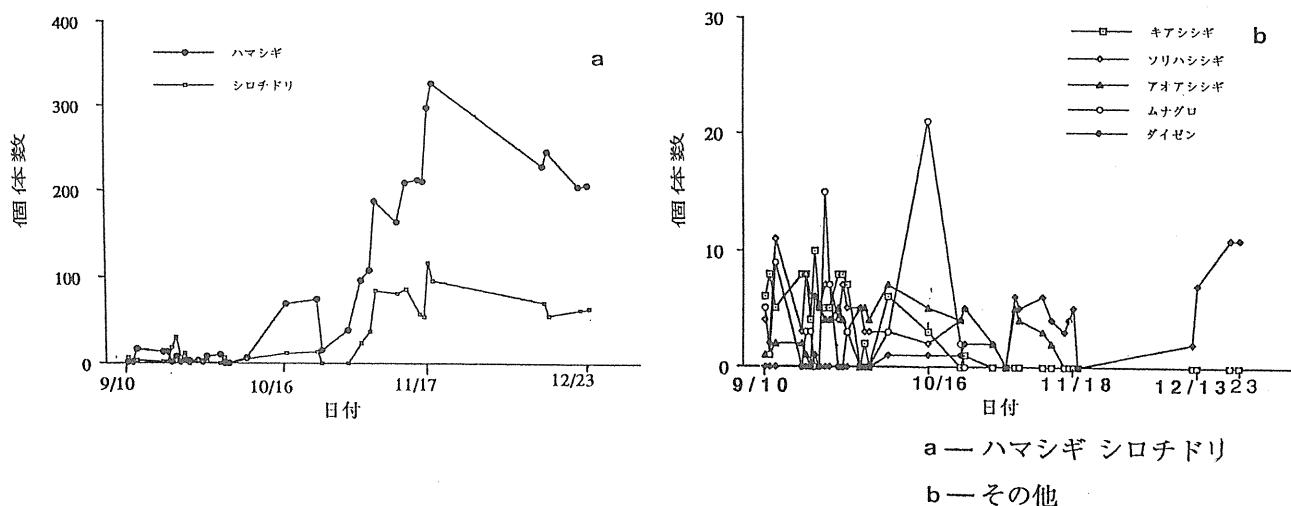
図C-3 サギ4種の個体数変動



図C-4 サギ4種の個体数変動 (1993)



図C-5 春期個体数変動



E) 各要素間の関係

<同位栄養段階における種間相互作用>

*アシハラガニとヒメアシハラガニとは同属の近縁種であり強い種間相互作用が予測できた。また、分布に関しても大まかには重なり合うものの上記したように前者はより上流・高潮位高側に、後者は下流・低潮位高側にシフトしており、また、低潮位側に分布するアシハラガニは大型の個体が多いこと等から、両種間に相互作用の存在が示唆される。この事から、ケージによる実験を野外において行った。甲幅が10mm以下だとヒメアシハラガニがアシハラガニより強く、同じケージに閉じ込めておくと後者は捕食されてしまう事が解った。また、甲幅が10mmをこえると強さはほぼ対等であった。また、ケージ内の底質の量を変化させると捕食率が変化し、野外では生息空間の広がりからこの相互作用はある程度緩和されていることが示唆された。緩和は、特にサイズ差が大きくなると顕著にあらわれ、相互作用にsize refugeが存在することがわかった。また、この両種間の相互作用はsize-dependentなreciprocal predationと規定することができた。

<異なる栄養段階における相互作用>

*ハマガニによるアシの摂食：アシハラガニ及びハマガニの日周期活動性の調査の過程で、夕方の薄暗がりになるとアシハラガニと同様に川岸へと移動するハマガニ個体も多くみられたが、それと同頻度でアシに登りその生葉を直接摂食する個体もまた観察された。その活動周期などの調査はまだ行っていないが、アシに対する食害の程度について大まかな推定を行った（表E-1、2、3）。ハマガニによる食害のないアシの生葉の乾燥重量は一枚あたり399mgであった。ところが、食害を受けたものは302mgであり、全体の平均347mgから考えると葉の現存量の約1割以上が食害されたことになる。これは、アシの枯死体化による河口域生態系からの窒素の除去作用に対し負の効果を持つ可能性がある。しかし、ハマガニにとっては、黄葉となり落葉したのちに食するよりも生葉のほうがその2倍も窒素分を含んでおり（表E-1）栄養摂取効率が高い適応的な行動だと思われる。また、アシハラガニ・ハマガニの川岸の周期的な移動を行う個体は甲幅20mm以上の大型個体のみであるが、ハマガニのアシ摂食個体も大型個体に限られていた。ここでも川岸への移動の場合と同じく高温期にエネルギー収支

表E-1 1995年11月6日に採集した同一ヨシ個体の緑葉、黄葉、枯葉における炭素濃度と窒素濃度。炭素濃度では緑葉と枯葉に有意な差が認められた。窒素濃度では緑葉と黄葉、緑葉と枯葉の間に有意な差が認められた。その他の項目間においては有意な差は見られなかった。（P<0.05,ts-test）

	緑葉	黄葉	枯葉
炭素濃度 (%)	42.88	42.75	41.375
SD	0.44	0.68	0.365
窒素濃度 (%)	2.11	1.13	1.105
SD	0.01	0.02	0.035
n	4	4	4

表E－2 1995年10月23日採集のヨシの葉（1.25m²）におけるカニの食害のない葉と食害を受けた葉の枚数。合計は743枚。

	食害のない葉	食害を受けた葉
枚数	455	288
全体に対する割合 (%)	61.24	38.76

表E－3 カニによる食害のない葉と食害を受けた葉、平均的な葉の長さと一枚あたりの乾燥重量。葉の長さでは食害のない葉と食害のある葉において有意な差が認められた。（P<0.05, t-test）

	食害のない葉	食害を受けた葉	平均的な葉
葉の長さ (mm)	318.38	274.16	295.48
SD	73.55	90.28	87.19
一枚あたりの乾燥重量 (mg)	398.55	301.78	346.89
SD	23.89	81.68	71.24
n	455	288	743

の悪化に対する、その移動能力の高さを利用した大型個体ならではの解決法と推定される。ただ、ここで同じハマガニの中で川岸に移動する個体とアシに登り摂食する個体とが同時に存在することである。同じ個体がこの両方の採餌方法をとるのかどうかは明らかではないが、両者間での栄養摂取効率等の違いを明らかにする必要がある。

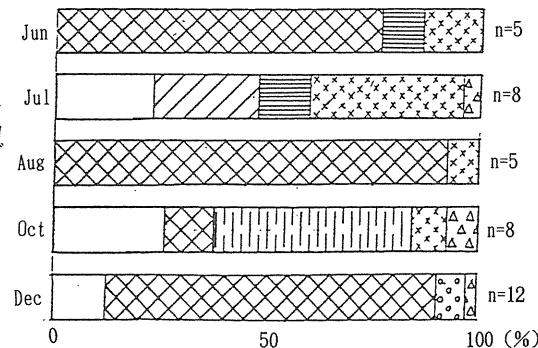
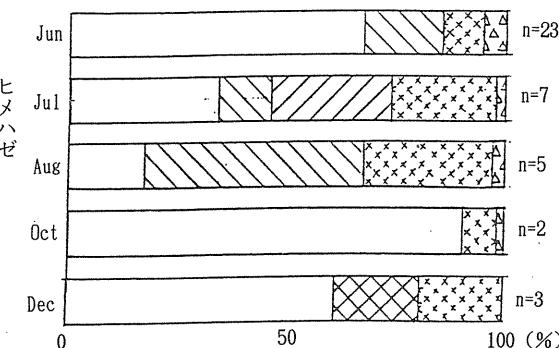
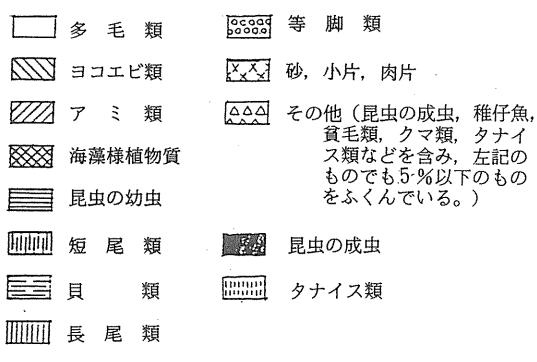
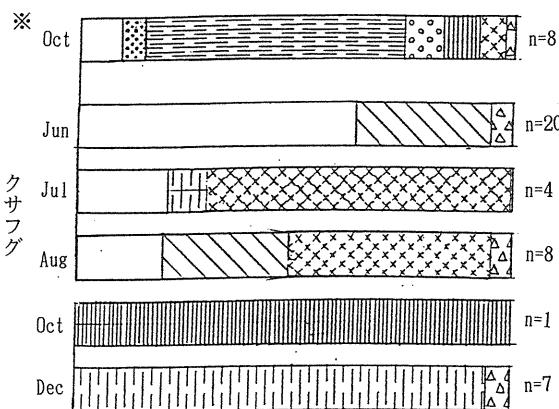
*主だった魚種（クサフグ、クロダイ、ヒメハゼ）のベントス捕食について胃内容分析により検討した（表E－4、図E－1、2）。クサフグは、春夏期には、主に、多毛類を食べているが、冬期は、そのころ甲幅10mm前後となったカニ類の当年定着個体を多く摂取している。また、貝類を摂取していることが特徴的である。クロダイ（標準体長 10cm前後までの個体）は、春夏期には、多毛類、アミ類、昆虫の幼虫等を、冬期になると多毛類とともにやはりカニの当年個体を多く摂食しているが、全般的に藻類食となっている。ヒメハゼは、主として多毛類を摂食しているが、小型個体は冬期藻類等も摂食している。夏期にヨコエビ・アミ等の小型甲殻類を多く摂食していた。これらの結果から、ベントスの中でもやはり生物量の多い優占種が全般的に摂食されていること、また、ベントス種の季節的消長もある程度反映されていることが明らかとなった。

表 E - 4

月別の3魚種ごとの胃内容物

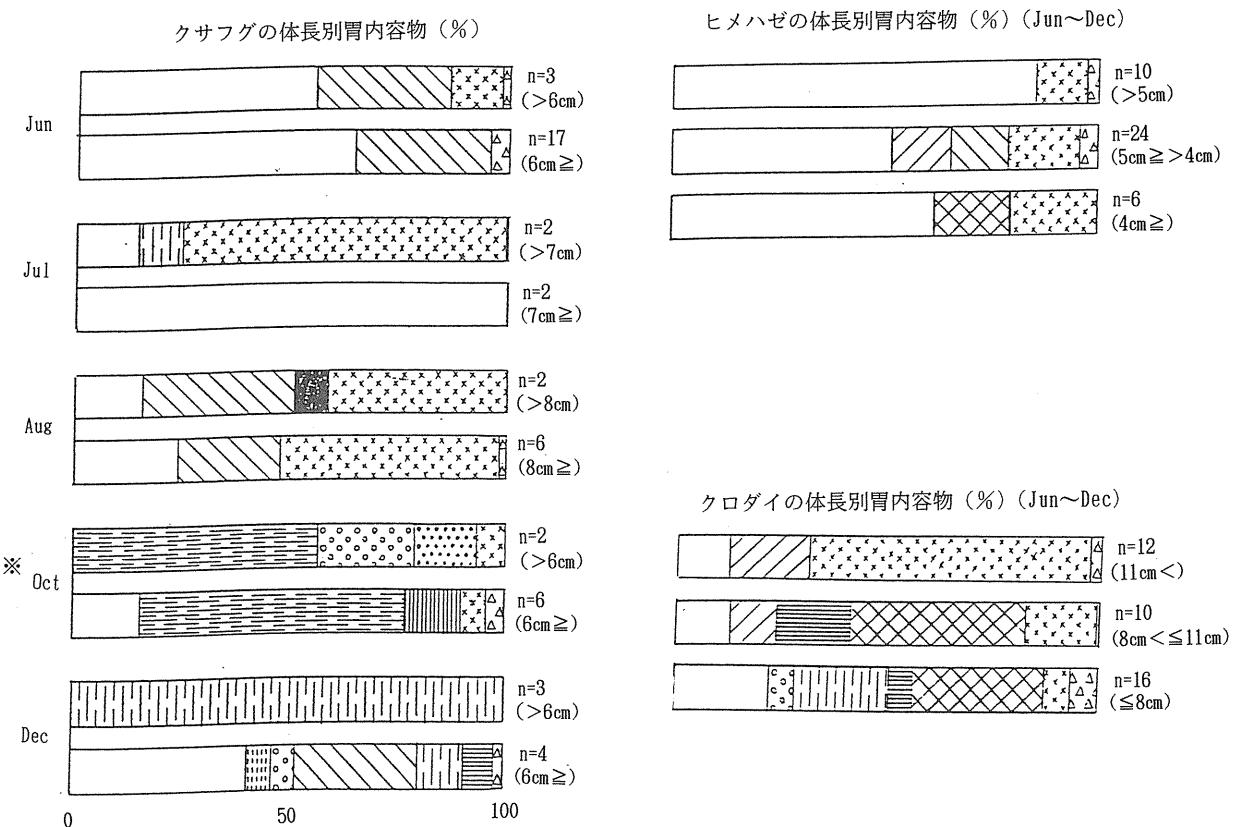
	総胃重量	貝類	多毛類	貧毛類	アミ類	クマ類	タナイス目	等脚類	ヨコエビ類	長尾類	短尾類	昆虫の幼虫	昆虫の成虫	稚仔魚	魚類	植物類	砂、肉片等
June	クサフグ (n=20)	1.2027 100.00	0.7691 63.35	0.0004 0.03				0.0007 0.06	0.3835 31.89	0.0004 0.03		0.0003 0.02	0.0001 0.01	0.0001 0.01	0.0024 0.20	0.8457 3.81	
	ヒメハゼ (n=23)	0.0873 100.00		0.0592 67.81	0.0028 3.21				0.0015 1.72	0.0156 17.87						0.0082 0.39	
	クロダイ (n=5)	0.8180 100.00										0.0612 9.90			0.4717 76.33	0.0851 13.77	
July	クサフグ (n=4)	1.49362 100.00	0.3556 20.95						0.0033 0.19	0.1506 8.88						1.1867 69.36	
	ヒメハゼ (n=7)	0.0850 100.00		0.0290 34.12	0.0236 27.76				0.0103 12.12	0.0107 2.00						0.0204 24.40	
	クロダイ (n=8)	3.7529 100.00	0.8606 22.93	0.0925 2.46	0.9230 24.59					0.4542 12.10					0.0626 1.3593	1.2593 36.2%	
August	クサフグ (n=8)	2.3046 100.00	0.4576 19.85						0.6650 28.86	0.0072 0.31	0.0871 3.78	0.0120 0.52				1.8757 46.58	
	ヒメハゼ (n=5)	0.0172 100.00		0.0030 17.44					0.0087 50.58		0.0005 2.91					0.0050 29.07	
	クロダイ (n=5)	2.1229 100.00	0.0002 0.01		0.1865 6.73										0.0026 11.21	1.9362 31.21	
October	クサフグ (n=1)	0.0260 100.00							0.0260 100.00								
	クサフグ (n=8)	0.3076 100.00	0.2300 53.34	0.0377 9.73				0.0326 8.41	0.0014 0.36	0.0320 8.26	0.0086 2.22	0.0003 0.08	0.0211 5.44		1.0239 6.17		
	ヒメハゼ (n=2)	0.0561 100.00		0.059 26.14				0.072 0.72	0.07 0.70				0.0009 1.50		0.3043 7.56		
	クロダイ (n=8)	0.5013 100.00	0.1572 26.14		0.0165 2.74	0.0058 1.13		0.0043 0.72	0.0004 0.07	0.0042 0.70	0.2815 46.32	0.3055 0.91	0.0065 1.08		0.0535 11.56	0.0483 8.12	
December	クサフグ (n=7)	0.7976 100.00	0.0193 2.42					0.0028 0.35	0.0027 0.34	0.0138 1.73	0.7549 94.65	0.0033 0.41			0.0008 0.10		
	ヒメハゼ (n=3)	0.0411 100.00		0.0253 61.56											0.0081 19.71	0.0077 18.73	
	クロダイ (n=12)	1.1512 100.00	0.1180 10.25					0.0081 0.70	0.0789 6.85	0.0109 3.02	0.0048 0.05	0.0006 0.05			0.8993 78.17		

* : 胃内容物を示す。



※腸内容物を示す。n : 実際に胃内容物の入っていた個体数

図 E - 1 全胃内容物湿重量に占める割合



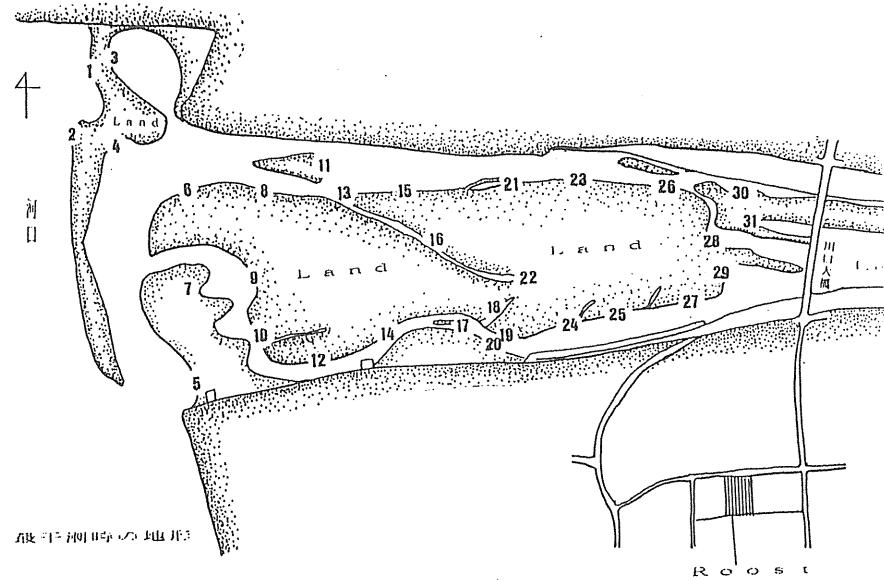
※腸内容物を示す。

図E-2

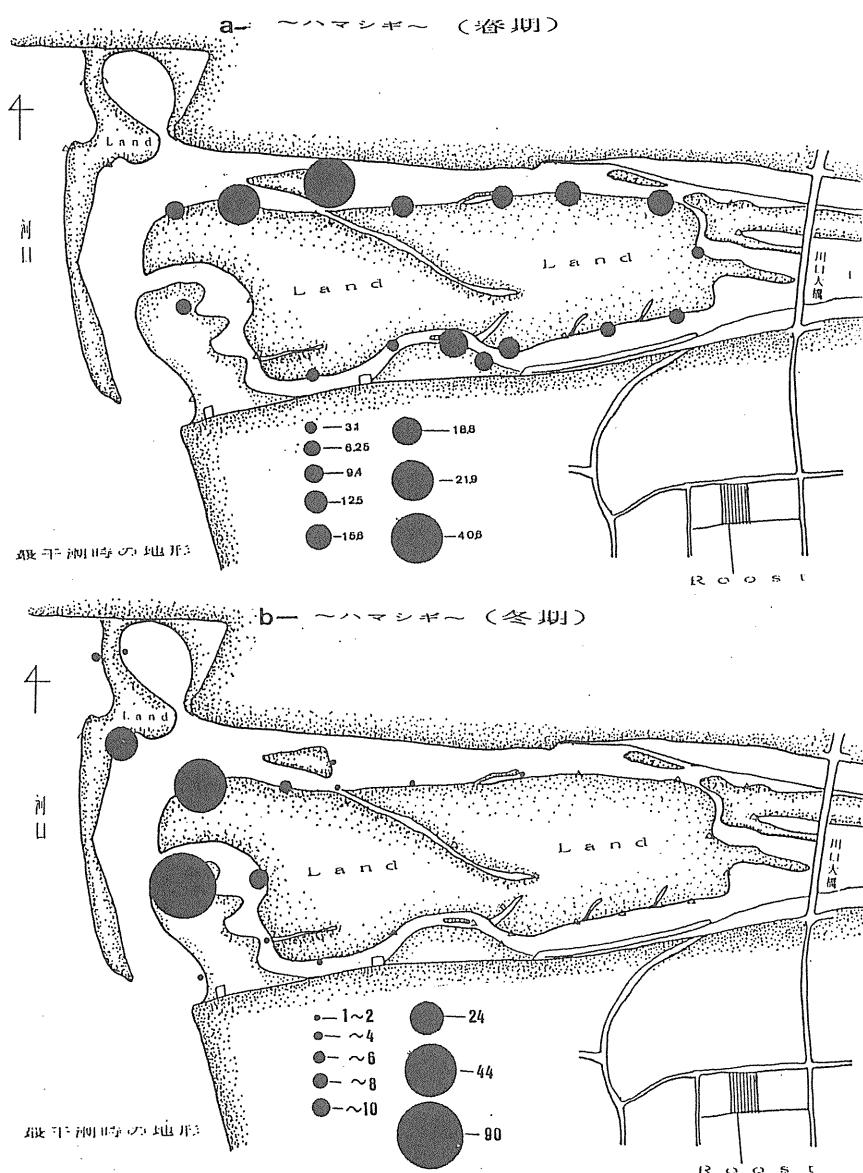
*鳥類もその多くが河口で餌を取っている。チドリ類に属するムナグロの摂食生態を調査した。その結果、多毛類を多く摂食していることが明らかとなった。大まかにはゴカイ類の多い場所で摂食しているもののその場所内では、ゴカイの密度とミクロな摂食場所との強い相関は見られなかった（ある程度の相関は見られた）。それは、ゴカイの動きんちょうじを見ることによってゴカイを見つけ摂食するムナグロの摂食方法との関係から、単にゴカイの密度の高いところでというのではなく浅く冠水していてゴカイ活性の高い場所で摂食していることの結果といえる。

*ハマシギの摂食生態：本種は、高密度な集団を形成して摂餌を行っていた。満潮時には採餌ができないので休息しており、引き潮から干潮時にかけて採餌を行っていた。4月から12月にかけての調査から（図E-3）、ハマシギの摂餌地点が季節的に大きく変化する事が明らかとなった（図E-4）。

春期：この時期ハマシギは、河口大橋に近い上流側地点28-31でかたまって満潮を迎える。満潮時にはほとんどが休息状態にあるが稀に他個体が休息している横で数羽が摂餌しているところも観察された。また、本調査地においてムナグロが干潟外にねぐらを持っていることが既に観察されている（加藤、1993）ことから、ハマシギについても調査したところ、観察期間の5月上旬に干潟外で本種がムナグロとともに休息している休耕田を発見した。満潮時にはこのねぐらでかたまって休息している。そして、最満潮時から約3時間ほど経過すると移動を始める。干潟において、潮が引くに従い少しづつ河



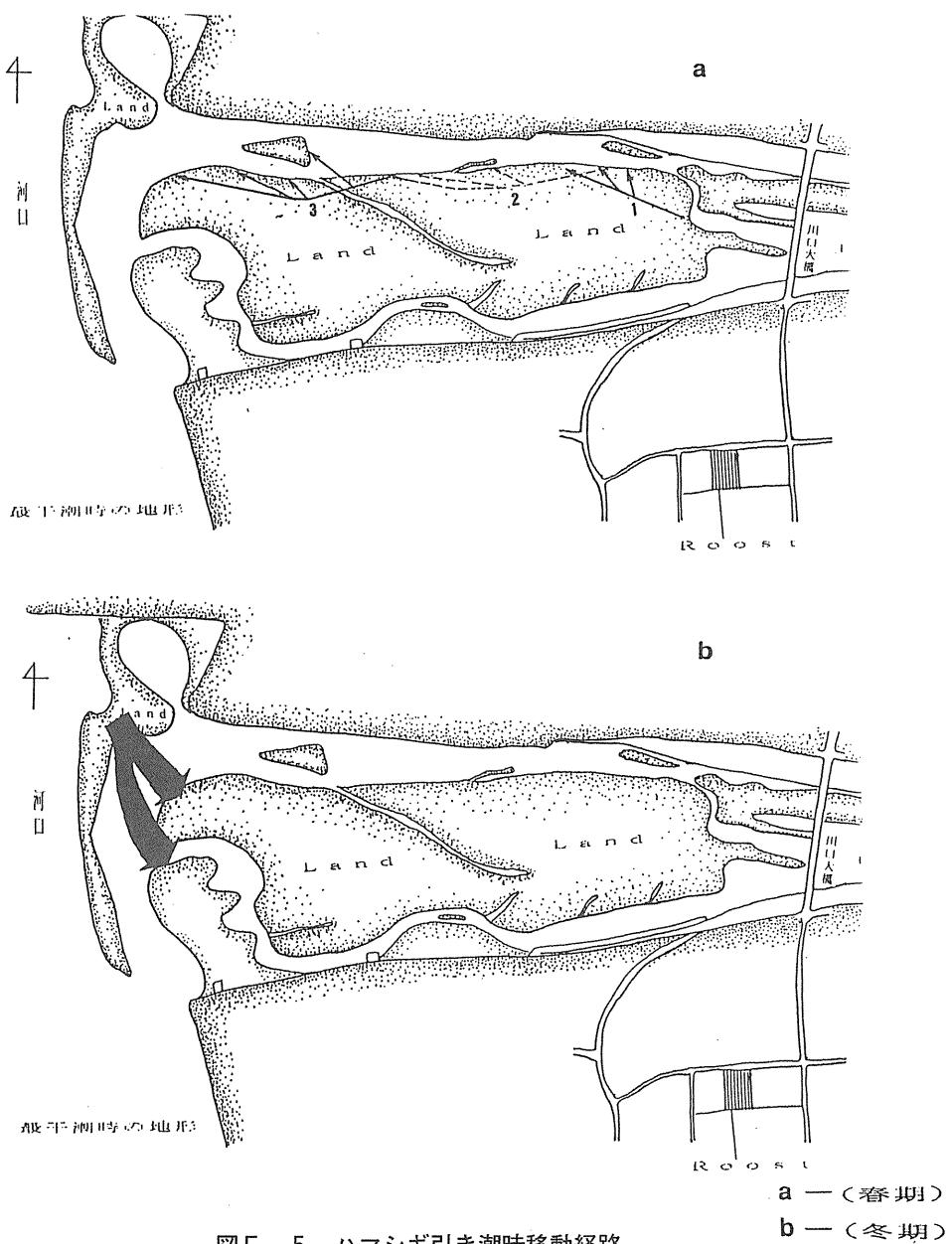
図E-3 ベントス採集地点及び採餌地点ナンバー



図E-4 干潮時の採餌数平均

口方向に向かって採餌しながら移動を行う（図E-5）。満潮時から引き始め2時間ほどでは地点26、28で多い。汀線に沿って採餌していくため休息時にはかたまっていた群が広っていく。最干潮時には河口に近い地点6、8、11、13、7で採餌を行う。

冬期：春期に利用していた上流側地点では採餌個体はほとんど観察されなかった。満潮時には河口の海に面した地点1、2でかたまって休息しているのが観察された。その後、最満潮時から3時間ほど経過すると河口に近い地点3-9に移動し採餌を始める。多くが地点9に移動しその場で休息して次第に摂餌し始める。干潮時にはこの地点間を小移動し採餌を続ける。最初に地点9点が干出したのち、地点6、8が、次に地点4、5、7が干出する。ハマシギの採餌のための移動もほぼこの順序に従っている。しかし、地点6、7、4といった地点で採餌時間の最後まで残っている。地点5については、人が多く訪れることから採餌はあまり観察されなかった。冬期は全採餌時間が春期より短いが、この



図E-5 ハマシギ引き潮時移動経路

ことと冬期の方が必要エネルギー量が増加するということとは矛盾する。これは夜間の採餌を考慮していないためと考えられる。夜間の採餌について、予備的な調査を行ったが、確かに採餌個体が観察された。

以上のことから、ハマシギの採餌は干出直後の汀線に沿っていることがわかった。このことは餌生物の活動性と関係していると考えられる。このことは、ムログロでの結果と一致する（加藤、1993）。

採餌の細かい内容を明らかにするために冬期個体追跡を地点4、6、7、9において行った。餌内容はわかりにくかったが、判別できたものだけ記録した（表E-5）。地点6では、カニを5分間に必ず1個体は捕獲している。しかし、他地点では全くカニの捕獲はみられなかった。また、地点9では観察期間中一度も捕獲自体が観察されなかった。地点9は満潮後約3時間後に最初の採餌に飛来する地点なので、最干潮時には採餌に適さない可能性が考えられる。また、地点6は採餌継続時間が他地点に比べて長いことも観察されており、高い餌捕獲率が期待される地点を選んでいることが示唆される。5分間のつつきの回数は平均288回で地点間似大きい違いはなかった。また、本地点では探し食のみが観察された。

表E-5 ハマシギ採餌内容

Point No.	つつき回数	ゴカイ	カニ	貝	不明
No.4	320	1	0	2	7
	282	0	0	0	0
	300	1	0	0	1
	平均	300	0.7	0	0.7
No.6	268	0	1	0	1
	133	0	1	0	1
	236	0	1	0	0
	327	0	1	0	3
	311	1	1	0	0
	平均	255	0.2	1	0
No.7	215	0	0	1	2
	356	0	0	0	3
	264	0	0	0	2
	平均	278	0	0	0.3
No.9	331	0	0	0	0
	300	0	0	0	0
	324	0	0	0	0
	平均	318	0	0	0

/5分

*その他のシギ類： ハマシギ以外のシギ類は全体数が少ないので、あまり明らかな傾向はみられなかった。しかし、チュウシャクシギについて、地点6、8、11で多く観察された。次に多かったのは、地点7、9、10、13、14、21であった。ハマシギと比較して河口に近い地点での採餌が多く汀線沿いよりは、川の流れの中に入り胸まで水に浸かって採餌しているのが観察された。また、チュウシャクシギは、カニを優先的に採餌している（表E-6）。キアシシギは春期に地点6、20、21、26で採餌がみられた。しかし、採餌場所は秋期には地点17、19、26がほとんどで、地点6、21ではほとんど観察されなかった。これはハマシギとは全く逆の傾向であった。キアシシギは、汀線沿いと言うよりは

流れの中に胸まで浸かって採餌しており、餌生物が異なる可能性がある。キアシシギとほぼ同じ大きさのソリハシシギも同じ傾向がみられる。

表E-6 チュウシャクシギ採餌内容

Point No.	つつき回数	カニ	不明
No.8	14	3	
No.14	3	16	
No.17	14	5	
No.21	15	6	
206	3	0	

/ 10分

* サギ類：鳥類の中でも周年定着して河口域を一つの主要な餌場としているサギ類（多くは魚類を摂食している）についても摂食生態について調査を行った。重信川河口域生態系では、4種のサギ類、アオサギ (*Ardea cinerea*)、コサギ (*Egretta gazzetta*)、ダイサギ (*E. alba*)、ゴイサギ (*Nycticorax nycticorax*) が最高次消費者となっている。これらは、河口域での生産物を陸域に還元する（有機物除去=河川浄化）重要な働きを持っている。これら4種のサギ類が消費する有機物量を推定した。非繁殖期において、アオサギは基本的に夜行性で干潮時に移動しながらS型、待ち伏せてのW型、S型と次の場所への移動を繰り返すSM型により採餌し、コサギは昼行性で干潮時にS型により、ダイサギは昼行性で潮汐周期によりW・SM型を使い分けて、また、ゴイサギは夜行性でW型により採餌していた。また、サギ類は採餌場所に応じて獲得エネルギー効率の良い採餌方法を選択していること、非繁殖期には4種共に採餌の開始及び終了に照度条件が関与していることがわかった。また、非繁殖期には夜行性であるアオサギ・ゴイサギが繁殖期になると昼間にも採餌を行い、採餌場所が非繁殖期に比べてコロニーのより近くに移動してきていることも明らかになった。サギ類4種の河川利用個体数は、河川の水量や周辺環境の変化に伴い大きく変動していた。

サギ類の最低消費エネルギー量を推定するために、利用可能であったゴイサギを用いて基礎代謝量を10、20、30度の温度条件下で脈拍数を同時に計測しながら測定した。成鳥5羽と幼鳥4羽を用いて一定容積の呼吸室内での酸素及び二酸化炭素濃度の時間的变化をガスクロマトグラフで測定した。その結果、ゴイサギの体温（40度）に近い気温だと心拍数が減少し、心拍数と酸素消費量・二酸化炭素排出量との間に正の関数があることが明らかになった。これらより、以下のような気温と鳥の年令と基礎代謝量との関係が明らかになった。

$$Y = (476.60 - 10.37X) \times W \quad (1)$$

$$Y = (426.76 - 8.07X) \times W \quad (2)$$

(1)は成鳥、(2)幼鳥の一日に必要な最低エネルギー量 (Y : kcal) を表している (X : 気温 ; W : 体重g)。松山市の日平均気温データから、体重600gのゴイサギが1年間に最低68,428kcal消費していることがわかった。ゴイサギ以外の3種についても同じような代謝活性であるという仮定の基に、

アオサギ、コサギ、ダイサギの体重を 1,200 g、500 g、1,500 g とし、重信川下流域を餌場として利用した個体数から1994年に消費した最低エネルギー量を求めるとき、6,077,135kcal となった。

これらサギ類は、河口域生態系で生産された有機物の一部を陸域へ循環しているがその程度は基礎代謝にもとづく過小評価的な方法によっても比較的大きく評価された。この基礎代謝量に加えて、運動代謝量までを考慮したサギ類の消費する有機物の推定は河口域生態系の河川浄化能（有機物除去能力）を定量的に評価する上で重要な課題と考えられる。

F) 生態系モデル解析

河川上流部や河口域表層において生産された有機物は死骸・排せつ物等として流下・沈降する途中でその一部が分解され、残りの未分解有機物が懸濁粒子と共に底部に沈積しそこで生物過程を経て分解され、分解産物としての栄養塩類は再び河川水へと戻っていく。この物質循環において、底部への有機物負荷が増加すると循環する物質量は増加するが、増加には底質環境の悪化等=分解能力の低下からおのずと限界がある。これが河口域生態系の自浄作用の限界である。下水など人間活動に由来する有機物が負荷される場合、水域の自浄能力の限界を越えない程度のものとする必要がある。そのことが、持続的に人間活動を継続する上で条件となってくる。この自浄作用の限界がどこにあるかを一般的に規定するのは困難であるが、一つの考え方として、海底部における有機物の酸化的分解（この場合は酸素を使ってベントスや好気性細菌類が有機物を分解することを意味する）が、最も大きくなる有機物負荷量をその限界点とすることが可能である（Omori et al., 1993）。有機物の人為的付加は、その分解を通して、栄養塩類の増加を伴う。この栄養塩の増加は、河川水内の一次生産者への基質の供給となり、一次生産量の増加つまり生態系の自然過程に基づく有機物付加の増加を意味する。このように富栄養化を考えると、ここで示した限界点が水域を持続的に保全する上で有機物負荷の限度とは必ずしも言えないが、少なくともこの限界点を越えた有機物の流入は沿岸生態系に対する過負荷であるのはまちがいない。

<モデル解析>

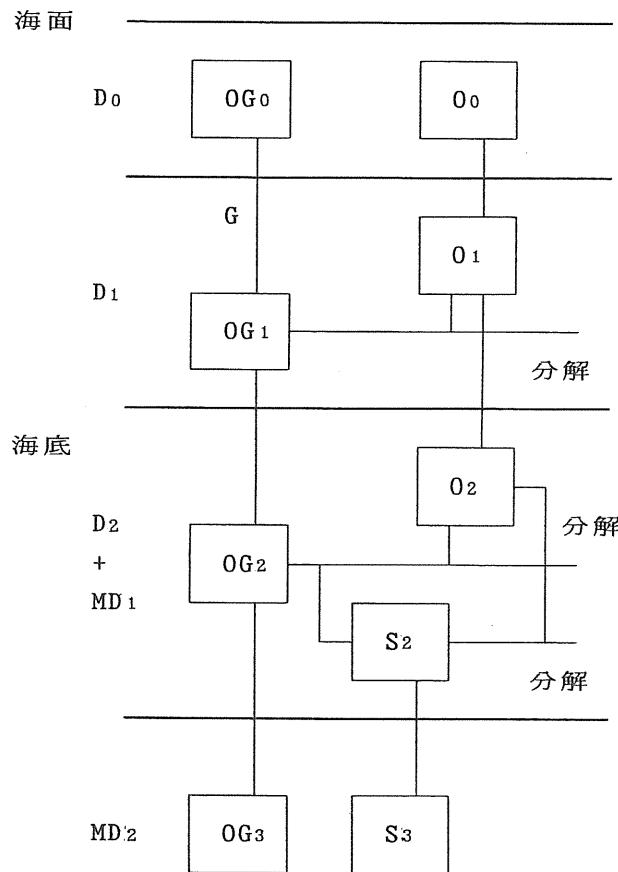
有機物付加の限界値としての（好気的分解が最大となる）硫化物量が、水深、温度成層化の程度（=表層からの酸素の供給速度の違い）、環境温度などの場所的・季節的な環境の違いによってどのように変化するかをモデルにより検討した。

底部における有機物の好気的分解の過程に絡む酸素収支の簡単な一次元モデルを構成した（大森、1991）が、その改良版として今回構成したモデルの式は以下の通りである。また、モデルの要素間の関係図を図F-1に示している。

$$D_0 \cdot dO_0/dt = 0 \quad (O_0 = \text{const.}) \quad (1)$$

$$D_0 \cdot dOG_0/dt = 0 \quad (OG_0 = \text{const.}) \quad (2)$$

$$D_1 \cdot dO_1/dt = (A_0/\Delta Z_{a1}) \cdot (O_0 - O_1) - B_1 \cdot D_1 \cdot (O_1 - C) \cdot OG_1 - (A_1/\Delta Z_{a2}) \cdot (O_1 - O_2) \quad (3)$$



図F-1 モデル構成要素間の関係（記号に関しては本文参照）

$$D_1 \cdot dOG_1/dt = G - B_1 \cdot D_1 \cdot (O_1 - C) \cdot OG_1 - I \cdot OG_1 \quad (4)$$

$$(D_2 + MD_1) \cdot dO_2/dt = (A_1/\Delta Z_{a2}) \cdot (O_1 - O_2) - B_2 \cdot (O_2 - C) \cdot OG_2 - D \cdot S_2 \cdot O_2 \quad (5)$$

$$(D_2 + MD_1) \cdot dOG_2/dt = I \cdot OG_1 - B_2 \cdot (O_2 - C) \cdot OG_2 - E \cdot OG_2/(O_2 + F) - (K/\Delta Z_K) \cdot (OG_2 - OG_3) - H \cdot OG_2 \quad (6)$$

$$(D_2 + MD_1) \cdot dS_2/dt = E \cdot OG_2/(L \cdot O_2 + F) - D \cdot S_2 \cdot O_2 - (J/\Delta Z_j) \cdot (S_2 - S_3) - H \cdot S_2 \quad (7)$$

$$MD_2 \cdot dO_3/dt = 0 \quad (O_3 = \text{const.}) \quad (8)$$

$$MD_2 \cdot dOG_3/dt = 0 \quad (OG_3 = \text{const.}) \quad (9)$$

$$MD_2 \cdot dS_3/dt = 0 \quad (S_3 = \text{const.}) \quad (10)$$

ただし、式中の各記号は、以下のような意味を持つとする。

O_{0-3} : 第1-4層の溶存酸素濃度 ($\mu\text{ mol O}_2/\text{cm}^3$)

OG_{0-3} : 第1-4層の有機物濃度 ($\mu\text{ mol O}_2/\text{cm}^3$)

S_{2-3} : 第3-4層の還元物質濃度 ($\mu\text{ mol O}_2/\text{cm}^3$)

D_{0-1} : 第1-2層の厚さ (cm)

$D_2 + MD_2$: 第3層の厚さ (cm)

MD_2	: 第4層の厚さ (cm)
$A-L$: 定数
ΔZ_{a1}	: 第1層から第2層にかけての溶存酸素濃度変化層の厚さ (cm)
ΔZ_{a2}	: 第2層から第3層にかけての溶存酸素濃度変化層の厚さ (cm)
ΔZ_k	: 第3層から第4層にかけての有機物質濃度変化層の厚さ (cm)
ΔZ_j	: 第3層から第4層にかけての還元性物質濃度変化層の厚さ (cm)

これらの変数の単位は酸素当量（これらの量、特にSやOGが分解されるときに必要とする酸素量のこと）で表現されるものとする。定数の中で、特に、Gは表層（第1層）から中間層（第2層）への有機物負荷速度をあらわす。簡単化の為に、 O_0 、 O_3 、 OG_0 、 OG_3 、 S_3 は一定としてある ((1)、(2)、(8)、(9)、(10)式参照)。(3)式は、第2層での酸素濃度の変化を表現しているが、その第1項は表層と第2層間の酸素の拡散を、第2項は水柱における有機物の好気的分解にともなう酸素消費速度を、第3項は第2層から底層表層部（第3層）への酸素の拡散・移流の速度をそれぞれあらわしている。(4)式は、第2層での有機物濃度の変化を表している。第1項は、表層からの有機物の移入速度(G)を、第2項は水柱における有機物の分解速度を、また、第3項は、底層表層部（第3層）への有機物の移入速度を表現している。(5)式は、底層表層部（第3層）での溶存酸素量の変化を表現している。第1項は、第2層からの溶存酸素の拡散・移流速度を、第2項は、第3層での有機物の好気的分解速度を、また、第3項は、還元性物質の酸化速度を表している。

(6)式は、第3層での有機物量の変化を表現している。第1項は、第2層からの有機物の移流速度を、第2項は好気的分解による有機物の減少速度を、第3項は有機物の嫌気的分解速度を、第4項は底層表層下部（第4層）への有機物の拡散速度を、また、第5項は移流速度（堆積速度）を表している。(7)式は、第3層における還元性物質量の変化を表現している。第1項は、有機的の嫌気的分解速度を、第2項は還元物質の酸化速度を、また、第3項は、還元性物質の底表層下部（第4層）への拡散速度を、また、第4項は、還元性物質の移流速度（堆積速度）を表している。

これらの方程式に含まれる定数を性格には測定していないために、これまでに発表された文献データをもとに定数を決定し（式の非線形性から解析解を求めるのが困難な為）数値解を求め、このモデルの特性を検討した (McCave, 1973; Jorgensen, 1977; 中西・浮田, 1979; Aller and Yingst, 1980; Kemp and Boyton, 1980; Billen, 1982; Enoksson and Ruden-Berg, 1983; Kawai and Maeda, 1984; Ludden et all., 1985)。また、 B_{1-2} 、DE、の係数についてQ₁₀則に基づく温度補正を行った（温度係数=2.5）。今回の計算で使用した定数の値を表F-1に挙げている。この結果により、泥底の酸素消費速度は有機物負荷速度が増加するに従い増加するが、好気的分解の限界溶存酸素濃度前後になると一旦飽和状態となり減少に転ずる。その後、更に有機物負荷速度が増大すると底泥の酸素消費速度は再び増加しある限界の速度に徐々に近づくことになる。なお、この限界速度は、表層からの酸素の拡散に依存して決まるものであり、場所毎に異なる値を示すと考えられる。底泥の酸素消費速度が途中で

最大値を示すところは、好気的分解の活性が最大値をこえて減少していく過程の反映である。この好気的分解活性が減少していくと共に嫌気的分解が活発となって行き、未分解有機物量もまた急激に増大していくことになる。

表F-1 計算に使用したモデルの各係数値
(記号に関しては、本文参照)

coefficient	value
$A_0 / \Delta z_{a1}$	10 - 200 ($\Delta z_{a1} = 20\text{m}$)
$A_1 / \Delta z_{a2}$	10 - 200 ($\Delta z_{a2} = 20\text{m}$)
B_1	.00524
B_2	.00524
C	.08
D	.0888 - .280
E	.001
F	1
G	1 - 500
H	.000712 - .00137
I	15
$J / \Delta z_j$.0518 - .0553 ($\Delta z_j = 10\text{cm}$)
$K / \Delta z_k$.00173 - .0138 ($\Delta z_k = 10\text{cm}$)
D_0	-
D_1	1000-6000 (cm)
$(D_2 + MD_1)$	200
MD_2	-
$O_0 =$.257
$OG_0 =$	-
$O_3 =$	0
$OG_3 =$.0001
$S_3 =$.0001

<場所的・季節的環境変化に伴う底層における有機物分解過程の変化>

異なる場所毎に水深 ($D_0 + D_1 + D_2$ 、このうち特に D_1 が変化すると考えてよい) が変化したり、溶存酸素の拡散・移流速度に関する係数 (特に、 $A_0 / \Delta z_{a1}$) が、また、有機物分解等に関わる化学反応の温度変化に伴う反応速度の変化が考えられる。また、季節的な変化については、夏期の温度躍層の形成に伴う溶存酸素の拡散・移流速度に関する係数 (特に、 $A_0 / \Delta z_{a1}$) や、有機物分解等に関わる化学反応の温度変化に伴う反応速度の変化が考えられる。

ある与えられた溶存酸素の垂直的な拡散・移流速度係数 ($A_0 / \Delta z_{a1}$) における水深と還元性物質の限界値（いわゆる酸化的分解の最大値を示す硫化物濃度の限界値）との関係は、垂直混合がよく行われている（つまり、高い $A_0 / \Delta z_{a1}$ 値を持つ）状態では、深くなるほど限界値は小さくなりその変化の度合いも大きいが、ある程度の深さになるとそれほど変化しなくなる。また、垂直混合が制限された状態だと限界値は、水深に拘らずそれほど大きな変化は見られなくなる。それと共に、有機物負荷量の（還元性物質の限界値に対応した）限界値も同じように変化する。つまり、垂直混合の度合いが同じだと浅い所ほど有機物負荷の限界値が大きくなることである。しかし、垂直混合の制限される夏期でも河口部では水平方向の海水の流動が絶えず存在する（=水平的な溶存酸素の供給）と考えられ、垂直一次元モデルでは考慮されていない要因から、実際には、水深が深いほど夏期における（水平的な供給を垂直的なものに換算したとする） $A_0 / \Delta z_{a1}$ 値は顕著には低下しないと考えられる。

$D_1 = 1000$ (cm) での各温度における溶存酸素の垂直的な拡散・移流速度係数 ($A_0 / \Delta z_{a1}$) と還元性物質（硫化物）の限界値との関係は、垂直混合の度合いが大きいほど（つまり、 $A_0 / \Delta z_{a1}$ 値が大きいほど）限界値は大きくなっている。また、温度が高いほど限界値も高くなっている。同様の条件における有機物負荷量の限界値も同様の傾向を示している。ただし、この場合は、環境温度が高いほど限界値は低下していることが分かる。これらは地理的に異なる場所間（=平均の環境温度が異なる）での関係を示しているといえる。次に、同じ場所での季節的な環境変化を考慮する。この場合、環境温度と垂直混合の程度とには、連関があり、高温時には混合の程度が低下する傾向がある。よって、季節的な垂直混合の程度の違いによる還元性物質の限界値の変化は、同時に起こる環境温度の変化によって緩和されるといえる。また、有機物負荷限度量については、同じ連関から、逆に、有機物負荷限度量は、強調された形で季節的に変化する。つまり、夏期の垂直混合の制限されるとき、有機物負荷限度量がかなり低下し、混合期には逆に大きくなると推測される。また、このような季節的な変化は、水深が深くなるに従って小さくなると考えられる。

地理的な違い（緯度の違い）に基づく平均温度の変化を考える場合、還元性物質の限界値とそのときの未分解堆積有機物量との関係の傾向として、環境温度が高くなると還元性物質の濃度は高くなり、逆に未分解堆積有機物濃度は低下するという結果が得られる。この関係は、緯度が高くなるにつれて底質に含まれる硫化物量が減少し有機物量が増加するというこれまでに報告されている関係と一致する（畠、1990）。以上のことから、水深や季節的な温度変化、また、垂直混合率の変化に伴って、有機物負荷限度を示す還元性物質（=硫化物）の限界値は変化するもののその程度は比較的小さいことが分かった。また、その限界値によって示される有機物負荷限度量は、逆に、環境の変化に伴って大きな違いを示すことが明らかとなった。ある与えられた場所毎に有機物負荷の限界値を直接的に推定する為には、このモデルを2次元に拡張し、また、モデルの各係数を実測することが今後必要となってくるであろう。

<まとめ>

重信川河口域は、上記したように、常時冠水している箇所の少ない、つまり、海の影響の強いタイプ

である。よって、河口域生態系の分解部の大部分が干出の度に空気にふれる為、好気的な状態を維持することができる。よって、冠水部で泥底部分に好気的分解が最大となる負荷限度量を適用する必要があるが、生態系全体としては、相対的な重要度は低いと考えられる。河口域の潮間帯部分が問題なわけだが、その場所の底質によってもまた構造が変わってくる。泥質干渉であれば、冠水部分と基本的にはほぼ同様の理論で規定する事が可能であるが、底質表面における一次生産者（主として底生硅藻類）が新たなそして本質的な要素として加わるため必要が存在する。ここでは、分解者と生産者が隣合させて存在するため機能的な面で新たな検討が必要となってくる（冠水部分でも水深の浅さから同様の問題が生じてくる）。これに対し、砂れき・転石浜では、腐食連鎖部分が殆どなくなり、物質流としては生食連鎖が主流となる。つまり、河口域生態系の中で生産部分にあたるわけである。また、潮間帯最上部での生産の場であるヨシ原は、同時に底質部分に分解部を持っている。このように河口域は、生産部と分解部とが異なった割合で存在する部分系がいくつか存在しそれが河川の規模などの物理的・地形的な影響でモザイクを形成して河口域生態系の全体を形作っていると考えられる。これらにベントス類が、直接作用、また、生物搅乱などの間接作用を通じて河口域生態系の各構造の機能に影響を与えている。更に、これらのベントスを餌とする鳥類・魚類等の高次消費者のベントス群集に与える影響や物質環境上の効果（物質の系外への持ち出しや直接的な環境の促進）も存在する。今後とも河口域生態系の機能等の評価を行う上で、負荷限度量自体については河川流量が重要なカギとなると思われるが、河口域生態系のモザイク構造を考慮しながら、系の生物過程を定量的に明らかにする必要があると考えられる。

現時点ではまだ不十分であるが、河口域生態系の動態が明らかになり、数値モデルが形成され、ある程度動態の予測が可能になると、生態系のどの部分が水質浄化に大きな効果を持つかを明らかにすることができます。例えば、一次生産者であるアシ群落や高次消費者である鳥類が河口域の浄化力＝水質改善の力を高めることができることは今回の研究からも明らかであるが、その維持または促進を行うことのできる護岸や中洲の維持・整形・植栽等の整備事業を起こすことも可能となる。また、浄化力（＝水質改善の力）を最大限にするための最適な河川水量の算出、それを維持するための上・中流部での河川改修事業の実施等に対する勧告も可能となる。このように本研究を更に進めることの効果として、自浄力（＝水質改善力）が安定的に最大となるような河口域生態系の保全に関する具体的な方針を得ることができると考えられる。

参考文献

- Aller, R. C. and Yingst, J. K. (1980) Relationship between microbial distribution and the anaerobic decomposition of organic matter in surface sediments of Long Island Sound (USA). *Mar. Biol.* 56: 29-42.
- Billen, G. (1982) An idealized model of nitrogen recycling in marine sediments. *Am. J. Sci.* 282: 512-541.
- Enoksson, V. and Ruden-Berg, L. (1983) A system for determining exchanges between sedi-

- ment and water exemplified by nitrogen flux under controlled oxygen conditions. *Ecol. Bull. (Stockholm)* 35: 243-250.
- 畠 幸彦 (1990) 堆積物. (水産学シリーズ 82) 海面養殖と養魚場環境, pp.51-68, 恒星社厚生閣.
- Jorgensen, B. B. (1977) The sulfur cycle of a coastal marine sediment (Limfjorden, Denmark). *Limnol. Oceanogr.* 22: 814-832.
- Kawai, A. and Maeda, H. (1984) Oxygen consumption in the bottom water related with the production of sulfides in the bottom sediments. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.* 50: 119-124.
- Kemp, W. M. and Boyton, W. R. (1980) Influence of biological and physical processes on dissolved oxygen dynamics in an estuarine system: Implications for measurement of community metabolism. *Est. Coast. Shelf Sci.* 11: 407-431.
- Ludden, E., Admiraal, W. and Colijn F. (1985) Cycling of carbon and oxygen in layers of marine microphytes; a simulation model and its eco-physiological implications. *Oecologia (Berlin)* 66: 50-59.
- McCave, I. N. (1977) Mud in the North Sea. In: Goldberg, E. D., ed., *North Sea Science*, Cambridge, Mass., Massachusetts Inst. Technology Press, p.75-100.
- 中西 弘・浮田正夫 (1979) 内湾における汚濁負荷と物質収支. (水産学シリーズ 30) 水域の自浄作用と浄化, pp.54-69, 恒星社厚生閣.
- 大森浩二 (1990) 養殖漁場における有機物負荷制限値の推定方法について. 平成元年度宇和島湾浅海養殖漁場環境調査報告書, 遊子漁業協同組合, 50-56.
- 大森浩二 (1991) 海底における有機物分解と養殖漁場汚染. 平成 2 年度宇和島湾浅海養殖漁場環境調査報告書, 遊子漁業協同組合, 1-10.