

貝類に着目した河口域の環境分類とその修復

ENVIRONMENTAL CLASSIFICATION AND RESTORATION OF ESTUARY BOTTOM FOCUSING ON BIVALVES

天野邦彦¹・小林草平²・尾嶋百合香³・中西哲⁴

Kunihiko AMANO, Sohei KOBAYASHI, Yurika OSHIMA and Satoru NAKANISHI

¹正会員 博(工) 室長 国土技術政策総合研究所 河川環境研究室 (〒305-0004 つくば市旭1)

(前所属: 上席研究員 土木研究所 河川生態チーム 〒305-8516 つくば市南原1-6)

²博(農) 専門研究員 土木研究所 河川生態チーム (〒305-8516 つくば市南原1-6)

³正会員 博(工) 国土交通省 徳島河川国道事務所 (〒770-0803 徳島市上吉野町3丁目35)

⁴ 正会員 修(工) 研究員 土木研究所 河川生態チーム (〒305-8516 つくば市南原1-6)

We have surveyed the distribution of benthic macroinvertebrates in the Toyo River estuary area. The area was environmentally classified by the distribution of macroinvertebrates. Salinity and depth are two most significant environmental factors which control the distribution of macroinvertebrates. Trench which had been excavated during a reclamation project seemed to have negative impact on the habitat of bivalves. Restoration by which this trench is buried with sand and gravel seems to be effective to conserve the benthic habitat. Since the restoration of these habitat can enhance both the biomass of commercially useful bivalves and water quality control function, it is highly recommendable to pursue it.

Key Words : Benthic macroinvertebrates, estuary, ecosystem service, and restoration

1. はじめに

河口汽水域は、河川に代表される淡水環境と海洋に代表される塩水環境とが接する場所であり、動的かつ複雑な環境変化に応じて種々の貝類が生息している場所である。貝類の生息域という観点で河口汽水域を見た場合、特に水中の懸濁物を摂食している二枚貝については、主に底質と水質特性が生息する種類や量を直接的に強く規定する要素であると考えられる。貝類の生息に影響する底質の粒径は直上の水流に影響を受けるため、流速の速い滞筋部や浅部では大きめの粒径分布を示す。また、水質について見ると縦断的には海側で、横断的には深部で、塩分が高くなり、富栄養化した水域では深部で溶存酸素が低くなる。

貝類の生息を直接的に強く規定すると思われる底質と水質の分布に影響し、これらを形成するのは、地形、河川流量や潮汐といった物理的特性であるので、河口部における貝類の生息環境の概要を決めるのは河口地形、河川流量や潮汐ということになる。

しかし、特に高度経済成長期以降に、河口は埋め立てや浚渫などで地形の改変を受けたり、河川流量も取水などにより変化を受けていることが多い。自然環境の保全、復元に対する社会の関心が強まるなか、このように改変を受けた環境を修復して、良好

な自然環境を復元しようとする自然再生事業が始まっている。今後、河口部においても、このような事業の進展が望まれるが、その際には地形、水質、底質といった物理環境と生物との関連性を把握して、適切な修復を行う必要がある。

ここでは、河口部の生態系の重要な要素であるとともに、水質・底質といった物理環境の影響を直接受けやすい貝類に着目して、地形や水質・底質等の物理環境と生息する貝類の量・種との関連性を把握することを目的として、愛知県豊川河口域において実施した現地調査とこれが示唆する環境保全の方向性について述べることにしたい。

2. 方法

本研究では、豊川河口汽水域における地形や水質・底質等の物理環境と生息する貝類の量・種との関連性を把握することを目指して、物理および生物現地調査結果を統計解析的手法により解析することで、貝類の生息環境分類(環境類型化)を行った。また、河口汽水域において縦断的に採取された二枚貝の炭素安定同位体比を用いて、水理計算との比較により、餌資源の観点から見た貝類の生息環境評価を行った。そして、これらの結果を用いて、環境保全の方向性について考察を行った。以下にそれぞれ

の方法について記述する。

(1) 調査地の概要と現地調査

豊川は流域面積724km²、幹川流路延長77km、段戸山（標高：1,152m）を源流に設楽町、新城市、豊川市および豊橋市を通り三河湾へ流れる一級河川である。豊川下流域は昭和40年代より放水路・護岸・埋め立てなどによる人為的な地形変化を受けている（図-1）。豊川が流入する渥美湾においては、富栄養化により夏季に底層の溶存酸素が欠乏するために、水深の深い場所では、貝類が生息することができない。また、強い離岸風が生じた場合に貧酸素の底層水が沿岸に湧昇し、苦潮とよばれる現象が生じると、沿岸においても魚介類のへい死を招く。豊川河口部は、浚渫により河床が掘削されたという経緯があり、水深が深くなっている箇所が存在するため、満潮時には溶存酸素濃度が低い塩水が侵入し、貝類の生息には厳しい環境になっている。

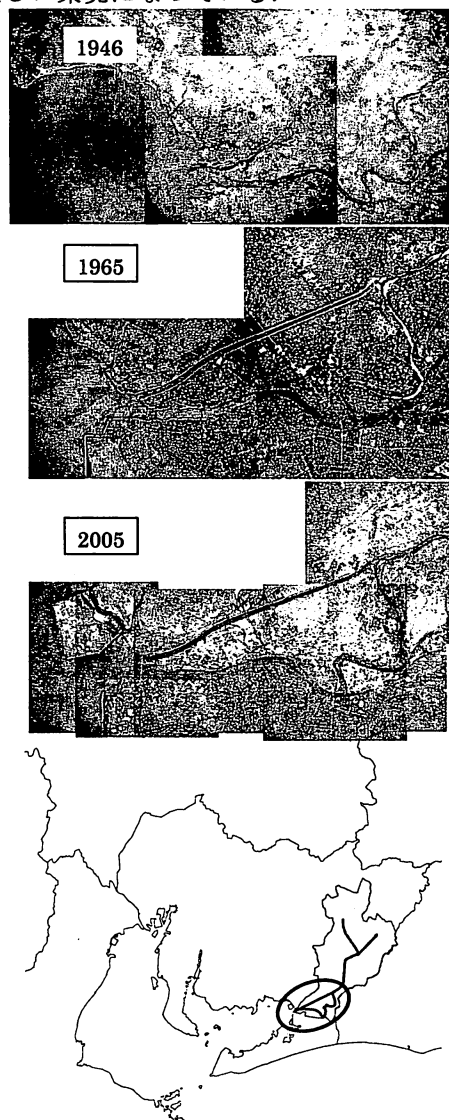


図-1 航空写真に見る豊川河口部の環境変遷および流域図

(2) 現地調査

現地調査をヤマトシジミ *Corbicula japonica* の生息域である豊川汽水域（放水路分岐付近：本川11.6km）からアサリ *Ruditapes philippinarum* 稚貝で有名である三河湾に面した六条干潟を含む河口汽水域を対象に行った。まず、本川6.8km付近から海域までの約4.7km²で深浅測量調査を行うことで、詳細な地形情報を入手すると共に、河口域における貝類の生物相と生息量を把握するために、貝類等の試料採取調査を実施した。調査は図-2に示す海水の影響の異なる5区域32地点で行い、A区域：海域（8地点）、B区域：常に海水と淡水が混合している河口域（11地点）、C区域：海水の影響が強いと思われる河川域（7地点）、D区域：海水の影響が弱いと思われる河川域（3地点）、E区域：放水路（3地点）で行った。

また、図-2に示す5地点において、自記式計測器多項目水質計を設置し、平成19年5月12日から6月2日にかけての20昼夜連続的に水質（水温、濁度、塩分、溶存酸素、pH）を計測した。設置水深は表層（水面下50cm）と底層（底上50cm）の2層とし、表層に設置する計器については水位の変化に追従する様に係留した。測定間隔は10分間とした。

現地調査の詳細については、既報¹⁾を参照のこと。

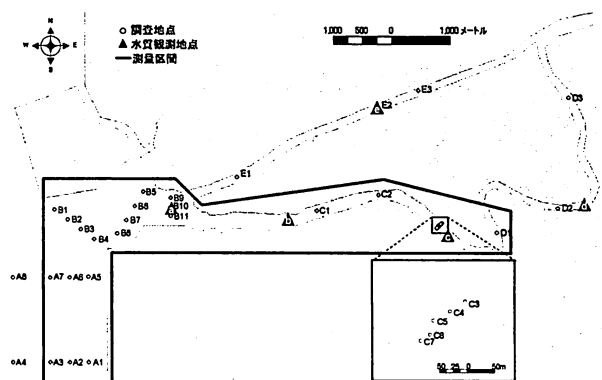


図-2 調査地点図

(3) 環境類型区分

各調査地点での水深、塩分、底質組成などの物理環境と、採取された貝類の情報をを用いて、Canonical Correspondence Analysis (CCA) を行った。この手法を用いた解析を行うことで、貝類の選好性や調査地点の環境特性を示すと考えられる物理環境の項目を分析して、調査範囲を貝類生息の観点から類型化することが可能になると考えられる。

(4) 水理解析

水中懸濁物を濾しとることで摂食する二枚貝の安定同位体比は、河口部の懸濁物が示す安定同位体比の影響を受けていると考えられる。河口部の懸濁物は、上流の河川より輸送されたものと沿岸部で生産された有機物が潮汐により輸送されたものとが混合しているため、その組成は海水の影響度合いにより異なる。この影響度合いを評価するために、水理計

算を用いて、河口部における河川由来及び海由来の懸濁物の混合状況の解析を実施した。

解析に用いたモデルは、Blumberg and Goodrich モデル²⁾を改良した流動モデルであり、潮汐流、吹送流、塩分に基づく密度流により駆動される。渡辺ら³⁾により東京湾における流動解析に使用されているが、湾内の流動を計算するために河川流による影響も評価可能となっている。

この水理解析モデルに現地平成19年5～6月に計測された水文・気象・潮汐条件を入力して2ヶ月間連続計算を実施し、後半の1ヶ月間に関する計算結果を用いて懸濁物の混合状況の評価とした。河川および海からの懸濁物は、そもそも組成が異なっており、貝類の同化効率は大きく異なるものと考えられる。このため、懸濁物のうち、貝類が容易に同化できる成分が河川および海からどれほどの割合で供給されるかについて評価することを目指した。

淡水域の最下流で測定された河川由来の懸濁物の炭素安定同位体比と、沿岸域で測定された海由来の炭素安定同位体比については現地調査により得られているので（河川由来： $\delta^{13}C_{river} = -26\text{‰}$ 、海由来：

$\delta^{13}C_{sea} = -19\text{‰}$ ），これらの炭素安定同位体比を有した河川由来と海由来の懸濁物の混合計算を実施した（式(1)）。しかし、河川由来と海由来の同化可能懸濁物の濃度割合は不明であるため、計算においては、河川由来と海由来の濃度割合を変化させたケースを実施して、汽水域における同化可能な懸濁物の安定同位体比の平均値の縦断的变化を上記で仮定した濃度割合に基づく値として推定した。表-1に計算ケースの一覧を示す。

$$r_{sea} = \frac{(\delta^{13}C_{estuary} - \delta^{13}C_{river})}{(\delta^{13}C_{sea} - \delta^{13}C_{river})} \quad (1)$$

ここに、 r_{sea} :懸濁物に占める海由来の割合、 $\delta^{13}C$:炭素安定同位体比、添字については、seaは海由来、riverは河川由来、estuaryは河口域における混合物を示す。

表-1 計算ケース一覧

ケース一覧		可川起源：初期濃度(0mg/l)、境界濃度(10mg/l) 懸濁物沈降速度(m/day)		
初期&境界濃度(mg/l)	沈降速度(m/day)	0.2	0.5	1
海起源	10(初期:全域)	0.2	ケース1	
		0.5		ケース2
		1		ケース3
		5		
		10		
	30(初期:全域)	0.2	ケース4	
		0.5		ケース5
	40(初期:全域)	0.2	ケース6	
		0.5		ケース7
	50(初期:全域)	0.2	ケース8	
		0.5		ケース9
	60(初期:全域)	0.2	ケース10	
		0.5		ケース11
	70(初期:全域)	0.2	ケース12	
		0.5		ケース3

この同化可能な懸濁物の炭素安定同位体比の計算推定値を貝類の炭素安定同位体比測定値と比較する

ことで、河川および海のそれぞれから供給される同化可能な有機物量の割合を水理計算から逆推定することを試みた。これら2つの値は、別の物性であるため、直接比較はできないが、餌と摂食者との間に成立するとされる炭素安定同位体比の関係を利用することで推定した。すなわち、摂食者の体を構成する炭素安定同位体比は、餌のそれより1‰増加するという既往研究結果^{4, 5)}を採用し、河口域で採取された二枚貝の炭素安定同位体比測定結果から、1‰引いた値をその場所における平均的な同化可能な懸濁物の炭素安定同位体比とした。

このようにして水理計算と貝類の測定値から推定した河口域のそれぞれの場所における同化可能な懸濁物の安定同位体比の平均値を比較し、同化可能な懸濁物の河川由来と海由来の構成割合を推定した。

3. 結果

(1) 底質環境

底質の観測結果については、既報¹⁾で報告済みであり、重複を避けるために今回の検討で対象とする河川河口域における特徴について簡易的に述べる。豊川本川と放水路の流入部が合流する河口域（図-2）は滞筋など複雑な地形を形成しており、浄化センターに近い箇所（B1）では水深が4～5mと深くなっておりシルトと細砂が中心の泥底で有機質であった。埋め立て地付近が深場となっているのは埋立ての為に土砂採取されたためと思われる。その他の調査点では水深1～2mと浅場であった。

少し上流ではあるが、依然海域の影響が強いと思われるSt. C1では砂質に礫が混ざっており、蛇行部に近い調査点では、右岸側（St. C3, C4）では砂質、左岸側（St. C6, C7）では粗砂や細礫が優占していた。さらに上流部で蛇行部に近いSt. D1, D2では水深2～3m程度と下流のC区域よりも深くなっており、砂質に粗砂や礫が混在していた。上流のSt. D3では細砂質で、シルトが混在していた。

これらの状況から、深掘部以外の場所では、概ね砂質の底質環境であり、比較的浅い場所においては、底質という観点からは二枚貝の生息に適している場所である。

(2) 水質環境

図-2に示すSt. a～eにおける底層（水底上50cm）において、塩分および溶存酸素濃度を観測した結果を図-3に示す。海域に近いSt. aやSt. bではおおむね海水と同程度の塩分（32psu前後）であるが、干潮時には塩分が大きく低下していることがわかる。一日の間の塩分の変化は20psuにおよぶこともあり、潮汐の影響を強く受けている。また、St. cにおいては、1～30psuまでの濃度変化があり海域の影響を受けている河川域である事が確認できるが、St. a, bに比べて上流に位置する分、塩分は低めである。St. dでは、普段は5psu以下の淡水であるが、小潮時

等の底層部では15psu付近まで塩分が上昇しており、当箇所までは塩水が遡上していた。また放水路のSt. eでは、普段は本川からの水供給がないため、河口から同程度離れているSt. cよりも塩分変動が小さく、底層部においては常に15psuの塩分があった。観測期間中の5月25日から26日にかけて、降雨により時間最大流量約480m³/sの出水に伴い、塩分が全ての地点において一時的に下がっていた。

溶存酸素濃度の変化は、塩分変化と逆の相関関係を示している。塩分が上昇する満潮時に呼応して溶存酸素濃度が下がっている。湾の底層に存在する低酸素水塊が満潮時に河口汽水域に侵入するためにこのような相関があると考えられる。

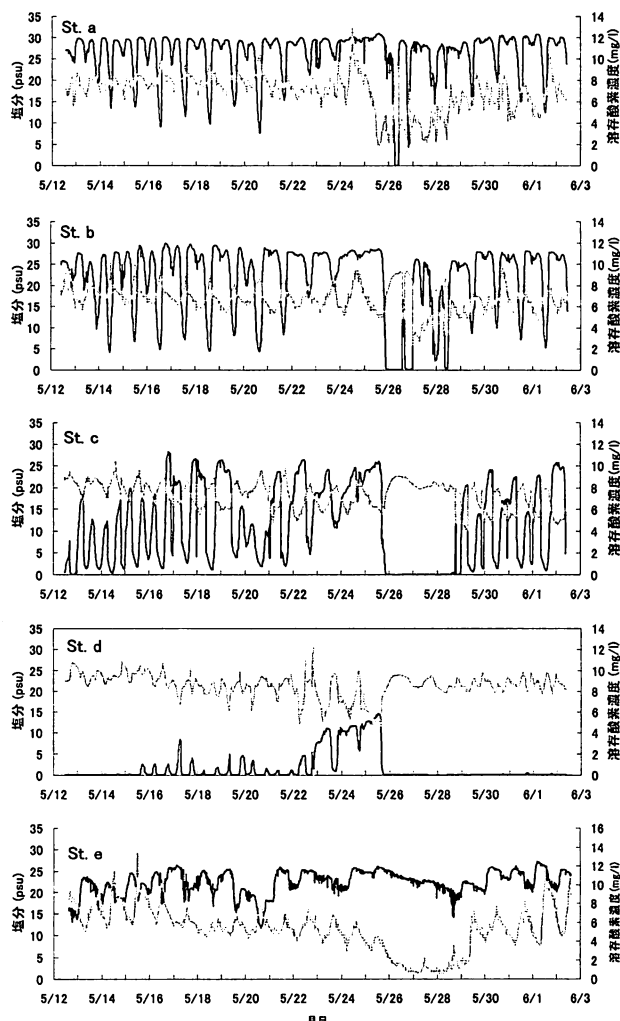


図-3 塩分と溶存酸素濃度の変化
(黒線が塩分、グレー線が溶存酸素濃度を示す。)

(3) 貝類分布

貝類分布についても、既報¹⁾で報告済みであるが、以下に今回の検討で対象とする河川河口域における特徴について簡単に記述する。沿岸域における浅場および河口域の沖側ではアサリが優占しており、干潮時には干上がってしまう岸側(St. B5, B8)ではウミナ *Batillaria multiformis*、ホソウミナ *Batillaria cumingii*が出現していた。St. C1ではアサリとホトトギスガイ *Musculista senhousia*が出

現し、それより上流地点(St. C2, C3)ではヤマトシジミが優占していた。さらに上流のSt. D1, D2ではヤマトシジミが優占していたが、St. D3では淡水域に生息するチリメンカワニナ *Semisulcospira reiniana*が優占していた。

(4) CCA結果

Canonical Correspondence Analysis (CCA) 解析を行った結果を図-4に示す。この解析は、貝類の嗜好性や調査地点の環境特性を示すと考えられる物理環境の項目を分析して、2次元の図面上に示すというものである。この図上で近い場所にプロットされた貝類は、類似の環境を選好すると考えられ、またそのような環境を有する地点がその付近にプロットされる。さらに、図中に描かれた矢印は、このような環境特性の相違の方向を示している(矢印の長さは影響の強さを示している)。すなわち、塩分と書かれた矢印の方向に、塩分の違いにより区別される地点や貝類が並べられる。図-4では左側に塩分が高い地点や塩分を好む種類がプロットされている。

この図を見ると、豊川河口汽水域で貝類分布に最も影響を持つ物理環境は、塩分の様である。貝類調査結果からは、海水の影響が強い区域の方が貝類の数は多かった。水深が2番目に影響が大きい物理環境と考えられる。水深が大きい場所では、粒径が小さく、有機物量が多い底質特性を示すため、有機物量が水深と同じ方向、粒子サイズが逆の方向の矢印で示されている。

図-4から、アサリは、塩分が高く、水深が比較的浅い環境を好んでいることが示される。ヤマトシジミは塩分が低い場所(現地調査結果からは5~20psuの場所)を好むことが示された。これらは、既往研究^{6, 7)}の知見と一致していた。干潮時には水が干上がるような水際の非常に浅い地点では、ウミナなどの巻き貝が多く見られたが、CCAの結果もこれを支持していた。

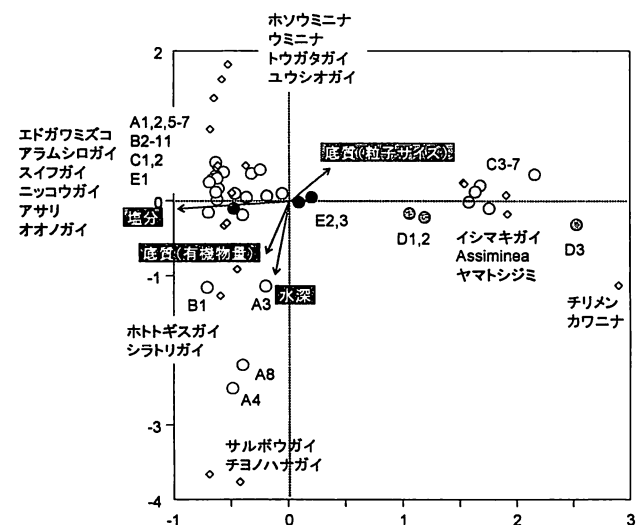


図-4 CCAによる豊川河口汽水域の環境と貝類分布の分類
(図中の丸印は調査地点の属性、菱形は貝類の属性の位置を示す。)

(5) 水理計算結果

同化可能懸濁物の河川由来、海由来の割合について、水理計算結果から求めたものと、二枚貝の測定結果から求めたものとを比較して縦断的に示す（図-5）。紙面の都合から、懸濁物の沈降速度について、沿岸域で優占種になりやすい珪藻類の沈降速度に近い0.2m/dとした計算ケースの結果のみを示す。

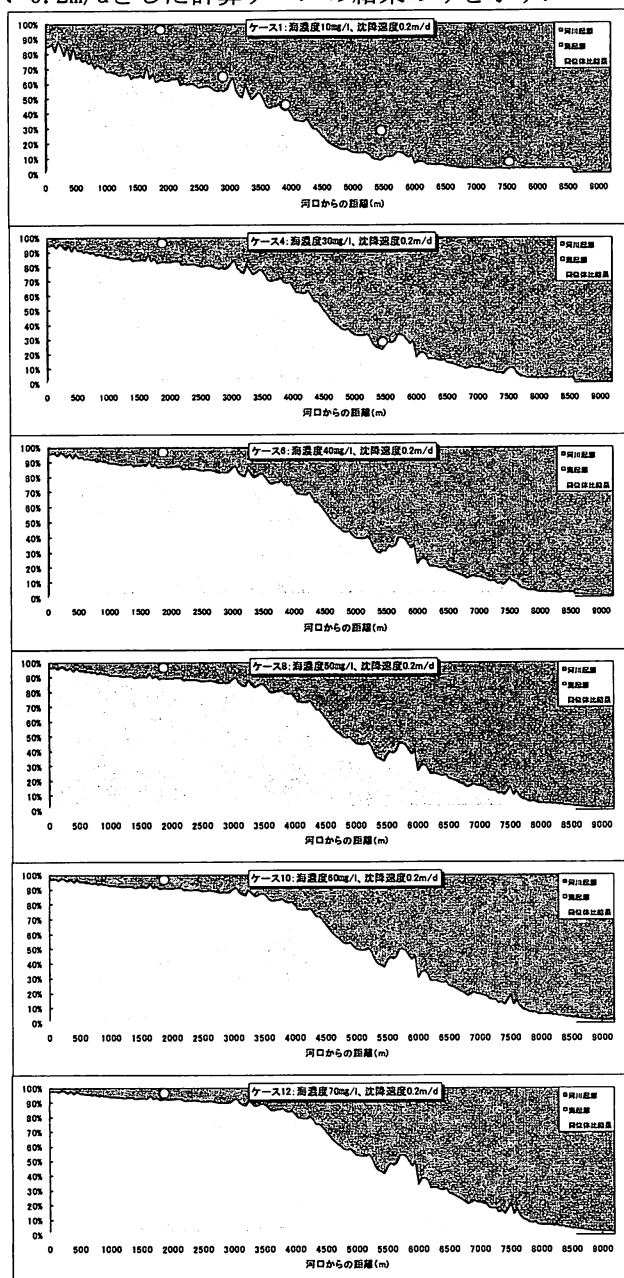


図-5 水理計算と貝類安定同位体比からの推定結果比較（縦軸は海由来のものが占める懸濁物割合）

河口域における懸濁物の河川由来、海由来の混合比率は、当然の結果であるが、海由来の流入濃度割合が高いほど、海由来の影響が大きくなる結果となっている。ケース1は、貝類が同化可能な懸濁物の河口域への流入割合が海由来のものが河川からのそれと同じ比率の場合であり、ケース12は、海由来のものが河川からのそれの7倍とした場合である。計算結果から見ると、ケース4、5で比較的良好な一致を見せており、この結果から海由来の同化可能懸

濁物は、量的にみると河川からの供給の3～4倍程度であると考えられる。

4. 考察

調査を始める前には、直感的に河口汽水域を図-2の測定点のアルファベットで示したように5つの区域に分けていたが、現地調査結果とCCAは、この場所の環境分類は以下のように出来そうであるということを示している。すなわち、塩分の高いA,B区域とC,E区域の下流側で平均水深が1～3m程度の比較的浅い範囲は、アサリが優占する生息域と分類できそうである。塩分の高い区域でこれよりも浅い範囲はウミナナなどの巻き貝が優占する生息域、またA区域で3mより深い部分はアサリの生息には適していないようである。C区域の上流側半分、D区域の下流端、E区域の上流端はヤマトシジミが優占する生息域と考えられる。

豊川河口域には、河床が浚渫により深くなっている部分がある。浚渫窪地のような深場では有機物の堆積が多くなり、貧酸素化することが多くなる⁸⁾。今回の調査結果を見ると、このような部分を砂礫により埋め戻して環境修復を行うことで、従来の様にアサリが優占する場所として修復できる可能性が高いと考えられる。すなわち、貝類の生息環境として類型区分すると塩分濃度と水深が類型化を規定する大きな要因であり、水深を浅くすることで、アサリが選好する底質環境を再生できると考えられる。

このような措置を執ろうとする場合、治水安全度が損なわれないようにすることが必須であるが、豊川河口部においては、周辺部と同程度まで深掘部を埋め戻すことによる治水上の問題は生じないため、実効的な対策であると考えられる。これらのことから河口域の深掘部を周辺部と同等に砂礫で埋め戻すことが環境修復の方向性として妥当と考えられる。

河口部付近の深掘れ部分を解消することは、満潮時に溶存酸素濃度が低い底層の海水が河口に侵入することも軽減する効果が期待できるため、貧酸素水塊侵入による底生生物への悪影響が緩和される。深掘れ部が解消されて、満潮時に底層部の海水の代わりに表層部の海水がより多く河口部に侵入すれば、表層海水は植物プランクトン濃度が高いため、これをろ過することで餌としている二枚貝にとっては、餌の観点からも有利になると考えられる。水深が浅く底質・酸素条件の良い箇所では現在でも貝類が量産されていることから、このような場所を拡げることが望ましい。

安定同位体比調査結果に基づく水理計算結果は、アサリやヤマトシジミといった河口域の貝類は、海域で生産されたと考えられる有機懸濁物を多く摂取していることを示していた。懸濁物の全量で考えると、河川由来のものが量的には多いと考えられるが、餌として同化可能な懸濁物という観点で見た場合、計算結果からは、海由来の懸濁物は河川由来のもの

に比較して3~4倍の割合（影響力）を有していると評価された。この結果は、河口域において貝類生産性が高くなる理由として、沿岸域での一時生産の役割が高いことを示している。実際、河口前面の沿岸域は、河川から供給された栄養塩類を利用して植物プランクトンが活発に増殖している。植物プランクトンの大量増殖は、水質悪化につながる可能性があるが、干潟のような浅い河口地形が広がっていれば、植物プランクトンを多く含む海水が満潮時にこのような浅場に供給されることで、そこに生息する貝類がこれを餌資源として利用することで、水質改善効果が期待できる。また、増加した貝類は漁獲対象にもなることから、生産性の高い場所になるであろう。

河口域では流下有機物の分解などにより酸素消費が活発に行われている。しかし浅場では水表面からの酸素供給により底層まで溶存酸素が保たれることから、環境を嫌氣的にせず生産、消費、分解が行われると期待できる。河口汽水域では、航路浚渫等、過去の改変の結果、人為的に形成された深場が存在する場合があるが、治水や舟運の制約が許すのであれば、貝類の生息場所の復元を行うと共に水質改善効果も期待できると考えられることから、このような状況を解消して浅場を修復することが期待される。

5. 結論

潮汐の影響を受けて、塩淡水が複雑に混合する豊川河口域において、水質、底質の観点から貝類の生息環境を解析し、環境類型化を行った。人為的改変の変遷とも併せて検討した結果、貝類の生息場修復という観点からは、河口部周辺における浅場の修復が適切であると考えられた。このような浅場が修復できれば、生息量が増大した貝類が、沿岸で増殖した植物プランクトンを餌として摂取することで、水質改善効果も期待できる。

このような河口域の浅場は、食料供給（漁獲）、水質調整といった機能を有する生態系サービスの高い場所であると考えられる。今後、生態系サービスの定量化を行うことで、環境修復が環境のみでなく、住民に対して経済的便益も提供するものであるということを評価していくことが望ましいといえる。

河口域の修復について、今回は局所的な検討に終了したが、局所的に生息場を修復したとしても、湾全体の環境改善が進まない限り、貧酸素の問題はすぐに解決するものではない。湾全体の環境修復を流域全体の協力で推進する（負荷量削減対策）と共に今回検討を行ったような生物生息場の修復が実施されることが必要である。

謝辞：国土交通省中部地方整備局豊川河川事務所の方々には調査期間中、様々な面で便宜を図っていただくと共に、各種の貴重なデータを提供していただいた。記して感謝いたします。この研究は科学技術振興調整費（課題名：伊勢湾流域圏の自然共生型環

境管理技術開発）の助成のもとで行われた。

参考文献

- 1) 尾嶋百合香, 天野邦彦, 中西哲, 小林草平, 中田和義, 豊川河口域に生息する貝類の分布特性と物理環境特性との関係について, 河川技術論文集, 第14巻, pp. 483-488, 2008.
- 2) Blumberg, A. F. and Goodrich, D. M., Modeling of wind-induced destratification in Chesapeake Bay, *Estuaries*, 13, 236-249, 1990.
- 3) 渡辺正孝, 天野邦彦, 石川裕二, 木幡邦男, 秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程, 土木学会論文集第7部門, No.608, VII-9, pp.13-29, 1998.
- 4) Minagawa, M. and Wada, E., Stepwise enrichment of N-15 along food-chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, pp.1135-1140, 1984.
- 5) McCutchan, J.H., Lewis, W.M., Kendall, C. and McGrath, C.C., Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulphur, *Oikos*, 1-2, pp.378-390, 2003.
- 6) 伊藤博, アサリとはどんな生き物か, アサリの生態, および漁協生産の推移 日本ベントス学会誌57, pp. 134~138, 2002.
- 7) 村幹雄, 日本のシジミ漁協 その現状と問題点, たたら書房, pp. 1~17, 2000.
- 8) 佐々木淳, 磯部雅彦, 渡辺晃, 五明美智尾, 東京湾における青潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集第43巻, pp. 1111~1115, 1996.

(2009. 4. 9受付)