

河川汽水域における環境に配慮した 河道設計法確立のための 河道特性と貝類相の関係に関する研究

STUDY ON RELATION BETWEEN SHELFISH FAUNA AND RIVER COURSE
CHARACTERISTICS TO ESTABLISH RIVER IMPROVEMENT TECHNOLOGY
FOR ENVIRONMENTAL CONSERVATION IN RIVER ESTUARIES

巖島 怜¹・吉川寛朗²・森田 海²・島谷幸宏³

Rei ITSUKUSHIMA, Hiroaki YOSHIKAWA, Kai MORITA and Yukihiro SHIMATANI

¹正会員 九州大学助教 持続可能な社会のための決断科学センター (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²学生会員 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³フェロー会員 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

Estuaries are distinctive environment which fluctuates continually by mixing fresh water and sea water due to the influence of the tide and waves. However, disappearance of habitats is a serious problem in estuaries since river improvement technology in consideration of the environment has not been established. In this study, we investigated the relation between shellfish fauna and physical factors of watershed scale and river course characteristics. As a result of single correlation analysis, sinuosity, river bed complexity, comparable height difference in low flow channel, depth ratio, bed slope and number of types of habitat had significant positive correlation to abundance of shellfish fauna. These results suggest that the securement or creation of high attitude area in low flow channel should be considered when conducting the river bed excavation, or diversity of shellfish fauna can be secured by increasing the depth ratio when conducting river improvement.

Key Words : river estuary, river improvement technology, environmental conservation, shellfish fauna

1. はじめに

2006年に「多自然川づくり基本指針」が策定され、多自然川づくりがすべての川づくりの基本であることが定められた。その後、多自然川づくりに関する技術的、学術的知見が集積され、2008年に中小河川に関する河道計画の技術基準¹⁾が制定された。当該基準の解説である多自然川づくりポイントブックⅢ²⁾では、山間地のセグメントMから自然堤防帯のセグメント2河道³⁾が対象とされているが、扇状地から自然堤防帯に相当するセグメント1及び2における事例や研究成果が大部分を占めており、河川汽水域を対象としたものはほとんどみられない。河川汽水域については学術的、技術的知見が不足しており、環境に配慮した河川改修技術および自然再生技術が確立

されていない。河口域は、汽水環境に耐え得る特有の種が生息する特殊な場である一方⁴⁾、多くの河口域が既に人為により改変されている^{5) 6)}。さらに、近年、津波災害対策等の河川汽水域における河川改修は頻繁に行われており、環境に配慮した河川改修技術の確立は喫緊の課題である。

米国や欧州では、生物相、水質、底質、ハビタット等複数の指標により河口域の環境を評価し、保全計画が策定されている^{7) 8)}。また、豪州や南アフリカを中心に河口域の外力特性とハビタットの関係⁹⁾、生物相と地形による河口域区分に関する研究¹⁰⁾が進められており、類似した河口域毎にリファレンスとなる環境が定められ保全や再生が進められている。一方、国内では、汽水域の環境保全を目的として潮汐、波浪、河床材料等の指標を用いた大河川河口域の類型化に関する研究^{11), 12), 13)}や個別河

川の塩水遡上や栄養塩流出特性に関する研究¹⁴⁾、河口域のハビタットと生息種に関する研究^{15)、16)}が行われている。また、河川管理の観点から河口の平衡断面形に関する研究¹⁷⁾や河川と海の条件から河口を分類した研究¹⁸⁾が行われている。しかし、河道特性やハビタットと生物相の関係について研究が進んでおらず、当該河川の河道特性と潜在的な生息場の関係や、どのような改修を行えばハビタットが保全されるかという技術的観点から行われた研究はほとんどみられない。

本研究は、河口域における環境に配慮した河道改修技術の構築を最終的な目標とし、河川汽水域に生息する貝類に影響を及ぼす要因について、流域スケールの物理要因と河道特性を対象に調べた。また、貝類相と河道特性との関係を調べ、生物の生息に影響を及ぼす河道特性要因を明らかにした。

2. 方法

(1) 対象河川

本研究では、九州に位置する40の中小河川の汽水域を対象とした(図-1)。これらの河川は、干満差の大きい有明海に流入する河川や波浪が大きい太平洋に流入する河川等、環境のバリエーションを考慮し選定した。

(2) 現地調査

河口の環境を評価する生物相として貝類相を対象とした。貝類は、水質や底質などに影響されやすく、自力での移動能力が低い種や特殊な環境条件下でのみ出現する種も多く、個々の場所における種はその場所の環境の現状を直接反映しており¹⁹⁾、環境の良否の判断や人為的インパクトの検出に最適な生物と考えられる²⁰⁾。

対象河川において大潮または中潮の干潮時に干出する1リーチ内の各ハビタットにおいて50cm×50cmのコドラートを設置し、表層と地中10cmの範囲の貝類(二枚貝綱、腹足綱、多板綱)を採捕し同定を行った。調査は2015年4月28日から2017年2月25日にかけて実施した。また、調査対象区間の河道の縦横断形状及びハビタットの面積を調べるため、RTK-GPSにより地形測量を行った。

(3) 物理指標の算出

本研究では、流域スケールの物理要因と河道特性値の2種の物理指標を設定した。算出方法を以下に記述する。

a) 流域スケールの物理要因

流域スケールの物理要因として、潮汐、波浪、河川の3つのエネルギーを代表する指標を用いた。潮汐に関する指標として①潮位差、波浪に関する指標として②開放度及び③direct fetch、河川に関する指標として④生起確率5年の比流量(以下、比流量)、⑤生起確率5年流量時の河口部における摩擦速度(以下、摩擦速度)及び④河

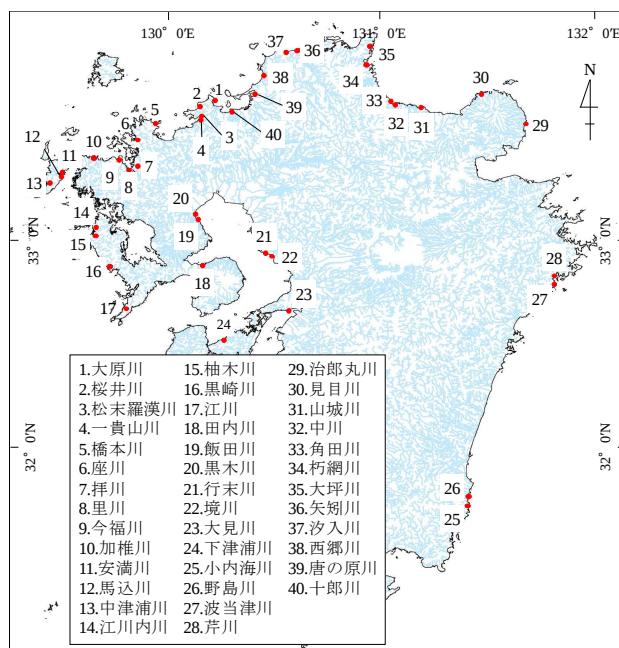


図-1 対象河川の位置図

口の河床勾配(以下、河床勾配)を用いた。これらの指標のうち①～③の算出方法については、既報¹³⁾で報告済みである。各河川における生起確率5年の流量は、対象河川が位置する県が公表している降雨強度式に基づき、合理式により計算した。流出係数は人口密集地を流下する西郷川、唐の原川及び十郎川の3河川で0.8、それ以外の河川で0.7とした。また、流下時間の算定はクラークン式²¹⁾を用いた。⑤摩擦速度は、下式により算出した。

$$u_* = g^{0.5} n^{0.3} Q^{0.3} I^{0.35} B^{-0.3}$$

g: 重力加速度(cm/s²), n: 粗度係数, Q: 流量(cm³/s), I: 河口部の河床勾配, B: 河口部の川幅(cm)

粗度係数は、河道計画検討の手引きにおけるセグメント3区間の粗度係数設定方法²²⁾を参考に、現地の河道の河床材料の状況に応じ、泥河川を0.015、砂河川を0.020、礫河川を0.023とした。④河床勾配は測量成果を用い、測量未実施の河川では国土地理院の電子国土webの標高値を使用した。解析には対数変換した値を用いた。

b) 河道特性値の算出

河道特性値は全40河川のうち、測量実施済みの24河川を対象に平面形、横断形、縦断形、ハビタットの4項目について指標を設定した。平面形については、⑦蛇行度、⑧調査区間における川幅の最大値と最小値の比(以下、川幅最小最大比)、⑨調査区間の各断面における川幅の標準偏差(以下、川幅標準偏差)を測量成果から算出した。次に、横断形に関する指標として、⑩河床の複雑度、⑪比高差及び⑫生起確率5年流量時における川幅水深比(以下、川幅水深比)を用いた。⑩河床の複雑度は河床の総延長を河床幅で除した値であり、⑪比高差は低水路内の高低差を示しており、低水路内の最大標高値と最小標高値の差である。また、⑫川幅水深比は生起確率5年

流量時の水深を等流計算によって求め、川幅の比から算出した。これらの指標は各横断面の平均値を用いた。縦断形に関する指標として、⑥河口部の河床勾配、⑬河床縦断の凸凹度を用いた。⑬河床縦断の凹凸度は、測量区間の上下流端の最深河床高を結んだ直線と各断面の最深河床高の差を表したものであり、下式により算出した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - z_i)^2}$$

h_i : i番目の断面における最深河床高, z_i : i番目の断面における平均河床勾配から算出した河床高

ハビタットに関する指標として、調査区間で確認された、⑭ハビタットの種類、⑮河道面積に占めるハビタット面積の割合（以下、ハビタット率）を用いた。ハビタットは河床材料粒度分布試験の結果に基づき泥、砂、礫及び巨石の4種に加え、岩盤、捨石、人工構造物及び植生をハビタットの種類として追加した。

(4) 統計解析

a) 貝類相に影響を与える物理要因

各河川の貝類相に影響を及ぼす物理要因を明らかにするため、各河川と物理要因の関係を非計量多次元尺度構成法（NMDS: Non-Metric MultiDimensional Scaling²³⁾）によって解析した。河川間の貝類相の類似度はBray-Curtis similarity²⁴⁾を用いた。生物データとして40河川に出現した貝類の有無データを、物理要因として①潮位差、②開放度、③direct fetch、④比流量、⑤摩擦速度、⑥河床勾配を用いた。また、999回のpermutation testを行い、物理要因の有意性を検定した。

b) 河道特性と貝類相の関係

次に、河道特性と貝類相の関係を調べるため、単相関分析を行った。貝類相の豊富さを示す指標として、各河川の種数、個体数及び多様度指数（Shannon-Wienerの H' ）を用いた。単相関分析には、Pearsonの積率相関係数を用いた。統計学的有意水準は危険率5%未満とした。上記の解析には統計解析ソフトRを使用した。

3. 結果及び考察

(1) 生物調査結果

調査の結果採捕された貝類を表-1に示す。40河川で31科68種11,582個体の貝類を採捕した。最も多く採捕されたのは、ウミナナ科のウミナナであり27河川で合計3,732個体が確認された。また、イソシジミ、テリザクラ、コオキナガイなどの二枚貝は生息河川が少なく個体数も僅かであった。河川別に見ると伊万里湾流入河川の坪川で種数、個体数ともに最大であり、17種1,249個体が確認された。調査対象河川のうち、大原川及び橋本川では調査域内で貝類の生息が確認されなかった。

表-1 現地調査の結果採捕された貝類

科名	標準和名	学名	出現河川数	個体数
アッキガイ科	イボニシ レイシガイ	<i>Thais clavigera</i> <i>Reishia bronni</i>	6 1	52 1
アマオブネガイ科	アマガイ イシマキガイ ヒロクチカノコ	<i>Nerita japonica</i> <i>Clithon retropicta</i> <i>Neripteron cornucopia</i>	10 21 4	307 293 21
イガイ科	イガイ コウロエンカワヒバリガ ヒバリガイ ヒバリガイモドキ ムラサキイガイ	<i>Mytilus coruscus</i> <i>Xenostrobus securis</i> <i>Modiolus nipponicus</i> <i>Hormomya mutabilis</i> <i>Mytilus galloprovincialis</i>	1 1 2 10 20	1 6 35 214 345
ウスヒザラガイ科	ウスヒザラガイ	<i>Ischnochiton comptus</i>	1	5
ウミナナ科	ウミナナ ホソウミナナ	<i>Batillaria multiformis</i> <i>Batillaria attramentaria</i>	27 18	3732 1052
エゾバイ科	イソニナ	<i>Japeuthria ferrea</i>	2	5
オカミミガイ科	ウスコミミガイ	<i>Laemodonta exaratoidea</i>	1	1
オキナガイ科	コオキナガイ ソトオリガイ	<i>Laternula boschasina</i> <i>Laternula (Exolaternula) marilina</i>	2 2	3 22
オニノツガイ科	コグツノブエ	<i>Cerithium coralium</i>	1	1
カラマツガイ科	カラマツガイ	<i>Siphonaria japonica</i>	1	2
カワザンショウガイ科	カワザンショウ類	<i>Assiminea sp.</i>	14	1469
クサズリガイ科	ヒザラガイ	<i>Acanthopleura japonica</i>	1	1
サザエ科	カンギク スガイ	<i>Turbo coronatus coronatus</i> <i>Turbo cornatus coreensis</i>	2 6	4 43
シオサザナミ科	イソシジミ オチバガイ ハザクラ	<i>Nuttallia comoda</i> <i>Psammotaea virescens</i> <i>Psammotaea minor</i>	1 2 2	1 18 13
シジミ科	ヤマトシジミ	<i>Carbicula japonica</i>	3	9
タマキビ科	アラレタマキビ タマキビ ヒメウスラタマキビ マルウスラタマキビ	<i>Nodilittorina radiata</i> <i>Littorina brevicula</i> <i>Littoraria intermedia</i> <i>Littoraria articulata</i>	3 21 12 3	58 296 260 95
チドリマスオ科	クチバガイ	<i>Coccella chinensis</i>	6	17
ニシキウス科	イシダミ クマノコガイ クロヅケガイ コシダカカシガラ	<i>Monodonta labio form confusa</i> <i>Chlorostoma xanthostigma</i> <i>Monodonta neritoides</i> <i>Omphalius rusticus</i>	10 1 1 1	89 1 2 1
ニッコウガイ科	サクラガイ テリザクラ	<i>Niiodontella hokkaidoensis</i> <i>Moerella iridescens</i>	1 1	2 1
バカガイ科	チヨノハナガイ	<i>Raetellops pulchellus</i>	1	2
ハナダモリ科	ハナダモリ	<i>Glaucanome chinensis</i>	4	63
フトヘナタリ科	カワアイ クロヘナタリ シマヘナタリ フトヘナタリ ヘナタリ	<i>Cerithidea djadjarisensis</i> <i>Cerithidea largillierti</i> <i>Cerithidea ornata</i> <i>Cerithidea rhizophorarum</i> <i>Cerithidea cingulata</i>	4 3 6 15 7	584 44 43 567 1135
フナガタガイ科	ウネナシトマヤカイ	<i>Trapezium oblongum</i>	8	59
フネガイ科	カリガネガイ	<i>Barbatia virescens</i>	7	41
マクガイ科	マクガイ	<i>Isoqanomon ephippium</i>	1	10
マルスタレガイ科	アサリ オキシジミ ハマグリ	<i>Ruditapes philippinarum</i> <i>Cyclina sinensis</i> <i>Meretrix lusoria</i>	6 6 2	91 33 4
ムシロガイ科	アラムシロ ヒメムシロ	<i>Reticunassa festiva</i> <i>Nassarius multigranosa</i>	3 1	23 6
ユキズメガイ科	ツナメリミヤコドリ ミヤコドリ カスリアオガイ クモリアオガイ コウダカアオガイ コモレビコガモガイ シボリガイ ツボミガイ アオガイ ウノアシ カモガイ	<i>Phenacolepas unguiformis</i> <i>Cinnalepeta pulchella</i> <i>Nipponacmea radula</i> <i>Nipponacmea nigrans</i> <i>Nipponacmea concinna</i> <i>Lotia tenuisculpta</i> <i>Patelloida pygmaea</i> <i>Patelloida pygmaea form conulus</i> <i>Nipponacmea gloriosa</i> <i>Patelloida saccharina</i> <i>Lotia dorsuosa</i>	2 2 6 6 2 1 7 12 1 1 1	7 9 26 73 8 1 179 1 1 1
ユキノカサガイ科	ヒメコザラ	<i>Patelloida pygmaea form heroldi</i>	9	46
ヨメガカサガイ科	マツバガイ ヨメガカサ	<i>Cellana nigrolineata</i> <i>Cellana toreuma</i>	4 1	15 4
リンゴガイ科	スクミリンゴガイ	<i>Pomacea canaliculata</i>	1	18

(2) 貝類相による河川の類型化と物理指標

NMDSの結果得られた、各河川の平面上のプロットを図-2に示す。貝類相による類型化の結果、対象とした40河川は図中の曲線で囲まれる3つのグループに分類された。また、permutation test (p<0.05) によって選択された物理要因をベクトルで示した。選択された物理要因は波浪のエネルギーの指標である②開放度及び③direct fetchが第1軸の正の方向に、河川のエネルギーの指標である⑤摩擦速度が第2軸の正の方向に、潮汐のエネルギーを示す①潮位差及び⑥河床勾配が、第2軸の負の方向に配置された。

表-2に類型化された各グループの物理要因の特徴を示した。Group1 (14河川) は、3グループのなかで最も②direct fetch及び③開放度が最も低く波浪のエネルギーが小さいグループである。ホソウミナナやウミナナ類に付

着するツボミガイが多く確認された。Group2（12河川）は、①潮位差が大きく、⑥河床勾配が最も緩勾配であり、潮汐のエネルギーが卓越するグループである。干潟に多く生息するウミニナや潮の飛沫する環境に生息するタマキビの出現率が高い。Group3（14河川）は摩擦速度が最も大きく、河川のエネルギーが卓越するグループである。感潮域上流端の低塩分域に多く生息するイシマキガイの出現率が高かった。

対象とした河川は、潮汐、波浪、河川の3つの外力の大きさによって類型化され、各グループで特徴的な種は、それぞれのグループに属する河川の環境構造を反映していると考えられる。

(3) 河道特性値と生物相の関係

表-3に生物指標と河道特性について単相関分析を行った結果を示す。貝類種数は、6種の河道特性値と有意な相関が見られ、特に、河川の横断形の指標である比高差及び川幅水深比と有意な正の相関がみられた。また、個体数と有意な正の相関を示したのは、河床勾配であり、緩勾配であるほど個体数が増加する傾向にある。また、蛇行度及び川幅水深比が多様度指数と有意な正の相関がみられた。

次に、比高差と種数、河床勾配と個体数及び川幅水深と種数について、(2)で分類したグループ毎にプロットした結果を図-3～図-5に示す。比高差について、group1及びgroup2と比較して、group3に属する河川で値が小さく、最大の河川でも1.1mであった。これは、group3に属する河川は、河川のエネルギーが卓越するため、洪水時に堆積土砂がフラッシュされ高標高域が存在しにくいことや、泥質のハビタットが卓越するgroup1の河川とは異なり、河岸構成材料が砂質の河川が多く分類されていることから、河岸高に差異が生じた可能性が考えられる（図-3）。

次に、河床勾配と個体数の関係について考察する。Group3に属する河川は勾配が急で生息個体数が少ないのに対し、group1に属する河川では、多くの個体の生息がみられた（図-4）。この理由として、group1に属する河川は緩勾配で潮汐差が大きく感潮区間が長いから、多くの種や個体の生息基盤が豊富にあることが考えられる。

最後に、川幅水深比と種数の関係に着目する。図-5より、group3を除き、川幅水深比が20以上では、10種以上の生息が確認された。また、group3の河川では、川幅水深比が20以上の河川でも生息種が5～6種と他のgroupと比較して低い結果となった。これらの河川では急勾配で潮位差も小さいことから、感潮区間が狭く、生息区間が限られていることが要因として考えられる。

このように、group間の河道特性の違いが、生息する種数や個体数に影響を及ぼしていることから、環境修復や保全を行う際には、河道特性が類似したgroup毎に評価や目標設定を行う必要がある。

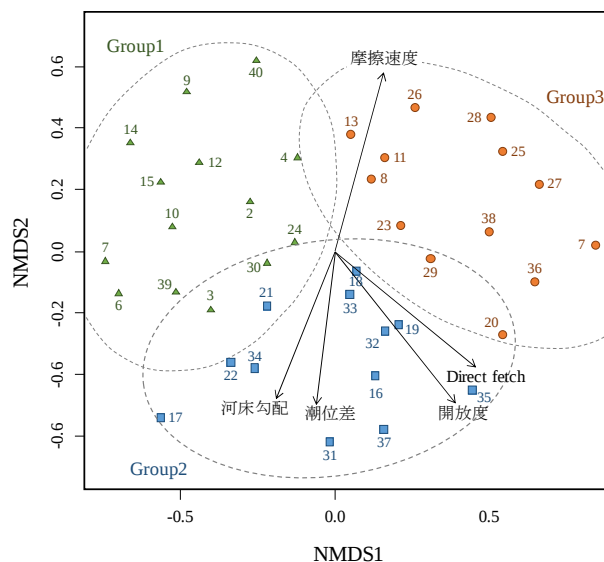


図-2 NMDSによる対象河川の貝類相の解析と物理要因

表-2 各groupの物理要因の特徴

	潮位差(cm)	Direct fetch(km)	開放度	河床勾配	摩擦速度(cm/s)
Group1	248 ± 49	43.8 ± 74.6	1.21 ± 1.58	2.53 ± 0.62	30.7 ± 15.4
Group2	395 ± 110	302 ± 480	6.17 ± 4.17	2.76 ± 0.56	23.8 ± 10.6
Group3	255 ± 99	313 ± 331	4.64 ± 5.00	2.23 ± 0.25	38.3 ± 10.1

表-3 生物指標と河道特性の単相関分析結果

	種数	個体数	多様度指数
平面形			
蛇行度	0.59 **	0.06	0.58 ***
川幅最小最大比	0.38	0.05	0.11
川幅標準偏差	0.33	0.03	0.03
横断形			
河床の複雑度	0.48 *	0.19	0.3
比高差	0.63 ***	0.31	0.29
川幅水深比	0.58 ***	0.08	0.42 *
縦断形			
河床勾配	0.49 *	0.68 ***	0.16
河床の凸凹度	0.17	-0.16	0.02
ハビタット			
種類	0.46 *	0.21	0.23
ハビタット率	0.02	0.06	-0.18

*** 0.1%水準で有意, ** 1%水準で有意, * 5%水準で有意

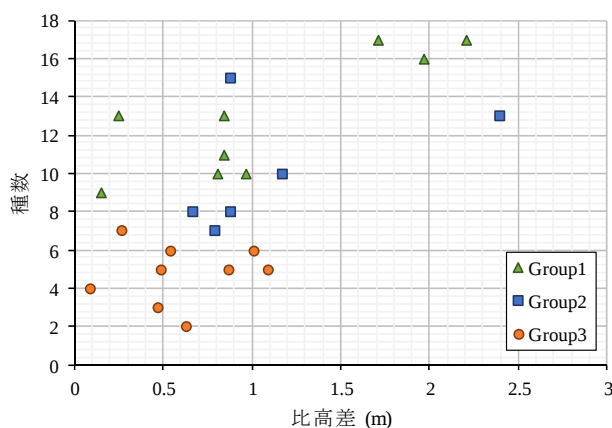


図-3 比高差と種数の関係

(4) 河川改修技術への応用

単相関分析の結果、河川の平面形、横断形及び縦断形を代表する指標と貝類相の豊富さに関する指標との間に有意な相関関係がみられた。本節では、上記の結果を踏まえ、河川改修時に配慮すべき事項について述べる。

a) 平面形

河川の平面形に関する指標と生物相の単相関分析の結果、蛇行度と種数の間に有意な正の相関関係がみられた。蛇行により砂州が形成され、河道内に多様な標高分布が生じることで、多様なハビタットが形成されと考えられる。一方、本研究で対象とした川幅の変化に関する指標は、生物指標と有意な相関関係はみられなかった。しかし、川幅の変化は土砂堆積や流速の変化をもたらすため、河道環境の多様性を支える重要な要因と考えられる。対象河川で最も多くの種が確認された加椎川及び拝川は、急拡などの川幅の変化によって多様なハビタットが形成されており（図-6）、川幅を変化させることは、河川汽水域の河道改修の際の環境配慮として重要である。多自然川づくりポイントブックⅢ²⁾において、一律の川幅にせず川幅（河床幅）に変化を与える工夫を行うという配慮事項は、河口域にも適用されるものと考えられる。

b) 横断形

単相関分析の結果、河床の複雑度、比高差及び川幅水深比が生息種数との間に有意な正の相関がみられた。河床の複雑度及び比高差が大きいことは、河道内の標高分布が多様であることを意味しており、多様な標高分布が潮上帯、潮間帯、潮下帯といった幅広い塩分濃度や河床材料の多様性を生じさせ、多様な種の生息基盤を創出していることを示唆している。従って、河川汽水域で河床掘削を行う場合は、比高差の維持或は創出が重要であり、現在河川中流域を対象として滞筋保全のために実施されているスライドダウンによる掘削では、低水路内の高標高域を失う可能性がある。河川汽水域では、低水路内の標高分布に配慮した河道掘削方法の構築が必要である。

また、川幅水深比が生息種数と多様度指数に影響を与える指標であることが明らかとなった。ヘナタリ類やカワザンショウ類の巻貝類は、干潟や植生上に転がって生息する種であり、川幅水深比が小さい河川では、洪水時に掃流され定着しにくいものと考えられる。

大石（2013）は、中小河川の中流域を対象に、降雨規模確率1年時の水深と川幅の比が15以上の場合に砂州の発達や瀬・淵の形成が明瞭になることを明らかにしている²⁾。本研究では、河口域においても、川幅水深比が20以上の河川で確認種数が増加する傾向が確認されており、川幅水深比が河道内環境の多様度を示す指標となり得ることが示唆された。

c) 縦断形

単相関分析の結果、縦断形の指標として河床勾配が種数及び個体数と有意な正の相関が確認された。これは、(2)で述べた通り河川の特徴を反映したものである。本

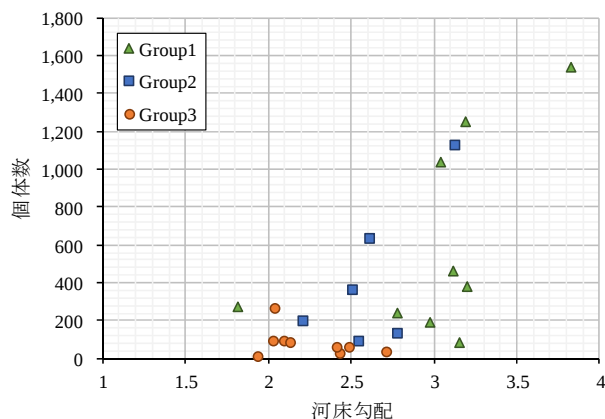


図-4 河床勾配と個体数の関係

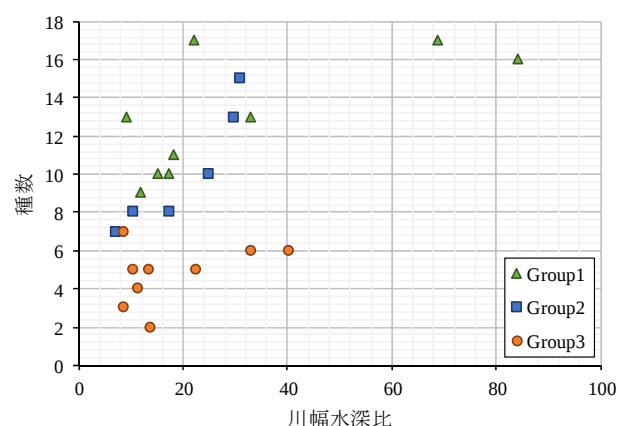


図-5 川幅水深比と種数の関係

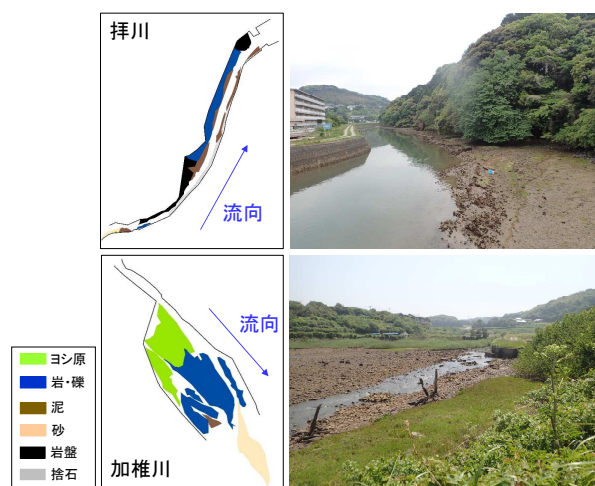


図-6 川幅の変化とハビタットの多様性

研究では、河床の縦断的な凹凸を示す指標が生物相との関係に有意な差がみられなかったが、汽水域で生じる瀬環境保全上重要と考えられる。本研究では干出したハビタットに生息する貝類を対象としており、水中を利用する他の分類群を用いた評価により、河床縦断形状と生物相の関係を把握する必要がある。

4. 結論

(1) NMDSの結果、対象とした40河川は貝類相の類似度から3つの区分に類型化された。また、それらの分類は、潮汐、波浪、河川の3つの外力に特徴付けられた。

(2) 貝類相と河道特性の単相関分析の結果、蛇行度、河床の複雑度、比高差、川幅水深比、河床勾配、ハビタットの種数が貝類相と有意な正の相関関係がみられた。

(3) 蛇行度、低水路内の比高差及び川幅水深比が貝類の多様性に重要であることから、河道改修時の法線形の設定、河床掘削の際の高標高域の維持や過度な掘削による川幅水深比の低下に配慮が必要である。

謝辞：本研究はJSPS科研費 JP15K18144及び公益財団法人河川財団の運用する河川基金の助成を受けた。

参考文献

- 1) 国土交通省：中小河川に関する河道計画の技術基準について、2008。
- 2) 多自然川づくり研究会：多自然川づくりポイントブックⅢ 中小河川に関する河道計画の技術基準；解説。公益社団法人日本河川協会、東京、2011。
- 3) 山本晃一：沖積河川 一構造と動態一。（財）河川環境管理財団・企画、技報堂出版、東京、2010。
- 4) Schröder-Adams, C.J, Boyd, R.L. and Tran, T.: Estuarine foraminiferal biofacies pattern compared to the brackish ichnofacies model: Port Stephens, southeast Australia, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*., Vol.139, pp.78-87, 2014.
- 5) Cohen, A.N. and Carlton, J.T.: Accelerating invasion rate in a highly invaded estuary, *Science*., Vol.279, pp.555-558, 1998.
- 6) Edgar, G.J, Barrett, N.S, Graddon, D.J. and Last, P.R.: The conservation significance of estuaries: A classification of Tasmanian estuaries using ecological, physical and demographic attributes as a case study, *Biological Conservation*., Vol.92, pp.383-397, 2000.
- 7) Borja, A, Bricker, S.B, Dauer, D.M, Demetriades, N.T, Ferreira, J.G, Forbes, A.T, Hutchings, P, Jia, X, Kenchington, R, Marques, J.C. and Zhu, C.: Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide, *Marine Pollution Bulletin*., Vol.56, pp.1519-1537, 2008.
- 8) Voulvoulis, N., Arpon, K.D. and Giakoumis, T. The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation, *Science of the Total Environment*. Vol.575, pp.358-366, 2017.
- 9) Heap, A, Bryce, S, Ryan, D, Redke, L. and Smith, R.: Australian Estuaries and Coastal Waterways: A Perspective for Improved and Integrated Resource Management, *Australian Geological Survey Organization*. Record 2001/07, 2001.
- 10) Harrison, T.D. and Whitfield, A.K.: Fish trophic structure in estuaries, with particular emphasis on estuarine typology and zoogeography, *Journal of Fish Biology*., Vol.81, pp.2005-2029, 2012.
- 11) 楠田哲也, 山本晃一（監修）, 河川環境管理財団（編）：河川汽水域, 技報堂出版, 2008.
- 12) 岸田弘之, 天野邦彦, 大沼克弘, 遠藤希実：河川汽水域の環境管理技術確立のための全国一級水系の汽水域環境類型化, 土木学会論文集B1（水工学）, Vol. 67, pp. I _1237-1278, 2011.
- 13) 巖島伶, 吉川寛朗, 島谷幸宏：Ecoregionの概念に基づく底生動物相及び物理環境による河口域の類型化, 土木学会論文集B1（水工学）, Vol.73, No.4, pp. I _1171- I _1176-58, 2017.
- 14) 横山勝英, 岩附豊佳, 児玉真史, 岡村和磨, 山本浩一, 池ノ谷直樹：春季の高濁度感潮域における栄養塩分布特性に関する調査研究, 土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol. 67, pp. I _901-905, 2011.
- 15) 山西博幸, 楠田哲也, 李昇潤, 原浅黄, 村上啓介：北川感潮部における水理・水質変動とカワスナガニの生息環境に関する研究, 環境工学研究論文集, 第37巻, pp.173-181, 2000.
- 16) 天野邦彦, 遠藤希実, 大沼克弘：ヤマトシジミの生息域として見た菊池川河口域の環境変遷と修復の可能性評価, 土木学会論文集B1（水工学）, Vol.68, pp. I _1561- I _1566, 2002.
- 17) 山本晃一：河口の断面特性, 第23回海岸工学講演会, pp.284-290, 1976.
- 18) 須賀堯三：河口の分類と水理特性, 水理講演会論文集, Vol. 32, pp.197-202, 1988.
- 19) 佐藤正典：有明海の生物多様性保全のための四学会合同シンポジウム有明海の特異な生物相—諫早湾の環境復元の意義—, 日本ベントス学会誌, Vol.66, pp.102-116, 2012.
- 20) Koutsoubas, D, Dounas, C, Arvanitidis, C, Kornilios, S, Petihakis, G., Triantafyllou, G. and Eleftheriou, A.: Macrobenthic community structure and disturbance assessment in Gialova Lagoon, Ionian Sea. *ICES Journal of Marine Science*., Vol.57, pp.1472-1480, 2000.
- 21) 井口昌平：コウ水の到達速度に関するいわゆるRzihaの公式とKravenの表の由来について, 土木学会誌42-1, pp.25-27, 1957.
- 22) 国土技術研究センター（編）：河道計画検討の手引き, 山海堂, 2003.
- 23) Kruskal, J.B.: Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis, *Psychometrika*., Vol.29(1), pp.1-27, 1964.
- 24) Bray, J.R. and J.T. Curtis.: An Ordination of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin, *Ecological Monographs*., Vol.27, pp.325-349, 1957.
- 25) 大石哲也, 原田守啓, 高岡広樹, 萱場祐一：生物生息場に配慮した中小河川における最小川幅設定についての一考察, 第68回土木学会年次学術講演会講演集, pp. 135-136, 2013.

(2017. 4. 3受付)