

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

RIVERINE ESTUARY CLASSIFICATION FOR THE SAKE OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION

岸田弘之¹・天野邦彦²・大沼克弘³・遠藤希実⁴
Hiroyuki KISHIDA, Kunihiko AMANO, Katsuhiko OONUMA and Maremi ENDOH

¹正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 環境研究部長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 博(工) 同 環境研究部 河川環境研究室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 工修 同 環境研究部 河川環境研究室 主任研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 工修 同 環境研究部 河川環境研究室 研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

The environment of riverine estuaries is characterized by many factors including tidal oscillation, river flow and morphology, and the combination of these factors makes each estuary unique in its environment. However, there are similarities among some estuaries. We have tried to classify Japan's 109 riverine estuaries based on physical environmental factors like tidal oscillation, wave energy, and high and low river flow. 109 riverine estuaries were divided into 5 classifications. Fish species monitoring data have also been analyzed to categorize riverine estuaries and the results were compared to 5 classifications divided by physical factors. Since our physical and biological classification both seemed to be related to the salinity of the estuary, these two classifications showed fair conformity.

Key Words : Estuary, classification, physical environment, Biological environment, TWINSpan

1. はじめに

淡水と海水が混じり合う汽水域では、河川と海洋の双方から潮位、波浪、洪水、土砂供給や汚濁付加などの外力を受けて、複雑な物理・化学的現象が生じている。さらに、このような特徴を持つ物理・化学的環境の下で、これに適応した特徴的なハビタット(生物の生息場所)が形成されている。このように汽水域では多様な物理・化学的環境やハビタットが微妙なバランスのもとで形成されているため、河道掘削等の河川改修や下水処理水の放流等人為的な改変を行おうとする場合には、様々な側面から影響を検討・把握する必要がある。しかしながら、汽水域を対象とした従来の研究は個別の現象や個別河川等について行われているものが多く、人為的なインパクトに対する様々な環境影響に必要な体系的な研究が十分行われていないのが現状である。さらに、長期的には地球温暖化に伴う海面上昇による河口域の治水安全度の低下や塩水遡上による利水への影響が懸念されることを勘

案すると、このような変化をも視野に入れて、治水・利水・環境が総合的に調和した汽水域の保全・再生・管理が必要である。

上記の必要性に鑑みて、汽水域をその特性により類型化することが本研究の目的である。複雑で固有性の高い汽水域環境であるが、類似の汽水域を環境特性により類型化することができれば、同一類型の複数河川の中から人為的改変の程度が異なる河川を選んで、これらの環境を比較することで、特定の人為的改変の環境影響を評価することが可能になることや、比較的人為的改変の少ない河川を選んで、その環境を調査し、これを対照河川とすることで、同一類型の河川汽水域の環境保全目標を相当程度客観的に設定することが可能になるといった利点がある。このようなねらいと目的を実現するため、汽水域環境の特性を規定すると考えられる自然環境要素を抽出し、全国一級水系河川の汽水域の類型化を実施した。

2. 研究方法

河口域において水位が潮汐の影響を受ける区間を一般に感潮域と呼ぶが、その中でも実際に海水が遡上する部分は、河川と海洋の環境の遷移領域になっており、物理的、化学的、生物的環境が複雑に影響し合う場である。本稿では、このような場を河川汽水域と定義して、その環境特性に着目した類型化について検討を行う。

河川汽水域の環境は、主に河川と海洋との相互作用により形成されると考えられるため、両者の特性の組み合わせにより特徴が異なり、多様なものと想定される。このように多様と考えられる河川汽水域の環境について考察しようとするならば、ある程度の類型化を行い、類型毎の比較や類型内での河川毎の比較を行うことで、環境評価が行いやすいと考えられる。

汽水域の物理特性のみに着目した類型化の試みは古くから行われている¹²⁾³⁾。また近年では、単に物理特性のみを対象にせず、より広い環境特性に基づいた汽水域の類型化事例が存在する。例えば米国において、汚濁を希釈やフラッシュにより低減する汽水域の能力を物理指標により評価して汚濁に対する抵抗力を分類した事例⁴⁾がある他、タスマニア島の汽水域についてGISを用いて潮汐、塩分、汽水域の大きさや河川流量などのデータを整理して物理環境特性による類型化を行うと共に、この類型化の妥当性を底生動物と魚類のデータとの比較で検証した事例⁵⁾などがある。

本研究は、日本の河川汽水域について物理特性による類型化と生物データによる類型化の対応性の検討を行い、汽水域環境保全の方向性整理の確立を目指すものである。このためにまず全国109一級水系を対象に汽水域環境に関する悉皆調査を行い、汽水域環境を強く規定すると考えられる河川及び海洋の物理環境指標による類型化を行った。また、河川水辺の国勢調査により得られた生物情報を解析することで、生物生息状況を調査し、物理環境指標による類型化との比較を行った。上記の検討について、項目毎に以下に述べる。

(1) 全国109一級水系汽水域の物理環境に関する悉皆調査

日本における河川汽水域の物理環境分類に関する調査として、土木研究所により実施された海水と淡水の混合形態に関する全国調査⁶⁾がある。また、日本の河川汽水域の大分類を行った事例⁷⁾がある。今回実施する全国109一級水系汽水域環境に関する悉皆調査では、これらを参考に全国の河川汽水域の自然環境を物理環境により類型化することを目的にデータ収集と解析を行った。

汽水域の物理環境と一言で言っても、その構成要素は多岐にわたるため、類型化の指標に何を選定するかは、類型化の目的により無数の候補がある。ただし本研究の大きな目的は、河川汽水域の自然環境の保全に資する管理手法を確立することにあるので、生物の生息に強く影響すると考えられる規定要因の特性に基づいた類型化が

必要である。また生物の生息に影響する要因は非生物のものだけではないが、ここでは、単純化のために非生物的要因にのみ着目して、類型化を行うことを物理環境による類型化と捉えることとする。以上のことから、河川汽水域において生物の生息を強く規定する非生物的要因を指標として類型化を行うという方針を立てた。

ところで、河川汽水域は河川の一部でありながら、潮汐の影響を受けることで、塩分濃度の高い海水が混合していることや、定期的な水位変動や流況変動が生じているということで特徴づけられている。河川汽水域は、まさに潮汐による海水の混合と変動特性により環境が規定されていると考えてよい。この特性や程度が、物質動態や、種々の生化学的反応、生物生息環境に影響し、総じて河川汽水域環境を形成していると考えられる。

上記の類型化の方針と河川汽水域の特徴に鑑みて、本研究では、汽水域環境を規定する物理環境指標として、河川流量、河床勾配、潮汐差、波浪を取り上げて汽水域環境の類型化を行うこととした。これまで行われてきた多くの汽水域環境の類型化は、塩分混合状況を評価するものが多い。今回行う物理環境指標による類型化も塩分混合状況を評価することを意識したものとなっているが、マクロな視点から、簡便に評価できる指標を採用した。

a) 河川に関する物理指標

河川汽水域の物理環境を河川の側から規定する要因を考えると、上流から供給される河川水と土砂が、まず挙げられる。河川が運搬する水と土砂の量は、常に変動しており、特に出水時には平常時と異なり大量の水と土砂が運搬される。このため、平常時と出水時における河川が運搬する水及び土砂が汽水域環境に与える影響は異なることが推察される。汽水域に生息する生物にとって平常時の環境が通常経験するものであるため、平常時の環境を代表する指標についてまず検討する。また、出水時については、出水規模により種々の影響があることが推察されるが、これらを全て網羅する指標を検討することは複雑すぎるため、河道形状を形成する程度の出水を表す指標を検討することとした。

生物には河川流量が減少して塩分濃度が上昇する際の影響が大きいと考えられるため、このことも考慮して河川水については、平常時を代表する（平常時の環境を形成する）指標として、河口における単位幅当たりの低水流量を選定した。また、出水時を代表する（汽水域地形を形成する）指標としては、平均年最大流量を選定した。平均年最大流量を選んだのは、これは河道形状形成に強く関係する低水路満杯流量に概ね一致すると指摘されている⁸⁾ためである。土砂に関しては定量的なデータの存在状況に制約があることから、河床材料の視点を含ませることを目的に河床材料（粒径）と関係が深い河床勾配を指標として選定した。

平常時流量としては、流量年表あるいは水文水質DBに掲載されている各水系の最下流の流量観測所において

表-1 物理特性による類型化に使用した物理指標

		平常時の環境形成要因による類型化	地形形成要因による類型化
類型化に用いる物理指標	川の力	単位幅当たり低水流量	平均年最大流量
	川の形状	河床勾配	
	海の力	潮汐差	波浪, 潮汐差
類型化により分類が想定される事象	汽水域区間長, 混合形態	干潟・砂州の地形・形態	

1994～2003年に観測された低水流量の期間平均値を算出し、これを横断測量結果および航空写真から求めた河口における水面幅で除することで、単位幅当たりの平常時流量とした。出水時流量としては、平常時流量同様に流量年表あるいは水文水質DBに掲載されている各水系の最下流の流量観測所において1994～2003年に観測されたデータを対象として、年ごとに時間最大流量を求め、期間平均値を算出した。河床勾配については、各水系における河川整備基本方針に記載された最下流セグメントにおける実河床勾配を収集した。

b) 海洋に関する物理指標

河川汽水域の物理環境を海洋の側から規定する要因としては、潮汐と波浪が挙げられる。沿岸漂砂も重要な要因であることが推察されるが、河川同様に定量的データの存在状況の制約から、本稿では対象としない。

潮汐については、潮汐差を指標として選定した。潮汐差は、JODCおよび国土地理院により集計された河口に最も近い検潮所において1994～2003年に観測された潮位データを集計し、この期間中の朔望平均満潮位と朔望平均干潮位の差として算出した。また、波浪については、沿岸技術研究センターの海象年表から、河口に最も近い検潮所において1994～2003年に観測されたエネルギー平均波高を集計した。

(2) 物理特性による類型化

物理特性による類型化は、平常時を代表する（通常の環境を形成する）指標と出水時を代表する（汽水域地形を形成する）指標を対象に2種類の類型化を試みた。それぞれに用いた指標の組み合わせを表-1に示す。

類型化の手法としては、まず表-1の指標に関して主成分分析を行い、主成分と主成分得点を求めた。その後、固有値が1以上の主成分について、主成分得点を対象としたクラスター分析を行うことで、汽水域の類型化を行った。

(3) 生物（魚類）出現特性による類型化

生物種による水域環境の類型化は近年盛んに行われており、日本の河川に対して試みられた事例もある⁹⁾。本検討では、109一級水系のうち、汽水域区間において河川水辺の国勢調査による魚類の調査結果がある85水系を対象に2001～2005年の出現魚類データを用いて、調査地点と出現種による分類に使用されることが多い

TWINSPAN分析による類型化¹⁰⁾を行った。また、この類型化の指標種とその他出現種の生態情報から各類型の特徴について検討した。

3. 結果

(1) 全国109一級水系汽水域の物理環境に関する悉皆調査と類型化

a) 平常時の環境形成要因による類型化

単位幅当たり低水流量(m^2/s)、河床勾配、潮汐差(m)に関して主成分分析を行った結果を表-2に示す。固有値が1以上の2つの主成分について、109水系の値を2次元平面にプロットした結果を図-1に示す。図-1における各プロットの色は、クラスター解析により5つに類型化された結果を示している。

図-2には、クラスター解析により5つに類型化された水系の全国分布を示す。平常時の環境形成要因により5つに類型化されたが、図-1のプロットの番号順に、表-3の様に分類できる。第1主成分の値が正の水系は、潮汐差が大きいグループであり、3つ目のグループは有明海に流入する河川が主なものとなっている。また第1主成分が負になっている水系は単位幅当たりの低水流量が大きい水系である。第2主成分については、主に河床勾配が支配的要素であり、値が小さいほど（図-1においては左にあるほど）勾配が大きい水系である。

b) 地形形成要因による類型化

平均年最大流量(m^3/s)、潮汐差(m)、河床勾配、エネルギー平均波高 (m) に関して主成分分析を行った結果を表-4に示す。固有値が0.8以上の3つの主成分について、109水系の値を求めクラスター解析により5つに類型化された結果の全国分布を図-3に示す。図-3における各河川の色は、クラスター解析により5つに類型化された結果を示している。地形形成要因によって5つに類型化した結果は、表-5の様に分類できる。第1主成分の値が小さい水系は、大きい潮汐差により特徴付けられ、大きい水系は、波浪が大きいことで特徴付けられている。また、第2主成分の値が小さい水系は洪水時の流量が大きく、大きい水系は河床勾配が大きいという特徴が見られる。

(2) 生物（魚類）出現特性による類型化

表-6に出現魚類による類型化と物理環境による類型化の結果の比較を示す。また、山本ら⁶⁾による塩水混合形態の整理結果についても引用して最下行に示す。今回実施した類型化結果と山本らが分類した塩水混合形態を比較する場合、平常時の環境形成要因による類型化の結果と比較するのが妥当である。山本らにより強混合と分類された河川は全て潮汐差が大きい河川として分類され（潮汐Ⅰ型、潮汐Ⅱ型）、緩混合と分類された河川は北海道の河川を除いてほとんどが潮汐Ⅰ型に分類されてい

表-2 平常時の環境形成要因による主成分分析結果

主成分番号	固有値	寄与率(%)	累積寄与率(%)
1	1.51	50.18	50.18
2	1.02	33.96	84.14
3	0.48	15.86	100.00
固有ベクトル	主成分1	主成分2	主成分3
潮汐差(m)	0.7133	0.0267	0.7003
河床勾配	-0.3008	-0.8909	0.3403
単位幅当たり低水流量(m ² /s)	-0.6330	0.4534	0.6275

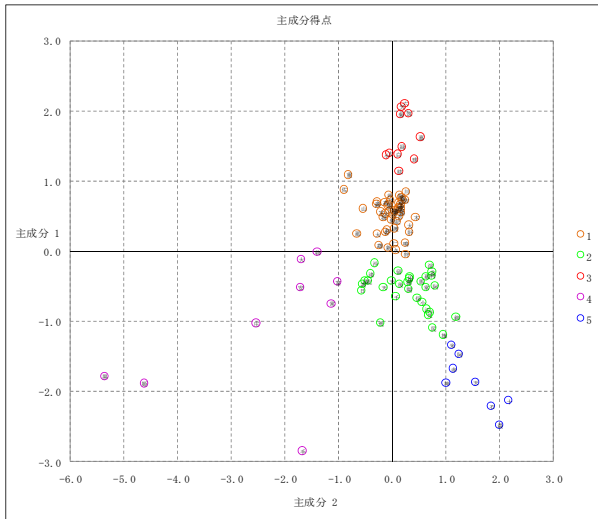


図-1 平常時の環境形成要因による類型化

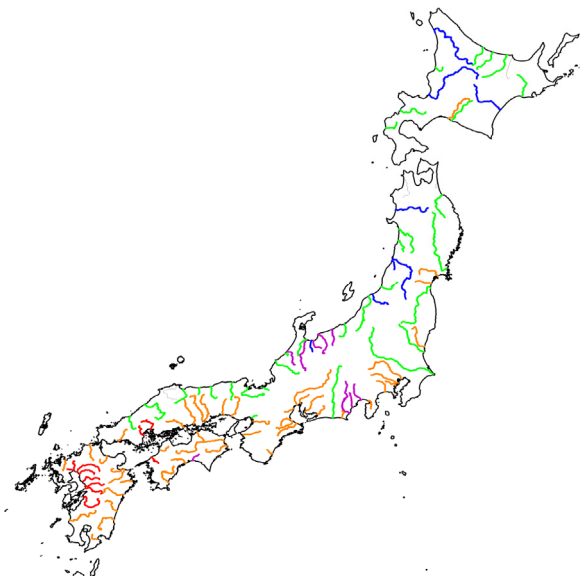


図-2 平常時の環境形成要因による類型の全国分布

表-3 平常時の環境形成要因による類型

クラスター	名称	特徴	水系の分布
1	潮汐Ⅰ型	潮汐がやや大きい	太平洋側
2	流量Ⅰ型	河川流量がやや多い	日本海側, 太平洋側
3	潮汐Ⅱ型	潮汐が非常に大きい	有明, 瀬戸内海の一部
4	勾配型	勾配が大きい	北陸~中国, 東海
5	流量Ⅱ型	勾配が緩く流量が多い	主に日本海側の大河川

表-4 地形形成要因による主成分分析結果

主成分番号	固有値	寄与率(%)	累積寄与率(%)	
1	1.71	42.69	42.69	
2	1.11	27.73	70.42	
3	0.89	22.22	92.64	
4	0.29	7.36	100.0	
固有ベクトル	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
平均年最大流量(m ³ /s)	0.0941	-0.6872	-0.7203	0.0029
潮汐差(m)	-0.7048	-0.0574	-0.0345	0.7062
河床勾配	0.2150	0.6992	-0.6380	0.2403
エネルギー平均波高(m)	0.6694	-0.1885	0.2699	0.6660

表-5 地形形成要因による類型

クラスター	名称	特徴	水系の分布
1	均衡型	外力が均衡している	全国
2	波浪型	波浪が大きい	日本海側
3	潮汐型	潮汐が大きい	太平洋側の内湾
4	流量型	河川流量が多い	外湾に注ぐ大河川
5	勾配型	勾配が大きい	北陸, 東海

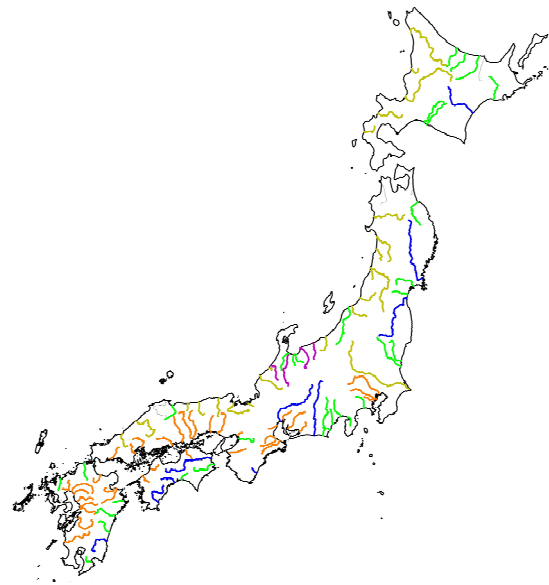


図-3 地形形成要因による類型の全国分布

る。また、弱混合と分類された河川は、流量Ⅰ型、流量Ⅱ型に分類される結果となった。

汽水域出現魚類による類型化の結果(表-6)を見ると、まず北海道の河川とそれ以外の2つに大きく分けられることがわかる(レベル1の区分)。すなわち北海道の河川では、ウグイ属(エゾウグイと考えられるが属レベル以下識別不能)が典型的に出現するのに対して、それ以外の河川ではあまり見られず、マハゼやボラは逆に北海道以外の河川ではほとんどの河川で見られるのに対して、北海道では見られない。また、北海道の河川に典型的に見られる北方性の種以外の魚種について見ると、海水性~汽水性の種と汽水性~淡水性の種により河川が大きく分類(レベル2の区分)される。このレベル2の区分の指標種となるのは、海水性ではキチヌ、淡水性ではコイ、ヌマチチブ、モツゴ、ゲンゴロウブナである。

表—6 出現魚種によるTWINSPAN分析結果

魚種	汽水～海水性の種が主に出現															淡水～汽水性の種が主に出現															2011年の出現																						
	香井	白井	矢野	高田	紀伊	大津	新大	小松	松川	那賀	香取	加古	吉野	信濃	大津	五ヶ	仁大	小大	矢野	香取	球磨	新相	天	山	庄	多	鶴	川	那	名		木	阿	阿	久	九	小	常	神	大	日	馬	黒	北	江	千	由	河	高	石	天	香	高
ベロの指標種	キヌ															マヒ、ホウ															ガイ																						
ベロの指標種	キヌ															マヒ、ホウ															ガイ																						
魚種	[Grid of green and red cells representing species presence/absence]																																																				
水系名	香井	白井	矢野	高田	紀伊	大津	新大	小松	松川	那賀	香取	加古	吉野	信濃	大津	五ヶ	仁大	小大	矢野	香取	球磨	新相	天	山	庄	多	鶴	川	那	名	木	阿	阿	久	九	小	常	神	大	日	馬	黒	北	江	千	由	河	高	石	天	香	高	十
平常時の環境形成要因による類型化	[Color-coded cells for environmental factors]																																																				
地形形成要因による類型化	[Color-coded cells for topographic factors]																																																				
混合形態 ^①	[Color-coded cells for mixed forms]																																																				

魚類と物理環境指標による河川の分類とを比較すると、汽水域で海水性～汽水性の魚類が優占する河川は潮汐差が大きい潮汐Ⅰ型、潮汐Ⅱ型に分類されるものが多く、淡水性の魚種が優先する河川は流量Ⅰ型や流量Ⅱ型の河川が多い。

4. 考察

109一級水系の類型化結果を見ると、地形形成要因による類型化結果よりも、汽水域環境形成要因による類型化結果の方が、塩水の混合形態や魚類の生息状況との関連との関係性を良く示す様である(表—6)。今回

実施した上記2種類の物理指標による類型化と比較した内容は、塩水混合や魚類生息である。これらの内容は、塩分混合形態は言うまでもなく、魚類の生息状況も海水性、汽水性、淡水性と結局、河川汽水域の塩分状態を評価した内容と捉えられるため、平常時の環境形成要因で類型化した河川の分類と、塩分混合形態や魚類生息特性の分類が類似の結果を示したものと考えられる。この結果は、河川汽水域の塩分特性や魚類生息状況は、潮汐差、河床勾配、低水流量によりマクロな視点から説明が可能であることを示しており、今回実施した物理環境による類型化の結果が、魚類の生息域という観点から見た河川汽水域の類型化としても妥当であることを示していると考えられる。

表—6の結果は、出現魚種により河川別に見ると左から右に海水の影響の大きさに合わせて、海水、汽水、淡水的環境と遷移することを示す。塩分の状況が出現魚種を規定すると考えられるため、塩分濃度の範囲が広いほど、多様な魚種が存在することが推測される。このため、魚種の多様性という観点からは、中央付近に位置する河川において高くなると言えそうであるが、塩分濃度に加えて塩分変動特性や河川汽水域地形など魚類のハビタット形成を規定する他の要因についても検討する必要がある。

潮汐差が非常に大きい河川では、塩水の交換量が大いいために河口の塩分濃度変化も激しいことが予想される。今回の分析結果(表—6)を見ても、海水の影響が非常に強いと考えられる潮汐Ⅱ型の河川のうち、有明海奥部に流入する3河川については、他の該当河川が表—6の左側に集まる(海水の影響が強い)傾向にあるのに対して様相が異なり、最も右に位置している。これは海水以外に細粒土砂の影響などが影響している可能性が考えられる他、環境の変動特性や地形による影響も考えられ、今後の検討課題である。

5. まとめ

全国109一級水系の汽水域について、潮汐や河川流量などの物理環境要因による類型化とデータの存在する85一級水系における出現魚類種による分類を同時に実施して、河川汽水域の環境に関する評価を行った。その結果、汽水域に出現する魚種は、平常時の汽水域環境形成要因と考えられる潮汐差、河床勾配、単位幅あたり低水流量を説明変数として5つに分類した類型あてはめと良好な関係を示した。物理環境要因と出現魚種による河川汽水域の分類は、それぞれ間接的に塩分濃度の程度を評価する結果となっていると考えられ、このために良好な関係性を示したものと考えられる。

今回の試みは河川汽水域の環境類型化の第一歩であるが、得られた結果を利用することで、類似な汽水域

環境を持つ河川を選んで比較することが可能になるほか、気候変動等に伴い、汽水域環境が変化した場合に生物への影響がどのようなものになるかについて予測するための基礎資料にできる。

今回の類型化は、結果として河川汽水域の塩分濃度特性を強く反映したものになったが、簡便に汽水域環境を類型化することが可能であることを示したと言える。ただし、複雑な汽水域環境の一端を評価したこととどまるため、今後、魚類以外の生物や、他の物理環境指標を含めた検討を実施していくことが必要である。

謝辞：各種資料収集に関しては、全国の一級水系河川管理者にご協力いただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Ippen, A. T. and Harlemann, D. R. F.: Technical Bulletin 5. Committee for Tidal Hydraulics, USACE, WES, 1961.
- 2) Hansen, D. V. and Rattray, M.: New diagrams in estuary classification, *Limnology and Oceanography*, Vol. 11, pp. 319-326, 1966.
- 3) Jay, D.A. and Smith, J. D.: Circulation in and classification of shallow, stratified estuaries, pp. 21-41, in Dronkers, J. and van Leussen, W. (eds), *Physical processes in estuaries*, Heidelberg, Germany, Springer-Verlag, 1988.
- 4) Engle, V. D., Kurtz, J. C., Smith, L. M., Chancy, C. and Bourgeois, P.: A classification of U.S. estuaries based on physical and hydrologic attributes, *Environ Monit Assess*, Vol. 129, pp. 397-412, 2007.
- 5) Edgar, G., 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.
- 6) 山本晃一, 高橋晃, 深谷渉: 感潮河川の塩水遡上実態と混合特性, 土木研究所資料, 第3171号, 1993.
- 7) 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.
- 8) 山本晃一: 沖積河川 一構造と動態一, 技報堂出版, 2010.
- 9) 巖島怜, 島谷幸宏, 中嶋淳, 河口洋一: 環境指標のための魚類セグメントエコロジー, 水工学論文集, 第53巻, pp. 1189-1194, 2009.
- 10) Hill M. O.: TWINSpan - a FORTRAN program for arranging multivariate data in an ordered two-way table by classification of the individuals and attributes, Department of Ecology and Systematics, Cornell University, 1979.

(2010. 9. 30受付)