

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16150

研究課題名(和文)河床変動・塩分シミュレーションに基づく河川汽水域の類型化と魚類の出現様式の関連性

研究課題名(英文) Relationship between riverbed-salinity variation based on simulation and distribution pattern of fish in riverine estuary.

研究代表者

乾 隆帝 (Inui, Ryutei)

山口大学・大学院創成科学研究科・助教(特命)

研究者番号：20723844

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では(1)西日本の1級水系における魚類の出現パターンに基づき河川を類型化し、(2)各グループに属する河川の平水時の塩分変動と出水時の河床変動をシミュレーションにより算出し、さらに(3)塩分変動および河床変動特性と魚類の出現パターンの関係性を調べた。

(1)の結果、27河川は4つのグループに区分された。(2)の結果、河川によって塩分遡上や底面平均塩分の特性が異なっていた。出水による細粒化・粗粒化傾向は、河川間で顕著な違いは見られなかった。(3)の結果、周縁性魚類や汽水性ハゼ類が生息するためには、浅所における汽水域面積がある程度以上必要であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we tried to elucidate (1) classifying rivers based on the distribution pattern of fish in the first class rivers in western Japan, (2) calculate salinity fluctuation at the time of usual water level of river and river bed fluctuation at the time of flooding, and furthermore, (3) relationship between characteristics of salinity and riverbed fluctuation and distribution pattern of fish.

As a result of (1), 27 rivers were classified into 4 groups. As a result of (2), characteristics of salinity fluctuation and characteristics of bottom salinity were different for each river. However, the characteristics of river bed fluctuation due to flooding were not different for each river. As a result of (3), it became clear that species diversity of saltwater fish and brackish gobies becomes abundant when shallow area in the brackish water area becomes larger than a certain extent.

研究分野：応用生態工学

キーワード：汽水域 河川 ハビタット 魚類 シミュレーション 塩分 河床 保全

1. 研究開始当初の背景

河川汽水域は、地球上の水圏システムのうち最も生産力の高い場所である。淡水と海水が混合し、かつ周期的に発生する潮汐の作用を受ける特殊な環境を有しているため、汽水環境に耐えうる特有の生物が生息する特殊な場となっており、貴重種も多い。しかしながら汽水域は、河口堰や導流堤の建設、河道の掘削、埋め立て等の人間活動によって、生態系や生物多様性に負のインパクトを受けつつしている環境であるため、近年は、生態系の保全や自然再生が課題となっている。

日本の河川は、大陸の河川に比べて急勾配であるため、河口域における河床材料は礫や砂、泥など様々な粒径により形成されている。また、潮汐と流量の関係性により、高塩分水が遡上する河川から、ほぼ塩分が遡上しない河川まで様々である。このような関係性から、日本の河川の汽水域においては、生態系の保全や自然再生していく上で、それぞれの河川の流域特性に応じた対策を講じる必要があると言える。しかしながら、これまでの研究で、河床変動特性と塩分変動特性の両方に着目し、河川汽水域を区分した例はなく、さらには、それらの環境特性と汽水域生態系の関係を明らかにした例もない。そこで本研究では、汽水域における河床変動および塩分変動シミュレーションをおこない、それらの結果に基づき河川汽水域を類型化すること、さらには、汽水域タイプと魚類の出現パターンとの関連性を明らかにすることを目的とする。

2. 研究の目的

本研究では、(1) 魚類の出現パターンに基づき河川を類型化すること、(2) 汽水域における河床変動および塩分変動シミュレーションをおこない、それらの結果に基づき河川汽水域を類型化すること、(3) 汽水域タイプと魚類の出現パターンとの関係性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 西日本に流入する 1 級水系のうち、九州地方は松浦川、小丸川、球磨川、番匠川、肝属川、山国川、五ヶ瀬川、緑川、中国地方は太田川、旭川、芦田川、吉井川、高梁川、小瀬川、佐波川、高津川、四国地方は肱川、重信川、物部川、土器川、吉野川、那賀川、近畿地方は加古川、熊野川、北川、揖保川、紀ノ川の 27 水系を対象とし、河川環境データベースから、2016 年 6 月時点で公開されていた最新の河川水辺の国勢調査のデータを入手し、各河川で出現した汽水海水魚のうち、周縁性魚類（主に海域に生息するが河川も利用する種）および、先行研究からハビタットタイプが明確であることが示されている汽水性ハゼ類（泥タイプ 9 種：キセルハゼ・シヨウキハゼ・タビラクチ・チワラスボ・ツマグロスジハゼ・トビハゼ・ノボリハゼ・マサゴハゼ・ムツゴロウ、砂タイプ 4 種：エドハ

ゼ・チクゼンハゼ・ヒメハゼ・ヒモハゼ、礫タイプ 2 種：イドミミズハゼ、クボハゼ）を抽出した。なお、汽水性ハゼ類については、多くの河川で過小評価になっていることが明らかになっていることから、2010 年から 2013 年にかけておこなった採集調査データにより補完をおこなった。

さらに、対象河川の周縁性魚類の種数、汽水性ハゼ類のうち礫タイプの種数、砂タイプの種数、泥タイプの種数のデータを用い、ユークリッド距離に基づくウォード法によるクラスター分析をおこなった。なお、解析の際には、各河川の周縁性魚類の種数 / 全河川の周縁性魚類の種数、各河川の礫タイプの種数 / 全河川の礫タイプの種数、各河川の砂タイプの種数 / 全河川の砂タイプの種数、各河川の泥タイプの種数 / 全河川の泥タイプの種数という比率データにすることにより標準化している。また、クラスター分析によって区分したグループ間で、周縁性魚類の種数、汽水性ハゼ類のうち礫タイプの種数、砂タイプの種数、泥タイプの種数についての比較をおこなった。

(2) 対象河川汽水域の塩分変動特性を明らかにするために、オブジェクト指向型数値流体モデル (Fantom3D) を用いて 3 次元河川海水流動モデルを構築し、塩分変動特性の解明を試みた。計算対象には、魚類の分布パターンにより区分されたすべてのグループに属する河川を対象とするために、吉井川、芦田川、松浦川、小瀬川、高津川、北川、佐波川および那賀川の 8 河川を選択した。

全河川ともに、基本的な条件として、計算領域は感潮域、または最河口堰から湾口部までとし、水平方向のメッシュサイズは海域で 320m、河道部で 20m の正方形メッシュとした。また、鉛直方向には河道域で解像度が高くなるように格子幅 0.2m-1m の不等間隔格子を用いた。境界条件には、河川水辺の国勢調査が魚類調査を行っている時期の前後 2 週間の、大規模出水時を除き、かつ大潮、小潮、中潮を含む 14 日間の実際の流量および潮汐データを用いた。初期塩分として海域には 30ppt、河口域には 15ppt、感潮域上流から純淡水域と思われる区間には 0ppt を与えた。各河川における塩分の影響の大小を定量化するため、計算期間中の底面における平均塩分を計算格子ごとに算出し、河川ごとに、計算期間中の平均塩分が、低塩分 (0.01 - 5ppt)、中塩分 (5.01 - 15ppt)、高塩分 (15.01 - 30ppt) となる面積を算出した。また、汽水性ハゼ類は、主に潮間帯から潮下帯浅所に生息していること、また、周縁性魚類についても、潮下帯浅所が生息地として重要とされていることから、前述の低塩分 (0.01 - 5ppt)、中塩分 (5.01 - 15ppt)、高塩分 (15.01 - 30ppt) となる領域のうち、潮間帯から潮下帯浅所 (T.P.-2m 以上、つまり平均海面時の水深が 2m 以浅、以下汽水域浅所) にあたる部分の

面積も算出した。

対象河川汽水域の河床変動特性を明らかにするために、河川の流れ・河床変動解析ソフトである iRIC ソフトウェアを用いて計算した。全河川ともに、基本的な条件として、境界条件としては、上流端流量に汽水性ハゼ類の採集調査が行われた最終年である 2013 年から過去 5 年で最大の出水時の実際の観測値を用い、下流端には等流水深を与えて計算を行った。マンングの粗度計数は 0.03 とし、初期の河床材料は 0.0625mm および 0.125mm が 14%、0.25mm および 0.5mm が 12%、1mm および 2mm が 10%、4mm および 8mm が 8%、16mm および 32mm が 4%、64mm および 128mm が 2%の混合粒径を使用した。なお、ソルバには Nays2DH を用いた。さらに、出水前後での粒度の変化を可視化するため、出水条件下での計算によって算出された中央粒径を、出水前（初期条件）の中央粒径で除することによって算出された値により、細粒化、粗粒化の傾向を算出した。

(3) 塩分変動特性と魚類の出現パターンの関係性を明らかにするために、各河川における周縁性魚類の種数および汽水性ハゼ類の種数と、低塩分以上の面積、中塩分以上の面積、高塩分以上の面積、汽水域浅所における低塩分以上の面積、中塩分以上の面積、高塩分以上の面積との関係性について、単回帰分析を用いて検討した。さらに、各塩分区分の占める面積との関係性の検討をおこなった。

河床変動特性と魚類の出現パターンの関係性を明らかにするために、各河川における周縁性魚類の種数および汽水性ハゼ類の種数と、汽水域全域、汽水域浅所における河床粒径が粗粒化、細粒化したものの面積と汽水域全域の面積と汽水域 2m 以浅の面積との関係性の検討をおこなった。

4. 研究成果

(1) 周縁性魚類の種数は、那賀川で最も多く(40種)、吉井川で最も少なかった(7種)。汽水性ハゼ類の種数は、球磨川で最も多く(13種)、高津川で最も少なかった(0種)。また、球磨川、那賀川、佐波川、揖保川、吉野川、土器川、番匠川、紀ノ川、小丸川、五ヶ瀬川、加古川、山国川、重信川については、礫、砂、泥の3タイプとも出現することに対して、松浦川は砂タイプのみ、物部川については泥タイプのみ、高津川についてはいずれのタイプも出現しないことが明らかになった。これらの結果から、西日本の河川汽水域における魚類の出現状況は河川によって様々であることが明らかになった。

クラスター分析の結果、27河川は4つのグループに区分できることが明らかになり、Aグループは4河川、Bグループは7河川、Cグループは6河川、Dグループは10河川が属することが明らかになった。4グループに

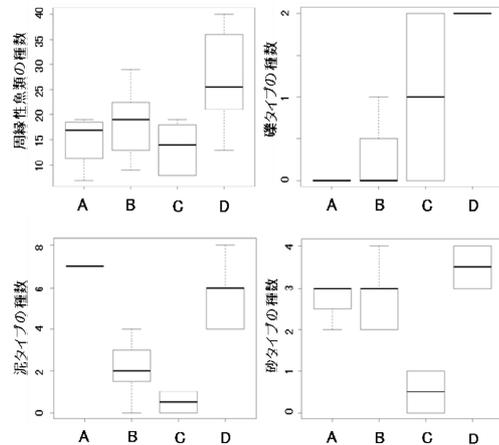


図1 周縁性魚類および汽水性ハゼ類のグループごとの分布特性

出現する各タイプの魚類の分布特性(図1)を比較すると、周縁性魚類の種数は $D > B > A > C$ の順となり、汽水性ハゼ類については、グループAは泥タイプが多く礫タイプが生息しない、グループBは砂タイプが多い、グループDは汽水性ハゼ類が全タイプともに多いという特徴がみられた。魚類データからは、グループDは最も塩分の影響を受けている汽水域で、グループCが最も塩分影響が少ない汽水域であることが予想された。

(2) 塩分遡上特性は、吉井川、芦田川および松浦川は潮汐を問わず常に高塩分のエリアが広く、小瀬川、佐波川および那賀川は、平均的に見ると塩分は高いものの、干満による塩分の変動が大きく、高津川および北川は、干満による塩分の変動は小さく、大潮満潮時でも高塩分が河川をあまり遡上しないという特徴があることが明らかになった。

図2に各河川の底面平均塩分を示している。各河川の汽水域全域(平均塩分0.01ppt以上)における低塩分(0.01 - 5ppt)エリアの面積に着目すると、那賀川、高津川、佐波川、小瀬川、吉井川、松浦川、芦田川、北川の順で大きかった。中塩分エリアの面積に着目すると、吉井川、那賀川、佐波川、松浦川、高津川、小瀬川、北川、芦田川の順で大きかった。高塩分エリアの面積に着目すると、吉井川、那賀川、松浦川、芦田川、高津川、小瀬川、佐波川、北川の順で大きかった。汽水域浅所においては、低塩分エリアの面積に着目すると、那賀川、佐波川、高津川、小瀬川、吉井川、松浦川、芦田川、北川の順で大きかった。中塩分エリアの面積に着目すると吉井川、那賀川、佐波川、松浦川、小瀬川、高津川、北川、芦田川順で大きかった。高塩分エリアの面積に着目すると、吉井川、松浦川、那賀川、佐波川、芦田川、小瀬川、高津川、北川の順で大きかった。

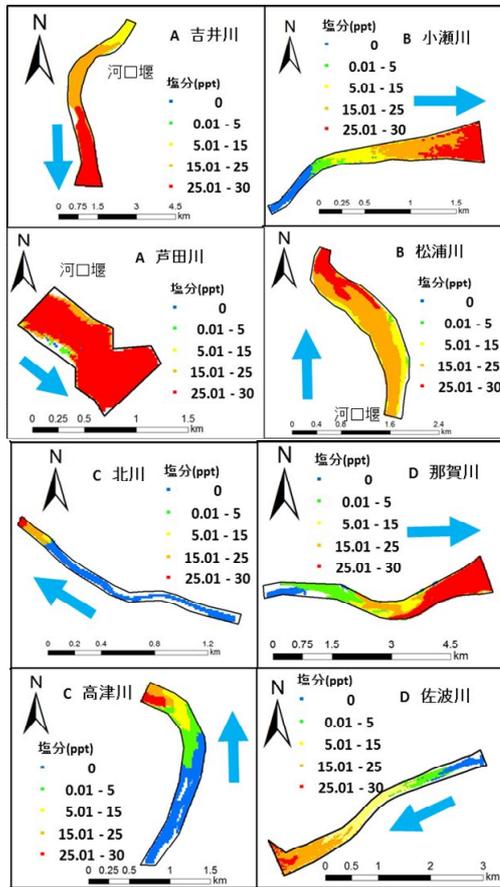


図2 各河川の底面平均塩分

図3に、汽水域全域における出水前後での粒度の変化を示している。これらの数値は、出水条件下での計算によって算出された中央粒径を、初期条件の中央粒径(7.14mm)で除することによって算出された値であるため、数値が大きくなるほど粗粒化、数値が小さくなるほど細粒化していることを意味し、数値が1以下のものを細粒化、1より大きいものを粗粒化と定義している。汽水域全域でみると、吉井川は上流から下流まで粗粒化・細粒化エリアが交互に分布している。芦田川は上流端付近で横断方向に細粒化エリアが分布し、そこから細粒化・粗粒化エリアが下流方向に向かい交互に分布している。小瀬川は上流から流心に沿って粗粒化エリアが、岸際に沿って細粒化エリアが分布している。北川も小瀬川同様、流心に沿って粗粒化エリアが、岸際に沿って細粒化エリアが分布している。佐波川は上流から粗粒化エリアと細粒化エリアが交互に分布している。那賀川は、小瀬川と北川同様に、流心に沿って粗粒化エリアが、岸際に沿って細粒化エリアが分布している。これらの結果を集計すると、汽水域全域、浅所ともに、細粒化、粗粒化した面積および比率は、河川間で顕著な違いは見られなかった。

(3) 塩分変動特性と魚類の出現パターンの関係性について、各河川における周縁性魚類

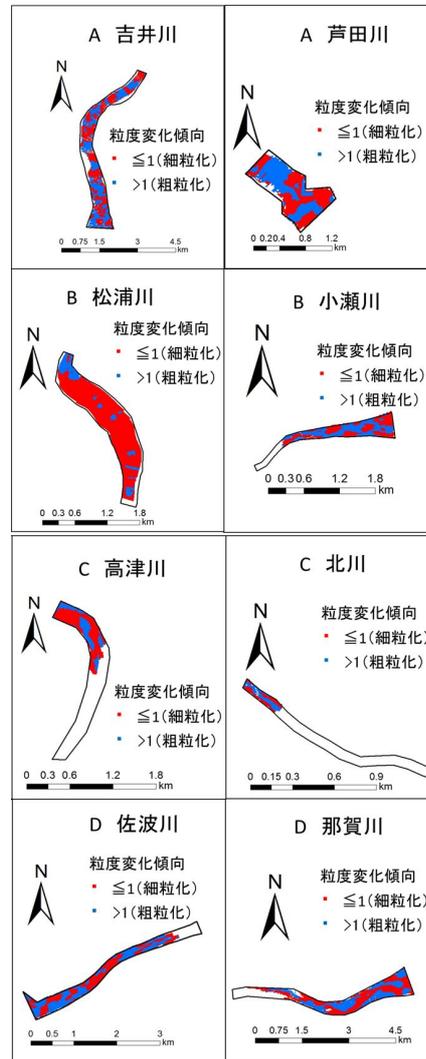


図3 各河川の出水前後での粒度の変化

の種数、汽水性ハゼ類の種数と、汽水域全体における平均塩分が低塩分以上(=汽水域)の面積、汽水域浅所における平均塩分が低塩分以上(=汽水域)の面積の関係性をみたところ、周縁性魚類の種数との明確な関係性はみられなかった一方、汽水性ハゼ類の種数については、低塩分以上の面積と強い正の関係性がみられたことから、汽水性ハゼ類の種多様性は、汽水域面積との関係性が強いことが示された。さらに、汽水域全域よりも、汽水域浅所に限定した場合に、各塩分面積と汽水性ハゼ類の種数との相関が強くなったことから、ハゼ類の主要生息場である浅所における汽水域面積が、ハゼ類の種多様性に及ぼす影響が大きいことが明らかになった。さらに、クラスター分析によって類型化したグループと、汽水域浅所における汽水域面積、低塩分の面積の関係性について図4に示している。グループAは汽水性ハゼ類のうち泥タイプが多く生息しており、グループBは汽水性ハゼ類のうち砂タイプが多く生息しており、グループCは周縁性魚類・汽水性ハゼ類ともに種数が少なく、グループDは周縁性魚類の種

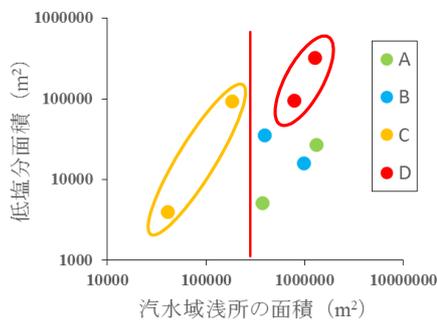


図4 クラスタ分析によって類型化した魚類の出現パターンと、汽水域浅所における汽水域面積、低塩分の面積の関係性

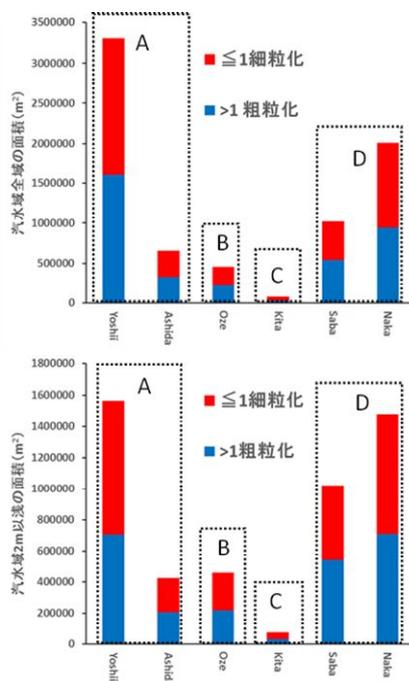


図5 汽水域全域(上図)および汽水域2m以浅(下図)における細粒化、粗粒化の占める面積と、クラスタ分析によって類型化した魚類の出現パターンとの関係性

数が多く、汽水性ハゼ類は多様なハビタットタイプが生息するという特徴を持っているが、周縁性魚類・汽水性ハゼ類ともに種数が少ないグループCについては、汽水域浅所における汽水域面積がある一定面積より小さいこと、そして、グループA、B、Dのうち、周縁性魚類・汽水性ハゼ類ともに多様であったグループDについては、低塩分の面積が大きいこと、そして、A、Bについては明確な差がないものの、AのほうがBに比べて、低塩分の面積がやや少ない傾向が示された。つまり、周縁性魚類や汽水性ハゼ類が生息するためには、浅所における汽水域面積がある程度必要で、その中でも、低塩分の汽水域面積が大きい河川においては、礫タイプの汽水性

ハゼ類が生息可能である一方、低塩分の汽水域面積が小さい河川においては、泥タイプの汽水性ハゼ類が中心に生息していることが示唆された。

河床変動特性と魚類の出現パターンの関係性について、図5に汽水域全域および汽水域2m以浅における細粒化、粗粒化の占める面積と、クラスタ分析によって類型化した魚類の出現パターンとの関係性を示している。汽水域全域、汽水域浅所どちらの場合においても、粗粒化と細粒化した面積はすべての河川で約半分占めており、グループ間での明確な差異を見出すことができなかった。つまり、本研究条件下での計算のみでは、汽水域の魚類相に影響を与える河床変動の特性を見出すことができなかったといえる。このような結果になった理由として、下流端の計算条件に等流水深を与えて計算を行ったこと、河川による土砂供給の特性の違いを考慮できていなかったことが推察される。今後の課題として、上流および海域からの土砂供給を考慮したモデルの構築が必要であることが明らかになった。

<引用文献>

- 1) 楠田哲也, 山本晃一(監修), 河川環境管理財団(編): 河川汽水域, 技法堂出版, 2008.
- 2) 河川環境データベース: <http://mizukoku.nilim.go.jp/ksnkankyo/>
- 3) 乾 隆帝, 小山彰彦: 本州・四国・九州の河口干潟に生息するハゼ類(シリーズ日本の希少魚類の現状と課題), 魚類学雑誌, 61巻, pp105-109, 2014
- 4) 新谷哲也, 中山恵介: 環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型流体モデルの開発と検証, 水工学論文集, 第53巻, pp.1267-1272, 2009.
- 5) iRIC ソフトウェア: <http://i-ric.org/ja/introduction>.
- 6) Barbier E.B., Hacker S.D., Kennedy C., Koch E.W., Stier A.C., & Silliman B.R. The value of estuarine and coastal ecosystem services. Ecological monographs 81: pp.169-193, 2011
- 7) 乾 隆帝・赤松良久・新谷哲也・小山彰彦: 希少種イドミズハゼの生息環境と生息場の河床変動および塩分変動特性, 水工学論文集, Vol.71, No.4, I_949-I_954, 2015

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

- 1) R. Inui, A. Koyama, Y. Akamatsu: Abiotic and biotic factors influence the habitat use of four *Gymnogobius* (Gobiidae) species in riverine estuaries in the Seto Inland Sea, Ichthyological Research, 査読有, 65, pp.1-11 2018
DOI: 10.1007/s10228-017-0584-5
- 2) Y. Henmi, K. Eguchi, R. Inui, J. Nakajima, N.

- Onikura, G. Itani: Field survey and resin casting of *Gymnogobius macrognathos* spawning nests in the Tataro River, Fukuoka Prefecture, Japan, Ichthyological Research, 査読有, 65, pp.168-171, 2018
DOI: 10.1007/s10228-017-0590-7
- 3) A. Murase, R. Inui, R. Miki, Y. Miyazaki: Revising the distribution of a threatened goby, *Apocryptodon punctatus* (Perciformes, Gobiidae, Oxudercinae), in Japan with a discovery of an isolated population, ZooKeys, 査読有, 645, pp.71-83, 2017
DOI: 10.3897/zookeys.645.10755
- 4) A. Koyama*, R. Inui*, K. Umemura, M. Wakabayashi, K. Kanno, N. Onikura: The first record of the spawning nest of *Gymnogobius cylindricus* and *Gymnogobius macrognathos*, Ichthyological Research, 査読有, 64, pp.261-263, 2017
DOI: 10.1007/s10228-016-0548-1
* Both authors contributed equally to this paper.
- 5) A. Koyama, R. Inui, K. Sawa, N. Onikura: Symbiotic partner specificity and dependency of two gobies (*Apocryptodon punctatus* and *Acentrogobius* sp. A) and four alpheid shrimps inhabiting the temperate estuary of southern Japan, Ichthyological Research, 査読有, 64, pp.131-138, 2017
DOI: 10.1007/s10228-016-0535-6
- 6) 乾 隆帝・竹川有哉・赤松良久: 汽水性希少ハゼ類から見た瀬戸内海における保全上重要な汽水域の抽出, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol. 72, No. 2, I_1417-I_1422, 2016
- 7) A. Koyama, R. Inui, H. Iyooka, Y. Akamatsu, N. Onikura: Habitat suitability of eight threatened gobies inhabiting tidal flats in temperate estuaries: model developments in the estuary of the Kuma River in Kyushu Island, Japan, Ichthyological Research, 査読有, 63, pp 307-314, 2016
DOI: 10.1007/s10228-015-0490-7
- [学会発表](計9件)
- 1) 乾 隆帝, 小山彰彦: ハゼとカニから見る億首川マングローブ林の豊かさ, 生態系管理講習会「億首川マングローブ林の保全と活用」(招待演者), 2017年11月, 金武町立中央公民館(金武町)
- 2) 乾 隆帝: 汽水域と応用生態工学～河川汽水域の「場」と「生物」の多様性～, 第9回汽水域研究会シンポジウム「汽水域を百学連環で考える」(招待演者), 2017年10月, 高知大学(高知市)
- 3) 乾 隆帝: 防災と干潟保全の両立を目指して～徳島県那賀川汽水域における事例～, 2017年度魚類学会シンポジウム「淡水魚保全における河川行政との連携」(演者), 2017年9月, 北海道大学(函館市)
- 4) 乾 隆帝: 河川汽水域における自然再生～河川法改正20年汽水域の川づくりを振り返る～, ELR2017自由集会,(コンピナー), 2017年9月
- 5) 乾 隆帝: 汽水性ハゼ類から見た河川汽水域, 「いい川づくり研修会2017」(招待演者), 2017年2月, 山口県庁(山口市)
- 6) 乾 隆帝, 竹川有哉, 赤松良久: 汽水性希少ハゼ類から見た瀬戸内海における保全上重要な汽水域の抽出, 第63回海岸工学講演会, 2016年11月, 大阪大学中之島センター(大阪市)
- 7) 乾 隆帝, 竹村紫苑, 赤松良久, 鎌田磨人: ハゼ類を指標にした河川汽水域の健全性評価とハビタットの劣化を引き起こす要因の解明, 応用生態工学会第19回郡山大会, 2015年9月, 日本大学(郡山市)
- 8) 乾 隆帝, 小山彰彦, 赤松良久: キセルハゼ, クボハゼ, エドハゼおよびチクゼンハゼの生息環境, 2015年度魚類学会年会, 2015年9月, 近畿大学(奈良市)
- 9) 乾 隆帝, 赤松良久, 小山彰彦: ハゼ類を指標にした佐波川汽水域のハビタット類型と河床変動との関係性, 土木学会中国支部研究発表会, 2015年5月, 山口大学(宇部市)
- [図書](計2件)
- 1) 乾 隆帝, 竹村紫苑(編集): 億首川の自然ハンドブック1 汽水域・マングローブ林内のハゼ類, 金武町教育委員会, pp.22, 2016.
- 2) 竹村紫苑・乾 隆帝,(編集): 億首川の自然ハンドブック2 汽水域・マングローブ林内のカニ類, 金武町教育委員会, pp.22, 2016.
6. 研究組織
- (1)研究代表者
乾 隆帝 (INUI, Ryutei)
山口大学・大学院創成科学研究科・助教(特命)
研究者番号: 20723844