

生理・餌条件に着目したリュウキュウアユ 仔稚魚成育場に対する人為改変影響評価

EVALUATION OF HUMAN IMPACT ON ESTUARINE NURSERY AREA FOR RYUKYU-AYU LARVA

大槻順朗¹・二瓶泰雄²・島谷幸宏³
Kazuaki OHTSUKI, Yasuo NIHEI and Yukihiro SHIMATANI

¹正会員 博（工） 東京理科大学助教 理工学部土木工学科（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

²正会員 博（工） 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科（同上）

³フェロー 博（工） 九州大学大学院教授 工学研究院環境社会部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

Estuaries play an important role to create suitable habitat for larval and juvenile fishes but there are little study to evaluate human impact on this function. In this study, investigations of habitat suitability for Ryukyu-ayu, endangered fish species in Amami Oshima Is, were conducted in two contrasting estuaries focused on the physiological condition and feed resource distribution by using field observation and numerical 3D flow simulation results. As a result suitable area was strictly limited in the modified estuary and numerical experiment results support that tidal flat restoration can create twice area of suitable habitat compared present condition.

Key Words : estuary, habitat evaluation, fish larva, physiological condition, Copepoda, tidal flat, restoration, Amami-Oshima, Ryukyu-Ayu

1. 序論

河口域は淡水産、海産問わず仔稚魚の重要な生息場として重要な役割を果たしている¹⁾。河口域に仔稚魚のゆりかごとなる成育環境が形成されるのは、河川からの淡水供給と海からの海水供給を受け、それらが潮汐により複雑に運動する流動場に伴って、熱や物質、また生物そのものが複雑に輸送、混合されていることが基盤となっている。近年、河口域の干拓・埋立などの人為改変により、河口域に依存する生物の減少が顕在化しているが、人為改変に伴う河口域の物理環境の変質と共に、河口域が本来持っている仔稚魚等の保育機能が損なわれ、機能不全になっていることが要因となっている可能性が考えられる。しかしながら、人為改変に対する物理量の変化について評価された研究は多いものの、河口域が生物に果たす機能の劣化の視点から評価した事例は多くない。

河口域の持つ仔稚魚の保育機能に関連して、Houde²⁾は魚類の仔稚魚から成魚への成長段階の移行に関わる要因として水温・物理過程・餌・捕食者・速い成長であると述べている。亜熱帯から温帯域の河口域は多くの場合、沿岸と比較し低水温・低塩分であり、仔稚魚の餌資源として利用される動物プランクトンの生息密度が高いため

¹⁾、生理的な生命維持に関わるエネルギーを最小限に留めつつ、必要な餌資源を獲得できると考えられる。

本研究で対象とするリュウキュウアユ (*Plecoglossus altivelis ryukyuensis*) は奄美大島のみに生息する絶滅危惧種であり、11月から3月の孵化から遡上期までの仔稚魚期を一貫して河口海域で過ごす両側回遊魚である。その個体数減少の要因について、河口域の改変に伴う環境劣化が有力視されている³⁾⁴⁾。本種の保全に当たっては、生息場の定量的評価が必要であり、その視点として河口域が持つ生理的好適環境と餌資源の提供という機能に着目し分析、評価を行うことが重要であると考えられる。

そこで本研究では、リュウキュウアユの生息場としての河口域の定量的評価を行なうべく、奄美大島の対照的な河口域を持つ役勝川と河内川両河口において、現地物理環境観測及び3次元流動場解析、及び餌資源（カイアシ類）のサンプリング調査を実施した。これらから、生存率の推定による生理的好適度と、餌資源分布の予測モデルを構築し統合することにより、リュウキュウアユ仔稚魚の生息適地の定量的評価、比較を行った。それらを踏まえ、リュウキュウアユの保全が喫緊の課題となっている河内川において好適条件が形成される地形効果について分析し、環境回復に向けたレストレーションプランについて検討し、効果の評価を行った。

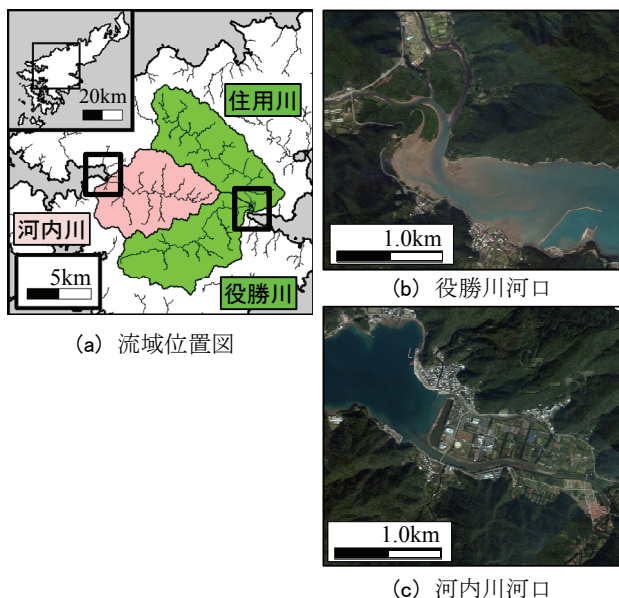


図-1 研究サイト

2. 研究サイトの概要

研究対象地は鹿児島県奄美大島東部・住用湾に注ぐ役勝川・住用川及び同島西部・焼内湾に注ぐ河内川の両河口である（図-1 (a)）。役勝川は流域面積46.4km²の2級河川で、河口において同じく2級河川の住用川（流域面積47.0km²）と合流する（図-1 (b)）。河口部は国定公園に指定され、約71haのマングローブ域とその下流部に約100ha干潟域がある。リュウキュウアユ仔稚魚の生息域はStn.Y2下流からStn.Y6にかけての河口域の滞筋であり（図-2 (a)）、主に表層を遊泳する姿が観察されている³⁾。河内川は流域面積39.7km²の2級河川で、役勝川、住用川とは流域を隣接している。役勝川と対照的に、河口域においては1954年の工事開始より干潟域の干拓・埋立による大規模な人為改変を被っており（図-1 (c)）、水質上の問題は生じていないが、河道の直線化・狭隘化が生じている。河内川におけるリュウキュウアユ仔稚魚生息域は、干拓・埋立区間末端の実質的な河口付近（Stns.K3,K4, 図-2 (b)）に局所的に分布する³⁾。

3. 現地観測及び数値シミュレーションの概要

(1) 現地観測

図-2 (a) (b) に示す役勝川7地点、河内川7地点、計14地点において、自記式水温塩分計（COMPACT-CT, アレック電子社、現JFEアドバンテック社製）を用いて水面下10cmの表層水温及び塩分濃度を1分間隔で計測した。観測日時は、リュウキュウアユ仔稚魚が河口海域沿岸部に出現し、遡上個体も出現する時期となる2010年3月3-4日（役勝川河口域）、同3月5-6日（河内川河口域）

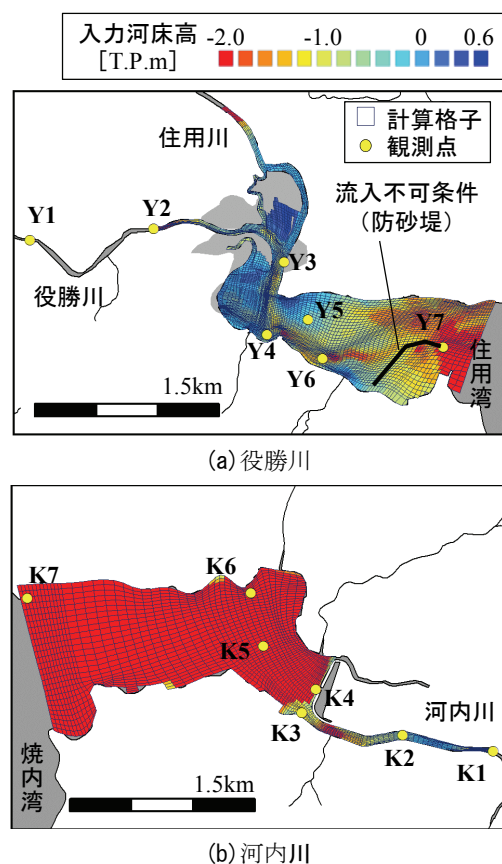


図-2 現地観測地点と計算領域

であり、大潮・中潮に当たる。詳細な方法と結果については大槻ら⁵⁾を参照されたい。

上記観測に合わせ、リュウキュウアユ仔稚魚の餌資源であるカイアシ類をターゲットとした採水サンプリング調査を実施した。各満潮時において、水面から50cmの水深において500ml採水を行い、海水濃度屈折計（MASTER-S/Mill α, アタゴ社製）を用いてサンプル水の塩分濃度を計測し、直ちに5%のホルマリンで固定し持ち帰り、同定および個体数のソーティングを行った。

(2) 3次元流動シミュレーション

対象水域における流動・水温・塩分場の再現を行うため、3次元流動シミュレーションを実施した。計算対象領域は図-2 (a) (b) に示す通りである。計算格子については、平面には一般座標系の境界適合型計算格子を、鉛直には5層にσ座標系を用いた格子を設定した。計算時間間隔は0.6secである。計算対象期間は各々の観測日の24時間とし、助走期間としてその1日前から計算を行った。計算プログラムについては、Delft3D (Deltares社)⁶⁾を用いた。

計算条件については、両計算対象範囲において、下流端に観測潮位（気象庁奄美観測所）と水温22℃、塩分濃度33‰を与えた。上流端には河川流量を役勝川、住用川、河内川において3m³/secを与えた。ただし、河内川の流量については、観測前日に降雨があったことを考慮し、午

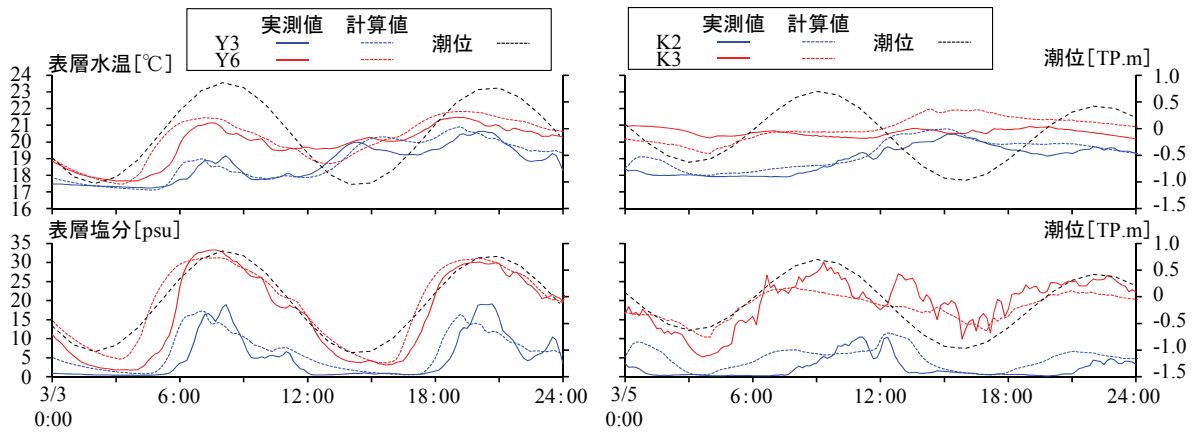


図-3 計算値と観測値の比較

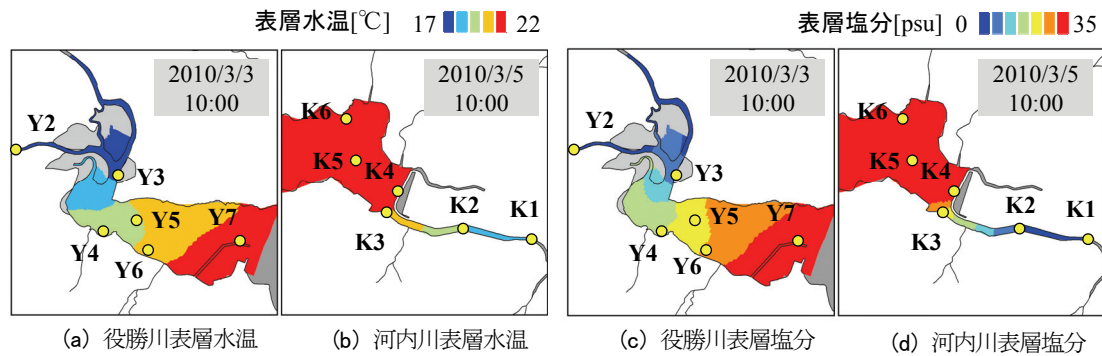


図-4 役勝川と河内川における水温・塩分濃度マップ

前3時まで観測値に合わせて最大7m³/secまで増加させた。河川水温については、役勝川、住用川ではStn.Y2の、河内川ではStn.K1の観測値をそれぞれ与えた。Manningの粗度係数については、一律に0.03m^{1/3}secを与えた。放射量については、各計算期間における気象庁名瀬観測所の全天日射量、気温、相対湿度を与え、雲量を0.5に設定した。初期条件については、計算開始日の潮位と、水温21℃、塩分濃度20‰を与え、計算対象期間24時間前からの助走計算の結果から初期条件による値の影響がなくなっていることを確認した。

4. リュウキュウアユ生残モデルの構築

(1) 水温・塩分濃度の観測結果と再現計算結果

再現計算結果の妥当性を検討するため、図-3に役勝川Stns.Y3, Y6及び河内川におけるStns.K2, K3の水温及び塩分濃度の観測値と計算値(表層第1層目)を示す。これより、計算結果と実測値は概ね一致していることが確認でき、潮汐に伴う高温・高塩分水の遡上による水温、塩分上昇と日射量の増加による日中の水温上昇を表現できていると考えられる。それぞれの物理量の挙動に着目すると、役勝川においては、水温・塩分上昇期となる満潮時前後を除けば、相対的に海側のStn.Y6においても、生息に適する20℃以下の汽水環境が比較的長い期間形成されるが、河内川河口においては、河道部から湾流出部(K3)でさえ、干潮時でも水温・塩分ともにそれほど

低下しない。また、計算結果を空間的に見ると(図-4)、河内川において20℃以下の汽水環境が形成されている領域は、河道部の極めて限定された領域に留まり、縦断的な物理環境勾配が著しく急であることが示唆される。

(2) 生存率推定モデルを用いた生理的好適度場評価

リュウキュウアユ仔稚魚の生息場評価のため、生理的好適条件を対象とした評価モデルを構築した⁵⁾。このモデルは、リュウキュウアユ孵化仔魚に対する室内絶食生存試験結果⁴⁾をベースとしており、GLM(一般化線形モデル)を用いて構築したモデルである。応答変数を実験区ごとの死亡率、説明変数を、水温 T [°C]、塩分濃度 C [psu]、継続時間 t [hour]としモデル化を行い、AIC(Akaike's information Criterion; 赤池情報量基準)を用いたモデル選択の結果から、下記、式(1)及び(2)の生存率 SR の推定式を得た。

$$SR = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-z)} \quad (1)$$

$$z = 90.23 + 0.2096(T - 16.33)^2 + 0.009665(C - 12.66)^2 + 2.715 \log(1 + t) \quad (2)$$

式(1)(2)と3次元流動計算結果における水温・塩分濃度の計算結果を用い、前述の生息適地評価モデルを用いてリュウキュウアユのハビタットの生理的好適度を推定する。ここでは、現地観測を実施した期間の24時間、30分ごとの水温・塩分計算値に対し、評価モデルを用い

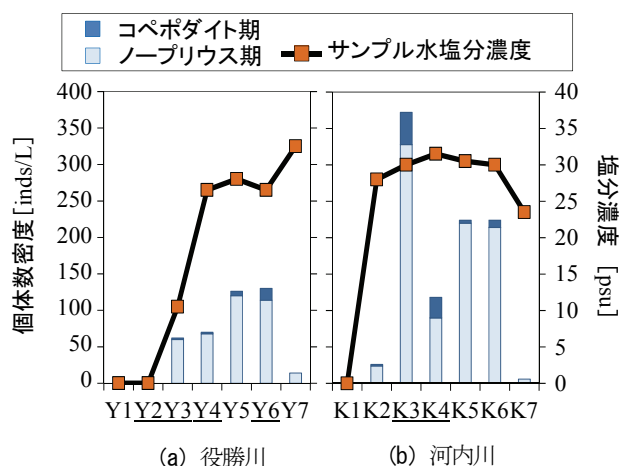


図-5 採取されたカイアシ類の個体数密度

で各時刻の24時間推定生存率（SR）を算出し、それらの平均値を生理的好適度指標（PSI）とし、各計算メッシュ上における評価値とした

(3) 餌資源分布と予測方法

生理的好適条件に並び、対象種の生育に不可欠な餌資源の分布について検討できる推定モデルを構築する。図-5にリュウキュウアユ仔稚魚が捕食するカイアシ類のサンプリング調査結果を示す。ここでは、岡ら⁷⁾を参考に、リュウキュウアユが主に捕食するカイアシ類のコペポダイト期の個体数に着目し、その成長前段階となるノープリウス期の個体数についても示すとともに、サンプル水の塩分濃度も合わせて示す。また下線付きの地点はリュウキュウアユ仔稚魚が主に出現している地点を示す。これより、役勝川・河内川に共通し、リュウキュウアユの出現域において、多くのカイアシ類が採取されていることが分かる。また、生理的好適条件の評価において好適と評価された河道部では、極めて少数の個体しか採取されなかった。カイアシ類が採取された地点においてはサンプル水の塩分濃度が概ね10psu以上の領域であることから、カイアシ類の分布には河口内における塩分濃度の挙動が強く関係していると考えられる。

そこで、まず、塩分の挙動とカイアシ類個体数との関係を検討する。ここでは、GLMを用いてカイアシ類個体数を応答変数、観測塩分の最大値（1次項、2次項）と変動幅の3つを説明変数とするモデルを構築した。応答変数はポアソン分布に従うとし、リンク関数を対数関数とした。係数の決定には最尤法を用い、すべてのパラメータの組み合わせに対し、AICが最も小さいモデルをベストモデルと決定した。こうして得られたカイアシ類個体数密度推定モデルは下記式（3）で表される。

$$C_{\text{op}} = \exp(-7.8596 - 0.01989(C_{\text{max}} - 25.604)^2 + 0.02714C_{\text{range}}) \quad (3)$$

ここで、 C_{op} : カイアシ類個体数密度[inds./L]、 C_{max} : 表層塩分濃度の最大値[psu]、 C_{range} : 表層塩分濃度の変動幅

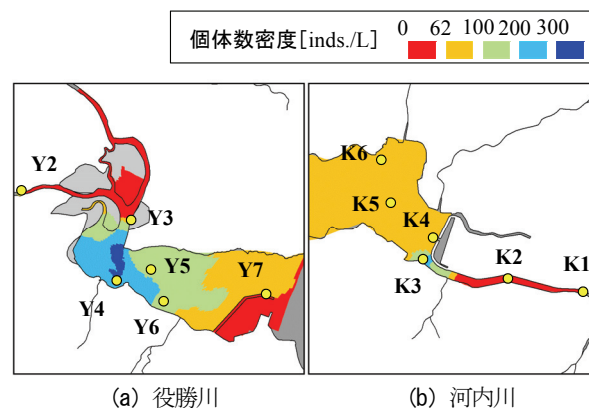


図-6 カイアシ類個体数密度の推定値マップ

[psu]である。構築したモデルを用い、塩分濃度の挙動を表すパラメータにより、概ね個体数密度を説明できることが分かった（ピアソンの相関係数=0.743）。次に、リュウキュウアユの存在を決定するカイアシ類個体数密度の閾値を決定する。ここでは、カイアシ類個体数密度とリュウキュウアユ存在の二値データに対するROC曲線（Receiver Operating Characteristic curve; 判断閾値に対する偽陽性割合を横軸、真陽性割合を縦軸にとった曲線）を描き、存在を最も効率良く分離するカイアシ類個体数密度の閾値を求めた。その結果、閾値として、個体数密度 ≥ 62 [inds./L]を得た。また、この分類に対するAUC（曲線下面積、0から1の値をとり1に近いほど分類精度が高い）は0.625であった。構築した推定モデルを用いてカイアシ類の個体数密度を推定した結果が図-6である。これより、河川上流部や湾口部ではカイアシ類の個体数密度は低く、その間の汽水域では相対的に高い。これは、図-5の観測結果と対応しており、適正な塩分濃度の範囲にカイアシ類が分布する結果が得られている。また、カイアシ類個体数密度が200[inds./L]以上となるエリアは役勝川で広く分布しており、勾配が小さい広大な干潟の存在による塩分変化の影響を受けていることが分かる。

(4) 生理的条件と餌資源条件から見る適地評価

ここまでの検討より、現在の生息分布は餌資源が十分な密度で分布していることを前提に、その上で生理的好適条件が良い場所に位置することが示唆された。そこで、これらを踏まえた生理的好適環境と餌資源環境を統合した生息場評価式として、式（4）を提案する

$$HSI = FSI \times PSI, FSI = \begin{cases} 1 & (C_{\text{op}} \geq 62) \\ 0 & (C_{\text{op}} < 62) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 HSI : ハビタット好適度指標、 FSI : 餌資源好適度指標である。すなわち、餌資源の十分でない地点にはリュウキュウアユは生息せず、餌資源の条件を満足する地点の中で生理的に好適な場所が相対的に好適な地点であることを表現している。

上記評価式を用いて、役勝川と河内川河口域について

再度生息場評価を行った結果を図-7に示す。これを見ると、生理的条件評価により値の高かった上流部において評価値が極めて低くなり、リュウキュウアユの生息分布範囲とよく対応する結果となった。リュウキュウアユが基本的に滞筋を利用していることを考慮して滞筋に沿った測線におけるHSI値を比較した結果を図-8に示す。これを見ると、役勝川のHSI値は上流に向けて緩やかに減少するが、河内川ではその様子が急である。HSIが50%以上の範囲を生息可能と見なすと、河川滞筋では役勝川で1,054mとなり、河内川（250m）の約4倍に達する。

地形形状とHSIとの関係を検討するため、地盤標高別のHSI値について図-9に示す。ここでは、地盤高を-2.0TP.mから+1.0TP.mまでを0.2mごと分割し、その範囲における平均のHSI値を示している。役勝川と河内川の結果を比較すると、河内川でHSI値が0でない範囲において、HSIの平均値は役勝川での値と概ね一致しており、河内川において評価値が低いのは、役勝川の干潟域に見られる-1.0～-0.0TP.m程度の領域が殆ど無いためであると考えられる。役勝川の結果を詳細に見ると、干潟域に対応する範囲では地盤高に対するHSIの勾配が緩いことから、地盤高のみならず、干潟地形の持つ平面的広がり効果も重要であることが示唆される

5. 保全プランの検討と効果の評価

(1) 検討するレストレーションプラン

絶滅が危惧されるリュウキュウアユの保全に向けて、河内川において劣化した仔稚魚育成場機能を回復するレストレーションが喫緊の課題である。現在河内川において適地が限定されているのは、河川への海水遡上が制限されているために汽水環境の形成が阻害されているためであると言える。また、図-10 (a) に示す1954年に河内川において干潟干拓・埋立事業が開始される以前の河内川河口部の航空写真に現在の水際線を重ねあわせたものを示す。これを見ると、かつては現在塩水が遡上する上流端付近までが干潟であったことが分かる。このことから、検討するレストレーションプランとしては、かつて干潟であった領域の復元が軸となると考え、復元する干潟の面積を変化させ、HSIの面的分布に与える影響について検討することにした。各ケースにおける設定地盤高を図-10 (b) (c) (d) に示す。それぞれ埋立地の海側、陸側、全体を復元したケースであり、干潟域の地盤高については、役勝川の例を参考に+0.0～-1.0TP.mの間で設定している。各ケースとも、地形のみを変化させ、外的条件を現況と同じにして再度生息場の評価を実施した。

(2) レストレーションに対する効果の定量的評価

3つのプランにおける好適度（HSI）の空間分布推定結果について図-11に示す。ここでは、Stn.K1を起点に河

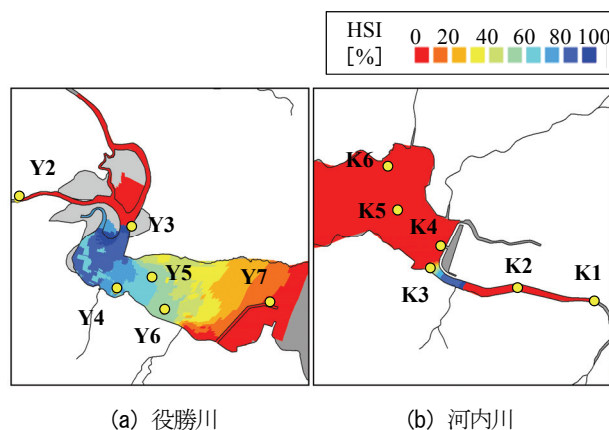


図-7 役勝川と河内川における生息適地マップ

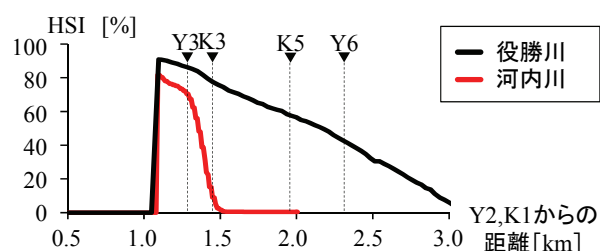


図-8 役勝川と河内川におけるHSI縦断面図

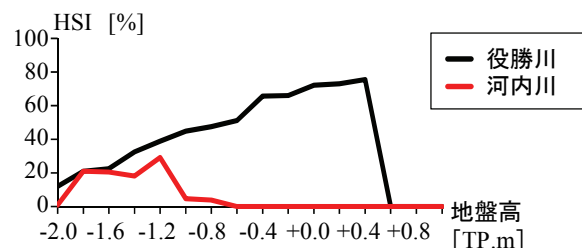


図-9 地盤高に対するHSIの関係

川縦断的に値の変化を示している。これより、すべてのケースにおいて適地が上流側にシフトするとともに、値の勾配が緩やかになっている。特に興味深いのは、ケース②と③を比較すると、干潟再生面積に大きな差があるにも関わらず、ケース②においてより適地領域が広いことである。この要因としては、上げ潮時から満潮時にかけて干潟上に広がり一時貯留された低温・低水温水がケース③では一部海域に直接流出するのに対し、ケース②では全て滞筋に再流入するためであると考えられる。このことに加え、現況とケース②を比較すると、ケース間で塩水遡上断面が変わらないにも関わらず適地が上流に拡大することが分かる。これは、海水遡上期に河川水が水平方向に分散することで、海水を押し戻す流体力が低減し、海水遡上量が増加するためであると考えられる。

現状の埋立地における土地利用について、海側には公的機関や住宅など、地域の重要施設が数多く立地しているため、ケース①、③については事実上実現困難である。今回の評価においては最も現実的な対策であるケース②において最も保全効果が高い結果となった。HSI50%を閾値とすると、可ハビタット範囲は縦断距離にして550mとなり、現況と比較し2倍強に適地範囲が拡大する。

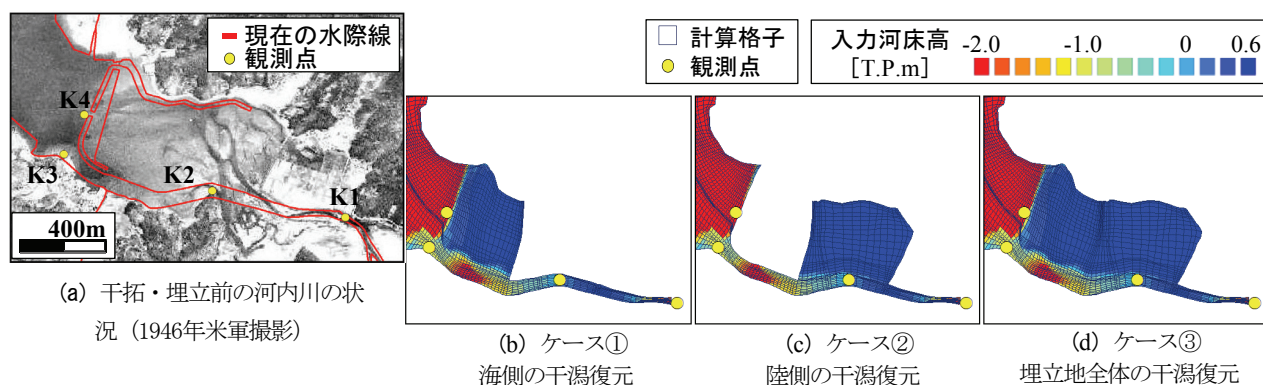


図-10 河内川における検討保全プランに対する設定地盤

5. 結論

本研究では、河口域が魚類仔稚魚の成育に果たす生理的好適環境と餌資源環境の形成機能に着目し、絶滅危惧種リュウキュウアユを対象に、現地観測、3次元流動場数値解析ならびに統計モデリングを用いて2つの対照的な河口において生息場の適地評価を実施した。合わせて、環境劣化に対するレストレーションプランを検討し、その効果を評価した。以下にまとめを記す。

① 役勝川及び河内川において現地観測と3次元流動解析を実施した結果、リュウキュウアユの生息数が少ない河内川では低水温・低塩分となる汽水環境が空間的に極めて限定的であることが明らかとなった。

② 室内生存試験結果に基づく生存率推定モデルを用い、水温・塩分データから生理的好適度を判定するモデルを構築した。これに、餌資源となるカイアシ類の分布調査結果を基にしたカイアシ類の個体数密度予測モデルとをカップリングし、リュウキュウアユ仔稚魚に対する生息場評価ツールを作成した結果、評価値は現在の生息分布とよく適合し、干潟が干拓・埋立された河内川においては、生息適地が極めて限定的であることが示唆された。

③ 河内川における保全策の検討とその効果の評価のため、生息場の優劣に強く関わる塩分遡上量に着目し、有力な環境回復策と考えられる干潟復元について3つのケースで評価をした結果、干拓・埋立地上流側のみ干潟を復元するケースが全体を復元するケースより効果があることが示唆された。

なお、本研究は水温、塩分濃度やそれと関連する餌資源分布に基づくリュウキュウアユの生息場評価を行ったのみであり、対象種の生育環境と水域変化に対する影響を評価したものである。したがって、今後のレストレーションに向けては、これらの長期的データに基づく検討を行なうとともに、土砂・水質・動植物プランクトンの物理化学的挙動を明らかにし、持続可能かつ長期的に効果的なプランを検討することが必要であり、今後の課題とする。

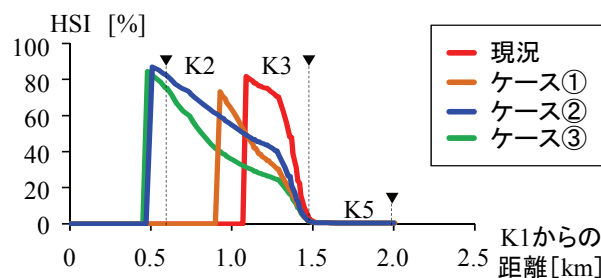


図-11 レストレーションケースごとのHSI縦断変化

謝辞：本研究の遂行にあたり四宮明彦教授（元 鹿児島大学水産学部）及び岸野底博士（河川環境調査）には多大なるご助力を頂いた。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（B）（課題番号:22310050 研究代表者:島谷幸宏）及び同特別研究員奨励費（大槻順朗）を使用した。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中 克, 田川正朋, 中山耕至: 稚魚 生存と変態の生理生態学, 京都大学学術出版会, 2009
- 2) Houde, ED: Comparative growth, mortality, and energetics of marine fish larvae: Temperature and implied latitudinal effects. Fishery Bulletin [FISH. BULL.]. Vol. 87, no. 3, pp.471-495, 1989
- 3) 岸野 底, 四宮明彦: 奄美大島住用湾および焼内湾周辺におけるリュウキュウアユ仔稚魚の回帰遡上, 魚類学雑誌, 第52巻, pp.115-124, 2005
- 4) 岸野 底, 四宮明彦, 寿 浩義: リュウキュウアユ仔魚の水温・塩分耐性に関する生存実験, 魚類学雑誌, 第55巻, pp.1-8, 2008
- 5) 大槻順朗, 島谷幸宏: 河口域の人為改変に伴うリュウキュウアユ仔稚魚の生理的生息条件に対する影響評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.513-518, 2012
- 6) Deltares: Delft3D-FLOW User Manual Hydro-Morphodynamics, Ver.3.15, p688, 2011
- 7) 岡慎一郎, 徳永浩一, 四宮明彦: 奄美大島住用湾の砕波帯におけるリュウキュウアユ仔稚魚の食性, 魚類学雑誌, 第43巻, pp.21-26, 1996

(2012. 9. 30受付)