

冬季亜熱帯河口域の持つ吸熱作用による水温低下 効果とリュウキュウアユ保全手法に関する考察

THE ENDOTHERMIC EFFECT OF NATURAL SUBTROPICAL ESTUARIES
AND A POLICY FOR CONSERVATIONS OF AN ENDANGERED FISH LARVAE

大槻順朗¹・池松伸也²・島谷幸宏³

Kazuaki OHTSUKI, Shinya IKEMATSU and Yukihiro SHIMATANI

¹学生会員 工修 九州大学大学院工学府 日本学術振興会特別研究員
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

²正会員 九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

³フェロー会員 工博 九州大学大学院工学研究員 教授 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

This paper is focused on the endothermic effect of the tidal flat in subtropical estuaries. When tidal flats are dried up in mid-night, its surface can be cooled by radiation cooling and it can cool flooded seawater. We conducted heat balance observations at two different estuaries, natural estuary and artificial estuary which loses its tidal flat. Heat sensor was used to measure a budget of heat flux from ground to water body directly. The result shows tidal flat can work heat absorber. The maximum budget of heat flux was about 60W/m². Another survey shows it can work almost every morning high tide. This flux value means the endothermic effect tidal flat can work is not so much large to change water temperature drastically but it will be larger than that we ignore if estuaries has a widespread tidal flat. From the standpoint of a conservation of Ryukyu-ayu, which inhabit in Amami Is. only, the cooling effect of tidal flat is considerable because it can reduce deadly seawater temperature (21°C) to safety temperature for Ryukyu-ayu larvae (20°C).

Key Words : tidal flat, estuaries, physical properties, water temperature, Amami Islands, Conservation of fish species, Ryukyu-ayu(*Plecoglossus altivelis ryukyuensis*)

1. はじめに

河川河口域はその基礎生産性の高さと生理的柔軟性などから多様な仔稚魚のハビタットとして重要である¹⁾。しかし、多くの河口域は人為的改変による直接的環境改変と温暖化等による間接的環境改変により、物理環境が大きく変化しており、河口域を利用する多くの生物種の存続が懸念される。特に水温については多くの種で脆弱性が科学的に明らかになっていないものの、稚魚成育上極めて重要な環境ファクターと考えられており²⁾、人為的改変や温暖化の影響による生息域水温上昇により多くの魚種が人知れず絶滅の憂き目に遭うことが懸念される。したがって、自然河口域の温熱環境評価、改変による影響評価を元に水温管理に対する技術的知見を得ることは今後極めて重要となると考えられる。

本研究では水温上昇の影響種としてリュウキュウアユを取り上げる。リュウキュウアユ(*Plecoglossus altivelis*

ryukyuensis)は奄美大島のみに生息する両側回遊型の魚種で、個体数減少著しい³⁾。かつては沖縄島にも生息が確認されていたが1980年代に絶滅が確認された。減少・絶滅の有力な要因として、仔稚魚生息域である冬季河口水域の水温上昇が指摘されている⁴⁾。本報に先駆けて、広大な干潟域を伴う自然河口域と河口域の改変が顕著な人口河口域において、水温多点連続観測を実施した結果、水温は自然河口域で低く、人工河口域では本種仔稚魚の生育に顕著な影響が発生する20°C以上の高水温が持続することが示された⁵⁾。

河口域における低水温域ソースは冷涼な河川水の流入と、干出時に冷やされた干潟干出面による吸熱が考えられる。冬季の奄美大島は大潮の最干潮が未明であり、気温が10°C程まで低下するという特徴を有している。このことは河口干潟の吸熱効果、ひいては河口域の低水温域発生に大きく影響すると考えられる。海水温は昼夜間わず概ね21°Cと高く、リュウキュウアユの生息好適環境創出への寄与も大きいと推察される。

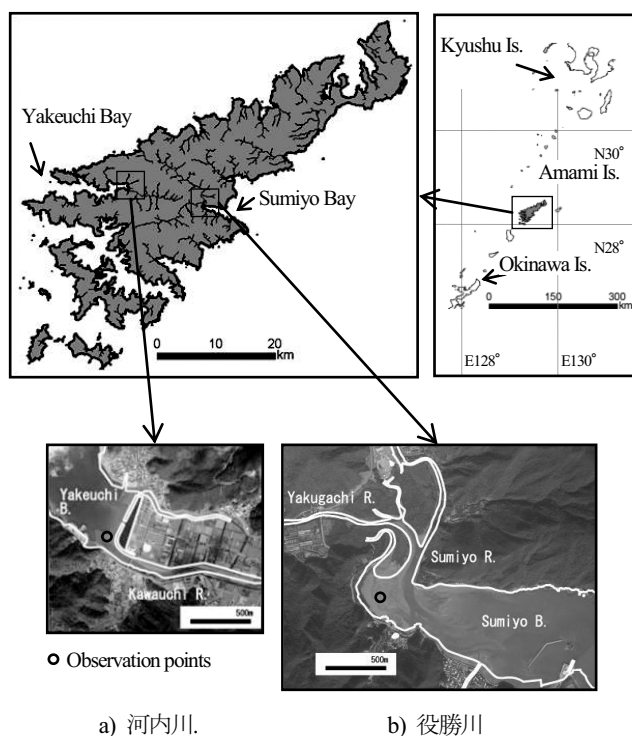


図-1 研究対象地

干潟の温熱環境に関しては既に多くの研究がある⁶⁾⁷⁾。内山ら⁸⁾は砂浜海岸と干潟における熱収支観測及び数値解析により温熱特性の差異について詳細に検討している。Harrison et al.⁹⁾はScotlandの河口干潟において熱流量や熱貯留の季節変化について研究を行っている。しかし冬季かつ亜熱帯の特徴を有する研究事例は二瓶ら¹⁾の石垣島の事例など極めて少ないのが現状で、これらの温熱環境と生態系維持との関連はさらに知見が不足している。

そこで本研究では、奄美大島河川河口域において、冬季・夜間干潮時から上げ潮時にかけて発揮される吸熱作用と水温環境に与える影響に着目し、吸熱量を直接観測することにより定量的に明らかにし、その効果がリュウキュウアユに与える影響を評価、保全に向けた提言を行うことを目的とした。

2. 研究の概要

(1) 研究対象地

奄美大島の中央部に位置する河内川河口、役勝川河口の両河口干潟上において観測を行った(図-1)。いずれの観測地点もリュウキュウアユ仔稚魚の生息地の一つとなっている。

河内川は東シナ海に開く焼内湾にそそぐ流域面積39.7km²の2級河川である。河口域にはかつては干潟やマングローブが広がっていたが、干拓事業により河道部の縮小と直線化、干潟域の大幅な縮小等の著しい人為改変を受けている。近年リュウキュウアユの生息个体数が減少し、絶滅が最も懸念されている河川である。観測地点

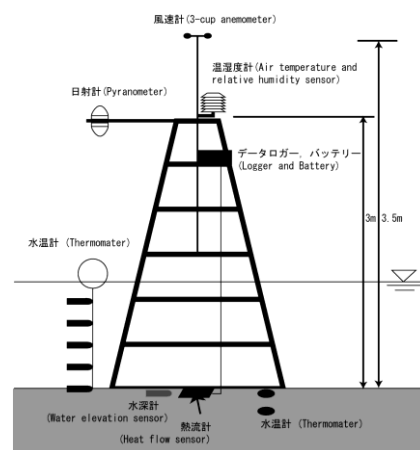


図-2 観測装置概念図

表-1 観測機器一覧

Item	Name of sensor	(Manufacturer)
Heat Flux	MF-180	(EKO INSTRUMENTS co.,LTD.)
Solar radiation	LP RAD01	(DELTAOHM S.r.L.)
Air temperature Humidity	HD9009TR	(DELTAOHM S.r.L.)
Wind speed	SWI C3C Anemometer	(Second Wind Inc.)
Water depth	U20-001-01-Ti	(Onset Computer Corporation)
Water temperature	U22-001, UTBI-001	
Ground temperature		(Onset Computer Corporation)

は河口に僅かに残存する干潟上に位置し(-100T.P.cm)、大潮干潮時のみ干出が発生する。

役勝川は太平洋に開く住用湾に注ぐ流域面積46.4km²の2級河川である。河口域は71haに及ぶ広大な干潟およびその上流にメヒルギ(*Kandelia obovata*)を優占種とするマングローブ域が広がり極めて自然度が高い。河口において支川の住用川(流域面積:47.0km²)が合流し、住用湾に流入後、南岸から山間川(流域面積:5.3km²)と合流する。干潟域は大潮・中潮時は一日2回、小潮時には1回干出が発生する。観測地点は滞筋の右岸側に位置し、小クリークに囲まれた干潟上(-13T.P.cm)に位置している。二瓶ら¹⁰⁾は、石垣島のマングローブ域が低水温水塊のソースであることを指摘しているが、役勝川河口域のマングローブ域はオキナワアナジャコの巣塚等により陸化が進み、大潮から中潮の満潮時のみ縁辺部が約50cm冠水するのみであるため、日常的な水温環境への影響は干潟域に比べ相対的に小さいと考えられた。

(2) 熱収支観測観測

図-2に観測装置概念図を、表-1に観測機器の詳細を示す。観測装置は二瓶ら¹⁰⁾による報告を参考にした。観測項目は、気温、相対湿度、短波放射量(上向き/下向き)、風速の気象項目に加え、地盤面を介する熱流量をヒートセンサー(英弘精機社製)を用いて直接観測した。その他、水温、水深、地盤面温度、周辺水温の測定を行った。観測日時は河内川、役勝川各々2009年2月10日、2月12日の15時から24時間、観測間隔は1分間とした。

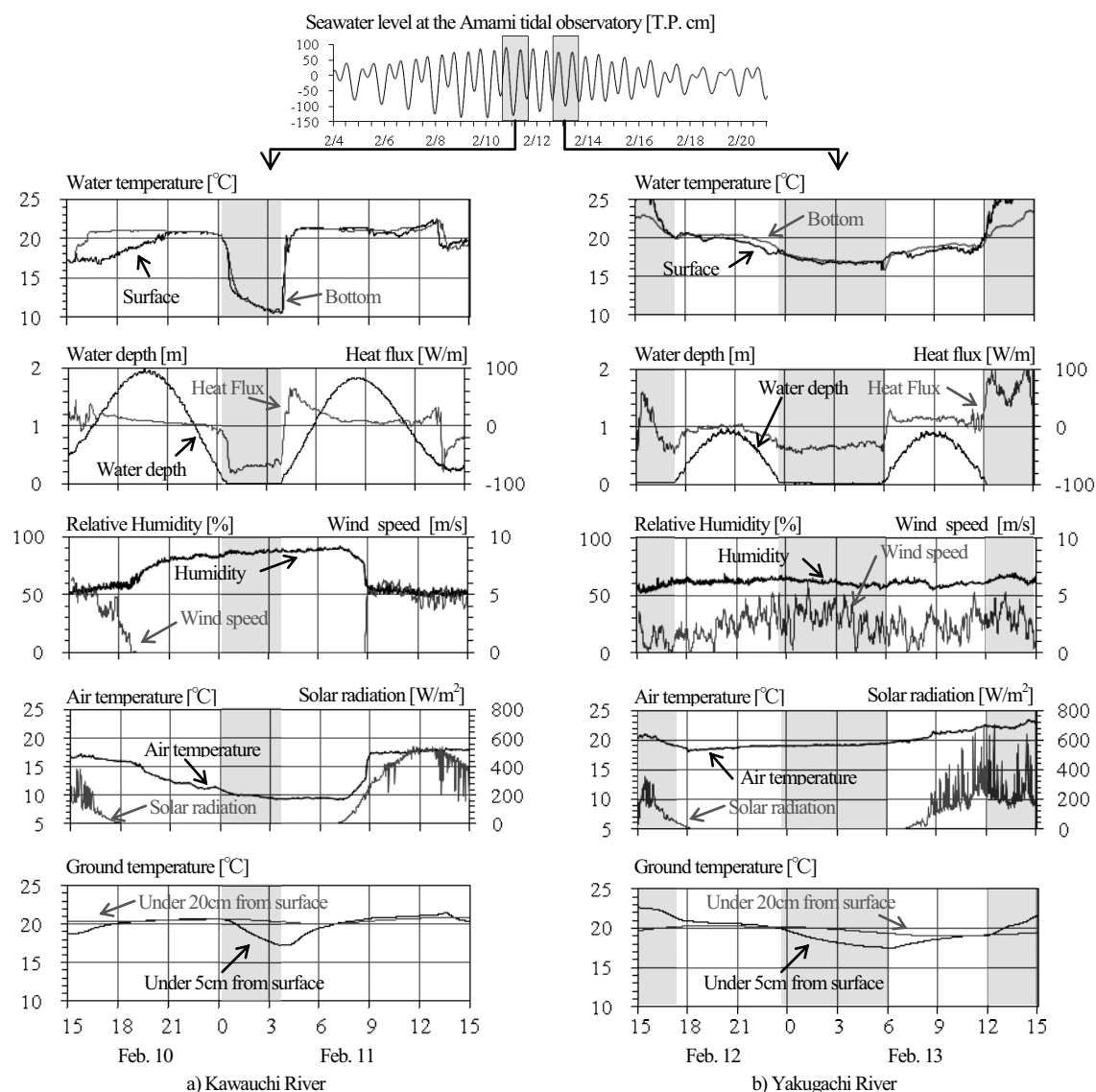


図-3 熱流量観測結果

(3) 水温多点連続観測

2008年2月8日～21日まで、役勝川河口域で25点、河内川河口域で5点、水面下15cmの表層と底層において水温の連続観測を行った。詳細は大概ら¹⁾に記述されている。

3. 観測結果

(1) 観測時における気象条件

観測結果を図-3に示す。図中の網掛けは干出時を示している。本調査は機材の制約により、2つの観測地点で観測日を分割せざるを得なかったため、観測日の気象条件について比較する。気象庁名瀬観測所の観測結果によると、2/10から2/13にかけて1mm以上の降水は記録されなかった。また、観測期間の気温は河内川、役勝川両観測時で各々、最低12.2℃、18.3℃、平均15.5℃、20.2℃であった。したがって、河内川観測時の方が、夜間に干潟面が冷却されやすい条件にあったと考えられる。

(2) 熱流量観測

河内川干潟域では、2/10 0:30 頃の干出直後から底面温度が急激に低下し始め、4:00 頃の再浸水までに 18.7℃から 10.7℃まで低下した。3 時間 30 分の干出時間の地盤から大気への熱流量の平均は 67.3W/m² であった。また、平均気温は 9.9℃であり、風速は干出時間全域でほぼ 0 であった。地温は干出までは 20.5℃でほぼ一定であり、地表面下 5cm では再冠水までに 17.3℃まで低下したが、20cm 下ではほとんど変動は見られなかった。再浸水直後、水柱から地盤面へ冠水から約 30 分後最大 64.5W/m² の熱流量が観測され、以後 10W/m² 以上の熱流量が 7:22 までの約 3 時間 20 分継続した。底層水温への顕著な影響は見られず、冠水直後から約 30 分で約 21℃の平衡状態に達し、水温上昇抑制の兆候は確認できなかった。

役勝川干潟域では、8/12 23:40 から干潟面が干出し、2/13 5:55 の再浸水までに底面温度が 18.5℃から 16.9℃まで低下した。干出時間は約 6 時間 15 分で、この間の地盤面から大気への平均熱流量は 34.4W/m²、平均気温は 19.2℃であり、約 3m/sec の弱風が連吹していた。再冠

水直後、最大 30.6W/m^2 の水域から地盤面への熱流量が観測され、以後 10W/m^2 以上、平均 12W/m^2 の熱流量が 10:22 までの約 4 時間 20 分継続した。水温は冠水直後から徐々に上昇し、平衡状態にはならず 12:00 の再干出まで漸増し、最終的に 19.5°C に達した。河内川同様、冠水に従って地表面下 5cm 地温も上昇し、約 4 時間 30 分後に 19.0°C となり、地表面下 20cm 地温と同じ温度に至った。

(3) 底層水温長期観測

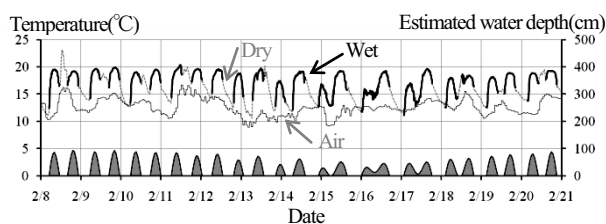
図-4に2008年2月8日から21日における河内川、役勝川両観測点の底層水温と気象庁名瀬気象台における気温、及び奄美駿潮所観測潮位から推定した水深の長期観測結果を示す。干出時の温度は波線で示しており、このときの温度は干潟面温度を示すと考えられる。河内川干潟域では小潮時や干潮時を除き、 20°C を上回る高水温が維持されていた。干出は大潮期の夜間のみ発生し、夜間の冠水直前の干潟面温度は平均で 14.4°C であった。一方、Stn.2の役勝川干潟域では、満潮時を除き水温は 20°C を下回っていた。潮位との明瞭な周期性が確認でき、水温のピークは概ね一日に2回(満潮時)訪れ、多くの日でピーク水温は午後に比べ午前が低かった。干出は小潮時の一部を除き一日2回発生し、夜間の冠水干出面温度は平均 12.8°C であった。干潟面温度は気温とよく対応していた。

2. 干潟域の発揮する吸熱作用

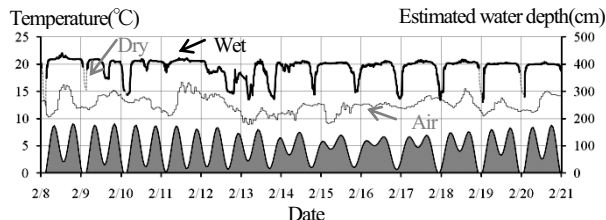
(1) 干潟域のもつ吸熱効果

河内川干潟では干潟面の冷却量が大きく水塊から吸熱しやすい状態にあり、単位面積当たりの吸熱量は役勝川干潟観測時の2倍程度であった。ところが水温への影響は小さく、冠水間もなく完全な海水下にあると考えられる平衡状態に達した。一方、役勝川干潟では単位面積当たりの地盤面への熱流量は小さかったものの、再干出後の水温の上昇が緩やかであり、水深が約 1m に達し、海水の影響下と考えられる満潮時においても平衡状態に達しなかった。これは、冠水した海水が観測地点に達するまでに干潟面もしくは河川水によって冷却されたためと考えられる。本研究結果では冷却ソースを明確に特定することはできないが、河川水の影響の極めて小さいと考えられる水深下で温度上昇抑制の兆候が見られたことは、干潟面による底層水域への冷却効果が一定の効果を有することを示していると考えられる。

長期観測の結果、観測された吸熱量の差は気象条件の差によるものであると考えられ、役勝川干潟域でも河内川観測時と同規模の吸熱量が日常的に発揮されていると考えられる。一方、河内川では干潟による吸熱は発生しているものの干潟の干出が大潮時の干潮時に限られるため、その効果は役勝川と比較的小さいと考えられる。



a) Kawauchi River



b) Yakugachi River

図-4 底層水温(干潟面温度)、気温の長期観測結果及び水深の推定値

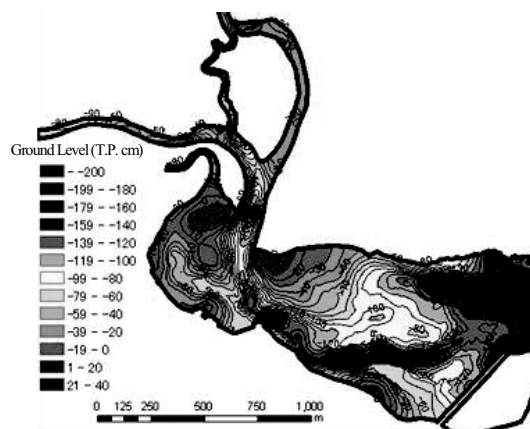


図-5 役勝川河口域の地盤高

図-5に役勝川河口域の干潟地盤高を示す。役勝川河口の干潟域は地盤高が似通ったいくつかの領域に区分できる。領域の区分は大潮・小潮時の碎波出現位置と概ね対応している。湾口部に近い領域と観測地点を設けた領域の地盤高はおよそ 80cm 異なり、観測地点に到達する海水はそれより湾口側の領域の干潟面の冷却を受けながら輸送されたと考えられる。特に冠水フロントに位置する海水は、冠水とともに次々に大きな吸熱を熱容量の小さい浅水状態で受けるので降温効果が増幅されていると考えられる。実測された干潟の発揮する吸熱量は最大約 60W/m^2 であり、水深 10cm の水塊を 1 時間に 0.5°C 低下させる程度の小量であった。しかし、このような過程を経て湾奥へ輸送される結果、ハビタットとされる湾奥領域の水温に少なくない影響を与えられると考えられる。

(2) 吸熱効果を増幅させる要因

干潟地盤面の吸熱効果は夜間干出時における放熱量によって、地盤面温度がどの程度低下するかにより決定されると考えられるので、地盤面が吸熱効果を発揮するのに十分な干出冷却時間を検討する。まず、夜間干出時の一次元熱収支について検討する。夜間は日射(短波放射)が0であるので、干出地盤面における熱収支式は、長波

放射量上・下向き成分 $L^\downarrow$ 及び $L^\uparrow$ 、顕熱 H 、潜熱 ϵE 、地中伝導熱 G として以下の式(a)~(c)で表わされる。

$$L^\downarrow - L^\uparrow = H + \epsilon E + G \quad \cdots(a)$$

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad \cdots(b)$$

$$\epsilon E = \epsilon \rho \beta C_H U (q_s - q) \quad \cdots(c)$$

ここに、

$c_p \rho$:空気の体積熱容量(J/K/m³)、 C_H :顕熱輸送のバルク輸送係数、 U :風速(m/sec)、 $T_s - T$:地表と大気との温度差(K)、 ϵ :水の気化潜熱(J/kg)、 β :地表面蒸発効率、 $q_s - q$:地表と大気との比湿差(g/kg)

大気境界層上空の風速が10m/sec以下の弱風の場合、 H 、 ϵE は $L^\downarrow - L^\uparrow$ に比べ小さくなり、放熱量は地盤からの長波放射量 $L^\uparrow (= \sigma T_s^4)$ と大気からの下向き長波放射 $L^\downarrow$ の差で表され、気温の低下とともに地盤冷却量が増大する¹¹⁾。一方風速が概ね10m/sec以上のとき、 H 、 ϵE とも風速の関数で、増加しようとする一方、上層の暖気が地表面に下降し気温と地表面温度の差を小さくするため、負のフィードバックが働き、実際には地盤面冷却は起こりにくくなる¹¹⁾。役勝川観測時では地表面で弱風が連吹しており、大気の攪拌が起こっていたものと考えられる。以上より、地盤面冷却量 G は長波放射量 $L^\downarrow$ 、および $L^\uparrow$ に依存し、 G の評価に当たっては $L^\downarrow$ 、 $L^\uparrow$ を高精度に観測・推定すること必要である。しかし本観測においては機材の制約と観測の不備により十分な精度を確保できなかったため、 H 、 ϵE を含めた熱収支の観点から G を評価出来ない。また、後述する通り、長波放射量が地盤面の温度低下の時間変化に与える影響は大きい。この点については今後の課題としたい。

次に、干潟面による吸熱を期待できる干出時間を検討するために、放射冷却終端温度と干出時間の関係について、近藤ら¹²⁾による近似式(d)~(g)を用い検討する。

$$DT_{MAX} \equiv T_0 - T_{RAD} = T_0 - (L_0^\downarrow / \sigma)^{1/4} \quad \cdots(d)$$

$$T_0 - T_s = DT_{MAX} \times P(x) \quad \cdots(e)$$

$$x = (4\sigma T_0^3)^2 t / c_G \rho_G \lambda_G \quad \cdots(f)$$

$$P(x) \equiv 2\pi^{-1/2} x^{1/2} - x + (4/3)\pi^{-1/2} x^{3/2} - (1/2)x^2 + (1/3)\pi^{-1/2} x^{5/2} \quad (x \leq 0.2) \quad \cdots(g)$$

ここに、

DT_{MAX} :放射最大冷却量(K)、 T_0 :夕刻の地表面温度(K)、 T_{RAD} :放射最大冷却量(K)、 $L_0^\downarrow$:夕刻の下向き長波放射(W/m²)、 σ :Stefan-Boltzmann 係数、 $P(x)$:時間変化の無次元量、 $c_G \rho_G$:地表面の体積熱容量(J/K/m³)、 λ_G :熱伝導率(W/K/sec)

$L_0^\downarrow$ については、河内川・役勝川両観測時それぞれに、近藤ら¹¹⁾による推定式を用いて日平均値を算出し(各々289, 327W/m²)、仮に $L_0^\downarrow$ として用いている。

図-6に $P(x)$ と干出時間の関係を示す。 $P(x)$ は放射冷却による最大冷却量に対する冷却率と解釈でき、無次元量 x を介し、時間 t の関数となっている。 $P(x)$ は干出後約1時間までは急激に大きくなるが、それ以降は変化が緩やかになることが分かる。初期温度 $T_0=20^\circ\text{C}$ のとき、3

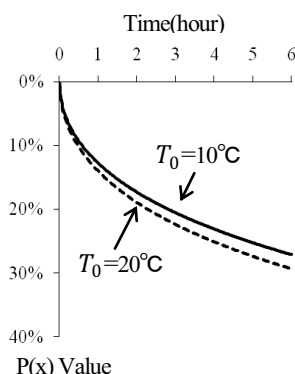


図-6 $P(x)$ 値の時間変化

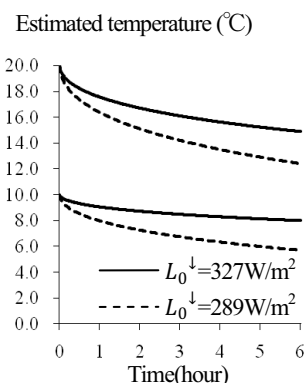


図-7 地表面温度推定値の時間変化

時間後と6時間後における $P(x)$ の差は約7%であり、現在の河内川と役勝川の干潟地盤高の差が与える干潟表面の冷却量の差はそれ以外の要因と比較し相対的に小さいと言える。観測時において見られた冷却量の差は気象条件の差、具体的には下向き長波放射量 $L_0^\downarrow$ や風速によるところが大きいと考えられる。図-7に示す解析結果によれば、河内川・役勝川両観測時の下向き長波放射量の差異により、初期温度 $T_0=20^\circ\text{C}$ 場合、3時間干出では 2.0°C 、6時間干出では 2.8°C の冷却量の差異が生じ、長波放射量の大小が温度低下に与える影響の大きさが伺える。

以上の検討から干潟面による吸熱量に最も大きな影響を与える要素は、下向き長波放射量や風速の気象要素である。干出時間は概ね3時間までは重要であるがそれ以上は干潟面温度の低下に大きく寄与しない。リュウキュウアユの生息する河川は比較的広い流域を持ち、山間部に囲まれた内湾に河口を持つことが多い。このような地形は、上空の一般風を遮蔽しやすく、斜面で発生した冷気が谷部に集積し下向きの大気放射量が少なくなると考えられ、本種生息条件の良化に正に作用すると考えることができる。

5. 保全に向けた干潟域の取り扱い

(1) 底層水温がリュウキュウアユ仔稚魚に与える影響

リュウキュウアユは孵化後一旦海域に流化し、仔魚段階から稚魚段階へ移行するに伴い沿岸に接岸する。この段階で本種の多くは水温・塩分濃度の低い表層域を利用している⁴⁾。一方、接岸前の仔魚段階の生息水域は特定されていないが、リュウキュウアユと多くの共通点を持つ本土アユの知見を適応すれば、仔魚段階では自然光に脆弱であり、日中は底層に分布すると指摘されている。したがって本種仔稚魚の成育上、底層水温は表層のみならず重要であり、密度差により冷涼な河川水による冷却効果が及びにくい底層を冷却する干潟面の吸熱効果は重要であると考えられる。岸野ら¹³⁾による室内実験結果によると水温 19°C 区と 21°C 区(塩分15psu)とでは、50時間後

の生存率が前者では80%程度であるのに対し、21℃区ではほぼ0%となる。海水温が昼夜問わず概ね20-21℃であることから、役勝川干潟域が発揮しているとみられる底層水温に対する最大1℃程度の降温効果により、水温が20℃以下に抑えられることにより生息条件が大幅に改善されていると考えられる。

(2) 保全対策と干潟域の量と質

干潟の造成に当たって重要な要素は、面積、高さ、素材である。本研究では吸熱効果と密接な関係がある面積と地盤高について考察する。干潟面の吸熱効果は単位面積当たりの量は水温を劇的に変化させるほど大きくはないので、十分な干潟面が確保されなければ効果を期待することはできない。役勝川河口干潟の場合、干潟面積は71haで、期待できる降温量は1℃程度であった。干潟地盤高については夜間干潮時に3時間以上の干出が発生するよう地盤高を設定すれば、気象条件が整えば冷却効果を期待できる。しかし、干出時間や干出タイミングは甲殻類等他の干潟依存種に大きな影響を与える。また、日中の日射量が大きいたときは干潟面によって水域が加温され、青潮等の要因となりうる。気象条件や潮位変動幅を勘案しながら熟慮の上、現場ごと個別に対応すべきである。リュウキュウアユの仔稚魚生息環境保全について述べると、河川水の水温が約14℃であることから、干潟の吸熱に比べ大きな低水温域ソースであると考えられる。干潟面積の拡大は効果の大きさに比べ多大な労力とコストを伴い、現状では現実的な対策とは言い難い。本事例では河道修復による河川水の誘導・河口内での貯留と混合促進による対策を第一としながら、干潟面積の確保を検討することを推奨したい。

6. 結論

本研究は奄美大島の河内川、役勝川両河口域において、冬季の上げ潮時に干潟域の発揮する吸熱作用と水温に与える影響について検討し、河口域に生息するリュウキュウアユの保全方針の考察を行った。以下にまとめを行う。

- ① 冬季奄美大島河口干潟域における局所熱収支観測の結果、早朝の再冠水時に吸熱効果が認められ、水温長期観測から吸熱効果は日常的に発揮されていることが明らかとなったが、吸熱量は最大約 60W/m²程度で、水温に劇的な影響を及ぼす量ではなかった。
- ② 小さい干潟域においては明瞭な水温への影響は見られなかった一方、大きな干潟域では干潟の吸熱によると見られる水温上昇抑制効果が認められた。干潟が広い場合、冠水フロントに位置する海水が多く、干潟面から冷却を受けながら湾奥部に輸送されることが降温効果を増幅する要因であると考えられる。
- ③ 干潟の干出時間と干出面温度の関係を検討した結果、

約 3 時間の夜間干出が発生する干潟で十分な干潟面積が存在すれば、干潟面の吸熱による降温効果を期待できることが明らかとなった。

- ④ 干潟面の吸熱量は河川水による冷却量より小さいと考えられる。リュウキュウアユ保全に向けた水温対策は、まず河道修復等による河川水の河口内滞留・混合の促進をベースとし、可能であれば干潟域の拡大を検討するべきであると考えられる。

謝辞：本研究は財団法人・水環境科学振興財団による研究助成(自然科学分野:萌芽的研究, NO. 20341)をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

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, E. D. : Emerging from Hjort's Shadow. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.*, Vol.41, pp.53-70, 2008
- 3) 長田芳和, 細谷和海編, 四宮明彦著: 3 リュウキュウアユ, 緑書房, 日本の希少淡水魚の現状と系統保存—よみがえれ日本産淡水魚, pp.36-47, 1997
- 4) 岸野 底, 四宮明彦: 奄美大島役勝川および河内川におけるリュウキュウアユの孵化時期と体サイズ, 魚類学雑誌, 第 51 巻, pp.149-156, 2004
- 5) 大槻順朗, 島谷幸宏, 四宮明彦, 上野あやな, 河口洋一: リュウキュウアユ保全に向けた干潟マングローブ域の水域冷却機能の現地観測, 土木学会水工学委員会, 2009 年 3 月, 水工学論文集, 第 53 巻, 2009
- 6) 水島雅文, 角湯正剛, 曾我雅海: 干潟の発達する浅海域の自然温水分布の形成機構とその予測, 電力土木, 第 198 巻, pp.10-19, 1986
- 7) 松永信博, 児玉真史, 福田和代, 杉原裕司: 干潟における熱収支の観測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.1056-1060, 1998
- 8) 内山雄介, 灘岡和夫, 堀川誠司: 砂浜と干潟の比較による湾奥部極浅海域の水環境特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.1051-1055, 1998
- 9) Harrison, S. J., and A.P.Phizackea : Seasonal changes in heat flux and heat storage in the intertidal mudflats of the Forth Estuary, *J. Climatol.*, Vol.5, pp.473-485, 1985
- 10) 二瓶泰雄, 網島康雄, 佐藤正也, 青木康哲, 佐藤慶太, 灘岡和夫: 現地観測に基づくマングローブ域の水温・放射環境に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.1206-1210, 2002
- 11) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994
- 12) 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

(2010. 4. 8受付)