

長良川河口堰の魚道における塩水遡上の動態と水生生物の生息分布・遡上行動に関する一考察

EVALUATION OF FISHWAYS OF THE NAGARA ESTUARY BARRAGE BASED ON HABITAT AND UPSTREAM MIGRATION FOR AQUATIC ORGANISM

和田 清¹・小出水 規行²・大堀 文彦³

Kiyoshi WADA, Noriyuki KOIZUMI and Fumihiko OHORI

¹正会員 工博 (独)岐阜工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2236-2)

²正会員 農博 (独)農業工学研究所 主任研究官 生態工学研究室 (〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)

³学生会員 独立行政法人国立高等専門学校機構 岐阜工業高等専門学校 専攻科 建設工学専攻

Actual achievements of the four fishways of the Nagara estuary barrage for fishes were investigated based on the data of five-years monitoring on environmental changes. It should be noted that temporal concentration of upstream migration was observed both hourly and daily in the Seseragi (brook-type) fishway. The peak of the upstream migration of fishes corresponded to the neap tide period. Under natural condition, the range of salt water extends upstream farther as the tide advances. Settlement of the Japanese mitten crab (*Eriocheir japonica*) was investigated in the Seseragi-fishway. The megalopa larvae settled and metamorphosed to crab stage in the upper tidal zone in the fishway. The youngest crabs were nearly two millimeters in carapace width. Settlement of megalopa larvae occurred mainly in early summer (June) and early winter (December). The majority of larvae that settled in winter did not survive and metamorphose to the crab stage due to low water temperatures. Thus, the growth and upstream migration of the Japanese mitten crab seemed to be strongly influenced by water temperature in the estuary. The suitable settlement position of megalopa larvae corresponded to the tip of salt water intrusion at neap tide. In this study, it is clarified that the Seseragi-fishway have a fulfill function to mitigate for decreased estuary zone that change aquatic organism phase from freshwater to seawater.

Key Words : estuary, salt water intrusion, fishway, juvenile ayu, Japanese mitten crab

1. はじめに

長良川河口堰の運用が1995年に開始され、河口堰の各種魚道の機能評価については、生態に関するモニタリングデータを利用した遡上魚類や甲殻類に関する解析などが行われている¹⁾²⁾。その結果、河口堰を多数の回遊性水生生物が通過している実態が報告されている。一方、長良川河口堰の下流側は、建設前の淡水と海水が混合する汽水域から、上層と下層の塩分濃度が大きく異なる密度成層化へと建設後に変化し、潮汐流が著しく弱化したことが指摘されている³⁾。また、河口堰の右岸に設置された「せせらぎ魚道」は、他の魚道に比べて塩水遡上を許容する構造となっている。

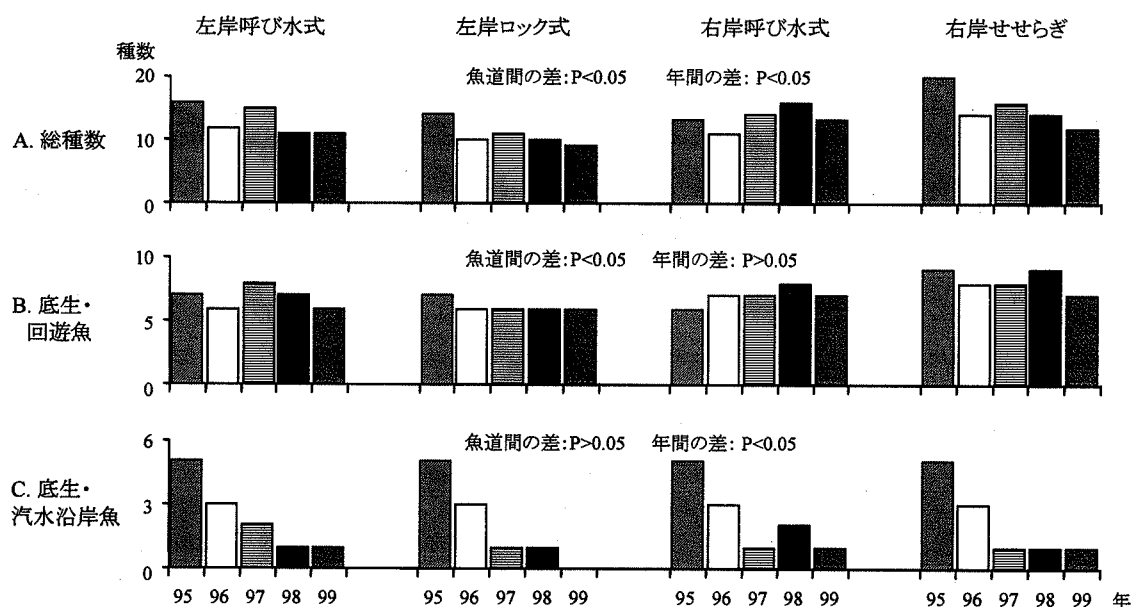
本研究では、このような潮汐による塩水遡上が、魚道における水生生物相の生息分布や遡上行動に対してどのような影響を及ぼしているかを明らかにしようとするものである。具体的には、まず、モニタリングデータを用

いて、河口堰に設置された各種魚道における魚種数や個体数といった魚類群集に関する統計解析を行い、遡上魚類の魚道間および年間の差異を定量的に把握する。次いで、せせらぎ魚道において、水質・水位計測を行い、潮汐や塩水遡上の影響範囲を明らかにして、付着藻類・貝類の生息分布を明らかにする。さらに、モクズガニの定期的なサンプリング調査、稚アユのモニタリングデータを用いて、塩水遡上による着底・遡上行動を考察する。

2. モニタリングデータの統計解析

2.1 解析方法

河口堰では、魚道を遡上する魚類や甲殻類のモニタリングとして、ミニトラップを利用した生物採捕調査が実施されている。採捕調査は1995～99年の5年間、毎年4～5月を中心に概ね3日ごとに行われた(全調査期間を通じて延べ91回、年平均18回)。調査手順は各回ともに同一



図一 魚道別・年別の種類数比較とそれに関する分散分析結果 (Pは有意確率)

であり、網の開口部を下流に向けて、各魚道の直上流に4つのミニトラップが設置された。トラップの設置期間は1日であり、採捕生物については種名と個体数が記録されている。

解析では、すべての採捕魚類を底生魚と遊泳魚の生息型に区分して、さらに、各生息型における魚類を純淡水種、回遊種、汽水沿岸種の生活型に分類した。これらの分類単位ごとに、各魚道における年別の出現種数と調査1回あたりの平均個体数を算出した⁴⁾。

算出した生息型、生活型に関する年別・魚道別の種数と平均個体数について、魚道種類と年を因子（魚道種類の水準は左岸呼び水式、左岸ロック式、右岸呼び水式、右岸せせらぎの各魚道、年の水準は1995、96、97、98、99年の各年）とする分散分析を行った。種数の解析では繰り返しのない二元配置の分散分析、個体数の解析では繰り返しの異なる二元配置の分散分析および一元配置の分散分析を利用し、それぞれの魚道または年のものが有意に多いのか、あるいは少ないのかを比較した。なお、ここでの分散分析においては、個々のデータが互いに独立であることを仮定し、分析の有意水準には5%を用いた。因子が有意となった場合は、その因子の水準について、多重比較を行った。

2.2 解析結果

全調査期間を通じて、34魚種12,719個体が確認（採捕）され、その内、底生魚が21種11,638個体、遊泳魚が13種1,081個体を占めた。底生魚が種数・個体数ともに遊泳魚を上回り、中でも、回遊魚のヌマチチブとカジカ、汽水沿岸種のマハゼの個体数が多く、それぞれの魚道で確認されている。一方、遊泳魚については、回遊魚のアユがせせらぎ魚道のみ出現し、汽水沿岸魚

のスズキがすべての魚道に確認されている。なお、底生魚と比較して、遊泳魚の数が少ないことは、トラップの構造と設置方法に原因があり、ここでは遊泳魚よりも底生魚の方が採捕されやすい傾向にあったと考えられる。

(1) 魚類の種類数

図一は、魚種数についての分散分析結果から、魚道別の総種数、底生・回遊魚および底生・汽水沿岸魚の種類数について示したものである。同図をみると、総種数については、魚道間、年間ともに有意な差が認められ、多重比較の結果、せせらぎ魚道と1995年の種数が多いと示された（同図A）。せせらぎ魚道の種数の多さは、底生の回遊魚の結果に関連し、せせらぎ魚道は他の魚道よりも2魚種程度多く遡上したことが示された（同図B）。1995年の種数の多さは、底生の汽水沿岸魚における結果（同図C）からも支持され、すべての魚道において、底生の汽水沿岸魚の種数は経年的に減少し、1999年では1種しか確認されていない。この減少の原因は特定できないが、河口堰の建設によって、ハゼ類やカレイ類などの汽水沿岸魚に、何らかの影響が及んだものと推察される。

(2) 魚類の個体数

平均個体数の分析では、すべての魚道種類を因子水準に用いると、魚道と年の効果によって交互作用が有意となり、年間と魚道間の比較ができなくなった。これは、せせらぎ魚道における個体数が、他の魚道を大きく上回っていることに起因する。したがって、二元配置の分散分析については、せせらぎ魚道を除いて分析を行い、せせらぎ魚道のみ、年を因子とする一元配置の分散分析を行った。これらの要点は以下のようである。総個体数について、二元配置の分散分析を行っ

た魚道（左岸呼び水式とロック式、右岸呼び水式）では、有意な交互作用と魚道間の差は検出されず、年間のみに有意な差が認められた。このことは、呼び水式とロック式魚道の遡上個体数は同程度であったことを意味する。また、せせらぎ魚道の個体数は他の魚道よりもかなり多く、その数は概ね4～5倍程度となった。せせらぎ魚道についても、年間の差は有意となった。総個体数における年間の差の多重比較によると、すべての魚道で、1997年の値が有意に高いことが認められた。この現象は底生の回遊魚のうち、カジカの個体数が急激に増えたことに起因する。また、魚種数でも確認できたように、底生の汽水沿岸魚の個体数が1995年から減少し、その度合いは呼び水式とロック式魚道において顕著であった。

3. せせらぎ魚道における塩水遡上の動態

3.1 調査方法

図-2は、長良川河口堰右岸のせせらぎ魚道（延長320m、幅15m、上流部勾配1/347、下流部1/110）の概略図を示したものである。上流端にはラバーゲートが4基、河床は玉石（粒径20～40cm）が配置され、魚道内には幅約3mの蛇行した滞筋と瀬・淵が形成されている。その滞筋に沿って右岸側に鳥害防止用ブロックが約3m間隔で設置されている。

潮位、塩水の遡上状況を把握するために、水質モニタリングシステム（HORIBA製）を図中①④の河床2ヶ所、圧力式水位計（ウイジン製）を図中①④⑥の3ヶ所、温度データロガー（onset社製：55個）を鉛直方向に20cm間隔で5～6個を1組とした棒を魚道内10ヶ所に設置して、2003年12月25日～翌年2月15日の期間、自動観測を行った。

3.2 調査結果

長良川河口堰による水環境への影響を監視する目的で、自動観測装置による長期間の連続観測が行われている。図-3は、上記観測期間における河口堰直下の潮位と塩分濃度の時系列を示したものである。同図から、潮汐の変動に追従して上層の塩分濃度は変化する。一方、下層では中潮～大潮の干潮時において、塩分濃度がスパイク状に低下するものの、高塩分（約3.5%）を保持する傾向にある。このように、河口堰建設後、上層と下層の塩分濃度が大きく異なり、特に下層では潮汐に対応した濃度変化が小さい傾向が顕著となり、潮汐の影響を受けにくくなったことがわかる。

せせらぎ魚道の塩分濃度の時系列を、大潮から中潮時について示したものが図-4である。同図から、下流側の地点①は、上げ潮時に高塩分（約3%）の海水が遡上していること、地点④では、せせらぎ魚道を通る

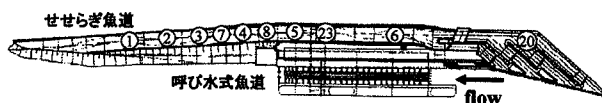


図-2 せせらぎ魚道の概略図

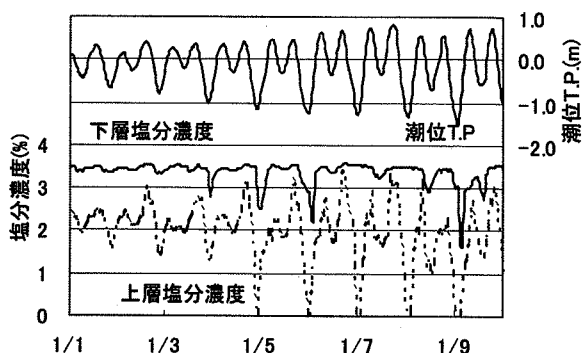


図-3 自動観測装置の塩分と潮位の時系列（河口堰直下）

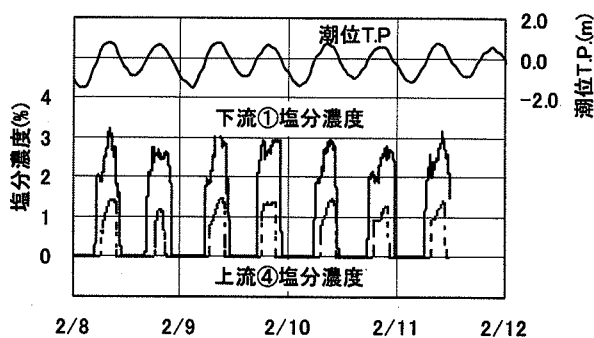


図-4 せせらぎ魚道の塩分の時系列（地点①④）

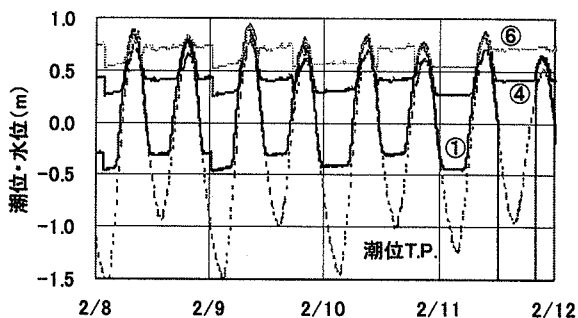


図-5 せせらぎ魚道の潮位の時系列（地点①④⑥）

淡水と遡上する塩水が混合・希釈され、約半分の塩分濃度に低下していることなどがうかがえる。また、図中から、地点①および④の塩水遡上に反応する時間差と地点間距離（河床勾配：1/110）から、塩水遡上平均速度を算出すると0.83～1.52cm/sである。これらより、潮汐変動が大きな大潮時でさえ、塩分遡上速度は1cm/s程度であり、塩水楔として遡上する密度流（弱混合形態）の傾向が強いと考えられる。なお、中潮から小潮時の観測結果によれば、地点④は小潮の満潮時における塩水遡上端にほぼ位置することが確認されている。

図-5は、せせらぎ魚道の水位変動をT.P.換算して表したものである。同図から、小潮でも上げ潮時に海水の影響を常時受けている地点①、小潮の満潮時に塩水

が遡上する到達付近の地点④、大潮の満潮時にのみ塩水が遡上する地点⑥の順に潮位変動が小さくなっていることがわかる。したがって、せせらぎ魚道は、塩水が、A：ほぼ毎日遡上する、B：潮汐によっては遡上する、C：遡上しないという3つの区間に大別することができる。

4. せせらぎ魚道における生物相の生息分布

4.1 付着藻類のクロロフィル濃度

せせらぎ魚道の玉石に付着した藻類の調査を、2003年10月2日、翌年1月31日、2月11日に実施した。調査地点は、瀬・淵を含めた15地点であり、玉石にセル(5×5cm)をあてて藻類を採取し、アセトン抽出・吸光法によりクロロフィルを抽出した。吸光光度計は、島津製UV-1240を用いて分析した。

2月11日の分析結果から、瀬におけるクロロフィルa,b,c濃度の一例を示したものが図-6である。同図から、クロロフィルaは空間的な差異が小さく、クロロフィルbおよびcは、地点②付近を境に、上下流側で減少する傾向にある。また、クロロフィルbおよびcの構成比をみると、地点①ではクロロフィルc、地点②より上流側ではクロロフィルbの方が大きい。一般に、クロロフィルaはすべての藻類、クロロフィルbは緑藻類、クロロフィルcは珪藻類や鞭毛藻類に含まれている。これらのことから、日射条件の類似した地点①と②、⑧では、クロロフィル濃度に空間的な偏りがみられ、藻類の種類が異なることが示唆される。

4.2 付着貝類の種類

玉石に付着した貝類の調査を2003年10月2日に実施した。貝類の種類と個体数を把握し、その要点は以下のようなものである。地点①の玉石表面にはフジツボ類が固着し、小潮時の塩水遡上域である地点④付近より海側では、海域から汽水域を生息域とするイシマキガイのみが生息している。また、地点⑥付近から上流側では、マキガイ綱のチリメンカワニナ、ヒメタニシ、ニマイガイ綱のカワヒバリガイ類が確認されている。これらの貝種は主に比較的流れの緩やかで、底質が砂泥の河川下流域で優占する種類である。特に、せせらぎ魚道出口からカルバート付近にかけては、チリメンカワニナの個体数が多く淡水域の影響を強く受けている。地点④から⑥の間は潮汐依存域であるため、これら複数の貝種の生息が確認されている。このように、貝類の生息分布からも、淡水が支配的な領域・潮汐依存域・塩水遡上域という、全長300m余りの魚道区間に圧縮された汽水環境の再生がうかがえる。なお、呼び水式魚道内にもカワヒバリガイ類、同魚道入口付近にはコウロエンカワヒバリの生息が確認されている。

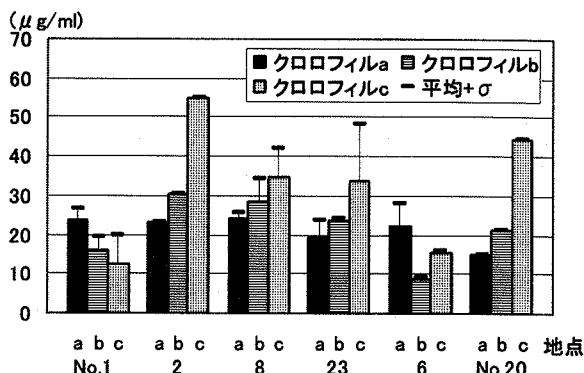


図-6 クロロフィルa,b,c濃度 (藻類)

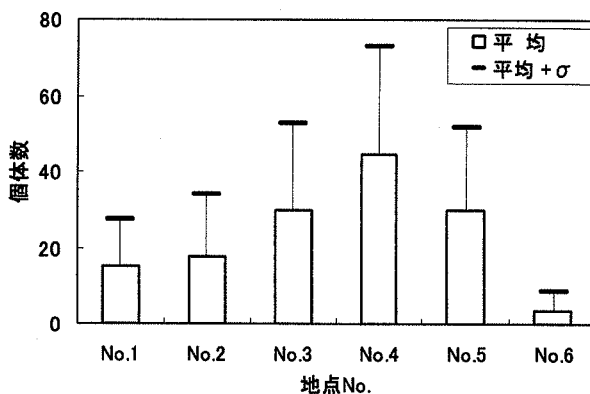


図-7 生息場所の差異による個体数変動 (モクズガニ)

4.3 モクズガニのメガロパ幼生の浮遊・着底過程

せせらぎ魚道に浮遊・着底するモクズガニのメガロパ幼生や生息する稚ガニを採捕するために、鳥害防止ブロックの間にレンガと人工芝マット (全4種類) で加工した稚ガニトラップ (20cm×10cm×5cm) を2002年1月10日から設置し、約2~3週間ごと (メガロパ幼生が一齢稚ガニに変態する期間) に稚ガニトラップの回収を行い、個体数、甲幅などを計測している⁹⁾。

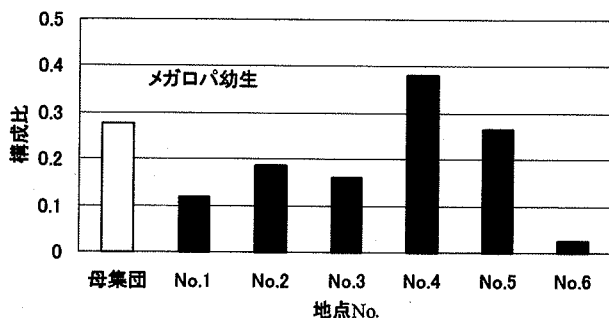
モクズガニは、河川の中下流域で成長し海域へ降下し繁殖する降海回遊型の底生動物である。海域で浮遊生活し、流れに受動的なメガロパ幼生が、塩水遡上によって輸送され河床に着底し、1齢稚ガニへと変態できるかどうかは、モクズガニの生活史の初期減耗に直結する重要な過程である。以下では、2002年度の調査データから、せせらぎ魚道の場所とモクズガニの生息分布の関係をみることにする。

(1) 生息場所の差異による個体数の有意差検定

同種類のトラップを用いた地点①~⑥における個体数の統計的有意差の検定を行った。検定にあたって、繰り返しのある二元配置分散分析と最小有意差検定の方法を用いた。因子A：地点No.、因子B：調査日、帰無仮説：個体数への各因子による有効的な影響はない (場所と時期とは無関係にモクズガニは生息している) とした。二元配置分散分析の結果、両因子とも帰無仮説が棄却され、地点、調査日ごとに有意差がある

表一1 χ^2 検定による各地点の甲幅構成比

地点No.	甲幅構成比
1(下流)	甲幅5mm以上 (中・大サイズ) に偏り
2	甲幅7mm以上 (大サイズ) に偏り
3	甲幅2~3mm (一齢稚ガニ) に偏り
4	2mm未満 (メガロパ幼生) に偏り
5	甲幅2~3mm (一齢稚ガニ) に偏り
6(上流)	甲幅2~3mm、5~7mm (一齢・中) に偏り



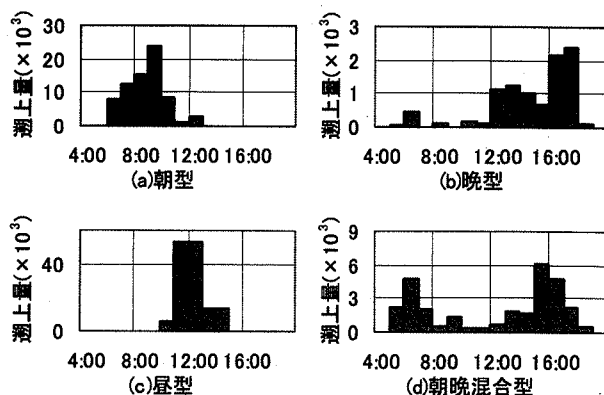
図一8 メガロパ幼生の構成比の空間分布 (χ^2 検定)

ことが認められた。また、最小有意差の検定によれば、地点④と①、②、⑥、地点⑥と③、④、⑤には有意差がある。この最小有意差検定の結果と各地点の個体数の平均値を示したものが図一7である。同図から、地点③、④、⑤の差異は明確でないが、他の地点と有意な差が生じていることが検証された。3.で述べたように、この地点④は、小潮の満潮時における塩水遡上端に位置している。

(2) 甲幅測定による個体群の変動

地点ごとに採捕されたモクズガニを甲幅2mm未満 (メガロパ幼生)、2~3mm (一齢稚ガニ)、3~5mm (稚ガニ小サイズ)、5~7mm (中)、7mm以上 (大) に分類し、割合 (構成比) を比較した。適合度の検定には、 χ^2 検定を用いた。なお、 χ^2 検定ではデータ数 > 5、期待度数 > 5 が必須条件であり、これを満たしていない地点No.6では信頼度が低い。母集団：採捕された全個体数、標本：各地点の個体数、帰無仮説：母集団が各標本の確率分布にしたがう (全個体数と各地点における個体数の甲幅の構成比が一致する) とした。

χ^2 検定 (適合度の検定) の結果、全ての地点において帰無仮説は棄却された。つまり、各地点における個体数の甲幅の構成比と全個体数の甲幅の構成比は一致しないということである。母集団構成比と各標本構成比を比較した結果を表一1にまとめた。地点③、④、⑤ではメガロパ幼生と一齢稚ガニが、地点①、②では比較的大きいサイズの稚ガニが多く採捕されたことがわかる。また、図一8は、メガロパ幼生と一齢稚ガニについて、 χ^2 検定で得られた構成比を地点ごとに比較したものである。図中の左側は母集団における構成比を示している。同図から、メガロパ幼生はNo.4で多く、No.1, 6ではきわめて少ないことがわかる。また、一齢稚ガニはメ



図一9 稚アユの魚群の日周行動

ガロパ幼生の着底が多い地点③、④、⑤周辺で多く、地点①で少ないことなどが確認されている。なお、地点①はほぼ常時海水が進入、地点⑥は大潮時のみ海水が進入する場所である。このように、塩水遡上によって輸送されるメガロパ幼生の生息分布に偏りが生じ、せせらぎ魚道の河床に着底し、その周辺で一齢稚ガニに変態している実態が明らかにされた。

5. せせらぎ魚道における稚アユの遡上行動

5.1 稚アユの日周行動とn次モーメント

図一9は、全魚道を通じた稚アユの魚群としての行動パターンを示したものである。魚群の日周行動については、日出・日入の照度較差の著しい時間帯 (6時、18時) に特に活発となり、自律的な日周リズムがあることが指摘されている⁹⁾。しかしながら、長良川河口堰では必ずしもこれらの時間帯にピークをもつ分布形とはならず、同図のように、(a)朝型、(b)晩型、(c)昼型、(d)朝晩混合型に大別することができる。そこで、日周行動を表わすパラメータとして、重心時刻 (1次モーメント) と n 次モーメント (無次元) を用いて、稚アユの遡上量の時系列を表示する。

図一10は、1999年における重心時刻と2次モーメントで表した稚アユの遡上量の一例である。同年は、4/21~4/22と5/8~5/11の2回に遡上量のピークが発生している。この第1ピークは(a)朝型、第2ピークは(c)昼型に分類される。(c)型と(d)型では、両方とも重心時刻は12時付近となるものの、(c)型は単峰型、(d)型では双峰型となるので、(c)型は2次モーメントが小さく、(d)型では2次モーメントが(c)型に比べて大きくなる。また、(a)型と(b)型は単峰型であり、2次モーメントの傾向が同じとなるが、重心時刻が大きく異なることが想定される。このようにn次モーメントを用いて稚アユの日周行動を表現することができる。

5.2 各魚道における稚アユの遡上量と潮位特性

せせらぎ魚道では、集中した日の短時間内に多数の稚アユが遡上することが把握されている。また、小潮

時に稚アユの遡上量が急増するといわれており、稚アユの遡上行動に影響を及ぼす環境因子として、潮位特性に着目して検討を行った。

図-11は、潮位変動の模式図(左上)、稚アユの遡上量と潮位特性量の関係を示したものである。潮位変動のA,B,C,D象限および破線は、稚アユの遡上量のそれらと対応している。また、潮位特性量として、潮位T.P.(m)、潮位の傾き(m/h)である。傾きは上げ潮時には正、下げ潮時には負の値となる。同図から、せせらぎ魚道では、稚アユの遡上量の急増時は、潮位T.P.が0~0.5m、傾き0~0.3m/hに集中している。また、ほとんどの遡上データは破線の右上に位置することから、小潮時の潮位T.P.>0mの上げ潮から満潮時をやや過ぎた頃まで、遡上量が増加することがわかる。この理由として、潮位上昇によりT.P.≒0m付近から魚道内に塩水遡上が始まり、上げ潮による魚道の遡上通過断面積の拡大、稚アユの遡上行動の引き金を引く環境要因(温度、魚群密度、水流など)が考えられる。また、T.P.<0mの下げ潮から干潮時では、遡上量のピークが発生しにくいことがわかる。一方、両岸に位置する呼び水式魚道では、遡上量は減少するものの同様の傾向がみられる。また、干潮時付近でも上げ潮時と同程度の遡上量である。呼び水式魚道の最下流端の越流隔壁は可動式となっており、呼び水効果が常時、引き金を引く環境要因として機能し、せせらぎ魚道の遡上しない時間帯を補完しているものと考えられる。

6. おわりに

以上、長良川河口堰の魚道群において、遡上魚類の魚道間および年間の差異が定量的に把握され、「せせらぎ魚道」における潮汐による塩水遡上が、藻類、貝類の生息分布に影響を及ぼし、モクズガニのメガロパ幼生の着床場所と密接な関係にあることが現地調査によって明らかにされた。さらに、稚アユの遡上の日周行動パターン、潮汐や塩水進入と連動した遡上量のピークなど、感潮域の魚道がもつ特性を把握することができた。総延長数十kmに及んでいた汽水環境が、せせらぎ魚道内に圧縮されている実態と、魚道群が機能を分担している一端が示された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、魚道調査にご配慮を頂いた水資源機構・長良川河口堰管理所環境課に感謝の意を表す。なお、本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(C)(2):課題番号15560450)および(財)土屋環境教育振興財団の研究助成を受けて行ったものである。

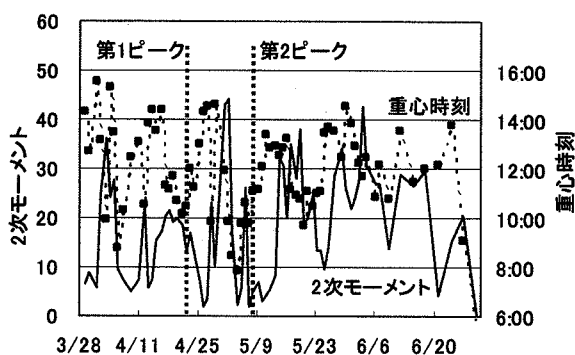


図-10 重心時刻と2次モーメント (1999年)

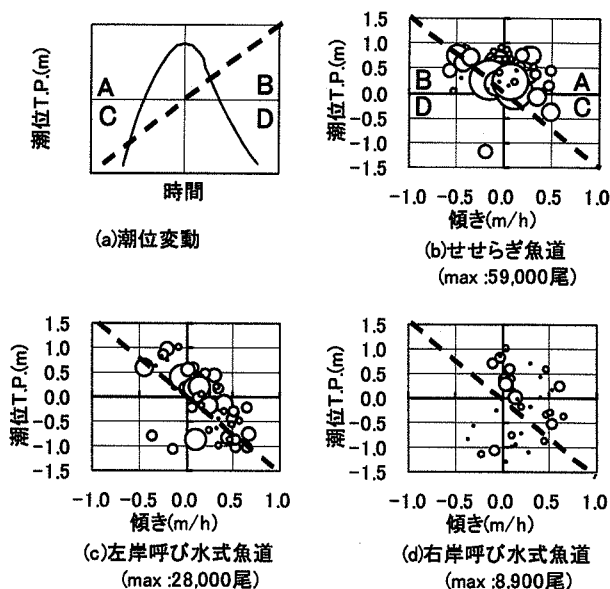


図-11 稚アユの遡上量と潮位特性量 (T.P.と傾き)

参考文献

- 1) 竹門康弘：長良川河口堰におけるモクズガニの遡上分析に基づく魚道の評価, 応用生態工学3(2), pp.153~168, 2000.
- 2) 新村安雄：長良川河口堰の呼び水魚道とせせらぎ魚道, 応用生態工学 3(2), pp.169~178, 2000.
- 3) 有田正光・鯉淵幸生：長良川河口堰が堰下流域の塩水侵入に与えた影響, 長良川河口堰が汽水域生息場の特性に与えた影響に関する研究, 科研成果報告書 (代表：玉井信行, 課題番号 13305035, (A)(1)), pp.17~40, 2003.
- 4) 小出水規行：長良川河口堰魚道の遡上魚類に関するモニタリングデータの統計解析とせせらぎ魚道における塩水遡上の現地調査, (代表:玉井信行,課題番号 13305035, (A)(1)), pp.113~129, 2003.
- 5) 和田 清・小出水規行・今村和志：長良川河口堰「せせらぎ魚道」における密度流の特性とモクズガニの着底・生息分布, 土木学会水工学論文集第48巻, pp.1585-1590, 2004.
- 6) 廣瀬利雄・中村中六：魚道の設計, 山海堂, pp.203-207, 1991. (2004. 4. 7受付)