

琵琶湖におけるニゴロブナの資源増殖に関する研究^{※1}

藤原 公一^{※2}

※1 本論文は 2011 年に東京海洋大学大学院に提出された学位論文である

※2 2012 年 7 月逝去

※3 学位論文提出時に印刷中、審査中であった著者の原著論文 2 篇が、既に日本水産学会誌に掲載済みのため、水産試験場研究報告編集委員会において第 1 章の文末の一部を現状に合わせた記載に改めた。なお、原著論文「琵琶湖におけるニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の種苗放流効果。」は 2012 年度日本水産学会論文賞を受賞した。

※4 第 6 章、第 7 章および第 8 章において「藤原、未発表」と記述のある著者のヨシの切り口の冠水にともなう出芽遅延と成長阻害についての原著論文が、著者の生前に日本水産学会誌に投稿され、没後に受理、掲載となったため、水産試験場研究報告編集委員会において第 6 章の文献の最後に書き加えた。

目 次

第1章	緒 言	3
第2章	ニゴロブナの飼育仔稚魚の発育と成長	8
第3章	アリザリン・コンプレクソン（ALC）を用いたニゴロブナの耳石への標識の検討	
3-1	ニゴロブナの耳石への ALC 標識装着条件の検討	20
3-2	ALC を用いたニゴロブナの耳石への多重標識装着条件と放流サイズの 推定方法	29
第4章	成長および流水トレーニングに伴うニゴロブナ仔稚魚の遊泳速度の変化	41
第5章	琵琶湖沿岸のヨシ帯におけるニゴロブナの初期生態とその環境への適応	
5-1	ヨシ帯奥部の環境特性とニゴロブナ仔魚のその水域への蟄集と適応	54
5-2	ニゴロブナ仔魚が琵琶湖の発達したヨシ帯岸辺付近へ蟄集する要因	71
第6章	琵琶湖におけるニゴロブナ種苗の放流水域としてのヨシ帯の重要性と放流事業の 課題	82
第7章	琵琶湖におけるニゴロブナ放流種苗の成長および分布域の拡大と沖合への 種苗放流技術の検討	98
第8章	琵琶湖におけるニゴロブナの種苗放流効果	115
第9章	総 括	132
謝 辞		134

第1章 緒言

琵琶湖と琵琶湖漁業の概要 琵琶湖は最大水深が104m、面積が674km²、水量が28km³におよぶ広大な水面¹⁾で、湖岸は岩礁、岩石、礫、砂浜、人工湖岸および抽水植物帯など変化に富み、²⁾400数十万年という世界的にも古い歴史を有する³⁾古代湖の一つに数えられている。⁴⁾また、琵琶湖は中緯度地域に位置する亜熱帯湖で、主湖盆の北湖は水深が深く、夏季には表層水が暖められて軽くなり、鉛直方向に水が成層する。一方、冬季には表層水が冷却されて重くなり、上下層が完全に入れ替わる年1回の全循環がみられる。⁵⁾このように長い歴史を持ち、変化に富んだ自然条件に恵まれた広大な琵琶湖には、15種の固有魚種⁶⁾をはじめ、多様で豊かな魚介類が生息し、既に縄文時代早期(約1万年前)から漁撈が行われている。⁷⁾

琵琶湖では、「エリ漁」(小型定置網漁業)や「沖曳き網漁」(底曳き網漁業)のほか、棒の先にカラスの羽を付けた「追い棒」で、湖岸に群れるアユを「さで網」に追い込んで漁獲する「アユ追いさで網漁」、産卵のために接岸したコイやフナ類をヨシ帯内で捕獲する「たつべ漁」など、琵琶湖独自に発達した歴史ある漁業が営まれている。また1972、1973年頃からは、夏になると湖面直下で群れを形成するアユを、漁船の先端に取り付けた網ですくい獲る「アユ沖すくい網漁」といった新たな漁法も行われている。⁸⁾

このように琵琶湖では、様々な漁業が発達し、年間の総漁獲量⁹⁾は、Fig. 1.1に示したように、1950年代には10,000 tを超え、このうちセタシジミを主とする貝類は約6,500~8,200 tで全体の74~77%、アユやニゴロブナなどの魚類は約2,100~2,300 tで全体の21~24%、スジエビなどのエビ類は約150~230 tで全体の約2%を占めていた。1960年には、除草剤PCPの水域汚染により、同薬剤に対して感受性が高いセタシジミの大量斃死が起こり、¹⁰⁾それ以降は貝類の漁獲量は急激に減少したが、魚類やエビ類の漁獲量は漸増した。しかし、エビ類では1970年代末から、魚類でも1980年代末から、いずれも漁獲量は減少に転じている。

ニゴロブナの漁獲概要と増殖対策 琵琶湖にはニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis*、ギンブナ *C.a.langsdorfii* およびゲンゴロウブナ *C.cuvieri* の1

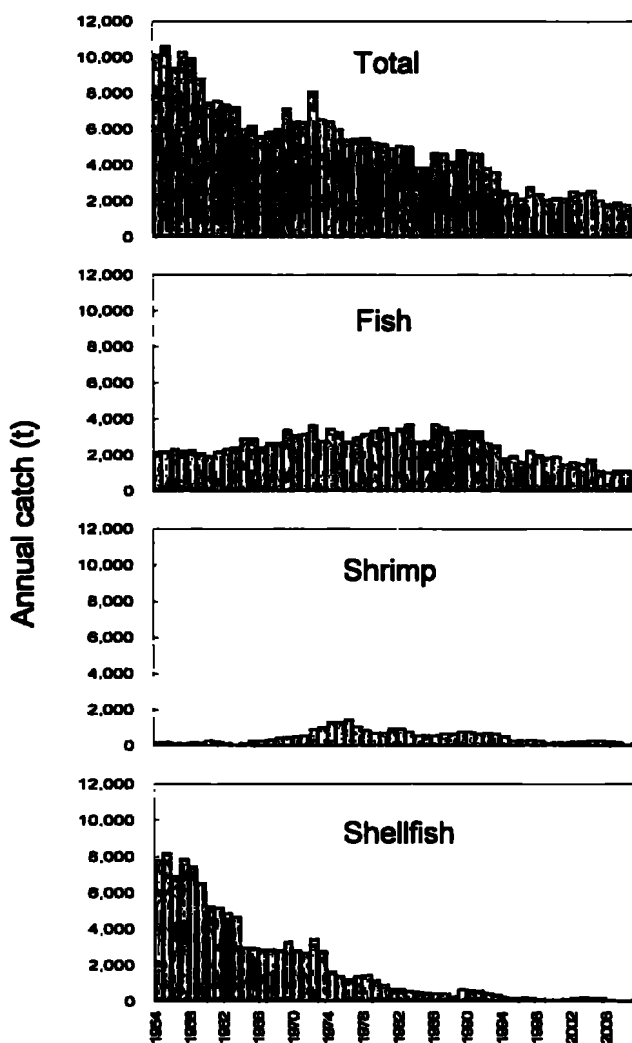


Fig.1.1 Annual changes in catches in Lake Biwa.⁹⁾

種2亜種のフナ属魚類が生息している。滋賀県農林水産統計年報¹¹⁾において、1986年まではこれらフナ属をすべて含めて“フナ”として漁獲量が報告されている。1987年以降は、後述するようにフナズシの材料に最も適するため商品価値が非常に高いニゴロブナのメスは“ニゴロブナ”、ニゴロブナのオス、ゲンゴロウブナおよびギンブナは、それらを合わせて、“その他フナ”として分類され(近畿農政局滋賀農政事務所私信)、漁獲量が報告されている。Fig. 1.2には、このようなフナ属の漁獲量の推移を示した。“フナ”は1980年代初頭までは年ごとに漁獲量の変動がみられるものの、概ね600 tの漁獲があり、琵琶湖の総漁獲量の約10%、魚類の漁獲量の約25%を占めていた。しかし、その後、漁獲量が急激に減少し、1990年代半ばからは100 t程度で推移している。“ニゴロブナ”の漁獲量も同様の減少傾向を示し、1988年の198 tを最高に、1997年には18 tにまで減少した。このフナ属の漁獲量の減少原因として、動

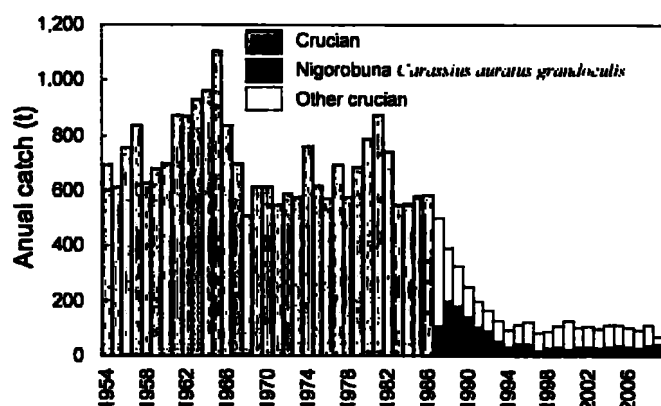


Fig.1.2 Annual changes in catches of crucians in Lake Biwa.⁹⁾

肉食に偏った食性の外来種オオクチバス *Micropterus salmoides*¹¹⁾ の琵琶湖への侵入と拡大による食害が指摘されている。^{12, 13)} また、フナ属の産卵・繁殖場となる琵琶湖沿岸域の開発事業などに伴う改変、特にニゴロブナにとっては発育や成長の場として不可欠なヨシ帯の大規模な喪失も、¹⁴⁾ その主要な原因と考えられている。

このため、ニゴロブナなどの水産資源の維持を目的に、1985年から滋賀県漁業協同組合連合会（以下、滋賀県漁連）によって、オオクチバスなど外来魚の駆除事業が実施されている。¹³⁾ また滋賀県によって、1981年から琵琶湖沿岸にニゴロブナなどの産卵・繁殖場の造成事業が実施されている。¹⁴⁾ さらに1983年からは琵琶湖栽培漁業センター（以下、栽培漁業センター）によって、ニゴロブナの大規模な種苗放流事業が実施されている。¹⁵⁾ しかし、これら産卵・繁殖場造成事業や種苗放流事業の開始当初は、後述するようにニゴロブナの増殖に関する知見が不十分で、効果的な事業展開には至らなかった。しかし、本研究で得られたニゴロブナ資源の増殖技術に関する成果とそれを受けた事業展開により、2008年頃からは事業効果が顕著に現れるようになり、漁獲物に占めるニゴロブナ放流魚の割合、いわゆる混獲率が上昇し、¹⁶⁾ 漁獲は回復傾向に転じている。¹⁴⁾

研究の経緯 琵琶湖の周辺では古くから淡水魚を塩と飯で自然発酵させるナレズシが作られている。その一つであるフナズシは、滋賀県内に専門店があるほか、一般家庭でも作られ、滋賀県の特産品として全国に知られている。^{7, 17-19)} このフナズシの材料には、フナ属の中で特に骨や皮が柔らかく、特別に味

が良いニゴロブナが最も適する。また、フナズシは薄く輪切りにして盛り付けるが、卵巣があるものは見栄えが良く、商品価値が非常に高い。このため、ニゴロブナのメスはフナズシの材料として主に用いられ、古くから高い価格で取引され、琵琶湖漁業の重要な漁獲対象となっている。しかし、上記したように1980年代からはその漁獲量の減少が続いたため、1983～1984年度に行政、業界および研究者からなる「温水魚資源対策検討委員会」が開催され、ニゴロブナの資源増殖のあり方が検討された。¹⁵⁾ また、同時進行する形で、1983年からニゴロブナの種苗放流事業が開始された。¹⁵⁾ しかし、その当時は本種の生理・生態や種苗放流技術に関する科学的知見が十分に集積されておらず、既にふ化仔魚の大量放流事業が実施されていたアユ *Plecoglossus altivelis* と同様に、本種についても年間5,000万尾という大量のふ化仔魚の放流を中心とした資源増殖計画が立てられ、種苗放流事業が進められた。¹⁵⁾ しかし、その後も本種の資源に回復の兆しがみられなかったことから、著者らは、ニゴロブナの種苗放流のあり方を抜本的に見直すため、1990～1997年にニゴロブナ種苗の放流技術について研究を行った。近年ではその成果を受けた効果的な本種の種苗放流事業が栽培漁業センターと滋賀県漁連によって実施されている。本論文は、その研究内容をとりまとめたものである。

研究の概要 ニゴロブナの効果的な種苗放流技術、特に放流サイズを確立するための基礎資料を得る目的で、飼育魚を用いてふ化直後から稚魚に至るまでの発育と成長を詳細に調べた。第2章では、この調査で明らかになったニゴロブナの発育ステージ毎の形態的な特徴と個体発生の過程でみられる骨形成や諸器官の発達について述べる。

また本研究では、琵琶湖においてニゴロブナの効果的な種苗放流技術や産卵・繁殖場の造成条件など、本種の増殖技術を検討するため、標識を付けたニゴロブナ種苗の放流・回収調査を中心に研究を進めた。第3章3-1では、卵や仔稚魚の段階にあるニゴロブナの耳石ヘアリザリン・コンプレクソンを用いた染色標識（以下、ALC標識）を付けるための適正条件を検討した結果について述べる。また、効果的な種苗放流技術を確立するうえで、放流する水域や時期などの条件を変えた標識種苗放流による適正な放流条件の検討や生き残りやすい種苗サイズの検討が重

要である。その研究を進めるうえで、相互に識別可能な多種類の ALC 標識の装着技術や再捕された標識魚の放流サイズを推定できる技術の確立が必要であった。このため、ニゴロブナの卵や仔稚魚へ ALC 標識操作を複数回繰り返して行い、耳石への相互識別可能な多重標識を付ける条件を明らかにするとともに、多重標識の装着が放流後の種苗に影響をおよぼさないことを確認した。また、放流する直前に ALC 標識を付け、再捕魚の耳石に見られる ALC 蛍光のサイズ、すなわち放流時の耳石サイズから、放流魚の体長を推定する技術の確立するため、ニゴロブナ仔稚魚の耳石サイズ-体長関係を調べた。一般に成長が異なる群間では耳石サイズ-体長関係に差が出る²⁰⁾ことが知られている²⁰⁾ため、この検討は魚体の成長履歴を考慮して行った。その結果、異なる生産ロットの標識種苗においても、放流時の体長を高い精度で推定できる方法を見いだした。第3章3-2では、それらの結果について述べる。

効果的な放流サイズを検討するうえで、成長に伴う遊泳速度の変化の把握も重要な検討項目である。魚の遊泳速度は、無気呼吸によって20秒以内に限り泳げる最大速度である突進速度、20秒から200分の間泳げ、最後は疲労する prolonged swimming speed および疲労することなく200分以上泳げる持続遊泳速度に大別される。²¹⁾一般に1~数秒間持続する最大遊泳速度と定義される突進速度²²⁾と prolonged swimming speed のうち測定時間を60分間とした最大遊泳速度(巡航速度)²³⁾が測定される。しかし、これまで本種の遊泳速度に関する報告はない。そこで、仔魚から稚魚に至る各ステージにわたって、魚体サイズ毎に本種の突進速度と巡航速度を測定し、成長に伴う遊泳能力の変化を評価した。また、流水中で飼育する、いわゆる流水トレーニングが、本種の両遊泳速度におよぼす影響とこのトレーニングを経た種苗の放流効果について検討した。第4章では、これらの結果について述べる。

琵琶湖ではニゴロブナの資源増殖のために、種苗放流事業に加えて、ヨシ *Phragmites australis* を植栽した本種の産卵・繁殖場の造成事業が行われている。¹⁴⁾これらの事業を進めるうえで、本種の初期生態の把握は非常に重要である。そこで、ALC 標識を付けたニゴロブナ仔魚を、琵琶湖沿岸水域に自生するヨシ帯内に放流してその動きを追跡するとともに、一

部の魚については消化管内容物を観察して本種の仔魚期の食性を確認した。また、そのヨシ帯内の溶存酸素濃度や餌となる動物プランクトン密度などの環境特性も調査した。第5章5-1では、これらの調査によって明らかとなった“ニゴロブナ仔魚は著しく貧酸素環境にあるヨシ帯の奥部(岸辺付近)へ積極的に蟄集する”という特異な初期生態と本種仔魚のその環境への適応について述べる。

さらに、ニゴロブナの種苗放流の適地や産卵・繁殖場の造成条件を検討するうえで、このようなヨシ帯の奥部へ本種仔魚を積極的に蟄集させる要因の解明も重要である。そこで、観察された天然ヨシ帯奥部の環境に対する本種仔魚の忌避/選好性を室内の行動実験により検討し、本種仔魚のヨシ帯奥部への蟄集要因を明らかにした。第5章5-2ではこの結果について述べる。

第6章では、ALC 標識を付けて識別したニゴロブナ仔稚魚を琵琶湖のヨシ帯、近隣の砂浜およびそれらの沖合水域へ放流し、琵琶湖で再捕調査を行い、本種仔稚魚が琵琶湖で生き残るうえでヨシ帯が不可欠であることを明らかにした。また、高い放流効果が期待できる種苗サイズ(発育段階)を確認した。さらに、ヨシ帯が待つ本種仔稚魚のこのナーサリー機能は、治水を目的とした琵琶湖の人為的な水位低下によるヨシ帯面積の減少、ヨシ帯の管理を目的とした冬季のヨシ刈り取り・焼き払いによるヨシの成長遅滞および限られたヨシ帯への過度の種苗放流による密度効果で低下することを明らかにした。

冠水域に自生するヨシ帯、いわゆる水ヨシ帯は、1974年には琵琶湖の湖岸に約99 ha 存在したが、²⁴⁾湖岸の開発、改変などにより破壊され、2002年には約76 ha²⁵⁾まで減少している。また、既述のとおり人為的な琵琶湖の水位低下やヨシの刈り取り事業などで、有効な水ヨシ帯が一層減少した状況にある。このような現状では、ヨシ帯に依存しない段階まで育成した本種の種苗放流技術の検討も重要な課題である。しかし、春季に生まれ、ヨシ帯内で6,7月まで育った以降の本種の生態に関しても、これまで断片的にしか知られていなかった。ヨシ帯に依存しない本種の放流技術を検討するうえで、このような情報の収集が不可欠である。そこで、ALC 標識を付けた本種稚魚を6,7月に琵琶湖沿岸のヨシ帯へ放流し、その後、翌年の春季にかけて琵琶湖内でそれらを追跡調査して

移動や成長の特性の把握に努めた。また、その知見をもとに、ALC 標識で識別したサイズが異なる本種種苗を生まれた年の晩秋季に琵琶湖沖合に放流し、追跡調査を経て高い放流効果が期待できるサイズを明らかにした。さらに近年では、気温の上昇に伴い琵琶湖の水温も上昇する傾向にあり、²⁸⁻³⁰⁾ 冬季の鉛直混合の弱まり、すなわち水温躍層の解消の遅れが指摘されている。²⁸⁻³⁰⁾ このような琵琶湖の温暖化傾向を背景に、沖合へ当歳魚種苗の放流を行う場合の効果的な放流条件についても検討した。第7章では、これらの検討結果について述べる。

このような放流技術に関する知見を受けて、現在、琵琶湖では栽培漁業センターと滋賀県漁連によって、ニゴロブナの種苗放流事業が実施されている。しかし、その放流効果の経済的側面は十分に評価されていない。このためニゴロブナの主要な漁法である刺網漁の漁獲物を対象に、琵琶湖のヨシ帯や沖合などへ放流したニゴロブナの ALC 標識種苗の混獲状況を調査し、種苗放流の経済効果を評価して、最も効果的な放流技術について検討した。また、今後、効果的な種苗放流事業を進めていくうえでの課題を整理した。第8章ではこれらの結果について述べる。

第9章では、それまでに述べてきた研究結果を総括し、今後の課題と展望について述べる。

なお、本研究の各章の内容は、以下のとおり原著論文として公表済みである。

- ・藤原公一、ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の飼育仔稚魚の発育と成長。日水誌 2010; 76: 894-904. (第2章)
- ・藤原公一、アリザリン・コンプレクソンを用いたニゴロブナ, *Carassius auratus grandoculis* の耳石への標識装着条件。水産増殖 1999; 47: 221-228. (第3章 3-1)
- ・藤原公一、臼杵崇広、根本守仁、北田修一、アリザリン・コンプレクソンを用いたニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の耳石への多重標識装着条件と放流サイズの推定方法。日水誌 2010; 76: 637-645. (第3章 3-2)
- ・藤原公一、臼杵崇広、北田修一、成長および流水トレーニングに伴うニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* 仔稚魚の遊泳速度の変化。日水誌 2010; 76: 1025-1034. (第4章)

- ・藤原公一、臼杵崇広、根本守仁、北田修一、琵琶湖沿岸のヨシ帯におけるニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の初期生態とその環境への適応。日水誌 2011; 77: 387-401. (第5章 5-1)
- ・藤原公一、北田修一、ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* 仔魚が琵琶湖の発達したヨシ帯岸辺付近へ蟄集する要因。日水誌 2011; 77: 853-861. (第5章 5-2)
- ・藤原公一、臼杵崇広、根本守仁、松尾雅也、竹岡昇一郎、田中 満、北田修一、琵琶湖におけるニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* 種苗の放流水域としてのヨシ帯の重要性と放流事業の課題。日水誌 2011; 77: 822-833. (第6章)
- ・藤原公一、臼杵崇広、根本守仁、松尾雅也、竹岡昇一郎、田中 満、中新井 隆、北田修一、琵琶湖におけるニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* 放流種苗の成長および分布域の拡大と沖合への種苗放流技術の検討。日水誌。2011; 77: 1051-1064. (第7章)
- ・藤原公一、松尾雅也、臼杵崇広、根本守仁、竹岡昇一郎、田中 満、北田修一、琵琶湖におけるニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の種苗放流効果。日水誌。2012; 78: 421-428. (第8章)

文 献

- 1) 滋賀県琵琶湖研究所、「世界の湖」人文書院、京都、2001.
- 2) 西野麻知子、生物多様性からみた琵琶湖・淀川水系。「とりもどせ！琵琶湖・淀川の原風景」(西野麻知子編)、サンライズ出版、彦根、2009; 8-60.
- 3) 里口保文、琵琶湖のあらまし 生い立ち。「琵琶湖ハンドブック」(琵琶湖ハンドブック編集委員会編)、滋賀県、大津、2007; 20-21.
- 4) 中井克樹、古代湖って何?。「世界の古代湖」(宮本真二、アンドリュー ロシター、脇田健一編) 滋賀県立琵琶湖博物館、草津、1997; 3-4.
- 5) 中田英昭、他、水圏環境。「水産海洋ハンドブック」(水産海洋ハンドブック編集委員会編)、生物研究社、東京、2007; 1-62.
- 6) 西野麻知子、琵琶湖の固有種。「琵琶湖ハンドブック」(琵琶湖ハンドブック編集委員会編)、滋賀県、大津、2007; 66-67.

- 7) 大沼芳幸. 魚と暮らし. 「近江湖物語二 湖幸比古と豊古比咩の世界」滋賀県文化財保護課・(財)滋賀県文化財保護協会, 大津. 2008; 38-49.
- 8) 前畑政善, 秋山廣光, 松田征也. 「琵琶湖の魚と漁具・漁法」滋賀県立琵琶湖文化館. 大津. 1984.
- 9) 昭和 29 年次～平成 21 年次滋賀農林水産統計年報 (近畿農政局編), 大津. 1955～2011.
- 10) 村長義雄, 水沼栄三, 箕田冠一, 有馬武司, 尾崎久雄. セタシジミの異常斃死に関する研究 II 異常斃死の原因について. 滋賀水試研報 1962; 15: 16-41.
- 11) 淀太我, 井口恵一朗. バス問題の経緯と背景. 水研センター研報 2004; 12: 10-24.
- 12) 山中 治. 昭和 60 年～62 年度オオクチバス対策総合調査研究報告書 総括. 滋賀水試研報 1989; 40: 63-92.
- 13) 岡村貴司. 滋賀県の外来魚(ブラックバス・ブルーギル)駆除事業. 「外来種ハンドブック」(日本生態学会編), 地人書館, 東京. 2002; 24-26.
- 14) 滋賀県農政水産部水産課. 「滋賀の水産」滋賀県, 大津. 2011.
- 15) ニゴロブナ. 昭和 58(1983)年度～平成 17(2005)年度種苗生産放流事業結果概要. 財団法人滋賀県水産振興協会, 草津. 2007; 2-17.
- 16) ニゴロブナ. 2009(平成 21)年度生産放流事業報告. 財団法人滋賀県水産振興協会, 草津. 2011; 2-14.
- 17) 小島朝子, 北村眞一, 堀越昌子. なぜ琵琶湖で育った. 「ふなずしの謎」(滋賀の食文化研究会編)サンライズ出版, 滋賀. 1995; 9-33.
- 18) 藤井建夫. すしの先祖は魚の漬け物. 「魚の発酵食品」成山堂書店, 東京. 2000; 77-96.
- 19) 藤井建夫. 水産発酵食品にみる先人の知恵とその継承. 「水産の 21 世紀 - 海から拓く食料自給」(田中 克, 河合真一郎, 谷口順彦, 坂田泰造)京都大学学術出版会, 京都. 2010; 419-442.
- 20) Mosegaard H, Svedäng H, Taberman K. Uncoupling of somatic and otolith growth rates in arctic char (*Salvelinus alpinus*) as an effect of differences in temperature response. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1988; 45: 1514-1524.
- 21) Wolter C, Arlinghaus R. Navigation impacts of freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance. *Rev. Fish. Biol. Fish.* 2003; 13: 63-89.
- 22) Blaxter JHS. Swimming speeds of fish. *FAO Fish Rep.* 1969; 62: 69-100.
- 23) Brett JR. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 1964; 21: 1183-1226.
- 24) 滋賀県水産試験場. びわ湖のヨシ帯分布と現存量. 琵琶湖の葭地等に関する予察的検討結果報告書, 葭地保全造成検討委員会, 大津. 1977; 51-62.
- 25) 森田 尚, 津村祐司, 西森克浩, 山中 治. 琵琶湖の水位変動に伴うヨシ群落冠水面積の変化. 平成 15 年度滋賀水試事業報告 2004; 14-15.
- 26) 遠藤修一, 山下修平, 川上委子, 奥村康昭. びわ湖における近年の水温上昇について. 陸水雑 1999; 60: 223-228.
- 27) 中室克彦, 奥野智史, 前澤 希, 坂崎文俊, 田口 寛, 福永 勲, 西海暢展, 加賀城直哉, 服部幸和. 琵琶湖における水温上昇の実態把握とその要因解析. 水環境学会誌 2008; 31: 713-718.
- 28) 速水祐一, 藤原建紀. 琵琶湖深層水の水温化. 海の研究 1999; 8: 197-202.
- 29) 熊谷道夫. 地球温暖化が琵琶湖に与える影響. 環境技術 2008; 37: 407-413.
- 30) 北澤大輔, 熊谷道夫. 気候変動の琵琶湖物質循環への影響に関する生態系シミュレーション. 生産研究 2008; 60: 46-49.

第2章 ニゴロブナの飼育仔稚魚の発育と成長

琵琶湖では、ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の資源を回復させるために古くから滋賀県漁業協同組合連合会によって、また1983年からは琵琶湖栽培漁業センター(以下、栽培漁業センター)が中心となって種苗放流事業が実施されている。¹⁾ しかし、栽培漁業センターで種苗放流事業が始められるようになってからも、本種の種苗放流技術に関する科学的知見が十分ではなく、それまでに行われていたアユ *Plecoglossus altivelis* と同様に、ふ化直後の仔魚の大量放流を中心に事業が進められた。¹⁾ しかし、その後も本種の資源に回復の兆しがみられなかったことから、著者らは、まず放流効果が期待できる種苗のサイズについて検討した。

この検討を進めるには、対象とする魚種の初期形態や成長、器官形成などから構築された発育ステージにもとづいた知見を集積することが重要となる。しかし、ニゴロブナに関しては、友田²⁾が初期形態と生態的特徴を報告しているものの、その目的はゲンゴロウブナ *C. cuvieri* との系統的な差違を比較・解明することであり、至適放流サイズの検討には十分ではなかった。そこで、ニゴロブナの効果的な種苗放流技術、特に放流サイズを確立するための基礎資料を得ることを目的に、飼育魚を用いて、ふ化直後から稚魚に至るまでの発育と成長を詳細に調べ、発育ステージ毎にそれらの特徴を明らかにした。また、形態的な特徴に加え、個体発生の過程でみられる骨形成や諸器官の発達についても調査した。

材料および方法

供試魚 本研究には、滋賀県水産試験場(以下、滋賀水試)で養成しているニゴロブナ親魚が1990年5月29日と1994年5月19日に人工産卵藻(キンラン、川島商事)へ自然産卵した卵を用いた。これら卵は琵琶湖から水を取り入れた池で管理し、前者は1990年6月2日、後者は1994年5月24日にふ化した。ふ化した仔魚は粗放的に餌料を培養している池(12.5×8.0×水深1.0m)に設置した3.5×2.0×深さ0.7mの網イネス(目合い0.1mm)へ約5,000尾収容し

て45日間飼育した。飼育中はポンプでツボワムシ *Brachionus calyciflorus* やタマミジンコ *Moina macrocopa* などの餌料生物を含む池中の水を網イネス内に連続して注入した。池中の餌料生物の密度が低下し始めた10日目以降は、これに加えて配合飼料(餌付けA、科学飼料研究所)を午前6時から午後6時の間、ゼンマイ式小型自動給餌機(FIAP CLOCKWORK FEEDER)で連続的に投与した。飼育中は溶存酸素濃度の低下を防ぐため、網イネス内でエアーレーションを行った。また、天然水域では発育初期のニゴロブナは水草など浮遊物周辺の水面直下に生息するため、網イネスの水面面積の概ね85%の部分に、人工産卵藻を浮かべた。なお、本研究ではふ化当日を0日齢と定義した。

供試魚の生体観察と固定 以下に述べる測定と観察には、1994年5月24日にふ化した仔魚を、飼育終了までの間に最初の5日間は連日、それ以降は次第に日数を空けて延べ18回、毎回60尾を目安にサンプリングして用いた。各サンプリングで得た供試魚のうち20尾は体長・体重関係と相対成長、卵黄・鰾の体積を求めるために10%ホルマリン溶液で直ちに固定した。残りは氷水中へ浸漬して麻酔(氷冷麻酔)し、万能投影機で標準体長(以下、体長。Fig. 2.1)を測定するとともに、数尾は実体顕微鏡下で体の外観と鼻孔の形成過程を観察した。また、鱗が発生した標本では体左半面の全ての鱗数を計数し、背鰭起点直下の側線鱗の形態を観察した。さらに、各器官の発達過程を観察するため、10%ホルマリン溶液、ブアン氏液およびカルノフスキー氏液でそれぞれ10尾ずつ固定した。

外部形態のスケッチは1990年6月2日にふ化した仔魚を上記と同様に飼育し、同じ頻度で毎回数尾ずつサンプリングして、その一部について氷冷麻酔後、実体顕微鏡で観察して行った。発育ステージはKendall *et al.*³⁾に準じて、ふ化直後の仔魚(ステージA)、下顎が形成されてから脊索末端が上屈を開始するまでの仔魚(ステージB)、上屈開始後から完了するまでの仔魚(ステージC)、上屈完了後から鰭条が定数に達するまでの仔魚(ステージD)、鰭条が定数に達した後の稚魚(ステージE)の5ステージに区分した。

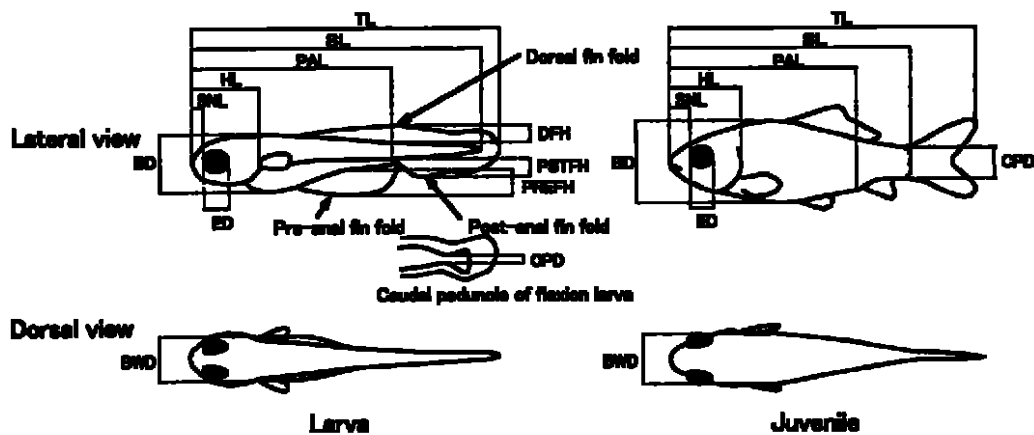


Fig. 2.1 Definition of morphological parameters. TL: total length, SL: standard length, PAL: pre-anal length, HL: head length, SNL: snout length, ED: eye diameter, BD: body depth (including yolk in larva), DFH: dorsal fin fold height (maximum height excluding parts supported by fin rays), PSTFH: post-anal fin fold height (maximum height excluding parts supported by fin rays), PREFH: pre-anal fin fold height (maximum height), CPD: caudal peduncle depth (minimum depth after flexion stage in larva), BWD: body width (including yolk in larva).

体各部の測定 水洗したホルマリン固定標本を用い、万能投影機下でFig. 2.1に示した各部の長さおよび卵黄と鰾の長さ高さ、脊索末端の上屈角度(脊索上屈角)を測定した。鰾の計測は、1室の間のみ行った。卵黄と鰾の体積 $V \text{ mm}^3$ は、ともに回転楕円体として、 $V = \pi L \cdot H^2 / 6$ (ただし L : 卵黄または鰾の長さ, mm , H : 卵黄または鰾の高さ, mm) の計算式で算出した。⁴⁾ 体重は化学天秤を用いて測定した。なお、魚体はホルマリン固定に伴い縮小し、固定前の体長($SL \text{ mm}$)と固定後の体長($FSL \text{ mm}$)との間には、 $SL = 1.01FSL + 0.363$ ($N=88$, $R^2=0.999$, $P<0.001$) の関係が認められた。したがって、ホルマリンで固定した標本は、固定前の体長をこの計算式で推定した。

各器官の発達過程の観察 鰭と骨の形成過程は、ホルマリン固定した標本の軟骨と硬骨を Dingorokus and Uhler⁵⁾ の方法で二重染色し、実体顕微鏡下で観察した。ブアン氏液固定した標本は、70%エタノールに保存後、定法に従い $4 \mu\text{m}$ 厚のパラフィン切片を作製した。これにマイヤーのヘマトキシリン・エオジン染色を施し、光学顕微鏡下で消化管や心臓、脾臓など内臓諸器官、鰾、骨格筋、眼の発達を観察した。なお、切片は、体表側面から体の中心部を通過するまで体軸方向に連続して作製した。また、背鰭の起点前後数 mm の部分については、体軸と直行する方向に連続して作製した。カルノフスキー氏液固定し

た標本は、オスミウム酸を用いて再固定後エタノール系列で脱水し、酢酸イソアミルに移した。これを滋賀県農業技術振興センターにおいて臨界点乾燥した後、金スパッタリングを行い、主に体表の感覚器官の形成について走査電子顕微鏡で観察した。

結果

発育ステージとその形態的、生態的特徴

1. ステージ A (Fig. 2.2A) ふ化当日、0日齢の仔魚。体長は $5.00 \pm 0.12 \text{ mm}$, $4.81 \sim 5.18 \text{ mm}$ (平均値 $\pm$ SD, 範囲, 以下同様)。仔魚は浮遊せず、人工産卵藻や網イケスの側面に頭部下面で接し、尾部を下にして懸垂する。卵黄長は体長の概ね 46% を占め、卵黄の体積は $0.52 \pm 0.21 \text{ mm}^3$, $0.29 \sim 0.90 \text{ mm}^3$ 。口は未形成で、口は頭部下面に穴状に開口する。粘液細胞は体表の他、このステージに限って口の周辺に多数分布する。鰓孔や肛門、尿道口は既に開口する。鰭は胸鰭の他、背部から尾部を経て肛門にかけてと肛門前に膜鰭が存在する。背部と肛門後の膜鰭は肛門前の膜鰭に比べて顕著に大きい。背部の膜鰭には、逆U字状に多数の毛細血管が分布し、その中を赤血球が上下する。黒色素胞(以下、色素)は背部体表に多数存在し、尾部の膜鰭や腹部体表、腹腔内の上面部

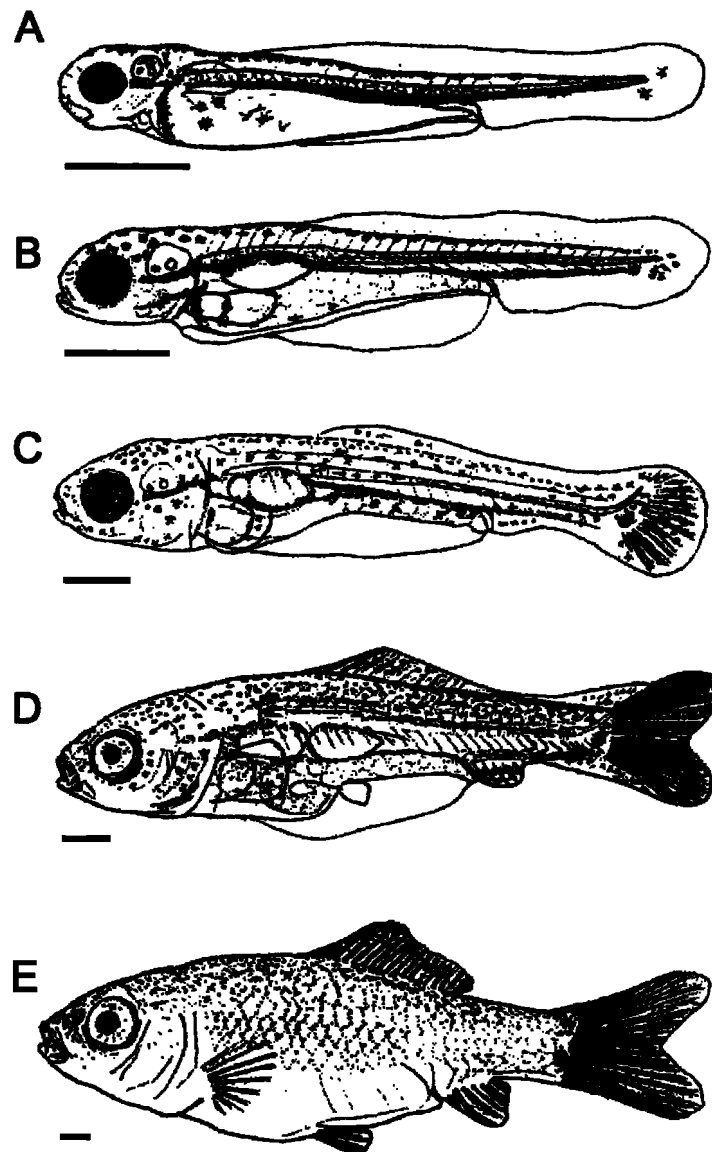


Fig. 2.2 Hatchery-reared larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. A) stage A: newly hatched larva, 5.2 mm standard length (SL), 0 day after hatching (DAH). B) stage B: pre-flexion larva, 5.9 mm SL, 2 DAH. C) stage C: flexion larva, 9.0 mm SL, 8 DAH. D) stage D: post-flexion larva, 11.7 mm SL, 14 DAH. E) stage E: juvenile, 18.0 mm SL, 28 DAH. Each scale bar: 1 mm.

分にも散在する。

2. ステージ B (Fig. 2. 2B) 下顎が形成されてから脊索末端が上屈を開始するまでの上屈前仔魚 (Fig. 2. 3)。体長は 5.89 ± 0.32 mm, 5.32~6.44 mm。鰓が発現し、仔魚は浮遊するようになるが、分布は浮かべた人工産卵薬内の水面直下にのみ限られる。遊泳行動は間欠的で運動能力は低いと思われる。卵

黄の吸収が急速に進み、ステージの終わりには 0.03 mm^3 (ふ化時の卵黄体積の約 5%) まで減少する。下顎の形成に伴い摂餌が可能となる。摂餌は、卵黄が残存している (0.09 mm^3 : ふ化時の卵黄体積の約 17%) 2 日齢から始まり、消化管に餌料生物が一系列に並ぶ。鰭条は形成されず、膜鰭のみ存在する。胸鰭の基部は、肉厚で発達している。背部や肛門後の膜

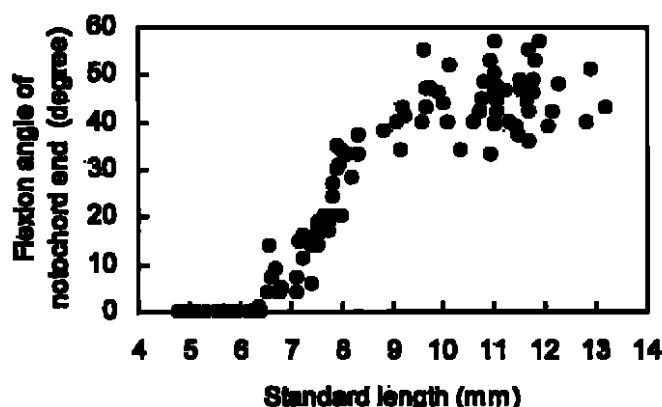


Fig. 2.3 Relationship between standard length and flexion angle of notochord end in hatchery-reared larval *nigrobona Carassius auratus grandoculis*. Standard length: estimated value before fixation.

鰭は成長に伴い退縮するが、肛門前の膜鰭は発達する (Fig. 2. 4)。背部の膜鰭の毛細血管は依然存在する。形成直後の鰭の上面に色素が認められる。体表や腹腔内上面、尾部の膜鰭の色素は次第に数を増す。

3. ステージ C (Fig. 2. 2C) 脊索末端の上屈が始まり、完了するまでの上屈仔魚 (Fig. 2. 3)。体長は 7.68 ± 0.79 mm, 6.39~9.59 mm。網イネス内での分布は、このステージでも人工産卵薬内の水面直下に限られ、人影などには敏感に反応しない。仔魚は頭を上に向けて浮遊し、持続的に泳がない。卵黄は、直ちに (3 日齢) 吸収される。背部と肛門後の膜鰭は、成長に伴い退縮・消失していくが、肛門前の膜鰭は発達する (Fig. 2. 4)。また、背部膜鰭の毛細血管は、このステージの前半で確認できなくなる。体表の色素は数を一層増し、背部の膜鰭にも多数出現する。加えて、上屈した脊索末端の下部分に色素が集まり、黒点を形成する。

4. ステージ D (Fig. 2. 2D) 脊索末端の上屈が完了してから、全ての鰭条が定数に達するまでの上屈後仔魚 (Fig. 2. 3, 2. 5)。体長は 11.98 ± 1.51 mm, 9.63~15.94 mm。仔魚は、人工産卵薬の水面直下からその周辺へ次第に分布を広げる。また、運動能力も非常に高くなり、物音などに敏感に反応して、人が近づくと人工産卵薬の内部へ勢いよく逃避するようになる。ステージ後半には、一部の仔魚は 10 数尾から数 10 尾の集団で、網イネスの底層部分にも分布し始め、網イネスなどに付着した藻類をついばむ行動をとる。この集団は、各個体が同じ方向へそろって泳ぐなどの統一性のある行動はとらない。尾部の

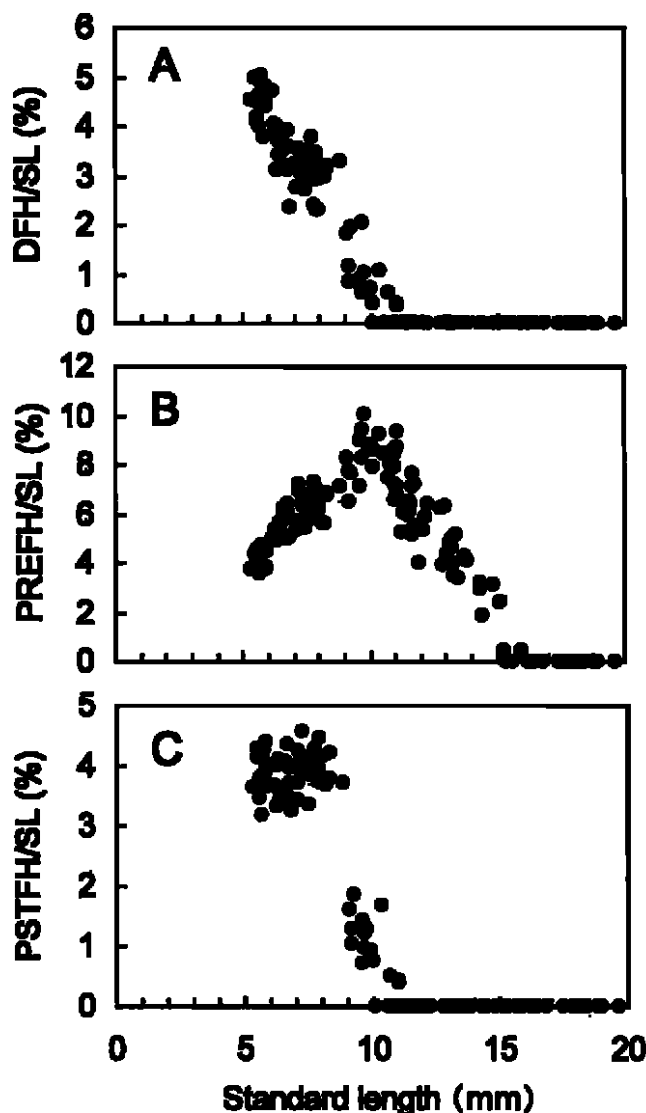


Fig. 2.4 Changes in proportions of A: dorsal fin fold height (DFH), B: pre-anal fin fold height (PREFH) and C: post-anal fin fold height (PSTFH) to standard length (SL) with growth in hatchery-reared larval and juvenile *nigrobona Carassius auratus grandoculis*. Standard length: estimated value before fixation. Refer to Fig. 2.1 for each fin fold height.

黒点はさらに鮮明となる。最後まで残った肛門前の膜鰭もこのステージの終わりには消失する (Fig. 2. 4)。色素は体背部を中心にさらに増加する。

5. ステージ E (Fig. 2. 2E) 全ての鰭条が定数に達した以降の稚魚 (Fig. 2. 5)。体長は 21.32 ± 4.38 mm, 15.33~31.84 mm。稚魚になると仔魚ではみられなかった網イネスの底をついばむ個体が増える。また、持続的に遊泳するようになり、統一性のある行動をとる群を形成して網イネス内全面を泳ぎ回る。このように群を形成した稚魚の体長は 20.03 ± 3.95 mm, 16.32~31.59 mm であった。本ステージでは鰭条の

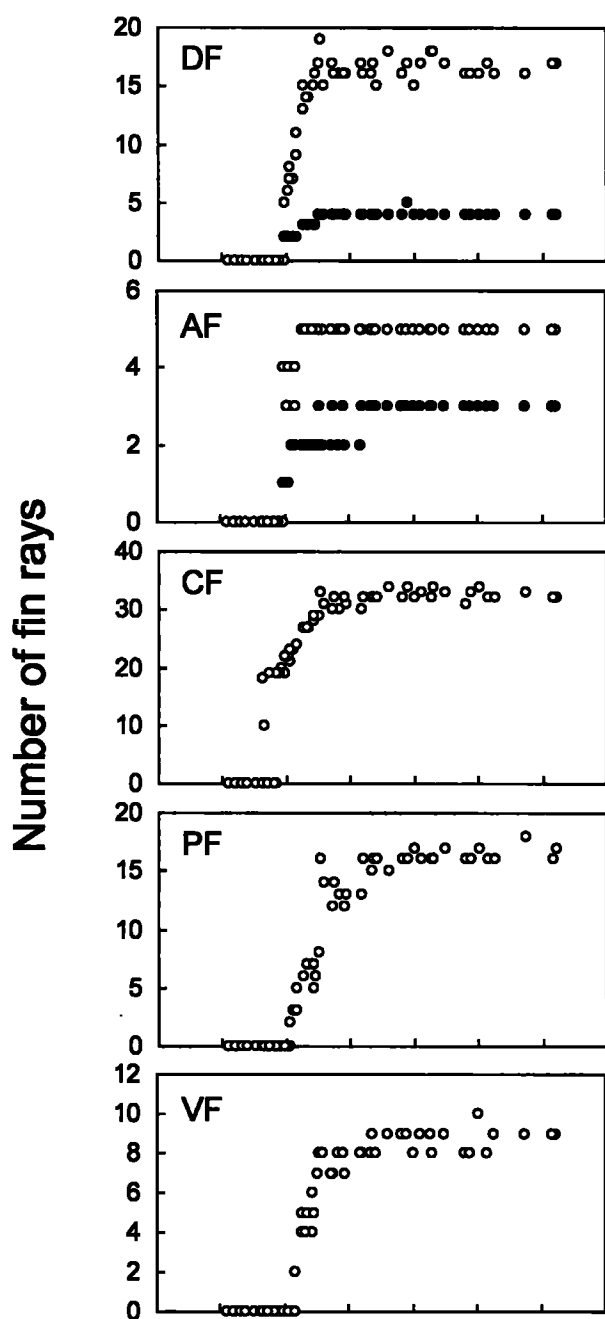


Fig.2.5 Relationships between standard length and number of fin rays in hatchery-reared larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. DF:dorsal fin, AF:anal fin, CF:caudal fin, PF:pectoral fin, VF:ventral fin. Open and closed symbols represent soft and spiny-soft rays, respectively.

他、鱗数も定数に達するとともにグアニンが全身に発現し、ニゴロブナ特有の外部形態が完成する。

成長と発育ステージの進行 1994年5月24日にふ化した仔魚の飼育期間中の平均水温は 21.8℃、範囲は 18.4～24.8℃であった (Fig. 2.6A)。仔稚魚は 45 日の飼育期間を通して概ね順調に成長した (Fig. 2.6

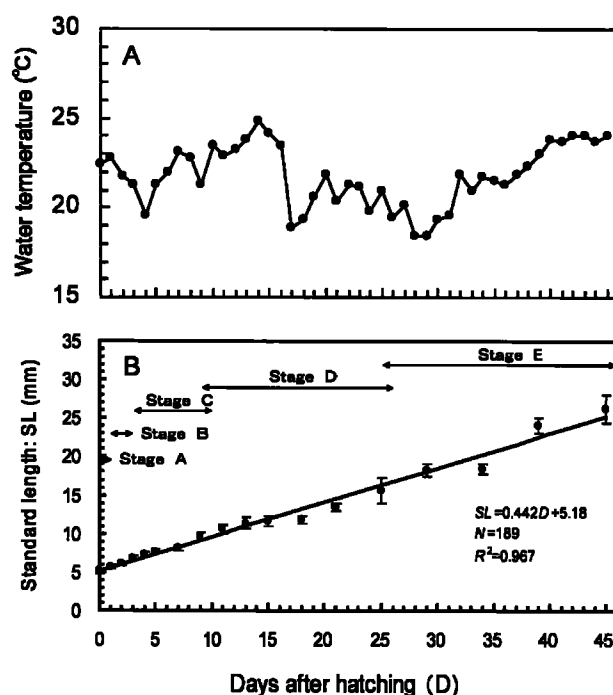


Fig.2.6 A:water temperature and B:growth in standard length of hatchery-reared larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* in rearing period.

Standard length:estimated value before fixation. Solid circles and vertical bars indicate mean $\pm$ SD of standard length. Refer to the text for each stage.

B)。日齢(D;日)と体長(SL;mm)の間には $SL = 0.442D + 5.18$ ($N = 189$, $R^2 = 0.967$, $P < 0.001$) の関係が認められた。各発育ステージの仔稚魚の日齢は、ステージAが0日齢、Bが1～2日齢、Cが3～9日齢、Dが9～25日齢であり、ステージEには25日齢以降に到達した。体長と体重(BW;g)は、後述する体長に対する全長、体高、体幅などの比率に変曲点がみられた体長 12 mm を境として、それ未満では $BW = 4 \times 10^{-7} SL^{4.63}$ ($N = 118$, $R^2 = 0.982$, $P < 0.001$)、それ以上では $BW = 7 \times 10^{-6} SL^{3.52}$ ($N = 71$, $R^2 = 0.994$, $P < 0.001$) の関係で表すことができた (Fig. 2.7)。

1990年6月2日にふ化した仔魚の飼育期間中の平均水温は 21.3℃、範囲は 17.9～25.0℃であり、成長と発育は上記の仔稚魚とほぼ同様であった。

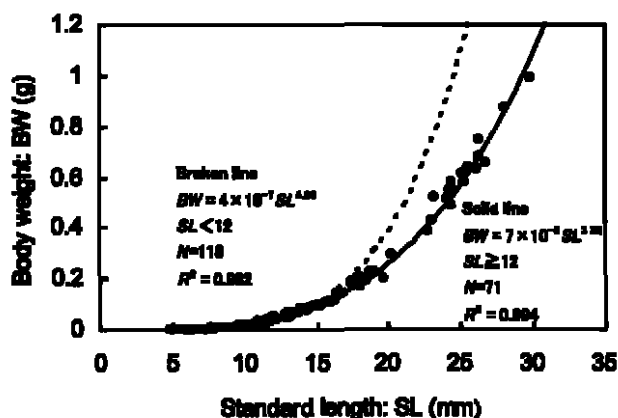


Fig.2.7 Relationship between standard length and body weight of hatchery-reared larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. Standard length: estimated value before fixation.

体各部の相対成長 体長に対する吻長, 頭長, 肛門前長, 全長, 体高, 尾柄高, 体幅および眼径の比率(各部位/体長×100)を Fig. 2.8 に示した。変曲点は概ね体長 6mm(吻長, 頭長, 肛門前長, 全長, 体高, 体幅, 眼径), 同 8mm(肛門前長, 全長), 同 12 mm(吻長, 頭長, 肛門前長, 全長, 体高, 尾柄高, 体幅, 眼径), 同 16mm(肛門前長, 眼径)に集中した。これらは, ステージ B, C, D の平均体長(体長約 6 mm, 同 8 mm, 同 12 mm)およびステージ D から E への移行期(同 16 mm)に相当した。

内部骨格と鰓条, 鰭の形成

1. 内部骨格 ステージ A では, 肩胛部分, 鰓弓部分, 顎部分および神経頭蓋の下面などごく一部に軟骨が

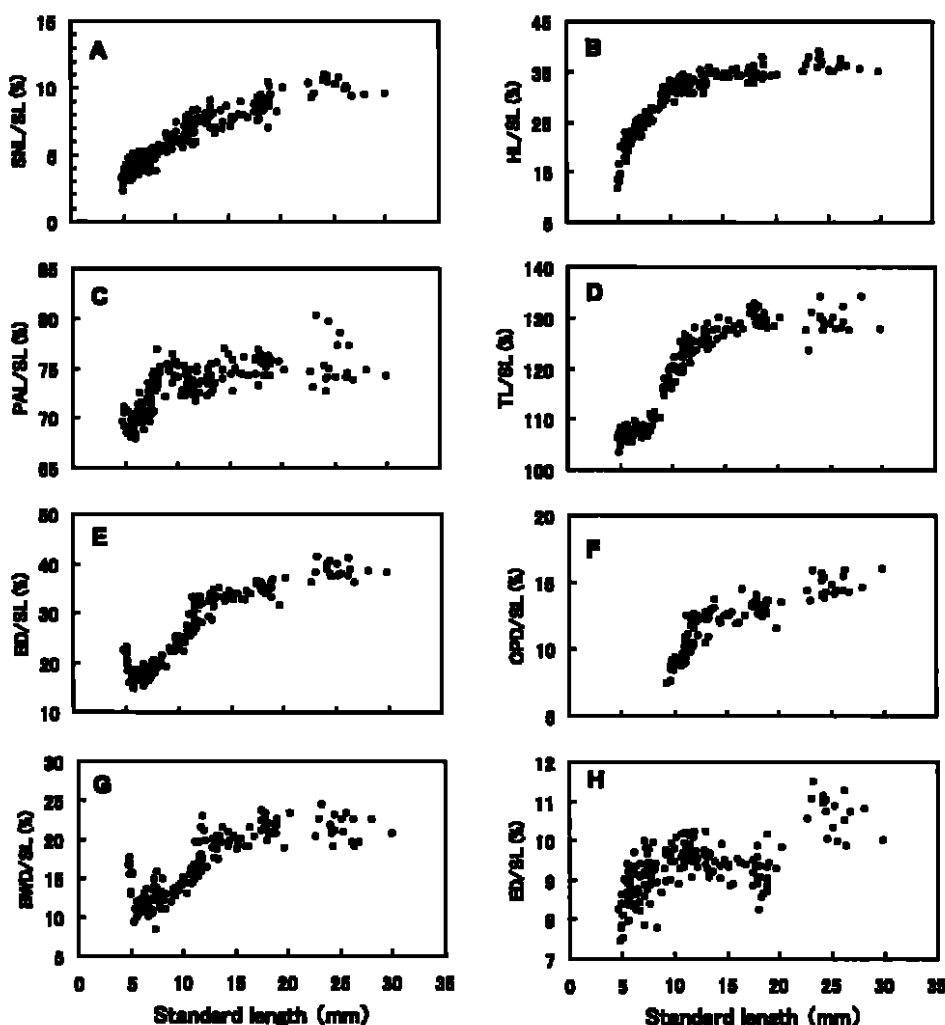


Fig. 2.8 Proportions of A: snout length (SNL), B: head length (HL), C: pre-anal length (PAL), D: total length (TL), E: body depth (BD), F: caudal peduncle depth (CPD), G: body width (BWD) and H: Eye diameter (ED) to standard length (SL) in hatchery-reared larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. Standard length: estimated value before fixation. Refer to Fig. 2.1 for each length.

認められるのみで、骨格系は極めて貧弱である。ステージBに入ると、口器が形成され前上顎骨が出現する。また、下尾軟骨が現れ、鰓弓部分の軟骨が発達する。ステージCの前半には神経弓門軟骨が、少し遅れて血管弓門軟骨が体の前端と後端から発現する。その直後には擬鎖骨と咽頭歯の硬骨化が始まる。ステージの後半には、背鰭、尻鰭の順に担鰭軟骨が、下顎では歯骨などの硬骨が形成され始める。ステージDに入ると体の前方から尾部末端まで、順次脊柱が出現する。このステージの半ばには神経・血管弓門や頭蓋部で、また終期には背鰭と尻鰭の担鰭骨、腰帯および尾骨で硬骨化が始まるなど、全身で骨格の形成が著しく進行する。ステージEでは、尾部や各鰭、頭蓋骨の関節部分を除いて化骨が終了し、骨格系が概ね完成する。

2. 鰭条 (Fig. 2. 5) 鰭条の形成は、尾鰭が最も早く、ステージC、体長約8mmで認められる。ステージDに達すると直ちに、背鰭、尻鰭および胸鰭の鰭条が同10mmで出現する。腹鰭の鰭条はそれらよりも遅れて、同11mmで確認できるようになる。胸鰭と腹鰭を除く各鰭の鰭条は同13mmで定数に達する。胸鰭と腹鰭の鰭条形成もステージEに入り同16mmで完了する。

3. 鱗 ステージDに入り、体長約11mmを超えると体側面中央部に鱗が発生する。その後、鱗は、尾柄部を経て背部と腹部にまで認められ、急速に枚数を増す。ステージEに入り、同16mmには全ての個体で鱗が定数(体半面で概ね250~260枚)に達する。

鰓と筋肉、鰓、内臓諸器官の発達 (Fig. 2. 9)

1. 鰓 鰓は、ステージAでは未形成であるが、ステージBに達すると直ちに1室が発生し、成長とともに体積を増す。その体積は、1日齢の体長 $5.7 \pm 0.2\text{mm}$ で $0.02 \pm 0.01\text{ mm}^3$ 、2~3日齢の同 $6.5 \pm 0.5\text{mm}$ で $0.05 \pm 0.01\text{ mm}^3$ 、4日齢の同 $7.3 \pm 0.3\text{mm}$ で $0.06 \pm 0.01\text{ mm}^3$ 、5日齢の同 $7.7 \pm 0.2\text{mm}$ で $0.08 \pm 0.02\text{ mm}^3$ である。また、ステージCの半ばには後室の前端に小さな前室が認められるようになり、ステージDには前室が後室よりも大きくなる。

2. 筋肉 ステージA, Bの間は、普通筋の筋繊維の中央に円形で大型の筋核が存在する。血合筋は体側に沿ってまばらに1層のみ認められる。ステージCの前半に、普通筋の筋核は小型化して筋繊維の周辺へと移動を開始する。1層でまばらだった血合筋は、

このステージの半ばには2層となる。ステージDの半ばには、普通筋が腹腔下部にまで伸張するとともに筋繊維周辺への筋核の移動が完了する。このころから血合筋や中間筋が急速に発達し、ステージDの末には普通筋層の1/3の深さまで体側からV字状に伸張する。ステージEに達すると、これら骨格筋はさらに層を増し、成魚とほぼ同様となる。

3. 鰓 ステージAでは、既に口の内側上方に口腔弁が存在する。鰓は左右4個ずつの塊状で一次鰓弁は未分化である。ステージBに入ると一次鰓弁が、ステージCの前半には二次鰓弁が分化するなど、鰓は次第に発達する。ステージDの前半には鰓把が出現し、全体的な構造が整う。

4. 内臓諸器官 ステージAでは、直線状の消化管は一層の細胞からなる。心臓には赤血球が観察され拍動する。造血組織としてIntermediate cell mass^{7,8)}があるものの、胸腺や脾臓などは分化していない。頭腎には数本の細尿管が、体腎には1本の管状の細尿管が存在する。膀胱は既に認められる。ステージBに達すると、直ちに肝臓と脾臓が出現し、摂餌した個体では肝臓にグリコーゲンあるいは脂質の蓄積痕と考えられる空胞がみられる。

Intermediate cell mass は次第に縮小する。甲状腺の濾胞にはコロイドが蓄積しているが、濾胞上皮細胞高は低く甲状腺は活性化していない。ステージCでは、消化管は依然直線状だが、本ステージ前半に内側に襞が発生する。Intermediate cell mass はさらに縮小し消失する。それに代わって造血組織として胸腺、頭腎のリンパ様組織および体腎の間質リンパ様組織が、少し遅れて脾臓が出現・発達する。排泄器官では、体腎に細尿管と糸球体がステージCの半ばに分化し、次第に発達する。ステージDでは、それまで直線状だった消化管が一巡回する。また、ステージDの中盤に限って、甲状腺の濾胞上皮細胞が高さを増し非常に活性化する。ステージEに達すると、各器官の発達が一層進み内臓の基本的な構造が完成する。

感覚器官の発達 (Fig. 2. 9)

1. 眼 ステージAでは、網膜の色素を既に有するが、外顆粒層、外網状層、色素上皮層、細小血管は未分化である。しかし、ステージCには構造的に完成し、網膜に二重錐状体と単錐状体がモザイク配列するようになる。

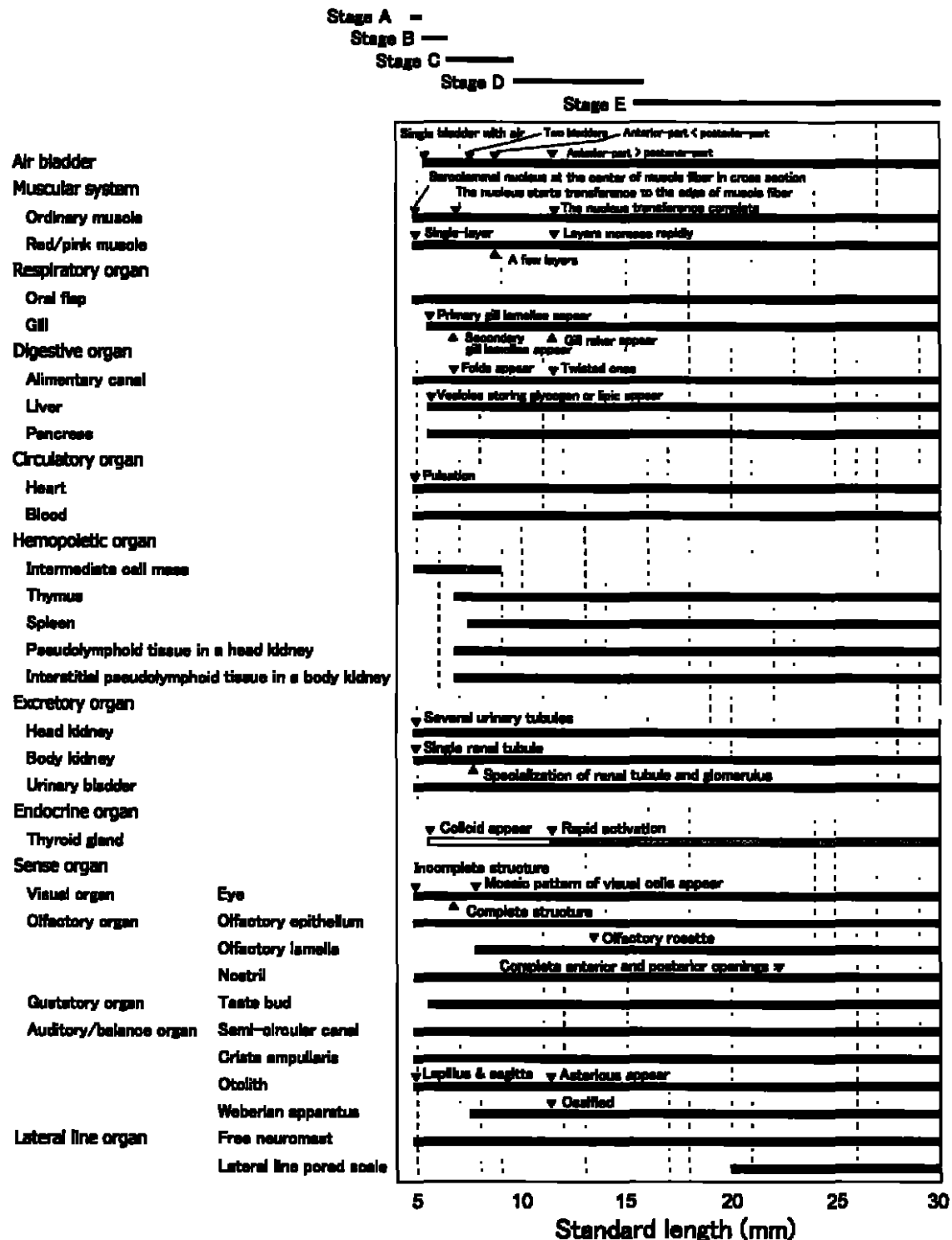


Fig. 2.9 Various ontogenetic changes in hatchery-reared larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. Open bar: existence, solid bar: increase or development, stippled bar: degradation. Refer to the text for each stage.

2. 嗅覚器官 ステージAでは、鼻孔は楕円形で、浅くくぼんだ鼻腔の底に嗅上皮が存在する。ステージCには嗅上皮に皺が発生し、嗅板が形成され、ステージDには、嗅板は嗅房となる。ステージBの半ばまで鼻孔は楕円形だが、このステージの終わりには鼻孔の背・腹両側に鼻孔隔皮形成組織が出現し、中央方向へ伸張し始める。ステージDでは、これらの組織はさらに発達するが癒合しない。ステージEに入り、体長約22 mmを超えると伸張した組織は鼻孔隔皮を形成し、前鼻孔と後鼻孔が完全に分離した個体が出現する。全ての個体でこれらの構造が認められるのは同24mmを超えてからである。

3. 味覚器官 ステージAでは味蕾は分化していない。ステージBに達すると直ちに、食道に味蕾が出現し、以降分布を拡大する。

4. 聴覚器官 ステージAで既に三半規管、聴峰、耳石が存在する。ただし、耳石は礫石と扁平石のみである。ステージDの半ばまでに、耳石のうち未形成だった星状石が出現し、ウエパー器官は硬化する。飼育魚が物音に敏感になるのもこのころからである。

5. 側線器官 ステージAで既に遊離感丘が存在し、その後成長に伴い増加する。ステージDに入ると、直ちに側線鱗にV字状の切り込みが生じるようになり、次第に穴伏に変化するがこのステージの間、側線孔は形成されない。ステージEに入って、体長約20 mmを超えると側線孔の完成した個体が現れるものの、全ての個体で完了するのは同29mmを超えてからである。

考 察

ニゴロブナやゲンゴロウブナ、コイ *Cyprinus carpio* などは、ふ化後しばらくの間は水草などに付着して懸垂することが知られている。^{2,9)} 本研究においても、ふ化直後のステージAのニゴロブナに同様の生態が観察された。本ステージの仔魚は、鰓が未形成で浮遊できず、水底への沈降を防ぐため周辺の器物へ付着すると考えられる。このような行動を可能とするのは、本ステージのみ特徴的にみられた口周囲の多数の粘液細胞と口腔上方の弁が関与していると思われる。このように、ステージAは能動的な機能に乏しいため、捕食者に対しては全く無防備な状態にあるといえる。

ステージBに達すると鰓、口器が形成され、仔魚は水面直下での浮遊や摂餌が可能となる。これに伴い、形態的にも大きな変化が生じ、ステージBは相対成長の変曲点が多く存在する時期でもある。卵黄は吸収が進み、本ステージの終期にはほとんど認められなくなった。魚類の初期生活史において、一般にこのような内部栄養から外部栄養へ転換する時期に初期減耗が起こり、¹⁰⁾ それには飢餓が強く関係する¹¹⁾ とされている。ステージBのニゴロブナ仔魚は、鰓が全て膜鰓で、遊泳時に推進力を担う尾部も下尾軟骨のみが形成され始めた段階で発達していない。遊泳は比較的発達した胸鰓による間欠的なもので、餌を追いかけて摂餌する能力は低い。したがって、天然水域では餌料生物の密度が高くない限り、飢餓により死亡することが予想される。

ニゴロブナの天然仔魚は餌料として浮遊性の小型甲殻類を好むことが知られており、¹²⁾ これら甲殻類は、抽水植物(ヨシ)帯の中央部から岸边付近に高密度で分布する傾向にある。¹³⁻¹⁵⁾ また、ステージBの本種仔魚は、ヨシ帯の中央部から岸边付近に多数分布することが観察されている¹³⁻¹⁶⁾ が、これら水域の溶存酸素濃度はヨシ帯の先端や外部に比べて低く、夜間には著しく低下する。¹³⁻¹⁵⁾ 一般に低酸素水域で繁殖する魚の仔魚は体表に血管が広く分布し、皮膚呼吸によるガス交換機構が発達することが明らかになっている。¹⁷⁾ 先に、ステージBの本種仔魚は二次鰓弁が発現せず、背部の膜鰓に多数の毛細血管が分布することを述べたが、鰓が機能するまでの間は、この膜鰓部分でガス交換を行っていると考えられる。加えて本研究ではステージBの仔魚は水面直下に分布することを報告したが、天然環境下でも同様の知見が得られており、¹³⁻¹⁵⁾ 少しでも酸素の溶け込みが見込める水面直下において、背部の膜鰓を介して酸素を吸収することで低酸素環境に適応しているものと思われる。

このように、ステージBの本種仔魚は、依然、体の構造や機能が不完全で飢餓や被食による大量死亡に直面しているといえる。しかし、これらの仔魚が分布しているヨシ帯中央部から岸边付近は餌料生物が豊富で、溶存酸素濃度が低いため捕食者が侵入しにくく、ニゴロブナ仔魚の生息に適した水域といえよう。

ステージCでは、二次鰓弁の分化が始まり背部の

膜鰭の毛細血管は完全に消失した。この段階から呼吸は鰓が担うようになり、以降は呼吸機能が向上するものと考えられる。また、ステージCでは、硬骨魚類の初期の造血組織として知られる intermediate cell mass^{7,8)}は消失し、代わって、胸腺^{18,19)}頭腎のリンパ様組織²⁰⁾、体腎の間質リンパ様組織²⁰⁾、脾臓²¹⁾が出現し、次第に発達した。さらに眼は構造的に完成し、網膜に二重錐状体と単錐状体がモザイク配列するようになった。これにより網膜感度の急速な向上²²⁾が予想される。このように、ステージCでは呼吸や造血、視覚といった生活を支える基本的な機能の向上がうかがえる。

ステージDでは、小型化した普通筋の筋核が筋繊維周辺へ移動を完了し、骨格筋は急速に層を増した。また各鰭条が出現し、胸鰭と腹鰭を除いて定数に達した。これに加え、脊柱の形成が進行し、背鰭と尻鰭の担鰭骨や尾骨など、遊泳を担う骨の硬骨化も始まるなど、全身の運動機能が格段に向上した。形態面では、ステージDの初期には肛門前の膜鰭が発達 (Fig. 2. 2D) して、遊泳時に水の抵抗を受けにくいとされる稚魚と同様の側面投影形態²³⁾を示した。その後、この膜鰭は次第に縮小した (Fig. 2. 4B) が、それに伴い腹部が稚魚の体型へと次第に変化し、ステージDを通じて同じ側面投影形態が維持された。飼育魚はそれまでのステージとは異なり運動性を増し、一部は集団で網イケスの低層部分にも分布を拡大した。また、鰓前室の発達に加え、鰓で受けた水の振動を内耳に伝えるウエパー器官²⁴⁾や耳石が成魚と同様の構造、形態を整えるなど、聴覚機能の向上がうかがえた。飼育下においても、ステージDのニゴロブナは、人が近づく物音などに非常に敏感になるのが観察された。以上のように、この時期は行動面でもそれまでの仔魚期とは異なった特徴を発現する段階に移行して行く。これらのことから、ステージDは運動能力や感覚能力を著しく向上させ、仔魚期から稚魚期の生態、形態特性を獲得する多面的な変化の期間であるといえる。また、体各部の相対成長に関して、ステージDの平均的なサイズである体長12 mmに多くの変曲点がみられたことは上記の事象を支持している。なお、ステージDの一時期のみ甲状腺は濾胞上皮細胞の高さが増したことから、この前後で甲状腺ホルモンのサージが起こったと考えられる。甲状腺ホルモンはヒラメ *Paralichthys olivaceus* を始

め、魚類の変態に中心的役割を果たし、稚魚への移行期に顕著に上昇することが知られている。²⁵⁾ 先に述べてきたステージDにおけるニゴロブナ仔魚の機能や形態の大きな転換にも、甲状腺ホルモンが関与しているものと思われる。

仔魚は体長16 mm を超えると稚魚期であるステージEとなった。このステージでは鰭条と鱗は定数に達し、体色や体型もニゴロブナの特徴が整った。また骨格がほぼ完成するとともに、骨格筋および消化、呼吸、循環、造血、排泄、感覚を司る各器官も急速に発達するなど、一部を除いてほぼ成魚と同様の構造が完成し、生理的にも機能の一層の向上がうかがえた。これら飼育下の稚魚は運動性を著しく増し、統一性のある群の形成や網イケス内での分布の拡大、底層での摂餌など、それまでの发育ステージとは異なった行動も発現した。飼育した本種仔稚魚の外部形態と生態を詳細に観察した友田²⁾も、ステージEとほぼ同じ体長13.8~16.7mmには、今回の知見と同様の事象を報告している。このように、本ステージは、外部形態や生理機能、行動、生態ともに成魚の特性を獲得する時期であると判断される。

上記の結果から、体長が概ね16 mmまで成長して稚魚期に達したニゴロブナは、仔魚期の各ステージと比べて、天然環境下での生活を支える機能や生き残る能力の格段の向上が期待される。したがって、このステージ(体長)は、効果的な放流サイズを検討するうえでの基準の一つになると考えられる。

滋賀県は1983~1984年に温水魚資源対策検討委員会を設置して、琵琶湖のニゴロブナの栽培漁業のあり方について検討した。その結果、同委員会から、ニゴロブナ資源を増大させるために年間5千万尾のふ化仔魚を放流する計画が提示された。¹⁾しかし、この放流事業はニゴロブナの发育や成長に伴う機能および行動の変化、生態などを十分に理解して行われたものではなかった。当時、滋賀県では年間70億尾のアユのふ化仔魚の放流が可能とされる人工河川²⁶⁾が既に稼働しており、ニゴロブナでもアユと同様に、可能な限り大量の種苗放流を行うことが前提とされていた。その後、琵琶湖栽培漁業センターはニゴロブナふ化仔魚の大量放流を中心とした種苗放流事業を8年間実施したが、資源回復には結びつかなかった。

積極的に水産資源を回復、増殖させるため、栽培

漁業は80種を超える多種多様な魚介類で実施されている。天然水域において、魚介類の減耗のほとんどは仔稚魚期に集中する。それらの発育段階にある種苗を放流して効果を上げるには、対象種毎に初期の外部形態や発育の特性、生理・生態的な生物情報を元に「何時」、「どこに」、「どれくらい」、「どんなサイズ」で放流するか、すなわち至適条件を明らかにすることが不可欠である。先に述べたようにニゴロブナのふ化仔魚放流では、その実施に先だって検討されるべき基礎的知見の収集が十分でなく、成果を得ることが出来なかった。ニゴロブナの資源回復を目的とした放流事業を効率的かつ効果的に進めて行くうえで、本種の初期生活史を十分に調査し、それらの結果に基づいた種苗放流技術の構築が重要である。このような技術開発を進めるうえで、本研究で得られた情報は、貴重な基礎資料になるといえる。

文 献

- 1) ニゴロブナ. 昭和58(1983)年度～平成17(2005)年度種苗生産放流事業結果概要. 財団法人滋賀県水産振興協会, 草津. 2007; 2-17.
- 2) 友田淑郎. びわ湖産フナの発育. I. ニゴロブナの発育について, およびゲンゴロウブナとニゴロブナの分化についての予察的研究. 大阪市立自然史博物館研究報告1965; 18: 3-30.
- 3) Kendall Jr AW, Ahlstrom EH, Moser HG. Early life history stages of fishes and their characters. In: Moser HG, Richards WJ, Cohen DM, Fahay MP, Kendall Jr AW and Richardson SL (eds). *Ontogeny and Systematics of Fishes Spec. Publ. No. 1*, Am. Soc. Ichthyol. Herpetol. 1984; 11-22.
- 4) 奥世田兼三, 照屋和久, 菅谷琢磨, 関谷幸生. 初回摂餌の遅れがキジハタ *Epinephelus akaara* 仔魚の摂餌, 成長, および生残に及ぼす影響. 日水誌 2006; 72: 702-709.
- 5) 北島力, 山根康幸, 松井誠一, 吉松隆夫. アユ仔魚の発育に伴う比重の変化. 日水誌1998; 64: 822-829.
- 6) Dingerkus G, Uhler LD. Enzyme clearing of alcian blue stained whole small vertebrates for demonstration of cartilage. *Stain Technol.* 1977; 52: 229-232.
- 7) Detrich HW III, Kieran MW, Chan FY, Barone LM, Yee K, Rundstadler JA, Pratt S, Ransom D, Zon LI. Intraembryonic hematopoietic cell migration during vertebrate development. *Developmental Biology* 1995; 92: 10713-10717.
- 8) Zapata A, Diez, Cejalvo T, Gutiérrez-de Frías C, Cortés A. Ontogeny of the immune system of fish. *Fish & Shellfish Immunology* 2006; 20: 126-136.
- 9) 中村守純. 「日本のコイ科魚類」資源科学研究所, 東京. 1969.
- 10) Heming TA, Buddington RK. Yolk absorption in embryonic and larval fishes. In: Hoar WS, Randall DJ (eds). *Fish Physiology Vol. XI*. Academic Press, London. 1988; 407-446.
- 11) 塚本勝巳. III. 発育過程の生態学的側面. 8. 魚類の初期減耗過程とそのメカニズムに関する標識放流実験. 「魚類の初期発育」(田中克編) 恒星社厚生閣, 東京. 1991; 9-20.
- 12) 平井賢一. びわ湖内湾の水生植物帯における仔稚魚の生態 III ニゴロブナ仔稚魚の食性と生息域の関係. 日本生態学会誌 1972; 22: 69-93.
- 13) 藤原公一, 白杵崇広, 小林徹, 水谷英志. 琵琶湖の固有種ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* を育む場としてのヨシ等植物群落の重要性. 環境システム研究1995; 23: 414-419.
- 14) 藤原公一, 白杵崇広, 根本守仁. ニゴロブナ資源を育む場としてのヨシ群落の重要性とその管理のあり方. 滋賀県琵琶湖研究所所報1999; 16: 86-93.
- 15) 藤原公一, 白杵崇広, 根本守仁, 北田修一. 琵琶湖沿岸のヨシ帯におけるニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の初期生態とその環境への適応. 日水誌 2011; 77: 387-401.
- 16) 鈴木誉士, 永野元, 小林徹, 上野紘一. RAPD分析による琵琶湖産フナ属魚類の種・亜種判別およびヨシ帯に出現するフナ仔稚魚の季節変化. 日水誌 2005; 71: 10-15.
- 17) Rombough PJ. Respiratory gas exchange, aerobic metabolism, and effects of hypoxia during early life. In: Hoar WS, Randall DJ (eds). *Fish Physiology Vol. XI*. Academic Press,

- London. 1988; 59-161.
- 18) 会田勝美, 小林牧人, 金子豊二. 7. 内分泌. 「魚類生理学」(板沢靖男, 羽生功編) 恒星社厚生閣, 東京. 1991; 167-241.
- 19) 長谷川大輔, 小野信一, 原日出夫. ワカサギの成長に伴う胸腺の発達と胸腺に及ぼす飼育水温の影響. 「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部2005; 3: 33-45.
- 20) 小栗幹郎. VIII 腎臓. 「魚類組織図説—正常組織と病理組織」(日々谷京編) 講談社, 東京. 1982; 94-103.
- 21) 隆島史夫. VI-3 脾臓. 「魚類組織図説—正常組織と病理組織」(日々谷京編) 講談社, 東京. 1982; 64-72.
- 22) 川村軍蔵. I. 発育過程の形態学的側面. 1. 感覚器官. 「魚類の初期発育」(田中克編) 恒星社厚生閣, 東京. 1991; 9-20.
- 23) Van Snik GMJ, Van Den Boogaart JGM, Osse JWM. Larval growth patterns in *Cyprinus carpio* and *Clarias gariepinus* with attention to the finfold. *Journal of fish Biology* 1997; 50: 1339-1352.
- 24) 小林博. XV 感覚器官. 「魚類解剖学」(落合明編) 緑書房, 東京, 1987, 283-308.
- 25) 田中克, 田川正朋, 中山耕至. 「稚魚 生残と変態の生理生態学」京都大学学術出版会, 京都, 2009.
- 26) 人工河川. 平成21年度滋賀の水産. 滋賀県農政水産部水産課, 大津. 2009; 63-65.

第3章 アリザリン・コンプレクソン (ALC) を用いた ニゴロブナの耳石への標識の検討

3-1 ニゴロブナの耳石へのALC標識装着条件の検討

ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の効果的な種苗放流技術や産卵・繁殖場の造成条件など、本種の増殖技術を検討するうえで、標識を付けたニゴロブナ種苗の放流・回収調査は重要な手法のひとつである。今日まで魚類の標識のために様々な方法が考案されてきたが、その中でもアリザリン・コンプレクソン (ALC) や塩酸テトラサイクリンなどの蛍光物質を含む水中へ卵や仔稚魚を浸漬して施す耳石標識法は、長期間保持する標識を一度に多数の個体へ確実に装着でき、魚体への影響が少ないことがマダイ *Pagrus major*^{1,2)} やアユ *Plecoglossus altivelis*³⁾ で確かめられ、優れた標識と考えられている。このうち特に ALC は、現在までに上記の魚種の他、ヒラメ *Paralichthys olivaceus*、ニシン *Clupea pallasii*、コレゴヌス *Coregonus* sp.、ハタハタ *Arctoscopus japonicus* など多くの魚種で用いられてきた。⁴⁻¹⁸⁾ 本節では、卵や仔稚魚の発育段階にあるニゴロブナの耳石へ ALC の染色標識 (以下、ALC 標識) を付けるための適正条件を検討した。

材料および方法

ALC 供試液 ALC (1, 2-dihydroxyanthraquinone-3-yl-methylamine-N, N-diacetic Acid, 和光純薬工業) 10 g を 1 mol/L の NaOH で完全に溶解させた。その pH を 1 mol/L の HCl と NaOH で 7.6~7.8 に調整し、琵琶湖水 (以下、湖水) を加えて 1 L にメスアップして、ALC を 10 mg/mL 含む ALC 原液を調製した。後述する各実験では、使用のつどこの原液を湖水で希釈して用いた。

供試卵および供試魚 滋賀県水産試験場 (以下、滋賀水試) で養成したニゴロブナのメス親魚に 10 IU/g 体重のゴナドトロピン (帝国臓器製薬株式会社) を腹腔内注射し、水温を徐々に 5℃ 上昇させて排卵を誘発した。¹⁹⁾ その後、排卵した 10 尾から卵を搾出し、それにオス親魚 10 尾から搾出した精液を加えて、湖水中で受精させた。その卵を直ちに湖水中に置いた多数のすりガラス板 (50×100 mm) 上に散布して付着させ、供試卵とした。なお、これらの卵は受精後速

やかに 5 mg/L のマラカイトグリーン液に 20 分間浸漬して水生菌の発生を予防した。²⁰⁾ また、すりガラス板 1 枚当たり卵を 100 粒残して他は無作為に取り除き実験条件を一定にした。

これらの卵からふ化した仔魚は、培養したツボムシ *Brachionus calyciflorus* やタマミジンコ *Moina macrocopa* などの動物餌料を与えて湖水を流した FRP 製 500 L 水槽で飼育し、随時取り上げて供試魚とした。

ALC 標識条件の検討

1. 卵への ALC 標識 予備実験の結果、水温 20℃ では、ニゴロブナ卵の発眼は概ね受精 24 時間後に始まり 48 時間後に完了した。ふ化は概ね受精 72 時間後に始まり 96 時間後に完了した。そこで、卵の段階で ALC 標識を付けるための適正な ALC 濃度とその時期や期間を知るため、水温を 20℃ に調節した 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 および 256 mg/L (等比 8 段階、公比 2) の濃度の ALC 液または対照水を各 1 L 入れたピーカーへ、卵を付着させたすりガラス板を 1 枚ずつ浸漬した。浸漬の時期や期間は卵の発生段階別に次の 4 通りとした。これ以外の期間は、卵を 1 L の湖水を入れたピーカーへ収容した。なお、これらのピーカーは 20℃ のウォーターバス中に設置して水温を一定に保って管理し、ふ化率 (供試卵数に対するふ化尾数の百分率) と奇形魚出現率 (ふ化尾数に対する奇形魚尾数の百分率) を求めた。また、各ふ化仔魚を 30 尾ずつ (ふ化尾数が 30 尾未満の場合は、全ふ化仔魚) をそれぞれ 1 L の湖水中へ移して上記の動物餌料を与えて 7 日間飼育し、この間の斃死率を求めた。さらに 7 日目には後述する方法で ALC 標識を評価した。なお、この飼育期間中、湖水は水温を 20℃ に調整した新しいものと毎日半量ずつ取り替えた。

① 発眼前浸漬; 受精直後から 24 時間後まで。

② 発眼中浸漬; 受精 24 時間後から 48 時間後まで。

③ 発眼後浸漬; 受精 48 時間後から 72 時間後まで。

④ 全期間浸漬; 受精直後から 72 時間後まで。

2. 仔稚魚への ALC 標識 仔稚魚へ ALC 標識を付けるための適正な ALC 濃度を知るため、水温が 20℃ の上記と同濃度系列の ALC 液または対照水を 1 L ずつ入れたピーカーへ、ふ化仔魚 [0 日齢魚 (5.3±0.1 mm (標準体長±SD。標準体長は以下、体長という)) と 6 日齢魚 (同 6.8±0.1 mm) を 30 尾ずつ、21 日齢魚 (同 9.8±0.1 mm) を 10 尾ずつ 24 時間収容した。また同 ALC 液または対照水

を3L入れたビーカーへ90日齢魚(同 34.2 ± 1.1 mm)を10尾ずつ24時間収容した。これらのビーカーは20℃のウォーターバス中に設置して水温を一定に保ち、この間の死亡率を求めた。その後は、各ビーカーの水を全て湖水に入れ替えて、上記した動物餌料を与えてさらに7日間飼育し、この間の死亡率を求めた。また7日目にはALC標識を評価した。この7日間、湖水は水温を20℃に調整した新しいものと毎日半量ずつ取り替えた。

3. ALC液への浸漬時間の検討 明瞭なALC標識を付けるために必要な浸漬時間を検討するため、20℃に調整した16 mg/Lまたは32 mg/LのALC液あるいは対照水を各20L入れたポリカーボネート製水槽へ、40日齢魚(体長 16.1 ± 1.4 mm)を70尾ずつ収容し、これら水槽を20℃のウォーターバス中に設置して水温を一定に保ち、1, 2, 3, 4, 5, 6および24時間後に各水槽から10尾ずつ取り上げてALC標識を評価した。

ALC標識の評価 卵の段階でALC液へ浸漬した魚とその対照魚はふ化後7日目に、また仔稚魚の段階でALC液へ浸漬した魚とその対照魚は浸漬を終了して7日目に全て取り上げ、この時点で8日齢以前の魚はそのままスライドグラス上に置きカバーグラスで押しつぶして、耳石の内、礫石のALC標識を評価した。さらに成長した魚では実体顕微鏡下で左側の礫石を摘出して乾燥させ、それを標本用封入剤M-X(松浪硝子工業株式会社)を用いてスライドグラス上にカバーグラスをかけて封入してALC標識を評価した。なお、一般に魚類の内耳には、礫石、扁平石および星状石と呼ばれる3種類の耳石が存在する²¹⁾が、キンギョ *C. auratus*では、礫石はふ化直後から比較的大きく、円形から西洋梨型へ一様に成長する²²⁾ため、ALC標識を付けるうえで最も適すると思われる。両種であるニゴロブナにおいてもキンギョと同様と考えられ、本研究ではALC標識の評価の対象として礫石(以下、耳石という)を選んだ。

ALC標識の評価には落射型蛍光顕微鏡(OPTIPHOT, XT-BFD, ニコン)を用い、G励起フィルター(BM520)を装着して行った。評価の基準は、ALCの蛍光が「非常に明瞭で確認しやすい」、「確認できる」、「不明瞭で確認しにくい」および「確認できない」の4段階とし、それぞれに100, 50, 25, 0ポイントの評価点を与えた。なお、一部の耳石について、数人でそのALC標識を評

価し、評価結果に大差がないことを予め確認した。

ALC標識の保持性と標識装着の長期的影響の検討 発眼卵を16 mg/LのALC液に20℃で24時間浸漬して耳石に点状のALC標識を付けた仔魚(以下、点状標識魚という)をふ化させた。また、発眼卵を同様の条件で通常の湖水に浸漬して対照とする仔魚をふ化させた。その後、両者を容量500 LのFRP製水槽2槽に300尾ずつ別々に収容し、湖水の通水と通気を行いながら上記の動物餌料や配合飼料(餌付けAまたはB, 科学飼料研究所)を与えて807日間飼育した。この間、両水槽から標本を1回に10尾ずつ無作為に8回抽出してALC標識を評価し、この標識の保持性を検討した。

また、両者を150尾ずつ、容量500 LのFRP製水槽1槽に収容し、上記と同様にして807日間飼育した。この間、この水槽からは標本を1回に30~50尾ずつ無作為に8回抽出して体長を測定した。その後、ALC標識の有無を調べて標識魚と対照魚を特定し、標識魚の出現率やこのALC標識装着が成長や生残におよぼした影響を評価した。

さらに体長 16.1 ± 1.4 mmの40日齢稚魚を2群に分け、1群は16 mg/LのALC液へ20℃の条件で24時間浸漬して耳石へリング状のALC標識を付けた。また、他の1群は通常の湖水を用いて同様の操作を行い対照魚とした。その後、上記と同様に807日間、両者を別々に飼育し、飼育開始時と807日後には各20尾ずつの標本を抽出してALC標識を評価し、この標識の保持性を検討した。

統計処理 試験区と対照区の間のお化率、奇形魚出現率、死亡率および同一水槽で飼育したALC標識魚と対照魚の出現率の差は、フィッシャーの直接確率計算法で検定した。2群の体長の平均値の差は、それらがF検定により $P > 0.05$ で等分散とみなされた場合はスチューデントのt検定で、そうでない場合にはウェルチのt検定で検定した。

結 果

卵段階でのALC標識装着条件 卵を通常の湖水(対照区)や各濃度のALC液へ浸漬したときのふ化率、奇形魚出現率、ふ化仔魚の7日間死亡率およびALC標識の評価点を浸漬時期別にFig. 3. 1. 1に示した。

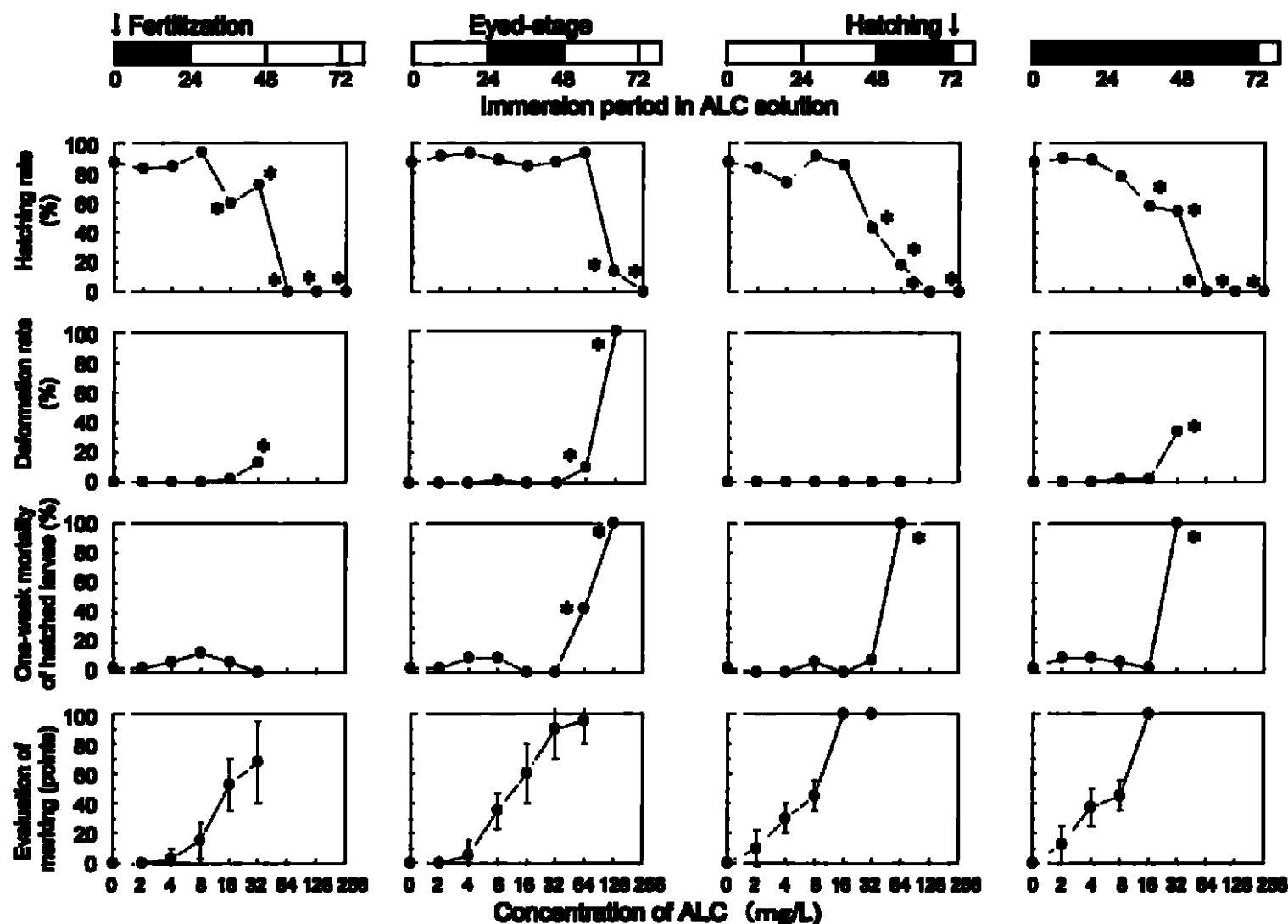


Fig. 3.1.1. Results of immersion marking of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* eggs in ALC solution. Uppermost plates show the immersion period. Asterisks in the 2nd, 3rd and 4th plates from the top indicate significant differences to the control at $P < 0.05$ by *chi*-square test. Vertical bars in the 5th plates from the top indicate standard deviations. Visibility of ALC marking was classified into 4 levels: clearly visible (point 100), visible (50), scarcely visible (25) and non-visible (0). Evaluation points were shown as average value of 10 fish.

ふ化率は、いずれの時期に卵をALC液へ浸漬しても低濃度のALC液では対照区と変わらなかったが、ある濃度を超えると低下傾向に転じ、その濃度は浸漬時期によって異なった。そこで、対照区と比べてふ化率が低下し始めるALC濃度を知るため、各浸漬時期別に、対照区と各濃度区との間で、ふ化率を比較した。その結果、発眼前浸漬の8 mg/L 区では有意差はみられなかった($P>0.05$)が、16 mg/L 区ではふ化率の有意な低下がみられた($P=0.000$)。全期間浸漬でも8 mg/L区では有意差はみられなかった($P>0.05$)が、16 mg/L 区ではふ化率の有意な低下がみられた($P=0.000$)。これに対して、発眼を開始した以降に卵をALC液へ浸漬すると、さらに高いALC濃度でもふ化率は低下しにくい傾向にあり、発眼中浸漬では64 mg/L区、発眼後浸漬では16 mg/L 区でともにふ化率の有意な低下はみられなかった(ともに $P=0.000$)。

奇形魚は、発眼後浸漬ではふ化仔魚が得られた最高のALC濃度である64 mg/L 区でも出現しなかったが、それ以前に卵をALC液へ浸漬した場合、ある濃度を超えると増加する傾向にあった。そこで上記と同様にALC濃度毎に、奇形魚出現率を対照区と比較した。その結果、発眼前浸漬と全期間浸漬の16 mg/L区では対照区との間に有意差はみられなかった(ともに $P>0.05$)が、32 mg/L区では対照区に比べて有意な上昇がみられた(それぞれ $P=0.001$, 0.000)。これに対して発眼中浸漬では、32mg/L区で奇形魚は出現しなかったが、64 mg/L 区では対照区よりも有意に奇形魚出現率が上昇した($P=0.008$)。発眼後浸漬では、いずれの区でも奇形魚は出現しなかった。このように、奇形魚は浸漬時期が遅いほどALC濃度が高くても出現しにくい傾向にあった。

ふ化後7日間の死亡率は、全期間浸漬では対照区と16 mg/L 区がともに3.3%であったが、ALC濃度が1段階高い32 mg/L 区では全ての供試魚が死亡し、対照区との間で有意差がみられた($P=0.000$)。一方、これ以外は32 mg/L区と対照区との間では、死亡率に有意差はみられなかった($P>0.05$)。しかし、発眼中浸漬と発眼後浸漬の64 mg/L 区では、ともに対照区に比べて死亡率の有意な上昇がみられた(ともに $P=0.000$)。

ALC標識は、どの時期に卵をALC液へ浸漬した場合にも、その濃度が高いほど明瞭に確認できた。また、同じALC濃度では浸漬時期が遅いほど明瞭に確認できた。特に発眼後に16~32 mg/L のALC液または全期

間16 mg/L のALC液へ浸漬した場合、ALC標識は安定して明瞭に確認でき、それらの評価点は調査した全ての個体で満点の100ポイントであった。

これらの結果をまとめると、対照区との間でふ化率、奇形魚出現率およびふ化仔魚の7日間死亡率に有意差がなく、ALC標識が安定して明瞭に確認できたALC液への卵の浸漬条件、すなわち20℃のALC液へ卵を浸漬してALC標識を付けるうえでの最適条件は、発眼を完了した卵の16 mg/LのALC液への24時間浸漬であった。

仔稚魚へのALC標識装着条件 ふ化直後から90日齢までの4とおりのサイズの仔稚魚を20℃のALC液へ24時間浸漬したときのALC濃度毎の死亡率、浸漬後湖水中での7日間の死亡率およびALC標識の評価点をFig. 3. 1. 2に示した。

ふ化仔魚(0日齢魚)を128 mg/L以下のALC液中へ24時間浸漬した場合には、浸漬中の死亡はみられなかった。また、6, 21および90日齢魚を64 mg/L 以下のALC液中へ浸漬した場合にも、32 mg/L区で6日齢魚が1尾死亡した以外は、死亡した個体はなかった。この死亡率を対照区と各濃度区との間で比較したところ、対照区に比べて死亡率の有意な上昇がみられたALCの最低濃度は、ふ化仔魚では256mg/L($P=0.000$)、6日齢魚では 128 mg/L($P=0.005$)、21 日齢魚では 256 mg/L($P=0.000$)、90日齢魚では128 mg/L($P=0.002$)であった。

ALC液へ浸漬した後、7日以内の湖水中での死亡率は、ふ化仔魚の32 mg/L区では13%であったが、対照区との間で有意差がみられなかった($P>0.05$)。しかし64 mg/L区や128 mg/L 区では供試した全ての個体が死亡し、対照区との間に有意差がみられた(ともに $P=0.000$)。6日齢魚では、64 mg/L以下のALC濃度区で浸漬後7日以内に死亡する個体はなかったが、128 mg/L区では全個体が死亡し、対照区との間に有意差がみられた($P=0.000$)。21 日齢および60日齢魚の128 mg/L 区では、ALC液へ浸漬後7日間に死亡する個体はなかった。このように浸漬するALC液の濃度を高めても、発育が進んだ魚ほど浸漬後に死亡する個体が減少する傾向にあった。

ALC標識はどの日齢の魚においても、浸漬したALC濃度が高いほど明瞭に確認できた。また、ふ化仔魚から21日齢魚までは16 mg/L 以上、90日齢魚では32mg/L以上のALC液へ浸漬すると、ALC標識は安定し

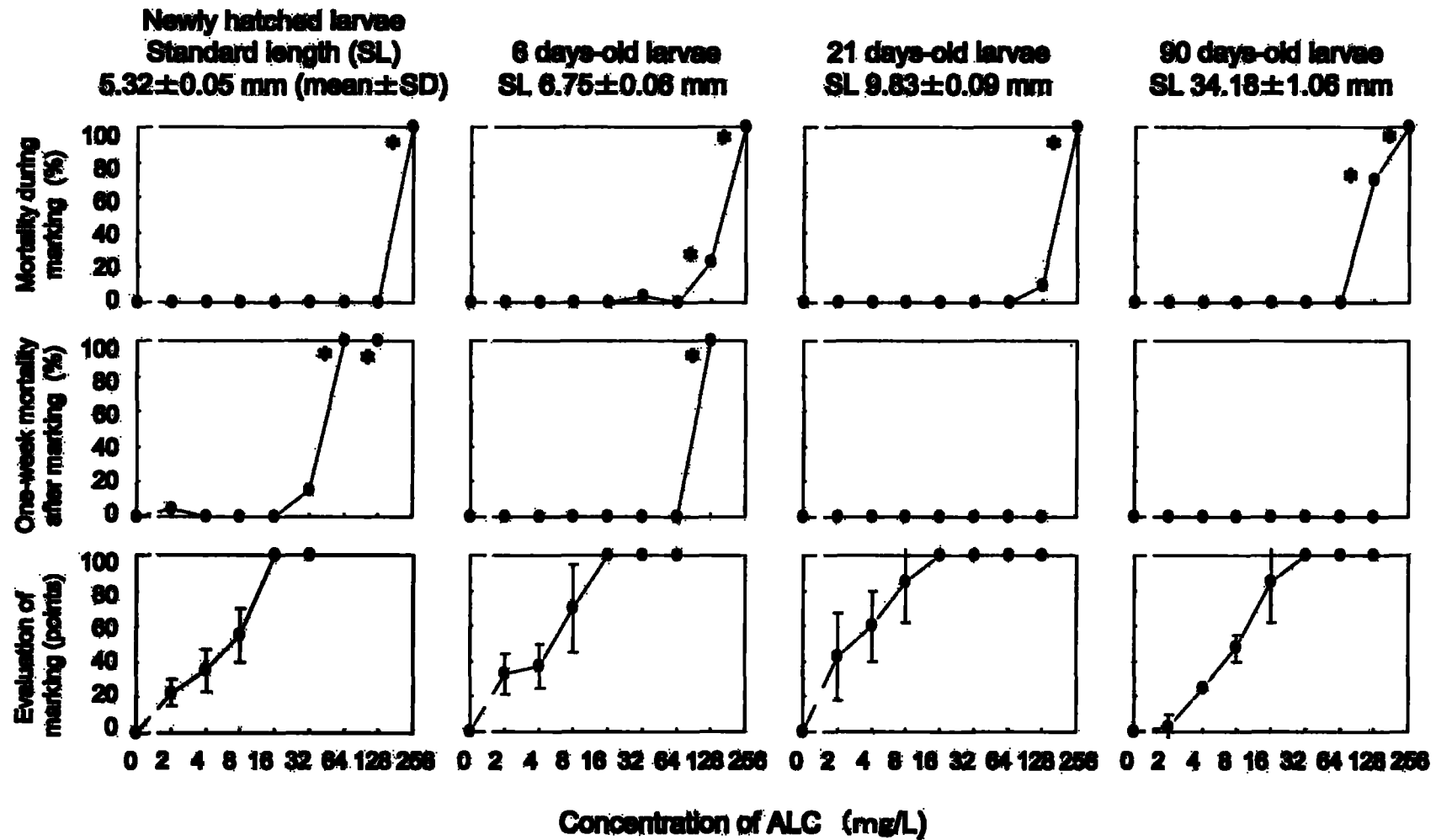


Fig. 3.1.2. Results of immersion marking of larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* in ALC solution. Asterisks in the uppermost plates and the 2nd plates from the top indicate significant differences to the control at $P<0.05$ by *chi*-square test. Vertical bars in the 3rd plates from the top indicate standard deviations. See Fig. 3.1.1 for evaluation of marking.

て明瞭に確認でき、それらの評価点は調査した全ての個体で満点の100ポイントであった。

これらの結果をまとめると、浸漬中やその後7日間の死亡率に対照区との間で有意差がなく、ALC標識が安定して明瞭に確認できたALC濃度、すなわち20℃のALC液へ仔稚魚を24時間浸漬してALC標識を付けるうえでのALCの最適濃度は、21日齢までの平均体長9.6mm以下の仔魚²³⁾では16~32 mg/L、90日齢の平均体長34.2mmの稚魚²⁴⁾では32~64 mg/Lであった。

また、Fig. 3.1.3には40日齢の平均体長16.1mmの稚魚²⁵⁾を20℃の条件で16mg/Lおよび32 mg/LのALC液へ浸漬したときの浸漬時間毎のALC標識の評価点を示した。いずれの濃度のALC液へ供試魚を24時間浸漬した場合にも、ALC標識の評価点は調査した全ての個体で満点の100ポイントであったが、浸漬時間を短縮すると、それに伴って評価点は低下し、個体毎に評価点

のばらつきが大きくなる傾向にあった。また、浸漬時間が1時間の場合には、ALC標識が確認できない個体もあった。しかし、16 mg/LのALC液へ5~6時間、または32 mg/LのALC液へ4~6時間浸漬した場合には、調査した全ての個体で評価点が50ポイントであり、「標識が確認できる」と判断された。

ALC標識の保持性と標識脱着影響の検討 点状標識魚と対照魚をふ化直後から807日間別々の水槽で飼育した。この間に8回の標本抽出を行ったところ、調査した全ての点状標識魚でALC標識が確認され、Fig. 3.1.4Aに示したように標本抽出日毎のALC標識の評価点の平均値は85~100ポイントと高かった。また、日数の経過に伴うALC標識の衰退は認められなかった。なお、対照魚の耳石には、ALCの蛍光と間違える発光は認められなかった。

これら点状標識魚とは別に、40日齢でALC標識を施

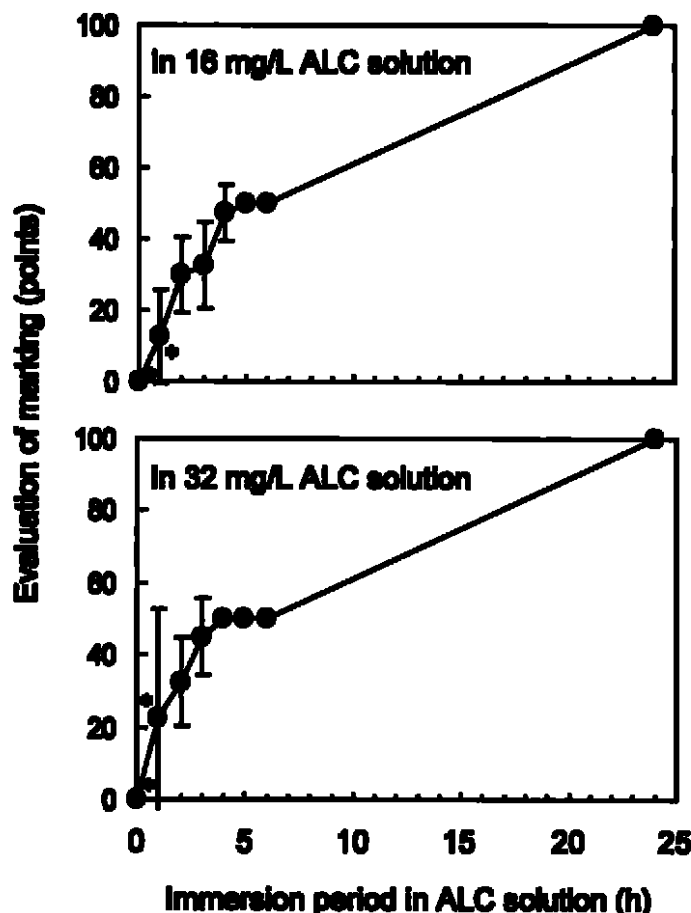


Fig. 3.1.3. Relationships between evaluation of ALC marking in nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* otolith and treatment period. Vertical bars indicate standard deviations. Asterisks show existence of non-marked otoliths. See Fig. 3.1.1 for evaluation of marking.

した平均体長16.1mmの稚魚とその対照魚を別々の水槽で飼育したところ、807日後にはどのALC標識魚からもリング状のALC標識が確認され、Fig. 3. 1. 4Aに示したように、その評価点の平均値は95ポイントと高かった。対照魚の耳石からは、ALCの蛍光と間違える発光は認められなかった。

また、同一水槽に点状標識魚と対照魚を150尾ずつ収容して807日間飼育し、この間8回の標本抽出を行ったところ、Fig. 3. 1. 4Bに示したように、点状標識魚の出現率は標本抽出日によって若干変動する結果を

得た。しかし、飼育開始時(ふ化当日)と各標本抽出日の点状標識魚の出現率には有意差はみられなかった($P>0.05$)。また、各回に抽出された点状標識魚と対照魚の体長をFig. 3. 1. 4Cに示した。どの標本抽出日においても、両者の体長の間には有意差はみられなかった($P>0.05$)。先に述べたとおり、点状標識魚と対照魚は標識で確実に区別できるため、これらの結果は両者の807日間の生残率と成長には差がないことを示すものである。

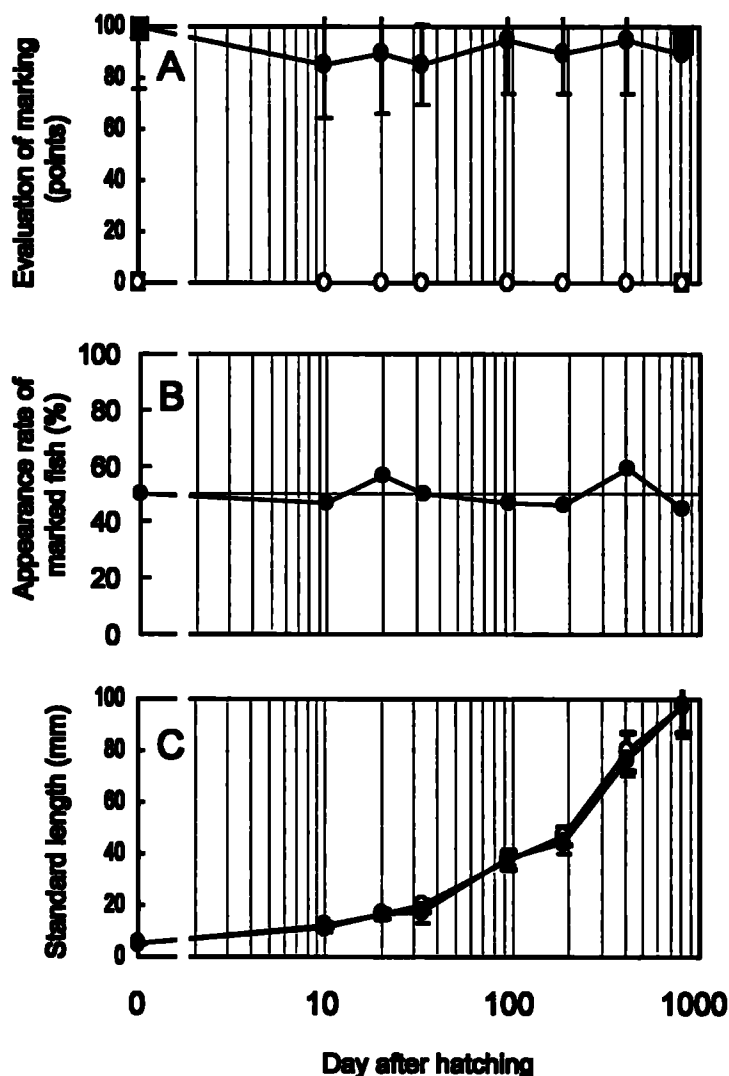


Fig. 3.1.4. Retention of ALC-marking (A), and influences of the marking on survival (B) and growth (C) in nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. Solid and open symbols indicate marked and control groups, respectively. Circles and quadrilaterals indicate groups marked at egg and juvenile stage, respectively. Vertical bars indicate standard deviations. Marked fish and control fish shown in A had been reared separately, while these fishes shown in B and C had been reared together in the same tank. No significant differences ($P>0.05$) between marked fish and control fish in B and C were recognized at each point by *chi*-square test and Student's *t*-test, respectively.

考 察

卵をALC液へ浸漬して耳石へALC標識を付ける場合、発生が進んだ卵ほどALCによる弊害が少なく、明瞭なALC標識が得られた。その最適条件は、水温20℃では16 mg/LのALC液への発眼完了卵の24時間浸漬であった(Fig. 3. 1. 1)。これは、発生初期の卵は細胞分裂が活発で、その過程でALCの影響を強く受けたのに対し、発眼開始以降の卵は胚体の基本構造がほぼ完成し、²⁴⁾ ALCの影響が少なかったためと考えられる。また、耳石の分化は発眼とほぼ同時期に始まり、分化した耳石はその後次第に成長する。²⁴⁾ ALCはこの耳石の形成部分に取り込まれる²⁵⁾ ため、特に発眼完了以降にALC液へ浸漬すると耳石へのALCの沈着が進行し、安定したALC標識が得られたものと思われる。

仔稚魚へALC標識を付けるときのALCの最適濃度は、20℃のALC液へ24時間浸漬する場合には、平均体長が9.8mm以下の仔魚では16~32 mg/L、34.2mmの稚魚では32~64 mg/Lであった(Fig. 3. 1. 2)。また、仔魚から稚魚への変態直後に当たる平均体長16.1mmの稚魚²⁶⁾ でも16~32 mg/LのALC液へ20℃で24時間浸漬すると安定して明瞭なALC標識が得られた(Fig. 3. 1. 3)。これらの結果とALC使用量の節約という経済性を考えると、ALCの最適濃度は体長16 mmまでの仔魚では16 mg/L、同16 mm程度の稚魚では16 mg/L、それを超え同35 mmまでの稚魚では32 mg/Lといえる。なお、平均体長16.1mmの稚魚では16 mg/LのALC液へ5~6時間、32 mg/LのALC液へ4~8時間の浸漬でも有効なALC標識が得られたが(Fig. 3. 1. 3)、24時間浸漬した場合に比べてALC標識は明瞭ではなかった。この浸漬時間を短縮したALC標識は、放流のための輸送中に活魚槽の中で標識する場合などには有効な手段であるが、できるだけ24時間浸漬することによって、より明瞭なALC標識を装着することが望ましい。

体長11 mmでALC標識を付けたマダイでは、耳石の切断や研磨処理を行うことにより、412日後にもALC標識が確認されている¹⁾。ニゴロブナにおいては、卵あるいは稚魚の段階で付けたALC標識は、特に耳石の切断や研磨などの処理を施さなくても、ともに807日後に調査した全ての個体で確認された(Fig. 3. 1. 4A)。また、先に述べた適正条件で卵や仔稚魚の段階でALC標識を付けた場合、ふ化率、奇形魚出現率、ふ化後7日間の死亡率、仔稚魚のALC液への浸漬中の死亡

率およびその後7日間の仔稚魚の死亡率に、それぞれ対照区との間で有意差はみられなかった(Fig. 3. 1. 1, 3. 1. 2)。さらに、卵の段階で適正な条件でALC標識を付けたふ化仔魚と対照区のふ化仔魚を同一水槽内で807日間飼育したところ、この期間中の両者の生存率や成長には有意差はみられなかった(Fig. 3. 1. 4B, C)。したがって、適正な条件で施したALC標識は、ニゴロブナに対して弊害を及ぼさず、しかも長期間に渡って有効な方法といえる。

文 献

- 1) 栗田博・塚本勝巳. アリザリン・コンプレクソンによるマダイ稚仔魚の耳石標識—I. 栽培技研1987; 16: 93-104.
- 2) 栗田博・塚本勝巳. アリザリン・コンプレクソンによるマダイ稚仔魚の耳石標識—II. 栽培技研1989; 17: 115-128.
- 3) Tukamoto K. Mass-marking of ayu eggs and larvae by tetracycline-tagging of otoliths. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1985; 51: 903-911.
- 4) Tukamoto K. Otolith tagging of ayu embryo with fluorescent substances. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1988; 54: 1289-1295.
- 5) 塚本勝巳. 魚卵・稚仔魚の耳石標識法. 海洋と生物 1987; 9: 103-105.
- 6) Tsukamoto K, Kuwada H, Hirokawa J, Oya M, Sakiya S, Fujiimoto H, Imaizumi K. Size-dependent mortality of red sea bream, *Pagrus major*, juveniles released with fluorescent otolith-tags in News Bay, Japan. *J. Fish Biol.* 1989; 35 (Suppl. A): 59-69.
- 7) Yamashita Y, Nagahora S, Yamada H, Kitagawa D. Effects of release size on survival and growth of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* in coastal waters off Iwate Prefecture, northeastern Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1994; 105: 269-276.
- 8) 相沢康, 戸田久仁雄. ワカサギのALC標識. 神奈川淡水試報1995; 31: 50-54.
- 9) 大木雅彦. ウナギ稚魚に対するアリザリン・コンプレクソンを用いた耳石標識の有効性について. 宮崎水試研報1999; 7: 42-49.

- 10) 梶山誠. アリザリンコンプレキソンを用いたナマズ *Silurus asotus* の耳石標識について. 千葉内水試験研報2000; 7: 29-33.
- 11) 山崎幸夫. ALC耳石標識を用いたスズキ稚魚の放流サイズと生残の検討. 茨城水試験研報2000; 38: 9-13.
- 12) 永山聡司, 川島時英, 庄司紀彦, 牧野直, 芝田健二, 清水利厚. クロダイ稚魚のアリザリンコンプレキソン標識手法の検討. 千葉水試験研報2001; 57: 247-249.
- 13) 片倉靖次, 桜井泰憲, 太田守信, 神正人. Oxytetracycline, Alizarin Complexone および Alizarin Red Sを用いたスケトウダラ幼魚の耳石染色実験. 水産増殖2003; 51: 327-335.
- 14) 松村靖治. アリザリンコンプレクソン並びにテトラサイクリンによるトラフグ *Takifugu rubripes* 卵および仔稚魚の耳石標識. 日水誌2005; 71: 307-317.
- 15) 友田努, 桑田博. pH調整したアリザリン・コンプレクソン溶液の希釈によるハタハタ稚魚の耳石標識. 日水誌2006; 72: 76-78.
- 16) 中川雅弘, 大河内裕之, 服部圭太. Alizarin Complexone を用いたクロソイ種苗の耳石標識試験. 水産増殖2007; 55: 253-257.
- 17) 小畑泰弘, 山崎英樹, 竹森弘征, 岩本明雄, 奥村重信, 藤本宏, 山本義久, 北田修一. 異なるサイズで放流したサワラ人工種苗の資源添加効率の比較. 日水誌2007; 73: 55-61.
- 18) 草加耕司. オニオコゼ種苗に適した標識法の検討. 岡山水試験研報2008; 23: 29-34.
- 19) 滋賀県水産試験場. ホンモロコ・ニゴロブナ of 雌化技術開発に関する研究. 昭和63年度地域バイオテクノロジー研究開発促進事業報告書1989: 2-4.
- 20) 木村忠亮. ニゴロブナの採卵およびふ化について. 滋賀県水試験研報1976; 26: 30-41.
- 21) 小林博. 感覚器官. 「魚類解剖学」(落合明編) 恒星社厚生閣, 東京. 1987; 281-308.
- 22) Mugiya Y and Tanaka S. Otolith development, increment formation, and an uncoupling of otolith to somatic growth rates in larval and juvenile goldfish. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1992; 58: 845-851.
- 23) 藤原公一. ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の飼育仔稚魚の発育と成長. 日水誌 2010; 76:894-904.
- 24) 梶尾孝雄. キンギョ *Carassius auratus* の正常初期発生段階. 魚類学雑誌 1960; 8: 20-24.
- 25) 塚本勝巳. 魚類の初期減耗過程とそのメカニズムに関する標識放流実験. 「魚類の初期発育」(田中克編) 恒星社厚生閣, 東京. 1991; 105-118.

3-2 ALCを用いたニゴロブナの耳石への多重標識装着条件と放流サイズの推定方法

著者らは、ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の増殖事業を効果的に進めるため、多くの魚種で化学標識として用いられているアリザリン・コンプレクソン (ALC) による耳石の染色標識¹⁻¹⁷⁾ (以下、ALC標識) を施した種苗の放流・再捕調査により、ニゴロブナの効果的な種苗放流技術や産卵・繁殖場の造成条件などを検討してきた。

ALCは標識時の耳石の最外層に取り込まれて耳石の輪郭に沿って蛍光標識を形成する。その後はその外側に耳石の新しい成長層が形成され、耳石が成長してもこの標識は変わることはない。¹⁸⁾ このため、ALC標識は日数を空けて繰り返して行えば多重標識となり、そのパターンを変えることで相互に識別可能な多種類の標識が可能と考えられる。しかし、標識操作が魚体へ損傷を与えるためサワラ *Scomberomorus niphonius* では多重標識は困難とされている。¹⁶⁾ また、多重標識の装着が、天然水域へ放流された魚の成長や生残におよぼす影響を直接評価した研究は見当たらない。このため、多重標識を利用してニゴロブナの放流技術などを研究するに当たり、放流後のこの標識の影響などの評価が不可欠である。

また、耳石サイズと魚体サイズの関係を明らかにしておき、放流直前に種苗へALC標識を付ければ、再捕魚の耳石の最も外側のALC蛍光のサイズから放流時の魚体サイズを推定できる。これまでにヒラメ *Paralichthys olivaceus*⁶⁾ やスズキ *Lateolabrax japonicus*¹⁰⁾ で、この方法を用いて再捕魚の放流時の魚体サイズ推定が行われている。しかし、耳石サイズと魚体サイズの関係は、同じ魚種であっても成長履歴などによって異なり、¹⁹⁻²⁴⁾ 放流種苗の生産条件などが異なれば、この関係も変わると考えられる。このため、異なる生産ロットの種苗を放流する場合などは、耳石と魚体の成長の非同調性を考慮したうえで、耳石サイズから魚体サイズを逆算する方法の検討が重要となる。

そこで前節で示した手法で、ニゴロブナの卵や仔稚魚へのALC標識を複数回繰り返して行い、耳石への相互識別可能な多重標識を付ける標識間隔などの条件を明らかにするとともに、放流時の魚体サイズの推定精度を上げるために多重標識の最終標識操作を

放流直前に行った場合でも、その標識操作が天然水域へ放流された種苗の成長や生残に影響をおよぼさないことを確認した。また、魚体の成長履歴を考慮して耳石サイズ-体長関係を調べ、異なる生産ロットの標識種苗においても、再捕魚の耳石上のALC蛍光サイズから放流時の体長を精度良く推定する方法を見いだした。

材料および方法

ALC供試液 ALC (1, 2-dihydroxyanthraquinone-3-yl-methylamine-N,N-diacetic Acid, 和光純薬工業) を1 mol/LのNaOHで溶解させた後、1 mol/LのHClを加えてpHを7.6~7.8に調整した。これに琵琶湖水 (以下、湖水) を加えてALC含量10mg/mLの原液を調製した。各実験では、この原液を必要な濃度になるように湖水で希釈して用いた。

多重標識条件の検討 滋賀県水産試験場 (以下、滋賀水試) で養成したニゴロブナのメス成魚に10 IU/g 体重のゴナドトロピン (帝国臓器製薬株式会社) を腹腔内注射し、水温を次第に5℃上げて排卵²⁵⁾ させ、卵を搾出した。これを10尾分プールし、オス成魚10尾から搾出、混合した精液を加えて攪拌して、湖水中に置いた多数のすりガラス板 (50×100 mm) 上に散布して受精させた。卵はすりガラス板 1枚につき100粒残して他は無作為に取り除いて実験条件を一定にした。これらの卵を湖水中でふ化させ、ふ化仔魚を水温 20±1℃のウォーターバス中に置いた水量10 Lのパンライト水槽 7槽へ 50尾ずつ収容し、少量の湖水を常時注入して通気しながらツボウムシ *Brachiomus calyciflorus* やタマミジンコ *Moina macrocopa* などの動物餌料を飽食するまで与えて40日間飼育した。ALC標識は、Fig. 3. 2. 1に示した間隔で卵や仔稚魚を16 mg/LのALC液へ24時間²⁶⁾ ずつ浸漬して6とおり行った。最後の標識を終了してから9日後 (ふ化40日後) に、各水槽から10尾ずつ取り上げ、3種類の耳石のうち、ニゴロブナにとってALC標識に最も適した礫石²⁶⁾ を摘出し、乾燥後、組織標本用封入剤M-X (松浪硝子工業株式会社) でスライドガラス上にカバーガラスをかけて封入した。耳石は左側のものを摘出した。後日、落射型蛍光顕微鏡 (OPTIPHOT, XT-EFD, ニコン) を用い、G励起フィルター (BM520) を装着して、それぞれの耳石のALC発光の識別性の良否を評価した。

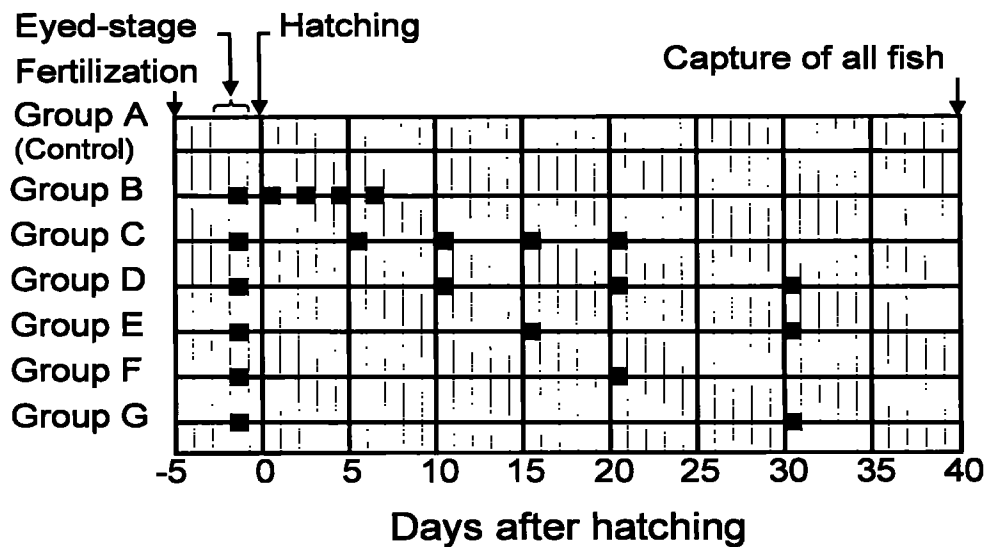


Fig. 3.2.1 The process for ALC multiple marking of otoliths of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. Rectangles show immersion time (days) of eggs or fish in ALC solution. All fish were captured on the 40th day after hatching to check ALC marks in their otoliths (lapilli).

多重標識が放流魚の成長・生残におよぼす影響の評価 滋賀水試内のニゴロブナ成魚池へ人工産卵藻(キンラン, 川島商事)を浮かべて1994年5月8日に採卵し, 得られた卵を「点状標識群」と「多重標識群」の2群に分けて湖水を注入したコンクリート池中で培養した。同月11日に卵が発眼したので, 点状標識群は, 約5万粒の卵を通気した16 mg/LのALC液1 m³中へ24時間浸漬²⁶⁾して耳石の核部分へ点状標識した(Table 3.2.1)。同月15日に全ての魚がふ化したので, 両群を266,000尾ずつ8.0×5.0×1.0m水深のコンクリート池中に設置した3.5×2.0×0.7m深さの網イケス2張りずつに均等に収容し, 少量の湖水を注入して通気しながら, 上記の動物餌料や配合飼料(餌付けA

またはB, 科学飼料研究所)を飽食するまで与えて42日間飼育した。この間, 多重標識群はTable 3.2.1に示した間隔で, 全個体を酸素ガスを供給した16 mg/LのALC液1~2 m³に24時間²⁶⁾ずつ5回浸漬して耳石へ5重標識した。標識中は無給餌であった。多重標識群の最終標識が終了した同年6月26日(42日齢)には, 生産された全魚(多重標識群131,829尾, 点状標識群102,622尾)を混合して活魚輸送車の1m³水槽1槽へ収容し, 酸素ガスを供給しながら運搬して, Fig. 3.2.2に示した滋賀県長浜市湖北町海老江の琵琶湖岸に自生するヨシ群落中央部へバケツリレーして放流した。なお, 放流時に多重標識群からは250尾, 点状標識群からは220尾を無作為サンプリングして冷凍保存した。後日,

Table 3.2.1 ALC marking process in otolith^{*1} of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* released in Lake Biwa

Mark type	Immersion time (days) of nigorobuna in ALC solution ^{*2} before and after hatching					
	-4	1	9	19	29	41
Multiple mark (5 rings)		+	+	+	+	+
Dot mark (core)	+					

*1: Lapillus.

*2: Eggs or fish were immersed in 16 mg/L ALC solution for 24 hours on each immersion day.

解凍後にこれら全個体の標準体長(以下、体長)を測定して平均体長を求めるとともに、多重標識群は体長1mm間隔の相対度数を求め、全放流尾数にこれに乗じて、体長1mm間隔毎の放流尾数を推定した。また、多重標識群は150尾について耳石の長径(以下、耳石長)を測定し、耳石長-体長関係を求めた。耳石長の測定は左側の耳石を上記の方法で摘出してW-Xで封入後、顕微鏡の接眼マイクロメータを用いて行った。

同年11月5日から翌年4月15日(放流後132~293日)には、琵琶湖(主湖盆の北湖)で小型機船底曳き網を用いてニゴロブナ当歳魚を13,525尾採集した。その標本を冷凍保存し、後日解凍して体長と体重を測定後、左側の耳石を摘出し、4mol/Lの塩酸で耳石の外周の一部を溶解して上記の方法で標識の有無と標識の種類を調べた。

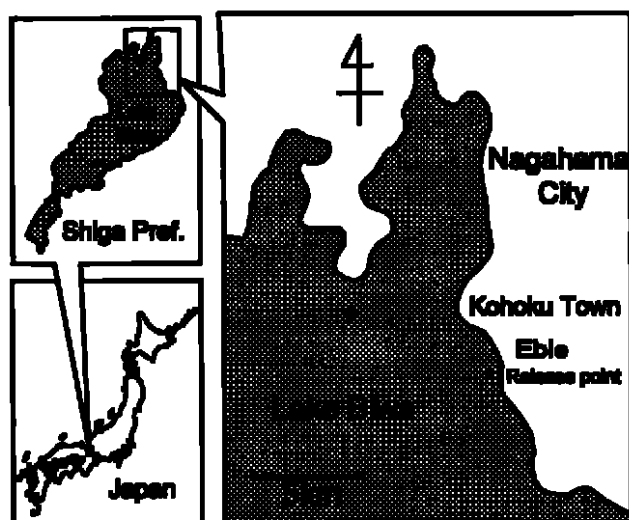


Fig.3.2.2 Release point of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* with otoliths marked with ALC. Fish were released in the center of a wild reed zone along the shore of Kohoku Town.

耳石長と体長との関係の検討 点状標識群や多重標識群と同様の方法で1992~1996年の間に41ロットのニゴロブナ仔稚魚を網イケスで生産し、その一部を冷凍保存した。後日、それらのうち、5,800尾の体長と耳石長を上記の方法で測定し、体長、日齢および耳石長との関係を検討した。

統計処理 点状標識群と多重標識群の養成期間中の生残率の差および琵琶湖への放流実験における両群の再捕率(放流尾数に対する再捕尾数の割合)の

差は、ともに二項分布の正規近似による比率の差検定で検定した。しかし、琵琶湖への放流実験においては、同時同所に N_1 , N_2 を放流した2群の再捕系列は正の相関をもつことが知られており、²⁷⁻²⁹⁾これを無視すると検定統計量を過大評価することになる。このため、次式で検定統計量 z を計算し、これらの相関を考慮した場合の2群の再捕率の差の検定も行った。

$$z = \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{\sqrt{\hat{p}(\hat{p}_1) + \hat{p}(\hat{p}_2) - 2\widehat{Cov}(\hat{p}_1, \hat{p}_2)}}$$

なお、ここで再捕率の推定値 $\hat{p}_1$ と $\hat{p}_2$ の分散は、それぞれ $\hat{p}(\hat{p}_1) = N_1\hat{p}_1(1 - \hat{p}_1)$, $\hat{p}(\hat{p}_2) = N_2\hat{p}_2(1 - \hat{p}_2)$ で示される。このデータから共分散 $\widehat{Cov}$ の推定は困難であるため、ここでは最も影響が大きい場合、すなわち相関係数を1と仮定して、

$$\widehat{Cov}(\hat{p}_1, \hat{p}_2) = \sqrt{N_1\hat{p}_1(1 - \hat{p}_1)N_2\hat{p}_2(1 - \hat{p}_2)}$$

として z を計算した。

また、放流魚の体長、再捕魚の体長、体重および肥満度の平均値の両群間における差は、それぞれの項目に関して、仮説 H_0 :「両群の母分散は等しい」をF検定により検定し、 $P>0.05$ でいずれも等分散とみなされたため、スチューデントの t 検定で検定した。

結 果

多重標識の評価 Fig. 3.2.1に示した間隔でニゴロブナの卵や仔稚魚をALC液へ浸漬すると、耳石に、発眼期の卵の浸漬ではその核部分に点状、仔稚魚の浸漬では供試魚のサイズに応じて核を取り巻くリング状に蛍光標識が付き、これを繰り返すことで多重標識が可能であった(Fig. 3.2.3)。この多重標識の識別性の評価結果をTable 3.2.2に示した。点状標識した後、ふ化直後にも標識し、さらにその後は1日間隔(2日に一度の頻度)で標識を繰り返したB群では、隣接するリングの蛍光が識別しにくかった。また、点状標識とふ化直後のリング状標識の蛍光が重なり、点状標識の確認は困難であった。これ以外の頻度で行った標識(C~G群)は、いずれも明瞭に識別できた。

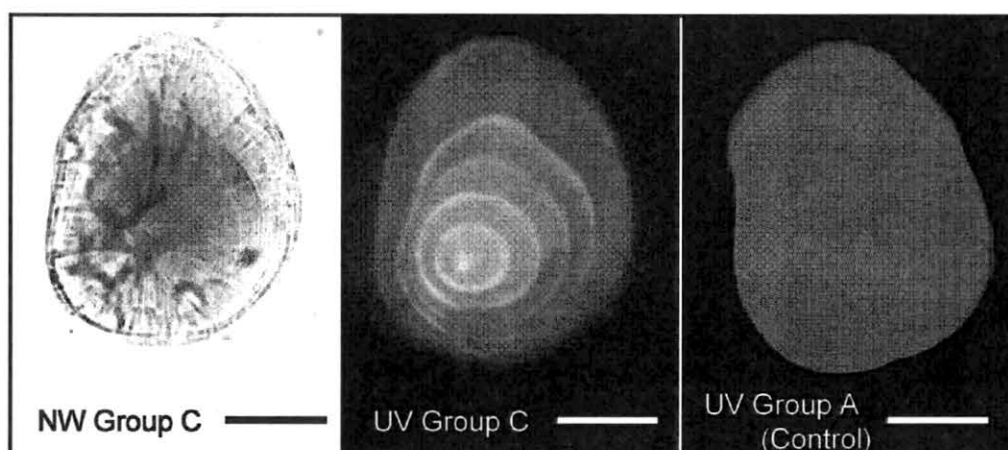


Fig. 3.2.3 Photographs of otoliths (lapilli) of juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. NW: normal white lighting. UV: ultraviolet lighting with G filter. Scale bar: 0.1mm. See Fig. 3.2.1 for group names.

Table 3.2.2 Evaluation of ALC multiple marking in otolith^{*1} of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*

Group ^{*2}	Immersion frequency in ALC solution		Mark type	Evaluation of multiple marking
	Before hatching	After hatching		
A	None	None	None	—
B	Once	Once in 2 days; 4 times	Core and 4 rings	Unclear
C	Once	Once in 5 days; 4 times	Core and 4 rings	Clear
D	Once	Once in 10 days; 3 times	Core and 3 rings	Clear
E	Once	Once in 15 days; 2 times	Core and 2 rings	Clear
F	Once	Once in 20 days; 1 time	Core and ring	Clear
G	Once	Once in 30 days; 1 time	Core and ring	Clear

*1: Lapillus.

*2: Shown in Fig. 3.2.1.

多重標識が放流魚の成長・生残におよぼす影響の評価 多重標識群を、最終の標識が完了した42日齢の時点で、同日齢の点状標識群とともに琵琶湖へ放流した。放流までのこれら標識魚の飼育成績をTable 3.2.3に示した。飼育中の生残率は多重標識群が49.6%で、点状標識群の38.6%よりも有意に高かった($P<0.0001$)。また、放流時点の体長は、多重標識群が 16.6 ± 3.7 mm(平均値 $\pm$ SD)、点状標識群が 16.7 ± 4.4 mmで、両者間で有意差はみられなかった($P=0.768$)。

Table 3.2.4には、琵琶湖へ放流した標識魚の再捕

調査結果を示した。この調査では、多重標識群が177尾(再捕率0.135%)、点状標識群が139尾(同0.136%)再捕された。二項分布の正規近似による比率の差検定では、両再捕率の間には有意差はみられなかった($P=0.884$)。また、再捕率の相関を考慮した検定統計量は、 $z=0.000185$ ($P=0.500$)となり、この場合にも両群の再捕率には差がみられなかった。

さらに、点状標識群と多重標識群の再捕魚の体長、体重および肥満度にも有意差はみられなかった(それぞれ $P=0.718$, $P=0.968$, $P=0.718$)。

Table 3.2.3 Rearing result of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* in the ALC marking process *1

Rearing result of nigorobuna in ALC marking process, until released in Lake Biwa *2								
Mark type*1	The number at hatching (<i>H</i>)	The number at release (<i>R</i>)	<i>R/H</i> *3	The number of released fish	Standard length at release*4			Age at release
					Mean	± SD	<i>N</i>	
			%			mm		d
Multiple mark (5 rings)	266,000	131,829	49.6	131,579	16.6	± 3.7	250	42
Dot mark (core)	266,000	102,622	38.6	102,402	16.7	± 4.4	220	42

*1: Shown in Table 3.2.1.

*2: The multiple marked fish were released immediately after completion of the last marking together with the dot-marked fish in Lake Biwa on June 26, 1994.

*3: Significant difference ($P < 0.0001$) by a test of two proportions under normal approximation.*4: No significant difference ($P = 0.768$) by Student's *t*-test.Table 3.2.4 Comparison of recapture rate and growth between recaptured ALC multiple and dot- marked nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* in otoliths*1

Mark type	N	Recapture rate*2	Standard length*3			Body weight*4			Condition factor*5		
			Mean	± SD		Mean	± SD		Mean	± SD	
		%		mm			g				
Multiple mark (5 rings)	177	0.134	90.5	± 10.9		24.7	± 9.6		3.21	± 0.24	
Dot mark (core)	139	0.135	90.9	± 9.3		24.8	± 7.7		3.20	± 0.25	

*1: Refer Table 3.2.1 for mark type. These fish were released in Lake Biwa on June 26, 1994, and recaptured from 132 to 293 days after release by trawl net.

*2: Number of recaptured fish / number of released fish $\times 100$. No significant difference ($P = 0.884$) from a test of two proportions under normal approximation.*3: No significant difference ($P = 0.718$) by Student's *t*-test.*4: No significant difference ($P = 0.968$) by Student's *t*-test.*5: Body weight / standard length³ $\times 10^3$. No significant difference ($P = 0.718$) by Student's *t*-test.

耳石長と体長との関係 1992～1996年に生産したニゴロブナ仔稚魚41ロットから抽出した合計5,800尾の標本の耳石長(OLmm)と体長(SLmm)の間には、全個体を一括すると

$$SL = 36.7OL + 1.49 \dots\dots\dots (1)$$

($R^2 = 0.862$, $N = 5,800$, $P < 0.0001$)
 の関係が認められた (Table 3.2.5)。ロット毎には、Table 3.2.5に示した各関係が認められた。また、全個体について、体長をその飼育日数で除して求めた日間成長量(DG mm/d)と体長に対する耳石長の割

合(相対耳石長:ROI)との間には

$$ROI = 0.0194DG^{0.286}, R^2 = 0.482, N = 5,800, P < 0.0001$$

の関係が認められ (Fig. 3.2.4), 日間成長量が小さい個体ほど相対的に大きな耳石を持つ傾向にあった。そこで全個体について、それぞれの耳石長の他に日間成長量を説明変数として重回帰分析を行ったところ、

$$SL = 33.9OL - 14.2DG - 2.69 \dots\dots\dots (2)$$

($R^2 = 0.944$, $N = 5,800$, $P < 0.0001$)
 の関係が認められた。また、飼育日数を D とし

Table 3.2.5 Otolith^{*1}-somatic relationships in length of larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* reared during the period between 1992 to 1996

Year	Lot no.	Age	N	Standard length			$SL = aOL + b$ ^{*2}		
				Mean	±	SD	a	b	R ²
		d				mm			
1992	1	30	98	15.6	±	2.2	55.8	-3.01	0.812
1992	2	40	100	16.8	±	2.8	50.3	-3.24	0.889
1992	3	24	112	10.5	±	1.5	35.9	1.78	0.878
1992	4	32	99	14.9	±	3.1	46.0	-1.10	0.963
1992	5	32	99	15.0	±	2.9	47.4	-1.54	0.947
1993	6	44	116	15.6	±	3.0	48.1	-2.57	0.876
1993	7	44	119	15.4	±	2.6	46.1	-1.77	0.840
1993	8	44	120	16.7	±	3.7	49.8	-3.11	0.931
1993	9	42	114	18.2	±	3.6	49.2	-2.94	0.923
1993	10	42	118	17.0	±	3.8	51.5	-3.85	0.935
1993	11	42	117	18.0	±	3.9	46.8	-2.38	0.954
1993	12	42	120	16.8	±	3.4	48.2	-3.33	0.930
1993	13	42	118	17.7	±	3.4	40.5	-0.78	0.888
1993	14	47	90	21.8	±	3.8	51.2	-3.60	0.936
1993	15	42	120	16.6	±	3.9	40.9	-1.44	0.943
1994	16	44	150	17.6	±	4.4	50.0	-3.54	0.922
1994	17	44	150	16.2	±	3.3	42.7	-1.85	0.946
1994	18	44	150	20.6	±	2.7	44.0	-0.80	0.833
1994	19	42	150	17.1	±	3.7	50.6	-3.48	0.913
1994	20	42	118	15.7	±	3.4	51.5	-3.83	0.918
1994	21	42	150	18.5	±	4.5	53.3	-4.54	0.912
1994	22	44	148	16.3	±	3.6	50.2	-3.80	0.932
1994	23	44	148	16.6	±	3.1	49.7	-4.46	0.892
1995	24	62	137	20.9	±	3.5	47.6	-3.93	0.869
1995	25	62	139	21.2	±	3.6	51.5	-5.32	0.818
1995	26	60	138	19.8	±	3.9	52.7	-5.53	0.855
1995	27	52	160	18.6	±	3.6	47.8	-3.97	0.884
1995	28	52	159	19.2	±	3.9	50.3	-5.14	0.889
1995	29	52	139	16.0	±	3.0	41.6	-1.50	0.912
1995	30	55	139	17.8	±	3.2	46.5	-2.73	0.840
1995	31	45	242	16.1	±	3.1	49.0	-3.27	0.907
1995	32	34	140	15.7	±	3.4	52.3	-2.90	0.918
1995	33	45	372	17.6	±	3.1	48.1	-3.18	0.879
1995	34	73	138	19.4	±	3.9	39.9	-2.91	0.889
1995	35	52	140	16.5	±	4.1	48.5	-4.39	0.925
1995	36	36	139	18.3	±	3.5	49.0	-3.60	0.906
1995	37	83	93	25.0	±	4.6	46.4	-6.69	0.902
1995	38	83	89	24.1	±	4.9	45.1	-5.62	0.935
1995	39	73	117	21.5	±	4.7	43.8	-5.31	0.906
1996	40	64	265	23.3	±	3.6	44.1	-4.26	0.868
1996	41	64	230	23.7	±	3.4	43.2	-3.86	0.836
-	All lots	-	5,800	-	-	-	36.7	1.49	0.862

*1: Lapillus.

*2: Regression equation of standard length (SL in mm) to long axis length of otolith: lapillus (OL in mm). All equations are statistically significant ($P < 0.0001$).

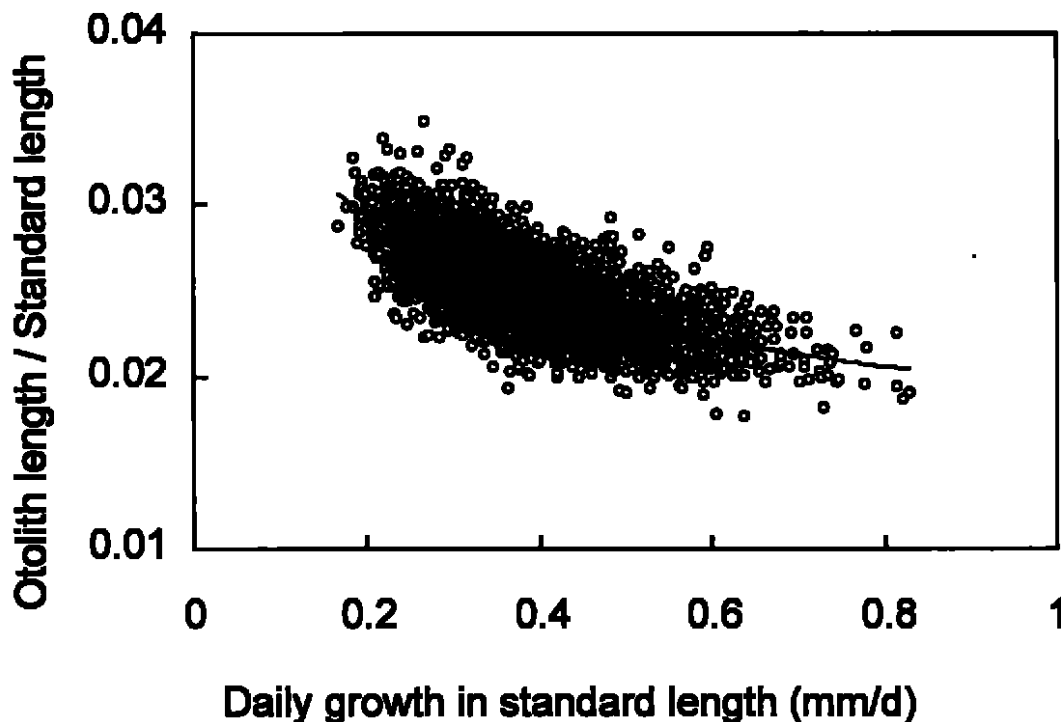


Fig. 3.2.4 Relationship between daily growth in standard length (DG) and relative length of otolith to standard length (ROL) in larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* of the 41 lots reared during the period between 1992 to 1996. Long axis length of lapillus is shown as otolith length. Solid line indicates the regression curve, $ROL=0.0194DG^{-0.255}$, $R^2=0.482$, $N=5,800$, $P<0.0001$.

体毎の日間成長量を式(1)から

$DG=(36.7OL+1.49)/D$ で近似し、この式と式(2)から

$$SL=33.9OL+521OL/D+21.2/D-2.69 \quad \cdots \cdots (3)$$

が導かれた。

耳石長からの体長推定 式(1)、ロット毎の耳石長—体長関係式(Table 3.2.5), 式(2)および式(3)をそれぞれ用いて、耳石長から全個体5,800尾の体長を推定し、実測体長との関係をFig. 3.2.5A-Dに示した。推定精度 V を

$$V=1/n \sum (SL_i - SL_i)^2$$

(ただし、 SL_i : 実測体長, $\widehat{SL}_i$: 推定体長)で算出すると、 V は式(2) (Fig. 3.2.5C)が1.14で最も高く、次いでロット毎の耳石長—体長関係式(Fig. 3.2.5B)が1.25, 式(3) (Fig. 3.2.5D)が1.98, 式(1) (Fig. 3.2.5A)が2.78の順であった。推定精度が最も高かった式(2)の V で各推定式の V を除して推定効率を求めると、推定効率は式(2)の1.00に対して、ロット毎の耳石長—体

長関係式が1.10, 式(3)が1.74, 式(1)が2.45となった。

放流サイズの推定とサイズ毎の生残状況

Fig. 3.2.6には多重標識群(Table 3.2.4)の放流時の推定体長組成を示した。また、同群の耳石長—体長の関係式

($SL=50.6OL-3.48$, $R^2=0.913$, $N=150$, $P<0.0001$) および式(3)を用いて、個々の再捕魚について放流時の体長を推定し、その体長の1mm間隔毎に再捕率(再捕尾数/放流尾数のパーセンテージ)を示した。放流魚の推定体長組成には有意な正規性はみられず(正規性の検定, $P=0.0004$)、その組成は、16.6mmを中央値として体長の小さい方向への広がり小さく、大きい方向へ広がり大きい傾向にあった。再捕率は、体長が23 mmまでは両体長推定方法ともに、体長が大きくなるに従い上昇する傾向にあった。また、体長22 mmまでは両方法によって求めた再捕率は近似していた。しかし、体長が23 mmを超えると両方法ともに再捕率は低下傾向を示し、22 mmを超えると推定方法間で大きな差がみられた。

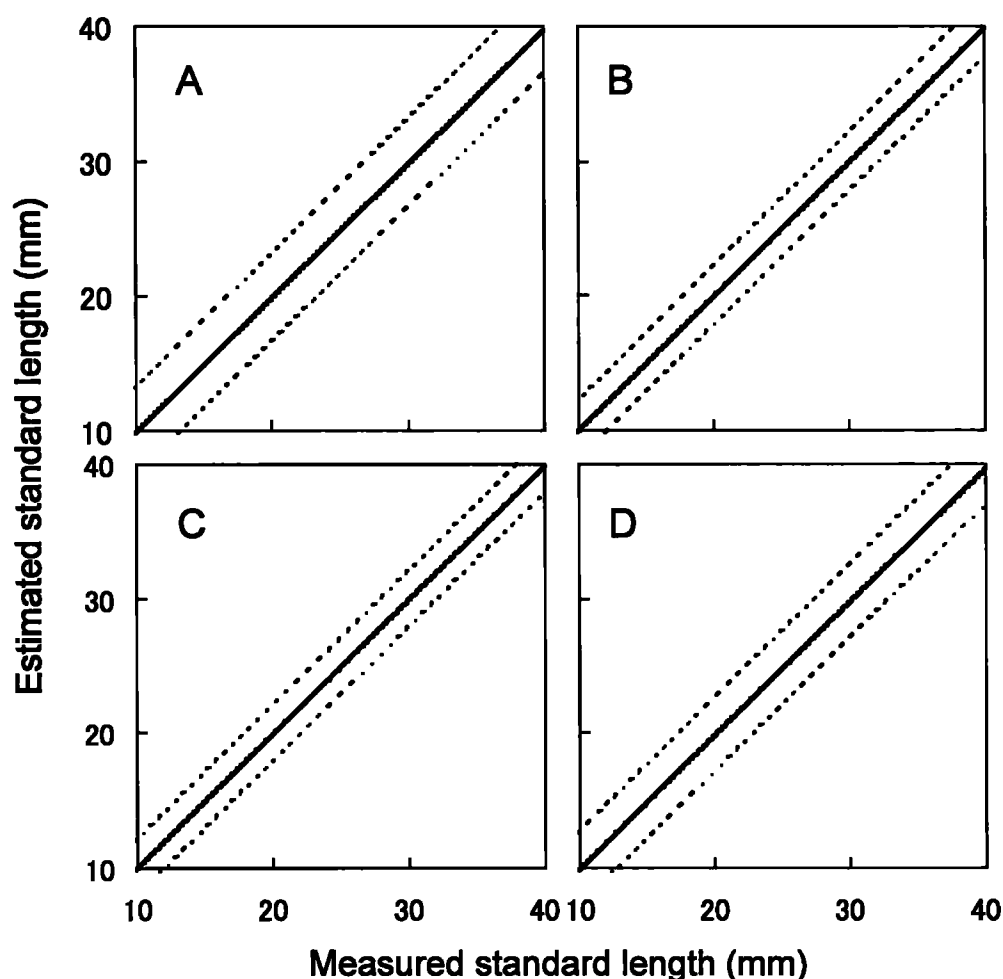


Fig. 3.2.5 Relationships between measured standard length (SL) and estimated standard length ($\widehat{SL}$) in larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* of the 41 lots reared during the period between 1992 to 1996. Solid lines and dotted lines indicate regression lines between SL and $\widehat{SL}$, and 95% confidence intervals, respectively. Calculation methods of $\widehat{SL}$, and correlations between SL and $\widehat{SL}$ are as follows. A: calculated by the regression equation between long axis length of lapillus (OL) and standard length (SL) of all individuals, $\widehat{SL} = 0.842SL$, $R^2 = 0.842$, $N = 5,800$, $P < 0.0001$. B: calculated by regression equations between OL and SL of each lot, $\widehat{SL} = 0.997SL$, $R^2 = 0.935$, $N = 5,800$, $P < 0.0001$. C: calculated by the multiple regression equation with SL as a dependent variable, and OL and daily growth in standard length as explanatory variables of all individuals, $\widehat{SL} = 0.997SL$, $R^2 = 0.941$, $N = 5,800$, $P < 0.0001$. D: calculated by the equation $\widehat{SL} = 33.9OL + 521OL/D + 21.2/D - 2.69$ expressing age in days as D , $\widehat{SL} = 0.991SL$, $R^2 = 0.893$, $N = 5,800$, $P < 0.0001$. Refer to Table 3.2.5 and the text for each regression equation and the equation for D , respectively.

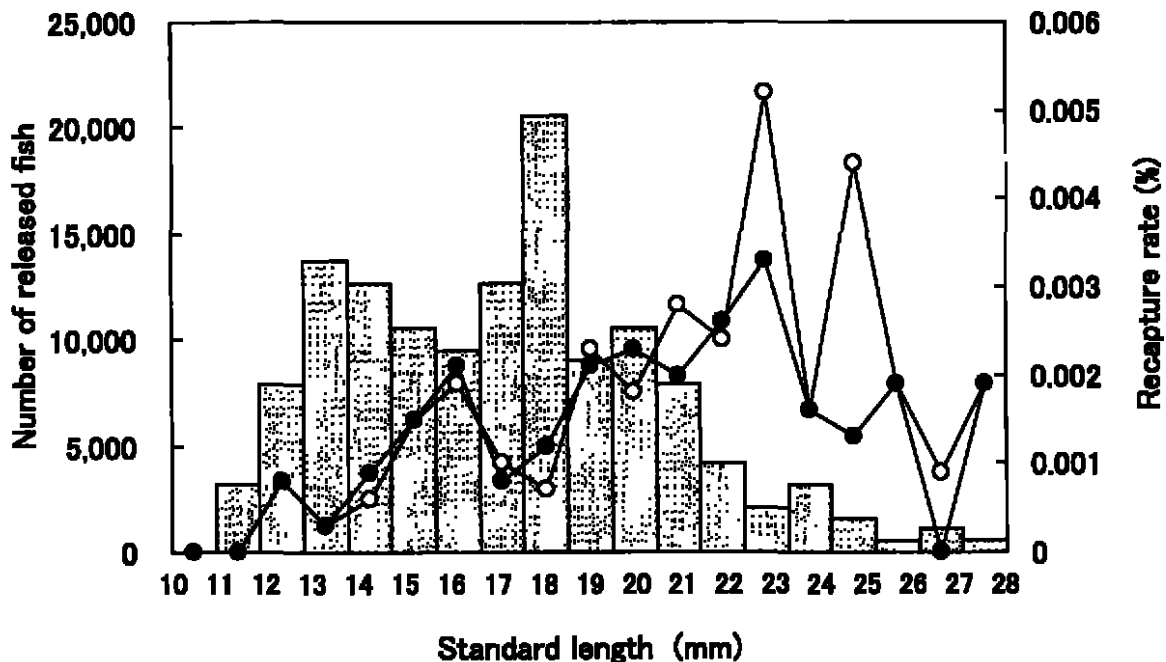


Fig. 3.2.6 Standard length distribution of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* released in Lake Biwa, and comparison of recapture rates for estimated standard lengths at release of the fish. Rectangles show the number of released fish. Open circles and closed circles indicate use of the equations $\widehat{SL} = 50.6OL - 3.48$ and $\widehat{SL} = 33.9OL + 521OL/D + 21.2/D - 2.69$ (OL: otolith length in mm was measured from the outermost ALC luminescence mark of recaptured fish; D: days after hatching until release), respectively. Refer to the text for the details of these equations.

考 察

多重標識の条件 キンギョ *C. auratus* の耳石 (礫石) には、ふ化までにほぼ3本、ふ化後は1日にほぼ1本の輪紋が形成されることが確認されており、²⁵⁾ その亜種であるニゴロブナも同様に輪紋が形成されると考えられる。ALCは耳石の形成層に取り込まれる¹⁹⁾ ため、ALC液に発眼期の卵を浸漬すると点状²⁶⁾ に、仔稚魚を日数を空けて浸漬すると、浸漬回数に応じて多重リング状に標識できることになる。しかし、本研究では、発眼期の卵の点状標識とふ化直後のリング状標識は、両標識の蛍光が重なり点状標識の確認は困難であった。また、リング状標識を1日間隔(2日に1度の頻度)で行うと隣接する蛍光リングの識別は容易ではなかった。一方、点状標識した後、ふ化5日後以降にリング状標識すると両標識は明確に識別できた。また、リング状標識を4日以上の日数を空けて行うと隣接する蛍光リングが明確に識別できた。これ

らの結果から、標識のタイプを確実に識別するうえで、点状標識とふ化直後のリング状標識の組合せは避けるべきであり、また、多重のリング状標識はなるべく日数を空けて行う方が望ましいといえよう。

多重標識が放流魚の成長・生存におよぼす影響の評価 卵段階でALC標識したニゴロブナと対照魚(無標識魚)を807日間、同じ水槽で飼育したところ、生存率や成長には両者間で有意差が認められず、少なくとも卵段階でのALC標識はふ化後のニゴロブナに影響を及ぼさないことは既に確認されている。²⁶⁾ そこで、本研究では卵段階でALC標識した点状標識群と放流直前までに計5回のALC標識した多重標識群との間で、放流までの養成成績を比較したところ、生存率は多重標識群の方が高く、養成終了時の体長には両群間で有意差は認められなかった。また、多重標識群と点状標識群を同じ条件で琵琶湖北湖の東北部沿岸のヨシ群落内へ放流し、その132~293日後に琵琶湖(北湖)一帯で、小型機船底曳き網によりこれらを再捕したところ、両群の再捕率、体長、体重および

肥満度には有意差が認められなかった。このため、ニゴロブナでは、少なくとも5重の多重標識は種苗の養成に影響せず、また放流直前に最終標識した場合でも、放流後の成長や生残に影響を及ぼさないといえる。サワラでは多重標識操作が魚体へ損傷を与えるため困難とされている¹⁶⁾が、ニゴロブナではそのような弊害はみられず、有効な標識方法といえよう。

放流サイズの推定方法 種苗の放流サイズと放流後の生残率や成長との関係の解明は、栽培漁業を効果的に進めるうえで重要である。耳石は日数の経過に伴い耳殻内で層状に成長し、ALCはその耳石の形成部分に取り込まれる。¹⁸⁾ このため、放流直前の種苗にALC標識を付ければ、そのALC蛍光は放流時の耳石の輪郭を示すこととなる。予め放流魚のサイズと耳石のサイズとの関係を明らかにし、ALC標識直後の種苗を放流すれば、再捕魚の耳石の最外のALC蛍光からその個体の放流サイズが逆算できる。そこで、本研究では、過去に生産したニゴロブナ仔稚魚41ロットから抽出した全個体5,800尾の耳石長と体長との関係を調べ、放流サイズの逆算方法を検討した。その結果、ホッキョクイワナ *Salvelinus alpinus*,¹⁹⁾ グッピー *Poecilia reticulata*,²⁰⁾ ストライトバス *Morone saxatilis*,²¹⁾ タイセイヨウサケ *Salmo salar*,²²⁾ キンギョ, ²³⁾ カタクチイワシ *Engraulis japonicus*²⁴⁾ およびマイワシ *Sardinops melanostictus*²⁴⁾ などと同様に、ニゴロブナでも日間成長量が小さい個体ほど相対的に大きな耳石を持つため、耳石長から体長を推定するうえで日間成長量も考慮する必要があると考えられた。そこで全個体について、それぞれの耳石長と日間成長量を説明変数、体長を従属変数として重回帰分析を行い、高い精度 ($V=1.14$) で体長推定が可能な式(2)を得た。しかし、再捕魚の放流時の体長を推定する場合、放流までの個体毎の日間成長量は不明であり、実際には式(2)を用いることはできない。そこで、個体毎の日間成長量を式(1)を用いて

$DG=(36.70L+1.49)/D$ で近似し、この式と式(2)から種苗の養成日数が判れば利用できる式(3)を導いた。これら式(1)、(3)およびロット毎の耳石長一体長関係式 (Table 3.2.5) から全個体の体長を推定し、式(2)の推定効率を1.00として比較した。その結果、推定効率はロット毎の耳石長一体長関係式が1.10、次いで式(3)が1.74と高く、式(1)が2.45でそれらよりも劣った。このため、可能な限り高い精度で再捕魚の放流

サイズを推定するためには、放流種苗のロット毎に耳石長一体長関係を求めておく必要があるといえよう。しかし、放流事業の現場では放流種苗のロット数が非常に多く、ロット毎のこの関係式の算出は煩雑であり、困難と思われる。このため、放流事業の現場では、放流する標識種苗の養成日数を揃えることで一般化した式(3)を用い、一定の高い精度で放流サイズを推定するのが現実的と思われる。

琵琶湖へ放流された多重標識群に関して、そのロットの耳石長一体長の関係式と式(3)を用いてそれぞれ推定された放流時の体長毎の再捕率 (Fig. 3.2.6) は、ともに体長23 mmまでは体長が大きくなるに伴い上昇する傾向を示した。通常、放流体長がさらに大きくなると再捕率は一層上昇すると考えられるが、体長23 mmを超えると、両体長推定方法による再捕率はともに低下する傾向にあった。また、体長22 mmまでは、両体長推定方法による再捕率は近似していたが、さらに大きな体長では両者間で大きな差がみられた。ニゴロブナは、種苗の養成中に大きな個体が小さな個体を共食いすることが知られている。これが原因で多重標識群には体長10 mm未満の個体は存在せず、逆に22~27 mm台の個体は少数ずつ存在するという体長組成の偏りが生じたと考えられる。体長22 mmを超えた大きなサイズでは、このように放流尾数が少なかったため、再捕率の推定誤差が大きくなり、再捕率の低下や推定方法間の再捕率に差が生じたと思われる。また、体長11 mm未満の種苗の放流尾数も少なかったが、本来このサイズは、それよりも大きなサイズに比べて生残率は低いと考えるのが妥当であり、両推定方法による再捕率はともにゼロとなったと思われる。これらのことから、体長毎の放流尾数が過度に少なくならないように注意を払い、少なかった場合にはそのデータを慎重に取り扱うことで、いずれの体長推定方法を用いても適正放流サイズの一定精度を確保した検討は可能であり、また、両者間でその精度に実質的な差はないといえよう。

以上の結果から、ALCによる耳石への点状標識と一定の日数を空けて実施する多重のリング状標識の組合せで、確実に識別できる多種類の標識が可能であり、放流直前に最終標識を行うことで、再捕魚の耳石上の標識サイズから高い精度で放流時の種苗のサイズが推定できることが明らかになった。この標識を活用した標識種苗の放流・再捕調査を行うことによ

り、ニゴロブナ種苗の最適な放流サイズ・場所・時期や稚苗性付与の効果などを明らかにすることが可能となろう。

文 献

- 1) 栗田博・塚本勝巳. アリザリン・コンプレクソンによるマダイ稚仔魚の耳石標識—I. 栽培技研1987; 16: 93-104.
- 2) 栗田博・塚本勝巳. アリザリン・コンプレクソンによるマダイ稚仔魚の耳石標識—II. 栽培技研1989; 17: 115-128.
- 3) Tukamoto K. Otolith tagging of ayu embryo with fluorescent substances. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1988; 54: 1289-1296.
- 4) 塚本勝巳. 魚卵・稚仔魚の耳石標識法. 海洋と生物 1987; 9: 103-105.
- 5) Tsukamoto K, Kuwada H, Hirokawa J, Oya M, Sakiya S, Fujimoto H, Imaizumi K. Size-dependent mortality of red sea bream, *Pagrus major*, juveniles released with fluorescent otolith-tags in News Bay, Japan. *J. Fish Biol.* 1989; 35 (Suppl. A): 59-69.
- 6) Yamashita Y, Nagahora S, Yamada H, Kitagawa D. Effects of release size on survival and growth of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* in coastal waters off Iwate Prefecture, northeastern Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1994; 105: 269-276.
- 7) 相沢康, 戸田久仁雄. ワカサギのALC標識. 神奈川淡水試報1995; 31: 50-54.
- 8) 大木雅彦. ウナギ稚魚に対するアリザリン・コンプレクソンを用いた耳石標識の有効性について. 宮崎水試研報1999; 7: 42-49.
- 9) 梶山誠. アリザリンコンプレクソンを用いたナマズ *Silurus asotus* の耳石標識について. 千葉内水試研報 2000; 7: 29-33.
- 10) 山崎幸夫. ALC耳石標識を用いたスズキ稚魚の放流サイズと生残の検討. 茨城水試研報 2000; 38: 9-13.
- 11) 永山聡司, 川島時英, 庄司紀彦, 牧野直, 芝田健二, 清水利厚. クロダイ稚魚のアリザリンコンプレクソン標識手法の検討. 千葉水試研報 2001; 57: 247-249.
- 12) 片倉靖次, 桜井泰憲, 太田守信, 神正人. Oxytetracycline, Alizarin Complexone および Alizarin Red Sを用いたスケトウダラ幼魚の耳石染色実験. 水産増殖 2003; 51: 327-335.
- 13) 松村靖治. アリザリンコンプレクソン並びにテトラサイクリンによるトラフグ *Takifugu rubripes* 卵および仔稚魚の耳石標識. 日水誌 2005; 71: 307-317.
- 14) 友田努, 桑田博. pH調整したアリザリン・コンプレクソン溶液の希釈によるハタハタ稚魚の耳石標識. 日水誌 2006; 72: 76-78.
- 15) 中川雅弘, 大河内裕之, 服部圭太. Alizarin Complexoneを用いたクロソイ種苗の耳石標識試験. 水産増殖2007; 55: 253-257.
- 16) 小畑泰弘, 山崎英樹, 竹森弘征, 岩本明雄, 奥村重信, 藤本宏, 山本義久, 北田修. 異なるサイズで放流したサワラ人工種苗の資源添加効率の比較. 日水誌 2007; 73: 55-61.
- 17) 草加耕司. オニオコゼ稚苗に適した標識法の検討. 岡山水試報 2008; 23: 29-34.
- 18) 塚本勝巳. 魚類の初期減耗過程とそのメカニズムに関する標識放流実験. 「魚類の初期発育」(田中克編) 恒星社厚生閣, 東京. 1991; 105-118.
- 19) Mosegaard H, Svedäng H, Taberman K. Uncoupling of somatic and otolith growth rates in arctic char (*Salvelinus alpinus*) as an effect of differences in temperature response. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1988; 45: 1514-1524.
- 20) Reznik D, Lindbeck E, Bryga H. Slower growth results in larger otoliths: An experimental test with guppies (*Poecilia reticulata*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1989; 46: 108-112.
- 21) Secor DH, Dean JM. Somatic growth effects on the otolith-fish size relationship in young pond-reared striped bass, *Morone saxatilis*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1989; 46: 113-121.
- 22) Wright PJ, Metcalfe NB, Thorpe JB. Otolith and somatic growth rates in Atlantic salmon parr, *Salmo salar* L: evidence against coupling. *J. Fish Biol.* 1990; 36: 241-249.
- 23) Mugiya Y, Tanaka S. Otolith development, increment formation, and an uncoupling of

- otolith to somatic growth rates in larval and juvenile goldfish. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1992; 58: 845-851.
- 24) Takasuka A, Oozeki Y, Aoki I, Kimura R, Kubota H, Sugisaki H, Akamine T. Growth effect on the otolith and somatic size relationship in Japanese anchovy and sardine larvae. *Fish Sci.* 2008; 74: 308-313.
- 25) ホンモロコ・ニゴロブナの雌化技術開発に関する研究. 昭和63年度地域バイオテクノロジー研究開発促進事業報告書, 滋賀県水産試験場. 彦根. 1989.
- 26) 藤原公一. アリザリン・コンプレクソンを用いたニゴロブナ, *Carassius auratus grandoculis* の耳石への標識装着条件. 水産増殖 1999; 47: 221-228.
- 27) 北田修一, 岸野洋久, 平松一彦. 2つの同時放流群の死亡係数による種苗性の差の検定. 日水誌 1993; 59: 269-272.
- 28) Kitada S, Hiramatsu K, Kishino H. Estimating mortality rates from tag recoveries: incorporating over-dispersion, correlation, and change points. *ICES Journal of Marine Science* 1994; 51: 241-251.
- 29) 北田修一. 「栽培漁業と統計モデル分析」共立出版, 東京. 2001.

第4章 成長および流水トレーニングに伴うニゴロブナ仔稚魚の遊泳速度の変化

ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の資源回復を進めるため、1983年から琵琶湖栽培漁業センターが中心となって種苗放流技術を改善しつつ、ニゴロブナの放流事業を実施している。¹⁾ 著者らは、この事業を効果的に進めるため、種苗の放流サイズや中間育成技術などについて研究してきた。

効果的な放流サイズを検討するうえで、成長に伴う遊泳速度の変化の把握は重要である。魚の遊泳速度は、無気呼吸によって20秒以内に限り泳げる最大速度である突進速度 (burst speed)、20秒から200分の間泳げ、最後は疲労する prolonged swimming speed および疲労することなく200分以上泳げる持続遊泳速度 (sustained swimming speed) に大別される。²⁾ 一般には、1～数秒間持続する最大遊泳速度と定義される突進速度³⁾ と prolonged swimming speed のうち測定時間を60分間とした最大遊泳速度⁴⁾ (以下、巡航速度: cruising speed) が測定されることが多い。しかし、これまで本種の遊泳速度に関する報告はない。近縁のフナ属では遊泳速度と遊泳時間の関係、⁵⁾ 200分の遊泳で50%の個体が疲労する遊泳速度、⁶⁾ 突進速度、⁷⁾ および巡航速度⁸⁾ が報告されているものの、魚体サイズ毎に調べられたものではなく、これらからニゴロブナ種苗における放流サイズを検討するには問題がある。そこで、著者らは、仔魚から稚魚に至る各ステージにわたって、魚体サイズ毎に本種の突進速度と巡航速度を測定し、成長に伴う遊泳能力の変化を評価した。また、流水中で飼育する、いわゆる流水トレーニングが本種の両遊泳速度におよぼす影響とこのトレーニングを経た種苗の放流効果について検討した。

材料および方法

供試魚 滋賀県水産試験場(以下、滋賀水試)で養成したニゴロブナ成魚の飼育池へ人工産卵囊(キンラン、川島商事)を浮かべて採卵し、1分に曝気した地下水を流した水槽内で卵管理して1991年5月13日にふ化仔魚を得た。この仔魚約5,000尾を4.0×2.0×水深0.7mのコンクリート池に收容し、少量の地下水を注入して通気しながらツボウムシ *Brachionus calyciflorus*

や タマミジンコ *Moina macrocopa* などの餌料や配合飼料(餌付けA、科学飼料研究所)を与えて110日間飼育し、この間に適宜取り上げて供試した。飼育期間中は照度と水温の調整は行わず、水温は16.0～21.3℃であった。

魚体サイズ毎の遊泳速度の測定 室内に設置した遊泳速度測定装置(Fig. 4.1)を用いて、魚体サイズ毎に突進速度と巡航速度を測定した。測定の数時間前には供試魚を屋外の養成池から貯水槽(A₁, A₂)に浮かべた半球状のステンレス容器(ボウル)へ移し、測定時の水温や照度などに馴化させた。測定は、供試魚を1尾ずつ透明アクリル管(B₁, B₂)に收容して行った。この收容は、B₁, B₂を水槽(D₁, D₂)との接合部分から外し、キャップ(C₁, C₂)部分を水面上へ出した状態でC₁, C₂を外し、そこからB₁, B₂の中へ供試魚を水とともに静かに流し込んで行った。その後、直ちにC₁, C₂を取り付け、B₁, B₂を水から出すことなく所定の位置に設置した。

突進速度は、毎秒当たりの遊泳距離(以下、ABS, mm/s)およびABSを標準体長(以下、体長またはSL, mm)で除して求めた対体長比(以下、RBS, SL/s)で示した。突進速度の測定は、可変抵抗器(E)のダイヤルを操作して供試魚を入れたB₁内に水流を発生させて行った。流速を発生させると供試魚は水流に抗して泳ぎはじめ、次第に流速を上げると、流れに抗しきれなくなつてB₁の後方へ流されはじめる、この時点でEのダイヤルを微調整して約1秒間、供試魚が水流に抗して泳げる最大流速でそのダイヤルを固定し、オーバーフロー(F₁)する水量をメスシリンダーで測定した。この流速は1秒間当たりのオーバーフロー水量をB₁の内断面積で除して求め、それを突進速度とした。供試魚の体長は、突進速度の測定後に計測した。突進速度測定時の水温は19.3～21.8℃、溶存酸素濃度は8.6～9.0 mg/L であった。

巡航速度は、毎秒当たりの遊泳距離(以下、ACS, mm/s)およびACSを体長(mm)で除して求めた対体長比(以下、RCS, SL/s)で示した。巡航速度の測定は、1回の実験に装置を6セット用いた。予備実験でおおまかに巡航速度を測定し、その値を参考に、予めコック(G)を調整してB₂内の流速を約5%ずつ変えた6通りの水流を発生させた。この流速は、突進速度の測定と同様に、オーバーフロー(F₂)する1秒間当たりの水量をB₂の内断面積で除して求めた。供試魚は、1回の

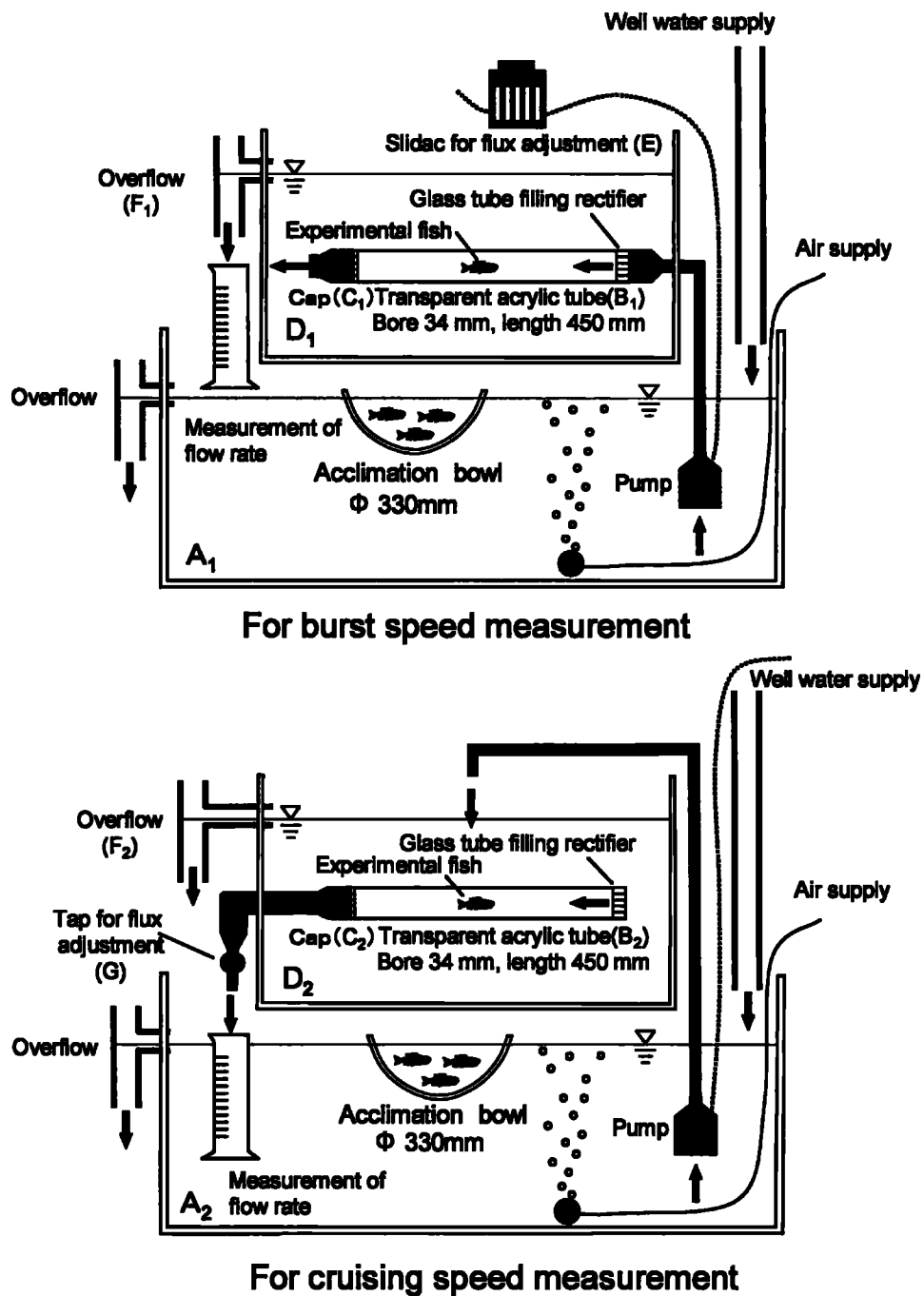


Fig. 4.1 Illustration of the apparatuses used to measure swimming speeds of *nigorobuna* *Carassius auratus grandoculis*. Arrows indicate direction of water flow. Refer to the text for the letters of A to G.

測定にほぼ同じサイズのものを6尾用い、1尾ずつB₂内に収容した。その後60分間遊泳させ、流されずに泳ぎ続けた最高流速を巡航速度とした。この体長には、巡航速度測定後に計測した供試魚6尾の平均体長

を用いた。巡航速度測定時の水温は19.2～20.1℃、溶存酸素濃度は8.8～9.0 mg/Lであった。

トレーニングによる遊泳速度の変化の検討 トレーニングによる遊泳速度の変化を調べるために

Fig. 4. 2に示した水槽を2セット準備し、一方は流水飼育するトレーニング区、他方は止水飼育する非トレーニング区とした。両水槽へは体長 22.6 ± 1.9 mm (平均値 $\pm$ SD)の供試魚をそれぞれ400尾ずつ収容した。トレーニング区の供試魚には、トレーニングを開始する直前に藤原³⁾の方法で1重のALC耳石標識を付けた。飼育は、タマミジンコなどの餌料を毎朝9時に与えて、次のとおり行った。トレーニング区では、ポンプで水流を10日間発生させ、その後12日間はポンプを止めて止水とした。水流発生時の水槽内の流速は100~250 mm/s(トレーニング開始時の供試魚の体長の4.4~11.1倍/s)で、内側に比べて外側で速かった。上下の流速には差がなかった。なお、トレーニング区の供試魚が全て水流に抗して遊泳できる訳で

はなく、一部は流されながら遊泳した。非トレーニング区では、ポンプを作動させずに22日間連続して止水とした。飼育期間中の水温は23.4~27.6℃、溶存酸素濃度は8.3 mg/Lであった。飼育開始時と5, 10, 16および22日目に、両区の供試魚の突進速度(RBS)と巡航速度(RCS)を測定した。RBSは前述の方法で測定した。RCSは1回の測定にFig. 4. 1に示した装置1セットと供試魚1尾を用い、60分毎にB₂内の流速を約8%ずつ上昇させて、供試魚が水流に抗して泳ぎきれなくなって流されはじめるまでの時間を記録してBrett⁴⁾の方法で、次式により求めた。

$$RCS = (V + t/3600 \times \Delta V) / SL$$

ここで、Vは60分間(3600 s)遊泳できた最大流速(mm/s)、 ΔV はVから増加させた流速(mm/s)、tはV+

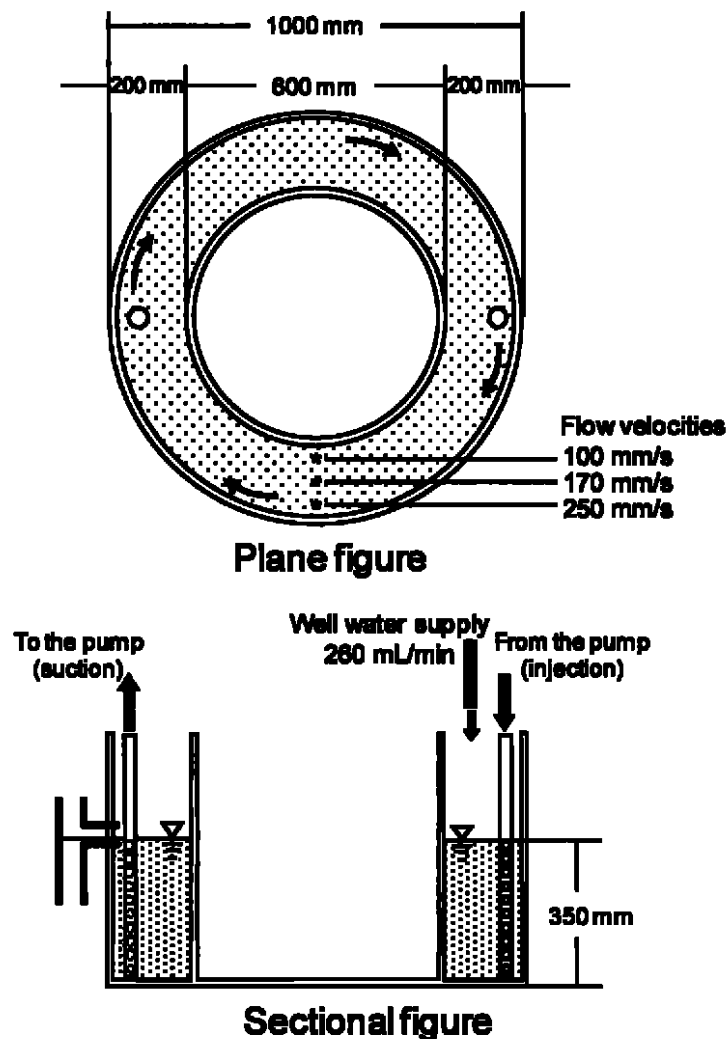


Fig. 4.2 Illustration of the annular tank used to rear nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* in running-water. The current was generated by injecting the water sucked up by the pump. The control fish were reared in the still condition in an identical annular tank but without an induced water flow.

ΔVの流速に供試魚が抗しきれなくなつて流されはじめるまでの時間(s)を示す。これらの遊泳速度の測定後には、供試魚の体長を計測した。遊泳速度測定時の水温は19.3~20.1℃、溶存酸素濃度は9.0 mg/Lであった。

トレーニング魚の放流効果の評価

1. 池中実験 オオクチバス *Micropterus salmoides* (体長106~235 mm)を1~2尾収容したコンクリート池(5.0×8.0×水深1.0m, 3池)に網イケス(1.0×1.0×深さ0.7m)を設置し、その中にトレーニング開始10日後の上記のトレーニング区と非トレーニング区のニゴロブナをそれぞれ10尾ずつ収容した。1時間の馴致後にイケスからそれらを池内へ開放した。その24時間後にコンクリート池の水を引かせ、生残した供試魚を回収し、耳石のALC標識の有無を藤原⁹⁾の方法で確認した。

2. 琵琶湖への種苗放流実験 琵琶湖栽培漁業センターから提供された1992年6月11日産卵のニゴロブナ卵を、「トレーニング群」と「非トレーニング群」の2群に分けて、産卵翌日に滋賀水試内の琵琶湖水を流したコンクリート池に設置した網イケスにそれぞれ収容し、水温18.7~19.7℃で管理した。卵は6月15日にはふ化した(この日を0日齢とする)。その後、これらふ化仔魚に前述の餌料および配合飼料を与えて7月17日までの32日間飼育した。飼育期間中の水温は19.0~23.4℃であった。この間、両群を区別できるように、藤原¹⁰⁾の方法で、トレーニング群には8日齢、16日齢、24日齢および32日齢の時点で合計4重のALC標識を付けた。非トレーニング群には卵段階での点状とふ化後に同様の4重のALC標識を付けた。標識中は無給餌とした。また7月9日から16日までの7日間は、トレーニング群は水中ポンプで水流を発生させた円筒形水槽(水量4.0 m³, 直径2.4m, 琵琶湖水を2 L/min 注入し中央部から排水)で飼育した。この流水トレーニング開始時の尾数は約62,000尾、体長は10.6±1.5mmであった。同水槽内の流速は110~340 mm/s(中心~最外部、流水トレーニング開始時の供試魚の体長の10.3~31.8倍/s)であった。流速には上下で差はなかった。なお、流水トレーニング中の種苗の多くは、水流に流されながら遊泳した。このトレーニング期間中、非トレーニング群(7月9日時点で約33,000尾、体長10.8±1.4mm)はイケス内での飼育を継続した。

給餌は両群ともそれまでと同様に行った。7月17日には、生産されたトレーニング群49,100尾、非トレーニング群25,800尾を混合した後、酸素ガスを満たした多数のビニール袋に分けて収容し、滋賀県近江八幡市牧町の琵琶湖岸(琵琶湖北湖盆東岸)に自生するヨシ帯まで自動車で運搬して、その中央部に放流した。同年10月15日から翌年4月6日(放流後90~263日)には、琵琶湖(主湖盆の北湖)で小型機船底曳き網を用いてニゴロブナ当歳魚を21,392尾採集した。その標本を冷凍保存し、後日解凍して体長と体重を測定した後、藤原¹⁰⁾の方法でALC標識を確認して放流魚と天然魚を判定し、さらに放流魚の耳石標識からトレーニング群と非トレーニング群を識別した。

統計処理 2群の体長、体重および遊泳速度の平均値の差は、仮説 H_0 :「2群の母分散は等しい」をF検定により検定し、 $P>0.05$ で等分散とみなされた場合はスチューデントのt検定で、そうでない場合にはウェルチのt検定で検定した。個々の池中実験における2群の生残率の差はフィッシャーの直接確率計算法で、全ての池中実験の結果を一括した生残率の差はマンテル・ヘンツェル法で検定した。琵琶湖への種苗放流実験における2群の再捕率(放流尾数に対する再捕尾数の割合)の差は、二項分布の正規近似による比率の差検定で検定した。しかし、同時同所に N_1, N_2 を放流した2群の再捕系列は正の相関をもつことが知られており、¹¹⁻¹³⁾ これを無視すると検定統計量を過大評価することになる。このため、次式で検定統計量 z を計算し、これらの相関を考慮した場合の2群の再捕率の差の検定も行った。

$$z = \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{\sqrt{\hat{V}(\hat{p}_1) + \hat{V}(\hat{p}_2) - 2\widehat{Cov}(\hat{p}_1, \hat{p}_2)}}$$

なお、ここで再捕率の推定値 $\hat{p}_1$ と $\hat{p}_2$ の分散は、それぞれ

$\hat{V}(\hat{p}_1) = N_1 \hat{p}_1 (1 - \hat{p}_1)$, $\hat{V}(\hat{p}_2) = N_2 \hat{p}_2 (1 - \hat{p}_2)$ で示される。このデータから共分散 $\widehat{Cov}$ の推定は困難であるため、ここでは最も影響が大きい場合、すなわち相関係数を1と仮定して、

$$\widehat{Cov}(\hat{p}_1, \hat{p}_2) = \sqrt{N_1 \hat{p}_1 (1 - \hat{p}_1) N_2 \hat{p}_2 (1 - \hat{p}_2)} \text{ と}$$

して z を計算した。

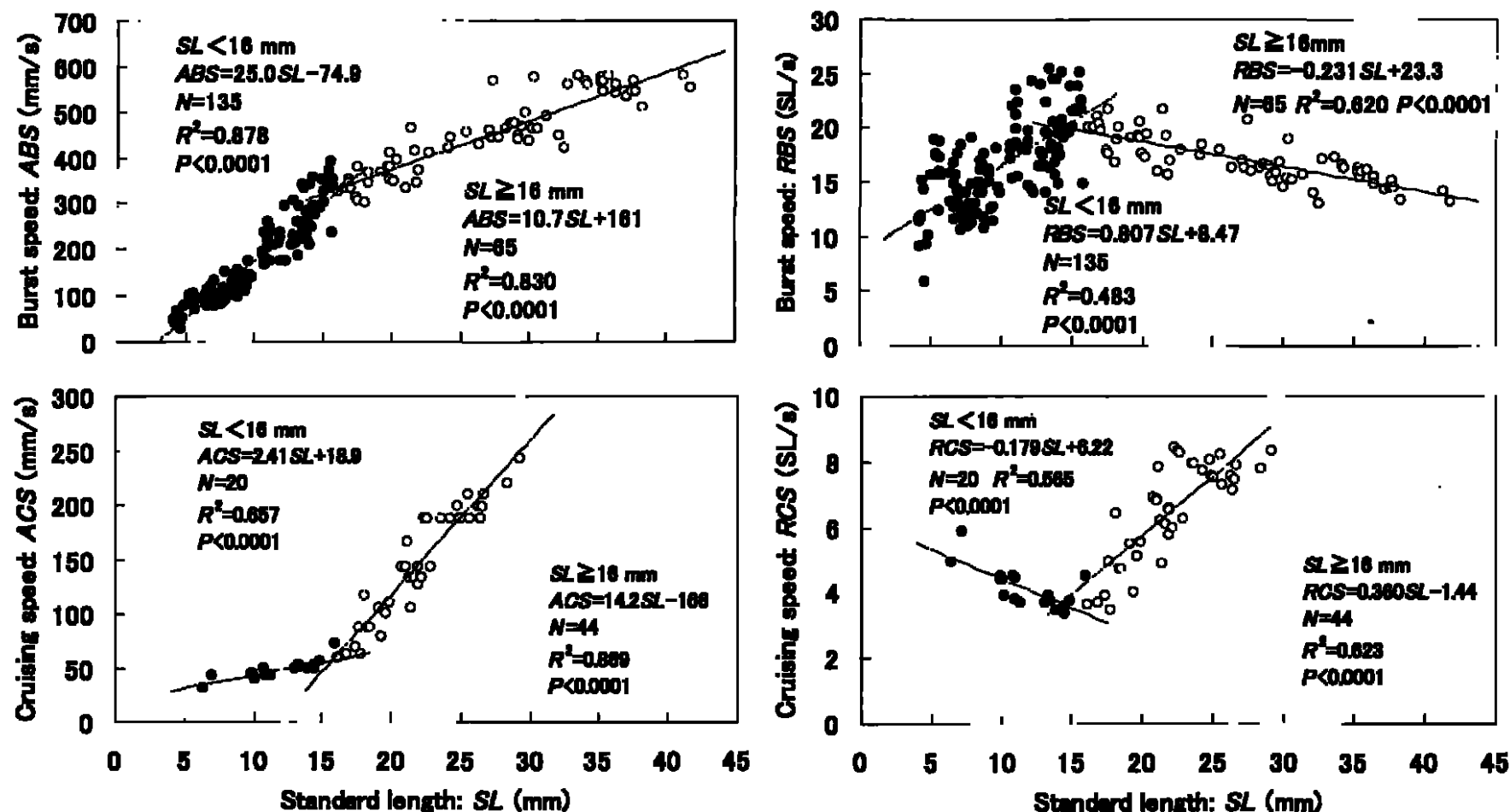


Fig. 4.3 Relationships between standard length and swimming speed of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. Solid circles: SL < 16 mm, open circles: SL ≥ 16 mm.

結 果

成長に伴う遊泳速度の変化 魚類の突進速度は水温の影響を受けないが、巡航速度などの持続的な遊泳速度は水温の影響を受けることが知られており、^{3, 4, 14, 15)} 魚のサイズ毎に巡航速度を比較する場合には測定時の水温を揃える必要がある。本研究では、巡航速度を 19.2~20.1℃のほぼ一定の水温のもとで測定したため、それぞれの測定値を直接比較することができる。そこで、ニゴロブナの体長と測定された各遊泳速度との関係を Fig. 4.3 に示した。ニゴロブナは、体長が概ね 16 mm まで成長すると稚魚期を迎えることが確認されている。¹⁶⁾ ABS は体長約 16 mm までは体長に比例して大きく増加した(回帰直線の傾き 25.0)が、それ以降は増加率が低下した(同 10.7)。また、RBS もその体長までは体長に比例して増加した(同 0.807)が、それ以降は減少に転じた(同 -0.231)。一方、ACS は体長約 16 mm までは増加率は低かった(同 2.41)が、その体長を超えると急激に増加した(同 14.2)。RCS はその体長まで減少傾向にあった(同 -0.179)が、それ以降は増加に転じた(同 0.360)。このように、稚魚期に達する体長約 16 mm までは突進速度が増加し、それ以降は巡航速度が急激に増加する関係にあった。

成長に伴う遊泳能力の変化 Tsukamoto *et al.*⁵⁾ は複数種の淡水魚において、それらの遊泳速度(1 秒間当たりの最大遊泳距離)の対数と遊泳時間の対数とは一回帰する関係にあることを報告している。この関係は次式で表すことができる。

$$SS = a \cdot t^b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、SS(mm/s)は最大遊泳速度、t(s)はその速度で遊泳可能な最大時間、*a*と*b*は魚種や魚体サイズなどに特有の定数である。また、魚の遊泳能力の

指標となる SAI(swimming ability index)⁵⁾は、遊泳速度を 0 秒から巡航速度を測定した 60 分(3600s)までの間で積分する

$$SAI = \int_0^{3600} SS dt \times 10^{-5} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表すことができる。そこで、Fig. 4.3に示したABSとACSを測定した体長約6mmから30 mmまでのニゴロブナに対して、体長階級毎にSAIを次のとおり計算した。まず、体長 1 mm 区間毎に体長、ABSおよびACSの平均値を求めた。その *i* 番目の体長階級毎に、突進速度の測定時間である1秒とABS_{*i*}、および巡航速度の測定時間である3600秒とACS_{*i*}を式(1)に代入して、*a*と*b*、を計算した。これらの値を用いて、式(1)と(2)から Table 4.1に示した体長階級毎のSAIを計算した。また、体長とSAIおよび体長とSAIを体長で除して求めた相対SAIとの関係をFig. 4.4に示した。

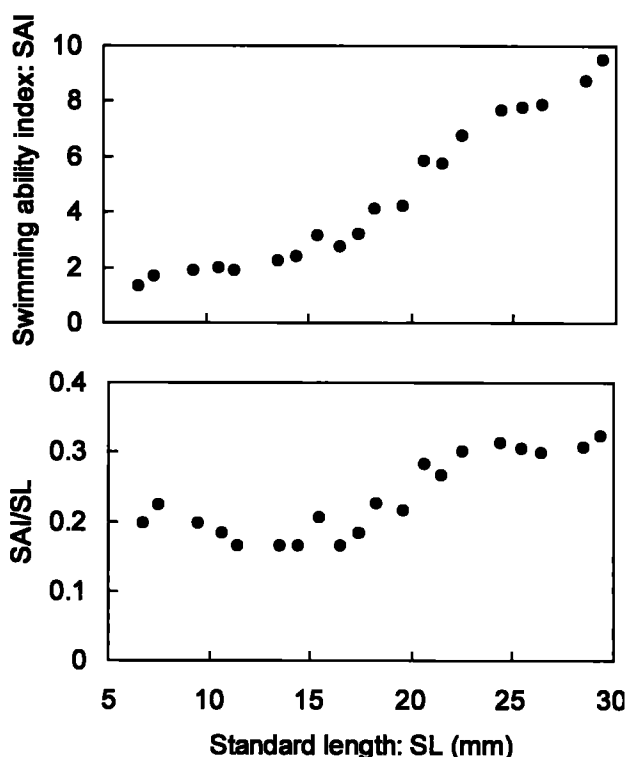


Fig.4.4 Relationship between standard length and swimming ability index:SAI, and relative SAI:SAI/SL of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. The relationship between swimming speed (SS) and swimming time (t) was expressed by the following formula: $SS = at^b$, where *a* and *b* are constants specific to body size of nigorobuna. SAI was defined as follows:
 $SAI = \int_0^{3600} SS dt \times 10^{-5}$

Table 4.1 SAI of each standard length of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*

Mean standard length	Burst speed(ABS) ^{*1}		Cruising speed(ACS) ^{*1}		Constants ^{*2}		SAI: swimming ability index ^{*3}
	Mean	N	Mean	N	a	b	
mm	mm/s		mm/s				
6.7	95.7	16	31.9	1	96	-0.134	1.33
7.5	97.9	17	41.9	1	98	-0.104	1.68
9.4	137.9	11	44.5	2	138	-0.138	1.86
10.7	195.9	6	44.5	5	196	-0.181	1.96
11.4	218.8	10	41.9	1	219	-0.202	1.89
13.6	257.1	17	49.6	5	257	-0.201	2.23
14.4	295.7	9	51.8	4	296	-0.213	2.37
15.4	330.0	10	71.6	1	330	-0.187	3.17
16.6	338.4	4	60.1	2	338	-0.211	2.74
17.5	333.4	4	72.3	3	333	-0.187	3.20
18.2	338.6	3	96.6	3	339	-0.153	4.10
19.6	376.8	5	98.3	4	377	-0.164	4.23
20.6	371.6	2	143.3	3	372	-0.116	5.84
21.5	385.2	5	139.6	9	385	-0.124	5.73
22.5	408.3	1	167.5	5	408	-0.109	6.77
24.4	434.3	2	191.0	3	434	-0.100	7.64
25.4	456.8	1	192.8	4	457	-0.105	7.76
26.4	429.1	1	198.4	4	429	-0.094	7.88
28.6	472.9	3	220.4	1	473	-0.093	8.75
29.4	463.7	4	242.4	1	464	-0.079	9.48

*1: Measurement time: 1s for burst speed, 3600s for cruising speed.

*2: $SS = a \cdot t^b$ where SS: swimming speed in mm/s, t: swimming time in s.*3: $SAI = \int_0^{max} SS dt \times 10^{-3}$.

SAIは稚魚期に達する体長約16 mmまでは成長に伴い緩慢に上昇したが、それ以降は大きく上昇する傾向にあった。一方、体長の大小に関係なく遊泳能力の指標になると考えられる相対SAIは、体長約16 mmまでは概して低下する傾向にあったが、同体長から体長約24mmまでは上昇傾向を示し、それ以降は横ばいになった。

トレーニングによる遊泳速度の変化 Fig. 4.5にトレーニング区と非トレーニング区のニゴロブナの遊泳速度の変化と体長の推移を示した。RBSは、トレーニングを開始して5日後の測定では、トレーニング区が非トレーニング区に比べて有意に大きかった($P=0.040$)。さらに5日間(通算10日間)のトレーニングを経てその差は一層広がった($P=0.002$)。10日目以降は、トレーニング区の水流を止めて止水条件でさらに継続飼育したところ、飼育16日目の測定では、依然としてRBSには両区間で有意差がみられた($P=0.017$)。しかし、飼育22日目の測定では、両区間で有意差がみられなくなった($P=0.519$)。この突進速

度の測定では、平均的なサイズの供試魚を採取できず、供試魚の体長は16日目までの測定では日数を経るに伴い大きくなったものの、22日目の測定では16日目よりもやや小さくなった。しかし、いずれの日の測定でも、供試魚の体長には両区間で有意差はみられなかった($P=0.140 \sim 0.712$)。

RCSには、同様のトレーニングを経ても両区間で有意差はみられなかった($P=0.341 \sim 0.886$)。また、この巡航速度の測定でも、平均的なサイズの供試魚を採取できず、日数の経過とともに体長が大きくなる傾向はみられなかった。しかし、いずれの日の測定でも、供試魚の体長には両区間で有意差はみられなかった($P=0.180 \sim 0.882$)。

トレーニング魚の放流効果の評価

1. 池中実験 オオクチバスのいるコンクリート池に収容したトレーニング区と非トレーニング区のニゴロブナの24時間後の生残率をTable 4.2に示した。3回の実験とも、いずれも生残率は非トレーニング区よりもトレーニング区のニゴロブナの方が高い値で

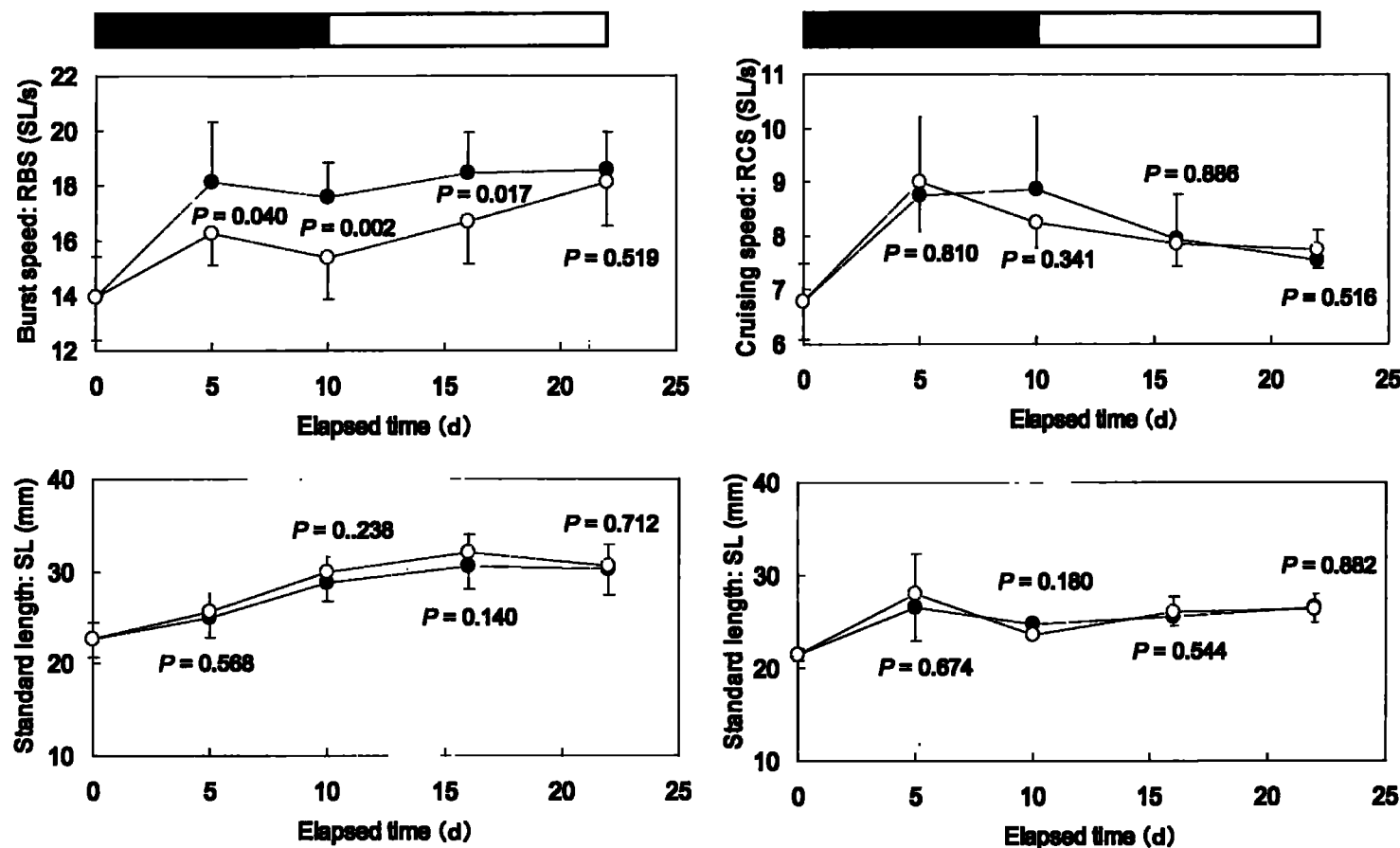


Fig. 4.5 Transition of swimming speed (upper traces) and standard length (lower traces) of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* reared in running water (solid circles: trained group) and in still water (open circles: untrained group). Uppermost rectangles show the training process of the trained group (solid: in running water, open: in still water). Fish of untrained group were reared throughout in the still water. Vertical bars indicate standard deviations and *P*-values refer to significant levels of difference in swimming speed between the two groups.

Table 4.2 Comparison of survival rates within 24 hours between trained and untrained nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* released in the ponds^{*1} where largemouth bass exist

Trial number	The number of largemouth bass ^{*2} (): standard length	Survival rates of nigorobuna		Fisher's exact probability test	Mantel-Haenszel procedure
		Trained fish ^{*3}	Untrained fish ^{*3}		
		%	%		
1	2 (108 mm, 106 mm)	50	30	$P=0.325$	
2	1 (192 mm)	40	30	$P=0.500$	$P=0.186$
3	2 (200 mm, 235 mm)	80	60	$P=0.314$	

*1: 5.0×8.0×depth 1.0 m ponds made of concrete.

*2: *Micropterus salmoides*.

*3: Ten fish were examined respectively. Trained fish were reared for ten days in running water after ALC marking, and untrained fish were reared in still water for the same number of days. Refer to the text for ALC marking.

あったが、両者間に有意差はみられなかった ($P=0.314 \sim 0.500$)。また、3回の実験結果を一括しても有意差はみられなかった ($P=0.186$)。

2. 琵琶湖への種苗放流実験 琵琶湖へ放流したトレーニング群と非トレーニング群の再捕調査結果を Table 4.3 に示した。両群の放流時の体長や再捕時の体長と体重には有意差はみられなかった (それぞれ $P=0.641$, $P=0.229$, $P=0.146$)。再捕尾数および再捕率は、トレーニング群では17尾, 0.096%, 非トレーニング群では28尾, 0.109%となり、両群間の再捕率には有意差はみられなかった ($P=0.680$)。また、再捕率の相関を考慮した検定統計量は、 $z = 0.00066$ ($P=0.500$) となり、この場合にも両群の再捕率には差がみられなかった。

ニング群では28尾, 0.109%となり、両群間の再捕率には有意差はみられなかった ($P=0.680$)。また、再捕率の相関を考慮した検定統計量は、 $z = 0.00066$ ($P=0.500$) となり、この場合にも両群の再捕率には差がみられなかった。

Table 4.3 Comparison of recapture rate and growth between trained and untrained nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* released in Lake Biwa

ALC mark type ^{*1}	Released fish			Recaptured fish ^{*2}			
	Standard length ^{*3}		Number	Standard length ^{*4}		Body weight ^{*5}	Recapture rate ^{*6}
	Mean ± SD			Mean ± SD		Number	
	mm			mm		g	%
Trained fish ^{*7}	4 rings	14.6 ± 2.9	49,100	88.6 ± 8.2	23.2 ± 6.6	47	0.096
Untrained fish ^{*7}	Core and 4 rings	14.8 ± 2.7	25,800	91.5 ± 12.1	26.2 ± 11.0	28	0.109

*1: Refer the text for ALC marking.

*2: These fish were released in Lake Biwa on July 17, 1992, and recaptured from 90 to 263 days after release by trawl net.

*3: No significant difference ($P=0.641$) by Student's *t*-test.

*4: No significant difference ($P=0.229$) by Student's *t*-test.

*5: No significant difference ($P=0.146$) by Student's *t*-test.

*6: Number of recaptured fish / number of released fish×100. No significant difference by a test of two proportions under normal approximation taking the correlation ($P=0.300$) and no correlation ($P=0.680$) between two groups into account.

*7: Trained fish were reared for seven days in running water, and untrained fish were reared in still water for the same number of days.

考 察

ニゴロブナの巡航速度は、体長約16 mmまではACSの増加率が低く、RCSはむしろ減少する傾向にあったが、その体長を超すとACSとRCSともに急激な増加に転じた(Fig. 4. 3)。魚の持続的な遊泳には血合筋が使われることが知られている。²⁵⁾ また、その際、酸素の供給と運動代謝物などの排出が円滑に行われる必要があるとされている。^{18, 19)} このため巡航速度が増加するうえで、血合筋や呼吸器官、循環器官などの発達が必要といえる。藤原¹⁶⁾ は孵化直後からニゴロブナを飼育し、体長が概ね16 mm に達すると鰭条が定数になって稚魚期を迎え、骨格がほぼ完成するとともに、呼吸、循環、造血、排泄などを司る各器官と血合筋や中間筋が急速に発達することを観察した。今回測定した体長約16 mm を超えたニゴロブナの巡航速度の急激な増加には、運動や生理機能を司るこれら各器官や鰭、骨格、筋肉の発達や完成が深く関係しているといえる。

また、突進速度は、体長約16 mmまではABSとRBSがともに増加傾向にあったが、その体長を超すとABSは増加が緩慢になり、RBSは減少に転じた(Fig. 4. 3)。マダイ *Chrysophrys major*²⁰⁾ やクロダイ *Acanthopagrus schlegelii*²¹⁾ などでは、仔魚期から稚魚期への移行時に、鰭を含む各種器官などが分化して機能的に発達し、それに伴い遊泳速度が増加することが報告されている。ニゴロブナの場合も同様に、体長約16mmまでは、各器官などの分化・発達に伴い突進速度が増加したものと思われる。一方、稚魚段階まで成長した多くの魚種では、体サイズの増加とともにABSが増加するがRBSは減少することが知られている。¹⁹⁾ ニゴロブナに近縁なキンギョ *C. auratus auratus* (体長60~110 mm)²²⁾ やギンブナ *C. a. langsdorfi* (体長50~110mm)⁷⁾ でもこのことが確認されており、体長約16 mmを超えたニゴロブナもこれらと同様であった。

マダイでは、稚魚期への移行に伴う遊泳能力の増加が天然水域での行動範囲の拡大や着底水域への能動的な移動と密接な関係を持つと考えられている。

²³⁾ また、着底期直前に遊泳速度(対全長比速度)は最大値を示し、その後は低下することが知られている。

²⁴⁾ レッドドラム *Sciaenops ocellatus* では、発育初期は外洋生活を送り、成長に伴い巡航速度(測定時間2分)が増加するが、次第にその増加は緩慢になって着

底生活へ移行することが知られている。²⁵⁾ このように、魚類の遊泳速度と生態の変化とは密接に関係する。ニゴロブナの場合、琵琶湖沿岸のヨシ帯に放流された仔魚は、その後もヨシ帯内に生息するが、体長が概ね16 mm を超えた個体からヨシ帯外へも分布を広げはじめ、ヨシ帯先端に設置したトラップで採集されるようになる^{26, 27)}。ニゴロブナにとってこの体長は、巡航速度を急激に増して生息範囲を拡大しはじめる生態面での大きな転換点でもある。

また、魚類の遊泳能力の指標として用いられるSAI⁵⁾ は、ニゴロブナでは体長の増加とともに上昇し、体長約16 mmを超えるとその上昇率が増した(Fig. 4. 4)。さらに、SAIを体長で除して求めた相対SAIは、体長の大小間で遊泳能力を比較できる指標と考えられるが、この値は体長約16 mm を超えると初めて上昇に転じた(Fig. 4. 4)。このように、ニゴロブナにとってこの体長は、巡航速度の増加だけではなく、遊泳能力自体が飛躍的に向上する転換点でもある。これらのことから体長約16 mmは、ニゴロブナの種苗放流を検討するうえで、重要な放流基準の一つになるといえる。

これまで、魚類の流水トレーニングに関しては、サケ科魚類を中心に研究されており、同トレーニングは遊泳速度に影響を与えないという報告がある一方、遊泳速度が向上するとの報告もある。²⁸⁾ ニジマス *Oncorhynchus mykiss* の稚魚(体長60~70mm)を流水中で飼育すると、赤筋に対する白筋の割合が増え、酸素消費量が減少して、非常に速い流速中での遊泳を維持できる時間が増加することが報告されている。²⁹⁾ これは突進速度の向上と解釈することができる。また、ニジマス1歳魚を流水トレーニングすると、有酸素遊泳力、すなわち巡航速度が向上することが報告されている。³⁰⁾ ニゴロブナの場合、流水トレーニングにより、突進速度はトレーニング開始5日後に非トレーニング区に比べて有意に増加し、10日後にはその差が一層広がった(Fig. 4. 5)。また、滋賀水試内のコンクリート池と琵琶湖(近江八幡市牧町沿岸)にそれぞれ設置した網イネスで養成したニゴロブナの突進速度を測定したところ、Table 4. 4に示したように、琵琶湖内で養成したニゴロブナの突進速度は、コンクリート池で養成したニゴロブナに比べて有意に大きかった(ABSでは $P=0.044$, RBSでは $P=0.024$)。これは、琵琶湖内では波浪などにより絶えず水が動揺した状

Table 4.4 Comparison of burst speed between nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* reared in concrete pond and in Lake Biwa

Setting place of the fish cage	N	Standard length: SL ^{*1}			Burst speed: ABS ^{*2}			Burst speed: RBS ^{*3}		
		Mean	±	SD	Mean	±	SD	Mean	±	SD
		mm			mm/s			SL/s		
In concrete pond	10	12.1	±	0.8	207.0	±	37.0	17.3	±	4.0
In Lake Biwa	10	11.5	±	0.7	251.2	±	52.3	22.0	±	4.6

*1: No significant difference ($P=0.067$) by Student's t -test.

*2: Significant difference ($P=0.044$) by Welch's t -test.

*3: Significant difference ($P=0.024$) by Welch's t -test.

態にあり、それがトレーニング効果に繋がったと解釈される。

一方、巡航速度は流水トレーニングにより増加しなかった (Fig. 4.5)。先に述べたように、巡航速度の増加には血合筋や呼吸器官、循環器官などの発達が必要と考えられるが、このトレーニングに供した魚は、稚魚期に達して間もない段階であり、筋肉やこれら器官の発達が十分でなく、巡航速度の増加には繋がらなかったものと考えられる。

このようにニゴロブナ種苗に対する流水トレーニングの効果は、捕食者からの逃避に関係すると考えられる突進速度の向上として現れるのが特徴的であった。しかし、全国の内水面において水産資源への食害が大きな問題になっているオオクチバス³¹⁾を収容した実験池にトレーニング魚と非トレーニング魚を放ったところ、24時間後の両者の生残率には有意差がみられなかった (Table 4.2)。また、琵琶湖へ同様の種苗を放流し、その90~263日後までの生残状況を比較したところ、やはり両者間で有意差がみられなかった (Table 4.3)。キンギョを餌として与え、それを捕食する時の全長170mmのオオクチバスの最大遊泳速度は、5.8 TL/s (対全長比速度)、すなわち986 mm/sとなることが報告されている。³²⁾ さらに大きなサイズのオオクチバスは、一層大きな速度で泳ぐことが可能と考えられる。それに対して、稚魚期に達した体長16~30mmのニゴロブナのABSは332~482mm/s (Fig. 4.3)であり、流水トレーニングによってRBSは約10%増加する (Fig. 4.5)ため、このトレーニングを経た同サイズのニゴロブナのABSは365~530mm/sと計算される。しかし、非トレーニング魚とトレーニング魚ともに、突進速度はオオクチバスの餌を捕食するときの遊泳速度に比べるとはるかに小さく、これ

ら種苗は、オオクチバスに直面した場合、いずれも被食は免れにくいと思われる。このため、オオクチバスの生息密度が高い現状の琵琶湖では、流水トレーニングや湖中での種苗生産・中間育成による突進速度の増加は、種苗の放流効果の向上には貢献しないと考えられる。

スジアラ *Plectropomus leopardus* をサンゴ礁域に設置した囲い網の中で7日間馴致した後に放流すると、直接放流した種苗に比べて環境への順応が速いと判断され、被食頻度が低下傾向にあることが示されている。³³⁾ また、マダイでは、学習によって捕食者回避能力が強化され、被食頻度を低減できる可能性が示されている。³⁴⁾ ニゴロブナ種苗においても、放流効果を高めるうえで突進速度を増加させるだけではなく、放流に当たり、このように環境への馴致や捕食者回避の学習などについて研究する価値はあろう。また、琵琶湖ではオオクチバスなど外来性肉食魚の大規模な駆除事業が進められており、³⁵⁾ 今後もこのような漁場環境を改善する事業の推進が不可欠である。一方、オオクチバスなどが生息しない沖合へのニゴロブナ種苗の放流技術の検討も重要と思われる。

文 献

- 1) ニゴロブナ. 昭和58(1983)年度~平成17(2005)年度種苗生産放流事業結果概要, 財団法人滋賀県水産振興協会, 草津, 2007; 2-17.
- 2) Wolter C, Arlinghaus R. Navigation impacts of freshwater fish assemblages: the ecological relevance of swimming performance. *Rev. Fish. Biol. Fish.* 2003; 13: 63-89.
- 3) Blaxter JHS. Swimming speeds of fish.

- FAO Fish Rep. 1969; 62: 69-100.
- 4) Brett JR. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 1964; 21: 1183-1226.
- 5) Tsukamoto K, Kajihara T, Nishiwaki M. Swimming ability of fish. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 1975; 41: 167-174.
- 6) Johnston IA, Goldspink G. A study of the swimming performance of the Crucian carp *Carassius carassius* (L.) in relation to the effects of myotomal muscles and liver. *J. Fish. Biol.* 1973; 5: 249-260.
- 7) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 山本晃義, 渡邊拓也, 脇健樹. 河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究〜アユ、オイカワ、カワムツ、ギンブナを対象〜. 土木学会論文集B 2009; 65: 296-307.
- 8) De Boeck G, van der Ven K, Hattink J, Blust R. Swimming performance and energy metabolism of rainbow trout, common carp and gibel carp respond differently to sublethal copper exposure. *Aquatic Toxicology* 2006; 80: 92-100.
- 9) 藤原公一. アリザリン・コンプレクソンを用いたニゴロブナ, *Carassius auratus grandoculis* の耳石への標識装着条件. 水産増殖1999; 47: 221-228.
- 10) 藤原公一, 白杵崇広, 根本守仁, 北田修一. アリザリン・コンプレクソンを用いたニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の耳石への多重標識装着条件と放流サイズの推定方法. 日水誌 2010; 637-645.
- 11) 北田修一, 岸野洋久, 平松一彦. 2つの同時放流群の死亡係数による種苗性差の検定. 日水誌 1993; 59: 269-272.
- 12) Kitada S, Hiramatsu K, Kishino H. Estimating mortality rates from tag recoveries: incorporating over-dispersion, correlation, and change points. *ICES J. Mar. Sci.* 1994; 51: 241-251.
- 13) 北田修一, 「栽培漁業と統計モデル分析」 共立出版, 東京. 2001.
- 14) 橋本新, 平石智徳, 鈴木健吾, 山本勝太郎, 梨本勝昭. ヒラメの網生簀内における遊泳能力について. 日水誌 1996; 62: 12-16.
- 15) Zeng LQ, Cao ZD, Fu SJ, Peng JL, Wang YX. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Siliurus meridionalis*). *Comp Biochem. Physiol. A* 2009; 153: 125-130.
- 16) 藤原公一. ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の飼育仔稚魚の発育と成長. 日水誌2010; 894-904.
- 17) Xu G, Arimoto T, Inoue M. Red and white muscle activity of the jack mackerel *Trachurus japonicus* during swimming. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1993; 59: 745-751.
- 18) Reidy SP, Kerr SR, Nelson JA. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod. *J. Exp. Biol.* 2000; 203: 347-357.
- 19) Hammer C. Fatigue and exercise tests with fish. *Comp. Biochem. Physiol.* 1995; 112A: 1-20.
- 20) Fukuhara O. Functional morphology and behavior of early life stages of red sea bream. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 1985; 51: 731-743.
- 21) Fukuhara O. Larval development and behavior in early life stages of black sea bream reared in the laboratory. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1987; 53: 371-379.
- 22) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 飯國洋平, 山本晃義. 静止流体中の魚の突進速度に関する実験的研究. 水工学論文集 2007; 51: 1267-1272.
- 23) 岸田達, 福原修. マダイ仔稚魚の遊泳能力に関する実験的研究. 南西水研報 1981; 13: 9-17.
- 24) 矢野勲, 小川良徳. マダイ稚仔魚の遊泳速度. 養殖研報 1981; 2: 49-54.
- 25) Faria AM, Ojanguren AF, Fuiman LA, Goncalves EM. Ontogeny of critical swimming speed of wild-caught and laboratory-reared red drum *Sciaenops ocellatus* larvae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2009; 384: 221-230.
- 26) 藤原公一, 白杵崇広, 小林徹, 水谷英志. 琵琶湖の固有種ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* を育む場としてのヨシ等植物群落の重要性. 環境システム研究 1995; 23: 414-419.
- 27) 藤原公一, 白杵崇広, 根本守仁, 北田修一. 琵琶湖沿岸のヨシ帯におけるニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の初期生態とその環境への適応. 日水誌 2011; 77: 387-401.
- 28) Davison W. The effects of exercise training on

- teleost fish, a review of recent literature. *Comp. Biochem. Physiol.* 1997; 117A: 67-75.
- 29) Nahhas R, Jones NV, Goldspink G. Some aspects of sustained training of rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson. *J. Fish Biol.* 1982; 20: 351-358.
- 30) Farrell AP, Johansen JA, Steffensen JF, Moyes GD, West TG, Suarez RK. Effects of exercise training and coronary ablation on swimming performance, heart size, and cardiac enzymes in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Can. J. Zool.* 1990; 68: 1174-1179.
- 31) 淀本我, 井口恵一朗. バス問題の経緯と背景. 水研センター研報 2004; 12: 10-24.
- 32) Mitsunaga Y, Shimizu T, Suzuki K, Yamane T. Convenient analysis of swimming mechanism of largemouth bass using digital video cameras. *Fish. Engin.* 2005; 41: 245-250.
- 33) 浜崎浩幸, 竹内宏行, 塩澤聡, 照屋和久. サンゴ礁域に放流したスジアラ人工種苗の滞留, 摂餌および被食に及ぼす囲い網による環境馴致効果. 日本誌 2004; 70: 22-30.
- 34) 藤川裕司, 佐々木正. 人工種苗マダいの捕食者回避における学習効果. 水産増殖 2001; 49: 151-156.
- 35) 滋賀県農政水産部水産課. 有害生物駆除の強化による水産資源の回復. 滋賀の水産, 滋賀県, 大津. 2009; 21.

第5章 琵琶湖沿岸のヨシ帯におけるニゴロブナの初期生態とその環境への適応

材料および方法

5-1 ヨシ帯奥部の環境特性とニゴロブナ仔魚のその水域への集結と適応

琵琶湖では、ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の資源を回復させるため、琵琶湖栽培漁業センターが中心となって種苗放流事業が行われている。¹⁾ また自然繁殖を増大させて資源回復を進めるため、滋賀県によって琵琶湖の沿岸にヨシ *Phragmites australis* を植栽した本種の産卵・繁殖場の造成事業が行われている。²⁾ この種苗放流事業を効果的に進めるうえで、ニゴロブナの初期生態の把握は非常に重要である。また、産卵・繁殖場を造成するうえでもそれらは不可欠な知見となる。

琵琶湖にはニゴロブナのほか、ゲンゴロウブナ *C. cuvieri* とギンブナ *C. a. langsdorfi* のフナ属魚類が生息しているが、仔稚魚期には、これらを外観から判別することは極めて困難である。³⁾ これまで、フナ属の仔稚魚は琵琶湖沿岸にみられるヨシ帯などに多数生息することが、古くは平井^{4,5)} や友田,⁶⁾ 近年では Yamamoto *et al.*⁷⁾ によって報告されているが、いずれも上記3種が識別されたものではない。最近になって、RAPD分析による判別からニゴロブナ仔魚は琵琶湖の内湖である西の湖沿岸のヨシ帯の岸边付近に多数分布することが確認された。⁸⁾ しかし、この調査はヨシ帯内の仔魚の分布と調査日毎の個体数の増減を把握したものであり、本種の発育初期の移動特性や生態を詳細に捉えたものではない。そこで、アリザリン・コンプレクソンを用いて耳石に染色標識（以下、ALC標識）^{9,10)} を付けたニゴロブナ人工種苗を、琵琶湖沿岸水域に自生するヨシ帯、あるいはヨシ帯内に縦・横方向に設置された網製通路内に放流してその動きを追跡するとともに、一部の魚については消化管内容物を観察して食性を確認した。また、そのヨシ帯内の溶存酸素濃度（以下、DO）や餌となる動物プランクトン密度などの環境特性も調査した。本節ではこれらの知見をもとに、琵琶湖におけるニゴロブナ仔稚魚の生態的特性とそれらが生息するヨシ帯の環境との関係を明らかにするとともに、本種の種苗放流水域や造成する産卵・繁殖場の条件を検討した。

ヨシ帯内におけるニゴロブナ仔稚魚の分布と食性およびヨシ帯内の環境特性

1. 調査水域と定点 ニゴロブナの産卵場となっている滋賀県近江八幡市牧町の琵琶湖沿岸に自生するヨシ帯（Fig. 5. 1. 1以下、牧ヨシ帯）を調査水域とした。牧ヨシ帯は幅が概ね150～160 m、奥行きが概ね45～50 m、琵琶湖基準水位（BSL）±0cm時点の水深は岸边では0cm、外縁部では57～84 cmであった。ヨシの密度は内部では高く、外縁部ではやや低かった。岸边付近には、樹冠の投影概観を円で示したヤナギ類 *Salix* spp. やハンノキ *Alnus japonica* が自生しており、それら樹冠の下は太陽光が遮られることが多かった。ヨシ帯の内部や外縁部の所々にキシウスズメノヒエ *Paspalum distichum* が繁茂していた。

後述するように1992年に牧ヨシ帯内にニゴロブナの仔稚魚を継続飼育しながら順次放流して、その分布などを調査したが、Fig. 5. 1. 1Aに示したように、最初の放流の数日前には、ヨシ帯から離脱する魚を捕獲するための小型定置網（以下、マス網、垣網部；長さ15 m、身網部；幅4×長さ3 m、袋網部；長さ5 m、網の目合いは全て3mm）を先端に取り付けた目合い0.3mmのポリエチレン網を3枚設置した。これらポリエチレン網で仕切られた内部には、放流仔魚の分布などの調査定点として、汀線に平行な離岸25 m線上に10 m間隔でA25～O25の14定点、D25とL25を通過する岸から沖方向への線上に5m間隔でD5～D50およびL5～L50のそれぞれ10定点（D25とL25を除くとそれぞれ9定点）を設定した。D45とL45はヨシ帯の外縁部、D50とL50はヨシ帯の外部に位置した。なお、これら調査終了後はポリエチレン網やマス網は撤去した。

また、本種仔魚のヨシ帯内での岸から沖方向および汀線に平行方向の移動を把握するため、1995年6月13日に、牧ヨシ帯へFig. 5. 1. 1Bに示したようにポリエチレン製の通路（目合い0.3mm、断面がU字状で幅30 cm、通路内の水深は概ね10～20 cm）を岸から沖方向と汀線に平行な方向に各1本設置した（以下、それぞれ縦通路、横通路）。なお、これら通路の設置時の琵琶湖水位はBSL-5 cmで、上記した1992年の本種仔魚の放流・分布調査開始日（5月19日）のBSL+31 cmや後述する1994年のヨシ帯内の環境特性調査開始

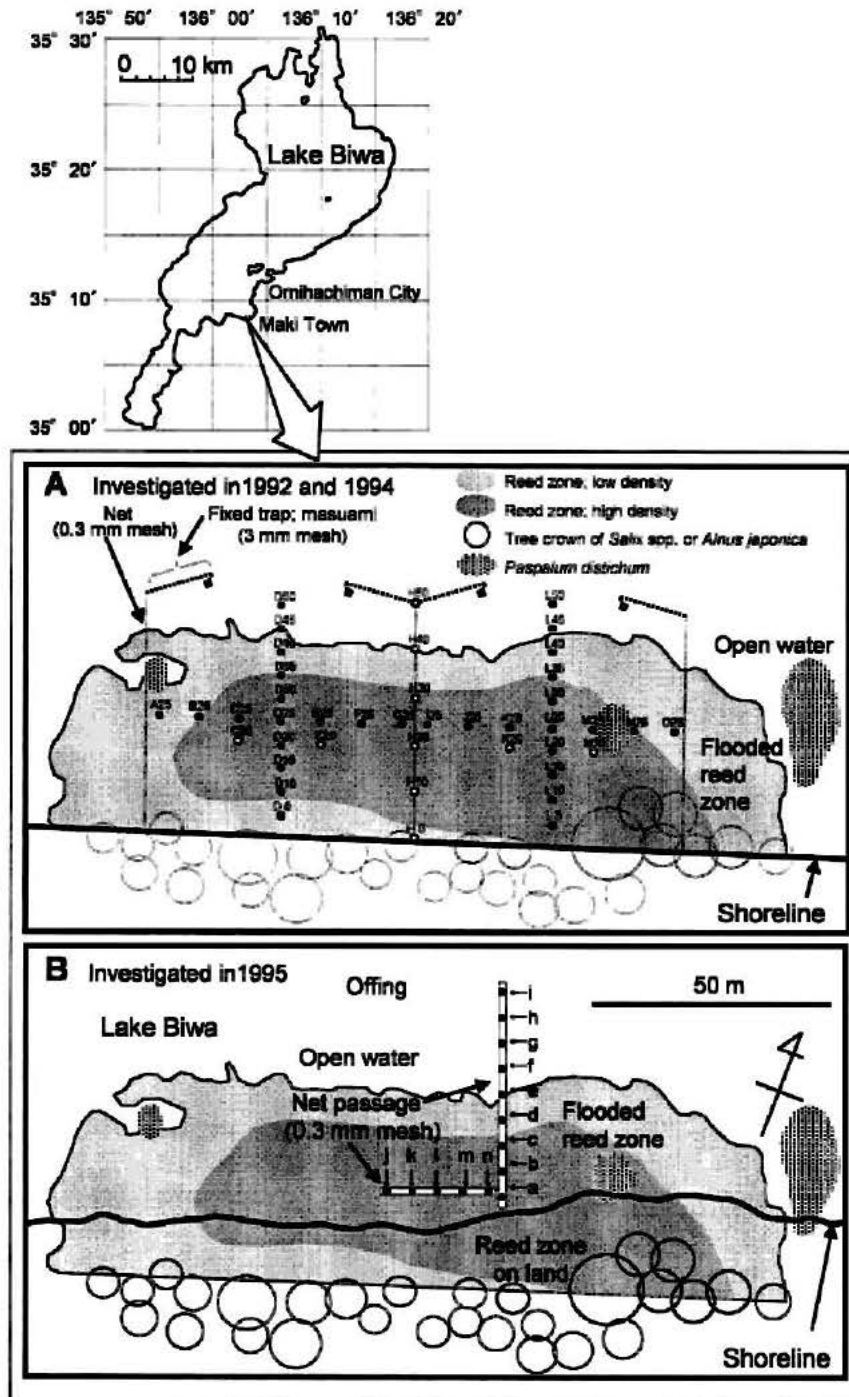


Fig. 5.1.1 Schematic representations of the investigated reed zone in Lake Biwa. Solid and open small circles in figure A indicate the stations to investigate the distribution of released larval nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*, dissolved oxygen concentration and water temperature in 1992, and the stations to investigate the habitat characteristics of nigorobuna such as dissolved oxygen concentration, water temperature and density of food zooplankton in 1994, respectively. Figure B shows the positions of net passages set in order to investigate the movement of larval nigorobuna in the reed zone in 1995, and solid small circles in this figure indicate the investigated stations. Characters in both figures indicate station names. The shoreline at the time of the investigation in 1995 was retreating to the offing compared with those in 1992 and 1994.

Table 5.1.1 Larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* released in the reed zone^{*1} of Lake Biwa

Group	ALC marking ^{*2}		Date of release	Released fish					
	Mark type	Immersion time (day) of nigorobuna in ALC solution before and after hatching		Age	Standard length				Number at release
					Mean	±	SD	N	
				DAH ^{*3}	mm				
A1	Core	-3	19-May-1992	2	5.5	±	0.3	124	1,074,000
A2	Core and ring	-3, 9	27-May-1992	10	7.6	±	1.0	100	295,000
A3	Core and 2 rings	-3, 9, 19	6-Jun-1992	20	9.7	±	1.4	135	49,000
A4	Core and 3 rings	-3, 9, 19, 29	16-Jun-1992	30	15.1	±	2.5	113	26,000
A5	Core and 4 rings	-3, 9, 19, 29, 39	26-Jun-1992	40	16.1	±	2.8	140	29,300
B1	Core	-3	17-Jun-1992	2	5.7	±	0.4	112	313,000
B2	Core and ring	-3, 7	23-Jun-1992	8	7.0	±	0.5	129	193,000
B3	Core and 2 rings	-3, 7, 15	1-Jul-1992	16	8.1	±	0.9	142	199,000
B4	Core and 3 rings	-3, 7, 15, 23	9-Jul-1992	24	10.7	±	1.5	180	91,000
B5	Core and 4 rings	-3, 7, 15, 23, 31	17-Jul-1992	32	14.8	±	2.7	124	25,800

*1: Refer to Fig. 5.1.1 for the location.

*2: Refer to the text for ALC marking. The multiple marked fish were released immediately after completion of the last marking.

*3: Days after hatching.

日(4月27日)のBSL+20 cmに比べて低く、汀線は沖方向へ移動していた。このため、通路の設置位置は牧ヨシ帯の中央部よりも沖側となった。縦通路の長さは45 m、横通路の長さは20mであった。それぞれの通路の両端は同じポリエチレン網で閉鎖した。通路内には6m間隔で縦通路はa~iの9定点、横通路はj~nの5定点を設定した。

さらに、1994年には牧ヨシ帯内のD0や水温、動物プランクトン密度といった本種仔魚の生息に関わる環境特性を調査した。この調査はFig. 5. 1. 1Aに示したように、汀線に平行な離岸20mの線上に20m間隔で設定したC20,E20,H20,K20,M20の5定点とH20を通過する岸から沖方向への線上に10 m 間隔で設定したH0~H50の6定点(H20を除くと5定点)で行った。H40は牧ヨシ帯の外縁部、H50は牧ヨシ帯の外部に位置した。

2. ヨシ帯内へ直接放流した仔魚の分布、食性とヨシ帯離脱魚の調査 ヨシ帯内におけるニゴロブナ仔魚の分布や食性およびヨシ帯を離れ始めるサイズを知るため、次のとおり本種のALC標識種苗の放流、再捕調査を行った。琵琶湖栽培漁業センターで1992年5月11日と同年6月11日に自然産卵させて得たニゴロブナ卵を翌日に滋賀県水産試験場(以下、滋賀水試)へ搬入し、琵琶湖水を流したFRP水槽に収容・管理して5月17日と6月15日にふ化仔魚を得た。前者は39日間、後者は31日間、藤原¹¹⁾の手法に従って飼育した。飼育期間中の水温は16.9~24.8℃であった。これら卵の管理中およびふ化後の飼育中に、藤原⁹⁾および藤原ら¹⁰⁾の方法で耳石(礫石)へ1~5重のALC標識を付け、ふ化後2, 10, 20, 30, 40日齢(A1~A5群, Aシリーズ)および同2, 8, 16, 24, 32日齢(B1~B5群, Bシリーズ)に分けて、牧ヨシ帯内へ順次放流した(Table 5. 1. 1)。A, B両シリーズの放流はそれぞれ5月19日と6月17日から開始した。放流魚はビニール袋へ酸素ガスとともに封入して水を張った活魚輸送車の水槽に浮かべ、牧ヨシ帯付近まで運搬し、ヨシ帯内へ搬入して定点A25とO25を結んだ線上で均等に放った。なお、放流時に各群から100~180尾を無作為抽出して冷凍保存し、後日、解凍して標準体長(以下、体長)を測定した。

A2群を放流した4日後、A1群を放流してからは12日後の5月31日の午後1時から、牧ヨシ帯内の各定点(Fig. 5. 1. 1A, 黒丸)に塩化ビニール管(φ13 mm)

で製作した内寸1.0×1.0mの四角枠を浮かべ、枠内に浮遊する放流魚と思われる仔魚の尾数を計数した。同時に各定点のD0と水温を水質チェッカー(U-10, 堀場製作所)で測定した。ニゴロブナ仔魚は水面直下に分布するため、¹¹⁾測定は水面下概ね5cmで行った。また、5月31日から7月24日までの間に7回、牧ヨシ帯内の随所でタモ網(150×200 mm, 目合い0.3mm)を用いてフナ属仔稚魚を採集した。さらに、6月22日から8月28日までの間に42回、マス網(Fig. 5. 1. 1A)で牧ヨシ帯から離脱するフナ属仔稚魚を採集した。これらの採集魚は氷蔵して滋賀水試へ持ち帰り、直ちに体長を測定するとともに、藤原⁹⁾および藤原ら¹⁰⁾の方法でALC標識の有無を調べて放流魚を判別した。放流魚についてはサイズと標識のタイプから放流群を特定した。なお、5月31日に牧ヨシ帯内で採集した魚の一部は現場で5%緩衝ホルマリンを用いて固定し、滋賀水試に持ち帰り速やかにALC標識の有無を確認し、標識魚については消化管内容物を摘出して、その種類(ミジンコ亜綱, カイアシ亜綱およびユスリカ類幼虫に分類。カイアシ亜綱は成体+コペポディッドとノープリウスに区別)を調べ、計数後、それらのサイズ(触覚を除く最大長および最大幅)を生物顕微鏡(OPTIPHOT, XT-EFD, ニコン)の接眼マイクロメーターを用いて測定した。

3. ヨシ帯内に設置した網製通路内へ放流した仔魚の分布調査 ニゴロブナ仔魚のヨシ帯内での移動方向を知るため、滋賀水試で自然産卵させて得た仔魚(14日齢, 体長 7.5 ± 0.7 mm, 平均値±SD)を縦通路と横通路(Fig. 5. 1. 1B)の中央(定点eおよび1)へ1995年6月14日午後1時にそれぞれ2, 226尾ずつ放流した。仔魚の分布は、放流の24時間後、48時間後および72時間後に通路内の各定点でタモ網(150×200 mm, 目合い0.3mm)を用いて無作為に1回ずつすくい取って確認した。同時に各定点のD0を測定した。採集した仔魚は、氷蔵して滋賀水試へ持ち帰り、直ちに個体数を計数し体長を測定した。使用した仔魚の飼育と放流、D0の測定は、前述と同様の方法で行った。

4. ヨシ帯内の環境特性調査 ニゴロブナ仔稚魚の生息環境を把握するため、各定点(Fig. 5. 1. 1A, 白丸)において、1994年4月27日から同年5月30日の間に計5回、D0および水温を測定した。また、各定点の水面直下の水5Lを現場でプランクトンネット(NXXX25, 離合社)を用いてろ過し、得られたサンプル水50 mLに同

量の10%緩衝ホルマリンを加えて滋賀水試へ持ち帰り、後日、動物プランクトンの種類(ミジンコ亜綱、カイアシ亜綱に分類。カイアシ亜綱は成体+コペポデッドとノープリウスに区別)と個体数を調べ、それぞれの生息密度を算出した。これらの調査は、毎回、午後1時から同じ行程で行った。また4月27日と5月22日には、午前10時から3時間おきに9回連続してD0と水温を測定した。

ニゴロブナ仔魚の貧酸素環境への適応の確認

1. 貧酸素耐性の評価 ニゴロブナとホンモロコ *Gnathopogon caerulescens* における仔稚魚の貧酸素耐性を次の方法で調べた。まず、水温20℃の琵琶湖水を30 L入れた丸型パンライト水槽(φ44 cm, 深さ30 cm)6槽に窒素ガスを激しく注入して、酸素飽和度が0~35%の範囲で6段階の水を調製した。この中へ、予め窒素ガスを注入して内部の空気を窒素と置換した容積1LのPET広口瓶を静かに沈め、広口瓶の中を水で満たした。その後、広口瓶をパンライト水槽の水面まで持ち上げ、その中へ前日から無給餌としたニゴロブナまたはホンモロコの仔稚魚を10尾収容して密栓した。これら供試魚は、1994年6~7月に滋賀水試で自然産卵・ふ化させ藤原¹¹⁾の手法に従って飼育したもので、ニゴロブナは0, 9, 12, 34および57日齢、ホンモロコは0, 1, 4, 35および65日齢、体長は両種とも概ね5~25 mmの範囲にあった。密栓後、瓶は20℃のウォーターバス中に静置し、60分後に各供試魚の生死を判定した。供試魚の死亡は、ガラス棒で魚体に刺激を加えても反応しないことで判断した。D0は、実験開始時のパンライト水槽内と終了時の各瓶内の供試水をヨシ帯の調査と同様の方法で測定し、それらを平均して求めた。貧酸素耐性の指標として、60分間に供試尾数の50%が死亡するD0(以下、LD0₅₀)を求めた。LD0₅₀の算出は、JIS工場排水試験法(JIS K 0102)のTL_m値の算出法¹²⁾に準じて行った。実験終了後には、生存個体は氷冷水中に浸漬(以下、氷冷麻酔)して、死亡個体はそのまま、直ちに全供試魚の体長を測定した。

2. 体比重の測定 空気中からの酸素の溶解込みが見込まれる水面直下への浮遊性を評価するため、ニゴロブナとホンモロコの仔稚魚の体比重を次の方法で測定した。水温20℃の琵琶湖水中にNaClを溶解させて比重が0.990~1.060の範囲で20段階の水を調製し、1Lビーカーに入れて20℃のウォーターバス中に

設置した。その中へ麻酔したニゴロブナ仔稚魚(0~41日齢、体長は概ね5~30 mm, 合計230尾)およびホンモロコ仔稚魚(0~47日齢、体長は概ね5~25 mm, 合計220尾)を1尾ずつ収容し、魚体が浮上も沈降もせずビーカー中で懸垂する状態にあったときの水の比重をその魚の体比重とした。供試魚は、貧酸素耐性の評価に用いたものと同じ由来であった。なお、これらは前日から無給餌とし、測定時の水温に数時間馴致してから用いた。麻酔は、200 mg/LのMS222(ethyl m-aminobenzoate methanesulfonate, 三共製薬)に浸漬して行った。実験終了後には、直ちに全供試魚の体長を測定した。水の比重は標準比重計(JIS B 7525, 標準密度計, 安藤計器製工所)で測定した。

3. 無酸素水中でのニゴロブナ仔魚の生死に及ぼす水面有無の影響の評価 水面の存在が無酸素水中においたニゴロブナ仔魚の生死に及ぼす影響を次の方法で調べた。水温を20℃に調節した琵琶湖水を200 L入れた丸型FRP水槽(φ1.0 m, 深さ75 cm)に窒素ガスを激しく注入してD0が0.00 mg/Lの水を調製した。この中に、内径31×長さ200 mmの塩化ビニール製円筒(両端を目合い0.3mmのポリエチレン網で覆ったもの)を2本設置した。一方の円筒は完全に水中に沈めた。もう一方の円筒は、一端を水面上に出すようにして設置した。これらの中へ貧酸素耐性の評価に用いたものと同じ由来のニゴロブナ仔魚(12日齢、体長10.5±0.5mm)を10尾ずつ収容し、60分後のそれらの生死を貧酸素耐性の評価と同様にして判定した。供試魚は前日から無給餌とした。実験終了直後には、生残個体は氷冷麻酔して、死亡個体はそのまま、全供試魚の体長を測定した。得られた結果はフィッシャーの直接確率計算法により有意差検定を行った。

結 果

ヨシ帯内におけるニゴロブナ仔稚魚の分布と食性およびヨシ帯内の環境特性

1. ヨシ帯内へ直接放流した仔魚の分布 1992年5月31日に行った牧ヨシ帯内の各定点(Fig. 5. 1. 1A, 黒丸)におけるA1群とA2群の仔魚分布密度(個体数/m²)およびD0, 水温の調査結果をFig. 5. 1. 2に示した。なお、この調査日に牧ヨシ帯内で採集されたフナ属仔魚は744尾で、ALC標識の確認により、その内A1群は180尾(24.2%), A2群は540尾(72.6%), 合計720尾

(96.8%)を占めた。このため、Fig. 5.1.2の仔魚分布密度は、日視計数した仔魚尾数に0.968を乗じて修正した値を用いた。また、採集された放流魚の体長は 9.0 ± 1.1 mmであった。D5～D50の10定点やL5～L50の10定点の岸辺から沖方向への仔魚の分布は、離岸25 mのD25やL25よりも岸辺側に集中し、分布密度は岸辺付近ほど高くなる傾向がみられた。一方、離岸30mのD30やL30よりも沖側では、仔魚の分布は極端に低下した。D0はD5を除いて、仔魚の分布密度が高い定点では低い傾向がみられた。水温は、D5～D50およびL5～L50ともに、沖側から岸辺方向へ行くにしたがい上昇する傾向がみられた。離岸25 mの汀線に平行な線上に設けたA25～O25の定点の仔魚分布密度は、ヨシ帯の縁辺部では低く、中央部では一様に高かった。D0はスズメノヒエが繁茂する付近のM25～

O25で高かった。水温は定点間で大きな差はみられなかった。

2. ヨシ帯内に設置した網製通路内へ放流した仔魚の分布 牧ヨシ帯内に設置した縦通路と横通路(Fig. 5.1.1B)内に放流したニゴロブナ仔魚の放流翌日以降の採集尾数と採集時のD0をFig. 5.1.3に示した。縦通路内のa～iの9定点の仔魚の採集尾数は、いずれの調査Hにおいても岸辺に近いaで最も多く、沖側ほど減少した。ヨシ帯から外れた沖側のf～iでは、仔魚はほとんど採集されなかった。D0はヨシ帯内のa～eで低く、それに比べてf～iでは高かった。また横通路内のj～nの5定点では、調査日によって同仔魚の採集尾数は変動し、a～iでみられたような一方に分布が偏ることはなかった。

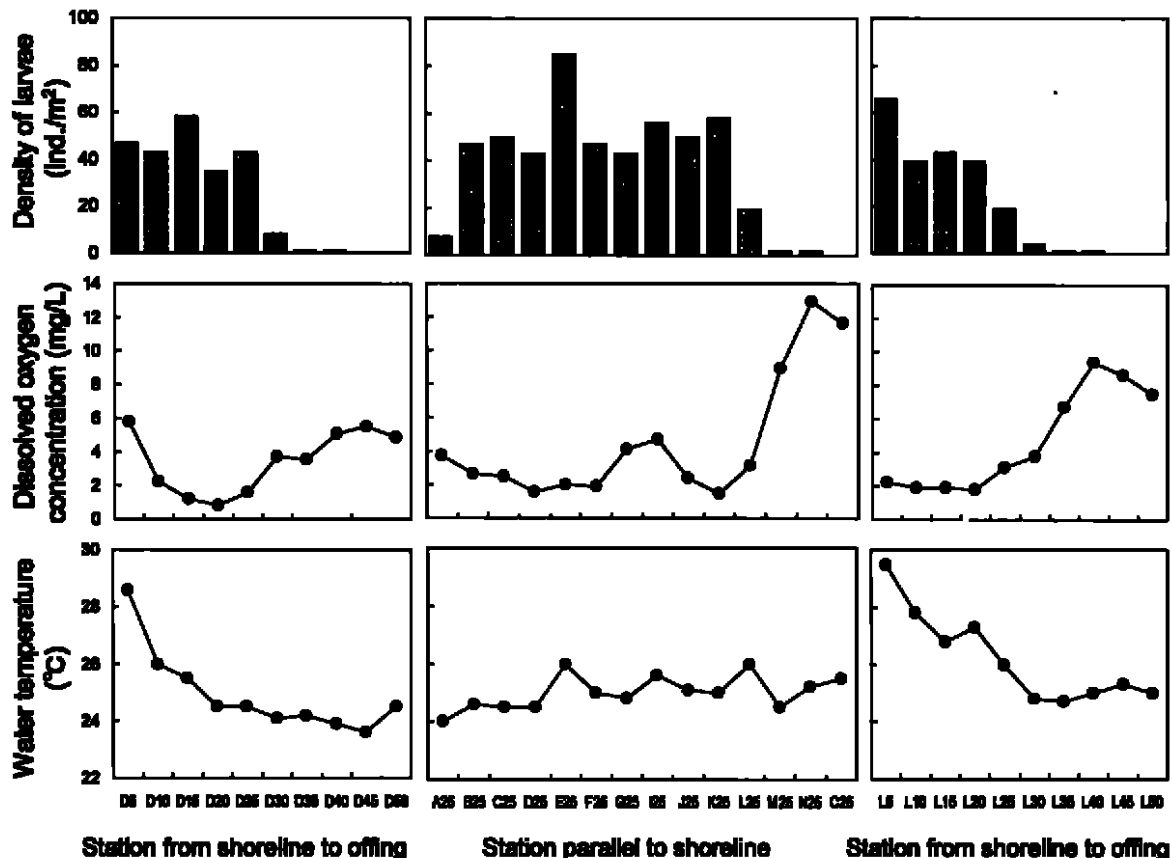


Fig. 5.1.2 Distribution of released larval nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*, dissolved oxygen concentration and water temperature at investigated stations in the reed zone. See the uppermost map and A in Fig. 5.1.1 for the location of the reed zone and investigated stations, respectively. Two-days-old larvae (group A1 in Table 5.1.1) of 1,074,000 and 10-days-old larvae (group A2 in Table 5.1.1) of 295,000 of the same birthday were released along the line connecting Sta. A25 and Sta. O25 and the investigation was conducted on May 31, 1992 four days after the last release.

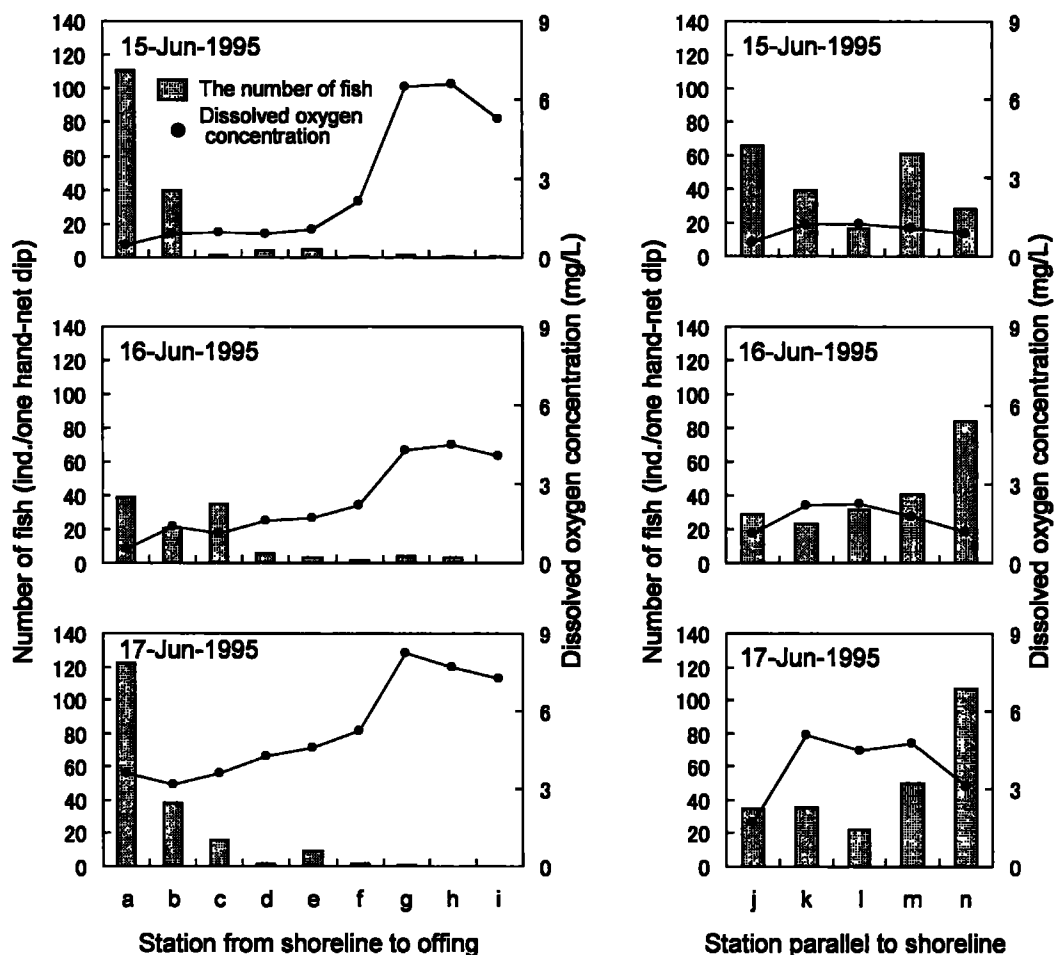


Fig. 5.1.3 Distributions of larval nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* released into the net passages set in the reed zone, and dissolved oxygen concentrations at each investigated station in the net passages. See the uppermost map and B in Fig. 5.1.1 for the location of the reed zone and investigated stations, respectively. Fourteen-days-old larvae of 2,200 of 7.50 ± 0.71 mm (mean $\pm$ SD) in standard length were released at Sta. e and Sta. l on June 14, 1995, respectively, and investigations were conducted on June 15, 16 and 17.

3. ヨシ帯を離れ始めるニゴロブナのサイズ 1992年に牧ヨシ帯内にニゴロブナのALC標識仔稚魚を順次放流(Table 5.1.1)し、その後5月31日～7月24日の間にヨシ帯内ではタモ網で、6月22日～8月28日の間にヨシ帯外ではマス網で採集されたフナ属仔稚魚の全尾数は、それぞれ2,163尾と3,774尾であった。このうち、ALC標識を確認して判別された放流魚はそれぞれ2,079尾(96.1%)と2,476尾(65.6%)であった。牧ヨシ帯内外でタモ網やマス網で採集された放流魚の体長の経日変化を、放流時点のニゴロブナ仔稚魚(A1～B5の10群, Table 5.1.1)の体長とともにFig. 5.1.4に示した。ヨシ帯内で採集された放流魚の体長は16 mm未満で、ほとんどが上屈後仔魚¹¹⁾以前の发育段階であった。一方、ヨシ帯から外れた沖側に設置し

たマス網で採集されたヨシ帯を離れ始めた放流魚のほとんどが体長16 mmを超えた稚魚¹¹⁾で、日数の経過とともに次第に大きな個体も捕獲されるようになった。

4. ヨシ帯内での仔魚の食性 牧ヨシ帯において採集されたニゴロブナ放流魚(A1群とA2群, 採集時には14日齢)21尾の体長とそれらの消化管内にみられた餌料生物の種類ごとの大きさとの関係をFig. 5.1.5に示した。ニゴロブナ仔魚の消化管内には餌料生物のうち、ミジンコ亜綱とカイアシ亜綱(成体・コペポディッド)が高い割合で確認された。ミジンコ亜綱は、体長が約8mmよりも小さい仔魚で多くみられ、カイアシ亜綱(成体・コペポディッド)は、どの体長の仔魚でも認められた。それに比べて、カイアシ亜綱(ノーブ

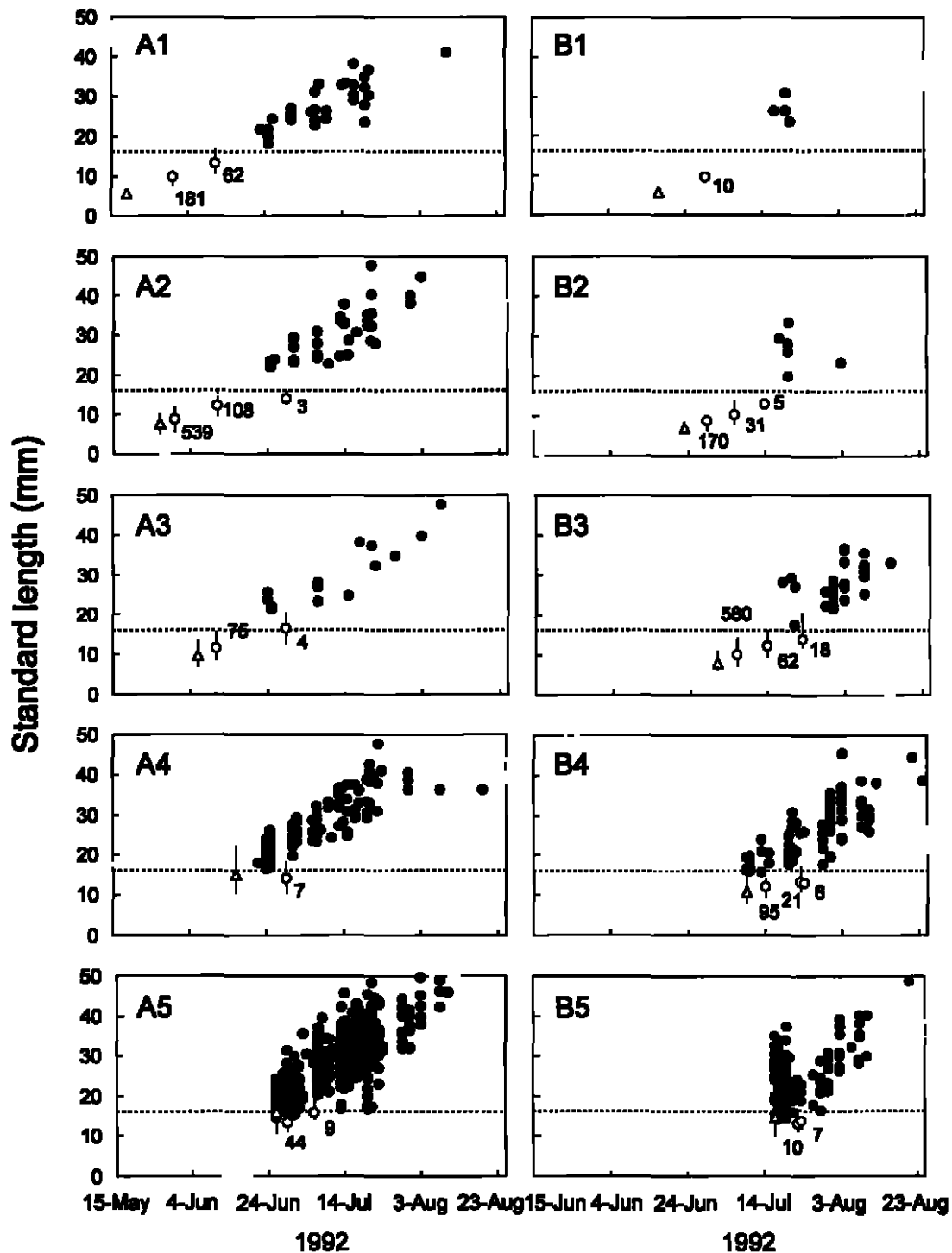


Fig. 5.1.4 Standard length (SL) of released and recaptured nigorobuna *Carassius auratus grandoculis*. Triangles: average SLs of released fish, open circles: average SLs of recaptured fish in the reed zone by a hand-net, solid circles: individual SLs of recaptured fish outside the reed zone by fixed traps (masuami), solid lines: range of SLs, figures: numbers of sample, dotted line: SL=16 mm. See the uppermost map and A in Fig. 5.1.1 for the location of the reed zone and fixed traps (masuami), respectively. Refer to Table 5.1.1 for group names A1-B5.

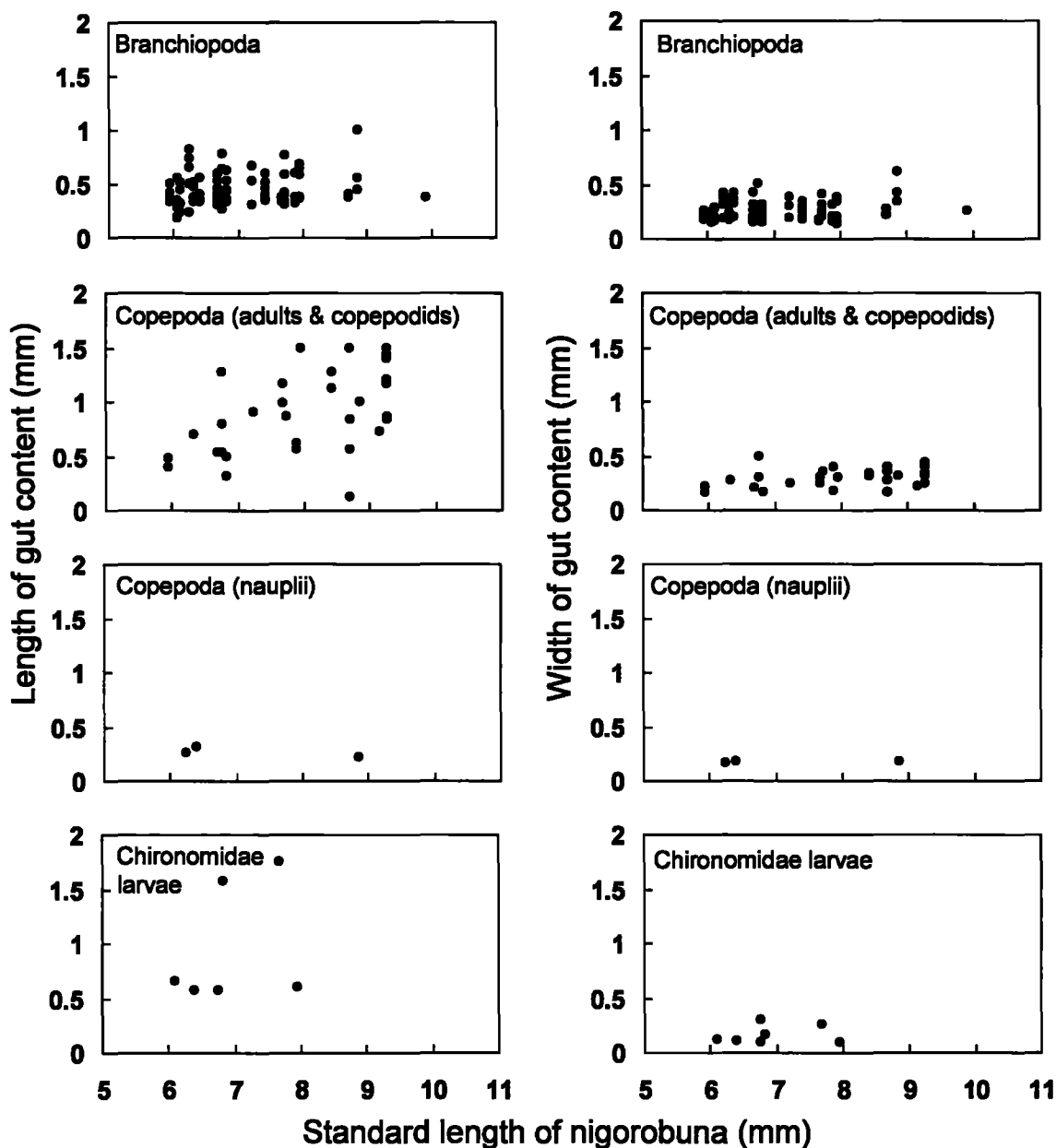


Fig. 5.1.5 Length and width of gut contents of larval and juvenile nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* collected in the reed zone on May 31, 1992.

See Fig. 5.1.1 for the location and overview of the reed zone.

リウス)やユスリカ類幼虫は少なかった。なお、今回採集されたニゴロブナ仔魚は、いずれも最大幅約0.5mm以下の餌料生物を捕食していた。また、大きな仔魚ほど最大長の大きいカイアシ亜綱(成体・コペポディッド)を捕食する傾向があった。

5. ヨシ帯内の環境特性 牧ヨシ帯の各定点(Fig. 5.1.1A, 白丸)において、1994年4月27日から同年5月30日の間に数日おきに行ったD0、水温および動物プランクトン密度の調査結果をFig. 5.1.6に示した。岸边から沖方向へ設定したH0～H50の5定点を比較

すると、いずれの調査日においてもD0は岸边付近のH0で低く、ヨシ帯の先端(H40)方向へ行くにしたがい高くなり、ヨシ帯から外れた沖側のH50ではH40よりも若干低くなる傾向がみられた。水温は調査日が遅いほど上昇する傾向にあった。また、H0から離岸20mのH20にかけて高くなり、さらに沖方向へ行くにしたがい低下する傾向がみられた。動物プランクトン密度はH0～H20で高い傾向にあり、カイアシ亜綱(ノープリウス)が個体数の大部分を占めた。カイアシ亜綱(成体・コペポディッド)やミジンコ亜綱の個

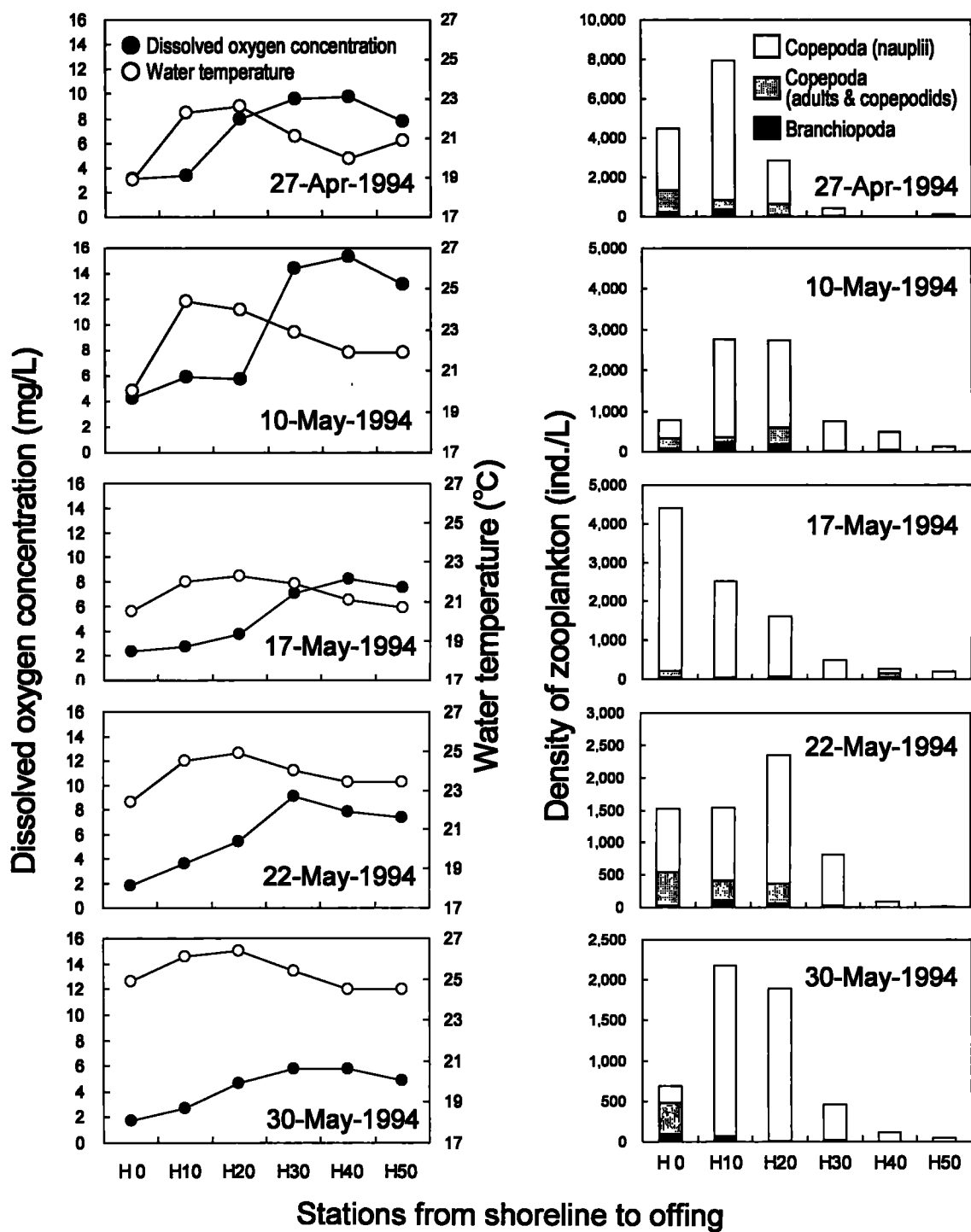


Fig. 5.1.6 Changes in density of zooplankton, dissolved oxygen concentration and water temperature at investigated stations in the reed zone from April 27 to May 30 in 1994. See the uppermost map and A in Fig. 5.1.1 for the location of the reed zone and investigated stations, respectively.

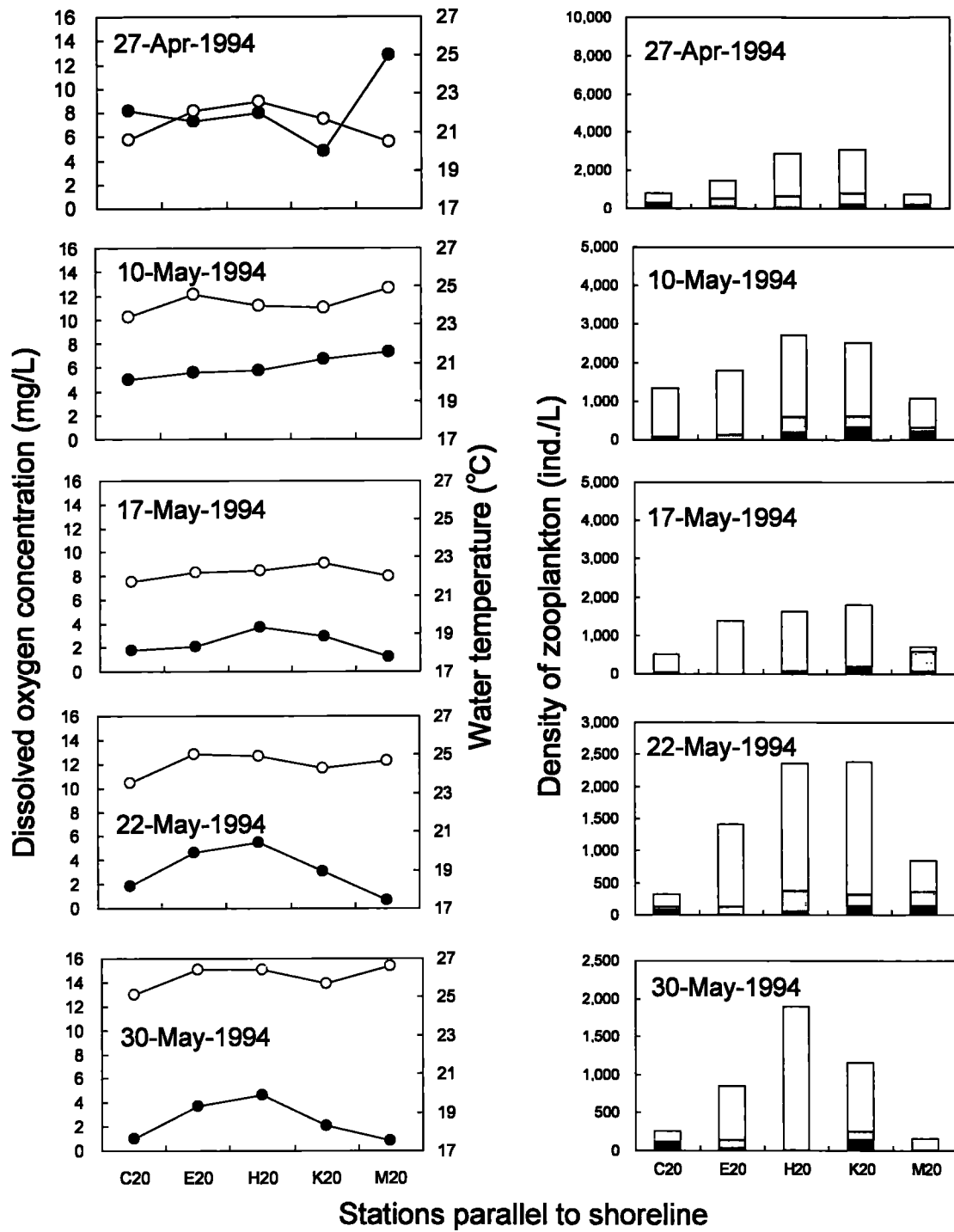


Fig. 5.1.6 (Contd.)

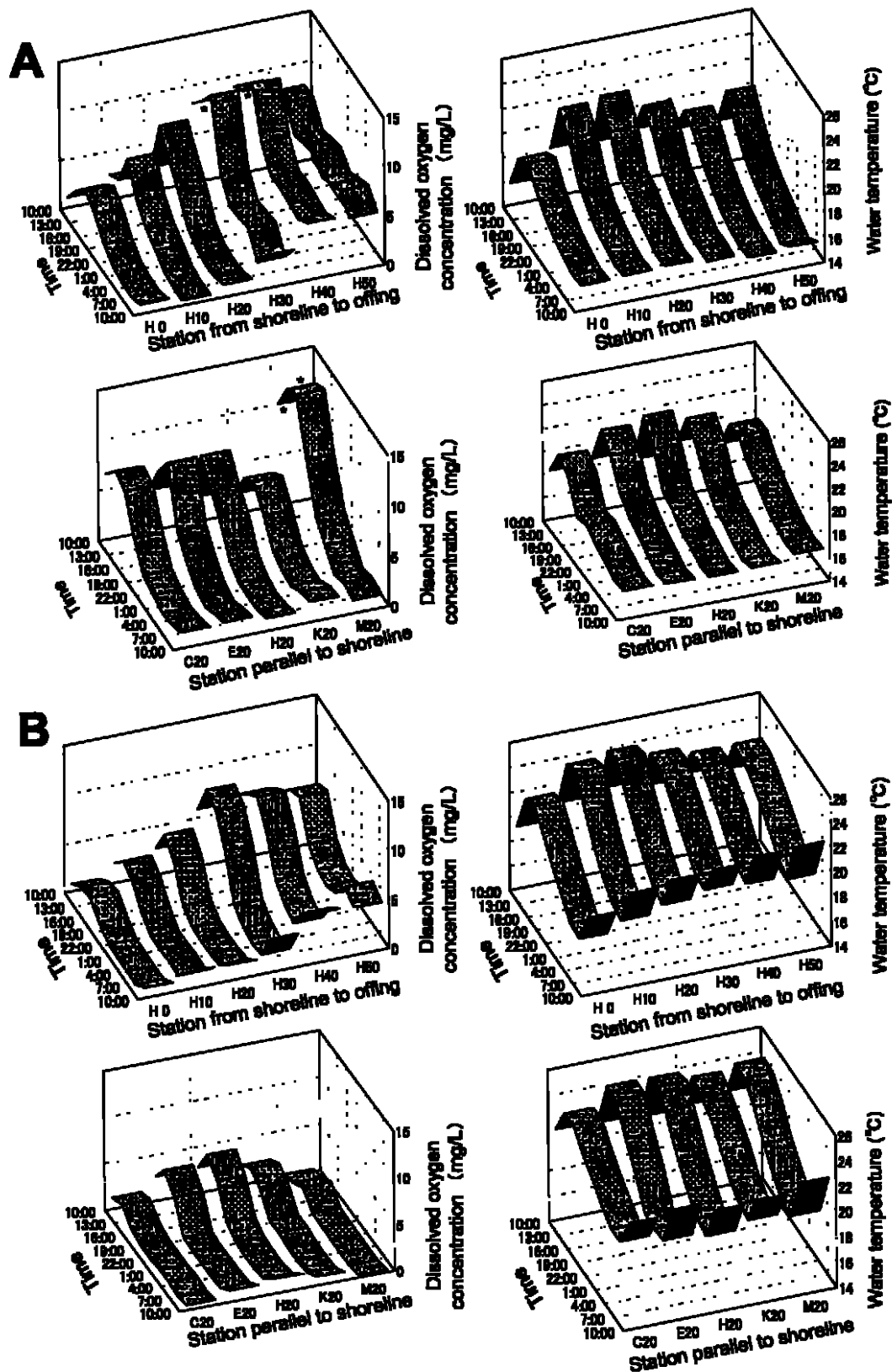


Fig. 5.1.7 Time-dependent changes in dissolved oxygen concentration and water temperature at investigated stations in the reed zone A) from April 27 to 28 and B) from May 22 to 23 in 1994. Asterisks show supersaturation of dissolved oxygen. See the uppermost map and A in Fig. 5.1.1 for the location of the reed zone and investigated stations, respectively.

体数は調査日によって変動するが、やはりH0～H20に多く、離岸30mのH30よりも沖側では極端に少なかった。離岸20mの汀線に平行な線上に設けたC20, E20, H20, K20, M20の5定点の調査結果を比較すると、いずれの調査日においてもD0に顕著な変動傾向はみられなかった。なお、4月27日調査では、キシウスズメノヒエが繁茂するM20でD0が高かった。沖方向へ設定した定点同様、水温は調査日が遅いほど上昇したが、いずれの調査日においても定点間で顕著な変動傾向はみられなかった。動物プランクトン密度はヨシ帯中央部のE20やH20, K20で高く、その両外側では低い傾向がみられた。個体数はカイアシ亜綱(ノープリウス)が大部分を占め、カイアシ亜綱(成体・コペポディッド)やミジンコ亜綱の個体数はそれに比べて少なく、調査日毎、定点毎にばらつきがみられた。牧ヨシ帯の各定点(Fig. 5. 1. 1A, 白丸)において、1994年4月27日と5月22日の午前10時から行ったD0と水温の日内変動調査(それぞれ4月調査, 5月調査という)の結果をFig. 5. 1. 7に示した。D0は、4月調査に比べて5月調査の方が低く推移した。また、両月の調査ともD0はいずれの定点においても日中は上昇し、日没(4月調査:18時38分, 5月調査:18時58分)後は低下する傾向がみられた。特に、H0では夜明け(4月調査:5時10分, 5月調査:4時48分)前後の4時と7時の調査で極端に低いD0が観測され、5月調査では0.00 mg/Lの無酸素状態にあった。H0～H50のD0を比較すると、両月の調査とも4月27日～5月30日の調査結果と同様に、H0付近で低く、ヨシ帯の先端(H40)方向へ行くにしたがい高くなった。またH50ではH40よりも昼間は若干D0が低くなり、夜間は若干高くなる傾向

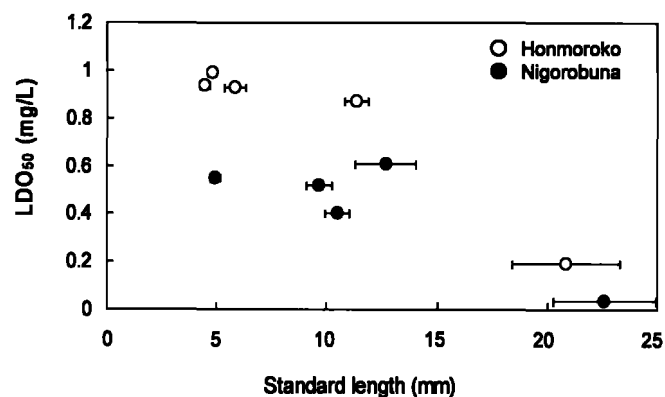


Fig.5.1.8 Comparison of the low oxygen tolerance between nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* and honmoroko *Gnathopogon caerulescens*. Refer to the text for LD₅₀. Horizontal bars indicate SDs.

がみられた。一方、C20, E20, H20, K20, M20の5定点間では、両月の調査ともD0には一定の変動傾向は認められなかった。4月調査では、キシウスズメノヒエが繁茂するM20で日中にD0の著しい上昇が観測された。水温は4月調査に比べ5月調査の方が高く推移し、両月の調査とも日中に上昇し、夜間に低下する傾向が確認された。

ニゴロブナ仔魚の貧酸素環境への適応

1. 貧酸素耐性 ニゴロブナとホンモロコの体長とLD₅₀との関係をFig. 5. 1. 8に示した。LD₅₀は、体長約13 mmまでのニゴロブナ仔魚では0.40～0.61 mg/Lで、ほぼ同サイズのホンモロコ仔魚の0.81～0.99 mg/Lに比べて非常に低く、ニゴロブナ仔魚はホンモロコ仔魚よりも貧酸素耐性が高いことがうかがえた。また、LD₅₀は両種とも成長に伴い低下し、貧酸素耐性が上昇する傾向がみられた。

2. 体比重 ニゴロブナとホンモロコの体長と体比重との関係をFig. 5. 1. 9に示した。体比重は、ふ化直

Table 5.1.2 Comparison of survival rates of larval nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* in oxygen-free water with open-surface or closed-surface

No.	Dissolved oxygen	Water temperature	Water surface	Standard length of experimental fish				Number survived	Number dead	Survival rate ^{*1}
				Mean	±	SD	N			
	mg/L	°C		mm						%
1	0.00	19.9	Open	10.5	±	0.6	10	8	2	80
2	0.00	19.9	Closed	10.5	±	0.5	10	0	10	0

*1: Significant difference ($P=0.0004$) by Fisher's exact probability test.

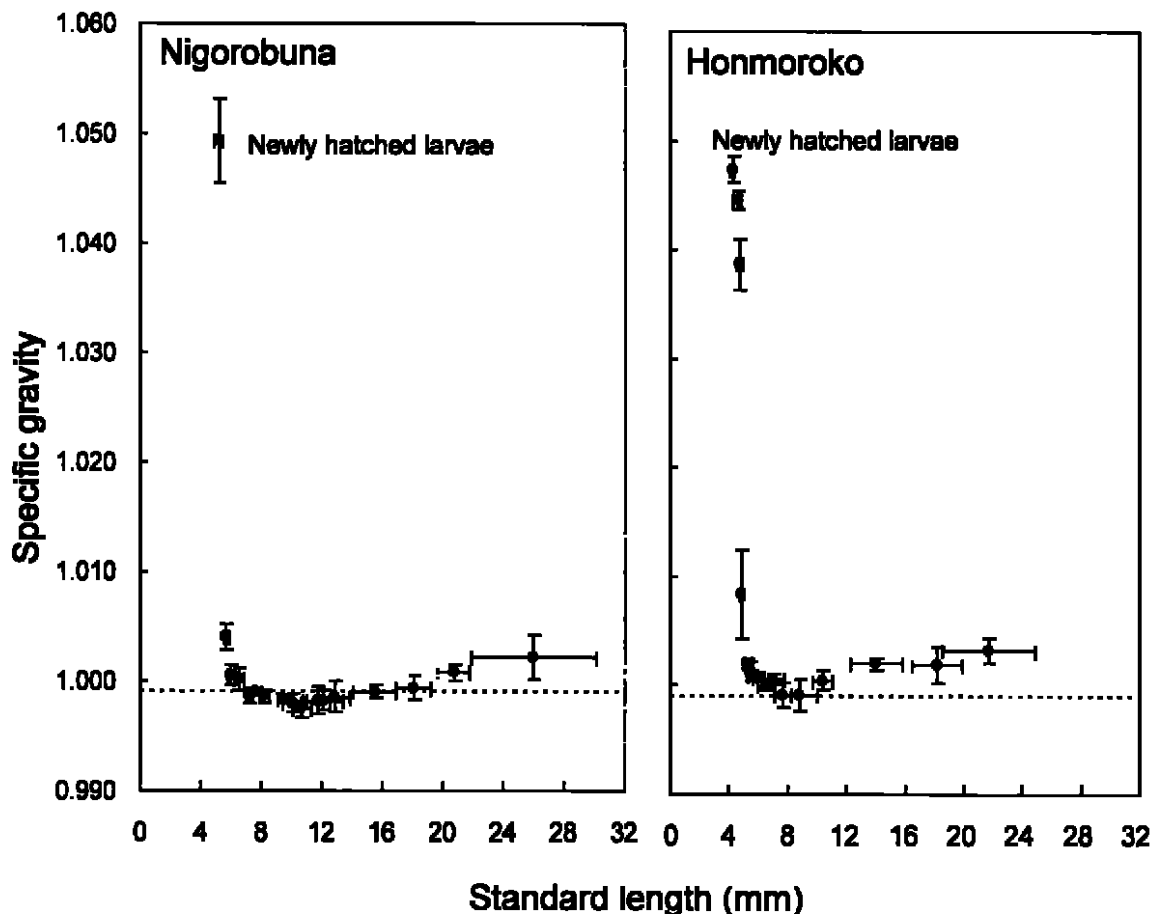


Fig. 5.1.9 Transition of the body specific gravity accompanying the growth of nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* and honmoroko *Gnathopogon caeruleus*. Vertical and horizontal bars indicate SDs. Dotted lines show the specific gravity of environmental water.

後の仔魚(ニゴロブナ; 体長 5.2 ± 0.3 mm, ホンモロコ; 体長 4.3 ± 0.2 mm)では、両種とも環境水の比重よりも大きかったが、成長に伴い急速に減少した。また観察期間中ホンモロコの体比重は概ね環境水の比重よりも大きく推移したが、ニゴロブナでは体長7~16mmの間の体比重は環境水の比重よりも若干小さく、水面へ浮上しやすい状態にあった。

3. 無酸素水中でのニゴロブナ仔魚の生死に及ぼす水面有無の影響 水面の有・無の条件で水温 19.9°C の無酸素水(DO: 0.00 mg/l)中に60分間おいた12H齢のニゴロブナ仔魚(体長 10.5 ± 0.5 mm)の生残状況をTable 5.1.2に示した。同仔魚の生残率は、水面が存在しないと0%であったが、水面が存在すると80%で、これらの間には、高い有意差が認められた($P=0.000$)。

考 察

牧ヨシ帯内へAIC標識を付けた2H齢と10H齢のニゴロブナ仔魚を放流し、14日齢の時点でその分布を調査したところ、平均体長 9.0 mm になったこれら仔魚がヨシ帯の中央部から岸边付近にかけて高密度に分布するのが確認された。この結果は、本種仔魚はヨシ帯の岸边付近へ蟄集することを示唆するものである。しかし、ヨシ帯の縁辺部や沖側では、本種仔魚は水の流れて分散して観察されなかった可能性や琵琶湖で多数生息するオオクチバス *Micropterus salmoides* の稚魚をはじめ、様々な生物により捕食されて減少した可能性もあり、この結果だけでは本種仔魚はヨシ帯の岸边付近に自ら集まったとはいいきれない。そこで、分散や被食の影響を排除した網製通路内へ

14日齢で平均体長7.5mmの本種仔魚を放流したところ、放流翌日には既に岸辺付近で多数採集された。これらの結果から、ヨシ帯内ではニゴロブナ仔魚は能動的にその岸辺付近へ蟬集するといえる。体長7～9mm前後のニゴロブナは、脊索末端の上屈が始まり、完了するまでの上屈仔魚期にあり、¹¹⁾この発育段階では遊泳能力、とりわけ巡航速度が小さく持続的に泳ぐことはほとんどできない。¹³⁾しかし同仔魚は、放流後にすみやかにヨシ帯の岸辺付近に集まったことから、断続的に遊泳することによりヨシ帯の岸辺付近へ移動したものと考えられる。

一方、ニゴロブナ仔魚が蟬集するヨシ帯の岸辺付近は著しくD0が低い環境にあった。また、この水域には動物プランクトンが高密度に分布することが確認された。岸辺付近が貧酸素化する要因のひとつに、この動物プランクトンの呼吸による酸素消費が考えられる。さらにD0は日没後に低下しはじめ、夜明け前には極小値を示し、時には無酸素状態になることもあった。ヨシ帯内では、植物プランクトンやヨシなどへの付着藻類が重要な基礎生産者であることが知られている。¹⁴⁾昼間はこれらが光合成作用により酸素を発生させるものの、夜間は光合成が行われず、逆に呼吸作用により酸素が消費されるため、夜間のD0の著しい低下を招いたものと思われる。一方、ヨシ帯を外れた沖側では、D0はヨシ帯先端に比べて昼間は若干低く、夜間は若干高まる傾向がみられた。この付近は沖側の水の影響を受けており、昼間は光合成作用で酸素が発生するヨシ帯先端よりもD0が低く、夜間は酸素消費の大きいヨシ帯先端よりもD0が上昇したものと思われる。

牧ヨシ帯内の水温は、岸辺付近では若干低く、離岸20～30mで高く、さらに沖側では低くなる傾向にあった。岸辺の陸側にはヤナギ類やハンノキが自生しており、それら樹冠の下は太陽光が遮られることが多かったため、岸辺付近の水温は低く推移したものと思われる。また、ヨシ帯内はヨシの繁茂により水が停滞し、水温は上昇傾向を示したが、沖側は外部の水の影響を受けて若干低かったと考えられる。

このようにヨシ帯内は、汀線から沖方向へ魚類の餌となる動物プランクトンの密度や魚類の生息に大きな影響を与えるD0と水温の変動が大きい。ニゴロブナ仔魚の生息場としてヨシ帯を考える場合、これら水平的な生物・物理的環境特性と本種仔魚の

生理・生態的特性の相互関係を検討することが重要である。

まず、どうしてニゴロブナ仔魚は貧酸素環境にあるヨシ帯の岸辺付近に集まることが可能なのであろうか。それは、以下に述べるように本種仔魚が貧酸素環境へ非常に適応しているからだと推察される。

今回、ニゴロブナとホンモロコの子魚を用いてLD₅₀を比較したが、前者の値は後者に比べて非常に低く、ニゴロブナ仔魚における貧酸素耐性の高さがうかがえた。一方、水温27℃の条件で、魚自体の酸素消費により密閉した呼吸室内のD0を低下させた時に供試魚の半数が死亡するD0(単位:mg/L)が多くのコイ科魚種で報告されている。それらの値(単位:mg/Lへ変換)は、ウグイ *Tribolodon hakonensis* (全長84 mm)で1.04 mg/L,¹⁵⁾ イトモロコ *Squalidus gracilis* (同65 mm)で0.90 mg/L,¹⁵⁾ タモロコ *Gnathopogon elongates elongates* (同78 mm)で1.26 mg/L,¹⁶⁾ カワムツ *Zacco temminckii* (同118 mm)で1.12 mg/L,¹⁶⁾ オイカワ *Z. platypus* (同114 mm)で1.29 mg/L, ワタカ *Ischikauia steenackeri* (同145 mm)で0.77 mg/L,¹⁶⁾ コイ *Cyprinus carpio* (同116 mm)で0.80 mg/L¹⁶⁾である。各魚種の発育段階やサイズ、測定時の水温などが異なり、ニゴロブナ仔魚のLD₅₀とこれらの値を直接比較することはできないが、本種仔魚のLD₅₀は0.40～0.61 mg/Lといずれの魚種の数値よりも低く、本種仔魚は、上記コイ科仔魚と比較して極めて高い貧酸素耐性を有する可能性がある。

ニゴロブナは主にヨシ帯などにみられる浮遊物に産卵し、⁹⁾ふ化直後の仔魚は器物に付着、懸垂して水底への沈下を防いでいる。¹¹⁾しかし、ふ化翌日には鰓が発現し、その体積は4,5日の間に急速に増加する。¹¹⁾体比重は、このような鰓の発達に伴い数日のうちに低下し、仔魚期の間は周囲の水よりも若干小さく推移した。本種仔魚は、このようにして空気中からの酸素の溶解込みが見込める水面へ浮上しやすい条件を獲得するのであろう。それに対して、ホンモロコ仔魚の体比重は周囲の水よりも小さくなることはなかった。一般に貧酸素水域で繁殖する魚の仔魚の体表には血管が広く分布し、皮膚呼吸によるガス交換機構が発達することが知られている。¹⁷⁾本種の場合、ふ化直後から体長約8mmまで、鰓が未発達の間は背部の膜鰭に多数の毛細血管が分布しており、¹¹⁾水面直下へ浮上してこの膜鰭を介して酸素を吸収すること

で貧酸素環境に対応していると考えられる。さらに、今回の研究で体長10.5mmサイズの本種仔魚は、水面が存在すると無酸素条件でも死ににくいことが明らかになった。ニゴロブナ仔魚は、このような生理的特性によりD0の著しく低いヨシ帯の岸辺付近の環境に上手く適応しているといえよう。また、一般にこのような貧酸素水域へ捕食者が侵入することは困難であると考えられる。特に近年、在来魚への食害が大きな問題となっているオオクチバス¹⁶⁾に比べて、本種の貧酸素耐性は大きいこと¹⁹⁾が確認されており、ニゴロブナの仔魚にとってヨシ帯の岸辺は捕食者からの退避地としても大きな機能を有しているといえよう。

フナ属仔魚は、小型の甲殻類を好んで食べることが知られている。^{5,20,21)} 今回の調査で、ニゴロブナ仔魚は生息密度の高いカイアシ亜綱のノープリウスよりも、その成体やコペポディッドの他、ミジンコ亜綱を好んで食べることが確認された。また、これらの動物プランクトンはヨシ帯の岸辺付近に多く分布することが確認された、このため、本種仔魚にとって、D0が著しく低いが餌となる動物プランクトンの多いヨシ帯の岸辺付近は、摂餌や成長の場としても重要であるといえる。

一方、放流仔稚魚のヨシ帯内外での採集調査の結果、体長16 mmまでの仔魚はヨシ帯内部で採集され、ヨシ帯の沖側に設置したマス網では、同16 mmを超えた稚魚が採集された。本種は、体長16 mmを境にして稚魚期に達し、¹¹⁾ 急激に巡航速度が増加して遊泳能力が向上することが確認されている。¹²⁾ また、イケス内の飼育魚の観察でも、この体長を境に分布を拡大することが明らかとなっている。¹³⁾ これらのことから、本種は稚魚期に達すると、それまで生息したヨシ帯を離れて生息水域を拡大することが可能になるといえよう。しかし、マス網で日数の経過に伴い体長16 mmを超えた直後の稚魚とともに、さらに成長して巡航遊泳力を得た稚魚が採集されるようになったことから、稚魚期に達した以降の本種は、ヨシ帯を離脱するだけではなく、ヨシ帯を出入りしていることも十分考えられる。

このように奥行きがあり発達したヨシ帯の岸辺付近は、ニゴロブナ仔魚にとって餌料に恵まれた発育や成長の場として極めて重要な水面である。またD0が著しく低いため、捕食者が侵入しにくく、貧酸素環境に適応したニゴロブナ仔魚にとっては、捕食者

からの退避地としての機能も大きい。滋賀県は、ニゴロブナの産卵・繁殖の場を拡充するため、本報告で明らかにしてきたようなニゴロブナ仔稚魚の生理生態特性に合致した好適な環境をモデルにヨシ帯(奥行きは概ね30m以上)を、琵琶湖沿岸で積極的に造成している。¹⁰⁾ また、そのようなヨシ帯は、天然魚の産卵・繁殖の場としてだけではなく、ニゴロブナ種苗の放流適地としても利用されている。

第6章では、琵琶湖でニゴロブナを増殖事業をより一層進めるうえで、本種の生残にとってのヨシ帯の重要性、ヨシ帯の造成要件と管理のあり方、および本種に対するヨシ帯の環境収容力について述べる。

文 献

- 1) ニゴロブナ. 昭和58 (1983) 年度～平成17 (2005) 年度種苗生産放流事業結果概要. 財団法人滋賀県水産振興協会, 草津. 2007; 2-17.
- 2) 滋賀県農政水産部水産課. 沿岸漁場整備開発事業. 滋賀の水産, 滋賀県, 大津. 2009; 41-43.
- 3) 細谷和海. フナ. 『日本産稚魚図鑑』(沖山宗雄編) 東海大学出版会, 東京. 1988; 253-254.
- 4) 平井賢一. びわ湖内湾の水生植物帯における仔稚魚の生態 I 仔稚魚の生活場所について. 金沢大学教育学部紀要自然科学編1970; 19: 93-105.
- 5) 平井賢一. びわ湖内湾の水生植物帯における仔稚魚の生態 III ニゴロブナ仔稚魚の食性と生息域の関係. 日本生態学会誌1972; 22: 69-93.
- 6) 友田淑郎. びわ湖産フナの発育. I. ニゴロブナの発育について, およびゲンゴロウブナとニゴロブナの分化についての予察的研究. 大阪市立自然史博物館研究報告1965; 18: 3-30.
- 7) Yamamoto T, Kohnatsu Y, Yuma M. Effects of summer drawdown on cyprinid fish larvae in Lake Biwa, Japan. *Limnology* 2006; 7: 75-82.
- 8) 鈴木啓士, 永野元, 小林徹, 上野敏一. RAPD分析による琵琶湖産フナ属魚類の種・亜種判別およびヨシ帯に出現するフナ仔稚魚の季節変化. 日水誌 2005; 71: 10-15.
- 9) 藤原公一. アリザリン・コンプレクソンを用いたニゴロブナ, *Carassius auratus grundoculis*の耳石への標識装着条件. 水産増殖1999; 47: 221-228.
- 10) 藤原公一, 臼杵崇広, 根本守仁, 北田修一. アリ

- ザリン・コンプレクソンを用いたニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の耳石への多重標識装着条件と放流サイズの推定方法. 日水誌 2010; 76: 637-645.
- 11) 藤原公一. ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の飼育仔稚魚の発育と成長. 日水誌 2010; 76: 894-904.
- 12) 杉山峯一, 藤井清文. 急性毒性試験法. 「実験動物としての魚類—基礎実験法と毒性試験—」(江上信雄編) ソフトサイエンス社, 東京. 1981; 380-419.
- 13) 藤原公一, 臼杵崇広, 北田修一. 成長および流水トレーニングに伴うニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* 仔稚魚の遊泳速度の変化. 日水誌 2010; 76: 1025-1034.
- 14) Mitamura O, Tachibana J. Primary productivity of epiphytic and planktonic algae and biogeochemical characteristics in reed zones of Lake Biwa. *Jpn. J. Limnol.* 1999; 60: 265-280.
- 15) 山元憲一, 平野修. ウグイとイトモロコの低酸素下における鼻上げ, 窒息死および逃避反応. 日水誌 1987; 53: 1741-1744.
- 16) 山元憲一, 平野修, 原 洋一, 三代健造. 淡水産魚類11種の低酸素下における鼻上げおよび窒息死. 水産増殖 1988; 36: 49-52.
- 17) Rombough PJ. Respiratory gas exchange, aerobic metabolism, and effects of hypoxia during early life. In: Hoar WS, Randall DJ (eds). *Fish Physiology Vol. XI*. Academic Press, London. 1988; 59-161.
- 18) 淀太我, 井口恵一朗. バス問題の経緯と背景. 水研センター研報 2004; 12: 10-24.
- 19) Yamanaka H, Kohmatsu Y, Yuma M. Difference in the hypoxia tolerance of the round crucian carp and largemouth bass: implications for physiological refugia in the macrophyte zone, *Ichthyol Res* 2007; 54: 308-312.
- 20) 山本敏哉. 微小甲殻類を摂餌したニゴロブナ仔魚の成長. 矢作川研究 2005; 9: 85-88.
- 21) 平井賢一. びわ湖内湾の水生植物帯における仔稚魚の生態 II 水生植物帯にすむ仔稚魚の食性について. 金沢大学教育学部紀要自然科学編 1971; 20: 59-70.

5-2ニゴロブナ仔魚が琵琶湖の発達したヨシ帯岸辺付近へ集まる要因

前節では、ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の種苗放流の適地や産卵・繁殖場の造成条件を明らかにするため、その初期生態を調査し、本種は仔魚期には琵琶湖沿岸に自生する奥行きがあるよく発達したヨシ帯の岸辺付近(奥部)に能動的に集まり、その水域を発育の場として利用すること¹⁾を述べた。また、ヨシ帯奥部は本種をはじめとするフナ属仔魚が好んで摂餌する微小甲殻類(ミジンコ亜綱)^{2,4)}が多いが、溶存酸素(DO)が著しく低く、その水域は一般に魚類が生息するうえで大変厳しい環境にあると考えた。¹⁾一方、本種仔魚は生理的にそのような貧酸素環境に適応していることを明らかにした。¹⁾それでは、本種仔魚をヨシ帯奥部へ積極的に集まる要因は何であろうか。本種の種苗放流の適地や産卵・繁殖場の造成条件を検討するうえで、この要因を明らかにすることは不可欠である。そこで、これまでに天然のヨシ帯で観察されているこれらの条件の水をニゴロブナ仔魚が忌避するか、あるいは選好するか(以下、忌避/選好性)を室内において行動実験により検討し、本種仔魚のヨシ帯奥部への集まる要因を明らかにした。

材料および方法

供試魚 滋賀県水産試験場(以下、滋賀水試)のニゴロブナ親魚池に人工産卵巣(キンラン、川島商事)を設置し、自然産卵した卵を琵琶湖水(以下、湖水)を取り込んだ池中で管理し、1996年6月3日にふ化仔魚を得た。これらふ化仔魚を1 m³のFRP水槽に収容し、少量の湖水を掛け流しながらツボフムシ *Brachionus calyciflorus* やタマミジンコ *Moina macrocopa* などの餌料を与えて飼育し、ふ化8~12日後(8~12日齢)に実験に供した。これら供試魚の標準体長(以下、体長)は7.9~11.1 mm、発育段階は青索の末端の上屈が始まった上屈仔魚期から上屈が完了した直後の上屈後仔魚期⁵⁾であった。

試験装置

1. 特性が異なる水の忌避/選好試験装置 Fig. 5. 2. 1に示した装置を用いてTable. 5. 2. 1に示した特性の異なる4通りの水と明暗条件に対するニゴロブナ仔魚の忌避/選好性を評価した。この装置は、試験水

と対照水を入れた500 L貯水槽から、水中ポンプでそれらの水を上方に設置した定水頭槽へ揚げ、試験槽の左右へ370ml./minずつ定量注入できる仕組みになっている。試験槽は日高⁶⁾の考案した装置を参考にして製作したもので、水の注入側に3枚、排出側に3枚の整流板を備える。各整流板には、直径2mmの穴を規則正しく80箇所開けてある。整流板を通過した水は、試験槽中央部のテスト・チャンバー(以下、TC)内を、観察方向(波線矢印)からみて左、右(以下、それぞれ左サイド、右サイド)完全に分離して平行に流れる。このことは水溶性色素ポンソーR(赤色503号)を一方のサイドに流して確認した。試験槽の水容量は1,200 mL、流速は約18.5cm/minで、注入された水は1分間に約0.6回転する。

2. 水温が異なる水の忌避/選好試験装置 異なる水温の水は、比重差があるためFig. 5. 2. 1の装置ではTC内を平行に流れず、忌避/選好試験はできない。そのためFig. 5. 2. 2に示した装置を用いて、水温が異なる水に対するニゴロブナ仔魚の忌避/選好性を評価した。この装置のTCへは供試魚を入れた水を100 mL注入し、試験槽両端のAチャンバー(以下、AC)またはBチャンバー(以下、BC)へ温水(36.5℃)あるいは冷水(2.0℃)を、後述する実験条件に応じて200 mL注入することでTC内の水に水温勾配を持たせた。

供試魚の行動観察 供試魚から外部の観察者などがみえないように、両忌避/選好試験装置のTCを含む本体部分は、ともに、内面を黒く塗装した観察方向のみを開放にしたカバーの内部に設置した。これらカバーの内側上面には、Fig. 5. 2. 1の装置ではTCの左サイドと右サイドへ、Fig. 5. 2. 2の装置ではTCのAサイドとBサイドへ均等に光が当たるように蛍光灯を設置した。また、これら装置は暗室内に設置した。供試魚へ与える観察者などの影響を完全に排除するため、観察はそれぞれのTCから約2m離れた位置から行った。

試験装置のブランクテスト

1. 特性が異なる水の忌避/選好試験装置のブランクテスト 試験装置(Fig. 5. 2. 1)の左右の貯水槽にステンレス製ボウル(直径33 cm)を浮かべ、その中に供試魚を約60分間収容して、水温などに馴致させた。TCの左サイドと右サイドへは同じ湖水(水温19.2℃, DO 8.98 mg/L)を予め流しておき、同ボウルからピーカーで供試魚を10尾すくいとり、ピーカーの水をサ

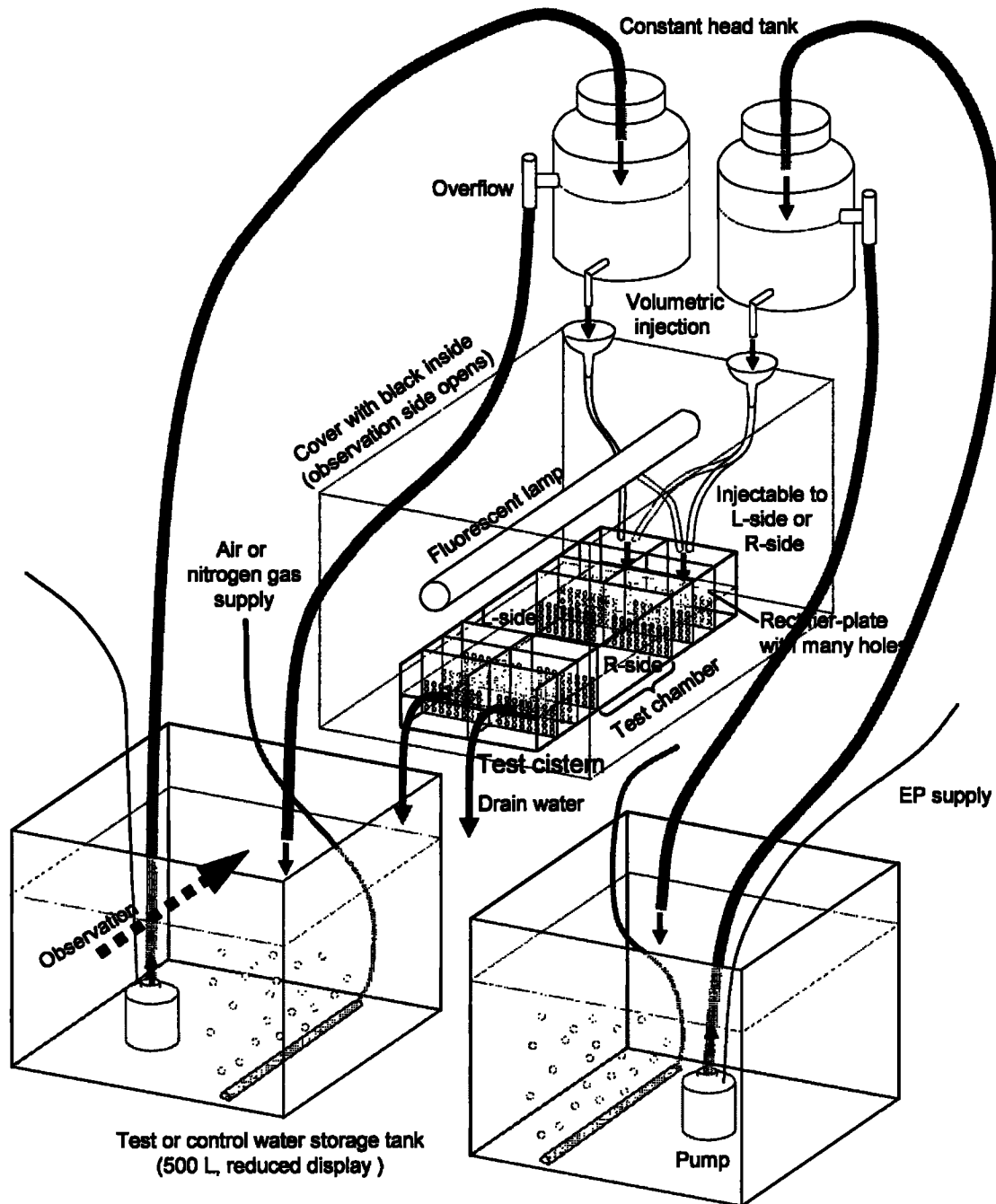


Fig. 5.2.1 Illustration of the apparatus used for the avoidance/preference test of larval *nigrobona* *Carassius auratus grandoculis* to water with different properties. Test cistern made of transparent acrylics boards: width 160 × length 300 × height 50 mm (water depth 25 mm). Test chamber portion: width 160 × length 100 × height 50 mm. L-side: the left half of the test chamber. R-side: the right half of the test chamber. Solid arrows indicate the directions of water currents.

Table 5.2.1 The results of avoidance/preference test of larval nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* to water with different properties

Experiment	Object of avoidance/preference test	Property		F_L and F_D of each experiment ^{*1}				Evaluation	Significance level (P) between blank test ^{*2}
		Test water side (L-side in blank test)	Control water side (R-side in blank test)	Mean	$\pm$ SD	N			
%									
Blank test	—	Lake Biwa water DO ^{*3} : 8.98 mg/L WT ^{*4} : 19.2°C	Lake Biwa water DO: 8.98 mg/L WT: 19.2°C	50.0	$\pm$ 4.0	6	—	—	
Exp. 1	Lake Biwa water of low DO	Lake Biwa water DO: 2.08 mg/L WT: 20.5°C	Lake Biwa water DO: 8.76 mg/L WT: 20.5°C	52.1	$\pm$ 10.8	6	Non-avoidance Non-preference	0.668	
Exp. 2	Shoreline-water in reed zone	Shoreline-water in reed zone Zooplankton-rich ^{*5} DO: 5.92 mg/L WT: 21.0°C	Outer edge-water of reed zone Zooplankton-scarce ^{*5} DO: 7.57 mg/L WT: 21.0°C	61.1	$\pm$ 12.8	6	Preference	0.045	
Exp. 3	Filtered shoreline-water in reed zone	Shoreline-water in reed zone Zooplankton-free DO: 7.69 mg/L WT: 22.9°C	Outer edge-water of reed zone Zooplankton-free DO: 7.90 mg/L WT: 22.9°C	45.5	$\pm$ 2.0	4	Non-avoidance Non-preference	0.070	
Exp. 4	Lake Biwa water with cultured zooplankton added	Lake Biwa water with cultured zooplankton added ^{*6} DO: 7.96 mg/L WT: 21.0°C	Lake Biwa water without cultured zooplankton added ^{*6} DO: 8.13 mg/L WT: 21.0°C	59.7	$\pm$ 12.6	6	Non-avoidance Non-preference	0.062	
		Lake Biwa water Shaded with black cover DO: 8.84 mg/L WT: 20.0°C	Lake Biwa water Not shaded DO: 8.84 mg/L WT: 20.0°C	(64.5	$\pm$ 4.9	5	Preference	0.000) ^{*7}	
Exp. 5	Light shielding	Lake Biwa water Shaded with black cover DO: 8.84 mg/L WT: 20.0°C	Lake Biwa water Not shaded DO: 8.84 mg/L WT: 20.0°C	24.5	$\pm$ 5.5	6	Avoidance	0.000	

*1: F_L : distribution frequency of larval nigorobuna at the left side of the test chamber at every one minute from 5 to 15 minutes later in the blank test. F_D : the same frequency at the test water side in Experiment 1 to 5.

*2: By Student's t -test or Welch's t -test.

*3: DO: dissolved oxygen concentration.

*4: WT: water temperature.

*5: Test water: *Brachionus* sp. 180 ind./L, *Mytilina* sp. 60 ind./L, *Scapholeberis* sp. 30 ind./L, *Cyclops* sp. 30 ind./L, nauplius 1110 ind./L. Control water: *Brachionus* sp. 390 ind./L, *Mytilina* sp. 60 ind./L, nauplius 330 ind./L.

*6: Test water: *Brachionus calyciflorus* 120 ind./L, *Moina macrocopa* 240 ind./L, *Daphnia* sp. 600 ind./L. Control water: Zooplankton-free.

*7: Rejected the extreme value: 35.5% ($P < 0.05$ by Thompson's outlier test).

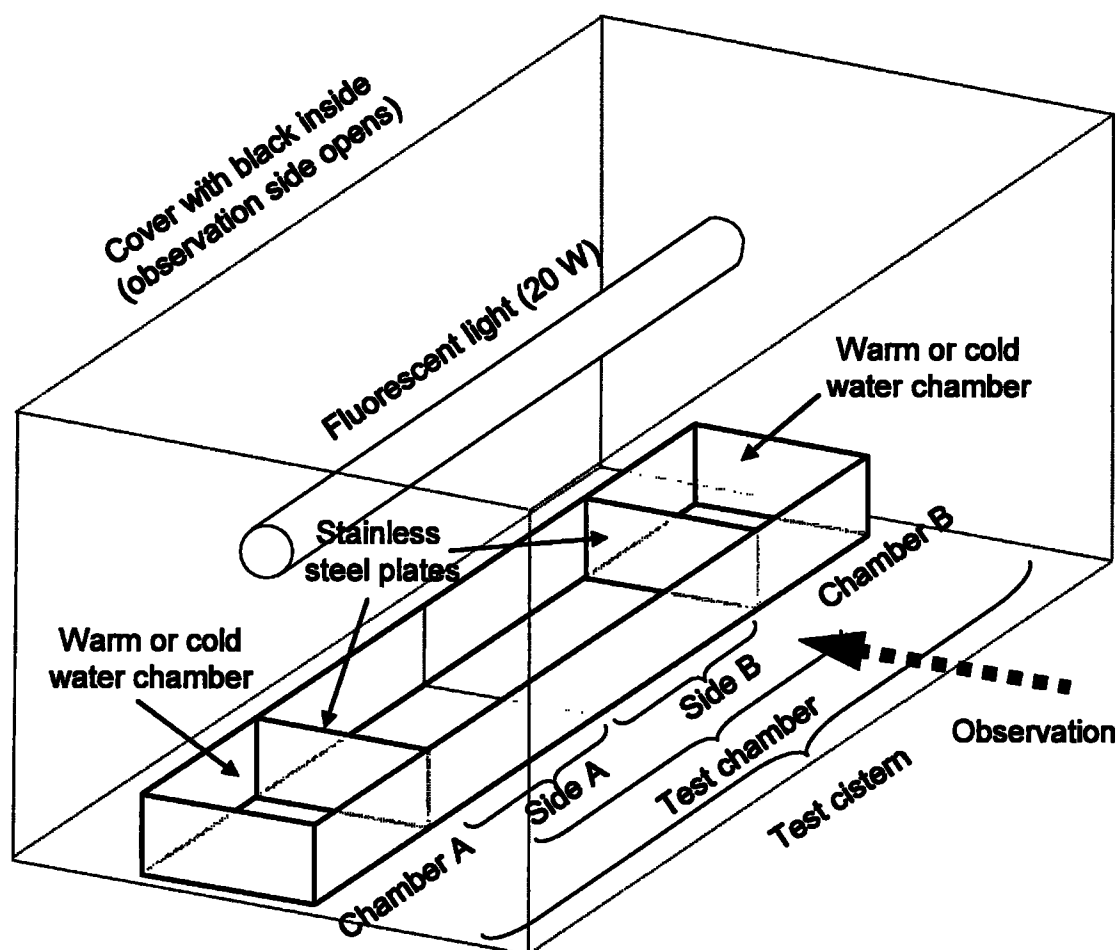


Fig. 5.2.2 Illustration of the test cistern used to examine the avoidance/preference of larval nigrubuna *Carassius auratus grandoculis* to a different water temperature from that before the experiment. Test cistern made of transparent acrylics boards: width 110 × length 430 × height 50 mm. Test chamber portion: width 110 × length 230 × height 50 mm.

イフォンで吸い出して30 mLに調整した後、TCの中央部に静かに注ぎ入れた。その後1～15分の間に1分毎に15回、左サイドに分布する供試魚の尾数 N_L を計数し、左サイドにおける供試魚の分布頻度(F_L , %)を次式により算出した。

$$F_L = (N_L / 10) \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

このプランクテストは、毎回、供試魚を新しいものと入れ替えて6回行った。

2. 水温が異なる水の忌避/選好試験装置のプランクテスト 供試魚を飼育水槽から水とともに10 Lパンライト水槽に移し、その中からピーカーで10尾すくいとり、ピーカーの水をサイフォンで吸い出して100 mLに調整した後、TC (Fig. 5. 2. 2) の中央部へ静かに注ぎ入れた。この時の水温は20. 6℃であった。その後1～5分の間に1分毎に5回、TC内のAサイドに分布する供試魚の尾数 N_A を計数し、Aサイドにおける供試

魚の分布頻度(F_A , %)を次式により算出した。

$$F_A = (N_A / 10) \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

このプランクテストは、毎回、供試魚を新しいものと入れ替えて6回行った。

忌避/選好試験

1. 特性が異なる水の忌避/選好試験 TC (Fig. 5. 2. 1) の一方のサイドへTable 5. 2. 1に示した4通りの試験水を、その反対サイドへは同表に示した対照水を流した試験を、試験水を流すサイドを交互に入れ替えて4回または6回行った(試験1～4)。また、両サイドへ同じ湖水を流し、一方のサイドのみ上面を黒い板で覆って遮光した試験を、遮光サイドを交互に入れ替えて6回行った(試験5)。試験1、試験4および試験5の供試水には滋賀水試に導いている湖水を用いた。試験1では、Fig. 5. 2. 1の貯水槽内の試験水には窒素ガスを、対照水には空気を注入してD0を調整し

た。他の試験を含めてD0と水温は、試験槽の上端でハンディー溶存酸素計(D-25, 堀場製作所)を用いて測定した。試験4では、湖水に滋賀水試内のコンクリート池で粗放培養している動物プランクトン(Table 5.2.1, 脚注参照)を添加して試験水とした。この動物プランクトンを添加しなかった湖水を対照水とした。試験2と試験3の供試水は、著者らが行ったニゴロブナの初期生態調査¹⁾のフィールドであった滋賀県近江八幡市牧町沿岸に自生するヨシ帯(幅約150~160 m, 奥行き約45~50 m)の奥部と外縁部から採水したものをを用いた。採水は投げ込み型水中ポンプを用いて行った。採水した水は活魚輸送車で滋賀水試まで搬入し、試験2ではそのまま、試験3ではプランクトンネット(NXX17, 目合い72 μ m, 離合社)でろ過し、いずれも緩やかに通気し、水温が一定になった翌日に供試した。忌避/選好試験は、TCに通水した数分後に、その中央部にプランクテストと同様に10尾の供試魚を静かに注ぎ込んで行った。供試魚を入れた後、5~15分までの間に1分毎に11回、TC内の試験水サイドあるいは遮光サイドに分布する供試魚の尾数 N_q を計数し、それらサイドにおける供試魚の分布頻度(F_q , %)を次式により算出した。

$$F_q = (N_q/10) \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

この忌避/選好試験は、毎回、供試魚を新しいものと入れ替えて、試験水を流すサイドを交互に入れ替えて、試験3では4回、それ以外の試験では6回行った。なお、遮光サイドに分布した供試魚の尾数は、観察できる非遮光サイドの尾数を10尾から差し引いて求めた。

2. 水温が異なる水の忌避/選好試験 ニゴロブナ仔魚は、それまでの生息水温(前歴水温)よりも高い水温と低い水温が存在した場合、どちらを忌避/選好するかを知るため、次の試験を行った(試験6)。まず、プランクテストと同様に、予めTC(Fig. 5.2.2)の中央部へ100 mLの飼育水(20.6℃)とともに供試魚を10尾静かに注ぎ入れた。その後、試験槽(Fig. 5.2.2)のACまたはBCへ温水を、反対側へ冷水を注入した。その後1~4分の間に1分毎に4回、TC内の温水注入側のサイドに分布する供試魚の尾数(N_T)を計数し、そのサイドにおける供試魚の分布頻度(F_T , %)を次式により算出した。

$$F_T = (N_T/10) \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

この忌避/選好試験は、毎回、供試魚を新しいもの

と入れ替えて、温水または冷水をAC, BCへ交互に注入して4回行った。

さらに、ニゴロブナ仔魚の前歴水温よりも高い水温の水の忌避/選好性(試験7)または低い水温の水の忌避/選好性(試験8)を知るため、予めTC(Fig. 5.2.2)の中央部へ100 mLの飼育水(試験7では21.9℃, 試験8では22.4℃)とともに供試魚を10尾静かに注ぎ入れた。その後、速やかにACまたはBCへ試験7では温水を、試験8では冷水を注入し、反対側のチャンバーへは何も注入せずに、温水または冷水を注入するサイドを交互に入れ替えて6回行った、TC内の温水側あるいは冷水側のサイドに分布する供試魚の F_T を式4より求めた。なお、この試験でも、毎回、供試魚は新しいものと入れ替えた。

さらに、試験6~8実施時のTC内における水温を把握するため、水銀水温計をAサイド中央、AサイドとBサイドの境界線上中央およびBサイド中央に設置し、試験6~8と同じ条件でTC内に供試魚の飼育水を入れ、ACとBCにそれぞれ温水と冷水を入れた場合(試験9)、ACにのみ温水を入れた場合(試験10)およびACにのみ冷水を入れた場合(試験11)の1分毎の水温を読み取った。

統計処理 Fig. 5.2.1に示した装置の各プランクテストにおいて、仮説 H_0 :「TCの左サイドと右サイドの供試魚の分布頻度(以下、「供試魚の分布頻度」は「分布頻度」)に偏りはない」、を二項検定により検定した。また、Fig. 5.2.2に示した装置の各プランクテストにおいても、仮説 H_0 :「TCのAサイドとBサイドの分布頻度に偏りはない」、を同様に検定した。また、Fig. 5.2.1に示した装置のプランクテストおよび試験1~5において、仮説 H_0 :「各試験の試験開始5分後から15分後までの1分毎の分布頻度の平均値に差がない」、を一元配置分散分析法で検定した。Fig. 5.2.2に示した装置のプランクテストおよび試験6~8においても、仮説 H_0 :「各試験の試験開始1分後から4分後までの1分毎の分布頻度の平均値に差がない」、を同様に検定した。その上で、試験1~5では試験開始5分後から15分後までの分布頻度の試験毎の平均値を、試験6~8では試験開始1分後から4分後までの分布頻度の試験毎の平均値を、トンプソンの棄却検定法で $P < 0.05$ で棄却されるものを除いてデータとして採用した。プランクテストと試験1~8との間での分布頻度(各試験のデータの平均値)の平均値差は、仮説 H_0 :

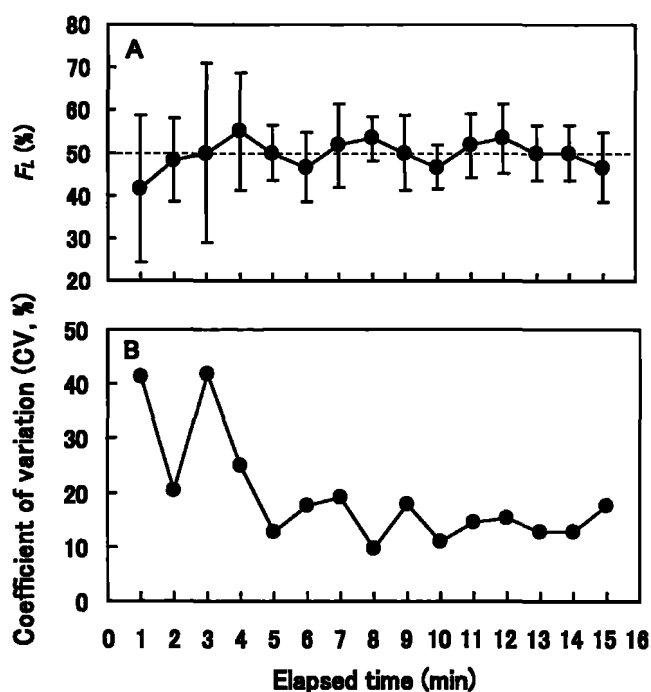


Fig.5.2.3 Temporal changes in distribution frequency of experimental fish on the left side of the test chamber (see Fig.5.2.1) in the blank test: F_L (A) and its coefficient of variation (B). Solid circles in A refer to the average values of six measurements, and vertical bars to the standard deviations.

「両者の分散は等しい」をF検定で検定し、 $P>0.05$ で等分散と判定された場合は、スチューデントのt検定、不等分散と判定された場合はウェルチのt検定で、次の仮説のもとで検定した。

試験1～5

仮説 H_0 :「ブランクテストにおけるTCのLサイドと試験1～5におけるTCの試験水を流したサイドの分布頻度の平均値は等しい」。

試験6～8

仮説 H_0 :「ブランクテストにおけるTCのAサイドと試験6～8におけるTCの水温を変化させたサイドの分布頻度の平均値は等しい」。

結 果

試験装置のブランクテスト

1. 特性が異なる水の忌避/選好試験装置のブランクテスト 各ブランクテストにおけるTC(Fig. 5. 2. 1)の左サイドと右サイドの供試魚の分布頻度には偏りはみられなかった ($P>0.05$)。Fig. 5. 2. 3Aには時間経過に伴う F_L (6回の試行の平均値) の推移を、Fig. 5.

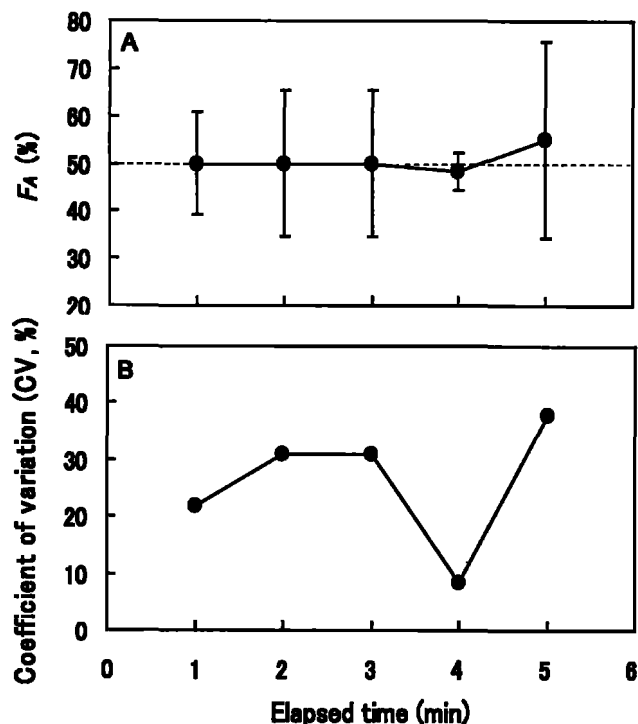


Fig.5.2.4 Temporal changes in distribution frequency of experimental fish on side of A of the test chamber (see Fig.5.2.2) in the blank test: F_A (A) and its coefficient of variation(B). Solid circles in A refer to average values of six measurements, and vertical bars to the standard deviations.

2. 3B にはその変動係数 (CV) を示した。 F_L は、試験を開始して1分後には41.2%であったが、それ以降はほぼ50%で安定した。 F_L のCVは、試験開始当初は40%を超えることもあったが、時間の経過とともに小さくなり、5分後以降は10～20%の範囲内で安定した。また、5分以降の1分毎の F_L の平均値には有意差はみられなかった ($P>0.05$)。

2. 水温が異なる水の忌避/選好試験装置のブランクテスト 各ブランクテストにおけるTC(Fig. 5. 2. 2)のAサイドとBサイドの供試魚の分布頻度には偏りはみられなかった ($P>0.05$)。Fig. 5. 2. 4Aには時間経過に伴う F_A (6回の試行の平均値) の推移を、Fig. 5. 2. 4BにはそのCVを示した。 F_A は試験開始の1分後から4分後までほぼ50%で安定していたが、5分後には55%とそれまでよりも大きくなった。 F_A のCVは、試験開始の1分後から4分後までほぼ30%以内で安定していたが、5分後には38%とそれまでよりも大きくなった。また、試験開始1～4分後の1分毎の F_A の平均値には有意差はみられなかった ($P>0.05$)。

水温が異なる水の忌避/選好試験装置のTC内の水温分布 試験9～11におけるTC内の各点での時間の

経過に伴う水温の変化をFig. 5.2.5に示した。試験9においては、時間の経過に伴い水温はTCのAサイドでは次第に上昇(5分後に2.1℃上昇)し、Bサイドでは次第に下降(5分後に2.6℃下降)したが、AサイドとBサイドの境界では大きな水温変動はみられなかった。試験10においては、5分後には水温はAサイドで3.0℃上昇したが、AサイドとBサイドの境界およびBサイドでは1.2～1.4℃の上昇であった。試験11においては、5分後には水温はAサイドで2.2℃下降し、AサイドとBサイドの境界およびBサイドではともに0.6℃上昇した。

忌避/選好試験 特性が異なる4通りの試験水および遮光サイドへのニゴロブナ仔魚の忌避/選好試験の結果をTable 5.2.1に示した。いずれの試験においても、試験開始後5～15分の間の1分毎の F_0 の平均値には有意差はみられなかった($P>0.05$)。試験1では、DOが2.08 mg/Lと低い湖水を流したサイドにおける

分布頻度は、 $52.1 \pm 10.8\%$ (平均値 $\pm$ SD)で、DOが低い水に対する本種仔魚の忌避/選好性はみられなかった($P=0.668$)。試験2では、ヨシ帯奥部とヨシ帯外縁部の水を供試した。ヨシ帯奥部の水にはツボウムシ属 *Brachionus* sp. が180 ind./L、サヤガタウムシ属 *Mytilina* sp. が60 ind./Lみられた他、アオムキミジンコ属 *Scapholeberis* sp. やケンミジンコ属 *Cyclops* sp. といった微小甲殻類がともに30 ind./L、ノープリウス幼生が1110 ind./Lみられ、DOは5.92 mg/Lであった。それに対して、ヨシ帯外縁部の水にはツボウムシ属が390 ind./L、サヤガタウムシ属が60 ind./L、ノープリウス幼生が330 ind./Lみられたが、微小甲殻類がみられず、DOは7.57 mg/L。とヨシ帯奥部の水よりも若干高かった。ヨシ帯奥部の水を流したサイドにおける分布頻度は $61.1 \pm 12.9\%$ で、本種仔魚はヨシ帯奥部の水を有意に選好した($P=0.045$)。しかし、試験3において、ヨシ帯奥部の水から動物プランクトンをろ過・除去すると、その水を流したサイドにおける分布頻度は $45.5 \pm 2.0\%$ に低下し、忌避/選好性に有意差はみられなくなった($P=0.070$)。また、試験4において、湖水(動物プランクトンは含まれない、DOは8.13 mg/L、水温は21.0℃)と、その湖水に培養した動物プランクトンを添加した水(ツボウムシが120 ind./Lの他、タマミジンコやミジンコ属 *Daphnia* sp. といった微小甲殻類がそれぞれ240 ind./L、600 ind./L含まれる、DOは7.96 mg/L、水温は21.0℃)を供試したところ、後者を流したサイドにおける異常値($F_0=35.5\%$, $P<0.05$)を除いた分布頻度は $64.5 \pm 4.9\%$ で、本種仔魚は有意に動物プランクトンを含む水を有意に選好した($P=0.000$)。さらに試験5においてTCへ左右同じ湖水を流し、一方を遮光すると、その遮光サイドにおける分布頻度は $24.6 \pm 5.5\%$ となり、本種仔魚は暗条件を著しく忌避した($P=0.000$)。

ニゴロブナ仔魚の前歴よりも水温が高い、あるいは低い湖水の忌避/選好試験の結果をTable 5.2.2に示した。いずれの試験においても、試験開始後1～4分の間の1分毎の F_1 の平均値には有意差はみられなかった($P>0.05$)。試験6において、前歴よりも高い水温と低い水温の湖水の選択性を調べたところ、水温の高いサイドにおける分布頻度は $66.3 \pm 8.3\%$ で、本種仔魚は前歴に比べて低い水温よりも高い水温の湖水を有意に選好した($P=0.001$)。また試験7におい

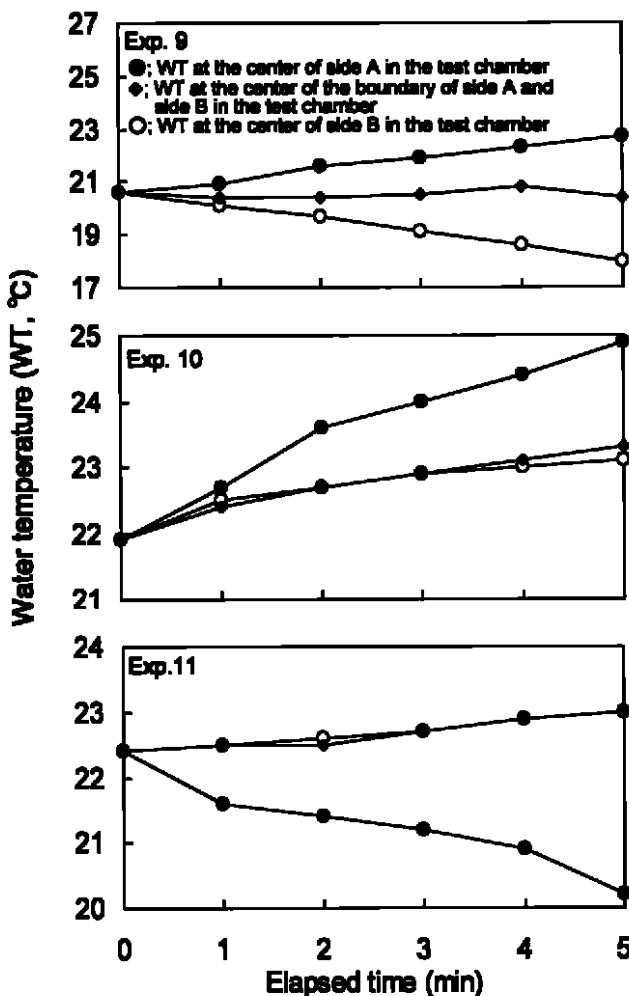


Fig.5.2.5 Temporal changes in water temperature in the test chamber (see Fig.5.2.2) in Experiments 9 to 11.

Table 5.2.2 Results of avoidance/preference test of larval nigorobuna *Carassius auratus grandoculis* to a different water temperature from that before the experiment

Experiment	Object of avoidance/preference test	Water temperature ^{*1}		F_A and F_T of each experiment ^{*2}			Evaluation	Significance level (P) between blank test ^{*3}	
		Side A	Side B	Mean	±	SD			N
%									
Blank test	—	The same as antecedent	The same as antecedent	49.6	±	3.7	6	—	—
Exp. 6	Higher or lower water temperature than antecedent	Higher than antecedent	Lower than antecedent	66.3	±	8.3	4	Preference	0.001
Exp. 7	Higher water temperature than antecedent	Higher than antecedent	The same as antecedent	65.0	±	12.5	6	Preference	0.014
Exp. 8	Lower water temperature than antecedent	Lower than antecedent	The same as antecedent	44.6	±	7.7	6	Non-avoidance Non-preference	0.090

*1: See Fig. 5.2.1 for water temperature in the test chamber.

*2: F_A : distribution frequency of larval nigorobuna at side A of the test chamber at every one minute from 1 to 4 minutes later in the blank test. F_T : the same frequency on high (in Experiment 6 and 7) or low (in Experiment 8) temperature water side.

*3: By Student's t -test or Welch's t -test.

て、前歴水温とそれよりも高い水温の湖水の選択性を調べたところ、水温の高いサイドにおける分布頻度は $65.0 \pm 12.5\%$ で、本種仔魚は前歴よりも高い水温の湖水を有意に選好した ($P=0.014$)。一方、試験 8 において、前歴水温とそれよりも低い水温の湖水の選択性を調べたところ、水温の低いサイドにおける分布頻度 $44.6 \pm 7.7\%$ で、本種仔魚は前歴よりも低い水温の湖水に対しては、有意な忌避/選好性を示さなかった ($P=0.090$)。

考 察

本研究により、ニゴロブナ仔魚は、低い DO を特に忌避せず、遮光環境を忌避するが、高い水温を選好し、餌となる微小甲殻類に強く誘引される特性を有することが確認された。

Fig. 5.2.1 に示した忌避/選好試験装置のプランクテストでは、いずれの試験でも供試魚は TC の両サイドに偏りなく分布し、試験開始後 5～15 分の間の 1 分毎の F_L の平均値は 50%、CV は 10～20% で安定していた (Fig. 5.2.3)。また、いずれの試験においても、この間の 1 分毎の F_0 の平均値には有意差はみられなかった。このため、この装置を用いた、異なる特性の水や遮光条件に対するニゴロブナ仔魚の忌避/選好試験では、試験水は TC の左右どちらのサイドに流しても問題はなく、この研究ではサイドを左右交互に替えて流し、あるいは遮光し、精度を上げるために試験開始 5 分後から終了する 15 分後までの 1 分毎の N_0 を試験毎に平均してデータとして採用したことは適切であったと判断される。また、Fig. 5.2.2 に示した忌避/選好試験装置のプランクテストでも、いずれの試験でも供試魚は TC の両サイドに偏りなく分布し、試験開始後 1～4 分間の 1 分毎の F_L の平均値はほぼ 50%、CV は 9～31% で比較的安定していた (Fig. 5.2.4)。また、いずれの試験においても、この間の 1 分毎の F_T の平均値には有意差はみられなかった。このため、この装置を用いた、水温の異なる水に対する本種仔魚の忌避/選好試験では、TC の A、B どちらのサイドの水温を変化させても問題はなく、この研究では水温を変化させるサイドを交互に変更したことは適切と判断される。また、TC 内の水温は、時間の経過とともに変化した (Fig. 5.2.5) が、安定してデータが得られた試験開始後 1 分から 4 分までの N_T をデータとして採用し、4 回ま

たは 8 回の試験回数にわたるその平均値をデータとして採用したことは適切であったと判断される。以上の結果、上記したデータを用いて、特性が異なる水や明暗差、水温差に対するニゴロブナ仔魚の忌避/選好性の評価は可能であるといえよう。なお、試験 4 では、トンプソンの棄却検定を経て $F_0=35.5\%$ の一例の値を棄却した。この値を観測した試験のみ、全ての供試魚が TC の一方のサイドに集まる現象が観察された。また、この棄却データを除く試験 4 における分布頻度の CV は 15.0～27.8% であったが、この棄却データの CV は 54.1% と大きかったことから、異常値であったと判断される。

これまでの研究で、奥行きがあり、よく発達したヨシ帯は、その奥部ほど貧酸素状態にあり、ニゴロブナ仔魚はヨシ帯奥部に能動的に集集することが確かめられている。¹⁾ 今回の忌避/選好試験では、本種仔魚は DO が 8.76 mg/L と 2.08 mg/L の水とでは、DO の低い水を忌避しないという結果が得られた。このため、貧酸素は本種仔魚のヨシ帯奥部への集集行動に対して、大きな障害にはならないと思われる。また、これまでに多くの魚種で、貧酸素に対する逃避行動がみられる DO (単位: mg/L) が報告されており、それらの閾値 (単位: mg/L へ変換) は、カマツカ *Pseudogobioesocetus* (全長 74 mm) では 4.83 mg/L,²⁾ ウグイ *Tribolodon hakonensis* (同 84 mm),³⁾ イトモロコ *Squalidus gracilis* (同 65 mm)⁴⁾ カワムツ *Zacco temminckii* (同 6.2 g)⁵⁾ およびオイカワ *Z. platypus* (同 7.2 g)⁶⁾ では 3.0 mg/L 以上、ウナギ *Anguilla japonica* (同 187 mm)¹⁰⁾、タモロコ *Gnathopogon elongatus* (体重 7.2 g)⁹⁾ およびギンブナ *C. auratus langsdorfi* (同 39.0 g)⁸⁾ では 2.75 mg/L、オオクチバス *Micropterus salmoides* (同 23 g)¹¹⁾ では 2.4 mg/L¹¹⁾、ワタカ *Ischikania steenackeri* (同 15.4 g) とコイ *Cyprinus carpio* (同 39.0 g) では 1.95 mg/L¹²⁾ である。ニゴロブナ仔魚は DO が 2.08 mg/L の水を忌避しないという今回の試験結果と、これらの値の比較からも、ニゴロブナ仔魚は貧酸素を忌避しにくい特性を有する魚種であることがうかがえる。なお、ヨシ帯の奥部は、昼間に比べて夜間は DO が一層低下する傾向にあり、明け方には無酸素になることもある。¹³⁾ しかし、本種仔魚は本来、貧酸素耐性が高い¹⁴⁾ うえに、仔魚期には背部の膜嚢に毛細血管が密に分布し、¹⁵⁾ この時期は体比重が環境水の比重よりも若干小さく、水面から酸素の溶け込みが見込める水面直下に浮上してこの膜嚢を

介して呼吸ができると考えられている。¹⁾このように本種仔魚は貧酸素環境へ生理的に適応していることから、貧酸素は忌避の原因にならないものと思われる。

平井¹²⁾や鈴木ら¹³⁾は、ヨシ帯奥部はその外縁部よりも水温が高い傾向にあることを報告している。著者らも、岸辺に樹木が繁茂して日陰になる場合を除くと、水温はヨシ帯奥部ほど高い傾向にあることを観察している。¹⁾今回の忌避/選好試験で、本種仔魚は前歴よりも高い水温の水を選好するという結果が得られた。このため、本種仔魚がヨシ帯奥部へ蟄集する要因のひとつとして、水温の高い水域の選好が考えられる。金尾ら¹⁴⁾は水田ではニゴロブナの初期成長は速く、その原因として高水温の可能性を指摘している。ヨシ帯内では、本種仔魚は高水温水域に蟄集することで周辺水域よりも速く成長する可能性がある。

ニゴロブナの産卵期に当たる4, 5月^{15, 16)}には、ヨシ帯の奥部にカイアシ亜綱のノープリウス幼生が優占し、その成体やコペポディッド幼生、ミジンコ亜綱も多数出現する。^{1, 17)}フナ属仔魚はこれらのうち、ミジンコ亜綱を好んで食べることが報告されている。^{2, 4)}また、ヨシ帯に放流されたニゴロブナ仔魚の消化管からは、カイアシ亜綱の成体やコペポディッド幼生、ミジンコ亜綱が多数確認され、分布密度の高いノープリウス幼生よりも、これらを選択的に捕食していることが報告されている。¹⁾今回の忌避/選好試験では、本種仔魚はヨシ帯の奥部のアオムキミジンコ属やケンミジンコ属といった微小甲殻類を含む水を、それらを含まない外縁部の水よりも選好するが、プランクトンネットでろ過して動物プランクトンを取り除くと、ヨシ帯奥部の水への選好性が消失することが確認された。また、培養したタマミジンコやミジンコ属といったミジンコ亜綱の微小甲殻類を添加した水を選好することも確認された。これらの結果から、本種仔魚がヨシ帯奥部へ蟄集する要因のひとつとして、餌となる微小甲殻類を含む水の選好が考えられる。

ヨシ帯の岸辺付近にはヤナギ類*Salix spp.*やハンノキ*Alnus japonica*が自生することが多く、著者らは、本種仔魚はヨシ帯奥部に蟄集するが、このような樹木の日陰となる部分には仔魚が少ないことを観察している。¹⁾今回の明・暗条件への忌避/選好試験では、

本種仔魚は明条件よりも暗条件を著しく忌避した。ヨシ帯の奥部において、また今回の忌避/選好試験の明・暗条件下において、ともに照度などの測定は行われておらず、今回の試験結果からは木陰はヨシ帯内での本種仔魚の蟄集を妨げる要因になっているとは言いきれない。しかし、その可能性を否定できるものではなく、今後、ニゴロブナの好適な産卵・繁殖場を造成するにあたり、光条件について更なる研究が必要である。

ヨシ帯の奥部は、貧酸素、高水温に加え、微小甲殻類が豊富であり、本研究で確認されたようにニゴロブナ仔魚はこの環境特性を選好してヨシ帯奥部へ蟄集する。そして、このような水域を捕食者からの退避地として、また摂餌や成長の場として利用していると思われる。特に近年、侵略的外来種のおオクチバスによる在来魚への食害が大きな問題となっているが、¹⁸⁾おオクチバス稚魚に比べて本種仔魚の貧酸素耐性が大きく、¹⁹⁾また、おオクチバスはDOが低い水を忌避する¹¹⁾ため、貧酸素にあるヨシ帯奥部は、本種仔魚が生残するうえで極めて有効な水域である。

ニゴロブナ仔魚を対象とした種苗放流を進めるうえで、岸辺付近にこのような環境が形成される発達したヨシ帯への放流が重要である。また、ニゴロブナの産卵・繁殖の場としてヨシ帯を造成する場合も、このような環境が創成される奥行きのあるヨシ帯の設計が必要である。第6章では、ニゴロブナ仔魚が生残するうえでのこのようなヨシ帯の重要性を、天然水域での標識種苗放流調査などにより精査・実証した結果について述べる。

文 献

- 1) 藤原公一，白杵崇広，根本守仁，北田修一．琵琶湖沿岸のヨシ帯におけるニゴロブナ*Carassius auratus grandoculis*の初期生態とその環境への適応．日本誌 2011; 77: 387-401.
- 2) 平井賢一．びわ湖内湾の水生植物帯における仔稚魚の生態 II 水生植物帯にすむ仔稚魚の食性について．金沢大学教育学部紀要自然科学編 1971; 20: 59-70.
- 3) 平井賢一．びわ湖内湾の水生植物帯における仔稚魚の生態 III ニゴロブナ仔稚魚の食性と生息域の関係．日本生態学会誌 1972; 22: 69-93.

- 4) 山本敏哉. 微小甲殻類を摂餌したニゴロブナ仔魚の成長. 矢作川研究 2005; 9:85-88.
- 5) 藤原公一. ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の飼育仔稚魚の発育と成長. 日本誌 2010; 76: 894-904.
- 6) 日高秀夫, 菅 麻也子, 立川 涼. メダカによる化学薬剤の忌避試験法. 口農化誌 1983; 57: 571-579.
- 7) 山元憲一, 平野 修, 原 洋一, 古川浩史. カマツカの低酸素下における呼吸および逃避反応. 魚類学雑誌 1987; 33: 399-404.
- 8) 山元憲一, 平野 修. ウグイとイトモロコの低酸素下における鼻上げ, 窒息死および逃避反応. 日本誌 1987; 53: 1741-1744.
- 9) 山元憲一. コイ科魚類6種の低酸素下における逃避反応. 水産増殖 1991; 39:129-132.
- 10) 山元憲一. ウナギの低酸素下における逃避反応. 水産増殖 1990; 38: 113-116
- 11) Burleson ML, Wilhelm DR, Smatresk NJ. The influence of fish size on the avoidance of hypoxia and oxygen selection by largemouth bass. *J Fish Biol* 2001;59: 1336-1349
- 12) 平井賢一. びわ湖内湾の水生植物帯における仔稚魚の生態 I 仔稚魚の生活場所について. 金沢大学教育学部紀要自然科学編 1970; 19: 93-105.
- 13) 鈴木紀雄, 川嶋宗雄, 遠藤修一, 板倉安正, 木村保弘. 琵琶湖におけるヨシ群落に関する研究—ヨシ群落内の物理・化学・生態的性状—. 滋賀大学教育学部紀要 自然科学・教育科学 1993; 43: 19-41.
- 14) 金尾滋史, 大塚泰介, 前畑政善, 鈴木規慈, 沢田裕一. ニゴロブナ *Carassius auratus grandoculis* の初期成長の場としての水田の有効性. 日本誌2009; 75:191-197.
- 15) 中村守純. 「日本のコイ科魚類」資源科学研究所, 東京. 1969.
- 16) 松田尚一, 前畑政善, 秋山廣光. 「湖国びわ湖の魚たち」(滋賀県立琵琶湖文化館編) 第一法規出版, 東京. 1986.
- 17) Yamamoto T, Nozaki K. Microcrustacean abundance as potential food resource for larval and juvenile fishes in a reed zone of Lake Biwa. *Suisanzoushoku* 2004; 52:145-152.
- 18) 淀 太我, 井口恵一朗. パス問題の経緯と背景. 水研センター研報 2004; 12:10-24.
- 19) Yamanaka H, Kohmatsu Y, Yuma M. Difference in the hypoxia tolerance of the round crucian carp and largemouth bass: implications for physiological refugia in the macrophyte zone. *Ichthyol Res* 2007; 54: 308-312.