

平成 22 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19380113

研究課題名 (和文) 有明海におけるシログチ仔稚魚の輸送・減耗過程：  
最近年の魚類資源減少の要因を探る

研究課題名 (英文) Larval transport and survival processes of white croaker in Ariake Bay in relation to recent decline in fish resources.

研究代表者

中田 英昭 (NAKATA HIDEAKI)

長崎大学・水産学部・教授

研究者番号：60114584

研究成果の概要 (和文)：有明海において資源の減少が懸念される魚類の代表種としてシログチを取り上げ、仔稚魚の成育場への輸送過程と減耗に関与する要因について現地調査と数値モデル解析を行った。その結果、シログチ仔魚の遺伝学的な同定手法、親魚の産卵および仔稚魚の分布や成育場への輸送の実態、潮汐に対する選択性の発現など仔稚魚の能動的な行動の重要性、輸送過程における摂餌の成否や底層の貧酸素水塊の影響等について新たな知見が得られた。

研究成果の概要 (英文)：Larval transport and survival processes of white croaker, which has been recently decreasing, in Ariake Bay were studied by field samplings/measurements and numerical experiments. Several new findings were obtained, including a new genetic method for identification of white croaker larvae at the early stage, actual conditions of the spawning, larval distribution and transport, possible mechanism of the larval transport, and effects of prey availability and hypoxic water in the bottom water during the period of larval transport.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2008 年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2009 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：水産海洋学

科研費の分科・細目：水産学一般

キーワード：仔稚魚輸送、初期減耗、魚類資源、海洋環境、有明海、シログチ

## 1. 研究開始当初の背景

有明海では 1980 年代に二枚貝の漁獲量が著しく減少し大きな社会問題になっているが、二枚貝以外の漁獲量も 1987 年を境に減少し続けており、シログチをはじめとする底棲魚類の漁獲量は 1990 年代後半にさらに急

激の減少する傾向を示している。これはおそらく、有明海の最近年の環境変化によりこれらの魚類資源の再生産過程に何らかの変化を生じていることを示唆している。有明海では、諫早湾における閉め切り堤防建設を含むこれまでの沿岸開発の影響を受けて、奥部の

干潟が一部消滅したことに加え、潮流流速が全体に減少しそれに伴い海底泥の細粒化や有機物含有量の増加が進行しつつあること、さらには夏季に奥部で底層水の貧酸素化が拡大傾向にあることが報告されており、魚類の成育環境の悪化が懸念されている。また、1990年代とくにその後半には、透明度の上昇に伴い赤潮の発生頻度が急増し、それが環境悪化を加速している。

さらに注目されるのは、減少が顕著な魚類の多くが、有明海中央部で産卵し発育初期に奥部の干潟や河口域を主な生息場所にする「湾央－湾奥輸送型」の生活史を持っている点である。このことは、流れによって産卵場から成育場に輸送される過程で減耗を高める何らかの要因が作用していることを強く示唆している。この点を明らかにすることは、有明海の環境や資源の回復をはかる上できわめて重要な課題であるが、これまで有明海では流れによる仔稚魚の輸送過程や輸送に伴う減耗の実態について全く研究例がない。

## 2. 研究の目的

本研究は、有明海において最近年急激に資源が減少する傾向を示している底棲性魚類資源の減少要因を探るために、その代表種としてこれまでに生活史や繁殖生態に関する知見が得られているシログチを取り上げ、その資源再生産の変動に重要と考えられる有明海中央部の産卵場から奥部の成育場への仔稚魚の輸送とそれに伴う減耗の過程を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、シログチ仔稚魚の採集と合わせて、親魚の産卵状況や流れを含む物理・生物環境の調査を継続的に実施するとともに、それと緊密に連携させながら、数値モデルに基づくシログチ仔稚魚の流れによる輸送の実態と機構、さらにはシログチの産卵から加入に至る期間の減耗の程度を決定する主要な環境要因の検討を行った。方法の詳細は、以下の通りである。

(1) 親魚の産卵生態に関する調査：仔稚魚の輸送モデルの初期条件として重要な親魚の産卵実態を把握するため、産卵親魚の成熟状態、産卵数、産卵時期・頻度・周期性等について調査を行った。

(2) 輸送モデルの基礎となる流れの実測：超音波ドップラー流速計 (ADCP) を、産卵海域から奥部成育場への輸送経路と想定される海域に設置し、仔稚魚の輸送にかかわる流れの変動実態を3次元的に計測した。

(3) 輸送経路の物理・生物環境の測定：輸送経路と想定される海域において、シログチ仔

稚魚の採集と連携しながら、多項目鉛直プロファイラーによる水温・塩分・溶存酸素等の物理・生物環境の測定を繰り返し行った。

(4) 仔稚魚の採集と同定・分析：産卵期に有明海奥部で仔稚魚の採集を繰り返し行い、シログチの同定と胃内容物等の分析に供した。

(5) 流れの数値モデルの作成と仔稚魚輸送のシミュレーション：仔稚魚の輸送に重要な働きをしていると考えられる残差流の数値モデルを作成し、実測データ等を用いてその検証を行うとともに、幾つかの代表的なケースについてシログチ仔稚魚の輸送シミュレーションを実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 仔魚の遺伝学的な同定手法の開発

有明海には2種のニベ科魚類 (シログチ、コイチ) が生息し、仔魚期の外部形態は酷似している。シログチ仔魚期の生態を明らかにするためには、これらの二種を正確に区別する必要があるが、これまでの分類基準は曖昧なものであった。そこで、外部形態による同定手法を確立するため、シログチ仔魚の外部形態の詳細な記載を行い、近縁種コイチとの外部形態の相違を明らかにすることを目的として飼育実験を行った。すなわち、漁船に同乗して親魚を採集し、産卵時刻となる日没頃に船上で人工授精を行い、受精卵を得た。受精卵は約24時間で孵化し、仔魚は孵化後2日目には開口して摂餌を開始した (図1)。仔魚は最長で孵化後10日間、前屈曲期に達するまで飼育することができた。これらの飼育仔魚を数日ごとに取り上げ、詳しく記載したところ、種査定基準となる外部形態、黒色素胞の分布様式にはかなりの個体変異がみられることが分かった。コイチの初期発育に関する論文をもとに2種の発育様式について比較したところ、前屈曲期までの2種の仔魚を外部形態から分類することは不可能であることが分かった。

次に、上記2種の仔魚のミトコンドリアDNAをもとに、PCR法により簡便に判別することを目的として、プライマーの開発を行った。形態学的に同定が可能であった成魚または稚魚期のシログチ45個体およびコイチ11個体について、FishF1およびFishR1プライマーを用いてミトコンドリアDNAのCOI遺伝子の部分塩基配列 (655bp) を決定した。設計した3つの上流プライマー (ParF、NalF および FishF1) および1つの下流プライマー (FishR1) を混合してPCRを行うと、シログチでは約320bpと約700bpの2つのDNA断片が、コイチでは約500bpと約700bpの2つのDNA断片が増幅されることが確認できた。そこで、形態学的に同定

されたシログチとコイチ（計 56 個体）を材料とし、混合プライマーを用いて PCR を行ったところ、それぞれの種において特異的な大きさの DNA 断片が正確に増幅されることが確認された。そこでさらに、有明海から採集されたニベ科の仔魚 115 個体について混合プライマーを用いた PCR を行ったところ、すべての個体で約 700bp の DNA 断片および種特異的な DNA 断片（約 320bp または約 500bp のいずれか一方）の 2 つの断片が増幅された（図 2）。これらのことから、本研究で設計したプライマーは、シログチとコイチを識別するのに有効であることが明らかとなった。また、本手法は 1 サンプルあたり 1 回の PCR 反応で判別可能な簡便な方法であるとともに、一度に二箇所の変異サイトを同時に調べるため、精度は大変高いと考えられた。

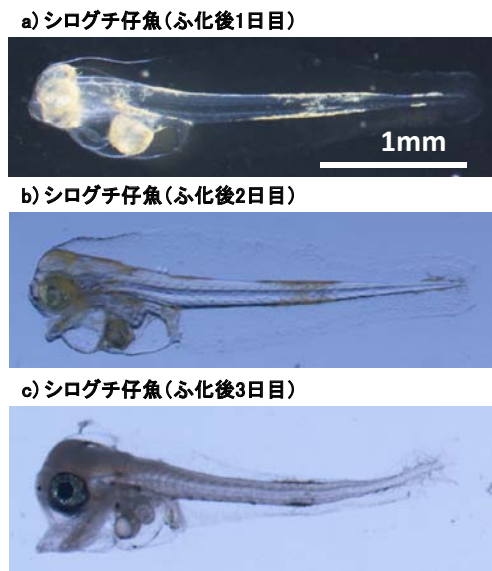


図 1 シログチのふ化仔魚

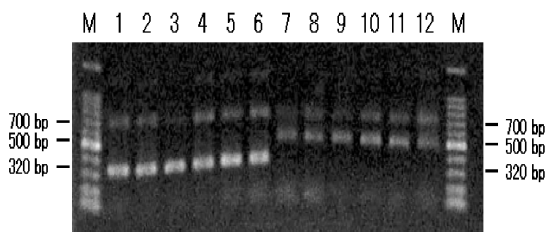


図 2 混合プライマーを用いたミトコンドリア DNA COI 領域の増幅結果。内部増幅対照（約 700bp）および、シログチ（1～6 レーン、約 320bp）またはコイチ（7～12 レーン、約 500bp）に特異的な DNA 断片が増幅された。M: DNA サイズマーカー（100bp Ladder）。

## (2) 親魚の産卵生態

シログチ親魚の産卵状況を調べるために、産卵場所である有明海の島原半島沖で採集した雌の卵巣の生殖腺重量指数[(生殖腺重量

÷体重)×10<sup>2</sup>]と組織学的観察結果に基づく成熟度を月別に分析した。その結果、年により多少の変動はあるものの、有明海では 6 月の初旬に産卵が始まり、9 月上旬には多くの個体で産卵が終了すると推定された。親の成熟状況から産卵盛期は 7 月頃と考えられた。

また、産卵直前の水和卵をもつ産卵親魚が新月時に大量に漁獲されたこと、同日に行った定点調査で仔魚は限られた定点にパッチ状に分布していることが確認されたことから、有明海における本種の産卵には月周期性がみられる可能性が強く示唆された。

受精卵は現場で採水した海水中では浮上することなく沈降することから、シログチ卵は少なくとも受精直後の夜間には底層に分布すると考えられた。

## (3) 仔稚魚の分布・生態

シログチ仔魚の出現状況には年変動がみられるものの、産卵盛期と推定された 7 月の出現数は調査した各年とも少なく、8 月から 9 月にかけて多くなる傾向がみられた。7 月に湾奥を中心に発生する貧酸素水等の環境条件が、この時期に出現する卵・仔魚の生残にマイナスの影響を及ぼしている可能性が示唆される。

2009 年にフィールドで採集されたほとんど全てのニベ科仔魚について、ミトコンドリア DNA を用いた種判別を行った結果、シログチ仔魚は 7 月から 9 月にかけて有明海奥部の主に西側海域に出現し、佐賀県太良沖の定点付近に集積することが分かった。なお、フィールドで採集された仔魚は全て前屈曲期から着底直前のものであった。また、仔魚は 5 メートル以浅の表層には出現せず、常に中底層で採集されたことから、有明海の中底層に卓越する湾奥方向への残差流により、受動的に成育場へと輸送されているものと推察された。

また、シログチ仔魚とコイチ仔魚が同時に採集されることは極めてまれであり、シログチ仔魚はコイチ仔魚とは明確に異なる分布様式をもつことが初めて明らかになった。コイチは湾奥及び諫早湾を、シログチは湾中心部を中心に出現しており、諫早湾奥部ではこれまで全く採集されていない。コイチの仔魚は産卵場である湾奥及び諫早湾付近に、一方で、シログチ仔魚は島原沖以南の産卵場から湾奥部の成育場への輸送経路と思われる西側海域に主に分布するものと推察された。

さらに、胃内容物を分析した結果、シログチ仔魚はコペポダイト期のカイアシ類を主要な餌の一つとしていることが分かった。環境水中のカイアシ類のサイズ組成と、仔魚の胃内に出現したカイアシ類のサイズを比較したところ、仔魚が摂食していたのは比較的大型のカイアシ類であり、環境中には量的に

少ないことが確認されたことから、仔魚は大型のサイズのカイアシ類を選択的に摂餌していると考えられた。また、初期の発達段階（前屈曲）の仔魚ほど空胃率が高い傾向がみられたことから、この時期の摂餌成功の可否が初期減耗の多寡に大きな影響を及ぼしていると考えられた。

#### (4) 仔稚魚生息域の環境特性

① 仔魚の高密度分布域の水塊特性：シログチ仔魚の採集点の海底上1 mにおけるTS図に仔魚密度をプロットすることによって、仔魚の高密度分布域の水塊特性について検討した。その結果、2008-2009年のいずれの採集時にも、相対的に低水温・高塩分の地点に仔魚が高密度に分布する傾向が認められた（図3）。上記の低水温・高塩分の底層水塊は、奥部に向かって急に水深が浅くなる場所に分布しており、その前面にはフロントが形成されていた。シログチは孵化後約1ヶ月で着底し、稚魚期へと移行すると考えられるが、上記のフロント付近には、前屈曲期から着底直前の仔魚が多く出現していたことから、仔魚は産卵場から少なくとも10日以内にこのフロント付近に到達し、そこに着底する時期まで滞留しているものと推察された。なお、稚魚期の成育場である河川の感潮域を含む湾最奥部では仔魚は全く採集されないことから、湾最奥部の成育場への移動には上げ潮流を能動的に選択するような仔魚の行動が関与している可能性が示唆された。

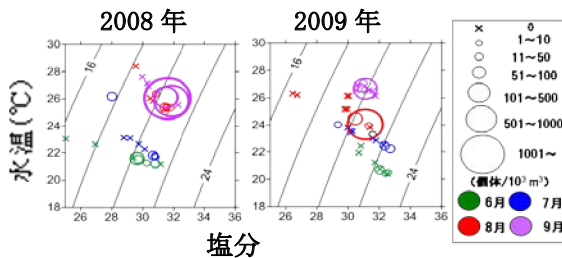


図3 シログチ仔魚採集点（海底上1 m）の水塊特性。丸の大きさは仔魚密度を示す。

② 諫早湾底層の貧酸素水の影響：仔魚の採集を実施した2007-2009年のうち、2007年夏季は諫早湾の底層水の貧酸素化が最も顕著で長期間にわたって持続した。この年は湾岸から沖向きの風（南西風）の頻度が高かったために、諫早湾底層に沖側から高密度の水塊が進入しやすく、それが湾内の成層を強化したため貧酸素化を促進したものと推察された。一方、2008年夏季は、北寄りの風の頻度が比較的高く、貧酸素化の頻度は2007年よりも低下した。2009年夏季は全体に風が強く、また連吹期間が短かったため、貧酸素化の影響は最も小さかった。沖向きの風が連吹

する年には、諫早湾の沖側の底層を輸送されるシログチ仔魚が湾内の貧酸素水の影響を大きく受け、死亡率が高くなる可能性がある。貧酸素化が顕著であった2007年8月には、7月に比べてシログチ仔魚の採集数が著しく減少しており、上記の推論と現象的には符合している。

さらに、仔稚魚の成育場と考えられる奥部浅海域の貧酸素化のメカニズムに関連して、諫早湾北岸部の干潟域における貧酸素化の発生事例に関する観測データの解析を行った。その結果、小潮期で風が弱く、残差流が小さい時期には、酸素の供給速度が著しく減少するため、浅海域でも急速に貧酸素化が進行する可能性があることが明らかとなった。

#### (5) 仔稚魚輸送の数値シミュレーション

2007年7月と2008年7月における有明海の流動場を3次元数値シミュレーションによって再現し、得られた流動場をもとに、以下に述べる合計27ケースについて卵・仔魚を模した仮想粒子追跡実験を行った。

Run 1-1~1-4とRun 2-1~2-4は2007年7月初旬の出水前後の比較、Run 3-1~Run 6-4は、潮汐の影響を調べるための実験である。河川流量の変動が小さい方が潮汐の影響をみるのに望ましいので、潮汐の影響に関する実験には河川流量の変化が小さい2008年の流れ場を使用した。Run 3-1~3-4とRun 4-1~Run 4-4は大潮時と小潮時の比較、Run 5-1~5-4とRun 6-1~Run 6-4は粒子放流時の潮汐の位相の影響を調べるための実験である。

Run 7-1~Run 7-3は粒子の沈降速度の影響を評価するための実験であり、沈降速度以外の条件はRun 4-1と同一とした。与えた沈降速度は、Run 7-1、7-2、7-3でそれぞれ $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$  m/sである。上げ潮時に浮上し、下げ潮時に沈降するという、仔魚の能動的行動Selective Tidal Stream Transport (STST)の効果についても検討した。

STSTを入れない実験(Run 1-1、2-1、3-1、4-1、5-1、5-2、5-3)では、2007年7月の出水中に粒子を放流したケース(Run 1-1)と出水後のケース(Run 2-1)で、それぞれ、約9%および3%の粒子が仔魚の成育場に到達したが、それ以外のケースではほとんどの粒子は成育場に到達できなかった。一方、STSTを入れた場合には、多い場合には8割程度の粒子が成育場に到達した。STSTを開始させる日を遅くすると、成育場に到達する粒子の割合は大きく減少する傾向がある。

2007年7月の出水中および出水後に粒子を放流した実験の結果を比較すると、双方のケースで成育場に到達する粒子の割合に大きな違いはない。出水中と出水後のどちらのケースにおいても、放流開始から1日後にSTSTを開始させた場合に成育場に到達する粒子

数が最大となり、その割合は約7割となった。放流から STST を開始する日が遅くなると、成育場に到達する粒子数は減少する。放流から3日後に STST を開始した場合には、成育場に到達する粒子の割合は、出水前 (Run 1-3) と後 (Run 2-3) で、それぞれ 31%、36% となった。放流から5日後に STST を開始した場合、成育場に到達する粒子の割合は激減し、出水前 (Run 1-4) と後 (Run 2-4) で、それぞれ 16%、6% となった。有明海湾奥部の海岸に漂着した粒子に着目すると、STST を放流後1日後に始めたケース (Run 1-2 と 2-2) では、粒子は筑後川の河口周辺に漂着する傾向が見られた。

大潮時と小潮時での実験結果を比較した結果、成育場に到達する粒子の割合に大きな差はなかった。すなわち、小潮時において、放流から1、3、5日目に STST を開始した場合に成育場に到達する粒子の割合はそれぞれ、80%、54%、14%であり、大潮時において放流から1、3、5日に STST を開始した場合に成育場に到達する粒子の割合はそれぞれ、73%、53%、9%であった。

放流時の潮時の影響を検討した結果、STST を入れない場合には、どの実験においても粒子は湾中央部から湾奥の広い範囲に拡散する傾向を示した。一方、STST を入れた場合、成育場に到達する粒子の割合は 47~73% と大きく変化した。

粒子の沈降速度を考慮した実験の結果、沈降速度が  $10^{-3}$  m/s のケースでは、流速が0に近い海底付近に粒子が停滞し続けるため、粒子は放流した地点からあまり動かないことが分かった。仔魚の生理学的な分析から、諫早湾口付近に滞留している仔魚は孵化後30日程度経過しているという結果が得られている。仔魚が海水に対し完全に中立であるということは考えにくく、上記の結果は、仔魚が孵化後しばらくはある程度大きな沈降速度を持ち、海底付近に滞留していることを示唆している。そして、ある程度成長し遊泳速度を持つようになると、STST のような能動的行動によって、湾奥方向に移動するものと考えられる。今後さらに、仔魚の輸送過程に関して定量的評価を行うのであれば、現地調査、室内実験等の手法により、仔魚の沈降速度や能動的行動に関する定量的情報を得ることが必要不可欠である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

①玉置昭夫、万田敦昌、大橋智志、S. Mandal、浜口昌巳：橘湾および有明海湾口部の砂質干潟に生息するハルマンスナモグリ (十脚甲殻

類スナモグリ科)・イボキサゴ (腹足類ニシキウズガイ科) 幼生の輸送。沿岸海洋研究、46(2)、119-126、2009 (査読あり)

②Yamaguchi, A. and G. Kume: Evidence for up-estuary transport of puffer Takifugu larvae (Tetraodontidae) in Ariake Bay, Japan. Journal of Applied Ichthyology, 24(1), 60-62, 2008 (査読あり)

③山口敦子、久米元、藤崎靖志、樋口貴彦、長富潔、原研治：寄生虫およびミトコンドリアDNA・PCR-RFLP分析による長崎周辺4海域産シログチの系群判別。長崎大学水産学部研究報告、89、7-13、2008 (査読なし)

[学会発表] (計11件)

①山口敦子：底生魚類減少要因の解明に向けた最近の研究から。沿岸環境関連学会連絡協議会第21回ジョイントシンポジウム「有明海貧酸素水塊の実態と要因」、2009年10月31日、佐賀大学

②万田敦昌：有明海の残差流の変動特性—季節変動と大潮・小潮周期変動。2009年度日本海洋学会秋季大会、2009年9月27日、京都大学

③三品裕史、中田英昭、高橋鉄哉：諫早湾における底層貧酸素水塊の変動特性。日本水産学会九州支部大会、2009年1月24日、長崎大学

④Nakata, H., H. Mishina and T. Takahashi: Development and movement of oxygen depleted bottom water responding to the wind-induced circulation in Isahaya Bay. Nagasaki University-KORDI Joint Symposium on Tidal Flat Issues, 28 Nov. 2008, Nagasaki University

⑤万田敦昌、坂牧正悟、速水祐一：CTDデータより推定した有明海奥部の残差流の短周期変動。2008年度日本海洋学会秋季大会、2008年9月26日、広島国際大学

[図書] (計4件)

①Nakata, H., H. Mishina, T. Takahashi, K. Hirano: A newly emerging environmental issue: Development of hypoxia in the bottom water of Ariake Bay. Coastal Environmental and Ecosystem Issues of the East China Sea, Eds., A. Ishimatsu and H.-J. Lie, TERRAPUB, 1-12, 2010.

②Manda, A., A. Yamaguchi, and H. Nakata: Numerical experiment on the fortnight variation of the residual current in Ariake Bay. Coastal Environmental and Ecosystem Issues of the East China Sea, Eds., A. Ishimatsu and H.-J. Lie, TERRAPUB, 41-48, 2010.

③山口敦子、田北徹：有明海の金・銀の小さなコイチとシログチ。干潟の海に生きる魚

たちー有明海の豊かさと危機、日本魚類学会  
自然保護委員会編（田北徹・山口敦子責任編  
集）、東海大学出版会、123-137、2009.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中田 英昭 (NAKATA HIDEAKI)  
長崎大学・水産学部・教授  
研究者番号：6 0 1 1 4 5 8 4

### (2) 研究分担者

山口 敦子 (YAMAGUCHI ATSUKO)  
長崎大学・水産学部・准教授  
研究者番号：1 0 3 1 0 6 5 8  
万田 敦昌 (MANDA ATSUYOSHI)  
長崎大学・水産学部・准教授  
研究者番号：0 0 3 4 3 3 4 3