

アカアマダイ卵・仔稚魚の東シナ海から 宮崎県沿岸域への輸送に関する粒子追跡実験

石川和雄¹, 伊藤幸彦^{1†}, 中村啓彦², 仁科文子², 齋藤友則³, 渡慶次 力⁴

Particle-tracking experiments of the transport of eggs, larvae and juveniles of red tilefish *Branchiostegus japonicus* from the East China Sea to the coastal area of Miyazaki Prefecture, Japan

Kazuo ISHIKAWA¹, Sachihiko ITOH^{1†}, Hirohiko NAKAMURA²,
Ayako NISHINA², Tomonori SAITO³ and Tsutomu TOKESHI⁴

東シナ海由来のアカアマダイ卵・仔稚魚の宮崎県沿岸域への輸送過程を、海洋同化システムの再解析値を用いた粒子追跡実験により調べた。主産卵季・産卵場である秋季・東シナ海陸棚縁辺から輸送される粒子のうち、平均的な着底時期とされる45日目に宮崎県沿岸域に到達したのは全体の0.01–0.7%で、その約90%が大隅海峡を経由、トカラ海峡経由は約10%であった。宮崎県への到達粒子数は、大隅海峡を通過する粒子数と有意な正の相関があったが、大量に到達する事例には黒潮小蛇行に伴う大隅分枝流の減速が関係していた。宮崎県沿岸に到達しなかったものを含め、太平洋側に出た粒子は全体の10.8%、日本海側に出た粒子は1.5%であり、88%は東シナ海に留まった。これらの結果より、東シナ海のアカアマダイは域内で再生産しつつ、日本沿岸に仔稚魚を供給していること、宮崎県沿岸に対しては大隅海峡が主要な輸送経路であることが示唆された。

キーワード：アカアマダイ, 卵稚仔魚輸送, 東シナ海, 大隅海峡

This study investigated transport processes of red tilefish *Branchiostegus japonicus* from the East China Sea to the coastal area of Miyazaki Prefecture by particle-tracking experiments. Particles were released from areas along the shelf break of the East China Sea in autumn, which are the main spawning ground and season, respectively, and the movement patterns and paths were examined using reanalysis data of an ocean data assimilation system. After 45 days from the release, which is the average duration until settlement, 0.01–0.7% of particles released in the East China Sea reached the coastal area of Miyazaki Prefecture. Among them, 90% and 10% of particles passed through the Ohsumi and the Tokara Straits, respectively. The number of particles reaching Miyazaki Prefecture was positively correlated with those passing through the Ohsumi Strait, while mass arrival events were further related to the deceleration of the Ohsumi Branch Current caused by a small meander of the Kuroshio. Proportions of particles by destination at Day 45, including those not reaching Miyazaki Prefecture, were 10.8% to the Pacific, 1.5% to the Sea of Japan, and 88% remained within the East China Sea. Therefore, it is likely that red tilefish has a major reproduction cycle within the East China Sea, while larvae and juveniles were also supplied from there to Japanese coastal areas. Finally, it is suggested that the Ohsumi Strait is the main passage of larval/juvenile transport of red tilefish, from the East China Sea to the coastal areas of Miyazaki Prefecture.

Key words: red tilefish, larval transport, particle-tracking experiment, the East China Sea, the Ohsumi Strait

2018年9月5日受付, 2019年4月22日受理

¹ 〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5 東京大学大気海洋研究所

Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8564, Japan

² 〒890-0056 鹿児島市下荒田4-50-20 鹿児島大学水産学部

Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 4-50-20 Shimoarata, Kagoshima 890-0056, Japan

³ 〒887-0031 宮崎県日南市戸高1-12-1 宮崎県南那珂農林振局

Minaminaka Agriculture and Forestry Promotion Bureau, Miyazaki Prefecture, 1-12-1 Todaka, Nichinan, Miyazaki 887-0031, Japan

⁴ 〒889-2162 宮崎県宮崎市青島6-16-3 宮崎県水産試験場

Fishery Research Institute, Miyazaki Prefectural Government, 6-16-3 Aoshima, Miyazaki, Miyazaki 889-2162, Japan

† itohsach@aori.u-tokyo.ac.jp

はじめに

アカアマダイ *Branchiostegus japonicus* は, 東シナ海の陸棚から縁辺域を主分布域とし, 日本周辺の沿岸域にも分布する底生性魚類である。アカアマダイは東シナ海におけるアマダイ類漁業の主対象であり, 1950年代から日本漁船によって延縄漁業が行われていた。当時の漁業の主体は長崎県や山口県籍の漁船で, 1970年には山口県籍の漁船だけでもおよそ12,000トンの漁獲があった(山下, 2004; 酒井ほか, 2017)。一方, 近年では中国, 韓国籍漁船との漁場の競合, 東シナ海におけるアカアマダイ資源状態の悪化などが原因となり, 日本籍漁船はほぼ東シナ海から撤退した。日本籍漁船の漁場は対馬海峡周辺から日本海西部海域に移行し, 東シナ海陸棚海域においては中国籍漁船が主体となっている(酒井ほか, 2017)。日本の漁獲量は, 1990年代から減少し始め, 2010年の山口, 福岡, 佐賀, 長崎, 熊本の五県の累計漁獲量は668トンであった(酒井ほか, 2017)。これに対して, 2010年の東シナ海における中国のアカアマダイ漁獲量(福建省・浙江省の合計値)はおよそ15,500トン, 韓国のアカアマダイ漁獲量はおよそ1,550トンであり, 日本のアカアマダイ漁獲量と比較して非常に大きく(酒井ほか, 2017), 東シナ海という国際入会漁場における日中韓での国際共同資源管理の必要性が指摘されている(時村, 2011; 酒井ほか, 2017)。

1990年代以降, 東シナ海におけるアカアマダイの調査・研究が減少するなか, 山下ほか(2011)は東シナ海で実施された延縄試験操業で漁獲されたアカアマダイを用いて, 成長と成熟について検討を行った。彼らは, 東シナ海の陸棚および陸棚縁辺のうち, 陸棚中央および南西部(当該論文では以降それぞれ中央海域, 南西海域と呼称する。ただし図中ではCentral area, Southwest areaと示す; Fig. 1a)において9月から10月にかけて生殖腺重量指数が増加することと, 成熟個体が他の海域と比較して非常に多く漁獲されることを明らかにした。この結果に基づき, 東シナ海におけるアカアマダイの主要な産卵域は, 9月から10月にかけて中央海域と南西海域に形成されると推測している(山下ほか, 2011)。アカアマダイは分離性浮遊卵を産卵し, 自然環境・飼育実験下では産卵時期に複数回産卵を行うことが知られている(林, 1979; 奥村, 2001)。そのため, 成熟個体が多い東シナ海の中央海域と南西海域では, 産卵期中に継続して産卵が行われていると考えられる。

近年のDNA多型解析を用いた研究では, 日本の太平洋側沿岸域と日本海側沿岸域, 東シナ海, 台湾沿岸域で採集したアカアマダイに遺伝的な差異が認められておらず, 東シナ海陸棚からの日本沿岸域へのアカアマダイ卵・仔稚魚の輸送による遺伝的交流の可能性が示唆されている(No-hara et al., 2010; 柳本ほか, 2010)。しかし, 日本の沿岸域

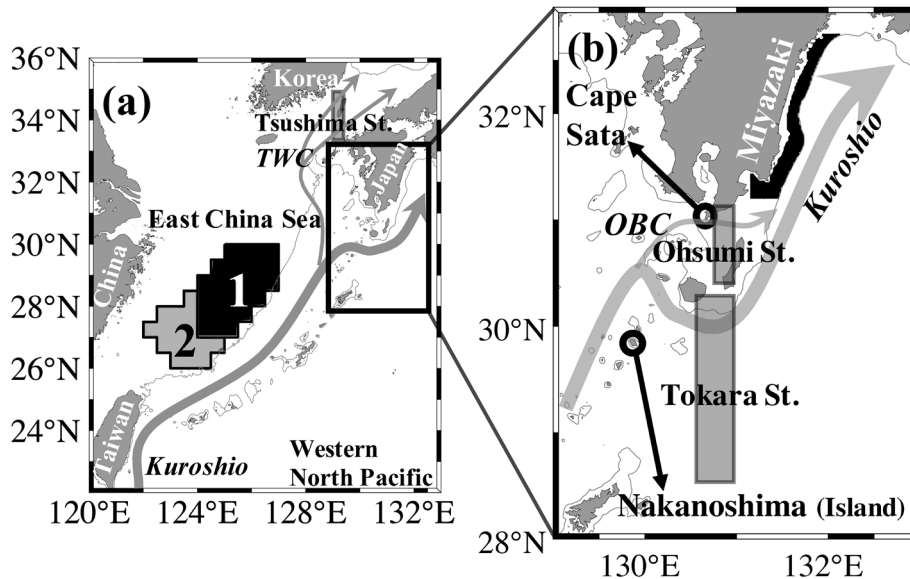


Figure 1. Topography and current system of the study area: (a) the East China Sea and (b) areas around the Ohsumi and Tokara Straits, and Miyazaki Prefecture. Depth contours of 200 m are shown by thin gray solid lines. Shaded areas with numbers in (a) are the two main spawning grounds of red tilefish (1. Central and 2. Southwest areas) according to Yamashita et al. (2011), from which particles are released in numerical experiments. In (a), OBC and TWC indicate the Ohsumi Branch Current and the Tsushima Warm Current, respectively. Semitransparent gray rectangulars within the Tsushima Strait (a), and Ohsumi and Tokara Straits (b) are areas used to count particles passing through each strait from the East China Sea (see text for details). The black shaded area in (b) is the potential settlement area in Miyazaki Prefecture, defined as an area between 30 to 200 m isobaths.

に生息するアカアマダイが東シナ海陸棚域に産卵回遊をするという知見はこれまでのところ得られていない。したがって、日本沿岸域のアカアマダイ資源量の変動は東シナ海からの卵・仔稚魚輸送量の変動に影響を受けている可能性がある。

アカアマダイは東シナ海や対馬暖流域だけでなく、千葉県以南の太平洋側沿岸域でも漁獲されている。黒潮の平均的な流路を考慮すると、東シナ海から太平洋沿岸への卵・仔稚魚輸送は、九州南方に位置するトカラ海峡・大隅海峡 (Fig. 1b) のいずれかを經由している可能性が高い。黒潮による海水の輸送量全体を見た場合、東シナ海から太平洋側沿岸域に至る最大の水路は屋久島の南側に位置し水深の大きいトカラ海峡 (Fig. 1b) である。しかし、東シナ海陸棚域から宮崎県を含む太平洋沿岸域への生物輸送には、屋久島と九州本島の間に存在する水深の小さい大隅海峡 (Fig. 1b) の寄与も重要である可能性がある。黒潮本流から大隅海峡へ流入する大隅分枝流は、九州南方において低塩分で特徴付けられる東シナ海系水を取り込み、その結果、東シナ海系水の太平洋側沿岸域への輸送の主体を担っていることが、水温と流速の観測から示唆されている (斉藤ほか, 2008, 斉藤, 2009)。また、斉藤ほか (2004) は、日向灘において東シナ海系と考えられる低塩分水塊を観測し、同時に東シナ海由来と思われるマアジ *Trachurus japonicus* 仔稚魚を採集した。これは、東シナ海で産卵されたマアジの仔稚魚が、東シナ海系水塊とともに大隅海峡を經由して宮崎県沿岸域に到達したことを示唆する。

大隅分枝流は、鹿児島県の離島である中之島 (Fig. 1b) から鹿児島県本土の南端に位置する佐多岬周辺海域 (Fig. 1b) に黒潮北縁の水温前線が北上するときに強化されることが知られている (Nagata and Takeshita, 1985)。黒潮前線の緯度と中之島の潮位は、20日程度の周期帯で同期的に変動していることが、表層水温と中之島の潮位データの解析から示されており (斉藤ほか, 2008)、大隅分枝流の強化も同様のタイムスケールで生じていると推測されている (斉藤, 2009)。また、九州南岸における潮位のスペクトル解析からは、17-20日と35-90日の周期帯で変動が大きいことが示されており、それぞれ黒潮の前線波動の影響と黒潮流路そのものの影響であると解釈されている (Nakamura et al., 2003)。

このように、既往の研究からは、日本の太平洋側沿岸域に分布するアカアマダイは東シナ海からの卵・仔稚魚の供給により遺伝的交流をしている可能性が高く、その輸送経路としてはトカラ海峡だけでなく大隅海峡も重要であること、また大隅海峡での輸送強化には東シナ海における黒潮流路と前線波動の動態が重要であることが示唆されている。しかし、東シナ海陸棚から太平洋沿岸域におけるアカアマダイ卵・仔稚魚の分布調査はほとんど行われておらず、輸送様式やその経月・経年変動、卵・仔稚魚輸送におけるトカラ海峡・大隅海峡の重要性等の検討はなされてい

ない。

魚類卵・仔稚魚の輸送過程を調べる上で、直接的なサンプリングと並ぶ重要な手法の1つが数値モデルを用いて計算される流速場を利用した粒子追跡実験である (e.g., Kasai et al., 2008; Takeshige et al., 2015)。Kasai et al. (2008) は、東シナ海のマアジ卵・仔稚魚を対象に粒子実験を行い、実際に調査で得られた仔稚魚分布と比較した。その結果、採集調査で仔魚が非常に高密度であった台湾北部海域から実際に日本沿岸に卵・仔稚魚が輸送されること、台湾北部海域に産卵される個体の多くが太平洋側に輸送されること等が示唆された。Takeshige et al. (2015) は九州西岸のカタクチイワシ *Engraulis japonicus* を対象とし、長期的な環境変化によって卵・仔稚魚輸送がどのように変化するか、粒子追跡実験の結果に基づいて詳述した。これらの研究が示すように、粒子追跡実験は輸送に関する仮説検証や、現場調査では直ちに得られない広域分布・長期変動を推定できるという点で非常に有用である。

しかし、すべての数値モデリングがそうであるように、粒子追跡実験にもいくつか注意すべき点が存在する。主要なものとしては、輸送を計算するうえで必要な流速場の再現性や粒子 (卵・仔稚魚) の初期位置 (産卵場)、仔稚魚の挙動 (滞在深度、回遊特性等) 等が挙げられる。第1の点は、データ同化手法の発展により、海面高度が捉えることができる表層の数10 km規模の現象であれば、十分な再現性が得られるようになってきた (e.g., Usui et al., 2006)。一方、粒子の初期位置や挙動については、調査や飼育実験等に基づく知見が必要であり、対象生物によっては必ずしも十分ではない。本研究が対象とする東シナ海由来のアカアマダイについては、後述するように流速場は再現性が確保できているほか、主産卵場の大局的な位置 (山下ほか, 2011) や分布深度 (沖山, 1964) 等には知見があるものの、産卵量の詳細な時空間変動までは推定できていない。しかし、東シナ海から太平洋側沿岸域へのアカアマダイ卵・仔稚魚の輸送過程に関する調査知見はほとんどない中、東シナ海の主産卵場域から日本の太平洋側に輸送され得るのか、トカラ海峡、大隅海峡をどのように通過するのか等、数値実験が輸送実態の理解に貢献できる部分は小さくない。

本研究では、トカラ海峡・大隅海峡を經由した東シナ海から太平洋側沿岸域への卵・仔稚魚輸送を考える上で、宮崎県沿岸域への到達状況に焦点を当てる。宮崎県沿岸域は黒潮に沿ってトカラ海峡・大隅海峡のすぐ下流側に位置し、卵・仔稚魚が東シナ海から輸送されている可能性が高い。宮崎県における延縄漁業の漁獲量および単位努力量あたり漁獲量 (Catch Per Unit Effort: CPUE) は、資料が整理されている1980年代末から1990年代に減少し、2000年代以降は低位で推移している (宮崎県, 2017; Fig. 2)。日本海側に主漁場を有する山口県、福岡県などのアカアマダイ漁獲量が大きい県の漁獲量も同様の傾向であり (酒井ほ

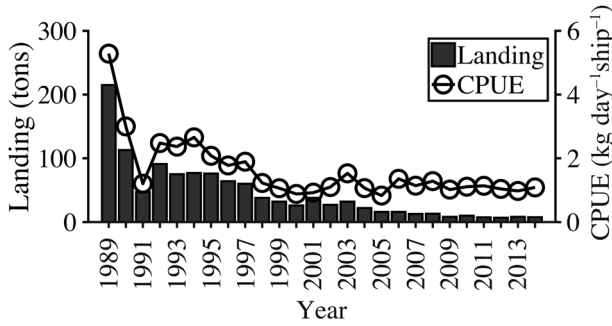


Figure 2. Landing and CPUE of tilefish species in Miyazaki Prefecture. CPUE was calculated from the data of longline fisheries.

か, 2017), 同一の供給源と考えられる東シナ海資源状況の悪化に伴って卵・仔稚魚の供給量が減少している可能性も考えられる. 一方, 宮崎県への卵・仔稚魚供給量は, 東シナ海における産卵量だけではなく, 黒潮の流路変動に伴う輸送効率や地先に生息するアカアマダイ由来の産卵量が影響することもあり得る. 産卵量の絶対値情報が得られていない現段階での粒子追跡実験では, 東シナ海における産卵量変化が宮崎県沿岸への卵・仔稚魚供給量に及ぼす影響を直接評価することはできないが, 黒潮の経年的な流路変動の影響は産卵量一定の条件下でも検討可能である.

本研究では, 粒子追跡実験によってアカアマダイ卵・仔稚魚の輸送様式を調べる. 輸送先としてはトカラ海峡・大隅海峡のすぐ下流に位置する宮崎県沿岸に着目し, 卵・仔稚魚輸送における両海峡の寄与に焦点を当て, 東シナ海由来のアカアマダイ卵・仔稚魚が宮崎県沿岸の資源に与える影響について議論を行う.

材料と方法

粒子追跡実験

粒子輸送を計算する流動場として, 海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM-WNP (Usui et al., 2006; 石崎ほか, 2010) の再解析値 (以後, MOVE 再解析データと呼称) を用いた. MOVE 再解析データの計算領域は 117°E–160°W, 15–65°N の北西太平洋で, 日本近海の水平空間解像度は東西, 南北ともに 1/10 度である. アカアマダイ仔稚魚が深度 20 m 層で採集された事例 (沖山, 1964) に基づき, 18 m 層の流速データを用いた. 解析範囲は東シナ海全域と宮崎県を含む領域 (22–36°N, 120–135°E), 期間は 1995–2004 年の 9 月 1 日から 12 月 8 日までとした. 中規模渦等の擾乱の影響を定量的に検討するため, 日別平均流速のほかに月別長期平均流速 (月別気候値) を用いた実験も行った.

MOVE 再解析データは同化プロダクトであるため, 海面高度データで捉えることのできる黒潮表層の流路はよく再現できる. MOVE 再解析データの東シナ海・南西諸島周辺から九州南岸における黒潮流路変動の再現性について

は, 橋本・井上 (2009) や大崎ほか (2009) でも検証されており, 黒潮流軸の離接岸や黒潮小蛇行なども定量的に再現可能であることが示されている.

大隅海峡は沿岸の浅い海峡であるが, 海峡の地形は MOVE 再解析データにおいても十分に再現されている. 本研究で着目している大隅分枝流に対する長期的なモニタリング等はこれまで実施されていない. 本研究では, 齋藤ほか (2008) が示唆している 20 日程度の流速変動を考慮して, 大隅海峡上流の 30.85°N, 130.95°E 地点における 18 m 層の東西流の周波数特性を調べたところ, 弱いながらも 20 日程度の周期に変動のピークが認められた. これらのことから, 本データは東シナ海からトカラ・大隅海峡周辺を通過する生物輸送の検討に適切であると判断した.

粒子の水平的な輸送は式 (1) に従って計算した.

$$X_i^{(n+1)} = X_i^n + V_i \Delta t + R \sqrt{2K_h \Delta t} \quad (1)$$

添字 i ($=1, 2$) は東西, 南北成分を表し, X_i は粒子の位置, V_i は粒子の位置に応じて線形補間した水平流速ベクトル, Δt はタイムステップである. R は平均 0 で標準偏差 1.0 の正規乱数であり, 東西, 南北成分にそれぞれ与えている. K_h は水平拡散係数であり, Smagorinsky の乱流拡散パラメタリゼーション (Smagorinsky, 1963) を用いて推定した. その式は以下の通りである.

$$K_h = C \Delta x \Delta y \times \frac{1}{2} |\nabla V + (\nabla V)^T| \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} |\nabla V + (\nabla V)^T| = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Δx と Δy は東西・南北方向の空間解像度であり, MOVE 再解析データの場合, 0.1 度 (緯度・経度) である. V は水平流速ベクトルであり, u, v はそれぞれ東西・南北の流速成分である. 無次元定数 C は 0.1 とした (e.g., Ezer and Mellor, 2000).

粒子投入時期は, アカアマダイの産卵期を考慮して, 9 月から 10 月の 5 日 (上旬), 15 日 (中旬), 25 日 (下旬) とした. 月別気候値を用いた実験では, 月別気候値の流速場を線形補間し, 上旬, 中旬, 下旬相当の流速場を粒子投入時期とした. 粒子の初期位置は, 山下ほか (2011) がアカアマダイの主産卵場と推定している東シナ海の中央海域と南西海域に設定した (Fig. 1a). アカアマダイ親魚の局所的な分布や生物学的な産卵条件などは考慮せず, 海域内に緯度・経度 0.02 度間隔で一様に配置した. 投入粒子数はそれぞれ中央海域で 17,176 個, 南西海域で 10,276 個である.

宮崎県水産試験場ではアカアマダイの種苗放流のためにアカアマダイ親魚から採卵し種苗の生産を行っている. その過程で得られた仔稚魚飼育試験によると, アカアマダイ

稚魚は日齢40日目で全長およそ15.9 mmまで成長した(金丸ほか, 2014)。また, 全長15 mm程度に達したアカアマダイ稚魚はその5-7日後には底層に着底をするという報告(沖山, 1964; 井関ほか, 2013)から, 計算日数を45日とした。

アカアマダイは東シナ海大陸棚から陸棚斜面にかけて全域で漁獲されており(山下, 2007; 山下ほか, 2011), 宮崎県においても水深70-160 m帯を中心に漁場が形成されている(黒木・寺山, 1993)。本研究では, 計算日数最終日の45日目に, 宮崎県の30-200 mの水深帯(Fig. 1b)に粒子が存在した場合に宮崎県沿岸域に到達したとみなし, 到達粒子数を計数した。

アカアマダイ稚魚は着底を行うことから, 成長につれて徐々に能動的な移動能力を得ることが予想される。しかし, アカアマダイ稚魚の遊泳行動をモデル化するための知見の蓄積は現段階では不十分であり, 本研究では受動的な輸送のみを考慮した。

海峡通過粒子数

トカラ海峡は北端と南端を30.31°N, 28.50°N, 西端と東端を130.60°E, 131.00°E, 大隅海峡は北端と南端を31.20°N, 30.45°N, 西端と東端を130.75°E, 130.90°Eの領域(Fig. 1b)として, この領域を計算期間中に粒子が通過すれば, 各海峡を通過したとみなした。どちらかの海峡を通過後に別の海峡を通過した場合は, 後者の海峡を通過したととして計数した。また, 東シナ海に残留する粒子量を把握するために, 対馬海峡の北端と南端を35.50°N, 33.20°N, 西端と東端を129.40°E, 129.50°E(Fig. 1a)として対馬海峡を通過する粒子数も計数した。

黒潮流軸

中規模渦や黒潮の離接岸と粒子輸送の対応関係を把握するために, 2003年11月15-28日のMOVE再解析データの海面高度データを用いた。また, 海面高度1 mを黒潮流軸と定義し, 九州南方海域における黒潮流軸と粒子輸送の対応を調べた。

宮崎県でのアカアマダイ0歳魚の推定資源尾数

宮崎県は, 県独自にアマダイ類の資源評価を行っている。宮崎県におけるアマダイ類の漁獲は大部分がアカアマダイであるため(宮崎県, 2017), アマダイ類の資源量をアカアマダイの資源量と見なした。東シナ海からの仔稚魚輸送量が宮崎県の資源変動に強く影響しているのであれば, 加入時の資源尾数が個体輸送量と対応していると考えられる。そこで, チューニングVPA(Virtual Population Analysis)より得られたアカアマダイ0歳魚の推定資源尾数(宮崎県, 2017)を用い, 粒子追跡実験の結果から得られた東シナ海から宮崎県沿岸に到達した粒子数と比較した。

結果

沿岸到達粒子の挙動概要

月別気候値の流速場を用いた粒子追跡実験では, 中央海域

および南西海域に投入した粒子のうち, 宮崎県沿岸域に到達したもののほとんどが大隅海峡を経由した(Fig. 3a, 3b)。トカラ海峡を通過した粒子は, 中央海域に投入した10月初旬と下旬の1粒子ずつのみであった(Fig. 3a)。気候値の流速場であるため, 10年以下の時間スケールの擾乱はおおむね除去されており, 輸送経路は滑らかで蛇行等の擾乱の影響はなく, 両海域の陸棚斜面部付近の粒子が黒潮前線に沿って速やかに宮崎県沿岸に到達していた。

日別平均の流速場を用いると, 両海域に投入した粒子が陸棚斜面付近から黒潮に取り込まれる過程は同様であった。しかし, 宮崎県沿岸に到達する粒子の多くは大隅海峡経由であったが, トカラ海峡を経由する粒子も存在した(Fig. 3c, 3d)。輸送経路は月別気候値を用いたケースとは大きく異なり, 流速場に存在する様々な擾乱の影響を受けていた。例えば, 中央海域に由来する粒子の一部は, 宮崎県沖合海域で, 中規模渦に捕捉され, 反時計回りに日向灘の沖合を周回した後に宮崎県沿岸に到達していた(Fig. 3c)。この反時計回りの輸送経路は, 種子島・屋久島東部海域で黒潮小蛇行が発生して黒潮流路が離岸し, 宮崎県沖合で低気圧性渦を生じたことによるものであった(Fig. 3e)。また, 南西海域に投入された粒子の中には, 東シナ海を北上したのち, 九州西岸を北上し, その後トカラ・大隅海峡を通過して宮崎県沿岸に到達するものが存在した(Fig. 3d)。これは, 黒潮が舌状に九州西岸を北上する黒潮暖水舌が形成されていたことが原因であったと考えられる(Fig. 3f)。このように, 東シナ海から宮崎県沿岸に到達する粒子は様々な時間・空間スケールの擾乱の影響を受けた輸送経路をとり, 擾乱の影響によってトカラ海峡を通過する粒子も増加することがわかった。

経月・経年変動

月別気候値を用いた実験では, 中央海域および南西海域に投入した各粒子数に占める宮崎県沿岸に到達した粒子数の割合(旬別6ケース)は, 南西海域発が0.10-0.20%, 中央海域発が0.05-0.10%であった。前述のように到達した粒子は, ほぼすべてが大隅海峡を経由した(Fig. 4a, 4l)。一方, 日別平均値の流速場を用いた場合は, 到達粒子数は投入時期によって大きく異なり, またトカラ海峡を通過して到達する粒子も一定割合(全粒子のうち大隅海峡通過粒子数が88.5%, トカラ海峡通過粒子数が11.5%)見られた(Fig. 4b-k, 4m-v)。到達粒子数(年別・旬別60ケース)は南西海域発が0.04-0.70%(平均0.22%), 中央海域発が0.01-0.62%(平均0.15%)であり, 月別気候値を用いたケースより増加した。変動は不規則で, 到達粒子の総数・海峡毎の数ともに, 明瞭な経月変動は見られなかった。中央海域の1995年10月下旬発(Fig. 4b), 2003年10月中旬発(Fig. 4j), 南西海域の2000年9月中旬発(Fig. 4r), 2003年10月中旬発(Fig. 4u)では, 平均値を大きく上回る粒子が到達していた。日別平均流速を用いた実験において, 投入

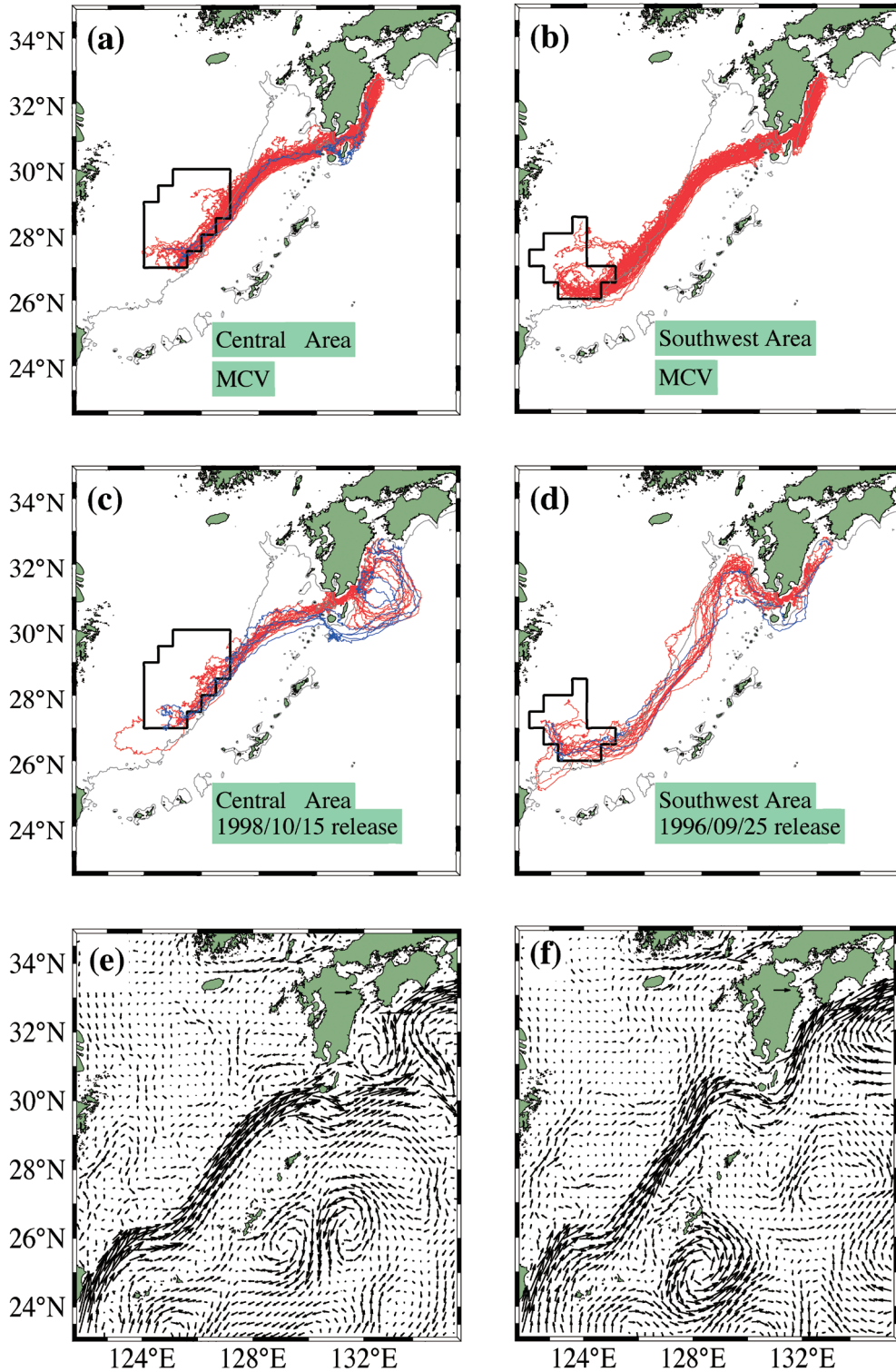


Figure 3. Trajectories of particles that reached the coastal area of Miyazaki Prefecture from the main spawning grounds in the East China Sea (red and blue lines), calculated by (a)–(b) monthly climatology velocity (MCV, drawing of all trajectories released in Sep. and Oct.) and (c)–(d) daily mean velocity fields. (c)–(d) show trajectories of particles that were released on Sep. 25, 1996 and Oct. 15, 1998, respectively. Red and blue lines are those through the Ohsumi and Tokara Straits, respectively. Areas demarcated by black lines are the Central (a and c) and Southwest area (b and d). Depth contours of 200 m are shown by thin solid lines. (e)–(f) show current velocities at 18 m on Nov. 16, 1998 and Nov. 4, 1996, respectively.

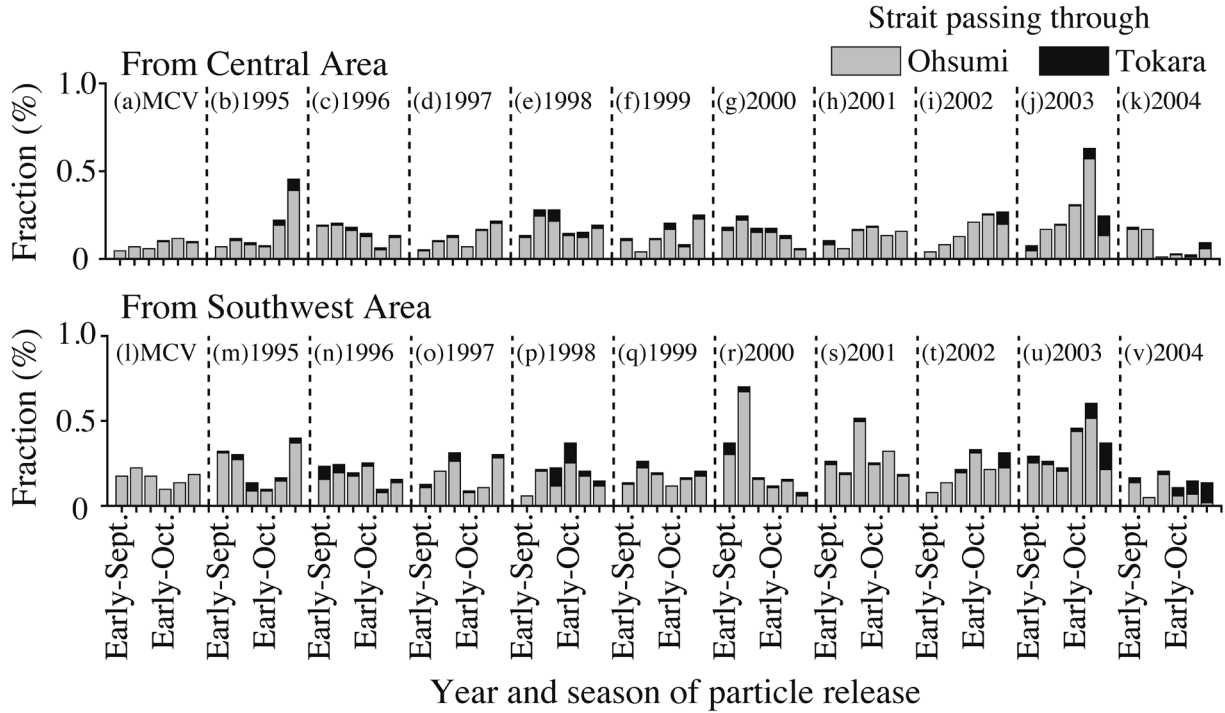


Figure 4. Seasonal and interannual variations of the fraction of particles reaching the coastal area in Miyazaki Pref. via the Ohsumi (gray) and Tokara (black) Straits from the Central (a–k) and Southwest areas (l–v). The left-most column (a and l) indicates the results from the monthly climatology velocity and others (b–k and m–v) are those from 1995 to 2004 calculated by the daily mean velocity. Six bars in each panel indicates fractions of particles released on Sep. 5th, Sep. 15th, Sep. 25th, Oct. 5th, Oct. 15th, and Oct. 25th.

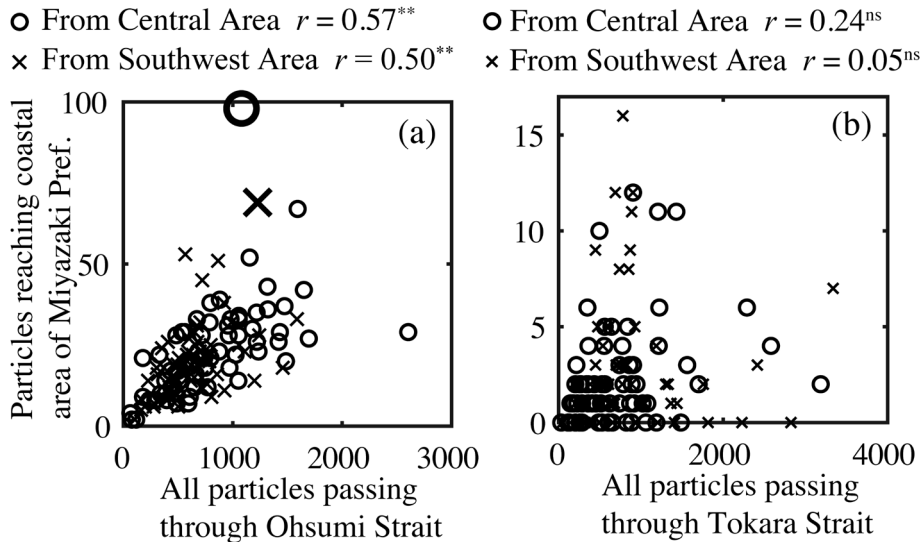


Figure 5. Relationship between the total number of particles passing through the Ohsumi/Tokara Strait and the fraction of particles that reached the coastal area of Miyazaki Pref.: (a) through the Ohsumi Strait and (b) through the Tokara Strait. Correlation coefficients are shown above the panels, where superscripts ** and ns indicate $p < 0.01$ and $p > 0.05$ (not significant). Two large marks in (a) are cases of the release on October 15, 2003, when exceptionally large number of particles reached Miyazaki Prefecture.

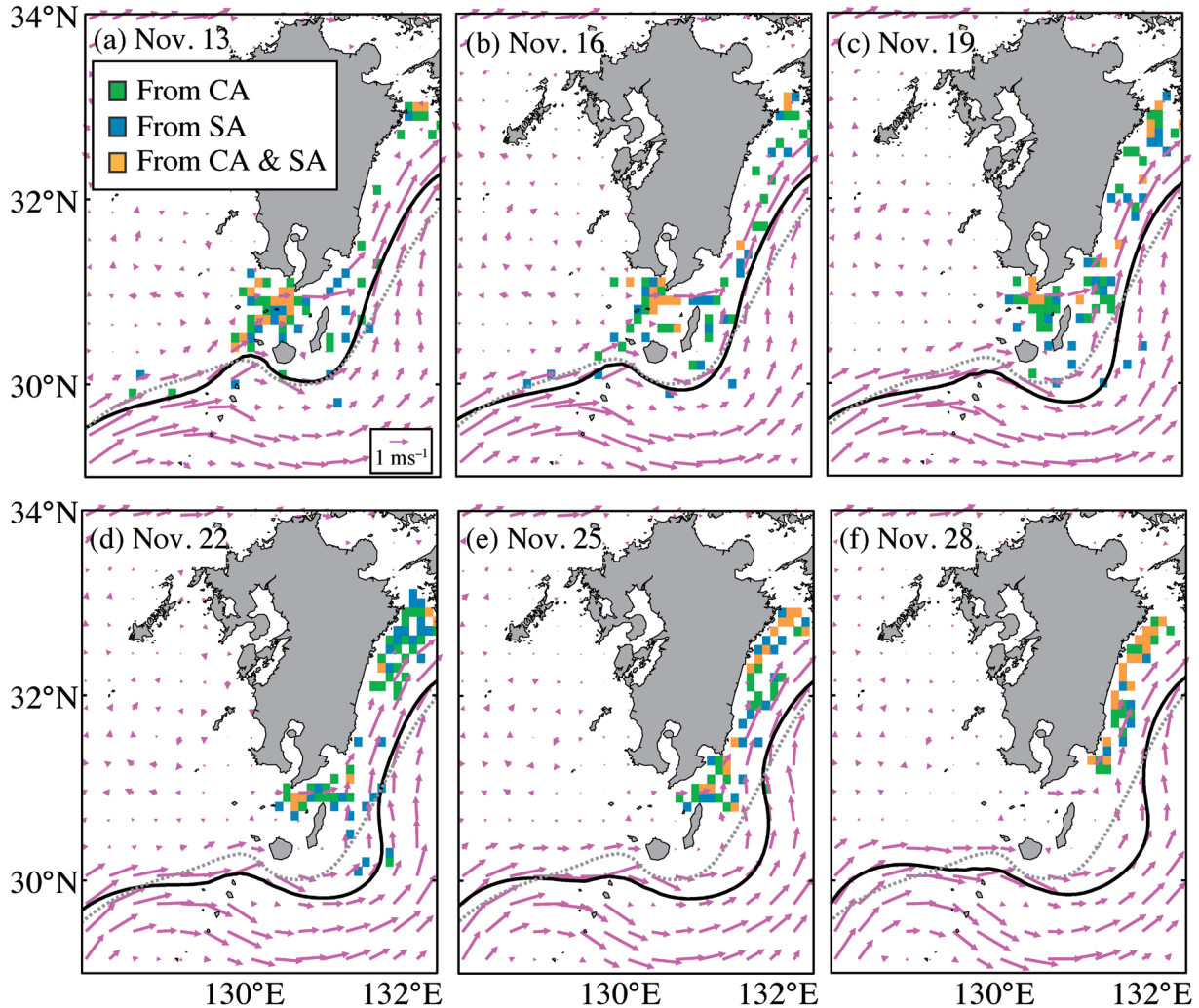


Figure 6. Snapshots of the distributions of particles from Nov. 13–28, 2003, which were released on Oct. 15, 2003. Pixels of the model domain are filled with colors if particles existed within them. Fill colors of green, blue and yellow indicate that particles within the pixel are originating only from the Central Area, only from the Southwest Area, or both from the Central and Southwest areas, respectively. Pink arrows are the velocity at 18 m depth, and black solid and gray dot-dashed lines indicate the axis of the Kuroshio (contour of 1 m sea surface height) based on the daily mean velocity and that based on the monthly-mean climatology (average of 1995–2004) velocity, respectively.

した粒子のうち計算終了時の45日目に宮崎県沿岸に到達しなかったものを、通過海峡別に粒子数を平均すると、トカラ海峡を通過して太平洋側に出たものが5.7%、大隅海峡を経由して太平洋側に出たものが5.1%、対馬海峡を経由して日本海側に出たものが1.5%、東シナ海に滞留していたものが88%であった。

宮崎県沿岸域への到達粒子数は、大隅海峡通過粒子数(宮崎県沿岸への到達の有無を問わずに計数したもの)と有意な正の相関が認められた (Fig. 5a, 南西海域: $r=0.50$, $p<0.01$, 中央海域: $r=0.57$, $p<0.01$)。一方、トカラ海峡通過粒子数と宮崎県沿岸到達粒子数の相関は、両粒子投入海域ともに有意ではなかった (Fig. 6b, $p>0.05$)。

2003年10月中旬投入粒子の大量到達

前節で述べたように、日別平均値の流速場による輸送実験では、宮崎県沿岸への到達量は粒子投入時期によって大きく異なった (Fig. 4)。この輸送の経月・経年変動に関わる要因をさらに調べるため、南西海域、中央海域発ともに宮崎県沿岸に粒子が非常に多く到達した2003年10月15日投入の事例について、海況と輸送様式を詳述する。

産卵場を発した粒子群は11月13日頃には九州南方、大隅海峡の上流域に到達した (Fig. 6a)。この粒子群が大隅海峡を通過する時期に、薩南海域において黒潮流路が南側に膨らむ形で黒潮小蛇行が発達し、大隅海峡を流れる大隅分枝流が弱まった (Fig. 6b-e)。これによって、粒子群は海峡

を通常よりもゆっくりした速度で通過し、着底時期である45日目にちょうど宮崎県沿岸に到達した (Fig. 6f). 2003年10月15日投入粒子全体の大隅海峡通過数は平均より多いものの最大ではなく (Fig. 5a), 宮崎県沿岸への大量到達には大隅海峡通過粒子数だけでなく、海峡内の流速が小さいことが重要であることが示唆される。

宮崎県沿岸域への粒子到達量とアカアマダイ資源量

粒子追跡実験の結果から得られた宮崎県沿岸域への到達粒子数を各年で積算し、アカアマダイの0歳魚の資源尾数と比較した。前述のように、東シナ海におけるアカアマダイの産卵量および分布の情報は得られていないため、特定の月や海域が強く影響する可能性も考慮して、月、経由した海峡、粒子の起源海域ごとに27通りに場合分けした。その結果、すべての事例で到達粒子数と資源尾数の相関は有意ではなかった ($p>0.05$)。

考察

東シナ海由来アカアマダイ卵・仔稚魚の宮崎県沿岸域への輸送

本研究では、東シナ海で産卵されたアカアマダイ卵・仔稚魚の宮崎沿岸域への輸送過程を、粒子追跡実験によって検討した。実験を行った1995–2004年のすべてで、東シナ海陸棚の中央部 (中央海域) と南西部 (南西海域) に投入した粒子が宮崎県沿岸域に輸送された。東シナ海における産卵量の絶対値や卵の分布は不明なものの、両海域は東シナ海におけるアカアマダイ主産卵場と推定されており (山下ほか, 2011), 宮崎県沿岸域へアカアマダイ稚魚を供給していることが示唆される。

太平洋沿岸域に着底したアカアマダイが東シナ海陸棚域に産卵回遊をするという知見はこれまでのところ得られていない。東シナ海を北上する台湾暖流や日本海・太平洋側へ流入する対馬暖流・黒潮による南から北 (西から東) への物質輸送を促進する海流系の存在を考え合わせると、東シナ海はアカアマダイ卵・仔稚魚の一方的な供給源であると考えられる。したがって、東シナ海内部で十分な再生産が行われなければ、東シナ海から日本沿岸に広がるアカアマダイ資源の分布は維持できないと考えられる。本研究では、着底のタイミングと仮定した45日間の計算では、平均で88%の粒子が東シナ海に滞留した。山下 (2007) はアカアマダイが成長に伴って、底質の異なる海域へ小規模に回遊している可能性を指摘している。着底後も東シナ海内部で回遊しているのであれば、東シナ海陸棚を起源とするアカアマダイが、東シナ海陸棚域で再生産して資源を維持しているという仮説は成立する。

東シナ海から宮崎県沿岸への到達粒子の多くは、黒潮流量が大きいトカラ海峡ではなく、沿岸の大隅海峡を経由した (Fig. 4)。これは、粒子投入域 (産卵場) と設定した到達域 (着底域) がともに黒潮流路の沿岸側に位置しており、

沿岸側の大隅海峡を通る大隅分枝流による輸送が効率的であることが関係していると考えられる。

月別気候値を用いた実験と日別平均値を用いた実験の比較からは、沿岸と沿岸をつなぐ輸送における黒潮擾乱の重要性が示唆される。宮崎県沿岸への到達粒子数は、月別気候値の実験の場合よりも日別平均値の場合の方が平均的に多かった。これは、黒潮の前線性の擾乱があることによって、より沿岸域の粒子が黒潮の強流帯にエントレインメント (連行) され、海峡通過後は強流帯から沿岸側にデイトレインメント (離脱) されることによると推測される。

中央海域および南西海域はどちらも大型のアカアマダイ親魚が生息する海域であると報告されている (山下ほか, 2011)。両海域の産卵親魚の分布密度や卵・仔稚魚の個体数密度など詳細な情報は今のところ得られていないため、どちらがより産卵海域として重要であるかはわかっていない。本研究では、両海域に投入した粒子の宮崎県沿岸到達割合に大きな違いは見られなかった。さらに、中央海域と南西海域に投入した粒子の流跡線 (Fig. 3a–d) からは、黒潮の前線性の擾乱が黒潮の強流帯へ粒子を輸送したことが確認できるため、両海域の陸棚斜面付近に生息するアカアマダイ親魚量や卵・仔稚魚の個体数密度が、宮崎県沿岸へのアカアマダイ卵・仔稚魚の供給量決定に重要な影響を与えるのではないかと考えられる。したがって、両海域の陸棚斜面付近のアカアマダイ親魚の生息密度を知ることは、今後アカアマダイ資源量変動を解明するうえで重要な情報となると考えられる。

粒子追跡実験の再現性は、仔稚魚の採集調査の結果により直接的に検証できる。しかし、アカアマダイ仔稚魚が実際に採集された事例は、佐渡ヶ島周辺海域 (沖山, 1964), 富山湾 (林, 1990), 山口県北部海域 (河野・天野, 2008), 若狭湾西部海域 (井関ほか, 2013) で報告されているが、いずれも日本海側での調査結果であり、太平洋側でのアカアマダイ卵・仔稚魚の採集の報告はほとんどない。しかし、東シナ海、日本海側沿岸および太平洋側沿岸の連結性は、ミトコンドリアDNAを用いた分子系統解析から示唆されている (Nohara et al., 2010)。彼らの解析では、東シナ海および日本海側沿岸と太平洋側沿岸 (高知県と静岡県) の3集団間で遺伝的な差異が認められなかった。すなわち、東シナ海から日本海側だけでなく、太平洋側沿岸域へもアカアマダイ卵・仔稚魚が輸送され、地先のアカアマダイと交配していることが示唆される。

宮崎県におけるアカアマダイ加入量への影響

粒子追跡実験により計算された宮崎県沿岸到達粒子量と、VPAから得られたアカアマダイ0歳魚推定資源尾数の間には、有意な相関関係はなかった。粒子追跡実験では東シナ海の産卵場域に毎年一樣な粒子分布を与えているため、到達粒子量と加入尾数の間に相関がないことで、アカアマダイ仔稚魚輸送過程の重要性が否定されるわけではない。し

かし、少なくとも黒潮流路変動等に起因する卵・仔稚魚輸送量の変化だけでは、宮崎県のアカアマダイ新規加入尾数を説明できないと考えられる。

加入量変動に大きく影響し得るもう1つの大きな要因として、東シナ海で産卵されてから宮崎県沿岸域に到達するまでの初期減耗が挙げられる。本研究では、単純に輸送のみを計算し個体の死亡は考慮していないため、仔稚魚の死亡率が経年的に変化しているのであれば、粒子輸送量を完全に再現できていたとしても加入尾数は説明できない。

宮崎県沿岸に生息するアカアマダイは、地先において成熟・産卵する(黒木・寺山, 1993)。しかし、宮崎県沿岸域の地先由来の個体がどの程度地先に定着しているか、またその個体数が東シナ海陸棚から移入する個体数に対してどの程度の割合かなど、不明な点は多い。これらの点も、宮崎県のアカアマダイ加入量変動要因を解明するための課題である。

東シナ海から太平洋側沿岸域への生物輸送

本研究ではアカアマダイ卵・仔稚魚に見立てた粒子の輸送実験を行い、東シナ海陸棚から宮崎県沿岸域への輸送量およびその時間変化様式を示した。黒潮は、東シナ海の大隅半島斜面に沿って北上した後、主にトカラ海峡を通過し太平洋側へ流入する。しかし、黒潮の北側にあたる東シナ海陸棚縁辺に主産卵場を持つアカアマダイを想定した数値実験では、より沿岸の大隅海峡を通過する大隅分枝流に取り込まれた方がより宮崎県沿岸へ到達しやすいことが示された。これは、東シナ海から宮崎県沿岸へのアカアマダイ卵・仔稚魚供給量が、大隅海峡通過流量の影響を強く受けていることを示唆するものであり、宮崎県沿岸における資源量変動の要因解明につながる1つの鍵となり得る。

本研究の実験結果に基づく、東シナ海陸棚からトカラ海峡を通過する輸送経路は、宮崎県沿岸域に到達する粒子の主要な経路ではない。しかし、黒潮に沿ってより下流側の太平洋沿岸域に到達するには、途中で沿岸側に離脱せずに輸送される必要があることから、宮崎県以東の海域では沖合側のトカラ海峡を通過した粒子の挙動が重要となる可能性がある。

東シナ海の陸棚縁辺域は、アカアマダイ以外にもマアジやブリ *Seriola quinqueradiata* など様々な魚類の産卵場となっている。これらの魚類卵・仔稚魚の黒潮による生物輸送過程と太平洋側沿岸域との連結性は、加入の成否や遺伝的な差異を生み出す原因となりうる。今後、東シナ海から黒潮を経由した太平洋側沿岸域への生物輸送の実態解明のため、国際共同観測や複数のパラメーターを設定した数値実験等、多面的な取り組みが望まれる。

謝辞

本研究を行うにあたり多大な助言を頂いた鹿児島大学水産学部海洋環境グループの皆様にご心からお礼申し上げます。

特に、数値計算やデータ処理をサポートし、解析の助言をくださった平中陸氏、峯俊介氏、阿部英晃氏には深く感謝いたします。本研究は宮崎県水産試験場の研究課題「アカアマダイの効果的な資源管理及び資源回復手法の開発」に基づき、鹿児島大学の2015年度受託研究「流動モデルを用いたアカアマダイの卵・仔稚魚追跡実験」で実施された。

引用文献

- Ezer, T. and G. L. Mellor (2000) Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **32**, 185–208.
- 橋本 晋・井上博敏 (2009) 南西諸島周辺における黒潮の流路変動と海況変動. *測候時報*, **76**, 55–81.
- 林 清志 (1990) 富山湾に出現する魚卵及び仔稚魚の季節変化と鉛直分布. *富山県水産試験場研究報告*, **2**, 1–17.
- 林 泰行 (1979) 東シナ海産アカアマダイの成熟と産卵に関する研究-II 卵巣卵径の経月変化からみた産卵様式. *日本水産学会誌*, **45**, 1475–1479.
- 井関智明・上原伸二・八木佑太 (2013) 若狭湾西部におけるアカアマダイ浮遊期仔稚魚の出現・分布. *日本海リサーチ&トピックス*, **13**, 3–6.
- 石崎士郎・大森正雄・伊藤 渉・吉岡典哉 (2010) 北西太平洋版海データ同化システム (MOVE/MRI. CO-WNP) における予測結果の検証. *測候時報*, **77**, 59–69.
- 金丸昌慎・南 隆之・杉田 浩・吉田照豊 (2014) アカアマダイ種苗生産技術開発—受精卵確保・種苗生産試験—. 平成26年度宮崎水試事報, 宮崎県・宮崎県水産試験場, 107–112.
- Kasai, A., K. Komatsu, C. Sassa and Y. Konishi (2008) Transport and survival processes of eggs and larvae of jack mackerel *Trachurus japonicus* in the East China Sea. *Fisheries Science*, **74**, 8–18.
- 河野光久・天野千絵 (2008) 日本海南海域におけるアカアマダイの産卵期・産卵場および仔魚の出現. *山口県水産研究センター研究報告*, **6**, 31–36.
- 黒木敏行・寺山誠人 (1993) 日向灘海域におけるアカアマダイの生態と漁獲状況について. *南西外海の資源・海洋研究*, **9**, 53–64.
- 宮崎県 (2017) アマダイ類の資源評価. 平成28年度宮崎県沿岸資源評価, 1–7.
- Nagata, Y. and K. Takeshita (1985) Variation of the sea surface temperature distribution across the Kuroshio in the Tokara Strait. *J. Oceanogr. Soc., Japan*, **41**, 244–258.
- Nakamura, H., H. Ichikawa, A. Nishina and H.-J. Lie (2003) Kuroshio path meander between the continental slope and the Tokara Strait in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, **108**, 3360.
- Nohara, T., H. Takeuchi, T. Tsuzaki, N. Suzuki, O. Tominaga and T. Seikai (2010) Genetic variability and stock structure of red tilefish *Branchiostegus japonicus* inferred from mtDNA sequence analysis. *Fisheries Science*, **76**, 75–81.
- 沖山宗雄 (1964) アカアマダイ *Branchiostegus japonicus* (HOUTTUYN) の初期生活史. *日本海区水産研究所研究報告*, **13**, 1–14.
- 奥村重信 (2001) アカアマダイの親魚養成と種苗生産に関する研究. 特別研究報告 (16), 社団法人日本栽培漁業協会, 1–43.
- 大崎晋太郎・有吉正幸・志賀 達・岩尾尊徳 (2009) MOVE/MRI. COM-WNPを用いた日本南方における黒潮流路変動の解析. *測候時報*, **76**, 37–54.
- 齊藤 勉 (2009) 九州南方での水温前線北上に伴う海況変動と海水交換に関する研究. *水産総合研究センター研究報告 (九州大学博士号論文)*, **27**, 1–41.
- 齊藤 勉・秋山秀樹・今脇資郎・市川 香・奥野 章・瀬藤 聡 (2004) 九州南部における海洋構造の変動. 「マアジの産卵と加

- 入機構—東シナ海から日本沿岸へ—」原 一郎, 東海 正編, 恒星社厚生閣, 東京, 52–68.
- 斉藤 勉・秋山秀樹・今脇資郎・市川 香・奥野 章・瀬藤 聡・馬谷紳一郎・田中耕治 (2008) 九州南方での水温前線の北上に伴う水温・流速変動. 海の研究, **17**, 163–178.
- 酒井 猛・川内陽平・青沼佳方 (2017) 平成28 (2016) 年度アマダイ類 (東シナ海) の資源評価. 平成28年度我が国周辺水域の漁業資源評価 第2分冊, 水産庁・水産研究・教育機構, 1192–1212.
- Smagorinsky, J. (1963) General circulation experiments with the primitive equations I Basic experiment. Mon. Wea. Rev., **91**, 99–164.
- Takeshige, A., Y. Miyake, H. Nakata, T. Kitagawa and S. Kimura (2015) Simulation of the impact of climate change on the egg and larval transport of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) off Kyushu Island, the western coast of Japan. Fish. Oceanogr., **24**, 445–462.
- 時村宗春 (2011) 東シナ海の水産資源と漁業形態. 日本水産学会誌, **77**, 919–923.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda and M. Kamachi (2006) Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. Adv. Space Res., **37**, 806–822.
- 山下秀幸 (2004) 東シナ海産アカアマダイの水揚実態とY/R解析. 日本水産学会誌, **70**, 16–21.
- 山下秀幸 (2007) 東シナ海産アカアマダイの体長組成の海域差. 日本水産学会誌, **73**, 1074–1080.
- 山下秀幸・酒井 猛・片山知史・東海 正 (2011) 東シナ海産アカアマダイの成長と成熟の再検討. 日本水産学会誌, **77**, 188–198.
- 柳本 卓・山下秀幸・酒井 猛・明神寿彦・小林敬典 (2010) DNA多型分析によって明らかになったアカアマダイの集団構造. DNA多型, **18**, 127–130.