沿岸域における指標生物（マハゼ）の群集動態解析手法の試行

吉田 潤¹・古川 恵太²・上村 了美³・岡田 知也⁴

¹九州地方整備局 長崎港湾・空港整備事務所（〒850-0961 長崎県長崎市小ヶ倉町3-76-72）

E-mail:yoshida-j894t@pa.qsr.mlit.go.jp

²正会員 海洋政策研究財団 海洋グループ（〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-4-10）

E-mail:k-furukawa@sof.or.jp

³大阪市立大学大学院工学研究科環境水域工学分野（〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138）

E-mail:satomi.kami@gmail.com

⁴正会員 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

E-mail:okada-t92y2@ysk.nilim.go.jp

沿岸域における生態系サービスの向上においては、沿岸域の環境を統合的に評価すること、さらに大型生物などを指標として分かり易く評価し実践的な管理につなげていくことが重要である。そこで本稿では、沿岸域一体を生息場とする生物（マハゼ）を利用して沿岸域の環境を総合的に評価することを将来的な目標とし、マハゼの群集動態の解析手法の実証的な開発を行った。

その結果、既往文献よりも長期化しているふ化時期や、年毎に成長速度を考慮する必要性が明らかになり、また全長組成分布より得られるふ化群組成は、場所毎のマハゼの加入・滞留の状況の違いを捉えることができる解析手法として有望であること、また、特定のふ化群出現頻度を空間的に解析することにより、マハゼの移動経路と影響範囲を推定できる可能性があることが示唆された。

Key Words : coastal area, comprehensive assessment, goby(*Acanthogobius flavimanus*), total length, otoliths analysis

1. はじめに

(1) 沿岸域における環境評価の現状

沿岸域は生物多様性と生態系機能が海洋で最も高い海域であり、藻場や干潟など水産業の観点からも重要な生態系を含んでいる¹⁾。特に、都市臨海部においては、運河域などの水際線が生物の生息場としての機能等の高い生態系サービスを提供できる場として検討・注目され^{2,3)}ている。そうした生態系サービスのうち、多くは、悪化しているか、または持続不可能な状態で利用されていることが指摘されており、沿岸域も例外ではない^{4,5)}。

沿岸域の生態系サービスを持続的に利用していくために、個別の場や特定の時間の環境だけではなく、つながり、持続性などに着目し、沿岸域を総合的に管理することが有効と考えられる。

そうした、統合沿岸域管理の指標として、様々な影響を蓄積し積分的に反応する大型の生物などを採用することで、分かり易い包括的な評価を実施し、実践的な管理につなげていくというアイデアに行きついた。

そこで、本報では、内湾域から干潟・河口部を含む汽水域を対象に、そうした場を回遊する生物としてマハゼ（*Acanthogobius flavimanus*）をとりあげ、沿岸域を総合的に評価するための第一段階として、その出現状況・成長過程を把握し、群集動態の解析手法の開発と妥当性について検討を行った。

(2) マハゼの特性

マハゼは我が国の内湾・汽水域の典型種であり、漁獲種として、また遊漁・釣りの対象魚として広く親しまれてきた⁶⁾。マハゼの多くは図-1に示すように1年魚であり、

図-1 マハゼの生活史⁷⁾

沿岸水深15m以浅を生息域とし、内湾域と河口域を行き来する特性を持っている。その生活史は、春に深場（水深8m～15m）で発生し、河口域へ遡上、春から夏にかけて浅場砂泥域（水深0m～3m）で生活し、秋に成熟とともに徐々に深場へ移動し、冬に深場で産卵する。また、マハゼは底生魚類として底質・ベントスへの強い選好性を持っており⁶⁾⁸⁾、底質の変化に敏感であること、また、貧酸素水塊の忌避⁹⁾や水温による昼夜の活動期の変化⁹⁾などの水質要因による行動形式が観察されている。

2. 検討方法

(1) マハゼ調査の実施

マハゼを2009年から2012年にかけて東京湾の東京湾奥部と神奈川県側において採取した（図-2）。採取方法は、各調査時期のマハゼの生息場所に応じて、釣りや投網、刺網等を利用して採取を行った。また、マハゼの個体データとして、大きさと重さの計測を行った。大きさについては標本の全長を計測用シートやノギスを用いて1mm単位で、重さについては湿重量をはかりを用いて0.1g単位で計測することを基本とした（図-2）。尚、全長とは体の前端から尾鰭の後端までの長さのことである。

(2) 耳石解析

採取された全個体のうち、2009年から2011年に採取された合計245検体（図-3）について、全長計測を行った後耳石を摘出して輪紋数を測定した（図-4）。

耳石は聴覚や平衡感覚をつかさどる器官であり、耳石の輪紋には日周輪や年齢が形成されることから、年齢査定定形質として多くの研究で扱われており¹⁰⁾、東京湾のマハゼについても日周性であることが確認されている¹¹⁾。

その事を利用して、採取日から輪紋数をさかのぼることでマハゼのふ化時期の推定を行った。さらに全長とふ化日数の関係からマハゼの各年の成長速度の式（成長曲線）の推定を行った。

(3) ふ化群組成解析

2009年から2012年に採取された27地点、延べ112地点（図-5）について、コホート解析によるふ化群組成解析を行い、ふ化群の出現頻度について検討を行った。

観測データをもとに得られた全長組成分布は、各ふ化群月の全長頻度分布が混合した分布となる。年齢別サイズや個体数等を知る方法としてコホート解析がよく使われ、一般的に体長等の度数分布を正規分布に分解する手法が用いられる。本稿では条件設定と操作が容易な表計算ソフトのMS-Excel（(株)マイクロソフト社）による最小二乗法¹²⁾を採用し、計算を行った。

正規分布確率密度関数は、

図-2 調査エリア(左)と全長計測(右上)、湿重量計測(右下)

図-3 耳石解析に用いたマハゼの採取地点（2009～2011）

図-4 耳石解析の流れ

図-5 ふ化群組成解析に用いたマハゼの採取地点

$$f_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x - \mu_i)^2}{\sigma_i^2} \right] \quad (1)$$

のように表される。ここで、 $f_i(x)$ は階級 x における i 月ふ化群の正規分布確率密度、 σ_i は i 月ふ化群の標準偏差（推

定するパラメータ), μ_i は*i*月ふ化群の平均全長(推定するパラメータ)である。また, 理論上の階級*x*の混合正規分布確率密度を $g(x)$ とすると,

$$g(x) = \sum_{i=11}^{8} f_i(x) \quad (2)$$

で表され, 実測値を基とした実際の各階級における全長度数分布は次式で表される。

$$C(x) = N(x) / \sum_{x=\min}^{\max} N(x) \quad (3)$$

$C(x)$ は階級*x*における全長度数分布, $N(x)$ は階級*x*の標本数(実測値)で表される。さらに, *i*月ふ化群のふ化群組成(推定するパラメータ)を P_i とすると, 理論値である $g(x)$ と実測値である $C(x)$ を全区間で最もあてはまりを良くするパラメータ p_i , μ_i 及び, σ_i を推定するために, 以下に示す式を目的関数としその値が最小となるように, 最適解を探索した。

$$L(x) = \sum_{x=\min}^{\max} (g(x) - C(x))^2 \quad (4)$$

*i*月ふ化群の平均全長 μ_i は2(2)節で得られる成長式をもとに算定することができ, 初期条件として各ふ化群月の平均全長 μ_i を与え, 以下の条件を付与した。

$$\mu_{11月} \geq \mu_{12月} \geq \mu_{1月} \cdots \geq \mu_{7月} \geq \mu_{8月} \quad (5)$$

また, 混合正規分布の和とふ化群組成の和が1になるように, 各パラメータが負に収束しないように(6)式を制約条件に設定した。

$$\sum_{x=\min}^{\max} g(x) = 1 \quad \sum_{i=11}^{8} P_i = 1 \quad p_i, \mu_i, \sigma_i \geq 0 \quad (6)$$

上記の手法により, 図-6に例示するとおり, 複数のふ化群月の全長頻度分布が混合した分布となる。この複合分布を各全長階級の度数を1に標準化して示すと図-7のようになり, さらに, 組成分布全体を100%とした時のふ化群割合を求め図-8のような「ふ化群組成」を得た。

3. 結果

(1) マハゼのふ化時期と成長曲線推定結果

採取日と輪紋数から推定されたふ化時期を図-9に示す。11月から8月までの幅広いふ化時期を有していた。

また, 全長とふ化日数の関係から成長曲線の推定を行った結果が図-10である。年によって成長曲線が異なる可能性が考えられたため, ベルタランフィー(von Bertalanffy), ロジスティック(logistic), ゴンペルツ(Gompertz)の3式¹³⁾をそれぞれ当てはめた。また, ふ化直後から100日目までのデータがほとんど得られなかつ

図-6 全長混合頻度分布

図-7 全長階級別ふ化群頻度分布

図-8 ふ化群組成

図-9 輪紋数から推定されたふ化時期

図-10 成長曲線推定

たため, ふ化直後の成長曲線については, 鈴木らにより得られているマハゼの人工飼育からの実験式¹⁴⁾に最もあう曲線をその年の成長曲線とした(式(7)~式(10))。

図-11 ふ化群組成 (多摩川河口 2009 年データ)

図-12 ふ化群組成 (野島水路 2011 年データ)

図-13 ふ化群組成 (朝潮運河2011年データ)

図-14 ふ化群組成 (大森2012年データ)

2009年度 Gompertz式

$$L_t = L_{\infty} e^{-C e^{-Kt}} \quad (7)$$

$$L_{\infty}=262.921, C=3.904, K=0.00794$$

2010年度 logistic式

$$L_t = \frac{L_{\infty}}{1 + e^{b - ct}} \quad (8)$$

$$L_{\infty}=216.551, b=2.585, C=0.0153$$

2011年度 Gompertz式

$$L_t = L_{\infty} e^{-C e^{-Kt}} \quad (9)$$

$$L_{\infty}=262.921, C=3.784, K=0.00936$$

実験式 (鈴木ら, 1989) ¹⁴⁾

$$\begin{aligned} L1 &= 4.697 \times 1.034 & (0 \leq t \leq 45) \\ L2 &= 0.716 \times t - 14.123 & (46 \leq t \leq 170) \\ L3 &= 160.18 \times t - 715.9 & (171 \leq t \leq 330) \end{aligned} \quad (10)$$

ただし, t はふ化後の経過時間 (day) である。

(2) ふ化群組成の時系列変化の結果

図-11～図-14は多摩川河口の2009年7月, 10月, 11月, 野島水路の2011年7月, 9月, 10月, 11月, 朝潮運河の2011年9月, 10月, 11月, 大森の2012年4月, 5月, 6月, 8月, 9月, 10月についてのふ化群組成を示したものである。4地点におけるふ化群組成について, ふ化群混合率1%以下を除外して検討を行った。

多摩川河口の7月の集団には3ヶ月分のふ化群, 10月と11月の集団には4ヶ月分のふ化群が混合しており, 時間の経過とともにふ化群数が増加していた。また, 全体の

過半数を占めていたふ化群月が7月, 10月, 11月と時間の経過とともに入れ替わっていた。

野島水路の7月と9月の集団には2ヶ月分のふ化群, 10月の集団には3ヶ月分のふ化群, 11月の集団には4ヶ月分のふ化群が混合しており, 多摩川河口と同様に時間の経過とともにふ化群数が増加していた。また, 全体の過半数を占めていたふ化群月が7月, 9月, 10月, 11月と多摩川河口と同様に時間の経過とともに入れ替わっていた。

朝潮運河は9月, 10月, 11月全ての時期の集団において, 2ヶ月分のふ化群が全長組成を構成しており, 時間の経過に伴う変化はなかった。また, 全体の過半数を占めていたふ化群月の時間の経過に伴う入れ替わりは顕著ではなかった。

また, 大森の4月の集団には2ヶ月分のふ化群, 5月の集団には1ヶ月分のふ化群, 6月の集団には3ヶ月分のふ化群, 8月の集団には2ヶ月分のふ化群, 9月と10月の集団には3ヶ月分のふ化群が混合しており, 時間の経過に伴う顕著な増加は見られなかった。また, 全体の過半数を占めていたふ化群月が4月, 5月と6月と8月, 9月と10月と2～3ヶ月に1回程度に入れ替わりであった。

以上の結果より, 多摩川河口や野島水路では顕著にふ化群の混合数が増加していたが, 朝潮運河ではふ化群数の変動がなくその数も少なかった。大森については朝潮運河よりもふ化群数が多い時期があったが, ふ化群の混合数の変化は多摩川や野島水路ほど顕著ではなかった。

(3) ふ化群出現頻度の結果

ある時期にふ化した群が, 各場所・各時期にどれくらい出現するのかを推定した。その中でも多地点かつ多くの時期に出現していた2011年の4月にふ化した群を抽出

図-15 ふ化群出現頻度（2011年4月ふ化群）の空間分布

し、その出現頻度を場所毎・月毎に整理し、東京湾奥部について空間的に見た「ふ化群出現頻度」の一例を図-15に示す。

朝潮運河～東扇島に着目すると、2011年9月の集団における4月ふ化群の割合は、朝潮運河、芝浦、京浜運河、南前堀、多摩川河口、東扇島は80%以上と高かったのに対して、大森は20%以下で他の地点に比べて小さかった。また、朝潮運河と大森は時間の経過とともに減少していたが、多摩川河口はほぼ一様であった。このように同一のふ化群でも場所によって出現の時期と頻度が違う様子が示された。

4. 考察

(1) マハゼのふ化時期と成長速度について

近年の東京湾奥部や神奈川県側に生息するマハゼのふ化時期の推定結果は、既往文献における3月下旬～6月上旬⁹⁾、3月中旬～5月中旬¹⁵⁾、1月～5月¹⁶⁾よりも長期間であり、特に6月から8月までふ化時期が続いていたことが特徴的であった。また、成長速度が年によって異なることから、全長からふ化時期を逆算する際には、年ごとに異なる成長速度（成長曲線）を用いることで解析精度を高めることができる。

そのため、本稿ではマハゼのふ化時期は11月から8月までとし、成長速度は年度別に推定した結果をそれぞれ

採用することとした。尚、2012年度の成長速度については、鈴木ら¹⁴⁾による実験式を採用することとした。

(2) ふ化群組成について

混合しているふ化群数が増加していた多摩川河口や野島水路については、成長するマハゼにとって多様な生活の場として機能しており、小さなマハゼから比較的大きなマハゼまで生活することができる場であることが推察される。

一方、朝潮運河や大森については時間の変化と共にふ化群数の顕著な増加が見られなかったことから、マハゼにとってごく限定的な期間にのみ利用されている場であることが示唆された。

このようにふ化群組成の時系列変化は、場所毎のマハゼの加入や滞留の状況の違いを捉えることができる事が示された。

(3) マハゼの動態の推定への予察

図-15には今まで産卵生息孔が確認できた場所についても図示した。その結果、点線矢印のように湾内に面した産卵孔を目指して移動している様子が推察され、その中でも移動経路が複数あることが推察された。この移動経路が複数あることは、耳石のSr/Ca変動のパターンが複数あることから同様の指摘がなされており¹¹⁾、今回の推察と矛盾しない。

以上のことから、ふ化群の出現頻度を場所毎、月毎に追跡することによって、移動経路と影響範囲を推察できる可能性が示唆された。

5. 結論

本稿では、マハゼの全長計測と耳石データからマハゼの群集動態の解析手法について検討し、以下の知見を得ることができた。

- ・当該期間における東京湾に生息するマハゼのふ化時期は既往文献よりも長期化しており（11月～8月）、成長速度は毎年の変動を考慮する必要がある。
- ・全長組成分布におけるコホート解析より得られるふ化群組成は場所毎のマハゼの加入・滞留の状況の違いを検討する解析手法として有望である。

なお、特定のふ化群出現頻度を空間的に解析することは、採取されたマハゼに対する各場所・各時期における代表性や採取方法による違いの検証が必要であるが、将来的には移動経路と影響範囲の推定に使える可能性があり、本稿で提案された全長計測を主体とする手法は、マハゼの群集動態の解析手法として有効である。またこれらの結果と底質や水質要因への嗜好性、忌避行動と関連づけて捉えることで、沿岸域の総合的評価に向けた検討に活用できる可能性がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり、各種調査におきましてはこれまで多くの方々のご協力があつて実施されてきたものであり、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小路淳・堀正和・山下洋：浅海域の生態系サービス-海の恵みと持続的利用，恒生社厚生閣，2011。
- 2) 岡田知也：河口域の水質特性－河口域の保全・再生の際に留意すべき河口域の機能とは？－，水工学シリーズ，04-B-2，2004。
- 3) 佐藤千鶴，古川恵太，岡田知也：京浜運河における

底生生物からみた自然再生の可能性，海洋開発論文集，第22巻，pp.211-216，2006。

- 4) Millennium Ecosystem Assessment : Ecosystems and Human Well-being, Island Press, 2005.
- 5) 横浜国立大学 21 世紀 COE 翻訳委員会：生態系サービスと人類の将来，オーム社，2007
- 6) 宮崎一老：マハゼに就て，日本水産学会誌，Vol.9 No.4, pp.159-180, 1940.
- 7) 国土技術政策総合研究所：東京湾環境マップー京浜運河編一，2008。
- 8) 道津喜衛，水戸敏：マハゼの産卵習性および仔，稚魚について，魚類学雑誌，IV-4/5/6, pp.153-161, 1955.
- 9) 中瀬浩太，金山進，木村賢史，上野淳一，石橋克己：都市内湾域の人工干潟水域における水質環境と生物に関するモニタリング，海洋開発論文集，第26巻，pp.729-734, 2010.
- 10) 荒井崇臣：魚類の回遊履歴：解析手法の現状と課題，魚類学雑誌，49(1):1-23, 2002.
- 11) 上村了美：マハゼの耳石が語ること，海洋調査協会報，No.107, pp.15-19, 2012.
- 12) 相澤康，滝口直之：MS-Excelを用いたサイズ度数分布から年齢組成を推定する方法の検討，水産海洋研究，63(4), pp.205-214, 1999.
- 13) 能勢幸雄，石井丈夫，清水誠：水産資源学，財団法人 東京大学出版会，1988.
- 14) 鈴木伸洋，柵瀬信夫，杉原拓郎：人工ふ化飼育によるマハゼの卵発生と仔稚魚の発育過程，水産増殖，36巻4号，pp.277-289, 1989.
- 15) 東京都水産試験場：東京都内湾生息環境調査報告書～東京湾奥部におけるマハゼの産卵生態について～，東水試出版物通刊，No.337, 1985.
- 16) 米山純夫，千野力，竹之内卓夫，村井衛：東京湾奥において小型底曳網により1988-99年に採集された魚類とその生息環境，東京都水産海洋研究報告，(3), pp.13-62, 2009.

ATTEMPT OF METHOD FOR ANALYSIS COMMUNITY DYNAMICS OF INDEX SPECIES (GOBY:*Acanthogobius flavimanus*) IN COASTAL AREA

Jun YOSHIDA, Keita FURUKAWA, Satomi KAMIMURA and Tomonari OKADA

For the enhancement of ecosystem services in coastal area, it is worth to consider a comprehensive evaluation of targeted environment by a well-known indicator species. Thus, we have selected a marginal migratory goby (*Acanthogobius flavimanus*) as a comprehensive evaluate species.

As a result, a hatching season of gobies was determined as longer than the said period, and needed to consider the difference of growth speed for each year. Hatching group fraction obtained from total length composition diagram, was an effective analysis technique. It was potentially able to capture the lifecycle of gobies for each location. And the spatial distribution of a specific hatching group was potentially able to determine the routes of migration.