

トラフグ伊勢・三河湾系群の再生産に関わる海洋環境変動

青木一弘^{1†}, 児玉真史², 黒木洋明³, 鈴木重則⁴, 津本欣吾⁵,
岡田 誠⁶, 久野正博⁶, 横山文彬⁷, 加藤毅士⁷

Interannual variation of hydrographical condition related to the reproduction of tiger puffer *Takifugu rubripes* in Ise and Mikawa Bays, Japan

Kazuhiro AOKI^{1†}, Masashi KODAMA², Hiroaki KUROGI³, Shigenori SUZUKI⁴, Kingo TSUMOTO⁵,
Makoto OKADA⁶, Masahiro KUNO⁶, Fumiaki YOKOYAMA⁷ and Tsuyoshi KATOU⁷

トラフグ伊勢・三河湾系群における再生産成功率 (RPS) の変動機構を解明するために、伊勢湾内およびその沖合域において1993–2012年に観測された水温、塩分を基に海洋環境との同期性を解析した。その結果、RPSと各成長過程における海洋環境の間に有意な相関関係がみられた。産卵期前である2月の伊勢湾中央部における10 m深水温が高く、3月の湾中央部の5 m深塩分が高く、産卵期である4月の伊勢湾湾奥部における10 m深塩分が高く、着底後である7月の湾中央部の30 m深水温が低く、10月の湾中央東部表層0 m深の水温が高い年にRPSが高い傾向にあった。ステップワイズ重回帰分析の結果に基づいて、水温および塩分値を用いたRPS追算を試みた。

We studied the variation of recruitment per spawning of the tiger puffer *Takifugu rubripes* in Ise and Mikawa Bays, Japan with special reference to temperature and salinity for clarifying the controlling factors of its interannual variation from 1993 to 2012. Interannual variation in the recruitment per spawning is positively correlated with the 10 m-depth temperature in the central area of Ise Bay in February, 5 m-depth salinity in the central area in March and 10 m-depth salinity in the bay head in April, and negatively correlated with the 30 m-depth temperature in the central area in July. On the basis of the results in a stepwise multiple linear regression analysis, we hindcast the recruitment per spawning from 1993 to 2012 using the temperature and salinity around Ise Bay.

Key words: *Takifugu rubripes*, recruitment per spawning, temperature, salinity, Ise and Mikawa Bay

2015年3月18日受付, 2015年12月22日受理

¹ 水産総合研究センター中央水産研究所

National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research Agency, 2–12–4 Fukuura, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236–8648, Japan

² 国際農林水産業研究センター

Japan International Research Center for Agriculture Sciences, 1–1 Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305–8686, Japan

³ 水産総合研究センター増養殖研究所横須賀庁舎

Yokosuka Laboratory, National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, 6–31–1 Nagai, Yokosuka, Kanagawa 238–0316, Japan

⁴ 水産総合研究センター増養殖研究所南伊豆庁舎

Minami-Izu Laboratory, National Research Institute of Aquaculture, Fisheries Research Agency, 183–2 Minami-Izu, Kamo, Shizuoka 415–0156, Japan

⁵ 三重県農林水産部

Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Mie Prefecture, 13 Koumeicho, Tsu, Mie 514–8570, Japan

⁶ 三重県水産研究所

Mie Prefecture Fisheries Research Institute, 3564–3 Hamajima, Shima, Mie 517–0404, Japan

⁷ 愛知県水産試験場漁業生産研究所

Marine Resources Research Center, Aichi Fisheries Research Institute, Toyohama, Toyoura, Minamichita-cho, Chita-gun, Aichi 470–3412, Japan

† kazuaoiki@affrc.go.jp

はじめに

フグは我が国において高級魚として消費されており、その中でも天然トラフグ *Takifugu rubripes* の消費価値は極めて高い。伊勢湾、熊野灘および遠州灘 (Fig. 1) は全国でも有数の天然トラフグの漁場が形成されており、近年では年間約100トンが漁獲されている。当歳魚は伊勢湾および三河湾において小型底曳き網漁業により、1歳魚以降は熊野灘および遠州灘においてふくはえ縄漁業により漁獲される。トラフグ伊勢・三河湾系群の産卵期は4-5月とみられ、産卵場は伊勢湾湾口部の安乗沖と山周辺海域で確認されている (神谷ほか, 1992; 白木谷ほか, 2002)。ふ化後の仔魚は伊勢湾内において確認され、5月初旬には湾口部で、下旬には湾中央東部で採集例がある (岡田ほか, 2015)。翌6月には全長約10 mmの仔稚魚が伊勢湾中央部から奥部の砕波帯に着底する (中島ほか, 2008)。その後、秋季までは湾内に生息するが、冬季から春季にかけて水温が低下するとともに徐々に湾外に移動し、1歳の秋季には熊野灘にまで移動することが報告されている (中島, 2011)。

本系群の漁獲量は、不定期に発生する卓越年級群の影響によって大きな変動を示し、近年では1999年と2001年に卓越年級群が発生したことが報告されている (鈴木ほか, 2015)。当海域の天然トラフグの漁獲量と親魚量には関係性はみられず、その変動要因はいまだ不明であるが、秋・冬季における湾内の底曳き網漁業による当歳魚の漁獲量と翌年湾外で漁獲される1歳魚の漁獲量には強い正の相関関

係があることから (鈴木ほか, 2015)、漁獲加入以前の卵稚仔魚期の生残が加入量を決定していると考えられる。一方で、産卵場において毎年産卵が確認されているのに対して、浮遊期仔魚はイワシ類等の卵稚仔調査ではほとんど採集されず、また、砕波帯への着底後、秋季までは伊勢湾内の底曳き網漁業で混獲されていないことから、この間の生息域についても不明な点が多い。このように本系群の初期生態に関する知見不足が加入量、ひいては資源量の変動要因解明の支障となっている。

本研究ではトラフグ伊勢・三河湾系群の資源変動機構の解明を目的に、再生産成功率 (RPS) に影響を与える海洋環境変動の抽出を試み、RPSの予測指標を推定した。

材料と方法

平成26年度トラフグ伊勢・三河湾系群の資源評価報告書 (鈴木ほか, 2015) には、月別漁業種別年齢別漁獲尾数および年齢別魚体体重からVPAを用いて推定された親魚量と加入尾数が記載されている。その親魚量と加入尾数からRPS (=加入尾数/親魚量) を算出した (Fig. 2)。

RPSと海洋環境の関係を調べるために、三重県の調査船あさまおよび愛知県の調査船海幸丸で実施された浅海定線調査および沿岸定線調査で取得された水温・塩分の観測値を解析に用いた。それらの調査は原則として毎月行われているが、海況次第で調査日は変更される。そのため、観測日が月の初旬から下旬までばらつきがあり、解析に用いる各月の観測値 (特に水温) がその月を代表していない可能性がある。よって、水温については各観測点・各深度の調和解析を用いて求められた季節変動成分からの偏差を解析に用いた。1993-2012年の各観測点 (Fig. 1)・各測定深 (0, 5, 10, 20, 30 m)・各月ごとの観測値とRPSの相関係数を求めることにより、RPSにかかわる海洋環境変動の抽出を試みた。本報では、湾内を湾奥・湾中央部・湾口部に大分し、結果を記述した (Fig. 1)。さらに、赤池情報量基準 (Akaike, 1973) を判定基準としたステップワイズ法で項目選択を行い、RPSとの重回帰分析を行った。重回帰分析の際は、各水温・塩分値は平均値からの偏差を標準偏差で除した値を

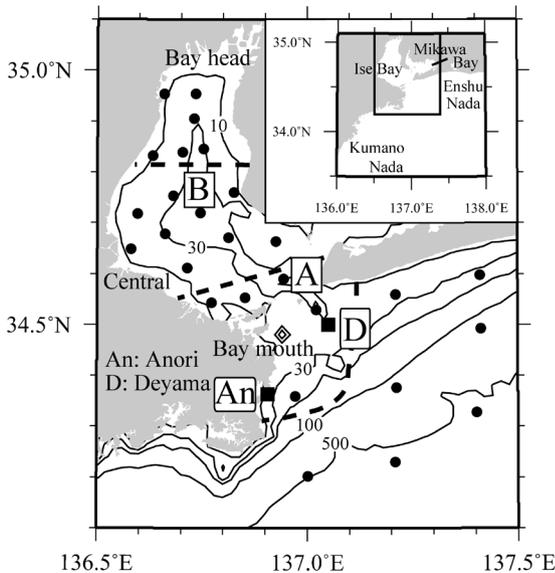


Figure 1. Map of the study area in the Ise and Mikawa Bays, Japan. The solid lines indicate the bottom isobaths of 10, 30, 100 and 500 m. Solid circles indicate the observational sites and A and B show mentioned stations in the text. Solid squares show locations of Anori and Deyama. The bay head, central area, and bay mouth are divided by broken lines.

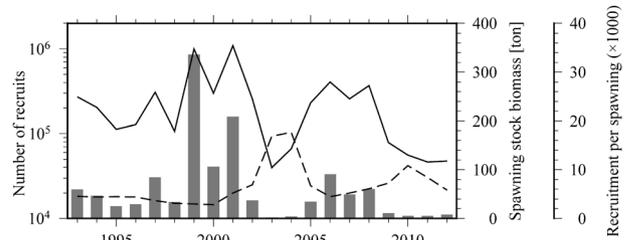
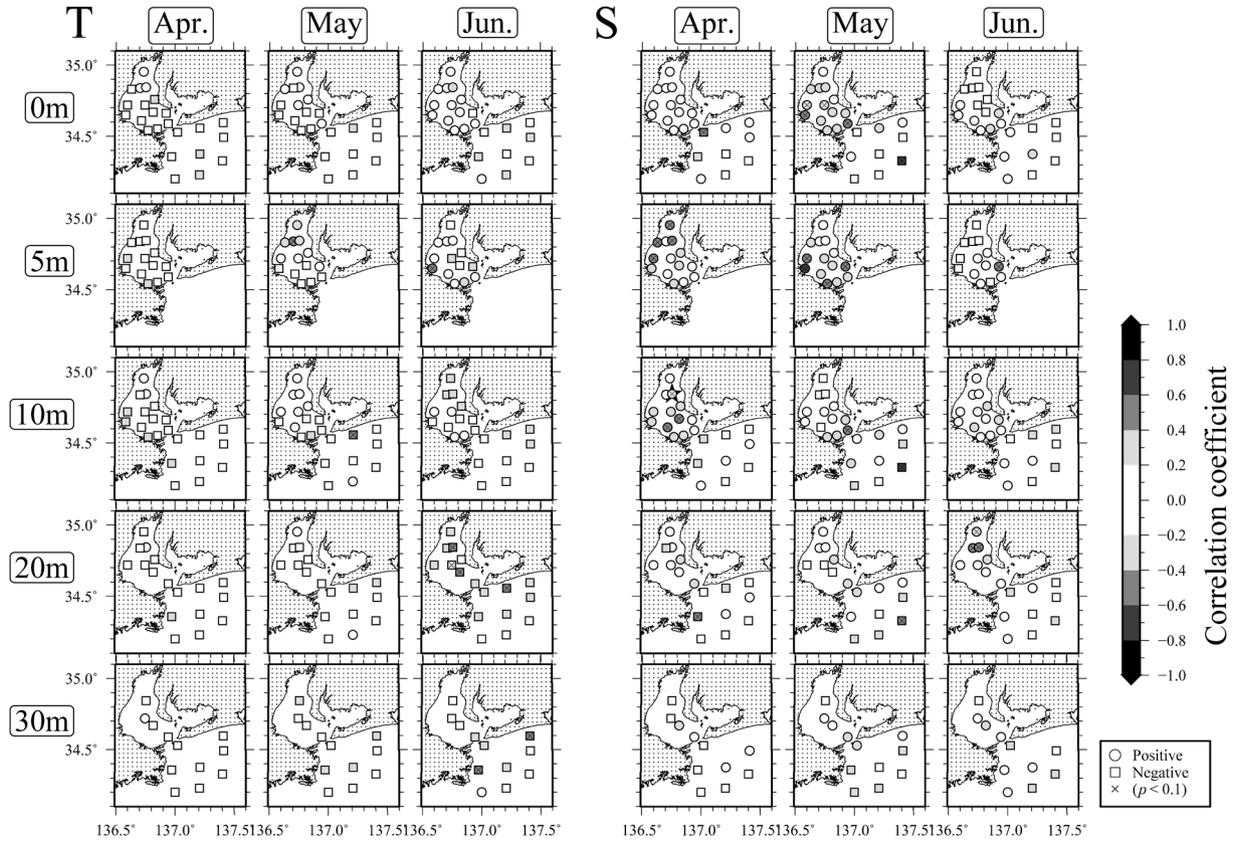
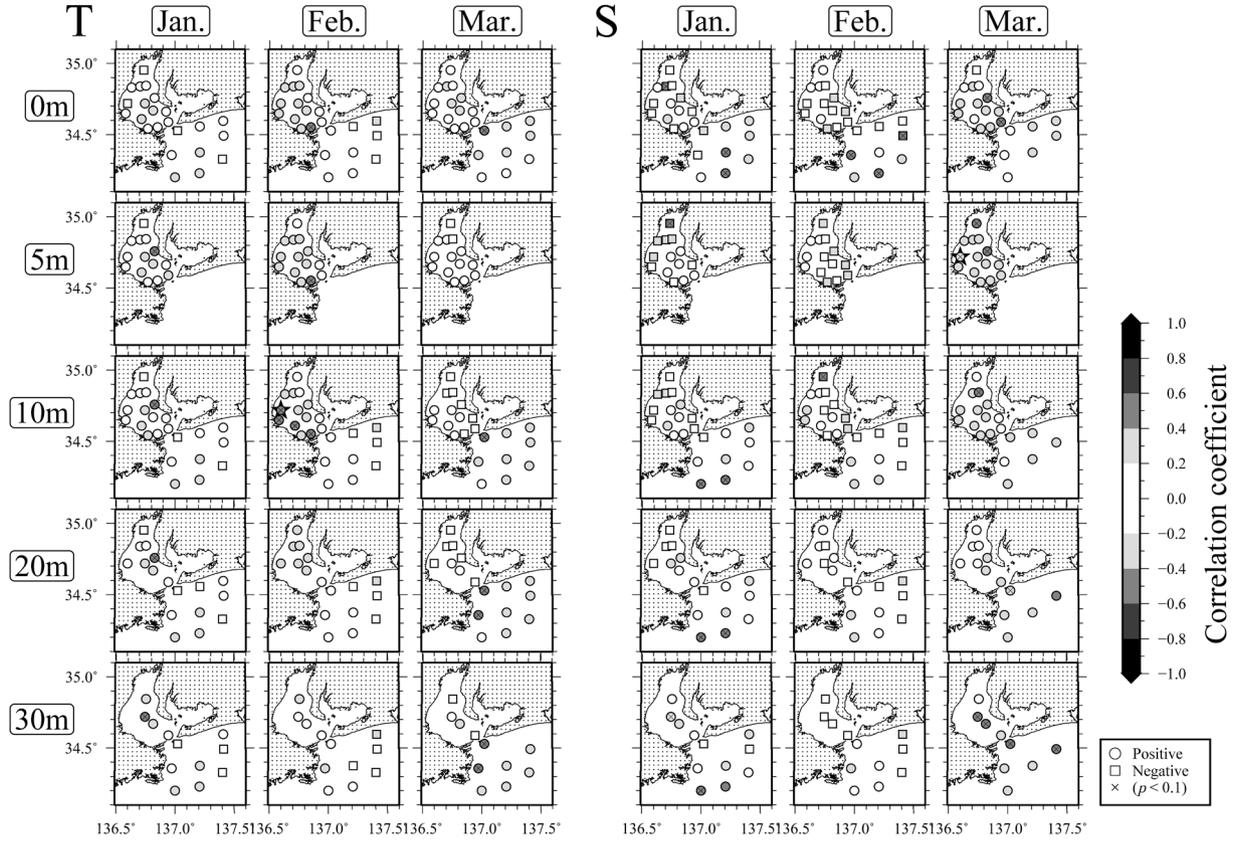
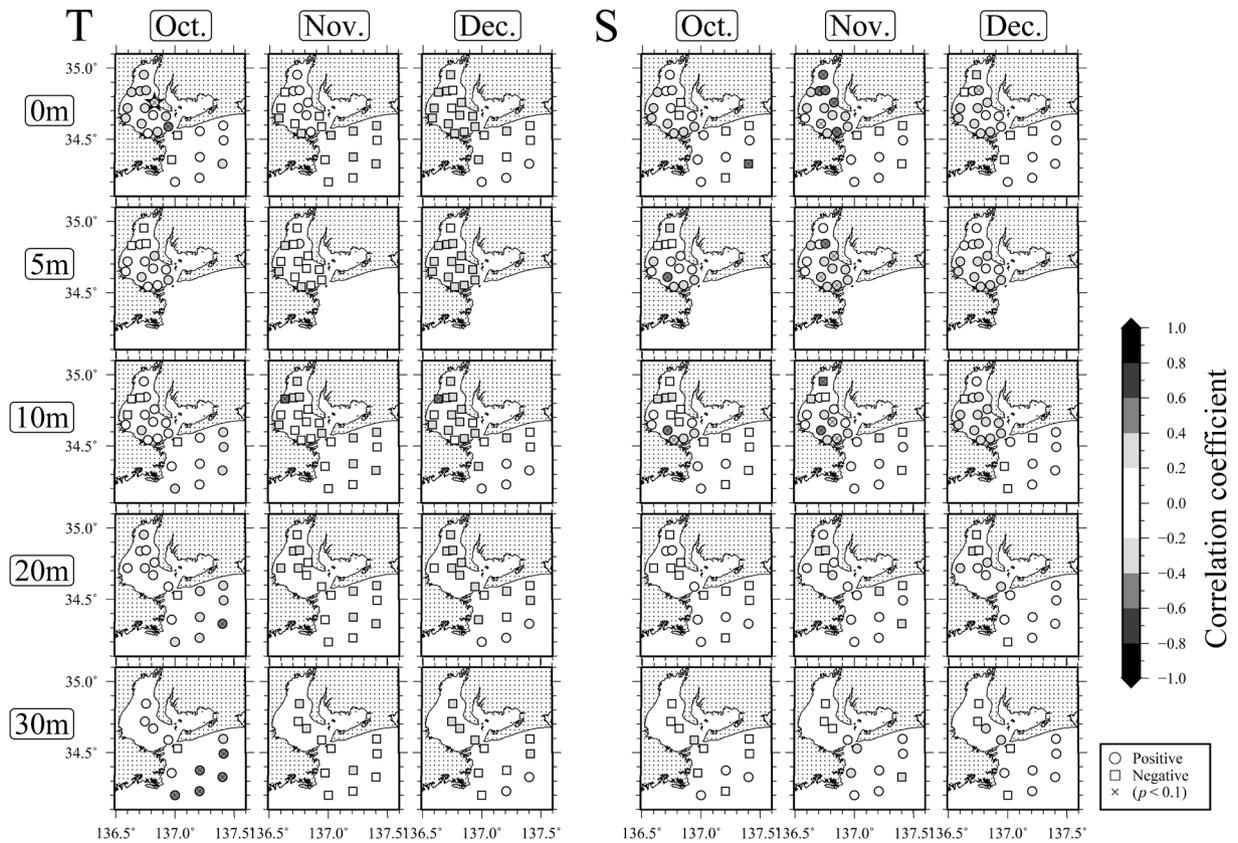
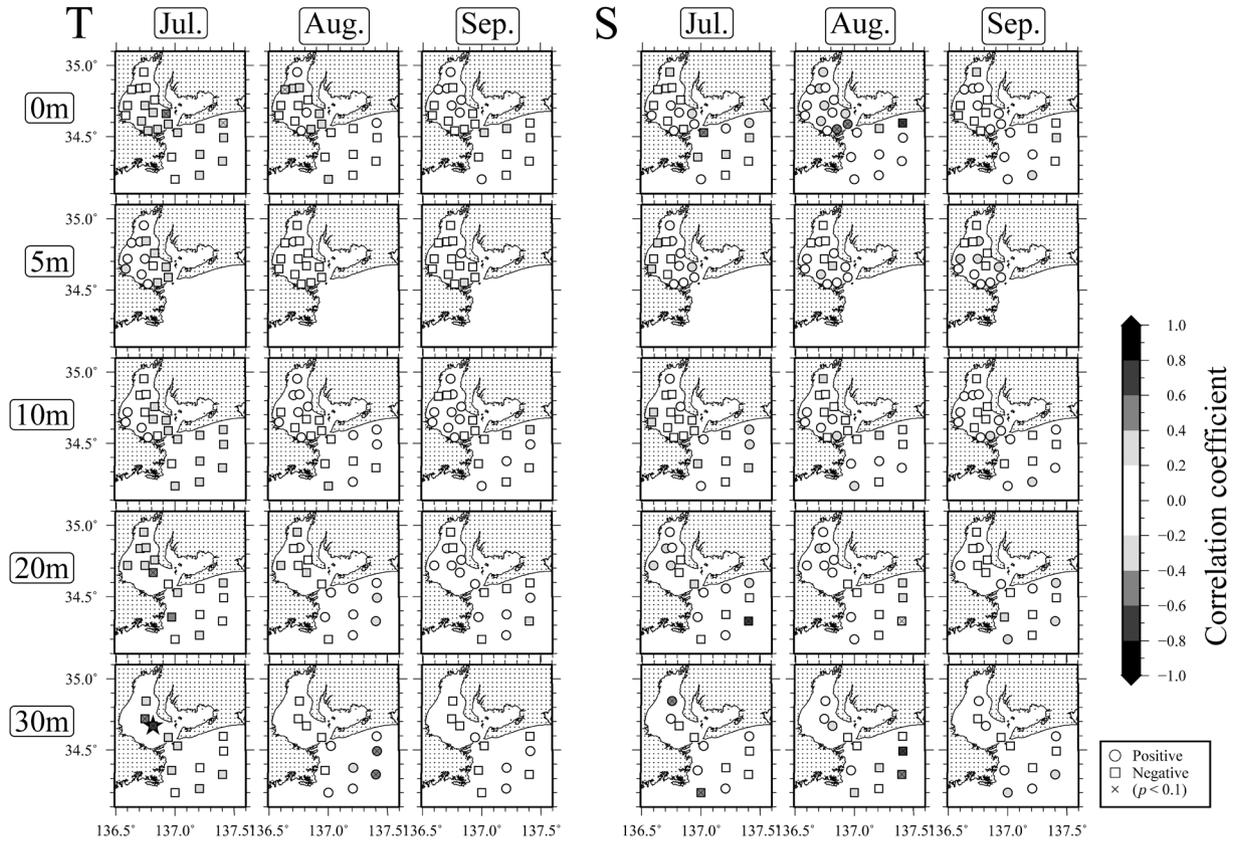


Figure 2. Interannual variations of the number of recruits (solid line), spawning stock biomass (broken line) and recruitment per spawning (RPS, gray bar) of tiger puffer *Takifugu rubripes*.





用いた。

高橋ほか(2000)に倣い, 湾口水の湾中央部への侵入深度を算出した。Stn. AおよびB (Fig. 1)における海水密度を水温, 塩分および深度を用いて算出し, Stn. A (湾口部)の海水密度と等しくなるStn. B (湾中央部)の深度を見積もることにより, 湾口水の侵入深度を概算した。

結果

RPSと水温・塩分の相関解析

1-3月の水温偏差とRPSの相関関係に着目すると, 湾中央部および湾口の表層0 mから30 m深水温偏差と正相関がみられ, 2月の10 m深における複数の測点で見られたのが顕著だった (Fig. 3a)。また, 1-3月では湾外の測点の塩分と正の相関関係がみられ, 3月のみ湾内における0.5および10 m深の塩分との間に正の相関がみられた。湾内塩分と正の相関関係にある状態は6月まで継続し (Fig. 3b), 最も顕著な相関は5月における湾中央部の5 m深で見られ, 相関係数は0.61であった。一方, 夏季(6-7月)では湾中央部の20および30 m深水温偏差と負の相関関係がみられたが, 8-9月の水温および塩分とは明瞭な相関関係はみられなかった (Figs. 3b and c)。秋季になると10月の湾中央東部や湾口の表層0 m深および湾外の30 m深の水温偏差と正の相関関係, 翌月(11月)の湾内表層0 mおよび5 m深の塩分と正の相関関係がみられ, 最も高相関だったのは湾奥部表層0 mであり, 相関係数は0.55であった (Fig. 3d)。

重回帰分析

RPSと有意な相関がみられた項目を用いて, ステップワイズ重回帰分析を実施し, 次式が得られた。

$$\log_{10}(R_p) = 0.251T_{Feb.} + 0.157S_{Mar.} - 0.395T_{Jul.} + 0.172T_{Oct.} + 3.48 \quad (1)$$

ここで R_p はRPS, $T_{Feb.}$ は2月の湾中央西部10 m深の水温偏差, $S_{Mar.}$ は3月の湾中央西部5 m深の塩分, $T_{Jul.}$ は7月の湾中央部30 m深の水温偏差, $T_{Oct.}$ は10月の湾中央東部表層0 m深の水温偏差を示し, 選択された測点はFigs. 3a, cおよびdに示す。重相関係数, 補正重決定係数およびAICは, それぞれ0.95, 0.88および382.3となり, 追算値は1999年および2001年の卓越年級の発生を評価できたが, 定量的には過小評価となる特性がみられた (Fig. 4)。加えて, 式(1)は2009-2012年の低いRPSも高精度で追算できた。

漁期前の予測

式(1)は漁期開始後に取得される10月の水温偏差を使用するため, 漁期前の予測には使用できない。よって, 漁期開始前の9月までに取得された項目に限定したステップワイズ重回帰分析の結果, 次式が得られた。

$$\log_{10}(R_p) = 0.300T_{Feb.} + 0.201S_{Mar.} - 0.379T_{Jul.} + 3.48 \quad (2)$$

ここで, 選択された項目は式(1)の $T_{Oct.}$ を除く3つの変数と共通しているが, 各項の係数は異なった。重相関係数, 補正重決定係数およびAICは, それぞれ0.91, 0.80および409.5であった。式(2)は式(1)と同様に卓越年級の発生はおおむね追算できたが, 式(1)と比べ1993年のRPSを過大に評価するほか, 1999年の卓越を式(1)よりも過小評価となる特性がみられ (Fig. 4), それには $T_{Oct.}$ が1993年と1999年で偏差が大きかったことが影響していた。式(2)では2-7月に取得される項目を使用しており, 漁期開始の3ヶ月前に評価可能なことが利点ではあるが, その精度は落ちる結果となった。

分布域を考慮した変数選択

2-3月(産卵期前)に親魚は伊勢湾湾口, 熊野灘および遠州灘に分布することが報告されており (中島・新田, 2005), ステップワイズ法で選択された $T_{Feb.}$ および $S_{Mar.}$ の位置 (湾内; Fig. 3a)とは異なっていることから, 式(1)および(2)は偶然の一致である可能性を否定できない。

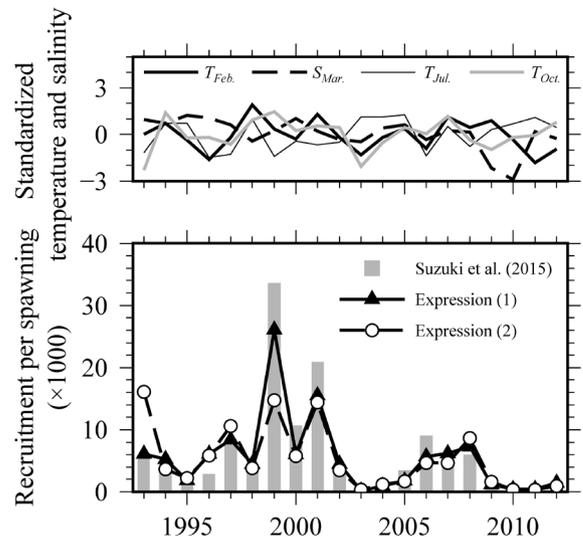


Figure 4. Interannual variations of standardized temperature, standardized salinity and RPS by expressions (1) and (2). RPS data are estimated from Suzuki et al. (2015).

Figure 3. Correlation coefficient distributions between RPS and water temperature (left) or salinity (right) in January–March (a), April–June (b), July–September (c) and October–December (d). We used the variables indicated by stars behind symbol for expressions (1)–(4).

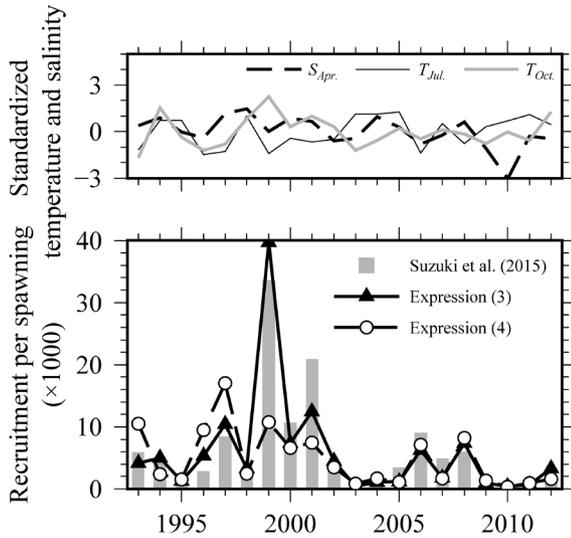


Figure 5. Interannual variations of standardized temperature, standardized salinity and RPS by expressions (3) and (4). RPS data are estimated from Suzuki et al. (2015).

よって、親魚および当歳魚の分布が確認されている時期・場所の項目に限定したステップワイズ重回帰分析の結果、次式が得られた。

$$\log_{10}(R_p) = 0.172S_{Apr} - 0.412T_{Jul} + 0.240T_{Oct} + 3.48 \quad (3)$$

ここで S_{Apr} は4月の湾奥部10 m深の塩分 (Fig. 3b) を示し、 T_{Jul} および T_{Oct} は式 (1) および (2) で採択された変数と共通していた。重相関係数、補正重決定係数およびAICは、それぞれ0.88, 0.74および385.0であり、式 (1) にやや劣る結果であった。さらに、漁期開始前の9月までに取得された項目に限定したステップワイズ重回帰分析の結果、次式が得られた。

$$\log_{10}(R_p) = 0.211S_{Apr} - 0.395T_{Jul} + 3.48 \quad (4)$$

ここで、選択された項目は式 (3) の T_{Oct} を除く2つの変数と共通しており、重相関係数、補正重決定係数およびAICは、それぞれ0.79, 0.57および416.2であった。式 (3) は式 (1) および (2) と同様に卓越年級の発生をおおむね追算できた (Fig. 5)。一方、式 (4) は1999年および2001年のRPSを大きく過小評価したが、2002年以降の変動はおおむね追算できた (Fig. 5)。

湾口水の侵入深度

式 (1)–(4) に共通して、 T_{Jul} (7月の湾中央部水温偏差) が採用された。7月の湾中央部底層が高水温の年には、湾中央部底層水温が湾口部底層水温より高い傾向にあった (Fig. 6)。また、湾口水の湾中央部での侵入深度を算出した結果、湾中央部底層が高水温だった年 (1995, 2000, 2003

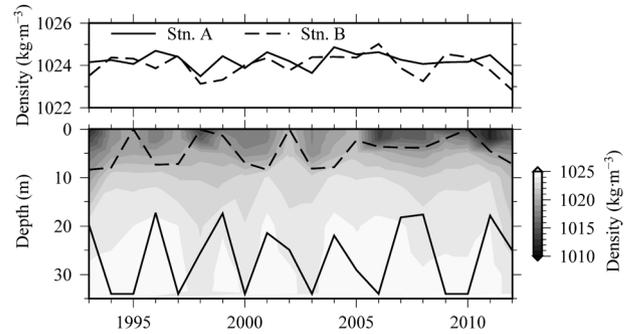


Figure 6. Interannual variations of bottom-water density in July at Stn. A in the bay mouth and Stn. B in the central area (Fig. 1) in upper panel. Vertical distribution of water density at Stn. B and intrusion depths of surface (dotted line) and bottom water (solid line) at Stn. A in lower panel.

年等) は湾口底層水の侵入深度が深く底層になっていた。

考察

海洋環境がRPS変動に寄与する要因

式 (3) および (4) で選択された変数は、4月の塩分および7月、10月の水温偏差であり、各海洋環境が再生産過程にどのように関与したか考察を行う。産卵期および仔魚期である4月の湾奥部の10 m深が高塩分な年に高いRPSになる結果を得た。後述の伊勢湾産のイカナゴ *Ammodytes personatus* の加入量が外海水移入による仔稚魚の成育場への輸送過程に左右されることが示唆されている (富山, 2003)。湾内が高塩分になる年は、高塩分な湾外水が湾内に多く流入し、湾口部に浮遊するふ化仔魚が多く成育場に輸送され、その結果として初期生残率が高くなり、高いRPSになったと推測される。

7月の湾中央部水温偏差 (T_{Jul}) が高い年に低RPSになるという結果になった。湾中央部底層が高水温の年には、湾口底層水の侵入深度が深く底層になっていた (Fig. 6)。湾中央部底層で貧酸素水塊が発達した際に、湾口水が底層に侵入すると貧酸素水塊が湾奥部に遡上または中層に押し上げられることが報告されており (赤石ほか, 2005)、このことが沿岸・浅海域に分布するトラフグ当歳魚 (阿知波, 2004) に影響している可能性が考えられる。トラフグと同様に伊勢湾において小型底曳き網漁業で漁獲されるシャコ *Oratosquilla oratoria* およびマアナゴ *Conger myriaster* や三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の浮遊幼生は貧酸素水塊発生の影響により、その分布域や現存量が変化する (成田ほか, 2007; 多部田ほか, 2012; 山田ほか, 2015)。よって、7月が高水温となる年は幼稚魚の好適な成育場が縮小していた可能性が考えられ、結果的に低RPSになったと推測される。

また、7–9月は有明海のトラフグにおいては高成長期にあたる (田北・Intong, 1991)。本研究では式 (1)–(4) の

いずれにおいても T_{Jul} の係数の絶対値は他の係数に比べて大きかったことから, RPSに最も強い影響を及ぼしていた。よって, この時期にトラフグが低い水温を経験することは上記の生育可能な水域の拡大だけでなく, 後述の10月とは異なり, 低水温やそれに伴う成育環境が速い成長をもたらす, 高生残率となる何らかの機構が存在する可能性もある。

10月の湾中央部水温偏差 (T_{Oct}) が高い年は高RPSになるという結果を得た。トラフグは9-10月において伊勢湾中央東部-湾口部に生息しており (阿知波, 2004), 有意な相関がみられた場所と一致していた (Fig. 3d)。 T_{Oct} は19.7-23.8°Cの範囲で変動し, 卓越がみられた1999年および2001年の T_{Oct} は23.7°Cから23.8°Cの値であり, 比較的高温であった。トラフグ成魚の生息最適水温は15-24°Cであり (Nakajima et al., 2010), 1999年および2001年の T_{Oct} は上限に近いがその範囲内にある。さらに有明海において9-10月が高温な年はトラフグが好成長となることが報告されている (松村, 2007)。よって, 伊勢湾においても高 T_{Oct} 年に高RPSになる要因として, 10月の湾中央部の高水温がトラフグ当歳魚の速い成長をもたらしたことが考えられる。

式 (1)-(4) では選択されていないが, 本系群トラフグの産卵期前である3月の湾口部の水温とRPSに有意な正の相関関係が認められることから, 前述のように外海水の流入量増加に伴う仔魚の湾内への輸送量の増加に加え, 3月において湾口部が高温になることにより, 親魚に好適な生息環境が整うことが推察される。本種と同様に伊勢湾湾口を産卵場とするイカナゴの卵黄形成に水温が影響することが示唆されているが (富山ほか, 1999; 山田・久野, 1999), トラフグ親魚の成熟や産卵に水温および塩分がどの様に作用するか具体的な機構は未詳である。さらに, 水温の直接的な作用だけでなく, 水温の餌料環境を通じた影響といった間接的な要因も考えられる。

本研究によって局所的な海洋環境変動を考慮した相関解析を実施したことで, トラフグ伊勢・三河湾系群におけるRPSの予測可能性が示された。これまで, 加入量の予測指標がなかった本系群において, 不明であった再生産機構の解明に寄与する重要な結果であると考えられる。本研究で行った魚類の資源量変動と局所的な海洋環境変動に着目する解析は, 生息域が比較的狭い魚種に対しては, 有用であると考えられる。本研究で海洋環境変動がRPS変動に関与している可能性を推測したが, 各々の要因についてさらに究明していく必要がある。特に, トラフグ親魚の成熟や卵形成に関わる環境要因や湾内への移入に係る調査を実施する必要があると考える。また, 今回の推定の再現性を確認するためには, 今後とも湾内外の継続的な観測が必要であろう。

謝 辞

本研究は愛知・三重の両県で長期にわたり実施されてきた

調査船調査結果を用いる事で遂行できたものであり, 長年調査を実施・担当された方々の尽力に敬意を表します。加えて, 本稿の改訂に有益なコメントを頂いた2名の査読者および担当編集委員に感謝致します。

引用文献

- 阿知波英明 (2004) 伊勢湾, 三河湾で標識放流したトラフグ人工種苗の分布・移動. 日本水産学会誌, **70**, 304-312.
- Akaike, H. (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: Proceedings of the Second International Symposium on Information Theory, eds. B. N. Petrov and S. Caski, Akademiai Kiado, Budapest, pp. 267-281.
- 赤石正廣・大島 巖・鶴飼亮行・青井浩二・黒田伸郎 (2005) 現地観測による伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊の挙動の把握. 海洋開発論文集, **21**, 391-396.
- 神谷直明・辻ヶ堂 謙・岡田一宏 (1992) 伊勢湾湾口部安乗沖におけるトラフグの産卵場. 栽培技術, **20**, 109-115.
- 松村靖治 (2007) 有明海におけるトラフグ *Takifugu rubripes* 人工種苗の漁獲サイズにおよぼす放流条件, 資源量指標および水温の影響. 日本水産学会誌, **73**, 250-255.
- 中島博司 (2011) 伊勢湾, 熊野灘に生息するトラフグ未成魚の移動, 成長および食性. 水産増殖, **59**, 51-58.
- 中島博司・新田 朗 (2005) 標識放流試験から見たトラフグ親魚の伊勢湾湾口部産卵場への回帰. 日本水産学会誌, **71**, 736-745.
- Nakajima, H., A. Nitta and K. Fujita (2010) Seasonal swimming behavior and optimum water temperature for adult ocellate puffer *Takifugu rubripes* revealed by using archival tags. Aquaculture Sci., **58**, 85-96.
- 中島博司・津本欣吾・沖 大樹 (2008) 伊勢湾の砂浜海岸砕波帯に出現したトラフグ稚魚について. 水産増殖, **56**, 221-229.
- 成田光好・M. Ganmanee・関口秀夫 (2007) 伊勢湾におけるシャコ *Oratosquilla oratoria* の個体群動態. 日本水産学会誌, **73**, 18-31.
- 岡田 誠・津本欣吾・黒木洋明・鈴木重則 (2015) 伊勢湾で採集されたトラフグ浮遊期仔魚. 黒潮の資源海洋研究, **16**, 143-148.
- 白木谷卓哉・田中健二・岩田靖宏・家田喜一・石川雅章 (2002) 伊勢湾湾口部におけるトラフグの産卵場及び産卵時期. 愛知県水産試験場研究報告書, **9**, 27-31.
- 鈴木重則・山本敏博・黒木洋明・澁野拓郎 (2015) 平成26年度我が国周辺水域の漁業資源評価 (魚種別系群別資源評価・TAC種以外) 第3分冊, 水産庁増殖推進部・独立行政法人水産総合センター, 1697-1718.
- 多部田 茂・中村義治・須藤隆行・丸山拓也・関根幹男・入江政安・関 いずみ・古川恵太 (2012) 伊勢湾におけるマアナゴを対象とした底びき網漁業の実態把握と操業シミュレータの開発. 沿岸域学会誌, **25**, 41-52.
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山陽一 (2000) 伊勢湾における外洋系水侵入深度と貧酸素水塊の季節変動. 海の研究, **9**, 265-271.
- 田北 徹・S. Intong (1991) 有明海におけるトラフグとシマフグの幼期の生態. 日本水産学会誌, **57**, 1883-1889.
- 富山 実 (2003) 2001年漁期における伊勢湾産イカナゴの資源回復について. 愛知県水産試験場研究報告, **10**, 37-44.
- 富山 実・船越茂雄・向井良吉・中村元彦 (1999) 伊勢湾産イカナゴの成熟, 産卵と水温環境. 愛知県水産試験場研究報告, **6**, 21-30.
- 山田浩且・久野正博 (1999) 伊勢湾産イカナゴの成熟に及ぼす水温および光周期の影響. 水産海洋研究, **63**, 14-21.
- 山田 智・岩田靖宏・堀口敏宏・鈴木輝明 (2015) 三河湾におけるアサリ浮遊幼生の鉛直分布に与える貧酸素水塊の影響. 水産海洋研究, **79**, 1-11.