

名城大学・ Vol.4
中部電力
産学連携活動資料

貧栄養化問題の解決に向けた意見交換会Ⅳ
～豊かな伊勢湾、三河湾の再生に向けて～

名城大学と中部電力の産学連携活動の概要

産学連携協定について

学校法人名城大学と中部電力株式会社は、地域社会の持続的な発展に資する活動を目指して、包括連携協定を締結(2020年3月24日)

●協定に定める活動項目

- ①地域貢献活動
- ②学術的活動
- ③人材の育成・交流

基本理念

名城大学

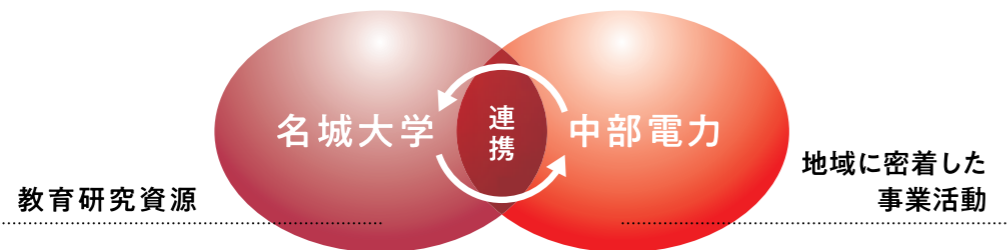


社会との「人的交流」を通じた、地域の活性化に貢献することを重要な社会貢献ミッションとし、自治体・民間企業との地域発展に資する活動を展開

中部電力



グループ全体で企業価値を持続的に高めるESG経営を推進し、事業基盤である中部圏の地域との信頼関係の維持・向上を目的に、地域共生活動を積極的に展開



名城大学の教育研究資源と中部電力の地域に密着した事業活動の強みを活かし、地域社会の持続的な発展に資する活動の展開を目指す。

活動概要

協定に定める活動項目のうち、当面は①地域貢献活動に取り組むこととし、その具体的な活動について以下のとおり覚書を交換。

- ア 地域コミュニティの形成・発展等に向けた取り組みに関すること
- イ 防災等の地域が抱える諸課題への取り組みに関すること
- ウ 海洋環境や海洋資源に係る諸課題への取り組みに関すること

目次

》貧栄養化問題の解決に向けた意見交換会Ⅳ

- 議事次第 P2
- 貧栄養化問題の解決に向けた意見交換会Ⅳの開催にあたって、伊勢湾・三河湾の貧栄養化問題の総括 P4
- 講演資料 ①伊勢湾・三河湾の漁業と貧栄養化問題の総括
 - 小型底びき網漁業、採貝漁業(アサリ)、のり養殖業 — P5
 - いかなご船びき網漁業 — P11
- ②伊勢湾のイカナゴは消えたのか? ~環境DNA分析による分布実態調査~ P18
- ③イカナゴ資源の回復を目指して ~伊勢湾イカナゴ生活史モデルによる予測シミュレーション~ P23

貧栄養化問題の解決に向けた意見交換会Ⅳ

~豊かな伊勢湾、三河湾の再生に向けて~

開催日時 2024年3月9日(土) 13:30~17:00

開催場所 中電ホール 愛知県名古屋市中区東新町1番地

〈議事次第〉

- 1 開会挨拶 名城大学副学長 大野 栄治
- 2 ご挨拶 愛知県漁業協同組合連合会 代表理事会長 山下 三千男
三重県漁業協同組合連合会 代表理事会長 濱口 慶太
- 3 趣旨説明 名城大学大学院総合学術研究科 特任教授 鈴木 輝明
- 4 講演 1 『伊勢湾・三河湾の漁業と貧栄養化問題の総括』
小型底びき網漁業、採貝漁業(アサリ)、のり養殖業 前 愛知県水産試験場 場長 蒲原 聡
いかなご船びき網漁業 株式会社日本海洋生物研究所 大阪支店 副支店長 橋口 晴穂
(休憩)
伊勢湾イカナゴ生活史モデルの開発と資源減少要因の解析(名城大学・中部電力共同研究)
- 5 講演 2 『伊勢湾のイカナゴは消えたのか? ~環境DNA分析による分布実態調査~』
名城大学大学院総合学術研究科 特任教授 鈴木 輝明
特任教授 中田 喜三郎
中部電力株式会社 執行役員 総務・広報・地域共生本部 部長 橋本 当矢
株式会社日本海洋生物研究所 大阪支店 副支店長 橋口 晴穂
研究員 安武 由矢 (発表者)
- 6 講演 3 『イカナゴ資源の回復を目指して ~伊勢湾イカナゴ生活史モデルによる予測シミュレーション~』
名城大学大学院総合学術研究科 特任教授 鈴木 輝明
特任教授 中田 喜三郎
中部電力株式会社 執行役員 総務・広報・地域共生本部 部長 橋本 当矢
株式会社サイエンスアンドテクノロジー 取締役 名古屋支店 支店長 市川 哲也 (発表者)
名古屋支店 研究員 丸尾 哲平
(休憩)
- 7 質疑応答および名城大学・中部電力共同研究の成果と今後の課題 名城大学大学院総合学術研究科 特任教授 鈴木 輝明
- 8 閉会挨拶 中部電力株式会社 執行役員 総務・広報・地域共生本部 部長 橋本 当矢



山下 三千男 やました みちお

出身／愛知県
平成16年／師崎漁業協同組合 代表理事組合長(現在に至る)
平成29年／愛知県漁業協同組合連合会 代表理事会長(現在に至る)
愛知県漁業無線協会理事、愛知県漁港漁場協会理事、愛知県魚市場協会理事、愛知海区漁業調整委員会会長、公益財団法人愛知県水産振興基金副理事長、東日本信用漁業協同組合連合会経営管理委員 他



濱口 慶太 はまぐち けいた

出身／三重県
平成30年／みえぎょれん販売株式会社 代表取締役社長(現在に至る)
令和 5年／三重県漁業協同組合連合会 代表理事会長(現在に至る)
みえぎょれん養殖株式会社代表取締役社長、公益財団法人三重県水産振興事業団理事長
三重県JF共済推進本部推進本部会長、三重県漁港漁場協会副会長
全国漁業信用基金協会三重支所運営委員、公益財団法人三重県農林水産支援センター評議員 他



鈴木 輝明 すずき てるあき

出身／愛知県
昭和49年／愛知県庁入庁(愛知県水産試験場 技師)
平成14年／愛知県水産試験場漁場環境研究部 部長
平成16年／愛知県水産試験場漁業生産研究所 所長
平成19年／愛知県水産試験場 場長(平成22年3月まで)
名城大学大学院総合学術研究科特任教授(現在に至る)。農学博士、愛知海区漁業調整委員会委員、愛知県長良川河口堰適正運用検討委員会委員、国土交通省中部地方整備局伊勢湾再生海域検討委員会 他



蒲原 聡 かもはら さとる

出身／大阪府
昭和60年／愛知県庁入庁(栽培漁業協会 技師)
平成16年／愛知県水産試験場漁業生産研究所 主任研究員
平成28年／愛知県水産試験場漁場環境研究部 部長
令和 4年／愛知県水産試験場 場長
令和 5年／いであ株式会社名古屋支店 技術顧問(現在に至る)
博士(学術)、公益社団法人日本水産学会理事



橋口 晴穂 はしぐち せいほ

出身／長崎県
平成16年／株式会社日本海洋生物研究所 中部支店 入社(研究員)
平成20年／株式会社日本海洋生物研究所 大阪支店 異動
平成25年／同 副支店長(現在に至る)
博士(学術)



安武 由矢 やすたけ よしや

出身／長崎県
令和 3年／純真短期大学 非常勤講師
令和 4年／株式会社日本海洋生物研究所 大阪支店 入社(研究員)(現在に至る)
修士(農学)



市川 哲也 いちかわ てつや

出身／岐阜県
平成 4年／株式会社中電シーティーアイ 入社
平成19年／株式会社サイエンスアンドテクノロジー 入社
平成26年／同 取締役 名古屋支店 支店長(現在に至る)
博士(工学)

貧栄養化問題の解決に向けた意見交換会Ⅳの開催にあたって 伊勢湾・三河湾の貧栄養化問題の総括

名城大学大学院総合学術研究科 特任教授 鈴木 輝明

過去10年の間に伊勢湾・三河湾の生態系は大きく変化し、様々な漁業生産力は大きく低下してきた。この原因について多くの研究者は温暖化による水温上昇であると述べてきたし、マスコミもそのように報道してきた。一見わかりやすく、もっともらしいが本当にこの認識は正しいのだろうか?2020年からの名城大学と中部電力との産学連携活動の中で私たちは海の変節の原因について別の見方が必要であることを強く認識した。それは海の「貧栄養化」である。伊勢湾・三河湾においては赤潮・貧酸素対策として1980年から化学的酸素要求量(COD)及びCODの内部生産に関連する総窒素(TN)、総リン(TP)の水質総量規制が実施されてきた。この規制により、TN、TP濃度は大きく低下し、近年では現行の類型指定(主要な漁場はⅡ類型で最も厳しい類型に指定)に基づく環境基準値を下回る状態にまでなってきた。しかし削減を強化してもCODは依然として環境基準を満たさないことから、CODや、CODの増加の要因とされてきたTN、TPもさらなる削減強化が計画・実施されてきた。しかし、現実にはCODは下がらないどころか逆に上昇傾向にある海域もあり、CODの環境基準達成のためのTN、TP削減は適切な対策ではないことが周知されるようになってきた。この環境管理対策上の問題と近年の漁業生産力の大幅な低下に関連があるのだろうか?これがいわゆる「貧栄養化」問題である。

社会連携活動ではこの伊勢湾・三河湾の貧栄養化問題を取り上げ、漁業生産力低下との関連性や対応策について多くの方々から貴重な報告を頂くとともに、独自に研究を立ち上げてきた。初年度は瀬戸内海東部の播磨灘でのイカナゴ資源の減少と栄養塩不足との関連や瀬戸内法の改正、環境基準に下限値を設けた兵庫県条例の改正の経緯やその内容について意見交換をおこなった。二年度は愛知県水産試験場の研究者の方々から伊勢湾・三河湾のあさり漁業や底びき網漁業の低迷が貧栄養化と深く関係していることを報告していただいた。昨年度は2016年から禁漁となり、現在でも資源の回復が見られない伊勢湾イカナゴの不漁問題を取り上げ、我が国のイカナゴ研究の専門家の協力を得て実施した共同研究の成果について報告した。当初、イカナゴの資源減少要因については夏眠期の水温上昇が主因であるとの見解があったが、研究の結果、孵化後の伊勢湾内における索餌回遊時の「餌不足」による肥満度の低下が夏眠期の水温耐性や孕卵量を低下させたことが最も重要な原因と考えられた。つまり、見かけの原因は夏眠期の水温上昇のように見えるがその背景には餌不足という重要な病が隠れていたということである。次の問題は餌不足は何が原因で起こったのかという点であった。イカナゴの主要な餌料は動物プランクトンであるが、伊勢湾の動物プランクトンの経年的な変化については一貫した観測がなされてこなかったが、長年にわたり実施されてきた国土交通省事業や電力事業の実施に伴う漁業影響調査の報告から各機関の協力を得て動物プランクトンデータを抽出、整理した結果、伊勢湾の動物プランクトンはこの20年間の間に3割近くに減少し、特にアサリが激減した時期である2014年から2021年までの間の低下が著しいことが明らかになった。この動物プランクトンの減少も貧栄養化に伴う植物プランクトンの減少によるものであることも併せて明らかになった。この研究成果はヨーロッパ北部大西洋におけるイカナゴの一種であるレッサー・サンドイールの減少に関する研究結果とほぼ同様な結果であり、イカナゴについても貧栄養対策が最も喫緊の課題であることが明確になった。

これらの成果は県を始めとする関係省庁への対策要請や現地視察においても利用され、令和4年11月から実施されている広域流域下水道施設の栄養塩管理運転の強化にも繋がっている。今年度は過去3年間の意見交換会での成果を総括するとともに、伊勢湾イカナゴ漁場を共有する三重県漁業関係者のご参加も頂きながら、現在の分布状況や栄養塩回復による資源の動向について最新の研究成果を報告し、両県漁業関係者や研究者のご意見を伺ったうえで今後の対策に供したいと考え企画した。

伊勢湾・三河湾の漁業と貧栄養化問題の総括 — 小型底びき網漁業、採貝漁業(アサリ)、のり養殖業 —

前 愛知県水産試験場 場長 蒲原 聡

1 はじめに

「人々の豊かな生活」には、その地域で生産された食物の安定した供給が欠かせない。しかし、日本の食用魚介類の自給率は1964年の113%から2021年の59%へと約半分に低下している(図1)。1970年代から2000年代前半にかけて輸入量が急激に増加した半面、国内生産量は1990年代以降減少し続けている。2019年には輸入量が国内生産量を上回り、輸入への依存がさらに高まっている。

沿岸の「豊かな海」の再生が求められて久しいが、いまだに漁獲量は減少し続けている。しかし、日々豊富な輸入品に囲まれていると、「豊かな海」から享受する恩恵への感謝の気持ちやその必要性への意識が薄らいでいないか気がかりだ。「豊かな海」を取り戻すために、伊勢湾・三河湾の水産物の生産力を振り返り、利水環境について考えてみたい。

2 栄養塩類環境から見た漁業の現状

1) 小型底びき網漁業

シャコ、マアナゴは、この2種類で愛知県の伊勢湾小型底びき網漁業の全漁獲金額の30% (1970～2020年平均) を占めるほど重要な魚種である。しかし、これらの漁獲量は1990年代後半以降減少しており(図2)、図1の日本の食用魚介類の国内生産量と減少の推移がよく似ている。これら魚種の肥満度は2010年以降低下する(図3)(曾根ら, 2022a,b を改変)と共に、その分布域は2020年にかけて伊勢湾の北部漁場に

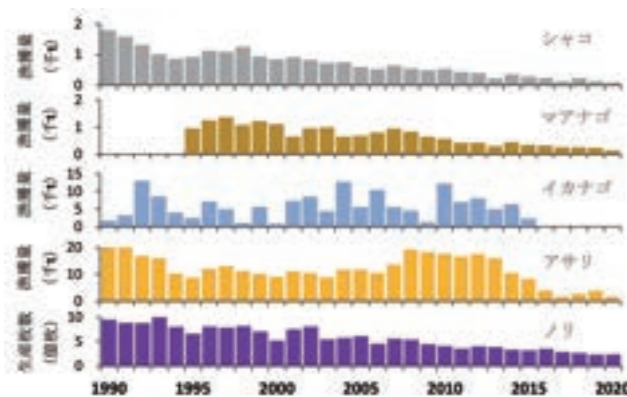


図2 シャコ、マアナゴ、イカナゴ及びアサリの漁獲量、ノリ生産枚数の推移(曾根ら, 2022a,b, 農林水産統計)

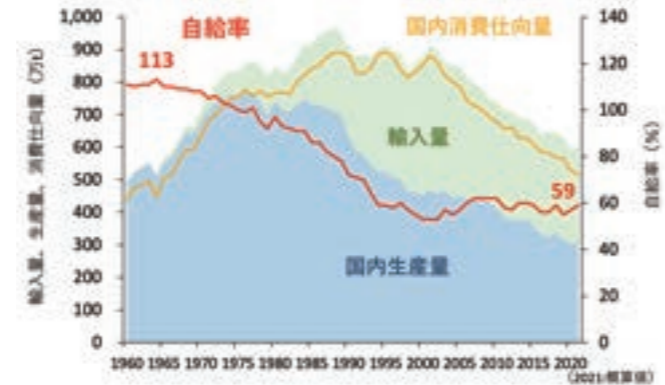


図1 日本の食用魚介類の国内生産量、輸入量、国内消費仕向量、及び、自給率の推移(水産物需給の動向)

注: 自給率(%) = (国内生産量 ÷ 国内消費仕向量) × 100、国内消費仕向量 = 国内生産量 + 輸入量 - 輸出货量 ± 在庫の増減量

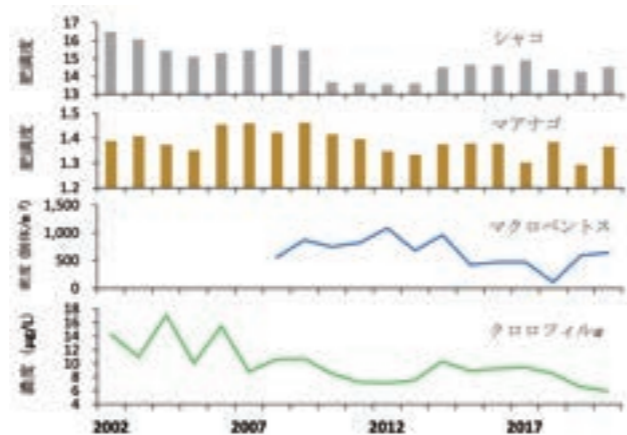


図3 シャコ、マアナゴの肥満度、マクロベントス夏冬平均密度及びクロロフィルa年平均濃度の推移

窄まっている(図4)(曾根ら, 2022a,b)。シャコは伊勢湾南部を中心とした1歳時春季から夏季にかけての生残率の低下により、分布域の縮小と大型個体の減少が見られている。シャコの餌となるゴカイや二枚貝類などのマクロベントス個体数は年々減少しており(図3)、マアナゴの餌になるシャコ、イカナゴなども減少している(図2)。植物プランクトンの指標となるクロロフィルa濃度は、経年的に低下するとともに(図3)、濃い濃度の範囲は湾奥部に収束している(図5)(青山ら, 2022)。夏季を中心とした基礎生産力の低下と餌料生物の減少との関連が指摘されている。逆に、マダイ、クロダイ、ヒラメなどの大型魚食魚の増加により、生態系の栄養段階は上昇しており、小型底びき網漁業が対象とする伊勢湾の生態系構造は大きく変化している(図6)(曾根ら, 2022c)。

2) 採貝漁業(アサリ)

2009～2013年の愛知県のアサリ漁獲量は1.6～1.8万tで(図2)、生産額は50億円前後と海面漁業生産額の20～32%を占めていた。しかし、2014年は1万t、2015年は0.8万tと減少して、2016～2020年は1.6～3.9千t、8.3～15.3億円と海面漁業に占める割合は6.6～9.4%に減少した。西三河地区は2009～2013年では県漁獲量の85.2%を占め、主要なアサリ生産地であった。アサリの活力指標となる肥満度を西三河地区について2年毎に平均すると、1998～1999年は活力が低下する肥満度12(水産庁, 2008)を上回っていたが、2007～2008年は11月から1月にかけて、2016～2017年は11月及び12月に肥満度12を下回るようになった(図7)。アサリが痩せることにより活力が低下して、少しの波浪でも減耗しやすくなっていると推測された。そこで、餌料を成長と再生産に必要な環境と捉えて、植物プランクトン濃度と水温から構成するアサリ成長モデルを使用して解析を試みた(蒲原ら, 2021)。1998年から2017年にかけての水温は年による大きな差はなかった(図8(A))。植物プランクトン量は2006年までは大きな振幅が見られたが、2007年以降は年間の最高値が低くなると共に振幅が小さくなった(図8(A))。1998～2006年の各年のアサリ軟体部乾重量の計算値は、生存に最低限必要な軟体部

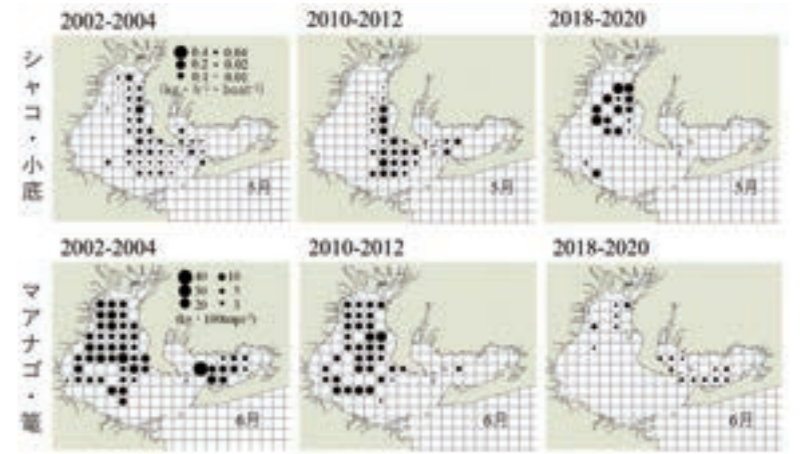


図4 標本船調査によるシャコ、マアナゴの分布の推移

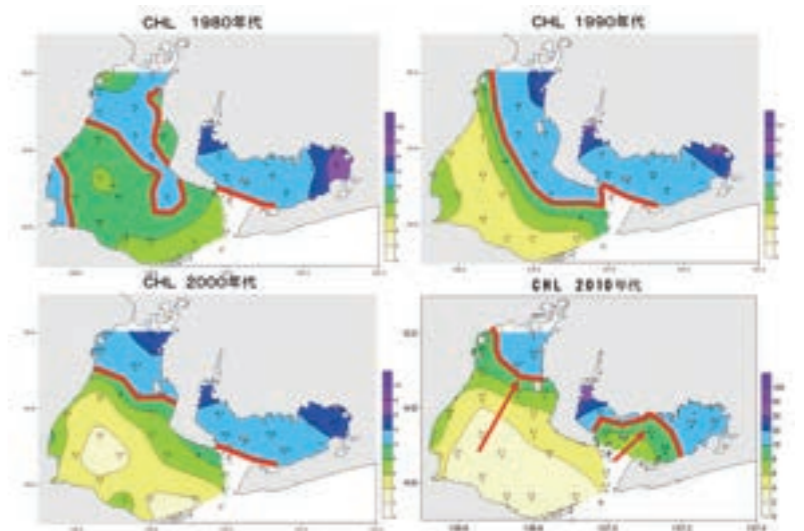


図5 クロロフィルa濃度の水平分布の推移(赤線: 10µg/L)

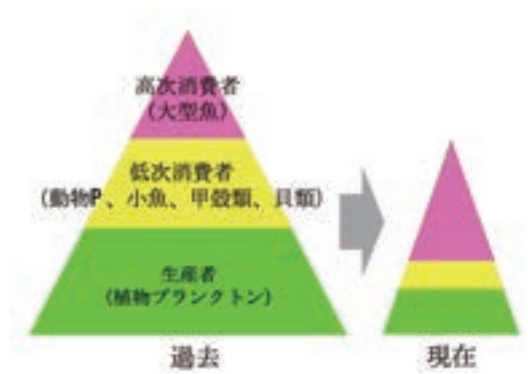


図6 伊勢湾の生態系構造の変化

乾重量である0.128gDWを上回ったが、2007年以降は2009年及び2017年を除き、0.081～0.126gDWと生存に最低限必要な軟体部乾重量を下回った(図8(B))。年間累計の生殖腺乾重量は1998～2006年は0.218～0.252gDWの変動範囲であったが、2007～2017年は0.140～0.197gDWと上限値、下限値ともに大きく低下した(図8(C))ことから、再生産への影響が危惧された。伊勢湾東部小鈴谷干潟においても、2014年春季にアサリ資源の急激な減耗が起き、その後も資源量低下が継続しているが、植物プランクトン量の低下による生理的死亡の可能性が報告されている(芝ら, 2020)。経年的な餌料濃度の低下が軟体部重量の低下(=肥満度の低下)を招き、資源量の減少が生じたと考えられる。アサリの成育を確保するためには、アサリの餌料となる植物プランクトンは1998～2006年の発生量を確保する必要がある。窒素、リン及びクロロフィルaの濃度の推移、リン総量削減計画及び実績を図9に示した。アサリに必要な植物プランクトン量を確保するためには、1998～2006年の水質が必要である。この時期の全リンは環境基準Ⅲ類型の濃度範囲にあり、リン負荷量は少なくとも2006年実績の5.4t/日が必要である。

3) のり養殖業

ノリ生産枚数は、1990年に9.4億枚であったが、2020年に2.3億枚となり低下し続けている(図2)。ノリ生産期間の目安となる共販への最終出荷回次数を沿海の鬼崎漁協から吉田漁協までの14漁協(支所を含む)を平均すると、1999～2002年度は平均9.8回次であったが、2003～2017年度は9.1回次となり、大規模な色落ちが発生した2018年は8.8回、2021年は8.3回となった。10回次近くまで出荷されていた年代は、色落ちが発生しても降雨による河川からの栄養塩類供給でノリの色調が回復した。近年は、栄養塩類不足で色落ちが発生すると、降雨があっても栄養塩類の回復がないままノリの色調が戻らず、生産が早期に終了する傾向にある。

三河湾西部(知多湾)表層におけるリン酸態リン(PO₄-P)と溶存無機態窒素(DIN)の平均濃度の変化を図10に示した。PO₄-P及びDINの濃度はいずれも

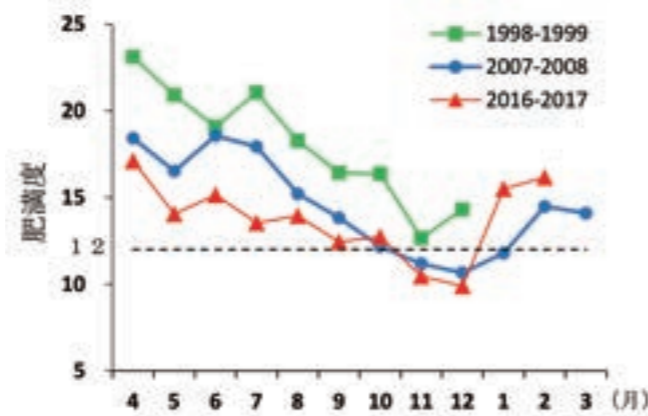


図7 三河湾一色干潟におけるアサリ肥満度の推移(肥満度8～12は活力が低い状態、水産庁, 2008)

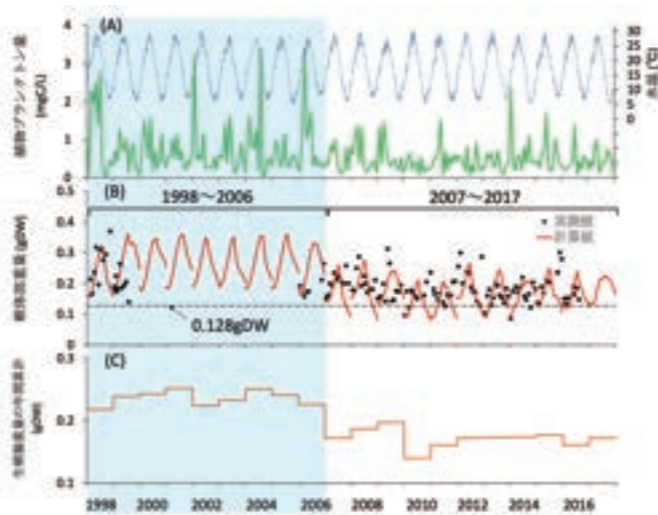


図8 三河湾西三河地区の植物プランクトン量及び水温(A)、アサリ軟体部重量の計算値及び実測値(B)、アサリ生殖腺重量の年間累計(C)の推移

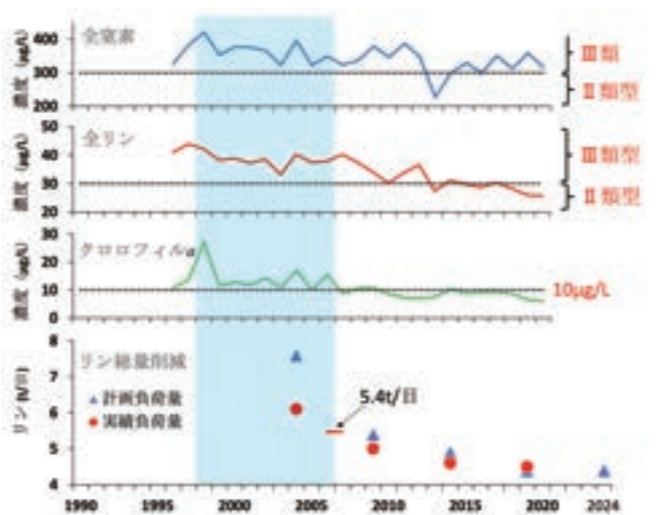


図9 愛知県Ⅱ類型海域の全窒素、全リン及びクロロフィルaの年平均濃度の推移、リン総量削減の計画及び実績(愛知県環境局)

夏季は低く、秋季に上昇してそれ以降は徐々に低下している。2013～2016年度のPO₄-P及びDINの月平均濃度は、1997～2012年度と比較して秋季のピークが低く、早くも1月には良いノリの目安となる10μg/L及び100μg/L(愛知県水産試験場, 2004)を下回った。このように、PO₄-P及びDINの栄養塩類が早期に低下することにより、生産の早期終了や単価の低下を招く色落ちが発生する漁業被害となっている(蒲原ら, 2020)。

のり養殖の生産力回復に必要なことは、漁期終了まで生産が続けられる栄養塩類の確保である。漁期を賄う秋季の栄養塩濃度の確保や漁期終盤の栄養塩類の供給を計画的に管理する時期に来ている。

4) 貧酸素水塊及び有害プランクトン

伊勢湾・三河湾のリン及び窒素の負荷量は1979年以降削減されてきたが、貧酸素水塊の発生面積は微増している。流入負荷が減少しても海域の貧酸素化は改善されていないことから、海域の生産力回復のために総量削減を緩めても貧酸素化が深刻になるとは言えない。

赤潮発生延べ日数は1996年以降若干低下している(図11(A))が、高密度になると貝類をへい死させる有害プランクトンであるヘテロカプサ(*Heterocapsa circularisquama*)は、1998年度以降では2000年度を除き2016～2019年度に高細胞数が確認された(図11(B))(蒲原, 2023)。魚介類をへい死させる有害プランクトンであるカレニア(*Karenia mikimotoi*)は2015～2017年度及び2021年度に高細胞数が確認された(図11(B))。これらの有害プランクトンは渦鞭毛藻類であり、有機態の栄養塩類を利用できることから、無機態の栄養塩類濃度が低い海域でも潜在的に増殖することが可能とされている(今井ら, 2016)。また、カレニアは20mに及ぶ日周鉛直移動を行い、嫌気条件下で濃度が高まる底層の栄養塩類を利用することができる。有害プランクトンの発生は、2015年度以降伊勢湾・三河湾における窒素及びリンの濃度が低下した後に顕著となっている。赤潮発生延べ日数は若干減少しているが、植物プランクトンの構成種に変化が生じており、単純な赤潮の減少ではない。瀬戸内海においても栄養塩類が低下して以降、これら有害プランクトンの発生が頻繁に確認されている。

3 下水道管理運転の試行

愛知県漁業協同組合連合会から「伊勢湾および三河湾は漁業生産に必要な栄養塩類が低下しており、所要の措置を講ずること」との要望が出されたことから、愛知県は2017年度から三河湾沿岸の矢作川及び豊川の2ヶ所の広域流域下水道(図12)から放流するリンを秋季から春季までの期間、排水規制基準内(1mg/L)で増加する試験

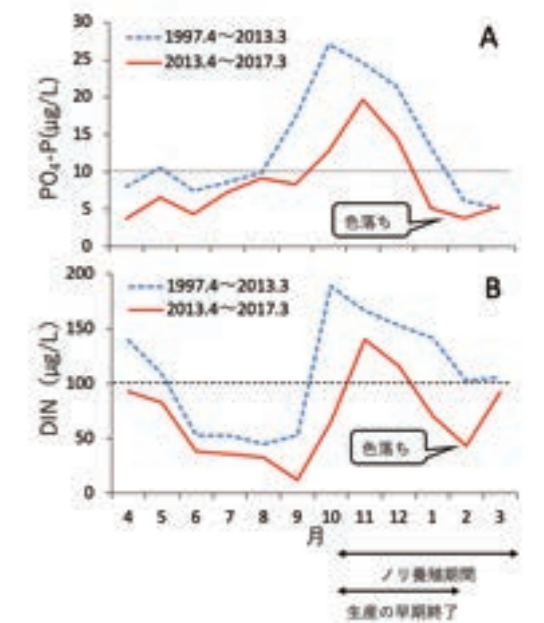


図10 三河湾西部(知多湾)表層(4測点平均)におけるPO₄-P(A)及びDIN(B)の平均濃度の変化
破線は品質の良いノリに必要な濃度(PO₄-P:10 μg/L、DIN:100 μg/L)

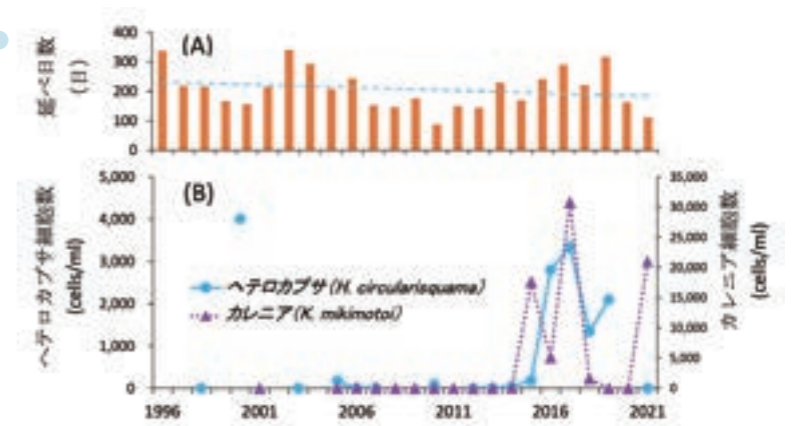


図11 伊勢湾・三河湾における赤潮発生延べ日数(A)、ヘテロカプサ及びカレニアの年度別最高密度(B)の推移



図12 矢作川浄化センター及び豊川浄化センターの放流口周辺に設けた調査測点

運転を実施した。2022年度11月から3月にかけて、これまでの2倍(国の排水基準、リン:2mg/L、窒素:20mg/L)を上限として放流する社会実験が実施された。2023年度は9~3月に実施されている。2022年度社会実験中のリン及び窒素の平均放流濃度は矢作川浄化センターが1.28mg/L及び10.5mg/L、豊川浄化センターが1.40mg/L及び11.3mg/Lであった。リンの平均放流濃度は通常運転と比較して、両浄化センター共に3.9倍となった(図13)。

矢作川浄化センター近傍では、離れた場所と比較してアサリ現存量の増加が観測された。矢作川浄化センター放流口から東に広がっている一色干潟における1日1隻あたりアサリ漁獲量(CPUE)は、腰マンガ、底びき網共に2014年から低下して2017年から2020年まで低迷していたが、2023年にかけて回復傾向にある(図14)(第2回愛知県栄養塩管理検討会資料)。2022年度の知多湾において良質なノリが出荷された時期は、2017~2021年度と比較して20~30日ほど長くなった。また、矢作川地区のノリ葉体の色調は、2017~2021年度と比較して放流口に近いほど黒かった。この様に、採貝漁業及びのり養殖業に社会実験の効果が

4 おわりに

「豊かな海」の役割を担ってきた伊勢湾・三河湾の水産生物の生産力の重要性について、漁獲量回復の立場から考えてきたが、本来「豊かな海」の再生は、漁業関係者だけの問題ではない。水産生物の生産力の回復が食料確保、自給率の向上に直結することを認識した上で、利水環境のあり方を社会共通の課題として捉えることは重要である。以下に課題を記載する。

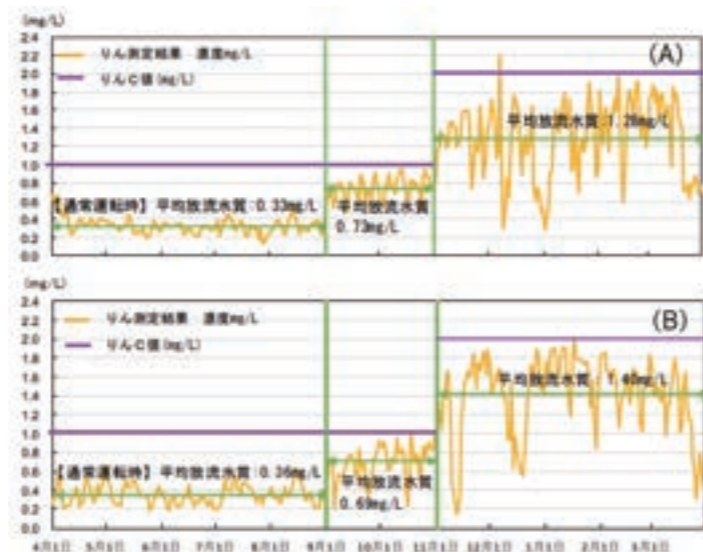


図13 矢作川浄化センター(A)及び豊川浄化センター(B)における2022年度のリン放流濃度の推移(第2回愛知県栄養塩管理検討会資料)

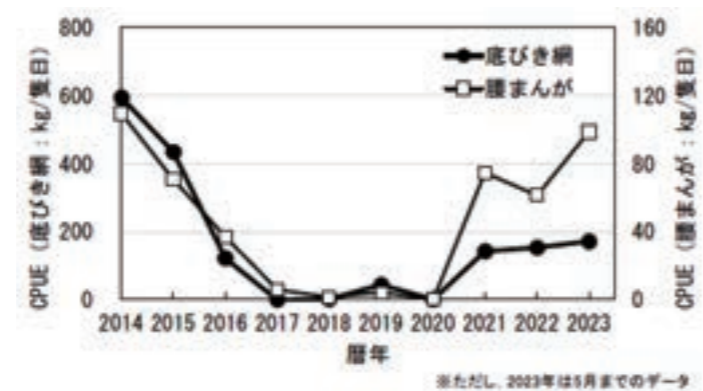


図14 三河湾一色干潟における底びき網及び腰まんがの1日1隻あたりのアサリ漁獲量(CPUE)の推移(第2回愛知県栄養塩管理検討会資料)

- 水産生物にとって望ましい水質環境基準の類型指定の見直しの検討が必要である。また、水産生物の回復が見え始めている現段階において社会実験を中断すべきではない。
- 貧栄養及び基礎生産力の低下は、夏季はシャコの成長、秋季はアサリの産卵・体力回復、冬季はノリ葉体の生長、春季は夏眠前のイカナゴの栄養蓄積と各水産生物の生活史の要に影響を与えている。「水産生物の利水目的」の達成のためには、時期を限った季節別管理運転ではなく、周年の管理運転が必要である。
- 温暖化により海水温が上昇するのであれば、湾内で一生を過ごすアサリなどは活性が高い期間が長くなる。また、来遊魚介類の湾内での回遊期間は長くなる。これまで以上に餌が必要となる。
- 生物多様性を確保するためには、食物連鎖の裾野である基礎生産(植物プランクトンの増殖)を広げる必要がある。
- 藻場が衰退している現状において、藻場再生でブルーカーボンとしての価値を求めるのであれば、炭素を固定する機能がある海草・藻類を育む窒素、リンの供給が欠かせない。
- 植物プランクトンの著しい増殖(=赤潮)だけをみるのではなく、増殖した植物プランクトンを食べる(赤潮を抑制する)懸濁物ろ過食者(アサリなど)が生息できない状態がなぜ起きているのかを考えることが重要である。懸濁物ろ過食者が減少すると貧酸素水塊面積が拡大する。
- 伊勢湾・三河湾の水産生物の生産力を取り戻すための利水環境の検討は、湾を囲む愛知県、三重県、岐阜県の3県及び関係機関の協力が欠かせない。

<引用文献>

愛知県環境局. 総量削減計画. URL <https://www.pref.aichi.jp/soshiki/mizutaiki/0000047072.html>.

愛知県水産試験場. 2004. ノリ養殖テキスト, 80p.

青山裕晃・蒲原聡. 2022. 伊勢・三河湾の年代別栄養物質濃度の水平分布について. 愛知水試研報, 27, 37-40.

今井一郎・山口峰生・松岡数充. 2016. 有害有毒プランクトンの科学. 恒星社厚生閣, 東京, 175-200.

蒲原聡. 2023. アサリ湧く豊かな伊勢湾・三河湾に. 愛知水試研報, 28, 47-60.

蒲原聡・芝修一・鶴島大樹・鈴木輝明. 2021. 三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連. 水産海洋研究, 85(2), 69-78.

蒲原聡・高須雄二・湯口真実・美馬紀子・天野禎也. 2020. 2018年度ノリ漁期において伊勢・三河湾で生産された乾海苔の黒み度への漁場の栄養塩類の影響. 愛知水試研報, 25, 1-8.

農林水産省. 水産物需給の動向. URL https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/r04_h/trend/1/t1_1_1.html.

農林水産省. 農林水産統計. URL https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyousei/index.html.

芝修一・姫野天領・吉田司・蒲原聡・田中義人・鈴木輝明. 2020. 個体成長モデルを用いた伊勢湾東部沿岸域におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* 資源の減耗要因の検討. 水産海洋研究, 84(1), 11-26.

曾根亮太・日比野学・下村友季・鶴崎直文・澤山周平. 2022a. 伊勢・三河湾におけるシャコの資源動態と肥満度の変化及び加入・生残過程. 愛知水試研報, 27, 22-30.

曾根亮太・日比野学・下村友季・鶴崎直文・横内一樹. 2022b. 伊勢・三河湾におけるマアナゴの資源動態と肥満度, 胃内容物組成及び餌料環境の変化. 愛知水試研報, 27, 10-21.

曾根亮太. 2022c. 伊勢湾におけるシャコ・マアナゴの減少と漁獲物組成の変化. 名城大学・中部電力産学連携活動資料vol.2, 10-11.

水産庁. 2008. 干潟生産力改善のためのガイドライン, 東京, 206p.

伊勢湾・三河湾の漁業と貧栄養化問題の総括

— いかなご船びき網漁業 —

株式会社日本海洋生物研究所 大阪支店 副支店長 橋口 晴穂

1 伊勢湾でのイカナゴの生活史と餌

イカナゴは、高水温期になると砂に潜る「夏眠」という特徴的な生態を有しており、その間に生殖腺を発達させて夏眠から覚めると間もなく産卵する。夏眠中は摂餌しない本種にとって、夏眠に入る際の栄養状態は再生産を左右する重要な要因と考えられている(山田ほか, 1999)。伊勢湾の夏眠場は、神島南東部に位置する水深20m付近(出山海域および鯛ノ島海域)、産卵場は出山海域北部から神島北部にかけての湾口部付近(図1)とされている(山田, 2011)。

図2には、摂餌回遊中の2月もしくは3月に伊勢湾内で採集され、愛知県水産試験場で保存されていたイカナゴ標本の胃内容物を分析した結果を示した。図2の縦軸は餌の重要度を示す餌料重要度指数(IRI)を示すが、IRIとは胃内容物で確認された

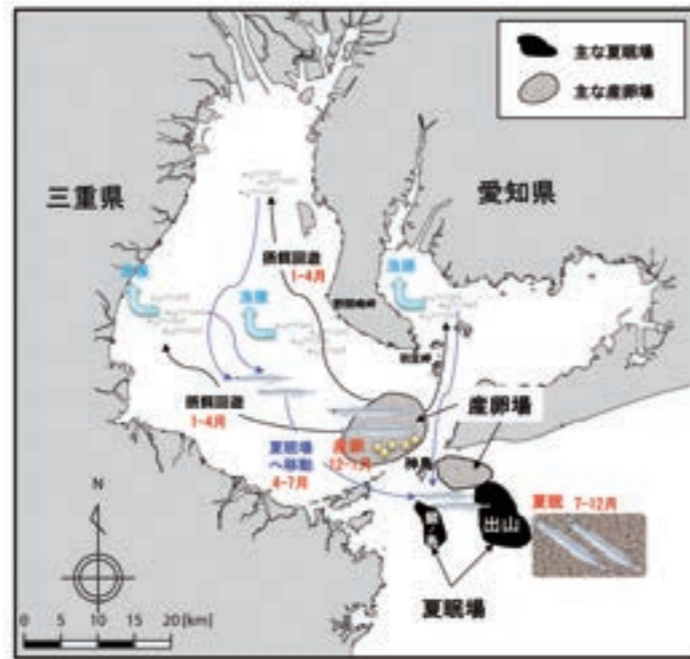


図1 伊勢湾産イカナゴの生活史

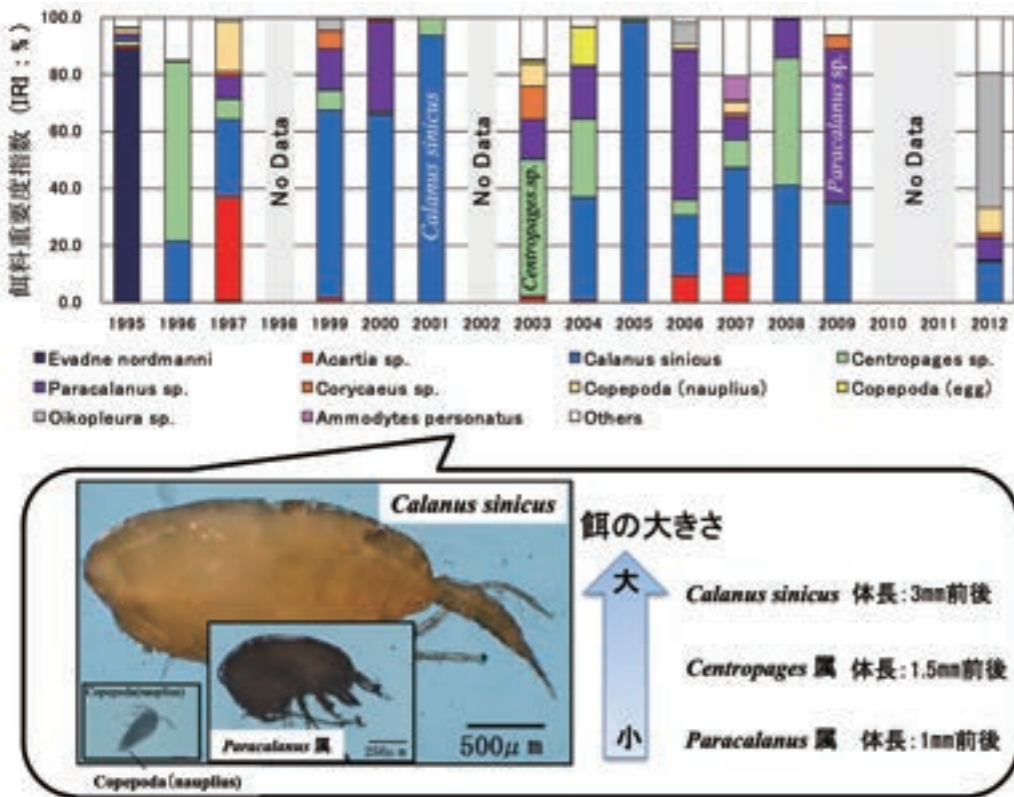


図2 イカナゴの胃内容物組成と主な餌生物の大きさ

餌の出現頻度、個体数および重量の情報を基に求められる値で(例えば、佐藤ほか, 2014)、割合が高いほどより重要な餌であることを示す指標である。イカナゴの主な餌は、海域における主要な動物プランクトンであるカイアシ類の *Calanus sinicus*、*Centropages* 属および *Paracalanus* 属であり、中でも成体の体長が3mm前後になる大型の *C. sinicus* への依存度は高いと考えられた(図2)。この結果は、瀬戸内海の播磨灘で調査された胃内容物組成とも概ね一致する(橋口ほか, 2021)。

2 伊勢湾のイカナゴ資源は出山海域の夏眠資源が重要

伊勢湾のいかなご船びき網漁業では、1992年から漁獲後の残存尾数10億尾、2007年からはさらに制限を強化して20億尾以上の残存尾数を目標とした資源管理を、愛知県、三重県の漁業者が協力して行ってきた(中村ほか, 2017)。しかし、イカナゴの漁獲量は、大きな変動を伴うものの、2010年を境に急激に減少し、2016年には禁漁に追い込まれ、その後も資源の回復はみられない(図3)。

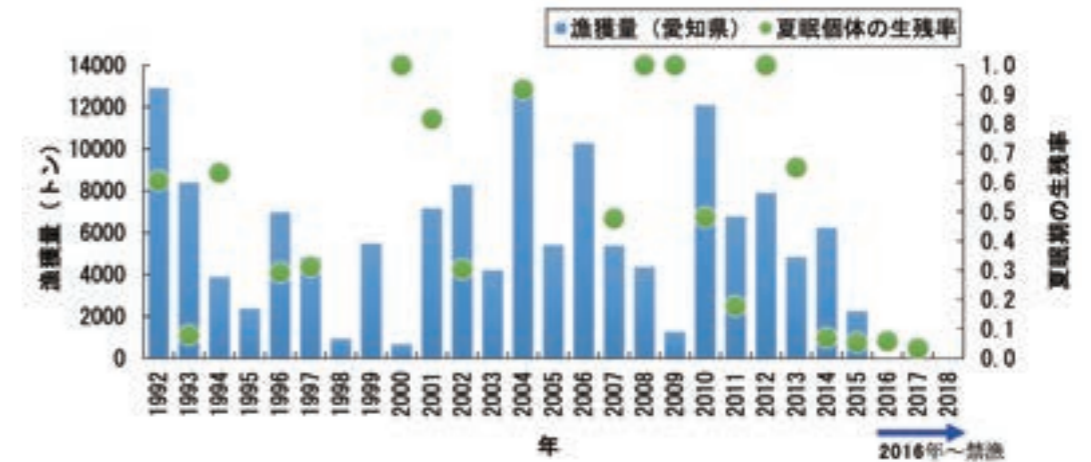


図3 愛知県のイカナゴ漁獲量の推移と出山海域における夏眠期の生残率

愛知県水産試験場では、主たる夏眠場の出山海域でイカナゴが夏眠場に蟄集する4月から夏眠を終了する12月までの間、空釣漁具(長さ5m、文鎮30個)を用いて、夏眠魚の状況を継続的に調査している(中村ほか, 2017)。夏眠魚の生残率(計算方法は後述する表1に従った)は、2014年から2017年にかけて10%未満の低水準で推移し、2018年以降では夏眠個体も確認されていない(図3)。

図4には、夏眠魚の単位距離あたりの生息密度(中村ほか, 2017)に、孕卵数(1491.5×体重1.2493;兵庫県立農林水産技術総合センター, 2020)を乗じて計算した産卵量密度指数と、デイルー法で推定された漁場への漁獲加入尾数(中村ほか, 2017)との関係を示した。産卵量密度指数と漁獲加入尾数には強い正の関係があり、1992-2017年では伊勢湾で漁獲されるイカナゴ資源は出山海域の産卵量に強く依存していることが分かる。すなわち、近年のイカナゴ漁獲量の減少(図3)は、出山海域における夏眠魚資源に依存した産卵量の減少に

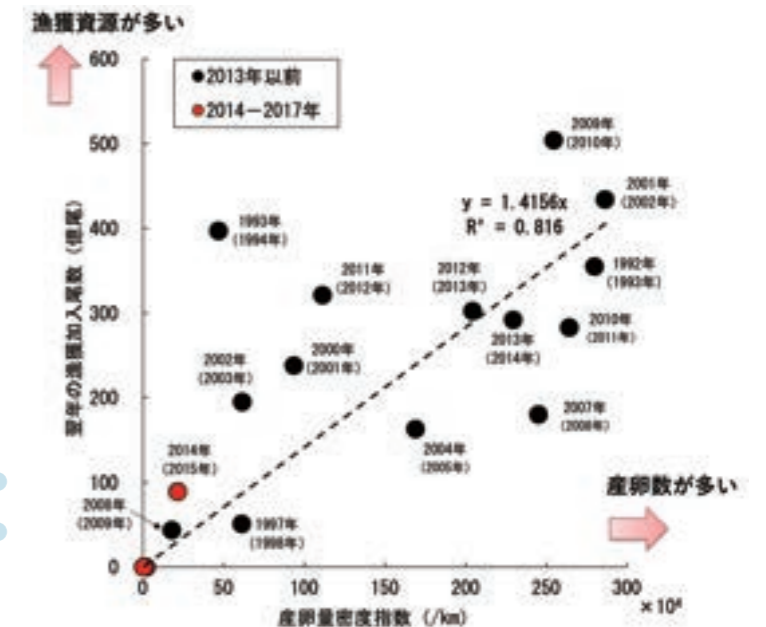


図4 出山海域における産卵量密度指数と漁獲加入尾数の関係

起因していると考えられる。主たる夏眠場、産卵場における産卵量密度指数と漁獲資源との間に強い正の相関がみられたことについては、瀬戸内海の播磨灘(魚住・西川, 2023)、備讃瀬戸(Akai and Yoneda, 2021)でも同様の報告がある。

3 伊勢湾の環境(栄養塩、植物プランクトン、カイアシ類)の変化

1) 夏眠場(出山海域)は内湾の影響が強いのか? 外洋の影響が強いのか?

図5には湾奥から湾口にかけての全窒素(T-N)および溶存態無機窒素(DIN)の経年変化を示した。また、愛知県水産試験場が実施する出山海域に近いA1、およびそれよりも沖合のA10での観測結果(中野ほか, 2023; 黒田ほか, 2023)も合わせて示した。なお、伊勢湾内の観測値に用いた広域総合水質調査は年4回(四季)の観測であるため、ここではイカナゴが摂餌回遊する1-2月の値を示した。

T-NおよびDINともに、2000年代前半からの10年間で急激に減少し、2010年頃以降は低水準で推移している。A1およびA10では2008年から観測されているが、湾内での傾向を踏まえるとこの頃には既に低水準であったと推察される。一方で、A1と各地点との相関分析において、T-NではA1より沖合のA10との相関も比較的高かったが、湾内の複数の地点でそれと同程度の高い値を示した。さらに、DINではA10よりも湾内の地点との相関係数が高く、出山海域周辺(A1)の栄養塩環境は湾内の影響が強いことが示唆された。

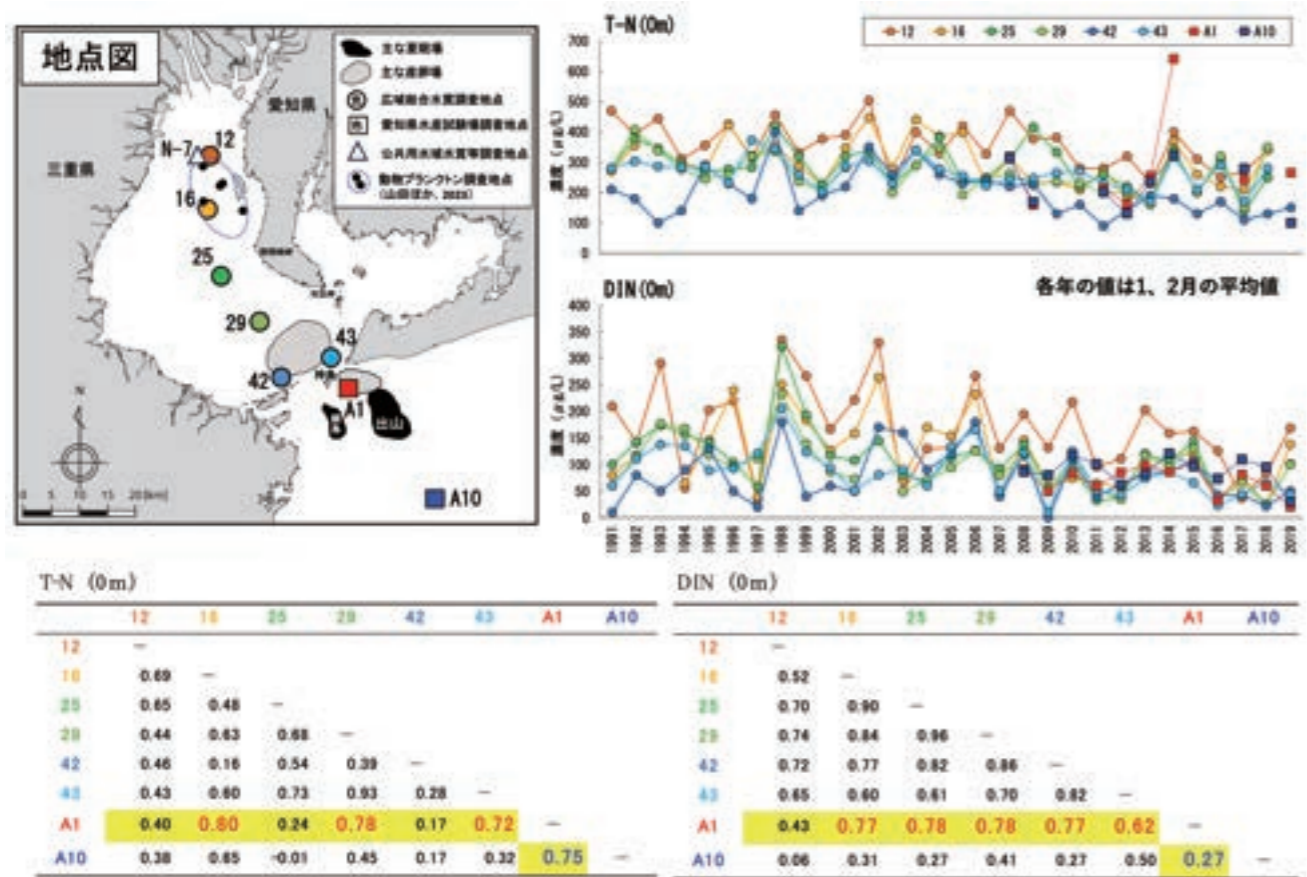


図5 1-2月における伊勢湾奥部から湾口付近にかけてのT-N、DINの経年変化
下表は地点間の相関分析結果を示す。表中の赤字はA1との相関で、相関係数が0.6より高かった値、青字はA10との相関係数を示す。

2) 伊勢湾の水温とイカナゴの餌料(カイアシ類)はどう変化しているのか?

伊勢湾・三河湾における栄養塩やクロロフィルの平面分布を年代別に整理した結果では、年代を追うごとに高濃度域は縮小し、2010年代では比較的高い濃度の範囲は湾奥部のごく限られた海域のみで、湾口に近づくほど低濃度になることが示されている(青山・蒲原, 2022)。一方で、出山海域周辺において、イカナゴの餌料となるカイアシ類

の長期にわたる観測結果はみあたらない。したがって、ここでは出山海域周辺にも影響すると考えられる伊勢湾中部で観測されたカイアシ類の現存量(山田ほか, 2023)の変化について、水温および植物プランクトンの指標である植物色素量(クロロフィルa量とフェオ色素量の合計値)の観測結果と合わせて、図6(調査地点は図5を参照)に示した。

伊勢湾中部における水温は、この20年間で一定の傾向はみられなかった(図6(a); $n=300, rs=0.002, p=0.976$)。一方で、植物色素量は2000年代前半から減少し、2010年以降は低水準で推移し、この間、有意な減少傾向を示した(図6(b); $n=300, rs=-0.328, p<0.005$)。植物色素量の変化について、年代別に平均値を求めると、1999-2001年では31mgC/m³であったが、2002-2008年では21mgC/m³と約7割、2014-2017年では11mgC/m³、2020-2022年では13mgC/m³と約3割にまで減少した(図6(b))。植物プランクトンを餌とするカイアシ類の現存量についても、植物色素量と同様に経年的な減少傾向が確認され(図6(b); $n=150, rs=-0.357, p<0.005$)、年代別に平均値を求めると、1999-2001年では35mgC/m³であったが、2002-2008年では14mgC/m³、2014-2017年ではイカナゴ資源が低迷してカイアシ類に対する捕食圧が低下しているにもかかわらず20mgC/m³と概ね半減し、2020-2022年では4mgC/m³と1割程度までに減少していた(図6(b))。植物色素量とカイアシ類現存損量の減少は概ね同調しており、この傾向はイカナゴが摂餌回遊する1-6月に限っても同様であった。栄養塩濃度やクロロフィル濃度が湾中部よりもさらに低い出山海域においては(青山・蒲原, 2022)、餌となるカイアシ類の減少はより顕著であることが推察される。

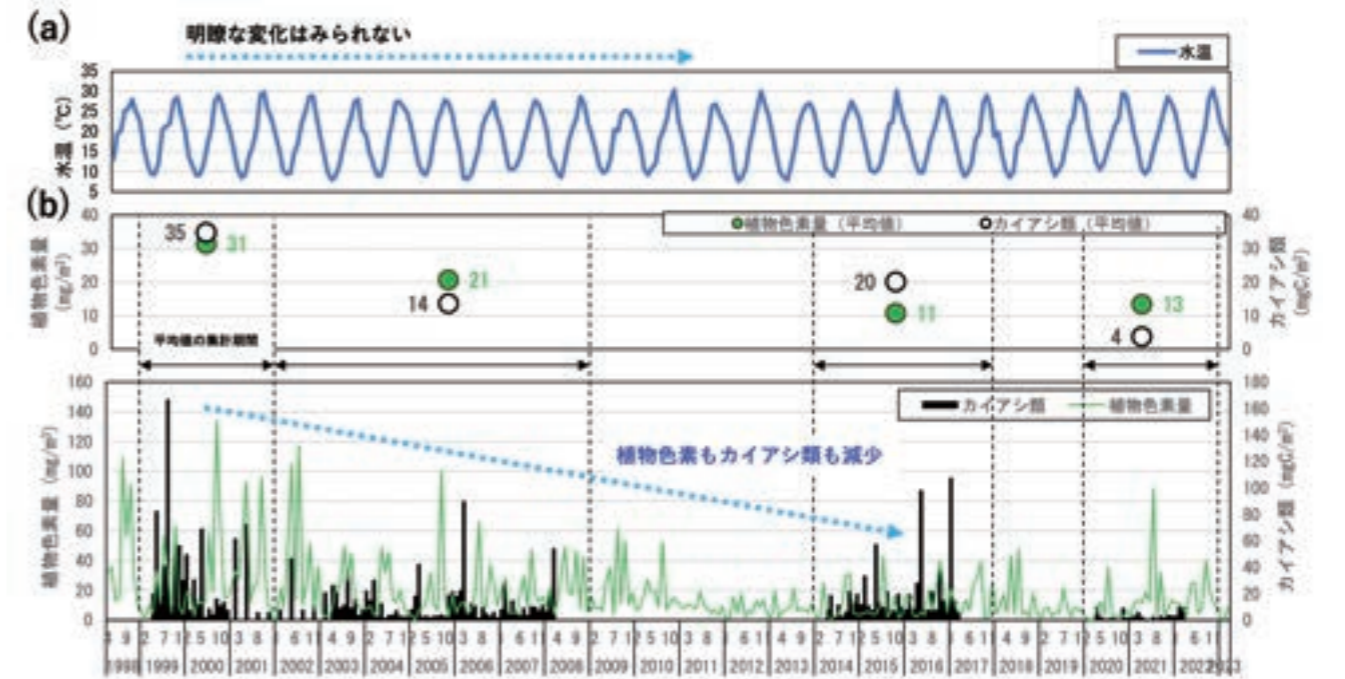


図6 (a) 湾中央における(a)水温および(b)植物色素量、動物プランクトンの経年変化。

4 イカナゴ資源の減少要因は何か?

1) 夏眠期を詳細に区分して解析

図3で示したように、夏眠期の生残率の低下が伊勢湾のイカナゴ資源の減少を招いた可能性が高い。そこで、夏眠期間中のイカナゴの栄養状態の変化をより詳細に解析するため、中村ほか(2017)の情報を基に、夏眠期を表1に示した期間に分割し、肥満度および生残率を計算した。図1で示したように、1-3月までは湾内全域で摂餌回遊し、出山海域では4-5月ごろから夏眠のために移動してきたと思われる個体が確認され、夏眠を始める

表1 夏眠期の区分と肥満度および生残率の算定

産卵期		夏眠期				夏眠後期		
4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
生残率 = B ÷ A (ただし、生残率の最大値は1とした)								
A: 4-7月の生息密度の最大値				B: 10-12月の生息密度の最大値				

6-7月に個体数密度が高くなるが(中村ほか, 2017)、夏眠場周辺においても夏眠に入る7月頃までは、活発に摂餌すると考えられる。

2) 蛸集期→夏眠前期および夏眠前期→夏眠後期にかけての肥満度の低下

図7には、(a) 蛸集期(4-5月)から夏眠前期(6-7月)、(b) 夏眠前期から夏眠後期(10-12月)の肥満度および肥満度の低下量の経年変化を示した。蛸集期から夏眠前期の肥満度の低下量は、2011年以前は明瞭な傾向がなかったものの、2012-2017年では0.3から0.6(この間の平均値は0.51)と、毎年確認された(図7(a))。一方、夏眠前期から夏眠後期(10-12月)では、毎年例外なく肥満度は低下するが、2011年以前の肥満度の低下量は平均すると0.56であったのに対し、2012年以降では平均で0.69と、2012年以降ではそれ以前よりも夏眠中にやや痩せている傾向が確認された(図7(b))。

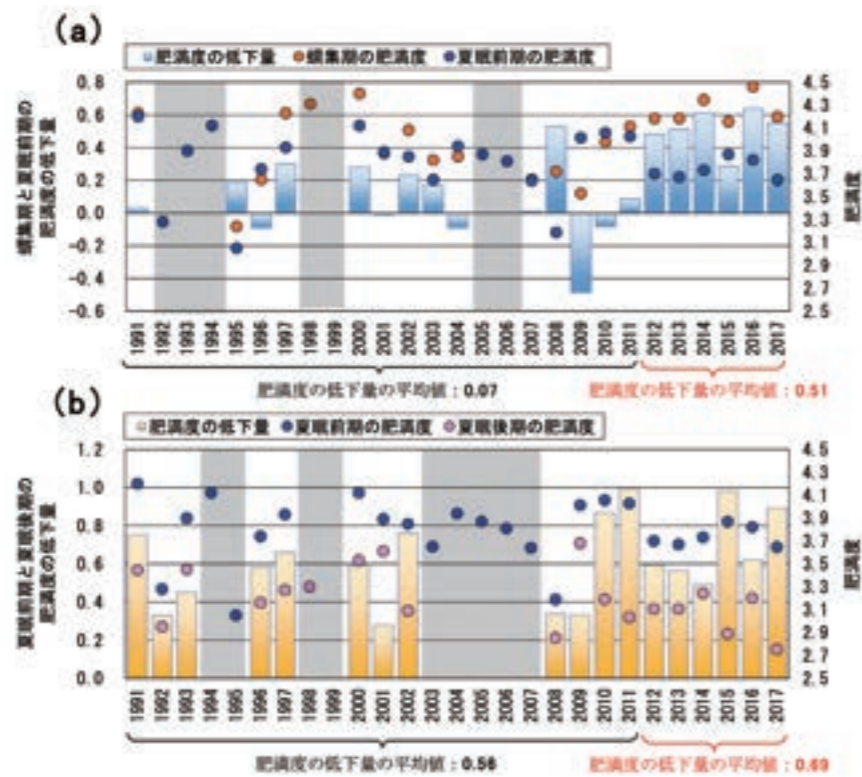


図7 (a) 蛸集期(4-5月)と夏眠前期(6-7月)の肥満度と両者の肥満度の低下量、および(b) 夏眠前期と夏眠後期(10-12月)の肥満度と両者の肥満度の低下量
網掛け部は、肥満度の低下量を計算できなかった年を示す。

3) 肥満度の低下が夏眠期間中の生残率を大きく低下させる!?

図8(a)には、夏眠前期から後期の肥満度の低下量と夏眠期間中の生残率との関係を示した。生残率が1を上回った年を除くと、危険率5%を満たさなかったが、両者には負の関係が認められた($n=13, rs=-0.500, p=0.083$)。この傾向は、夏眠期間中の肥満度の低下が小さいほど、生残率が高くなることを示している。一方で、生残率が大きく低下した2014年から2017年にかけては、肥満度の低下量の多寡に対して生残率が一律に低く、他の年と異なる傾向を示した。

図8(b)には、蛸集期から夏眠後期にかけての肥満度の低下量と夏眠期間中の生残率との関係を示した。ここでも生残率が1を上回った年を

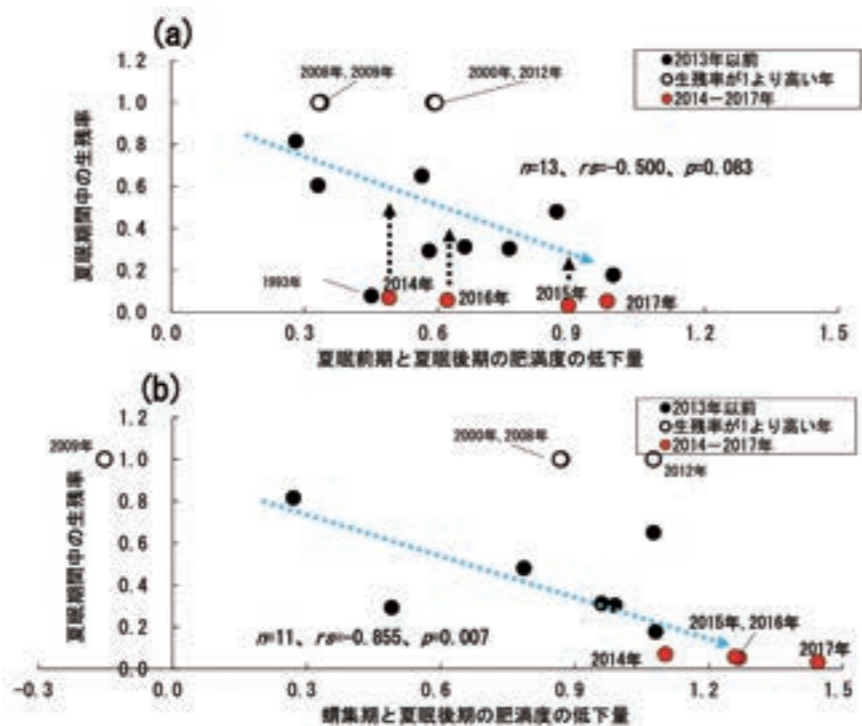


図8 (a) 夏眠前期(6-7月)から夏眠後期(10-12月)の肥満度の低下量と夏眠期間中の生残率との関係
(b) 蛸集期(4-5月)から夏眠後期の肥満度の低下量と夏眠期間中の生残率との関係
 n は標本数、 rs はスピアマンの順位相関係数、 p は危険率を示す。

除くと、両者に有意な負の相関が認められた($n=11, rs=-0.855, p=0.007$)。また、2014年から2017年にかけても他の年と同様の傾向を示した。すなわち、2014年から2017年にかけての極端に低い生残率は、夏眠場に蛸集してから夏眠を開始するまでに栄養状態が悪化し、肥満度が低下したことが大きな要因と考えられる。

4) 蛸集期の肥満度の低下は餌不足が原因!?

図9(a)には、図7(a)に示した蛸集期から夏眠前期の肥満度の低下量と動物プランクトン生産の基礎となる植物色素量との関係を示した。なお、植物色素量には図6(b)で示した湾中部での観測値を用いた。植物色素量が高いほど肥満度の低下量は小さくなる傾向があり、両者には有意な負の相関が認められた($n=16, rs=-0.624, p=0.016$)。特に、肥満度の大きな低下がみられた2012年以降では、植物色素量は 5mg/m^3 前後の低い値を示した。植物色素量の低下はイカナゴの餌となるカイアシ類の減少を意味する(図6(b))。したがって、2012-2017年における蛸集期から夏眠前期の肥満度の低下は、餌不足に起因すると考えられた。一方で、肥満度の低下量と湾中部の水温に有意な関係は認められなかった(図9(b))。

飢餓状態のイカナゴを用いて夏眠中の高水温の影響を調べた室内実験では(山田・久野, 1999)、水温 27°C では短期間のうちに全ての個体が斃死したが、飽食状態のイカナゴを用いた実験では(赤井・内海, 2012)、 28°C でも斃死率は約3割に止まり、栄養状態の悪化は高水温耐性を弱めると考えられる(図10)。一見すると近年の高水温化が夏眠中の生残率を著しく低下させたように見えるが、国立研究開発法人海洋研究開発機構

(JAMSTEC)から提供された詳細地形潮汐計算モデル(JCOPE-T: Japan Coastal Ocean Predictability Experiment with Tide resolving)による計算結果を用いて、夏眠場の水温を詳細に解析したところ、生残率が著しく低かった2012年以降の水温は他の年と比較して決して高い値ではなかった(橋口ほか, 2023)。

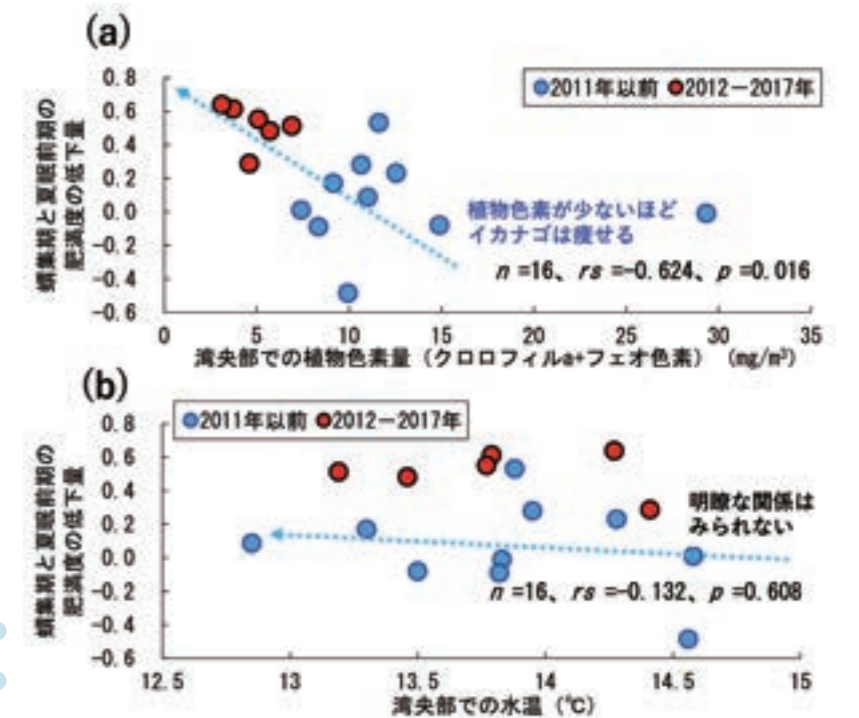


図9 蛸集期(4-5月)から夏眠前期(6-7月)の肥満度の低下量と伊勢湾中部における(a) 植物色素量および(b) 水温との関係
 n は標本数、 rs はスピアマンの順位相関係数、 p は危険率を示す。

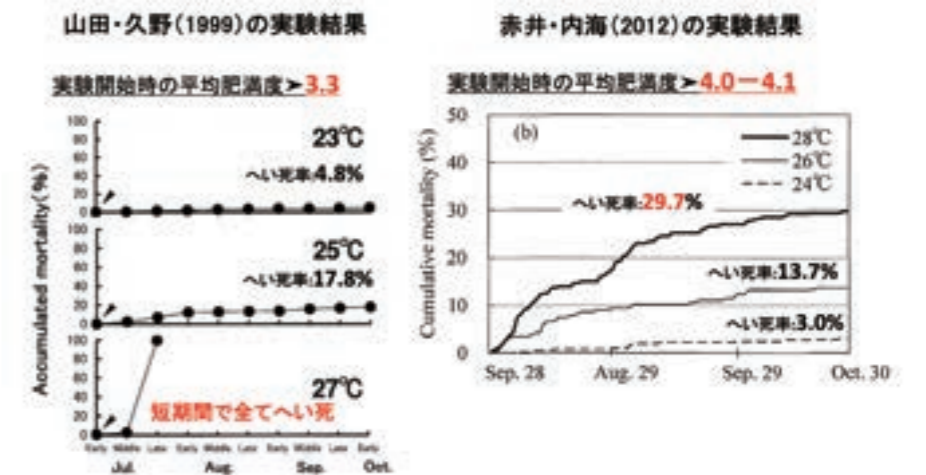


図10 肥満度の相違による夏眠中の高水温の影響に関する文献比較(山田・久野, 1999, 赤井・内海, 2012)

ヨーロッパ北部の大西洋にはレッサー・サンドイル (*Ammodytes marinus*) というイカナゴが生息している。レッサー・サンドイルもまた資源減少が問題となっているが、その要因として冬眠中(ここでは夏眠ではなく冬眠)の餓死が資源減少の主たる要因であり、越冬前の餌条件の変化(主餌料のカイアン類個体数)による影響が大きいと指摘されている(MacDonald et al., 2018)。

上述したように、イカナゴは餌料環境の影響を強く受けると同時に、海域の生態系の中では低次の栄養段階と高次の栄養段階をつなぐ重要な種であり、イカナゴ資源の消失は生態系のバランスを大きく崩すことになるため、イカナゴ資源の回復は極めて重要な課題である。

<参考文献>

赤井紀子・内海範子. 2012. 瀬戸内海産イカナゴの死亡と再生産に及ぼす夏眠期における高水温飼育の影響. 日本水産学会誌, 78(3), 399-404.

Akai N. and M. Yoneda. 2021. Age-related variation in reproductive potential and influence on recruitment of western sand lance *Ammodytes japonicus* in the Seto Inland Sea, western Japan. Journal of Sea Research, 172, 102036.

青山裕晃・蒲原聡. 2021. 伊勢・三河湾の年代別栄養物質濃度の水平分布について. 愛知水試研報, 27, 37-40.

橋口晴穂・西川哲也・魚住香織・古澤一思・森 敦史・今尾和正・反田 實. 2021. 播磨灘におけるイカナゴ当歳魚の胃内容物重量指数の経年的低下とその要因. 水産海洋研究, 85(1), 24-32.

橋口晴穂・鈴木輝明・中田喜三郎・橋本当矢・市川哲也. 2023. 伊勢湾イカナゴ資源減少要因の解析. 名城大学・中部電力産学連携活動資料vol.3, 5-8.

兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター. 2020. 豊かな瀬戸内海の再生を目指してー豊かな瀬戸内海再生調査事業の成果ー. URL <https://www.hyogo-suigi.jp/seika/booklet/>.

黒田伸郎・曾根亮太・中野哲規・中村元彦. 2023. 渥美外海における栄養塩の動態. 愛知水試研報, 28, 8-19.

MacDonald, A., D. C. Speirs, S. P. R. Greenstreet and M. R. Heath. 2018. Exploring the influence of food and temperature on North Sea sandeels using a new dynamic energy budget model. Frontiers in Marine Science, 5, Article 339.

中村元彦・植村宗彦・林茂幸・山田大貴・山本敏博. 2017. 伊勢湾におけるイカナゴの生態と漁業資源. 黒潮の資源海洋研究, 18, 3-15.

中野哲規・黒田伸郎・曾根亮太・中村元彦. 2023. 渥美外海における栄養塩の動態と黒潮流路の関係. 黒潮の資源海洋研究, 24, 51-57.

佐藤二郎・元谷剛・林浩志. 2014. 岡山県東部海域におけるイヌノシタ及びアカシタビラムの食性. 岡山水研報告, 29, 61-68.

魚住香織・西川哲也. 2023. 播磨灘におけるイカナゴ個体群の産卵量指数の低下. 日本水産学会誌, 89(1), 15-21.

山田浩且・久野正博. 1999. 夏眠期における伊勢湾産イカナゴのへい死条件. 三重水技研報, 8, 1-5.

山田浩且・西村昭史・土橋靖史・久野正博. 1999. 伊勢湾産イカナゴ親魚の栄養状態と再生産力. 水産海洋研究, 63(3), 22-29.

山田浩且. 2011. 伊勢湾におけるイカナゴの新規加入量決定機構に関する研究. 三重水研報, 19, 1-77.

山田智・鈴木輝明・中田喜三郎・橋本当矢. 2023. 伊勢湾湾奥部における動物プランクトン群集の変化. 名城大学・中部電力産学連携活動資料vol.3, 9-12.

伊勢湾のイカナゴは消えたのか? ～環境DNA分析による分布実態調査～

名城大学大学院総合学術研究科 特任教授 **鈴木 輝明**
特任教授 **中田 喜三郎**
中部電力株式会社 執行役員 総務・広報・地域共生本部 部長 **橋本 当矢**
株式会社日本海洋生物研究所 大阪支店 副支店長 **橋口 晴穂**
研究員 **安武 由矢** **発表者**

1 はじめに

伊勢湾では、イカナゴの分布状況を把握するため、発生初期の仔魚を対象としたボンゴネット調査、それよりもやや成長した仔魚を対象とするカイトネット調査、および漁期間近の稚魚を対象とした試験操業調査が実施されているが、2019年の試験操業調査を最後に、それ以降は分布が確認されていない。資源が乏しい状況では採捕されないこともしばしば起こるため、採捕調査のみで分布の有無を判断することは難しい。近年、採捕器具を用いずに分布の有無を判断する調査手法として、環境DNA調査が注目されている。生物は生命活動をする中で水や空気、土壌などの環境中にDNAを放出する。これを環境DNAと言い、環境中のDNA含有物質を回収し、そのDNA量から対象生物の存在や種組成を判断する手法が環境DNA調査である(図1)。環境DNA調査は、生息量が少ない種や採捕器具を用いた調査が困難な場において、採捕調査よりも簡便にかつ短時間で多地点を調査できるため、近年用いられることが増えた手法であり、「伊勢湾のイカナゴは消えたのか?」を確認するのに適した方法と考えた。

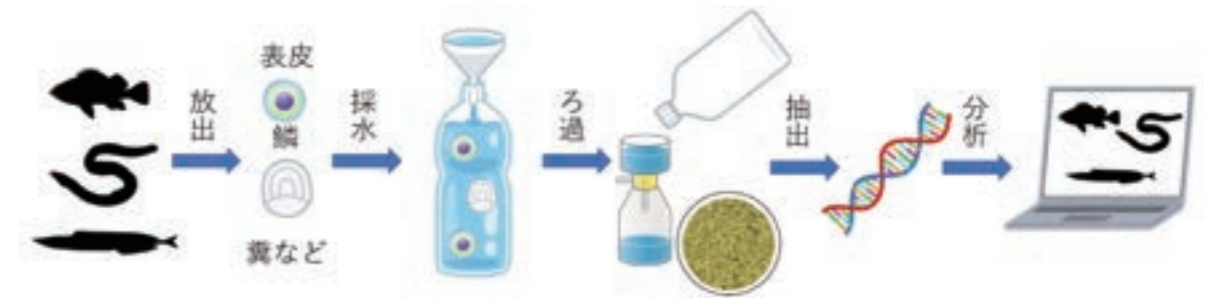


図1 環境DNA調査の概念図

2 事前準備(プライマーとプローブの設計)

環境中にイカナゴのDNAが存在するかを確認するためには、イカナゴの環境DNAに特異的に結合するプライマー*1とプローブ*2を事前に設計しておく必要がある。本調査では、イカナゴの種特異的プライマーおよびプローブを、イカナゴ以外の日本産イカナゴ属2種(オオイカナゴ、キタイカナゴ)との識別が可能と考えられたミトコンドリアDNAのCyt b領域*3の情報を基に設計した。設計したプライマーとプローブは、伊勢湾産イカナゴ(愛知県水産試験場漁業生産研究所提供)および瀬戸内海産イカナゴ(兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター提供)の標本を用い、実際に

*1: プライマーはDNA(の一部)を増やすために必要なものであり、特定の生物のDNAを増やす種特異的プライマーと多くの生物のDNAを増やす汎用プライマーがある。今回の汎用プライマーはMiFishプライマーという魚類に絞ったプライマーを用いた。環境DNA分析において、種特異的プライマーは種特異的分析に用い、汎用プライマーは種網羅的分析に用いる。

*2: プローブは特定のDNAに結合する蛍光物質を有したもので、DNAが増える際に蛍光するため、蛍光センサーで検知されるとDNAが増えたことがわかる。

*3: 動物の細胞の中にある細胞内小器官のミトコンドリアにあるDNAの1つの領域である。

DNAが増幅されて検出できるかを検証し、問題がないことを確認した。また、イカナゴ稚魚の遊泳期にあたる1-2月に兵庫県播磨灘の海水を採取し、実際の海水でもDNAが検出できることを確認した。

3 現地調査

伊勢湾における主たる夏眠場は神島南東部に位置する水深20m付近(出山海域および鯛ノ島海域)と言われている(山田, 2011)。夏眠時期は、伊勢湾内を回遊したイカナゴが夏眠場へ蟄集するため、環境水中のDNA量も高くなると推測される。そこで、調査は夏眠を開始する時期にあたる2023年6月27日および7月4日に、出山海域および鯛ノ島海域の15地点で行った(図2)。

イカナゴは砂に潜り“夏眠”することから、海底堆積物中には、環境水中に放出されたDNAが沈降したものに加えて、潜砂行動により放出されたDNAも存在するため、海水中よりも多くのDNAが蓄積されている可能性が高い。また、環境水中の環境DNAは1日以内、長くても数日で分解されるが(平岡ら, 2023)、堆積物中では、数か月以上という比較的長期間保存されることが知られており(Turner et al., 2015)、水槽実験では1年以上保存された報告もある(Ogata et al., 2021)。したがって、本調査ではイカナゴの環境DNAをより高い確率で検出できるように、下記に示す夏眠場における海底直上の海水と海底表層の堆積物の2つの環境中からのDNA抽出を試みた。なお、I-2、I-8、I-15では、水温等を鉛直的に観測し調査時の環境情報を取得した。

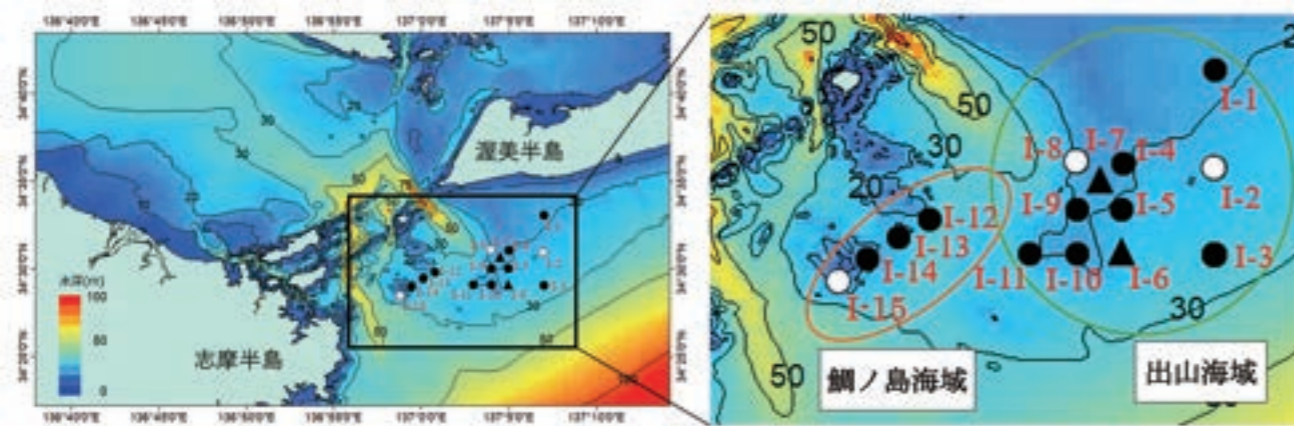


図2 伊勢湾における夏眠時期調査地点
(全15地点のうち、○では水温等の鉛直観測、▲では種網羅的分析を追加して調査)

1) 海底直上水中からのDNAの抽出

環境中のDNAの採水には、バンドーン採水器を使用して、イカナゴが生息する海底に近い海底直上0.5mから4Lの海水を採水した。DNAの抽出には、SGF法(Suzuki et al., 2023)を用い、加えて一部の地点では環境DNA調査・実験マニュアル(環境DNA学会, 2020)に記載された環境DNA分析の定法(GF/F法)を併用した。

SGF法とは最近報告された手法で、GF/F法よりもDNAの回収率が高くろ過時間が極めて短いと報告されている(Suzuki et al., 2023)。SGF法は、海域での事例はないが、採水後、直ちに船上にてDNAをろ過抽出できる利点がある。

GF/F法とは、実験室に持ち帰った海水(4L)を粒子保持能0.7 μ mのガラスファイバーフィルター(GF/F)を用いて吸引ろ過した後、フィルター上の捕集物からDNAを抽出する手法である。GF/F法ではイカナゴの捕食者を含む魚類相を把握するため、イカナゴのDNA(種特異的分析)に加えて、MiFishプライマー(Miya et al., 2015)による種網羅的分析を行った。

2) 海底堆積物からのDNAの抽出

堆積物の採取には円筒型採泥器を使用して、海底表面の底泥を1kg以上採泥した。堆積物からのDNA抽出にも、

SGF法(以後、堆積物SGF法)とGF/F法(以後、堆積物GF/F法)を併用した。

堆積物SGF法では、各地点で採泥した堆積物から船上にて堆積物40gを分取し、同一地点の表層水(1L)に懸濁させて、SGF法によりろ過抽出した。

堆積物GF/F法では、各地点の堆積物を冷凍保存して実験室に持ち帰り、後日、分取した堆積物40gを蒸留水で懸濁させ、上澄みをGF/F法にてろ過抽出し、環境DNAを分析した。

4 結果と考察

1) 海底直上水中の環境DNAからみたイカナゴの存在

夏眠場直上の海水の種特異的分析の結果を図3に示す。海底直上水ではSGF法もしくはGF/F法の何れかの手法において、出山海域の2地点(I-6、I-7)でイカナゴのDNAが検出された。

陽性が確認された地点のうち、特にI-7周辺は過去の夏眠魚調査においても、高密度でイカナゴが確認された場である(中村ら, 1997)。環境水中の環境DNAは1日以内(平岡ら, 2023)、長くても数日で分解されることから(Dejean et al. 2012, Thomsen et al. 2012)、本調査で検出されたイカナゴの環境DNAは、調査日の数日前以降に海水中へ放出された可能性が高く、出山海域の夏眠場にイカナゴが現存する可能性を示唆している。

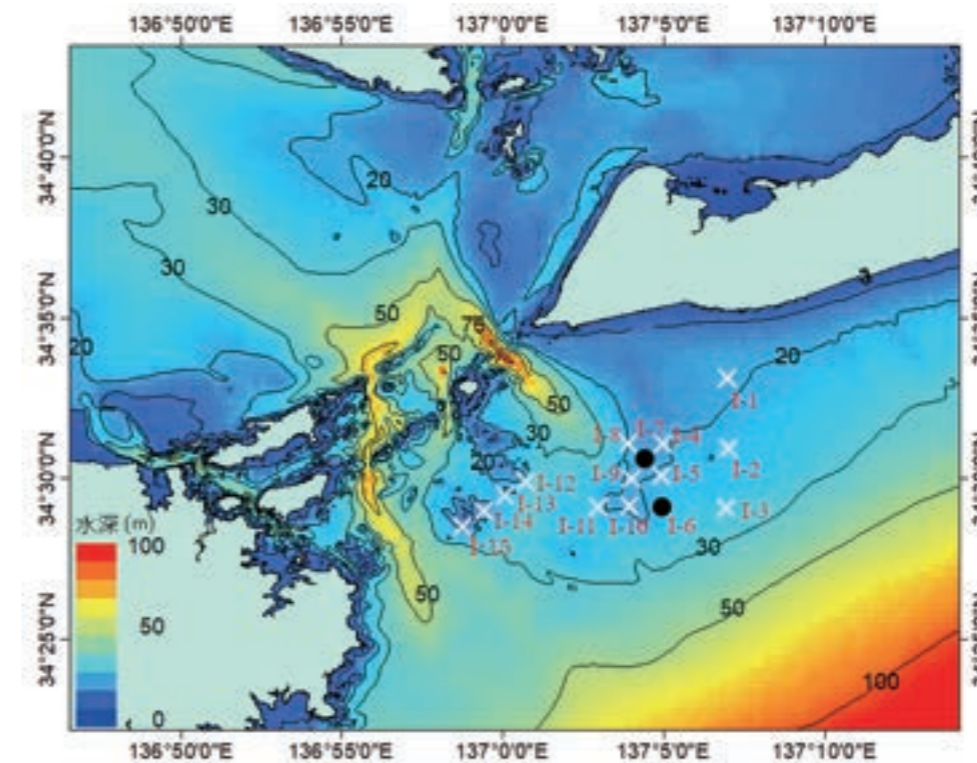


図3 海底直上水中におけるイカナゴ環境DNAの分析結果
●:陽性; ×(白):陰性

2) 海底堆積物中の環境DNAからみたイカナゴの存在

夏眠場の堆積物の種特異的分析の結果を図4に示す。海底堆積物中からは、堆積物SGF法もしくは堆積物GF/F法の何れかの手法において、計8地点(I-2、I-3、I-7、I-8、I-9、I-11、I-13およびI-14)でイカナゴの環境DNAが検出された。

海底直上水中から検出された地点は2地点(I-6、I-7)のみであったが(図3)、堆積物中では出山海域と鯛ノ島海域のより広範囲でイカナゴの環境DNAが検出された。この結果は、潜砂行動に伴い放出されたDNAや沈降堆積したDNAの存在により、堆積物中には海水中よりも多くのイカナゴのDNAが蓄積している可能性を示唆している。また、イカナゴの資源量は大きく低迷したものの、生存戦略のためにより夏眠に適した環境を求めて、伊勢湾湾口部の広範囲を夏眠場として利用している可能性が考えられる。

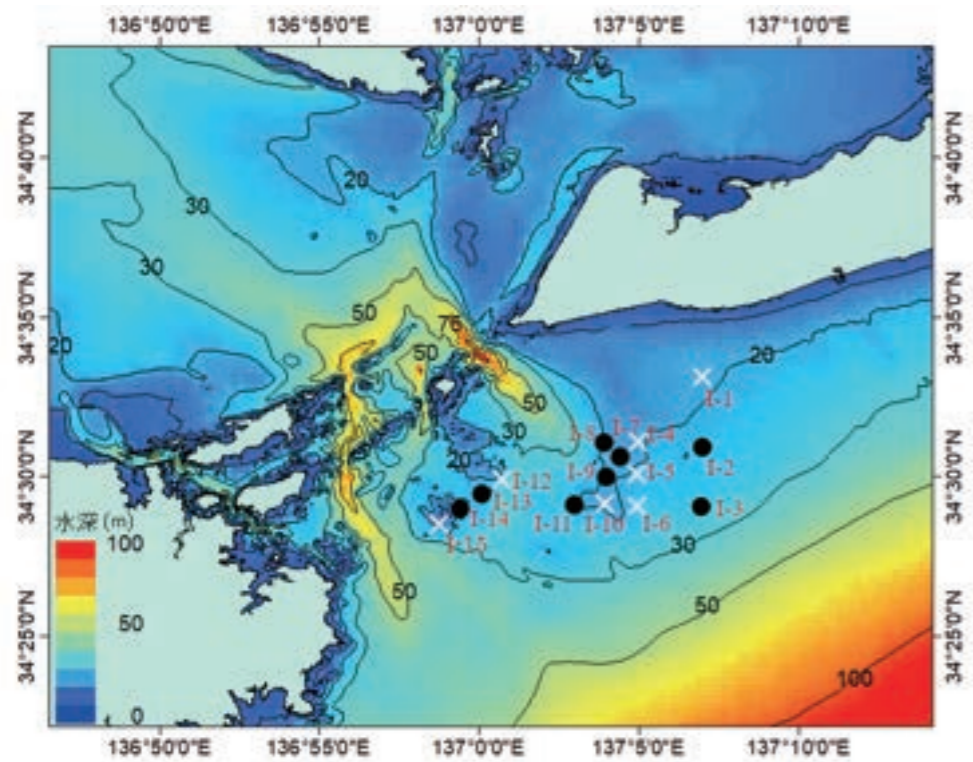


図4 海底堆積物中におけるイカナゴ環境DNAの分析結果
●:陽性; ×(白):陰性

3) イカナゴに対する捕食者の影響

図2に示した出山海域のI-6およびI-7では、MiFishプライマーを用いた種網羅的定量分析を実施し、イカナゴ以外の魚種を確認した。また、出山海域と比較検討するため、兵庫県播磨灘における夏眠場の2地点でも同様の調査を実施し、伊勢湾での結果と合わせて、図5に示した。

伊勢湾ではスズキ目やウナギ目、播磨灘ではニシン目(主としてカタクチイワシ)の環境DNAが多かった(図5)。伊勢湾のI-7では、スズキ目の中でもホウボウ科のDNAが多かった。

種網羅的定量分析で検出されたDNAのうち、イカナゴの捕食者と考えられる種としてはハモ、ヒラメ、ブリなどが挙げられるが、これらのDNA量は播磨灘と比較して、伊勢湾で顕著に多かった。イカナゴやカタクチイワシなどのプランクトン食の魚類は、魚食性魚類の餌として極めて重要である。伊勢湾では、播磨灘と比較してプランクトン食の魚類が少なく、それを餌とする魚食性魚類が比較的多い。イカナゴ資源が豊富な時代は、一定程度の捕食圧がかかっても、それを上回る再生産により資源は維持されると考えられるが、資源が低迷すると捕食圧は資源量を左右する重要な要因になると考えられる。このことが、低水準ながら今なおイカナゴ漁を継続できるだけの資源が存在する播磨灘と、禁漁しているにもかかわらず資源の回復がみられない伊勢湾の違いを生んでいると考えられる。

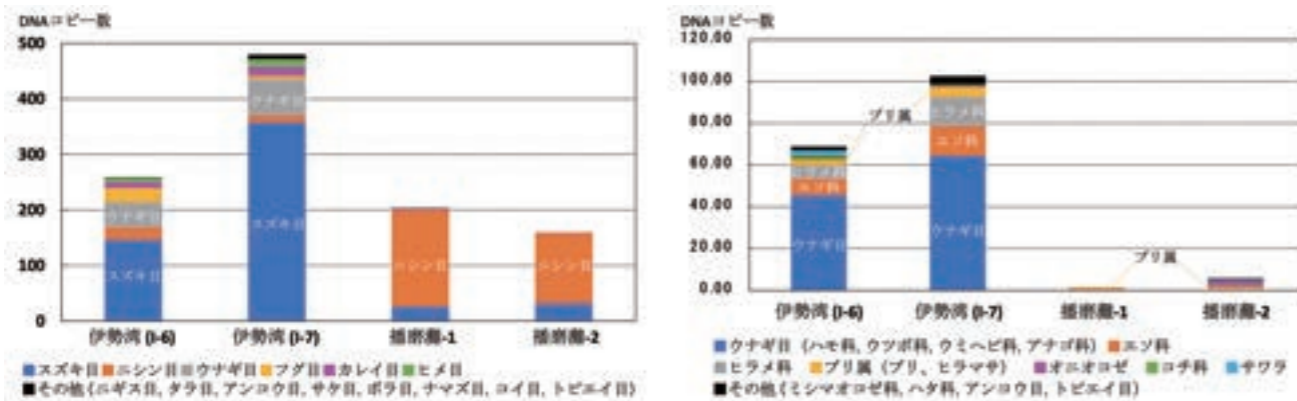


図5 種網羅的定量分析による各地点の目ごとのDNAコピー数(左)とイカナゴの捕食者と考えられる魚類のDNAコピー数(右)

5 おわりに

本調査により、イカナゴの環境DNAを伊勢湾において確認することができた。伊勢湾では、試験操作などでは採捕できないほど極めて厳しい資源状況ではあるが、現在もイカナゴが生息している可能性は高いと考えられる。

一方で、イカナゴの環境DNAは、調査海域の中でもやや深場で検出される傾向がみられた。本調査時の水温の鉛直分布(図6)では、より水深が深い東西の地点(I-2、I-15)で底層水温は低い。飢餓状態にあるイカナゴは、高水温の影響をより強く受けることから(山田・久野, 1999)、生存戦略のためにより水温が低い深場に夏眠場を求めている可能性がある。また、出山海域は捕食者も多いため、夏眠場は広範囲に分散している可能性もある。本調査結果を踏まえると近年調査が行われていない渥美半島外海を含めた深場に夏眠場がシフトしている可能性も考えられ、調査範囲の拡大は今後の課題である。

漁業者からは、かつての出山海域周辺はイカナゴの夏眠場としての機能だけでなく、伊勢湾でも有数の漁場であったが、イカナゴがいなくなった現在は漁場としての機能も低下したとの声が上がっている。イカナゴ資源の回復は、単一の漁業資源としての側面だけでなく、イカナゴを餌料としている多くの漁業資源の回復に繋がる極めて重要な課題である。

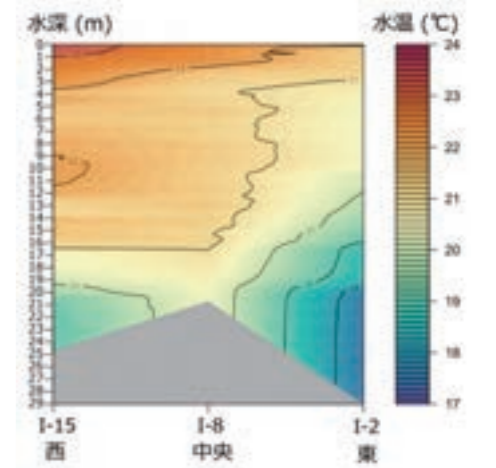


図6 鉛直水温分布

<参考文献>

Dejean T, A. Valentini, C. Miquel, P. Taberlet, E. Bellemain and C. Miaud. 2012. Improved detection of an alien invasive species through environmental DNA barcoding: the example of the American bullfrog *Lithobates catesbeianus*. *Journal of Applied Ecology*, 49, 953-959.

平岡礼鳥・市川哲也・今尾和正・宮向智興・高倍昭洋・田中義人・鈴木輝明. 2023. 数値シミュレーションを用いた魚類の環境DNA分解速度推定の試み～伊勢湾口の矢湾を対象として～. *海洋理工学会誌*, 27(2), 25-35.

環境DNA学会. 2020. 環境DNA調査・実験マニュアル Ver.2.2.

Miya M., Y. Sato, T. Fukunaga, T. Sado, J. Y. Poulsen, K. Sato, T. Minamoto, S. Yamamoto, H. Yamanaka, H. Araki, M. Kondoh and W. Iwasaki. 2015. MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. *R. Soc. Open Sci.*, 2, 150088.

Ogata M, R. Masuda, H. Harino, K. M. Sakata, M. Hatakeyama, K. Yokoyama, Y. Yamashita and T. Minamoto. 2021. Environmental DNA preserved in marine sediment for detecting jellyfish blooms after a tsunami. *Scientific Reports*, 11, 16830.

Suzuki R, K. Kawamura and Y. Mizukami. 2023. Simple extraction and analysis of environmental DNA using glass fibers in suspension form. *Limnology*, 24, 25-36.

Thomsen P. F., J. Kielgast, L. L. Iversen, P. R. Møller, M. Rasmussen and E. Willerslev. 2012. Detection of a diverse marine fish fauna using environmental DNA from seawater samples. *PLoS ONE*, 7(8), e41732.

Turner, C. R., K. L. Uy and R. C. Everhart. 2015. Fish environmental DNA is more concentrated in aquatic sediments than surface water. *Biological Conservation*, 183, 93-102.

中村元彦・船越茂雄・向井良吉・家田喜一・石川雅章・柳橋茂昭. 1997. 伊勢湾産イカナゴの夏眠場所. *愛知水試研報*, 4, 1-10.

山田浩且. 2011. 伊勢湾におけるイカナゴの新規加入量決定機構に関する研究. *三重水研報*, 19, 1-77.

山田浩且・久野正博. 1999. 夏眠期における伊勢湾産イカナゴのへい死条件. *三重水技研報*, 8, 1-5.

イカナゴ資源の回復を目指して ～伊勢湾イカナゴ生活史モデルによる予測シミュレーション～

名城大学大学院総合学術研究科 特任教授 **鈴木 輝明**
 特任教授 **中田 喜三郎**
 中部電力株式会社 執行役員 総務・広報・地域共生本部 部長 **橋本 当矢**
 株式会社サイエンスアンドテクノロジー 取締役 名古屋支店 支店長 **市川 哲也** **発表者**
 名古屋支店 研究員 **丸尾 哲平**

1 はじめに

伊勢湾海域におけるイカナゴ漁は2016年以降禁漁となっており、資源減少の要因は外洋環境の変化に伴う夏眠期の高水温による死亡や成熟悪化、仔魚の無効分散の増大、および索餌回遊時の餌不足による肥満度の低下などが考えられている。これらの要因を明らかにするため、先行研究である「豊かな瀬戸内海再生調査事業検討会」(兵庫県, 2020)において開発された“大阪湾・播磨灘イカナゴ生活史モデル”(市川, 2018; 丸尾ほか, 2022)を参考にして、名城大学では中部電力と共同して“伊勢湾海域イカナゴ生活史モデル”の開発に取り組んでいる。伊勢湾におけるイカナゴ資源を回復させるためには、海域の栄養塩環境の改善や資源管理が必要であり、今後想定される施策を検討する上でイカナゴ生活史モデルを活用し、栄養塩環境や資源尾数および漁獲率等に関して複数の条件を想定したシミュレーションを行い、それぞれがイカナゴ資源へ与える影響について検討した。

2 伊勢湾イカナゴ生活史モデルの概要

伊勢湾イカナゴ生活史モデル(丸尾ほか, 2023)は、既存の低次栄養段階生態系モデルを基本として、イカナゴ現存量を考慮できるようモデルを改良し、栄養塩、および基礎生産と関係する動物プランクトン量とイカナゴ資源量との関係を解析できる物質循環モデル(図1)である。モデルの主な特徴は、以下の通りである。

- イカナゴ(高次栄養段階)の動態を考慮した生態系モデル。
- イカナゴの生活史を反映した生物物理過程の新たなモデル化と、低次栄養段階生態系モデルとの結合。
- イカナゴ稚仔魚は流れに受動的なトレーサとして取り扱い、成長に伴い自らの行動様式で活動。
- イカナゴの成長と生残プロセスを卵黄嚢期、仔魚期、稚魚期、幼魚期、未成魚期および成魚期の成長段階ごとに考慮。
- 夏眠場(湾外の出山海山)と産卵場(湾内)が異なる場所に存在しているため、夏眠・産卵場への能動的移動を考慮。
- 夏季に発生する貧酸素水塊からの逃避行動を考慮。

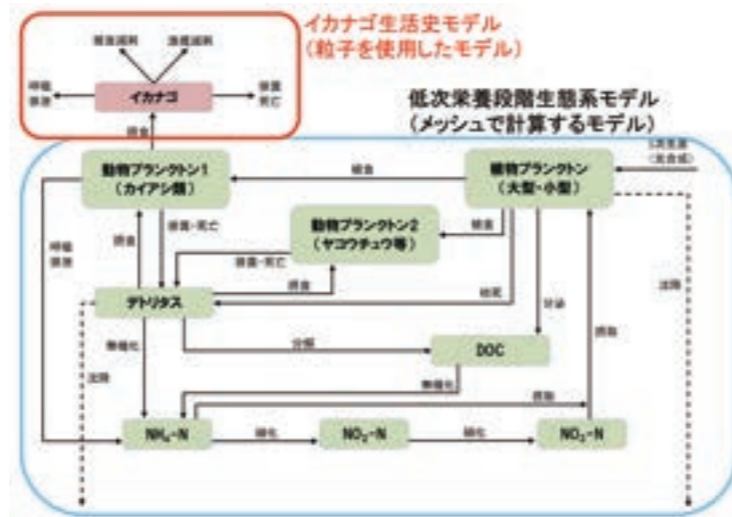


図1 イカナゴ生活史モデルの概念図

3 イカナゴ動態の確認(モデルの再現性)

開発された“伊勢湾海域イカナゴ生活史モデル”を使用して、イカナゴ、動物・植物プランクトンおよび栄養塩等を

対象とした水質生態系シミュレーションの再現計算を実施した。対象年度は2014年と2015年の2ヶ年とし、海域の流れ場・水温・塩分は再現性が確認された流況等物理場数値シミュレーション結果を使用した。ここではモデルの再現性として、2014年と2015年におけるイカナゴの成長、漁獲および夏眠の動態を確認した。

イカナゴの成長について、モデルによる体重(漂流粒子の平均値)の経時変化と、愛知県による観測値の平均値と比較した(図2)。両年ともモデルでは、2月中旬に稚魚期に移行し、さらには3月中旬に幼魚期に移行しており、漁獲開始時期の成長過程が適切に捉えられている。2014年の4月以降の実測値がモデルより高く推移しているのは、漁獲対象をシンコから餌用であるイカナゴに変更したためだと考えられる。また、2015年の成長が2014年よりも早いのは、ふ化時期が2014年よりも10日程度早いためであると考えられる。

漁獲について、イカナゴ尾数の経時変化を漁獲実績に基づく資源量推定結果(デルーリ法)と比較した(図3)。その結果、モデルによる漁獲開始時の尾数は約350億尾(2014年)と約65億尾(2015年)で、デルーリ法推定による同時期の尾数304億尾(2014年)と80億尾(2015年)と概ね整合しており、漁獲に伴う稚魚尾数の減少傾向はデルーリ法とよく一致した。

夏眠中の肥満度について、モデルによる平均値の経時変化を愛知県による測定値と比較した(図4)。夏眠中は摂餌活動を停止し産卵に向けて生殖腺を発達させるため、呼吸代謝により相応の体重が消失する。このため、7~8月の夏眠開始時に最大4.1程度(2014年)と3.7程度(2015年)であった肥満度が、夏眠終了時の12月には最小3.2程度(2014年)と3.2程度(2015年)まで減少する状況が観測されていた。モデルでは、7月の夏眠開始時の肥満度は約3.5(2014年)と約3.8(2015年)であり、12月の夏眠終了時には約3.2(2014年)と約3.2(2015年)となり、観測による肥満度の推移と比較して若干違いはあるものの、肥満度の減少傾向について概ね整合していた。

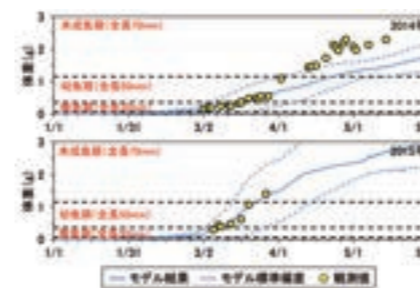


図2 イカナゴ体重の比較

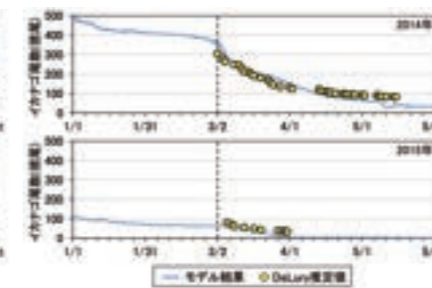


図3 イカナゴ尾数の比較

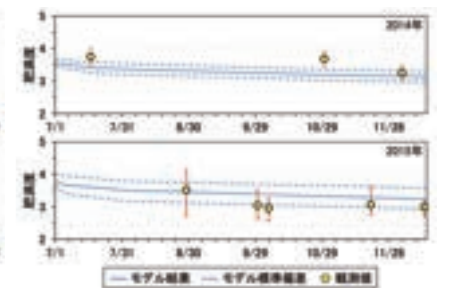


図4 夏眠期におけるイカナゴ肥満度の比較

最後に、イカナゴと低次生態系との相互作用について、2014年3月の物質収支を算定し、2016年3月の播磨灘の収支と比較した(表1)。それによると、播磨灘より伊勢湾の方が生産フラックスと転送効率が高い結果となり、伊勢湾では栄養塩レベルの変化によってイカナゴの生産が播磨灘より敏感に応答することが示唆された。

以上のように、2014年から2015年におけるイカナゴの各成長における動態をモデルにより再現することができ、伊勢湾における低次生態系(動植物プランクトン、栄養塩)の計算結果も概ね観測値と整合した結果となった。また、モデルによる2015年生活史終了時の再生産尾数が1億尾を下回り、2016年以降禁漁になっている状況も再現された。

表1 モデルから計算された播磨灘と伊勢湾における物質収支の比較

	播磨灘 (明石海峡漁場)	伊勢湾 (伊勢三河湾全域)
植物プランクトン現存量(mgC/m ³)	53.17	107.42
動物プランクトン現存量(mgC/m ³)	18.02	21.39
イカナゴ現存量(mgC/m ³)	5.47	7.82
1次生産フラックス(mgC/m ³ /day)	10.21	13.51
2次生産フラックス(カイアシ類) (mgC/m ³ /day)	2.14	4.49
3次生産フラックス(イカナゴ) (mgC/m ³ /day)	0.56	1.31
転送効率1次→2次(%)	20.96	33.23
転送効率2次→3次(%)	26.17	29.18

4 環境変化(湾内貧酸素と外洋底層由来栄養塩)によるイカナゴ動態の応答(モデルの感度解析) ——

“伊勢湾海域イカナゴ生活史モデル”の開発により、伊勢湾における植物プランクトンから動物プランクトンを経てイカナゴに至る物質収支と、イカナゴの生活史や資源量の再現が可能となった。さらに、本モデルを用いることにより様々な環境変化に伴うイカナゴ資源への影響の定量的評価も可能である。ここでは、底層貧酸素水塊と外洋からの栄養塩供給を変化させた感度解析を実施し、2014年環境におけるイカナゴの生産構造と比較した。

まず、伊勢湾夏季における貧酸素水塊が発生しない(底層酸素濃度が高い)ケース1を仮定し、2014年現況と比較した。その結果、再生産資源尾数は現況比0.87倍となった。また、夏眠場に到達した親魚尾数は現況比0.72倍となった。一方、夏眠開始時の肥満度は現況比1.01倍となった(図5)。貧酸素水塊からの逃避行動が弱まるため、餌料濃度が高い湾内に留まりやすくなり、夏眠場への到達尾数は減少するものの成長はやや良くなるためと考えられる。

現在の伊勢湾夏季底層に発生する貧酸素水塊は、イカナゴの逃避行動により湾口夏眠場への蝟集を促す役割がある可能性が示唆された。一方、現在よりも貧酸素水塊の規模が小さかった過去の伊勢湾では、湾内にも夏眠場が存在していたと言われており、この産卵資源尾数および夏眠魚の減少は、貧酸素水塊の拡大が湾内の夏眠場を消失させ、夏眠場が現在の湾口夏眠場のみになったためと推測される。

次に、外洋底層からの栄養塩供給が80%減少したケース2を仮定し、2014年現況と比較した。その結果、再生産資源尾数は現況比0.67倍となった。また、夏眠場に到達した親魚尾数は現況比0.62倍となった。一方、夏眠開始時の肥満度はほとんど変化がなかった(図5)。外洋底層からの栄養塩供給の減少は、イカナゴの成長に明瞭な影響はないものの、伊勢湾内における餌料環境を変化させ、イカナゴの分布に影響を与えることが示唆され、今後の課題として検討する必要がある。

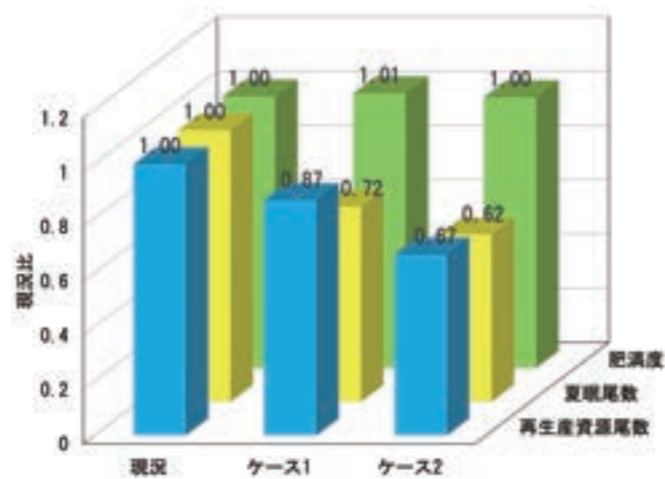


図5 感度解析ケースの現況に対する変化率

(ケース1:貧酸素水塊が発生しない、ケース2:外洋底層からの栄養塩供給が80%減少)

5 イカナゴ資源の回復を目指した想定計算 ——

イカナゴ資源を回復するために必要な栄養塩環境はどの程度なのか、かつて伊勢湾内の栄養塩が高かった年代を想定した計算を実施し、2014年をベースとした基本計算におけるイカナゴの生産構造と比較した。

想定年は、愛知県の浄化センターによる窒素・リンの除去量の増加に伴い、河川の窒素・リン濃度が低下する直前の2004~2006年(2000年代中期)を対象とした。2000年代後期になると、アサリ資源量の減少やノリの色落ちなどが問題となってくる(蒲原ほか, 2021)。そのため、アサリの成育に必要な栄養塩環境が確保されていて、かつ実現可能な栄養塩環境として2000年代中期を選定した。想定計算では、河川および事業所からの負荷量を2000年代中期の水準に設定し、その他の環境要因(流動場、水温および外海からの栄養塩類供給等)は2014年をベースとした基本計算と同等とした。なお、栄養塩に対するイカナゴ資源の応答をみるため漁獲量は0に設定し、計算結果が落ち着くまで10年間の自律計算を実施した。

イカナゴの再生産資源尾数について比較すると、基本計算では750億尾から10年後に約250億尾まで3割程度に減少したが、想定計算では750億尾から増減は見られるものの8年後から急激に増加し、10年後に約1800億尾まで2.4倍程度に増加した(図6(a))。また、イカナゴの夏眠開始時の資源尾数について比較すると、基本計算では

6.7億尾から10年後に約3億尾まで半減したが、想定計算では9.8億尾から増減は見られるものの8年後から急激に増加し、10年後に約23億尾まで2.3倍程度に増加した(図6(b))。さらに10年後の夏眠開始時の肥満度は、基本計算の3.52に対して想定ケースでは3.58と増加した(図6(c))。このことから、想定計算のイカナゴ再生産資源尾数の急激な増加は、夏眠場への蝟集尾数および成長自体が向上したためと考えられる。

以上のように、2000年代中期の栄養塩環境を想定することにより、2014年基本計算よりも低次生産が増加し、イカナゴ餌料である動物プランクトンの増加に結び付くことが考えられる。その結果、10年程度かけて徐々にイカナゴ資源量が増加するが、特に夏眠場への蝟集尾数が急激に増加する時点から再生産資源尾数の急激な増加が起こることが予測された。一方、現在と同レベルの栄養塩環境のままでは、禁漁を10年続けてもイカナゴ資源量は回復せず漸減傾向にある可能性が示唆された。

本発表では、以上の検討結果を示すとともに、初期資源尾数の多寡による再生産資源尾数の回復傾向の推移に関する想定計算の結果を示し、伊勢湾におけるイカナゴ資源回復に向けた提言を報告する。

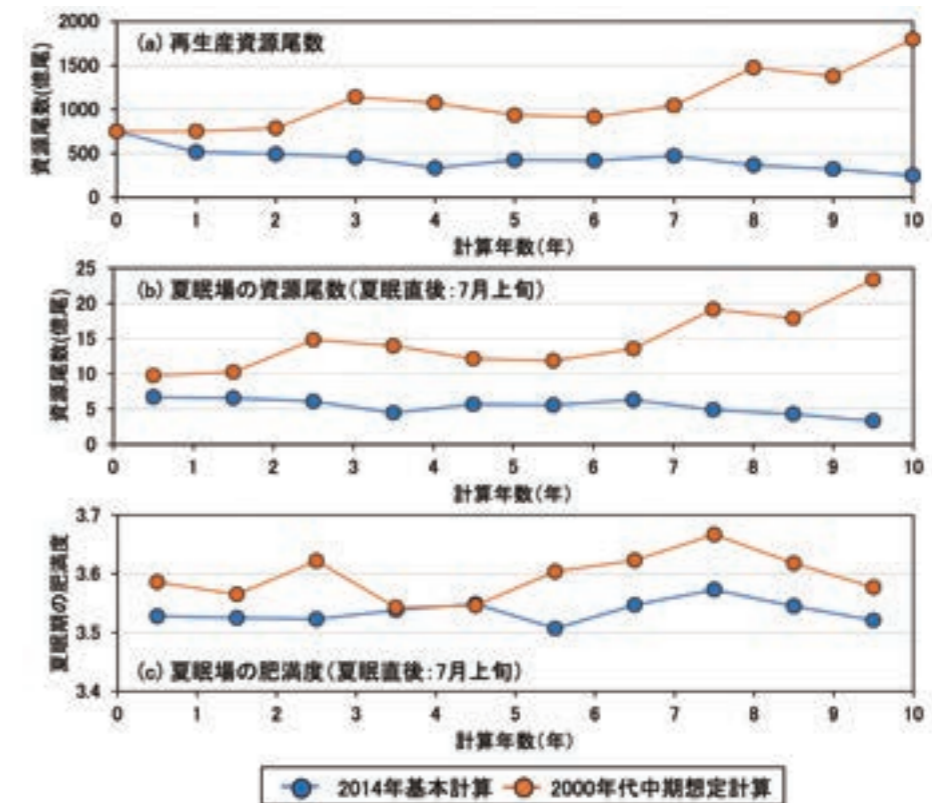


図6 2000年代中期想定計算における(a)再生産資源尾数、(b)夏眠場の資源尾数および(c)夏眠場の肥満度の推移

<参考文献>

兵庫県立農林水産総合技術センター水産技術センター. 2020. 豊かな瀬戸内海の再生を目指して—豊かな瀬戸内海再生調査事業の成果—, URL <https://www.hyogo-suigi.jp/seika/booklet/>

市川哲也. 2018. 低次生態系モデルと連動したイカナゴ生活史モデル(大阪湾・播磨灘イカナゴ資源漁業モデル)の開発. 水産海洋地域研究集会第1回東部瀬戸内海研究集会「東部瀬戸内海のイカナゴ資源と環境を考える」講演要旨集, 28-31.

丸尾哲平・反田實・田口浩一・市川哲也・橋口晴穂・今尾和正. 2022. 大阪湾・播磨灘におけるイカナゴ生活史モデルの開発—低次栄養段階生態系モデルとの結合—. 海洋理工学会誌, 27(1), 15-30.

丸尾哲平・田口浩一・市川哲也・濱崎真美・橋口晴穂・安武由矢・今尾和正・鈴木輝明・中田喜三郎・田中義人. 2023. 伊勢湾海域を対象とした低次栄養段階生態系モデルと結合したイカナゴ生活史モデルの開発. 海洋理工学会令和5年度春季大会講演論文集, 39-40.

蒲原聡・芝修一・鶴島大樹・鈴木輝明. 2021. 三河湾のアサリ*Ruditapes philippinarum*の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連. 水産海洋研究, 85(2), 69-78.