

は、海洋低次生態系モデル eNEMURO (図 1, Yoshie et al., 2011) を燧灘に適用した。このモデルは、サイズや生態系内の機能により、4 種の栄養塩、4 種の植物プランクトン、4 種の動物プランクトン、3 種のデトリタスを取り扱うプランクトン機能群モデルである。栄養塩環境の変化に応じて、貧栄養環境における小型植物プランクトンを基点とする長い食物連鎖の低次生態系構造から、富栄養環境における珪藻など大型植物プランクトンを起点とする短い食物連鎖の低次生態系構造への移り変わりなどを陽に取り扱うことができる生態系モデルである。このモデルに、境界条件として水温、日射量、混合層水深に加え、観測された栄養塩濃度の季節変化の平年値を与え、平年的な低次生態系の季節変動を再現できるように、モデル中の各種生物の振る舞いを規定する生理パラメータの調整を行った。

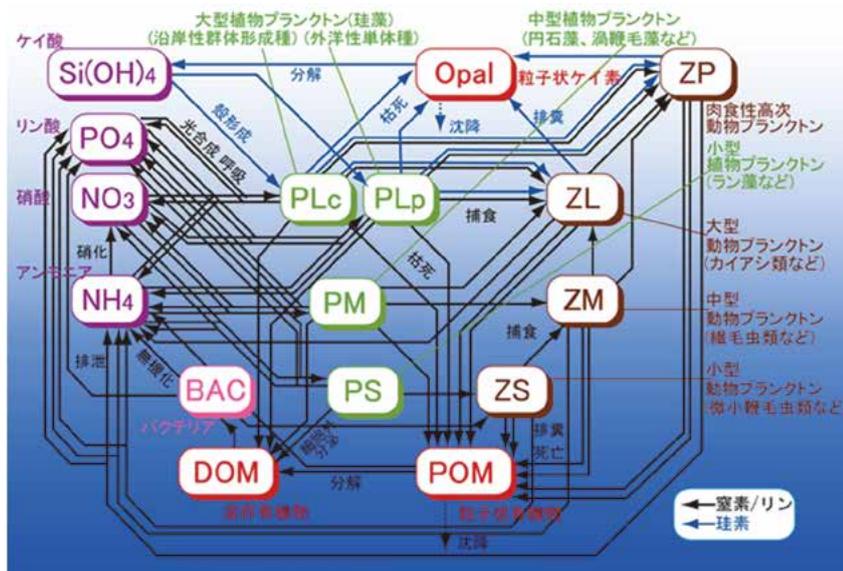


図 1 eNEMURO ver. 4 のコンパートメント

(3) 燧灘におけるカタクチイワシ豊漁年と不漁年における低次生態系の事例解析

先の生理パラメータの調整により、平年的な低次生態系の季節変動を現実に近い形で再現した上で、カタクチイワシ仔稚魚が豊漁であった 2005 年と不漁であった 2011 年における栄養塩濃度の観測値をモデルに与える事例解析実験を行い、両年の低次生態系の季節変動について比較した。そして、カタクチイワシの資源変動に最も関連性が高いカタクチイワシ仔稚魚 5 月発生群の漁獲量が、いつのどのような生物の変動と関連している解析した。

(4) 長期的な栄養塩濃度変動に対する低次生態系の応答解析

先の豊漁年と不漁年における事例解析に加えて、1993 年から 2013 年にかけての長期的な栄養塩濃度の変動を生態系モデルに与えることにより、それらに対する低次生態系応答を探る長期変動実験を実施した。そして、カタクチイワシ仔稚魚漁獲量の経年変動と、春季の植物プランクトンおよび動物プランクトンの経年変動などとの関連性について解析した。

(5) メソ動物プランクトンの食性の違いによる生態系への影響評価

カタクチイワシの餌料としては、これまでメソ動物プランクトンが重要視されてきたが、その種の違いにより餌料としての質に違いがあることが示唆されている (河野ら 私信)。そこで、生態系モデル中のメソ動物プランクトンについて、捕食経路の違いにより 2 種類に拡張するモデルの改良を実施した。具体的には、珪藻など植物プランクトンを選択的に捕食す

る植食性の *Paracalanus spp.* を想定したグループと、 繊毛虫など動物プランクトンを選択的に捕食する肉食性の *Oithona spp.* を想定したグループの 2 種類を考慮し、 新たに生態系モデルに導入した。そして、 先の実験と同様に境界条件として水温、 日射量、 混合層水深に加えて栄養塩濃度の季節変化の平年値を与え、 平年的な低次生態系の季節変動を再現できるように生理パラメータを調整し、 どちらのメソ動物プランクトンが春季の生態系に及ぼす影響について解析した。

【結果】

(1) 餌料プランクトンの採集および分析

・メソ動物プランクトン現存量の年代間の比較

年代間での比較を可能とするために、 扱う分類レベルを最も種分解能の低いデータセットにあわせた。すなわち1990年代に関しては4つの属およびその他としてまとめた情報までしか記載されていないため、 全てのデータを5つのカテゴリー（*Acartia*属、 *Calanus*属、 *Paracalanus*属、 *Oithona*属、 その他）にまとめた。さらに各測点のデータを灘・湾ごとに平均値を求める、 1980年代（1979年～1980年）、 1990年代（1993～1994年）と2018年および2019年の間で比較した。

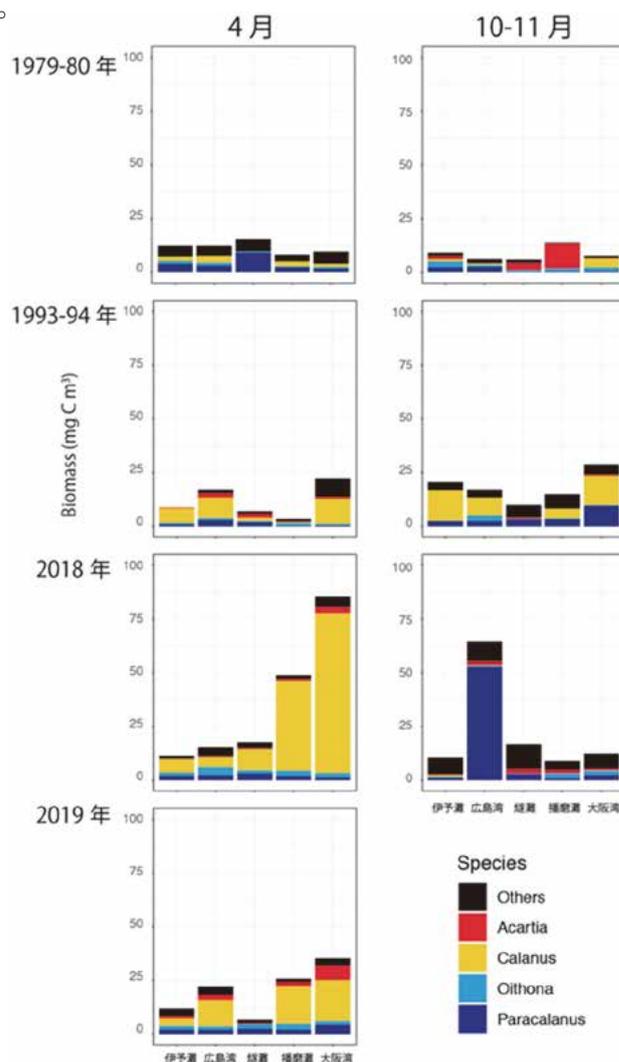


図2 灘・湾における年代毎の4月および10-11月のカイアシ類の組成。

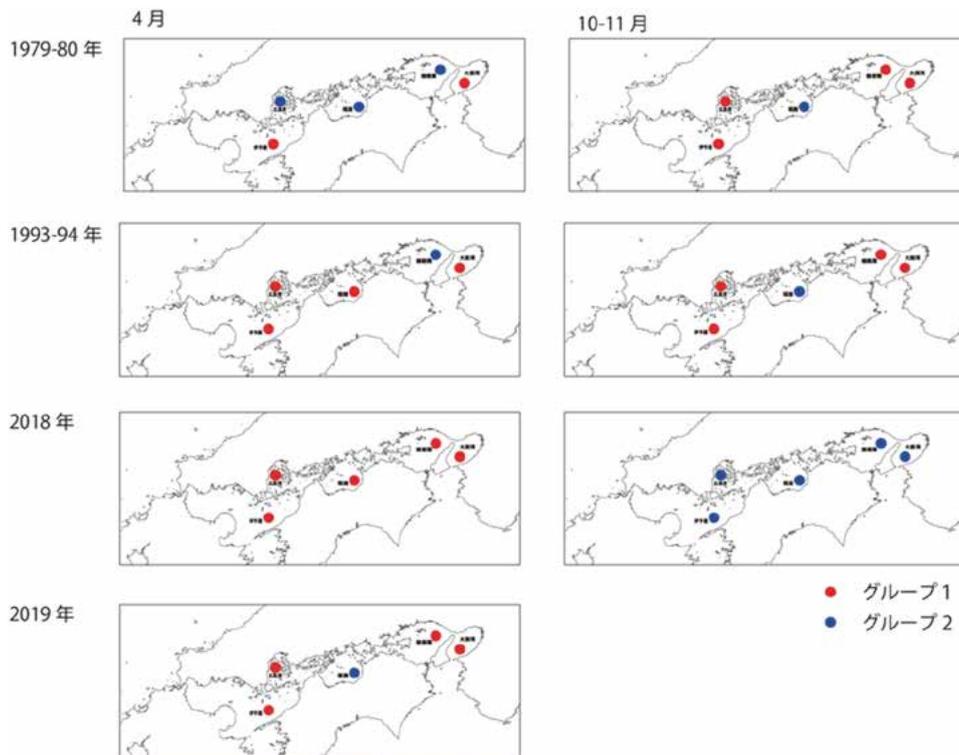


図3 灘・湾における年代毎の4月および10-11月のグループ区分。

現存量について見ると、現在（2018年，2019年）が1980年代，1990年代に比べ低い傾向は見られず，2018年4月の大阪湾・播磨灘および10月の広島湾では過去に比較して高い値を示した（図2）。現存量の季節的な差異についてみると，1980年代および1990年代では4月と10-11月の間に大きな差異は見られなかった。2018年については特異的に高い4月の大阪湾・播磨灘および10月の広島湾を除くと季節間で大きな差異は見られなかった。

次に組成について見ると，2018年の4月ではCalanus属が高い割合を占めるのに対し，10月ではParacalanus属が高い値を占めるようになった。すなわち季節による明確な優占種の遷移が見られた。2019年に関しては現時点で4月までのデータを見ることができ，組成は概ね2018年と同様であった。1990年代に関しては4月に関してはCalanus属が高い割合を占め，10月も同様にはCalanus属が高い割合を占めた。すなわちこの年代では優占種の明確な遷移は見られなかった。さらに1980年代では4月にParacalanus属が高い割合を占め10月-11月にはAcartia属が高い割合を占めると言った現在と1990年代とは異なる季節的な遷移を示した。

さらにクラスター解析（Bray-Curtis, Ward法）を行うことで群集構造の変動について検討を行った。解析の結果，群集を2つに区分した（図3）。2018年では4月は全ての灘・湾でグループ1が出現したが，10月には全ての灘・湾でグループ2が出現し群集構造の明確な遷移が確認された。2019年の4月に関しても，燧灘を除き全ての灘・湾でグループ1が出現した。一方で1990年代では4月にはグループ1が多くを占めたが，10月もグループ1が多く出現した。このことから1990年代は季節による群集構造の遷移が現在よりも明確でないことが確認できた。さらに80年代では4月にグループ2が多く出現し，10月にグループ1が多く見られた。以上のように主要種および群集構造の季節遷移のパターンは年代によって異なることが明らかとなった。さらに調査・分析および過去データの掘り起こしを行うことで，デー

タ数を増やして群集構造の変動について検討を行い、水産資源の変動との関係を考察する予定である。

次に、マイクロ動物プランクトンであるカイアシ類のノープリウス幼生について4月の現存量を調べた。播磨灘を除く全ての灘・湾で2019年の現存量は2018年よりも高い値を示した(図4)。さらに燧灘について2001年～2002年と2018年～2019年の4月における現存量と組成を比較した。その結果2018年～2019年の現存量は2001年～2002年に比べ高い値を示した(図5)。組成についてみると2001年～2002年はカラヌス目とキクロプス目の割合が概ね均等であったが、2018年～2019年にはカラヌス目の割合が大きく低下していることが明らかとなった。カタクチイワシ仔魚の餌としてはキクロプス目よりもカラヌス目のほうが利用されやすいと報告されていることから(Mitsuzawa et al., 2017), このような組成の変化が最近の燧灘におけるカタクチイワシ仔魚の漁獲量の低下に関係している可能性が考えられた

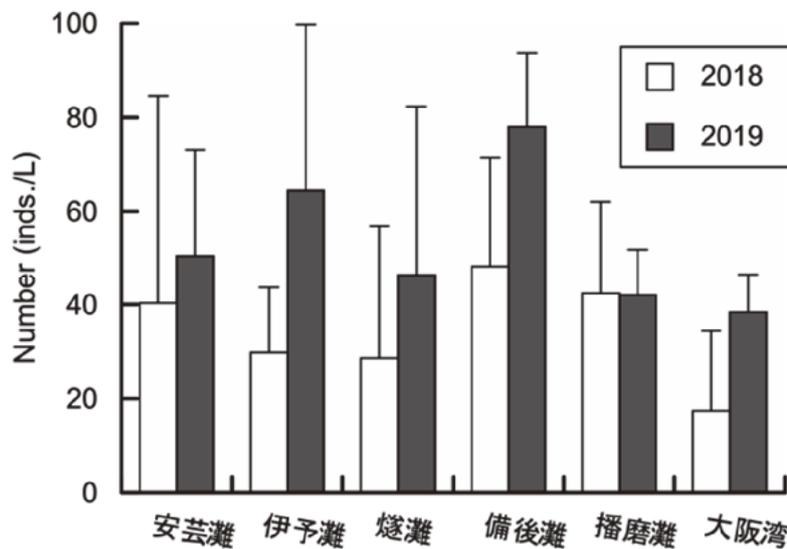


図4 灘・湾毎の2018年と2019年の4月およびノープリウス幼生の密度の比較

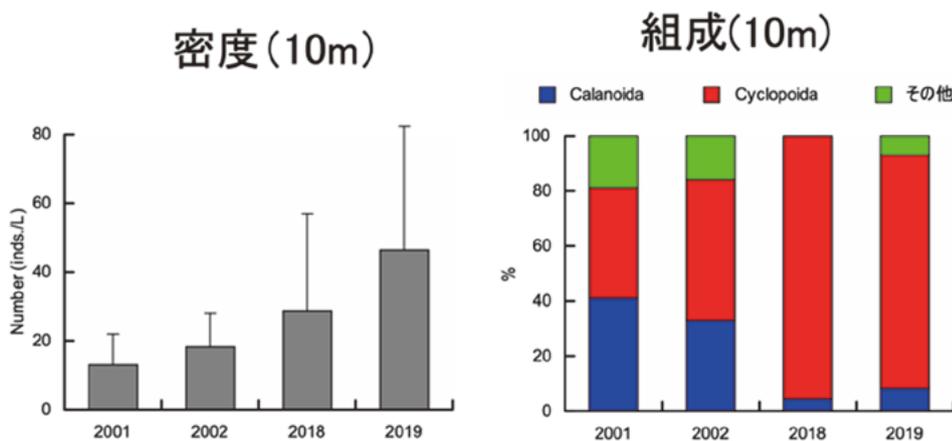


図5 燧灘における2001年～2002年と2018年～2019年のカイアシ類・ノープリウス幼生の現存量と目レベルの組成

(2) 海洋生態系モデルを用いた燧灘における低次生態系の季節変動再現

生態系モデル eNEMURO を用いて、モデル中の各種生物の振る舞いを規定する生理パラメータの調整を行うことにより、燧灘における低次生態系の平年的な季節変動を再現することに成功した。

(3) 燧灘におけるカタクチイワシ豊漁年と不漁年における低次生態系の事例解析

カタクチイワシ仔稚魚の豊漁年(2005年)と不漁年(2011年)における春季(4-6月)の低次生態系を比較すると、不漁年には硝酸濃度が約6割減少し、その影響により春季の珪藻ブルームが縮小し珪藻現存量は約6割減少、珪藻を餌料の一部とするメソ動物プランクトン現存量は約2-3割減少していた(図6)。不漁年には春季の栄養塩濃度の大幅な減少に応じて、春季の珪藻ブルームの規模と春季のメソ動物現存量が大きく減少することが明らかとなった。このことから春季の栄養塩濃度の経年変化が珪藻ブルームの規模を左右しカタクチイワシの餌料として重要なメソ動物の現存量の経年変動を引き起こしていること示唆された。

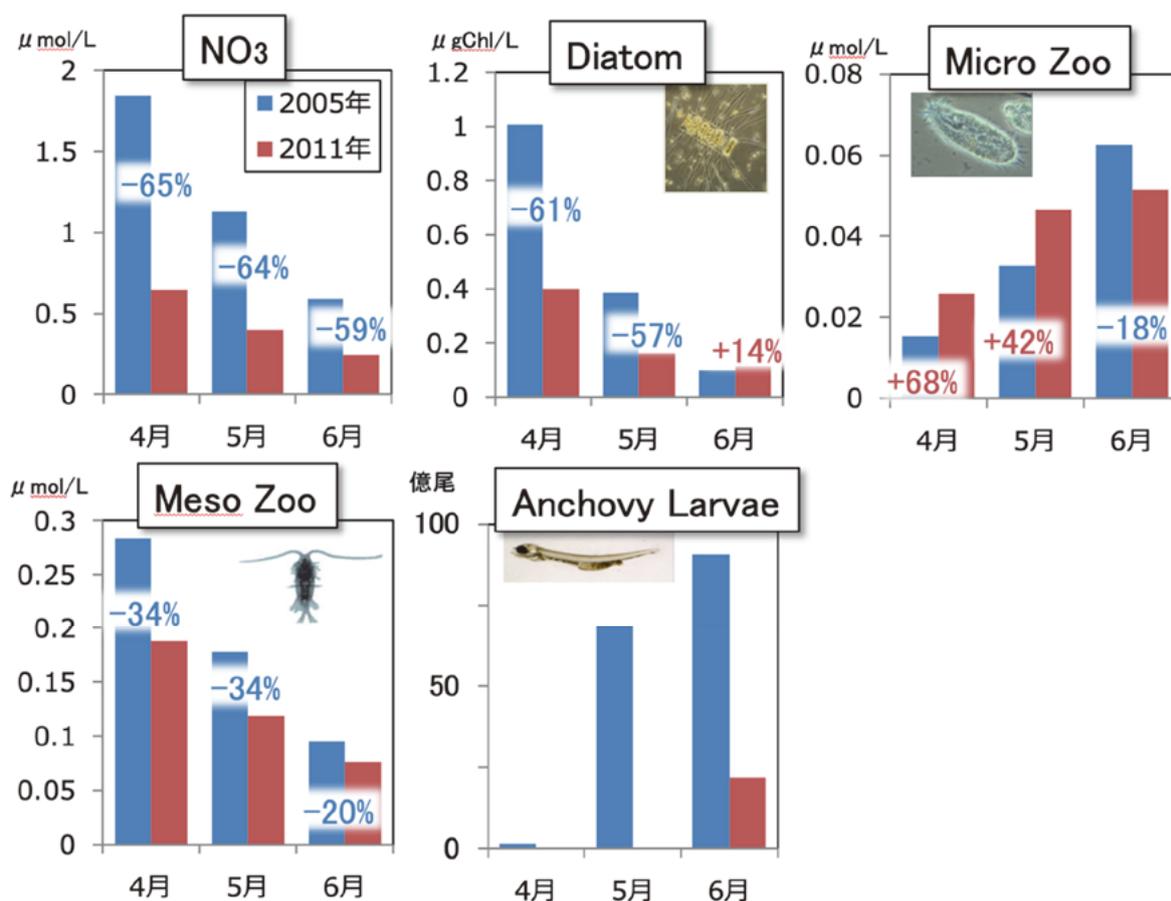


図6 豊漁年(2005年, 青色)と不漁年(2011年, 橙色)における春季の栄養塩および植物・動物プランクトンの現存量

(4) 長期的な栄養塩濃度変動に対する低次生態系の応答解析

先に重要であることが示唆された春季の珪藻およびメソ動物プランクトン現存量について、1993年から2013年にかけての長期的な栄養塩濃度の変動への応答を調べたところ、春季の栄養塩濃度に応じてそれらの現存量が変動していた。そして、カタクチイワシ仔稚魚5

月発生群漁獲量の経年変動と5月の珪藻現存量およびメソ動物プランクトン現存量の経年変動の間に有意の相関関係があることが明らかとなった。先の事例解析に用いた特定年だけでなく、長期的に同様のメカニズムが働いていることが示唆された。

(5) メソ動物プランクトンの食性の違いによる生態系への影響評価

カタクチイワシの餌料として重要である春季のメソ動物プランクトン現存量の変動に対しては、*Paracalanus* のような春季に珪藻を餌料とする植食性のメソ動物プランクトンの寄与率が高いことが明らかとなった。

【参考文献】

Uye S., Kuwata H., Endo T., Standing stocks and production rates of phytoplankton and planktonic copepods in the Inland Sea of Japan, *Journal of Oceanography Society of Japan*, 42, 421-434, 1987

Uye S., Nagano N., Tamaki H., Geographical and Seasonal Variations in Abundance, Biomass and Estimated Production Rates of Microzooplankton in the Inland Sea of Japan, *Journal of oceanography* 52, 689-703, 1996.

Mitsuzawa A., Miyamoto H., Ueda H., Feeding selectivity of early-stage fish larvae on the nauplii and eggs of different copepod species, *Plankton Benthos Res.*, 12, 115-122, 2017.

Yoshie N., Guo X., Fujii N., Komorita T. Ecosystem and nutrient dynamics in the Seto Inland Sea, Japan, In *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry—Marine Environmental Modeling & Analysis*, Eds., K. Omori, X. Guo, N. Yoshie, N. Fujii, I. C. Handoh, A. Isobe and S. Tanabe, pp. 39-49, 2011.

課題番号：2) -イ

課題名：水質環境や餌料環境と小型浮魚生産量との因果関係の評価

水産研究・教育機構 瀬戸内海区水産研究所
米田道夫，河野悌昌，高橋正知，中村政裕
香川県水産試験場
藤田辰徳，宮川昌志，山本昌幸

【背景・目的】

瀬戸内海の有用魚類複数種において、近年、漁獲量の減少や低迷が顕著になっている。瀬戸内海の代表有用種であるカタクチイワシでは、当該系群全体の資源水準は中位で、動向は横ばいと評価されている（水産庁 2019）。しかし、灘や湾によってその状況は異なり、特に燧灘のカタクチイワシでは加入量の低迷が顕在化しており、2014年にはシラス（仔魚）が全く漁獲されないという異例の不漁に陥った。このような現象は、生息域の物理・生物環境、対象種の生物特性や生活史が湾や灘によって異なることに起因しているのではないかと考えられるが、その詳細は不明である。カタクチイワシをはじめ、多くの魚類は動物プランクトンを餌料として利用していることから、栄養塩等の水質環境が小型浮魚生産量に及ぼす影響を評価するには、動物プランクトンを介した水質環境と対象種の生産量の因果関係を明らかにすることが重要である。そこで、本課題では、燧灘およびその周辺海域での海洋環境調査およびカタクチイワシなどの卵仔魚調査や成熟・産卵調査を進め、過去の調査結果と比較しながら、海洋環境と加入豊度との関連性を検証する。これにより、小型浮魚の生産量に及ぼす環境条件の影響を評価するための基盤作りを行う。今年度では、燧灘の海洋環境およびカタクチイワシに関するデータを整理するとともに、本種の産卵盛期および加入主群発生月である5、6月の親魚の肥満度や卵・仔稚魚の経年変化および餌料環境との関係を調べた。

【方法】

(1) 燧灘における海洋環境およびカタクチイワシに関する調査データの整理

瀬戸内海区水産研究所（瀬戸内水研）および香川県において実施された燧灘での海洋環境およびカタクチイワシに関しての調査および解析データなどを集約した。なお、調査時期は燧灘カタクチイワシの加入群発生月である4～7月を対象とした。

(2) 燧灘カタクチイワシ卵、仔稚魚の長期データ解析

1993～2019年に丸特ネットで採取されたカタクチイワシ卵と仔魚および漁獲された仔稚魚の経年変化を調べるとともに、各発育段階の生残指数を求めた。なお、仔魚期について、前期（卵黄吸収期）と後期（摂餌開始）が区別された2003年以降を対象とした。調査月は当該海域における本種の産卵盛期であり、かつ、加入主群発生月である5、6月とした。得られた観察値を標準化するため、調査定点と月をランダム効果として、各年の標準値を混合効果モデルにより求めた。各発育段階の生残指数を次式により求めた：卵～前期仔魚期（摂餌開始前）＝前期仔魚期密度÷卵密度，前期～後期仔魚期（摂餌開始後約1週間）＝後期仔魚密度÷前期仔魚密度，後期仔魚期～漁獲仔稚魚（摂餌開始約1週間～1.5カ月）＝後期仔魚密度÷

仔稚魚漁獲尾数。標準値と年の関係を一般化線形モデルまたは非線形回帰モデルにより評価した。

(3) 燧灘カタクチイワシ親魚の餌環境と肥満度の経年変化および加入量との関係

2001～2018年にノルパックネット(100 μ m)鉛直曳にて採取されたカイアシ類の種組成と密度を調べた。カイアシ類各種の炭素重量(mg/m³)はUye(1982, 1991), Uye et al.(2002)に基づいて推定した。雌親魚標準体長(SL)90mm以上の個体を対象として肥満度を次式により求めた: 肥満度=卵巣除去体重 $\times 10^5 \div SL^3$ 。各調査年の5, 6月のカイアシ類炭素重量, 肥満度, 仔稚魚漁獲尾数の標準値を混合効果モデルにより求めた(ランダム効果: 調査月)。標準値間の相関関係の有無を一般化線形モデルにより評価した。

(4) 燧灘カタクチイワシの卵サイズと水温の関係における豊漁年と不漁年の比較

2005年(豊漁年)と2016年(不漁年)の5～6月に採取された受精卵の体積(V mm³, V=長径 \times 短径² $\times 4 \div 3$)と調査海域の10m水温の関係を求めた後, 混合効果モデル(ランダム効果: 調査定点)により調査年の影響を検証した。

【結果】

(1) 燧灘における海洋環境およびカタクチイワシに関する調査データの整理

瀬戸内水研では2001～2010年においてCTDによる水温, 塩分測定, 採水による栄養塩やノープリウス幼生密度, ノルパックネットによる動物プランクトン密度, ボンゴネットなどによる仔魚調査が実施されてきた(図1)。一方, 香川県では1993年からCTDや採水などによる環境, 卵仔魚調査が行われており, 特に2014年以降, 5～6月において仔稚魚標本の耳石日周輪解析や初期生残に関しての調査が行われてきた。その他, 愛媛県や広島県も香川県と同様に海洋環境やカタクチイワシに関する調査が実施されていた。

(2) 燧灘カタクチイワシ卵, 仔稚魚の長期データ解析

5, 6月の卵密度は経年的に増加しており(P<0.001, R²=0.69), 2015年以降の平均卵密度は2000年代前半の約4倍であった(図2)。前期仔魚密度は卵密度と同様に2000年代以降に増加傾向を示した(P<0.01, R²=0.35)。一方, 後期仔魚密度は年変動が比較的大きかったが, 調査年との有意な相関は認められなかった(P=0.66)。仔稚魚漁獲尾数は2000年代前半にピークを迎えた後, 減少した(P<0.001, R²=0.58)。卵～前期仔魚期の生残指数には比較的大きな年変動が認められたものの, 調査年と有意な相関はなかった(図3, P=0.62)。前～後期仔魚期の生残指数は2000年代以降急激に減少した(P<0.001, R²=0.68)。同様に, 後期仔魚～漁獲加入までの生残指数も減少傾向が認められた(P<0.05, R²=0.25)。これらのことから, 燧灘のカタクチイワシでは, 摂餌開始以降における仔魚の減耗が経年的に拡大していることが示された。

(3) 燧灘カタクチイワシ親魚の餌環境と肥満度の経年変化および加入量との関係

カイアシ類の炭素重量は, 年変動がやや大きいものの, 経年的に減少傾向が認められた(図4)。一方, カイアシ類の構成種には経年的な変化が認められ, 近年では*Calanus sinicus*が減少傾向を, *Acartia* spp.や*Microsetella norvegica*は増加傾向をそれぞれ示した。雌親魚の肥満度には経年的な減少が認められ(図5, P<0.001, R²=0.32), 1993年からの27年間で約87%と推定された。雌親魚の肥満度とカイアシ類炭素重量および仔稚魚漁獲尾数と肥満度の間にはそれぞれ有意な正の相関が認められた(図6, 前者:P<0.05, R²=0.26, 後者:P<0.01, R²=0.36)。燧灘を仮想した低次生産モデルより, 近年では栄養塩の低下により, 春季の珪藻ブルームが

縮小することに伴い、特に植食性のカイアシ類の現存量が減少していることが示されている（田所ほか 2020）。またカタクチイワシの給餌実験から、産卵期間中の雌親魚の肥満度は数週間前までの摂餌量の多寡を反映していることが示されている（Yoneda et al. 2014）。これらのことから、雌親魚の肥満度の経年的な減少は主要な餌料生物であるカイアシ類の減少がその一因であると考えられた。また、仔稚魚漁獲尾数と肥満度の関係から、雌親魚の摂餌状況（栄養状態）が仔稚魚の生残にも影響を及ぼしていることが窺えた。

(4) 燧灘カタクチイワシの卵サイズと水温の関係における豊漁年と不漁年の比較

2016年の雌親魚の肥満度は2005年の約88%、同年の漁獲尾数は約17%（2005年=149億尾、2016年=25億尾）であった（図7）。卵体積と水温の関係は両調査年において有意な差異が認められ（ $P<0.01$, $R^2=0.35$ ）、2016年は2005年に比べて、同じ水温でも卵体積が約94%にとどまることが示された。カタクチイワシの給餌実験から、低給餌区の雌親魚は高給餌区に比べて小型の卵を産出していることが示されており（Yoneda et al. 2014）、両年の卵サイズの差異は親の摂餌状況や栄養状態（肥満度）を反映している可能性がある。

以上の結果から、燧灘のカタクチイワシについて、①雌親魚の肥満度の減少は餌料環境の低迷が一因であること、②不漁期である近年の受精卵の卵サイズは豊漁期に比べて小型化していること、③摂餌開始直後の減耗が近年増大していること、などが示された。カタクチイワシの初期成長に及ぼす親魚の給餌条件の影響に関する実験結果から、低給餌由来の仔魚は高給餌由来の仔魚に比べて、同じ餌料環境においても成長率が有意に低くなることが示されている（米田ほか 未発表）。瀬戸内海の貧栄養化と魚類生産低迷との因果関係を明らかにしていくためには、今後さらに野外調査に基づいた豊漁期と不漁期の初期生残率の比較を行うとともに、生態モデルなどを利用して初期生残に及ぼす餌料環境の影響や母性効果などの評価を進めていく必要がある。

【参考文献】

水産庁. 令和元年度魚種別系群別資源評価（50魚種84系群）.

[http:// http://abchan.fra.go.jp/digests2019/html/2019_25.html](http://abchan.fra.go.jp/digests2019/html/2019_25.html), 2019.

田所和明, 岡崎雄二, 吉江直樹, 郭 新宇. 2) -ア 栄養塩等の水質環境が小型浮魚の餌料刊行に及ぼす影響解明, 平成31年度漁場環境改善推進事業のうち栄養塩の水産資源に及ぼす影響の調査報告書, 水産庁, 東京. 2020, 印刷中.

Uye S. Length-weight relationships of important zooplankton from the Inland Sea of Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 149-158, 1982.

Uye S. Temperature-dependent development and growth of the planktonic copepod *Paracalanus* sp. in the laboratory. Bull. Plankton Soc. Japan Spec., 627-636, 1991.

Uye S., Aoto I., Onbé T. Seasonal population dynamics and production of *Microsetella norvegica*, a widely distributed but little-studied marine planktonic harpacticoid copepod. J. Plankton Res., 24, 143-153, 2002.

Yoneda M, Kitano H, Tanaka H, Kawamura K, Selvaraj S, Ohshimo S, Matsuyama M, Shimizu A. Temperature- and income resource availability- mediated variation in reproductive investment in a multiple-batch-spawning Japanese anchovy. Mar. Ecol. Prog. Ser., 516, 251–262, 2014.

瀬戸内水研

年	4月	5月	6月	7月
2001				
2002				
2003				
2004				
2005				
2006				
2007				
2008				
2009				
2010				

- 調査項目
- ✓ CTD: 水温/塩分
- ✓ 採水: 栄養塩、クロロフィルa
ノープリウス幼生
- ✓ LNP鉛直曳網:
動物プランクトン/魚卵
- ✓ ボンゴネット傾斜曳網: 仔魚
- ✓ ORIネット多層階段曳網: 仔魚

香川県

	4月	5月	6月	7月
1993年	1	1	1	1
1994年	1	1	2	1
1995年	1	1	2	1
1996年	1	1	2	1
1997年	1	1	2	1
1998年	1	1	2	2
1999年	2	2	2	2
2000年	1	1	2	2
2001年	1	1	2	1
2002年	1	1	2	2
2003年	1	1	2	2
2004年	1	2	2	2
2005年	2	2	2	2
2006年	1	2	2	1
2007年	3	1	3	3
2008年	3	2	3	3
2009年	2	2	3	3
2010年	2	3	3	3
2011年	2	3	3	3
2012年	2	3	4	4
2013年	2	3	4	4
2014年	3	3	3	3
2015年	3	5	5	4
2016年	3	5	5	4
2017年	3	5	5	4
2018年	3	5	5	4
2019年	3	5	5	4

- 1 CTD: 水温・塩分
- 1 採水: 栄養塩・クロロフィルa
- 1 丸特Bネット鉛直曳網
- 2 親魚生物測定
- 3 LNP鉛直曳網
- 4 耳石日周輪解析
- 4 ノープリウス幼生調査
- 5 ボンゴネットによる仔魚調査

図1. 燧灘の海洋環境およびカタクチイワシ調査に関するメタデータ(瀬戸内水研と香川県)

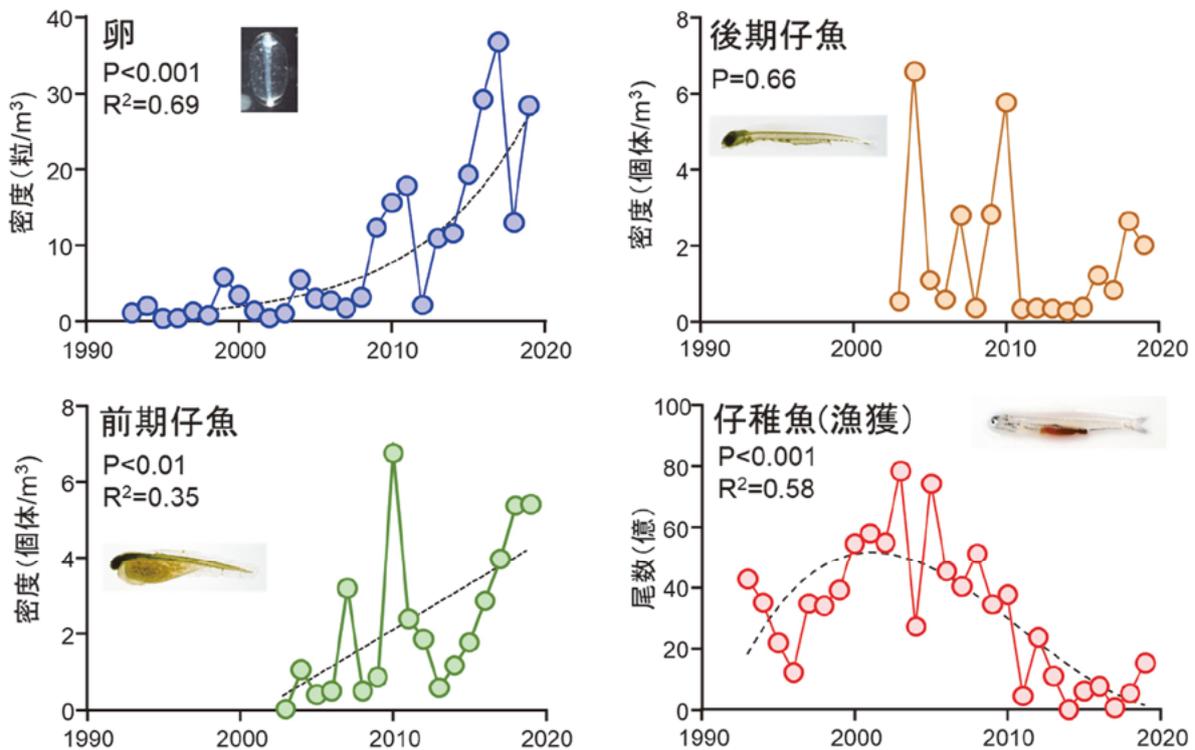


図2. 燧灘カタクチイワシ卵・仔魚密度および仔稚魚漁獲尾数の経年変化