Skeletonema			Chaetoceros		
300 µmol/m <sup>2</sup> /s		40 µmol/m <sup>2</sup> /s	300 µmol/m²/s	40 µmol/m <sup>2</sup> /s	
5	81	7	0	0	
10 尔 15 塑 20 25 30	96	14	1	0	
	100	15	1	5	
	95	17	16	9	
	89	12	59	14	
	69	10	100	14	

図3 各光量子東密度・塩分条件下における Skeletonema 属および Chaetoceros 属の発芽・増 殖ポテンシャルの相対値



図 4 2022 年の 5, 8 および 10 月における広島湾および備後灘の各定点における珪藻類組成 (表層における観察結果)



図5 各 DIN 濃度条件下における Skeletonema sp.および Cyclotella sp.の増殖速度

11	山田湾のよい順夜		及信の小温のよ	い塩川と水柱のバ	_907木食塭辰反	(主龙宗十均恒)
	広島	湾		備後灘		
	5月	8月	10月	5月	8月	10月

25.25

29.87

2.83

0.41

16.29

19.75

31.64

0.79

0.17

17.01

28.78

31.46

1.04

0.46

28.19

23.11

31.55

4.03

0.33

5.05

17.56

29.82

1.59

0.21

7.78

水温

塩分 DIN

DIP

DSi

28.31

24.07

4.20

0.37

30.25

表1 広島湾および備後灘における各月の表層の水温および塩分と水柱あたりの栄養塩濃度(全定点平均値)

課題番号: I-2)-ア

課題名:栄養塩等の水質環境が小型浮魚の餌料環境に及ぼす影響解明

水産研究・教育機構 水産資源研究所塩釜庁舎

田所和明,岡崎雄二

愛媛大学・沿岸環境科学研究センター

吉江直樹,郭新宇

### 【背景・目的】

近年,瀬戸内海では漁獲量がトレンド的に減少している。その原因の一つとして 1980 年代 以降の栄養塩濃度低下に伴う,生物生産の低下が考えられている。しかしながら,両者の間 の詳しい関係は明らかになっていない。動物プランクトンは直接的な水産資源の餌であるた め,水産資源との関係を検討することによって詳細な変動メカニズムを明らかにできると考 えられる。また瀬戸内海は海洋学的特性の異なる,幾つもの海域(灘湾)によって構成され ているため,海洋環境および低次生態系についてもそれぞれに特性を明らかにした上で,水 産資源との関係を検討する必要がある。

そこで、本課題ではプランクトン食性であり、また瀬戸内海の重要な水産資源となってい るカタクチイワシをはじめとした小型浮魚類と動物プランクトンの関係に着目して課題を進 める。そのために瀬戸内海全域において観測によって動物プランクトンおよび海洋環境の動 態を調べ、小型浮魚類との関係を検討する。さらに過去の資料および試料を掘り起こし解析 することで1980年代~2010年代末までの餌料プランクトン環境の変動について検討を行う。 このことによって動物プランクトンの生産速度、バイオマスおよび群集構造の中・長期的な 変遷を明らかにする。さらに、小型浮魚類の胃内容物調査などから小型浮魚の摂餌生態を調 べ、餌として重要な動物プランクトンを特定する。このことによって、小型浮魚類の変動の 鍵となる餌料環境の変動を明らかにすることができる。最終的に、得られた情報を統合し、 低次生産環境と小型浮魚生産量の因果関係をデータ解析や生態系モデル等により評価する。

# 【方法】

(1) 小型浮魚類の胃内容物と環境中のノープリウスの分析

2001 年と 2002 年の 5 月に燧灘で採集したカタクチイワシ仔魚の胃内容物組成を調べた。 胃内容物はカイアシ類の卵, ノープリウス, コペポダイトおよびその他に区分して計数した。 さらにそれらの体長も計測した。また 2018 年に燧灘で採集された試料を用いてカタクチイワ シ仔魚の餌として重要と考えられるノープリウスのサイズを分析した。

(2) 餌料プランクトンの分析

本事業において 2018 年の 4 月と 10 月,2019 年の 2 月,4 月,7 月そして 2020 年の 4 月 に瀬戸内海全域の 30 定点で一斉調査を行い,メソ動物プランクトおよび微小動物プランクト ン試料を採集した。メソ動物プランクトンは改良型ノルパックネット(口径 45cm,目合 0.1mm) を用いて,海底直上から表面までの鉛直曳網で採集した。また微小動物プランクトンはバン ドン採水器を用いて全ての観測点の 10m層,さらに 8 観測点で各層(0,5,10,20,30, Bottom) から採集した。採集したメソ動物プランクトは5%中性ホルマリン、微小動物プランクトン試料は4%のルゴール液で固定し、可能な限り低い分類段階で個体数の計数を行った。 (3) 過去の餌料プランクトンデータの調査と整理

現在(2010年代)と過去を比較するために、文献調査および水産研究・教育機構で過去に 採集されたデータを整理した。メソ動物プランクトンの現存量については、Uye et al. (1987, 1997)が1979~1980年および1993~1994年に季節毎に年4回の調査を行い報告していること から、論文中の図から数値を読み取りデータを電子化、整理した。2007~2011年については、 水産研究・教育機構瀬戸内庁舎が同様に季節毎に年4回の調査を行っており(樽谷,私信), そのデータを整理した。さらに微小動物プランクトンに関しては、Uye et al. (1996)が季節毎に 年4回の調査を行い報告していることから、図から数値を読み取りデータを整理した。 (4) 海洋生態系モデルおよびデータ解析

これまでは、比較的複雑な低次生態系構造を持つ0次元の低次生態系モデルを用いて、環 境変動に対する低次生態系応答について解析を行ってきた。本年度は、シンプルな低次生態 系構造ながら、黒潮流路変動など外洋からの擾乱の影響や、下水処理場管理運転などの栄養 塩管理に伴う貧酸素化などを評価できる高解像度の3次元海洋生態系モデルの開発を行った。 物理モデルは、並列海洋数値モデル sbPOM を用い、水平解像度1km、鉛直30層(シグマ座標 系)、初期条件はJCOPEの気候値を、大気の境界条件は気象庁のMSM-Sを、海洋の境界条件 はJCOPEとNAO(潮汐)を与え、2015年から2017年末までの3年間の時間積分を行った。 モデル領域は、黒潮擾乱の影響を考慮するために九州南岸沖から紀伊半島南岸沖の広い領域 を含んだものであり、低次生態系モデルは、シンプルなNPZDモデルではあるが、栄養塩を 2種類(DINとDIP)、溶存酸素を取り扱うことができる(図1)。

# 【結果】

#### (1) 小型浮魚類の胃内容物分析

2001 年と 2002 年の燧灘における調査では、カタクチイワシの胃内容物中に最も多く見ら れたのはカイアシ類のノープリウスで、続いてカイアシ類の卵、その他、コペポダイトであ った(図 2a)。富山湾における先行研究でもカイアシ類のノープリウスがカタクチイワシ仔魚 の主な餌であることが報告されていることから(Hirakawa et al. 1997)、ノープリウスは最も重 要な餌生物であると考えられた。さらに餌のサイズについては 0.2mm 以下の小型のものが中 心であった(図 2b)。これも先行研究(Hirakawa et al. 1997)の結果と同様である。胃内容物中の 餌料と環境中のノープリウスのサイズを比較すると、0.2mm 以下のサイズ範囲に該当するの はサイクロポイダとパラカラヌス属の幼生であることから(図 3)、これらが主要な餌となっ ていると考えられた。

(2) 微小動物プランクトン現存量の年代間の比較

瀬戸内海全域の平均値を用いて微小動物プランクトンの現存量と組成を 1993~1994 年 (1990年代), 2007~2008年(2000年代), 2018~2019年(2010年代)で比較した(図4)。カイア シ類のノープリウスは生物量(mg C m<sup>3</sup>), 個体数(cells m<sup>3</sup>)共に年代間で大きな変化は見ら れなかったが, 無殻繊毛虫ではいずれも 2000年代以降に増加していた。さらに 2000年代以 降で比較すると, 2000年代から 2010年代に個体数は大きく増加してのに対し, 生物量は少 しの増加にとどまった。サイズの小さな個体は大きな個体に比べ1個体あたり生物量が小さいことから、1990年代から現在までの間に小型無殻繊毛虫の個体数がトレンド的に増加したと考えられた。一方で有鐘繊毛虫の生物量は2000年代以降に大きく減少していたが、個体数には顕著な減少トレンドは見られなかったことから、こちらも小型が進んだと考えられた。

さらにサイズを計測した 2007~2008 年と 2018~2019 年でサイズ組成を比較すると, 2018 ~2019 年に 25µm 以下の小型の割合が増加していることが明らかとなった(図 5)。一方で生 物量は個体数の増加ほど割合が増えていないことから,近年微小動物プランクトンの小型化 が進んでいることが裏付けられた。このような微小動物プランクトンのサイズ組成の変化は, 海洋環境変動や餌である植物プランクトンの群集構造の変化に関係している可能性がある。

(3) メソ動物プランクトンの群集構造および現存量の年代間の比較

主要な5つの属(*Calanus*, *Acartia*, *Paracalanus*, *Oithona*, *Microsetella*)のカイアシ類の現存量(mg C m<sup>-3</sup>)を用いて, 1980年代~2010年代までの各年代における各観測点の群集をクラスター解析によって4つのグループに区分した(図 6)。

各クラスターの季節遷移を見ると、1980年代から1990年代までは明瞭なパターンは見られなかったが、2000年代では秋、2010年代では夏から秋にクラスター1の出現頻度が低下した。クラスター1を特徴づけるのは Calanus であるため(図 6)、この結果から 2000年代以降に Calanus の出現時期が夏以降に短くなっていると考えられた。水域間の比較を行うために 灘湾毎に平均値を求め比較した結果でも、2000年代では秋以降、2010年代では夏以降に Calanus はほとんど出現しなくなっていた(図 7)。近年(2017年~2020年)に播磨灘で調査を 行った結果でも Calanus は夏以降に出現しないことが示されている(Nishikawa et al. 2023)。さらに燧灘での研究(Yoneda et al. 2022)でも近年の Calanus の減少が示されている。この Calanus の出現パターンの変化は、1980年代から現在までの栄養塩濃度の減少に対応していることから、栄養塩環境の変化が一次生産に影響を与えることでそれらを餌料とする Calanus へ影響 した可能性が考えられた。またこの 40年間に瀬戸内海の水温に上昇トレンドも見られる。 Calanus は水温 25℃を超えると生息できないことが報告されていることから(Uye 2000)、水温 上昇に伴って季節変動パターンが変化した可能性もある。本種はカタクチイワシやイカナゴ などの重要な餌生物であるため、その季節遷移パターンの変動や減少は水産資源へも影響を 与えている可能性がある。

(4) 瀬戸内海の生態系における炭素フローの年代間の比較

これまでに本事業で得られたデータを用いて現在(2010年代)の瀬戸内海における生態系のエネルギーフローを算出し、1990年代(Uye & Shimizu 1997)と比較した(図8)。なお、本事業では一次生産速度は測定してないためその比較は行っていない。二次生産を比較すると、カイアシ類などの植食性メソ動物プランクトン(HMZ)の生産量は年代間で大きな差異はなかったものの、微小動物プランクトン(MZ)の生産量が倍増していた。そのため一次生産への微小動物プランクトンの要求量は167gCm<sup>2</sup>year<sup>-1</sup>と1990年代に比べ倍増した。次に三次生産をみると2010年代に肉食性動物プランクトン(CNZ)の生産が大きく減少していた。さらに浮魚類(PF)の生産量も2010年代には大きく減少していたことが示された。これからのことから、動物プランクトンの生産量(二次生産量)は2010年代には減っておらずむしろ微小動物プラ

ンクトンでは増加している一方で、三次生産量は大きく減少していることが示された。すな わち二次生産から三次生産への転換効率が低下していると考えられた。その原因として、微 小動物プランクトンでは小型のものが増加し、カイアシ類では Calanus の出現時期が短くな っていることなどから、生態系構造の変化が影響した可能性が考えられた。また 1990 年代前 期はマイワシ資源量が高かった時期でもあったため、それらが瀬戸内海の外から来遊し、見 かけ上の三次生産量が増大していた可能性もある。系外からの来遊をどのように評価するの かは今後の課題である。

#### (5) 海洋生態系モデルおよびデータ解析

モデルにより計算された外洋域における表層海流と海面水温を衛星等による観測結果と 比較したところ、観測結果を現実に近い形で再現していた。瀬戸内海内部については、全域 における表層水温と表層塩分の計算結果は、季節変化を含めて時空間変化を適切に再現して いた(図 9, 図 10)。また、水温と塩分の鉛直構造についても、季節変化を含めて観測された時 空間変化を適切に再現していた(図 11, 図 12)。これらから、現実的な物理的流動場の再現に 概ね成功した。一方、低次生態系については観測値との比較はできていないが、栄養塩濃度 が過大評価である可能性が高く、それに伴い他の各要素の濃度も過大評価の可能性が高い。 これは、外洋側の栄養塩の境界条件の与え方に問題がある可能性が高く、今後は、それらの 境界条件の修正や生理パラメータの調整を行う必要性ある(図 13)。

(6)5年間のまとめ

動物プランクトンは基礎生産と水産資源を繋ぐ生態系の要ではあるものの分類などに専 門的な知識と技術を要するため、群集構造の踏み込んだ長期変動解析は世界的にも少ない。 今回、本事業では瀬戸内海で一斉調査およびその分析でき、さらにこれまでの研究者による 研究とデータの蓄積によって,瀬戸内海全域における1980年代から現在までの各年代のデー タを揃えることができた。そしてそれらを比較することで近年群集構造や季節遷移のパター ンが長期的に変動していることが示唆された。これらの成果は今後、水産資源の変動を理解 する上で基礎的な知見として活用されることが期待される。一方で、今回の年代間の比較で は大阪湾で検出されているようなトレンド(藤原他 2022)を見いだすことが出来なかった。 灘湾毎に詳細な経年変動のパターンを明らかにしていくためには,より高い時間解像度のデ ータを取得していく必要がある。幸い2012年以降、瀬戸内海の沿岸定線で採集された動物プ ランクトン試料は、体系的に収集されており、それらを使った解析が今後の課題となる。ま た生態系モデルを使った解析では、比較的複雑な低次生態系構造を持つ0次元の生態系モデ ルでは比較的良く次生態変動を再現することが出来た。一方で、黒潮流路変動など外洋から の擾乱の影響や、下水処理場管理運転などの栄養塩管理に伴う貧酸素化などを評価するため の高解像度の3次元海洋生態系モデルについては、現時点では栄養塩濃度などの各要素を過 大評価している可能性が高く、今後さらに開発を進める必要がある。

<u>文献</u>

- 藤原建紀,鈴木健太郎,木村奈保子,鈴木元治,中嶋昌紀,田所和明,阿保勝之.栄養塩類変 動が内湾の生態系・生物生産に及ぼす影響:大阪湾.水産環境学会誌,45,3,145-158, 2022.
- Hirakawa K, Goto T, Hirai M. Diet composition and prey size of larval anchovy, *Engraulis japonicus*, in Toyama bay, southern Japan sea, Bull. Japan Sea Natl. Fish. Res. Inst., 47, 67-78, 1997.
- Nishikawa T, Watanabe T, Shiotani T, Izumi S, Furusawa K, Tadokoro K. Seasonal copepod dynamics and biomass in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan, Fish. Sci., https://doi.org/10.1007/s12562-022-01659-1, 2023.
- Uye S. Why does *Calanus sinicus* prosper in the shelf ecosystem of the Northwest Pacific Ocean? ICES J. Mar. Sci. 57, 1850–1855, 2000.
- Uye S, Kuwata H, Endo T. Standing stocks and production rates of phytoplankton and planktonic copepods in the Inland Sea of Japan. J. Oceanogr. Soc. Japan, 42, 421–434, 1987.
- Uye S, Nagano H, Tamaki H. Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan, J. Oceanogr., 52, 689–703, 1996.
- Uye S, Shimizu T. Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of meso-and macrozooplankton in the Inland Sea of Japan, J. Oceanogr., 53, 529–538, 1997.
- Yoneda M, Fujita T, Yamamoto M, Tadokoro K, Okazaki Y, Nakamura M, Takahashi M, Kono N, Matsubara T, Abo K, Xinyu G, Yoshie N. Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan, Prog. Oceanogr. 206, https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102860, 2022.



130°E 131°E 132°E 133°E 134°E 135°E 136°E

5500 5000

4500

4000

3500

3000

2500

2000

1500

500

図1 3次元海洋生態系モデルの生態系構造の概略とモデルの領域



 図 2 2001 年と 2002 年の燧灘におけるカタクチイワシ仔魚の胃内容物組成(2)と仔魚の体長 (SL: standard length)に対する餌のサイズ分布



図3 カタクチイワシ仔魚の胃内容物のサイズと環境中のノープリスのサイズの比較



図 4 1990 年代, 2000 年代, 2010 年代の微小動物プランクトンの生物量と個体数の比較



図 5 2000年代,2010年代の微小動物プランクトンのサイズ別の生物量と個体数の比較



図6 年代別の各クラスターの分布とそれらの平均組成



図7 各年代の灘湾毎の平均カイアシ類組成



年平均クロロフィル量:3.3mg/m3

平均水温:17.8℃ 年平均クロロフィル量:3.5mg/m<sup>3</sup>

図8 1990年代と2010年代の炭素フローの比較。BA:バクテリア,HNF:従属栄養繊毛虫, MZ:微小動物プランクトン,HMZ:植食性メソ動物プランクトン,CNZ:肉食性動物プ ランクトン,PF:浮魚類(マイワシ,カタクチイワシ,イカナゴ,しらすの漁獲量から 推定)



図 9 瀬戸内海全域の表層水温の時空間分布(左上:冬季観測,右上:夏季観測, 左下:冬季モデル,右下:夏季モデル)



図 10 瀬戸内海全域の表層塩分時空間分布(左上:冬季観測,右上:夏季観測, 左下:冬季モデル,右下:夏季モデル)



図11 瀬戸内海全域の水温断面(図中の左側が豊後水道で右側が紀伊水道, 左上:冬季観測,右上:夏季観測,左下:冬季モデル,右下:夏季モデル)



図 12 瀬戸内海全域の塩分断面(図中の左側が豊後水道で右側が紀伊水道, 左上:冬季観測,右上:夏季観測,左下:冬季モデル,右下:夏季モデル)