

平成30年度～令和4年度
水産庁 漁場環境改善推進事業のうち
栄養塩、赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発
「栄養塩の水産資源に及ぼす影響の調査」

事業成果ダイジェスト

国立研究開発法人 水産研究・教育機構
国立大学法人 香川大学
国立大学法人 愛媛大学
兵庫県立農林水産技術総合センター
和歌山県水産試験場
香川県水産試験場
一般社団法人 全国水産技術協会

水産庁委託「漁場環境改善推進事業のうち栄養塩、赤潮・貧酸素水塊に対する被害軽減技術等の開発」が平成30年度～令和4年度に実施されました。このうち、「栄養塩の水産資源に及ぼす影響の調査」について事業成果の概要を紹介することを目的として本冊子を作成しました。

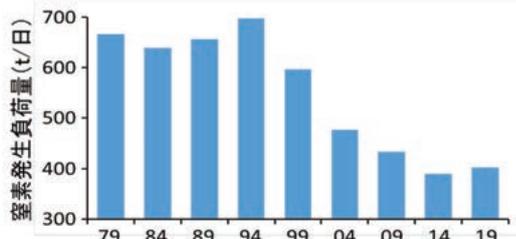
もくじ

はじめに：事業の目的、背景および主要成果	1
1) 栄養塩等の水質環境が沿岸海域の漁業生産に及ぼす影響の解明	
ア. 栄養塩等の水質環境が二枚貝等の餌となる底生性の微細藻類に及ぼす影響の解明	2
イ. 栄養塩等の水質環境が二枚貝の生産力に及ぼす影響の解明	
① 播磨灘北西部における陸域からの栄養塩供給が二枚貝養殖漁場の生産力に及ぼす影響の解明	4
② 紀伊水道の栄養塩環境が二枚貝生産に及ぼす影響解明	6
③ 瀬戸内海の栄養塩環境が二枚貝生産に及ぼす影響の評価	8
ウ. 栄養塩等の水質環境が藻場の生物生産力等に及ぼす影響の解明	10
エ. 栄養塩等の水質環境が植物プランクトン等の低次生産に及ぼす影響の解明	12
2) 栄養塩等の水質環境が小型魚類の生産量に及ぼす影響の解明	
ア. 栄養塩等の水質環境が小型魚類の餌料環境に及ぼす影響解明	14
イ. 水質環境及び餌料環境と小型魚類生産量との因果関係の評価	16
3) 栄養塩管理方策の検討	18

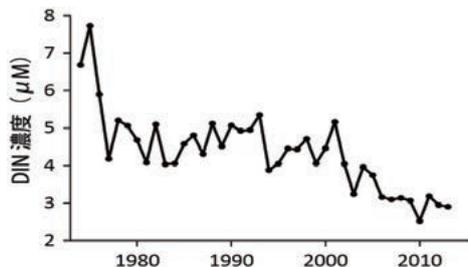
はじめに：事業の目的、背景および主要成果

近年、内湾を中心として二枚貝や小型魚類等の水産資源の減少やノリ等の色落ちなど生産力の減少が顕著となっており、栄養塩の減少や偏在による生態系への影響が懸念されています。特に、瀬戸内海では貧栄養化による漁業生産の低迷が懸念されており、栄養塩濃度と漁業生産の因果関係についての科学的な検証が求められていました。本事業では、瀬戸内海を主要なフィールドとして調査・研究を実施することにより、栄養塩が一次生産を通じてより高次の水産資源に与える影響を調査し、適切な栄養塩管理方針の検討に資することを目的としました。

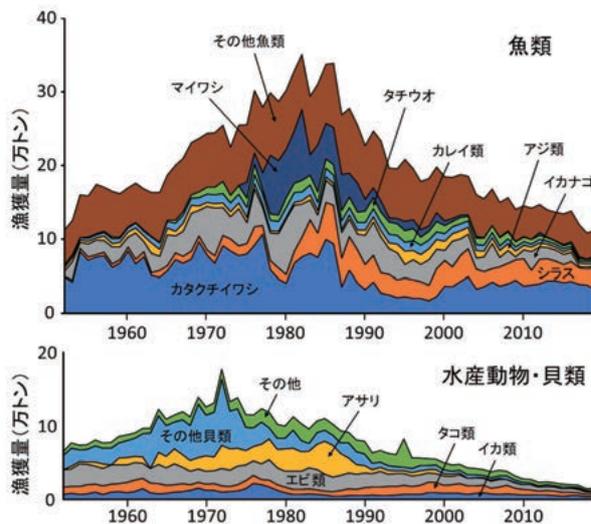
瀬戸内海の貧栄養化と水産資源の減少



瀬戸内海の発生負荷量（2019年は目標値）（環境省資料より）

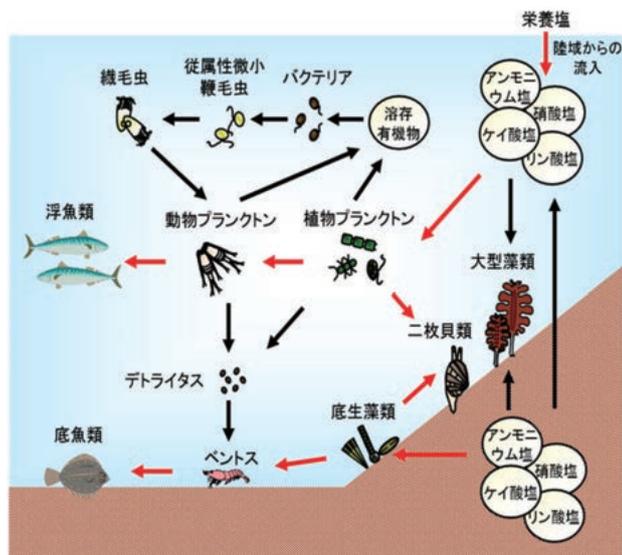


瀬戸内海表層の年平均栄養塩濃度（水環境学会誌, 39, 97-101）



瀬戸内海の漁業生産量。中国四国農政局統計情報部瀬別漁獲統計、農林水産省漁業・養殖生産量統計年報大海区都道府県振興局別統計をもとに作成。

本事業では栄養塩不足による餌料環境の変化や生態系の質的変化を解明しました



水産生物のほとんどは栄養塩を直接利用するのではなく、種によって栄養塩との関係が異なり、生態系の構造は複雑である。

栄養塩と水産資源の関係解明には、栄養塩と餌生物との関係や生態系の質的変化（種・サイズ組成の変化など）の解明が重要

主要成果

底生微細藻：栄養塩濃度の高い河口干潟では現存量に大きな変化はない。潮間帯では、栄養塩濃度により現存量や再懸濁量が制御されていることが示唆された。

植物プランクトン：プランクトン群集のサイズ組成が変化し、マイクロプランクトンの割合が減少。沿岸域の栄養塩濃度が低下し *Skeletonema* 属の優占度が低下。

二枚貝：陸域負荷に伴う一次生産が二枚貝生産に重要。浮遊幼生の餌となるプランクトンが数千 cells mL⁻¹規模で発生することが適正な生産環境に必要。

藻場：栄養塩濃度と藻場景観との関係性は低いが、藻体の質（葉幅、地下茎の太さ、窒素含有量）に影響。藻体の窒素含有量は餌料生物である端脚類の成長や再生産に影響があり、高次捕食者への影響が示唆された。

動物プランクトン：小型魚類の重要な餌生物である *Calanus* が減少した。数値実験から、水温上昇と栄養塩減少により大型珪藻が減少し、魚類餌料のカイアシ類が減少することが示唆された。

小型魚類：春～初夏における餌のカイアシ類の減少により、カタクチイワシの雌親魚は痩せて、小さな卵を産んでいる。それらの仔魚は飢餓耐性が低く、成長も遅いため、初期減耗が大きくなり加入低迷を招いている。

1)-ア 栄養塩等の水質環境が二枚貝等の餌となる底生性の微細藻類に及ぼす影響の解明

担当機関：水産研究・教育機構 水産技術研究所、香川大学

近年、我が国沿岸域では、アサリを始めとする二枚貝の生産量が減少しています。その要因の一つとして、栄養塩濃度の低下に伴う餌生物の減少が指摘されています。二枚貝の餌としては、植物プランクトンに加え、潮間帯・潮下帯に生息する底生性の微細藻類が重要であると考えられています。植物プランクトンについては、栄養塩濃度の低下に伴い、浅海域において減少している可能性が指摘されています。一方、底生性の微細藻類については、調査・研究例が少なく、出現種や現存量に関する基礎的な情報すら不足しており、栄養塩等の環境変化に対する応答は不明でした。

本研究では、香川大学が保有する約20年間にわたる観測データを用いて、潮間帯における底生性の微細藻類量の長期変動を解析しました。また、現場観測により、潮間帯・潮下帯における底生性の微細藻類の出現種等を調べました。さらに、観測データの解析や優占種の培養株を用いた室内試験により、栄養塩等の水質環境が底生性の微細藻類の動態に及ぼす影響を調べました。

長期変動

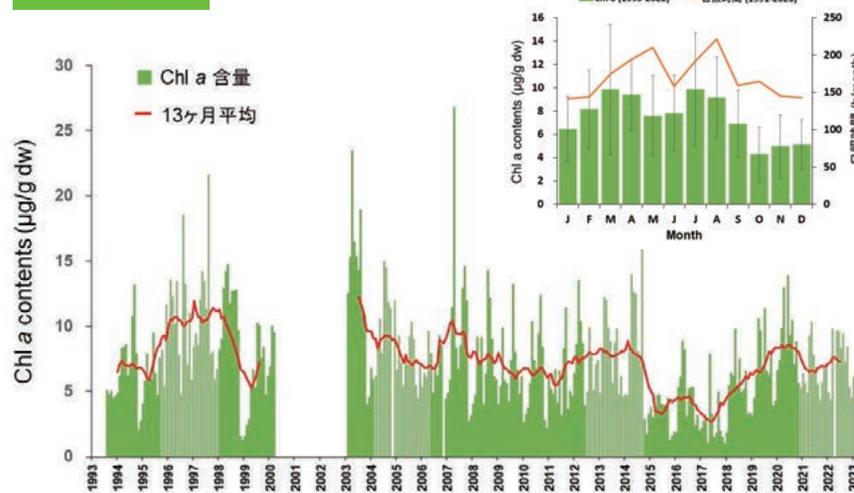


図1. 新川河口干潟における表層堆積物Chl a含量の経年変動

図2. Chl a含量と日照時間の年間変動

底生性微細藻類の現存量変動と環境因子の関連を解析するため、1990年代から取得している観測データを用いて両者の解析を行いました。2015年～2017年に明瞭な減少傾向が認められるものの、調査干潟において表層堆積物中のChl a含量は1990年代から大きく変わっていないことが確認されました。またChl a含量の年間変動を制御する主要な環境因子は温度と光量であることが示唆されました。

出現種

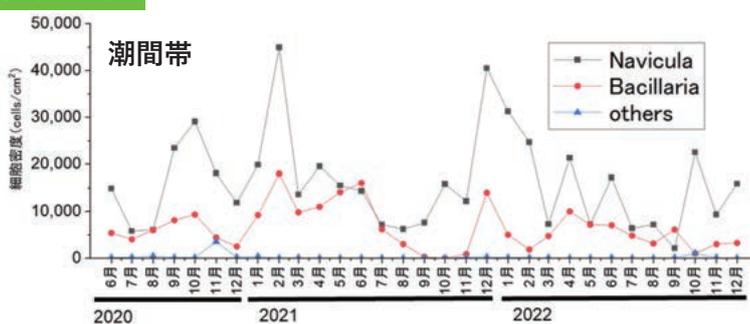


図3. 広島県廿日市市の干潟における底生性微細藻類の出現動態

二枚貝は懸濁物食者であるため、干潟堆積物を人為的に再懸濁させ、そこに含まれる底生微細藻類の生物組成を調べました。その結果、*Navicula*科が周年を通して優占しており、*Nitzschia*属を主な構成とする*Bacillaria*科がそれに続くことが確認されました(図3)。

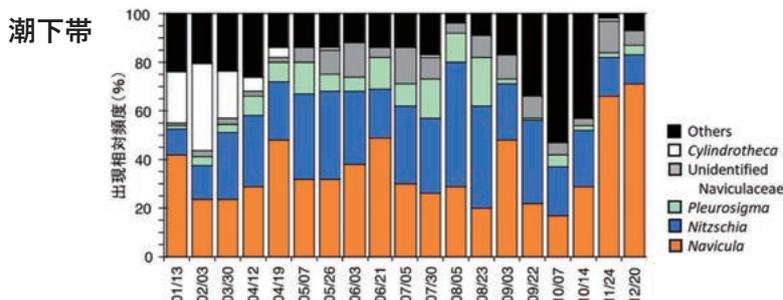


図4. 香川県志度湾海底(水深6m)における微細藻類種組成の季節変動

走光性により、海底上の微細藻類の生細胞のみをレンズティッシュ上に捕集し、その種組成を解析しました。その結果、潮下帯の海底面に出現する微細藻類種として、*Nitzschia*属と*Navicula*属が通年の優占種であることが確認されました(図4)。

栄養塩と増殖（潮間帯）

表1. 調査干潟で優占する底生珪藻の半飽和定数

試験種	温度(°C)	半飽和定数 K_{μ} (μM)	
		N	P
<i>Nitzschia longissima</i>	20	0.77	0.10
<i>N. traheaformis</i>	20	0.33	0.19
<i>N. flustulum</i>	20	0.32	0.01
	30	0.20	0.04
<i>Cylindrotheca</i> sp.	20	2.25	0.14
	30	1.62	0.16
<i>N. dubliformis</i>	20	0.56	0.06
平均値		0.86	0.10

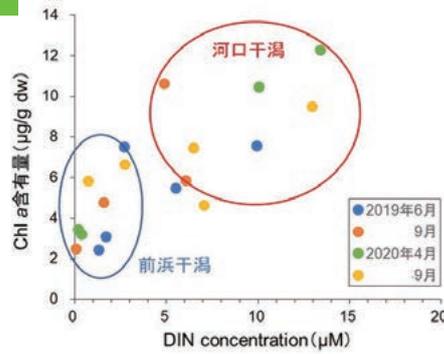


図5. 7カ所の潮間帯における Chl a 含量と DIN 濃度

底生性微細藻類の栄養塩濃度に対する増殖応答を明らかにするため、半飽和定数 (K_{μ}) を調べた結果、底生珪藻は植物プランクトンと同等の低い K_{μ} を有することが確認されました。また現場観測から、栄養塩濃度により底生微細藻類の現存量が制御されている可能性が示唆されました (図5)。

栄養塩と増殖（潮下帯）

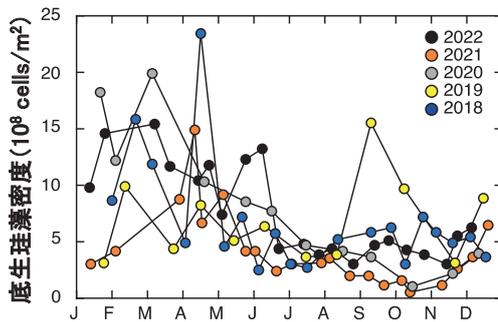


図6. 表層堆積物中の底生珪藻（羽状目）生息密度の5ヶ年における変動

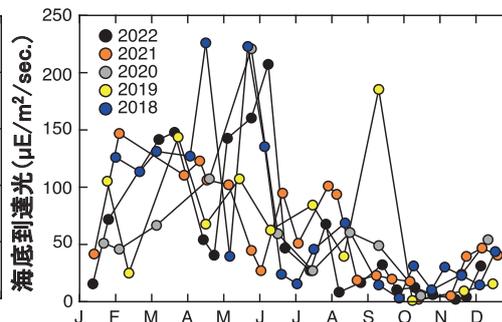


図7. 海底到達光の5ヶ年における変動

表層泥中の底生珪藻（羽状目珪藻）の生息密度を5ヶ年にわたり調べたところ、晩冬から春にかけて高い一般傾向が確認されました (図6)。この時期の間隙水栄養塩濃度は低い一方、海底到達光は高かったことから (図7)、潮下帯底生微細藻類の生息量変動には、栄養塩より光環境がより強く影響していることが示唆されました。

栄養塩と付着力

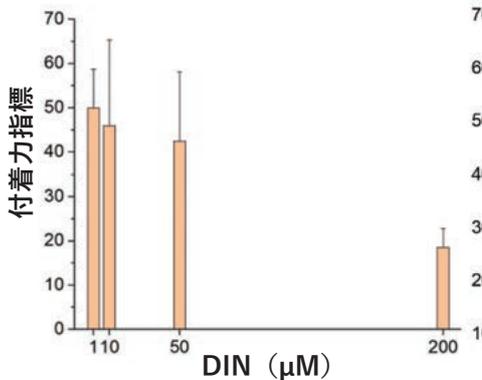


図8. 各DIN濃度における *Navicula* 属の付着力指標

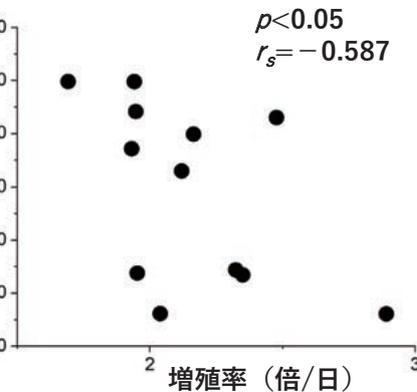


図9. *Navicula* 属の増殖率と付着力指標との関係

室内試験の結果、DIN濃度が低下すると底生微細藻類の付着力が高くなることが確認されました (図8)。また、増殖率と付着力との間には負の相関が確認されました (図9)。DIN濃度の低下により、底生微細藻類の活性が低下すると付着力が高まり、水中に再懸濁されにくくなることが示唆されました。

5年間で得られた主要な成果

【潮間帯に生息する底生微細藻類現存量の長期変動】

- 常に高い栄養塩濃度が観測される河口干潟では、底生微細藻類の現存量は大きく変化していないことが明らかになりました。また年間変動は、温度と光量に制御されることが示唆されました。

【潮間帯・潮下帯における底生微細藻類の組成】

- 潮間帯、潮下帯のいずれにおいても *Navicula* 属や *Nitzschia* 属が優占することが明らかになりました。

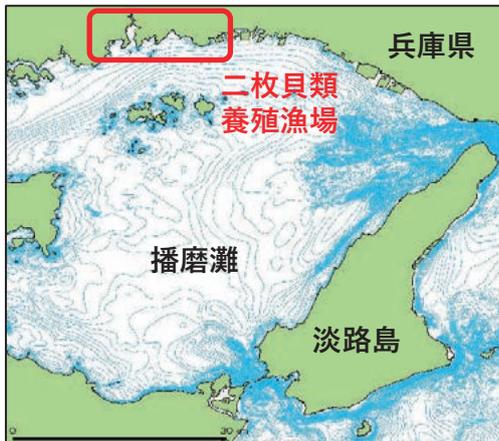
【栄養塩濃度に対する底生微細藻類の応答】

- 植物プランクトンに類似した低い半飽和定数を有していることが明らかになりました。一方で、潮間帯では、栄養塩濃度により現存量や再懸濁量が制御されている可能性が示唆されました。
- 潮下帯の底生微細藻類の生息量変動には、栄養塩より光環境がより強く影響していることが示唆されました。

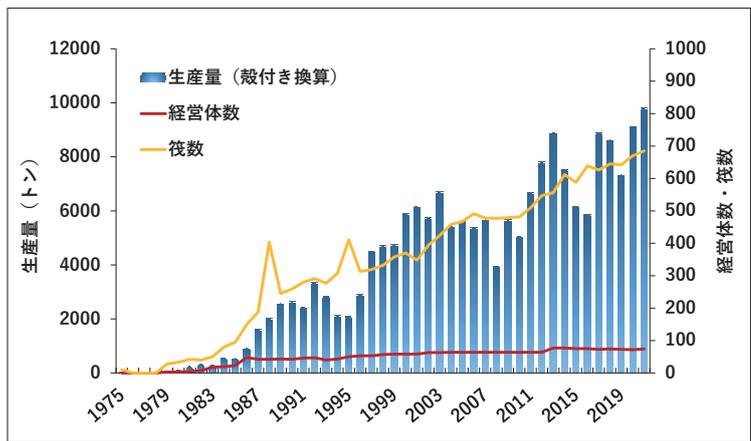
1)-イ-① 播磨灘北西部における陸域からの栄養塩供給が二枚貝養殖漁場の生産力に及ぼす影響の解明

担当機関：兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター

- 兵庫県の播磨灘北西部沿岸では、マガキやアサリ等の二枚貝類養殖が盛んに行われ、生産量は安定している。
- 貧栄養化が課題となっている播磨灘で、偏在的に生産性の高い二枚貝類養殖漁場の環境特性を解明し、栄養塩等の水質環境が漁場の生産力に与える影響を明らかにする。
- 得られた知見は播磨灘の水質管理の検討資料として活用する。

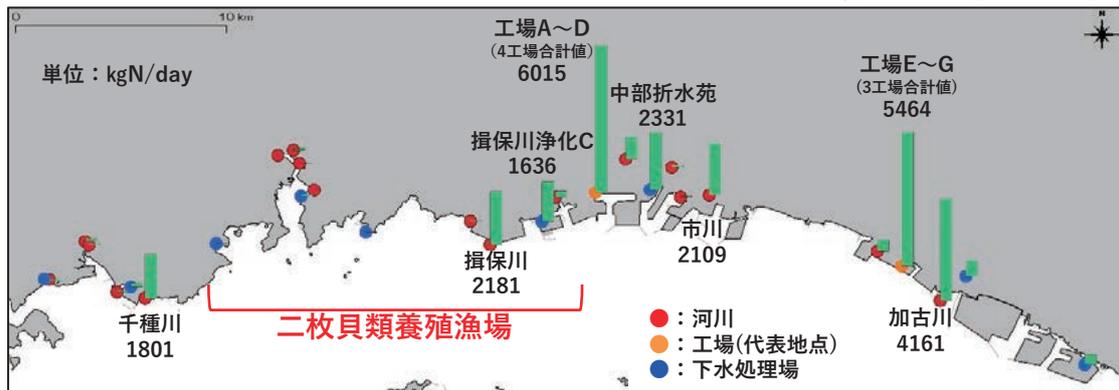


播磨灘広域図

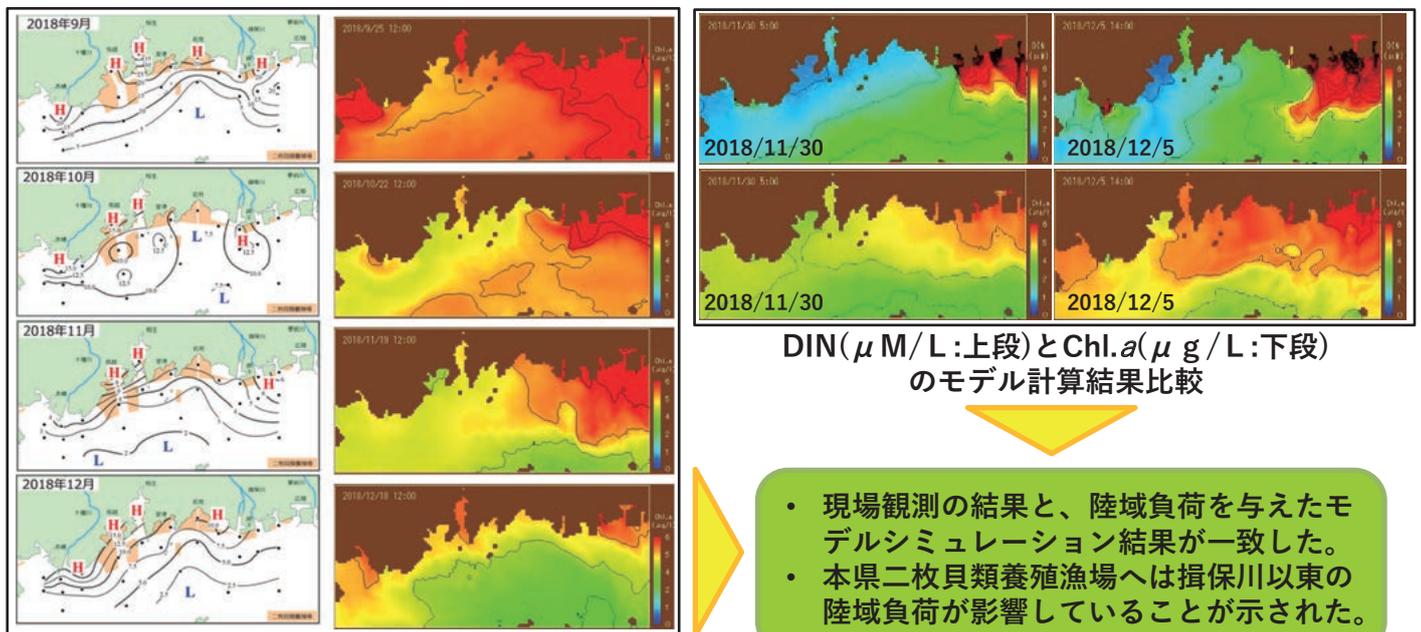


兵庫県のマガキ生産量、経営体数及び筏数の推移

(出典：農林水産統計、兵庫県統計資料)



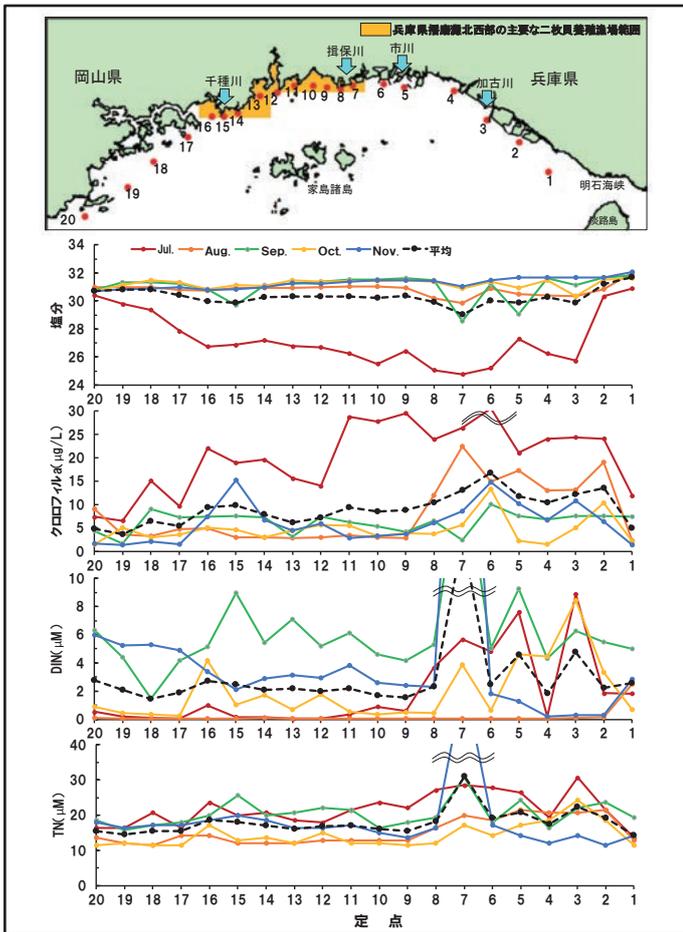
兵庫県播磨灘北部海域における二枚貝類養殖漁場と主な陸域負荷源(TN)の位置図



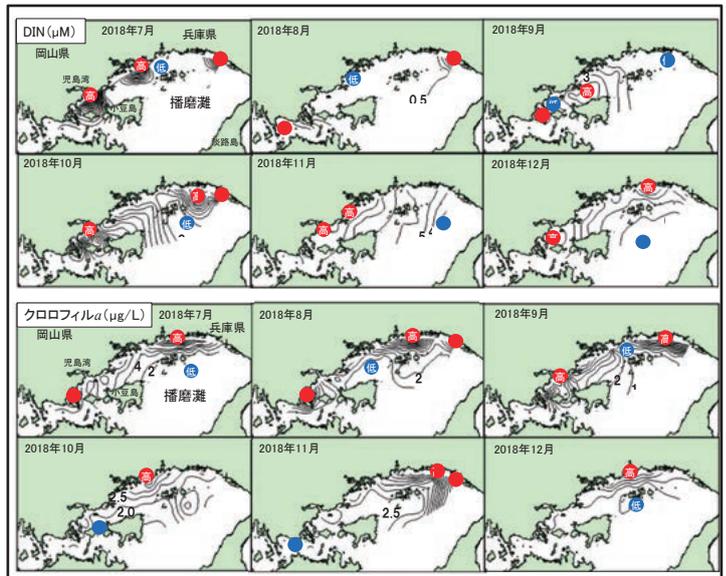
DIN($\mu\text{M/L}$:上段)とChl.a($\mu\text{g/L}$:下段)のモデル計算結果比較

- 現場観測の結果と、陸域負荷を与えたモデルシミュレーション結果が一致した。
- 本県二枚貝類養殖漁場へは揖保川以東の陸域負荷が影響していることが示された。

Chl.a ($\mu\text{g/L}$) の観測結果(左)とモデル計算結果(右)

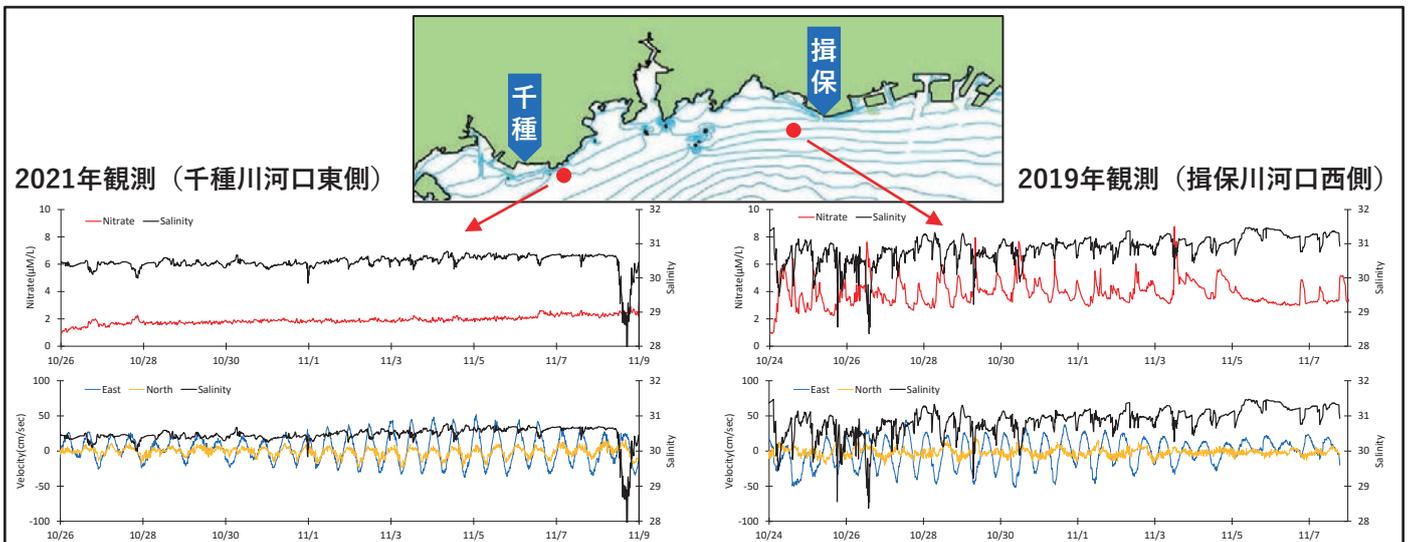


播磨灘北部沿岸地先の水質観測結果(2020年)



播磨灘北部広域観測結果(2018年の例)

- 河口周辺域でDIN、TN、クロロフィルa濃度が高くなる傾向が見られた。
- 隣接する岡山県海域から本県二枚貝養殖漁場への直接的な影響を示す連続的な水質の分布は明確ではなかった。
- 本県二枚貝類養殖漁場は県内の陸域負荷源からの栄養塩供給、及びそれに伴う一次生産によって支えられている事が示唆された。



流向流速(cm/sec、東西:青、南北:黄)、塩分(黒)及び硝酸態窒素濃度(μM/L、赤)の連続観測結果

- 揖保川河口西側では西流時に河川水の影響(低塩分、高栄養塩)が強く見られたが、千種川河口東側では東流時に河川水の影響はわずかに観測されたのみであった。
- 千種川以西の陸水よりも揖保川以东の陸水の方が、栄養塩供給としての影響が大きいと示唆された。

【5年間で得られた主要な成果】

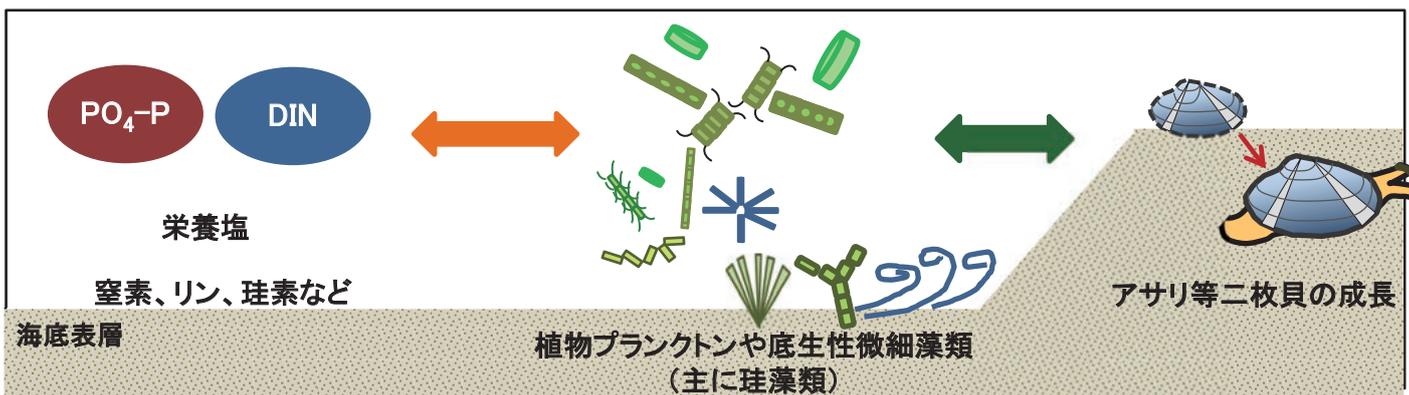
現場観測と数値シミュレーションにより、兵庫県播磨灘北西部の二枚貝類養殖漁場は、揖保川以东の播磨灘北部沿岸の陸域負荷源からの栄養塩供給と、それに伴う一次生産により支えられている事が示された。今後、兵庫県海域の栄養塩管理を進めるにあたっては、陸域負荷を中心に沿岸部の養殖漁場への波及効果を考慮する必要があると考えられた。

1)-イ-② 紀伊水道の栄養塩環境が二枚貝生産に及ぼす影響解明

担当機関：和歌山県水産試験場

近年、瀬戸内海のアサリやハマグリ生産量は減少していますが、和歌山県の干潟域でも同様に減少しています。アサリ等の二枚貝の生産性低下の原因のひとつとして、海域の栄養塩の低下による餌不足や冬季水温の上昇などの環境変化が関係していると考えられますが、実海域において調査・研究した事例は少なく詳細は明らかになっていません。

そこで、本課題では、海域の栄養塩や餌料環境調査に加え、アサリ等二枚貝を用いた飼育試験を実施し、海域の餌料環境が二枚貝の生産性に及ぼす影響について検討しました。



海水中の微細藻類密度とアサリの成長との関係

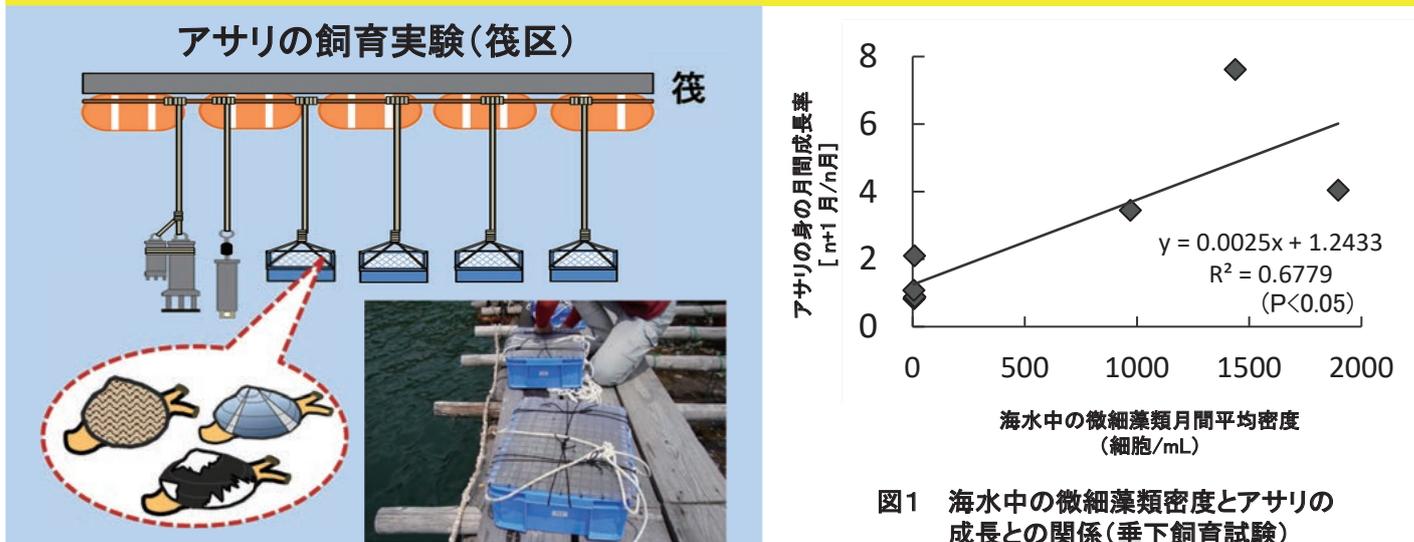


図1 海水中の微細藻類密度とアサリの成長との関係(垂下飼育試験)

垂下飼育試験の結果、アサリの成長には、海水中の微細藻類の密度が重要であることが確認された。また、好適な成長のためには、**1,000 cells/mL以上**の微細藻類が必要であることが示唆された(図1)。

5年間で得られた主要な成果

- 垂下式のアサリ飼育試験の結果、アサリの成長には、海水中の微細藻類の密度が重要であることが確認された。
- 干潟域でのアサリ飼育試験の結果、アサリの成長には、干潟堆積物中の微細藻類が重要であることが確認された。
- 干潟に設置された被覆網下のカゴで飼育されたアサリの炭素・窒素安定同位体分析の結果から、アサリは、主に底生微細藻類を餌としていたことが考えられた。
- 干潟に被覆網やカゴを設置することで、アサリの餌(微細藻類)を増やす効果が確認された。
- 栄養塩濃度が低下し、微細藻類の生産が低迷した環境下でも、被覆網やカゴの設置がアサリ等の二枚貝の餌料環境を改善する手法として有効であることが示された。

干潟域における微細藻類密度とアサリの成長との関係

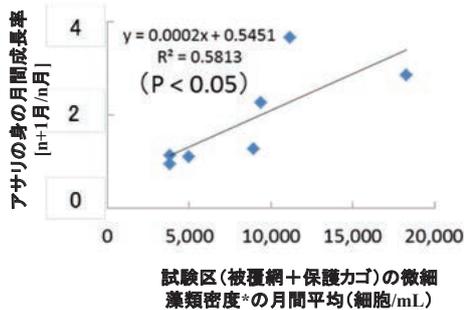
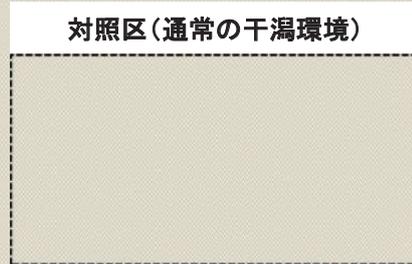
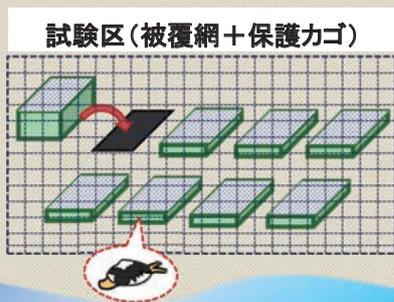


図2 試験区(被覆網+保護カゴ)における微細藻類密度*とアサリの成長との関係

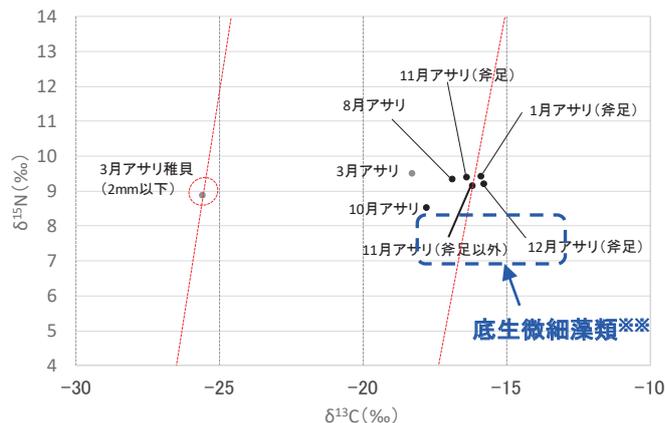


図3 アサリの炭素・窒素安定同位体比分析結果

干潟域での飼育試験の結果、アサリの成長には、干潟堆積物中の微細藻類の密度が重要であることが確認された。また、**好適な成長のためには、10,000 cells/mL以上の密度***が必要であることが示唆された(図2)。

*表層5mmの干潟堆積物1.5gを15mLの滅菌海水に懸濁・静置後に得た上清における細胞密度

被覆網下のカゴで飼育されたアサリの炭素・窒素安定同位体比は、 $\delta^{13}\text{C}$ が $-18.3 \sim -15.8\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が $8.54 \sim 9.51\text{‰}$ であった。これに対し、殻長2mm未満のアサリ稚貝は $\delta^{13}\text{C}$ が -25.6‰ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が 8.88‰ であり、異なる餌を利用している可能性が示唆された。安定同位体分析の結果から、アサリは、主に底生微細藻類を餌としていたことが考えられた(図3)。

**「河口汽水域を利用する魚類の食物源」安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態(伊藤・掛川 2008)」より読み取り

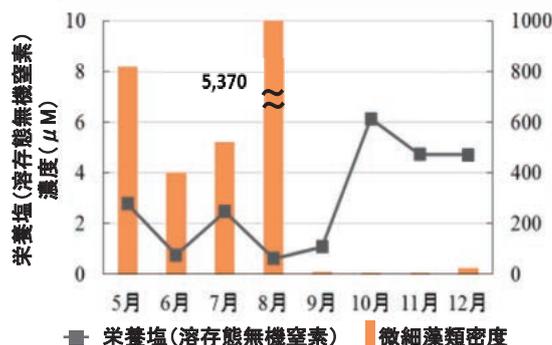


図4 海水中の栄養塩(溶解態無機窒素)濃度と微細藻類密度

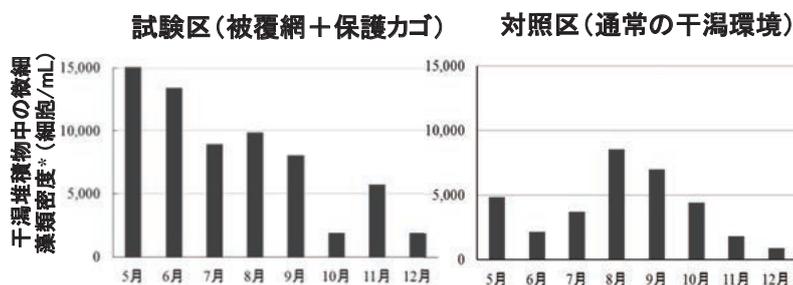


図5 試験区(被覆網+保護カゴ)の微細藻類密度*の変化

図6 対照区(通常の干潟環境)の微細藻類密度*の変化

海水中の植物プランクトンがアサリの成長に十分な密度(1,000 cells/mL)となることはまれであった(図4)。一方、干潟の微細藻類密度は、被覆網や保護カゴを設置をすることで二枚貝の成長に十分な密度(10,000 cells/mL)に増加することがしばしば見られた(図5、6)。

被覆網は主に被害防止の目的で設置されるが、本課題により餌を増やす効果が確認された。

栄養塩濃度が低下し、微細藻類の生産が低迷した環境下でも、被覆網やカゴの設置が二枚貝の餌料環境を改善する手法として有効であることが示された。

1)-イ-③ 瀬戸内海の栄養塩環境が二枚貝生産に及ぼす影響の評価

担当機関：水産研究・教育機構 水産技術研究所

近年、全国的にアサリやハマグリ生産量が減少しており、また広島湾などで養殖が盛んなカキについても採苗不調等の問題が生じています。これらの原因として、人為開発による生息環境の破壊、食害、そして栄養塩等の水質環境の変化などが考えられています。

栄養塩環境が二枚貝生産に及ぼす影響を評価するため、まず瀬戸内海沿岸域における水質や二枚貝生産量のデータを総合的に解析しました。その結果、r戦略者である二枚貝類は浮遊幼生期を経る大量加入が安定した資源形成の条件であり、浮遊幼生の生残に影響する餌料環境の調査・研究が重要と考えられました。

浮遊幼生の餌は数μmと小さいため、現場海域で観測された例はほとんどありません。本研究では、これまで不明であったマガキやアサリ等の浮遊幼生の餌となる植物プランクトンを特定し、定量的に観測するための技術開発を行いました。また、室内実験により、二枚貝浮遊幼生にとって好適な餌密度を把握するとともに、餌として有力な植物プランクトンが各浮遊幼生に捕食されるかどうか確認しました。

二枚貝浮遊幼生の餌料生物の特定・観測体制の構築

【STEP 1】メタバーコーディング解析による二枚貝浮遊幼生の餌候補の絞り込み

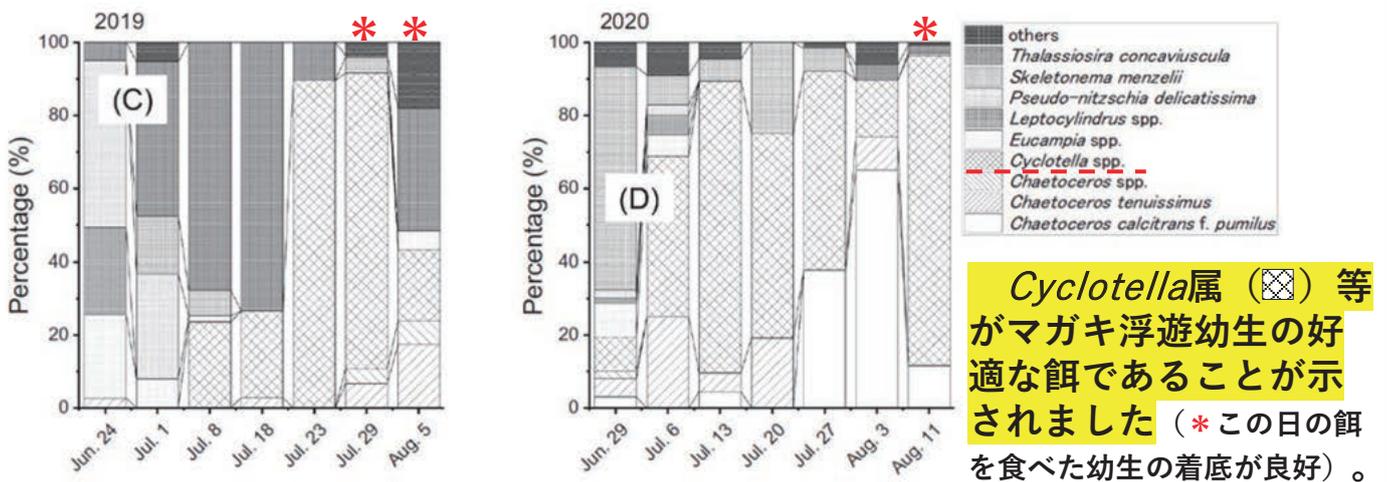


図1. マガキ採苗時期の広島湾における10 μm未満の珪藻類の組成の経時変化 (Matsubara et al., 2023)

【STEP 2】定量PCRによる二枚貝浮遊幼生の餌生物の定量的な観測

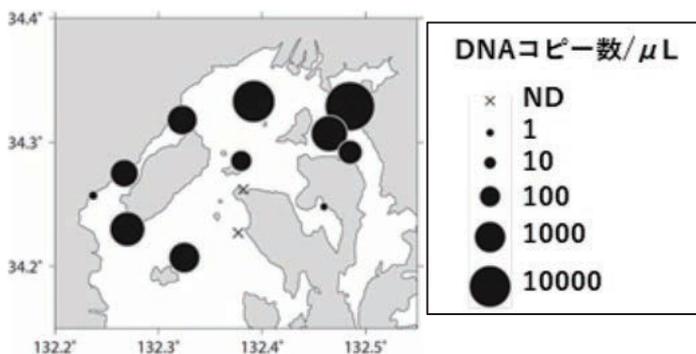


図2. *Cyclotella* sp. 1の広島湾における水平分布の一例 (2022年の夏季 こたか丸による観測)

メタバーコーディング解析等により、*Cyclotella*属3種、*Skeletonema*属1種、*Minidiscus*属1種の計5種の微小な珪藻類が、マガキ等の浮遊幼生の餌として有力であることが分かりました。

浮遊幼生の餌生物5種をターゲットとした定量PCR系を開発し、定量的に観測できる体制が整いました。

二枚貝浮遊幼生の餌生物を定量的に観測できる体制が整ったことで、水質環境の変化が二枚貝浮遊幼生の餌料環境に与える影響について研究が進み、栄養塩環境と二枚貝生産との関係の解析が進むことが期待されます。

好適な餌密度の確認と、二枚貝浮遊幼生による各種珪藻類の取り込み

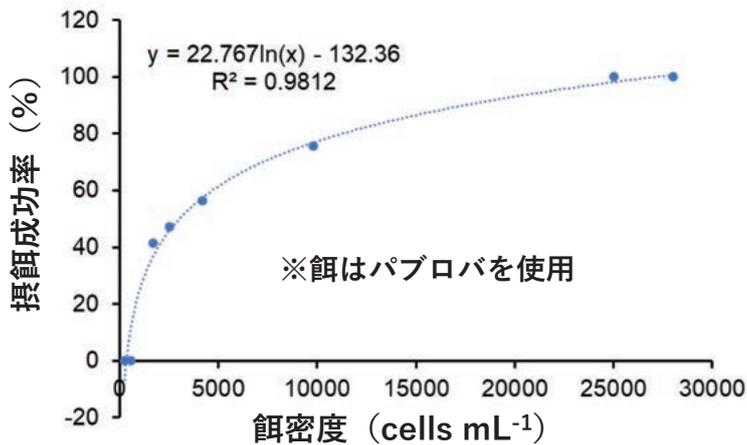


図3. 餌密度がマガキ幼生の摂餌成功率に与える影響
(28000 cells mL⁻¹の成功率を100%として算出)

マガキ浮遊幼生を用いて、餌密度と摂餌成功率の関係を調べたところ、摂餌成功率は餌密度依存的に上昇することが確認されました。4200 cells mL⁻¹以上の餌密度で50%以上のマガキ幼生が摂餌に成功することが推定され、浮遊幼生の餌となるプランクトンが数千 cells mL⁻¹規模のブルームを形成することが、二枚貝の生産に重要であることが示唆されました。

珪藻類 diatoms	<i>Cyclotella</i> sp.1	<i>Cyclotella</i> sp.2	<i>Cyclotella</i> sp.3	<i>Skeletonema menzeli</i>	<i>Minidiscus comicus</i>
二枚貝 bivalve					
マガキ <i>Crassostrea gigas</i>					
アサリ <i>Ruditapes philippinarum</i>					

図4. 二枚貝浮遊幼生の餌として有力な珪藻類をマガキおよびアサリの浮遊幼生に与えた結果
(アサリの浮遊幼生は山口県栽培漁業公社より譲渡いただいた)

マガキ浮遊幼生は *Cyclotella* sp. 1 を、アサリ浮遊幼生は *S. menzeli* や *M. comicus* をよく捕食することが確認されました。 *S. menzeli* はアサリの産卵時期である秋季に発生することが確認されており、アサリ浮遊幼生の好適な餌であることが考えられました。

5年間で得られた主要な成果

浮遊幼生の餌となるプランクトンが、数千 cells mL⁻¹ 規模で発生する環境が、二枚貝の生産に適した環境であることが示唆されました。

メタバーコーディング解析等により、これまで不明であった、二枚貝浮遊幼生の餌として有力な微小な植物プランクトンを5種見だし、それらの定量検出系を構築しました。これにより、二枚貝浮遊幼生の餌料環境を高精度でモニタリングすることが可能となり、浮遊幼生の餌が豊富に発生する環境条件の解明に繋がることを期待されます。

【引用文献】

Matsubara et al, 2023. Factors driving the settlement of Pacific oyster *Crassostrea gigas* larvae in Hiroshima Bay, Japan. *Aquaculture*. 563, 738911.

1)-ウ 栄養塩等の水質環境が藻場の生物生産力に及ぼす影響の解明

担当機関：水産研究・教育機構 水産技術研究所

瀬戸内海の貧栄養化が進み、生態系を支える一次生産者の生産力の低下とそれによる漁業への影響が懸念されています。海草・海藻類が形成する藻場は、海域の一次生産に寄与し、産業上重要な魚介類の産卵場や稚仔期の生息場、あるいは餌料供給の場として機能しています。海水中の栄養塩濃度の低下は藻場を構成する一次生産者による生産量や質的な性状に影響を及ぼしていると考えられています。

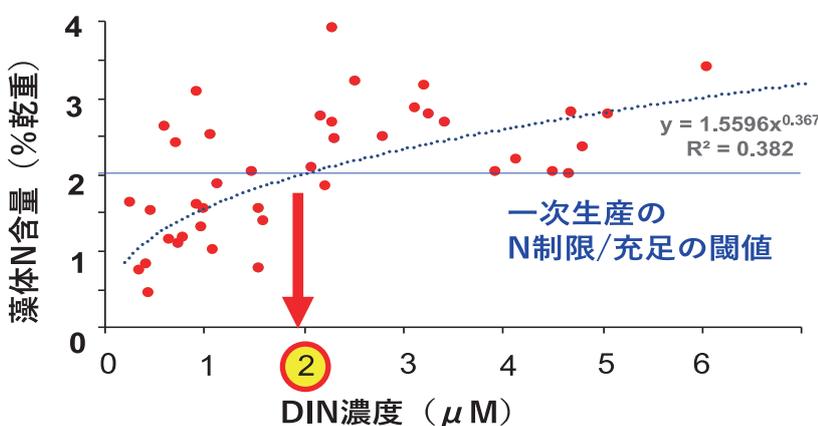
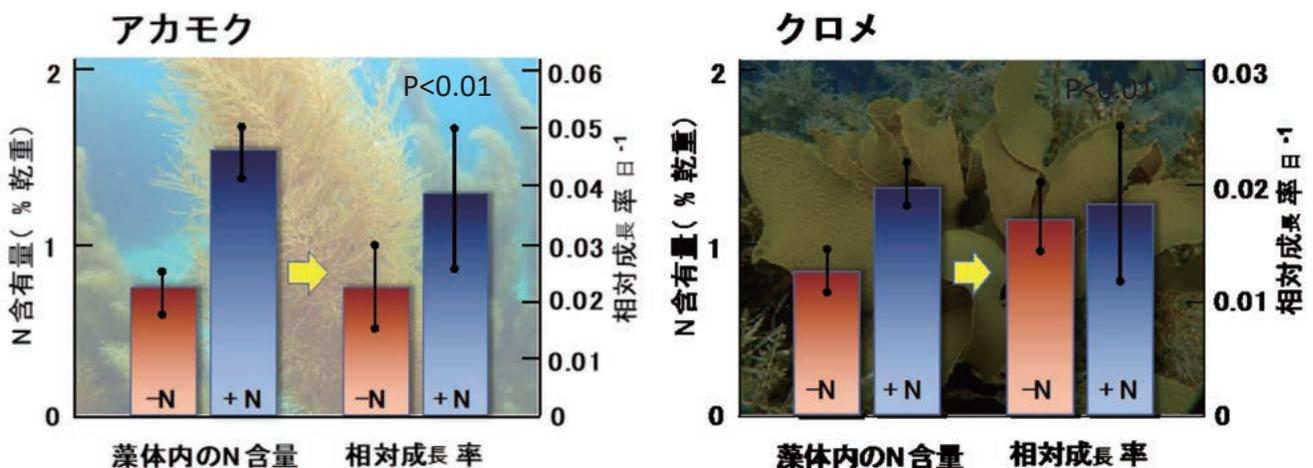
そこで藻場生態系の様々な機能うち、1. 栄養塩が藻場の一次生産に与える影響、2. 栄養塩が一次生産者を介した植食動物や高次の魚類等への影響の2つを柱として、瀬戸内海の藻場の生産力と機能の現状評価を行いました。

1. 栄養塩が藻場の一次生産に与える影響

海域での栄養塩欠乏を想定し、窒素を添加せずに欠乏している海水(-N)と窒素を定期的に添加した海水(+N)を用いて、瀬戸内海の藻場構成海藻として一般的なアカモクとクロメ幼体を10月の約1ヶ月培養しました。

その結果、アカモクとクロメともに実験後は藻体に含まれる窒素含量が異なり、窒素を添加している実験区(+N)が有意に多く窒素が含まれました。また成長率はアカモクでは含有窒素量と同様に成長率にも差がでましたが、クロメでは有意な差が見られませんでした。

アカモクは藻場を構成する大型藻の中でも栄養塩の影響を受けやすい。



本事業において、アカモクに窒素を添加し藻体含有窒素量が増加しても、含量およそ2%(乾重量)程度で藻体の生産量が飽和することがわかりました。

左の図より、DIN濃度 $2\mu\text{M}$ 以上あれば上記の藻体N含量2%以上を維持できると考えられます。

天然海域においてDINが $2\mu\text{M}$ 以上あれば藻場の生産量は維持できる。

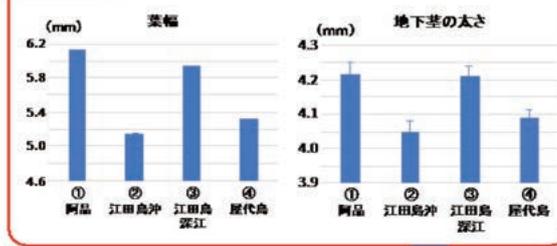
屋代島(広島湾口部)の藻場でモニタリングしたDIN濃度と天然アカモクの藻体N含量の関係

種子植物であるアマモの藻場も栄養塩の影響を受けるのか。

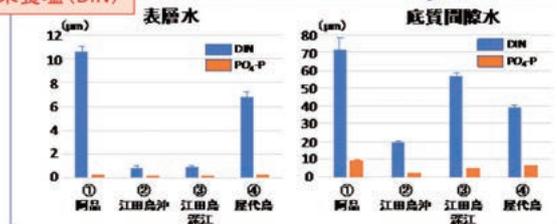


※底質においては専用の探水器を使用

アマモ草体



栄養塩 (DIN)



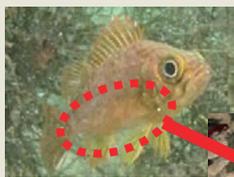
広島湾各地のアマモ場において表層水と地中の間隙水採取し、栄養塩とアマモ場景観との関係を解析



表層の栄養塩とアマモ場景観との関係性は低いしかし..

底質の間隙水のDIN濃度が高いほどアマモ藻体の“質”にかかわる葉幅や地下茎の太さが大きい傾向がありました。

2. 栄養塩が一次生産者を介した植食動物や高次の魚類等への影響

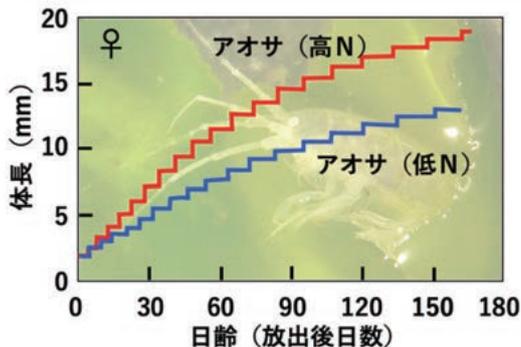


シロメバル稚魚の胃内容物には大量のヨコエビが！

メバル稚魚の餌として重要な端脚類(ヨコエビ)は、海藻を棲みかとし、海藻自体を餌としている。

生育した栄養塩環境の異なる海藻は餌料としての価値に変化があるのか？

餌としてヨコエビに与えてみる



高・低窒素(N)アオサを餌として与えたときのヨコエビの日齢と体調の関係

雌のヨコエビが成熟に達する日齢・体長・成熟率・抱卵率

	n	成熟日齢	成熟体長 (mm)	成熟率 (%)	抱卵率 (%)
アオサ(高N)	11	44.0±3.2	10.1±0.6	90.1	72.7
アオサ(低N)	13	85.0±5.8	10.5±0.4	53.8	7.7

低Nアオサが餌だとヨコエビの成長が遅く、再生産の能力が低いことがわかりました。

→ それを餌とする高次捕食者にも影響があると示唆されました。

5年間で得られた主要な成果

瀬戸内海的主要な藻場構成種である温帯性コンブ目類とホンダワラ類では、ホンダワラ類(アカモク)が低栄養塩の影響を受けやすいことが示唆されました。また藻場生産量を維持するためには最低で2μMのDIN濃度が必要であることがわかりました。アマモ場については底質の栄養塩濃度がアマモ草体の葉や根の太さに影響があることが示唆されました。

栄養塩環境が藻場を利用するメバルなどの高次捕食者に直接的に与える影響は本課題では解明できなかったが、餌料生物である端脚類が窒素含量の異なる海藻を餌とすることで成長や再生産に影響があることがわかり、それを餌とする高次捕食者にも何らかの影響があることが示唆されました。

1)-エ 栄養塩等の水質環境が植物プランクトン等の低次生産に及ぼす影響の解明

担当機関：水産研究・教育機構 水産技術研究所

瀬戸内海における漁業生産低迷の要因として、低次生産の量や質の変化が指摘されています（浜口 2011）。陸域負荷の削減に伴い、低次生産量が低下したことは示されていますが（西嶋 2018）、低次生産の質（植物プランクトンの種組成やサイズ組成）がどのように変化したか、不明な点が多い状況です。本研究では、室内試験や現場観測等を通して、陸域負荷の削減に伴う栄養塩等の水質環境の変化が、二枚貝や動物プランクトンの餌として重要な珪藻類の種組成に与える影響を検討しました。また、植物プランクトン群集のサイズ組成に与える影響についても調べました。

珪藻類の種組成に与える影響

瀬戸内海では長期的に *Skeletonema* 属の優占度が低下し、その他の珪藻類（*Chaetoceros* 属等）の優占度が上昇しています（Nishikawa et al., 2010）。しかし、そのメカニズムは未解明です。陸域負荷の削減は、沿岸域に生息する生物の生産を特異的に低下させることが想定されたため、本研究では「*Skeletonema* 属は沿岸域を生息域とする珪藻類である」と仮説を立て、その検証を行いました。

沿岸域の特徴として、低塩分傾向が挙げられるため、塩分が *Skeletonema* 属と *Chaetoceros* 属の休眠期細胞（タネ）の発芽と、発芽した栄養細胞の増殖に与える影響を室内試験で調べました。

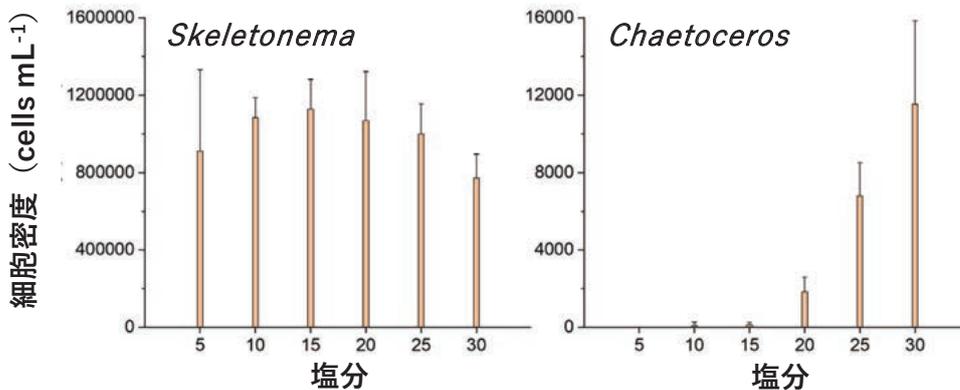


図1. 各塩分において休眠期細胞から発芽・増殖した栄養細胞の密度（培養7日目）

その結果、*Skeletonema* 属および *Chaetoceros* 属の発芽・増殖に好適な塩分はそれぞれ10-20および30であり、*Skeletonema* 属は塩分の低い条件（＝沿岸域の条件）を、*Chaetoceros* 属は塩分の高い条件を好んで発芽・増殖することが明らかになりました（図1）。

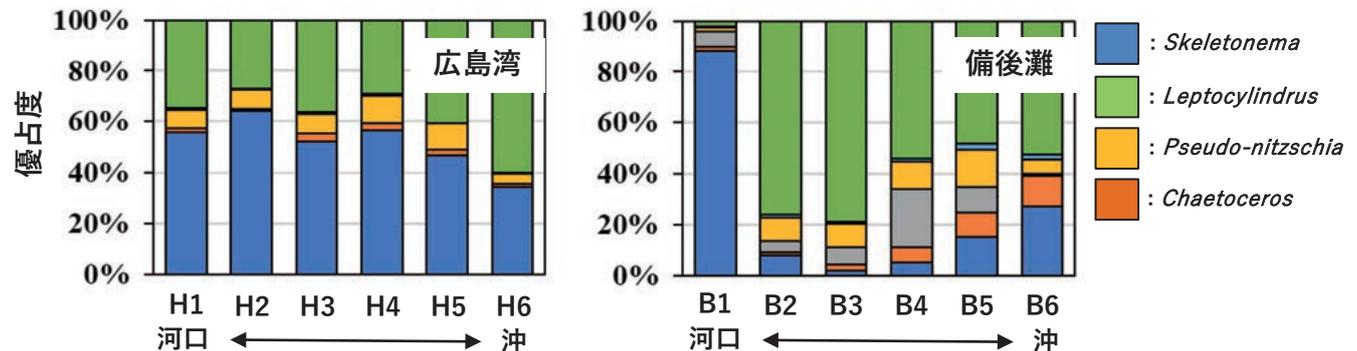


図2. 広島湾および備後灘の各観測点における植物プランクトン優占度（2021年春）

また、現場観測の結果、塩分の低い傾向にある広島湾や、備後灘の河口付近などで *Skeletonema* 属（■）の優占度が高くなる傾向が確認されました（図2）。これらの室内試験と現場観測の結果から、*Skeletonema* 属は塩分の低い海域、すなわち沿岸域を主な生息域とすることが示されました。

最近行われた長期データを用いた解析によって、瀬戸内海の栄養塩濃度は塩分30未満の沿岸域で大きく低下していることが明らかになりました（梅原 2022）。陸域負荷削減により、*Skeletonema* 属の生息域である沿岸域の栄養塩濃度が特に低下したことが、長期的に *Skeletonema* 属の優占度が低下した要因の一つと考えられます。

植物プランクトン群集のサイズ組成の変化

プランクトンは大きさにより、マイクロプランクトン (>20 μm)、ナノプランクトン (2-20 μm)、ピコプランクトン (0.2-2 μm) に分けられます。捕食者の観点からすると、餌のサイズは捕食の可否に影響する重要な要素となります。栄養塩等の水質環境の変化は、動物プランクトン等の餌となる植物プランクトン群集のサイズ組成にも影響を与える可能性があります。瀬戸内海における植物プランクトン群集のサイズ組成の変化については全く情報がありませんでした。

水産研究・教育機構では、約10年前に瀬戸内海広域における植物プランクトン群集のサイズ組成を調査していました。そこで本研究では、現在の瀬戸内海で同様の調査を実施し、過去のデータと比較することで、瀬戸内海における植物プランクトン群集のサイズ組成の変化を検討しました。

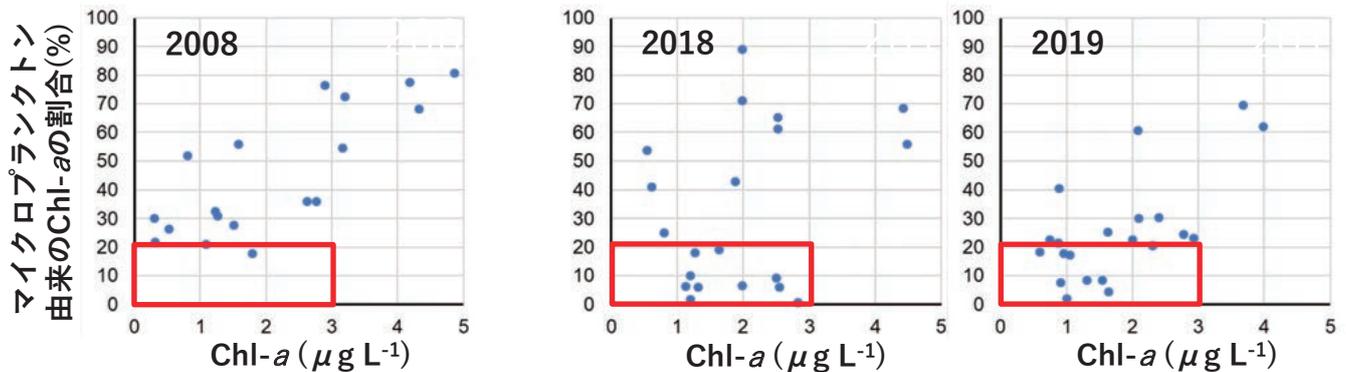


図3. Chl-*a*濃度とマイクロプランクトン由来のChl-*a*の割合の関係（2008、2018、2019年の春）

2008年と近年の観測結果を比較すると、2008年はChl-*a*濃度が3 μg L⁻¹未満の海域（＝沖合域）でもマイクロプランクトン由来のChl-*a*濃度は20%を概ね超えていましたが、近年では20%未満であることが多くなっていることが明らかになりました。このことから、瀬戸内海では長期的にマイクロプランクトンの割合が低下している可能性が考えられました（図3）。

表1. 各プランクトンの増殖に対するDINの半飽和定数

	増殖に対するDINの半飽和定数
ナノプランクトン (<i>Cyclotella</i>)	0.25 (μM)
マイクロプランクトン (<i>Skeletonema</i>)	1.01 (μM)

また、室内試験の結果、増殖に対するDIN（溶存態窒素）の半飽和定数はナノプランクトンよりもマイクロプランクトンが大きいことが確認され、マイクロプランクトンは増殖に比較的高いDINを要求することが確認されました（表1）。このことから、負荷削減によるDINの低下は、マイクロプランクトンの生産を特に低下させることが考えられました。

これらの現場観測と室内試験の結果から、瀬戸内海では長期的にマイクロプランクトンの割合が低下している可能性があり、陸域負荷削減によるDINの低下が要因の一つであることが考えられました。

5年間で得られた主要な成果

【水質環境の変化が珪藻類の種組成に与える影響】

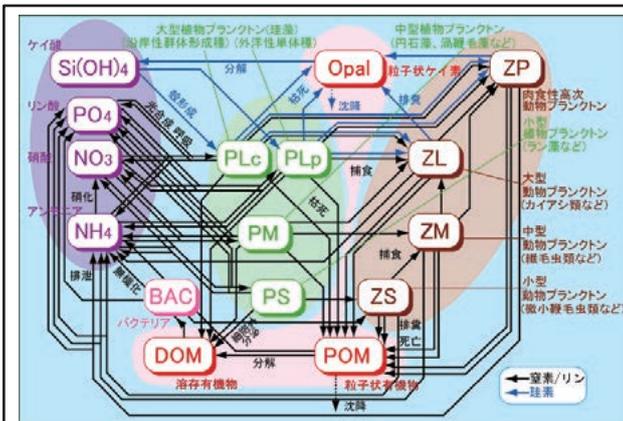
陸域負荷削減により、*Skeletonema*属の生息域である沿岸域の栄養塩濃度が特に低下したことが、瀬戸内海において長期的に*Skeletonema*属の優占度が低下した要因の一つであることが示されました。

【水質環境の変化が植物プランクトン群集のサイズ組成に与える影響】

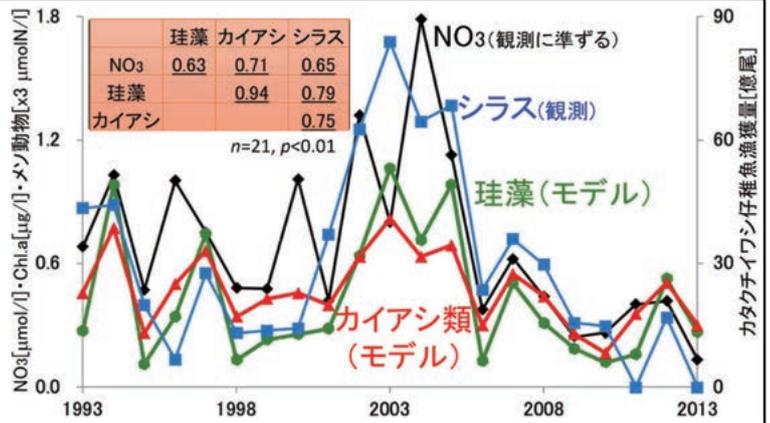
瀬戸内海では長期的にマイクロプランクトンの割合が低下している可能性があり、陸域負荷削減によるDINの低下がその要因の一つであることが示されました。

【引用文献】

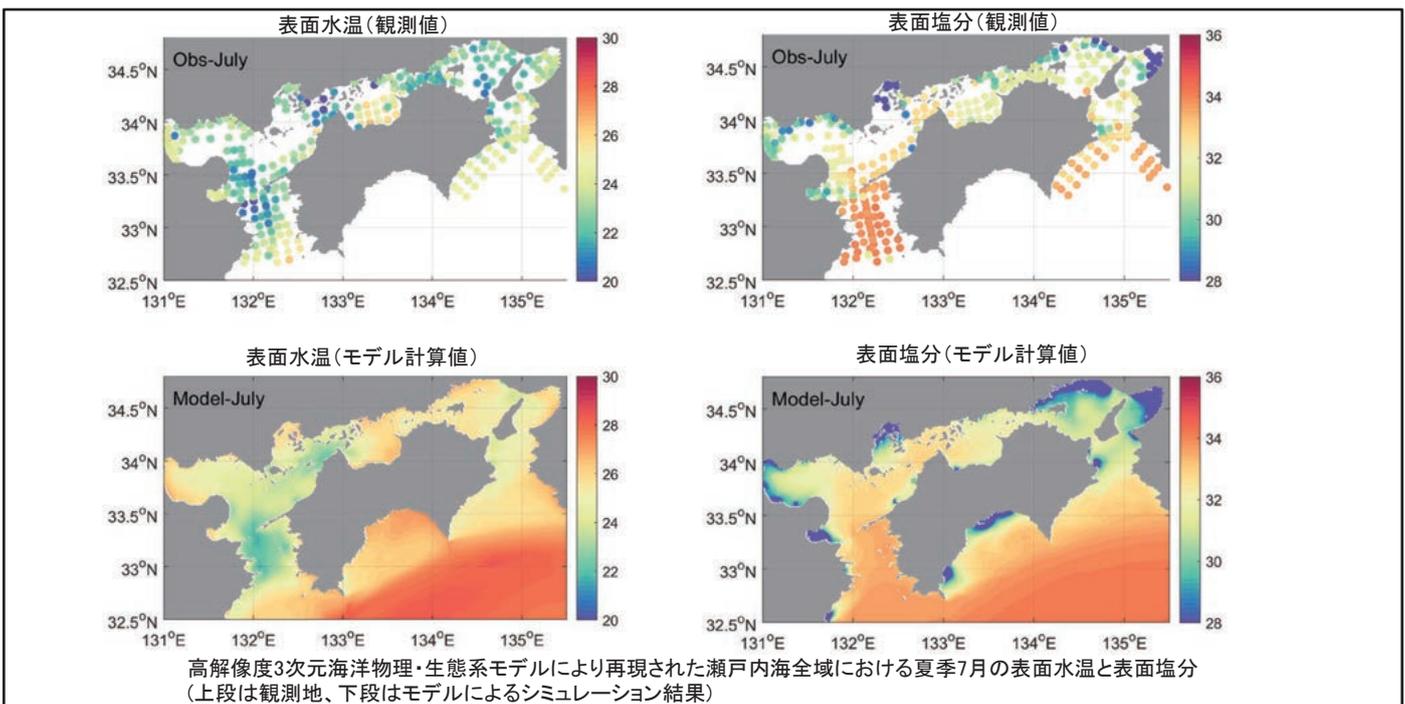
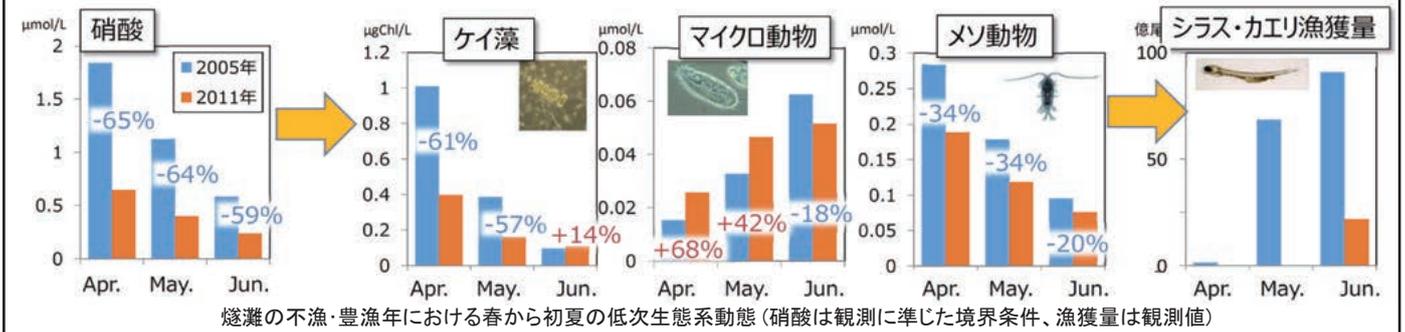
- 浜口昌巳, 2011. 一次生産の変化と有用種の関係（二枚貝）. 水産総合研究センター研究報告. 34, 33-47.
 西嶋渉, 2018. 瀬戸内海における栄養塩濃度管理法. 沿岸海洋研究. 56, 13-19.
 Nishikawa et al, 2010. Nutrient and Phytoplankton Dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan During a 35-Year Period from 1973 to 2007. Estuaries and Coasts. 33, 417-427.
 梅原亮, 2022. 岸沖の視点で見た瀬戸内海の栄養塩環境の変化. 第21回広島湾研究集会講演要旨集.



海洋低次生態系モデルeNEMUROの概略図 (Yoshie et al., 2011より)



栄養塩の経年変動を与えた際の低次生態系の経年変化と各変数間の相関係数



5年間で得られた主要な成果

- 1980年代から2010年後期までの動物プランクトンの群集構造および現存量の変動を明らかにした。
- *Calanus*が主要種である群集は90年代までは周辺出現していたが、それ以降にその出現期間が短くなり、2000年代後期には秋、2010年代後期には夏～秋にほとんど出現しなくなった。
- *Calanus*はカタクチワシやイカナゴ等の重要な餌生物であることから、水産資源への影響が懸念された。
- 栄養塩から大型動物プランクトンまでを取り扱う低次生態系モデルを用いて、燧灘と燧灘における低次生態系の季節変動を再現することに成功した。
- 春季の栄養塩環境が、春季ケイ藻ブルームの規模を変え、魚類餌料のカイアシ類現存量を変動させ、ボトムアップ的にシラス資源量を変動させる可能性が示唆された。
- 温暖化による水温上昇と栄養塩減少を与えた経年変動実験から、Chl.a濃度は不変ながら大型珪藻が減少し、魚類餌料のカイアシ類の減少を引き起こす可能性が示唆された。
- 3次元生態系モデルの開発し、瀬戸内海全域の時空間変動を再現することに成功した。

2)-イ 水質環境及び餌料環境と小型魚類生産量との因果関係の評価

担当機関：水産研究・教育機構 水産技術研究所、水産資源研究所、香川県水産試験場

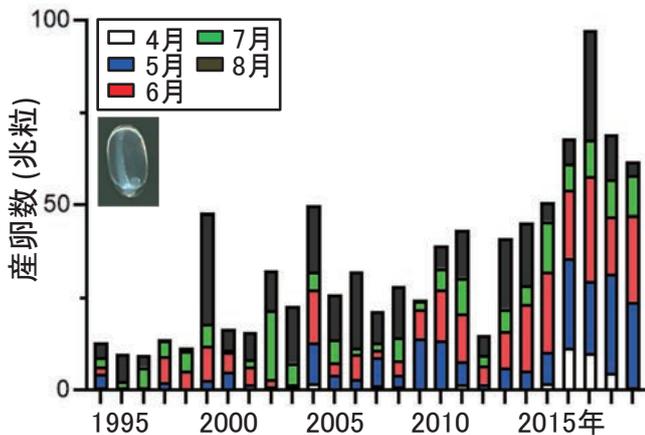
背景・目的・方法など

瀬戸内海では、近年、動物プランクトン食性の小型魚類における漁獲量の減少や低迷が顕著になっており、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います。このような現象は、生息域の環境変化や対象種の生物特性に及ぼす環境応答の違いなどに起因していると考えられますが、その詳細は不明です。本課題では、調査船調査や飼育実験などにより、燧灘のカタクチイワシの生物特性や加入量に及ぼす環境の影響を明らかにした上で、餌料環境（動物プランクトン）を介した貧栄養化と魚類生産の関連性について考察を進めました。

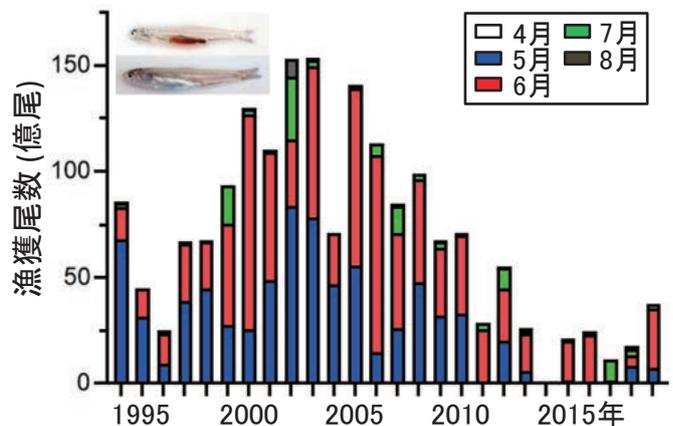


卵は増えているが、仔稚魚は減っている ～孵化後間もない時期の大量死～

(a) 産卵数の月別変化（1994～2019年）



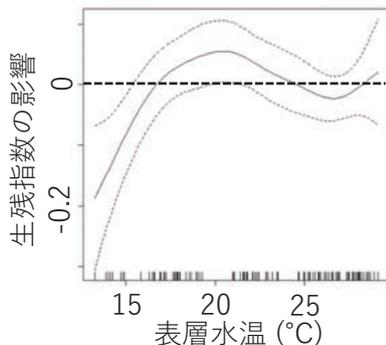
(b) 仔稚魚の発生月別漁獲尾数（1994～2019年）



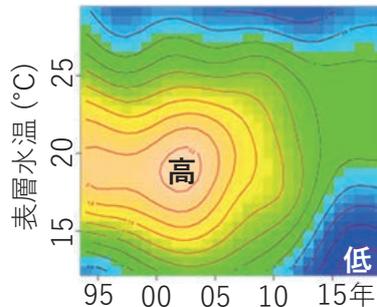
産卵数(a)は2000年代以降から徐々に増加していることが判りました。一方、漁獲された仔稚魚(b)の大部分は5月と6月に生まれていることが判りましたが、両発生月群ともに2000年代以降から急激に減少していることが明らかになりました。



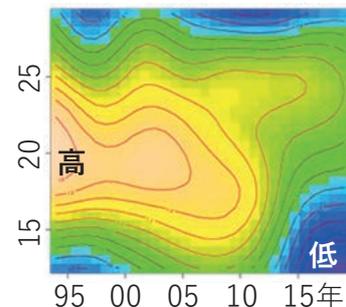
(a) 卵期の生残指数



(b) 卵～加入期の生残指数



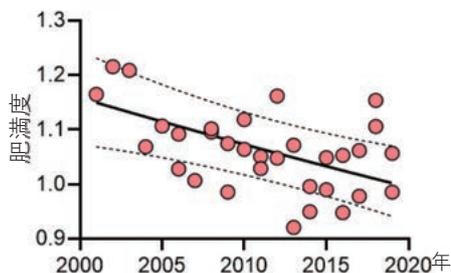
(c) 仔魚～加入期の生残指数



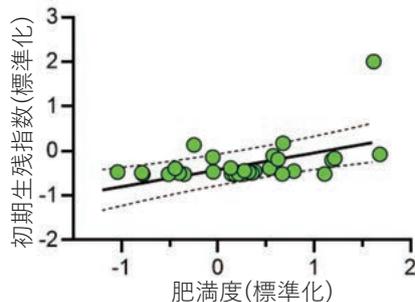
卵期の生残指数(a)は水温のみの影響を受け、経年的な変化は認められませんでした。一方、卵～加入期 (b) および仔魚～加入期 (c) の生残指数は2000年代前半まで20°C前後で最も高かったのですが、その後いずれの水温帯でも急激に減少し、2015年以降では18°C以下の低水温帯で最も低くなっていました。以上から、最近年のカタクチイワシは孵化して間もない時期に大量に死亡していることが示されました。

餌条件が悪くなると、親は痩せて小さな卵を産み、その仔魚の成長も遅くなる
～初期生残に及ぼす母性効果～

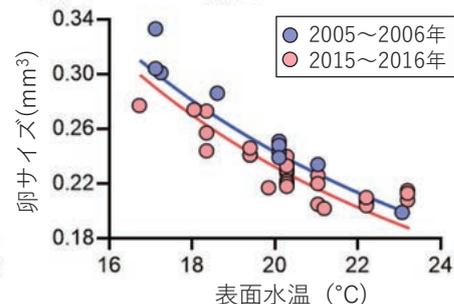
(a) 肥満度(5～6月)



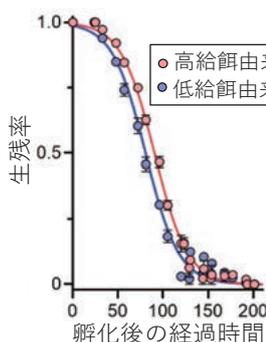
(b) 肥満度と初期生残指数



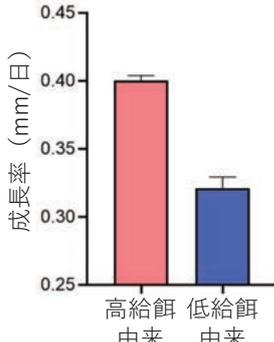
(c) 卵サイズと水温



(d) 仔魚の無給餌生残

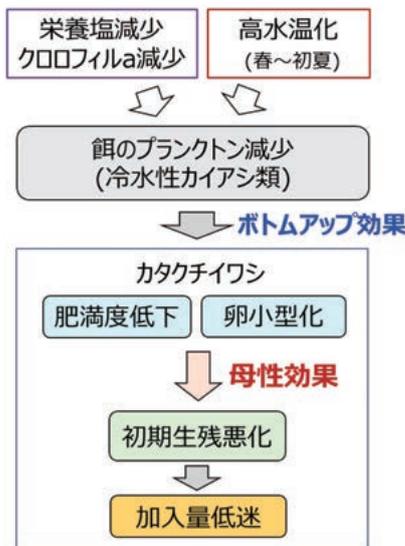


(e) 初期成長

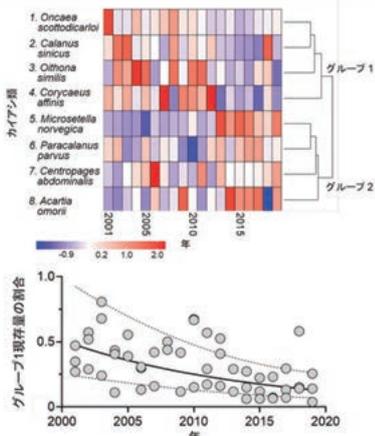


雌魚の肥満度(a)は経年的に減少しており、初期生残指数との有意な相関関係から(b)、肥満度の高かった年代には初期生残が高かったことが示されました。また、卵サイズと水温の関係から、最近年は卵が小さくなっていることが判りました。飼育実験から、餌を制限して痩せた親(低給餌由来)から生まれた仔魚は、高給餌区の太った親から生まれた仔魚に比べて、飢餓耐性が低く(d)、成長も遅い(e)ことが判りました。

まとめ



燧灘では、栄養塩やクロロフィルaの減少、高水温化の影響により、餌のプランクトンが減少しています。これがボトムアップ効果として作用することで、カタクチイワシの親魚の肥満度の低下や卵の小型化を招くとともに、母性効果により、初期生残が悪化しています。以上の複合的な要因により加入量が低迷していると考えられます。



産卵盛期(5～6月)に出現するカイアシ類(グループ1; 冷水性)の現存量の割合が減少(2001年=48%、2019年=13%)

5年間で得られた主要な成果

- 燧灘のカタクチイワシは5,6月発生群が漁獲の大多数を占めますが、2000年代以降、急激に減少していることが判りました。
- 仔魚～加入期の初期生残指数は2000年代以降、調査した全ての水温範囲で減少しており、特に低水温時期(産卵盛期)の生残が最も悪くなっていました。
- 栄養塩の低下に伴う植物プランクトンの減少、高水温化などの影響により、産卵盛期に出現する餌のカイアシ類が減少していることが判りました。
- 産卵盛期における餌不足により、雌親魚は痩せて、小さな卵を産んでいることが示されました。また、それらの仔魚は飢餓耐性が低く、成長も遅いことが示されました。
- 以上のことから、最近年では初期減耗がより大きくなっており、これがカタクチイワシの加入低迷を招いている原因であると考えられました。

3) 栄養塩管理方策の検討

担当機関：一般社団法人 全国水産技術協会

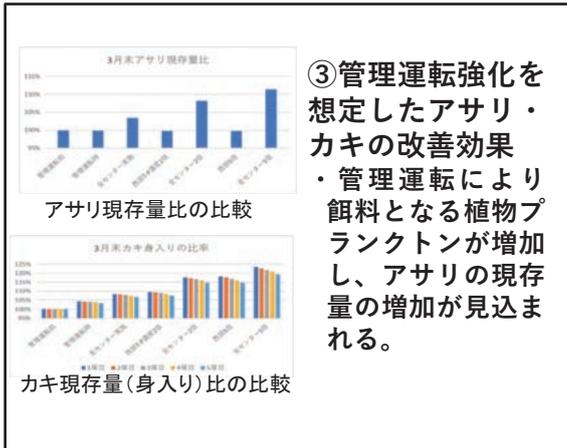
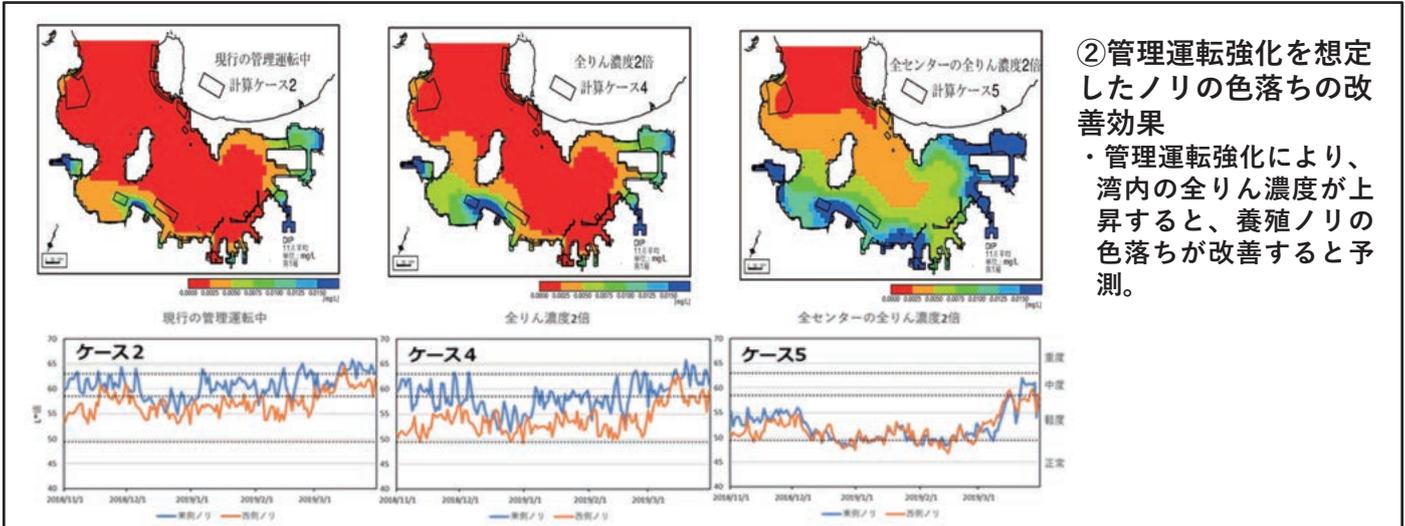
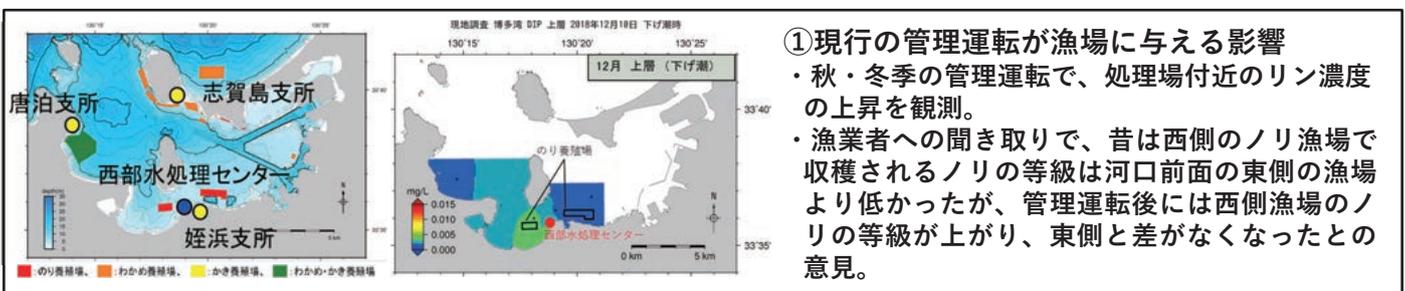
背景・目的

「豊かな海」を実現するために、必要となる適切な栄養塩の濃度を明らかにし、そのことによって漁業生産を増大させるための方策を検討。

方法

- ・博多湾をモデルとし、湾内で実施されている栄養塩供給を目的とした下水処理場の管理運転について実態を把握するとともに、シミュレーションによってノリを中心とした改善効果を評価し、栄養塩の管理方針を検討。(平成30年度～令和2年度)
- ・瀬戸内海において近年イカナゴの記録的な不漁の原因として高水温や栄養塩の減少が疑われている。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。備讃瀬戸のイカナゴに関する生態系モデルを構築して、栄養塩管理によるイカナゴ資源の回復の可能性を検討。(令和3年度～令和4年度)

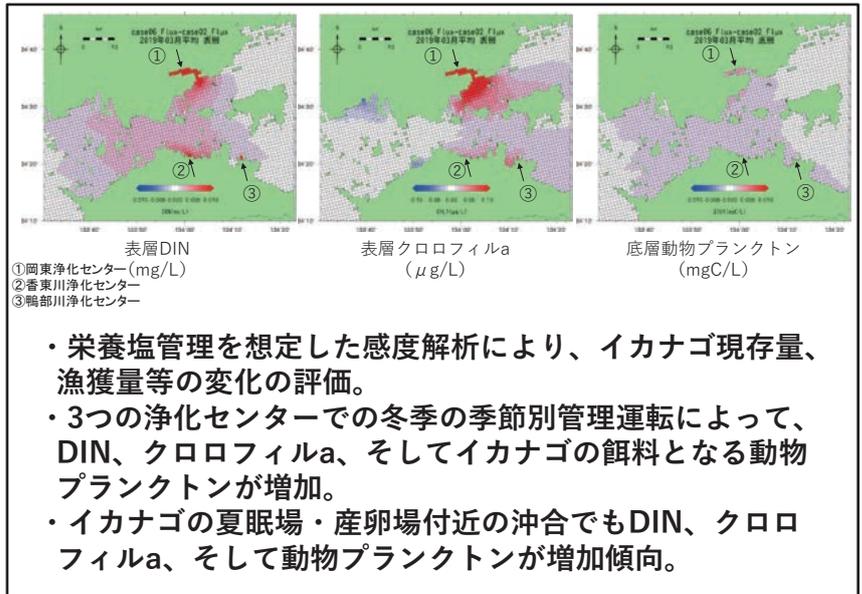
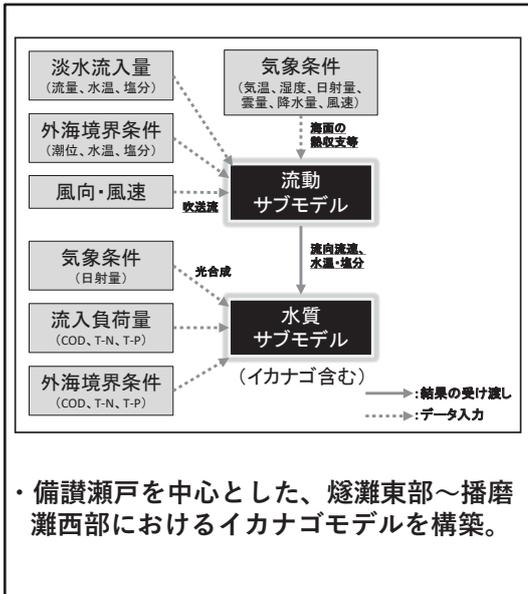
博多湾



・ 博多湾の栄養塩管理方策

- ・ 養殖業・漁業の生産性向上のため、海域のモニタリングを行いつつ、多くの水処理センターで管理運転を行うことが望ましい。
- ・ 管理運転を行う期間は、ノリの養殖期や他の漁業生物の生活史を考慮し10月から翌年3月まで行うことが望ましい。さらに、種付け時期である10月から11月と、一番良いノリが採れる12月下旬から翌年1月頃には排水中の全りん濃度を高めるといった弾力的な管理運転を行うとより効果的である。
- ・ 現状の管理運転は排水中の全りん濃度の年平均値を0.5mg/Lを上限としているが、全ての水処理センターで管理運転を行うとともに、排水中の全りん濃度の上限を2倍に高めることで、環境基準を達成しつつノリの品質改善効果を期待。

瀬戸内海



栄養塩管理方針の検討

例) 3カ所ある下水処理施設からの負荷量濃度を2倍に増やした場合の漁業生産量の変化予測

備讃瀬戸の栄養塩管理方策

- ・播磨灘～燧灘間の移流による変化が大きく、イカナゴをターゲット種とすると栄養塩管理は、湾灘の境界をまたいだ広範囲で行うことが必要。
- ・浄化センター管理運転による効果は期待できるものの、施肥や海底耕耘については範囲も効果も限定的。
- ・施肥や海底耕耘の効果は局所的だが、漁業者が自ら実施可能。
- ・施肥は、ノリ養殖では局所的には効果が認められることなどから、ターゲット種や漁場環境の特性に応じた栄養塩管理方策が必要。
- ・湾灘ごとに個別に実施するのではなく、隣接する湾灘と連携して対策の内容や時期を決めて実施することが重要。

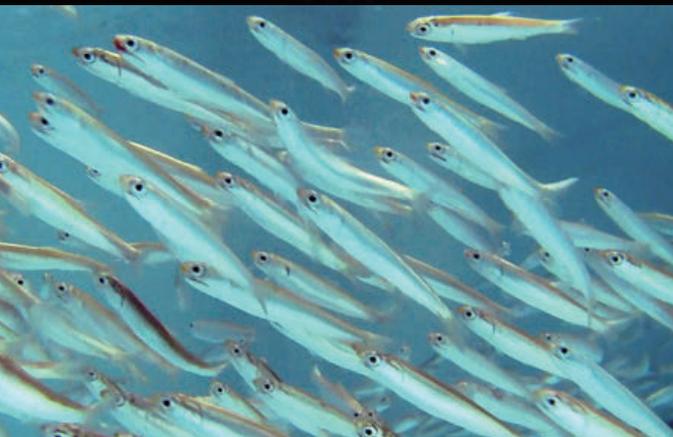
今後検討すべき課題

- ・隣接する湾灘からの栄養塩供給量の検討
- ・栄養塩類の広域的な総量削減の緩和(湾灘の枠を超えた足並みを揃えた対応)

生産額が最大となる栄養塩添加量を求める。

5年間で得られた主要な成果

- ・博多湾内で実施されている下水処理場の管理運転の実態を把握できた。これらを基に構築したモデルを用い、シミュレーションによって栄養塩類の挙動を明らかにし、漁場ごとの最適栄養塩濃度が推定できるようになった。ノリを中心とした改善効果を評価し、当該海域における栄養塩の管理方策を提示した。
- ・瀬戸内海におけるイカナゴの不漁とその原因として疑われる高水温や栄養塩の減少に関わり、備讃瀬戸のイカナゴに関する生態系モデルを構築した。管理運転の条件設定の変化、施肥・海底耕耘の実施などを想定したケーススタディを行い、栄養塩管理によるイカナゴ資源の回復の可能性を検討できた。その結果を基に当該海域における栄養塩管理方策を示すことができた。



問い合わせ先

国立研究開発法人 水産研究・教育機構（廿日市庁舎）

〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5

TEL 0829-55-0666

香川大学 農学部

〒761-0795 香川県木田郡三木町池戸

TEL 087-891-3148

愛媛大学 沿岸環境化学研究センター

〒790-8577 愛媛県松山市文京町2-5

TEL 089-927-9839

兵庫県立農林水産技術総合センター 水産技術センター

〒674-0093 兵庫県明石市二見町南二見22-2

TEL 078-941-8601

和歌山県水産試験場

〒649-3503 和歌山県東牟婁郡串本町串本1557-20

TEL 0735-62-0940

香川県水産試験場

〒761-0111 香川県高松市屋島東町75-5

TEL 087-843-6511

一般社団法人 全国水産技術協会

〒105-0003 東京都港区西新橋2-15-7

TEL 03-6459-1911

発行 令和5年3月

発行者 国立研究開発法人 水産研究・教育機構

水産技術研究所

〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5