

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

**閉鎖性海域・瀬戸内海における栄養塩濃度管理法の開発
(S-13-1)**

平成26年度～平成30年度

Development of methods for managing nutrient salt concentrations in the Seto Inland Sea (enclosed coastal sea)

〈研究代表機関〉
広島大学

〈研究分担機関〉
香川大学

2019年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	20
II-1 栄養塩濃度管理手法開発 （広島大学） 要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 干潟・藻場の栄養物質循環・生物再生産に果たす機能の解明 （香川大学） 要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	83

I. 成果の概要

課題名	S-13-1 閉鎖性海域・瀬戸内海における栄養塩濃度管理法の開発
課題代表者名	西嶋 渉 (広島大学環境安全センター長・教授)
研究実施期間	平成26～30年度
累計予算額	161,452千円 (うち平成26年度：60,853千円、平成27年度：26,982千円、平成28年度：26,133千円、平成29年度：24,351千円、平成30年度：23,133千円) 累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 栄養塩、基礎生産、二次生産、転送効率、脆弱性指標、地域固有透明度、アマモ場、干潟、プランクトン食魚

研究体制

テーマ名：閉鎖性海域・瀬戸内海における栄養塩濃度管理法の開発

- (1) 栄養塩濃度管理手法開発 (広島大学)
- (2) 干潟・藻場の栄養物質循環・生物再生産に果たす機能の解明 (香川大学)

1. はじめに (研究背景等)

閉鎖性海域全体が極度に富栄養化した海域での栄養塩管理は、過度な植物プランクトンの増殖に伴う赤潮や底質悪化など様々な悪影響を低減するために陸域からの栄養塩負荷を削減することである。一方で、ある程度富栄養化の制御に成功した海域では、依然として環境保全上の問題が残る場所・季節と特に環境保全上問題がない場所・季節が混在するようになる。このような段階の海域では、環境保全上の問題が残る場所・季節だけを見てさらなる栄養塩類の削減を行うと結果として、高次生産を支える基礎生産、二次生産をも低下させ、水産上有用な魚類等の生産をも低下させることも起こり得る。

昭和40年代以降、瀬戸内海を含む閉鎖性海域では広い範囲で赤潮が頻発するなど水質汚濁の進行が顕著であった。その改善のために導入された瀬戸内海環境保全特別措置法に基づく水質総量規制によって1979年比で瀬戸内海に流入する窒素の負荷量は $27.7 \text{ kg-N km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ から $16.7 \text{ kg-N km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (40%の削減)、リンの負荷量は $2.63 \text{ kg-P km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ から $1.03 \text{ kg-P km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (61%の削減)に減少した。この間赤潮の発生件数は約300件から100件程度まで減少した一方で、漁獲量の大幅な減少もあり、平成27年10月2日に瀬戸内海環境保全特別措置法が一部改正され、瀬戸内海の環境の保全について、水質が良好な状態で保全されるとともに、生物の多様性及び生産性が確保されるなど、瀬戸内海の有する価値や機能が最大限に発揮された「豊かな海」とする考え方が示された。また、湾・灘ごとや季節ごとの課題に対応し、多面的な価値・機能が最大限発揮された「豊かな瀬戸内海」を目指すことも謳われている。

瀬戸内海に流入する栄養塩類は陸域からの負荷だけでなく、瀬戸内海が2か所で接続する太平洋からの負荷が大きく、底泥からの負荷も考慮する必要がある。外洋起源の栄養塩類の見積もりに関しては大阪湾を除くと外洋起源の栄養塩がおよそ6割～9割、あるいは6割足らずとの報告がある。いずれにしても陸域負荷と比較して太平洋からの負荷が卓越しているという結論は共通しており、その中で陸域からの窒素で40%、リンで61%の栄養塩流入負荷の減少がどう瀬戸内海の生物生産に影響を及ぼしたかを整理する必要がある。ある程度富栄養化の制御に成功した一方で、大阪湾や一部の沿岸域では依然として環境保全上の問題が残る、近年の漁獲の減少が顕著な瀬戸内海を対象として、人為起源の栄養塩負荷に伴う負の影響を抑え、健全な海域環境を実現しつつ、海域の生物生産性を損なわない栄養塩管理方法について検討することは、閉鎖性海域において環境保全と生物生産を両立させる栄養塩管理のモデルケースとなり得る。

2. 研究開発目的

S-13は、持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発を目指して、「きれいで、豊かで、賑わいのある、持続可能な、沿岸海域（里海）」を実現することを目的としている。その中でテーマ1は、比較的広域な閉鎖性沿岸海域のモデル海域である瀬戸内海において、栄養塩管理と生物生息環境の保全・再生を通じて赤潮等の障害を起こさない健全な物質循環と高い生物生産性の実現を目指した持続性の高い沿岸管理手法を開発することを目的とした。

そのため本テーマ1では、サブテーマ1として、1) 多様性の高い広域な閉鎖性海域の管理の基本となる海域特性の指標開発、2) 生物生産性の基本となる基礎生産、二次生産といった低次生態系構造の解明と栄養塩の関係を評価、3) プランクトン食魚を中心とした高次生態系構造の解明、4) 自然要因によっても植物プランクトンの増殖による障害が起こりやすい沿岸域に特化した対策について検討した。サブテーマ2では、サブテーマ1の4) で取り組む沿岸域に特化した対策として重要な位置を占める沿岸域に発達する干潟・藻場の栄養物質循環・生物再生産に果たす機能の解明に取り組んだ。

3. 研究開発の方法

(1) 栄養塩濃度管理手法開発

(1) -1 環境管理のための海域特性の指標開発とその適用

環境省は閉鎖性指標を用いて閉鎖性海域88か所を選定している（図1）。

瀬戸内海は面積的には突出して大きく、その中でも代表的な内湾である広島湾、大阪湾が東京湾、伊勢湾などに近い面積を持っており、一元管理するには大きすぎることがわかる。このような大きな海域を管理する場合の一つの方法は、地形的なブロックに分けて管理する方法であり、瀬戸内海の場合は湾灘管理となる。重点的に検討した広島湾、大阪湾は規模的にみると東京湾、伊勢湾等の富栄養化が進んだ海域が含まれ、大都市圏を流域圏に持つ大河川が流入するという共通性がある。そのため、広島湾や大阪湾を対象とした栄養塩管理手法の開発は広くこれらの海域に適用できる可能性がある。一方で、瀬戸内海の湾灘は、592~4,009 km²の規模の違いと流入河川や接続海域の影響など海域特性は様々であり、地理的なブロックだけではなく、様々な湾灘に共通して適用可能な管理手法の開発が望まれている。この視点での管理手法の開発は、規模の大小を問わずより汎用的に適用できる可能性がある。

海域の富栄養化に伴う様々な悪影響が、主として植物プランクトンの過剰増殖によって引き起こされていることを考えると植物プランクトンの増殖に関係した海域特性の視点から海域内を区分けし、管理する視点が重要であると考え、本研究を行った。

(1) -1-1 光環境の特性解明

光環境は、底生生態系の基礎生産にとっては死活的に重要な環境因子であり、浮遊生態系の基礎生産にとっても、有光層を決める重要な因子である。瀬戸内海全域を対象として、有光層を決める重要な因子である透明度の時空間分布を明らかにし、岸沖の透明度の違いや経年変化について考察した。また、植物プランクトンによる光減衰以外の「地域性」を加味した透明度指標を開発し、東京湾や伊勢湾などへの適用可能性について検討した。

(1) -1-2 植物プランクトンの増殖に対する脆弱性指標の開発と適用

植物プランクトンの増殖は栄養塩以外にも様々な環境因子の影響を受ける。ここでは、栄

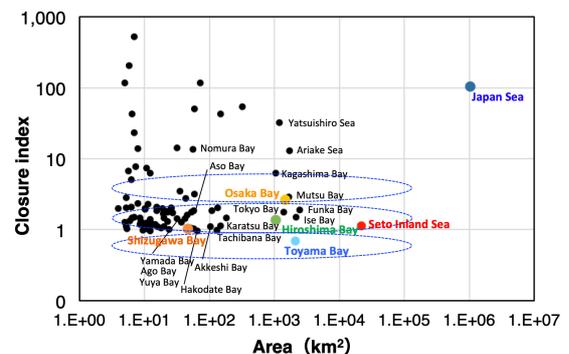


図1 閉鎖性海域における瀬戸内海の位置づけ

養塩管理によって減少し、今後も変動が予測される栄養塩類を直接扱わず、地理的な海域特性を表現する比較的安定した水質項目に基づき、植物プランクトンの増殖のしやすさを表す指標として脆弱性指標（Vulnerable Index: VI）を開発した。

(1) -1-3 底質の特性説明

沿岸域では、浮遊生態系と底生生態系が密接に結びついた複雑な食物網が形成されている。そこで瀬戸内海の実地環境と底生生物の概要を把握するために、底質の物理化学的環境から底生生物の量と質を評価した。また、逆に底生生物を汚濁耐性などに基づいてランク付けする生物指標であるMultivariate AZTI's Marine Biotic Index (M-AMBI) を用いて、直接底生生物の健全性を評価した。

(1) -2 低次生態系構造の時空間分布の解明

海域に流入した栄養塩類が植物プランクトンの生産につながり、そこから始まる浮遊系における主要なフローは2つあり、一つは、さらに高次な生物につながる生物生産のフロー、今一つは富栄養海域で一般的にみられる生物生産フローに利用されなかった植物プランクトンの生産が底質に移行し、環境悪化を引き起こすフローである（図2）。環境保全と生物生産の両立を目指す管理においては、生物生産のフローを定量化する必要があるが、定量的なデータはない。そこで、低次生産速度を実測しながら、そのデータに基づき、過去の水質データから基礎生産速度、二次生産速度を推定する手法を開発し、過去からの低次生産速度の時空間分布を明らかとし、陸域からの窒素で4割、リンで6割の栄養塩負荷の削減が低次生産に及ぼした影響を評価した。

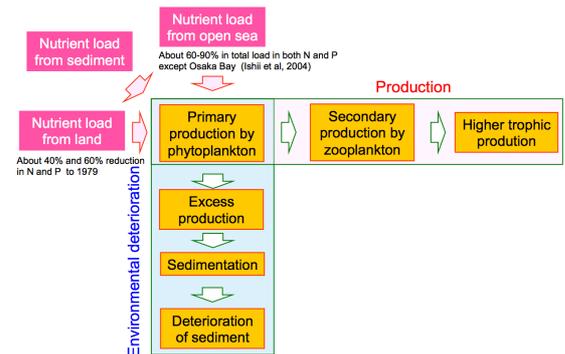


図2 栄養塩から始まる物質フロー

(1) -2-1 低次生産の実態解明

魚類等の高次生態系を支える低次生態系における物質とエネルギーの効率的な流れが豊かな高次生態系を形成することから、各段階間での転送にも着目して生態系を評価した。

(1) -2-2 基礎生産・二次生産の推定手法の開発

基礎生産および二次生産を実測し、実測データに基づき、Chl. *a*濃度、透明度、栄養塩濃度、水温といった水質モニタリングデータから瀬戸内海の基礎生産・二次生産を推定するアルゴリズムを作成した。

(1) -2-3 瀬戸内海全域における過去から現在までの低次生産構造の時空間分布

開発した基礎生産、二次生産を使って季節別の変化および1981-1990年の10年間のChl. *a*濃度を基準として分類した海域について時間変化を計算した。また、瀬戸内海における主要な三次生産としてのカタクチイワシ生産の時間変化についても推定し、各栄養段階の生産速度から、基礎生産から二次生産、二次生産から三次生産の転送効率を計算した。

(1) -3 プランクトン食魚を中心とした高次生態系構造の解明

低次生産と魚類等高次生産を生態学的につないでいる三次生産者としてプランクトン食魚があげられるが、瀬戸内海ではカタクチイワシとイカナゴが代表種である。ここでは、イカナゴの保全に向けた個体群解析とプランクトン食魚の高次捕食者である魚食性魚類の食物としての役割を含めて高次生態系構造について検討した。

(1) -3-1 漁獲量及び資源量から評価した魚類の生産構造

漁業・養殖業生産統計によるプランクトン食魚とその他の魚種に分けた漁獲量の推移から、プランクトン食魚の変動傾向の特徴について検討し、海砂利採取の影響について考察した。

(1) -3-2 プランクトン食魚であるイカナゴの個体群解析

イカナゴは、砂に潜る習性を有しており、さらに夏～秋の高水温期には砂の中で潜砂した

まま摂餌を行わずに過ごす「夏眠」を行う。夏眠の後、イカナゴは底質に沈性卵を産むため、好適な底質環境はイカナゴにとって生息場、夏眠場、産卵場として極めて重要である。イカナゴ資源を保全していくためには、現在残されている生息場や産卵場所の把握や、イカナゴにとって必要な環境の理解が必要不可欠である。そこで、イカナゴの再生産状況を把握するため、浮遊仔魚の調査および粒子追跡によるシミュレーションを実施し、採集された仔魚の起点となっている場所を産卵場として推定した。また、瀬戸内海における東部個体群と中西部個体群の遺伝的な分化を明らかにするために、イカナゴの新規マイクロサテライトDNAマーカーを開発し、遺伝的集団構造の解析を行った。

(1) -3-3 瀬戸内海の主要魚食魚であるタチウオの食性

瀬戸内海の主要魚食魚であるタチウオの食性を明らかにするための胃内容物および安定同位体を用いた解析を実施した。

(1) -4 脆弱性が高い沿岸域に特化したアマモを活用した生態学的栄養塩対策

人為起源の栄養塩負荷を絞っても陸域からの栄養塩負荷がゼロになるわけではなく、森林起源を代表とする自然由来の栄養塩は負荷されるため、淡水流入が大きく、環境要因によって植物プランクトンの増殖が起こりやすい脆弱性が高い海域では、人為負荷の削減だけでは問題が解決しないこともありうる。そこで、生態学的手法として底生大型海藻藻類を活用する。これらは、高栄養塩濃度となる沿岸域で高水温期に栄養塩類を吸収し、栄養塩の吸収で競合する植物プランクトンの増殖を抑え、その後枯死した生体が漂流して広範囲に分散し、低水温期に徐々に枯死体から分解に伴う栄養塩が放出される。アマモ (*Zostera marina*) はこの手法に適した海草であることから、アマモによる栄養塩管理について検討した。

(1) -4-1 アマモの栄養塩吸収機能

広島湾のアマモを例にとると3月~4月ぐらいから繁茂し始め、8月には枯死・衰退がはじまるライフサイクルをとる。生育場所によって各ステージの時期は若干異なるが、春から初夏にかけてアマモが繁茂期を迎えることは共通し、春から夏にかけて植物プランクトンの増殖を抑制する効果が期待できる。

(1) -4-2 アマモ場の栄養塩吸収機能が植物プランクトン増殖の抑制に果たす役割

光環境からみたアマモの潜在的な分布域を広島湾において推定し、広島湾北部海域において、アマモ場面積を現状から増加させることによってどの程度植物プランクトンの増殖を抑制できるかをモデルにより検証した。地理情報解析ソフトArcGISを用いて、広島湾北部における50 m格子の水深データおよび450 m格子の透明度データより、光環境条件によるアマモ場の潜在的な分布面積の推算を行った。現在のアマモ場の分布およびそこで得られた潜在的なアマモ場の分布を用いて、広島湾全域における5月~9月のChl. *a*濃度の分布を広島湾についてネスティングした瀬戸内海モデルを用いて計算した。

(2) 干潟・藻場の栄養物質循環・生物再生産に果たす機能の解明

(2) -1 藻場 (アマモ場)

藻場はこれまで、魚の産卵場あるいは幼稚魚の生育場 (海のゆりかご) としての機能が注目されてきたが、藻場が窒素やリンの動態に及ぼす影響については明らかにされてきていないため、瀬戸内海備讃瀬戸海域に面する香川県の様々な藻場干潟において、栄養塩循環に関する調査を行った。藻場では、海水の交換に伴う栄養塩の収支を見積もるモニタリング調査を実施し、流入、溶出、流出量を推定した。また、アマモによる間欠的な栄養塩取り込みを評価するために、アマモ草体の炭素および窒素含量の変化についてのモニタリングを行った。

(2) -2 干潟

干潟はその形成条件によって「前浜干潟」「河口干潟」「潟湖干潟」に分けられる。各形態の干潟に認められる共通の特徴として、陸域と海域の境界に位置し、大型および微細藻類、二枚貝などに代表される多くの底生生物が見られ、それらの生物が物質循環のスピードを高めていると考えられる。また、酸素が豊富に存在することで、バクテリア等による有機物の分解速

度も非常に大きい。瀬戸内海では前浜干潟、河口干潟が全干潟面積の99%以上を占めるため、本研究ではこれら2つの干潟について調査を行った。干潟への流入負荷の違いが干潟機能に及ぼす影響を明らかにするために、河口干潟である新川・春日川と前浜干潟である大串半島の西海浜で干潟に流入する栄養塩類と流出する栄養塩類の調査を実施し、干潟域における有機物の分解・無機化能力を定量的に把握した。

4. 結果及び考察

(1) 栄養塩濃度管理手法開発

(1) -1 環境管理のための海域特性の指標開発とその適用

(1) -1-1 光環境の特性解明

周防灘における水深別Chl. *a*濃度および透明度の関係から、透明度が低い10 m以浅の沿岸部では、Chl. *a*濃度が高いにも関わらず、その減少が透明度の増加をほとんど引き起こしておらず、透明度を決定する因子として植物プランクトンの寄与が小さいであろうことが明らかとなった。植物プランクトン以外の光減衰をもたらす因子によって決定される透明度（ここでは地域固有透明度と呼ぶ（region-specific background Secchi depth: BSD））を季節ごとに求め、図3に春季および夏季の分布を示した。地域固有透明度は塩分および水深と相関を示し、結果として、豊後水道、紀伊水道といった接続海域の影響を受ける水深の大きい水道部で高く、沿岸部、特に大河川に隣接する大阪湾奥部、広島湾奥部で低い値を示した。Chl. *a*濃度が高い沿岸域では、Chl. *a*濃度が高いためにその海域の透明度が低いと考えがちであるが、Chl. *a*濃度に依存した光減衰とその他の要因による光減衰を区別して評価し、陸域からの栄養塩負荷の削減によって、達成し得る光環境の改善の限界を十分把握した上で、栄養塩管理を含めた総合的な環境管理を行うべきであると考えられる。

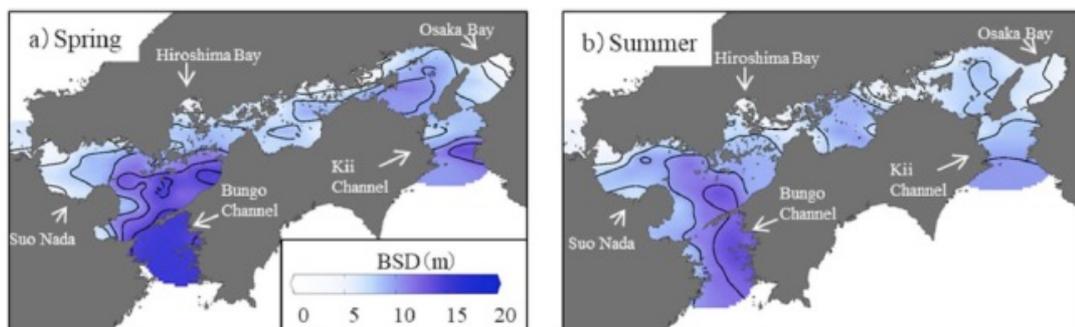


図3 (a) 春季および (b) 夏季における地域固有透明度の空間分布

(1) -1-2 植物プランクトンの増殖に対する脆弱性指標の開発と適用

植物プランクトンの増殖に影響を及ぼすと考えられる主要な環境因子（塩分、躍層形成、透明度）を用いて、最近10年間の平均Chl. *a*濃度を推定する脆弱性指標の作成を試みた。これら単独の環境因子で最も高い相関で平均Chl. *a*濃度を予測できた因子は塩分 ($R^2 = 0.493$) であった（図4）。2環境要因で予測した場合、塩分と透明度の組み合わせで $R^2 = 0.663$ まで改善した（図4）。しかし、3環境要因に増やしても改善は $R^2 = 0.672$ にとどまったため、塩分と透明度による組み合わせにより予測することで十分であると判断した。

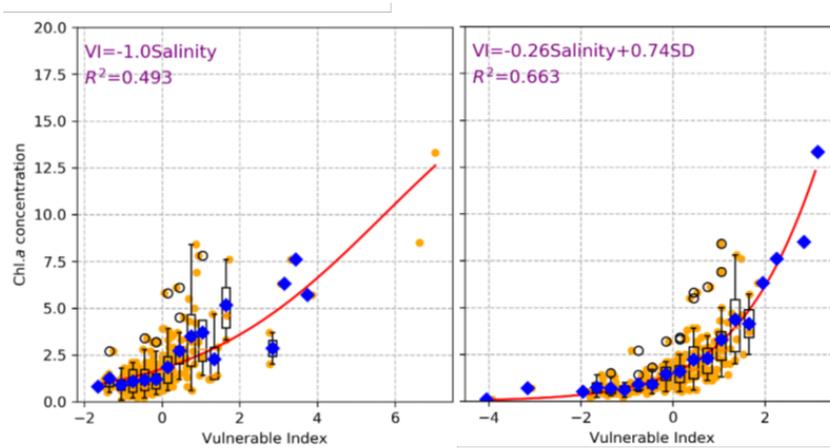


図4 塩分のみ（左）および塩分と透明度の組み合わせ（右）による夏季平均Chl. *a*濃度の予測

(1) -1-3 底質の特性説明

(1) -1-3-1 底質とベントスの分布特性

底質の物理化学特性に関する項目を使用したクラスター解析および主成分分析の結果から、有機物負荷の指標となる泥分、TOC含量、硫化物量、およびORPは、マクロベントス群集の密度や多様性と大きく関わっていたことがわかった。全調査地点の42%の地点がクラスター1に分類され（表1）、それらの地点では泥分およびTOC含量が高く、マクロベントス群集の密度や多様性が著しく低いことが明らかとなった。

表1 各クラスターにおける湾灘ごとの地点数

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6
Kii Channel	9(32)	0	0	5(18)	14(50)	0
Osaka Bay	23(74)	0	0	1(3)	4(13)	3(10)
Harima Nada	35(51)	6(9)	11(16)	0	11(16)	5(7)
Bisan Seto	3(11)	5(18)	14(50)	0	2(7)	4(14)
Bingo Nada	8(53)	2(13)	1(7)	0	3(20)	1(6)
Hiuchi Nada	26(81)	0	0	0	5(16)	1(3)
Aki Nada	0	5(33)	3(20)	0	5(33)	2(14)
Hiroshima Bay	20(87)	0	0	1(4)	2(9)	0
Iyo Nada	0	1(2)	0	25(56)	18(40)	0
Suo Nada	46(50)	1(1)	5(5)	4(4)	14(15)	21(23)
Beppu Bay	5(63)	0	0	1(13)	1(13)	0
Bungo Channel	5(17)	0	0	17(59)	5(17)	1(3)
Hibiki Nada	0	0	3(30)	0	7(70)	0

(%) Sites excluded in Clusters 1-6: Iy-49, Bu-38, Suo-104, and Be-15.

(1) -1-3-2 M-AMBI指標に基づく底質環境の空間分布の解明

ベントスデータから計算されたM-AMBI値の分布はクラスターと類似したパターンであり、大阪湾奥を含む沿岸部で低く、沖合域や潮流の早い海峡部で高い（より健全性が高い）傾向であった（図5）。海底環境の総合指標としての生物指数M-AMBIが瀬戸内海において適用可能であることが明らかとなり、本指標により物理・化学・生物学的特性による「健全な底質環境」の指標値を定量的に示すことが可能となり、底生生態系の特徴に応じた海域区分の実現可能性が示唆された。

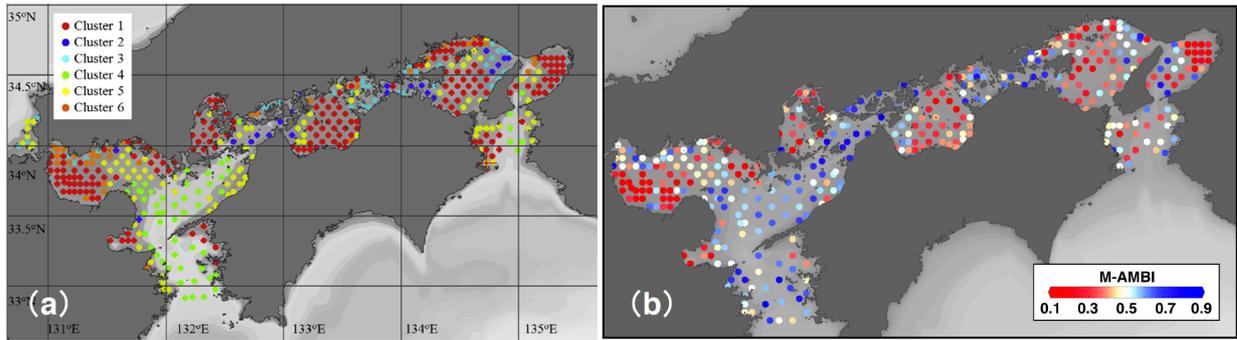


図5 瀬戸内海における (a) 底質物理化学特性に基づくクラスターおよび (b) M-AMBI値の分布

(1) -2 低次生態系構造の時空間分布の解明

(1) -2-1 低次生産の実態解明

中西部海域における低次生態系構造解析では、基礎生産はいずれの季節においても広島湾奥で高い値を示し、湾中央や安芸灘の基礎生産は比較的低かった(図6)。一方、二次生産は夏季を除いて基礎生産ほど顕著な地域差は表れていない。大阪湾における低次生態系構造解析では、水深1 mにおける容積ベースの解析ではあるが、図7に示す繊毛虫類およびカイアシ類の容積ベースの年平均生産速度の時間変化から、1990年代後半までは繊毛虫類の生産速度が大きかったが、その後減少し、2000年前後以降はカイアシ類の方が大きいことが明らかとなった。また、淀川BOD濃度と繊毛虫類の個体数にはよい一致が見られたことから、有機汚濁の改善に伴って繊毛虫類が減少したことが示された。

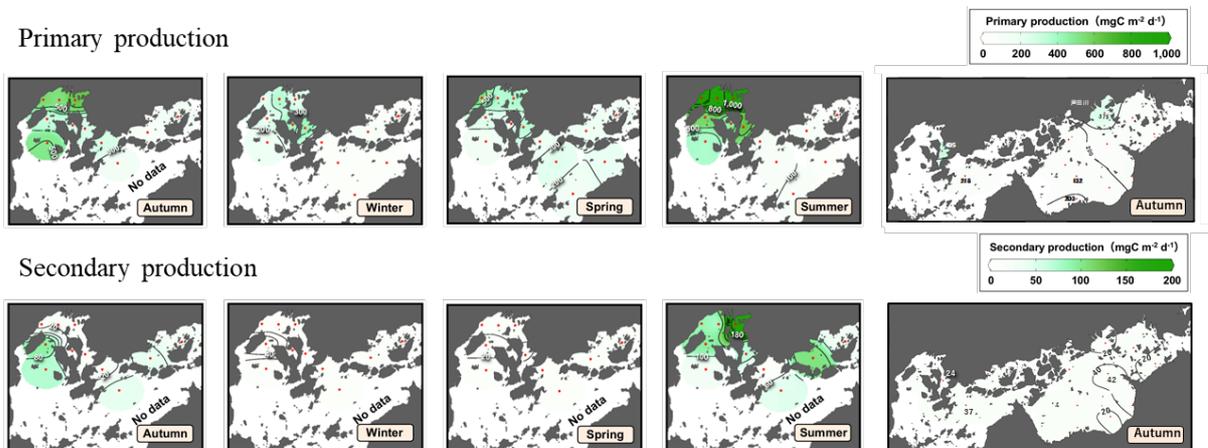


図6 広島湾、安芸灘、瀬戸内海中西部における基礎生産および二次生産の空間分布

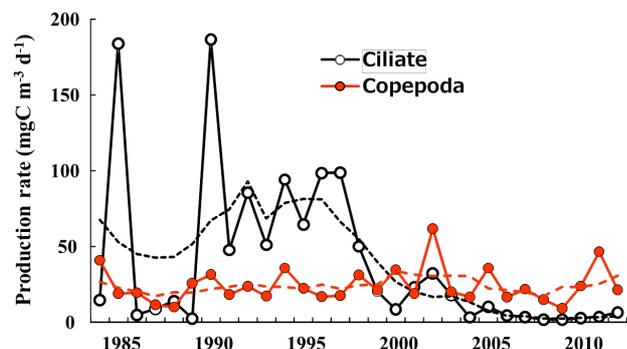


図7 繊毛虫類およびカイアシ類の生産速度の時間変化

(1) -2-2 基礎生産・二次生産の推定手法の開発

広島湾他で得られたデータを用いて計算した窒素およびリンの半飽和定数は図8の通りである。栄養塩濃度が高い領域では半飽和定数は一定の値を示したが、DIN 2.0 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 、DIP 0.2 $\mu\text{mol l}^{-1}$ あたりから急激に減少した。半飽和定数を一定とした計算では、栄養塩濃度が欠乏してくると基礎生産がほとんどゼロになるが、実測ではそのようなことはなく、栄養塩欠乏状態においても一定の基礎生産が起こっている。半飽和定数を栄養塩濃度の係数とすることでこの問題は解消し、実測値をよく再現した。

栄養塩濃度に依存した半飽和定数は以下の通りである。

$$K_N = 6.12 \times (1 - \exp(-0.27 \times \text{DIN}))$$

$$K_P = 1.04 \times (1 - \exp(-1.63 \times \text{DIP}))$$

また、実測値と計算値の関係は以下の図に示す。結果として、計算値の誤差は年間値で5%であった(図9)。

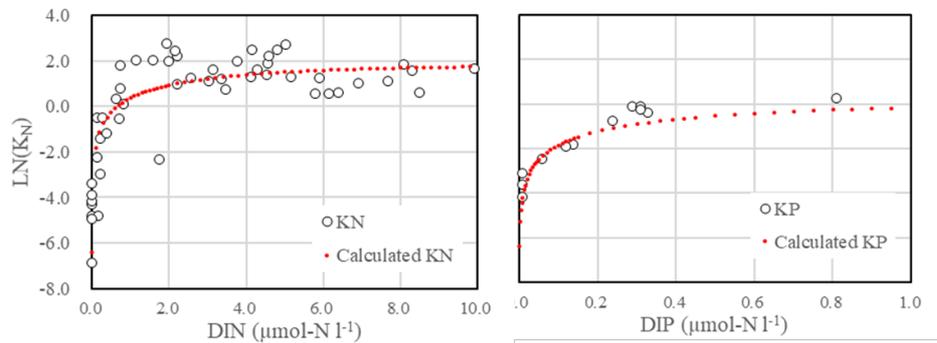
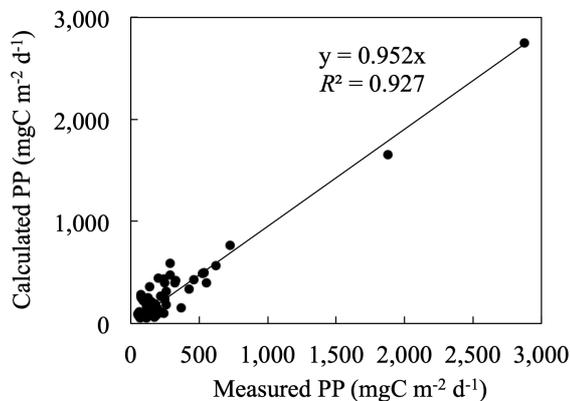


図8 DIN (左) およびDIP (右) に依存した半飽和定数



Measured	Calculated	Error
Autumn		
240.39	247.83	1.03
Winter		
150.92	127.15	0.84
Spring		
265.23	223.62	0.84
Summer		
491.77	606.08	1.23
Total		
287	301	1.05

図9 計算値と実測値の関係 (左) と誤差 (右)

Chl. *a*濃度とカイアシ類による二次生産速度の関係を図10に示す。Chl. *a*濃度 10 $\mu\text{g l}^{-1}$ あたりでカイアシ類にとっては十分な餌環境となり、それ以上では二次生産速度は大きく変化しなかった。二次生産速度の計算式は以下の通りである。

$$G = G_{max} \times (1 - \exp(-0.21 \times \text{Chl. } a))$$

$$G_{max} = 44.9 \times \exp(0.0627)$$

$$G: \text{Secondary production (mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1})$$

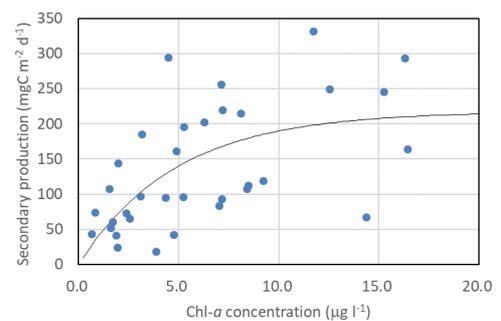


図10 大阪湾におけるChl. *a*濃度とカイアシ類の二次生産速度の関係

(1) -2-3 瀬戸内海全域における過去から現在までの低次生産構造の時空間分布

(1) -2-3-1 生産に関わる水質と基礎生産の時空間分布解析

瀬戸内海全域における季節ごとの基礎生産の経年変化を図11に示す。秋から冬は過去からの変化はほとんど観察されなかったが、春および夏は2000年頃から低下傾向にあり、特に夏の減少が著しことがわかった。

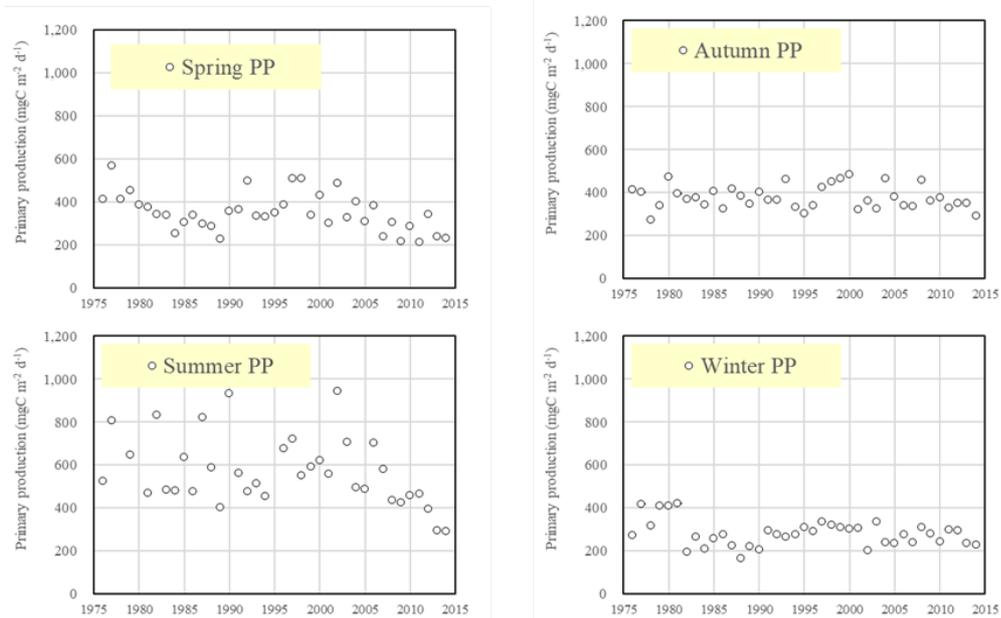


図11 季節別の平均基礎生産の時間変化。1970年代は地点数が少ないため参考値。

海域別の基礎生産の変化をみるために、1981年～1990年までの10年間のChl. *a*濃度を基準に海域を5つに分類した。すなわち、平均Chl. *a*濃度が $2 \mu\text{g l}^{-1}$ 以下、 $2\sim 5 \mu\text{g l}^{-1}$ 、 $5\sim 10 \mu\text{g l}^{-1}$ 、 $10\sim 20 \mu\text{g l}^{-1}$ 、 $20 \mu\text{g l}^{-1}$ 以上の海域に分類した。それぞれの瀬戸内海における専有面積は、32.0%、45.1%、13.7%、13.7%、4.0%、5.3%であった。海域ごとの基礎生産の変化を図12に示す。Chl. *a*濃度 $20 \mu\text{g l}^{-1}$ 以上の海域のみ他の海域より濃度も高いため縦軸が異なっている。Chl. *a*濃度が $5 \mu\text{g l}^{-1}$ を超えるような比較的濃度の高い海域では、Chl. *a*濃度の減少は顕著であり、広い面積を占める低濃度海域では明確な減少傾向は見られなかった。

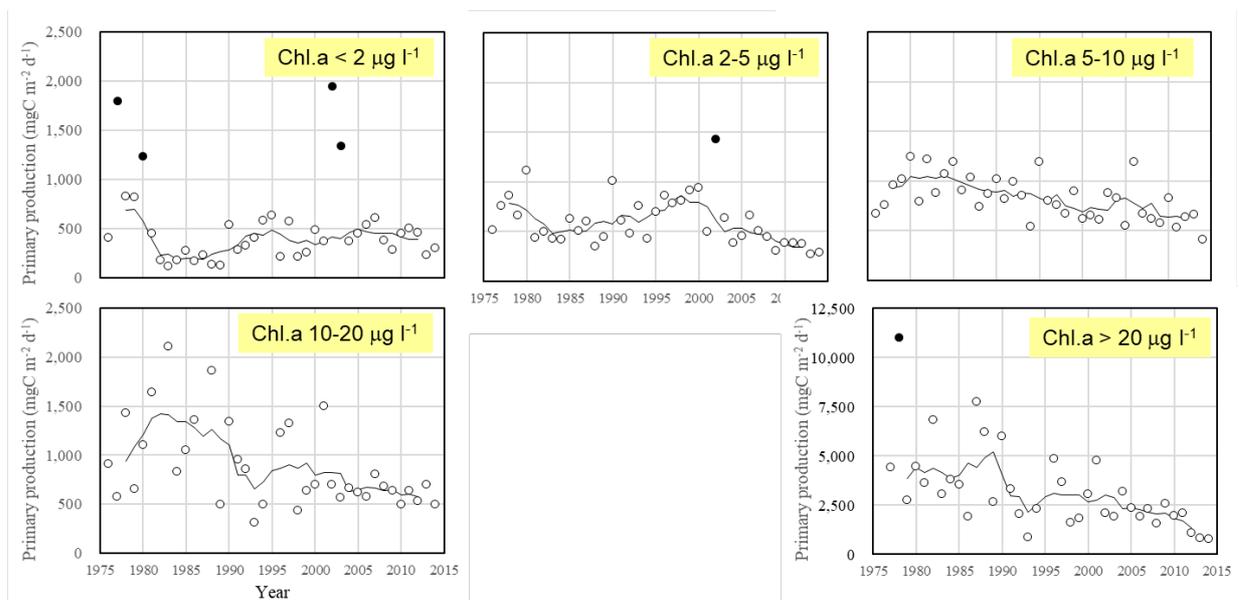


図12 1981-1990年の平均Chl. *a*濃度で分類された海域の平均基礎生産の時間変化

●は外れ値。1970年代は地点数が少ないため参考値。

(1) -2-3-2 二次生産の時空間分布解析

1970年代後半からの季節別の瀬戸内海全体でのカイアシ類の平均二次生産の時間変化を図13に示す。季節別の二次生産は基礎生産ほど大きな変動は示していない。夏季を除けば時間変化はほとんどなく、夏季、秋季で $60\sim 80\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 、春季は $40\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 、冬季は $30\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 程度で推移している。夏季は基礎生産同様に2000年前後からの減少が起こっている。

春季においても2000年あたりから減少しているようにも見えるが、現在のレベルは1980年代～1990年代と同程度である。春季、夏季、秋季、冬季の2005～2014年の平均水温をみるとそれぞれ $15.6 \pm 2.8^\circ\text{C}$ 、 $24.4 \pm 2.2^\circ\text{C}$ 、 $23.4 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 、 $11.5 \pm 2.1^\circ\text{C}$ となっていた。基礎生産では春季と秋季の値は大きくは異ならなかったが、二次生産では春季と比較して秋季の二次生産は1.5倍程度となっている理由は、水温の違いである。

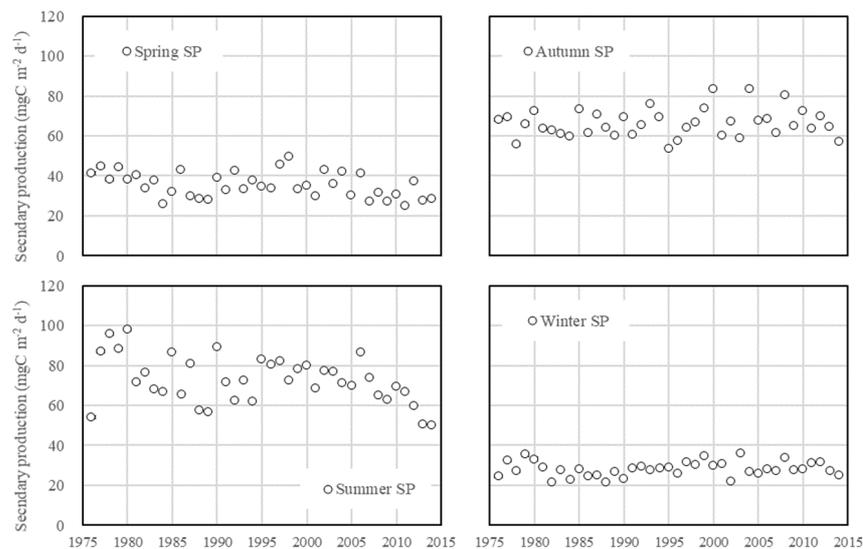


図13 季節別の平均二次生産の時間変化。1970年代は地点数が少ないため参考値。

(1) -2-3-3 瀬戸内海における主要な三次生産としてのカタクチイワシ生産の時間変化

カタクチイワシと東部海域におけるイカナゴについて漁獲量だけでなく、資源量が推定されている。カタクチイワシの餌は植物プランクトンと動物プランクトンであり、その比率は1:3とされている。そこであとの解析のために動物プランクトンに依存した部分の生産速度を計算した(図14)。その結果、生産速度としても1990年代半ばが最も低く、その後は一定であることが示された。

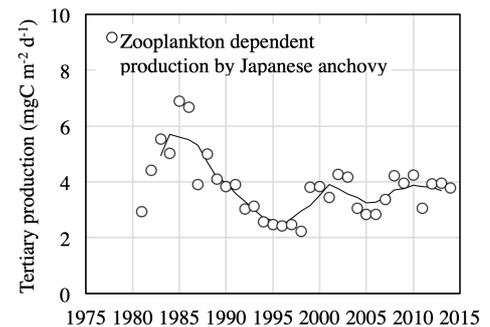


図14 カタクチイワシの動物プランクトン依存分の三次生産の時間変化

(1) -2-3-4 転送効率の時間変化

基礎生産および二次生産の瀬戸内海全体の年平均

均値と基礎生産から二次生産および二次生産から三次生産における転送効率を図15に示す。先に示した通り基礎生産については、春季と夏季に2000年代から減少がみられ、その他の季節では変化がなかった。春季と夏季の基礎生産は相対的に大きいため、これらの季節の減少が年平均値の減少にも寄与し、2000年前後から低下傾向が顕著になっている。一方、二次生産は季節的にみると夏季のみの減少であったが、やはり夏季の二次生産が年変動に与える影響が大きいため、2000年前後から減少がみえる。ただ、1980年代から2000年前後に向けていったん増加した影響で、1980年代と比較すると現在の二次生産はほぼ同等の値となっている。

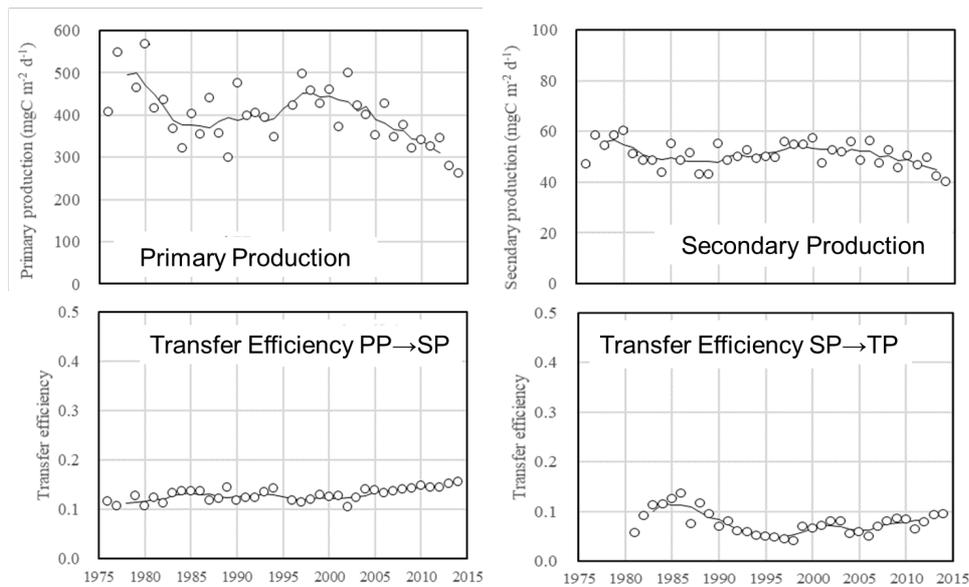


図15 基礎生産、二次生産の年変動（上）と基礎生産から二次生産および二次生産から三次生産における転送効率（下）の時間変化

基礎生産から二次生産の転送効率をみると2000年前後まではほぼ一定の値（ 0.13 ± 0.01 ）を示しているが、その後若干増加している。基礎生産の減少は基本的にChl. *a*濃度がもともと高い海域で顕著に起こっており、Chl. *a*濃度が $10 \mu\text{g l}^{-1}$ を超えるような海域における基礎生産の減少は二次生産の減少に結びつかないことは先に示した通りである。2000年前後まではこのような高濃度Chl. *a*濃度を示す海域の基礎生産が減少しつつも、専有面積が大きく、二次生産の増加に結びつくChl. *a*濃度が $5 \mu\text{g l}^{-1}$ 以下の海域で基礎生産が増加していたため、結果として海域全体の基礎生産は高まり、二次生産への転送効率も一定となった。しかし、2000年以降は、 $2 \sim 5 \mu\text{g l}^{-1}$ 以下の海域での基礎生産が若干減少するなかで、さらに高濃度Chl. *a*濃度を示す海域の基礎生産が減少したため、結果として転送効率が増加したと推定される。

次に二次生産から三次生産の転送効率をみると1985年前後を除き0.1以下の範囲で変動し、その変動は三次生産の変動に依存している。二次生産は比較的安定した中で三次生産が変動しており、転送効率が低いことも考えるとカタクチイワシの三次生産は二次生産に依存しない変動である可能性が高いと結論付けられる。

(1) -3 プラクトン食魚を中心とした高次生態系構造の解明

(1) -3-1 漁獲量及び資源量から評価した魚類の生産構造

魚類漁獲量全体の推移をプラクトン食魚とその他の魚種に分けて評価したところ、2000年までの漁獲量はプラクトン食魚で説明され、2000年以降はその他魚類の減少で説明された(図16左)。漁獲量としては1980年代から一貫して減少しているが、その中身は2000年を境に異なっていることが示された。また、1980年代におけるプラクトン食魚はマイワシが中心であったが、2000年代半ばにはマイワシはほとんど姿を消した。この現象はレジームシフトとも呼ばれ日本沿岸域でも同様に起こった現象であり、餌環境を含め特に瀬戸内海で環境変化をもたらした結果ではないと考えられる。カタクチイワシの資源量は1990年代を底に近年は増加しており、この変動は先にも述べた通り基礎生産、二次生産とは一致しておらず、カタクチイワシの餌となる基礎生産、二次生産に依存した変動とは考えられない。イカナゴについてはカタクチイワシとは異なり、資源量が示されている1980年代から一貫して減少している(図16右)。潜砂したまま「夏眠」を行うイカナゴにとって、瀬戸内海で1960年代から続いた海砂の採取は、イカナゴ資源に極めて大きな負の影響をもたらしたと考えられる。

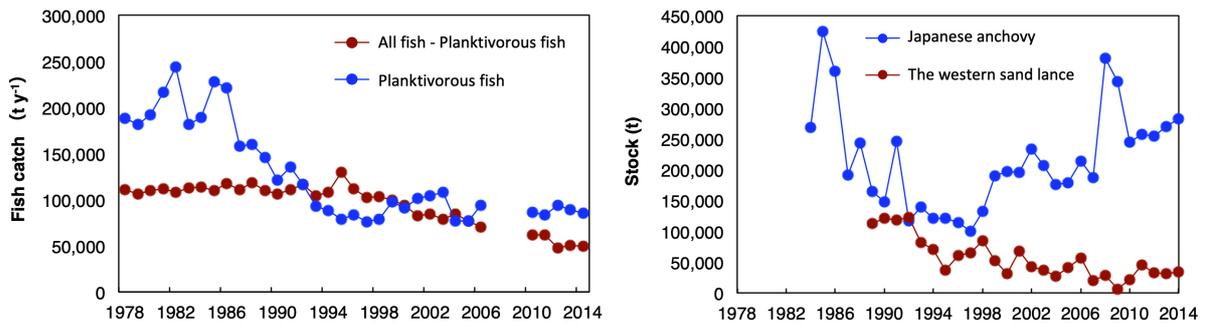


図16 プランクトン食魚とその他の魚種に分けた漁獲量（左）およびカタクチイワシとイカナゴの資源量の推移（右）

(1) -3-2 プランクトン食魚であるイカナゴの個体群解析

2014年および2015年の1月のイカナゴ仔魚採集調査においては、中西部（安芸灘～燧灘西部）に比べ、東部（備讃瀬戸～播磨灘）の方が採集個体数が多い傾向であり、体サイズについても東西間で変異がみられ、仔魚の全長は東部ほど大きい傾向がみられた（図17）。粒子追跡によるシミュレーションにより、安芸灘三原瀬戸周辺において産卵場が散在している可能性が示唆された。また、中西部の主要な産卵場である安芸灘・燧灘で生まれた仔魚は海流によって東部海域には移動しないことが明らかとなった。また、イカナゴの東部個体群と中西部個体群の遺伝的な分化を明らかにするために、遺伝的集団構造解析に適したマイクロサテライトDNAマーカー11座を開発した。瀬戸内海に生息するイカナゴは、遺伝的に一つの集団で成立すること ($F_{st} = 0.0062 \pm 0.0012$: 平均値 \pm 標準偏差、 $p > 0.05$)、イカナゴ主要漁場の一つの伊勢三河湾の集団 ($F_{st} = 0.0058 \pm 0.0011$ 、 $p > 0.05$) や日本海に分布する集団 ($F_{st} = 0.0060 \pm 0.0008$ 、 $p > 0.05$) とともに遺伝的に明確な分化が認められないことが裏付けられた。したがって、瀬戸内海のイカナゴは遺伝的集団としては単一の集団に属し、瀬戸内海の東西の海域間である程度の個体が入り出しつつ維持されていることが示された。

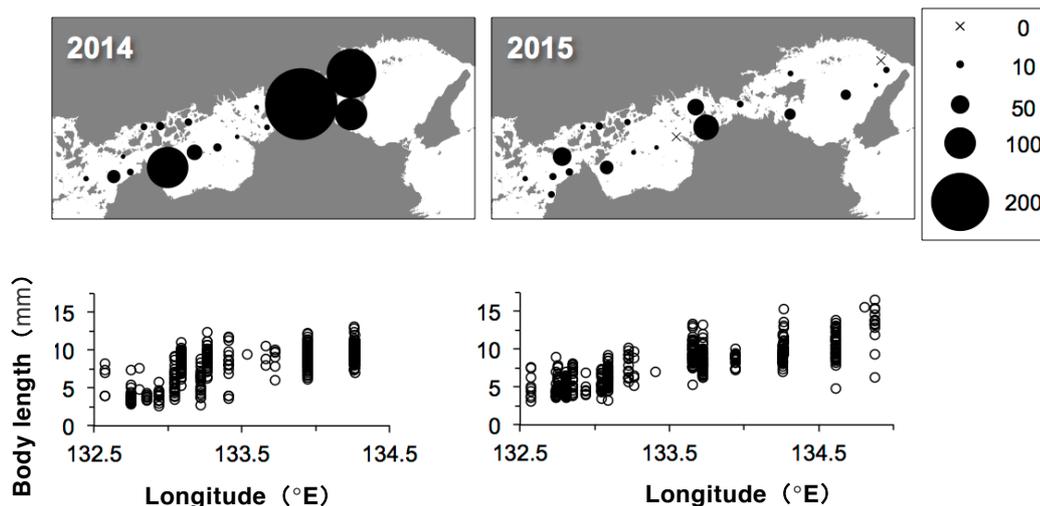


図17 イカナゴ仔魚の採集数（上）および経度と体長の関係（下）

2014年と2015年の夏期のドレッジ調査により、竹原沖から大崎上島と大三島の海峡部までの三原瀬戸西部エリア（3地点）と三原湾細島周辺の三原瀬戸東部エリア（2地点）に夏眠イカナゴの存在を確認した。イカナゴが採捕された地点とされなかった地点の底質を比較したところ、イカナゴ採捕地点の底質のせん断強度は、 $0.77 \sim 2.01 \text{ kN m}^{-2}$ の低い抵抗値を示していた。イカナゴ採捕地点と非採捕地点の底質の淘汰度、貝殻含有率に有意差は認められなかつ

た。一方、イカナゴ採捕地点の底質の中央粒径は有意に小さく、せん断強度が有意に低いという差異がみとめられた。さらに、水槽実験によりイカナゴが多く潜砂した底質を詳しく分析する底質選好性実験を実施した。検討する底質性状として、中央粒径、粒度の淘汰度、貝殻含有率、せん断強度に着目し分析を行った。各底質へのイカナゴ潜砂率と底質性状についてステップワイズ回帰分析を行った結果、潜砂率を説明する変数として、せん断強度のみが説明変数として選択された（図20）。この結果はイカナゴにとって好ましい底質条件の1つとして、底質への潜砂しやすさおよび砂中での移動しやすさが重要であることを示唆するものである。

モデル堆積物としてイカナゴが好む粒径のガラスビーズを使用して砂中の生態を可視化する飼育実験より、夏眠時の水温環境においてイカナゴの潜砂深度は10 cm未満（定位時の最深点：平均5.1 cm、最大8.9 cm、 $n = 65$ ）であることが確認された。また、イカナゴが夏眠する夏季の野外砂底内環境を観測した結果、砂底内では、日平均水温、日最高水温いずれも常に海底直上水温より有意に低い水温が維持され、深く位置するほど日平均水温・最高水温ともに低い環境でイカナゴが夏眠できることが確認された（表2）。

表2 夏季の砂質海底における海底直上水温と砂底内温度の推移

Characteristics of temperature in the sand bottom during summer period increasing water temperature

		Difference to bottom water (°C)		Range of daily temperature change (°C)
		Daily mean temperature	Daily maximum temperature	
Bottom water				0.98±0.28
Pore water below bottom surface	4 cm	-0.24±0.04	-0.44±0.15	0.67±0.19
	10 cm	-0.50±0.06	-0.82±0.18	0.47±0.17
	15 cm	-0.68±0.08	-1.06±0.21	0.36±0.12
Significant difference among 3 depth pore waters (Repeated ANOVA, N = 3 for each depth)		$p < 0.05$	$p < 0.05$	$p < 0.05$

(1) -3-3 瀬戸内海の主要魚食魚であるタチウオの食性

燧灘、大阪湾のどちらにおいてもカタクチイワシが多く観察された。また、大阪湾では魚類のほかに甲殻類（ソコシラエビ属）の割合が高かった。2017年4月において、燧灘で漁獲された個体の胃内容物からカタクチイワシとイカナゴがともに重量割合8.8%で検出された。タチウオの肥満度と肝臓重量指数には海域間で差はみられず、栄養状態には大きな差はないと考えられた。

燧灘におけるタチウオへのプランクトン食魚イカナゴ・カタクチイワシの貢献度を安定同位体比分析から推定した結果、イカナゴの非夏眠時である5月に、タチウオの餌のうち27.6~59.3%がプランクトン食魚2種によって支えられており、イカナゴが少ない燧灘においてもイカナゴがタチウオの餌資源として貢献（3.1

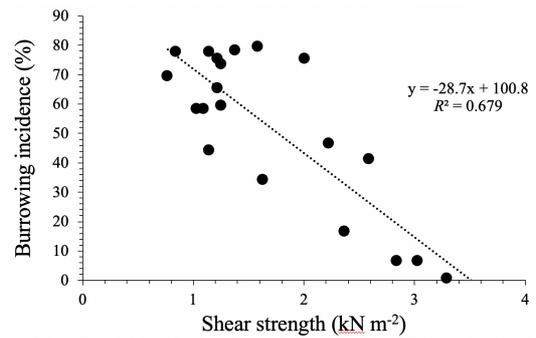


図18 イカナゴの水槽実験における底質のせん断強度と潜砂率（潜砂個体数割合）の関係

表3 炭素・窒素安定同位体比混合ベイズモデルで推定された燧灘のタチウオに対する各餌生物の貢献割合

Main stomach contents of cutlassfish	Estimated contribution for cutlassfish (minimum - maximum %)
Anchovy	24.5 - 51.4
Sand lance	3.1 - 10.0
Shrimps	19.2 - 31.7
lesser grass shrimp	2.2 - 17.3
Squids	2.5 - 36.3

～10.0%)していることが裏付けられた(表3)。これらの結果より、燧灘では、イカナゴの夏眠期前の5～6月にタチウオ大型個体の繁殖が開始されるため、タチウオ再生産への栄養としてイカナゴやカタクチイワシが大きく寄与していることが示唆された。

(1) -4 脆弱性が高い沿岸域に特化したアマモを活用した生態学的栄養塩対策

(1) -4-1 アマモの栄養塩吸収機能

アマモの生産・栄養塩の吸収能力を砂泥質の沿岸域に生息するアオサ、コアマモ、付着微細藻類との比較で評価した。図19は広島湾奥に位置する地御前干潟において、そこに生息するアマモを含めた4種の基礎生産者の基礎生産の時間変化を約2年間にわたり測定した結果である。それぞれの占有している面積は異なるが、ここでの基礎生産は生育場所での生産速度となっている。富栄養化が進む沿岸ではアオサが繁茂し、地御前干潟でもアオサが重層して生育していた。そのため、アオサの基礎生産は年間を通じて大きな値を示したが、アマモも繁茂期である5月～7月ぐらまではアオサをしのぐ基礎生産量であった。富栄養化が顕著であった1980年代のChl. *a*濃度が20 $\mu\text{g l}^{-1}$ を超える海域の基礎生産と匹敵する5,000 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 程度の基礎生産を示し、年によってはその数倍の値を示した。

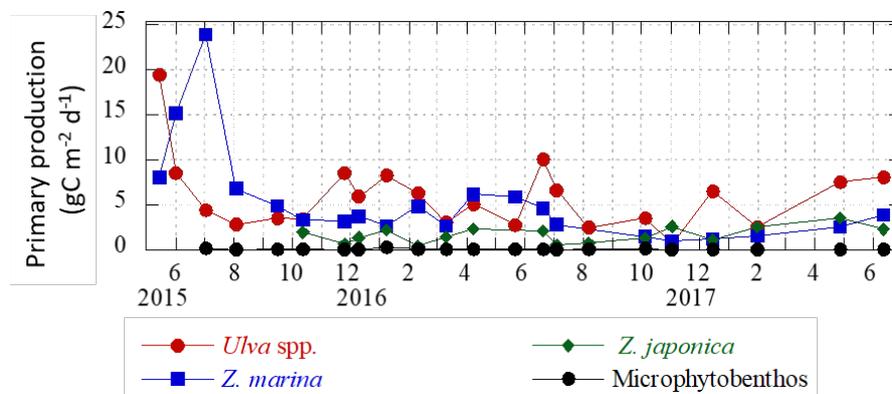


図19 地御前干潟における基礎生産者による生産の時間変化

地御前干潟や生島湾で得られた132～468 $\text{mgN m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 、8.3～29.3 $\text{mgP m}^{-2} \text{d}^{-1}$ の窒素及びリンの栄養塩の吸収によってどの程度陸域から負荷される栄養塩を沿岸域で低減できるかを見積もった。2009年の瀬戸内海に陸域から負荷される窒素およびリンはそれぞれ1日387トン、24トンであり、最新のアマモ場面積は瀬戸内海全体で6,381 haとされている。このアマモ場面積では5月～8月に1日窒素で8.4～29.9トン、リンで0.53～1.87トンを吸収可能であり、これは陸域負荷の窒素で2.2～7.7%、リンで2.2～7.8%に相当する。それほど大きな値とはいえないが、瀬戸内海には1960年代には22,653 haのアマモ場が存在した。この面積までアマモ場が回復したとするとその割合は窒素で7.7～27.4%、リンで7.8～27.8%となり大きな削減効果が期待できる。

(1) -4-2 アマモ場の栄養塩吸収機能が植物プランクトン増殖の抑制に果たす役割

アマモの生育していた地点の光環境は表面光量の約20%であった。この条件を用いて広島湾北部の潜在的なアマモ場生育可能海域を特定したところ370 haあることがわかった。1989～1990年の調査時でのこの海域のアマモ場面積は100 haである。現在の100 haのアマモ場と生育可能海域370 ha全体にアマモ場が生育している場合を想定し、モデル計算した結果が図20である。アマモ場面積を増加させたのはこの図の上1/4の北部海岸だけであるが、5月～6月では明瞭に北部でのChl. *a*濃度が低下している。広島湾では大川である太田川河口が北部海岸に位置しているが、この河川水は西側に流れていくことが知られており、北部から西側で高いChl. *a*濃度が検出される。アマモ場面積の増加はこの西側においてもChl. *a*濃度低下を引き起こしている。一方で湾中央部や湾口への影響は限定的であり、脆弱性が高い沿岸部に特化した対策としての有効性を示した。一方で、7月～8月になると効果は観察されるが、5月～6月ほどの明瞭な効果はなく、植物プランクトンの繁殖期とアマモの繁殖期に若干のずれがあることがわかる。

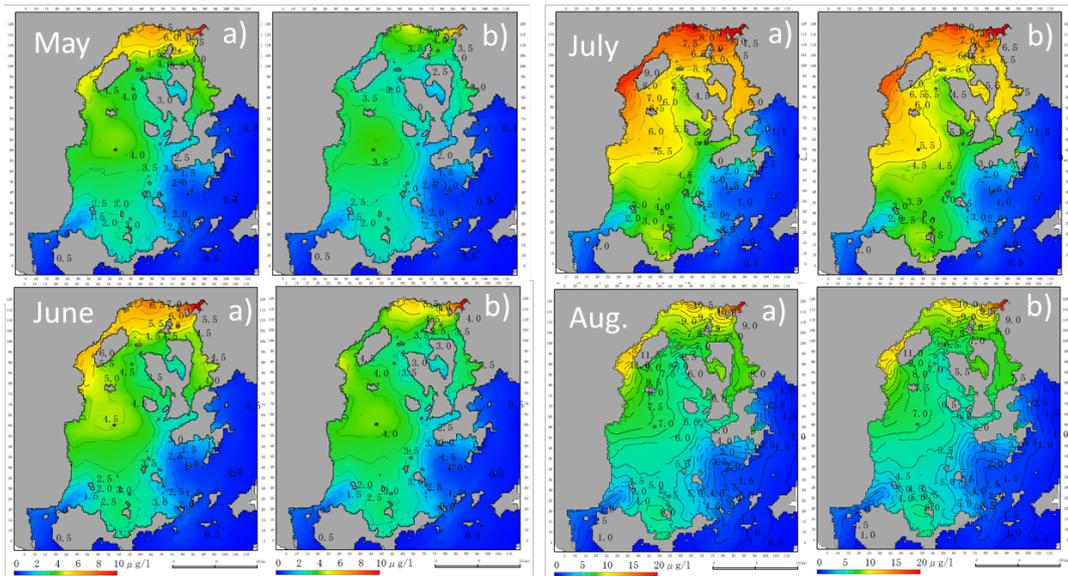


図20 5月から8月の広島湾における (a) 現況 (100 ha) と (b) アマモ場生育可能面積 (370 ha) すべてにアマモが生育したと仮定したときのChl. *a*濃度の分布

(2) 干潟・藻場の栄養物質循環・生物再生産に果たす機能の解明

(2) -1 藻場 (アマモ場)

沿岸部では降雨による塩分低下と栄養塩濃度の増加が起こる。生島湾で2015年6月に行った観測では、降水時に塩分の低下と急激なDIN濃度の増加が認められ、その際にアマモ葉鞘部のN含量が 16.3 mg N g^{-1} から6日間で約2倍の 35.1 mg N g^{-1} まで上昇し、一方で炭素窒素比 (C/N比) は22.6から14.2まで減少する現象を捉えた (図21)。これは定常時における栄養塩吸収による植物プランクトンの増殖抑制効果だけでなく、海域の栄養塩濃度が急激に高まる降雨時にはその吸収能力を高めて栄養塩濃度の低減に寄与する機能がアマモにはあることを示している。

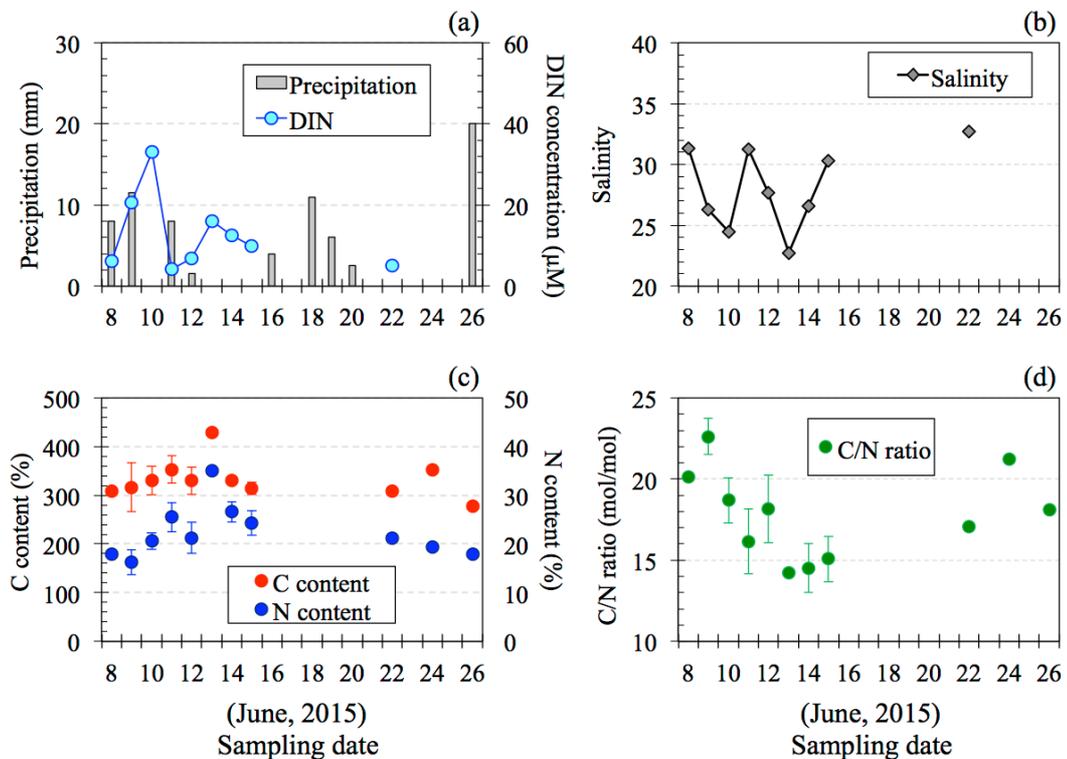


図21 (a) 降水量と生島湾のDIN濃度の変化、(b) 塩分の変化、(c) アマモ草体の炭素と窒素含量の変化、および (d) アマモ草体の炭素窒素比 (C/N比) の変化

(2) -2 干潟

新川・春日川は本研究プロジェクトの前の流入負荷が大きかった2006年～2010年の結果と負荷が減少した本プロジェクト期間の結果を比較した。2006年～2010年の新川・春日川河口干潟では42%の窒素が除去されていたが、2017年の同干潟ではむしろ増加していたこともあり（表4）、干潟における窒素の除去については明確にはできなかった。一方で、共通する機能としていずれの場合も粒子状の有機窒素（PON）が減少し、DINが増加する現象がみられ、その程度は流入負荷に依存することがわかった。この粒子状の有機窒素を無機化し、生物に利用できる形態に変化させる機能が干潟の物質循環機能として重要であることが示された。

表4 干潟への窒素流入量とその形態変化

	Inflow	Outflow to offshore area
Shinkawa-Kasugagawa River Estuary 2006-2010 (high nutrient)	68.7 ton y ⁻¹ PON 63% DIN 37%	39.7 ton y ⁻¹ PON 13% DIN 87%
Shinkawa-Kasugagawa River Estuary (2017) (low nutrient; decreasing from 2006-2010)	33.5 ton y ⁻¹ PON 45% DIN 55%	45.3 ton y ⁻¹ PON 11% DIN 89%
Inter tidal flat, West of Ohgushi Peninsula 2016 (further low nutrient)	0.162 ton y ⁻¹ PON 67% DIN 33%	0.133 ton y ⁻¹ PON 58% DIN 42%

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1. これまで実測に頼っていた基礎生産、二次生産の推定をクロロフィル-*a*濃度、透明度、水温、栄養塩濃度等一般的に行われている水質モニタリングデータから推定する手法を開発したことは、水質モニタリングデータの蓄積がある海域では過去に遡って生物生産を推定できることになり、今後の海域における生物生産の研究の発展に大きく貢献する。
2. 透明度は1900年以前から測定されている海域における基本的な生物環境の指標であるが、あくまで現状の光環境を表しているに過ぎない。富栄養化の進展やその改善によってもたらされる植物プランクトン濃度の変化によって変わる透明度の基礎として地域固有透明度という植物プランクトン以外の因子によって決定される透明度を決定する手法を開発したことによって、今後の透明度の変化を植物プランクトンを変数として予測できることになり、数値シミュレーションの活用などを通じて、海洋学の発展に大きく貢献する。
3. イカナゴの底質選好についてはこれまで粒径分布で表現されていたが、本研究ではせん断強度で表される潜りやすさがイカナゴの底質選好を決定しているという新しい科学的知見が得られた。
4. イカナゴが潜砂することで低温度かつ安定した温度環境で夏季を乗り切ることができることが示され、イカナゴが高水温期を砂中で夏眠する意義の一端を初めて明らかにした。
5. 瀬戸内海のイカナゴは遺伝的集団としては単一の集団に属し、瀬戸内海の東西の海域間である程度の個体が入り出しつつ維持されていることが示された。
6. アマモの物質循環機能として栄養塩吸収に関してはこれまでも知見があったが、降雨等による一時的な栄養塩濃度の上昇に対して、草体内の栄養塩濃度を高めて吸収する現象は報告されおらず、栄養塩濃度が低い海域に生息するアマモの生存戦略の一端を発見できた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省の瀬戸内海環境情報基本調査及び豊かな海の確保に向けた方策検討業務有識者検討会における湾・灘ごとの水質の変化状況の検討において、本研究成果である沿岸と沖合を塩分によって分類、評価する手法が取り入れられ、総量削減の効果等の水質変化の評価、解析に貢献した（平成29年度報告書4-1）。同時に本検討委員会の解析結果は、環境審議会水環境部会瀬戸内海小委員会における検討でも用いられ、当該小委員会における水環境の変化状況の解析に貢献した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1. 本研究で開発したクロロフィル-*a*濃度、透明度、水温、栄養塩濃度等の水質モニタリングデータから基礎生産、二次生産を推定する計算式は、海域の生物生産を知る手段としての活用が見込まれる。特に、改正瀬戸内海特別措置法では豊かな瀬戸内海を目指すことが謳われており、豊かさを表す生物生産性の主要指標となる。
2. 上記計算式を用いて推定した過去からの基礎生産、二次生産の変化と瀬戸内海での分布、三次生産の変化は、今後の総量削減計画の策定において、過去の総量削減効果の検証のために活用されることが見込まれる。
3. 本研究で開発した地域固有透明度という概念は、それぞれの地域で植物プランクトンが存在しないと仮定した場合の透明度であり、栄養塩管理によってそれぞれの海域で達成できる限界の透明度が存在することを示したものである。地域固有透明度は、環境省が設定を求めている沿岸透明度において、実現可能な目標透明度を設定するための活用が見込まれる。
4. 塩分や脆弱性指標によって沿岸域と沖合域を分ける手法は、栄養塩管理における重点的に監視、対策する海域の設定などに活用されることが見込まれる。
5. アマモ場を活用した沿岸海域に特化した対策手法は、植物プランクトンの増殖が起こりやすい沿岸域における栄養塩対策に活用することが見込まれる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Wataru Nishijima, Akira Umehara, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai: Marine Pollution Bulletin, 92, 1-2, 90-98. (2015). Variations in macrobenthic community structures in relation to environmental variables in the Seto Inland Sea
- 2) Wataru Nishijima, Akira Umehara, Satoshi Sekito, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai: Science of the Total Environment, 571, 543-550. (2016). Spatial and temporal distributions of Secchi depths in the Suo Nada of the Seto Inland Sea, Japan, exposed to anthropogenic nutrient loading
- 3) Yuya Shigematsu, Yuichiro Ochi, Shuhei Yamaguchi, Kazumitsu Nakaguchi, Yoichi Sakai, Jun-ya Shibata, Wataru Nishijima, Takeshi Tomiyama: Japan, Fisheries Science, 83, 373-382. (2017). Winter longitudinal variation in the body size of larval fishes in the Seto Inland Sea
- 4) 新野洋平、柴田淳也、富山毅、坂井陽一、橋本博明: 日本水産学会誌, 83, 1, 34-40. (2017). 瀬戸内海中央部燧灘周辺におけるタチウオ *Trichiurus japonicus* の食性
- 5) Wataru Nishijima, Akira Umehara, Satoshi Sekito, Feng Wang, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai: Ecological Indicators, 84, 583-589. (2018). Determination and distribution of region-specific background Secchi depth based on long-term monitoring data in the Seto Inland Sea, Japan
- 6) 一見和彦, 東蘭圭吾, 山口聖, 山口一岩, 多田邦尚: 沿岸海洋研究, 55(2), 79-86 (2018) 干潟域における一次生産と無機化過程: 高松市新川河口干潟域の調査結果から
- 7) 西嶋渉: 沿岸海洋研究, 56(1), 13-19. (2018). 瀬戸内海における栄養塩濃度管理法
- 8) Satoshi Nakai, Yohei Soga, Satoshi Sekito, Akira Umehara, Tetsuji Okuda, Masaki Ohno, Wataru Nishijima, Satoshi Asaoka: Water Policy, 20(4), 855-870. (2018). Historical changes in primary production in the Seto Inland Sea, Japan, after implementing regulations to control the pollutant loads
- 9) Akira Umehara, Satoshi Asaoka, Tetsuji Okuda, Naoki Fujii, Wataru Nishijima, Satoshi Nakai, Hironori Yamamoto, Sosuke Otani: Aquaculture, 495, 311-319. (2018). Biological

- productivity evaluation at lower trophic levels with intensive Pacific oyster farming of *Crassostrea gigas* in Hiroshima Bay, Japan
- 10) Satoshi Asaoka, Akira Umehara, Sosuke Ohtani, Naoki Fujii, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima, Koji Takeuchi, Hiroshi Shibata, Waqar Azeem Jadoon, Shinjiro Hayakawa: Marine Pollution Bulletin, 133, 891–899. (2018). Spatial distribution of hydrogen sulfide and sulfur species in coastal marine sediment Hiroshima Bay, Japan
 - 11) Jun-ya Shibata, Satoshi Tomano, Tetsuya Umino, Takeshi Tomiyama, Yoichi Sakai, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Wataru Nishijima: Japan Agricultural Research Quarterly, 52(4), 307–313. (2018). Isolation, characterization, and PCR multiplexing of microsatellite loci for western sand lance (*Ammodytes japonicus* Duncker and Mohr 1939)
 - 12) Feng Wang, Akira Umehara, Wataru Nishijima, Satoshi Nakai: Ecological Indicators, 98, 397–408. (2019). Distribution of region-specific background Secchi depth in Tokyo Bay and Ise Bay, Japan
 - 13) 坂井陽一、遠藤梓、岩崎菜美、富山毅、柴田淳也、山口修平、中口和光：広島大学総合博物館研究報告、10、19–27。(2018)。瀬戸内海三原瀬戸におけるイカナゴの夏眠底質環境
 - 14) Hirotsune Kuzuhara, Michio Yoneda, Tatsuo Tsuzaki, Masanori Takahashi, Naoaki Kono, Takeshi Tomiyama: Plos One, 14, e0213611. (2019). Food availability before aestivation governs growth and winter reproductive potential in the capital breeding fish, *Ammodytes japonicus*
 - 15) Daichi Uehara, Jun Shoji, Yuichiro Ochi, Shuhei Yamaguchi, Kazumitsu Nakaguchi, Jun-ya Shibata, Takeshi Tomiyama: Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 99(2), 517–523. (2019). Diel changes in the vertical distribution of larval cutlassfish *Trichiurus japonicus*
 - 16) Azusa Endo, Nami Iwasaki, Jun-ya Shibata, Takeshi Tomiyama, Yoichi Sakai: Journal of Ethology, 37, 213–219. (2019). The burrowing sand lance *Ammodytes japonicus* (Teleostei, Ammodytidae) prefers benthic sediments of low shear strength
 - 17) Feng Wang, Akira Umehara, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima: Water Policy, 21(4), 865–879. (2019). Management of the west-central Seto Inland Sea, Japan: factors controlling spatiotemporal distribution of chlorophyll *a* concentration and Secchi depth
 - 18) Akira Umehara, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Masaki Ohno, Wataru Nishijima: Marine Environmental Research, 148, 67–74. (2019). Benthic quality assessment using M-AMBI in the Seto Inland Sea, Japan

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 書籍：里海管理論（分担執筆）、第三章栄養塩管理を分担、85–125。(2019)
執筆：西嶋渉、坂井陽一、富山毅、柴田淳也、多田邦尚、一見和彦、朝日俊雅
- 2) 書籍：Integrated Coastal Management and Satoumi—Restoring Japanese Estuaries and Bays—（分担執筆）Nutrient managementを担当 in press
執筆：Wataru Nishijima、Yoichi Sakai、Takeshi Tomiyama、Jun-ya Shibata、Kuninao Tada、Kazuhiko Ichimi、Toshimasa Asahi

(2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) Akira Umehara, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Wataru Nishijima: Estuarine and Coastal Science Association 55, London, United Kingdom, Sep. 2015. “Benthic quality assessment using M-AMBI analysis in Seto Inland Sea, Japan”
- 2) Toshimasa Asahi, Kazuhiko Ichimi, Kuninao Tada: EMECS11, St. Petersburg, Russia, Aug.

2016. “Nutrient dynamics in eelgrass (*Zostera marina*) meadow and the variation of nutrient contents of eelgrass”
- 3) Tetsuji Okuda, Satoshi Sekitou, Akira Umehara, Satoshi Asaoka, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima: EMECS11, St. Petersburg, Russia, Aug. 2016. “Fate of Silts and Clay from River and its Contribution to Transparency”
 - 4) Feng Wang, Akira Umehara, Masaki Ohno, Wataru Nishijima, Satoshi Nakai: The 3rd Asian Marine Biology Symposium, Kumamoto, Japan, Nov. 2017. “A new index for assessing phytoplankton growth potential in the Seto Inland Sea, Japan”
 - 5) Tetsuji Okuda: The 4th International Workshop on Sato Umi-Gempita SPL-GAPURA, Jakarta, Indonesia, Oct. 2017. “Management of Nutrient Concentrations in the Seto Inland Sea”
 - 6) Akira Umehara, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Masaki Ohno, Wataru Nishijima: Estuarine and Coastal Science Association 57, Perth, Australia, Sep. 2018. “Evaluation of benthic quality using M-AMBI in Seto Inland Sea, Japan”
 - 7) Wataru Nishijima, Tetsuji Okuda, Akira Umehara, Satoshi Nakai, Kuninao Tada: EMECS12, Pattaya, Thailand, Nov. 2018. “Management of the ecosystem in the Seto inland sea”
 - 8) Akira Umehara, Sosuke Ohtani, Satoshi Asaoka, Naoki Fujii, Haruka Miyagawa, Kenji Sugimoto, Yota Uchida, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima. EMECS12, Pattaya, Thailand, Nov. 2018. “Evaluation of water purification function by eelgrass (*Zostera marina*) meadows and its application to coastal management”
 - 9) Feng Wang, Akira Umehara, Wataru Nishijima, Satoshi Nakai: EMECS12, Pattaya, Thailand, Nov. 2018. “Determination of region-specific background Secchi depth in four temperate semi-enclosed seas, central Japan”

7. 研究者略歴

<研究代表者>

西嶋 涉

筑波大学大学院修士課程環境科学研究科修了、博士（工学）
現在、広島大学環境安全センター教授

<研究分担者>

1) 坂井 陽一

大阪市立大学大学院理学研究科修了、博士（理学）
現在、広島大学大学院生物圏科学研究科教授

2) 富山 毅

東北大学大学院博士課程後期単位取得退学、博士（農学）
現在、広島大学大学院生物圏科学研究科准教授

3) 中井 智司

東京農工大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）
現在、広島大学大学院工学研究科教授

4) 多田 邦尚

北海道大学大学院博士後期課程単位取得退学、水産学博士
現在、香川大学農学部教授

5) 一見 和彦

愛媛大学大学院連合農学研究科修了、博士（農学）
現在、香川大学農学部教授

II. 成果の詳細

II-1 栄養塩濃度管理手法開発

広島大学 環境安全センター	西嶋 渉
広島大学 大学院生物圏科学研究科	坂井 陽一
広島大学 大学院生物圏科学研究科	富山 毅
広島大学 大学院生物圏科学研究科	中井 智司

平成26年度～30年度累計予算額：129,758千円

（うち平成26年度：54,044千円、平成27年度：20,173千円、平成28年度：19,324千円、平成29年度：18,551千円、平成30年度：17,666千円） 累計予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

閉鎖性沿岸海域のモデル海域として瀬戸内海を対象として、栄養塩管理と生物生息環境の保全・再生を通じて赤潮等の障害を起こさない健全な物質循環と高い生物生産性の実現を目指した持続性の高い沿岸管理手法を開発することを目的として研究を行い結果以下のことを明らかとした。1) 水質総量削減によって減少した栄養塩の流入は、主としてクロロフィル*a* (Chl.*a*) 濃度が高かった沿岸域の基礎生産を減少させ、瀬戸内海の約80%を占める元々Chl.*a*濃度が低い沖合域を中心とした海域の基礎生産にはほとんど影響を及ぼしていないことがわかった。2) 二次生産はChl.*a*濃度に依存して増加するが、Chl.*a*濃度10 $\mu\text{g l}^{-1}$ ぐらいでその増加は止まることが明らかとなり、その結果として、高Chl.*a*濃度を示す海域で主として起こった基礎生産の減少は二次生産には大きな影響を及ぼしておらず、1980年代から二次生産は大きく変化していないことが明らかとなった。3) 一方で、依然として沿岸域ではChl.*a*濃度が高い海域が存在するが、このような今後重点的に管理すべき海域を特定するための指標として、塩分と透明度を用いた脆弱性指標を開発した。4) このような植物プランクトンが増殖しやすい海域に特化した対策として、植物プランクトンの増殖と繁殖期が重なるアマモを取り上げ、アマモによる栄養塩吸収を活用することで植物プランクトンの増殖を抑制する手法を示した。この手法は、春季から夏季に吸収された栄養塩は分解に伴い秋季以降に放出されるため、海域に供給される栄養塩の総量を大きく変化させないことに特長がある。5) アマモ場の自然再生とも関連する透明度については、植物プランクトン以外の光減衰要因には地域特性があり、その海域で植物プランクトン濃度の低減、すなわち栄養塩管理で達成しうる最大の透明度を地域固有透明度として推定する手法を開発し、栄養塩管理によって改善しうる透明度はそれほど大きくないことを示した。

[キーワード]

栄養塩、基礎生産、二次生産、脆弱性指標、地域固有透明度

1. はじめに

人口密集地域を流域圏に持つ閉鎖性海域では、人為起源の負荷に伴う水域の汚濁や富栄養化が大きな問題となっている。一方で、このような閉鎖性海域の生物生産が人為起源の栄養塩類に支えられている側面もある。つまり、陸域からの有機汚濁負荷については少なければ少ないほど良好な海域環境となるが、陸域からの栄養塩類の負荷について言えば、過剰な負荷は富栄養化に伴う植物プランクトンの過度な増殖を引き起こす一方で、負荷が低くなりすぎると基礎生産の低下を通じて魚類等の高次生産を低下させるリスクを伴う。

閉鎖性海域全体が極度に富栄養化した海域での栄養塩管理は、過度な植物プランクトンの増殖に伴う赤潮や底質悪化など様々な悪影響を低減するために陸域からの栄養塩負荷を削減することで

ある。一方で、ある程度富栄養化の制御に成功した海域では、依然として環境保全上の問題が残る場所・季節と特に環境保全上問題がない場所・季節が混在するようになる。このような段階の海域では、環境保全上の問題が残る場所・季節だけを見てさらなる栄養塩類の削減を行うと結果として、高次生産を支える基礎生産、二次生産をも低下させ、水産上有用な魚類等の生産をも低下させることも起こり得る。一方で、陸域からの人為的な栄養塩負荷がない状態での生態系が、その海域が本来持つ生態系であり、その自然状態に近づく過程で生物生産が低下することは致し方ないともいえる。しかし、古来沿岸域は人々の生活の場であり、人の生活と隣接する海域は密接に結びつき、人間活動によって生じた栄養塩類が海域に負荷され、その海域の生物生産を支えてきたことまた事実である。そのような相互関係の中で、人間活動から発生する人為負荷を管理しながら、環境保全と生物生産を両立させ、豊かな海を実現することが求められている。

瀬戸内海の栄養塩類に関する管理の状況と水域特性について説明する。昭和40年代以降瀬戸内海を含む閉鎖性海域では広い範囲で赤潮が頻発するなど水質汚濁の進行が顕著であった。そのため、瀬戸内海においては、昭和48年に瀬戸内海環境保全臨時措置法が制定され、昭和53年には瀬戸内海環境保全特別措置法として恒久法となった。閉鎖性水域の水質改善を図るためには、排水の濃度規制のみでは十分ではないため、水域に流入する汚濁負荷の総量を削減する必要があることから、水質総量規制が導入された。1979年に始まった水質総量規制はスタート時には対象がCODのみであったが、1999年から窒素およびリンが加わり、瀬戸内海に流入する窒素の負荷量は $27.7 \text{ kg-N km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ から $16.7 \text{ kg-N km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (40%の削減)、リンの負荷量は $2.63 \text{ kg-P km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ から $1.03 \text{ kg-P km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (61%の削減)に減少した。この間赤潮の発生件数は約300件から100件程度まで減少した一方で、漁獲量の大幅な減少もあり、瀬戸内海の貧栄養化を懸念する意見もでてきた。そのような中、平成27年10月2日に瀬戸内海環境保全特別措置法が一部改正され、瀬戸内海の環境の保全について、水質が良好な状態で保全されるとともに、生物の多様性及び生産性が確保されるなど、瀬戸内海の有する価値や機能が最大限に発揮された「豊かな海」とする考え方が示された。また、湾・灘ごとや季節ごとの課題に対応し、多面的な価値・機能が最大限発揮された「豊かな瀬戸内海」を目指すことも謳われている。

瀬戸内海に流入する栄養塩類は陸域からの負荷だけでなく、瀬戸内海が2か所で接続する太平洋からの負荷が大きく、底泥からの負荷も考慮する必要がある。外洋起源の栄養塩類の見積もりに関してはいくつかの論文が発表されている。石井ら(2004)¹⁾は大阪湾を除くと外洋起源の栄養塩がおよそ6割~9割を占める計算しているが、武岡(2006)²⁾は、石井ら(2004)の研究結果も含めての過去の外洋起源の寄与率に関する研究を整理し、外洋起源の栄養塩類は窒素およびリンともに6割足らずであるとしている。いずれにしても陸域負荷と比較して太平洋からの負荷が卓越しているという結論は共通しており、その中で陸域からの窒素で40%、リンで61%の栄養塩流入負荷の減少がどう瀬戸内海の生物生産に影響を及ぼしたかを整理する必要がある。

2. 研究開発目的

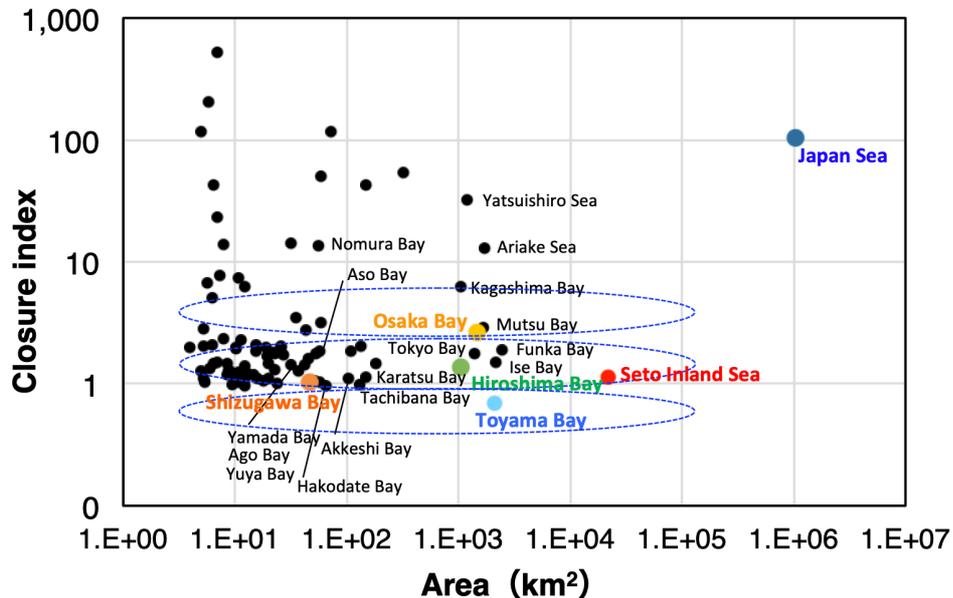
S-13は、持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発を目指して、「きれいで、豊かで、賑わいのある、持続可能な、沿岸海域(里海)」を実現することを目的としている。その中でテーマ1は、比較的広域な閉鎖性沿岸海域のモデル海域である瀬戸内海において、栄養塩管理と生物生息環境の保全・再生を通じて赤潮等の障害を起こさない健全な物質循環と高い生物生産性の実現を目指した持続性の高い沿岸管理手法を開発することを目的とした。

そのため本テーマ1では、サブテーマ1として、1)多様性の高い広域な閉鎖性海域の管理の基本となる海域特性の指標開発、2)生物生産性の基本となる基礎生産、二次生産といった低次生態系構造の解明と栄養塩の関係を評価、3)プランクトン食魚を中心とした高次生態系構造の解明、4)自然要因によっても植物プランクトンの増殖による障害が起こりやすい沿岸域に特化した対策について検討した。

3. 研究開発方法

(1) -1 環境管理のための海域特性の指標開発とその適用

環境省は閉鎖性指標を用いて閉鎖性海域88か所を選定している。瀬戸内海とテーマ2で対象とした志津川湾はこの海域に含まれる。閉鎖性海域88か所に加えて、本研究で重点的に検討を加えた瀬戸内海の中でも閉鎖性が高い広島湾、大阪湾、さらにテーマ3が対象とした富山湾、日本海を面積と閉鎖性指標で整理した（図(1)-1）。



図(1)-1 閉鎖性海域における瀬戸内海の位置づけ

瀬戸内海は面積的には突出して大きく、その中でも代表的な内湾である広島湾、大阪湾が東京湾、伊勢湾などに近い面積を持っており、一元管理するには大きすぎるのがわかる。このような大きな海域を管理する場合の一つの方法は、地形的なブロックに分けて管理する方法であり、瀬戸内海の場合は湾灘管理となる。重点的に検討した広島湾、大阪湾は規模的にみると東京湾、伊勢湾等の富栄養化が進んだ海域が含まれ、大都市圏を流域圏に持つ大川が流入するという共通性がある。そのため、広島湾や大阪湾を対象とした栄養塩管理手法の開発は広くこれらの海域に適用できる可能性がある。一方で、瀬戸内海の湾灘は、592～4,009 km²の規模の違いと流入河川や接続海域の影響など海域特性は様々であり、地理的なブロックだけではなく、様々な湾灘に共通して適用可能な管理手法の開発が望まれている。この視点での管理手法の開発は、規模の大小を問わずより汎用的に適用できる可能性がある。

海域の富栄養化に伴う様々な悪影響が、主として植物プランクトンの過剰増殖によって引き起こされていることを考えると植物プランクトンの増殖に関係した海域特性の視点から海域内を区分けし、管理する視点が重要であると考え、本研究を行った。

(1) -1-1 光環境の特性解明

光環境は、底生生態系の基礎生産にとっては死活的に重要な環境因子であり、浮遊生態系の基礎生産にとっても、有光層（photic zone）を決める重要な因子である。海域の光環境は、Secchiによって開発された白色の透明度板を水中に沈め、肉眼で識別できなくなる深さと定義される透明度（Secchi depth）という指標で、世界中の海域等で150年以上前から測定されてきた。我が国の閉鎖性海域でも富栄養化による海域の汚染が著しかった1970年代からこの方法による海域環境のモニタリングが行われてきた。このように長期データが存在する透明度

は、その海域本来の光環境の把握や富栄養化の進展や人為的な環境改変、その後の環境回復に伴う光環境の変化を理解するためには大変有用な指標である。

現在は透明度に加えて、光量子センサーを用いて光環境の評価が行われている。光合成に利用される波長域は、光合成有効放射（Photosynthetically Active Radiation）と呼ばれる400 nm～700 nmの波長域であり、海水に入射した光は、下に表すランベルト・ベールの法則（Lambert-Beer Law）にしたがって指数関数的に減衰する。

$$I_z = I_0 \exp(-K_d Z)$$

ここで、 I_z ：水深Z mのときの光量（ $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ）、 I_0 ：海表面直下光量（ $\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ）、 K_d ：光減衰係数（ m^{-1} ）、 Z ：水深（m）。

また、水中に入射した光は、一般的には水分子、溶存有色有機物質（CDOM; Chromophoric Dissolved Organic Matter）、植物プランクトンを含む懸濁物質（SPM; Suspended Particle Matter）によって減衰する。このため、光減衰係数は、次の式で表現される。

$$K_d = K_w + K_{\text{CDOM}} + K_{\text{PHY}} + K_{\text{TRI}}$$

ここで、 K_w ：水による光減衰（ m^{-1} ）、 K_{CDOM} ：溶存有色有機物質による光減衰（ m^{-1} ）、 K_{PHY} ：植物プランクトンによる光減衰（ m^{-1} ）、 K_{TRI} ：植物プランクトン以外の懸濁物質による光減衰（ m^{-1} ）。

光減衰と透明度は以下の式の関係にあることが知られており、光量子センサーを用いた測定がなされていなかった過去や透明度のデータのみ取得されている海域においては、透明度の値を用いて光減衰係数を推定することが可能である。

$$K_d = b/SD$$

ここで、 b ：係数、 SD ：透明度（m）。

そこで（1）-1-1では、瀬戸内海全域を対象として、浮遊生態系の基礎生産にとっても、有光層を決める重要な因子である透明度の時空間分布を明らかにし、岸沖の透明度の違いや経年変化について考察した。また、植物プランクトンによる光減衰以外の「地域性」を加味した透明度指標を開発し、東京湾や伊勢湾などへの適用可能性について検討した。さらには、開発した透明度指標に栄養塩負荷に関わる水質特性を併せる事で新たに植物プランクトンの増殖に対する脆弱性指標の開発を試みた。

（1）-1-1-1 透明度の時空間分布の解明

広域総合調査および瀬戸内海総合水質調査における2005年から2014年のデータを用いて、瀬戸内海における夏季平均クロロフィル-*a*（Chl.*a*）濃度と夏季平均透明度の空間分布図を作成し、海域による両指標の分布を評価した。

また、観測点が多い周防灘において、1981年から2011年の広域総合調査データおよび2003年から2011年の瀬戸内海総合水質調査データを用いて詳細検討を行った。

（1）-1-1-2 地域固有透明度指標の開発とその分布特性

広域総合調査および浅海定線調査により得られたChl.*a*濃度及び透明度からChl.*a*濃度をゼロと仮定したときの透明度を推定し、地域固有透明度と定義した。地域固有透明度は以下の式により求めた。

$$\ln(1/SD) = aChl + b$$

ここで、 SD ：透明度（m）、 Chl ：Chl.*a*濃度（ $\mu\text{g l}^{-1}$ ）、 a 、 b は定数である。

（1）-1-1-3 地域固有透明度の他海域への適用可能性

地域固有透明度の汎用性を確認するため、東京湾および伊勢湾において地域固有透明度を計算した。使用したデータは1981年から2015年の広域総合調査データである。

(1) -1-2 植物プランクトンの増殖に対する脆弱性指標の開発と適用

栄養塩の負荷量および濃度は植物プランクトンの増殖に大きな影響を及ぼす。一方で、植物プランクトンの増殖はその他の様々な環境因子の影響を受けることも知られており、特に地理的に決まる環境因子に注意を払う必要がある。ここでは、栄養塩管理によって減少し、今後とも変動が予測される栄養塩類を直接扱わず、地理的な海域特性を表現する比較的安定した水質項目に基づき、植物プランクトンの増殖のしやすさを表す指標として脆弱性指標 (Vulnerable Index: VI) を定義した。検討した環境因子は、塩分、透明度、地域固有透明度、岸からの距離 (島嶼は含まない)、水深、躍層形成 (表層と下層の密度差からのみ単純化して計算したプランクトン・バイサラ振動数 N^2) であり、以下の式に基づき、VIを計算した。

$$\text{Chl.}a\text{濃度} = 1/(b_1 + b_2 \times \exp(b_3 \times \text{VI}))$$

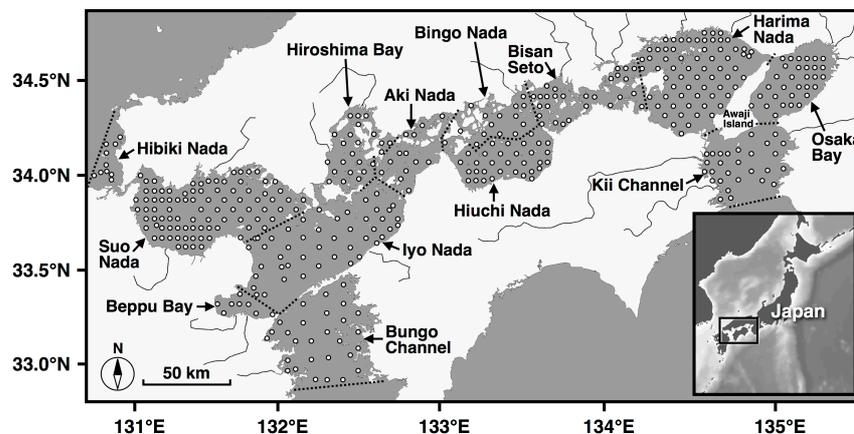
$$\text{VI} = \alpha P_1 + \beta P_2 + \gamma P_3$$

ここで、 α 、 β 、 γ 、 b_1 、 b_2 、 b_3 は定数、 P_1 、 P_2 、 P_3 は環境因子。

用いたデータは、2003年～2012年の夏季Chl.a濃度の平均値である。

(1) -1-3 底質の特性解明

沿岸域では、プランクトンや魚類等から構成される浮遊生態系と、海底に生息するゴカイ等の底生生物 (ベントス) からなる底生生態系が密接に結びついた複雑な食物網が形成されている。海底のベントスは、水中および海底表面の微細藻類や海底に溜まった有機物を摂餌し、魚類等の餌として再び水中の食物連鎖に有機物を受け渡す役割を担っており (腐食連鎖)、沿岸域の生物生産や物質循環に寄与している。また、海底環境は週や月レベルでダイナミックに変化する水質特性に比べ比較的安定的であり、水質環境の履歴を把握することができるため、海域環境の平均像を評価する上で重要な指標である。瀬戸内海では、1980年から約10年に1度、400地点程度の底質・ベントスの一斉調査 (瀬戸内海環境情報基本調査) が実施されており、膨大なデータが存在する (図(1)-2)。その底質特性とベントス情報を用いて底生生態系に関わる解析を行えばデータ数に裏付けされた信頼性の高い成果が期待できる。瀬戸内海では、高度経済成長期に伴う人口・産業の集積により水質汚濁が顕在化し、1979年から総量規制が導入された。仮に水質改善に伴う底質の物理化学的特性やベントス群集構造の変化について明らかにすることができれば、瀬戸内海の底生生態系構造の把握に大きく貢献できると考えられる。そこで (1) -1-3では、瀬戸内海の海底環境の概要を把握すると同時に、生物と底質特性を合わせた海底環境の健全性評価のための指標の瀬戸内海における適用の可否について明らかにした。



図(1)-2 瀬戸内海環境情報基本調査における測点

(1) -1-3-1 底質とベントスの分布特性

瀬戸内海全域における海底環境特性を評価するために、環境省が実施した第3回瀬戸内海環境情報基本調査 (2001～2004年) の底質および底生生物データを使用した。調査および分析方

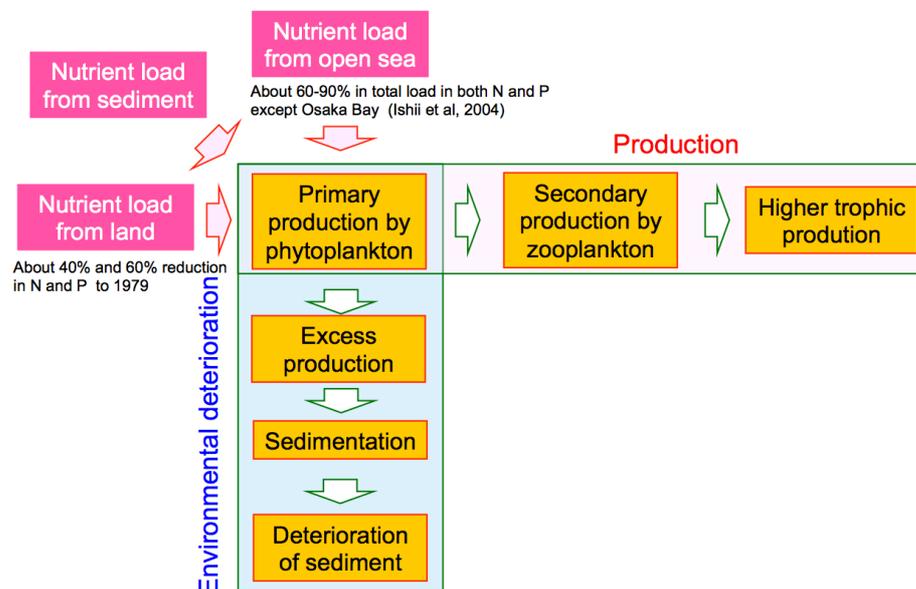
法は、環境省が当該調査において定める方法であり、425地点における水深、泥温、強熱減量（IL）、全有機炭素（TOC）含量、粒度組成、酸化還元電位（ORP）、硫化物含量、およびマクロベントスの密度のデータを解析に使用した。

(1) -1-3-2 M-AMBI指標に基づく海底環境の健全性評価

生物指数を用いた瀬戸内海全域における海底環境の把握のために、(1)-1-3-1と同様のデータセットを用いて、ヨーロッパで開発された生物指数であるAZTI's Marine Biotic Index（AMBI）解析を導入した。AMBI解析は底生生物（マクロベントス）群集の組成を用いた評価法であり、有機汚濁耐性に基づいて個々のマクロベントスについてそれぞれグループを割り当て（G1～5）重み付け計算をし、ある場所における種組成から計算される生物指数値を算出する方法である³⁾。AMBI解析には、AMBI software version 5.0 を使用して地点ごとにAMBI値を計算し、種数、多様性指数、およびAMBI値の因子分析によって算出される多様性を加味した総合的指数であるMultivariate AMBI（M-AMBI）値を得た。得られたM-AMBI値および上記クラスター解析結果を用いて瀬戸内海における適用可能性について明らかにした。

(1) -2 低次生態系構造の時空間分布の解明

図(1)-3に簡単に示したが、海域に流入した栄養塩類が植物プランクトンの生産につながり、そこから始まる浮遊系における主要なフローは2つあり、一つは、さらに高次の生物につながる生物生産のフロー、今一つは富栄養海域で一般的にみられる生物生産フローに利用されなかった植物プランクトンの生産が底質に移行し、環境悪化を引き起こすフローである。従来の環境保全を目的とした管理の場合には、生物生産のフローを見る必要がなかったために、植物プランクトンの増殖に対してもChl.a濃度を代替指標としてモニタリングするだけで充分であったが、環境保全と生物生産の両立を目指す管理においては、生物生産のフローを定量化する必要が生じる。



図(1)-3 栄養塩から始まる物質フロー

生物生産のフローを定量化するためには、各栄養段階の生産速度を求める必要があるが、瀬戸内海をはじめ、各栄養段階の生物生産速度に関するデータは水質のように蓄積されていない。管理においては現状把握だけでなく、過去の施策の効果を検証し、次の施策に生かす必要から長期的なデータの蓄積は不可欠である。そこで、現状把握のための低次生産速度を実測しながら、そのデータに基づき、過去の水質データから基礎生産速度、二次生産速度を推定する手法を開発し、過去からの低次生産速度の時空間分布を明らかとした。また、得られたデータに基づき、外洋起源の負荷割合が陸域負荷よりも大きい瀬戸内海において、陸域からの窒素で4割、

リンで6割の栄養塩負荷の削減が低次生産に及ぼした影響を評価した。

(1) -2-1 低次生産の実態解明

魚類等の高次生態系を支える低次生産という視点では、生産量が大きく、様々な大型魚類の餌となるプランクトン食魚を支える低次生物生産は重要である。低次生態系における物質とエネルギーの効率的な流れが豊かな高次生態系を形成することにつながることから、低次生態系の各段階における生産性をみると同時に各段階間での転送にも着目して生態系を評価する必要がある。また、これまで湾灘として扱われてきた生態系区分から岸沖の評価へと議論を進めるためには、同じ湾灘で岸沖を比較出来るデータセットが必要である。そこで(1) -2-1では、瀬戸内海を代表する内湾である広島湾や大阪湾、安芸灘や燧灘を対象に、それぞれ岸沖に地点を設け、低次生物生産に関わる調査を実施した。

(1) -2-1-1 中西部海域における低次生態系構造解析

広島湾については、2014年11月2-3日(秋)、2015年2月7日(冬)、5月9日(春)、8月20日(夏)に7地点において、安芸灘については2015年10月25日(秋)、2016年1月31日(冬)、5月14日(春)、9月1日(夏)に6地点において四季調査を行った。また、2016年11月14-16日に瀬戸内海西部調査として広島湾(1地点)、安芸灘(1地点)、燧灘(6地点)、備後灘(3地点)、備讃瀬戸(3地点)を選定し観測を行った。各調査の採水層は、表層水および表層水の光量の50、10%、および底層の計4層とした。

各層から採取した500 mLの海水を500 mLポリカーボネート製ボトルに分取し、予め調製した1%の ^{13}C 安定同位体試薬 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ (PR-24600 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 99.2% : 和光純薬) を ^{13}C 量が試料水中のDICの10%程度になるように添加し4時間培養を行った。培養後、予め空焼きしたガラス繊維ろ紙(GF/F : Whatman)にてろ過を行いPOCを捕捉した。その後、 1 mol l^{-1} 塩酸を滴下してフィルター上の無機炭酸を除去し、3%NaCl等張液を用いてフィルター上に残留した塩酸を洗浄した。ガラス繊維ろ紙を窒素ガス雰囲気下で乾燥させ、 -30°C 以下で炭素同位体分析まで凍結保存した。フィルターの粒子態有機炭素濃度 ($\mu\text{gC l}^{-1}$) を元素分析計 (Flash EA1112:Thermo Fisher Scientific) 、 ^{13}C 存在度 ($^{13}\text{C atom}\%$) を安定同位体比質量分析計 (DELTAplus Advantage: Thermo Fisher Scientific) で測定した。

POC : 培養後の粒子態有機炭素濃度 ($\mu\text{g l}^{-1}$)

Ais : 培養後の粒子態有機炭素の ^{13}C 存在度 ($\text{atom}\%$)

Ans : ^{13}C 添加前の粒子態有機炭素の ^{13}C 存在度 ($\text{atom}\%$) = $1.08 \text{ atom}\%$

Aic : 添加後の海水中の全炭酸の ^{13}C 存在度 ($\text{atom}\%$) は以下の式により算出した。

$$Aic = \frac{DIC \times Ans + \text{添加NaH}^{13}\text{CO}_3 \text{水溶液量} \times \text{NaH}^{13}\text{CO}_3 \text{のatom}\%}{DIC + \text{添加NaH}^{13}\text{CO}_3 \text{水溶液量}}$$

また、基礎生産速度 P ($\mu\text{gC l}^{-1} \text{ h}^{-1}$) は次の式で計算した。

$$P = POC \times \frac{(Ais - Ans)}{(Aic - Ans)} \times \frac{F}{T}$$

ここで F は同位体分別係数 (=1.025) 、 T は培養時間 (h) を示す。

水柱積分の基礎生産量は以下の式で算出した。

$$PP_{STN} = 12 \times \int (PB_z \times CHL_z) dz$$

$$PB_z = a \times \left(\frac{I_z}{I_0} \right) \times 100$$

(1) -2-1-2 大阪湾における低次生態系構造解析

大阪湾における解析は、大阪湾東部においては1970年代から毎月実施されている植物・動物プランクトンデータ (月1回小潮時に大阪湾東部海域の12定点でバンドン採水器を用いて水深1 m層から採集) を含む公共用水域調査データを用いた解析と2014-2017年7月~10月に大阪湾で

月ごとに実施した水質測定と北原式定量ネットによる鉛直曳網によって採取した動物プランクトンデータの解析からなる。

両解析で用いたデータとも動物プランクトンの個体数から現存量および生産速度を推定した。生産速度は現存量に各分類群の成長速度を乗じることで計算した。現存量の推定は大阪湾における優占群である繊毛虫類とカイアシ類について行った。繊毛虫類の現存量は、有鐘繊毛虫についてはVerity and Langdon (1984)⁴⁾に従い鐘 (Lorica) 長と口径から円錐形等に近似し、鐘を持たない繊毛虫についてはPutt and Stoecker (1989)⁵⁾に従い体長から球形等に近似して体積を計算した後、以下の式により炭素量に変換した。計算式は以下の通りである。

$$\text{Loricata}^{4)}: CW (\mu\text{g}) = (444.5 + 0.053 \times LV) \times 10^{-6}$$

$$\text{Aloricata forms}^{5)}: CW (\mu\text{g}) = 0.14 \times CV \times 10^{-6}$$

ここで、CW：炭素換算現存量、LV：Lorica容積、CV：細胞容積である。

カイアシ類はノープリウス幼生とコペポディド幼生および成体に分け、コペポディド幼生および成体はUye (1982)⁶⁾に従い、体長から炭素量に換算した値を用いた。記載されている種についてはそれぞれの換算式を、それ以外はUye (1982)⁶⁾の中でTotal Copepodaとして示されている以下の換算式を適用した。

$$CW(\mu\text{g}) = 10^{-8.37} \times L (\mu\text{m})^{3.07}$$

ここで、CW：炭素換算値、L：体長である。ノープリウス幼生の換算式は以下のUye et al. (1996)⁷⁾を用いた。

$$CW(\mu\text{g}) = 10^{-10.82} \times L (\mu\text{m})^{2.94}$$

生産速度は、炭素現存量に成長速度を乗じて求めた。各生物の成長速度は、有鐘繊毛虫についてはNagano and Uye (2002)⁸⁾から、鐘を持たない繊毛虫はMüller and Geller (1993)⁹⁾、カイアシ類はUye and Shimazu (1997)¹⁰⁾の水温と成長速度の関係式から求めた。水温は大阪府立環境農林水産総合研究所水産技術センターが月の上旬に行っている浅海定線調査で取得された表層水温の日別平均値のうち、各月15日のものを使用した。

(1) -2-2 基礎生産・二次生産の推定手法の開発

生態系を支える基礎生産は、水質管理に留まらず、生態系保全も視野に入れた栄養塩管理および水産資源管理において基礎となる重要な情報である。湾灘が連結した多様な海域環境からなり、高度経済成長期の水質汚濁から環境管理の徹底によって水質改善が進んだ瀬戸内海においては、基礎生産においても空間的な多様性が高く、年代による変化も大きいことが予想される。海域管理の基礎となる情報である基礎生産は、直接測定することは多大な労力がかかるため、基礎生産を広範囲かつ定期的に測定している海域は稀有である。そこで、多くの海域で定期的なモニタリングが行われているChl.a濃度等の基本的な水質項目、あるいは衛星画像などを用いて基礎生産を推定する試みがなされている。基礎生産速度は、基礎生産を担う植物プランクトン濃度、その活性に影響を及ぼす水温、水中での光環境などがわかればおおよその推定が可能となるため、現在では衛星画像からそれらの値を求め、地球規模で基礎生産が推定されている。しかし、沿岸域では植物プランクトン以外の懸濁物質や溶存有色有機物の影響が強いためChl.a濃度や光環境の推定が難しく、結果として信頼性が高い基礎生産を求めることが困難となっている。一方で、定期的なモニタリングではChl.a濃度や水温、光減衰の推定に利用可能な透明度などが実測されていることから、それらの実測値を使って基礎生産を推定することが可能である。一方、魚類等高次生態系を支える低次生産という視点では、生産量が大きく、様々な大型魚類の餌となるプランクトン食魚を支える動物プランクトンによる二次生産が基礎生産よりむしろ重要である。

基礎生産については、栄養塩濃度が異なる海域 (広島湾・安芸灘等) で季節別 (水温の違い) に実測し、二次生産については、植物プランクトン濃度が高い海域 (大阪湾) の高水温期にChl.a濃度 (植物プランクトンの代替指標) を実測し、実測した二次生産速度との関係を明らかにした。得られた実測データを用いて関係式を作成し、広域総合調査 (環境省) 等の長期水質モニ

タリングデータ (Chl.a濃度、栄養塩、水温、透明度) から瀬戸内海の基礎生産・二次生産の過去からの変化と広域的な分布を推定した。

(1) -2-2-1 基礎生産の推定手法の開発

基礎生産の実測は非常に多くの労力が必要なだけでなく、過去のデータが極めて乏しく、瀬戸内海全体の基礎生産の時空間分布を実測データから把握することは不可能である。したがって、生物生産という視点では過去の栄養塩管理の効果を検証することもできない。そこで本研究では二つのアプローチで実測なしで基礎生産を推定する手法を開発した。いずれの手法も、(1) -2-1-1で実施した中西部海域の基礎生産の実測値を指標とした。衛星データを用いた推定ではこのうち広島湾のデータのみを使用した。

(1) -2-2-1-1 水質モニタリングデータを用いた基礎生産の推定

広域総合調査や浅海定線調査などの過去からの長期水質データを用いて基礎生産を推定するアルゴリズムを作成した。基本的なアプローチは、実測データがある地点における計算により求めた最大同化効率(P^B_{max})と実測した同化効率(P^B)の差が栄養塩制限によって起こったと仮定し、窒素およびリンの半飽和定数を決定し、以下の式によって基礎生産速度を求めた。

$$Pr = P^B \times CHL$$

$$PP_{stn} = \iint [P^B(z, t) \times CHL(z)] dz dt$$

$$P^B = P^B_{max} \times DIN / (DIN + K_N) \quad \text{or} \quad P^B_{max} \times DIP / (DIP + K_P)$$

ここで、 Pr : 光合成速度 ($\text{mgC m}^3 \text{ h}^{-1}$)、 P^B : 同化効率 (mgC mgChl.a^{-1})、 PP_{stn} : 光合成有効層における基礎生産速度 ($\text{mgC m}^2 \text{ d}^{-1}$)、 CHL : Chl.a濃度 (mgChl.a m^{-3})、 Z : 水深 (m)、 t : 時間 (h)、 P^B_{max} : 最大同化効率 (mgC mgChl.a^{-1})、 DIN : 溶存無機窒素濃度 ($\mu\text{mol l}^{-1}$)、 DIP : 溶存無機リン濃度 ($\mu\text{mol l}^{-1}$)、 K_N : 窒素の半飽和定数 ($\mu\text{mol l}^{-1}$)、 K_P : リンの半飽和定数 ($\mu\text{mol l}^{-1}$)。DINとDIPの使い分けはRedfield比16を使用する。

(1) -2-2-1-2 衛星データを用いた基礎生産の推定

GOCI/COMSの衛星プロダクトデータとしては、Korea Ocean Satellite Center (KOSC、http://kosc.kiost.ac/eng/p20/kosc_p21.html)を使用し、Kameda and Ishizaka (2005)¹¹⁾モデルを修正した以下の式を用いて基礎生産を計算した。係数決定のための現場観測値は広島湾の実測値である。

$$PP_{stn} = 0.1405 P_{obs} \frac{E_0}{E_0 + 4.1} Z_{eu} Chl_{cor} D_{irr}$$

ここで、 P_{obs} : 同化効率の推定値 ($\text{mgC mgChl.a}^{-1} \text{ h}^{-1}$)、 E_0 : 表層海水のPAR ($\text{E m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)、 Z_{eu} : 有光層深度 (m)、 Chl_{cor} : 実測値から衛星の出力値を補正したChl.a濃度 (mg m^{-3})、 D_{irr} : 日照時間 (h)。

(1) -2-2-2 二次生産速度の推定手法の開発

(1) -1.2.1から温度一定条件下 ($25.4 \pm 2.0^\circ\text{C}$) でのChl.a濃度と二次生産速度の関係が得られたことから、ここに温度の変数を入れて二次生産速度を推定するアルゴリズムを開発した。

(1) -2-3 瀬戸内海全域における過去から現在までの低次生産構造の時空間分布

瀬戸内海全域における低次生産構造が過去から現在までにどのように推移してきたのかを明らかにすることは、栄養塩から魚類へと繋がるエネルギーフローの解明において重要である。そこで、(1) -2-2で開発した基礎生産、二次生産を使って季節別の時間変化および1981-1990年の10年間のChl.a濃度を基準として分類した海域について時間変化を計算した。また、瀬戸内海における主要な三次生産としてのカタクチイワシ生産の時間変化についても推定し、各栄養段階の生産速度から、基礎生産から二次生産、二次生産から三次生産の転送効率を計算した。

(1) -2-3-1 生産に関わる水質と基礎生産の時空間分布解析

1970年代後半からの瀬戸内海全体における季節別の平均基礎生産を計算した。また、海域別の基礎生産の変化をみるために、1981年～1990年までの10年間のChl.a濃度を基準に海域を5つに分類し、それぞれの海域の専有面積と基礎生産の変動傾向について明らかにした。

(1) -2-3-2 二次生産の時空間分布解析

1970年代後半からの季節別の瀬戸内海全体でのカイアシ類の平均二次生産の時間変化を計算し、変動傾向と四季の違いについて明らかにした。

(1) -2-3-3 瀬戸内海における主要な三次生産としてのカタクチイワシ生産の時間変化

瀬戸内海の主要なプランクトン食魚であるカタクチイワシは、植物プランクトンと動物プランクトンを1:3で餌にしているとされることから、この比率を用いて、動物プランクトンに依存した三次生産を以下の式によって推定した。

$$\text{カタクチイワシの生産速度} = \sum_{m=0}^{10} \left[\frac{W_{m+1} - W_m}{30} \right] \times S_m \times 0.1$$

(mgC d⁻¹)

W_m: m月齢の平均体重(g-ww)
 S_m: m月齢の資源尾数
 ※炭素量は質量の10%として計算
 ※10月齢以上は10月齢としてまとめた

(1) -2-3-4 転送効率の時間変化

以上の各栄養段階の生産速度から、基礎生産から二次生産、二次生産から三次生産の転送効率を計算した。転送効率は以下の式によって定義される。

$$\text{転送効率} = \text{二次生産速度} / \text{基礎生産速度} \text{あるいは} \text{三次生産速度} / \text{二次生産速度}$$

(1) -3 プランクトン食魚を中心とした高次生態系構造の解明

瀬戸内海は生産性の高い海域であり、単位面積あたりの漁獲量は極めて大きいことが知られている。しかし、瀬戸内海における漁獲量については1985年の48.5万トンにピークに減少が続いており、2015年では15万トンほどに低下している。このうち、甲殻類や貝類などを除いた魚類の漁獲量は同様に減少が続いており、ピーク時の年間約35万トンに比べて2014年以降は三分の一程度に低下している。

先にみてきた動植物プランクトンによる低次生産と魚類等高次生産を生態学的につないでいる三次生産者としてプランクトン食魚があげられるが、瀬戸内海では漁獲としてもこのプランクトン食魚であるイワシ類やイカナゴの割合が高い。瀬戸内海における最も主要な漁獲対象種はカタクチイワシであり、次いでイカナゴの割合が高く、2012～2016年における両種の漁獲量は瀬戸内海全体の50%以上、魚類漁獲量の60%以上である。カタクチイワシの三次生産については(1) -2-3-3、低次生産の関係については(1) -2-3-4においてすでに検討した。ここでは、もう一種の重要なプランクトン食魚のイカナゴの保全に向けた個体群解析とプランクトン食魚の高次捕食者である魚食性魚類の食物としての役割を含めて高次生態系構造について検討した。

(1) -3-1 漁獲量及び資源量から評価した魚類の生産構造

漁業・養殖業生産統計によるプランクトン食魚とその他の魚種に分けた漁獲量の推移から、プランクトン食魚の変動傾向の特徴について明らかにした。また、プランクトン食魚であるカタクチイワシと瀬戸内海東部系群のイカナゴについては、水産庁の「我が国周辺水域の漁業資源評価」により資源量が推定されているため、資源量に基づきその変動傾向について明らかにした。イカナゴについては、兵庫県とそれ以外の漁獲を比較し、海砂利採取の影響について考察した。

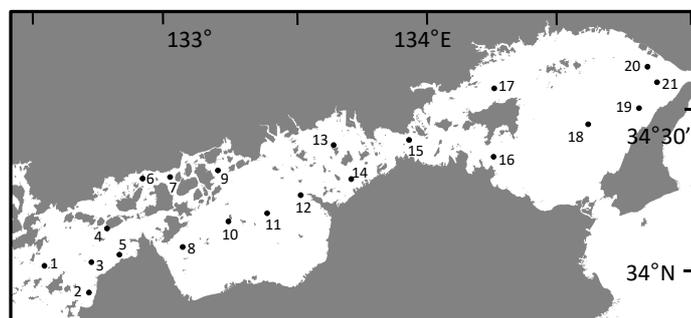
(1) -3-2 プランクトン食魚であるイカナゴの個体群解析

イカナゴは瀬戸内海において特に重要な魚種であり、兵庫県など瀬戸内海東部海域では、イカナゴ稚魚(シンコ)のくぎ煮は春の風物詩となっている。イカナゴはそれ自体、瀬戸内海の重要な水産資源で大きな経済的価値を持つとともに、多くの魚類にとって重要な餌生物となりその生産を支えている。これまで仙台湾、伊勢湾、瀬戸内海において、少なくとも7目16科21種の魚類がイカナゴを捕食していることが確認されている。瀬戸内海の漁獲統計でも扱われる重要な水産資源においても、そのうち、10分類群(ヒラメ、クロダイ、スズキ、ブリ、カレイ類、マアナゴ、ニベ・グチ類、エソ類、タチウオ、サワラ)においてイカナゴが

利用され、その生産に大きく貢献していると考えられる。そのため、イカナゴを瀬戸内海において保全していくことは、イカナゴそのものだけに留まらず、多くの瀬戸内海の魚食性魚類の生産を底上げし維持していくことに貢献する。しかしながら、2017年の瀬戸内海におけるイカナゴの漁獲量は過去最低であり、資源の深刻な減少が懸念されている。イカナゴはカタクチイワシと異なり、砂に潜る習性を有しており、さらに夏～秋の高水温期には砂の中で潜砂したまま摂餌を行わずに過ごす「夏眠」を行う。夏眠の後、イカナゴは底質に沈性卵を産むため、好適な底質環境はイカナゴにとって生息場、夏眠場、産卵場として極めて重要である。ところが、1960年代から続いた海砂の採取は、イカナゴ資源に極めて大きな負の影響をもたらした。1965年で海砂の採取をやめた兵庫県では良質な環境が多く残されているものの、瀬戸内海の中西部では特に影響が深刻であり、イカナゴの漁業は局所的に小規模に行われている程度である。イカナゴ資源を保全していくためには、現在残されている生息場や産卵場所の把握や、イカナゴにとって必要な環境の理解が必要不可欠である。

(1) -3-2-1 中西部个体群の産卵場の推定と東部个体群との交流

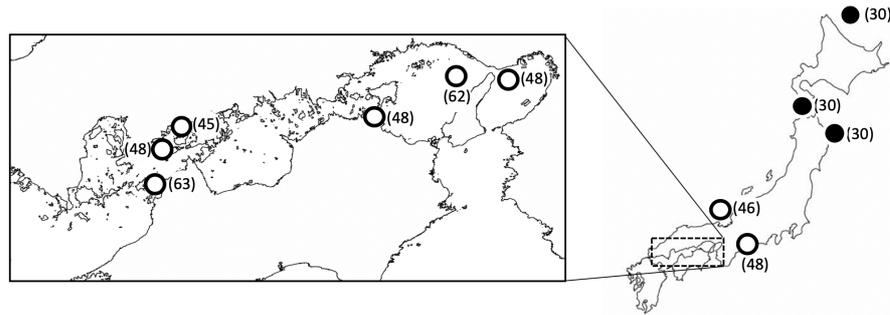
イカナゴの再生産状況を把握するため、瀬戸内海の広い範囲にわたって孵化後の浮遊仔魚の採集を行った。2014年1月20日～23日に、伊予灘から播磨灘にかけての16地点（図1-4の定点1および3～17）において、広島大学附属練習船豊潮丸によるイカナゴ仔魚採集を行った。丸稚ネット（口径1.3 m、目合0.3 mm）を表層および10 m層について2ノットで5分間曳網することで仔魚を採集した。また、2015年1月26日～30日に伊予灘から播磨灘にかけての21地点（図(1)-4）において同様の調査を実施し、得られた仔魚の地点別個体数や体サイズを整理した。2014年1月に行った調査で得られた仔魚については、粒子追跡実験を行うための孵化後日数を体サイズから推定した。仔魚の採集地点と孵化後の日数をもとに、粒子追跡によるシミュレーションを実施し、採集された仔魚の起点となっている場所を産卵場として推定した。



図(1)-4 仔魚調査定点

(1) -3-2-2 東部个体群と中西部个体群の遺伝的な分化

イカナゴの個体群分布の解明に必要な遺伝的集団解析用のDNAマーカーとして、新規マイクロサテライトDNAマーカーの開発を行った。イカナゴのマイクロサテライトDNA領域を把握するため、2014年5月に愛媛県沖で採集されたイカナゴ1個体から抽出したDNAを用い次世代シーケンサー（Roche 454FLX+）で塩基配列を解読し、得られた塩基配列データを元に、PCR用プライマー設計が可能な反復配列領域を選定した。選定したマーカー候補座用のPCRプライマーをPrimer3¹²⁾を用いて設計し、集団構造解析用のマイクロサテライトDNAマーカーを開発した。集団構造解析のために、2015年に瀬戸内海の東部と西部それぞれで3地域、および解析用外群として瀬戸内海以外の5地域からイカナゴ試料を収集した（図(1)-5）。そのうち、イカナゴ属魚類の種判別基準となるミトコンドリアDNAのCOI領域塩基配列を基に瀬戸内海に分布する種であるイカナゴ（*Ammodytes japonicus*）と確認できた試料について、開発したマイクロサテライトDNAでのアレル型判定に基づく遺伝的集団構造の解析を行った。



図(1)-5 イカナゴ試料採取地点と集団解析結果。STRUCTURE解析で判別された2集団をそれぞれ黒丸と白丸で示す。括弧内の数字は各地点でマイクロサテライトDNA分析に供した個体数。

(1) -3-2-3 三原瀬戸におけるイカナゴの生息状況およびイカナゴの底質選好性

イカナゴの産卵場が分布されることが推定された安芸灘北部水域において、イカナゴ夏眠期である2014年7月と2015年7月においてドレッジを用いた底質採集調査データを総合的に用い、過去にイカナゴの主要な生息場所の1つであった三原瀬戸および周辺水域における底質環境の特徴およびイカナゴの出現状況についてのデータの分析・精査を進めた。各地点での夏眠個体の採取記録に加え、ドレッジで採取された底質の中央粒径とインマンの淘汰度で評価し、貝殻含有率および物理的な抵抗の尺度としてペーンせん断強度を測定した。また、採集底質に対してイカナゴを放流後に潜砂個体の割合を比較し、潜砂行動の起こりやすい底質について評価・分析し、イカナゴの生息場所として重要となる物理環境要因の絞り込みを進めた。この飼育実験には愛媛県松山市北条沖の伊予灘で漁獲されたイカナゴ個体を用いた。瀬戸内海のイカナゴは水温が20℃を越えると夏眠を始めることが知られており¹³⁾、実験水槽は夏眠に至らず活発に遊泳する水温15～17℃に設定し、三原瀬戸で採集した底質をそれぞれ底面26 cm×15 cmの水槽に厚さ8 cmになるように敷いた。水槽にイカナゴを8個体ずつ入れ、30分後に砂に潜っている個体割合を計数する作業を、各水槽につき6回ずつ繰り返し、潜砂率を算出した。この潜砂率をイカナゴの底質選択性の強さの指標とした。

(1) -3-2-4 イカナゴの底質内生態および野外砂底内の環境解明

イカナゴの生存に必要な砂質層の堆積深度を明らかにするため、海砂と比重が等しいガラスビーズを用いた飼育実験を実施し、潜砂時の定位深度を明らかにした。堆積物中で長期間滞在するイカナゴにとっての生息地好適性に大きく影響する、堆積物中での酸素獲得実態の評価手法の確立を目指し、呼吸に伴う海水の動きを染色海水により可視化し、イカナゴが堆積物中でどのように酸素を獲得しているかの生態解明を試みた。ガラスビーズの追加により定位深度を実験的に操作し、定位深度が堆積物中での呼吸に及ぼす影響の解明を目指した。また、イカナゴが夏眠時に経験するであろう砂中の温度環境の理解を目指し、深さ15 cmまでの温度環境を調べた。広島県竹原市の広島大学附属水産実験所地先の砂底にて、2017年8月1日から10月25日まで水温ロガーを砂底直上、底質表面下4 cm、10 cm、15 cmに設置し、各層の温度を5分間隔で記録した。設置翌日8月2日から水温が最高に達した8月31日までの温度上昇期のデータを用いて、砂底内各層の温度特性を、日平均水温、日最高水温および一日の温度変化幅の3つの視点から整理した。

(1) -3-2-5 夏眠前の餌料環境がイカナゴの再生産特性に及ぼす影響

イカナゴは夏眠中には全く摂餌せず、夏眠前に蓄積したエネルギーを用いて冬季に産卵を行う。したがって、夏眠前の栄養蓄積が極めて重要であるが、その良否は餌料環境に左右されると考えられる。餌料環境が悪化した場合に再生産特性に生じる影響を明らかにするため、給餌量を変えた飼育実験を実施した。実験区として、飽食量を給餌する飽食区と、その25%を給餌

する低給餌区を設け、瀬戸内海の斎灘で採集されたイカナゴ当歳魚を用いて、5月から7月まで給餌し、夏眠を経て翌年1月まで飼育を行った。実験区間で体サイズ、成熟個体の割合、雌の卵子数を比較した。なお、実験は国立研究開発法人水産教育・研究機構瀬戸内海区水産研究所との共同研究として行った。

(1) -3-3 瀬戸内海の主要魚食魚であるタチウオの食性

瀬戸内海の主要魚食魚であるタチウオは、2007年には瀬戸内海で1万トン以上の漁獲量がみられたが、2015年以降の漁獲量は年間4千トン未満であった。瀬戸内海におけるタチウオの漁獲量は全国の約半分程度を占めており、タチウオのような高次捕食者の資源の減少要因についての調査研究が必要である。そこで(1)-3-3では、タチウオの食性を明らかにするための胃内容物および安定同位体を用いた解析を実施した。

(1) -3-3-1 胃内容物解析

2016年4月～2017年4月にかけて、大阪湾および濠灘で漁獲されたタチウオを収集し、魚体測定および胃内容物の観察を行った。

(1) -3-3-2 安定同位体解析

イカナゴの非夏眠時である2015年5月に濠灘で漁獲されたタチウオを収集し安定同位体比分析を行った。分析に用いたイカナゴ・カタクチイワシを含むタチウオの餌生物試料はタチウオの胃内容物から収集した。タチウオおよび餌生物の炭素・窒素安定同位体比を測定し、ベイズ混合モデル解析を用いてタチウオへの各餌生物の貢献度を推定した。

(1) -4 脆弱性が高い沿岸域に特化したアマモを活用した生態学的栄養塩対策

海域の富栄養化による赤潮や底質悪化を改善する手法としては、総量削減に代表される主として陸域からの人為起源の栄養塩負荷を削減する手法が代表的である。富栄養化に伴う様々な障害は沿岸域で主として起こるため、少なくとも富栄養化が著しい海域においては陸域からの栄養塩負荷の削減は効果的な手法である。一方で、陸域から流入した栄養塩類は沿岸域で障害を起こしているだけではなく、一部は沖合に運ばれ、生物生産を支えている側面もある。つまり、陸域からの有機汚濁負荷については少なければ少ないほど良好な海域環境となるが、陸域からの栄養塩類の負荷については言えば、過剰な負荷は富栄養化に伴う植物プランクトンの過度な増殖を引き起こす一方で、負荷が低くなりすぎると基礎生産の低下を通じて魚類等の高次生産を低下させるリスクを伴う。また、人為起源の栄養塩負荷を絞っても陸域からの栄養塩負荷がゼロになるわけではなく、森林起源を代表とする自然由来の栄養塩は負荷されるため、淡水流入が大きく、環境要因によって植物プランクトンの増殖が起こりやすい脆弱性が高い海域では、人為負荷の削減だけでは問題が解決しないこともありうる。

閉鎖性海域全体が極度に富栄養化した海域での栄養塩管理は、過度な植物プランクトンの増殖に伴う赤潮や底質悪化など様々な悪影響を低減するために陸域からの栄養塩負荷を削減することである。一方で、ある程度富栄養化の制御に成功した海域では、ここまでみてきた瀬戸内海のように依然として環境保全上の問題が残る場所・季節が沿岸域の比較的狭い範囲で残りながら、ほとんどの海域・季節では特に環境保全上問題は無い。このような段階の海域では、環境保全上の問題が残る場所・季節だけを見てさらなる栄養塩類の削減を行うと結果として、高次生産を支える基礎生産、二次生産をも低下させ、水産上有用な魚類等の生産をも低下させることも起こり得る。一方で、陸域からの人為的な栄養塩負荷がない状態での生態系が、その海域が本来持つ生態系であり、その自然状態に近づく過程で生物生産が低下することは致し方ないともいえる。しかし、古来沿岸域は人々の生活の場であり、人の生活と隣接する海域は密接に結びつき、人間活動によって生じた栄養塩類が海域に負荷され、その海域の生物生産を支えてきたことまた事実である。瀬戸内海沿岸では海藻類の採取や養殖が営まれている海域やカキなどの二枚貝養殖が営まれている海域もあり、そのような海域では他の海域と比較してより多くの栄養塩類を必要とする。このような相互関係の中で、人間活動から発生する人為負荷を管理しながら、環境保全と生物生産を両立させ、豊かな海を実現することが求められている。

栄養塩類の低減を通じて達成される環境保全と栄養塩類にその生産が左右される基礎生産に基礎を置く生物生産では、栄養塩類に関しては全く逆の要求をしていることになる。しかし、環境保全と生物生産では重点的に管理すべき時期と海域が異なることに注意を向ければ、両方の要求を満たす栄養塩管理は可能である。時期についていえば、高水温期には植物プランクトンの過度な増殖を抑制するため栄養負荷を低く保ち、低水温期には生物生産のために栄養塩負荷を高くし、海域についていえば、栄養塩が過剰になりやすい沿岸域の栄養塩濃度を低減し、栄養塩が不足しがちな沖合では栄養塩濃度を高める栄養塩管理である。沿岸に立地する下水処理場や工場の排水放出口を沿岸域をバイパスし、沖合に移動する手法や沿岸の停滞しやすい沿岸域を避け、沖合への流れが存在する沿岸域に放出口を移動する方法などがある。一方、放出口は移動させないが、放出する栄養塩濃度を障害が起こりやすい高水温期には低下させ、低水温期に増加、あるいは現状維持する手法がある。下水処理場で近年試行的に行われている季節別運転がこれにあたる。下水処理場の季節別運転は、脱窒抑制など運転方式の変更を伴うため、かなり大変な変更であるが、工場排水などでは凝集剤を使用してリンを低減することなども行われており、このような場合は冬季のみ凝集剤の添加を停止して、放流水中のリン濃度を上げることは容易であり、コスト低減にもつながる。

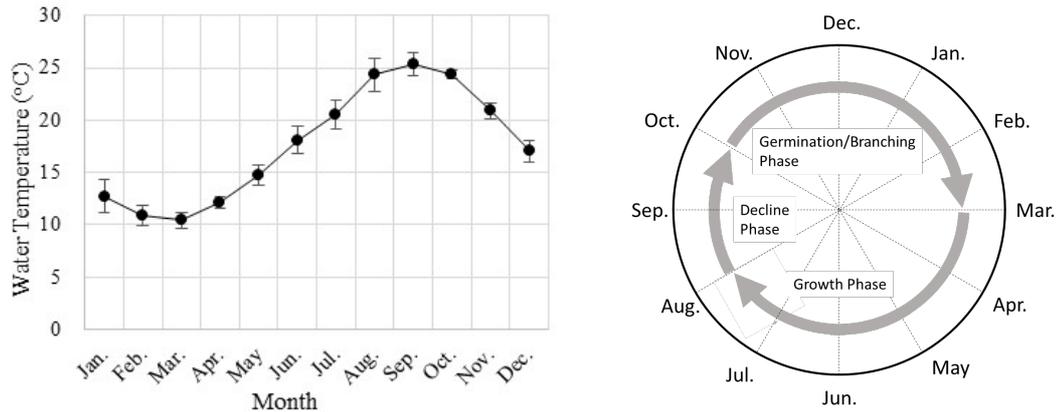
一方、生態学的な手法で、春から夏場に植物プランクトンに利用される栄養塩量を低減し、秋から冬に海域で利用可能な栄養塩量を増加させることも可能である。多くの植物プランクトンと同様に高水温期に繁茂期を迎える底生大型海草藻類の生息環境を整え、海域への栄養塩の供給元である河口周辺や下水処理上等の放流口周辺、地下水の湧水が活発な沿岸で積極的に繁茂させる手法である。これらの底生大型海草藻類は、高栄養塩濃度となる沿岸域で高水温期に栄養塩類を吸収し、栄養塩の吸収で競合する植物プランクトンの増殖を抑え、その後枯死した生体が漂流して広範囲に分散し、低水温期に徐々に枯死体から分解に伴う栄養塩が放出される。瀬戸内海を含め日本沿岸の砂泥底において一般的にみられる海草の一種であるアマモ (*Zostera marina*) はこの手法に適した海草である。アマモは日本以外にもヨーロッパや北米でも一般的な種であり、15℃～20℃の範囲で活発に増殖し、さらに高水温になると枯死・衰退していくことが知られている。瀬戸内海は砂泥質の沿岸が広く分布しており、生態学的手法に用いる底生大型海草藻類としてアマモが汎用性が高いと考え、アマモによる栄養塩管理について検討した。

アマモなどの浅海域に生息する海藻草類を活用した手法の利点を整理すると以下の通りである。1) 陸域から負荷される栄養塩類は浅海域を通して沖合に運ばれるため、その通り道に効果的にアマモ場等を造成・配置することで栄養塩が海域全体に拡がる前に吸収・除去することが可能である。2) 降雨時等で水中の栄養塩濃度が高くなる時に栄養塩の吸収量が増加する。3) 海藻草類の衰退期は赤潮の発生等のリスクが小さい時期であり、この時期に生息場所だけでなく、流れ藻となって広範囲に拡がり、移動中や漂着先で徐々に分解し、栄養塩を広範囲かつ長期間にわたって放出する。4) 植物プランクトンや底生付着藻類などが利用できる年間の栄養塩量は変化させず、これらの生物による栄養塩利用量を高水温期に少なく、低水温期に大きくし、植物プランクトンの過剰増殖を抑制しつつ、年間基礎生産量を確保できる。

(1) -4-1 アマモの栄養塩吸収機能

アマモは光合成を行い水中の栄養塩を盛んに吸収し、夏季に枯死した後は栄養塩を周辺海域に供給することにより、物質循環に果たす役割は大きいと考えられる。(1) -4-1では、広島湾をモデルにアマモの栄養塩吸収機能について評価する。広島湾において2013年～2017年に実施された浅海定線調査によって得られた水深5mの水温の月変化を図(1)-6 (a) に示す。広島湾内ではアマモの主要な生息水深である5mにおいて、水温が15℃～20℃になるのは5月から7月となることから、広島湾のアマモは3月～4月ぐらいから繁茂し始め、8月には枯死・衰退がはじまるライフサイクルをとる(図(1)-6 (b))。生育場所によって各ステージの時期は若干異なるが、春から初夏にかけてアマモは繁茂期を迎え、この時期は植物プランクトンの増殖期と一致する。このため、アマモと植物プランクトンが栄養塩類の摂取において競合関係となり、春から夏に

かけて植物プランクトンの増殖を抑制する効果が期待できる。



図(1)-6 (a) 広島湾における2017年の水深5 m層の水温の月変化及び (b) アマモのライフサイクル

(1) -4-1-1 地御前干潟における基礎生産者の生産および栄養塩吸収速度の評価

アマモの生産・栄養塩の吸収能力評価のために、広島湾奥に位置する砂質の地御前干潟において大型海藻藻類3種（アマモ・コアマモ・アオサ）および底生微細藻類を対象に一次生産量を測定し、比較した。調査は2015年5月から2017年6月の約2年間にわたり実施し、大型海藻藻類は溶存酸素（DO）法、底生微細藻類については（1）-2-1-1同様に¹³C法を用いて一次生産量を測定した。

(1) -4-1-2 陸域負荷栄養塩に対するアマモの吸収容量の評価

（1）-4-1-1の広島湾奥の地御前干潟におけるアマモの生産量の結果およびサブテーマ2の生島湾の生産量の結果から、繁茂期におけるアマモの潜在的な栄養塩吸収量を推定し、陸域からの栄養塩負荷量に対する吸収量の寄与率を計算した。

(1) -4-2 アマモ場の栄養塩吸収機能が植物プランクトン増殖の抑制に果たす役割

光環境からみたアマモの潜在的な分布域を広島湾において推定し、広島湾北部海域において、アマモ場面積を現状から増加させることによってどの程度植物プランクトンの増殖を抑制できるかをモデルにより検証した。

(1) -4-2-1 広島湾におけるアマモの生育可能海域の評価

2016-2017年に環境省が実施した瀬戸内海における藻場・干潟分布状況調査結果に基づき、厳島北東部、大奈佐美島、能美島北部の自然海岸のアマモ場（環境省調査では藻場の種類は特定されていないので、海底質から判断した）の範囲を特定した。次に、地理情報解析ソフトArcGIS（10.3.1）を用いて、広島湾北部における50 m格子の水深データおよび450 m格子の透明度データより、広島湾においてアマモの生育できる光環境条件を特定した。この光条件をもとに、広島湾北部海域における光環境のみから推定したアマモ場の潜在的な分布面積を計算した。

(1) -4-2-2 広島湾におけるアマモの栄養塩吸収による植物プランクトンの増殖抑制効果の評価

現在のアマモ場の分布および上記で求めた潜在的に生育可能なアマモ場の分布を用いて、広島湾全域における5月～8月のChl.a濃度の分布を広島湾についてネスティングした瀬戸内海モデルを用いて計算した。瀬戸内海モデルはテーマ5で開発したモデルを使用した。

4. 結果及び考察

(1) 栄養塩濃度管理手法開発

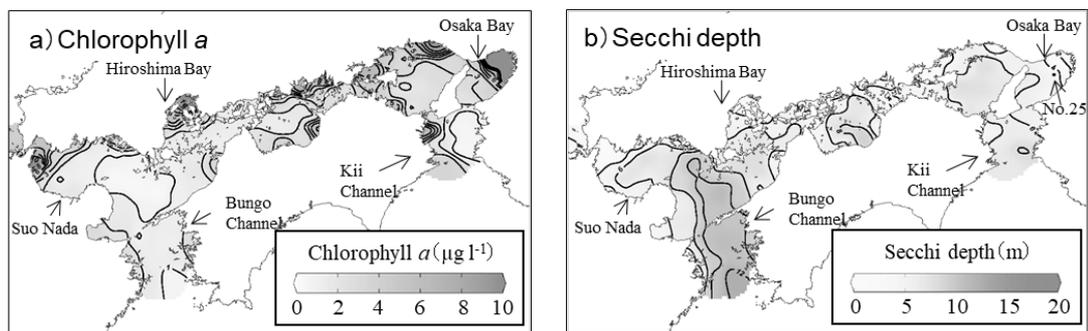
(1) -1 環境管理のための海域特性の指標開発とその適用

(1) -1-1 光環境の特性解明

(1) -1-1-1 透明度の時空間分布の解明

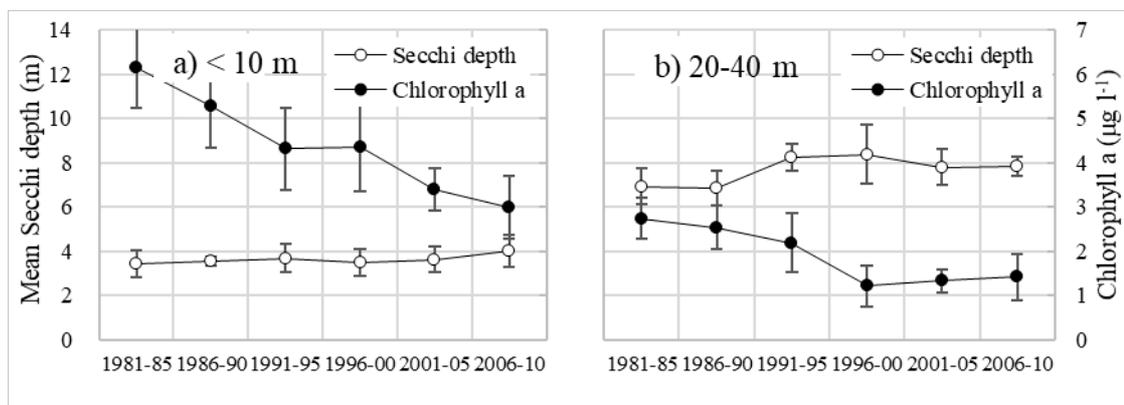
光環境は、底生生態系の基礎生産にとっては死活的に重要な環境因子であり、浮遊生態系の基礎生産にとっても、有光層を決める重要な因子である。海域の光環境は、Secchiによって開発された白色の透明度板を水中に沈め、肉眼で識別できなくなる深さと定義される透明度（Secchi depth：SD）という指標で、世界中の海域等で150年以上前から測定されてきた。我が国の閉鎖性海域でも富栄養化による海域の汚染が著しかった1970年代からこの方法による海域環境のモニタリングが行われてきた。このように長期データが存在する透明度は、その海域本来の光環境の把握や富栄養化の進展や人為的な環境改変、その後の環境回復に伴う光環境の変化を理解するためには大変有用な指標である。

図(1)-7に最近10年間のChl.a濃度と透明度の瀬戸内海における分布を示す。瀬戸内海の中でも閉鎖性が高い大阪湾北東部、広島湾北部、周防灘西部で $10 \mu\text{g l}^{-1}$ 前後の高いChl.a濃度を示す一方で、豊後水道や紀伊水道や沖合部の多くの場所では、 $2 \mu\text{g l}^{-1}$ 以下のChl.a濃度を示している。一方、透明度はChl.a濃度と逆の傾向を示し、大阪湾北東部、広島湾北部、周防灘西部では5 mを下回る場所が多く、水道部では10 m以上の透明度を示す場所も多い。



図(1)-7 瀬戸内海における (a) Chl.a濃度と (b) 透明度の空間分布

これらの分布は、一見すると現在Chl.a濃度が高い海域において栄養塩管理等の強化によって水道や沖合部なみにChl.a濃度を低下させることができれば10 mを超える透明度も達成できるように見えるが、それは真実であろうか。瀬戸内海の中でも比較的水深が小さく、接続している伊予灘に向けてすり鉢状に水深が大きくなっている周防灘を例にこの問題を考えてみる。図(1)-8に夏季周防灘における水深別Chl.a濃度および透明度の5年平均値の推移を示す。評価は、10 m以浅、10 m～20 m、20 m～40 m、40 m以深に分けて行った。ここでは沿岸部に位置する10 m以浅の海域と沖合部に位置する20 m～40 mの海域について示す。



図(1)-8 夏季周防灘における水深別Chl.a濃度および透明度の5年平均値の推移

左図10 m以浅の海域では、Chl.a濃度は1980年代の約 $6 \mu\text{g l}^{-1}$ から2000年代後半には約 $2.5 \mu\text{g l}^{-1}$ まで低下したが、その間の透明度はほとんど変化せず、3 m前後で推移している。一方で、右図20 m～40 mの海域では、Chl.a濃度は1980年代前半の約 $2.5 \mu\text{g l}^{-1}$ から1990年代後半までに約 $1.0 \mu\text{g l}^{-1}$ まで低下し、その後大きな変化はない。1980年代前半から1990年代にかけてChl.a濃度の低

下に呼応した透明度の増加が観察され、現在8 m前後の透明度で推移している。この結果からは2つのことがわかる。この10 m以浅の海域の2000年代後半のChl.a濃度と20 m～40 mの海域の1980年代後半のChl.a濃度はいずれも約 $2.5 \mu\text{g l}^{-1}$ と等しいが、前者の透明度は3.4 m、後者は7.7 mと大きく異なり、Chl.a濃度以外の透明度を決定する因子に大きな違いがあることがわかる。一方、透明度が低い10 m以浅の沿岸部では、Chl.a濃度が高いにも関わらず、その減少が透明度の増加をほとんど引き起こしておらず、透明度を決定する因子として植物プランクトンの寄与が小さいであろうことが推定される。この事実は、透明度の低い沿岸域において植物プランクトン濃度を低下させることができても、それが必ずしも透明度の顕著な改善につながらない可能性があることを示唆している。

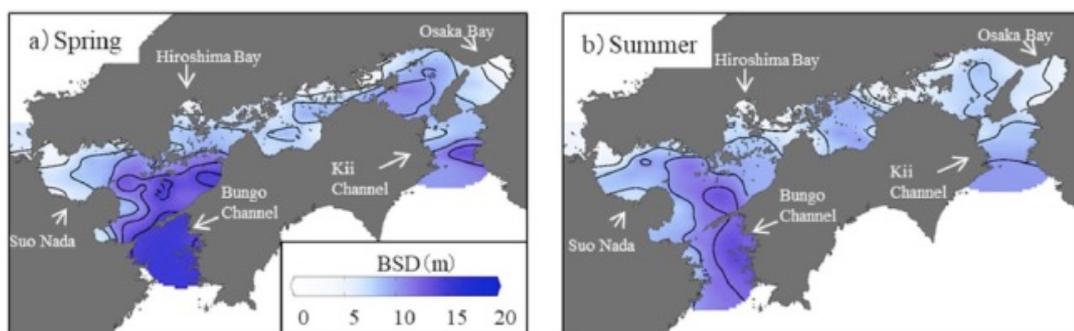
(1) -1-1-2 地域固有透明度指標の開発とその分布特性

栄養塩管理による光環境の改善シナリオは、陸域からの栄養塩負荷の削減によって、植物プランクトン濃度が低下し、植物プランクトンによる光減衰が低下し、透明度が改善されるというものである。以下は一般的に用いられている光減衰係数 (K_d) を表現する式である。

$$K_d = K_w + K_{CDOM} + K_{PHY} + K_{TRI}$$

ここで、 K_w ：水による光減衰 (m^{-1})、 K_{CDOM} ：溶存有色有機物質による光減衰 (m^{-1})、 K_{PHY} ：植物プランクトンによる光減衰 (m^{-1})、 K_{TRI} ：植物プランクトン以外の懸濁物質による光減衰 (m^{-1})。

この式からも明らかのように、光減衰に影響を及ぼす因子は植物プランクトン以外にも存在し、植物プランクトン以外の因子による光減衰の程度は海域によって異なると考えられる。そのため、各海域において現状で植物プランクトンによる光減衰の寄与を正しく知り、植物プランクトン量の制御によって到達し得る透明度改善の限界を知ったうえで栄養塩管理を行う必要がある。植物プランクトン以外の光減衰をもたらす因子によって決定される透明度、すなわちその海域において植物プランクトンが存在しないと仮定した場合の透明度をここでは地域固有透明度 (region-specific background Secchi depth : BSD) と呼ぶことにする。使用したデータが季節毎に採取されているため、地域固有透明度は季節ごとに求め、ここでは春季および夏季の地域固有透明度を示す (図(1)-9)。



図(1)-9 (a) 春季および (b) 夏季における地域固有透明度の空間分布

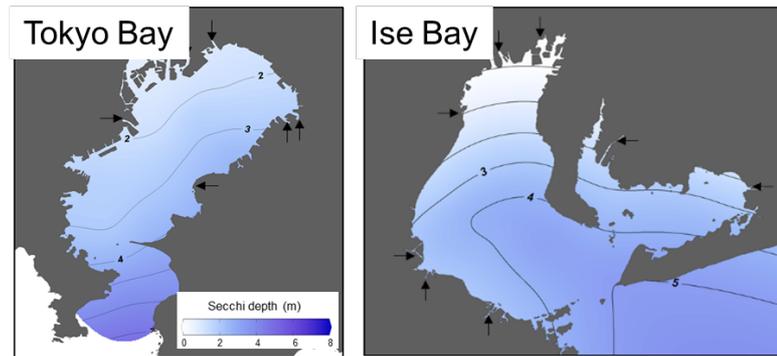
地域固有透明度は塩分および水深と相関を示し、結果として、豊後水道、紀伊水道といった接続海域の影響を受ける水深の大きい水道部で高く、沿岸部、特に大河川に隣接する大阪湾奥部、広島湾奥部で低い値を示す。これは河川水を通じて懸濁物質や溶存有色有機物質が流入すること、水深が小さい海域では底質の巻き上がりによって懸濁物質が供給されることなどが影響したためと考えられる。

海域への栄養塩類の流入は、主として河川、地下水など淡水流入によることから、結果的に地域固有透明度が低い場所でChl.a濃度が高くなる傾向がある。Chl.a濃度が高い沿岸域では、Chl.a濃度が高いためにその海域の透明度が低いと考えがちであるが、Chl.a濃度に依存した光減衰とその他の要因による光減衰を区別して評価し、陸域からの栄養塩負荷の削減によって、達

成し得る光環境の改善の限界を十分把握した上で、栄養塩管理を含めた総合的な環境管理を行うべきであると考える。

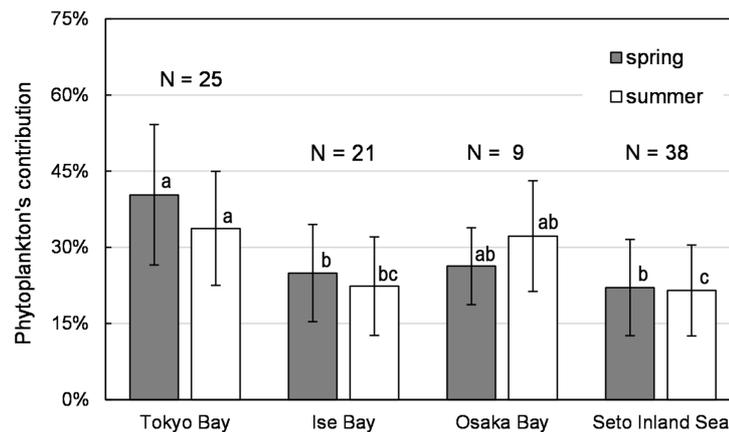
(1) -1-1-3 地域固有透明度の他海域への適用可能性

ここで開発した地域固有透明度を瀬戸内海と比較してChl.a濃度が高い東京湾および伊勢湾に応用した。また、現状の透明度と地域固有透明度に基づき、植物プランクトンが光減衰に及ぼす寄与率を評価した。両湾の地域固有透明度の空間分布を図(1)-10に示す。両湾の地域固有透明度は、瀬戸内海のような地理的な分布に影響された複雑な分布は示さず、湾奥から湾口に向けて地域固有透明度が増加する空間分布を示した。瀬戸内海と同様に塩分との相関は高く、相関係数は東京湾および伊勢湾でそれぞれ0.73、0.64となった。



図(1)-10 東京湾および伊勢湾における夏季地域固有透明度の空間分布

2006～2015年における東京湾および伊勢湾の夏季平均Chl.a濃度はそれぞれ $28.9 \pm 13.0 \mu\text{g l}^{-1}$ 、 $12.6 \pm 8.6 \mu\text{g l}^{-1}$ であり、瀬戸内海の $3.6 \pm 6.4 \mu\text{g l}^{-1}$ と比較すると高い。図(1)-11に光減衰における植物プランクトンの寄与率を東京湾、伊勢湾、大阪湾、大阪湾を除く瀬戸内海で計算した結果を示す。Chl.a濃度が他の海域と比較して大きい東京湾でも植物プランクトンによる光減衰の寄与率は湾平均では50%に満たない。栄養塩管理によって植物プランクトン濃度が低下すれば透明度が回復し、底層まで光が届くようになり、藻場の自然再生が可能との見方もあるが、現状陸域からの栄養塩負荷の影響でChl.a濃度が高くなっている海域では、同時に懸濁物質負荷も大きくなっており、栄養塩管理による透明度回復には限界がある。

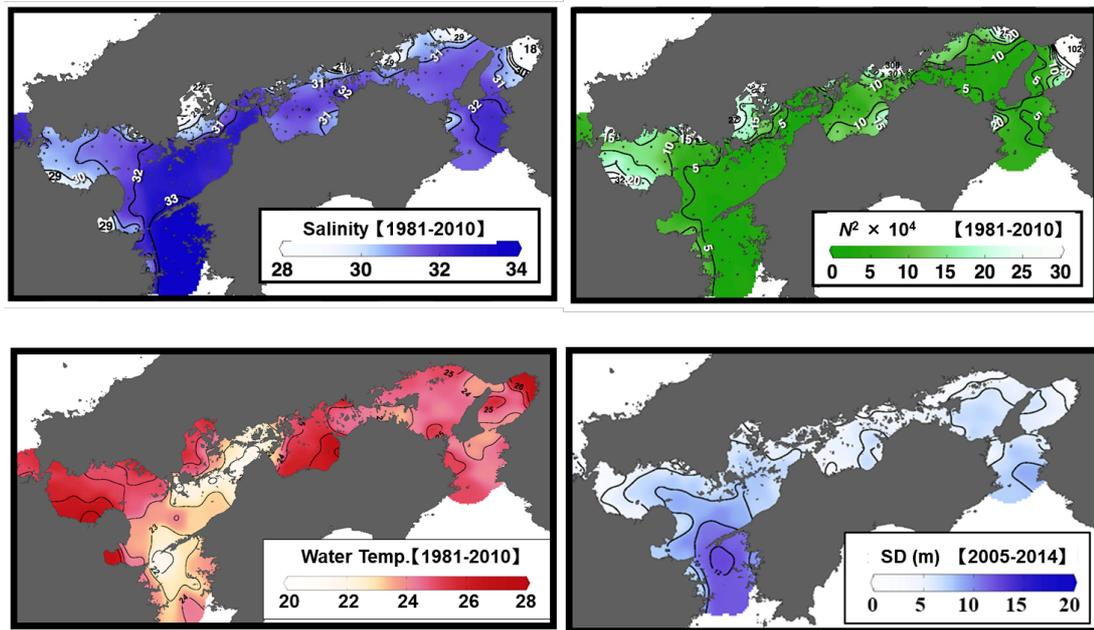


図(1)-11 光減衰における植物プランクトンの寄与率

(1) -1-2 植物プランクトンの増殖に対する脆弱性指標の開発と適用

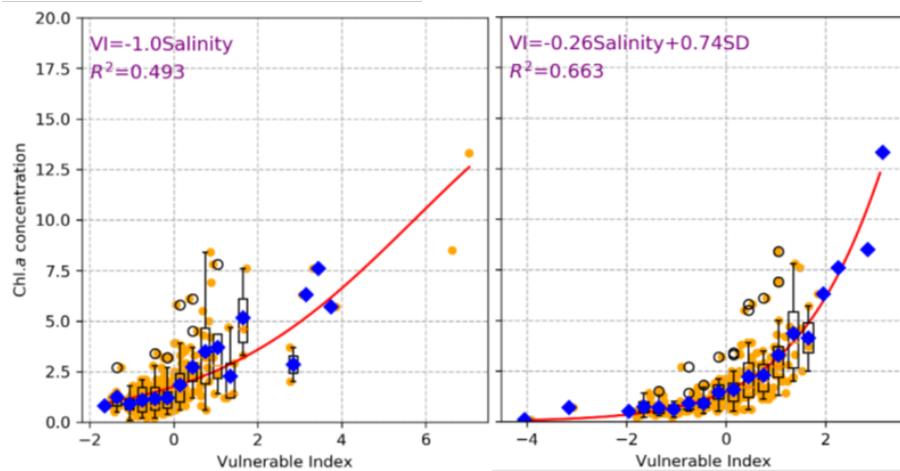
図(1)-12に植物プランクトンの増殖に影響を及ぼすと考えられる主要な環境因子の空間分布を示す。塩分、躍層形成、透明度とも類似した傾向を示した。閉鎖性が高い大阪湾北東部、広島湾北部、及び本州側沿岸で低塩分、低透明度、強い躍層形成が見られた。別府湾では測定点の数が不足し、外挿した数値が入っているので注意が必要である。水温に関しては、他の物理

因子とは少し異なる傾向を示した。閉鎖性が高い湾や沿岸部で高い値を示したことは共通しているが、豊後水道から伊予灘、安芸灘にかけて低い値を示し、燧灘や東部海域で高い値を示した。



図(1)-12 塩分、水温、密度躍層 ($N^2 \times 10^4$)、透明度 (SD) の空間分布

次に、これらの環境因子を用いて、最近10年間の平均Chl.a濃度を推定する脆弱性指標の作成を試みた。これら単独の環境因子で最も高い相関で平均Chl.a濃度を予測できた因子は塩分 ($R^2 = 0.493$) であった (図(1)-13)。2環境要因で予測した場合、塩分と透明度の組み合わせで $R^2 = 0.663$ まで改善した。しかし、3環境要因に増やしても改善は $R^2 = 0.672$ にとどまったため、塩分と透明度による組み合わせにより予測することで十分であると判断した。塩分は淡水の流入量の指標であり、陸域からの栄養塩類の代替指標ともなりうる環境因子である。しかし、流域圏の都市化の度合い等によって陸域から河川水等淡水中に栄養塩濃度は異なる。一方で、人為的な栄養塩負荷が全くなくなっても森林や土地起源の栄養塩は流入することから、人為起源の栄養塩の多い少ないはありながらもベースとしての自然由来の栄養塩類が淡水によって供給されるためChl.a濃度の予測因子としては最も有効であったと考えられる。透明度は光合成有効層を決定する重要な環境因子であり、塩分と補完的に扱うことで予測精度が向上したと考えられる。



図(1)-13 塩分のみ (左) および塩分と透明度の組み合わせ (右) による夏季平均Chl.a濃度の予測

(1) -1-3 底質の特性説明

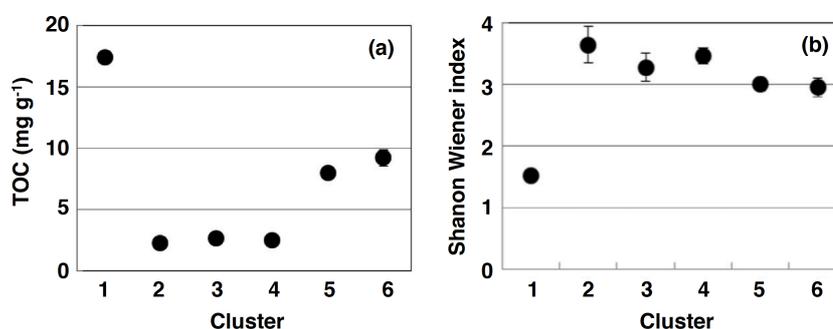
(1) -1-3-1 底質とベントスの分布特性

底質の物理化学特性に関する項目を使用したクラスター解析および主成分分析の結果から、有機物負荷の指標となる泥分、TOC含量、硫化物量、およびORPは、マクロベントス群集の密度や多様性と大きく関わっていたことがわかった。全調査地点の42%の地点がクラスター1に分類され（表(1)-1）、それらの地点では泥分およびTOC含量が高く、マクロベントス群集の密度や多様性が著しく低いことが明らかとなった（図(1)-14）。クラスター1には、閉鎖性の強い広島湾、大阪湾、別府湾、および燧灘の地点が多く含まれ、一方で比較的砂質でマクロベントス群集の密度や多様性が高いクラスター2には、豊後水道、伊予灘、安芸灘、および備讃瀬戸の地点が多く含まれた。底生生物の群集構造および底質の物理化学特性の間の対応関係が明らかとなり、底生生態系の特徴に応じた海域区分の実現可能性が示唆された。

表(1)-1 各クラスターにおける湾灘ごとの地点数

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6
Kii Channel	9(32)	0	0	5(18)	14(50)	0
Osaka Bay	23(74)	0	0	1(3)	4(13)	3(10)
Harima Nada	35(51)	6(9)	11(16)	0	11(16)	5(7)
Bisan Seto	3(11)	5(18)	14(50)	0	2(7)	4(14)
Bingo Nada	8(53)	2(13)	1(7)	0	3(20)	1(6)
Hiuchi Nada	26(81)	0	0	0	5(16)	1(3)
Aki Nada	0	5(33)	3(20)	0	5(33)	2(14)
Hiroshima Bay	20(87)	0	0	1(4)	2(9)	0
Iyo Nada	0	1(2)	0	25(56)	18(40)	0
Suo Nada	46(50)	1(1)	5(5)	4(4)	14(15)	21(23)
Beppu Bay	5(63)	0	0	1(13)	1(13)	0
Bungo Channel	5(17)	0	0	17(59)	5(17)	1(3)
Hibiki Nada	0	0	3(30)	0	7(70)	0

(%) Sites excluded in Clusters 1-6: Iy-49, Bu-38, Suo-104, and Be-15.



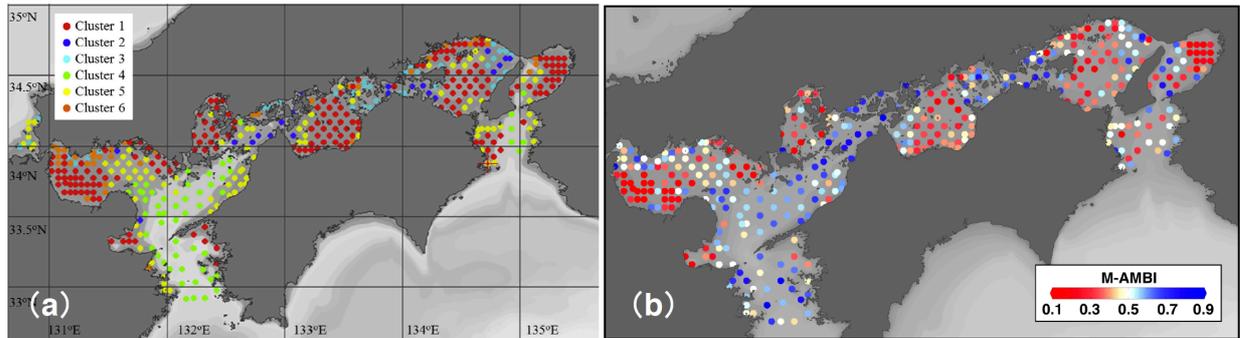
図(1)-14 各クラスターにおける (a) 堆積物表層のTOC含量および (b) マクロベントスのシャノン・ウィナー多様度指数 (H')

(1) -1-3-2 M-AMBI指標に基づく海底環境の健全性評価

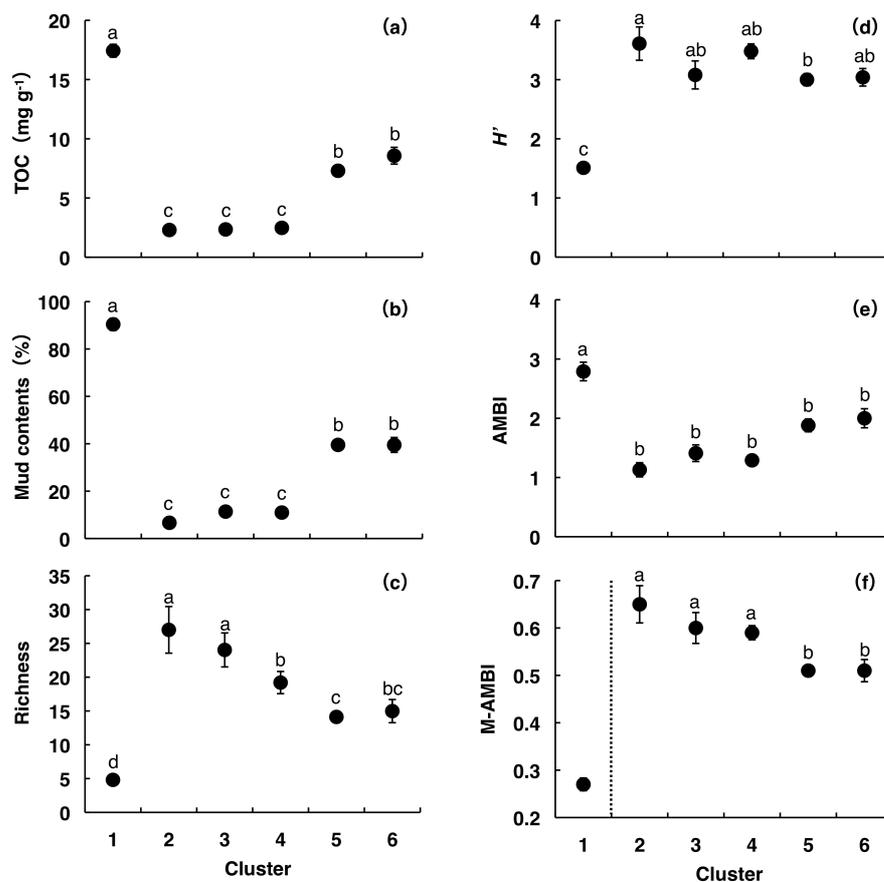
瀬戸内海におけるAMBI・M-AMBI解析適用のために、海域全体における出現頻度の最も高い5分類群について、文献を元に新たにグループ(G1~5)を定義し、解析を実施した。M-AMBI解析では、(1) -1-3-1で分類したクラスターに対し、底質特性が大きく異なるクラスター1とそれ以外(クラスター2~6)に分けて実施した。響灘を除く瀬戸内海の全地点数のうち、92.5% (384/415地点)が解析可能であることがわかった。非汚染指標種であるG1は、伊予灘および紀伊水道などに多く分布し、沖合域に多く見られた。一方で、汚染指標種であるG4は大阪湾、播磨灘北部、別府湾、および広島湾奥部の沿岸部で多く見られ、もっとも汚染に強いとされるG5は周防灘などで稀に観察された。図(1)-15には、瀬戸内海における底質の物理化学特性に基づくクラスターおよびM-AMBI値の分布を示す。

両者は類似した分布パターンであり、M-AMBI値は大阪湾奥を含む沿岸部で低く、沖合域や潮流の早い海峡部で高い(より健全性が高い)傾向であった。各クラスターにおけるTOC含量、

泥分、および生物指数（種数、 H' 、AMBI、M-AMBI）の平均値の結果から、有機汚濁の進んだ底質であるクラスター1では、すべてのパラメータにおいてクラスター2-6とは有意に異なることが示された（図(1)-16）。また、底質特性が類似するクラスター2-6については、TOC含量、泥分、およびM-AMBIにおいてクラスター2-4およびクラスター5-6の間に有意差があり（Tukey-Kramer test、 $p < 0.05$ ）、他の生物指数（種数、 H' 、AMBI）では異なる傾向を示した。本成果から、海底環境の総合指標としての生物指数M-AMBIが瀬戸内海において適用可能であることが明らかとなり、本指標により物理・化学・生物学的特性による「健全な底質環境」の指標値を定量的に示すことが可能となった。



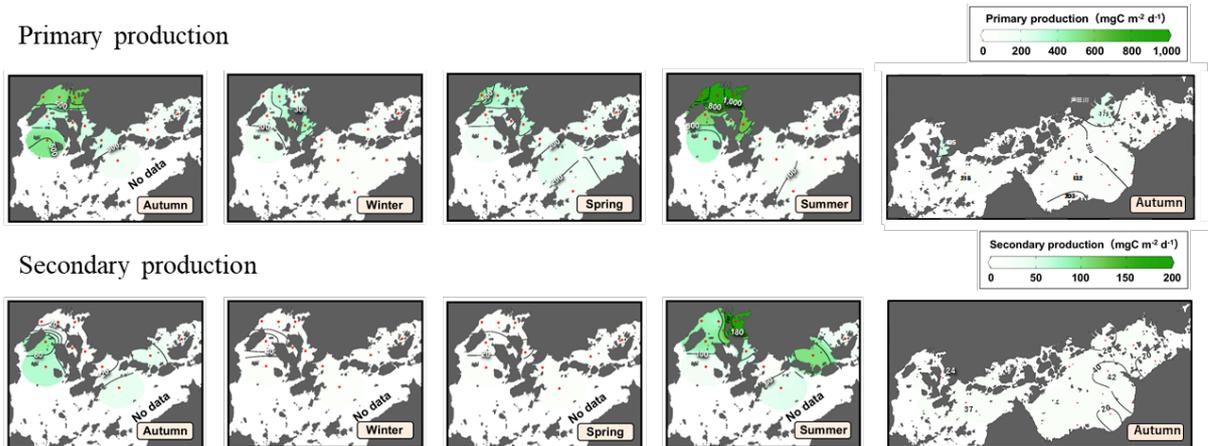
図(1)-15 瀬戸内海における (a) 底質物理化学特性に基づくクラスターおよび (b) M-AMBI値の分布



図(1)-16 各クラスターにおける堆積物表層の (a) TOC含量、(b) 泥分、(c) 種数、(d) H' 、(e) AMBI、および (f) M-AMBIの平均値。図中のエラーバーは標準誤差を示し、アルファベットは多重比較検定によるクラスター間の有意差を示す（Tukey-Kramer test、 $p < 0.05$ ）。

- (1) -2 低次生態系構造の時空間分布の解明
 (1) -2-1 低次生産の実態解明
 (1) -2-1-1 中西部海域における低次生態系構造解析

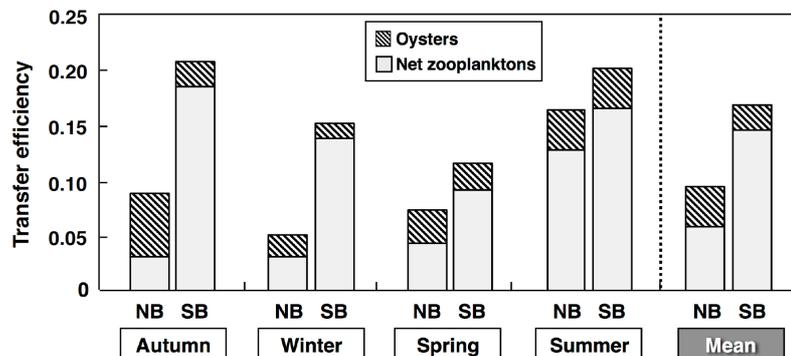
各海域で行った調査結果を図(1)-17に示す。基礎生産はいずれの季節においても、広島湾奥で高い値を示し、湾奥の基礎生産は274~1,080 mgC m⁻² d⁻¹、湾中央では152~567 mgC m⁻² d⁻¹の範囲であった。特に太田川からの流入負荷を受ける湾奥の基礎生産は夏季において、1,080 mgC m⁻² d⁻¹に達した。広島湾に比べて閉鎖性が小さく、陸からの流入負荷が小さい安芸灘の基礎生産は39.3~282 mgC m⁻² d⁻¹であり、広島湾よりも基礎生産は低かった。秋季における瀬戸内海中西部海域（燧灘~備讃瀬戸）の基礎生産は120~375 mgC m⁻² d⁻¹であった。二次生産は夏季を除いて基礎生産ほど顕著な地域差は表れていない。



図(1)-17 広島湾、安芸灘、瀬戸内海中西部における基礎生産および二次生産の空間分布

ここで得られた25調査地点、64データにおける同化効率（Chl.a当たりの基礎生産）、光減衰係数、水質データに基づいて、(1) -2-2-1-1の水質モニタリングデータを用いた基礎生産の推定を行った。

広島湾でのカキ養殖は年間約20,000トンの収穫量があり、我が国のカキ生産量の50~60%を占める。そのため、広島湾においては低次生産構造を理解する上でカキによる基礎生産の消費を考慮する必要がある。図(1)-18は、二次生産をカキと動物プランクトンに分けて、基礎生産からの転送効率を計算した結果を示す。先にみてきたように北部海域は基礎生産が高い一方で、基礎生産ほど二次生産が高くないが、カキの生産量は南部と比較して北部が大きい。図1-18では北部で大きいカキの二次生産を含めても北部の転送効率は南部と比較して低く、二次生産に利用されず底泥に移行している生産が大きいことが示唆される結果となった。また、カキの生育期である秋季には北部ではカキによる二次生産が動物プランクトンによる二次生産を上回っていたが、年間を通じてみると動物プランクトンによる二次生産の方が大きいことがわかった。



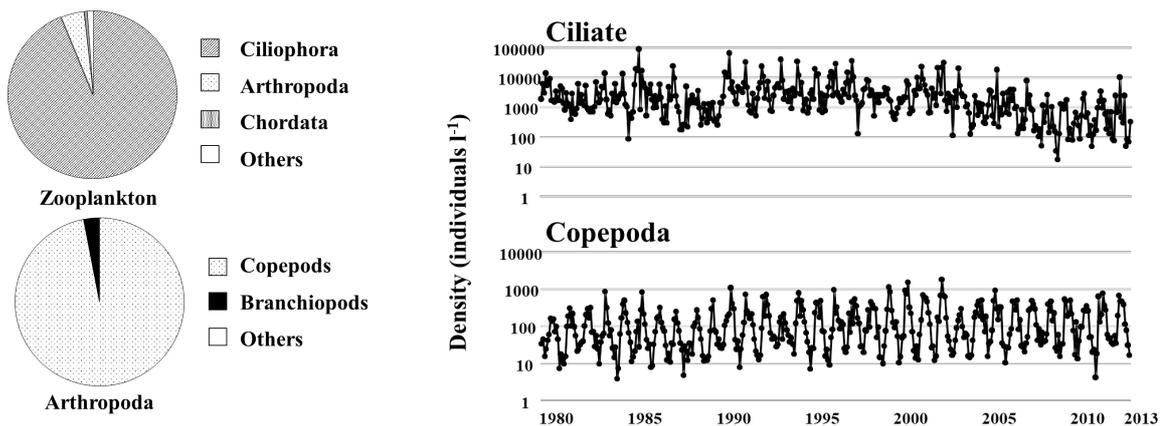
図(1)-18 広島湾北部 (NB) および南部 (SB) における動物プランクトンおよびカキへの基礎生産の転送

(1) -2-1-2 大阪湾における低次生態系構造解析

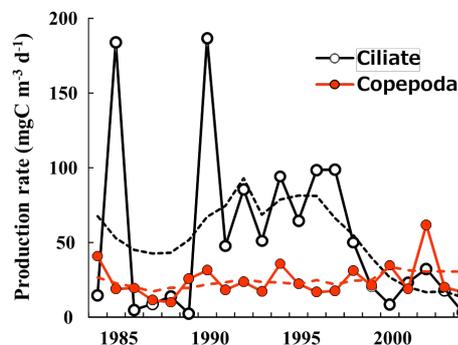
動物プランクトン調査はネットが用いられることが多いが、この調査では採水という手法をとったことによって、小型の繊毛虫類も含めた結果が得られている。調査期間平均では、個体数ベースでは繊毛虫量が95%を占める結果となった(図(1)-19)。ただし、主要なプランクトン食魚であるカタクチワシの胃内容物からは主としてカイアシ類が検出されていることから動物プランクトンの動態解析には繊毛虫類とカイアシ類について検討した。

繊毛虫類およびカイアシ類の毎月の個体数の変化(図(1)-19)をみると、繊毛虫類は1990年以降有意な減少傾向(Mann-kendoll test, $p < 0.01$)を示し、特に2000年代に入ってから減少傾向が顕著であった。一方、カイアシ類密度は1990年以降有意な変化傾向は確認されなかった。動物プランクトンの場合、水平、垂直方向に不均一に存在することから一般には鉛直曳網で採取し、垂直方向の不均一性の問題を排除する。そのため、本結果は水深1mの採水の結果である点は注意が必要である。

図(1)-20に繊毛虫類およびカイアシ類の容積ベースの年平均生産速度の時間変化を示す。本来、(1) -2-2の生産構造の解析で実施しているように面積ベースの解析とすべきであるが、鉛直方向の動物プランクトンの分布はこのモニタリングデータでは不明なため、ここでは水深1mの位置における容積ベースの解析とした。1990年代後半までは繊毛虫類の生産速度が大きかったが、その後大きく減少し、2000年前後以降はカイアシ類の方が大きい。一方、カイアシ類については、変動も小さく、過去からの減少は見られなかった。



図(1)-19 動物プランクトンの構成(左)と繊毛虫類およびカイアシ類個体数の時間変化(右)

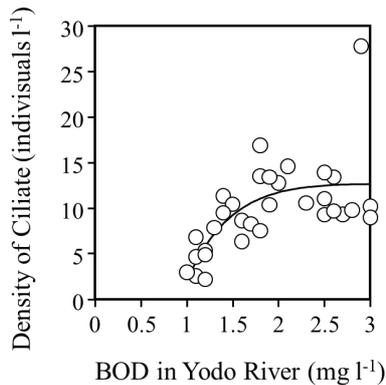


図(1)-20 繊毛虫類およびカイアシ類の生産速度の時間変化

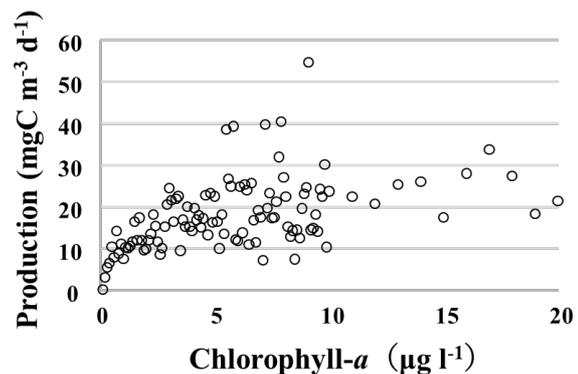
カイアシ類は植物プランクトンを餌として生育するが、繊毛虫類は植物プランクトンの他に細菌類やデトリタスなども餌にすることができることから、有機汚濁が進んだ海域で増加しやすい。そこで大阪湾に流入する主要な河川である淀川のBOD濃度との関係を検討した。特に繊

毛虫類では年変動が大きいことから、繊毛虫類数およびBOD濃度はそれぞれ5年移動平均を求めたのち、図にプロットした(図(1)-21)。その結果、淀川BOD濃度と繊毛虫類の個体数にはよい一致が見られ、有機汚濁の改善に伴って繊毛虫類が減少したことが示された。

カイアシ類については、餌となる植物プランクトン量との関係を明らかにするため、Chl.a濃度との関係性を評価した(図(1)-22)。低濃度のChl.a濃度の範囲では、Chl.a濃度の増加に伴ってカイアシ類の生産も増加したが、Chl.a濃度が $5 \mu\text{g l}^{-1}$ こえたあたりで増加は頭打ちになり、それ以上のChl.a濃度では明確な増加は観察されない。これは餌となる植物プランクトン濃度がそこに生育するカイアシ類にとっては十分な量になったためと考えられる。



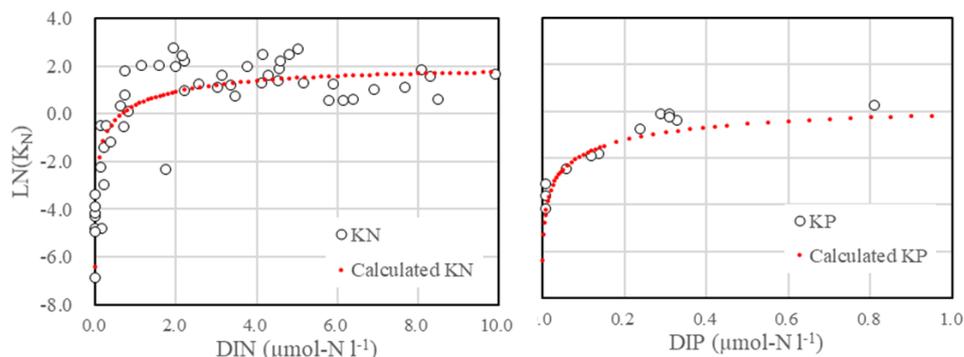
図(1)-21 5年移動平均した繊毛虫類の個体数と淀川BOD濃度との関係



図(1)-22 Chl.a濃度およびカイアシ類の生産速度の関係

- (1) -2-2 基礎生産・二次生産の推定手法の開発
- (1) -2-2-1 基礎生産の推定手法の開発
- (1) -2-2-1-1 水質モニタリングデータを用いた基礎生産の推定

広島湾他で得られたデータを用いて計算した窒素およびリンの半飽和定数は図(1)-23の通りである。栄養塩濃度が高い領域では半飽和定数は一定の値を示したが、DINで $2.0 \mu\text{mol l}^{-1}$ 、DIPで $0.2 \mu\text{mol l}^{-1}$ あたりから急激に減少した。半飽和定数を一定とした計算では、栄養塩濃度が欠乏してくると基礎生産がほとんどゼロになるが、実測ではそのようなことはなく、栄養塩欠乏状態においても一定の基礎生産が起こっている。半飽和定数を栄養塩濃度の係数とすることでこの問題は解消し、図(1)-24に示したように実測値をよく再現した。季節ごとに推定値の精度を確認したが、誤差は最大で23%、年間値で見ると5%であった。



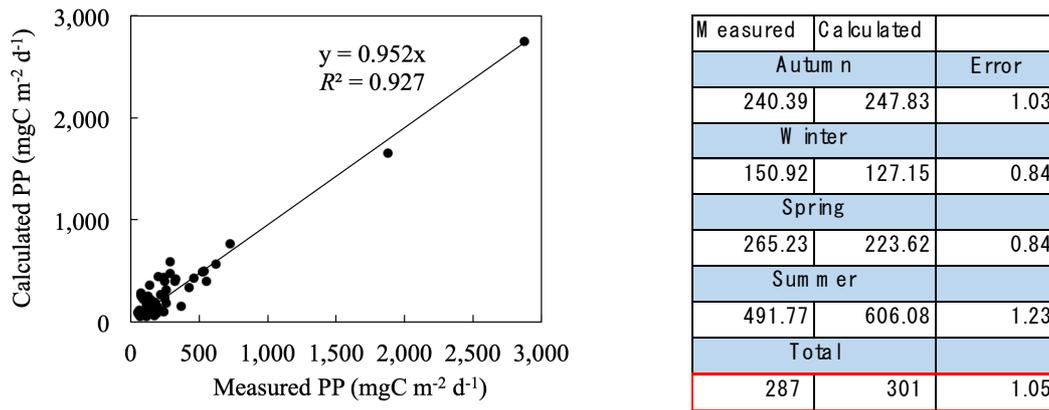
図(1)-23 DIN (左) およびDIP (右) に依存した半飽和定数

栄養塩濃度に依存した半飽和定数は以下の通りである。

$$K_N = 6.12 \times (1 - \exp(-0.27 \times \text{DIN}))$$

$$K_P = 1.04 \times (1 - \exp(-1.63 \times \text{DIP}))$$

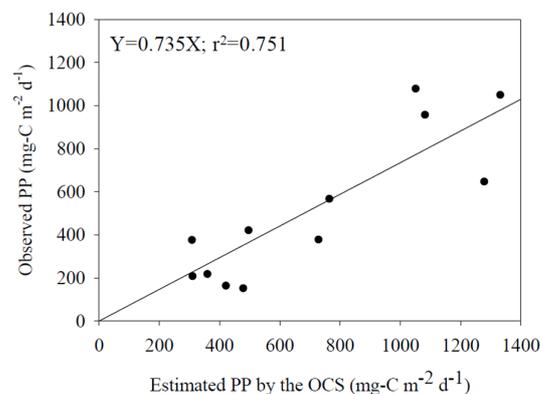
ここで、 K_N : 窒素の半飽和定数、 K_P : リンの半飽和定数を示す。



図(1)-24 計算値と実測値の関係 (左) と誤差 (右)

(1) -2-2-1-2 衛星データを用いた基礎生産の推定

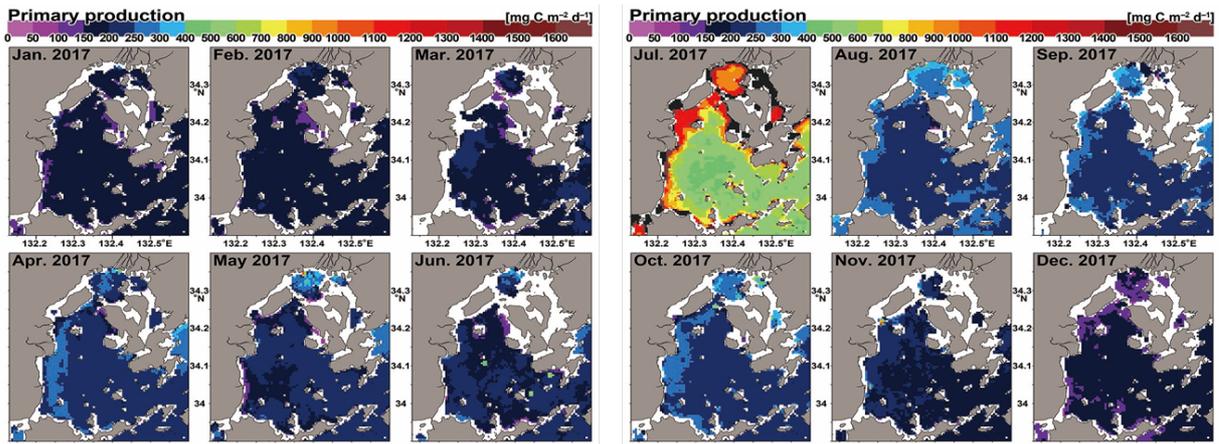
衛星データからChl.a濃度および光合成有効層を推定し、基礎生産速度を計算した結果を実測値と比較して図1-25に示す。衛星データを用いた計算では、水質データを用いた計算と異なり栄養塩濃度が変数に含まれない。しかし、ここで用いた同化効率 P_{opt} は、水質モニタリングデータを用いた推定で使用した最大同化効率 P_{max}^B とは少し異なる。 P_{max}^B はラボの培養実験から求めた最大値であるのに対して、 P_{opt} は海域の実測値から求めた経験値となる。植物生理学的には最大値とならない水温20℃前後で最大値をとるなど実態としては水温以外の環境要因を含んだ数字である。特に高水温域で過小評価となっているのは沿岸域のデータが多いことが理由ともいわれており、このような海域では栄養塩欠乏なども起こっているため、結果として高水温期には栄養塩制限が含まれた値となっている可能性が指摘されている¹⁴⁾。いずれにしても広島湾については計算値と実測値がよく一致した。一方で、広島湾以外の安芸灘ほかの基礎生産速度はうまく再現できなかった。



図(1)-25 衛星データに基づく計算値と実測値の比較

図(1)-26に広島湾における2017年の基礎生産の時空間分布を示す。2015年から2017年の3年間の評価を行ったが、2017年7月には3年間で最大の基礎生産を示した。この7月には台風が襲来しており、それに伴うChl.a濃度の上昇を反映した結果となっている。台風や大雨では陸域から大量の栄養塩類が流入することが知られており、その現象をよく表している。

栄養塩データが直接計算に入っていない点が衛星データを用いた基礎生産速度推定の欠点であるが、間接的には栄養塩濃度に依存したChl.a濃度の増減を反映した結果とはなる。一方で、衛星データを用いた解析は時空間解像度が実測水質データと比較すると飛躍的に大きく、過去の衛星データも利用可能であることから、実測値と一致する範囲を逸脱しない時間空間範囲でより詳細な時空間解像度での評価を行えば、大変有用なツールとなり得る。



図(1)-26 衛星データに基づく2017年の広島湾における基礎生産の時空間分布

(1) -2-2-2 二次生産速度の推定手法の開発

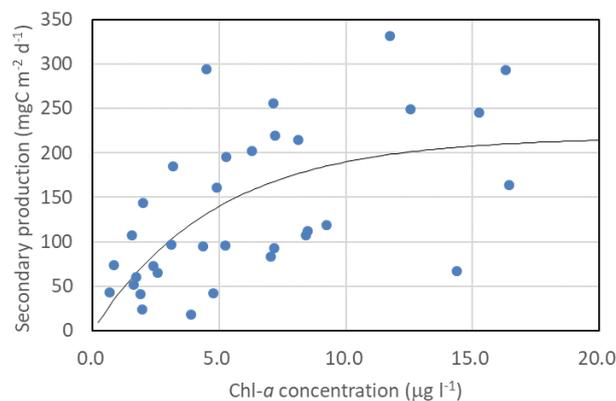
カイアシ類は動物プランクトンの中でも個体サイズが大きく、個体数が大きい主要な動物プランクトンであり、高次生物の餌としての主要な二次生産と考えることができる。基礎生産が異なると考えられる湾奥から湾口に向かう3地点において、カイアシ類による二次生産速度とChl.a濃度をプロットした結果を図(1)-27に示す。Chl.a濃度 $10 \mu\text{g l}^{-1}$ あたりでカイアシ類にとっては十分な餌環境となり、それ以上では二次生産速度は大きく変化しなかった。図1-27の近似曲線から計算される二次生産速度の計算式は以下の通りである。最大増殖速度の温度依存性についてはUye and Shimazu (1997)¹⁰⁾の文献値を用いた。

$$G = G_{max} \times (1 - \exp(-0.21 \times CHL))$$

$$G_{max} = 44.9 \times \exp(0.062 \times T)$$

ここで、 G : カイアシ類の二次生産速度 ($\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)、 G_{max} : カイアシ類の最大増殖速度 ($\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)、 CHL : Chl.a濃度 (mg m^{-3})、 T : 水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

ここで得られた一定範囲までのChl.a濃度は二次生産速度を高めるもののそれ以上では、二次生産速度は増加しないという結果は、増加が止まるChl.a濃度が $5 \mu\text{g l}^{-1}$ を超えた当たりと $10 \mu\text{g l}^{-1}$ 前後と若干の違いがあるが、(1) -2-1-2において得られた結果と一致している。Vidal (1980)¹⁵⁾が行った実験室での珪藻*Thalassiosira fluviatilis*と動物プランクトン*Calanus pacificus*の二者培養の結果でもChl.a濃度として $2 \sim 12 \mu\text{g l}^{-1}$ 以上で増殖速度は一定となったことが報告されている。また、Uye and Murase (1997)¹⁶⁾は、現場海水を用いた4月と7月のカイアシ類*Calanus sinicus*の培養試験において、卵生成速度はそれぞれChl.a濃度が $2.28 \mu\text{g l}^{-1}$ 、 $1.72 \mu\text{g l}^{-1}$ で最大値の90%に達することを示した。以上の文献からも一定以上の植物プランクトンの濃度では二次生産は増加しないことが示唆され、本研究結果を支持している。

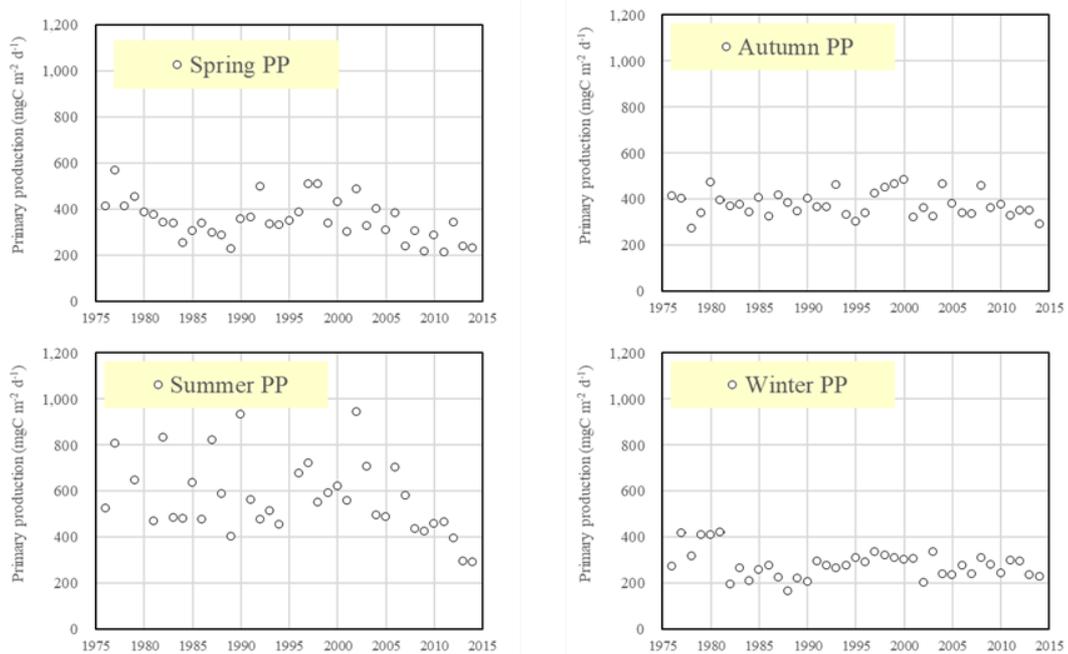


図(1)-27 大阪湾におけるChl.a濃度とカイアシ類の二次生産速度の関係

(1) -2-3 瀬戸内海全域における過去から現在までの低次生産構造の時空間分布

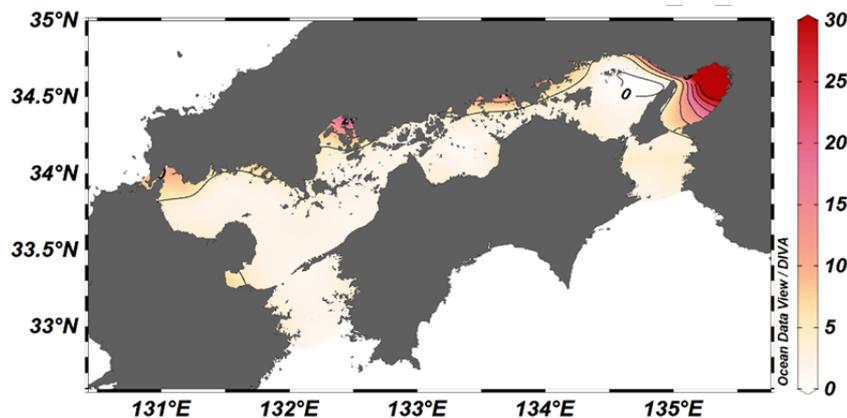
(1) -2-3-1 生産に関わる水質と基礎生産の時空間分布解析

1970年代後半からの季節別の瀬戸内海全体での平均基礎生産の時間変化を図(1)-28に示す。季節別の基礎生産をみると年変動が大きいと2000年ぐらいまでは夏季の基礎生産が他の季節より大きく、400~1,000 mgC m⁻² d⁻¹であった。春季と秋季は等しく400 mgC m⁻² d⁻¹前後、冬季はやや小さく300 mgC m⁻² d⁻¹前後であった。経年的な変化は秋季及び冬季には見られない。一方、春季および夏季では2000年前後から減少が始まっている。特に夏季の減少が著しく、近年の夏季基礎生産は400 mgC m⁻² d⁻¹を下回り、春季や秋季と同程度まで低下している。

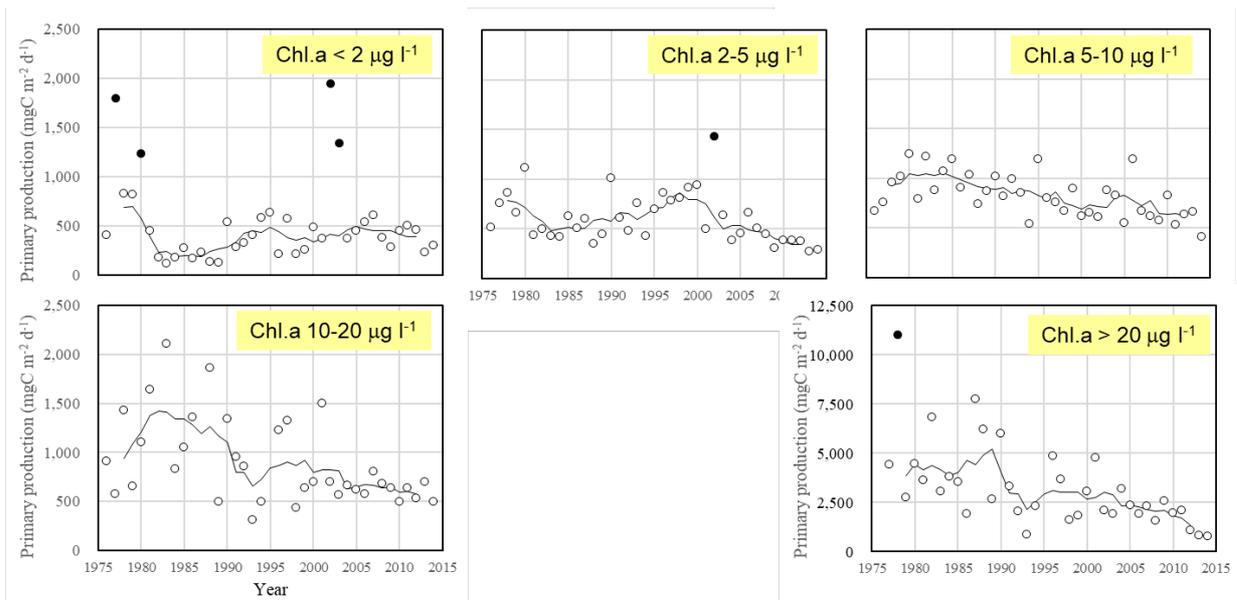


図(1)-28 季節別の平均基礎生産の時間変化。1970年代は地点数が少ないため参考値。

海域別の基礎生産の変化をみるために、1981年~1990年までの10年間のChl.a濃度を基準に海域を5つに分類した。すなわち、平均Chl.a濃度が2 μg l⁻¹以下、2~5 μg l⁻¹、5~10 μg l⁻¹、10~20 μg l⁻¹、20 μg l⁻¹以上の海域に分類した。それぞれの瀬戸内海における専有面積は、32.0%、45.1%、13.7%、13.7%、4.0%、5.3%であり、その分布を図(1)-29に示す。海域ごとの基礎生産の変化は図(1)-30に示す。Chl.a濃度20 μg l⁻¹以上の海域のみ他の海域より濃度も高いため縦軸が異なっている。Chl.a濃度が5 μg l⁻¹を超えるような比較的濃度の高い海域では、Chl.a濃度の減少は顕著であり、広い面積を占める低濃度海域では明確な減少傾向は見られなかった。



図(1)-29 1981-1990年の平均Chl.a濃度の空間分布

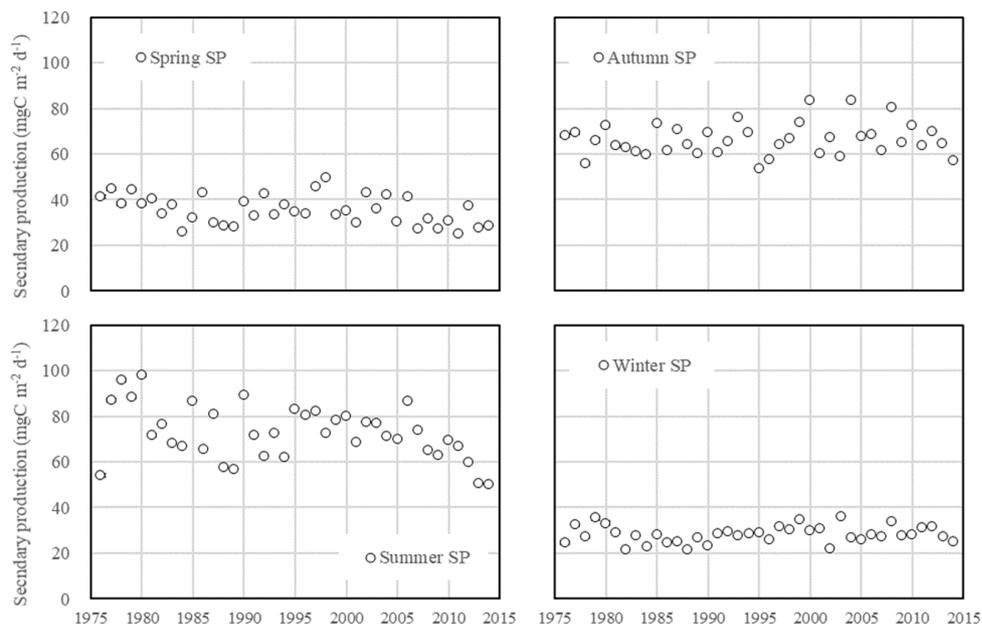


図(1)-30 1981-1990年の平均Chl.a濃度で分類された海域の平均基礎生産の時間変化

●は外れ値。1970年代は地点数が少ないため参考値。

(1) -2-3-2 二次生産の時空間分布解析

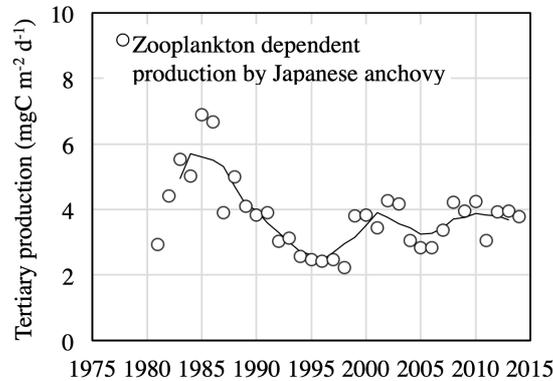
1970年代後半からの季節別の瀬戸内海全体でのカイアシ類の平均二次生産の時間変化を図(1)-31に示す。季節別の二次生産は基礎生産ほど大きな変動は示していない。夏季を除けば時間変化はほとんどなく、夏季、秋季で $60\sim 80\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 、春季は $40\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 、冬季は $30\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 程度で推移している。夏季は基礎生産同様に2000年前後からの減少が起こっている。春季においても2000年あたりから減少しているようにもみえるが、現在のレベルは1980年代～1990年代と同程度である。春季、夏季、秋季、冬季の2005～2014年の平均水温をみるとそれぞれ $15.6\pm 2.8^\circ\text{C}$ 、 $24.4\pm 2.2^\circ\text{C}$ 、 $23.4\pm 1.5^\circ\text{C}$ 、 $11.5\pm 2.1^\circ\text{C}$ となっていた。基礎生産では春季と秋季の値は大きくは異ならなかったが、二次生産では春季と比較して秋季の二次生産は1.5倍程度となっている理由は、水温の違いである。



図(1)-31 季節別の平均二次生産の時間変化。1970年代は地点数が少ないため参考値。

(1) -2-3-3 瀬戸内海における主要な三次生産としてのカタクチイワシ生産の時間変化

カタクチイワシと東部海域におけるイカナゴについては漁獲量だけでなく、資源量が推定されている。カタクチイワシの餌は植物プランクトンと動物プランクトンであり、その比率は1:3とされている。ここでは、動物プランクトンに依存したカタクチイワシの三次生産速度を計算した(図(1)-32)。その結果、生産速度としても1990年代半ばが最も低く、その後は一定であることが示された。



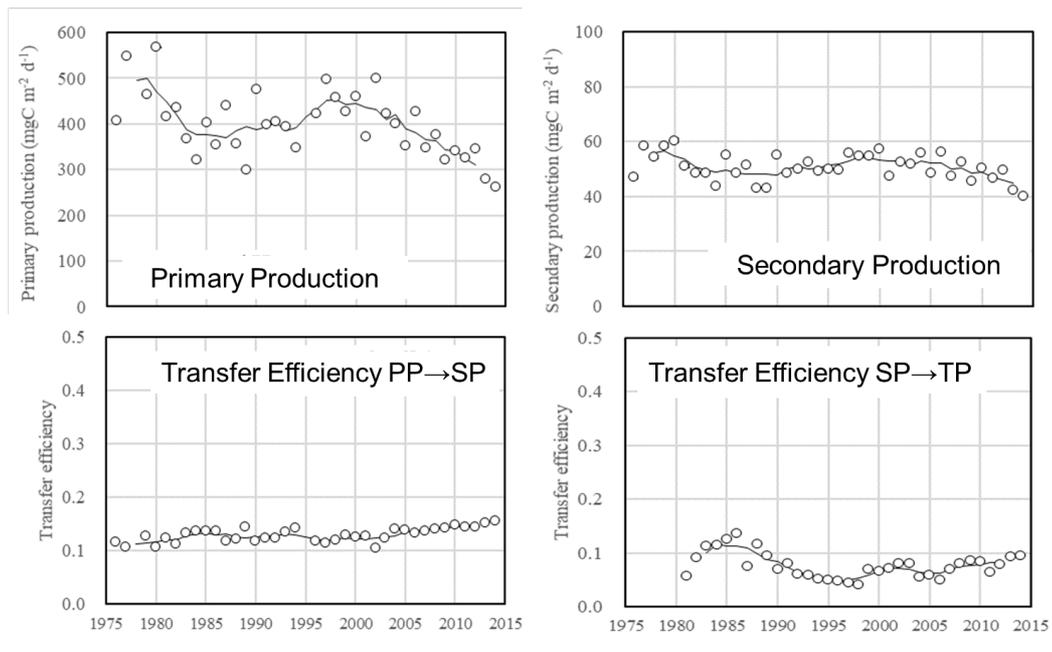
図(1)-32 カタクチイワシの動物プランクトン依存分の三次生産の時間変化

(1) -2-3-4 転送効率の時間変化

基礎生産および二次生産の瀬戸内海全体の年平均値と基礎生産から二次生産および二次生産から三次生産における転送効率を図(1)-33に示す。先に示した通り基礎生産については、春季と夏季に2000年代から減少がみられ、その他の季節では変化がなかった。春季と夏季の基礎生産は相対的に大きいため、これらの季節の減少が年平均値の減少にも寄与し、2000年前後から低下傾向が顕著になっている。一方、二次生産は季節的にみると夏季のみの減少であったが、やはり夏季の二次生産が年変動に与える影響が大きいため、2000年前後から減少がみえる。ただ、1980年代から2000年前後に向けていったん増加した影響で、1980年代と比較すると現在の二次生産はほぼ同等の値となっている。

基礎生産から二次生産の転送効率をみると2000年前後まではほぼ一定の値 (0.13 ± 0.01) を示しているが、その後若干増加している。基礎生産の減少は基本的にChl.a濃度がもともと高い海域で顕著に起こっており、Chl.a濃度が $10 \mu\text{g l}^{-1}$ を超えるような海域における基礎生産の減少は二次生産の減少に結びつかないことは先に示した通りである。2000年前後まではこのような高濃度Chl.a濃度を示す海域の基礎生産が減少しつつも、専有面積が大きく、二次生産の増加に結び付くChl.a濃度が $5 \mu\text{g l}^{-1}$ 以下の海域で基礎生産が増加していたため、結果として海域全体の基礎生産は高まり、二次生産への転送効率も一定となった。しかし、2000年以降は、 $2 \sim 5 \mu\text{g l}^{-1}$ 以下の海域での基礎生産が若干減少するなかで、さらに高濃度Chl.a濃度を示す海域の基礎生産が減少したため、結果として転送効率が増加したと推定される。

次に二次生産から三次生産の転送効率をみると1985年前後を除き0.1以下の範囲で変動し、その変動は三次生産の変動に依存している。二次生産は比較的安定した中で三次生産が変動しており、転送効率が低いことも考えるとカタクチイワシの三次生産は二次生産に依存しない変動である可能性が高いと結論付けられる。

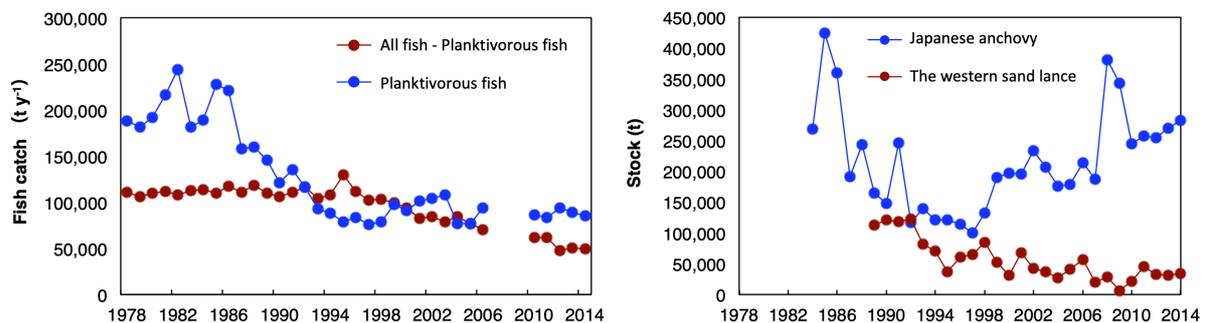


図(1)-33 基礎生産、二次生産の年変動（上）と基礎生産から二次生産および二次生産から三次生産における転送効率（下）の時間変化

(1) -3 プランクトン食魚を中心とした高次生態系構造の解明

(1) -3-1 漁獲量及び資源量から評価した魚類の生産構造

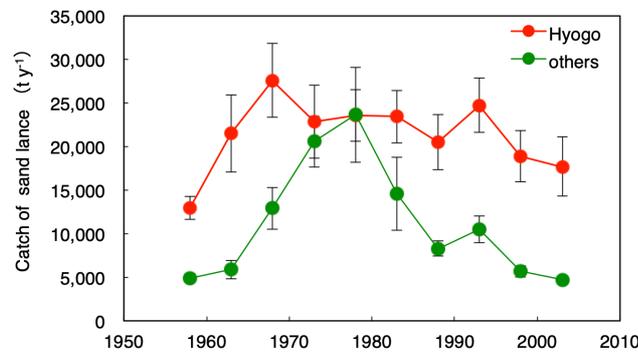
魚類漁獲量全体の推移をプランクトン食魚とその他の魚種に分けて評価したところ、2000年までの漁獲量はプランクトン食魚で説明され、2000年以降はその他魚種の減少で説明された(図(1)-34)。漁獲量としては1980年代から一貫して減少しているが、その中身は2000年を境に異なっていることが示された。また、1980年代におけるプランクトン食魚はマイワシが中心であったが、2000年代半ばにはマイワシはほとんど姿を消した。この現象はレジームシフトとも呼ばれ日本沿岸域でも同様に起こった現象であり、餌環境を含め特に瀬戸内海の影響がもたらした結果ではないと考えられる。カタクチイワシの資源量は1990年代を底に近年は増加しており、この変動は先にも述べた通り基礎生産、二次生産とは一致しておらず、カタクチイワシの餌となる基礎生産、二次生産に依存した変動とは考えられない。



図(1)-34 プランクトン食魚とその他の魚種に分けた漁獲量（左）およびカタクチイワシとイカナゴの資源量の推移（右）

イカナゴについてはカタクチイワシとは異なり、資源量が示されている1980年代から一貫して減少している(図(1)-34)。イカナゴはカタクチイワシと異なり、砂に潜る習性を有しており、さらに夏～秋の高水温期には砂の中で潜砂したまま摂餌を行わずに過ごす「夏眠」を行う。夏眠の後、イカナゴは底質に沈性卵を産むため、好適な底質環境はイカナゴにとって生息場、夏

眠場、産卵場として極めて重要である。そのため、瀬戸内海で1960年代から続いた海砂の採取は、イカナゴ資源に極めて大きな負の影響をもたらしたと考えられる。図(1)-35に兵庫県とそれ以外の府県に分けたイカナゴ漁獲量を示すが、1965年で海砂の採取をやめた兵庫県では漁獲量の減少は見られるもののその減少は小さい。一方で、1998年～2006年まで海砂採取を禁止しなかった香川県、岡山県、愛媛県、広島県を中心としたその他の海域では1980年代以降大きく減少しており、生息場である良質な砂底の減少はイカナゴ資源の減少に大きな影響を及ぼした可能性は高い。

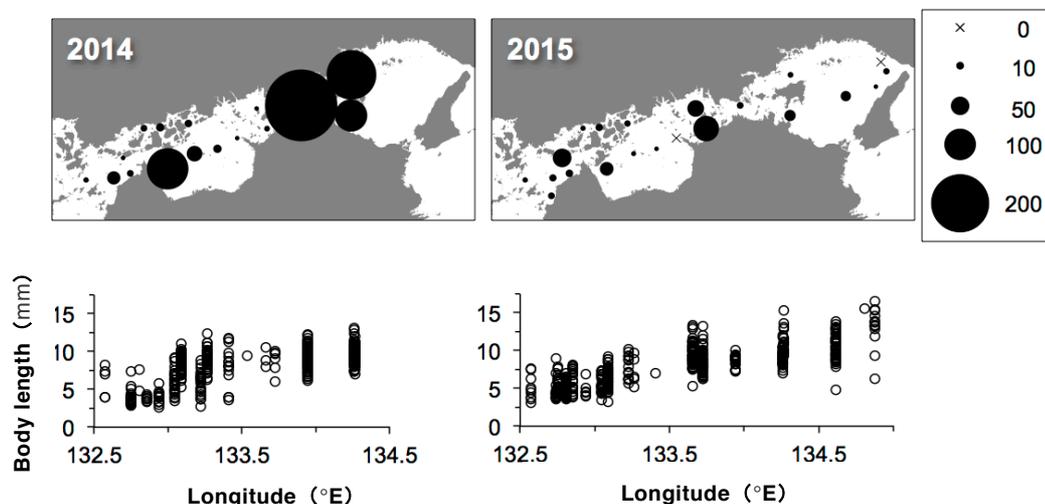


図(1)-35 兵庫県とそれ以外の府県に分けたイカナゴ漁獲量（5年平均値）の推移

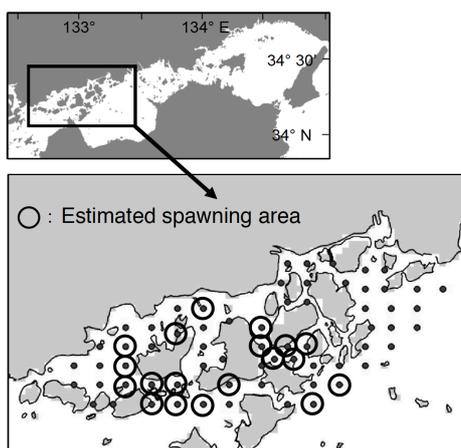
(1) -3-2 プランクトン食魚であるイカナゴの個体群解析

(1) -3-2-1 中西部個体群の産卵場の推定と東部個体群との交流

2014年1月の豊潮丸による丸稚ネット調査においては、イカナゴ仔魚は全ての調査地点で採集され、中西部（安芸灘～燧灘西部）に比べ、東部（備讃瀬戸～播磨灘）の方が同時期においてイカナゴ仔魚の採集個体数が多かった（図(1)-36）。2015年1月では採集個体数が少なかったが、備讃瀬戸、播磨灘、および安芸灘で仔魚を採集した。体サイズについても東西間で変異がみられ、仔魚の全長は東部ほど大きい傾向がみられた。さらに、体サイズにおける東大西小の傾向は、同じ調査で採集されたカサゴやメバル類でも確認された。冬季の水温が東部で低い傾向がみられることから、瀬戸内海の東西でみられる仔魚の体サイズの変異は、水温の差異による産卵（カサゴやメバル類では産仔）や孵化のタイミングの違いに起因している可能性が示唆された。2014年1月に得られた仔魚の体サイズは2.7～13.2 mm、推定ふ化後日数は0～27日と推定された。粒子追跡によるシミュレーションにより、安芸灘三原瀬戸周辺において産卵場が散在している可能性が示唆された（図(1)-37）。また、中西部の主要な産卵場である安芸灘・燧灘で生まれた仔魚は海流ののって東部海域には移動しないことが明らかとなった。



図(1)-36 イカナゴ仔魚の採集数（上）および経度と体長の関係（下）



図(1)-37 瀬戸内海中西部（三原瀬戸）において推定されたイカナゴの産卵場

(1) -3-2-2 東部個体群と中西部個体群の遺伝的な分化

日本沿岸に生息するイカナゴ *Ammodytes japonicus* の遺伝的集団構造解析に適したマイクロサテライトDNAマーカー11座を開発した（表(1)-2）。開発したマイクロサテライトDNAにおけるアリル型を判定し、ベイジアンクラスタリング解析STRUCTUREを用い遺伝的な集団数を解析した結果、日本沿岸のイカナゴは、岩手以北の集団、および福井以南の日本海・太平洋沿岸・瀬戸内海を一つとする、2集団に分かれることが示された。また、遺伝的分化程度を示す固定化指数 F_{st} に関する有意検定においても、瀬戸内海に生息するイカナゴは、遺伝的に一つの集団で成立すること（ $F_{st} = 0.0062 \pm 0.0012$: 平均値 \pm 標準偏差、 $p > 0.05$ ）、イカナゴ主要漁場の一つの伊勢三河湾の集団（ $F_{st} = 0.0058 \pm 0.0011$ 、 $p > 0.05$ ）や日本海に分布する集団（ $F_{st} = 0.0060 \pm 0.0008$ 、 $p > 0.05$ ）とも遺伝的に明確な分化が認められないことが裏付けられた（表(1)-3）。したがって、瀬戸内海のイカナゴは遺伝的集団としては単一の集団に属し、瀬戸内海の東西の海域間である程度の個体が入り出し維持されていることが示された。このことより、海砂採取に伴う生息地攪乱が生じた瀬戸内海東部の生息環境の改善を図ることで、瀬戸内海東部のイカナゴ個体群の改善のみならず、瀬戸内海東西のイカナゴ個体群がメタ個体群として支えあい瀬戸内海全体でのイカナゴの持続性を高めることにも貢献できると示唆された。

表(1)-2 開発したマイクロサテライトDNA11座の特性

Locus ID	GeneBank Accession No.	Repeat motif	Primer sequence (5' - 3')		Annealing temperature (°C)	Number of alleles	Allele size (bp)
			F	R			
Amm001	LC075600	(AG) ₁₀	CGGTTGCCTCTTGTCTCATC	CAGGGCGACTCAITTCATTC	59	6	115-125
Amm008	LC075605	(ACAG) ₄	ACCTACACACAGTGAAAGGTACCTTGC	GCTCTTGGTGATCTGCATGCAAC	59	14	269-337
Amm016	LC075613	(GT) ₁₀	GCATGTGCAATAGTGAATAAGTGTGG	TGAGCCATGGGTGTAGGCAAGT	59	8	119-133
Amm017	LC075614	(GT) ₁₅	TGTCTCTCCATCTGCTCTGTGTCTC	TACCATTGAGCATGAGCAGGCCG	59	18	148-212
Amm021	LC075618	(GT) ₁₅	GGAAACCAATTGTGCAACAGTC	CTCTGTCCATAATGGCTTGAAGACC	59	22	155-211
Amm022	LC075619	(AGAT) ₁₃	CAGCATCACATGCTTCTGTCTGC	GCTGCAGAAACAGATGATTGCAAGAGG	59	18	131-207
Amm024	LC075621	(GGT) ₁₂	CCCACGCCAAATGCAGCACATATC	TGGAAGTTGCTGACTCACCTCTGC	59	16	154-218
Amm025	LC075622	(AAAC) ₈	AGGACTAGGAGGAATAAGACCCGAGGC	TTAATGCCGAGTGGTGTGTTTGTG	59	5	184-200
Amm027	LC075624	(ATCC) ₆	TCGGAGAAATGGCTGGAGGC	TCGCTCACTTAGTCGCAGAITGAC	59	7	169-201
Amm028	LC075625	(AG) ₉	GGGAGTACACAAGACACAGCCTTAAC	TTCAITGGGACCATCTTTCTCCCGC	59	6	202-212
Amm029	LC075626	(AG) ₉	TGTTTGAICTTATGATGGTGGCAGAGC	AACGTGACGCTAATGAGCCGCTC	59	8	187-205

表(1)-3 マイクロサテライトDNA分析に基づく地域間の固定化指数 F_{st} (下半三角) およびその p 値 (sequential Bonferroni法で補正後の値。上半三角)。有意だった組合せを灰色白文字で示す。

	Seto inland Sea						Aichi	Fukui	Iwate	Aomori	Hokkaido
	Ehime	Takehara	Kamagari	Kagawa	Hyogo	Osaka					
Ehime	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.248	0.999	0.957	<0.05	<0.05	<0.05
Takehara	0.006	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.836	0.999	<0.05	<0.05	<0.05
Kamagari	0.005	0.007	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	<0.05	<0.05	<0.05
Kagawa	0.006	0.006	0.007	0.999	0.570	0.999	0.999	0.999	<0.05	<0.05	<0.05
Hyogo	0.005	0.005	0.005	0.005	0.999	0.999	0.999	0.999	<0.05	<0.05	<0.05
Osaka	0.007	0.008	0.008	0.008	0.006	0.999	0.999	0.999	<0.05	<0.05	<0.05
Aichi	0.006	0.005	0.006	0.005	0.005	0.008	0.999	0.999	<0.05	<0.05	<0.05
Fukui	0.007	0.006	0.005	0.006	0.005	0.007	0.006	0.999	<0.05	<0.05	<0.05
Iwate	0.031	0.032	0.032	0.034	0.037	0.035	0.032	0.038	0.999	0.999	
Aomori	0.053	0.053	0.051	0.056	0.057	0.053	0.051	0.056	0.012	0.999	
Hokkaido	0.045	0.045	0.043	0.048	0.049	0.046	0.045	0.048	0.009	0.010	

(1) -3-2-3 三原瀬戸におけるイカナゴの生息状況およびイカナゴの底質選好性

産卵場と推定された安芸灘三原瀬戸における場所の底質環境が、イカナゴの生息場所として妥当であるか検証するため、2014年と2015年の夏期にドレッジによる夏眠イカナゴと底質の採集調査を実施した。その結果、竹原沖から大崎上島と大三島の海峡部までの三原瀬戸西部エリア (3地点) と三原湾細島周辺の三原瀬戸東部エリア (2地点) に夏眠イカナゴの存在を確認した (図(1)-38)。出現した5地点の底質は中央粒径0.43~2.25 mmの砂成分であり、中央粒径0.43~2.25 mm、淘汰度0.81~1.79の砂底質であり、いずれも粒径0.25~4.0 mmの砂粒子をおよそ80%の重量割合で含む砂底質であった (表(1)-4)。これは他海域のイカナゴ夏眠場の底質性状 (中央粒径: 0.125~4.0 mm; 中村ら 1997¹⁷⁾, 反田 1998¹³⁾, 篠原ら 2003¹⁸⁾) の範囲に十分含まれる。一方、イカナゴが確認できなかった地点の底質に礫成分が多く含まれ、イカナゴの潜砂生息に適した砂成分の含有率が有意に低かった。そのようなイカナゴの生息に適さない底質環境は忠海沖から須波沖までの三原瀬戸中央エリアに目立つ傾向にあった。三原瀬戸西部エリアでは、広島県による夏眠イカナゴ調査においてもイカナゴの出現が確認されているが、採集イカナゴ個体数は減少傾向にあり¹⁹⁾、三原瀬戸においてイカナゴの夏眠生息に適した砂底質の分布が地理的に限られた状態にあることが、イカナゴ資源回復を制約する要因になっている可能性が示唆された。



図(1)-38 安芸灘三原瀬戸水域におけるドレッジ調査地点 (丸印: St-1からSt-11)。斜線範囲は過去の海砂利採取区域を示す。赤塗りはイカナゴ採捕地点を示す。

三角印は広島県 (2017) ¹⁹⁾ の調査定点 (赤塗りは2015年調査でのイカナゴ採集地点)。

表(1)-4 瀬戸内海三原瀬戸におけるドレッジ調査地点でのイカナゴ採捕数と底質特性。ND: 大きな礫が大部分を占めたため正確な測定ができなかったもの。調査地点の位置は図1-38を参照。調査点距離は2014年と2015年のドレッジ調査開始点の直線距離を示す。好適砂含有率と最適砂含有率はそれぞれ粒径0.25~4.0 mmと粒径0.5~2.0 mmの砂成分の重量割合を示す。

St	Sampling year	Startpoint of dredge sampling		Distance of sampling (m)	Depth (m)	Number of collected sand lances (individual)	Median grain size [mm (Md φ)]	Sorting (φ)	Characteristics of bottom sediment			
		Latitude (N)	Longitude (E)						Proportion of preferred size sands (%)	Proportion of suitable size sands (%)	Shell containing (%)	Shear strength (kN/m ²)
1	2014	34-18.598	132-55.719	340	35	2	0.43 (1.22)	1.18	81.8	32.5	14.2	0.77
	2015	34-18.436	132-55.608		34	0	1.18 (-0.24)	1.7	76	34.8	8.1	1.05
2	2014	34-18.753	132-57.799	450	31	2	0.82 (0.29)	1.15	95.3	60.2	12.5	2.01
	2015	34-18.998	132-57.787		37	0	1.23 (-0.30)	1.65	80.1	37.6	8.1	1.23
3	2014	34-18.711	133-00.602	140	38	0	4.56 (-2.19)	2.36	37.4	9.3	4.7	3.03
	2015	34-18.660	133-00.675		34	0	0.45 (1.15)	1.94	73.4	21.2	14.4	1.27
4	2014	34-20.980	133-05.689	280	20	0	4.47 (-2.16)	0.59	41.2	4	ND	ND
	2015	34-21.132	133-05.665		18	0	8.00 (-3.00)	ND	1.5	0.5	ND	ND
5	2014	34-21.471	133-07.664	110	19	1	2.25 (-1.17)	0.81	85	41.8	8.6	1.27
	2015	34-21.504	133-07.721		15	0	1.21 (-0.28)	1.39	82.3	52.6	9.1	1.1
6	2014	34-22.765	133-08.802	550	28	0	5.06 (-2.34)	1.1	39.7	14.3	33.6	2.59
	2015	34-22.479	133-08.697		24	2	1.68 (-0.75)	1.05	83.1	56.8	35.9	1.16
7	2014	34-20.047	133-05.262	360	13	0	0.46 (1.12)	1.45	84.7	26.6	20.3	1.6
	2015	34-19.860	133-05.207		20	0	0.40 (1.32)	1.3	81.3	20.8	14.6	0.86
8	2014	34-19.046	133-03.309	270	38	0	2.87 (-1.52)	2.28	52.8	18.3	10.4	2.85
	2015	34-18.947	133-03.173		36	0	7.92 (-2.99)	0.52	12.5	2.5	3.9	3.3
9	2014	34-17.523	133-03.621	110	22	0	3.02 (-1.60)	2	59.7	14.4	25.8	2.37
	2015	34-17.552	133-03.560		27	0	0.70 (0.52)	2.09	68.1	15.6	16.5	1.16
10	2014	34-16.287	132-57.900	40	35	0	2.11 (-1.08)	0.96	82.3	47.3	5.7	1.39
	2015	34-16.288	132-57.875		35	0	2.44 (-1.29)	1.67	68.5	34	11.4	2.23
11	2014	34-14.043	132-57.260	240	21	1	0.97 (0.04)	1.79	80.1	30.9	22.7	1.64
	2015	34-13.999	132-57.110		19	0	1.76 (-0.82)	1.21	89.6	44.9	16.9	1.23

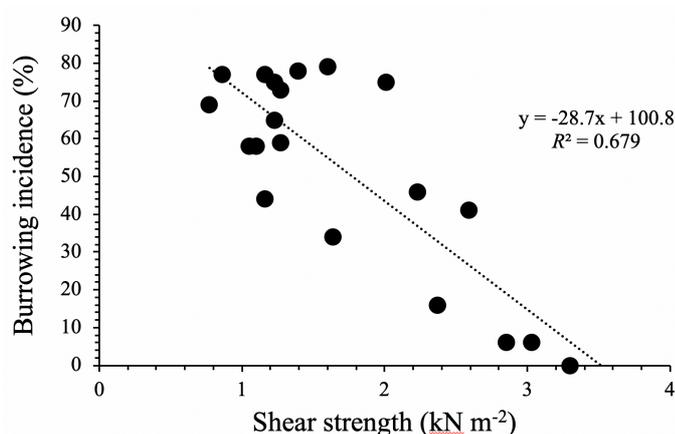
三原瀬戸を含めた瀬戸内海西部では、イカナゴの潜砂に好まれる底質環境を詳しく分析した事例がない。そこで、イカナゴが採捕された地点とされなかった地点の底質を比較したところ、イカナゴ採捕地点の底質のせん断強度は、0.77~2.01 kN m⁻²の低い抵抗値を示していた。イカナゴ採捕地点と非採捕地点（高根島と佐木島に挟まれたSt-7を外れ値として除く）の底質の淘汰度、貝殻含有率に有意差は認められなかった（表(1)-5）。一方、イカナゴ採捕地点の底質の中央粒径は有意に小さく、せん断強度が有意に低いという差異がみとめられた（表(1)-6）。さらに、水槽実験によりイカナゴが多く潜砂した底質を詳しく分析する底質選好性実験を実施した。検討する底質性状として、中央粒径、粒度の淘汰度、貝殻含有率、せん断強度に着目し分析を行った。各底質へのイカナゴ潜砂率と底質性状についてステップワイズ回帰分析を行った結果、潜砂率を説明する変数として、せん断強度のみが説明変数として選択された（図(1)-39）。すなわち、中央粒径よりもせん断強度がより明確に潜砂率を説明することができる可能性が示唆された。この結果はイカナゴにとって好ましい底質条件の1つとして、底質への潜砂しやすさおよび砂中での移動しやすさが重要であることを示唆するものである。ハンドベーンを用いたせん断強度の測定は底質採集現場で迅速に可能で、乾燥などのプロセスの必要な粒度組成分析よりも簡便な評価法である。他水域のイカナゴ個体群においてもせん断強度を指標として適用できるかは確認が必要であるが、イカナゴ資源の回復方策の基盤となる底質環境評価において力を発揮する手法となることが期待される。

表(1)-5 瀬戸内海安芸灘三原瀬戸における夏眠イカナゴ採捕地点 (St-1, 2, 5, 6, 11) と非採捕地点 (St-3, 4, 7, 8, 9, 10) の底質性状比較。イカナゴ採捕5地点のデータは、イカナゴが採捕された年度のデータのみ (非採捕年度データは除く)。イカナゴ非採捕6地点については、のべ12回の調査データを集計した。

		Results of aestivating sand lance collection					
		collected sites		not collected sites		t value	p
Median grain size	(mm)	1.2 ± 0.7	(5)	3.1 ± 2.7	(12)	-1.5	0.1
	(Md φ)	-0.07 ± 0.93	(5)	0.49 ± 3.12	(12)	-0.4	0.7
Sorting	(φ)	1.2 ± 0.4	(5)	1.6 ± 0.7	(11)	-1.2	0.3
Proportion of preferred size sands	(%)	85.1 ± 6.0	(5)	55.3 ± 27.3	(12)	2.4	0.03
Proportion of suitable size sands	(%)	44.4 ± 13.6	(5)	17.9 ± 13.6	(12)	3.7	0.002
Shell containing	(%)	18.8 ± 10.9	(5)	12.8 ± 7.1	(10)	1.3	0.2
Shear strength	(kN/m ²)	1.4 ± 0.5	(5)	2.0 ± 0.9	(10)	-1.5	0.1

表(1)-6 瀬戸内海安芸灘三原瀬戸におけるイカナゴ採捕地点と非採捕地点の底質性状比較。三原瀬戸中央部エリアにあって例外的に細砂底質を有していたSt-7を外れ値としてイカナゴ非採捕地点から除いた場合、中央粒径とせん断強度にイカナゴ採捕地点との有意差がみとめられた。

		Results of aestivating sand lance collection					
		collected sites		not collected sites		t value	p
Median grain size	(mm)	1.2 ± 0.7	(5)	3.7 ± 2.6	(10)	-2.2	0.046
Shear strength	(kN/m ²)	1.4 ± 0.5	(5)	2.2 ± 0.8	(8)	-2.4	0.03

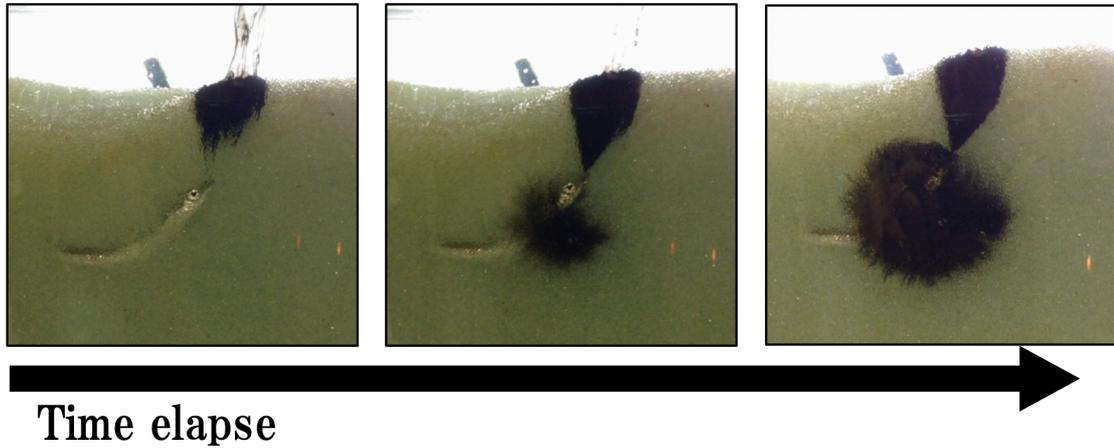


図(1)-39 イカナゴの水槽実験における底質のせん断強度と潜砂率 (潜砂個体数割合) の関係。潜砂率を目的変数としたステップワイズ重回帰分析の結果、底質の物理性状パラメータのうちせん断強度のみが説明変数として選択された。

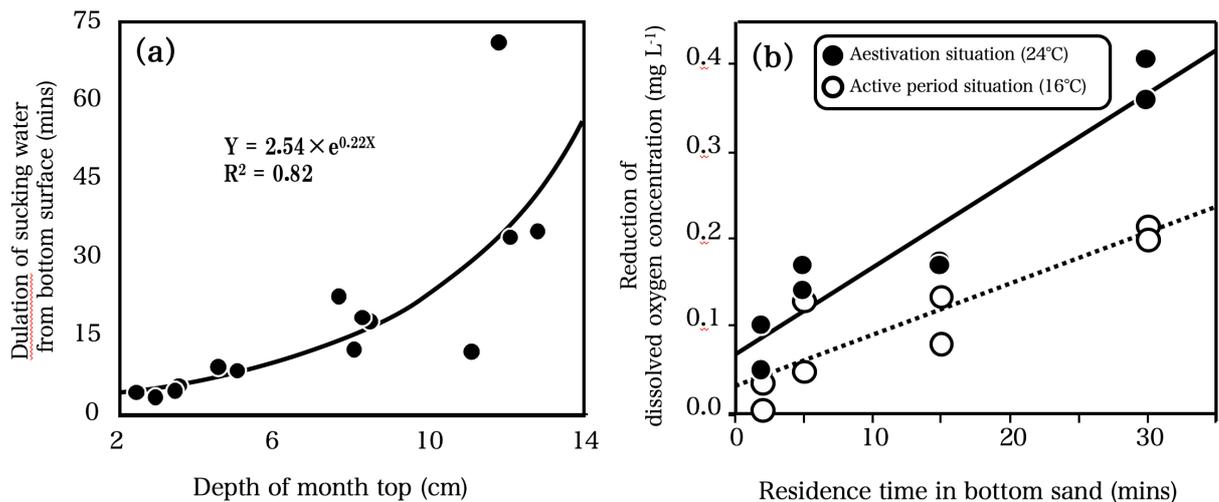
(1) -3-2-4 イカナゴの底質内生態および野外砂底内の環境解明

瀬戸内海において砂中で半年近く潜り夏眠するイカナゴにおける、砂中での生態および生息環境の解明を通じて、イカナゴにとって好適な底質環境の更なる検討を進めた。モデル堆積物としてイカナゴが好む粒径のガラスビーズを使用して砂中の生態を可視化する飼育実験より、夏眠時の水温環境においてイカナゴの潜砂深度は10 cm未満 (定位時の最深点: 平均5.1 cm、最大8.9 cm、n = 65) であることが確認された。このことより、イカナゴの生息には深さ10 cm以

上の砂質層の存在が好ましいことがわかった。また、染色海水による海水の動きを可視化する飼育実験から、イカナゴは潜砂中に砂中から海底直上の海水を吸込み酸素を確保すること（図(1)-40）、砂中での定位深度が深くなるほど海底直上からイカナゴに海水が到達するまでの時間が指数関数的に増加すること（図(1)-41(a)）、および海水取込みまでの時間が増加するほど砂中での溶存酸素の消失が大きくなることが明らかとなった（図(1)-41(b)）。

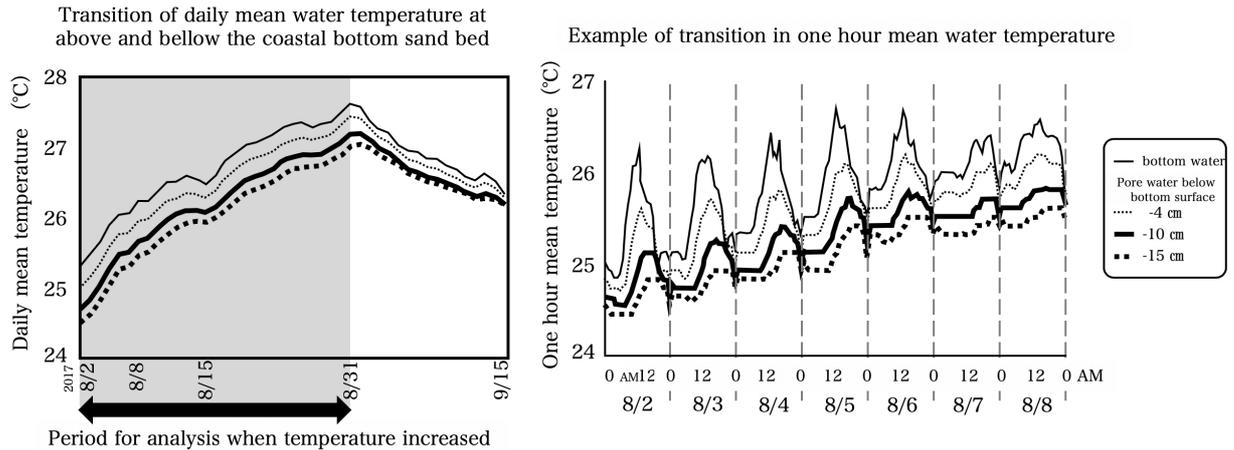


図(1)-40 砂中におけるイカナゴの呼吸に使用する底質上水塊取込みの様子



図(1)-41 (a) 砂中におけるイカナゴの定位深度と直上の海水が到達するまでの時間の関係
(b) 砂中の海水の経過時間と溶存酸素濃度の低下量の関係

また、イカナゴが夏眠する夏季の野外砂底内環境を観測した結果、砂底内では、日平均水温、日最高水温いずれも常に海底直上水温より有意に低い水温が維持され、深く位置するほど日平均水温・最高水温ともに低い環境でイカナゴが夏眠できることが確認された（図(1)-42）。また、砂中深くに位置するほど一日の温度変化の幅が小さく安定した温度環境にあることも確認された。



Characteristics of temperature in the sand bottom during summer period increasing water temperature

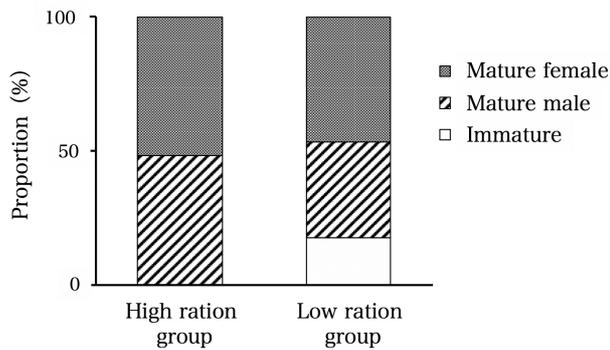
	Difference to bottom water (°C)		Range of daily temperature change (°C)	
	Daily mean temperature	Daily maximum temperature		
Bottom water			0.98 ± 0.28	
Pore water below bottom surface	4 cm	-0.24 ± 0.04	-0.44 ± 0.15	0.67 ± 0.19
	10 cm	-0.50 ± 0.06	-0.82 ± 0.18	0.47 ± 0.17
	15 cm	-0.68 ± 0.08	-1.06 ± 0.21	0.36 ± 0.12
Significant difference among 3 depth pore waters (Repeated ANOVA, N = 3 for each depth)	$p < 0.05$	$p < 0.05$	$p < 0.05$	

図(1)-42 夏季の砂質海底における海底直上水温と砂底内温度の推移

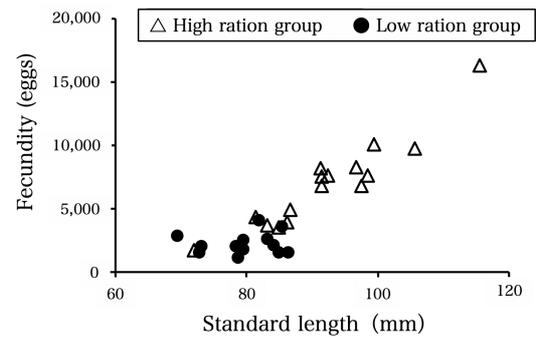
以上の結果より、砂の中で夏眠中に底質上の水を引き込んで呼吸する必要があるイカナゴにとって、なるべく深く潜ることが夏眠時に高温回避の面では利点になる一方、呼吸の面でコストが高まるトレードオフの中で夏眠を成立させていることが示唆された。そのため、イカナゴにとって好適な底質環境として、間隙がほどよくあり透水性が高いまたは還元化が進んでいない底質環境ほど、呼吸の面でなるべく砂中深く定位することを可能とし、夏季の高温ストレスの回避に貢献する好適な環境を提供すると考えられる。

(1) -3-2-5 夏眠前の餌料環境がイカナゴの再生産特性に及ぼす影響

飽食条件で飼育したイカナゴの体長は11月末時点で平均98.5 mmであったが、低給餌条件では75.6 mmであった。7月から11月末にかけての体重の減少率は、飽食区では36%、低給餌区では42%と推定された。飽食区では全ての個体が成熟したが、低給餌区では最終的に82%の個体が成熟し、18%は成熟しなかった(図(1)-43)。低給餌区では体長が大きい個体ほど成熟している傾向がみられ、50%成熟体長は70 mmと推定された。卵径は12~1月にかけて常に飽食区の方が大きく(ネスト分散分析、 $p < 0.001$)、低給餌条件では成熟の進行が遅れることが示唆された。孕卵数は飽食区では体長依存で変化し、平均6,297粒であったのに対し、低給餌区では体長にかかわらず平均2,251粒で一定であった(図(1)-44)。以上から、夏眠前の餌料条件が悪い場合には、イカナゴにおいて体サイズの減少、未成熟個体の増加、成熟の遅延、産卵数の減少を引き起こすことが示唆された。



図(1)-43 イカナゴの給餌条件ごとの成熟率

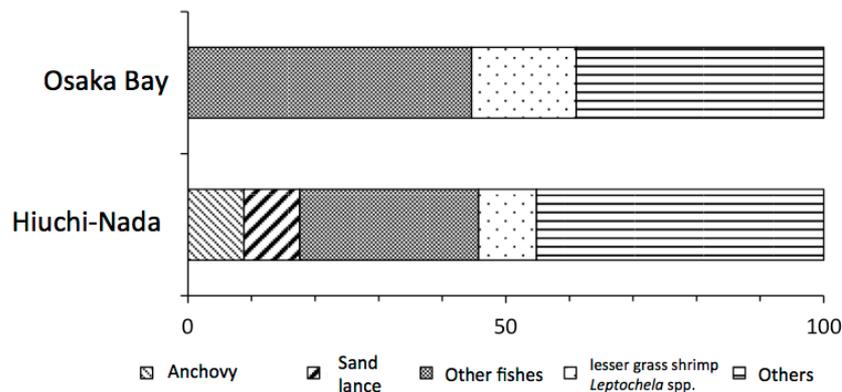


図(1)-44 イカナゴの体長と孕卵数の関係

(1) -3-3 瀬戸内海の主要魚食魚であるタチウオの食性

(1) -3-3-1 胃内容物解析

燧灘、大阪湾のどちらにおいてもカタクチイワシが多く観察された。また、大阪湾では魚類のほかに甲殻類（ソコシラエビ属）の割合が高かった。2017年4月において、燧灘で漁獲された個体の胃内容物からカタクチイワシとイカナゴがともに重量割合8.8%で検出された（図(1)-45）。しかし同月、大阪湾で漁獲されたタチウオの胃内容物からはカタクチイワシ、イカナゴともに検出されず、サイウオ属魚類がよく出現した。また、どちらの海域でもソコシラエビ類の重量割合が高かった。タチウオの肥満度と肝臓重量指数には海域間で差はみられず、栄養状態には大きな差はないと考えられた。



図(1)-45 2017年4月におけるタチウオの胃内容物組成（重量%）

(1) -3-3-2 安定同位体解析

燧灘におけるタチウオへのプランクトン食魚イカナゴ・カタクチイワシの貢献度を安定同位体比分析から推定した。推定には、イカナゴ・カタクチイワシの他に、燧灘におけるタチウオの胃内容物に関する知見²⁰⁾で指摘されたタチウオにとって重要と考えられる餌生物を含めた炭素・窒素安定同位体比（表(1)-7）を用い推定した。その結果、イカナゴの非夏眠時である5月に、タチウオの餌のうち27.6～59.3%がプランクトン食魚2種によって支えられており、イカナゴが少ない燧灘においてもイカナゴがタチウオの餌資源として貢献（3.1～10.0%）していることが裏付けられた（表(1)-8）。これらの結果より、燧灘では、イカナゴの夏眠期前の5～6月にタチウオ大型個体の繁殖が開始されるため、タチウオ再生産への栄養としてイカナゴやカタクチイワシが大きく寄与していることが示唆された。

表(1)-7 燧灘で漁獲されたタチウオおよびその胃内容物より収集されたタチウオの主要な餌生物における炭素・窒素安定同位体比

Taxa	N	Carbon stable isotope ratio (‰)	Nitrogen stable isotope ratio (‰)
Cutlassfish	30	-15.81±0.26	19.25±1.19
Main stomach contents			
Anchovy	10	-16.75±0.67	16.32±1.87
Sand lance	7	-18.88±0.34	15.89±0.83
Shrimps	4	-15.52±0.28	15.81±1.32
lesser grass shrimp	8	-19.24±0.62	14.45±0.33
Squids	2	-17.22±0.21	18.47±1.26

表(1)-8 炭素・窒素安定同位体比混合ベイズモデルで推定された燧灘のタチウオに対する各餌生物の貢献割合

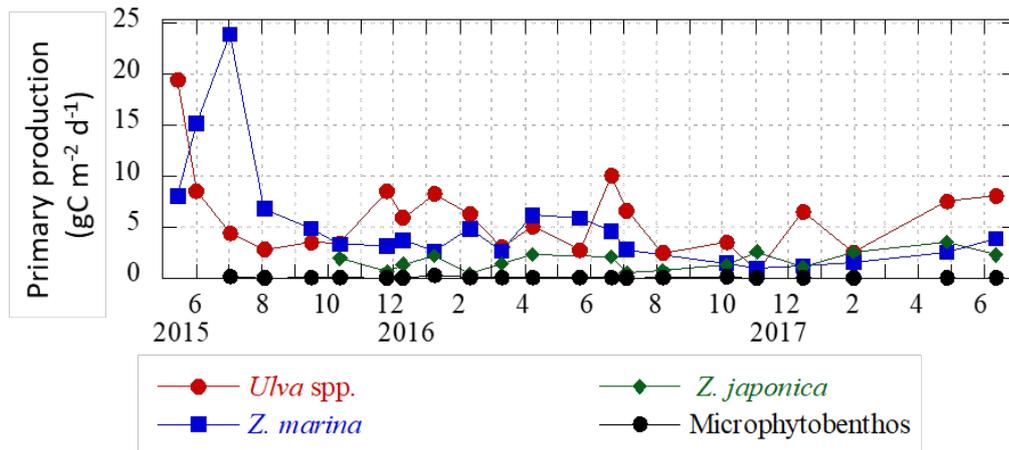
Main stomach contents of cutlassfish	Estimated contribution for cutlassfish (minimum - maximum %)
Anchovy	24.5 - 51.4
Sand lance	3.1 - 10.0
Shrimps	19.2 - 31.7
lesser grass shrimp	2.2 - 17.3
Squids	2.5 - 36.3

(1) -4 脆弱性が高い沿岸域に特化したアマモを活用した生態学的栄養塩対策

(1) -4-1 アマモの栄養塩吸収機能

(1) -4-1-1 地御前干潟における基礎生産者の生産および栄養塩吸収速度の評価

アマモの生産・栄養塩の吸収能力を同じく砂泥質の沿岸域に生息するアオサ、コアマモ、附着微細藻類との比較で評価した。図(1)-46は広島湾奥に位置する地御前干潟において、そこに生息するアマモを含めた4種の基礎生産者の基礎生産の時間変化を約2年間にわたり、測定した結果である。それぞれの占有している面積は異なるが、ここでの基礎生産は生育場所での生産速度となっている。富栄養化が進む沿岸ではアオサが繁茂し、地御前干潟でもアオサが重層して生育していた。そのため、アオサの基礎生産は年間を通じて大きな値を示したが、アマモも繁茂期である5月～7月ぐらいまではアオサをしのぐ基礎生産量であった。富栄養化が顕著であった1980年代のChl.a濃度が $20 \mu\text{g l}^{-1}$ を超える海域の基礎生産と匹敵する $5,000 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 程度の基礎生産を示し、年によってはその数倍の値を示した。



図(1)-46 地御前干潟における基礎生産者による生産の時間変化

図(1)-46の基礎生産は十分な光量下での結果なので、実際の海域でのアマモの生育水深と光量から現場海域における基礎生産速度を見積もったところ5月～8月の基礎生産は $2,200\sim 7,800\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ となった。C:N = 1:0.06、N:P = 16:1として窒素およびリンの吸収速度を計算したところ、 $132\sim 468\text{ mgN m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 、 $8.3\sim 29.3\text{ mgP m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ となった。

(1) -4-1-2 陸域負荷栄養塩に対するアマモの吸収容量の評価

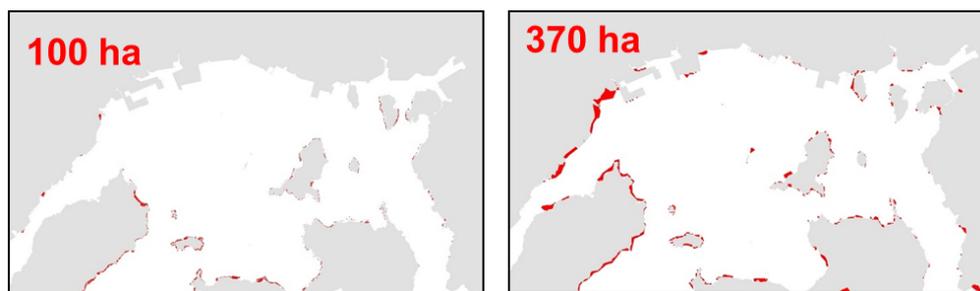
アマモの生産速度については我が国の沿岸域でいくつか類似した調査があり、 $2,900\sim 3,900\text{ mgC m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ と報告されており、我々の調査結果と矛盾しない。また、サブテーマ2の生島湾でも窒素の吸収速度が見積もられており、 $160\text{ mgN m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ である。生島湾は河川流入がなく、広島湾奥の地御前干潟と比較すると栄養塩濃度が低い海域であるため、窒素の吸収速度としては地御前干潟の吸収速度の範囲内ではあるが、低い値となっている。

地御前干潟、生島湾で得られた $132\sim 468\text{ mgN m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ 、 $8.3\sim 29.3\text{ mgP m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ の窒素及びリンの栄養塩の吸収によってどの程度陸域から負荷される栄養塩を沿岸域で低減できるかを見積もってみた。2009年の瀬戸内海に陸域から負荷される窒素およびリンはそれぞれ1日387トン、24トンであり、最新のアマモ場面積は瀬戸内海全体で6,381 haとされている。このアマモ場面積では5月～8月に1日窒素で8.4～29.9トン、リンで0.53～1.87トンを吸収可能であり、これは陸域負荷の窒素で2.2～7.7%、リンで2.2～7.8%に相当する。それほど大きな値とはいえないが、瀬戸内海には1960年代には22,653 haのアマモ場が存在した。この面積までアマモ場が回復したとするとその割合は窒素で7.7～27.4%、リンで7.8～27.8%となり大きな削減効果が期待できる。

(1) -4-2 アマモ場の栄養塩吸収機能が植物プランクトン増殖の抑制に果たす役割

(1) -4-2-1 広島湾におけるアマモの生育可能海域の評価

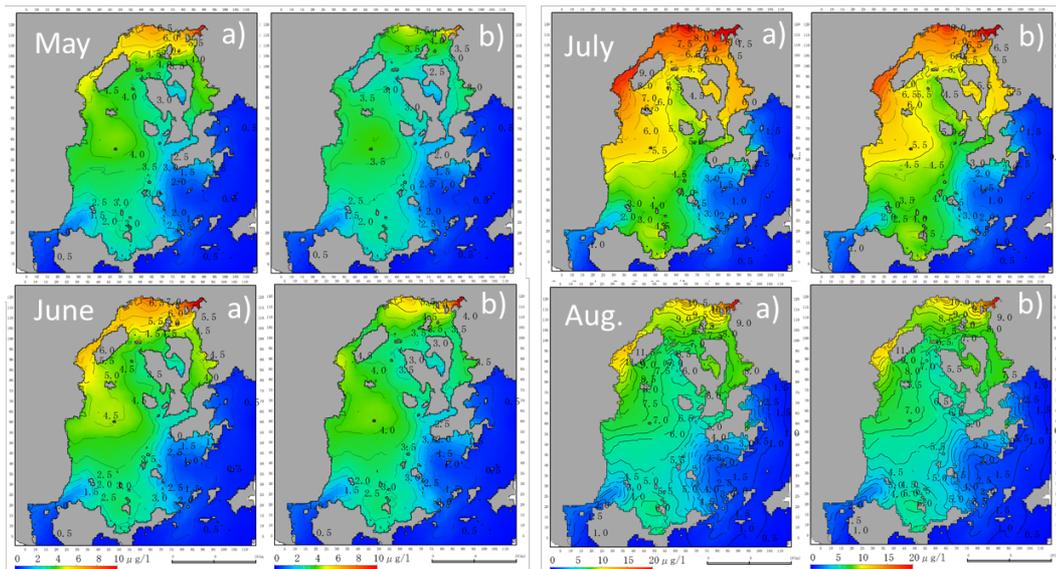
アマモの生育していた地点の光環境は表面光量の約20%であった。この条件を用いて広島湾北部の潜在的なアマモ場生育可能海域を特定したところ370 haあることがわかった(図(1)-47)。1989～1990年の調査時でのこの海域のアマモ場面積は100 haである。



図(1)-47 広島湾北部海域における現在のアマモ場分布(左)と潜在的な生育可能域の分布(右)

(1) -4-2-2 広島湾におけるアマモの栄養塩吸収による植物プランクトンの増殖抑制効果の評価

現在の100 haのアマモ場と生育可能海域370 ha全体にアマモ場が生育している場合を想定し、モデル計算した結果が図(1)-48である。アマモ場面積を増加させたのはこの図の上部1/4の北部海岸だけであるが、5月～6月では明瞭に北部でのChl.a濃度が低下している。広島湾では大河川である太田川河口が北部海岸に位置しているが、この河川水は西側に流れていくことが知られており、北部から西側で高いChl.a濃度が検出される。アマモ場面積の増加はこの西側においてもChl.a濃度の低下を引き起こしている。一方で湾中央部や湾口への影響は限定的であり、脆弱性が高い沿岸部に特化した対策としての有効性を示した。一方で、7月～8月になると効果は観察されるが、5月～6月ほどの明瞭な効果はなく、植物プランクトンの繁殖期とアマモの繁殖期に若干のずれがあることがわかる。



図(1)-48 5月～8月の広島湾における (a) 現況 (100 ha) と (b) アマモ場生育可能面積 (370 ha) すべてにアマモが生育したと仮定したときのChl.a濃度の分布

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1. これまで実測に頼っていた基礎生産、二次生産の推定をChl.a濃度、透明度、水温、栄養塩濃度等一般的に行われている水質モニタリングデータから推定する手法を開発したことは、水質モニタリングデータの蓄積がある海域では過去に遡って生物生産を推定できることになり、今後の海域における生物生産の研究の発展に大きく貢献する。
2. 透明度は1900年以前から測定されている海域における基本的な生物環境の指標であるが、あくまで現状の光環境を表しているに過ぎない。富栄養化の進展やその改善によってもたらされる植物プランクトン濃度の変化によって変わる透明度の基礎として地域固有透明度という植物プランクトン以外の因子によって決定される透明度を決定する手法を開発したことによって、今後の透明度の変化を植物プランクトンを変数として予測できることになり、数値シミュレーションの活用などを通じて、海洋学の発展に大きく貢献する。
3. イカナゴの底質選好についてはこれまで粒径分布で表現されていたが、本研究ではせん断強度で表される潜りやすさがイカナゴの底質選好を決定しているという新しい科学的知見が得られた。
4. イカナゴが潜砂することで低温度かつ安定した温度環境で夏季を乗り切ることができることが示され、イカナゴが高水温期を砂中で夏眠する意義の一端を初めて明らかにした。
5. 瀬戸内海のイカナゴは遺伝的集団としては単一の集団に属し、瀬戸内海の東西の海域間である程度の個体が入り出しつつ維持されていることが示された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省の瀬戸内海環境情報基本調査及び豊かな海の確保に向けた方策検討業務有識者検討会における湾・灘ごとの水質の変化状況の検討において、本研究成果である沿岸と沖合を塩分によって分類、評価する手法が取り入れられ、総量削減の効果等の水質変化の評価、解析に貢献した(平成29年度報告書4-1)。同時に本検討委員会の解析結果は、環境審議会水環境部会瀬戸内海小委員会における検討でも用いられ、当該小委員会における水環境の変化状況の解析に貢献した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1. 本研究で開発したChl.a濃度、透明度、水温、栄養塩濃度等の水質モニタリングデータから基礎生産、二次生産を推定する計算式は、海域の生物生産を知る手段としての活用が見込まれる。特に、改正瀬戸内海特別措置法では豊かな瀬戸内海を目指すことが謳われており、豊かさを表す生物生産性の主要指標となる。
2. 上記計算式を用いて推定した過去からの基礎生産、二次生産の変化と瀬戸内海での分布、三次生産の変化は、今後の総量削減計画の策定において、過去の総量削減効果の検証のために活用されることが見込まれる。
3. 本研究で開発した地域固有透明度という概念は、それぞれの地域で植物プランクトンが存在しないと仮定した場合の透明度であり、栄養塩管理によってそれぞれの海域で達成できる限界の透明度が存在することを示したものである。地域固有透明度は、環境省が設定を求めている沿岸透明度の設定において、実現可能な目標透明度を設定するための活用が見込まれる。
4. 塩分や脆弱性指標によって沿岸域と沖合域を分ける手法は、栄養塩管理における重点的に監視、対策する海域の設定などに活用されることが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上发表

<査読付き論文>

- 1) Wataru Nishijima, Akira Umehara, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai: Marine Pollution Bulletin、92、1-2、90-98.(2015). Variations in macrobenthic community structures in relation to environmental variables in the Seto Inland Sea
- 2) Wataru Nishijima, Akira Umehara, Satoshi Sekito, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai: Science of the Total Environment、571、543-550.(2016). Spatial and temporal distributions of Secchi depths in the Suo Nada of the Seto Inland Sea, Japan, exposed to anthropogenic nutrient loading
- 3) Yuya Shigematsu, Yuichiro Ochi, Shuhei Yamaguchi, Kazumitsu Nakaguchi, Yoichi Sakai, Jun-ya Shibata, Wataru Nishijima, Takeshi Tomiyama: Japan, Fisheries Science、83、373-382. (2017). Winter longitudinal variation in the body size of larval fishes in the Seto Inland Sea
- 4) 新野洋平、柴田淳也、富山毅、坂井陽一、橋本博明: 日本水産学会誌、83、1、34-40.(2017). 瀬戸内海中央部燧灘周辺におけるタチウオ *Trichiurus japonicus* の食性
- 5) Wataru Nishijima, Akira Umehara, Satoshi Sekito, Feng Wang, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai: Ecological Indicators、84、583-589.(2018). Determination and distribution of region-specific background Secchi depth based on long-term monitoring data in the Seto Inland Sea, Japan
- 6) 西嶋渉: 沿岸海洋研究、56 (1)、13-19.(2018). 瀬戸内海における栄養塩濃度管理法
- 7) Satoshi Nakai, Yohei Soga, Satoshi Sekito, Akira Umehara, Tetsuji Okuda, Masaki Ohno, Wataru

- Nishijima, Satoshi Asaoka: *Water Policy*, 20(4), 855-870.(2018). Historical changes in primary production in the Seto Inland Sea, Japan, after implementing regulations to control the pollutant loads
- 8) Akira Umehara, Satoshi Asaoka, Tetsuji Okuda, Naoki Fujii, Wataru Nishijima, Satoshi Nakai, Hironori Yamamoto, Sosuke Otani: *Aquaculture*, 495, 311-319.(2018). Biological productivity evaluation at lower trophic levels with intensive Pacific oyster farming of *Crassostrea gigas* in Hiroshima Bay, Japan
 - 9) Satoshi Asaoka, Akira Umehara, Sosuke Ohtani, Naoki Fujii, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima, Koji Takeuchi, Hiroshi Shibata, Waqar Azeem Jadoon, Shinjiro Hayakawa: *Marine Pollution Bulletin*, 133, 891-899.(2018). Spatial distribution of hydrogen sulfide and sulfur species in coastal marine sediment Hiroshima Bay, Japan
 - 10) Jun-ya Shibata, Satoshi Tomano, Tetsuya Umino, Takeshi Tomiyama, Yoichi Sakai, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Wataru Nishijima: *Japan Agricultural Research Quarterly*, 52(4), 307-313.(2018). Isolation, characterization, and PCR multiplexing of microsatellite loci for western sand lance (*Ammodytes japonicus* Duncker and Mohr 1939)
 - 11) Feng Wang, Akira Umehara, Wataru Nishijima, Satoshi Nakai: *Ecological Indicators*, 98, 397-408.(2019). Distribution of region-specific background Secchi depth in Tokyo Bay and Ise Bay, Japan
 - 12) 坂井陽一、遠藤梓、岩崎菜美、富山毅、柴田淳也、山口修平、中口和光：広島大学総合博物館研究報告、10、19-27。（2018）．瀬戸内海三原瀬戸におけるイカナゴの夏眠底質環境
 - 13) Hirosune Kuzuhara, Michio Yoneda, Tatsuo Tsuzaki, Masanori Takahashi, Naoaki Kono, Takeshi Tomiyama: *Plos One*, 14, e0213611. (2019). Food availability before aestivation governs growth and winter reproductive potential in the capital breeding fish, *Ammodytes japonicus*
 - 14) Daichi Uehara, Jun Shoji, Yuichiro Ochi, Shuhei Yamaguchi, Kazumitsu Nakaguchi, jun-ya Shibata, Takeshi Tomiyama: *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 99(2), 517-523.(2019). Diel changes in the vertical distribution of larval cutlassfish *Trichiurus japonicus*
 - 15) Azusa Endo, Nami Iwasaki, Jun-ya Shibata, Takeshi Tomiyama, Yoichi Sakai: *Journal of Ethology*, 37, 213-219. (2019). The burrowing sand lance *Ammodytes japonicus* (Teleostei, Ammodytidae) prefers benthic sediments of low shear strength
 - 16) Feng Wang, Akira Umehara, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima: *Water Policy*, 21(4), 865-879.(2019). Management of the west-central Seto Inland Sea, Japan: factors controlling spatiotemporal distribution of chlorophyll *a* concentration and Secchi depth
 - 17) Akira Umehara, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Masaki Ohno, Wataru Nishijima: *Marine Environmental Research*, 148, 67-74. (2019). Benthic quality assessment using M-AMBI in the Seto Inland Sea, Japan

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 書籍：里海管理論（分担執筆）、第三章栄養塩管理を分担、85-125. (2019)
執筆：西嶋渉、坂井陽一、富山毅、柴田淳也、多田邦尚、一見和彦、朝日俊雅
- 2) 書籍：Integrated Coastal Management and Satoumi-Restoring Japanese Estuaries and Bays-（分担執筆）Nutrient managementを担当 in press
執筆：Wataru Nishijima, Yoichi Sakai, Takeshi Tomiyama, Jun-ya Shibata, Kuninao Tada, Kazuhiko Ichimi, Toshimasa Asahi

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 坂井陽一：環境報告書 2017、広島大学、15（2017）瀬戸内海の魚に関する研究

（2）口頭発表（学会等）

- 1) 重松勇也、越智雄一郎、中口和光、山口修平、坂井陽一、富山毅：平成26年度日本水産学会秋

- 季大会、2014年9月、瀬戸内海におけるイカナゴ仔魚の分布と体サイズの地理的変異
- 2) 富山毅：平成26年度日本水産学会秋季大会、2014年9月、底魚の分散と加入機構
 - 3) 岩崎菜美、柴田淳也、富山毅、坂井陽一：第33回日本動物行動学会大会、2014年11月、海底に潜って仮眠する魚、イカナゴの好む砂とは一潜砂底質の選好性実験
 - 4) 柴田淳也、富山毅、坂井陽一：第26回魚類生態研究会、2015年2月、マイクロサテライトDNAを用いたイカナゴの集団構造解明：マーカー開発について
 - 5) 曾我遥平、関藤怜志、中井智司、梅原亮、奥田哲士、西嶋渉：第17回化学工学会学生発表会、2015年3月、広島湾における基礎生産に係る栄養塩動態の把握
 - 6) 関藤怜志、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：第49回日本水環境学会年会、2015年3月、河口域における有色溶存有機物（CDOM）の光減衰への寄与
 - 7) 梅原亮、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：2015年度日本海洋学会春季大会、2015年3月、AMBI 解析を用いた瀬戸内海の底生生態系の把握
 - 8) 朝日俊雅、一見和彦、山口一岩、多田邦尚：2015年度日本海洋学会春季大会、2015年3月沿岸栄養塩循環に対するアマモ場の機能
 - 9) 柴田淳也、笥野哲史、海野徹也、富山毅、坂井陽一：平成27年度日本水産学会春季大会、2015年3月、次世代シーケンスによるイカナゴの集団構造分析用新規マイクロサテライトDNAマーカーの開発
 - 10) 西嶋渉：日本化学会中国四国支部第52回分析化学講習会、2015年8月、特別講演「環境モニタリングデータを活用した瀬戸内海の環境研究
 - 11) 新野洋平、坂井陽一、富山毅：平成27年度日本水産学会秋季大会、2015年9月、瀬戸内海中央部におけるタチウオの産卵期
 - 12) 山本圭吾：2015年度日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会、2015年9月、大阪湾における一次生産者現存量の試算と経年変化
 - 13) 朝日俊雅、一見和彦、多田邦尚：2015年度日本海洋学会秋季大会、2015年9月、アマモ場堆積物間隙水中の無機態窒素の動態
 - 14) 関藤怜志、長尾正之、中井智司、梅原亮、奥田哲士、西嶋渉：2015年度日本海洋学会秋季大会、2015年9月、広島湾における有色溶存有機物（CDOM）に対するカキ養殖の影響について
 - 15) Akira Umehara, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Wataru Nishijima: Estuarine and Coastal Science Association 55, London, United Kingdom, Sep. 2015. Benthic quality assessment using M-AMBI analysis in Seto Inland Sea, Japan
 - 16) 山本圭吾：2015年度水産海洋学会研究発表大会、2015年10月、大阪湾におけるカタクチイワシ資源量の推定
 - 17) 遠藤梓、富山毅、坂井陽一：第34回日本動物行動学会大会、2015年11月、イカナゴの潜砂習性と底質の選好性
 - 18) 曾我遥平、西嶋渉、中井智司、奥田哲士、梅原亮：化学工学会中国四国支部・関西支部合同支部大会 大学院生発表会、2015年12月、広島湾における基礎生産量の評価
 - 19) 宮川陽香、梅原亮、大谷壮介、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：第18回化学工学会学生発表会福岡大会、2016年3月、広島湾の砂質干潟における底生微細藻類からアサリへの転送効率
 - 20) 朝日俊雅、一見和彦、多田邦尚：2016年度日本海洋学会春季大会、2016年3月、短期間のアマモの窒素含量の変動
 - 21) 梅原亮、浅岡聡、藤井直紀、大谷壮介、山本裕規、中井智司、奥田哲士、曾我遥平、西嶋渉：2016年度日本海洋学会春季大会、2016年3月、広島湾の低次生物生産過程における炭素転送効率
 - 22) 重松勇也、越智雄一郎、山口修平、中口和光、柴田淳也、西嶋渉、坂井陽一、富山毅：平成28年度日本水産学会春季大会、2016年3月、冬季瀬戸内海に出現する仔魚の体サイズの地理的変異
 - 23) 上原大知、越智雄一郎、山口修平、中口和光、柴田淳也、小路 淳、坂井 陽一、富山毅：平成28年度日本水産学会春季大会、2016年3月、瀬戸内海中西部におけるタチウオ仔稚魚の出現様式

- 24) 吉田侑生、上原大知、小路淳、富山毅：平成28年度日本水産学会春季大会、2016年3月、砂浜・河口・藻場におけるヒメハゼの出現様式および食物利用
- 25) 柴田淳也、富山毅、坂井陽一、青山潤、吉永龍起、田中千香也、河野悌昌、高橋正知、中村行延、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：平成28年度日本水産学会春季大会、2016年3月、マイクロサテライトDNAを用いたイカナゴ *Ammodytes japonicus* の遺伝的集団構造解析
- 26) Tetsuji Okuda, Satoshi Sekitou, Akira Umehara, Satoshi Asaoka, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima: EMECS11, St. Petersburg, Russia, Aug. 2016. Fate of Silts and Clay from River and its Contribution to Transparency
- 27) Akira Umehara, Satoshi Asaoka, Naoki Fujii, Sosuke Otani, Hironori Yamamoto, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Wataru Nishijima: EMECS11, St. Petersburg, Russia, Aug. 2016. Energy transfer efficiencies on lower trophic levels with intensive oyster farming in Hiroshima Bay, Japan
- 28) 宮川陽香、梅原亮、大谷壮介、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：2016年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会、2016年9月、広島湾の砂質干潟における底生微細藻類からアサリへの炭素転送効率
- 29) 梅原亮、浅岡聡、藤井直紀、大谷壮介、山本裕規、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：2016年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会、2016年9月、カキ養殖が盛んな広島湾における低次生物生産構造
- 30) 遠藤梓、富山毅、坂井陽一、柴田淳也：2016年度日本魚類学会年会、2016年9月、瀬戸内海産イカナゴにおける潜砂底質選好性と砂中行動
- 31) 柴田淳也、富山毅、坂井陽一、青山潤、田中千香也、吉永龍起、河野悌昌、高橋正知、中村行延、竹谷裕平、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：平成28年度日本水産学会秋季大会、2016年9月、日本沿岸におけるイカナゴ *Ammodytes japonicus* の遺伝的集団構造
- 32) 柴田淳也、遠藤梓、富山毅、坂井陽一：日本動物行動学会第35回大会、2016年11月、イカナゴは砂中でいかに過ごすのか？：休息・夏眠時の潜砂深度と呼吸活動
- 33) 柴田淳也、遠藤梓、富山毅、坂井陽一：第28回魚類生態研究会、2017年2月、砂中におけるイカナゴの呼吸と定位深度
- 34) 関藤怜志、梅原亮、大野正貴、奥田哲士、中井智司、長尾正之、西嶋渉：第51回日本水環境学会年会、2017年3月、沿岸域における有色溶存有機物（CDOM）の動態および起源
- 35) 宮川陽香、梅原亮、大谷壮介、大野正貴、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：第51回日本水環境学会年会、2017年3月、砂質干潟における一次生産量の経月変化と栄養塩吸収源としての役割
- 36) 梅原亮、浅岡聡、大谷壮介、藤井直紀、宮川陽香、中井智司、奥田哲士、大野正貴、西嶋渉：日本海洋学会海洋生物学シンポジウム、2017年3月、広島湾における潮下帯および潮間帯の炭素転送効率
- 37) 葛原裕恒、米田道夫、津崎龍雄、高橋正知、河野悌昌、富山毅：平成29年度日本水産学会春季大会、2017年3月、餌料条件に応じたイカナゴ当歳魚の成長パターンの変異
- 38) 辻大地、梅原亮、大谷壮介：平成29年度土木学会関西支部年次学術講演会、2017年5月、前浜干潟の大型および微細藻類の一次生産量の変動特性
- 39) 柴田淳也、新野洋平、岡本直大、富山毅、坂井陽一：日本動物行動学会第36回大会、2017年8月、タチウオの個性豊かな“顔つき”と“食性”の関係～栄養多型の可能性を探る～
- 40) 梅原亮、中井智司、奥田哲士、大野正貴、西嶋渉：2017年日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会、2017年9月、M-AMBI解析を用いた瀬戸内海の底質環境の把握
- 41) Feng Wang, Akira Umehara, Masaki Ohno, Wataru Nishijima, Satoshi Nakai: The 3rd Asian Marine Biology Symposium, Kumamoto, Japan, Nov. 2017. A new index for assessing phytoplankton growth potential in the Seto Inland Sea, Japan
- 42) Akira Umehara, Satoshi Asaoka, Sosuke Ohtani, Naoki Fujii, Haruka Miyagawa, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Masaki Ohno, Wataru Nishijima: The 3rd Asian Marine Biology Symposium, Kumamoto,

- Japan, Nov. 2017. Biological productivity on lower trophic levels in inter-tidal and sub-tidal areas in Hiroshima Bay, Japan
- 43) Tetsuji Okuda: The 4th International Workshop on Sato Umi-Gempita SPL-GAPURA, Jakarta, Indonesia, Oct. 2017. Management of Nutrient Concentrations in the Seto Inland Sea
- 44) 柴田淳也、遠藤梓、富山毅、坂井陽一：第29回魚類生態研究会、2018年2月、イカナゴは砂中でいかに過ごすのか？：夏眠時の砂中での呼吸および温度環境
- 45) 葛原裕恒、米田道夫、津崎龍雄、高橋正知、河野悌昌、富山毅：平成30年度日本水産学会春季大会、2018年3月、餌条件に伴う蓄積栄養依存型産卵種の繁殖戦術：イカナゴを例に
- 46) 後藤直登、米田道夫、津崎龍雄、入路光雄、富山毅：平成30年度日本水産学会春季大会、2018年3月、イカナゴとマサバの親子関係の検証：性と年齢の掛け合わせ実験
- 47) 宮川陽香、梅原亮、大谷壮介、大野正貴、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：第52回日本水環境学会年会、2018年3月、藻場干潟における水質浄化機能の把握
- 48) 梅原亮、大野正貴、関藤怜志、中井智司、奥田哲士、西嶋渉：海洋生物シンポジウム2018、2018年3月、海域特性の異なる沿岸域における有色溶存有機物（CDOM）の動態および起源
- 49) Akira Umehara, Satoshi Nakai, Tetsuji Okuda, Masaki Ohno, Wataru Nishijima: Estuarine and Coastal Science Association 57, Perth, Australia, Sep. 2018. Evaluation of benthic quality using M-AMBI in Seto Inland Sea, Japan
- 50) Wataru Nishijima, Tetsuji Okuda, Akira Umehara, Satoshi Nakai, Kuninao Tada: EMECS12, Pattaya, Thailand, Nov. 2018. Management of the ecosystem in the Seto inland sea
- 51) Akira Umehara, Sosuke Ohtani, Satoshi Asaoka, Naoki Fujii, Haruka Miyagawa, Kenji Sugimoto, Yota Uchida, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima : EMECS12, Pattaya, Thailand, Nov. 2018. Evaluation of water purification function by eelgrass (*Zostera marina*) meadows and its application to coastal management
- 52) Feng Wang, Akira Umehara, Wataru Nishijima, Satoshi Nakai: EMECS12, Pattaya, Thailand, Nov. 2018. Determination of region-specific background Secchi depth in four temperate semi-enclosed seas, central Japan
- 53) 内田陽太、中井智司、梅原亮、西嶋渉：第53回日本水環境学会年会、2019年3月、栄養塩循環におけるアマモ場の機能評価

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して～持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発～」(主催：環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1&テーマ5、2017年1月26日、サテライトキャンパスひろしま502大会議室、参加人数61名)
- 2) 一般公開シンポジウム「美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して～持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発～」(主催：環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1・宇部工業高等専門学校研究推進モデル事業、2017年11月2日、サテライトキャンパスひろしま501・502大会議室、参加人数85名)
- 3) 一般公開シンポジウム「美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して～持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発～」(主催：環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1&テーマ5・地域適応コンソーシアム事業中国四国地域事業・宇部工業高等専門学校研究推進モデル事業、2018年10月15日、サテライトキャンパスひろしま501・502大会議室、参加人数57名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) 曾我遥平、西嶋渉、中井智司、奥田哲士、梅原亮：第81年会化学工学会、2016年3月、瀬戸内海における基礎生産量の評価（ポスター、学生奨励賞）
- 2) Sosuke Ohtani, Akira Umehara, Haruka Miyagawa, Satoshi Asaoka, Naoki Fujii, Tetsuji Okuda, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima: EMECS11, St Petersburg, Russia, Aug. 2016. Transfer efficiency from primary producers to *Ruditapes philippinarum* on an intertidal flat in Hiroshima Bay, Japan（ベストポスター賞）

8. 引用文献

- 1) 石井大輔、柳哲雄：海の研究、13、389-401、（2004）．瀬戸内海各湾・灘における全リン・全窒素の起源と濃度変動機構
- 2) 武岡英隆：沿岸海洋研究、2、105-111、(2006). 沿岸域における外洋起源栄養物質の見積もり法とその問題
- 3) A. Borja, J. Franco, V. Pérez: Marine Pollution Bulletin, 40、1100-1114. (2000). A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments
- 4) Peter G. Verity, Christopher Langdon: Journal of Plankton Research, 6、859-868. (1984). Relationships between lorica volume, carbon, nitrogen, and ATP content of tintinnids in Narragansett Bay
- 5) Mary Putt, Diane K. Stoecker: Limnology and Oceanography, 34、1097-1103. (1989). An experimentally determined carbon: volume ratio for marine “oligotrichous” ciliates from estuarine and coastal waters
- 6) Shin-ichi Uye: Journal of the Oceanographical Society of Japan, 38、149-158. (1982). Length-weight relationships of important zooplankton from the Inland Sea of Japan
- 7) Shin-ichi Uye, Naoki Nagano, Hidenori Tamaki: Journal of Oceanography, 52、689-703. (1996). Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan
- 8) Naoki Nagano, Shin-ichi Uye : Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan, 56、142-149. (2002). Seasonal variations in abundance, biomass, *in situ* growth rate and production of tintinnid ciliates in Kure Port, the inland Sea of Japan
- 9) Helga Müller, Walter Geller: Archiv fur Hydrobiologie, 126、315-315. (1993). Maximum growth rates of aquatic ciliated protozoa: the dependence on body size and temperature reconsidered
- 10) Shin-ichi Uye, Tetsuya Shimazu: Journal of Oceanography, 53、529-538. (1997). Geographic and seasonal variations in abundance、biomass and estimated production rates of meso- and macrozooplankton in the inland sea of Japan
- 11) Takahiko Kameda, Joji Ishizaka: Journal of Oceanography, 61、663-672.(2005). Size-Fractionated Primary Production Estimated by a Two-Phytoplankton Community Model Applicable to Ocean Color Remote Sensing
- 12) Steve Rozen, Helen Skaletsky: Methods Molecular Biology, 132、365–386.(2000). Primer3 on WWW for general users and for biologist programmers.
- 13) 反田實：沿岸の環境圏、フジ・テクノシステム、東京、348-355、（1998）．内海漁場ーイカナゴと底質
- 14) Michael J. Behrenfeld、Paul G. Falkowski: Limnology and Oceanography, 42(1)、1–20.(1997). Photosynthetic rates derived from satellite based chlorophyll concentration

- 15) J. Vidal: *Marine Biology*、56、111–134. (1980). Physioecology of zooplankton. I. Effects of phytoplankton concentration、temperature、and body size on the growth rate of *Calanus pacifus* and *Pseudocalanus* sp.
- 16) Shin-ichi Uye、Atsushi Murase: *Plankton Biology and Ecology*、44、97-99.(1997). Infertility of the planktonic copepod *Calanus sinicus* caused by parasitism by a larval epicaridian isopod
- 17) 中村元彦、船越茂雄、向井良吉、家田喜一、石川雅章、柳橋茂昭：愛知水試研究報告、4、1-9、（1997）．伊勢湾産イカナゴの夏眠場所
- 18) 篠原基之、日野宗治、小塚広之：岡山水試報、18、6-11、（2003）．備讃瀬戸中央部におけるイカナゴの夏眠場の底質について
- 19) 広島県：広島県海砂利採取環境調査報告、39-40、（2017）．イカナゴ
- 20) 新野洋平、柴田淳也、富山毅、坂井陽一、橋本博明：日本水産学会誌、83、1、34-40.(2017). 瀬戸内海中央部燧灘周辺におけるタチウオ *Trichiurus japonicus*の食性

II-2 干潟・藻場の栄養物質循環・生物再生産に果たす機能の解明

香川大学農学部農学部
香川大学農学部瀬戸内圏研究センター

多田 邦尚
一見 和彦

平成26～30年度累計予算額：31,694千円（うち平成26年度：6,809千円、平成27年度：6,809千円、平成28年度：6,809千円、平成29年度：5,800千円、平成30年度：5,467千円）
累計予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

干潟・藻場の機能解明を目的として干潟・藻場の物質収支の定量的な観測および調査を行った。アマモ場ではアマモ場とその沖合海域の栄養塩の収支について現場観測を行い、アマモを取り巻く栄養塩環境についての知見を得た。アマモ場では春季に莫大なアマモの生物量が認められた。アマモ草体の窒素量は調査を行った湾内の水柱窒素量と比較して極めて大きく、沖合海域も含めた沿岸海域の窒素循環に大きな影響を与えていると考えられた。また、アマモが海水交換に伴い沖合海域から湾内に供給される溶存無機態窒素量以上の窒素を吸収、固定していることが示唆された。加えて、アマモは降水などにより間欠的に湾内に栄養塩が供給されると、数日から一週間という比較的短い期間に効率よく栄養塩を吸収し、成長に必要な窒素量の数倍の窒素を取り込む能力が有ることが明らかとなった。

干潟では河口干潟、前浜干潟という二大干潟の物質収支について現場観測を行い、干潟域における有機物の分解・無機化能力を定量的に把握した。河口干潟では多量の有機物が河川を通して負荷される一方、その大部分が干潟上で無機化されていた。低栄養度の前浜干潟は中栄養度あるいは高栄養度の河口干潟同様に有機物の無機化機能を有するものの、その作用は小さいことが示唆された。このように、干潟はその形態に依らず有機物の無機化機能を有するものの、その無機化機能は干潟の栄養度と関係があることが示唆された。加えて、干潟の有機物無機化機能を評価する目的で下水・排水処理場といった人間が行っている人為的な有機物処理能力と比較したところ、両者は同程度であることが明らかとなった。

【キーワード】

干潟、藻場、アマモ、栄養塩

1. はじめに

干潟・藻場といった浅海域は、沿岸海域の生態系が健全に機能するために、また活発な物質循環を促進するために大変重要である。しかしながら、我が国の干潟・藻場の面積は減少の一途をたどってきた。日本最大の閉鎖性水域である瀬戸内海では、干潟は1898年から、藻場については1960年からその面積が調査されているが、何れも調査開始時からその面積は半分以下になっている。干潟・藻場がさまざまな生物にとって重要であり、物質循環のうえでも重要であることは定性的には理解されているものの、親生物元素などの物質収支を定量的に評価した研究は世界的にも少なく¹⁻²⁾、我が国では極めて少ない³⁻⁵⁾。従って「干潟・藻場の物質収支」が十分に解明されていないのが現状である。干潟・藻場はどのような機能を持っており、どのくらい重要であるのかが明確化されていないため、どのように保全し、何を取り戻せば良いのかが明らかとなっていない。それは干潟・藻場を保全、修復するための政策が立てられない事を意味している。

サブテーマ2では、これまでに香川県沿岸の干潟・藻場における窒素（N）・リン（P）の物質収支を定量化するための調査・研究を行い、明らかになったことについて干潟・藻場におけるN・Pの年間収支を中心に述べる。

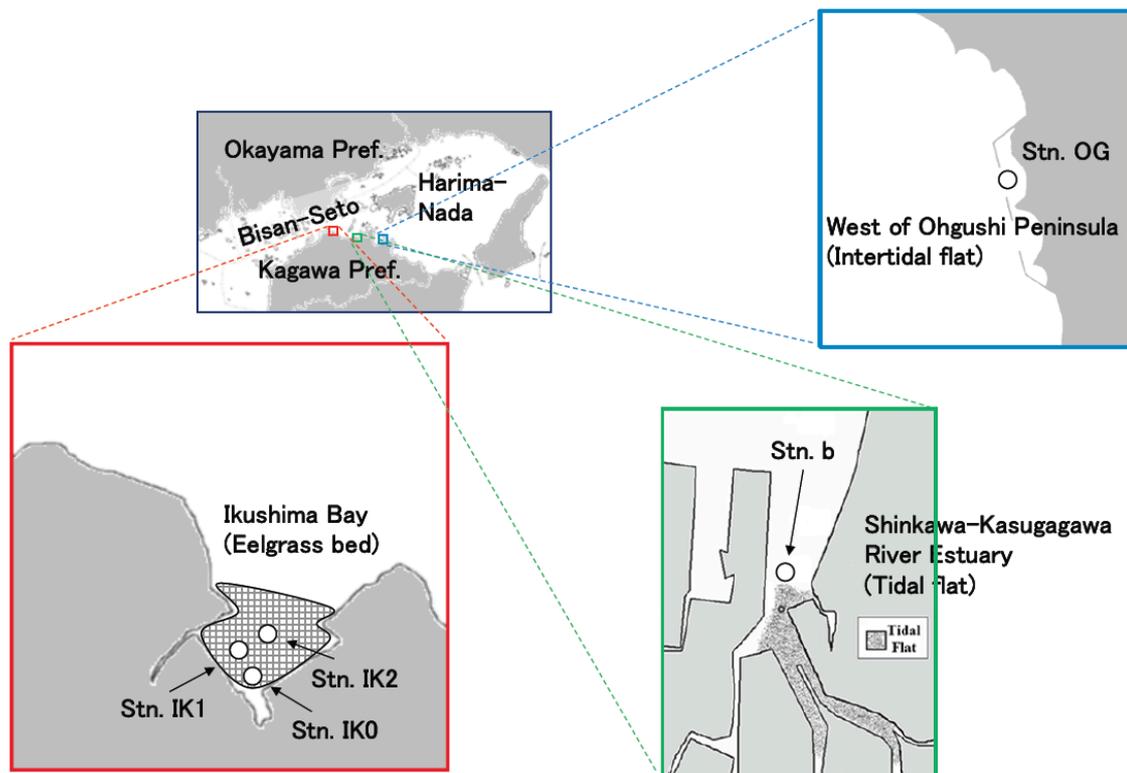
2. 研究開発目的

干潟や藻場は、定性的にその重要性が指摘されているものの、栄養物質の循環あるいは生物生産に果たす役割を現場で検証した研究例は世界的に少ない。サブテーマ2では、サブテーマ1の4)で取り組む沿岸域に特化した対策として重要な位置を占める沿岸域に発達する干潟・藻場の栄養物質循環・生物再生産に果たす機能の解明に取り組んだ。

3. 研究開発方法

(2) -1 藻場 (アマモ場)

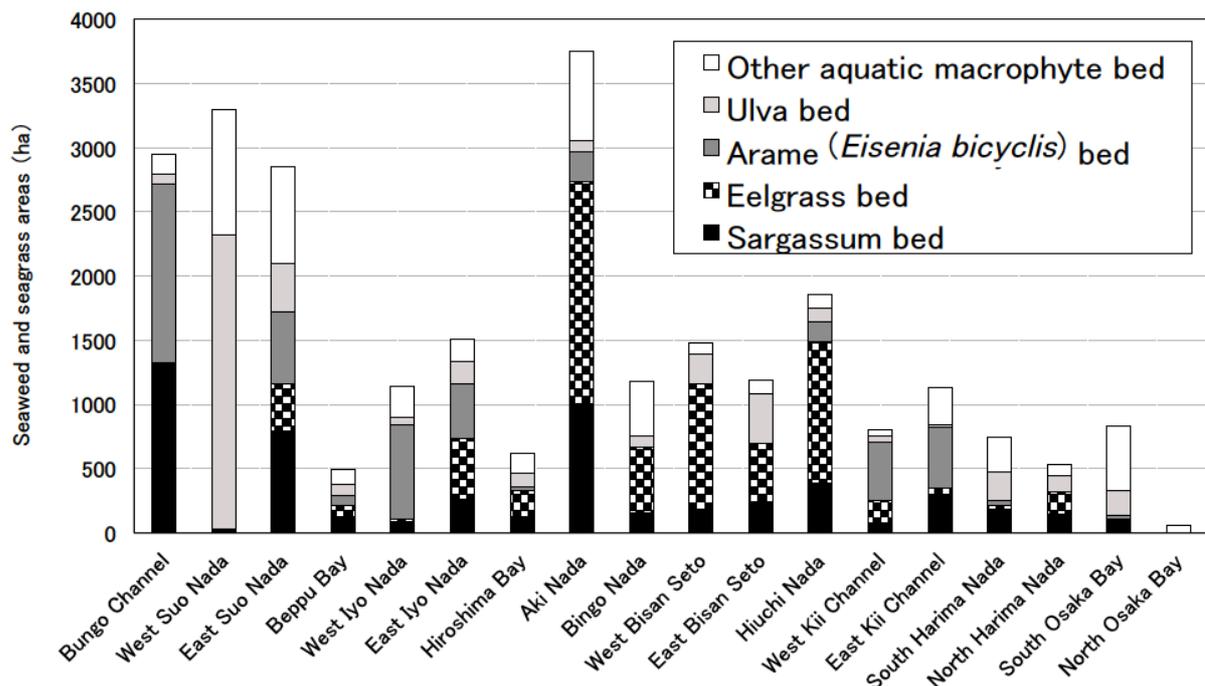
瀬戸内海備讃瀬戸海域に面する香川県高松市西部の生島湾、高松市北部の新川・春日川河口干潟および播磨灘に面する香川県さぬき市北部に位置する志度湾北部の大串半島西海岸において調査を行った (図(2)-1)。



図(2)-1 観測を行った干潟と藻場

藻場はこれまで、魚の産卵場あるいは幼稚魚の生育場 (海のゆりかご) としての機能が注目されてきた。しかし、藻場が窒素やリンの動態に及ぼす影響についてはあまり研究されてこなかった。瀬戸内海に現存する藻場面積は我が国におけるその1/4を占めている。瀬戸内海の藻場は中央部に多く、その中でもアマモ (*Zostera marina*) が密生するアマモ場の占める面積が最も大きい (図(2)-2) ⁶⁾。生島湾は晩冬から初夏にかけて、広範囲にアマモの群落を観察される。特に夏季は湾内のほぼ全域がアマモに覆われ、アマモ場となる。生島湾の面積は $4.2 \times 10^5 \text{ m}^2$ であり、湾内に流入する河川は無い。また、香川県沿岸では湧水および伏流水は極めて少ない⁷⁾。従って、湾内の海水は沖合海水とのみ、潮の満ち引きに伴って交換されていると考えられる。生島湾では海水の交換に伴う栄養塩の収支を見積もる目的で2014年の春季(5月)、夏季(7月)、秋季(10月)、および冬季(翌1月)に各一回調査を行った。一潮汐間(約12時間)に9回の採水を行い、栄養塩濃度を測定した。各採水間の潮位変化と生島湾の面積 ($4.2 \times 10^5 \text{ m}^2$) から、アマモ場内外を流入出する海水量を算出し、これに各採水試料中の栄養塩濃度の平均値を乗じることによって一日あたりにアマモ場へ流入出する栄養物質の量を見積もった。また、海水中の栄養

塩動態に加えて、アマモ場内の堆積物を内径4 cmのアクリルコアで採取し、堆積物から水中へ溶出する栄養塩量をコアインキュベーション法にて測定した。加えて、2014年から2015年にかけて2ヶ月に一度程度の頻度で、Stn. IK2において表層から10 cmまでの堆積物を内径4 cmのアクリルコアで採取した。採取した堆積物を表層から1 cm毎にスライスして遠心分離を行い、各層の間隙水中の栄養塩濃度測定を行った。さらに、2014年から2015年にかけてコドラート (31 cm × 31 cm) を用いたアマモの現存量調査を行った。コドラートによるアマモ現存量調査とは別に、2015年6月にアマモ草体の炭素および窒素含量の変化についてのモニタリングを行った。干潮時にStn. IK0にてアマモを3-5株採取し、水道水をかけ流しながら付着物を取り除いた後に凍結乾燥処理を行い、炭素および窒素含量を測定した。アマモ採取時に表層海水の塩分および栄養塩濃度を測定した。



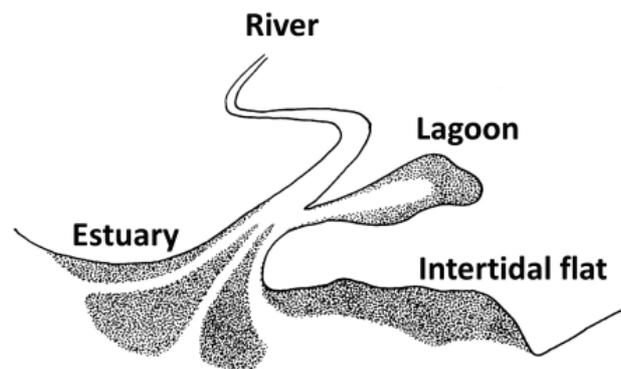
図(2)-2 瀬戸内海の藻場面積. 環境省 (2004) の報告書⁶⁾を基に作成

(2) -2 干潟

干潟はその形成条件によって「前浜干潟」「河口干潟」「潟湖干潟」に分けられる (図(2)-3)。前浜干潟は主に遠浅の海など広大な砂質の干潟である。河口干潟は文字通り河川の河口部に形成され、その底質は河川から流入してくる砂泥や有機物質などに大きく影響を受ける。潟湖干潟は河口部や海岸から入り込んだ潟に形成される。各形態の干潟に認められる共通の特徴として、陸域と海域の境界に位置し、大型および微細藻類、二枚貝などに代表される多くの底生生物が見られ、それらの生物が物質循環のスピードを高めていると考えられる。また、酸素が豊富に存在することで、バクテリア等による有機物の分解速度も非常に大きい。瀬戸内海では前浜干潟、河口干潟が全干潟面積の99%以上を占めるため、本研究ではこれら2つの干潟について調査を行った。

前浜干潟として、大串半島西海岸において調査を行った。大串半島西海岸は面積 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^2$ 程度の砂泥質の前浜干潟である。本研究では、この前浜干潟を「低栄養度の干潟」として取り扱う。生島湾同様に流入河川は無く、湾内の海水は潮汐に伴って沖合海水とのみ交換されていると考えられる。2015年の春季、夏季、秋季、および2016年の冬季に栄養塩の収支を見積もる目的で生島湾同様に一潮汐間 (10~12時間) の観測を行った。

河口干潟として新川・春日川河口干潟において調査を行った。本干潟は高松市郊外に位置し、面積 $7.2 \times 10^5 \text{ m}^2$ と香川県全河口干潟面積($2.3 \times 10^6 \text{ m}^2$)の1/3におよぶ県下では最大の河口干潟である。前浜干潟と比較すると河口干潟は河川を通して陸域からの影響を強く受け、有機物量および栄養物質量は沿岸域の中でも多い。2006～2010年に本干潟で行われた調査では、河川からのリンの負荷と干潟から沖合域への流出量はほぼ釣り合うものの、その形態は懸濁態から溶存無機物質(栄養塩)へと大きく変化した⁴⁾。また、窒素もリンと同様に形態変化が認められ、干潟が有機物を無機化する場であると考えられている⁴⁾。このように、河川を通して陸域から懸濁態有機物の負荷を受け、また干潟上に数多くのベントスが存在していた2006年～2010年の新川・春日川河口干潟を「高栄養度の干潟」とみなす。一方で本河口干潟の堆積物表層の微細藻類量、アサリ等のマクロベントス量はこの10年で大きく減少し(一見、未発表)、干潟の栄養度は低下したと考えられる。このように大串半島西海浜のような前浜干潟よりも栄養度が高いが、河口干潟としては栄養度が低下した新川・春日川河口干潟を「中栄養度の干潟」として、河川—干潟—海域間の栄養物質の収支を見積もる目的で観測を行った。河川から干潟への栄養物質負荷量は流入河川(新川)の栄養物質濃度に河川流量を乗じることで算出した。また、干潟域と沖合海域の境界部で測定した海水中の栄養物質の濃度に潮汐に伴う干潟域の海水容積の変化量を乗じることで、干潟域と沖合海域における一潮汐間の栄養物質の流入出量を算出した。



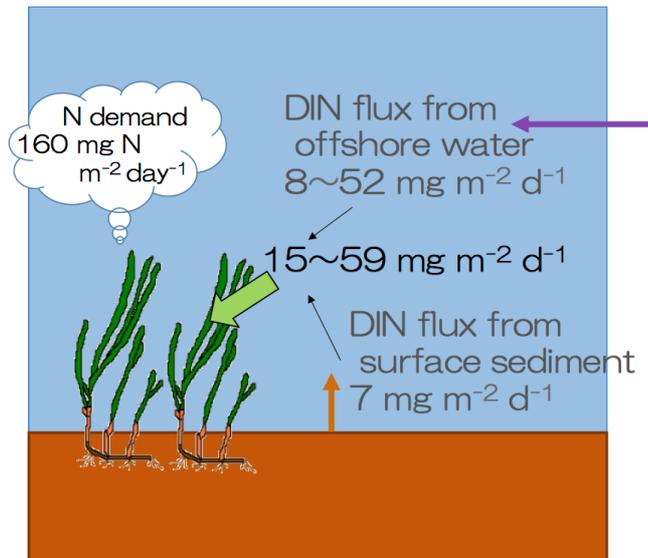
図(2)-3 さまざまな干潟の形態

4. 結果及び考察

(2) -1 藻場(アマモ場)

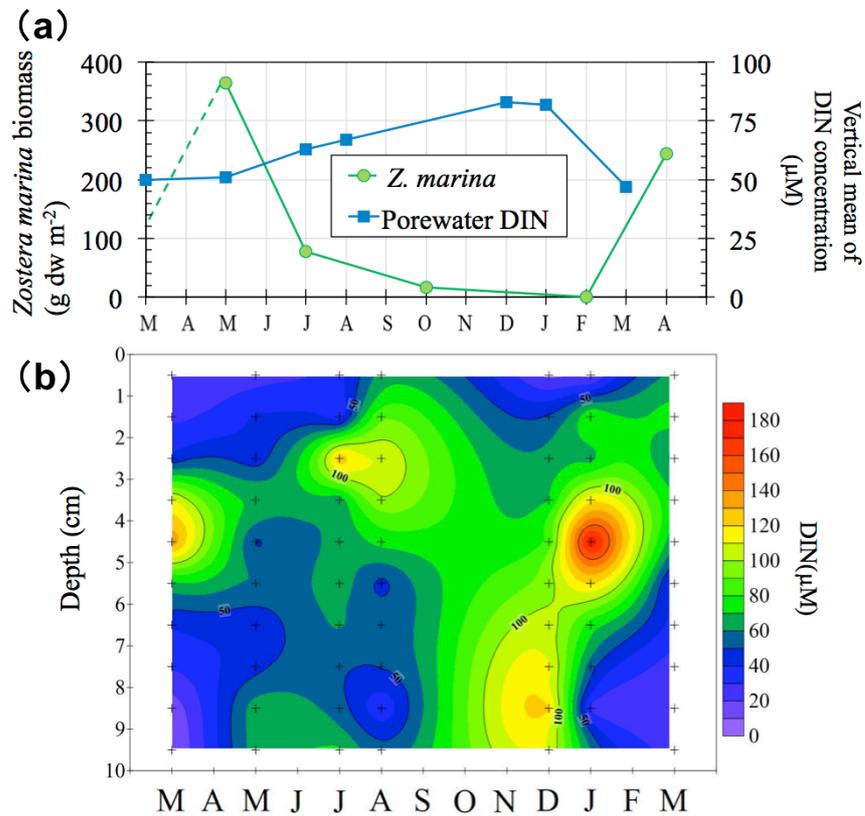
生島湾では、アマモ生物量が5月に最大量(364 g dw m^{-2})に達し、その後夏季(296 g dw m^{-2})から秋季(16.4 g dw m^{-2})にかけて減少し、冬季にはほぼ枯渇し、翌年4月には再び現存量が増加していた。このような生物量の変化から、特に生物量が増大する春季にはアマモが成長のために栄養塩を取り込んでいると考えられる。調査の結果、アマモの繁茂期(春季)に湾内に流入する溶存無機態窒素(DIN)量は $8 \sim 52 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と見積もられた。また、コアインキュベーション法により春季に湾内の堆積物から水柱に溶出するDIN量は $7 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と見積もられた。従って、春季には湾内に $15 \sim 59 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ のDINが取り込まれたと考えられた(図(2)-4)。一方、繁茂期におけるアマモの窒素要求量をアマモ草体の平均窒素含量($0.02 \text{ gN g dw}^{-1}$)⁷⁾および冬季から春季の間(90日)のアマモの現存量の増加量($4.04 \text{ g dw m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)から見積もった結果、同期間に一日平均 $81 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の窒素がアマモの草体として固定されていたと推測された。また、春季のアマモ生物量(364 g dw m^{-2})に香川県沿岸のアマモの成長速度($0.022 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)とアマモの平均窒素含量($0.02 \text{ gN g dw}^{-1}$)⁸⁾を乗じた結果、アマモ繁茂期には平均で $1.6 \times 10^2 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の窒素がアマモの草体として固定されていたと見積もられた(図(2)-4)。室内実験の結果ではあるが、アマモ近縁種 *Zostera noltii* のDIN取り込み速度は $72 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、同種

の短時間（3時間程度）の最大DIN取り込み速度は $220 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と見積もられている⁹⁾。本研究で見積もったアマモのDIN取り込み速度（一日平均 $81 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ および繁茂期に $1.6 \times 10^2 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ）が実験的に見積もった数値と等しいことは、自然環境下のアマモが、実際に概ね一日平均 $81 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、繁茂期には $1.6 \times 10^2 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ でDINを取り込んでいると考えられる。一方で、潮汐によって湾内に流入するDIN量と堆積物から水柱に溶出するDIN量はアマモの成長量（窒素固定量）の9～73%であり、それだけではアマモの成長に必要な窒素量を満たさない。従って、アマモ場の形成には潮汐によってもたらされる沖合海域由来の水柱DIN以外にもDINのソースが存在していることが示唆された。

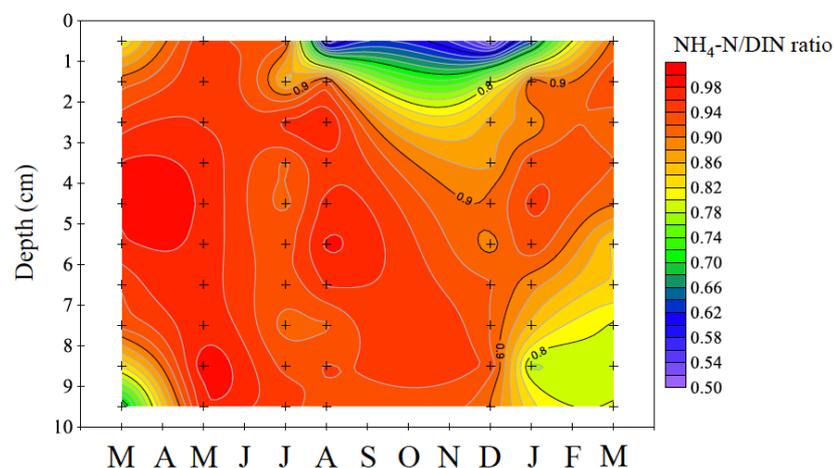


図(2)-4 生島湾における湾内へのDIN供給量とアマモの窒素要求量の比較（春季）

アマモは葉鞘部と根の双方から栄養塩を吸収することができる。我々が観測を行った結果、アマモの生物量が高い春季には0～10 cm 深の堆積物間隙水中平均DIN濃度は低く（平均 $50.8 \mu\text{M} = 0.706 \text{ mgN l}^{-1}$ ）、アマモの衰退期である冬季には高く（ $82.7 \mu\text{M} = 1.16 \text{ mgN l}^{-1}$ ）なっていた（図(2)-5）。そのような間隙水中のDIN濃度の挙動は、アマモの地下茎が位置する5 cm 深付近で顕著であり、春季から初夏は $50 \mu\text{M}$ 程度であるが、冬季には $171 \mu\text{M}$ のDINが確認された（図(2)-5）。また、香川県沿岸の湧水および伏流水が少ないこと、間隙水のDINの大部分がアンモニウム態の窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）であり、湧水および伏流水に含まれる硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）の影響が認められなかったこと（図(2)-6）より、間隙水中のDINは大部分が有機物の分解によって発生した無機態の窒素であると考えられた。間隙水中のDIN濃度は水柱のDIN濃度（ $0.03 \sim 0.2 \text{ mgN l}^{-1}$ ）に比べて高いが、間隙水自体の容積は著しく少なく、間隙中のDINの現存量（0～10 cm 深の積算量： 0.38 mgN m^{-2} ）は、水柱のDINの現存量（ 47 mgN m^{-2} ）に比べ1/120 程度であった。現在、堆積物の間隙水中のDIN濃度がわかっているだけで、アマモの地下部から吸収される速度が分からないためその寄与を見積もることはできないが、既往の報告ではアマモの栄養塩吸収には根からの栄養塩取り込みも葉鞘部と同様に重要とされており¹⁰⁾、数値モデルによるシミュレーションによると葉鞘部と根による吸収量は同程度とされている¹¹⁾。以上のように、潮汐および湾内の堆積物からの溶出による水柱へのDIN供給量（ $15 \sim 59 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ）は繁茂期のアマモの窒素要求量（ $160 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ）の1～4割でしかない。従って、残りの不足している要求量を満たす供給源としては、間隙水中から根に吸収されるDINがかなり大きな割合を占めると予測される。



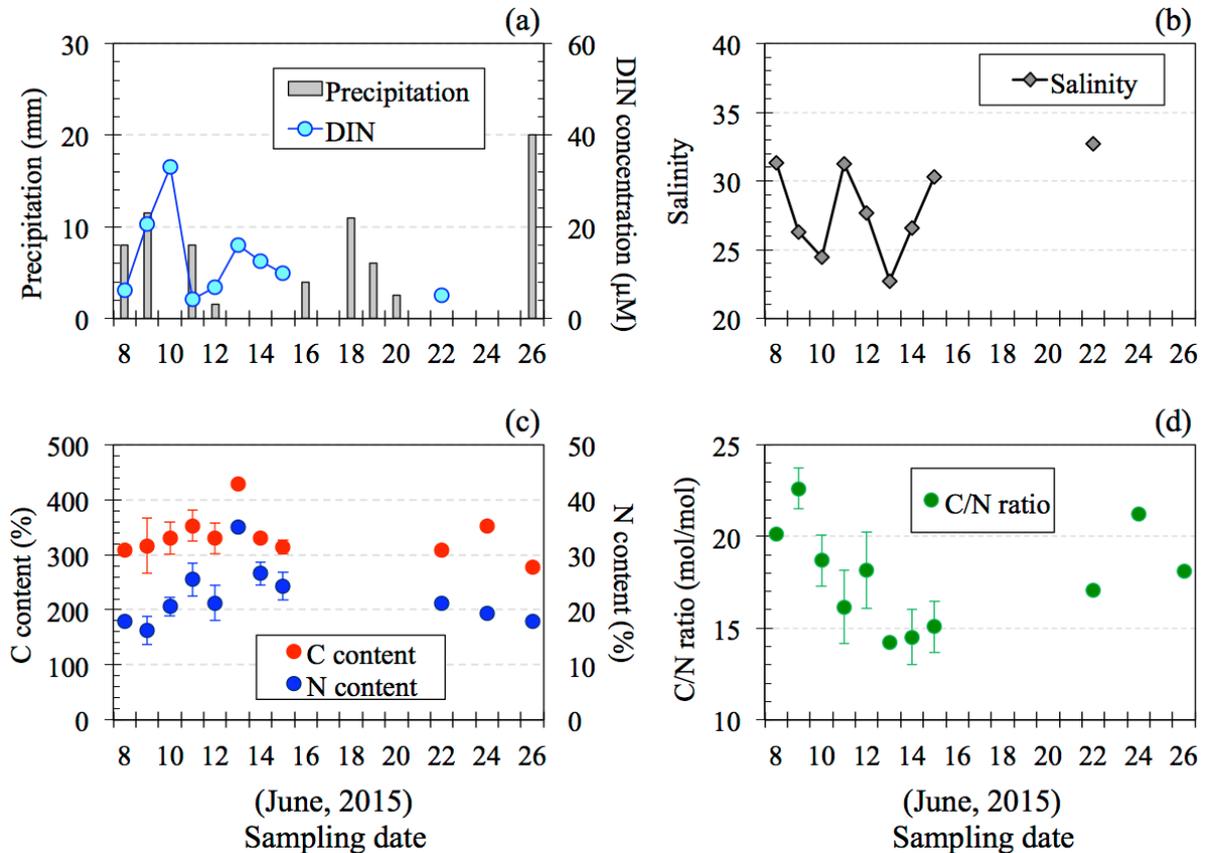
図(2)-5 (a) アマモ草体の現存量の変化および堆積物表層0~10 cm の間隙水中平均DIN濃度の変化
および (b) 堆積物表層0~10 cm 深の栄養塩濃度の変化



図(2)-6 生島湾のアマモ場堆積物間隙水中のDINに対する $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合

上述のように、海水交換に伴う沖合からの栄養塩の供給だけでは湾内のアマモの成長に必要な窒素を満たすことが出来ない。一方で、短期間（1日程度）の栄養塩供給があった場合、アマモが短期間で栄養塩を取り込む現象を捉えることが出来た。生島湾では、降水時に塩分の低下と急激なDIN濃度の増加が認められ、その際にアマモ葉鞘部のN含量が 16.3 mgN g^{-1} から6日間で約2倍の 35.1 mgN g^{-1} まで上昇し、一方で炭素窒素比（C/N比）は22.6から14.2まで減少していた（図(2)-7）。アマモ葉鞘部のC/N比は22程度とされており⁸⁾、本調査結果はアマモが短期間に窒素を過剰に取り込んだ事を示している。また、6日間で 18.8 mgN g^{-1} に相当する窒素を吸収したのであれば、繁茂期のアマモの現存量（ 364 gdw m^{-2} ）より、 $1.1 \times 10^3 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の窒素を取

り込んだと算出された。これは繁茂期のアマモの窒素要求量 ($160 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 図(2)-4) の6.9倍であり、このことからアマモが数日から1週間という比較的短い期間で自身の成長に必要な量以上の窒素を取り込んでいることが示唆された。従って、アマモは湾内へ間欠的に供給されたDINを効率良く取り込み、草体内に蓄える機能があると考えられる。このようにアマモは海水交換によって供給された水柱DINだけでなく、複数の窒素の吸収機構を持ち、自身の生長を維持あるいは促進していると考えられた。



図(2)-7 (a) 降水量と生島湾のDIN濃度の変化、(b) 塩分の変化、(c) アマモ草体の炭素と窒素含量の変化、および (d) アマモ草体の炭素窒素比 (C/N比) の変化

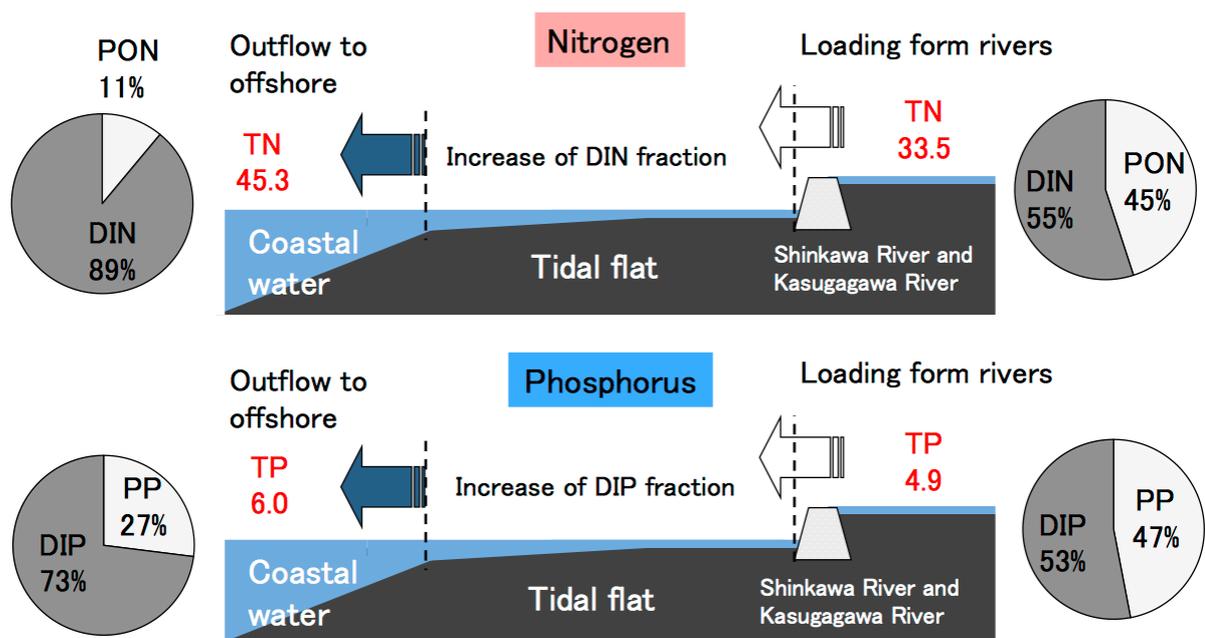
次に、沿岸海域においてアマモ場が栄養塩循環に与える影響について考察する。生島湾が面する備讃瀬戸海域には1,426 haのアマモ場が存在し (図(2)-2) 、これらのアマモ場が全て生島湾と同等のDIN ($160 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) を要求すると仮定すると、備讃瀬戸海域では繁茂期に全アマモ場で総量として1.8~2.2 tN d^{-1} のDINが固定されていると見積もられた。一方、備讃瀬戸海域の河川から負荷される全窒素 (TN) 量は日平均で約82 tN d^{-1} と見積もられている。従って、備讃瀬戸海域では繁茂期において、アマモ場に固定される窒素は河川TN負荷量の2.2-2.7%程度と見積もられた。次に水柱のDINとアマモ草体の窒素現存量を比較する。備讃瀬戸海域のDIN濃度と生島湾のDIN濃度が等しいと仮定し、備讃瀬戸海域の面積 ($1,084 \text{ km}^2$) と水深 (平均15 m) を乗じて春季の備讃瀬戸海域全域のDIN現存量を算出すると、296 tNと見積もられた。他方、生島湾の繁茂期のアマモの現存量 (364 gdw m^{-2}) と同程度のアマモの生息密度が備讃瀬戸全域のアマモ場で観測されると仮定し、備讃瀬戸海域のアマモ場の面積 (1,426 ha) とアマモの窒素含量 (0.02 gN gdw^{-1})⁸⁾ を乗じることで備讃瀬戸海域全域のアマモ繁茂期 (春季) のアマモ草体の窒素量を算出すると102 tN と見積もられ、水柱DINの34%に匹敵すると算出された。このように、河川から負荷されるTN量に対するアマモの窒素要求量はわずか数%程度であるが、現存量としてはアマモ草体の窒素量が水柱DINの数%におよび、備讃瀬戸海域においてアマモ草体が保持する窒素量が大きいことがうかがえる。さらに、同様の見積もりを生島湾内で行う

と、水柱のDINとアマモ草体の窒素現存量はそれぞれ 0.047 gN m^{-2} および 7.4 gN m^{-2} とアマモ草体が水柱DINの160倍程と極めて多量の窒素を有していると算出された。

以上のように、瀬戸内海東部備讃瀬戸海域に位置する生島湾内のアマモをめぐる窒素収支に注目してきた。アマモは繁茂期には湾内を覆い尽くすほどの大きな現存量となるが、夏を過ぎると枯れて流れ藻となって沖合へ流出する。アマモの繁茂期にはアマモ草体の窒素要求量は $160 \text{ mgN m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と湾内へのDIN供給量と比較して大きく、さらにその現存量は 7.3 gN m^{-2} となり、湾内の水柱DIN量 (0.047 gN m^{-2}) と比較して非常に大きな窒素のストックとなる。本研究では、アマモの流出量を測定していないが、著者らの観察では、湾内に一部のアマモが堆積している一方でその大半は湾外に流出していた。流出したアマモはいずれ分解され海水中へDINとして回帰することになる。備讃瀬戸全域で考えても、面積ではわずか数% にしか過ぎないアマモ場が、アマモの繁茂期には水柱DINの1/3程度の窒素をアマモとしてストックしていると見積もられた。このように、アマモは春季から夏季にかけて沿岸海域で非常に大きな窒素ストックとなり、その後沖合に窒素を輸送して分解を受け、沿岸海域の窒素循環に大きく寄与していると考えられる。

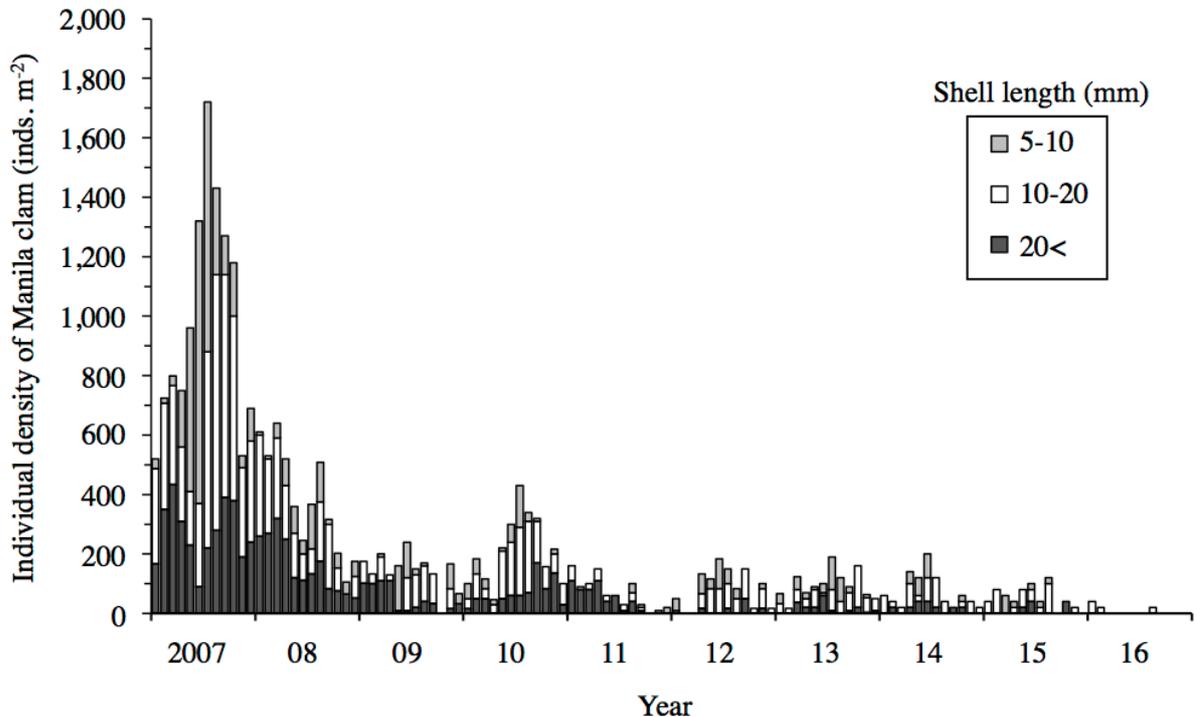
(2) -2 干潟

上述のように、河口干潟は陸域と海域の間に位置し、河川を通じて陸域から有機物負荷の影響を強く受ける。この有機物が干潟域から沖合海域へと負荷されると、底質の還元化や大量の有機物が微生物分解を受けることで海水中の溶存酸素が消費され、溶存酸素濃度の低下、ひいては貧酸素水塊の発生が懸念される。2006年から2010年に新川・春日川河口干潟で行われた調査¹²⁾に基づく河川—干潟—海域での物質収支を図(2)-8に示す。河川から干潟へ負荷された窒素量の減少が認められた。これは窒素の一部が脱窒で大気へ放出される等の結果と考えられる。一方で、干潟への流入時には6割程度を占めていた懸濁有機態窒素 (PON) が沖合への流出時にはわずか1割程度に減少していた。リンは窒素と異なり、河川から干潟へ負荷された量と干潟から沖合に流出した量はほぼ等しかった。また、窒素と同様に河川から流入するリンの半分以上が有機物を多く含む懸濁態リン (PP) であったが、干潟から流出するPPはわずか1割程度となっていた。このように、干潟は流入する有機物を無機化する機能を持つと考えられる。



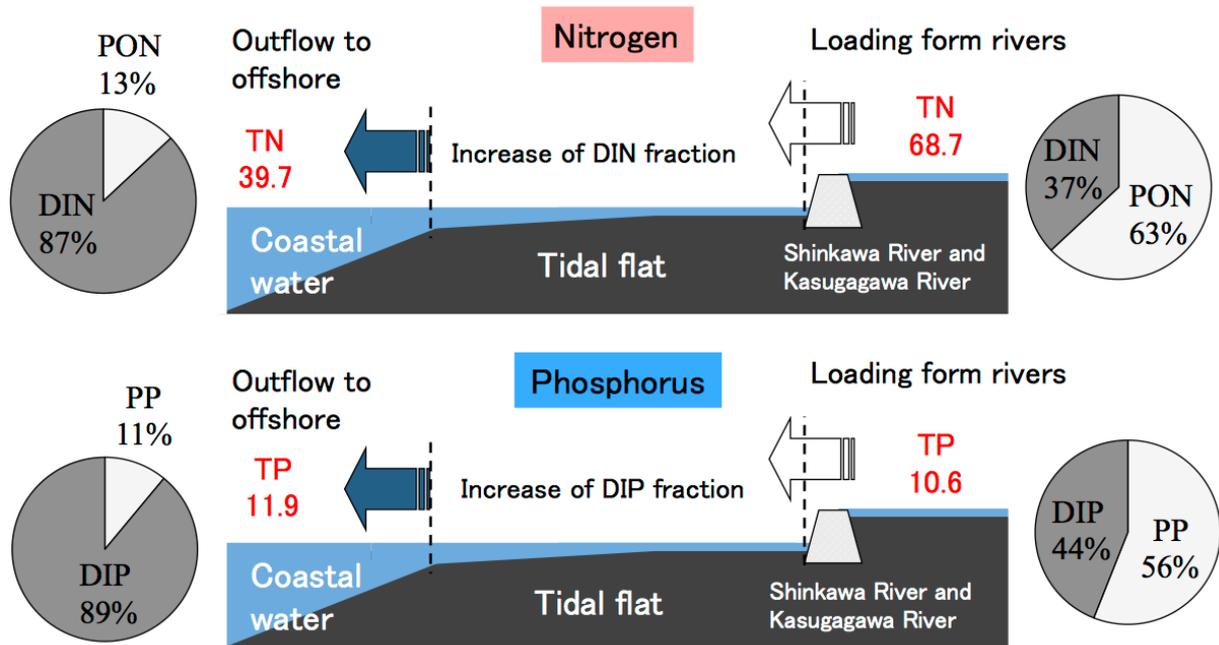
図(2)-8 高栄養度干潟における栄養物質収支。窒素、リンそれぞれについて、河川から干潟への負荷量（白抜き矢印）と干潟から沖合への流出量（灰色矢印）を示す。単位は t y^{-1}

2006～2010年の調査後、新川・春日川河口干潟ではアサリ生物量の減少など（図(2)-9）¹³⁾、マクロベントス生物量の大幅な減少が認められた。加えて、微細藻類量の減少も確認されている（一見、私信）。従って2006～2010年調査時の新川・春日川河口干潟を高栄養度の干潟と定義する一方で、現在（2017年度調査時）の新川・春日川河口干潟を中栄養度の干潟と定義し、2006～2010年と同様の調査を行い、栄養度の異なる干潟での物質収支を評価した。



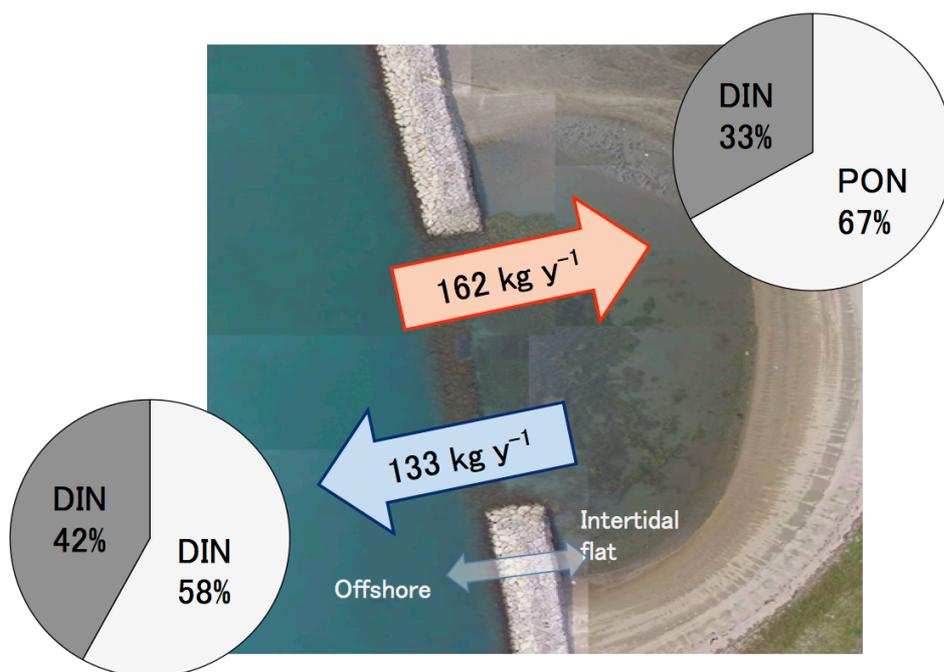
図(2)-9 新川・春日川河口干潟におけるアサリ個体数の経年変化¹⁴⁾

2017年度に新川・春日川河口干潟（中栄養度の干潟）で行った調査の結果（図(2)-10）、河川から干潟へ負荷された窒素量（33.5 t y⁻¹）よりも干潟から沖合に流出した窒素量（45.3 t y⁻¹）は幾分多かった。ただし、2006～2010年の調査時と同様に干潟への流入時には4割程度を占めていたPONが沖合への流出時には減少し、わずか1割程度となっていた。また、河川から干潟へ負荷されたリン量（4.9 t y⁻¹）よりも干潟から沖合に流出したリン量（6.0 t y⁻¹）の方が幾らか多かったが、窒素と同様に河川から流入するリンの半分以上が懸濁態リン（PP）であったにも関わらず、干潟から流出するPPは3割程度となっていた。このように、中栄養度および高栄養度の干潟は流入する有機物を無機化する場であることが現場調査を通じてわかり、従来から言われてきたように干潟は水質浄化に大きく関わっている「自然の浄化槽」であることが定量的に明らかになった^{4, 12, 14)}。一方で、干潟の有機物分解能力は干潟の栄養度によって異なり、栄養度が低い干潟では有機物分解能力が減少する可能性が示唆された。



図(2)-10 2017年度新川・春日川河口干潟（中栄養度干潟）における栄養物質収支。
 図(2)-8と同様に窒素およびリンそれぞれについて、河川から干潟域への物質負荷量（白抜き矢印）と干潟域から沖合海域への物質流出量（灰色矢印）を示す。単位は t y^{-1}

低栄養度の大串半島西岸の前浜干潟において、上げ潮時に干潟へ流入する沖合海水と、下げ潮時に干潟から沖合へ流出する海水を比較した。その結果、窒素の流入量（ 0.162 t y^{-1} ）と流出量（ 0.133 t y^{-1} ）に大きな差は認められなかった。また、流入時は窒素の67%がPONであったが、流出時は58%と減少していた（図(2)-11）。このように低栄養度の前浜干潟でも無機化作用は確認されたものの、上述の中栄養度あるいは高栄養度の河口干潟と比べて小さいことが明らかとなった。



図(2)-11 低栄養度干潟（前浜干潟）における窒素収支

以上のように、干潟への流入時と沖合への流出時における窒素の組成（PONとDINの割合）は異なっており、干潟域の無機化機能を捉えることが出来た。一方、干潟の栄養度の違いにより窒素、リン収支に伴う形態変化の状況が異なることが明らかとなった（表(2)-1）。高栄養度および中栄養度の干潟では河川から干潟に流入するPONとDIN量はほぼ同等であるが、干潟から沖合域に流出する際には大部分がDINとなっていた。従って、有機物および親生物元素の負荷が大きく、栄養度が高い河口干潟では有機物の分解が卓越し、河川から干潟への流入時よりも沖合への流出時の方が明らかにPONの割合が小さく、DINの割合が大きくなったと考えられた。他方、低栄養度の干潟から沖合域に流出するPON量はDIN量とほぼ同等であった。栄養度が低い前浜干潟では、PONの割合が減少し、DINの割合が増加する傾向は認められるもののその割合の変化は顕著ではなく、河口干潟と比較するとPONの分解能力は小さいと考えられた。このように栄養度の違いによって干潟上での有機物分解能力が異なると考えられた。

表(2)-1 干潟への窒素流入量とその形態変化

	Inflow	Outflow to offshore area
Shinkawa-Kasugagawa River Estuary 2006-2010 (high nutrient)	68.7 ton y ⁻¹ PON 63% DIN 37%	39.7 ton y ⁻¹ PON 13% DIN 87%
Shinkawa-Kasugagawa River Estuary (2017) (low nutrient; decreasing from 2006-2010)	33.5 ton y ⁻¹ PON 45% DIN 55%	45.3 ton y ⁻¹ PON 11% DIN 89%
Inter tidal flat, West of Ohgushi Peninsula 2016 (further low nutrient)	0.162 ton y ⁻¹ PON 67% DIN 33%	0.133 ton y ⁻¹ PON 58% DIN 42%

上述の自然干潟の有機物分解能力を評価する目的で、調査を行った香川県の全干潟のPON分解能力と全下水・排水処理場のPON除去能力を試算し比較した。本調査で得られた河口干潟（中栄養度および高栄養度）および前浜干潟（低栄養度）の有機物分解能力を香川県に残存する全自然干潟（河口干潟225 ha, 前浜干潟752 ha）がそれぞれ有すると仮定して試算すると、39～69 t N y⁻¹のPONが無機化されていると推定される（表(2)-2）。他方、香川県下の全16ヶ所の下水・排水処理場の一日あたりの処理水量、処理水中の懸濁物量（SS）から県内の人為的なPONの処理量を試算した（表(2)-3）。なお、処理水中の懸濁物の1～2%がPONとして計算を行った。その結果、香川県下の全下水・排水処理場の同分解能力は総計で87～174 t N y⁻¹と推定された。従って、現存の自然干潟は、われわれが人為的に処理している懸濁態有機物の22-79%におよぶ浄化機能があると見積もられた。

表(2)-2 香川県下の全自然干潟における懸濁有機態窒素（PON）の分解・除去量

	PON removal ratio (g N m ⁻² y ⁻¹)	Area (ha)	Total PON removal ratio (ton N y ⁻¹)
Tidal flat	14.0 ~ 27.5	225	32 ~ 62
Intertidal flat	0.9	752	6.8
Total		977	39 ~ 69

表(2)-3 香川県内の全下水・排水処理場における PON の除去量。処理水量（流入水量）および処理水中の懸濁物量（SS）のデータは香川県（2013）¹⁵⁾を基に作成した。

また、SSの1～2%がPONとしてPON除去量を算出した。

Local region	Center	Treating water mass $\times 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$	SS concentration g m^{-3}	SS removal rate ton d^{-1}	PON removal rate kg N d^{-1}
Kagawa prefecture	Daisokugawa clarification center	16.0	157	2.5	25 ~ 50
Kagawa prefecture	Kanakuragawa clarification center	13.0	178	2.3	23 ~ 46
Kagawa prefecture	Koutougawa clarification center	28.4	119	3.4	34 ~ 68
Takamatsu	East sewage treatment center	70.5	142	10.0	100 ~ 200
Takamatsu	Mure clarification center	5.9	157	0.9	9 ~ 18
Takamatsu	Aji clarification center	0.5	154	0.1	1 ~ 1
Marugame	Marugame clarification center	22.1	122	2.7	27 ~ 54
Kanonji	Kanonji city sewage treatment center	7.1	67	0.5	5 ~ 9
Sanuki	East Tsuda clarification center	0.5	190	0.1	1 ~ 2
Sanuki	Central Tsuda clarification center	1.6	117	0.2	2 ~ 4
Sanuki	West Tsuda clarification center	0.3	126	0.0	0 ~ 1
Sanuki	East Ohkawa clarification center	0.2	115	0.0	0 ~ 1
Sanuki	West Ohkawa clarification center	0.5	148	0.1	1 ~ 1
Sanuki	Kabegawa clarification center	4.3	206	0.9	9 ~ 18
Higashi-Kagawa	Shinkawa Komatsubara Clarification center	0.1	90	0.0	0 ~ 0
Naoshima	Naoshima clarification center	1.0	120	0.1	1 ~ 2
	Total	171.8	2,207	23.8	238 ~ 476

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

アマモの物質循環機能として栄養塩吸収に関してはこれまでも知見があったが、降雨等による一時的な栄養塩濃度の上昇に対して、草体内の栄養塩濃度を高めて吸収する現象は報告されておらず、栄養塩濃度が低い海域に生息するアマモの生存戦略の一端を発見できた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省の瀬戸内海環境情報基本調査及び豊かな海の確保に向けた方策検討業務有識者検討会における湾・灘ごとの水質の変化状況の検討において、本研究成果である沿岸と沖合を塩分によって分類、評価する手法が取り入れられ、総量削減の効果等の水質変化の評価、解析に貢献した（平成29年度報告書4-1）。同時に本検討委員会の解析結果は、環境審議会水環境部会瀬戸内海小委員会における検討でも用いられ、当該小委員会における水環境の変化状況の解析に貢献した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

アマモ場を活用した沿岸海域に特化した対策手法は、植物プランクトンの増殖が起こりやすい沿岸域における栄養塩対策に活用することが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 一見和彦、東菌圭吾、山口聖、山口一岩、多田邦尚：沿岸海洋研究、55(2)、79-86. (2018). 干潟域における一次生産と無機化過程：高松市新川河口干潟域の調査結果から

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 一見和彦：水環境学会誌、39、125-129. (2016). 沿岸域における河口干潟の機能的役割：新川・春日川河口干潟域（瀬戸内海備讃瀬戸）における窒素およびリン収支（特集 干潟生態系の修復と生態系サービスの評価）
- 2) 書籍：沿岸域統合管理と里海（分担執筆）第二章瀬戸内海の栄養塩濃度管理を分担 in press
執筆者：西嶋渉、坂井陽一、富山毅、柴田淳也、多田邦尚、一見和彦、朝日俊雅
- 3) 書籍：Integrated Coastal Management and Satoumi-Restoring Japanese Estuaries and Bays-（分担執筆）Nutrient managementを担当 in press
執筆者：Wataru Nishijima、Yoichi Sakai、Takeshi Tomiyama、Jun-ya Shibata、Kuninao Tada、Kazuhiko Ichimi、Toshimasa Asahi

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 朝日俊雅、一見和彦、山口一岩、多田邦尚：日本海洋学会2015年度春季大会、2015年3月、沿岸栄養塩循環に対するアマモ場の機能
- 2) 朝日俊雅、一見和彦、多田邦尚：日本海洋学会2015年度秋季大会、2015年9月、アマモ場堆積物間隙水中の無機態窒素の動態
- 3) 朝日俊雅、一見和彦、多田邦尚：日本海洋学会2016年度春季大会、2016年3月、短期間のアマモの窒素含量の変動
- 4) Toshimasa Asahi、 Kazuhiko Ichimi、 Kuninao Tada: EMECS11、 St. Petersburg、 Russia、 Aug. 2016. Nutrient dynamics in eelgrass (*Zostera marina*) meadow and the variation of nutrient contents of eelgrass
- 5) 朝日俊雅：日本プランクトン学会若手の会シンポジウム、2016年9月、藻場の窒素循環と海草の窒素取り込み
- 6) 朝日俊雅、一見和彦、多田邦尚：海洋生物学シンポジウム、2017年3月、アマモ場の窒素動態とアマモの窒素含量
- 7) 朝日俊雅、多田邦尚、山田真知子、上田直子、玉利俊哉、柳哲雄：日本地球惑星科学連合（JpGU）2018年大会、2018年5月、過栄養内湾域における堆積物中の炭素・窒素・リンの鉛直分布

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して～持続可能な沿岸海域実現を目

- 指した沿岸海域管理手法の開発～」(主催：環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1&テーマ5、2017年1月26日、サテライトキャンパスひろしま502大会議室、参加人数61名)
- 2) 多田邦尚：香川大学瀬戸内圏研究センターシンポジウム (2017) 「浅海域の低次生物生産過程と栄養塩循環」
 - 3) 多田邦尚：香川大学瀬戸内圏研究センターシンポジウム (2018) 「藻場・干潟における物質収支とその機能」
 - 4) 一般公開シンポジウム「美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して～持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発～」(主催：環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1・宇部工業高等専門学校研究推進モデル事業、2017年11月2日、サテライトキャンパスひろしま501・502大会議室、参加人数85名)
 - 5) 一般公開シンポジウム「美しく恵み豊かな瀬戸内海を目指して～持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発～」(主催：環境省環境研究総合推進費S-13テーマ1&テーマ5・地域適応コンソーシアム事業中国四国地域事業・宇部工業高等専門学校研究推進モデル事業、2018年10月15日、サテライトキャンパスひろしま501・502大会議室、参加人数57名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Ivan Valiela, John M. Teal : Nature、280、652–656.(1979).The nitrogen budget of a salt marsh ecosystem
- 2) Thomas G.Wolaver、 John D.Spurrier: Estuarine Coastal and Shelf Science、26、203–214. (1988). The exchange of phosphorus between a euhaline vegetated marsh and the adjacent tidal creek
- 3) 佐々木克之: 沿岸海洋研究ノート、26、172–190.(1989).干潟域の物質循環
- 4) 一見和彦、浜口佳奈子、山本昭憲、多田邦尚、門谷茂：沿岸海洋研究、48、167–178.(2011).新川・春日川河口干潟（瀬戸内海備讃瀬戸）におけるリンの収支
- 5) 国分秀樹、土橋靖史、高山百合子：土木学会論文集、B2-65、1081-1085.(2009).英虞湾の干潟・アマモ場連続態における直上水の流入流出フラックスの観測
- 6) 環境省：第4回自然環境保全基礎調査報告書（2004）。
- 7) 清水裕太、小野寺真一、斎藤光代：陸水学雑誌、70、129-139.(2009).50 mメッシュ標高情報とGISを利用した海底地下水流出量の空間分布評価－瀬戸内海中央部での適用例－
- 8) Carlos M. Duarte: Marine Ecology Progress Series、67、201–207. (1990).Seagrass nutrient content
- 9) Ana Alexandre、João Silva、Tjeerd J. Bouma、Rui Santos: Journal of Experimental Marine Biology and Ecology、401、7-12. (2011). Inorganic nitrogen uptake kinetics and whole-plant nitrogen budget in the seagrass *Zostera noltii*
- 10) F. T. Short、C.P. McRoy: Botanika Marina、27、547–555.(1984).Nitrogen uptake by leaves and roots of the seagrass *Zostera marina* L
- 11) Richard C. Zimmerman、Robert D. Smith、Randall S. Alberte: Marine Ecological Progress Series、41、167–176. (1987). Is growth of eelgrass nitrogen limited? A numerical simulation of the effect of light and nitrogen on the growth dynamics of *Zostera marina*.
- 12) 一見和彦：水環境学会誌、39、125–129.(2016).沿岸域における河口干潟の機能的役割～新川・春日川河口干潟域（備讃瀬戸）における窒素およびリンの収支～
- 13) Kazuhiko Ichimi、Miyuki Honda、Yuka Okada、Kana Tsuzuki、Hitomi Yamaguchi: Fisheries

Science、in press (2019). Importance of shingle beaches as habitat for Manila clam *Ruditapes philippinarum*

- 14) 一見和彦：沿岸海洋研究、55、79-86. (2018) .干潟域における一次生産と無機化過程；高松市新川河口干潟の調査研究から
- 15) 香川県：香川県土木部下水道課、かがわの下水道3. (2013) 処理場施設状況について
<http://www.pref.kagawa.jp/gesuido/keep/img/data03.pdf>

II. 英文Abstract

Development of methods for managing nutrient salt concentrations in the Seto Inland Sea (enclosed coastal sea)

Principal Investigator: Wataru NISHIJIMA

Institution: Hiroshima University

1-5-3 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-

8513

, JAPAN

Tel: +81-82-424-6199 / Fax: +81-82-424-6199

E-mail: wataru@hiroshima-u.ac.jp

Cooperated by: Kagawa University

[Abstract]

Key Words: Nutrient, Primary Production, Secondary Production, Transfer Efficiency, Vulnerable Index, Region-Specific Background Secchi Depth, Eelgrass Bed, Tidal Flat, Planktivorous Fish

Many enclosed and semi-enclosed seas with densely populated and industrialized watersheds are subject to excess eutrophication and deterioration of the quality of water and sediment because of human activities. Conversely, part of the production in the sea is supported by the nutrient loading from land areas. We aim to establish the nutrient management method in which adverse effects of nutrient loading from human activities are avoided, and healthy environmental conditions and high productivity are maintained. The Seto Inland Sea that has overcome an environmentally problematic condition to some extent, whereas environmentally problematic conditions remain in some areas and seasons, is a target semi-enclosed sea for this study.

We developed the method to estimate primary and secondary productions from water quality monitoring data and estimated the temporal and spatial distribution of primary and secondary productions in the Seto Inland Sea since the 1970s. The 40% and 61% reduction of the total nitrogen and phosphorus loadings from land from 1979 to 2009, respectively, did not affect the primary production in autumn and winter but decreased it in spring and summer from the 2000s. In the 1980s, a remarkable reduction of primary production occurred in the eutrophic areas with more than $5 \mu\text{g l}^{-1}$ of Chlorophyll *a* concentrations, whereas little reduction occurred in the off-shore areas with lower Chlorophyll *a* concentrations. Because the very high density of phytoplankton observed in the eutrophic areas in the 1980s did not stimulate secondary production, the secondary production did not remarkably change. Moreover, typical planktivorous fish such as the Japanese anchovy fluctuated independently of the phytoplankton and zooplankton production. Sand lance, another important planktivorous fish, has a unique lifestyle dependent on sandy sediment. We obtained new scientific findings of the ecology of sand lance, wherein their habitat is determined by penetrability. The penetrability is expressed in terms of the shear strength of the bottom sediment and the degree of burrowing in the sand. Sand lance prefers sediments with low and stable temperatures to control their metabolism in summer. There were two regional

groups of the sand lance in the Seto Inland Sea, the eastern and the western groups. However, analysis using microsatellite DNA markers developed in the study, we confirmed that sand lance inhabiting the eastern and western regions of the Seto Inland Sea were genetically identical.

The Seto Inland Sea has a variety of areas with different geographic property, the extent of land effects, water quality, and other important characteristics. We developed two important indicators, expressing marine environment related to phytoplankton growth for the management of enclosed and semi-enclosed sea, the region-specific Background Secchi Depth (BSD) and the vulnerable index to phytoplankton growth (VI). The BSD is defined as the Secchi depth excluding the contribution of phytoplankton and shows the ultimate Secchi depth achieved by nutrient control. The difference between the BSD and the present Secchi depth is less than 20% in many areas. Therefore, further improvement of Secchi depth through the decrease in phytoplankton concentration is not expected. The Chlorophyll *a* concentration can be estimated by VI, which was calculated by salinity and Secchi depth. It is difficult to manage phytoplankton growth by controlling nutrient loading from land in areas with high VI, such as coastal areas and estuaries.

For the management of coastal areas with high VI, an ecological method using macrophytes was developed. *Zostera marina*, a typical eelgrass in many enclosed and semi-enclosed seas in the world, uptakes nutrients from the water in the warm season where phytoplankton also grows and releases them in the cold season. We showed that nutrient uptake by *Z. marina* increased when the nutrient concentration in the water is increased due to rain, indicating that *Z. marina* was a suitable plant for nutrient management using the ecological method. We confirmed the effectiveness of *Z. marina* on phytoplankton control in the coastal area in Hiroshima Bay.