

## 海域における生物の多様性及び生産性に影響を及ぼす要因に関する知見

## 目次

海域における生物の多様性及び生産性 .....	2
1 海域における生物の多様性及び生産性に影響を及ぼす要因について .....	2
2 分類群ごとの状況 .....	3
2.1 プランクトンの生物の多様性及び生産性 .....	3
2.2 底生生物（ベントス）の生物の多様性及び生産性 .....	6
2.3 遊泳生物（ネクトン）の生物の多様性及び生産性 .....	8
2.4 海藻類の生物の多様性及び生産性 .....	11
参考文献 .....	13

## 海域における生物の多様性及び生産性

瀬戸内海においては、水質の改善が必ずしも豊かな海の実現に繋がっていないとの問題意識から、令和3年6月に瀬戸内海環境保全特別措置法が改正され、特定の海域ごとに栄養塩類のきめ細やかな管理ができるよう栄養塩類管理制度の創設や自然海浜保全地区の指定対象の拡充等が行われるなど、生物の多様性及び生産性が確保された「豊かな海」を目指すこととされた。

瀬戸内海におけるこうした動きは他の海域にも広がりつつあり、水質のみならず、生物の多様性及び生産性の観点を踏まえた対応を検討する必要がある。このため、海域における生物の多様性及び生産性に影響を及ぼす要因について既往文献等から整理を行った。

### 1 海域における生物の多様性及び生産性に影響を及ぼす要因について

閉鎖性海域の生物の多様性及び生産性は、栄養塩類をはじめ、気候変動による海水温上昇や赤潮、貧酸素水塊の発生等、様々な環境要因が複合的に影響した結果と考えられる。

窒素、りんといった栄養塩類については、プランクトンや海藻において、栄養塩類濃度の低下による生物量の低下や種組成の変化などが生じており、一部の海域において栄養塩類の不足が指摘されている。一方、生物多様性については、陸域負荷の低減に伴い、貧酸素水塊の解消等を通じて底生生物や海藻類において生物多様性の向上が見られている。

近年、特に顕著となっている気候変動に伴う海水温上昇については、生息可能な種の分布を変化させ、また海洋一次生産を変化させる可能性があることから、食物連鎖を通じて生態系全体へ広範な影響を及ぼす可能性が予測されている。

一方で、海域の生物の多様性及び生産性に影響を及ぼす要因については、現在も未解明な点が多い。例えば、栄養塩類と一部の水産資源との間に相関関係がみられるが、因果関係は明らかになっていない部分も多く、今後も、基礎調査や科学的知見を充実させる必要がある。

## 2 分類群ごとの状況

### 2.1 プランクトンの生物の多様性及び生産性

#### 【概要】

陸域負荷低減に伴い、瀬戸内海における赤潮発生件数は高度経済成長期から現在まで減少しており、プランクトン量が減少するとともに水質が改善してきたことがうかがえる。近年では、海域中の栄養塩類の濃度が低下し、植物プランクトンは生物量の減少と種組成の変化がみられ、溶存態無機窒素（DIN）濃度の低下に伴う植物プランクトンの生物量の減少によって、動物プランクトンの生物量の減少が見られている。また、窒素・りん の負荷量が低下した場合、一次生産から二次生産に至る転送効率が低下する海域があることが明らかになった。水温上昇により、植物プランクトンの生物量が減少し、それに伴い動物プランクトンの生物量も減少すると予測した知見がある。

#### 【要点】

- ▶ 陸域負荷（窒素・りん）と植物プランクトンの生物多様性の関係として種組成に着目すると、陸域負荷低減に伴い種組成の変化が見られており、全体に占める珪藻類の割合が増加し、渦鞭毛藻の割合が減少したと報告されている。また、栄養塩類と植物プランクトンの生産性の関係として、栄養塩類濃度の低下と生物量の減少に相関が見られている。
- ▶ 大阪湾では DIN 低下に伴い、植物プランクトンの生物量の減少が報告されている。瀬戸内海における赤潮発生件数は高度経済成長期から現在まで減少しており、水質が改善したことがうかがえる。また、気候変動に伴い水温が上昇することによる夏～秋季の一次生産の低下などの予測結果が報告されている。また、一般的には、水温上昇により成層化して上層と下層の水が混合されないため下層で貧酸素水塊が発達するが、夏～秋季の一次生産のれに起因する貧酸素水塊の体積の減少が予測されている知見もある。
- ▶ 栄養塩類と動物プランクトンの関係として、大阪湾では動物プランクトンの減少は DIN 濃度の低下に伴う植物プランクトンの生物量の減少によるものと見られている。
- ▶ 伊勢湾の生産構造について、予測モデルの計算結果によると動物プランクトンの捕食量は夏季に植物プランクトン等の被食者の現存量に与える影響（トップダウン効果）が大きい。また、動物プランクトンへの転送経路として、大型の植物プランクトンから成る classical-food web と小型の微生物から成る micro-food web の比率はおおよそ 9 : 1 であった。
- ▶ 数値シミュレーションによる感度解析により、伊勢湾では窒素・りん負荷量が減少した場合、一次生産から二次生産に至る転送効率が低下する海域があることが明らかになっている。
- ▶ 水温上昇と動物プランクトンの関係として、シミュレーションで水温上昇により肉食性の動物プランクトンの割合が増加すると予測されている。また、シミ

シミュレーションによると、気候変動に伴い動物プランクトンの生物量が減少すると予測された。

陸域負荷（窒素・りん）と植物プランクトンの関係として、日本国内では、陸域負荷低減に伴い、東京湾及び瀬戸内海（播磨灘等）で、渦鞭毛藻の割合が減少し、珪藻類の割合が増加した[1][2][3]。大阪湾で、渦鞭毛藻類の *Alexandrium tamarense* の年間最高細胞密度は、春季の DIN 濃度及び優占種である珪藻類 *Skeltonema* 属の平均細胞密度と有意な負の相関が認められた[3]。

栄養塩類と植物プランクトンの生産性の関係として、一般に、栄養塩類が多いほど植物プランクトンの生物量も多くなるが[2]、植物プランクトン群集は、栄養塩類の減少に対しては生物量としての減少よりも種組成の変化という応答を示す可能性が高いと考えられている[4]。大阪湾では、DIN 濃度の低下に伴い、植物プランクトンの生物量の減少が見られた[5]。また、瀬戸内海における赤潮発生件数は高度経済成長期から現在まで減少しており、水質が改善したことがうかがえる[2]。RCP8.5 シナリオ<sup>1</sup>で予測した結果では特に夏～秋の顕著な高水温は一次生産を大きく低下させることが予測されており、それに伴って表層 DIN が残存するが、10月～11月は豊富な栄養塩類に支持されて一次生産が強まり、冬季も一次生産が高く維持されると予測されている[6][7]。また、将来的には、夏から秋季の一次生産の減少に起因する貧酸素水塊の体積の減少が予測されている[8]。

栄養塩類と動物プランクトンの関係として、大阪湾では、陸域負荷低減に伴い、動物プランクトンの卓越種は大幅に減少し、その他の種も減少したことにより、卓越した種が見られなくなった[5]。この、大阪湾での動物プランクトンの減少は、DIN 濃度の低下に伴う植物プランクトンの生物量の減少によるボトムアップ効果によるものと考えられる[5]。また、シミュレーションでは植物プランクトンの小型化に起因して、動物プランクトン全体に対してクラゲのような肉食性の動物プランクトンの占める割合が増加すると予想されている[9]。

栄養塩類と生物生産性については、伊勢湾の生産構造に関して、予測モデルの計算結果より、動物プランクトンの捕食量は夏季には  $100\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$  を超えるなど、植物プランクトン等の被食者の現存量に与える影響（トップダウン効果）は大きいとされている。また、動物プランクトンへの転送経路として、大型の植物プランクトンから成る classical-food web と小型の微生物から成る micro-food web の比率はおよそ 9 : 1 であった。一方で、貧酸素水塊の影響により動物プランクトンの捕食量は約 2 割減少しているものと推測された[10]。

伊勢湾における微生物群集の観測結果より、窒素・りん濃度に対する浮遊生物系の食物連鎖の応答性を評価したところ、マイクロサイズの植物プランクトン現存量は窒素・りん濃度と比例関係にあるのに対して、逆にシアノバクテリアである *synechococcus* sp. の現存量は T-N が約  $0.3\text{mg}/\text{L}$ 、T-P が約  $0.03\text{mg}/\text{L}$  を下回った時期・海域で増加する傾向が確認された。さらに、数値シミュレーションによる感度解析により、伊勢湾では窒素・りん負荷量が減少した場合、一次生産から二次生産に至る転送効率が低下する海域があることが明らかになった[11]。

<sup>1</sup> RCP（代表濃度経路）シナリオは、気候変動を予測するために作られたシナリオのこと。RCP8.5 は予測されている気温上昇が最も高いシナリオで、基準期間（1985～2005年）の平均と比較して 2100年には  $2.6\sim 4.8^\circ\text{C}$  もの気温上昇が予測されている。

水温変動と動物プランクトンの生物生産性の関係としては、気候変動に伴い、植物プランクトンのバイオマス量が減少することにより、動物プランクトンの生物量は全球的に減少するとシミュレーションにより予測されている [9]。

## 2.2 底生生物（ベントス）の生物の多様性及び生産性

### 【概要】

陸域負荷の低減に伴い、海域ではベントスの種類数の増加が見られている。また、栄養塩類が減少した伊勢湾では、植物プランクトンの生物量の減少とアサリの現存量の減少に相関が見られたが、因果関係は明らかになっていない。底層 D0 とベントスの生物の多様性及び生産性の関係として、大阪湾では貧酸素水塊の解消により生物多様性の向上が見られている。また、東京湾では、低酸素状態による大型底生生物の幼生の定着の阻害等の可能性が示唆されている。

### 【要点】

- 栄養塩類とベントスの生物多様性の関係として、栄養塩類が減少した東京湾では、動物プランクトンの種組成の変化により、出現種の変化が見られている。陸域負荷の低減により、海域ではベントスの種類数の増加が見られている。
- また、栄養塩類とベントスの生物生産性の関係として、栄養塩類が減少した伊勢湾では植物プランクトンの生物量の減少とアサリの現存量の減少に相関が見られたが、因果関係は明らかになっていない。
- 水温上昇とベントスとの関係として、大分県中津干潟では、干潟の地温が高いため稚貝が越夏できないとの知見も得られており、ベントスに対する気候変動の影響も示唆されている。
- 底層 D0 とベントスの生物の多様性及び生産性の関係として、大阪湾では貧酸素水塊の解消により生物多様性の向上が見られている。また、東京湾では低酸素状態による大型底生生物の幼生の定着の阻害等の可能性が示唆されている。
- 食害によるベントスの生物量への影響として、捕食生物による食害がアサリ稚貝の減少要因の一つであることが示唆されている。

栄養塩類とベントスの生物多様性の関係として、瀬戸内海全体では、陸域負荷低減に伴い、1990年代～2010年代にかけてベントス群集の健全性（M-AMBI<sup>2</sup>）が向上したとの知見が見られる[12]。大阪湾では、1993年、2003年に比較して2015年のベントス個体数、種類数が増加しており、陸域負荷低減に伴って減少した窒素・りん負荷量に対応する新たな水質・底質の平衡状態が実現しつつある可能性が示唆されている[13][14]。東京湾では、「水温の上昇、栄養塩類濃度の低下及びカイアシ類の密度の低下」と「小型・中型の底棲魚介類（シャコ、ハタタテヌメリ、マコガレイなど）の生息数の減少、大型の底棲魚介類（スズキおよびサメ・エイ類、コベルトフネガイ）の生息数の増加」との間に相関が見られているが、因果関係は明らかになっていない[17]。また、栄養塩類の濃度が比較的高い場合の知見であるが、洞海湾（福岡県北九州市）では、陸域負荷低減により、水質汚濁の著しい腐水域から富栄養域まで水質が改善され、アンモニア等により光合成が阻害される無生物状態が解消され、海藻類の生物多様性が向上し、さらに付着生物の生物多様性

<sup>2</sup> M-AMBI (Multivariate Marine Biotic Index : 多変量海洋生物指数) : 種数、群集構造を示す種多様度指数 (H') 及び AMBI 値の因子分析により計算される総合的な生物指数 (AMBI とはある場所における種組成から計算される生物指数)

が向上したとの報告がある[15][16]。

栄養塩類とベントスの生物生産性の関係として、伊勢湾では、植物プランクトンの生物量の減少による餌量不足に伴い、2014年以降にアサリの漁獲量が急減したとシミュレーションモデルで推定されている[18][19]。一方で、大分県中津干潟の事例では、干潟地表の地温が高いことで春季発生群の稚貝の越夏が困難との知見も見られており[21]、気候変動による漁獲量への影響も示唆される。また、伊勢湾では、季節別管理運転等の取組により、小型の珪藻類が増加して、アサリ稚貝が増加したという事例もみられる[20]。また、小型の珪藻類は、アサリにとって消化に良いとの報告がある[22]。また、室内実験において、DIN濃度が上昇すると端脚類の成長が促進されたという報告がある[23]。

底層D0とベントスの生物の多様性及び生産性の関係として、一般的に、底層D0が低いほど生態系の低次の生物から高次の生物に向けてのエネルギー転送率が低下するといわれている[24]。底層D0とベントスの生物の多様性及び生産性の関係性を示す具体例としては、大阪湾において、ベントスの生物多様性が向上したのは、りんの陸域負荷量が低下し、貧酸素水塊の規模が縮小したことが要因との知見がある[14]。食害によるベントスの生物量への影響として、伊勢湾において、ツメタガイ[26]、キタワセタガイ[27]、ヒトデ類[28]、魚類[29]によるアサリ稚貝の食害が報告されている。

## 2.3 遊泳生物（ネクトン）の生物の多様性及び生産性

### 【概要】

栄養塩類の濃度変化は、魚類の餌生物の量などに影響し、魚類の再生産に影響することが指摘されており、栄養塩類の濃度が線形的に生物の現存量に影響するとの知見もある。また、水温上昇は、ネクトンの生息域に影響を及ぼし、一部の高緯度域では移入による生物多様性の向上が予測される一方で、餌生物である動物プランクトンの種類が変化することで餌の質が低下し、魚類のバイオマス量が下がると予想された例も報告されている。また、播磨灘では水温上昇によるイカナゴの増減が確認された。

### 【要点】

- 栄養塩類とネクトンの生物多様性の関係として、海底地下水湧出による水質変化に伴う限定的な条件であり、因果関係は明らかになっていないが、栄養塩類の多い海域で雑食性魚類の生物多様性が高かったという知見がある。
- 栄養塩類とネクトンの生物生産性の関係として、大阪湾では、仔稚魚の個体数変動が、栄養塩類濃度・一次生産量・高次栄養段階の生物の現存量に線形的に応答するとの知見があり、栄養塩類の濃度低下は、魚類の餌生物の生物量などに影響し、卵サイズの変化等の魚類の再生産に影響したとの報告がある。
- イカナゴの生活史のシミュレーションによると、1990年代頃の栄養塩類濃度の上昇により資源量等が増加し、その際の水温変化による資源量の応答は比較的小さいと推定されている知見も見られるが、高水温にさらされた場合にイカナゴのへい死、成長阻害、再生産等に悪影響を及ぼすとの知見もある。
- 底層 D0 とネクトンの生物多様性の関係として、底層 D0 が高い海域よりも底層 D0 が低い海域でネクトンの生物多様性が低くなったとされる報告も見られる。
- 水温上昇とネクトンの生物多様性の関係として、水温上昇により生息域が北上してネクトンの生物多様性が向上する一方で、低緯度域では生物多様性が低下するとシミュレーションで予測された知見がある。また、水温上昇とネクトンの生物生産性の関係として、気候のレジームシフトや気候変動はネクトンまでの食物連鎖に影響を及ぼし、水温上昇に伴い動物プランクトンがカイアシ類からサルバ類等に変化することにより、餌の質が低下し、魚類の生物量が下がるとの知見がある。
- 水温や栄養塩類については、EwE (Ecopath with Ecosim) モデルを瀬戸内海東部に適用し、低次栄養段階生態系の構成要素の現存量を変化させた際の高次栄養段階生態系の応答について調べたところ、シラス、イカ類、マダイの応答性が他の生物群と比べて僅かに高いことが示唆された。
- イカナゴ EwE モデルを播磨灘に適用したところ、貧栄養化の進行に伴ってイカナゴは減少し、水温 1℃上昇で増加、2℃上昇で減少することが示された。

栄養塩類とネクトンの生物多様性の関係として、瀬戸内海の生口島（広島県尾道市）において、海底地下水湧出に伴う栄養塩類の供給が多い海域（溶存無機態りん等の濃度が高い傾向がある海

域) では、雑食性魚類の生物多様性が高かったという知見が得られている[30]。

栄養塩類とネクトンの生物生産性の関係として、大阪湾の仔稚魚の個体数変動は、海域に供給される DIN 濃度の低下、一次生産量の減少、高次栄養段階生物の現存量の減少として、現存量が線形的に応答する関係があると示唆されている[5]。瀬戸内海では、餌資源のプランクトンの減少に伴い、イカナゴの幼生の生存率の減少が示唆されるとともに[34]、水温上昇及び DIN 濃度の低下による植物プランクトンの減少に伴って冷水性の動物プランクトンが減少し、カタクチイワシの卵サイズの小型化やイカナゴの生物量の減少につながったとの報告がある[35]。瀬戸内海において、冷水性の魚類であるイカナゴの生活史をモデル化したシミュレーションによると、漁獲量の豊富であった 1990 年代頃の栄養塩類環境を想定した感度解析の結果として、栄養塩類の流入負荷増加により資源量や漁獲量の増加が推定されており、また、その際の水温変化による資源量の応答は小さい傾向にあると示されている[31]。なお、水温の上昇に伴い初期の生存率には影響しないが、幼生の成長が早くなると示唆されている[32]。一方で、イカナゴが夏眠期に高水温に曝された場合、温度耐性の低い個体のへい死、基礎代謝増加による成熟の阻害、雌のよう卵数の減少、雄の精巣重量の減少など、再生産に対する悪影響の可能性が示唆されている[33]。

溶存酸素量とネクトンの生物多様性の関係として、中国近海の東シナ海では、底生魚類の多様性指数と栄養塩濃度に負の相関があり、底層 DO と正の相関を持っている傾向が見られ[36]、また、珠江河口では、一部水域で溶存酸素が魚類の多様性の主要な制限因子とされている[37]。

水温上昇とネクトンの生物多様性の関係として、シミュレーションモデルによると気候変動によりネクトンの種の分布の変化が起き、生息域が北上することで、高緯度域ではネクトンの生物多様性が上昇し、低緯度域ではネクトンの生物多様性が低下すると予測された[38][39]。オーストラリア周辺では、熱波による水温の上昇に伴い、過去 10 年間で熱帯性魚類の個体数の減少も見られている[40]。

水温上昇とネクトンの生物生産性の関係として、備讃瀬戸では、水温が高い 2020 年度はイカナゴの仔魚期の成長率は上がる一方で、ERI (Egg production index) 及び RPE (Recruitment per ERI) <sup>3</sup> は低下[32]しており、再生産に影響があるとされる。太平洋 10 年規模振動をはじめとした気候のレジームシフトは、まぐろ類、いわし類などの水産有用種の漁獲量変動に関係しており、ボトムアップ的に生物量の変動に関わり、低次の生物から順に増加(減少)し、太平洋 10 年規模振動の周期に従い、変動するとされている[41][42][43]。また、地球温暖化が進行すると、海洋動物バイオマスの減少が大きくなることが示されている[44][46]。海洋生態系モデルによると、水温の上昇に伴ってカイアシ類等の雑食性プランクトンよりもサルパ類等のゼラチン質濾過食性プランクトンが増えて、魚類の餌の質が低下し、小型外洋魚類のバイオマス量が下がると予想されている知見が見られる[45]。また、海洋熱波が増加した場合には海藻等には生息の阻害など悪影響があるが、魚類は比較的影響が少なく、むしろ熱帯性魚類が温帯地域に新たに侵入することによる生息域の拡大があるとの知見もある[46]。

EwE (Ecopath with Ecosim) モデル<sup>4</sup>を瀬戸内海東部に適用し、低次栄養段階生態系の構成要素

<sup>3</sup> ERI (Egg production index) は卵生産指数で、RPE (Recruitment per ERI) は卵生産指数あたりの新規加入量(新規加入尾数等)

<sup>4</sup> EwE (Ecopath with Ecosim) モデルは低次栄養段階生態系の変化に対する高次栄養段階生態系の応答を調べるためのモデル。食物網モデルとして広く利用されている。

である植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスの現存量を変化させた際の高次栄養段階生態系の応答について調べたところ、栄養段階の違いによる応答性の違いについては顕著な差異は認められなかったが、各生物群の応答性の違いに注目すると、シラス、イカ類、マダイの応答性が、他の生物群に比べてわずかに高いことが示唆された[47]。

EwE モデルに、海洋生物の水温・栄養塩類に対する生理応答とイカナゴの生活史を組み込んだイカナゴ EwE モデルを開発し、播磨灘に適用した。本モデルによる水温・栄養塩類の感度解析の結果、貧栄養化が現状より進行するとイカナゴは減少し、水温 1℃上昇では増加、水温 2℃上昇では減少することが示された。また、イカナゴの減少は、餌の減少に伴うイカナゴ生産量の減少が主要因であると推察された[48]。

## 2.4 海藻類の生物の多様性及び生産性

### 【概要】

栄養塩類の海藻類への影響は、栄養塩類濃度の低下に伴って富栄養化が改善し、海藻類の種類数、湿重量が増加した例が見られる。また、水温変動による海藻類への影響として、急激な水温上昇の頻度増加による海藻の生育密度の減少、生物量の減少が示唆されている。さらに、水温上昇に伴う冬の植食性魚類の摂餌活動の長期化等により、食害が海藻の生産性に影響を与えている。

### 【要点】

- 栄養塩類と海藻類の生物多様性の関係として、栄養塩類の濃度が低下し、富栄養化の改善に伴って、海域で海藻類の紅藻類・褐藻類の種類数、湿重量が増加した例が報告されている。
- 水温変動と海藻類の生物多様性の関係として、急激な水温上昇（海洋熱波）の頻度増加と海藻の生育密度の減少について、海藻の現存量の減少との相関が示されている。また、水温変動と海藻類の生産性の関係については、瀬戸内海を対象としたシミュレーションモデルによって、水温上昇によりワカメの成長が阻害される水域が多いが、冬季に低水温となる地域では成長速度が増加する場合もあることが示唆されている。
- 食害による海藻類への影響として、水温上昇に伴う冬の植食性魚類の摂餌活動の長期化等により、海藻類は魚類による食害を受けている。
- なお、ワカメ・ノリ養殖については、栄養塩類と海藻類の生物生産性の関係として、ワカメの発胞体が設置される秋季の栄養塩類の濃度の低下で、ワカメの生育不良を招くとの知見がある。また、ノリの色落ちの要因として栄養塩類（DIN）の減少が示唆されている。また、ノリ育苗期の水温降下が鈍くなることで、ノリ芽の病害が発生しており、近年は拡大傾向とされている。

栄養塩類と海藻類の生物多様性の関係として、洞海湾（福岡県北九州市）では、腐水域が解消され、浮遊物質（SS）の減少及び透明度が増加したことにより湾内に生育する海藻類の紅藻類・褐藻類の種類数、湿重量が増加したとの報告がある[16]。

一方で、室内実験において、アンモニウム（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>）濃度が 100mg/L を超える水域では光合成が阻害され、アマモの生育が悪くなることが示されている[50]。

水温変動と海藻類の生物多様性の関係として、海洋熱波による急激な水温上昇の頻度増加が海藻類に影響を与えるとされ、西オーストラリアでは海洋熱波の頻度増加と海藻類の生育密度の減少が相関を示し、カリフォルニア沿岸では海洋熱波の頻度増加とジャイアントケルプのバイオマス量の減少の相関が示されている[49]。

水温変動と海藻類の生産性の関係として、シミュレーションによると、水温上昇による影響は状況によって異なり、多くの水域ではワカメの成長が阻害されたが、冬季に水温が低温となる地域では成長速度を加速させるポジティブな効果も示された。また、DIN 濃度が減少した場合にはほぼ全ての地域で平均総重量が減少する可能性が示唆された[51]。

なお、水産資源であるワカメ、ノリ等の養殖については、以下のような知見がある。

栄養塩類と海藻類の生産性の関係として、三陸沿岸のワカメ養殖施設に発胞体が設置される秋季において、栄養塩類の濃度が低下することでワカメの生育不良をまねき、ワカメの枯死に繋がるとされる[52][53]。また、瀬戸内海のノリ養殖場での栄養塩類(DIN)の減少がノリの色落ちの要因であると考えられている[2][54]。

また、ノリ育苗期の終盤である11月頃からの水温降下が鈍くなることで、ノリ芽の病害が発生しており、近年は拡大傾向との報告がある[55]。

食害による海藻類への影響として、水温上昇に伴う冬の植食性魚類の摂餌活動の長期化等により海藻類は魚類による食害を受けており、ノリ養殖場では、クロダイ[56]、カモ[57]などによる食害が報告されている。ワカメ養殖場では、クロダイ、ウマヅラハギ、ニジギンポ、メジナなどによる食害が報告されている[58]。

## 参考文献

- [1] Yoshida, K., Chiba, S., Ishimaru, T. (2011). Long-term variation in the wintertime diatom community structure in Tokyo Bay, Japan (1981-2000). *Plankton and Benthos Research*, 6(4), 195-205.
- [2] 多田邦尚, 西川哲也, 樽谷賢治, 山本圭吾, 一見和彦, 山口一岩, 本城凡夫 (2014). 瀬戸内海東部海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影響. *沿岸海洋研究*, 52(1), 39-47.
- [3] 山本圭吾 (2019). 大阪湾における植物プランクトンの長期変動と有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium tamarense* の大增殖. *沿岸海洋研究*, 56(2), 63-72.
- [4] 吉田陽一 (1973). 低次生産段階における生物生産の変化. 日本水産学会編集, 水圏の富栄養化と水産増殖, 恒星社厚生閣, 東京, 92-103.
- [5] 藤原建紀, 鈴木健太郎, 木村奈保子, 鈴木元治, 中嶋昌紀, 田所和明, 阿保勝之 (2022). 栄養塩類変動が内湾の生態系・生物生産に及ぼす影響: 大阪湾. *水環境学会誌*, 45(3), 145-158.
- [6] 東博紀, 横山亜紀子, 中田聡史, 吉成浩志, 越川海 (2020). RCP8.5 シナリオに基づく瀬戸内海の一次生産および水質への気候変動影響予測. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 76(2), I\_1147- I\_1152.
- [7] 東博紀, 吉成浩志, 中田聡史, 横山亜紀子, 越川海 (2021). RCP8.5 の気候変動が播磨灘の窒素フローに及ぼす影響. *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 77(2), I\_1099- I\_1104.
- [8] 東博紀, 越川海 (2024). 東京湾と伊勢・三河湾の貧酸素水塊を対象とした気候変動の影響と負荷管理の効果. *土木学会論文集*, 80(16), 23-16137.
- [9] Heneghan, R. F., Everett, J. D., Blanchard, J. L., Sykes, P., Richardson, A. J. (2023). Climate-driven zooplankton shifts cause large-scale declines in food quality for fish. *Nature Climate Change*, 13(5), 470-477.
- [10] 永尾謙太郎, 田中陽二, 中田喜三郎, 恩田充 (2015). 伊勢湾での詳細な観測データに基づく微生物を含めた物質循環解析. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 71 (2), I\_1411- I\_1416.
- [11] 永尾謙太郎, 中村由行 (2018). 伊勢湾における窒素・リン濃度に対する微生物ループの応答. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 74 (2), I\_1243- I\_1248.
- [12] Umehara, A., Borja, A., Ishida, A., Nakai, S., Nishijima W. (2021). Responses of the benthic environment to reduction in anthropogenic nutrient loading in the Seto Inland Sea (Japan), based on M-AMBI assessment. *Marine Environmental Research*, 105509.
- [13] 柳哲雄 (2018). 持続可能な沿岸海域管理法開発プロジェクトの概要. *沿岸海洋研究*, 56(1), 3-11.
- [14] 辻野睦, 阿保勝之, 樽谷賢治 (2016). 大阪湾における底質環境とマクロベントス群集—2003年と2011年. *日本水産学会誌*, 82(3), 330-341.
- [15] 梶原葉子, 山田真知子 (1997). 洞海湾における付着動物の出現特性と富栄養度の判定. *水環境学会誌* 20 (3), 185-192.

- [16] 梶原葉子, 山田真知子 (2019). 沿岸海域における付着動物の環境指標種としての検討. 水環境学会誌 Journal of Japan Society on Water Environment, 42 (2) , 53-65.
- [17] Kodama, K., Kuroki, M., Yamakawa, T., Shimizu, M., Kintsu, H., Horiguchi, T. (2024). Remarkable shifts in the megabenthic community structure over four decades in Tokyo Bay, Japan, in relation to environmental variations. Marine Environmental Research, 200, 106640.
- [18] 芝修一, 吉田司, 鶴島大樹, 蒲原聡, 田中義人, 鈴木輝明 (2021). アサリ (*Ruditapes philippinarum*) 資源動態に係る餌料環境解析手法としての個体成長モデルの比較検討. 海洋理工学会誌, 26 (2), 1-12.
- [19] 蒲原聡, 芝修一, 鶴島大樹, 鈴木輝明. (2021). 三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連. 水産海洋研究, 85 (2), 69-78.
- [20] 蒲原聡, 湯口真実, 栗田貴代, 鈴木輝明 (2022). 三河湾豊川河口域におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* の発生から見た流域下水道の栄養塩供給効果. 水環境学会誌, 45 (4) , 181-191.
- [21] 梶原直人, 手塚尚明, 浜口昌巳 (2017). 大分県中津干潟における地温とアサリ着底稚貝個体数の変動特性. 水産工学, 53 (3), 149-157.
- [22] 岡内正典 (2002). 海産魚介類の初期餌料用微細藻類の大量培養技術の開発. 日本水産学会誌, 68 (5), 625-628.
- [23] Sudo, H., Yoshida, G. (2021). Effects of a reduction in algal nitrogen content on survival, growth, and reproduction of an herbivorous amphipod. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 539, 151543.
- [24] Malone, C. T., Newton, A. (2020). The Globalization of Cultural Eutrophication in the Coastal Ocean: Causes and Consequences. Frontiers in Marine Science, 7, 670.
- [25] Kodama, K., Oyama, M., Kume, G., Serizawa, S., Shiraishi, H., Shibata, Y., Shimizu, M., Horiguchi, T. (2010). Impaired megabenthic community structure caused by summer hypoxia in a eutrophic coastal bay. Ecotoxicology, 19 (3) , 479-492.
- [26] 瀬川直治, 服部克也 (1997). 伊勢湾小鈴谷干潟におけるツメタガイによるアサリの食害. 愛知県水産試験場研究報告, 4, 41-48.
- [27] 瀬川直治, 菅沼光則 (1996). 漁場および飼育にみる捕食者キセワタガイと被食者アサリの関係について. 愛知県水産試験場研究報告, 3, 7-15.
- [28] 瀬川直治 (1997). 食害種によるアサリの減耗. 水産工学, 33 (3), 225-229.
- [29] 日比野学, 村田将之, 山田穂高 (2022). タイムラプスカメラを用いた潮下帯に移植されたアサリ稚貝を捕食する魚類の観察. 愛知県水産試験場研究報告, 27, 1-9.
- [30] Nhat, N. H., Saito, M., Onodera, S. I., Hamada, M., Hyodo, F., Nagare, H. (2024). Environmental DNA Reveals the Impact of Submarine Groundwater Discharge on the Spatial Variability of Coastal Fish Diversity. Biology, 13 (8), 609.
- [31] 丸尾哲平, 反田實, 田口浩一, 市川哲也, 橋口晴穂, 今尾和正 (2022). 大阪湾・播磨灘におけるイカナゴ生活史モデルの開発-低次栄養段階生態系モデルとの結合-. 海洋理工学会

- 誌, 27(1), 15-30.
- [32] Akai, N., Saito, M., Yoneda, M. (2024). Inter-annual variation in the relationship between early growth rate and potential survival of the western sand lance *Ammodytes japonicus* in the Seto Inland Sea in western Japan. *Fisheries Science*, 90(4), 591-605.
- [33] 赤井紀子, 内海範子 (2012). 瀬戸内海産イカナゴの死亡と再生産に及ぼす夏眠期における高水温飼育の影響. *日本水産学会誌*, 78(3), 399-404.
- [34] Fujita, T., Yamamoto, M., Kono, N., Tomiyama, T., Sugimatsu, K., Yoneda, M. (2021). Temporal variations in hatch date and early survival of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in response to environmental factors in the central Seto Inland Sea, Japan. *Fisheries Oceanography*, 30(5), 527-541.
- [35] Yoneda, M., Fujita, T., Yamamoto, M., Tadokoro, K., Okazaki, Y., Nakamura, M., Takahashi, M., Kono, N. Abo, K. Xinyu, G., Yoshie, N. (2022). Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan. *Progress in Oceanography*, 206, 102860.
- [36] Chang, N., Shiao, J., Gong, G. (2012). Diversity of demersal fish in the East China Sea: Implication of eutrophication and fishery. *Continental Shelf Research*, 47, 42-54.
- [37] Lai, H., Bi, S., Yi, H., Li, H., Wei, X., Wang, G., Guo, D., Liu, X., Chen, J., Chen, Q., Zhang, Z., Liu, S., Huang, C., Lin, L., Li, G. (2024). Characteristics of demersal fish community structure during summer hypoxia in the Pearl River Estuary, China. *Ecol Evol*, 14(7), e11722.
- [38] Cheung, W. W., Lam, V. W., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and fisheries*, 10(3), 235-251.
- [39] Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I. C., ... Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332), eaai9214.
- [40] Edgar, G. J., Stuart-Smith, R. D., Heather, F. J., Barrett, N. S., Turak, E., Sweatman, H., ... Bates, A. E. (2023). Continent-wide declines in shallow reef life over a decade of ocean warming. *Nature*, 615(7954), 858-865.
- [41] Drinkwater, K., Hunt, G., Lehodey, P., Lluch-Cota, S., Murphy, E. J., Sakurai, Y., Schwing, F., Beaugrand, G., Sundby, S. (2010). Climate forcing on marine ecosystems. *Marine ecosystems and global change*, 11-39.
- [42] Lan, K. W., Wu, Y. L., Chen, L. C., Naimullah, M., Lin, T. H. (2021). Effects of climate change in marine ecosystems based on the spatiotemporal age structure of top predators: A case study of bigeye tuna in the Pacific Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 8, 614594.
- [43] Wu, Y. L., Lan, K. W., Evans, K., Chang, Y. J., Chan, J. W. (2022). Effects of

- decadal climate variability on spatiotemporal distribution of Indo-Pacific yellowfin tuna population. *Scientific Reports*, 12(1), 13715.
- [44] Tittensor, D. P., Novaglio, C., Harrison, C. S., Heneghan, R. F., Barrier, N., Bianchi, D., ... Blanchard, J. L. (2021). Next-generation ensemble projections reveal higher climate risks for marine ecosystems. *Nature Climate Change*, 11(11), 973-981.
- [45] Heneghan, R. F., Galbraith, E., Blanchard, J. L., Harrison, C., Barrier, N., Bulman, C., ... Tittensor, D. P. (2021). Disentangling diverse responses to climate change among global marine ecosystem models. *Progress in Oceanography*, 198, 102659.
- [46] Lotze, H. K., Tittensor, D. P., Bryndum-Buchholz, A., Eddy, T. D., Cheung, W. W., Galbraith, E. D., ... Walker, N. D. (2018). Ensemble projections of global ocean animal biomass with climate change. *BioRxiv*, 467175.
- [47] 吉江直樹 (2022) . 栄養塩循環から高次栄養段階生態系までを取り扱う統合モデルの現状と課題, 沿岸海洋研究, 60 (1), 41-50.
- [48] 屋敷朋也, 西川哲也, 相馬明郎 (2022) . Ecopath with Ecosim モデルによるイカナゴ資源の栄養塩・温度依存性の解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) ,78 (2), I\_895-I\_900.
- [49] Smale, D. A., Wernberg, T., Oliver, E. C., Thomsen, M., Harvey, B. P., Straub, S. C., ... Moore, P. J. (2019). Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, 9(4), 306-312.
- [50] Wang, H., Tang, X., Chen, J., Shang, S., Zhu, M., Liang, S., Zang, Y. (2021). Comparative studies on the response of *Zostera marina* leaves and roots to ammonium stress and effects on nitrogen metabolism. *Aquatic Toxicology*, 240, 105965.
- [51] Onitsuka, G., Yoshida, G., Shimabukuro, H., Takenaka, S., Tamura, T., Kakehi, S., ... Higashi, H. (2024). Modeling the growth of the cultivated seaweed *Undaria pinnatifida* under climate change scenarios in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Applied Phycology*, 1-14.
- [52] Kakehi, S., Naiki, K., Kodama, T., Wagawa, T., Kuroda, H., Ito, S. (2018). Projections of nutrient supply to a wakame (*Undaria pinnatifida*) seaweed farm on the Sanriku Coast of Japan. *Fisheries Oceanography*, 27(4), 323-335.
- [53] Kaga, S., Kakehi, S., Naiki, K., Kodama, T., Wagawa, T., Segawa, S., ... Ito, S. (2022). Seasonal variations in nutrient concentrations in Sanriku coastal waters, Japan: Effects on *Undaria pinnatifida* (Laminariales; Phaeophyta) seaweed farms. *Regional Studies in Marine Science*, 54, 102484.
- [54] 上野智貴, 山本民次, 福岡浩一 (2022). 完熟鶏糞肥料を主原料とする海域用施肥材の開発. *水環境学会誌*, 45(2), 67-73.
- [55] 谷田圭亮 (2022). 瀬戸内海の水温上昇が生物に与える影響-兵庫県におけるノリ養殖-. *瀬戸内海*, 79, 19-21.
- [56] 吉田圭介, 潘是均, 横山貴洋, 山下泰司, 上田勇輝, 杉野博之, 小島崇 (2024). ノリ養殖漁場でのクロダイの食害把握に向けた水中画像の深層学習と教師データ基準の検討. *土木*

学会論文集, 80(16), 23-16150.

- [57] 手塚尚明, 梶原直人, 小栗一将, 喜安宏能, 渡部祐志, 塩田浩二 (2023). 撮影手法を用いたノリ・アオノリ養殖場における食害種の出現記録. 日本水産学会誌, 89(1), 34-48.
- [58] 梶原慧太郎, 高倉良太, 五利江重昭 (2024). 兵庫県瀬戸内海域におけるワカメ養殖育苗期の食害実態把握と食害防除カゴの開発. 日本水産学会誌, 90(6), 539-547.