

2021 年度

瀬戸内海の環境保全・創造に係る
研究委託事業

栄養塩類から高次生態系を含む
シミュレーションモデルの構築

瀬戸内海環境保全知事・市長会議

1 研究背景及び目的

近年、瀬戸内海の水質改善と逆行する形で水産資源の漁獲量は減少しており、その要因として栄養塩濃度の減少が懸念されているが、栄養塩濃度と水産資源量との関連性は明らかになっていない。本研究では、栄養塩濃度と水産資源量の関連性の解明と、「豊かな瀬戸内海」の実現に資することを目的として、栄養塩から高次生態系までを包括した統合シミュレーションモデル（以降、統合モデルと呼ぶ）を構築するために課題を整理した。そして、統合モデルのプロトタイプを提案し、瀬戸内海における基礎的なシミュレーションを実施した。本研究は、令和元年から令和2年度にかけての2年間の研究に令和3年度の1年間の研究を追加したものであるため、ここでは、先の2年間の研究成果も合わせて報告する。

2 研究内容、実施方法

瀬戸内海にすぐに応用可能な数値モデルが存在しないため、モデル構築に向けた勉強会を総合的な沿岸生態系研究検討会として実施した。2年間で4回開催した勉強会では、生態系モデルを専門とする研究者だけではなく、低次生態系、高次生態系、魚類生理生態、水産資源、陸水生態系など関連する幅広い分野から8名の研究者を招聘し、ご講演いただくと共に意見交換を実施し、統合モデル構築の可能性について検討を行った。3年目には、統合モデルのプロトタイプモデルとして、生物地球化学モデル（物理過程＋低次生態系過程）モデル（以降 Biogeochemical の略称である BGC モデル）と高次生態系過程を取り扱う食物網モデルを組み合わせた統合モデルについて検討を行った。BGC モデルとしては、比較的複雑なプランクトン機能群モデル eNEMURO (Yoshie et al. 2011) を瀬戸内海に適用し、栄養塩濃度を変化させた際の低次生態系の応答について解析した。食物網モデルとしては、広く利用されている食物網モデル Ecopath with Ecosim (Polovina, 1984、以降 EwE モデル) を瀬戸内海に適用し、低次生態系構成要素の植物・動物プランクトンなどを変化させた際の高次生態系応答について解析した。

3 実施結果および得られた知見

1年目には、これまでの栄養塩濃度と水産資源の関連性、瀬戸内海における水産資源変動の要因、世界の統合モデル、陸水の統合モデル、瀬戸内海のモデルに関する研究について検討した。栄養塩と水産資源の関連性については、世界のさまざまな沿岸域や湖沼での観測データをもとにした研究から、栄養塩濃度と漁獲量の間には大まかな正の相関関係が認められるが、同程度の栄養塩環境においても資源量には最大で千倍程度の変動幅があり (e.g. Nixon 1982, Downing et al. 1990)、単純に栄養塩濃度から漁獲量を推定する場合には非常に大きな不確実性を含んでいることが示された。また、栄養塩濃度が増加し、ボトムアップ効果により植物量と基礎生産量が増加したとしても、それが魚類の餌料である動物プランクトンの変動には繋がらず、魚類資源量の増加には繋がらない事例があることが示された (McQueen et al. 1989)。これらから、本事業の背景にあ

る栄養塩変動が水産資源変動とリンクしている可能性は示唆されたが、この大きな変動幅の要因やボトムアップ効果がどの程度魚類の餌料環境変化に影響するのかについて解明しない限り、行政や漁民が求める精度の漁業変動予測は難しいことが明らかとなった。瀬戸内における水産資源変動とその要因に関する研究からは、カタクチイワシの経年変動には、漁業の影響よりも環境の影響の方が大きいことや、資源変動に大きく影響する初期生残過程については未解明な部分が多いことが示された（河野ら私信）¹⁾。また、この初期生残過程には、水温や魚類餌料としてメソ動物プランクトン現存量との関連性が重要であることが示唆された（e.g. 高橋 2001, Zenitani et al. 2009, 2011）。世界の統合モデルに関する研究からは、大きく分けると3つのタイプの統合モデルがあり、それぞれに問題点があることが明らかとなった（Ito et al. 2018）。1つ目の BGC モデルと IBM（個体群動態モデル）モデルを組み合わせたタイプの統合モデルでは、物理過程から低次生産過程が最も現実的に即しており、高次生態系については定性的な再現性は高いが定量性が低いことが問題である（e.g. Rose et al. 2015）。2つ目の Atlantis (Fulton 2014) のような極めて複雑な統合モデルでは、モデル運用に高度な技術的習熟が必要であり、数多くの不確実性の高い生理パラメータを内在しているため原理的に計算結果の不確実性が高いことが問題である。3つ目の多魚種間の相互作用に焦点を絞った食物網モデル（EwE モデル, Polovina, 1984）では、プログラミング技能が無くとも利用でき高次生態系の再現性は高いが、物理・栄養塩・低次生産過程が適切に導入されていないことが問題である。陸水（琵琶湖）での複雑さが異なる統合モデルを用いた研究からは、栄養塩負荷の変動に対する計算結果がモデル中の生態系構造や生理パラメータの違いにより大きく異なる場合があり、計算結果の不確実性が高いことが示された（佐藤・早川 2019）。瀬戸内海におけるモデル研究としては、食物網モデルを用いて瀬戸内海の食物網構造を再現し、漁法別漁獲制限の影響を評価した研究（亘 2015）や、初期生残過程を適切に考慮したカタクチイワシ仔稚魚 IBM を用いた研究（Zenitani et al. 2012）など、非常に先進的な研究がこれまでに実施されていた。

2年目には、統合モデル構築に特に重要な問題点の絞り込み、魚類の初期生存過程と餌料としての重要な動物プランクトンの詳細について検討した。特に重要な問題点としては、低次と高次生態系を繋ぐ鍵種である動物プランクトンについて、モデル中で簡素に表現されていることと、観測データや生理・生態の知見が不足していることが指摘された（Ito et al. 2010）。これは、動物プランクトンは、生物地球化学分野と水産学分野の境界領域に位置する研究対象であり、両分野において研究数が不足していることに起因する。モデル中の動物プランクトン表現法の適切な改良のためには、さらなる観測や実験による知見の集積が必要不可欠である。統合モデルの構造としては、先に挙げた BGC モデルと IBM を組み合わせたタイプでは、1～2種の重要魚種を取り扱うことは可能だが、数十種の魚種を取り扱う際には計算コストが飛躍的に増大するため現実的ではない。そのため、高次生態系の総合的な理解のためには、BGC モデルと多魚種間の相互作用に特化した食物網モデルとを組み合わせる用いることが現実的である。食物網モ

デルや IBM を適切に運用するためには、資源調査による現存量、胃内容物組成による食性、飼育実験による餌消費速度などの生理パラメータといった多岐にわたる観測が必要であり、研究分野の枠を超えた魚類・水産資源研究者らとの連携が重要である。また、モデルによる食物網構造の計算結果を、アミノ酸安定同位体比を用いた各生物の栄養段階と餌起源の推定値を用いて検証可能となったため (e.g. Chikaraishi et al. 2009)、今後はこれらを測定できる分析化学者との連携が重要となるだろう。水産資源変動に重要な初期生残過程については、著名な 3 つの仮説について検討した。1 つ目はマッチミスマッチ仮説と呼ばれ、仔魚と餌の出現タイミングのミスマッチや量的なミスマッチが生じることにより生残率が下がるというものである (e.g. Cushing 1975)。2 つ目は成長関連仮説と呼ばれ、仔稚魚期の成長速度が速いほど遊泳能力・摂餌能力・逃避能力に優れ、初期生残率が上昇するというものである (e.g. Takasuka et al. 2003)。3 つ目は母性効果と呼ばれ、親魚の年齢や肥満度が高いほど卵の質が高まり、孵化後の体長が大きく・成長が早く・遊泳能力に優れ、初期生残率が上昇するというものである (e.g. Green 2008)。この 3 つの仮説に関わる環境要因が変化することにより、初期生残率が変化し、資源への加入量が大きく変化すると考えられた (米田ら私信)²⁾。この初期生残に関与する成長段階に応じた餌料としての動物プランクトンの詳細について検討した。これまでの多くの研究から、カタクチイワシとイカナゴの餌料生物については、次のようにまとめられた (e.g. Okazaki et al. 2019)。仔稚魚の食性は、季節や海域によらず特定の動物プランクトンに依存しており、主にカラヌス目 (Paracalanus) やポエキロストム目 (Oncaea, Corycaeus) のカイアシ類を摂餌する傾向がある。一方で、キクロプス目 (Oithona) カイアシ類は見つけにくく食べにくい行動様式をとるため、環境中に多く存在したとしても摂餌されにくい (e.g. Henriksen et al. 2007)。前期仔魚は、カイアシ類のノープリウス幼生を摂餌し、稚魚期以降はカイアシ類だけではなく尾虫類・オキアミ類・その他の甲殻類幼生・翼足類なども捕食するが、生涯を通して最も重要な餌料生物としては、カラヌス目カイアシ類であることが明らかとなった (岡崎ら私信)³⁾。このことからカラヌス目カイアシ類の変化が魚類の初期生残過程に影響する可能性が示唆された。カイアシ類の群集組成の時空間変動について検討したところ、過去 50 年間の出現時期の経年変化から、カラヌス目カイアシ類 Paracalanus の出現時期が遅れ、同目の Calanus も出現時期が限られる傾向があることが明らかとなり、近年、春から夏にかけて、仔稚魚の餌料環境が悪化している可能性が示唆された (田所ら私信)⁴⁾。

3 年目には、まず、栄養塩濃度の変化に対する低次生態系の応答を調べるためのモデル解析を実施した。一般的に、低次生態系の構造は、栄養塩環境により大きく異なることが知られている。亜熱帯海域のような栄養塩濃度が低い環境では、基礎生産者として貧栄養環境に適応した小型植物プランクトンが優占し、微小動物プランクトン、小型動物プランクトンを経由した長い食物連鎖を経て、魚類の主な餌料であるカイアシ類へと物質が供給される。一方、亜寒帯海域のような栄養塩濃度が高い環境では、富栄養環境に適応した大型植物プランクトンの珪藻類が優占し、この珪藻類を直接カイアシ類が捕

食するため、魚の餌料へ効率よく物質が供給される（図1）。これは、低次生態系構造の違いにより、同じ基礎生産量であったとしても、魚類の餌料環境が大きく変わることの意味している。そこで、本研究では、4種類の栄養塩、4種類の植物プランクトン、4種類の動物プランクトン、3種類のデトリタスを予報変数とし、先の低次生態系の構造変化を取り扱うことができる BGC モデル eNEMURO を用いることにした（図2）。瀬戸内海における栄養塩変動と水産資源変動との関連性を考慮するために、近年カタクチイワシシラス漁獲量が激減して問題となっている瀬戸内海中央部の燧灘において、eNEMURO を適用した。一般的に、瀬戸内海のカタクチイワシの資源変動には、太平洋系群などの外部からの移流による影響が考えられるが、燧灘のカタクチイワシにおいては地場発生系群がその大多数を占めているため、主に燧灘の環境変化により資源変動が生じると考えられている（Fujita et al. 2021）。シラスの豊漁年（2005 年）と不漁年（2011 年）に香川県による浅海定線調査により観測された栄養塩（DIN および DIP）濃度（阿保ら 2015）をモデルに与え、モデルにより再現された低次生態系の違いについて解析を行った。燧灘におけるシラス漁獲量減少の主要因は、5～6 月生まれの春期発生群の減少によるものであることから（Fujita et al. 2021）、特に、春季の低次生態系応答について解析を行った。その結果、春期の栄養塩濃度変動に低次生態系は応答し、春季の珪藻ブルームの規模が大きく変動し、それを餌とするカイアシ類の現存量が春期に大きく変化する可能性が示唆された（図3）。このことは、春期のカタクチイワシ親魚の肥満度を変化させ、その親魚が産む卵の質を変化させ、その卵から孵った仔魚の初期生残率を大きく左右し、最終的にはカタクチイワシのシラス資源量変動を支配している可能性が示唆された（Yoneda et al., submitted）。

栄養塩と低次生態系構造の関係

栄養塩環境に応じ構造変化⇒ 仔稚魚への物質伝達変化



図1 栄養塩環境と低次生態系構造の関係

低次生態系モデルeNEMURO

PICESの標準生態系モデルNEMUROを拡張したeNEMURO (4N-4P-4Z-3D) を用いて栄養塩変動に対する低次生態系応答を計算

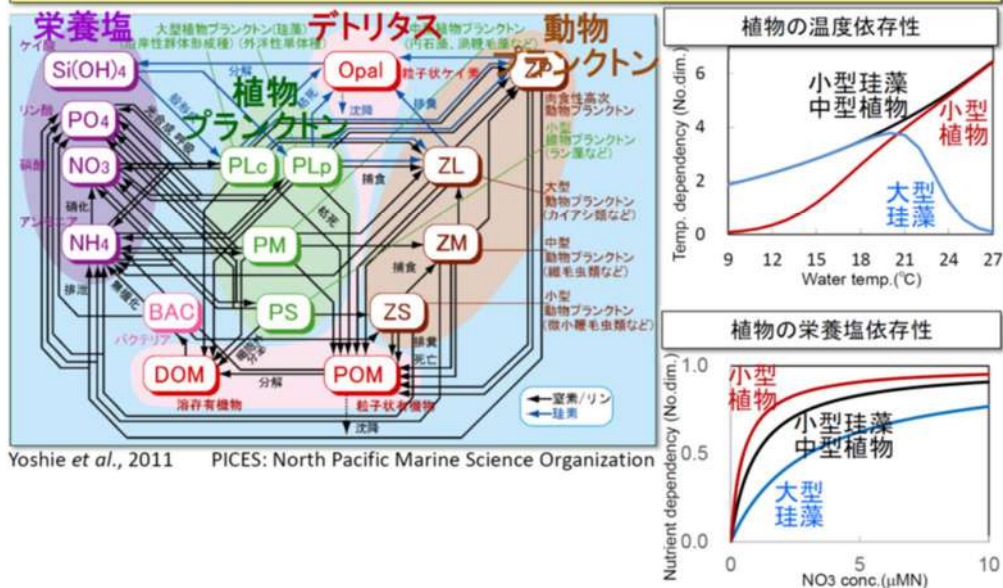


図2 低次生態系モデル eNEMURO の概略

燧灘の低次生態系シミュレーション

春の栄養塩減少に応じ、春のケイ藻・カイアシ類が減少する可能性を示唆

豊漁年(2005年)と不漁年(2011年)の春季生物量の比較

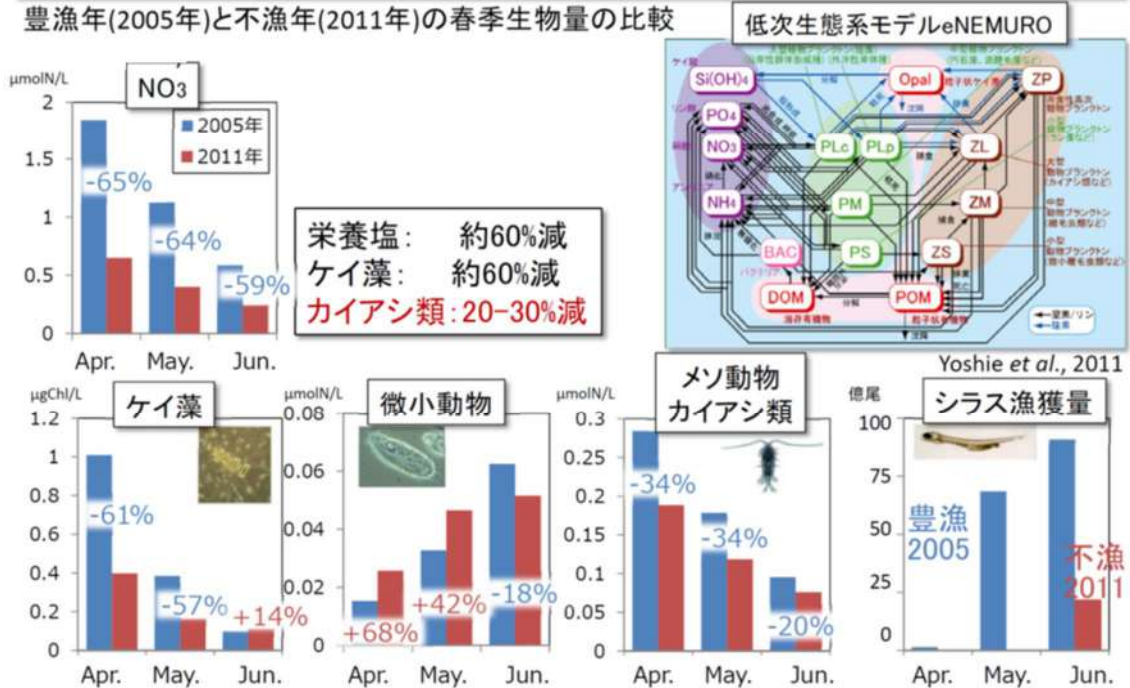


図3 燧灘におけるシラス豊漁年と不漁年の栄養塩変動に伴う春季の低次生態系応答

次に、低次生態系の変化に対する高次生態系の応答を調べるためのモデル解析を実施した。食物網モデルとしては、広く利用されている食物網モデル EwE モデル (EwE 6.6.5 released in Dec. 2020) を瀬戸内海東部 (大阪湾および燧灘を含む) に適用し、低次生態系構成要素の植物プランクトン、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生態系応答について調べた。EwE モデルについては、これまでに運用経験がなかったため、マニュアルの精読と文献調査によりモデルの理解を深めると共に、専門家である水産研究・教育機構水産資源研究所の巨真吾グループ長に師事しながら、数値解析を実施した。EwE モデルのうち、静的な定常状態を仮定したモデルである Ecopath モデルを使用し、山本 (2017) に記載された 2013 年における瀬戸内海東部の 23 群の生物群について現存量・各種生理パラメータ・食物組成を用いてモデルを駆動した (表1、2)。その結果、23 群の生物群からなる低次から高次を含む生態系構造を再現することができた (図4)。

	2013						
	TL	B	P/B	Q/B	Y	P/Q	EE
G1 マイワシ	2.92	0.34	1.08	10.61	0.07	0.10	0.30
G2 カタクチイワシ	2.97	10.53	2.78	12.44	2.23	0.22	0.33
G3 シラス	3.02	4.50	5.88	19.60	2.25	0.30	0.47
G4 イカナゴ	3.00	2.70	2.01	10.50	1.54	0.19	0.54
G5 アジ類	3.85	0.87	1.52	7.73	0.39	0.20	0.46
G6 サバ類	3.84	0.61	1.08	8.01	0.10	0.13	0.32
G7 ヒラメ	4.00	0.09	0.88	4.02	0.03	0.22	0.48
G8 カレイ類	3.16	0.55	0.61	5.03	0.24	0.12	0.78
G9 マダイ	3.43	0.43	1.00	5.67	0.19	0.18	0.47
G10 クロダイ	3.19	0.45	1.07	5.11	0.20	0.21	0.43
G11 サワラ	4.02	0.34	1.44	6.19	0.12	0.23	0.28
G12 プランクトン食魚類	2.83	1.34	1.23	8.53	0.12	0.14	0.24
G13 ベントス食魚類	3.02	3.55	1.11	5.52	0.93	0.20	0.59
G14 魚食性魚類	4.02	0.77	0.96	5.28	0.63	0.18	0.89
G15 甲殻類	2.48	2.18	2.18	9.37	0.29	0.23	0.85
G16 イカ類	3.80	0.14	3.42	13.68	0.25	0.25	0.81
G17 タコ類	2.88	0.24	2.44	9.76	0.45	0.25	0.88
G18 ベントス	2.16	21.63	3.63	12.10		0.30	0.49
G19 大型二枚貝	2.00	0.56	0.79	3.16	0.06	0.25	0.71
G20 クラゲ	2.86	16.44	0.66	2.12		0.31	0.16
G21 動物プランクトン	2.02	16.64	44.75	149.46		0.30	0.48
G22 植物プランクトン	1.00	56.23	94.91				0.38
G23 デトライタス	1.00	70.40					0.15

表1 2013 年における Ecopath モデルに用いた各生物群の栄養段階 (TL)、現存量 (B, t/km2)、現存量あたりの生産量 (P/B)、現存量あたりの摂取量 (Q/B)、漁獲量 (Y, t/km2)、摂取量あたりの生産量 (P/Q)、 Ecotrophic efficiency (EE)、正体：入力パラメータ、斜体：推定パラメータ

被食者/捕食者	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20	G21
G1 マイワシ											0.005			0.005		0.005					
G2 カタクチイワシ					0.290	0.250	0.500		0.080	0.090	0.550		0.005	0.450		0.250					
G3 シラス					0.500	0.500	0.315		0.100	0.090	0.280		0.040	0.411		0.350					
G4 イカナゴ					0.020	0.040	0.130		0.070	0.040	0.100		0.010	0.050		0.070					
G5 アジ類					0.010	0.010					0.015			0.015		0.005					
G6 サバ類						0.010					0.005			0.010		0.005					
G7 ヒラメ							0.005							0.002							
G8 カレイ類															0.001						
G9 マダイ														0.002							
G10 クロダイ														0.002							
G11 サワラ											0.005			0.001							
G12 プランクトン食魚類					0.010	0.010					0.010		0.005	0.010		0.005					
G13 ベントス食魚類							0.030	0.010	0.010	0.020	0.005		0.050	0.010	0.010	0.020					
G14 魚食性魚類											0.005			0.005							
G15 甲殻類					0.010				0.010	0.350	0.200	0.010	0.005	0.050	0.002	0.020	0.100	0.300			
G16 イカ類						0.010					0.010		0.003	0.010		0.010					
G17 タコ類							0.010					0.002					0.010				
G18 ベントス					0.020			0.970	0.340	0.350		0.100	0.700	0.010	0.339	0.100	0.350	0.050			
G19 大型二枚貝										0.010				0.010		0.010					
G20 クラゲ												0.001	0.001							0.050	
G21 動物プランクトン	0.800	0.950	1.000	0.980	0.140	0.180						0.690	0.015	0.005	0.020	0.080		0.100		0.750	0.020
G22 植物プランクトン	0.100	0.050		0.020								0.100						0.100	0.800	0.050	0.800
G23 デトライタス							0.010	0.050	0.200			0.104	0.119		0.600		0.330	0.750	0.200	0.150	0.180

表2 2013 年における Ecopath モデルに用いた各生物群の食物組成 (DC)

モデルによる生態系構造の再現

Ecopathを用いて、東部瀬戸内海における植物・動物プラ・水産資源データを導入し、23群の生物による低次から高次を含む生態系構造を推定

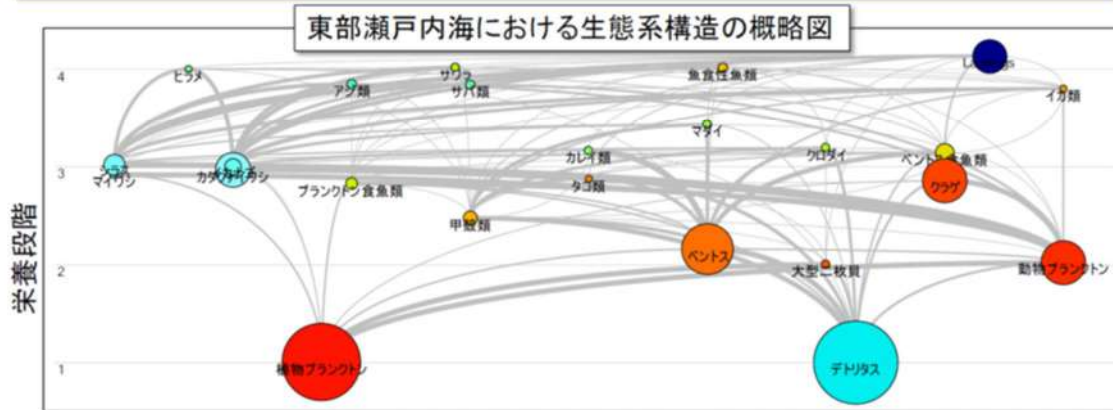


図4 Ecopath により計算された瀬戸内海東部の高次生態系構造

この Ecopath による静的な定常状態にある生物の現存量を初期値とし、モデル中の現存量や漁獲圧の時間変化を与えた際の動的な生態系変化を計算する Ecosim モデルを用いて、植物プランクトンと動物プランクトン現存量を 10 年間で初期値の 90%、95%、105%、110%になるように毎月徐々に変化させた際の各生物群の応答を計算した（図5）。そして、10 年目の結果について、現存量を変化させなかった標準実験（Ctrl.）の結果と比較した。

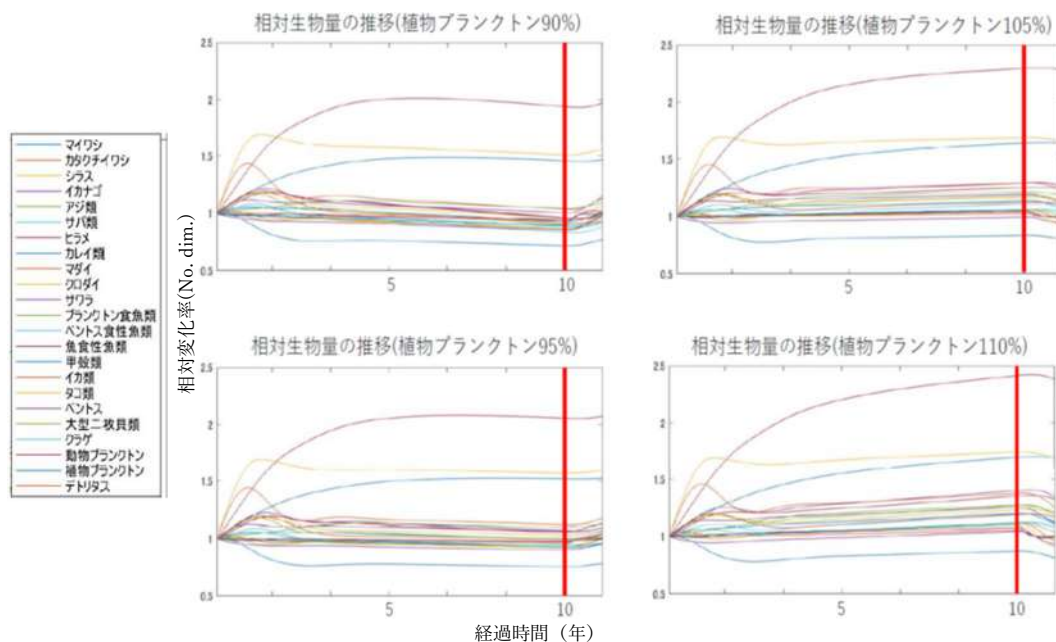


図5 Ecosim により計算された植物プランクトン現存量の変化に対する各生物群の応答

その結果、生態系全体としては、動物プランクトンの変動よりも植物プランクトンの変動に対して応答性が高いこと（図6）が示唆された。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（図7）。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僅かに高いことなどが明らかとなった（図8）。

低次生態系変動による生態系全体の応答

Ecosimを用いて、低次生態系（植プラ・動プラ）変動に伴う生態系全体の応答を解析 ⇒ **動プラより植プラの変動に対して感度が高い**

Ecopathによる静的定常状態を初期値とし、Ecosimにより植物・動物プラ現存量を10年間で初期値の90%、95%、105%、110%になるように動的に変化させた際の10年目の現存量を比較した。

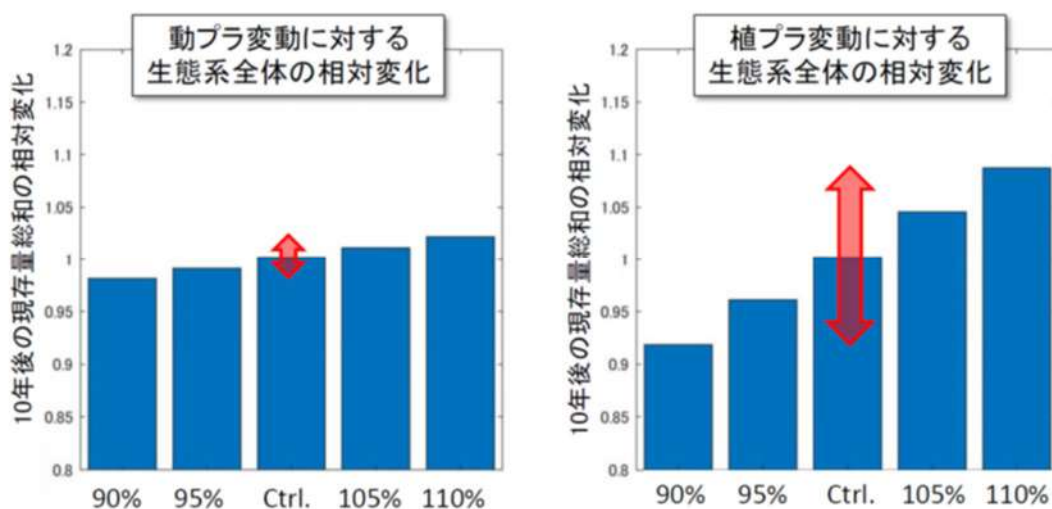


図6 低次生態系変動に対する生態系全体の応答

低次生態系変動による各栄養段階の応答

Ecosimを用いて、植・動プラの変動に伴う各栄養段階の応答を解析
⇒ 栄養段階の違いによる顕著な応答性の差異は認められない

Ecopathによる静的定常状態を初期値とし、Ecosimにより植物・動物プラ現存量を10年間で初期値の90%、95%、105%、110%になるように動的に変化させた際の10年目の現存量を比較した。

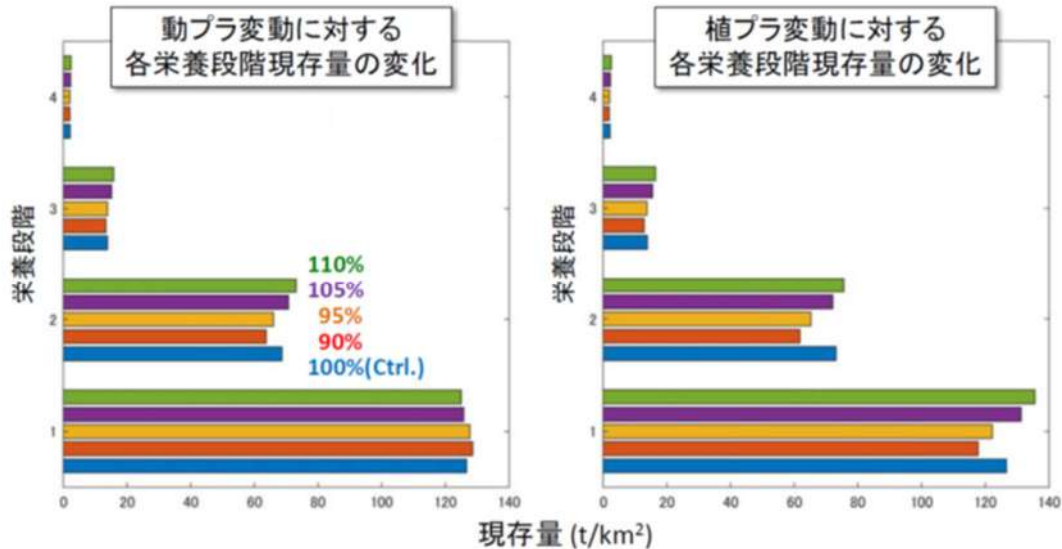


図7 低次生態系変動に対する各栄養段階の応答

低次生態系変動による各生物の応答

Ecosimを用いて、植・動プラの変動に伴う各生物の応答を解析
⇒ シラス、イカ類、マダイの応答感度が僅かに高い可能性を示唆

生物名	栄養段階	動物プラ変動に対する相対変化				植プラ変動に対する相対変化				
		90%	95%	105%	110%	90%	95%	105%	110%	
14魚食性魚類	TL	zp0.9	zp0.95	zp1.05	zp1.10	phy0.9	phy0.95	phy1.05	phy1.10	
11サワラ	4.02	0.88	0.94	1.05	1.11	0.88	0.94	1.06	1.13	濃赤色ほど 増加率大
7ヒラメ	4.00	0.86	0.93	1.06	1.13	0.87	0.94	1.07	1.13	
5アジ類	3.85	0.87	0.93	1.06	1.12	0.89	0.95	1.06	1.11	
6サバ類	3.84	0.86	0.93	1.06	1.13	0.84	0.92	1.09	1.17	
16イカ類	3.80	0.85	0.92	1.07	1.14	0.83	0.91	1.09	1.18	濃青色ほど 減少率大
9マダイ	3.43	0.87	0.93	1.06	1.12	0.83	0.92	1.09	1.18	
10クロダイ	3.19	1.01	1.00	1.00	0.99	0.93	0.96	1.04	1.08	
8カレイ類	3.16	0.98	0.99	1.01	1.02	0.87	0.94	1.07	1.13	
13ベントス食魚類	3.14	0.98	0.99	1.01	1.02	0.88	0.94	1.06	1.13	
3シラス	3.02	0.85	0.92	1.06	1.13	0.82	0.91	1.10	1.19	
4イカナゴ	3.00	0.91	0.95	1.04	1.09	0.88	0.94	1.06	1.13	
2カタクチイワシ	2.97	1.00	1.00	1.00	1.00	0.88	0.94	1.06	1.12	
1マイワシ	2.92	0.92	0.96	1.03	1.07	0.89	0.95	1.06	1.11	
17タコ類	2.88	1.03	1.01	0.99	0.98	0.90	0.95	1.05	1.10	
20クラゲ	2.86	0.90	0.95	1.04	1.09	0.86	0.93	1.07	1.15	
12プランクトン食魚類	2.83	1.02	1.01	0.99	0.99	0.93	0.97	1.04	1.07	
15甲殻類	2.48	1.01	1.00	1.00	1.00	0.90	0.95	1.05	1.10	
18ベントス	2.16	1.02	1.01	0.99	0.98	0.90	0.95	1.05	1.10	
21動物プランクトン	2.02	0.89	0.94	1.04	1.10	0.89	0.94	1.06	1.12	
19大型二枚類	2.00	0.90	0.95	1.04	1.09	0.93	0.97	1.03	1.07	
22植物プランクトン	1.00	1.02	1.01	0.99	0.98	0.90	0.95	1.05	1.10	
23デトリタス	1.00	1.01	1.01	1.00	0.99	0.95	0.98	1.02	1.05	

図8 低次生態系変動に対する各生物群の応答

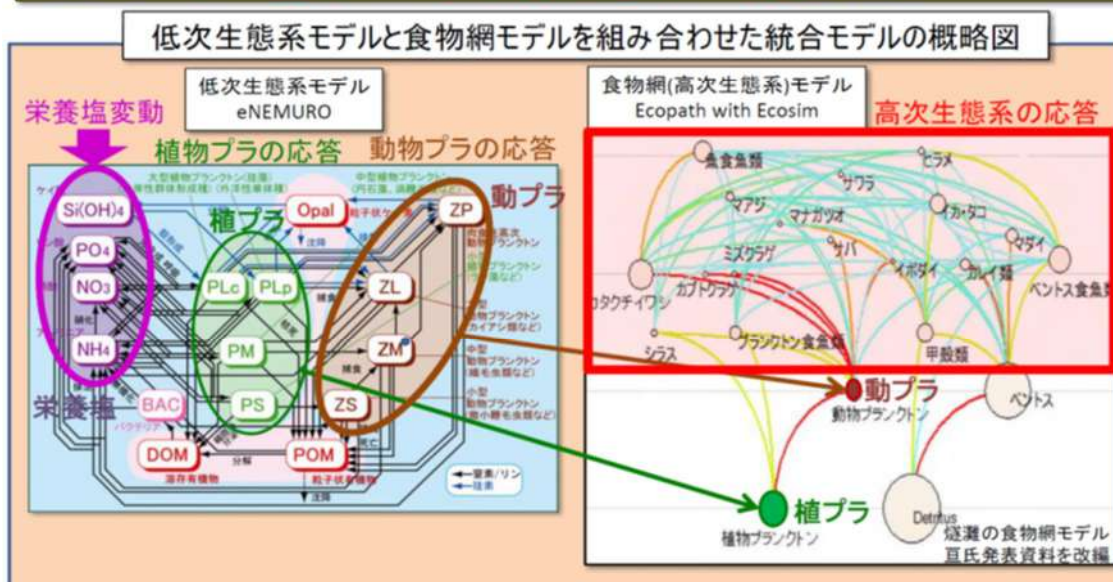
先に挙げた低次生態系モデル eNEMURO では、植物プランクトンを4群、動物プランクトンを4群、デトリタスを3群に分けて取り扱っており、植物プランクトンや動物プランクトンの総量ではなく、大型珪藻やカイアシ類といった生態系変動の鍵を握る生物群の変動が重要であることが示唆された。しかし、現状の EwE モデルでは、それらを分けて取り扱っていないため、今後はそれらをどのように取り扱うべきかという問題点が浮かび上がった。この問題の解決に向けて2つの手法が考えられる。一つ目は、EwE モデル内でそれらの生物群を分けて個別に取り扱う手法である。この手法は、技術的には可能であるが、表2に示された高次の各生物群の食物組成について新たに調査・設定する必要があり、そのような観測データが極めて不足していることが問題となる。二つ目は、複数種ある植物プランクトンや動物プランクトンについて、高次生態系への重要性に応じて重み付け加算した上で EwE に与える手法である。今後は、まず、大型珪藻やカイアシ類が重要であることは自明であるため、それらの生物群への重み付けを大きくし EwE モデルに与えることを試してゆきたい。

4 まとめと今後の方向性

現状の生態系モデルは、信頼性が確立された定説には至っておらず、利用可能な最上の科学 (Best Available Science: BAS) の段階にある (伊藤ら私信)⁵⁾。これは、今から数十年前の気象予報モデルの黎明期に、モデルによる天気予報の精度が低く当たらなかった状況に似ている。気象予報モデルのような生態系モデルの発展には、モデル開発の努力と同時に、分野横断的に動物プランクトン・魚類・水産資源の研究者らと密に連携し、観測・室内実験・モデルを融合させ未解明の生物過程を少しずつ解明してゆくことが必要不可欠である。現在の体系的理解に基づいて栄養塩から高次生態系を含む統合モデルを構築することは可能であり、BGC モデルと食物網モデルを組み合わせた統合モデルが現実的であると考えられた (図9)。

プロトタイプの統合モデルの提案

低次生態系モデルにより栄養塩変動に対する植・動物プラの応答を計算
それらをEcopath型モデルに与え高次生態系への影響を評価



BGC モデルにより、水温・流動場・栄養塩供給量（陸・外洋・海底の3つの供給源を考慮）などの環境変動に対する植物プランクトンや動物プランクトンの応答を計算し、それらを食物網モデルに与えることにより、対象海域における多魚種間の相互作用を考慮した生態系全体への影響評価がある程度は可能だろう。しかし、現状ではモデルの不確実性は高く、行政が求める精度には達していない可能性があるため、モデルを政策に適用する際には、科学者と行政担当者が密に連携し、モデルの不確実性が政策の信頼性を毀損するリスクがあることを十分に注意した上で利用すべきである。

最後に、今後の不確実性の少ない統合モデル構築に向けて、必要不可欠な知見とそれに関わる技術や取り組みについて、以下のようにまとめた。

- (1) 植物および動物プランクトンの種類別時空間分布・生理生態の知見
現場型顕微鏡と AI 自動画像判別、環境 DNA による時空間分布解析
- (2) 魚類の初期生残過程と環境要因との関連性の知見
耳石・眼球水晶体の超微量安定同位体を用いた環境履歴復元
- (3) 高次生態系の食性を含む食物網構造の知見
胃内容物を含めた環境 DNA による網羅的な生態系構造解析
- (4) 沿岸特有の影響（藻場・干潟・底質・地形など）の知見
市民や NPO と協力した広域高頻度沿岸環境モニタリング

補注

- 1) 瀬戸内海研究会議「瀬戸内海的环境保全・創造に係る研究 - 栄養塩類の働きを踏まえた高次生態系までの統合シミュレーションモデル構築のための課題整理-」勉強会招待講演者 河野悌昌 (国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産資源研究所 グループ長)
- 2) 瀬戸内海研究会議「瀬戸内海的环境保全・創造に係る研究 - 栄養塩類の働きを踏まえた高次生態系までの統合シミュレーションモデル構築のための課題整理-」勉強会招待講演者 米田道夫 (国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産技術研究所 主任研究員)
- 3) 瀬戸内海研究会議「瀬戸内海的环境保全・創造に係る研究 - 栄養塩類の働きを踏まえた高次生態系までの統合シミュレーションモデル構築のための課題整理-」勉強会招待講演者 岡崎雄二 (国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産資源研究所 主任研究員)
- 4) 瀬戸内海研究会議「瀬戸内海的环境保全・創造に係る研究 - 栄養塩類の働きを踏まえた高次生態系までの統合シミュレーションモデル構築のための課題整理-」勉強会招待講演者 田所和明 (国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産資源研究所 主幹研究員)
- 5) 瀬戸内海研究会議「瀬戸内海的环境保全・創造に係る研究 - 栄養塩類の働きを踏まえた高次生態系までの統合シミュレーションモデル構築のための課題整理-」勉強会招待講演者 伊藤幸彦 (東京大学大気海洋研究所 地球表層圏変動研究センター 准教授)

引用文献

- 阿保勝之・阿部和雄・中川倫寿・辻野睦 (2015) 瀬戸内海ブロック浅海定線調査 観測 40 年成果 (海況の長期変動), 独立行政法人 水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所, pp256, 95-131.
- 佐藤祐一・早川和秀 (2019) 栄養塩負荷の増減が琵琶湖の高次生態系に与える影響: モンテカルロ法を用いた食物連鎖モデルによる解析, 水環境学会誌, 42(4), 133~143.
- 高橋素光 (2001) カタクチイワシの仔稚魚期における成長・発達様式と資源加入機構, 東京大学学位論文, 1-107.
- 山本昌幸 (2017) 沿岸海洋食物連鎖系における栄養塩物質の循環に関する研究, 2016 年度瀬戸内海研究会議研究成果報告書, 102-137.
- 亘真吾 (2015) 瀬戸内海周防灘における Ecopath with Ecosim による多魚種・多漁業を一括対象とした資源解析, 水産海洋研究, 79(4), 255-265.
- Chikaraishi, Y., Ogawa, N.O., Kashiya, Y., Takano, Y., Suga, H., Tomitani, A., Miyashita, H., Kitazato, H., and Ohkouchi, N. (2009) Determination of aquatic food-web structure based on compound-specific nitrogen isotopic composition of amino acids. *Limnology and Oceanography: Methods*, 7(11), 740-750.

- Cushing, D. H. (1975) Marine ecology and fisheries. United Kingdom Cambridge University Press.
- Downing, J. A., C. Plante, and S. Lalonde (1990) Fish production correlated with primary productivity, not the morphoedaphic index, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47, 1929-1936.
- 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. *Fish. Oceanogr.* 30, 527–541.
- Fulton E. A., A. D. M. Smith, D. C. Smith and P. Johnson (2014) An integrated approach is needed for ecosystem based fisheries management: insights from ecosystem-level management strategy evaluation, *PLoS One*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084242>.
- Green, B. S. (2008) Maternal effects in fish populations. *Adv. Mar. Biol.*, 54, 1–105.
- Henriksen, C. I., E. Saiz, A. Calbet and B. W. Hansen (2007) Feeding activity and swimming patterns of *Acartia grani* and *Oithona davisae* nauplii in the presence of motile and nonmotile prey. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 331: 119–129
- Itoh S., A. Takeshige, A. Kasai and S. Kumura (2018) Modeling the coastal ecosystem complex: present situation and challenge, *Fish. Sci.*, 84, 293-307.
- Ito S., N. Yoshie, T. Okunishi, T. Ono, Y. Okazaki, A. Kuwata, T. Hashioka, K. A. Rose, B. A. Megrey, M. J. Kishi, M. Nakamachi, Y. Shimizu, S. Kakehi, H. Saito, K. Takahashi, K. Tadokoro, A. Kusaka, H. Kasai (2010) Application of an automatic approach to calibrate the NEMURO nutrient-phytoplankton-zooplankton food web model in the Oyashio region, *Progr. Oceanogr.*, 87, 186-200
- McQueen, D. J., M. R. S. Johannes, J. R. Post, T. J. Stewart and D. R. S. Lean (1989) Bottom - Up and Top - Down Impacts on Freshwater Pelagic Community Structure, *Ecol. Monogr.*, 59 (3), 289-309.
- Nixon S. W. (1982) Nutrient dynamics, primary production and fisheries yields of lagoons, *Oceanol. Acta*, 357-371.
- Okazaki Y, Tadokoro K, Kubota H, Kamimura Y, Hidaka K (2019) Dietary overlap and optimal prey environments of larval and juvenile sardine and anchovy in the mixed water region of the western North Pacific. *Mar Ecol Prog Ser* 630:149-160.
- Polovina, J. J. (1984) An overview of the ECOPATH model. *Fishbyte*, 2, 5–7.
- Rose K. A., J. Fiechter, E. N. Curchitser, K. Hedstrom, M. Bernal, S. Creekmore, A. Haynie, S. Ito, S. Lluch-Cota, B. A. Megrey, C. A. Edwards, D. Checkley, T. Koslow, A. McClatchie, F. Werner, A. MacCall and V. Agostini (2015) Demonstration of a fully-coupled end to- end model for small pelagic fish using sardine and anchovy in the California Current, *Prog. Oceanogr.*, 138, 348–380.

- Takasuka, A., Aoki, I., Mitani, I. (2003) Evidence of growth-selective predation on larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Sagami Bay. Marine Ecology Progress Series, 252: 223–238.
- Yoshie, N., X. Guo, N. Fujii, and T. Komorita (2011) Ecosystem and nutrient dynamics in the Seto Inland Sea, Japan. In Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry Vol.5, Modeling and Analysis of Marine Environmental Problems, ed. by K. Omori, X. Guo, N. Yoshie, N. Fujii, I. C. Handoh, A. Isobe, and S. Tanabe, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 39-49
- Yoneda, M., T. Fujita, M. Yamamoto, K. Tadokoro, Y. Okazaki, M. Nakamura, M. Takahashi, N. Kono, T. Matsubara, K. Abo, G. Xinyu, and N. Yoshie (submitted) Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan. *Pro. Oceanogr.*,
- Zenitani, H., N. Kono, Y. Tsukamoto and R. Masuda (2009) Effects of temperature, food availability, and body size on daily growth rate of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* larvae in Hiuchi-nada, *Fish. Sci.*, 75, 1177–1188.
- Zenitani, H., N. Kono and Y. Tsukamoto (2011) Simulation of copepod biomass by a prey-predator model in Hiuchi-nada, central part of the Seto Inland Sea: Does copepod biomass affect the recruitment to the shirasu (larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus*) fishery? , *Fish. Sci.*, 77, 455–466.
- Zenitani, H. and N. Kono (2012) Daily growth rate model of Japanese anchovy larvae *Engraulis japonicus* in Hiuchi-nada Sea, central Seto Inland Sea, *Fish. Sci.*, 78, 1001–1011.