

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1368 March 2020

新たな魚類生態系モデルによる低次生態系と漁獲量の解析

井上 徹教
小室 隆

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
1.1 背景	4
1.2 既存モデルの概要	4
1.3 目的	4
2. 既往の研究事例	4
2.1 既往の魚類予測モデル	5
2.2 魚類（漁業）の予測モデルに関する既往の分類	5
2.3 流動モデルと低次元生態系モデルを基本とした魚類モデルの適用例	13
3. 魚類モデルの構築	16
3.1 魚類モデルの概要	16
4. 計算結果	29
4.1 浮遊系	29
4.2 底生系	30
4.3 魚類モデル（カタクチイワシ，時系列変化）	31
4.4 魚類モデル（カタクチイワシ，発育段階変化）	33
4.5 計算値と実測値の比較	33
4.6 今後の改良点	34
5. おわりに	34
参考文献	35

Analysis of Lower Trophic Ecosystem Model and Fish Catches Using a New Fish Ecosystem Model

Tetsunori INOUE*
Takashi KOMURO**

Synopsis

In the inner bays such as Tokyo Bay and Ise Bay in Japan, a large amount of nutrients had flowed from rivers into the inner bay in 1950-1970s. As the results, eutrophication had been progressed in the inner bays. Eutrophication were mainly caused by industrial development and population increase in the river basin. Although the government regulated total emissions, the environmental standard value has not been achieved, and the COD is still high in Tokyo Bay, Ise Bay, and Osaka Bay.

In recent years, a decrease of fish catches in many inner bays due to the occurrence of anoxia and oligotrophication has been regarded as a problem. This problem has not been clarified yet. In order to resolve the problem, field survey of the entire inner bay is necessary. However, it is unrealistic because of limited budget, staffing, and period. On the other hand, it is possible to reproduce and predict the environmental change in the bay using a simulation model that incorporating several field observation data. In this study, we aimed to develop a fish ecosystem model that can incorporated into the Ise Bay Simulator which based on the lower trophic ecosystem model and the flow dynamic model.

According to the results, we confirmed that the fish ecosystem model could be well-incorporated into the Ise Bay simulator. This model can not only calculate the bay environment but also predict and reproductions fish dynamics and resources. The results for anchovy (*Engraulis japonicas*) in Ise Bay shows that they gathered at the spawning area during the April and that they escape from the anoxic water occurred in the central part in summer. We also compared the calculation results with the fish catch data. As the results, there were varied depending on the species, but the reproducibility was relatively good. It is necessary to improve the calculation accuracy using a parameter tuning systems. In addition, we plan to collect data using a fish finder data and environmental DNA method.

Key Words: Fish ecosystem model, Ise Bay simulator, inner bay, fishery resources

* Head, Marine Environmental Information Group, Marine Information and Tsunami Department

** Associate Researcher, Marine Environmental Information Group, Marine Information and Tsunami Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5107 Fax : +81-46-844-1274 e-mail: inoue-t@p.mpat.go.jp

新たな魚類生態系モデルによる低次生態系と漁獲量の解析

井上 徹教*・小室 隆**

要 旨

日本国内の東京湾や伊勢湾などの内湾では 1950-1970 年代に内湾に流入する河川流域内において、産業の発展や人口増加により、多量の栄養塩が流入し、富栄養化が進行した。その後総量規制により一定の成果は見られたが、人口が集中している東京湾、伊勢湾、大阪湾では環境基準値を達成するには至っておらず、依然として COD が高い状態で推移している。

一方近年では、貧酸素水塊の発生や貧栄養化などにより、内湾における漁獲量の低下が問題視されている。漁獲量の減少は富栄養化や貧酸素水塊の発生などが予測されるが、根本的な原因の解明には至っていない。原因を解明するためには、内湾全域を対象とした現地観測が必須となるが、内湾全域を網羅するような調査は予算・人員・期間に限られるため非現実的である。そこで、内湾数カ所における現地調査データを組み込んだシミュレーションモデルを使用することで内湾全域における環境変動を再現・予測することが可能となる。本研究においては低次生態系モデルと流動モデルをベースとした伊勢湾シミュレーターに組み込むことが可能な魚類生態系モデルを開発することを目的とした。

本研究の結果、魚類生態系モデルが伊勢湾シミュレーター内で動作することを確認した。本モデルは魚類の動態・資源量予測のみならず、同時に内湾環境を再現することができる。伊勢湾内のカタクチイワシを対象にした計算結果からは、4月の産卵期には産卵場所に集まる行動を見せ、夏季には湾中央部で発生した貧酸素水塊発生から逃れるような行動が再現された。また、伊勢湾内で漁獲された魚種の漁獲量データと計算結果を比較した結果、種によって異なるものの、比較的良い再現性を持った種もあった。このことから計算精度を高める必要があるため、パラメータチューニングシステムを用いて計算精度の向上を目指す。また、現時点においてモデルに使用している魚類データは漁獲量だけのため、今後は魚探データや種構成を解明できる環境 DNA を用いてデータの蓄積を図っていく。

キーワード：魚類生態系モデル，伊勢湾シミュレーター，内湾，漁業資源

* 海洋情報・津波研究領域 海洋環境情報研究グループ長

** 海洋情報・津波研究領域 海洋環境情報研究グループ専任研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5107 Fax：046-844-1274 e-mail: inoue-t@p.mpat.go.jp

1. まえがき

1.1 背景

日本国内の東京湾や伊勢湾などの内湾では戦後の高度経済成長期における産業の発展、人口増加に伴い、多量の栄養塩が河川から内湾に流入し、富栄養化が進行した。その後総量規制により一定の成果は見られたが、人口が集中している東京湾、伊勢湾、大阪湾では環境基準値を達成するには至っておらず、依然としてCODが高い状態で推移している。そのためさらなる栄養塩負荷の削減が求められる。

近年では、富栄養化のみならず貧酸素水塊の発生や貧栄養化などにより、内湾における漁獲量の低下が問題視されている（一色，2018）。例えば、図-1に示す東京湾内の漁獲量は東京湾内では1965年から1970年の間に大幅に減少し、横ばい状態が続いていたが、1989年以降、再び減少傾向にあり、高度経済成長期後に漁獲量の低下が見られる。また、伊勢湾における漁獲量について図-2に示す。伊勢湾では昭和55-61年頃を境に漁獲量が減少し、平成5年頃より横ばいで推移したが、回復の傾向はみられていない。漁獲量の急激な落ち込みは、富栄養化や貧酸素水塊の発生などが予測されるが根本的な原因の解明には至っていない。

1.2 既存モデルの概要

本研究に先立って、筆者らは流動モデルと低次生態系モデルをベースとした沿岸生態系シミュレーションモデル（以下、伊勢湾シミュレーター）の開発を行ってきた。沿岸海域における従来の数値モデルは計算コストの関

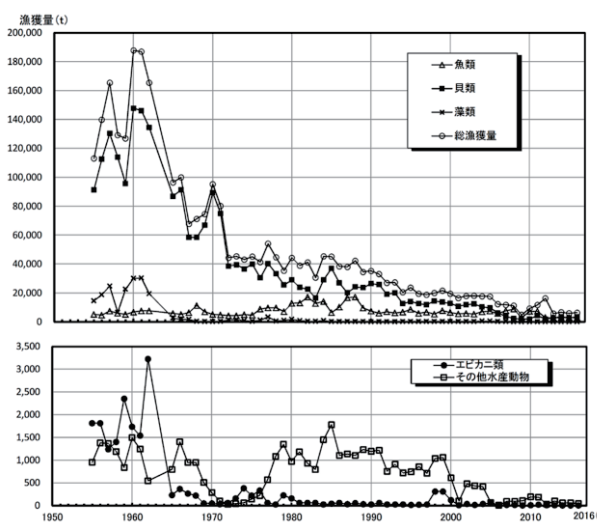


図-1 東京湾における漁獲量の変化
(東京湾環境情報センターHP より引用)

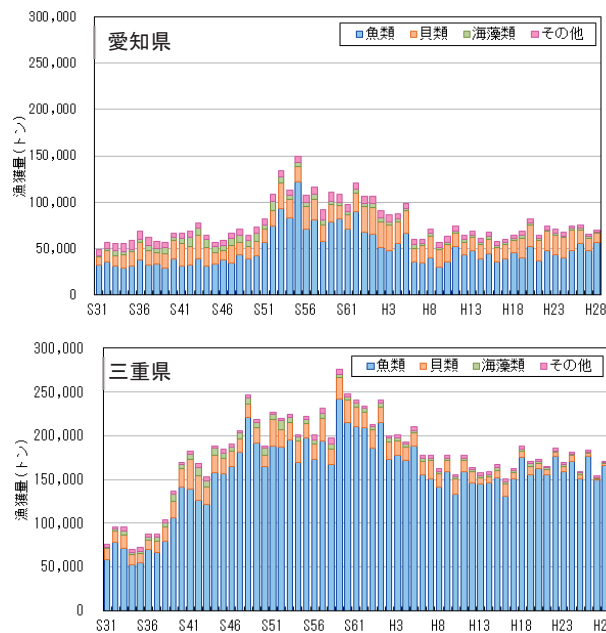


図-2 伊勢湾における漁獲量の変化
(伊瀬湾環境データベースより引用)

係から、静水圧近似を仮定したモデルが一般的であった（佐々木ら，1996；村上ら，2007）。しかしながら、湧昇流や河川水の流入、密度流などは、静水圧近似では再現が困難であることが指摘されている（木下，2000；Heggelund *et al.*, 2004）。近年では、沿岸海域のシミュレーションに非静水圧モデルを用いた事例も報告されており、その有用性が認識されている（岡田ら，2000；殿城・佐藤，2001；富田・柿沼，2005；中山・岡田，2006；大見ら，2008）。以上の背景を踏まえて、伊勢湾シミュレーターの開発においては、非静水圧による沿岸域に適した新しい三次元流動モデルを開発してきた（井上ら，2015）。

また近年、水域生態系においては、従属栄養性細菌が溶存態有機物の分解や窒素やリン等の栄養塩類の循環を支配するなど、水中の物質循環や食物網で重要な役割を担っていることが明らかになっており（Azam *et al.*, 1998），1980年代以降微生物を介した腐食連鎖の存在が明らかにされてきた。腐食連鎖では細菌が栄養基質として溶存態有機物（Dissolved organic matter; DOM）を消費することが物質循環の起点とみることができる。さらに細菌を原生動物が捕食し、原生動物を大型動物プランクトンが捕食するという経路により、溶存態有機物が高次の栄養段階へと繋がっていく。すなわち、古典的生食連鎖では植物プランクトン→動物プランクトンという大型生物の捕食—被食関係のみが注目され、細菌はデトリタスが無機化する分解者という位置づけであったが、腐食連鎖では細菌が溶存態有機物を高次の捕食者へ繋ぐ鎖環として、食物

網において重要な役割を果たす。以上の背景を踏まえて、伊勢湾シミュレーターでは腐食連鎖についても考慮している（井上ら、2015）。

1.3 目的

漁獲量の低下原因を解明するためには、内湾全域を対象とした現地観測が必須となる。しかし、内湾全域を網羅するような調査は予算・人員・期間等の制約によりおのずと限界がある。その代替的な手段として、シミュレーションモデルを使用することで内湾全域における環境変動を再現・予測することが期待される。しかし、内湾において、漁獲対象種のような生物をモデル化した事例はほとんどない。

そこで本研究では、既存の流動モデルと低次生態系モデルである伊勢湾シミュレーターに組み込むことができる魚類生態系モデルを開発し、試算による漁獲量の再現を行うことを目的とする。

本研究において開発する魚類生態系モデルは沿岸域における開発事業を実施する際に用いることを想定している。開発するモデルは開発事業の影響や緩和策などについて、シミュレーションによる検討を可能とすることを目指している。

2. 既往の研究事例

本章では、魚類を表現する数値モデルに関する既往の文献を整理するとともに、伊勢湾における魚類動態予測モデル構築の参考とする。

2.1 既往の魚類予測モデル

魚類（漁業）の予測モデルは、単一資源の管理を対象とした個体群動態モデルが基本的なモデルとなっているものが多いが（岸田ら、1998）、近年は、漁業活動や大規模気候変動が海洋生態系に影響を及ぼし水産資源や生態系の機能の低下を招くことが懸念されるようになり、生態系を考慮した漁業管理の手法等の研究開発が盛んに行われるようになってきている。欧米では単一資源管理から生態系に基づく漁業管理への転換が検討されている。また、生物多様性保全の観点からも海からの恵み（生態系サービス）を持続的に享受するために生態系を適切に維持する生態系アプローチが提唱されている。

まず2.2では、様々な観点から開発されてきた魚類（漁業）の予測モデルの研究事例を整理した。整理するにあたり、主にPlaganyi (2007) により分類されている魚類（漁業）モデルを参考としている。Plaganyi (2007) による分類では、対象とする生態系をどのレベルまでモデル化するか、生

態系における何に着目するか、どのように評価するか等で分類されている。これらを参考にし、これまで開発されているモデルの特徴や適用事例について整理した。

つぎに2.3では、今回扱う伊勢湾シミュレーションモデルのような流動モデル、低次生態系モデルに魚類の個体群動態モデルを組み込んだモデルに焦点を当てる。まず、魚類モデルの基本的なモデルでもある個体群動態モデルの特徴について概説し、今回構築したモデルも含め現在までに開発されている流動モデルと低次生態系モデルをベースとしたものに組み込まれた魚類モデルの研究事例を示した。

2.2 魚類（漁業）の予測モデルに関する既往の分類

Plaganyi (2007) により分類されているものを中心に、これまで開発されてきた魚類の予測モデルを組み込んだ漁業モデル・生態系モデルの代表的なものを表-1に示す。ここに示すようにa) Whole ecosystem models, b) Dynamic system models, c) CCAMLR models, d) Dynamic multispecies models, Minimum Realistic Models, e) Individual-based models, f) Bioenergetic modelsの6つに分けて整理した。

a) Whole ecosystem models

Whole ecosystem modelsでは、対象とする海域の生態系に対して生態系内の1次生産者から、頂点捕食者までの全構成種を考慮したモデルとしたものである。一般的にかなり単純化したモデルとなっている。このモデルの代表例として、生態系における安定状態を予測するECOPATH (Polovina, 1984; Christensen and Pauly, 1992) がある。例えば、Polovina (1984) は、北西ハワイ諸島のフレンチフリゲート瀬での生態系を対象として、イタチザメ、鳥などの上位捕食者から植物プランクトンといった1次生産者までを扱い、年平均の生物量や生産・消費量を評価している。また、ECOPATHでの安定状態から動的な予測を行うものとして、ECOSIM (Walters *et al.*, 1997), ECOPATH with ECOSIM (Christensen *et al.*, 2000; Christensen and Walters, 2002, 2004) が提案されている。

b) Dynamic system models

Dynamic system modelsは、海洋物理モデルなど力学的外力と、生物的外力との相互作用を表現しようとしたモデルである。ここであげられるモデルとして、まず、SEPODYM/SEAPODYM (Lehodey, 2001; Lehodey, *et al.*, 2003) やNEMURO.FISH (Okunishi *et al.*, 2011; Kishi *et al.*, 2011) がある。SEAPODYMは、太平洋における3種類のマグロの動態を予測するモデルとなっており、移動を

ADVECTION-DIFUSION (移流拡散) により表現し、遊泳行動を *habitat quality* 関数によってモデル化している。

NEMURO.FISHは、後述する Individual-Based Models (IBM) によって、例えば西北太平洋におけるマイワシの動態予測 (Okunishi *et al.*, 2011) を行っている。これらは基本的に生物量を議論するモデルとなっている。

これに対して、Dynamic system modelsに分類されるものでも、ERSEM (Baretta, *et al.*, 1996), SSEM (Sekine *et al.*, 1991), IGBEM (Fulton, 2001; Fulton *et al.*, 2004), ATLANTIS (Fulton *et al.*, 2004, 2005) は、生物地球化学的な議論をしたモデルであり、これらを特に Biogeochemical models と分類している。例えば、これらのモデルの代表的なものである ATLANTIS は、ERSEM 等をベースとした物質循環モデルとエネルギー代謝モデルを組み合わせたモデルとなっており、オーストラリアの海域における禁漁区域や保護区の設定による影響などの管理戦略評価を行うモデルとなっている。また、後述する Individual-Based Models (IBM) に分類されている OSMOSE (Shin and Cury, 2001, 2004), INVITRO (Gray *et al.*, 2006) も Dynamic system models に分類することができるモデルである。

c) CCAMLR models

CCAMLR models は、南極海生態系を対象としたモデルであり、南極において多くの種の食資源となっているオキアミの漁業が生態系に与える影響を評価するなどのために開発されているものである。南極海生態系は生物相が単純なため、生態系のほとんどのものをカバーすることから、Whole ecosystem models に分類することもできるものもある。しかし、ここでは CCAMLR (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources) が開発しているモデルとして、Whole ecosystem models とは分けて分類している。現在、開発されているモデルとして、KPFM (Watters *et al.*, 2006), EPOC (Constable, 2005, 2006), SMOM (Plagányi and Butterworth, 2006a, 2006b) などがある。元々、Butterworth and Thompson (1995) によって、オキアミ資源の変動が捕食者側に与える影響を一方向でのみ考慮したケースと捕食者の消費量の違いを含む相互作用を考慮したケースをそれぞれ検討するために Predator-prey models が開発されている。KPFM (Watters *et al.*, 2006) は、南極半島周辺を管理区域 (SSMU) ごとに分けてオキアミの漁獲量を検討したものであり、この区域間の移動やオキアミと捕食者の空間的構造を考慮したものである。このモデルの特徴として、不確実性を考慮するためにモンテカルロシミュレーションを用いている。EPOC (Constable, 2005, 2006) は、KPFM と同様、南極海のオキ

アミを対象とした空間的な構造を予測するモデルとなっており、海洋、海氷、大気、底生生物の環境を示すための地形が考慮できるものとなっている。SMOM (Plagányi and Butterworth, 2006a, 2006b) では、オキアミと捕食者 (ペンギン、オットセイ、魚、クジラ) の動態モデルに、Mori and Butterworth (2004, 2005, 2006) のモデル式を拡張したものをを用いており、15の管理区域 (SSMU) を扱うモデルとなっている。

d) Dynamic multispecies models, Minimum Realistic Models

Dynamic multispecies models, Minimum Realistic Models は、対象とする生態系から重要な相互作用関係のある必要最低限の種を取り出してモデル化したものである。オリジナルの Minimum Realistic Model (MRM) は、Punt and Butterworth (1995) により提案されており、南アフリカ西岸での2種のヘイクとオットセイを対象にオットセイの除去によるヘイクの漁業影響を評価したのものとなっている。ESAM (Livingston and Methot, 1998; Hollowed *et al.*, 2000; Tjelmeland and Lindstrøm, 2005) は、年齢別の資源量評価モデルに対して捕食による死亡を陽的にモデル化している。例えば、Livingston and Methot (1998), Hollowed *et al.* (2000) は、アラスカ湾のスケトウダラを対象として、捕食による死亡を漁業による捕獲死亡と同じとして定義し、3種の捕食者 (2種のカレイ科とアシカ) の影響を組み込んでいる。MSVPA and MSFOR (Pope, 1991; Sparre, 1991; Vinther, 2001) も、生態系内の中から対象とする種を限定したモデルであり、年齢別の捕獲量と魚の胃の内容物のデータを用いて、漁獲による死亡と捕食による死亡を評価したものである。自然死を年齢や時間依存が組み込まれた捕食者モデルによるものと他の要因に分けているモデルとなっている (ただし、捕食者による影響に着目しており、他の影響を無視したものとなっている)。例えば、Vinther (2001) は、バルト海、北海での多種の魚類 (タラ、ニシン等) の年齢別の資源量を評価している。MULTSPEC (Bogstad *et al.*, 1997) は、多種の生物に対する地域、年齢、長さ構造を予測するモデルであり、バレンツ海における多種の生物 (シシャモ、ニシン、タラ、タテゴトアザラシ、ミンククジラ) の個体群動態モデルとなっている。GADGET (Trenkel *et al.*, 2004; Begley and Howell, 2004; Taylor *et al.*, 2004; Taylor and Stefansson, 2004; Begley, 2012), SEASTAR (Tjelmeland and Lindstrøm, 2005), MSM (Jurado-Molina *et al.*, 2005; Jurado-Molina *et al.*, 2005) も同様の多種の生物を扱ったモデルとなっている。

e) Individual-based models (IBM)

Individual-based models (IBM) は、個体ごとの生活史（捕食、成長、繁殖、死亡）を組み込んでおり、空間的な影響を考慮したモデルとなっている。OSMOSE (Shin and Cury, 2001, 2004) , INVITRO (Gray *et al.*, 2006) や上述しているNEMURO.FISHがこのモデルに分類される。OSMOSE (Shin and Cury, 2001, 2004) は、例えば、南ベンゲラ州（アンゴラ共和国）の12種の魚（カタクチイワシ、マサバ、ヘイク、ニシマアジ、キングクリップ等）を対象に適用されており、生態系のサイズ構造を考慮しているため、サイズによって食べられたり食べたりする関係が変わるモデルとなっているという特徴がある。INVITRO (Gray *et al.*, 2006) は、個体を扱うというより、魚の群れを扱うAgent-based modelsとなっており、オーストラリアの北西沿岸域を漁業について管理戦略の評価を行うモデルとなっている。

f) Bioenergetic models

Bioenergetic modelsは、Yodzis (1998) により、開発されたモデルであり、生物量に基づく生態系モデルである。生物の特徴を経験的にアロメントリー式で表現している。Koen-Alonso and Yodzis (2005) は、モデルを改良し、パタゴニア水域におけるイカ、カタクチイワシ、ヘイク、オタリア（アシカ）高次栄養段階の必要最低限の種を取り出し、食物を代謝する際のプロセス（捕食、呼吸、被食、死亡等）を微分方程式により表現したエネルギー代謝モデルを提案している。

以上に示したモデルの適用例、特徴等を整理してまとめたものを表-1および表-2に示す。

表-1 (1) 魚類の予測モデルを組み込んでいる漁業モデル生態系モデル一覧（類別）

1) Whole ecosystem models : 生態系内の全構成種を対象とするモデル		
モデル名(略称)	名称	参考文献
EwE	ECOPATH with ECOSIM	Polovina, 1984, Christensen and Pauly, 1992, Walters <i>et al.</i> , 1997, Christensen <i>et al.</i> , 2000, Christensen and Walters, 2002, 2004, 袴田, 2002, 清田, 2015
2) Dynamic system models : 物理的要素と生物学的要素が相互に作用するモデル		
モデル名(略称)	名称	参考文献
ERSEM	European Regional Seas Ecosystem Model	Baretta, <i>et al.</i> , 1996
SSEM	Shallow Seas Ecological Model	Sekine <i>et al.</i> , 1991
IGBEM	Integrated Generic Bay Ecosystem Model	Fulton, 2001, Fulton <i>et al.</i> , 2004
ATLANTIS	ATLANTIS	Fulton <i>et al.</i> , 2004, 2005
SEPODYM	Spatial Environmental Population Dynamics Model	Lehodey, 2001,
/SEAPODYM	/Spatial Ecosystem and Population Dynamics Model	Lehodey, <i>et al.</i> , 2003
NEMURO.FISH	North Pacific Ecosystem Model for Understanding Regional Oceanography.For Including Saury and Herring	Okunishi <i>et al.</i> , 2011, Kishi <i>et al.</i> , 2011, 岸ら, 2005, 岸, 2008

表-1 (2) 魚類の予測モデルを組み込んでいる漁業モデル生態系モデル一覧 (類別)

3) CCAMLR models ; 南極海の生態系を対象としたモデル		
モデル名(略称)	名称	参照文献
CCAMLR models	Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources models	Butterworth and Thomson, 1995, Mori and Butterworth, 2004, 2005, 2006
KPFM	Krill-Predator-Fishery Model	Watters <i>et al.</i> , 2006
EPOC	Ecosystem Productivity Ocean Climate model	Constable, 2005, 2006
SMOM	Spatial Multi-species Operating Model	Plagányi and Butterworth, 2006a, 2006b
4) Dynamic multispecies models, Minimum Realistic Models ; 対象とする種を限定したモデル		
モデル名(略称)	名称	参照文献
MRM	Minimally Realistic Model	Punt and Butterworth, 1995
ESAM	Extended Single-species Assessment Models	Livingston and Methot, 1998, Hollowed <i>et al.</i> , 2000, Tjelmeland and Lindstrøm, 2005
MSVPA and MSFOR	Multi-species Virtual Population Analysis and Multi-species Forecasting Model	Pope, 1991, Sparre, 1991, Vinther, 2001
MULTSPEC	Multi-species model for the Barents Sea	Bogstad <i>et al.</i> , 1997
GADGET	Globally applicable Area Disaggregated General Ecosystem Toolbox	Trenkel <i>et al.</i> , 2004, Begley and Howell, 2004, Taylor <i>et al.</i> , 2004, Taylor and Stefansson, 2004, Begley, 2012
4) Dynamic multispecies models, Minimum Realistic Models ; 対象とする種を限定したモデル		
モデル名(略称)	名称	参照文献
SEASTAR	Stock Estimation with Adjustable Survey observation model and TAG-Return data	Tjelmeland and Lindstrøm, 2005
MSM	Multi-species Statistical Model	Jurado-Molina, Livingston and Ianelli, 2005, Jurado-Molina, Livingston and Gallucci, 2005
5) Individual-based models ; 個体ごとの生活史 (捕食, 成長, 繁殖, 死亡) を考慮		
モデル名(略称)	名称	参照文献
OSMOSE	Object-oriented Simulator of Marine ecosystem Exploitation	Shin and Cury, 2001, 2004
INVITRO	INVITRO	Gray <i>et al.</i> , 2006
6) Bioenergetic models ; 生物量に基づいて生態系を記述したモデル		
モデル名(略称)	名称	参照文献
Bioenergetic/allometric model	Multi-species trophodynamic model using bioenergetic and allometric approach	Yodzis, 1998, Koen-Alonso and Yodzis, 2005

表-2(1) 生態系モデルを利用した魚類予測モデル適用例

1) Whole ecosystem models ; 生態系内の全構成種を対象とするモデル		
モデル名(略称)	適用例	モデルの特徴
EwE	<ul style="list-style-type: none"> ○Polovina, 1984 - French Frigate Shoals (the Northwestern Hawaiian Islands) が対象 - Tiger sharks, Birds, Monk seals, Small pelagics, Jacks, Reef fishes, Lobsters and crabs, Bottom fishes, Zooplankton, Heterotrophic benthos, Phytoplankton...等上位捕食者から1次生産者までの全構成種を考慮 - ECOPATHによる評価 ○Christensen and Walters., 2000 - marine ecosystem of the North Atlantic が対象 - ECOPATH with ECOSIM による評価 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮；可 -対象種類区分：30程度 -年齢区分可 Top-Downタイプ^o ※高次生物が主対象

表-2(2) 生態系モデルを利用した魚類予測モデル適用例

2) Dynamic system models ; 物理的要素と生物学的要素が相互に作用するモデル		
モデル名(略称)	適用例	モデルの特徴
ERSEM	<ul style="list-style-type: none"> ○Baretta, Baretta-Bekker and Ruardij, 1996 - Northern sea の生態系モデルを構築 - 栄養素, バクテリア, 植物プランクトン, 小型動物プランクトン, 中型動物プランクトン, 有機物の間の, 炭素/栄養素/酸素の動態を表現 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮; 可 ※光, 水温, 栄養塩環境 -対象種類区分: 10-20 程度 ※動植物プランクトン -年齢区分なし - Biogeochemical models
SSEM	<ul style="list-style-type: none"> ○Sekine <i>et al.</i>, 1991 - Shijiki Bay に適用 - goby, congereel, seabream, copepod, gammarid, mysid, phyto, detritus 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮; 可 ※水温, 栄養塩, 流動環境 -対象種類区分例 魚類, プランクトン, 栄養塩 -年齢区分なし - Biogeochemical models
IGBEM	<ul style="list-style-type: none"> ○Fulton, Smith and Johnson, 2004 - Port Philip Bay (Australia)を対象 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮; 可 ※栄養塩, 流動環境 -対象種類区分: 20-30 程度 -年齢区分; 脊椎動物は可 - Biogeochemical models
ATLANTIS	<ul style="list-style-type: none"> ○Fulton, Smith and Punt, 2004 - The Northwest Shelf (NWS) of Western Australia を対象 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮; 可 ※光, 水温, 栄養塩, 流動環境 -対象種類区分: 20 以上 -年齢区分; 脊椎動物は可 - Biogeochemical models
SEAPODYM	<ul style="list-style-type: none"> ○Lehodey, 2001; Lehodey, Chai and Hampton, 2003 - Pacific Ocean を対象 - 3 種類のマグロの動態予測 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮; 可 ※物理・生物地球化学的モデルとの結合可能 -対象種類区分; 3 程度 (拡張は可) -年齢区分可 -移動: ADVECTION-DIFUSION -行動: habitat quality 関数
NEMURO.FISH	<ul style="list-style-type: none"> ○Okunishi <i>et al.</i>, 2011 - 西北太平洋におけるマイワシの動態予測 ○岸ら, 2005 - 日本海のスルメイカへの適用 	<ul style="list-style-type: none"> -Bottom-UP タイプ ※低次生物が主体 -IBM による動態予測

表-2(3) 生態系モデルを利用した魚類予測モデル適用例

3) CCAMLR models ; 南極海の生態系を対象としたモデル		
モデル名(略称)	適用例	モデルの特徴
KPFM	<ul style="list-style-type: none"> ○Watters <i>et al.</i>, 2006 - Antarctic Peninsula region を対象 - krill の漁獲量を検討 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮；可 ※流動モデルと結合 -対象種類区分：1-4 程度 -年齢区分あり ※幼体と成体区分等 -不確実性：モンテカルロシミュレーションを適用 -地域区分あり ※南極半島周辺を管理区域 (SSMU) ごとに区分
EPOC	<ul style="list-style-type: none"> ○Constable 2005, 2006 - Antarctic Peninsula region を対象 - krill の空間的な構造を予測 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮；可 ※海洋モデルとの結合可能（未開発） -対象種類区分；2 -年齢・大きさ区分可 -海洋，海氷，大気，底生生物の環境を示すための地形を考慮
SMOM	<ul style="list-style-type: none"> ○Plagányi and Butterworth, 2006a, 2006b - Antarctic Peninsula region の 15 の管理区域 (SSMU) を対象 - オキアミと捕食者ペンギン，オットセイ，魚，クジラ)の動態モデル 	<ul style="list-style-type: none"> -物理・生物的環境の考慮；可 ※海洋モデルとの結合可能（未開発） -対象種類区分；2 -年齢区分可

表-2(4) 生態系モデルを利用した魚類予測モデル適用例

4) Dynamic multispecies models, Minimum Realistic Models ; 対象とする種を限定したモデル		
モデル名(略称)	適用例	モデルの特徴
MRM	○Punt and Butterworth, 1995 - Southern Benguela Upwelling region - Cape fur seal の Cape hake (<i>Merluccius capensis</i> and <i>M. paradoxus</i>) への影響を評価	-物理・生物的環境の考慮；なし -対象種類区分；数種類程度 -年齢区分可
ESAM	○Livingston and Methot, 1998, Hollowed <i>et al.</i> , 2000 - Gulf of Alaska を対象 - Alaska pollack に対する捕食者である Pacific halibut (<i>Hippoglossus stenolepis</i>) , arrowtooth flounder (<i>Atheresthes stomias</i>) , and Steller sea lions (<i>Eumetopias jubatus</i>) の影響を評価	-物理・生物的環境の考慮；なし -対象種類区分；2-4 程度 -年齢区分可 -捕食による死亡を漁獲死亡と同じに定義
MSVPA and MSFOR	○Vinther, 2001 - North Sea, Baltic Sea を対象 - Cod, Haddock, Whiting, Saithe, Herring , Norway pout , Sandeel , Plaice, Sole などの年齢別の資源量を評価	-物理・生物的環境の考慮；なし -対象種類区分；数種類程度 -年齢区分可
MULTSPEC	○Bogstad, Hauge and Ulltang, 1997 - Barents Sea を対象 - capelin (<i>Mallotus villosus</i>), herring (<i>Clupea harengus</i>), cod (<i>Gadus morhua</i>), harp seal (<i>Phoca groenlandica</i>) and minke whale (<i>Balaenoptera acutorostrata</i>) に対する地域, 年齢, 長さ構造を予測	-物理・生物的環境の考慮；可 ※海洋モデルとの結合；水温, 餌料環境 -対象種類区分；数種類程度 -年齢区分可
GADGET	○Trenkel <i>et al.</i> , 2004 - Celtic Seaに適用 - hake, cod, megrim, whiting, mackerel, horse mackerel, blue whiting, Norway pout, Poor codを扱う	-物理・生物的環境の考慮；可 ※海洋循環モデルとの結合可能 -対象種類区分；数種類程度 -年齢・大きさ区分可
SEASTER	○Tjelmeland and Lindstrøm, 2005 - Northeast Atlantic を対象 - minke whales による捕食が herring の資源量に与える影響を評価	-物理・生物的環境の考慮；なし -対象種類区分；2-4 程度 -年齢区分可
MSM	○Jurado-Molina <i>et al.</i> , 2005 - Eastern Bering Sea を対象	-物理・生物的環境の考慮；なし -対象種類区分；2 程度 -年齢区分可

表-2(5) 生態系モデルを利用した魚類予測モデル適用例

5) Individual-based models ; 個体ごとの生活史(捕食, 成長, 繁殖, 死亡)を考慮		
モデル名(略称)	適用例	モデルの特徴
OSMOSE	○Shin and Cury, 2001, 2004 - Southern Benguela を対象 -12種の魚類 (Anchovy, Chub mackerel, Cape hake (shallow-water), Cape hake (deep-water), Horse mackerel, Kingklip, Lanternfish, Lightfish, Round herring, Sardine, Silver kob, Snoek) を扱う	-物理・生物的環境の考慮; なし -対象種類区分; 7-20 程度 -年齢区分可 -サイズ構造を考慮
	○Gray <i>et al.</i> , 2006 - Northwest shelf of Australia を対象	-物理・生物的環境の考慮; 可 ※流動, 風雨等環境 -対象種類区分: 10-20 -年齢・大きさ区分可 - Agent-based models
6) Bioenergetic models ; 生物量に基づいて生態系を記述したモデル		
モデル名(略称)	適用例	モデルの特徴
Bioenergetic/ allometric model	○Koen-Alonso and Yodzis 2005 - the marine community of northern and central Patagonia in the southwestern South Atlantic Ocean を対象 - hake (<i>Merluccius hubbsi</i>), squid (<i>Illex argentinus</i>), anchovy (<i>Engraulis anchoita</i>), and South American sea lions (<i>Otaria flavescens</i>).の高次栄養段階の必要最低限の種を扱う	-物理・生物的環境の考慮; なし -対象種類区分; 4-29 -年齢区分なし -食物を代謝のプロセス(捕食, 呼吸, 被食, 死亡等)を微分方程式により表現 -エネルギー代謝モデル

2.3 流動モデルと低次生態系モデルを基本とした魚類モデルの適用例

ここでは、流動モデルと低次生態系モデルをベースとしたものに組み込まれた魚類モデルの研究事例を示す。このようなモデルは、前節で示した物理的要素と生物学的要素が相互に作用するモデルDynamic system modelsに分類されるものである。ここで扱われる魚類モデルは、個体群動態モデルを基本としたものであり、流動モデルと低次生態系モデルがあれば、比較的導入しやすいモデルである。個体群動態モデルは、人口動態モデルと同様に個体数をベースとしたモデルであり、通常は次式のように表される。

$$\begin{aligned} (\text{個体数の変化量}) &= (\text{加入量}) + (\text{移出量}) \\ &- (\text{自然死亡係数} + \text{漁獲係数}) \times (\text{現存個体数}) \end{aligned}$$

なお、資源量(重量)への換算は、個体の成長を考慮した換算式が用いられる。また、適用対象となる魚類等は寿命が1年以上の多年生が多く、魚類の年齢に伴う加入量、死亡率等(生活史)が通常は考慮される。

魚類モデルとの組み合わせた例では、NEMURO.FISHのように流動・低次生態系モデルにより水温、塩分あるいは餌料性プランクトンの時空間的な予測を行い、その結果を利用して魚類等の移動・反応あるいは成長等の予測を行う例が比較的多く見られる。

生態系モデルと結合した魚類予想モデルの既往例(国内)としては、岸ら(2005, 2008)、小田ら(1997)、中村ら(2001)、関根(2002)、白田(2008)、本宮ら(2015)、本宮(2011)、鈴木ら(2012, 2013)、多部田ら(2012)がみられる。これらのモデルの概要は表-3のとおりである。

小田ら(1997)は、生活史と生理・生態構造が把握されているヨシエビを対象生物とし、物理環境因子に対するヨシエビ固有の応答を定式化した個体群動態モデルを開発した。そしてこのモデルに従来から用いられている傾圧流動モデルと浮遊生態系物質循環モデルを組み合わせ、大阪湾を対象にヨシエビの浮遊幼生の動態についてモデルの有用性を検討している。白田(2008)はマダイ瀬戸内海東部系群を対象とした動態モデルの構築を行った。使用されたモデルは行動モデル、成長モデル、減耗モデルから構成されている。また選好因子として水温、塩分、溶存酸素、餌量としている。このモデルは低次生態系モデルと

は連携していないため、環境要因の計算を行うことができない。

また、本研究対象となる伊勢湾を対象とした例ではマアナゴを対象としたモデル開発が、本宮ら(2015)、本宮(2011)、鈴木ら(2012, 2013)、多部田ら(2012)により進められている。流動・低次生態系モデルによる水温、DO等の予測結果と環境選好強度をモデル化した行動モデルを結合したモデルを用いている。また、漁業情報として重要な要素である操業位置の予測を行うモデルも開発されている(鈴木ら(2012, 2013)、多部田ら(2012))。

本宮ら(2015)は伊勢湾のマアナゴを対象に、動態モデルの開発を行った。開発されたモデルは低次生態系モデル、行動モデル、成長モデル、個体数変動モデルを組み合わせた動態モデルとなっている。このモデルでは水域の環境変動(水温や溶存酸素など)、マアナゴの漁獲量やCPUE(Catch Per Unit Effort: 単位努力あたりの漁獲量)、マアナゴの分布、対象とする年級群の全加入個体数に対する自然死亡、漁獲、湾外移出を計算することが可能となっている。

鈴木ら(2013)は、伊勢湾のマアナゴを対象にして魚類の移動、個体数変動、成長を計算する魚類動態モデル、資源量の空間分布や経済的条件に基づき漁船の行動を決定する漁獲モデルを結合した資源量解析モデルを開発した。このモデルの環境要因は「水温」、「溶存酸素」、「底質」の3種となっている。マアナゴは餌料環境よりも底質環境に依存しているため、環境要因に底質を設定し、分布と粒度に基づき選好強度を設定している。多部田ら(2012)は、伊勢湾のマアナゴを対象にして操業実態調査を行い、漁業者や漁協の水揚げ伝票等のデータを用いて漁獲量や価格に関する情報を収集・分析を行った。さらには海域の資源量の空間分布および操業にかかる経費・収益性によって操業形態が変化することをモデル化し、水域環境的側面ならびに漁業経済的側面が地域の漁業行動に及ぼす影響を定量的に評価する操業シミュレーターを開発している。このシミュレーターは、漁獲実績や水揚げに基づく資源量診断から魚価、燃料コストなど経済条件に見合った漁業者の意思決定(出漁判断と漁場選択)を反映したモデルとなっている。

表-3(1) 生態系モデルを活用した魚類予測モデル例（国内例）

文献名	モデル概要	備考
<p>岸ら（2005） 岸（2008）</p>	<p>（NEMURO モデルの特徴） ○カイアシ類の季節的な上下移動が特徴である。 ○海洋低次生態系モデルである。 ○3次元物理モデルと結合して水温、動物プランクトンの時空間分布を求める。</p> <p>（NEMURO.FISH モデルの特徴） ○魚類等の生物エネルギーモデルを作成、予測した水温、動物プランクトン（餌料生物）の条件下で成長等を計算 ○大西洋ニシン用に開発された ○日本近海のサンマ、日本海のスルメイカにも使用</p>	
<p>小田ら（1997） 中村ら（2001）</p>	<p>○対象海域；大阪湾 ○対象生物；ヨシエビ ラーバ期（浮遊幼生） ；孵化から2～3週間で着底</p> <p>（モデル） ○流動モデル、低次生態系モデルと結合 ○低次生態系モデル；餌料、DO等の環境因子の予測 ○ラグランジェ粒子としてモデル化 ○ラグランジェ粒子の漂流 生物固有の環境応答（水温、塩分、餌生物等に対する忌避・選択行動）</p>	
<p>関根（2002）</p>	<p>○対象生物；マコガレイ ○現地追跡調査と室内実験によりカレイの行動シミュレーションモデルを作成 ○環境選好性実験；水温、DO、選好強度式を求める ○水質計算は、潮流モデルと水底質モデルを使用 ○現地追跡調査結果を再現計算する</p>	
<p>白田（2008）</p>	<p>○対象海域；瀬戸内海東部海域 ○対象生物；マダイ ○モデル構成；個体数変動モデル、成長モデル、行動モデル（移動） ○行動モデル；環境要因-水温、塩分、DO、餌量を選好因子とする ○環境条件；観測によるマップデータあるいは物理・生態系モデルにより作成データ</p>	

表-3(2) 生態系モデルを活用した魚類予測モデル例（国内例）

文献名	モデル概要	備考
<p>本宮（2011） 本宮ら（2015）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○対象海域；伊勢湾 ○対象生物；マアナゴ ○モデル構成； 個体数変動モデル，成長モデル，行動モデル（移動） ○行動モデル；環境要因-水温，DO，底質の選好強度でモデル化 ○環境条件；流動（MEC モデル）・低次生態系モデルと結合，水温，DO の時空間変動予測結果を条件として利用 	<p>伊勢湾を対象</p>
<p>鈴木ら （2012，2013）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○対象海域；伊勢湾 ○対象生物；マアナゴ ○モデル構成；同上マアナゴモデル＋漁獲モデル ○漁獲モデル；資源量分布，魚価，漁港と漁場間の距離等経済的条件を元に漁船の操業位置，漁獲係数を決定する． ○環境条件；低次生態系シミュレーションにより時空間分布を作成 	<p>伊勢湾を対象</p>
<p>多部田ら （2012）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○対象海域；伊勢湾 ○対象生物；マアナゴ ○操業実態調査（操業日誌，GPS 操業航跡等） ○操業位置の予測；資源情報，漁港情報，価格情報等を考慮して予測 	<p>伊勢湾を対象</p>

3. 魚類モデルの構築

本モデルは調査対象とした全魚種を同時に計算できるモデルとなっており、それらの捕食被食関係がモデル化している。なお、流動モデルは非静水圧モデルを用い、生食連鎖モデル、腐食連鎖モデル microbial loop とのカップリングとなっている。

3.1 魚類モデルの概要

魚は成長過程で生態的特徴が変化するため、本モデルでは魚の発育段階を区切り、それぞれ個別の変数で管理する。また、伊勢湾シミュレーターに合わせ、魚の変数炭素量ベースで計算するために、以下の変数を設けた。

$FISH_{f,a}$: 魚の濃度 [$\text{molC} \cdot \text{m}^{-3}$]

添え字 f は魚の種類を表し、 a は発育段階区分 [$a=1$: 卵期, 2: 仔魚期, 3: 稚魚期, 4: 成魚期 1 (成魚 1 年目から初期産卵まで), 5: 成魚期 2 (1 年目産卵以降の成魚)] を表す。

N_{FISH} : 計算対象の魚の種類数

N_{Age} : 発育段階区分数=5

本モデルでは複数の魚種の中で浮魚と底魚が共存する。底魚の扱いについては、現行モデルである、伊勢湾シミュレーターが三次元流動場のモデルとして扱われており、底層における段差の移動や、格子位置によって底層厚が異なることを考慮して、浮魚と同様に三次元モデル計算を行う。これについては 3.1 (12) で説明する。

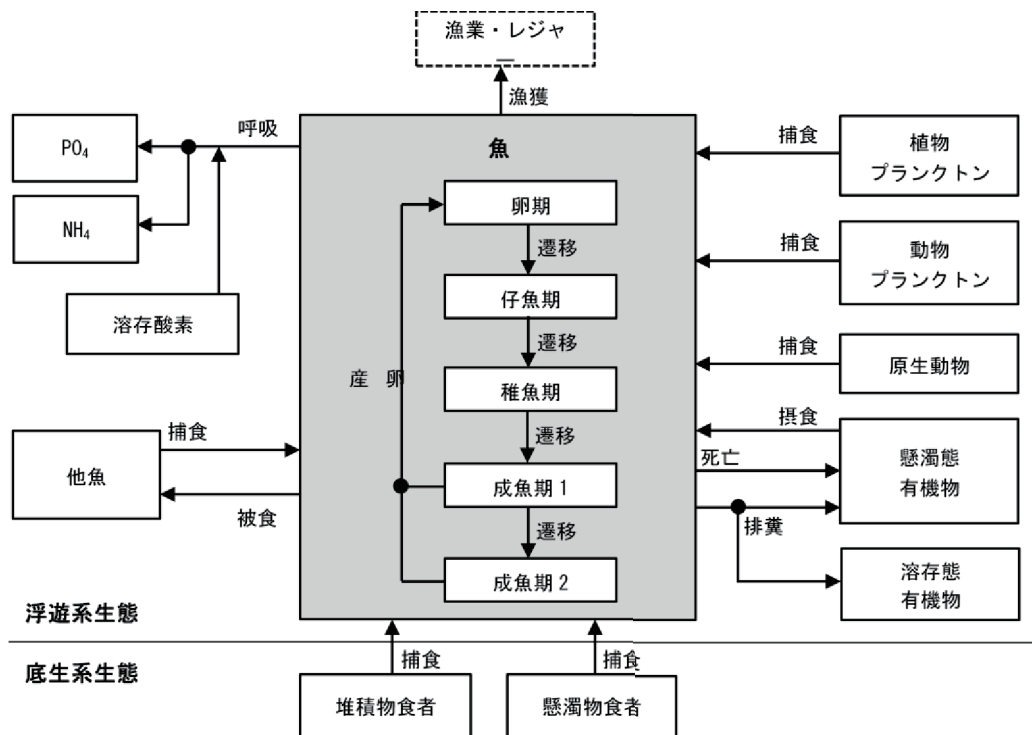


図-1 詳細魚類モデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

魚は植物プランクトン・動物プランクトン・原生動物・懸濁態有機物・魚・堆積物食者・懸濁物食者の捕食によって増殖し、他魚による被食・排糞・呼吸・自然死亡・漁獲によって減少する。また、魚類の特徴でもある回遊・産卵・発育段階の遷移によっても増殖する。したがって、魚類の増殖 $S_{FISH,f,a}$ [$\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]は、次式のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 S_{FISH,f,a} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} (B_{Phy2Fish,i,f,a} - \Delta B_{Phy2Fish,i,f,a})}_{\text{植物プランクトンの捕食}} + \\
 & \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} (B_{Zoo2Fish,j,f,a} - \Delta B_{Zoo2Fish,j,f,a})}_{\text{動物プランクトンの捕食}} + \\
 & \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} (B_{Pz2Fish,n,f,a} - \Delta B_{Pz2Fish,n,f,a})}_{\text{原生動物の捕食}} + \\
 & \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} B_{Pom2Fish,k,f,a}}_{\text{懸濁態有機物の摂食}} + \underbrace{\sum_{f'}^{N_{FISH}} \sum_{a'}^{N_{Age}} (B_{Fish2Fish,f',a',f,a} - \Delta B_{Fish2Fish,f',a',f,a})}_{\text{魚の捕食}} + \\
 & \underbrace{B_{Mdf2Fish,f,a} - \Delta B_{Mdf2Fish,f,a}}_{\text{堆積物食者の捕食}} + \underbrace{B_{Msf2Fish,f,a} - \Delta B_{Msf2Fish,f,a}}_{\text{懸濁物食者の捕食}} - \\
 & \underbrace{\sum_{f'}^{N_{FISH}} \sum_{a'}^{N_{Age}} B_{Fish2Fish,f,a,f',a'}}_{\text{他魚による被食}} - \underbrace{B_{FishExc,f,a}}_{\text{排糞}} - \underbrace{B_{FishResp,f,a}}_{\text{呼吸}} - \\
 & \underbrace{B_{FishLoss,f,a}}_{\text{自然死亡}} - \underbrace{B_{FishMor,f,a}}_{\text{漁獲}} + \underbrace{B_{FishMig,f,a}}_{\text{回遊}} + \underbrace{B_{FishSpaw,f,a}}_{\text{産卵}} + \underbrace{B_{FishSwf,f,a}}_{\text{発育段階の遷移}}
 \end{aligned} \quad (1)$$

なお、捕食、排糞・残滓は現行モデルの動物プランクトン等の方法にならない、C,N,P比に伴う捕食調整を行うものとする。

(2) 摂餌

摂餌については、植物プランクトン、動物プランクトン、原生動物の捕食、懸濁態有機物の摂食、魚の捕食、堆積物食者の捕食、懸濁物食者の捕食を考慮している。

a) 植物プランクトンの捕食

植物プランクトンによる捕食 $B_{Phy2Fish,i,f,a}$ [$\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]は、次式のように表わされる。

$$B_{Phy2Fish,i,f,a} = \frac{\eta_{FISH,f,a}^{PHY,i} \cdot PHY_i}{\Pi_{FISH,f,a}} \cdot R_{FishFeed,f,a} \cdot FISH_{f,a} \quad (2)$$

$R_{FishFeed,f,a}$: 魚の捕食速度 [s^{-1}]

$\Pi_{FISH,f,a}$: 魚の餌料濃度 [$\text{molC} \cdot \text{m}^{-3}$]

$$\Pi_{FISH,f,a} = \sum_i^{N_{PHY}} (\eta_{FISH,f,a}^{PHY,i} \cdot PHY_i) + \sum_j^{N_{ZOO}} (\eta_{FISH,f,a}^{ZOO,j} \cdot ZOO_j) +$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_n^{N_{PZ}} (\eta_{FISH,f,a}^{PZ,n} \cdot PZ_n) \\
 & + \sum_k^{N_{DEC}} (\eta_{FISH,f,a}^{POM,k} \cdot POC_k) + \sum_{f'}^{N_{FISH}} \sum_{a'}^{N_{Age}} (\eta_{FISH,f,a}^{FISH,f',a'} \cdot FISH_{f',a'}) \\
 & + u_{FishBtm}^{Layer,K} \cdot \left(\eta_{FISH,f,a}^{MDF} \cdot \frac{MDF}{D_{MDF}} + \eta_{FISH,f,a}^{MSF} \cdot \frac{MSF}{D_{MSF}} \right) \quad (3)
 \end{aligned}$$

$\eta_{FISH,f,a}^{PHY,i}$: 植物プランクトン捕食の選好係数[-] : パラメータ

$\eta_{FISH,f,a}^{ZOO,j}$: 動物プランクトン捕食の選好係数[-] : パラメータ

$\eta_{FISH,f,a}^{PZ,n}$: 原生動物捕食の選好係数[-] : パラメータ

$\eta_{FISH,f,a}^{POM,k}$: 懸濁態有機物摂食の選好係数[-] : パラメータ

$\eta_{FISH,f,a}^{FISH,f',a'}$: 他魚捕食の選好係数[-] : パラメータ

$\eta_{FISH,f,a}^{MDF}$: 堆積物食者の選好係数[-] : パラメータ

$\eta_{FISH,f,a}^{MSF}$: 懸濁物食者の選好係数[-] : パラメータ

$u_{FishBtm}^{Layer,K}$: K層での底面魚の存在率[-] (底面魚の扱い参照)

$$R_{FishFeed,f,a} = \alpha_{FishFeed,f,a} \cdot$$

$$f_{top} (T_{FishFeedOpt,f,a}, T_{FishFeedMax,f,a}, \beta_{FishFeed,f,a}) \cdot$$

$$f_{feed} (\lambda_{Fish,f,a}, \Pi_{Fish,f,a}^{\min}, \Pi_{Fish,f,a}) \cdot f_{MM} (DO, K_{FishFeed,f,a}^{DO}) \quad (4)$$

$\alpha_{FishFeed,f,a}$: 最大捕食速度 [s^{-1}] : パラメータ

$\beta_{FishFeed,f,a}$: 捕食の温度係数 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] : パラメータ

$T_{FishFeedOpt,f,a}$: 摂餌最適温度 [$^{\circ}\text{C}$] : パラメータ

$T_{FishFeedMax,f,a}$: 摂餌限界温度 [$^{\circ}\text{C}$] : パラメータ

$\lambda_{Fish,f,a}$: イブレイフ定数 [$(\text{molC} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$] : パラメータ

$\Pi_{Fish,f,a}^{\min}$: 餌料濃度の下限値 (閾値) [$\text{molC} \cdot \text{m}^{-3}$] : パラメータ

$K_{FishFeed,f,a}^{DO}$: 捕食に対する溶存酸素の半飽和定数 [$\text{molO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$] : パラメータ

b) 動物プランクトンの捕食

動物プランクトンの捕食 $B_{Zoo2Fish,j,f,a}$ [$\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]は次式のように表わされる。

$$B_{Zoo2Fish,j,f,a} = \frac{\eta_{FISH,f,a}^{ZOO,j} \cdot ZOO_j}{\Pi_{FISH,f,a}} \cdot R_{FishFeed,f,a} \cdot FISH_{f,a} \quad (5)$$

c) 原生動物の捕食

原生動物の捕食 $B_{Pz2Fish,n,f,a}$ [$\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]は、次式のように表わされる。

$$B_{Pz2Fish,n,f,a} = \frac{\eta_{FISH,f,a}^{PZ,n} \cdot PZ_n}{\Pi_{FISH,f,a}} \cdot R_{FishFeed,f,a} \cdot FISH_{f,a} \quad (6)$$

d) 懸濁態有機物の摂食

懸濁態有機物の摂食 $B_{Pom2Fish,k,f,a}$ [molC・m⁻³・s⁻¹]は、次式のように表わされる。

$$B_{Pom2Fish,k,f,a} = \frac{\eta_{FISH,f,a}^{POM,k} \cdot POC_k}{\Pi_{FISH,f,a}} \cdot R_{FishFeed,f,a} \cdot FISH_{f,a} \quad (7)$$

e) 魚の捕食

魚の捕食 $B_{Fish2Fish,f',f,a}$ [molC・m⁻³・s⁻¹]は、次式のように表わされる。

$$B_{Pom2Fish,k,f,a} = \frac{\eta_{FISH,f,a}^{FISH,f',a'} \cdot FISH_{f',a'}}{\Pi_{FISH,f,a}} \cdot R_{FishFeed,f,a} \cdot FISH_{f,a} \quad (8)$$

f) 堆積物食者の捕食

堆積物食者の捕食 $B_{Pom2Fish,k,f,a}$ [molC・m⁻³・s⁻¹]は、次式のように表わされる。

$$B_{Mdf2Fish,f,a} = u_{FishBtm}^{Layer,K} \cdot \frac{\eta_{FISH,f,a}^{MDF} \cdot MDF}{\Pi_{FISH,f,a} \cdot DMDF} \cdot R_{FishFeed,f,a} \cdot FISH_{f,a} \quad (9)$$

g) 懸濁物食者の捕食

懸濁物食者の捕食 $B_{Pom2Fish,k,f,a}$ [molC・m⁻³・s⁻¹]は、次式のように表わされる。

$$B_{Msf2Fish,f,a} = u_{FishBtm}^{Layer,K} \cdot \frac{\eta_{FISH,f,a}^{MSF} \cdot MSF}{\Pi_{FISH,f,a} \cdot DMSF} \cdot R_{FishFeed,f,a} \cdot FISH_{f,a} \quad (10)$$

(3) 捕食調整量

捕食調整量 $\Delta B_{Phy2Fish,i,f,a}^{cut}$, $\Delta B_{Zoo2Fish,j,f,a}^{cut}$, $\Delta B_{Pz2Fish,n,f,a}^{cut}$, $\Delta B_{Fish2Fish,f',a',f,a}^{cut}$, $\Delta B_{Mdf2Fish,f,a}^{cut}$, $\Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{cut}$ [molC・m⁻³・s⁻¹]は、次式のように表わされる。

$$\Delta B_{Phy2Fish,i,f,a}^{cut} = \left\{ 1 - \min \left(1, \frac{N_c^{PHY,i}}{N_c^{FISH,f,a}}, \frac{P_c^{PHY,i}}{P_c^{FISH,f,a}} \right) \right\} \cdot B_{Phy2Fish,i,f,a} \quad (11)$$

$$\Delta B_{Zoo2Fish,j,f,a}^{cut} = \left\{ 1 - \min \left(1, \frac{N_c^{ZOO,j}}{N_c^{FISH,f,a}}, \frac{P_c^{ZOO,j}}{P_c^{FISH,f,a}} \right) \right\} \cdot B_{Zoo2Fish,j,f,a} \quad (12)$$

$$\Delta B_{Pz2Fish,n,f,a}^{cut} = \left\{ 1 - \min \left(1, \frac{N_c^{PZ,n}}{N_c^{FISH,f,a}}, \frac{P_c^{PZ,n}}{P_c^{FISH,f,a}} \right) \right\} \cdot B_{Pz2Fish,n,f,a} \quad (13)$$

$$\Delta B_{Fish2Fish,f',a',f,a}^{cut} = \left\{ 1 - \min \left(1, \frac{N_c^{FISH,f',a'}}{N_c^{FISH,f,a}}, \frac{P_c^{FISH,f',a'}}{P_c^{FISH,f,a}} \right) \right\} \cdot B_{Fish2Fish,f',a',f,a} \quad (14)$$

$$\Delta B_{Mdf2Fish,f,a}^{cut} = \left\{ 1 - \min \left(1, \frac{N_c^{MDF}}{N_c^{FISH,f,a}}, \frac{P_c^{MDF}}{P_c^{FISH,f,a}} \right) \right\} \cdot B_{Mdf2Fish,f,a} \quad (15)$$

$$\Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{cut} = \left\{ 1 - \min \left(1, \frac{N_c^{MSF}}{N_c^{FISH,f,a}}, \frac{P_c^{MSF}}{P_c^{FISH,f,a}} \right) \right\} \cdot B_{Msf2Fish,f,a} \quad (16)$$

$N_c^{FISH,f}$: 魚のN/C[-] : パラメータ

$P_c^{FISH,f}$: 魚のP/C[-] : パラメータ

(4) 排糞・残滓

魚の排糞・残滓 $B_{FishExc,f,a}$ [molC・m⁻³・s⁻¹]は、次式のように表わされる。

$$B_{FishExc,f,a} = \sum_k^{NDEC} B_{FishExc,k,f,a} \quad (17)$$

魚の分解速度分画 k 種の排糞・残滓量 $B_{FishExc,k,f,a}$: [molC・m⁻³・s⁻¹]は、次式のように表わされる。

$B_{FishExc,k,f,a} =$

$$\sum_i^{NPHY} \frac{(1 - e_{FISH,f,a}^{PHY,i} \cdot e_{FISH,f,a}^{dec,k}) \cdot c_{Phy,i}^{dek,k} \cdot (B_{Phy2Fish,i,f,a} - \Delta B_{Phy2Fish,i,f,a}^{cut})}{\text{植物プランクトンの捕食に対する非同化量}}$$

$$\sum_j^{NZOO} \frac{(1 - e_{FISH,f,a}^{ZOO,j} \cdot e_{FISH,f,a}^{dec,k}) \cdot c_{Zoo,j}^{dek,k} \cdot (B_{Zoo2Fish,j,f,a} - \Delta B_{Zoo2Fish,j,f,a}^{cut})}{\text{動物プランクトンの捕食に対する非同化量}}$$

$$\sum_n^{NPZ} \frac{(1 - e_{FISH,f,a}^{PZ,n} \cdot e_{FISH,f,a}^{dec,k}) \cdot c_{Pz,n}^{dek,k} \cdot (B_{Pz2Fish,n,f,a} - \Delta B_{Pz2Fish,n,f,a}^{cut})}{\text{原生動物の捕食に対する非同化量}}$$

$$\frac{(1 - e_{FISH,f,a}^{POM} \cdot e_{FISH,f,a}^{dec,k}) \cdot B_{Pom2Fish,k,f,a}}{\text{懸濁態有機物の摂食に対する非同化量}}$$

$$\sum_{f'}^{NFISH} \sum_{a'}^{NAGE} \frac{(1 - e_{FISH,f,a}^{FISH,f',a'} \cdot e_{FISH,f,a}^{dec,k}) \cdot c_{Fish,f',a'}^{dek,k} \cdot (B_{Fish2Fish,f',a',f,a} - \Delta B_{Fish2Fish,f',a',f,a}^{cut})}{\text{魚の捕食に対する非同化量}}$$

$$\frac{(1 - e_{FISH,f,a}^{MDF} \cdot e_{FISH,f,a}^{dec,k}) \cdot c_{Mdf}^{dek,k} \cdot (B_{Mdf2Fish,f,a} - \Delta B_{Mdf2Fish,f,a}^{cut})}{\text{堆積物食者の捕食に対する非同化量}}$$

$$\frac{(1 - e_{FISH,f,a}^{MSF} \cdot e_{FISH,f,a}^{dec,k}) \cdot c_{Msf}^{dek,k} \cdot (B_{Msf2Fish,f,a} - \Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{cut})}{\text{懸濁物食者の捕食に対する非同化量}}$$

(18)

$e_{FISH,f,a}^{dec,k}$: 魚の分解速度分画 k 種の同化効率[-] : パラメータ

$e_{FISH,f,a}^{PHY,i}$: 魚の植物プランクトン捕食に対する同化効率[-] : パラメータ

$e_{FISH,f,a}^{ZOO,j}$: 魚の動物プランクトン捕食に対する同化効率[-] : パラメータ

$e_{FISH,f,a}^{PZ,n}$: 魚の原生動物捕食に対する同化効率[-] : パラメータ

$e_{FISH,f,a}^{POM}$: 魚の懸濁態有機物捕食に対する同化効率[-] : パラメータ

$e_{FISH,f,a}^{FISH,f',a'}$: 魚の他魚捕食に対する同化効率[-] : パラメータ

$e_{FISH,f,a}^{MDF}$: 魚の堆積物食者捕食に対する同化効率[-] : パラ

メータ

$e_{FISH,f,a}^{MSF}$: 魚の懸濁物食者捕食に対する同化効率[-] : パラ

メータ

$C_{FISH,f',a'}^{dek,k}$: 魚の分解速度別の存在割合[-] : パラメータ,

$$\sum_k^{NDEC} C_{FISH,f',a'}^{dek,k} = 1 \quad (19)$$

(5) 魚の正味の排糞・残滓

魚の正味の排糞・残滓 $B_{FISH,k,f,a}^{net,C}$, $B_{FISH,k,f,a}^{net,N}$, $B_{FISH,k,f,a}^{net,P}$

[molC・m⁻³・s⁻¹]は、次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} B_{FISHExc,k,f,a}^{net,C} &= \underbrace{B_{FISHExc,f,a}^{net,C}}_{\text{魚の排糞}} + \underbrace{\sum_i^{NPHY} C_{PHY,i}^{dek,k} \cdot \Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{rem,C}}_{\text{植物プランクトンの補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{\sum_j^{NZOO} C_{ZOO,j}^{dek,k} \cdot \Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{rem,C}}_{\text{動物プランクトンの補食に対する捕食調整}} + \underbrace{\sum_n^{NPZ} C_{PZ,n}^{dek,k} \cdot \Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{rem,C}}_{\text{原生動物の補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{\sum_{f'}^{NFISH} \sum_{a'}^{NAGE} C_{FISH,f',a'}^{dek,k} \cdot \Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{rem,C}}_{\text{魚の補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{C_{MDF}^{dek,k} \cdot \Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{rem,C}}_{\text{堆積物食者の捕食に対する捕食調整}} + \underbrace{C_{MSF}^{dek,k} \cdot \Delta B_{Msf2FISH,f,a}^{rem,C}}_{\text{懸濁物食者の捕食に対する捕食調整}} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} B_{FISHExc,k,f,a}^{net,N} &= \underbrace{N_c^{FISH,f} \cdot B_{FISHExc,f,a}^{net,C}}_{\text{魚の排糞}} + \\ &\quad \underbrace{\sum_i^{NPHY} C_{PHY,i}^{dek,k} \cdot \Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{rem,N}}_{\text{植物プランクトンの補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{\sum_j^{NZOO} C_{ZOO,j}^{dek,k} \cdot \Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{rem,N}}_{\text{動物プランクトンの補食に対する捕食調整}} + \underbrace{\sum_n^{NPZ} C_{PZ,n}^{dek,k} \cdot \Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{rem,N}}_{\text{原生動物の補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{\sum_{f'}^{NFISH} \sum_{a'}^{NAGE} C_{FISH,f',a'}^{dek,k} \cdot \Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{rem,N}}_{\text{魚の補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{C_{MDF}^{dek,k} \cdot \Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{rem,N}}_{\text{堆積物食者の捕食に対する捕食調整}} + \underbrace{C_{MSF}^{dek,k} \cdot \Delta B_{Msf2FISH,f,a}^{rem,N}}_{\text{懸濁物食者の捕食に対する捕食調整}} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} B_{FISHExc,k,f,a}^{net,P} &= \underbrace{P_c^{FISH,f} \cdot B_{FISHExc,f,a}^{net,C}}_{\text{魚の排糞}} + \\ &\quad \underbrace{\sum_i^{NPHY} C_{PHY,i}^{dek,k} \cdot \Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{rem,P}}_{\text{植物プランクトンの補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{\sum_j^{NZOO} C_{ZOO,j}^{dek,k} \cdot \Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{rem,P}}_{\text{動物プランクトンの補食に対する捕食調整}} + \underbrace{\sum_n^{NPZ} C_{PZ,n}^{dek,k} \cdot \Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{rem,P}}_{\text{原生動物の補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{\sum_{f'}^{NFISH} \sum_{a'}^{NAGE} C_{FISH,f',a'}^{dek,k} \cdot \Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{rem,P}}_{\text{魚の補食に対する捕食調整}} + \\ &\quad \underbrace{C_{MDF}^{dek,k} \cdot \Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{rem,P}}_{\text{堆積物食者の捕食に対する捕食調整}} + \underbrace{C_{MSF}^{dek,k} \cdot \Delta B_{Msf2FISH,f,a}^{rem,P}}_{\text{懸濁物食者の捕食に対する捕食調整}} \end{aligned}$$

$$\underbrace{\sum_{f'}^{NFISH} \sum_{a'}^{NAGE} C_{FISH,f',a'}^{dek,k} \cdot \Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{rem,P}}_{\text{魚の補食に対する捕食調整}} +$$

$$\underbrace{C_{MDF}^{dek,k} \cdot \Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{rem,P}}_{\text{堆積物食者の捕食に対する捕食調整}} + \underbrace{C_{MSF}^{dek,k} \cdot \Delta B_{Msf2FISH,f,a}^{rem,P}}_{\text{懸濁物食者の捕食に対する捕食調整}} \quad (22)$$

$\Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{rem,C}$: 魚が植物プランクトンを補食した際の余剰炭素量[molC・m⁻³・s⁻¹]

$\Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{rem,C}$: 魚が動物プランクトンを補食した際の余剰炭素量[molC・m⁻³・s⁻¹]

$\Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{rem,C}$: 魚が原生動物を補食した際の余剰炭素量[molC・m⁻³・s⁻¹]

$\Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{rem,C}$: 魚が他魚を補食した際の余剰炭素量[molC・m⁻³・s⁻¹]

$$\Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{rem,C} = \Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{cut} \quad (23)$$

$$\Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{rem,N} = (N_c^{PHY,i} - N_c^{FISH,f}) \cdot B_{PHY2FISH,i,f,a} + N_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{cut} \quad (24)$$

$$\Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{rem,P} = (P_c^{PHY,i} - P_c^{FISH,f}) \cdot B_{PHY2FISH,i,f,a} + P_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{PHY2FISH,i,f,a}^{cut} \quad (25)$$

$$\Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{rem,C} = \Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{cut} \quad (26)$$

$$\Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{rem,N} = (N_c^{ZOO,j} - N_c^{FISH,f}) \cdot B_{ZOO2FISH,j,f,a} + N_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{cut} \quad (27)$$

$$\Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{rem,P} = (P_c^{ZOO,j} - P_c^{FISH,f}) \cdot B_{ZOO2FISH,j,f,a} + P_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{ZOO2FISH,j,f,a}^{cut} \quad (28)$$

$$\Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{rem,C} = \Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{cut} \quad (29)$$

$$\Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{rem,N} = (N_c^{PZ,n} - N_c^{FISH,f}) \cdot B_{PZ2FISH,n,f,a} + N_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{cut} \quad (30)$$

$$\Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{rem,P} = (P_c^{PZ,n} - P_c^{FISH,f}) \cdot B_{PZ2FISH,n,f,a} + P_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{PZ2FISH,n,f,a}^{cut} \quad (31)$$

$$\Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{rem,C} = \Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{cut} \quad (32)$$

$$\Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{rem,N} = (N_c^{FISH,f'} - N_c^{FISH,f}) \cdot B_{FISH2FISH,f',a',f,a} + N_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{cut} \quad (33)$$

$$\Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{rem,P} = (P_c^{FISH,f'} - P_c^{FISH,f}) \cdot B_{FISH2FISH,f',a',f,a} + P_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{FISH2FISH,f',a',f,a}^{cut} \quad (34)$$

$$\Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{rem,C} = \Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{cut} \quad (35)$$

$$\Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{rem,N} = (N_c^{MDF} - N_c^{FISH,f}) \cdot B_{Mdf2FISH,f,a} + N_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{cut} \quad (36)$$

$$\Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{rem,P} = (P_c^{MDF} - P_c^{FISH,f}) \cdot B_{Mdf2FISH,f,a} + P_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{Mdf2FISH,f,a}^{cut} \quad (37)$$

$$\Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{rem,C} = \Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{cut} \quad (38)$$

$$\Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{rem,N} = (N_c^{MSF} - N_c^{FISH,f}) \cdot B_{Msf2Fish,f,a} + N_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{cut} \quad (39)$$

$$\Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{rem,P} = (P_c^{MSF} - P_c^{FISH,f}) \cdot B_{Msf2Fish,f,a} + P_c^{FISH,f} \cdot \Delta B_{Msf2Fish,f,a}^{cut} \quad (40)$$

(6) 呼吸 :

魚の呼吸 $B_{FishResp,f,a}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹]は、動物プランクトン等の方法にならって魚類についても静止呼吸と捕食活動・移動による活動呼吸に分けて次式で表す。

$$B_{FishResp,f,a} = \underbrace{f_{temp}(\alpha_{FishRespR,f,a}, \beta_{FishResp,f,a}) \cdot f_{MM}(DO, K_{FishResp,f,a}^{DO}) \cdot FISH_{f,a}}_{\text{静止呼吸}} + \underbrace{\alpha_{FishRespAFeed,f,a} \cdot R_{FishFeed,f,a} \cdot FISH_{f,a}}_{\text{摂餌活動呼吸}} + \underbrace{\alpha_{FishRespAMig,f,a} \cdot \frac{V_{FishMig,f,a}^T}{V_{FishMig,f,a}} \cdot FISH_{f,a}}_{\text{回遊活動呼吸}} \quad (41)$$

$\alpha_{FishRespR,f,a}$: 0°Cにおける静止呼吸速度[s⁻¹] : パラメータ

$\beta_{FishResp,f,a}$: 呼吸の温度係数[°C⁻¹] : パラメータ

$K_{FishResp,f,a}^{DO}$: 静止呼吸に対する溶存酸素の半飽和定数 [molO₂ · m⁻³] : パラメータ

$\alpha_{FishRespAFeed,f,a}$: 捕食活動に対する活動呼吸の割合[-] : パラメータ

$\alpha_{FishRespAMig,f,a}$: 回遊による活動呼吸速度[s⁻¹] : パラメータ

$V_{FishMig,f,a}$: 魚の巡航速度[m · s⁻¹] : パラメータ

$V_{FishMig,f,a}^T$: 各セルの回遊速度[m · s⁻¹]

各セルの回遊速度 $V_{FishMig,f,a}^T$ [m · s⁻¹]は、次式で表わされる。

$$V_{FishMig,f,a}^T = \sqrt{(Flux_{FishMig,f,a}^X)^2 + (Flux_{FishMig,f,a}^Y)^2 + (Flux_{FishMig,f,a}^Z)^2} / FISH_{f,a} \quad (42)$$

$$Flux_{FishMig,f,a}^X = 0.5 \times (Flux_{FishMig,f,a}^{X_{I,J,K}} + Flux_{FishMig,f,a}^{X_{I-1,J,K}}) \quad (43)$$

$$Flux_{FishMig,f,a}^Y = 0.5 \times (Flux_{FishMig,f,a}^{Y_{I,J,K}} + Flux_{FishMig,f,a}^{Y_{I,J,K-1}}) \quad (44)$$

$$Flux_{FishMig,f,a}^Z = 0.5 \times (Flux_{FishMig,f,a}^{Z_{I,J,K}} + Flux_{FishMig,f,a}^{Z_{I,J,K-1}}) \quad (45)$$

なお、回遊フラックスの算出は (9) 回遊の項を参照。

(7) 自然死亡

魚の自然死亡 $B_{FishLoss,f,a}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹]は、発育段階によって大きく異なるので、死亡係数は発育段階で分けて考える。水温、溶存酸素、塩分濃度の生存制限を考慮して、次式で定義する。

$$B_{FishLoss,f,a} = \left(\underbrace{\alpha_{FishLoss,f,a}}_{\text{自然死亡}} + \underbrace{\alpha_{FishLossTemp,f,a} \cdot u_{FishLossTemp,f,a}}_{\text{水温による死亡}} + \underbrace{\alpha_{FishLossDo,f,a} \cdot u_{FishLossDo,f,a}}_{\text{酸素濃度による死亡}} + \underbrace{\alpha_{FishLossSalt,f,a} \cdot u_{FishLossSalt,f,a}}_{\text{塩分濃度による死亡}} + \underbrace{\alpha_{FishLossSed,f,a} \cdot u_{FishLossSed,f,a}}_{\text{底生生物(貝類)の底質選好による死亡}} \right) \cdot FISH_{f,a}^{Y_{FishLoss}} \quad (46)$$

$\alpha_{FishLoss,f,a}$: 各発育段階の自然死亡速度[s⁻¹] : パラメータ

$Y_{FishLoss}$: 自然死亡の指数係数[-] : パラメータ

$\alpha_{FishLossTemp,f,a}$: 活動限界温度時の死亡速度[s⁻¹] : パラメータ

$\alpha_{FishLossDo,f,a}$: 活動限界 DO 時の死亡速度[s⁻¹] : パラメータ
 $\alpha_{FishLossSalt,f,a}$: 活動限界塩分濃度時の死亡速度[s⁻¹] : パラメータ

$\alpha_{FishLossSed,f,a}$: 底質活動限界時の死亡速度[s⁻¹] : パラメータ

$u_{FishLossTemp,f,a}$: 魚の死亡速度における水温の制限関数[-]

$u_{FishLossDo,f,a}$: 魚の死亡速度における DO の制限関数[-]

$u_{FishLossSalt,f,a}$: 魚の死亡速度における塩分濃度の制限関数[-]

$u_{FishLossSed,f}$: 底生生物(貝類)の底質選好強度[-]

$$u_{FishLossTemp,f,a} = 1 -$$

$$f_{linter}(x_{i_{FishLossTemp,f,a}}, f_{i_{FishLossTemp,f,a}}(T)) \quad (47)$$

$x_{i_{FishLossTemp,f,a}}$: 水温死亡の直線関数節点, 水温 [°C] : パラメータ

$f_{i_{FishLossTemp,f,a}}$: 水温死亡の直線関数節点制限値[-] : パラメータ

$$u_{FishLossDo,f,a} = 1 - f_{liner}(x_{i_{FishLossDo,f,a}}, f_{i_{FishLossDo,f,a}}, DO) \quad (48)$$

$x_{i_{FishLossDo,f,a}}$: 貧酸素・過飽和死亡の直線関数節点 DO
[molO₂・m⁻³] : パラメータ
 $f_{i_{FishLossDo,f,a}}$: 貧酸素・過飽和死亡の直線関数節点制限値
[-] : パラメータ

$$u_{FishLossSalt,f,a} = 1 - f_{liner}(x_{i_{FishLossSalt,f,a}}, f_{i_{FishLossSalt,f,a}}, S) \quad (49)$$

$x_{i_{FishLossSalt,f,a}}$: 塩分濃度死亡の直線関数節点, 塩分[psu] :
パラメータ
 $f_{i_{FishLossSalt,f,a}}$: 塩分濃度死亡の直線関数節点制限値[-] :
パラメータ

$$u_{FishLossSed,f} = \begin{cases} 0 & (\text{底生生物以外}) \\ 1 - P_{FishLossSed,f}(Index_{i,j}^{sed}) & (\text{底生生物}) \end{cases} \quad (50)$$

$P_{FishLossSed,f}$: 底質に対する選好強度を示す配列[-] : パラメータ

$Index_{i,j}^{sed}$: 底質の分類番号 : 入力データ(忌避回遊参照)

(8) 漁獲

漁獲 $B_{FishFmor,f,a}$ [molC・m⁻³・s⁻¹]は、発育段階で分けて、ファイル入力で空間的、時間的に与える。

$$B_{FishFmor,f,a} = F_{Fish,f,a} \cdot FISH_{f,a} \quad (51)$$

$F_{Fish,f,a}$: 漁獲速度[s⁻¹] : 入力データ

(9) 回遊

回遊 $B_{FishMig,f,a}$ [molC・m⁻³・s⁻¹]は索餌回遊、産卵回遊、忌避回遊を考慮する。回遊生成項は各セル界面より算出される回遊フラックス(魚の濃度×回遊速度)より求める。

$$B_{FishMig,f,a} = - \left(\frac{\partial Flux_{FishMig,f,a}^x}{\partial x} + \frac{\partial Flux_{FishMig,f,a}^y}{\partial y} + \frac{\partial Flux_{FishMig,f,a}^z}{\partial z} \right) \quad (52)$$

$Flux_{FishMig,f,a}^{X_{I,J,K}}$: セル X 方向界面 I, J, K における回遊フラックス

$$Flux_{FishMig,f,a}^{X_{I,J,K}} = Flux_{FishMigFeed,f,a}^{X_{I,J,K}} + Flux_{FishMigSpaw,f,a}^{X_{I,J,K}} + Flux_{FishMigEvas,f,a}^{X_{I,J,K}} \quad (53)$$

$Flux_{FishMigFeed,f,a}^{X_{I,J,K}}$: セル X 方向界面 I, J, K における索餌回遊フラックス

$Flux_{FishMigSpaw,f,a}^{X_{I,J,K}}$: セル X 方向界面 I, J, K における産卵回遊フラックス

$Flux_{FishMigEvas,f,a}^{X_{I,J,K}}$: セル X 方向界面 I, J, K における忌避回遊フラックス

Y, Z 方向も同様に求める

a) 浮遊分散速度

移動力のない時期は流動による移流拡散とする浮遊分散期は発育段階により定める(卵仔期)。

b) 索餌回遊

・索餌回遊方向(選好方向)

索餌回遊方向の与え方については、以下の2通りの方法をスイッチで選択出来るようにする。

①回遊方向を1方向性で与える方法

当該格子を囲む格子の餌料濃度に対して濃度が最も大きい格子に向かって移動するものとする。移動方向のセル界面のみ索餌回遊フラックスを与え、他のセル界面のフラックスは0とする。例えばX正方向の移動の場合は以下の式になる。

$$Flux_{FishMigFeed,f,a}^{X_{I,J,K}} = V_{FishMig,f,a}^{Feed} \cdot FISH_{f,a} \quad (54)$$

$$Flux_{FishMigFeed,f,a}^{X_{I-1,J,K}} = 0 \quad (55)$$

$$Flux_{FishMigFeed,f,a}^{Y_{I,J,K}} = 0 \quad (56)$$

$$Flux_{FishMigFeed,f,a}^{Y_{I,J-1,K}} = 0 \quad (57)$$

$$Flux_{FishMigFeed,f,a}^{Z_{I,J,K}} = 0 \quad (58)$$

$$Flux_{FishMigFeed,f,a}^{Z_{I,J,K-1}} = 0 \quad (59)$$

$V_{FishMig,f,a}^{Feed}$: 索餌回遊速度[m・s⁻¹]

②回遊方向を餌料濃度の比率で分配する方法

当該格子を囲む格子の餌料濃度に対して濃度が大きい格子のみを対象に餌料濃度の比率で移動方向のセル界面に索餌回遊フラックスを分配する。例えばX正方向のセル界面では以下の式になる。

$$Flux_{FishMigFeed,f,a}^{X_{I,J,K}} = \alpha_{FishMigFeed,f,a}^{I+1,J,K} \cdot V_{FishMig,f,a}^{Feed} \cdot FISH_{f,a} \quad (60)$$

$$\alpha_{FishMigFeed,f,a}^{I+1,J,K} = \frac{\prod_{Fish,f,a}^{Step,I+1,J,K}}{\prod_{Fish,f,a}^{Step,I-1,J,K} + \prod_{Fish,f,a}^{Step,I+1,J,K} + \prod_{Fish,f,a}^{Step,I,J-1,K} + \prod_{Fish,f,a}^{Step,I,J+1,K} + \prod_{Fish,f,a}^{Step,I,J,K-1} + \prod_{Fish,f,a}^{Step,I,J,K+1}} \quad (61)$$

$$\prod_{Fish,f,a}^{Step,I+1,J,K} = \begin{cases} \prod_{Fish,f,a}^{I+1,J,K} & (\prod_{Fish,f,a}^{I+1,J,K} > \prod_{Fish,f,a}^{I,J,K}) \\ 0 & (\prod_{Fish,f,a}^{I+1,J,K} \leq \prod_{Fish,f,a}^{I,J,K}) \end{cases} \quad (62)$$

$\prod_{Fish,f,a}^{I,J,K}$: 格子 I, J, K における餌料濃度[molC・m⁻³]

全方位のセル界面に対して同様の索餌回遊フラックスを求め
る。

・索餌回遊速度

索餌回遊速度は巡航速度に補正係数を乗じて求める。補正
係数は、餌料最大格子との濃度勾配によって与える。

$$V_{FishMig,f,a}^{Feed} = A_{FishFeed,f,a} \cdot (1 - A_{FishSpaw,f}) \cdot \alpha_{FishMig,f,a}^{Feed} \cdot V_{FishMig,f,a} \quad (63)$$

$A_{FishFeed,f,a}$: 索餌による魚類の移動を引き起こすイブ
ルスイッチ

$$A_{FishFeed,f,a} = \begin{cases} 0 & (\prod_{Fish,f,a} \geq \prod_{Fish,f,a}^{min}) \\ 1 & (\prod_{Fish,f,a} < \prod_{Fish,f,a}^{min}) \end{cases} \quad (64)$$

$A_{FishSpaw,f}$: 産卵回遊期間を示すスイッチ (産卵回遊参照)

$\prod_{Fish,f,a}$: 魚の餌料濃度[molC・m⁻³]

$\prod_{Fish,f,a}^{min}$: 餌料濃度の下限値 (閾値) [molC・m⁻³] : パラメ
ータ

$\alpha_{FishMig,f,a}^{Feed}$: 索餌回遊の補正係数[-]

$V_{FishMig,f,a}$: 魚の巡航速度[m・s⁻¹] : パラメータ

$$\alpha_{FishMig,f,a}^{Feed} = (\prod_{Fish,f,a}^{Max} - \prod_{Fish,f,a}^{I,J,K}) / \prod_{Fish,f,a}^{Max} \quad (65)$$

$\prod_{Fish,f,a}^{I,J,K}$: 格子 I, J, K における餌料濃度[molC・m⁻³]

$\prod_{Fish,f,a}^{Max}$: 格子 I, J, K および隣り合う格子の中で最大とな
る格子の餌料濃度[molC・m⁻³]

c) 産卵回遊

・産卵回遊方向

当該格子を囲む格子の中でより産卵場に近い格子に向かっ
て移動するものとする。産卵場の方向を識別するために、前
処理として以下の手順で産卵回遊経路マップを作成する。

- ①. 産卵場となる格子に 0 を入力する。
- ②. 全ての格子を調べ、未入力格子に対して隣接する格

子に入力格子がある場合、入力格子の中の最小値に 1 加
算した値をその未入力格子に入れる。

③. ②を陸上部以外の全ての格子が入力格子になるまで

8	7	6	6	7	8	9	10	11	12
7	6	5	5	6	7	8	9	10	11
6	5	4	4	5	6	7	8	9	10
5	4	3	3	4	5		9	10	11
4	3	2	2	3	4		10	11	12
3	2	1	1	2	3		11	12	13
2	1	0	0	1	2		12	13	14
3	2	1	1	2	3		13	14	15
4	3	2	2	3	4		14	15	16

産卵場 陸上部

図-3.2 産卵回遊経路マップのイメージ図

繰り返す。

これらの手順で以下のようなマップが作成される (図-3.2)。
それぞれの格子で隣接格子を調べて値の小さい格子の方に移
動することで、産卵場に近い方向へ誘導していく。実際は可
変格子や BCM 格子の使用を考慮して、マップ入力値には格
子幅を加算した値を用いる。

移動方向のセル界面のみ産卵回遊フラックスを与え、他の
セル界面のフラックスは 0 とする。例えば X 正方向の移動の
場合は以下の式になる。

$$Flux_{FishMigSpaw,fa}^{X_{I,J,K}} = V_{FishMig,f,a}^{Spaw} \cdot FISH_{f,a} \quad (66)$$

$$Flux_{FishMigSpaw,fa}^{X_{I-1,J,K}} = 0 \quad (67)$$

$$Flux_{FishMigSpaw,fa}^{Y_{I,J,K}} = 0 \quad (68)$$

$$Flux_{FishMigSpaw,fa}^{Y_{I,J-1,K}} = 0 \quad (69)$$

$$Flux_{FishMigSpaw,fa}^{Z_{I,J,K}} = 0 \quad (70)$$

$$Flux_{FishMigSpaw,fa}^{Z_{I,J,K-1}} = 0 \quad (71)$$

$V_{FishMig,f,a}^{Spaw}$: 産卵回遊速度[m・s⁻¹]

・産卵回遊速度

生育場から産卵場までの回遊速度は知見がない。このため
索餌回遊の速度を用い、生殖腺の成熟によって速度を調整す
る。

$$V_{FishMig,f,a}^{Spaw} =$$

$$\begin{cases} 0 & (a = 1, 2, 3, a = 4 \text{ 出産卵しない魚種}) \\ A_{FishSpaw,f} \cdot \alpha_{FishMig,f}^{Spaw} \cdot P_{FishEvas,f,a} \cdot V_{FishMig,f,a} & (a = 4 \text{ 出産卵する魚種}, a = 5) \end{cases} \quad (72)$$

$A_{FishSpaw,f}$: 産卵回遊期間を示すスイッチ

$\alpha_{FishMig}^{Spaw}$: 産卵回遊の補正係数[-]

$P_{FishEvas,f,a}$: 忌避回遊の選好強度 (忌避回遊参照)

$$A_{FishSpaw,f} = \begin{cases} 0 & (Span_{Spaw,f} > Span_{SpawB,f}) \\ 1 & (Span_{Spaw,f} \leq Span_{SpawB,f}) \end{cases} \quad (73)$$

$Span_{SpawB,f}$: 産卵回遊期間[s] : パラメータ

$Span_{Spaw,f}$: 現在時刻から産卵開始時刻までの時間差[s]

$Span_{Spaw,f}$

$$= \begin{cases} t_{SpawStart,f} - Date & (t_{SpawStart,f} \geq Date) \\ t_{SpawStart,f} - Date + 86400 \times 365 & (t_{SpawStart,f} < Date) \end{cases} \quad (74)$$

$t_{SpawStart,f}$: 初年から産卵開始時刻までの経過時間[s] : パラメータ

$Date$: 初年から現在時刻までの経過時間[s]

$$Date = \text{mod}(t + t_{start}, 86400 \times 365) \quad (75)$$

t_{start} : 初年 (1月1日 0:00) から計算 $t = 0$ の時刻までの経過時間[s] : 共有パラメータ

t : 計算時間

$$\alpha_{FishMig}^{Spaw} = Gonad_{max} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-k_{FishSpaw,f} \cdot (Span_{SpawB,f} - Span_{Spaw,f})\right) \right\}^{\beta_{FishSpaw}} \quad (76)$$

$Gonad_{max}$: 最大生殖腺指数=1

$k_{FishSpaw,f}$: 産卵親魚の生殖腺指数係数[-] : パラメータ

$\beta_{FishSpaw}$: 産卵親魚の生殖腺成長速度指数=1

補足 : 補正係数は卵巣の成長速度式より導出

$$\alpha_{FishMig}^{Spaw} = f(W_{FishSpaw}, t), \quad f(W_{FishSpaw}, t) = Gonad_{max} \cdot (1 - e^{-k(t-t_0)})^b \quad (77)$$

d) 忌避回遊

貧酸素水塊、淡水流入等の生息環境悪化に対する忌避行動時の回遊速度を与える。忌避行動は一方向性を持たない拡散性の行動であるため、当該格子を囲む格子の選好強度に応じた比率配分による移動モデルとする。

選好強度の配分による移動モデルを炭素濃度ベースで行えるように改良する。また三次元の移動、可変格子でも扱えるように拡張する。

例えば以下のように各格子内の選好強度が求まっている場合、セル I, J, K の X 方向界面で A・B 間の移動フラックスは次のようになる (図-3.3)。

	$P_{I,J+1,k}$	
	A	B
$P_{I-1,J,k}$	$P_{I,J,k}$	$P_{I+1,J,k}$
	$P_{I,J-1,k}$	

$P_{I,J,k}$: 格子 I,J,K の選好強度

図-3.3 格子内の移動フラックス

$$Flux_{FishMigEvas,fa}^{X_{I,J,K}} = D_{AB,f} \cdot V_{FishMig,f,a} \cdot FISH_{f,a}^{I,J,K} - D_{BA,f} \cdot V_{FishMig,f,a} \cdot FISH_{f,a}^{I+1,J,K} \quad (78)$$

$V_{FishMig,f,a}$: 魚の巡航速度[m・s⁻¹] : パラメータ

$D_{AB,f}$: 可変格子を考慮した A→B への選好強度による配分比[-]

$D_{BA,f}$: 可変格子を考慮した B→A への選好強度による配分比[-]

$$D_{AB,f} = \frac{VP_{I+1,J,K}}{VP_{I,J,K} + VP_{I-1,J,K} + VP_{I+1,J,K} + VP_{I-1,J,K} + VP_{I,J+1,K} + VP_{I,J,K-1} + VP_{I,J,K+1}} \quad (79)$$

$$D_{BA,f} = \frac{VP_{I,J,K}}{VP_{I+1,J,K} + VP_{I,J,K} + VP_{I+2,J,K} + VP_{I+1,J-1,K} + VP_{I+1,J+1,K} + VP_{I+1,J,K-1} + VP_{I+1,J,K+1}} \quad (80)$$

$$VP_{I,J,K} = Vol_{I,J,K} \cdot P_{I,J,K} \quad (81)$$

$Vol_{I,J,K}$: 格子液層部の体積[m³]

全方位のセル界面に対して同様の忌避回遊フラックスを求めめる。

各格子の選好強度は次式であらわす。

$$P_{FishEvas,f,a} = u_{FishEvasTemp,f,a} \cdot u_{FishEvasSalt,f,a} \cdot$$

$$u_{FishEvasDo,f,a} \cdot u_{FishEvasSed,f,a} \quad (82)$$

$u_{FishEvasTemp,f,a}$: 水温に対する選好強度[-]

$u_{FishEvasDo,f,a}$: DO に対する選好強度[-]

$u_{FishEvasSalt,f,a}$: 塩分に対する選好強度[-]

$u_{FishEvasSed,f,a}$: 底質に対する選好強度[-]

$$u_{FishEvasTemp,f,a} = f_{liner}(x_{i_{FishEvasTemp,f,a}}, f_{i_{FishEvasTemp,f,a}}, T) \quad (83)$$

$x_{i_{FishEvasTemp,f,a}}$: 水温による選好強度の直線関数節点: 水温[°C] : パラメータ

$f_{i_{FishEvasTemp,f,a}}$: 水温による選好強度の直線関数節点: 確率値[-] : パラメータ

$$u_{FishEvasDo,f,a} = f_{liner}(x_{i_{FishEvasDo,f,a}}, f_{i_{FishEvasDo,f,a}}, DO) \quad (86)$$

$x_{i_{FishEvasDo,f,a}}$: DO による選好強度の直線関数節点: DO [molO₂ · m⁻³] : パラメータ

$f_{i_{FishEvasDo,f,a}}$: DO による選好強度の直線関数節点: 確率値[-] : パラメータ

$$u_{FishEvasSalt,f,a} = f_{liner}(x_{i_{FishEvasSalt,f,a}}, f_{i_{FishEvasSalt,f,a}}, S) \quad (84)$$

$x_{i_{FishEvasSalt,f,a}}$: 塩分濃度による選好強度の直線関数節点: 塩分[psu] : パラメータ

$f_{i_{FishEvasSalt,f,a}}$: 塩分濃度による選好強度の直線関数節点: 確率値[-] : パラメータ

$$u_{FishEvasSed,f,a} = \begin{cases} 1 & \text{(浮魚)} \\ P_{FishEvasSed,f,a}(Index_{i,j}^{sed}) & \text{(底魚)} \end{cases} \quad (85)$$

$P_{FishEvasSed,f,a}$: 底質に対する選好強度を示す配列[-] : パラメータ

$Index_{i,j}^{sed}$: 底質の分類番号 : 入力データ

底質の分類番号は以下の通り

1 : 粘性土, 2 : 砂混じりシルト, 3 : 砂質土, 4 : 砂礫, 5 : 岩盤

(10) 産卵

産卵 $B_{FishSpaw,f,a}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹] は, 産卵期に 1 回とす
る。産卵に伴う生物量の変化は同時刻には生じない。産卵期

には親魚の卵巣が減少することで生物量の形態が卵に変化する
ように生物量の遷移が生じる (図-3.4)。

本モデルでは産卵回遊中に産卵場に達した個体群が産卵期
間に等しい産卵速度で産卵するものとする (産卵速度)。年
齢 (級) 群ごとに求めた産卵親魚の生殖腺重量指数と年級ご
との魚類重量を乗じて産卵量を計算する。

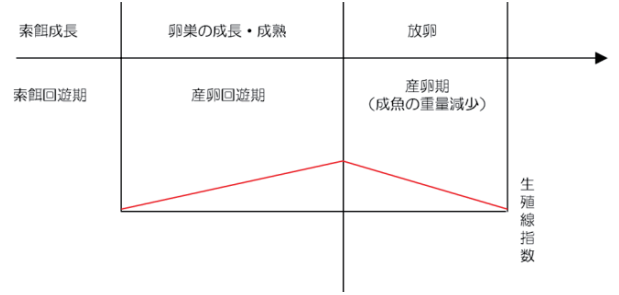


図-3.4 生殖腺 (卵巣) 指数の変化

$$B_{FishSpaw,f,a} = \begin{cases} A_{FishSpaw1,f} \cdot R_{FishSpaw,f} \cdot FISH_{f,4} + R_{FishSpaw,f} \cdot FISH_{f,5} & (a = 1) \\ 0 & (a = 2,3) \\ -A_{FishSpaw1,f} \cdot R_{FishSpaw,f} \cdot FISH_{f,4} & (a = 4) \\ -R_{FishSpaw,f} \cdot FISH_{f,5} & (a = 5) \end{cases} \quad (86)$$

$A_{FishSpaw1,f}$: 成魚 1 年目から産卵する魚種のスイッチ (0 or 1) [-] : パラメータ

$R_{FishSpaw,f}$: 魚の産卵速度[s⁻¹]

$$R_{FishSpaw,f} = \begin{cases} \alpha_{FishSpaw,f} \cdot (Span_f - Span_{Swt,f,1}) / Span_f^2 & (Span_{Swt,f,1} < Span_f) \\ 0 & (Span_{Swt,f,1} \geq Span_f) \end{cases} \quad (87)$$

$\alpha_{FishSpaw,f}$: 生殖腺指数 (産卵開始時期に魚の卵巣が占める割合)[-]

$Span_f$: 発育段階の遷移に要する期間 (放卵期の期間) [s] : パラメータ

$Span_{Swt,f,1}$: 産卵開始時刻から現在時刻までの時間差[s] (発育段階の遷移参照)

$$\alpha_{FishSpaw,f} = GI_{FishSpawMax,f} \cdot \{1 - \exp(-k_{FishSpaw,f} \cdot Span_{SpawB,f})\}^{\beta_{FishSpaw}} \quad (88)$$

$GI_{FishSpawMax,f}$: 最大生殖腺指数[-] : パラメータ

$k_{FishSpaw,f}$: 産卵親魚の生殖腺指数係数[-] : パラメータ

$Span_{spawB,f}$: 産卵回遊期間[s] : パラメータ

$\beta_{FishSpaw}$: 産卵親魚の生殖腺成長速度指数=1

(11) 発育段階区分の遷移 :

発育段階の遷移に伴う単位時間当たりの生物量 $B_{FishSwT,f,a}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹] は、遷移期間内に一定量で行われるものと仮定する。

$$B_{FishSwT,f,a} = \begin{cases} -R_{FishSwT,f,a+1} \cdot FISH_{f,a} & (a = 1) \\ R_{FishSwT,f,a} \cdot FISH_{f,a-1} - R_{FishSwT,f,a+1} \cdot FISH_{f,a} & (a = 2,3,4) \\ R_{FishSwT,f,a} \cdot FISH_{f,a-1} & (a = 5) \end{cases} \quad (89)$$

$R_{FishSwT,f,a}$: 発育段階区分の遷移速度[s⁻¹]

$R_{FishSwT,f,a} =$

$$\begin{cases} 1/(Span_f - Span_{swt,f,a}) & (Span_{swt,f,a} < Span_f) \\ 0 & (Span_{swt,f,a} \geq Span_f) \end{cases} \quad (90)$$

$Span_f$: 発育段階の遷移に要する期間(放卵期の期間) [s] : パラメータ

$Span_{swt,f,a}$: 発育段階の遷移開始時刻から現在時刻までの時間差[s]

$$Span_{swt,f,a} = \begin{cases} Date - t_{swtStart,f,a} & (t_{swtStart,f,a} \leq Date) \\ Date + 86400 \times 365 - t_{swtStart,f} & (t_{swtStart,f,a} > Date) \end{cases} \quad (91)$$

$t_{swtStart,f,a}$: 初年から発育段階の遷移開始時刻までの経過時間[s] : パラメータ

$Date$: 初年(1月1日 0:00)から現在時刻までの経過時間[s]

$$Date = \text{mod}(t + t_{start}, 86400 \times 365) \quad (92)$$

t_{start} : 初年から計算 $t = 0$ の時刻までの経過時間[s] : 共有パラメータ

t : 計算時間

(12) 底面魚の扱い

底面魚については、底層における段差の移動や、格子位置によって底層厚が異なることを考慮して、浮遊魚と同様に三次元でのモデル計算を行う。魚種が底魚の場合は計算後に分散した生物量を底面に戻す。

$$FISH_{f,a} = u_{FishBtm}^{Layer,K} \cdot \int_d^\eta FISH_{f,a}(z) dz / D_{FishBtm} \quad (93)$$

$D_{FishBtm}$: 底面魚が生息する層厚[m] : 共有パラメータ

$u_{FishBtm}^{Layer,K}$: K層での底面魚の存在率[-]

$$u_{FishBtm}^{Layer,K} = \max \left\{ \frac{\min(z_K, \eta, d + D_{FishBtm}) - \max(z_{K-1}, d)}{\min(z_K, \eta) - \max(z_{K-1}, d)}, 0 \right\} \quad (94)$$

z_K : K層の上面高さ[m], η : 水面の高さ[m], d : 底面の高さ[m]

回遊については三次元で扱うと段差を上ることが出来なくなる場合があるため、低層の生物変数より回遊速度・好選強度を求めてから、二次元での移動分散を行い、結果を三次元の各層に存在率を乗じて配分する。

(13) 既存モデルの修正

魚類モデルを使用するために、既存の伊勢湾シミュレーターに対して以下の項目を追加した。

a) 植物プランクトンの増殖モデル

植物プランクトン $S_{PHY,i}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹] は次式で表わされる。

$$S_{PHY,i} = \underbrace{B_{PhyPs,i}^C}_{\text{光合成}} - \underbrace{B_{PhyExt,i}}_{\text{細胞外分泌}} - \underbrace{B_{PhyResp,i}}_{\text{呼吸}} - \underbrace{B_{PhyLoss,i}}_{\text{死亡}} - \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} B_{Phy2Zoo,i,j}}_{\text{動物プランクトンによる被食}} - \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} B_{Phy2Pz,i,n}}_{\text{原生動物による被食}} - \underbrace{B_{Phy2Fish,i}}_{\text{魚による被食}} + \underbrace{B_{PhyMig,i}}_{\text{鉛直移動}} - \underbrace{\sum_f^{N_{FISH}} \sum_a^{N_{Age}} B_{Phy2Fish,i,f,a}}_{\text{魚による被食}} \quad (95)$$

b) 植物プランクトンの減少に伴う余剰栄養塩の減少

$$B_{SqnLoss,i} = \left(B_{PhyLoss,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} B_{Phy2Zoo,i,j} + \sum_n^{N_{PZ}} B_{Phy2Pz,i,n} + \sum_f^{N_{FISH}} \sum_a^{N_{Age}} B_{Phy2Fish,i,f,a} \right) \cdot \frac{SQN_i}{PHY_i} \quad (96)$$

$$B_{SqLoss,i} = \left(B_{PhyLoss,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} B_{Phy2Zoo,i,j} + \sum_n^{N_{PZ}} B_{Phy2Pz,i,n} + \sum_f^{N_{FISH}} \sum_a^{N_{Age}} B_{Phy2Fish,i,f,a} \right) \cdot \frac{SQP_i}{PHY_i} \quad (97)$$

c) 動物プランクトンの増殖モデル

植物プランクトン $S_{ZOO,j}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹] は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
S_{ZOO,j} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} (B_{Phy2Zoo,i,j} - \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut})}_{\text{植物プランクトンの捕食}} + \\
& \underbrace{\sum_k^{NDEC} B_{Pom2Zoo,k,j}}_{\text{懸濁態有機物の摂食}} + \underbrace{\sum_n^{NPZ} (B_{Pz2Zoo,n,j} - \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut})}_{\text{原生動物の捕食}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} (B_{Bac2Zoo,m,j} - \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut})}_{\text{好気性細菌の捕食}} - \underbrace{B_{ZooExc,j}}_{\text{排糞}} - \underbrace{B_{ZooResp,j}}_{\text{呼吸}} - \\
& \underbrace{B_{ZooLoss,j}}_{\text{死亡}} - \underbrace{B_{Zoo2Fish,j}}_{\text{魚による被食}} + \underbrace{B_{ZooMig,j}}_{\text{鉛直移動}} - \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} B_{Zoo2Fish,j,f,a}}_{\text{魚による被食}}
\end{aligned} \tag{98}$$

d) 原生動物の増殖モデル

原生動物 $S_{PZ,n}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹]は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
S_{PZ,n} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} (B_{Phy2Pz,i,n} - \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut})}_{\text{植物プランクトンの捕食}} + \\
& \underbrace{\sum_{n'}^{NPZ} (B_{Pz2Pz,n',n} - \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut})}_{\text{原生動物の捕食}} - \underbrace{\sum_{n'}^{NPZ} B_{Pz2Pz,n',n}}_{\text{原生動物による被食}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} (B_{Bac2Pz,m,n} - \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut})}_{\text{好気性細菌の捕食}} - \underbrace{\sum_j^{NZOO} B_{Pz2Zoo,n,j}}_{\text{動物プランクトンによる被食}} - \\
& \underbrace{B_{PzExc,n}}_{\text{排糞}} - \underbrace{B_{PzResp,n}}_{\text{呼吸}} - \underbrace{B_{PzLoss,n}}_{\text{死亡}} - \underbrace{B_{Pz2Fish,n}}_{\text{魚による被食}} - \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} B_{Pz2Fish,n,f,a}}_{\text{魚による被食}}
\end{aligned} \tag{99}$$

e) 懸濁態有機物の増殖モデル

懸濁態有機炭素 $S_{POC,k}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹]は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
S_{POC,k} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot B_{PhyLoss,i}}_{\text{植物プランクトンの死亡}} + \underbrace{\sum_j^{NZOO} c_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot B_{ZooLoss,j}}_{\text{動物プランクトンの死亡}} - \\
& \underbrace{\sum_j^{NZOO} B_{Pom2Zoo,k,j}}_{\text{動物プランクトンによる摂食}} + \underbrace{\sum_j^{NZOO} \kappa_{ZooExc,j} \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,C}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_n^{NPZ} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot B_{PzLoss,n}}_{\text{原生動物の死亡}} + \underbrace{\sum_n^{NPZ} \kappa_{PzExc,n} \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,C}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \alpha_{BacPom,m} \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} - \underbrace{\sum_m^{NBAC} B_{PomDecA,k,m}^C}_{\text{好気性細菌による分解}} - \\
& \underbrace{B_{PomDecB,k}^C}_{\text{嫌気性細菌による分解}} + \underbrace{B_{FishLoss,k}^C}_{\text{魚の死亡・排糞}} + \underbrace{B_{PocSett,k}}_{\text{鉛直移動}} + \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} c_{Fish,f,a}^{dec,k} \cdot B_{FishLoss,f,a}}_{\text{魚の死亡}} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} B_{Pom2Fish,k,f,a}}_{\text{魚による摂食}} + \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} \kappa_{FishExc,f,a} \cdot B_{FishExc,k,f,a}^{net,C}}_{\text{魚の正味の排糞・残滓量}}
\end{aligned} \tag{100}$$

懸濁態溶存窒素 $S_{PON,k}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹]は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
S_{PON,k} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot N_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyLoss,i}}_{\text{植物プランクトンの死亡}} + \\
& \underbrace{\sum_j^{NZOO} c_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot N_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooLoss,j}}_{\text{動物プランクトンの死亡}} - \underbrace{\sum_j^{NZOO} N_C^{ZOO,j} \cdot B_{Pom2Zoo,k,j}}_{\text{動物プランクトンによる摂食}} + \\
& \underbrace{\sum_j^{NZOO} \kappa_{ZooExc,j} \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,N}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_n^{NPZ} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot N_C^{PZ,n} \cdot B_{PzLoss,n}}_{\text{原生動物の死亡}} + \underbrace{\sum_n^{NPZ} \kappa_{PzExc,n} \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,N}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \alpha_{BacPom,m} \cdot N_C^{Bac,m} \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} - \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} B_{PomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による分解}} - \underbrace{B_{PomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による分解}} + \underbrace{B_{FishLoss,k}^N}_{\text{魚の死亡・排糞}} + \\
& \underbrace{B_{PonSett,k}}_{\text{鉛直移動}} + \underbrace{\sum_f^{NFISH} (N_C^{FISH,f} \cdot \sum_a^{NAge} c_{Fish,f,a}^{dec,k} \cdot B_{FishLoss,f,a})}_{\text{魚の死亡}} - \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} (N_C^{FISH,f} \cdot \sum_a^{NAge} B_{Pom2Fish,k,f,a})}_{\text{魚による摂食}} + \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} \kappa_{FishExc,f,a} \cdot B_{FishExc,k,f,a}^{net,N}}_{\text{魚の正味の排糞・残滓量}}
\end{aligned} \tag{101}$$

懸濁態溶存リン $S_{POP,k}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹]は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
S_{POP,k} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot P_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyLoss,i}}_{\text{植物プランクトンの死亡}} + \\
& \underbrace{\sum_j^{NZOO} c_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot P_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooLoss,j}}_{\text{動物プランクトンの死亡}} - \underbrace{\sum_j^{NZOO} P_C^{ZOO,j} \cdot B_{Pom2Zoo,k,j}}_{\text{動物プランクトンによる摂食}} + \\
& \underbrace{\sum_j^{NZOO} \kappa_{ZooExc,j} \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,P}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} + \underbrace{\sum_n^{NPZ} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot P_C^{PZ,n} \cdot B_{PzLoss,n}}_{\text{原生動物の死亡}} + \\
& \underbrace{\sum_n^{NPZ} \kappa_{PzExc,n} \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,P}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \alpha_{BacPom,m} \cdot P_C^{Bac,m} \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} - \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} B_{PomDecA,k,m}^P}_{\text{好気性細菌による分解}} - \underbrace{B_{PomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による分解}} + \underbrace{B_{FishLoss,k}^P}_{\text{魚の死亡・排糞}} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{B_{PopSett,k}}_{\text{鉛直移動}} + \underbrace{\sum_f^{NFISH} \left(P_c^{FISH,f} \cdot \sum_a^{NAge} c_{Fish,f,a}^{dec,k} \cdot B_{FishLoss,f,a} \right)}_{\text{魚の死亡}} - \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \left(P_c^{FISH,f} \cdot \sum_a^{NAge} B_{Pom2Fish,k,f,a} \right)}_{\text{魚による摂食}} + \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} \kappa_{FishExc,f,a} \cdot B_{FishExc,k,f,a}^{net,P}}_{\text{魚の正味の排糞・残滓量}} \quad (102)
\end{aligned}$$

$\kappa_{FishExc,f,a}$: 魚の排糞・残滓量のうち、懸濁態有機物に配分される割合[-] : パラメータ

f) 溶存態有機物の増殖モデル

溶存態炭素 $S_{DOC,k}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹] は次式で表わされる.

$$\begin{aligned}
S_{DOC,k} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot B_{PhyExt,i}}_{\text{植物プランクトンの細胞外分泌}} + \\
& \underbrace{\sum_j^{NZOO} (1 - \kappa_{ZooExc,j}) \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,C}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_n^{NPZ} (1 - \kappa_{PzExc,n}) \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,C}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot (1 - \alpha_{BacPom,m}) \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} - \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} B_{DomDecA,k,m}^C}_{\text{好気性細菌による DOC 分解}} - \underbrace{B_{DomDecB,k}^C}_{\text{嫌気性細菌による DOC 分解}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} \kappa_{DecA,k} \cdot B_{PomDecA,k,m}^C}_{\text{好気性細菌による POC 分解}} + \underbrace{\kappa_{DecB,k} \cdot B_{PomDecB,k}^C}_{\text{嫌気性細菌による POC 分解}} + \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} (1 - \kappa_{FishExc,f,a}) \cdot B_{FishExc,k,f,a}^{net,C}}_{\text{魚の正味の排糞・残滓量}} \quad (103)
\end{aligned}$$

溶存態窒素 $S_{DON,k}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹] は次式で表わされる.

$$\begin{aligned}
S_{DON,k} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot N_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyExt,i}}_{\text{植物プランクトンの細胞外分泌}} + \\
& \underbrace{\sum_j^{NZOO} (1 - \kappa_{ZooExc,j}) \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,N}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_n^{NPZ} (1 - \kappa_{PzExc,n}) \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,N}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot (1 - \alpha_{BacPom,m}) \cdot N_C^{BAC,m} \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} - \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} B_{DomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による DON 分解}} - \underbrace{B_{DomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による DON 分解}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} \kappa_{DecA,k} \cdot B_{PomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による PON 分解}} + \underbrace{\kappa_{DecB,k} \cdot B_{PomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による PON 分解}} +
\end{aligned}$$

$$\underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} (1 - \kappa_{FishExc,f,a}) \cdot B_{FishExc,k,f,a}^{net,N}}_{\text{魚の正味の排糞・残滓量}} \quad (104)$$

溶存態リン $S_{DOP,k}$ [molC · m⁻³ · s⁻¹] は次式で表わされる.

$$\begin{aligned}
S_{DOP,k} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot P_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyExt,i}}_{\text{植物プランクトンの細胞外分泌}} + \\
& \underbrace{\sum_j^{NZOO} (1 - \kappa_{ZooExc,j}) \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,P}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_n^{NPZ} (1 - \kappa_{PzExc,n}) \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,P}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot (1 - \alpha_{BacPom,m}) \cdot P_C^{BAC,m} \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} - \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} B_{DomDecA,k,m}^P}_{\text{好気性細菌による DOP 分解}} - \underbrace{B_{DomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による DOP 分解}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} \kappa_{DecA,k} \cdot B_{PomDecA,k,m}^P}_{\text{好気性細菌による POP 分解}} + \underbrace{\kappa_{DecB,k} \cdot B_{PomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による POP 分解}} + \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \sum_a^{NAge} (1 - \kappa_{FishExc,f,a}) \cdot B_{FishExc,k,f,a}^{net,P}}_{\text{魚の正味の排糞・残滓量}} \quad (105)
\end{aligned}$$

g) 窒素 (NH₄) の増殖モデル

窒素 S_{NH_4} [molC · m⁻³ · s⁻¹] は次式で表わされる.

$$\begin{aligned}
S_{NH_4} = & \underbrace{\sum_i^{NPHY} N_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyResp,i}}_{\text{植物プランクトンの呼吸}} + \underbrace{\sum_i^{NPHY} B_{SqnLoss,i}}_{\text{SQN の減少}} - \\
& \underbrace{\sum_i^{NPHY} B_{PhyTake,i}^{NH_4}}_{\text{植物プランクトンによる摂取}} + \underbrace{\sum_j^{NZOO} N_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooResp,j}}_{\text{動物プランクトンの呼吸}} + \\
& \underbrace{\sum_n^{NPZ} N_C^{PZ,n} \cdot B_{PzResp,n}}_{\text{原生動物の呼吸}} + \underbrace{\sum_m^{NBAC} N_C^{BAC,m} \cdot B_{BacResp,m}}_{\text{好気性細菌の呼吸}} - \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} B_{BacTake,m}^{NH_4}}_{\text{好気性細菌による摂取}} + \underbrace{\sum_m^{NBAC} \sum_k^{NDEC} (1 - \kappa_{DecA,k}) \cdot B_{PomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による懸濁態有機物の分解}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{NBAC} \sum_k^{NDEC} B_{DomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による溶存態有機物の分解}} + \\
& \underbrace{\sum_k^{NDEC} (1 - \kappa_{DecB,k}) \cdot B_{PomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による懸濁態有機物の分解}} + \\
& \underbrace{\sum_k^{NDEC} B_{DomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による溶存態有機物の分解}} - \underbrace{B_{NH_4 \rightarrow NO_2}}_{\text{アンモニアの酸化 (NH}_4 \rightarrow \text{NO}_2)} + \\
& \underbrace{\sum_f^{NFISH} \left(N_c^{FISH,f} \cdot \sum_a^{NAge} B_{FishResp,f,a} \right)}_{\text{魚の呼吸・排洩}} \quad (106)
\end{aligned}$$

h) リン (PO₄) の増殖モデル

リン S_{PO_4} [molC · m⁻³ · s⁻¹] は次式で表わされる.

$$\begin{aligned}
S_{PO_4} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} P_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyResp,i}}_{\text{植物プランクトンの呼吸}} - \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} B_{PhyTake,i}^{PO_4}}_{\text{植物プランクトンによる摂取}} + \\
& \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} B_{SqpLoss,i}}_{\text{SQPの減少}} + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} P_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooResp,j}}_{\text{動物プランクトンの呼吸}} + \\
& \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} P_C^{PZ,n} \cdot B_{PzResp,n}}_{\text{原生動物の呼吸}} + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} P_C^{BAC,m} \cdot B_{BacResp,m}}_{\text{細菌の呼吸}} - \\
& \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{BacTake,m}^{PO_4}}_{\text{細菌による摂取}} + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} \sum_a (1 - \kappa_{DecA,k}) \cdot B_{PomDecA,k,m}^P}_{\text{好気性細菌による懸濁態有機物の分解}} + \\
& \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \sum_k^{N_{DEC}} B_{DomDecA,k,m}^P}_{\text{好気性細菌による溶存態有機物の分解}} + \\
& \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} (1 - \kappa_{DecB,k}) \cdot B_{PomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による懸濁態有機物の分解}} + \\
& \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} B_{DomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による溶存態有機物の分解}} + \\
& \underbrace{\sum_f^{N_{FISH}} (P_C^{FISH,f} \cdot \sum_a^{N_{Age}} B_{FishResp,f,a})}_{\text{魚の呼吸・排泄}} \quad (107)
\end{aligned}$$

i) 溶存酸素の増殖モデル

溶存酸素 S_{DO} [molC · m⁻³ · s⁻¹]は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
S_{DO} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} TOD_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyPS,i}^C}_{\text{植物プランクトンの光合成}} - \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} TOD_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyResp,i}}_{\text{植物プランクトンの呼吸}} - \\
& \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} TOD_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooResp,j}}_{\text{動物プランクトンの呼吸}} - \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} TOD_C^{PZ,n} \cdot B_{PzResp,n}}_{\text{原生動物の呼吸}} - \\
& \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} TOD_C^{BAC,m} \cdot B_{BacResp,m}}_{\text{好気性細菌の呼吸}} - \underbrace{TOD_N^{NH_4,2NO_2} \cdot B_{NH_4,2NO_2}}_{\text{アンモニアの酸化(NH}_4 \rightarrow \text{NO}_2)} - \\
& \underbrace{TOD_N^{NO_2,2NO_3} \cdot B_{NO_2,2NO_3}}_{\text{亜硝酸の硝化(NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3)} - \underbrace{TOD_{Mn}^{MnOxi} \cdot B_{MnOxi}}_{\text{マンガンの酸化(Mn} \rightarrow \text{MnO}_2)} - \\
& \underbrace{TOD_{Fe}^{FeOxi} \cdot B_{FeOxi}}_{\text{第一鉄の酸化(Fe} \rightarrow \text{Fe(OH)}_3)} - \underbrace{TOD_S^{H_2SOxi} \cdot B_{H_2SOxi}}_{\text{硫化水素の酸化}} + \\
& \underbrace{\sum_f^{N_{FISH}} \sum_a^{N_{Age}} TOD_C^{FISH,f,a} \cdot B_{FishResp,f,a}}_{\text{魚の呼吸・排泄}} \quad (108)
\end{aligned}$$

$TOD_C^{FISH,f,a}$: 魚の呼吸に対する酸素と炭素の比 [molO₂ · molC⁻¹] : パラメータ

j) 堆積物食者の増殖モデル

堆積物食者 S_{MDF} [molC · m⁻³ · s⁻¹]は次式で表わされる。

$$S_{MDF} = \underbrace{B_{Bma2Mdf,q} - \Delta B_{Bma2Mdf,q}^{cut}}_{\text{底生微細藻類の捕食}} +$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\sum_p^{N_{MEI}} (B_{Mei2Mdf,p,q} - \Delta B_{Mei2Mdf,p,q}^{cut})}_{\text{メイオセントスの捕食}} + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} B_{Det2Mdf,q,k}}_{\text{デトリタスの摂食}} + \\
& \underbrace{B_{Bba2Mdf,q} - \Delta B_{Bba2Mdf,q}^{cut}}_{\text{好気性細菌の捕食}} + \underbrace{B_{Bdnb2Mdf,q} - \Delta B_{Bdnb2Mdf,q}^{cut}}_{\text{脱窒菌の捕食}} - \\
& \underbrace{B_{MdfResp,q}}_{\text{呼吸}} - \underbrace{B_{MdfExc,q}}_{\text{排糞}} - \underbrace{B_{MdfLoss,q}}_{\text{死亡}} - \underbrace{J_{Mdf2Fish,q}}_{\text{魚による被食}} - \\
& \underbrace{J_{MdfCatch,q}}_{\text{漁獲}} - \underbrace{\sum_f^{N_{FISH}} \sum_a^{N_{Age}} B_{Mdf2Fish,f,a}}_{\text{魚による被食}} \quad (109)
\end{aligned}$$

k) 懸濁物食者の増殖モデル

懸濁物食者 S_{MSF} [molC · m⁻³ · s⁻¹]は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
S_{MSF} = & - \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} (J_{Phy2Msf,i,r} \cdot u_{MsfFeed,r} - \Delta J_{Phy2Msf,i,r}^{cut})}_{\text{植物プランクトンの捕食}} - \\
& \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} (J_{Zoo2Msf,j,r} \cdot u_{MsfFeed,r} - \Delta J_{Zoo2Msf,j,r}^{cut})}_{\text{動物プランクトンの捕食}} - \\
& \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} (J_{Pz2Msf,n,r} \cdot u_{MsfFeed,r} - \Delta J_{Pz2Msf,n,r}^{cut})}_{\text{原生動物の捕食}} - \\
& \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} J_{Pom2Msf,k,r} \cdot u_{MsfFeed,r}}_{\text{懸濁態有機物の摂食}} - \underbrace{B_{MsfResp,r}}_{\text{呼吸}} - \underbrace{B_{MsfExc,r}}_{\text{排糞}} - \\
& \underbrace{B_{MsfLoss,r}}_{\text{死亡}} - \underbrace{J_{Msf2Fish,r}}_{\text{魚による被食}} - \underbrace{J_{MsfCatch,r}}_{\text{漁獲}} - \underbrace{\sum_f^{N_{FISH}} \sum_a^{N_{Age}} B_{Msf2Fish,f,a}}_{\text{魚による被食}} \quad (110)
\end{aligned}$$

4. 計算結果

上記のモデルを用いて、伊勢湾海域において2年間のシミュレーション計算を実施して稼働可能なことを確認した。なお、試算に用いた魚種は以下に該当する魚とした。

伊勢湾内において重要な漁獲対象種として、漁業者が注目していること。

- 2) 比較的漁獲量や他の観測データが揃っていること
- 3) 存在量としても主であり、湾内の全体の物質循環に寄与していると考えられること

4.1 浮遊系

浮遊系については、植物プランクトン、動物プランクトン、好気性細菌、原生動物を対象に計算を行った(図-4.1)。7月の植物プランクトン1では伊勢湾・三河湾内では少なく、外洋において濃度が高いことが示された。植物プランクトン2は伊勢湾内の四日市沖～鈴鹿沖で濃度が高い様子が再現され

た、11月の動物プランクトンは三河湾内、伊勢市沖や鳥羽市沖において高い傾向が再現された。1月の好気性細菌は湾内で高く、外洋との境界付近から低くなった。

4.2. 底生系

次に底生系についてはメイオセントス、堆積物食者、懸濁物食者、底生好気性細菌、底生微細菌を対象に計算を行った(図-4.2)。メイオセントスは沿岸部の水深が浅い場所に分布

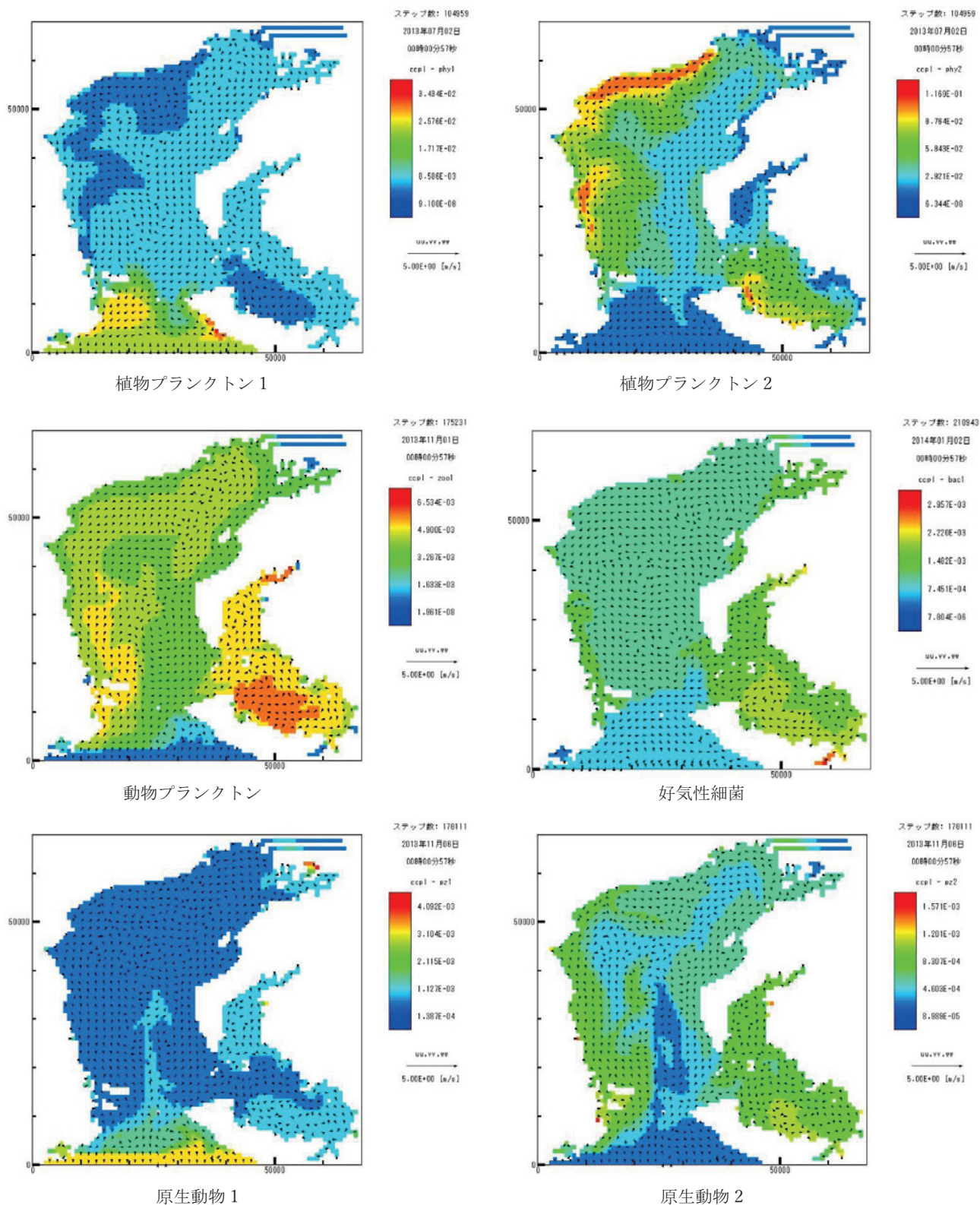


図-4.1 計算の結果 (浮遊系)

しており、三河湾内の濃度が高く表現された。堆積物食者、底生好気性細菌、底生微細藻類についてもメイオベントスと同様に沿岸部で濃度が高く再現された。懸濁物食者は外洋と接する境界部で高く、次第に減少していく様子が再現された。

4.3 魚類モデル(カタクチイワシ, 時系列変化)

図-4.3にはカタクチイワシの成魚期における分布を示した。2月には伊勢湾と三河湾にまたがるように分布し、4月の産卵期には、産卵場所に設定した周辺に分布する様子が再現されている。なお、伊勢湾内での正確な産卵場所が分かっていな

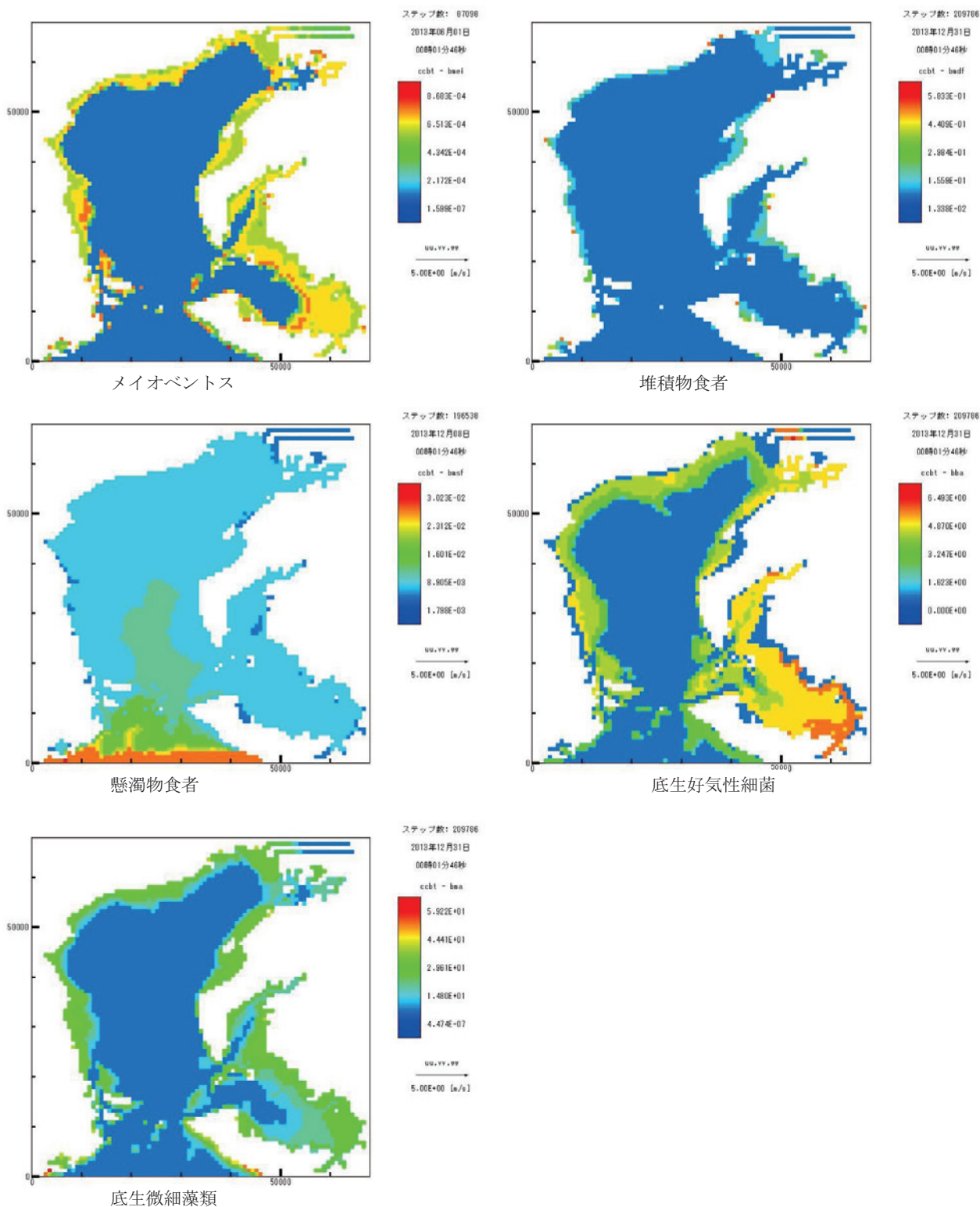


図-4.2 計算の結果(底生系)

いため、本研究では任意の場所に設定して計算を行った。6月には次第に伊勢湾全体に広がっていく様子が再現され、8月には三河湾に分布が集中した。三河湾内にカタクチイワシが集中した要因は、伊勢湾シミュレーターによって伊勢湾内に

再現された貧酸素水塊が発生した結果、貧酸素水塊から逃れるように溶存酸素濃度が高い三河湾に移動したと考えられる。10月には三河湾からカタクチイワシが伊勢湾に戻る様子が再現され、12月には伊勢湾の湾口の西側に多く分布する様子が

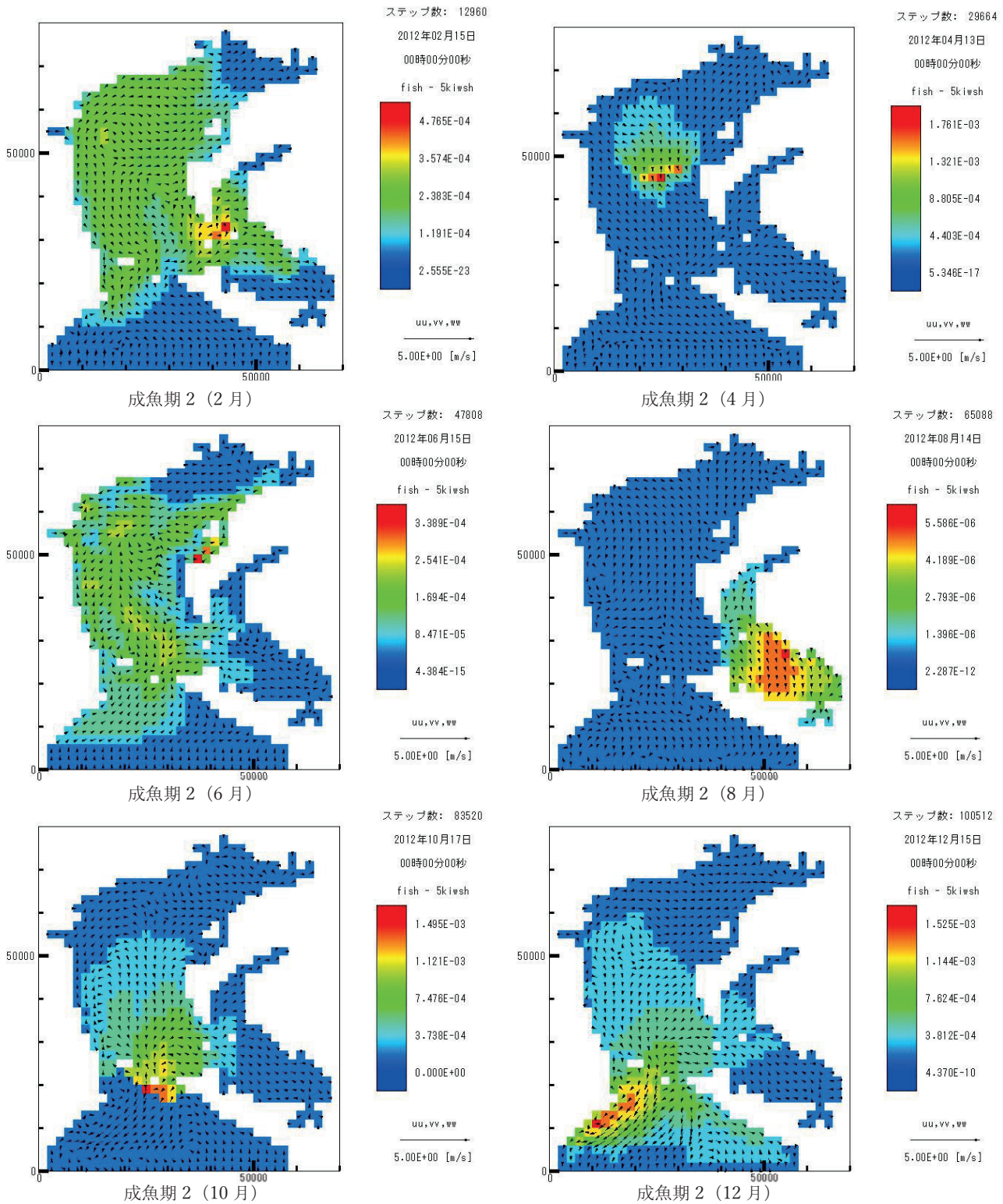


図-4.3 成魚期におけるカタクチイワシの分布

再現された。これは内湾に比べて、外洋水の海水温が高いためと考えられる。

4.4 魚類モデル(カタクチイワシ, 发育段階変化)

図-4.4に发育段階におけるカタクチイワシの分布を示した。

5月の卵期には四日市や鈴鹿沖に集中しており、孵化後の6月

には仔魚が伊勢湾内全域に広がっている様子が再現された。稚魚期では、名古屋港付近に局所的な集中が見られるが、伊勢湾内全域では均等に分布する様子が表現された。成魚期には湾内から湾外に分布が変化の様子が再現された。

4.5 計算値と実測値の比較

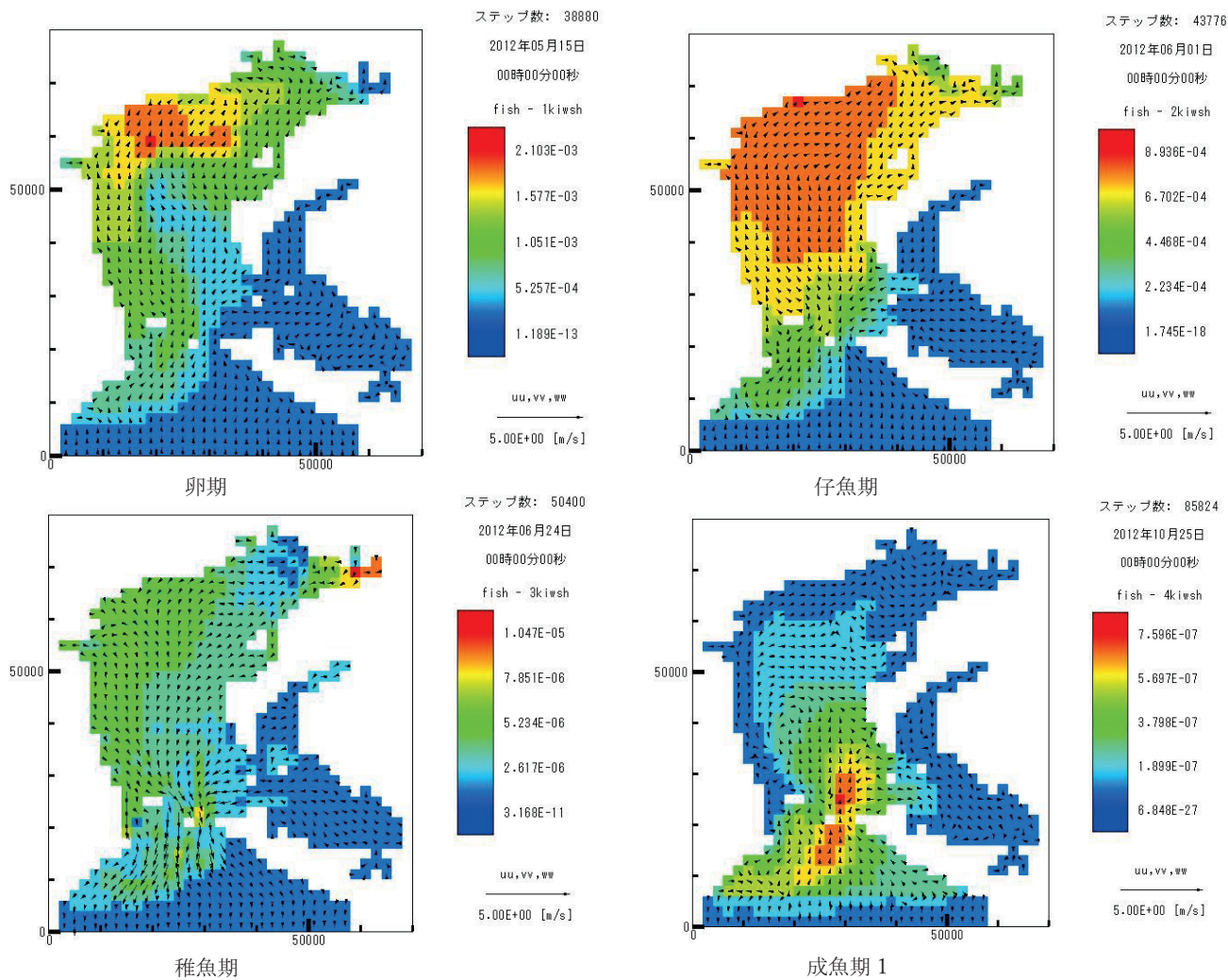


図-4.4 发育段階におけるカタクチイワシの分布

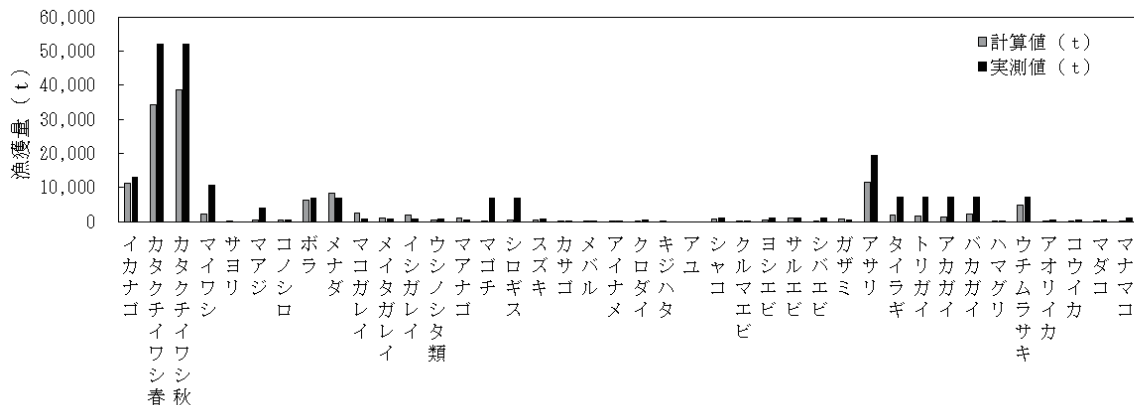


図-4.5 計算結果と実際の漁獲量との比較

図-4.5には計算値と実際の漁獲量を示した。計算では40種の魚種について漁獲量の計算を行った。計算対象とした全40種の比較結果は、計算値が漁獲量に近い値を示した魚種もいたが、実際の漁獲量に及ばない魚種もあった。この結果から計算精度の向上が必要であることがわかる。

4.6 今後の改良点

本魚類予測モデルは、環境に対する移動・反応に伊勢湾シミュレーターの水温、DO計算結果を利用することにより、環境の時空間的な変動を魚類の分布に反映することが可能なモデルを構築した。これにより、水温、DO、底質等の環境変化の魚類-漁業資源への影響予測も可能となる。本モデルの改良点等としては、モデルの利用目的や現在の研究状況（未解明部分も含め）によりその重点が変わるが、魚類の動態モデルについて以下の通り検討した。

魚類の動態については、その生態をよく理解する必要がある。望岡（2006）は、現在の生態研究に関して議論されている項目をいくつか挙げているが、モデルに関わるものとして、①仔魚の来遊、②性比、移動、成長、③集団構造の3つあげられる。

まず、①については、モデルにおける毎年の1年級群の初期加入についての問題に関わるものである。例えば福井ら（2005）の実験によれば、マアナゴ葉形仔魚初期から1ヶ月以内に浮遊性から底生性へと変わり成魚同様の夜行性を示すようになることが確認されている。このように、マアナゴは、葉形仔魚から成魚への変態を通して加入することになる。既往研究では、その加入に関する調査や特性について、いくつかの検討が行われている。このように、仔魚の分布や加入時期については、さらに検討していく必要があると考えられる。

②については、モデルにおける魚類の成長に関わる問題があげられる。鍋島（2001）は、大阪湾における餌料生物と魚類成長の関係について検討し、餌生物の豊穡さが成長に大きく関与することを指摘している。現状のモデルでは、成長について加入年から均等に成長することを仮定しており、成長に対する性差や環境等の影響は考慮されていない。上記を踏まえると、その成長に対する性比や環境の考慮やそれに伴うモデルの修正が精度向上の一つとして考えられる。

②の移動については、魚類の行動特性を表すための選好強度の改良が考えられる。現状のモデルでは、水温、DO、底質から選好強度を決定している。しかし、例えば、中村ら（2003）

によるマアナゴの分布移動特性と生息地適正評価モデルの大阪湾への適用では、含泥率、全硫化物、餌料生物密度などを考慮した評価を実施しており、環境因子のさらなる追加がモデル改良の一つとして考えられる。また、Gorie and Nagasawa（2010）にも示されているように、餌料環境よりもむしろ底質環境で選択するといったことも選好強度の中でもその優位性などを追加していくことも可能と考えられる。本モデルにおいても、上記のような環境因子を追加して検討していくことが必要と考えられる。

③に示す集団構造としては、モデルにおける湾外移出の考慮が改良点の一つとして考えられる。Gorie *et al.*（2010）は、明石海峡のマアナゴを対象にその成長や移動について調査し、2種の集団（明石海峡に残るものと大阪湾まで移動していくもの）が存在することを確認している。そのため、直近としては、漁業情報-漁船分布等の予測モデルの組み込みでの適用性の確認を行う必要がある。

5. おわりに

本研究において、既存のシミュレーターである伊勢湾シミュレーターにて使用可能な魚類モデルを作成した。また長期にわたる計算が可能であることが証明できたとともに、実際の漁獲データと比較することができた。

本研究で得られた成果は伊勢湾に限らず、他の内湾にたいしても地形データや環境データなどを用いることにより適応可能である。そのため、各水域での漁業資源管理において重要な役割を果たすものとなることが期待できる。また、本モデルを使用することで、沿岸域における開発対象区の周辺を特定の季節にだけ利用する魚がいた場合、その利用時期だけは工事を避けるなど、生物や環境に配慮した工程管理を行うことが可能となる。

現時点では、種によって実測値と計算結果が異なるが、比較的良い現地データとの再現性を示した種もあった。今後はパラメータチューニングシステムを用いて計算精度の向上を目指す。さらには現地観測データを拡充させるため、漁獲量データのみならず、魚探データや近年生物の在・不在を調べることができる環境DNAを用いて、生息魚種のデータの蓄積を図っていく。

謝辞

本研究に使用した現地データの一部は国土交通省中部地方

整備局港湾空港部より提供を受けた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 一色竜也 (2018) : 東京湾におけるマコガレイの長期資源変動について, 神奈川県水産技術センター研究報告第9号, 8p. 伊勢湾環境データベース : 伊勢湾流域の環境 漁獲量推移. (2020年2月10日閲覧). http://www.isewan-db.go.jp/ise-kankyo/B3d_1.asp
- 井上徹教, 中村由行, 鈴木高二朗, 田中陽二, 内藤了二 (2015) : 水質・生態系シミュレーションモデル (伊勢湾シミュレーター) の開発と適用事例, HEDORO, No.123, pp.34-40.
- 大見智亮, 内藤大輔, 酒井亨, 山口将人, 寺津和彦, 田口浩一, 中田喜三郎, 中村由行 (2008) : 浚渫窪地における酸素環境シミュレーション, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1026-1030.
- 岡田知也, 中山恵介, 日比野忠史, 細川恭史 (2000) : 大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内環境に及ぼす影響の定量的評価, 港湾空港技術研究所報告, Vol.39, No.2, pp.73-98.
- 小田一紀, 石川公敏, 城戸勝利, 中村義治, 矢持進, 田口浩一 : 内湾の生物個体群動態モデル—大阪湾の「ヨシエビ」を例として, 海岸工学論文集, 44, pp.1196-1200, 1997.
- 岸道郎, 中島一歩, 橋岡豪人, 奥西武, 吉本幸恵 : 浮き魚の成長モデル(NEMURO.FISH)—日本海のスルメイカへの適用—, 月刊海洋, 37 (8), pp.592-595, 2005.
- 岸道郎 : 海洋生態系の数値モデルの研究, 海の研究, 17 (1), pp.7-18, 2008.
- 岸田達, 須田真木 : 個体群動態モデルによるマイワシの資源変動機構解析, 中央水産研究所研究報告書, 11, pp.37-64, 1998.
- 木下嗣基 (2000) : 静水圧モデルとFull-3Dの比較, MECモデルワークショップ (第1回), 日本造船学会海洋環境研究委員会, pp.17-23.
- 清田雅史, 米崎史郎, 成松康二, 伊藤正木, 服部努 : 生態系モデリングによる食物網構造の把握と漁業の影響評価: 東北沖底層生態系へのEcopath適用例, 沿岸海洋研究, 53 (1), pp.55-64, 2015.
- 佐々木淳, 磯部雅彦, 渡辺晃, 五明美智男 (1996) : 東京湾における青潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1111-1115.
- 白田慶一郎 : 沿岸海域における魚類の動態モデルの構築, H20 (2008) 東大修論 (指導教員 : 多部田茂准教授)
- 鈴木翔太, 多部田茂, 中谷祐介, 中村義治 : 魚類動態モデルを利用したマアナゴ漁業シミュレーターの開発, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 69 (2), pp.I_1201-I_1205, 2013.
- 関根雅彦 : 水産海洋分野におけるモデル研究の最前線 7. 貧酸素水塊の発生とそれに伴う魚の逃避行動のモデル, 水産海洋研究, 66 (1), pp.65-67, 2002.
- 多部田茂, 中村義治, 須藤隆行, 丸山拓也, 関根幹男, 入江政安, 関いずみ, 古川恵太 : 伊勢湾におけるマアナゴを対象とした底びき網漁業の実態把握と操業シミュレーターの開発, 沿岸域学会誌, 25 (3), pp.41-52, 2012.
- 殿城賢三, 佐藤徹 (2001) : 五ヶ所湾の海域浄化装置の効果に関する数値シミュレーション, MECモデルワークショップ (第2回), 日本造船学会海洋環境研究委員会, pp.27-34.
- 東京湾環境情報センター HP (2020年1月27日閲覧) <http://www.tbeic.go.jp/kankyo/gyogyo.asp>
- 富田孝史, 柿沼太郎 (2005) : 海水流動の3次元性を考慮した高潮, 津波数値シミュレーターSTOCの開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, Vol.44, No.2, pp.83-98.
- 中村義治, 田口浩一, 寺澤知彦 (2001) : 環境評価のための数値モデルの変遷と課題, 環境技術, 第30巻, 7号, pp.531-536.
- 中村義治, 吉田司, 有山啓之, 矢持進村, 玉井恭一, 入江隆彦, 小出水規行, 阪上雄康, 小谷野喜二 (2003) : 大阪湾におけるマアナゴの分布移動特性と生息地適性評価モデル, 海岸工学論文集, 50, pp.1151-1155.
- 中山恵介, 岡田知也 (2006) : 湾口部にシルをもつ湾における底層貫入とDO濃度に関する観測と数値実験, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.817-822.
- 鍋島靖信 (2001) : マアナゴの成長と食性, 日本水産学会誌, 67 (1), pp.113-114.
- 袴田高志 (2002) : 水産海洋分野におけるモデル研究の最前線 9. Ecopath with Ecosimモデルの現状と問題点, 水産海洋研究, 66 (1), pp.69-70.
- 福井篤, 渡辺哲理, 魚谷逸朗 (2005) : 駿河湾で採集されたマアナゴ葉形仔魚の変態にともなう行動の変化, 日本水産

- 学会誌, 71 (3), pp.378-380.
- 村上智一, 安田孝志, 吉野純 (2007): 気象モデルおよび多重座標系海洋モデルを用いた台風0416号による広域高潮の再現, 土木学会論文集B, Vol. 63, No.4, pp.282-290.
- 本宮祐規: 伊勢湾におけるマアナゴの動態モデルの構築, H23 (2011) 東大修論 (指導教員: 多部田茂准教授)
- 本宮祐規, 多部田茂, 黒木洋明, 丸山拓也, 日比野学, 中村義治: 伊勢湾におけるマアナゴの動態モデルの開発, 水産工学, 52 (2), pp.83-93, 2015.
- 望岡典隆, 塩澤成子, 長坂美紀, 久保田正: 1994年~1995年の駿河湾におけるマアナゴ (*Conger myriaster*) 葉形仔魚の来遊, 「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部, 4(3), pp.133-139, 2006.
- Azam, F. (1998): Microbial control of oceanic carbon flux: The plot thickens, *Science*, 280(5346), pp.694-696.
- Butterworth, D. S., and Thompson, R. B. (1995): Possible effects of different levels of krill fishing on predators: some initial modelling attempts. *CCAMLR Science*, Vol.2, pp.79-97.
- Baretta, J.W., Baretta-Bekker, J. G., and Ruardij, P. (1996): From EMS to ERSEM toward sgeneric coastal ecosystem models. *Aquabiol.* Vol.104, pp.197-209 (translated from Japanese).
- Bogstad, B., Hauge, K. H., and Ulltang, Ø. (1997): MULTSPEC: a multi-species model for fish and marine mammals in the Barents Sea. *J. N. Atl. Fish. Sci.* Vol.22, pp.317-341.
- Begley, J., and Howell, D. (2004): "An overview of GADGET the Globally applicable Area-Disaggregated General Ecosystem Toolbox". *ICES CM 2004/FF: 13*, 15pp.
- Begley, J. (2012): Gadget User Guide. Available from website www.hafro.is/gadget.95
- Christensen, V., and Pauly, D. (1992): ECOPATH II: a software for balancing steady-state models and calculating network characteristics. *Ecol. Model.*, Vol.61, pp.169-185.
- Christensen, V., Walters, C. J., and Pauly, D. (2000): *Ecopath with Ecosim: a User's Guide* October 2000 Edition. Fisheries Centre University of British Columbia Vancouver Canada and ICLARM Penang Malaysia. 130pp.
- Christensen, V., and Walters, C. J. (2000): *Ecopath with Ecosim: methods capabilities and limitations*. In D. Pauly and T.J. Pitcher (eds). *Methods for Evaluating the Impacts of Fisheries on North Atlantic Ecosystems*. Fisheries Centre Research Reports8, pp.79-105.
- Christensen, V., and Walters, C. J. (2004): *Ecopath with Ecosim: methods capabilities and limitations*. *Ecol. Model.* Vol.172, pp. 109-139.
- Constable, A. J. (2005): *Implementing plausible ecosystem models for the Southern Ocean: an ecosystem productivity ocean climate (EPOC) model*, Workshop document presented to WG-EMM subgroup of CCAMLR (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources) WG-EMM-05/33, 20pp.
- Constable, A. J. (2006): *Using the EPOC modelling framework to assess management procedures for Antarctic krill in Statistical Area 48: evaluating spatial differences in productivity of Antarctic krill*, Workshop document presented to WG-EMM subgroup of CCAMLR (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources) WG-EMM- 06/38, 18pp.
- Fulton, E. A. (2001): *The Effects of Model Structure and Complexity on the Behaviour and Performance of Marine Ecosystem Models*, Ph.D. thesis School of Zoology University of Tasmania Hobart, 429pp.
- Fulton, E. A., Smith, A. D. M., and Johnson, C. R. (2004): *Biogeochemical marine ecosystem models. I. A model of marine bay ecosystems*, *Ecol. Model.* Vol.174, pp.267-307.
- Fulton, E. A., Smith, A. D. M., and Punt, A. E. (2004): *Ecological indicators of the ecosystem effects of fishing: Final Report, No.R99/1546*, Australian Fisheries Management Authority Canberra.
- Fulton, E. A., Smith, A. D. M., and Punt, A. E. (2005): *Which ecological indicators can robustly detect effects of fishing?* *ICES J. Mar. Sci.* Vol.62, pp.540-551.
- Gorie, S., and Nagasawa, K. (2010): *Habitat Preference and feeding habits of juvenile whitespotted conger *Conger myriaster* in the Eastern Seto Inland sea, Japan*, *Aquaculture Sci.*, 58(2), pp.167-179.
- Gorie, S., Tanda, M., and Nagasawa, K. (2010): *Movement and growth of whitespotted conger *Conger myriaster* in the Eastern Seto Inland Sea, Japan*, *Aquaculture Sci.*, 58(2), 233-242.
- Gray, R., Fulton, E. A., Little, L. R., and Scott, R. (2006): *Ecosystem Model Specification within an Agent Based Framework*, North West Shelf Joint Environmental

- Management Study Technical Report, Vol 16, 127pp.
- Hegge Lund, Y., Vikebo, F., Berntsen, J., and Furnes, G. (2004): Hydrostatic and non-hydrostatic studies of gravitational adjustment over a slope, *Coast. Shelf. Res.*, Vol.24, pp.2133-2148.
- Hollowed, A. B., Ianelli, J. N., and Livingston, P. A. (2000): Including predation mortality in stock assessments: a case study for Gulf of Alaska walleye Pollock, *ICES J. Mar. Sci.*, Vol.57, pp.279-293.
- Jurado-Molina, J., Livingston, P. A., and Ianelli, J. N. (2005): Incorporating predation interactions to a statistical catch-at-age model for a predator-prey system in the eastern Bering Sea, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol.62, No.8, pp.1865-1873.
- Jurado-Molina, J., Livingston, P. A., and Gallucci, V. F. (2005): Testing the stability of the suitability coefficients from the eastern Bering Sea, *ICES J. Mar. Sci.*, Vol.62, No.5, pp.915-924.
- Koen-Alonso, M., and Yodzis, P. 2005. Multi-species modelling of some components of northern and central Patagonia Argentina. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 62 pp.1490-1512.
- Lehodey P. (2001): The pelagic ecosystem of the tropical Pacific Ocean: dynamic spatial modelling and biological consequences of ENSO. *Prog. Oceanogr.*, Vol.49, pp.439-468.
- Kishi, M. J., Ito, S., Megrey, B. A., Rose, K. A., Werner, F. E., (2011): A review of the NEMURO and NEMURO.FISH models and their application to marine ecosystem investigations. *J. Oceanogr.*, Vol.67, pp.3-16.
- Livingston, P. A., and Methot, R. D. (1998): Incorporation of predation into a population assessment model of eastern Bering Sea walleye Pollock, *Fishery Stock Assessment Models Alaska Sea Grant College Program AK-SG-98-01*, pp.663-718.
- Lehodey, P., Chai, F., and Hampton, J. (2003): Modelling climate-related variability of tuna populations from a coupled ocean-biogeochemical-populations dynamics model. *Fish. Oceanogr.*, Vol.12, pp.483-494.
- Mori, M., and Butterworth, D. S. (2004): Consideration of multi-species interaction in the Antarctic: an initial model of the minke whale-blue whale-krill interaction, *Afr. J. Mar. Sci.*, Vol.26, No.1, pp.245-259.
- Mori, M., and Butterworth, D.S. (2005): Modelling the predator-prey interactions of krill baleen whales and seals in the Antarctic ecosystem, Workshop document presented to WG-EMM subgroup of CCAMLR WG-EMM-05/34, 44pp.
- Mori, M., and Butterworth, D. S. (2006): A first step towards modelling the krill – predator dynamics of the Antarctic ecosystem, *CCAMLR Sci.*, No.13, pp.217-277.
- Okunishi, T., Ambe, D., Ito, S., Kameda, T., Setou, T. Komatsu, K. Kawabata, A., Takasuka, A., Kubota, H. (2011): A numerical modeling study of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) migrations in the western North Pacific. In Omori K. Guo X. Yoshie N. Fujii N. Handoh I. Isobe A. Tanabe S. (eds.) *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry Vol. 5, Modeling and Analysis of Marine Environmental Problems Terrapub Tokyo*, pp.51–56.
- Polovina, J. J. (1984): Model of a coral reef ecosystem. I. The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals. *Coral Reefs*, Vol.3, pp.1-11.
- Pope, J. G. (1991): The ICES multi-species assessment group: evolution insights and future problems. *ICES Mar. Sci. Symp.*, Vol.193, pp.23-33.
- Punt, A. E., and Butterworth, D. S. (1995): The effects of future consumption by the Cape fur seal on catches and catch rates of the Cape hakes. 4. Modelling the biological interaction between Cape fur seals *Arctocephalus pusillus pusillus* and Cape hakes *Merluccius capensis* and *M. paradoxus*, *S. Afr. J. Mar. Sci.*, Vol.16, pp.255-285.
- Plagányi, É. E., and Butterworth, D. S. (2006a): A spatial multi-species operating model (SMOM) of krill-predator interactions in small-scale management units in the Scotia Sea. Workshop document presented to WG-EMM subgroup of CCAMLR WG-EMM- 06/12, 28pp.
- Plagányi, É. E., and Butterworth, D. S. (2006b): An illustrative management procedure for exploring dynamic feedback in krill catch limit allocations among small-scale management units. Workshop document presented to WG-EMM subgroup of CCAMLR WG-EMM- 06/28, 17pp.
- Plagányi, É. E. (2007): Models for an Ecosystem Approach to Fisheries, *FAO Fisheries Technical paper*, 477pp.
- Sekine, M., Nakanishi, H., Ukita, M., and Murakami, S. (1991): A shallow-sea ecological model using an object-oriented programming language, *Ecol. Model.*, Vol.57, pp.221-236.

- Sparre, P. (1991): Introduction to multi-species virtual population analysis, *ICES Mar. Sci., Symp*, Vol.193, pp.12-21.
- Shin, Y-J., and Cury, P. (2001) Exploring fish community dynamics through size-dependent trophic interactions using a spatialized individual-based model, *Aquat. Living Resour*, Vol.14, pp.65-80.
- Shin, Y-J., Shannon, L. J., and Cury, P. M. (2004): Simulations of fishing effects on the southern Benguela fish community using the individual-based model: learning from a comparison with ECOSIM, In L. J. Shannon, K. L. Cochrane and S. C. Pillar (eds). *Ecosystem approaches to fisheries in the Southern Benguela*, *Afr. J. Mar. Sci.*, Vol.26, pp.95-113.
- Taylor, L., Begley, J., Kupca, V., and Stefansson, G. (2004): A simple implementation of gadget for cod in Icelandic waters, *ICES CM 2004/FF: 23*, 39pp.
- Taylor, L., and Stefansson, G. (2004): Gadget models of cod-capelin-shrimp interactions in Icelandic waters, *ICES CM 2004/FF: 29*, 30pp.
- Tjelmeland, S., and Lindstrøm, U. (2005): An ecosystem element added to the assessment of Norwegian spring spawning herring: implementing predation by minke whales, *ICES J. Mar. Sci.*, Vol.62, pp.285-294.
- Trenkel, V. M., Pinnegar, J. K., and Tidd, A. N. (2004): Can Multi-species models be expected to provide better assessments for Celtic sea groundfish stocks?, *ICES CM 2004/FF: 05*, 26pp.
- Vinther, M. (2001): Ad hoc multi-species VPA tuning applied for the Baltic and North Sea fish stocks, *ICES J. Mar. Sci.*, Vol.58, pp.311-320.
- Walters, C. J., Christensen, V., and Pauly, D. (1997): Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments, *Rev. Fish. Biol. Fish.*, Vol.7, pp.139-172.
- Watters, G. M., Hinke, J. T., Reid, K., and Hill, S. (2006): KPFM2 be careful what you ask for – you just might get it, *CCAMLR WG-EMM-06/22*, 48pp.
- Yodzis, P. (1998): Local trophodynamics and the interaction of marine mammals and fisheries in the Benguela ecosystem, *J. Anim. Ecol.*, Vol.67, pp.635-658.

港湾空港技術研究所資料 No.1368

2020. 3

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2020) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています