

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.50 No.2 June 2011

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 50 卷 第 2 号 (Vol. 50, No. 2) , 2011 年6月 (June 2011)

目 次 (CONTENTS)

微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築田中陽二, 中村由行, 鈴木高二朗, 井上徹教, 西村洋子 3
(Development on the Pelagic Ecosystem Model Considering the Microbial Loop for Estuary and Coastal AreasYoji TANAKA, Yoshiyuki NAKAMURA, Kojiro SUZUKI, Tetsunori INOUE, Yoko NISHIMURA)

微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築

田中陽二*・中村由行**・鈴木高二朗***・井上徹教****・西村洋子*****

要 旨

沿岸の海域は陸域からの栄養塩が河川から流入し、プランクトンによる一時生産が活発に行われ、魚類も豊富に存在し、生態系にとって非常に重要な海域である。一方で、沿岸に近い陸域では都市化が進行している地域が多く、栄養塩負荷の増大によって赤潮や青潮などの発生が問題となっている。このような複雑である沿岸域の水環境を解析し、現状理解や対策の立案を行うツールとして、数値シミュレーションモデルは非常に有効である。一方、海洋生態学の分野で植物プランクトンを動物プランクトンが捕食するという古典的生食食物連鎖に加えて、細菌から原生動物、動物プランクトンへ至る経路、いわゆる微生物ループの重要性が80年代以降、明らかとなってきた。しかしながら、微生物ループのモデル化は現在でも模索が続いており、沿岸域で広く適用できる標準的なモデルは未だ確立されていない状況である。

そこで、本研究では当研究所で開発した非静水圧流動モデルをベースとして、微生物ループを考慮した新しい浮遊生態系モデルの開発を目的とした。さらに、開発されたモデルを用いて、伊勢湾での5年間の長期計算を実施し、精度の検証を行った。加えて、伊勢湾での微生物ループの役割について、計算結果から解析を行った。

伊勢湾での長期のシミュレーション結果を観測値と比較し、潮汐・潮流および塩分・水温場において非常に高い再現性を有していることを確認した。水質についても、植物プランクトンの鉛直分布や、夏場の底層貧酸素化を良好に再現していた。細菌や原生動物、動物プランクトン、植物プランクトン種の現存量は観測結果と概ね一致していたが、季節変動や鉛直分布の再現性については改良の余地が残された。

伊勢湾での微生物ループの役割について解析を行った結果、細菌の現存量（ストック）は生物量の4%であるが、細菌生産量（フロー）は一次生産量の18%に相当する高い割合であることが明らかとなった。また、動物プランクトンの飼料源は植物プランクトンが主体的であることを定量的に示した。さらに、伊勢湾中央部において、酸素消費に対する細菌の割合が底層で50%を占めることを明らかにした。

本研究で開発された浮遊生態系モデルは、沿岸域の水質・生態系環境を解析・予測するツールとして有用であることが示された。

キーワード: 数値計算, 浮遊生態系モデル, 微生物ループ, 細菌, 沿岸域, 伊勢湾

* 海洋・水工部 海洋情報研究領域 海洋環境情報研究チーム 研究官

** 研究主監

*** 海洋・水工部 海洋情報研究領域 海洋環境情報研究チーム リーダー

**** 海洋・水工部 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究チーム 主任研究官

***** 海洋・水工部 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究チーム 特別研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5049 Fax：046-844-1274 e-mail:tanaka-yo@pari.go.jp

Development on the Pelagic Ecosystem Model Considering the Microbial Loop for Estuary and Coastal Areas

Yoji TANAKA*
Yoshiyuki NAKAMURA**
Kojiro SUZUKI***
Tetsunori INOUE****
Yoko NISHIMURA*****

Synopsis

Estuary area is one of the most important areas for marine ecosystems. In recent years, the contamination of water becomes a serious problem in some estuary areas. Numerical simulation is useful to predict flow and water quality for an estuary area. On the other hand, the significance of the microbial loop that is the route from the bacteria to the protozoan and the zooplankton has become clear in the field of the marine ecology in late years.

The purpose of this study is to develop a pelagic ecosystem model considers the microbial loop for estuary and coastal areas by including the non-hydrostatic numerical model. The developed model is applied to simulate in Ise Bay from 2004 to 2008 for accuracy validation of the model. Additionally, the role of the microbial loop was examined from the numerical result.

It was confirmed to compare a long-term simulation result with the observed value, and for the tide, the current, salinity and the water temperature field to have very high reproducibility. In addition, the simulation result also reproduced phytoplankton's vertical profile and the hypoxic water at bottom layer in summer. Biomass of bacteria, protozoa, zooplankton of simulation was roughly corresponding to observations. Some improvement points were left about a seasonal variation and vertical profile of microbe's biomass.

In this study, the applicability of the new pelagic ecosystem model improved from non-hydrostatic numerical model for the flow and water quality simulation is demonstrated. It becomes an essential tool to analyze water quality field in estuary and coastal areas.

Key Words: Numerical model, Pelagic ecosystem model, Microbial loop, Bacteria, Estuary, Ise Bay

* Researcher of Marine Environmental Information Division, Marine Environment and Engineering Department
** Executive Researcher
*** Head of Marine Environmental Information Division, Marine Environment and Engineering Department
**** Senior Researcher of Marine Environment and Engineering Department
***** Postdoctoral Fellow of Coastal and Estuarine Environment Research Group
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5049 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:tanaka-yo@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
1.1 研究の背景と目的	7
1.2 浮遊生態系モデルの特徴	8
2. 浮遊生態系モデル	8
2.1 モデルの構成	8
2.2 移流拡散方程式	10
2.3 使用する関数	10
2.4 捕食量の調整および排糞	11
2.5 植物プランクトン	14
2.6 動物プランクトン	18
2.7 原生動物	22
2.8 好気性細菌	24
2.9 脱窒菌	26
2.10 懸濁態有機物	27
2.11 溶存態有機物	31
2.12 窒素	32
2.13 リン酸	34
2.14 ケイ酸	35
2.15 硫化水素	35
2.16 溶存酸素	36
2.17 魚	37
2.18 簡易底生系モデル	38
3. 伊勢湾への適用例	42
3.1 境界条件	42
3.2 計算条件	50
3.3 計算結果の検証	57
3.4 伊勢湾における微生物ループの役割	63
4. まとめ	65
謝辞	65
参考文献	65

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

沿岸の海域は陸域からの栄養塩が河川から流入し、プランクトンによる一時生産が活発に行われ、魚類も豊富に存在し、生態系にとって非常に重要な海域である(Nixon, 1988). しかしながら、近年の都市化に伴う栄養塩負荷の増大によって、海域の富栄養化による赤潮の発生や底層での貧酸素水塊の形成など、様々な問題が世界各地の沿岸域で顕在化している. このような複雑である沿岸域の水環境を解析し、現状理解や対策の立案を行うツールとして、数値シミュレーションモデルは非常に有効である.

これまでの沿岸域や海洋での食物連鎖に対する概念は、主として植物プランクトンが有機物を生産し、それを動物プランクトンが捕食し、さらに魚介類がそれを捕食する、いわゆる古典的生食食物連鎖(Grazing food chain)が主体的という認識であった. 沿岸域の浮遊生態系モデルでも古典的生食食物連鎖による生物循環モデルが開発・使用されてきた(中田, 1993; Kawamiya et al., 1995; Kishi et al., 2001; Sohma et al., 2004; Yamanaka et al., 2004; 小山ら, 2010).

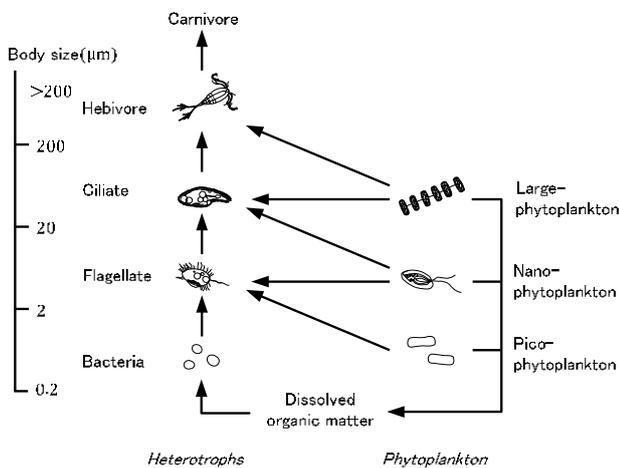


図-1.1 微生物ループの概念: Fenichel(1987), 古谷(1999)を改変

近年、水域生態系において、従属栄養性細菌は、溶解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いる(Azam et al., 1998). 1980年代になり、微生物を考慮した、もうひとつの食物連鎖、

「微生物ループ」の存在が明らかにされ始めた(図-1.1). 微生物ループでは、細菌が栄養基質として溶解態有機物(Dissolved organic matter; DOM)を消費することが起点となる. 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、溶解有機物が高次の栄養段階へと繋がっていく. すなわち、古典的生食食物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、微生物ループでは細菌が溶解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している.

健全な沿岸生態系では、この微生物ループを含めた食物網が正常に機能することで、我々に豊富な水産資源をもたらす. 一次生産により植物プランクトンは有機物を生産し、一方、捕食圧によりその増殖が適度に抑えられることで栄養塩が潤沢に残り、湾は多様な生物の生育に最適な場となる. 健全な生態系を保つ上で、有機物を分解し栄養塩回帰する細菌は、大変重要な構成員である. ところがこのバランスが崩れると、貧酸素水塊や赤潮といった環境問題の発生につながる. 細菌群集は、一方で系を正常に保ち、他方で環境悪化を加速させる. 人間活動による環境変化が激しい沿岸生態系において微生物ループによる物質循環を考慮することは、環境変動の予測に必須である. またさらに、近年の研究により、細菌群集は様々な性質をもつ多様な亜集団によって構成されていることが明らかになりつつある(Nishimura and Nagata, 2007; Kirchman, 2008). しかし、細菌群集の多様性やそれぞれの役割まで考慮したモデルはない. そこで、本研究では、微生物ループを考慮し、さらに、従来考慮されてきた動物プランクトンや植物プランクトンだけでなく、細菌の多様性・役割をも考慮することによって、より正確な生物循環を再現できる浮遊生態系モデルの構築を目的とした.

これまでに、微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルはいくつかの先駆的な研究例がある(Baretta et al., 1995; 堀口ら, 1998; Nakata et al., 2004; 大見ら, 2008). しかしながら、微生物ループのモデル化は現在でも模索が続いており、沿岸域で広く適用できる標準的なモデルは未だに確立されていない状況である. 加えて、沿岸域での細菌や原生動物の観測例は少なく、微生物の生物量や活性の情報は乏しい.

以上の背景を踏まえて、本研究では微生物ループを考慮した新しい浮遊生態系モデルの構築を目的とした。また、開発されたモデルを用いて、伊勢湾での年間を通じたシミュレーションを行い、計算結果を観測値と比較することによって現地適用性を確認する。さらに、伊勢湾における微生物ループの役割についても、本モデルによるシミュレーションによって解析を行う。

1.2 浮遊生態系モデルの特徴

本モデルの大きな特徴は微生物ループを考慮したことにあるが、その他にも生態系モデルに関する新しい知見をなるべく取り入れ、汎用性の高いモデルとなるように考慮した。

生物（細菌・原生動物・植物プランクトン・動物プランクトン）については、それぞれ多種類に分類できるようにモデル化を行った。例えば、植物プランクトンについてはサイズ別や、栄養塩形態別（珪藻類、渦鞭毛藻類など）による区分けが考えられ、海域特性によって分類を増やすことが可能である。これによって、食物連鎖・微生物ループを柔軟に構成することができる。

有機物については、分解・無機化速度の違いによって分類するマルチGモデル (Westrich and Berner, 1984) を採用した。すなわち、POM (Particle organic matter; 懸濁態有機物, 生存している生物は含まない) と、DOM は分解・無機化速度の分画毎に状態変数を分けられる。マルチGモデルによって、赤潮の発生後、大量にデトリタスが発生することによって酸素が急激に減少する効果の再現などが期待される。

さらに、炭素・窒素・リンについて、トータルの現存量が保存されるようにモデル化を行った。これまでの生態系モデルでは、植物プランクトンや動物プランクトン、POM, DOM などについて、ある元素を基準とした状態変数を用いており、他の元素については C:N 比, C:P 比から割り出すモデルとなっていた。例として、中田(1993)は炭素基準モデル, Kawamiya et al. (1995)は窒素基準モデル, 柳ら(2004)はリン基準モデルとなっている。しかし、このようなモデルでは、例えば植物プランクトンが死亡して POM になった場合に、POM の C:N:P 比率は死亡した植物プランクトン量に応じて時間変化するはずであるが、POM の C:N:P 比率が固定されているため、基準となる元素以外の現存量は保存されないこととなる。したがって、本モデルでの POM と DOM は分解・無機化速度による分類に加え、炭素・窒素・リン別でも状態変数を分けた。なお、水中の CO_2 は考慮していないため、炭素については

有機炭素量が保存されることとなる。

一方、生態系モデルの再現性とは別に、沿岸域では流動場の再現性も重要である。著者らは高速なアルゴリズムを採用した非静水圧流動モデル「LT」を開発してきた(田中・鈴木, 2010)。本研究での浮遊生態系モデルは LT に結合されており、流動場の再現性も兼ね備えた総合的な沿岸域生態系モデルとなることを目指した。

本研究の浮遊生態系モデルの特徴をまとめると、以下の通りである。

- 細菌・原生動物を状態変数として取扱い、微生物ループを考慮した。
- 細菌・原生動物・植物プランクトン・動物プランクトンはそれぞれ多種類に分類でき、生物間の複雑な捕食-被食関係を表現することを可能とした。
- POM と DOM を分解・無機化速度分画別に状態変数を分け、マルチ G モデルを取り入れた。
- POM と DOM を炭素・窒素・リン別に状態変数を分けており、(有機)炭素・窒素・リンの保存性を確保した。
- 流動モデルは非静水圧近似である LT を使用し、流動場も高精度に再現可能なモデルとした。

2. 浮遊生態系モデル

2.1 モデルの構成

浮遊生態系モデルの概要を図-2.1, 状態変数一覧を表-2.1 に示す。なお、各状態変数やパラメータの単位はなるべく SI 単位系に準拠した。

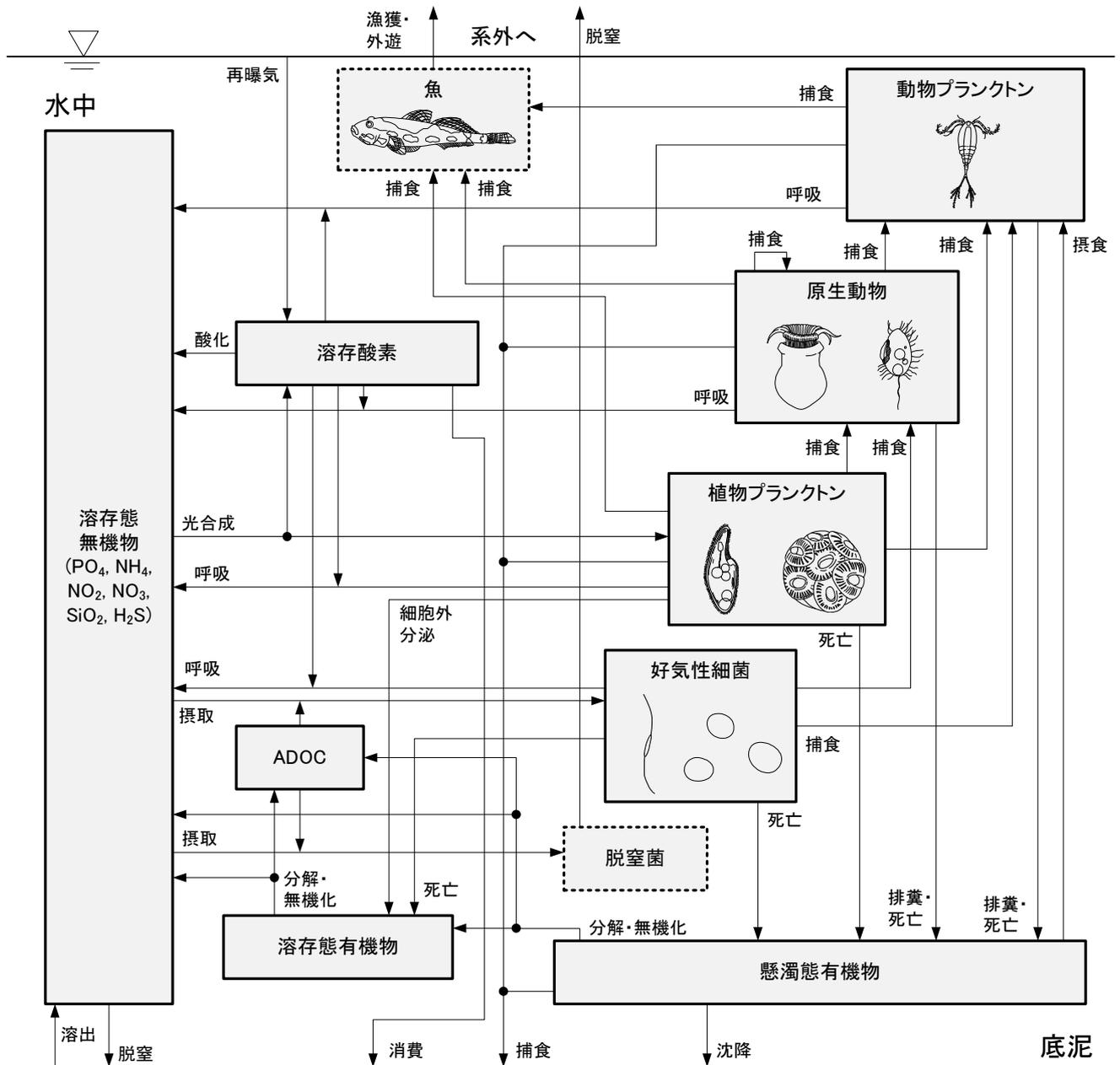


図-2.1 浮遊生態系モデルの物質循環フロー

表-2.1 浮遊生態系モデルの状態変数

分類	記号	単位	種類数
植物プランクトン	PHY_i	molC m^{-3}	N_{PHY}
植物プランクトンの 余剰窒素量	SQN_i	molN m^{-3}	N_{PHY}
植物プランクトンの 余剰リン量	SQP_i	molP m^{-3}	N_{PHY}
動物プランクトン	ZOO_j	molC m^{-3}	N_{ZOO}
懸濁態有機炭素	POC_k	molC m^{-3}	N_{DEC}
懸濁態有機窒素	PON_k	molN m^{-3}	N_{DEC}
懸濁態有機リン	POP_k	molP m^{-3}	N_{DEC}
利用可能溶存態有機 炭素	$ADOC$	molC m^{-3}	1
溶存態有機炭素	DOC_l	molC m^{-3}	N_{DEC}
溶存態有機窒素	DON_l	molN m^{-3}	N_{DEC}
溶存態有機リン	DOP_l	molP m^{-3}	N_{DEC}
好気性細菌	BAC_m	molC m^{-3}	N_{BAC}
原生動物	PZ_n	molC m^{-3}	N_{PZ}
リン酸： PO_4^{3-}	PO_4	molP m^{-3}	1
アンモニア： NH_4^+	NH_4	molN m^{-3}	1
亜硝酸： NO_2^-	NO_2	molN m^{-3}	1
硝酸： NO_3^-	NO_3	molN m^{-3}	1
ケイ酸： SiO_2	SiO_2	molSi m^{-3}	1
硫化水素： H_2S	H_2S	molS m^{-3}	1
溶存酸素： O_2	DO	$\text{molO}_2 \text{ m}^{-3}$	1

2.2 移流拡散方程式

ある浮遊生態系の変数を $C[\text{mol m}^{-3}]$ とすると、 C の移流拡散方程式は次式で表わされる。なお、 z 方向は鉛直上向きを正とする。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial uC}{\partial x} - \frac{\partial vC}{\partial y} - \frac{\partial wC}{\partial z} - \frac{\partial J_{C,x}}{\partial x} - \frac{\partial J_{C,y}}{\partial y} - \frac{\partial J_{C,z}}{\partial z} + S_C + q_C \quad (2.2.1)$$

u, v, w : x, y, z 方向の流速 $[\text{m s}^{-1}]$

$J_{C,x}, J_{C,y}, J_{C,z}$: x, y, z 方向の C のフラックス $[\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$

S_C : 変数 C の増加速度 $[\text{mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}]$

q_C : 外部（河川など）からの流入 $[\text{mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}]$

水中間でのフラックスは拡散フラックスであり、フィック(Fick)の法則より次式で表わされる。

$$J_{C,x} = -D_{C,h} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.2.2)$$

$$J_{C,y} = -D_{C,h} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (2.2.3)$$

$$J_{C,z} = -D_{C,v} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.2.4)$$

$D_{C,h}$: 水平方向の変数 C の拡散係数 $[\text{m}^2 \text{ s}^{-1}]$

$D_{C,v}$: 鉛直方向の変数 C の拡散係数 $[\text{m}^2 \text{ s}^{-1}]$

水面($z = \eta$)および底面($z = h$)でフラックスが生じる場合の境界条件は次式で表わされる。

$$(J_C)_{z=\eta} = J_{C_p}^{pa} \quad (2.2.5)$$

$$(J_C)_{z=h} = J_{C_p}^{pb} \quad (2.2.6)$$

J_C^{pa} : 水面でのフラックス（上向き正） $[\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$

J_C^{pb} : 底面でのフラックス（上向き正） $[\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$

2.3 使用する関数

生態系モデル中では、温度依存性関数やミカエリス-メンテン(Michaelis-Menten)式などが頻繁に現れるため、これらは以下のように簡略化して表記している。

(1) 指数関数型温度関数

硝化反応のような化学反応や、光合成のような生物活動においては、温度に関して指数関数的に反応速度・活動速度が上昇することが知られている。その関数は2つのパラメータを用いて、次式で表わされる。

$$f_{temp}(\alpha, \beta) = \alpha \cdot \exp(\beta \cdot T) \quad (2.3.1)$$

α : 0°C における反応速度 $[\text{s}^{-1}]$

β : 温度係数 $[\text{ }^\circ\text{C}^{-1}]$

T : 水温 $[\text{ }^\circ\text{C}]$

なお、しばしば温度に対する応答性を Q_{10} という指数で表わすことが行われるが、これは温度が 10°C 上昇した場合の反応速度の応答倍率である。すなわち、温度係数との関係は、 $\beta = \ln(Q_{10})/10$ となる。一般に、生理学的な応答が不明な場合は $Q_{10} = 2$ ($\beta = 0.0693[\text{ }^\circ\text{C}^{-1}]$)とする場合が多い(中田, 1993)。関数 f_{temp} の例を図-2.2に示す。

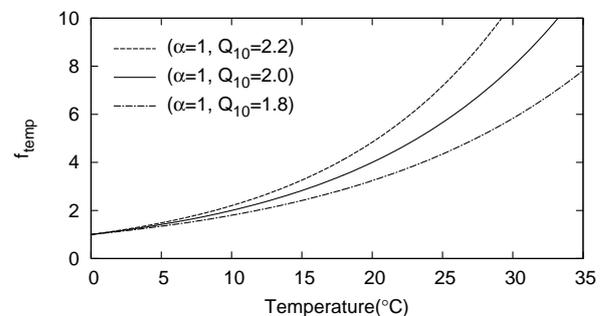


図-2.2 指数関数型温度関数の例

(2) 最適水温型温度関数

生物活動の場合では、活動に最適な温度があり、それ

を超えると活動が鈍り始め、ある温度以上では活動が停止することが一般的である。Solidoro et al. (2000)は懸濁物食性マクロベントスの温度関数を次式でモデル化した。

$$f_{topt}(T_{opt}, T_{max}, \beta) = \exp\{\beta(T - T_{opt})\} \cdot \left\{ \max\left(0, \frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}}\right) \right\}^{\beta(T_{max} - T_{opt})} \quad (2.3.2)$$

T_{opt} : 最適温度[°C]
 T_{max} : 活動限界温度[°C]
 β : 温度係数[°C⁻¹]

この関数は $T = T_{opt}$ のとき $f_{topt} = 1$ となり、 $T \geq T_{max}$ のとき $f_{topt} = 0$ となる関数である。関数 f_{topt} の例を図-2.3に示す。

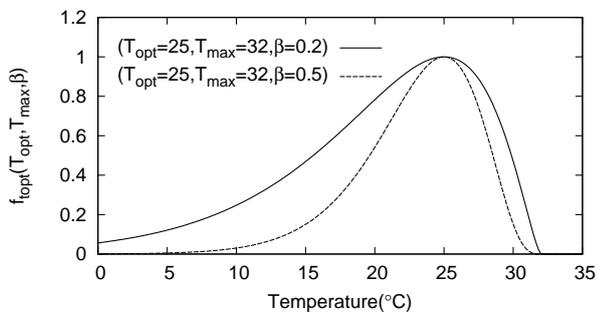


図-2.3 最適水温型温度関数の例

(3) ミカエリス-メンテン型反応速度関数

ミカエリス-メンテン型反応速度式は生物の酵素反応に使われる関数である。また、微生物の増殖速度式であるモノー(Monod)の式も同形であるため、ここでは両者とも次式で表わすこととする。

$$f_{MM}(X, K) = \frac{X}{X + K} \quad (2.3.3)$$

X : 濃度[mol m⁻³]

K : 半飽和定数[mol m⁻³]

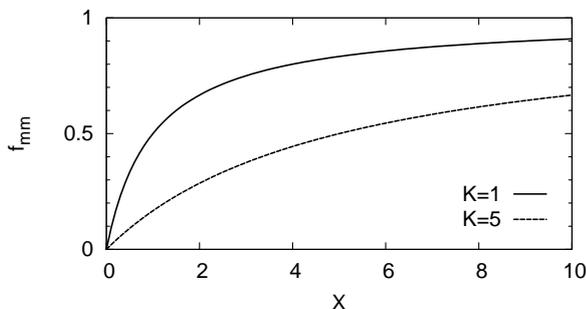


図-2.4 ミカエリス-メンテン型反応速度関数の例

上記関数 $f_{MM}(X, K)$ は、0~1の範囲を取り、 $X = K$ のとき0.5となる関数である(図-2.4)。なお、半飽和定数 $K = 0$ の場合は、 X によらず常に $f_{MM} = 1$ とする。

(4) 飼料濃度に対する制限関数

動物プランクトンなどの捕食・摂食活動をする生物では、捕食対象となる飼料の濃度が高くなると捕食速度が一定値に収束する。さらに、飼料の濃度が少なすぎると捕食を行わないこともParsons et al. (1967)によって報告されている。Parsons et al. (1967)はIvlev(1945)のモデル式を発展させて、次式のモデル式を提案した。

$$f_{feed}(\lambda, \Pi^{min}, \Pi) = 1 - \exp\{\lambda \cdot \min(0, \Pi^{min} - \Pi)\} \quad (2.3.4)$$

λ : イブレフ(Ivlev)定数[m³ molC⁻¹]

Π^{min} : 飼料濃度の下限値[molC m⁻³]

Π : 飼料濃度[molC m⁻³]

この関数は飼料濃度 Π が Π^{min} 以下で0となり、飼料濃度が増えるにしたがって1に漸近する。制限関数 f_{feed} の例を図-2.5に示す。

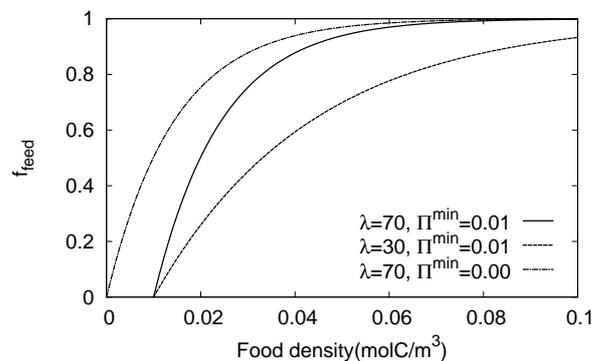


図-2.5 飼料濃度の制限関数の例

2.4 捕食量の調整および排糞

(1) 捕食量の調整

原生動物や動物プランクトンの変数は炭素量をベースにしており、窒素やリン量に関しては、炭素比率で計算するようにしている。したがって、捕食されたときに窒素・リン量に関して保存性を満たすように注意しなければならない。ただし、ケイ素に関しては珪藻以外に利用されず、珪藻の死がいから水中に再帰する割合は少ないと考え、珪藻が死亡あるいは捕食されたときになくなるものとする。

例えば、植物プランクトンが動物プランクトンに捕食された場合、炭素や窒素量の変動は表-2.2で表わされ

る。表-2.2の捕食による余剰量 ΔB^{rem} [molC m⁻³ s⁻¹]は、原生動物と動物プランクトンの炭素窒素比が異なることで生じた量である。これは動物プランクトンの残滓（ざんし；食べかす）に相当すると考え、余りとなる δB^{rem} は後述する排糞・残滓量に加える。

$$\Delta B^{rem,N} = (N_C^{PHY,i} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} \quad (2.4.1)$$

$$\Delta B^{rem,P} = (P_C^{PHY,i} - P_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} \quad (2.4.2)$$

ただし、 $\Delta B^{rem,N}$ 、 $\Delta B^{rem,P}$ のどちらかが負である場合、すなわち、 $(N_C^{PHY,i} < N_C^{ZOO,j})$ or $(P_C^{PHY,i} < P_C^{ZOO,j})$ の場合、これは動物プランクトンが捕食される植物プランクトン量以上に捕食を行ったことを意味している。この状況を避けるために、捕食量の調整を行う。

捕食調整の概念図は図-2.6に示す通りであり、以下に具体的な手順を記す。

a) 捕食者と被食者のN/C, P/Cを比べる。捕食者のN/C, P/Cどちらかが、被食者のそれより大きければ、捕食調整を行う。

b) 窒素とリン、どちらが制限になるか調べる。

$$(N_C^{PHY,i} - N_C^{ZOO,j}) \cdot (N_C^{PHY,i})^{-1} < (P_C^{PHY,i} - P_C^{ZOO,j}) \cdot (P_C^{PHY,i})^{-1} \quad (2.4.3)$$

ならば窒素制限であり、それ以外はリン制限となる。

c) 捕食調整を行う。動物プランクトンの捕食量 $B_{Phy2Zoo,i,j}$ から $\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$ [molC m⁻³ s⁻¹]を差し引いて、 $\Delta B^{rem,N} = 0$ とする（窒素制限の場合）。すなわち、

$$N_C^{PHY,i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} - N_C^{ZOO,i} \cdot (B_{Phy2Zoo,i,j} - \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}) = 0 \quad (2.4.4)$$

$$\therefore \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut} = \frac{N_C^{ZOO,j} - N_C^{PHY,i}}{N_C^{ZOO,i}} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} > 0 \quad (2.4.5)$$

捕食調整を行った結果を表-2.3に示す。リンで調整する場合も同様に考えるので、調整量は次式となる。

$$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut} = \frac{P_C^{ZOO,j} - P_C^{PHY,i}}{P_C^{ZOO,i}} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} \quad (2.4.6)$$

d) 新しく計算された捕食の余剰分を排糞・残滓に振り分ける。捕食の余剰分である $\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C}$ 、 $\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,N}$ 、 $\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,P}$ は、次式で計算される。

$$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C} = \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut} \quad (2.4.7)$$

$$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,N} = (N_C^{PHY,i} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} + N_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut} \quad (2.4.8)$$

$$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,P} = (P_C^{PHY,i} - P_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} + P_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut} \quad (2.4.9)$$

(2) 排糞・残滓

本モデルでは懸濁態・溶存態有機物を分解速度別に分けるマルチGモデルを採用している。よって、捕食時の同化効率についても分解速度別の対応をする必要がある。加えて、捕食物の一部は溶存態有機物になることが知られている（Nagata, 2000）。以上を踏まえて、排糞・残滓について図-2.7に示す流れでモデリングした。

排糞・残滓発生の流れとして、動物プランクトン*j*種が植物プランクトン*i*種を捕食する場合を考える。捕食量は $B_{Phy2Zoo,i,j}$ であるが、植物プランクトンの分解速度別の組成比で考えると、次式で表わされる。

$$B_{Phy2Zoo,i,j} = \sum_k^{N_{POM}} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} \quad (2.4.10)$$

ここで、 $c_{PHY,i}^{dec,k}$ は植物プランクトンの分解速度別の組成比[-]であり、 $\sum_k^{N_{POM}} c_{PHY,i}^{dec,k} = 1$ である。

動物プランクトンの同化効率を考えると、珪藻の殻のように難分解性のものは同化効率が低く、易分解性のものは同化効率が高くなることが考えられる。そこで、同化効率を、植物プランクトン*i*種の同化効率 $e_{ZOO,j}^{PHY,i}$ [-]と、分解速度分画*k*種の同化効率 $e_{ZOO,j}^{dec,k}$ [-]の積で表わすこととする。したがって、植物プランクトン*i*種を捕食したときの動物プランクトンから出てくる排糞・残滓量 $B_{ZooExc,j}^{PHY,i}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は次式で表わされる（ $B_{ZooExc,j}^{PHY,i}$ には捕食調整で生じた余剰量 $\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C}$ は含まれない）。

$$B_{ZooExc,j}^{PHY,i} = \sum_k^{N_{DEC}} B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i} \quad (2.4.11)$$

$$B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i} = (1 - e_{ZOO,j}^{PHY,i} \cdot e_{ZOO,j}^{dec,k}) \cdot c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot (B_{Phy2Zoo,i,j} - \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}) \quad (2.4.12)$$

なお、正味の同化効率 $\hat{e}_{ZOO,j}^{PHY,i}$ は、次式で求められる。

$$\hat{e}_{ZOO,j}^{PHY,i} = \frac{\{B_{Phy2Zoo,i,j} - \sum_k^{N_{POM}} B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i}\}}{B_{Phy2Zoo,i,j}} = \sum_k^{N_{DEC}} e_{ZOO,j}^{PHY,i} \cdot e_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot c_{PHY,i}^{dec,k} \quad (2.4.13)$$

動物プランクトンから出てくる排糞・残滓量のうち、懸濁態有機物になる割合を $\kappa_{ZooExc,j}$ [-]とし、溶存態有機物になる割合を $(1 - \kappa_{ZooExc,j})$ [-]とする。このとき、 $B_{ZooExc,j}^{PHY,i}$ には捕食調整で生じた余剰量 $\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C}$ が含まれていないので、正味の排糞・残滓量にはそれを含まれることに注意。すなわち、植物プランクトン*i*種が分解速度分画*k*種の懸濁態有機物になる排糞・残滓量のC, N, P量は(2.4.14)~(2.4.16)式のようになる。

表-2.2 動物プランクトンによる植物プランクトンの捕食と各元素の移動（捕食調整なし）

元素	植物プランクトンの減少量	動物プランクトンの増加量	余剰量: $\Delta B^{rem,C}$, $\Delta B^{rem,N}$, $\Delta B^{rem,P}$
炭素	$B_{Phy2Zoo,i,j}$	$B_{Phy2Zoo,i,j}$	$\Delta B^{rem,C} = 0$
窒素	$N_C^{PHY,i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} + \underbrace{\frac{SQN_i}{PHY_i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j}}_{B_{SqLoss,i}の一部分}$	$N_C^{ZOO,j} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j}$	$\Delta B^{rem,N} = (N_C^{PHY,i} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j}$
リン	$P_C^{PHY,i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} + \underbrace{\frac{SQP_i}{PHY_i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j}}_{B_{SqLoss,i}の一部分}$	$P_C^{ZOO,j} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j}$	$\Delta B^{rem,P} = (P_C^{PHY,i} - P_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j}$

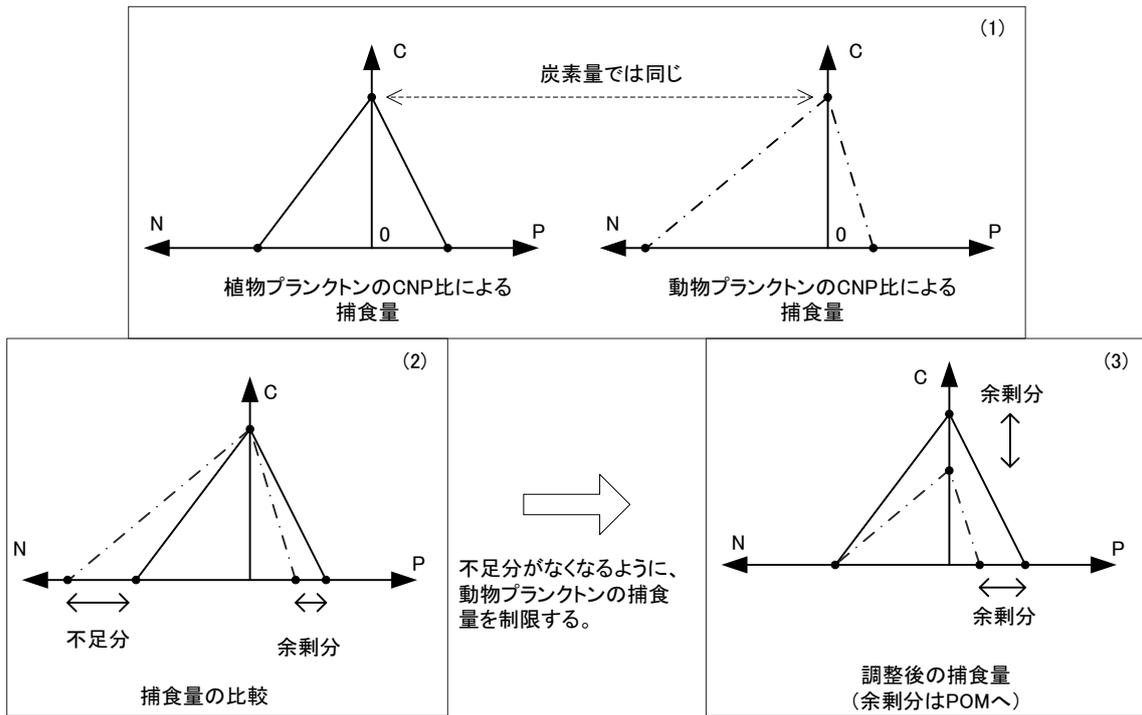


図-2.6 捕食調整の概念図

表-2.3 動物プランクトンによる植物プランクトンの捕食と各元素の移動（窒素で捕食調整）

元素	植物プランクトンの減少量	動物プランクトンの増加量	余剰量: $\Delta B^{rem,C}$, $\Delta B^{rem,N}$, $\Delta B^{rem,P}$
炭素	$B_{Phy2Zoo,i,j}$	$B_{Phy2Zoo,i,j} - \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$	$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$
窒素	$N_C^{PHY,i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} + \underbrace{\frac{SQN_i}{PHY_i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j}}_{B_{SqLoss,i}の一部分}$	$N_C^{ZOO,j} \cdot (B_{Phy2Zoo,i,j} - \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut})$	0
リン	$P_C^{PHY,i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} + \underbrace{\frac{SQP_i}{PHY_i} \cdot B_{Phy2Zoo,i,j}}_{B_{SqLoss,i}の一部分}$	$P_C^{ZOO,j} \cdot (B_{Phy2Zoo,i,j} - \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut})$	$(P_C^{PHY,i} - P_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} + P_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$

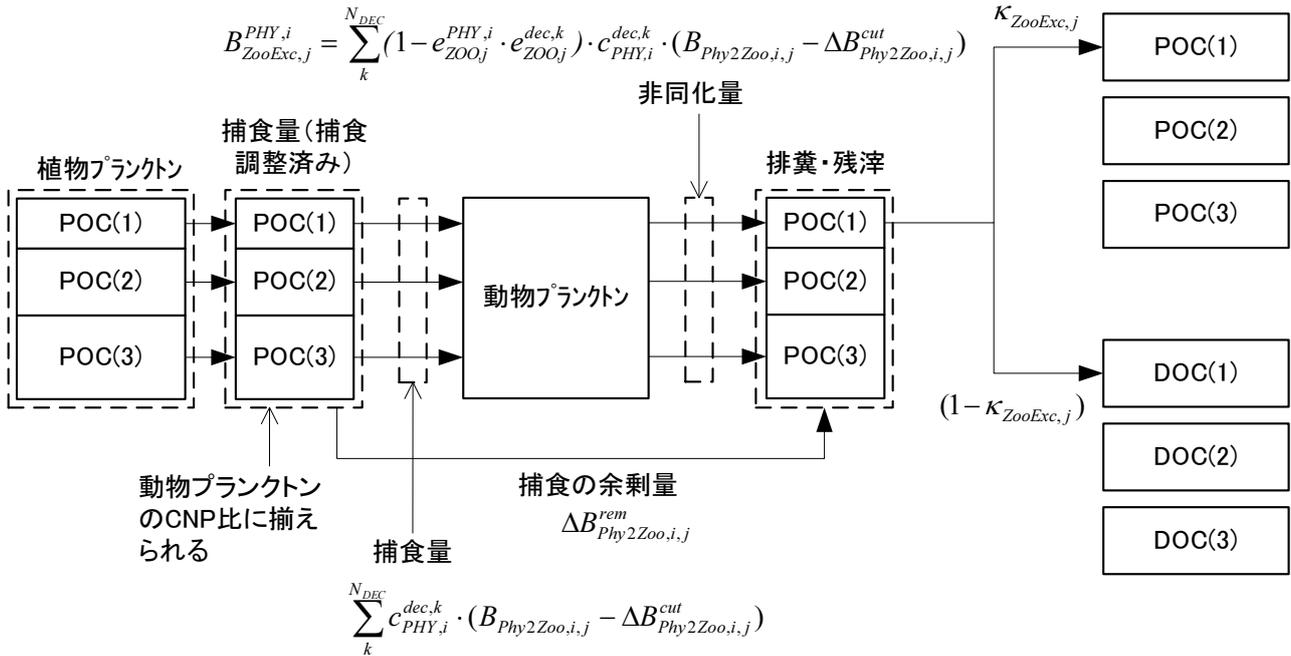


図-2.7 動物プランクトンが植物プランクトンを捕食する際の排糞・残滓の流れ

$$(B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i})^C = \kappa_{ZooExc,j} \cdot (B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i} + \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C}) \quad (2.4.14)$$

$$(B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i})^N = \kappa_{ZooExc,j} \cdot (B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i} + \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,N}) \quad (2.4.15)$$

$$(B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i})^P = \kappa_{ZooExc,j} \cdot (B_{ZooExc,j,k}^{PHY,i} + \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,P}) \quad (2.4.16)$$

2.5 植物プランクトン

植物プランクトンの細胞内栄養塩量（セルクオタ； cell quota）は変動することが知られている（Droop, 1974）．そこでモデルでは、植物プランクトンの細胞で、成長の維持に最低限必要な栄養塩量（サブシステムクオタ； subsistent quota）と、それ以外の蓄積栄養塩量（SQN, SQP）を分けて取り扱った（中田, 1993）．植物プランクトンの炭素量をPHY[molC m⁻³]とし、その炭素量の維持に最低限必要な窒素・リン量（サブシステムクオタ）をそれぞれN_C^{PHY,i}・PHY[molN m⁻³]、P_C^{PHY,i}・PHY[molP m⁻³]と表わす．ここで、N_C^{PHY,i}、P_C^{PHY,i}は、それぞれ植物プランクトンのサブシステムクオタの N/C 比、P/C 比である．植物プランクトン中の窒素・リン量（セルクオタ）からサブシステムクオタを差し引いた量、すなわち余剰栄養塩量をそれぞれSQN[molN m⁻³]、SQP[molP m⁻³]とする（図-2.8）．

なお、ケイ素に関しては珪藻の体内に利用可能な形態では蓄積されないため、ケイ素の蓄積栄養塩量は考えないものとした．

植物プランクトンモデルの物質フローを図-2.9 に示す．

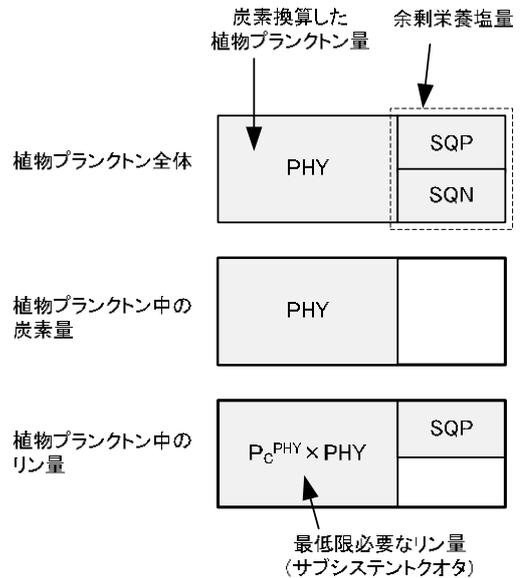


図-2.8 植物プランクトンの概念図

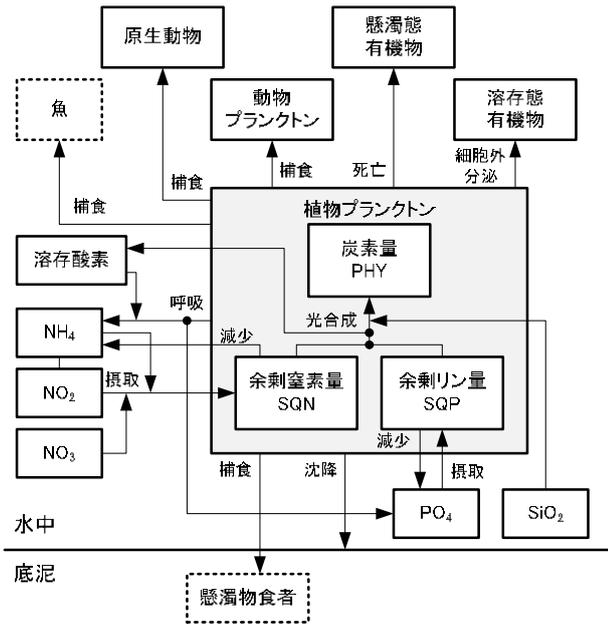


図-2.9 植物プランクトンモデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

植物プランクトン(PHY)は光合成によって増殖し、細胞外分泌・呼吸・自然死亡・被食によって減少し、鉛直移動によって増減する。したがって、植物プランクトンの増加速度 $S_{PHY,i}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、次式のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 S_{PHY,i} = & \underbrace{B_{PhyPs,i}^C}_{\text{光合成}} - \underbrace{B_{PhyExt,i}}_{\text{細胞外分泌}} - \underbrace{B_{PhyResp,i}}_{\text{呼吸}} - \underbrace{B_{PhyLoss,i}}_{\text{死亡}} \\
 & - \sum_j^{N_{zoo}} \underbrace{B_{Phy2Zoo,i,j}}_{\text{動物プランクトンによる被食}} - \sum_n^{N_{pz}} \underbrace{B_{Phy2Pz,i,n}}_{\text{原生動物による被食}} \\
 & - \underbrace{B_{Phy2Fish,i}}_{\text{魚による被食}} + \underbrace{B_{PhyMig,i}}_{\text{鉛直移動}} \quad (2.5.1)
 \end{aligned}$$

$B_{PhyPs,i}^C$: 植物プランクトン*i*種の光合成 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PhyExt,i}$: 植物プランクトン*i*種の細胞外分泌 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PhyResp,i}$: 植物プランクトン*i*種の呼吸 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PhyLoss,i}$: 植物プランクトン*i*種の自然死亡 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{Phy2Zoo,i,j}$: 動物プランクトン*j*種による植物プランクトン*i*種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹] : 2.6 参照.

$B_{Phy2Pz,i,n}$: 原生動物*n*種による植物プランクトン*i*種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹] : 2.7 参照.

$B_{Phy2Fish,i}$: 魚による植物プランクトン*i*種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹] : 2.17 参照.

$B_{PhyMig,i}$: 植物プランクトン*i*種の鉛直移動 [molC m⁻³ s⁻¹]

余剰栄養塩量(SQN, SQP)は栄養塩の摂取によって増加し、光合成を行うことによって減少するとともに、植物プランクトンの自然死亡や鉛直移動などによって減少または増減する。したがって、余剰栄養塩量の増加速度 $S_{SQN,i}$ [molN m⁻³ s⁻¹], $S_{SQP,i}$ [molP m⁻³ s⁻¹]は以下のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 S_{SQN,i} = & \underbrace{B_{PhyTake,i}^{NH_4}}_{\text{アンモニアの摂取}} + \underbrace{B_{PhyTake,i}^{NO_2}}_{\text{亜硝酸の摂取}} + \underbrace{B_{PhyTake,i}^{NO_3}}_{\text{硝酸の摂取}} \\
 & - \underbrace{B_{PhyPs,i}^N}_{\text{光合成に伴う減少}} - \underbrace{B_{SqNLoss,i}}_{\text{植物プランクトンの減少に伴う減少}} \\
 & \underbrace{B_{PhyMig,i} \cdot \frac{SQN_i}{PHY_i}}_{\text{鉛直移動}} \quad (2.5.2)
 \end{aligned}$$

$B_{PhyTake,i}^{NH_4}$: 植物プランクトン*i*種によるアンモニアの摂取 [molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{PhyTake,i}^{NO_2}$: 植物プランクトン*i*種による亜硝酸の摂取 [molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{PhyTake,i}^{NO_3}$: 植物プランクトン*i*種による硝酸の摂取 [molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{PhyPs,i}^N$: 植物プランクトン*i*種の光合成に伴う余剰窒素量の減少 [molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{SqNLoss,i}$: 植物プランクトン*i*種の減少に伴う余剰窒素量の減少 [molN m⁻³ s⁻¹]

$$\begin{aligned}
 S_{SQP,i} = & \underbrace{B_{PhyTake,i}^{PO_4}}_{\text{リンの摂取}} - \underbrace{B_{PhyPs,i}^P}_{\text{光合成に伴う減少}} \\
 & - \underbrace{B_{SqPLoss,i}}_{\text{植物プランクトンの減少に伴う減少}} \\
 & + \underbrace{B_{PhyMig,i} \cdot \frac{SQP_i}{PHY_i}}_{\text{鉛直移動}} \quad (2.5.3)
 \end{aligned}$$

$B_{PhyTake,i}^{PO_4}$: 植物プランクトン*i*種によるリン酸の摂取 [molP m⁻³ s⁻¹]

$B_{PhyPs,i}^P$: 植物プランクトン*i*種の光合成に伴う余剰リン量の減少 [molP m⁻³ s⁻¹]

$B_{SqPLoss,i}$: 植物プランクトン*i*種の減少に伴う余剰リン量の減少 [molP m⁻³ s⁻¹]

(2) 底泥とのフラックス

植物プランクトンの底泥とのフラックスには、懸濁物食者による被食と、底泥への沈降を考慮した。したがって、植物プランクトンの底泥とのフラックス

$J_{PHY,i}^{bp}$ [molC m⁻² s⁻¹]は、次式のように定式化される。

$$J_{PHY,i}^{bp} = \underbrace{J_{Phy2Msf,i}}_{\text{懸濁物食者による被食}} + \underbrace{J_{Phy2Det,i}}_{\text{底泥への沈降}} \quad (2.5.4)$$

$J_{Phy2Msf,i}$: 懸濁物食者による植物プランクトン*i*種の捕食 [molC m⁻² s⁻¹] : 2.18 参照。

$J_{Phy2Det,i}$: 植物プランクトン*i*種の底泥への沈降フラックス [molC m⁻² s⁻¹]

余剰栄養塩量の底泥フラックスは植物プランクトンの底泥フラックスに応じて発生する。よって、余剰栄養塩量の底泥とのフラックス $J_{SQN,i}^{bp}$ [molN m⁻² s⁻¹], $J_{SQP,i}^{bp}$ [molP m⁻² s⁻¹]は以下のように定式化される

$$J_{SQN,i}^{bp} = \underbrace{J_{PHY,i}^{bp} \cdot \frac{SQN_i}{PHY_i}}_{\text{植物プランクトンの減少に伴う SQN の減少}} \quad (2.5.5)$$

$$J_{SQP,i}^{bp} = \underbrace{J_{PHY,i}^{bp} \cdot \frac{SQP_i}{PHY_i}}_{\text{植物プランクトンの減少に伴う SQP の減少}} \quad (2.5.6)$$

(3) 光合成による増殖

光合成による増殖 $B_{PhyPs,i}^C$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、水温に対して指数関数的に増加し (Eppley, 1972), 栄養塩と光量によって制限されると考え、次式のように定式化を行った。

$$B_{PhyPs,i}^C = f_{temp}(\alpha_{PhyPs,i}, \beta_{Phy,i}) \cdot u_{PhyPsN,i} \cdot u_{PhyPsL,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.7)$$

$\alpha_{PhyPs,i}$: 植物プランクトン*i*種の 0°Cでの最大光合成速度 [s⁻¹] : パラメータ

$\beta_{Phy,i}$: 植物プランクトン*i*種の温度活性係数 [°C⁻¹] : パラメータ

$u_{PhyPsN,i}$: 栄養塩制限関数[-]

$u_{PhyPsL,i}$: 光制限関数[-]

光合成に伴う栄養塩消費 $B_{PhyPs,i}^N$ [molN m⁻³ s⁻¹], $B_{PhyPs,i}^P$ [molP m⁻³ s⁻¹]は、 $B_{PhyPs,i}^C$ を基準として以下のように表わされる。

$$B_{PhyPs,i}^P = P_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyPs,i}^C \quad (2.5.8)$$

$$B_{PhyPs,i}^N = N_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyPs,i}^C \quad (2.5.9)$$

栄養塩制限関数 $u_{PhyPsN,i}$ [-]はリービッヒ (Liebig) の最小律原理より、リン・窒素・ケイ素の最小制限値を用いることとした。一方、Droop (1974) はサブシステントクオタを半飽和定数としたモデル化を行った (中田, 1993)。しかし、そのモデル化では余剰栄養塩量をサブシステントクオタと同量保持していても最大成長速度の半分とな

り、余剰栄養塩量を多く保持しない種では制限が強過ぎると考えられる。そこで、半飽和定数はサブシステントクオタに比例するようにパラメータを加えて、次式のように定式化を行った。

$$u_{PhyPsN,i} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{MM}(SQP_i, K_{PhyPsNutP}) \\ f_{MM}(SQN_i, K_{PhyPsNutN}) \\ f_{MM}(SiO_2, K_{PhyPsNutSi}) \end{array} \right\} \quad (2.5.10)$$

$$K_{PhyPsNutP} = \alpha_{PhyPsNut,i} \cdot P_C^{PHY,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.11)$$

$$K_{PhyPsNutN} = \alpha_{PhyPsNut,i} \cdot N_C^{PHY,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.12)$$

$$K_{PhyPsNutSi} = \alpha_{PhyPsNut,i} \cdot Si_C^{PHY,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.13)$$

$\alpha_{PhyPsNut,i}$: 植物プランクトン*i*種の光合成に対する余剰栄養塩量の制限パラメータ[-] : パラメータ

光制限関数 $u_{PhyPsL,i}$ [-]は、光-光合成関数を層内で積分することにより得られる。水中での光の減衰はランベルト・ベール (Lambert-Beer) の法則より、次式のように表わせる。

$$I(z_b) = I(z_t) \cdot \exp\{-k_{ext} \cdot (z_b - z_t)\} \quad (2.5.14)$$

$I(z)$: z 位置における水中光量 [W m⁻²]

k_{ext} : 光の消散係数 [m⁻¹]

z_t : 水面からメッシュ上面の位置 [m]

z_b : 水面からメッシュ下面の位置 [m]

植物プランクトンの光-光合成関数として、ここでは強光阻害を考慮した Steele (1962) の式を用いた。よって、光制限関数 $u_{PhyPsL,i}$ [-]は次式のように表わされる。

$$u_{PhyPsL,i} = \frac{1}{z_b - z_t} \int_{z_b}^{z_t} \frac{I(z)}{I_{opt,i}} \cdot \exp\left\{1 - \frac{I(z)}{I_{opt,i}}\right\} dz \quad (2.5.15)$$

$$= \frac{1}{k_{ext} \cdot (z_b - z_t)} \cdot \left[\exp\left\{1 - \frac{I(z_t)}{I_{opt,i}}\right\} - \exp\left\{1 - \frac{I(z_b)}{I_{opt,i}}\right\} \right] \quad (2.5.16)$$

$I_{opt,i}$: 植物プランクトンの最適光量 [W m⁻²] : パラメータ

光の消散係数 k_{ext} [m⁻¹]は、クロロフィル a 濃度によって消散係数が増加する Riley (1956) のモデル式を用いた。

$$k_{ext} = k_0 + \alpha_{ext1} \cdot CHL + \alpha_{ext2} \cdot (CHL)^{2/3} \quad (2.5.17)$$

k_0 : 湾に固有のクロロフィル量に依存しない消散係数 [m⁻¹] : パラメータ

α_{ext1} : 消散係数パラメータ 1 [m⁻¹ (μg L⁻¹)⁻¹] : パラメータ

α_{ext2} : 消散係数パラメータ 2 [m⁻¹ (μg L⁻¹)^{-2/3}] : パラメータ

CHL : 水中のクロロフィル a 濃度 [μg L⁻¹]

水中のクロロフィル *a* 濃度 CHL [$\mu\text{g L}^{-1}$] は次式で計算される。

$$CHL = \sum_i^{N_{PHY}} CHL_C^{PHY,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.18)$$

$CHL_C^{PHY,i}$: 植物プランクトン *i* 種の炭素量とクロロフィル *a* 濃度の比 [$\mu\text{g m}^3 \text{L}^{-1} \text{molC}^{-1}$]: パラメータ

(4) 細胞外分泌

植物プランクトンの細胞外分泌 $B_{PhyExt,i}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、一般的に光合成量に比例する。ここでは、クロロフィル *a* によって光合成量と細胞外分泌量の比率が変化する Watt (1966) のモデルを用いた。

$$B_{PhyExt,i} = B_{PhyPs,i}^C \cdot \alpha_{PhyExt,i} \cdot \exp(-\beta_{PhyExt,i} \cdot CHL_C^{PHY,i} \cdot PHY_i) \quad (2.5.19)$$

$\alpha_{PhyExt,i}$: 光合成に対する細胞外分泌の割合 [-]: パラメータ

$\beta_{PhyExt,i}$: 細胞外分泌割合のクロロフィル *a* 係数 [$\text{L } \mu\text{g}^{-1}$]: パラメータ

(5) 呼吸

植物プランクトンの呼吸 $B_{PhyResp,i}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、水温による増加効果および酸素量による制限を考え、次式で表わした。

$$B_{PhyResp,i} = f_{temp}(\alpha_{PhyResp,i}, \beta_{Phy,i}) \cdot f_{MM}(DO, K_{PhyResp}^{DO}) \cdot PHY_i \quad (2.5.20)$$

$\alpha_{PhyResp,i}$: 0°C での最大呼吸速度 [s^{-1}]: パラメータ

$K_{PhyResp}^{DO}$: 呼吸に対する溶存酸素の半飽和定数 [$\text{molO}_2 \text{m}^{-3}$]: パラメータ

(6) 自然死亡

自然死亡 $B_{PhyLoss,i}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は捕食以外による死亡であり、2 乗に比例する定式化を行った。

$$B_{PhyLoss,i} = \alpha_{PhyLoss,i} \cdot (PHY_i)^2 \quad (2.5.21)$$

$\alpha_{PhyLoss,i}$: 自然死亡速度 [$\text{m}^3 \text{molC}^{-1} \text{s}^{-1}$]: パラメータ

(7) リンの摂取

植物プランクトンは余剰栄養塩量を使用したモデルであるから、栄養塩の摂取と光合成は別々に行われる。リンの摂取 $B_{PhyTake,i}^{PO_4}$ [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、水中のリン濃度と、余剰栄養塩量による 2 種類の制限を受けるため、次式で定式化を行った。

$$B_{PhyTake,i}^{PO_4} = UP_{max,i} \cdot u_{PhyTake,i}^{PO_4} \cdot f_{MM}(PO_4, K_{PhyTake,i}^{PO_4})$$

$$\cdot P_C^{PHY,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.22)$$

$UP_{max,i}$: 最大リン摂取速度 [s^{-1}]: パラメータ

$u_{PhyTake,i}^{PO_4}$: 植物プランクトンによるリン摂取の制限関数 [-]

$K_{PhyTake,i}^{PO_4}$: リン摂取の半飽和定数 [molP m^{-3}]: パラメータ

植物プランクトンによるリン摂取の制限関数 $u_{PhyTake,i}^{PO_4}$ [-] は、木幡ら (1982) および Lehman et al. (1975) より、次式のように定式化を行った。

$$u_{PhyTake,i}^{PO_4} = \frac{1}{PQP_{max,i} - 1} \cdot \left(PQP_{max,i} - \frac{P_C^{PHY,i} \cdot PHY_i + SQP_i}{P_C^{PHY,i} \cdot PHY_i} \right) \quad (2.5.23)$$

$PQP_{max,i}$: 最大細胞内リン保持量のサブシステムクオタに対する比 [-]: パラメータ

(8) 窒素の摂取

アンモニア・亜硝酸・硝酸の摂取 $B_{PhyTake,i}^{NH_4}$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$], $B_{PhyTake,i}^{NO_2}$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$], $B_{PhyTake,i}^{NO_3}$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$] についても、リンと同様に考えた。ただし、アンモニア濃度が高い場合はそれを優先的に摂取する Wroblewski (1977) のモデル式を用いて、次式で定式化を行った。

$$B_{PhyTake,i}^{NH_4} = UN_{max,i} \cdot u_{PhyTake,i}^N \cdot f_{MM}(NH_4, K_{PhyTake,i}^{NH_4}) \cdot (1 - u_{PhyTakeNH_4,i}) \cdot N_C^{PHY,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.24)$$

$$B_{PhyTake,i}^{NO_2} = UN_{max,i} \cdot \frac{NO_2}{NO_2 + NO_3} \cdot u_{PhyTake,i}^N$$

$$\cdot f_{MM}(NO_2, K_{PhyTake,i}^{NO_2}) \cdot u_{PhyTakeNH_4,i}$$

$$\cdot N_C^{PHY,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.25)$$

$$B_{PhyTake,i}^{NO_3} = UN_{max,i} \cdot \frac{NO_3}{NO_2 + NO_3} \cdot u_{PhyTake,i}^N$$

$$\cdot f_{MM}(NO_3, K_{PhyTake,i}^{NO_3}) \cdot u_{PhyTakeNH_4,i}$$

$$\cdot N_C^{PHY,i} \cdot PHY_i \quad (2.5.26)$$

$UN_{max,i}$: 最大窒素摂取速度 [s^{-1}]: パラメータ

$u_{PhyTake,i}^N$: 植物プランクトンによる窒素摂取の制限関数 [-]

$K_{PhyTake,i}^{NH_4}$: アンモニア摂取の半飽和定数 [molN m^{-3}]: パラメータ

$K_{PhyTake,i}^{NO_2}$: 亜硝酸摂取の半飽和定数 [molN m^{-3}]: パラメータ

$K_{PhyTake,i}^{NO_3}$: 硝酸摂取の半飽和定数 [molN m^{-3}]: パラ

メータ

$u_{PhyTakeNH_4,i}$: アンモニアによる硝酸摂取の抑制関数[-]

植物プランクトンによる窒素摂取の制限関数 $u_{PhyTake,i}^N$ [-]は、リンと同様に次式で表わされる。

$$u_{PhyTake,i}^N = \frac{1}{PQN_{max,i} - \left(PQN_{max,i} - \frac{N_C^{PHY,i} \cdot PHY_i + SQN_i}{N_C^{PHY,i} \cdot PHY_i} \right)} \quad (2.5.27)$$

$PQN_{max,i}$: 最大細胞内窒素保持量のサブシステントクオタに対する比[-] : パラメータ

アンモニアによる硝酸摂取の抑制関数は Wroblewski (1977) のモデル式を用いた。

$$u_{PhyTakeNH_4,i} = \exp(-\Psi_{PhyTake,i} \cdot NH_4) \quad (2.5.28)$$

$\Psi_{PhyTake,i}$: アンモニア濃度による硝酸摂取の抑制係数 [$m^3 \text{ molN}^{-1}$] : パラメータ

(9) 植物プランクトンの減少に伴う余剰栄養塩量の減少

植物プランクトンの捕食等による減少によって、余剰栄養塩量も減少する。各余剰栄養塩量の減少 $B_{SqnLoss,i}$ [$\text{molN m}^{-3} \text{ s}^{-1}$], $B_{SqPLoss,i}$ [$\text{molP m}^{-3} \text{ s}^{-1}$] は以下のように表わされる。

$$B_{SqnLoss,i} = B'_{PhyLoss,i} \cdot \frac{SQN_i}{PHY_i} \quad (2.5.29)$$

$$B_{SqPLoss,i} = B'_{PhyLoss,i} \cdot \frac{SQP_i}{PHY_i} \quad (2.5.30)$$

$$B'_{PhyLoss,i} = B_{PhyLoss,i} + \sum_j^{N_{zoo}} B_{Phy2Zoo,i,j} + \sum_n^{N_{pz}} B_{Phy2Pz,i,n} + B_{Phy2Fish,i} \quad (2.5.31)$$

(10) 鉛直移動

植物プランクトンの鉛直移動 $B_{PhyMig,i}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{ s}^{-1}$] は次式で表わされる。ただし、水面および底面位置では $\partial PHY_i / \partial z = 0$ とする。

$$B_{PhyMig,i} = w_{Phy,i} \cdot \frac{\partial PHY_i}{\partial z} \quad (2.5.32)$$

$w_{Phy,i}$: 植物プランクトン i 種の鉛直移動速度 [m s^{-1}] : 鉛直上向きを正とする。

植物プランクトンの鉛直移動速度は日周期鉛直移動を考慮して、以下のように定式化を行った。

$$w_{Phy,i} = w_{PhyConst,i} + w_{PhyDay,i} \quad (2.5.33)$$

$w_{PhyConst,i}$: 定常な沈降速度 [m s^{-1}] : パラメータ

$w_{PhyDay,i}$: 日周期鉛直移動速度 [m s^{-1}]

$$w_{PhyDay,i} = \begin{cases} w_{PhyUp,i} & \left(\begin{array}{l} T_{PhyStart,i} \leq T_{hour} \\ \text{and } T_{hour} \leq T_{PhyEnd,i} \end{array} \right) \\ w_{PhyDown,i} & \left(\begin{array}{l} T_{hour} < T_{PhyStart,i} \\ \text{and } T_{PhyEnd,i} < T_{hour} \end{array} \right) \end{cases} \quad (2.5.34)$$

$w_{PhyUp,i}$: 日周期鉛直移動の上昇速度 [m s^{-1}] : パラメータ

$w_{PhyDown,i}$: 日周期鉛直移動の下降速度 [m s^{-1}] : パラメータ

$T_{PhyStart,i}$: 上昇を始める時刻 [hour] : パラメータ

$T_{PhyEnd,i}$: 上昇を終わる時刻 [hour] : パラメータ

T_{hour} : 時刻 [hour]

$$T_{hour} = \text{mod}(t + t_{phaseHour}, 86400) / 3600 \quad (2.5.35)$$

$t_{phaseHour}$: 計算開始時刻と午前零時との時刻差 [sec] : パラメータ

(11) 底泥への沈降

底泥への沈降フラックス $J_{Phy2Det,i}$ [$\text{molC m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] は、次式のように表わされる。

$$J_{Phy2Det,i} = \min(0, w_{Phy,i}) \cdot PHY_i \quad (2.5.36)$$

ここで、底泥への沈降フラックス $J_{Phy2Det,i}$ は鉛直上向きを正とする。したがって、 $w_{Phy,i} < 0$ のとき (沈降するとき) に値を取り、 $w_{Phy,i} \geq 0$ のとき (上昇するとき) は $J_{Phy2Det,i} = 0$ となるようにしている。

2.6 動物プランクトン

動物プランクトンは、ミジンコのように摂食を行う単細胞生物でないプランクトンの総称である。また、動物プランクトンの物質フローを図-2.10に示す。

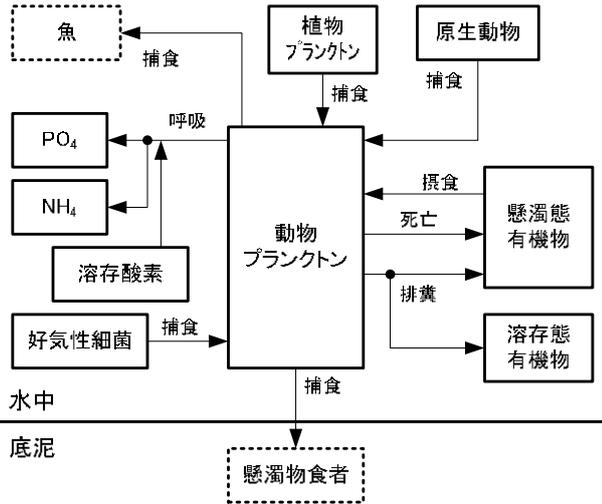


図-2.10 動物プランクトンモデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

動物プランクトンは植物プランクトン・懸濁態有機物・原生動物・好気性細菌の捕食（摂食）によって増殖し、排糞・呼吸・自然死亡・魚による被食によって減少し、鉛直移動によって増減する。したがって、動物プランクトンの増加 $S_{Zoo,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、次式のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 S_{Zoo,j} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} (B_{Phy2Zoo,i,j} - \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut})}_{\text{植物プランクトンの捕食}} \\
 & + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} B_{Pom2Zoo,k,j}}_{\text{懸濁態有機物の摂食}} + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} (B_{Pz2Zoo,n,j} - \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut})}_{\text{原生動物の捕食}} \\
 & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} (B_{Bac2Zoo,m,j} - \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut})}_{\text{好気性細菌の捕食}} - \underbrace{B_{ZooExc,j}}_{\text{排糞}} \\
 & - \underbrace{B_{ZooResp,j}}_{\text{呼吸}} - \underbrace{B_{ZooLoss,j}}_{\text{死亡}} - \underbrace{B_{Zoo2Fish,j}}_{\text{魚による被食}} \\
 & + \underbrace{B_{ZooMig,j}}_{\text{鉛直移動}} \quad (2.6.1)
 \end{aligned}$$

$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$: 動物プランクトン j 種による植物プランクトン i 種の捕食の調整量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{Pom2Zoo,k,j}$: 動物プランクトン j 種による懸濁態有機物 k 分画の摂食 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{Pz2Zoo,n,j}$: 動物プランクトン j 種による原生動物 n 種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹]

$\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut}$: 動物プランクトン j 種による原生動物 n 種の捕食の調整量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{Bac2Zoo,m,j}$: 動物プランクトン j 種による好気性細菌 m 種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹]

$\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut}$: 動物プランクトン j 種による好気性細菌 m 種の捕食の調整量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{ZooExc,j}$: 動物プランクトン j 種の排糞 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{ZooResp,j}$: 動物プランクトン j 種の呼吸 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{ZooLoss,j}$: 動物プランクトン j 種の自然死亡 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{Zoo2Fish,j}$: 魚による動物プランクトン j 種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{ZooMig,j}$: 動物プランクトン j 種の鉛直移動 [molC m⁻³ s⁻¹]

捕食の調整量である $\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$, $\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut}$, $\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut}$ の計算方法は 2.4 を参照。

(2) 底泥とのフラックス

底泥とのフラックス $J_{Zoo,j}^{bp}$ [molC m⁻² s⁻¹] は、懸濁物食者による被食のみを考える。

$$J_{Zoo,j}^{bp} = \underbrace{J_{Zoo2Msf,j}}_{\text{懸濁物食者による被食}} \quad (2.6.2)$$

$J_{Zoo2Msf,j}$: 懸濁物食者による被食 [molC m⁻² s⁻¹] : 2.18 参照。

(3) 植物プランクトンの捕食

動物プランクトンによる植物プランクトンの捕食 $B_{Phy2Zoo,i,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹] は、次式のように表わされる。

$$B_{Phy2Zoo,i,j} = \eta_{Zoo,j}^{PHY,i} \cdot u_{Phy2Zoo,i,j} \cdot R_{ZooFeed,j} \cdot ZOO_j \quad (2.6.3)$$

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

$R_{ZooFeed,j}$: 動物プランクトンの捕食速度 [s⁻¹]

$u_{Phy2Zoo,i,j}$: 植物プランクトンの捕食率 [-]

動物プランクトンの捕食速度 $R_{ZooFeed,j}$ [s⁻¹] は、温度による指数関数的な捕食速度の増加に対し、DO による制限関数と、飼料濃度による Parsons et al. (1967) の制限関数式 (2.3.4) を用いて、次式のように定式化を行った。

$$R_{ZooFeed,j} = f_{temp}(\alpha_{ZooFeed,j}, \beta_{Zoo,j}) \cdot f_{MM}(DO, K_{ZooFeed}^{DO}) \cdot f_{feed}(\lambda_{Zoo,j}, \Pi_{Zoo,j}^{min}, \Pi_{Zoo,j}) \quad (2.6.4)$$

$\alpha_{ZooFeed,j}$: 0°C における動物プランクトンの最大捕食速度 [s⁻¹] : パラメータ

$\beta_{Zoo,j}$: 動物プランクトンの温度活性係数 [°C⁻¹] : パラメータ

$K_{ZooFeed}^{DO}$: 捕食に対する溶存酸素の半飽和定数

[molO₂ m⁻³] : パラメータ

$\lambda_{ZOO,j}$: 動物プランクトンのイブレフ定数

[m³ molC] : パラメータ

$\Pi_{ZOO,j}^{min}$: 飼料濃度の下限値[molC m⁻³] : パラメータ

$\Pi_{ZOO,j}$: 動物プランクトンの飼料濃度[molC m⁻³]

動物プランクトン全体の飼料濃度 $\Pi_{ZOO,j}$ [molC m⁻³]は次式で表わされる.

$$\Pi_{ZOO,j} = \sum_i^{N_{PHY}} \Pi_{ZOO,j}^{PHY,i} + \sum_k^{N_{DEC}} \Pi_{ZOO,j}^{POM,k} + \sum_n^{N_{PZ}} \Pi_{ZOO,j}^{PZ,n} + \sum_m^{N_{BAC}} \Pi_{ZOO,j}^{BAC,m} \quad (2.6.5)$$

$\Pi_{ZOO,j}^{PHY,i}$: 動物プランクトンが捕食可能な植物プランクトン濃度[molC m⁻³]

$\Pi_{ZOO,j}^{POM,k}$: 動物プランクトンが摂食可能な懸濁態有機物濃度[molC m⁻³]

$\Pi_{ZOO,j}^{PZ,n}$: 動物プランクトンが捕食可能な原生動物濃度[molC m⁻³]

$\Pi_{ZOO,j}^{BAC,m}$: 動物プランクトンが捕食可能な好気性細菌濃度[molC m⁻³]

動物プランクトンが捕食可能な植物プランクトンなどの濃度は以下のように表わされる. 選好係数は0~1の値を与え, 捕食しない場合は, 選好係数を0とする.

$$\Pi_{ZOO,j}^{PHY,i} = \eta_{ZOO,j}^{PHY,i} \cdot PHY_i \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{PHY,i}}{N_C^{ZOO,j}}, \frac{P_C^{PHY,i}}{P_C^{ZOO,j}}\right) \quad (2.6.6)$$

$$\Pi_{ZOO,j}^{POM,k} = \eta_{ZOO,j}^{POM,k} \cdot \min\left(POC_k, \frac{POP_k}{P_C^{ZOO,j}}, \frac{PON_k}{N_C^{ZOO,j}}\right) \quad (2.6.7)$$

$$\Pi_{ZOO,j}^{PZ,n} = \eta_{ZOO,j}^{PZ,n} \cdot PZ_n \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{PZ,n}}{N_C^{ZOO,j}}, \frac{P_C^{PZ,n}}{P_C^{ZOO,j}}\right) \quad (2.6.8)$$

$$\Pi_{ZOO,j}^{BAC,m} = \eta_{ZOO,j}^{BAC,m} \cdot BAC_m \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{BAC,m}}{N_C^{ZOO,j}}, \frac{P_C^{BAC,m}}{P_C^{ZOO,j}}\right) \quad (2.6.9)$$

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

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

$\eta_{ZOO,j}^{BAC,m}$: 好気性細菌捕食の選好係数[-] : パラメータ

植物プランクトンの捕食率 $u_{phy2Zoo,i,j}$ [-]は単純に濃度比で分配すると考えて, 次式のように定式化を行った.

$$u_{phy2Zoo,i,j} = \frac{\Pi_{ZOO,j}^{PHY,i}}{\Pi_{ZOO,j}} \quad (2.6.10)$$

(4) 懸濁態有機物の摂食

懸濁態有機物の摂食 $B_{Pom2Zoo,i,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は植物プランクトンの捕食と同様に表わされる.

$$B_{Pom2Zoo,k,j} = \eta_{ZOO,j}^{POM,k} \cdot u_{Pom2Zoo,k,j} \cdot R_{ZooFeed,j} \cdot ZOO_j \quad (2.6.11)$$

$u_{Pom2Zoo,k,j}$: 懸濁態有機物の摂食率[-]

$$u_{Pom2Zoo,k,j} = \frac{\Pi_{ZOO,j}^{POM,k}}{\Pi_{ZOO,j}} \quad (2.6.12)$$

(5) 原生動物の捕食

原生動物の捕食 $B_{Pz2Zoo,n,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹]も, 植物プランクトンの捕食と同様に表わされる.

$$B_{Pz2Zoo,n,j} = \eta_{ZOO,j}^{PZ,n} \cdot u_{Pz2Zoo,n,j} \cdot R_{ZooFeed,j} \cdot ZOO_j \quad (2.6.13)$$

$$u_{Pz2Zoo,n,j} = \frac{\Pi_{ZOO,j}^{PZ,n}}{\Pi_{ZOO,j}} \quad (2.6.14)$$

(6) 好気性細菌の捕食

好気性細菌の捕食 $B_{Bac2Zoo,m,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹]も, 植物プランクトンの捕食と同様に表わされる.

$$B_{Bac2Zoo,m,j} = \eta_{ZOO,j}^{BAC,m} \cdot u_{Bac2Zoo,m,j} \cdot R_{ZooFeed,j} \cdot ZOO_j \quad (2.6.15)$$

$$u_{Bac2Zoo,m,j} = \frac{\Pi_{ZOO,j}^{BAC,m}}{\Pi_{ZOO,j}} \quad (2.6.16)$$

(7) 排糞・残滓

動物プランクトンの排糞・残滓 $B_{ZooExc,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は, 各摂食に対する非同化量の和として, 以下のように表わされる.

$$B_{ZooExc,j} = \sum_k^{N_{DEC}} B_{ZooExc,j,k} \quad (2.6.17)$$

$B_{ZooExc,j,k}$: 分解速度分画 k 種の排糞・残滓量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$$B_{ZooExc,j,k} = B_{ZooExc,j,k}^{PHY} + B_{ZooExc,j,k}^{POM} + B_{ZooExc,j,k}^{PZ} + B_{ZooExc,j,k}^{BAC} \quad (2.6.18)$$

$B_{ZooExc,j,k}^{PHY}$: 植物プランクトンの捕食に対する非同化量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{ZooExc,j,k}^{POM}$: 懸濁態有機物の捕食に対する非同化量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{ZooExc,j,k}^{PZ}$: 原生動物の捕食に対する非同化量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{ZooExc,j,k}^{BAC}$: 好気性細菌の捕食に対する非同化量 [molC m⁻³ s⁻¹]

各摂食に対する非同化量は以下のように表わされる。

$$B_{ZooExc,j,k}^{PHY} = \sum_i^{N_{PHY}} (1 - e_{ZOO,j}^{PHY,i} \cdot e_{ZOO,j}^{dec,k}) \cdot c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot (B_{Phy2Zoo,i,j} - \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}) \quad (2.6.19)$$

$$B_{ZooExc,j,k}^{POM} = (1 - e_{ZOO,j}^{POM} \cdot e_{ZOO,j}^{dec,k}) \cdot B_{Pom2Zoo,k,j} \quad (2.6.20)$$

$$B_{ZooExc,j,k}^{PZ} = \sum_n^{N_{PZ}} (1 - e_{ZOO,j}^{PZ,n} \cdot e_{ZOO,j}^{dec,k}) \cdot c_{Pz,n}^{dec,k} \cdot (B_{Pz2Zoo,n,j} - \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut}) \quad (2.6.21)$$

$$B_{ZooExc,j,k}^{BAC} = \sum_m^{N_{BAC}} (1 - e_{ZOO,j}^{BAC,m} \cdot e_{ZOO,j}^{dec,k}) \cdot c_{Bac,m}^{dec,k} \cdot (B_{Bac2Zoo,m,j} - \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut}) \quad (2.6.22)$$

$e_{ZOO,j}^{dec,k}$: 分解速度分画 k 種の同化効率[-] : パラメータ

$e_{ZOO,j}^{PHY,i}$: 植物プランクトンの同化効率[-] : パラメータ

$e_{ZOO,j}^{POM}$: 懸濁態有機物の同化効率[-] : パラメータ

$e_{ZOO,j}^{PZ,n}$: 原生動物の同化効率[-] : パラメータ

$e_{ZOO,j}^{BAC,m}$: 好気性細菌の同化効率[-] : パラメータ

排糞・残滓モデルの考え方については 2.4 を参照。

(8) 呼吸

動物プランクトンの呼吸 $B_{ZooResp,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、静止呼吸と活動呼吸を考慮して、次式のように定式化を行った。

$$B_{ZooResp,j} = \underbrace{B_{ZooRespR,j}}_{\text{静止呼吸}} + \underbrace{B_{ZooRespA,j}}_{\text{活動呼吸}} \quad (2.6.23)$$

$B_{ZooRespR,j}$: 動物プランクトンの静止呼吸 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{ZooRespA,j}$: 動物プランクトンの活動呼吸 [molC m⁻³ s⁻¹]

動物プランクトンの静止呼吸は、水温による指数関数的な増加と、D0 による制限関数によって、次式のように表わされる。

$$B_{ZooRespR,j} = f_{temp}(\alpha_{ZooRespR,j}, \beta_{Zoo,j}) \cdot f_{MM}(DO, K_{ZooResp}^{DO}) \cdot ZOO_j \quad (2.6.24)$$

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

$K_{ZooResp}^{DO}$: 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

動物プランクトンの活動呼吸は捕食量に比例すると考

えた。

$$B_{ZooRespA,j} = \alpha_{ZooRespA,j} \cdot R_{ZooFeed,j} \cdot ZOO_j \quad (2.6.25)$$

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

(9) 自然死亡

動物プランクトンの自然死亡 $B_{ZooLoss,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、植物プランクトンと同様に2乗に比例する定式化を行った。

$$B_{ZooLoss,j} = \alpha_{ZooLoss,j} \cdot (ZOO_j)^2 \quad (2.6.26)$$

$\alpha_{ZooLoss,j}$: 動物プランクトンの自然死亡速度 [m³ molC⁻¹ s⁻¹] : パラメータ

(10) 鉛直移動

動物プランクトンの鉛直移動 $B_{ZooMig,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、次式のように表わされる。ただし、水面および底面位置では $\partial ZOO_j / \partial z = 0$ とする。

$$B_{ZooMig,j} = w_{Zoo,j} \cdot \frac{\partial ZOO_j}{\partial z} \quad (2.6.27)$$

$w_{Zoo,j}$: 動物プランクトンの鉛直移動速度 (鉛直上向きを正) [m s⁻¹]

動物プランクトンの鉛直移動速度 $w_{Zoo,j}$ [m s⁻¹]は、採餌活動による移動と、光環境による移動の両方を考えて、以下のように定式化を行った。

$$w_{Zoo,j} = \begin{cases} w_{Zoo,j}^{Food} & \left(\begin{array}{l} T_{ZOO,j}^{start} < T_{hour} \\ \text{and } T_{hour} < T_{ZOO,j}^{end} \end{array} \right) \\ w_{Zoo,j}^{Light} & \left(\begin{array}{l} T_{hour} \leq T_{ZOO,j}^{start} \\ \text{and } T_{ZOO,j}^{start} \leq T_{hour} \end{array} \right) \end{cases} \quad (2.6.28)$$

$w_{Zoo,j}^{Food}$: 採餌活動するときの移動速度 [m s⁻¹]

$w_{Zoo,j}^{Light}$: 光環境によって移動するときの移動速度 [m s⁻¹]

$T_{ZOO,j}^{start}$: 採餌活動の開始時刻 [hour] : パラメータ

$T_{ZOO,j}^{end}$: 採餌活動の終了時刻 [hour] : パラメータ

$$w_{Zoo,j}^{Food} = \begin{cases} 0 & \left\{ \begin{array}{l} \Pi_{ZOO,j}^P > \Pi_{ZOO,j}^{Stop} \text{ or} \\ \left(\begin{array}{l} \Pi_{ZOO,j}^P > \Pi_{ZOO,j}^T \\ \text{and } \Pi_{ZOO,j}^P > \Pi_{ZOO,j}^B \end{array} \right) \end{array} \right\} \\ w_{Zoo,j}^{Food,up} & (\Pi_{ZOO,j}^T > \Pi_{ZOO,j}^B) \\ w_{Zoo,j}^{Food,down} & (\Pi_{ZOO,j}^T \leq \Pi_{ZOO,j}^B) \end{cases} \quad (2.6.29)$$

$\Pi_{ZOO,j}^{Stop}$: 採餌活動をやめる飼料濃度 [molC m⁻³] : パラメータ

$\Pi_{ZOO,j}^P$: 現在のセルの飼料濃度 [molC m⁻³]

$\Pi_{ZOO,j}^T$: ひとつ上のセルの飼料濃度 [molC m⁻³]

$\Pi_{ZOO,j}^B$: ひとつ下のセルの飼料濃度 [molC m⁻³]

$w_{ZOO,j}^{Food,up}$: 採餌活動するときの上昇速度[m s⁻¹] : パラメータ
 $w_{ZOO,j}^{Food,down}$: 採餌活動するときの下降速度[m s⁻¹] : パラメータ

$$w_{ZOO,j}^{Light} = \begin{cases} 0 & (I_{Avg} < I_{ZOO,j}^{Start}) \\ w_{ZOO,j}^{Light,down} & (I_{Avg} \geq I_{ZOO,j}^{Start}) \end{cases} \quad (2.6.30)$$

I_{Avg} : セル内平均光強度[W m⁻²]

$I_{ZOO,j}^{Start}$: 移動を開始する光強度[W m⁻²] : パラメータ

$w_{ZOO,j}^{Light,down}$: 下降速度[m s⁻¹] : パラメータ

$$I_{Avg} = \frac{1}{z_b - z_t} \int_{z_t}^{z_b} I_t \cdot \exp\{-k_{ext} \cdot (z - z_t)\} dz = \frac{I_t - I_b}{k_{ext} \cdot (z_b - z_t)} \quad (2.6.31)$$

z_t : 水面からメッシュ上面の位置[m]

z_b : 水面からメッシュ下面の位置[m]

I_t : メッシュ上面での光強度[W m⁻²]

I_b : メッシュ下面での光強度[W m⁻²]

k_{ext} : 消散係数[m⁻¹] : 2.5 参照

2.7 原生動物

原生動物は単細胞生物のうち生態が動物的な生物の総称である。鞭毛虫（ミドリムシなど）や繊毛虫（ゾウリムシなど）、肉質虫（アメーバなど）等が含まれる。本モデルでは細菌や植物プランクトンを捕食する原生動物を取り扱う。原生動物の物質フローを図-2.11に示す。

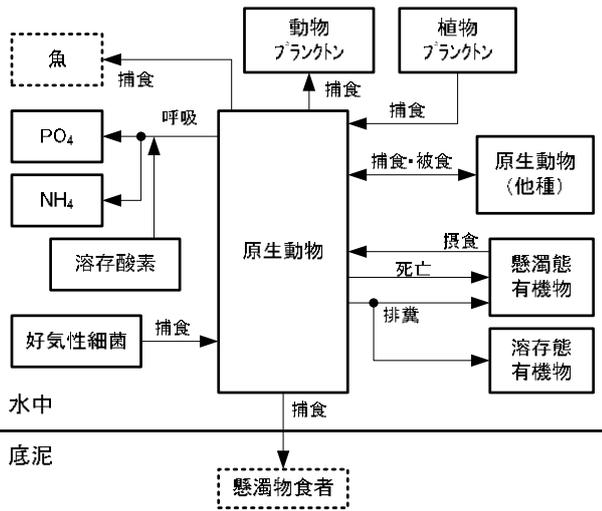


図-2.11 原生動物モデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

原生動物は植物プランクトン・他種の原生動物・好気性細菌の捕食によって増殖し、他種の原生動物・動物プランクトン・魚による被食および排糞・呼吸・自然死亡

によって減少する。なお、鉛直移動は考えないこととした。したがって、原生動物の増加 $S_{PZ,n}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、次式のように定式化される。

$$S_{PZ,n} = \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} (B_{Phy2Pz,i,n} - \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut})}_{\text{植物プランクトンの捕食}} + \underbrace{\sum_{n'}^{N_{PZ}} (B_{Pz2Pz,n',n} - \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut})}_{\text{原生動物の捕食}} - \underbrace{\sum_{n'}^{N_{PZ}} B_{Pz2Pz,n,n'}}_{\text{原生動物による被食}} + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} (B_{Bac2Pz,m,n} - \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut})}_{\text{好気性細菌の捕食}} - \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} B_{Pz2Zoo,n,j}}_{\text{動物プランクトンによる被食}} - \underbrace{B_{PzExc,n}}_{\text{排糞}} - \underbrace{B_{PzResp,n}}_{\text{呼吸}} - \underbrace{B_{PzLoss,n}}_{\text{死亡}} - \underbrace{B_{Pz2Fish,n}}_{\text{魚による被食}} \quad (2.7.1)$$

$\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut}$: 原生動物 n 種による植物プランクトン i 種の捕食の調整量[molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{Pz2Pz,n',n}$: 原生動物 n 種による原生動物 n' 種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹]

$\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut}$: 原生動物 n 種による原生動物 n' 種の捕食の調整量[molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{Bac2Pz,m,n}$: 原生動物 n 種による好気性細菌 m 種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹]

$\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut}$: 原生動物 n 種による好気性細菌 m 種の捕食の調整量[molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PzExc,n}$: 原生動物 n 種の排糞 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PzResp,n}$: 原生動物 n 種の呼吸 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PzLoss,n}$: 原生動物 n 種の自然死亡 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{Pz2Fish,n}$: 魚による原生動物 n 種の捕食 [molC m⁻³ s⁻¹] : 2.17 参照。

捕食調整量 $\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut}$, $\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut}$, $\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut}$ の計算方法は2.4を参照。

(2) 底泥とのフラックス

底泥とのフラックス $J_{PZ,n}^{bp}$ [molC m⁻² s⁻¹]は、懸濁物食者による被食のみを考えた。

$$J_{PZ,n}^{bp} = \underbrace{J_{Pz2Msf,j}}_{\text{懸濁物食者による被食}} \quad (2.7.2)$$

$J_{Pz2Msf,j}$: 懸濁物食者による被食 [molC m⁻² s⁻¹] : 2.18 参照。

(3) 植物プランクトンの捕食

植物プランクトンの捕食 $B_{Phy2Pz,i,n}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、

動物プランクトンと同様に次式のように定式化を行った。

$$B_{Phy2Pz,i,n} = \eta_{Pz,n}^{PHY,i} \cdot u_{Phy2Pz,i,n} \cdot R_{Pz,n} \cdot PZ_n \quad (2.7.3)$$

$R_{Pz,n}$: 原生動物の捕食速度[s⁻¹]

$u_{Phy2Pz,i,n}$: 植物プランクトンの捕食率[-]

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

原生動物の捕食速度 $R_{Pz,n}$ [s⁻¹]は、動物プランクトンの場合と同様に考えた。

$$R_{Pz,n} = f_{temp}(\alpha_{Pz,n}, \beta_{Pz,n}) \cdot f_{MM}(DO, K_{Pz}^{DO}) \cdot f_{feed}(\lambda_{Pz,n}, \Pi_{Pz,n}^{min}, \Pi_{Pz,n}) \quad (2.7.4)$$

$\alpha_{Pz,n}$: 0°Cでの原生動物の捕食速度[s⁻¹] : パラメータ

$\beta_{Pz,n}$: 原生動物の温度活性係数[°C⁻¹] : パラメータ

K_{Pz}^{DO} : 捕食に対する溶存酸素の半飽和定数 [molO₂ m⁻³] : パラメータ

$\lambda_{Pz,n}$: 原生動物のイブレイフ定数[m³ molC⁻¹] : パラメータ

$\Pi_{Pz,n}^{min}$: 飼料濃度の下限値[molC m⁻³] : パラメータ

$\Pi_{Pz,n}$: 原生動物の飼料濃度[molC m⁻³]

原生動物の飼料濃度 $\Pi_{Pz,n}$ [molC m⁻³]は次式で表わされる。

$$\Pi_{Pz,n} = \sum_i^{N_{PHY}} \Pi_{Pz,n}^{PHY,i} + \sum_m^{N_{BAC}} \Pi_{Pz,n}^{BAC,m} + \sum_{n'}^{N_{PZ}} \Pi_{Pz,n}^{PZ,n'} \quad (2.7.5)$$

$\Pi_{Pz,n}^{PHY,i}$: 原生動物が捕食可能な植物プランクトン濃度[molC m⁻³]

$\Pi_{Pz,n}^{BAC,m}$: 原生動物が捕食可能な好気性細菌濃度 [molC m⁻³]

$\Pi_{Pz,n}^{PZ,n'}$: 原生動物が捕食可能な原生動物濃度 [molC m⁻³]

原生動物が捕食可能な植物プランクトンなどの濃度は以下のように表わされる。

$$\Pi_{Pz,n}^{PHY,i} = \eta_{Pz,n}^{PHY,i} \cdot PHY_i \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{PHY,i}}{N_C^{PZ,n}}, \frac{P_C^{PHY,i}}{P_C^{PZ,n}}\right) \quad (2.7.6)$$

$$\Pi_{Pz,n}^{BAC,m} = \eta_{Pz,n}^{BAC,m} \cdot BAC_m \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{BAC,m}}{N_C^{PZ,n}}, \frac{P_C^{BAC,m}}{P_C^{PZ,n}}\right) \quad (2.7.7)$$

$$\Pi_{Pz,n}^{PZ,n'} = \eta_{Pz,n}^{PZ,n'} \cdot PZ_{n'} \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{PZ,n'}}{N_C^{PZ,n}}, \frac{P_C^{PZ,n'}}{P_C^{PZ,n}}\right) \quad (2.7.8)$$

$\eta_{Pz,n}^{BAC,m}$: 好気性細菌捕食の選好係数[-] : パラメータ

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

植物プランクトンの捕食率 $u_{Phy2Pz,i,n}$ [-]は単純に濃度

比で分配すると考えて、次式のように定式化を行った。

$$u_{Phy2Pz,i,n} = \frac{\Pi_{Pz,n}^{PHY,i}}{\Pi_{Pz,n}} \quad (2.7.9)$$

(4) 原生動物による原生動物（他種）の捕食

原生動物は、自分よりサイズの小さい原生動物を捕食することがある。その捕食速度 $B_{Pz2Pz,n',n}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、以下のように表わされる。

$$B_{Pz2Pz,n',n} = \eta_{Pz,n}^{PZ,n'} \cdot u_{Pz2Pz,n',n} \cdot R_{Pz,n} \cdot PZ_n \quad (2.7.10)$$

$u_{Pz2Pz,n',n}$: 原生動物の捕食率[-]

$$u_{Pz2Pz,n',n} = \frac{\Pi_{Pz,n}^{PZ,n'}}{\Pi_{Pz,n}} \quad (2.7.11)$$

なお、 $\eta_{Pz,n}^{PZ,n'}$ は0または1の値を取り、捕食・被食関係で値が以下のように異なる。

$$\eta_{Pz,n}^{PZ,n'} = \begin{cases} 1 & (n \text{種が} n' \text{種を捕食する場合, } n \neq n') \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (2.7.12)$$

(5) 原生動物（他種）による被食

原生動物による被食速度 $B_{Pz2Pz,n,n'}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、(4)の $B_{Pz2Pz,n',n}$ の n と n' を入れ替えただけである。例えば、原生動物（サイズ小）を番号1とし、原生動物（サイズ大）を番号2とした場合、 $B_{Pz2Pz,1,2}$ のみが正值となる。したがって、サイズ小と大の生成項は以下ようになる。

$$S_{Pz,1} = \underbrace{\sum_{n'}^{N_{PZ}} (B_{Pz2Pz,n',1} - \Delta B_{Pz2Pz,n',1}^{cut})}_{\text{原生動物の捕食=0}} - \underbrace{B_{Pz2Pz,1,1}}_{\text{原生動物(小)による被食=0}} - \underbrace{B_{Pz2Pz,1,2}}_{\text{原生動物(大)による被食>0}} + (\text{その他}) \quad (2.7.13)$$

$$S_{Pz,2} = \underbrace{B_{Pz2Pz,1,2} - \Delta B_{Pz2Pz,1,2}^{cut}}_{\text{原生動物(小)の捕食>0}} + \underbrace{B_{Pz2Pz,2,2} - \Delta B_{Pz2Pz,2,2}^{cut}}_{\text{原生動物(大)の捕食=0}} - \sum_{n'}^{N_{PZ}} B_{Pz2Pz,2,n'} + (\text{その他}) \quad (2.7.14)$$

(6) 好気性細菌の捕食

好気性細菌の捕食 $B_{Bac2Pz,m,n}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、植物プランクトンの捕食と同様に考える。

$$B_{Bac2Pz,m,n} = \eta_{Pz,n}^{BAC,m} \cdot u_{Bac2Pz,m,n} \cdot R_{Pz,n} \cdot PZ_n \quad (2.7.15)$$

$u_{Bac2Pz,m,n}$: 好気性細菌の捕食率[-]

$$u_{Bac2Pz,m,n} = \frac{\Pi_{Pz,n}^{BAC,m}}{\Pi_{Pz,n}} \quad (2.7.16)$$

(7) 原生動物の排糞・残滓

原生動物の排糞・残滓 $B_{PzExc,n}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、動物プランクトンの場合と同様に考える。

$$B_{PzExc,n} = \sum_k^{N_{DEC}} B_{PzExc,n,k} \quad (2.7.17)$$

$B_{PzExc,n,k}$: 分解速度分画 k 種の排糞・残滓量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$$B_{PzExc,n,k} = B_{PzExc,n,k}^{PHY} + B_{PzExc,n,k}^{PZ} + B_{PzExc,n,k}^{BAC} \quad (2.7.18)$$

$B_{PzExc,n,k}^{PHY}$: 植物プランクトンの捕食に対する非同化量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PzExc,n,k}^{PZ}$: 原生動物 (他種) の捕食に対する非同化量 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PzExc,n,k}^{BAC}$: 好気性細菌の捕食に対する非同化量 [molC m⁻³ s⁻¹]

各捕食に対する非同化量は以下のように表わされる。

$$B_{PzExc,n,k}^{PHY} = \sum_i^{N_{PHY}} (1 - e_{PZ,n}^{PHY,i} \cdot e_{PZ,n}^{dec,k}) \cdot c_{PHY,i} \cdot (B_{Phy2Pz,i,n} - \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut}) \quad (2.7.19)$$

$$B_{PzExc,n,k}^{PZ} = \sum_{n'}^{N_{PZ}} (1 - e_{PZ,n}^{PZ,n'} \cdot e_{PZ,n}^{dec,k}) \cdot c_{PZ,n'} \cdot (B_{Pz2Pz,n',n} - \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut}) \quad (2.7.20)$$

$$B_{PzExc,n,k}^{BAC} = \sum_m^{N_{BAC}} (1 - e_{PZ,n}^{BAC,m} \cdot e_{PZ,n}^{dec,k}) \cdot c_{BAC,m} \cdot (B_{Bac2Pz,m,n} - \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut}) \quad (2.7.21)$$

$e_{PZ,n}^{dec,k}$: 分解速度分画 k 種の同化効率[-] : パラメータ

$e_{PZ,n}^{Phy,i}$: 原生動物の植物プランクトン捕食に対する同化効率[-] : パラメータ

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

$e_{PZ,n}^{Bac,m}$: 原生動物の好気性細菌捕食に対する同化効率[-] : パラメータ

(8) 呼吸

呼吸 $B_{PzResp,n}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は静止呼吸と活動呼吸を考えて、次式のように定式化を行った。

$$B_{PzResp,n} = \underbrace{B_{PzRespR,n}}_{\text{静止呼吸}} + \underbrace{B_{PzRespA,n}}_{\text{活動呼吸}} \quad (2.7.22)$$

$$B_{PzRespR,n} = f_{temp}(\alpha_{PzRespR,n}, \beta_{Pz,n}) \cdot f_{MM}(DO, K_{PzResp}^{DO}) \cdot PZ_n \quad (2.7.23)$$

$$B_{PzRespA,n} = \alpha_{PzRespA,n} \cdot R_{Pz,n} \cdot PZ_n \quad (2.7.24)$$

$\alpha_{PzRespR,n}$: 0°Cでの静止呼吸速度[s⁻¹] : パラメータ

K_{PzResp}^{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

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

(9) 自然死亡

原生動物の自然死亡 $B_{PzLoss,n}$ [molC m⁻³ s⁻¹]は、植物プランクトンと同様に、2乗に比例する定式化を行った。

$$B_{PzLoss,n} = \alpha_{PzLoss,n} \cdot (PZ_n)^2 \quad (2.7.25)$$

$\alpha_{PzLoss,n}$: 自然死亡速度[m³ molC⁻¹ s⁻¹] : パラメータ

2.8 好気性細菌

好気性細菌は酸素に基づく代謝機構を備えた細菌類である。本モデルでは細菌による分解と摂取の過程を分けてモデル化している。細菌による懸濁態・溶存態有機物の分解 (無機化) と、栄養塩の摂取、および呼吸の概念を図-2.12に示す。

有機物は細菌の出す酵素によって分解される。その際、POPとDOPはPO₄に分解され、PONとDONはNH₄にそれぞれ分解される。POCとDOCに関しては、細菌による分解と摂取の中間段階としてADOC (利用可能溶存有機炭素) という仮想的な炭素に分解されると考える。したがって、細菌が栄養塩を摂取する対象は、無機態のリン・窒素 (PO₄, NH₄, NO₂, NO₃) とADOCとなる。呼吸は細菌の活動に伴う消費である。好気性細菌の場合、炭素はCO₂として系外に排出され、リンはPO₄になり、窒素はNH₄となる。

好気性細菌に関わる物質フローを図-2.13に示す。

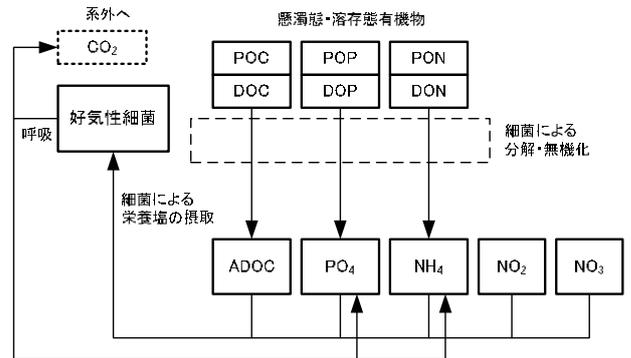


図-2.12 細菌による分解と栄養塩摂取の概念

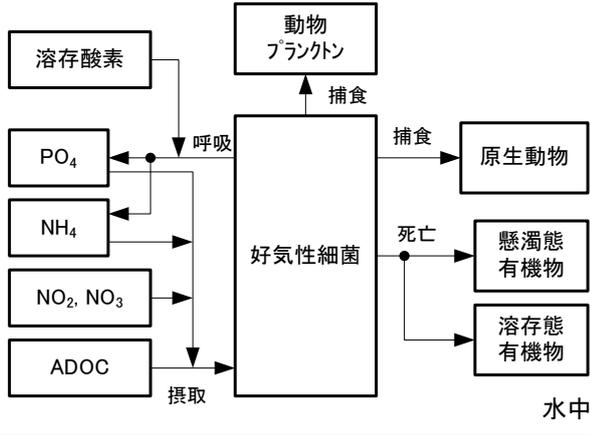


図-2.13 好気性細菌モデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

好気性細菌は ADOC および栄養塩の摂取によって増殖し、呼吸、自然死亡および動物プランクトン・原生動物による被食によって減少する。したがって、好気性細菌の増加 $S_{BAC,m} [\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}]$ は、次式のように定式化される。

$$S_{BAC,m} = \underbrace{B_{BacTake,m}^C}_{\text{ADOC の摂取}} - \underbrace{B_{BacResp,m}}_{\text{呼吸}} - \underbrace{B_{BacLoss,m}}_{\text{死亡}} - \underbrace{\sum_j^{N_{zoo}} B_{Bac2Zoo,m,j}}_{\text{動物プランクトンによる被食}} - \underbrace{\sum_n^{N_{pz}} B_{Bac2Pz,m,n}}_{\text{原生動物による被食}} \quad (2.8.1)$$

$B_{BacTake,m}^C$: 好気性細菌 m 種による ADOC の摂取 $[\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}]$

$B_{BacResp,m}$: 好気性細菌 m 種の呼吸 $[\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}]$

$B_{BacLoss,m}$: 好気性細菌 m 種の自然死亡 $[\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}]$

(2) ADOC の摂取

好気性細菌による ADOC の摂取 $B_{BacTake,m}^C [\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}]$ は、溶存酸素と栄養塩による制限を考えて、次式のように定式化を行った。

$$B_{BacTake,m}^C = f_{temp}(\alpha_{BacTake,m}, \beta_{Bac,m}) \cdot u_{BacDo} \cdot u_{BacTake,m} \cdot BAC_m \quad (2.8.2)$$

$\alpha_{BacTake,m}$: 0°C での ADOC の最大摂取速度 $[\text{s}^{-1}]$: パラメータ

$\beta_{Bac,m}$: 好気性細菌の温度活性係数 $[\text{C}^{-1}]$: パラメータ

u_{BacDo} : 好気性細菌の酸素制限関数 $[-]$

$u_{BacTake,m}$: 好気性細菌の栄養塩制限関数 $[-]$

酸素制限関数 $u_{BacDo} [-]$ は、次式のように、簡易なステップ関数とした。

$$u_{BacDo} = \begin{cases} 1 & (DO > DO_{BAC}) \\ 0 & (DO \leq DO_{BAC}) \end{cases} \quad (2.8.3)$$

DO_{BAC} : 好気性細菌が活動を停止する溶存酸素濃度 $[\text{molO}_2 \text{m}^{-3}]$: パラメータ

栄養塩制限関数 $u_{BacTake,m} [-]$ は、次式のようにモデル化を行った。

$$u_{BacTake,m} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{MM}(ADOC, K_{BacTake,m}^{ADOC}) \\ f_{MM}(NH_4 + NO_2 + NO_3, K_{BacTake,m}^N) \\ f_{MM}(PO_4, K_{BacTake,m}^P) \end{array} \right\} \quad (2.8.4)$$

$K_{BacTake,m}^{ADOC}$: 摂取活動に対する ADOC の半飽和定数 $[\text{molC m}^{-3}]$: パラメータ

$K_{BacTake,m}^N$: 摂取活動に対する窒素の半飽和定数 $[\text{molN m}^{-3}]$: パラメータ

$K_{BacTake,m}^P$: 摂取活動に対するリンの半飽和定数 $[\text{molP m}^{-3}]$: パラメータ

(3) 栄養塩の摂取

好気性細菌による各態窒素の摂取 $B_{BacTake,m}^{NH_4} [\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}]$, $B_{BacTake,m}^{NO_2} [\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}]$, $B_{BacTake,m}^{NO_3} [\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}]$ は、以下のように、各態窒素の比率で均等配分する。

$$B_{BacTake,m}^{NH_4} = \frac{NH_4}{NH_4 + NO_2 + NO_3} \cdot N_C^{BAC,m} \cdot B_{BacTake,m}^C \quad (2.8.5)$$

$$B_{BacTake,m}^{NO_2} = \frac{NO_2}{NH_4 + NO_2 + NO_3} \cdot N_C^{BAC,m} \cdot B_{BacTake,m}^C \quad (2.8.6)$$

$$B_{BacTake,m}^{NO_3} = \frac{NO_3}{NH_4 + NO_2 + NO_3} \cdot N_C^{BAC,m} \cdot B_{BacTake,m}^C \quad (2.8.7)$$

好気性細菌によるリンの摂取 $B_{BacTake,m}^{PO_4} [\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}]$ は、次式のように表わされる。

$$B_{BacTake,m}^{PO_4} = P_C^{BAC,m} \cdot B_{BacTake,m}^C \quad (2.8.8)$$

(4) 懸濁態有機物の分解

好気性細菌による懸濁態有機物の分解 $B_{PomDeca,k,m}^C [\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}]$, $B_{PomDeca,k,m}^N [\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}]$, $B_{PomDeca,k,m}^P [\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}]$ は、以下のように、細菌濃度と懸濁態有機物濃度の積に比例する定式化を行った。

$$B_{PomDeca,k,m}^C = \mu_{Deca,k,m} \cdot u_{BacDo} \cdot POC_k \cdot BAC_m \quad (2.8.9)$$

$$B_{PomDeca,k,m}^N = \mu_{Deca,k,m} \cdot u_{BacDo} \cdot PON_k \cdot BAC_m \quad (2.8.10)$$

$$B_{PomDeca,k,m}^P = \mu_{Deca,k,m} \cdot u_{BacDo} \cdot POP_k \cdot BAC_m \quad (2.8.11)$$

$\mu_{DecA,k,m}$: 有機物の最大分解速度 [$\text{m}^3 \text{molC}^{-1} \text{s}^{-1}$]

$$\mu_{DecA,m,k} = f_{temp}(\alpha_{DecA,m,k}, \beta_{Bac,m}) \quad (2.8.12)$$

$\alpha_{DecA,m,k}$: 0°Cでの有機物の最大分解速度 [$\text{m}^3 \text{molC}^{-1} \text{s}^{-1}$] : パラメータ

(5) 溶存態有機物の分解

好気性細菌による溶存態有機物の分解 $B_{DomDecA,k,m}^C$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] , $B_{DomDecA,k,m}^N$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$] , $B_{DomDecA,k,m}^P$ [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、懸濁態有機物の分解と同様に考える。

$$B_{DomDecA,k,m}^C = \mu_{DecA,k,m} \cdot u_{BacDo} \cdot DOC_k \cdot BAC_m \quad (2.8.13)$$

$$B_{DomDecA,k,m}^N = \mu_{DecA,k,m} \cdot u_{BacDo} \cdot DON_k \cdot BAC_m \quad (2.8.14)$$

$$B_{DomDecA,k,m}^P = \mu_{DecA,k,m} \cdot u_{BacDo} \cdot DOP_k \cdot BAC_m \quad (2.8.15)$$

(6) 呼吸

好気性細菌の呼吸 $B_{BacResp,m}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は活動呼吸のみを考え、次式のように定式化を行った。

$$B_{BacResp,m} = (1 - e_{BAC,m}) \cdot B_{BacTake,m}^C \quad (2.8.16)$$

$e_{BAC,m}$: ADOC の同化効率 [-] : パラメータ

(7) 自然死亡

細菌はウイルスによる感染によって自然死亡する。ウイルスの感染速度は細菌数に比例し、温度に対して指数関数的に増加すると考え、好気性細菌の自然死亡 $B_{BacLoss,m}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は次式のように定式化を行った。

$$B_{BacLoss,m} = f_{temp}(\alpha_{BacLoss,m}, \beta_{BacLoss,m}) \cdot (BAC_m)^2 \quad (2.8.17)$$

$\alpha_{BacLoss,m}$: 0°Cにおける死亡速度 [$\text{m}^3 \text{molC}^{-1} \text{s}^{-1}$] : パラメータ

$\beta_{BacLoss,m}$: 死亡速度の温度係数 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] : パラメータ

2.9 脱窒菌

本モデルでは、脱窒菌 (Denitrifying Bacteria) のバイオマス量を変数としては取り扱わず、パラメータとして与えた。したがって、脱窒菌の量に増減はないので、摂取した分だけ呼吸を同時に行うものと仮定した (図-2.14)。

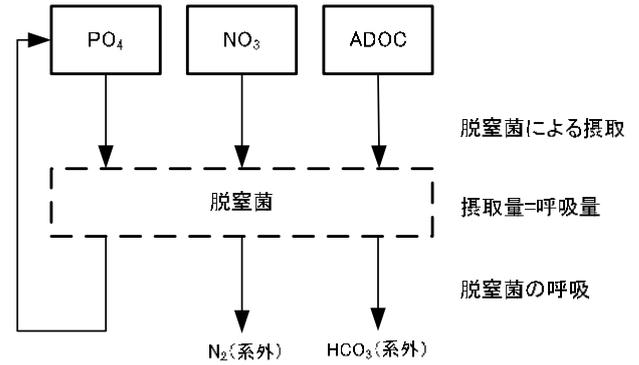


図-2.14 脱窒菌による脱窒過程のモデル化

(1) 脱窒菌による硝酸の摂取 (脱窒)

脱窒菌による硝酸の摂取 $B_{DnbTake}^{NO_3}$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、いわゆる脱窒であり、栄養塩と酸素制限関数により、次式のように定式化を行った。

$$B_{DnbTake}^{NO_3} = f_{temp}(\alpha_{DnbTake}, \beta_{Dnb}) \cdot u_{DnbTake} \cdot u_{DnbDo} \quad (2.9.1)$$

$\alpha_{DnbTake}$: 硝酸の摂取速度 [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] : パラメータ

β_{Dnb} : 脱窒菌の温度活性係数 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] : パラメータ

$u_{DnbTake}$: 栄養塩制限関数 [-]

u_{DnbDo} : 脱窒菌の酸素制限関数 [-]

脱窒菌の栄養塩制限関数 $u_{DnbTake}$ [-] は、ADOC と硝酸、リン酸によって、次式のように表わされる。

$$u_{DnbTake} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{MM}(ADOC, K_{DnbTake}^{ADOC}) \\ f_{MM}(NO_3, K_{DnbTake}^N) \\ f_{MM}(PO_4, K_{DnbTake}^P) \end{array} \right\} \quad (2.9.2)$$

$K_{DnbTake}^{ADOC}$: 脱窒に対する ADOC の半飽和定数 [molC m^{-3}] : パラメータ

$K_{DnbTake}^N$: 脱窒に対する硝酸の半飽和定数 [molN m^{-3}] : パラメータ

$K_{DnbTake}^P$: 脱窒に対するリンの半飽和定数 [molP m^{-3}] : パラメータ

脱窒菌の酸素制限関数 u_{DnbDo} [-] は、次式のように、簡易なステップ関数とした。

$$u_{DnbDo} = \begin{cases} 0 & (DO_{DnbDo} < DO) \\ 1 & (DO \leq DO_{DnbDo}) \end{cases} \quad (2.9.3)$$

DO_{DnbDo} : 脱窒菌が活動を開始する溶存酸素濃度 [$\text{molO}_2 \text{m}^{-3}$] : パラメータ

(2) 脱窒菌による ADOC の摂取

脱窒菌による ADOC の摂取 $B_{DnbTake}^C$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、

硝酸の摂取量に応じて、次式のように表わされる。

$$B_{DnbTake}^C = \frac{1}{N_C^{DNB}} \cdot B_{DnbTake}^{NO_3} \quad (2.9.4)$$

2.10 懸濁態有機物

懸濁態有機物はモデル変数を炭素・窒素・リンに分けて取り扱う。さらに分解速度に応じて分類するマルチ G モデルとした。溶存態有機物も同様であり、懸濁態有機物と溶存態有機物 (ADOC を除く) は同じ種類数で存在する (図-2.15)。

一方, Ishikawa and Nishimura(1983)は POC が分解される過程を調べた結果, 多くが POC から CO₂ に直接無機化されるプロセスであることを報告している。そこで, POM の主要な分解プロセスとして, POM から直接無機化されるプロセスと, 同じ分解速度の DOM に分解されるプロセスのみを考えることとした (図-2.16)。分解される POM のうち, DOM になる割合は $\kappa_{DecA,k}$ である。

懸濁態有機物に関する物質フローを図-2.17 に示す。

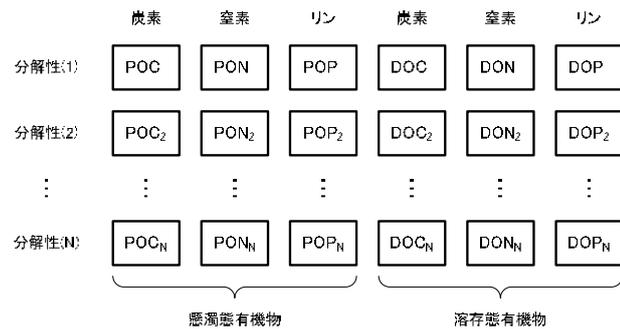


図-2.15 懸濁態・溶存態有機物の概念図

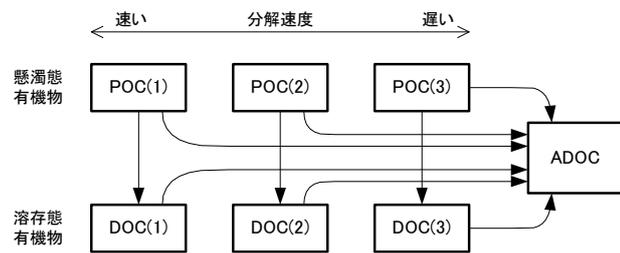


図-2.16 懸濁態・溶存態有機炭素の分解

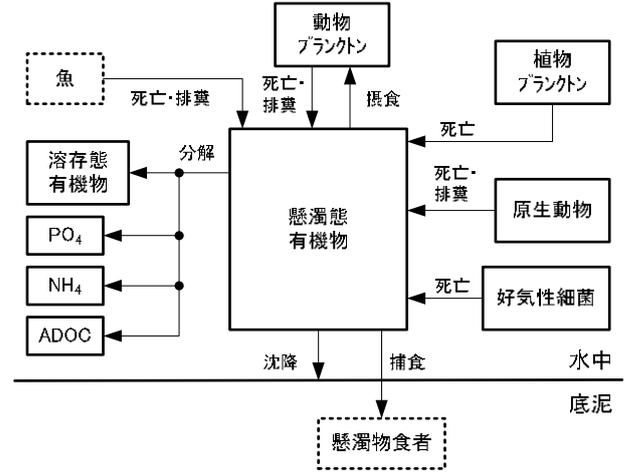


図-2.17 懸濁態有機物モデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

懸濁態有機物は植物プランクトン・動物プランクトン・原生動物・好気性細菌・魚の死亡および排糞・残渣によって増加する。また, 動物プランクトンの摂食, 分解 (無機化) によって減少し, 沈降 (鉛直移動) によって増減する。したがって, 懸濁態有機炭素の増加 $S_{POC,k}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は, 次式のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 S_{POC,k} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot B_{PHYLoss,i}}_{\text{植物プランクトンの死亡}} + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} c_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot B_{ZOOLoss,j}}_{\text{動物プランクトンの死亡}} \\
 & - \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} B_{Pom2Zoo,k,j}}_{\text{動物プランクトンによる摂食}} \\
 & + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} \kappa_{ZooExc,j} \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,C}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残渣量}} \\
 & + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot B_{PZLoss,n}}_{\text{原生動物の死亡}} + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} \kappa_{PZExc,n} \cdot B_{PZExc,n,k}^{net,C}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残渣量}} \\
 & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \alpha_{BacPom,m} \cdot B_{BACLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} \\
 & - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{PomDecA,k,m}^C}_{\text{好気性細菌による分解}} - \underbrace{B_{PomDecB,k}^C}_{\text{嫌気性細菌による分解}} \\
 & + \underbrace{B_{FishLoss,k}^C}_{\text{魚の死亡・排糞}} + \underbrace{B_{PocSett,k}}_{\text{沈降}} \quad (2.10.1)
 \end{aligned}$$

$c_{PHY,i}^{dec,k}$: 植物プランクトン i 種に含まれる分解速度分画 k 種の割合 [-]

$c_{ZOO,j}^{dec,k}$: 動物プランクトン j 種に含まれる分解速度分画 k 種の割合 [-]

$\kappa_{ZooExc,j}$:動物プランクトン j 種からの排糞・残渣のうち懸濁態有機物になる割合[-]

$B_{ZooExc,j,k}^{net,C}$:動物プランクトン j 種からの分解速度分画 k 種の正味の排糞・残渣(炭素) [molC m⁻³ s⁻¹]

$c_{PZ,n}^{dec,k}$:原生動物 n 種に含まれる分解速度分画 k 種の割合[-]

$\kappa_{PzExc,n}$:原生動物 n 種からの排糞・残渣のうち懸濁態有機物になる割合[-]

$B_{PzExc,n,k}^{net,C}$:原生動物 n 種からの分解速度分画 k 種の正味の排糞・残渣(炭素) [molC m⁻³ s⁻¹]

$c_{BAC,m}^{dec,k}$:好気性細菌 m 種に含まれる分解速度分画 k 種の割合[-]

$\alpha_{BacPom,m}$:好気性細菌 m 種に含まれる懸濁態有機物の割合[-]

$B_{PomDecA,k,m}^C$:好気性細菌 m 種による懸濁態有機炭素 k 種の分解[molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{PomDecB,k}^C$:嫌気性細菌による懸濁態有機炭素 k 種の分解[molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{FishLoss,k}^C$:魚による懸濁態有機炭素 k 種への死亡・排糞[molC m⁻³ s⁻¹]: 2.17 参照.

$B_{PocSett,k}$:懸濁態有機炭素 k 種の沈降[molC m⁻³ s⁻¹]

懸濁態有機炭素と同様に, 懸濁態有機窒素・リンの増加 $S_{PON,k}$ [molN m⁻³ s⁻¹], $S_{POP,k}$ [molP m⁻³ s⁻¹]は以下のように定式化される.

$$\begin{aligned}
 S_{PON,k} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot N_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyLoss,i}}_{\text{植物プランクトンの死亡}} \\
 & + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} c_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot N_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooLoss,j}}_{\text{動物プランクトンの死亡}} \\
 & - \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} N_C^{ZOO,j} \cdot B_{Pom2Zoo,k,j}}_{\text{動物プランクトンによる摂食}} \\
 & + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} \kappa_{ZooExc,j} \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,N}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} \\
 & + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot N_C^{PZ,n} \cdot B_{PzLoss,n}}_{\text{原生動物の死亡}} \\
 & + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} \kappa_{PzExc,n} \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,N}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \alpha_{BacPom,m} \cdot N_C^{BAC,m} \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} \\
 & - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{PomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による分解}} - \underbrace{B_{PomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による分解}} \\
 & + \underbrace{B_{FishLoss,k}^N}_{\text{魚の死亡・排糞}} + \underbrace{B_{PonSett,k}}_{\text{沈降}} \tag{2.10.2}
 \end{aligned}$$

$B_{ZooExc,j,k}^{net,N}$:動物プランクトン j 種からの分解速度分画 k 種の正味の排糞・残渣(窒素) [molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{PzExc,n,k}^{net,N}$:原生動物 n 種からの分解速度分画 k 種の正味の排糞・残渣(窒素) [molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{PomDecA,k,m}^N$:好気性細菌 m 種による懸濁態有機窒素 k 種の分解[molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{PomDecB,k}^N$:嫌気性細菌による懸濁態有機窒素 k 種の分解[molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{FishLoss,k}^N$:魚による懸濁態有機窒素 k 種への死亡・排糞[molN m⁻³ s⁻¹]: 2.17 参照.

$B_{PonSett,k}$:懸濁態有機窒素 k 種の沈降[molN m⁻³ s⁻¹]

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

$$+ \underbrace{B_{FishLoss,k}^P}_{\text{魚の死亡・排糞}} + \underbrace{B_{PopSett,k}}_{\text{沈降}} \quad (2.10.3)$$

$B_{ZooExc,j,k}^{net,P}$: 動物プランクトン j 種からの分解速度分画 k 種の正味の排糞・残渣 (リン) [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$B_{PzExc,n,k}^{net,P}$: 原生動物 n 種からの分解速度分画 k 種の正味の排糞・残渣 (リン) [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$B_{PomDecA,k,m}^P$: 好気性細菌 m 種による懸濁態有機リン k 種の分解 [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$B_{PomDecB,k}^P$: 嫌気性細菌による懸濁態有機リン k 種の分解 [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$B_{FishLoss,k}^P$: 魚による懸濁態有機リン k 種への死亡・排糞 [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$] : 2.17 参照.

$B_{PopSett,k}$: 懸濁態有機リン k 種の沈降 [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

(2) 底泥とのフラックス

懸濁態有機物の底泥とのフラックス $J_{POC,k}^{bp}$ [$\text{molC m}^{-2} \text{s}^{-1}$] , $J_{PON,k}^{bp}$ [$\text{molN m}^{-2} \text{s}^{-1}$] , $J_{POP,k}^{bp}$ [$\text{molP m}^{-2} \text{s}^{-1}$] は、懸濁態有機物食者による被食と底泥への沈降を考えた.

$$J_{POC,k}^{bp} = \underbrace{J_{Pom2Msf,k}^{C}}_{\text{懸濁物食者による被食}} + \underbrace{J_{Pom2Det,k}^C}_{\text{底泥への沈降}} \quad (2.10.4)$$

$$J_{PON,k}^{bp} = \underbrace{N_C^{MSF} \cdot J_{Pom2Msf,k}^C}_{\text{懸濁物食者による被食}} + \underbrace{J_{Pom2Det,k}^N}_{\text{底泥への沈降}} \quad (2.10.5)$$

$$J_{POP,k}^{bp} = \underbrace{P_C^{MSF} \cdot J_{Pom2Msf,k}^C}_{\text{懸濁物食者による被食}} + \underbrace{J_{Pom2Det,k}^P}_{\text{底泥への沈降}} \quad (2.10.6)$$

$J_{Pom2Msf,k}^C$: 懸濁物食者による懸濁態有機物 k 種の摂食 [$\text{molC m}^{-2} \text{s}^{-1}$] : 2.18 参照.

$J_{Pom2Det,k}^C$: 懸濁態有機炭素 k 種の底泥への沈降 [$\text{molC m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

$J_{Pom2Det,k}^N$: 懸濁態有機窒素 k 種の底泥への沈降 [$\text{molN m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

$J_{Pom2Det,k}^P$: 懸濁態有機リン k 種の底泥への沈降 [$\text{molP m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

(3) 嫌気性細菌による分解

嫌気性細菌による懸濁態有機物の分解 $B_{PomDecB,k}^C$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] , $B_{PomDecB,k}^N$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$] , $B_{PomDecB,k}^P$ [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、懸濁態有機物濃度に比例する定式化を行った. なお、ここでの分解速度は、好気性細菌による分解の分解速度とは定義が異なるため、注意されたい. また、好気性細菌以外の細菌をまとめて嫌気性細菌とし、嫌氣的分解はこの嫌気性細菌が担うものと考え.

$$B_{PomDecB,k}^C = \mu_{DecB,k} \cdot u_{DecbDo} \cdot POC_k \quad (2.10.7)$$

$$B_{PomDecB,k}^N = \mu_{DecB,k} \cdot u_{DecbDo} \cdot PON_k \quad (2.10.8)$$

$$B_{PomDecB,k}^P = \mu_{DecB,k} \cdot u_{DecbDo} \cdot POP_k \quad (2.10.9)$$

$\mu_{DecB,k}$: 嫌気性細菌による有機物の分解速度 [s^{-1}]

u_{DecbDo} : 嫌氣的分解に対する酸素制限関数 [-]

$$\mu_{DecB,k} = f_{temp}(\alpha_{DecB,k}, \beta_{DecB}) \quad (2.10.10)$$

$\alpha_{DecB,k}$: 0°Cでの嫌気性細菌による有機物の最大分解速度 [s^{-1}] : パラメータ

β_{DecB} : 嫌氣的分解の温度係数 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] : パラメータ

嫌気性細菌の酸素制限関数 u_{DecbDo} [-] は、次式のような簡易なステップ関数とした.

$$u_{DecbDo} = \begin{cases} 0 & (DO_{DecbDo} < DO) \\ 1 & (DO \leq DO_{DecbDo}) \end{cases} \quad (2.10.11)$$

DO_{DecbDo} : 嫌気性細菌の活動限界溶存酸素濃度 [$\text{molO}_2 \text{m}^{-3}$] : パラメータ

(4) 動物プランクトンの正味の排糞・残渣

2.4 で述べたように、本モデルでは、炭素・窒素・リンの保存性を保つために捕食調整を行う. したがって、動物プランクトンの正味の排糞・残渣 $B_{ZooExc,j,k}^{net,C}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] , $B_{ZooExc,j,k}^{net,N}$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$] , $B_{ZooExc,j,k}^{net,P}$ [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、排糞に捕食調整分を含めたものとなる.

$$B_{ZooExc,j,k}^{net,C} = \underbrace{B_{ZooExc,j,k}}_{\text{動物プランクトンの排糞}} + \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C}}_{\text{植物プランクトンの捕食に対する捕食調整}} + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,C}}_{\text{原生動物の捕食に対する捕食調整}} + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,C}}_{\text{好気性細菌の捕食に対する捕食調整}} \quad (2.10.12)$$

$$B_{ZooExc,j,k}^{net,N} = \underbrace{N_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooExc,j,k}}_{\text{動物プランクトンの排糞}} + \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,N}}_{\text{植物プランクトンの捕食に対する捕食調整}} + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,N}}_{\text{原生動物の捕食に対する捕食調整}} + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,N}}_{\text{好気性細菌の捕食に対する捕食調整}} \quad (2.10.13)$$

$$\begin{aligned}
B_{ZooExc,j,k}^{net,P} &= \underbrace{P_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooExc,j,k}}_{\text{動物プランクトンの排糞}} \\
&+ \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,P}}_{\text{植物プランクトンの捕食に対する捕食調整}} \\
&+ \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,P}}_{\text{原生動物の捕食に対する捕食調整}} \\
&+ \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,P}}_{\text{好気性細菌の捕食に対する捕食調整}} \quad (2.10.14)
\end{aligned}$$

$B_{ZooExc,j,k}$: 動物プランクトンの捕食調整量を含めない分解速度分画 k 種の排糞・残滓量[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]
(2.6 参照)

$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C}$: 動物プランクトンが植物プランクトンを捕食した際の余剰炭素量[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,C}$: 動物プランクトンが原生動物を捕食した際の余剰炭素量[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,C}$: 動物プランクトンが好気性細菌を捕食した際の余剰炭素量[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C} = \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut} \quad (2.10.15)$$

$$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,N} = (N_C^{PHY,i} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} - N_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut} \quad (2.10.16)$$

$$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,P} = (P_C^{PHY,i} - P_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} - P_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut} \quad (2.10.17)$$

$$\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,C} = \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut} \quad (2.10.18)$$

$$\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,N} = (N_C^{PZ,n} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Pz2Zoo,n,j} - N_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut} \quad (2.10.19)$$

$$\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,P} = (P_C^{PZ,n} - P_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Pz2Zoo,n,j} - P_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut} \quad (2.10.20)$$

$$\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,C} = \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut} \quad (2.10.21)$$

$$\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,N} = (N_C^{BAC,m} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Bac2Zoo,m,j} - N_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut} \quad (2.10.22)$$

$$\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,P} = (P_C^{BAC,m} - P_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Bac2Zoo,m,j} - P_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut} \quad (2.10.23)$$

$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$, $\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut}$, $\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut}$ の計算方法については 2.4 を参照。

(5) 原生動物の正味の排糞・残滓

原生動物の正味の排糞・残滓 $B_{PzExc,n,k}^{net,C}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$],

$B_{PzExc,n,k}^{net,N}$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$], $B_{PzExc,n,k}^{net,P}$ [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$] についても、動物プランクトンの場合と同様に考える。

$$B_{PzExc,n,k}^{net,C} = \underbrace{B_{PzExc,n,k}}_{\text{原生動物の排糞}}$$

$$\begin{aligned}
&+ \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,C}}_{\text{植物プランクトンの捕食に対する捕食調整}} \\
&+ \underbrace{\sum_{n'}^{N_{PZ}} c_{PZ,n'}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,C}}_{\text{原生動物の捕食に対する捕食調整}} \\
&+ \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,C}}_{\text{好気性細菌の捕食に対する捕食調整}} \quad (2.10.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{PzExc,n,k}^{net,N} &= \underbrace{N_C^{PZ,n} \cdot B_{PzExc,n,k}}_{\text{原生動物の排糞}} \\
&+ \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,N}}_{\text{植物プランクトンの捕食に対する捕食調整}} \\
&+ \underbrace{\sum_{n'}^{N_{PZ}} c_{PZ,n'}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,N}}_{\text{原生動物の捕食に対する捕食調整}} \\
&+ \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,N}}_{\text{好気性細菌の捕食に対する捕食調整}} \quad (2.10.25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{PzExc,n,k}^{net,P} &= \underbrace{P_C^{PZ,n} \cdot B_{PzExc,n,k}}_{\text{原生動物の排糞}} \\
&+ \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,P}}_{\text{植物プランクトンの捕食に対する捕食調整}} \\
&+ \underbrace{\sum_{n'}^{N_{PZ}} c_{PZ,n'}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,P}}_{\text{原生動物の捕食に対する捕食調整}} \\
&+ \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,P}}_{\text{好気性細菌の捕食に対する捕食調整}} \quad (2.10.26)
\end{aligned}$$

$B_{PzExc,n,k}$: 原生動物の捕食調整量を含めない分解速度分画 k 種の排糞・残滓量[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]
(2.7 参照)

$\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,C}$: 原生動物が植物プランクトンを捕食した際の余剰炭素量[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,C}$: 原生動物が原生動物を捕食した際の余剰炭素量[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,C}$: 原生動物が好気性細菌を捕食した際の余剰炭素量[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$$\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,C} = \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut} \quad (2.10.27)$$

$$\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,N} = (N_C^{PHY,i} - N_C^{PZ,n}) \cdot B_{Phy2Pz,i,n} - N_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut} \quad (2.10.28)$$

$$\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,P} = (P_C^{PHY,i} - P_C^{PZ,n}) \cdot B_{Phy2Pz,i,n} - P_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut} \quad (2.10.29)$$

$$\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,C} = \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut} \quad (2.10.30)$$

$$\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,N} = (N_C^{PZ,n'} - N_C^{PZ,n}) \cdot B_{Pz2Pz,n',n} - N_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut} \quad (2.10.31)$$

$$\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,P} = (P_C^{PZ,n'} - P_C^{PZ,n}) \cdot B_{Pz2Pz,n',n} - P_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut} \quad (2.10.32)$$

$$\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,C} = \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut} \quad (2.10.33)$$

$$\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,N} = (N_C^{BAC,m} - N_C^{PZ,n}) \cdot B_{Bac2Pz,m,n} - N_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut} \quad (2.10.34)$$

$$\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,P} = (P_C^{BAC,m} - P_C^{PZ,n}) \cdot B_{Bac2Pz,m,n} - P_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut} \quad (2.10.35)$$

$\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut}$, $\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut}$, $\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut}$ の計算方法については 2.4 を参照。

(6) 沈降

懸濁態有機物の沈降 $B_{PocSett,k}$ [molC m⁻³ s⁻¹], $B_{PonSett,k}$ [molN m⁻³ s⁻¹], $B_{PopSett,k}$ [molP m⁻³ s⁻¹] は、以下のように表わされる。ただし、水面および底面位置では $\partial POC_k / \partial z = \partial PON_k / \partial z = \partial POP_k / \partial z = 0$ とする。

$$B_{PocSett,k} = w_{POM,k} \cdot \frac{\partial POC_k}{\partial z} \quad (2.10.36)$$

$$B_{PonSett,k} = w_{POM,k} \cdot \frac{\partial PON_k}{\partial z} \quad (2.10.37)$$

$$B_{PopSett,k} = w_{POM,k} \cdot \frac{\partial POP_k}{\partial z} \quad (2.10.38)$$

$w_{POM,k}$: 懸濁態有機物の移動速度 (鉛直上向きを正)
[m s⁻¹]: パラメータ

(7) 底泥への沈降

懸濁態有機物の底泥への沈降 $J_{Pom2Det,k}^C$ [molC m⁻² s⁻¹], $J_{Pom2Det,k}^N$ [molN m⁻² s⁻¹], $J_{Pom2Det,k}^P$ [molP m⁻² s⁻¹] は、以下のように表わされる。

$$J_{Pom2Det,k}^C = \min(0, w_{POM,k}) \cdot POC_k \quad (2.10.39)$$

$$J_{Pom2Det,k}^N = \min(0, w_{POM,k}) \cdot PON_k \quad (2.10.40)$$

$$J_{Pom2Det,k}^P = \min(0, w_{POM,k}) \cdot POP_k \quad (2.10.41)$$

2.11 溶存態有機物

モデル上では前述したように溶存態有機物を分解速度別に分類した (マルチ G モデル)。また、細菌による分解・無機化と、細菌の栄養塩摂取を分けてモデル化したため (図-2.12), ADOC (Available DOC; 利用可能溶存態有機炭素) というコンパートメントを新たに創出した。ADOC の概念としては、細菌が直接摂取できる低分子状の有機炭素にあたる。

溶存態有機物の物質フローを図-2.18 に示す。

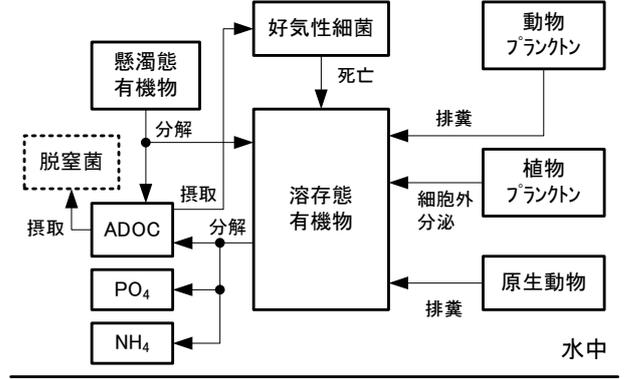


図-2.18 溶存態有機物モデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

溶存態有機物は植物プランクトンの細胞外分泌、動物プランクトン・原生動物の排糞、好気性細菌の死亡、懸濁態有機物の分解によって増加し、分解 (無機化) によって減少する。したがって、溶存態有機物 (炭素・窒素・リン) の増加 $S_{DOC,k}$ [molC m⁻³ s⁻¹], $S_{DON,k}$ [molN m⁻³ s⁻¹], $S_{DOP,k}$ [molP m⁻³ s⁻¹] は、以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} S_{DOC,k} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot B_{PhyExt,i}}_{\text{植物プランクトンの細胞外分泌}} \\ & + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} (1 - \kappa_{ZooExc,j}) \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,C}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} \\ & + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} (1 - \kappa_{PzExc,n}) \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,C}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}} \\ & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot (1 - \alpha_{BacPom,m}) \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} \\ & - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{DomDecA,k,m}^C}_{\text{好気性細菌による DOC 分解}} - \underbrace{B_{DomDecB,k}^C}_{\text{嫌気性細菌による DOC 分解}} \\ & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \kappa_{DecA,k} \cdot B_{PomDecA,k,m}^C}_{\text{好気性細菌による POC 分解}} \\ & + \underbrace{\kappa_{DecB,k} \cdot B_{PomDecB,k}^C}_{\text{嫌気性細菌による POC 分解}} \end{aligned} \quad (2.11.1)$$

$B_{DomDecA,k,m}^C$: 好気性細菌 m 種による溶存態有機炭素 k 種の分解 [molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{DomDecB,k}^C$: 嫌気性細菌による溶存態有機炭素 k 種の

分解[$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$$\begin{aligned}
 S_{DON,k} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot N_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyExt,i}}_{\text{植物プランクトンの細胞外分泌}} \\
 & + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} (1 - \kappa_{ZooExc,j}) \cdot B_{ZooExc,j,k}^{net,N}}_{\text{動物プランクトンの正味の排糞・残滓量}} \\
 & + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} (1 - \kappa_{PzExc,n}) \cdot B_{PzExc,n,k}^{net,N}}_{\text{原生動物の正味の排糞・残滓量}} \\
 & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} c_{BAC,m}^{dec,k} \cdot (1 - \alpha_{BacPom,m}) \cdot N_C^{BAC,m} \cdot B_{BacLoss,m}}_{\text{好気性細菌の死亡}} \\
 & - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{DomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による DON 分解}} - \underbrace{B_{DomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による DON 分解}} \\
 & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \kappa_{DecA,k} \cdot B_{PomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による PON 分解}} \\
 & + \underbrace{\kappa_{DecB,k} \cdot B_{PomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による PON 分解}} \quad (2.11.2) \\
 & B_{DomDecA,k,m}^N : \text{好気性細菌 } m \text{ 種による溶存態有機窒素 } k \text{ 種の無機化} [\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}] \\
 & B_{DomDecB,k}^N : \text{嫌気性細菌による溶存態有機窒素 } k \text{ 種の無機化} [\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}]
 \end{aligned}$$

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

$$+ \underbrace{\kappa_{DecB,k} \cdot B_{PomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による POP 分解}} \quad (2.11.3)$$

$B_{DomDecA,k,m}^P$: 好気性細菌 m 種による溶存態有機リン k 種の無機化 [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

$B_{DomDecB,k}^P$: 嫌気性細菌による溶存態有機リン k 種の無機化 [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$]

ADOC は懸濁態有機物・溶存態有機物の分解によって増加し、好気性細菌・脱窒菌の摂取で減少する。したがって、ADOC の増加 $S_{ADOC,k}$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、以下のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 S_{ADOC} = & \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \sum_k^{N_{DEC}} (1 - \kappa_{DecA,k}) \cdot B_{PomDecA,k,m}^C}_{\text{好気性細菌による懸濁態有機物の分解}} \\
 & + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} (1 - \kappa_{DecB,k}) \cdot B_{PomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による懸濁態有機物の分解}} \\
 & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \sum_k^{N_{DEC}} B_{DomDecA,k,m}^C}_{\text{好気性細菌による溶存態有機物の分解}} \\
 & + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} B_{DomDecB,k}^C}_{\text{嫌気性細菌による溶存態有機物の分解}} - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{BacTake,m}^C}_{\text{好気性細菌による摂取}} \\
 & - \underbrace{B_{DnbTake}^C}_{\text{脱窒菌による摂取}} \quad (2.11.4)
 \end{aligned}$$

(2) 嫌気性細菌による分解

嫌気性細菌による溶存態有機物の分解 $B_{DomDecB,k}^C$ [$\text{molC m}^{-3} \text{s}^{-1}$], $B_{DomDecB,k}^N$ [$\text{molN m}^{-3} \text{s}^{-1}$], $B_{DomDecB,k}^P$ [$\text{molP m}^{-3} \text{s}^{-1}$] は、懸濁態有機物の分解と同様に考える。

$$B_{DomDecB,k}^C = \mu_{DecB,k} \cdot u_{DecbDo} \cdot DOC_k \quad (2.11.5)$$

$$B_{DomDecB,k}^N = \mu_{DecB,k} \cdot u_{DecbDo} \cdot DON_k \quad (2.11.6)$$

$$B_{DomDecB,k}^P = \mu_{DecB,k} \cdot u_{DecbDo} \cdot DOP_k \quad (2.11.7)$$

$\mu_{DecB,k}$: 嫌気性細菌による有機物の分解速度 [s^{-1}]

2.10 参照

u_{DecbDo} : 嫌氣的分解に対する酸素制限関数 [-] : 2.10 参照

2.12 窒素

無機溶存態の窒素はアンモニア (NH_4), 亜硝酸 (NO_2), 硝酸 (NO_3) を取り扱う。窒素の物質フローを図-2.19 に示す。

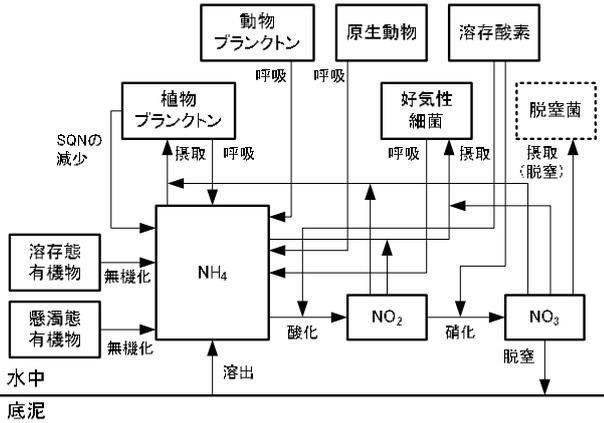
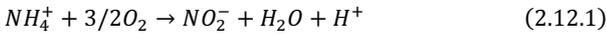
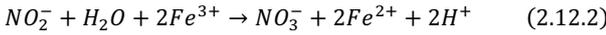


図-2.19 窒素モデルの物質フロー

ここで、アンモニアの亜硝酸への酸化の化学式は次式のように表わされる (赤松ら, 2002).



亜硝酸の硝酸への硝化反応に対する化学反応式は次式のように表わされる (赤松ら, 2002).



(1) 増殖モデル

アンモニアは植物プランクトン・動物プランクトン・原生動物・好気性細菌の呼吸、植物プランクトンの余剰栄養塩量の減少、懸濁態有機物・溶存態有機物の無機化によって増加する。また、植物プランクトン・好気性細菌の摂取、酸化反応によって減少する。したがって、アンモニアの増加 S_{NH_4} [$molN m^{-3} s^{-1}$] は、次式のように定式化される。

$$\begin{aligned}
 S_{NH_4} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} N_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyResp,i}}_{\text{植物プランクトンの呼吸}} + \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} B_{SqnLoss,i}}_{\text{SQNの減少}} \\
 & - \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} B_{PhyTake,i}^{NH_4}}_{\text{植物プランクトンによる摂取}} + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} N_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooResp,j}}_{\text{動物プランクトンの呼吸}} \\
 & + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} N_C^{PZ,n} \cdot B_{PzResp,n}}_{\text{原生動物の呼吸}} + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} N_C^{Bac,m} \cdot B_{BacResp,m}}_{\text{好気性細菌の呼吸}} \\
 & - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{BacTake,m}^{NH_4}}_{\text{好気性細菌による摂取}} \\
 & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \sum_k^{N_{DEC}} (1 - \kappa_{DecA,k}) \cdot B_{PomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による POM の無機化}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \sum_k^{N_{DEC}} B_{DomDecA,k,m}^N}_{\text{好気性細菌による DOM の無機化}} \\
 & + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} (1 - \kappa_{DecB,k}) \cdot B_{PomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による POM の無機化}} \\
 & + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} B_{DomDecB,k}^N}_{\text{嫌気性細菌による DOM の無機化}} \\
 & - \underbrace{B_{NH_4,2NO_2}}_{\text{アンモニアの酸化}(NH_4 \rightarrow NO_2)} \quad (2.12.3)
 \end{aligned}$$

$B_{NH_4,2NO_2}$: アンモニアの亜硝酸への酸化 [$molN m^{-3} s^{-1}$]

亜硝酸はアンモニアの酸化反応によってのみ増加し、植物プランクトン・好気性細菌の摂取および硝化反応によって減少する。したがって、亜硝酸の増加 S_{NO_2} [$molN m^{-3} s^{-1}$] は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 S_{NO_2} = & - \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} B_{PhyTake,i}^{NO_2}}_{\text{植物プランクトンによる摂取}} - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{BacTake,m}^{NO_2}}_{\text{細菌による摂取}} \\
 & + \underbrace{B_{NH_4,2NO_2}}_{\text{アンモニアの酸化}(NH_4 \rightarrow NO_2)} - \underbrace{B_{NO_2,2NO_3}}_{\text{硝化}(NO_2 \rightarrow NO_3)} \quad (2.12.4)
 \end{aligned}$$

$B_{NO_2,2NO_3}$: 亜硝酸の硝酸への硝化 [$molN m^{-3} s^{-1}$]

硝酸は亜硝酸からの硝化反応によってのみ増加し、植物プランクトン・好気性細菌の摂取および脱窒菌の摂取 (脱窒) によって減少する。したがって、硝酸の増加 S_{NO_3} [$molN m^{-3} s^{-1}$] は、次式のように表わされる。

$$\begin{aligned}
 S_{NO_3} = & - \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} B_{PhyTake,i}^{NO_3}}_{\text{植物プランクトンによる摂取}} - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{BacTake,m}^{NO_3}}_{\text{細菌による摂取}} \\
 & + \underbrace{B_{NO_2,2NO_3}}_{\text{硝化}(NO_2 \rightarrow NO_3)} - \underbrace{B_{DnbTake}^{NO_3}}_{\text{脱窒菌による摂取}} \quad (2.12.5)
 \end{aligned}$$

(2) 底泥とのフラックス

アンモニアの底泥とのフラックス $J_{NH_4}^{bp}$ [$molN m^{-2} s^{-1}$] は底泥からの溶出を考えた。硝酸の底泥とのフラックス $J_{NO_3}^{bp}$ [$molN m^{-2} s^{-1}$] は底泥での脱窒に伴う消費フラックスを考えた。

$$J_{NH_4}^{bp} = J_{NH_4}^{sed} \quad (2.12.6)$$

底泥溶出フラックス

$J_{NH_4}^{sed}$: 底泥とのアンモニアフラックス [$molN m^{-2} s^{-1}$] : 2.18 参照

$$j_{NO_3}^{bp} = \underbrace{j_{NO_3}^{sed}}_{\text{底泥消費フラックス}} \quad (2.12.7)$$

底泥消費フラックス

$j_{NO_3}^{sed}$: 底泥との硝酸フラックス (脱窒)

[molN m⁻² s⁻¹] : 2.18 参照

(3) アンモニアの酸化

アンモニアの酸化 $B_{NH_4_2NO_2}$ [molN m⁻³ s⁻¹] は一次反応に従うとして、次式のように定式化を行った。

$$B_{NH_4_2NO_2} = f_{temp}(\alpha_{NH_4_2NO_2}, \beta_{NH_4_2NO_2}) \cdot f_{MM}(DO, K_{DO, NH_4_2NO_2}) \cdot NH_4 \quad (2.12.8)$$

$\alpha_{NH_4_2NO_2}$: 0°Cでのアンモニアの酸化反応速度[s⁻¹] : パラメータ

$\beta_{NH_4_2NO_2}$: アンモニアの酸化反応速度の温度係数 [°C⁻¹] : パラメータ

$K_{DO, NH_4_2NO_2}$: アンモニアの酸化反応に対する溶存酸素の半飽和定数[molO₂ m⁻³] : パラメータ

(4) 亜硝酸の硝化

亜硝酸の硝化 $B_{NO_2_2NO_3}$ [molN m⁻³ s⁻¹] についても、アンモニアの酸化と同様に考え、次式のように定式化を行った。

$$B_{NO_2_2NO_3} = f_{temp}(\alpha_{NO_2_2NO_3}, \beta_{NO_2_2NO_3}) \cdot f_{MM}(DO, K_{DO, NO_2_2NO_3}) \cdot NO_2 \quad (2.12.9)$$

$\alpha_{NO_2_2NO_3}$: 0°Cでの亜硝酸の硝化反応速度[s⁻¹] : パラメータ

$\beta_{NO_2_2NO_3}$: 硝化反応速度の温度係数[°C⁻¹] : パラメータ

$K_{DO, NO_2_2NO_3}$: 硝化反応に対する溶存酸素の半飽和定数[molO₂ m⁻³] : パラメータ

2.13 リン酸

無機溶存態のリンとして、リン酸(PO₄)を取り扱う。

リンは窒素とともに生物の主要な必須栄養素であり、沿岸域では植物プランクトンの制限因子になる場合がある。

リン酸の物質フローを図-2.20に示す。

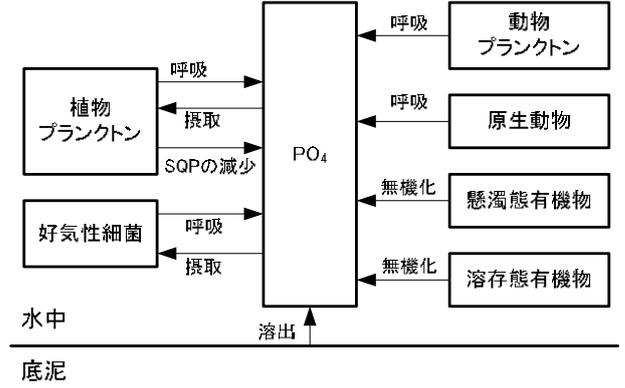


図-2.20 リン酸モデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

リン酸は植物プランクトン・動物プランクトン・原生動物・好気性細菌の呼吸、および懸濁態・溶存態有機リンの無機化、植物プランクトンの余剰リンの減少によって増加する。また、植物プランクトン・好気性細菌による摂取によって減少する。よって、リン酸の増加 S_{PO_4} [molP m⁻³ s⁻¹] は、次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} S_{PO_4} = & \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} P_C^{PHY,i} \cdot B_{PhyResp,i}}_{\text{植物プランクトンの呼吸}} - \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} B_{PhyTake,i}^{PO_4}}_{\text{植物プランクトンによる摂取}} \\ & + \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} B_{SqpLoss,i}}_{\text{SQPの減少}} + \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} P_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooResp,j}}_{\text{動物プランクトンの呼吸}} \\ & + \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} P_C^{PZ,n} \cdot B_{PzResp,n}}_{\text{原生動物の呼吸}} + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} P_C^{BAC,m} \cdot B_{BacResp,m}}_{\text{細菌の呼吸}} \\ & - \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} B_{BacTake,m}^{PO_4}}_{\text{細菌による摂取}} \\ & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \sum_k^{N_{DEC}} (1 - \kappa_{DecA,k}) \cdot B_{PomDecA,k,m}^P}_{\text{好気性細菌による POM の無機化}} \\ & + \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} \sum_k^{N_{DEC}} B_{DomDecA,k,m}^P}_{\text{好気性細菌による DOM の無機化}} \\ & + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} (1 - \kappa_{DecB,k}) \cdot B_{PomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による POM の無機化}} \\ & + \underbrace{\sum_k^{N_{DEC}} B_{DomDecB,k}^P}_{\text{嫌気性細菌による DOM の無機化}} \end{aligned} \quad (2.13.1)$$

(2) 底泥とのフラックス

リン酸の底泥とのフラックス $J_{PO_4}^{bp}$ [molP m⁻² s⁻¹] は、底泥からの溶出を考慮した。

$$J_{PO_4}^{bp} = \underbrace{J_{PO_4}^{sed}}_{\text{底泥溶出フラックス}} \quad (2.13.2)$$

$J_{PO_4}^{sed}$: 底泥からの溶出フラックス [molP m⁻² s⁻¹] :

2. 18 参照

2. 14 ケイ酸

ケイ酸 (SiO₂) は珪藻類の増殖時に使用される栄養塩である。沿岸域での供給源は、一般に河川や開境界からの流入のみである。ケイ酸は珪藻類の摂取と底泥への沈降、または開境界への流出によって減少する (図-2. 21)。

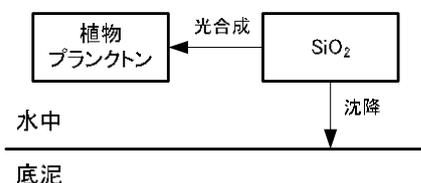


図-2. 21 ケイ酸モデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

上述のように、ケイ酸は植物プランクトンの光合成によって減少し、沈降によって増減する。よって、ケイ酸の増加 S_{SiO_2} [molSi m⁻³ s⁻¹] は、次式のように表わされる。

$$S_{SiO_2} = - \sum_i^{N_{PHY}} \underbrace{Si_C^{PHY,i} \cdot B_{PHYPS,i}^C}_{\text{植物プランクトンによる摂取}} + \underbrace{B_{SiO_2Sett}}_{\text{沈降}} \quad (2.14.1)$$

$Si_C^{PHY,i}$: 植物プランクトン i 種の Si/C 比率 [molSi molC⁻¹]

B_{SiO_2Sett} : ケイ酸の沈降 [molSi m⁻³ s⁻¹]

(2) 底泥とのフラックス

ケイ酸の底泥とのフラックス $J_{SiO_2}^{bp}$ [molSi m⁻² s⁻¹] は、底泥への沈降のみを取り扱う。

$$J_{SiO_2}^{bp} = \underbrace{J_{SiO_2Sett}}_{\text{底泥への沈降}} \quad (2.14.2)$$

J_{SiO_2Sett} : ケイ酸の底泥への沈降 (鉛直上向きを正) : [molSi m⁻² s⁻¹]

(3) 沈降

ケイ酸の沈降 B_{SiO_2Sett} [molSi m⁻³ s⁻¹] は、次式のように表わされる。なお、水面および底面では $\partial SiO_2 / \partial z = 0$ とする。

$$B_{SiO_2Sett} = w_{SiO_2} \cdot \frac{\partial SiO_2}{\partial z} \quad (2.14.3)$$

w_{SiO_2} : ケイ酸の移動速度 (鉛直上向きを正) [m s⁻¹] :
パラメータ :

(4) 底泥への沈降

ケイ酸の底泥への沈降 J_{SiO_2Sett} [molSi m⁻² s⁻¹] は、次のように表わされる。

$$J_{SiO_2Sett} = \min(0, w_{SiO_2}) \cdot SiO_2 \quad (2.14.4)$$

2. 15 硫化水素

浮遊生態系モデルでは硫化物の代表として硫化水素 (H₂S) を考える。硫化水素は底泥で嫌気状態のときに生成され、底泥からの溶出で水中に拡散する。酸化すると硫酸 SO₄²⁻ になるが、硫酸は水中に豊富にあると考えて、浮遊生態系では硫酸量をモデル変数としない。硫化水素の物質フローを図-2. 22 に示す。

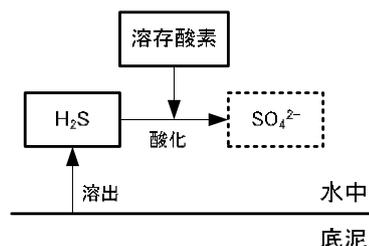


図-2. 22 硫化水素モデルの物質フロー

ここで、硫化水素の酸化に対する化学反応式は次式で表わされる (Fossing et al., 2004)。



(1) 増殖モデル

硫化水素の増加 S_{H_2S} [molS m⁻³ s⁻¹] は酸化による減少のみを考える。

$$S_{H_2S} = - \underbrace{B_{H_2SOxi}}_{\text{酸化}(H_2S \rightarrow SO_4)} \quad (2.15.2)$$

B_{H_2SOxi} : 硫化水素の硫酸への酸化 [molS m⁻³ s⁻¹]

(2) 底泥とのフラックス

硫化水素の底泥とのフラックス $J_{H_2S}^{bp}$ [molS m⁻² s⁻¹] は、底泥からの溶出フラックスのみを考える。

$$J_{H_2S}^{bp} = \underbrace{J_{H_2S}^{sed}}_{\text{底泥溶出フラックス}} \quad (2.15.3)$$

$J_{H_2S}^{sed}$: 硫化水素の底泥からの溶出フラックス [molS m⁻² s⁻¹] : 2. 18 を参照

(3) 硫化水素の酸化

硫化水素の酸化 S_{H_2S} [molS m⁻³ s⁻¹]は、一次反応式に従うと考え、以下のように定式化を行った。

$$B_{H_2SOxi} = f_{temp}(\alpha_{H_2SOxi}, \beta_{H_2SOxi}) \cdot f_{MM}(DO, K_{H_2SOxi}^{DO}) \cdot H_2S \quad (2.15.4)$$

α_{H_2SOxi} : 0°Cでの酸化反応速度[s⁻¹] : パラメータ
 β_{H_2SOxi} : 反応速度の温度係数[°C⁻¹] : パラメータ
 $K_{H_2SOxi}^{DO}$: 酸化反応に対する溶存酸素の半飽和定数 [molO₂ m⁻³] : パラメータ

2.16 溶存酸素

溶存酸素は健全な海域では豊富に存在するが、富栄養化が進行した海域では底層で溶存酸素が消費されるため、貧酸素水塊が形成され、生物を死滅させる。底層の貧酸素化は沿岸域の水質環境において特に重要な問題の一つである。

溶存酸素(DO)の物質フローを図-2.23に示す。

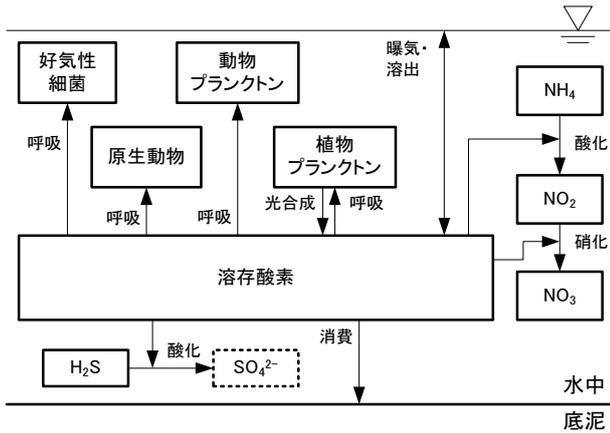


図-2.23 溶存酸素モデルの物質フロー

(1) 増殖モデル

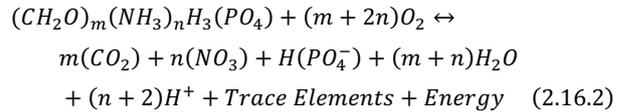
溶存酸素は光合成によって増加し、植物プランクトン・動物プランクトン・原生動物・好気性細菌の呼吸、および酸化・硝化反応によって消費される。したがって、溶存酸素の増加 S_{DO} [molO₂ m⁻³ s⁻¹]は、次式のように定式化される。

$$S_{DO} = \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} TOD_C^{PHY_i} \cdot B_{PhyPs,i}^C}_{\text{植物プランクトンの光合成}} - \underbrace{\sum_i^{N_{PHY}} TOD_C^{PHY_i} \cdot B_{PhyResp,i}}_{\text{植物プランクトンの呼吸}} - \underbrace{\sum_j^{N_{ZOO}} TOD_C^{ZOO_j} \cdot B_{ZooResp,j}}_{\text{動物プランクトンの呼吸}} - \underbrace{\sum_n^{N_{PZ}} TOD_C^{PZ_n} \cdot B_{PzResp,n}}_{\text{原生動物の呼吸}}$$

$$- \underbrace{\sum_m^{N_{BAC}} TOD_C^{BAC_m} \cdot B_{BacResp,m}}_{\text{好気性細菌の呼吸}} - \underbrace{TOD_N^{NH_4_2NO_2} \cdot B_{NH_4_2NO_2}}_{\text{アンモニアの酸化(NH}_4 \rightarrow \text{NO}_2)} - \underbrace{TOD_N^{NO_2_2NO_3} \cdot B_{NO_2_2NO_3}}_{\text{亜硝酸の硝化(NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3)} - \underbrace{TOD_S^{H_2SOxi} \cdot B_{H_2SOxi}}_{\text{硫化水素の酸化}} \quad (2.16.1)$$

$TOD_C^{PHY_i}$: 植物プランクトンの光合成・呼吸に対する酸素と炭素の比[molO₂ molC⁻¹] : パラメータ
 $TOD_C^{ZOO_j}$: 動物プランクトンの呼吸に対する酸素と炭素の比[molO₂ molC⁻¹] : パラメータ
 $TOD_C^{PZ_n}$: 原生動物の呼吸に対する酸素と炭素の比[molO₂ molC⁻¹] : パラメータ
 $TOD_C^{BAC_m}$: 好気性細菌の呼吸に対する酸素と炭素の比[molO₂ molC⁻¹] : パラメータ
 $TOD_S^{H_2SOxi}$: 硫化水素の酸化に必要な酸素量 [molO₂ molS⁻¹] : パラメータ
 $TOD_N^{NH_4_2NO_2}$: アンモニアの酸化に必要な酸素量 [molO₂ molN⁻¹] : パラメータ
 $TOD_N^{NO_2_2NO_3}$: 亜硝酸の硝化に必要な酸素量 [molO₂ molN⁻¹] : パラメータ

ここで、光合成や呼吸に伴う酸素消費量に関しては、有機物中のC:N:P比率から理論的に換算できる。有機物中のC:N:P比率がm:n:1の場合、酸化-還元反応は次式に従う(中田, 1993)。



したがって、炭素に対する酸素量 TOD_C [molO₂ molC⁻¹]は、

$$TOD_C = \frac{m+2n}{m} \quad (2.16.3)$$

となる。

(2) 水面でのフラックス

溶存酸素の水面でのフラックス J_{DO}^{pa} [molO₂ m⁻² s⁻¹]は水面での再曝気を考える。

$$J_{DO}^{pa} = \underbrace{J_{Reaer}}_{\text{水面での再曝気}} \quad (2.16.4)$$

J_{Reaer} : 水面での再曝気 (鉛直上向きを正) [molO₂ m⁻² s⁻¹]

(3) 底泥とのフラックス

溶存酸素の底泥とのフラックス J_{DO}^{pb} [molO₂ m⁻² s⁻¹]は、底泥の酸素消費フラックスを考える。

$$J_{DO}^{bp} = \underbrace{J_{DO}^{sed}}_{\text{底泥フラックス}} \quad (2.16.5)$$

J_{DO}^{sed} : 溶存酸素の底泥フラックス[molO₂ m⁻² s⁻¹] :
2.18 参照

(4) 水面での再曝気

水面での再曝気 J_{Reaer} [molO₂ m⁻² s⁻¹]は再曝気係数を用いて、次式のように表わされる。なお、水中の溶存酸素濃度が過飽和になれば、溶存酸素は逆に水中から大気中へ溶出される。

$$J_{Reaer} = -k_L \cdot (DO_{sat} - DO) \quad (2.16.6)$$

k_L : 再曝気係数[m s⁻¹]
 DO_{sat} : 飽和溶存酸素濃度[molO₂ m⁻³]

酸素の再曝気係数 k_L [m s⁻¹]は、摩擦速度とシュミット数を用いて、次式のように表わされる(土木学会, 1999, p. 595)。

$$k_L = \begin{cases} 1.0 \times 10^{-6} + 34.1 \times 10^{-4} \cdot U_* \cdot S_{CL}^{-0.5} & (U_* \geq 0.3 \text{m/s}) \\ 1.0 \times 10^{-6} + 144 \times 10^{-4} \cdot U_*^{2.2} \cdot S_{CL}^{-0.5} & (U_* < 0.3 \text{m/s}) \end{cases} \quad (2.16.7)$$

U_* : 水面での風の摩擦速度[m s⁻¹]

S_{CL} : 液相のシュミット数[-] : パラメータ

水面での風の摩擦速度 U_* [m s⁻¹]は水面10mでの風速より、次式で換算される(土木学会, 1999, p. 595)。

$$U_* = 1.0 \times 10^{-2} \cdot (6.1 + 0.63U_{10})^{0.5} \cdot U_{10} \quad (2.16.8)$$

U_{10} : 水面10m高さにおける風速[m s⁻¹]

水中の飽和酸素濃度 DO_{sat} [molO₂ m⁻³]は次式で計算される(土木学会, 1999, p. 591)。

$$DO_{sat} = \rho_{O_2} \cdot \exp(X_{DoSat}) \quad (2.16.9)$$

$$X_{DoSat} = A_1 + A_2 \cdot \frac{100}{\theta} + A_3 \cdot \ln\left(\frac{\theta}{100}\right) + A_4 \cdot \frac{\theta}{100} + S \left\{ B_1 + B_2 \cdot \frac{\theta}{100} + B_3 \cdot \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \right\} \quad (2.16.10)$$

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -173.4292 \\ +249.6339 \\ +143.3483 \\ -21.8492 \end{pmatrix} \quad (2.16.11)$$

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.033096 \\ +0.014259 \\ -0.001700 \end{pmatrix} \quad (2.16.12)$$

$\theta = T + 273.15$: 絶対温度[K]

S : 塩分[-]

$\rho_{O_2} = 1.429/32$: 酸素密度[molO₂ L⁻¹] (単位注意)

2.17 魚

ここでの魚は、遊泳する魚介類全体を指す。魚(FISH)はバイオマス量を外部入力として与えるモデルとなっている(図-2.24)。なお、魚自体の遊泳は考慮しない。

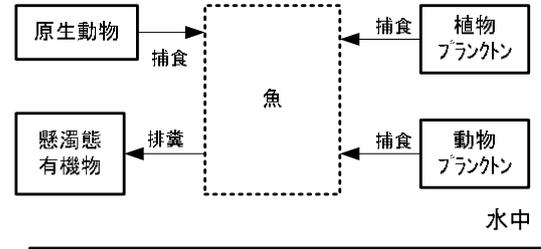


図-2.24 魚モデルの物質フロー

(1) 排糞

魚の排糞 $B_{FishLoss,k}^C$ [molC m⁻³ s⁻¹], $B_{FishLoss,k}^N$ [molN m⁻³ s⁻¹], $B_{FishLoss,k}^P$ [molP m⁻³ s⁻¹]は以下のように定式化を行った。

$$B_{FishLoss,k}^C = (1 - e_{Fish}) \cdot B_{FishEat,k}^C \quad (2.17.1)$$

$$B_{FishLoss,k}^N = (1 - e_{Fish}) \cdot B_{FishEat,k}^N \quad (2.17.2)$$

$$B_{FishLoss,k}^P = (1 - e_{Fish}) \cdot B_{FishEat,k}^P \quad (2.17.3)$$

e_{Fish} : 魚の同化効率[-] : パラメータ

$B_{FishEat,k}^C$: 魚が捕食した炭素[molC m⁻³ s⁻¹]

$B_{FishEat,k}^N$: 魚が捕食した窒素[molN m⁻³ s⁻¹]

$B_{FishEat,k}^P$: 魚が捕食したリン[molP m⁻³ s⁻¹]

魚が捕食した炭素・窒素・リン $B_{FishLoss,k}^C$ [molC m⁻³ s⁻¹], $B_{FishEat,k}^N$ [molN m⁻³ s⁻¹], $B_{FishEat,k}^P$ [molP m⁻³ s⁻¹]は以下のように表わされる。

$$B_{FishEat,k}^C = \sum_i^{N_{PHY}} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot B_{Phy2Fish,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} c_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot B_{Zoo2Fish,j} + \sum_n^{N_{PZ}} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot B_{Pz2Fish,n} \quad (2.17.4)$$

$$B_{FishEat,k}^N = \sum_i^{N_{PHY}} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot N_C^{PHY,i} \cdot B_{Phy2Fish,i}$$

$$+ \sum_j^{N_{ZOO}} c_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot N_C^{ZOO,j} \cdot B_{Zoo2Fish,j}$$

$$+ \sum_n^{N_{PZ}} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot N_C^{PZn} \cdot B_{Pz2Fish,n} \quad (2.17.5)$$

$$B_{FishEat,k}^P = \sum_i^{N_{PHY}} c_{PHY,i}^{dec,k} \cdot P_C^{PHY_i} \cdot B_{Phy2Fish,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} c_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot P_C^{ZOO_j} \cdot B_{Zoo2Fish,j} + \sum_n^{N_{PZ}} c_{PZ,n}^{dec,k} \cdot P_C^{PZn} \cdot B_{Pz2Fish,n} \quad (2.17.6)$$

(2) 植物プランクトンの捕食

魚による植物プランクトンの捕食 $B_{Phy2Fish,i}$ [molC m⁻³ s⁻¹] は以下のように定式化を行った。

$$B_{Phy2Fish,i} = \frac{PHY_i}{\Pi_{Fish}} \cdot R_{Fish} \cdot FISH \quad (2.17.7)$$

R_{Fish} : 魚の捕食速度 [s⁻¹]

$FISH$: 魚の存在量 [molC m⁻³ s⁻¹] : 外部入力

魚の捕食速度 R_{Fish} [s⁻¹] は、動物プランクトンの捕食速度と同様に考えた。

$$R_{Fish} = f_{temp}(\alpha_{FishFeed}, \beta_{FishFeed}) \cdot f_{MM}(DO, K_{FishFeed}^{DO}) \cdot f_{feed}(\lambda_{Fish}, \Pi_{Fish}^{min}, \Pi_{Fish}) \quad (2.17.8)$$

$\alpha_{FishFeed}$: 0°Cでの最大捕食速度 [s⁻¹] : パラメータ

$\beta_{FishFeed}$: 捕食の温度係数 [°C⁻¹] : パラメータ

$K_{FishFeed}^{DO}$: 捕食に対する溶存酸素の半飽和定数 [molO₂ m⁻³] : パラメータ

Π_{Fish} : 魚の飼料濃度 [molC m⁻³]

λ_{Fish} : 魚のイブレフ定数 [m³ molC⁻¹] : パラメータ

Π_{Fish}^{min} : 飼料濃度の下限値 [molC m⁻³] : パラメータ

$$\Pi_{Fish} = \sum_i^{N_{PHY}} PHY_i + \sum_j^{N_{ZOO}} ZOO_j + \sum_n^{N_{PZ}} PZ_n \quad (2.17.9)$$

(3) 動物プランクトンの捕食

魚による動物プランクトンの捕食 $B_{Zoo2Fish,j}$ [molC m⁻³ s⁻¹] は、植物プランクトンの場合と同様に考える。

$$B_{Zoo2Fish,j} = \frac{ZOO_j}{\Pi_{Fish}} \cdot R_{Fish} \cdot FISH \quad (2.17.10)$$

(4) 原生動物の捕食

魚による原生動物の捕食 $B_{Pz2Fish,n}$ [molC m⁻³ s⁻¹] は、

植物プランクトンの場合と同様に考える。

$$B_{Pz2Fish,n} = \frac{PZ_n}{\Pi_{Fish}} \cdot R_{Fish} \cdot FISH \quad (2.17.11)$$

2.18 簡易底生系モデル

底泥内での物質循環と水-底泥間のフラックスを計算するため、簡易な底生系モデル（簡易底生系モデル）を用いる。簡易底生系モデルは沈降フラックスに対応して、水-底泥間のフラックス（酸素消費速度など）が決まる形とする。底泥の間隙水と直上水との拡散フラックスなどは考えない。仮定として、底泥に沈降してきた有機物は、瞬間的にある割合だけ分解されるとみなす。POCの沈降フラックス場合は、直上水の酸素・硝酸の消費フラックスと硫化水素の溶出フラックスに変換される（反応は酸素→硝酸→硫化水素の順番）。PON、POPの沈降フラックスの場合は、それぞれアンモニアの溶出とリン酸の溶出フラックスに変換される（図-2.25 参照）。

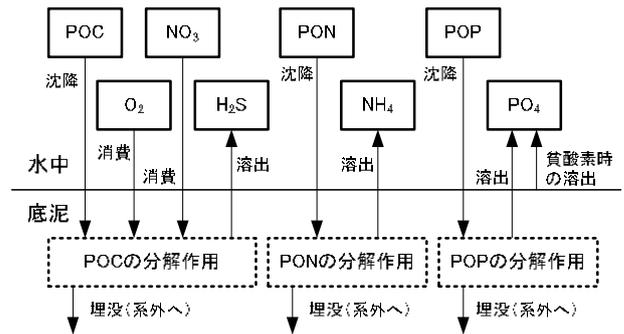


図-2.25 簡易底生系モデルの溶出・消費フラックス

また、干潟・浅場の効果を取り入れるために、懸濁物食者（アサリなど）のモデルも取り入れる。懸濁物食者は、バイオマス MSF [molC m⁻²] の変動は強制的に与え、捕食（摂食）、呼吸のみを取り扱うこととする（図-2.26）。

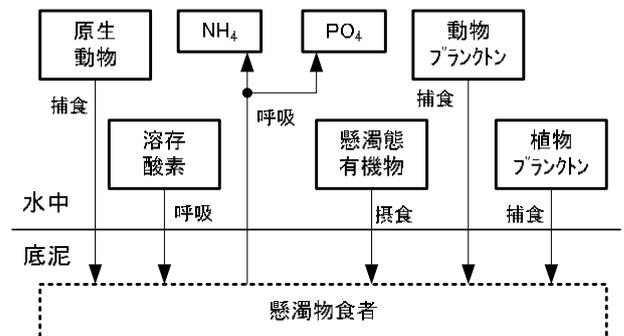


図-2.26 簡易底生系モデルの懸濁物食者モデルの物質フロー

(1) 酸素フラックス

底泥の酸素フラックス J_{DO}^{sed} [molO₂ m⁻² s⁻¹]は、懸濁態有機物の沈降に比例する消費成分と定常的な酸素消費成分、および懸濁物食者の呼吸を考え、次式のように定式化を行った。

$$J_{DO}^{sed} = \underbrace{u_{DoSed} \cdot TOD_C^{POC} \cdot J_{POC}^{sed}}_{\text{沈降フラックスに対する消費}} + \underbrace{u_{DoSed} \cdot J_{DO, const}^{sed}}_{\text{定常的な消費}} + J_{MsfResp}^{O_2} \quad (2.18.1)$$

懸濁物食者の呼吸

TOD_C^{POC} : 懸濁態有機炭素を分解するために必要な酸素 [molO₂ molC⁻¹] : パラメータ

u_{DoSed} : 底泥の酸素フラックスに対する DO 制限関数 [-]

J_{POC}^{sed} : 分解される懸濁態有機炭素フラックス [molC m⁻² s⁻¹]

$J_{DO, const}^{sed}$: 定常的な酸素フラックス [molO₂ m⁻² s⁻¹] : パラメータ

$J_{MsfResp}^{O_2}$: 懸濁物食者の呼吸による酸素フラックス [molO₂ m⁻² s⁻¹]

分解される懸濁態有機炭素フラックス J_{POC}^{sed} [molC m⁻² s⁻¹]は、底泥への有機物の沈降フラックスに対し、分解率をかけて、次式のように定式化を行った。

$$J_{POC}^{sed} = \sum_k^{N_{DEC}} f_{temp}^{sed}(\alpha_{sed,k}, \beta_{sed}) \cdot J_C^{sed,k} \quad (2.18.2)$$

f_{temp}^{sed} : 底泥の有機物に対する分解率 [-]

$J_C^{sed,k}$: 底泥への有機炭素の沈降フラックス [molC m⁻² s⁻¹]

底泥への有機物の沈降フラックス $J_C^{sed,k}$ [molC m⁻² s⁻¹]は、POC の沈降フラックスと、植物プランクトンの沈降フラックスの和で表わされる。

$$J_C^{sed,k} = J_{Pom2Det,k}^C + \sum_i^{N_{PHY}} C_{Phy,i}^{dec,k} \cdot J_{Phy2Det,i} \quad (2.18.3)$$

$J_{Pom2Det,k}^C$: POC の底泥とのフラックス [molC m⁻² s⁻¹]

$J_{Phy2Det,i}$: 植物プランクトンの底泥とのフラックス [molC m⁻² s⁻¹]

底泥の有機物に対する分解率 f_{temp}^{sed} [-]は、温度に対して指数関数的に増加するものとした。ただし、30°Cを超えた場合は最大値になるように定式化を行った。

$$f_{temp}^{sed}(\alpha_{sed,k}, \beta_{sed}) = \alpha_{sed,k} \cdot \min[1, \exp\{\beta_{sed}(T - 30)\}] \quad (2.18.4)$$

$\alpha_{sed,k}$: 分解速度分画 k 種の最大分解率 [-] : パラメータ

β_{sed} : 分解率の温度依存係数 [°C⁻¹] : パラメータ

底泥の酸素フラックスに対する DO 制限関数 u_{DoSed} [-]は、ミカエリスメンテン型の関数形とした。

$$u_{DoSed} = f_{MM}(DO, K_{DO}^{sed}) \quad (2.18.5)$$

DO : 浮遊系最底層の溶存酸素濃度 [molO₂ m³]

K_{DO}^{sed} : 溶存酸素の半飽和定数 [molO₂ m³] : パラメータ

(2) 硝酸フラックス

底泥との硝酸フラックス $J_{NO_3}^{sed}$ [molN m⁻² s⁻¹]は、分解される懸濁態有機炭素フラックスに対して酸素制限された残りの成分で発生すると考え、次式のように定式化を行った。

$$J_{NO_3}^{sed} = N_C^{Dec} \cdot u_{No3Sed} \cdot (1 - u_{DoSed}) \cdot J_{POC}^{sed} \quad (2.18.6)$$

u_{No3Sed} : 底泥の硝酸フラックスに対する硝酸制限関数 [-]

底泥の硝酸フラックスに対する硝酸制限関数 u_{No3Sed} [-]は、ミカエリスメンテン型の関数形とした。

$$u_{No3Sed} = f_{MM}(NO_3, K_{NO_3}^{sed}) \quad (2.18.7)$$

N_C^{Dec} : 懸濁態有機炭素を分解するために必要な硝酸 [molN molC⁻¹] : パラメータ

$K_{NO_3}^{sed}$: 沈降有機物の分解速度に対する硝酸の半飽和定数 [molN m⁻³] : パラメータ

(3) 硫化水素フラックス

底泥からの硫化水素の溶出フラックス $J_{H_2S}^{sed}$ [molS m⁻² s⁻¹]は、分解される懸濁態有機炭素フラックスに対して酸素消費分と硝酸消費分の残りの成分で発生すると考え、以下のように定式化を行った。なお、 J_{POC}^{sed} は負（つまり水中→底泥方向）の値をとるが、 $J_{H_2S}^{sed}$ は正（つまり底泥→水中方向）の値をとるため、 J_{POC}^{sed} にマイナスがかかっている。

$$J_{H_2S}^{sed} = S_C^{Dec} \cdot (1 - u_{No3Sed}) \cdot (1 - u_{DoSed}) \cdot (-J_{POC}^{sed}) \quad (2.18.8)$$

S_C^{Dec} : 懸濁態有機炭素を分解するために必要な硫化物 [molS molC⁻¹] : パラメータ

(4) アンモニアフラックス

底泥からのアンモニアの溶出フラックス $J_{NH_4}^{sed}$ [molS m⁻² s⁻¹]は、沈降フラックスに応じて決定される定式化を行った。

$$J_{NH_4}^{sed} = \underbrace{\sum_k^{NDEC} f_{temp}^{sed}(\alpha_{sed,k}, \beta_{sed}) \cdot (-J_N^{sed,k})}_{\text{沈降フラックスに対する溶出}} + \underbrace{J_{MsfResp}^N}_{\text{懸濁物食者の呼吸}} \quad (2.18.9)$$

$J_N^{sed,k}$: 底泥への有機窒素の沈降フラックス
[molN m⁻² s⁻¹]
 $J_{MsfResp}^N$: 懸濁物食者の呼吸によるアンモニアフラックス
[molN m⁻² s⁻¹]

底泥への有機窒素の沈降フラックス
 $J_N^{sed,k}$ [molN m⁻² s⁻¹]は、懸濁態有機物の沈降フラックスと、余剰栄養塩量を含む植物プランクトンの沈降フラックスの和で表わされる。

$$J_N^{sed,k} = J_{Pom2Det,k}^N + \sum_i^{NPHY} C_{Phy,i}^{dec,k} \cdot N_C^{PHY,i} \cdot J_{Phy2Det,i} + \sum_i^{NPHY} C_{Phy,i}^{dec,k} \cdot J_{SqLoss,i} \quad (2.18.10)$$

$J_{Pom2Det,k}^N$: PON の底泥とのフラックス
[molN m⁻² s⁻¹]
 $J_{Phy2Det,i}$: 植物プランクトンの底泥とのフラックス
[molC m⁻² s⁻¹]
 $J_{SqLoss,i}$: 植物プランクトンの減少に伴う余剰栄養塩量の減少 (底面フラックス) [molN m⁻² s⁻¹]

(5) リン酸フラックス

底泥からのリン酸溶出フラックス $J_{PO_4}^{sed}$ [molS m⁻² s⁻¹] は、沈降フラックスに比例して溶出する成分と、貧酸素状態になったときに溶出する成分に分け、および懸濁物食者の呼吸を考えて、次式のように定式化を行った。

$$J_{PO_4}^{sed} = \underbrace{\sum_k^{NDEC} f_{temp}^{sed}(\alpha_{sed,k}, \beta_{sed}) \cdot (-J_P^{sed,k})}_{\text{沈降フラックスに対する溶出}} + \underbrace{J_{PO_4}^{sed,do}}_{\text{貧酸素状態に対する溶出}} + \underbrace{J_{MsfResp}^P}_{\text{懸濁物食者の呼吸}} \quad (2.18.11)$$

$J_P^{sed,k}$: 底泥への有機リンの沈降フラックス
[molP m⁻² s⁻¹]
 $J_{PO_4}^{sed,do}$: 貧酸素状態でのリンの溶出フラックス
[molP m⁻² s⁻¹]
 $J_{MsfResp}^P$: 懸濁物食者の呼吸によるリン酸フラックス
[molP m⁻² s⁻¹]

底泥への有機リンの沈降フラックス

$J_P^{sed,k}$ [molP m⁻² s⁻¹]は、懸濁態有機物の沈降フラックスと、余剰栄養塩量を含む植物プランクトンの沈降フラックスの和で表わされる。

$$J_P^{sed,k} = J_{Pom2Det,k}^P + \sum_i^{NPHY} C_{Phy,i}^{dec,k} \cdot P_C^{PHY,i} \cdot J_{Phy2Det,i} + \sum_i^{NPHY} C_{Phy,i}^{dec,k} \cdot J_{SqLoss,i} \quad (2.18.12)$$

$J_{Pom2Det,k}^P$: POP の底泥への沈降フラックス
[molP m⁻² s⁻¹]
 $J_{SqLoss,i}$: 植物プランクトンの減少に伴う余剰栄養塩量の減少 (底面フラックス) [molP m⁻² s⁻¹]

貧酸素状態でのリンの溶出フラックス
 $J_{PO_4}^{sed,do}$ [molP m⁻² s⁻¹]は、直上水の酸素濃度が一定値以下になれば溶出し始めるものと考え、次式のように定式化を行った。

$$J_{PO_4}^{sed,do} = J_{PO_4Max} \cdot \max\left(\frac{DO_{PO_4Flux} - DO}{DO_{PO_4Flux}}, 0\right) \quad (2.18.13)$$

J_{PO_4Max} : 無酸素状態でのリン酸の最大溶出速度
[molP m⁻² s⁻¹] : パラメータ
 DO_{PO_4Flux} : リン酸が底泥から溶出する限界の溶存酸素濃度 [molO₂ m⁻³] : パラメータ

(6) 懸濁物食者による植物プランクトンの捕食

懸濁物食者による植物プランクトンの捕食
 $J_{Phy2Msf,i}$ [molC m⁻² s⁻¹]は次式のように表わされる。

$$J_{Phy2Msf,i} = -\eta_{MSF}^{PHY,i} \cdot u_{Phy2Msf,i} \cdot R_{MSF} \quad (2.18.14)$$

$\eta_{MSF}^{PHY,i}$: 植物プランクトンの選好係数[-] : パラメータ
 $u_{Phy2Msf,i}$: 植物プランクトンの選択率[-]
 R_{MSF} : 懸濁物食者の捕食速度 [molC m⁻² s⁻¹]

懸濁物食者の捕食速度 R_{MSF} [molC m⁻² s⁻¹]は次式のように定式化を行った。

$$R_{MSF} = F_{Msf} \cdot \Pi_{MSF} \cdot u_{MsfFilt} \quad (2.18.15)$$

F_{Msf} : 単位面積当たりの懸濁物食者のろ過速度
[m s⁻¹]
 Π_{MSF} : 懸濁物食者の飼料濃度 [molC m⁻³]
 $u_{MsfFilt}$: 直上水による制限関数[-]

単位面積当たりの懸濁物食者のろ過速度 F_{Msf} [m s⁻¹] は最適水温型の温度関数式(2.3.2)を用いて、次式のように定式化を行った。

$$F_{MSF} = \alpha_{MsfFeed} \cdot f_{topt}(T_{MsfOpt}, T_{MsfMax}, \beta_{Msf}) \cdot u_{MsfFeed} \cdot MSF \quad (2.18.16)$$

$\alpha_{MsfFeed}$: 懸濁物食者あたりの最大ろ過速度 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{molC}^{-1}$] : パラメータ

T_{MsfOpt} : 懸濁物食者の最適温度[°C] : パラメータ

T_{MsfMax} : 懸濁物食者の活動限界温度[°C] : パラメータ

β_{Msf} : 摂食速度の温度係数[°C⁻¹] : パラメータ

$u_{MsfFeed}$: 飼料濃度飽和の制限関数[-]

飼料濃度飽和の制限関数 $u_{MsfFeed}$ [-]は、次式のような定式化を行った。

$$u_{MsfFeed} = \min\left(1, \frac{\Pi_{MSF}^{max}}{\Pi_{MSF}}\right) \quad (2.18.17)$$

Π_{MSF}^{max} : 飽和飼料濃度[molC m^{-3}]

R_{MSF} : 懸濁物食者の捕食速度[s^{-1}]

直上水による制限関数 $u_{MsfFilt}$ [-]は、ろ過量が直上水の体積を超えないようにするための制限関数である。

$$u_{MsfFilt} = \min\left(1, \frac{\Delta V_w}{F_{Msf} \cdot \Delta S \cdot \Delta t}\right) \quad (2.18.18)$$

ΔV_w : 直上水の体積[m^3]

ΔS : 底面の面積[m^2]

Δt : 時間刻み[s]

植物プランクトンの選択率 $u_{phy2Msf,i}$ [-]はバイオマスに比例して配分するものとした。

$$u_{phy2Msf,i} = \frac{\Pi_{MSF}^{PHY,i}}{\Pi_{MSF}} \quad (2.18.19)$$

Π_{MSF} : 懸濁物食者の飼料濃度[molC m^{-3}]

$\Pi_{MSF}^{PHY,i}$: 捕食可能な植物プランクトン*i*種の飼料濃度 [molC m⁻³]

懸濁物食者の飼料濃度 Π_{MSF} [molC m^{-3}]は次式のように表わされる。

$$\Pi_{MSF} = \sum_i^{N_{PHY}} \Pi_{MSF}^{PHY,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} \Pi_{MSF}^{ZOO,j} + \sum_n^{N_{PZ}} \Pi_{MSF}^{PZ,n} + \sum_k^{N_{POM}} \Pi_{MSF}^{POM,k} \quad (2.18.20)$$

$$\Pi_{MSF}^{PHY,i} = \eta_{MSF}^{PHY,i} \cdot PHY_i \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{PHY,i}}{N_C^{MSF}}, \frac{P_C^{PHY,i}}{P_C^{MSF}}\right) \quad (2.18.21)$$

$$\Pi_{MSF}^{ZOO,j} = \eta_{MSF}^{ZOO,j} \cdot ZOO_j \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{ZOO,j}}{N_C^{MSF}}, \frac{P_C^{ZOO,j}}{P_C^{MSF}}\right) \quad (2.18.22)$$

$$\Pi_{MSF}^{PZ,n} = \eta_{MSF}^{PZ,n} \cdot PZ_n \cdot \min\left(1, \frac{N_C^{PZ,n}}{N_C^{MSF}}, \frac{P_C^{PZ,n}}{P_C^{MSF}}\right) \quad (2.18.23)$$

$$\Pi_{MSF}^{POM,k} = \min\left(POC_k, \frac{POP_k}{P_C^{MSF}}, \frac{PON_k}{N_C^{MSF}}\right) \quad (2.18.24)$$

$\eta_{MSF}^{ZOO,j}$: 動物プランクトンの選好係数[-] : パラメータ

$\eta_{MSF}^{PZ,n}$: 原生動物の選好係数[-] : パラメータ

(7) 懸濁物食者による動物プランクトンの捕食

懸濁物食者による動物プランクトンの捕食 $J_{Zoo2Msf,j}$ [$\text{molC m}^{-2} \text{s}^{-1}$]は、植物プランクトンの場合と同様に考える。

$$J_{Zoo2Msf,j} = -\eta_{MSF}^{ZOO,j} \cdot u_{Zoo2Msf,j} \cdot R_{MSF} \quad (2.18.25)$$

$u_{Zoo2Msf,i}$: 動物プランクトンの選択率[-] : パラメータ

$$u_{Zoo2Msf,j} = \frac{\Pi_{MSF}^{ZOO,j}}{\Pi_{MSF}} \quad (2.18.26)$$

(8) 懸濁物食者による原生動物の捕食

懸濁物食者による原生動物の捕食 $J_{Pz2Msf,n}$ [$\text{molC m}^{-2} \text{s}^{-1}$]は、植物プランクトンの場合と同様に考える。

$$J_{Pz2Msf,n} = -\eta_{MSF}^{PZ,n} \cdot u_{Pz2Msf,n} \cdot R_{MSF} \quad (2.18.27)$$

$u_{Pz2Msf,n}$: 原生動物の選択率[-]

$$u_{Pz2Msf,n} = \frac{\Pi_{MSF}^{PZ,n}}{\Pi_{MSF}} \quad (2.18.28)$$

(9) 懸濁物食者による懸濁態有機物の摂食

懸濁物食者による懸濁態有機物の摂食 $J_{Pom2Msf,k}$ [$\text{molC m}^{-2} \text{s}^{-1}$]は、植物プランクトンの場合と同様に考える。

$$J_{Pom2Msf,k} = -u_{Pom2Msf,k} \cdot R_{MSF} \quad (2.18.29)$$

$u_{Pom2Msf,k}$: 懸濁態有機物の選択率[-]

$$u_{Pom2Msf,k} = \frac{\Pi_{MSF}^{POM,k}}{\Pi_{MSF}} \quad (2.18.30)$$

(10) 懸濁物食者の呼吸

懸濁物食者の呼吸によるフラックス (酸素, 窒素, リン) $J_{MsfResp}^{O_2}$ [$\text{molO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$], $J_{MsfResp}^N$ [$\text{molN m}^{-2} \text{s}^{-1}$], $J_{MsfResp}^P$ [$\text{molP m}^{-2} \text{s}^{-1}$]は、以下のように表わされる。

$$J_{MsfResp}^{O_2} = -TOD_{Msf} \cdot B_{MsfResp}^C \quad (2.18.31)$$

$$J_{MsfResp}^N = N_C^{MSF} \cdot B_{MsfResp}^C \quad (2.18.32)$$

$$J_{MsfResp}^P = P_C^{MSF} \cdot B_{MsfResp}^C \quad (2.18.33)$$

TOD_{Msf} : 懸濁物食者の炭素量に対する酸素要求量 [$\text{molO}_2 \text{molC}^{-1}$] : パラメータ

N_C^{MSF} : 懸濁物食者の N/C 比[molN molC⁻¹] : パラメータ

P_C^{MSF} : 懸濁物食者の P/C 比[molP molC⁻¹] : パラメータ

$B_{MsfResp}^C$: 懸濁物食者の呼吸[molC m⁻² s⁻¹]

懸濁物食者の呼吸 $B_{MsfResp}^C$ [molC m⁻² s⁻¹]は、静止呼吸と活動呼吸を考え、次式のように定式化を行った。

$$B_{MsfResp}^C = \underbrace{B_{MsfRespR}^C}_{\text{静止呼吸}} + \underbrace{B_{MsfRespA}^C}_{\text{活動呼吸}} \quad (2.18.34)$$

$B_{MsfRespR}^C$: 懸濁物食者の静止呼吸[molC m⁻² s⁻¹]

$B_{MsfRespA}^C$: 懸濁物食者の活動呼吸[molC m⁻² s⁻¹]

懸濁物食者の静止呼吸 $B_{MsfRespR}^C$ [molC m⁻² s⁻¹]は次式のように定式化を行った。

$$B_{MsfRespR}^C = f_{temp}(\alpha_{MsfRespR}, \beta_{Msf}) \cdot f_{MM}(DO, K_{MsfResp}^{BDO}) \cdot MSF \quad (2.18.35)$$

$\alpha_{MsfRespR}$: 静止呼吸速度[s⁻¹] : パラメータ

DO : 直上水の溶存酸素濃度[molO₂ m⁻³]

$K_{MsfResp}^{BDO}$: 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

懸濁物食者の活動呼吸 $B_{MsfRespA}^C$ [molC m⁻² s⁻¹]は、捕食に比例する定式化を行った。

$$B_{MsfRespA}^C = \alpha_{MsfRespA} \cdot R_{MSF} \cdot MSF \quad (2.18.36)$$

$\alpha_{MsfRespA}$: 懸濁物食者の捕食に対する活動呼吸の割合[-] : パラメータ

3. 伊勢湾への適用例

本研究で開発されたモデルの現地適用例として、伊勢湾・三河湾（以下、本研究では両者を合わせて「伊勢湾」と呼ぶ）の計算を行った。計算対象の期間は 2004 年 1 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日までの 5 年間とした。

3.1 境界条件

(1) 気象データ

気温・気圧・日射量・降雨量は名古屋気象台の観測値（気象庁, web1）を用いて、空間的に一様に与えた。大気放射量は二宮ら（1996）の方法を用いて名古屋気象台のデータから推測した。

風向風速は伊勢湾周囲にある気象観測所（名古屋、蒲郡、伊良湖、亀山、桑名、小俣、東海、豊橋、津、四日市、中部国際空港、南知多、鳥羽）（気象庁, web1）から、

風速データをメッシュ上の各点へ空間補間して用いた。具体的には、桑形・近藤(1990, 1991)による各アメダス局の方向別粗度をもとに海面上 100m での風速に補正し、分散を 50m² とした正規分布による距離に応じた重み付けを行って、各メッシュ上に空間補間した。その 100m 風速から、海面粗度を 0.001m と仮定して、海面上 10m 風速を推定した。

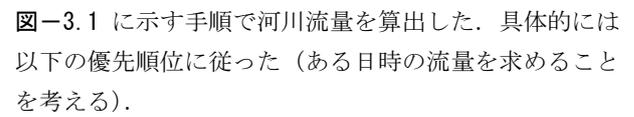
なお、気象データは 1 時間間隔のデータを使用し、風速以外の欠測値は前後の観測値から線形補間した。

(2) 河川流入量

河川流入としては一級河川とその他主要河川を考慮した。まず、一級河川での流量の設定方法について述べる。

a) 一級河川の流量の設定方法

伊勢湾に流入する一級河川は計 10 河川である。一級河川の流量と水位は国土交通省の水文水質データベース（国土交通省河川局, web）で毎時データとして公開されている。ただし、水位・流量ともに欠測や未確定となっている場合が多く、そのままではデータが不十分である。

そこで、各一級河川について水位と流量データがある河口に近い観測所（これを基準観測所とする）を整理し、 図-3.1 に示す手順で河川流量を算出した。具体的には以下の優先順位に従った（ある日時の流量を求めることを考える）。

i) 流量データ (Q とする) があればそれを利用する。

ii) 同時刻の水位データ (H とする) があれば、水位-流量曲線 (H-Q 曲線) を作成しておき、H-Q 曲線と水位から、水位を算出する。なお、H-Q 曲線は同じ年の水位と流量データから作成されるが、その年の水位と流量データが揃っていなければ、前後の年での H-Q 曲線を利用する。

iii) その時刻の水位は欠測しているが、同じ日に水位データがある場合は、その日の平均水位を算出し、日平均水位から H-Q 曲線を使って流量を算出する。

iv) この段階以後は 1 日以上 の長期間にわたって水位・流量ともに欠測している場合である。その中でも、同じ河川水系で別の水位・流量観測所（第 2 観測所と呼ぶ）で流量 (Q' とする) を測定できている場合は、第 2 観測所の流量と基準観測所の流量 (Q) との関係式 (Q' -Q 曲線) から、流量を算出する。なお、Q' -Q 曲線は 2004 ~2008 年のデータを使って求めた。

v) 第 2 観測所の水位データ (H' とする) があれば、その水位データから、第 2 観測所の流量データによる水位-流量曲線 (H' -Q' 曲線) から流量 (Q') を算出す

る. その第2観測所の流量から, 前述の Q' - Q 曲線より, 流量を算出する.

vi) 上記までで伊勢湾のほぼ全一級河川の流量が推定可能であるが, 宮川のみに関しては, 基準観測所となる岩出の他に水位と流量を計測している観測所がない. そこで, 第2観測所(宮川では度会川)の水位(H')と, 基準観測所(岩出)の流量(Q)から, H' - Q 曲線を作成し, 流量を算出した.

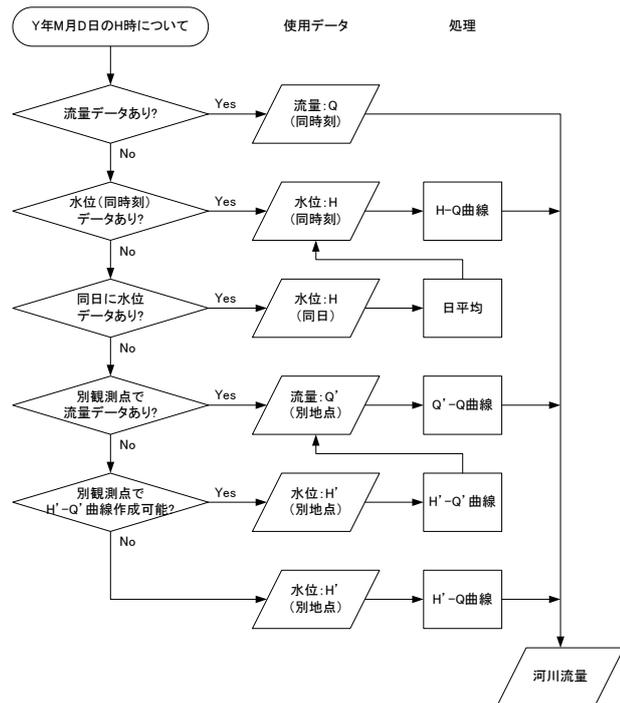


図-3.1 一級河川の流量設定方法

表-3.1 に各河川で使用した観測所とデータの整備状況を示す. なお, 水文水質データベース(国土交通省河川局, web)の水位・流量データの整備状況については, あくまでも2010年11月現在の状況であることに注意されたい.

b) 一級河川の水質の設定方法

水温は水文水質データベース(国土交通省河川局, web)のテレメータ観測所があればその値を用いて, データがない河川ではそれ以外の河川水温の平均値を用いた.

水質項目については, (3.1.1)式の流量-負荷量の関係式(L-Q 曲線)をCOD・TN・TPのそれぞれについて求め, COD・TN・TPから各態の有機物・栄養塩へ配分することとした.

$$L = aQ^b \quad (3.1.1)$$

L: 河川からの負荷量[$g s^{-1}$]

Q: 河川流量[$m^3 s^{-1}$]

a, b: パラメータ

COD・TN・TPの水質については, 公共用水域水質観測が各自治体で行われており, 環境数値データベース(国立環境研究所, web)でデータベースとして集約されているため, それを使用した. 流量は前述の方法で算出した2004~2008年の流量を日平均した値を使用して, L-Q 曲線を作成した. 表-3.2 に各一級河川のL-Q 曲線のパラメータと水質観測点を示す. また, 表-3.3 に各一級河川のL-Q 曲線のグラフを, 既往の文献値(江里口, 2001; いであ, 2008)とともに示す. 本研究で得られたL-Q 曲線は既往の結果と概ね一致していた. 河川負荷(COD・TN・TP)の分画はいであ(2008)を参考に, 表-3.4のように設定した.

ケイ酸(SiO_2)に関しては観測値自体がほとんど見当たらない. そこで, 児玉ら(2006)が矢作川の下流部で2000~2003年に溶存態ケイ素を計測していたので, その観測グラフ(Fig. 5)から, L-Q 曲線のパラメータを推定した(図-3.2). 他の河川でも同じパラメータを用いた(表-3.2). その他の水質項目として, DOは飽和値を与え, 微生物(細菌・植物プランクトンなど)は0とした.

表-3.4 河川流入負荷の分画(by weight)

分画	割合	分画	割合
DIP/TP	0.54	PCOD/COD	0.23
POP/(POP+DOP)	0.68	POC/PCOD	0.86
DIN/TN	0.73	DOC/DCOD	0.93
NH_4 /DIN	0.42	易分解性	0.5
NO_3 /(NO_2+NO_3)	0.97	準易分解性	0.3
		難分解性	0.2

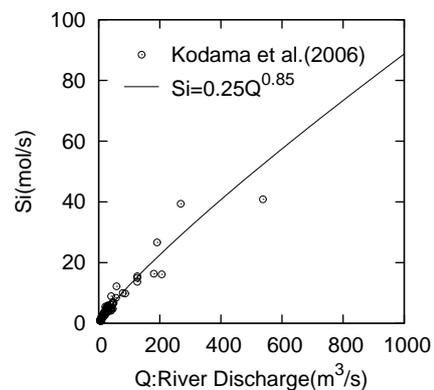


図-3.2 矢作川の溶存態ケイ酸のL-Q 曲線(児玉ら, 2006)

表-3.1 一級河川の流量設定に利用した観測所とデータの整備状況（国土交通省河川局，web）：○は全データあり，△は丸一日未満の欠測，▲は丸一日以上の欠測，×はほぼ全データ欠測，空白は流量算出に不必要な部分を示す。

河川	基準観測所												第2観測所				
	揖斐川	揖斐川	揖斐川	木曾川	庄内川	長良川	豊川	矢作川	櫛田川	雲出川	鈴鹿川	鈴鹿川	宮川	木曾川	長良川	雲出川	宮川
観測所	烏江	高瀬	万石	笠松	枇杷島	墨俣	当古	米津	櫛田橋	雲出橋	河原田	高岡	岩出	犬山	穂積	舞出	度会橋
2003	水位					▲											
	流量					○											
2004	水位	▲	○	△	▲	○	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	流量	▲	○	△	▲	○	×	○	○	▲	▲	○	△	○	▲	×	×
2005	水位	▲	○	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	▲	○			○
	流量	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2006	水位	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	▲		
	流量	▲	×	○	○	○	▲	×	×	○	○	○	○	○	▲	▲	▲
2007	水位	▲	○	○	○	○	▲	△	○	▲	△	○	△	○		△	
	流量	▲	×	○	○	×	▲	○	○	○	▲	△	▲	△	▲	△	×
2008	水位	▲	△	△	○	○	○	△	△	△	▲	△	△	△	△		○
	流量	▲	×	○	○	○	×	○	○	○	▲	▲	▲	△	▲	▲	○

表-3.2 一級河川のL-Q曲線に利用した観測所とパラメータ： $L = aQ^b$, $Q[m^3 s^{-1}]$

河川	観測所	COD[g s ⁻¹]		TN[g s ⁻¹]		TP[g s ⁻¹]		SiO ₂ [molSi s ⁻¹]	
		a	b	a	b	a	b	a	b
長良川	伊勢大橋	7.1073	0.7764	2.6941	0.7974	0.1168	0.8144	0.250	0.850
揖斐川	伊勢大橋	4.4067	0.8521	1.2870	0.9603	0.1594	0.7781	0.250	0.850
木曾川	横満蔵	3.3924	0.9490	0.2890	1.1281	0.0304	0.9838	0.250	0.850
矢作川	米津大橋	3.1461	0.9393	2.1428	0.7697	0.1029	0.7935	0.250	0.850
庄内川	枇杷島橋	46.3037	0.4018	11.8833	0.4886	1.1958	0.3346	0.250	0.850
豊川	当古橋	2.1510	0.9619	2.0925	0.8349	0.0206	1.0514	0.250	0.850
鈴鹿川	小倉橋	3.2580	0.8847	2.9660	1.1042	0.0675	0.9080	0.250	0.850
雲出川	雲出橋	2.8904	0.9746	1.1374	1.0154	0.0335	0.8814	0.250	0.850
櫛田川	櫛田橋	1.7370	1.0229	0.8795	1.0215	0.0138	1.0849	0.250	0.850
宮川	度会橋	0.7001	1.1066	0.7804	0.9485	0.0049	1.2372	0.250	0.850

表-3.3 各一級河川のL-Q曲線(1)

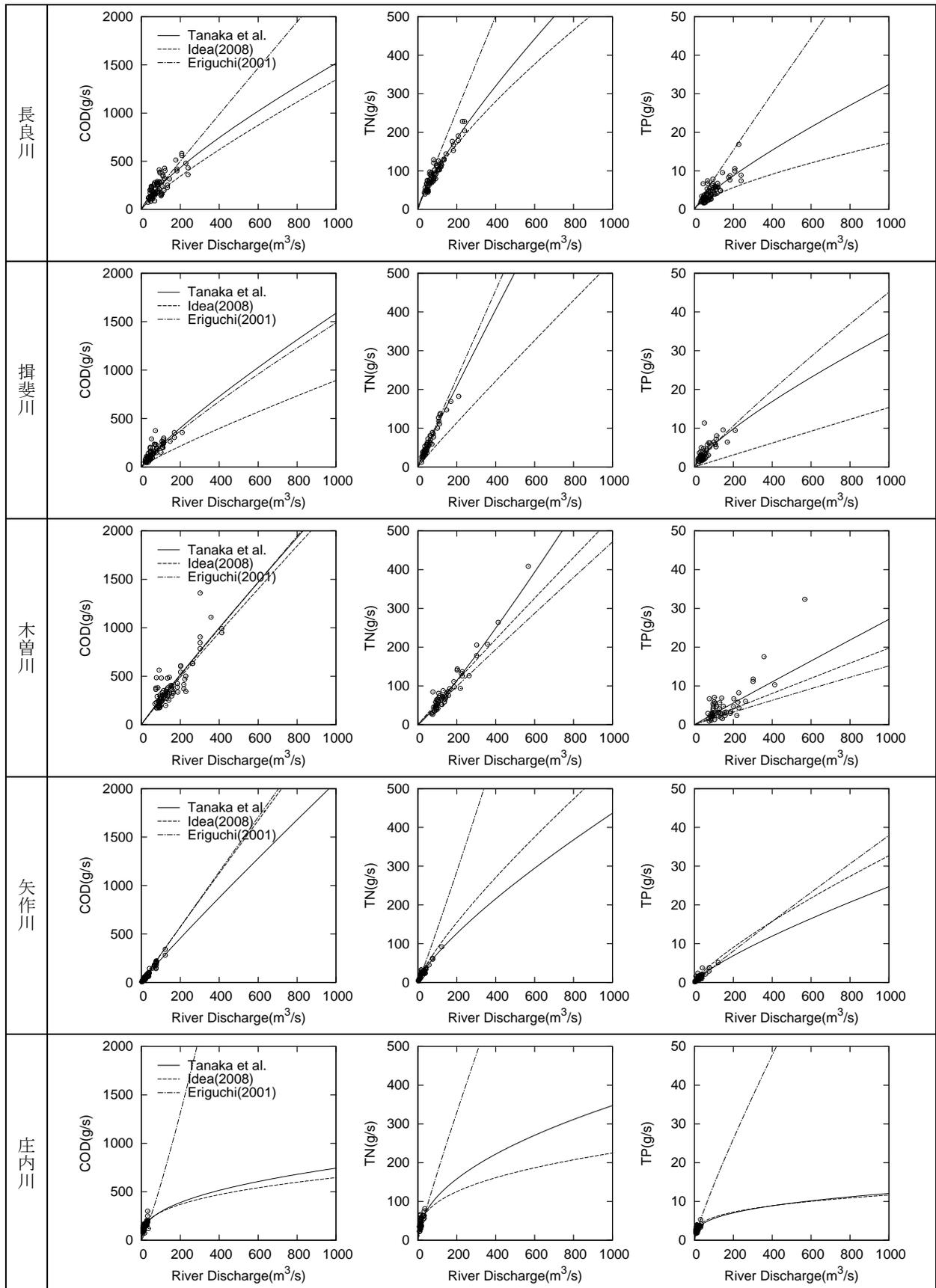


表-3.3 各一級河川のL-Q曲線(2)

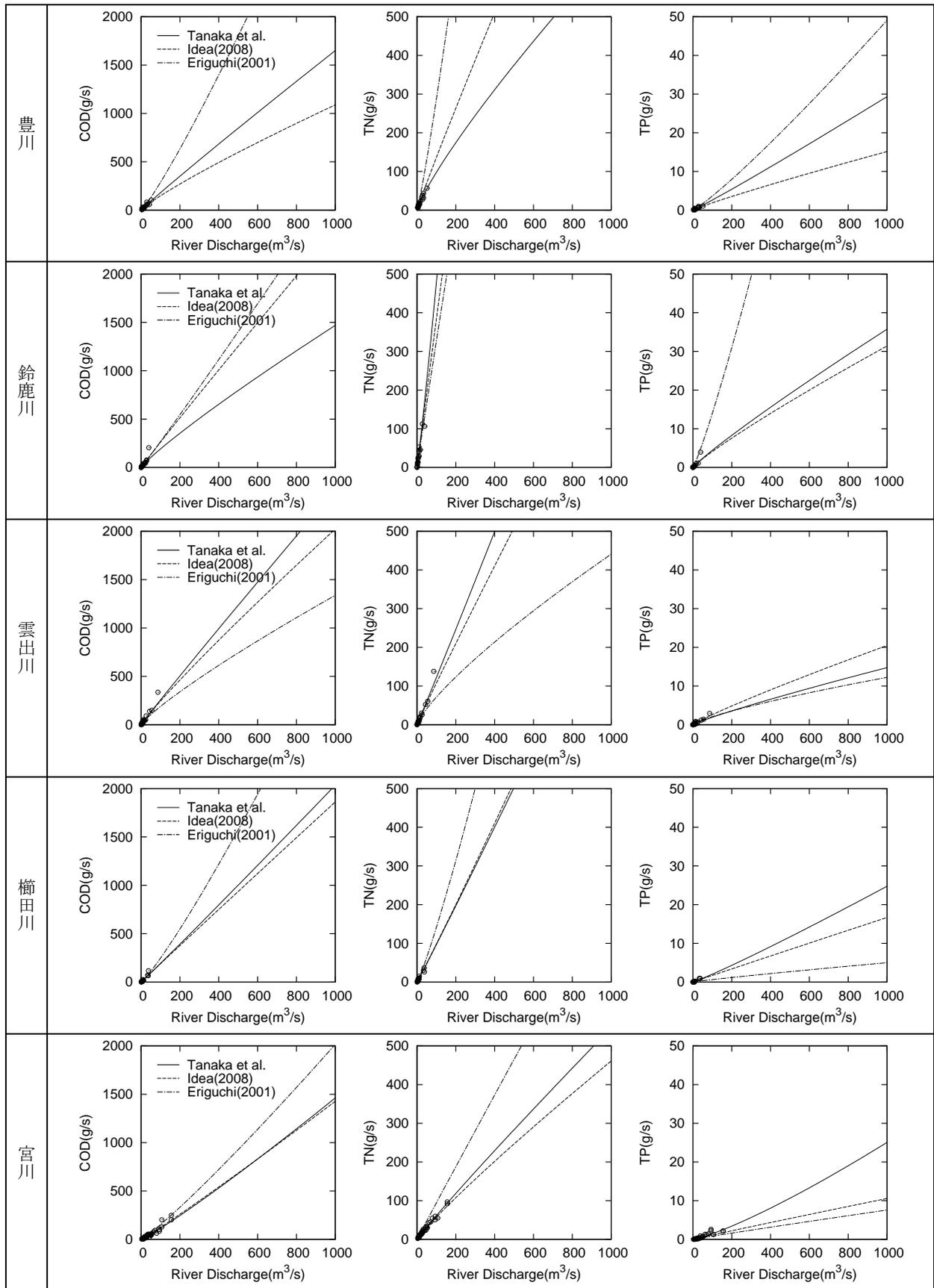


表-3.5 中小河川の観測地点および流量・水温：データで○は流量データあり，×はデータ無し．相関は近隣の一級河川との流量相関関係で，**は有意水準 1%以下，*は有意水準 5%以下，×は有意水準 5%以上（相関なし）．

水域名称	観測地点の名称	近隣の 一級河川	流量： $Q_B = aQ_A^b$ [$m^3 s^{-1}$]					水温： $T = aT_{air} + b$ [°C]	
			データ	相関	a	b	平水流量	a	b
志登茂川	江戸橋	雲出川	○	×	—	—	4.75	0.9093	0.4106
安濃川	御山荘橋	雲出川	○	×	—	—	1.15	0.8415	0.7498
岩田川	観音橋	雲出川	○	×	—	—	2.10	0.8580	1.1791
阪内川	荒木橋	櫛田川	○	**	0.1245	1.1218	0.75	0.8757	0.5703
金剛川	昭和橋	櫛田川	○	×	—	—	0.55	0.9415	-1.3592
笹笛川	八木戸橋	櫛田川	○	×	—	—	1.70	0.8608	0.4158
外城田川	野依橋	宮川	○	×	—	—	2.00	0.8227	0.8984
勢田川	勢田大橋	宮川	×	—	—	—	—	0.8040	2.9826
五十鈴川	堀割橋	宮川	○	×	—	—	1.20	0.7634	1.6085
加茂川	野畑井堰	宮川	○	**	0.2746	0.3939	1.10	0.8144	0.1840
朝明川	朝明大橋	揖斐川	○	×	—	—	0.65	0.8133	2.1992
員弁川	日の出橋	揖斐川	○	*	1.1395	0.4139	8.45	0.7759	2.1751
三滝川	三滝橋	鈴鹿川	×	—	—	—	—	0.7164	3.9410
中の川	木鎌橋	鈴鹿川	○	×	—	—	0.90	0.9310	-0.4718
海蔵川	新開橋	鈴鹿川	×	—	—	—	—	0.7097	4.2780
天白川（三重）	大井の川橋	鈴鹿川	×	—	—	—	—	0.6656	7.0091
金沢川	千代崎樋門	鈴鹿川	○	×	—	—	2.35	0.8351	1.8864
荒子川	荒子川ポンプ所	庄内川	×	—	—	—	—	0.8955	1.4450
中川運河	東海橋	庄内川	×	—	—	—	—	0.8141	2.8407
堀川	港新橋	庄内川	×	—	—	—	—	0.6159	8.0502
山崎川	道德橋	庄内川	×	—	—	—	0.14	0.6398	8.5839
天白川（愛知）	千鳥橋	庄内川	×	—	—	—	2.36	0.6996	6.1974
日光川	日光大橋	庄内川	○	**	12.3795	0.3187	33.27	0.7938	3.2918
新川（名古屋）	萱津橋	庄内川	○	×	—	—	32.83	0.7144	4.7083
梅田川	飛越橋	豊川	○	**	0.1736	0.2411	0.30	0.7667	3.9875
音羽川	剣橋	豊川	○	**	0.0677	0.8226	0.53	0.7226	2.7191
白川	新白川橋	豊川	○	**	0.2243	0.3708	0.64	0.5921	6.6459
佐奈川	柳橋	豊川	○	**	0.1258	0.5919	0.53	0.6212	7.8492
柳生川	柳生橋	豊川	○	**	0.1207	0.3912	0.32	0.8334	2.9278
汐川	船倉橋	矢作川	○	×	—	—	1.29	0.9300	0.3124
境川	境大橋	矢作川	○	×	—	—	2.88	0.8624	0.2329
逢妻川	境大橋	矢作川	○	×	—	—	9.78	0.8070	1.0907
猿渡川	三ッ叉橋	矢作川	○	×	—	—	1.68	0.7771	2.4081
高浜川	高浜橋	矢作川	○	×	—	—	3.56	0.8108	2.0623
新川（衣浦）	水門橋	矢作川	○	×	—	—	3.61	0.8629	0.8836
阿久比川	半田大橋	矢作川	○	×	—	—	3.07	0.8740	0.8825
矢作古川	古川頭首工	矢作川	○	**	0.1807	0.6509	2.04	0.8689	0.5965
鹿乗川	米津小橋	矢作川	○	×	—	—	2.15	0.8018	1.3838

c) 中小河川の流量の設定方法

一級河川と同様に，中小河川についても公共用水域水質観測が毎月行われている（国立環境研究所，web）．ここでは，表-3.5 に示す 38 河川について取り扱った．

流量は図-3.3 に示す手順で算出を行った．具体的には以下の優先順位に従った．使用した中小河川データは 1990～2008 年である．

- i) 全期間（1990～2008 年）において流量データがなかった場合，その河川は無視する．
- ii) 流量観測値がある河川については，観測流量（ Q_B ）と，一級河川の日平均流量（ Q_A ）から，(3.1.2)式の Q_B-Q_A 曲線の相関を調べた．両者の相関が有意水準 5%以下であれば， Q_B-Q_A 曲線から流量を算出した．なお，一級河川の日平均流量は，2003 年以前については雨量・流量年表データベース（日本河川協会，2007）の流量，2004 年以後については水文水質データベースの観測値（国土交通省河川局，web）を用いた．
- iii) 該当月に流量観測値がある場合は，その値を該当月で一定値として用いた．
- iv) 該当月に流量観測値がない場合は，全期間（1990～2008）流量観測値の中央値を流量に用いた．

$$Q_B = aQ_A^b \quad (3.1.2)$$

Q_B : 中小河川流量 [$m^3 s^{-1}$]
 Q_A : 近隣の一級河川流量 [$m^3 s^{-1}$]
 a, b : パラメータ

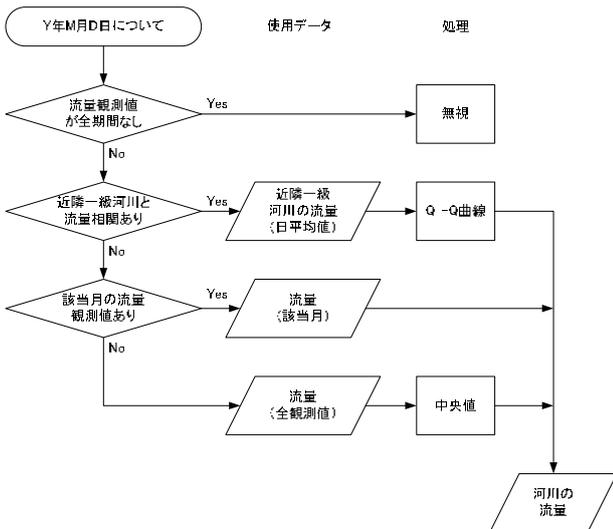


図-3.3 中小河川の流量設定フロー

d) 中小河川の水質の設定方法

水温については，水温の観測値と気温の観測値から，

(3.1.3)式の回帰直線を推定し，気温から算出した．

$$T_w = aT_{air} + b \quad (3.1.3)$$

T_w : 河川の水温 [$^{\circ}C$]
 T_{air} : 気温 [$^{\circ}C$]
 a, b : パラメータ

中小河川の水質については，図-3.4 の手順に従って設定した．具体的には以下の優先順位に従って水質（COD・TN・TP）を求め，一級河川と同様に表-3.4 の比率で各分画の水質を算出した．

- i) 該当月の水質観測値がある場合は，その値を使用した．
 - ii) 該当年の水質観測値がある場合は，水質の年平均値を用いた．
 - iii) 該当年の水質観測値がない場合は，全期間（1990～2008 年）の平均値を用いた．
- ケイ酸については，一級河川と同じく矢作川の L-Q 曲線を用いて算出した．その他，D0 は飽和値を与え，微生物（細菌・植物プランクトンなど）は 0 とした．

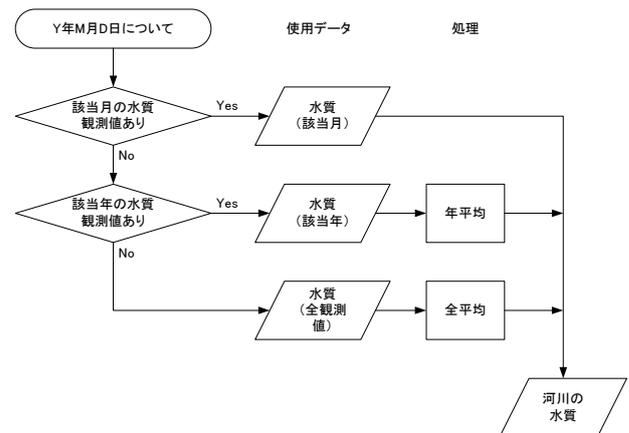


図-3.4 中小河川の水質設定フロー

e) 河川流入負荷量

一級河川と中小河川からの流入負荷量の時系列変化を図-3.5 に，および 2004～2008 年の平均負荷量を表-3.6 に示す．中小河川は一級河川と比べて，流量は 17%であるが，水質が比較的悪いために COD・TN・TP の負荷量は一級河川と同程度のオーダーであり，特に TP は一級河川の負荷量よりも高かった．

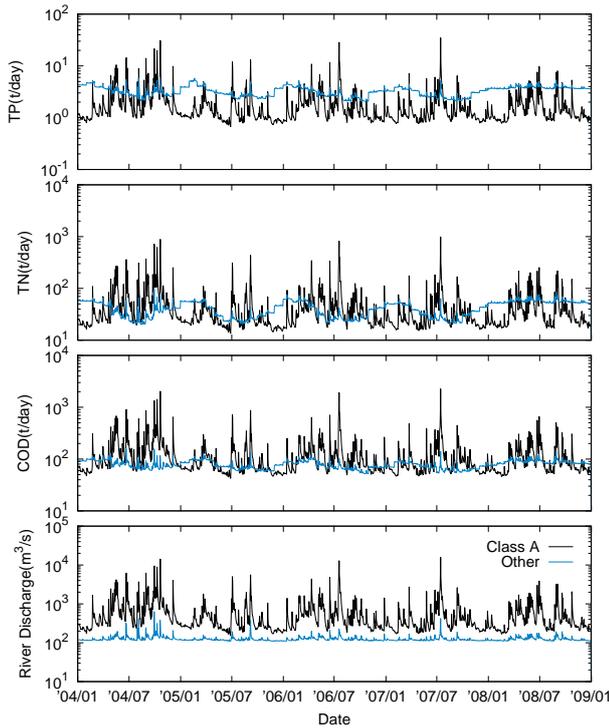


図-3.5 伊勢湾に流入する一級河川 (class A) と中小河川 (Other) の流量と COD, TN, TP 負荷量の時系列変化

表-3.6 伊勢湾・三河湾に流入する一級河川と中小河川の流量と COD, TN, TP 負荷量 (2004~2008 年の平均値)

項目	一級河川	中小河川	中小河川の比率[%]
流量[m ³ s ⁻¹]	602.7	125.6	17.2
COD[t day ⁻¹]	120.8	78.9	39.5
TN[t day ⁻¹]	46.0	41.8	47.6
TP[t day ⁻¹]	1.9	3.3	63.6

(3) 開境界条件

a) 潮位

境界条件として、外洋で長周期成分を含む主要 14 分潮 (Sa, Ssa, Mm, MSf, Mf, Q₁, O₁, P₁, S₁, K₁, N₂, M₂, S₂, K₂) の潮汐を与えた。潮汐の振幅と位相については各検潮所の調和定数に適合するように調整した(海上保安庁, 1992)。ただし、長周期成分 (Sa, Ssa, Mm, MSf, Mf) の位相は、既往の解析結果では検潮所間での差が大きいため、全検潮所に適合させることは困難である。よって、長周期成分については、鬼崎の 2004 年~2009 年の潮位データ (気象庁, web2) を調和分解し、得られた調和定数と適合するように開境界の調和定数を決定した。開境界 (伊良湖水道沖約 25km) で与えた潮汐の調和定数を表

-3.7 に示す。

なお、開境界での流速は直交する方向 (南北方向) の勾配を 0 とするノイマン条件とした。

表-3.7 開境界で与えた潮汐の調和定数

分潮	振幅 (cm)	位相 (deg)	分潮	振幅 (cm)	位相 (deg)
Sa	12.0	148.2	P ₁	7.2	175.8
Ssa	2.4	39.9	S ₁	0.7	4.4
Mm	1.1	112.5	K ₁	22.0	179.7
MSf	0.9	76.2	N ₂	7.8	156.8
Mf	0.9	136.8	M ₂	43.7	162.9
Q ₁	3.5	149.3	S ₂	19.9	185.6
O ₁	16.5	155.3	K ₂	5.5	183.4

b) 水質

開境界での水温・塩分は愛知水産試験場の海幸丸による定線観測データを用いた。使用した観測地点は A10 (緯度: 34 度 22.5 分, 経度: 137 度 12.5 分) であり、毎月 1 回の頻度で計測されている。それを鉛直方向に直線補間し、水平方向には一様、時間的には直線補間で与えた。A10 での水深 0, 50, 100m の水温・塩分データについて、図-3.6 に示す。

栄養塩などの水質項目については、いであ(2008)の設定値を参考に、COD: 2.5 [mg L⁻¹], TN: 0.4 [mg L⁻¹], TP: 0.043 [mg L⁻¹], SiO₂: 0.12 [mol Si m⁻³] を一定値で与えた。分画比を表-3.8 に示す。

その他の水質項目として、DO は飽和値を与え、微生物 (細菌・植物プランクトンなど) は 0 とした。

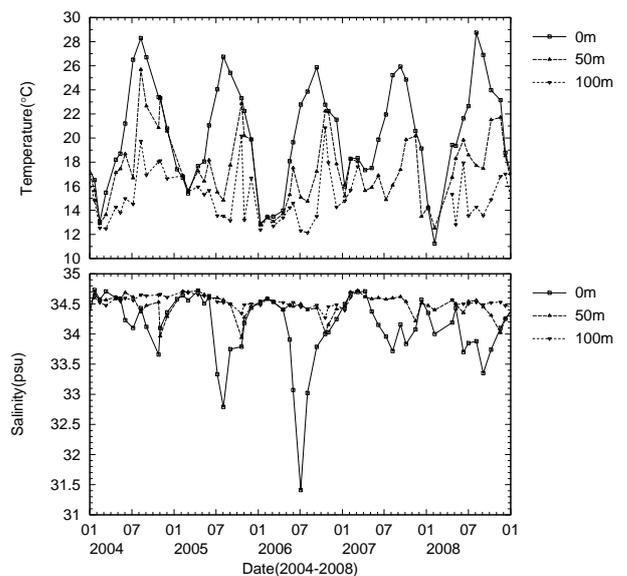


図-3.6 開境界条件に使用した水温・塩分データ

表-3.8 開境界条件での負荷の分画 (by weight)

分画	割合	分画	割合
DIP/TP	0.72	POC/COD	0.23
POP/(POP+DOP)	0.49	DOC/COD	0.88
DIN/TN	0.26	易分解性	0.5
NH ₄ /DIN	0.37	準易分解性	0.3
NO ₃ /(NO ₂ +NO ₃)	0.97	難分解性	0.2

3.2 計算条件

(1) 計算メッシュ

水平方向の計算メッシュは 2km 正方格子とし、40×32 メッシュとした (図-3.7)。水深データは鉛直方向のメッシュは 28 層に区切った。鉛直方向のメッシュ区切り位置はそれぞれ、-100, -70, -50, -41, -39, -37, -35, -33, -31, -29, -27, -25, -23, -21, -19, -17, -15, -13, -11, -9, -7, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 5 である (単位 m, 鉛直上向きを正, 平均水面は 0m)。

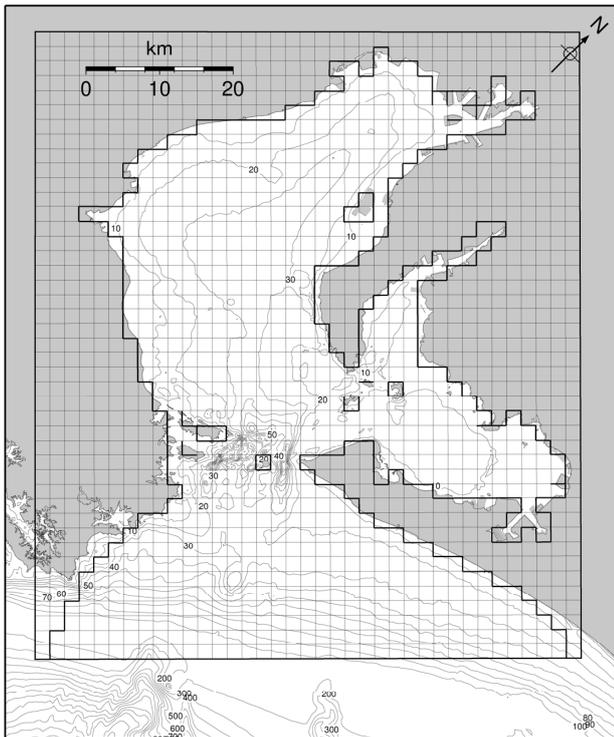


図-3.7 伊勢湾の計算メッシュ

(2) 流動モデルのパラメータ

流動モデルのパラメータおよび設定条件を表-3.9 に示す。各パラメータの詳しい説明については田中・鈴木 (2010) を参照されたい。

表-3.9 流動モデルのパラメータ

項目	設定値
時間刻み	150 [s]
コリオリパラメータ	$8.5208 \times 10^{-5} [s^{-1}]$
水平方向の乱流モデル (渦動粘性係数)	SGS 乱流モデル $C_s = 0.12$
水平方向の乱流シュミット数	0.9 [-]
水平方向の乱流プラントル数	0.9 [-]
鉛直方向の乱流モデル (渦動粘性係数)	Munk-Anderson モデル $\nu_{v0} = 5.0 \times 10^{-4} [m^2 s^{-1}]$, $\alpha_v = -1, \beta_v = 5.2$
鉛直方向の乱流モデル (渦動拡散係数)	Munk-Anderson モデル $D_{v0} = 1.0 \times 10^{-4} [m^2 s^{-1}]$, $\alpha_d = -3/2, \beta_d = 10/3$
TVD スキーム	水平方向: $\kappa = 1/3$ 鉛直方向: $\kappa = 1.0$
水面の摩擦係数	本多・光易 (1980)
海底面の摩擦係数	0.0026 [-]
水面のアルベード	0.07 [-]

(3) 浮遊生態系モデルのパラメータ

伊勢湾の計算に適用した浮遊生態系モデルの生物構成を図-3.8 に示す。植物プランクトンはサイズの大きい順に、珪藻・渦鞭毛藻・独立栄養性微小鞭毛虫 (Autotrophic nanoflagellate; ANF)・シアノバクテリアの 4 種類に分類した。なお、シアノバクテリアは生物学的には細菌であるが、光合成を行うため、ここでは植物プランクトンに含めた。原生動物は繊毛虫と従属栄養性微小鞭毛虫 (Heterotrophic nanoflagellate; HNF) の 2 種類に分類した。好気性細菌は 1 種類とした。動物プランクトンは 1 種類とし、POM・珪藻・渦鞭毛藻・繊毛虫を捕食する、ろ過食性動物プランクトンとした。

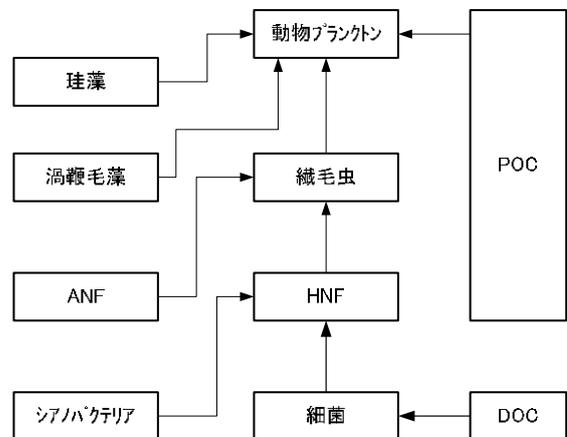


図-3.8 浮遊生態系モデルで設定した生物構成: 矢印は捕食・被食の関係を表わす。

表-3.10 植物プランクトンに関わるパラメータ

記号	定義[単位]	珪藻	渦鞭毛藻	ANF	シアバクテリア	参考文献
$\alpha_{PhyPs,i}$	0°Cでの最大光合成速度[s ⁻¹]	4.78×10^{-6}	6.83×10^{-6}	1.71×10^{-5}	2.87×10^{-5}	T, 1), T, T
$\beta_{Phy,i}$	植物プランクトンの温度活性係数[°C ⁻¹]	6.33×10^{-2}	6.33×10^{-2}	6.33×10^{-2}	6.33×10^{-2}	1)
$I_{opt,i}$	植物プランクトンの最適光量[W m ⁻²]	72.6	99.07	99.07	99.07	2), 3), 3), 3)
$\alpha_{PhyPsNut,i}$	光合成に対する余剰栄養塩の制限比[-]	0.2	0.2	0.2	0.2	T
$\alpha_{PhyExt,i}$	光合成に対する細胞外分泌の割合[-]	0.135	0.135	0.135	0.135	4)
$\beta_{PhyExt,i}$	細胞外分泌割合のクロフィル係数 [L µg ⁻¹]	2.01×10^{-3}	2.01×10^{-3}	2.01×10^{-3}	2.01×10^{-3}	4)
$\alpha_{PhyResp,i}$	0°Cでの最大呼吸速度[s ⁻¹]	3.47×10^{-7}	3.47×10^{-7}	3.47×10^{-7}	3.47×10^{-7}	2)
$\beta_{PhyResp,i}$	呼吸速度の温度活性係数[°C ⁻¹]	5.24×10^{-2}	5.24×10^{-2}	5.24×10^{-2}	5.24×10^{-2}	2)
$K_{PhyResp}^{DO}$	呼吸に対する溶存酸素の半飽和定数 [molO ₂ m ⁻³]	6.25×10^{-2}	6.25×10^{-2}	6.25×10^{-2}	6.25×10^{-2}	T
$\alpha_{PhyLoss,i}$	自然死亡速度[m ³ molC ⁻¹ s ⁻¹]	5.00×10^{-6}	1.78×10^{-5}	1.08×10^{-4}	5.47×10^{-4}	T
$UP_{max,i}$	最大リン摂取速度[s ⁻¹]	4.63×10^{-5}	4.63×10^{-5}	4.63×10^{-5}	4.63×10^{-5}	5)
$K_{PhyTake,i}^{PO_4}$	リン摂取の半飽和定数[molP m ⁻³]	1.00×10^{-3}	3.00×10^{-3}	3.00×10^{-3}	3.00×10^{-3}	6)
$PQP_{max,i}$	最大細胞内リン保持量のサブシテントクオタに対する比[-]	2.0	2.0	2.0	2.0	T
$UN_{max,i}$	最大窒素摂取速度[s ⁻¹]	2.08×10^{-5}	2.08×10^{-5}	2.08×10^{-5}	2.08×10^{-5}	5)
$K_{PhyTake,i}^{NH_4}$	アンモニア摂取の半飽和定数[molN m ⁻³]	1.50×10^{-3}	5.00×10^{-3}	5.00×10^{-3}	5.00×10^{-3}	6)
$K_{PhyTake,i}^{NO_2}$	亜硝酸摂取の半飽和定数[molN m ⁻³]	1.50×10^{-3}	5.00×10^{-3}	5.00×10^{-3}	5.00×10^{-3}	7)
$K_{PhyTake,i}^{NO_3}$	硝酸摂取の半飽和定数[molN m ⁻³]	1.50×10^{-3}	5.00×10^{-3}	5.00×10^{-3}	5.00×10^{-3}	7)
$PQN_{max,i}$	最大細胞内窒素保持量のサブシテントクオタに対する比[-]	2.0	2.0	2.0	2.0	T
$\Psi_{PhyTake,i}$	アンモニアによる硝酸摂取の抑制係数 [m ³ molN ⁻¹]	1.462×10^3	1.462×10^3	1.462×10^3	1.462×10^3	8)
$w_{PhyConst,i}$	定常な沈降速度[m s ⁻¹]	0	0	0	0	
$w_{PhyUp,i}$	日周期鉛直移動の上昇速度[m・s ⁻¹]	0	0	0	0	
$w_{PhyDown,i}$	日周期鉛直移動の下降速度[m・s ⁻¹]	0	0	0	0	
$T_{PhyStart,i}$	上昇を始める時刻[hour]	0	0	0	0	
$T_{PhyEnd,i}$	上昇を終わる時刻[hour]	0	0	0	0	
$N_C^{PHY,i}$	植物プランクトンのサブシテントクオタの N/C [molN molC ⁻¹]	1.33×10^{-1}	1.33×10^{-1}	1.33×10^{-1}	1.33×10^{-1}	6)
$P_C^{PHY,i}$	植物プランクトンのサブシテントクオタの P/C [molP molC ⁻¹]	6.67×10^{-3}	6.67×10^{-3}	6.67×10^{-3}	6.67×10^{-3}	6)
$Si_C^{PHY,i}$	植物プランクトンのサブシテントクオタの Si/C [molSi molC ⁻¹]	1.30×10^{-1}	0	0	0	9)
$TOD_C^{PHY,i}$	植物プランクトンの O ₂ /C[molO ₂ molC ⁻¹]	1.27	1.27	1.27	1.27	(2.16.3)式
$CHL_C^{PHY,i}$	植物プランクトンの Chl. -a/C [µg L ⁻¹ (molC m ⁻³) ⁻¹]	187.5	187.5	187.5	187.5	10)より
$C_{PHY,i}^{dec,k}$	植物プランクトンの分解速度別の存在割合[-] : (易分解, 準易分解, 難分解)	0.800, 0.195, 0.005	0.800, 0.195, 0.005	0.800, 0.195, 0.005	0.800, 0.195, 0.005	T

T: Tuning, 1) Epplley(1972), 2) 中田(1993), 3) いであ(2008), 4) Watt(1966), 5) 田口(1997), 6) Lehman et al. (1975), 7) Nataka et al. (2004), 8) Wroblewski(1977), 9) Brzezinski(1985), 10) 福留ら(2000)

表-3.11 動物プランクトンに関わるパラメータ

記号	定義[単位]	パラメータ	参考文献
$\eta_{ZOO,j}^{PHY,i}$	植物プランクトン捕食の選好係数[-] (珪藻, 渦鞭毛藻, ANF, シアノバクテリア)	1, 1, 0, 0	
$\eta_{ZOO,j}^{POM,k}$	懸濁態有機物摂食の選好係数[-] : (易分解, 準易分解, 難分解)	1, 1, 1	
$\eta_{ZOO,j}^{PZ,n}$	原生動物捕食の選好係数[-] : (繊毛虫, HNF)	1, 0	
$\eta_{ZOO,j}^{BAC,m}$	好気性細菌捕食の選好係数[-]	0	
$\alpha_{ZooFeed,j}$	0°Cにおける動物プランクトンの最大捕食速度[s ⁻¹]	6.67×10^{-7}	T
$\beta_{Zoo,j}$	動物プランクトンの温度活性係数[°C ⁻¹]	5.88×10^{-2}	1)
$K_{ZooFeed}^{DO}$	捕食に対する溶存酸素の半飽和定数[molO ₂ m ⁻³]	1.56×10^{-2}	T
$\lambda_{ZOO,j}$	動物プランクトンのイブレフ定数[m ³ molC ⁻¹]	1.20×10^2	1)
$\Pi_{ZOO,j}^{min}$	飼料濃度の下限値[molC m ⁻³]	4.16×10^{-3}	T
$e_{ZOO,j}^{PHY,i}$	植物プランクトンの同化効率[-] : (珪藻, 渦鞭毛藻, ANF, シアノバクテリア)	1, 1, 0, 0	T
$e_{ZOO,j}^{POM}$	懸濁態有機物の同化効率[-] : (易分解, 準易分解, 難分解)	1, 1, 1	T
$e_{ZOO,j}^{PZ,n}$	原生動物の同化効率[-] : (繊毛虫, HNF)	1, 0	T
$e_{ZOO,j}^{BAC,m}$	好気性細菌の同化効率[-]	0	T
$e_{ZOO,j}^{dec,k}$	分解速度分画k種の同化効率[-] : (易分解, 準易分解, 難分解)	$8.75 \times 10^{-1},$ $4.81 \times 10^{-5},$ 0	T
$K_{ZooExc,j}$	排糞・残渣量のうち, 懸濁態有機物に配分される割合[-]	0.5	2)
$\alpha_{ZooRespR,j}$	0°Cにおける静止呼吸速度[s ⁻¹]	1.09×10^{-7}	T
$K_{ZooResp}^{DO}$	静止呼吸に対する溶存酸素の半飽和定数[molO ₂ m ⁻³]	1.56×10^{-2}	T
$\alpha_{ZooRespA,j}$	捕食活動に対する活動呼吸の割合[-]	0.2	1)
$\alpha_{ZooLoss,j}$	動物プランクトンの自然死亡速度[m ³ molC ⁻¹ s ⁻¹]	8.15×10^{-5}	T
$T_{ZOO,j,s}$	採餌活動の開始時刻[hour]	0	
$T_{ZOO,j,e}$	採餌活動の終了時刻[hour]	0	
$\Pi_{ZOO,j}^{Stop}$	採餌活動をやめる飼料濃度[molC · m ⁻³]	0	
$w_{ZOO,j,Food,up}$	採餌活動の上昇速度[m s ⁻¹]	0	
$w_{ZOO,j,Food,down}$	採餌活動の下降速度[m s ⁻¹]	0	
$I_{ZOO,j}$	移動を開始する光強度[W m ⁻²]	0	
$w_{ZOO,j,Light,down}$	光環境で移動するときの下降速度[m s ⁻¹]	0	
$N_C^{ZOO,j}$	動物プランクトンの N/C[molN molC ⁻¹]	1.20×10^{-1}	3)
$P_C^{ZOO,j}$	動物プランクトンの P/C[molP molC ⁻¹]	3.88×10^{-3}	3)
$TOD_C^{ZOO,j}$	動物プランクトンの呼吸量に対する酸素消費割合[molO ₂ molC ⁻¹]	1.24	(2.16.3)式
$c_{ZOO,j}^{dec,k}$	動物プランクトンの分解速度別の存在割合[-] (易分解, 準易分解, 難分解)	0.800, 0.195, 0.005	T

T:Tuning, 1)Nakata et al. (2004), 2)Nagata(2000), 3)中田(1993)

表-3.12 原生動物に関わるパラメータ

記号	定義[単位]	繊毛虫	HNF	参考文献
$\alpha_{Pz,n}$	0°Cでの捕食速度[s ⁻¹]	9.05×10^{-7}	1.28×10^{-5}	T
$\beta_{Pz,n}$	原生動物の温度活性係数[°C ⁻¹]	6.93×10^{-2}	6.93×10^{-2}	$Q_{10} = 2$
K_{Pz}^{DO}	捕食に対する溶存酸素の半飽和定数	1.56×10^{-2}	1.56×10^{-2}	T
$\lambda_{Pz,n}$	原生動物のイブレフ定数[m ³ molC ⁻¹]	8.00×10^2	1.20×10^3	T
$\Pi_{Pz,n}^{min}$	飼料濃度の下限値[molC m ⁻³]	1.00×10^{-4}	1.00×10^{-4}	T
$\eta_{Pz,n}^{PHY,i}$	植物プランクトン捕食の選好係数[-] (珪藻, 渦鞭毛藻, ANF, シアノバクテリア)	0, 0, 1, 0	0, 0, 0, 1	
$\eta_{Pz,n}^{PZ,n'}$	原生動物捕食の選好係数[-]: (繊毛虫, HNF)	0, 1	0, 0	
$\eta_{Pz,n}^{BAC,m}$	好気性細菌捕食の選好係数[-]	0	1	
$e_{Pz,n}^{PHY,i}$	原生動物の植物プランクトン捕食に対する同化効率[-] (珪藻, 渦鞭毛藻, ANF, シアノバクテリア)	0, 0, 1, 0	0, 0, 0, 1	T
$e_{Pz,n}^{PZ,n'}$	原生動物の原生動物捕食に対する同化効率[-]	0, 1	0, 0	T
$e_{Pz,n}^{BAC,m}$	原生動物の好気性細菌捕食に対する同化効率[-]	0	1	T
$e_{Pz,n}^{dec,k}$	分解速度分画k種の同化効率[-] (易分解, 準易分解, 難分解)	$8.75 \times 10^{-1},$ $4.81 \times 10^{-5},$ 0	$8.75 \times 10^{-1},$ $4.81 \times 10^{-5},$ 0	T
$\kappa_{PzExc,n}$	排糞・残渣量のうち, 懸濁態有機物に配分される割合[-]	0.33	0.33	1)
$\alpha_{PzRespR,n}$	0°Cでの静止呼吸速度[s ⁻¹]	3.12×10^{-7}	2.47×10^{-7}	2), T
K_{PzResp}^{DO}	静止呼吸に対する溶存酸素の半飽和定数[molO ₂ m ⁻³]	1.56×10^{-2}	1.56×10^{-2}	T
$\alpha_{PzRespA,n}$	捕食活動に対する活動呼吸の割合[-]	0.2	0.2	2)
$\alpha_{PzLoss,n}$	自然死亡速度[m ³ molC ⁻¹ s ⁻¹]	1.62×10^{-4}	1.62×10^{-4}	T
$N_C^{PZ,n}$	原生動物のN/C[molN molC ⁻¹]	1.20×10^{-1}	1.20×10^{-1}	3)
$P_C^{PZ,n}$	原生動物のP/C[molP molC ⁻¹]	3.88×10^{-3}	3.88×10^{-3}	3)
$TOD_C^{PZ,n}$	原生動物の呼吸量に対する酸素消費割合[molO ₂ molC ⁻¹]	1.24	1.24	(2.16.3)式
$C_{PZ,j}^{dec,k}$	原生動物の分解速度別の存在割合[molC molC ⁻¹] (易分解, 準易分解, 難分解)	0.800, 0.195, 0.005	0.800, 0.195, 0.005	T

T:Tuning, 1)Nagata(2000), 2)Nakata et al. (2004), 3)中田(1993)

表-3.13 好気性細菌に関するパラメータ

記号	定義[単位]	パラメータ	参考文献
$\alpha_{BacTake,m}$	0°CでのADOCの最大摂取速度[s ⁻¹]	6.94×10^{-6}	1)
$\beta_{Bac,m}$	好気性細菌の温度活性係数[°C ⁻¹]	6.93×10^{-2}	$Q_{10} = 2$
DO_{BAC}	好気性細菌が活動を停止する溶存酸素濃度[molO ₂ m ⁻³]	3.13×10^{-2}	T
$K_{BacTake,m}^{ADOC}$	摂取活動に対するADOCの半飽和定数[molN m ⁻³]	3.69×10^{-3}	T
$K_{BacTake,m}^N$	摂取活動に対する窒素の半飽和定数[molN m ⁻³]	7.14×10^{-3}	2)
$K_{BacTake,m}^P$	摂取活動に対するリンの半飽和定数[molP m ⁻³]	3.23×10^{-4}	2)
$\alpha_{DecA,m,k}$	0°Cでの有機物の最大分解速度[s ⁻¹] (易分解, 準易分解, 難分解)	$7.10 \times 10^{-5},$ $4.81 \times 10^{-6},$ 4.81×10^{-8}	T
$e_{BAC,m}$	ADOCの同化効率[-]	0.5	3)
$\alpha_{BacLoss,m}$	0°Cにおける死亡速度[m ³ molC ⁻¹ s ⁻¹]	2.07×10^{-4}	T
$\beta_{BacLoss,m}$	死亡速度の温度係数[°C ⁻¹]	6.93×10^{-2}	$Q_{10} = 2$
$\alpha_{BacPom,m}$	好気性細菌が死亡したときに懸濁態有機物になる割合[-]	0	T
$N_C^{BAC,m}$	好気性細菌のN/C[molN molC ⁻¹]	1.97×10^{-1}	4)
$P_C^{BAC,m}$	好気性細菌のP/C[molP molC ⁻¹]	2.01×10^{-2}	4)
$TOD_C^{BAC,m}$	好気性細菌の呼吸量に対する酸素消費割合[molO ₂ molC ⁻¹]	1.40	(2.16.3)式
$c_{BAC,m}^{dec,k}$	好気性細菌の分解速度別の存在割合[molC molC ⁻¹] (易分解, 準易分解, 難分解)	0.800, 0.195, 0.005	T

T:Tuning, 1)今井・山口(1996), 2)小山ら(2010), 3)Cole et al. (1982), 4)Fagerbakke et al. (1996), 5)中田(1993)

表-3.14 脱窒菌に関するパラメータ

記号	定義[単位]	パラメータ	参考文献
$\alpha_{DnbTake}$	硝酸の摂取速度[molC m ⁻³ s ⁻¹]	2.51×10^{-7}	T
β_{Dnb}	脱窒菌の温度活性係数[°C ⁻¹]	6.93×10^{-2}	$Q_{10} = 2$
$K_{DnbTake}^{ADOC}$	脱窒に対するADOCの半飽和定数[molN m ⁻³]	1.00×10^{-4}	T
$K_{DnbTake}^N$	脱窒に対する硝酸の半飽和定数[molN m ⁻³]	1.00×10^{-3}	T
$K_{DnbTake}^P$	脱窒に対するリンの半飽和定数[molP m ⁻³]	1.00×10^{-4}	T
DO_{DnbDo}	脱窒菌の活動限界溶存酸素濃度[molO ₂ m ⁻³]	1.56×10^{-2}	T
N_C^{DNB}	脱窒菌のN/C[molN molC ⁻¹]	1.97×10^{-1}	1)

T:Tuning, 1)Fagerbakke et al. (1996)

表-3.15 懸濁態・溶存態有機物に関するパラメータ

記号	定義[単位]	パラメータ	参考文献
$\alpha_{DecB,k}$	0°Cでの嫌気性細菌による有機物の最大分解速度[molC m ⁻³ s ⁻¹] (易分解, 準易分解, 難分解)	1.39 × 10 ⁻⁷ , 1.39 × 10 ⁻⁸ , 1.39 × 10 ⁻¹⁰	T
β_{DecB}	嫌氣的分解の温度係数[°C ⁻¹]	6.93 × 10 ⁻²	Q ₁₀ = 2
DO _{DecbDo}	嫌気性細菌の活動限界溶存酸素濃度[molO ₂ m ⁻³]	3.13 × 10 ⁻²	T
$\kappa_{DecA,k}$	懸濁態有機物の好氣的分解に対する溶存態無機物生成の割合[-]: (易分解, 準易分解, 難分解)	0.6, 0.6, 0.6	T
$\kappa_{DecB,k}$	懸濁態有機物の嫌氣的分解に対する溶存態無機物生成の割合[-]: (易分解, 準易分解, 難分解)	0.6, 0.6, 0.6	T
$w_{POM,k}$	懸濁態有機物の沈降速度[m s ⁻¹] (易分解, 準易分解, 難分解)	5.00 × 10 ⁻⁶ , 5.00 × 10 ⁻⁶ , 5.00 × 10 ⁻⁶	1)

T: Tuning, 1) 北澤(2001)

表-3.16 栄養塩・溶存酸素に関するパラメータ

記号	定義[単位]	パラメータ	参考文献
$\alpha_{NH_4NO_2}$	0°Cでのアンモニアの酸化反応速度[s ⁻¹]	2.51 × 10 ⁻⁷	1)
$\beta_{NH_4NO_2}$	アンモニアの酸化反応速度の温度係数[°C ⁻¹]	6.93 × 10 ⁻²	Q ₁₀ = 2
K _{DO,NH₄2NO₂}	アンモニアの酸化反応に対する溶存酸素の半飽和定数[molO ₂ m ⁻³]	1.56 × 10 ⁻²	2)
$\alpha_{NO_2NO_3}$	0°Cでの亜硝酸の硝化反応速度[s ⁻¹]	1.11 × 10 ⁻⁶	T
$\beta_{NO_2NO_3}$	硝化反応速度の温度係数[°C ⁻¹]	6.93 × 10 ⁻²	Q ₁₀ = 2
K _{DO,NO₂2NO₃}	硝化反応に対する溶存酸素の半飽和定数[molO ₂ m ⁻³]	1.56 × 10 ⁻²	T
w _{SiO₂}	ケイ酸の沈降速度[m s ⁻¹]	0	T
$\alpha_{H_2SO_xi}$	0°Cでの硫化水素の酸化反応速度[s ⁻¹]	1.25 × 10 ⁻⁵	T
$\beta_{H_2SO_xi}$	反応速度の温度係数[°C ⁻¹]	6.93 × 10 ⁻²	Q ₁₀ = 2
K _{H₂SO_xi} ^{DO}	硫化水素の酸化反応に対する溶存酸素の半飽和定数[molO ₂ m ⁻³]	1.56 × 10 ⁻²	T
TOD _N ^{NH₄2NO₂}	酸化反応 (アンモニア→亜硝酸) に対する酸素消費割合[molO ₂ molN ⁻¹]	1.5	(2.12.1)式
TOD _N ^{NO₂2NO₃}	硝化反応 (亜硝酸→硝酸) に対する酸素消費割合[molO ₂ molN ⁻¹]	0.5	(2.12.2)式
TOD _S ^{H₂SO_xi}	硫化水素の酸化反応に対する酸素消費割合[molO ₂ molS ⁻¹]	2.0	(2.15.1)式
S _{CL}	液相のシュミット数[-]	558	3)

T: Tuning, 1) Horrigan and Springer(1990), 2) 中田(1993), 3) 土木学会(1999)

表-3.17 その他の浮遊系に関するパラメータ

記号	定義[単位]	パラメータ	参考文献
k ₀	湾に固有のクロロフィル量に依存しない消散係数[m ⁻¹]	0.35	1)
α_{ext1}	消散係数パラメータ 1[m ⁻¹ (μg L ⁻¹) ⁻¹]	0.0088	2)
α_{ext2}	消散係数パラメータ 2[m ⁻¹ (μg L ⁻¹) ^{-2/3}]	0.054	2)
t _{phaseHour}	計算開始時刻と午前零時との時刻差[sec]	0	

1) 中田(1993), 2) Riley(1956)

表-3.18 簡易底生系モデルのパラメータ

記号	定義[単位]	パラメータ	参考文献
$\alpha_{sed,k}$	分解速度分画 k 種の最大分解率[-] : (易分解, 準易分解, 難分解)	1.0, 0.2, 0.05	T
β_{sed}	分解率の温度依存係数[°C ⁻¹]	6.93×10^{-2}	$Q_{10} = 2$
K_{DO}^{sed}	溶存酸素の半飽和定数[molO ₂ m ³]	1.56×10^{-2}	T
$J_{DO,const}^{sed}$	定常的な底泥の酸素フラックス[molO ₂ m ⁻² s ⁻¹]	-1.808×10^{-7}	T
N_C^{Dec}	懸濁態有機炭素を分解するために必要な硝酸[molN molC ⁻¹]	1.13	1)
K_{NO3}^{sed}	沈降有機物の分解速度に対する硝酸の半飽和定数[molN m ⁻³]	1.00×10^{-2}	T
S_C^{Dec}	懸濁態有機炭素を分解するために必要な硫化物[molS molC ⁻¹]	0.5	1)
J_{Po4Max}	無酸素状態でのリン酸の最大溶出速度[molP m ⁻² s ⁻¹]	2.24×10^{-9}	T
$DO_{Po4Flux}$	リン酸が底泥から溶出する限界の溶存酸素濃度[molO ₂ m ⁻³]	1.29×10^{-1}	T
$\eta_{MSF}^{PHY,i}$	懸濁物食者の植物プランクトン捕食の選好係数[-] (珪藻, 渦鞭毛藻, ANF, シアノバクテリア)	1, 1, 0, 0	
$\alpha_{MsfFeed}$	懸濁物食者あたりの最大ろ過速度[m ³ s ⁻¹ molC ⁻¹]	1.96×10^{-6}	2)
T_{MsfOpt}	懸濁物食者の最適温度[°C]	25.0	3)
T_{MsfMax}	懸濁物食者の活動限界温度[°C]	32.0	3)
β_{Msf}	懸濁物食者の摂食速度の温度係数[°C ⁻¹]	0.2	3)
$\eta_{MSF}^{ZOO,j}$	懸濁物食者の動物プランクトン捕食の選好係数[-]	1	
$\eta_{MSF}^{PZ,n}$	懸濁物食者の原生動物捕食の選好係数[-] : (繊毛虫, HNF)	1, 1	
N_C^{MSF}	懸濁物食者の N/C 比[molN molC ⁻¹]	1.71×10^{-1}	2)
P_C^{MSF}	懸濁物食者の P/C 比[molP molC ⁻¹]	5.42×10^{-3}	2)
$\alpha_{MsfRespR}$	懸濁物食者の静止呼吸速度[s ⁻¹]	1.62×10^{-8}	2)
$K_{MsfResp}^{BDO}$	懸濁物食者の静止呼吸に対する溶存酸素の半飽和定数[molO ₂ m ⁻³]	1.56×10^{-2}	T
$\alpha_{MsfRespA}$	懸濁物食者の捕食に対する活動呼吸の割合[-]	0.2	T

T:Tuning, 1)Fossing et al. (2004), 2)北澤(2001), 3)小沼ら(2002)

表-3.19 モデルの初期値

項目	初期値	参考文献
水温[°C], 塩分[-]	12, 33	T
植物プランクトン[molC m ⁻³] (珪藻, 渦鞭毛藻, ANF, シアノバクテリア)	1.04 × 10 ⁻² , 1.53 × 10 ⁻³ , 9.00 × 10 ⁻⁴ , 2.37 × 10 ⁻⁴	1)
植物プランクトンの余剰窒素量[molN m ⁻³] (珪藻, 渦鞭毛藻, ANF, シアノバクテリア)	3.24 × 10 ⁻³ , 4.92 × 10 ⁻⁴ , 2.79 × 10 ⁻⁴ , 7.35 × 10 ⁻⁵	T
植物プランクトンの余剰リン量[molP m ⁻³] (珪藻, 渦鞭毛藻, ANF, シアノバクテリア)	1.63 × 10 ⁻⁴ , 2.47 × 10 ⁻⁵ , 1.40 × 10 ⁻⁵ , 3.69 × 10 ⁻⁶	T
動物プランクトン[molC m ⁻³]	2.11 × 10 ⁻³	1)
原生動物[molC m ⁻³] (繊毛虫, HNF)	2.11 × 10 ⁻³ , 2.34 × 10 ⁻³	1)
細菌[molC m ⁻³]	2.86 × 10 ⁻³	1)
懸濁態有機炭素[molC m ⁻³] (易分解, 準易分解, 難分解)	3.83 × 10 ⁻³ , 2.68 × 10 ⁻² , 7.66 × 10 ⁻³	1)
懸濁態有機窒素[molN m ⁻³] (易分解, 準易分解, 難分解)	8.00 × 10 ⁻⁴ , 8.00 × 10 ⁻⁴ , 2.60 × 10 ⁻⁴	1)
懸濁態有機リン[molN m ⁻³] (易分解, 準易分解, 難分解)	1.46 × 10 ⁻⁴ , 1.40 × 10 ⁻⁴ , 7.08 × 10 ⁻⁵	1)
溶存態有機炭素[molC m ⁻³] (易分解, 準易分解, 難分解)	1.33 × 10 ⁻² , 9.31 × 10 ⁻² , 2.66 × 10 ⁻²	1)
溶存態有機窒素[molN m ⁻³] (易分解, 準易分解, 難分解)	3.20 × 10 ⁻³ , 5.67 × 10 ⁻³ , 1.78 × 10 ⁻³	1)
溶存態有機リン[molN m ⁻³] (易分解, 準易分解, 難分解)	2.11 × 10 ⁻⁴ , 3.00 × 10 ⁻⁴ , 7.40 × 10 ⁻⁵	1)
ADOC[molC m ⁻³]	2.22 × 10 ⁻³	T
リン酸[molP m ⁻³]	6.45 × 10 ⁻⁴	1)
溶存態無機窒素[molN m ⁻³] (アンモニア, 亜硝酸, 硝酸)	4.20 × 10 ⁻³ , 1.58 × 10 ⁻⁴ , 5.36 × 10 ⁻³	1)
ケイ酸[molSi m ⁻³]	1.67 × 10 ⁻²	T
溶存酸素[molO ₂ m ⁻³]	2.50 × 10 ⁻¹	T

T:Tuning, 1)福留ら(2000)

マルチGモデルとして、有機物は分解速度別で3種類に区分した。ここでは便宜上、分解速度の速い順に、易分解性、準易分解性、難分解性と定義する。

浮遊生態系モデルのパラメータを表-3.10~3.18に示す。初期値として、流速・水位については全域で0とし、各水質項目は表-3.19に示す値を全域に一定で与えた。なお、魚および懸濁物食者は全域・全期間で0とした。

3.3 計算結果の検証

田中・鈴木(2010)によって、LTの流動モデルについての検証は既に行われている。しかしながら、計算条件が変わったこともあるため、流動モデルも含めて本モデルの検証を行った。

(1) 潮汐の比較

既往の観測結果がある15地点(名古屋, 四日市, 鬼崎, 師崎, 武豊, 形原, 蒲郡, 佐久島, 三河, 豊橋, 立馬埵, 福江, 伊良湖, 神島, 鳥羽)について、潮汐の調和定数を比較した(海上保安庁, 1992; 国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所, web)。潮汐の振幅値・位相の比較を図-3.9に示す。振幅のRMSE (Root Mean Square Errors) は1.14cm, 位相のRMSEは4.53度であり、振幅・位相と

もに観測値とよく適合していた。

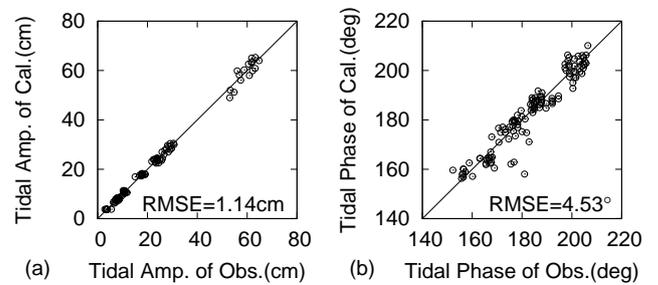


図-3.9 各検潮所における潮位の観測値と計算結果の比較 (長周期成分は除く): (a)振幅, (b)位相

(2) 潮流の比較

伊勢湾では海上短波レーダー(HFレーダー)による潮流観測が国土交通省中部地方整備局により行われている。HFレーダーによる観測値を調和分解し、数値計算結果と比較した(田中ら, 2010)。M₂分潮の潮流振幅について、HFレーダーによる観測値、数値計算結果、および既往の数値計算結果(柳・黒田, 1988)を図-3.10に示す。本研究での数値計算結果は観測結果、既往の研究結果と定性的に一致していた。

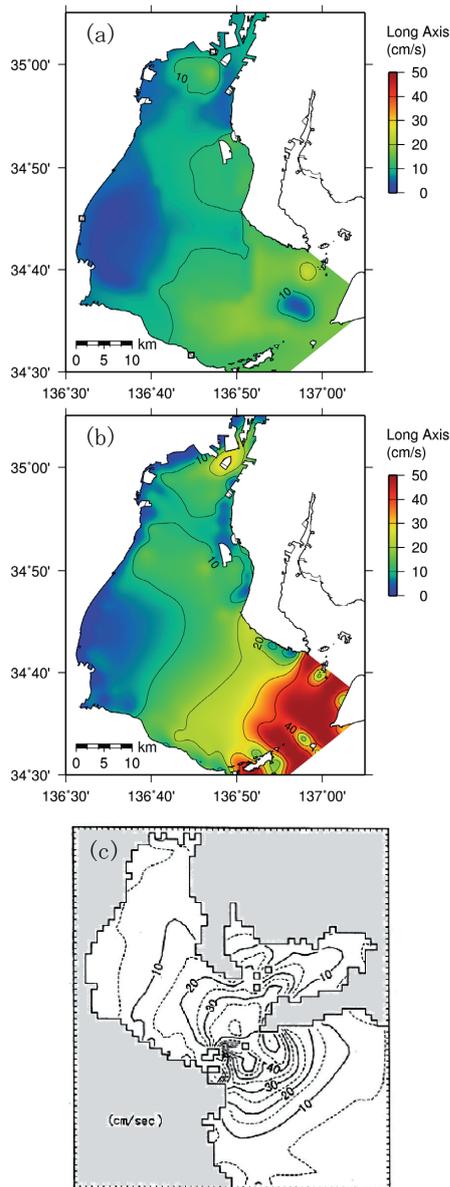


図-3.10 伊勢湾での M_2 潮流振幅の分布：(a)HF レーダー、(b)本計算結果、(c)柳・黒田(1988)

(3) 水質の比較

伊勢湾の代表的な地点として、伊勢湾の湾奥部(St. 2)、伊勢湾の中央部(St. 11)、渥美湾の中央部(A-5)、知多湾の中央部(K-5)の4点について、水質の比較を行った(図-3.11)。St. 2, 11は三重水産研究所の観測点。A-5, K-5は公共用水域水質観測の観測点である。

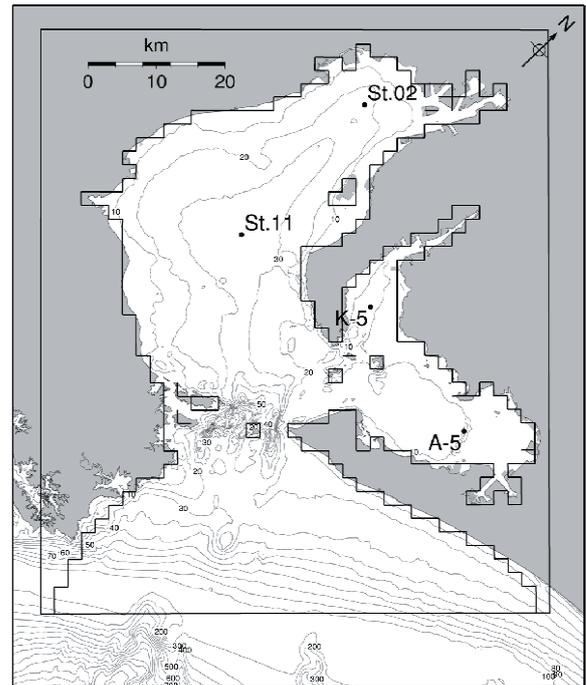


図-3.11 水質を比較する地点

各地点の表層・底層における、塩分・水温・DO・クロロフィル a の時系列変化を図-3.12~3.19 に示す。水温・塩分については、各地点とも良く観測値と適合している。ただし、冬場の水温についてはやや計算値の水温が高めに出ていた。冬場の冷却効果がやや過小評価となっているようである。

クロロフィル a についてはSt. 2とSt. 11については計算結果が過大評価気味となっていたが、これは三重水産研究所のクロロフィル a 観測値がやや低めの傾向となっていること(三重水産研究所、私信)に起因しているようである。愛知水産試験場での観測値である、K-5, A-5では観測値のクロロフィル a 変動が激しくなっていたものの、計算結果はそれに追従しておらず、過小評価気味となっていた。

DO については各地点とも表層ではやや過小評価となっていた。底層では夏場に酸素が低下する現象が再現されており、特にSt. 2, St. 11では底層の貧酸素化が再現されていた。A-5の夏場の底層では、計算結果はやや過小評価となっていた。なお、St. 11で夏場の底層で急激にDOが増加している現象が見られるが、このとき同時に底層塩分も上昇していることから、これは外洋からの水塊が底層に侵入してきたことによる。笠井(2003)、寛ら(2004)は夏場に伊勢湾底層へ間欠的に外洋水が侵入することを報告しており、本研究の数値計算結果でも同様の現象が発生していた。

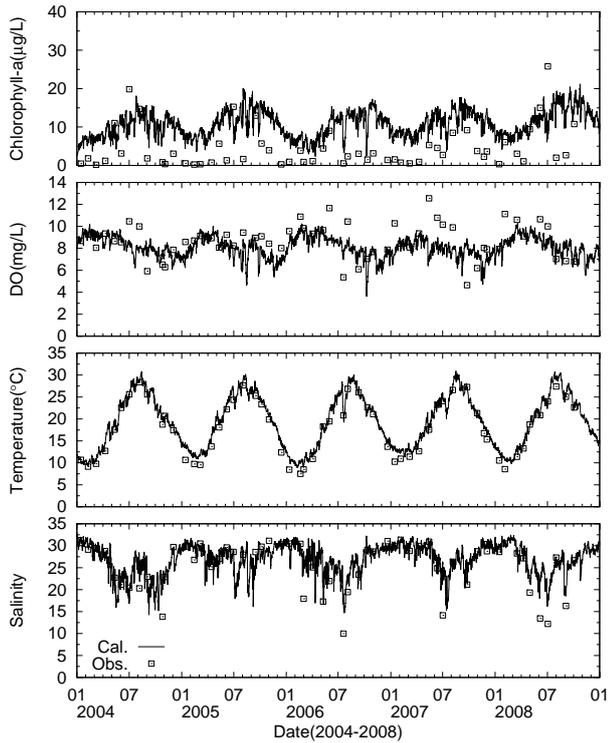


図-3.12 伊勢湾湾奥部 (St. 2) 表層の水質時系列変化

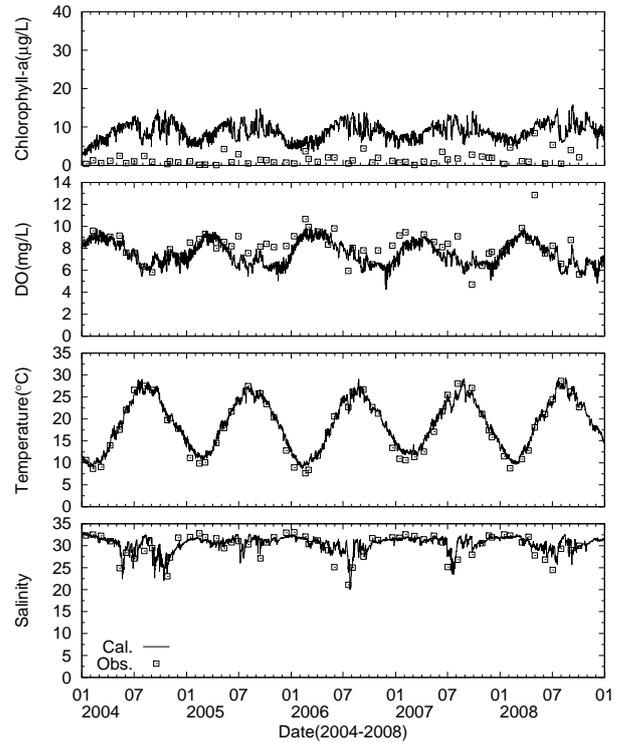


図-3.14 伊勢湾中央部 (St. 11) 表層の水質時系列変化

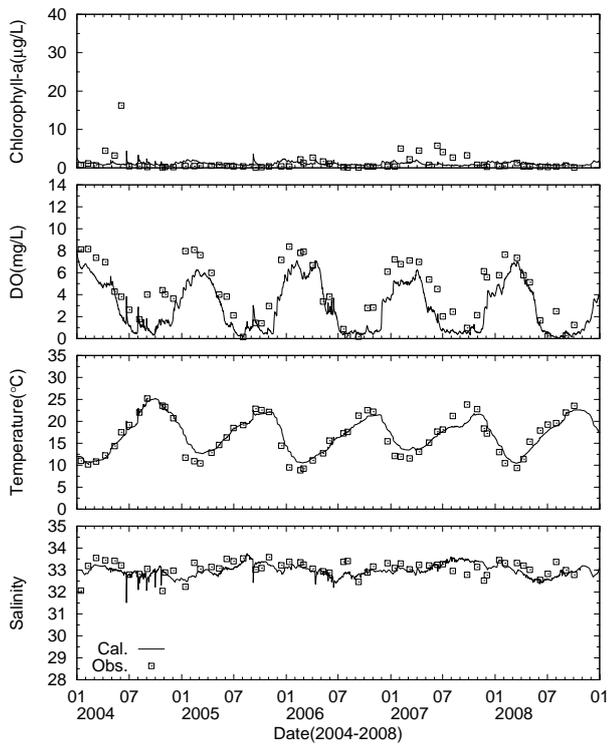


図-3.13 伊勢湾湾奥部 (St. 2) 底層の水質時系列変化

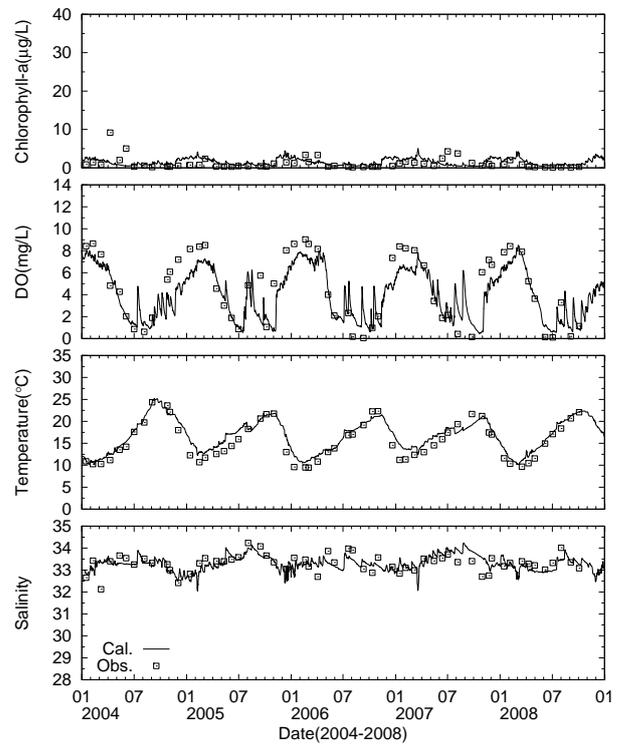


図-3.15 伊勢湾中央部 (St. 11) 底層の水質時系列変化

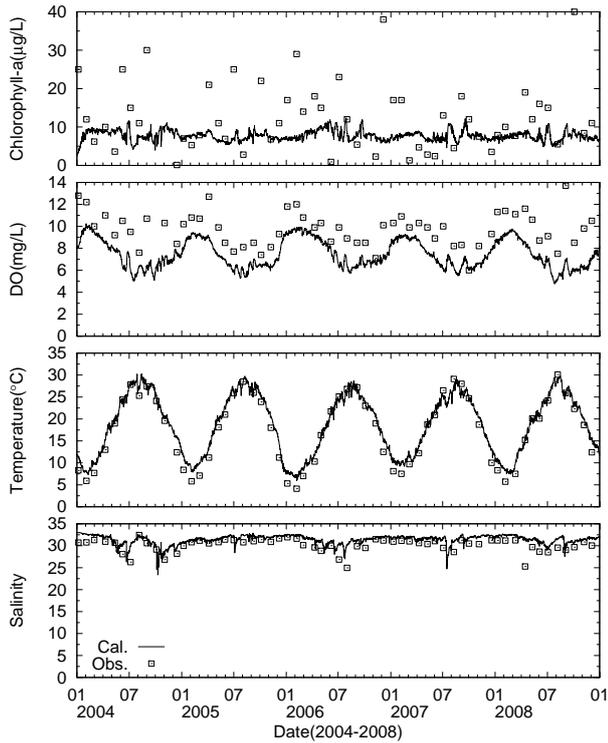


図-3.16 渥美湾中央部 (A-5) 表層の水質時系列変化

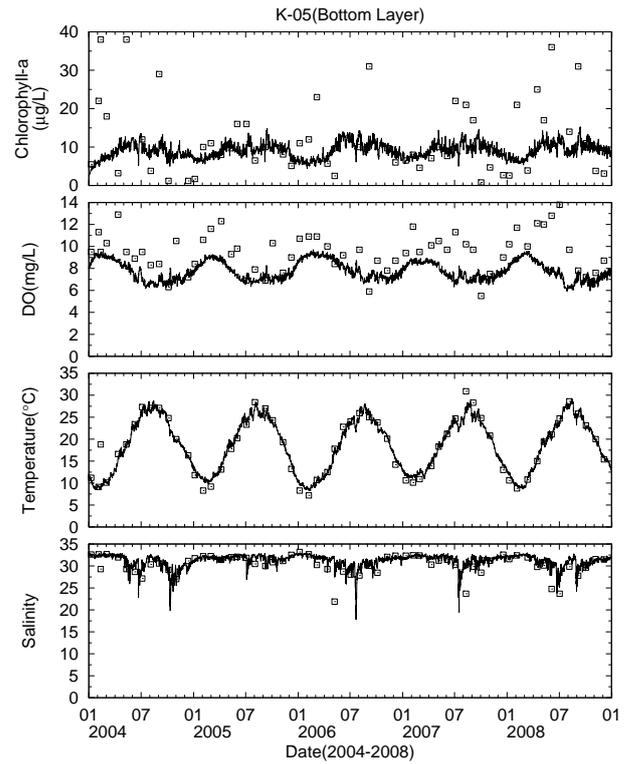


図-3.18 知多湾中央部 (K-5) 表層の水質時系列変化

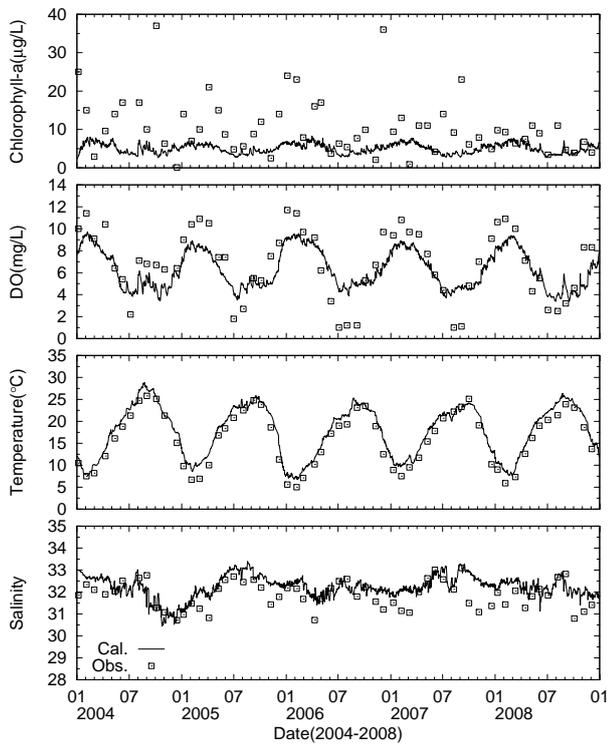


図-3.17 渥美湾中央部 (A-5) 底層の水質時系列変化

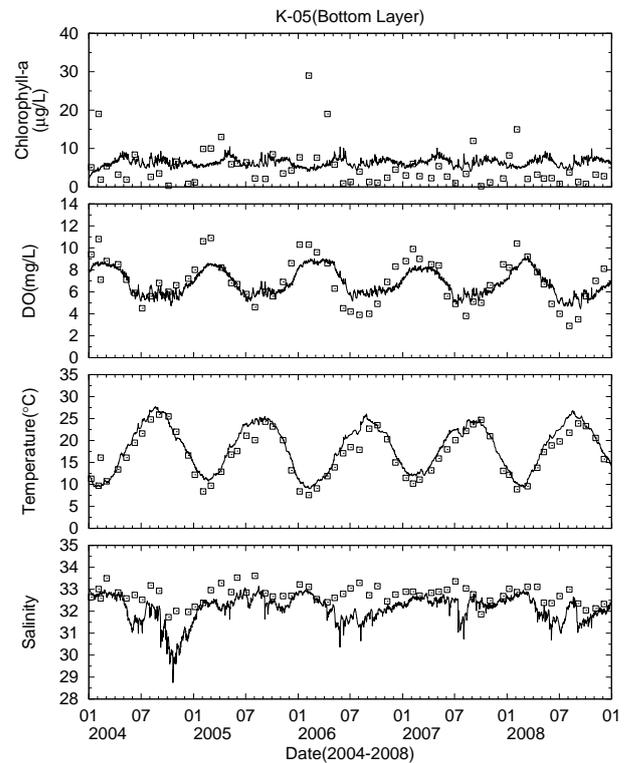


図-3.19 知多湾中央部 (K-5) 底層の水質時系列変化

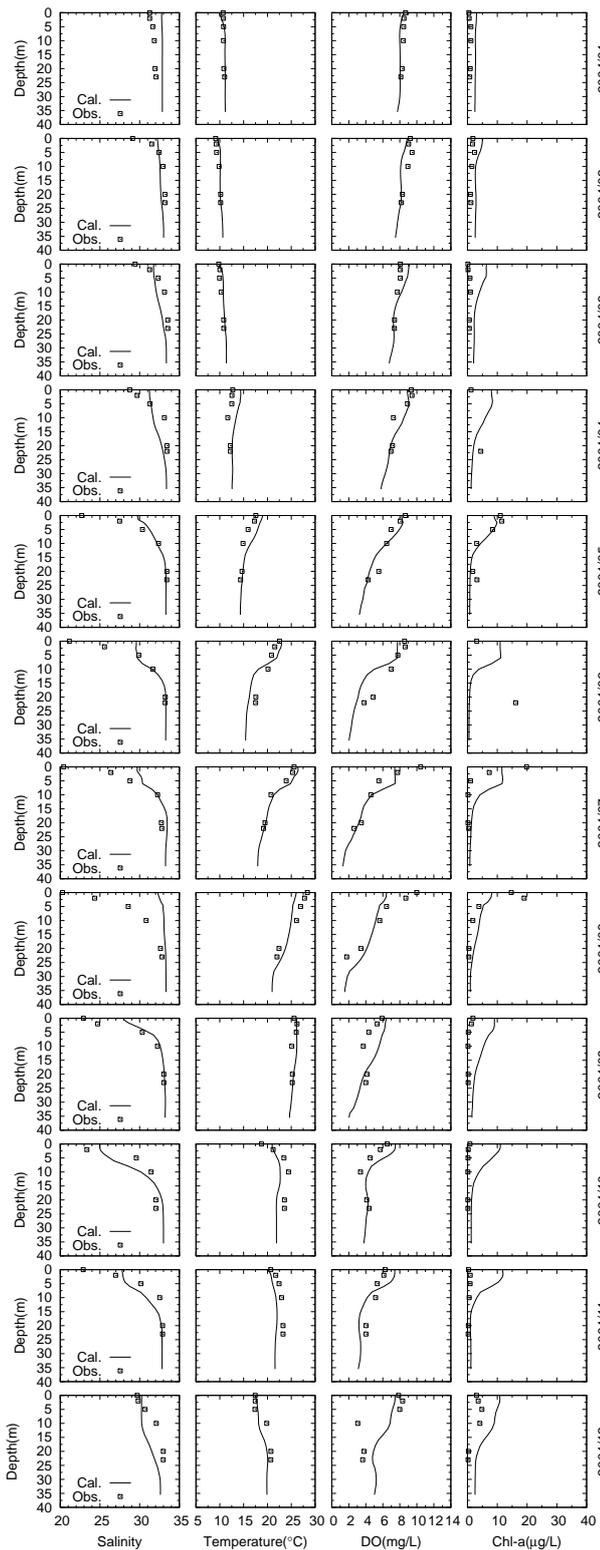


図-3.20 伊勢湾中央部(St. 11)の鉛直分布 (2004年)

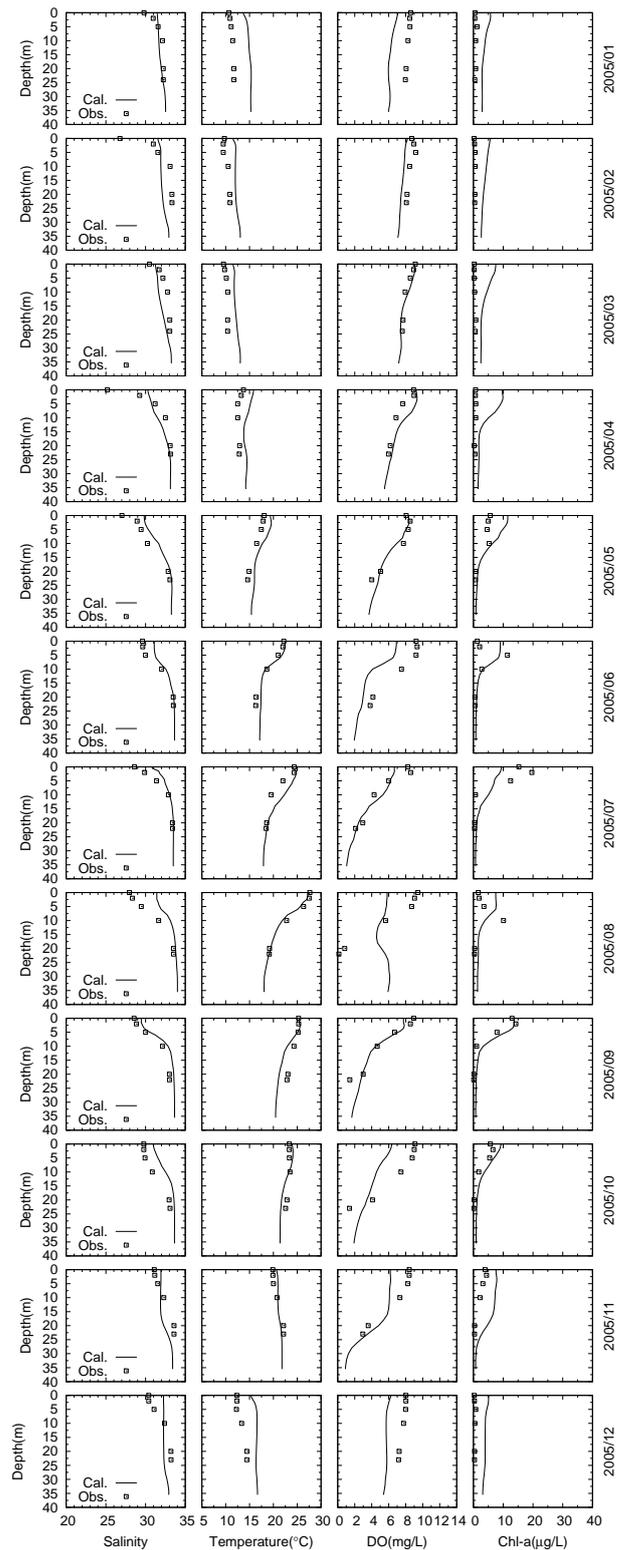


図-3.21 伊勢湾中央部(St. 11)の鉛直分布 (2005年)

伊勢湾中央部の St. 11 において、計算結果と観測値の鉛直分布を比較したグラフを図-3.20, 3.21 に示す。計算結果は密度成層や、底層の貧酸素化、表層での植物プランクトンの増殖が良く再現されていた。

植物プランクトンの種別での変動や、細菌・原生動物等については観測値自体が少ない。そこで計算期間とは別の期間となるが、福留ら(2000)が1995年5月~1996年3月の期間で、植物プランクトン種や細菌などを詳細に観測しているため、その値と比較することとした。図-3.22 に植物プランクトンの季節変化、図-3.23 に細菌・原生動物・動物プランクトンの季節変化について比較を行ったグラフを示す。なお、福留ら(2000)は全観測地点の全層平均値を図化しているため、観測値としてはそのグラフを読み取った値と、計算結果としては伊勢湾中央部 (St. 11) における各月の5年間での全層平均値との比較であることに注意されたい。計算結果と観測値は概ね一致しているものの、全植物プランクトン量が6~8月で少なくなっていた。また、細菌や原生動物が9月でピークを取る傾向は計算では出ていなかった。季節変動の再現性については、パラメータを見直すなど、今後改良の余地がある。

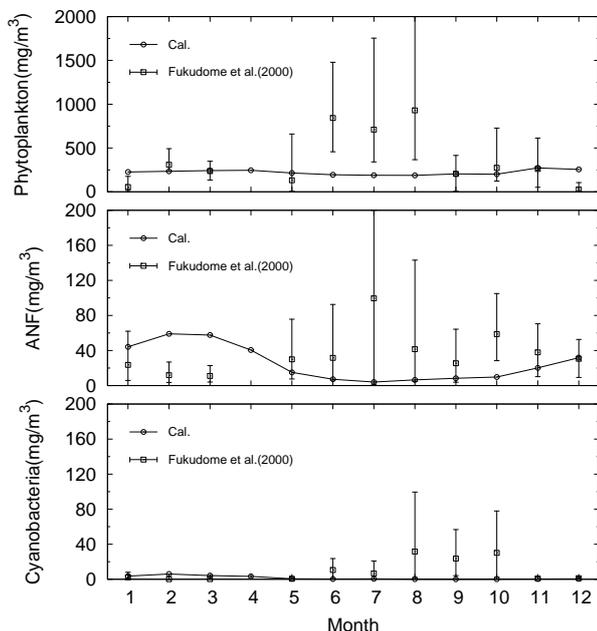


図-3.22 伊勢湾中央部 (St. 11) における植物プランクトンの季節変化: 計算結果は5年間の平均値。観測値(福留ら, 2000)のエラーバーは最小値, 平均値, 最大値を表わす。

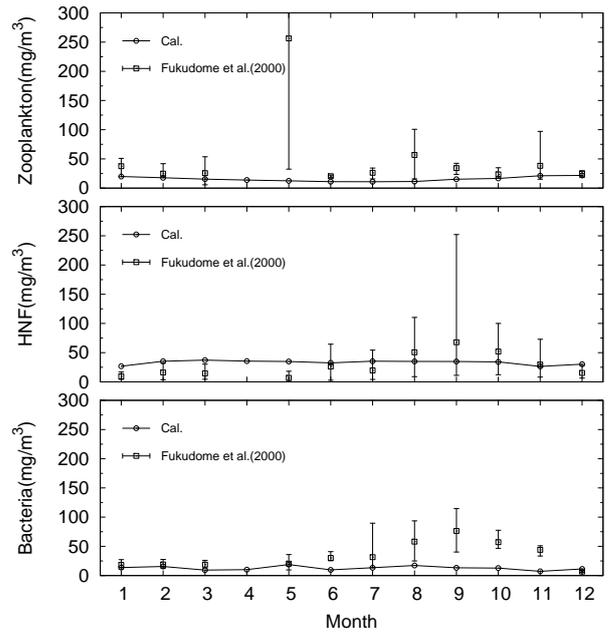


図-3.23 伊勢湾中央部 (St. 11) における細菌・原生動物・動物プランクトンの季節変化: 計算結果は5年間の平均値。観測値(福留ら, 2000)のエラーバーは最小値, 平均値, 最大値を表わす。

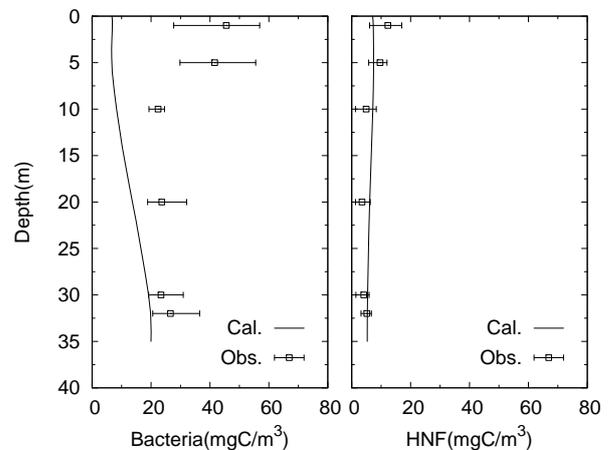


図-3.24 伊勢湾中央部 (St. 11) における細菌・原生動物の鉛直分布: 計算結果は5年間の平均値。観測値のエラーバーは最小値, 平均値, 最大値を表わす。

細菌と原生動物 (HNF) について、2009年5月19日、7月15日、9月16日に伊勢湾中央部で観測を行った。図-3.24に観測値と、計算結果(5年間の平均値)の鉛直分布を示す。計算結果は観測値と比べて、細菌は過小評価、HNFは概ね同程度の値となっていた。また、観測では細菌が表層で最大となっているが、計算結果では底層で最大となっており、逆の分布形状となっていた。表層で少なくなった理由としては、表層付近で細菌が植物プ

ランクトンと栄養塩の摂取で競合している可能性が考えられる。しかし、Naganuma (1997), 福留ら (2000) は伊勢湾において、細菌量が植物プランクトン量に比例することを報告しており、実際の現象は細菌と植物プランクトンは共存関係にあると考えられる。植物プランクトンと細菌との共存関係の再現については今後の課題である。

3.4 伊勢湾における微生物ループの役割

前節で本モデルの精度検証を行い、パラメータの改良などの課題が残されているものの、本モデルが一定の精度を有していることを確認した。本モデルの特徴の一つは微生物ループを考慮したことであり、これによって対象海域での細菌や原生動物の役割を定量的に示すことが可能となった。そこで、伊勢湾における微生物ループの役割について、検討を行った。

(1) 細菌の現存量

伊勢湾全域における有機物の平均現存量を表-3.20に示す。有機物全体としては溶存態有機物が約3/4を占めており、生物量(魚介類を除く)は有機物全体の約15%であった。生物の中では植物プランクトンの現存量が圧倒的に多く、81.5%を占めていた。好気性細菌は生物中の3.9%、有機物全体では0.6%であった。伊勢湾での生物中に占める細菌の割合として、福留ら(2000)は5.4%、Uye et al. (2000)は3.3%であったことを報告しており、計算結果は観測値と概ね一致していた。

表-3.20 伊勢湾全域での平均有機炭素量

種類	現存量 [mgC m ⁻²]	割合[%]	
		全体	生物
溶存態有機物	35018	74.60	—
懸濁態有機物*)	4919	10.48	—
植物プランクトン	5707	12.16	81.48
動物プランクトン	345	0.73	4.92
原生動物	680	1.45	9.71
好気性細菌	272	0.58	3.88

*)懸濁態有機物は生物を含まない

(2) 細菌の生産量

伊勢湾全域と、伊勢湾(狭義)・三河湾の海域について、水柱の一次生産量と細菌の平均生産量を求めた(表-3.21)。細菌生産量の一次生産に対する比率は、全域で18%であった。値は海域によってばらついているが、この

理由は、前述したように表層付近では細菌量が低いため、水深の浅い地点で細菌生産量が低くなったためである。計算では細菌量が過小評価となっていたため、浅場における細菌生産量の一次生産量に対する比率はここでの試算より大きいことが示唆される。

表-3.21 各海域での一次生産量と細菌生産量

海域	伊勢湾 (広義)	伊勢湾 (狭義)	三河湾
平均水深[m]	18.8	21.6	10.4
一次生産量 [mgC m ⁻² day ⁻¹]	738.5	762.8	664.9
細菌生産量 [mgC m ⁻² day ⁻¹]	134.4	166.5	37.4
(細菌生産量) ÷ (一次生産量) [%]	18.2	21.8	5.6

一方、観測から見積もった比率として、Cole et al., (1988)は種々の海域における細菌生産量の一次生産量に対する比率は、平均で約30%であることを報告している。伊勢湾においては、Uye et al. (2000)が31.8%、および福留ら(2000)は10%であることを報告している。計算結果はこれら既往の文献値と同程度の大きさであった。

従って、伊勢湾全域での細菌の現存量(ストック)は植物プランクトンの4.8%であるが、生産量(フロー)は一次生産の18.2%に相当しており、細菌が生物循環に重要な役割を担っていることが数値計算からも定量的に明らかとなった。

(3) 生物循環と微生物ループ

伊勢湾全域における水柱平均の生物循環フロー(グロス)を算出した(図-3.25)。なお、計算では細菌の同化効率を50%(Cole, 1982)としているので、細菌のDOC(ADOC)摂取量は細菌生産量の2倍となる。

一方、動物プランクトンの飼料源として、古典的生食食物連鎖由来の量と、微生物ループ由来の量の比較がしばしば行われる(Ducklow et al., 1986; Sherr et al., 1987; 越川ら, 1999; 中野, 2000)。そこで、伊勢湾全域における動物プランクトンの正味捕食量(捕食量から排糞・残渣量を除いた量)の割合を算出した(図-3.26)。植物プランクトンの割合(古典的生食食物連鎖由来)は全体の65.5%を占め、原生動物の割合(微生物ループ由来)は全体の1.4%であった。したがって、動物プランクトンの飼料源のうち、微生物ループ由来は古典的生食食物連鎖由来の2.1%であった。繊毛虫のバイオマス量は珪

藻と渦鞭毛藻のバイオマス量の2.3%であり、原生動物の捕食量が少ない理由はバイオマス量が少ないためである。

したがって、伊勢湾での細菌を経由する生物循環は、DOM→細菌→HNF→POM あるいは、DOM→細菌→HNF→繊毛虫→POM に至る経路が主体的であった。動物プランクトンの飼料源は植物プランクトンが主体的であった。

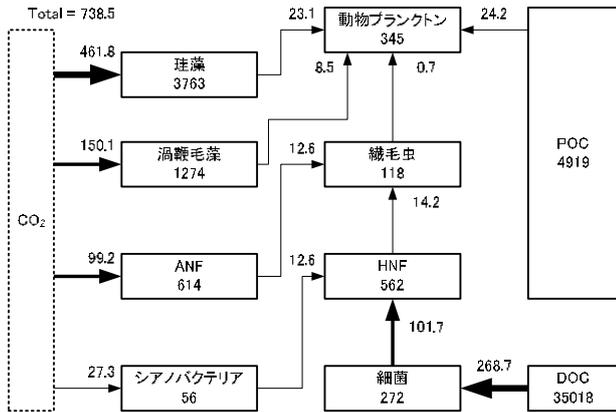


図-3.25 伊勢湾全域における炭素の生物循環フローおよびストック: 矢印(フロー)の単位は $[mgC\ m^{-2}\ day^{-1}]$, ボックス内(ストック)の単位は $[mgC\ m^{-2}]$

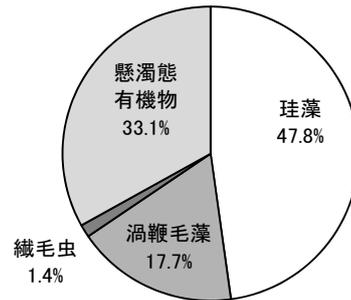


図-3.26 伊勢湾全域における動物プランクトンの飼料源の割合

(4) 酸素消費量に占める細菌の割合

閉鎖性内湾では底層の貧酸素化が問題となっており、底層の貧酸素化は主として細菌の好氣的分解に伴う呼吸といわれている(佐々木, 1998)。しかしながら、細菌が酸素消費にどの程度関与しているかは未だ明らかになっていない。

そこで、伊勢湾中央部 (St. 11) において、平均的な生物量、および酸素変化、酸素消費の内訳について、それぞれのプロファイル調べた(図-3.27)。なお、表層での再曝気および、底層での酸素消費は除いている。

生物量は植物プランクトンが優占しており、特に水深12m程度までの有光層で生物量が多かった。各水深での細菌量は表層で全体生物量の1%、底層でも12%であり、生物量に占める割合は小さかった。

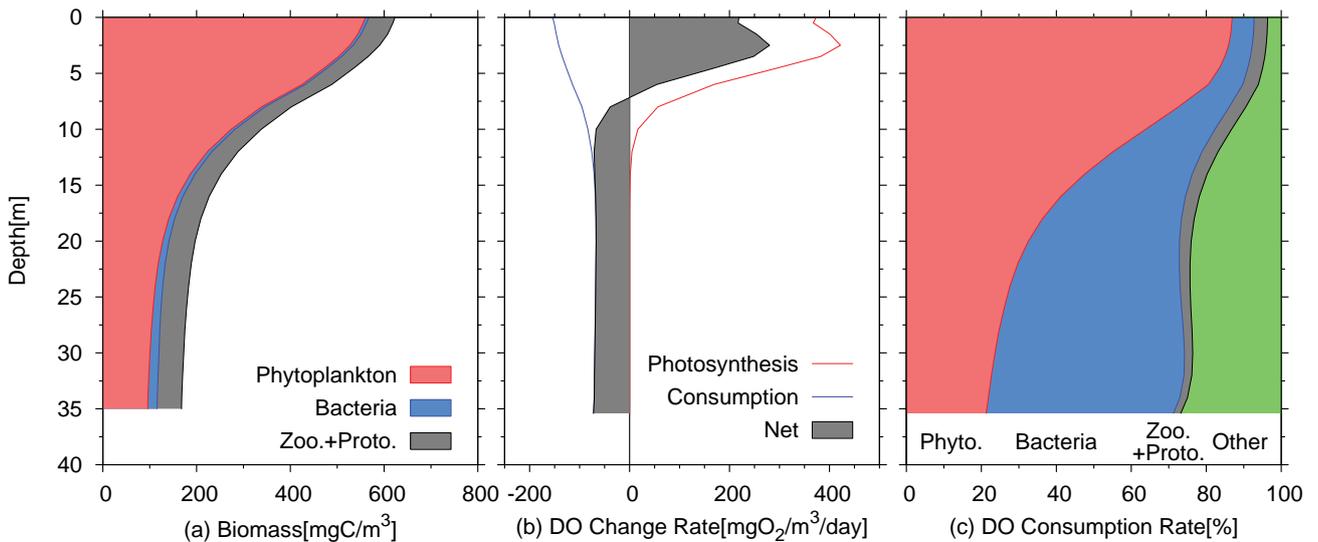


図-3.27 伊勢湾中央部 (St. 11) における微生物量と酸素消費に関するプロファイル (全期間平均): (a)は生物量 (植物プランクトン, 細菌, 動物プランクトン+原生動物). (b)は溶存酸素の変化速度 (光合成, 酸素消費, 正味). (c)は酸素消費の割合 (左から植物プランクトンの呼吸, 細菌の呼吸, 動物プランクトン+原生動物の呼吸, その他).

溶存酸素の変化は、光合成による増加と、呼吸や化学反応による消費に分けられる。光合成速度は最表層においては強光障害が発生するため、水深 2.5m で最大の $422[\text{mgO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ day}^{-1}]$ となり、15m 以下ではほぼ 0 となっていた。酸素消費は生物量の多い表層で最大の $-151[\text{mgO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ day}^{-1}]$ となり、15m 以下では約 $-70[\text{mgO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ day}^{-1}]$ で、ほぼ一定値となっていた。酸素増加と消費を合わせた正味の酸素変化速度は 7m 以深で減少に転じていた。

酸素消費の割合のプロファイルにおいて、表層は植物プランクトンによる呼吸が全体の酸素消費の 87% を占めていた。しかし、深くなるにつれて植物プランクトンの現存量とともに減少し、底層での酸素消費に占める割合は 21% であった。それとは逆に、細菌の呼吸が酸素消費に占める割合は深いほど高くなり、底層では 50% を占めていた。底層における貧酸素水塊の形成に、細菌の酸素消費が大きな影響を及ぼしていることが示唆された。

このように、伊勢湾における酸素消費に対する細菌の割合が定量的に示された。これは本研究によって始めて明らかとなったことである。ただし、細菌の現存量が過小評価されていることなど、モデルにはまだ改良すべき点が残されているため、より正確な定量化を行うことが今後の課題である。

4. まとめ

本研究では微生物ループを考慮した新しい浮遊生態系モデルを開発し、「LT」に組み込んだ。開発されたモデルを伊勢湾へ適用し、2004～2008 年の長期計算を行った。

計算結果と観測値を比較し、精度の検証を行った。潮流、水温、塩分については高精度な再現結果が得られ、水質についても植物プランクトンの鉛直分布や、夏場の底層貧酸素現象を良く再現していた。細菌や原生動物、動物プランクトン、植物プランクトン種の現存量は観測結果と概ね一致していたが、季節変動や鉛直分布については改良の余地が残された。モデルの精度向上を推進するためにパラメータの改良は今後も漸次行っていくことが重要となる。

加えて、モデルの計算結果から、微生物ループの役割について解析を行った。細菌の現存量（ストック）は生物量の 3.8% であるが、細菌生産量（フロー）は一次生産の 18% に相当することが明らかとなった。また、動物プランクトンの飼料源は植物プランクトンが主体的であることを定量的に示した。さらに、伊勢湾中央部において、

酸素消費に対する細菌の割合が底層で 50% を占めることを明らかにした。

本研究で開発された浮遊生態系モデルは、沿岸域の水環境を解析・予測するツールとして有用であることが示され、実務レベルでの使用に耐え得ると考えられた。今後は他の海域に適用することで精度の向上を進めていきたい。加えて、底泥内の物質循環を解析するために、底生生態系モデルの機能追加を行う予定である。

(2011年1月27日受付)

謝辞

本研究は国土交通省中部地方整備局港湾空港部、ならびに国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所の協力のもとに実施されたものである。愛知県建設部河川課には河川流量データを提供して頂きました。愛知県水産試験場には海幸丸の観測データを提供して頂きました。東海大学 中田喜三郎教授、ならびに伊勢湾再生海域検討会研究WGの委員の方々には計算結果について有益なご助言を頂きました。みずほ情報総研株式会社 眞雅行様、荒木和博様、ならびに株式会社ブライア・コンサルティング 坂本光様には本モデルのプログラミングを行って頂きました。港湾空港技術研究所 細川真也主任研究官には生態系モデルのパラメータについてご助言を頂きました。査読委員の方々には有益なご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 赤松良久・池田駿介・中嶋洋平・戸田祐嗣 (2002) : マングローブ水域における小潮期の有機物・栄養塩輸送—地下浸透流に着目して—, 土木学会論文集, No. 7 12/II-60, pp. 175-186.
- いであ株式会社 (2008) : 平成 19 年度特殊案件等環境影響審査調査 (三河湾神野西地区埋立事業に係る環境影響基礎調査) 報告書, 環境省総合環境政策局, 23 4p.
- 今井一郎・山口峰生 (1996) : 北部広島湾における海洋細菌の現存量と生産量, および従属栄養性微小鞭毛虫類の季節変化, 南西水研研報, No. 29, pp. 75-86.
- 江里口知己 (2001) : 伊勢湾の貧酸素水塊形成に関する研究, 修士論文, 東海大学大学院海洋学研究所, 18 0p.
- 大見智亮・内藤大輔・酒井亨・山口将人・寺澤知彦・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.

- 海上保安庁水路部(1992):日本沿岸潮汐調和定数表,日本水路協会,267p.
- 笥茂徳・藤原建紀・杉山陽一(2004):伊勢湾底層への間欠的な外海水の進入とそれに伴う湧昇,海の研究,第13巻,pp.537-551.
- 笠井亮秀(2003):河川水と海水の接合点,沿岸海洋研究,第40巻,pp.101-108.
- 気象庁(web1):過去の気象データ検索,http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php.,参照2010-10.
- 気象庁(web2):潮汐観測資料,http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/genbo/index.php,参照2010-02.
- 北澤大輔(2001):数値シミュレーションによる超大型浮体式構造物の海洋生態系への影響に関する研究,博士論文,東京大学大学院工学系研究科,373p.
- 桑形恒男・近藤純正(1990):東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定,天気,37巻,3号,pp.55-59.
- 桑形恒男・近藤純正(1991):西日本アメダス地点における地表面粗度の推定,天気,38巻,8号,pp.15-18.
- 国土交通省河川局(web):水文水質データベース,http://www1.river.go.jp/,参照2010-11.
- 国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所(web):三河港湾事務所,http://www.mikawa.pa.cbr.mlit.go.jp/index.html.参照2010-11.
- 国立環境研究所(web):環境数値データベース,http://www.nies.go.jp/igreen/index.html.,参照2010-11.
- 越川海・原田茂樹・渡辺正孝(1999):溶存有機物の微生物食物連鎖を経由する高次栄養段階への伝達,日本プランクトン学会報,Vol.46,pp.78-87.
- 児玉真史・田中勝久・澤田知希・都築基・山本有司・柳澤豊重(2006):矢作川下流におけるDSi:DIN比の変動要因,水環境学会誌,Vol.26,pp.93-99.
- 木幡邦男・渡辺信・中村泰男・渡辺正孝(1982):赤潮鞭毛藻 *Olisthodiscus luteus* のリン酸制限化での静置培養;増殖およびリン摂取の動力学的解析,国立郊外研究所研究報告,第30巻,pp.95-111.
- 小沼晋・五島勇樹・中村由行(2002):成長モデルを用いた東京湾番洲干潟での二枚貝による懸濁物除去量の推定,海岸工学論文集,第49巻,pp.1126-1130.
- 小山由美子・藤田昌史・信岡尚道・三村信男(2010):浮遊細菌群の動態を考慮した汽水域生態系モデルの構築,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.66, No.1, pp.1141-1145.
- 佐々木克之(1998):沿岸生態系における酸素,窒素,炭素およびリンの循環,沿岸の環境圏,平野敏行(編),フジ・テクノシステム,pp.275-281.
- 田口浩一(1997):浮遊生態系モデル—構造と応用例I—,生態系工学研究会,第17回シンポジウム,pp.44-55.
- 田中陽二・鈴木高二朗(2010):密度流・湧昇流の計算を目的とした三次元沿岸域流動モデルの開発について,港湾空港技術研究所報告,第49巻,第1号,pp.3-25.
- 田中陽二・鈴木高二朗・内田吉文・白崎正浩(2010):伊勢湾・三河湾における海洋短波レーダーを用いた表層平均流に関する研究,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.66, No.1, pp.1431-1435.
- 土木学会(1999):水理公式集[平成11年版],丸善,713p.
- 中田喜三郎(1993):生態系モデル—定式化と未知のパラメータの推定法—,海洋工学コンファレンス,第8号,pp.99-138.
- 中野伸一(2000):湖沼有機物動態における微生物ループでの原生動物の役割,日本生態学会誌,Vol.50,pp.41-54.
- 日本河川協会(2007):雨量・流量年表データベース,DVD-ROM.
- 二宮秀典・赤坂裕・松尾陽(1996):AMeDASのデータを用いた時刻別大気放射量の推定法,空気調和・衛生工学論文集, No.60, pp.133-144.
- 福留真樹・畑恭子・中田喜三郎(2000):1995年5月～1996年3月の伊勢湾における細菌, *Synechococcus*, ANF, HNF, 動物プランクトン, ネット動物プランクトンの変動と相互の関係,海洋理工学会誌,第6巻,pp.59-72.
- 古谷研(1999):微生物食物網におけるピコ・ナノ植物プランクトン,日本プランクトン学会報,第46巻,pp.60-66.
- 堀口文男(2001):沿岸生態系モデルによる東京湾の通年シミュレーション,海洋理工学会誌,Vol.7,pp.1-30.
- 本多忠夫・光易恒(1980):水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究,海岸工学論文集,第27巻,pp.90-93.
- 柳哲雄・黒田誠(1988):伊勢・三河湾の潮汐・潮流,愛媛大学工学部紀要,第17巻,pp.291-298.
- 柳哲雄・屋良由美子・松村剛・石丸隆(2004):東京湾のリン・窒素循環に関する数値生態系モデル解析,

- Vol. 13, pp. 61-72.
- Azam, F. et al. (1983): The ecological role of water-column microbes in the sea, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 10, pp. 257-263.
- Baretta, J. W. et al. (1995): The European regional seas ecosystem model, a complex marine ecosystem model, *Neth. J. Sea Res.* Vol. 33, pp. 233-246.
- Barzevinski, M. A. (1985) The Si:C:N ratio of marine diatoms: Interspecific variability and the effect of some environmental variables, *J. Phycol.*, Vol. 21, pp. 347-357.
- Cole, J. J. et al. (1982): Interactions between bacteria and algae in aquatic ecosystems, *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, Vol. 13, pp. 291-314.
- Cole, J. J. et al. (1988): Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 43, pp. 1-10.
- Droop, M. R. (1974): The nutrient status of algal cells in continuous culture, *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, Vol. 54, pp. 825-855.
- Ducklow, H. W. et al. (1986): Bacterioplankton: A sink for carbon in coastal marine plankton community, *Science*, Vol. 232, pp. 865-867.
- Eppley, R. W. (1972): Temperature and phytoplankton growth in the sea, *Fish. Bull.* Vol. 70, pp. 1063-1085.
- Fagerbakke, K. M. et al. (1996): Content of carbon, nitrogen, oxygen, sulfur and phosphorus in native aquatic and cultured bacteria, *Aquat. Microb. Ecol.*, Vol. 10, pp. 15-27.
- Fenchel, T. (1987): *Ecology of Protozoa: The biology of free-living phagotrophic protists*, Science Tech Publishers. 197p.
- Fossing, H. et al. (2004): A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay (Denmark), NERI Technical Report, No. 483, 65p.
- Horrigan, S. G. and Springer, A. L. (1990): Oceanic and estuarine ammonium oxidation: Effects of light, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 35, pp. 479-482.
- Ishikawa, M. and Nishimura, H. (1983): A new method of evaluating the mineralization of particulate and dissolved photoassimilated organic matter, *J. Oceanogr. Society Japan*, Vol. 39, pp. 29-42.
- Ivlev, V. S. (1945): The biological productivity of waters, *Usp. Sovrem Biol.*, Vol. 19, pp. 98-120.
- Kawamiya, M. et al. (1995): An ecological-physical coupled model applied to station Papa, *J. Oceanogr.*, Vol. 51, pp. 635-664.
- Kirchman, D. L. (2008): *Microbial ecology of the oceans*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 593p.
- Kishi, M. J. et al. (2001): An ecological-physical coupled model with ontogenetic vertical migration of zooplankton in the Northwestern Pacific, *J. Oceanogr.*, Vol. 57, pp. 499-507.
- Lehman, J. T. et al. (1975): The assumptions and rationales of phytoplankton population dynamics, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 20, pp. 343-364.
- Naganuma, T. (1997): Abundance and production of bacterioplankton along a transect of Ise Bay, Japan, *J. Oceanogr.*, Vol. 53, pp. 579-583.
- Nagata, T. (2000): Production mechanisms of dissolved organic matter, *Microbial Ecology of the Oceans*, Eds., Kirchman, D. L., Wiley-Liss, Inc., pp. 121-152.
- Nakata, K. et al. (2004): Characterization of ocean productivity using a new physical-biological coupled ocean model, *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*, Eds., Shiyomi, M. et al., Terrapub, pp. 1-44.
- Nishimura, Y. and Nagata, T. (2007): Alphaproteobacterial dominance in a large mesotrophic lake (Lake Biwa, Japan), *Aquat. Microb. Ecol.*, Vol. 48, pp. 231-240.
- Nixon, S. W. (1988): Physical energy inputs and the comparative ecology of lake and marine ecosystems, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 33, pp. 1005-1025.
- Parsons, T. R. et al. (1967): Some observations on the Dependence of Zooplankton Grazing on the Cell Size and Concentration of Phytoplankton Blooms, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 23, pp. 10-17.
- Riley, G. A. (1956): *Physical Oceanography*, Bull. Bingham Oceanogr. Collect., Vol. 15, pp. 15-46.
- Sherr, E. B. et al. (1987): Bacteria: Link or sink?, *Science*, Vol. 235, pp. 88a-88.
- Sohma, A. et al. (2004): Modeling and evaluating the ecosystem of sea-grass beds, shallow waters without sea-grass, and an oxygen-depleted offshore area, *J. Mar. Syst.*, Vol. 45, pp. 105-142.
- Solidoro, C. et al. (2000): Modelling the growth of *Tapes philippinarum* in Northern Adriatic lagoons,

- Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.199, pp.137-148.
- Steele, J. H. (1962): Environmental control of photosynthesis in the sea, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.7, pp.137-150.
- Uye, S. et al. (2000): Abundance, biomass, production and trophic roles of micro- and net-zooplankton in Ise Bay, central Japan, in Winter, *J. Oceanogr.*, Vol.56, pp.389-398.
- Watt, W. D. (1966): Release of dissolved organic material from the cells of phytoplankton populations, *Proc. R. Soc. Lond. B*, Vol.164, pp.521-551.
- Westrich, J. T. and Berner, R. A. (1984): The role of sedimentary organic matter in bacterial sulfate reduction: The G model tested, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.29, pp.236-249.
- Wroblewski, J. S. (1977): A model of phytoplankton plume formation during variable Oregon upwelling, *J. Mar. Res.*, Vol.35, pp.357-394.
- Yamanaka, Y. et al. (2004): An ecosystem model coupled with Nitrogen-Silicon-Carbon cycles applied to station A7 in the Northwestern Pacific, *J. Oceanogr.*, Vol.60, pp.227-241.

港湾空港技術研究所報告 第50巻第2号

2011.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人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 大應

Copyright © (2011) by PARI

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

この資料は、港湾空港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、複写は港湾空港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。

CONTENTS

Development on the Pelagic Ecosystem Model

Considering the Microbial Loop for Estuary and Coastal Areas

…… Yoji TANAKA, Yoshiyuki NAKAMURA, Kojiro SUZUKI, Tetsunori INOUE, Yoko NISHIMURA …… 3