

# 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

## Development of Ecosystem Model for Brackish Lakes Considering Dynamics of Suspended Bacteria

小山由美子<sup>1</sup>・藤田昌史<sup>2</sup>・信岡尚道<sup>3</sup>・三村信男<sup>4</sup>

Yumiko OYAMA, Masafumi FUJITA, Hisamichi NOBUOKA and Nobuo MIMURA

We developed an ecosystem model for brackish lakes considering dynamics of suspended bacteria such as heterotrophs and nitrifier, and applied it to Hinuma Lake for its calibration and validation. The model predicted well seasonal water quality changes in 1998 and 2004 compared with the previous model in which the suspended bacteria were not incorporated as model components. In particular, the estimation of the biological reactions such as nitrification and denitrification was effective in the simulation of ammonia and nitrite concentration. Additionally, nitrogen balance in Hinuma Lake estimated from the simulation showed the reliability of the model structure.

### 1. はじめに

湖沼流域対策を検討するうえで、その効果を適切に見積もることが求められる。湖沼生態系モデルは、その有効なツールとして期待されているが、従来のモデルでは限界がある。モデル成分として、COD、窒素の除去・変換反応の主体となる浮遊細菌群を独立させていない場合、例えば、CODの最大除去速度定数などの値には、関係する細菌群の存在量が間接的に含まれている。したがって、流域の生活排水対策などにより、COD、窒素などの流入負荷の削減がなされると、明らかに湖内細菌群の存在量は減少することから、関係するパラメータを適宜キャリブレーションしなければならない。つまり、将来の湖内水質予測という観点では、このようなモデル構造では原理的に汎用性が低い。

そこで本研究では、有機物、窒素の計算に重要となる湖内浮遊細菌群として従属栄養細菌、硝化細菌をモデル成分として組み込み、それらの動態を計算できる生態系モデルを作成した。また、窒素の挙動をより正確に見積もるために、全窒素(T-N)の形態をアンモニア態窒素(NH<sub>4</sub>-N)、硝酸態窒素(NO<sub>3</sub>-N)、有機態窒素(Org-N)にわけた。そして、構築したモデルを汽水湖沼沼に適用し、その有効性を検討した。

### 2. 汽水域生態系モデルの構築

本モデルは、流動場、密度場、生態系に関する三つのサブモデルから構成されている。流動・密度場のモデル

は、三次元のNavier-Stokesの式、連続の式、塩分濃度の拡散方程式、熱収支の式、海水の密度と水温・塩分濃度を関係づける状態方程式を基礎式とした三村ら(1993)のモデルを用いた。

生態系モデルは、中田(1993)にしたがって作成した塚田ら(1997)のモデルに、バイオマス成分として従属栄養細菌(X<sub>H</sub>)、硝化細菌(X<sub>N</sub>)を追加した。これらの反応速度式やパラメータは、River Water Quality Model No. 1(IWA, 2001)にしたがった。これにともない、懸濁態有機物は懸濁態分解性有機物(X<sub>S</sub>)と懸濁態難分解性有機物(X<sub>I</sub>)にわけた。また、全無機窒素(DIN)はアンモニア性窒素(S<sub>NH4</sub>)、硝酸性窒素(S<sub>NO3</sub>)にわけて、有機態窒素(X<sub>ON</sub>)も考慮することにより、全窒素を表現できるようにした。従来は、懸濁態有機物や溶存態有機物にN/C比を乗じることによりDINを算定していたが、X<sub>N</sub>やX<sub>H</sub>をモデル成分として導入することにより、硝化反応や脱窒反応が計算できるようになり、アンモニア性窒素や硝酸性窒素を有機物とは独立に計算できるようになった。さらに、計算対象となる湖沼の藻類群集を考慮して、植物プランクトンを珪藻(X<sub>ALG1</sub>)、藍藻(X<sub>ALG2</sub>)、緑藻(X<sub>ALG3</sub>)にわけた(小林, 2008)。

以上より、本研究で作成した浮遊細菌群導入型の生態系モデルの成分は、X<sub>ALG1</sub>, X<sub>ALG2</sub>, X<sub>ALG3</sub>, 動物プランクトン(X<sub>CON</sub>), X<sub>H</sub>, X<sub>N</sub>, X<sub>S</sub>, X<sub>I</sub>, 溶存態有機物(S<sub>S</sub>), 溶存酸素(S<sub>O2</sub>), S<sub>NH4</sub>, S<sub>NO3</sub>, リン酸態リン(S<sub>PO4</sub>)の計13成分で構成されている(図-1)。基礎式は、移流拡散方程式に生物反応項を加えた式(1)であり、13成分(C)の時間変化をあらわす。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \Delta C \dots (1)$$

1 修(工) (株)日水コン 東部下水道事業部  
2 正会員 博(工) 茨城大学准教授 工学部都市システム  
工学科  
3 正会員 博(工) 茨城大学准教授 工学部都市システム  
工学科  
4 正会員 工博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育  
研究センター

表-1 浮遊細菌群導入型のPetersonマトリクス  
(a) 植物プランクトン

	珪藻 $X_{AlG1}$	藍藻 $X_{AlG2}$	緑藻 $X_{AlG3}$	懸濁態 分解性 有機物 $X_5$	懸濁態 難分解性 有機物 $X_7$	溶存 酸素 $S_{O2}$	アンモニア性 窒素 $S_{NH}$	硝酸性 窒素 $S_{NO3}$	リン酸態 リン $S_{PO4}$	反応速度式
1. Growth of $X_{AlG1}$ with $S_{NH}$	1					1	$-a_{N,AlG1}$		$-a_{P,AlG1}$	$k_{e,AlG1} \times \left( \frac{T}{K_{T,AlG1}} \exp\left(1 - \frac{T}{K_{T,AlG1}}\right) \right)^n \times \frac{S_{NH} + S_{NO3}}{K_{S,AlG1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG1,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,AlG1,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG1,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,AlG1}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,AlG1}}\right) X_{AlG1}$
2. Growth of $X_{AlG2}$ with $S_{NH}$		1				1	$-a_{N,AlG2}$		$-a_{P,AlG2}$	$k_{e,AlG2} \times \left( \frac{T}{K_{T,AlG2}} \exp\left(1 - \frac{T}{K_{T,AlG2}}\right) \right)^n \times \frac{S_{NH} + S_{NO3}}{K_{S,AlG2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG2,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,AlG2,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG2,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,AlG2}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,AlG2}}\right) X_{AlG2}$
3. Growth of $X_{AlG3}$ with $S_{NH}$			1			1	$-a_{N,AlG3}$		$-a_{P,AlG3}$	$k_{e,AlG3} \times \left( \frac{T}{K_{T,AlG3}} \exp\left(1 - \frac{T}{K_{T,AlG3}}\right) \right)^n \times \frac{S_{NH} + S_{NO3}}{K_{S,AlG3} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG3,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,AlG3,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG3,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,AlG3}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,AlG3}}\right) X_{AlG3}$
4. Growth of $X_{AlG1}$ with $S_{NO3}$	1					1		$-a_{N,AlG1}$	$-a_{P,AlG1}$	$k_{e,AlG1} \times \left( \frac{T}{K_{T,AlG1}} \exp\left(1 - \frac{T}{K_{T,AlG1}}\right) \right)^n \times \frac{S_{NH} + S_{NO3}}{K_{S,AlG1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG1,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,AlG1,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG1,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,AlG1}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,AlG1}}\right) X_{AlG1}$
5. Growth of $X_{AlG2}$ with $S_{NO3}$		1				1		$-a_{N,AlG2}$	$-a_{P,AlG2}$	$k_{e,AlG2} \times \left( \frac{T}{K_{T,AlG2}} \exp\left(1 - \frac{T}{K_{T,AlG2}}\right) \right)^n \times \frac{S_{NH} + S_{NO3}}{K_{S,AlG2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG2,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,AlG2,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG2,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,AlG2}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,AlG2}}\right) X_{AlG2}$
6. Growth of $X_{AlG3}$ with $S_{NO3}$			1			1		$-a_{N,AlG3}$	$-a_{P,AlG3}$	$k_{e,AlG3} \times \left( \frac{T}{K_{T,AlG3}} \exp\left(1 - \frac{T}{K_{T,AlG3}}\right) \right)^n \times \frac{S_{NH} + S_{NO3}}{K_{S,AlG3} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG3,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,AlG3,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,AlG3,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,AlG3}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,AlG3}}\right) X_{AlG3}$
7. Aerobic Respiration of $X_{AlG1}$	-1			$f_{A,AlG1}$	$1-f_{A,AlG1}$		$-a_{N,AlG1}$		$-a_{P,AlG1}$	$k_{r,AlG1} \times e^{a_{N,AlG1}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,AlG1} + S_{O2}} X_{AlG1}$
8. Aerobic Respiration of $X_{AlG2}$		-1		$f_{A,AlG2}$	$1-f_{A,AlG2}$		$-a_{N,AlG2}$		$-a_{P,AlG2}$	$k_{r,AlG2} \times e^{a_{N,AlG2}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,AlG2} + S_{O2}} X_{AlG2}$
9. Aerobic Respiration of $X_{AlG3}$			-1	$f_{A,AlG3}$	$1-f_{A,AlG3}$		$-a_{N,AlG3}$		$-a_{P,AlG3}$	$k_{r,AlG3} \times e^{a_{N,AlG3}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,AlG3} + S_{O2}} X_{AlG3}$
10. Death of $X_{AlG1}$	-1			$(1-f_{A,AlG1}) \times Y_{AlG1,1}$	$f_{A,AlG1} \times Y_{AlG1,1}$	$1-Y_{AlG1,1}$	$a_{N,AlG1} \times (1-f_{A,AlG1}) \times Y_{AlG1,1} + a_{N,AlG1} \times Y_{AlG1,1}$			$k_{d,AlG1} \times e^{a_{N,AlG1}(T-1)} X_{AlG1}$
11. Death of $X_{AlG2}$		-1		$(1-f_{A,AlG2}) \times Y_{AlG2,1}$	$f_{A,AlG2} \times Y_{AlG2,1}$	$1-Y_{AlG2,1}$	$a_{N,AlG2} \times (1-f_{A,AlG2}) \times Y_{AlG2,1} + a_{N,AlG2} \times Y_{AlG2,1}$			$k_{d,AlG2} \times e^{a_{N,AlG2}(T-1)} X_{AlG2}$
12. Death of $X_{AlG3}$			-1	$(1-f_{A,AlG3}) \times Y_{AlG3,1}$	$f_{A,AlG3} \times Y_{AlG3,1}$	$1-Y_{AlG3,1}$	$a_{N,AlG3} \times (1-f_{A,AlG3}) \times Y_{AlG3,1} + a_{N,AlG3} \times Y_{AlG3,1}$			$k_{d,AlG3} \times e^{a_{N,AlG3}(T-1)} X_{AlG3}$

(b) 動物プランクトン

	珪藻 $X_{AlG1}$	藍藻 $X_{AlG2}$	緑藻 $X_{AlG3}$	動物 プランクトン $X_{COV}$	従属栄養 細菌 $X_H$	硝化細 菌 $X_N$	懸濁態分解 性有機物 $X_5$	懸濁態難分解 性有機物 $X_7$	溶存酸素 $S_{O2}$	アンモニア性窒素 $S_{NH}$	リン酸態リン $S_{PO4}$	反応速度式
13. Growth of $X_{COV}$ on $X_{AlG1}$	$-1/Y_{COV}$			1			$f_f Y_{COV}$		$(1-f_c) Y_{COV}$	$(a_{N,AlG1} - a_{N,COV}) \times Y_{COV}$	$(a_{P,AlG1} - a_{P,COV}) \times Y_{COV}$	$k_{e,COV} \times e^{a_{N,COV}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,COV} + S_{O2}} X_{COV}$
14. Growth of $X_{COV}$ on $X_{AlG2}$		$-1/Y_{COV}$		1			$f_f Y_{COV}$		$(1-f_c) Y_{COV}$	$(a_{N,AlG2} - a_{N,COV}) \times Y_{COV}$	$(a_{P,AlG2} - a_{P,COV}) \times Y_{COV}$	$k_{e,COV} \times e^{a_{N,COV}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,COV} + S_{O2}} X_{COV}$
15. Growth of $X_{COV}$ on $X_{AlG3}$			$-1/Y_{COV}$	1			$f_f Y_{COV}$		$(1-f_c) Y_{COV}$	$(a_{N,AlG3} - a_{N,COV}) \times Y_{COV}$	$(a_{P,AlG3} - a_{P,COV}) \times Y_{COV}$	$k_{e,COV} \times e^{a_{N,COV}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,COV} + S_{O2}} X_{COV}$
16. Growth of $X_{COV}$ on $X_5$				1			$(f_f - 1) Y_{COV}$		$(1-f_c) Y_{COV}$	$(a_{N,5} - a_{N,COV}) \times Y_{COV}$	$(a_{P,5} - a_{P,COV}) \times Y_{COV}$	$k_{e,COV} \times e^{a_{N,COV}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,COV} + S_{O2}} X_{COV}$
17. Growth of $X_{COV}$ on $X_H$				1	$-1/Y_{COV}$		$f_f Y_{COV}$		$(1-f_c) Y_{COV}$	$(a_{N,H} - a_{N,COV}) \times Y_{COV}$	$(a_{P,H} - a_{P,COV}) \times Y_{COV}$	$k_{e,COV} \times e^{a_{N,COV}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,COV} + S_{O2}} X_{COV}$
18. Growth of $X_{COV}$ on $X_N$				1		$-1/Y_{COV}$	$f_f Y_{COV}$		$(1-f_c) Y_{COV}$	$(a_{N,N} - a_{N,COV}) \times Y_{COV}$	$(a_{P,N} - a_{P,COV}) \times Y_{COV}$	$k_{e,COV} \times e^{a_{N,COV}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,COV} + S_{O2}} X_{COV}$
19. Aerobic Respiration of $X_{COV}$				-1			$f_{A,COV}$			$a_{N,COV} \times f_{A,COV} \times a_{N,H}$	$a_{P,COV} \times f_{A,COV} \times a_{P,H}$	$k_{r,COV} \times e^{a_{N,COV}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,COV} + S_{O2}} X_{COV}$
20. Death of $X_{COV}$				-1			$(1-f_{A,COV}) \times Y_{COV,1}$			$a_{N,COV} \times (1-f_{A,COV}) \times Y_{COV,1} + a_{N,COV} \times Y_{COV,1}$	$a_{P,COV} \times (1-f_{A,COV}) \times Y_{COV,1} + a_{P,COV} \times Y_{COV,1}$	$k_{d,COV} \times e^{a_{N,COV}(T-1)} X_{COV}$

(c) 加水分解

	懸濁態分解性有機物 $X_5$	懸濁態難分解性有機物 $X_7$	アンモニア性窒素 $S_{NH}$	リン酸態リン $S_{PO4}$	反応速度式
21. Hydrolysis.	-1	-1	$a_{N,5} \times Y_{NH} \times a_{N,5}$	$a_{P,5} \times Y_{PO4} \times a_{P,5}$	$k_{hyd} \times e^{a_{N,5}(T-1)} X_5$

(d) 従属栄養細菌

	懸濁態 分解性 有機物 $X_5$	懸濁態 難分解性 有機物 $X_7$	溶存 酸素 $S_{O2}$	アンモニア性 窒素 $S_{NH}$	硝酸性窒素 $S_{NO3}$	リン酸態リン $S_{PO4}$	反応速度式
22. Aerobic Growth of $X_H$ with $S_{NH}$	1		$-1/Y_{H,N}$	$-1(Y_{H,N} - 1)$	$a_{N,5} \times Y_{H,N} \times a_{N,5}$	$a_{P,5} \times Y_{H,N}$	$k_{e,H} \times e^{a_{N,H}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,H} + S_{O2}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,H} + S_{NH}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,H,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,H,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,H,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,H}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,H}}\right) X_H$
23. Aerobic Growth of $X_H$ with $S_{NO3}$	1		$-1/Y_{H,N}$	$-1(Y_{H,N} - 1)$	$a_{N,5} \times Y_{H,N}$	$a_{P,5} \times Y_{H,N}$	$k_{e,H} \times e^{a_{N,H}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,H} + S_{O2}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,H} + S_{NH}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,H,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NO3}}{K_{N,H,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,H,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,H}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,H}}\right) X_H$
24. Aerobic Respiration of $X_H$	-1		$f_{A,H}$	$1-f_{A,H}$	$a_{N,5} \times f_{A,H} \times a_{N,5}$	$a_{P,5} \times f_{A,H}$	$k_{r,H} \times e^{a_{N,H}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,H} + S_{O2}} X_H$
25. Anoxic Growth of $X_H$ with $S_{O2}$	1		$-1/Y_{H,N}$		$a_{N,5} \times Y_{H,N} \times a_{N,5}$	$a_{P,5} \times Y_{H,N}$	$k_{e,H} \times e^{a_{N,H}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,H} + S_{O2}} \times \frac{K_{O2,H}}{K_{O2,H} + S_{O2}} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,H} + S_{O2}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,H} + S_{NH}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,H,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,H,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,H,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,H}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,H}}\right) X_H$
26. Anoxic Respiration of $X_H$	-1		$f_{A,H}$		$a_{N,5} \times f_{A,H} \times a_{N,5}$	$a_{P,5} \times f_{A,H}$	$k_{r,H} \times e^{a_{N,H}(T-1)} \times \frac{K_{O2,H}}{K_{O2,H} + S_{O2}} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,H} + S_{O2}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,H} + S_{NH}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,H,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,H,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,H,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,H}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,H}}\right) X_H$

(e) 硝化細菌

	硝化細菌 $X_N$	懸濁態難分解性 有機物 $X_7$	溶存 酸素 $S_{O2}$	アンモニア性 窒素 $S_{NH}$	硝酸性窒素 $S_{NO3}$	リン酸態リン $S_{PO4}$	反応速度式
27. Growth of $X_N$	1		$(4.57 \times Y_N) / Y_N$	$-1/Y_N$	$(1 - a_{N,N}) \times Y_N$	$-a_{P,N}$	$k_{e,N} \times e^{a_{N,N}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,N} + S_{O2}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,N} + S_{NH}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,N,1} + S_{NH} + S_{NO3} + S_{PO4}} \times \frac{S_{NH}}{K_{N,N,1} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{S_{PO4}}{K_{P,N,2} + S_{NH} + S_{NO3}} \times \frac{I}{K_{I,N}} \exp\left(1 - \frac{I}{K_{I,N}}\right) X_N$
28. Aerobic Respiration of $X_N$	-1		$f_{A,N}$	$1-f_{A,N}$	$a_{N,N} \times f_{A,N}$	$-f_{A,N} \times a_{P,N}$	$k_{r,N} \times e^{a_{N,N}(T-1)} \times \frac{S_{O2}}{K_{O2,N} + S_{O2}} X_N$

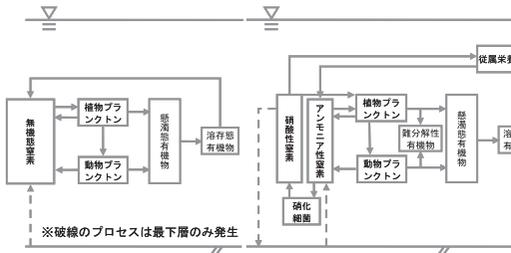


図-1 モデルの概念図 (左：従来型, 右：浮遊細菌群導入型)

ここで,  $u, v, w$ は流速成分,  $K_x, K_y, K_z$ は各方向の拡散係数である. 生物変化項 ( $\Delta C$ ) は, 当該成分の増殖, 死滅あるいは生成, 消費が計算される. 具体的には表-1にPetersonマトリクスを示したが, 反応速度式に化学量論係数を乗じて物質収支をとることで $\Delta C$ が計算される. 一方, 浮遊細菌群導入型モデルの妥当性を評価するために, 塚田ら (1997) のモデルで植物プランクトンを前述の三成分にわけたものを従来型モデルとした.

### 3. 計算対象と計算条件

計算対象は, 茨城県中央部に位置する汽水湖沼沼を対象とした. 計算領域は, 大洗からの海水の侵入がある汽水域である (図-2). 水域を水平方向に100mの格子に分割したところ, x方向に134マス, y方向に112マスとなった. 鉛直方向には0.5mまたは1.0mで区切り, 最大20層に分割した. タイムステップは30sとした.

計算に必要となる入力データは, 気温, 降雨量, 日射量, 雲量, 風速, 風向, 水蒸気圧である. これらは, 日本気象協会のSDPデータより, 水戸気象台における当該年度の1時間ごとの実測値を30s間隔に補間して与えた.

上流境界として, 那珂川については国土交通省が観測した毎時水位データを, 濁沼川については茨城県が観測した毎時流量データを与えた. 下流境界として, 茨城県

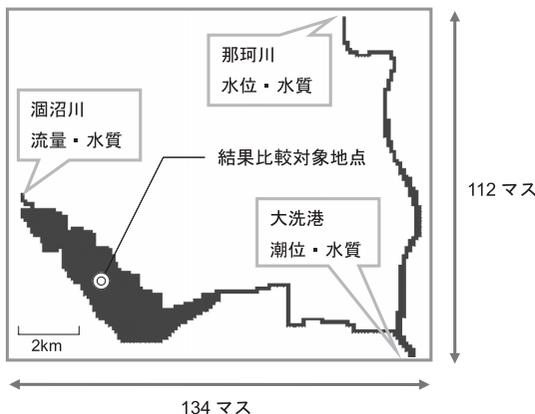


図-2 計算領域

表-2 浮遊細菌群導入型モデルのパラメータ

	記号	値	単位
植物プランクトン			
増殖収率	$Y_{ALG}$	0.62	gCOD/gCOD
最大比増殖速度 (珪藻)	$k_{e,ALG1}$	1.3	1/day
最大比増殖速度 (藍藻)	$k_{e,ALG2}$	2.0	1/day
最大比増殖速度 (緑藻)	$k_{e,ALG3}$	1.9	1/day
最大比呼吸速度	$k_{r,ALG}$	0.05	1/day
最大比死滅速度	$k_{d,ALG}$	0.05	1/day
死滅に伴う難分解性有機物の生成率	$f_{i,ALG}$	0.2	gCOD/gCOD
温度係数	$\beta_{ALG}$	0.046	1/°C
窒素の飽和定数 (珪藻)	$K_{N,ALG1}$	0.01	gN/m <sup>3</sup>
窒素の飽和定数 (藍藻)	$K_{N,ALG2}$	0.005	gN/m <sup>3</sup>
窒素の飽和定数 (緑藻)	$K_{N,ALG3}$	0.012	gN/m <sup>3</sup>
アンモニア性窒素の飽和定数	$K_{NH,ALG}$	0.01	gN/m <sup>3</sup>
リン酸態リンの飽和定数 (珪藻)	$K_{PO4,ALG1}$	0.001	gP/m <sup>3</sup>
リン酸態リンの飽和定数 (藍藻)	$K_{PO4,ALG2}$	0.0005	gP/m <sup>3</sup>
リン酸態リンの飽和定数 (緑藻)	$K_{PO4,ALG3}$	0.0012	gP/m <sup>3</sup>
溶解酸素の飽和定数	$K_{O2,ALG}$	0.2	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
最適水温 (珪藻)	$K_{T,ALG1}$	10	°C
最適水温 (藍藻)	$K_{T,ALG2}$	23	°C
最適水温 (緑藻)	$K_{T,ALG3}$	18	°C
水温に対する尖り度	$\theta_{ALG}$	3	-
最適日射量 (珪藻)	$K_{L,ALG1}$	180	cal/cm <sup>2</sup> /day
最適日射量 (藍藻)	$K_{L,ALG2}$	350	cal/cm <sup>2</sup> /day
最適日射量 (緑藻)	$K_{L,ALG3}$	250	cal/cm <sup>2</sup> /day
窒素含有率	$a_{N,ALG}$	0.07	gN/gCOD
リン含有率	$a_{P,ALG}$	0.01	gP/gCOD
動物プランクトン			
増殖収率	$Y_{CON}$	0.2	gCOD/gCOD
死滅収率	$Y_{CON,d}$	0.62	gCOD/gCOD
最大比増殖速度	$k_{e,CON}$	0.0002	m <sup>3</sup> /day <sup>-1</sup>
最大比呼吸速度	$k_{r,CON}$	0.05	1/day
最大比死滅速度	$k_{d,CON}$	0.05	1/day
死滅に伴う難分解性有機物の生成率	$f_{i,CON}$	0.2	gCOD/gCOD
増殖に伴う懸濁性有機物の生成率	$f_e$	0.4	gCOD/gCOD
温度係数	$\beta_{CON}$	0.08	1/°C
溶解酸素の飽和定数	$K_{O2,CON}$	0.5	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
窒素含有率	$a_{N,CON}$	0.06	gN/gCOD
リン含有率	$a_{P,CON}$	0.005	gP/gCOD
加水分解			
分解収率	$Y_{hyd}$	1	gCOD/gCOD
最大比加水分解速度	$k_{hyd}$	3	1/day
温度係数	$\beta_{hyd}$	0.07	1/°C
従属栄養細菌			
増殖収率 (好気)	$Y_{Heter}$	0.6	gCOD/gCOD
増殖収率 (嫌気)	$Y_{Heter,a}$	0.5	gCOD/gCOD
最大比増殖速度 (好気)	$k_{e,Heter}$	2	1/day
最大比増殖速度 (嫌気)	$k_{e,Heter,a}$	1.6	1/day
最大比自己分解速度 (好気)	$k_{d,Heter}$	0.1	1/day
最大比自己分解速度 (嫌気)	$k_{d,Heter,a}$	0.05	1/day
自己分解に伴う難分解性有機物の生成率	$f_{i,H}$	0.2	gCOD/gCOD
温度係数	$\beta_H$	0.07	1/°C
溶解性有機物の飽和定数 (好気)	$K_{S,Heter}$	3	gCOD/m <sup>3</sup>
窒素の飽和定数 (好気)	$K_{N,Heter}$	0.1	gN/m <sup>3</sup>
リン酸態リンの飽和定数 (好気)	$K_{PO4,Heter}$	0.01	gP/m <sup>3</sup>
溶解酸素の飽和定数 (好気)	$K_{O2,Heter}$	0.2	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
溶解性有機物の飽和定数 (嫌気)	$K_{S,Heter,a}$	3	gCOD/m <sup>3</sup>
硝酸性窒素の飽和定数 (嫌気)	$K_{NO3,Heter,a}$	0.5	gN/m <sup>3</sup>
リン酸態リンの飽和定数 (嫌気)	$K_{PO4,Heter,a}$	0.01	gP/m <sup>3</sup>
窒素含有率	$a_{N,H}$	0.07	gN/gCOD
リン含有率	$a_{P,H}$	0.01	gP/gCOD
硝化細菌			
増殖収率	$Y_A$	0.24	gCOD/gN
最大比増殖速度	$k_{e,N}$	0.8	1/day
最大比自己分解速度	$k_{d,N}$	0.05	1/day
自己分解に伴う難分解性有機物の生成率	$f_{i,N}$	0.2	gCOD/gCOD
温度係数	$\beta_N$	0.069	°C
アンモニア性窒素の飽和定数	$K_{NH4,N}$	0.5	gN/m <sup>3</sup>
リン酸態リンの飽和定数	$K_{PO4,N}$	0.02	gP/m <sup>3</sup>
溶解酸素の飽和定数	$K_{O2,N}$	0.5	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
窒素含有率	$a_{N,N}$	0.07	gN/gCOD
リン含有率	$a_{P,N}$	0.01	gP/gCOD
非生物			
懸濁性有機物の窒素含有率	$a_{N,S}$	0.04	gN/gCOD
懸濁性有機物のリン含有率	$a_{P,S}$	0.01	gP/gCOD
難分解性有機物の窒素含有率	$a_{N,X}$	0.02	gN/gCOD
難分解性有機物のリン含有率	$a_{P,X}$	0.01	gP/gCOD
溶解性有機物の窒素含有率	$a_{N,S}$	0.03	gN/gCOD
溶解性有機物のリン含有率	$a_{P,S}$	0.003	gP/gCOD

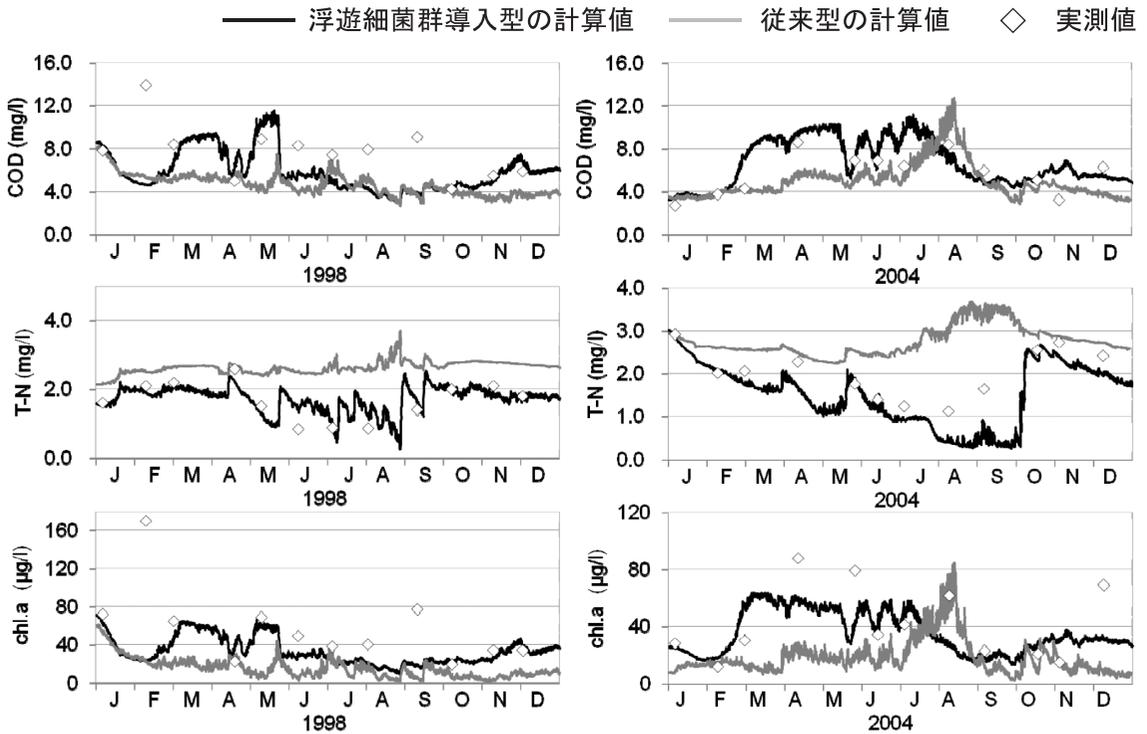


図-3 再現結果 (左側：1998年, 右側：2004年)

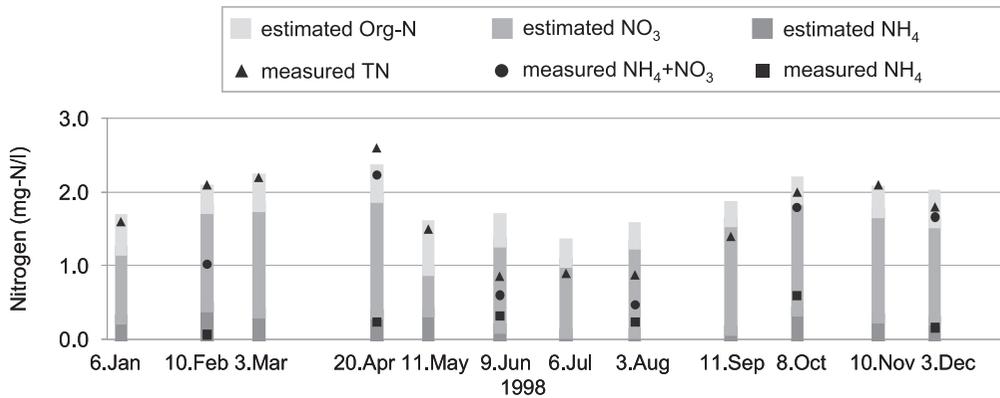


図-4 無機態窒素の再現結果

が観測した大洗港の毎時の潮位データを30s間隔に補間して与えた。

潟沼の水質に影響を及ぼす潟沼川の全窒素, 全リン濃度については, 茨城県公害技術センター (1999) の報告にしたがい, 流量に依存する関数で与えた。このとき, 同センターが提案する換算係数を用いて, 各形態に配分した。その他の河川については, 国立環境研究所が観測した1ヶ月ごとのデータを年平均したものを与えた。

細菌群などの初期値を与えることが難しいため, 仮に初期値を与え1年間の計算を行った。そして, 実測値や

成分のバランスを考慮して初期値を与えなおし, 1年間の計算を行い, これを計算結果とした。

#### 4. 汽水湖潟沼におけるモデルの再現性

環境省が公表している2004年の毎月の公共用水域水質調査データ (測定地点名: 宮前, 水深0.5m, 項目: COD, T-N, クロロフィルa (Chl. a)) を用いて, 浮遊細菌群導入型と従来型による計算結果を比較した (図-3)。いずれのモデルでも, パラメータは基本的に文献値付近の値を与えており, 計算値を実測値に合わせ込むようなキャリ

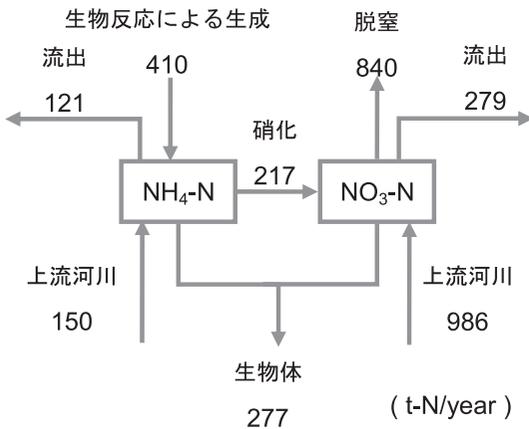


図-5 無機態窒素の年間収支の推定

レーションは行っていない。それにもかかわらず浮遊細菌群導入型の計算結果は、大局的に現地観測データとよく似た時間的変動を示していた。特に、夏期におけるT-Nの低下の再現性は、従来型モデルよりも格段に向上した。このときの浮遊細菌群導入型の生態系モデルのパラメータセットを表-2に示した。

次に、このパラメータセットを変更せずに1998年の計算を行った(図-3)。2004年における結果と同様に、浮遊細菌群導入型の方が実測データに近く再現することができた。CODが過小評価された期間が見られたが、これはChl. aが過小評価されたのと連動していると考えられる。前述したように、湖沼の藻類群集を考慮して、植物プランクトンを三成分導入することで、これらの動態を柔軟に表現することを試みたが、さらに改良の余地がある。

この年の夏期は、窒素が形態別に測定されているため、浮遊細菌群導入型の計算結果とあわせて図-4に示した。2004年と同様に、この期間はT-Nの減少が見られる。このとき、硝酸性窒素の減少の寄与が高いことから、脱窒が卓越していたものと考えられる。一方、計算結果でもこの過程を捉えることができている。脱窒などのプロセスを現実によく再現できたものと判断される。したがって、事前に想定したとおり、浮遊細菌群を独立のモデル成分として導入して、水質の再現に寄与の高い反応プロセスがより適切に計算されたことにより、従来型のモデル構造では再現が難しかったT-Nの形態別変化も捉えることができたといえる。

5. 構築したモデルの有効性

1998年の計算結果から求めた湖内の無機態窒素の年間収支を図-5に示した。現状では硝酸性窒素の流入量が極めて多く、そのほとんどが脱窒により系外に排出されて

いると見積もられている。一方で、将来は流域対策などにより硝酸性窒素の流入量が削減されることは容易に予想されるが、この場合、脱窒反応を受ける窒素量や生物体へ移行する窒素量が減少し、さらには生物反応により生成される量が減少するなどの波及効果が想定される。そのため、現状よりもそれぞれのプロセスの律速効果が高まるものと考えられる。いかえると、浮遊細菌群をモデル成分として導入し、その動態を独立させて表現することにより、将来の流入汚濁負荷の削減効果などをより正確に見積もることができるようになったといえる。

6. おわりに

浮遊細菌群の動態を考慮し、窒素の形態を分けた湖沼生態系モデルを湖沼に適用したところ、従来型よりも水質の季節変化を実測により近く再現することができた。特に窒素については、硝化や脱窒に係わる細菌群の反応を表現したことにより、T-Nだけでなく形態別濃度も再現することができた。また、計算から湖内の無機態窒素の収支を算出したところ、将来流域対策などがなされたときの湖内水質を予測する場合、本モデルのように浮遊細菌群を独立の成分として導入し、湖内水質の再現に重要となる反応プロセスを計算するモデル構造は妥当であることが示された。

現状では、底質モデルを特に改良しなくても水質の再現性は得られている。ただし、将来、流域対策などがなされると、それにともない底質環境も変化すると予想される。その意味では、湖内水質の予測において寄与の高い溶出プロセスなどを正しく見積もることが鍵となる。著者らが目指しているように、湖内水質の将来予測が可能な生態系モデルを構築するためには、今後は底質モデルの汎用性を高める研究を展開する必要があるが、本研究で浮遊系のモデル構造をより普遍化したことにより、目標に一步前進できたといえる。

参考文献

茨城県公害技術センター (1999) : 湖沼水質汚濁機構解明調査報告書。  
 小林正明 (2008) : 湖沼における物質循環予測と水質改善策の検討, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文。  
 塚田光博, 三村信男, 鈴木雅晴 (1997) : 東京湾における貧酸素水塊の形成・停滞・消滅過程のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1086-1090。  
 中田喜三郎 (1993) : 沿岸生態系モデル, 環境流体汚染 (松梨順三郎編著), 森北出版, pp. 165-231。  
 三村信男, 矢内勝弘, 小林卓也, 登坂弘明 (1993) : 密度場を考慮した東京湾の潮流の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1006-1010。  
 IWA Task Group on River Water Quality Modelling (2001): River Water Quality Model No. 1, Scientific and Technical Report No. 12, IWA Publishing, London, UK.