

水質改善対策の評価を目的とした浮遊系-底生系結合生態系モデルの開発と適用

Biogeochemical Model with Benthic-Pelagic Coupling Applied to Tokyo Bay

永尾謙太郎¹・畑恭子²・芳川忍³・細田昌広⁴・藤原建紀⁵

Kentaro NAGAO, Kyoko HATA, Sinobu YOSHIKAWA, Masahiro HOSODA, and Tateki FUJIWARA

To estimate impacts of water quality improvements, it is necessary to develop a physical-biogeochemical model, which evaluates the interaction between the pelagic and benthic systems. Therefore, we have developed the model (CAMBAS:Costal Areas Model for Biogeochemical Analysis) and applied to Tokyo Bay. The result made clear that total oxygen consumption triggered by bottom sediment intensely depends on the amount of suspended organic matter deposition. In addition, the model outputs showed that it's important to create habitat such as tidal flats for restoring coastal ecosystems diversity. This model has been proven to be an effective tool to estimate impacts of water quality improvements.

1. はじめに

東京湾のような閉鎖性の強い内湾では、COD、窒素、リンの環境基準の達成率は十分な状況になく、流入負荷物質の削減を目的とした第6次総量規制が実施されている。一方で、Yamamoto (2003) は瀬戸内海ではリンの流入量の過剰な削減が海域の貧栄養の原因となり、海域の生態系や漁業生産を貧困化させたことを指摘している。

このように健全な海域の生態系を維持するために必要となる流入負荷削減量は、内湾ごとに異なるものと考えられる。また、鈴木ら (2003) は、生物的機能による自律的な回復を行うことが内湾の環境修復には重要であり、そのためには干潟・浅場の修復が有効な手段となることを提案している。さらに、中村・相馬 (2008) は、干潟・浅海域を修復することが不可欠であり、単に流入負荷物質の削減を継続しても、多様な生態系の再生は困難であることを指摘している。

このような背景に基づき、本研究では水質改善対策の評価、とくに底生生物の生息環境に悪影響を及ぼす貧酸素化に対する堆積物の寄与、および水質改善対策による健全な生態系の再生を評価する指標として底生生物の応答を定量的に把握できる浮遊系-底生系結合生態系モデルを開発し、東京湾への適用を行った。

2. 浮遊系-底生系結合生態系モデルの概要

1 正会員	工修	いであ (株)	水環境解析グループ
2	博(工)	同上	
3	修(学)	同上	
4	水修	いであ (株)	
5 正会員	農博	京都大学大学院	農学研究科

表-1 モデル変数

モデル変数	単位
水質 (浮遊系)	
植物プランクトン (PHY)	mg/L
動物プランクトン (ZOO)	mg/L
懸濁態有機物 (POC, PON, POP)	mg/L
溶存態有機物 (DOC, DON, DOP)	mg/L
栄養塩類 (NH ₄ -N, NO _x -N, PO ₄ -P)	mg/L
溶存酸素 (O ₂)	mg/L
酸素消費物質 (ODU*)	mg/L
底質 (底生系)	
有機物 (TOC, TON, TOP)	mg/g-dry
栄養塩類 (NH ₄ -N, NO _x -N, PO ₄ -P)	mg/L
溶存酸素 (O ₂)	mg/L
マンガン (MnO ₂ , Me ²⁺)	mg/g-dry, mg/L
鉄 (Fe(OH) ₃ , Fe ²⁺ , FeS, FeS ₂ , S ⁰)	mg/g-dry, mg/L
硫黄 (SO ₄ ²⁻ , ΣH ₂ S)	mg/L
メタン (CH ₄)	mg/L
吸着態栄養塩類(DNH ₄ -N, DPO ₄ -P)	mg/g-dry
底生生物 (底生系)	
付着藻類 (DIA)	gC/m ²
懸濁物食者 (BSF)	gC/m ²
堆積物食者 (BDF)	gC/m ²
海藻類 (SGS)	gC/m ²
海藻類 (SWD)	gC/m ²

※ODU:Oxygen Demand Unit=
(Mn²⁺, Fe²⁺, ΣH₂S, CH₄の合計値(酸素消費量に換算))

内湾における水質改善対策の評価にあたっては、ある対策によって生じる水質浄化、それに応答する底質浄化や底生生物相の回復、これらの相互作用が及ぼすさらなる水質浄化といった対策の波及効果 (生物的機能による自律的な回復) を評価することが重要となる。本モデルはこれらの効果を表現するため、浮遊系と底生系の2つのサブモデルにより構成されている。

(1) モデル変数と生物・化学過程

本モデルのモデル変数を表-1に示す。本モデルの特徴は、底生系モデルにおいて酸素循環を律速している重要

表-2 海洋環境における有機物の段階的酸化分解

1) 酸素還元	
$(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)_z + xO_2 + yH^+$	(1)
$\rightarrow xCO_2 + yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + 2H^+ + xH_2O$	
2) 硝酸還元	
$(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)_z + \frac{4}{5}xNO_3^- + (\frac{4}{5}x + y)H^+$	(2)
$\rightarrow xCO_2 + (y + \frac{2}{5}m \cdot x)NH_4^+ + \frac{2}{5}m \cdot xN_2 + HPO_4^{2-} + \frac{7}{5}xH_2O$	
<i>m</i> : biochemical parameter (0 ≤ <i>m</i> ≤ 1)	
3) マンガン還元	
$(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)_z + 2xMnO_2 + (4x + y)H^+$	(3)
$\rightarrow xCO_2 + 2xMn^{2+} + yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + 2H^+ + 3xH_2O$	
4) 鉄還元	
$(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)_z + 4xFe(OH)_3 + (8x + y)H^+$	(4)
$\rightarrow xCO_2 + 4xFe^{2+} + yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + 2H^+ + 11xH_2O$	
5) 硫酸還元	
$(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)_z + \frac{1}{2}xSO_4^{2-} + (\frac{1}{2}x + y)H^+$	(5)
$\rightarrow xCO_2 + \frac{1}{2}xH_2S + yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + H^+ + xH_2O$	
6) メタン発酵	
$(CH_2O)_x(NH_3)_y(H_3PO_4)_z + yH^+$	(6)
$\rightarrow \frac{1}{2}xCO_2 + \frac{1}{2}xCH_4 + yNH_4^+ + HPO_4^{2-} + 2H^+$	

ここで x/y は有機物の C/N 比を表す

表-3 底生系モデルで考慮する2次反応式

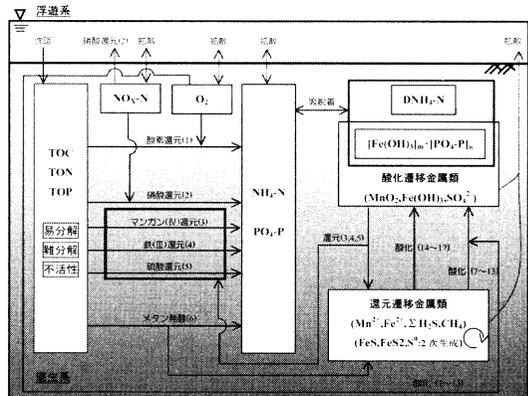
1) 酸素による還元物質の酸化	
$NH_4^+ + 2O_2 + 2HCO_3^- \rightarrow NO_3^- + 2CO_2 + 3H_2O$	(7)
$Mn^{2+} + \frac{1}{2}O_2 + 2HCO_3^- \rightarrow MnO_2 + 2CO_2 + H_2O$	(8)
$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + 2HCO_3^- + \frac{1}{2}H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 2CO_2$	(9)
$\sum H_2S + 2O_2 + 2HCO_3^- \rightarrow SO_4^{2-} + 2CO_2 + 2H_2O$	(10)
$FeS + 2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + SO_4^{2-}$	(11)
$FeS_2 + \frac{7}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$	(12)
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	(13)
2) マンガン・鉄酸化物による還元物質の酸化	
$MnO_2 + 2Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \rightarrow Mn^{2+} + 2Fe(OH)_3 + 2CO_2$	(14)
$MnO_2 + \sum H_2S + 2CO_2 \rightarrow Mn^{2+} + S^0 + 2HCO_3^-$	(15)
$2Fe(OH)_3 + H_2S + 4CO_2 \rightarrow 2Fe + S^0 + 4HCO_3^- + 2H_2O$	(16)
3) 硫酸イオンによる還元物質の酸化	
$CH_4 + SO_4^{2-} + CO_2 \rightarrow 2HCO_3^- + \sum H_2S$	(17)
4) 沈殿作用	
$Fe^{2+} + HS^- + HCO_3^- \leftrightarrow FeS \downarrow + CO_2 + H_2O$	(18)
$FeS + H_2S \rightarrow FeS_2 \downarrow + H_2$	(19)
$FeS + S^0 \rightarrow FeS_2 \downarrow$	(20)
$S^0 + H_2O \rightarrow \frac{3}{4}H_2S + \frac{1}{4}SO_4^{2-} + \frac{1}{2}H^+$	(21)

出典：Wijnsman ら(2002)

な要素であるマンガン・鉄・硫黄を構成要素とし、堆積物内の酸化還元状態に依存した有機物の段階的酸化分解を考慮していることである(表-2)。これにより堆積物による酸素消費量ならびに硫化水素等の還元物質の溶出量を詳細に推定することが可能となり、貧酸素化のメカニズムに対して各種生物・化学過程を定量化することができるようになる(Fossing ら (2004))。なお底生系モデルで考慮する段階的酸化分解に続く2次反応を表-3に、底生生物の循環を除いた底生系モデルの物質循環図を図-1に示す。ここで、モデルに考慮される堆積物内の酸素の生成・消費に関わる生物・化学過程は、a)有機物の酸素還元、b)硝化、c)マンガン(II)イオン(Mn²⁺)の酸化、d)鉄(II)イオン(Fe²⁺)の酸化、e)硫化水素(ΣH₂S=HS⁻+H₂S)の酸化、f)硫化物(FeS,FeS₂)の酸化、g)メタン(CH₄)の酸化、h)底生生物の光合成による生成と呼吸による消費である。底生生物については、貧酸素水塊の暴露による底生生物の死亡や付着藻類など光合成を行う底生生物と植物プランクトンとの光の競合関係が考慮されている安岡ら(2005)のモデル構造を引用している。これらのモデル変数の相互作用を解析することにより、上記の波及効果を表現する。なお、浮遊系モデルではマンガン、鉄、硫黄の解析は行わず、堆積物より溶出するこれらの還元物質を酸素消費量に換算したODU(Oxygen Demand Unit :mgO/L)という一つの解析項目に集約し、計算を簡易なものにした。

3. 現地適用性の検討(東京湾への適用)

モデルを東京湾に適用し、モデルの再現性を検証した。



注: 括弧内の数値は表-2および表-3に対応している

図-1 底生系モデルの物質循環図

(1) 計算条件

a) 計算対象期間

計算期間は、1999年4月から2000年3月までとし、この1年間における非定常計算を行った。

b) パラメータ

計算に用いたパラメータとして底生系モデルに用いた代表的な値を表-4に示す。

c) 空間分解能およびタイムステップ

浮遊系モデルの基本構造には、鉛直方向に20層に分割したレベルモデルを用いた。水平方向には図-2に示す計算範囲を1kmの正方形格子に分割した。堆積物内は泥深10cmまでを計算の対象とし、鉛直方向に10層に分割した。分割幅は0.02~3.50cmとし、特に堆積物表層付近は濃度勾配が生じやすいことから、分割幅を小さくした。底生

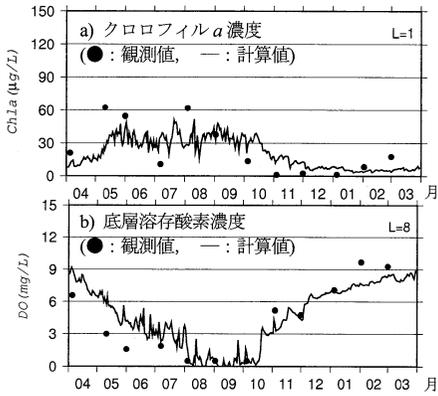


図-3 水質項目の観測値と計算値の比較

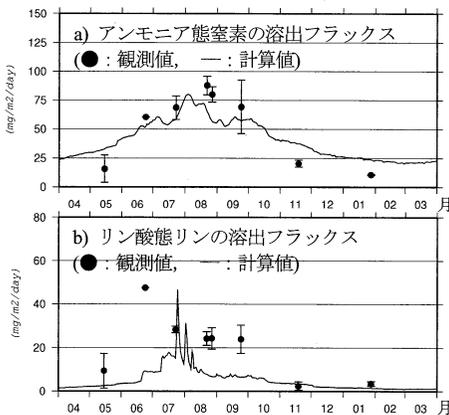


図-4 堆積物からの栄養塩溶出フラックスの観測値と計算値の比較

砂などの底質改良施策の効果を予測する際の基礎的な知見となるため重要である。前述の計算結果に基づき、東京湾湾奥部における堆積物への有機炭素の沈降フラックスと堆積物による酸素消費ポテンシャルの関係を図-6に示す。ここで、酸素消費ポテンシャルは堆積物による酸素消費フラックスと、酸素消費量に換算された還元物質(マンガン(II)イオン(Mn²⁺), 鉄(II)イオン(Fe²⁺), 硫化水素(ΣH₂S=HS⁻+H₂S), メタン(CH₄))の溶出フラックスとの和として算出している。有機物の沈降フラックスと堆積物起源の酸素消費量には正の相関があることから、有機物の沈降フラックスに対する堆積物の応答は比較的早く、堆積物による酸素消費は水中からの懸濁有機物の沈降量に強く依存しているものと考えられる。このことは、水中からの懸濁有機物の除去が貧酸素化の対策に有効であることを示唆するものである。逆に、過去に蓄積した汚濁物質を除去するという観点から実施される浚渫等に代表される底質改良施策は、東京湾のような富栄養化が進行した内湾では、底生生物の発現などの効果を除くと、貧酸素化の軽減に対してあまり効力を

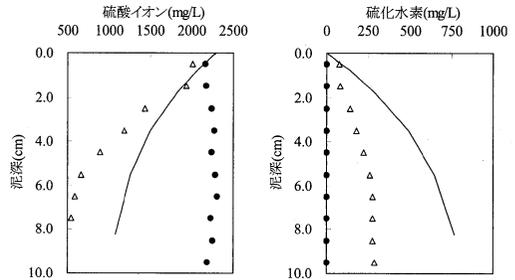


図-5 深掘跡地における堆積物内の硫酸イオン・硫化水素濃度の観測値と計算値の比較

(—: 深掘跡地内での計算値, △: 深掘跡地内での観測値, ●: 深掘跡地外(原地盤)での観測値)

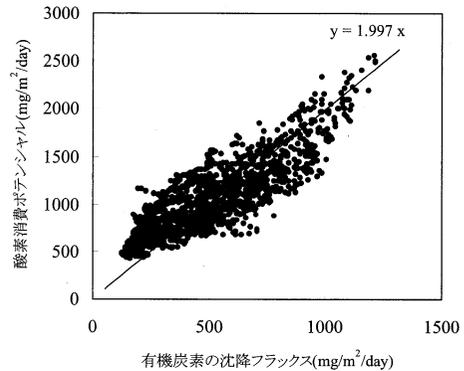


図-6 東京湾湾奥部での堆積物による酸素消費ポテンシャルと有機炭素の沈降フラックスの関係

持たないものと推測される。

5. 流入負荷削減対策と底生生物の現存量の関係性

これまでに示した東京湾の現況を再現した計算を基本ケースとして、陸域からの流入負荷量の削減を想定した予測ケースを実施した。予測に際しては、流入負荷量の削減後10年間の環境変遷過程を計算した。なお、この予測期間内では、1999年4月から2000年3月までの気象・流量等の環境条件が、毎年継続したものと仮定した。予測にあたっての前提条件を以下に示す。

- ①流入負荷量の削減にあたっては、全流入負荷点において流入負荷物質であるCOD・T-N・T-Pが一律に削減されると仮定する。
- ②流入負荷量の削減に伴い貧酸素化などが軽減されたとしても、現況での生息場以外の場所(図-2参照)では、生息に適した地盤と水深帯が存在しないため、二枚貝を対象とする懸濁物食者は新たに生息範囲を拡大することはできないと仮定する。
- ③流入負荷量の削減に際して、窒素とリンのバランスが大きく変化する場合でも、出現する植物プランク

トンなどの生物種は現況から変化しないものと仮定する。

予測結果として、図-7に流入負荷量の削減時における貧酸素水塊の体積と、二枚貝類を対象とした懸濁物食者現存量の現況からの比を示す。なお本研究では貧酸素水塊は溶存酸素2mg/L以下の水塊と定義している。流入負荷削減量の増加に伴い、湾内の貧酸素水塊が解消されているが、同時に懸濁物食者の現存量も減少していることがわかる。本モデルにおいて、底生生物の現存量を支配する大きな要因は、生息場が貧酸素水塊に暴露される時間と底生生物が捕食可能な有機物量（採餌環境）である。つまり、現状の東京湾のように底生生物の生息基盤が少ない条件下では、流入負荷量の削減時には貧酸素水塊が解消され生息環境が改善するものの、同時に生物生息場での懸濁物食者の摂餌できる有機物量が低下することにより、結果的に底生生物の現存量は低下してしまう可能性が示唆された。

沿岸域において貧酸素水塊を解消させる本来の目的は、多様な生態系の再生であることから、流入負荷削減対策によって湾内の貧酸素水塊が解消されたとしても、そこに生息する生物量が減少してしまうようでは、対策実施の意義が失われてしまう。そのため、環境改善対策の評価にあたっては、底層溶存酸素のような生息環境のみに着目するのではなく、採餌環境等の生物が持続的に生息できる環境の予測も行うことが望ましいものと考えられる。

6. おわりに

内湾における水質・堆積物・底生生物の相互作用を解析する浮遊系-底生系結合生態系モデルを新たに開発し、東京湾へ適用・観測値との検証を行った。主要な結論を以下に示す。

- 1) 開発したモデルの再現性の検証として、東京湾全域の水質項目、底質項目、底生生物現存量について観測値と計算値を比較し、概ね妥当な結果得た。本モデルは今後、内湾において実施が想定される様々な環境改善対策の評価に対して、有効なツールであると考えられる。
- 2) 東京湾のような富栄養化の進行した内湾では、堆積物による底層溶存酸素の消費量は、水中からの有機懸濁物質の沈降量に強く依存しており、有機懸濁物質の水中からの除去が貧酸素化の対策に有効であることが計算結果より示唆された。

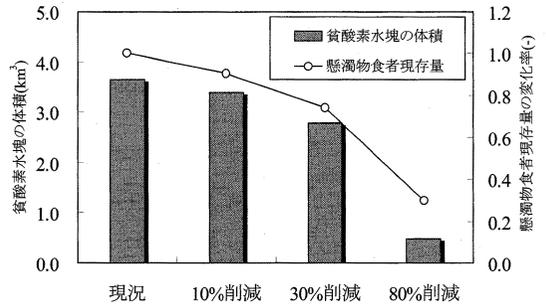


図-7 流入負荷量の削減対策による貧酸素水塊の体積の減少と懸濁物食者現存量の変化

- 3) 健全な生態系の回復という指標を底生生物の現存量とした場合、流入負荷削減対策のみでは目的の達成は難しく、底生生物が持続的に採餌を行える生息基盤の創造が重要であることが本モデルによる予測結果より示唆された。

謝辞：本研究は平成19年度経済産業省委託業務 平成19年環境負荷物質対策調査（閉鎖性海域水質環境対策検討調査）の一部として行われた。平成19年度環境負荷物質対策調査（閉鎖性海域水質環境対策検討調査）検討委員会（委員長 小池勲夫東京大学名誉教授）並びに経済産業省産業技術環境局環境指導室に深く感謝致します。

参考文献

- 鈴木輝明・武田和也・本田是人・石田基雄（2003）：三河湾における環境修復事業の現状と課題，海洋と生物，Vol.25, No.3, pp.187-80.
- 中村由行・相馬明郎（2008）：内湾複合生態系モデルを用いた流入負荷及び干潟・浅海域の影響評価，第42回日本水環境学会年会講演集，pp.351.
- 安岡澄人・畑恭子・芳川忍・中野拓治・白谷栄作・中田喜三郎（2005）：有明海の泥質干潟・浅海域での窒素循環の定量化-泥質干潟域の浮遊系-底生系結合生態系モデルの開発-，海洋理工学会誌，Vol.11, No.1, pp.21-33.
- Fossing, H., P. Berg, B. Thamdrup, S. Rysgaard, H. M. & Nielsen Sørensen, K. Nielsen (2004): A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay (Denmark), National Environmental Research Institute Ministry of the Environment/Denmark, NERI Technical Report, No.483
- Wijnsman J.W.M., P.M.J.Herman, J.J.Middelburg and K.Soetaert (2002): A Model for Early Diagenetic Processes in Sediments of the Continental Shelf of the Black Sea, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.54, pp.403-421.
- Yamamoto, T (2003) : The Seto Inland Sea-eutrophic or oligotrophic?, Marine Pollution Bulletin, Volume 47, issues 1-6, pp.37-42.