

受水域への干潟機能の仮説と検証 ～数理モデルの解析結果から～

相馬 明郎

Citation	水環境学会誌, 39A(4); 141-145
Issue Date	2016
Type	Journal Article
Textversion	Publisher
Right	© 公益社団法人 日本水環境学会.

Self-Archiving by Author(s)
Placed on: Osaka City University Repository

受水域への干潟機能の仮説と検証
～数理モデルの解析結果から～

相 馬 明 郎

水環境学会誌 第39巻 (A) 第4号 (2016)

pp. 141～145 別刷

公益社団法人 日本水環境学会

受水域への干潟機能の仮説と検証*

～数理モデルの解析結果から～

相馬 明郎

1. はじめに

水質汚濁が未だ深刻である閉鎖性海域においては、再生の目標とそのための施策が、湾域毎の再生推進会議で検討され、水質の「きれいな海」だけでなく、豊富な生物が生息する「豊かな海」の再生が、各湾域共通の目標として掲げられるようになった¹⁻³⁾。そうした中、干潟・浅海域の修復・保全は、赤潮の抑制や貧酸素化の改善、さらには、豊かな生態系の回復に繋がる施策としても期待されている⁴⁻⁶⁾。本稿では、干潟・浅海域が東京湾など

の受水域に与える機能において明らかになってきたことについて、内湾複合生態系モデルの研究⁶⁾に基づき紹介する。

2. 干潟・浅海域機能の作業仮説設定

図1は、筆者らが内湾複合生態系モデルを開発する際、干潟・浅海域生態系が受水域に与える機能について立てた作業仮説である⁷⁾。この仮説では、干潟・浅海域の創生は、貧酸素化の改善、赤潮の軽減の過程を介して、「豊かな海」再生へと繋がる一連の生態系連鎖“環境改善スパイラル（正のスパイラル）”につながる、としていた

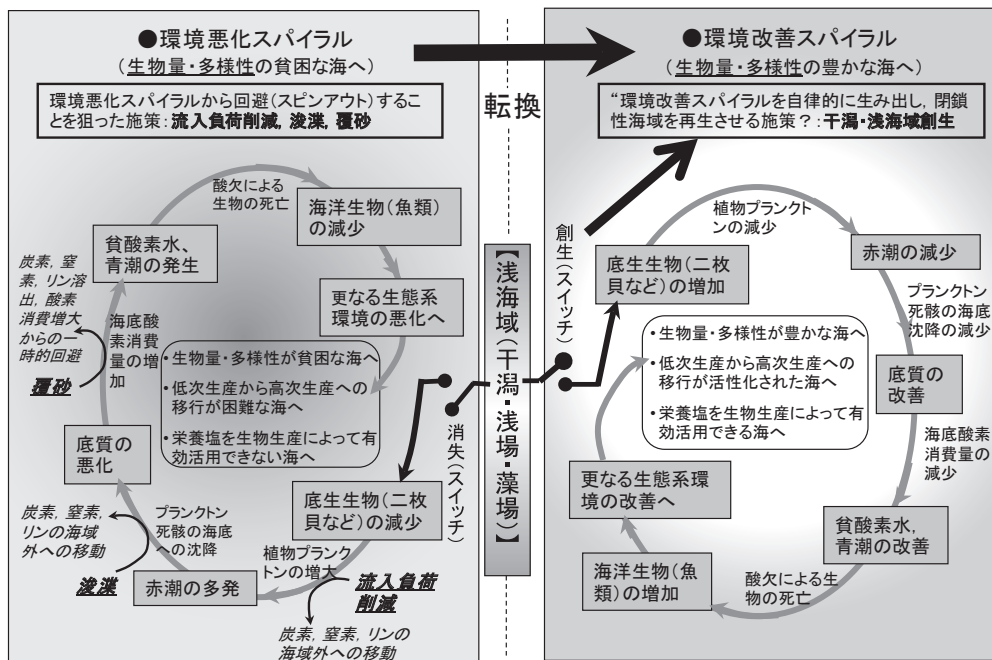


図1 受水域への干潟・浅場・藻場機能の作業仮説^{6,7)}



Akio Sohma
博士 (工学)

- 平成6年 青山学院大学理工学研究科物理学専攻博士前期課程修了
 - 同年 株式会社富士総合研究所 (現:みずほ情報総研) 入社
 - 16年 Bergen Center for Computational Science, Univ. of Bergen客員研究員
 - 17年 みずほ情報総研株式会社 主席研究員 / シニアマネージャ
 - 23年 みずほ情報総研株式会社 研究主幹 / 担当部長
 - 28年 大阪市立大学大学院工学研究科教授
- 海洋理工学会堀田記念奨励賞受賞

(図1右)^{6,7)}。一方、干潟・浅海域の消失は、この逆向きのスパイラル“環境悪化スパイラル（負のスパイラル）”を駆動している可能性があることを示していた (図1左)。

3. 仮説の検証に必要なモデル

図1に示した、環境改善・悪化スパイラルは、干潟・浅海域-湾中央域、浮遊系-底生系間の相互作用、あるいは、干潟・浅海域、湾中央域それぞれにおける浮遊系、底生系内部の生物・化学・物理過程から成り立っている。また、スパイラルの主な駆動力となっているのが、受水域での貧酸素化の改善・悪化であり、その主要因である海底での酸素消費は、堆積物表層数ミリスケールで急激に変化する生物代謝に起因している^{8,9)}。したがって、図1に示した作業仮説を検証するためには、次の条件を満

* Hypothesis and Verification of Tidal Flats' Function to Receiving Water Areas ~ Numerical Model Analysis ~

たす数理生態系モデルが有効であろう。すなわち、第1に、内湾全体を干潟・浅海域生態系-湾中央生態系、および、底生生態系-浮遊生態系が時空間的に連鎖した複合生態系として扱うこと。第2に、各生態系内部の生物代謝を機構的（メカニクスの）に表現すること。第3に底生系の鉛直微細構造を表現すること、である。

4. 内湾複合生態系モデル

“内湾複合生態系モデル（英名：ECOHYM, 和名：雑俳）”は、「3. 仮説の検証に必要なモデル」で掲げた第1～第3の3つの条件すべてを満たす最初のモデル^{10, 11)}として開発され、これまでに東京湾^{10, 11)}と三河湾¹²⁾に適用された。本モデルで取り扱う浮遊系、底生系の生態系ダイアグラムは、図2のとおりである。

本モデルは、図1に示した作業仮説を検証するツールとして活用されることはもちろん、数理生態系モデルが元来持っている特徴の1つである「演繹法と帰納法の融合による“未知なる機構の解明”ならびに“生態系応答の予測・評価”」機能を活かすことで、以下の視点からの干潟・浅海域に関する研究を可能にした。

①全体論的視点と還元論的視点：(1) 湾全体を、干潟・浅海域と湾中央域が時空間的に相互に連携した生態系として捉える「全体論的視点」、および、(2) 干潟・浅海域内部における生物・化学・物理過程の1つ1つを解明していく「還元論的視点」の両視点から、内湾における干潟・浅海域の機能を予測・評価可能である。

②マクロな視点とミクロな視点：“干潟・浅海域あるいは湾中央域堆積物表層における生物代謝の鉛直微細構造（ミクロな視点）”と“受水域全体の動態（マクロな視点）”が、生物・化学・物理過程によって機構的（メカニクスの）にモデル化されており、干潟・浅海域が受水域の貧酸素改善・消失に与える影響を、ミクロな視点とマクロな視点の両視点を紐付けた形で予測・評価可能である。

とくに本モデルを東京湾に適用した事例でいえば、還元論的視点からの研究あるいはミクロな視点からの研究では、東京湾における干潟・浅海域および湾中央域底生系の酸素生成・消費メカニズムを解析・解明した^{13, 14)}。全体論的視点からの研究あるいはマクロな視点からの研究

では、(1) 現在までに埋立られた干潟・浅海域を復元した東京湾（干潟復元システム）を再現し、(2) 現在の東京湾（現況システム）と比較することで、干潟・浅海域が「貧酸素化の改善」および「生態系バランスの変化」に与える機能を明らかにし、「豊かな海」再生に向けた干潟・浅海域の役割を解明した^{10, 15)}。

以下では、これらの研究成果のうち、全体論的視点からの研究あるいはマクロな視点からの研究から得られた、“干潟・浅海域が受水域に与える機能”について、いくつかの解析事例をご紹介します。

5. 干潟・浅海域の機能

5.1 “きれいな海”かつ“豊かな海”を創造する機能

干潟・浅海域創生および流入負荷削減施策に対する受水域生態系の応答を把握するため、干潟の埋立がほとんど行われていない過去の東京湾（干潟復元システム：図3）と、現状の東京湾（現況システム）で河川由来の流入負荷を1/2にした場合（流入負荷1/2現況システム）の2つのケースを計算し、現状の東京湾（現況システム）と比較した。図4に、年周期定常状態に達した干潟復元システム、流入負荷1/2現況システムそれぞれに対する現況システムの比較を示す。干潟復元システム、流入負荷1/2現況システムとも、現況システムに比べ、貧酸素化は改善され、また、懸濁態有機物は減少しており、ともに、水質のきれいな海となっている。しかしながら、底生動物の現存量に関しては、干潟復元システムでは増加している一方で、流入負荷1/2現況システムでは、貧酸素化による酸欠死（夏季における急激な減少）は見受けられなくなるものの、生物量は現況システムより減少する結果となった。すなわち、流入負荷1/2削減は、富栄養化状態を改善させるが、生物量の豊富な「豊かな海」につながることはなく、むしろ貧困な生態系を導いている。一方、干潟・浅海域の復元は、懸濁態有機物や栄養塩を、底生動物に同化させることで有効に活用し、豊かな生態系の回復を促している。

ここで提示されたモデルの結果は、多くの仮定と仮説を含むものの、栄養塩の活用という視点からすると、干潟・浅海域の創生および流入負荷削減施策の本質的な方向性の差を明確にしている。すなわち、豊かな生態系を

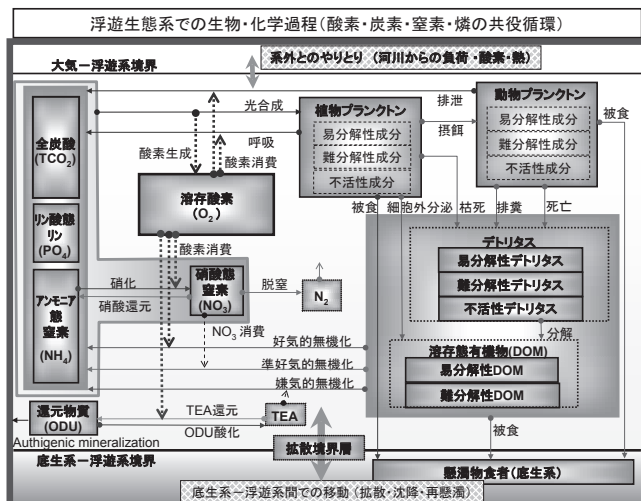


図2 (a) 本モデルで表現した浮遊系での生態系ダイアグラム

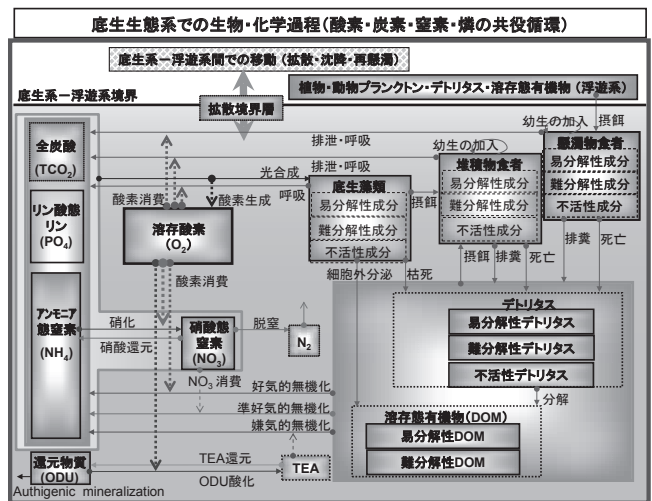


図2 (b) 本モデルで表現した底生系での生態系ダイアグラム

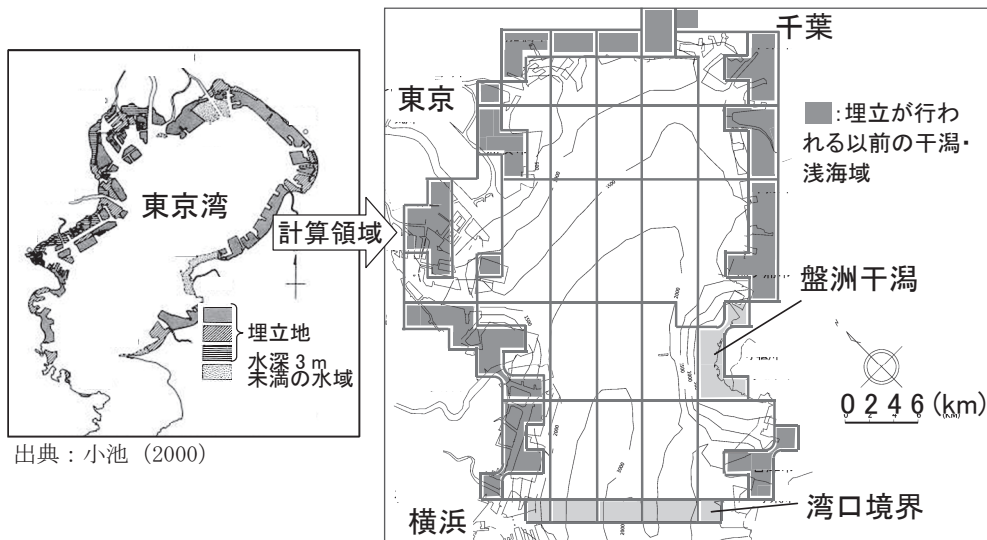


図3 埋立が行われる以前の東京湾（干潟復元システム）とその計算格子
現在の東京湾（現況システム）の計算格子に、ハッチ部分の干潟・浅海域を加えている¹⁵⁾。

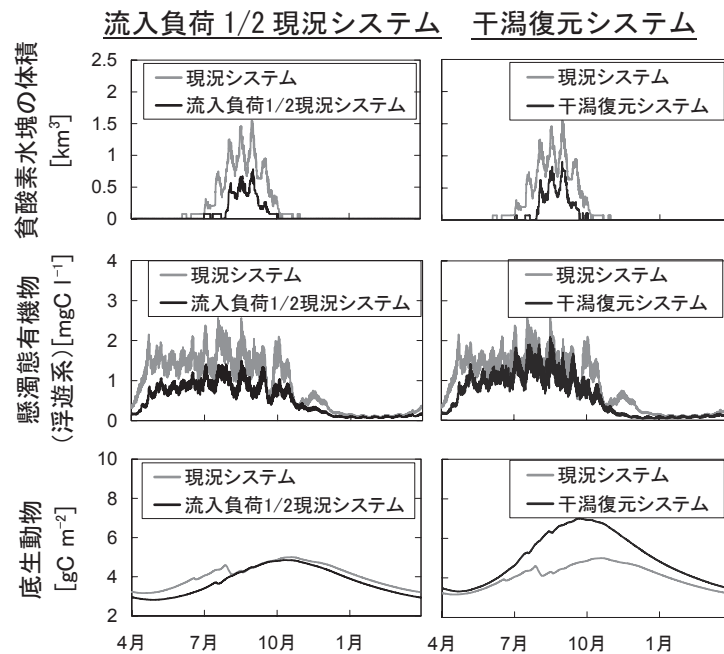


図4 干潟復元システム（埋立が行われる前の東京湾），流入負荷1/2現況システム，現況システムにおける (a) 東京湾全域での貧酸素水塊（ $2.0 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$ 以下）の体積，(b) 懸濁態有機物（動・植物プランクトン+デトリタス）の平均濃度，(c) 底生動物（懸濁物食者+堆積物食者の平均生息密度¹⁵⁾）

回復させる干潟・浅海域の創生は，栄養塩を高次の多種多様な生物に同化させ，海域内で有効利用できる栄養塩量を引き上げる手法であり，流入負荷削減は，貧酸素化の改善によって酸欠による生物死亡の抑制をすることはできても，生物量を益々増加させ海域内で過剰な栄養塩を有効利用できるポテンシャルを積極的に高めるという手法ではない。

5.2 環境改善スパイラルの促進機能

低次栄養段階から高次栄養段階への栄養塩の円滑な移行という視点は重要である。富栄養化が進行し，貧酸素化が問題となっている海域では，低次生産から高次生産への栄養経路が貧弱であり，その結果，赤潮などバランスの崩れた生態系が形成されやすい。こうした場合，何

かしらの施策によって低次栄養段階から高次栄養段階への円滑な移行を促進させることができれば，健全な生態系バランスを回復し，生物の豊かな海へと導ける可能性があり，生態系の評価も，このような視点から行われるべきである。以上の背景より，各施策に対する低次生産，高次生産のフラックスを定量的に評価することで，低次栄養段階から高次栄養段階への円滑な移行，高次生物による過剰栄養塩の効率的利用，そしてそれらにともなう健全な生態系バランス回復を示すことを試みた^{6, 10)}。具体的には，低次生産は，植物プランクトンの光合成フラックスと動物プランクトンの摂餌フラックスの総和で定義した。高次生産については，高次生産を示す魚類はモデル化されていないので，プランクトンやデトリタスから

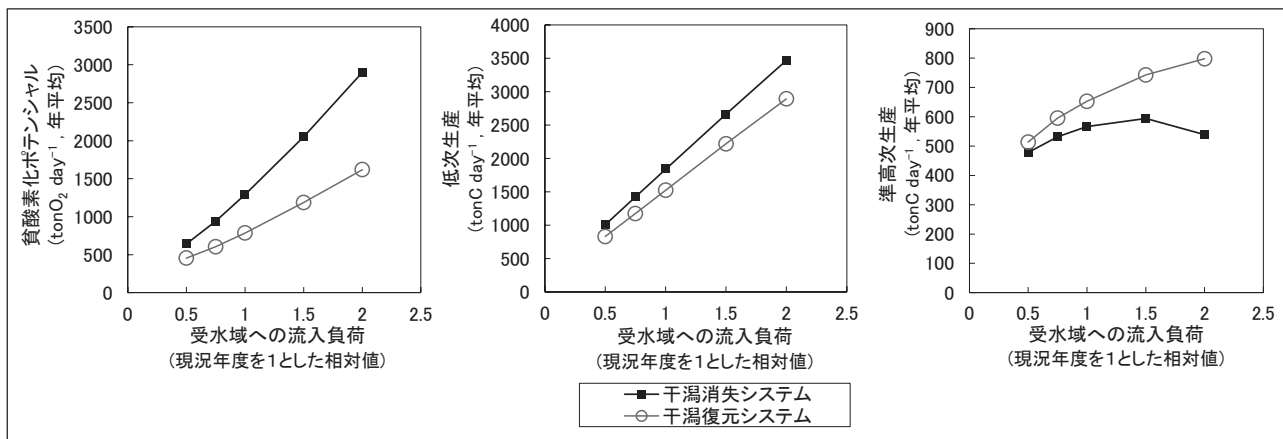


図5 埋立が行われていなかった東京湾（干潟復元システム）と現在の東京湾（干潟消失システム）の流入負荷に対する応答（左：貧酸素化ポテンシャル，中央：低次生産，右：準高次生産^{6, 10)}）

比較的大きな生物への栄養段階の移行として、プランクトン、デトリタスから底生動物という食物連鎖の経路を、“準高次生産”と名付け、底生動物（懸濁物食者、堆積物食者）の摂餌フラックスの総和で定義した。

流入負荷を増減した場合、干潟・浅海域が多く残されていた東京湾（干潟復元システム）と、埋立が進行した現在の東京湾（干潟消失システム）とでは、生態系の応答にどのような差が出るかを、貧酸素化ポテンシャル、低次生産、準高次生産の3つの指標を使って評価した結果（モデルの結果）を図5に示す^{6, 10)}。如何なる流入負荷の状況においても、干潟復元システムのほうが、貧酸素化ポテンシャル、低次生産が低く、準高次生産が高く、また、干潟復元システム、干潟消失システムとも流入負荷の増加により、貧酸素化ポテンシャル、低次生産は増加するが、その増加率は干潟消失システムの方が大きい。準高次生産は、干潟復元システム、干潟消失システムとも流入負荷が現状の1.5倍になるまでは増加するが、流入負荷が現状の1.5倍より大きくなると、干潟消失システムでは底生生物の酸欠死亡により減少に転じる。モデルが示したこれら生態系の応答は、干潟・浅海域を復元することで、貧酸素化（貧酸素化ポテンシャル）を抑制しつつ、栄養塩を低次栄養段階（低次生産）から高次栄養段階（高次生産）まで上手に引き上げ、生物生産の豊かな海にできる可能性、すなわち、環境改善スパイラルを作れる可能性を示唆している。

6. 環境施策の体系

さて、筆者らは、「5. 内湾修復の視点と方向性」で紹介した以外にも、いくつかの解析を実施しているが、これまでのところ、当初、我々が設定した作業仮説を棄却する結果は出ていない。

もし、設定した作業仮説が正しいとするならば、閉鎖性海域における主な環境施策である、①流入負荷（流入栄養塩）の削減、②覆砂、③浚渫、④干潟・浅場域の修復・保全の4つの施策は、「対症的改善施策」と「抜本的改善施策」あるいは「富栄養化の抑制」と「豊かな生態系回復」という視点から、以下のように体系化されるであろう。

6.1 “対症的改善施策”と“抜本的改善施策”

上記の仮説（スパイラル）の観点から、流入負荷（流

入栄養塩）削減、覆砂、浚渫、干潟・浅場域（藻場を含む）創生といった施策を整理すると、流入負荷削減、浚渫、覆砂といった施策は、干潟・浅場域（藻場を含む）創生とは、その狙いが本質的に異なる。つまり、流入負荷削減、浚渫、覆砂は、それぞれ“植物プランクトンの増大過程”、“プランクトン死骸の海底への沈降・堆積過程”、“海底酸素消費量の増加過程”といった、環境悪化スパイラルを形成する過程から、生態系を回避（スピアウト）させることにより、閉鎖性海域が負のスパイラルに陥るのを抑制・停止させることを狙った施策であるのに対し、干潟・浅海域創生は、干潟・浅海域を人工的・土木学的に創生し、そこに生物を自律的に定着・蘇生させ、埋立により失われた干潟・浅海域が持つ生物機能を回復させることで、環境改善に向かう駆動力を自律的に促進させ、負のスパイラルと逆向きのスパイラル：環境改善スパイラルを発生させる、という発想に基づくものである（図1右）。環境改善スパイラルを促す干潟・浅海域の創生は、云わば、環境悪化スパイラルに対する“抜本的改善対策”、これに対し、環境悪化スパイラルを抑制・停止させる、①流入負荷の削減、②浚渫、③覆砂は、環境悪化スパイラルに対する“対症的改善対策”とも見られる。

6.2 “富栄養化の抑制”と“豊かな生態系回復”

栄養塩（窒素、リン）の循環という観点から整理すれば、流入負荷削減、浚渫、覆砂といった施策は、有効利用できない過剰な栄養塩を閉鎖性海域の外部（系外）へ輸送する手法である。これに対し、干潟・浅海域創生は、豊かな生態系を回復させることで、栄養塩を高次の多種多様な生物に同化させ、海域内で有効利用できる栄養塩量を引き上げる手法である。すなわち、流入負荷の削減、浚渫、覆砂は、“富栄養化の抑制（栄養塩削減）”を第一目的とした施策、干潟・浅海域の創生は、“豊かな生態系の回復（栄養塩の有効活用）”を第一目的とした施策といえることができる。

7. おわりに

最後に、これまでの内湾複合生態系モデルを用いた研究結果を踏まえながら、内湾再生の方向性について言及したい。本稿でも一部ご紹介した「豊かな海」、「健全な生態系バランス」、「環境改善／悪化スパイラル」といっ

た内湾複合生態系モデルの解析結果は、内湾の“生産性”の観点とその中心に置かれている。“生産性”の向上は、水産の見地からは（持続的な漁業生産を行うという意味でも）これまでも重要な主題であった。一方、閉鎖性海域は、水産のみならず、環境保全（水質の向上・生態系の保護）、産業発展（海域環境保全と産業発展の両立）、国土利用（干潟造成、下水整備、浚渫・覆砂、埋立地の効果的利用）といった観点から、その管理・利用方法が検討されてきた。そのような中、閉鎖性海域の“再生”という標語が打ち出され、環境保全のみならず、産業発展、国土利用も、閉鎖性海域の“再生”と関係付けできれば、という意識は益々強くなりつつある。ここで“再生”とは何かを明確にする必要がある。冒頭でも述べたように、再生の目標とそのための施策が、湾域毎の再生推進会議で検討され、水質の「きれいな海」だけでなく、多様な生物が生息する「豊かな海」を取り戻すことが、各湾域共通の目標として比重を増している¹⁻³⁾。すなわち、水環境分野と水産分野が探求してきたものを融合する形として、“再生”の方向性が設定されたのである。

これらの分野を融合する1つの手法が生態系モデルである。本稿で示した内湾複合生態系モデルの解析は、いくつかの仮定・仮説が含まれてはいるものの“生産性”の定量的評価を具現化した一例である。とはいえ、ここで示した解析は、“過去の埋め立てられた干潟をすべて復元する”、あるいは、“流入負荷を50%削減する”といった、実現が難しい大胆なシナリオについてであり、実際の行政施策においては、ここまで大胆なシナリオの実行は現実的ではない。しかしながら、これら大胆な仮説は、各種施策の特性と今後の再生の方向性を把握・検討する上では意義がある。また、実現可能な干潟造成面積、流入負荷削減量がたとえ小さかったとしても、それら施策を行う周辺海域では、本稿で示した生態系応答が起こる可能性はある。これについては、より詳細な計算格子を用いたモデル解析が必要であろう。この解析の結果、上述の可能性の実現が明らかになれば（内湾再生を考える際、広い内湾全体を考えることはもちろん大切ではあるが）、より現実的な目標設定として、①再生する水域エリア（せまいエリア）を、例えば“環境モデル水域”としていくつか抽出し、水域毎に環境保全、産業発展、国土利用の相互関係（可能であれば互いにwin-winの関係になれるシステム）を明確にすること¹⁶⁻¹⁸⁾、②それをもとにモデル水域の再生目標を定めること、そして③その目標を達成すべく環境保全をはじめとする行動計画と事業計画を構築すること、が重要であろう。

最近では、内湾複合生態系モデルの他にも、浮遊系と底生系、干潟浅海域と湾央域を連結し、堆積物の鉛直微細構造を表現したモデルが開発され、日本の閉鎖性海域に適用されている¹⁹⁾。こうした数理生態系モデルが、上記①、②、③を決定する際の合意形成のコミュニケーションプラットフォームとして機能し、沿岸環境と最も調和した社会システムの創造の貢献に資することを期待している。

参考文献

1) 東京湾再生推進会議, 東京湾再生推進会議ホームページ. URL: http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TB_Renaissance/ (2016年2月時点).

- 2) 三河湾環境再生推進協議会, 三河湾環境再生推進協議会ホームページ. URL: <http://www.mikawawanjouka.jp/> (2016年2月時点).
- 3) 大阪湾再生推進会議, 大阪湾再生推進会議ホームページ. URL: <http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/suishin/> (2016年2月時点).
- 4) 国分秀樹, 高山百合子, 矢持進, 2008. 英虞湾沿岸未利用地における海水導入による環境再生効果の検討. 海岸工学論文集 55, 1271-1275.
- 5) 佐々木直美, 多部田茂, 北澤大輔, 2008. 東京湾の生態系長期変動シミュレーション. 第20回海洋工学シンポジウム講演論文集, CD-ROM.
- 6) 相馬明郎, 桑江朝比呂, 左山幹雄, 2005. 内湾堆積物表層における酸素循環過程の解明と内湾複合生態系酸素循環モデル構築に関する基礎的研究. 運輸分野における基礎的研究推進制度平成14年度採択課題研究成果報告書(最終版). 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (<http://www.jrnt.go.jp/business/research.htm>), 神奈川.
- 7) 相馬明郎, 関口泰之, 2003. 生態系ネットワークと底生鉛直微細構造に着目した新しい内湾複合生態系酸素循環モデルの開発～流動モデル・湾央域底生生態系モデルの開発・改良と東京湾への適用～, 2003年度海洋理工学会秋季大会講演論文集, pp.87-92.
- 8) Canfield, D.E., Jørgensen, B.B., Fossing, H., Glud, R., Gundersen, J., Ramsing, N.B., Thamdrup, B., Hansen, J.W., Nielsen, L.P., Hall, P.O.J., 1993. Pathways of organic carbon oxidation in three continental margin sediments. *Marine Geology* 113, 27-40.
- 9) Rysgaard, S., Berg, P., 1996. Mineralization in a northeastern Greenland sediment: mathematical modeling, measured sediment pore water profiles and actual activities. *Aquatic Microbial Ecology*, 11, 297-305.
- 10) 相馬明郎, 関口泰之, 垣尾忠秀, 2005. 貧酸素海域の生態系評価を目的とした内湾複合生態系モデル“ZAPPAI(雑俳)”の開発と適用－干潟創生, 浚渫・覆砂, 流入負荷削減施策に対する東京湾生態系の自律的応答と赤潮に対する耐性－. 海洋理工学会誌 11(2), 21-52.
- 11) Sohma, A., Sekiguchi, Y., Kuwae, T., Nakamura, Y., 2008. A benthic-pelagic coupled ecosystem model to estimate the hypoxic estuary including tidal flats -Model description and validation of seasonal/daily dynamics. *Ecological Modeling* 215, 10-39.
- 12) みずほ情報総研株式会社, 2010. 平成21年度三河湾里海再生基礎検討委託業務報告書. 平成21年度愛知県委託業務, 愛知.
- 13) 相馬明郎, 関口泰之, 桑江朝比呂, 中村由行, 2008. 東京湾の底生系における酸素消費メカニズム－内湾複合生態系モデルの解析－. 海岸工学論文集 55, 1206-1210.
- 14) 相馬明郎, 桑江朝比呂, 関口泰之, 中村由行, 2009. 干潟・浅海域における酸素の生成・消費メカニズム－生態系モデルによる解析－. 土木学会論文集 B2(海岸工学) B2-65(1), 1146-1150.
- 15) 相馬明郎, 関口泰之, 桑江朝比呂, 中村由行, 2010. 干潟・浅海域が貧酸素化と生態系バランスに与える影響－モデル解析－. 土木学会論文集 B2(海岸工学) 66(1), 1146-1150.
- 16) 経済産業省中部経済産業局(委託先: みずほ情報総研(株)), 2006. H17年度産業公害防止対策調査. 閉鎖性海域の海域別対策調査報告書(伊勢湾). URL: <http://www.chubu.meti.go.jp/kankyo/kogai.htm> (2016年2月時点).
- 17) 経済産業省中部経済産業局(委託先: みずほ情報総研(株)), 2007. H18年度産業公害防止対策調査. 閉鎖性海域保全対策の費用対効果(伊勢湾)調査報告書. URL: <http://www.chubu.meti.go.jp/kankyo/kogai.htm> (2016年2月時点).
- 18) 経済産業省関東経済産業局(委託先: みずほ情報総研(株)), 2008. H19年度産業公害総合防止対策調査. 東京湾の水環境改善に資する技術に関する実証モデル調査報告書. URL: http://www.kanto.meti.go.jp/tokei/hokoku/20080508sankou_tokyobay.html (2016年2月時点).
- 19) 永尾謙太郎, 畑恭子, 芳川忍, 細田昌広, 藤原建紀, 2008. 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. 海岸工学論文集 55, 1191-1195.