

水質浄化装置による諫早湾貧酸素水塊低減の 数値シミュレーション

Numerical Simulation on Decrease of Oxygen-Deficient Water by Seawater-Quality Enhancer Installed in Isahaya Bay

齊藤 周*・佐藤 徹**・北澤 大輔***

Shu SAITO, Toru SATO and Daisuke KITAZAWA

要旨: 近年有明海の環境悪化と諫早湾潮受堤防の関係が社会問題になっている。堤防は明らかに諫早湾近傍の潮流速度を減少させたが、生態系変化、特に漁業事情の悪化の原因を堤防のみに帰するかはさらなる検討を要する。しかし現場の漁業関係者からは緊急な対策が要求されており、それが局所的であれ、工学的手法の検討も為されるべきである。そこで三重県五ヶ所湾で効果のあった密度流拡散装置を諫早湾口の竹崎島沖に適用し、既存の海洋物理モデルに生態系モデルを組み入れることにより、この装置の貧酸素水塊低減化に関する効果について調べた。その結果、深層及び表層から給水した海水を1日当たり100万トン規模で中層に放流した場合、装置稼動8週間後に諫早湾内の貧酸素水塊の約16%を、1000万トンの放流では約52%減少できることが予測された。今後の課題として、貧酸素水塊の形成と深く関わっている底生生態系モデルを生態系モデルに組み込むなどしてより詳細なモデルを構築し、観測結果との比較・検証によりモデルの信頼性を高めていくことがあげられる。

キーワード: 諫早湾潮受堤防・海洋モデル・生態系モデル・貧酸素水塊・水質浄化装置

1. 緒言

近年、有明海におけるノリの不作、タイラギ等の二枚貝の死滅や湾内の全体的な漁獲高の減少と、諫早湾潮受堤防閉め切りとの関連が問題となっている。1987-2000年にM2分潮振幅が佐賀県大浦で約5cm減少した理由として、堤防による地形変化・外洋の潮汐振幅減少・平均水位増加の効果に関して、宇野木¹⁾は観測に基く振幅増幅率の解析により、塚本・柳²⁾、灘岡・花田³⁾は2次元数値計算により見積り、外洋潮汐が大きな効果を持つことを示したが、その割合については各々異なる見解を提出した。最近になって藤原ら⁴⁾は詳細な3次元計算によりこの問題に解を提出している。

一方、堤ら⁵⁾は2001年度の実海域での水温・溶存酸素・塩分・密度に関する調査結果から、大量の河川水の流入が成層構造を生成し、これが秋季の赤潮や夏季の貧酸素水塊の発生を引き起こすと指摘した。さらに1998年以降の秋季の赤潮が高頻度・大規模になった理由として、大雨によって赤潮が発生しやすい高栄養塩濃度の表層水が形成された時、諫早湾口の下げ潮時の流速低下が有明海全体の反時計回りの流れを減速させ、海水交換を低下させるためと考察している。

問題が近年の赤潮や貧酸素水塊(溶存酸素量2mg/l以下の海域)の頻発・大規模化であり、貧酸素水塊が発生するようになった海域が諫早湾

* 東京大学 工学部システム創成学科(研究当時), **正会員 東京大学 新領域創成科学研究科環境学専攻

*** 正会員 東京大学 生産技術研究所

内・その沖合いや湾外部の湾口付近に集まっている点⁶⁾、特に社会問題になった2000年12月の大規模赤潮が諫早湾が起源であった点⁷⁾から、有明海全体の潮汐振幅の変化よりもむしろ、諫早湾周辺の地域的な潮流の変化に着目すべきであろう。宇野木¹⁾も諫早湾近傍での堤防設置による潮流変化に着目しており、灘岡・花田³⁾は堤防が潮汐波動の腹の位置になるため諫早湾内で流速振幅レベルは大きく減少したことを指摘している。

潮受堤防は諫早湾近傍での潮流を大きく変えたが、生態系変化、特に漁業事情の悪化の原因を堤防のみに帰するかどうかはさらなる検討を要すると思われる。例えば貧酸素化の他の原因として、気候変動による成層の強化・汚濁物質負荷の増大による富栄養化・堤防設置による干潟の消失なども考察されている(田中ら⁸⁾、阿部ら⁹⁾、関口・石井¹⁰⁾、佐々木ら¹¹⁾)。

しかし現場の漁業関係者からは緊急な対策の実施が要求されており、対策案の研究も要因調査と平行して為されるべきである。対策案として堤防の一部に設けられた水門の開閉が考えられているが、これも湾内の環境を新たに大規模に変える可能性があり、その実施には十分な検討を要するものと思われる。一方で工学的機器による対策法はnon-regrettableであり、局所的でも効果があるならば自治体や漁業関係者に受け入れられる可能性がある。

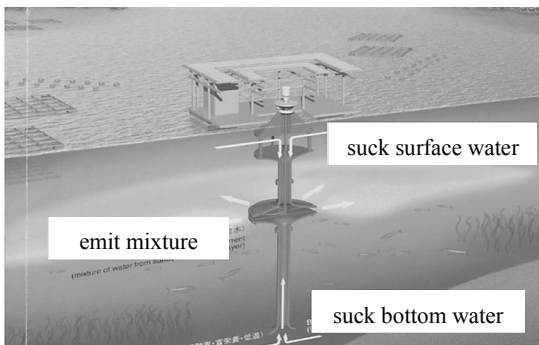


図1 密度流拡散装置(マリノフォーラム 21)

そこで本研究では、夏場の貧酸素水塊に対する工学的かつ局所的な解決策として、密度流を応用した大内ら¹²⁾による海水湧昇装置を取り上げる。この装置は「密度流拡散装置」と命名されており、三重県五ヶ所湾では赤潮対策に効果があったとされている^{13,14)}。密度流拡散装置の模式図を図1に示す。またマリノフォーラム 21 のプロジェクトとして、2003年に相模湾に「海洋肥沃化装置」と命名され設置された深層水湧昇機器¹⁵⁾もこれと同様な機構の物である。

佐藤ら¹⁶⁾は回転水槽に地形模型を設置し、この装置の物理的效果について調べたが、生態学的な効果については触れられていない。本報では、この装置の生態学的効果、特に貧酸素水塊の発生抑制効果について、既存の海洋流動モデルに生態系モデルを組み込み、数値シミュレーションによって調査する。従って本報は、特に夏場の貧酸素水塊発生という現状および、それを解決する手法の効果モデルにより再現するものであり、潮受堤防有無の影響等の有明海の環境変化の要因を分析・議論するものではない。また現状の再現といっても、一般的な夏場を意識しており、特定日目の貧酸素水塊の状態を再現するものではないことに注意されたい。

2. 解析に用いたモデル

2.1 物理モデル

有明海内の流動場の解析にはMECモデル¹⁷⁾を用いた。このモデルは日本造船学会海洋環境研究委員会に所属する4大学5研究室が共同で開発した海洋流動の3次元数値解析モデルであり、その特徴は、大きなスケールを解く静水圧近似モデルと、人工物まわりなどの局所的な3次元流れを解く非静水圧近似(full-3D)モデルのカップリングにある。MECモデルはインターネット¹⁸⁾でソースコードが公開されており、コードの改造が容易

にできる。今回は full-3D モデルは用いず、静水圧モデルのみを使用した。

2.2 生態系モデル

生態系モデルは各コンパートメントに関する移流拡散方程式をベースとし、右辺に生物・化学的変化項を加える。今回考慮したコンパートメントは浮遊系モデルの植物プランクトン (PHY)、動物プランクトン (ZOO)、懸濁態有機物 (POC)、溶解態有機物 (DOC)、リン酸塩 (DIP)、全無機態窒素 (DIN)、溶解態酸素 (DO) である。底生系モデルは、そのメカニズムが複雑であり十分に解明されていないため、また浮遊系のみでも貧酸素水塊の発生が可能であることから今回は考慮しなかった。従って沈降した各コンパートメントは海底ですぐに分解されるとし、底泥での酸素消費速度は一定値 (1500 mgO₂/m²/日) として与えた。各コンパートメントは図2に示すような生物・化学的变化を考慮し、DO には光合成、呼吸、無機化、底泥での消費、再曝気等を考慮している。

3. 貧酸素水塊発生シミュレーション

3.1 計算条件

計算格子作成には、JODC の 500m メッシュ電気海図データ (2002 年度に販売されているものは

1967 年の計測値) を使い、海岸線や諫早湾堤防など経年変化の激しい部分については、海上保安庁が 2001 年に発行した 10 万分の 1 の海図を読み取って入力した。計算領域は、図 3 に示すように外部境界で残差流が環流とならないよう早崎瀬戸から離れた樺島・先津間からとし、田中ら¹⁹⁾ や Yamaguchi and Kyojuka²⁰⁾ の計算領域とほぼ同様な範囲とした。

格子情報を含んだ計算条件を表 1 に示す。水平渦動粘性係数は Richardson の 4/3 乗則、鉛直渦動粘性係数は成層化関数によるものとし、以下の式を用いた。

$$K_H = K_{H0} (L/L_0)^{4/3} \quad (1)$$

$$K_Z = K_{Z0} (1 + \beta Ri)^\alpha \quad (2)$$

$$Ri = -g\rho_0^{-1} \frac{\partial\rho}{\partial z} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^{-2} \quad (3)$$

ここで K_H 、 K_Z はそれぞれ水平、鉛直渦動粘性係数、 L は水平格子サイズ、 L_0 は水平スケールの基準値でありここでは 1km とした。 K_{H0} および K_{Z0} は各動粘性係数の基準値であり、これらを表 1 に示す。また α 、 β は係数で、ここでは中辻ら²¹⁾ を参考にそれぞれ -1、5.2 とした。

本計算では風速は海面での潜熱に考慮されるが、

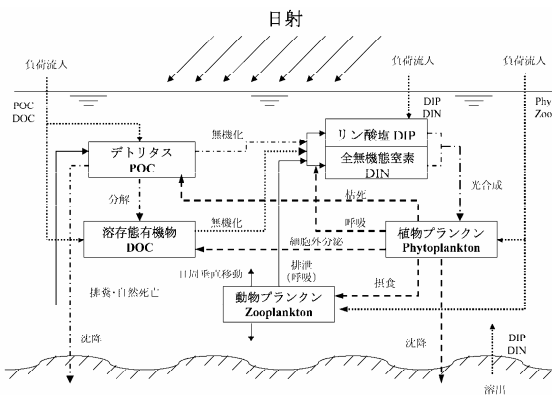


図 2 生態系モデルの概念図

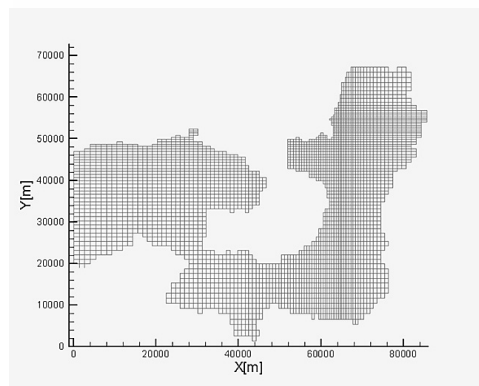


図 3 計算領域と計算格子

表 1 計算条件

Domain Size (m)	85000×70000
Number of Grids	100×80×20
Minimum Grid Size (m)	120
Vertical Grid Size (m) ×	4×1
Number of Layers	1×5
from Bottom to Top	2×5
	3×2
	4×2
	5×2
	10×3
Time Step (s)	6.0
Standard Horizontal Eddy	1.0
Viscosity (m ² /s)	
Standard Vertical Eddy	0.001
Viscosity (m ² /s)	
Bottom Friction Coefficient	0.0026
Wind Velocity U ₁₀ (m/s)	3.7
Flow Rate of River (m ³ /s)	
Honmyo	8.97
Rokkaku	45.57
Kase	55.40
Chikugo	396.89
Taba	151.29
Kikuchi	127.13
Shira	39.53
Midori	120.94
Albedo	0.06
Sea Surface Emissivity	0.97
Cloud Effect Coefficient	0.65
Maximum Global Solar	900
Radiation (W/m ²)	
Cloud Index (1-10)	6.37
Vapour Pressure (hPa)	27.9
Atmosphere Temperature (°C)	29.0
Precipitation (mm/hr)	0.6

運動量に対するせん断の影響は考えられていない。河川流量は 2001 年 7 月の観測値から Yamaguchi and Kyojuka²⁰⁾ が流域面積に関する補正を加えたものを与えた。

堤防がある場合の本明川は、潮受堤防に設けられた二つの排水門からそれぞれ半分の流量を常時流した。また最強日射量は 2001 年およその夏場の観測値、降水量は 2001 年 7 月の諫早・多良岳・佐賀・柳川・大牟田・岱明の平均を取った。温度・塩分の開境界及び初期条件には、およその観測値を与えた。

開境界では日野²²⁾の無反射境界条件を課し、入

表 2 生態系モデルの各コンパートメント

	河川濃度	初期値
PHY (mgC/m ³)	0	50
ZOO (mgC/m ³)	0	5
POC (mgC/m ³)	1000	50
DOC (mgC/m ³)	2000	100
DIP (m.mol/ m ³)	6	0.8
DIN (m.mol/ m ³)	100	6
DO (mg/L)	8	8~4

射波は計算目的に応じて、中潮 (M2 分潮) か小潮 (|M2|-|S2|) の振幅を持つ半日周期波を与え、大浦における観測値と一致するように数回の試行の結果をもとに振幅を決定した。また生態系モデルを稼動させる前に、河川水の効果が定常的になるように、一定振幅のまま成層が発達するまで約 3 ヶ月分計算した。このような非現実的な潮汐を与えたのは、本研究の目的がモデルシミュレーションにより貧酸素水塊を発生させ、それを 4 章で述べるような機械的装置でどこまで解消できるかを調べるものであるため、強成層を作るという意味で、貧酸素水塊がより形成しやすい条件、別の言い方をすれば、機械装置にとってより厳しい条件を想定しているからである。

生物・化学的変化項におけるパラメータは基本的に中田²³⁾の行った東京湾生態系モデルにおけるパラメータを元としている。中田²³⁾と比較して変更したパラメータは、植物プランクトンの最大増殖速度 (1.058 倍)、枯死速度 (0.5 倍)、動物プランクトンの最大摂食速度 (1.56 倍)、自然死亡速度 (0.875 倍)、懸濁態有機物の分解速度 (2.0 倍)、溶存態有機物の無機化速度 (2.25 倍) である。これらのパラメータは、海域によって変化すべきものであり、日本自然保護協会による 2001 年 8 月の底層の酸素濃度の実測値²⁴⁾とほぼ一致するように試行錯誤の未決定した。

生態系モデルの各コンパートメントの初期値は、DO 以外は表 2 に示す一定値とし、DO は表層 8 mg/L から 0.2 mg/L/m で深さ 20m まで線形に減少

させ、20m以深では4 mg/Lで一定とした。例えば諫早湾内の海底では深さ約10 mで6 mg/Lである。

河川水の塩分濃度は0、温度は30°C（2001年8月8日の観測値）に設定した。生態系モデルの各コンパートメントの河川からの流入量は観測値をもとに全ての河川で等しく与えた。これを表2に示す。淡水の植物・動物プランクトンは塩水では生きられないと考え、流入量は0とした。

光の減衰は Lambert-Beer 則を用いており、今回は植物プランクトンや POC による減衰は取り扱っているが、無機懸濁物質は考慮されていない。日射は日長を 0.587 とし、太陽高度を考慮して昼間のみを与えることで昼夜の別は考慮されている。

3.2 計算結果と考察

流れ場の検証のため入射波を中潮とし、図5に、図4で示す観測点での水深3mにおける計算結果と2001年の観測結果²⁵⁾をM2分潮の潮流楕円で比較する。結果は興味の対象である湾奥のSt.1~6のみを示す。同様に生態系モデルを用いて有明海の環境予測を行っている前例²⁶⁾と比較しても、良い一致と言える。

図6に表層の残差流を示す。河川からの淡水密度流による有明海湾奥の反時計回りの環流によって、諫早湾近傍では南向きの流れが形成され、諫早湾口部に入り込む様子となっている。

図7は、堤ら⁵⁾の有明海湾奥を縦断する調査点列と同じ鉛直断面での水温と塩分のコンター図で

ある。計算の海面条件は観測した2001年8月3日のものとは異なるため、この日に観測で確認された強い躍層は見られないが、計算結果の成層は堤ら⁵⁾が示した観測値と概ね一致しており、夏場の一般的な成層は再現されていると考えられる。

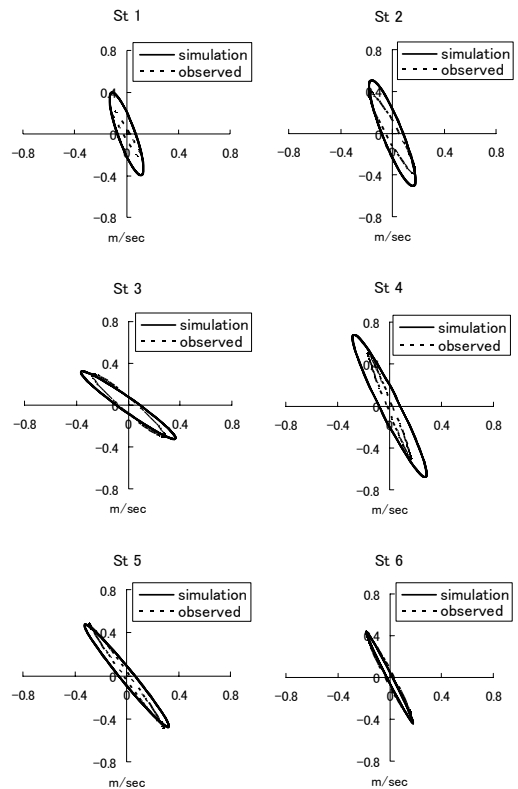


図5 M2分潮の潮流楕円の比較
(実線は計算、破線は観測)

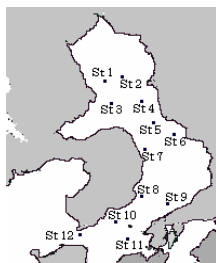


図4 観測ステーションの位置

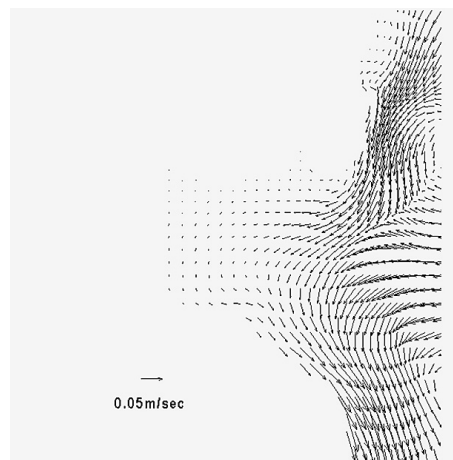


図6 諫早湾近傍の表層残差流

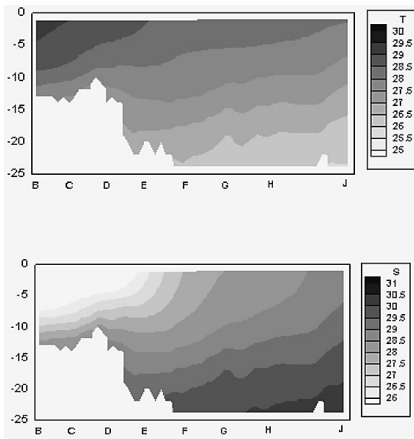


図7 有明海湾奥部の南北方向の鉛直断面における水温(上)と塩分(下)のコンター図

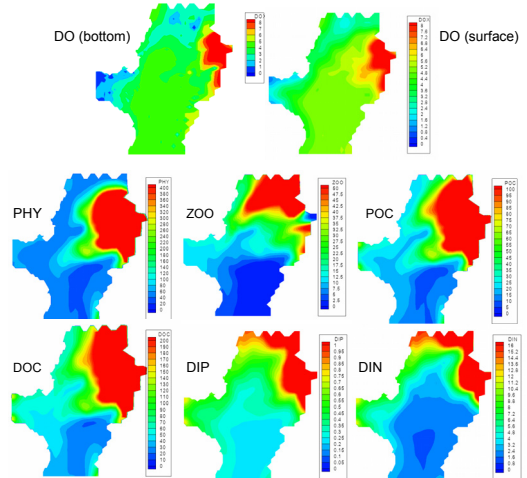


図8 計算開始から8ヵ月後のDO(底層と表層)と他のコンパートメント(表層)のコンター図

図8に、小潮の条件で生態系モデル稼働開始から8ヶ月分の計算を行った後の有明海の底層と表層におけるDOと各コンパートメントの表層における値のコンター図を示す。生態系モデルの検証のため、堤ら⁵⁾の2001年8月3日の観測値との比較を表3に示す。クロロフィルa(Chl-a)は、堤ら⁵⁾の計測点Bの表層2mの値と計算結果の表層の値の比較である。計算値のChl-aはモデル式で用いた係数を用いてPHYから求めた。DOは堤ら⁵⁾の計測点BからFにおける底層の値の比較である。潮汐条件や気象条件が観測のものと同じでないため厳密な比較は不可能であるが、計算値と観測値は良く一致している。また中山ら²⁷⁾は大浦沖と小長井沖にて2002年6月から8月にDOの観測を実施した。その結果から7月以降で強風の吹かない小潮時には底層で2~4mg/Lと読み取ることができる。この値もその地点における本計算結果と良い一致となっている。

図8を見ると、貧酸素水塊は諫早湾、特に潮受堤防付近に発生している。有明海東岸の筑後川・矢部川の河口と比較して、諫早湾奥の本明川河口では植物プランクトンの量に大きな違いがある。また図6の表層残差流と図8のDINやDIPを見比べると諫早湾への無機栄養塩の供給は、本明川の

表3 Chl-aとDOの計算値と観測値⁵⁾の比較

Compartment	Calculated	Observed
Chl-a (µg/L)	4.4	4.1~5.5
DO (mg/L)	3~5	3~5

みならず筑後川起源もあることがわかる。

植物プランクトンの光合成活動は貧酸素水塊の形成に大きな影響がある。諫早湾内には本明川からも筑後川からも栄養塩の供給は行われているにも関わらず、植物プランクトンが増加しなかったのは、主として栄養塩律速の値に違いがあるためと考えられる。諫早湾堤防付近及び有明海東岸の筑後川河口付近における栄養塩律速指標の最大値を表4に示す。筑後川近傍域では栄養塩は植物プランクトンの増殖を制限していないが、諫早湾潮受堤防付近では律速となっていることがわかる。これは、流量も最大で近傍に多くの河川を持つ筑後川河口域に対し、諫早湾では栄養塩の流入量が相対的に小さいためと考えられる。鯉渕ら²⁸⁾は観測結果から、諫早湾内では通常窒素が制限因子になっていると述べている。本計算でも諫早湾内での植物プランクトンの増殖を制限しているのは窒素となっている。

有機物に着目すると、潮受堤防付近では本明川

表 4 栄養塩律速の指標

	DIP	DIN
near Isahaya Dyke	0.89	0.80
Chikugo River estuary	1.0	1.0

からの流入により POC と DOC は諫早湾口付近に比べ高い値を示している。植物プランクトンによる酸素供給に比べ相対的に有機物の量が多く、その酸素消費も大きいために、堤防付近の酸素消費はますます増加すると考えられる。諫早湾内の有機物の起源については、図 8 の POC を見る限り、無機栄養塩に比べて筑後川からのものは影響が少ないように見える。

一方、筑後川河口近傍では、筑後川から供給される大量の有機物の分解のため酸素が消費されているはずであるにもかかわらず貧酸素水塊が発生していない。植物プランクトンの光合成に伴う酸素生成量の効果が大きいと考えられる。また筑後川河口は水深が小さく鉛直混合が大きいことも理由としてあげられよう。

本計算では本明川からの流入に対し、調整池内の水位と堤防海側の潮位による制御は行わず、簡単のため一定流量放水としている。現実には主に干潮時に放水が行われているが、今回はその影響の差異について定量的な比較は行っていない。しかし、本明川からの水質は一旦調整池に貯められ、そこで COD 濃度が高められるという報告¹¹⁾もあるため、本計算で与えた条件より局所的に貧酸素水塊が発生しやすくなっていると推定される。今後の課題としたい。

4. 密度流拡散装置のシミュレーション

4.1 計算における密度流拡散装置の取扱い

密度流拡散装置は、表層の高酸素かつ高温な海水と、低層の貧酸素かつ低温で栄養に富んだ海水を吸い込み、混合して中間層に密度流として放出する。密度流拡散装置は表層と水深 10m にそれぞ

れ吸込みを置き、水深 4m にその和の流量の吹き出しを置くことで表現した。設置場所は図 6 を参考に、なるべく諫早湾内に密度流が進行することを期待して、図 9 に示すように諫早湾口北側の竹崎島沖とした。竹崎島沖における水深は約 7m で、計算格子は鉛直方向に四層あり、吸込み口は一層目及び四層目にとり、放出口を二層目にとった。物理モデル及び生態系モデルの初期値は、3 章の結果の値を用いた。

二つの吸込み口からは同じ流量を吸い込む。放出流量は 100 万 t/日, 300 万 t/日, 500 万 t/日, 1000 万 t/日とした。五ヶ所湾で稼働している装置の放出流量は 12 万 t/日で、装置 1 基の現実的な最大流量は 100 万 t/日とされており、1000 万 t/日というのは 10 基分である。複数基設置する場合は、竹先島沖のみに限らず、広く諫早湾内に設置した方が効果が高いようにも思えるが、ここでは流量による比較のため竹先島沖一ヶ所からの放流とした。

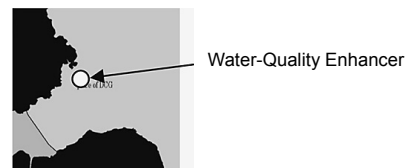


図 9 密度流拡散装置の設置場所

4.2 計算結果と考察

設置後8週目の諫早湾内における底層の溶存酸素量を図10に示す。密度流拡散装置の貧酸素水塊の解消効果を、装置を設置しなかった場合の溶存酸素量2mg/L以下の面積を基準として、表5に示す。100万t/日の放出量では4週間では効果は見られないが、8週間後には約16%、1000万t/日の場合は4

表 5 装置による諫早湾内の貧酸素水塊減少効果

million ton per day	1	3	5	10
4 weeks	1.47%	32.9%	16.7%	43.7%
8 weeks	16.3%	18.4%	34.4%	51.9%

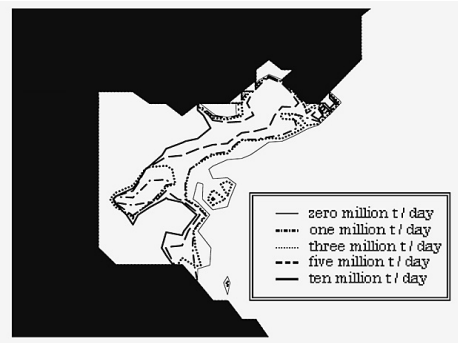


図 10 装置移動 8 週間後の放出流量の差による底層の貧酸素水塊の境界線の位置の変化

週間後で44%，8週間後では52%の低減効果があることが予測された。

図 11～13 に，流量 1000 万 t/日のケースで，装置を設置しない場合と設置した場合の設置 2 日後の DO，PHY，POC，DIN の鉛直分布及び放出口のある層における濃度のコンター図を示す。鉛直断面は鉛直方向に約 300 倍デフォルメされている。

密度流拡散装置を設置した場所では，各コンパートメントの増加が見られ生態系の循環が活発に行われていることが確認できる。

図 13 を見ると，諫早湾内の POC 濃度は表層より底層の方が高くなっている。これは，本明川からの有機物が底層に堆積しているためと，植物プランクトン起源の有機物が沈降したためと考えられる。密度流拡散装置から放出された水塊は，このような底層の有機物や筑後川起源の表層の栄養塩を含み，これにより植物プランクトンが増殖する。これに伴い動物プランクトンや有機物が増加する。動物プランクトンも死骸や排泄などによって有機物となり，これら有機物は再び分解され栄養塩となる。このようにして密度流拡散装置を設置した場所では生態系の循環が活性化していると推測される。

図 11 から装置により溶存酸素は増えていることがわかるが，これは装置付近の植物プランクトンの増加に伴い，光合成による酸素供給が増えた

ためと考えられる。一方，植物プランクトンの増加によって有機物が増加し，その分解に酸素を消費するが，結果として装置付近の溶存酸素が増えるのは，消費量に比べ光合成による供給量が多いためと考えられる。

4.3 議論

江原ら²⁹⁾は水理模型実験により，放出された中間密度水を湾内に広げるのは，密度流自体よりも，主に残差流やシアー拡散等の潮流によることを確かめた。従って密度流拡散装置の物理的な役割は，表層の栄養塩と底層の有機物を豊富に含む海水を，密度を調整することで鉛直移流を最小限に抑えて中間層に留めるといふ点にあると考えられる。湾内への広がりには図 6 に示した残差流に依存するので，装置の設置位置の選定は重要であり，竹崎島沖は表層の淡水密度流が顕著な時には良い選定であったと言えるが，それ以外の設置場所の効果については今後の課題としたい。

密度流拡散装置の生態系への効果に関しては，4.2 で考察した以外にも，再曝気によって酸素を豊富に含む表層の海水を中間層に運ぶ効果もあることも考えられる。さらに貧酸素水塊を直接汲み上げる効果もあり，単純計算によると，貧酸素水塊の面積約 5000ha，厚さ 1m とすると容量は約 5×10^7 t で，放出量 100 万 t/日 で 50 日，1000 万 t/日 では 5 日 で汲み上げられることになる。但し，生態系は定期的に活動しており，単純に貧酸素水塊を汲み上げた分が減少となるわけではない。

密度流拡散装置によって植物プランクトンが増えると，赤潮発生時には赤潮が助長されないかという懸念がある。夏から秋にかけての赤潮は，大雨の直後の河川水による淡水密度流の富栄養化が原因とされる。また近年では，海水の高温化も赤潮発生の高頻度化に大きく寄与すると言われてい。一方で五ヶ所湾のように密度流拡散装置設置

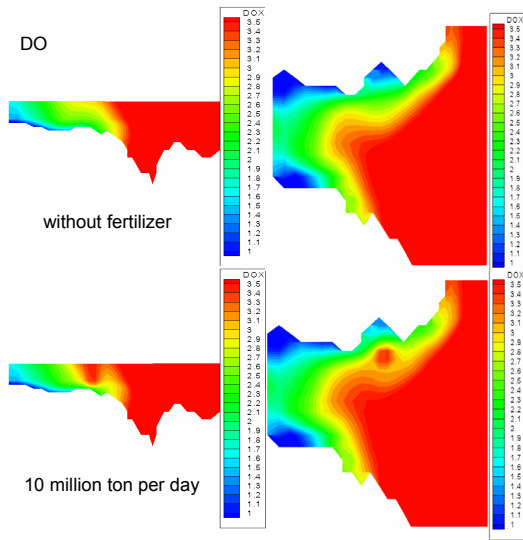


図 11 装置のある場合とない場合の、装置稼働 2 日後の DO のコンター図

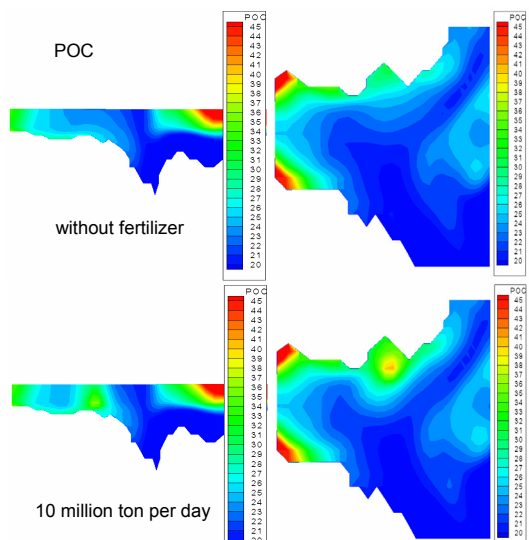


図 13 装置のない場合とある場合の、装置稼働 2 日後の POC のコンター図

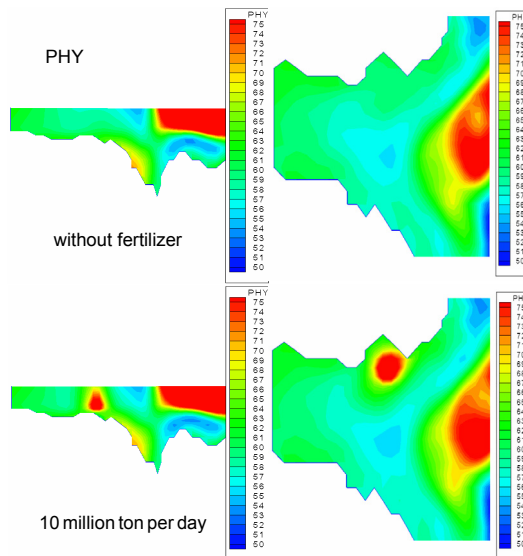


図 12 装置のない場合とある場合の、装置稼働 2 日後の PHY のコンター図

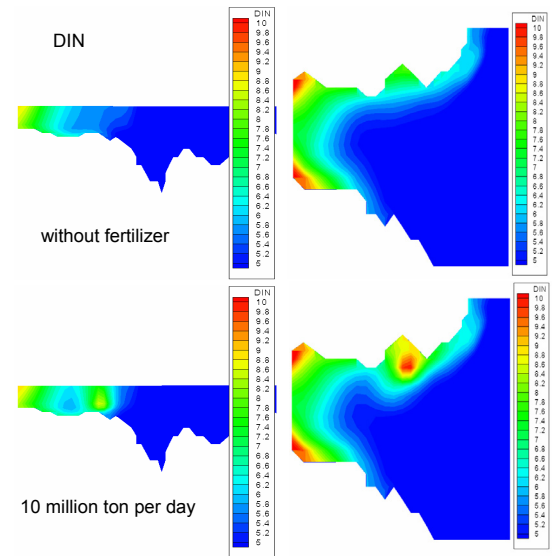


図 14 装置のない場合とある場合の、装置稼働 2 日後の DIN のコンター図

以来、赤潮被害が激減したという事例もある。装置により貧酸素水塊が解消された海域で、本研究では扱っていない底生生物や魚類が増加し、植物プランクトンを摂食することも考えられるが、そのメカニズムはあくまで想像の域を出ない。今後、植物プランクトンの大増殖を再現し、これに対して装置がどう機能するかモデルで予測する必要がある。

ある。

2000 年 12 月に社会問題にまでなったノリの不作に関しては、珪藻赤潮の発生によってノリが栄養不足に陥ったことに起因するとされている。密度流拡散装置を夏の貧酸素水塊減少のために用いるならば、温度成層がなく降水量も少ない冬に稼働する必要はない。現実的には、夏場の貧酸素

水塊発生を抑えるために装置を稼動しつつ、大雨の後など赤潮の発生しそうな時期を見計らい装置の運転を一時的に止めればよい。

5. 結論

3次元の数値物理モデルに生態系モデルを組み込み、有明海の解析を行い、諫早湾潮受堤防のある場合の湾内の貧酸素水塊発生を再現した。その後、海水浄化装置として密度流拡散装置を湾口北岸に近い竹崎島沖に設置し、装置による貧酸素水塊減少の効果をモデルにより調べた。その結果、100万t/日の流量では、諫早湾内底層の貧酸素水塊面積で、4週間後に1.5%、8週間後で16%の削減効果があり、1000万t/日では4週間後に44%、8週間では52%の効果があると予測された。

但し今回のシミュレーションでは、密度流拡散装置の貧酸素水塊に対する効果のメカニズムを調べるという名目のもと、簡単のため、小潮の一定振幅で、河川流量、全天日射量、降水量は2001年7月の平均値が継続的に続くものとなっており、現実に即したものではない。生態系モデルに関しては、底生生物モデルを用いず、底層における酸素消費速度を一定としている。またいくつかのコンパートメントを振った感度解析も必要であろう。ここで取り上げた工学機器が赤潮の対策になるか、あるいは助長するかという点についてもさらなる検討を要する。今後の課題としたい。

謝辞

研究中数々の有益な助言を下された九州大学経塚雄策教授および科学技術振興機構(当時)の山口創一氏、密度流拡散装置の概要をご教示くださった大内一之博士、有明海の現状についてお教えくださった佐賀県大浦漁業協同組合及び「佐賀有明の会」の皆様にお礼申し上げます。

引用・参考文献

- 1) 宇野木早苗：有明海における潮汐と流れの变化，海と空，78，19-30，2002.
- 2) 塚本秀史，柳哲雄：有明海の潮流，海と空，78，31-38，2002.
- 3) 灘岡和夫，花田岳：有明海における潮汐振幅減少要因の解明と諫早堤防閉め切りの影響，海岸工学論文集，49，401-405，2002.
- 4) 藤原考道，経塚雄策，濱田孝治：有明海における潮汐・潮流減少の原因について，海の研究，13(4)，403-410，2004.
- 5) 堤裕昭，岡村絵美子，小川満代，高橋徹，山口一岩，門谷茂，小橋乃子，安達貴浩，小松利光：有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係，海の研究，12(3)，291-306，2003.
- 6) 水産総合研究センター西海区水産研究所：有明海調査ニュース，4，3，2001.
- 7) 石坂丞二，北浦康仙，田島清史，田中昭彦：有明海の生物光学的特性について，九州沖縄地区合同シンポジウム「有明海の海洋環境」，9，2001.
- 8) 田中健路，滝川清，成松明：有明海とその周辺地域における近年の気候変動の傾向，海岸工学論文集，50，1171-1175，2003.
- 9) 阿部淳，松永信博，児玉真史，徳永貴久，安田秀一：有明海西部海域における高濁度層の形成と酸素消費過程，海岸工学論文集，50，966-970，2003.
- 10) 関口秀夫，石井亮：有明海の環境異変一有明海のアサリ漁獲量激減の原因について一，海の研究，12(1)，21-36，2003.
- 11) 佐々木克之，程木義邦，村上哲生：諫早湾調整池からのCOD・全窒素・全リンの排出量および失われた浄化量の推定，海の研究，12(6)，573-591，2003.

- 12) 大内一之, 山磨敏夫, 小林勝弥, 中村充: 密度流拡散装置の研究開発, 日本造船学会論文集, 183, 281-289, 1998.
- 13) Ouchi, K., Yamatogi, T.: A study on the entrainment with Density Current Generator, Proc. OCEANS 2000, 2, 787-791, 2000.
- 14) 殿城賢三, 佐藤徹: MEC モデルの開発及び海域浄化装置の効果に関する数値シミュレーション, 関西造船協会誌, 236, 289-296, 2001.
- 15) Ouchi, K.: Outline of Ocean Nutrient Enhancer "TAKUMI" for the experiment at Sagami Bay, Proc. Int. Symp. on Ocean Space Utilization Tech., 495-500, 2000.
- 16) 佐藤徹, 吉川拓郎, 斉藤周, 土屋好寛: 模型実験と数値計算による諫早湾近傍域の海水浄化装置の物理的効果予測, 日本造船学会論文集, 195, 281-289, 2004.
- 17) 日本造船学会海洋環境研究委員会: MEC Ocean Model オペレーションマニュアル, 日本造船学会, 2003.
- 18) <http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/>
- 19) 田中昌宏, 稲垣聡, 山木克則: 有明海の潮汐及び三次元流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 49, 406-410, 2002.
- 20) Yamaguchi, S., Kyojuka, Y.: A numerical simulation of physical environments in the Ariake Sea including the effects of the tidal flat, Proc. 22nd Int. Conf. OMAE, OMAE2003-37354, 1-7, 2003.
- 21) 中辻啓二, 許再寧, 室田明: 三次元表層密度流の数値実験, 土木学会論文集, 434II-10, 1991.
- 22) 日野幹雄: 水理計算における新しい無反射境界の数値的検討, 東京工業大学土木工学科研究報告, 38, 39-50, 1987.
- 23) 中田喜三郎: 沿岸生態系モデル, 環境流体汚染, 松梨順三郎編, 森北出版, 165-231, 1993.
- 24) http://www.nacsj.or.jp/old_database/isahaya/isahaya-010817-hokoku.html
- 25) 海上保安庁水路部: 有明海海域環境調査解析報告書, 30-44, 2001.
- 26) 農林水産省, 国土交通省, 経済産業省, 環境省: 有明海海域環境調査報告書(概要版)(国土総合開発事業調整費調査), 2003.
- 27) 中山哲敏, 佐伯信哉, 時吉学, 木本克則: 有明海北西部で発生する貧酸素水塊に着目した現地調査, 海岸工学論文集, 50, 976-989, 2003.
- 28) 鯉淵幸生, 佐々木淳, 有田正光, 磯部雅彦: 有明海における水質変動の支配要因, 海岸工学論文集, 50, 971-975, 2003.
- 29) 江原健太郎, 佐藤徹, 多部田茂, 土屋好寛: 回転水槽を用いた密度流拡散の内湾水理模型実験, 日本造船学会論文集, 190, 271-278, 2001.

著者紹介



齊藤 周

東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻(東京都文京区本郷7-3-1), 昭和56年生まれ, 平成16年3月東京大学工学部システム創成学科卒, 現在同大学院修士課程。

E-mail: saito@globalenv.t.u-tokyo.ac.jp



佐藤 徹(正会員)

東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻(東京都文京区本郷7-3-1), 昭和36年生まれ, 昭和61年3月東京大学大学院工学系研究科船舶工学専攻修士課程修了, 同年4月(株)ブリヂストン入社, 平成5年インペリアルカレッジ化学工学科博士課程修了, 平成8年東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻勤務, 現在同大学院教授, 工学博士, 日本船舶海洋工学会会員。

E-mail: saio-t@k.u-tokyo.ac.jp

<http://triton.naoe.t.u-tokyo.ac.jp/stafffiles/SATO/>



北澤大輔（正会員）

東京大学生産技術研究所（東京都目黒区駒場 4-6-1），昭和 49 年生まれ，平成 14 年 3 月東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻博士課程修了，同年 4 月東京大学生産技術研究所勤務，現在同大学助教授，工学博士，日本船舶海洋工学会会員。

E-mail: dkita@iis.u-tokyo.ac.jp

<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/%7Edkita/index-j.htm>

Numerical Simulation on Decrease of Oxygen-Deficient Water by Seawater-Quality Enhancer Installed in Isahaya Bay

Shu SAITO, Toru SATO and Daisuke KITAZAWA

ABSTRACT: It is said that the tidal current in the Ariake Sea has changed since the construction of the Isahaya Dyke. The change may bring on the environmental deterioration in the Ariake Sea. Especially in the Isahaya Bay, the emergence of oxygen-deficient water has been prominent. In this study, firstly, we simulated the emergence of oxygen-deficient water by incorporating an ecosystem model into an ocean current model and elucidated the mechanism of such a phenomenon both from physical and biological viewpoints. Secondly, we proposed a local engineering solution, i.e. a seawater-quality enhancer, which mixes bottom and surface waters and discharges the mixture at the depth of euphotic layer, and numerically simulated its effects on the ecosystems. It was shown that 16 % of the oxygen-deficient water in the Isahaya Bay is reduced by the apparatus with the flow rate of 1-million-ton water per day and 52 % in the 10-million-ton case 8 weeks after the start of operation. In the future, it is necessary that the reliability of the present model is improved by conducting more accurate simulations with incorporating a benthic model, which is deeply concerned with oxygen-deficient water, and by comparing the computational results with measurements more precisely.

KEYWORDS: *Isahaya Dyke, Ocean Current Model, Ecosystem Model, Oxygen-Deficient Water, Water-Quality Enhancer*