### 閉鎖性内湾及び外洋における密度流拡散装置の効果の数値予測

水向 健太郎<sup>1</sup>, 佐藤 徹<sup>\*2</sup>, 多部田 茂<sup>2</sup>

# Model Prediction on ecological effects of density current generator in semi-enclosed bay and open sea

Kentaro Mizumukai<sup>1</sup>, Toru Sato<sup>\*2</sup>, Sigeru Tabeta<sup>2</sup> \*<sup>2</sup> Department of Environment Systems, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa 277-8536, Japan

An apparatus, which mixes waters of surface and bottom in density stratification and discharges the mixture at the middle depth, has made a remarkable success in enhancing water quality for ecosystems in a small semi-enclosed bay. In this study, we conducted numerical simulations by using a three-dimensional tidal current model and an ecosystem model to predict the effects of the apparatus in two different seas; a semi-enclosed bay and the area around a solitary island in the open sea. Isahaya Bay in Ariake Sea was chosen as the former case to see how effectively the apparatus can reduce oxygen-deficient water, and the sea around Okinotori-shima Island represented the latter, where we are interested in the effect of the apparatus on fertilisation; how much primary production can be increased. As a result, it is suggested that, the apparatus reduces up to 40% of oxygen-deficient water at the bottom of Isahaya Bay, although it is not very effective in fertilising the area around the solitary island.

*Key Words* : Ocean model; Ecosystem model; Semi-enclosed bay; Solitary island; Water-quality enhancer; Density current.

#### 1. 緒 言

現在の日本の海洋環境には、富栄養化から生じる赤潮や 青潮・貧酸素水塊などの水質悪化によって漁業被害を被り、 水質改善が求められている海域と、一方で栄養塩に乏しく、 肥沃化を求められている海域とがある.この水質改善と海 洋肥沃化を同時に満たす工学機器として、本研究では密度 流拡散装置に着目した.

密度流拡散装置は今後様々な環境問題に適用される可 能性が大きい.ただし機器の影響を定量的に観測すること は難しく,影響自体も海域の特徴に応じてどのように変化 するかも未だ定かではない.そこで本研究では、閉鎖性内 湾と外洋という二つの異なる種類の海域における密度流拡 散装置の効果についてシミュレーションを行うことにした. まず閉鎖性内湾については、日本で最も広大な干潟を有し、 かつては豊穣の海と言われながらも近年赤潮や貧酸素水塊 の発生といった環境悪化が著しい有明海を対象海域とした. そして外洋については、EEZ 問題で注目され、自立的な経 済活動の場としての漁場育成が望まれている沖ノ鳥島を対 象とした.

#### 2. 数値モデル

2・1 流動モデル 使用した流動モデルは MEC モデ ルの Nesting バージョンであり,静水王近似の部分のみ用い ている. 海底面の表現には Full step を用いた.

2・2 密度流拡散装置 海水は大きく分けると表層水 と深層水とに分けられる.表層水は高水温・低塩分・低密 度で,溶存酸素濃度は高いが栄養塩濃度は低い.一方の深 層水はそれとは全く正反対の性質を持つ.密度流拡散装置 はこの表層水と深層水を吸引・混合し,密度調整を行って 中層で放流する装置である.放流された海水は密度流とし て水平方向に進行するため,汲み上げられた深層水が有光 層に長時間滞留することができ,これにより生態系が活性 化すると言われている.

密度流拡散装置は本来吐き出し口において高圧になり、 それによって噴流が放出されるが、噴流の効果は装置の近 傍のみに限られ、今回使用する格子の水平スケール程度で は放流水は潮流と密度流とによって運ばれる.したがって 齋藤ら<sup>(1)</sup>の研究をもとに、密度流拡散装置による海水や栄養 塩などの汲み上げ効果が装置の設置セル内で平均化される よう、流速変化などを流動モデルに組み込んだ.

2・3 **生態系モデル** 使用した生態系モデルは、北澤 <sup>0</sup>が構築した浮遊系モデルと底生系モデルを含むモデルで

<sup>1</sup>三井海洋開発

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>東京大学 環境システム学専攻. (〒277-8563 千葉県柏市柏 の葉 5-1-5)

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

ある.ただし、有明海の計算では主に干潟域など底生生物の働きの寄与が大きいと考えられる領域を考慮するため底 生系を含めたが、沖ノ鳥島の計算では環礁外に着目してい るため、浮遊系のみの生態系モデルを使用した.

#### 3. 有明海での水質改善効果の予測シミュレーション

3・1 計算条件 齋藤ら<sup>0</sup>により、定常流場の条件化での貧酸素水塊の再現計算及び密度流拡散装置による貧酸素水塊の解消効果についての報告があるが、これは小潮が連続的に発生するような非現実的な条件での計算であり、実際には各種の条件は時間変動を持つため、装置の効果の傾向を捉えることは出来ても、条件の変動に対する応答を見ることは出来なかった。そこで本研究では潮汐・河川流量・気象条件について時間変化を持たせるリアルタイムシミュレーションを行った。夏場の貧酸素水塊に対する装置の効果を見るために、計算期間は2001年の4月~8月までとした。上記に挙げた条件は全てこの計算期間内での観測値を用いている。

計算格子はFig.1 に示すNesting 格子を用い、湾奥とロ之 津の領域の格子解像度を上げている. Rank1 での格子幅を 1500m, Rank2 での格子幅を 500m とした. 計算領域は鉛直 方向に 26 層に分けられ、水平方向の格子数は Rank1 が 59×48, Rank2 のうち湾奥部は 69×72, ロ之津部は 42×33 と した. 深度データは齋藤ら<sup>(1)</sup>が用いたものを参考にしている.



Fig. 1 Nesting-grid systems used in Ariake Sea calculation.

動粘性係数及び拡散係数の算出には、水平方向には Richardson の4/3 乗則を、鉛直方向にはMellor-Yamada level 2.5 を用いた.河川の条件については、本明川・筑後川・嘉 瀬川・六角川・矢部川・菊池川・緑川・白川といった8つ の一級河川からの流入量を流量年表<sup>33</sup>から参照して与えた. 河川水には植物プランクトンや動物プランクトンの濃度は 0 であるとし、また完全な淡水の流入であるとして塩分を0 としている.河川水に含まれる栄養塩や有機物の濃度は、 山口・経塚の計算を参考にして与えた.気温・気圧・全天 日射量・雲量・相対湿度・降水量・風向風速などの気象条件は、佐賀地方気象台での観測値を用いた。開境界は樺島 牛深間に設定し、9分潮(K1,K2,M2,N2,O1,P1,S2,µ2,v2) による合成潮汐に日野の無反射スキーム<sup>(4)</sup>を適用して境界 に与えた。

3-2 物理場の計算 2001 年に海上保安庁は有 明海で潮流観測<sup>(5)</sup>を行い,主要分潮の調和定数を求 めた.その際の観測地点における,今回の計算で の潮流楕円を観測値と比較したものを Fig.2 に示 す.大浦沖では M2 及び S2 分潮の長軸方向が良く 一致しており,長軸長さもまずまずである.口之 津の潮流楕円は,長軸長さこそ差があるものの, 軸方向はほぼ観測値との一致が見られ,過去の研 究と比べても今回の計算によって有明海の物理場 は精度良く計算できたと言えよう.



Fig. 2 Measured and calculated tidal ellipses for M2 (left) and S2 (right) constituents at St. 1 (top) and 12 (bottom). The units of the horizontal and the vertical axes are knot.





**3・3 貧酸素水塊の再現** 物理場の計算に続き, 生態系モデルを加えた計算を行って貧酸素水塊発 生の再現を試みた.2001 年夏には日本自然保護協 会の観測により、大浦沖から諫早湾内までの広い (Fig.3左).一方本研究で計算された同時期の有明 海湾奥底層での溶存酸素濃度は Fig.3 右のように なり、観測で見られたものと同様の範囲において 貧酸素水塊の発生が見られた.ただし、ここでは 溶存酸素濃度が 3mg/ℓ の場合を貧酸素状態とする.

3・4 密度流拡散装置の設置シミュレーション

Fig.4に,計算で求められた有明海湾奥底層での 貧酸素水塊量の時間変化を示す.Fig.5はSt.1に おける潮位の計算結果である.計算開始105日目

(7月15日)から貧酸素水塊が発生し、潮汐の変 動に伴ってその量も変化していることが分かる. 密度流拡散装置をどのタイミングで駆動させれば 効果的であるかを検討するために、計算開始から 85 日目 (6月 25 日),95 日目 (7月 5日),105 日 目(7月15日),115日目(7月25日)にそれぞ れ装置を駆動し始める4ケースを計算した.ただ し,装置の設置場所は Fig. 7(b)とし,各設置点で は吐き出し流量が100万トン/日の装置を一基ずつ 設置するとした.また、有明海は潮位差が非常に 大きいため、密度流拡散装置の表層側吸い込み口 や吐き出し口の位置が潮位変動に伴って変化する とし、表層側の吸い込み口は海表面より下で全て 水が満たされているもののうち一番上のセルに位 置し、そこから2つ下のセルに吐き出し口が位置 するとした.



Fig. 4 Time change of calculated volume of ODW.



Fig. 5 Time change of calculated wave height at St. 1.

範囲において底層での貧酸素水塊発生が見られた

結果を Fig. 6 に示す. これによると, 貧酸素水 塊が発生し始めるより以前から密度流拡散装置を 駆動させたとしても, 貧酸素水塊発生を食い止め ることは出来ないことが分かる.また, 貧酸素水 塊が最も多く発生した 120 日目付近での貧酸素水 塊解消効果は全4ケースでほとんど変わらず, 最 大 40%の解消効率を持つことが分かった.すなわ ち,密度流拡散装置による貧酸素水塊解消効果は 短時間での駆動でも有効であることが明らかとな った.



Fig. 6 Time changes of the differences in the volume of ODW between the calculations with and without DCG.



Fig. 7 Installation locations of DCG in Isahaya Bay.

続いて,装置の設置場所別で貧酸素水塊の解消効 果がどのように変わるかを検討した.最も深刻な低 溶存酸素濃度となる諫早湾内において Fig.7 のよう な5種類の設置方法を考慮し,それぞれの場合での 貧酸素水塊解消効果を見た.ただし,設置方法(a)から(c)では各設置点で吐き出し流量が100万トン/日の装置を置くとし,一方設置方法(d)と(e)では各点に300万トン/日級の装置を設置するとした.

先の貧酸素水塊再現計算の場合と比べて,各ケースでの底層溶存酸素濃度の回復値の平面分布を Fig. 8 に示す.これによると,貧酸素水塊が発生しやすい 諫早湾奥に装置を置いた場合が最も密度流拡散装置 による貧酸素水塊解消効果が高いことが分かった.



Fig. 8 Horizontal distribution of the differences in DO at the bottom between the calculations with and without DCG.

前項の Fig. 7(b)を参照し,密度流拡散装置によって 貧酸素水塊が解消されるメカニズムを考察する. Fig.9 は,溶存酸素濃度・植物プランクトン濃度・栄養塩濃 度(PO4,NH4)・水温について,再現計算の状態及びそ れと比較した変化量の鉛直分布を示している.密度流 拡散装置の設置地点では底層で溶存酸素濃度が上昇し ていることが分かる.これは底層での植物プランクト ンが増加しているからと考えられ,計算でもそのよう な結果となっている.しかしながら植物プランクトン の増殖に不可欠な栄養塩の濃度は逆に底層で減少して いる.栄養塩以外に植物プランクトンの増殖を促進す る要因としては水温が考えられるため,水温の鉛直分 布を見てみると,確かに密度流拡散装置の設置点では 底層で水温が上昇している.



Fig. 9 Vertical distributions of the calculated DO (a), diatom (b), dinoflagellat (c), PO<sub>4</sub>-P (d) and NH<sub>4</sub>-N (e), and temperature (f) (left) and their differences from those without DCG (right).

そこで次のようなことが考えられる. 諫早湾の湾奥 では表層と深層とで栄養塩濃度に違いはあるものの, その濃度は植物プランクトンの増殖にとっては充分で あり,密度流拡散装置によって底層から高濃度の栄養 塩が汲み上げられてもさほど効果は無い.一方,密度 流拡散装置によって海水の鉛直循環が促進され,密度 成層が壊れることで底層の水温が上昇した.これによ って底層で植物プランクトンが増殖し,光合成によっ て溶存酸素濃度が回復した.

## 4. 沖ノ鳥島での海洋肥沃化効果の 予測シミュレーション

4・1 計算条件 有明海での計算例とは異なり, 沖ノ鳥島の計算では計算格子を Variable とした. 動粘性係数及び拡散係数の算出には,水平方向に は Richardson の 4/3 乗則を,鉛直方向には成層化 関数を用いた.海底地形の再現には,島近傍の詳 細な地形は海図から,それ以外の地形については NOAA (アメリカ海洋大気庁)の公開データを使 用した.海図からの地形データ作成については, MEC モデルワークショップ第3回テキスト<sup>(6)</sup>に記 載されている「海図からの地形データ作成ソフト」 を使用した.格子数は51×50×23 であり,水平格 子幅は 500m から 50km まで変化する.

今回の計算は沖ノ鳥島を中心とする四辺開境界 の領域を考慮した.潮汐はM2,S2,K1,O1の4分 潮を考慮し,強制振幅で波高を与えた.領域自体 が広大なため,境界線上で同じ高さの波高を与え るのではなく,各分潮の波の方向を事前に求め, 開境界上の各点でそれぞれ位相差を持った波高を 与えるようにした.波の方向は計算期間中で一定 とし,その算出には国立天文台の海洋潮汐モデル (NAO99b)を用いた.



Fig. 10 Variable-sized grid system and bathymetric feature around Okinotori-shima Island.

水温・塩分や栄養塩などの各種コンパートメン ト値は JODC による月別統計値を年平均化した値 を用いた. 珪酸塩珪素濃度の鉛直分布のみ, 2006 年に行われた佐賀大学による観測値<sup>(7)</sup>を使用した. Bulk 公式に必要な気象条件は JAMSTEC による観 測値を年平均値化したものを用いた.風による影 響は考慮しなかった.

4・2 物理場の計算 Fig. 11 に沖ノ鳥島環礁内で の潮位変動を示す.これにより,大潮小潮の周期 は約2週間であることが分かる.そこで,計算開 始10日目から24日目までの2週間での残差流を 調べた.Fig. 12に表層と中層での残差流を示す. 表層では反時計回りの,中層では時計回りの回転 流が生じていることが分かる.また,Fig. 13 に鉛 直平面での残差流を示す.深層からの湧昇流が中 層で止められ,表層では斜面を下る流れが起こっ ている.



Fig. 11 Time change of calculated tidal amplitude in the vicinity of the Okinotori-shima reef.



Fig. 12 Horizontal distribution of calculated tidal residual current in the surface (left) and the middle (right) layers.



Fig. 13 Contour maps of the vertical velocity component of calculated residual current and its enlargement near the top.

この結果の解釈として、次のように考えた.ま ず、潮汐の影響で湧昇流が生じる.この湧昇流は 密度躍層があるために躍層付近で止められ、密度 流となって外向きの流れとなり、これがコリオリ の力によって時計回りに回転する.この表層水に 連行される形で表層水は内向きに流れ、これもコ リオリの力を受けることで反時計回りに回転する. これが島中心に見られる特異な流場が生じる仕組 みであると考えられる.同様の流場は,Beckmann<sup>(8)</sup> による類似した計算例でも報告されており,この ような回転流は急勾配を持つ海山のような海底地 形付近では共通のものであると考えられる.

4・3 生態系計算 密度流拡散装置の効果を計算 する前に,生態系モデルを加えた 30 日間の予備計 算を行った.30 日後,環礁外での栄養塩濃度の鉛 直分布を佐賀大学による観測値と比較したところ, 栄養塩分布の誤差が大きいものの,深層ほど濃度 が高く,表層では極めて濃度が低い傾向は捉えら れた.これらの分布を正確に合わせるためには, 今回使用した内湾生態系パラメーターではなく, 外洋生態系に適したパラメーターを必要とするが, それを得るだけに必要な沖ノ鳥島周辺での観測が ほとんど存在しないのが現状である.

4・4 密度流拡散装置の設置位置 Fig. 14 により, 沖ノ鳥島環礁付近では表層回転残差流の回転中心 が南北に一つずつあることが分かる.これらの回 転中心に密度流拡散装置を設置すれば,深層から 汲み上げられた栄養塩がより長時間濃度を維持し たまま滞留することができるため,まず装置をこ の二つのポイントに設置することとした.逆に, 回転残差流が比較的近い地点にも装置を置く場合 も考慮し,全部で3つの設置点について密度流拡 散装置の効果を見た.本計算では装置の吐き出し 口深さは潮位に関わらず常に水深 17.5m とする. また,装置の吐き出し流量は100 万トン/日とした.



Fig. 14 Enlarged map of residual current and locations of DCG installation.

密度流拡散装置の吐き出し口からは常に濃度1の染料があるとした. Fig. 15 は沖ノ鳥島環礁付近

での各ケースの染料濃度の水平分布を示す.また Fig. 16 は,密度流拡散装置を動かさなかった場合 と比較した,各ケースでの植物プランクトン濃度 の増分の分布を示す.いずれも,平面の高さは密 度流拡散装置の吐き出し口の高さと等しい.



Fig. 15 Horizontal distributions of calculated dye concentration near the Okinotori-shima reef at the depth of the DCG outlet in Cases 1 (a), 2 (b), and 3 (c).



Fig. 16 Horizontal distributions of calculated PHY near the Okinotori-shima reef at the depth of the DCG outlet in Cases 1 (a), 2 (b), and 3 (c).

これらの結果から,染料拡散域,すなわち装置 からの放流水が拡散した範囲において植物プラン クトンの濃度が上昇していることが分かる.また, 各ケースでの植物プランクトン濃度の上昇度を見 ると,ケース2すなわち環礁外南側の回転残差流 中心に装置を設置した場合が,この分布の書き出 し時には一番装置が有効に働いていることが言え る.ケース3のように,残差流が比較的強い地点 に装置を設置した場合は,植物プランクトン濃度 の増加分は低い値となった.

先の結果から、ケース2の設置点が最も植物プ ランクトン増殖に対し有効で有ることが示された ため、ケース2の設置点において装置の吐き出し 流量を10倍の1,000万トン/日とした場合の計算

(ケース4)を行った. Fig. 17 は,この場合の植物プランクトンの増加量を時系列に見たときのものである.その結果,装置設置場所付近で増殖した植物プランクトン量は高々約6トン程度であった.



Fig. 17 Time change of the calculated increase of PHY from that without DCG in Case 4.

#### 6. 結 語

有明海の計算において,密度流拡散装置は短時間の駆動でその効果を発揮できることが分かり, また貧酸素水塊の発生範囲内に装置を設置すれば, 最大 40%もの高い水塊解消効果を得ることが出来 ることが示された.したがって,有明海のような 閉鎖性内湾においては密度流拡散装置の水質浄化 装置としての役割は十分に発揮できると考えられ る.ただし,そのためには貧酸素水塊などの環境 悪化がどのような範囲で発生しているかといった ことを正確に観測・把握した上で,装置の設置点 を決定することが望ましい.

沖ノ鳥島の計算からは、環礁周辺での特異な回 転残差流の回転中心に装置を設置した場合が最も 密度流拡散装置が生態系に与える影響が大きくな ることが分かったが、現状で現実的とされる規模 の密度流拡散装置の流量では劇的な肥沃化には至 らなかった.閉鎖性内湾とは異なり、外洋は海水 交換が激しいため、放流水が最も滞留しやすいと 考えられるようなところでも潮流や海流などで栄 養塩が流されてしまうためと考えられる.

#### 文 献

- (2) 北澤大輔,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,東京大学博士論文,2001.
- (3) 流量年表 2001年, 国土交通省, 2001.
- (4) 日野幹雄, 仲座栄三, 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, Vol. 38 (1987), pp. 39–50.
- (5) 有明海海域環境調查解析報告書,海上保安庁水 路部,2001.
- MEC Ocean Model オペレーションマニュアル
  Version 1.1,日本造船学会海洋環境研究委員会, 2003.
- (7) 池上康之ら,沖ノ鳥島における海洋深層水調査, 第10回海洋深層水利用学会全国大会海洋深層水
   2006みえ尾鷲大会講演要旨集,2006,pp. 37-38.
- (8) Beckmann, A., A numerical simulation of flow at Fieberling Guyot, Jornal of Geophysical Research, Vol. 102 (1997), pp. 5595-5613.