修士論文
閉鎖性内湾及び外洋における海洋肥沃化装置の効果に関する研究

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻
56758 水向 健太郎　　指導教員　佐藤 徹 教授

1　背景と目的

近年様々な形で明らかとなっている海洋環境の悪化に対し、自然の浄化作用に任せるだけでなく、各種水質改善装置によって海洋環境をコントロールし、環境悪化を食い止めることが徐々に模索されてきている。水質改善装置には各々影響する範囲や度合いが異なるが、比較的広範囲かつ実績のある装置として密度流拡散装置 (図 1) が挙げられる。この装置は表層と底層の海水を取り込み、混合して水平方向に密度流として放流することで、「水質浄化」と「海洋肥沃化」の両方の性質を兼ね備える工学機器と言われ、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は不明である。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数値シミュレーションを行い、装置の汎用性を検討する。閉鎖性内湾としては、日本で最も広大な干潟を有し、近年赤潮や貧酸素水塊の発生といった環境悪化の著しい有明海を対象海域とした。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利用が計画さ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

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p_s}{\partial x}+fv+A_M\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_M\frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p_s}{\partial y}-fu+A_M\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_M\frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

$$0=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p_s}{\partial z}-g\ ,\qquad \frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

u,v,w：流速　，　A_M：水平動粘性係数　，　A_C：水平動拡散係数
f：コリオリパラメーター　，　K_M：鉛直動粘性係数　，　K_C：鉛直動拡散係数

本研究で用いる数値モデルは、日本造船学会海洋環境研究委員会が開発した MEC モデル (Marine Environment Committee Model[1]) の Nesting バージョンを基本としている。MEC モデルは非圧縮性流れ及びブジネスク近似を仮定しおり、Full-3D 計算と静水圧計算との結合が可能なモデルであるが、今回はそのうち静水圧計算の部分のみ用いた。

時間の離散化には陽解法を用いる。空間に関しては流速及び水温・塩分の移流項について、有明海の計算では 3 次上流差分を、沖ノ鳥島の計算では 1 次上流差分を採用した。拡散項には 2 次中央差分を用いている。有明海及び沖ノ鳥島の場合でともに計算格子は直交格子の Staggered 配置を採用し、海底面は Full-step の階段近似で表現される。

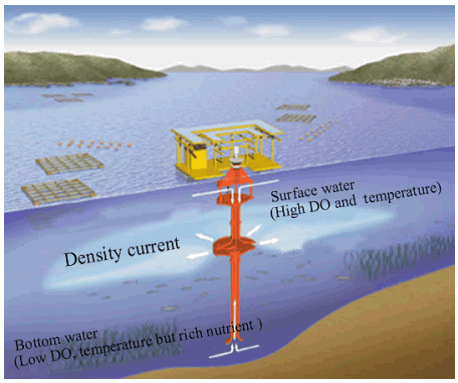

Fig. 1: Image of density current generator (from Marino forum)

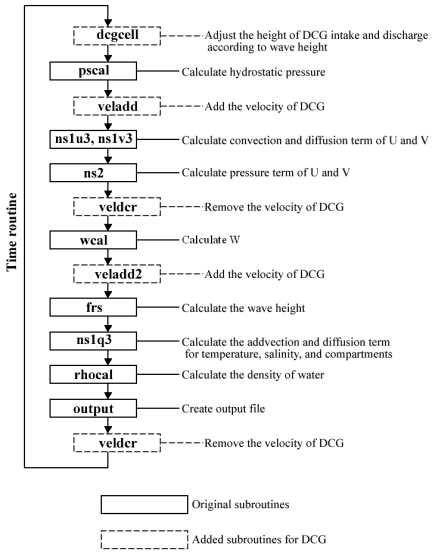

Fig. 2: Flow of calculation including the effect of DCG

2.2 生態系モデル

本研究での生態系モデルは北澤ら [2] が構築したものを用いた。生態系モデルは浮遊系モデルと底生系モデルに分けられる。有明海は干潟の影響が大きいので底生系モデルを用いたが、沖ノ鳥島の場合は環礁外の生態系に焦点を絞っているので、底生系モデルは用いなかった。生態系モデルのパラメーターは、有明海の場合は齋藤ら [3] がチューニングしたものを用い、沖ノ鳥島の場合は北澤ら [2] が東京湾の計算用に用いたものを採用した。

2.3 密度流拡散装置の効果の表現

本計算では格子スケールが密度流拡散装置自体の大きさより遥かに大きいため、装置からの放出水は密度流と潮流によって運ばれる。ここでは齋藤ら [3] の手法を参考にし、図 2 のような手順に沿って密度流拡散装置による吸い込みと吐き出しの効果を数値モデルに組み込んだ。

3 有明海での水質改善効果の予測計算

3.1 計算条件

計算には図 3 のような Nesting 格子を使用し、格子幅は親領域で 1500m、子領域で 500m となっている。2001 年の春から夏にかけての、8 つの一級河川からの河川流量、佐賀気象観測台での気温・気圧・全天日射量・雲量・相対湿度・降水量及び風向風速の観測値を条件として用いた。潮汐は 9 分潮 $(K_1, K_2, M_2, N_2, O_1, P_1, S_2, \mu_2, \nu_2)$ を考慮し、日野の無反射境界スキーム [4] を適用した。

3.2 計算結果

夏場の貧酸素水塊を再現した後、密度流拡散装置の置き場所や駆動時間による貧酸素水塊の解消効果の変化を検証した。駆動時間の長短に関わらず貧酸素水塊解消効果は大きくは変化せず、貧酸素水塊の発生領域内部に装置を設置する場合が最も効果的であることが明らかとなった。

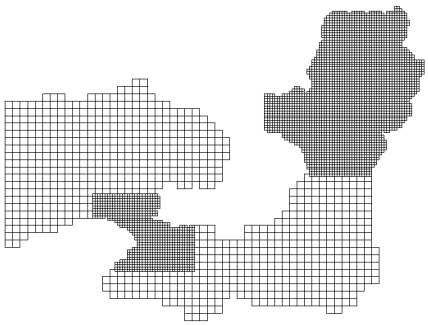

Fig. 3: Grid system for Ariake sea simulation

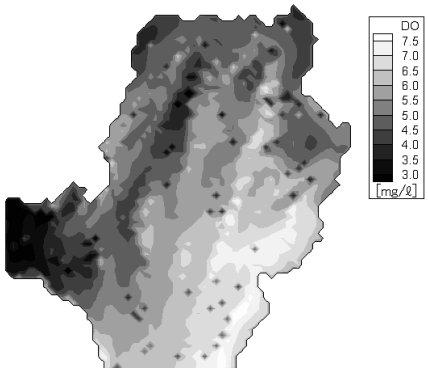

Fig. 4: Horizontal distribution of DO at the bottom in Ariake sea

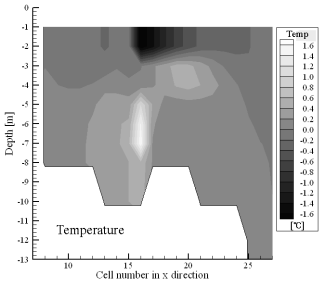

Fig. 5: Change of temperature in a vertical layer by the effect of DCG

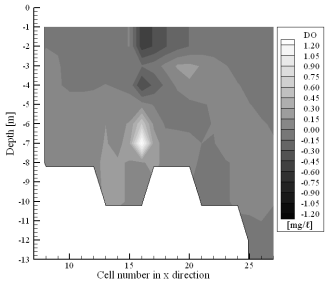

Fig. 6: Change of DO in a vertical layer by the effect of DCG

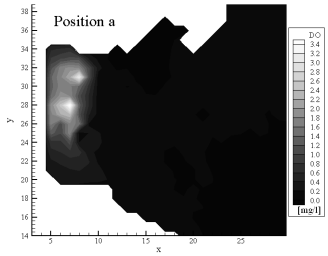

Fig. 7: Recovery of DO at the bottom of Isahaya bay by the effect of DCG

4 沖ノ鳥島での海洋肥沃化効果の予測計算

4.1 計算条件

計算領域は四辺が開境界であり、図 8 のような Variable 格子を用いた。海底地形の再現には、海図から作成した深度データとアメリカ海洋大気庁 (NOAA) による深度データを接合して作成した (図 9 参照)。潮汐は M_2 , S_2 , K_1 , O_1 の 4 分潮を考慮し、国立天文台の海洋潮汐モデルから波の方向を求め、開境界で位相差を持つ平面波として強制振幅で入射した。JODC の公開データから水温・塩分や栄養塩の鉛直分布を求めて初期値及び開境界値とした。気象条件は JAMSTEC による観測値を年平均化して使用した。

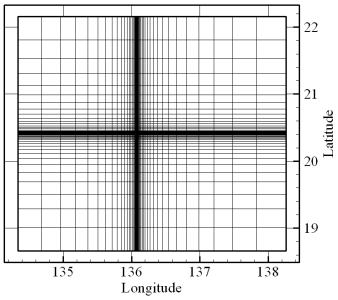

Fig. 8: Grid system for Okinotori-shima simulation

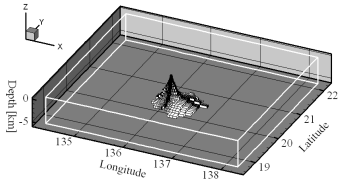

Fig. 9: Topographical character of Okinotori-shima in the model

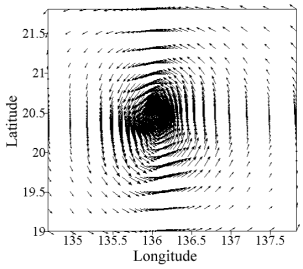

Fig. 10: The flow on the surface layer around Okinotori-shima

4.2　計算結果

沖ノ鳥島周辺海域の流場を計算したところ、表層では強い反時計回り (図 10) の、中層では弱い時計回りの回転流が生じた。これは海山を駆け上がる湧昇流が密度躍層に押さえ込まれることで生じる密度流が原因であることが分かった。密度流拡散装置からの放流水が拡散した範囲 (図 11) において、植物プランクトンの増殖が見られた (図 12)。また、残差流が遅い場所と速い場所とに密度流拡散装置を置くと、残差流が遅い場所の方が放流水が停滞し、植物プランクトンがよく育つ結果が見られた。また、複数基の装置を設置すればプランクトンの増殖効果は上がるものの、全体量と比較すると遥かに小さかった (図 13 参照)。

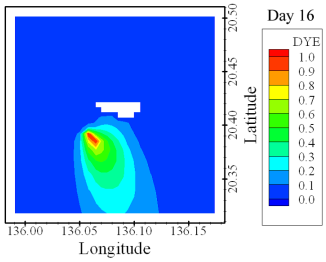

Fig. 11: Dye concentration around DCG

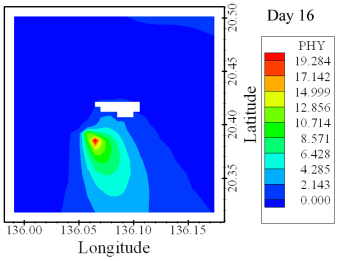

Fig. 12: Difference of phytoplankton concentration around DCG

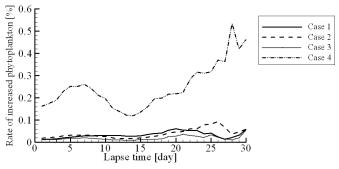

Fig. 13: Historical change of rate of increased phytoplankton by DCG

5　まとめ・結論

本研究では数値モデルを用い、閉鎖性内湾と外洋とでの密度流拡散装置の水質改善効果や海洋肥沃化効果について検証し、装置の設置場所・吐き出し流量別にその効果を定量的に表した。

有明海の計算例では、諫早湾内での貧酸素水塊発生領域内部に密度流拡散装置を設置することで短期間のうちに効果的に溶存酸素量を回復することが可能であるという水質改善効果が認められた。またそのメカニズムとして、装置設置域の海水の鉛直混合促進が密度成層を弱くさせ、底層の水温が上昇することにより、有光層内の植物プランクトンが増殖して溶存酸素量が増えるということが明らかとなった。一方、沖ノ鳥島の計算例では、水深 1000m 付近の深層水を汲み上げることで短期間のうちに植物プランクトンを増殖させる効果は確かに認められたが、その効果はとても小さかった。

以上の海域別の計算例から、密度流拡散装置は短期間での水質改善及び海洋肥沃化の効果をもたらすことが可能であるが、閉鎖性内湾では小規模でも効果を発揮出来ても、外洋においては規模を大きくしなければ効果は期待できない。また、装置設置の際には事前に周辺海域の流域を正確に把握した上で設置計画を立てなければ、装置の効果を最大限に引き出すことは出来ないことも明らかとなった。

[1] 「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.

[2] 北澤大輔・藤野正隆・多部田茂, 「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」, 日本造船学会論文集, Vol.192, pp277-287, 2002.

[3] 齋藤周・佐藤徹・北澤大輔, 「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」, 沿岸域学会誌, Vol.18(2), pp.13-24, 2005.

[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, pp.39-50, 1987.