

発電所取放水量の変化が放水口周辺の溶存酸素量分布に与える影響について

INFLUENCE OF CHANGING IN THE DISCHARGE WATER VOLUME FROM POWER PLANT ON THE DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATION NEAR THE POWER PLANT

長谷川一幸¹・清野通康²・横田瑞郎³・市川哲也⁴・長谷川晃一⁵・柳川竜一⁶

Kazuyuki HASEGAWA, Michiyasu KIYONO, Mizurou YOKOTA,
Tetsuya ICHIKAWA, Kouichi HASEGAWA and Ryouichi YANAGAWA

¹正会員 博(工) 財団法人海洋生物環境研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300)

²博(農) 財団法人海洋生物環境研究所 (〒101-0051 東京都千代田区神田神保町3-29帝国書院ビル5F)

³農修 財団法人海洋生物環境研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300)

⁴株式会社サイエンスアンドテクノロジー (〒460-0022 愛知県名古屋市中区金山2-14-1司ビル2階)

⁵理修 株式会社中電シーティーアイ (〒461-0005 愛知県名古屋市中区東桜1-3-10東桜第一ビル)

⁶正会員 博(工) 株式会社中電シーティーアイ (同上)

Using the numerical analysis models in Osaka Bay and the Nanko area, we calculated the 3-dimensional distribution of dissolved oxygen concentration (DO) in the summer when the bottom layer was in the hypoxic condition. In order to verify the model reproduction of DO, model results were compared to the observations. We also studied about the relation of the discharge volume from the power plant to DO.

Key Words : power plant, Osaka Bay, DO, numerical simulation model

1. はじめに

内湾域の湾奥に位置する発電所では、底層の貧酸素化した水塊を冷却水として使用する場合がある。放水口前面海域では、貧酸素水の放出により時期によっては海域の生態系に大きな影響を与える可能性がある。一方で発電所からの放水は流動の促進により湾奥の停滞水域を改善する可能性もある。そこで本研究では、大阪湾の湾奥に位置する南港発電所周辺海域をモデル海域として、発電所取放水と溶存酸素(DO)の関係を明らかにするとともに、取放水量が変化することで発電所前面海域のDOにどのような影響を与えるのか把握することを目的とした。

大阪湾のDOを把握する研究は、これまでに浅海定線調査などの観測値を基に、城¹⁾や藤原ほか²⁾が行った研究や、堀江ほか³⁾や、岸ほか⁴⁾、山根ほか⁵⁾、韓ほか⁶⁾、谷本ほか⁷⁾によって行われてきた水質モデルを用いた数値シミュレーション研究がある。湾奥における貧酸素水塊の分布特性に関する現場観測については、航路の安全上の問題や港湾構造物の維持管理上の問題などもあり、特に鉛直分布特性を時系列で把握することが困難である場合が多

いため、数値シミュレーションを用いて解析することは有効な方法であると考えられる。そこで本研究では、大阪湾全体を把握する数値シミュレーションモデルと南港発電所周辺海域を把握するモデルを連結し、特に底層水が貧酸素となる夏季におけるDOについての数値シミュレーション解析を行うとともに、現地観測を実施してモデル精度を検証した。また、この数値シミュレーションモデルを使用して発電所取放水量とDOとの関係を把握した。

2. 数値モデルの概要

本研究では、田口ほか⁸⁾が考案した3次元流動モデルと低次生態系モデルを用いて数値シミュレーション解析を行った。発電所からの取放水影響を捉えるために発電所周辺海域では細分化したメッシュサイズ(50~250m)の数値モデルを構築した。

一方で、大阪湾全域(南北63km, 東西63km)を対象としたメッシュサイズ(500m~1km)の数値モデルも構築し、流動および水質特性の計算結果を境界条件として細分化したモデルに取り込んだ。

本計算に使用した計算領域と流入河川位置を図-1に示した。

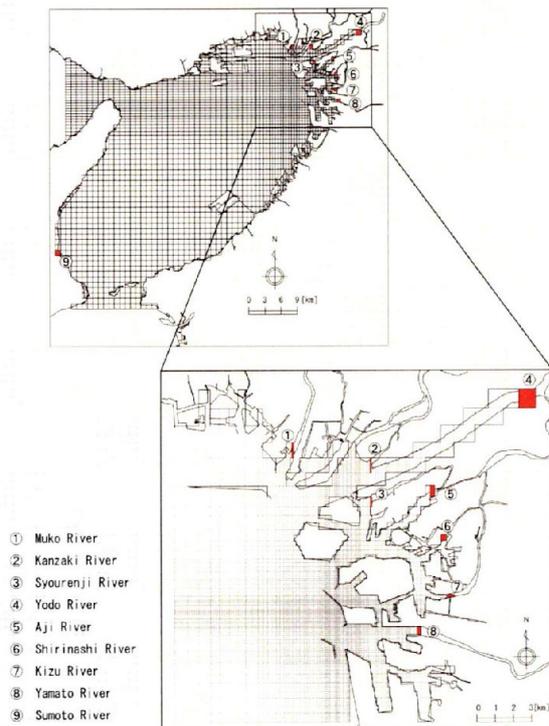


図-1 計算領域と流入河川位置

(1) 流動モデル

本研究では、鉛直多層流動モデルを用いて流動場を算出した⁹⁾。

モデルの基礎式は以下のように表される。

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} + (v \cdot \nabla) M_k + (vw)_{-H_{k-1}} - (vw)_{-H_k} - f_0 k \times M_k = \frac{h_k}{\rho_k} \left(\psi_k - \frac{1}{2} g h_k \nabla \rho_k \right) + [\nabla \cdot (A_H \nabla)] M_k + \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{-H_{k-1}} - \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{-H_k} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = w_1 - \nabla \cdot M_1, \quad w_{k-1} = w_k - \nabla \cdot M_k \quad (2 \leq k \leq K-1) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_k \theta_k) + \nabla \cdot (M_k \theta_k) + (w \theta)_{-H_{k-1}} - (w \theta)_{-H_k} = [\nabla \cdot (h_k K_H \nabla)] \theta_k + \left(K_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{-H_{k-1}} - \left(K_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{-H_k} \quad (3)$$

ここで、 $h_k (k=1,2,\dots,K)$ は第 k 層の厚さ、 H_k は第 k 層下端の深度、 $v=(u,v)$ は流れの水平速度成分、 w は鉛直成分、 ζ は潮位、 ρ は海水密度、 θ は水温および塩分、 $M_k = h_k \cdot v_k$ は第 k 層内の体積輸送、 ∇ は水平傾度演算子、 g は重力加速度、 f_0 はコリオリ係数、また A_H, K_H と A_z, K_z はそれぞれ水平および鉛直方向の渦粘性係数、渦拡散係数、 ψ_k は第 k 層の水平圧力勾配を表す。海水密度を記述する状

態方程式に対しては、Knudsen 式を適用した。

(2) 水質モデル

水質モデルは、沿岸海洋の低次生態系を対象として、12 の生態的構成要素を物質の拡散方程式に組み込むことで構成され、水質モデルの構成要素である現存量を B とした場合、以下のように表される。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (uB) - \frac{\partial}{\partial y} (vB) - (w + w_s) \frac{\partial B}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)^* \quad (4)$$

ここで、 B は生態系要素の現存量、 u, v, w は湾内の流れの速度成分、 w_s は各生態系要素の沈降速度、 K_x, K_y, K_z は渦拡散係数、 $(\partial B / \partial t)^*$ は系内の生物化学プロセスによる現存量の変化を示す。

なお、ここでは植物プランクトンの栄養塩摂取動態に関し、セル・クォータ (Cell Quota) モデルを採用した。光合成速度は光の制限を受けるばかりでなく、植物プランクトンの細胞内に蓄積された栄養素 (セル・クォータ) 量からも制限される¹⁰⁾ が、この機構を取り込んだのがセル・クォータモデルである。また、本研究で使用した生物・化学的過程の基礎式は以下の通りである¹¹⁾。

なお、水産庁瀬戸内海漁業調整事務所が提供している赤潮情報 (<http://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akasio/gepou/index.html>) によると、大阪湾では年間を通じて *skeletonema costatum* 種が比較的優先して出現する。

そこで、本モデルで設定した植物プランクトンの増殖速度は、鶴田ほか¹²⁾ の報告を参考にし、*skeletonema costatum* 種を対象とした水温と塩分の関数式を用いた。

植物プランクトン (Phy)

$$\frac{\partial Phy}{\partial t} = \text{光合成による増殖} - \text{細胞外分泌} - \text{呼吸} - \text{動物プランクトンの摂食} - \text{枯死} - \text{沈降} \quad (5)$$

窒素・クォータ (SQN)

$$\frac{\partial (SQN)}{\partial t} = \text{無機態窒素の摂取} - \text{増殖による利用} - \text{動物プランクトンの摂食} - \text{枯死} - \text{沈降} \quad (6)$$

リン・クォータ (SQP)

$$\frac{\partial (SQP)}{\partial t} = \text{無機態リンの摂取} - \text{増殖による利用} - \text{動物プランクトンの摂食} - \text{枯死} - \text{沈降} \quad (7)$$

動物プランクトン (Zoo)

$$\frac{\partial Zoo}{\partial t} = \text{植物プランクトンの摂食} + \text{デトリタスの摂食} - \text{排糞} - \text{排泄} - \text{自然死亡} \pm \text{周垂直移動} \quad (8)$$

懸濁態有機炭素 (POC)

$$\frac{\partial POC}{\partial t} = \text{植物プランクトンの枯死} + \text{動物プランクトンの自然死亡} + \text{動物プランクトンの排糞} - \text{動物プランクトンによる捕食} - \text{細菌による分解 (無機化)} - \text{分解余剰物生成} - \text{沈降} \quad (9)$$

溶存態有機炭素 (DOC)

$$\frac{\partial DOC}{\partial t} = \text{植物プランクトンの細胞外分泌} + \text{懸濁態有機物の分解 余剰物生成} - \text{無機化} \quad (10)$$

リン酸塩 (PO_4)

$$\frac{\partial PO_4}{\partial t} = - \text{植物プランクトンによる摂取} + \text{動物プランクトンの排泄} + \text{懸濁態有機物の無機化} + \text{溶存態有機物の無機化} + \text{底泥からの溶出} \quad (11)$$

アンモニウム塩 (NH_4)

$$\frac{\partial NH_4}{\partial t} = - \text{植物プランクトンによる摂取} + \text{動物プランクトンの排泄} + \text{懸濁態有機物の無機化} + \text{溶存態有機物の無機化} - \text{硝化} + \text{硝酸塩の還元} + \text{底泥からの溶出} \quad (12)$$

亜硝酸塩 (NO_2)

$$\frac{\partial NO_2}{\partial t} = \text{アンモニア態窒素の酸化} - \text{硝化} \quad (13)$$

硝酸塩 (NO_3)

$$\frac{\partial NO_3}{\partial t} = - \text{植物プランクトンによる摂取} + \text{亜硝酸態窒素の酸化} \quad (14)$$

溶存酸素 (DO)

$$\frac{\partial DO}{\partial t} = \text{光合成による供給} - \text{植物プランクトンの呼吸による消費} - \text{動物プランクトンの呼吸による消費} - \text{懸濁態有機物の無機化に伴う消費} - \text{溶存態有機物の無機化に伴う消費} - \text{アンモニア態窒素の酸化による消費} - \text{底泥での消費} + \text{再曝気} \quad (15)$$

化学的酸素要求量 (COD)

$$\frac{\partial COD}{\partial t} = (\text{植物プランクトン} + \text{動物プランクトン} + \text{懸濁態有機物} + \text{溶存態有機物}) \text{のCOD成分の時間変化} \quad (16)$$

(3) 計算条件

南港発電所は総出力180万kWのLNG火力発電所であり稼働率は高く、発電所北側の港湾域の中・底層(取水ポンプ水深8m)から取水し西側の大阪湾に表層放水(水深約4m)している。南港発電所近傍のモデルでは発電所の運用実態を考慮して取放水量を以下の3ケースとして検討を行った。

① 取放水量現況再現

取放水量 78 m³/s (9時~21時), Δt=6℃, 放水位置 3~5m層, 取水位置 8~9m層, 21時以降 9時までは取水量 36m³/s, Δt=0℃

② 取放水量無し

取放水量を 0m³/s

③ 取放水量を2倍

取放水量 156 m³/s (9時~21時), Δt=6℃, 放水位置 3~5m層, 取水位置 8~9m層, 21時以降 9時までは取水量 78m³/s, Δt=0℃

計算期間は、湾奥の成層が形成され始める6月から9月末までとした。また、DOは取水時の値と放水時の値は等しいと仮定した。取放水位置は取水が第8層、放水が第3層と4層とした。なお、計算に使用した水質モデルの各パラメータは田口ほか⁸⁾の値を参考に設定した。流動および水質モデルの初期条件と境界条件を表-1に示した。流入河川流量は日平均流量の実測値を用い、実測値の無い神崎川・武庫川・正蓮寺川・洲本川に関しては大和川との流量相関式から推定値を与えた。

表-1 流動および水質モデルの初期条件と境界条件

計算期間	2002年6月1日0時 ~ 2002年9月30日24時
流動計算の時間刻み	8秒(湾全体), 2.5秒(南港周辺)
水質計算の時間刻み	150秒(湾全体), 30秒(南港周辺)
潮位条件	主要4分潮(M ₂ , S ₂ , K ₁ , O ₁)と年周潮で潮位変動を近似
風向・風速	MANAL(気象庁メソ客観解析データ)から海上風の時間変化を推定
気象要素	毎時の日射量, 雲量, 気温, 相対湿度, 降水量
流入河川	淀川・大和川を含めた9河川
水温・塩分の初期条件	公共用水域水質観測データから補間値を設定
水質の初期条件	公共用水域水質観測データから補間値を設定

3. 計算結果

発電所の運用実態を考慮して、取放水量を変化させた場合のD0の鉛直分布と水平分布について検討を行った。

(1) D0 鉛直分布についての検討

a) 現況の D0 分布

発電所放水口前面海域の D0 分布を把握するため、2002 年 8 月に南港発電所放水口から沖方向に設けた調査ライン上の D0 鉛直分布を測定するとともに、数値シミュレーションにより同地点の D0 鉛直分布を計算した。D0 測定は溶存酸素計(長島商事製 ND-10)を用いて海面下 0.5m より 0.5m 間隔で海底直上 0.5m まで行い、ウィンクラー・アジ化ナトリウム変法で校正した。なお、この時の発電所取放水量は 78 m³/s であった。観測結果を図-2 に示した。取水口近傍での D0 の値は 0.6~1.6mg/L 程度であったが、放水口前面から沖合 100m 範囲の D0 分布は、放水口水深(3~5m 深)で 4~6mg/L 程度で推移し、顕著な D0 の低下は認められなかった。また、放水口下端以深では 4mg/L 以下となった。

数値シミュレーションモデルを使用して発電所取放水量が 78m³/s (現況) の場合の 2002 年 8 月における D0 鉛直分布を計算した結果を図-3 に示した。放水口前面の D0 分布は放水口上端付近で 5mg/L 程度、放水口下端以深で 3mg/L 以下となった。D0 の分布傾向は計算値が若干小さい値となったが、観測値と計算値でほぼ同様の傾向となった。

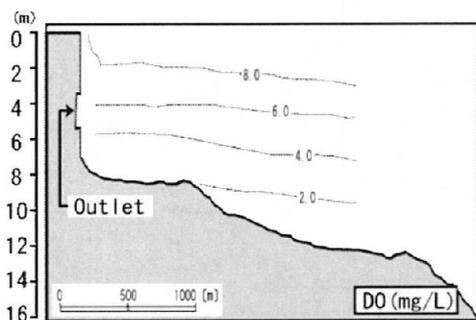


図-2 2002 年 8 月の南港発電所放水口前面における D0 鉛直分布 (観測値)

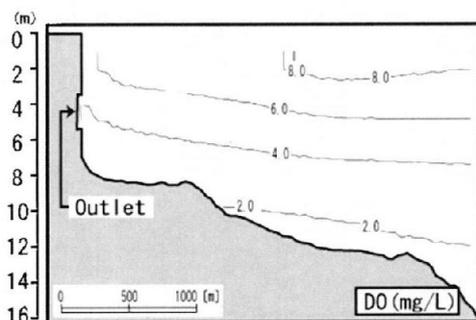


図-3 2002 年 8 月の南港発電所放水口前面における D0 鉛直分布 (モデル計算結果, 放水量 78m³/s)

b) 取放水が無い場合の D0 分布

発電所取放水量が 0m³/s とした場合、同位置・同期間中の D0 鉛直分布を数値シミュレーションモデルによって計算した結果を図-4 に示した。

取放水が無い場合、現況(放水量 78 m³/s) と比べ放水口直近域から沖合 1.5km 付近までの表層域での D0 は 8 mg/L 以上と高くなる傾向が見られた。また、放水口から約 1km 沖合底層の 2mg/L 以下の低 D0 水塊に着目すると、放水が止まるとわずかながら浅い水深まで低 D0 水塊が張り出す結果となった。

なお、図には示していないが、発電所の取放水が無い場合と現況(放水量 78 m³/s) の D0 の差分を比較すると、放水口近傍から沖合 1.5km 以遠では表層 D0 の差分が 1.0mg/L 以下となり、表層水温の差分も 1℃以下となった。

c) 取放水量が 2 倍の場合の D0 分布

発電所取放水量が 156m³/s とした場合、同位置・同期間中の D0 鉛直分布を数値シミュレーションモデルによって計算した結果を図-5 に示した。

取放水量が増えたことにより取水口直近の鉛直循環が強化され、取水側の D0 が 0.5mg/L 程度改善した結果、取放水量が 78 m³/s の時と比べ、全体的に放水側の D0 が改善された。また、放水口から約 1km 沖合底層に存在していた 2mg/L 以下の低 D0 水塊は水深がより深い約 1.25km 沖合にまで後退した。

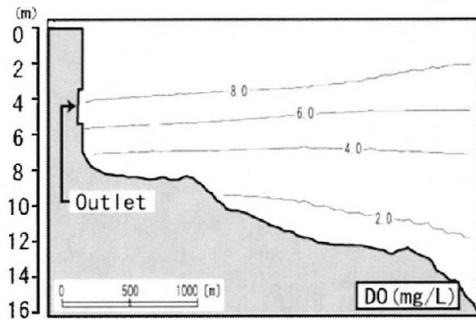


図-4 2002 年 8 月の南港発電所放水口前面における D0 鉛直分布 (モデル計算結果, 放水量 0m³/s)

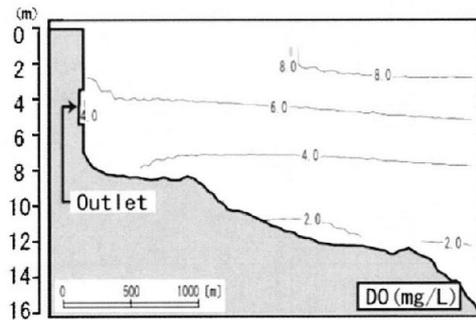


図-5 2002 年 8 月の南港発電所放水口前面における D0 鉛直分布 (モデル計算結果, 放水量 156m³/s)

(2) D0 水平分布についての検討

a) 現況の D0 分布

数値シミュレーションモデルを使用して発電所取放水が $78\text{m}^3/\text{s}$ (現況) の場合の 2002 年 8 月における表層の D0 水平分布を図-6 に、海底直上層の D0 水平分布を図-7 に示した。

表層の D0 分布は、南港発電所の北西部に設置されている防波堤によって北側の約 10mg/L の水塊と南西側の約 8mg/L の水塊に分離されている。また、低 D0 水塊の放水によって放水口近傍で周辺水塊よりも低 D0 となった。

海底直上層の D0 分布は、南港発電所の北側では約 1mg/L となるが、F 西側では放水口近傍で $2\sim 3\text{mg/L}$ となった。

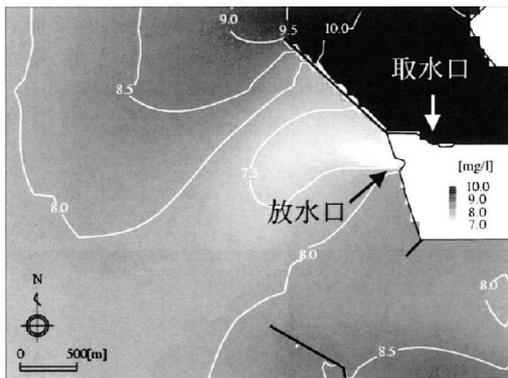


図-6 2002 年 8 月の南港発電所放水口前面における表層 D0 の水平分布計算結果 (放水量 $78\text{m}^3/\text{s}$)

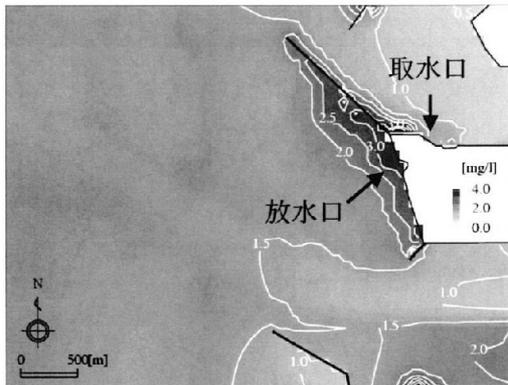


図-7 2002 年 8 月の南港発電所放水口前面における海底直上 D0 の水平分布計算結果 (放水量 $78\text{m}^3/\text{s}$)

b) 取放水が無い場合の D0 分布

発電所取放水が $0\text{m}^3/\text{s}$ とした場合、同期間中の D0 水平分布を数値シミュレーションモデルによって計算した表層の D0 水平分布を図-8 に、海底直上層の D0 水平分布を図-9 に示した。

表層の D0 分布は、南港発電所の北西部に設置されている防波堤によって北側の約 10mg/L の水塊と南西側の約 8mg/L の水塊に分離されているが、放水が止まったことで、北側の水塊が防波堤を回り込ん

で南港発電所西側まで及ぶ結果となった。図には示していないが、現況との差を比較すると、取放水が無いと放水口から最大 1.5km 沖合の範囲で約 1.0mg/L の D0 の増加が認められた。

海底直上層の D0 分布は、現況と取放水が無い場合でほとんど変わらないが、取水口近傍の最大 0.5km 沖合の範囲で約 0.5mg/L の D0 の増加が認められた。

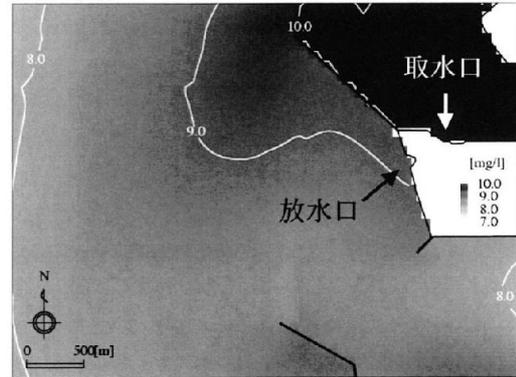


図-8 2002 年 8 月の南港発電所放水口前面における表層 D0 の水平分布計算結果 (放水量 $0\text{m}^3/\text{s}$)

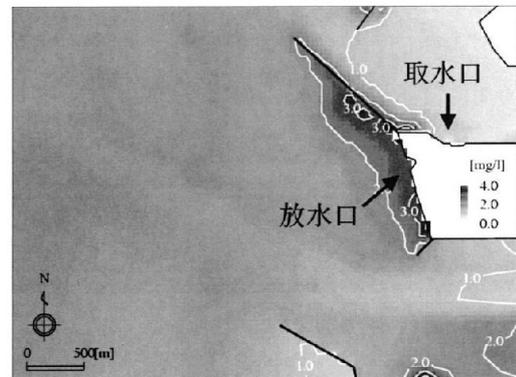


図-9 2002 年 8 月の南港発電所放水口前面における海底直上 D0 の水平分布計算結果 (放水量 $0\text{m}^3/\text{s}$)

c) 取放水量が 2 倍の場合の D0 分布

発電所取放水が $156\text{m}^3/\text{s}$ であった場合、同期間中の D0 水平分布を数値シミュレーションモデルによって計算した表層の D0 水平分布を図-10 に、海底直上層の D0 水平分布を図-11 に示した。

表層の D0 分布は、南港発電所の北西部に設置されている防波堤によって北側の約 10mg/L の水塊と南西側の約 $8\sim 9\text{mg/L}$ の水塊に分離されているが、取放水量が 2 倍になったことで、現況と比べて 7.5mg/L 以下の範囲が縮小した。

海底直上層の D0 分布は、取水口近傍の最大 0.5km 沖合の範囲で約 0.5mg/L の D0 の増加が認められた。

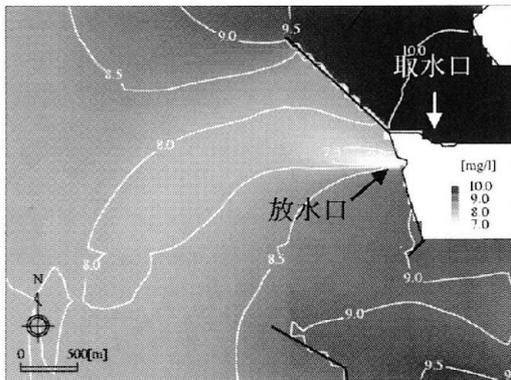


図-10 2002年8月の南港発電所放水口前面における表層DOの水平分布計算結果(放水量 $156\text{m}^3/\text{s}$)

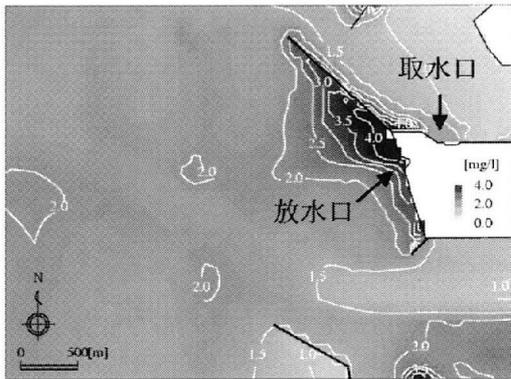


図-11 2002年8月の南港発電所放水口前面における海底直上DOの水平分布計算結果(放水量 $156\text{m}^3/\text{s}$)

4. おわりに

内湾に立地する深層取水型の発電所の前面海域では、放水口近傍の狭い範囲で表層DOが低下するものの、底層DOは発電所が稼働することで改善される可能性がある。これは、放水とは逆向きの補償流によって外海水が供給されることと放水による鉛直混合によるものと推察された。また、発電所の取水量が増えると取水口直近の鉛直循環が強化され、取水側のDOが改善されることで放水側のDOも改善する可能性があることが示唆された。

謝辞

報告に当たり、調査にご協力を賜った大阪市港湾局、国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所、関西電力(株)に感謝の意を表します。また、データの整理、作図の補助をして頂いた当研究所(契約所員)の関マリ子さんにもあわせて御礼致します。本研究は水産庁委託の発電所取水内湾漁業影響調査の成果の一部を使用したものである。

参考文献

- 1) 城久：大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産におよぼす影響について、大阪府水産試験場研究報告, No. 7, pp. 22-28, 1986.
- 2) 藤原建紀, 岸本綾夫, 中嶋昌紀：大阪湾の貧酸素水塊の短期的および長期的変動, 海岸工学論文集, Vol. 51, pp. 931-935, 2004.
- 3) 堀江毅, 細川恭史：海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について, 港湾技術研究所報告, Vol. 22, No. 3, pp. 159-205, 1983.
- 4) 岸道郎, 池田三郎, 平野敏行, 西村陽：赤潮生態系の数値モデル, 沿岸海洋ノート, Vol. 22, No. 2, pp. 109-118, 1985.
- 5) 山根伸之, 寺口貴康, 中辻啓二：閉鎖性内湾の貧酸素水塊の形成機構に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 961-965, 1998.
- 6) 韓銅珍, 丸谷尊彦, 中辻啓二：閉鎖性内湾における水質・底質モデルの構築とその検証, 海岸工学論文集, Vol. 47, pp. 1091-1095, 2000.
- 7) 谷本照巳, 星加章, 三島康史, 柳哲雄：大阪湾における懸濁物質・窒素・リンの収支と循環, 海の研究, Vol. 10, No. 5, p. 397-412, 2001.
- 8) 田口浩一, 中根徹：浮遊生態系モデル-構造と応用例-, *Ecosystem Engineering*, pp. 9-23, 1997.
- 9) 長谷川一幸, 清野通康, 横田瑞郎, 秋本泰, 丸茂恵右, 市川哲也, 長谷川晃一：数値シミュレーションモデルを用いた大阪湾湾奥部における物理環境特性の把握, 海洋調査技術, Vol. 20, No. 2, pp. 23-37, 2008.
- 10) Droop, M.R.: Vitamin B12 and marine ecology, V. Continuous culture as an approach to nutritional kinetics, *Helgoland Wiss. Meeresunters.*, Vol. 20, pp. 629-636, 1970.
- 11) 長谷川一幸, 清野通康, 横田瑞郎, 秋本泰, 丸茂恵右, 市川哲也, 長谷川晃一, 柳川竜一：現地観測と数値シミュレーション解析による大阪湾の湾奥部におけるDO分布特性の把握, 海洋調査技術, Vol. 21, No. 2, pp. 1-12, 2009(掲載予定).
- 12) 鶴田新生, 大貝政治, 上野俊士郎, 山田真知子：浮遊珪藻 *Skeletonema costatum* (GREVILLE) CLEVE の増殖に及ぼす塩素量の影響, *Bulletin of the Japanese society of Scientific Fisheries*, Vol. 51, No. 11, pp. 1883-1886, 1985.