

発電所取放水が大阪湾湾奥部における溶存酸素の移動に与える影響について

長谷川一幸^{*1§}・清野通康^{*2}・横田瑞郎^{*1}・秋本泰^{*2}・丸茂恵右^{*1}・
市川哲也^{*3}・長谷川晃一^{*4}・柳川竜一^{*4}

Influence of the Discharge Water from Power Plant on the Dissolved Oxygen Displacement in an Enclosed Coastal Sea, Osaka Bay

Kazuyuki Hasegawa^{*1}, Michiyasu Kiyono^{*2}, Mizurou Yokota^{*1}, Yutaka Akimoto^{*2},
Keiyu Marumo^{*1}, Tetsuya Ichikawa^{*3}, Kouichi hasegawa^{*4} and Ryouichi Yanagawa^{*4}

要約: 大阪湾の湾奥に位置する南港発電所周辺海域において, 大阪湾全体を把握する流動・水質モデルを使用して, 成層の影響が顕著となる夏季における発電所取放水の変化とD0移動量との関連性を検討した。その結果, 取放水が無い場合では, D0の水平移動量および鉛直移動量は極端に減少するが, 取放水がある場合には, 特に7月から8月中旬にかけて上層から下層への酸素供給が増加することが示された。

キーワード: 大阪湾, 南港火力発電所, 溶存酸素, 数値シミュレーションモデル

Abstract: Applying numerical analysis models to the Nanko area of Osaka Bay, we calculated dissolved oxygen displacement affected by power plant discharge in the summer when the bottom layer was hypoxic. The power plant discharge was found to increase the oxygen supply from the upper layer to the bottom layer during July and the first half of August. On the other hand, halt condition of the power plant discharge decreased the horizontal and vertical dissolved oxygen displacement.

Key words: Osaka Bay, Nanko thermal power plant, dissolved oxygen, Numerical simulation model

まえがき

大阪湾の水質は1970年代後半から1980年代に悪化のピークが見られたが, 下水道の整備等が進み1990年代には栄養塩類濃度は減少に転じ, 現在では1970年中頃のレベルにまで戻りつつある。特に総窒素量は1990年代と1980年代を比較すると22%, 総リン量は13%減少したと報告されている(星加ら, 1998)。このように大阪湾の水質は改

善の方向に向かっているものの, 湾奥部では, 高度成長期以降の大規模な埋め立てにより多くの浅海域が消失し, 直立護岸で囲まれた閉鎖性の強い海域が多数出現するため(石垣ら, 2005), 依然として深刻な水質問題を抱えている。

大阪湾には多くの発電所が立地し, その多くが水質の悪化が著しい湾奥に立地するため発電所取放水が湾奥の水質にどのような影響を与えるのかを把握することは非常に重要である。これまでの

(2010年11月4日受付, 2011年3月2日受理)

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

§ E-mail: hasegawa@kaiseiken.or.jp

*2 財団法人 海洋生物環境研究所 事務局 (〒162-0801東京都新宿区山吹町347番地藤和江戸川橋ビル7階)

*3 株式会社 サイエンスアンドテクノロジー (〒140-0001 東京都品川区北品川1-9-12アールビル3階)

*4 株式会社 中電シーティーアイ (〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南一丁目27-2 日本生命笹島ビル)

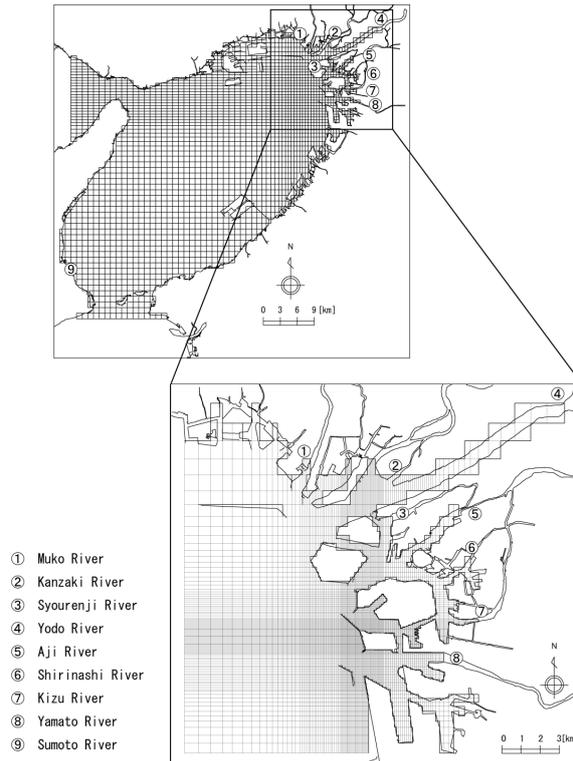


Fig. 1 Calculation area and model horizontal resolution in Osaka Bay and the vicinity of the Nanko thermal power plant.

研究で、大阪湾の湾奥に立地する南港発電所周辺海域をモデル地点とし、内湾海域環境、特に底層が貧酸素となる夏季における物理環境（流動・水温・塩分）を把握する数値モデルを構築するとともに（長谷川ら，2008），底層が貧酸素となる夏季における溶存酸素量（以下DOと記載）について現地観測と数値シミュレーション解析を行うことで大阪湾湾奥のDO分布特性を把握してきた（長谷川ら，2009a）が、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取水して冷却水として使用した後、昇温した水塊を放水しているため、貧酸素水塊によるDOの低下が放水口前面で顕在化する可能性も考えられる（長谷川ら，2009b）。一方で発電所の規模にもよるが、毎秒数十トン程度の海水が放水されることによって海水が移動することで海域全体のDO移動量が増加し、結果的に生物の生息環境の改善につながる可能性がある。そこで、南港発電所の取放水量の変化とDO移動量との関連性を明らかにすることを本研究の目的とした。

方法

数値モデルの概要 本研究では、田口ら（1997）

が考案した3次元流動モデル（マルチレベルモデル）と低次生態系モデルを基に大阪湾全体領域と南港発電所領域について数値シミュレーション解析を行った。大阪湾全体の計算は大阪湾全域を含む南北63km、東西63kmとし、メッシュサイズは500m～1kmとした。一方、南港発電所近傍海域の計算では細分化した50～250mメッシュで実施した。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（取水水深約3～8m）から取水し西側の大阪湾に表層放水している。南港発電所近傍のモデルでは発電所の取放水影響を考慮し、大阪湾全体の流動および水質特性の計算結果を境界条件として与えた。南港発電所近傍における計算領域をFig. 1に示した。

3次元流動モデル 解析に使用したモデルは、小田ら（1997）が考案した鉛直多層3次元流動モデル（マルチレベルモデル）を用いた。モデルの基礎式は以下のように表される。

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

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

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

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、 $\nu = (u, v)$ 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。

海面からの冷却または加熱による交換熱量 Q_0 は次式で表現した。

$$Q_0 = Q_s - Q_b - Q_h - Q_e \quad (4)$$

ここで、 Q_s は輻射量 ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)、 Q_b は海表面からの逆輻射量、 Q_h は顕熱量 (対流により大気と海面の間を出入りする熱交換量)、 Q_e は潜熱量 (蒸発・凝縮による熱移動量) である。

鉛直方向の乱流輸送 (渦粘性係数、渦拡散係数) については、中立安定状態を基準にした勾配リチャードソン数 Ri の関数表現を採用した。以下に算定式を示した。

$$A_z = C_\mu L \sqrt{e} \cdot (1 + \alpha \cdot Ri)^\beta$$

$$K_z = \frac{C_\mu}{Pr_T} L \sqrt{e} \cdot (1 + \alpha \cdot Ri)^\beta$$

$$Ri = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot L \quad (5)$$

ここで、 C_μ と Pr_T は経験係数、 L は乱流の特性距離に相当する長さのスケール、 e は単位質量あたりの乱流の運動エネルギー、 α と β は鉛直渦粘性係数・鉛直渦拡散係数とリチャード数との関係から求めた経験定数である。

また、乱流エネルギー e の輸送を次式で表現し

Table 1 Numerical model parameters used for the calculation of environmental factors in Osaka Bay.

Calculation condition	Selected Value	
Calculation area	whole of Osaka Bay (63km×63km)	
Horizontal resolution	500m~1km	
Depths and thickness of model levels	Level 1 : surface ~2m	Level 6 : 15~20m
	Level 2 : 2~4m	Level 7 : 20~30m
	Level 3 : 4~7m	Level 8 : 30~40m
	Level 4 : 7~10m	Level 9 : 40~50m
	Level 5 : 10~15m	Level 10 : 50~bottom
Calculation time step	8sec	
Calculation period	May 1st,2002 to January 1st,2003	
Tidal level condition of baymouth	Approximation of tidal level fluctuation based on the tidal harmonic constant relating M2,S2,K1,01 tidal component to Sa annual tide	
Temperature and salinity condition of baymouth	Estimate daily variation value by the public water body observations in Kitan and Akashi channel	
River inflow	Yamato, Yodo, Kanzaki, Aji, Kizu, Muko, Shirinashi, Syourenji, and Sumoto rivers	
River inflow temperature(°C)	Estimate value by the approximation formula of water temperature and air temperature	
River inflow salinity(psu)	Estimate value by the approximation formula of water flow and salinity	
Wind direction/velocity	Estimate value by the MANAL data	
Sea surface friction coefficient	Estimate value by the bulk formula(Kondo,1975)	
Precipitation	Estimate value by the hourly AMeDAS observations	
Meteorological element	Hourly observations value of temperature, cloudage, humidity, insolation at the weather station in Osaka, Kobe, Sumoto and Wakavama	
Coriolis coefficient	$8.24 \times 10^{-5} \text{S}^{-1}$	
Sea bottom friction coefficient	0.0026	
Coefficient of horizontal eddy viscosity	$0.05 \times \Delta^2 (4/3)$	
Coefficient of horizontal diffusion	Δ : horizontal mesh size	
Coefficient of vertical eddy viscosity	Turbulent flow model results	
Coefficient of vertical diffusion		

た。

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_k e_k) + \nu_k \nabla \cdot (h_k e_k) + (w e)_{-H_{k-1}} - (w e)_{-H_k} = \left[\nabla \cdot \left(h_k \frac{A_H}{\sigma_T} \nabla \right) \right] e_k + \left(\frac{A_z}{\sigma_T} \frac{\partial e}{\partial z} \right)_{-H_{k-1}} - \left(\frac{A_z}{\sigma_T} \frac{\partial e}{\partial z} \right)_{-H_k} + S - C_D h_k \frac{e^2}{L} \quad (6)$$

ここで、 σ_T と C_D は経験係数、 S は層間の剪断応力による乱れエネルギー e の生産、右辺の最終項は粘性による散逸を表す。

また、計算に用いた解析条件をTable 1に示した。なお、流入河川流量は大和川、淀川、安治川、木津川、尻無川に関しては日平均流量の実測値を与え、実測値の無い河川については大和川の流量 Q との相関式から神崎川 ($Q=0.069 \times \text{大和川} Q^{1.258}$)、武庫川 ($Q=0.113 \times \text{大和川} Q^{0.671}$)、正連寺川 (2002年6月以前は $Q=1.108 \times \text{大和川} Q^{0.564}$ 、2002年6月以降は淀川水位 H との相関式から $Q=0.03 \times 137.19 \times (H+4.81)^2$)、洲本川 ($Q=0.015 \times \text{大和川} Q^{1.715}$)

の流量を設定した。

流入河川の水温の値は気温と公共用水域の水温データから近似式を求めて設定し、流入河川の塩分の値は流量と公共用水域の塩分データから近似式を求めて各河川の塩分Sを淀川塩分 (S=15.407×EXP(-0.0413×Q))、大和川塩分 (S=0.0796×EXP(-0.0332×Q))、安治川 (塩分S=8.91)、木津川塩分 (S=27.592×EXP(-0.1244×Q))、尻無川塩分 (S=13.459×EXP(-0.1324×Q))、正蓮寺川塩分 (S=15.229×EXP(-0.1018×Q))、神崎川塩分 (S=14.963×EXP(-0.0701×Q))、洲本川塩分 (S=0.0796×EXP(-0.0332×Q))、武庫川塩分 (S=0.0796×EXP(-0.0332×Q))と設定した。ただし、安治川は流量変化に伴う塩分変化が顕著でなかったため一定値とし、武庫川と洲本川の塩分はデータが不足していたため、最もデータ量の多い大和川の設定値と同値とした。

南港発電所近傍海域における流動モデル モデル海域近傍の流動、水温、塩分の変化をより詳細に把握するため、取放水口前面では水平方向50m、鉛直方向には12層に分割して南港周辺の解像度を高めた。解析に使用したモデルの基礎式は大阪湾全体の流動場を求めたものと同じであるが、沖合の境界では大阪湾全体の流動場モデルで得られた計算結果を境界条件として設定した。南港発電所の取放水条件は、9時～21時のフル稼働で取放水量78m³/s、Δt=6℃、21時以降9時まででは取水量36m³/s、Δt=0℃とし、取放水位置は取水が第8層、放水が第3層と4層とした。解析に使用した諸条件をTable 2に示した。

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。水質モデルの構造をFig. 2に示した。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(uB) - \frac{\partial}{\partial y}(vB) - (w+w_s)\frac{\partial B}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial B}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial B}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial B}{\partial z}\right) + \left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)^* \quad (7)$$

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

Table 2 Numerical model parameters used for the calculation of environmental factors in the vicinity of the Nanko thermal power plant.

Calculation condition	Selected Value
Calculation area	Surrounding ocean area of Nanko power plant (20km×20km)
Horizontal resolution	50m~250m
Depths and thickness of model levels	Level 1 : surface ~2m Level 7 : 7~8m
	Level 2 : 2~3m Level 8 : 8~9m
	Level 3 : 3~4m Level 9 : 9~10m
	Level 4 : 4~5m Level 10 : 10~12m
	Level 5 : 5~6m Level 11 : 12~14m
	Level 6 : 6~7m Level 12 : 14~bottom
Calculation time step	150sec
Calculation time span	June 1st,2002 to September 30th,2002
Boundary condition of baymouth	Estimate value by the numerical calculation results (temperature,salinity,tidal level,flow)of whole Osaka Bay
Tidal level condition	Estimate value by the numerical calculation results for the whole fo Osaka Bay
River inflow	Yamato,Yodo,Aji,Kizu,Muko,Shirinashi,Shyourenji, and Sumoto rivers
River inflow temperature(°C)	Estimate value by the approximation formula of water temperature and air temperature
River inflow salinity(psu)	Estimate value by the approximation formula of water flow and salinity
Meteorological element	Hourly observations value of temperature,cloudage,humidity at the weather station in Osaka,Kobe,Sumoto and Wakayama
Coriolis coefficient	8.24×10 ⁻² S ⁻¹
Wind direction/velocity	Estimate value by the MANAL data
Sea surface friction coefficient	Estimate value by the bulk formula(Kondo,1975)
Sea bottom friction coefficient	0.0026
Coefficient of horizontal diffusion	0.05×Δ ² (4/3) Δ: horizontal mesh size
Coefficient of vertical diffusion	Turbulent flow model results

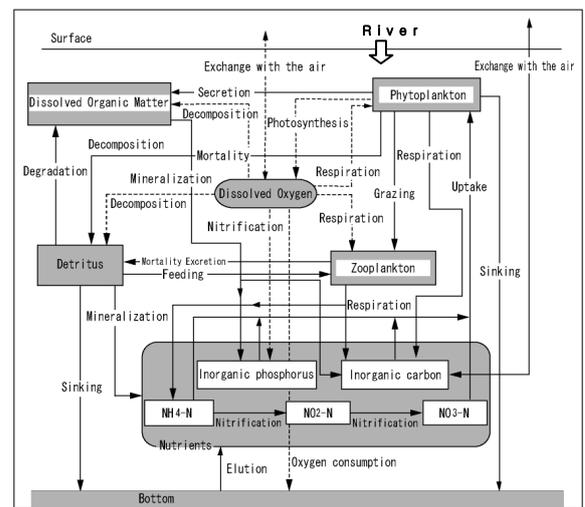


Fig. 2 Conceptual diagram of the low-order ecosystem model.

度、K_x、K_y、K_zは渦拡散係数、(∂B/∂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。光合成速度は光によって制限されるばかりでなく、植物プランクトンの細胞内に蓄積された栄養素（セル・クオータ）量からも制限される（Droop, 1970）が、この機構を取り込んだのがセル・クオータモデルである。

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。

①植物プランクトン 植物プランクトン N_p 種のグループについて i グループの炭素生物量を A_{p_i} (mgC/m^3) とすると、その時間変化は以下のように表される。

$$\frac{\partial A_{p_i}}{\partial t} = (\text{光合成}) - (\text{細胞外分泌}) - (\text{呼吸}) - (\text{動物プランクトンによる摂食}) - (\text{枯死}) - (\text{沈降})$$

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、鶴田ら（1985）の報告を参考に *Skeletonema* 属を対象とした水温と塩分の関数式で与えた。

②植物プランクトンのセル・クオータ セル・クオータの動力学は次のように表わされる。また、SQNは窒素クオータ、SQPはリンクオータ（いずれも単位は $\mu\text{g-at.}/\text{L}$ ）を指す。

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

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

③動物プランクトン 動物プランクトン j グループの生物量 (mgC/m^3) Z_j ($j=1, 2, \dots, N_z$) として、 Z_j の時間変化を以下のように表現した。

$$\frac{\partial Z_j}{\partial t} = (\text{摂食(植物プランクトン)}) + (\text{摂食(デトリタス)})$$

−(排糞)−(排泄)−(呼吸)−(自然死亡±日周垂直移動)

④懸濁態有機物（デトリタス） 懸濁態有機物コンパートメントは、非生物態（デトリタス態）の有機炭素POC ($\text{mg C}/\text{m}^3$)、窒素PON ($\mu\text{g-at.}/\text{L}$) およびリンPOP ($\mu\text{g-at.}/\text{L}$) の3形態を考慮した。計算は炭素量単位のPOCで行い、N/C比、P/C比を乗じてPON、POP量へ換算した。POCコンパートメントの時間変化は以下のように表現した。

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

⑤溶存態有機物 溶存態有機物はDOC（単位： $\text{mg C}/\text{m}^3$ ）、DON ($\mu\text{g-at.}/\text{L}$) およびDOP ($\mu\text{g-at.}/\text{L}$) の3形態を考慮した。DOC現存量を状態変数として扱い、元素組成N/C、P/C比を乗じてそれぞれDON、DOP量へ換算した。DOC現存量の時間変化は以下のように表現した。

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

⑥リン酸塩 リン酸塩の生物化学的プロセスを定式化したものを示した。

$$\frac{\partial \text{PO}_4}{\partial t} = - (\text{植物プランクトンによる摂取}) + (\text{動物プランクトンの排泄}) + (\text{懸濁態有機物の無機化}) + (\text{溶存態有機物の無機化}) + (\text{底泥からの溶出}) + (\text{河川からの供給})$$

⑦無機態窒素 無機態窒素コンパートメントはアンモニウム塩、亜硝酸塩および硝酸塩3態の窒素である。以下に生物化学プロセスを定式化したものを示した。

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

$$\frac{\partial NO_2}{\partial t} = (\text{アンモニア態窒素の酸化}) - (\text{硝化}) + (\text{河川からの供給})$$

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

⑧溶存酸素 溶存酸素コンパートメントに関する定式化は酸素の供給と消費に関するすべての生物化学プロセスを炭素量から酸素量に換算して捉え、以下のように表現した。

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

⑨化学的酸素要求量 水質汚濁に関するモデルのコンパートメントは化学的酸素要求量 (COD) である。CODの時間変化量は各態有機物中のCOD/C比を用いて以下のように表現した。

$$\frac{\partial DOC}{\partial t} = (\text{植物プランクトンコンパートメントから決まるCODの時間変化}) + (\text{動物プランクトンコンパートメントから決まるCODの時間変化}) + (\text{懸濁態有機物コンパートメントから決まるCODの時間変化}) + (\text{溶存態有機物コンパートメントから決まるCODの時間変化}) + (\text{河川からの供給})$$

水質モデルの計算期間は、湾奥の成層が形成さ

Table 3 Boundary conditions of the ocean circulation model and the low-order ecosystem model.

Calculation area	Whole of Osaka-Bay	Surrounding ocean area of Nanko power plant
Amount of insolation(w/m ²)	Hourly observations in Osaka by Japan Meteorological Agency	
Daily mean river inflow (m ³ /s)	Yamato, Yodo, Kanzaki, Aji, Kizu, Shirinashi, Syourenji, and Sumoto rivers	Yamato, Yodo, Kanzaki, Aji, Kizu, Muko, Shirinashi and Syourenji rivers
River inflow temperature(°C)	Estimate value by the correlation equation of water temperature and air temperature	
River inflow salinity(psu)	Estimate value by the correlation equation of water flow and salinity	
Dissolution rate of saline mud nutrient and oxygen consumption rate	Dissolution rate of phosphorus=a×exp.(0.0388×T-0.541×DO) Dissolution rate of nitrogen=a×exp.(0.064×T) oxygen consumption rate=a×exp(0.115×T)×H×DO Where T is temperature:H is bottom layer height:DO is concentration of dissolved oxygen.	
Tidal level condition	Approximation of tidal level fluctuation based on the tidal harmonic constant relating M2,S2,K1,O1 tidal component and Sa annual tide	Estimate value by the numerical calculation results for the whole of Osaka Bay
Temperature(°C) Salinity(psu)	Estimate daily variation value by the public water body observations in Kitan and Akashi channel	Estimate value by the numerical calculation results for the whole of Osaka Bay

Table 4 River and ocean inflow load of the low-order ecosystem model.

Calculation area	Whole of Osaka-Bay	Surrounding ocean area of Nanko power plant
River inflow load (T/day)	COD NH4-N NO2-N NO3-N PO4-P	Estimate value by the correlation equation of river inflow and load
	DO	Estimate value by the correlation equation of river inflow and load
Open sea inflow load (mg/l)	COD NH4-N NO2-N NO3-N PO4-P	Estimate value by the numerical calculation results for the whole of Osaka Bay
	DO	Estimate value by the numerical calculation results for the whole of Osaka Bay

れ始める6月から9月末までとした。また、DOは取水施設内で上昇することはないため取水時の値と放水時の値は等しいものとし、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、計算に使用した各パラメータは田口ら(1997)の値を参考に設定した。

境界条件についてはTable 3に、河川負荷量、外海負荷量についてはTable 4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・洲本川に関しては最もデータ量の多い大和川との流量相関式から推定値を与えた。

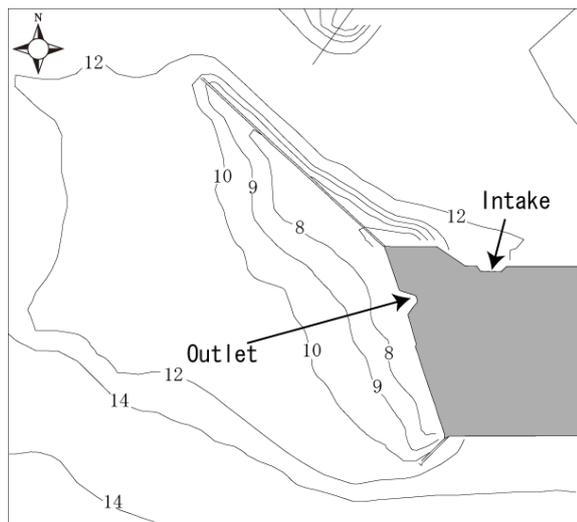


Fig. 3 Water depth chart in the vicinity of the Nanko thermal power plant.



Fig. 4 Segment areas based on the water depth chart.

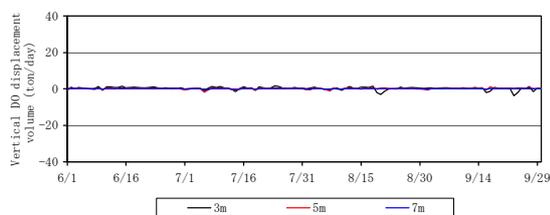


Fig. 5 Daily variation of vertical dissolved oxygen displacement volume in the segment area ① in the case of 0ton/s discharge at each depth. Positive value means upward DO displacement volume, negative value means downward DO displacement volume.

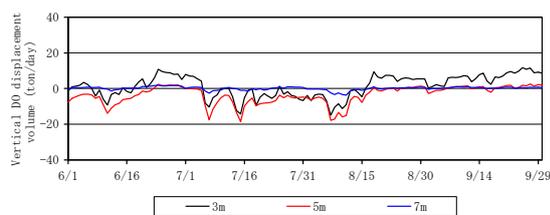


Fig. 6 Daily variation of vertical dissolved oxygen displacement volume in the segment area ① in the case of 78ton/s discharge at each depth. Positive value means upward DO displacement volume, negative value means downward DO displacement volume.

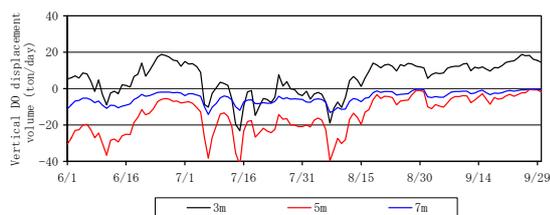


Fig. 7 Daily variation of vertical dissolved oxygen displacement volume in the segment area ① in the case of 156ton/s discharge at each depth. Positive value means upward DO displacement volume, negative value means downward DO displacement volume.

数値モデルの計算条件 南港発電所の運用実態を考慮して取放水量を以下の3ケースとした場合に、発電所取放水量が放水海域のDO移動量にどのような影響を与えるか検討を行った。

① 取放水量無し

取放水量を $0 \text{ m}^3/\text{s}$

② 取放水量現況再現

取放水量 $78 \text{ m}^3/\text{s}$ (9時～21時), $\Delta t = 6 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 $36 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

③ 取放水量を2倍

取放水量 $156 \text{ m}^3/\text{s}$ (9時～21時), $\Delta t = 6 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 $78 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

DO移動量は、水深図 (Fig. 3) を基にボックスに分割した (Fig. 4) 海域間のDO移動量を算出することで、各ケースで検討した。

結果

放水口直近で発電所の取放水影響がもっとも大きいと想定される海域① (Fig. 4) におけるDOの鉛直移動量の日変化を各ケースでFig. 5～7に示した。取放水が無い場合では海面下3m, 5m, 7mのいずれにおいてもDOの移動は計算期間中ほとんど認められないが、現況の場合では、海面下7mの位置でも最大約3 ton/dayのDOの鉛直移動が発生した。また、海面下3m, 5mではさらに活発な鉛直移動が認められ、最大で約15ton/dayのDOの鉛直移動が発生した。取放水が2倍になると、現

Table 5 Differences in the monthly horizontal dissolved oxygen displacement volume (kg/day) between the segment area ① and the area ② in each layer. Case1 is 0ton/s discharge, Case2 is 78ton/s discharge and Case3 is 156ton/s discharge. Positive value means DO displacement volume from segment ① to ②, negative value means DO displacement volume from segment ② to ①.

	Depth(m)	Jun	Jul	Aug	Sep
Case1	1st layer (0~3m)	-4,025	-3,348	-3,147	-2,078
	2nd layer (3~5m)	-1,792	-1,441	-1,008	-695
	3rd layer (5~7m)	-787	-674	-460	-556
	4th layer (7~8m)	-246	-157	-140	-195
Case2	1st layer (0~3m)	14,230	8,431	13,068	15,581
	2nd layer (3~5m)	20,344	18,215	14,054	7,977
	3rd layer (5~7m)	7,323	9,713	7,240	2,312
	4th layer (7~8m)	-353	565	787	-351
Case3	1st layer (0~3m)	36,253	24,209	29,498	27,054
	2nd layer (3~5m)	42,766	37,267	30,839	18,571
	3rd layer (5~7m)	20,820	22,312	16,593	7,432
	4th layer (7~8m)	5,972	7,018	5,392	2,036

況に比べDOの鉛直移動は顕著に増加し、最もDOの移動量の少ない海面下7mの位置でも最大で約10ton/dayにもなった。

海域①で放水された水塊はさらに沖合の海域②~④へ広がっていくと考えられる。そこで、取放水量が変化することで、各海域へのDO移動量にどの程度変化があるかを検討した。Table 5~7に海域①-②間でのDO移動量、海域①-③間でのDO移動量、海域①-④間でのDO移動量の月変化を示した。

北側の防波堤によって流れが遮断されていることもあり、放水方向直線上の沖合に位置する海域①から②へのDOの移動量が最も多くなった。この海域①から②へのDOの移動量に着目すると、取放水が無い場合、放水口周辺では成層化が進み、放水による鉛直循環も発生しないため、底層でのDO不足は外海からの供給のみに頼ることになり、計算期間中すべて②から①へとDOが移動する結果となった。一方で、現況では成層が強化される7~8月は放水による鉛直混合が盛んになることで、

Table 6 Differences in the monthly horizontal dissolved oxygen displacement volume (kg/day) between the segment area ① and the area ③ in each layer. Case1 is 0ton/s discharge, Case2 is 78ton/s discharge and Case3 is 156ton/s discharge. Positive value means DO displacement volume from segment ① to ③, negative value means DO displacement volume from segment ③ to ①.

	Depth(m)	Jun	Jul	Aug	Sep
Case1	1st layer (0~3m)	1,918	2,658	2,554	1,627
	2nd layer (3~5m)	730	515	-66	3
	3rd layer (5~7m)	582	281	21	117
	4th layer (7~8m)	46	34	18	8
Case2	1st layer (0~3m)	-1,168	-2,052	-2,249	-837
	2nd layer (3~5m)	2,774	925	-256	53
	3rd layer (5~7m)	898	-58	-628	-400
	4th layer (7~8m)	69	-94	-117	-50
Case3	1st layer (0~3m)	-8,196	-9,830	-10,327	-2,325
	2nd layer (3~5m)	-1,622	-2,737	-4,066	-1,262
	3rd layer (5~7m)	-1,840	-3,131	-3,387	-1,352
	4th layer (7~8m)	585	-23	-222	167

外海の底層の水塊よりも放水口周辺の底層のDO値が高くなり、①から②へDOの移動が認められる結果となるが、それ以外の期間では外海水の底層DO値の方が高いために、②から①へとDOが移動する結果となった。また、取放水量が2倍になると、計算期間中すべてで底層のDOの移動は①から②の方向になった。

考察

大阪湾の湾奥に位置する南港発電所周辺海域において、大阪湾全体を把握する流動・水質モデルを使用して、成層の影響が顕著となる夏季における発電所取放水の変化とDO移動量との関連性を検討した。

その結果、取放水が無い場合では、DOの水平移動量および鉛直移動量は極端に減少するが、取放水がある場合には、特に7月から8月中旬にかけて上層から下層への酸素供給が増加することが示された。また、その量は数トン~数十トン/dayで

Table 7 Differences in the monthly horizontal dissolved oxygen displacement volume (kg/day) between the segment area ① and the area ④ in each layer. Case1 is 0ton/s discharge, Case2 is 78ton/s discharge and Case3 is 156ton/s discharge. Positive value means DO displacement volume from segment ① to ④, negative value means DO displacement volume from segment ④ to ①..

	Depth(m)	Jun	Jul	Aug	Sep
Case1	1st layer (0~3m)	-2,132	-821	-512	-685
	2nd layer (3~5m)	-755	-744	-1,086	-892
	3rd layer (5~7m)	-284	-408	-442	-388
	4th layer (7~8m)	-36	-44	-39	-53
Case2	1st layer (0~3m)	10,908	9,991	8,646	4,458
	2nd layer (3~5m)	4,199	3,821	3,296	2,209
	3rd layer (5~7m)	3,618	3,029	2,309	1,915
	4th layer (7~8m)	606	545	377	314
Case3	1st layer (0~3m)	19,341	16,638	13,310	8,306
	2nd layer (3~5m)	8,471	7,295	6,159	4,316
	3rd layer (5~7m)	6,195	5,408	4,207	3,195
	4th layer (7~8m)	985	850	614	519

あると見積もられた。特に成層が発達する7~8月には、発電所の取放水によって鉛直混合が盛んになり表層の高DO水が底層に送り込まれ、放水口直近の底層DOが周辺海域よりも高い値となることで、酸素環境の改善に役立っている可能性がある。

これまで、現地観測および流動・水質モデルによる数値シミュレーションによる検討によって、南港発電所放水口前面100m地点のDO分布は、観測値および計算値のいずれも放水口水深のDOの値は3~5mg/Lであり、この値は日本水産資源保護協会(2000)が提唱する「内湾漁業の夏期底層において最低限維持しなくてはならないDO値(4.3mg/L)」とほぼ同レベルで、発電所取放水は湾奥のDO環境を極端に悪化させていないものと考えられる(長谷川ら, 2009b) ことや発電所放水によって水温躍層が乱されている範囲は放水口から沖合で500m程度に限定される(長谷川ら, 2008) ことなどを総合的に考えれば、夏季の貧酸素化された水塊が取放水されることで南港発電所放水口付近のDO環境を悪化させる懸念もあったが、発電所取放

水は、一定の水質改善効果を担っている可能性を示す結果となった。

内湾域で貧酸素の影響を最も受けやすい生物は移動性が小さい底生動物であると考えられる(城, 1989)。今後は、発電所取放水と底生動物相との関連性を解明するための生物学的な検討やDO以外の生物の生息に関わる硫化水素やpHなどの影響なども検討が必要であろう。

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、適切な指導をいただいた日本大学大学院総合科学研究科・和田明教授、図表作成に尽力して頂いた当所の関マリ子氏に厚く御礼申し上げます。本研究は水産庁委託の発電所取放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。

引用文献

- Droop, M.R. (1970). Vitamin B12 and marine ecology V. Continuous culture as an approach to nutritional kinetics. *Helgoland Wiss. Meeresunters*, **20**, 629-636.
- 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(2008). 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*, **20**, 23-37.
- 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(2009a). 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*, **21**, 1-12.
- 長谷川一幸・清野通康・横田瑞郎・市川哲也・長谷川晃一・柳川竜一(2009b). 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. *海洋開発論文集*, **25**, 1281-1286.
- 星加章・谷本照巳・三島康史(1998). 大阪湾における富栄養化と内部生産有機物. *水環境学会誌*, **21**, 765-771.
- 石垣衛・入江政安・中辻啓二・山本縁(2005). 大阪湾奥の物理的攪乱と貧酸素水塊が二枚貝の生息域に及ぼす影響. *海岸工学論文集*, **52**,

- 1181-1185.
- 城久(1989). 大阪湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 75-86.
- Kondo,J.(1975).Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Bound.-Layer Meteor.*, **9**, 91-112.
- 日本水産資源保護協会(2000). 水産用水基準2000年度版. 日本水産資源保護協会, 東京, 96pp.
- 小田一紀・石川公敏・城戸勝利・中村義治・矢持 進
- ・田口浩一(1997). 内湾の生物個体群動態モデルの開発—大阪湾の「ヨシエビ」を例として—. *海岸工学論文集*, **44**, 1196-1220.
- 田口浩一・中根徹(1997). 浮遊生態系モデル—構造と応用例—. *Ecosystem Engineering*, 9-23.
- 鶴田新生・大貝政治・上野俊士郎・山田真知子(1985). 浮遊珪藻 *Skeletonema costatum* (GREVILLE)CLEVEの増殖に及ぼす塩素量の影響. *日本水産学会誌*. **51**, 1883-1886.