

冷却水取放水を利用した内湾の水質改善効果

Water Quality Purification in a Bay
by Intake or Outlet of Cooling Water

松梨 史郎*・坂井伸一**・角湯正剛***

By Shiro MATSUNASHI, Shinichi SAKAI and Masatake KADOYU

As a method of water quality purification in a bay, it is proposed to use an intake or outlet of cooling water of a power plant. It is shown that the relation of water exchange and water quality, and the calculation results of the change in water quality in the case of taking water from the inside of the bay and draining it into the outside of the bay, and that of taking from the outside and draining it into the inside.

Keywords : bay, water quality purification, cooling water, water quality model, water exchange

1. まえがき

従来、発電所の冷却水取放水は、周辺海域への環境影響として、温排水の拡散影響等の、マイナスのイメージとしてとらえられてきた。これらについては発電所の立地に当たって環境影響評価が実施されている。一方、この取放水による流動をむしろ積極的に利用して、湾内の海水交換効果を促進し、閉鎖的な湾の水質改善を行うことが考えられる。産業排水や生活排水の流入によって閉鎖的な湾の水質が悪化するに伴い、海域の窒素・リンの環境基準や排出基準が制定され、改善対策が早急に求められている昨今において、発電所の施設の積極的な利用を検討することは、発電所の立地支援のためにも必要と考えられる。

これまでに取放水による水質改善については、取水による交換率増大に関するシミュレーション^{1) 2)}や、発電所運開前後のプランクトン種の変化の観測結果^{3) 4) 5)}があるが、取放水による海水交換の促進と水質の関係について検討した例は見あたらない。

本研究は、海水交換効果と水質の関係の検討と、発電所冷却水取放水による内湾の水質改善効果の、湾内から取水し湾外へ放水する場合、および湾外から取水し湾内へ放水する場合のそれぞれについて、実海域でのケーススタディーに基づく検討を行ったものである。

* 正会員 工修 電力中央研究所 環境科学部 主査研究員

** 正会員 工修 電力中央研究所 環境科学部 担当研究員

*** 正会員 工博 電力中央研究所 研究コーディネーター (〒270-11 我孫子市我孫子1646)

2. 海水交換と水質の関係

沿岸海域において、生物生産は活発であっても、赤潮のような富栄養状態にならないためには、対象海域に流入する栄養塩量と海水交換あるいは湾内の滞留時間に、あるバランスがあることが想定される。海水に含まれる物質が、生物・化学的な変化をする場合は、さらにその変化の特徴によって海水と滞留時間が異なることを考慮しなければならない。

ここでは海水の動きを示す物理的な交換率の各水質項目への寄与度について、藻類の制限栄養塩として最も重要なリンの循環を基礎とした1ボックスの富栄養化予測モデルを用いて検討した。同モデルはクロロフィルa、動物プランクトン、リン酸態リン、有機態リン、全リン、溶存酸素の時間変化を計算するものである⁶⁾。以下にモデルの基礎式のみを示す。

1) クロロフィルa (Y)

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = G_{ys} f_P Y - R_Y Y - D_Y Y + \frac{\partial W_Y Y}{\partial z} + F(Y) \quad (1)$$

2) 動物プランクトン (Z)

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = G_Z Z - R_Z Z - D_Z Z + F(Z) \quad (2)$$

3) リン酸態リン (P)

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -G_{ys} f_P Y + \gamma_Y R_Y Y + \gamma_Z R_Z Z + K_D D + \frac{W_P d A_b}{A_b dz} + F(P) \quad (3)$$

4) 有機態リン (D)

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = & (1 - \gamma_Y) R_Y Y + (1 - f_Y) D_Y Y + (1 - \gamma_Z) R_Z Z \\ & + D_Z Z - K_D D + \frac{\partial W_D D}{\partial z} + F(D) \end{aligned} \quad (4)$$

5) 全リン (TP)

$$TP = Y + Z + P + D \quad (5)$$

6) 溶存酸素 (O)

$$\begin{aligned} \frac{\partial O}{\partial t} = & \sigma_{OY} G_{ys} f_P Y - \sigma_{OY} R_Y Y - \sigma_{OZ} R_Z Z - \sigma_{OD} K_D D \\ & + K_s (O_s - O) - \frac{W_O d A_b}{A_b dz} + F(O) \end{aligned} \quad (6)$$

式(1)～(6)の最右辺の関数F(X)は、水質Xの移流・拡散を表わす。また各式における化学・生物項の関数は、 G_{ys} 、 R_Y 、 D_Y ：それぞれ植物プランクトンの増殖関数、呼吸関数、動物プランクトンによる捕食関数、 f_P ：栄養塩による制限関数、 G_Z 、 R_Z 、 D_Z ：それぞれ動物プランクトンの増殖関数、呼吸関数、死滅関数、 γ_Y 、 γ_Z ：プランクトンの無機態リンへの回帰率、 K_D ：有機物分解関数、 A_b ：海底面積、 f_Y ：捕食効率関数、 W_P 、 W_O ：底泥からのリンの溶出速度、酸素消費速度、 W_Y 、 W_D ：植物プランクトン、有機態リンの沈降速度、 K_s 、 O_s ：再曝気係数、酸素飽和濃度、 σ_{OY} 、 σ_{OZ} 、 σ_{OD} ：それぞれ植物プランクトン、動物プランクトン、有機態リンからD Oへの換算係数、である。

ここでは簡単のために、同モデルにおいて動物プランクトンの消長を省略し、移流・拡散を表す関数F(X)について、

$$F(X) = R_{1t} X_1 - R_t X \quad (7)$$

$$R_{1t} = q_1 / V, \quad R_t = Q_o / V, \quad Q_o = q_1 + Q_1 \quad (8)$$

なる簡略化を行う。ただし R_{it} : 河川流量の湾の容量に対する比率、 R_t : 湾口での流出流量の湾の容量に対する比率 (滞留時間の逆数) で、ここではこれを単に交換率と称することにする。ただし外海からの流入水質は0とし、湾口部で無限の希釈があるものとする。また X_i 、 Q_i : それぞれ河川からの流入水質、流入流量、 Q_o : 湾口での流出量、 Q_i : 湾口での流入量、 V : 湾の容量である。

式(1)~(6)の右辺を0として平衡解を求めると、

$$Y^* = \frac{K_D D^* + W_p / H + R_{it} P_i - R_t P^*}{(1 - \gamma_y) R_y + W_y / H + R_t} \quad (9)$$

$$P^* = \frac{(R_y + W_y / H + R_t) K_p}{G_{ys} - (R_y + W_y / H + R_t)} \quad (10)$$

$$D^* = \frac{A_y (W_p / H + R_{it} P_i + R_{it} D_i - R_t P^*) - W_p / H - R_{it} P_i + R_t P^*}{K_D + A_y (W_D / H + R_t)} \quad (11)$$

$$O^* = (\sigma_{oy} G_{ys} f_p Y^* - \sigma_{oy} R_y Y^* - \sigma_{od} K_D D^* + K_s O_s - W_o / H + R_{it} O_i) / (K_s + R_t) \quad (12)$$

$$A_y = \frac{R_y + W_y / H + R_t - \gamma_y R_y}{W_y / H + R_t} \quad (13)$$

ただし Y^* 、 P^* 、 D^* 、 O^* : それぞれ Y 、 P 、 D 、 O の平衡解、 H : 水深である。

上式の平衡状態が得られるためには、式(10)が正になること、すなわち

$$G_{ys} > R_y + W_y / H + R_t \quad (14)$$

なる条件が成立する必要がある。従って、交換率が小さすぎるとプランクトンは増殖が促進され、大きすぎるとプランクトンが減少するとともに、リン酸態リンが増大する。従って海域にとって望ましい状態、すなわち赤潮状態や、プランクトンの存在しない貧栄養の状態ではなく、環境面からも水産面からも適度な栄養状態を維持しうるような交換率が存在することを示唆している。

ここでは上述の平衡解に基づいて、交換率に関する各水質項目の感度解析を実施した。解の感度解析の方法としては、ある水質 X に対して、パラメーター x を $x + \Delta x$ に変化させた場合の $\Delta x / x$ に対する X の変化、 $\Delta X / X$ を計算する。従ってたとえば取放水によって交換率が変

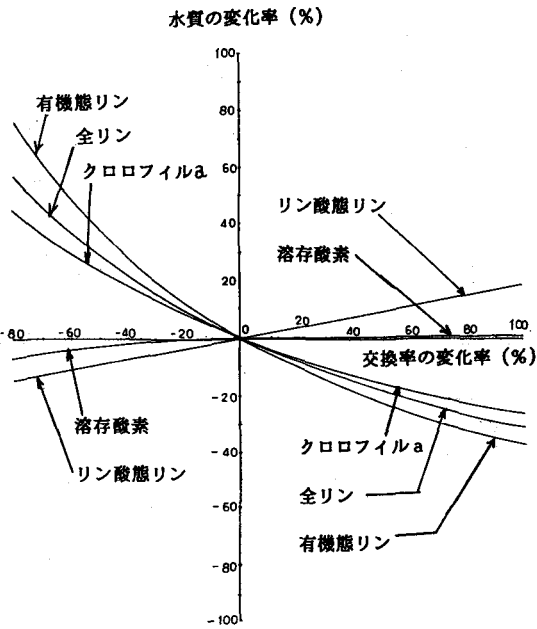


図-1 交換率の変化に対する水質の変化率

われば、その交換率の変化に応じた水質の変化の割合が計算されることになる。

図1に計算結果を示す。同図を見ると、クロロフィルa、有機態リン、全リンは交換率が增大するとともに減少し、リン酸態リンと溶存酸素は交換率が增大するとともに増大する。またリン酸態リンは他の水質項目に比べて交換率に対する感度が鈍いことが認められる。従って水質項目によって交換率の増大による水質変化の現れ方が異なることがわかる。

また冷却水の放水を用いる場合には、水温の上昇に伴う影響も考えなければならない。水温が上昇すると植物プランクトンの増殖促進が考えられるが、実海域ではこの他植物プランクトンの自己分解や動物プランクトンによる捕食・自己分解や有機物の分解も促進されるため、その二次汚濁への影響と取放水による外海への排出効果は、物理的な速度と化学・生物的反応速度の釣合となる。従って定量的な検討には、それらの影響を考慮したシミュレーションで行う必要がある。これについては次節で検討する。

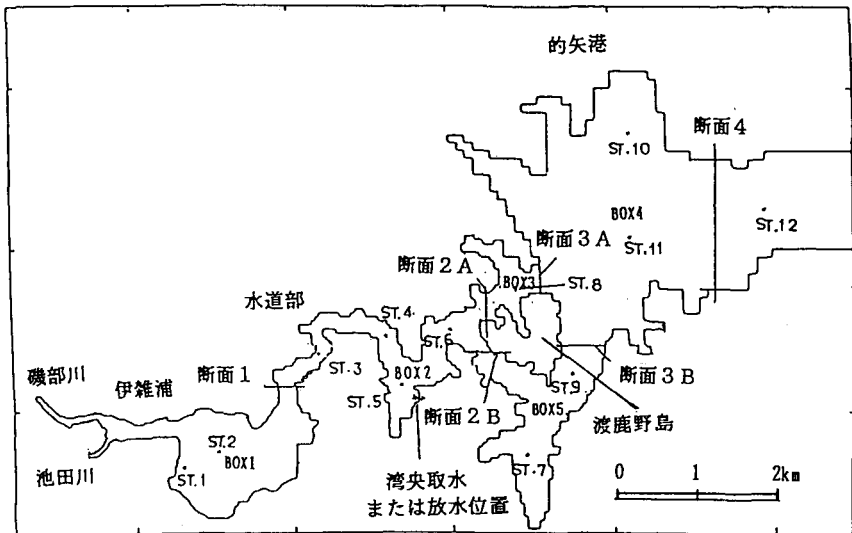


図-2 流動・水質実測点、取放水口の位置および水質計算対象ボックス
流動測点ST3,6,8,12,水質測点ST1~12

3. 取放水による水質改善効果のケーススタディー

3・1 対象海域の流動・水質の実態と再現計算

取放水による水質改善効果を、取放水を行っていない自然湾に取放水設備を仮想的に設け、富栄養化予測モデルを適用することによって検討した。

まず、検討対象の湾で流動・水質調査およびその再現計算を行った。図2に調査の対象とした三重県磯部町の的矢湾およびその調査測定点を示す。同湾は、太平洋に面した三重県磯部町、阿児町および相模に位置する長さ約9km、幅最大3kmの規模を有し、潮位差は約1m程度の閉鎖性の強い湾である。同湾は大別して、湾奥部から伊雑浦、水道部、渡鹿野島近海、的矢港から成る、やや複雑な形状を呈している。また水深は、そ

れぞれ伊雑浦で1~4m、水道部で5~10m、渡鹿野島近海で5~10m、的矢港で10~20mとなっている。

流速は、湾内4点上下2層において、'89年秋季から'90年秋季の各季節に15日間の連続測定を行った。水質は、'89年秋季から'90年秋季にかけて調査を実施した。測定項目は水温・塩分・D0・各態リン・各態窒素・クロロフィルaとした。調査の主な結果は、以下のシミュレーション結果とともに示す。

(a) 流動のシミュレーション

流動計算に用いたモデルは、鉛直方向に静水圧近似を用いた準3次元モデルである。以下に基礎式を示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho_0 \partial x} + A_H \nabla^2 u + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f v \quad (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho_0 \partial y} + A_H \nabla^2 v + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - f u \quad (16)$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\rho_0 \partial z} - g \quad (17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

ここにu、v、w：それぞれx、y、z方向の流速、P：圧力、 A_H 、 A_z ：それぞれ水平方向・鉛直方向の渦動粘性係数、 ρ ：密度、 ρ_0 ：基準密度、f：コリオリ係数である。

メッシュ分割は水平方向が25~100m、鉛直方向が1~2mとし、潮汐流、潮汐残差流、河川流入流、吹送流、密度流を各々独立に計算した。渦動粘性係数は水平方向を $10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ 、鉛直方向を $50 \text{cm}^2/\text{s}$ とし、潮流計算では湾口での潮位条件に基いて行った。河川流は淡水であるため表層1mの厚さのみを流れるとし、吹送流は風速の測定結果から、水面における風の条件を風速1mの南東の風として、表面応力として与えて計算した。また計算対象期間の代表密度として夏季の実測の密度分布を与え、その空間的な密度勾配によって生じる密度流も求めた。

流動調査の結果、潮汐流はM2潮流が最も卓越していた。湾奥のST.3では上下層ともに長軸方向の流速が12~13cm/s、湾中央のST.6では8~10cm/s程度で、ST.8と湾口のST.12では長軸方向は上下層に大きな差があり、上層は10cm/s程度、下層は5cm/s程度であった。潮流楕円によって計算結果を実測値と比較した結果、全体として大略一致を見た。

実測の恒流成分は、ST.3では1~2cm/s程度の流れが、またST.6、ST.8では2~6cm/s程度の、ST.12では3cm/s程度の湾口に向かう流れとなっていた。一方潮汐流から算出される潮汐残差流は、流れのパターンがきわめて複雑であるが、恒流の実測の各測定点における流動の値と傾向が、潮汐残差流の計算値においても大略認められた。河川流入流の実測及び計算は、同湾に流入する2大河川について行ったが、流速値は微弱で、湾奥で1.9cm/s、水道部で0.8cm/s、湾口で0.1cm/s程度であった。そのほか吹送流・密度流についても計算を行ったが、吹送流は、きわめて微弱で0.2cm/s程度となった。また密度流もその傾向が明確でなく、流速値も最大で0.5cm/s程度で、湾奥部での流れはほとんどなかった。以上、同湾の流動として潮汐流が卓越し、恒流については潮汐残差流が他の成分に比べて大きいことが認められた。

(b) 水質のシミュレーション

本計算では的矢湾の水質の時空間的变化を再現することを目的とした。水質の時空間变化を追跡するためには差分メッシュモデルよりもボックスモデルの方が解析の容易さから有効であるため、3層5ボックス計15ボックスで、前述の富栄養化予測モデルに水温を加えた水質計算を実施した。

水質計算は、水質の実測値および同湾の地形から勘案して、水深2m以浅を上層、2~4mを中層、それ以深を下層とし、伊雑浦・水道部・渡鹿野島近海・的矢港を5つのボックスに分け、計算期間は'89年10月から1年間とし、年間の季節変化を再現することを目標とした。場の流速は、流動計算によって得られた潮汐残差流および河川流入流を用い、流速を各ボックス断面に配置して行った。また拡散係数は、水平方向は潮汐流の往復効果を考慮して $10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ を、鉛直方向は $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ を与えた。また水質パラメータは、既往の文献値を参考に設定した。用いた値は文献6)に譲る。

図2に計算の対象ボックスを、図3に湾中央のBOX2の上層の計算結果を示す。水温の実測値は、大気との熱の交換によって、秋から冬にかけて低下し、春から夏にかけて上昇し、計算結果は、この年間の季節変化を再現している。クロロフィルaの実測値は、全般的に上層の湾奥で高く、湾口で低い。季節変化は、秋冬は値がきわめて低いのにに対し、湾奥上層で夏季に高い。計算値は上述の傾向をほぼ再現している。リン酸態リンの実測値は、湾奥では流入負荷の影響で高く、湾口に向うに従って低くなっていた。湾奥では流入負荷の影

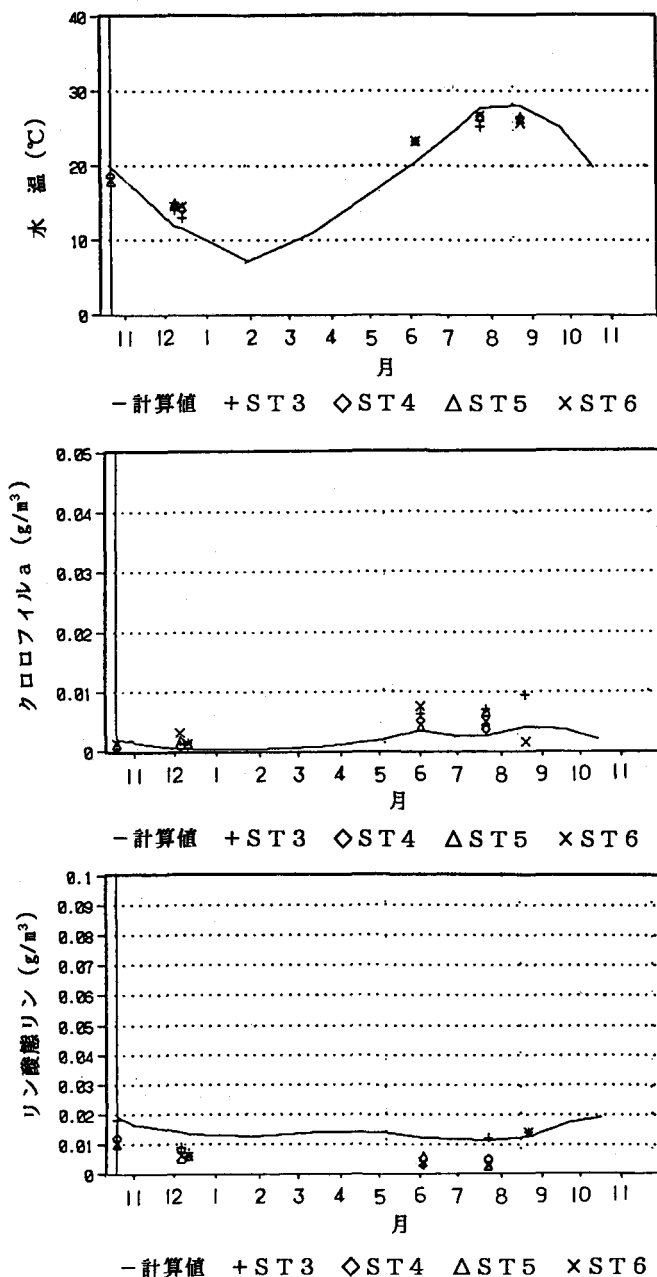


図-3 実測値と計算値の比較 (BOX2上層)

響が大きい。計算値は湾奥・湾央で夏季の植物プランクトンによる摂取で、若干減少する様子を示している。

3・2 水質改善促進効果の検討

的矢湾に、発電所冷却水取放水設備を仮想的に設け、その水質改善効果について、シミュレーションを行うことによって検討した。

(a) 取水・放水流動

ここでは50万kwの火力発電所を3基設置するとして、取水・放水量 $60\text{m}^3/\text{s}$ を設定した。また湾の規模や形状を勘案し、取水口または放水口的一方を湾内に、他方を湾外に設置する、湾内取水・湾外放水または湾外取水・湾内放水を想定した。またその際湾外に設置される取水口または放水口での流動は、湾内の水質変化には関与しないものとして、流動・水質計算は湾内での取水・放水についてのみ検討した。湾内における取水口・または放水口の設置場所は、図2のような湾央の水道部（ボックスモデルではBOX2に相当する）とした。取水・放水流動の計算に用いたモデルは、潮汐流の計算に用いたものと同様である。ただし放水流の計算では温水の密度効果を考慮して、放水流が水面から4mのみを流れるものとした。計算結果は、取水による流動は、取水口の前面から湾口

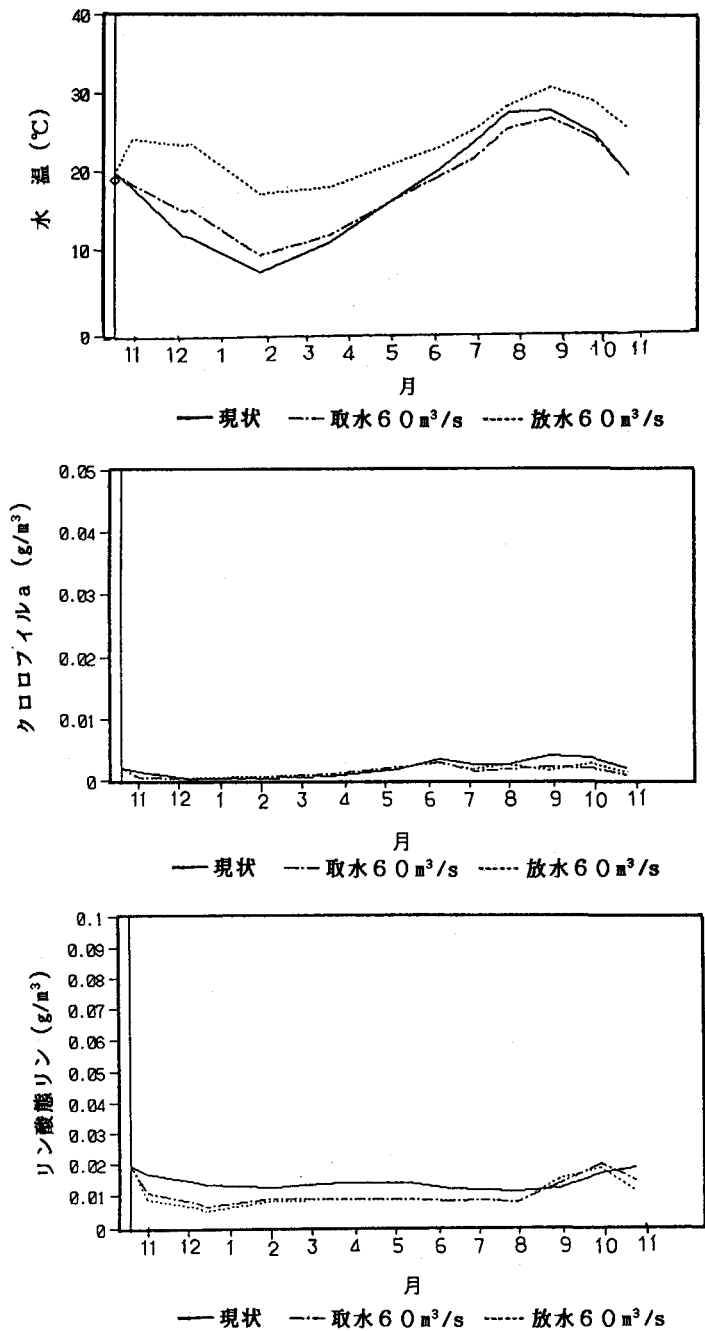


図-4 取水・放水による水質の変化 (BOX 2上層)

にかけて存在し、取水口より湾奥部では流動は生じない結果となった。放水も同様である。

(b) 取放水による水質改善促進効果の検討

富栄養化予測モデルを用いて、取水・放水による流動と水温上昇を考慮した水質の予測計算を実施し、取放水による水質改善効果について検討した。ここでは主として水質の季節変化について検討した。なお放水による水質計算では、放水口における水質として湾口の下層におけるデータを入力し、水温計算には、この値にさらに放水温度の上昇分として7℃を加えたものを用いた。

図4に湾央のBOX2の上層の計算結果を示す。水温は、取水ありの場合は、湾口の季節変化（湾奥に比べて冬季に高く、夏季に低い）の影響を受けて、取水なしの場合に比べて冬は高く夏は低くなる。この傾向は特に直接取水する BOX2 および 狭い水道部のBOX3 で顕著である。放水ありの場合は、湾口の季節変化の影響と放水温度の上昇の影響により、放水なしの場合に比べて年間にわたって高くなる。計算は放水のない状態から開始して1年間行ったため、初期条件の影響が最初の1ヶ月間程度残っている。クロロフィルaは、現状の値そのものが小さいため取水・放水による影響はわずかであるが、取水あり・放水ありともに取放水のない現状に比べて、6月から10月にかけて低くなっている。また放水の温度上昇は、水温の関数を通じてクロロフィルaの増殖、呼吸速度等に影響するが、クロロフィルaの絶対値が小さいために、その影響はほとんど見られなかった。リン酸態リンは、取水あり・放水ありともに現状に比べて、11月から翌年の8月にかけて低くなっている。特に BOX2 で著しいが、BOX1 でも同様の傾向が見られた。また8～10月は取放水によってクロロフィルaが排出されるため、リン酸態リンは現状に比べて減少せず、一時的に増大している。これをクロロフィルaとリン酸態リンの相互関係で検討すると以下ようになる。すなわち冬季は水温および日射量が低いため、湾内でクロロフィルaは増大せず外海との間に濃度差がなくなり、もはや排出されない。そのためリン酸態リンは植物プランクトンに摂取されることなく、取水・放水によってそのままの形で湾外に排出されてしまう。一方夏季は、取水・放水のない場合、水温と日射量の上昇に伴ってクロロフィルaは増大するが、取水・放水を施すと、リン酸態リンは排出されずそれを摂取したクロロフィルaの形で湾外に排出されることになる。

以上、取放水によって冬季は栄養塩の形で、夏季は植物プランクトンの形で排出され、富栄養化した水域の有効な水質改善対策となるものと考えられる。

4. あとがき

富栄養化予測モデルを用いて、海水交換と水質の関係、湾内から取水し湾外に放水する場合および湾外から取水し湾内に放水する場合のそれぞれについて検討した。今後は、湾内取水・湾外放水でも取水位置を変えた場合や、湾内から取水し、湾内の他の水域に放水する場合等、さらなる検討が必要と考える。

参考文献

- 1) 角湯正剛・水島雅文・和田 明：電力中央研究所報告，No.382017，1982.
- 2) 宮本晋一・柳瀬辰彦・宮池克人：中部電力総合研究所，研究報告書，土木（研）No.0278，1983.
- 3) (社)日本水産資源保護協会：福井県若狭海域における原子力発電所温排水の生物環境と漁業生産におよぼす影響に関する調査報告，－浦底および美浜地先海域－，1973.
- 4) 安田 徹：温排水の海洋生物に与える影響，温排水問題の現状と動向，産業技術出版，1978.
- 5) 水産生物と温排水研究協議会：水産生物と温排水，水産研究蔵書(25)，(社)日本水産資源保護協会，1973.
- 6) 松梨史郎・坂井伸一・角湯正剛：電力中央研究所報告，印刷中，1994.