

発電所冷却水による内湾の水質浄化

中部電力(株) 総合技術研究所	正会員	〇宮 池 晃 人
(財)電力中央研究所 土木技術研究所	正会員	和田 明
同 上	正会員	角 湯 正 剛
中部電力(株) 総合技術研究所	正会員	柳 頼 辰 彦
同 上		宮 本 晋 一

1. ま え が き

近年、外海に対する開放度が小さく閉鎖的な内湾の水質悪化が問題となっている。人口の集中による生活、工場排水の増加、過密な養殖漁業等が原因となっている。前者については下水道および処理施設の整備により排水の水質が向上しているものの、後者については規制が設けられておらず新たな汚染源となっている。わが国においては200カイリ時代を迎えて採る漁業から作る漁業への転換が叫ばれ、養殖漁業は急速な発展を遂げた。こうした中で養殖漁業は自らの水質汚染によりその生産力の減退が深刻化している。養殖漁業はもともと潮替りの悪い内湾で行なわれるため、投与する餌の残渣、排泄物等による溶存酸素量(DO)の低下とそれら堆積物による魚病菌の繁殖により養殖漁場としての条件は悪化しつつある。このような悪化した水質の改善を図る方法として、堆積物の浚渫による漁場の若返り、養殖漁業の方法(餌の投与方法等)そのものの改善、さらに厳しい排水規制による水質の向上等が考えられる。

本文は、比較的小規模な内湾の水質改善対策として、火力発電所の冷却水の取放水を利用する方法について検討をおこなった結果を述べたものである。なお研究対象地点としては、閉鎖性が強く養殖漁業が盛んに行なわれている、五ヶ所湾(三重県)を選定した。

2. 五ヶ所湾の環境

2-1 水質

五ヶ所海域は典型的なリアス式の地形であり、水面積約20km²、湾内水量約24,000万m³である。湾奥の静穏な海域では養殖漁業が盛んに行なわれている。

昭和56年6月18日に実施された水質調査結果のうち主要項目について表-1に示す。同海域は生活環境の保全に関する環境基準のうち水産一級に指定されている。つまり水域の利用目的がマダイ、ブリ、ワカメ等の水産生物用に適応しているということである。しかし、観測結果によるとpH、CODは表層で基準値をクリアーしておらず、中底層のDOはかなり下回っている。今後、盛んな養殖漁業、生活排水等によりこのよ

表-1 水質調査結果(測点No.は図-1参照)

項目	測点 採水層 基準値	ST-4			ST-6			ST-9			ST-20		
		表層	中層	底層	表層	中層	底層	表層	中層	底層	表層	中層	底層
水素イオン濃度(pH)	7.8以上 8.3以下	8.4	8.4	8.3	8.4	8.3	8.2	8.6	8.4	8.2	8.4	8.3	8.3
溶存酸素量(DO)	7.5ppm以上	7.2	7.9	4.9	7.6	6.5	4.6	9.0	5.5	3.4	7.7	6.3	6.1
化学的酸素要求量(COD)	2ppm以下	4.4	2.3	2.0	4.4	2.4	1.3	4.9	1.4	1.4	3.3	1.5	0.8

うな閉鎖性の強い内湾ではますます水質が悪化するものと思われる。

同じく6月に実施された水温、塩分調査結果より次のことがいえる。①表層水温の分布は、湾口から湾奥部にかけて徐々に水温が高くなっている。また水深方向の変化率は湾奥部で大きい。②塩分の分布は、陸水の流入により湾奥部ほど塩分が少なく、水深方向の変化率は水温と同様湾奥部で大きい。

以上の結果よりこの海域は3つの海域に大別できる。

- A. 湾口部 水温が低く、塩分は高い。両者とも水深方向の変化率が小さい。
- B. 湾奥部 水温が高く、塩分は低い。両者とも水深方向の変化率が大きく安定した密度成層がみられる。
- C. 湾中部 上記両者の中間的な性格を有する海域。

2-2 潮汐と流況、拡散の特性

昭和36年6月15日から7月15日にかけて長時間流動連続観測が13測点において実施された。観測点の位置は図-1に示すとおりである。これらの流動観測データを統計解析して当海域における流動と拡散の特性を求めた。

(1) 潮汐

気象庁発行の潮位表によると尾鷲検潮所における調和分析結果は表-2のような結果であり、 M_2 分潮が卓越している。五ヶ所海域は尾鷲海域に隣接しており、同様の傾向であると思われる。

表-2 尾鷲検潮所における調和分析結果

主 要 4 分 潮			
M_2	S_2	K_1	O_1
44.07 ^{cm}	19.82	22.16	17.03

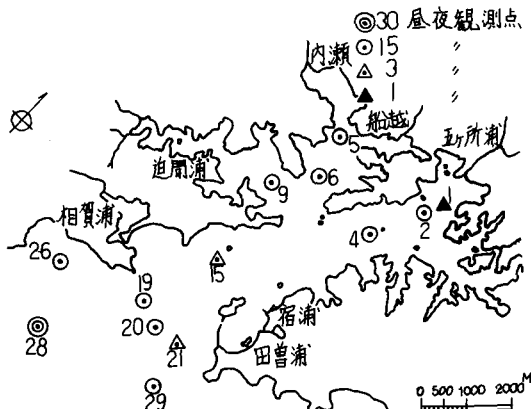


図-1 測点位置

(2) 流況

海域における流動や拡散の特性は、流速変動の自己相関関数およびパワースペクトルに顕著に現われる。図-2にST-19の表層(海面下2m)におけるパワースペクトルを示す。約12時間および24時間の周期に対応する周波数のところにピークがみられることから、五ヶ所海域においては潮汐往復流が卓越しており、基本的流動場は半日周潮流により支配されているが日周潮流成分による影響も強く、混合潮流の特性を有しているものと考えられる。また流動連続観測記録を調和分析した結果からも基本的流動場は M_2 潮流に支配されているといえる。図-3は調和分析より得られた潮流楕円要素を用いて M_2 分潮流の潮流楕円を書いたものである。これによると湾奥部の流速は2~4 cm/sと比較的小さく、湾口、湾外は6~10 cm/s程度となっている。特徴的なことは、湾口において表、中、底層間の位相がややずれていることである。図-4はST-19における表、中、底層の潮流楕円を示す。また恒流は湾奥部において表、中、底層とも0~1 cm/sと微弱であり、湾口部では表、底層の流向が南~南西(流出方向)で1~8 cm/sを示し、中層の流向は北東(流入方向)で1~4 cm/sを示している。(図-4参照)

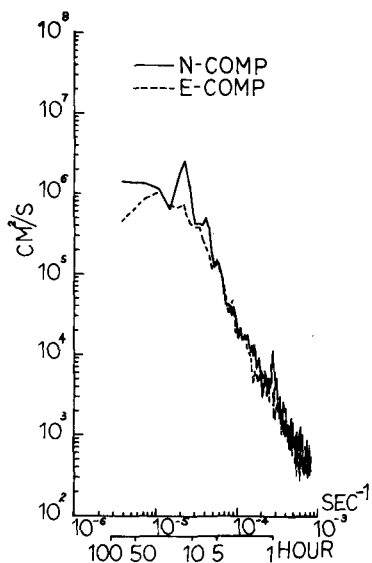


図-2 ST-19(表層)のパワースペクトル

(3) 拡散係数

流動観測データより12時間以上の長周期成分を除いたデータよりG. I. Taylorの定理を使って拡散係数を求めたが、北方成分が東方成分に比較してわずかに大きな値をとるがほぼ等方性と考えられる。拡散係数は湾口およ

び湾外で大きく 10° オーダーで、湾内では 10° オーダーとなっている。

3. 内湾の海水交換

海水交換という言葉を明確に定義するため海水交換の基本的な過程について考える。柏井¹⁾はある物質の断面・時間平均の輸送量は次の5項目からなっているとした。

①断面平均恒流による移流項②恒流のシアによる交換項③断面平均潮流による交換項④潮流のシアによる交換項⑤乱れによる交換項

このうち③と④を加えたものを広義の潮汐による海水交換、②～⑤を加えたものを広義の海水交換としている。これらの過程の中で、どの項がどの程度寄与しているかは一概に言えず、内湾の特性(地形、気象条件、陸水流入量等)により決まってくるものと思われる。

一方、海水交換を表わすパラメータとして海水交換率が多くの研究者によって提案されている。1つは湾口断面におけるオイラー的な連続観測に基づくものでParker²⁾、柏井¹⁾らが提案している。これは1潮汐間において湾内水と外海水の

入れ替わる割合を求めるものである。Parkerは、上げ潮時湾内に流入する海水量のうち初めて湾内に入る外海水の割合を海水交換率と定義している。これらの海水交換率の定義では湾内のある点の海水交換に要する時間といったものは解明できない。また指標物質の濃度が湾内と湾外であまり差がない場合、誤差が大きくなる。これに対してラグランジュ的手法に基づく方法は染料や粒子を追跡するもので、たとえば上げ潮時に対象水域に流入した物質量に対して1潮汐間にこの水域に取り残される物質量の割合を海水交換率と定義するもので、ここで用いる数値モデルシミュレーション手法はラグランジュ的手法に属するものである。

4. 数値モデルによる海水交換シミュレーション

4-1 海水交換率の定義

本文では、既往の研究にもとづいて海水交換率を次のように定義する。潮汐往復流の存在する湾を考え、海域には残差流がなく、乱れのないう平均的な潮流のみが存在すると仮定すると、高潮時に湾口部に近い湾内のある点(ST-Aとする)に投入された粒子群は下げ潮でいったん外海へ流出し、引き続き上げ潮で湾内へ流入し、高潮

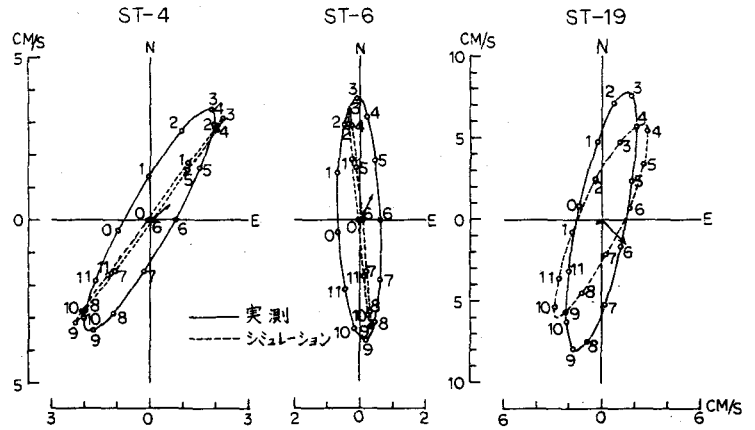


図-3 潮流情円(実測およびシミュレーション結果)

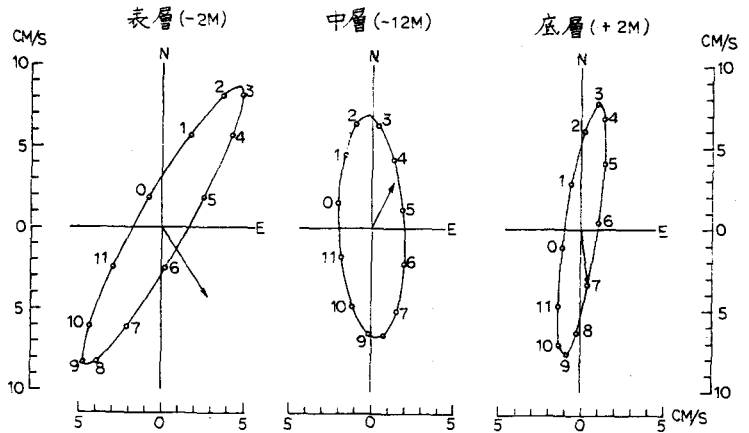


図-4 ST-19における各層の潮流情円

時にはST-Aにもどる。しかし実際の海域では、残差流や乱れ成分が存在しているため、ST-Aに投入された粒子群は1潮汐後にはすべてがST-Aにはもどらずに分散し、そのうちのいくつかは湾外に取り残されるものが存在すると考えられる。この取り残されたものの代償として、外海に存在したものが新たに入ってくると考えられる。本文では、この湾外に取り残されたものの全投入量に対する割合をST-Aにおける海水交換率と定義する。

いま、湾内の数多くの投入点での1潮汐後の海水交換率と投入された個々の粒子の位置が求められると、2潮汐経過後の海水交換率は、ある点に投入された粒子が、1潮汐後に分散した個々の粒子の位置での海水交換率の平均値で示される。これを繰り返せばn周期後の海水交換率を求めることができる。すなわち、投入点 (x_0, y_0) のn周期後の交換率 $r_n(x_0, y_0)$ は、次式で表わされる。

$$r_n(x_0, y_0) = \frac{\iint r_{n-1}(x, y) \cdot f(x, y | x_0, y_0) dx dy}{\iint f(x, y | x_0, y_0) dx dy} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 $r_{n-1}(x, y)$: (n-1)周期での交換率、 $f(x, y | x_0, y_0)$: (x_0, y_0) に投入された粒子群の1潮汐後の位置の確率密度関数

湾内の数多くの投入点に投入された粒子群の位置を1潮汐周期追跡すれば、式(1)を用いて湾内の各投入点のn周期後の海水交換率が求められることになる。

一方、湾内取水ー湾外放水した場合、上述の海水交換率の定義を用いると、取水口前面海域に投入された粒子は、ただちにに取り込まれ外海へ運ばれることになり、この付近の交換率は著しく大きい値を示すことになる。しかしながら、外海に運ばれたものの代償として、外海に存在したものが新たに入ってくることにはならない。

粒子の投入を外海域とし、上述の定義とは逆に湾内に取り残されたものの全投入量に対する割合で交換率を定義すれば、この問題は解決されるが、数値モデルを設定する場合に外海域を十分に大きく設定する必要があり、数値計算の実施のうえで問題が多い。

いま、交換率の定義として、現在湾の中にある粒子のうち、1周期前に湾外にあった粒子の割合で定義する。この交換率は、海域の流動の時間を逆に進めることで、(1)式を適用して算定することができる。湾外取水ー湾外放水する場合の海水交換率は、この定義によるものとする。

4-2 数値モデルの概要

観測結果によれば、五ヶ所湾海域における流動は半日あるいは1日周期で振動する往復流成分と、それに重畳された乱れ成分より構成されていると考えられる。したがって、この規則的な往復流と不規則な乱れ成分をそれぞれ独立に再現し、これらの合成されたものが実際の海域で生起しているであろう流れと考える。

規則的な往復流成分は、流体力学の運動ならびに連続方程式を用いた数値モデルにより再現することができる。次に、不規則な乱れ成分については、乱数を用いて所定の拡散係数を有する乱れを再現する方法を用いる。

この方法は、乱れが一次Markov過程に従うと仮定したモデルであり、この手法を用いるためには、乱れの自己相関関数は、次式に示すように単調に指数関数的に減少し、相関係数が0に漸近する形状となる必要がある。

$$R(\tau) = \rho^\tau \quad \text{----- (2)}$$

(ρ: 定数, $0 < \rho < 1$)

観測された流速変動より周期流成分や半日以上の周期を有する長周期成分を除去した流速変動より求められた自己相関曲線は、式(2)とほぼ同様の形状となる。一例として、ST-19で観測されたデータより求められた自己相関曲線を、式(2)と比較して図-5に示す。両者は、比較的良好な一致を示し、ある時間スケール以下の高周波成分の乱れについて、前述の仮定が成り立つものと考えられる。

4-3 計算条件

計算条件として、図-6に示す範囲を考え、この海域を湾内は縦横100m間隔、湾外は200~400m間隔の格

子群に分割した。前述したように、この海域の潮汐流は、表層から底層まで必ずしも一様な流況を呈してはいないが、第1近似解として、潮汐流は表層から底層まで一様な流況を示すものと仮定して、平面2次元モデルにより潮汐流のシミュレーションを実施した。また冷却水の取水による海域の流動シミュレーションについても、潮汐流と同様に、表層から底層まで取水により一様に流れるものと仮定して、平面2次元モデルによりシミュレーションを行った。取水量は60%を想定し、この時点での地形は、湾口に防波堤が存在する場合を想定した。

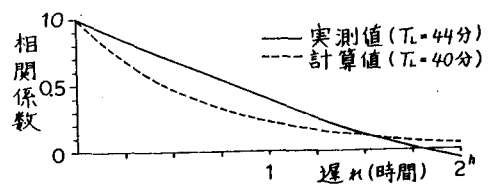


図-5 自己相関曲線

海水交換を求めるための粒子の分散シミュレーションは、湾内の200m間隔の格子上に50個の粒子をそれぞれ配置し、これらの粒子に、流動観測にもとづいて得られた拡散係数を有する乱れを与え、粒子の位置を時々刻々計算することとした。図-6に拡散係数を示す。

各粒子の境界条件として、海岸に到着した粒子は、いったんその点に留め、海域方向への乱れ成分が生じた段階で海域へ飛び出すものとした。

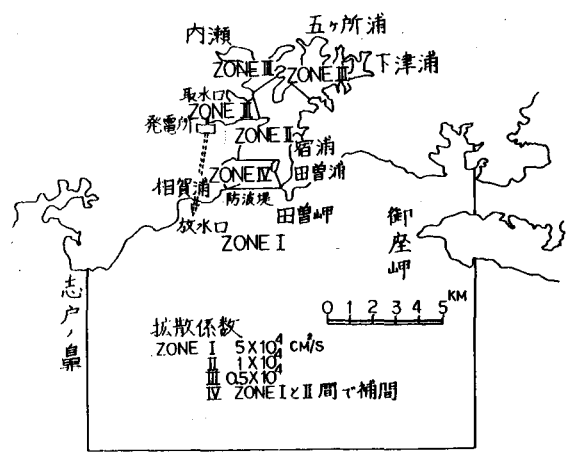


図-6 計算範囲および条件

5. シミュレーションの結果

5-1 潮汐流のシミュレーション結果

湾外の東面の境界で12時間周期の潮位条件を設定し、潮汐流を計算した。図-3にシミュレーション結果を、実測結果と比較して示す。海水交換シミュレーションは、平均的な流況を代表すると考えられるM2分潮成分を規則的な往復流として設定するものとするが、これらの図から、シミュレーション結果は、実際の海域の平均的な流況を良好に再現しているものと考えられる。なお、計算結果による潮汐残差流は、ほとんど存在しない。

なお、潮汐流のシミュレーションは、将来地形として湾口に防波堤がつくられた時点についても実施した。また、冷却水の取水による海域の流動シミュレーションは、この地形条件のもとに実施したが、取水口の設けられる支湾の湾奥で3cm/s前後の流動が生じるほかは、極めて微弱な流動が存在するのみである。

5-2 海水交換率のシミュレーション結果

図-7は、湾内に投入された各粒子の位置を1潮汐間にわたり追跡し、交換率を求めたものである。1周期後の交換率は、湾口部で大きく、それから離れるに従って小さくなる。図からは、取水の効果による海水交換率の向上は認められず、むしろ湾口の防波堤の存在による影響が認められるだけである。

2周期目以降の交換率は、式(1)を用いて求められる。図-8は、湾中央、湾奥における海水交換率の経時変化を示す。図より、湾内取水のある場合には、海水交換は着しく進み、特に湾中央に比べて湾奥にその効果が著しい。

図-9は、30日および60日目の海水交換率の湾内分布を示す。取水による効果は、取水口の存在する支湾のみならず、他の支湾にもおよび、五ヶ所湾海域の海水浄化に有効に役立つものと考えられる。

6. あとがき

本文では海水交換が、潮汐往復流と、それに重畳された乱れ成分により行なわれているとの仮定のもとに検討をおこなった。

しかしながら、実際の海域では、潮汐流のほか、風の吹送や密度差などに

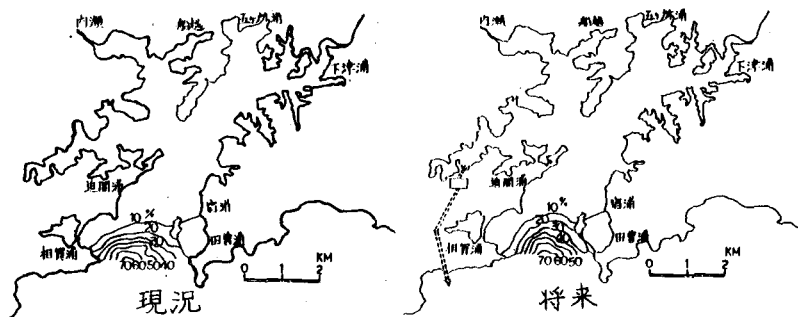


図-7 潮汐目の海水交換率

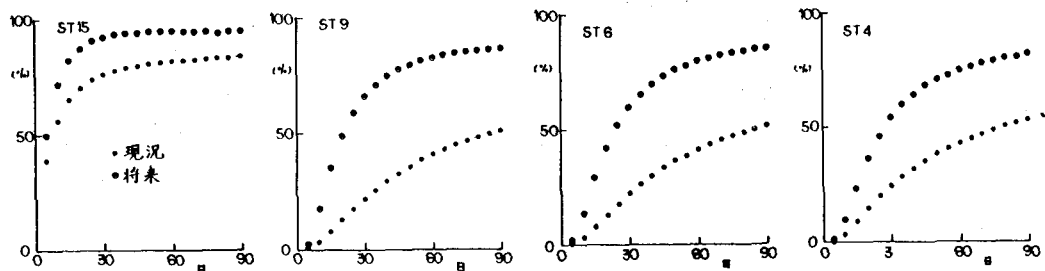


図-8 海水交換率の経時変化

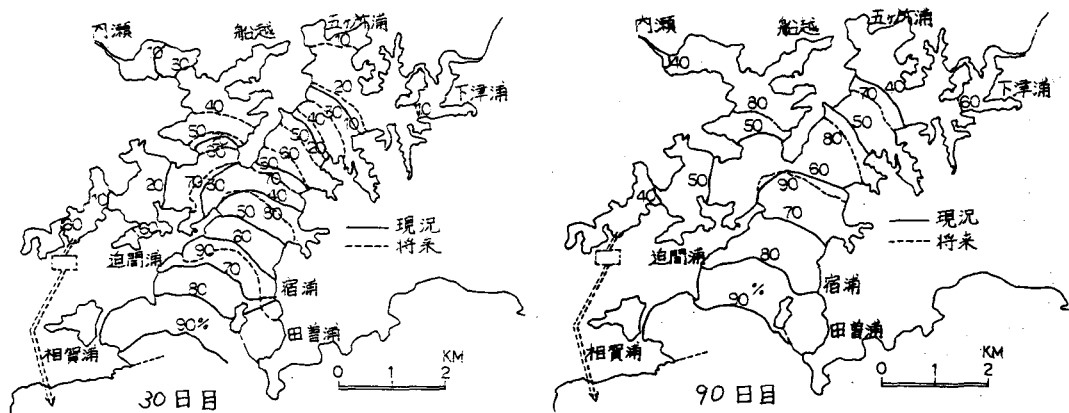


図-9 海水交換率の湾内分布

もとづく流れ、あるいは外海の流れや気象によるじょう乱など、湾をとりまく様々な要因が複雑にかみあって湾内水の交換現象を形成している。したがって、これらの要因が海水交換現象にどのような影響をおよぼしているのかを明らかにし、海水交換機構のより詳細な解明が必要である。また、年間を通じた水質変動の実態の把握と、その変動の機構を解明することも必要である。これらの研究に基づいて湾内水質予測モデルを構成し、湾内取水に伴う水質環境の変化予測を行うとともに、養殖漁業を代表とする水域の有効利用計画の立案をおこなうことができよう。

参考文献

- 1) 柏井誠: 潮汐による海水交換についてその1—海水交換の概念と海水交換率, 1977年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 96~97, 1977.
- 2) Parker, D. S., D. P. Norriss and A. W. Nelson: Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of A.S.C.E., vol. 98, SA2, pp. 305~323, 1972.
- 3) 角湯正剛・加藤正進・相田明: 閉塞された水域の海水交換に関する検討, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 429~433, 1980.