

冷却水取放水の海域環境改善への寄与とその定量的評価

A contribution of cooling water on the improvement of seawater environment

服部 孝之* 和田 明** 水鳥 雅文*** 佐藤 公己**** 大石みち子*****
 Takayuki, Hattori, Akira, Wada, Masafumi, Mizutori, Hiromi, Sato, Michiko, Oishi

Recently, it is feared that enclosed sea areas are contaminated by industrial and household drainages. For the purpose of the water quality improvement there is a method to accerate the seawater exchange between the bay and the open sea by using the cooling water intake and discharge of the steam power station in an enclosed sea area. In this paper, the effects of cooling water on the sea water exchange are studied experimentally and numerically. As a result, the contribution of cooling water on the sea water exchange is estimated quantitatively. And the adaptability of the 3D numerical model used to simulate a sea water exchange is evaluated by comparison of numerical results with experiments.

Keywords: (seawater exchange, intake, discharge, cooling water, hydraulic experiment)

1. まえがき

近年、湾などの閉鎖性海域においては、産業排水、生活排水などによる水質汚濁が懸念されている。このような海域の水質改善対策の一つとして、臨海発電所で使用する多量の復水器冷却用の海水の取放水を利用し、外海水との海水交換を促進させようという考え方がある。しかしながら、その効果を定量的に検討した研究例はほとんど見受けられない。

本研究は、静岡県清水市に位置する清水港湾内を試験海域として、湾内に想定した大規模発電所からの冷却水取放水による海水交換促進効果を、水理実験ならびに3次元数値シミュレーションモデルにより定量的に評価・検討を行ったものである。

2. 当該海域の概要

清水港湾を図-1に示す。当港湾は駿河湾に面し、防波堤により静穏な水域が確保されている。その反面、湾口部を防波堤により仕切られているため、年間を通じて湾奥部ほど水質が悪化している。また、水温成層が発達する春から夏にかけては、底層は表層、中層に比べてDOが低下している。

当海域の流動連続観測結果をもとに算出した代表的な自己相関係数を図-2に、潮流楕円と恒流（観測期間中の15日間平均流）を図-3に示す。湾内では、半日周期の潮流成分が認められる。恒流成分は、湾奥から湾外へ流出する北東流となっているが、湾外に比べると比較的微弱である。湾外では、一日周期の流速成分が卓越しており、流速（片振幅）は5~20cm/sである。恒流は、海岸線に沿った南流傾向となっている。

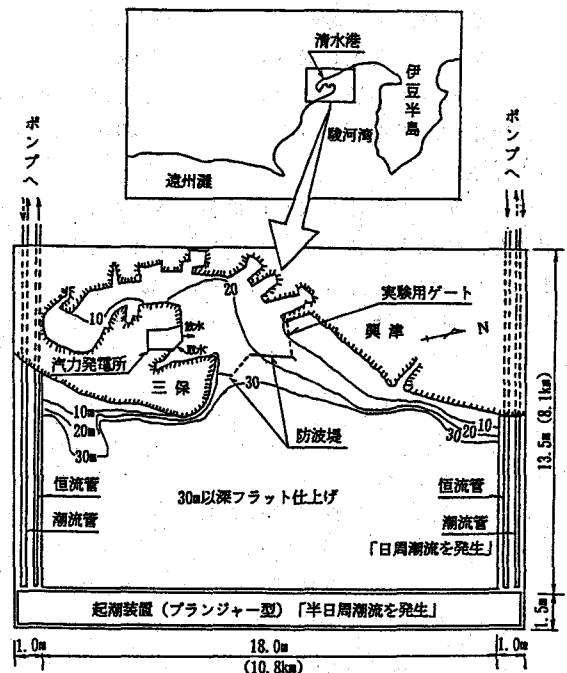


図-1 水理模型図

* 正会員	中部電力株式会社	電力技術研究所水理グループ(459 名古屋市中区大高町字北園山 20番地の1)
** 正会員 工博	東海大学	海洋学部海洋土木工学科
*** 正会員 工博	勸電力中央研究所	水理部環境水理研究室
**** 正会員 工修	中電工事株式会社	技術コンサルタント部
*****	㈱三菱総合研究所	システム科学部第一室

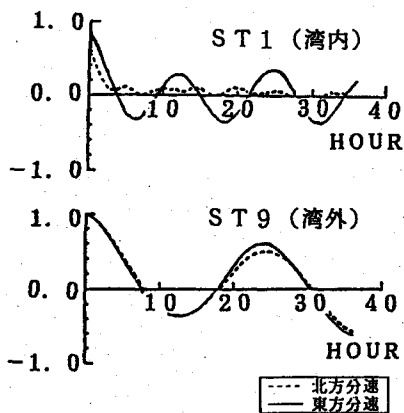


図-2 自己相関係数(原型)
(冬季 表層「海面下2.5m」)

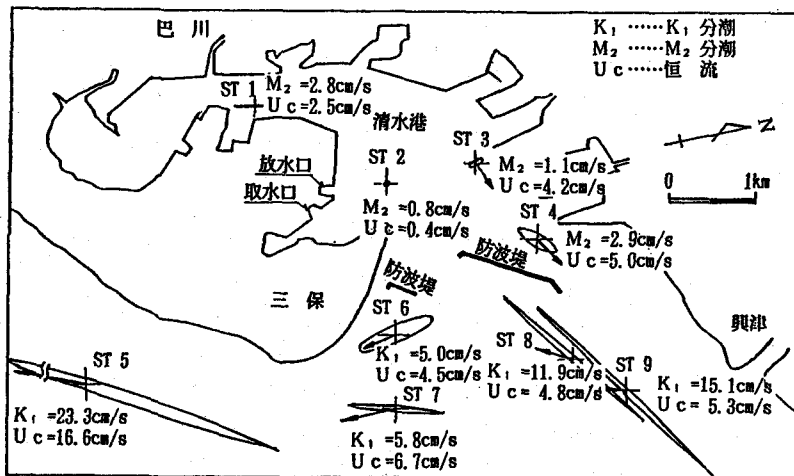


図-3 潮流楕円と恒流成分(現地観測値・冬季・表層)

3. 水理模型実験

3-1 模型縮尺と実験装置

水理模型は図-1に示すように幅15m、長さ20mの水槽内に水平縮尺1/600、鉛直縮尺1/60の歪度10の模型を設置した。相似則は流動現象等を原型と模型で相似に保つため、フルードの相似則を適用した。

本実験では、前述のように様々な流速成分の重畳する複雑な流況を模型内に再現するため、湾内での半日周潮流は、沖合に設置した起潮機(プランジャー型)により、また、湾外の一周期周潮流および恒流は水槽内の両端に設置した潮流管および恒流管により発生させた。

3-2 実験方法と検討ケース

実験手順は概ね、次のとおりである。最初に湾口部にゲートを設置して湾内と湾外を仕切り、湾内のマグネシウム濃度が湾外よりも約3~3.5ppm高くなるように塩化マグネシウムを投入し湾内の濃度が均一となるように攪拌する。湾内水が静止した後ゲートを開放すると同時に半日周期の潮汐を下げ潮方向に、一日周期の潮流を北方方向に発生させた。

採水はゲート開放前ならびに開放後の各半日周期の高潮時および低潮時に図-4に示す採水点で中層(現地水深7m)から自動採水装置により行った。

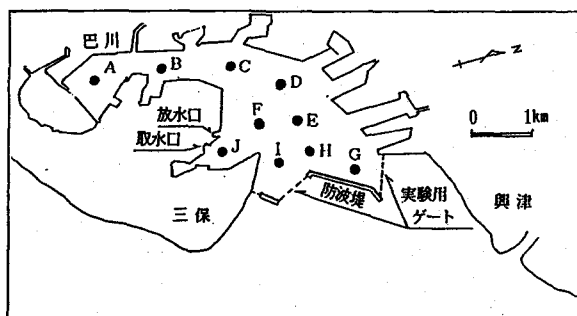


図-4 海水交換測定点(採水点)

各点の海水交換率は、マグネシウム(Mg)濃度を原子吸光分析装置により測定し、式(3-1)により求めた。

ここに、

$$\gamma = \frac{C_b - C_x}{C_b - C_o} \times 100 \quad \dots\dots\dots(3-1)$$

γ : 海水交換率(%)
 C_b : 実験開始時の湾内水のMg濃度
 C_o : 実験開始時の湾外水のMg濃度
 C_x : 測定点のMg濃度

また、各点の1周期(半日周期)当りの海水交換率を

定義するに当たっては、実験上の初期条件や境界条件の影響を排除するため、図-5に示すように水理実験開始後の数周期を除き、1周期当りの海水交換がほぼ定常になった期間内の交換率を平均したb/aとした。

検討ケースは、現状と図-1中に示す三保西側埋立地内に想定した汽力発電所(冷却水量94m³/s、取放水温度差7℃、放出流速30cm/s)設置後の2ケースとした。冷却水は、敷地前面海域の東側から深層取水し、北側へ表層放流するものとする。

3-3 水理実験結果

(1) 流況の再現

潮流楕円および恒流ベクトルに関する実験結果と実測結果を比較した一例を図-6に示す。湾内の流れの再現

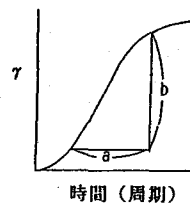


図-5 1周期当りの平均海水交換率の定義

にあたっては、特に、海水交換に影響を与える恒流成分を重視したが、結果的に流れの再現性は周期流、恒流とも良好なものと判断された。

(2) 港湾内の海水交換率

湾内の代表点における海水交換率の時間変化を図-7に示す。なお、採水点A、C、Iを湾奥、湾中央、湾口部の代表点として選出した。現状の場合、例えば、海水交換率が60%に達するのに要した周期は、地点Aで18周期、Cで9周期、Iで6周期程度となっており、湾奥の海水交換がかなり悪いことがわかる。

これに対して発電所設置後は、Aで14周期、Cで8周期、Iで4周期と短くなり、発電所の取放水によって海水交換が促進されていることがわかる。

また、湾内各点における1周期当りの平均海水交換率を図-8に示す。発電所の設置によって現状に比べ湾奥部(A)で2%程度、湾中央部(B~D)や湾口部付近(E~J)では5%近く平均海水交換率が改善されることかわかる。なお、湾奥での変化が小さいのは、発電所位置を比較的湾口部近くに想定したためと考えられる。

4. 数値シミュレーション

4-1 数値モデルの概要

前述のように清水港湾内の流動構造は、発電所を設置した場合温排水の放流による水温成層化および河川水の流入による淡水成層化等の影響により、3次元的な挙動を示すものと考えられる。そこで、本研究では、角湯ら(1980)の提案した海域の乱れによる水粒子の不規則運動を確率論的な考え方に基づき海水交換をシミュレートする2次元数値モデルを、冷却水取放水による3次元的な密度流構造を考慮できるよう3次元に拡張したモデルを採用し、湾内の詳細な海水交換特性について検討した。

(1) 流動計算の基本式

流動計算のモデルは静水圧近似を仮定したナビエ・ストークスの運動方程式、連続式および水温の拡散式により構成される。なお、海域流動(1日、半日周期の往復流および南向きの恒流)では、密度一様として取り扱った。

(2) 海水交換率の定義

海水交換率は、図-9に示すように、湾内へ投入した粒子数をN、ある経過時間後に潮汐流、恒流、乱れ(乱数を用いて所定の拡散係数を有する乱れを再現)により湾外へ流出した粒子数をMとした場合、式(4-1)に示すように定義した。

$$\text{海水交換率} = \frac{M}{N} \times 100 \% \quad (4-1)$$

N : 湾内へ投入した粒子数
M : 湾外へ流出した粒子数

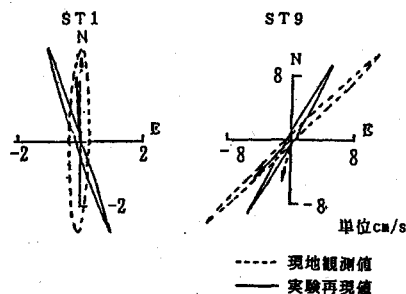


図-6 潮流楕円および恒流の比較 (表層)

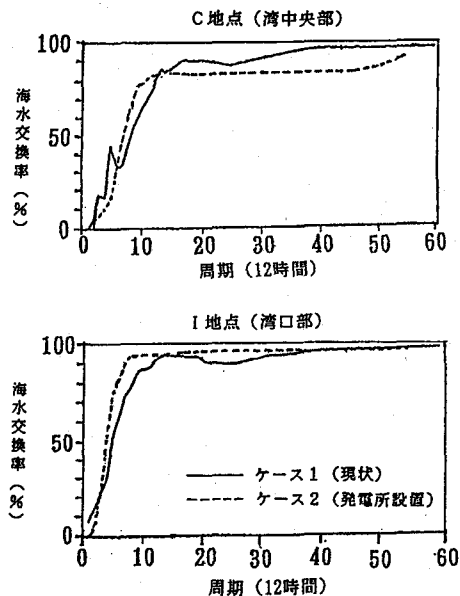


図-7 海水交換率(水理実験)

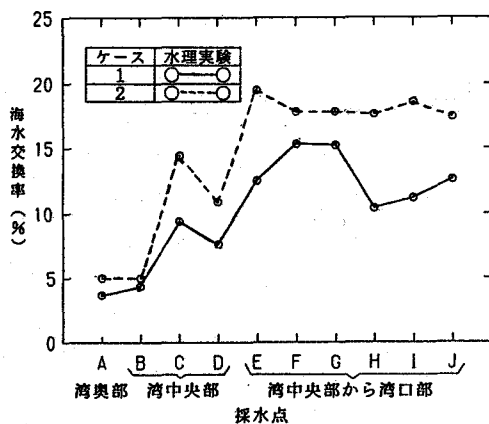


図-8 湾内の1周期(12時間)当りの海水交換率

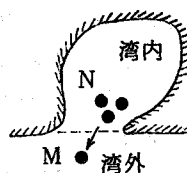


図-9 海水交換の定義

本検討では、清水港湾内の海水交換率を求めるために、湾内に粒子投入点を上層に124点、中層（海面下7.5m）に108点、底層（海面下14m）に59点配置し、各点にそれぞれ粒子を100個づつ設定・投入した。

なお、粒子投入点以外の海水交換率は、投入点での値をもとにAitkenの方法により補間した。

（3）計算領域と条件

計算領域を図-10に示す。格子サイズは水平方向には $\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$ 、鉛直方向には $\Delta z = 3.5\text{m}$ で水深30mまで分割した。

ここでは、海域の流動成分として1日周潮流、半日周潮流、恒流、取放水流、および河川流を対象に各流動計算を行った。各周潮流計算条件は表-2に示すとおりである。また、河川水（巴川）の流入量は $2.4\text{m}^3/\text{s}$ であり、冷却水取放水の流量は前述のとおりである。海水交換率の計算は、実験と同様に現状と発電所設置後の2ケースとした。また、渦動拡散係数は水平方向が湾内 $1\text{m}^2/\text{s}$ 、湾外 $5\text{m}^2/\text{s}$ 、鉛直方向が $10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ とした。

4-2 数値シミュレーション結果

（1）流況の再現

潮流楕円および恒流ベクトルに関する数値シミュレーション結果と実測結果との比較した一例を図-11に示す。ST1の恒流を除けば、ほぼ、流況は再現できたものと判断された。

図-12に流動シミュレーション結果を示す。湾内においては、冷却水取放水や河川水の流入の影響により、表層では湾内水は上げ潮、下げ潮とも湾内から湾外への流出傾向が、底層では三保側の開口部において、微弱ではあるが潮時に限らず湾内への流入傾向が認められた。

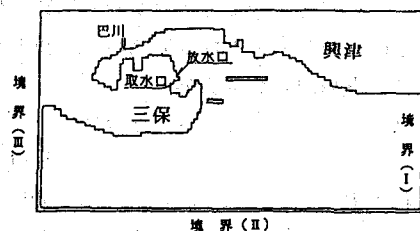


図-10 計算領域

表-2 流動計算条件

潮 流	潮 位 幅 (m)	周期 (h)	位相差 (sec)	恒 流 位 (m)	渦動粘性係数(m^2/s)	
					A_x A_y	A_z
一日周潮流	0.262	24	900	0	湾内 1	10^{-4}
					湾外 5	
半日周潮流	0.595	12	60	0.006	湾内 1	10^{-4}
					湾外 5	

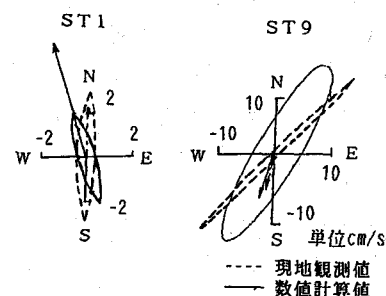


図-11 潮流楕円および恒流の比較（表層）

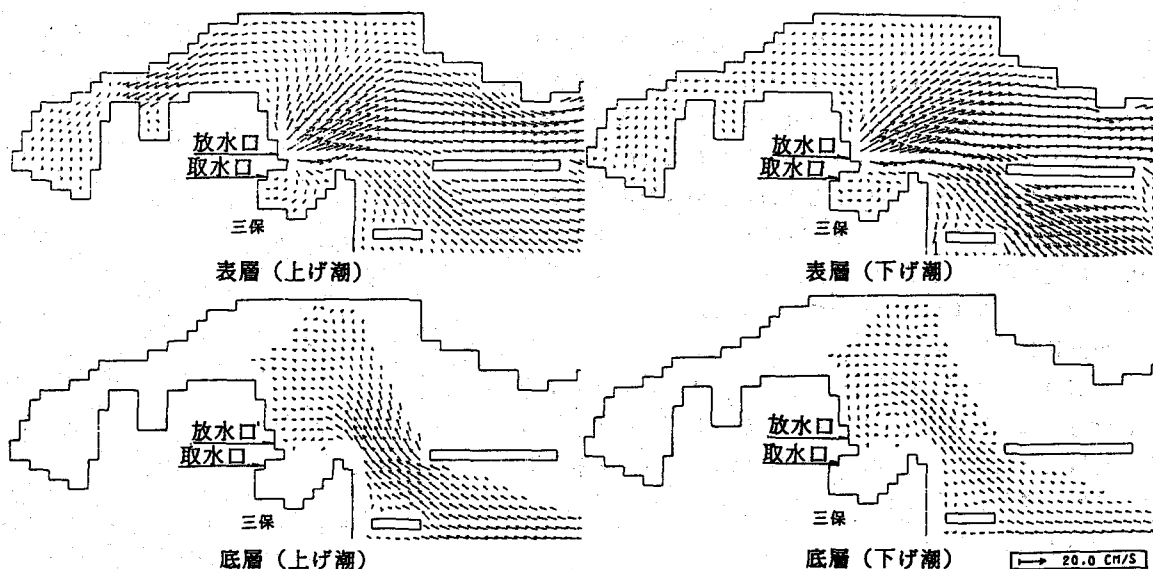


図-12 流動シミュレーション結果

（2）海水交換

図-13は、1周期（12時間）当りの湾内各点の中層における水理実験と数値シミュレーションによる海水交換率の比較を示す。現状の採水点E、F、Gで実験値に比べ計算値が低い海水交換率を示しているものの、その他の採水点および発電所設置後のケースについては、計算値と実験値は、ほぼ一致しており、本研究で用いた3次元モデルの適用性が確認されたものと考えられる。

図-14は現状および発電所設置後の各ケースにおけるの湾内の1周期当りの海水交換率を示す。

発電所設置前後を比較すると、発電所設置後の海水交換率は、現状

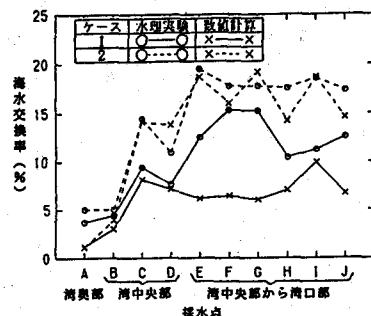


図-13 湾内の1周期（12時間）当りの海水交換率

に比べ表層および中層で約2倍、底層では、約3倍となっている。また、層別に比較すると底層の海水交換率が高いことかわかる。これは、図-12で示したように、河川水の流入や冷却水の取放水流動による影響と考えられ、特に、冷却水取放水の影響が大きいことがわかる。

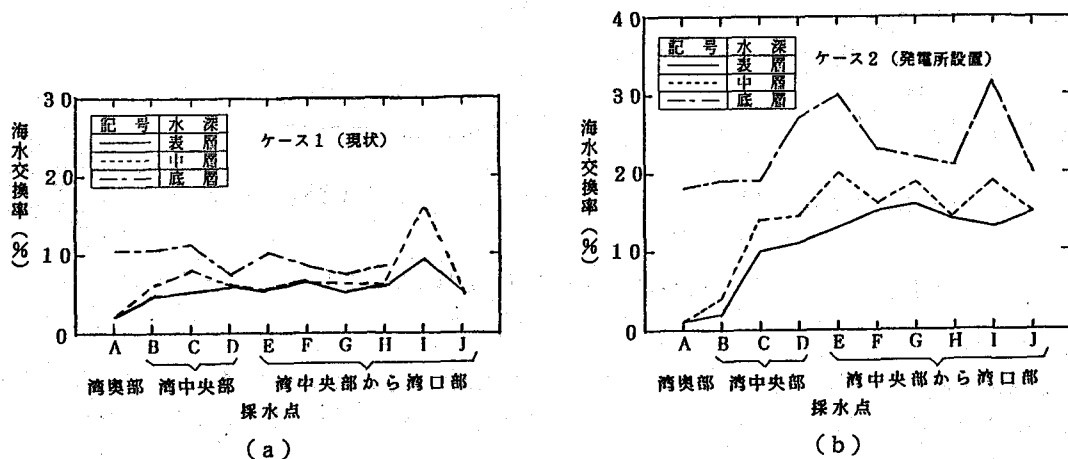


図-14 湾内の1周期(12時間)当りの海水交換率(数値シミュレーション)

図-15は、発電所設置前後における5日(10周期)経過後の湾内の海水交換率の平面分布を示す。90%以上の海水交換率の領域に着目すると、現状では表層、中層、底層とも湾口部に限定されていたものが、発電所設置により湾中央部まで拡大していることがわかる。

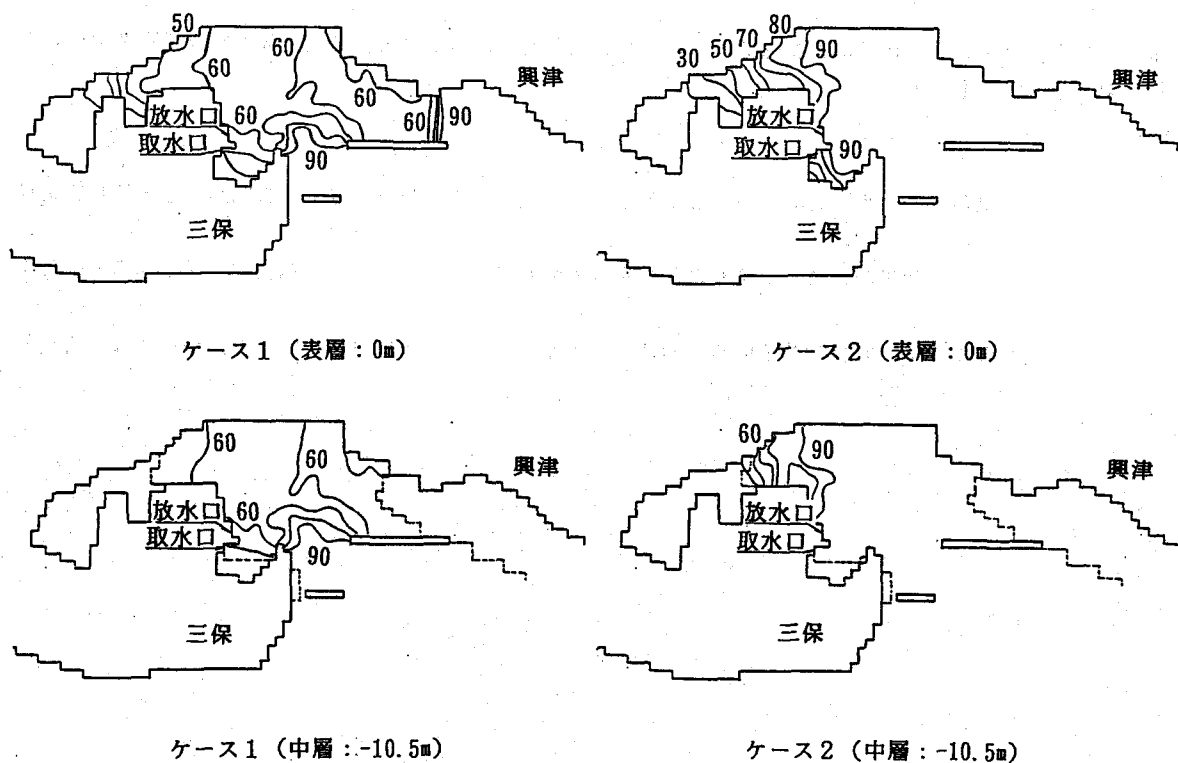


図-15-1 海水交換率の平面分布(5日経過後, 数値シミュレーション)

----- 計算時における
中層の海底地形
(境界)
添字は海水交換
率(%)

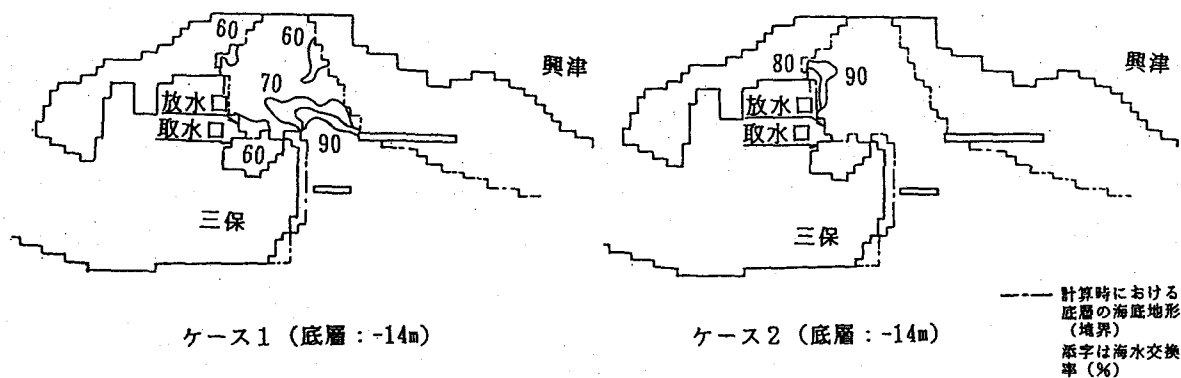


図-15-2 海水交換率の平面分布 (5日経過後, 数値シミュレーション)

5. 結論

閉鎖性海域の水質改善方策の一つとして, 汽力発電所の冷却水取放水による海水交換特性に着目し, 清水港湾を試験海域に水理実験と数値シミュレーションによりその効果について検討した結果, 次のことが明らかとなった。

①冷却水の湾内取放水により, 閉鎖性海域内の海水交換率が向上し, 水質浄化効果に大きく寄与することが確認された。冷却水取放水効果, 特に, 深層取水方式の適用等により底層の海水交換率は表層に比べ大幅に向上することが明らかとなった。

②角湯らの提案した確率論的手法を用いた2次元海水交換シミュレーションモデルを密度流などのように3次元的な流動場に適用できるように拡張し, 試験海域に適用した。その結果, 湾内の3次元的な海水交換特性を良好に再現することができ, 今後, 水質改善に適する取放水口の検討などに活用できることが示された。

謝辞

本研究の遂行にあたり御指導および御助言をいただいた(財)電力中央研究所, 我孫子研究所水理部片野尚明部長に謝意を表するものである。

参考文献

- 和田明・角湯正剛(1976): 瀬戸内海における水粒子運動の数値シミュレーション, 第20回水理講演会論文集 (P191 ~ 196)
- 角湯正剛・加藤正進・和田明(1980): 閉塞された水域の海水交換に関する検討, 第27回海洋工学講演会論文集 (P429 ~ 433)
- 角湯正剛・水鳥雅文・和田明(1982): 内湾における海水交換に関する水理学的研究, 電力中央研究所研究報告 382017