



REPORT
OF
MARINE ECOLOGY RESEARCH INSTITUTE

海洋生物環境研究所研究報告

No. 92302

九州北西岸の小湾に面した発電所の 取水による海水交換促進

平成 4 年12月

December, 1992

九州北西岸の小湾に面した発電所の 取水による海水交換促進

須 藤 静 夫 ・ 高 月 邦 夫¹

Water Exchange Promotion Induced by Cooling Water Intake of a Power
Plant on a Small Bay, Northwest Coast of Kyushu, Japan

Shizuo Sudoh and Kunio Takatuki

Sudoh, S. and Takatuki, K.(1992). Water exchange promotion induced by cooling water intake of a power plant on a small bay, northwest coast of Kyushu, Japan. *Rep. Mar. Ecol. Res. Inst.* No.92302 : 1-43.

Abstract : Water exchange promotion induced by cooling water intake of a power plant were examined in a small bay, northwest coast of Kyushu, Japan. The plant consists of two nuclear units, each with capacity of 559MWe (total combined capacity=1,118MWe). Volume of cooling water of the plant is 37m³ (total combined volume=74m³) per second during the period of full operation. Mean rates of sea water exchange in the bay were estimated based on two methods, a box model and a numerical simulation. In the box model, the bay was divided into 3 boxes, then the mean rates at the boundaries between adjoining boxes were calculated using 690nm beam attenuation coefficient measured by a underwater turbidity meter as a index of tracer. In the numerical simulation, the transitions of the tally marks placed on the same boundaries were traced for one tide cycle using the results of numerical simulation analysis of the current around the bay. The mean rates of sea water exchange at the boundaries were calculated from the volume of sea water movement in each box estimated by the drifting distance of the marks. The rates of sea water exchange at the boundaries obtained from the box model almost agreed with the rates from simulation method. The time scales required for replacement of sea water in each box were estimated from calculations on amounts of mass transfer in this bay using the above exchanging rates.

Results obtained were as follows. i) Periods required for exchange of ninety percent of sea water volume contained in box-1, immediately frontal area of the intakes, with $5.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ in water volume and $4.60 \times 10^5 \text{ m}^2$ in surface area, were about three days in the case of one unit operation, about one day for two unit operations, though the period was about seventeen days under natural conditions without plant operation. ii) In the same way, periods for exchange of fifty percent of total sea water volume in this bay combining box-1 to -3, with $1.05 \times 10^7 \text{ m}^3$ in volume and $1.09 \times 10^6 \text{ m}^2$ in surface area, were three days for one unit operation, one day for two unit operations, and eight days for no operation, respectively.

If locations of inlet and outlet in the cooling water system are selected suitably for conditions such as coastal geographical features and sea environmental properties, it is probable that the enhanced transport of sea water by the intake will contribute to promoting sea water exchange in surrounding waters of the plant.

Keywords : Power plant, Cooling water, Sea water exchange, Box model, Numerical simulation.

¹株式会社東京久栄 環境開発事業本部技術部環境システム課 主任研究員

須藤静夫・高月邦夫(1992) : 九州北西岸の小湾に面した発電所の取水による海水交換促進. 海生研報告, No.92302 : 1-43.

要約：九州北西岸の小湾に面して立地された発電所の取水による海水交換促進について検討した。この発電所は、電気出力55.9万kWの原子炉2基を備えており(合計電気出力111.8万kW), 定格出力で運転中の使用冷却水量は、各基 $37\text{m}^3/\text{秒}$ (合計冷却水量 $74\text{m}^3/\text{秒}$)である。前面の小湾内における平均的な海水交換率を、ボックスモデルと数値予測に基づいて推定した。ボックスモデルでは、その湾を3ボックスに分割し、水中濁度計で測定した690nmの光減衰係数をトレーサーの指標として、隣接するボックスの境界面における平均的な海水交換率を求めた。また、数値予測では、湾周辺の流況予測の結果を用いて、同じ境界面上に置いた個々のマーカーの動きを1潮汐周期間追跡した。マーカーの流程より推定した各ボックス内の海水移動容積から、各境界面における平均的な海水交換率を算定した。ボックスモデルから求めた各境界面における海水交換率の値は、数値予測から求めたそれぞれの境界面における値とほぼ一致した。そこで、これらの海水交換率の値を用いて、この小湾内の物質輸送量を計算することにより、各ボックス内の物質が入れ換わるのに要する時間スケールを推定した。

得られた結果は次のとおりであった。i)取水口直前域に相当するボックス1内の海水量(容量 $5.25 \times 10^6\text{m}^3$, 表面積 $4.60 \times 10^5\text{m}^2$)の90%が入れ換わるのに必要な期間は、発電所が稼働していない自然状態では約17日間であるのに対し、発電所1基稼働時には約3日間, 2基稼働時には約1日間であった。ii)同様に、ボックス1から3までを加えた湾全体の合計海水量(容積 $1.05 \times 10^7\text{m}^3$, 表面積 $1.09 \times 10^6\text{m}^2$)の50%が入れ換わるのに必要な期間は、発電所非稼働時の約8日間に對し、1基稼働時で約3日間, 2基稼働時で約2日間であった。

以上のことから、発電所周辺の海岸地形や海域環境条件等に対して、取放水口の位置が適切に選定されるならば、発電所の取放水による海水輸送は、周辺海域における海水交換の促進に効果的に寄与するものと考えられる。

キーワード：発電所、冷却水、海水交換、ボックスモデル、数値予測

目 次

I. まえがき	3	3. ボックスモデルによる海水交換率 算定結果	20
II. 海況調査方法.....	4	4. 数値予測による流況と海水交換率 算定結果	22
1. 調査海域.....	4	5. ボックスモデルと数値予測によって 得られた海水交換率の比較	29
2. 調査項目と観測方法.....	5	V. 海水交換促進効果の検討	29
III. 調査海域の海況特性.....	7	1. 湾内水に対する取水量の規模	29
1. 調査海域の水深.....	7	2. 湾内水の入れ換わり速度	31
2. 調査海域の流況.....	8	3.まとめ	36
3. 調査海域の濁り分布特性.....	8	引用文献	37
IV. 海水交換率の算定.....	15	付図	38
1. 海水交換率に関する既往の 研究.....	15		
2. 今回採用した算定方法.....	16		

図 表 目 次

第1図 調査海域の位置と定点流況および潮位の観測地点.....	6
第2図 濁度の水平分布調査コースと鉛直分布調査定点.....	7
第3図 調査海域の上げ潮時における基本的な流況パターン.....	9
第4図 調査海域の下げ潮時における基本的な流況パターン.....	9

第5図	定点流況観測から算定したパワースペクトル(定点 1~3)	10
第6図	定点流況観測から算定したパワースペクトル(定点 4~6)	11
第7図	湾口部の下げ潮時における測流板の流跡.....	12
第8図	湾奥から湾口沖に至る湾中央部海面下1m層の減衰係数分布.....	13
第9図	満潮時における湾内1m層の減衰係数分布.....	14
第10図	干潮時における湾内1m層の減衰係数分布.....	14
第11図	下げ潮時の湾奥から湾口沖に至る湾中央部断面内の減衰係数分布.....	15
第12図	湾内の物質収支モデル.....	18
第13図	流況予測範囲.....	22
第14図	潮流樁円による予測値と実測値の比較.....	25
第15図	大潮期満潮3時間後における予測流速ベクトル.....	25
第16図	大潮期干潮3時間後における予測流速ベクトル.....	26
第17図	マーカーの移動位置から推定した水塊の移動範囲.....	27
第18図	マーカーの移動位置から推定した各ボックス内流入海水の最大範囲と残留範囲.....	28
第19図	ボックス1における海水入れ換わり率の経日変化.....	34
第20図	ボックス2における海水入れ換わり率の経日変化.....	34
第21図	ボックス3における海水入れ換わり率の経日変化.....	35
第22図	湾全体の海水入れ換わり率の経日変化.....	35
付図1	大潮期における調査海域の予測流速ベクトル(満潮時～満潮後3時)	38
付図2	大潮期における調査海域の予測流速ベクトル(干潮前2時～干潮後1時)	40
付図3	大潮期における調査海域の予測流速ベクトル(干潮後2時～満潮前1時)	42
第1表	調査実施時期と観測項目	5
第2表	湾・海峡部における海水交換率の既往算定事例	16
第3表	各ボックス内の平均減衰係数	21
第4表	各ボックスの容積、水面積と平均水深	21
第5表	海水交換率の算定に用いた調査時の諸条件	21
第6表	ボックスモデルから得られた各境界面の平均海水交換率	21
第7表	数値予測から算定した各ボックス内流入海水最大容積、残留容積と 各境界面の平均海水交換率	28
第8表	ボックス1における経過日数と平均物質濃度	32
第9表	ボックス2における経過日数と平均物質濃度	32
第10表	ボックス3における経過日数と平均物質濃度	32
第11表	湾全体における経過日数と平均物質濃度	33

I. まえがき

我が国の沿岸水域は、古くから漁業・養殖業の場として、また近年ではレクリエーションの場としても重要視されるようになってきた。しかしながら、静穏であるために一層多面的な利用が行われている内湾の水質は、一般に著しく低下しており、自然回復がほとんど期待できない所も出現している。そのために、水質改善対策の一環として、閉鎖性水域内における海水交換の促進を目的とした、例えば外海水を湾内に導入するトンネルや水路の掘削、作れい・導流堤など、種々の土木的工法が採用されている。また、潮

流などの自然エネルギーがほとんど期待できない水域では、エアーバブルカーテンなどの機械エネルギーの導入も考えられている(中村ら, 1988)。

一方、臨海地帯に建設されている汽力発電所では、復水器冷却用に多量の海水を使用している。これらの発電所取放水量は、電気出力100万kW当たり、火力では約 $40\text{ m}^3/\text{s}$ 、原子力では約 $60\text{ m}^3/\text{s}$ であり、近年では電力需要の増大に伴う発電所の大規模化・集中化によつて、合計取放水量が $100\text{ m}^3/\text{s}$ 以上に達している所も珍しくはない。

こうした大量の海水の輸送力と保有エネルギーを有効に利用しようと考えるのは極めて自然のことである。すでに温排水の温度効果を養魚や水産種苗の生産などに利用することを意図した研究や企業化試験が各地で行われているが、その利用水量は、取放水量全体からみれば極く一部に限定されている。また、別の側面から、発電所の大量取放水に伴う海水輸送を利用して、富栄養化した内湾の海水交換を促進し、水質浄化を図ろうとする構想も現れている。服部・高橋(1988)は、数値予測と水理実験に基づいて、汽力発電所からの放水流が加わった場合の内湾における海水交換率の向上について検討し、また、宮池ら(1980)は、五ヶ所湾を対象にして、冷却水の取放水を利用する方法を数理モデルに基づいて予測検討している。

筆者らは、九州北西岸の小湾に面して取水口が設置されている既設発電所の前面海域における海況調査の結果に基づいて、ボックスモデルと数値予測の両手法から算定・検証した発電所前面海域の海水交換率を用いて、この発電所の取水に伴う海水交換促進について検討し、取放水に伴う海水輸送が、湾内の海水交換を促進し、水質浄化に寄与していることを認める結果を得たので報告する。

報告に先立ち、本稿を校閲していただいた当研究所深瀧弘元所長(現在研究所参与)、東京大学名誉教授羽生功博士(当研究所非常勤顧問)並びに、東海大学教授和田明博士(当研究所非常勤顧問)に深謝の意を表する。

II. 海況調査方法

1. 調査海域

調査海域は第1図に示す九州北西岸の小湾とその周辺である。南側の半島の湾口部に

注) この報告のなかで使用したデータは全て水産庁から当研究所に委託された大量取水漁業資源影響検討事業に係わる調査の際に得られたものである。

建設された発電所の取放水口は図に示す位置に設置され、この半島の北側の小湾内から取水された海水は、発電所を通過した後、半島の南側にある別のある別の小湾を経て外海へ放出されている。この発電所は、同型同大の2基の発電ユニットで構成されており、各ユニットの定格電気出力は55.9万kW、使用冷却水量は37.0m³/sである。したがって、総電気出力は111.8万kW、冷却水の総使用量は74.0m³/sとなっている。

なお、現地調査開始年次から終了年次までの4ヶ年間(1986~89年)に、湾中央部の南側陸岸から防波堤が構築されたこと、また湾奥部南側水域の一部が埋立てられたことにより、海岸形状が多少変化した。

2. 調査項目と観測方法

現地調査は発電所周辺海域の主として岩礁域に生息する魚類およびその卵・稚仔の分布状況を把握するために実施されたものであるが、ここでは、本報告をまとめるに際して基礎データとなる項目のみを取り出し、それらの調査方法について以下に略述した。

1986年には第1図に示す取水口前面の湾内外における深浅測量を実施した。さらに、1986~89年の間に3回、いずれも大潮期に同じ海域の流況、濁度、潮位についての調査を行った。各回の調査実施時期と観測項目は第1表のとおりであった。

第1表 調査実施時期と観測項目

調査次	調査実施時期	観測項目
第1回	1986年 8月27日 ~ 9月14日	深浅、流況 ¹⁾ 、濁度、潮位
第2回	1988年 7月30日 ~ 8月 1日	流況 ²⁾ 、濁度、潮位
第3回	1989年 8月 3日 ~ 8月 5日	流況 ²⁾ 、濁度、潮位

1) 定点観測と測流板追跡調査を実施 2) 測流板追跡調査のみを実施

1) 深浅測量

調査船に搭載した精密音響測深機(周波数200kHz)を用いて、湾内から湾口沖約1km以内の海域における深浅測量を実施した。

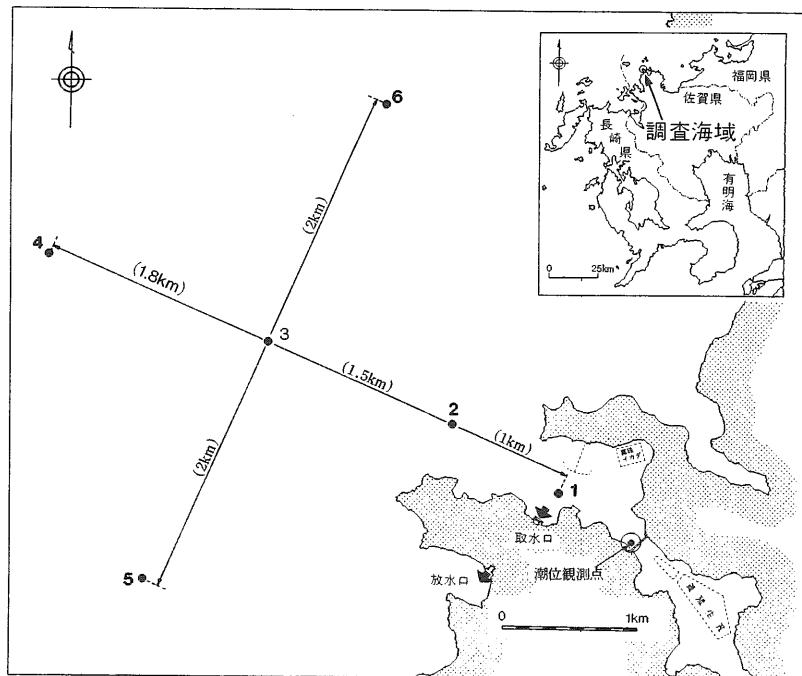
2) 流況調査

測流板追跡調査と、15昼夜にわたる定点連続観測を実施した。

(1)測流板追跡調査：湾内外の数カ所に測流板を投入し、これを調査船で追跡する方

法によって、主として湾口部周辺海水の概括的な移動経路を調べた。

(2)定点連続観測：湾内外に設けた6定点(第1図)にアーンデラー流速計を係留して、15昼夜連続の流況観測を行った。



第1図 調査海域の位置と定点流況および潮位の観測地点

3) 濁度調査

調査海域における水平・鉛直方向の水中濁度を測定した。

(1)水平分布調査：センサー部(光路長 50cm, 測定波長 690nm)が海面下約1mに位置するようにフロートを取り付けた水中濁度計を、湾奥から湾口部にかけて設定したコース(第2図)に沿って曳航し、濁度計からの出力電圧を自動平衡記録計で連続記録した。

(2)鉛直分布調査：水平分布調査で用いたものと同じ機種のセンサー部に水深計を装着し、湾奥から湾口にかけて設定した定点(第2図)においてこの濁度計を垂下することにより、海面から海底に至る間の濁度の連続記録を取得した。記録にはX-Yレコーダーを用いた。なお、測定した出力電圧から(1)式を用いて減衰係数(α)を求めた。

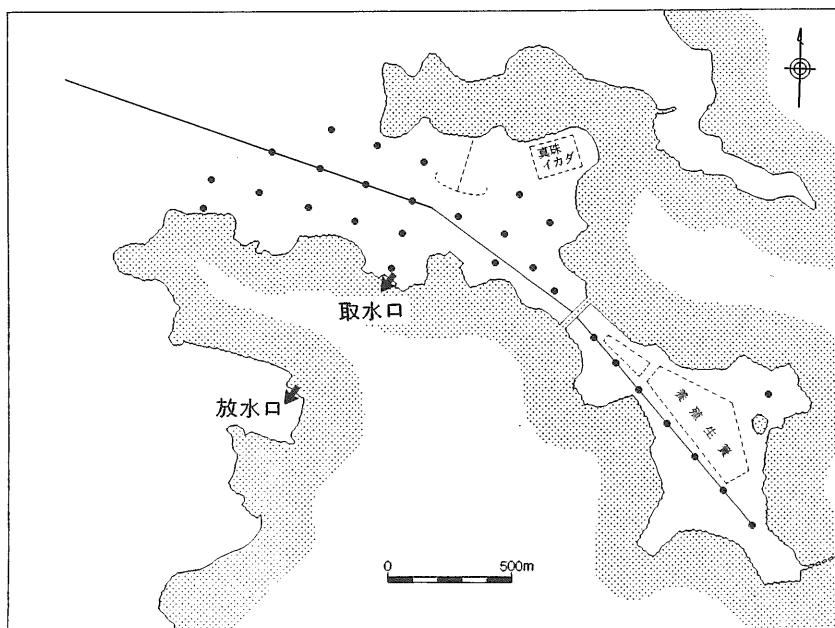
L : 濁度計の光路長(=0.5m)

Ma: 空気中での出力電圧(mV)

M : 水中の出力電圧(mV)

4) 潮位觀測

湾内の1地点(第1図)に潮位計を設置し、調査期間中の潮位を連続記録した。



第2図 濁度の水平分布調査コースと鉛直分布調査定点

III. 調査海域の海況特性

1. 調査海域の水深

汀線から急勾配で深くなる谷状の海底地形が特徴である。また、湾内の水深は約20m

以浅で、湾口部から湾奥に沿った海底地形の変化は緩やかであるが、湾口部では沖合に向かって急勾配で深くなっている。

2. 調査海域の流況

大潮期に実施した第1～3回の調査結果から推定された上げ潮時、下げ潮時の基本的な流況パターンを第3～4図に示した。また、定点観測データに基づいて、流速変動に関するパワースペクトルの計算結果を第5～6図に示した。

調査海域を湾内、湾口部および湾外の3水域に分けると、それぞれにおける特徴は以下のように整理される。

1) 湾内の流況

定点1におけるパワースペクトルから、湾内では半日周潮流が認められるほか、約20分間の周期を持った副振動による流れが発生していることがわかる。また、調査期間中のデータから算定した平均流速は約5cm/sであった。

2) 湾口部の流況

上げ潮時には湾口部の南側から北東方向に向かって湾内に海水が流入し、下げ潮時には、上げ潮時の場合と反対方向の経路で湾内の海水が流出する。測流板追跡調査から得られた下げ潮時における湾口部の典型的な流況パターンを第7図に示した。

また、このような海水の動きに伴って湾外水と湾内水とが接触するため、湾口部では顕著な潮目が発生する。

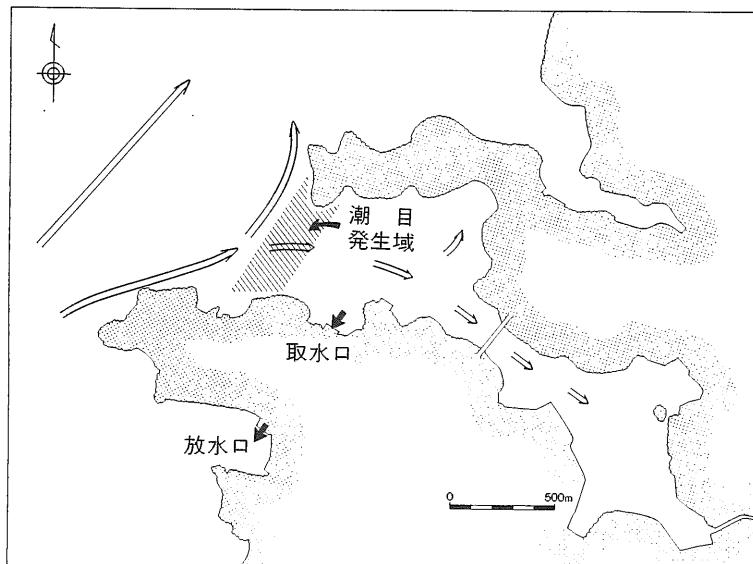
3) 湾外の流況

定点2～6のパワースペクトルによれば、湾外では半日周潮流が卓越しているほか、日周潮流が発生する。基本場の流れは約12時間の往復流であり、上げ潮時には北東方向の、下げ潮時には南西方向の流れとなる(第3～4図)。流速はかなり速くなることもあり、60cm/sを超える流れがしばしば発生する。

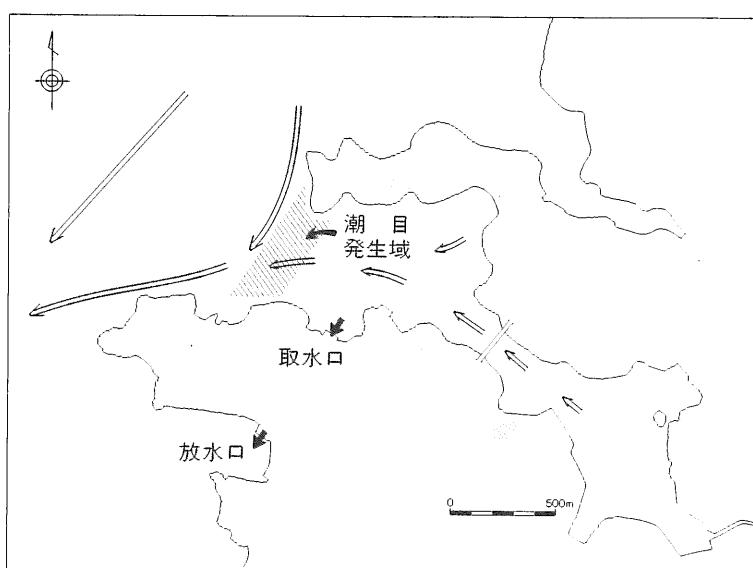
3. 調査海域の濁り分布特性

湾内では魚類養殖が行われており、これが調査海域内で最も大きな濁りの負荷源となっ

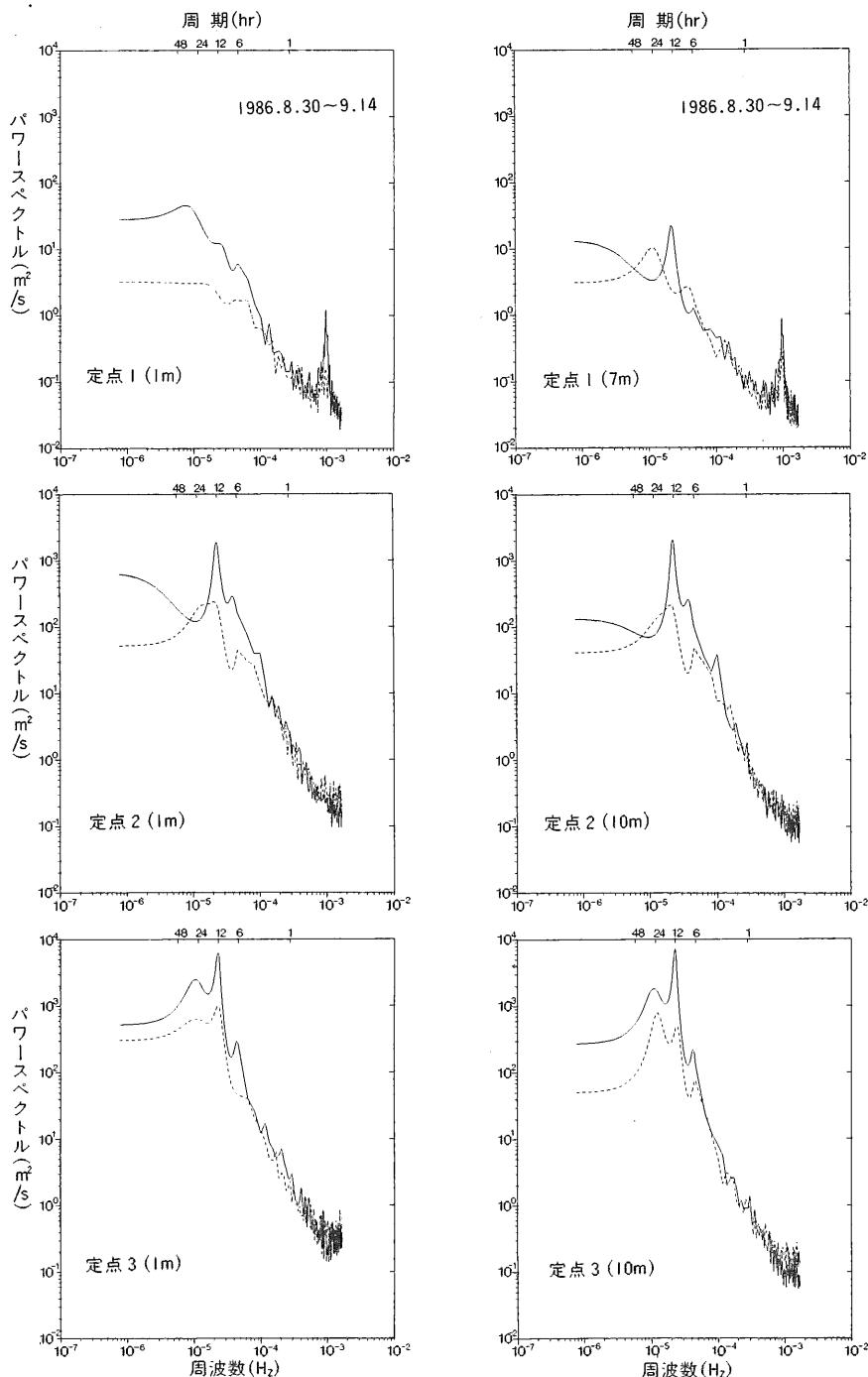
ている。さらに、湾奥部は浅く、海底はシルト質であるため、強風時にはこの水域で波浪による濁りの発生が考えられる。また、湾奥部には小川が流入しているが、降雨がなければこれによる濁り負荷の程度は微小である。



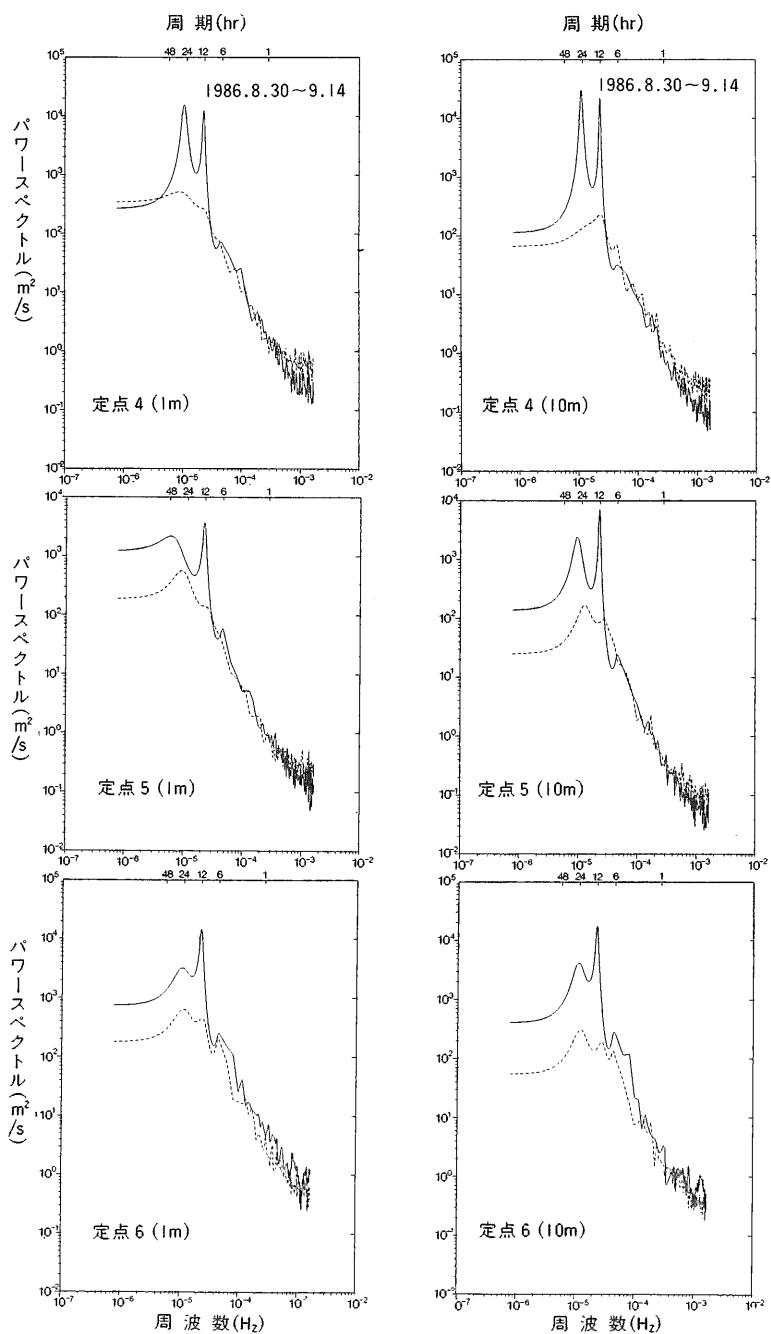
第3図 調査海域の上げ潮時における基本的な流況パターン



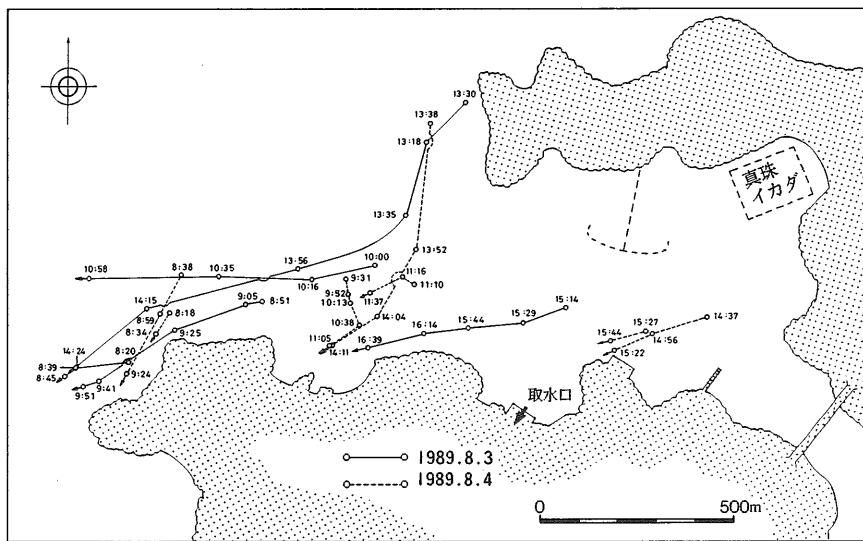
第4図 調査海域の下げ潮時における基本的な流況パターン



第5図 定点流況観測から算定したパワースペクトル(定点1~3)



第6図 定点流況観測から算定したパワースペクトル(定点4~6)



第7図 湾口部の下げ潮時における測流板の流跡

1) 湾内水平方向の濁り分布

第2図のコース沿いに測定した湾中央部海面下約1m層の減衰係数(α)の水平分布を第8図(第1回調査結果)に示した。 α の値は湾奥部の 2.5m^{-1} 前後から、湾口部～湾外における約 1.0m^{-1} 前後まで低減していた。また、上げ、下げ両潮時とも、湾口部付近から湾内寄りの水域では顕著な濁り分布の変化(潮目)が観測された。

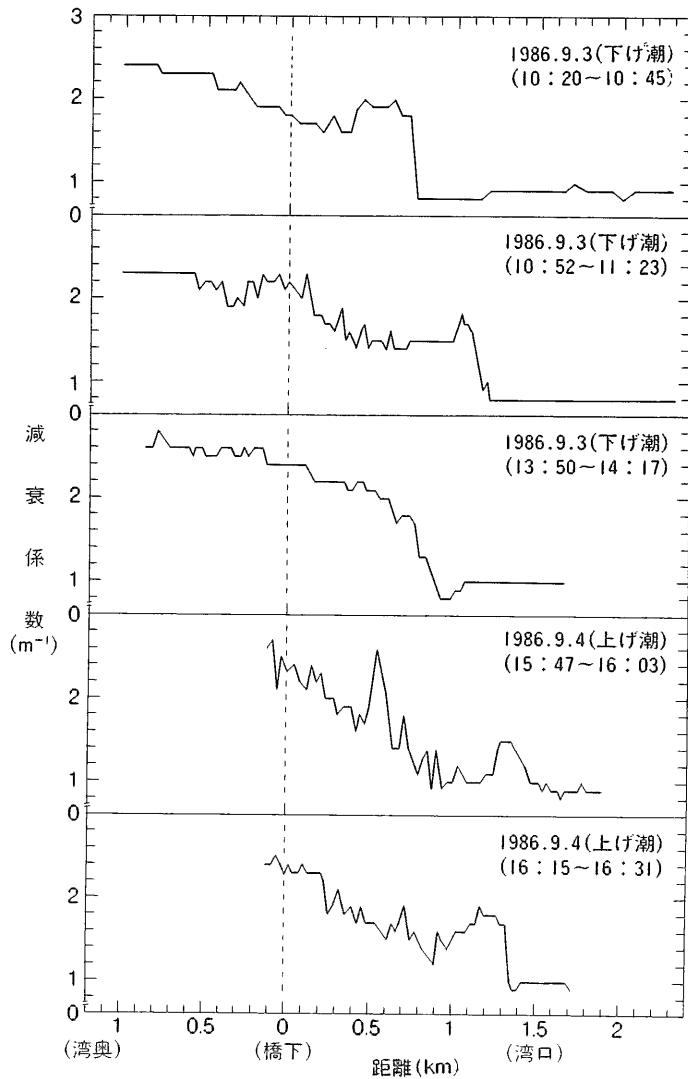
第3回調査時の満潮時前後と干潮時前後にかけて測定した海面下約1m層における減衰係数値から、湾内の等 α 線を描いたものが第9～10図である。湾内の濁度は、満潮時(第9図)よりも干潮時(第10図)に高くなる傾向にあり、潮汐に伴って変化することが示唆された。また、湾口部における等 α 線の形状と、第7図の流況とはよく対応する関係にあった。

2) 湾内鉛直方向の濁り分布

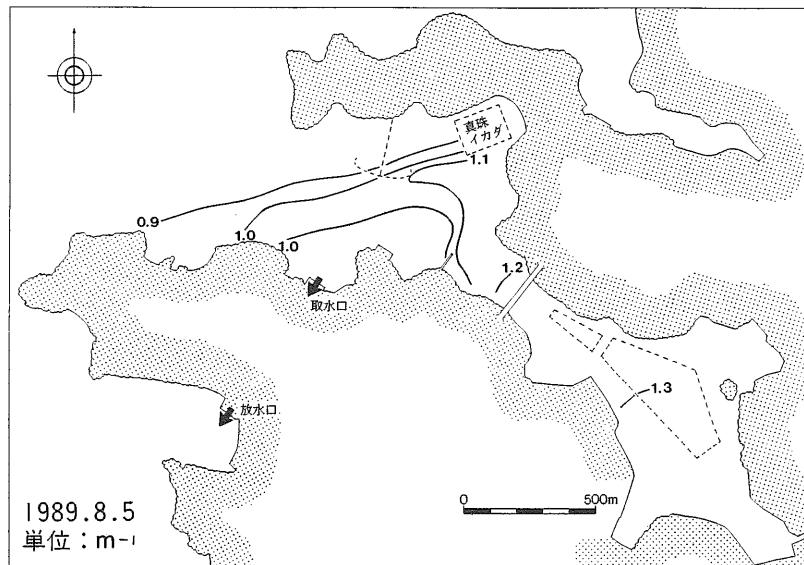
第1回調査時の鉛直分布調査結果に基づいて、湾奥から湾口沖に至る湾中央部断面内の下げ潮時における減衰係数分布を描いたものが第11図である。

中間の層では表層と海底付近に比べて濁度が低くなっていた。このような濁り分布の形態は、他海域でもよくみられる現象で、夏季には一般にこうした傾向が顕著になる。

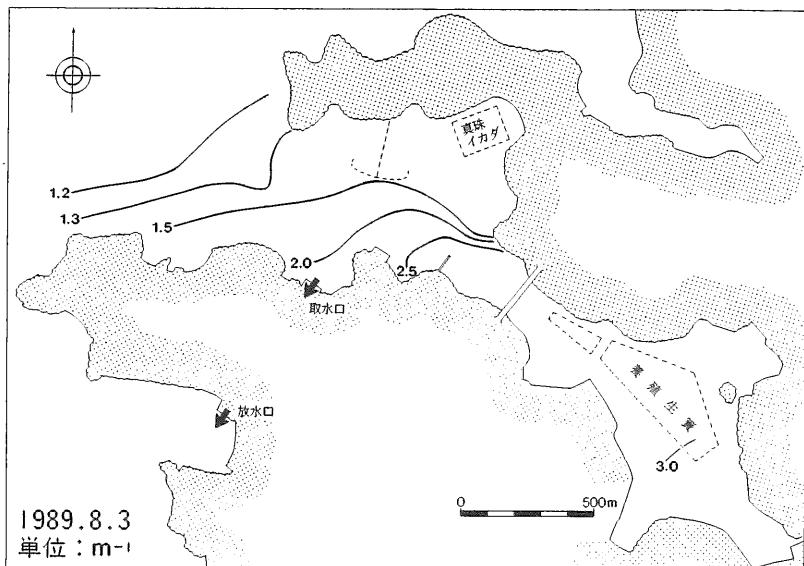
一方、表層に分布していた $\alpha \geq 1.5 \text{ m}^{-1}$ の水塊は、等 α 線の形状から推定して、明らかに湾奥部より流出したと考えられ、その先端部はほぼ湾口部まで達していた。また、この水塊は、湾口付近で $\alpha = 1.0 \text{ m}^{-1}$ の沖合海水によって海面から海底近くまでブロックされた状態にあり、前述の水平分布調査で観測された潮目は、海底近くまで達していたことが示唆された。懸濁物質の挙動は海水の動きと極めて類似した関係にあった。



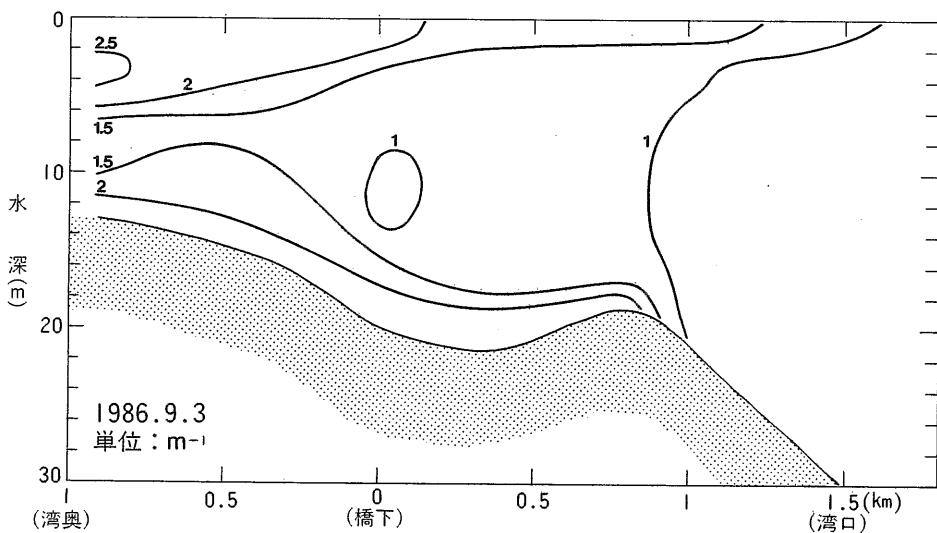
第8図 湾奥から湾口沖に至る湾中央部海面下1m層の減衰係数分布



第9図 満潮時における湾内1m層の減衰係数分布



第10図 干潮時における湾内1m層の減衰係数分布



第11図 下げ潮時の湾奥から湾口沖に至る湾中央部断面内の減衰係数分布

IV. 海水交換率の算定

1. 海水交換率に関する既往の研究

従来から、内湾・内海における水質問題を主な背景として、閉鎖性水域の海水交換率を算定するいろいろな方法が提案されてきた。そのうちの代表的な算定方法は大別すると、①現地調査や水理模型実験による方法(速水ら, 1956; Parker *et al.*, 1972; 中田・平野, 1976; 柏井, 1977; その他汎用的なボックスモデルによる方法), および、②数値予測による方法(今里・淡路, 1982; 角湯ら, 1982)となろう。一般に、閉鎖性の湾における海水の出入りには、12時間や25時間を周期として往復運動を繰り返す潮流の作用が支配的であるが、その他にも、恒流や気象・海象条件、海底・海岸地形等の諸要因も関与している。第2表は、これらの諸条件が異なる湾や海峡部について、海水交換率の算定が行われた既往事例を列挙したものである。

海水交換率の算定には塩分が指標物質として使用されるのが普通であるが、河川流入水域などの特定の所を別にすれば、海水の動きと対応する塩分変化を現地調査から取得するのは極めて困難であり、そのため、測流板の流跡を用いたり、水理実験や数値予測などによる方法が用いられることがある。ただし、第2表から明らかなように、同一

海域であっても算定方法等によって得られる結果がかなり相違することもある。

第2表 湾・海峡部における海水交換率の既往算定事例

海 域	海水交換率	方 法	指 標	文 献
東京湾	0.08~0.10	現地調査	塩 分	松本ら(1974)
東京湾	0.01~0.04	水理実験	ウラニン	堀江ら(1977)
浜名湖	0.46~0.57	現地調査	塩 分	松田(1982a)
浜名湖	0.43~0.52	現地調査	塩 分	松田(1982b)
三河湾	0.1 ~0.2	現地調査	塩 分	松村・松川(1981)
川平湾	0.14~0.36	現地調査	塩 分	松田(1982a)
川平湾	0.06~0.29	現地調査	塩 分	松田(1982b)
久美浜湾	0.82	現地調査	塩 分	柏井(1984)
豊後水道	0.11	現地調査	塩 分	川村ら(1975)
布刈瀬戸	0.2 ~0.5	現地調査	測 流 板	中田・平野(1976)
生口瀬戸	0.44~0.77	現地調査	測 流 板	中田・平野(1976)
来島海峡	0.07~0.26	現地調査	測 流 板	中田・平野(1976)
明石海峡	0.11~0.41	数値予測	マー カー	Imasato <i>et al.</i> (1980)
明石海峡	0.28~0.34	現地調査	塩 分	清水・川村(1981)
明石海峡	0.16	数値予測	塩 分	今里・淡路(1982)
鳴戸海峡	0.47~0.63	数値予測	マー カー	Imasato <i>et al.</i> (1980)
鳴戸海峡	0.06	数値予測	塩 分	今里・淡路(1982)
紀淡水道	0.23~0.26	数値予測	マー カー	Imasato <i>et al.</i> (1980)

2. 今回採用した算定方法

海水交換率の定義に関してはいくつかの提案がなされており、また、その算定方法については前述のとおりであるが、ここでは海水交換率を次のような意味をもつ数量として取り扱うこととした。すなわち、一定時間内に自然の作用によって所定の境界面を通り、対象水域内に流入した海水量、 Q_{in} と、流入した同じ海水が同じ境界面を通って対象水域外へ流出した海水量、 Q_{out} から、対象海域内に残留した海水量を、 $Q_{res} = Q_{in} - Q_{out}$ とした場合に、境界面における海水交換率(E)を、 $E = Q_{res}/Q_{in}$ と定義する。

筆者らが今回の算定対象とした海域においても塩分の変化はほとんど認められず、塩分を指標物質として取り扱うことは困難であった。そこで、この海域の流況特性や湾内で行われている魚類養殖に起因する水質、ならびに地形等を考慮して、非保存系物質であるという問題は残されているが、海中の懸濁物質の濃度変化から、ボックスモデルによる方法を用いて海水交換率の算定を試みた。さらに、このボックスモデルによる算定結果を検証するという目的をも含めて、今里・淡路(1982)による方法のうちの Euler-Lagrange手法に準じた数値予測からも海水交換率を算定した。

1) ボックスモデルによる算定方法

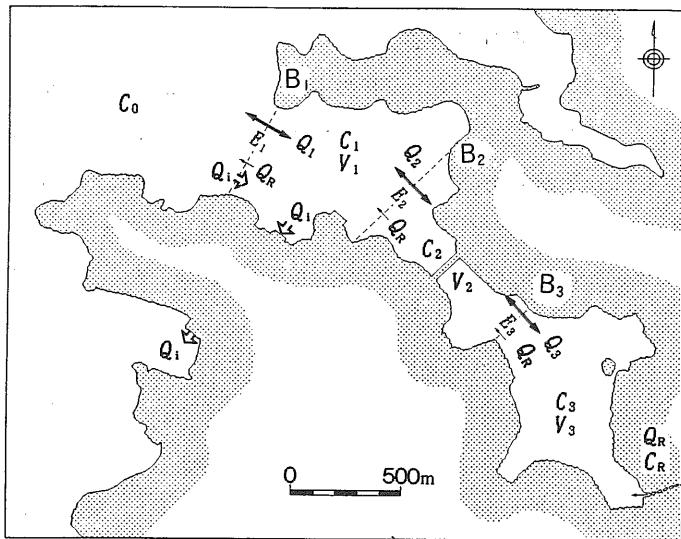
ボックスモデルによる方法は、海水交換機構に立ち入ることなく、単純に連続条件から海水交換の強さを求める方法としてこれまで数多く利用されてきた。指標物質には塩分が用いられているが、他の物質の場合でも、各物質の特性(例えば、減衰、消滅、生成など)に対する補正を加味すれば、同じように取り扱うことができる(宇野木, 1980)。ここでは、懸濁物質濃度の指標である光波長690nmの減衰係数で表示した濁度の値を使用した。ただし、濁度の測定時間間隔を潮時との対応のもとに可能な限り短時間にして未補正の値を用いた。

ボックスモデルを利用する場合には各種の条件を考慮して、対象水域を適切に分割することが重要である。当海域の場合では、先に示した流況・濁度調査の結果から、まず湾内と湾外との境界面の位置を潮目発生域に設定した。さらに、隣接するボックスの大きさに関しては、湾内の平均流速から推定した海水の移動距離($5\text{cm/s} \times 6\text{hr} = 1\text{km}$)を考慮するとともに、地形を加味して、第12図のように湾内を3ボックスに分割した。また、それぞれの境界面を外海側から B_1 , B_2 , B_3 とし、そこで平均的な海水交換率をそれぞれ E_1 , E_2 , E_3 とした。

ここで、鉛直方向の分割については単純化した1層として、非保存系要因である懸濁粒子の沈降・分解等を無視し、計算に必要な他の諸値を第12図のように設定すれば、各ボックス内の物質収支は、前述の定義に従う海水交換率を用いることにより、(2)~(4)式で表すことができる。

まず(2)式は、境界面 B_1 を通してボックス1内で起こると考えられる物質収支を表しており、第1項は、海水交流による外海からの流入フラックス量である。第2項は、ボックス1に流入した外海水の一部 $[(1-E_1) \times Q_1]$ が、次の下げ潮時にボックス1内の海水と入れ換わらずに、そのまま再び外海に流出した時のフラックス量である。第3項は、流入した外海水のうち、海水交換率 E_1 に相当する量($E_1 Q_1$)だけが、ボックス1の海水と入れ換わったため、これと同量のボックス1内の海水が外海に流出した時のフラックス量である。また、第4~6項は、境界面 B_2 におけるボックス1とボックス2との収支量である。さらに、第7項は流入河川によるボックス間の移動フラックス量、第8, 9項は発電所の取水による移動フラックス量で、ともに恒流的成分である。

ボックス2, 3内における物質収支(3), (4)式についても同様の考え方に基づいて構築した。ただし、第12図中の諸値の設定に当たっては、試行錯誤的にいくつかの方法が考



第12図 湾内の物質収支モデル

Q_1, Q_2, Q_3 : ボックス1, 2, 3の海水交流量, Q_A : 発電所の取水量, Q_R : 河川流量, V_1, V_2, V_3 : ボックス1, 2, 3の容積, C_1, C_2, C_3 : ボックス1, 2, 3の平均濁度, C_0 : 外海水の平均濁度, C_R : 河川水の平均濁度

えられるが、これらの設定方法に基づく物質収支式のそれについて仮計算した結果から、当海域の場合には、(2)～(4)式を用いるのが最も適切であると判断された。したがって、(2)～(4)式より、現地で測定した濁度の値を用いて各境界面の海水交換率を算定した。

〈ボックス1〉

〈ボックス2〉

$$\begin{aligned} & Q_2 C_1^n - (1 - E_2) Q_2 C_1^n - E_2 Q_2 C_2^n \\ & - Q_3 C_2^n + (1 - E_3) Q_3 C_2^n + E_3 Q_3 C_3^n \\ & + Q_R (C_3^n - C_2^n) = V_2 (C_2^{n+1} - C_2^n) \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

＜ボックス3＞

$$+ Q_R \left(C_R - C_3^n \right) = V_3 \left(C_3^{n+1} - C_3^n \right) \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ただし、 n , $n+1$ は時間ステップ(1ステップは潮汐周期の12時間)

2) 数値予測による算定方法

数値予測による代表的な海水交換率の算定には、今里・淡路(1982)のEuler-Lagrange手法と角湯ら(1982)の方法がある。方法的には両者とも予測した流れ場にマーカーを投入し、Lagrange的に追跡することによって海水交換率を求めるもので、両者の相違は、後者が追跡するマーカーに乱れを持たせている点にある。

ここでは、1潮汐周期(12時間)を対象とした場合について、今里・淡路(1982)に準じた方法により、前述と同じ各境界面における海水交換率を算定した。なお、今里・淡路(1982)に従えば、この程度の時間内ではどちらの方法を用いた場合にも、マーカーの湾内残留確率に大差はないと考えられる。

前述の調査結果から、対象海域の流れには潮流成分が支配的であると考えられるため、流況予測モデルは、Navier-Stokesの運動方程式と連続式で表すことができる。これらの方程式を海面($z = -\varsigma$)から、海底($z = h$)まで積分し、境界条件を導入すれば(5)～(7)式が得られる。流況調査の結果を用いて(5)～(7)式から、まず調査海域の一般流況を予測した。

$$-\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = fv - g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{r^2 u (u^2 + v^2)^{1/2}}{(\xi + h)} + A_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots \quad (5)$$

u, v : $-h \leq z \leq \xi$ における x, y 方向の平均流速

$A_x, A_y : -h \leq z \leq \xi$ における x, y 方向の平均渦動粘性係数

h : 平均水面からの水深

ξ : 平均水面からの水位変化量

g : 重力加速度 f : コリオリ係数 r^2 : 海底摩擦係数

次に、ボックスモデルで設定した同じ境界面の B_1 に 9 個のマーカーを、 B_2 , B_3 には境界面の長さに対応してそれぞれ 10, 5 個のマーカーを投入し、流況予測結果を用いてこれらのマーカーを 1 潮汐周期間連続して追跡した。さらに、マーカーの移動位置に基づいて、上げ潮時に外海側から境界面を越えて各ボックス内に流入した最大容積、 V_{in} と、1 潮汐周期後、上げ潮時に流入した海水が各ボックス内に残留した容積、 V_{res} を求め、両者の値を用いて、(8)式からボックスモデルの場合と同様に、発電所が稼動していない場合の自然状態における海水交換率を算定した。

$E_{1,2,3}$ ：各境界面における海水交換率

3. ボックスモデルによる海水交換率算定結果

海水交換率の算定には第1回および第3回調査のデータを使用した。第2回調査時には湾内で浚渫工事が行われており、これによる濁り負荷が観測されたため、この調査時のデータについては除外した。

第2図に示した定点における第1回、3回調査時の減衰係数の鉛直分布データを用いて各ボックスごとに包含される値を平均し、それを各ボックス内の平均減衰係数とした。各ボックスごとの平均減衰係数を第3表に、各ボックスの容積、水面積、平均水深を第4表に示した。さらに、計算に必要な他の諸条件を第5表に示した。また、(2)～(4)式より、第3～5表の値を用いて算定した各境界面の海水交換率を第6表に示した。湾口部の境界面B₁では0.44～0.65(平均0.55)、湾内寄りの境界面B₂では0.26～0.40(平均0.32)、最も湾奥寄りの境界面B₃では0.06～0.21(平均0.13)となった。

第3表 各ボックス内の平均減衰係数 (単位: m⁻¹)

調査年月／日	(潮 時)	外 海	ボックス 1	ボックス 2	ボックス 3
1986年9／3	(下げ潮)	1.00	1.80	2.40	2.63
1986年9／4	(上げ潮)	1.00	1.67	2.34	2.63
1989年8／3	(満 潮)	1.05	1.11	1.17	1.42
1989年8／3	(干 潮)	1.22	1.31	1.46	1.51
1989年8／4	(満 潮)	1.05	1.07	1.13	1.39
1989年8／4	(干 潮)	1.22	1.27	1.31	1.50

第4表 各ボックスの容積、水面積と平均水深

水域 区画	容 積 ¹⁾ (×10 ⁶ m ³)	水面積 (×10 ⁵ m ²)	平均水深 (m)
ボックス 1	5.25	4.60	11.4
ボックス 2	2.24	2.12	10.6
ボックス 3	3.01	4.13	7.3

1) 平均水面下の容積

第5表 海水交換率の算定に用いた調査時の諸条件

調査年月／日	潮位差 (m)	河川流量 ¹⁾ (m ³ /s)	河川水濁度 ¹⁾ (m ⁻¹)	発電所取水量 (m ³ /s)
1986年9/3~4	1.5	0.5	3.0	36.7
1989年8/3~4	1.8	2.5	3.0	37.5

1) 調査時における河川調査結果から推定した値

第6表 ボックスモデルから得られた各境界面の
平均海水交換率

調査年月／日	E ₁	E ₂	E ₃
1986年9/3~4 (下~上)	0.65	0.26	0.06
1989年8/3~4 (満~満)	0.56	0.40	0.12
1989年8/3~4 (干~干)	0.44	0.31	0.21
平 均	0.55	0.32	0.13

4. 数値予測による流況と海水交換率算定結果

第1回調査時に実施した大潮期における15昼夜の定点連続流況観測データ等に基づいて、まず、(5)～(7)式より対象海域の流況を予測した。

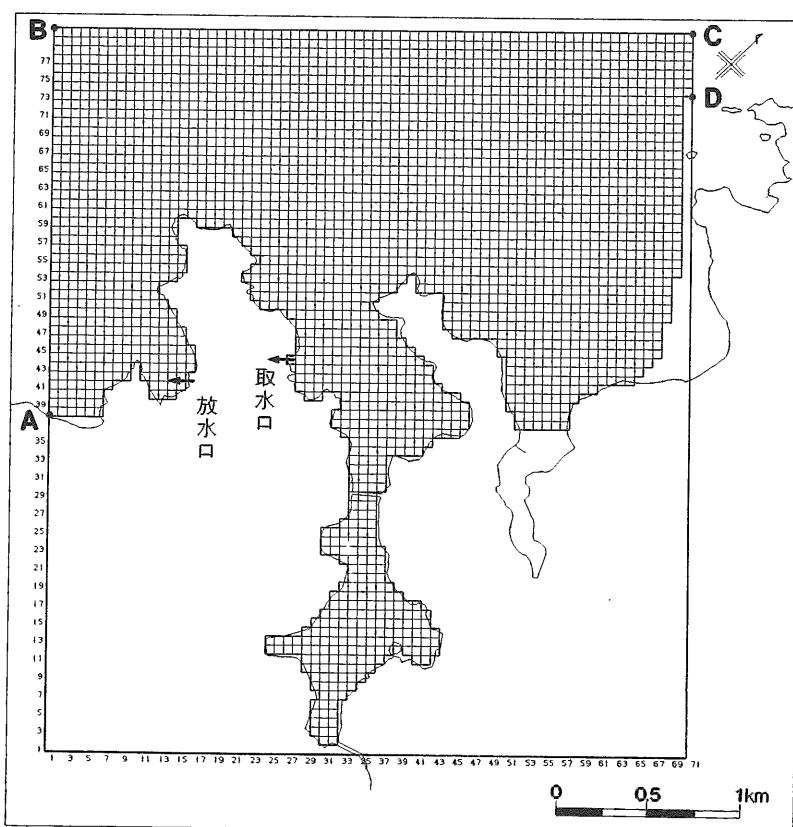
1) 流況予測条件

調査結果等を用いて流況予測条件を以下のように設定した。

(1) 予測対象範囲

地形、流況を考慮して予測範囲を第13図のように、北東～南西方向 3.5km、南東～北西方向 4.0kmとした。また、計算格子間隔については、 $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$ とした。

なお、前述のように調査期間中には境界面B₂の東側における防波堤(第7,9,10図参照)の構築等によって海岸地形の変化が起こったため、ボックスモデルから得た地形変化前



第13図 流況予測範囲

後の算定結果と比較するためには、それぞれに対応した条件設定が必要であるが、計算を省略化するため单一条件のみに関して予測することにして、ここでは地形変化前の状態を予測範囲の海岸形状とした。

(2) 水深

対象海域の水深(海底地形)および海岸地底については、海上保安庁水路部「海図第195号(呼子港及付近)」と深浅測量の結果を基に設定した。

(3) 境界条件

開境界上で 4 地点(第13図中の A ~ D)における大潮期の平均水面からの水位変化量を(9)式で与えた。また、境界上の任意の格子点における値については、両端 2 地点の値から線型補間により決定した。

ζ : 開境界での水位変化量

ω : 潮汐の角速度 ($= 30^\circ/\text{hr}$)

h_b : 開境界での $(M_2 + S_2)$ 分潮の潮位振幅

κ_b : 開境界でのM₂分潮の遅角

κ_m : 標準港(名護屋港)のM₂分潮の遅角 (=267.0°)

なお、4地点における潮汐の振幅と遅角に関しては、流況観測結果との整合性が得られるように、周辺海域の潮汐調和定数(海上保安庁水路部、1983)から試行錯誤的に決定した。

閉境界では(10)式のように、陸岸や防波堤を通しての流れはないとした。

s : 陸地線分に対する法線方向

(4) 河川流量

実測値(第5表)を平均して、河川流量を $1.5\text{m}^3/\text{s}$ とした。

(5) その他の諸条件

① コリオリ係数(f)

ω_0 ：地球自転の角速度 [$=2\pi/(24 \times 3600)$]

ϕ : 予測対象域中心の北緯 (=33.52°)

② 水平渦動粘性係数 (A_x, A_y)

定点流況観測データから算定した値に基づいて、調査海域の平均的な渦動粘性係数を以下のように設定した。

$$A_x = A_y = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$$

③ 海底摩擦係数 (r^2)

Chezyの粗度係数を用いて(12)式より海底摩擦係数を算定した

$$c \equiv (1/n) \times h^{1/6}$$

g : 重力加速度 c : Chezyの粗度係数

n : Manning の粗度係数 ($\equiv 0.026 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}^{-1}$)

2) 流況予測結果

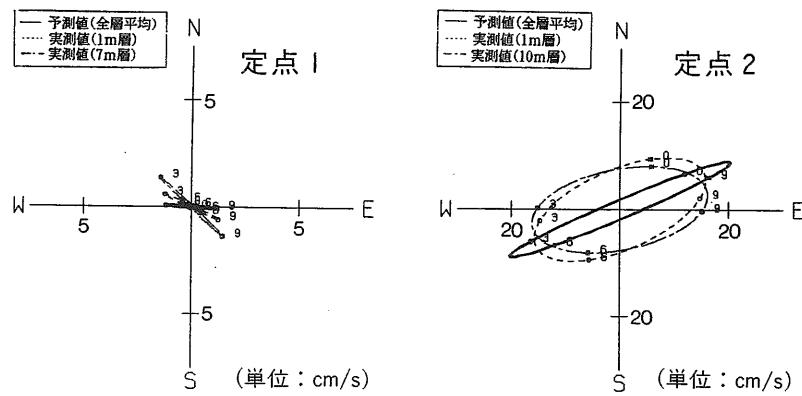
予測範囲内(第13図)の流況観測定点1, 2(第1図)における実測値と予測流速ベクトルに基づく潮流橋円の比較を第14図に示した。図中の数値は名護屋港の高潮時を0とした潮時である。橋円長軸方向の両者の値は概ね一致したが、定点2における短軸方向(湾口断面に直角方向)の予測流速は実測値より小さくなかった。この相違原因の1つには、湾口部における海底形状の急変が影響しているものと考えられる。

また、満干潮3時間後における流速ベクトルの予測結果を第15~16図に、その他の時間帯における予測結果を付図1~3に示した。これらの予測結果は、湾口部における流向、流速の急変や外海水と湾内水の接触水域等に関して、前述の流況調査の結果をよく反映した。

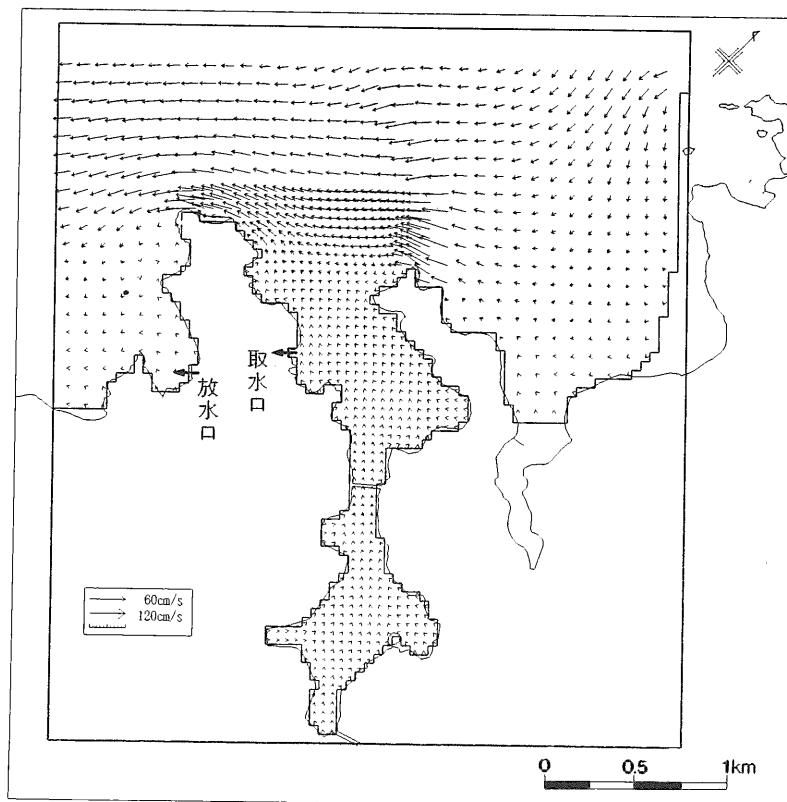
3) 海水交換率算定結果

前述の流況予測結果に基づいて、各境界面に投入したマーカーを1潮汐周期間追跡した。なお、1潮汐周期をマーカー追跡開始時の干潮3時間後から次の干潮後3時間までとした。追跡開始後10分間隔ごとに出力した結果のなかから、3, 6, 9, 12時間後におけるマーカーの位置を結んで推定した水塊の移動範囲を第17図に示した。

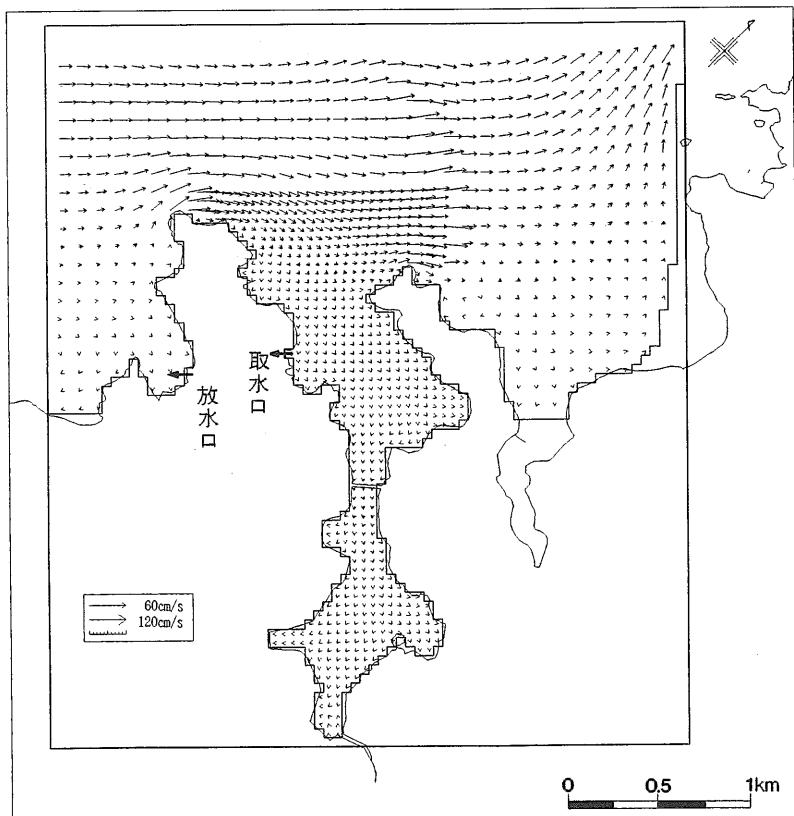
上げ潮最強時投入から3時間後(第17図-①)のほぼ満潮時までに、境界面B₁に投入



第14図 潮流楕円による予測値と実測値の比較
(図中の数字は名護屋港の高潮時を0とした潮時)



第15図 大潮期満潮3時間後における予測流速ベクトル



第16図 大潮期干潮3時間後における予測流速ベクトル

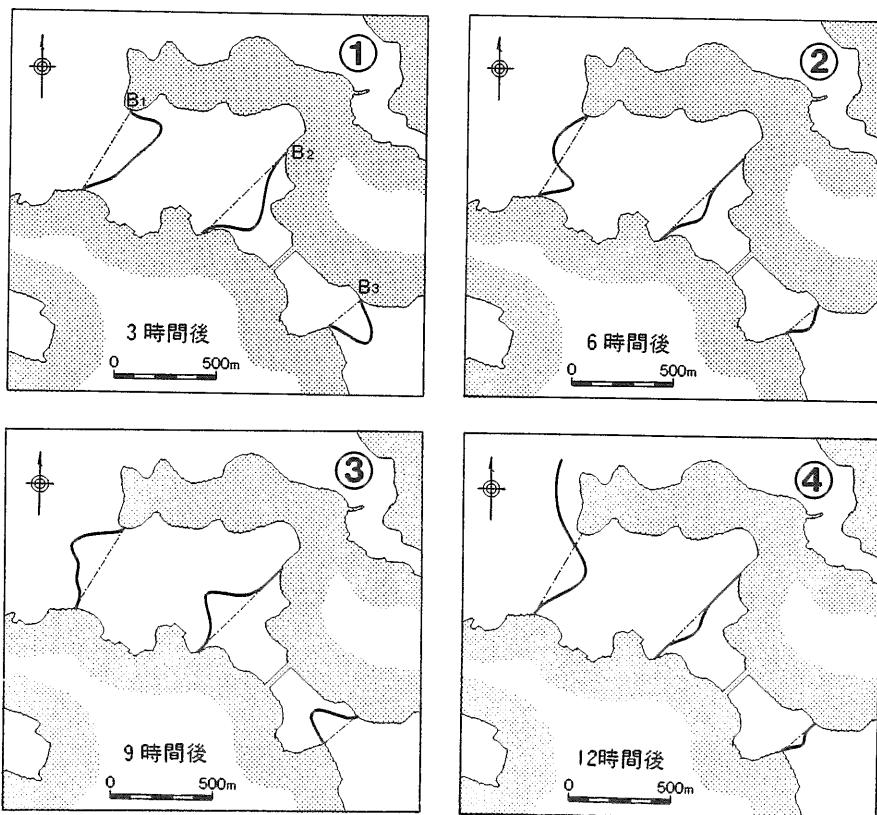
たマーカーは北東方向に偏向しながらボックス1内に流入した。また、境界面B₂, B₃に投入したマーカーはいずれも湾の長軸方向に流入した。

下げ潮最強時に当たる投入6時間後(第17図-②), 境界面B₁の北側に投入したマーカーは外海側に流出したが、南側の一部のマーカーはボックス1内に残留した。境界面B₂, B₃に投入したものは、投入3時間後の位置から各境界面にかなり接近する位置まで流出する方向の動きを示したが、境界面を越えて隣接のボックス内に流入するまでには至らなかった。

投入9時間後(第17図-③), ほぼ干潮時に当たっており、各境界面投入マーカーはいずれも外海方向に移動して、3時間後のほぼ満潮時における位置(第17図-①)とは各境界面に対して概ね対称的な位置に達した。

投入12時間後(第17図-④), 各境界面に投入したマーカーは、投入9時間後からの上げ潮によって再び湾内に流入する動きを示したが、境界面B₁の北側に投入したマーカーの一部は外海の上げ潮に乗って北に流出し、湾内には戻らなかった。

マーカーの移動位置から推定した各ボックス内への流入海水の最大範囲と残留範囲を第18図に示した。ただし、第18図に示した最大流入範囲は、上述の投入後3時間(ほぼ満潮時)における結果と概ね一致するが、各境界面付近の流況特性によってマーカーの動きがそれぞれ異なるため、全く同じにはならなかった。すなわち、最大流入範囲はマーカー投入後、境界面B₁では2時間40分から4時間30分の間に、境界面B₂, B₃では3時間10~20分の間に形成された。一方、残留範囲は各境界面とも、投入12時間後におけるマーカーの位置で決定された。

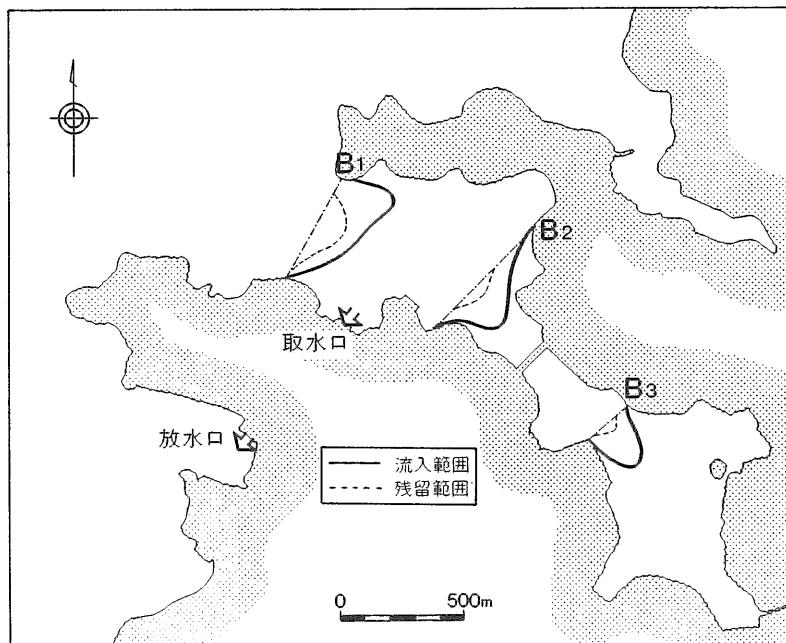


第17図 マーカーの移動位置から推定した水塊の移動範囲

第18図に示した各範囲内の全海水容積をそれぞれ(8)式中の V_{in} , V_{res} とし、両者の値を用いて海水交換率を算定した。各ボックスにおける V_{in} , V_{res} および各境界面の海水交換率を第7表に示した。湾口部の境界面 B_1 では0.45, 湾中央部の境界面 B_2 では0.19, 湾奥部の境界面 B_3 では0.15となった。

第7表 数値予測から算定した各ボックス内流入海水最大容積、残留容積と各境界面の平均海水交換率

水 域 区 画	V_{in} ($\times 10^6 m^3$)	V_{res} ($\times 10^5 m^3$)	E
ボックス 1	1.02	4.55	0.45 (E_1)
ボックス 2	0.62	1.19	0.19 (E_2)
ボックス 3	0.35	0.52	0.15 (E_3)



第18図 マーカーの移動位置から推定した各ボックス内流入海水の最大範囲と残留範囲

5. ボックスモデルと数値予測によって得られた海水交換率の比較

ボックスモデルから得られた海水交換率は、境界面B₁では数値予測による算定値の約1.2倍(ボックスモデル：0.55, 数値予測：0.45), 境界面B₃では数値予測による算定値の約0.9倍(それぞれ, 0.13, 0.15)となって、両者の値はほぼ一致した。一方、境界面B₂では数値予測による算定値の約1.7倍(それぞれ, 0.32, 0.19)となり、ボックスモデルによる算定値の方が多少大きくなつた。

両者の値が多少相違したことに関しては、算定方法が異なったこと、ボックスモデルによる物質収支計算には未補正の非保存系物質を用いたことなどのいろいろな原因が考えられるが、特に境界面B₂における相違の主たる原因については以下のように推察される。ボックスモデルによる算定値のうち、1986年の観測データを用いた結果(0.26)は、境界面B₂の東隣に防波堤が構築されていない状態におけるものであり、1989年のデータに基づく結果(0.40, 0.31)は構築後におけるものである。したがつて、数値予測による値(0.19)に対しては、前者の値(0.26)が対応するが、平均値で比較したため多少差が大きくなつた。また、外海と接しているため他のボックスよりも海水の動きが比較的活発なボックス1の水域と、これよりも湾内側にあって、海水の動きが微弱である水路状のボックス2とが連結される所に境界面が設定されたことにより、境界面付近の両ボックス内では、急な断面変化に起因して流況・濁度変化の相似性が弱くなつたことも原因の1つと考えられる。

しかしながら、海水交換率の値は、前述のように算定方法等によってかなり相違する場合のあることを考慮すれば、ここで用いたボックスモデルと数値予測から得られた値の相違は、第2表の既往成果と比較しても容認できる程度の差と見なすことができよう。したがつて、後述の発電所取放水に伴う当湾内の海水交換促進効果の検討のなかでは、ボックスモデルによって得られた海水交換率の値を用いることにする。

V. 海水交換促進効果の検討

1. 湾内水に対する取水量の規模

まず、湾内外へ流入出する海水交流量に対して、発電所の取水量がどの程度の規模に相当するかを推定した。なお、計算に必要な基本的数量を中潮期を対象に、以下のよう

に設定した。

(a) 取水量(Q_i)

$$Q_i = 37.0 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1基当たり)}$$

(b) 潮位差(T_R)

$$T_R = 1.1 \text{ m}$$

(c) B_1 断面から内側の平均水位時における湾の水面積(S_a)

$$S_a = 1.09 \times 10^6 \text{ m}^2$$

(d) B_1 断面から内側における平均水面下の容積(V_a)

$$V_a = 1.05 \times 10^7 \text{ m}^3$$

1) 海水交流量に対する取水量の比率(r)

中潮期の海水交流量($S_a \times T_R$),

$$1.09 \times 10^6 \times 1.1 \approx 1.20 \times 10^6 \text{ m}^3$$

となり、同時間内の発電所取水量(Q_i)は,

$$Q_i = 7.99 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1基稼動時)}$$

$$Q_{1+2} = 1.60 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (2基稼動時)}$$

であることから、両者の比率は以下のようになる。

$$r_1 = \frac{7.99 \times 10^5 \text{ m}^3}{1.20 \times 10^6 \text{ m}^3} = \frac{1}{1.5} \quad (\text{1基稼動時})$$

$$r_{1+2} = \frac{1.60 \times 10^6 \text{ m}^3}{1.20 \times 10^6 \text{ m}^3} = \frac{1}{0.75} \quad (\text{2基稼動時})$$

2) 湾内水量と取水量の比率(δ)

B_1 断面から内側の水域における平均水面下の海水量と、1日間の発電所取水量との比率は、1基、2基稼動時に対してそれぞれ以下のようなになる。

$$\delta_1 = \frac{1.05 \times 10^7 \text{ m}^3}{3.20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}} \approx 3.3 \text{ 日} \quad (\text{1基稼動時})$$

$$\delta_{1+2} = \frac{1.05 \times 10^7 \text{ m}^3}{6.39 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}} \approx 1.6 \text{ 日} \quad (\text{2基稼動時})$$

以上の計算結果に基づくと、発電所の取水規模は、当海域の中潮期を対象にした時の海水交流量に対して、1基稼動時には約0.7倍、同様に、2基稼動時には約1.3倍に相当する。また、湾内海水のみが取水されたとすれば、1基稼動時には約3.3日間で、2基稼動時には約1.6日間で平均水面下の全水量が入れ換わることになる。

2. 湾内水の入れ換わり速度

ボックスモデルから算定した海水交換率を(2)～(4)式に適用し、以下のような条件に対して、各ボックス内の濃度変化を予測し、その予測結果から、発電所が稼動していない自然状態、および発電所稼動中のそれぞれの場合における湾内水の入れ換わり速度を推定した。なお、物質濃度の時間変化を追跡予測するに際して、大潮期の条件(潮位差)を数10日間にわたって適用することは現実性に欠ける。したがって、海水交換率には大潮期に推定した前述の値を使用し、潮位変化には海域の平均的な中潮期の値を使用して、30日間の濃度変化を予測した。

(a) 海水交換率(E)	0.55, 0.32, 0.13(境界面 $B_1 \sim B_3$)
(b) 潮位差(T_R)	1.1m(中潮期の潮位差)
(c) 河川流量(Q_R)	0.0m³/s
(d) 湾内水の初期濃度(C_b)	10.0mg/l(仮想の保存系物質濃度)
(e) 外海水の濃度(C_0)	2.0mg/l(仮想の保存系物質濃度)
(f) 取水量(Q_i)	37.0m³/s(1基稼動時) 74.0m³/s(2基稼動時)

1) 湾内物質濃度の経日変化

各ボックスおよび湾全域について予測した平均濃度の経日変化を第8～11表に示した。ボックス1(第8表)では取水による海水交換促進効果が顕著である。取水が行われていない自然状態での物質濃度は、5日後に4.8mg/l、10日後には3.4mg/lまで低下するのに対して、取水時には5日後に、2.5mg/l(1基稼動)、2.2mg/l(2基稼動)、10日後には2.2mg/l(1基稼動)、2.1mg/l(2基稼動)となって、ボックス1の濃度は外海水の濃度(2.0mg/l)とほとんど同程度まで低下する。

湾奥部に向かうほど取水の効果は小さくなり、ボックス2(第9表)の10日後における濃度は、5.8mg/l(自然状態)、4.4mg/l(1基稼動)、4.2mg/l(2基稼動)、30日後で

は、 3.5mg/l (自然状態), 3.0mg/l (1基稼動), 3.0mg/l (2基稼動)となる。1ヶ月後のボックス2の濃度は、外海水濃度より約 1.0mg/l 高い状態にある。

同様に、ボックス3(第10表)では10日後, 9.3mg/l (自然状態), 8.9mg/l (1基稼動), 8.8mg/l (2基稼動), 30日後には 6.5mg/l (自然状態), 5.9mg/l (1基稼動), 5.8mg/l (2基稼動)となる。1ヶ月後の濃度は外海水濃度より約 4.0mg/l 高い。

湾全体の平均(第11表)では、10日後, 5.6mg/l (自然状態), 4.6mg/l (1基稼動), 4.5mg/l (2基稼動), 30日後には 3.8mg/l (自然状態), 3.4mg/l (1基稼動), 3.3mg/l (2基稼動)となる。

第8表 ボックス1における経過日数と平均物質濃度 (単位: mg/l)

経過日数	1	2	3	5	10	15	20	30
自然状態	8.17	6.88	5.95	4.75	3.41	2.88	2.63	2.41
1基稼動	4.75	3.24	2.75	2.46	2.24	2.17	2.13	2.09
2基稼動	2.81	2.40	2.32	2.23	2.13	2.09	2.07	2.05

第9表 ボックス2における経過日数と平均物質濃度 (単位: mg/l)

経過日数	1	2	3	5	10	15	20	30
自然状態	9.90	9.52	9.01	7.92	5.84	4.72	4.11	3.46
1基稼動	9.66	8.68	7.71	6.24	4.44	3.76	3.42	3.03
2基稼動	9.42	8.21	7.22	5.84	4.23	3.63	3.33	2.97

第10表 ボックス3における経過日数と平均物質濃度 (単位: mg/l)

経過日数	1	2	3	5	10	15	20	30
自然状態	10.00	9.99	9.97	9.87	9.32	8.60	7.84	6.50
1基稼動	10.00	9.98	9.92	9.70	8.90	8.04	7.24	5.92
2基稼動	10.00	9.97	9.89	9.64	8.80	7.92	7.12	5.82

第11表 湾全体における経過日数と平均物質濃度 (単位: mg/l)

経過日数	1	2	3	5	10	15	20	30
自然状態	9.06	8.34	7.76	6.90	5.63	4.92	4.44	3.81
1基稼動	7.30	6.33	5.87	5.34	4.62	4.19	3.87	3.39
2基稼動	6.29	5.81	5.54	5.13	4.49	4.09	3.79	3.33

2) 湾内水の入れ換わり率

各ボックス内の海水の入れ換わり率は、各ボックス内の濃度変化率に等しいものと見なし、(13)式から求めた値の経日変化を第19~22図に示した。

$$\text{濃度変化率} = \left[1 - \frac{C_i - C_o}{C_b - C_o} \right] \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

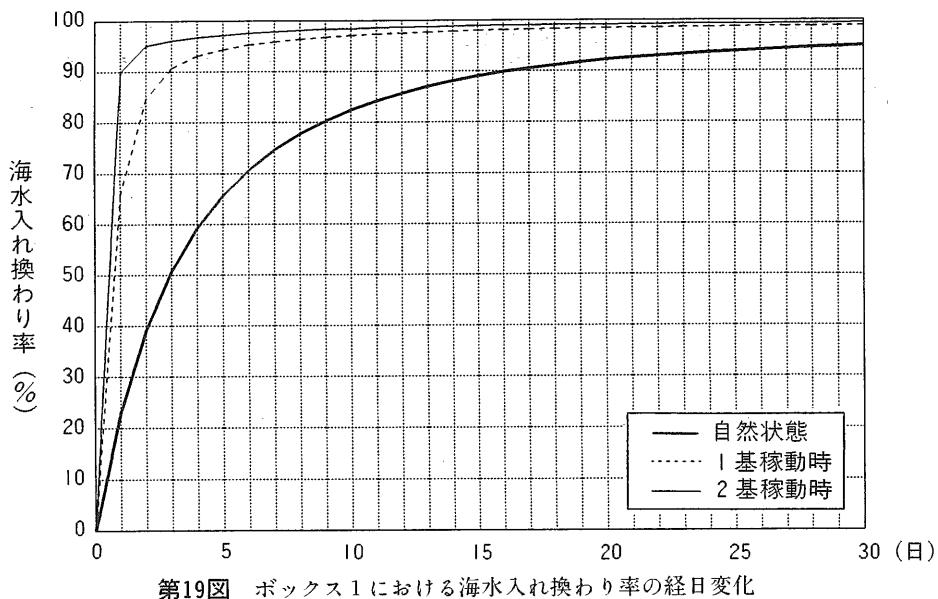
C_i : i日後の物質濃度

ボックス1(第19図)の海水が90%入れ換わるのに要する日数は、取水が行われていない場合は約17日間、1基稼動時には約3日間、2基稼動時には約1日間である。

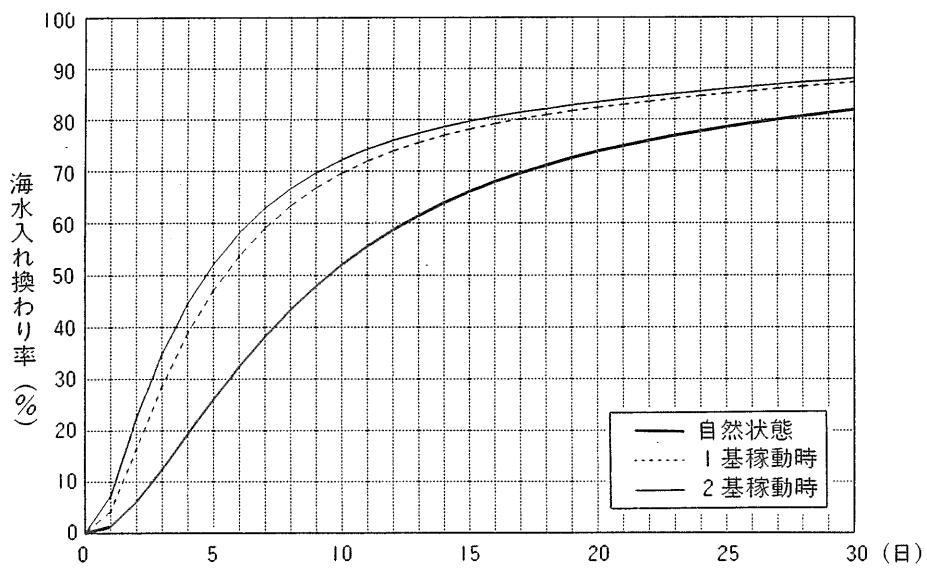
ボックス2(第20図)の海水が50%入れ換わるのには、取水が行われていない時は約10日間、1基稼動時には約6日間、2基稼動時には約5日間程度を要し、ボックス1に比べると取水効果はかなり弱くなる。

ボックス3(第21図)になると取水効果はさらに弱くなり、50%の海水交換に要する日数は、取水が行われていない場合には30日以上、1基稼動時には約30日間、2基稼動時には約29日間となる。

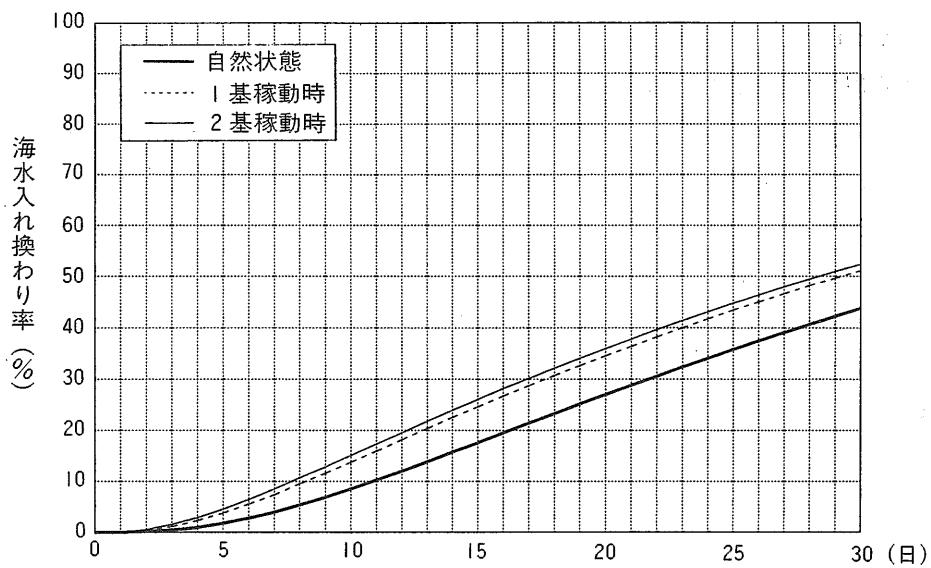
一方、湾全体(第22図)を平均的にみた場合について、50%の海水が入れ換わるためには、それぞれ、8日間、3日間、2日間を要し、70%の海水交換に対しては、それぞれ20日間、12日間、11日間が必要となる。



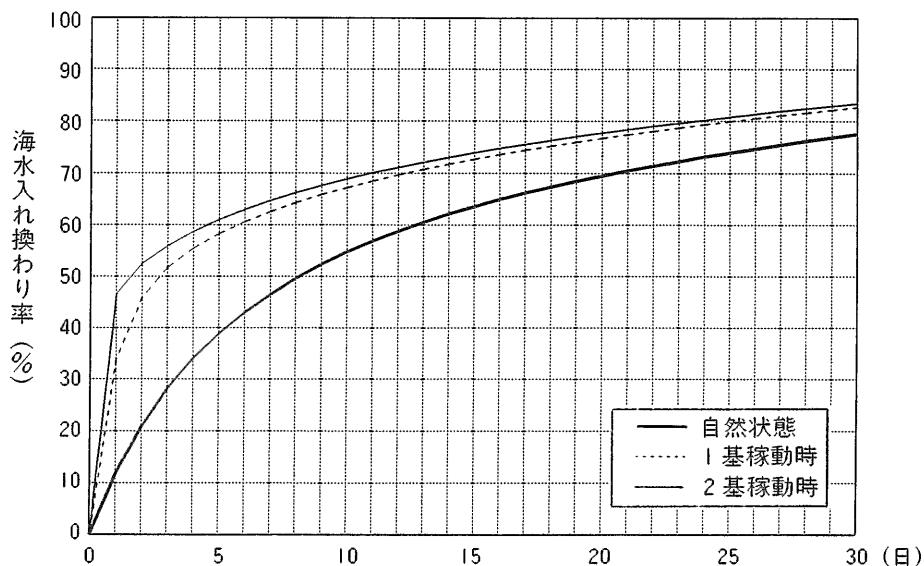
第19図 ボックス1における海水入れ換わり率の経日変化



第20図 ボックス2における海水入れ換わり率の経日変化



第21図 ボックス3における海水入れ換わり率の経日変化



第22図 湾全体の海水入れ換わり率の経日変化

3. まとめ

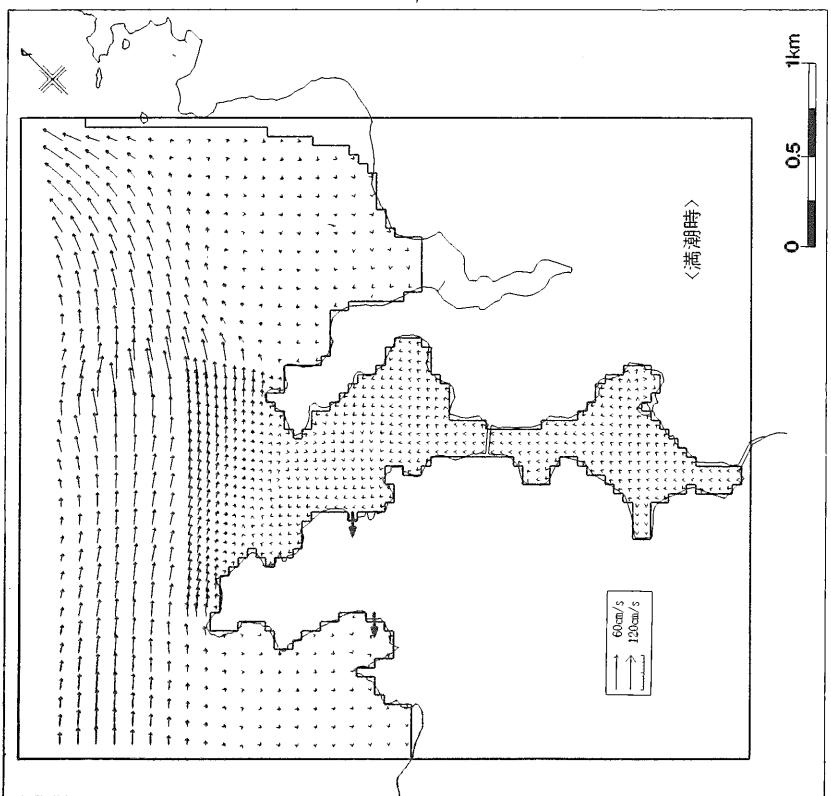
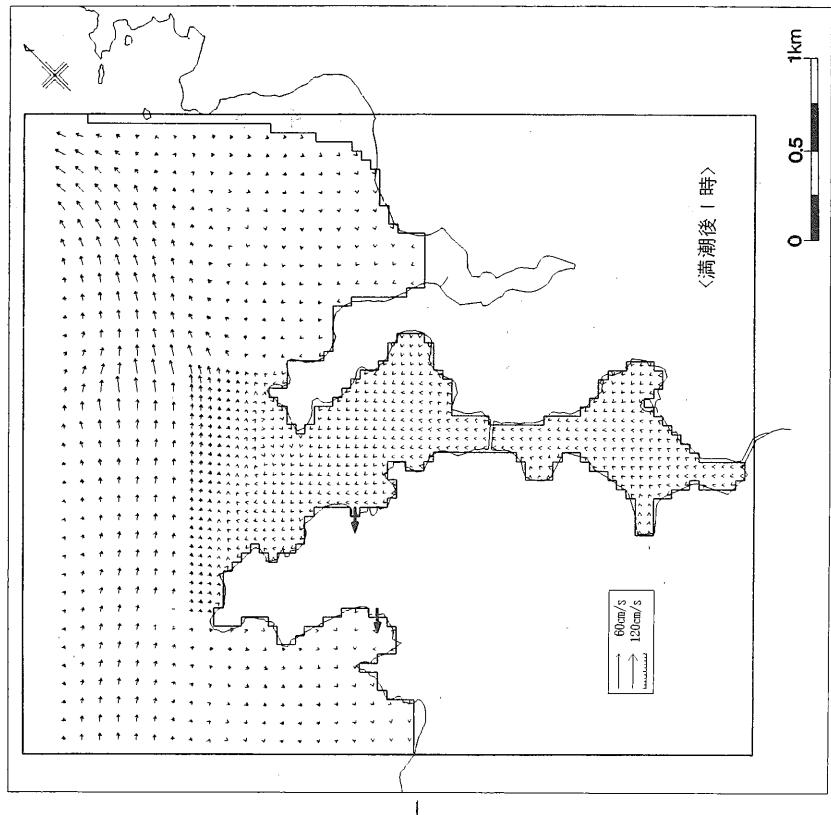
沿岸水域に面して建設されている汽力発電所では、多量の海水が冷却水として発電所構内の一端から取り込まれ、他端から放出されており、この輸送海水を水質改善に効果的に利用することが考えられる。通常、発電所の取放水口は、放出海水の再循環を防ぐため、比較的離れた位置に設けられている場合が多く、とりわけ小湾に面している発電所では、湾内から取水し、湾外に放出している例もある。このような取放水形式が採用されている所では、取水によって湾外海水が湾内に導入され、放水によって湾内海水が湾外へ排出されている。取放水量は発電所の出力規模により、また、取放水海水の移動経路は取放水口の位置、周辺の海岸地形等の諸条件によって異なるが、こうした人的行為による海水輸送が、特に小湾の海水交換促進には大きく寄与することが期待される。ただし、冷却用海水の取放水形式は、発電所周辺の様々な条件を考慮して決定されるため、場所によっては、海岸地形や前面海域の流況特性等から、必ずしもこの冷却用海水が効果的に利用できるとは限らない。

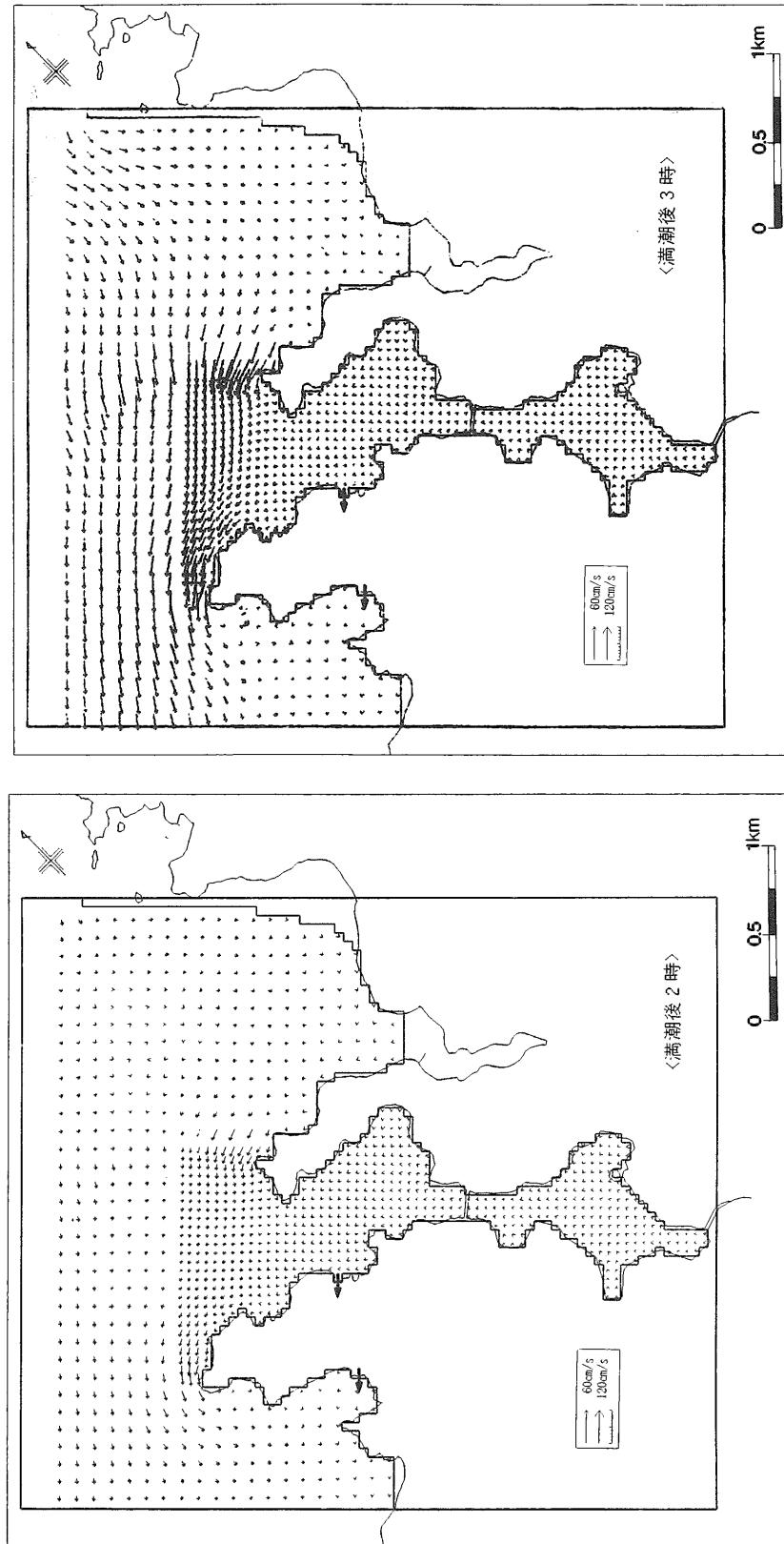
本報では、海岸地形に対して発電所の取放水口が海水交換促進の視点から効果的な位置関係にある小湾の海水交換率を算定し、この算定値を用いて、発電所が稼働していない時と稼働中のそれぞれの場合における海水交換促進効果について検討した。取水口を包含する区画水域(平均水面下の容積： $5.25 \times 10^6 \text{m}^3$ 、水面積： $4.60 \times 10^5 \text{m}^2$)の海水交換促進には極めて効果のあることが確認された。また、取水口から遠くなるほど海水交換に寄与する度合いは小さくなつたが、湾全体(平均水面の容積： $1.05 \times 10^7 \text{m}^3$ 、水面積： $1.09 \times 10^6 \text{m}^2$)に対してみた場合にもかなりの促進効果が示された。

なお、調査海域の湾奥部では小割網によるタイ養殖が行われており、養魚場内への自然の酸素供給に対して、こうした海水交換の促進による付加的な酸素供給が、当養魚場の生産向上に効果をもたらしているものと推察される。一般に、養殖密度は養魚場内の海水交換に依存するところが大きく、瀬戸内海の代表的な養魚場はいずれもこの関係にあることが、橋高(1960)などに示されている。また、筆者らの1人(未発表)が発電所前面海域利用構想の一環として、復水器冷却水を利用した魚類養殖について検討した結果では、冷却水による移流としての酸素供給量が極めて多いことから、魚の酸素消費量とのバランスでみると限り高密度養殖の可能性が考えられる。これまで主として温排水の温度効果を利用することが考えられてきたが、こうした取放水による海水の動きを有効に利用することについても検討していく必要があろう。

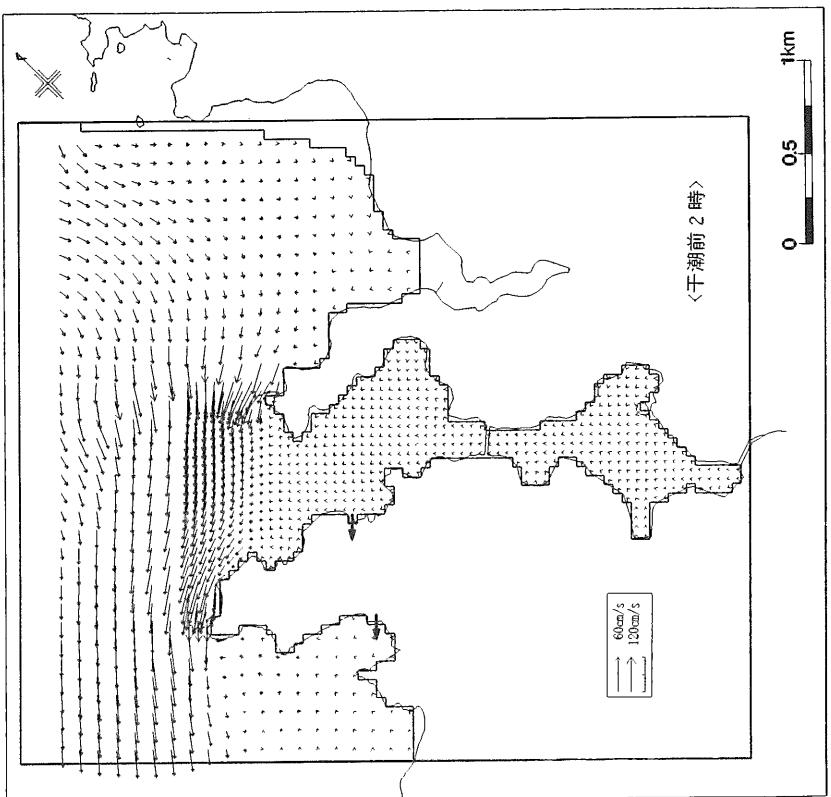
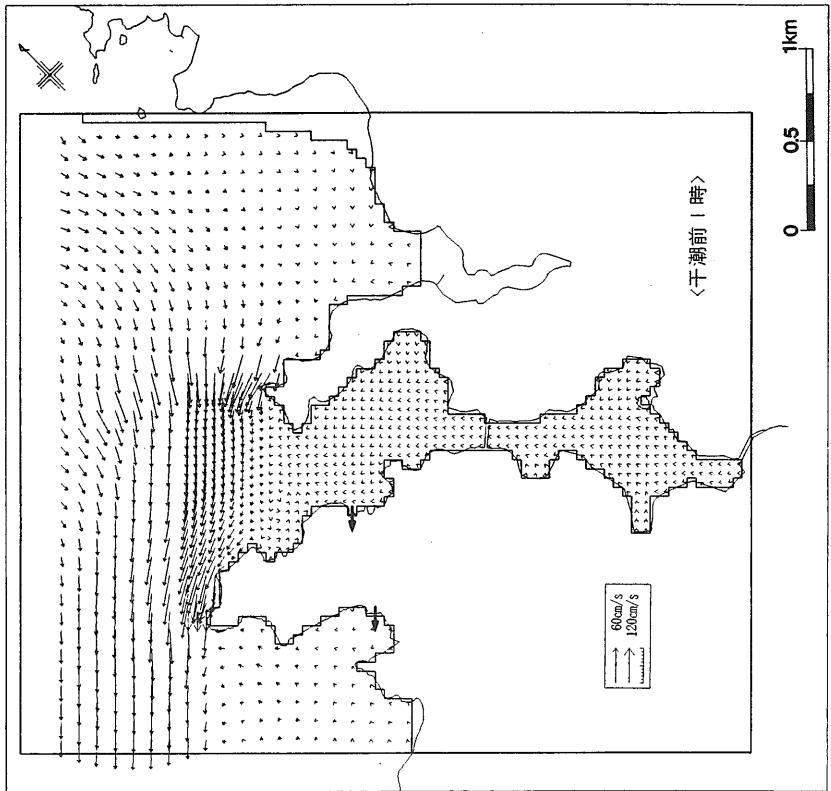
引　用　文　献

- 服部孝之・高橋 正(1988). 閉鎖性内湾の数理モデルによる海水交換予測手法の開発. 中部電力研究資料, (80) : 1-9.
- 速水頌一郎・福尾義昭・依田大介(1956). 明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について. 第3回海岸工学講演会論文集, 49-53.
- 堀江 毅・村上和男・亀山 豊・入尾野幸雄(1977). 水理模型実験による海水交換率の算定. 第24回海岸工学講演会論文集, 491-495.
- Imasato, N., Awaji, T. and Kunishi, H.(1980). Tidal exchange through Naruto, Akashi and Kitan Straits. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **26** : 151-162.
- 今里哲久・淡路敏之(1982). 明石・鳴門海峡を通しての海水交換の数値実験. 沿岸海洋研究ノート, **20**(1) : 19-32.
- 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. 電力中央研究所報告, (382017) : 1-45.
- 海上保安庁水路部(1983). 日本沿岸潮汐調和定数表. 財団法人日本水路協会, 172pp.
- 柏井 誠(1977). 潮汐による海水交換についてーその1 海水交換の概念と海水交換率. 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 96-97.
- 柏井 誠(1984). 海水交換概念と海水交換率. 日本海洋学会誌, **21**(2) : 169-182.
- 川村雅彦・清水浩輔・小山治行・中島秀夫・前川 力(1975). 豊後水道の海況と拡散係数. 海と空, **50** : 43-58.
- 橘高二郎(1960). 鹹水養魚場の水の交流について. 水産養殖, **26**(3) : 230-238.
- 松田義弘(1982a). Tidal trapping による湾内外水の交換機構の一例. 日本海洋学会春季大会講演要旨集, 119-120.
- 松田義弘(1982b). 潮汐交換率の定義について. 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 96-97.
- 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅(1974). 海水交流に関する現地観測. 第21回海岸工学講演会論集, 291-296.
- 松村皐月・松川康夫(1981). 三河湾・環境と漁業. 東海区水産研究所業績C集“さかな”, (26) : 31-44.
- 宮池克人・和田 明・角湯正剛・柳瀬辰彦・宮本晋一(1980). 発電所冷却水による内湾の水質浄化. 第10回環境問題シンポジウム, 21-26.
- 中田英昭・平野敏行(1976). 瀬戸水域における海水交流・交換について. 水産海洋研究会報, (29) : 7-14.
- 中村 充・今村弘二・稻垣友三郎監修(1988). 沿岸漁場整備開発事業構造物設計計算例集. 社団法人全国沿岸漁業振興開発協会, 398pp.
- Parker, D. S., Norris, D. P. and Nelson, A. W. (1972). Tidal exchange at Golden Gate. *Proc. of ASCE.*, **98**(SA2) : 305-323.
- 清水浩輔・川村雅彦(1981). 明石海峡を通じての海水交換. 海と空, **57**(1) : 41-56.
- 宇野木早苗(1980). 海水交換とその素過程について. 沿岸海洋研究ノート, **17**(2) : 89-98.

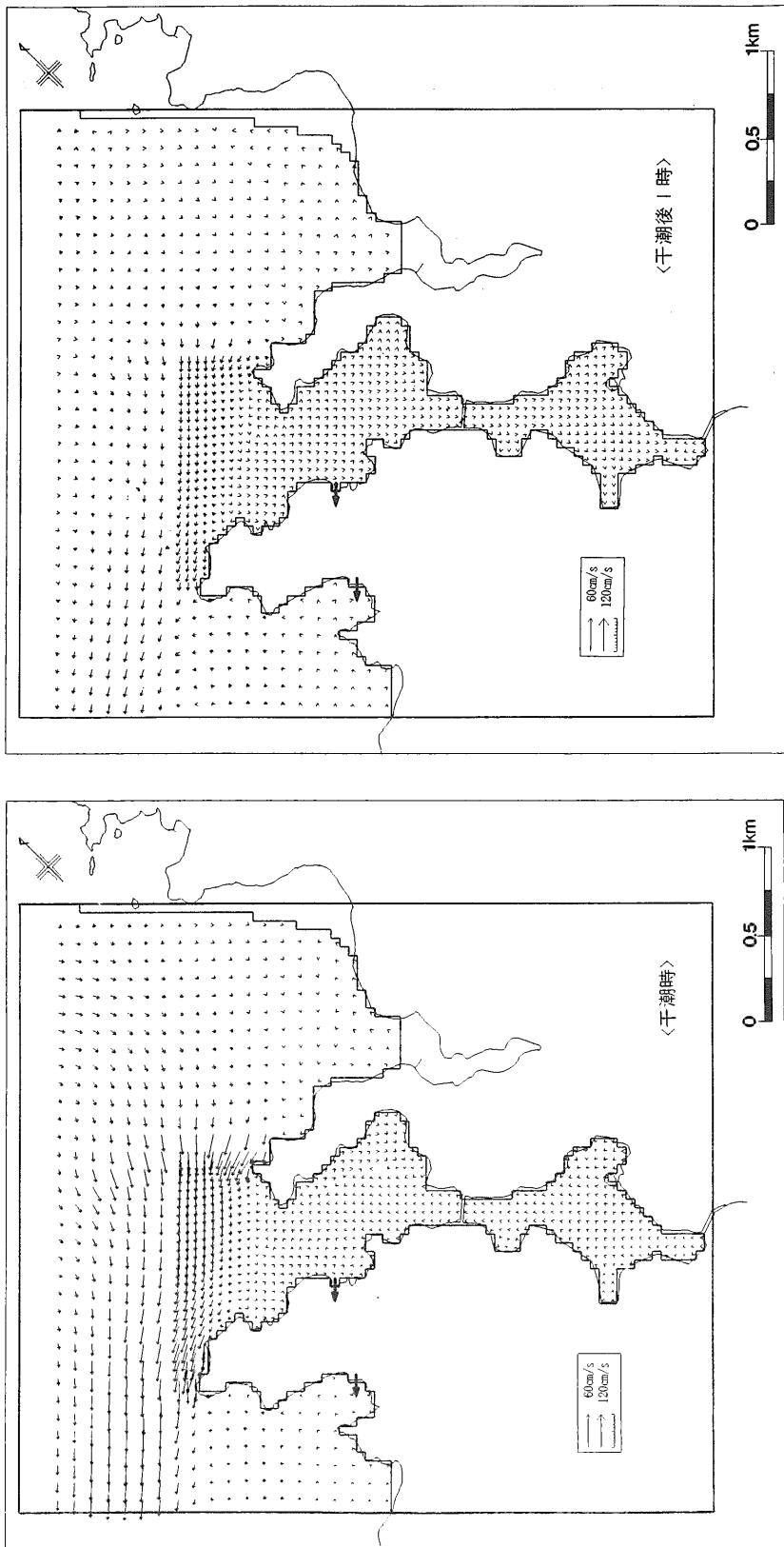


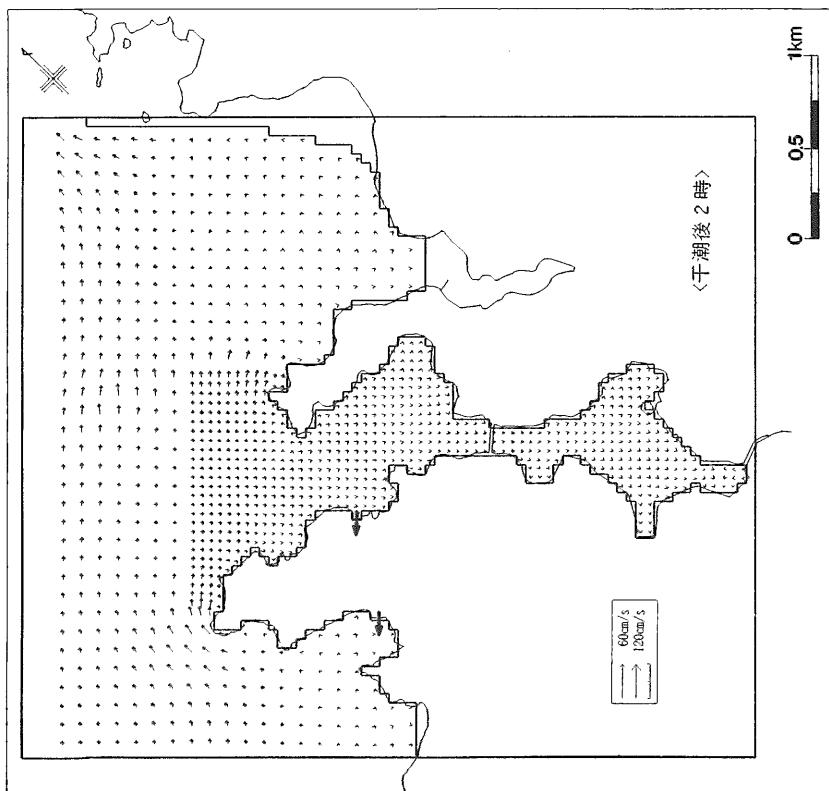
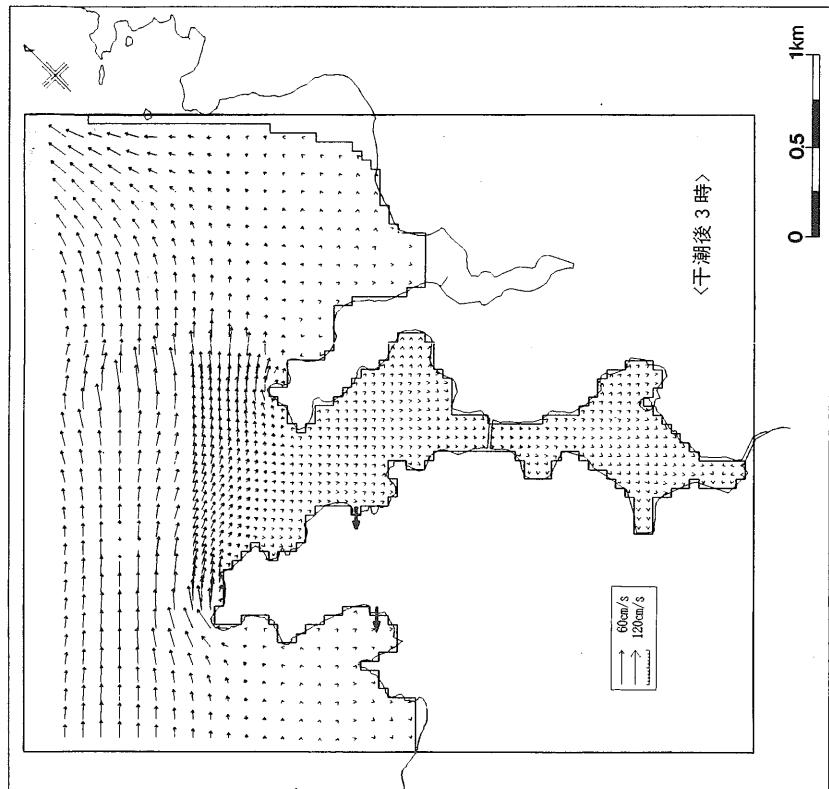


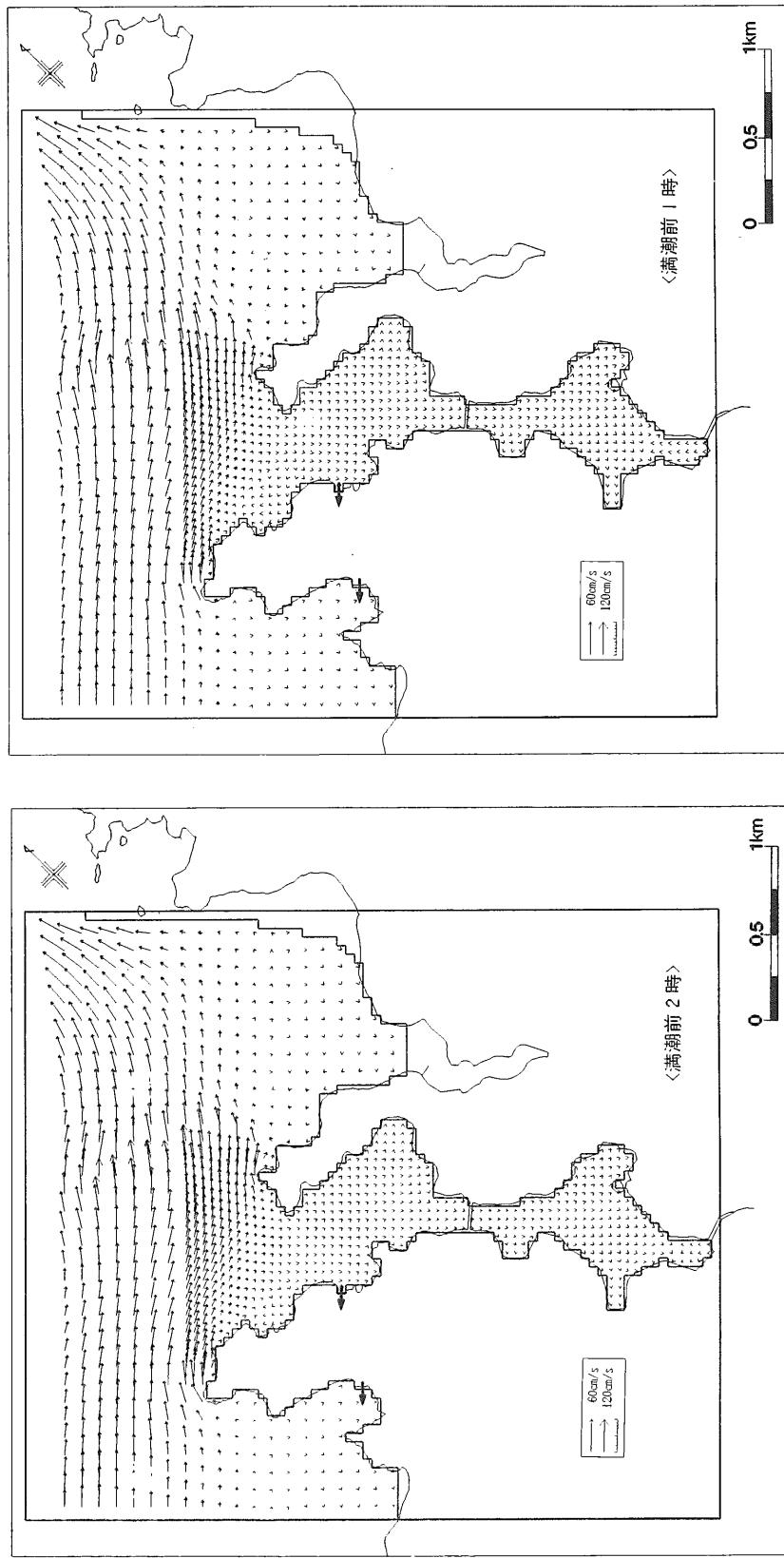
付図 1 大潮期における調査海域の予測流速ベクトル(満潮時～満潮後3時)



付図 2 大潮期における調査海域の予測流速ベクトル(干潮前 2 時～干潮後 1 時)







付図 3 大潮期における調査海域の予測流速ベクトル(干潮後2時～満潮前1時)

