

久美浜湾における潮流の流動特性に関する研究 (1)

今本 博健・石垣 泰輔・馬場 康之・秋山 真吾

A STUDY ON TIDAL CURRENTS IN KUMIHAMA BAY (1)

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI, *Yasuyuki* BABA and *Shingo* AKIYAMA

Synopsis

Kumihama Bay has characteristics of both brackish lake and semi-enclosed basin. Water quality in the bay has become worse in recent years.

In order to clarify flow feature in the bay, hydraulic model test and field observations were performed. For the model test, a model of the bay, with horizontal and vertical scales of 1 / 1000 and 1 / 200 respectively, was constructed. Tracer method was used to visualize flow in the model. The observations were undertaken in Aug. and Nov. in 1994. Main results are as follows:

- 1) The existence of circulating flow in the region near the channel is identified from the experimental results;
- 2) Fundamental flow characteristics in an area dominated by tidal currents have similarities between experimental data and field data.

1. はじめに

久美浜湾は京都府北西端、兵庫県との県境に位置する周囲約 26 km、水面積約 7 km²、最大水深 23 m、平均水深約 10 m の内湾である。リアス式の海湾の入り口を砂嘴によって閉じられた形をしており、日本海と幅 30 m、長さ 700 m の一本の水道でつながっている。また久美浜湾は山陰海岸国立公園内にあり風光明媚なことでも知られており、かつては湾内で海水浴ができるほど水質は良好であった。

しかし昭和 40 年代以降急速に水質汚濁が進み、現在では湾内遊泳禁止となっている。水質悪化の直接の原因として、人口の増加およびそれに伴う産業活動の増大による汚濁負荷の絶対量の増加が挙げられる。また間接的な原因として、外海と通じる水道が狭いため、海水交換が少なく閉鎖性の強いことが挙げられる。加えて湾奥部からの淡水の流入によって湾内は淡水と塩水の共存する汽水湖の性質を有し、通常の淡水湖では見られない流動特性を持つことが知られている^{1)~3)}。

本報告は久美浜湾における潮流の基本的な流動特性を検討するために水理模型実験を行い、現地での水深 1, 3, 5, 7, 9 m に相当する 5 層における挙動について検討した。また得られた結果の妥当性を検討するため、現地における漂流板の追跡結果との比較を行った。

2. 実験の概要

2.1 久美浜湾水理模型の概要

水理模型実験を行うにあたり模型縮尺の選定を行う必要があるが、本報告ではフルードの相似則に基づ

き以下の要領で縮尺を決定した。水平縮尺は実験施設の広さおよび実験対象領域の広さから 1 / 1000 とした。一般的には、次に鉛直縮尺を定め、それと水平縮尺から算定される粗度縮尺を満たすように粗度調整が行われる。しかしながら粗度調整に伴う人工粗度等の設置によって流れが乱される場合があるため、できる限り粗度調整は行わないことが望ましい。そこで本報告では先に粗度縮尺を模型と現地の粗度係数の比として定め、水平縮尺と粗度縮尺から鉛直縮尺を算定する方法を用いた。そして計測精度の問題なども考慮して最終的に鉛直縮尺を 1 / 200 に設定した。

Fig. 1 に本報告で使用した久美浜湾の水理模型および漂流板を示す。また模型の縮尺、および現地との諸量の対応を Table 1 に示す。模型は久美浜湾および日本海の一部を含む海域を再現した水平縮尺 1 / 1000、鉛直縮尺 1 / 200 の歪み模型である。外壁はコンクリートブロックできており、海底はモルタル刷毛仕上げになっている。本模型では日本海側にプランジャー型の起潮機を設置し、正弦波の潮汐を与えて現地での潮差を再現した。模型内の潮差を調整するための現地データとしては、久美浜湾には検潮所が存在しないため久美浜湾から最も近い兵庫県豊岡市の津居山港検潮所における海上保安庁の潮汐調和定数表⁴⁾を参照した。本報告では大潮を実験条件とし、津居山港検潮所における 2 (M₂+S₂) の値 (= 15.6 cm) を久美浜湾における大潮の潮差として、模型内の潮差が所定の値となるように調整を行った。調整の結果、Fig. 2 に示すように模型においてほぼ現地での潮差が再現された。

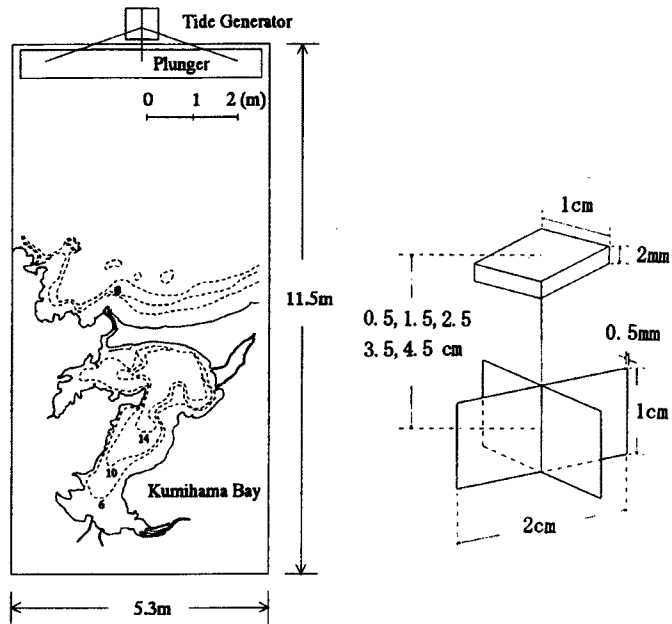


Fig. 1. Kumihama Bay model and float

Table 1. Scales of Kumihama Bay model

Factor	Scale	Prototype	Model
Horizontal Distance x_r	1 / 1000	1000 m	100 cm
Vertical Distance y_r	1 / 200	1 m	0.5 cm
Time $t_r = x_r \cdot y_r^{-1/2}$	1 / 70.71	12 h 25 m	632 sec
Velocity $u_r = y_r^{1/2}$	1 / 14.1421	1 m/sec	7.07 cm/sec
Roughness $n_r = x_r^{-1/2} \cdot y_r^{2/3}$	1 / 1.08	0.023	0.0213
Discharge $Q_r = x_r \cdot y_r^{3/2}$	1 / 2.83 × 10 ⁶	1000 m ³ /sec	357 cc/sec

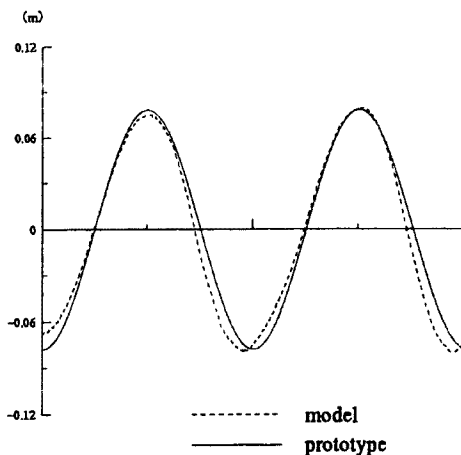


Fig. 2. Tidal range in the model compared with the field data

実験で使用した漂流板は、浮き（1 cm 角，2 mm 厚の発泡スチロール製），と抵抗板（2 × 1 cm 角，0.5 mm 厚のプラスチック板を十字に組み合わせたもの）を径 0.6 mm の釣り糸でつなぎ合わせたもので，抵抗板の中心が現地の水深 1，3，5，7，9 m に相当する 5 種類製作した。

2.2 実験および解析方法

流れの測定方法としては，固定点において流体の流速を測定するオイラー的方法と，個々の粒子を追跡しその時間変化を調べるラグランジュ的方法がある。オイラー的方法は，固定点における流速を精度よく測定することが可能である反面，本実験のように広範囲かつ非定常な流速場を対象とする場合には測定が非常に困難で，かなりの時間と労力を要する。一方，ラグランジュ的方法は個々の粒子に着目する手法で流動場全体を一度に捉えることができるが，対象とする流動場を精度良く測定するには数多くの粒子の移動を正確に捉えることが要求される。

本報告では久美浜湾全域における流動を捉えるために，後者のラグランジュ的方法による流れの可視化手法を用いて湾内の潮流の流動を捉えた。実験では，Fig. 1 に示した漂流板を用い，Fig. 3 に示す水道部の流速を基準とした 4 潮時，すなわち南流および北流最強時（Smax, Nmax）とその間の憩流時（S→N, N→S）における流動軌跡をスチールカメラに写し込む方法によって可視化を行った。ただし湾内の流速は場所的に大きな差があるために，写真の撮影は 4 種類の開放時間で行った。このようにして撮影した写真（Photo 1）からデジタイザーを用いて漂流板の移動距離を数値化し，流速を算出した。次に数枚分の写真から得られた流速データを 10 cm（現地 100 m）間隔の格子点における流速ベクトルに変換し（Fig. 4），等流速線，等渦度線を求めた。なお渦度は正が反時計回りの回転，負が時計回りの回転を表わす。

また漂流板の流動軌跡を水道部での南流開始時から次の南流開始時までの 1 周期間ビデオカメラを用いて追跡し，始点，終点の位置の差から残差成分を求め，潮汐残差流についても検討した。

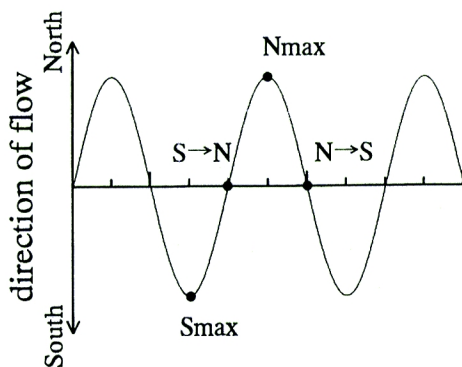


Fig. 3. Schematic tidal wave



Photo 1. Example photograph of flow visualization

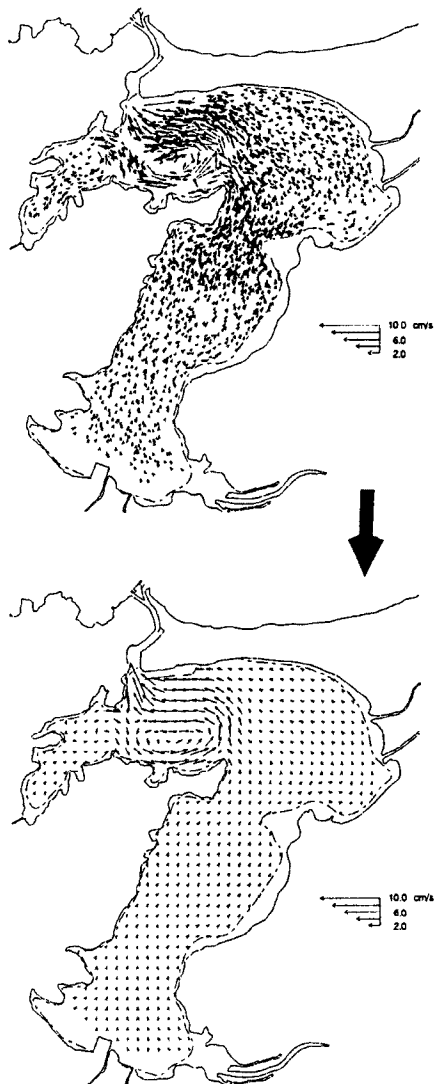


Fig. 4. Interpolation of measured velocity vectors to the node's data

なる。これは水道部の憩流時には湾内の流れも憩流となることを示すが、水道部付近には前の潮時と同様に反時計回りの渦が見られる。また南流最強時に比べ渦の規模が大きくなり、南流最強時と同様に渦の領域を渦度のプラスの領域と考えると、東西方向に約1,000 mの長軸半径を持つ楕円形となる。

水道部北流最強時（以下北流最強時とする）には、水道部を抜けて外海へ流出する流れが顕著となるが、依然として先の2つの潮時に確認された反時計回りの渦が見られる。渦の大きさは東西方向が700 m程度と南流憩流時と比して規模が小さくなり、南北方向が圧縮された形状となっている。流速の比較的大きな領域は南流最強時よりも拡大しているが、最大流速は大きく減少し、渦度の最大値も南流憩流時の半分以下となり渦は減衰過程にある。また渦の東側には、南流最強時と同様負の渦度を持つ領域が見られる。その他の領域での流速は1 cm/s以下と他の潮時と同様非常に小さく、流向は湾奥部から水道部方向である。

水道部北流から南流への憩流時（以下北流憩流時とする）には、南流憩流時と同様水道部付近以外に流れはほとんど見られない。反時計回りの渦は依然と存在しており、北流最強時よりも幾分規模を拡大して

3. 久美浜湾内の流動特性

本報告では大潮を対象として、現地での水深1, 3, 5, 7, 9 mに対応する5層についての可視化実験を行い、各層の主要4潮時における流動や残差流を捉えた。その結果、水深1 mすなわち表層部分での流動が最も大きく、水深3 mにおいても同様の傾向を示した。また水深5 m以深の深い層では流速はかなり減少し、表層と若干異なる様相が見られた。そこでまず表層における基本的な流動特性を示し、深い層については表層との相違点を述べる。

Fig. 5, 6は水深1 mにおける流速ベクトル、等流速線、および等渦度線である。なお、等流速線と等渦度線については南流および北流最強時の結果であり、流速等の値は現地換算値である。

水道部南流最強時（以下南流最強時とする）には、最大流速が20 cm/sを越える領域が水道部およびその出口付近に見られる。これは水道の幅が非常に狭いため、この流入によって反時計回りの大きな渦が形成される。等流速線図においても流速の大きな主流部はU字型を呈しており、渦の存在を表している。この渦の範囲を渦度のプラスの領域と考えると、東西方向に約700 mの長軸半径を持つ楕円形となる。渦の中心は、水道部出口のすぐ脇にあり、渦度が最大となる地点とほぼ位置を同じくする。一方、この反時計回りの渦の東側に負の渦度を有する領域があり、これは反時計回りの渦に誘引された流れによるものと考えられる。湾内のその他の領域では流速が1 cm/s以下と微小であるが、全体的には水道部から湾奥部に向かう形で流れている。

水道部南流から北流への憩流時（以下南流憩流時とする）には、水道部周辺以外の領域では流れはごく微小と

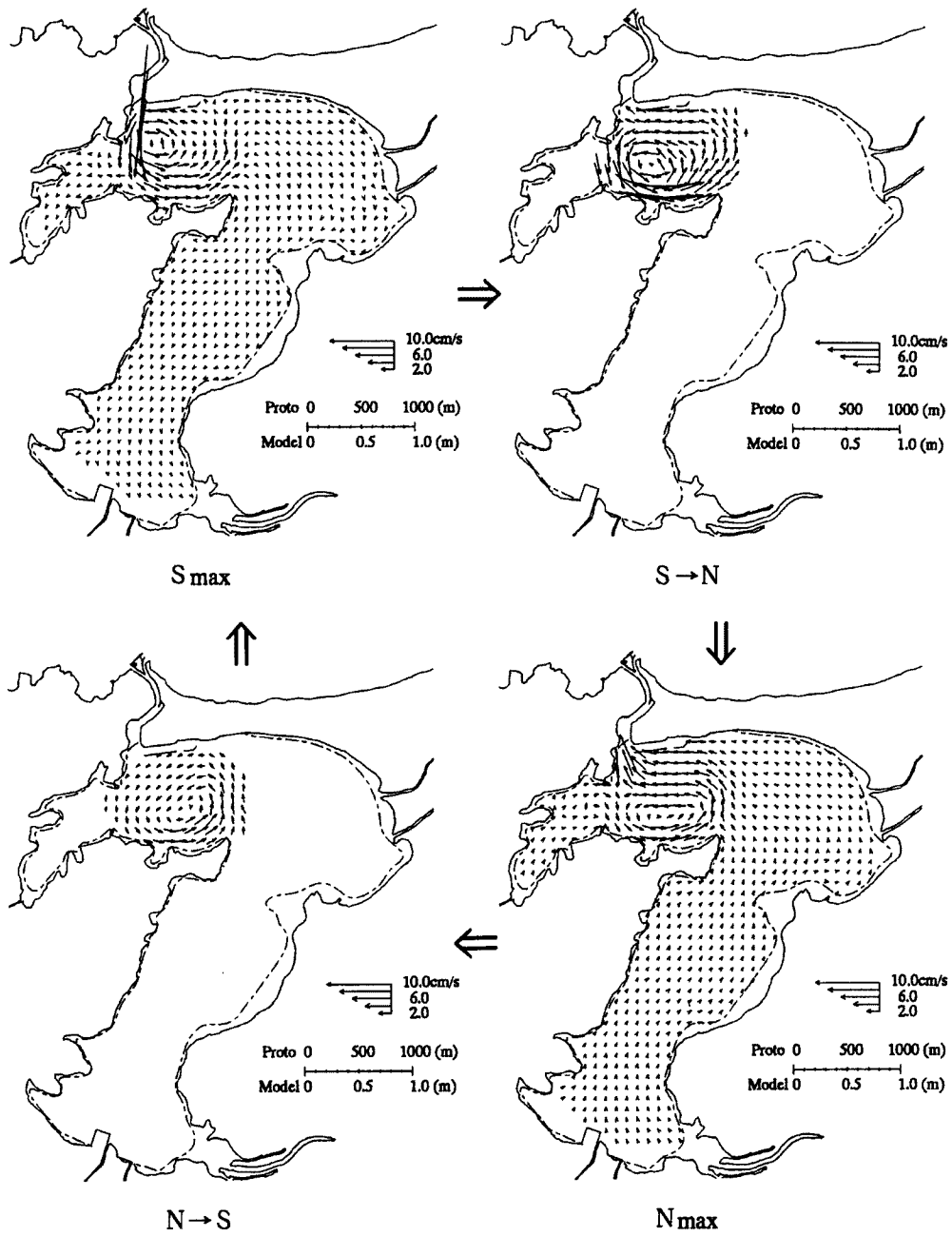


Fig. 5. Velocity vectors 1 m below water surface

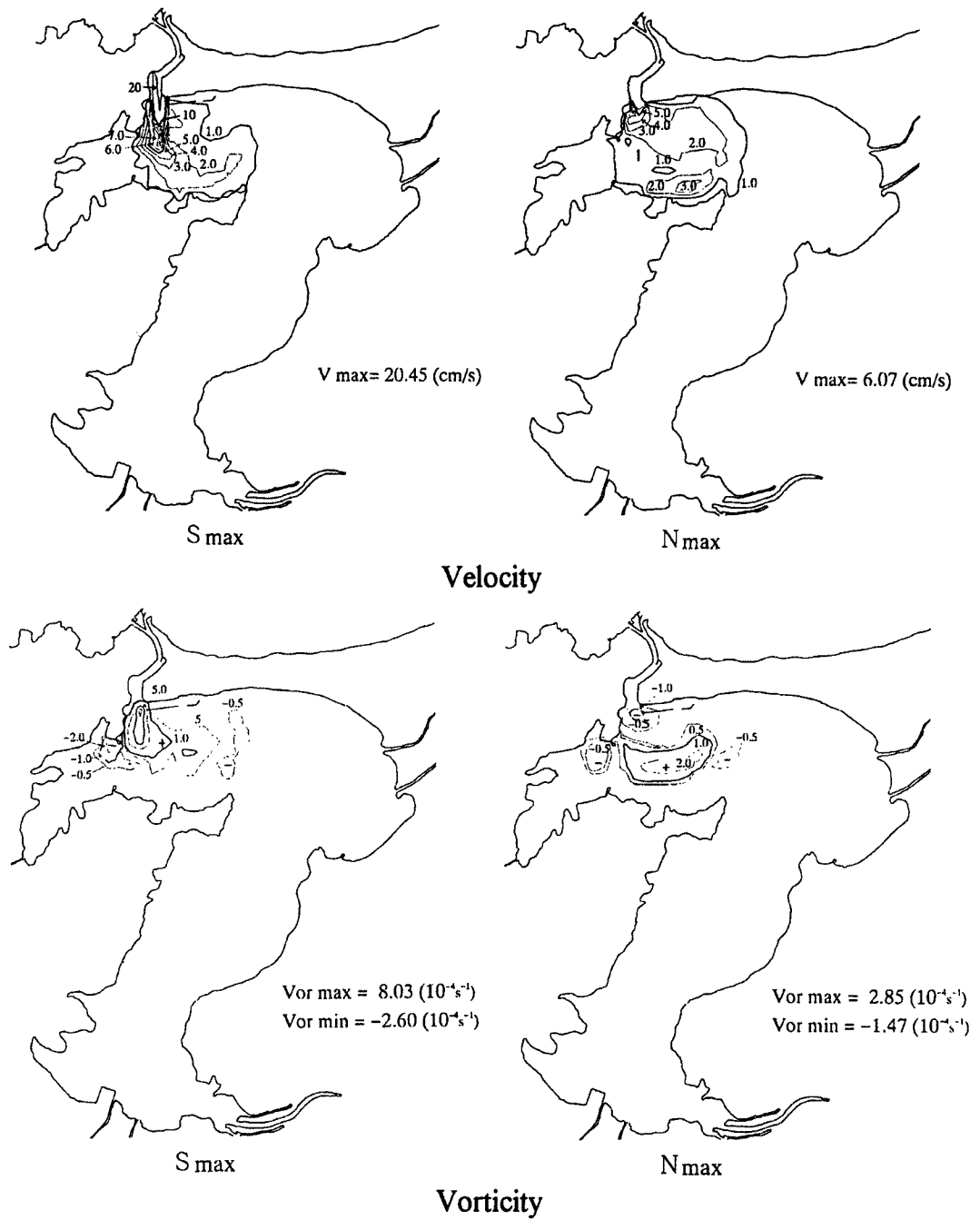


Fig. 6. Contours of velocity and vorticity 1 m below water surface

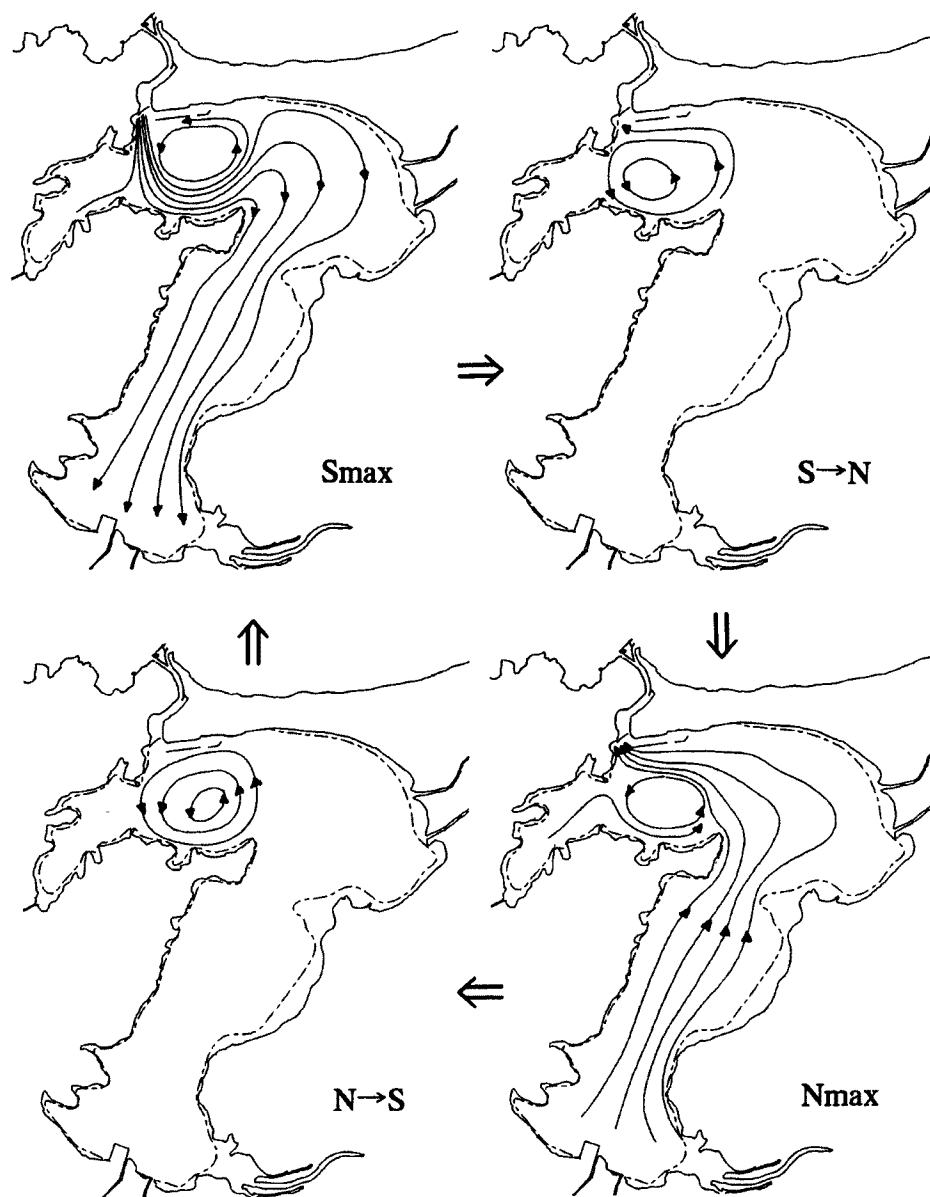


Fig. 7. Stream lines 1 m below water surface

いるようであるが、流速も全体的に小さくなり渦度の値も4潮時の中で最小値となっている。

Fig. 7は水深1mにおける湾内の流線図である。上述したように、湾内には1周期を通して水道部付近に反時計回りの渦が見られ、発達と減衰を繰り返している。水道部付近以外の領域では、南流最強時に水道部から湾奥部に向かう流れ、北流最強時には湾奥部から水道部に向かう流れが見られる。しかしその流速自体は非常に微小である。

以上が水深1mにおける湾内の流動特性で、水道部付近の渦とその他の流動の小さい領域とに特徴付けられる。水深5mの流線図（Fig. 8）では、水道部付近の渦はその規模を小さくしながらも1周期を通じて存在する。また北流最強時には時計回りの流れが湾の西部に見られるようになる。この時計回りの流れ

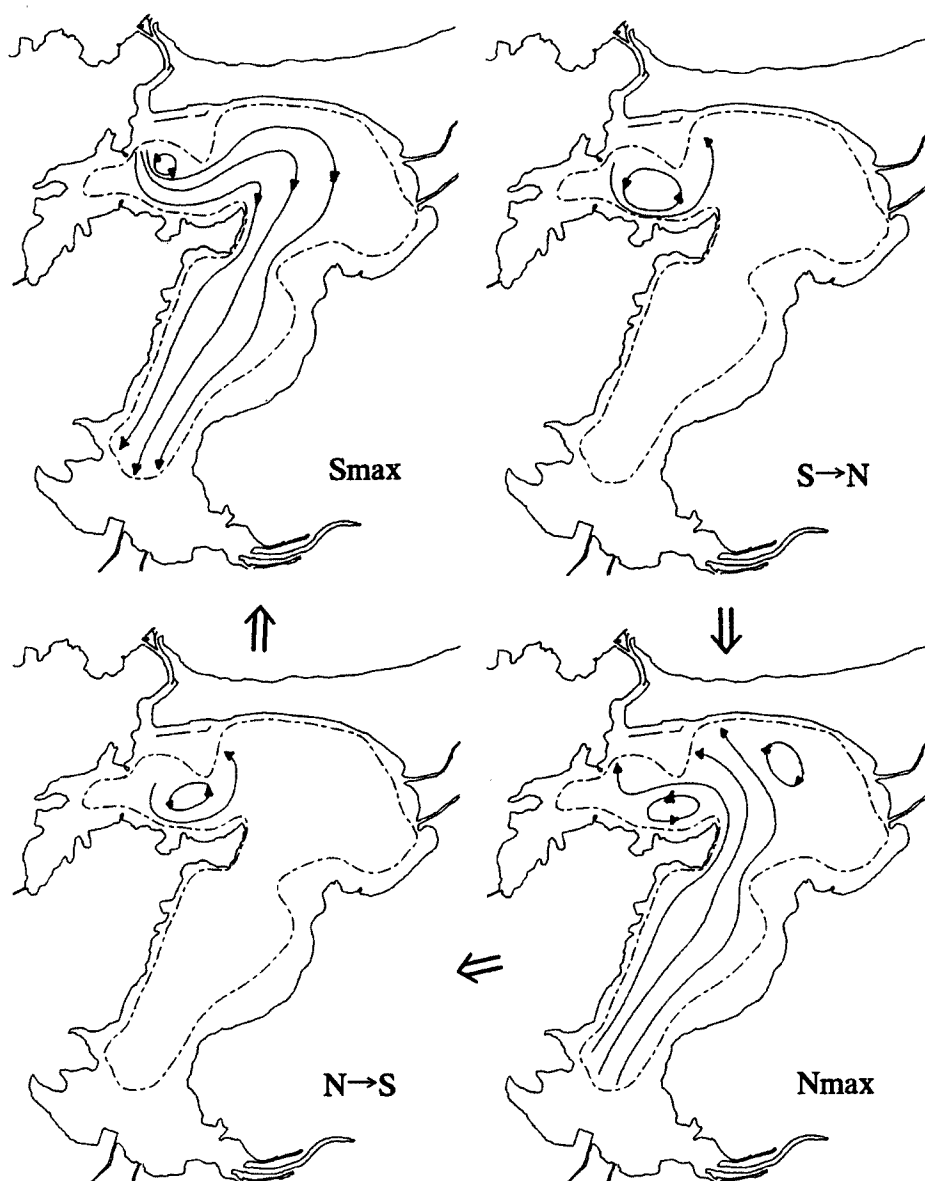


Fig. 8. Stream lines 5 m below water surface

はさらに深い層（水深7 m, 9 m）においても存在することが確認されている。

水道部付近に渦の形成される水深1 m, 3 m, 5 mにおける, 渦の中心部の渦度の変化は, 南流憩流時に最大, 北流憩流時に最小となる。また渦全体の発達と減衰を評価する指標として, 渦の循環値を上記の3層について算定した⁵⁾ (Fig. 9)。水深1 mおよび5 mでは, 循環値は南流憩流時に最大, 北流憩流時に最小となり, 渦度に着目した場合と同様の結果であり, 水深3 mにおいても同様の傾向を示している。このことから水道部付近に形成される渦は, 南流最強時から南流憩流時にかけての外海水の流入によってその勢いを拡大し, 規模や位置を変えながら次第に減衰するという一連のサイクルを持つことがわかる。

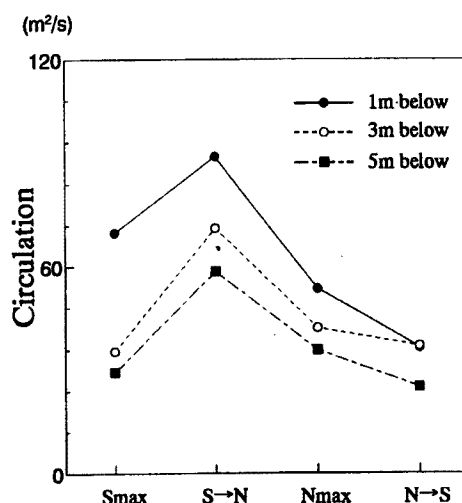


Fig. 9. Transitional change of circulation

以上、湾内の潮流の流動特性を主要4潮時について検討した。水道部付近に1周期を通じて反時計回りの渦が存在し、強い流動が見られる点、およびその他の領域における流動の微少な点といった基本的な特性が得られた。しかし、水深5mよりも深い層において北流最強時に表層と異なる流動が見られるなど、流動が地形の影響を受けることによると考えられる水深方向の流動の変化が認められた。

次に残差流に関する実験結果を示す。水道部の南流開始時から1周期間にわたる漂流板の流動軌跡から残差ベクトルを湾域全体にわたって求め、長期間の移動に関して重要となる潮汐残差流について検討した。Fig. 10は水深1m, 5m, 7mの3層についての残差ベクトルおよび潮汐残差流の流況である。水深1m, 5mの2層では水道部付近に反時計回りのベクトルがあり、これは前述した水道部付近の渦に対応するものである。またその西側には時計回りのベクトルが3層全てに認められた。上述の結果では、水深1mにおいてこの流れは確認されなかったが、残差ベクトルの形では表層から深い層まで同様の傾向を持つことが知れた。各層の残差ベクトルには大きな差は見られず、流速の小さな水深7m層においても潮汐残差流としては大きな流動を持つことが分かった。流況に関しては、各層とも似た結果となっている。しかし7m層では湾奥部から水道部方向に流れる様子が若干見られ、微弱ながら上層と下層で異なる流動を示すことが認められた。

4. 現地観測結果との比較

1994年に久美浜湾において現地観測を2回実施した。その際漂流板の追跡を実施し、水理模型実験結果との比較検討を行った。現地観測は1994年8月17日午前6時から午後6時までの12時間および11月17日午前9時から午後3時までの6時間の2回、ともに大潮に近い条件下で実施した。観測における調査内容は以下の3種に大別される⁶⁾。

- 1) 定点における水深、水温、塩分濃度および流速の計測
- 2) ADCPを用いた流速計測、水温、塩分濃度の鉛直分布の計測
- 3) 漂流板追跡

ここでは漂流板追跡結果についてのみ示す。現地観測は実験同様水面下の抵抗板と水面上のブイからな

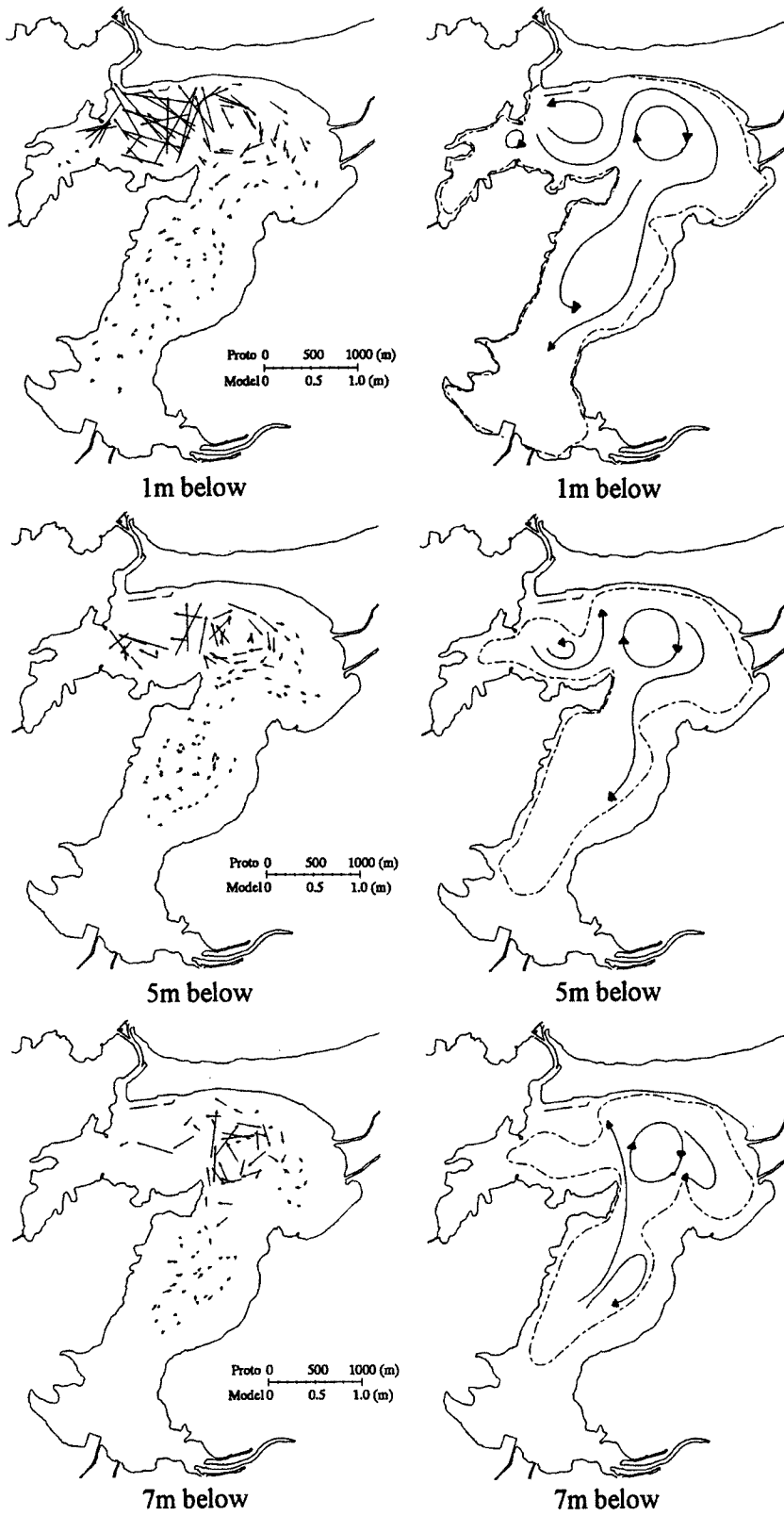


Fig. 10. Residual vectors and stream lines of residual flow

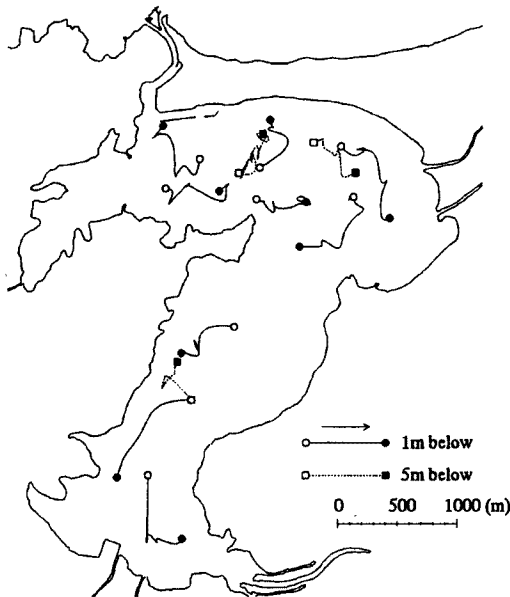


Fig. 11. Path lines in the field

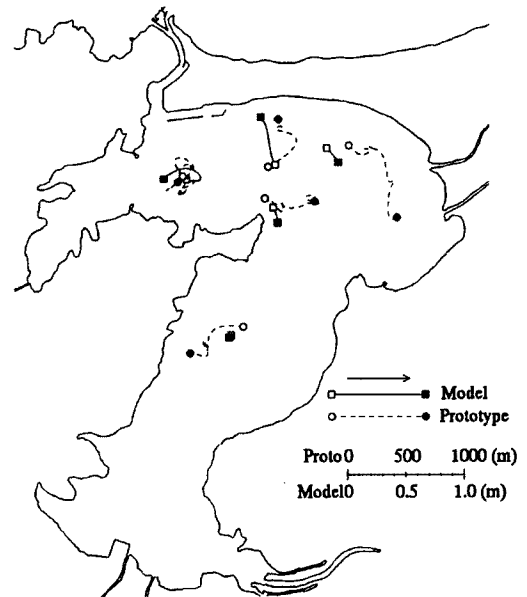


Fig. 12. Path lines in the model (solid line) and in the field (broken line)

る漂流板を湾内に投入し、それらを逐次追跡しながら GPS (Global Positioning System) によって位置を測定する方法で行った。本来一定時間ごとに位置の測定をすることが望ましいが、実際には困難なため観測時間中漂流板の追跡を続けた。漂流板はブイから抵抗板の中心までの長さが 1 m および 5 m の 2 種類を用意し、水深 1 m 用漂流板を 20 個、水深 5 m 用漂流板を 10 個の計 30 個を使用した。ただし 8 月の観測においては漂流板が風に流され、比較検討する結果とはなり得なかったため、以下の検討においては 11 月の観測結果を用いる。

Fig. 11 は漂流板の追跡結果を水深 1 m 用、5 m 用あわせて示したものである。11 月の観測は干潮直後から満潮手前までの上げ潮時に相当し、水道部からの流入の最盛期に実施された。水深 1 m 用の漂流板は湾全域にわたり同程度の移動距離を示している。水深 5 m 用の漂流板も比較的大きな移動距離を持ち、湾の北側では水深 1 m 用と似た傾向を示すが、湾奥部においては流向が逆になっており、上、下層における流動の違いが捉えられている。

これら現地観測結果と実験結果を比較したものが Fig. 12 であり、まず第一に移動距離の違いが認められる。実験結果は流動の強い水道部付近では現地結果と良い一致が見られる。しかし、その他の領域では現地の方がはるかに大きな移動距離を示しており、流速で比較すると実験では 1 cm/s 以下と非常に小さいのに対して、現地では平均 5 cm/s 以上の流速となる。また先に述べたように現地観測では上、下層での流向の逆転が見られたが、実験では 1 つの潮時における流向の逆転は確認されていない。

このように実験と現地観測では水道部付近の動きはよく一致するが、その他の領域での流動は実験に比べて現地観測の方がはるかに大きくなるなど異なる結果が得られた。この原因として、実験と現地との間の条件の違いが考えられる。実験では水塊の密度差を考慮していないが、特に久美浜湾のように淡水と海水が共存する汽水湖では水温や塩分濃度の成層が形成される。その他 8 月の観測において見られた吹送流など現地の流動は数多くの要因に影響され、その全てを実験において考慮しきれないことから違いが生じている。

一方水道部付近で良好な一致が見られたのは、水道部の幅が非常に狭く潮流速が大きいため、水道部付近では潮流による現象が卓越する。従って潮流を再現させたモデルでの実験結果と良い一致が得られた。

5. お わ り に

本報告は京都府北部に位置する久美浜湾を対象として、湾内の流動特性を水理模型実験、現地観測の面から検討したものである。

実験では異なる深さに抵抗板を有する漂流板を用いて、湾内の5層における流動を捉えた。その結果、湾内には1周期を通じて反時計回りの渦が見られ、外海からの流入によって発達し、その後減衰するサイクルが認められた。また潮汐残差流の形では深い層にも強い流れがあり、微弱ながら上、下層での流向の逆転も確認された。

現地観測結果と実験結果の比較において、潮流速の大きな領域では良い一致が得られたが、その他の領域では異なる流動特性が見られ今後課題を残した。すなわち密度差や風、その他の要因の考慮が大きな課題である。

謝 辞

久美浜湾での現地観測を遂行するに際し、久美浜町、新日本気象海洋株式会社の方々に御協力頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 河合英夫編著：流れと生物と一水産海洋学特論一，京都大学学術出版会，1991，pp.80-89.
- 2) 柏井 誠：無酸素層の形成機構における海水交換の役割と工事の効果について，昭和54，55年度浅海漁場開発事業調査報告書 久美浜湾地区，京都府，pp.1-6.
- 3) 柏井 誠：久美浜湾における無酸素水塊解消の試み，沿岸海洋研究ノート，Vol.26，1989，pp.129-140.
- 4) 海上保安庁：日本沿岸潮汐調和定数表，1983.
- 5) 大年邦雄：閉鎖性水域の潮流と海水交換に関する研究，京都大学学位論文，1994.
- 6) 今本博健・下野雅之・石垣泰輔・馬場康之・秋山真吾・森永剛史：久美浜湾における潮流の現地観測，平成7年度関西支部年次学術講演会講演概要，1995.