

汽水湖における閉鎖性水域の流動観測と流動モデルの適合性

Flow Observation in Nearly-closed Basin of the Brackish Lake
and Application of Flow Simulation Model

福岡捷二*・松本直也**・溝山 勇***・山根伸之****

By Shoji FUKUOKA, Naoya MATUMOTO, Isamu MIZOYAMA, Nobuyuki YAMAME

The flow in the brackish lake with nearly closed basin was measured by the use of an Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP). The circulatory flow inherent to this basin which has not been observed so far was measured by ADCP .

The numerical model was developed to explain well the flow field in the brackish lake ,except for the circulatory flow.

Keywords: Acoustic doppler current profiler, closed basin, brackish lake, simulation model

1. はじめに

湖沼における水質予測は、流域からの流入負荷量の算出、湖内流動の計算、生態系モデル等による内部生産のシミュレーションにより行われる。水質予測モデルの評価を行う場合、最も重要となるのが観測データとの再現性である。しかし、水質観測データ、湖流観測データとも湖沼水環境の機構を充分解明するほどのデータが得られていない状況にある。本論文は海洋観測等で利用されている超音波ドップラー流速プロファイラー (Acoustic Doppler Current Profiler; 略名 ADCP) を使用し、湖沼のなかでも水質問題が深刻かつ、解析の困難な汽水湖の閉鎖性水域において流況観測を行った。さらに、水平二次元多層レベルモデルを用いた流動モデルの設定を行い流動機構の検討、観測データの再現検証による流動モデルの評価を行った。

2. 観測方法

2.1 観測箇所の概要

米子湾は、中海の南東部に位置する細長い地形の閉鎖性水域である。山陰有数の都市である米子市の生活排水が流れ込み、閉鎖性による負荷の停滞が要因と推測される赤潮の発生が秋から春にかけて毎年見られる。そのため米子湾は、中海で最悪の水質 (COD 75%値 4.8mg/l)¹⁾ を有する水域となっている。

-
- * 正会員 工博 Ph.D 広島大学教授 工学部 第四類 (建設系)
(〒724 東広島市 鏡山 1-4-1)
- ** 正会員 工修 中国地方建設局 出雲工事事務所 事務所長
- *** 中国地方建設局 出雲工事事務所 水環境課 係長
- **** 正会員 (株) 建設技術研究所 大阪支社環境システム部

2.2 ADCPによる流況観測

流況観測は、従来の流向流速計に代わり近年海洋観測において活躍している超音波ドップラー流速プロファイラー（Acoustic Doppler Current Profiler;略名ADCP）を利用した。

ADCPは、4個のトランスデューサー（音波の送受波器）から水中に発射されたパルス状の超音波（一定周波数）が水中のプランクトン等の微細粒子によって反射される。この時生じる受波の周波数と送信波の周波数の差を測定解析することにより、多層（最小0.25m²/秒）の流向流速を計測処理することができる。但し、反射時間の短い表層部分（約1.0m）と湖底からの乱反射の影響を受ける0.8D（D=全水深）以深の測定が不可能である。

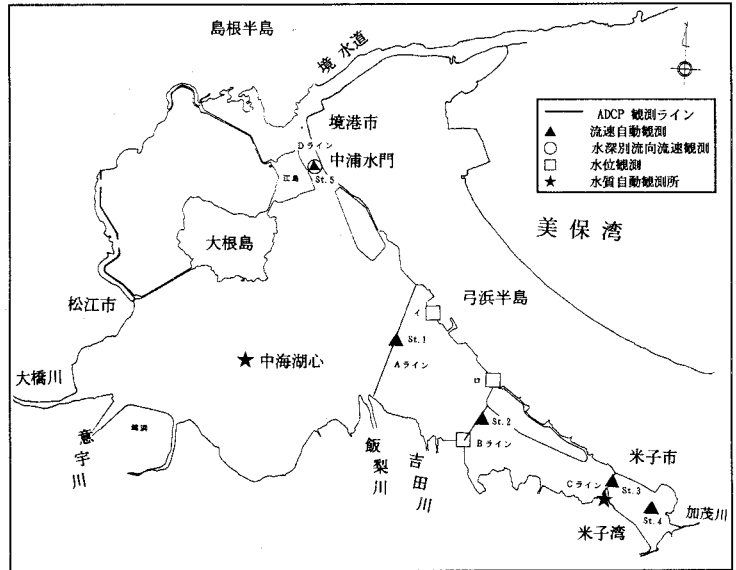


図-1 調査地点図

2.3 観測概要

観測は、大潮期と小潮期各1回行った。調査項目及び調査地点を図-1に示す。断面流速分布は、地形の変化が著しいラインA～Dの4断面とし、水面幅の狭い中浦水門では電磁流向流速計を使用した。ライン観測は、2潮汐間（25.5時間）実施し観測ピッチはADCPによる観測がラインA～Cを一周できる1.5時間ピッチ（計測回数各17回）で行った。調査期間中の水位を図-2に示す。小潮期の11月23日18時以降、水位の急上昇が見られるが、機器異常も含め原因は不明であった。

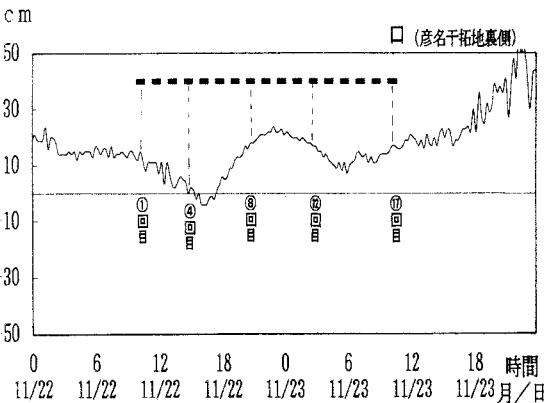


図-2(a) 水位の経時変化（小潮期）

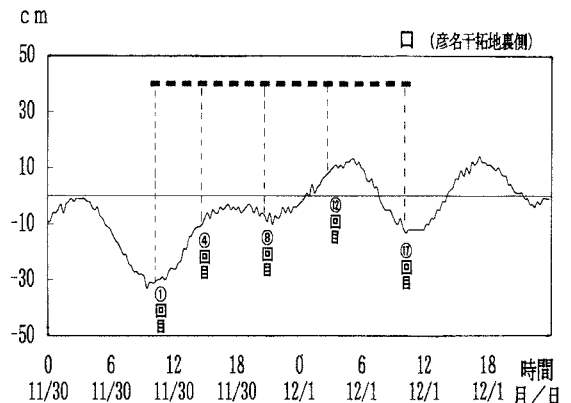


図-2(b) 水位の経時変化（大潮期）

3. 観測結果

流速ベクトル分布、流速断面分布及び塩分濃度の鉛直分布の測定例をそれぞれ図3, 4, 5に示す。ベクトル分布図、流速断面分布図を見ると、ラインAで大潮期は飯梨川河口付近から流入し弓浜半島側から流出するが（左回り）、小潮期は全く逆の（右回り）の流況が観測された。大潮期ラインA（8回目）では、断面流量収支は流出側であるが、流入の流速分布が飯梨川河口方向から、流出の流速分布の下側にもぐり込むような流況が見られる。さらに、ラインBでは平面的流況の変化はほとんど見られなくなり、上層流出、中層流入、下層流出といった水深方向に流向の異なる流況が顕著になっている。小潮期は、大潮期ほど明瞭ではないが、平面的、鉛直的に異なる流向が同一断面に存在する流況がどの観測回においても見られた。これらの流況は、観測回時によって微妙に変化しており、地形、水位、風向風速等の影響を受けているものと推測される。

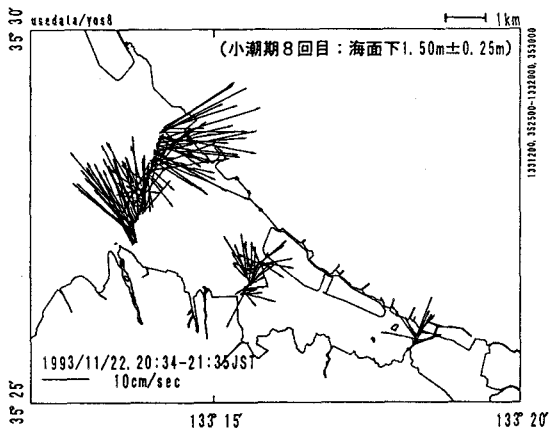


図-3(a) 流速ベクトル分布図 (小潮期)

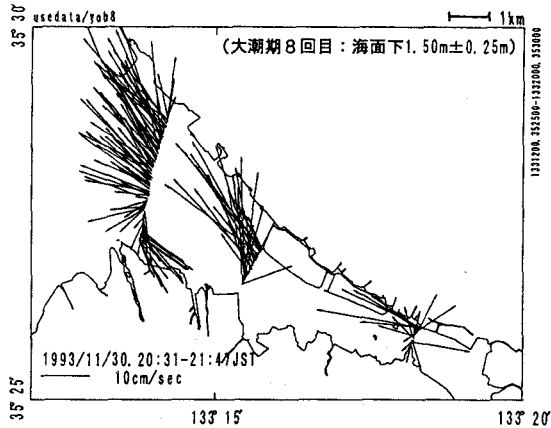


図-3(b) 流速ベクトル分布図 (大潮期)

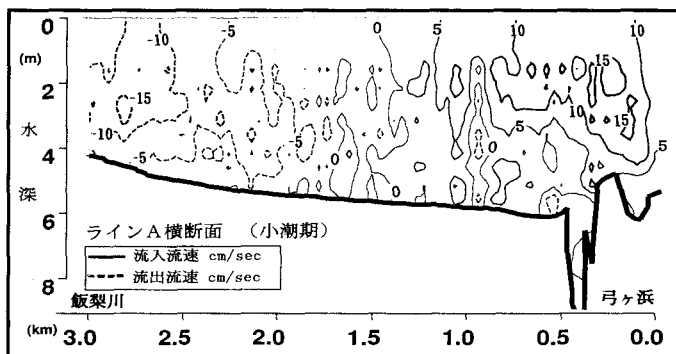


図-4 (a) 断面内流速分布図

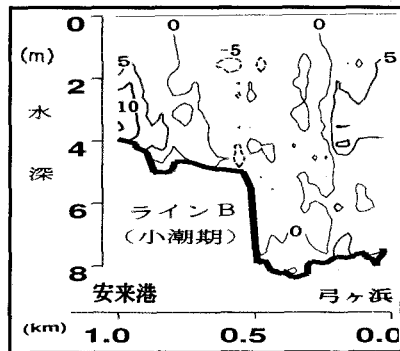


図-4 (b) 断面内流速分布図

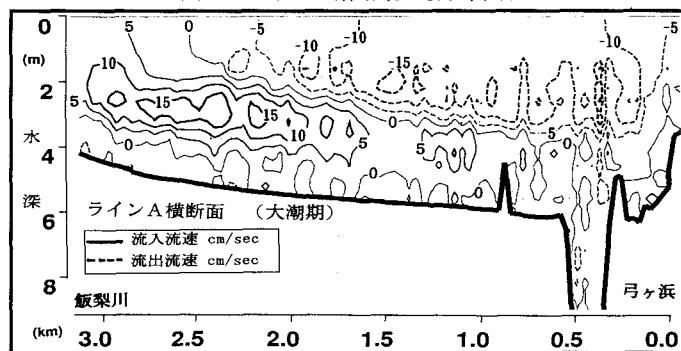


図-4 (c) 断面内流速分布図

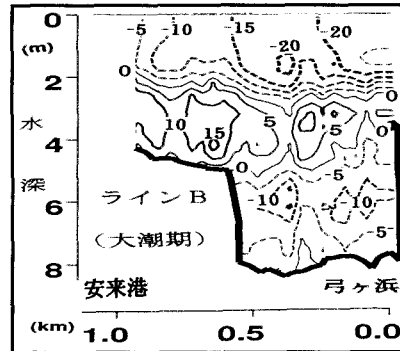


図-4 (d) 断面内流速分布図

一方、ADCP観測と同時に観測した塩分濃度の鉛直分布を見ると、小潮期は乱れが少なく塩分躍層を維持しているが、大潮期は塩分の鉛直濃度勾配が緩やかになっており成層の攪乱が見られ、流況の影響を受けている。このような、塩分濃度の傾向はほぼ全ラインで見られた。

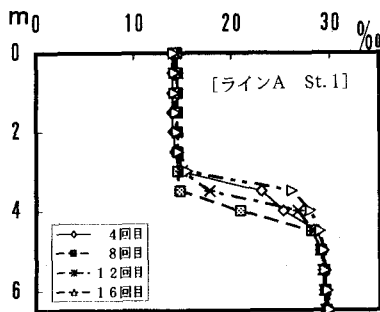


図-5(a) 塩分濃度鉛直分布 (小潮期)

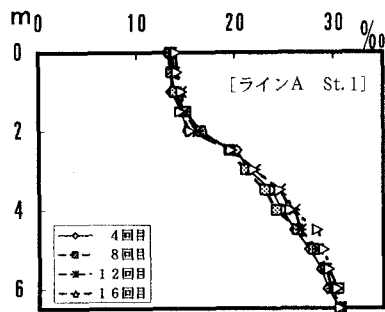


図-5(b) 塩分濃度鉛直分布 (大潮期)

4. 海水・塩分輸送量の解析

4.1 断面輸送量の算定

ADCPは水深ごとの二次元的に得た流速をそれぞれのピクセル（面積素片）にあてる。このピクセルの面積を dS' とし、流速成分を V_n [m/s]とする、ADCPがデータを得ている範囲 S' を通る流量 Q' [m³/s]は次式で与えられる。²⁾

$$Q' = \int_B^A \cdot \int_{cell}^{0.8D} V_n dS' \quad (1)$$

測定不可能な範囲の流速を図-6の通り仮定し補正すると次式となる。なお、岸に近く水深が浅いため測定不能断面は、測定可能断面に比べ面積が非常に小さいため、測定可能断面の流量 Q' に面積比 x を乗じた。

$$\int_B^A \cdot \int_{cell}^{0.8D} V_n dS + \int_B^A \cdot \int_0^{cell} V_{n(cell)} dS + \int_B^A \cdot \int_{0.8D}^D V_{n(0.8D)} \left[1 - \frac{h-0.8D}{D-0.8D}\right] dS + xQ \quad (2)$$

ADCP測定計算値 表層補正值 底層補正 沿岸補正值

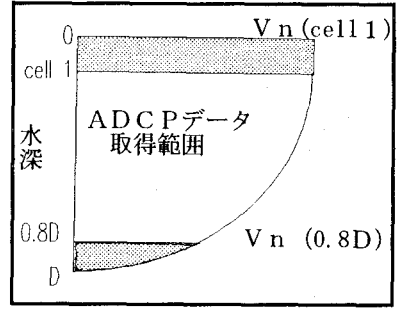


図-6 流速分布の仮定

塩分輸送量は、ADCP調査に合わせて実施したSTD調査（水温、塩分の鉛直調査）によって得られた水深0.5m毎の塩分濃度を、ADCPの各ピクセルにあてはめ算出した。

4.2 塩分輸送量の解析

ラインAにおける、正味の海水・塩分輸送量（流入量－流出量）を図-7に示す。小潮期の塩分輸送量の方向は海水の輸送方向とほぼ同じであるものの海水輸送量と塩分輸送量のピークにずれが見られる。これは、塩分躍層を維持した状態で海水輸送が行われるため、躍層を境に上下異なる流れが存在するためと推測される。

大潮期の塩分輸送量の変化を見ると海水輸送量と塩分輸送量の波形はよく一致しており、塩分成層の混合が進んでいる為と推測できる。

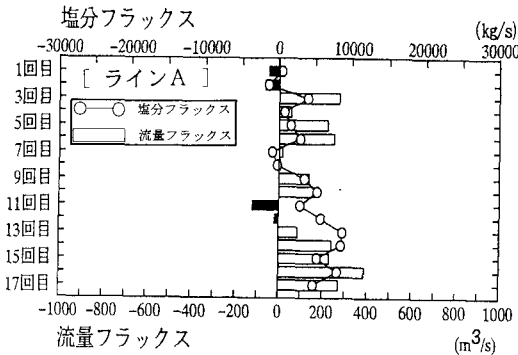


図-7(a) 正味の海水・塩分輸送量（小潮期）

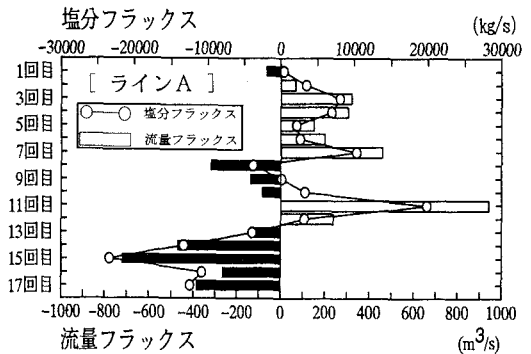


図-7(b) 正味の海水・塩分輸送量（大潮期）

5. 流動シミュレーション

5.1 流動モデルの設定

以上の観測によって得られたデータを用いて、流動モデルの構造とその評価を行った。中海・宍道湖は、境水道を通じて外海美保湾との間に海水交換があり年間を通じて密度成層が形成されている。湖内の流れは流域からの河川水の流入、潮汐振動、湖面風さらには水域の平面・湖底形状の影響を受け大きく変動している。このため、中海・宍道湖の流動現象の計算には、密度流、潮流、吹送流の効果を組み込んだ三次元非定常のシミュレーションモデルを設定する必要がある。

(a) 基礎方程式

本計算では、湖内流動モデルとして水平二次元多層レベルモデルを用いた。流動を支配する基礎方程式は、連続式、運動方程式および水温と塩分の拡散方程式であり、各流れ場の密度は水温と塩分より算定する。³⁾

(b) 計算領域

計算対象領域を図-9に示す。水平方向の格子分割は333m(1/3km)間隔とし、鉛直方向の層分割は、湖内の塩分濃度観測結果から概ね中海塩分躍層上限の水深2m, 下限の水深6m, さらにその中間水深の水深4mを基準に水深0~2m, 2~4m, 4~6m, 6m~湖底の4層とした。

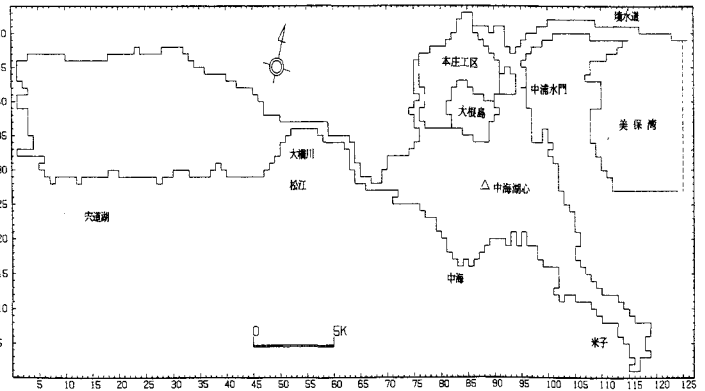


図-8 計算対象領域

5.2 湖内流動モデルの検証

(a) 検証計算条件

流動計算に用いる境界水理条件は、斐伊川本川新伊萱地点の時間流量・水温、

計算領域境界に位置する美保の関地点の時間潮位、美保湾の層別水温・塩分濃度を与えた。湖面風については、周辺の4気象観測所の時間風向・風速をもとに設定した。

(b) パラメータの同定

計算に必要なモデルパラメータの内、コリオリ係数(8.4×10^{-5})と湖底摩擦係数(2.6×10^{-3})は、既往報告値をもとに固定した。それ以外のパラメータは、湖内水位、大橋川流量、湖内層別塩分濃度の毎時観測データ、境界水道⁶⁾、米子湾の流量観測データ(ADCP)をもとに計算再現性から同定した。この結果、水平粘性係数= $40 \text{ m}^2/\text{s}$, 湖面摩擦係数= 0.8×10^{-3} , 内部摩擦係数= 2.6×10^{-3} , 水平拡散係数= $10 \text{ m}^2/\text{s}$, 鉛直拡散係数= $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ を設定した。

(c) 解析結果

検証計算結果から、湖内水位、湖内流動および湖内塩分の解析結果を示す。各水位観測所の湖内水位及び大橋川通過流量とも計算値は観測値を良く再現している。中浦水門においても、各層別流量および全断面流量とも計算値は観測値を良く再現している。一方、米子湾ラインAにおいては、全断面計算流量は潮汐流に伴う往復流波形は概ね再現しているものの流量振幅の絶対値(計算値)は観測値に比べ低い値となっている。また、各層別の観測流量は、1層(表層)と2, 3層(中層)で異なる流量波形を示しており、特に湖面風の強かった11月30日においてその傾向が強いことから吹送流の影響と考えられる。図-13は中海湖心および米子湾の層別塩分濃度の再現計算結果を示している。中海湖心の最下層部においては概ね塩分濃度は28‰程度で安定しており、計算値は観測値を良く再現している。表層部については、全体的に計算値が観測値に比べ若干高くなっており、観測値の中表層における時間的な混合~成層の変化についても計算値は十分に再現されていない。米子湾の計算塩分も、観測値に比べて高く、時間的な混合~成層過程の再現性に課題を残している。

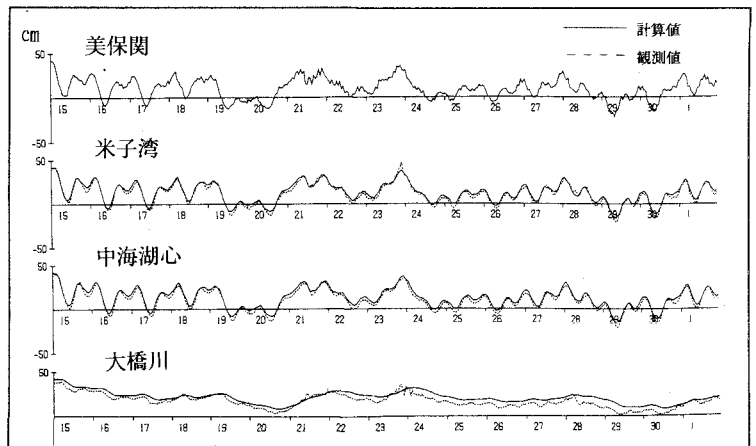


図-9 水位検証計算結果 (H5/11/15 ~ H5/12/1)

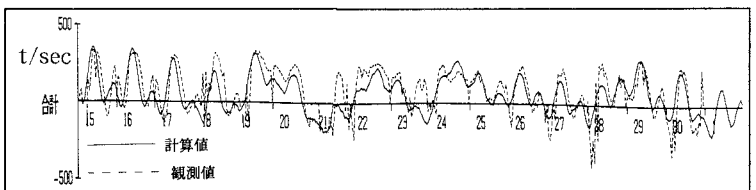


図-10 大橋川流量検証計算結果 (H5/11/15 ~ H5/12/1)

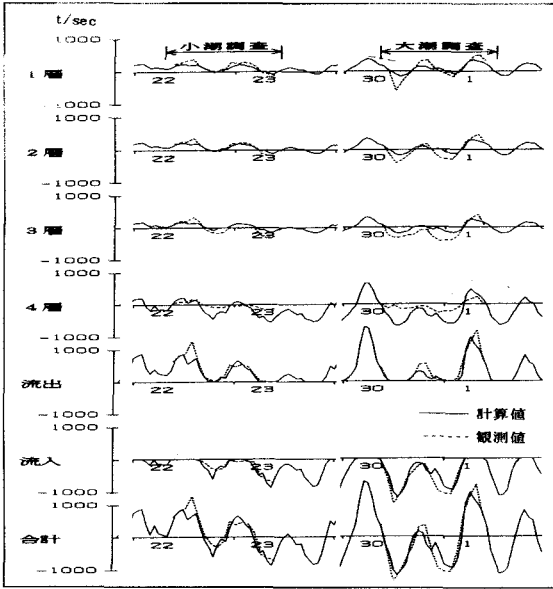


図-11 中浦水門流動検証計算結果

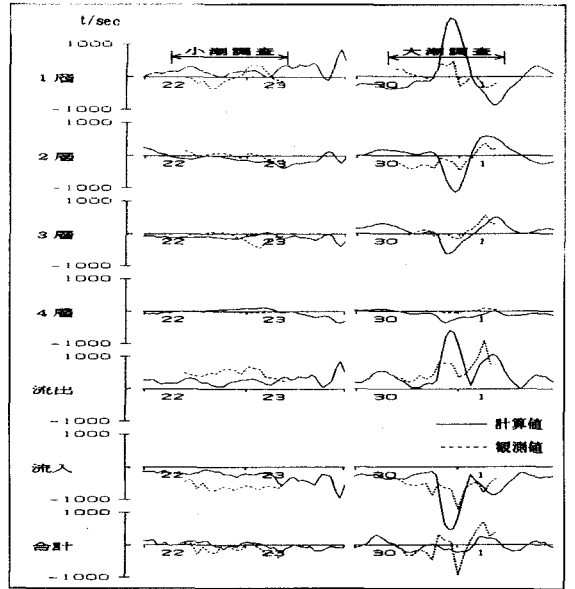


図-12 米子湾ラインA流動検証計算結果

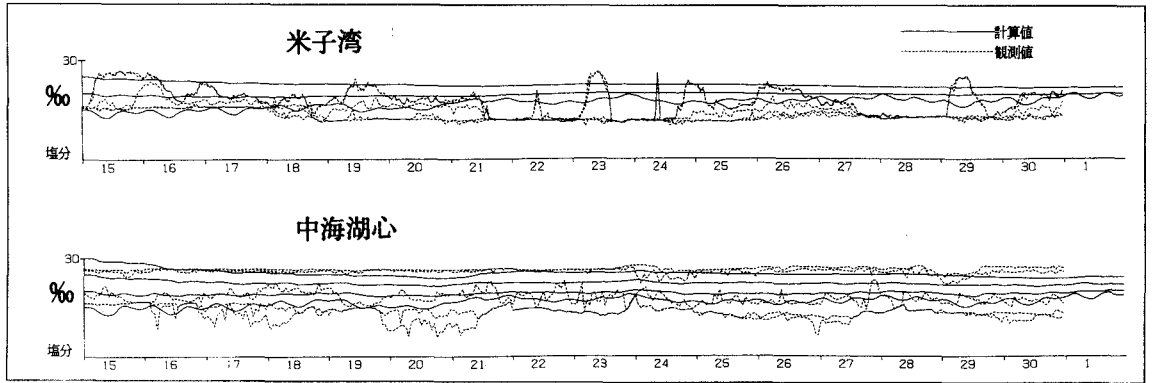


図-13 中海湖心・米子湾塩分検証計算結果 (H5/11/15 ~ H5/12/1)

6. まとめ

汽水湖の閉鎖性水域において、ADC Pを使用し断面流速分布観測を中心とする、流況観測を行った結果これまでの観測で見られなかった、環流など本水域特有の流れが観測された。一方、流動モデルを設定し、本水域の流動再現を行った結果、中浦水門のような狭窄部の流動構造については各層別の流量波形においても良好な再現性が得られることがわかった。また、米子湾の層別の通過流量や塩分濃度は潮汐流とともに湖面風・地形の影響を大きく受けていると推測できた。しかし、米子湾ラインAのような広領域の水域では、概ね全断面通過流量は潮汐に支配されているが、計算値の交換流量は表層部分での流速が上がらず、観測値に比べ過少に評価された。今後はさらに観測を続け、米子湾口における環流生成機構と環流が米子湾交換水量に及ぼす影響を把握し、これらを説明出来る流動モデルを構築することが残された大きな課題である。

謝辞 岡山理科大学教授 奥田 節夫先生、新日本気象海洋株式会社 吉村 友利氏、原田 洋一氏 には助言や協力をいただきましたことを記し、感謝の意とします。

参考文献

- 1) 島根県：平成4年度 公共用水域・地下水水質測定結果報告書
- 2) 関西水圏環境研究機構：境水道流出入量調査報告書 平成5年3月
- 3) 岩佐 義朗：湖沼工学 山海堂 平成2年3月 P115-P128