

湾内水の循環機構に関する研究

和田 明*・宮池 克人**

1. まえがき

湾内における排水の拡散現象を支配する要因として、海水の流動・分散過程（潮流、吹送流、恒流、渦動粘性の大きさなど）、地形条件および排水条件などの項目が考えられる。これらの要因が複雑に組み合わさって、海域における排水の拡散現象を形成している。湾内での潮汐流の往復運動は、時間スケールの短い現象には重要であるが、一般の水質汚濁のような長期的な変動過程に対してそれほど重要ではない。むしろ、恒流成分のような比較的緩慢な流動が汚染物質の拡がり方を支配するものと考えられる。したがって、恒流成分がどのように再現されるかが、拡散のモデル化にとって重要な課題となり得よう。

そのため、内湾の局所的な流動とその全水域との相互的な関連や拡散過程にかかわる各要因、たとえば風、波、潮汐、恒流、地形、陸水、排水、密度構造の海洋環境におよぼす寄与の程度を明らかにすることが重要である。このような研究展開のうえにたつて、はじめて信頼できる拡散モデルシステムが作られ、それに基づいて海洋における変動の予測も可能となるであろう。

本報告は、さきの報告¹⁾に引き続き、湾内水の力学的特性を把握するために、研究対象地点として三河湾海域を選び、湾内水の3次元的な流動機構を検討したものである。研究の展開にあたっては、湾内水の力学は潮汐流と風の吹送に伴う流動によって支配されるとして、現地気象・海洋観測の調査資料をもとに湾内水流動現象の数値シミュレーション解析を実施した。

2. 湾内水の流動特性

三河湾には、愛知県水産試験場所属の海況観測ブイが図-1に示す3カ地点に設置され、水面下1m層の流向流速が1時間ごとに観測されている。この観測記録を用いて、季別の平均流および流向別発生頻度を求め、湾内水の平均的流動の特性を調べた。図-2に、冬季（12, 1, 2月）、春季（4, 5, 6月）、および夏季（8月）のブ

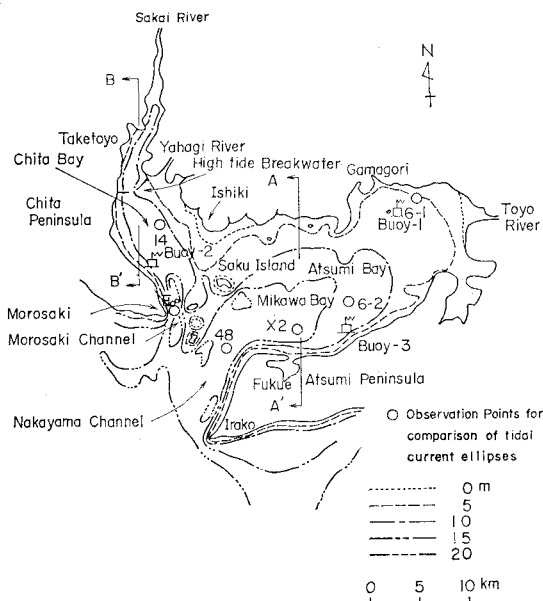


図-1 三河湾の地形と海況観測ブイの位置

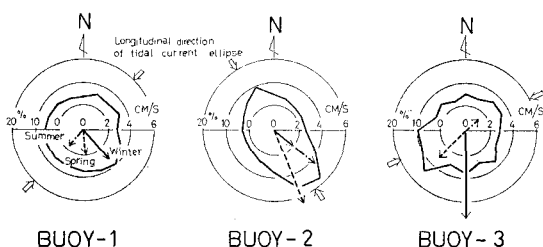


図-2 季別の平均流ベクトルと流向別発生頻度

イにおける季別の平均流、これら全期間を通じての流向別発生頻度、ならびに M_2 分潮流流楕円の長軸方向を示す。

季別の平均流は、1, 3号ブイでは冬季に発達し、しかもその方向は卓越せる冬冬季節風の吹送方向とほぼ一致する。一方、2号ブイでは、春・夏季に平均流が発達するが、その方向は季節を問わずほぼ一様である。

流向別発生頻度は、2, 3号ブイでは潮流流楕円の長軸方向、ないし季別の平均流の方向と一致した方向に高い頻

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所土木技術研究所

** 正会員 工修 (株)中部電力・総合技術研究所

度を示すが、1号ブイではいずれの方向もほぼ様な発生頻度を示す。

つぎに、風の吹送方向と、その時の流向との関係を検討するために、伊良湖測候所で観測された風のデータを用いて、各風向時における流向別発生頻度を求めた。1号ブイについて得られた結果によれば、各風向時において流向別発生頻度の分布形状が異なることが認められた。すなわち、西ないし北寄りの風のとき、風の吹送方向とほぼ一致した流れの発生頻度が高くなるが、南寄りの風のときには、流動が周辺地形の影響を受けるためか、風の吹送方向とは必ずしも一致しない方向に流れの発生頻度が高くなるという結果が得られた。一方、2, 3号ブイにおいては、風の吹送方向のいかんにかかわらず、潮流楕円の長軸方向に向かう流れの発生頻度が高く、とくに2号ブイでは季別の平均流の方向と一致した流れの発生頻度が顕著であることが認められた。図-3に、これらの結果の一例を示す。

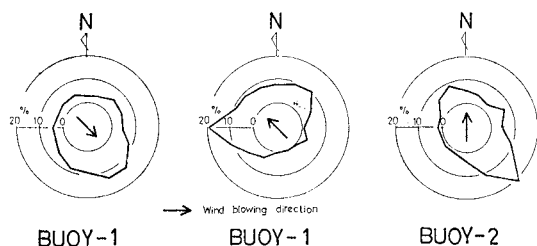


図-3 各風向時における流向別発生頻度の一例

海況観測ブイの流動観測データに対し、24時間の移動平均をほどこし、1日以上長周期の流動の変動特性を調べた。一例を図-4に流動ベクトルの形で示す。図中には、伊良湖測候所における風の観測結果を、風の吹送

方向をあらわすベクトルの形で示している。流動ベクトルは、図-2に示した季別の平均流の方向とほぼ一致した方向に向かう流動を基本とし、風向風速の変動に応じて流動の長周期変動が存在していることを示唆している。これらの変動周期は季節により異なる。冬季には、卓越する冬期季節風の存在により、変動周期が10日以上におよぶことがある。春季には、3, 4日の周期で変化する天候に従って風向風速もめまぐるしく変化するため、流動は3, 4日の変動周期をもって変化する。夏季における流動の変動周期は、2, 3日程度である。流動ベクトルの方向は、風向によっては必ずしも風の吹送方向とは一致せず、風の吹送に伴う流動が周辺地形の影響を鋭敏に受けることが推察される。

湾内における潮流観測の解析結果、および上述した海況観測ブイによる流動観測の解析結果より、湾内水の流動の特性として、潮汐流、潮汐残差流のほか、風の吹送に伴う流動の長周期変動が存在していることが認められ、とくに冬季には、卓越した冬期季節風の存在により、変動周期が10日以上におよぶ安定した流動の存在が認められる。

3. 数値モデルの内容

湾内水の力学的挙動は、流体の運動方程式、および連続方程式を用いて、一般に次のように表わされる。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) + 2\varepsilon_{ij} \Omega_j U_k = -\frac{\partial \phi}{\partial x_i} - g\delta_{3i} + A_H \nabla^2 U_i + A_v \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 t : 時間、 U_i : 流速成分、 Ω_i : 地球表面上で

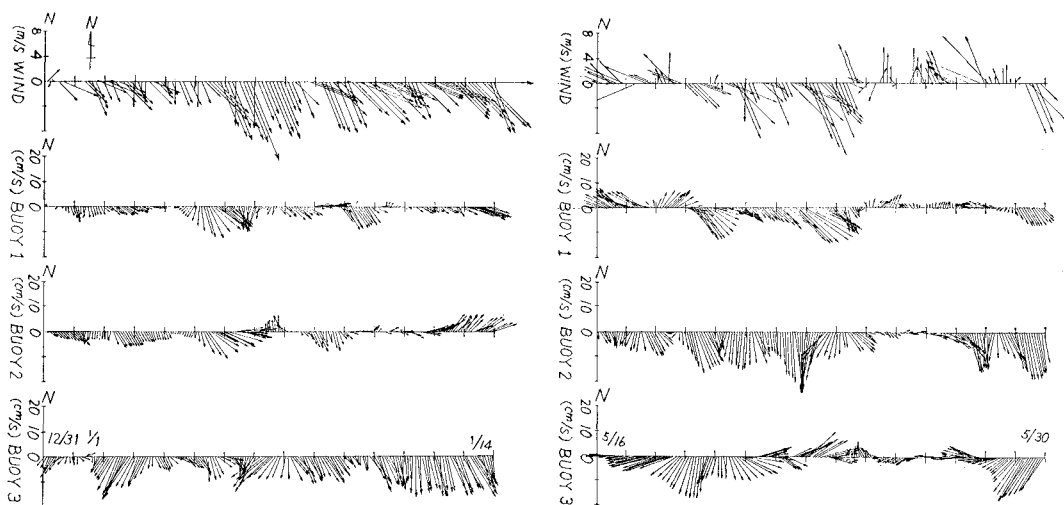


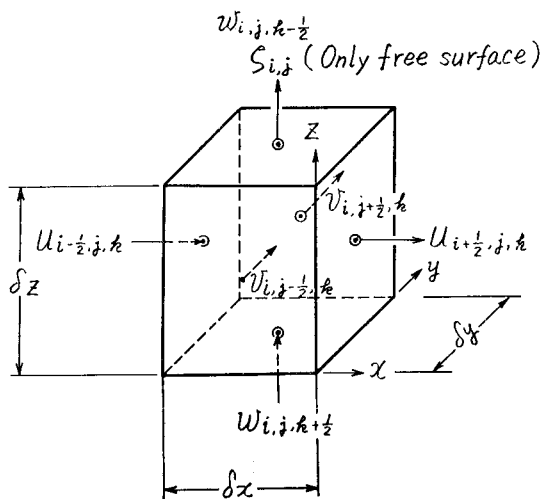
図-4 風のベクトルと流動ベクトル

の回転成分, $\phi: = p/\rho$, p : 圧力, ρ : 密度, g : 重力加速度, A_h : 水平方向の渦動粘性係数, A_v : 鉛直方向の渦動粘性係数, $\varepsilon_{i,j,k}$: i, j, k が cyclic order のとき +1, anticyclic order のとき -1, その他の組み合わせに対し 0, δ_{si} : $i=3$ に対し 1, その他に対し 0.

数値モデルの設定にあたり, (i) 冬季における三河湾では, 密度成層は形成されない, (ii) 静水圧分布の仮定が成立する, などの条件を式 (1) に適用する. さらに, 水面変化を考慮した計算を行うために, 水面での力学的境界条件として, 式 (3) を加えた.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u_s \frac{\partial \zeta}{\partial y} + v_s \frac{\partial \zeta}{\partial x} - w_s = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, ζ : 水位, u_s, v_s : 水面における水平方向流速成分, w_s : 水面における鉛直方向流速成分.



図—5 セルにおける流速計算点の配置

図—5 に, 差分計算に用いたセルを示す. 吹送流ならびに潮汐流の作用による湾内水の3次元的な循環機構を検討するため, 湾内を水平方向 $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ km}$, $\Delta z = 3.2 \text{ m}$ のセル群に分割した.

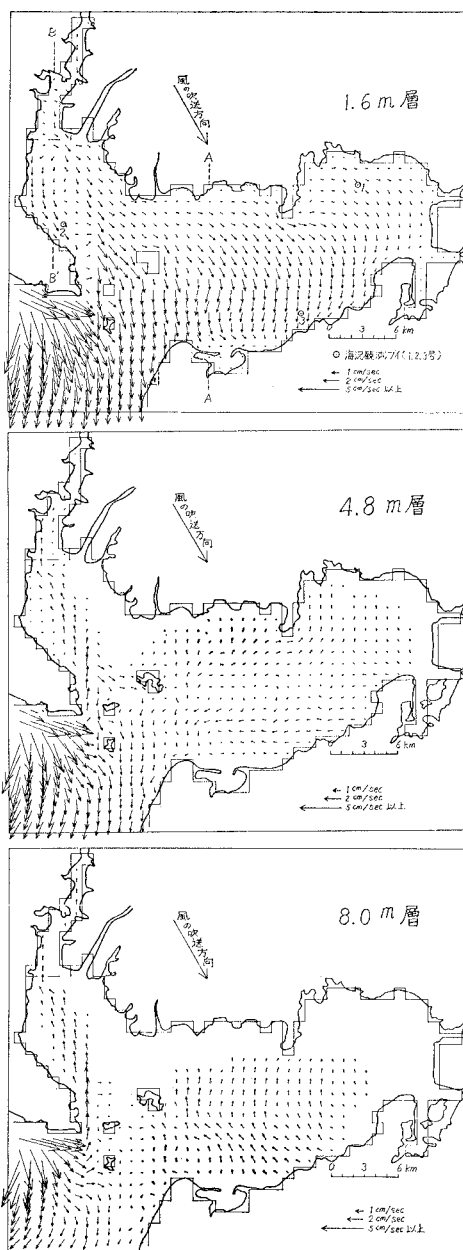
湾内吹送流の流動機構の数値計算を行うにあたり, 先の報告¹⁾で求めた, 代表的な冬季季節風の海上での風ベクトルを海面への摩擦力として与えた.

また, 潮汐流の計算にあたり, 師崎および伊良湖で観測された M_2 分潮の潮位条件を湾口境界に設定した.

海岸線, 海底面における境界条件としては, no slip condition を用いている. また, 水平方向の渦動粘性係数として, $10 \text{ m}^2/\text{sec}$, 鉛直方向の渦動粘性係数として, $0.01 \text{ m}^2/\text{sec}$ を用いた.

4. 吹送流の解析結果

吹送流に関する数値計算結果を, 代表的な水深について流動ベクトルの形で 図—6 に示す. 計算結果によれ



図—6 風の吹送に伴う代表的な水深での平面流動

ば, ほぼ数時間ののち定常状態の吹送流が形成され, 湾口における境界条件として水位を 0 に保ったときの各地の水位変化は, 福江で $+0.3 \text{ cm}$, 蒲郡で -1.2 cm , 武豊で -1.7 cm であった.

図—6 に示す流動のパターンを, 先に報告した水面を水平に固定した3次元モデルによる解析結果¹⁾と比較すると, 両者の間に差異は認められないが, 流速の大きさは先のモデルが今回のモデルに比べてほぼ2倍の値を与えていることが認められる. これは, 先のモデルでは水面を水平に固定しているため, 鉛直循環流が発生しやす

い状態におかれていたものと考えられる。

計算結果より、三河湾における冬季節風による湾内水の循環は、風の吹送方向における鉛直循環流が卓越するという結果が得られた。この鉛直循環流は、地形とくに海底形状の変化に敏感な影響を受ける傾向を示している。すなわち、知多湾においては、表層で湾口に向かい、深層で湾奥へ向かうスケールの大きい鉛直循環流の存在が認められる。一方、渥美湾では、湾全域としての循環流の形成は認められないが、表層では風の吹送方向に流れが卓越している。中層部ではいくつかの小スケールの平面循環流が存在するが、深層部では表層流に対する補償流としての鉛直循環流が形成される。

図-6 には、海況観測ブイの位置が示されているが、この付近における流動ベクトルは、図-2 に示した冬季の平均流の流向とよく一致しており、数理モデルの妥当性を示すものと考えられる。

5. 潮汐流の解析結果

潮汐流に関する数値計算結果を、潮流観測より得られた M_2 分潮の潮流楕円と比較した結果を、図-7 に示

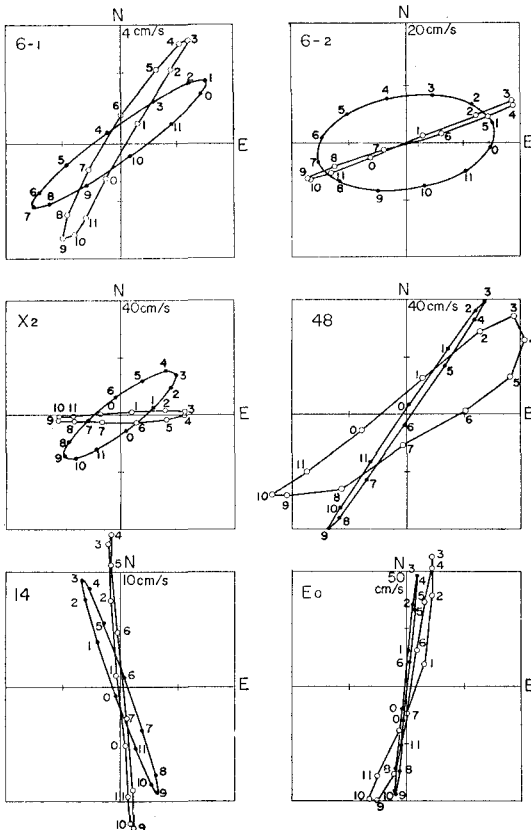


図-7 数値計算結果および潮流観測結果による M_2 分潮潮流楕円の比較図 (—●—; 観測結果, -○-; 計算結果)

す。図中、潮流楕円に付された数字は、平均太陰の子午線経過時間を示し、0 が低潮時に、6 が高潮時にほぼ相当する。比較を行った観測点の位置は、図-1 に示されている。これより、数値計算結果と実測結果は、ほぼ良好な一致を示し、数理モデルにおいては潮汐流による平均的な流況が再現されていることが認められた。

潮汐流の数値計算結果より、1 潮汐時間の平均流速を求め、これを潮汐残差流としてその特性を調べた。図-8 に、代表的な水深における潮汐残差流の数値計算結果

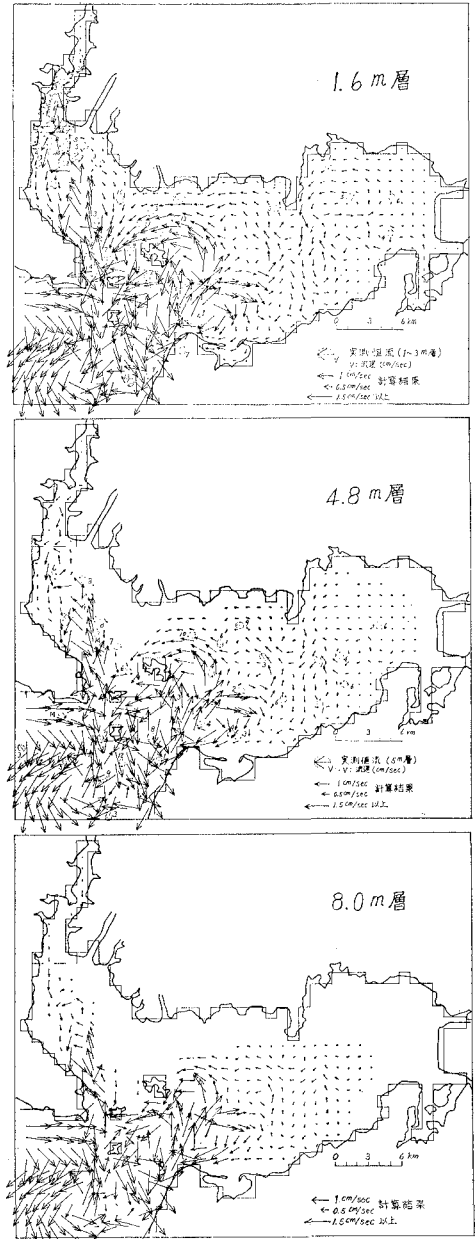


図-8 数値計算による代表的な水深での潮汐残差流と寒候期における実測恒流の平面流動

を流動ベクトルの形で示す。図中には、密度成層が形成されない 10 月から 4 月にかけての寒候期において行われた潮流観測より得られた恒流の流向流速をあわせて示している。

計算結果より、湾口部、知多湾、佐久島のまわり、福江沖などに、潮汐残差流にもとづく顕著な平面循環流が認められ、また渥美湾湾奥においても 2, 3 の微弱な平面循環流が認められる。図中に示した実測にもとづく寒候期の恒流は、これら顕著な平面循環流の認められる海域において、その流動パターンによく一致した流向を示し、計算結果による潮汐残差流の妥当性を示すものと考えられる。

なお、潮汐流および潮汐残差流の数値計算結果によれば、鉛直循環流の存在は認められず、潮汐流ならびに潮汐残差流は、水平運動の卓越する大きな渦、および水平循環流としての性質が卓越しているものと考えられる。

6. 結 論

拡散過程にかかわる風、潮流、恒流などの要因が海洋環境変動におよぼす役割を明らかにするために、三河湾

を対象として、3 次元数値モデルによる潮汐流ならびに吹送流のシミュレーション解析を実施した。この解析結果と現地観測の資料分析の結果、三河湾においては水平運動の卓越する潮汐往復流に伴う大きな水平渦、潮汐残差流としての水平循環流のほかに、顕著な季節風の存在する冬季には、風の吹送による鉛直循環流が形成され、これらの因子が湾内の分散過程に影響をおよぼすことが予想される。

また、今回展開した 3 次元解析手法に基づいて実施した流動に関する解析結果と実測結果を比較照合した結果、この解析手法が今後実際海域の 3 次元流動を解明するに有効であることが確認された。

謝辞：本研究にあたり、愛知県水産試験場、および海上保安庁水路部より資料提供を受けたことを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 和田 明・宮池克人：吹送流による湾内水の循環特性，第 23 回海講論文集，pp. 534~538, 1976.