

吹送流による湾内水の循環特性

和田 明*・宮池 克人**

1. 緒 論

湾内における排水の拡散現象を解明するためには、湾内水の流動などその力学的特性を把握することが必要である。沿岸海洋過程の研究分野においては、湾内水の力学的特性を把握し、湾内のあらゆるエコシステムへ影響をおよぼす多くの素過程の役割を明らかにすることが一つの大きな研究目標となっている。最近に至って現地観測と相まって、多くの解析解や実験などによって湾内水の力学的特性が次第に明らかにされつつある。

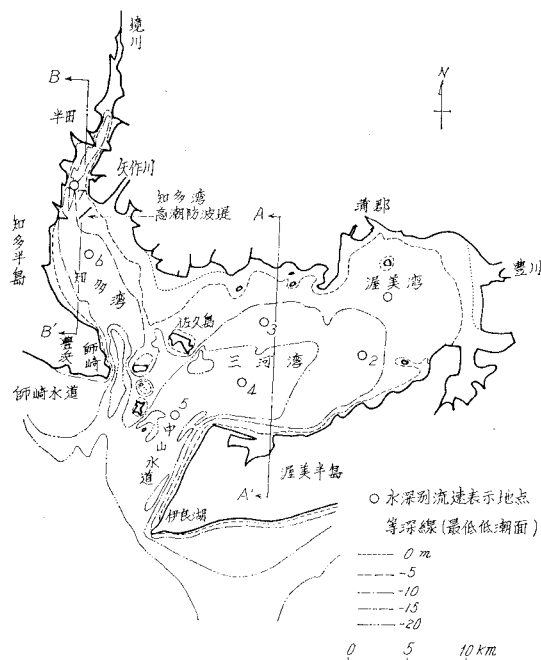
湾内における排水の拡散現象を支配する要因として、海水の流動・拡散条件（潮流、恒流、吹送流、渦動粘性の大きさなど）、地形条件および排水条件などの項目が考えられる。これらの要因が複雑に組み合わさって、海域における排水の拡散現象を形成している。

本文においては、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・知多湾海域を選び、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、対象地域における現地気象・海象観測の調査資料をもとにして、湾内水流動現象の数値シミュレーション解析を行い、上記の二つの因子による湾内水の流動機構を検討したものである。

2. 三河・知多湾の自然環境

三河・知多湾は、図—1 に示すように知多半島および渥美半島に囲まれた海域で、師崎水道および中山水道を含む段丘状の海底地形をした湾口で伊勢湾湾口部と結ばれる。湾内は、おおむね 15m より浅く、起伏の少ない海底地形となっており、一色から佐久島へのびる浅い舌状台地が知多湾と三河湾の海底を分離している。

湾内水の交換は、水深 20~30m のみお筋を有する師崎水道および中山水道を介して伊勢湾と行われ、知多湾に出入する海水は師崎水道を、三河湾に出入する海水は中山水道を通して交換がなされる。この付近の潮流は、中山水道で師崎水道より約 20 分早く転流し、このため高潮時および低潮時においては、湾口付近に複雑な潮流



図—1 三河・知多湾の地形図

が生ずる。

三河・知多湾内においてなされた潮流の 15 昼夜連続観測より得られた潮流特性を検討した結果、湾内の潮流は日周潮より半日周潮が卓越し、とくに M_2 分潮成分の存在が顕著である。

湾内における水温の鉛直分布は、夏季においては顕著な水温躍層が形成されるが、冬季においては海面から海底までほぼ様な水温分布となる。一方、塩分濃度の鉛直分布は、湾内に流入する矢作川、豊川などの河川水により夏季出水時においては、表層付近の塩分濃度が低下する時があるが、冬季においては河川流量は少なく、河口付近を除き湾内水の塩分濃度は海面から海底までほぼ様な鉛直分布となる。

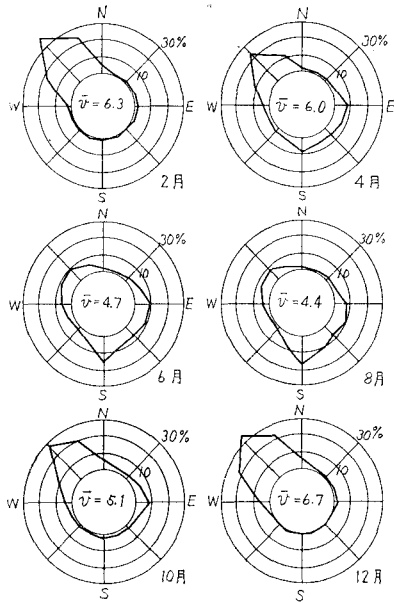
3. 季節風のモデル化

(1) 季節風の選択

図—2 は、渥美半島の伊良湖測候所における 1951 年から 1960 年までの 10 年間の 2 か月ごとの風向別発生

* 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



図—2 2 か月ごとの風向別発生頻度 (%) と
平均風速 $\bar{v}$ (m/s)
(1951~1960, 伊良湖測候所)

頻度と平均風速を示したものである。年間を通しての風の特徴は、秋季から春季にかけての北西寄り (WNW, NW, NNW) の風と、夏季の南寄り (SW, SE) の風に大別される。このうち、冬季における北西寄りの風の風向別発生頻度は約 90% ときわめて顕著で、かつこの期間の平均風速は 6.6 m/s と最も強い。これより、三河湾における吹送流による湾内水の循環は、この冬季風により最も顕著に生ぜしめられるものとして、冬季における三河・知多湾沿岸各地の風の観測資料を収集した。観測資料の収集期間は、1973 年 12 月から 1974 年 2 月までの 3 か月間とし、観測地点は 図—3 に示す 15 か地点で

ある。図—3 に各観測地点の最多発生風向とその平均風速を示し、あわせて概略の風の流線図を示す。冬型の気圧配置が強まり、きわめて顕著な季節風が発生したときの状態と、図—3 に示した最多風向とその平均風速とを比較すると、冬季における三河湾沿岸各地の平均的な季節風の分布は、ほぼ最多風向とその平均風速により表わすことができると考えられる。

一方、冬期季節風の継時特性を知るために、風速変動のデータをもとに自己相関関数、パワースペクトラムなどを求めた。これより風速の強弱変化に周期性は認められず、ほぼランダムに変化することが認められた。

(2) 季節風の流線解析

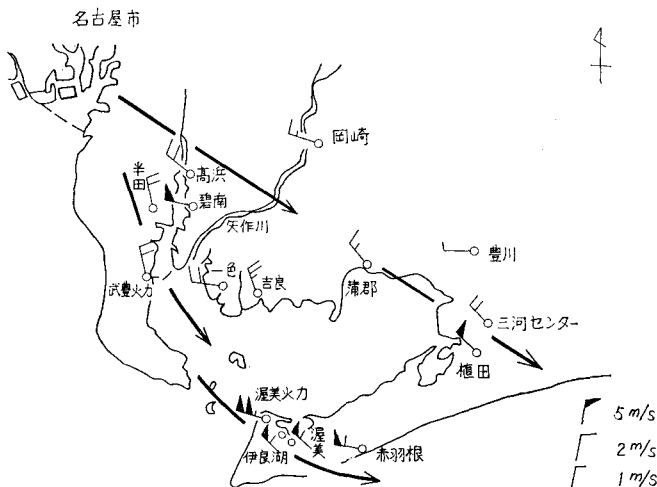
高度 1 000 m 以上の高層には、コリオリの転向力と気圧傾度とがつり合った、いわゆる地衡風が存在している。一方、地表面から数 10 m の低層では、大気の乱れによる渦動粘性ならびに地表面摩擦の影響が著しく、転向力を無視することができる。しかし、高度数 10 m より 1 000 m 程度までの下層大気においては、これらの摩擦力および転向力の両者を考慮する必要がある。

三河・知多湾は、奥行、幅ともに数 10 km 程度であり、これに対して冬期季節風を生ぜしめる大陸高気圧の気圧配置のスケールはきわめて大きく、また湾周辺の地形は一般に平坦であることから、冬期季節風が吹いているときの湾上空の地衡風は場所的にほぼ一様であろう。

以上の観点に基づいて、三河・知多湾の海上風の数値計算を流線解析法により行った。この解析法では、摩擦力と気圧傾度と地球の転向力の関係を示す式を基本形として、さらに地形による上昇迂回効果として地形を最少変位でさけるときの風のベクトル変化も考慮に入れた。計算にあたっては、基本式に対する解としてブランドルの解を適用し、地表の影響をうけない十分高いところでの地衡風として、観測資料が得られなかったため、1 000

m 高度での値を仮定した。このようにして、三河・知多湾上高度 100 m の風の平面分布を求め、これより低層の地表面の摩擦力の影響が著しく、転向力が無視しうる層においては、この間の風速分布は指数法則により表わされるものとした。

計算結果によれば、三河・知多湾上空 100 m の風は、5~6 m/s でほぼ一様方向に吹き、地域差が認められない。一方、観測結果は観測点ごとに風向・風速が異なる。この差異については、風速計設置周辺の地形、建物の影響、その地域特有の局所風の影響などが考えられる。一方、シミュレーション解析結果は、メソスケールを対象としたモデルによるもので、これらの局所効果を表現し得ないことによるものと考え



図—3 最多風向とその平均風速

られる。

大気境界層内における風速分布の解析手法については、今後検討すべき問題点を残しているが、今回においては上述の手法により三河・知多湾上空の風を設定して解析を進めた。

4. 吹送流の解析

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。

$$\frac{\partial \bar{p} U_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p} U_i U_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \bar{\rho} g \delta_{3i} + A_h \nabla^2 U_i + A_z \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_3^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p} U_i}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\bar{p}$: 密度、 U_i : 流速成分、 t : 時間、 $\bar{p}$: 圧力、 δ_{3i} : $i=3$ に対し 1, $i=1, 2$ に対し 0, A_h : 水平渦動粘性係数、 A_z : 鉛直渦動粘性係数。

冬季における三河・知多湾は、水温・塩分ともに鉛直方向に様な分布を呈し、密度成層は形成されない。また湾内の水深は浅く、起伏の少ない地形となっている。著者らは、先に第1近似解として、吹送流による湾内水の流動は、鉛直方向に比べて水平方向の流動成分が卓越するものとして、平面2次元モデルによる解析を行い、風成作用による湾内水の平面2次元的な流動機構について検討を行った¹⁾。

今回は、風成作用による湾内水の3次元的な流動機構を検討するため、従来のセル法を改良して、式(1)、(2)を基本とした3次元モデルによる解析を行った。モデルの設定にあたり、(i) 密度成層は存在しない、(ii) 圧力は静水圧分布する、(iii) 水位の変化は深さに比べて小さくこれを無視する、などの仮定が組み込まれている。境界条件としては、固定壁で流速が零、海面において次式で与えられる風摩擦力が働くとしている。

$$\tau_x = k u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}, \quad \tau_y = k v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2} \dots (3)$$

ここに、 k : 海面における風応力の摩擦係数、 u_w, v_w : 風速である。

セル法においては、運動方程式より流速の新しい値を求めるために圧力の値が必要となる。圧力、その微分は静水圧分布を仮定しているため、圧力方程式は水平方向流速に関する運動方程式を鉛直方向に平均化した式形になっている。圧力を算定するには、

$$D = \int_{-h}^0 \frac{\partial U_i}{\partial x_i} dz \dots \dots \dots (4)$$

を定義するとき、連続条件より $D=0$ とならなければならない。しかし数値計算上においては、圧力方程式中の $\partial D / \partial t$ は、

$$\partial D / \partial t = (D^{n+1} - D^n) / \Delta t \dots \dots \dots (5)$$

を計算していく。ここで、 D^{n+1} の値は 0 とおく。 n 次の divergence errors は、 $(n+1)$ 次でのそれを減少させるために、圧力に対する補正因子として用いる。

3次元モデルを用いて湾内吹送流の流動機構を計算するにあたり、流線解析法により求めた海上での風ベクトルを海面への摩擦力として与え、湾内を水平方向 $400 \times 400 \text{ m}$ 、深さ 2 m の矩形セル群により分割し、定常状態の吹送流に関してシミュレーションを行った。海上風として、 100 m 高度風を指数法則により 15 m 高度風に換算した値を用い、海面における風応力の摩擦係数として、 $k=3.2 \times 10^{-6}$ を用いた。伊良湖・豊浜を結ぶ湾口における境界条件は次のように設定した。

$$p=0, \quad \partial^2 U / \partial S^2 = \partial^2 V / \partial S^2 = \partial^2 W / \partial S^2 = 0 \dots (6)$$

ここに、 S : 境界に直角方向の距離である。

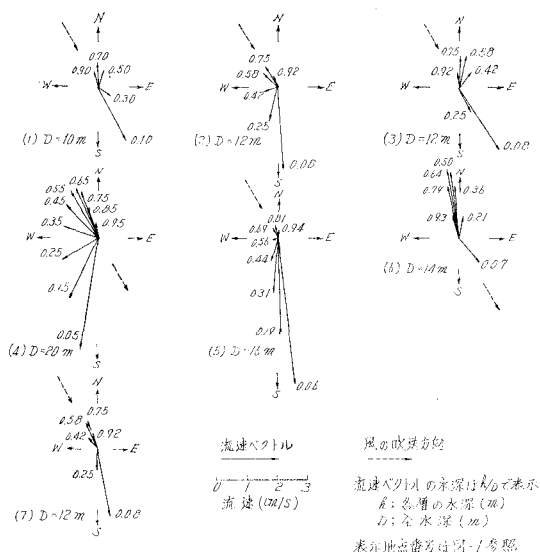
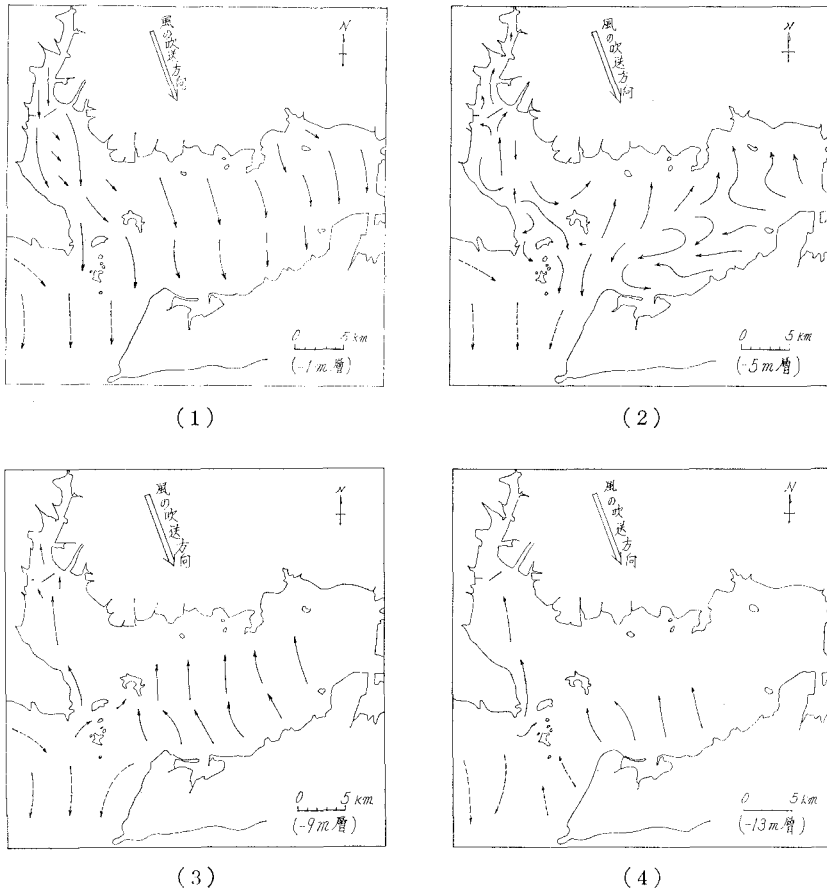


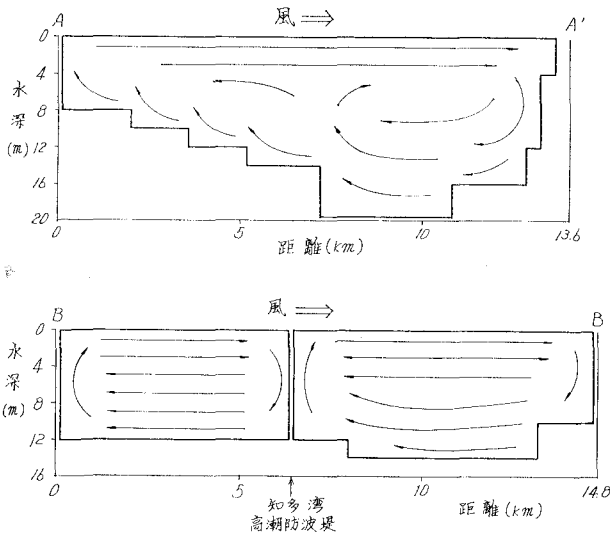
図-4 水深別の水平流速成分

計算結果より、次の結果が得られた。図-4 は代表的な地点 (図-1 に示す 1~7 の地点) における水深別の水平流速成分をベクトル表示したものである。これより、流れの鉛直構造は、表層においては風の吹送方向にほぼ一致した水平成分の流れが存在するが、下層に向かって次第にその流れの方向が変化し、底層付近では表層とほぼ逆方向の流れとなる。

湾内に形成された循環流について検討するため、図-5 に代表的な水深における平面流動の模式図を、図-6 に代表的な断面における鉛直流動の模式図を示す。これより、3次元モデルによる解析の結果は、平面2次元モデルによる結果と多少異なり、平面的な循環流の形成は中層部に深に認められるだけであり、むしろ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。この循環流は、地形、特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



図—5 風の吹送に伴う平面流動の模式図

図—6 風の吹送に伴う鉛直流動の模式図
(A-A' 断面および B-B' 断面)

いては表層で湾口へ向かい、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、三河

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、三河湾南側水域、および湾奥において、いくつかの小さい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するものと考えられる。

5. 潮汐流の解析

三河・知多湾においては、海底地形がおおむね 15m より浅く、起伏の少ない平坦な地形となっており、潮汐流の流動は水平方向成分に比べ鉛直方向成分は小さいものと考えられる。また水平方向流速の鉛直分布は、場所、潮時により複雑に変化するが、第 1 近似として海面から海底まで一様な分布を仮定すると、湾内潮汐流の挙動は平面 2 次元モデルにより表現される。このとき、海面に働く風摩擦力は考慮しない。潮汐流による平均的な流れを再現するため、伊良湖および師崎で観測された M_2 分潮による潮位条件を湾口境界に設定し、数値計算を行った。数値実験の結果によれば、三河・知多

湾における潮流分布は経時変化に伴い変化するが、ほぼ一様で湾奥に向かって次第に減衰し、潮流による湾内循環流は形成されず、海水は湾の長軸方向にほぼ一様な往復運動を行う。

対象海域における潮流流について数値シミュレーションにより求めた結果と、中部電力、通産省、海上保安庁および愛知県による実測資料を調解析して求めた結果とを比較すれば、両者はほぼ良好な一致を示し、数値モデルにおいては三河・知多湾海域について平均的な流況が再現されていることが確かめられた。

一方、潮流シミュレーションに基づく潮汐残差流は、師崎水道、知多湾高潮防波堤近傍海域、三河湾周辺部にスケールの弱い環流の発生が認められる。流速としては微弱であるが、この環流の存在は湾周辺部の長期的な分散過程に大きな役割を果たすことが予想される。

6. 結 論

数値モデルによるシミュレーション解析の結果、三河・知多湾内においては、潮汐往復流に伴う大きな渦、潮汐残差流としての恒流成分のほかに、気圧配置が安定している冬季では、湾内において吹送流に伴いいくつかの循環流が形成され、この因子が湾内の分散特性に影響をおよぼすことが予想される。

謝 辞: 本研究は、自然災害特別研究「沿岸海洋災害にかかわる海水の流動・拡散に関する研究」(代表者: 愛媛大学樋口明生教授) の分担課題の一つとして研究の補助を受けたことを記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 和田 明・宮池克人: 吹送流による湾内水の流動・拡散の特性, 第19回水理講演会論文集, 1976.