

沿岸海域における流動・拡散の可視化

Visualization of Fluid Motion and Dispersion Process in Estuarine and Coastal Waters

中辻啓二*・末吉寿明**・村岡浩爾***

by Keiji NAKATUJI, Toshiaki SUEYOSHI, Kohji MURAOKA

Graphic presentation of computational results for hydrodynamics and water quality models are becoming increasingly important for both practical engineering and research application. In the present study, many computational graphics methods are shown for understanding the physical processes observed in Osaka Bay. Animated movement of tracer particles and a QuickBASIC Graphics package provided by Bradford University are also included. Flow visualization provides a useful, powerful and convenient tool for post computational data processing.

Keywords: flow visualization, baroclinic flow model, estuary

1. まえがき

沿岸海域の流動や物質移動の研究は従来は多分に海洋学の分野であったが、現象が明らかになるにつれて、また沿岸空間の開発行為が大規模になるにつれて、工学的な色彩が濃くなってきた。逼迫状態にある沿岸海域の環境問題に対して今必要なことは、多角的な検討から解決策を模索する工学の取り組みである。このような背景を踏まえて、多種多様な素過程から成る沿岸海域の水理現象を解明する一手法として物理現象の数値実験の重要性が増している。そのためには密度流現象を含めた3次元的な流動の取扱い、および複雑な地形形状の表現や乱流現象のモデリングが必須となっている。その一方で、実験結果として得られた膨大なデータを理解しやすいように加工する画像解析技術として、3次元的な流動のアニメーションによる流れの可視化や対話型コンピューター支援システムの開発が早急に望まれている。専門的知識を持ち合わせていない一般の人々にも研究の成果を理解し、それに基づいて環境管理や環境創造の施策が意志決定されて初めて工学としての価値が生まれる。そのためにも、実験結果の可視化やアニメーションが是非とも必要である。

本研究では大阪湾のベイエリア開発を対象に行った3次元数値実験の数値データをもとに、沿岸海域での流れや物質の輸送に対する可視化処理技術の可能性を検討する。

* 正会員 工博 大阪大学 助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

** 学生員 大阪大学大学院生 工学研究科土木工学専攻 (同上)

*** 正会員 工博 大阪大学 教授 工学部土木工学科 (同上)

2. 粒子追跡法

(1) 可視化の概要

河口・沿岸域における環境アセスメントや水質解析の一手法として、差分法などによる N-S 方程式・乱流モデルを解く数値シミュレーションがよく活用される傾向にある。著者らは河口・沿岸域の水理現象における混合・拡散といった多様な素過程で構成される流動・水塊構造を対象に、自由水面を有した 3 次元密度流の数値実験を系統的に行っている。ここでは、大阪湾を中心に播磨灘、紀伊水道を含んだ 105 km 四方の海域を対象とした大阪湾広領域モデル¹⁾と明石海峡を中心とした東西方向に 40 km、南北方向に 35 km を対象とした明石海峡モデル²⁾で実施した、2 つの数値実験の後処理として可視化を試みる。3 次元密度流数値モデルのアルゴリズムおよび初期条件、境界条件、その他の諸係数に関しては前報^{2), 3)}で詳細に記述したので本文では省略する。

粒子の追跡実験はモンテカルロ法を用いたラグランジュ拡散解析により行った。数値的な流れの可視化を行うために、質量を持たない仮想的な粒子を想定して、次式により 1 ステップ毎の水表面粒子の移動距離を算出した。

$$\mathbf{x}(t_n) = \mathbf{x}(t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} \{ \mathbf{v} + \mathbf{v} \Delta t \cdot (\nabla_H \mathbf{v}) \} d\mathbf{t} + \text{Ran} \sqrt{2D\Delta t}$$

ここに、 $\mathbf{x}(t_n)$ は時間 t_n における粒子の座標、 $\mathbf{v}$ は座標 $\mathbf{x}(t_n)$ での水平方向流速、 D は座標 $\mathbf{x}(t_n)$ での渦動拡散係数、 Ran は正規乱数、 $\Delta t (= t_n - t_{n-1})$ は時間間隔である。なお、今回の粒子の追跡は水平 2 次元に限って行った。数値計算結果をもとに質量をもたない仮想粒子をラグランジュ的に追跡する場合、その可視化手法の違いにより種々の異なった曲線が得られる。それらは流線、流脈線、流跡線の 3 つに分類される。海域における潮流流動は非定常であるために、これらの線が一致することはない。流線は流れの中に混入された多数の微小なトレーサ粒子の動きを適当な短い露出時間で写真を撮ることによって得られる線を結んだもので、通常これは潮流場の流速ベクトルによる表示から推測することが出来る。一方、流れ場のある固定点から連続的にトレーサ粒子を放出したときに描く流脈線や個々のトレーサ粒子がたどる道筋である流跡線は、大阪湾の流れ場に観られる流動・水塊構造の特性に従って選択することができ、その手法次第で流れの変動の様相を的確に示すことが出来る。

(2) タイムラインによる残差流の可視化

図-1 は大阪湾の南北方向に 4 本のラインマーカーを設置して明石海峡の東流最強時の 3 時間前からの移流状況を追跡したものである。明石海峡の周辺では、オイラー的な潮流場を 1 潮汐平均した成分が潮汐周期成分よりも卓越する非線形な潮流成分を持つ領域が広がっており、潮汐残差流系の流動を呈している（中辻ら¹⁾）。本来なら、潮流により運ばれた物質は 1 潮汐後には元の位置に戻るはずであるが、図に示されるように 12 時間後のマーカーの分布は初期状態とは著しく異なった分布を示している。すなわち、マーカー粒子は大阪湾の中央部で南東方

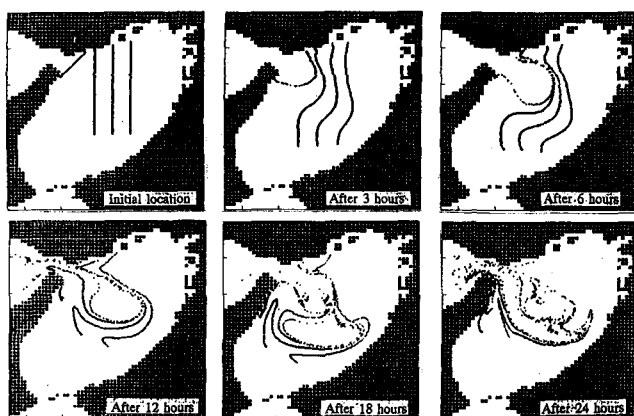


図-1 大阪湾の水表面に配置したマーカーの追跡

向に長軸を有する楕円状に広がる。この傾向は2サイクル後の分布にも認められ、大阪湾の物質の移動には往復流の潮流系よりもむしろ残差流成分が寄与していることが同図から明瞭にわかる。

(3) 流跡線による密度流の可視化

図-2は大阪湾湾奥部の水深1 m層および9 m層の位置に粒子を配置し、2潮汐間にわたって粒子追跡を行った結果である。湾奥の図中の○は粒子の初期位置を、●は水深1 m層、■は9 m層に位置する粒子の流跡線を表している。数字は追跡開始からの経過時間を示す。大阪湾の湾奥部では河川からの淡水流入と水表面の熱収支により複雑な密度流現象を呈しており、流動は3次元的に変化する。湾奥の北東部に位置する粒子A、Bは密度流の影響を受けて上・下層で異なる流跡をたどる傾向にあり、特に淀川河口付近の上層の粒子は神戸沖に向かって運ばれているのが分かる。一方、明石、泉南を結ぶ水深20 mライン上に配置されている粒子Dは上・下層とも明石海峡から発達した強い循環流に取り込まれ、潮汐フロントに沿って2潮汐間に10 km以上も輸送されている。この傾向は図-3に示す上嶋ら⁴⁾による湾奥部での現地観測結果とよく一致する。複雑な3次元的な現象を簡素化された2次元的映像に表示することは、現象をよりの確に理解する上で有用な手法ある。

(4) 流脈線による大規模渦の可視化

図-4は明石海峡の流れが東流最強となる1時間前から海峡断面方向に粒子を等間隔で配置し、2.5分毎に同一地点から1個ずつの粒子を連続的に放流したものである。粒子により描かれる線は流脈線に相当する。明石海峡両端に位置する淡路島の岬の背後と須磨沖には、振動流動場における流れの加速と複雑な地形形状の変化に伴って生じた一組の渦対が観測されている⁵⁾ことが分かる。このうち須磨沖に形成された渦核は時間の経過とともに渦巻が強化されている。一方、淡路島側の渦核は強化されずに下流へと輸送され、沖の瀬循環流に巻き込まれる様子が推測される。

(5) 粒子群の追跡と海水交換

図-5(a), (b)はそれぞれ水表面下2 m水深において明石海峡東流時および西流時の1/2潮時(6時間)の間に大阪湾へ流入または大阪湾から流出した粒子の6時間後、12時間後の状態を示したものである。図中の白抜きの丸印は各1/2潮汐の間に交換した粒子の初期位置を表している。海峡部における水塊の交換現象はラグランジュ的な機構であり、粒子群を一度に追跡することによりその過程を把握することが出来る。

東流時に大阪湾へ流入する水塊は、海峡部の水平地形形状による縮流効果を受けて湾中央部へと

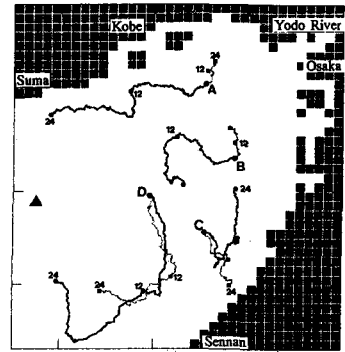


図-2 湾奥部の水深1 m層と9 m層での粒子の軌跡

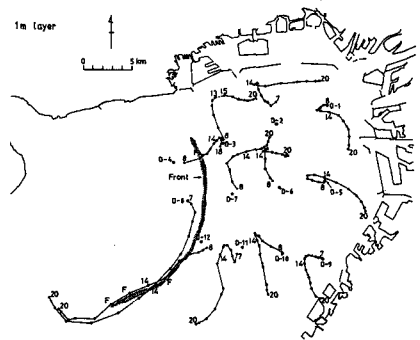


図-3 湾奥部での実測による浮標追跡⁴⁾(水深1 m層)

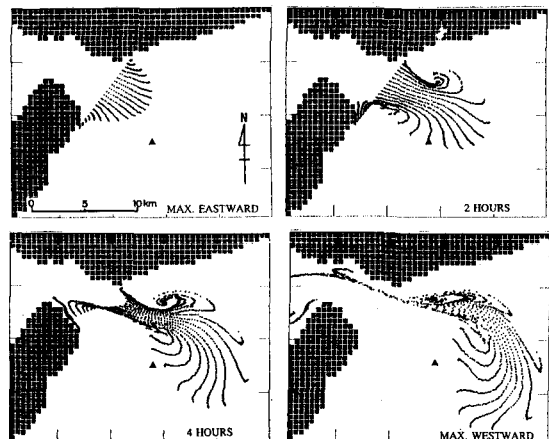
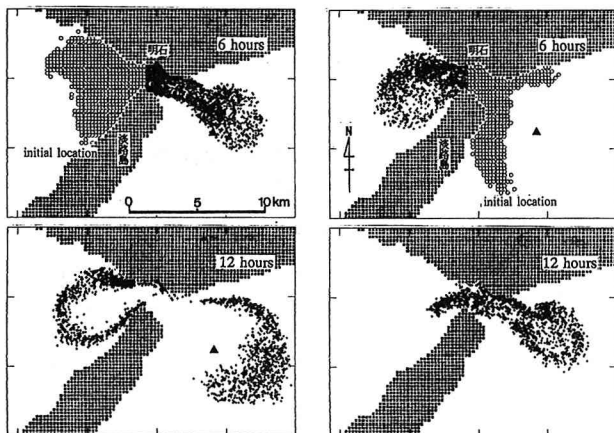


図-4 明石海峡東流時に形成される渦対の流脈線



(a) 明石海峡東流時

(b) 明石海峡西流時

図-5 明石海峡における1潮汐間の海水交換過程

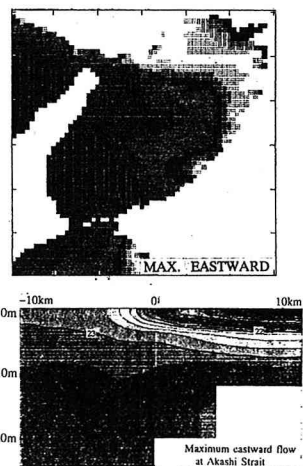


図-6 (a) 密度の水平分布, (b) フロント横断面の鉛直密度分布

ジェット状の流れに乗って輸送されていく。12時間後、その流入水塊は流れ場のせん断効果を受けて沖ノ瀬を中心に円弧状に引き延ばされる。一方、西流時に大阪湾から流出する水塊は、明石、須磨沖と淡路島・仮屋沖の両水塊である。この水塊は6時間後には播磨灘側へと放射状に拡がっている。その後、流れが東流になると、流出粒子の大部分は大阪湾へと引き戻される。播磨灘側に残留する粒子は東流時に大阪湾へ流入した粒子の残留成分と異なり、海峡部分にわずかに分布するのみである。この過程は人工衛星から得られた明石海峡での水塊の交流形態⁹⁾とよく類似している。

(6) 密度分布のカラー表示

図-6 (a) は明石海峡東流時における水表面での密度 σ_t の分布をカラーで表示したものである。大阪湾では明石海峡を往復する潮流により支配される鉛直混合の激しい西部海域と、停滞性の強い夏期に成層化する東部湾奥海域に分けられる。これらの両水塊が接する領域では潮汐フロントと呼ばれる不連続な構造が観測⁹⁾されている。図から湾奥部では $\sigma_t=20$ 以下の軽い河川水が、湾中央部では $\sigma_t=22$ 以上の水塊が拡がっており、等密度線が密に分布している神戸沖の20m水深線では潮汐フロントが生成されているのが視覚的に捉えることが出来る。また図-6 (b) はフロントを横切る方向に観測線を取ったときの同時刻における密度の鉛直断面分布を示したものである。カラーによる表示は読み取りを容易にするのに加えて、色彩の持つ印象(図では暖かくて軽い河川水は赤、冷たくて重い海水は青)から物理現象を感覚的にイメージするための助けとなる。

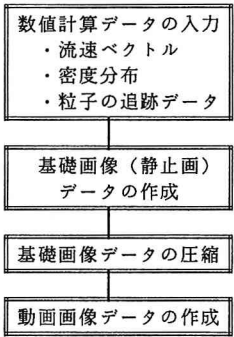
3. 動画 (アニメーション)

動画は幾つもの静止画を次々と連続的に映していくことにより動いているように見せる仕組みになっている。流体のシミュレーションの場合、各計算時間ステップ毎に流体の基礎方程式と乱流モデルを満たした流れの情報が得られることから、通常のCGアニメーションのような複雑な静止画の作成にける労力が必要でなく、流体现象の可視化が比較的容易に行える。とりわけ、沿岸海域で観られるような物質輸送や渦運動の機構を観察するためには、連続的に変化する画像で追跡した方がより深い理解につながる。そこで、数値実験から得られる流体のデータは図-7の流れ図に従って画像データに変換される。

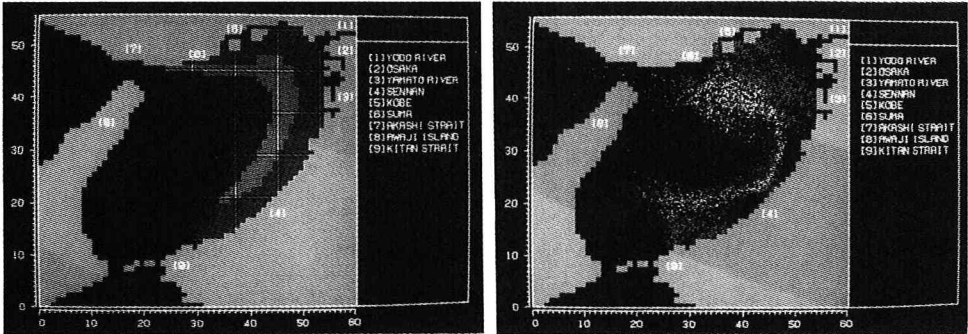
コンピューターで動画を表示する場合の問題点は、大量の静止画像を連続的に取り込み、また滑らかな流れを再現するために、どれだけ高速で画像を表示することが出来るかである。

そのためには、一枚ずつ描かせた基礎画像を圧縮して連続的な画像データを作成する必要がある。その手法として、ここでは連長圧縮法を用いる。この方法は圧縮率がデータの内容によって著しく変化する反面、画像データの復元速度は非常に速いという特徴を持っている。

今回開発したアニメ・ソフトは、流速ベクトル、スカラー量のコンター図、粒子の追跡などを描画することが出来る。写真－１は一例として大阪湾の湾奥に配置した粒子の移動をアニメ化した時の映像である。この例では、1 潮汐間の追跡実験に対して5 分毎の静止画を作成し、圧縮された 144枚の基礎画面を連続的に描写した。この写真は追跡開始時とその6 時間後の画像を撮影したものである。ハード機器にはNEC製のPC-9801を用い、プログラムの作成はC 言語とMS-FORTRAN言語を用いた。



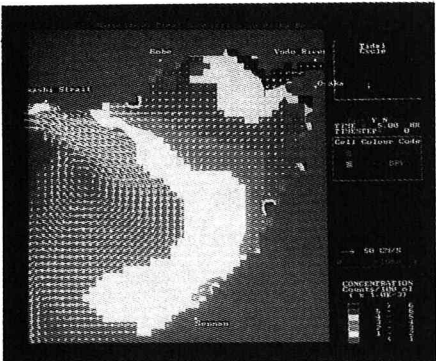
図－7 動画処理の流れ図



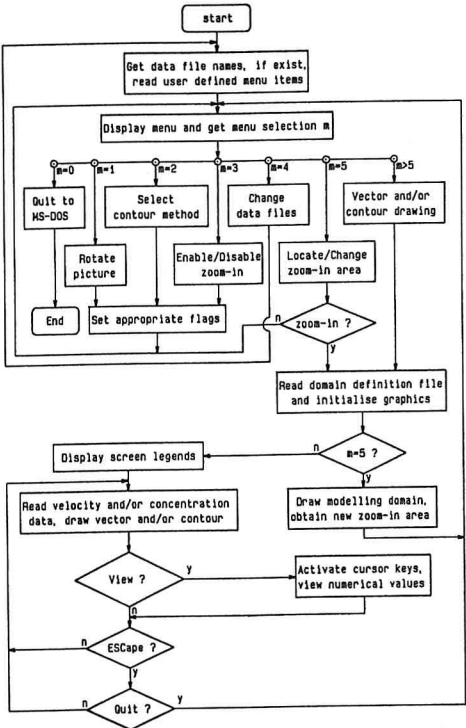
写真－１ アニメーション画像（湾奥部に配置した粒子群の移動）

4. QuickBASIC graphics software

英国の Bradford 大学の画像処理ソフトは2次元数値モデルのソフト DIVAST の後処理として用いられるCGソフトとして開発されたものである。DIVASTの数値実験結果から得られる情報は流れ場の流速と物質濃度であり、このCGソフトにより理解しやすい画像データに加工される。近年、数多くのCGパッケージ（例えば、UNIRAS、AutoCAD、



写真－２ 大阪湾のベクトル図と密度分布



図－8 画像処理ソフトの流れ図⁷⁾

NAG、FREELANCE 等) が市販されているが、それらは一般にそのアルゴリズムが分からないことに加えて、容量が大きく、経費が高く、しかも速度が遅い。Bradford大学CGソフトはこれらの汎用ソフトの欠点を補っている。プログラムはMS-DOS ver. 5.0のQuickBASIC言語で作成されている。

図-8はCGソフトの流れ図を示したものである。このプログラムは2つの画像技法から構成されている。1つは流速のベクトル表示で、もう1つはスカラー量のコンター表示である。コンター図には汚濁濃度や溶解濃度、密度、底面摩擦、温度の分布などを表現することが出来る。したがって、入力データは計算対象領域の地形データとDIVASTから得られた流速とスカラー量の計算結果である。プログラムの実行にはメニュー画面に起動形式を採用している。メニュー画面には次の10項目があり、必要に応じた画像が得られるように汎用性が持たされている。すなわち、メニュー画面には①MS-DOSのシステムへ、②ベクトルの表示、③スカラー量のコンター表示、④ベクトル+コンターの表示、⑤図面の回転、⑥スカラー量の内挿関数の選択(線形/2次関数)、⑦モニター画面のズーム機能、⑧入力ファイル名の変更、⑨全計算対象領域の表示、そして⑩流速や物質濃度の値の出力がある。これらの機能は、研究面からいえば必要条件を満たしている。また、少ないデータ数のときはアニメーションとしての利用も可能となる。

写真-2は大阪湾での数値計算結果をBradford大学CGソフト画像に描き出したもので、潮流場の流速ベクトルと密度コンター図を同時に描写したものである。現在、大阪大学とBradford大学間で共同研究を進行中であるが、計算結果のフロッピーのやりとりだけで同画面での可視化が可能となり、現象を理解し、且つ研究を促進させるうえで効率的である。

5. あとがき

河口・沿岸域における水質解析や環境アセスメントの一手法として、数値シミュレーションが、近年活用されている。河口・沿岸海域で観られる水理現象の数値モデルの構築において、熱収支や河川流入による密度流現象の3次元的な取り扱いおよび複雑な地形形状の表現や乱流現象の適切なモデル化による精度向上は、現地観測や水理実験による知見の集積と現象の理解が進むにつれて改善される。反面、この基礎研究の進展に伴って数値実験から得られる情報量は膨大化する傾向にある。出力データの解釈には多大な時間と労力が要求される。流動をベクトル表示した静止画像で眺めると、連続的に変化する画像で追跡するのでは現象の捉え方は明らかに異なる。研究面からも、また結果を表示して議論を行うという実用面からも、物理現象の可視化と対話型コンピューター支援システムの開発が急務であるといえる。今後は、大阪湾で観られる水理現象の3次元構造を適切に把握するための可視化技法やアニメーション技法の開発を行う予定である。

最後に、本研究は平成4年度文部省科学研究費重点研究(人間環境系、04202129)および平成4、5年国際学術研究(04044107)の補助を受けた。また、水理委員会基礎水理部会「水理実験のvisualizationとpresentation(通称、V&P)」研究分科会における討論が非常に役立った。また、R.A.Falconer教授よりCGソフトプログラムの提供を、アニメーションの作成には東北大学工学部の長尾昌明氏よりソフトの提供を得た。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 中辻啓二・山見晴三・末吉寿明・藤原建紀: 海岸工学論文集, 第39巻, pp.906-910, 1992.
- 2) 末吉寿明・山見晴三・中辻啓二・村岡浩爾: 第47回年次講演会概要集, 第2部, pp.1250-1251, 1992.
- 3) 中辻啓二・山本信弘・山見晴三・室田 明: 海岸工学論文集, 第38巻, pp.186-190, 1991.
- 4) 上嶋英機、他5名: 海岸工学論文集, 第34巻, pp.661-665, 1987.
- 5) 藤原建紀・中田英昭: 海の気象, 第35巻, 5・6号, pp.58-71, 1990.
- 6) Yanagi, t. and Takahashi, S.: Dynamic of Atmosphere and Ocean, Vol.12, pp.191-206, 1990.
- 7) Chen, Y and R.A.Falconer: 4th Intl. Conf. Hydrosoft '92, pp.21-24, 1992.