

大阪湾の恒流に関する数値実験

大 西 行 雄*

1. ま え が き

湾内における水質汚濁拡散を支配する要因として、特に時間スケールの大きな長期変動過程に対しては、潮汐振動流よりも恒流の方が重要であることは最近ではいわば常識となりつつある。

恒流は、潮汐流の非線型性に起因するもの（潮汐残差流）、海水密度の非一様性に起因するもの（浮力効果による流れ、または密度流）、風に起因するもの（吹送流）に分類されるが、従来から行なわれてきた一層モデルの数値シミュレーション手法は、これらのうち潮汐残差流と吹送流のみを、不完全な形で記述できるに過ぎない。和田ら¹⁾は、三河湾に対して三次元モデルを適用し、吹送流が顕著な鉛直循環流として現われることを明らかにしたが、密度効果が明らかにされていない点が不満である。著者は潮汐残差流、密度流、吹送流を含めて恒流を取り扱うには、現時点では、最も簡単な3次元モデル、すなわち2層位モデルで充分であるとし、モデルの設計思想²⁾、計算方式³⁾を既に公表している。本報告は、その考えを大阪湾の恒流に対して適用し、恒流に対する上記3流系の寄与の程度を検討したものである。

2. 数値モデル

(1) 格子分割

計算対象領域は、図-1に示すような、大阪湾とその周辺海域である。本報告の主たる対象である大阪湾の周辺に広く領域を設けたのは開口端近傍の計算誤差が湾内に及びにくくするためである。海域を水平的には2kmの正方形格子に、鉛直には平均海面下10mで2層位(level)に分割する。層位モデルは層厚が時間的に固定される点が層(layer)モデルと異なる。鉛直流は海面下10mの水平面を通過する鉛直流量により表示される。

(2) 潮汐応力

海域の流れを潮汐残差流、密度流などと分類することは可能だが、実際にはこれらの流れは互いに非線型に結合している。しかし、全ての流系の完全な結合系を扱うことは困難でもあるし、そのことに付随する技術的難点

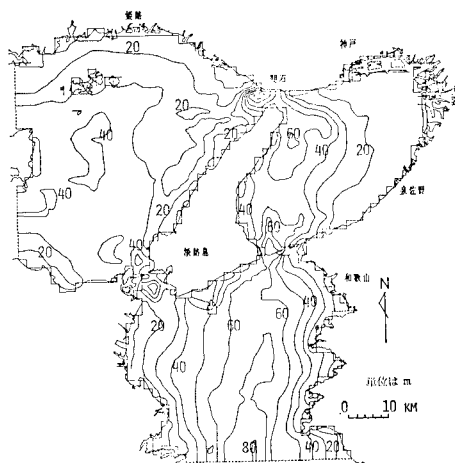


図-1 計算領域と水深分布

を考慮すれば現時点での最善とは言えない。ここでは、潮汐振動流と潮汐残差流との共存系（潮汐流系）、潮汐残差流と密度流と吹送流の共存系（恒流系）の2段階に分けて流況を扱う。ここで潮汐残差流のみが両方の系に含まれていることに注意しよう。

潮汐残差流は、潮汐振動流の非線型歪みによって形成される流れである。従って、潮汐流系を扱うことに問題はない。しかし、潮汐振動流を含めずに恒流系を扱うことが可能だろうか。この問題は既に著者によって⁴⁾、一層モデルの場合に解決されている。すなわち、最初に潮汐流系の計算を終わった時点で、潮汐振動流が潮汐残差流を駆動する「力」を、一種のラザエーションストレスである潮汐応力という形で分離することが可能であり、恒流を支配する方程式系が流れの非線型性を正しく表現するならば、この潮汐応力によって潮汐残差流は正しく再現可能である。この考えは容易に3次元モデルに拡張可能である。

(3) 診断モデル

密度流は海水密度の非一様性によって駆動される流れである。従って、密度流のモデリングは、海水密度分布の計算を含めて始めて完全なものとなる。ここで「完全」とは、方程式系が閉じることを意味している。この

ようなモデルを予報モデルという。予報モデルには、密度分布の計算誤差と、流れの計算誤差は互いに助長しあうという難点がある。実際、大阪湾のような内湾の海水密度分布は、季節変動をするので、予報モデルは海水密度分布の年間のサイクルを表現することが前提となるが、それには現時点で困難も多い⁵⁾。

予報モデルに対比すべきアイデアとして、海水密度分布は実測値を用いて密度分布に対する平衡流動場を計算するという診断モデルがある。本研究の目的からすれば、信頼性の小さな予報モデルよりも、海水密度には少なくとも信頼性における診断モデルの方が適当である。予報モデルの考え方は、従来、外洋に対して適用され⁶⁾てきたが、その理論的根拠は、Sakurai⁷⁾によって示されたように、海水密度場に対して流動場が比較的小さな時間（スピンアップ時間スケール）で近似的平衡に達するというにある。Endoh⁸⁾は診断モデルのアイデアを方程式系を単純化して琵琶湖に対して適用し、密度場として4日間4回の観測の平均を用いることで信頼性のある流動場の推定に成功している。本報告の診断モデルの特徴は従来のものには含まれていない潮汐応力を含む点である。

(4) 基礎方程式系

方程式は、3次元非圧縮流体に対する、コリオリ項を含む、ブーシネ近似、静水圧近似のナビエーストークス式である。計算式と共に既報⁹⁾であるので詳細は略す。ただ、本報告では平衡流動場を対象とするので、時間変化項は省略できることを注意しておく。

3. 入力諸元

(1) 海水密度分布

計算のケースを夏と冬とし、海水密度分布はそれぞれ7月と1月の平均分布を求めた。なるべく平均的で、擾乱の小さなデータを得るため、1971年から1975年に至る5ケ年の府県水産試験場の観測データ（浅海定線調査）を用い、次の手順で求めた。観測記録を鉛直方向に折れ線近似したものから、上層（10m以浅）と下層の平均密度を求める。同一地点の前後の記録から、各年につき1月（7月）15日相当のデータを直線補間によって求める。その5ケ年平均から、水平にスプライン補間によって格子点に割りふる。割りふられた結果から3×3格子に1つのデータをサンプリングして、それを用いてスプライン補間によって、再度、格子点に割りふる。この最後の手順は一種の平滑化の意味を持っている。このようにして得られた分布を、浮力 $b=(\rho_0-\rho)g/\rho_0$ （ただし $\rho_0=1.024\text{ gr/cm}^3$, $g=980\text{ cm/sec}^2$, ρ は上記海水密度）に変換して、図-2に示す。

(2) 河川流入量

対象海域に流入する101河川を選び、1971～1975年の

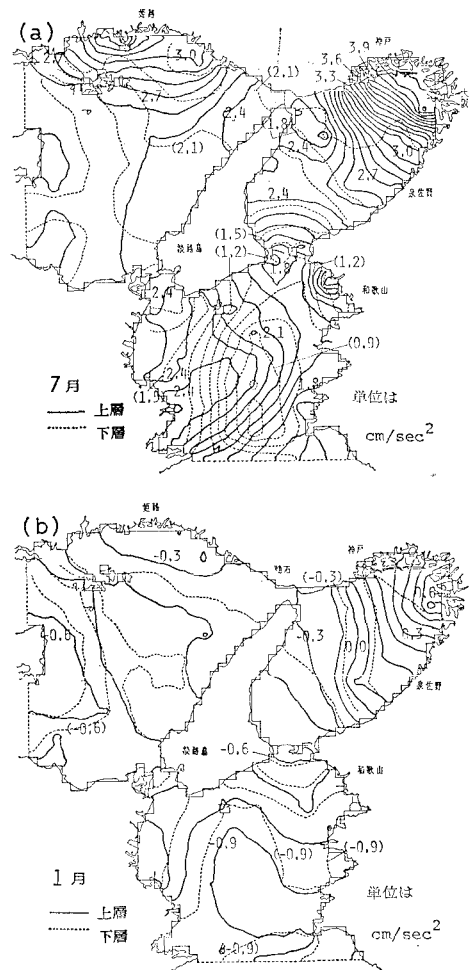


図-2 実測浮力分布

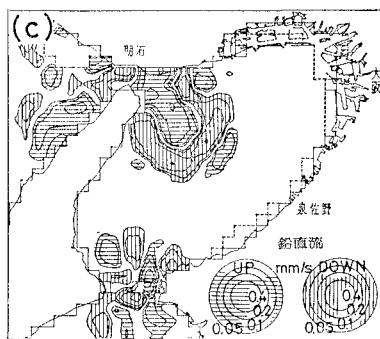
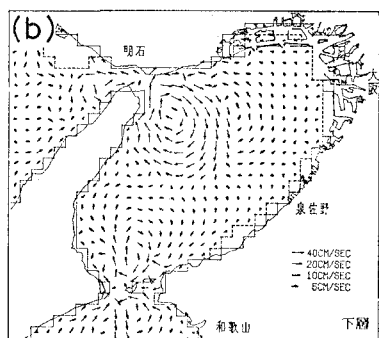
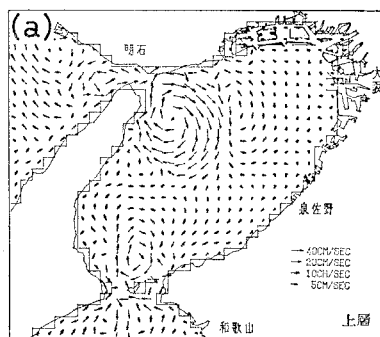
5ケ年平均の流入量を、冬季（1, 2月平均）と夏季（7, 8月平均）について、それぞれ求めた。その手法は、1級河川については流量年表を用い、測定地点下流の取排水を考慮して求めた。それ以外の河川については実測データと近隣1級河川との流量比を用いて、あるいは流域面積に関して、近隣1級河川との比を用いて、推定した。全データをここで挙げないが、各1級河川のデータと、101河川の合計を表-1に示しておく。

表-1 河川流入量（単位は m^3/sec ）

河川名	揖保川	加古川	淀川	大和川	紀ノ川	吉野川	那賀川	全 体
1, 2月 平 均	22.69	29.68	100.70	13.85	36.64	78.22	25.25	679.53
7, 8月 平 均	44.05	71.47	319.07	44.60	84.52	255.02	182.46	1798.17

(3) そ の 他

潮汐流系の計算にあたっては、図-1の点線で示され

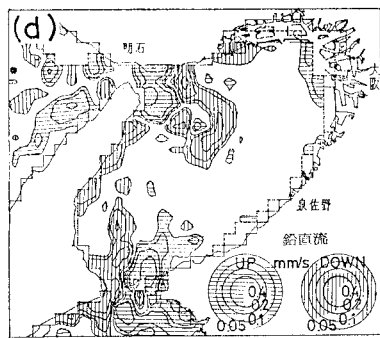
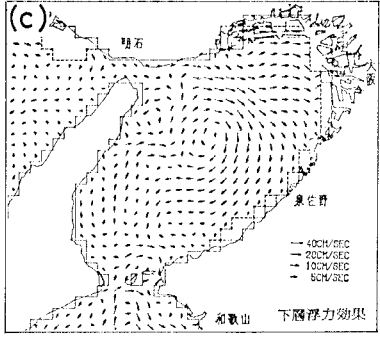
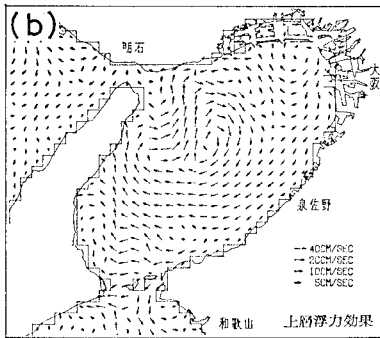
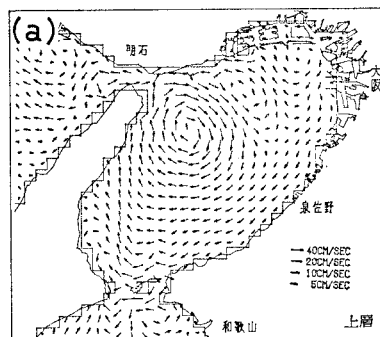


図—3 潮汐残差流

た開口端での M_2 分潮の潮位条件を、橘浦、御坊、大多付島、大部、坂手、引田の観測値をもとにして与えた。全モデルを通じて、水平方向の渦動粘性係数として $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、鉛直方向の渦動粘性係数として $5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、底摩擦係数として 0.001、また吹送流計算での海面摩擦係数、空気密度にそれぞれ 1.3×10^{-3} 、 $1.226 \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$ を用いた。

4. 結 果

潮汐流系モデルで計算された潮汐残差流と比べて恒流系モデルで、海水密度を一樣、無風の条件で再計算された潮汐残差流の再現性は良好である。また後者については、河川流入の有無による変化も検討したが、ほとんど差異がなかった。図—3 には後者による、夏の河川流入のケースを示すに留める。



図—4 7月の恒流

次に、夏(7月)の浮力分布を与えて、無風条件で恒流計算が行なわれた。結果を図示するに際して、(a) 上層の恒流、(b) 浮力効果を分離するため、上層の恒流から潮汐残差流(図3—(a))をベクトルの的に差し引いたもの、(c) 同様に下層の恒流と潮汐残差流(図3—(b))との

差, (d) 恒流の鉛直成分に分けて, 図-4 に示す。

次に, 冬(1月)の浮力分布を与えて, 無風条件と, 5 m/sec の北風の条件で恒流計算を行なった。これらについては, それぞれ, (a) 浮力効果のみ分離したもの, (b) 北風の結果から無風の結果を差し引いて, 風の効果だけを分離したものを, 図-5 に示す。

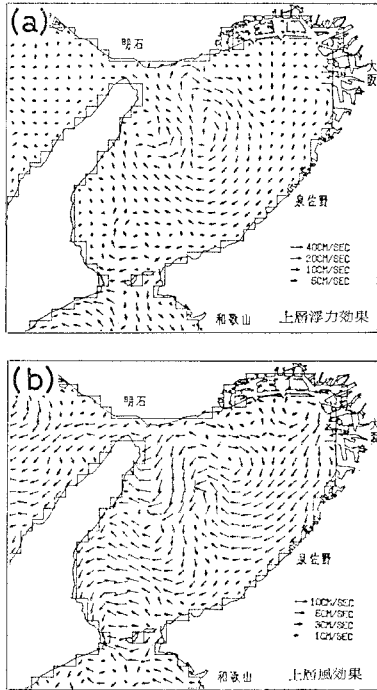


図-5 1月の恒流

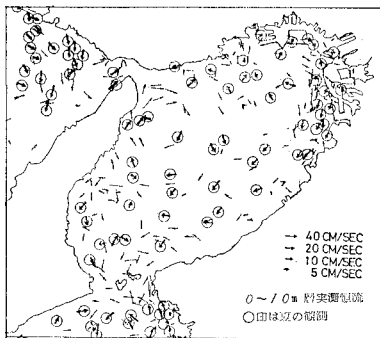


図-6 実測恒流分布

計算結果と比較するために, 対象海域における既報の恒流実測値を集計した。図-6 は, 上層における実測値を季節に無関係に全部一括して示したものであるが, データの大部分は春と夏の観測例である。

まず, 潮汐残差流の計算結果を見てみよう。大阪湾上層における流れは, 明石海峡東部での時計廻りの循環流が特徴的であり, この付近及び友ヶ島海峡北部の流況

は, 実測データとよく対応している。一方実測において見られる大阪湾東岸を南下する流況は潮汐残差流では微弱であり, 説明しきれない。潮汐残差流で特徴的なことは, 上, 下層の流れが良く似ている点である。和田ら¹⁹⁾は, 三河湾における3次元モデルによる計算から, 潮汐流ならびに潮汐残差流は, 水平循環流としての性質が卓越すると述べているが, 上・下層の流況だけを見ているとそれを裏づけるかのようである。しかし, 鉛直流の分布図を見れば, この流れが, 海峡周辺での上昇流とそれをドーナツ状に取り巻く下降流という特徴ある鉛直流分布を伴っていることが示されている。この鉛直流形成の力学的機構については, 地形を単純化したモデル実験で著者²⁾が報じているが, 大阪湾においても同様の機構で形成されていると考えてよい。

さて, 7月の浮力効果を含めた恒流の診断結果を実測と比べてみよう。大阪湾東岸での南下流が明確に現われて, 実測との対応が良くなっているのがわかる。この計算結果と実測はパターンのみでなく流速の大きさも良く一致している。浮力効果だけを分離した図を見れば, 上層では東岸に沿って南下し, 淡路島に沿って北上する流れが, 下層では湾奥部に向かう東向きの流れが特徴的である。この計算結果の信頼性を間接的に裏づける事実は浮力分布(図-2(a))の中に見られる。湾奥部の浮力分布の, 上層での大きな水平勾配と, 下層での驚くべき一様性は, 計算された流況から合理的に推定できるものである。海峡部周辺の鉛直流は浮力効果を考慮することによって弱められているが, 潮汐残差流によるものを逆転するには至っていない。このことは, 潮汐残差流に伴う鉛直流が実測に見られる浮力分布を作り, その浮力分布が浮力効果による流れを形成しているとすれば当然である。湾奥域には, 浮力効果によって新たに上昇流が形成されている。図-5に見られるように, この浮力効果による流れは, 冬季にも程度の差こそあれ, 継続し, この流れが基本的には河川からの淡水供給によることを示唆している。

最後に, 風の効果については, 5 m/sec 程度の風でも, 無風状態の基本場に対して, かなりの変化をもたらすことが示されている(図-5(b))。ここには図示しないが, 吹送流は, 和田¹⁸⁾らの報告と同様, 上下層の流れの向きが大きく異なる鉛直循環流の構造を持っている。

5. 結 論

恒流に対する, 潮汐・浮力・風の効果の寄与を検討するため, 大阪湾を対象として, 2層位の診断モデルによるシミュレーション解析を行なった。今回展開した計算手法は, これらの3効果の共存する場を, 充分に無理なく表現できることが確認された。計算の結果, これら3つの効果による流れは, いずれも鉛直流成分を持つ三次

元的構造を持つこと、夏の実測恒流は潮汐と浮力の効果で基本的に説明づけられること、季節風が長時間吹き続ける冬季には風の効果が無視できないことが明らかになった。

最後に、本研究は、運輸省第三港湾建設局の調査として行なわれ、計算はセンチュリ リサーチ センター(株)において行なわれたことを記し、謝意を表します。また、貴重な助言をいただいた。京都大学の国司秀明教授、愛媛大学の樋口明生教授、運輸省港湾技術研究所の堀江毅室長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 和田 明・宮地克人：湾内水の循環機構に関する研究。第25回海講論文集，pp. 533～537，1978。
- 2) 堀部純男編：環境科学としての海洋学，東大出版会，pp. 150～160，1978。
- 3) 堀部純男編：環境科学としての海洋学 2，東大出版会，pp. 246～270，1978。
- 4) Oonishi, Y.: A numerical study on the tidal residual flow, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 33, pp. 207～218, 1977.
- 5) 大西行雄・国司秀明：瀬戸内海の物理的海況要素のシミュレーションについて。沿岸海洋研究ノート，第16巻，pp. 1～10，1978。
- 6) Holland, W. R. and A. D. Hirschman: A numerical calculation of the circulation in the North Atlantic Ocean, J. Phys. Oceanogr, Vol. 2, pp. 336～354, 1972.
- 7) Sakurai, T.: Spin down problem of rotating stratified fluid in thermally insulated circular cylinders, J. Fluid Mech, Vol. 37, pp. 689～699, 1969.
- 8) Endoh, S.: Diagnostic analysis of water circulation in Lake Biwa, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 34, pp. 250～260, 1978.
- 9) 前出 3)
- 10) 大西行雄：スプライン法を用いた2次元補間について，日本海洋学会誌，第31巻，pp. 259～264，1975。
- 11) 前出 1)
- 12) Oonishi, Y.: A numerical study on the tidal residual flow—Vertical motion induced by tidal current—, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 34, pp. 140～159, 1978.
- 13) 前出 1)