

# 瀬戸内海全域における海水流動特性の数値実験

田中陽二<sup>1</sup>、河原能久<sup>2</sup>、末永慶寛<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>香川大学大学院工学研究科、<sup>2</sup>香川大学工学部)

**概要** 本研究は、瀬戸内海の流動や水質を定量的に把握することの基礎的な段階として、準3次元数値モデルによる計算をおこなった。本研究により、瀬戸内海の流動特性として以下のことがわかった。1) 単層モデルと多層モデルでは転流時に流量の差が大きい。2) 単層では3m/sの風を吹かせてもあまり変化はないが、多層モデルでは表層の流向が大きく変化した。3) 鉛直流は海峡部や島付近で発達しており、流速のオーダーは強いところでも水平流の1/100程度である。

**キーワード:** 瀬戸内海、数値計算、多層モデル

## 1 はじめに

瀬戸内海的环境保全を考える上で、流動場を把握することが必要である。本研究は、準3次元数値モデルによる計算により流動場の特徴を明らかにすること、及び冬季の季節風が海水流動に与える影響を評価することを目的とする。なお、瀬戸内海全域を対象にした単層モデルによる計算例や特定の湾を対象とした多層モデルによる計算例は報告されているが、本研究では瀬戸内海全域を多層モデルで計算しており、この点が本研究の特徴である。

## 2 瀬戸内海の冬季の季節風特性

瀬戸内海は年間を通してみると風向に偏りは少ないが、季節風の影響が強くなる冬は西風が卓越する。風による吹送流は卓越した風向があると流れに強く影響を及ぼすため、1月における風向風速の頻度を求めた。瀬戸内海沿岸部のアメダス地点における1月の風向ヒストグラムを図-1に示す。

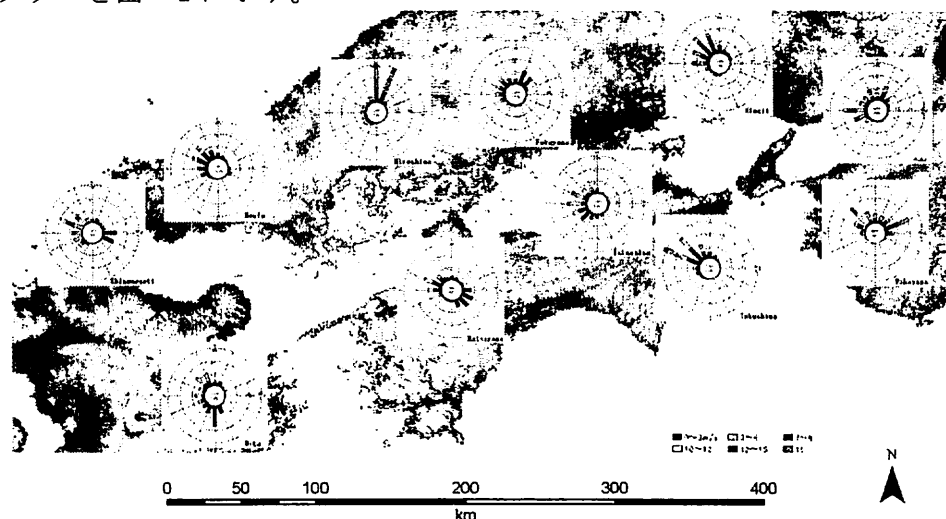


図-1 瀬戸内海周辺における冬季風速頻度

バーの方向は風向、色は風速、長さは頻度を表している。データは 1985~1999 年の 15 年間集計である。図を見ると広島以外は西~北西の風が卓越しており、これらは季節風の影響と考えられる。また風速はほとんど 6m/s 以下である。本研究は以上の結果を踏まえて、西風 3m/s の海上風を吹かせ、流動に与える影響を考察した。

### 3 研究方法

#### (1) 数値計算手法

潮流の計算には静水圧分布を仮定した多層モデルを採用し、スタッガードグリッドを用いた (図-2)。

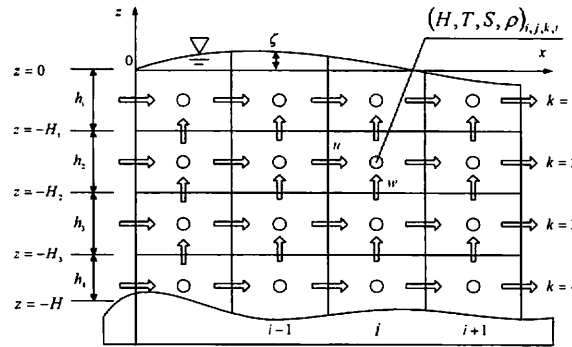


図-2 計算格子と変数配置

本研究における基礎方程式を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} w_{LN} &= 0 \\ w_{k-1} &= w_k - \frac{\partial M_k}{\partial x} - \frac{\partial N_k}{\partial y} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= w_1 - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_k}{\partial t} &= -\frac{\partial M_k \bar{u}_k}{\partial x} - \frac{\partial M_k \bar{v}_k}{\partial y} - (uw)_{-H_{k-1}} + (uw)_{-H_k} + f_0 N_k - \frac{h_k}{\rho_k} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{\rho_1 g h_k}{\rho_k} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ &\quad - \frac{g h_k}{\rho_k} \sum_{i=1}^{k-1} h_i \frac{\partial \rho_i}{\partial x} - \frac{g h_k^2}{2 \rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_h \frac{\partial M_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_h \frac{\partial M_k}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (2) \\ &\quad + \gamma_k^2 (u_{k-1} - u_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2} \\ &\quad - \gamma_{k+1}^2 (u_k - u_{k+1}) \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_k}{\partial t} &= -\frac{\partial N_k \bar{u}_k}{\partial x} - \frac{\partial N_k \bar{v}_k}{\partial y} - (vw)_{-H_{k-1}} + (vw)_{-H_k} - f_0 M_k - \frac{h_k}{\rho_k} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{\rho_1 g h_k}{\rho_k} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ &\quad - \frac{g h_k}{\rho_k} \sum_{i=1}^{k-1} h_i \frac{\partial \rho_i}{\partial y} - \frac{g h_k^2}{2 \rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_h \frac{\partial N_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_h \frac{\partial N_k}{\partial y} \right) \dots \dots \dots (3) \\ &\quad + \gamma_k^2 (v_{k-1} - v_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2} \\ &\quad - \gamma_{k+1}^2 (u_k - u_{k+1}) \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2} \end{aligned}$$

ここで、 $u, v, w$  :  $x, y, z$  方向の流速、 $M, N$  :  $x, y$  方向の線流量、 $\bar{u}_k, \bar{v}_k$  :  $k$  層内平均流速、 $h_k$  :  $k$  層の層厚、 $f_0$  : コリオリパラメータ、 $\rho$  : 密度、 $p_a$  : 大気圧、 $g$  : 重力加速度、 $\zeta$  : 潮位、 $\varepsilon_h$  : 水平渦動粘性係数、 $p$  : 圧力、 $\gamma_k^2$  : 層間の摩擦係数、である。

海面上の風応力と海底面の摩擦応力についても式(2)、(3)の最終項のようにバルク形式により表現している。離散化方法については差分法を用いて、時間差分については Leap Frog 法、空間差分については 2 次精度中心差分とした。

## (2) 計算条件

計算領域を図-3 に示す。なお、四国の南沖は計算から除外している。

開境界 AB、CD、EF より  $M_2$  分潮の潮汐 (12.42 時間周期) を与えて内部の流速を計算している。東側境界の FG は水深 0m とし壁のようにしている。各開境界 AB、CD、EF の振幅はそれぞれ 0.491, 0.508, 0.462(m)、遅角はそれぞれ 95.4, 0.0, 0.0(deg) を与えて計算を行った。

本研究では単層モデルと多層モデルの違い、及び風の影響を調べるために単層モデルと 3 層モデル、及び無風状態と西風 3m/s を与えた計 4 ケースを計算した。共通する計算パラメータを表-1 に示す。3 層モデルの層厚は表層から 5m、5m から 100m、100m から海底までとした。

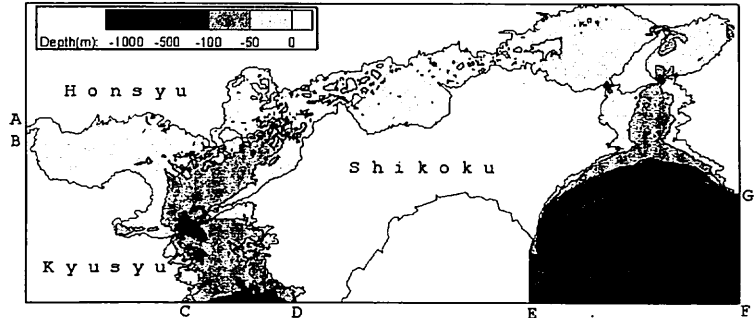


図-3 計算領域と水深

表-1 計算条件

$\Delta x, \Delta y$ [m]	1,000	マンニングの粗度係数 [ $m^{-1/3}s$ ]	0.026
$\Delta t$ [s]	1	海面の摩擦係数 [-]	0.0013
$f_0$ [1/s]	$8.12 \times 10^{-5}$	$\gamma_k^2$ [-]	0.05
$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	1.0234	$\varepsilon_h$ [-]	50.0

## 4 計算結果と考察

3 層・無風のケースの計算結果を観測値<sup>2)</sup>と比較した(図-4)。図は上が振幅、下が位相の比較である。単層・3 層モデルともに観測値を良好に再現している。なお、両モデルを比較した場合、振幅の誤差は単層モデルの方が少ないが、位相誤差は 3 層モデルの方が少ない。

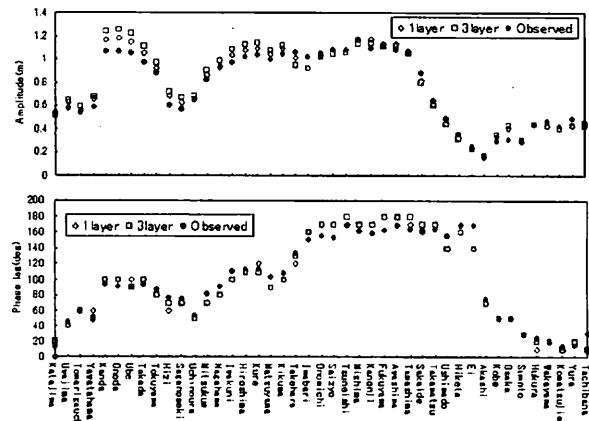


図-4 計算結果と観測値の比較

## (1) 単層モデルと多層モデルの違い

下げ潮時における単層・無風と多層・無風のケースとの流量を各断面について算出した(図-5)。

単層モデルと3層モデルとの流量の差は場所ごとに異なる。例として、豊後水道と紀伊水道における単層モデルと3層モデルの流量差を図-6,7に示す。differenceは3層モデルの流量引く単層モデルの流量である。

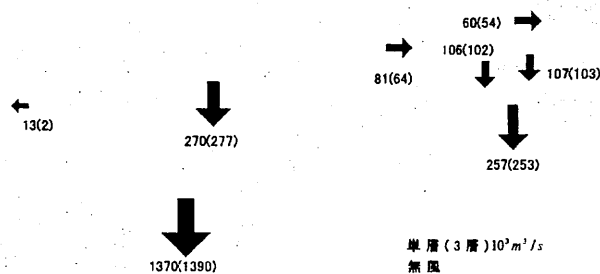


図-5 単層モデルと3層モデルの流量

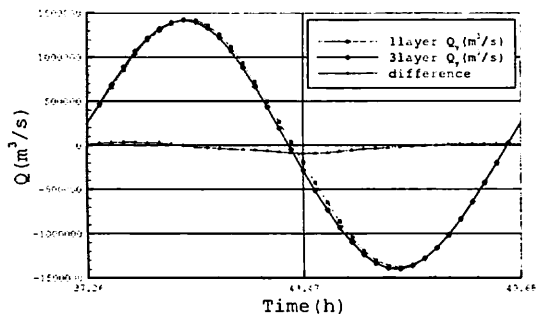


図-6 単層・3層モデルの流量(豊後水道)

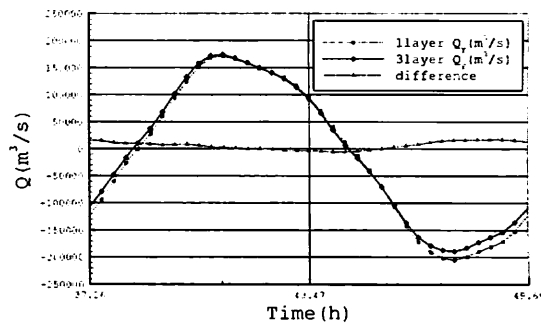


図-7 単層・3層モデルの流量(紀伊水道)

豊後水道では、3層モデルの流量は単層モデルに比べ、上げ潮から下げ潮の間で下方向の流量が多く、下げ潮から上げ潮の間ではそれほど大きな差はない。逆に紀伊水道では、上げ潮から下げ潮の間では差異は少なく、下げ潮から上げ潮の間では3層モデルのほうが上方向の流量が多い。37.26時間から49.68時間までの流量を積分すると、豊後水道の単層モデルでは $1.68 \times 10^7$  [m<sup>3</sup>]、3層モデルでは $1.27 \times 10^6$  [m<sup>3</sup>]となる。紀伊水道の単層モデルでは $-9.44 \times 10^6$  [m<sup>3</sup>]、3層モデルでは $-4.76 \times 10^6$  [m<sup>3</sup>]となる。これより3層モデルの方が、残差流は小さくなっているのがわかる。

## (2) 季節風の影響評価

単層、3層モデルで西風3m/sを与えてその影響を調べた。単層モデルによる大阪湾の残差流で無風状態の計算結果を図-8に、季節風を与えた場合の計算結果を図-9に、同じく3層モデルによる無風状態の計算結果を図-10に、季節風を与えた場合の計算結果を図-11にそれぞれ示す。

単層・西風3m/sのケースでは流速にあまり変化は見られなかったが、3層・西風3m/sのケースについては表層の流向が大きく変化した。図-11より、西風3m/sを吹かせた場合、関西国際空港を迂回する流れが発達していることがわかる。また、無風時では表層と2層目のベクトルはほぼ同じであるが、風を吹かせた場合は、湾内部では表層ベクトルが東に流されており、沿岸部では表層と2層目のベクトルの差異が大きくなっている。これらより、瀬戸内海において季節風の影響を見るためには多層モデルによる解析が必要であることが示唆される。

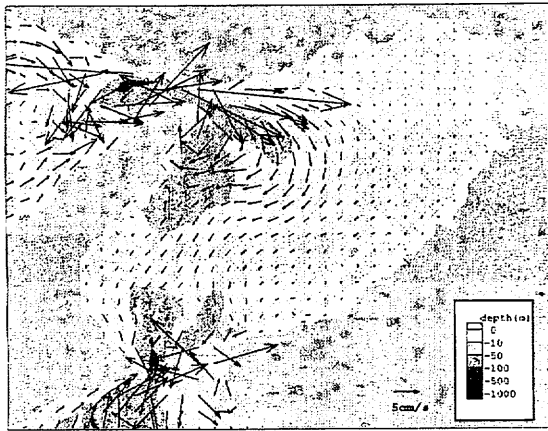


図-8 大阪湾の残差流（無風・単層）

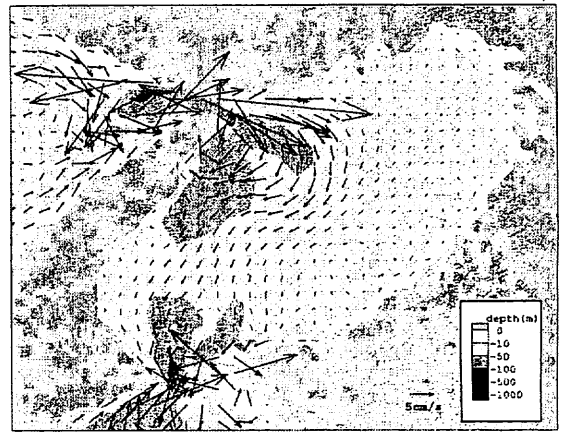


図-9 大阪湾の残差流（風あり・単層）

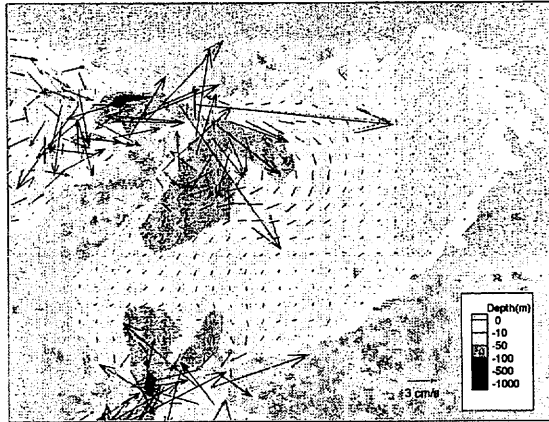


図-10 大阪湾の残差流（無風・3層）

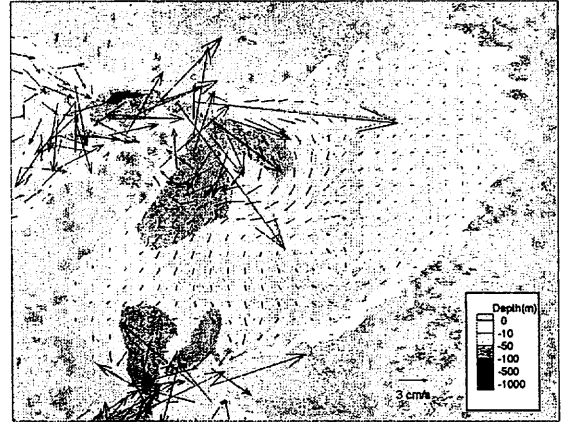


図-11 大阪湾の残差流（無風・3層）

また、前節の結果と同様に3層モデルは単層モデルと比べて全体的に残差流が小さいことがわかる。

### (3) 海峡部の鉛直流

3層の無風状態で計算した豊予海峡の上げ潮時と下げ潮時の流速結果を図-12,13に、備讃瀬戸の流速結果を図-14,15に示す。図中の赤いベクトルが水平流を表しており、コンター図は鉛直流を表している。

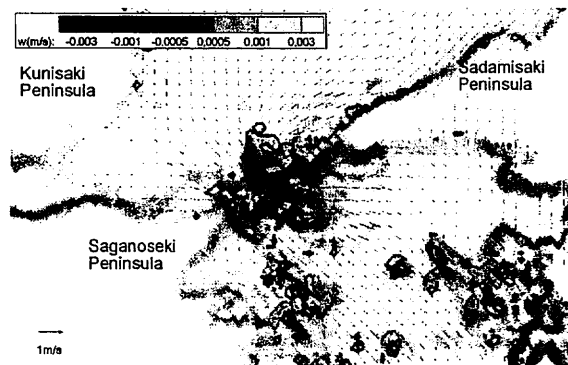


図-12 下げ潮時における豊予海峡の鉛直流

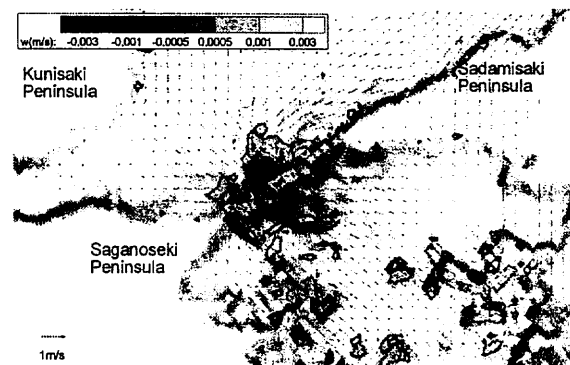


図-13 上げ潮時における豊予海峡の鉛直流

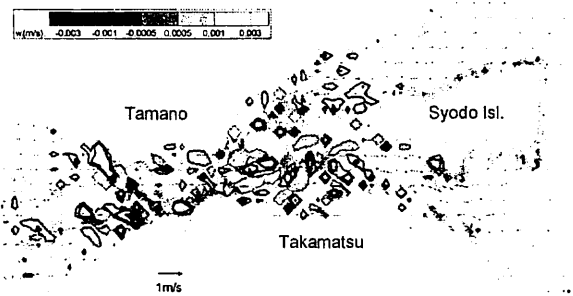


図-14 下げ潮時における備讃瀬戸の鉛直流

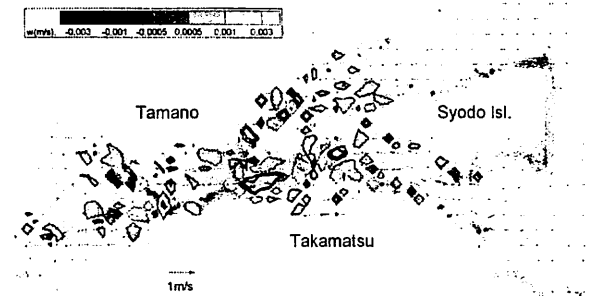


図-15 上げ潮時における備讃瀬戸の鉛直流

計算結果より鉛直流は海峡部や島付近でよく発達している。その流向は上げ潮時と下げ潮時で逆転している場合が多い。鉛直流の流速のオーダーは水平流の 1/1000 程度である。

## 5 おわりに

瀬戸内海全域の単層及び 3 層モデルによる解析を行い、以下の結論を得た。

1. 単層モデルと 3 層モデルによる流量の差異は場所ごとに特性が異なるが、3 層モデルでは残差流が小さくなっている。
2. 季節風の影響が単層モデルでは小さくできる可能性があり、多層モデルでの検討が必要である。
3. 海峡部の鉛直流は上げ潮時と下げ潮時で流向が逆転する場合が多い。
4. 鉛直流のオーダーは大きくとも水平流の 1/1000 程度である。

今後は水温・水質モデルも組み入れた計算を行う予定である。

## 参考文献

- 1) (財) 気象業務支援センター. アメダス観測年報 (テキストファイル版) CD-ROM.1984-1999.
- 2) 海上保安庁水路部 (編). 日本沿岸潮汐調和定数表. 財団法人 日本水路協会, 1992.
- 3) 横山長之 (編). 環境シミュレーションシリーズ 海洋環境シミュレーション-水の流れと生物-. 白亜書房, 1993.
- 4) Kazuo MURAKAMI. The considerations of  $M_2$  components for numerical modeling of tidal current in the Seto inland Sea. Proc 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Flow Modeling and Turbulence Measurements ·FMTM2001·, pp. 35-36, 2001.
- 5) 田中陽二, 末永慶寛, 河原能久, 吉野文雄. 瀬戸内海全域における海水流動の数値実験. 土木学会四国支部第 8 回技術研究発表会講演概要集, pp. 101-102, 2002.
- 6) 田中陽二, 河原能久. 多層モデルによる瀬戸内海全域の潮汐流の解析. 第 16 回数値流体力学会シンポジウム講演要旨集, p.82, 2002.