

吉見湾の潮流シミュレーション

千手智晴^{*1}・伊藤昌高^{*2}・杉原滋彦^{*1}Numerical Simulation of Tidal Currents in
Yoshimi Bay, ShimonosekiTomoharu Senjyu^{*1}, Masataka Ito^{*2}, and
Shigehiko Sugihara^{*1}

To show flow configuration in Yoshimi Bay, Shimonoseki, a numerical simulation of tidal currents was carried out. Two model experiments, the constant-depth model with the mean water depth (case A) and the real-depth model (case B), were carried out to determine the bottom topographic effect on flow. Flow distributions in both experiments exhibited the character of co-oscillating tide, and strong currents along breakwaters in the bay were generated. In case B, flows were intensified all over, in particular around the breakwaters, because of the shallow water depths around the bay head. Tidal residual currents were calculated for the real-depth model, but no residual currents were generated in the bay because of the simple configuration of the bay.

1 はじめに

吉見湾は水産大学の前に広がる、東西約900m、南北約850mの小さな湾である (Fig. 1)。湾口は南に向かって響灘に面しており、比較的解放性が強い。湾の平均水深は5.1mであるが、湾中央部から湾奥西部にかけては比較的大きな水深 (6m以上) となっており、湾奥部の海上自衛隊下関基地や吉見漁港への船舶の航路となっている。また、湾奥部には永田川、西田川の二つの河川が流れ込んでおり、さらに湾口部や湾内部には、自衛隊や吉見漁港、水産大学校による防波堤が複数設置されている。

我々にとって、吉見湾は最も身近な海であるにもかかわらず、そこでの水温・塩分の分布や、流れの状況などの海洋学的な研究はほとんど行われていない。吉見湾は小さな湾ではあるが、年間を通して水産大学校の実習艇やカッターやヨット、吉見漁港に出入りする漁船や、自衛隊の艦艇などの多くの船舶が往来している。また夏季には、水産大学校や海上自衛隊の海技実習・訓練が行われるだけでなく、大勢の海水浴客が訪れる。船舶の安全な航行や水泳コースの設定のためにも、湾内の流れの大まかな状況を把握しておくことは意味のあることと考えられる。

沿岸域での流れには、潮汐にともなう潮流や、風による吹送流、河川水と海水との密度差に起因する密度

水産大学校研究業績 第1620号, 1999年4月19日受付.

Contribution from National Fisheries University, No.1620. Received Apr. 19, 1999.

*1 水産大学校 海洋生産管理学科 資源環境計画学講座 (Laboratory of Marine Resource and Environment Planning, Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University).

*2 水産大学校 海洋生産管理学科 研究生 (Research student, Department of Fishery Science and Technology, National Fisheries University).

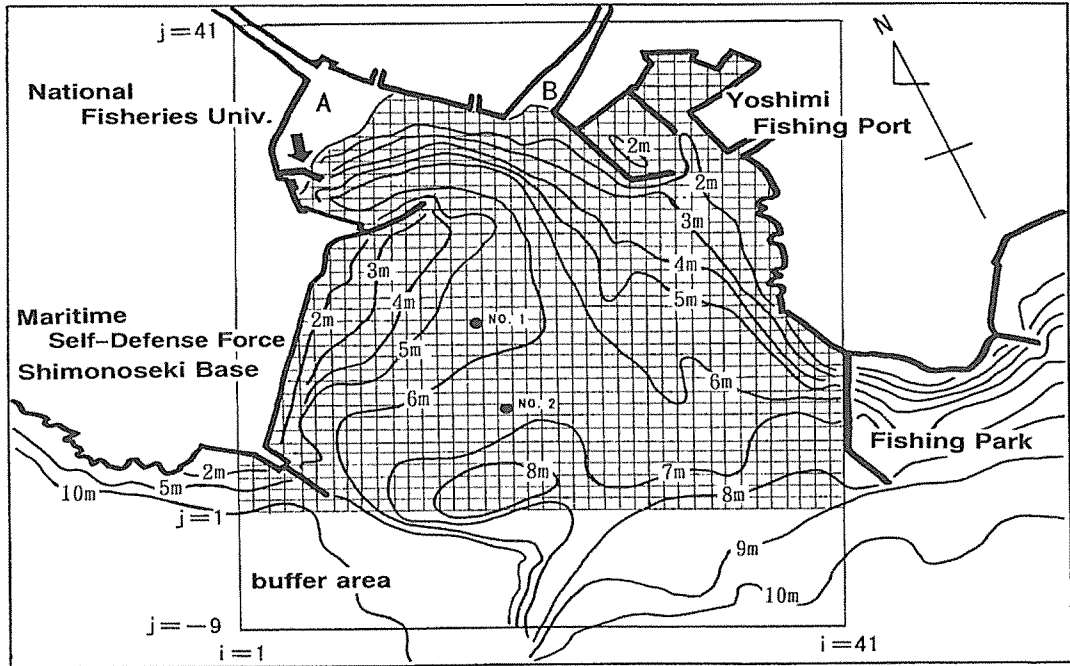


Fig. 1 Bottom topography in and around the Yoshimi Bay and model sea area. Solid circles with number denote buoys deployed by the Maritime Self-Defense Force. An arrow at the bay head shows the observation point of sea level.

流などいくつかの種類があるが、一般に最も大きなエネルギーをもっているのは潮流である¹⁾。そこで本研究では、吉見湾内の流動を明らかにする第一歩として、最も単純な線形一層モデルによる潮流の数値シミュレーションを行い、湾内の流れの特徴と、それに及ぼす海底地形の効果について調査した。

2 モデル

2.1 支配方程式

計算に用いた式は、線形化した運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2)$$

と、水平 2 次元の連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (hu) + \frac{\partial}{\partial y} (hv) \right\} \quad (3)$$

である。ここに u は東西方向の流速 (自衛隊からフィッシングパークに向かう方向を正)、 v は南北方向の流速 (湾口から湾奥に向かう方向を正)、 η は海面変位 (平均海面を原点に、上向きを正)、 g は重力加速度、 h は水深を表す。なお、今回のシミュレーションでは、吉見湾のスケールから考えて地球自転の効果は小さいとして、コリオリ力は無視している。また摩擦についても、動粘性係数の取り扱いに不明な点のあること、今回のシミュレーションでは湾内の流れの分布の概略を得ることを主な目的とすること等の理由から、省略している。

(1), (2), (3)式を、それぞれ時間については前方差分、空間については中央差分を用いて差分化すると、

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} = -g \times \frac{\eta_{i+1,j}^n - \eta_{i-1,j}^n}{2\Delta x} \quad (4)$$

$$\frac{v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^n}{\Delta t} = -g \times \frac{\eta_{i,j+1}^n - \eta_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \quad (5)$$

$$\frac{\eta_{i,j}^{n+1} - \eta_{i,j}^n}{\Delta t} = - \left[\frac{h_{i+1,j} \times u_{i+1,j}^n - h_{i-1,j} \times u_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + \frac{h_{i,j+1} \times v_{i,j+1}^n - h_{i,j-1} \times v_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \right] \quad (6)$$

となる。ここに n は時間ステップ数、 i は東西方向のグリッド (格子) 番号、 j は南北方向のグリッド番号、 Δt は時間間隔、 Δx は東西方向の格子間隔、 Δy は南北方向の格子間隔である。(4)、(5)、(6)式を交互に時間積分することにより、各時刻での u 、 v 、 η を求める。

2.2 モデル海域

シミュレーションを行った海域は、自衛隊の沖側防波堤とフィッシングパークの先端を結ぶ線よりも内湾側の海域である (Fig. 1)。格子間隔は東西、南北とも 25m とし、モデル海域の南西の隅を原点 ($i = 1$ 、 $j = 1$) とした。湾奥部の A および B 周辺は、砂浜または河口部であるが、陸地と考えて計算は行わない。

湾口での反射波の影響を軽減するため、モデル海域の南限 ($i = 1$) から、さらに南へ 10 グリッド (250m) の緩衝領域を設けた。緩衝領域の水深は 7.0m で、一定とした。

2.3 初期条件, 境界条件

実験開始時には、全海域で海水は静止状態にあるとする。すなわち、 $n = 0$ のとき、 $u = v = \eta = 0$ である。

境界条件としては、岸および防波堤に直交する流れは無いものとする (すなわち、岸および防波堤では $u = 0$ 、もしくは $v = 0$)。なお、フィッシングパークについては、現実には栈橋の下を通しての海水交換が考えられるが、今回の実験では便宜的に壁 (防波堤) と考え、直交する流れは無いものとした。

緩衝領域の南限 ($j = -9$) からは、以下のような正弦波を入射する。

$$\eta = A \times \sin \{ (2\pi/T_0) \times n \times \Delta t \} \quad (7)$$

ここに T_0 は周期で、本研究では M_2 分潮の周期の 12 時

間 25 分 (44700s) とした。振幅 (A) については、水産大学校防波堤 (Fig. 1 の矢印地点) で実測された潮位を参考に、0.35m を与えた。(潮位の実測については後述する。)

湾口 (緩衝領域南限) では、湾奥からの反射波 η_r を $\eta_r = \eta_{i,-8}^n - A \times \sin \{ (2\pi/T) \times (n-2) \times \Delta t \}$ (8) により計算し、(7)式との和を海面変位として与えた。(放射条件)

2.4 時間間隔

時間積分を行う時間間隔は、吉見湾の平均水深から計算される長波の位相速度 $C = (gh)^{1/2}$ と、格子間隔 ($\Delta x = \Delta y = 25\text{m}$) から、Courant-Friedrichs-Lewy の条件 ($\Delta t \leq \Delta x/C$ かつ $\Delta t \leq \Delta y/C$) を満足するように決定する²⁾。吉見湾の平均水深は 5.1m であるので、位相速度 C は 7.1m/s となることから、本研究では $\Delta t = 3$ 秒とした。

2.5 実験条件

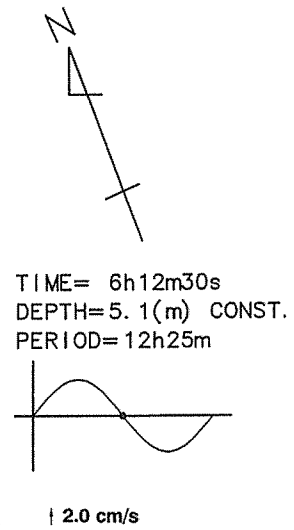
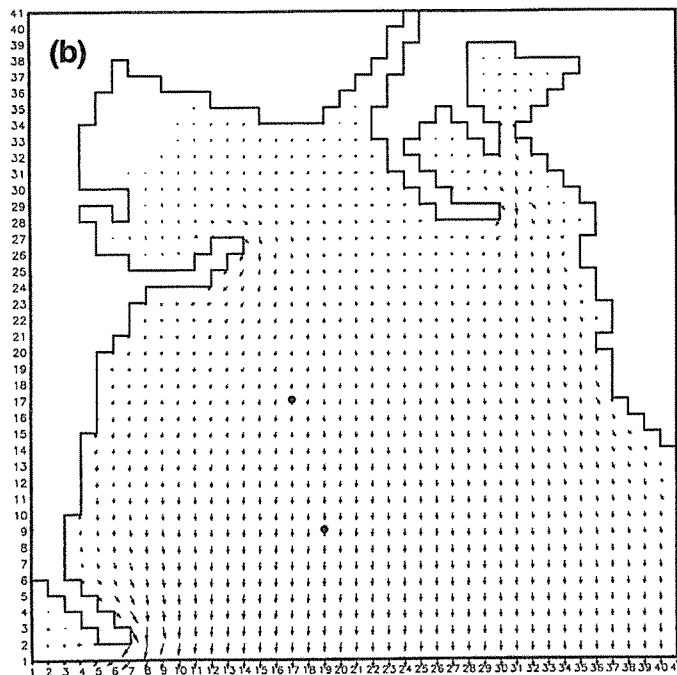
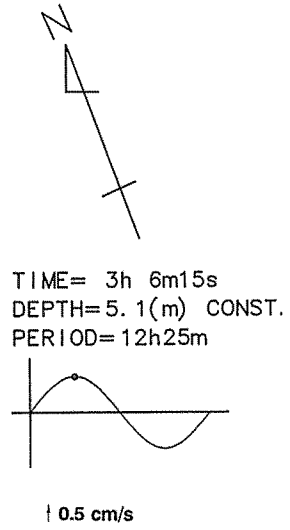
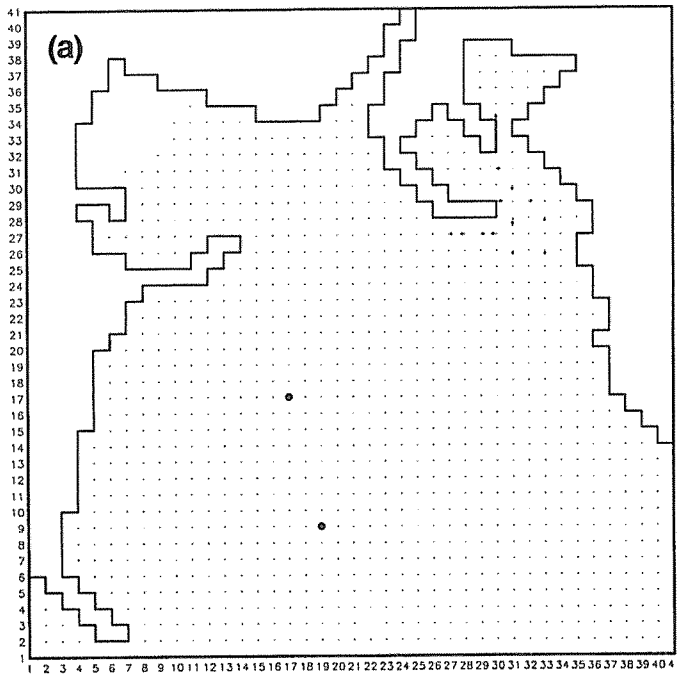
流れの分布に及ぼす海底地形の影響を調べるために、湾内の水深を 5.1m (平均水深) で一定としたケース (case A) と、現実的な水深を与えたケース (case B) の二つの実験を行った。

3 結果

3.1 水深を一定としたケース (case A)

1/4 周期毎の流れの様子を Fig. 2 (a)~(d) に示す。安定した結果を得るために、計算は 3 周期まで行い、Fig. 2 には 3 周期目の結果を示してある。図の右側の曲線は湾口での水位変動を表し、各時刻での水位 (位相) を黒丸で示してある。また強流時と憩流時で、流れを表す矢印の大きさを変えてあることにも注意して欲しい。

下げ潮最強流時 (Fig. 2 (b)) と上げ潮最強流時 (Fig. 2 (d)) の様子を見ると、流向は全体的に湾軸に平行であり、流速は湾口で大きく (約 1.0cm/s)、湾奥で小さな分布となっている。湾内でのスカラー平均



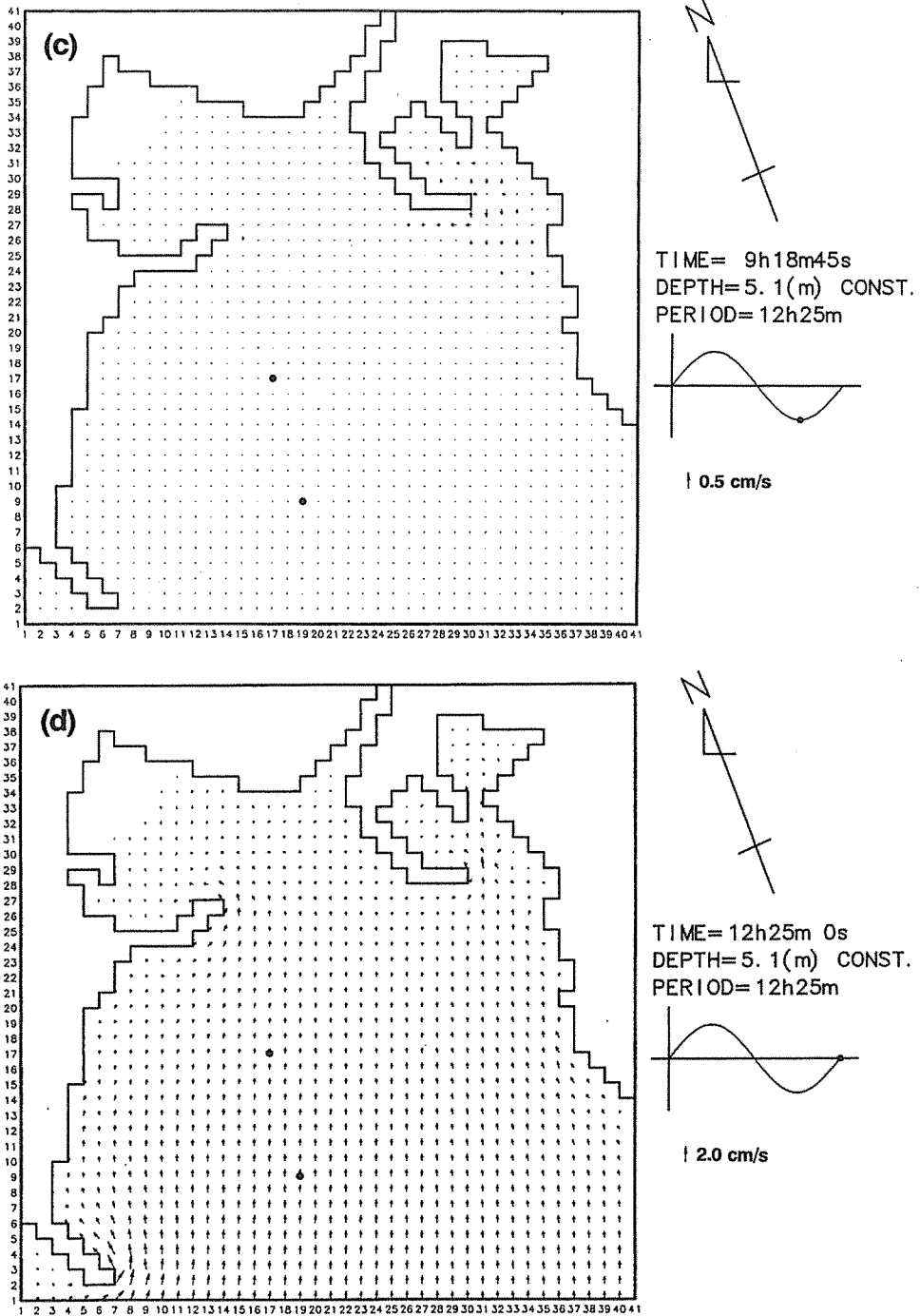


Fig. 2 Tidal currents in (a) high tide, (b) ebb tide, (c) low tide, and (d) flood tide for the constant-depth model (case A).

流速は、両潮時共に 0.6cm/s である。最も強い流れは、湾南西部の防波堤付近にみられ、 $1.2\sim 2.1\text{cm/s}$ の流れが、防波堤を回り込むように分布している。湾奥西部の防波堤や吉見漁港入口付近にも、 $0.7\sim 1.4\text{cm/s}$ の比較強い流れが認められ、いずれも防波堤に沿って、回り込むように流れているのが特徴的である。

一方、満潮時 (Fig. 2(a)) と干潮時 (Fig. 2(c)) では、湾内全域でほとんど流れが認められず、吉見漁港付近に 0.3cm/s 以下のわずかな流れがみられるだけである。湾内でのスカラー平均流速は、両潮時とも 0.02cm/s である。

湾奥部の水産大学校防波堤 (Fig. 1 矢印地点) での、海面変位のシミュレーション結果を Fig. 3 に示す。ただし Fig. 3 では、海面変位を平均海面からの偏差で示している。変動の振幅は 0.7m と、湾口で与えた振幅の2倍になっている。このことは、湾奥部を腹とする定在波 (共動潮) が形成されていることを示している。

3.2 現実的な水深を与えたケース (case B)

Fig. 4 (a)~(d)に、 $1/4$ 周期毎の流れの様子を示す。水深一定のケース (case A) と同様に、3周期目に注目して解析を進める。

全体的な流れのパターンをみると、case A とほぼ同様の湾軸に沿っての往復流が卓越していることがわ

かる。満潮時、干潮時には湾内全域でほとんど流れが無く、さらに最強流時には湾口部で流速が大きく、湾奥部では小さいという特徴も一致している。

Case A と大きく異なる点は、強流時の流れが全体的に強化されていることである。スカラー平均流速をみると、下げ潮最強流時 (Fig. 4(b)) では 0.8cm/s 、上げ潮最強流時 (Fig. 4(d)) では 1.0cm/s と、水深一定の場合の1.3~1.7倍の値を示している。この傾向は、特に吉見漁港付近で顕著に認められ、下げ潮時には $1.6\sim 6.4\text{cm/s}$ 、上げ潮時には $1.8\sim 9.2\text{cm/s}$ と、水深一定の場合の4.6~6.6倍の流れとなっている。そのため、case A では最大流速が自衛隊の沖側防波堤付近にみられたのに対し、このケースでは吉見漁港付近に現れている。また、湾奥部での流れが、等深線に沿う方向に強化されているのも特徴の一つである。これらの流れの強化は、湾奥部および吉見漁港付近の浅い水深によるものと考えられる。

注目すべき点は、全体的な流れの強化にともなって、湾奥西部および湾口部付近の防波堤に沿っての回り込むような流れも強化され (下げ潮時、 $1.2\sim 3.2\text{cm/s}$; 上げ潮時、 $1.5\sim 3.3\text{cm/s}$)、防波堤から $50\sim 75\text{m}$ ほど離れた地点でも、 1.0cm/s 程度の流れが認められることである。この値はそれほど大きなものではないが、防波堤の影響がこの程度の距離にまで及ぶことを意味しており、特にエンジンをもたない小型船舶や水泳をする人は注意が必要である。

計算結果の妥当性を検証する意味で、水産大学校防波堤 (Fig. 1 矢印地点) で実測された潮位の時系列と、同地点での海面変位のシミュレーション結果を Fig. 5 と Fig. 6 にそれぞれ示す。潮位の実測は、1998年7月27日09:00~28日10:00までの25時間にわたって、1時間毎に行った。観測当日の月齢は3.8で、大潮と小潮の間である。高高潮は27日11:00の 5.0m 、低低潮は27日19:00の 3.6m で、最大潮差は 1.4m であった。

シミュレーション結果 (Fig. 6) と比べると、両者は振幅、位相ともによく一致していることがわかる。実測潮位では、2回目の高潮時および低潮時の振幅が計算結果よりも小さくなっているが、これは他の分潮の影響による日潮不等のためである。

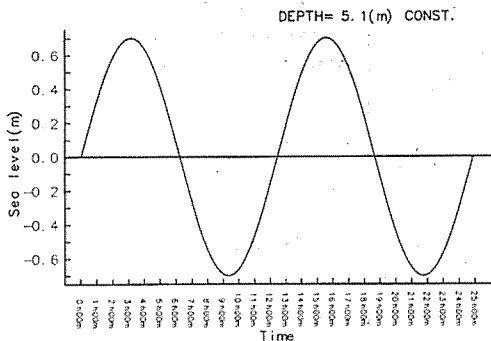


Fig. 3 Sea-level variation in the constant-depth model (case A) at the breakwater in the bay head.

シミュレーションによる海面変位の振幅は0.7mであり、case A (Fig. 3)と同様に、湾口で与えた振幅の2倍になっている。このことから、この地点での水位の変動には、海底地形はほとんど影響を与えないことがわかる。

4 考察

吉見湾のような小規模な湾では、湾内部での起潮力による潮汐振動はほとんどなく、外海での潮汐が湾内に進入してくることによる潮汐(共動潮)がほとんどである¹⁾。この場合、潮汐波は湾奥で反射され、定在波(standing wave)が形成されると考えられる。そこで、吉見湾を水深一定の矩形湾と考え、湾内での潮汐の振る舞いを考察する。

湾の奥行きを L 、水深を h とすると、湾の固有振動周期はメリアンの式、

$$T_m = \frac{4L}{(2m-1)\sqrt{gh}}, \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

により表される¹⁾。吉見湾の代表的なスケールとして、奥行きを850m、水深を5.1mとすると、 $m=1$ のときの周期(基本振動周期: T_1)は約480sとなる。次に、湾口から周期 T_0 の波が進入し、湾内の海水を強制振動させる場合を考える。この場合の湾口と湾奥での海面変位の比(潮差増幅率: R)は、次式によって与えられる¹⁾。

$$R = 1 / \cos\{(\pi/2) \times (T_1/T_0)\} \quad (10)$$

これより、 $T_1 < T_0$ の場合には $R > 0$ 、すなわち湾内の水位は湾口と同位相で変動することがわかる。今回のシミュレーションでは、 T_0 として M_2 分潮の周期(44700s)を与えた。この値は、吉見湾の基本振動周期の約100倍(すなわち $T_1/T_0 = 0.01$)である。そのため、潮差増幅率はほとんど1.0となり、湾口と湾奥の水位は、ほぼ同じ振幅の同位相の変動を示すと考えられる。

潮流は一定周期の往復流であるため、ある流体粒子に注目すると、一周期後には元の場所に戻ってくる。しかし、地形が複雑な場合や、流れが強い場合には、潮汐の非線形性のために潮汐残差流が発生し、一周期たっても元の場所に戻らないことがある。湾内外の海

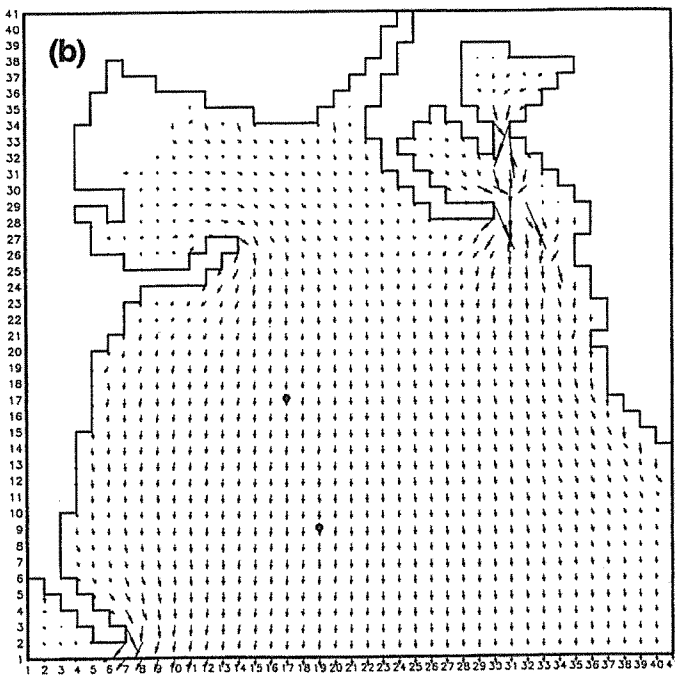
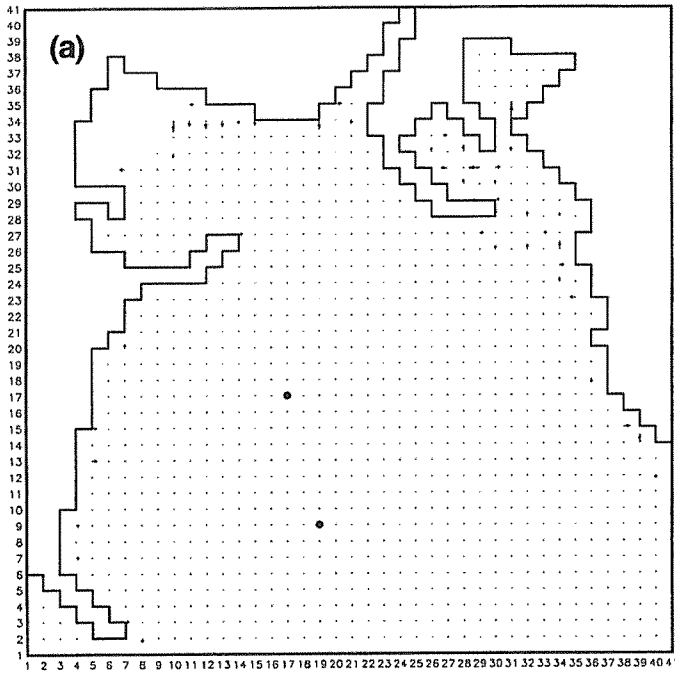
水交換や、水中の物質輸送には、潮流よりもむしろ潮汐残差流が重要な役割を果たす。そこで、現実的な水深を与えたケースについて、シミュレーション結果を一周期積分し、潮汐残差流を調べてみた。Fig. 7に潮汐残差流の分布を示す。湾内全域で流れは認められず、潮汐残差流はほとんど発生していないことがわかる。今回のシミュレーションでは、線形化した運動方程式((1), (2)式)を用いたことと、吉見湾の地形がそれほど複雑ではないために、潮汐残差流が発生しなかったものと考えられる。

5 おわりに

本研究では、吉見湾内の流れを明らかにする第一段階として、最も単純な線形一層モデルを用いて、湾内の潮流の数値シミュレーションを行った。しかしながら、今回は考慮しなかった摩擦や地球自転の効果も、流れの分布を決定する重要な要素であるかもしれない。特に摩擦については、底面摩擦だけでなく、水平粘性によって流れの分布が変わる可能性があるため、今後は検討が必要である。

また本モデルでは、境界条件としてフィッシングパークを壁と考えたが、現実には栈橋の下を通しての流れが存在する。Fig. 2やFig. 4に示されるように、湾内では入射波の進行方向に平行な往復流が卓越することを考えると、潮汐波の進行方向を規定する湾口での境界条件は非常に重要と考えられる。実際に海技実習の際に、自衛隊のNo. 1ブイ(Fig. 1参照)付近を泳いでいる学生が、下げ潮時にフィッシングパークの方向に流される事例も多く、細部では計算結果とかなり異なる流れが存在する可能性がある。

さらに本研究では、最も卓越した流れとして潮流を取り上げたが、浅海域では風による吹送流の影響も無視できないほど大きく、また河川水による密度流や、今回考慮しなかった非線形性に起因する潮汐残差流は、そのエネルギーこそ小さいが、常に一定方向に流れるため、海水交換や物質循環に大きな影響を与える。これらの影響を明らかにし、モデルを改良していくためにも、吉見湾内の複数の点での継続的な流れの観測が必要である。



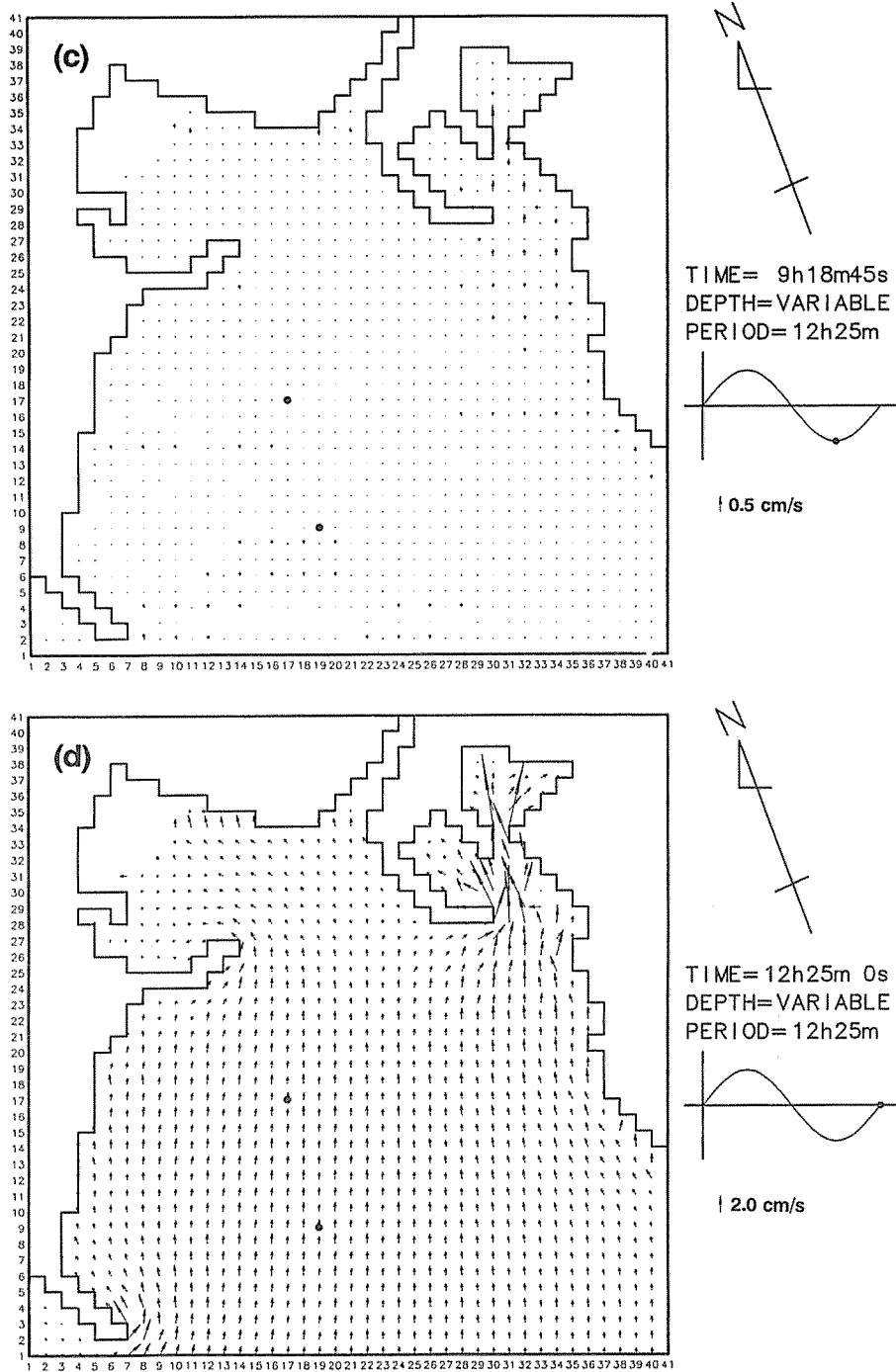


Fig. 4 Tidal currents in (a) high tide, (b) ebb tide, (c) low tide, and (d) flood tide for the real-depth model (case B).

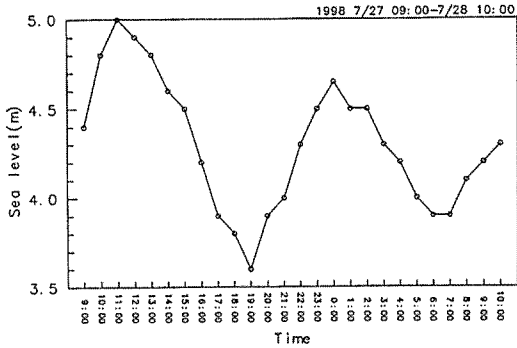


Fig. 5 Sea-level variation with time at the breakwater in the bay head (arrow in Fig. 1). The sea-level observation was carried out during the period from 09:00 on July 27 to 10:00 on July 28, 1998.

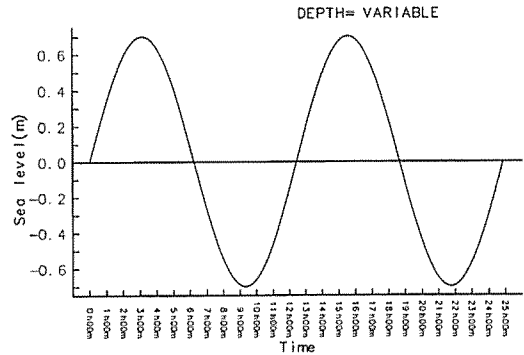


Fig. 6 Sea-level variation in the real-depth model (case B) at the breakwater in the bay head.

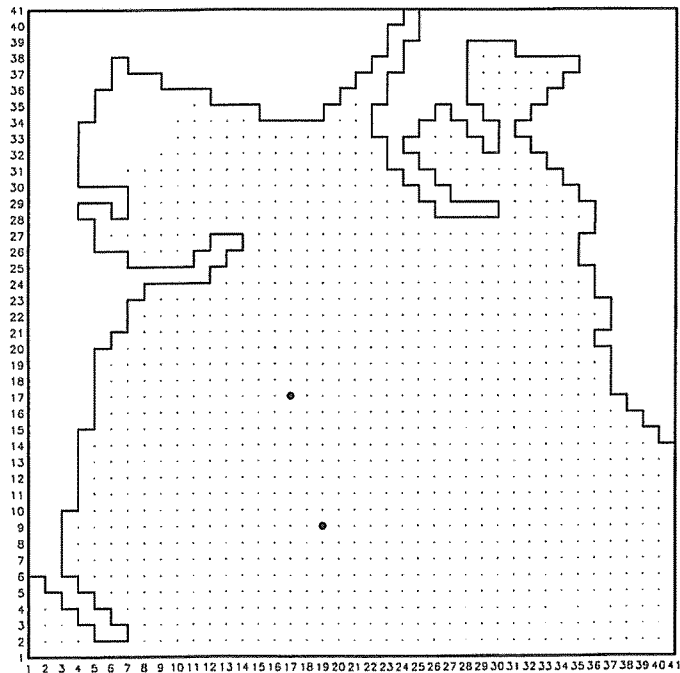


Fig. 7 Distribution of tidal residual currents in the real-depth model.

文 献

- 1) 宇野木早苗: 沿岸の海洋物理学, 初版, 東海大学出版会, 東京, 1993, p. 672.
- 2) 大西行雄・竹内健介: 数値計算—その立場と方法—, “環境科学としての海洋学” (堀部純男編), 東京大学出版会, 東京, 1977, pp. 150-168.