

内湾における局所的海水流動の数値計算 (第2報)

正員 藤野 正 隆* 正員 長谷部 雅 伸**

Numerical Simulation of Local Ocean Current in a Bay (Second Report)

by Masataka Fujino, *Member* Masanobu Hasebe, *Member*

Summary

Numerical simulation of ocean current is one of significant tools which are of practical use for environmental assessment of oceanophysical effects of large floating offshore structure, for example, on the surrounding sea water. In the previous paper, the so-called multilevel model of ocean current was adopted to simulate tidal current observed in the vicinity of an existing large floating offshore structure (LFOS), called Mega-Float model, moored off Oppama, Yokosuka. As a result of comparison between the observed current and simulation results, it was concluded that the main characteristic feature of tidal current in the close vicinity of the LFOS could be reproduced satisfactorily by numerical simulation. In the present paper, variation of water temperature and salinity, in addition to current velocity, are taken into consideration in order to enable numerical simulation to reproduce more detailed features of observed tidal current. The oceanographical observation carried out at the mooring site of Mega-Float model revealed that vertical structure of tidal current at low tide was complicated and changeable: on 29th August 1995, the upper current was southward while the lower current was northward, but one day after 29th August, both currents were northward. The numerical simulation presented in this paper partly succeeded in reproducing this complicated tidal current at low tide. In addition, the effects of Mega-Float model on tidal current, sea temperature and salinity were examined using the results of numerical simulation. As a result, it was found that Mega-Float model did not bring forth untrifling difference in sea temperature and salinity.

1. 緒 論

近年、海洋空間の新たな創成法の一つとして超大型浮体式海洋構造物の利用が考えられている。この実用化を目的として設立されたメガフロート技術研究組合では、平成7年度から3ヶ年の間、長さ300m、幅60m、深さ2mのポンツーン型浮体を東京湾内の神奈川県横須賀市追浜沖に係留し、実証実験を行ってきた。本実証実験の主要な研究項目の1つに超大型浮体式海洋構造物の環境影響評価技術の研究が挙げられ、浮体設置海域の流況、生態系への影響

評価システムの確立を目標として、設置浮体周辺での流況、気象などの物理計測のほか、光量子の計測、水質および底質の調査が行われ、多くの貴重なデータが得られた¹⁾。

さて、海洋空間利用のために、超大型浮体式海洋構造物を湾内に設置する場合、設置浮体が周辺海域の海洋環境にどのような影響を与えるかは、十分事前に検討しておく必要があるのは言うまでもない。このような検討に有効な方法の一つとして、数値シミュレーションの利用が挙げられるが²⁾、設置浮体近傍については、かなり詳細な計算が必要となる。

この問題について筆者らは前報³⁾で、内湾全体と浮体近傍の局所的領域をそれぞれ粗い格子と細かい格子に分割し同時に計算する方法を採用し、東京湾全体とメガフロート設置海域周辺の海水流動の再現を試みた。このシミュレーション結果では、概ね現場の観測データの特性を捉えるこ

* 東京大学大学院工学系研究科

** 清水建設(株)技術研究所計画技術開発部(研究当時、東京大学大学院工学系研究科)

とが出来、良好な成果を挙げたといえるが、観測された流況データには数値シミュレーションでは十分に再現できなかった現象も残った。たとえば、

- 干潮時に海面近く（上層）と海底付近（下層）で流れの向きが逆となる場合が散見された。
- 同じ干潮時の流況が一日経つと様子が大きく異なるなど、僅かな間に流れの特徴が大きく変化することがある。

こうした現象までも、数値シミュレーションで再現するためには、前報では考慮しなかった下記の要因も考慮に入れる必要があると考えられる。

- (1) 海水温や塩分濃度の変化に伴い生じる流れ（密度流）
- (2) 夏季特有の海水の密度成層化
- (3) 日射や海水の蒸発等の海面を通じての熱、塩分輸送
- (4) 湾内の河川からの淡水流入
- (5) 海面での風応力によって生じる流れ（吹送流）

本論文では、これら(1)～(5)の要因を、前報で計算に用いた数値モデルに新たに取り入れた計算を行い、観測データとの比較を行うことで、先に挙げた現象の解明を図る。また、前報での計算結果との比較も行い、これら要因が海水流動にどのような影響をもたらすのかについても考察する。

ところで、筆者らが注目しているメガフロート設置海域には実験モデル浮体が設置されているが、前報では局所的海水流動の数値シミュレーションに格子間隔の異なる分割格子を採用することの妥当性、有効性を検証することを主たる目的としていたため、この浮体の存在は考慮されていなかった。既に行われた実海域実験では浮体の存在による浮体周辺の流況への影響は、流速に若干の相違が認められたものの、顕著ではなかったと報告されている。そこで数値シミュレーションを通じてこれらのわずかな変化を捉えるために、メガフロート実証実験モデル浮体を想定した数値計算も行う。

2. 局所的海水流動の計算モデル

2.1 支配方程式

本研究で用いた海水の流速、温度および塩分濃度の支配方程式は、基本的には筆者らが以前より用いてきたものをベースとしている⁴⁾。よって、数値モデルの説明は要点のみにとどめることとする。

地球表面上の海水流動の記述には球面座標を用いるのが適当であるが、東京湾規模の現象ではデカルト座標系を用いることが出来る。ここでは、 x, y は水平面内座標で、 z は鉛直上方を正とし、 $z=0$ を平均海水面とする (Fig. 1)。また、コリオリパラメータも一定とみなすことが出来る。さらに、海水流動の現象は水平方向のスケールに対し、鉛

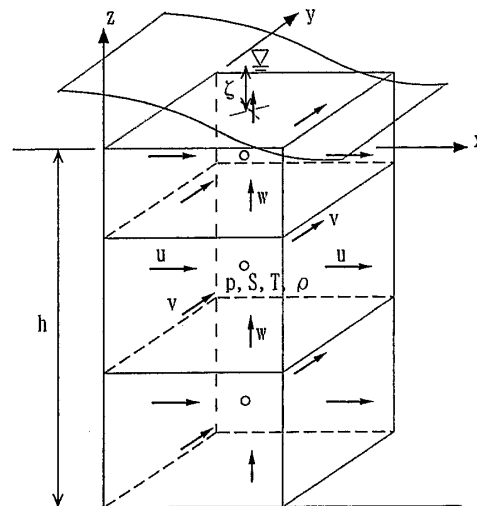


Fig.1 Coordinate system and arrangement of variables

直方向のスケールが小さいことから、静水圧近似を適用する。これより、流れの運動方程式と連続の式は次のようになる：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f v + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f u + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

ここで、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向流速、 f はコリオリパラメータ、 ρ_0 は海水の代表密度、 p は圧力、 g は重力加速度、 A_M および K_M はそれぞれ水平方向、鉛直方向渦動粘性係数である。

密度変化を考慮する時には、次のような温度 T 、塩分 S の移流拡散方程式を用いる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_c}{\delta} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_c}{\delta} \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \frac{RS}{V_R} \quad (6)$$

ここで A_c, K_c はそれぞれ水平および鉛直渦拡散係数を表す。(6)式の右辺の最終項の R は単位時間当たりの河川からの流入量、 V_R はそれが流入する部分の体積である。また、係数 δ は次のように定義される鉛直混合を表すパラメータである。

$$\delta = \begin{cases} 0 & \text{if } \partial\rho/\partial z > 0 \\ 1 & \text{if } \partial\rho/\partial z \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

さらに沿岸海域は水深が浅く圧力変化が小さいので、海水の密度は水温と塩分濃度のみの関数としてよい。1気圧における海水の密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ は、温度と塩分濃度によって次の近似式によって表されるとした。

$$\rho = 1028.14 - 0.0735 T - 0.00469 T^2 + (0.802 - 0.002 T)(S - 35.0) \quad (8)$$

流体が密度成層をなしているときには、密度勾配が運動量及び温度、塩分濃度などのスカラー量の鉛直方向乱流輸送を抑制する。この効果をモデルに取り入れるために、鉛直渦動粘性係数、鉛直渦拡散係数に対して以下のような成層化関数を適用する⁵⁾。

$$\frac{K_M}{K_{M0}} = (1 + \beta_1 R_i)^{\alpha_1} \quad (9)$$

$$\frac{K_C}{K_{C0}} = (1 + \beta_2 R_i)^{\alpha_2} \quad (10)$$

ここに、 K_{M0} 、 K_{C0} は均質流体（中立安定場）の鉛直渦動粘性係数、鉛直渦拡散係数である。また、 R_i は次式で定義される勾配型リチャードソン数である。

$$R_i = \frac{-g \cdot \partial\rho/\partial z}{\rho \{ (\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2 \}} \quad (11)$$

上式中の係数 α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 の値は、室内実験や屋外観測に基づいて数多くの研究者によって提唱されている。本研究では、以下の値を用いることとする。

$$\alpha_1 = -1, \beta_1 = 5.2 \quad (\text{Webb の提案式}) \quad (12)$$

$$\alpha_2 = -3/2, \beta_2 = 10/3 \quad (\text{Munk \cdot Anderson の提案式}) \quad (13)$$

つまり成層の安定状態が著しい（リチャードソン数が大きい）程、粘性係数および拡散係数の値は小さくなり、鉛直方向の物理量の輸送が行われにくくなる。

海面を通じての熱と塩分の輸送はバルク公式で評価する^{5),6)}。熱に関するバルク公式は以下のように4つの要素から構成され、

(1) 太陽からの短波放射 Q_A

$$Q_A = Q_{r0}(1 - 0.71C)(1 - r) \quad (14)$$

Q_{r0} : 完全晴天時の全日射量 [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

C : 0~1 で表した雲量

r : 海面の反射率

(2) 海洋からの長波放射 Q_B

$$Q_B = s\sigma T_a^4(0.39 - 0.058\sqrt{E_a})(1 - cC^2) + 4s\sigma T_a^3(T_w - T_a) \quad (15)$$

s : 黒体放射と表面放射の比

σ : ステファンボルツマン定数 [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$]

T_a : 絶対温度で表した気温 [K]

c : 緯度による定数 (=0.65)

T_w : 絶対温度で表した水温 [K]

E_a : 大気中の水蒸気圧 [hPa]

(3) 海水の蒸発による潜熱輸送 Q_e

$$Q_e = L\rho_a C_E(q_s - q_a)W \quad (16)$$

ただし、風速 W が極めて小さい場合（およそ $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下）は、次のような式で表される。

$$Q_e = L\rho_a C'_E \{ (T_w - T_a) + 0.61 T_a(q_s - q_a) \}^{1/3} (q_s - q_a) \quad (17)$$

L : 蒸発の潜熱 [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

ρ_a : 乾燥空気密度 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

C_E : 潜熱バルク係数

C'_E : 微風時の潜熱バルク係数

q_s : 海水の飽和比湿 [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$]

q_a : 海面上の比湿 [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$]

W : 海面上の風速 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

なお、海水の飽和比湿 q_s は飽和水蒸気圧 E_s と大気圧 p_a より以下の式で求める。

$$q_s = \frac{0.622 E_s}{p_a - 0.378 E_s} \quad (18)$$

また、海面上の比湿 q_a を求めるには、(18)式において E_s を E_a で置き換えればよい。

(4) 対流や伝導による顕熱輸送 Q_h

$$Q_h = C_a \rho_a C_H (T_w - T_a) W \quad (19)$$

ただし、風速 W が極めて小さい場合（およそ $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下）は、次のような式で表される。

$$Q_h = C_a \rho_a C'_H \{ (T_w - T_a) + 0.61 T_a(q_s - q_a) \}^{1/3} (T_w - T_a) \quad (20)$$

C_a : 乾燥空気の定圧比熱 [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

C_H : 顕熱バルク係数

C'_H : 微風時の顕熱バルク係数

以上より Q_A 、 Q_B 、 Q_e 、 Q_h が求まり、これより海面での熱流入量 Q_T は、下向き、すなわち流入を正とし、

$$Q_T = Q_A - Q_B - Q_e - Q_h \quad (21)$$

となる。

塩分に関するバルク公式は以下に示すとおりである。塩分に関しても、下向き、すなわち流入を正としている。

$$Q_S = S \{ \rho_a C_E(q_s - q_a)W - P_r \} \quad (22)$$

ただし、風速 W が極めて小さい場合（およそ $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下）は、次のような式で表される。

$$Q_S = S \{ \rho_a C'_E \{ (T_w - T_a) + 0.61 T_a(q_s - q_a) \}^{1/3} (q_s - q_a) - P_r \} \quad (23)$$

P_r : 単位面積単位時間毎の降水量 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]

S : 表層の塩分濃度 [%]

2.2 境界条件

陸地との境界のうち側面では、境界に垂直な流速成分を0とし、平行な成分に対しては free-slip の条件を課した。

海底面 $z = -h$ では、

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0 \quad (24)$$

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{xs}}{\rho_0} \quad (25)$$

$$K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{yh}}{\rho_0} \quad (26)$$

$$K_C \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (27)$$

$$K_C \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (28)$$

とした。ここで h は水深, τ_{xB}, τ_{yB} はそれぞれ x, y 方向の海底の摩擦応力であり, 海底摩擦係数 γ^2 を用いて次のように表される。

$$\tau_{xB} = \gamma^2 \rho_0 u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (29)$$

$$\tau_{yB} = \gamma^2 \rho_0 v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (30)$$

海底面での熱, 塩分のフラックスは 0 とした。

海面 $z = \zeta$ では,

$$p = p_a \quad (31)$$

$$-\frac{\partial \zeta}{\partial t} - u \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w = 0 \quad (32)$$

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho_0} \quad (33)$$

$$K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_y}{\rho_0} \quad (34)$$

$$K_C \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_T}{\rho_0 C_p} \quad (35)$$

$$K_C \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{Q_S}{\rho_0} \quad (36)$$

とした。ここで p_a は大気圧であるが, 以下で述べる計算では一定とした。また, C_p は海水の比熱である。 τ_x および τ_y は, x, y 方向の海面での風の応力で, 海面での抗力係数を C_d , 風速の x, y 方向成分を W_x, W_y とすれば, 次式で与えられる。

$$\tau_x = \rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (37)$$

$$\tau_y = \rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (38)$$

なお, 東京湾外に接する開境界においては, 潮位を境界条件として与えたが, 開境界での反射波を防ぐため, 日野の無反射スキームを用いた^{7), 8), 9)}。

2.3 計算の流れ

計算の手順は次のようになる (Fig. 2 参照)。

- (1) 潮位の計算
- (2) 圧力の計算
- (3) 水平方向流速 u, v の計算
- (4) 鉛直方向流速 w の計算
- (5) 水温 T , 塩分濃度 S 及び密度 ρ の計算

潮位 ζ に関しては, 連続の式(4)を z 方向に積分し, 境界条件(24), (32)を用いて導かれる式,

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz \quad (39)$$

から求めることができる。

また, 圧力 p に関しては, 式(3)を境界条件(31)のもとで海面から積分することにより,

$$p = -\rho g(z - \zeta) + p_a \quad (40)$$

を得る。

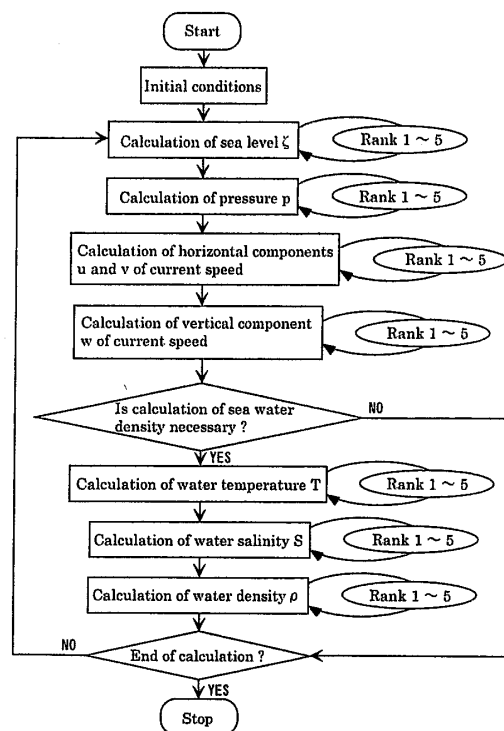


Fig. 2 Flow of numerical simulation

実際の計算には, 式(1), (2), (4), (5), (6), (8), (39), (40)を用いる。式(1), (2), (5), (6), (39)の時間発展の項をオイラー法により格子点上に離散化し, u, v, T, S, ζ を陽に解いていく。

また, p, w, ρ は各タイムステップでそれぞれ式(40), (4), (8), を適用することにより計算できる。

Fig. 2 に示した計算の主要な流れの右側に記すランク 1 よりランク 5 は, 後述のように, 格子の大きさの異なる領域を意味する。

2.4 離散化と格子構造

2.4.1 離散化

有限差分法による支配方程式の離散化については前報で記したとおりである。すなわち, 各変数は Fig. 1 に示すようにスタッガード (staggered) に配置し, 空間差分は, 移流項は 1 次の上流差分, 拡散項は 2 次の中央差分を用い, 時間差分にはオイラー前進差分を用いた。

2.4.2 鉛直方向の格子構造

鉛直方向を N 個の層に分割する, いわゆる多層モデルを採用した。そして, 各層の鉛直方向の中間点の深さに, 圧力 p , 水温 T , 塩分濃度 S および水平流速 u, v の評価点を設定した (Fig. 1)。

2.4.3 水平方向の格子構造

緒論で述べたように, メガフロート浮体を含む解析精査領域を最も細かい格子で分割することとした。具体的には格子間隔を 1/3 倍することを多段階にわたって, 最も粗い格子領域 (東京湾全体) から細かい格子領域 (メガフロート周辺海域) に, 順次, 移行できるようにした。

このような格子分割を用いる場合、異なる大きさの格子 (以下ではランクと呼ぶ) の接合部分で、均一な大きさの格子の場合とは異なる差分を行う必要がある。この詳細については前報を参照されたい。

2.4.4 計算対象海域の格子分割

前述のように、メガフロート浮体周辺の $720\text{ m} \times 540\text{ m}$ の海面を一边 20 m の正方形の最も細かい格子で分割し、その外側はメガフロート浮体から離れるにしたがい、格子間隔を 60 m , 180 m , 540 m , $1,620\text{ m}$ と順に大きくして行く格子分割法を用いた。具体的な分割法については前報を参照されたい。

また、水深方向の分割も前報の Table 2 に示すとおりで、8層とした。さらに、メガフロート浮体周辺の陸形状や防波堤などの恒久的構築物などについては後述の Fig. 8 を参照されたい。

3. メガフロート浮体周囲の流況の観測結果

メガフロート技術研究組合では、浮体設置前の平成7年8月と部分浮体 (長さ 200 m 、幅 40 m 、深さ 2 m) 設置後の平成8年1月に、浮体設置海域の気象・海象調査、流況調査、水質および底質調査を行ったことは、前報で紹介したとおりである。浮体設置海域の流況で特に特徴的なことは、メガフロート浮体周辺の海域では平均的に南流が北流より卓越し、平均的な南流はほぼ 0.1 m/s 程度であることである。一方、 M_2 分潮のみを考慮した海水流動の数値シミュレーションでも、この平均的な傾向を定量的に再現できることなどを示した。前記のほかに、メガフロート浮体設置海域周囲の流況の特筆すべきこととして、ほぼ類似の潮時においても、上層と下層の流れの構造が異なる場合のあることが指摘されている^{10), 11)}。

Fig. 3, Fig. 4 は、浮体設置前の平成7年8月28日から30日にかけて行われた測流板による流線追跡調査と ADCP を用いた曳航式流況調査の結果を基に作成された層別流況図である¹⁰⁾。このうち、Fig. 3 は8月29日の干潮時の流況である。上層 ($1.4 \sim 1.9\text{ m}$ 層) では南流、下層 ($5.9 \sim 6.4\text{ m}$ 層) では北流であり、上下で流向が異なる複雑な流れとなっている。

これに対し翌日の8月30日の干潮時には、流れの様子が一変し、上層および下層ともに北流となり (Fig. 4)、前日の干潮時とは流れの構造が明らかに異なる。一方、部分浮体設置後の冬季、平成8年1月10日に行われた干潮時の観測では、流速が低いため明確でない箇所もあるが、上層および下層とも微弱な北流となっている (Fig. 5)。

メガフロート浮体周囲の水深は 8 m 内外であるため、海水の流向に対する風の影響は無視できないと考えられる。Fig. 6 に平成7年8月28日から30日の住友重機械工業 (株) 追浜造船所で計測された風速、風向および推算データより推定した潮位を示す。図中、8月29日および30日

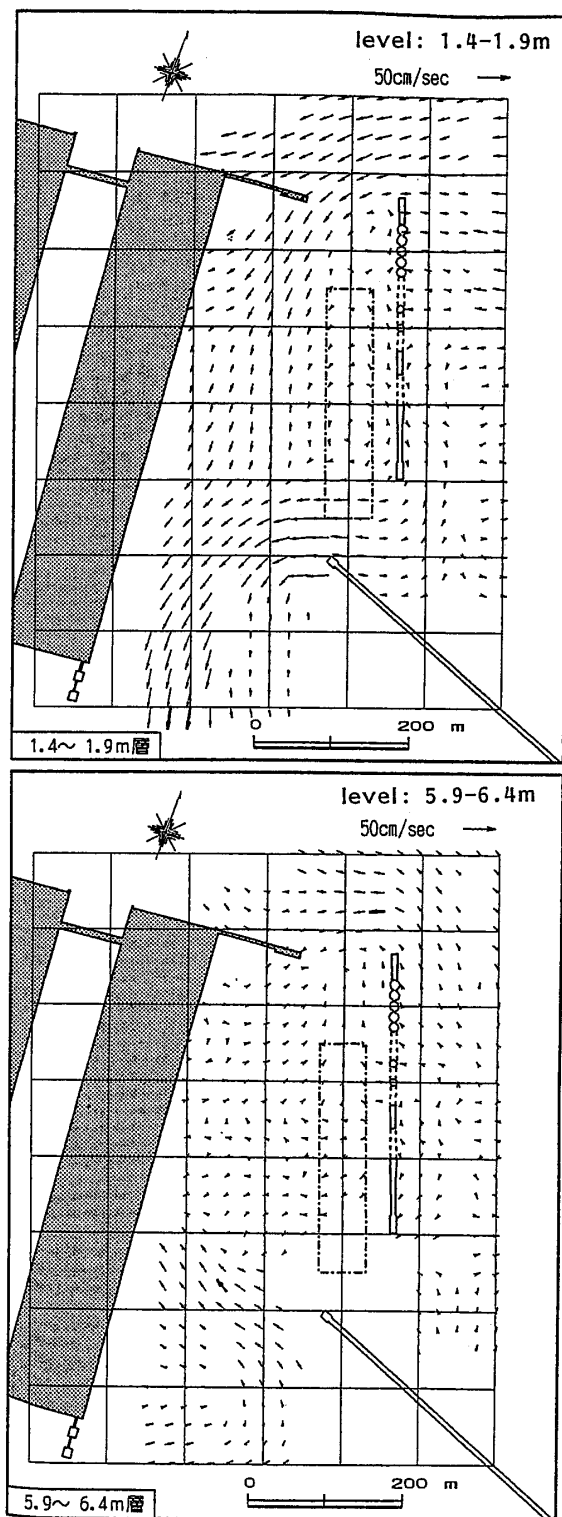


Fig. 3 Current observed on upper level ($1.4 \sim 1.9\text{ m}$) and lower level ($5.9 \sim 6.4\text{ m}$) at low tide of 29th August 1995

のそれぞれ4箇所、黒い棒線で表されたところが、流況調査が行われた時間帯を示す。観測期間の前後の風速は、「比較的強い南風が8月23日から調査前日の8月28日正午まで継続していた (最大値は8月28日0時頃の南西風 10 m/s 以上) が、8月28日に正午以降30日午前中まで

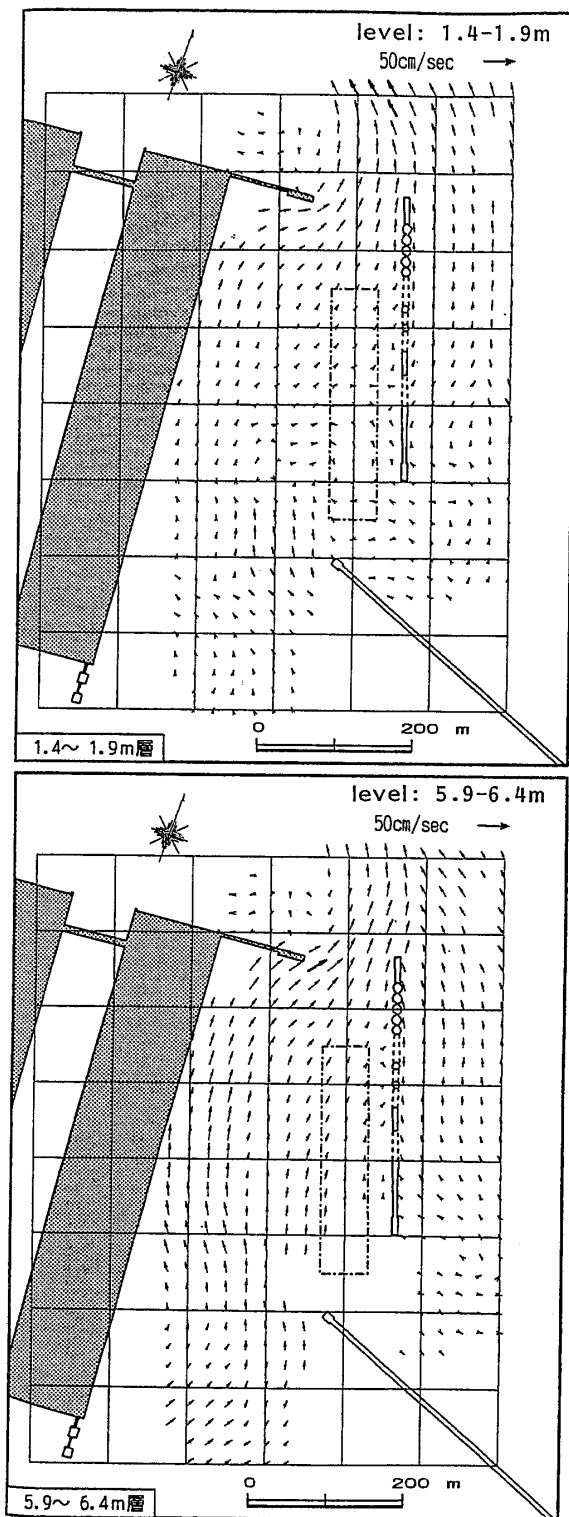


Fig. 4 Current observed on upper level (1.4-1.9 m) and lower level (5.9-6.4 m) at low tide of 30th August 1995

風は弱く、北東ないしは東の方向から5 m/s前後、8月30日午後から南に変わり、風速もやや強くなり、16時に約7 m/sであった」といわれている。

これに対し、平成8年1月10日の調査前の1月9日から10日の当日までは、南西の比較的風の強い天候であっ

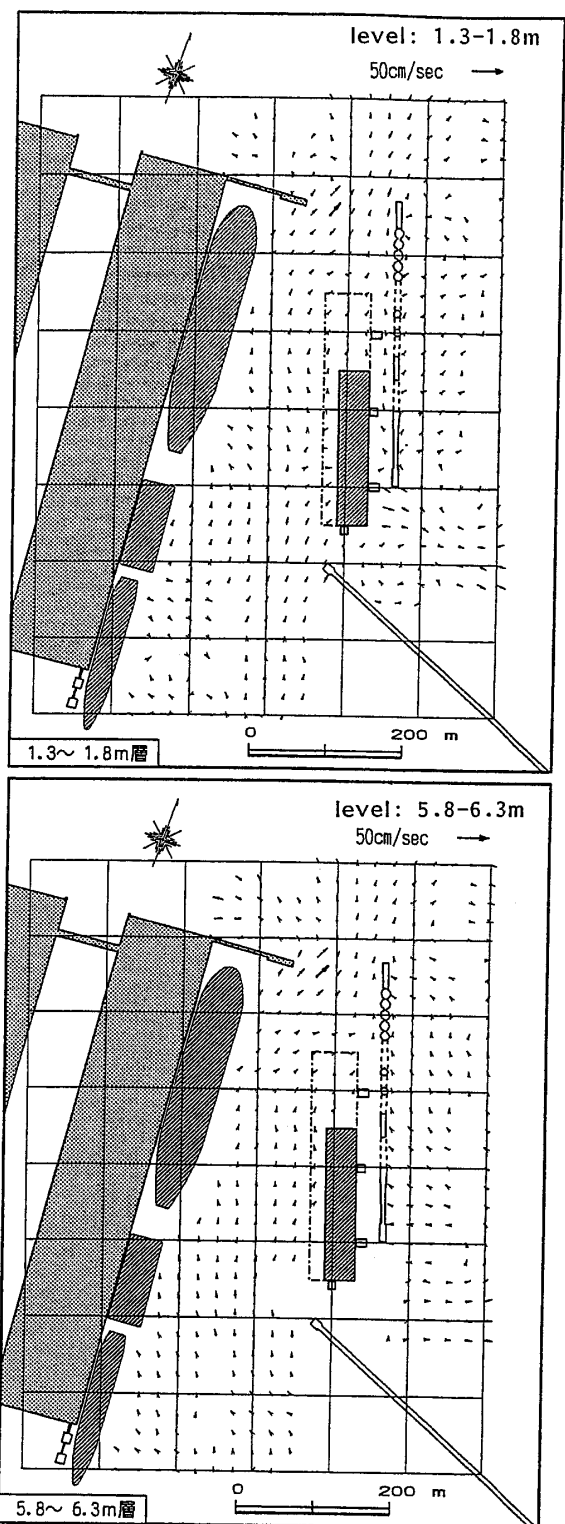


Fig. 5 Current observed on upper level (1.3-1.8 m) and lower level (5.8-6.3 m) at low tide of 10th January 1996

た（最大風速は11 m/s前後）。このような風の状況を考えると、Fig. 4, 5, 6に示した流況のうち、上層の流況には、風の影響が少なからず存在したことも考えられる。

さらに夏季の海水の流動には、密度流の影響も考えられる。Fig. 7に平成7年8月29日に実施された水温と塩分

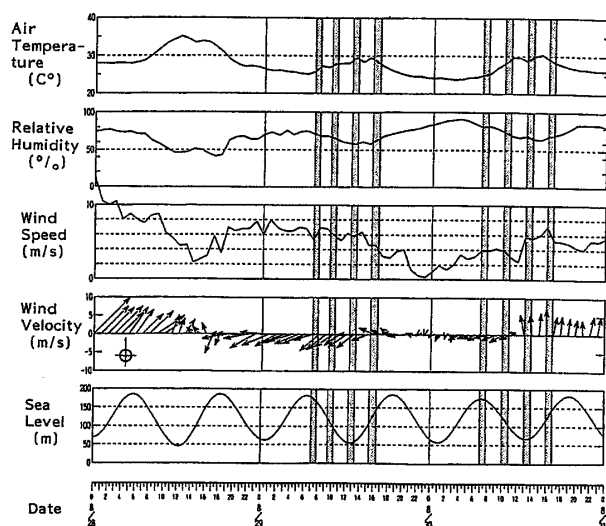


Fig. 6 Meteorological data and sea level in the vicinity of Mega-Float model moored off Oppama, Yokosuka (28th August 1995-30th August 1995)

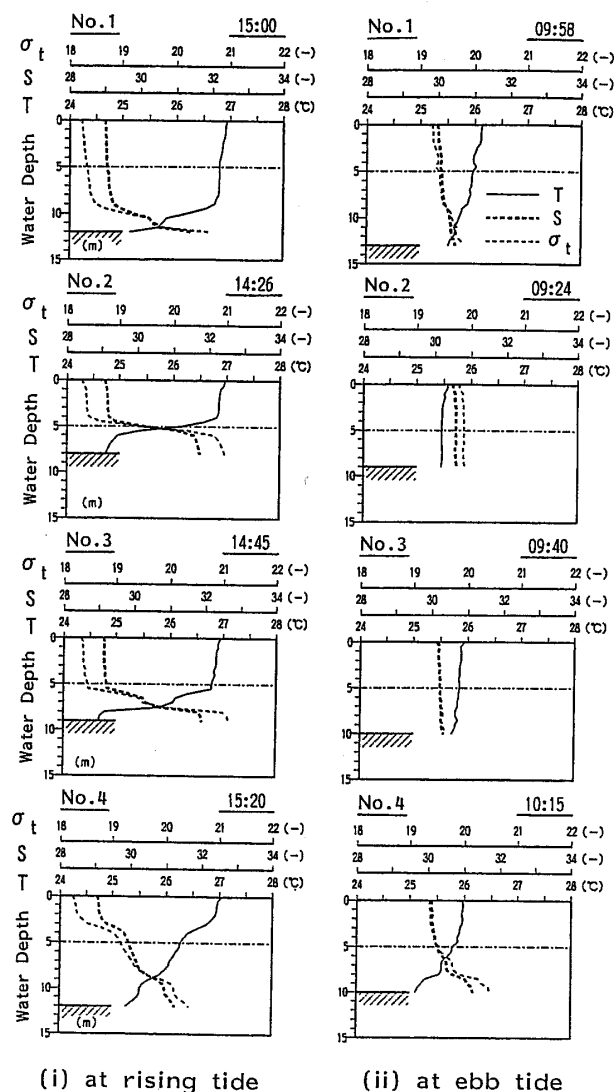


Fig. 7 Vertical distribution of sea temperature T , salinity S and density σ_t observed at rising tide and ebb tide of 29th August 1995

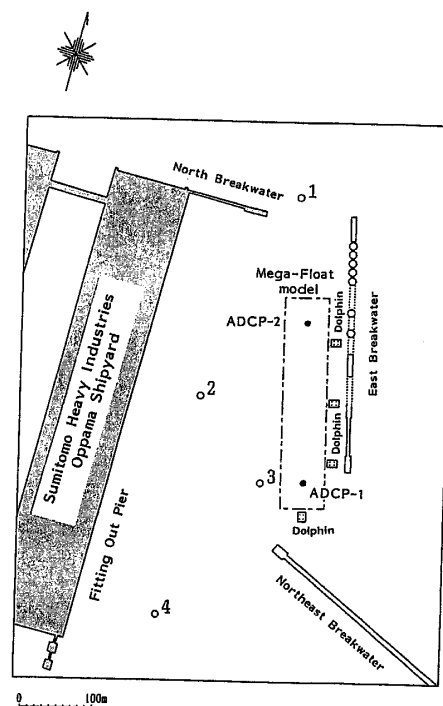


Fig. 8 Mooring site of Mega-Float model moored off Oppama, Yokosuka, and locations of measurement of temperature, salinity and density of sea water shown in Figure 7

濃度の鉛直分布の観測結果を示した、観測は下げ潮時と上げ潮時にのみ行われた¹⁰⁾。Fig. 7 には 14 個所で観測された結果のうち代表的な 4 個所 (Fig. 8 参照) での計測結果を示す。これによれば、下げ潮時には水温と塩分濃度の鉛直勾配は小さいのに対し、上げ潮時には水温と塩分濃度の上下層間の相違が著しいことが判る。ただし、いずれの場合も上層で高温低塩分、下層で低温高塩分という特徴は変わらない。

部分浮体設置後に行われた流況調査では、浮体設置海域周辺の流速は浮体設置前の流速の約 1/2 で、全般的に流れが弱くなっていたが、これは浮体や係留ドルフィンの存在による結果であると推定されている¹⁰⁾。一方、前述の干潮時における流況が観測時期によって異なる原因のひとつは、観測時の潮位変化に相違があることであると考えられる。すなわち、1 月 10 日における下げ潮時および上げ潮時の潮位変化は約 80 cm 程度と推定されるのに対し、浮体設置前の 8 月 29 日では潮位変化は約 120~130 cm, 8 月 30 日では約 100~110 cm と推定されている¹⁰⁾。

4. 数値シミュレーションの結果と考察

4.1 計算条件

前報の数値シミュレーションは M_2 分潮に対する流速のみの計算であったが、本報では海面での熱と塩分の流入、河川水の流入、海面上を吹送る風の影響を考慮した。計算のタイム・ステップは前報と同様 $\Delta t = 1.0$ s で、

特に断らない限り、計算は開始後5日間(432000ステップ)実施した。

潮位は開境界において M_2 分潮に相当する振幅(詳しくは前報参照)を与え、開境界における水温および塩分濃度は一定値に保った。また、水平方向の渦動粘性係数 A_M は1000 mの格子間隔に対して $100 \text{ m}^2/\text{s}$ とし、格子間隔がこれと異なる場合はリチャードソンの4/3乗則に基づき変化させた¹⁾。また、水平方向の渦拡散係数 A_c は1000 mの格子間隔に対し $10 \text{ m}^2/\text{s}$ とし、これもリチャードソンの4/3乗則で、格子間隔とともに変えた。この他の数値パラメータのうち、前報でも使用したものは前報どおりとし、本報で新たに導入した諸パラメータの値を Table 1 にまとめた。

本報では、水温および塩分濃度の変化を考慮するので、水温と塩分濃度の初期値の与え方が重要であり、極力実際に即した値を初期値に用いる必要がある。本報で検討する平成7年8月29日～30日の計測データではないが、平成8年8月8日から9日かけて東京湾内で水温・塩分濃度の鉛直分布が計測された例があり、これを海上保安庁水路部海洋データ・センターから入手した。これを基に、本報で用いる東京湾内の水温と塩分濃度の初期分布を作成した。Fig. 9に、その一部である水深1.5 mでの水温と塩分濃度の分布を示した。

河川からの淡水流入については、東京湾に流入する河川のうち主要な5河川、すなわち江戸川、荒川、隅田川、多摩川、鶴見川のみを考慮した。各河川の流量は豊水期を想定した平均的な一定値とし、水温は気温に等しいとして平均的な値 25.7°C と仮定した。各河川の想定流量は以下のとおりである。江戸川、荒川は $125 \text{ m}^3/\text{s}$ 、隅田川、多摩川は $75 \text{ m}^3/\text{s}$ 、鶴見は $50 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。

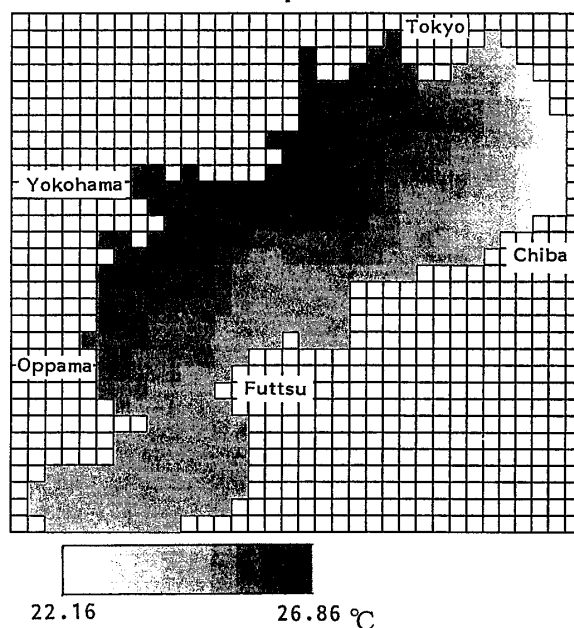
本報で、その計算結果を引用する計算ケースは、次の5ケースである。

- Case 0: 流速のみの計算で、海水の密度変化を考慮しない(すなわち、前報の計算に相当する)。
- Case 1: 流速のほか、密度(水温、塩分濃度)の変

化を考慮する。但し、海面での熱および塩分フラックス、河川流入、風の影響は考慮しない。

- Case 2: 流速のほか、密度変化も考慮する。また、海面での熱および塩分フラックス、河川流入も考慮する。風の影響は考慮しない。
- Case 3: Case 2と同一条件のほか、時間的に変動する風の影響を考慮する。
- Case 4: Case 3と同一条件のほか、メガフロート浮体の存在を考慮する。

Sea temperature



Salinity

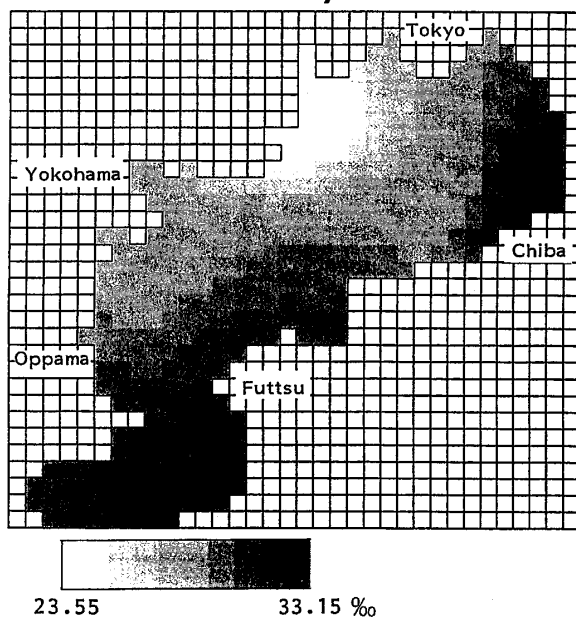


Table 1 Numerical values of various parameters used in simulation

Symbols	Numerical values	Symbols	Numerical values
C_p (J/kg/K)	3.930×10^3	c	0.65
C_a (J/kg/K)	1.006×10^6	L (J/kg)	2.45×10^6
C	0	q_s (kg/kg)	0.0223
Q_{T0} (J/m ² /sec)	400.0	q_e (kg/kg)	0.0173
r	0.09	P_r (kg/m ² /sec)	0
s	0.9	C_E	1.1×10^{-3}
σ (J/m ² /sec/K ⁴)	1.575×10^{-11}	C'_E	1.1×10^{-3}
T_a (°C)	26.7	C_H	1.1×10^{-3}
E_a (hPa)	27.71	C'_H	1.1×10^{-3}
ρ_a (kg/m ³)	1.226		

Fig. 9 Initial distribution of sea temperature and salinity on the uppermost level (0-3 m) used in numerical simulation

東京湾で卓越する主な分潮成分は半日周潮の M_2 分潮と S_2 分潮, 日周潮の K_1 分潮と O_1 分潮の4分潮である。このうち, 潮位振幅が最大なのは M_2 分潮であり, 次に大きいのが K_1 分潮, さらにこれに近い振幅をもつのが S_2 分潮である。これら3つの主要な分潮によるメガフロート浮体近傍での潮流速の大きさと潮流楕円を, M_2 分潮のみの場合, M_2 分潮+ K_1 分潮の場合, M_2 分潮+ S_2 分潮の場合の3ケースについてシミュレーション計算で比較したところ, M_2 分潮+ K_1 分潮の場合は, M_2 分潮単独の場合と目立った相違はなく, M_2 分潮+ S_2 分潮の場合も M_2 分潮単独の場合より, 流速の最大値が約20%強大きいほかは, さしたる相違はなかった¹²⁾。このことから, 前述の Case 0 から Case 4 における潮汐としては, M_2 分潮のみを考慮することとした。

4.2 計算結果と考察

4.2.1 密度変化を考慮した東京湾内の流況

前報とは異なり, 本報では海水の密度変化を考慮している。このことが, 東京湾内全体の海水流動に与える影響を検討するために, 前述の Case 0, Case 1, Case 2 について, 計算結果を比較する。計算結果のうち, 計算開始後4日経過した後の24時間の上層における恒流を Fig. 10 に示す。密度変化を考慮しない場合 (Case 0) と考慮した場合 (Case 1) とでは, 恒流の分布に明らかな相違がある。恒流の最大となる領域が千葉県富津岬と神奈川県観音崎を結ぶ線 (これを以下では湾口と呼ぶことにする) の北側に近接した中央やや右寄りの領域にあり, その流向が北西に向かうという大局的な流れの様子は両者で共通している。しかし, Case 1 では湾口北側の西岸, すなわち横浜から横須賀沖に沿って南下する流れが Case 0 より顕著であり, さらに, 浦賀水道を湾外に向かう流れも Case 0 より明瞭である。また, 湾奥の千葉沖の恒流も大きい。一方, 海面での熱および塩分フラックスや河川からの淡水の流入を考慮すると (Case 2), 河口付近に河川からの流入に相当する微弱な恒流が生ずることは当然としても, 前述の湾奥千葉沖の恒流は弱まり, かつ流向も変わる。また, 湾口北側の西岸を南下する流れは若干弱くなるが, 逆に浦賀水道を南下し, 湾外に向かう流れの勢いは強くなっている。このように密度変化を考慮することは, 東京湾内の恒流の全体像を大きく変えるものではないが, 湾口近くの西岸を南下し, さらに浦賀水道を湾外に向かう流れに明確な相違を生み出すことが判る。

次に, メガフロート浮体設置海域周辺の局所的流況の相違を比較したのが Fig. 11~Fig. 13 である。ここに示した流況は干潮時の上層 (水深1.5 m) と下層 (水深7.5 m) の流れで, Fig. 11 に示した Case 0 の場合, メガフロート浮体設置海域とその西側の流れは上層, 下層ともに北流となっている。同様に, 密度変化のみを考慮した Case 1 の場合 (Fig. 12) でも, 流速が若干小さめになっている

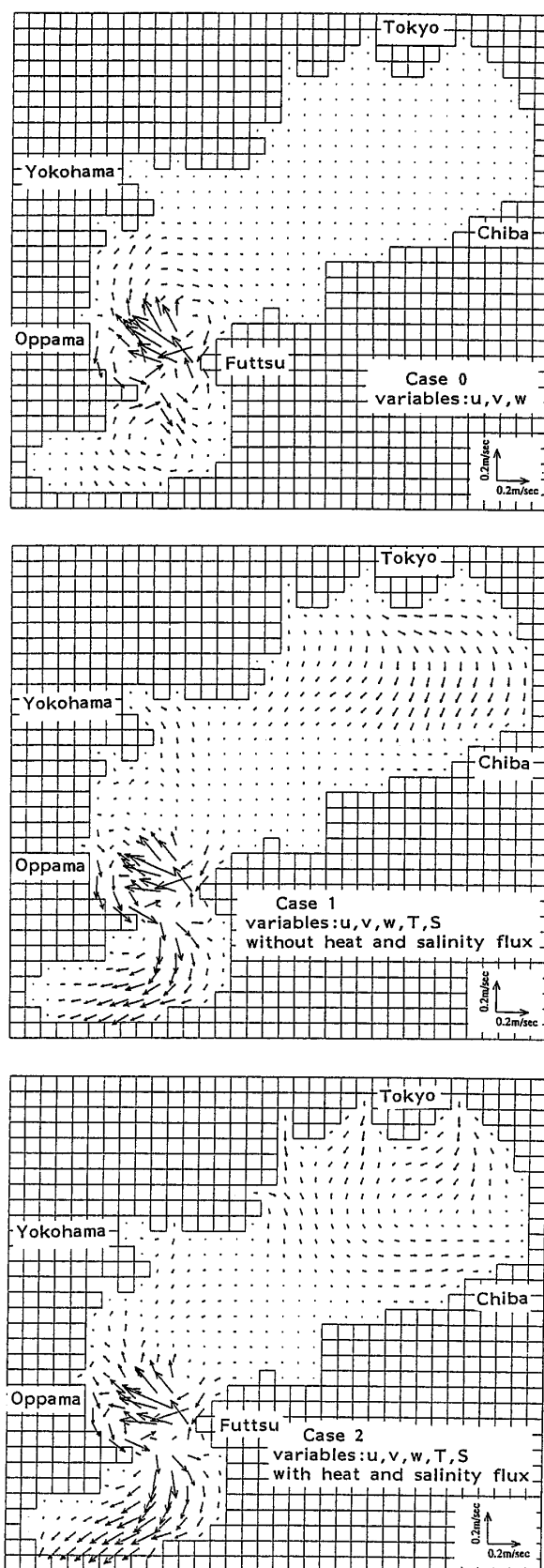
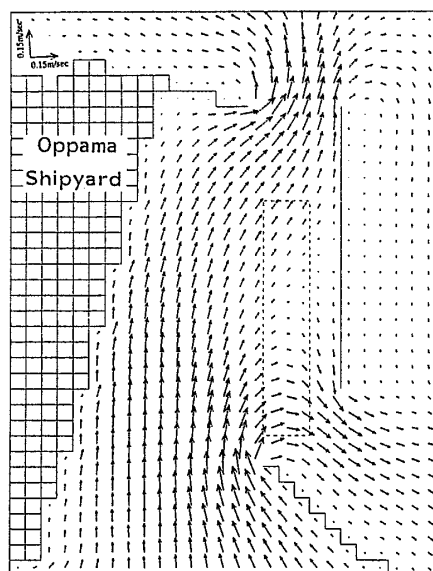


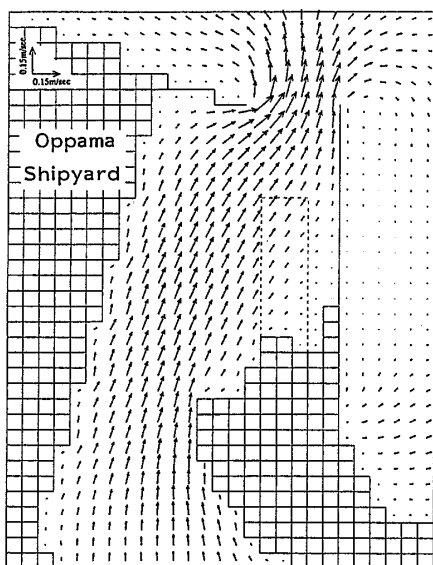
Fig. 10 Computed residual current on the uppermost level in Case 0, Case 1 and Case 2

(特に浮体設置海域で) とはいえ, Case 0 の場合と同様, 上下層ともに北流である。

これに対し, Case 2 では, 上層は南流, 下層は北流



(i) Level : 0 - 3m

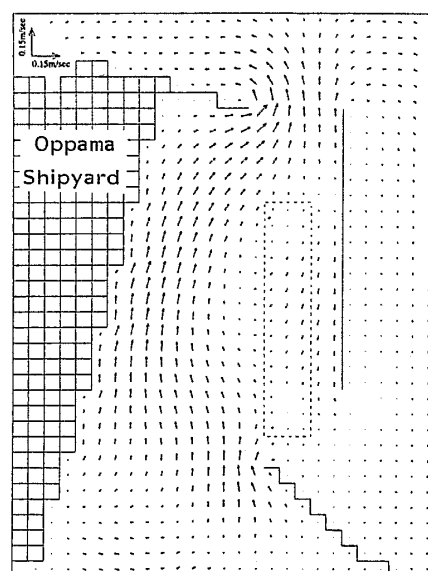


(ii) Level : 6 - 9m

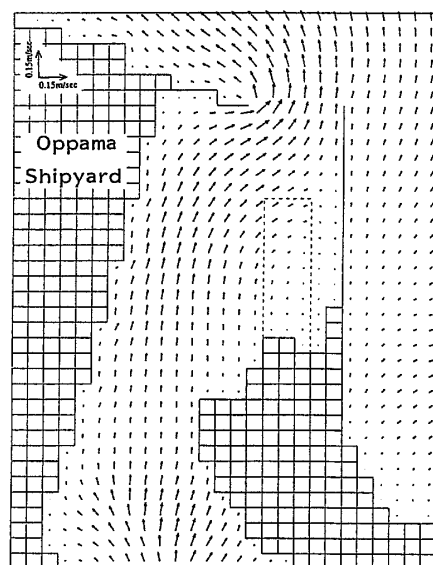
Fig. 11 Computed current at low tide around Mega-Float model in Case 0

(但し、浮体設置海域以北)となり、上層と下層とで流向が異なる。また、流速の大きさも上層の南流が下層の北流より卓越している。この結果は、先の Fig. 3 に示した平成7年8月29日の干潮時の観測結果と定性的に良く符合している。

Fig. 11~Fig. 13 には、干潮時の流況を示したが、Fig. 8 に示した北側 ADCP (ADCP 2) における干潮前後の南北流速 v (北流が正) の時間変化を Fig. 14 に示した。この図より、Case 0 および Case 2 の場合のいずれにおいても、流れは時間の経過とともに、南流から北流に移行するか、さもなければ北流の流速が増加する傾向にあることは明らかである。しかし、Case 2 では下層 (レベル3) での北流の発達を上層 (レベル1) より先行する。したがっ



(i) Level : 0 - 3m

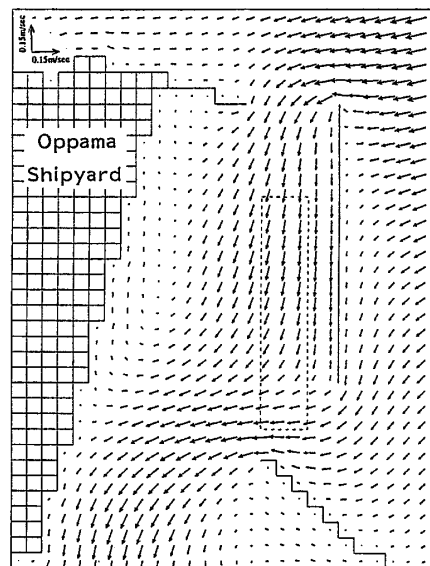


(ii) Level : 6 - 9m

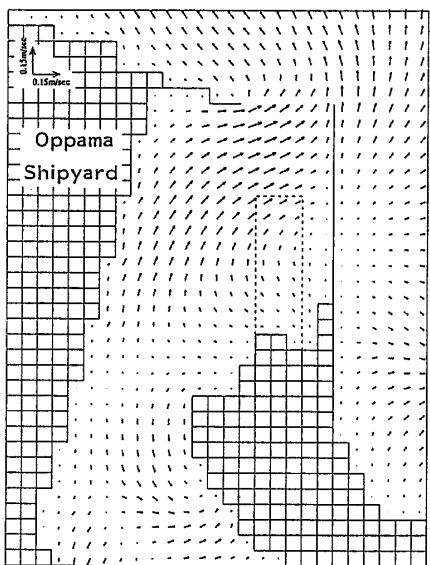
Fig. 12 Computed current at low tide around Mega-Float model in Case 1

て、干潮時には、上層ははまだ南流であるのに対し、下層はすでに北流に転じた後であるため、上層と下層の流向が逆となっている。Fig. 14 に示すシミュレーションでは、上層と下層の流向が逆となる流況が干潮をはさむ約1時間持続している。これに対し、Case 0 では、上下で流向が逆となる時間帯は数分程度、しかも、そのときの流速は極めて小さく、流向が逆になったと気付く程の大きさではない。

M_2 分潮のみを考慮した Case 0 の東京湾の恒流分布 (Fig. 10(a) 参照) に比べ、 M_2 分潮のほか、海面での熱および塩分フラックス、さらに河川からの淡水流入をも考慮した Case 2 の場合に、東京湾口北側の西岸沿いに南下する上層の恒流が強くなる (Fig. 10(c) 参照) ことが、



(i) Level : 0 - 3m



(ii) Level : 6 - 9m

Fig. 13 Computed current at low tide around Mega-Float model in Case 2

Fig. 11 と Fig. 13 に示した上下層の流向の相違を生じたものと考えられる。

参考に、浮体設置位置中央部直下での水温変化の時系列を Fig. 15, Fig. 16 に示す。海面での熱フラックスおよび河川流入を考慮しない Case 1 (Fig. 15) では、時間の経過とともに上層 (レベル 1)、中層 (レベル 2)、下層 (レベル 3) の水温は、いずれも初期値より顕著に低下している。これは、海面からの熱流入を遮断しているため当然予想される結果である。また、初期の 1°C あまりの水温の上下層間の相違も最終的に 0.2°C 程度に減じている。一方、海面での熱フラックスおよび河川流入を考慮した Case 2 (Fig. 16) では、全体的に水温は漸増傾向にあり、上、

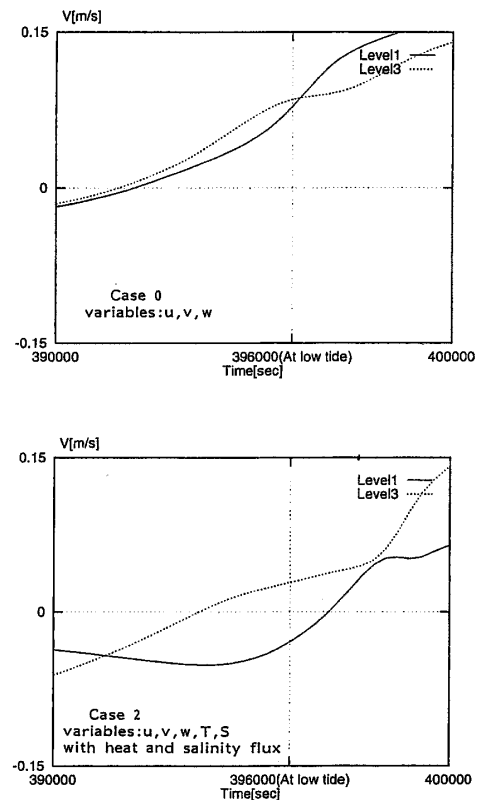
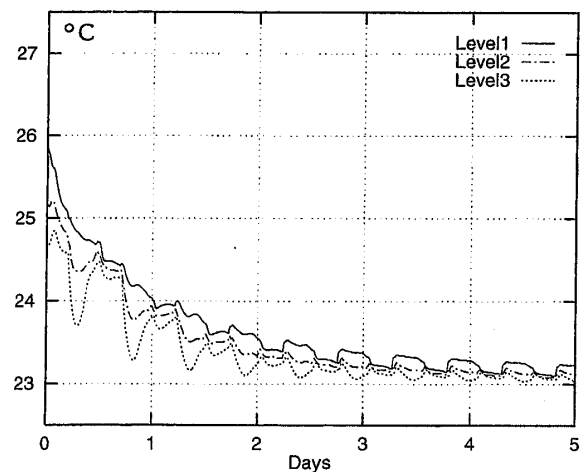
Fig. 14 Computed time variation of south-to-north component v of tidal current at low tide

Fig. 15 Computed time variation of sea temperature at the center of Mega-Float model (Case 1)

中、下層の水温とも初期値より増加していく。これは、計算で与えた海面および河川流入を介して出入する熱フラックスと初期に与えた湾内の水温分布等がバランスしていないことによるものと思われる。しかし、Case 2 の計算では、初期に与えた上層下層間の約 $1.2 \sim 1.3^{\circ}\text{C}$ の温度差は、おおむね良好に保たれている。このことは、計算で与えた熱および塩分フラックスに関する諸数値がおおむね妥当であったことを示すものと考えられる。

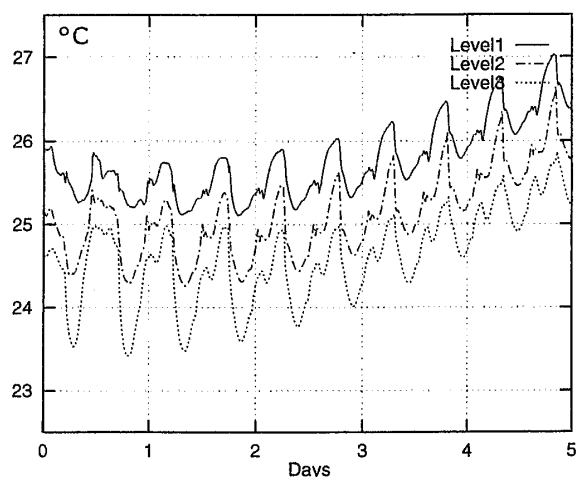


Fig. 16 Computed time variation of sea temperature at the center of Mega-Float model (Case 2)

4.2.2 変動風を考慮したメガフロート設置海域の流況と水温分布

ここまででその結果に言及したシミュレーション計算では、風の影響を考慮していない。そこで、Case 3およびCase 4では、Fig. 6にその一部を図示した現地での風速、風向の観測値を、風の入力データとするシミュレーションを行った。海上の風速、風向は場所によって異なるが、これらのシミュレーションでは計算領域全体で同一風速、同一風向と仮定した。計算は8月25日午前0時に開始し、8月29日の干潮時の流況について計算結果を比較検討することとした。なお、Case 4ではメガフロート浮体を想定したが、浮体の数値計算上の取り扱いについては、文献13)を参照されたい。なお、浮体は、熱の流出入を完全に遮断するものとし、浮体構造を介した熱の伝播はないとした。

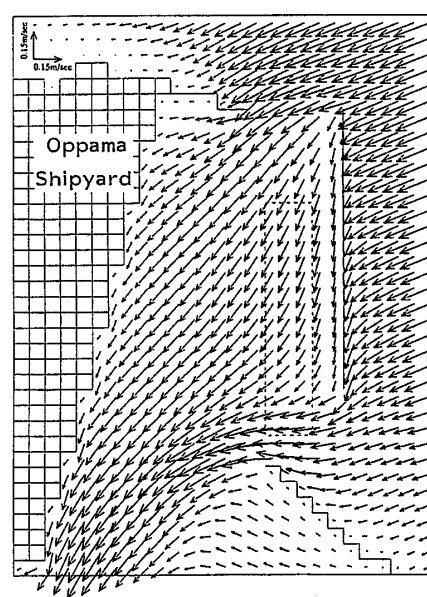
(1) 風の流況に対する影響

ここで仮定した風場は、東京湾全体にわたって一様な風速、風向とするもので実際にはあり得ないが、Case 3の8月29日干潮時の上層、下層の流況を示したのがFig. 17であり、これを風を考慮しないCase 2 (Fig. 13)と比較してみる。上層は南流であるという上層の全体的な流況はCase 2とよく似ているが、8月28日の夕刻から8月29日の干潮時まで、風速約6 m/sの北東ないしは東北東の風が連続して吹送していた分、Case 3の上層の流速はCase 2より明らかに大きい。一方、Case 3の下層の流況はCase 2のそれとは、上層ほどの類似性はない。特に、北防波堤と東防波堤北端を結ぶ付近とそれより北側、さらには東防波堤の東側の領域では、流速、流向ともかなり異なる。これは、Case 3ではこれらの領域の上層に南西ないしは西南西に向かう強い流れ (Case 2に比べての意)が存在し、その反流として下層に東向きの強い流れ (これもCase 2に比べての意)が生じたことによるものと考え

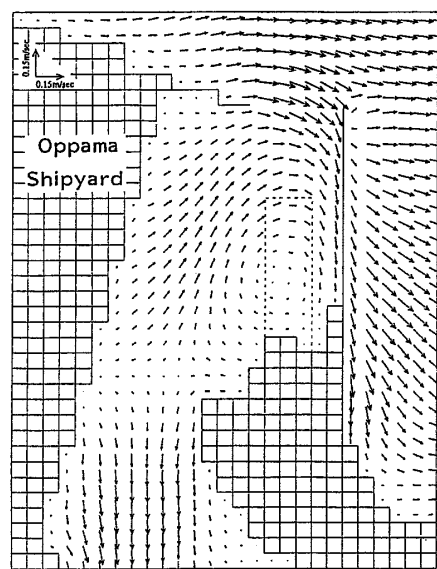
られる。また、東北防波堤の西側の流速、流向もCase 3とCase 2では明らかに異なる。

一方、Case 4では、メガフロート浮体の存在を考慮した。この場合の8月29日の干潮時に相当する流況を求めたところ、Fig. 17に示したCase 3の結果とほとんど変わらないことが判った。ただし、上層におけるメガフロート浮体の南半分とその極く近傍の流速と流向に若干の相違は存在するが、敢えて図示するほどの相違ではないので、割愛した。

前述のように、風速および風向が東京湾全体の大きさの海域で一定であるという仮定は非現実的である。そこで、



(i) Level : 0 - 3m

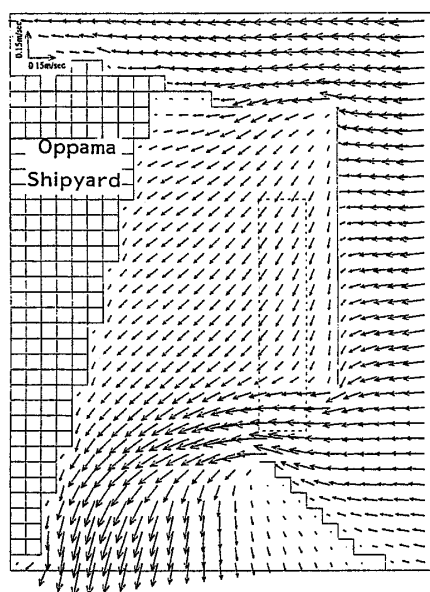


(ii) Level : 6 - 9m

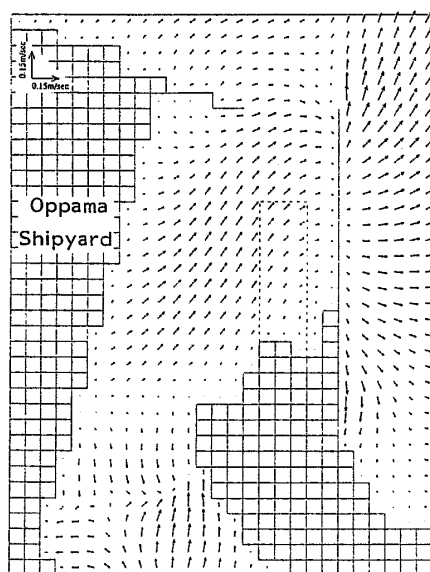
Fig. 17 Current at low tide around Mega-Float model, computed assuming that wind blows over the whole region of Tokyo Bay (Case 3)

本シミュレーションにおける Rank 2 の領域 (追浜沖を中心とする約 16 km×13 km の領域, 詳しくは第一報を参照されたい) に含まれる海上にのみ, 前述の変動風が吹送すると仮定したシミュレーションを行った。その結果のうち, 8月29日の干潮時に相当する流況を示したのが Fig. 18 である。当然予想されるように上層, 下層ともに, 全般的に流速は Case 3 の場合より小さい。この影響は下層の流況に顕著に現れている。すなわち, 北防波堤の北側を流れる下層の東向きの流れが弱くなるとともに, 東北防波堤の西側領域の下層の流向が Case 3 の場合より複雑になっている。

このように, 局所海域の流れをある程度正確に再現する



(i) Level : 0 - 3m



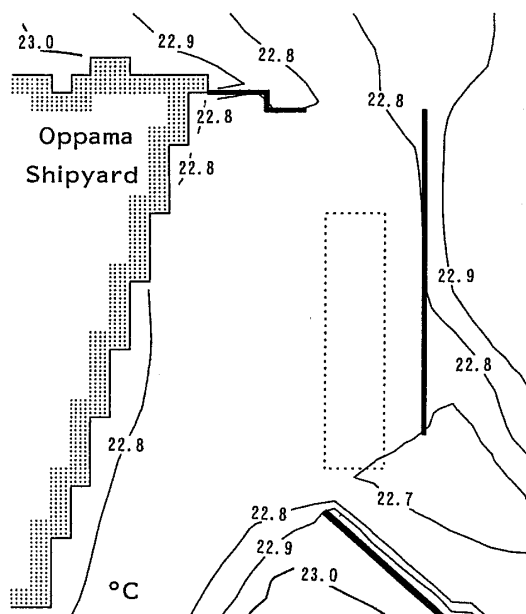
(ii) Level : 6 - 9m

Fig. 18 Current at low tide around Mega-Float model, computed assuming that wind blows only inside Rank 2 region

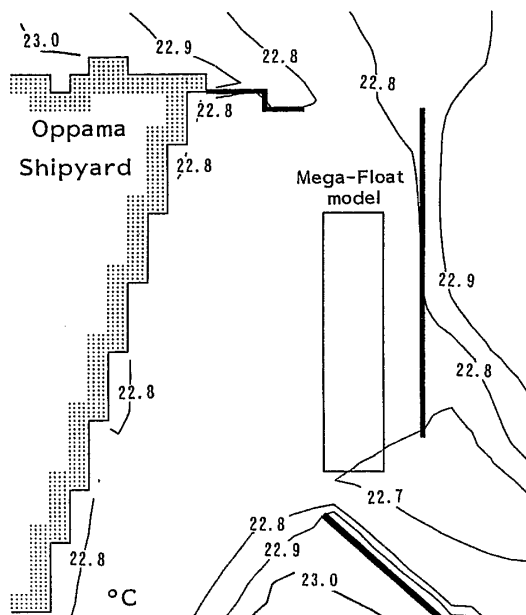
ためには, シミュレーションにおける風の入力データをどのように与えるかについても, 十分なる注意が必要であると思われる。

(2) メガフロート浮体の水温分布への影響

追浜沖に係留されているメガフロート浮体が, 浮体周囲の流況に与える影響は極めて小さいものであることを前項で明らかにした。この他, Case 3 および Case 4 のシミュレーション計算では水温および塩分濃度も計算されている。



(a) Case 3 (without Mega-Float model)



(b) Case 4 (with Mega-Float model)

Fig. 19 Effects of Mega-Float model on sea temperature distribution on the uppermost level at low tide

シミュレーション計算によれば、8月29日干潮時に相当する水温と塩分濃度分布に対する浮体の影響も極めて小さい。塩分濃度よりは水温の方が、浮体の有無の差が明確であるのでFig. 19に上層の水温分布を示した。(a)が浮体の存在しないCase 3であり、(b)は浮体の存在するCase 4である。両者の相違はほとんどないが、図中の左端に近い追浜造船所艀装岸壁南半分に隣接した領域と浮体の南端に近い領域の水温分布に極く僅かな違いが見られる。しかし、その差も極めて小さく、実際上は無視できる程度のものである。

5. 結 論

前報では、メガフロート浮体設置海域近傍での流況の細かい構造を明らかにするために、浮体近傍は格子間隔の小さい格子を用いる多段階分割法を用いて潮流の数値シミュレーションを実施し、それが有効であることを確認した。本報ではさらに、同じ多段階分割法を用い、流速・水温・塩分濃度の数値シミュレーションを実施し、メガフロート浮体周囲の流況等について、さらに詳細に検討した。その結果、得られた主な結論は以下のとおりである。

1. メガフロート浮体設置海域の流況調査によって観測された、干潮時の潮流の方向が上層と下層とで異なる現象をシミュレーションで再現し、その原因について考察した。
2. 内湾の海水流動の細かい構造を検討するには、海面を介しての熱および塩分のフラックス、河川流入、海上風などの効果を考慮に入れることの重要であることはすでに指摘されているが、メガフロート浮体設置海域での観測結果を、冒頭に述べた種々の要因を考慮したシミュレーション結果と比較検討することにより、局所的海水流動の正確な再現には上記の要因を的確に考慮することの重要性を改めて確認した。
3. メガフロート浮体の存在が、その周囲の海水の流速、水温および塩分濃度分布に与える影響は極めて小さいことを数値シミュレーションによって確認した。

海上に超大型海洋構造物を設置した場合の周辺海域の環境影響評価は、このような浮体の実現性を進展させるために、極めて重要な事前検討事項の一つである。今後、さらに、浮体の規模や設置海域を変更した場合、生態系への影響等についても考慮に入れた検討を続けていく所存である。

る。

最後に、本研究を進めるにあたり貴重な討論と助言を賜った九州大学経塚雄策教授、横浜国立大学多部田茂助教授、またメガフロート浮体周囲の海況実測データの利用に便宜を図っていただいたメガフロート技術研究組合大川豊氏ほかに深甚なる謝意を表します。さらに、本文中に載せた計算の一部を担当していただいた東京大学大学院生北澤大輔氏にも心よりお礼申し上げます。なお、本研究は平成9年度文部省科学研究費補助金を受けて実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Kobayasi, K., Ohkawa, Y. and Kodan, N.: Environmental Conditions of the Large-Scale Experiment of a Mega-Float Structure, Proc. of OMAE' 97, Vol. VI (1997)
- 2) 経塚雄策, 胡長洪, 長谷美広行, 肥海昭雄: 超大型浮体式海洋構造物が東京湾の水質と生態系に及ぼす影響について, 日本造船学会論文集第181号 (1997)
- 3) 藤野正隆, 清野和雄, 長谷部雅伸: 内湾における局所的海水流動の数値計算 (第1報), 日本造船学会論文集第182号 (1997)
- 4) 多部田茂, 藤野正隆: 多層モデルによる東京湾の夏秋季の流動及び密度場の計算, 日本造船学会論文集第176号 (1994)
- 5) 柳哲雄: 沿岸海洋学, 恒星社厚生閣 (1989)
- 6) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店 (1994)
- 7) 日野幹雄: 開放境界における波の無反射透過条件の極めて簡単な計算スキームの提案, 東工大土木工学科研究報告 Vol. 38 (1987)
- 8) 日野幹雄, 仲座栄三: 水理計算における新しい“無反射境界”の数値的検討, 東工大土木工学科研究報告 Vol. 38 (1987)
- 9) 藤野正隆, 影本浩, 多部田茂, 濱田孝治: 潮汐・潮流数値シミュレーションにおける無反射境界の有効性について, 日本造船学会論文集第175号 (1994)
- 10) 住友重機械工業株式会社: 平成7年度超大型浮体式海洋構造物の試験研究報告—実海域流況実証実験 I. 初期値計測結果 (1996)
- 11) 住友重機械工業株式会社: 平成7年度超大型浮体式海洋構造物の試験研究報告—実海域流況実証実験 II. 浮体モデル計測結果 (1996)
- 12) 長谷部雅伸: 内湾の局所的海洋物理環境の数値シミュレーションに関する研究, 東京大学大学院修士論文 (1998)
- 13) 藤野正隆, 影本浩, 濱田孝治: 超大型浮体周辺の海水に対する海面遮蔽の影響について, 日本造船学会論文集第180号 (1996)