

## 超大型浮体式海洋構造物に係わる環境アセスメント のための生態系モデルについて

経塚, 雄策  
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

磯辺, 篤彦  
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

胡, 長洪  
九州大学工学部船舶海洋システム工学科

長谷美, 広行  
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻 : (財)九州環境保全協会

他

<https://doi.org/10.15017/17443>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 19 (2), pp.215-226, 1997-09-01. 九州大学大学院総合理工学研究科  
バージョン :  
権利関係 :

# 超大型浮体式海洋構造物に係わる環境アセスメントの ための生態系モデルについて

経塚 雄策\*・磯辺 篤彦\*・胡 長洪\*\*  
長谷美 広行\*\*\*・肥海 昭男†

(平成9年5月31日 受理)

## An Ecohydrodynamic Model for Environmental Impact Assessment of a Mega Float in a Bay

Yusaku KYOZUKA\*, Atsuhiko ISOBE\*, Changhong HU\*\*,  
Hiroyuki HASEMI\*\*\* and Akio HIKAI†

A preliminary study on an ecohydrodynamic model for the environmental assessment of a Very Large Floating Structure (VLFS) or Mega-Float in a bay is presented. The model consists of two parts, a hydrodynamic model and a marine ecosystem. Tidal currents and steady currents by the density anomaly are calculated in a bay with/without Mega-Float in the hydrodynamic model. A simplified marine ecosystem composed of nutrients, marine planktons and organic matters floating freely in the ocean is newly developed and combined with the hydrodynamic model.

Numerical calculations with/without a Mega-Float in Tokyo Bay are demonstrated and the results are discussed by comparison with the existing computations and measurements.

### 1. はじめに

大気海洋環境システム学専攻海面環境工学講座では、平成7年度から「メガフロート技術研究組合」との間で「民間等との共同研究」を実施しており、超大型浮体式構造物の環境アセスメントのための流況および生態系予測手法の開発を行ってきたが、この間、いくつかの場所で「浮体式海上空港」の適用が検討されるなど、その実現性が非常に高まっている昨今である。また、マスコミ報道を通じて「浮体式海上空港」の存在が一般にも普及し、メガフロートへの期待感も高まっているように思われる。従って、メガフロートに関して残されているいくつかの技術的課題については早急に解決する必要がある。

メガフロートの利点のひとつとして上げられている「環境にやさしい」ということについても、ただ漠然と一般に納得されているようであるが、厳密に立証したものではないので、今後の研究を通じて明らかにすべき問題である。ただし、メガフロートの存在が周辺の海洋環境に与える影響については、既にいくつかの研究があり、流れおよび物質の拡散への影響は小さいと予想されることが数値計算によって示されてい

る<sup>1),2),3)</sup>。また、著者ら<sup>4)</sup>および藤野ら<sup>5)</sup>はメガフロート周りの定常流および水温・塩分分布に関して、メガフロートの存在により水面で遮蔽される日射熱の影響を考慮した密度流の計算例を示した。前者は日射の日変化を無視した簡易計算、後者は日変化も考慮した詳細な計算であるが、それらの結果、密度流はメガフロート周りの定常流のパターンに大きく影響すること、浮体下部では定常流の存在によって温度の拡散が行われ、そこでの温度変化はかなり小さくなると予想されること、などが示された。以上は、海洋環境の物理的な要因への影響であるが、それらがさらには水質や生態系などへの影響へと波及することになる。

本研究では、これらの研究の延長としてメガフロートによる海洋生態系への影響について検討を試みる。生態系モデルとしては、中田モデル<sup>6)</sup>を参考にしたが、手始めにやや簡易化したものを開発した。それを東京湾に適用し、既存の計算値および観測値との比較を行って、計算プログラムの検証を行った。さらには、横浜沖にやや大きめのサイズのメガフロートを仮定し、それが湾内の流れ、水質および生物プランクトンに与える影響について比較・考察を行った。

### 2. 数値計算モデル

#### 2.1 基礎方程式

沿岸域の規模の現象では、水平方向のスケールがそれ

\*大気海洋環境システム学専攻

\*\*九州大学工学部船舶海洋システム工学科

\*\*\*大気海洋環境システム学専攻修士課程（現在(財)九州環境保全協会）

†メガフロート技術研究組合

ほど大きくないので、地球の丸みを無視してコリオリパラメータを一定とし、デカルト座標系を用いる。また、水平方向のスケールに対して鉛直方向のスケールが非常に小さいことから、圧力については静水圧近似を用い、さらに浮力以外のすべての項で密度を一定とするブシネスク近似を用いる。格子の大きさより小さいスケールの過程は渦動粘性項・渦拡散項によって表す。

このとき、連続の方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

であり、3方向の運動方程式は次式で与えられる。

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_M \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (4)$$

ただし  $f$  はコリオリパラメーター、 $t$  は時間、 $\rho$  は海水の密度、 $\rho_0$  は海水の代表密度 (定数)、 $p$  は圧力、 $g$  は重力加速度、 $A_M$ 、 $K_M$  はそれぞれ水平方向、鉛直方向の渦動粘性係数である。

(4) を  $z$  で積分すれば、圧力は次式で与えられる。

$$p = p_a + \rho g (\eta - z) \quad (5)$$

ただし、 $\eta$  は水位であり、 $p_a$  は海面での大気圧である。

(1) を海底 ( $z=H$ ) から水面 ( $z=\eta$ ) まで  $z$  で積分し、水面と海底での境界条件を用いると次の水位に関する式を得る。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_H^\eta u dz \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \int_H^\eta v dz \right) = 0 \quad (6)$$

上式は、メガフロートのない海域で成立するが<sup>8</sup>、メガフロートが存在する場合には別の取扱いが必要である。胡・経塚<sup>3)</sup>は浮体が存在する場合には、(1)、(2)、(3) を  $z$  で鉛直方向に積分し、浮体底面での圧力に関する2次元ポアソン方程式を解いているが、ここでも同じ方法によった。

次に、海水の密度差によって密度流が誘導されるが、ここでは、海水密度の算定は Mamaev の式を用いて水温  $T$  (°C) と塩分  $S$  (‰) から次式で与えた。

$$\begin{aligned} \rho = 1028.14 - 0.0135T - 0.00469T^2 \\ + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0) \\ = 1000.0 + \sigma_t \quad (\text{kg/m}^3) \end{aligned} \quad (7)$$

この水温  $T$  と塩分  $S$  は次の拡散方程式を解いて求められる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \\ A_c \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_c \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \\ A_c \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_c \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \frac{RS}{V_R} + Q_S \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $A_c$ 、 $K_c$  は水平渦拡散係数、鉛直渦拡散係数、 $R$ 、 $V_R$  は単位時間当たりの河川流量および体積、 $Q_T$ 、 $Q_S$  は領域への熱および塩分流量である。

## 2.2 境界条件

海水の流動に関する境界条件として、海岸線では no-slip 条件を与え、海底および海面では以下の式で与えた。

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho}, \quad K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_y}{\rho} \quad (10)$$

ただし、海底では

$$\tau_x = \gamma_b^2 \rho u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}, \quad \tau_y = \gamma_b^2 \rho v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (11)$$

また、海面では風の応力を考慮して

$$\tau_x = C_d \rho_a u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}, \quad \tau_y = C_d \rho_a v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2} \quad (12)$$

ただし、 $\gamma_b^2$ : 海底摩擦係数、 $C_d$ : 水面における摩擦係数、 $(u_b, v_b)$ : 海底流速、 $(u_w, v_w)$ : 風速、 $\rho_a$ : 空気密度とする。

次に、水温の境界条件としては海域の熱収支を考える。通常、海岸線や海底面では断熱と考え、熱の出入りは海面と開境界を通じて行われる。海面での熱のフラックス  $Q_T$  は次の4つの項に分けて考慮される<sup>7)</sup> 太陽光からの吸収熱 ( $Q_s$ )、海面からの長波放射 ( $Q_b$ )、海水の蒸発による潜熱輸送 ( $Q_e$ )、大気との乱流熱伝達 ( $Q_c$ ) とすれば

$$Q_T = Q_s - (Q_b + Q_c + Q_e) \quad (13)$$

で与えられる。ここで、 $Q_s$ ,  $Q_b$ ,  $Q_c$ ,  $Q_e$  は

$$Q_s = (1 - \alpha_s) Q_{s'} = 0.93(1 - 0.67n) Q_{s0} \quad (14)$$

$$Q_b = 1.32 \times 10^{-12} \theta_w^3 \{0.49 - 0.066\sqrt{e(T_a)}\} \\ \times (1 - 0.65n^2) + 5.27 \times 10^{-12} \theta_w^3 (T_w - T_a) \quad (15)$$

$$Q_c = K_t \{T_w - T_a\} = \rho_a C_{pa} \frac{u_*^2}{W_h(z)} \{T_w - T_a\} \quad (16)$$

$$Q_e = Q_c/B = Q_c / \left\{0.66 \frac{T_w - T_a}{e(T_w) - e(T_a)}\right\} \quad (17)$$

によって与えられる。

ただし、

- $\alpha_s (=0.07)$  : 水面での反射率
- $n (0 < n < 1)$  : 雲量
- $\theta_w (=273 + T_w)$  : 水面の絶対温度
- $T_a$  : 接水大気温
- $K_t$  : 乱流熱伝達係数
- $u_*$  : 接水大気の摩擦速度
- $B$  : ボーエン比
- $Q_{s'}$  : 海面に達した日射量
- $Q_{s0}$  : 完全晴天時の日射量
- $e(T_a)$  : 水温  $T_a$  における水蒸気圧
- $T_w$  : 海面水温
- $C_{pa}$  : 大気の定圧比熱
- $W_h(z)$  : 高度  $z$  の平均風速
- $B$  : ボーエン比

一方、海面での塩分のフラックス  $Q_s$  は次式で与えられる。

$$Q_s = S(E_v - P_r) \quad (18)$$

ただし、

$E_v$ : 水蒸発量  $P_r$ : 降水量

また、開境界での熱と塩分の条件は、流出時には自由流出、流入時には海洋観測結果の値を与えている。

### 2.3 生態系モデル

中田<sup>9)</sup>に倣って、Fig. 1 のような生態系モデルを考える。メガフロートの影響は流れ、水温、日射の遮蔽など物理過程に直接的に現れるが、浮遊性のプランクトンなどへは直接的、間接的に影響している。ここでは、生態系の食物連鎖を植物プランクトン ( $P$ )、動物プランクトン ( $Z$ )、懸濁態有機物 ( $POM$ )、溶存態有機物 ( $DOM$ ) および無機栄養塩としてリン酸塩 ( $PO_4$ ) の5つの状態変数 (コンパートメント) によって表現している。これら以外に溶存酸素 ( $DO$ ) と

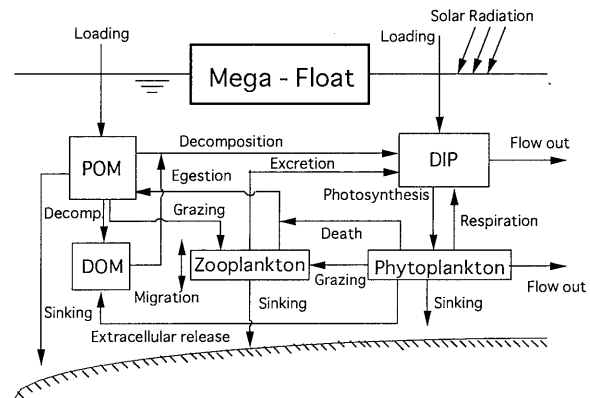


Fig. 1 Marine ecosystem model

化学的酸素要求量 ( $COD$ ) についても独立したコンパートメントを考えているが、これらは前述の5変数に従属的である。

これらの生物・物質は全て、海水中で浮遊しているものとして取り扱われ、その運動は移流拡散方程式によって記述される。例えば、植物プランクトン ( $P$ ) については

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -u \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial P}{\partial y} - w \frac{\partial P}{\partial z} \\ + A_c \nabla_h P + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_c \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial P}{\partial t} \right)^* \quad (19)$$

であり、この式の右辺の最後の項が生態系に関する項である。

以下、生態系を構成する各コンパートメントについて定式化を行うが、基本的には捕食・被食の食物連鎖と物質の循環を考えれば良い。ここでは、いくつかある中田モデル<sup>9),7),8)</sup>の内、文献<sup>9)</sup>のものを基本とし、部分的な変更および簡略化を行った。詳細は元の文献に譲るとして、ここでは最低限の説明をする。

#### 2.3.1 植物プランクトン ( $P_i$ )

このコンパートメントでは、組成比や水温、温度に対する特性の異なる複数の植物プランクトンを扱う。その炭素換算値を  $P_i$  ( $mgC/m^3$ ) とすれば、生物過程による時間変化量は次式によって計算する。

$$\left( \frac{dP_i}{dt} \right)^* = B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - B_6 - B_7 \quad (20)$$

ただし、

- $B_1$ : 光合成による増殖 (1次生産)
- $B_2$ : 細胞外分泌
- $B_3$ : 呼吸
- $B_4$ : 動物プランクトンによる被食
- $B_6$ : 枯死
- $B_7$ : 沈降

以下、各項別に述べる。

(a) 光合成による増殖 ( $B_1$ )

植物プランクトンの増殖は、次式のように主として水温、栄養塩濃度および光強度によって支配されていると考えられている。

$$B_1 = v_1(T) \cdot \mu_1(DIP) \cdot \mu_2(I) \cdot P \quad (21)$$

ここで、植物プランクトンの最大成長速度 ( $v_1(T)$ ) は

$$v_1(T) = \alpha_1 \exp(\beta_1 T) \quad (22)$$

ただし、

$\alpha_1$ : 0°Cにおける最大成長率 (1/day)

$\beta_1$ : 温度係数 (°C<sup>-1</sup>,  $\beta_1 = \ln Q_{10}/10$ )

$Q_{10}$ : 温度上昇が10°Cあるときの成長率

と与えられている。

光の強さ ( $I$ ) に対する光合成応答 ( $\mu_2(I)$ ) については、成長に最適な光強度 ( $I_{opt}$ ) があり

$$\mu_2(I) = \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (23)$$

によって表現する。さらに、水中の光強度は濁りによって減衰するので (ランベルト・ピア (Lambert-Beer) の法則)

$$I(z) = I_0 \exp(-kz)$$

を使う。なお、光強度の日変化については、次の生島 (1967) の式によって表現する。

$$I_0(t) = I_{max} \sin^3\left(\frac{\pi}{DL} t\right) \quad (24)$$

ただし、

$I_{max}$ : 最強日射量

$DL$ : 日の出から日没までの日長

また、栄養塩濃度による成長速度の制限 ( $\mu_1(DIP)$ ) をミカエリス・メンテンの式で表現する。ここでは、栄養塩としてリン酸塩 (DIP) だけを考えるので

$$\mu_1(DIP) = \left\{ \frac{DIP}{K_{DIP} + DIP} \right\} \quad (25)$$

ただし、

$K_{DIP}$ : リン酸塩 (DIP) の摂取に関する半飽和定数となるが、複数の栄養塩を考える場合はそれらの内の最小値を取る。

(b) 細胞外分泌 ( $B_2$ )

植物プランクトンは、光合成により固定した有機物の一部を溶存態有機物として細胞外に排出する。これ

を細胞外分泌と呼ぶ。分泌量はクロロフィル a (Chl-a) の関数として次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} B_2 &= \mu_3(P) \cdot B_1 \\ \mu_3(P) &= 0.135 \exp\{-0.00201 \cdot [Chl - a : C_p] \cdot P\} \end{aligned} \right\} (26)$$

ただし、

$[Chl - a : C_p]$ : 細胞内の  $C_p$  に対する  $Chl - a$  の比

(c) 呼吸 ( $B_3$ )

光合成によって生産された有機物は呼吸によって消費される。ここでは次式によって与える。

$$\left. \begin{aligned} B_3 &= v_3(T) \cdot P \\ v_3(T) &= \alpha_2 \exp(\beta_2 T) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

ここで

$\alpha_2$ : 0°Cにおける呼吸速度 (1/day)

$\beta_2$ : 温度係数 (°C<sup>-1</sup>:  $\ln Q_{10}/10$ )

(d) 枯死 ( $B_6$ )

ここでは、呼吸と同様な温度応答を仮定し次式によって与える。

$$\left. \begin{aligned} B_6 &= v_6(T) \cdot P \\ v_6(T) &= \alpha_3 \exp(\beta_3 T) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

ここで

$\alpha_3$ : 0°Cにおける枯死速度 (1/day)

$\beta_3$ : 温度係数 (°C<sup>-1</sup>:  $\ln Q_{10}/10$ )

(e) 沈降 (ベントスによる捕食) ( $B_7$ )

沈降によるベントスの捕食消失過程を次式によって与える。このモデルでは底泥からの栄養塩の溶出は考えていない。

$$B_7 = v_5(T) \cdot P \text{ (mgC/m}^3 \cdot \text{day)} \quad (29)$$

### 2.3.2 動物プランクトン ( $Z_j$ )

複数の動物プランクトンのグループを対象とし、各グループの動物プランクトンは卵から成体までの全ての発達期を通じて平均的な動物プランクトンとして扱い、齢構成や発達期の形態による生理学的な相違は考慮しない。各  $j$  グループの動物プランクトンの炭素換算量  $Z_j$  (mgC/m<sup>3</sup>) の生物過程による時間変化量は以下の式を用いて計算する。

$$\left(\frac{dZ_j}{dt}\right)^* = B_4 + B_8 - B_9 - B_{10} - B_{11} - B_{22} \pm B_{23} \quad (30)$$

ただし,

- $B_4$  : 植物プランクトンの摂食
- $B_8$  : デトリタスの摂食
- $B_9$  : 排糞
- $B_{10}$  : 排尿
- $B_{11}$  : 自然死亡
- $B_{22}$  : 沈降 (ベントスによる被食)
- $B_{23}$  : 日周鉛直移

(a) 摂食 ( $B_4$ )

動物プランクトンの摂食速度はイヴレフ (Ivlev, 1945) の実験式および温度応答を考慮して次式で与える.

$$\left. \begin{aligned} B_4 &= v_4(T) \cdot Z \\ v_4(T, P) &= \alpha_4 \exp(\beta_4 T) [1 - \exp\{\lambda(\Pi^* - \Pi)\}] \end{aligned} \right\} (31)$$

ただし,

- $\lambda$  : イヴレフ定数
- $\Pi, \Pi^*$ : 餌料濃度およびしきい値
- $\alpha_4, \beta_4$ : 摂食速度に関する温度係数

(b) 排糞 ( $B_9$ ) および排尿 ( $B_{10}$ )

排糞および排尿は摂食量および同化効率 ( $e$ ) および総成長率 ( $g$ ) を使って次式で与える.

$$B_9 = (1-e) \cdot v_4(T, P) \cdot Z \quad (32)$$

$$B_{10} = (e-g) \cdot v_4(T, P) \cdot Z \quad (33)$$

(c) 自然死亡 ( $B_{11}$ )

植物プランクトンと同様にして次式で与える.

$$\left. \begin{aligned} B_{11} &= v_7(T) \cdot Z \\ v_7(T) &= \alpha_5 \exp(\beta_5 T) \end{aligned} \right\} (34)$$

(d) 日周垂直移動 ( $B_{23}$ )

動物プランクトンは夜間に表層に, 昼間は下層に移動する習性が知られている. この垂直移動は, 海洋における物質の鉛直輸送に重要な役割を果たしていると考えられるが, ここでは機械的に以下で与える.

$$\left. \begin{aligned} w_z(t) &= -w_{down} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{DL}t\right) \\ w_z(t) &= w_{up} \cdot \sin\left\{\frac{\pi}{1-DL}(t-DL)\right\} \end{aligned} \right\}$$

従って, 次式のような表現をしている.

$$B_{23} = w_z(t) \frac{\partial Z_j}{\partial z} \quad (35)$$

### 2.3.3 懸濁態有機物 (デトリタス) (POM)

懸濁態有機物コンパートメントでは, 懸濁態有機炭素単位  $POC$  ( $mgC/m^3$ ) で計算を行い, 元素組成比  $P/C$  比および  $N/C$  比により  $POP$  (リン) や  $PON$  (窒素) に換算する.  $POC$  の生物過程による時間変化量は以下の式で計算する.

$$\left(\frac{dPOC}{dt}\right)^* = \sum_{i=1}^{N_p} B_6^i + \sum_{j=1}^{N_z} (B_{11}^j + B_9^j - B_8^j) - B_{12} - B_{13} - B_{16} + q_{POC} \quad (36)$$

ただし,

- $B_{12}$  : 細菌による  $POC$  の無機化分解
- $B_{13}$  : 分解余剰物による  $DOC$  の生成
- $B_{16}$  :  $POC$  の沈降
- $q_{POC}$  : 系外からの負荷

(a) 細菌によるデトリタスの無機化 ( $B_{12}$ )

ここでは, 温度と溶存酸素 ( $DO$ ) によって次式のように与える.

$$\left. \begin{aligned} B_{12} &= v_8(T, DO) \cdot POC \\ v_8(T, DO) &= \alpha_6 \exp(\beta_6 T) \cdot \frac{DO}{DO_1 + DO} \end{aligned} \right\} (37)$$

ただし,  $DO_1$  は細菌の酸素制限の半飽和値である.

(b) デトリタスの溶存態への変質 ( $B_{13}$ )

ここでは, 単純化して次式で与える.

$$B_{13} = \xi \cdot B_{12} \quad (38)$$

ただし,  $\xi$  は余剰物生成の割合である.

### 2.3.4 溶存態有機物 (DOM)

溶存態有機物の生物過程による時間変化量についても懸濁態有機物と同様に溶存態有機炭素単位 ( $DOC$ ) で計算を行い, 元素組成  $P/C$  比および  $N/C$  比から  $DOP$  や  $DON$  に換算する.

$$\left(\frac{dDOC}{dt}\right)^* = \sum_{i=1}^{N_p} B_2^i + B_{13} - B_{15} + q_{DOC} \quad (39)$$

ただし,

- $B_{15}$  : 細菌による  $DOC$  の分解
- $q_{DOC}$  : 系外からの負荷

ここで,  $B_{15}$  は  $POC$  の無機化と同様にして次式で与える.

$$\left. \begin{aligned} B_{15} &= v_9(T, DO) \cdot DOC \\ v_9(T, DO) &= \alpha_7 \exp(\beta_7 T) \cdot \frac{DO}{DO_2 + DO} \end{aligned} \right\} (40)$$

ただし,  $DO_2$  は酸素制限の半飽和値である.

### 2.3.5 リン酸塩 ( $DIP$ or $PO_4$ )

植物プランクトンが必要とする栄養塩としてはリン酸塩と無機態窒素 ( $DIN$ ) があり, その一方が欠けても増殖できない. 従って, 厳密には両方とも考慮すべきであるが, ここでは無機態窒素は豊富であると仮定し, リン酸塩のみを植物プランクトンの成長制限因子として単純化した. リン酸塩  $PO_4$  ( $mmolP/m^3$ ) の生物過程による時間変化量は以下の式を用いて計算する.

$$\left(\frac{dDIP}{dt}\right)^* = \sum_{i=1}^{Np} [P_h : C_p]_i (-B_i^i + B_3^i) + \sum_{j=1}^{Nz} B_{i0}^j + [P_h : C_{POM}] B_{12} + [P_h : C_{DOM}] B_{15} + q_{DIP} \quad (41)$$

ただし,

$q_{DIP}$ : リン負荷量

$[P_h : C_p]_i$ : 植物プランクトンの炭素量 ( $C_{pi}$ ) に対するリン ( $P_h$ ) の組成比

### 2.3.6 溶存酸素 ( $DO$ )

溶存酸素  $DO$  ( $mg/l$ ) に関しては生態内の酸素に関する循環も考えて, 以下の式を用いて生物過程による時間変化量を計算する.

$$\left(\frac{dDO}{dt}\right)^* = D_1 - D_2 - D_3 - D_4 - D_5 + D_7 \quad (42)$$

ただし,

$D_1$ : 光合成による供給

$D_2$ : 植物プランクトンによる消費

$D_3$ : 動物プランクトンによる消費

$D_4$ :  $POM$  の分解による消費

$D_5$ :  $DOM$  の分解による消費

$D_7$ : 再曝気

(a) 光合成による酸素供給 ( $D_1$ )

光合成による酸素供給量は次式で与えられる.

$$D_1 = [TOD : C_p] \cdot B_1 \quad (mgO_2/l \cdot day) \quad (43)$$

ここで,  $[TOD : C_p]$  は各コンパートメントの全酸素要求量 ( $TOD$ ) と炭素の組成比を表している.

(b) プランクトンの呼吸による酸素消費 ( $D_2, D_3$ )

プランクトンの呼吸による炭素消費を酸素換算すれば次式となる.

$$D_2 + D_3 = [TOD : C_p] \cdot B_3 + [TOD : C_z] \cdot B_{10} \quad (mgO_2/l \cdot day) \quad (44)$$

(c) 有機物の無機化に伴う酸素消費 ( $D_4, D_5$ )

懸濁態有機物の無機化 ( $B_{12}$ ) および溶存態有機物

の無機化 ( $B_{15}$ ) に伴う酸素消費は

$$D_4 + D_5 = [TOD : C_{POM}] \cdot B_{12} + [TOD : C_{DOM}] \cdot B_{15} \quad (mgO_2/l \cdot day) \quad (45)$$

(d) 再曝気 ( $D_7$ )

海面での再曝気については次式で与える.

$$D_7 = k_a \cdot (DO_s - DO) / h_s \quad (mgO_2/m^2 \cdot day) \quad (46)$$

ただし,

$DO_s$ : 飽和酸素量

$k_a$ : 再曝気係数

$h_s$ : 表層のレベル厚さ

### 2.3.7 化学的酸素要求量 ( $COD$ )

化学的酸素要求量  $COD$  ( $mg/l$ ) の生物過程による時間変化量は植物プランクトン, 動物プランクトン, 懸濁態有機物 ( $POM$ ) および溶存態有機物 ( $DOM$ ) の4つの有機物コンパートメントの挙動より, 各態有機物中の  $COD/C$  比を用いて以下の式で計算される.

$$\left(\frac{dCOD}{dt}\right)^* = \sum_{i=1}^{Np} [COD : C_p]_i \frac{dP_i}{dt} + \sum_{j=1}^{Nz} [COD : C_z]_j \frac{dZ_j}{dt} + [COD : C_{POM}] \frac{dPOC}{dt} + [COD : C_{DOM}] \frac{dDOC}{dt} + q_{COD} \quad (47)$$

ただし,

$q_{COD}$ : 系外からの負荷

## 3. 東京湾の地形と物理環境<sup>9)</sup>

東京湾は南北約 60km, 東西約 30km の細長い内湾であり, 平均水深は約 20m と浅い. 湾口が狭く, 外海との海水交換が制限された内湾であり, 沿岸域の埋立と大都市, 臨海工業地帯からの排水などで汚染が進み, 1970年代初めには最悪の状態となった. 東京湾の

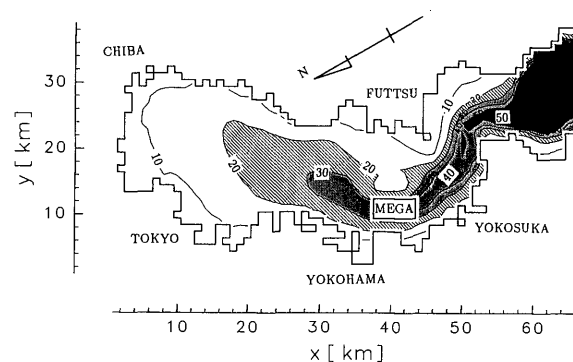


Fig. 2 Contour map of Tokyo Bay and location of Mega-Float

**Table 1** Parameters used in flow simulation

Horizontal mesh size	$\Delta x, \Delta y$	1km
Number of levels	$N_z(\Delta z)$	5(0, -2, -5, -15, -50m, bottom)
Time step	$\Delta t$	6 s
Coriolis parameter	$f$	$8.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
Gravity acceleration	$g$	$9.8 \text{ m/s}^2$
Bottom frictional coefficient	$\gamma_b$	0.0026
Reference density of water	$\rho_0$	$1025 \text{ kg/m}^3$
Density of air	$\rho_a$	$1.226 \text{ kg/m}^3$
Horizontal eddy viscosity	$A_M$	$50 \text{ m}^2/\text{s}$
Horizontal eddy diffusivity	$A_C$	$50 \text{ m}^2/\text{s}$
Vertical eddy viscosity	$K_{M0}$	$1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Vertical eddy diffusivity	$K_{C0}$	$1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Tidal level at open boundary	$\eta_0$	$0.373 \text{ m}(M_2)$
Solar radiation under clear sky	$Q_{s0}$	$756 \text{ cal/cm}^2 \text{ day}$
Temperature	$T_a$	$27^\circ\text{C}$
Relative humidity	$f_a$	80%

**Table 2** Loading rate of rivers

	Discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	DIP ( $\text{mmol}/\text{s}$ )	POC ( $\text{mgC}/\text{s}$ )	DOC ( $\text{mgC}/\text{s}$ )
Turumi River	20	100	$0.09 \times 10^6$	$0.2 \times 10^6$
Tama River	30	120	$0.1 \times 10^6$	$0.3 \times 10^6$
Sumida River	30	460	$0.1 \times 10^6$	$0.3 \times 10^6$
Ara River	50	320	$0.25 \times 10^6$	$0.6 \times 10^6$
Edo River	50	500	$0.25 \times 10^6$	$0.6 \times 10^6$

**Table 3** Values at open boundary

	level 1	level 2	level 3	level 4	level 5
temperature ( $^\circ\text{C}$ )	25.5	24.0	23.0	19.5	16.3
salinity ( $\text{‰}$ )	31.5	32.0	32.5	33.5	34.0
$P$ ( $\text{mgC}/\text{m}^3$ )	500	500	500	500	500
$Z$ ( $\text{mgC}/\text{m}^3$ )	50	50	50	50	50
DIP ( $\text{mmol}/\text{m}^3$ )	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
POC ( $\text{mgC}/\text{m}^3$ )	600	600	520	260	150
DOC ( $\text{mgC}/\text{m}^3$ )	1500	1500	1260	540	300
DO ( $\text{mg}/\text{l}$ )	8.0	8.0	8.0	6.0	6.0
COD ( $\text{mg}/\text{l}$ )	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

汚染の主体は有機汚濁であるが、その後、工場排水の規制と下水道の整備によって汚染源である有機物負荷が抑えられ、徐々にではあるが湾内の水質は回復しつつある。ただし、湾内の有機物は河川などからの流入による1次汚染よりも、湾内で増殖する植物プランクトンなどによる2次汚染の方が大きいことが指摘されており、負荷を抑えてもその効果がすぐには表れない構造になっている。Fig. 2に東京湾の水深および横浜沖に仮定されたメガフロート設置位置を示す。

気象条件としては、平均風速は年間を通して約5 m/sであるが、風向は夏は南ないし南西風、冬は北北西から北東風が卓越している。湾内の気温は、夏は表面水温(約25 $^\circ\text{C}$ )に近いが、冬は水温よりも4 $^\circ\text{C}$ ほど低い。

湾に供給される淡水としては河川水の流入があるが、ここでは、主要5河川を考慮し、Table 1のような年平均水量を用いた。また、降雨量および海面からの蒸発量については、それぞれ月平均で50~150mm程度



であり<sup>9)</sup>、その差引量は河川流入量に比べて僅かであるのでここでは無視した。

### 3.1 計算条件

夏季（8月）を想定し、横浜沖約2kmの海上にメガフロート ( $L \times B \times d = 6 \text{ km} \times 3 \text{ km} \times 2 \text{ m}$ ) を設置した場合としない場合の2ケースについて計算した。設置位置については、単に適当に決めただけで何の根拠もない。

差分メッシュは水平方向には  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 、鉛直方向には5層 (0, 2.5, 15, 50m, 海底) に分割した。かなり大きめのメガフロートを仮定した理由は水平方向の差分メッシュが  $1 \text{ km}$  であることを考えたためであり、幅方向に最低3メッシュ取れるように決めた。初期条件は流速 (0m/s)、塩分濃度および水温分布は **Table 3** の開境界での設定値を各レベルで与え、360

時間 (15日間) の数値シミュレーションを行った。潮汐は  $M_2$  のみを考慮し、周期を12時間とした。計算時間の都合上、日射の日変化は無視し、一定値で水面を加熱した。計算時間の決め方については、中田<sup>7)</sup>の結果が20日間となっているのを参考としたが、長時間の計算をすれば定常値が得られるという保証はないようであるので、計算に要する時間を考慮して決めた。実際の数値計算法は胡・経塚<sup>3)</sup>を元にしており、差分解法も同じである。主として Windows NT で動くパソコンによって計算した。

なお、渦動粘性係数 ( $K_M$ )、渦拡散係数 ( $K_C$ ) については、水平方向には一定値  $A_M = A_C = 50 \text{ m}^2/\text{s}$  とし、鉛直方向には多部田ら<sup>10)</sup>と同様に勾配型リチャードソン数を用いた成層化関数によって与えた。

本計算で用いられた主要な計算パラメーターを **Table**

**Table 4** Biological parameters used in ecosystem

compartment	item	symbol	value
Phytoplankton	max. growth rate	$\alpha_1, \beta_1$	0.851, 0.054
	respiration rate	$\alpha_2, \beta_2$	0.03, 0.0519
	mortality rate	$\alpha_3, \beta_3$	0.01, 0.0693
	max. light intensity	$I_{max}$	856 ly/day
	opt. light intensity	$I_{opt}$	200 ly/day
	half saturation const.	$K_p$	1.0 $\mu\text{g} \cdot \text{atP/l}$
	sinking rate	$w_p$	0.173 m/day
	extracellular release rate		13.5%
	ratio of carbon to phosphate	$[C_p : P]$	117
ratio of carbon to chlorophyll-a	$[C_p : chl-a]$	50	
Zooplankton	max. grazing rate	$\alpha_4, \beta_4$	0.18, 0.0693
	natural mortality rate	$\alpha_5, \beta_5$	0.054, 0.0693
	threshold food concentration	$\Pi^*$	50 $\text{mgC}/\text{m}^3$
	assimilation efficiency	$e$	0.7
	max. growth rate	$g$	0.3
	ratio of carbon to phosphate	$[C_z : P]$	124
POC	decomposition rate of POC	$\alpha_6, \beta_6$	0.1, 0.0693
	sinking rate	$w_{poc}$	0.432 m/day
	fraction transferred to DOC	$\xi$	0.25
ratio of carbon to phosphate	$[C_{poc} : P]$	172	
DOC	decomposition rate of DOC	$\alpha_7, \beta_7$	0.02, 0.0693
	ratio of carbon to phosphate	$[C_{doc} : P]$	337
DO	ratio of TOD to $C_p$	$[TOD : C_p]$	0.00347
	ratio of TOD to $C_z$	$[TOD : C_z]$	0.00348
	ratio of TOD to $C_{poc}$	$[TOD : C_{poc}]$	0.00329
	ratio of TOD to $C_{doc}$	$[TOD : C_{doc}]$	0.00329
	re-aeration constant	$k_a$	0.15
COD	ratio of COD to $C_p$	$[COD : C_p]$	0.00151
	ratio of COD to $C_z$	$[COD : C_z]$	0.00155
	ratio of COD to $C_{poc}$	$[COD : C_{poc}]$	0.00146
	ratio of COD to $C_{doc}$	$[COD : C_{doc}]$	0.00138

**Table 5** Initial values for ecosystem

	level 1	level 2	level 3	level 4	level 5
$P$ ( $mgC/m^3$ )	500	500	500	500	500
$Z$ ( $P(mgC/m^3)$ )	50	50	50	50	50
$DIP$ ( $mmol/m^3$ )	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$POC$ ( $mgC/m^3$ )	800	800	720	460	300
$DOC$ ( $mgC/m^3$ )	1800	1800	1560	840	600

1に、河川流量および有機物負荷量を Table 2 に、開境界における温度、塩分および生物量などの値については Table 3 に示す。生態系の計算で用いられたパラメータは Table 4 に見られるように、簡易化モデルでも40ほど必要である。これらの数字は、すべて中田による文献<sup>(6),(7),(8)</sup>から採られたものである。また、生態系のコンパートメントの初期値を Table 5 に示す。

4. 計算結果および考察

Fig. 3 (a) は、メガフロート無しの場合について、

30潮汐目の表層の残差流の計算結果を示している。この結果を Choi ら<sup>(11)</sup>の計算結果と比較すると残差流パターンおよび流速の絶対値も大体合っていることが判る。これを Fig. 3 (b) のメガフロート有りの結果と比較するとメガフロートのごく近傍で残差流が変化し、影響を受けていることが判るが、その程度は局部的かつ絶対値も小さいと言える。この結果から、密度流まで含めて、メガフロートが湾内の流れに及ぼす影響は

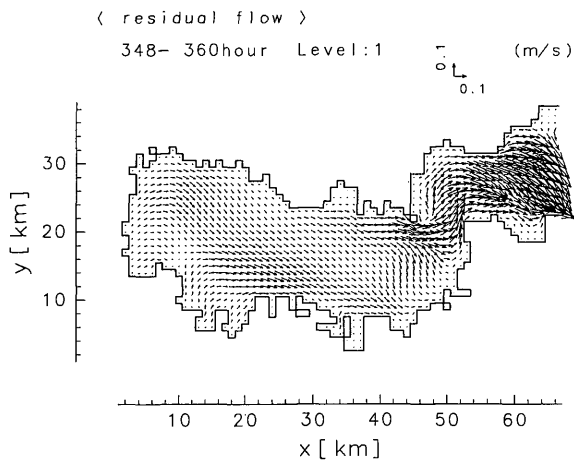


Fig. 3 (a) Residual current vectors in top level without Mega-Float

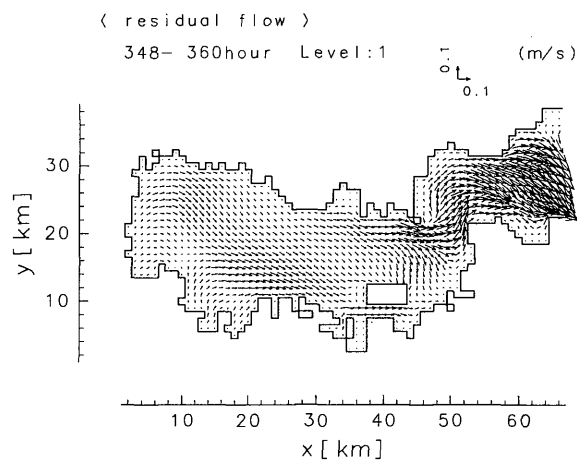


Fig. 3 (b) Residual current vectors in top level with Mega-Float

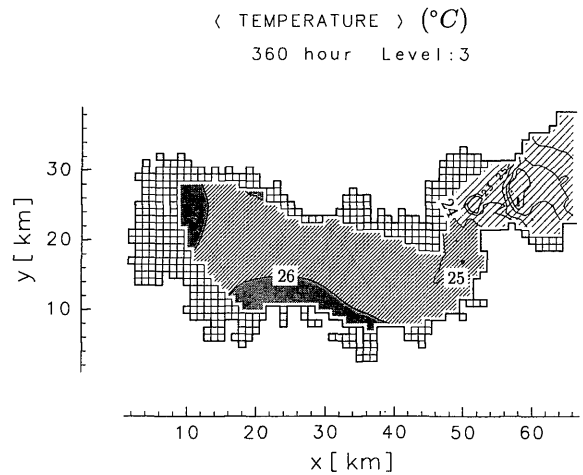


Fig. 4 (a) Horizontal distribution of temperature at third level without Mega-Float

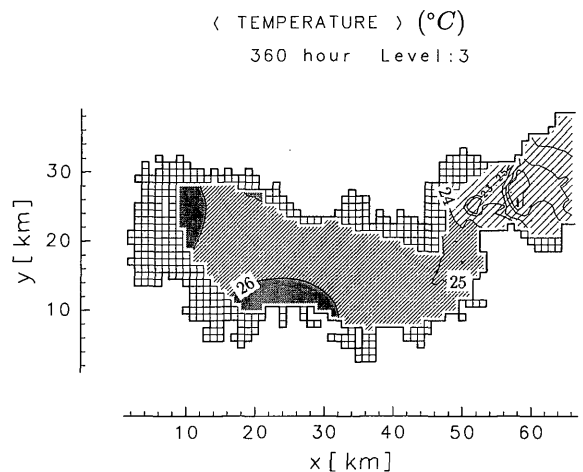


Fig. 4 (b) Horizontal distribution of temperature at third level with Mega-Float

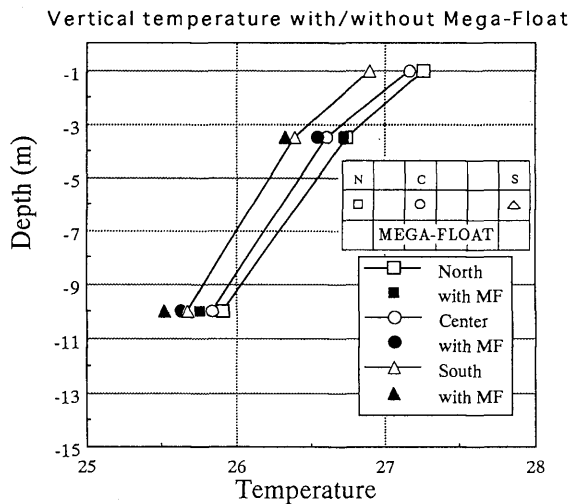


Fig. 5 Vertical distribution of temperature underneath Mega-Float at three points

小さいことが予想できる。

Fig. 4 (a) および 4 (b) は、同様に 3 層目 (Depth=10m) の水温の水平分布の比較を示した。メガフロート有りの場合、設置位置付近の 26℃の線が湾奥側に後退していることが判り、設置位置下部の水温が低下していることになっている。なお、1, 2 層目の結果には、メガフロートによる影響はほとんど見られなかった。3 層目の結果も湾全体についてはほとんど変化が無いので、メガフロートによる水温への影響も局所的であると言える。

Fig. 5 は、メガフロート設置位置 3 地点の水温の鉛直分布をメガフロートの有無について比較したものである。設置位置の水深が約 30m なので、メガフロート有りの場合には水深 3.5m と 10m の 2 点しかデータが無い。まず、3 地点による違いについては北側 (湾奥)、中央、南側 (湾口) の順で水温が高い。また、表層ほど水温が高い。メガフロートによる影響については、3 地点とも若干水温が低くなる、水深が大きいほど水温差が大きくなっていることが判る。なお、中央位置の 3 層目が最も水温差が大きくなっているが、その差は高々 0.2℃程度である。このような計算結果となった理由については、海水の流動作用により温度の拡散が強いこと、定常流による浮体下部の海水交換が効果的であるため、などが考えられる。これらの結果と夏場の水温分布の観測値<sup>13)</sup>を比較してみると表層の水温は一致しているが、観測値は成層が計算値よりもかなり強くなっている。これについては、特に鉛直方向の渦動粘性係数 ( $K_M$ ) および渦拡散係数 ( $K_C$ ) が関係していると思われるので、今後の課題としたい。

Fig. 6 (a) および 6 (b) は、表層の密度分布の比較を示した。メガフロートが無い場合の結果を Choi

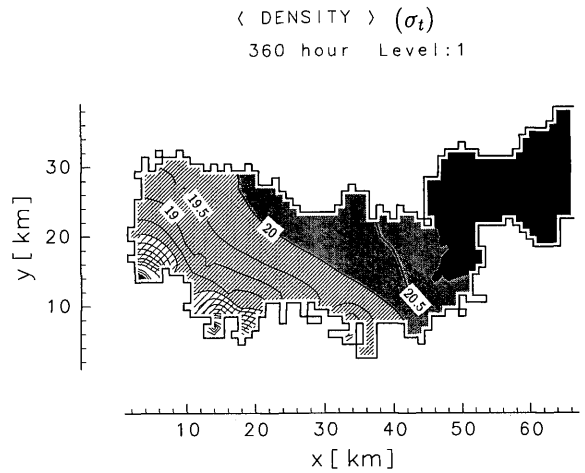


Fig. 6 (a) Horizontal distribution of density ( $\sigma_t$ ) without Mega-Float

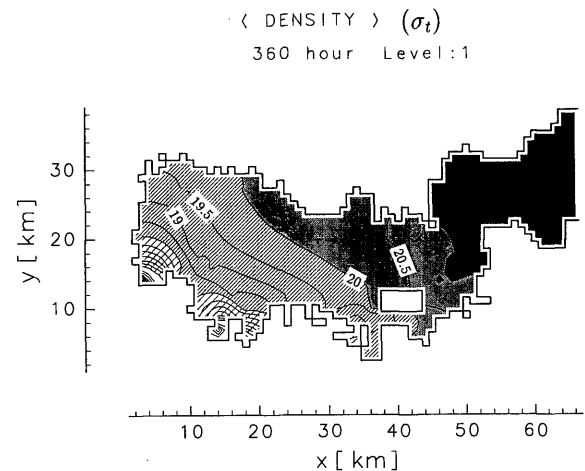


Fig. 6 (b) Horizontal distribution of density ( $\sigma_t$ ) with Mega-Float

ら<sup>14)</sup>の計算と比較すると、分布のパターンは非常に似ている。ただし、本計算の密度の方が大きな値 ( $\sigma_t$ で 1 程度) となっている。この原因としては、河川流量、水面での熱量の与え方などの違いが考えられるが、いずれにしても本質的な違いではないと考えられる。密度分布についても、メガフロートの影響は小さなものであり、かつ局所的となっている。

Fig. 7 (a) および 7 (b) は、表層の植物プランクトンの分布の比較である。メガフロート無しの結果を、中田の新しいモデル<sup>15)</sup>による結果 (Fig. 7 (c)) と比較すると本計算の方が、15%ほど小さな値になっているが、分布のパターンなどは良く一致していることが判る。中田の新しいモデルでは、植物プランクトンが細胞内栄養素保持量 (セルクオタ) によって記述するように変更されているほか、計算時間 (480時間) なども本計算とは異なっているので、この違いは本質的

ではないと考えられる。メガフロートの設置による影響はこの場合についても微小である。

Fig. 8 (a) および (b) は、同様に表層の COD の分

布の比較を示した。これらは、中田の新しいモデルによる COD の計算結果と定量的にも良く一致した結果となっている。また、宇野木・岸野<sup>12)</sup>による観測結果を Fig. 8 (c) に転載したが、これとの比較についても

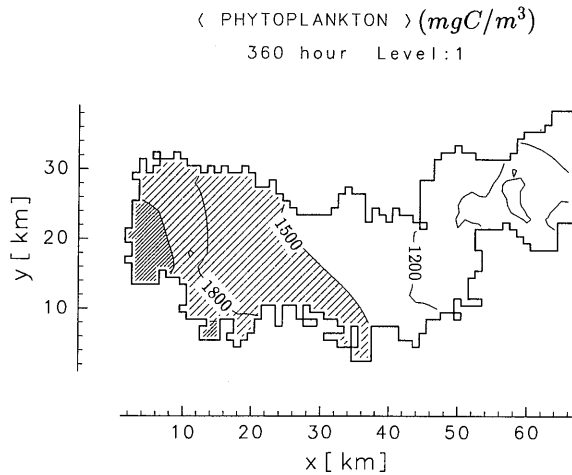


Fig. 7 (a) Horizontal distribution of phytoplankton at top level without Mega-Float

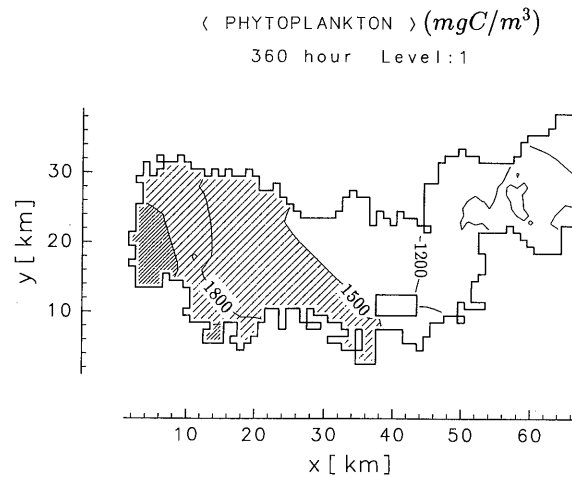


Fig. 7 (b) Horizontal distribution of phytoplankton at top level with Mega-Float

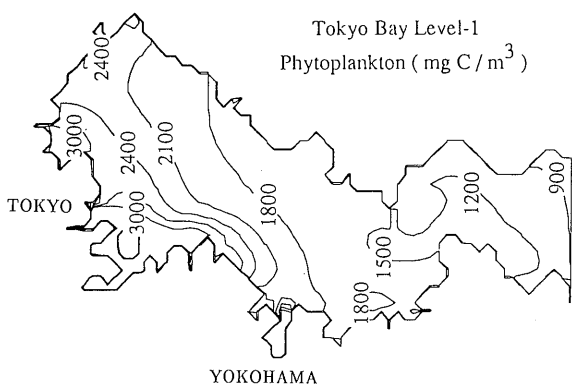


Fig. 7 (c) Horizontal distribution of phytoplankton at top level by Nakata<sup>7)</sup>

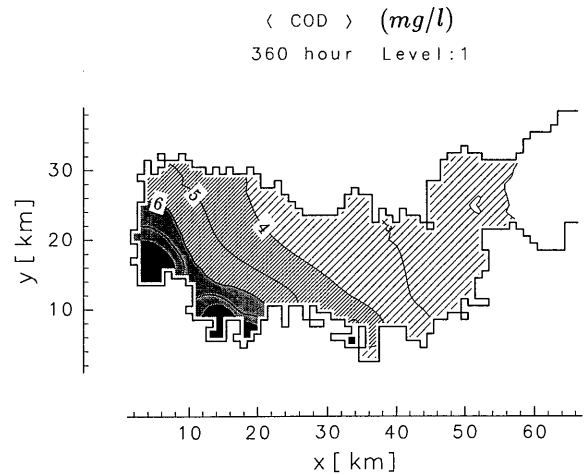


Fig. 8 (a) Horizontal distribution of COD at top level without Mega-Float

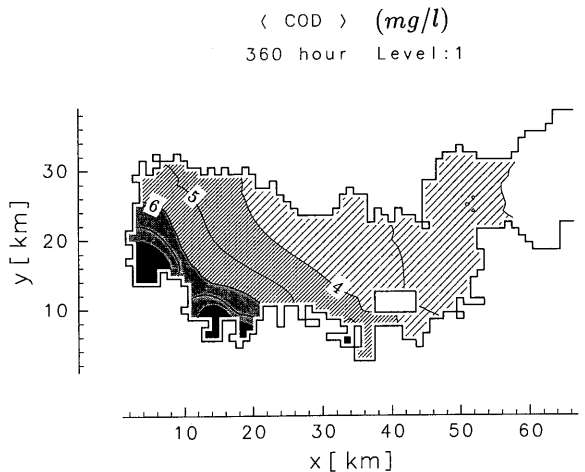


Fig. 8 (b) Horizontal distribution of COD at top level with Mega-Float

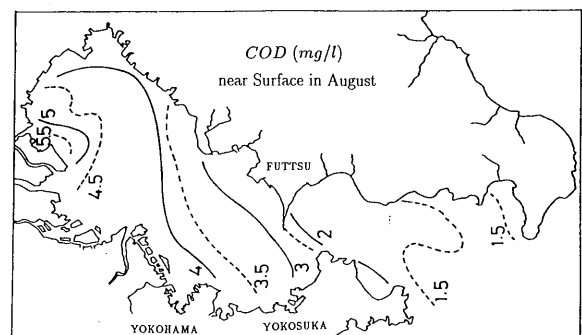


Fig. 8 (c) Horizontal distribution of COD by ocean measurement<sup>12)</sup>

細かな点を除けば、定量的にも良く一致していると思われる。CODの値は、我国ではこれまで水質の指標として重要視されてきた。ここでの結果は簡易な生態系モデルを使ってはいるが、湾内での内部生産を表現した結果となっており、予想以上に良い結果となっているように思われる。また、CODについても、メガフロートによる影響は軽微であると結論できる。

## 5. おわりに

本研究では、内湾に超大型浮体式構造物を設置した場合に、それが湾内の海洋環境に及ぼす影響について検討を行った。潮流、水温、塩分、密度、密度流を含む残差流などの物理過程に続き、浮遊物質およびプランクトンを対象とする生態系モデルを組み込み、湾内の水質(COD)を計算できるプログラムを開発した。それを東京湾に適用し、既存の計算結果および海洋観測結果と比較検討するとともに、横浜沖のメガフロートに対する影響について考察した。得られた結論をまとめると以下ようになる。

1. 夏季を対象とした東京湾の流動については、残差流のレベルまで観測値と比較的一致した計算結果が得られた。ただし、水温の鉛直分布については夏場の成層状態を十分に表現出来ていないので、今後の検討を要する。

2. 夏季の東京湾の水質の指標となっているCODの水平分布は既存の観測結果と比較的合っているので、今回の簡易モデルは有機物の内部生産の影響をかなり良く表現しているものと思われる。

3. メガフロートが周辺海域の環境に与える影響は、今回計算したサイズ( $L \times B \times d = 6 \text{ km} \times 3 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ )でも流れ、水温、水質および生態系への影響は小さく、かつ局所的なものとなった。ただし、今後、設置位置による違いなどについても、さらに検討する

必要があろう。

おわりに、本研究を遂行するに当たり(株)三井造船昭島研究所、小林正典氏、中川寛之氏、大森英行氏から貴重な情報と討論を賜りました。ここに記して御礼申し上げます。

## Reference

- 1) Kyojuka, Y. : Ocean environmental change by a huge offshore structure in a bay, International Conf. on Tech. Marine Environ. Preservation, Vol.1 (1995), pp. 489-496.
- 2) 井上義行, 多部田茂, 荒井誠, 中沢和弘: 浮体式空港の設計と環境影響に関する検討, 日本造船学会論文集, 第176号, (1994), pp.75-81.
- 3) 胡 長洪, 経塚雄策: 多層モデルによる超大型浮体まわりの流況計算, 西部造船会会報, 第91号, (1996), pp. 51-59.
- 4) Kyojuka, Y. and Hu C.: Numerical simulation of tidal flow and density field around a Mega-Float in a bay, Techno-Ocean '96, Proceeding 2, (1996), pp. 633-638.
- 5) 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), pp.393-402.
- 6) 松梨順三郎編: 環境流体汚染 (1993), 森北出版
- 7) 横山長之編: 海洋環境シミュレーション (1993), 白亜書房
- 8) 中田喜三郎: 生態系モデル (定式化と未知のパラメータの推定法), J. Adv. Mar. Tech. Conf., Vol.8, (1993), pp. 99-138.
- 9) 日本沿岸海洋誌: 東海大学出版会, (1985)
- 10) 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), pp. 75-81.
- 11) Choi, S.Y., Nakatsuji, K., Yuasa, T. and Yoon, J.S.: Three dimensional modeling of wind-driven residual circulation in Tokyo Bay, Japan, Proc. ICHD-1996, Hydrodynamics, Vol.2, (1996), pp. 691-696.
- 12) 宇野木早苗, 岸野元彰: 東京湾の平均的海況と海水交流 (1977), 理化学研究所, 海洋物理研究室.