九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

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^{0.2).3)}. また,著者ら⁰および藤野ら⁵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⁶¹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(現在側九州 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

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

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

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

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \tag{4}$$

ただしfはコリオリパラメーター,tは時間, ρ は海 水の密度, ρ_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 2 で積分すれば, 圧力は次式で与えられる.

$$p = p_a + pg(\eta - z) \tag{5}$$

ただし、 η 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*=*η*) 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.

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

上式は、メガフロートのない海域で成立するが、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³¹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* (℃) と塩分 *S*(‰) から次式で与えた.

$$\rho = 1028.14 - 0.0135T - 0.00469T^{2} + (0.802 - 0.002T) (S - 35.0) = 1000.0 + \sigma_{t} (kg/m^{3})$$
(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.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \qquad (8)$$
$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = A_c \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \frac{RS}{V_R} + Q_S \qquad (9)$$

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.

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

ただし,海底では

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

また、海面では風の応力を考慮して

$$au_x = C_d
ho_a u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}, \ \ au_y = C_d
ho_a v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2} \ \ (12)$$

ただし、 γ_b^2 :海底摩擦係数、 C_a :水面における摩擦係数、 (u_b, v_b) :海底流速、 (u_w, v_w) :風速、 p_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" 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_e) とすれば (13)

(18)

$$Q_T = Q_s - (Q_b + Q_c + Q_e)$$

で与えられる.ここで、 Q_s 、 Q_b 、 Q_c 、 Q_e は

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

$$Q_b = 1.32 \times 10^{-12} \theta_w^4 \{0.49 - 0.066\sqrt{e(T_a)}\} \times (1 - 0.65n^2) + 5.27 \times 10^{-12} \theta_w^3 (T_w - T_a)$$
(15)

$$Q_{c} = K_{t} \{T_{w} - T_{a}\} = \rho_{a} C_{pa} \frac{u_{*}^{2}}{W_{h}(z)} \{T_{w} - T_{a}\} \qquad (16)$$

$$Q_{e} = Q_{c}/B = Q_{c}/\left\{0.66\frac{T_{w} - T_{a}}{e(T_{w}) - e(T_{a})}\right\}$$
(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
<i>u</i> *	:接水大気の摩擦速度
В	: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 Ta 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
В	:ボーエン比

一方,海面での塩分のフラックス Qs は次式で与えら れる.

 $Q_s = S \left(E_v - P_r \right)$

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⁶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 (PO₄)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

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -u\frac{\partial P}{\partial x} - v\frac{\partial P}{\partial y} - w\frac{\partial P}{\partial z} + A_c \nabla_h P + \frac{\partial}{\partial z}(K_c\frac{\partial P}{\partial z}) + \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)^*$$
(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^{61.71.8}の内, 文献⁶⁰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.

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

ただし, B₁: 光合成による増殖(1次生産) B₂:細胞外分泌 B_3 :呼吸 B₄:動物プランクトンによる被食 B_6 :枯死 B_7 :沈降

— 218 —

以下,各項別に述べる.
 (a) 光合成による増殖(B₁)
 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.

$$B_1 = v_1(T) \cdot \mu_1(DIP) \cdot \mu_2(I) \cdot P \tag{21}$$

ここで、植物プランクトンの最大成長速度 $(v_1(T))$ は

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

ただし,

*α*₁:0℃における最大成長率(1/day)

 $β_1$: 温度係数 (C^{-1} , $β_1 = l_n Q_{10}/10$)

Q₁₀:温度上昇が10℃あるときの成長率 で与えられている.

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_{out}) があり

$$\mu_2(I) = \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right)$$
(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・ビア (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.

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

ただし,

Imax: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 μ₁(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

$$\mu_1(DIP) = \left\{ \frac{DIP}{K_{DIP} + DIP} \right\}$$
(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 (B₂)

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.

$$B_{2} = \mu_{3}(P) \cdot B_{1}$$

$$\mu_{3}(P) = 0.135 \exp\{-0.00201 \cdot [Chl - a : C_{p}] \cdot P\} \Big] (26)$$

ただし,

[*Chl*-*a*: *C_P*]:細胞内の *C_P* に対する *Chl*-*a*の 比

(c) 呼吸 (B₃)

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.

$$B_{3} = v_{3}(T) \cdot P$$

$$v_{3}(T) = \alpha_{2} \exp(\beta_{2}T)$$

$$(27)$$

ここで

α2:0℃における呼吸速度(1/day)
 β2:温度係数(℃⁻¹:lnQ10/10)
 (d) 枯死(B6)
 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。

$$B_6 = v_6(T) \cdot P$$

$$v_6(T) = \alpha_3 \exp(\beta_3 T)$$
(28)

ここで

*α*₃:0℃における枯死速度(1/day)

β₃:温度係数(℃⁻¹:lnQ₁₀/10)

(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.

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

2.3.2 動物プランクトン(*Z_i*)

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_i*(*mgC/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.

$$\left(\frac{dZ_{j}}{dt}\right)^{*} = B_{4} + B_{8} - B_{9} - B_{10} - B_{11} - B_{22} \pm B_{23}$$
(30)

ただし,

- B4 : 植物プランクトンの摂食
 B8 : デトリタスの摂食
 B9 : 排糞
 B10 : 排尿
- *B*₁₁ : 自然死亡
- B22 :沈降(ベントスによる被食)
- B₂₃ :日周鉛直移
- (a) 摂食 (B₄)

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

$$B_4 = v_4(T) \cdot Z$$

$$v_4(T,P) = \alpha_4 \exp(\beta_4 T) [1 - \exp\{\lambda(\Pi^* - \Pi)\}]$$
(31)

ただし,

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

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

(c) 自然死亡(B₁₁)
 植物プランクトンと同様にして次式で与える.

$$B_{11} = v_7(T) \cdot Z$$

$$v_7(T) = \alpha_5 \exp(\beta_5 T)$$
(34)

(d) 日周垂直移動 (B₂₃)

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.

$$w_{z}(t) = -w_{down} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{DL}t\right)$$
$$w_{z}(t) = w_{up} \cdot \sin\left\{\frac{\pi}{1-DL}(t-DL)\right\}$$

従って、次式のような表現をしている.

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

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/m³) 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.

$$\left(\frac{dPOC}{dt}\right)^* = \sum_{i=1}^{N_{\rm P}} B_6^i + \sum_{j=1}^{N_2} (B_{11}^j + B_9^j - B_8^j) - B_{12} - B_{13} - B_{16} + q_{POC}$$
(36)

ただし,

B₁₂ :細菌による POC の無機化分解

B₁₃ : 分解余剰物による DOC の生成

 B_{16} :POC の沈降

qpoc :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.

$$B_{12} = v_8(T, DO) \cdot POC$$

$$v_8(T, DO) = \alpha_6 \exp(\beta_6 T) \cdot \frac{DO}{DO_1 + DO}$$
(37)

ただし、DO₁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(B₁₃)
 ここでは、単純化して次式で与える.

$$B_{13} = \hat{\xi} \cdot B_{12} \tag{38}$$

ただし、ξ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.

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

ただし,

*B*₁₅ :細菌による *DOC* の分解

qpoc: 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.

$$B_{15} = v_9(T, DO) \cdot DOC$$

$$v_9(T, DO) = \alpha_7 \exp(\beta_7 T) \cdot \frac{DO}{DO_2 + DO}$$
(40)

2.3.5 リン酸塩 (DIP or PO₄)

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 子として簡単化した.リン酸塩 PO₄(mmolP/m³)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.

$$\left(\frac{dDIP}{dt}\right)^* = \sum_{i=1}^{N_P} [P_h : C_p]_i (-B_1^i + B_3^i) + \sum_{j=1}^{N_Z} B_{10}^j + [P_h : C_{POM}] B_{12} + [P_h : C_{DOM}] B_{15} + q_{DIP}$$
(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.

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

ただし,

D₁: 光合成による供給
 D₂: 植物プランクトンによる消費
 D₃: 動物プランクトンによる消費
 D₄: POM の分解による消費
 D₅: DOM の分解による消費
 D₇: 再曝気
 (a) 光合成による酸素供給量は次式で与えられる。

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

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

(c) 有機物の無機化に伴う酸素消費(D₄, D₅)
 懸濁態有機物の無機化(B₁₂)および溶存態有機物

の無機化(B15)に伴う酸素消費は

- $D_4 + D_5 = [TOD: C_{POM}] \cdot B_{12} + [TOD, C_{DOM}] \cdot B_{15}$ $(mgO_2/l \cdot day) \qquad (45)$
- (d) 再曝気 (D₇)海面での再曝気については次式で与える.

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

ただし,

- DOs: 飽和酸素量
- ka : 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.

$$\left(\frac{dCOD}{dt}\right)^{*} = \sum_{i=1}^{N_{P}} [COD: C_{P}]_{i} \frac{dP_{i}}{dt} + \sum_{j=1}^{N_{Z}} [COD: C_{Z}]_{j} \frac{dZ_{j}}{dt} + [COD: C_{POM}] \frac{dPOC}{dt} + [COD: C_{DOM}] \frac{dDOC}{dt} + [COD: C_{DOM}] \frac{dDOC}{dt} + q_{COD} \quad (47)$$

ただし,

qcop:系外からの負荷

3. 東京湾の地形と物理環境[®]

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

Horizontal mesh size	$\Delta x, \Delta y$	1 <i>km</i>
Number of levels	$N_z(\Delta_z)$	5(0,-2,-5,-15,-50m,bottom)
Time step	Δt	6 s
Coriolis parameter	f	$8.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
Gravity acceleration	g	$9.8m/s^2$
Bottom frictional coefficient	Υ _b	0.0026
Reference density of water	ρ_0	$1025 \ kg/m^3$
Density of air	ρa	1.226 kg/m^3
Horizontal eddy viscosity	A _M	$50m^2/s$
Horizontal eddy diffusivity	Ac	$50m^2/s$
Vertical eddy viscosity	К _{мо}	$1 \times 10^{-4} m^2/s$
Vertical eddy diffusivity	K _{C0}	$1 \times 10^{-4} m^2/s$
Tidal level at open boundary	η_0	$0.373m(M_2)$
Solar radiation under clear sky	Qso	$756 cal/cm^2 day$
Temperature	Ta	27°C
Relative humidity	fa	80%

Table 1Parameters used in flow simulation

 Table 2
 Loading rate of rivers

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

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

Table 3 Values at open boundary

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℃)に近いが、冬は水温よりも4℃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,**Table1**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⁹, 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1km×1km,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1km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 M₂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ⁿ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³⁰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 $A_M = A_c = 50m^2/s$ と し、鉛直方向には多部田ら¹⁰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ターを Table

compartment	item	symbol	value
	max. growth rate	α_1, β_1	0.851, 0.054
Compartment Phytoplankton Zooplankton POC DOC	respiration rate	respiration rate $\alpha_2, \ \beta_2$	
	mortality rate	α_3 , β_3	0.01, 0.0693
	max. light intensity	Imax	856 <i>ly/day</i>
Dhutanlanktan	opt. light intensity	Iopt	200 <i>ly/day</i>
Phytoplankton	half saturation const.	K _p	1.0 μg·atP/l
	sinking rate	w_p	0.173 m/day
	extracellular release rate		13.5%
	ratio of carbon to phosphate	bon to phosphate $[C_p:P]$	
	ratio of carbon to chlorophyl-a	$[C_p: chl-a]$	50
	max. grazing rate	α_4, β_4	0.18, 0.0693
Phytoplankton Zooplankton POC DOC	natural mortality rate	α_5 , β_5	0.054, 0.0693
	threshold food concentration	П*	50 mgC/m ³
	assimilation efficiency	e	0.7
	max. growth rate	g	0.3
	ratio of carbon to phosphate	$[C_z : P]$	124
	ratio of carbon to chlorophyl-a $[C_{\mu}]$ max. grazing rate α_{1} natural mortality rate α_{2} threshold food concentration α_{2} assimilation efficiency α_{2} max. growth rate $[C_{\mu}]$ carbon to phosphate $[C_{\mu}]$ decomposition rate of POC α_{4} sinking rate α_{4} fraction transfered to DOC α_{4} decomposition rate of DOC α_{4} decomposition rate of DOC α_{4}	α_6, β_6	0.1, 0.0693
POC	sinking rate	w_{poc}	0.432 m/day
FUC	max. growth rate α_1, β_1 $0.851,$ respiration rate α_2, β_2 $0.03, 0$ mortality rate α_3, β_3 $0.01, 0$ max. light intensity I_{max} $856 I_d$ opt. light intensity I_{opt} $200 I_d$ half saturation const. K_p $1.0 \mu g$ sinking rate w_p $0.173 a$ extracellular release rate $13.$ ratio of carbon to phosphate $[C_p: chl-a]$ sistil a mortality rate α_4, β_4 $0.18, 0$ natural mortality rate α_5, β_5 $0.054,$ threshold food concentration Π^* $50 mg$ assimilation efficiency e $0.$ max. growth rate g $0.$ ratio of carbon to phosphate $[C_x:P]$ 12 decomposition rate of POC α_6, β_6 $0.1, 0$ sinking rate w_{poc} 0.432μ fraction transfered to DOC ξ 0.2 ratio of carbon to phosphate $[C_{poc}:P]$ 17 decomposition rate of DOC α_7, β_7 $0.02, 0$ ratio of TOD to C_p $[TOD: C_p]$ 0.00 ratio of TOD to C_p $[TOD: C_{pc}]$ 0.00 ratio of TOD to C_{poc} $[TOD: C_{pc}]$ 0.00 ratio of COD to C_p $[COD: C_p]$ 0.00 ratio of COD to C_p $[COD: C_p]$ 0.00 ratio of COD to C_p $[COD: C_p]$ 0.00 ratio of COD to C_p $[COD: C_{pc}]$ 0.00 ratio of COD to C_p $[COD: C_{pc}]$ 0.00 <td>0.25</td>	0.25	
	ratio of carbon to phosphate	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	172
DOC	decomposition rate of DOC	α_7, β_7	0.02, 0.0693
DOC	ratio of carbon to phosphate	$[C_{doc}:P]$	337
	ratio of TOD to C_p	$[TOD: C_p]$	0.00347
	ratio of TOD to C_z	$[TOD: C_z]$	0.00348
DO	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
	ratio of COD to C_p	$[COD: C_{p}]$	0.00151
COD	threshold food concentration Π^* Σ assimilation efficiency e e max. growth rate g ratio of carbon to phosphate $[C_z: P]$ decomposition rate of POC α_6 , β_6 0 sinking rate w_{poc} 0 fraction transfered to DOC ξ f ratio of carbon to phosphate $[C_{poc}: P]$ 0 decomposition rate of DOC ξ σ_7 , β_7 0 ratio of carbon to phosphate $[C_{doc}: P]$ 0 ratio of TOD to C_p $[TOD: C_p]$ $Tatio of TOD to C_p$ $TOD: C_p$ ratio of TOD to C_p $[TOD: C_p]$ $Tatio of TOD to C_{doc}$ $[TOD: C_{boc}]$ ratio of TOD to C_{boc} $[TOD: C_{boc}]$ $Tatio of COD to C_p$ $[COD: C_p]$ ratio of COD to C_p $[COD: C_p]$ $Tatio of COD to C_p$ $[COD: C_p]$ ratio of COD to C_{boc} $[COD: C_p]$ $Tatio of COD to C_{boc}$ $[COD: C_{boc}]$ ratio of COD to C_{boc} $[COD: C_{boc}]$ $Tatio of COD to C_{boc}$ $[COD: C_{boc}]$ ratio of COD to C_{boc} $[COD: C_{boc}]$ $Tatio of COD to C_{boc}$ $[COD: C_{boc}]$ ratio of COD to C_{boc} $[COD: C_{boc}]$ $[COD: C_{boc}]$ ratio of COD to C_{boc} $[COD: C_{boc}]$ $[COD: C_{boc}]$	0.00155	
	ratio of COD to C_{poc}	$\begin{bmatrix} COD : C_{\rho} \\ [COD : C_{z}] \\ [COD : C_{poc}] \\ [COD : C_{poc}] \\ [COD \times C_{doc}] \\ 0.00138 \end{bmatrix}$	0.00146
	ratio of COD to C_{doc}	$[COD \succ C_{doc}]$	0.00138

 Table 4
 Biological parameters used in 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

Table 5 Initial values for ecosystem

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^{6,0,8} 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、



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



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

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¹¹¹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





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





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

30



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¹²⁾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 (b) Horizontal distribution of density (σt) with Mega-Float

ら¹¹⁰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(*a*, 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"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少である.

Fig. 8 (a) および (b) は,同様に表層の COD の分



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

< phytoplankton > (mgC/m^3)

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、字野木・岸野¹²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





(COD)

(mg/l)



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 ⁷⁾



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



Fig. 8 (c) Horizontal distribution of *COD* by ocean measurement ¹²⁾

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 とめると以下のようになる.

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 ($L \times B \times d = 6 \text{ km} \times 3 \text{ km} \times 2$ 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(㈱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.

Refarence

- Kyozuka, 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) Kyozuka, Y. and Hu C.: Numerical simulation of tidal flow and density field arounda 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)
- 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.
- 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.