

# 大規模海洋構造物の環境影響評価モデルの開発

## DEVELOPMENT OF AN ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT MODEL FOR LARGE MARINE STRUCTURES

田中昌宏<sup>1</sup>・J. van KESTER<sup>2</sup>・池谷 毅<sup>3</sup>・滝本邦彦<sup>4</sup>

Masahiro TANAKA, J. van KESTER, Tsuyoshi IKEYA and Kunihiro TAKIMOTO

<sup>1</sup>正会員 工博 鹿島建設(株) 技術研究所 環境技術研究部 (〒182-0032 東京都調布市飛田給2-19-1)

<sup>2</sup>Delft Hydraulics Marine and Coastal Management (Rotterdamseweg 185, Delft, The Netherlands)

<sup>3</sup>正会員 工博 鹿島建設(株) 技術研究所 環境技術研究部 (〒182-0032 東京都調布市飛田給2-19-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 鹿島建設(株) 建設総事業本部 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

The numerical simulation system for flow and water quality in estuaries (DELFT3D) was improved to assess the environmental impact of 3-dimensional large marine structures. Two models were developed. One is called "floating model" which simulates a floating structure by applying the additional atmospheric pressure on the water surface. The other is called "block model" which adds an infinite friction on a numerical grid to simulate flow around 3D structures.

The environmental impact assessment with these models was conducted for an offshore airport in Tokyo Bay. The effects of floating and island types of airport on the water environment were compared. The environmental impact of a floating type was weaker than that of an island type. The basic impact of the airport is to change the residual current or the estuary circulation, and this affects the material circulation in a bay.

**Key Words :** *Marine structure, environmental impact assessment, numerical simulation, water quality, ecological model, density current, residual current*

### 1. はじめに

関空二期, 神戸空港, 中部空港など人工島形式の海上空港が次々に建設される予定であり, 様々な周辺環境対策及び環境創造が試みられようとしている。また最近では, 環境負荷の少ないと考えられる浮体式や杭式の大規模海洋構造物が提案されており, その環境影響評価の研究が始められている。

経塚<sup>1)</sup>及び藤野<sup>2)</sup>はメガフロートを対象に浮体周りの流動及び水質を解析できるモデルを開発し, それぞれ東京湾内の横浜沖 (6km×3km), 追浜沖 (5km×1km) にメガフロートを設置した場合のシミュレーションを実施している。その結果, その周辺環境に与える影響は小さく, しかも局所的であると報告している。しかし, 設置位置などの違いを今後検討する必要があるとしている。また, 上野<sup>3)</sup>は杭式海上施設がリーフ上に建設された場合を想定し, 杭の抵抗モデルの検討を行うと共に水質への影響について数値実験を行い, 水質環境に及ぼす影響が小さいと報告している。

著者らのグループは, 沿岸域の環境影響評価においてシミュレーションモデルに求められる役割が, 今後より重要になるという観点から, オランダ・デルフト水理研究所と共同で流動及び水質モデルの精

度向上を目指した研究を実施してきた。その一環として, 流動モデルについては, 東京湾において実測が行われた期間の気象, 海象条件を時系列で与えた計算 (ナウキャスト) を実施し, モデルの精度を確認した<sup>4)</sup>。水質についても植物プランクトンまでを含む生態系モデルを構築し, 東京湾の夏場の平均的な水質の再現を行った<sup>5)</sup>。

本研究では, この流動・水質モデルを基に, 浮体式や杭式などの三次元的な大規模海洋構造物にも対応できるように改良を加え, 東京湾を対象に試算を実施した。

### 2. シミュレーションモデル

#### (1) 基本モデル

シミュレーションの基本モデルは, オランダ・デルフト水理研究所が開発した沿岸域を対象としたDELFT3Dシステムの内, 流動モデルのFLOWと水質モデルのWAQを用い, 今回3次元構造物周辺の解析を行うための改良を実施した。

流動モデルは, 鉛直方向に静水圧近似を仮定した準三次元モデルであり, 鉛直座標系には $\sigma$ 座標を用いている<sup>4)</sup>。水質モデルは, 田中・稲垣<sup>5)</sup>が東京湾の現状再現を目的に構築した生態系モデルを使用する。

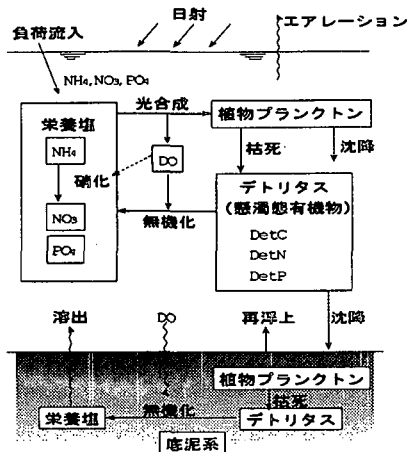


図-1 生態系モデルの概念図

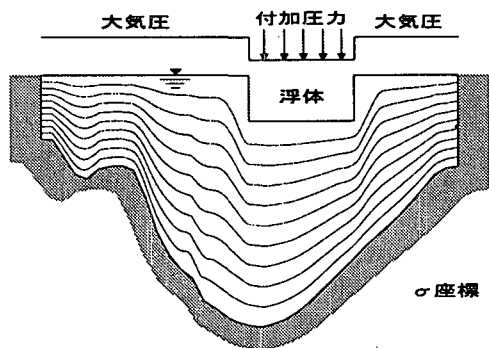


図-2 浮体モデルの概念図

このモデルは図-1に示す様に水中は植物プランクトンを中心に、栄養塩（アンモニア態窒素、硝酸態窒素、リン酸態リン）、デトリタス、溶存酸素の水質項目からなり、底泥系も一層でモデル化しており、富栄養化及びそれに伴う底層の貧酸素化のシミュレーションが可能である。

## (2) 三次元構造物モデル

DELFT3D-FLOWの標準モデルでは、遮蔽物を設定する場合、海底まで達する壁あるいはメッシュ全体を占める島を設定する方法である。本研究では、水深方向の任意の位置に遮蔽物を設定する方法として二つの手法を開発した。

一つは図-2に示す様に、構造物が存在する部分に付加的な圧力をかけ、強制的に水面をへこませて、構造物を表現する方法である（浮体モデル）。この方法では、浮体タイプの構造物のみが表現可能であり、本モデルでは $\sigma$ 座標を用いているので、水位変動に合わせて一定の喫水で計算が可能である。

二つ目は、構造物が存在するメッシュに無限大の抵抗を付加する方法で、抵抗は次式で与える（ブロックモデル）。

$$\tau_{\xi} = \rho \lambda u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \lambda = \infty \quad (1)$$

ここに、 $\tau_{\xi}$ ； $\xi$ 方向の抵抗、 $\xi, \eta$ ；水平方向座標、 $\rho$ ；水の密度、 $u$ ； $\xi$ 方向の流速成分、 $v$ ； $\eta$ 方向の流速成分、 $\lambda$ ；抵抗係数である。

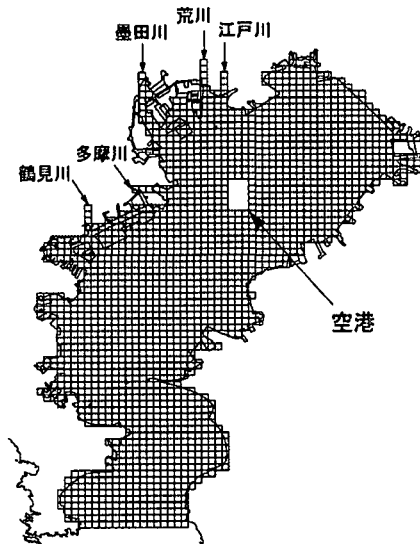


図-3 計算メッシュ及び海上空港の位置

表-1 計算条件

|      |                                                                               |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 計算期間 | 30日間 ( $\Delta t = 5$ 分)                                                      |
| 境界条件 | 開境界 水位：周期12時間、振幅0.37m<br>塩分：34.0（一定）<br>河川 総流量：512m <sup>3</sup> /s<br>塩分：0.0 |
| 初期条件 | 塩分：17.0（一様）                                                                   |
| 計算格子 | 水平800m、鉛直10層                                                                  |

本手法は、浮体に限らず任意の深さの三次元構造物の計算が可能である。一方、この手法は簡便であるが、構造物の鉛直方向の大きさをレイヤー単位で表現し、また本モデルが $\sigma$ 座標を使用しているため、水位変動に伴ってレイヤーの厚さが変化する事になる。

なお、水質モデルについては構造物による光の遮蔽を考慮している。

## 3. 計算条件

本モデルの有効性を確認するため、東京湾に計画されている首都圏第三空港を想定し、マリンフロート推進機構<sup>6)</sup>が提案している羽田沖の浮体空港案を参考にその影響評価を試みた。

### (1) 海上空港

本研究では、東京湾の現状再現<sup>4), 5)</sup>を行ったモデルをそのまま用いることとし、そのメッシュの範囲で海上空港を設定する事とした。図-3に計算メッシュと海上空港の位置を示す。メッシュは長さ800mの正方形メッシュであり、また東西南北方向に一致している。今回は試算であるので、海上空港はその規模をマリンフロート推進機構<sup>6)</sup>が提案している羽田沖の浮体空港案に概ね合わせ、図-3に示す様に、南北4km、東西2.4km、喫水2mとした。本来浮体の場合には、周囲に防波堤が必要であるが、800mのメッシュでは、それを表現できる分解能が無いた

め、防波堤は考慮していない。なお、比較のため、埋立て形式の空港についても計算を行った。

## (2) 流動計算条件

東京湾は春から秋にかけ強い密度成層が形成され、流動特性は密度分布に強く影響される。特に湾奥と太平洋との塩分差によって駆動される重力循環（エスチャリー循環）が基本流動であり、さらにそれに伴って湾奥表層に形成される時計回りの還流が東京湾の特徴である<sup>4),7)</sup>。

本研究では、海上空港の周辺環境に及ぼす基本特性を把握する目的から、上記の基本流動構造を表現できる範囲でできる限り条件を単純化する事とした。そこで、まず密度は塩分のみ関数とし、境界条件は、太平洋に面する開境界と主要河川からの淡水流入のみを考え、水面での風応力は考慮しない事とする。初期条件は計算領域全体で塩分を一定とし、塩分が定常に達するまで計算を行った。計算条件を表-1に示す。なお、この計算条件で東京湾の基本流動構造を表現できる事を確認している<sup>7)</sup>。

## (3) 水質計算条件

水質計算も夏場の平均的な水質を想定し、田中・稲垣<sup>5)</sup>が構築した生態系モデルを用い、同条件で計算を実施した。ただし、今回は十分に定常状態に達するように計算期間を120日間とした。

# 4. 結果及び考察

## (1) 流れ

図-4に下げ潮時の空港の南北断面上の流速ベクトルを示す。(a)が浮体モデル、(b)がブロックモデルの結果である。浮体モデルでは、浮体下部の流速が若干実際より加速済みであるが、両者とも三次元構造物の影響を表現している。以下の検討では、浮体モデルのよる結果のみを示す。

図-5は表層の残差流を示している。現状では時計回りの還流が明確に形成されているが、浮体では若干弱まり、埋立てではそのスケールが半分程度となり、さらに千葉沿岸の南下流が非常に小さくなっている。図-6は底層の残差流を示しており、埋立ての場合は湾奥の流れが弱まり、その影響が顕著である。後で考察するが、この残差流の変化は水質に大きく影響する。

残差流の変化を分かりやすく見るために、中立粒子をある点から連続的に投入し、流れの可視化を行った。今回の投入点は荒川河口の表層及び太平洋に面する開境界の中層である。図-7に粒子を投入してから6日目の表層の分布を示す。現状では、荒川から出た粒子は一旦西岸に沿って南下し、その後一部は湾奥の還流に乗って湾奥から千葉沿岸へと輸送されている。一方、埋立ての場合は、南下した粒子はそのまま流れ去り、湾奥には輸送されていない。浮体の場合は若干その影響は小さいが、湾奥に向かう粒子は少なくなっている。

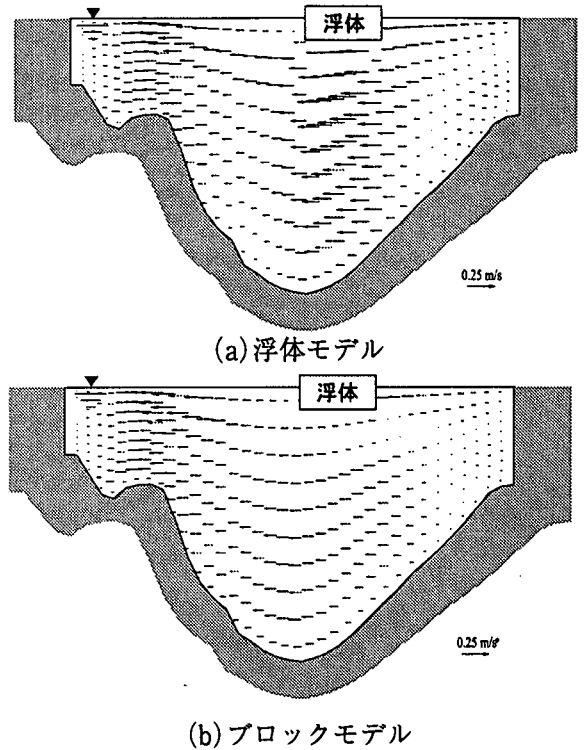


図-4 下げ潮時の流速ベクトル（南北断面）

## (2) 水質

図-8に表層の植物プランクトン濃度を示す。現状に比べ、空港より北側の湾奥で浮体、埋立て共に濃度が減少しているが、浮体の場合はその程度が小さい。この湾奥で植物プランクトンが減少した理由は、上記した残差流の変化から、空港がある場合には、河川からの栄養塩の湾奥への輸送量が減少したためと考えられる。

図-9は東京湾の水質環境で最も深刻な底層の溶存酸素濃度である。本モデルでは、還元状態の程度を表現するため、溶存酸素は負の値を取りうるようになっている。これを見ると、浮体式は現状とほとんどかわらず、むしろ溶存酸素が若干上昇している。一方、埋立ての場合は湾奥の溶存酸素が現状よりもかなり減少している。底層の溶存酸素は、主に底泥の有機物の分解に伴って減少すると考えられる。そこで、図-10に底泥に堆積した植物プランクトン量を示した。これより、湾奥の堆積量は現状の方が浮体、埋立てよりも多く、底層の貧酸素化と底泥の有機物量は逆比例している事になる。これは、先に示した底層の残差流の違いによって説明できると考えられる。つまり、埋立ての場合には、底層の残差流が急激に減少するため、底泥中の有機物は相対的に少なくとも、底層の流体塊が動かないために、溶存酸素の減少が顕著となる、と考えられる。

次に空港がある場合、底層の残差流が小さくなる理由について考察する。東京湾の流れは水平方向の密度差によるバロクリニックな流動が支配的である。そこで、その駆動力となる塩分濃度の分布を見てみる。図-11は空港位置の南北断面内の塩分濃度を示

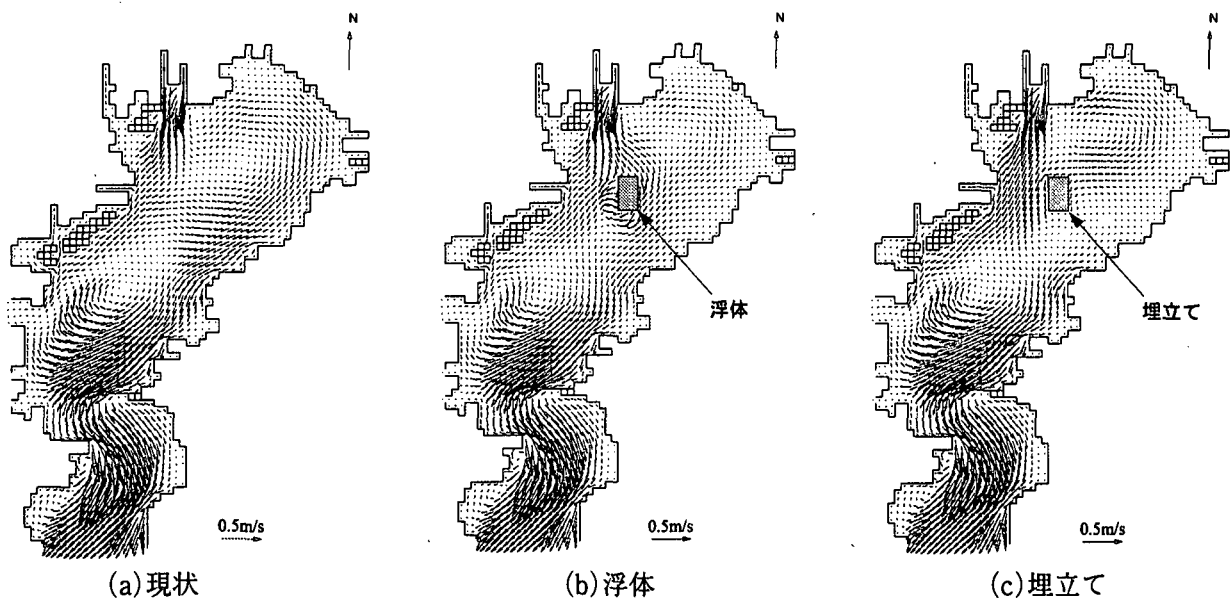


図-5 表層の残差流ベクトル

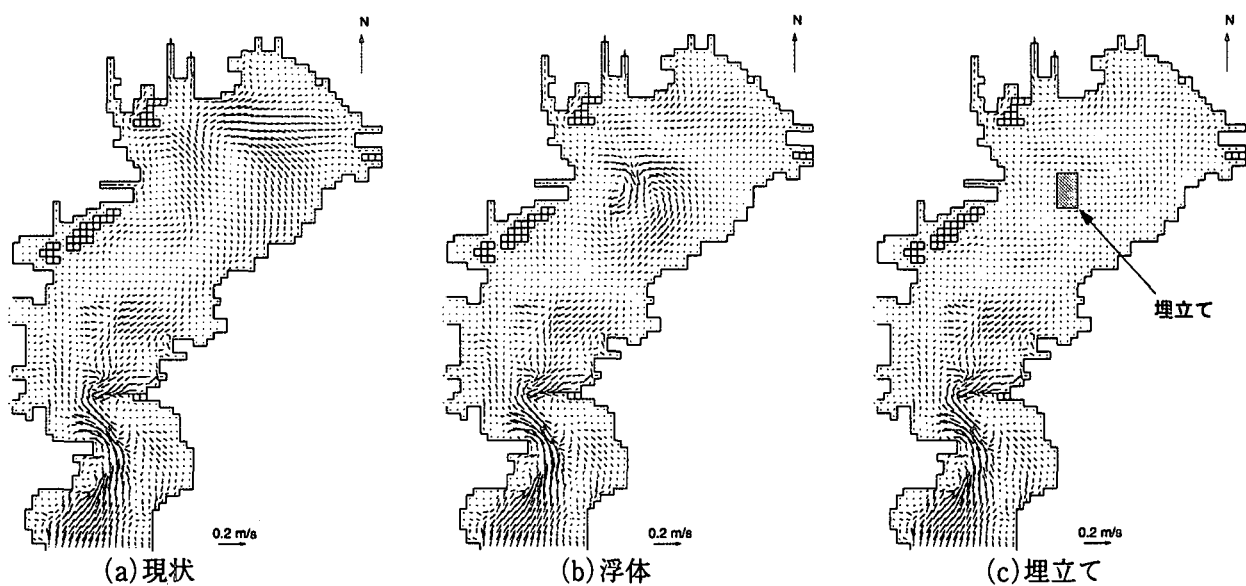


図-6 底層の残差流ベクトル

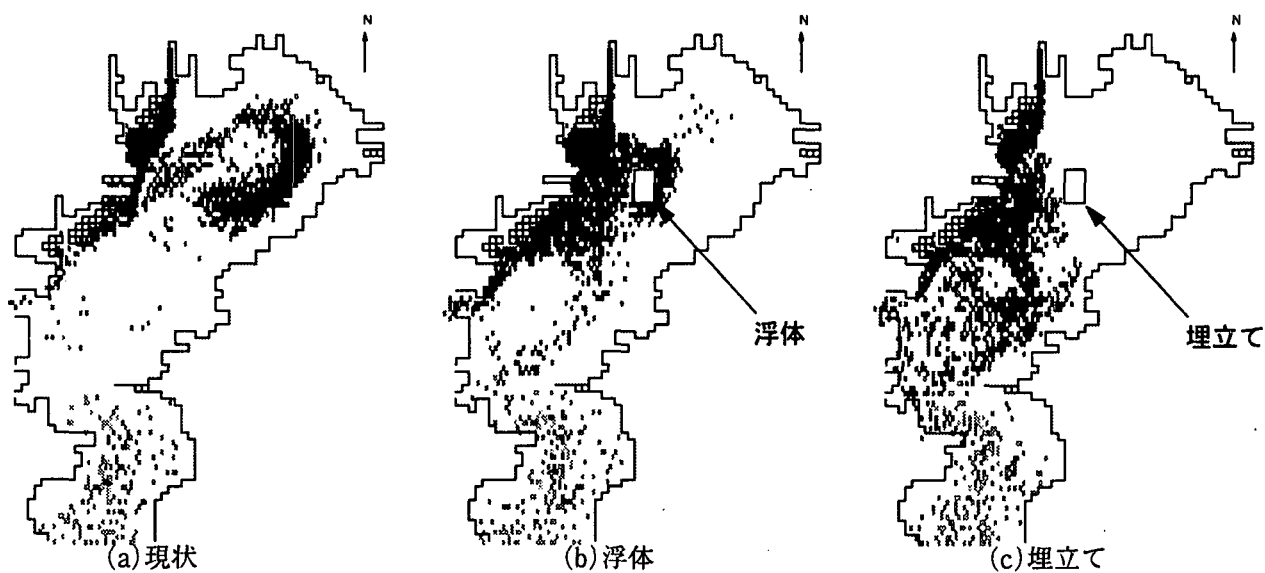


図-7 表層のトレーサー粒子の挙動 (粒子投入後6日目)

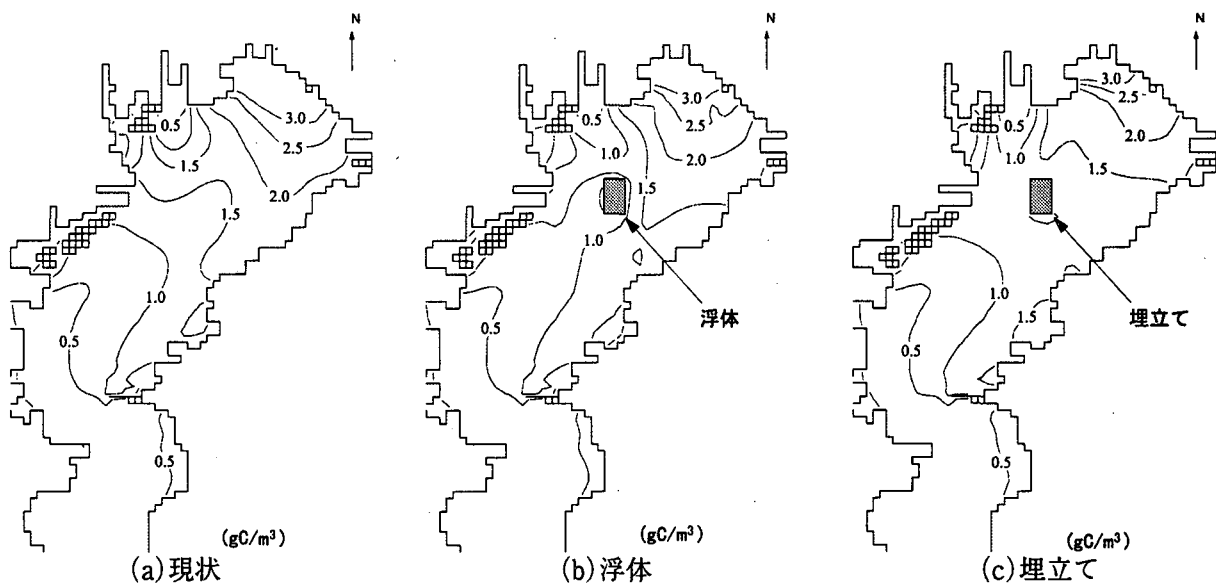


図-8 表層の植物プランクトン濃度

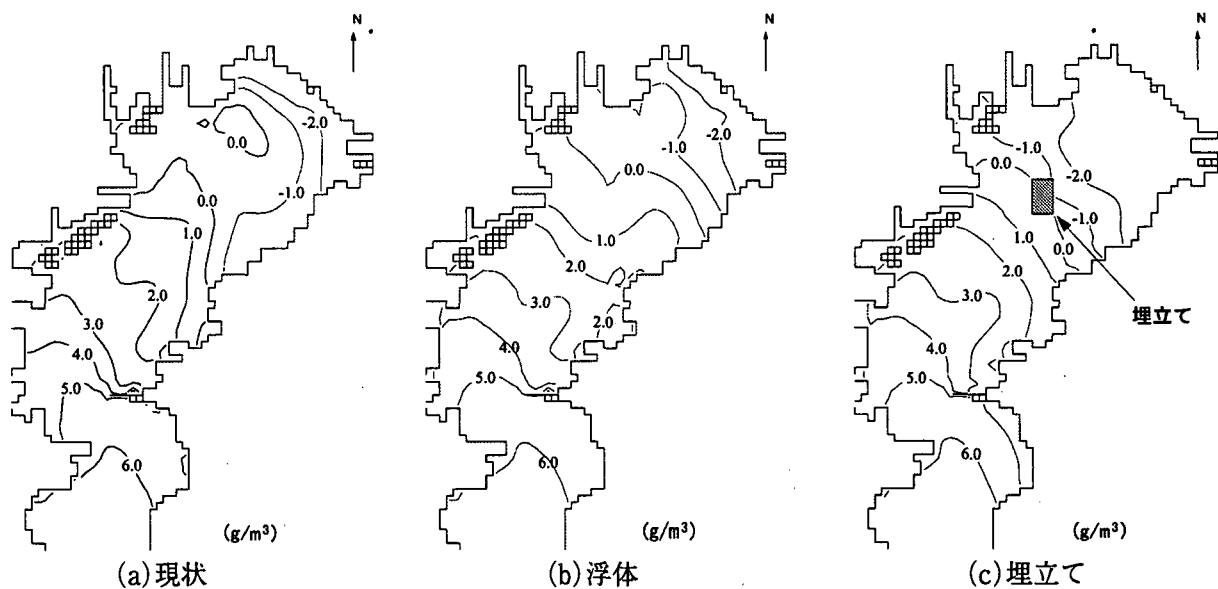


図-9 底層の溶存酸素濃度

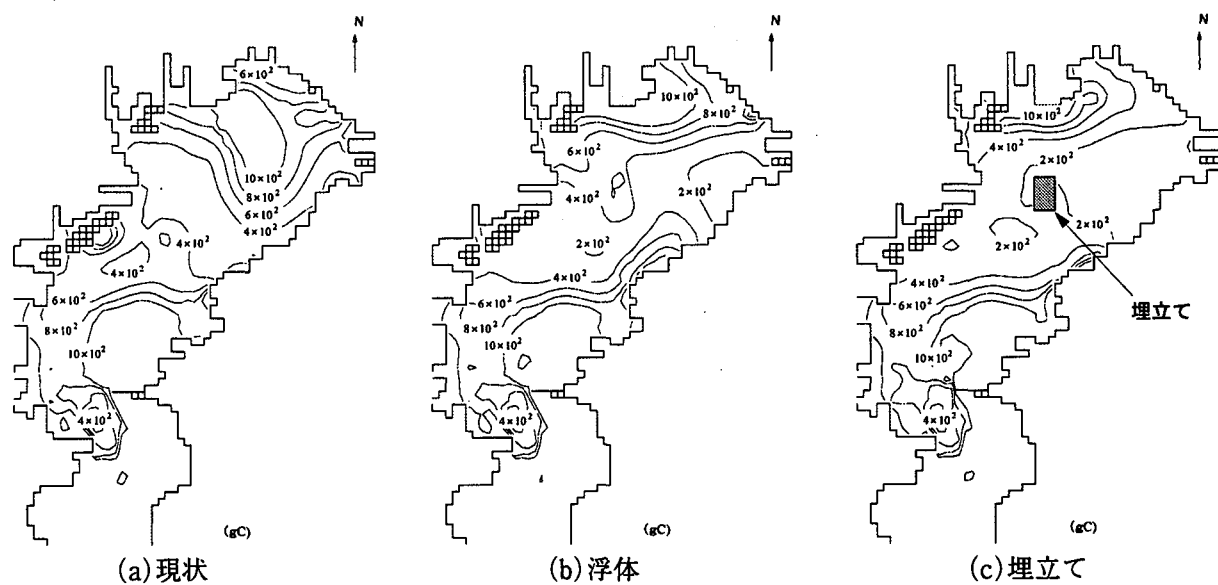


図-10 底層に堆積したプランクトン量

している。現状では、湾奥に近づくに従って等値線の鉛直方向の間隔が狭くなっており、それに伴って水平的な塩分勾配が形成されている。残差流の特性に見られたように、現状では湾奥に時計回りの還流が明確に形成されており、これはエスチャリー循環が強い事に対応している。したがって、湾奥の塩分等値線の変化は、エスチャリー循環の上昇流によって形成されたものと考えられる。一方、浮体及び埋立ての場合には、塩分が32.0のラインを見ると水平的にはほぼ平らであり、下層に行くほど塩分の水平勾配が小さくなっている。これによって、空港がある場合には底層の残差流が弱まったものと考えられる。

### (3) まとめ

以上のように、今回のシミュレーションでは、空港の影響は、局所的よりはむしろ、広域的であることが示唆された。浮体形式の場合その影響は比較的小さいが、埋立て形式の場合は、特に湾奥の水質への影響が大きく、底層の貧酸素化を助長する結果となった。この変化の根本原因は、東京湾全体の残差流系の変化に起因していると考えられ、湾全体に対し構造物の占める割合が小さくても、位置によっては流動構造を変化させ、その影響が広範囲に広がる可能性を示している。今回対象とした空港の位置は、東京湾のエスチャリー循環に対し、最も影響する位置になっているため、その影響が過大評価されている可能性はあるが、空港の位置や規模などに応じて、今後より詳細な検討が必要と考えられる。

## 4. おわりに

本研究では、環境負荷の少ないと考えられる浮体式や杭式の大規模海洋構造物の周辺環境への影響評価を行えるよう流動及び水質モデルに改良を加え、東京湾を対象に海上空港を想定した試算を実施した。

結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 三次元的な遮蔽構造物を表現するモデルとして、浮体モデル及びブロックモデルを提案した。
- (2) 羽田沖の海上空港を想定し、流動及び水質のシミュレーションを実施した結果、埋立てに比べ浮体方式の方が影響が少ない事が示された。
- (3) 大規模海洋構造物の設置は、残差流系への影響の度合いが重要であり、計画においてはその点を十分考慮する必要があると考えられる。

今後こうした影響評価を行う場合には、流れの外力をより厳密に与え、様々な状況下での検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 経塚雄策, 胡 長洪, 長谷美広行, 肥海昭男: 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

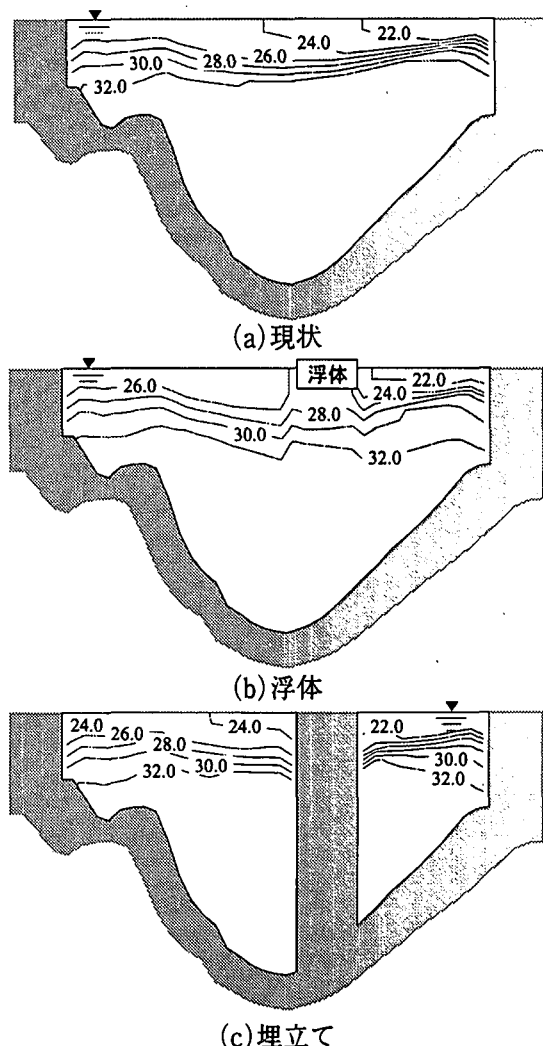


図-11 塩分濃度南北断面図 (右が湾奥)

響について, 日本造船学会論文集, 第181号, pp.151-390, 1997.

- 2) 藤野正隆, 多部田茂, 北澤大輔, 曾 一非: 超大型浮体の海洋物理環境への影響に関する一検討, 日本造船学会論文集, 第183号, pp.267-280.
- 3) 上野成三, 勝井秀博, 東江隆夫, 石野和男, 中川修: 流動・生態系モデルによる杭式棧橋工法で建設される海上施設の環境影響予測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.1171-1175.
- 4) 田中昌宏・稲垣 聡・八木 宏: 東京湾成層期の流動のリアルタイムシミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.386-390.
- 5) 田中昌宏・稲垣 聡: 生態系モデルを用いた東京湾夏季の水質のシミュレーション, 海洋開発論文集, Vol.13, pp.261-266.
- 6) マリーンフロート推進機構編: 浮体式海上空港—巨大プロジェクトへの挑戦—, 鹿島出版会, 1997.
- 7) 田中昌宏, Stelling, G. S., Markus, A.: 東京湾の残差流のシミュレーションとそれが水質解析に及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1121-1125.

(1999.4.19 受付)