

内湾における粒径を考慮した 底質堆積モデルの開発

MODELING OF SEDIMENT ACCUMULATION IN A BAY CONSIDERING GRAIN SIZE VARIATION

Thamnoon Rasmeeemasuang¹・佐々木 淳²

Thamnoon RASMEEMASMUANG and Jun SASAKI

¹ 非会員 M. E. 横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

² 正会員 博(工) 横浜国立大学准教授 大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

This study presents the modeling for the formation and characteristics of sediment layer in Tokyo bay over the time scale of several years. The model includes hydrodynamics, wave, bed shear stress and multi-class sediment models in order to simulate the sediment processes both in water body and bed layer. The sediment model accounts for sediment transport, settling, deposition, resuspension and burial sedimentation processes and is able to reproduce the accumulation of bed sediments. By the concept of multi-class particles, the important information of bed layer characteristics, for instance, the spatial distribution of particle sizes and the water content ratio are provided. Moreover, the numerical experiment was carried out to describe the mechanism of sediment accumulation investigated in the field.

Key Words: Tokyo Bay, estuary, sediment pollution, mud, environmental prediction

1. はじめに

閉鎖性内湾の底質はしばしば有機物に富み、高い酸素消費速度が底層水の貧酸素化を引き起こしたり、リンの溶出を通じて富栄養化を強める等、長期にわたって水質・生態系へ影響を及ぼしている。一方、内湾環境の再生には長期的な取り組みが必要であり、その費用対効果を検討するためには水環境の長期予測が不可欠である。そのため、長期的な底質動態を予測可能な数値モデルの開発が望まれる。また、開発途上国においては今後も港湾整備をはじめとする様々な沿岸開発が行われるが、開発にともなう底質のヘドロ化は大きな環境問題である。こういった課題への対処にもやはり底質の長期予測が必要となる。

ところでこのような底質の予測を考える際には、堆積速度だけでなく質を考える必要があるのは言うまでもない。質に関わる最も重要なパラメータは底質の粒径である。いわゆるヘドロの堆積域は粒径の細かい粘土・シルト分に有機物が吸着し、堆積したものであると考えられる。そのため、底質粒径の予測は質を含めた底質動態の予測を行う上で最も基本的な要素の一つである。

そこで本研究では底質の粒径を考慮した底質堆積予測を考える。対象を土砂粒子の物理過程に絞り、河川から内湾へ土砂が供給され、沈降・堆積と再浮上を繰

り返ししながら底質が形成されていく過程について数値モデルによる検討を行う。具体的には東京湾を対象とし、底質を構成する要素として細砂、シルト、および粘土からここでは4種類の土砂粒子を採用する。既往の研究成果を基に、それらの内湾における堆積予測モデルのプロトタイプを構築し、現地データとの比較によって定性的な考察を加える。

2. 数値モデル

本モデルで取り扱う物理過程を図-1に示す。まず、土砂の根源的な供給は河川からのみであると仮定し、様々な粒径を持つ底質粒子が河川水と共に内湾へ供給されるものとする。これらの粒子は流れに乗って運ばれ(移流)また濃度勾配によって拡散していくものとする。この過程は水中における流れ場と底質粒子の移流拡散場を解くことによって考えることができる。ただしここで考える流れ場は実際の流れ場のアンサンブル平均を取った平均流れ場であるとし、拡散場は実際の流れ場と平均流との差である乱流成分によるものを含んだものとして考える。これらの過程は粒径毎の移流拡散方程式を解くことで扱うことができるが、実際の土砂の比重は海水より大きいいため、沈降現象を考える必要がある。この沈降過程は移流拡散方程式における鉛直移流項に沈降速度を与えることに

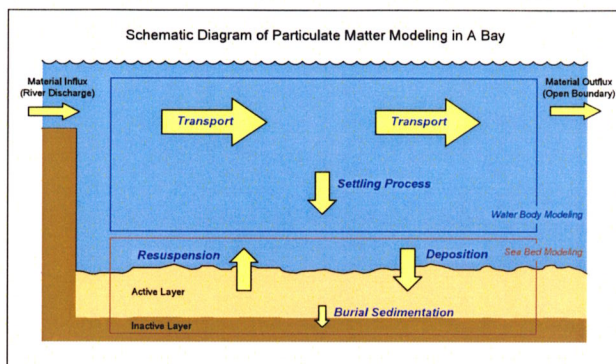


図-1 数値モデルで考慮する物理過程

よって表現することができる。実際のところ、この沈降速度の大きさの決定は結果に大きな影響を与えることから困難であり、いくつかの考え方があ。これについては後に詳しく述べる。

底質に堆積した粒子は底質モデルにおける堆積量として評価される。しかし、この粒子は流れや波によるせん断応力の作用で再び巻き上げられ、移流拡散し、また、沈降するといった過程を繰り返す。これらの過程を繰り返しながら、長期的にはある程度準定常的な状態に落ち着くものと考えられる。ただし、台風を初めとする強い擾乱が起こると再び再配置が起こったりもする。以上の過程を経て、底質の下層に埋没していくともはや再懸濁等は起こらず、安定した堆積層を形成していく。

以上より、本モデルでは土砂の水中における移流拡散過程を底質における沈降堆積と再懸濁を境界条件として解くモデルと、底質堆積過程を堆積量をパラメータとし、やはり沈降堆積と再懸濁を境界条件として解く底質モデルとから構成される。

数値モデルの全体像を図-2に示す。まず、流れ場については静水圧近似とブシネスク近似に基づく準3次元のprimitive方程式系を採用する。この中で水温および塩分の移流拡散方程式を解き、密度に関する状態方程式から密度場を決定する。また、底面における摩擦応力の内、波による影響を考慮するため、波浪推算モデルを採用する。底質に関しては沈降速度を考慮した移流拡散方程式モデルを採用し、流れ場および波浪による底面摩擦から評価した、底質の沈降堆積および再浮上を考慮したモデルを構築する。最後に底質モデルは沈降堆積と再懸濁による底質量の増減を考慮した平面2次元モデルを構築し、粒径別の堆積量を算定できるモデルを構築する。

(1) 流動モデルおよび波浪推算モデル

流動モデルは佐々木ら¹⁾による基礎方程式と差分アルゴリズムに基づく数値モデルを採用した。当該モデルはシグマ座標系を採用した準3次元モデルであり、水温、塩分の移流拡散方程式および状態方程式を解いている。差分式では鉛直移流項、鉛直拡散項、および

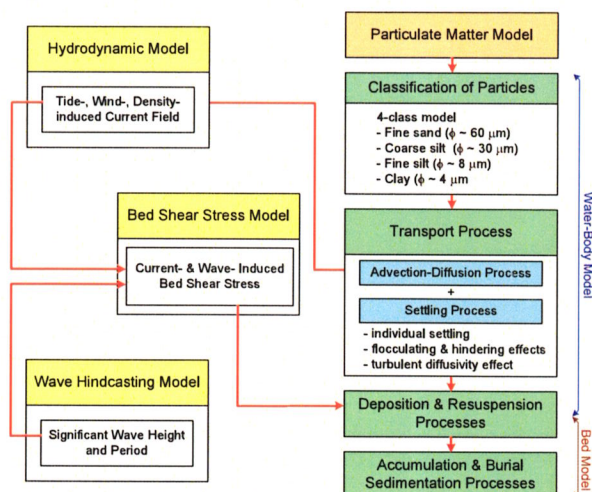


図-2 数値モデル全体の枠組み

水位項（外部重力モード）を陰に解く半陰解法を採用しており、計算の効率性と安定性に特長がある²⁾。

波浪推算モデルは簡便で広く使われている、アメリカ工兵隊のモデル式³⁾を採用したコード⁴⁾を使用した。当該モデルは深海用モデルと浅海用モデルからなり、対象に応じてこれらを使い分け、有義波高と有義波周期を計算している。

(2) 底面摩擦応力の算定法

底質の海底面への堆積と再浮上に関しては底面摩擦応力の関数として扱うため、その算定方法は重要である。ここでは底面摩擦応力 τ_b を流れによる成分 τ_{bc} と波浪による成分 τ_{bw} の和として考え、それぞれを

$$\tau_{bc} = \frac{\rho(u_b^2 + v_b^2)}{C_h^2} \quad (1)$$

$$\tau_{bw} = \frac{1}{2} \rho f_w |\hat{U}_b|^2 \quad (2)$$

と与えることとした。ここに u_b および v_b はそれぞれ海底面における x , y 方向の流速、 C_h および f_w はそれぞれ流れおよび波浪による摩擦係数、 $\hat{U}_b$ は海底面における波動流速振幅で

$$\hat{U}_b = \frac{\pi H}{T \sinh(2\pi h/L)} \quad (3)$$

により評価される。ただし、 L は波長で、分散関係式から決定される。

(3) 底質の分類

本研究では複数の粒径を考慮可能な底質予測モデルのプロトタイプの構築を目標とするが、便宜上底質を粒径が $62.5\mu\text{m}$ の細砂、 $31.3\mu\text{m}$ と $15.6\mu\text{m}$ のシルト、および $3.9\mu\text{m}$ の粘土の4種類の底質を採用することとした。これらの分類には任意性があり、本来は河川水經由で供給される底質の構成要素を考慮して決定されるべきものである。沈降速度の算定や底面における堆

積・再懸濁過程の定式化は最も重要な素過程であるが、これらは底質粒径の関数として構築されるため、汎用性の高いモデルとなっている。

(4) 底質輸送過程

各粒径の底質濃度を C とすると、これは次の移流拡散方程式に従うものと仮定する。

$$\frac{\partial(DC)}{\partial t} + \frac{\partial(uDC)}{\partial x} + \frac{\partial(vDC)}{\partial y} + \frac{\partial\{(\dot{\sigma} + \dot{\sigma}_s)DC\}}{\partial \sigma} = DK_h \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_v \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + s(C) \quad (4)$$

ここに、 (x, y, z) はデカルト座標系、 h は静水面を基準とした水深、 ζ は静水面から測った水位変動、 $D = h + \zeta$ は全水深、 $\sigma = (z + h)/(\zeta + h)$ 、 ρ は密度で参照密度 ρ_0 とそれからの偏差 ρ' から構成される。 (u, v, w) はデカルト座標系における流速成分、 K_v および K_h はそれぞれ鉛直渦動粘性係数および水平渦動粘性係数で、乱流モデルにより計算される。また、 $s(C)$ は生成項を表し、 $\dot{\sigma}$ は次式で定義される。

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma}{\partial y} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z} \quad (5)$$

$\dot{\sigma}_s$ は沈降を表す項であり、デカルト座標系における沈降速度を w_s とすれば w_s/D と定義される。

底質粒子の沈降過程は底質粒径および濃度によって大きく異なる振る舞いをする事が知られている。まず細砂のような非粘着性の粒子に関しては、個々の粒子がストークスの抵抗法則に従って沈降していくものと考えることができる。そこで非粘着性粒子の沈降速度 w_s は次式により表現できるものとする。

$$w_s = \frac{1}{18} \frac{gd^2(\rho_p - \rho)}{\eta} \quad (6)$$

ここに、 d は粒子の粒径、 ρ_p は粒子の密度、 ρ は周囲海水の密度、 η は海水の分子粘性係数である。

一方、粘着性の粒子であるシルト、粘土分に関しては濃度が高くなるにつれて粒子同士の衝突によるフロックが形成され、見かけの底質粒子が大きくなる。その結果、ストークスの抵抗法則から予測されるよりも大きな沈降速度が発現するようになる。さらに底質粒子の濃度が高くなると今度は混層流として振る舞うようになり、いわゆる干渉沈降現象が現れる。この場合は濃度が高くなるほど沈降速度の低下が見られるようになる。このように粘着性粒子の沈降速度は複雑な振る舞いをするが、簡単には底質濃度の関数として表すことができると考えられ、濃度と沈降速度に関する既往の知見をまとめたものが図-3である。これによると濃度が2~3g/Lを境にして、フロック影響下での沈降と干渉沈降とに分けることができる。以上を考慮して粘着性粒子の沈降速度として以下の式を採用した。

$$w_s = \lambda C^m \quad (7)$$

ここに、 d は粒子の粒径、 ρ_p は粒子の密度、 ρ は海水の密度、 η は海水の分子粘性係数、 λ は底質の性状に依存

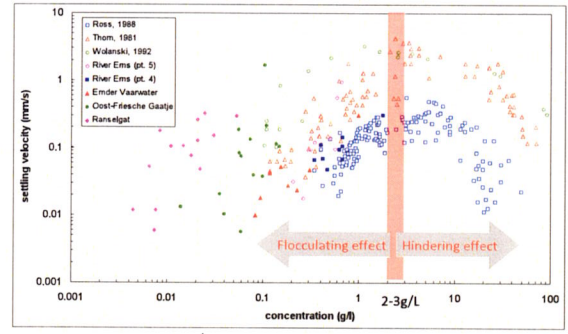


図-3 沈降速度の定式化における経験定数の推定に関わる実験結果のレビュー

したパラメータ、 m は0.005から1.4程度の値を取る経験定数⁵⁾(Leussen, 1994)である。本モデルではチューニングの結果、 $\lambda = 0.005$ 、 $m = 1.4$ を採用しているが、今後これらの影響を詳細に検討し、改良を加える予定である。

ところで流速が大きい場合には一般に強い乱流状態にあると考えられ、このときは水平軸を持つ乱流渦の影響で沈降が抑制されると考えられる。この効果を導入するため乱流エネルギー E_z を用いて、乱流の影響を考慮しない場合の沈降速度 w_{sl} を次式によって抑制することとした。

$$w_s = \varphi \frac{w_{sl}^2}{E_z} \quad (8)$$

ここに、 $\varphi = 0.693$ はモデルパラメータである。 E_z は流速振幅を $\bar{u}$ として、 $E_z = \gamma \bar{u}^2$ とした⁶⁾。

境界条件は水面においてはゼロフラックスの条件を与えた。一方、底面においては沈降フラックス F_D と再懸濁フラックス F_R を用いて、底面フラックス項を以下のように設定した。

$$K_v \frac{\partial C}{\partial \sigma} = D \cdot (F_R - F_D) \quad (9)$$

F_D と F_R は次節において定義される。

(5) 沈降フラックスと再懸濁フラックスの定式化

水・底質の境界においては底質の沈降フラックス F_D と再懸濁フラックス F_R を底面せん断応力 τ_b の関数として定式化する⁷⁾。この境界においては沈降、再懸濁、または平衡状態のいずれかが起こるが、それを決めるのは実際に働いている底面せん断応力と堆積に関する限界せん断応力 τ_d や再懸濁に関する限界せん断応力 τ_e との大小関係であり、以下のように定式化される。

$$F_D = \begin{cases} w_s C \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right), & \text{for } \tau_b < \tau_d \\ 0, & \text{for } \tau_b \geq \tau_d \end{cases} \quad (10)$$

$$F_R = \begin{cases} E_0 \left(\frac{\tau_b}{\tau_d} - 1 \right), & \text{for } \tau_b > \tau_e \\ 0, & \text{for } \tau_b \leq \tau_e \end{cases} \quad (11)$$

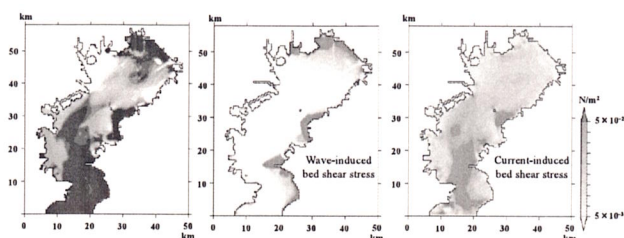


図-7 周年の底質堆積量（左）と周年平均した波浪（中央）および流れ（右）による底面摩擦応力

浸食の繰り返しが頻繁に見られ、浅い河口部におけるダイナミックな底質動態が伺われる。年間の積分値としてはほぼ平衡状態に近い若干の正の堆積と考えられるが、洪水等の挙動に強く影響を受けると考えられ、さらなる検討が必要である。

一方、図-6には湾奥中央部の代表点として、St. 2における水平流速、流速に起因する底面摩擦応力、および単位面積あたりの底質堆積量の3日毎の時系列を示す。湾奥中央域は強い底面せん断応力による浸食が多少見られるものの、多くの場合は堆積が勝っており、年間を通して徐々に堆積していく傾向が見られる。ただし、St. 1に比較すると堆積速度は小さく、緩やかかつ安定的に堆積が進む様子が現れている。また、特に堆積が進むのは洪水後であり、河川から供給された土砂が時間遅れを伴って湾奥中央部に堆積するものと考えられる。St. 2において堆積が安定的に進むのは底質の再懸濁が起こった際にも周囲の底質の流入があるためと考えられ、風向きの変化を反映して湾奥中央部では比較的一様な堆積が見られるものと推察される。

以上のように2点での時系列の詳細を見ることによって、土砂動態の様子が見えてくる。これらの検証は困難であるが、力学的観点から見て定性的には妥当な結果が得られているものと推察される。

（2）底質堆積の空間分布特性

次に内湾全体におけるすべての粒径成分を足し合わせた周年の底質堆積の空間分布について見る。図-7に底質堆積分布、波浪による底面摩擦応力の分布、および流れによる底面摩擦応力の分布を示す。まず、底質堆積分布を見ると、三番瀬付近、小櫃川河口の盤州干潟等の部分においてはほとんど堆積が見られない。これは波浪による底面摩擦応力の大きな浅海領域と重なっており、間欠的に見られる強いせん断応力のため、堆積が抑制されていると考えられる。また、湾口部においても堆積が著しく少ない。この領域では流れによる底面摩擦応力が大きいことが分かり、やはり底面摩擦応力の大きさと負の相関が見られる。

（3）粒径別の底質堆積分布

次に、本モデルの特徴である、粒径別の堆積計算結果について見ていく。図-8に細砂、粗いシルト、細かいシルト、および粘土成分それぞれの堆積分布を示す。

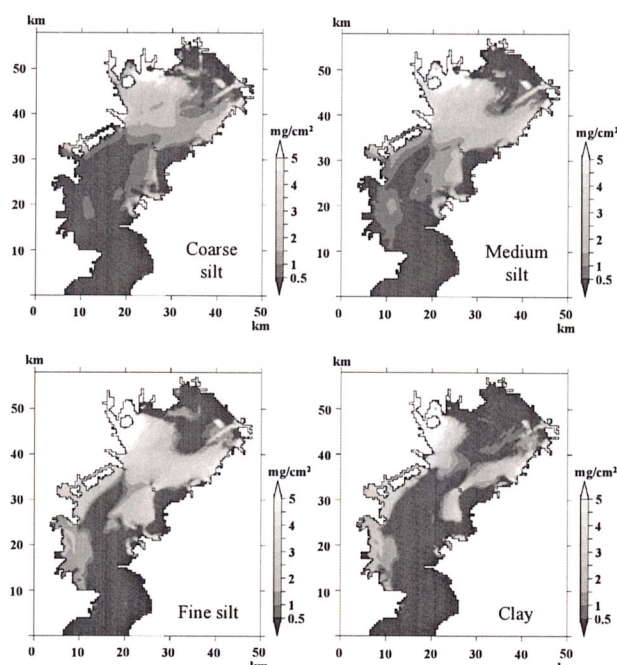


図-8 粒径成分別の周年の底質堆積分布

す。細砂分については河川水中の割合が少ないことと、沈降速度が大きいこと、および再懸濁が起きにくいことからほぼすべてが主要な河川の河口部に留まっている。これは従来の現地調査結果¹¹⁾と整合するものである。一方、シルト成分についても河口域で多くが堆積している様子が見られるが、細かい成分ほど湾奥全体へ広がっている様子も見られる。これは速やかに河口付近で堆積したものが沈降と再懸濁を繰り返しながら湾奥全体へ広がっていく様子を表しているものと考えられる。ところで細かいシルト分に関しては稲毛海岸沖や千葉沖あたりに筋状の堆積の少ない領域が見られる。これはフェッチの不連続による高波浪に対応しており、本研究で採用した波浪推算法の問題と考えられる。今後はより高精度で滑らかな波浪分布が得られるモデルへの改良が必要である。さらに、粘土分について見ると、今回のシミュレーションではその含有割合があまり大きくないため、あまり目立たないが、細かいシルト分と同様の挙動を示しており、湾奥全体に広がっている様子がわかる。

（4）底質粒径分布

前節で求めた粒径別の底質堆積分布から各格子点ごとの平均粒径を求めることができる。これを図示したものが図-9（左）である。本計算結果によれば、江戸川河口域や小櫃川河口をはじめとする主要河川の河口域においては粒径が粗く、湾奥においては粒径が細くなっている。これらの結果は少なくとも定性的には先の現地調査結果と符合している。

一方、湾奥の幕張沖においては底質粒径がかなり細くなっている等、現地調査結果との齟齬が見られる海域も存在する。その要因としては江戸川放水路から

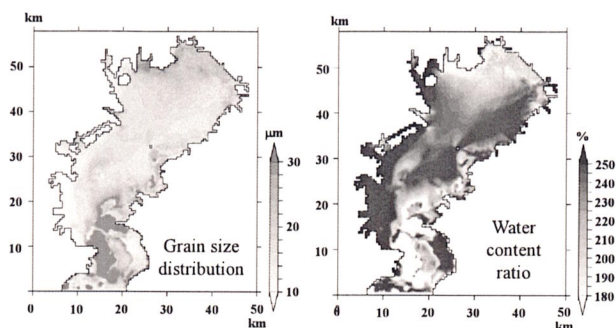


図-9 周年計算後の底質中央粒径分布と含水比分布

の放流水を考慮していないこと、幕張沖を含む千葉沿岸の底面摩擦応力が過小評価されている、あるいは限界せん断応力の設定の問題が考えられる。湾奥における再現性の向上は最重要課題として残されている。

一方、湾口付近の粒径計算値は粗粒となっている。湾口付近は砂の堆積や岩盤の露出が見られることが分かっており、定性的には現地データに符合していると考えられる。

(5) 含水比分布の簡易計算結果

底質粒径と含水比との間には一般に負の相関があることが知られている。Berner¹⁰⁾による両者の関係を適用し簡易的に含水比分布を計算したものが図-9(右)である。この結果は底質粒径分布と一対一に対応するものであるから新しい情報とはならないが、河口域における含水比のやや低い状態は現地調査結果¹²⁾に比較的合っている。また、湾奥における高含水比の底質も比較的現地データに合っている。ただし、高含水比底質の中心は北東に偏り過ぎており、底質粒径分布と同様に、モデルの改善が必要である。

一方、含水比の値そのものについては特に湾奥中央部においては現地データの半分から1/3程度の値となっており、再現性が悪い。これは湾奥における含水比が底質粒径のみを反映したものではないことを示唆しており、改善には有機物含量の再現が必要であると考えられ、今後の課題としたい。

4. まとめ

内湾を対象として複数の底質粒径を考慮した底質予測モデルのプロトタイプを構築した。本モデルは流動、波浪場と、底質の輸送、沈降、堆積、再懸濁の粒径別計算を融合するものであり、既往の知見を総合したものとなっている。本モデルを東京湾に適用し、周年にわたる再現計算を行うことによってモデル上での底質動態を把握し、物理現象として定性的には妥当な結果が得られていることを確認した。さらに、粒径別の底質堆積特性を把握し、既往の現地データとの比較を通して、再現性の検証と課題の抽出を行った。その結果、基本的には底質粒径分布は波浪および流動に

よる底面摩擦応力と相関があること、河口付近での選択的な粗粒化、湾奥中央部での細粒分の堆積と再懸濁の繰り返しによる底質形成の様子が把握された。今後はより詳細な現地データとの比較を通じたモデルの改良と本研究で考慮していない有機物を含む底質堆積予測モデルへと拡張していく予定である。

謝辞：本研究の一部は2003年度～2006年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号：15360263、代表：横浜国立大学佐々木淳助教授)の補助によるものである。

参考文献

- 1) 佐々木 淳，磯部雅彦，渡辺 晃，五明美智男：東京湾における青潮の発生規模に関する考察，海岸工学論文集，Vol. 43, pp. 1111-1115, 1996.
- 2) 佐々木 淳：3次元密度流としての内湾の流れのモデリング，1998年度(第34回)水工学に関する夏期研修会講義集，B-3, 20pp., 1998.
- 3) United States Army Corps of Engineers: Shore Protection Manual, 1994.
- 4) Achiari, H. and Sasaki, J.: Numerical Analysis of Wind-Wave Climate Change and Spatial Distribution of Bottom Sediment Properties in Sanbanze Shallows of Tokyo Bay, J. Coastal Res., SI50, 2007. (accepted)
- 5) Mehta, A.J.: Characteristics of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, In: Mehta, A.J.(Ed), Lecture Notes on coastal and Estuarine Studies 14 Springer, pp. 290-325, 1986.
- 6) Gerritsen, H., Vos, R.J., Theo van derKaaij, Lane, A. and Boon, J.G.: Suspended sediment modelling in a shelf sea (North Sea), Coastal Eng., 41, pp. 317-352, 2000.
- 7) Odd, N.V.M. and Murphy, D.G.: Particulate pollutants in North Sea, Report SR 292, Hydraulics Research, Wallingford, 1992.
- 8) Kappe, B.P., van Koningsbruggen, P. and Voogt, L.: Erosion of silt resulting from navigation, Report series, Integrated Water Management Ketelmeer, Rijkswaterstaat RIZA, Lelystad, 1989.
- 9) Winterwerp, J.C.: Flow-induced erosion of cohesive beds, a literature study, Delft Hydraulics Report No. 25, 1989.
- 10) Berner, R.A.: Early Diagenesis, A Theoretical Approach, Princeton University Press, 1980.
- 11) 貝塚爽平編：東京湾の地形・地質と水，築地書館，211pp., 1993.
- 12) 岡田知也，古川恵太：東京湾沿岸域における音響装置を用いた詳細な底質分布図の作成とベントス生息状況，海岸工学論文集，Vol. 52, pp. 1431-1435, 2005.