

東京湾奥部における浮泥堆積層厚の空間分布特性

五十嵐 学*・佐々木 淳**

東京湾奥部において、音波探査装置を用いて浮泥堆積層厚のデータを取得した。さらに陸域起源のシルト粘土分の輸送堆積過程を再現する数値モデルを構築して長期再現計算を行い、堆積分布の形成要因を検討した。現地調査結果から、閉鎖的な海域である東京港内の一部において浮泥の著しい堆積域が見られ、堆積厚は 50 cm 以上であった。その一方で、ほとんど堆積が見られない領域が存在するなど複雑な分布を示していた。数値計算結果は相違点も見られたものの、全体的な傾向はある程度再現されており、局所的な堆積性状は底面せん断応力の分布に対応することが示唆された。

1. はじめに

東京湾をはじめとする内湾浅海域には有機物に富む底泥の堆積が広範囲に見られる。特に浮泥は有機物含量が著しく高く、栄養塩の溶出を通じた水質への影響が極めて大きい。その上、浮泥を起源とする栄養塩供給過程は長期間にわたり持続することから、長期的な環境改善戦略を考える際には浮泥の堆積量を把握し、その水底質への影響の時間スケールを考慮していく必要がある。

従来、東京湾における底泥・浮泥の堆積に関する研究はいくつか行われており、松本(1983)は鉛 210 法による底質コアの年代推定より東京湾全域の底泥堆積速度図を作成し、五明ら(1990)は東京湾底泥の堆積特性を現地観測により明らかにしている。また、底泥の巻き上げや輸送に関する研究も行われており、中川(2002)は東京湾奥部において現地観測を行い、巻き上げ限界せん断応力等を明らかにしている。しかしながら、東京湾における浮泥の堆積厚分布に関する知見は港内を除くと限られている。

そこで本研究では、まず音波探査装置を用いた現地調査により東京湾奥部全域における浮泥の堆積厚を把握する。次に陸域起源のシルト粘土分の輸送、堆積、および再浮上をモデル化した数値モデルを構築し、出水等を含む気象・海象の特別観測値を用いた周年再現計算によって堆積分布の形成要因を調べる。

2. 現地調査

(1) 概要

調査は音響探査法を採用し、千本電機(株)底質探査装置 SH-20 (200 kHz, 12 kHz) を用いて、2003 年 8 月 4 日～8 月 7 日及び 8 月 28 日の 5 日間にわたり実施した。調査測線は図-1 に示すような東京湾奥部のアクアライン以北である。調査の様子を図-2 に示す。

一般に底泥はその支持力(強度)・密度・含水比などが

ら、浮泥と定着泥に区分できるが、音波は周波数が低いほど高い含泥率の層で反射する。したがって、200 kHz の周波数帯では、海水と浮泥の境界、すなわち海底面で反射し、12 kHz の周波数帯では、浮泥と定着泥との境界面で反射する。そして、反射波の信号は受波器で受波され、記録紙上に連続する海底地形および定着泥層が濃淡で記録される(図-3)。すなわち、200 kHz の測深記録が浮泥層の上面(海底面)となり、12 kHz で求めた境界面との

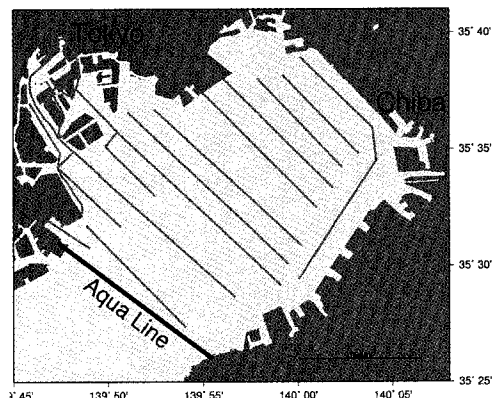


図-1 調査測線

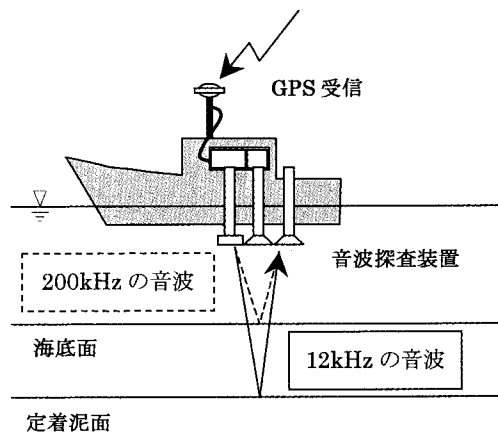


図-2 調査概略図

* 修(工) 東亜建設工業(株) 九州支店
** 正会員 博(工) 横浜国立大学助教授 大学院工学研究院システムの創生部門

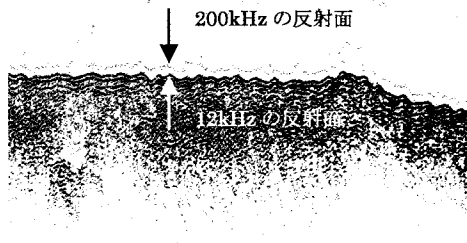


図-3 音波探査連続データ例

差が浮泥層の厚さである。なお、地質情報は深度表示ではなく反射時間で記録される。

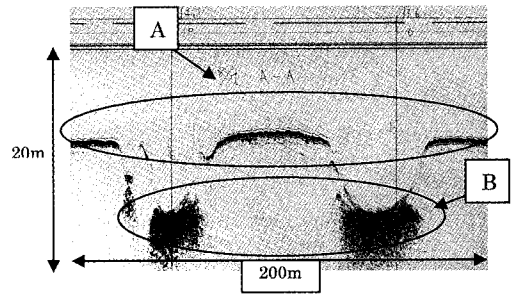
(2) 各海域における底泥堆積厚

記録紙に現れている濃淡模様（パターン）は、種々異なったパターンが累積している。これらのパターンの相違は、底泥の軟弱度による物理的特性を反映しているもので、パターンの明瞭度は音響インピーダンスの差異に基づくものである。ここで、音響インピーダンスとはある組織の密度とその組織内での音速の積であり、音響抵抗のことである。すなわち、浮泥のような軟弱な地層は、反射率が弱いので白く抜けたようなパターンを呈し、定着泥の層はやや締まったシルトなどで、強い濃淡のパターンを示している。浅瀬窪地及び航路、多摩川河口、及び東京港内における調査地点においては、それぞれ特徴的な浮泥堆積分布を示していた。

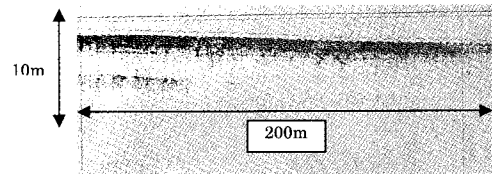
a) 浅瀬窪地 図-4(a)において、A付近は200 kHz及び12 kHzの記録共に、反射パターンがはっきりと現れている。これは、浮泥層とシルト層の境界がはっきりしていることを示しており、浮泥層、定着泥層とはっきり分離されていると考えられる。また、12 kHzの記録におけるパターンは、浮泥と定着泥の境界層で最も明瞭で、泥深方向にあまり発達していない。これは、泥深が増すにつれて浮泥が締め固まる傾向が強いということである。つまり、Aの領域においては巻き上げ等の影響をあまり受けずに浮泥がゆっくりと規則的に堆積していると推測できる。

これに対して、B付近は200 kHz及び12 kHzの記録共に、反射パターンが不明瞭である。また、12 kHzの記録におけるパターンにおいては、泥深方向に発達している。これはAにおける記録と比較すると明らかである。つまり、Bの領域（窪地）においてはSSが沈降しやすいために、厚く軟弱な泥層を形成していると考えられる。

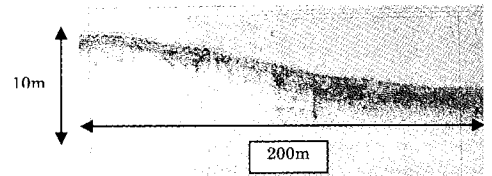
b) 多摩川河口 今回調査した中で最も上部部の水深が浅い図-4(b)の領域付近に、約50 cmと多くの浮泥が堆積する領域が見られた。この付近は200 kHz及び12 kHzの記録共に、反射パターンがはっきりと現れてい



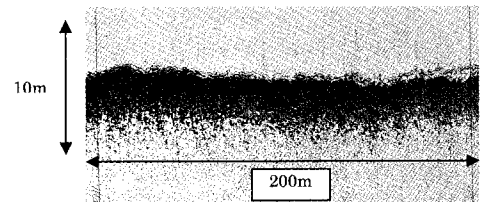
a) 浅瀬窪地



b) 多摩川河口上流側



c) 多摩川河口下流側



d) 東京港内

図-4 各海域における音響探査記録

る。すなわち、この領域においても巻き上げ等の影響をあまり受けずに圧密が進行し、底泥がゆっくりと規則的に堆積していると推測できる。

上述の傾向は水深が浅い領域まで見られるが、図-4(c)の水深が深くなる領域において浮泥堆積量が減少し、12 kHzの記録におけるパターンを見ると泥深方向に発達しているのが分かる。これは、この領域においては沈降・堆積及び巻き上げが共に起こりやすく、浮泥が同じ場所に留まる時間が短いために圧密も起こりにくくなって、軟弱度がほぼ一様な底泥が堆積していると考えられる。この領域の浮泥の堆積量はおよそ10 cmである。

c) 東京港 東京港においても上述した浮泥堆積状況と同様の傾向が見られた。図-4(d)に示した領域において、浮泥と定着泥の境界があいまいになっており、浮泥層厚の決定が難しい。これも底泥堆積層の上層と下層において泥の軟弱度の差異があまりないためと考えられる。ここでは浮泥の堆積厚を考えているために20 cmの堆積としている。

(3) 浮泥の堆積厚分布結果と考察

図-4に示したような音波探査の連続記録データを用いて湾奥部全体における浮泥層厚の分布を求めた結果を図-5に示す。これによると、主要河川の河口に位置し埋立による閉鎖的な海域が広がる東京港内の一部において浮泥の著しい堆積域が見られた。特に東京港中央防波堤沖や多摩川河口沖では50 cmを超える浮泥の堆積が確認された。しかし、隅田川河口の一部や羽田沖では浮泥の堆積がほとんど見られない海域が存在する等、複雑な分布を示していた。さらに今回の調査では図-5のAに示すような浚渫窪地におけるデータも取得し、30~40 cm程度の浮泥の堆積厚が推定された。

一方、湾奥部の平場では全般的に10~30 cm程度の浮泥の堆積が見られ、木更津沖のような特に堆積層厚の小さい領域が存在することを除けば比較的一様に浮泥が堆積していた。

一般に、浮泥は流れのよどんだ領域に堆積しやすく、東京港内や浚渫窪地がそれに当てはまるが、上記のような複雑な分布を示していた背景には、局所的に流速の大きい領域が存在し、底面せん断応力が増大して巻き上げが起りやすくなっていると考えられる。しかしながら、本調査では流速観測は行っていないためにリアルタイムでの考察は出来ないが、それを補完する試みとして次節で数値計算結果との比較・検討を行う。

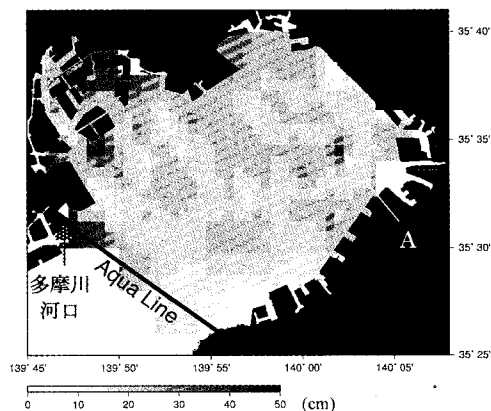


図-5 浮泥堆積層分布図

3. 数値計算

(1) 数値モデル概要

数値モデルは佐々木ら(1998)による流動モデルに波浪推算モデルと土砂の輸送・堆積・再浮上を考慮した浮泥動態モデルを組み込んだものを用いた。

まず、流動モデルは気象等の時別の実測データを用いることで周年にわたり現象の精密な再現を行った。波浪推算モデルでは波による浮泥の再浮上の重要性に鑑み、風向風速とフェッチおよび水深を考慮した浅海波浪予測式により、波高周期の平面分布を時々刻々推算した。予測式のパラメータの内、風向風速は気象庁の地上気象観測時日別編集データ(SDP)を使用し、水深も既知であるのでフェッチの値が分かれば予測式から波高と周期が計算可能となる。そのため、フェッチの計算を行うプログラムを作り、東京湾におけるフェッチの計算を行った。なお、この予測式は稲垣ら(2001)を参考にして適用した。

浮泥動態モデルでは、河口域における泥質の凝集現象を沈降速度の上昇として考慮し、浮泥の巻き上げ・堆積に関しては流動と波浪双方の寄与を含む底面せん断応力の関数として評価した。

a) 底面せん断応力の計算 せん断応力の計算には、既往の研究に多く見られるように、底面せん断応力 τ を流動によるもの τ_c と波浪によるもの τ_w の足し合わせとした。また、 τ_c はKim・Lee(2003)の研究より、 τ_w は稲垣ら(2001)より、

$$\tau_c = \frac{\rho g(u^2 + v^2)}{C_h} \quad (1)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w |\bar{U}_b|^2 \quad (2)$$

とした。ここに、 ρ は海水密度(gm^{-3})、 f_w は波による底面摩擦係数で、中川(2002)の研究より0.03の定数で与える。

b) 浮泥巻き上げ量及び堆積量の計算 単位時間当たりの堆積量を $D(\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1})$ 、単位時間当たりの沈降量をとすると、それぞれ次式のように求めることができる。

$$D = w_s \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right) \quad (3)$$

$$E = P \left(\frac{\tau}{\tau_e} - 1 \right) \quad (4)$$

ここで、 τ は底面せん断応力(Nm^{-2})、 τ_d は沈降限界におけるせん断応力(Nm^{-2})、 τ_e は巻き上げ限界におけるせん断応力(Nm^{-2})、 w_s は泥の沈降速度(ms^{-2})、 s は底面付近でのSS濃度(gm^{-3})、 P は経験定数($\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$)である。

c) 濃度変化の評価 実現象では底面付近において底泥の巻き上げ・堆積が起こることによって、底層付近の

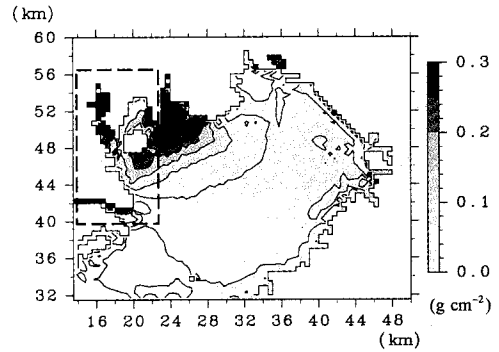
SS 濃度が大きく変化する。これは本モデルにおいても再現している。その評価方法として、巻き上げもしくは沈降によって起こる SS 濃度の変化は、本モデルにおける最下層においてのみ生じるものとしている。ただし、数値モデルの計算において求めているのは平均 SS 濃度であるので、底面付近の SS 濃度とは大きく異なる。そこで、細川ら (1986) にも用いられているように、それらの換算比率を $\alpha=5.0$ と設定した。

(2) 計算結果と考察

以上により構築したモデルを用い、境界条件として特別の気象データ、日別の河川流量、湾口の潮位変動を与え、1996 年 1 月 1 日からの 1 年間にわたる計算を複数年分実施した。表—1 に主な計算条件を示す。浮泥動態のパラメータは細川ら (1986) や中川 (2002) など既往の研究を参考に設定した。

図—6 は 1 年間の計算終了後の浮泥堆積量分布である。これによると、河口域での浮泥堆積量が最大となり、そこから距離が離れるほど堆積量が減少することを示している。これを松本 (1983) の東京湾における堆積物の堆積速度図と比較してみると、堆積速度図では多摩川河口域も堆積速度が大きいとしているが、先に述べたように本研究の計算結果ではあまり底泥の堆積が見られない領域もあり、局所的に底泥堆積量が 0 に近い領域も見られる。そこでこの相違の原因を考察する。

多摩川河口域のような浮遊土砂が多く存在する領域において、底泥が堆積しない原因として考えられるのが底泥の巻き上げ量が多い、すなわち底面せん断応力が大きい可能性が挙げられる。ここで、図—7 に単位計算ステップ当りの平均底面せん断応力分布を、図—8 に浮泥堆積量分布拡大図 (図—6 の点線枠内) を示す。図—7 を見る



図—6 浮泥堆積量分布

と、多摩川河口域において平均底面せん断応力が約 $1.0 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-2}$ 以上の値を示している領域がある。つまり、多摩川河口域付近では他領域よりも底面せん断応力が大きい領域があり、底泥が堆積したとしても巻き上げが卓越していて結果的に底泥堆積量が少なくなっていると推測できる。

また、底面せん断応力が大きくなる原因としては、流速が大きいことが挙げられる。ここで、図—9 に計算期間における底層での残差流を示す。これを見ると、湾奥部の中央域に多摩川河口域に向かう流速約 5 cm s^{-1} の流れが存在することが分かる。これらが多摩川河口付近で収束し、 10 cm s^{-1} 前後の速い流れが発生していると考えられることができる。

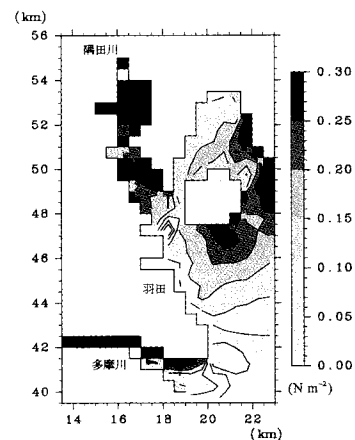
4. 現地調査結果と数値計算結果の比較・考察

ここでは、現地調査結果である浮泥層厚分布図 (図—5) と、数値計算結果である浮泥堆積量分布拡大図 (図—8) とを比較・考察する。

まず図—7 の羽田沖において前節の数値計算結果の考

表—1 計算条件

諸 元	入力条件
格子間隔	500 m
計算時間間隔	90 s
総格子数	100×123
波高・周期 風向・風速	浅海波浪予測式から推算 計算期間における気象庁 SDP データ (東京) の毎時実 測値を内挿 (湾内では一様と 仮定)
潮汐	気象庁の潮位表から計算
沈降速度	8.64 m day^{-1}
巻き上げ限界におけるせん断応力	$1.0 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-2}$
沈降限界におけるせん断応力	$5.0 \times 10^{-4} \text{ Nm}^{-2}$
経験定数	$7.5 \times 10^{-5} \text{ gm}^{3/2} \text{ s}^{-1}$
換算比率	5.0
底面摩擦係数	0.03



図—7 平均底面せん断応力分布図

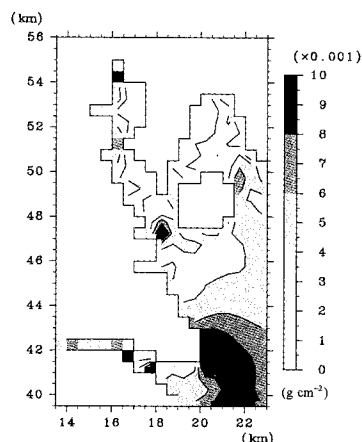


図-8 浮泥堆積分布 (図-6 の点線枠内の拡大図)

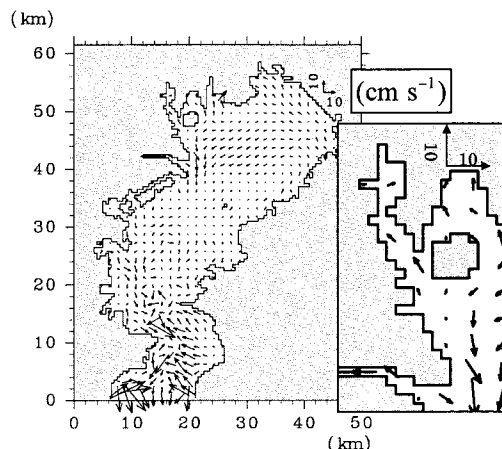


図-9 計算期間における底層の残差流 (図-6 の点線枠内)

察でも述べたように、ここでは底面せん断応力が大きいために他領域に比べて巻き上げが起りやすく、数値計算結果では底泥堆積があまり見られない領域であった。

そこで、現地調査結果である図-5の羽田沖を見ると、ここでも同様にあまり浮泥の堆積が見られない。次に、隅田川河口においても現地調査結果と数値計算結果共に底泥堆積量が少ない領域が見られるのが分かる。これは、図-7の平均底面せん断応力分布図および図-9の底層における残差流ベクトル図より、この領域において流速が大きく、それに伴い底面せん断応力も増大し、底面付近で巻き上げが起きやすくなっているためと考えられる。

以上より、現地調査結果と数値計算結果との間には一

部浮泥堆積分布の一致しない領域も見られるものの、一般的な傾向はある程度説明が可能であるといえる。

5. おわりに

本研究により、以下の結論が得られた。

- ・現地調査により、東京港中央防波堤や多摩川河口における著しい堆積や隅田川河口及び羽田沖における堆積層厚の小さい領域などの局所的な領域も含めて、東京湾奥部における浮泥の堆積状況を明らかにした。
- ・現地調査結果と数値計算結果との比較から、互いに幾つかの相関が見られ、それらの局所的な堆積性状は底面せん断応力の分布によってある程度説明可能なことが示唆された。

一方、東京港内の浮泥堆積層厚には浚渫等の影響もあり、実際の現地の状況をどれだけ読み取ることが出来たか不確かな面もある。また数値計算においても浮泥が定着泥に至る過程を再現していない等、今後改良していくべき点が多く残されているが、これらは今後の課題としたい。

謝辞：現地調査の実施にあたっては、日本ミクニヤ(株)にご協力いただいた。本研究は2003～2006年度日本学術振興会科学研究費基盤研究(B)(2)一般(代表：横浜国立大学佐々木助教授)の補助によるものである。

参考文献

- 稲垣 聡・Stephen G. Monismith・Jeffery R. Koseff・Jeremy D. Bricker (2001): 南サンフランシスコ湾における底泥輸送解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 641-645.
- 五明美智男・矢内栄二・大槻 忠 (1990): 東京湾底泥の堆積特性について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 848-852.
- 佐々木 淳・石井雅樹・磯部雅彦 (1998): 内湾における高解像流動モデルの開発と東京湾における長期再現計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 406-410.
- 鶴谷広一・村上和男・入江 功 (1989): 多層レベルモデルによる航路埋没の予測計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 379-383.
- 中川康之 (2002): 東京湾奥部での底泥巻き上げとその粒度分布特性について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1046-1050.
- 細川恭史・田中則男・久高将信・佐藤勝弘 (1986): トレンチ内に堆積する浮泥量の予測手法と現地への適用例, 第33回, 海岸工学講演会論文集, pp. 312-316.
- 松本英二 (1983): 東京湾の底質環境, 地球の科学 17, pp. 27-32.
- Kim, Tae In and Suk Woo Lee (2003): Sedimentation processes induced by large developments in the KEUM river estuary, Workshop on Hydro-environmental Impacts of Large Coastal Developments 2003, pp. 147-169.