

東京湾奥中央部における軟泥の形成要因に関する一考察

On the Causes of the Formation of Soft Mud at the Head of Tokyo Bay

佐々木淳¹・佐藤雄太²・Thamnoon Rasmeemasmuang³・柴山知也⁴

Jun SASAKI, Yuta SATO, Thamnoon RASMEEMASMUANG and Tomoya SHIBAYAMA

Accumulation of soft mud (muck) at the head of Tokyo Bay is one of the major causes of deterioration of water quality and ecosystems. We conducted field observation of sediment quality and numerical simulation of grain size distribution to reveal the mechanism of its accumulation, which will provide a suggestion for the future restoration of its estuarine environment. We revealed the detailed variation in sediment quality and one of the causes is attributed to the lower decomposition rate of organic matter due to the long-term exposure to hypoxic waters along with the higher rate of accumulation of very fine particles reflecting hydrodynamic properties.

1. はじめに

富栄養化した内湾の環境再生を進める際は、費用対効果の検討に基づく考える各施策の評価が不可欠であり、中でも施策の効果を予測する技術の確立と環境再生の定量的な目標設定が最重要の課題である。近年、内湾の流動場や水質場についてはある程度の推算が可能となりつつあるが、長期的な視点が必要な内湾の環境再生を考える上では、モデルへの組み込みを念頭においた底質系の十分な理解が不可欠である（例えば、山本ら，2006）。特に貧酸素化や栄養塩の溶出と関わりの深い有機物に富む軟泥（ヘドロ）の堆積は環境劣化の負の連鎖を引き起こし、環境再生を困難なものとする元凶と考えられている。

ところで東京湾奥部はほぼ全域が軟泥の堆積域と考えられるが、中でも湾奥中央部では含水比や有機物含量がとりわけ高い底質域が形成されている（岡田・古川，2005）。全湾的な水環境の改善を図るには、このような軟泥域の質の改善と規模の縮小が不可欠であると考えられ、必要な施策を提案していくためにも底質系の長期的なプロセスの理解に基づく長期予測モデルの開発が必要である。そこで本研究では軟泥の堆積するこの湾奥中央部を対象とし、現地調査と底質粒度に関する数値実験によって、このような軟泥域が形成される要因について検討する。また、長期的な環境再生を目指す上での適切な指針について考察することを目的とする。

2. 底質調査

(1) 調査方法

東京湾奥中央部に存在する高含水比の底質域とその周辺域を対象として、岡田・古川（2005）による含水比分布図を参考に、アクアライン以北の図-1に示す53調査点において水質調査および底質の表層採泥を実施した。各調査点では緯度経度をGPSに記録し、音響による水深測定を行った。水質調査にはアレック電子（株）の多項目水質計 AAQ1186 を用いた。採泥には離合社のエクマンバージ採泥器を用いたが、表層のコアのなるべく乱れの少ない試料を採取するため、採泥器内部に直径40 mm、長さ130 mmのアクリルパイプを固定器具を用いて取り付けできるようにした。採泥試料は携帯用保冷庫に保管し、調査終了後直ちに横浜国立大学水理実験棟まで持ち帰った。

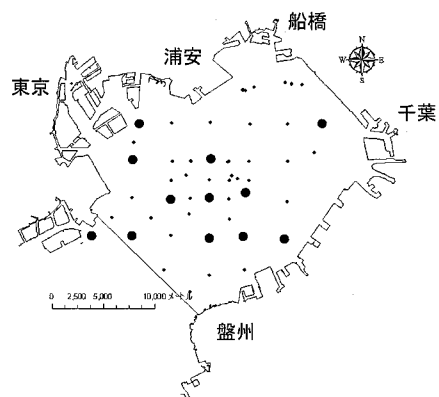


図-1 東京湾奥部の採泥調査点。太丸点では表層底泥の有機物分析も併せて実施。

1 正会員 博(工) 横浜国立大学准教授 大学院工学研究院システム部の創生部門
2 (株)電通東日本
3 博(工) Burapha 大学講師 工学部土木工学科
4 フェロー 工博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院システム部の創生部門

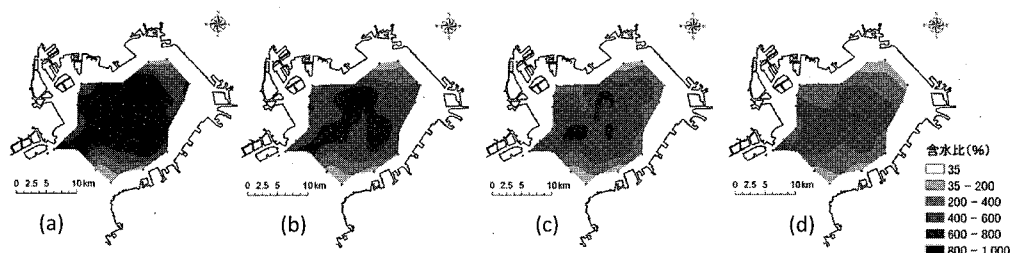


図-2 底質含水比の平面分布。(a) 0～1cm 層, (b) 1～3cm 層, (c) 3～6cm 層, (d) 6cm 層以深

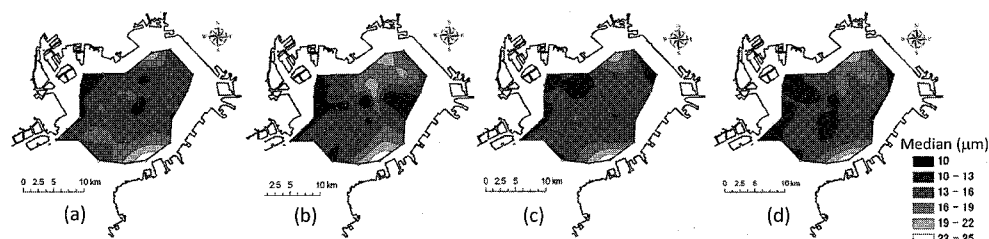


図-3 底質中央粒径の平面分布。(a) 0～1cm 層, (b) 1～3cm 層, (c) 3～6cm 層, (d) 6cm 層以深

(2) 底質分析

実験室に持ち帰った底質は直ちに下向きに下層から順に押しだし、表層から順に 0～1 cm, 1～3 cm, 3～6 cm, および 6 cm 以深の 4 つに分割されるようスライスした。分割された試料はそれぞれ含水比試験を行い、試験後の乾燥試料を用いて粒度分析を行った。粒度分析は島津製作所(株)のレーザー回折式粒度分析装置 SALD3100 を用い、各試料 3 回ずつの測定を行った。残った乾燥試料の内、表層試料から 12 測点分の代表的なサンプルを抽出し(図-1 の太丸の測点)、総合環境分析(株)に依頼して、全有機炭素含量、全有機窒素含量、炭素および窒素の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) 分析を行った。

(3) 調査結果

底質の各層における含水比の平面分布を図-2 に示す。表層の含水比は 800 % を超える極めて高い値を示す領域が湾奥中央部に広がっている様子が分かる。細かく見ると湾奥の中心部はその周辺に比べてやや含水比が低くなっているが、現時点では湾奥中央部における含水比の微細分布の原因はサンプリングや計測に伴う誤差を含め不明である。また、湾奥中央から沿岸に近づくに従って含水比が低くなる傾向があり、盤州や浦安沖で顕著である。さらに、東京港外縁においても含水比がやや低くなっている。一方、含水比の鉛直分布に着目すると、表層の含水比が高い測点ほど含水比の鉛直勾配が大きく、下層に行くほど含水比が下がると同時に平面的な差異が縮小する傾向が見られる。6 cm 以深の底質含水比の平面分布

を見ると、湾奥中央部から東京港外縁にかけて、ほぼ同様の含水比を示す様子が見て取れる。

次に底質各層における中央粒径の平面分布を図-3 に示す。盤州の沖合および浦安沖において中央粒径が大きくなっており、相対的に低い含水比を示している、図-2 の結果と整合している。湾奥中央部における中央粒径は $10\mu\text{m}$ 強の比較的一様で小さな値を取っており、東京港外縁にかけても湾奥中央部とほぼ同様の傾向となっている。また、鉛直分布も特段の傾向はなく、多少のばらつきは見られるものの、ほぼ同様の底質粒径を持つ粒子が一樣に堆積していると思えるのが妥当である。

図-4 に表層底質中の全有機炭素含量の平面分布を示す。図-2 と比較すると全有機炭素含量と含水比には正の相関があることがわかる。粒径分布が湾奥中央部全体で比較的一様であることを考えると、含水比の著しく高い軟泥域が形成されるメカニズムは高い有機物含量に密接に関わっているものと思われる。

3. 数値モデルの概要

湾奥中央部の有機物含量と含水比が共に著しく高い軟泥域の形成要因として、堆積速度や粒径分布との関係を議論するため、底質粒径分布の再現を志向した数値モデルを導入する。本モデルは Thamnoon・佐々木(2007)と基本的には同様のものであり、詳細は当該文献に譲るが、モデルの概要について簡単にまとめておく。

本モデルは図-5 に示す通り、流動モデル、波浪推算モデル、底面せん断応力算定モデル、底質移流拡散モデ

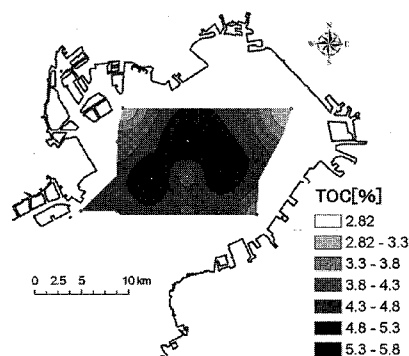


図-4 表層底質中の全有機炭素量の分布図

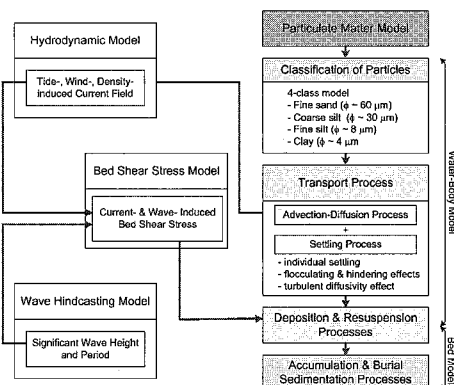


図-5 数値モデルの枠組み

ル、および底質堆積モデルから構成される。底質は細砂、粗いシルト、細かいシルト、粘土の4種類を採用し、細砂は非粘着性の粒子、その他は粘着性粒子としてモデル化した。底質粒子は基本的には移流拡散方程式に従うが、同時に沈降速度を持つものとし、その定式化にあたっては、非粘着性粒子はストークスの法則に従うとし、粘着性粒子に関してはフロック形成や干渉沈降を表現するため濃度依存型を採用した。また、乱流エネルギーの強さに応じて沈降が抑制される効果を導入している。水底面境界では標準的な波・流れによるせん断応力と堆積および浸食に関わる限界せん断応力の大小に応じて沈降、中立、および再浮上の判定を底質別に行い、堆積と再懸濁を繰り返しながら底質が形成されていく過程を時々刻々表現できるようになっている。

本モデルを水平 400 m の矩形格子、鉛直 20 層のシグマ座標格子に適用し、1996 年の気象、湾口境界、および河川流量に関する時系列データを用いて 2 年間計算し、底質粒径分布や底質の堆積速度を算定した。

4. 考 察

東京湾の湾奥中央部には含水比の顕著に高い軟泥の底質域が存在することを示したが、これらはいわゆるヘドロであり、既に見たように有機物含量の高い汚濁した底質となっている。これらの底質からのリン等の溶出によって富栄養化が強められたり、高い酸素消費速度によって貧酸素化を助長する等、内湾スケールの水環境に多大な影響を与えているものと推察される。そこでここではこの軟泥の特徴を明らかにし、その形成要因について物理面と生物・化学的な面から考察を加え、東京湾の水環境の再生を考える上で、この軟泥をどのようにとらえていくべきかについて論じる。

(1) 物理面からみた軟泥の形成要因

図-2 に示した、湾奥中央の高含水比の軟泥域を水深分布と比較すると、軟泥域は湾奥のすり鉢状に深くなっ

ている中央部に向かって形成されているが、深いほど含水比が高いといった相関関係は見られない。また、既述のように湾奥の広い範囲で底質中央粒径は比較的一様であり (図-3 参照)、図-6 から含水比と中央粒径の間にはほとんど相関が見られない。数値計算による中央粒径分布の結果からも (図-7)、湾奥中央部から湾奥にかけて細かい粒径の底質が比較的一様に堆積する様子が現れており、湾奥中央部で粒径が特に細くなるといった傾向は認められなかった。

次に底質の高い堆積速度が高含水比を維持している可能性について検討するため、松本 (1983)、文部省 (1986) をベースとして、東京湾奥部の底質堆積速度図を作成した (図-8)。これによれば底質の堆積速度は東京湾外縁が高く、沖合に向かって低下する傾向が顕著である。これは東京湾の湾奥西岸側に主要な河川の河口が存在することによる影響であると考えられる。また、対象としている湾奥中央部における堆積速度は比較的一様な値となっている。図-9 に示す、数値計算による堆積速度分布からも、堆積速度が東京港内で高い値を取り、沖に向かって低下していく傾向や、湾奥中央部で堆積速度が比較的一様となっている様子が見て取れる。湾奥中央部は湾奥の風成循環による環流等の影響で中央部の収束域に細粒分が堆積しやすいという可能性が考えられるが、底質構成材料については必ずしもそのような傾向のないことを示唆している。

底質各層ごとの含水比分布について見ると、定性的な平面分布の傾向は層間であまり差がなく、深層では含水比が全体的に下がる傾向が見られた (図-2)。実際にさわった感触では下層の底質ほど粘着性が高く、表層から数 cm で底質の性状が表層と大きく異なっていることを確認した。これについては圧密やセメンテーション等による要因を今後検討していく予定である。

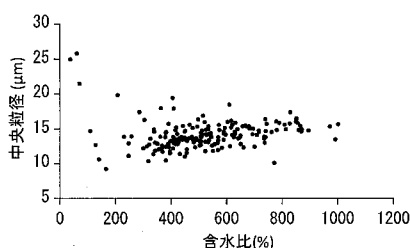


図-6 底質中央粒径と含水比の相関

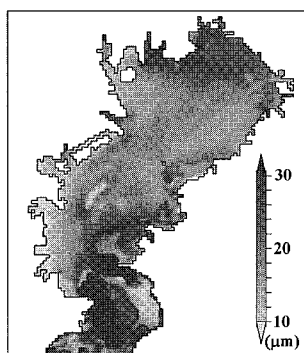


図-7 底質粒径分布の計算結果

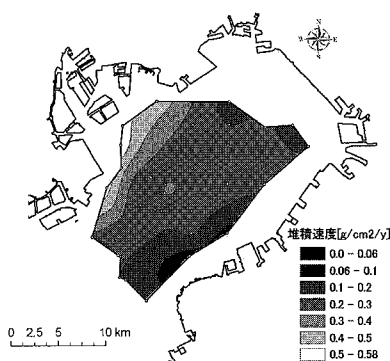


図-8 底質堆積速度の平面分布。文部省(1986)を基に作成。

(2) 生物化学面から見た軟泥の形成要因

既に見たように含水比と有機物含量には明確な正の相関があり、高含水比の湾奥中央底質は高い有機物含量を示している(図-4)。このことから高含水比の表層軟泥の形成には高い有機物含量が関係しているものと推察される。そこでまず、この有機物の起源について見るため、炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}$ の平面分布との比較を行った(図-10)。 $\delta^{13}\text{C}$ は一次生産者間での値の変化は大きい、食物網を通じて上位の栄養段階に移動する際にはあまり変化しないことが知られている。そのため、 $\delta^{13}\text{C}$ は有機物の一次生産者を推定する上で有効な指標と考えられている(DeNiro・Epstein, 1978; 和田, 1988)。中緯度における海産植物プランクトンの $\delta^{13}\text{C}$ は -20‰ 程度

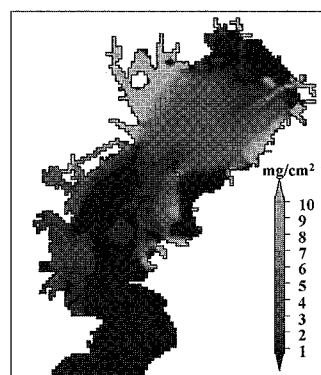


図-9 底質堆積速度平面分布の計算結果

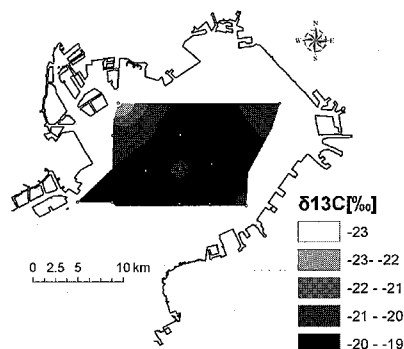
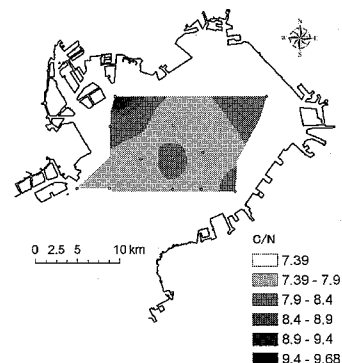
図-10 表層底質の $\delta^{13}\text{C}$ の平面分布

図-11 表層底質中 C/N の平面分布調査結果

の値をとるのに対し、陸起源の有機物の $\delta^{13}\text{C}$ は -27‰ 程度の値を取ることが知られている。図-10 より、有機物含量の高い湾奥中央部の軟泥の $\delta^{13}\text{C}$ が -20‰ 程度の値となっていることから、これらの有機物の主要な起源は湾内で生産された植物プランクトンであり、陸起源有機物の寄与は小さいものと推察された。一方、東京港外縁の $\delta^{13}\text{C}$ は -23‰ 程度となっており、陸起源有機物の影響が現れている結果であると解釈できる。

以上により、湾奥中央の軟泥は内部生産による有機物から成り、それを相対的に多量に含んでいることがわかった。ところでこのような炭素含量の高い底質域が形成されるメカニズムについては、一つは湾奥中央域における有機物の堆積速度が大きいということが考えられる。先の底質堆積速度の検討では、湾奥中央域が顕著に堆積速度の高い底質域であるという証拠は得られなかったが、有機物に関しては異なる振る舞いをする可能性がある。この点に関しては今後の検討課題とし、ここでは、有機物の堆積速度が湾奥全体で比較的一様だとしても、有機物含量に空間分布が生じる可能性について検討する。

図-11 に表層底質中の CN 比の平面分布調査結果を示す。一般に CN 比はベントスの介在を含め、有機物分解が進行するにつれて高い値をとることが知られている。すなわち新しく堆積した新鮮で分解の進んでいない有機物の CN 比は小さく、分解が進んだ有機物の場合は大きくなる傾向がある。同図を見ると、湾奥中央の有機炭素含量の大きい底質域では CN 比が相対的に小さい値となっており、分解のあまり進んでいない有機物が堆積しているものと推察される。有機物分解はバクテリアや底生動物による呼吸によってなされるが、湾奥中央域は最も長時間にわたり貧酸素水に曝露される底質域であるといえる。その結果、バクテリアは有機物分解速度の小さい嫌気性のものが支配的となり、底生動物に至っては貧酸素水塊のため長期間無生物状態となり、有機物分解が期待できない。実際、初冬に行った本調査時においても、東京港沖を含む湾奥沿岸ではゴカイ類等の底生動物が確認されたが、湾奥中央部においては全く見られず、夏場と同様な強い硫化水素臭が確認された。

以上のように湾奥中央の軟泥域は周年の貧酸素水塊の曝露状態に強く影響を受けていると考えられ、その有機物含量や CN 比等の平面分布は湾奥の水環境のマクロな指標として有効であると考えられる。水環境の再生を進めていく上で、これらはその効果を量る上で有用な指標と考えられる。

5. 結 論

東京湾奥中央部の高含水比を有する軟泥は同程度の中央粒径を持つその周囲の底質に比べて、有機物含量が高

く、CN 比が小さいという特徴が見られた。湾奥中央部はその環境条件から最も長期間貧酸素水にさらされていると考えられ、その結果、冬場になっても好気性微生物や底生動物の回復が遅れ、結果として有機物分解が著しく抑制され、このことが高い有機物含量と高含水比の底質を形成する要因となっているものと推察された。同じ湾奥部でもこの周囲では初冬になると底生動物の回復が見られ、その結果相対的には有機物分解が速く進行することが示唆された。以上のことから湾スケールの環境再生を考える上での目標設定の一つとして、湾奥中央部に存在する有機物含量の高い底質域の縮減が有効であるといえる。

謝辞：備船に際しては横浜市根岸の八幡橋鴨下丸にご協力いただいた。現地調査に際しては横浜国立大学水環境研究室の吉本侑矢、川本慎哉の両氏をはじめとする学生諸氏の協力を得た。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、および国土交通省関東地方整備局委託研究費の補助によるものである。

参 考 文 献

- 岡田知也・古川恵太(2005): 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の作成とベントス生息状況, 海岸工学論文集, Vol. 52, pp. 1431-1435.
- 松本英二(1983): 東京湾の底質環境, 地球化学, 17, pp. 27-32.
- 文部省(1986): 陸起源物質の沿岸海域への移行過程の評価Ⅱ, 「環境科学」研究報告集, B-284-R14-3, pp.74-89.
- 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・宮坂 仁・大串浩一郎・吉野健児・平川隆一(2006): 有明海奥部における表層底質の分布特性と底質環境の形成要因, 海岸工学論文集, Vol. 53, pp. 961-965.
- 和田英太郎(1988): 化学構造よりみた食物連鎖-窒素・炭素安定同位体分別を中心として-, 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー, 東海大学出版会, pp. 77-84.
- Thamnoon Rasmeemasuang・佐々木淳(2007): 内湾における粒径を考慮した底質堆積モデルの開発, 海洋開発論文集, Vol. 23, pp. 1141-1146.
- DeNiro, M. J. and S. Epstein(1978): Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals, Geochim. Cosmochim. Acta, Vol. 42, pp. 495-506.