

# 東京湾底泥の堆積特性について

五明美智男\*・矢内栄二\*\*・大槻 忠\*\*\*

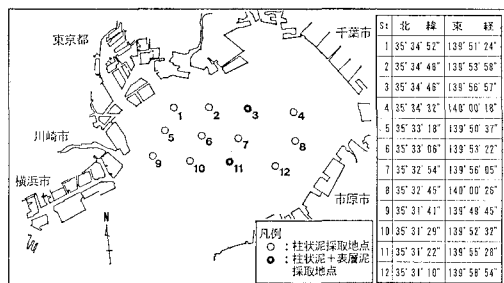
## 1. はじめに

我が国の内湾浅海域に堆積する底泥は、陸域からの工業・生活排水等の流入に伴う栄養塩類を含むとともに、海域の富栄養化に起因する多量の有機物等を含んでいる。こうした底泥は、バクテリア等による有機物の分解過程で底層の溶存酸素を消費し、また無機化された栄養塩類を再び水中へと溶出するため、海域の水質悪化の大きな原因となる。その上、成層の発達により酸素供給が減少する夏期には、底層水の貧酸素化もしくは無酸素化を招き、底生動物・付着動物などにも大きな影響を与えることが知られている。たとえば、東京湾の湾奥に形成される無生物域の発生は、こうした溶存酸素量の消長と一致することが報告されており、青潮として知られる無酸素底層水の湧昇接岸によりムラサキガイ・アサリなどの大量死が生じている(風呂田, 1988)。

このような底泥による水域の環境問題に対処するためには、底泥の汚染を低減させることが重要である。特に、富栄養化した水質の改善と生物相の回復を図るには、底泥からの栄養塩の溶出を低減させ魚貝類の産卵・生息場を提供できるような対策が望ましい。その一方法として、近年覆砂工法が各地で行われているが、設計・施工に際しての知見については十分とは言いがたいのが現状である。実施にあたっては、①汚染の実態、②底泥の物理・化学的な特性、③底泥の力学的な特性、④覆砂の効果とその持続性などについての十分な検討が必要である。本報告は、汚染底泥の堆積している代表的な東京湾において、原位置試験・柱状採泥等の現地調査と室内沈降試験を実施し、東京湾底泥の分布・汚染状況と強度特性について検討したものである。

## 2. 現地調査

調査は、海象状態が静穏であった1986年1月11日～1月13日の3日間にかけて行った。調査地点は、図一1に示すような東京湾の湾奥部から湾中央部にかけての12



図一1 調査地点

地点であり、ロランCにより座標値を測定した。現地における調査実施内容は、

- ① レッド・音響測深器による底泥厚の測定 (全地点)
- ② アクリルパイプによる柱状採泥 (全地点)
- ③ エクマンバーجによる表層泥の採取 (St. 3, St. 11)

- ④ 沈下板による支持力試験 (全地点)

である。また、試験採取後の室内試験は、

- ⑤ 土粒子比重・粒度組成・含水比などの土質試験
- ⑥ 全リン・全窒素・COD・強熱減量等の有機物分析
- ⑦ ベーン試験・粘度試験などの力学的特性試験
- ⑧ 採取泥を用いた沈降・圧密試験

について実施した。

## 3. 底泥の分布と汚染状況

### (1) 底泥の分布と厚さについて

底泥の厚さの測定は、底泥の定義のあいまいさと測深技術との関係で、大変むずかしいものとなる。たとえば Mehtaら(1989)は、底泥面における水深として、流れなどに対する流送抵抗や船舶の航行上問題となる parameter-defined depth とレッド測深、音響測深などにより得られる technique-defined depth を定義し、両者には物理的な関連性がないことや後者から前者を知ることが困難であることを指摘している。

今回の調査では、音響測深法 (400 kHz, 30 kHz) とレッド測深法 (円盤レッド, 重錘レッド) を用い、底泥が存在する場での水深測定を試験的に行った。図一2 は、

\* 正会員 水修 東亜建設工業(株)技術研究所

\*\* 正会員 工修 東亜建設工業(株)技術本部設計部

\*\*\* 農博 東亜建設工業(株)技術本部技術開発部

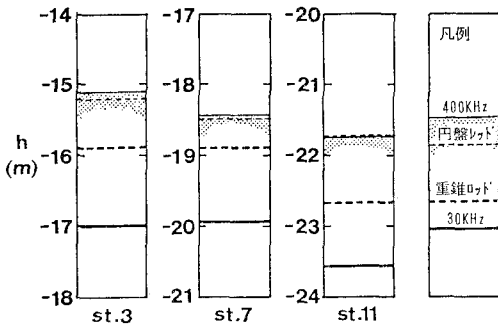


図-2 底泥堆積域での水深測定例

St. 3, St. 7, St. 11 での5回の測定平均による水深を示したものである。この図からわかるように、400 kHz の音響測深による水深と円盤レッド・重錘レッドとの水深差は、それぞれ 0~10 cm, 40~90 cm 程度である。また、重錘レッドと 30 kHz の音響測深による水深との差は、90 cm~1.1 m であった。

このような水深データが、堆積泥のどの深さを示しているかを検討することは、汚染された底泥の厚さや量を知る上で重要なことである。嘉門 (1978) によれば、400 kHz の音響測深による水深は底泥の浮遊層の上限を、またレッドによる水深は沈降・圧密層中でのレッドに対する支持力発生領域を示していると考えられる。以上の点から、堆積泥の厚さの目安として底泥表面から重錘レッド支持層までの深さとして定義した場合、その厚さは 40 cm~1 m 程度と推定される。

## (2) 底泥の汚染状況

St. 3 および St. 11 において採取した柱状試料およびエクマンバージによる攪乱試料を用い、泥色・泥臭の観察および有機物の分析を行った。

採取した底泥は、有機物の嫌気分解により発生する硫化水素臭が非常に強く、還元状態にある硫化物の存在のため黒色を示すものがほとんどであった (栗原, 1988)。底泥表面において測定した酸化還元電位も、St. 3 で -310 mV, St. 11 で -340 mV の高い値を示した。また、強熱減量・COD・全リン・全窒素の鉛直分布は、

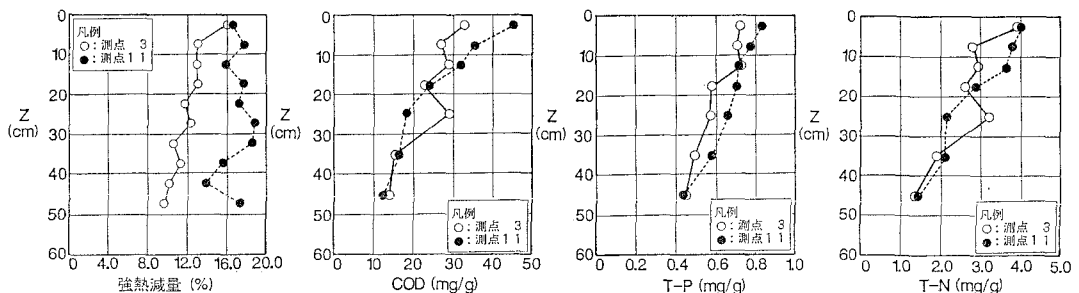


図-3 強熱減量, COD, 全リン, 全窒素の鉛直分布

図-3 に示すように泥深の増加とともに減少し、COD 値は表層で 40 mg/g 前後の大きな値を示していた。

## 4. 底泥の物理学的・力学的特性

### (1) 底泥の土質性状と強度の鉛直分布

各測点における透明なアクリルパイプ ( $\phi 20$  cm,  $L=1$  m) を用いた柱状採泥は、潜水土により 図-4 に示すような要領で実施した。試料は、底泥の物理試験・ベーン試験用に各測点につき1本とし、さらに、3. で述べた有機物分析用に St. 3 と St. 11 でそれぞれ1本を採取し、計 14 本とした。船上に回収した試料は、あらかじめ用意した受け台に固定し、表層の乱れがおさまった後に表層から底層までの泥色の観察を行った。また、調査終了後は実験室内において、有機物分析用の泥深 5 cm 毎の試料採取と表層から 5 cm 毎のベーン試験を行った。ベーン試験後の試料は、粒度組成・土粒子比重・含水比などの試験に用いた。

表-1 は、St. 3 および St. 11 における土質性状の鉛直分布を示したものである。土粒子比重は 2.60 前後の値を示し、また粒度組成については砂分が数 % でほとんどが粘土とシルトであった。粘土とシルトの比率は泥深により異なり、表層では粘土分が底層ではシルト分が多少多くなるようである。こうした傾向は、各測点において共通に見られるものであった。

図-5 は、各測点における含水比とベーン試験から得られるせん断強度の鉛直分布を示したものである。表層部分の含水比は、全測点において 300% を超える高含水

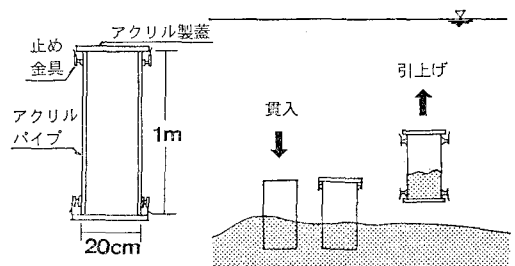


図-4 柱状採泥要領

比状態であり、特に St. 6, 7 では 500% 前後であった。含水比の鉛直分布には、泥深が増すにつれて圧密の影響が見られ、下層の含水比は 150~275% 程度まで減少している。底泥のせん断強度は、含水比の低下とともに大きくなり、表層で 2.0~5.0 g/cm<sup>2</sup>、底層で 10.0~27.0 g/cm<sup>2</sup> となっている。

泥色の目視観察によると、表層 5~10 cm には黄褐色もしくは灰・暗オリーブ色の層があり、その下に黒色、灰色の層が存在していた。表層には、クモヒトデなどの底生動物やシズクガイの殻が確認され、また St. 5 などでは、珪藻プランクトンの一種であるスケルトネマなどの遺骸による褐色系の堆積物が確認された。

## (2) 支持力特性

前述したように、底泥の表層付近のせん断強度は非常

表-1 土質性状の鉛直分布 (St. 3)

(a) St. 3

| 深度<br>(cm) | 含水比<br>W<br>(%) | 比重<br>s | 粒度組成     |            |           | コンシステンシー指数  |             |      |
|------------|-----------------|---------|----------|------------|-----------|-------------|-------------|------|
|            |                 |         | 砂<br>(%) | シルト<br>(%) | 粘土<br>(%) | 液性限界<br>(%) | 塑性限界<br>(%) | 塑性指数 |
| 0~5        | 320             | 2.616   | 1        | 35         | 64        | 194         | 66          | 128  |
| ~10        | 310             | 2.636   | 0        | 36         | 64        | 191         | 65          | 126  |
| ~15        | 259             | 2.618   | 1        | 41         | 58        | 168         | 57          | 110  |
| ~20        | 231             | 2.625   | 1        | 35         | 64        | 157         | 53          | 104  |
| ~25        | 222             | 2.646   | 1        | 47         | 54        | 150         | 53          | 97   |
| ~30        | 204             | 2.671   | 1        | 43         | 56        | 145         | 53          | 92   |
| ~35        | 185             | 2.679   | 3        | 43         | 54        | 142         | 52          | 89   |
| ~40        | 160             | 2.676   | 3        | 40         | 57        | 127         | 48          | 79   |
| ~45        | 160             | 2.692   | 1        | 45         | 54        | 128         | 47          | 81   |
| ~50        | 159             | 2.684   | 1        | 41         | 58        | 132         | 53          | 79   |
| ~55        | —               | —       | —        | —          | —         | —           | —           | —    |

(b) St. 11

| 深度<br>(cm) | 含水比<br>W<br>(%) | 比重<br>s | 粒度組成     |            |           | コンシステンシー指数  |             |      |
|------------|-----------------|---------|----------|------------|-----------|-------------|-------------|------|
|            |                 |         | 砂<br>(%) | シルト<br>(%) | 粘土<br>(%) | 液性限界<br>(%) | 塑性限界<br>(%) | 塑性指数 |
| 0~5        | 415             | 2.602   | 2        | 48         | 50        | 218         | 73          | 145  |
| ~10        | 349             | 2.597   | 3        | 47         | 50        | 215         | 71          | 144  |
| ~15        | 364             | 2.561   | 2        | 40         | 58        | 234         | 73          | 161  |
| ~20        | 393             | 2.581   | 3        | 41         | 56        | 239         | 71          | 168  |
| ~25        | 332             | 2.615   | 4        | 38         | 58        | 236         | 78          | 158  |
| ~30        | 324             | 2.619   | 2        | 42         | 56        | 224         | 77          | 147  |
| ~35        | 285             | 2.622   | 3        | 48         | 49        | 206         | 70          | 136  |
| ~40        | 238             | 2.620   | 3        | 42         | 55        | 188         | 64          | 124  |
| ~45        | 235             | 2.636   | 3        | 46         | 51        | 174         | 59          | 115  |
| ~50        | 235             | 2.625   | 2        | 51         | 47        | 176         | 58          | 118  |
| ~55        | —               | —       | —        | —          | —         | —           | —           | —    |

に小さく、覆砂などを行う場合にはその支持力が問題となる。本調査では、柱状採泥に平行し沈下板による水中での支持力試験を行った。沈下板は水中重量 27 g/cm<sup>2</sup> のものを用い、図-6 に示すような要領で行った。

表-2 は、沈下板の沈下量  $h$  と図-5 から求めた支持層のせん断強度  $\tau$  の値を示したものである。沈下量および支持点でのせん断強度にはかなりのバラツキが見られるが、原位置での調査の精度などが影響しているものと思われる。試みに、(沈下板重量  $w_0$ /せん断強度  $\tau$ ) として定義される支持力係数を算定したところ、3.0~10.0 の範囲となり平均で 4.5 となった。従来、軟弱地盤上における盛土の急速施工においては、限界盛土高の概略値は次式により推定される (稲田, 1972)。

$$\gamma' H = 3.8 \sim 5.15 Cu \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $\gamma' H$ : 有効盛土厚さ,  $Cu$ : 土の粘着力である。今回の支持力試験で得られた係数の平均値は、(1) 式の係数値と一致することがわかった。しかしながら、せん断強度から底泥支持力を正確に推定するためには、計測精度の向上を図りより多くの測定データによる検討が必要である。

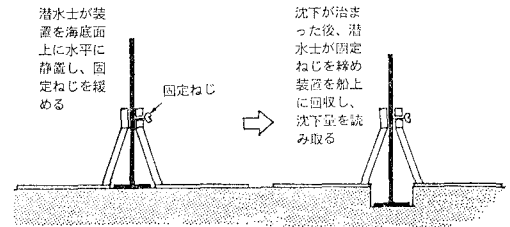


図-6 支持力試験

表-2 沈下量と支持力係数

| 測点 | 表面からの沈下量 $h$ (cm) | せん断強度 $\tau_{z=h}$ (g/cm <sup>2</sup> ) |
|----|-------------------|-----------------------------------------|
| 1  | 7.0               | 7.0                                     |
| 2  | 8.0               | 4.0                                     |
| 3  | 0.2               | —                                       |
| 4  | 19.0              | 9.0                                     |
| 5  | 9.0               | 2.5                                     |
| 6  | 8.0               | 4.0                                     |
| 7  | 13.0              | 4.0                                     |
| 8  | 12.0              | 5.0                                     |
| 9  | 14.0              | 7.0                                     |
| 10 | 16.0              | 8.0                                     |
| 11 | 10.0              | 8.0                                     |
| 12 | 7.0               | 7.0                                     |
| 平均 | 10.3              | 6.0                                     |

$$\text{支持力係数} = (27 \text{ g/cm}^2) / \tau_{z=h} = 4.5$$

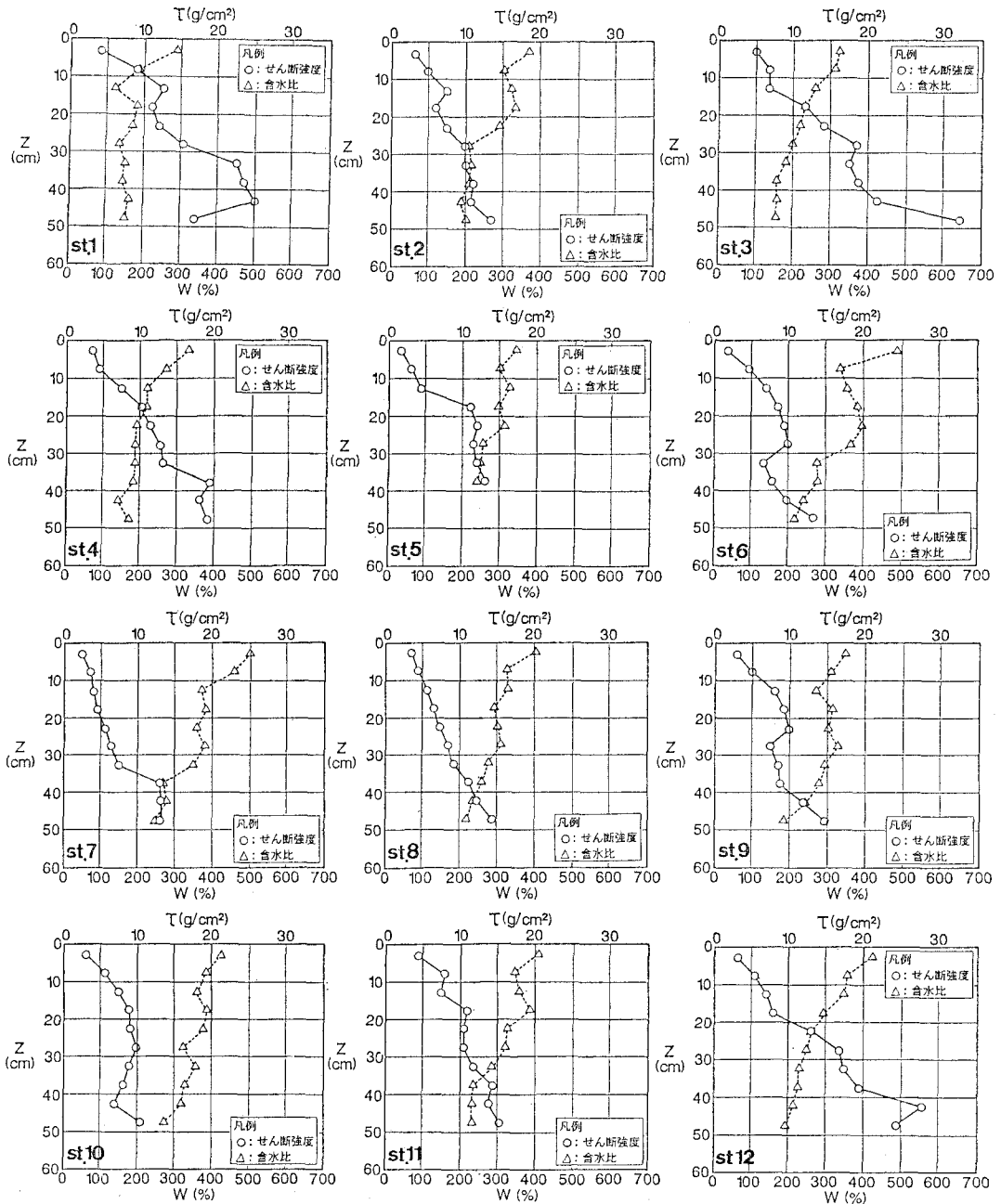


図-5 各水比とせん断強度の鉛直分布

## 5. 底泥の強度特性についての考察

4. において底泥の強度および支持力特性について検討した。ここでは、含水比が非常に高い底泥層の強度がどのようにして発現するか、現地調査結果と室内沈降圧密試験結果から検討する。

図-7 は、室内沈降・圧密試験に用いた沈降装置を示したものである。試料は、東京湾底泥を 2 mm ふりを通

し水洗いして使用した。実験条件を初期含水比 1000%、初期沈降高さ 80 cm として行い、界面の沈降曲線から判断される自重圧密の終了後に各層のせん断強度と含水比を測定した。図-8 は、せん断強度と含水比の鉛直分布を示したものであり、図-5 に示した含水比と同程度の値を示すものの、せん断強度は 1 オーダ低い値となっていることがわかる。

そこで、図-5 の St. 3, St. 11 および 図-8 の強度

について、(各泥深におけるせん断強度  $\tau$ )/(有効土被り圧  $\Sigma\gamma'H$ ) で定義される無次元せん断強度  $f$  の比較を行った(図-9)。この図からわかるように、現地で柱状に採泥した不攪乱試料では 3.0 前後の値を示すのに対し、室内試験では有効土被り圧の非常に小さい表層を除けば 0.25~0.30 程度の値を示している。正規圧密状態にある沖積粘土では、 $f$  が 0.25~0.33 (図中  $\square$ ) 程度の値となることが知られており、室内の自重圧密の結果と一致することがわかる。すなわち、現地における底泥では、沈降過程におけるフロックの形成や有機物の混入により凝集力の増加が強度発現の大きな原因となっており、その効果は有効土被り圧の 1.5 倍~4.5 倍程度となる。

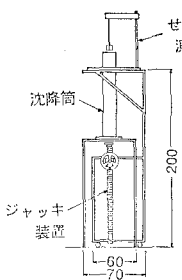


図-7 室内沈降装置

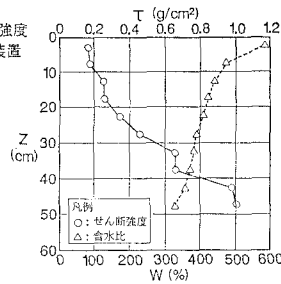


図-8 含水比・強度の分布

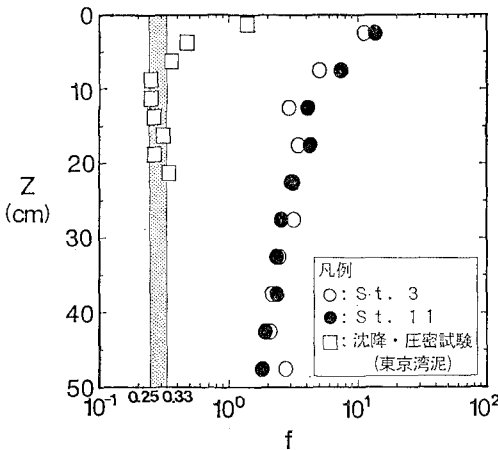
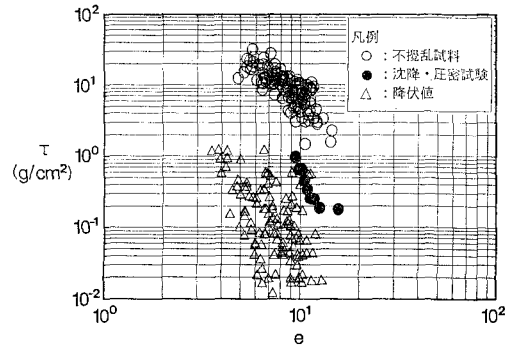
図-9 無次元せん断強度  $f$  の分布

図-10 底泥の強度と間隙比の関係

図-10 は、底泥の強度と間隙比の関係を表したもので、粘度計 (B8H 型、東京計器製) により測定した降伏値もあわせて示してある。降伏値はせん断強度の 1/100 程度で  $10^{-2}$ ~ $10^0$  g/cm<sup>2</sup> の値を示し、底泥の流動に対する抵抗力が非常に小さいことがわかる。また、外力作用時の抵抗力としては、ずり速度の発生に伴う粘性抵抗の増加が支配的になるものと考えられる。

## 6. おわりに

現地における試験および試料の採取・分析により、東京湾底泥の特性、特に有機物を多量に含む堆積泥の力学的な特性について考察した。東京湾底泥は、沈降過程におけるフロック形成および有機物の含有により、自重圧密による強度より 1 オーダー大きい強度をもつことが確認された。また、せん断強度から底泥の持つ平均的な支持力の推定が可能であることがわかった。

## 参考文献

- 稲田信穂 (1972): 軟弱地盤の調査から設計・施工まで, 鹿島出版会, 319 p.
- 嘉門雅史 (1978): ヘドロの工学的性質, 土と基礎, 26 巻, 1 号, pp. 19~24.
- 栗原康編 (1988): 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, 335 p.
- 風呂田利夫 (1988): 東京湾における貧酸素水の底生・付着動物に与える影響について, 沿岸海洋研究ノート, 第 25 巻, 第 2 号, pp. 104~113.
- Mehta, A. J., Hayter, E. J., Parker, W. R., Krone, R. B., and Teeter, A. M. (1989): Cohesive Sediment Transport. I: Process Description, J. Hydr. Div., ASCE, 115 (8), pp. 1076~1093.