

自由落下式底質強度計による堆積物分布の 簡易測定法の検討

EVALUATION OF A FREE-FALLING ACCELEROMETER SYSTEM FOR ASSESSMENT OF BOTTOM SEDIMENT PROPERTIES

中川康之¹・渡邊和重²・谷川晴一³・黒田祐一⁴

Yauyuki NAKAGAWA, Kazushige WATANABE, Harukazu TANIGAWA and Yuichi KURODA

¹ 正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

² 正会員 鳥取県 県土整備部 空港港湾課長 (〒680-8570 鳥取市東町1-220)

(前 国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 所長)

³ 正会員 国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 技術開発課長
(〒750-0066 山口県下関市東大和町2-29-1)

⁴ 国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 技術開発課 技術開発第一係長
(同上)

A technique is presented for rapid detection of sea bed sediment property using a free-falling type accelerometer. The measurement of deceleration during the penetration of the instrument into the sea bottom sediment allows for detection of the vertical profile of the sediment strength. Comparing output data from the system obtained in the field measurement with analyzed results of core-sampled sediments shows good detection of vertical structures of sediment properties, such as water content. There is high inverse correlation between the measured bearing strength and the water content especially for sediments with higher mud (silt and clay) content. Based on these measured data, this system appears to be utilized for spacial and temporally frequent monitoring of sedimentary environment.

Key Words : Free-falling probe, seabed bearing strength, muddy sediment, sediment properties

1. はじめに

砂や泥などの底質移動に伴う航路や泊地の埋没対策は、航行船舶の安全性の確保ならびに港湾施設の機能維持において極めて重要な課題である。効果的な埋没対策を講じるためには、航路等の埋没原因となる周辺海域からの底質の移動特性の把握と、数値シミュレーション等を用いた適切な予測が必要である。特に堆積物がシルトや粘土等の泥分により構成される場合、堆積物の移動特性は粒径以外にも鉱物組成や含水比などの様々な物性パラメータに支配される(例えば¹⁾)。たとえば、数値シミュレーションで必要となる堆積泥の侵食特性を示すパラメータの取得を目的として、現地底泥の移動限界特性に関する実験が数多く行われてきた(例えば^{2) 3)})。しかし、これら侵食特性を示すパラメータは、泥の供給過程や潮汐・波浪等の海象条件に依存し、個々の海域毎に異なる空間分布構造を有するため、埋没予測等の数値シミュレーションに際しては、対象とする海域毎

に底質分布特性を把握することが計算精度の向上にとって重要となる。

一方、泥分の堆積が進行しやすい海域では、同時に有機物等の汚濁物質の底質への蓄積も同時に生じやすい。このため、有明海・八代海再生特別措置法の施行にみられるような沿岸域環境の保全・再生が緊急の課題となる中で、底質の有機汚泥化や浮泥層形成などの底質環境の劣化に対する対策も急務となっている。この場合にも、やはり対象海域毎の底質分布特性の適切な把握が重要であることはいうまでもない。

これまで、海底堆積物の分布特性の把握には底質試料の採取およびその分析が一般的な手法として用いられてきており、堆積物の性状などその実態把握を行う上では欠かせない最も重要な調査手法となっている。しかしながら、堆積物の鉛直構造の把握も含めて空間的に密な情報を定期的に得る場合には、そのデータ収集にかかるコストは膨大なものになる。そこで、本研究では比較的簡易な方法により、海底堆積物特性に関する情報を効率的に収集する調査手法

の開発を目的として、自由落下式底質強度計を新たに導入した現地観測を実施し、同時に採取した底質試料の分析結果との比較を通じて、その計測結果の評価を行った。

2. 自由落下式底質強度計の概要

(1) 計測器の概要

沿岸域における簡便な底質強度の鉛直分測定の実施例として、干潟域における底生生物の生息環境特性の把握を目的とした、コーンペネトロメータによる現地測定がある⁴⁾⁵⁾。これらの測定は、主に乾出時の干潟域において上記装置を底質中に徐々に貫入し、貫入深さ毎の貫入抵抗力を記録することにより、底質強度の鉛直分布を求めるというものである。しかし、本研究で対象とするような潮下帯での海底堆積物に対しては、水中作業を必要とするなど上記測定法の適用は困難である。

そこで、本研究ではダイバー作業を伴うことなく、船上からのセンサーの昇降だけで底質強度情報を取得可能な自由落下式底質強度計⁶⁾(カナダ・JASCO Research 社製)の導入を試みた。本装置は、写真-1に示すように、加速度計、圧力計、およびデータ記録用メモリーを内蔵したセンサー本体(全長:47cm, 最大径:10cm, 空中重量:9.7kg)、本体下部に接続される底泥貫入用シャフト(全長:1mあるいは2m, 空中重量:シャフト長1mあたり3kg)、さらに引き上げ用ロープにより構成される。船上からセンサー一式を自由落下させ、底質中に貫入・静止を



写真-1 自由落下式底質強度計

数回繰り返した後、船上にセンサーを回収して内蔵メモリーに記録されたセンサー本体の加速度および圧力データをPCに転送する。加速度の測定範囲は0～10Gであり、測定分解能は0.0025G、また測定時間間隔は2kHzである。

(2) 測定原理

本装置は比較的柔らかい泥質を対象に開発されたものであり、センサーに接続されたシャフトが底泥中を貫入する際の衝撃力から底質強度を推定するものである。図-1は自由落下したセンサーの底泥貫入時における、センサー一式に作用する外力を模式的に示したものである。このときセンサー(質量: m)の鉛直方向の運動方程式(上向きを正とする)は次式で表される。

$$m\alpha = -mg + b + D + R + S \quad (1)$$

ここに、 α :加速度、 g :重力加速度、 b :センサー一式に働く浮力、 D :センサー一式に働く抵抗力、 R :センサーシャフト側面に働く堆積物のせん断抵抗、および S :底質からの反力である。

ここで、物体抵抗力(D)の算定に必要な落下速度は加速度と同時に測定する圧力(水深)の時間変化率から推定する。また堆積物への貫入はシャフト径(18mm)よりも大きなフット・リング(25～70mm)をシャフト先端部に取り付けて行うため、センサーシャフト側面に作用する底泥の粘着抵抗(R)は小

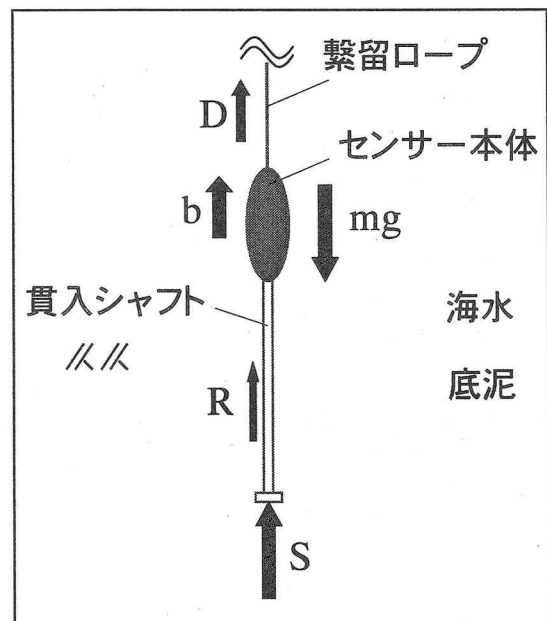


図-1 底泥貫入時のセンサーに作用する外力(m :センサー質量、 g :重力加速度、 b :浮力、 D :物体抗力、 R :シャフト表面に働く粘着抵抗力)

さく無視できるものとする。さらに、加速度の測定結果と上式を用いて求められる底質の反力 (S) は、フット・リングの面積を考慮して最終的には Bearing Strength (単位: Pa) に変換され底質の強度を表すことになる。

3. 観測結果

(1) 現地観測の概要

本研究では、有明海東岸に位置する熊本港周辺海域(図-2)における合計6地点を対象として、本測定装置による底質強度測定ならびに自重式コアサンプラーを用いた底質試料の採取を行った。各観測地点で採取したコアサンプルは、10cmピッチで層切りして粒度、含水比等の分析に供した。これら試料分析の結果(表-1にその概要を示す)によると、お

おね泥分を主体とした堆積物を対象としていることがわかる。ただし、St.4では含水比が100%以下、含泥率も80%以下となり比較的砂分の多い堆積物となっている。また、St.6においては、表層部より少し下層の堆積物が強固な状態となっており、ここで用いた自重式コアサンプラーで採取できたサンプル長は12cmのみと他地点に比べて極端に短くなっている。

(2) 底質強度の測定結果

a) 加速度の測定結果

底質強度(Bearing Strength)を求める際の基礎情報となる、センサーの底泥貫入時における加速度の記録結果の例を図-3に示す。同図の横軸は、上向きを正としたときのセンサー加速度が負から正に転じる点を基準として、センサー着底時の落下速度およ

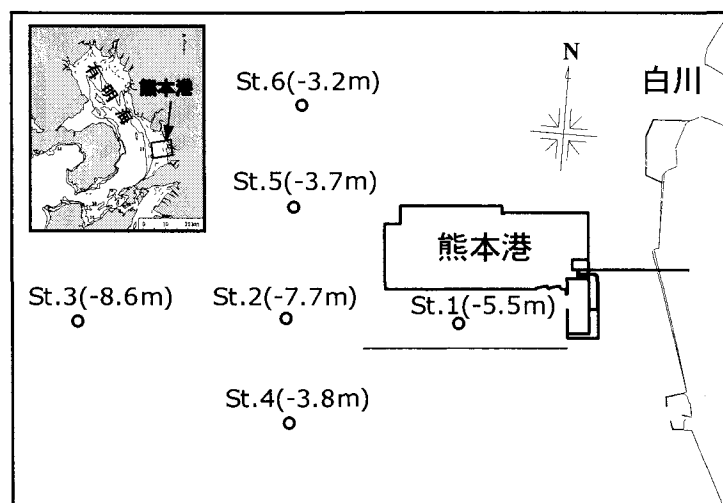


図-2 現地観測地点

表-1 各観測地点の表層堆積物の概要
(カッコ内はコア平均値)

測点	含水比; %	含泥率; %	採取コアの長さ; cm
St.1	155.1 (133.2)	94.2 (96.1)	56
St.2	222.6 (172.5)	96.4 (97.0)	40
St.3	179.8 (143.7)	97.4 (97.4)	73
St.4	83.4 (72.6)	75.2 (79.8)	51
St.5	159.6 (126.2)	95.3 (96.5)	89
St.6	110.3 (—)	81.5 (—)	12

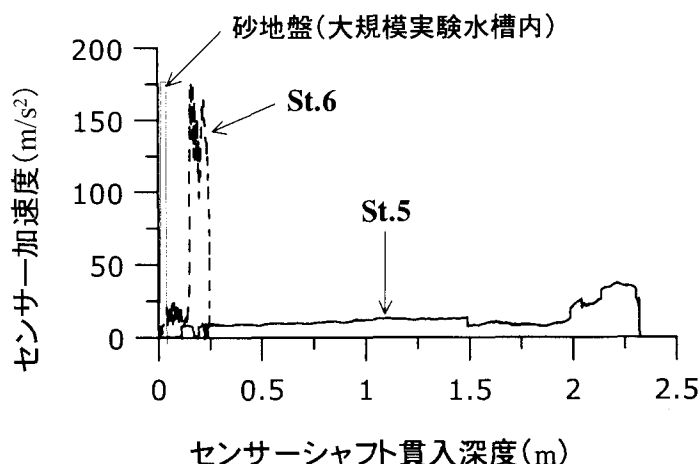


図-3 異なる地盤条件での加速度の記録

び加速度から算定されたセンサーシャフトの貫入深度を示している。例えばコアサンプル分析の結果によると、その全層にわたり軟泥が堆積していたSt. 5（コア長さ：89cm）における加速度の測定結果をみると、 10m/s^2 程度の値で深さ方向にほぼ一様に推移している。ただし、2mを過ぎたあたりでみられる一時的な加速度の増大は、今回の観測では全長2mのセンサーシャフトを用いていることから、センサー本体が底泥に貫入したことによる抵抗値の変化が示されているものと考えられる。一方、参考までに示した比較的固い砂地盤（大規模実験水槽内）での測定では、加速度のピーク値が本装置での測定限界を超える大きさにまで達し、シャフトの到達深度も極めて小さく、泥質での測定結果とは極めて異なる結果となっている。

さらに、コアサンプルの採取が表層の約10cmに限られたSt. 6における加速度記録をみると、表層10cm程度は軟泥が堆積するSt. 5と同程度の加速度となり、それより下層では砂地盤を対象とした結果と同様に 100m/s^2 を越える大きな加速度が生じており、堆積構造に対応した加速度の鉛直分布特性が示されている。このような落下式加速度計を用いて得られる加速度記録パターンの違いから、堆積物の差異を分類した例もみられる⁷⁾。

b) 底質強度（Bearing Strength）の測定結果

このように底質の堆積状況を反映した加速度の記録から、本装置では底質強度を示す指標としてさらにBearing Strengthを求める。図-2で示した熊本港周辺での各観測点におけるBearing Strengthの測定結果について、その鉛直分布を示したものが図-4である。鉛直方向に3mmピッチ程度で得られる生の記録に対して、同図では3cmごとの鉛直平均を施した結果を示してある。コアサンプルの結果からは、鉛

直方向にほぼ一様な軟泥の堆積がみられたSt. 1, 2, 3および5の結果をみると、どの地点も表層数10cm以内でBearing Strengthが 100kPa 程度にまで急激に上昇し、その後緩やかに $200\sim 300\text{kPa}$ まで上昇する分布となっている。また、これらの地点での表層10～20cmに注目すると、Bearing Strengthがかなり小さな値（St. 2では負の値をとるため図では非表示としている）を示し、泥質堆積物表層で生じやすい高濃度浮泥形成との対応について今後さらに検討していくことは興味深い。ただし、堆積泥の表層付近の詳細な鉛直構造については、コアサンプル分析を用いても現地の堆積状況を十分反映した結果を得られるとは限らないことから、極表層での強度測定結果の評価に適したサンプリング手法の開発が別途必要である。

一方、St. 6における測定結果では、他の泥質地点と同程度である 200kPa 程度の値を約12cmの深さまで示し、堆積物組成が異なると考えられる下層に到達すると、そこではBearing Strengthが急激に 1000kPa を越える大きな値にまで達していることがわかる。また、最も砂分の含有量が高くなるSt. 4については、表層付近での計測結果に大きなばらつきがみられる。

4. 底質強度測定結果と含水比の関係

本装置により求められるBearing Strengthの値と一般的な底質物性値との関係を調べるため、ここでは底泥の侵食特性を支配する代表的なパラメータの一つである含水比に注目してBearing Strengthとの比較を試みた。各観測地点でのコアサンプル分析層（層厚10cm）に対応するBearing Strengthの平均値を求め、両者の比較を行ったものが図-5である。比較的

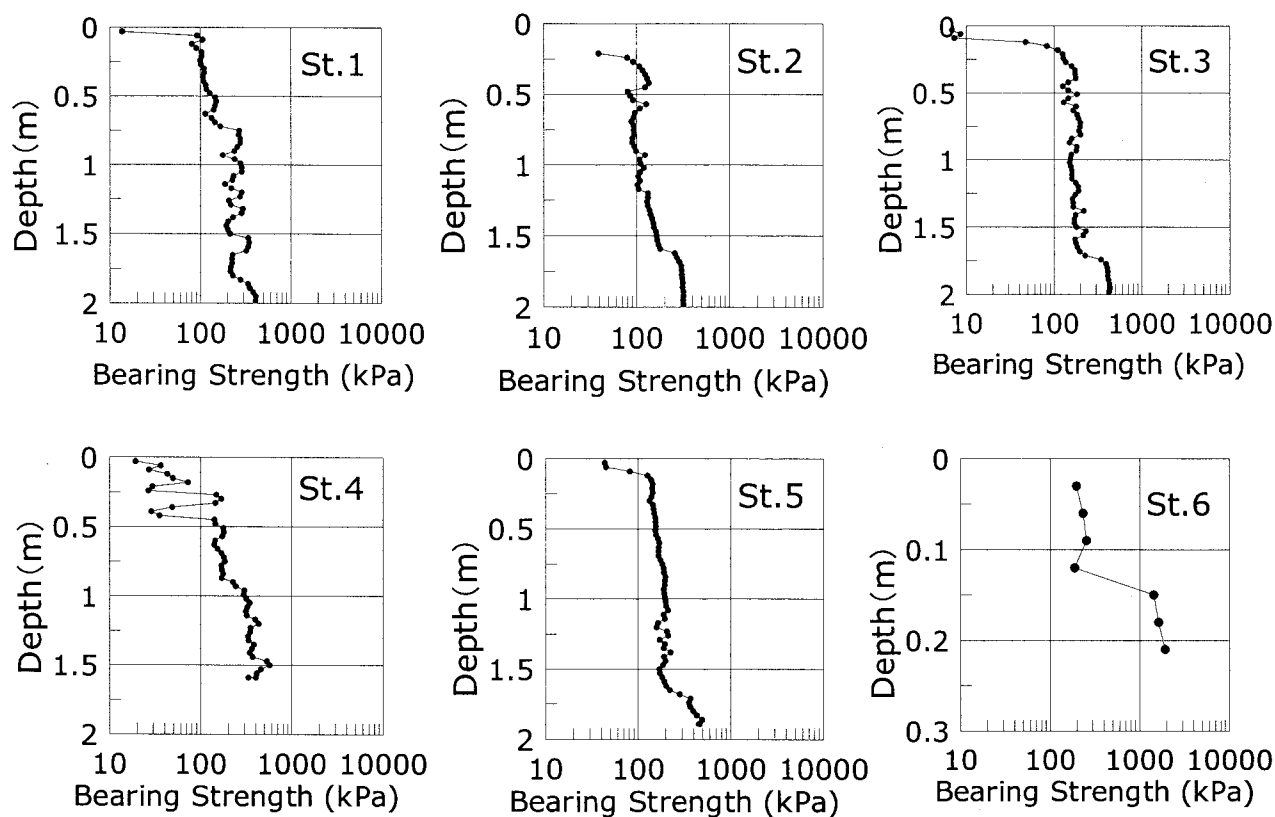


図-4 底質強度（Bearing Strength）の測定結果

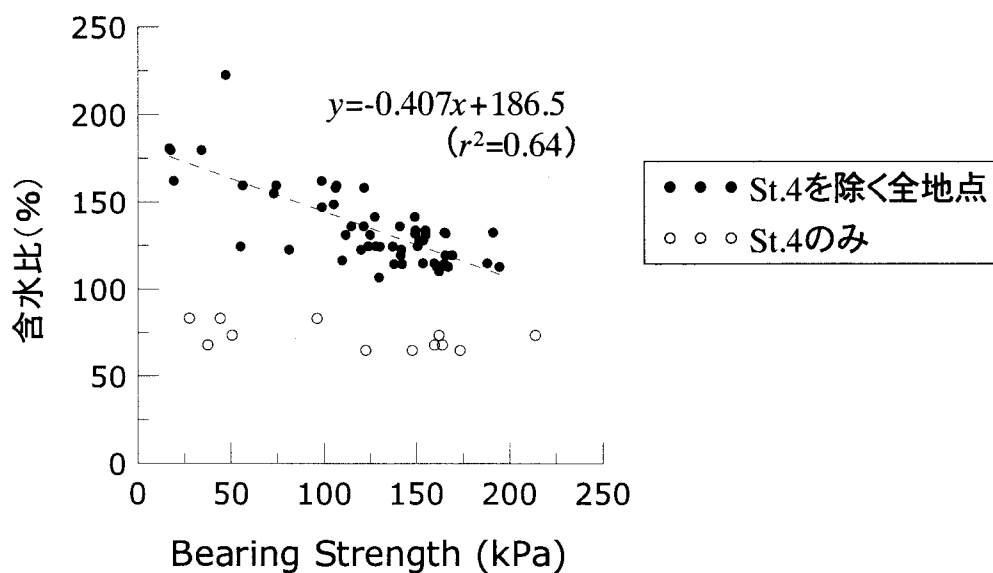


図-5 Bearing Strength と含水比の関係

砂が多かった St. 4 を除く全ての地点での結果について見ると、含水比と Bearing Strength の間で明瞭な負の相関関係がみられ、底質中の含水比が低下するにつれて底質強度が増大することがわかる。このように、泥分を主体とする底質に対しては、底泥の侵食強度特性の把握に有効なパラメータの一つである含水比が、本装置により得られる Bearing Strength

の結果を用いて推定可能であることが示された。

一方、図-5 において白丸で示した St. 4 については、上記の負の相関関係とは異なる対応関係を示している。この理由として、当地点では砂分が比較的多く、あるいは粘土分の占める割合が平均 34% と他の地点（同 55～65%）よりも小さく、底質組成の違いにより含水比と底質強度の関係そのものが他の地

点とは異なる可能性がある。また、同地点での測定結果のばらつきの原因が、底質中の砂分の増加による底質組成そのもののばらつきによるものか、あるいは泥質堆積物を対象として開発された本装置の適用に問題があるかは現時点では不明である。より詳細なコアサンプル分析および広範囲な底質条件での測定を通じて、本装置の適用範囲についてさらに検討を加える必要がある。

5. まとめ

比較的簡便な方法による底泥堆積状況の把握方法の確立を目的として、自由落下式底質強度計を新たに導入した現地調査を熊本港周辺で行い、堆積物強度の鉛直分布測定とコアサンプルの分析結果との比較を通じて測定結果の評価を行った。その結果得られた主な結論は以下の通りである。

堆積物の主体が軟泥である海域での調査結果からは、本装置により示される底質強度指標である **Bearing Strength** の値が泥の深さ方向に徐々に増大していく傾向が示された。一方、泥の下層に比較的強固な堆積層が存在する地点に対しては、そのような鉛直構造に対応する **Bearing Strength** の分布が得られ、船上からのセンサーの昇降のみで堆積構造の特性が把握可能であることが示された。

さらに、これら **Bearing Strength** の測定結果と、現地観測実施時に採取したコアサンプルの分析結果により得られた含水比の結果を比較したところ、堆積物が泥分を主体とする場合には明瞭な負の相関関係が得られ、泥質堆積物の侵食特性を示す重要なパラメータである含水比が本測定法により推定可能であることが示された。これらの結果から、海底堆積物特性の把握において、特に広域的な範囲や頻繁な定期観測が必要な場合に、コアサンプル等の分析結果

を補うものとして本装置の活用が期待できる。

一方、底質中の砂分の増大に伴い、観測値のばらつきが大きくなることや、**Bearing Strength** と含水比の関係も泥質の場合とは異なる傾向を示すことがわかり、対象とする底質組成の差異に基づく出力特性の変化についてはさらに検討を加えていく予定である。

謝辞：大規模波動地盤総合水路（港湾空港技術研究所内）における試験測定では、当研究所海洋・水工部耐波研究室（下迫健一郎室長）の協力を得たことを付記し、関係者各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Dyer, K.: *Coastal and estuarine sediment dynamics*, John Wiley & Sons, 342p., 1986.
- 2) 楠田哲也, 山西博幸, 吉見博之, 二渡了: 攪乱・不攪乱底泥の巻き上げ特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.314-318, 1989.
- 3) 鶴谷広一, 江口秀二, 高濱潤: ペーン試験とスランプ試験による柔らかい粘土の流動限界の検討ー回転粘土計との比較ー, 港湾技研資料, No.655, 21p. 1989.
- 4) 奥宮英治, 桑江朝比呂, 萩本幸将, 小沼晋, 三好英一, 野村宗弘, 中村由行: 干潟底泥の強度特性と環境要因との関係ーコーン貫入試験を用いた調査ー, 港湾技研資料, No.1002, 22p. 2001.
- 5) 上月康則, 倉田健吾, 村上仁士, 鎌田麻人, 上田薫利, 福崎亮: スナガニ類の生息場からみた吉野川汽水域干潟・ワンドの環境評価, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1116-1120, 2000.
- 6) 中川康之, 原田卓三, 末次広児, 宮崎崇: 熊本港周辺海域での底質強度分布測定の試み, 平成14年度土木学会年次講演会要旨集, pp.51-52, 2002.
- 7) Stoll, R.D., Flood, R. and Akl T. XBP – A new tool for rapid assessment of sea floor sediment properties, *Proc. of the Marine Technology Society Annual Conference in Baltimore*, pp.478-482, 1998.