

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1376 Sep 2020

河口沿岸域の地形変化予測に適用可能な砂泥混合輸送モデルの開発

小裕 大地、中川 康之

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 研究の背景と目的	4
1.2 関連する既往研究のレビュー	4
2. 砂泥混合輸送モデル	5
2.1 限界底面せん断応力の式	6
2.2 底質移動量の評価式	6
2.3 砂泥の移流拡散輸送および地形・含泥率変化	8
3. 現地土砂を用いた砂泥混合底質の移動実験	9
3.1 実験概要	9
3.2 砂泥混合底質の移動限界の評価	14
3.3 砂泥混合底質の移動量の評価	15
4. 実験結果を用いたモデルパラメータの最適化と精度検証	16
4.1 限界底面せん断応力の算定におけるパラメータ検討	16
4.2 計算条件	17
4.3 計算結果および考察	18
5. 本モデルの現地適用に向けた試行計算	19
5.1 計算条件	19
5.2 計算結果および考察	20
6. おわりに	25
謝辞	25
参考文献	25
記号表	26

Sand-mud Mixture Transport Model for Prediction of Morphological Change in Estuaries

Taichi KOSAKO*

Yasuyuki NAKAGAWA**

Synopsis

For conservation of marine ecosystem and maintenance of ports and harbors, it is important to predict sediment transport processes and bathymetric changes in inner bays and estuaries. Estuarine beds often consist of both non-cohesive sediments (sand) and cohesive sediments (mud). For better prediction of bathymetric changes in estuaries and siltation in ports and harbors, it is necessary to model the erodibility of sand-mud mixtures depending on a mud content, or bed composition. In this study, we developed a sand-mud mixture transport (SMMT) model for prediction of morphological changes in inner bays and estuaries. We carried out erosion tests for the sand-mud mixtures obtained in the field and also numerical simulations on the erosion tests to validate the present model. The proposed SMMT model was applied to the field in the eastern Ariake Sea to predict the sediment transport processes around a port and harbor in the estuary.

The experimental results show that the critical shear stress of the beds with the mud content of less than 29.6 % largely increases with the higher mud content. Accordingly, bedload transport rate and erosion volume decrease with the higher mud content under the range of the mud content. The simulation results with the properly parameterized SMMT model show good agreements with the experimental data, where the erodibility depending on the flow intensity and the mud content are quantitatively well reproduced. Through the simulation for the estuary, we examined the characteristics of the SMMT model on the sand and mud transport processes including the bathymetric and bed composition changes according to the current field and the spatial distribution of the bed composition.

Key Words: Sediment transport model, Sand-mud mixtures, Erosion test, Mud content, Critical shear stress

* Researcher of Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group, Coastal and Estuarine Environment Department

** Head of Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group, Coastal and Estuarine Environment Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5051 Fax : +81-46-844-1274 e-mail : kosako@p.mpat.go.jp

河口沿岸域の地形変化予測に適用可能な砂泥混合輸送モデルの 開発

小碓 大地*・中川 康之**

要 旨

河口沿岸域における土砂動態および地形変化の予測を適切に行うことは、生態系保全および周辺港湾の維持管理の観点から極めて重要な課題である。河口沿岸域の底質は、非粘着性土砂（砂）と粘着性土砂（泥）の混合粒径土砂で構成されることが多い。砂泥混合底質の侵食特性は底質中の含泥率に依存して変化することが報告されており、河口沿岸域の地形変化予測においても、砂泥混合底質の特徴を踏まえた土砂輸送現象のモデル化が重要となる。本研究では、河口沿岸域の地形変化予測に適用可能な土砂輸送モデルを開発することを目的として、砂泥混合底質の侵食特性および砂泥の侵食・堆積に伴う含泥率変化を考慮した砂泥混合輸送モデルを構築した。次いで、国内現地土砂で構成される砂泥混合底質の移動実験を実施し、モデルパラメータの最適化をふまえた底質移動量の推定結果に対する精度検証を行った。さらに、本モデルの現地適用に向けた基礎的な検討として、有明海東部海域（熊本港周辺）を対象とした土砂輸送シミュレーションを実施した。

国内現地土砂で構成される砂泥混合底質の移動限界および移動量の評価実験により、低含泥率域（29.6%未満）において限界底面せん断応力が増加し、底質移動量（侵食量）が著しく減少することが確認された。実験の再現計算を通じて、含泥率に依存した底質の侵食特性を考慮した本モデルは、移動限界の評価実験に基づき限界底面せん断応力のパラメータ調整を適切に行うことで、移動量の評価実験で示された含泥率に依存した底質移動量の外力応答特性を良好に再現できることが確認された。実海域を対象とした計算を通じて、本モデルにおける外力や含泥率の空間分布に依存した砂泥それぞれの輸送や地形変化、含泥率変化の特徴を確認した。

キーワード：土砂輸送モデル，砂泥混合底質，底質移動実験，含泥率，限界底面せん断応力

* 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ 研究官

** 沿岸環境研究領域 沿岸土砂管理研究グループ長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5051 Fax：046-844-1274 e-mail：kosako@p.mpat.go.jp

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

陸域と海域の接点である沿岸域は、多種多様な生物が生息する貴重な空間であるとともに、様々な人間活動に利用されている重要な空間である。その中でも、内湾や河口域に発達する干潟・浅場は、底生生物を中心とした豊かな生態系が形成される場所であると同時に、著しい水質浄化機能を有していることが知られている（栗原, 1980; 細川, 1991）。干潟・浅場の地形は、流入河川からの土砂供給や波・流れによる土砂移動により形成・維持されている。一方、河口沿岸域には微細土砂が堆積しやすい傾向にあり、このような海域における港湾においては、水域施設（航路・泊地）の埋没が船舶航行に支障をきたすケースも多い。河口沿岸域の生態系保全および周辺港湾の維持管理の観点から、河口沿岸域における土砂動態および地形変化の予測を適切に行うことは極めて重要な課題である。

地形変化の予測に際しては、対象海域における底質の支配粒径に応じて、砂（礫）もしくは泥のいずれか一方の成分のみを考慮して輸送シミュレーションを実施することが多い。しかしながら、河口沿岸域の底質は、非粘着性土砂である砂粒子および粘着性土砂である泥（シルト・粘土）粒子を含んだ混合粒径土砂（以下、砂泥混合底質）で構成されることが多い。また、既往研究（例えば、Mitchener and Torfs, 1996）により、砂泥混合底質の移動限界や侵食量などの侵食特性は、土砂中の含泥率（砂泥割合）に依存して変化することが報告されている。そのため、河口沿岸域の航路や泊地の埋没を含めた地形変化を高精度に予測するためには、対象海域における底質含泥率の空間分布ならびにその分布に応じた底質の侵食特性を考慮することが重要となる。

本研究の目的は、河口沿岸域の地形変化予測に適用可能な砂泥混合輸送モデルを開発することである。本研究では第一に、港湾における航路・泊地の埋没予測や内湾域での底質環境の変化予測を目的として開発された底泥輸送モデル（Tsuruya *et al.*, 1990, 中川, 2003）をベースに、砂泥混合底質の特徴を考慮可能な土砂輸送モデルを構築した（2章）。次いで、国内現地土砂で構成される砂泥混合底質の移動実験を実施し（3章）、モデルパラメータの最適化をふまえた本モデルの底質移動量の推定結果に対する精度検証を行った（4章）。さらに、本モデルの現地適用に向けた基礎的な検討として、有明海東部海域（熊本港周辺）を対象とした土砂輸送シミュレーションを実施した（5章）。

1.2 関連する既往研究のレビュー

(1) 砂泥混合底質の侵食特性

底質中の含泥率（粘土・シルトの重量比）に依存して侵食特性が変化することが、複数の既往研究により報告されている。Murray (1977) は、粗粒砂（粒径0.8 mm）および粘土質シルトを用いた含泥率（質量基準、本章では以下同様とする）0～18%の砂泥混合底質に対して侵食実験を実施し、含泥率の増大に伴い土砂輸送量が減少することを示している。

Raudkivi (1990) は、底質の侵食特性が非粘着性土砂の性質が支配的な場合と粘着性土砂の性質が支配的な場合で大きく異なることを指摘しており、粘土含有率5～10%で完全に粘着性土砂の性質に移行することを述べている。

Mitchener and Torfs (1996) は、複数の既往研究における室内実験および現地調査の結果に基づいて、砂泥混合底質の侵食特性について以下のように述べている。泥に対して砂を加えた場合と砂に対して泥を加えた場合のいずれにおいても、底質の侵食抵抗を表す限界底面せん断応力が増大し、侵食速度が低下する。均一な砂泥混合底質の限界底面せん断応力は、含泥率30～50%に最大値を有する。含泥率3～15%において、非粘着土砂から粘着性土砂の侵食挙動に移行する。

Panagiotopoulos *et al.* (1997) は、均一な細砂（152.5 μm および215 μm ）と現地底泥（Severn estuary, 英国）を用いた砂泥混合底質の侵食試験を実施し、以下のように述べている。含泥率30%（粘土含有率11%）未満において、含泥率の増加に伴う侵食抵抗の増分率は小さく、その増加傾向は内部摩擦角の増大に起因する。粘土含有率11～14%を超えると砂粒子同士の接触がなくなり、粘土による粘着力が砂泥混合底質の侵食挙動において支配となる。

(2) 砂泥混合輸送モデル

砂泥混合底質の侵食特性を考慮した土砂輸送モデル（以下、砂泥混合輸送モデル）の提案もなされている。砂泥両者の輸送を考慮した初期の土砂輸送モデルとしては、Chesher and Ockenden (1997) によって提案された水平2次元モデルが挙げられる。このモデルの特徴は、砂泥それぞれの侵食量の算定において同一の限界底面せん断応力を用い、その限界底面せん断応力を含泥率に依存して変化させる点にある。彼らは限界底面せん断応力を含泥率の線形関数で表現し、含泥率20%の時に最大値をとる形を採用しており（図-1.1）、van Rijn (1993) やWhitehouse *et al.* (2000) も同様の関係式を提案している。一方、砂泥の輸送量は限界底面せん断応力のみによって変化するものとしており、既往研究で指摘されている含泥率増大に伴う非

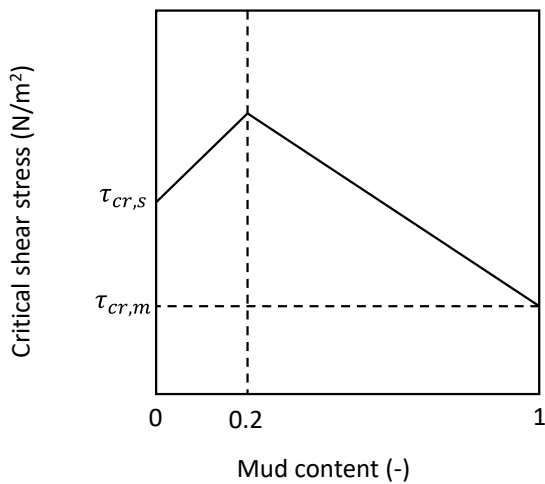


図-1.1 含泥率と限界底面せん断応力の関係
(Chesher and Ockenden (1997) を改変, 横軸: 含泥率, 縦軸: 限界底面せん断応力, $\tau_{cr,s}$ および $\tau_{cr,m}$: 砂および泥のみの場合の限界底面せん断応力)

粘着性土砂から粘着性土砂の侵食挙動への移行過程は考慮されていない。

van Ledden (2003) は, 既往の実験データに基づいて, 非粘着性土砂の性質が支配的な場合と粘着性土砂の性質が支配的な場合の砂泥混合底質の侵食特性を考慮した砂泥混合輸送モデルを提案している. 非粘着性土砂の性質が支配的な場合, 砂の巻き上げ量および掃流砂量は砂輸送モデルで用いられる従来の評価式 (例えば, van Rijn, 1984) で表現でき, 泥の巻き上げ量についても泥輸送モデルで一般的に採用される経験式 (例えば, van Leussen and Dronkers, 1988) で表現できるとしている. ただし, この時の泥の巻き上げ係数は粘着性土砂の性質が支配的な場合と比べて十分に大きいとされている. 一方, 粘着性土砂の性質が支配的な場合の侵食形態は巻き上げのみとなり, 砂泥の巻き上げ量はともに泥輸送モデルにおける経験式で表現できるとしている. Waeles *et al.* (2007) も同様のモデル化を行っている.

LeHir *et al.* (2011) および Mengual *et al.* (2017) は, 2つの限界含泥率を用いることで, 砂泥混合底質の侵食特性を含泥率に応じて完全に非粘着性土砂としてふるまう場合, 完全に粘着性土砂としてふるまう場合, および両者の遷移域の3段階に分類し, 砂泥混合底質の限界底面せん断応力を定めている.

しかしながら, いずれの砂泥混合輸送モデルについても, 限界底面せん断応力および侵食量の評価式を構成す

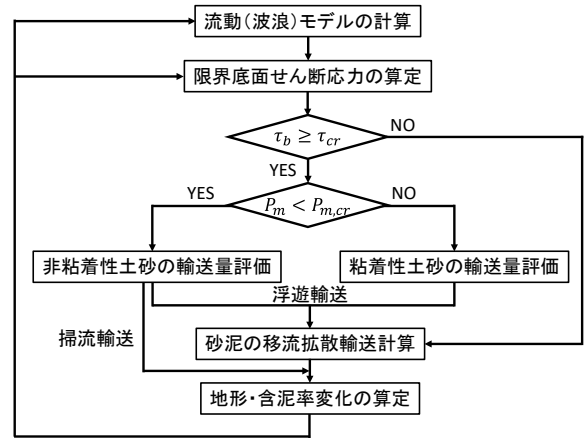


図-2.1 砂泥混合輸送モデルの構成
(τ_b : 底面せん断応力, τ_{cr} : 限界底面せん断応力, P_m : 含泥率, $P_{m,cr}$: 限界含泥率)

るパラメータに関して十分に理解されておらず, 現地土砂で構成される砂泥混合底質の侵食特性の再現性に関する検討事例も少ないのが現状である。

2. 砂泥混合輸送モデル

本研究で構築した砂泥混合輸送モデルは, 港湾における航路・泊地の埋没予測や内湾域での底質環境の変化予測を目的として開発された底泥輸送モデル (Tsuruya *et al.*, 1990; 中川, 2003) をベースとし, 既往研究を参考に砂泥混合底質の特徴を適切に考慮できるよう新たに改良を施したものである. 本モデルの構成は図-2.1に示すとおりであり, 従来の砂輸送モデルあるいは泥輸送モデルとは異なり以下の特徴を有する.

- (1) 含泥率 P_m に依存して限界底面せん断応力 τ_{cr} および砂泥それぞれの侵食量が変化する.
- (2) 非粘着性土砂の性質が支配的な場合 ($P_m < P_{m,cr}$, $P_{m,cr}$: 限界含泥率) と粘着性土砂が支配的な場合 ($P_m \geq P_{m,cr}$) で τ_{cr} および侵食量の変化の特徴が異なる.
- (3) 砂の掃流輸送および砂泥それぞれの移流拡散輸送を考慮する.
- (4) 砂泥混合底質の輸送に伴う地盤高だけでなく含泥率の時空間変化を考慮する.

次節以降では, 上記を踏まえた本モデルの詳細について述べる. なお, van Ledden (2003) が提案する砂泥混合輸送モデルにおいては質量基準の含泥率が採用されているが,

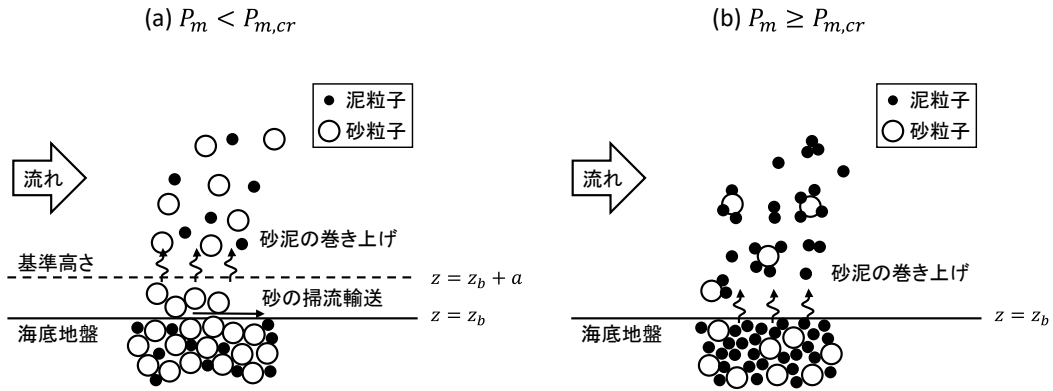


図-2.2 含泥率 P_m に依存した侵食挙動の概念図
($P_{m,cr}$: 限界含泥率, z_b : 地盤高さ, a : 基準高さ)

本研究では底質中の砂泥の相対体積の変化が侵食特性の変化するものと考え、本モデルにおける含泥率は式(1)に示すように体積基準の含有率を採用している。

$$P_m = \frac{V_m}{V_s + V_m} = \frac{W_m/\rho_m}{W_s/\rho_s + W_m/\rho_m} \quad (1)$$

ここで、 V_s および V_m は砂および泥の体積、 W_m および W_m は砂および泥の質量、 ρ_s および ρ_m は砂および泥の土粒子密度を表す。ただし、砂泥それぞれの土粒子密度が同じ場合には、体積基準の含泥率は既往研究でよく用いられる質量基準の含泥率と同義である。

2.1 限界底面せん断応力の式

本モデルでは、微量の泥の混入に対しても粘着性の発現により底質の侵食抵抗が増大するものとし、砂泥混合底質の限界底面せん断応力 τ_{cr} の算定にはvan Ledden (2003) が提案する式(2)を採用した。

$$\tau_{cr} \begin{cases} = \tau_{cr,s}(1 + P_m)^\beta, & \text{if } P_m < P_{m,cr} \\ = \frac{\tau_{cr,s}(1 + P_{m,cr})^\beta - \tau_{cr,m}(1 - P_m)}{1 - P_{m,cr}} & \\ \quad + \tau_{cr,m} & \text{if } P_m \geq P_{m,cr} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{cr,s}$ および $\tau_{cr,m}$ は砂および泥のみの場合の限界底面せん断応力、 β は限界底面せん断応力の増分にかかわる無次元パラメータを表す。式(2)は、 P_m の増加とともに底質の限界底面せん断応力が砂のみの場合に比べて増加し、含泥率が限界含泥率を超過すると泥のみの限界底面せん断応力に向かって線形的に変化することを意味しており、 $\beta = 1$ の場合には図-1.1 に示す限界底面せん断応力の変化と同様の傾向を示す。

2.2 底質移動量の評価式

砂泥の侵食挙動についてもvan Ledden (2003) の考え方に倣い、非粘着性土砂の性質が支配的な場合 ($P_m < P_{m,cr}$) と粘着性土砂の性質が支配的な場合 ($P_m \geq P_{m,cr}$) に砂泥の侵食挙動が異なるものとした(図-2.2)。本モデルにおいて、前者の場合には砂の掃流輸送が生じることに加えて泥の巻き上げが砂の巻き上げに支配され、後者の場合には砂の巻き上げが泥の巻き上げに支配される。また、以下に示す掃流砂量および砂泥の巻き上げ量は、 $P_m < P_{m,cr}$ において P_m の増加とともに粘着性土砂の侵食挙動に近づくようモデル化がなされている。

掃流移動による単位幅・単位時間当たりの砂の輸送量(輸送速度) q_b (kg/m/s) は、 $P_m < P_{m,cr}$ の範囲で P_m の増加とともにゼロに向かって減少するものとし、式(3)で定義される。

$$q_b \begin{cases} = \left(1 - \frac{P_m}{P_{m,cr}}\right) q_{b,0}, & \text{if } P_m < P_{m,cr} \\ = 0, & \text{if } P_m \geq P_{m,cr} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $q_{b,0}$ は砂のみ ($P_m = 0$) の場合の掃流移動による砂の輸送速度 (kg/m/s) であり、本モデルではvan Rijn (2007) に基づいて式(4)で表される。

$$q_{b,0} \begin{cases} = \gamma \rho_s u_* d_{50,s} D_*^{-0.3} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1\right)^\eta, & \text{if } \tau_b > \tau_{cr} \\ = 0, & \text{if } \tau_b \leq \tau_{cr} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 $d_{50,s}$ は砂の中央粒径、 D_* は無次元粒径 ($= d_{50,s} \sqrt{(\rho_s/\rho_w - 1)g\nu^{-2}}$)、 ρ_w は流体の密度、 g は重力加速度、 ν は流体の動粘性係数、 τ_b は底面せん断応力を

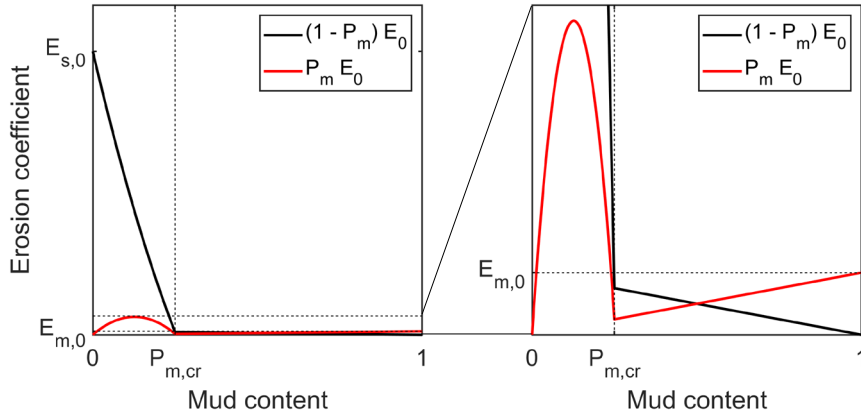


図-2.3 砂泥混合底質中の砂泥各成分の巻き上げ係数 $((1 - P_m)E_0$ および P_mE_0) と含泥率の関係
(横軸：含泥率，縦軸：巻き上げ係数)

表す。粒径 $200\ \mu\text{m}$ より大きい砂粒子に対して係数 γ および η はそれぞれ 0.5 および 1 である。

次に，砂泥それぞれの巻き上げフラックス E_s および E_m ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$) については，ここでは含泥率に応じてそれぞれ式(5)および式(6)で定義する。

$$E_s \begin{cases} = (1 - P_m)E_0 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1\right)^n, & \text{if } \tau_b > \tau_{cr} \\ = 0, & \text{if } \tau_b \leq \tau_{cr} \end{cases} \quad (5)$$

$$E_m \begin{cases} = P_mE_0 \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1\right)^n, & \text{if } \tau_b > \tau_{cr} \\ = 0, & \text{if } \tau_b \leq \tau_{cr} \end{cases} \quad (6)$$

ここで， E_0 および n は砂泥混合底質の巻き上げ係数およびべき指数であり，含泥率に依存して変化する。まず， E_0 については， $P_m < P_{m,cr}$ の範囲において，砂のみ ($P_m = 0$) の底質に対する巻き上げ係数 $E_{s,0}$ と泥のみ ($P_m = 1$) の底質に対する巻き上げ係数 $E_{m,0}$ を用いて，式(7)により表される。

$$E_0 \begin{cases} = \left(1 - \frac{P_m}{P_{m,cr}}\right)E_{s,0} + \frac{P_m}{P_{m,cr}}E_{m,0}, & \text{if } P_m < P_{m,cr} \\ = E_{m,0}, & \text{if } P_m \geq P_{m,cr} \end{cases} \quad (7)$$

$E_{s,0}$ は van Rijn (1993) による砂の平衡濃度式に基づいて式(8)により算定されるものとした。

$$E_{s,0} = \frac{0.015\rho_s w_{s,s}}{aD_*^{0.3}} \quad (8)$$

ここで， $w_{s,s}$ は砂粒子の沈降速度， a は基準高さ ($= 100d_{50,s}$ ，図-2.2) であり， $d_{50,s}$ を $250\ \mu\text{m}$ とした場合 (ρ_s を

$2,650\ \text{kg}/\text{m}^3$ ， $w_{s,s}$ を $3.48\ \text{cm}/\text{s}$ と仮定) の $E_{s,0}$ は $8.0 \times 10^{-3}\ \text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ 程度となる。一方， $E_{m,0}$ は泥輸送シミュレーションにおいて一般的に $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3}\ \text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ の範囲で与えられる (Winterwerp *et al.*, 2012) ことから， $E_{s,0}$ は $E_{m,0}$ と比べて10倍以上大きい値となる。さらに，含泥率 P_m を考慮することで，砂泥混合底質中の砂および泥の巻き上げ係数は $(1 - P_m)E_0$ および P_mE_0 となり，各係数の含泥率に対する変化は図-2.3に示すとおりである。すなわち，砂泥混合底質中の砂の巻き上げ係数を $((1 - P_m)E_0)$ は， $P_m < P_{m,cr}$ の範囲で含泥率の増加とともに $E_{m,0}$ の値以下まで急低下し， $P_m \geq P_{m,cr}$ の範囲では含泥率に応じて線形的に減少し， $P_m = 1$ において0となる。一方，泥分の巻き上げ係数 (P_mE_0) は， $P_m < P_{m,cr}$ の範囲で極大値を有する分布形状を示し，砂の巻き上げに追従して泥分の巻き上げが顕著になるという特徴を示している。式(5)および式(6)中の n は式(9)で定義されるように，既往の砂の巻き上げ評価式 (例えば，van Rijn, 1984; Nielsen, 1992) および泥の巻き上げ評価式 (例えば，van Leussen and Dronkers, 1988) に対応して，砂のみ ($P_m = 0$) の場合に $n = 1.5$ ，粘性土砂が支配的 ($P_m \geq P_{m,cr}$) な場合に $n = 1$ とし， $P_m < P_{m,cr}$ の範囲で線形的に変化するものとした。

$$n \begin{cases} = \frac{3P_{m,cr} - P_m}{2P_{m,cr}}, & \text{if } P_m < P_{m,cr} \\ = 1, & \text{if } P_m \geq P_{m,cr} \end{cases} \quad (9)$$

なお，本モデルにおける $P_m = 0$ の場合の砂の巻き上げ量 E_s は，van Rijn, (1993) による砂の平衡濃度式に相当することになる。

2.3 砂泥の移流拡散輸送および地形・含泥率変化

(1) 移流拡散方程式

水中に巻き上げられた砂泥は独立して輸送されるものとし、砂泥両者の浮遊輸送過程は式(10)および式(11)の移流拡散方程式によって解かれる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_{s,k} H_k}{\partial t} + \frac{\partial M_k C_{s,k}}{\partial x} + \frac{\partial N_k C_{s,k}}{\partial y} \\ & + \left((w - w_{s,s}) C_s \right)_{k-1/2} - \left((w - w_{s,s}) C_s \right)_{k+1/2} \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H H_k \frac{\partial C_{s,k}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H H_k \frac{\partial C_{s,k}}{\partial y} \right) \\ & - \left(K_z \frac{\partial C_s}{\partial z} \right)_{k-1/2} + \left(K_z \frac{\partial C_s}{\partial z} \right)_{k+1/2} = 0 \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_{m,k} H_k}{\partial t} + \frac{\partial M_k C_{m,k}}{\partial x} + \frac{\partial N_k C_{m,k}}{\partial y} \\ & + \left((w - w_{s,m}) C_m \right)_{k-1/2} - \left((w - w_{s,m}) C_m \right)_{k+1/2} \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H H_k \frac{\partial C_{m,k}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H H_k \frac{\partial C_{m,k}}{\partial y} \right) \\ & - \left(K_z \frac{\partial C_m}{\partial z} \right)_{k-1/2} + \left(K_z \frac{\partial C_m}{\partial z} \right)_{k+1/2} = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

ここで、 C_s および C_m は砂および泥の浮遊濃度、 M および N は x 方向および y 方向の流量、 w は鉛直流速（鉛直上向きを正とする）、 K_H および K_z は水平および鉛直拡散係数、 $w_{s,s}$ および $w_{s,m}$ は砂および泥の沈降速度を表す。移流拡散方程式における移流項は一次の風上差分、水平拡散項は二次の中央差分で解かれ、時間差分法は鉛直拡散項を除き陽的に解かれる。海底面における式(10)および式(11)の境界条件は式(12)および式(13)で定義される。

$$K_z \frac{\partial C_s}{\partial z} \Big|_{k=k_{btm}+1/2} = E_s - D_s \quad (12)$$

$$K_z \frac{\partial C_m}{\partial z} \Big|_{k=k_{btm}+1/2} = E_m - D_m \quad (13)$$

ここで、 k_{btm} は海底面直上の層を意味している。また、 D_s および D_m は砂泥の沈降フラックスであり、砂泥それぞれの沈降過程の特性を考慮して式(14)および式(15)で表される（例えば、Dyer, 1986）。

$$D_s = w_{s,s} C_{s,k_{btm}} \quad (14)$$

$$D_m \begin{cases} = w_{s,m} C_{m,k_{btm}} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right), & \text{if } \tau_b < \tau_d \\ = 0, & \text{if } \tau_b \geq \tau_d \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 τ_d は泥の沈降に関する限界せん断応力を表す。

(2) 地盤高さおよび含泥率の評価

砂泥の巻き上げ・沈降および砂の掃流輸送による地盤高さ z_b の変化は、底質の空隙率 ε を考慮して式(16)により解かれる。

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon) \frac{\partial z_b}{\partial t} = & - \frac{1}{\rho_s} \left(\frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{\partial q_b}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_s} (D_s - E_s) + \frac{1}{\rho_m} (D_m - E_m) \quad (16) \end{aligned}$$

さらに本モデルでは、砂泥の侵食・堆積に伴う含泥率の変化を考慮するため、平野 (1971) の砂礫混合を対象とした交換層モデルを参考にして含泥率の変化を評価するためのサブモデルを導入した。本サブモデルは、含泥率の変化の算定対象となる交換層、および含泥率が一定の不変層で構成される（図-2.4a）。土砂の堆積により海底面が上昇する場合には交換層の含泥率はそれより下層（不変層）の含泥率に無関係であるのに対して（図-2.4b）、侵食によ

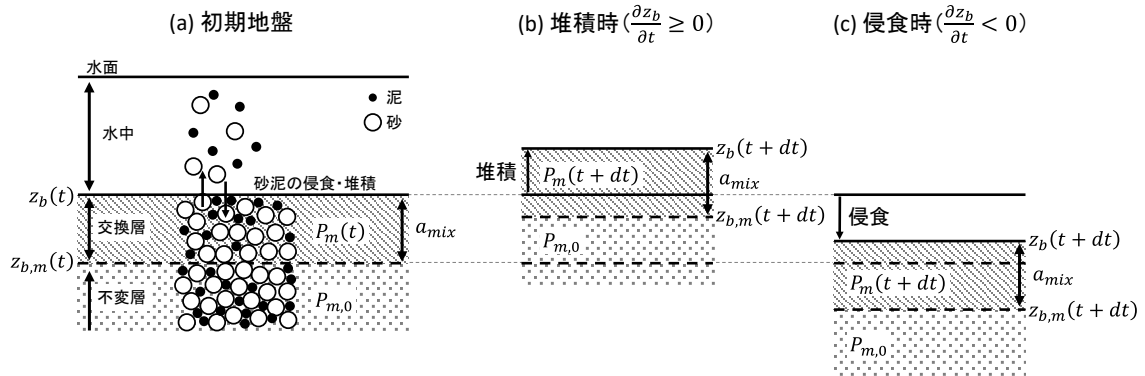


図-2.4 含泥率評価サブモデルの模式図

(z_b : 地盤高さ, $z_{b,m}$: 交換層下端, a_{mix} : 交換層厚さ, P_m : 交換層の含泥率, $P_{m,0}$: 不変層の含泥率)

り海底面が低下する場合には交換層は不変層に対して設定された含泥率を考慮することになる (図-2.4c). 不変層の含泥率は砂泥の侵食・堆積によらず常に一定であり, 堆積時における交換層の上方向の移動に際しては, ここでは交換層の厚さは常に一定と仮定するため, それよりも深部は不変層とみなすことになる. 以上を踏まえて含泥率 P_m の時間変化は式(17)で表される.

$$a_{mix} \frac{\partial P_m}{\partial t} \begin{cases} = \frac{1}{\rho_m(1-\varepsilon)}(D_m - E_m) - P_m \frac{\partial z_b}{\partial t}, & \text{if } \frac{\partial z_b}{\partial t} \geq 0 \\ = \frac{1}{\rho_m(1-\varepsilon)}(D_m - E_m) - P_{m,0} \frac{\partial z_b}{\partial t}, & \text{if } \frac{\partial z_b}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

ここで, a_{mix} は交換層厚さ, $P_{m,0}$ は不変層の含泥率である. すなわち, 堆積過程では堆積する砂泥の割合に依存して交換層の含泥率が増減するのに対し, 侵食過程では交換層の含泥率が不変層の値に近づいてくという特徴をもつ.

3. 砂泥混合底質の移動実験

現地土砂で構成される砂泥混合底質の侵食特性の把握と, 本研究で構築した砂泥混合輸送モデルのパラメータ

調整および精度検証を目的とした水槽実験を行った. なお, モデルパラメータ調整は限界底面せん断応力に関係するモデル中の各パラメータを対象とし, モデルの精度検証においては外力の変化に対する掃流輸送量および侵食量の変化を評価対象とした. そのため, 本実験では移動限界を評価するための実験 (実験1) および移動量を評価するための実験 (実験2) を実施した.

3.1 実験概要

(1) 実験設備および底質条件

実験には, 港湾空港技術研究所の海底流動実験水槽 (図-3.1) を用いた. 水槽の試験区間 (長さ4.8 m, 水路幅0.8 m) 中央の水路床に実験試料 (長さ676 mm, 幅200 mm, 深さ約100 mm) を2函敷設し, 各種計測器 (流速計, 濁度計, 粒度分布計) およびセディメントトラップを配置した (図-3.2). その後, 水位が70 cmとなるまで海水 (密度は約1,023 kg/m³) を充填し, 潮汐流を想定した一方向流を作用させて底質の移動限界および移動量を評価した. 表-3.1に連続計測に用いた各計測器の計測高さおよび記録間隔を示す.

実験試料には, 有明海東部に位置する熊本港周辺で採取した砂質土 (Stn.1) ならびに比較的泥分が多い底質

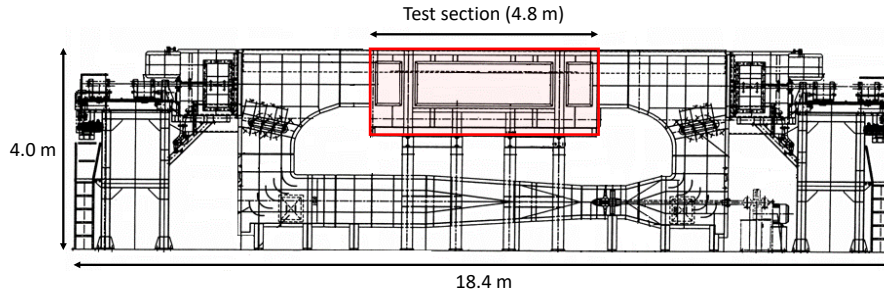


図-3.1 実験に用いた海底流動実験水槽 (赤枠: 試験区間)

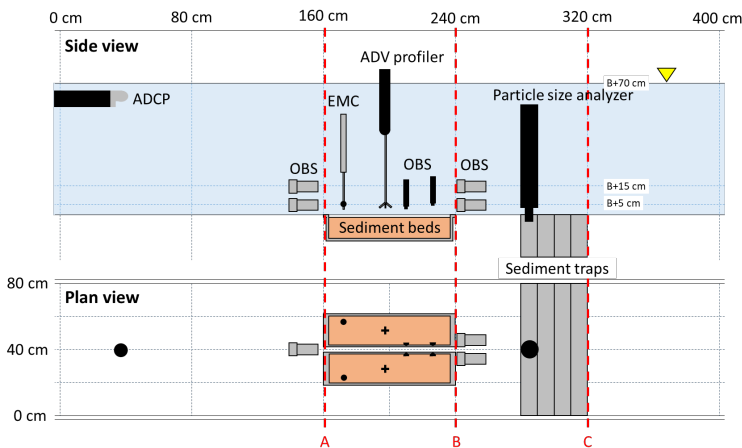


図-3.2 試験区間内の各種計測器等の設置位置図

表-3.1 各種計測器の計測条件

計測項目	計測器	計測高さ	記録間隔
流速	Aquadopp (Nortek 製)	底面上 0~50 cm (30 層, 層厚 20 mm)	1.0 秒
	Vectrino Profiler (Nortek 製)	底面上 0~2 cm (31 層, 層厚 1 mm)	1/16 秒
	ACM3-RS (JFE アドバンテック製)	底面上 5 cm	0.05 秒
濁度 (SS 濃度)	Infinity(Compact)-CLW (JFE アドバンテック製)	底面上 5 cm 底面上 10 cm	1.0 秒
	OBS-3+ (Campbell Scientific 製)	底面上 3 cm 底面上 5 cm	0.1 秒
粒径別体積濃度	LISST-200X (Sequoia 製)	底面上 5 cm	1.5 秒

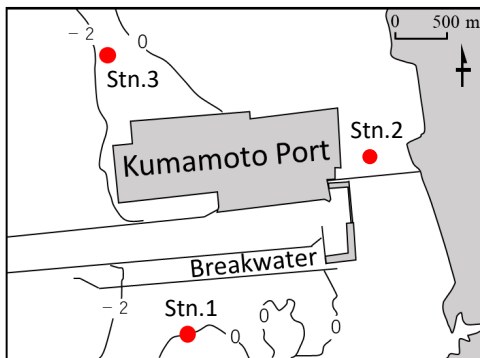


図-3.3 熊本港周辺における底質採取地点

(Stn.2およびStn.3)を用いた(図-3.3)。さらに、Stn.1およびStn.3の現地土砂それぞれの配合比を変えて混合することで、含泥率が異なる4種類の攪乱試料を作製した。攪乱試料の作製に際しては、現地土砂に対して海水を一定量充填し、試料内に気泡が混入しないよう注意を払いながら試料の練り返しを行った。上記操作により作製された攪乱試料については、海水下で1日程度静置した上で実験に用いた。各試料の底質条件として、レーザー回折・散乱式粒度分布計LA-960((株)堀場製作所製)により測定された粒径分布(図-3.4)に基づく含泥率および中央粒径(ともに体積基準),ならびに含水比を表-3.2に示す。現地の砂質土であるCase 1は粒径250 μm付近にピークを有するのに対して、現地の泥質土であるCase 5および6は粒径20 μm付近と60~100 μmの2箇所にピークを有する。実験試料の含泥率は6.0%~65.9%の範囲内であり、これらの含泥率条件を対象に底質の移動実験を実施した。

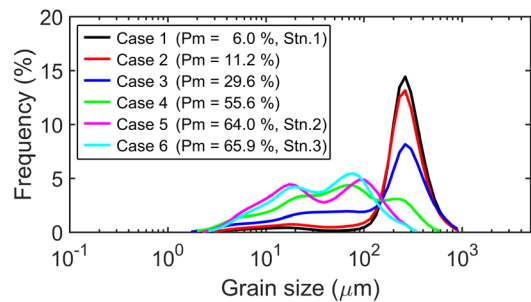


図-3.4 各実験試料の堆積基準の粒径分布
(横軸：粒径，縦軸：頻度)

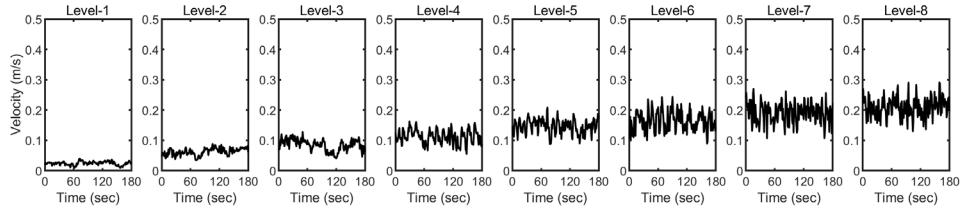
(2) 移動限界の評価実験 (実験1)

砂泥混合底質の移動限界の把握ならびにモデルのパラメータを最適化するためのデータ取得を目的とした実験(実験1)を行った。本実験では、各実験試料に対し一方向流を微流速から段階的に上昇させながら作用させ、底質が明瞭に移動し始める流速条件まで、一方向流の段階的な上昇を繰り返した。一方向流は、実験水槽の流速制御装置における設定流速(水平流速の鉛直平均値に相当)を0.05 m/sから開始し、0.05 m/s間隔で上昇させるものとし、各流速段階における一方向流の作用時間は180秒間とした。一例として、Case 1において超音波式流向流速プロファイラーVectrino profilerにより計測された底面上1.0 cmにおける流速の時間変化を図-3.5aに示す。各ケースの底面上1.0 cmにおける時間平均流速は表-3.2に示すとおりである。なお、Case 6(含泥率65.9%)については、一方向流の作用過程に不備があり、移動限界流速の判定が困難であると判断したため、解析対象から除外した。

表-3.2 底質条件および流速条件

Case	底質条件					流速条件 (B+1 cm)	
	含泥率 (%)	中央粒径 (μm)	含水比 (%)	種類	性状	実験 1 (m/s)	実験 2 (m/s)
1	6.0	245.8	41.0	現地 (Stn.1)	攪乱	0.022 ~ 0.19	0.22 ~ 0.37
2	11.2	229.8	42.4	Stn.1 と Stn.3 の混合	攪乱	0.026 ~ 0.30	0.31 ~ 0.43
3	29.6	179.8	47.6	Stn.1 と Stn.3 の混合	攪乱	0.023 ~ 0.33	0.35
4	55.6	49.4	73.7	Stn.1 と Stn.3 の混合	攪乱	0.022 ~ 0.32	0.35
5	64.0	33.0	138.9	現地 (Stn.2)	未攪乱	0.023 ~ 0.31	0.35 ~ 0.60
6	65.9	37.0	119.1	現地 (Stn.3)	未攪乱	—	0.30 ~ 0.51

(a) Velocity (m/s, B+1.0 cm)



(b) Volume concentration (μl/l)

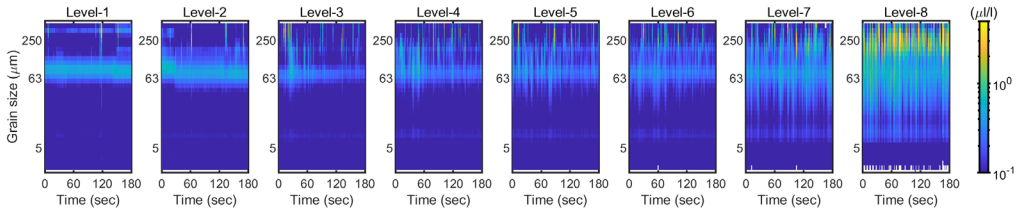


図-3.5 移動限界の評価実験における(a)底面上1 cmの流速および(b)粒径別体積濃度の計測例 (Case 1の計測結果)
(横軸: 時間, 縦軸(a): 流速, 縦軸(b): 粒径)

移動限界の判断には、実験試料の下流に設置された粒度分布計LISST-200X (測定範囲: 粒径1.0~500 μm) により計測される底面近傍の粒径別体積濃度 (図-3.5b) を用いた。実験試料の粒径特性を踏まえて、ここでは粒径100 μm以上300 μm未満を砂区分、粒径63 μm未満を泥区分とみなし、各粒径範囲の体積濃度の積分値を各流速段階で時間平均することによって流速上昇に伴う砂泥分それぞれの濃度変化を評価した。本研究では、砂泥いずれかの区分の体積濃度が急増する直前の流速段階を移動限界と定義し、この流速段階における底面上1.0 cmの時間平均流速を移動限界流速 $u_{b,cr}$ とした (図-3.6)。

限界底面せん断応力の算定には、Vectrino profilerによって計測される流速の鉛直分布を用いた。計測された流速

分布の特徴を確認のうえ、実験試料上の流速分布は壁面が滑らかな場合の対数則に従うと判断し、流速データ \bar{u} に対して式(18)を最小二乗法によりフィッティングさせることで移動限界時の摩擦速度 $u_{*,cr}$ を求めた。

$$\frac{\bar{u}}{u_{*,cr}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_{*,cr} y}{\nu} + A_s \quad (18)$$

ここで、 κ はカルマン定数 (= 0.4)、 y は底面からの距離、 ν は流体の動粘性係数 (= 10^{-6} m²/s)、 A_s は滑面条件に対する定数 (= 5.5) を表す。なお、Vectrino profilerによる底面極近傍 (底面上5 mm程度まで) の流速データは、流速計システムの特長上、過小評価となることが指摘されている (Koca *et al.*, 2017)。そのため、摩擦速度 $u_{*,cr}$ の算定に

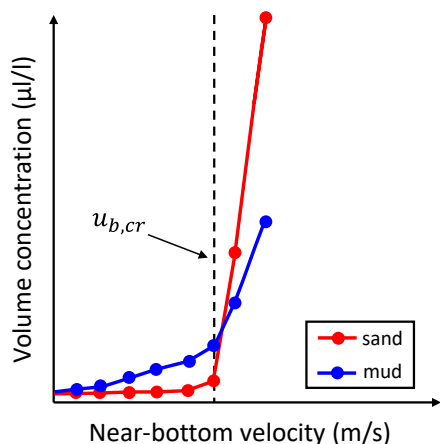


図-3.6 計測データに基づく移動限界判定の模式図
(横軸：底面近傍の流速，縦軸：懸濁粒子の体積濃度， $u_{b,cr}$ ：移動限界流速)

用いる流速データの対象は，底面上5 mmから上層のみとした。摩擦速度の算定に用いたデータおよび式(18)のフィッティング結果の一例を図-3.7に示す。摩擦速度の算定に用いた底面上5 mmから上層の流速値は対数則に従うのに対して，底面上5 mm未満の流速値は対数則から大きく外れており，既往研究で報告されているように流速が過小評価されていることがわかる。得られた $u_{*,cr}$ を式(19)に代入することで，限界底面せん断応力 τ_{cr} を算定した。

$$\tau_{cr} = \rho_w u_{*,cr}^2 \quad (19)$$

(3) 移動量の評価実験 (実験2)

砂泥混合底質の移動量の把握ならびにモデルの精度検証のためのデータ取得を目的とした実験(実験2)を行った。本実験では，各実験試料に対し実験1で確認した移動限界値より大きい流速条件の一方向流を設定し，一段階以上の流速レベルを各10分間作用させた。各試料に対する流速条件(底面上1 cmにおける流速の時間平均値)を表-3.2に示す。Case 1, 2, 5, 6の4ケースに対しては3段階の流速条件を設定し，Case 3, 4の2ケースに対しては1段階の流速条件を設定し，各流速条件で一定の一方向流を作用させた。多段階の一方向流を作用させるケースについては，各流速段階の作用終了後に流れを停止し，後述するセディメントトラップへの堆積物の捕獲および水中レーザースキャナによる地盤高計測を行った後，次の段階の一方向流を作用させた。なお，同程度の流速条件での移動量の比較ができるように，全6ケースに対して底面上1 cmにおける流速の時間平均値が0.3~0.4 m/sの流速条件を設けた。

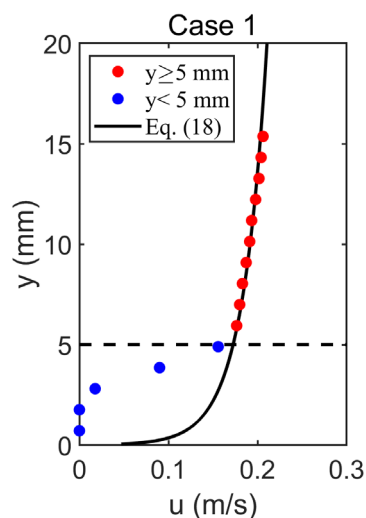


図-3.7 摩擦速度の算定に用いた流速データの一例
(Case 1の移動限界時，横軸：流速の時間平均値，縦軸：底面からの距離)

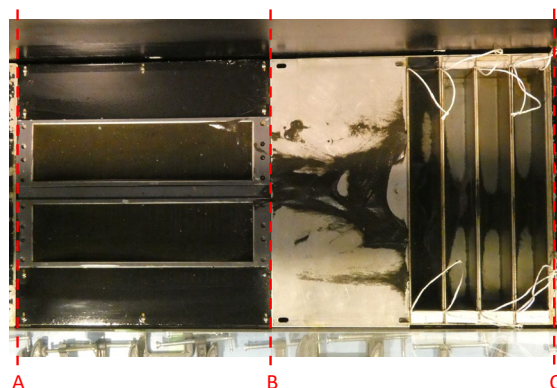


図-3.8 区間BCにおける土砂堆積状況の一例 (Case 1の最大流速作用後)

底質移動のうち主に掃流状態で輸送される土砂量(掃流土砂量)の評価を目的として，流れの作用によって区間BC内の床板上に堆積した土砂およびセディメントトラップに捕獲された土砂の乾燥重量を算定した。一例として，図-3.8にCase 1の最大流速作用後における区間BCの土砂堆積状況を示す。目視観察からはいずれのケースの捕獲物についても砂分が卓越していることが確認されており，得られた掃流土砂量は後述する本モデルによる掃流砂の輸送速度の検証データとして用いられた。

また，底質侵食量の評価を目的として，底質試料の表面高さを高精度に計測可能な水中レーザースキャナULS-100(2G Robotics製)を用いて，地盤高の詳細な空間分布を計測した(図-3.9)。水中レーザースキャナによる計測精度は対象物までの距離に依存するため，本研究では地盤

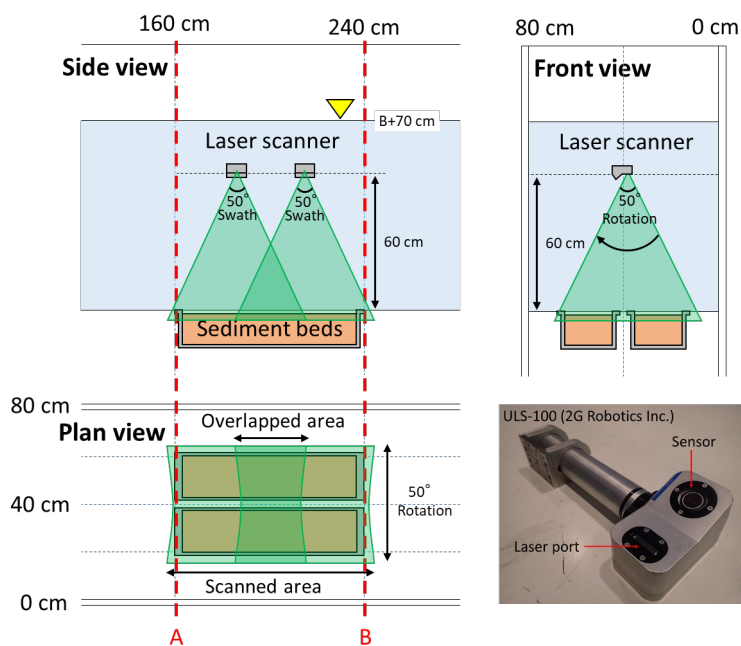


図-3.9 水中レーザースキャナ計測の概要図

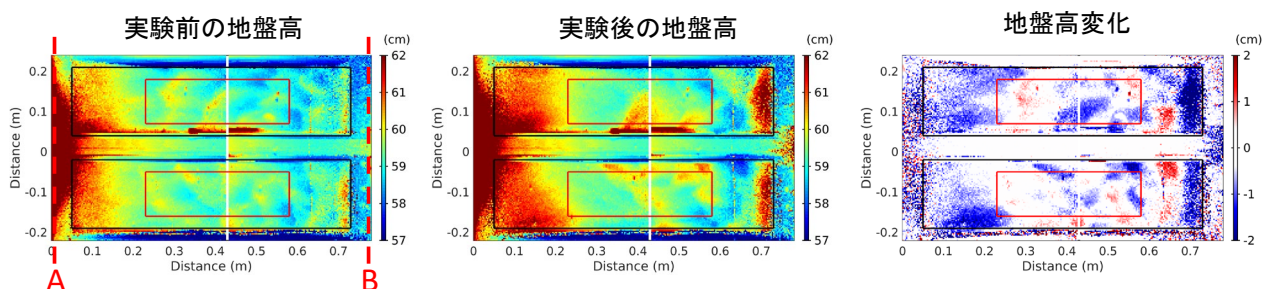


図-3.10 水中レーザースキャナによる地盤高の計測例
(Case 1, 流速条件 28.4 cm/s, 赤枠：土量変化の算定対象範囲)

高の計測分解能が0.1 mmとなるようセンサー部の設置高さを底面上0.6 mとした。レーザーのスワ角 50° （サンプル数480点）を考慮し流軸方向の2箇所に分けて計測し、また横断方向のセンサーの回転角を 50° （回転ピッチ 0.144° ）とすることで、実験試料表面全体の地盤高を計測した。上記計測条件における流軸方向および横断方向の計測分解能はそれぞれ1.254 mmおよび1.621 mmである。なお、水中レーザースキャナの試験計測の際に計測結果が外来光の影響を受けることが確認されたため、計測時には暗幕等により外部からの光を遮断して地盤高の計測を実施した。また、水中レーザースキャナによる距離計測は、水中の懸濁粒子の影響を強く受けるため、外力作用後に濁りが生じたケースにおいては実験試料表層に影響を及ぼさないよう注意を払いつつ、試料上層の水（海水もしくは淡水）の一部交換することで濁度を低下させて計測

への影響を抑えた。水中レーザースキャナによる計測結果は、計測データの空間解像度を踏まえて3 mmのメッシュのグリッドデータに整理して解析を行った。

計測結果の一例として、図-3.10にCase 1（底面近傍の流速0.28 m/s）における実験前後の地盤高およびその差分値（地盤高変化）を示す。計測結果は写真で確認される実験前後の地形の凹凸を良好に捕捉できており、外力作用によって生じる底質移動による地盤高変化の空間分布を高精度に評価可能であることがわかる。一方で、センサー部から地盤までの距離が遠くなるほど上層水中の懸濁粒子の影響を受けレーザー光の減衰が生じるため、計測精度が低下する傾向にある。そのため、図-3.10に示す赤枠内を解析対象として土量変化を算定することで底質移動量を評価した。

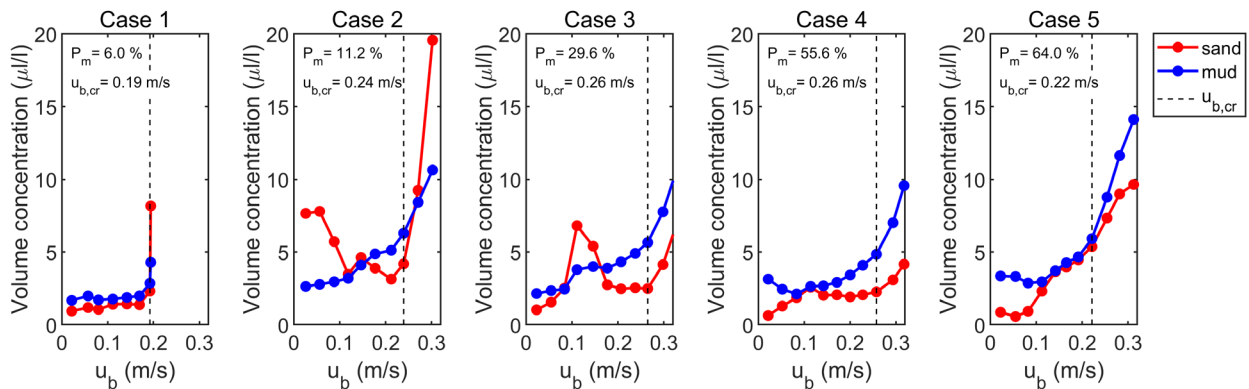


図-3.11 実験1における砂分（粒径100～300 μm）および泥分（粒径63 μm未満）の体積濃度変化
 （横軸：底面上1.0 cmの流速時間平均値，縦軸：懸濁粒子の体積濃度， P_m ：含泥率， $u_{b,cr}$ ：移動限界流速）

3.2 砂泥混合底質の移動限界の評価

図-3.11に、各ケースの流速上昇に伴い移動する土砂中の砂分（粒径100～300 μm）および泥分（粒径63 μm未満）の体積濃度の時間平均値，ならびに移動限界流速の判定結果を示す。Case 1（含泥率6.0%）において，流速0.19 m/sを超えた段階で砂泥両者の濃度が急増している。このケースでは流速0.19 m/s以前から砂粒子が掃流状態で輸送され始め，懸濁濃度が急増する流速段階では砂粒子が顕著に巻き上げられる様子が目視観察により確認された。Case 2（含泥率11.6%）においては，流速約0.24 m/sを超えた段階で砂分の体積濃度が急増している。泥分の体積濃度については，より小さい流速段階（約0.1 m/s）から緩やかな上昇傾向にあるものの，砂分の濃度急増に対応して濃度上昇率が增大していることがわかる。なお，このケースでは初期の流速段階（0.1 m/s以下）で砂分の濃度が高いが，目視観察ではこれらの流速段階において砂粒子の移動は確認されていないことから，これはフロック等の砂分粒径に相当する何らかの浮遊物質を検出したものと考えられる。Case 2においても，Case 1と同様に砂粒子が掃流状態で輸送される様子が目視観察により確認された。Case 3（含泥率29.6%）では，砂分の体積濃度が流速0.1 m/s前後で一度上昇した後，流速0.26 m/sを超えた段階で再度上昇している。泥分の体積濃度は，前者の流速段階でわずかに上昇し，後者の流速段階でCase 2でみられるような砂濃度の急上昇に対応した濃度上昇率の増加が確認される。ただし，目視観察によると前者の流速段階では前述のようなフロック等の砂粒径に相当する浮遊物質が巻き上がり，後者の流速段階で顕著な底質移動が生じていたことを踏まえ，流速0.26 m/sが移動限界流速であると判断した。なお，このケース以降の含泥率条件では，目視により明確

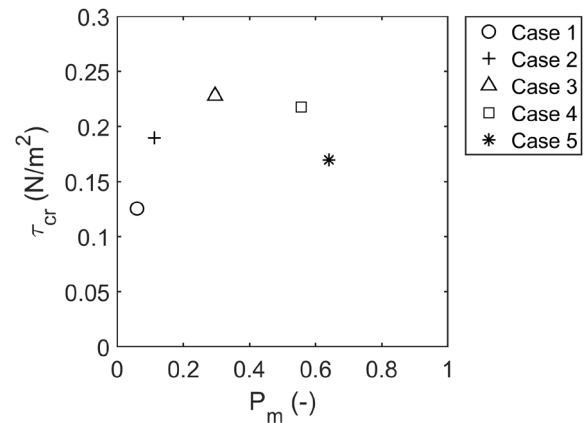


図-3.12 実験1により得られた限界底面せん断応力
 （横軸：含泥率，縦軸：限界底面せん断応力）

な掃流輸送は確認されなかった。Case 4（含泥率55.6%）においては，Case 3と同程度の流速段階（流速0.26 m/s）で砂泥分ともに濃度上昇あるいは濃度上昇率の増大が確認されるものの，Case 3と比較して砂分の濃度上昇量が小さい。未攪乱の現地泥であるCase 5（含泥率64.0%）に関しては，流速0.22 m/sを超えた段階で泥分の濃度上昇率が増大しており，移動限界流速に達したものと判断できる。以上の結果を整理すると，Case 1から5のいずれのケースにおいても，ある流速段階を超えた段階で砂分の濃度が上昇するとともに泥分の濃度上昇率が増大しており，これらの流速段階が含泥率に応じた砂泥混合底質の移動限界流速であると判断できる。

上記の移動限界の判断結果を通じて得られたそれぞれの含泥率条件に対する限界底面せん断応力を図-3.12に示す。含泥率30%未満に注目すると，含泥率6.0%から29.6%にかけて限界底面せん断応力は0.12 Paから0.23 Paと2倍程

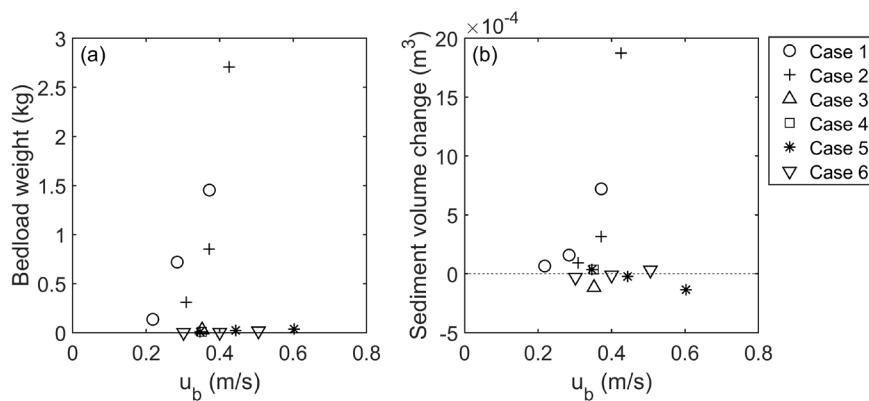


図-3.13 実験 2 における各ケースの(a)掃流土砂量および(b)土量変化 (侵食を正とする)
(横軸, 底面上 1.0 cm の流速時間平均値, 縦軸(a): 掃流土砂量, 縦軸(b): 土量変化)

度に増加している. 含泥率30%程度以上に関しては, 含泥率55.6%の場合の限界底面せん断応力は含泥率29.6%の場合と同程度であるのに対し, 含泥率64.0%では0.17 Pa程度となり含泥率55.6%と比べて小さい.

砂粒子の限界底面せん断応力は, Shields曲線 (例えば, Soulsby, 1997) に基づいて算定されることが一般的であり, 粒径250 μm の場合で約0.17 Paとなる. 本実験で得られた含泥率6.0%の限界底面せん断応力は0.12 Pa であり Shields曲線に基づく結果よりやや小さいもののオーダー的には同程度である. 非粘着性土砂の性質が支配的となる低含泥率底質は, 粘土混入に伴う粘着力・内部摩擦角の増加により限界底面せん断応力が増加する (例えば, Panagiotopoulos *et al.*, 1997). 本実験における含泥率30%未満の低含泥率域においても, 対象土砂の粒径や鉱物組成等の違いにより増加の程度に差異はあるものの既往研究と同様の傾向がみられる.

粘着性土砂の性質が支配的となる高含泥率底質の限界底面せん断応力は, 底質の湿潤密度に依存して変化し, 湿潤密度が大きいほど限界底面せん断応力は増大する (例えば, Mitchener and Torfs, 1996). Case 4 (含泥率55.6%) およびCase 5 (同64.0%) の含水比はそれぞれ73.7%および138.9%であり (表-3.2), 湿潤密度はそれぞれ1,559 kg/m^3 および1,343 kg/m^3 (海水の密度を1,023 kg/m^3 , 土粒子密度を2,650 kg/m^3 と仮定) となり, この湿潤密度の差により限界底面せん断応力に違いが生じた可能性が考えられる.

また, Case 5の未攪乱試料 (現地試料) は底質性状に空間的なばらつきがある可能性が高い. そのため, 均一に混合されたCase 4の攪乱試料とは異なり, より侵食抵抗の小さい箇所から選択的に侵食が生じることで, より小さい流速条件で移動限界に達した可能性も考えられる. その

他, 高含泥率底質の侵食抵抗は, 上記の湿潤密度条件をはじめ, 粘土の鉱物組成や有機物含有量, 生物学的過程などの様々な影響を受けるため (例えば, Mitchener and Torfs, 1996), 含泥率以外のパラメータが侵食抵抗に及ぼす影響についても今後検討する必要がある.

3.3 砂泥混合底質の移動量の評価

図-3.13に各ケースにおける掃流土砂量および土量変化を示す. まず, 流速上昇に伴う各ケースの土砂移動傾向について述べる. Case 1 (含泥率6.0%) およびCase 2 (同11.2%) については, 流速の上昇に伴い掃流土砂量および土量変化ともに大きく増大しており, 流速0.3~0.4 m/sの段階での掃流土砂量 (土量変化) は, 前者で約1.5 kg (約 $8.0 \times 10^{-4} m^3$), 後者で約0.9 kg (約 $3.0 \times 10^{-4} m^3$) であった. 一方, 含泥率29.6%以上のCase 3~6については, 流速0.3~0.4 m/sの段階での掃流土砂量は微小であり, 土量変化に関しても水中レーザースキャナーで検知できるほどの侵食は生じていなかった. 含泥率64.0%以上のCase 5, 6については, さらに高流速条件においても掃流土砂量, 土量変化ともに微小であった.

また, 底質の移動量に対する含泥率変化の影響を調べるため, 同程度の流速条件 (流速0.3~0.4 m/s) に対する各含泥率ケースの移動量を比較した (図-3.14). 含泥率6.0%から29.6%にかけて, 掃流土砂量および侵食方向の土量変化が著しく低下する. 含泥率29.6%以上のケースでは, 掃流土砂量は微小であり, 土量変化に関しても堆積に転じるケースがあるものの極めて小さい値で推移している. 含泥率6.0%から30%にかけての底質移動量の著しい減少傾向は, 同含泥率域での限界底面せん断応力の増大傾向と一致しており, さらに目視観察により含泥率29.6%

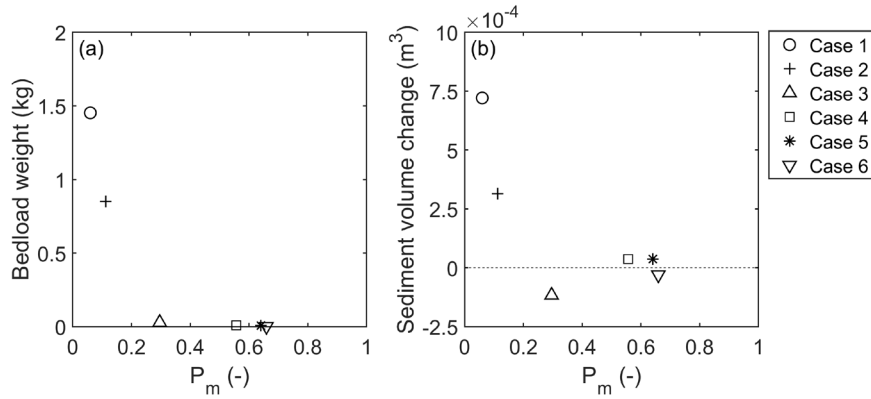


図-3.14 実験2における(a)掃流土砂量および(b)土量変化（侵食を正とする）の含泥率依存性
（流速条件： $u_b = 0.3 \sim 0.37$ m/s，横軸：含泥率，縦軸(a)：掃流土砂量，縦軸(b)：土量変化）

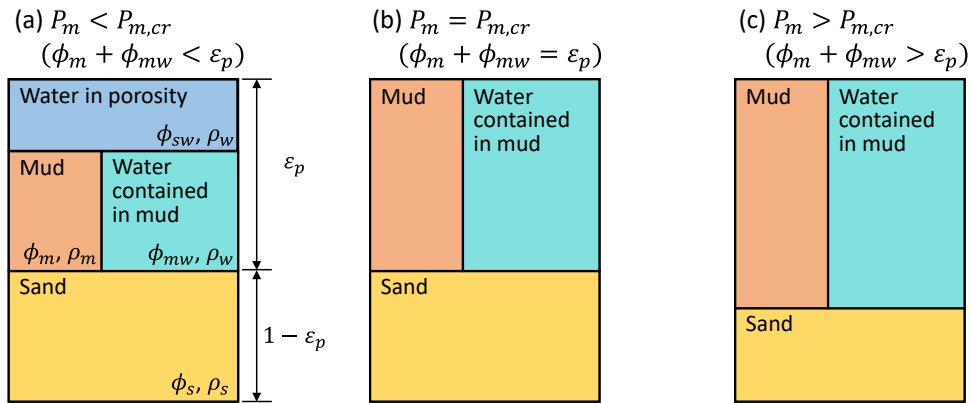


図-4.1 含泥率に応じた砂泥混合底質の示相図

以上で砂粒子の明確な掃流輸送が確認されなかったことを踏まえると，本実験で用いた砂泥混合底質は含泥率30%未満で非粘着性土砂から粘着性土砂に近い侵食挙動に移行するものと推察される。

4. 実験結果を用いたモデルパラメータの最適化と精度検証

4.1 限界底面せん断応力の算定におけるパラメータ検討

実験試料の底質条件（表-3.2）および実験で得られた限界底面せん断応力と含泥率の関係（図-3.12）に基づいて，砂泥混合底質の限界底面せん断応力を表す式(2)中のパラメータ（ $\tau_{cr,s}$, $\tau_{cr,m}$, $P_{m,cr}$, β ）について検討した。まず，限界含泥率 $P_{m,cr}$ については，趙ら（2019）が定義する粘土含有率による混合土砂の相対体積変化に基づく限界粘土含有率の考え方を参考に評価した。彼らは，Panagiotopoulos *et al.* (1997)の概念モデルに基づき，混合土

砂を粘土含有率が小さく砂の空隙に粘土が存在する状態（図-4.1a）と，砂の空隙より多くの粘土を含有する状態（図-4.1c）に分類し，その境界の状態（砂の空隙が粘土と粘土への吸着水で満たされている状態，図-4.1b）の粘土含有率を限界粘土含有率と定義している。本研究では，粘土含有率を含泥率に置き換え，泥，泥への吸着水，砂および間隙水の相対体積（ ϕ_m , ϕ_{mw} , ϕ_s , ϕ_{sw} ）を整理すると，それぞれ含泥率の関数として式(20)～式(23)で定義される。

$$\phi_m \begin{cases} = (1 - \varepsilon_p) \frac{\rho_s}{\rho_m} \frac{P_m}{1 - P_m}, & \text{if } \phi_m + \phi_{mw} < \varepsilon_p \\ = \frac{1}{1 + w_m \frac{\rho_m}{\rho_w} + \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{1 - P_m}{P_m}}, & \text{if } \phi_m + \phi_{mw} \geq \varepsilon_p \end{cases} \quad (20)$$

$$\phi_{mw} = w_m \frac{\rho_m}{\rho_w} \phi_m \quad (21)$$

$$\phi_s \begin{cases} = 1 - \varepsilon_p, & \text{if } \phi_m + \phi_{mw} < \varepsilon_p \\ = 1 - \phi_m - \phi_{mw}, & \text{if } \phi_m + \phi_{mw} \geq \varepsilon_p \end{cases} \quad (22)$$

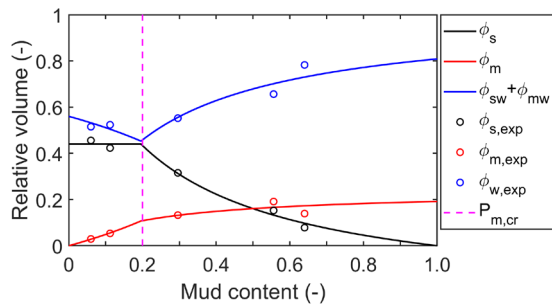


図-4.2 含泥率に応じた底質構成物（砂，泥および水）の相対体積に基づく限界含泥率
 （横軸：含泥率，縦軸：相対体積， $\phi_{s,exp}$ ， $\phi_{m,exp}$ および $\phi_{w,exp}$ ：各実験試料の砂，泥および水の相対体積， $P_{m,cr}$ ：限界含泥率）

$$\phi_{sw} \begin{cases} = \varepsilon_p - \phi_m - \phi_{mw}, & \text{if } \phi_m + \phi_{mw} < \varepsilon_p \\ = 0, & \text{if } \phi_m + \phi_{mw} \geq \varepsilon_p \end{cases} \quad (23)$$

ここで， ε_p は限界空隙率， w_m は泥に対する吸着水の含水比（重量比）である．砂と泥の土粒子密度をともに2,650 kg/m³，海水の密度を1,023 kg/m³と仮定すると，実験試料5ケース（Case 1~5）の砂，泥および水の相対体積（ $\phi_{s,exp}$ ， $\phi_{m,exp}$ ， $\phi_{w,exp}$ ）は，含泥率および含水比の値（表-3.2）から算定することができる．これにより得られた実験試料の各相対体積に対し，最小二乗法により式(20)~式(23)をフィッティングさせることで ε_p および w_m が得られ（ $\varepsilon_p = 0.56$ ， $w_m = 1.63$ ），その結果として限界含泥率 $P_{m,cr}$ が0.2となることがわかる（図-4.2）．本研究における含泥率は体積基準であるため，質量基準の含泥率で示されている既往研究と単純な比較はできないが，上述の仮定の通り砂泥の土粒子密度が同じであるならば体積基準と質量基準の含泥率は等しく，本研究で得られた限界含泥率 $P_{m,cr}$ （=0.2）は既往研究と同程度の値を示している．

次に，式(2)の他のパラメータについても同様に最小二乗法を用いたフィッティングにより決定した． $P_{m,cr}=0.2$ とした場合に得られた限界底面せん断応力を図-4.3に示す．砂と泥の限界底面せん断応力（ $\tau_{e,s}$ および $\tau_{e,m}$ ）はそれぞれ0.10 Paおよび0.13 Pa，無次元パラメータ β は5.1である． β に関して，van Ledden (2003)がPanagiotopoulos et al. (1997)の実験結果に基づいて決定した値(0.75~1.25)と比べると大きい値となった． β は含泥率増加に伴う限界底面せん断応力の増分に寄与するパラメータであり，対象土砂の条件によって大きく変化するものと考えられるけれども，このような変動幅の妥当性やその要因については，今後もデータの拡充等により確認する必要がある．

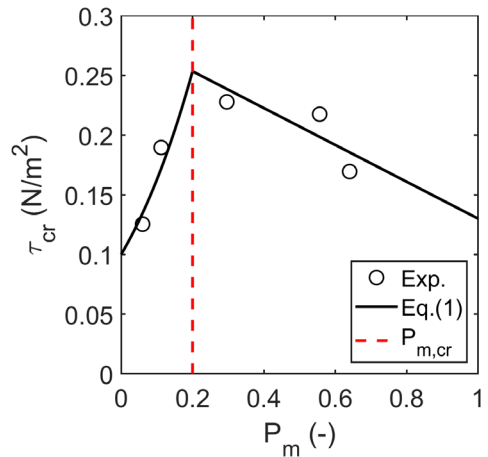


図-4.3 パラメータ調整された限界底面せん断応力
 （横軸：含泥率，縦軸：限界底面せん断応力）

表-4.1 実験の再現計算に用いた砂泥混合輸送モデルの土砂輸送に関連するパラメータ一覧

パラメータ	設定値
砂の中央粒径 $d_{50,s}$	250×10^{-6} m
泥の中央粒径 $d_{50,m}$	20×10^{-6} m
砂の土粒子密度 ρ_s	2,650 kg/m ³
泥の土粒子密度 ρ_m	2,650 kg/m ³
砂の巻き上げ係数 $E_{s,0}$	8.0×10^{-3} kg/m ² /s
泥の巻き上げ係数 $E_{m,0}$	0.1×10^{-3} kg/m ² /s
砂の限界底面せん断応力 $\tau_{cr,s}$	0.10 N/m ²
泥の限界底面せん断応力 $\tau_{cr,m}$	0.13 N/m ²
限界含泥率 $P_{m,cr}$	0.20
無次元パラメータ β	5.1

4.2 計算条件

2章で構築した砂泥混合輸送モデルの精度検証を行うため，3章で示した底質移動実験の再現計算を実施した．本モデルによる再現計算の対象項目は，図-3.13に示す掃流土砂量（kg）および土量変化（m³）から換算された掃流移動による土砂の輸送速度（kg/m/s）および侵食フラックス E （kg/m²/s）であり，それぞれ一方向流の作用時間（=10 min），土粒子密度（=2,650 kg/m³）および実験試料の空隙率（図-4.2の $\phi_{w,exp}$ ）を用いて換算した．本モデルでは砂のみに対して掃流移動を考慮しているため，式(3)で算定される q_b が検証項目の前者に相当する．また，再現計算に

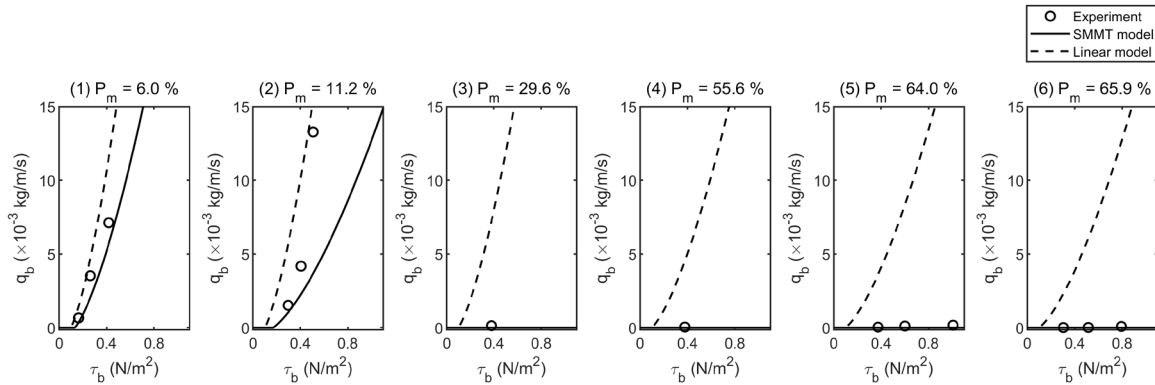


図-4.4 各含泥率条件における掃流移動による輸送速度 q_b の計算結果
(横軸：底面せん断応力，縦軸：掃流移動による輸送速度)

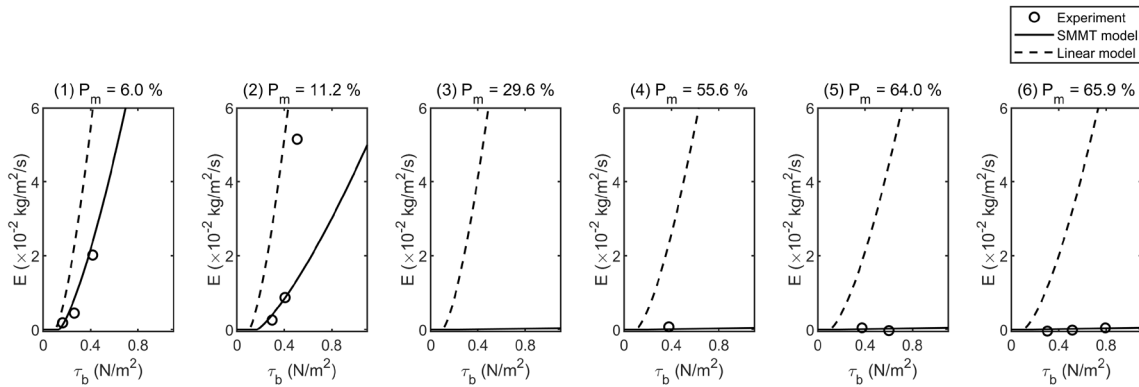


図-4.5 各含泥率条件における侵食フラックス E の計算結果
(横軸：底面せん断応力，縦軸：侵食フラックス)

における侵食フラックス E は，掃流輸送による侵食フラックス Q_b ならびに砂泥それぞれの巻き上げフラックス E_s および E_m (式(5)および式(6)) の合算値として式(24)により算定される。

$$E = Q_b + E_s + E_m \quad (24)$$

なお， Q_b の算定にあたっては，掃流輸送によって長さ0.676 mの実験試料から砂が一様に流失し，上流部から砂の供給がないものと仮定し，任意の作用外力に対する q_b (kg/m/s)を上記の試料長さで除することで算定した。実験の再現計算における砂泥混合輸送モデルの土砂輸送に関連するその他のパラメータについては，実験試料の粒径情報および前節のパラメータ検討の結果に基づき，表-4.1に示すとおりとした。なお，泥のみの場合の巻き上げ係数 $E_{m,0}$ については，既往研究 (Winterwerp *et al.*, 2012) を参考に 0.1×10^{-3} kg/m²/sとした。

4.3 計算結果および考察

移動量の評価実験の各含泥率条件6ケースに対する，砂泥混合輸送モデル (以下，SMMTモデルと呼称) を用いた掃流移動による砂の輸送速度 q_b および侵食フラックス E の再現計算結果を図-4.4および図-4.5に実線で示す。なお，SMMTモデルによる計算結果との比較のため，図中には実験結果を黒丸で，また砂輸送モデルと泥輸送モデルにより求められる輸送量を砂泥の割合で重ね合わせた結果 (以下，Linearモデルと呼称) を比較のため破線で示している。Linearモデルは，含泥率11.2%以下の低含泥率ケースでは q_b および E ともに実験結果を良好に再現できている一方で，含泥率29.6%以上の高含泥率条件では過大評価となっており，実験で確認されたこれらの含泥率域での侵食両の減少傾向を再現できていない。それに対してSMMTモデルは，含泥率11.2%における底面せん断応力0.4 Pa以上の q_b および E を過小評価しているものの，含泥率11.2%以下での流速上昇に伴う q_b および E の増大傾向，

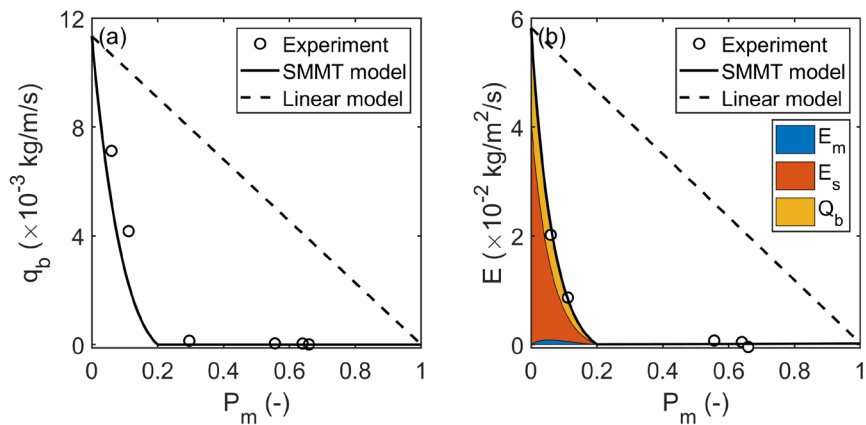


図-4.6 (a) 掃流移動による輸送速度および(b) 侵食フラックスの含泥率依存性の再現性
 (計算結果：底面せん断応力 0.4 N/m² 作用，実験結果：底面せん断応力 0.3~0.41 N/m² 作用)
 (横軸：含泥率，縦軸(a)：掃流移動による輸送速度，縦軸(b)：侵食フラックス)

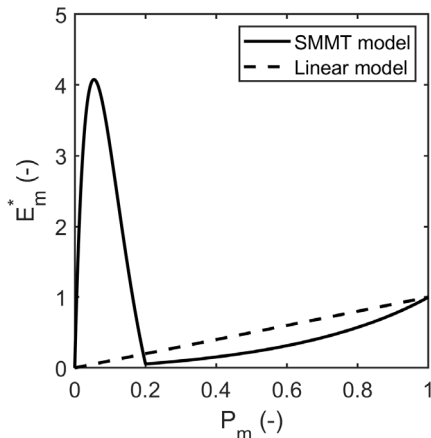


図-4.7 SMMT モデルと Linear モデルによる無次元化された泥の巻き上げフラックスの比較
 (底面せん断応力 0.4 N/m² の計算結果，横軸：含泥率，縦軸：無次元化された泥の巻き上げフラックス)

ならびに含泥率29.6%以上でほとんど侵食が生じない傾向を良好に再現できている。

底質移動量の含泥率依存性に関するSMMTモデルの再現性を調べるため，底面せん断応力0.4 Pa（底面上1.0 cmの流速条件0.36 m/s程度に相当）を作用させた場合の含泥率0~100%までの掃流移動による砂の輸送速度 q_b および侵食フラックス E を算定した（図-4.6）。なお，比較のため底面上1.0 cmにおける流速が0.35 m/s~0.40 m/sの実験結果およびLinearモデルによる計算結果を図中に示している。Linearモデルによる再現計算では，含泥率の増加に伴い q_b および E が線形的に減少するため，いずれの含泥率条

件においても過剰に侵食が生じる結果となっている。それに対してSMMTモデルによる計算結果は，低含泥率域（ $P_m < 0.3$ ）における含泥率の増加に伴う q_b および E の急激な減少傾向に加えて， $P_m \geq 0.3$ においてほとんど侵食が生じない状況を良好に再現できていることが確認された。

SMMTモデルとLinearモデルにより算定される泥の巻き上げ量を比較することで，両モデル間の泥の巻き上げ特性の違いを調べた（図-4.7）。なお，図中の E_m^* は無次元化された泥の巻き上げフラックス（ E_m を泥のみ（ $P_m = 1$ ）の場合の値で除することで得られる）である。 $P_m < 0.2$ におけるSMMTモデルの計算結果に注目すると，Linearモデルと比べて泥の巻き上げ量が大きく， $P_m = 1$ の値と比較して最大で4倍程度の巻き上げが生じる結果となっている。一方， $P_m \geq 0.2$ におけるSMMTの計算結果は，泥の巻き上げフラックスが含泥率の増加とともに線形的に減少するLinearモデルと比べて小さい値であることがわかる。ただし，SMMTモデルの計算で示されたように，低含泥率域で巻き上げ量が顕著となる傾向については，比較のための実験データがなく妥当性の検証ができていない。今後，泥の巻き上げ量に関する検証データを取得し定量的な評価を行う必要がある。

5. 本モデルの現地適用に向けた試行計算

5.1 計算条件

本砂泥混合輸送モデルの現地適用性に関する基礎検討として，実海域を対象とした土砂輸送シミュレーションを実施した。本研究では，国内で砂泥混合底質の堆積が確

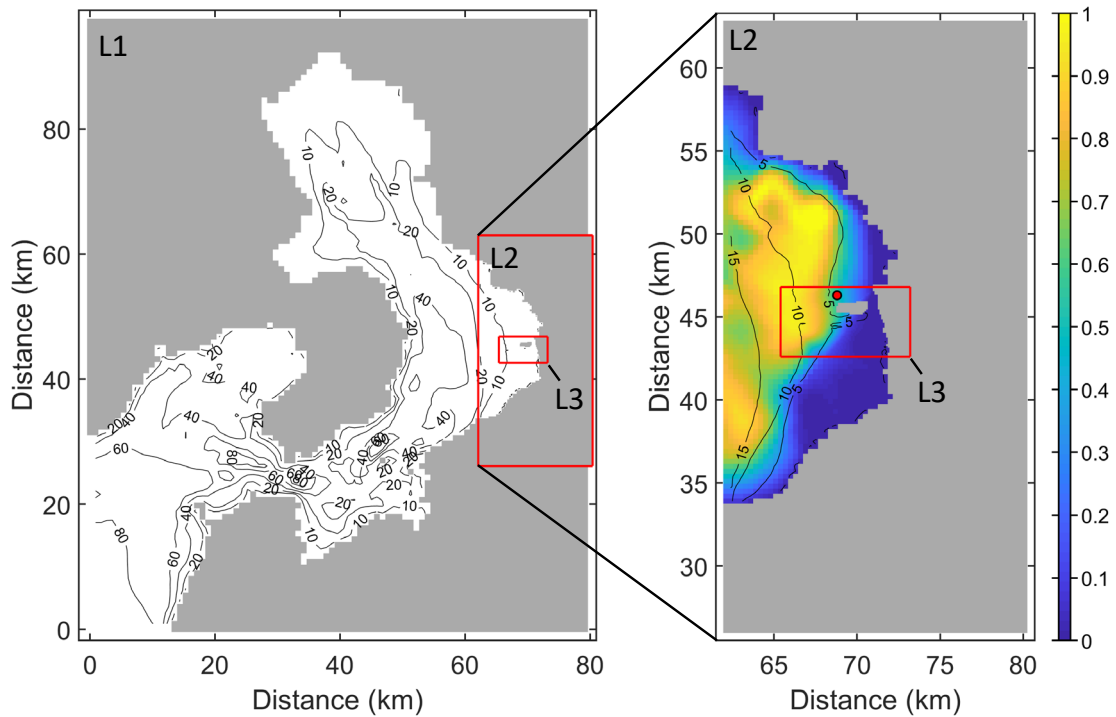


図-5.1 計算領域における水深（コンター，m）および初期含泥率（カラー，—）の空間分布
（右図中の赤丸：潮位および流速の観測地点）

認されている有明海東部海域を対象とした。土砂輸送シミュレーションの計算期間は2016年8月13日から2016年8月27日までの15日間であり、流動場の助走計算のため上記計算期間の前に12日間の助走期間を設けた。流動場の計算対象領域は有明海全域（L1：水平解像度900 m）、有明海東部海域（L2：同300 m）、および熊本港周辺海域（L3：同100 m）の3領域とし、土砂輸送の計算対象領域はL2およびL3の2領域のみとした（図-5.1）。大領域（L1）から小領域（L3）へのダウンスケーリングに際しては、水位、流速（流量）等の物理量を接続境界において双方向に反映させる2 wayネスティング手法を採用し、小領域から大領域へ物理量のフィードバックを考慮した。鉛直座標系はレベル（z）座標系であり、鉛直層数は6層（第1層：4 m、第2,3層：3 m、第4,5層：5 m、第6層：海底面まで）とした。流動場の計算における作用外力は潮汐のみとし、主要4分潮（M2, S2, K1, O1）による潮位変動を開境界で与えた。

土砂輸送シミュレーションにおける底質含泥率の初期分布として、現地データを参照して熊本港周辺からその沖合にかけて高含泥率の空間分布を与えた（図-5.1）。底質の掃流砂量および巻き上げ量の算定に関わる物理パラメータは、前章と同じ値（表-4.1）を採用した。砂泥粒子の

沈降速度については、Whitehouse *et al.* (2000) の式を用いてそれぞれの代表粒径から算定した。なお、泥の沈降速度は上記の算定値を最小値として濃度に依存して変化するものとした（Tsuruya *et al.*, 1990）。泥の沈降に関する限界せん断応力 τ_d は0.03 Paとした。地形と含泥率の変化を算定する際に用いる底質の空隙率 ε に関して、前章で示すように本来は含泥率等に依存して変化するが、本シミュレーションでは一定値（=0.65, 湿潤密度1,600 kg/m³に相当）を与えた。含泥率変化サブモデルにおける交換層厚さ a_{mix} は0.1 mとし、不変層の含泥率 $P_{m,0}$ は継続的に侵食が生じる領域の底質は砂質土に近づいていくものと仮定して0とした。上記の計算条件一覧を表-5.1に示す。

5.2 計算結果および考察

(1) 潮位および流速の再現性

本シミュレーションにおける流動場の再現性を検証するため、2016年8月18日から2018年9月2日にかけて熊本港の北側（図-5.1）における潮位、東西方向および南北方向の水深平均流速の観測値（中川ら, 2017）との比較を行った（図-5.2）。なお、潮位の観測値はInfinity-WH（JFEアドバンテック(株)製）により計測された深度データのバース

表-5.1 実海域計算における計算条件

項目	設定条件
解析期間	2016年8月13日～8月27日
水平解像度 (格子数)	L1: 900 m (90*100 格子) L2: 300 m (62*124 格子) L3: 100 m (79* 43 格子)
鉛直層数 (層厚)	第1層 :4.0 m 第2,3層:3.0 m 第4,5層:5.0 m 第6層 :海底面まで
潮汐外力	主要4分潮(M2, S2, K1, O1)
砂の沈降速度 $w_{s,s}$	3.48 cm/s
泥の沈降速度 $w_{s,m}$	0.0316 cm/s
泥の沈降に関する限界底面せん断応力 τ_d	0.03 Pa
底質の空隙率 ϵ	0.65
交換層厚さ a_{mix}	0.1 m
不変層の含泥率 $P_{m,0}$	0

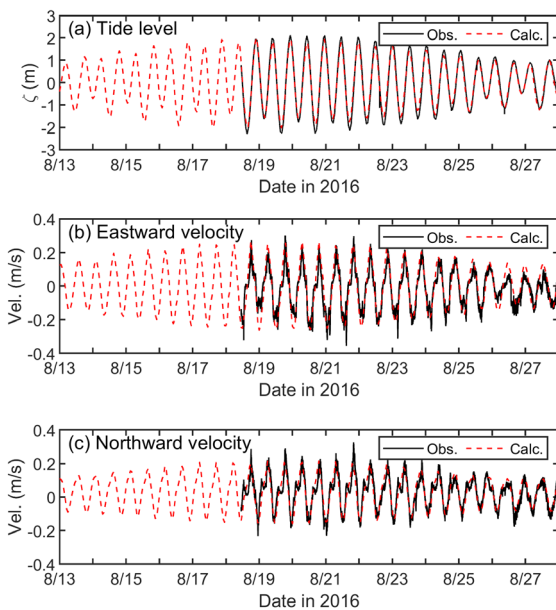


図-5.2 熊本港北側における観測値と計算値の比較
(a)潮位, および水平流速の(b)東西成分と
(c)南北成分の鉛直平均値)

ト平均値であり, 流速の観測値は Workhorse ADCP (1200kHz, Teledyne RD Instruments製) により計測された多層流速データの水深平均値である. 本シミュレーションにより計算された潮位は, 大潮から小潮にかけての観

測潮位の変動を良好に再現できている (図-5.2a). 水深平均流速に関しても, 観測値で確認される潮位変動に対応した東西方向および南北方向の流速変動を良好に再現できていることがわかる (図-5.2b,c).

(2) 土砂輸送シミュレーションの結果と考察

本砂泥混合輸送 (SMMT) モデルおよび砂輸送モデルと泥輸送モデルの線形重ね合わせ計算 (Linearモデル) による大潮の上げ潮時 (8月18日18時) における砂泥それぞれの巻き上げ量を比較することで, SMMTモデルの外力応答特性を調べた. まず, 泥の巻き上げ量の空間分布をみると (図-5.3), SMMTモデルによる計算では低含泥率 ($P_m < P_{m,cr} = 0.2$) かつ潮汐流による底面せん断応力が大きい海域 (例えば熊本港の南側海域) において泥の巻き上げ量が大きく, 含泥率条件によってはLinearモデルに対して2オーダー以上大きい値となる海域も存在する. 一方, 砂の巻き上げ量に関しては (図-5.4), SMMTモデルの計算結果はLinearモデルと比べてやや小さい傾向にある.

次に, 両モデルによる土砂輸送計算開始から15日経過後の泥および砂それぞれの侵食・堆積による地形変化を調べた. 泥の侵食・堆積による地形変化をみると (図-5.5), SMMTモデルでは潮汐流による底面せん断応力が大きい熊本港の南側海域において侵食が生じている一方, 潮汐流が比較的静穏な侵食域東側の干潟部において堆積がみ

られ、熊本港内を含む沖側の高含泥率域においてもわずかながら堆積が生じている。それに対してLinearモデルでは、SMMTモデルと比べ泥による地形変化が小さい。砂の侵食・堆積による地形変化をみると（図-5.6）、熊本港南側の干潟域において地形変化が顕著であるという点で両モ

デルは同様の傾向を示しているが、Linearモデルの方がやや地形変化量が大きい。

また、土砂輸送計算開始から15日経過後の底質の含泥率変化を両モデルで比較した結果（図-5.7）、両モデルで含泥率変化の傾向が異なることが確認できる。砂泥の侵食・

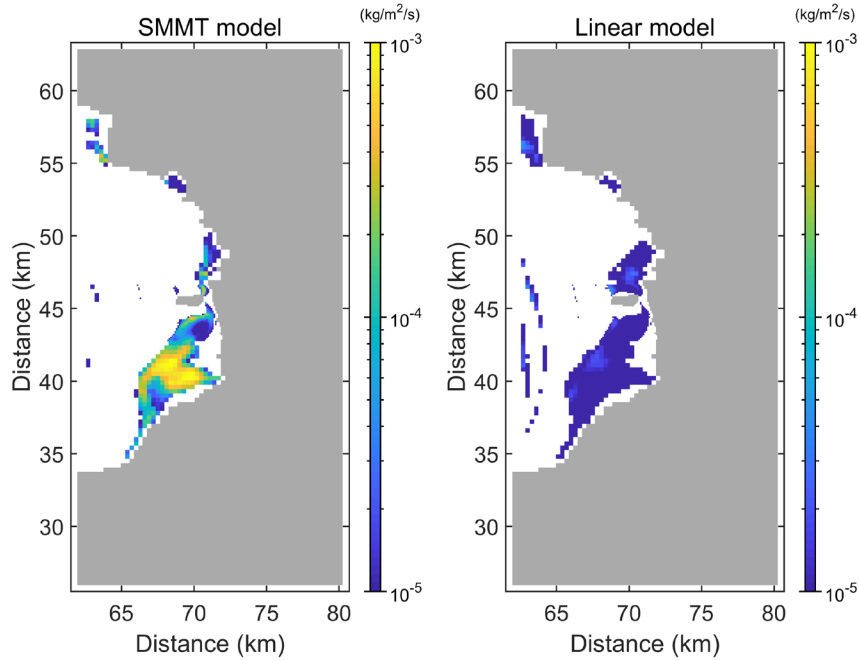


図-5.3 有明海東部海域における大潮・上げ潮時の泥の巻き上げフラックスの計算結果
（左図：SMMTモデルの計算結果，右図：Linearモデルの計算結果）

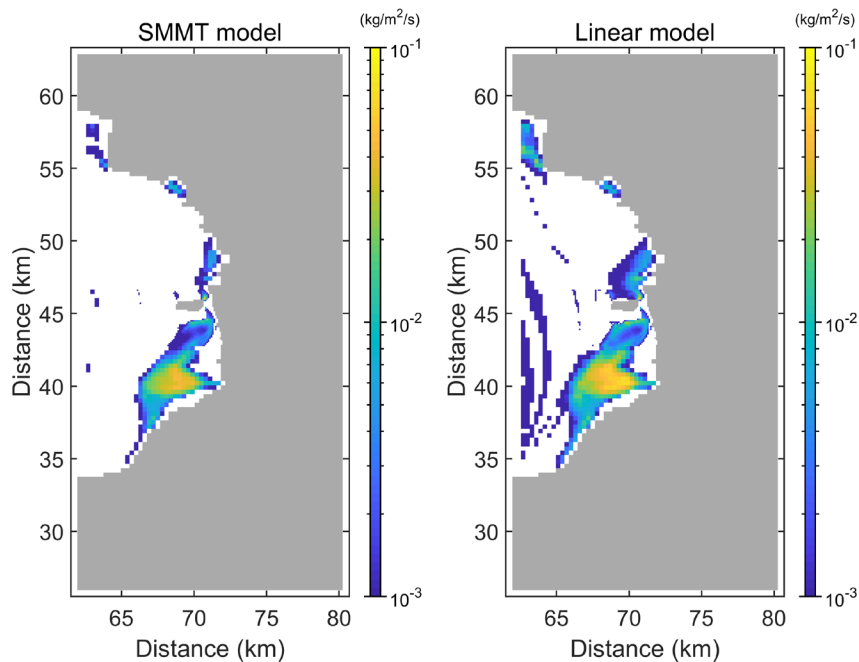


図-5.4 有明海東部海域における大潮・上げ潮時の砂の巻き上げフラックスの計算結果
（左図：SMMTモデルの計算結果，右図：Linearモデルの計算結果）

堆積が顕著である熊本港の南側海域に注目すると、Linearモデルでは含泥率が低下する傾向が強いのに対し、SMMTモデルでは前述の泥の侵食域で同様の含泥率低下がみられるものの、泥の堆積域において含泥率が増加し

ている。これらの傾向を整理すると、SMMTモデルの特徴として、Linearモデルと比べて低含泥率 ($P_m < P_{m,cr}$) かつ底面せん断応力が大きい領域における泥の巻き上げと、

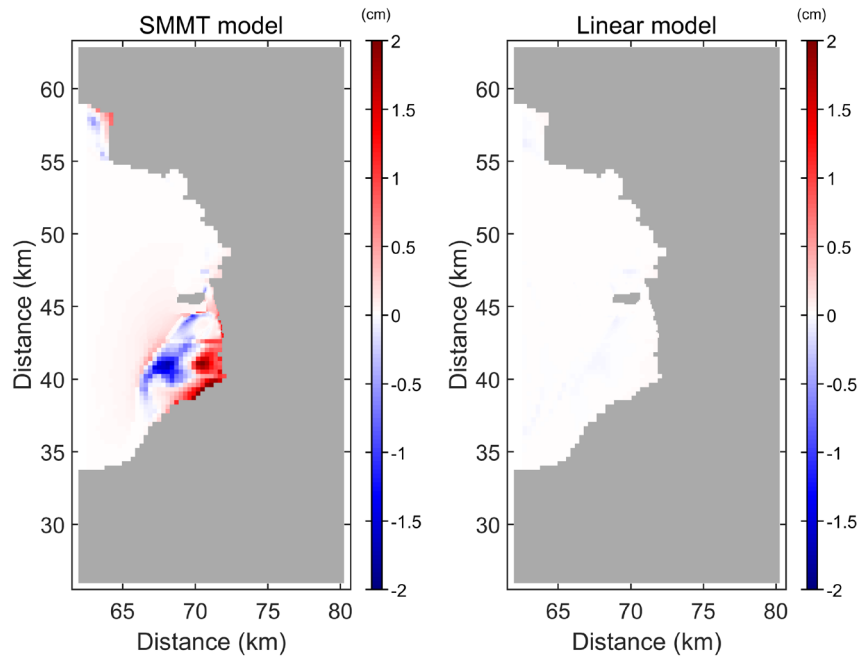


図-5.5 有明海東部海域における泥の侵食・堆積による地形変化の計算結果（土砂輸送計算開始から15日経過時）
（左図：SMMTモデルの計算結果，右図：Linearモデルの計算結果）

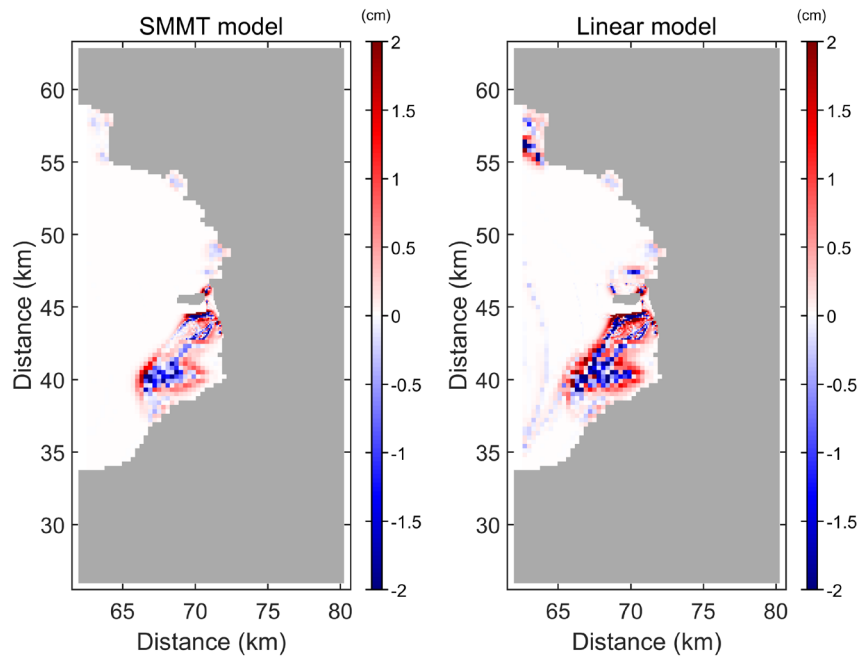


図-5.6 有明海東部海域における砂の侵食・堆積による地形変化の計算結果（土砂輸送計算開始から15日経過時）
（左図：SMMTモデルの計算結果，右図：Linearモデルの計算結果）

巻き上げられた泥の静穏域への堆積が顕著であり、砂泥の分級が促進されやすいことが確認された。

さらに、SMMTモデルの港湾埋没予測への活用検討として、熊本港周辺における潮汐流による砂泥の侵食・堆積傾向について調べた(図-5.8)。砂による地形変化に注目す

ると(図-5.8b)、含泥率が低い熊本港の防波堤の南側から岸側にかけての地形変化が顕著であり、沖側の高含泥率域ではほとんど地形変化が生じていない。一方、泥の侵食・堆積に関しては(図-5.8a)、熊本港内から航路の沖合にかけて広く堆積が生じている、砂による地形変化の特

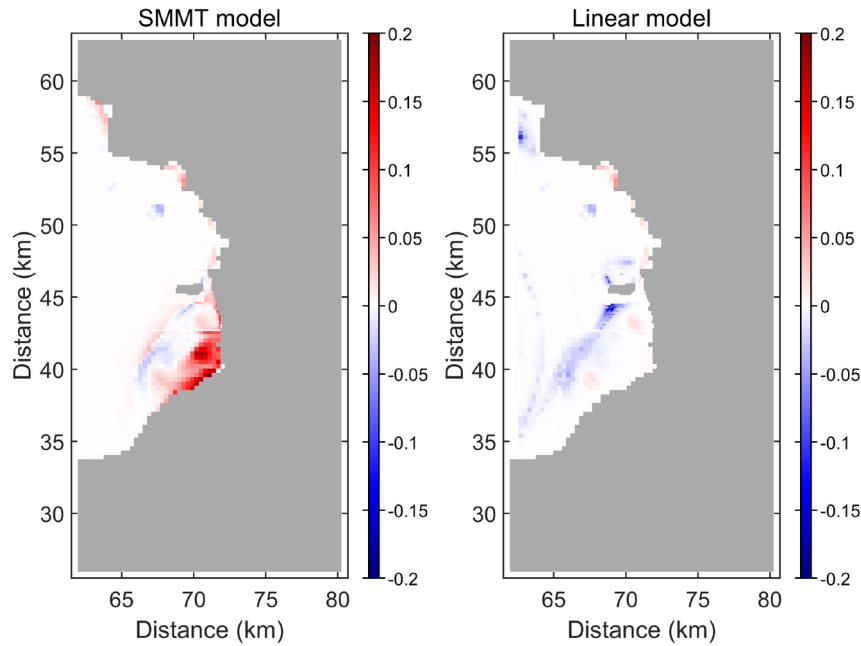


図-5.7 有明海東部海域における含泥率変化の計算結果(土砂輸送計算開始から15日経過時)
(左図：SMMTモデルの計算結果，右図：Linearモデルの計算結果)

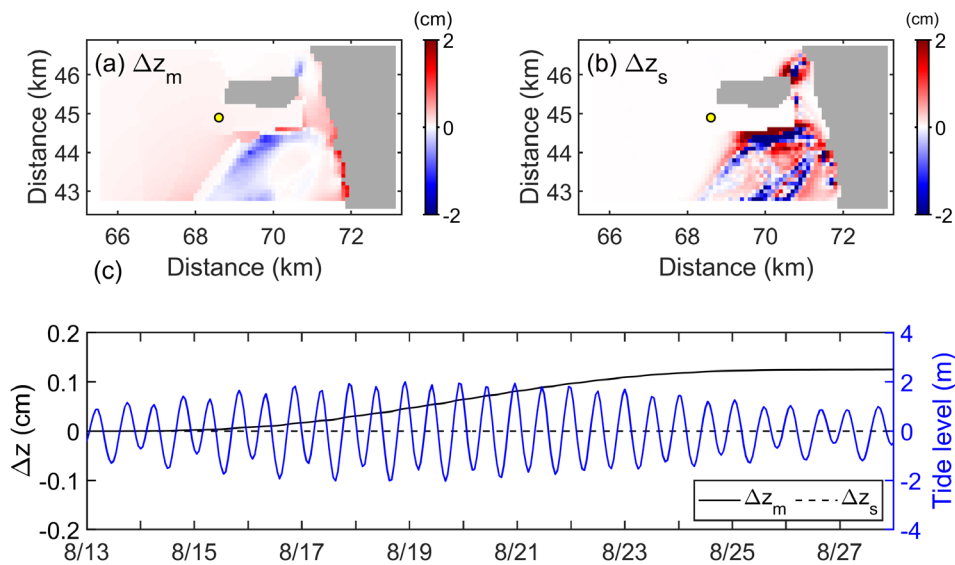


図-5.7 SMMTモデルによる(a,b)熊本港周辺における泥と砂による地形変化の空間分布(土砂輸送計算開始から15日経過後)および(c)航路部における地盤高の時間変化

徴と大きく異なる結果を示している。また、熊本港の航路部における砂泥による地形変化の時間変化をみると(図-5.8c)、潮汐流が大きくなる大潮時のみ泥の堆積が生じることが確認できる。ただし、本モデルによる実海域における土砂輸送および地形変化の予測精度については未検証であり、港湾内外での深浅測量等の現地観測データとの定量的な比較を通じて本モデルの現地適用性について検討する必要がある。

6. おわりに

本研究では、河口沿岸域の地形変化予測に適用可能な砂泥混合輸送モデルを開発することを目的として、砂泥混合底質の侵食特性および砂泥の侵食・堆積に伴う含泥率変化を考慮した砂泥混合輸送モデルを構築した。次いで、国内現地土砂で構成される砂泥混合底質の移動実験を実施し、本モデルのパラメータ調整および精度検証を行った。さらに、本モデルの現地適用に向けた基礎検討として、有明海東部海域を対象とした土砂輸送シミュレーションを実施した。本研究の主要な成果は以下のとおりであり、本モデルは砂泥が混合して堆積する海域における広域的な地形・粒度組成の変化や周辺港湾の埋没量の予測において有用なツールになりうることを期待される。

- (1) 国内現地土砂で構成される砂泥混合底質の移動限界および移動量の評価実験の結果、低含泥率域(29.6%未満)において限界底面せん断応力が増加し、掃流輸送および巻き上げによる侵食量が著しく低下することが確認された。
- (2) 実験の再現計算を通じて、含泥率に依存した底質の侵食特性を考慮した本モデルは、移動限界の評価実験に基づき限界底面せん断応力のパラメータ調整を適切に行うことで、移動量の評価実験で示された含泥率に依存した底質移動量の変化を良好に再現できることが確認された。
- (3) 有明海東部海域を対象とした実海域計算を通じて、本モデルの特徴として、低含泥率域($P_m < P_{m,cr}$)から底面せん断応力が大きい領域における泥の巻き上げと浮遊泥の静穏域への堆積が顕著であり、砂泥の分級が促進されやすいことが確認された。

なお、有明海をはじめ実海域の砂泥混合場では底質の含泥率が鉛直方向に変化していることが多い。一方で、本モデルでは底質の含泥率変化を単層の交換層で評価し、侵食時には含泥率を一定で与える不変層を用いる手法を

採用しているため、実海域で確認されている含泥率の鉛直分布を正確に反映できないのが現状である。そのため、今後の課題として、本モデルにおける含泥率変化モデルの多層化を検討する必要がある。また、本研究では潮汐流のみによる土砂輸送シミュレーションを実施したが、河口沿岸域における土砂動態および地形変化の予測においては、波浪外力の考慮(波浪による底質の巻き上げや海浜流輸送)、密度場の考慮(河川水流入、海面での熱収支)、河川からの土砂供給などを考慮することが重要となる。今後、これらを考慮した土砂輸送シミュレーションに対応可能なモデルへと発展させる。

(2020年8月5日受付)

謝辞

本研究は、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からの受託調査として実施したものである。現地調査の実施に際して、国土交通省九州地方整備局熊本港湾・空港整備事務所の関係者諸氏に甚大なるご協力を頂いた。また、現地調査および実験実施においては、(株)エコーおよび日本ミクニヤ(株)の作業協力を得た。最後に部内討議等を通じて貴重な意見やコメントを頂いた海洋・水工部門の各位ならびに査読意見を頂いた吉江宗生特別研究主幹ほか公表審査委員会の各位に謝意を表する。

参考文献

- 栗原 康 (1980): 干潟は生きている, 岩波書店, 219p.
- 趙 容桓・中村友昭・水谷法美 (2019): 粘土流失を考慮した混合土砂の漂砂計算手法の導入, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, pp.I_475-I_480.
- 中川康之 (2003): 有明海における底泥輸送現象のモデル化, 港湾空港技術研究所報告, Vol.42, No.4, pp.25-42.
- 中川康之・小碓大地・横山直弥・高山 優・幸福辰己 (2017): 潮汐流・波浪作用下における砂泥混合底質の移動特性に関する検討 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I_547-I_552.
- 平野宗夫 (1971): Armoringをともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, Vol. 195, pp.55-65.
- 細川恭史 (1991): 浅海域での生物による水質浄化作用, 沿岸海洋研究ノート, Vol.29, No.1, pp.28-36.
- Chesher, T.J., and Ockenden, M.C. (1997): Numerical modelling of mud and sand mixtures, In: Burt, N. et al. (Eds.), Cohesive Sediments, John Wiley & Sons, pp.395-402.

- Dyer, K. R. (1986): Coastal and estuarine sediment dynamics, John Wiley & Sons, 342p.
- Koca, K., Noss, C., Brand, A. and Lorke, A. (2017): Performance of the Vectrino Profiler at the sediment-water interface, Journal of Hydraulic Research, Vol.55, Issue.4, pp.573-581.
- Le Hir, P., Cayocca, F. and Waeles, B. (2011): Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modeling strategy, Continental Shelf Research, Vol.31, pp.S135-S149.
- Mengual, B., Le Hir, P. Cayocca, F. and Thierry, G. (2017): Modelling fine sediment dynamics: Towards a common erosion law for fine sand, mud and mixtures, Water, Vol.9, Issue.8, pp.1-23.
- Mitchener, H., and Torfs, H. (1996): Erosion of mud/sand mixtures, Coastal Engineering Vol.29, pp.1-25.
- Murray, W. A. (1977): Erodibility of coarse sand/clayey silt mixtures, Journal of the Hydraulics Division, Vol.103, Issue.10, pp.1222-1227.
- Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific, 324p.
- Panagiotopoulos, I., Voulgaris, G., and Collins, M.B. (1997): The influence of clay on the threshold of movement of fine sandy beds, Coastal Engineering, Vol.32, pp.19-43.
- Raudkivi, A. J. (1990): Loose boundary hydraulics, Pergamon Press, 538p.
- Soulsby, R. L. (1997): Dynamics of marine sands, Thomas Telford, London, 249p.
- Tsuruya, H., Murakami, K., and Irie, I. (1990): Mathematical modeling of mud transport in ports with a multi-layered model –Application to Kumamoto Port–, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.1, pp.3-51.
- van Ledden, M. (2003): Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins, PhD-thesis, Delft University of Civil Engineering, Report No.03-2, ISSN0169-6548.
- van Leussen, W. and Dronkers, J. (1988): Physical processes in estuaries: An introduction, in Dronkers, J. and van Leussen W. (eds.), Physical process in estuaries, Springer-Verlag, 560p.
- van Rijn L. C. (1984): Sediment transport, part I: bed load transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.110, No.10, pp.1431-1456.
- van Rijn L. C. (1993): Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua publications, 614p.
- van Rijn, L. C. (2007): Sediment transport, part I: bed load transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.133, No.6, pp.649-667.
- Waeles, B., Le Hir, P., Lesueur, P. and Delsinne, N. (2007): Modelling sand/mud transport and morphodynamics in the Seine river mouth (France): an attempt using a process-based approach, Hydrobiologia, Vol.588, pp.69-82.
- Winterwerp, J. C., Kesteren, W. G. M., van Prooijen, B. and Jacobs, W. (2012): A conceptual framework for shear flow-induced erosion of soft cohesive sediment beds, Journal of Geophysical Research, Vol.117, Issue.C10, C10020, doi:10.1029/2012JC008072.
- Whitehouse, R., Soulsby, R. L., Roberts, W., and Mitchener, H. (2000): Dynamics of estuarine muds, Thomas Telford, London, 210p.

記号表

a	: 基準高さ (m)
a_{mix}	: 混合層厚さ (m)
A_s	: 滑面の定数 (= 5.5)
β	: 無次元パラメータ (-)
C_m	: 泥の浮遊濃度 (kg/m ³)
C_s	: 砂の浮遊濃度 (kg/m ³)
D_m	: 泥の沈降量 (kg/m ² /s)
D_s	: 砂の沈降量 (kg/m ² /s)
D_*	: 無次元粒径 (-)
$d_{50,m}$: 泥の中央粒径 (m)
$d_{50,s}$: 砂の中央粒径 (m)
E	: 侵食量 (kg/m ² /s)
E_m	: 泥の巻き上げ量 (kg/m ² /s)
$E_{m,0}$: 泥のみの場合の巻き上げ係数 (kg/m ² /s)
E_s	: 砂の巻き上げ量 (kg/m ² /s)
$E_{s,0}$: 砂のみの場合の巻き上げ係数 (kg/m ² /s)
E_0	: 砂泥混合を考慮した巻き上げ係数 (kg/m ² /s)
ε	: 底質の空隙率 (-)
ε_p	: 限界空隙率 (-)
g	: 重力加速度 (m/s ²)
k_{btm}	: 海底面直上の層
K_H	: 水平拡散係数 (m ² /s)
K_Z	: 鉛直拡散係数 (m ² /s)
κ	: カルマン定数 (= 0.4)
M	: x 方向の流量 (m ² /s)
N	: y 方向の流量 (m ² /s)
n	: 砂泥混合を考慮したべき関数 (-)
ν	: 流体の動粘性係数 (m ² /s)

P_m	: 体積基準の含泥率 (-)
$P_{m,cr}$: 体積基準の限界含泥率 (-)
$P_{m,0}$: 不変層の体積基準の含泥率 (-)
ϕ_m	: 泥の相対体積 (-)
ϕ_{mw}	: 泥への吸着水の相対体積 (-)
ϕ_s	: 砂の相対体積 (-)
ϕ_{sw}	: 自由水の相対体積 (-)
Q_b	: 掃流輸送による侵食量 ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)
q_b	: 掃流砂量 (kg/m/s)
$q_{b,0}$: 砂のみの場合の掃流砂量 (kg/m/s)
ρ_m	: 泥の土粒子密度 (kg/m^3)
ρ_s	: 砂粒子の密度 (kg/m^3)
ρ_w	: 流体の密度 (kg/m^3)
τ_b	: 底面せん断応力 (N/m^2)
τ_{cr}	: 限界底面せん断応力 (N/m^2)
$\tau_{cr,s}$: 砂のみの場合の限界底面せん断応力 (N/m^2)
$\tau_{cr,m}$: 泥のみの場合の限界底面せん断応力 (N/m^2)
τ_d	: 泥の沈降に関する限界せん断応力 (N/m^2)
\bar{u}	: 流速の時間平均値 (m/s)
u_*	: 摩擦速度 (m/s)
$u_{*,cr}$: 移動限界時の摩擦速度 (m/s)
w	: 鉛直流速 (m/s)
w_m	: 泥に対する吸着水の含水比 (-)
$w_{s,m}$: 泥の沈降速度 (m/s)
$w_{s,s}$: 砂の沈降速度 (m/s)
y	: 底面からの距離 (m)

港湾空港技術研究所資料 No.1376

2020.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2020) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。