

令和4年度原子力規制庁委託成果報告書

耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に
係る防潮堤水理試験（黒津波影響）
（令和4年度分）

大成建設株式会社

令和5年2月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目 次

1. 事業概要	1-1
2. 知見調査	2-1
2.1. 有識者へのヒアリング	2-1
2.2. 文献調査	2-3
2.3. 技術検討会	2-12
3. 現地調査	3-1
3.1. 調査概要	3-1
3.2. 調査方法	3-2
3.2.1. 調査箇所を選定	3-2
3.2.2. サンプルング方法	3-3
3.2.3. 分析方法	3-5
3.2. 調査結果	3-18
3.2.1. サンプルング結果	3-18
3.2.2. 分析結果	3-24
4. 巻き上げ評価	4-1
4.1. 試験体製作	4-1
4.1.1. 試験装置	4-1
4.1.2. 底質模型	4-2
4.2. 巻き上げ試験	4-5
4.2.1. 試験概要	4-5
4.2.2. 試験方法	4-6
4.2.3. 予備試験結果	4-13
4.2.4. 固定床試験結果	4-14
4.2.5. 移動床試験結果	4-26
4.3. 粘性評価	4-49
4.3.1. 底質模型の粘性	4-50
4.3.2. 現地採取試料との比較	4-64
5. 波圧評価	5-1
5.1. 波圧試験	5-1
5.1.1. 試験概要	5-1
5.1.2. 試験方法	5-2
5.1.3. 粘性試験結果	5-8
5.1.4. 波検定結果	5-13
5.1.5. 通過波試験結果	5-14
5.1.6. 衝突試験結果	5-18
5.1.7. 流体密度による比較	5-39
6. 結果の整理	6-1
巻末資料	1
現地調査補足資料	1
(1) 作業写真集（気仙沼湾奥・川崎港京浜運河）	2
(2) 試験分析報告書	22

1. 事業概要

本事業は、防潮堤等の津波防護施設の耐津波設計評価に関連する内容として、ヘドロ等の泥・シルト性堆積物を含む津波（以下「黒津波」という）に関する文献等を調査・整理する。実際の海域におけるヘドロ等をサンプリングし、ヘドロ性状を分析・整理する。ヘドロ等の巻き上がりの発生条件に関する水理試験を実施する。ヘドロ等の巻き上がりや波圧への影響に関するデータを取得し整理・分析することで、実海域における黒津波の発生条件やその特性等に係る知見の拡充を図る。

(1) 知見調査

①有識者ヒアリング

黒津波に関わる知見および本事業で実施する試験内容・方法について、2名程度の有識者（過去の類似事業と異なる有識者とする。少なくとも1名は水工学分野の有識者とする。）に実施し、妥当性や課題等についてヒアリングする。

②文献調査

成果報告書とは別に、図表等も含めて各文献を1,2ページ程度で取りまとめる。水工学分野並びに河川および湾における泥等に関する文献についても、調査を実施する。

③技術検討会

1名以上の有識者を招聘して、原子力規制庁担当者の同席のもと、実施方針等を討議する。（オンライン可）

(2) 現地調査

①サンプリング

河口付近の海域において、海底に堆積したヘドロ等を採取する。対象海域の詳細は、原子力規制庁担当者と協議して決定する。

【対象海域】東北地方太平洋側に位置する河口近傍等の2箇所程度

（令和3年度に調査済みの海域を選定する場合は目的を明確化）

【採取地点】海域1箇所当たり5地点程度

（令和3年度に調査済みの海域を選定する場合はこれによらない）

②分析

ヘドロ等の粒度分布、比重、含水比、密度、組成等について調査・分析・整理し、津波に対する抵抗力を表すパラメータおよび流体の粘性に影響を与えるパラメータを分析・整理する。

(3) 巻き上げ評価

①試験体製作

流速の大きい領域におけるヘドロ等の巻き上げを模擬できる試験体を製作する。試験体製作に当たっては、せん断応力が限界せん断応力を大きく上回る条件を模擬可能なものとする。詳細は原子力規制庁担当者と協議して決定する。

②巻き上げ試験

あらかじめヘドロ等を堆積した地形を模擬した試験体に対し、津波を模した流れを入力し、ヘドロ等の巻き上げを再現する。同一条件での試験回数は3回程度、最少でも合計36ケース実施する。詳細は原子力規制庁担当者と協議して決定する。底質ごとに限界せん断応力等を取得し、流速の大きい領域におけるヘドロ等の巻き上げを模擬するために必要なパラメータを取得する。

③粘性評価

底質を含む水密度と粘性を表すパラメータの関係を整理する。底質は②で用いた底質模型等を用い、加えて現地調査で採取したサンプリング結果を用いる。

(4) 波圧評価

①波圧試験

ヘドロ等を模した底質を含む水を堤体に衝突させることで、水密度と堤体作用波圧の関係を計測・整理する。同一条件での試験回数は15回程度、最少でも合計75ケース実施する。底質を含む水の特長（密度・粘性）は複数種類設定し、それらの変化が波圧・波力の変化および波形に関わるパラメータに与える影響を確認できるようにする。

(5) 結果の整理

(2)現地調査、(3)巻き上げ評価、(4)波圧評価で得た結果を整理・考察し、相似則の影響についても考察する。

2. 知見調査

2.1. 有識者へのヒアリング

知見調査のうち有識者へのヒアリングについては、以下の3名（A～C）に昨年度成果および今年度の現地調査・水理試験の計画などを説明し、意見を頂いた。なお有識者Cは、水工学分野の有識者である。

(1) 有識者 A

- ・現地調査については、今後のリスク評価のため、可能であれば港湾管理者に底質調査の頻度などをヒアリングすることが望ましい。
- ・巻き上げ試験については、取得した結果（限界せん断応力や鉛直濃度分布等）から解析モデルを構築できるようにケースを検討する。
- ・波圧試験については、津波先端のプロファイルもカメラ等により記録し、濁水の濃度による違いを確認する。また、比較のために清水のみのケースも実施する。
- ・そのほか、黒津波が防潮堤等を越流して陸上の建屋内に浸水した場合に、海水に含まれる底泥やヘドロ等が機械類に与える影響はあるのか、可能であれば調査/検討する。

(2) 有識者 B

- ・昨年度現地調査の分析結果について、川崎港京浜運河での地点 A2 と久慈川河口付近海域での地点 A にて中央粒径が同程度である。一方、両地点で地盤の固さが異なるのは、含水比と強熱減量（有機物含有量）の影響と考えられる。
- ・昨年度水理試験の結果について、底質の鉛直濃度分布から最大でも 20%程度（サンドベッドでの濃度）となっている。底質移動の数値解析では、最大濃度を設定する必要があるため、重要なデータであると考えられる。
- ・高橋ら(1999)の砂の巻き上げ速度と村上ら(1989)の泥の巻き上げ速度が途中で逆転する現象に関連して、シルテーションモデルの場合には有効せん断力の増加に伴って巻き上げ速度が同じ傾向で増加しない可能性がある。巻き上げ試験により、底質の破壊限界（全体が流動して流れる限界）を確認することは有用であると考えられる。
- ・一般に巻き上げ速度として van Rijn (1984, 1986)が提案し、それを Nielsen (1992)が非定常流に拡張した式があり、その式では Shields 数の 1.5 乗となっている。村上ら(1989)はそれと同じか少し小さめの 1.2～1.5 乗としている。一方で、高橋ら(1999)は Bagnold(1966)を参照して 2.0 乗としており、底面せん断力が大きい条件で底質の巻き上げがどのように変化していくかが重要と考えられる。
- ・粘性の評価については、非常に貴重なデータとなる。底質の特性によるせん断応力の定式化ができれば、数値解析に適用する底質の巻き上げモデルに適用可能と考えられる。

(3) 有識者 C

- ・現地調査において底質表層の含水比を分析する場合、通常 2cm ごとにスライスをして深度方向の変化を確認することがある。
- ・ヘドロの定義を明確にする方が良い。
- ・巻き上げ試験については、底質模型が動き出す限界摩擦速度（移動限界）の測定は難しい。過去に実施された移動床実験の資料を参考にする。
- ・巻き上げ試験水路内に圧力計を設置することを検討する。底質模型全体が流動する原因の一つとして、流れによる圧力変化が影響している可能性があるため、水路延長方向にいくつか設置することが望ましい。
- ・波圧試験については、底質の含有に伴う流体の粘性変化が波形勾配の前傾化に影響するのか確認する。

2.2. 文献調査

海底に堆積した底質（土砂やヘドロ等）を含有した津波（以降，黒津波とする）が与える影響について，過去の文献等を調査した．本調査では，以下の内容に主眼を置き，現地調査・水理試験・数値解析の項目に分類して文献を整理した．

- ・ヘドロや底泥等の粒径の細かい底質を再現する模型材料について
- ・ヘドロや底泥等の粒径の細かい底質の巻き上げ条件について
- ・数値解析に適用可能な底質移動モデルについて

以降では，項目ごとに文献調査結果を示す．なお，水理試験や数値解析については，既往文献の多くが土砂に関するものであり，現状では非常に細かい粒径（数 μm 程度）のシルトやヘドロなどを対象とする研究は少ないため，土砂に関する内容も含めて整理した．

(1) 現地調査

横山ら(2014)¹⁾は、2011年3月11日に発生した津波により港湾施設・造船所・水産加工場などが破壊された気仙沼湾において、堆積物の柱状コアを採取して物性分析を行い、その特徴と環境影響について考察している。研究対象は、気仙沼湾の大島瀬戸（気仙沼湾の中で水深が最も深く、波浪が小さく静穏な場所であるが、津波発生時には10m程度の水位変動と流れで海水が著しく濁った）と舞根湾口としており、簡易型スミス・マッキンタイヤ採泥器による表層10cmの底質採取と、潜水士が採取した底質の柱状コア（直径10cm、全長33cm）を1cm毎にスライスしたものを、実験室で分析を実施した。舞根湾口で採取した表層底質の分析結果より、表層底質の泥分は36.4%で砂をほとんど含まない軟泥であり、金属類と有機化合物は全ての分析項目が環境基準を下回った。津波により港湾施設などから各種物質が湾内に輸送された可能性が考えられたが、底質に蓄積している様子は見られなかった。粒度分布は表層では粘土が約25%、シルトが75%であり、下方ほど粗いシルト（20～75 μ m）の割合が増え、15cm付近から砂が顕著になり、20～23cmでは約75%が砂礫で小石や貝殻も混入し、23cmより下は分布が一定で粘土が40%を超えていた。また、表層の強熱減量度は高く、含水比も300%を超えるため、有機物を多く含む軟泥であり、下方ほど強熱減量度と含水比が低下する結果であった。

山下ら(2020)²⁾は、2011年東北津波によって大規模な浸食を受けた気仙沼湾狭窄部海底を対象に、被災後地形や底質環境の実態と基盤岩分布を調査した。調査内容としては、音響測深機による水深調査、音波探査機による音波探査、VCS（バイブレーション・コアサンプラー）による海底堆積物探査、柱状試料および表層試料の土質試験を実施した。2011年津波後に調査された地形との差分によると、狭窄部より南側でやや堆積し、北側では1m程度浸食したこと等が確認され、既往の調査結果とも整合した。VCSによる柱状試料採取および音波探査により、地質構造を分析した。柱状試料長や地質情報、音波探査データの散乱層をもとに推定した震災前堆積物層厚と海底基盤岩の分布より、狭窄部東岸の海岸から西側に向かって基盤岩が張り出している可能性を示した既往モデリングと同様の結果が得られ、また狭窄部中央付近に厚い堆積層が分布することが確認された。

参考文献

- 1) 横山勝英, 原良輔, 河野益近, 島田克也, 吉永郁生: 気仙沼湾における海底堆積物に対する津波の影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.496-500, 2014.
- 2) 山下啓, 菅原大助, 有川太郎, 高橋智幸, 今村文彦: 海底基盤データを利用した津波移動床解析の改善の試み-気仙沼湾での事例, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vo.76, No.2, pp.I_427-I_432, 2020.

(2) 水理試験

① 定常流による底泥の巻き上げ

栗谷ら(1979)¹⁾は、海域や河口感潮部に堆積した汚泥のような凝集性土を対象とした水理実験を実施している。本実験は、可変勾配循環水路（長さ 13m、幅 0.87m）の上流部に整流板と助走区間 3m、中央部 7m の底泥を厚さ 4~5cm 敷き、流下実験により汚泥の力学的性状と巻き上げとの関係や限界掃流力を検討した。底泥試料には工事現場からの粒度分布の異なる粘性土 3 種と浄水場汚泥 2 種（好氣的、嫌氣的）を使用し、それぞれ降伏値、塑性粘度、粒度分布を測定しており、底泥の含水比を変化させて実験に用いた。得られた結果から、掃流力と浮遊物濃度との関係より、どの含水比においても、ある掃流力以上で巻き上がり始め、さらに掃流力を増加すれば、巻き上げ速度も増加した。巻き上げは、汚泥の粒度分布および汚泥の含水比の変化による汚泥強度や汚泥の粘塑性により大きく変わる。汚泥の降伏値 τ_y 、塑性粘度 μ_B 等を用いた無次元量の関係より、巻き上げ現象は大きく 3 つの領域に分けられることが明らかとなった。(1)汚泥の含水比が低く汚泥自体の強度が影響する領域、(2)混合粒径の特徴として **armoring** 現象が表われる領域、(3)密度流と類似した状態を示す領域である。また、粘土を砂粒としての限界摩擦速度を算出し、岩垣の式、栗原の式と比較したが、実験値と一致せず、凝集性が無視できないと報告している。また、汚泥含水比が高い場合、界面現象が密度流と類似していることについて、密度流理論が適用できるかどうかを検討したが、適用は無理であると結論付けている。

海田ら(1981)²⁾は、せん断流下での底泥の種々の沈降特性を実験的に明らかにし、一般的な濃度減少曲線を表わす式を導いている。さらに、河口感潮部での底泥の輸送特性について、周期的に掃流力を変化させた実験を行ない、底泥の巻き上げ-沈降特性について検討している。本実験は、円形回転水路（外径 220cm、内径 180cm、深さ 25cm）が用いられ、底泥試料としてカオリン及び工事現場で採取した粘性土を用いている。沈降単独の実験は所定のせん断応力の下で実施され、せん断応力を周期的に変動させる実験では、所定の時間静止沈降して底泥を形成し、実験を行なっている。底泥の自然沈降の特性については、約 5 時間経過後から圧密沈降を示し、50 時間を経れば底泥厚さはほぼ一定となり、底泥は堆積時間が長くなるに従って圧密されること、同じ堆積時間では下層にいくに従って固体分率が増加することが確認された。せん断流下での底泥の沈降特性については、初期濃度に関わらず沈降傾向はほぼ相似であり、最終的には一定値に至った。また、最終的な浮遊状態の濃度と初期濃度の比は一定であり、浮遊状態にある底泥の粒度分布が初期濃度に関わらず同じであった。得られた結果から、一定せん断応力下での底泥の沈降過程を表わす式を導出しており、実験との比較からその妥当性が確認されている。

楠田ら(1982)³⁾は、周期的掃流場での実験を行い、得られた結果から周期的定常状態における SS 濃度の挙動について簡単なシミュレーションを行なった。本実験は、円形回転水路（外径 220cm、内径 180cm、深さ 25cm）で実施され、底泥試料として、筑後川河口で採取した底泥を用いている。なお、(1)一定せん断応力下で初期濃度を変化させた沈降実験、(2)一定初期濃度でせん断応力を変化させた沈降実験、(3)一定せん断応力下での巻き上げ実験、(4)せん断応力を周期的に変動させ、巻き上げと沈降を伴う 4 つの実験を、比重 1.025 の塩水中で実施している。そのなかで、一定せん断応力下での底泥の巻き上げに関しては、SS 濃度の増加パターンが初期の急速巻き上げ期、その後の緩速巻き上げ期あるいは増減のない一定期の 2 つに分けられるとしている。また、急速巻き

上げ期の $t=0$ の初期巻き上げフラックス j_e と無次元掃流力との関係は両対数グラフ上でほぼ直線となったと報告している。

村上ら(1989)⁴⁾は、円形回転水路を使用し、内径 1.25m および外径 1.55m (水路幅 0.15m)、水深 0.16m で、せん断リングと円形水路の相対速度を 0 から連続的に増加させ、底質の巻き上げ特性を幅広い範囲で求めるために底面せん断力($\tau=1.0\text{Pa}$)まで変化させて一定時間ごとに測定した SS から巻き上げ速度を算定した。使用した底泥は、カオリナイト・ベントナイト・現地採取試料($d_{50}=0.8, 6.5, 25.0\mu\text{m}$)で、水道水または塩水を加えて所定の含水比に調整し、厚さ 2cm で水路内に敷き詰めた。一定のせん断応力を超えると急速に巻き上げ量が増加する特性を表現するため、浸食の限界せん断応力 τ_e を $E = M \cdot \{(\tau - \tau_e)/\tau_e\}$ で表した。ここで、 M は比例定数 (底泥の含水比、泥の種類などにより変化)、 $\tau - \tau_e$ は浸食の限界応力からの超過応力 (浸食に関わる有効せん断応力で無次元化)、 n は実験結果より 1.2~1.5 の範囲として報告している。

② 土砂を含んだ津波

松富・有川(2022)⁵⁾は、氾濫水密度実験と氾濫流遡上実験を条件・ケース等を増やして実施している。本実験は、幅 0.3 m のすべり台状の直線開水路を使用し、上端に水平に設置した貯水槽 (高さ 0.5 m, 幅 0.3 m, 長さ 1.7 m) からのゲート急開流れで津波氾濫流を模擬している。斜面の下端には土砂を敷いた水平部、その下流端には土砂を巻込んだ氾濫流先端部の氾濫水 (土砂水) 量を採水するための斜面部、さらに氾濫流遡上実験ではその斜面部に続けて粒径 0.85~2mm の砂を貼付けた同じ勾配を持つ斜面部を設けている。得られた結果から、移動床下の氾濫流の摩擦損失係数 K と氾濫水密度 ρ の評価実験式を提示し、移動床下の津波遡上理論の検証データを提供した。また、初期貯水深、斜面勾配と底質の中央粒径に依存し、 K と ρ が時間変化する一様勾配斜面上の津波遡上の理論 (級数) 解や計算例を提示した。この理論解は ρ が時間変化しない移動床下または固定床下の清水の場合にも適用でき、検証データと良く一致したと報告している。

中村ら(2020)⁶⁾は、予めカオリンを混ぜ濁水状態にした水をゲート急開により開放して段波状の津波を発生させる水理実験を実施し、カオリンの混入が津波の遡上や打ち上げに与える影響を検討している。本実験は、アクリル製開水路 (内寸長さ 5575 mm, 幅 300mm) を用いて実施され、開水路に上下方向の移動が制御可能なゲートを設け、ゲートを急開させることで津波を模擬している。貯水部の初期静水深は 100mm とし、初期浮遊砂濃度を 0, 1, 2% と変化させている。また、ゲートの岸側面から 2,490mm の位置に高さ 60 mm の鉛直壁を設置したケースも実施している。得られた結果から、初期浮遊砂濃度が高い方が遡上端の進行速度が若干遅く、カオリンを含んだことで底面摩擦が増加したために生じたと推察しており、その場合には摩擦係数が大きくなるほど氾濫流先端部の水面と底面のなす角が大きくなると報告している。また、鉛直壁前面での打ち上げ高は、初期浮遊砂濃度が高い方が若干低くなり、上述のように遡上端の進行速度が若干遅い影響を受けたためと報告している。鉛直壁へ作用する波圧や波力は、底質を含むことによる流体の見かけの密度が大きくなる影響だけではなく、鉛直壁衝突時に遡上端の進行速度が遅くなっている影響や遡上端の水面形状が丸みを帯びている影響、鉛直壁前面での打ち上げ高が低くなる影響も受けると考えられ、波圧や波力を増加させる効果と減少させる効果が混在していることから、これら相反する効果を考慮することの重要性が示唆されると報告した。

参考文献

- 1) 栗谷陽一, 楠田哲也, 海田輝之, 村岡浩爾: 底泥の巻き上げに関する基礎的研究, 衛生工学研究討論会講演論文集, Vol.15, p.21-27, 1979.
- 2) 海田輝之, 楠田哲也, 栗谷陽一, 則松秀晴, 馬場洋二, 松梨順三郎: 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究, 衛生工学研究討論会講演論文集, Vol.17, p.42-50, 1981.
- 3) 楠田哲也, 海田輝之, 栗谷陽一, 石原達弘: 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究(II), 衛生工学研究討論会講演論文集, Vol.18, p.152-159, 1982.
- 4) 村上和男, 菅沼史典, 佐々木均: 底泥の巻き上げ現象とそのモデル化に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.319-323, 1989.
- 5) 松富英夫, 有川太郎: 氾濫水密度の時間変化を考慮した津波遡上, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.78, No. 2, I_247—I_252, 2022.
- 6) 中村友昭, 高重建太, 趙容桓, 水谷法美: 土砂を含んだ濁水状態の津波の遡上と打ち上げに関する一考察, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, II-98, 2022.

(3) 数値解析

① 底泥を対象とした数値解析モデル

鶴谷ら(1994)¹⁾は、港湾技術研究所で開発された多層レベルモデル(港研モデル)を主体として、新たに高濃度浮泥流動層(fluid mud)の流動計算を組み込んだシルテーション予測モデルを開発した。fluid mudを考慮するためには、底泥と水層間の泥の交換機構を整理する必要があり、(1)沈降によるfluid mudの形成、(2)fluid mudから底泥への沈降、(3)底泥および浮泥層の巻き上げの3段階に分けて検討された。fluid mudの運動は、ビンガム流体の特性を考慮してモデル化した。熊本港における異常時の埋没再現計算を実施し、解析モデルは観測結果に対してほぼ妥当な結果を得ている。

近藤ら(2011)²⁾は、砂を対象とした既往の土砂移動モデルに加えて、シルト・粘土を対象としたシルテーションモデルを用い、底質特性が異なる2つの港湾に対して津波による土砂移動シミュレーションを実施した。シルテーションモデルについては、限界せん断力と底泥の降伏値の関連を明確にして巻き上げ量の算定式を提案している村上ら(1989)のモデルを適用している。底質条件がシルト・粘土砂(粒径0.14mm, 密度2.69g/cm³)である大阪港における計算結果より、流速が大きな地点における浸食が顕著で、流速が遅い港内に広く土砂が堆積しているが、浸食範囲が大きくなった。シルト・粘土は粒径が小さく、比較的小さな流速でも底質が巻き上げられるためと考えられる。

② 平面2次元の津波土砂移動モデル

山下ら(2022)³⁾は、津波堆積物の形成過程にある遡上津波を対象に、非定常流れにおける圧力勾配及び浮遊砂流の影響を考慮した摩擦速度の評価法を提案している。本手法による摩擦速度は、負の圧力勾配下で増加し、浮遊砂流では低下する特性を有する。これを飽和浮遊砂濃度式に取り入れることで、浮遊砂が比較的少ない津波来襲時(特に津波前面)において大量の土砂の巻き上げを予測し、浮遊砂流に遷移すると底面からの巻き上げ量を抑制させるため、飽和浮遊砂濃度の時空間的な変動を評価できる。既往の津波による移動床実験をベンチマーク問題として、浮遊砂流を伴う遡上津波に対する本手法の妥当性を検証した。その結果、本手法による浮遊砂濃度の時間変化は、遡上から後退流に伴う変動傾向と各ピーク濃度を比較的良好に再現した。特に負の圧力勾配が大きい津波先端部で顕著に変動する浮遊砂濃度については、本手法による非定常流型の摩擦速度による効果で実験結果を良く捉えられた。ただし、今回の検証は限られた事例であるため、本手法の津波土砂移動モデリングでの適用性を詳細に確認するために、今後さらに体系的な検証と実イベントを対象にした知見の蓄積が課題となっている。

③ 鉛直2次元の津波土砂移動モデル

神保ら(2022)⁴⁾は、底泥の巻き上げ過程に着目し、黒い津波の特性把握を目的として、水槽実験と数値計算を行った。水槽実験は、 $x=50\text{cm}$ 位置に段波を発生させるためのゲートを設置し、 $80 < x < 120\text{cm}$ の範囲にシルト(密度 2.3kg/m^3 , 中央粒径約 $10\mu\text{m}$)からなる泥を敷き詰めた水槽を用いて行った。水槽側面付近に設置したカメラで底泥および水面計の変化を連続撮影し、画像輝度値から泥の状態を推定し、底泥の浸食深は含水比の増加に伴いおおよそ線形的に増加することが分かった。また、段波作用時の底泥形状と浮遊泥濃度分布を分析した結果、含水比が高い場合、

段波作用後の早い段階から底泥が浮遊し始め、砕波による渦の影響を受けて水中の高位置まで巻き上がる可能性が示唆された。数値解析では、波による底泥の浸食及び沈降、浮遊泥輸送に伴う流体特性の変化を考慮した鉛直 2 次元モデルを構築した。浸食フラックスと限界せん断応力に関するパラメータは、実験の底面形状と比較を繰り返し行うことで最適化した。実験で得た底面形状は概ね再現できているが、やや誤差が生じている原因として底泥内部の運動機構を考慮していないためと考えられる。また、浮遊泥濃度分布の再現精度を底泥の含水比によって比較したところ、含水比 123% の場合の再現性は高かったものの、169% の場合には低かった。これは浮遊泥の高濃度域での輸送過程の再現性に起因すると考えられ、高濃度域の浮遊泥輸送過程のモデル化は今後の検討課題としている。

参考文献

- 1) 鶴谷広一, 村上和男, 入江功, 笹嶋博, 糸井正夫: Fluid mud を考慮した三次元シルテーション予測モデルについて, 海岸工学論文集, Vol.41, pp.1011-1015, 1994.
- 2) 近藤武司, 森本徹, 藤本典子, 殿最浩司, 家村健吾, 志方建仁: 津波による土砂移動が港湾施設に与える影響に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_261-I_265, 2011.
- 3) 山下啓, 菅原大助, 高橋智幸: 遡上津波の圧力勾配及び浮遊砂流の影響を考慮した津波土砂移動解析, 海洋工学シンポジウム, 第 29 回, 2022.
- 4) 神保壮平, 山中悠資, 下園武範: 津波による底泥の輸送に関する水理実験と数値計算による検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.78, No.2, pp.I_181-I_186, 2022.

2.3. 技術検討会

技術検討会については、2.1 に示す有識者のうち1名（有識者 C）を招聘し、試験内容などについて討議した。主な内容を以下に示す。

【日時】

令和5年1月18日(水) 16:30~18:00

【出席者】

原子力規制委員会 原子力規制庁
長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門
日比野 総括技術研究調査官, 石田 技術参与,
山下 技術研究調査官, 鳥山 技術研究調査官
大成建設株式会社 技術センター
社会基盤技術研究部 水理研究室
織田 室長, 本田 チームリーダー, 橋本 副主任研究員
有識者 C

【会議形態】

オンライン会議

【討議内容】

(1) 巻き上げ試験

- ・密度では底質の巻き上げ傾向が分かりにくいいため、SS 濃度でも評価する。
- ・濃度の時間変化を計測することが望ましい。今回の試験では、定常状態における鉛直濃度分布を対象としているが、流れの加速を考慮した場合は定常状態に至る前に底質が破壊されて大きな巻き上がりが生じている。今後の課題として、例えば以下を検討する。
 - ①映像データの輝度分析：分析可能な濃度上限に制約、輝度調整が困難
 - ②濁度計：分析可能な濃度上限に制約、センサーが大きいため流況に干渉
- ・吸引孔からの濁水採取による濃度結果の妥当性を検討する。
- ・サンドベッドの容量を増加しても、流れにより底質が巻き上がり、サンドベッドが浸食すると水路断面積が変化するため、あまり効果はないと考えられる。
- ・加速度に着目した底質移動の検討事例は、現状限られている。河川や潮流は定常流を対象とした研究が多く、風波による漂砂の検討で加速度の影響を検討した研究がある。
- ・粘性試験で得られた降伏せん断応力は、底質の破壊限界として考えられる。今後、流れによる作用せん断力と巻き上げ状況を分析して確認する。

(2) 波圧試験

- ・高速度カメラの映像と波力の時系列結果から、最大波力発生時における波の状態を検討する。
- ・今回の試験結果では、濁水の方が波力は小さい結果となったが、試験条件やケースが限定的であるため、黒津波の波力特性を包括した結果とは言えない。護岸形状や位置、地形、波の種類をパラメータとしてケースを増やした検討が望ましい。
- ・波圧試験の条件について、想定するシナリオを明示する。
- ・仕切板の引上げによる影響（濁水と清水の混合による流れ等）の確認は、水理試験では難しいため、数値解析であれば検討可能と考えられる。

3. 現地調査

3.1. 調査概要

現地調査は、海底に堆積した底質（ヘドロ等）の性状を確認することを目的に実施した。調査対象としては、河口付近の海域 2 箇所を選定し、潜水作業により柱状採泥器を用いて底質を採取した。得られたサンプルの粒度分布・比重・含水比・密度・組成等を分析して結果を整理した。以降に詳細を示す。

3.2. 調査方法

3.2.1. 調査箇所を選定

調査箇所として、以下の2箇所を選定し、底質のサンプリングを実施した。

(1) 気仙沼湾奥

東北地方太平洋沖地震による大津波の際に、ヘドロを含む底質を巻き込んだ黒津波が確認された場所として、宮城県気仙沼市気仙沼湾の奥（以降、気仙沼湾奥という）を選定した。調査区域を図-3.1に示す。

出典：地理院地図（電子国土 Web）を加工して作成



図-3.1 気仙沼湾奥の調査区域

(2) 川崎港京浜運河

令和3年度の調査箇所のうち既にヘドロの堆積が確認できている場所として、神奈川県川崎市川崎港京浜運河（以降、川崎港京浜運河という）を選定した。調査区域を図-3.2に示す。

出典：地理院地図（電子国土 Web）を加工して作成



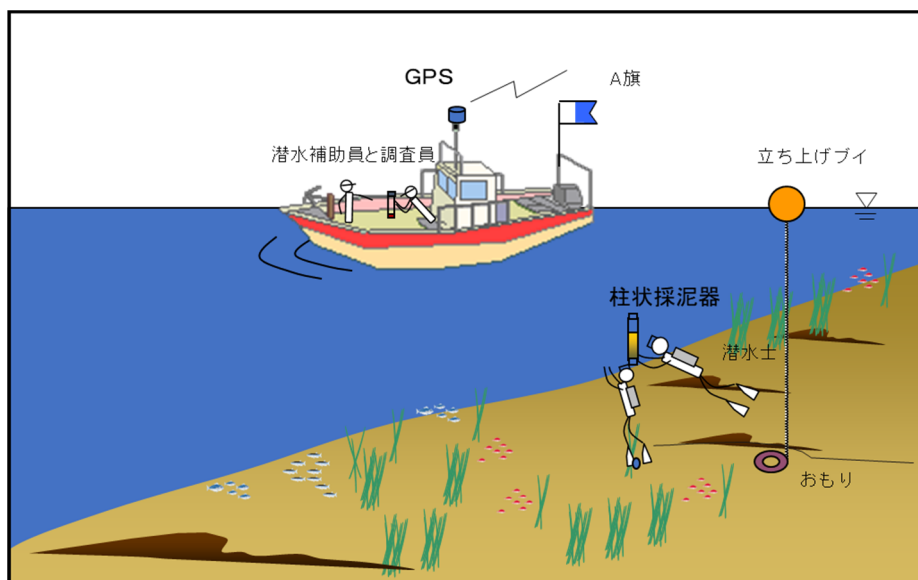
図-3.2 川崎港京浜運河の調査区域

3.2.2. サンプルング方法

本調査における底質のサンプルング方法（図-3.3）を以下に示す。

- ① 調査船でサンプルング予定地点に向かい、立ち上げブイ（入水ポイント）を投入し、その位置座標をGPSにより記録した。
- ② 潜水士2名が入水し、調査船が離れたことを確認してから、立ち上げブイのロープに沿って海底まで潜行した。調査船は、潜水士が入水した後にゆっくりと離れ、ダイバーとの安全距離を確保し、周辺的安全監視を行った。
- ③ 潜水士は、海底の状況を水中カメラで撮影し、柱状採泥器（内径 $\Phi 8\text{cm}$ ）を用いて底質のコアサンプルを3本もしくは6本採取した。
- ④ 潜水士2名は、立ち上げブイのロープに沿ってゆっくり浮上した。
- ⑤ 潜水士は、浮上完了後に手合図を送り調査船を呼び寄せ、船上へ揚収されることで作業を完了した。その後、立ち上げブイを回収した。
- ⑥ 次の地点に移動し、上記①～⑥を繰り返した。

なお、川崎港京浜運河での作業では、横浜海上保安部の指導により警戒船を1隻配置した。



(a) 底質サンプルングの作業イメージ



(b) 柱状採泥器



(c) 底質サンプルの揚収状況

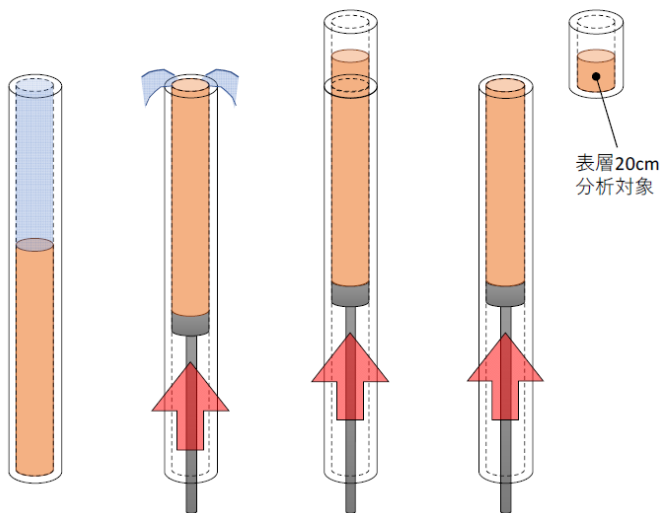


(d) 採取した底質サンプル

図-3.3 潜水作業による底質のサンプルング方法

分析対象となる底質のサンプルは、図- 3.4 に示すように柱状採泥器から表層 20cm を押し出して採取し、柱状試料 2 本分を攪拌して混ぜ合わせ、サンプルビンへ封入した。また、柱状試料 1 本は底質の密度計測用とした。そのほか、各調査箇所 1 地点において柱状試料 3 本を追加採取し、粘性試験を実施した。

柱状試料 上層水除去 コアの押出 表層試料の採取



(a) 作業ステップ

(b) 採取状況

図- 3.4 分析対象となる底質サンプルの表層部採取

3.2.3. 分析方法

採取した底質の分析項目は、粒度分布、比重、組成など表- 3.1 の通りとした。各項目における分析方法を次頁以降に示す。

表- 3.1 底質の分析項目一覧

No	項目名称	
1	粒度分布	D_{50}
2	比重	ρ_s
3	含水比	w
4	密度	ρ
5	沈降速度	V_s
6	強熱減量	IL
7	塑性限界・液性限界	W_P, W_L
8	水素イオン濃度	pH
9	化学的酸素要求量	COD
10	有機体炭素	TOC
11	金属	Fe, Mn, Cu, Zn
12	イオン	$\text{SO}_4^{2-}, \text{PO}_4^{3-}, \text{Cl}^-$

(1) 粒度分布

準拠：

JIS Z 8825

使用機器：

レーザ回折・散乱式粒度分布測定器：LMS-2000e セイシン企業製（写真- 3.1）

測定方法：

- ① 分散媒のみでブランク測定を行う。
- ② 分散層に試料を適量入れる。
- ③ 超音波分散により試料を分散させ、循環式にて粒度分布測定を行う。

【原理】

レーザ回折・散乱法による粒子径分布測定は、粒子による光散乱の角度分布（散乱パターン）が粒子径に依存する現象に基づいて行う。適正な液体または気体中に、適正濃度で分散された試料を単色光（通常はレーザ光）ビームが横切るように通過させる。粒子によって様々な角度に散乱された光は複数の光強度検出器で測定され、散乱パターンに対応する測定値が記録される。測定域における試料濃度等が適正範囲にあれば、粒子群からの光散乱パターンは、個々の単一粒子からの散乱パターンの総和と等しい。理論的に計算した想定される粒子径分画からの散乱パターンの重ね合わせが、測定された散乱パターンに最もよく一致するように各分画の寄与率を求める数学的逆問題を解くことで、体積基準の粒子径分布を求める。

測定条件：

- ① 測定範囲 0.02～2000 μm
- ② 使用溶剤 イオン交換水
- ③ 超音波使用時間 1分



写真- 3.1 レーザ回折・散乱式粒度分布測定器：LMS-2000e

（参照 <https://www.betterseishin.co.jp/>）

(2) 比重

準拠：

JIS Z 8807

使用機器：

比重瓶 (JIS R 3503 化学分析用ガラス器具に準拠)

測定方法：

ピクノメーター法を用いて測定した。

【原理】

比重瓶の質量を M_0 、試料固体を入れた比重瓶の質量を M_1 、更に標準物質を加えて比重瓶を満たしたときの質量を M_2 とすれば、 $m_1 = M_2 - M_1$ は加えた標準物質の質量である。標準物質だけで比重瓶を満たしたときの質量を M_3 とすれば、 $m_2 = M_3 - M_0 - m_1$ は試料固体と同体積の標準物質の質量である。試料固体の質量 $m_0 = M_1 - M_0$ と、 m_2 と標準物質密度とによって計算される試料固体の体積から試料固体の密度及び比重を求める。

測定条件：

使用分散媒 水

(3) 含水比

準拠：

JIS A 1203

測定方法：

- a) 容器の質量 m_c [g]をはかる。
- b) 試料を容器に入れ、全質量 m_a [g]をはかる。
- c) 試料を容器ごと恒温乾燥炉に入れ、 (110 ± 5) °Cで一定の質量になるまで炉乾燥する。なお、一定の質量とは、1時間乾燥させたときに、乾燥前後の質量変化が0.1%未満であればよい。
- d) 炉乾燥試料を容器ごとデシケーターに移すか蓋付き容器の蓋をし、おおむね室温になるまで冷ました後、全質量 m_b [g]をはかる。
- e) 試験は、対象とする試料について最低1回行う。

含水比は、次の式を用いて算出して、四捨五入によって、小数点以下1桁に丸める。対象とする試料について複数回行った場合の代表値は、算術平均値を採用する。平均値は四捨五入によって、小数点以下1桁に丸めて代表値とする。

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100$$

ここで、 w : 含水比 [%], m_a : 試料及び容器の質量 [g], m_b : 炉乾燥試料及び容器の質量 [g], m_c : 容器の質量 [g]である。

(4) 密度

準拠：

重量法

測定方法：

- 柱状採泥器（内径 $\Phi 8\text{cm}$ ）から表層 20cm の底質試料（体積 $V=1,005\text{cm}^3$ ）を採取する。
- 試料を容器ごと恒温乾燥炉に入れ、 $(110\pm 5)^\circ\text{C}$ で一定の質量になるまで炉乾燥する。なお、一定の質量とは、1 時間乾燥させたときに、乾燥前後の質量変化が 0.1% 未満であればよい。
- 炉乾燥試料を容器ごとデシケーターに移すか蓋付き容器の蓋をし、おおむね室温になるまで冷ました後、全質量 M_s [g]をはかる。
- 試験は、対象とする試料について 1 回行う。

密度 ρ は、次の式を用いて算出する。

$$\rho = \frac{M_s + (V - M_s/\rho_s) \cdot \rho_w}{V}$$

ここで、 ρ_s ：土粒子の密度 [g/cm^3]、 ρ_w ：水の密度 [g/cm^3]である。

ρ_w は現地の採取地点で計測した水温、塩分、圧力に応じて計算される UNESCO(1981)¹⁾の式で計算した。

$$\rho_w(S, t, p) = \frac{\rho_w(S, t, 0)}{1 - \frac{p}{K(S, t, p)}}$$

ここで、 S ：塩分 [-]、 t ：現場水温 [$^\circ\text{C}$]、 p ：圧力 [bar] ($\text{bar} = 10^5 \text{ Pa}$ 、1 気圧；海面のときを 0)、 K ：体積弾性率である。

1 気圧における海水の密度は次式から求める。

$$\rho(S, t, 0) = \rho_{w0} + (b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4)S + (c_0 + c_1 t + c_2 t^2)S^{3/2} + d_0 S^2$$

$$b_0 = +8.24493 \times 10^{-1} \quad c_0 = -5.72466 \times 10^{-3}$$

$$b_1 = -4.0899 \times 10^{-3} \quad c_1 = +1.0227 \times 10^{-4}$$

$$b_2 = +7.6438 \times 10^{-5} \quad c_2 = -1.6546 \times 10^{-6}$$

$$b_3 = -8.2467 \times 10^{-7}$$

$$b_4 = +5.3875 \times 10^{-9} \quad d_0 = +4.8314 \times 10^{-4}$$

基準の純粋の密度 ρ_{w0} は次式から求める。

$$\rho_{w0} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

$$a_0 = +999.842594 \quad a_1 = +6.793952 \times 10^{-2}$$

$$a_2 = -9.095290 \times 10^{-3} \quad a_3 = +1.001685 \times 10^{-4}$$

$$a_4 = -1.120083 \times 10^{-6} \quad a_5 = +6.536332 \times 10^{-9}$$

海水の体積弾性率 K は次式から求める。

$$K(S, t, p) = K(S, t, 0) + Ap + Bp^2$$

$$K(S, t, 0) = K_w + (f_0 + f_1 t + f_2 t^2 + f_3 t^3)S + (g_0 + g_1 t + g_2 t^2)S^{3/2}$$

$$f_0 = +54.6746 \quad g_0 = +7.944 \times 10^{-2}$$

$$f_1 = -0.603459 \quad g_1 = +1.6483 \times 10^{-2}$$

$$f_2 = +1.09987 \times 10^{-2} \quad g_2 = -5.3009 \times 10^{-4}$$

$$f_3 = -6.1670 \times 10^{-5}$$

$$A = A_w + (i_0 + i_1 t + i_2 t^2)S + j_0 S^{3/2}$$

$$i_0 = +2.2838 \times 10^{-3} \quad j_0 = +1.91075 \times 10^{-4}$$

$$i_1 = -1.0981 \times 10^{-5}$$

$$i_2 = -1.6078 \times 10^{-6}$$

$$B = B_w + (m_0 + m_1 t + m_2 t^2)S$$

$$m_0 = -9.9348 \times 10^{-7} \quad m_1 = +2.0816 \times 10^{-8}$$

$$m_2 = +9.1697 \times 10^{-10}$$

体積弾性率に関する式の純粹に関する項 K_w, A_w, B_w は次のように与えられる。

$$K_w = e_0 + e_1 t + e_2 t^2 + e_3 t^3 + e_4 t^4$$

$$e_0 = +19652.21 \quad e_1 = +148.4206$$

$$e_2 = -2.327105 \quad e_3 = +1.360477 \times 10^{-2}$$

$$e_4 = -5.155288 \times 10^{-5}$$

$$A_w = h_0 + h_1 t + h_2 t^2 + h_3 t^3$$

$$h_0 = +3.239908 \quad h_1 = +1.43713 \times 10^{-3}$$

$$h_2 = +1.16092 \times 10^{-4} \quad h_3 = -5.77905 \times 10^{-7}$$

$$B_w = k_0 + k_1 t + k_2 t^2$$

$$k_0 = +8.50935 \times 10^{-5} \quad k_1 = -6.12293 \times 10^{-6}$$

$$k_2 = +5.2787 \times 10^{-8}$$

この状態方程式は、塩分 $0 \leq S \leq 42$ 、水温 $-2^\circ\text{C} \leq t \leq 40^\circ\text{C}$ 、圧力 $0 \leq p \leq 1000 \text{ bar}$ の範囲で有効である。

(5) 沈降速度

使用機器：

①レーザ回折・散乱法：LMS-2000e

②光透過式遠心沈降法：SKC-2000

測定方法：

レーザ回折・散乱法および光透過式遠心沈降法により得られた中央粒径に対して、以下のストークス式により沈降速度を算定した。

$$V = \frac{d^2(\rho_s - \rho_f)g}{18\eta}$$

ここで、 V は沈降速度 [cm/s]、 d は粒子径 [cm]、 ρ_s は粒子密度 [g/cm³]、 ρ_f は液体密度 [g/cm³]、 g は重力加速度 [cm/s²] (=980)、 η は液体の粘度 [g/cm・s]とした。

【原理】

①レーザ回折・散乱法

(1)に記載の通り

②光透過式遠心沈降法

光透過式遠心沈降法では、遠心力により強制的に粒子を沈降させ、光の通過量を計測し、濃度変化を測定する。濃度の変化から通過率を算出し、沈降速度を用いてストークス式より粒径を換算する。この方法は、測定するサンプル中に様々な粒子径の粒子が混在していても、粒子の質量に依存した沈降速度で沈降するため、重い粒子は速く、軽い粒子は遅く沈降する。したがって、均一の密度を持つ粒子であれば、粒径の大きい粒子から小さな粒子に並び直すように分級されながら沈降していく。この大きさ順で落ちてくる粒子の濃度を光の透過率を使って求めるため、分布幅精度・分解能が高い粒子径分布を測定することが可能になる。

測定条件：

①レーザ回折・散乱法

(1)に記載の通り

②光透過式遠心沈降法

- ・粒径 0.5～75μm
- ・沈降距離 70mm
- ・液温 16.0～16.5℃
- ・使用溶剤 水

(5) 強熱減量

準拠：

JIS A 1226

使用機器：

空気加熱電気炉 アズワン製

測定方法：

- a) るつぼの質量 m_c [g] を 0.001 g まではかる。
- b) 試料をるつぼに入れ、試料及びるつぼの全質量 m_a [g] を 0.001 g まではかる。
- c) るつぼに蓋を斜めにかぶせて電気炉に入れ、徐々に加熱する。
- d) 温度を (750 ± 50) °C に保持し、1 時間強熱する。
- e) 強熱停止後、10 分程度電気炉を開放した後、るつぼばさみを用いて、るつぼを炉内から取り出し、室温で数分間放置する。
- f) るつぼをデシケーターに移し、おおむね室温になるまで冷ました後、強熱後の試料及びるつぼの全質量 m_b [g] を 0.001 g まではかる。
- g) 一定の質量になるまで、c)～f) を繰り返す。強熱後の試料及びるつぼの全質量 m_b が増加した場合は、増加する前の m_b を採用する。なお、一定の質量とは、試料の質量変化が 0.1 % 以下になることをいう。

強熱減量は、次の式を用いて算出して、四捨五入によって、小数点以下 1 桁に丸める。対象とする試料について複数回行った場合の代表値は、算術平均値を採用する。平均値は四捨五入によって、小数点以下 1 桁に丸めて代表値とする。

$$Li = \frac{m_a - m_b}{m_a - m_c} \times 100$$

ここに、 Li ：強熱減量 [%]， m_a ：炉乾燥試料及びるつぼの全質量 [g]， m_b ：強熱後の試料及びるつぼの全質量 [g]， m_c ：るつぼの質量 [g] である。

測定条件：

750°C で 1 時間

(6) 塑性限界・液性限界

準拠：

JIS A 1205

測定方法：

① 塑性限界

【試験】

- a) 練り合わせた試料の塊を、手のひらとすりガラス板（写真-3.2）との間で転がしながら試料をひも状にし、ひもの太さを直径 3 mm の丸棒に合わせる。このひもが直径 3 mm になったとき、再び塊にしてこの操作を繰り返す。
- b) a) の操作において、試料のひもが直径 3 mm になった段階で、試料が切れ切れになったとき、JIS A 1203 に規定されている方法に従い、その切れ切れになった部分の試料を集めて速やかに含水比を求める。
- c) 塑性限界試験は、対象とする試料について最低 3 回行う。

【計算】

- a) 3 回の含水比の算術平均値を塑性限界 W_P [%] とする。
- b) 塑性限界が上述した試験で求められないときは、NP (Non-Plastic) とする。
塑性指数は、次の式によって算出する。ただし、液性限界と塑性限界との間に有意な差がないときは、NP とする。

$$I_P = W_L - W_P$$

ここに、 I_P ：塑性指数， W_L ：液性限界 [%]， W_P ：塑性限界 [%]である。



写真-3.2 塑性限界試験の使用機器例

(参照 <https://www.marui-group.co.jp>)

②液性限界

【試験】

- a) 黄銅皿と硬質ゴム台との間にゲージを差し込み、黄銅皿の落下高さが (10 ± 0.1) mm になるように落下装置（写真-3.3）を調整する。
- b) へらを用いて試料を黄銅皿に最大厚さが約 10 mm になるように入れ、形を整える。溝切りを黄銅皿の底に直角に保ちながらカムの当たりの中心線を通る黄銅皿の直径に沿って溝を切り、試料を二つに分ける。
- c) 黄銅皿を落下装置に取り付け、落下装置によって 1 秒間に 2 回の割合で黄銅皿を持ち上げて落とすことを繰り返し、溝の底部の二つに分けた試料が長さ約 15 mm 合流するまで続ける。
- d) 溝が合流したときの落下回数を記録し、JIS A 1203 に規定されている方法に従い、合流した付近の試料の含水比を求める。
- e) 試料に蒸留水を加えるか、又は水分を蒸発させた後、試料をよく練り合わせて b)～d) の操作を 4 回以上繰り返す。その際、落下回数 10～25 回の試料を 2 個、25～35 回の試料を 2 個が得られるようにする。

【計算】

- a) 片対数グラフ用紙の対数目盛に落下回数及び算術目盛に含水比をとって、測定値をプロットする。
- b) 測定値に最もよく適合する直線を流動曲線とする。
- c) 流動曲線において、落下回数 25 回に相当する含水比 w [%] を小数点以下 1 桁まで読み取り、液性限界 W_L [%] とする。
- d) 流動曲線は、直線の勾配が $30 \sim 50^\circ$ になるようにスケールをとる。
- e) 液性限界が上述の試験で求められないときは、NP (Non-Plastic) とする。



写真-3.3 液性限界試験の使用機器例

(参照 <https://www.marui-group.co.jp>)

(7) 水素イオン濃度(pH)

準拠：

底質調査方法(H24)²⁾ II 4.4

使用機器：

- a) pH メーター
- b) 遠心分離機

測定方法：

底質から遠心分離機を用いて間隙水を抜き取り、その間隙水の水素イオン濃度(pH)を pH メーターで測定する。

測定条件：

水温 18～19℃

(8) 化学的酸素要求量(COD)

準拠：

底質調査方法(H24)²⁾ II 4.7

使用機器：

- a) 水浴
- b) 三角フラスコ

測定方法：

試料をはかり取り、アルカリ性溶液とし、沸騰水浴中で 30 分間加熱により消費される過マンガン酸カリウム溶液(20 mmol/L)の量から、COD_{sed} 値を求める。

測定条件：

- a) 水：JIS K 0557
- b) 過マンガン酸カリウム溶液(20 mmol/L)：JIS K 8247
- c) 水酸化ナトリウム溶液(300 g/L)：JIS K 8576
- d) しゅう酸ナトリウム溶液(50 mmol/L)：JIS K 8528
- e) でんぷん溶液(10 g/L)：JIS K 8659
- f) よう化カリウム溶液(100 g/L)：JIS K 8913
- g) 0.1 mol/L チオ硫酸ナトリウム溶液：JIS K 8637

(9) 有機体炭素(TOC)

準拠：

底質調査方法(H24)²⁾ II 4.10 燃焼酸化方式

使用機器：

- a) 乾燥器
- b) 磁製乳鉢, めのう乳鉢
- c) ミル
- d) ふるい：JIS Z 8801-1
- e) デシケーター
- f) 精密天秤 (0.001mg の桁まで秤量可能)
- g) 遠心分離機
- h) 元素分析計

測定方法：

試料の前処理は、塩酸(1+11)を添加し、無機の炭酸塩と炭酸水素塩を二酸化炭素に換えて除去した後、全有機炭素を元素分析計で測定する。なお、元素分析計は、燃焼酸化方式とし、試料中の有機物質を酸素あるいは空気気流中の燃焼炉(650°C~1,200°C)で完全に二酸化炭素と水に分解でき、炭素相当・窒素相当の指示値が得られ、乾燥重量当たりの有機炭素として測定できるものを使用した。

測定方法：

- a) 水：JIS K 0557
- b) 塩酸(1+11)：JIS K 8180
- c) アセトアニリド(C:71.09%, N:10.36%)
- d) p-ニトロアニリン(C:52.17%, N:20.28%)
- e) スルファニル酸(C:41.6%, N:8.1%)
- f) 酸化銅 (ワイヤー)
- g) 還元銅 (ワイヤー)
- h) ヘリウム
- i) 酸素
- j) 水素

(10) 各種金属(Fe, Mn, Cu, Zn)

準拠：

- ・鉄(Fe) 底質調査方法(H24)²⁾ II 5.5.4 ICP 発光分析法
- ・マンガン(Mn) 底質調査方法(H24)²⁾ II 5.6.4 ICP 発光分析法
- ・銅(Cu) 底質調査方法(H24)²⁾ II 5.3.4 ICP 発光分析法
- ・亜鉛(Zn) 底質調査方法(H24)²⁾ II 5.4.4 ICP 発光分析法

使用機器：

a) ICP 発光分光分析装置：

JIS K 0116 に規定する誘導結合プラズマ (ICP) 発光分光分析装置で波長の異なる 2 本以上のスペクトルが同時測定可能なもの。

b) ガス：アルゴン

c) 加熱装置 (マイクロウェーブ分解装置)：

樹脂製の密閉容器をマイクロウェーブにより加熱でき、温度制御機能をもつもの。

測定方法：

試料を前処理した後、内標準元素を加え、試料導入部を通して誘導結合プラズマ中に噴霧し、各種金属(Fe, Mn, Cu, Zn)と内標準元素の発光強度を測定して定量する。スペクトル干渉を受けやすいので、必ず適切なバックグラウンド補正を行う。

【原理】

ICP (Inductively Coupled Plasma : 高周波誘導結合プラズマ) は、発光分光分析法の一つである。分析試料に、プラズマのエネルギーを外部から与えると含有されている成分元素 (原子) が励起される。その励起された原子が、低いエネルギー準位に戻るときに放出される発光線 (スペクトル線) を測定する方法である。発光線の位置 (波長) から成分元素の種類を判定し、その強度から各元素の含有量を求める。

(11) 各種イオン(SO₄²⁻, PO₄³⁻, Cl⁻)

準拠：

- ・ 硫化物(SO₄²⁻) 底質調査方法(H24)²⁾ II 4.6 よう素滴定法
- ・ 全りん(PO₄³⁻) 底質調査方法(H24)²⁾ II 4.9 モリブデン青吸光光度法
- ・ 有機塩素化合物(Cl⁻) 環告第 13 号別表第 6/JIS K 0102 35.3 イオンクロマトグラフ法

使用機器：

- a) 蒸留装置 [SO₄²⁻]
- b) 分光光度計 [PO₄³⁻]
- c) イオンクロマトグラフ [Cl⁻]
- d) マイクロシリンジ [Cl⁻]

測定方法：

[SO₄²⁻]

亜鉛アンミン溶液で硫化亜鉛アンミン錯塩として現地固定した後、水蒸気蒸留により硫化水素を分離し、よう素滴定法により定量する。なお、固定方法としては、次の通りとする。

- ①ポリエチレンびん 300mL に亜鉛アンミン溶液を満す。
- ②採取した試料を均一に混ぜ、約 50g をポリエチレンびんに取る。
- ③亜鉛アンミン溶液をあふれさせ、容器中に空隙が残らないように密栓してよく混和する。
- ④4℃以下に保存する。

[PO₄³⁻]

硝酸一過塩素酸分解法もしくは硝酸一硫酸分解法で前処理分解した試料を、モリブデン青(アスコルビン酸)吸光光度法によりりんを測定・定量する。

[Cl⁻]

試料中の塩化物イオンをイオンクロマトグラフ(IC)法によって定量する。この方法では、分離液と呼ばれる移動相に液体試料を導入し、試料中のイオン成分を固定相である分離カラム内で分離させ、検出器によりイオン成分を測定する。

測定条件：

[PO₄³⁻]分析波長：880nm または 710nm

【参考資料】

- 1) 気象庁：海洋観測指針（第1部），pp.167-169，1999.
- 2) 環境省 水・大気環境局：底質調査方法，2012.

3.3. 調査結果

3.3.1. サンプルング結果

サンプルング結果として、各調査地点の位置、水深、底泥の推定層厚、柱状採泥器のサンプルおよび海底の状況写真、備考には採取した表層部の底質の状態を記載して整理した。なお、底泥の推定層厚については、コアサンプルの各層厚を物差しなどで計測した。また、備考に記載している底質名称について、本書内では以下の通り定義した。

- ・砂：粒径 2mm～0.074mm の土
- ・シルト：粒径 0.074mm～0.005mm の土
- ・粘土：粒径 0.005mm 以下の土
- ・浮泥：海底面の表層に溜まった、せん断強度を有さない水のようなもの。ただし、以下のヘドロの特徴を有する場合にはヘドロとした。
- ・ヘドロ：色が黒く、硫化水素等の臭いがするもの。
- ・底泥：浮泥とヘドロを合わせて底泥とした。

(1) 気仙沼湾奥

表-3.2, 図-3.5 に示す調査地点で採取された底質のサンプリング結果を表-3.3 および表-3.4 に示す。なお、気仙沼湾奥における調査写真集は、巻末に添付する。

- ・地点 A～D : 流れが小さく、底質が滞留していそうな場所
- ・地点 E : 湾中央

表-3.2 気仙沼湾奥でのサンプリング位置の座標

地点名	緯度	経度
地点 A	N38° 54′ 34.0″	E141° 34′ 56.3″
地点 B	N38° 54′ 21.8″	E141° 34′ 35.2″
地点 C	N38° 54′ 04.6″	E141° 34′ 48.2″
地点 D	N38° 53′ 51.1″	E141° 35′ 19.6″
地点 E	N38° 54′ 16.4″	E141° 35′ 02.2″



図-3.5 気仙沼湾奥におけるサンプリング位置図

表-3.3 気仙沼湾奥での底質サンプリング結果(1)

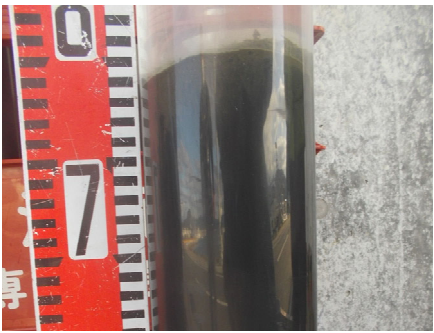
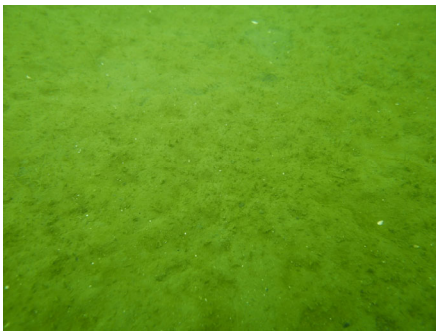

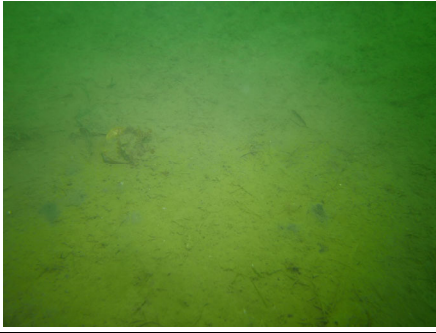
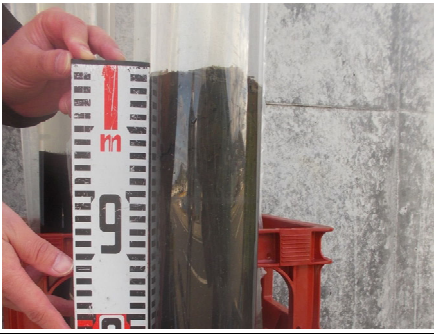
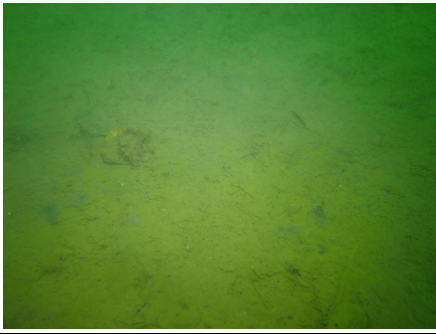

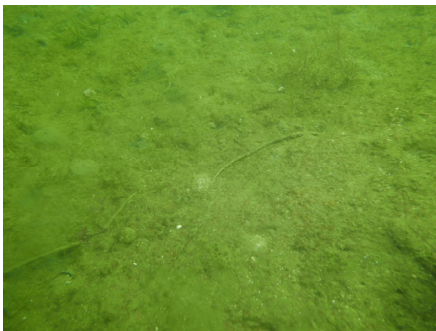
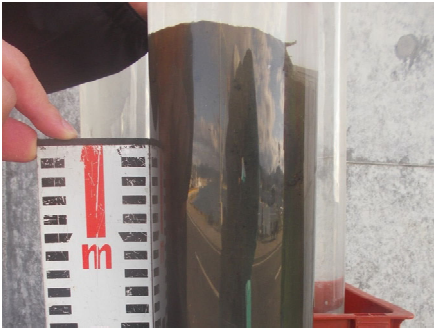
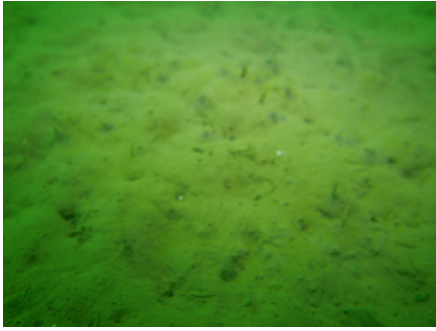
地点 A	水深	底泥の推定層厚
	5.8m	20cm
	コアサンプル	海底の状況
		
備考	採取した底質は腐卵臭(硫化水素)があり、底泥より下層は砂混じりであった。海底の表面は柔らかく、貝殻やロープなどが沈降していた。	
地点 B	水深	底泥の推定層厚
	7.1m	63cm
	コアサンプル	海底の状況
		
備考	採取した底質は腐卵臭(硫化水素)があり、底泥より下層は粘土であった。海底表面は平らで全体的に柔らかく、人工物は見られなかった。	
地点 C	水深	底泥の推定層厚
	8.6m	63cm
	コアサンプル	海底の状況
		
備考	採取した底質は腐卵臭(硫化水素)があり、底泥より下層は砂・粘土の互層となっていた。海底約 70cm まで柔らかく、魚の骨等が沈降していた。	

表-3.4 気仙沼湾奥での底質サンプリング結果(2)

地点 D	水深	底泥の推定層厚
	4.5m	55cm
	コアサンプル	海底の状況
		
備考	採取した底質に腐卵臭(硫化水素)はなく、底泥より下層は砂であった。海底約 30cm までは柔らかく、コンクリートシンカー等が沈降していた。	
地点 E	水深	底泥の推定層厚
	9.5m	30cm
	コアサンプル	海底の状況
		
備考	採取した底質に腐卵臭(硫化水素)はなく、底泥より下層は砂・粘土の互層であった。海底表面は平らでやや固い状態であり、人工的な沈降物は見られなかった。	

(2) 川崎港京浜運河

表-3.5, 図-3.6 に示す調査地点で採取された底質のサンプリング結果を表-3.6 に示す。なお、川崎港京浜運河での調査写真集は、巻末に添付する。

- ・地点 A1 : 令和3年度調査でヘドロが厚く堆積していた場所

表-3.5 川崎港京浜運河でのサンプリング位置の座標

地点名	緯度	経度
地点 A1	N35° 30' 28.0"	E139° 43' 20.5"

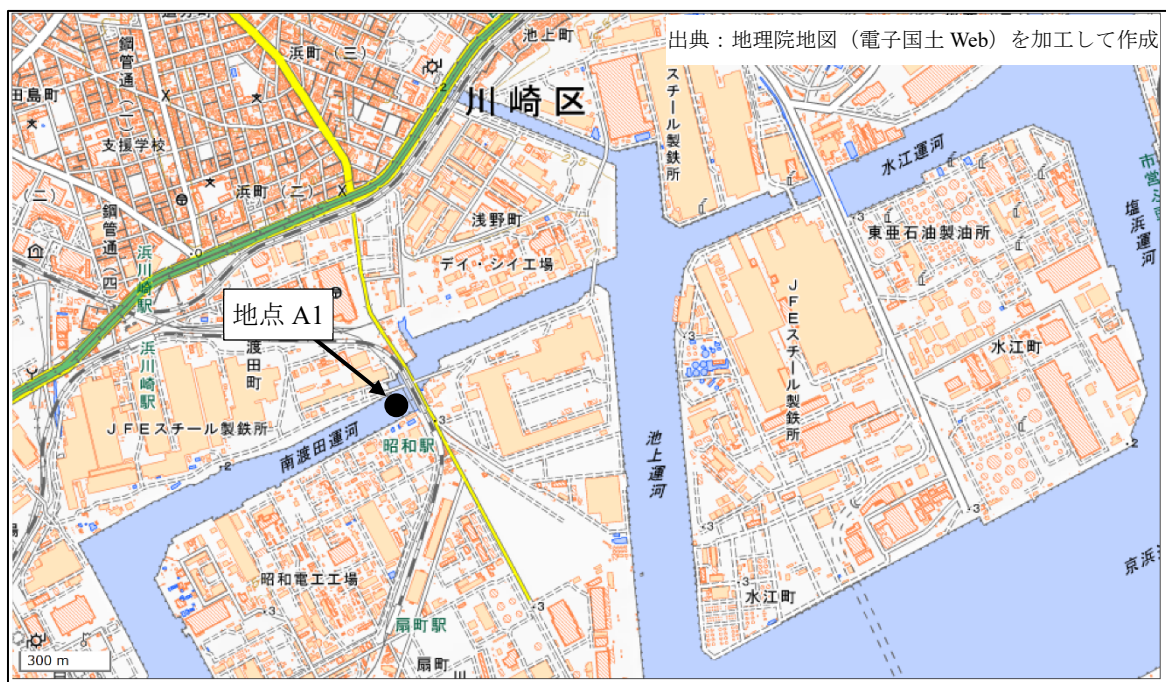




図-3.6 川崎港京浜運河におけるサンプリング位置図

表-3.6 川崎港京浜運河における底質のサンプリング結果

	水深	底泥の推定層厚
	4m	50cm
	コアサンプル	海底の状況
地点 A1		
備考	採取した底質は、ヘドロ及び粘土の混合物であり、アサリなど貝類の破片を含んでいた。	

3.3.2. 分析結果

(1) 気仙沼湾奥

気仙沼湾奥における分析結果一覧を表-3.7 および表-3.8 に示す。また、各調査地点での粒度分布を図-3.7 に示す。なお、各分析結果の試験表については、巻末に添付する。

表-3.7 気仙沼湾奥における分析結果一覧(1)

気仙沼湾奥							
項目	単位	地点A	地点B	地点C	地点D	地点E	備考
中央粒径(D ₅₀)	μm	17.131	21.478	19.730	65.182	18.774	
比重(D)	—	2.691	2.698	2.708	2.624	2.653	
含水比(w)	%	123.60	118.79	143.00	68.61	122.51	
密度(ρ)	kg/m ³	—	1433	1473	1653	1395	注1参照
沈降速度(V)	cm/s	0.0243	0.0384	0.0326	0.338	0.0286	中央粒径(D ₅₀)での沈降速度
強熱減量(IL)	%	12.11	11.81	12.25	7.80	12.39	
塑性限界(W _p)	%	42.1	40.1	40.3	31.8	42.2	
液性限界(W _L)	%	82.6	70.0	82.3	49.7	74.6	

注1:地点Aの密度(ρ)は、密度(ρ)用サンプル取得時に不具合が発生したため分析せず。

表-3.8 気仙沼湾奥における分析結果一覧(2)

気仙沼湾奥							
項目	単位	地点A	地点B	地点C	地点D	地点E	備考
水素イオン濃度(pH)	pH	7.3	7.5	7.4	7.6	7.4	25°C
科学的酸素要求量(COD)	mg/g	63	47	37	21	48	
有機体炭素(TOC)	mg/g	22	20	20	7.8	23	
各種金属							
Fe	mg/kg	40000	34000	39000	40000	41000	
Mn	mg/kg	310	290	410	330	380	
Cu	mg/kg	240	130	130	120	130	
Zn	mg/kg	300	220	190	140	130	
各種イオン							
SO ₄ ²⁻	mg/g	2.4	1.8	2.2	1.1	1.6	
PO ₄ ³⁻	mg/g	0.89	1.2	1.4	0.7	1.0	
Cl ⁻	mg/g	<4	<4	<4	<4	<4	

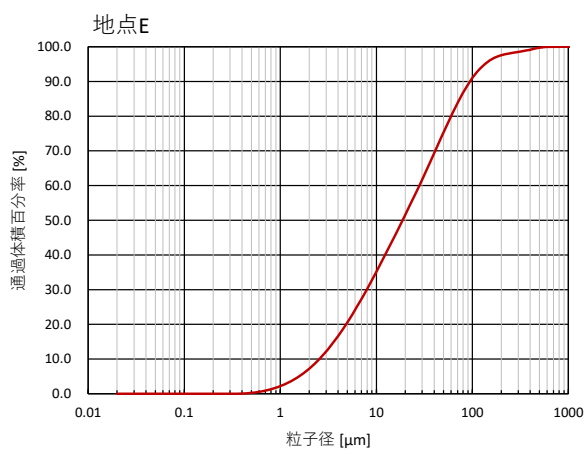
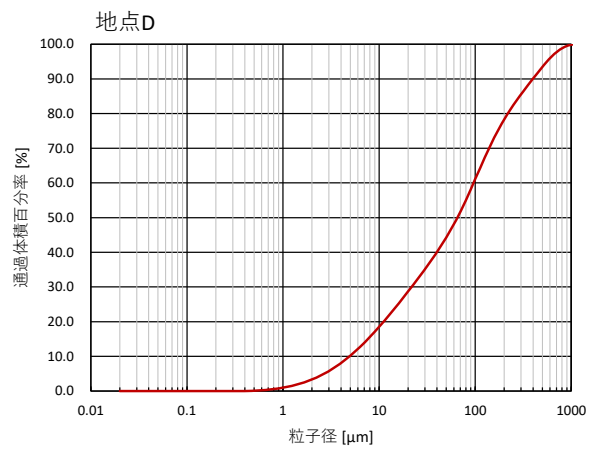
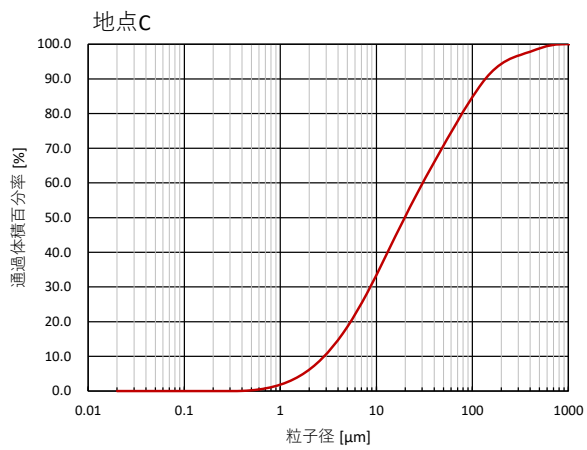
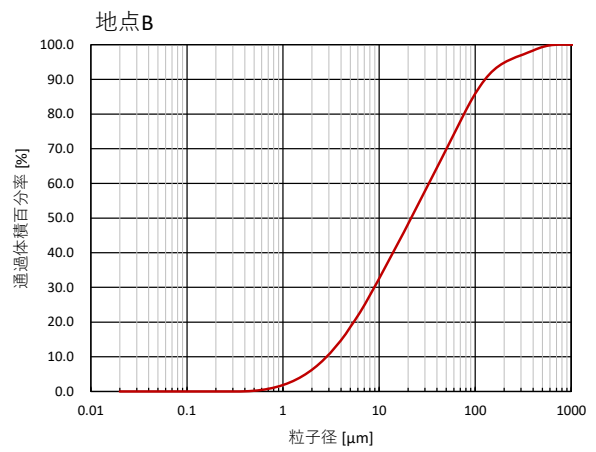
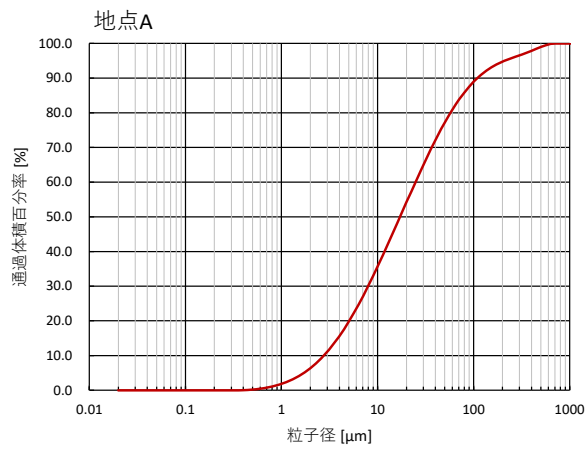


図-3.7 気仙沼湾奥における各調査地点での粒度分布

(2) 川崎港京浜運河

川崎港京浜運河における分析結果一覧を表-3.9 および表-3.10 に示す。また、調査地点での粒度分布を図-3.8 に示す。なお、各分析結果の試験表については、巻末に添付する。

表-3.9 川崎港京浜運河における分析結果一覧(1)

川崎港京浜運河			
項目	単位	地点A1	備考
中央粒径(D ₅₀)	μm	14.845	
比重(D)	—	2.637	
含水比(w)	%	359.31	
密度(ρ)	kg/m ³	1167	
沈降速度(V)	cm/s	0.0177	中央粒径での沈降速度
強熱減量(IL)	%	18.67	
塑性限界(W _p)	%	70.6	
液性限界(W _L)	%	146.4	

表-3.10 川崎港京浜運河における分析結果一覧(2)

川崎港京浜運河			
項目	単位	地点A1	備考
水素イオン濃度(pH)	pH	7.4	25°C
科学的酸素要求量(COD)	mg/g	71	
有機体炭素(TOC)	mg/g	59	
各種金属			
Fe	mg/kg	74000	
Mn	mg/kg	870	
Cu	mg/kg	450	
Zn	mg/kg	2200	
各種イオン			
SO ₄ ²⁻	mg/g	5.8	
PO ₄ ³⁻	mg/g	1.8	
Cl ⁻	mg/g	<4	

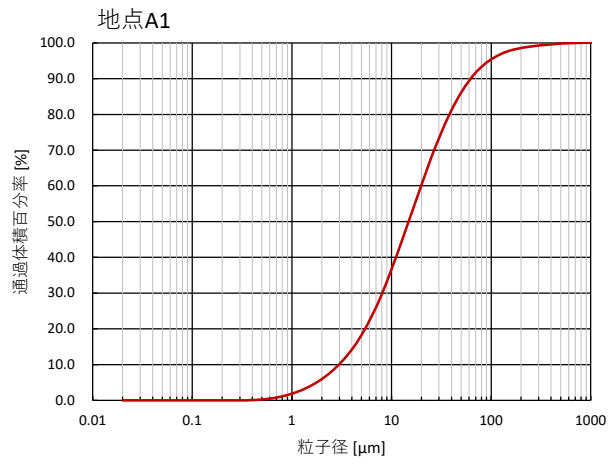


図- 3.8 川崎港京浜運河における調査地点での粒度分布

4. 巻き上げ評価

4.1. 試験体製作

4.1.1. 試験装置

試験体のうち試験装置は、幅 0.2m×高さ 0.2m の矩形断面で延長 9.0m の管路区間と、幅 0.5m×高さ 1.0m の矩形断面で延長 2.75m (擦付部 1.0m 含む) の開水路区間を有するアクリル製の二次元水路を用いて実施した (図-4.1)。水路の上流端部には容量 3m³ のタンクを 2 台設置し、タンク内に水を溜めて、軸流ポンプ 2 台により流れを発生させた。なお、流速は軸流ポンプの回転数により調整した。

管路区間の途中には、水路延長方向の両端部を 1:5 勾配にしたサンドベッド (幅 0.2m, 延長 4.0m, 深さ 0.15m) を設け、底質模型を敷き詰めた。また、水路側面から設置した吸引孔 ($\phi 4\text{mm}$) は、サンドベッド下流端から 0.75m 上流の位置に 8 箇所 (水路床から上方に 20mm ピッチ ; $Z=20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160\text{mm}$) と、サンドベッド下流端から 0.02m 下流の位置に 1 箇所 (水路床から上方に 20mm ; $Z=20\text{mm}$) とし、底質を含む濁水を各吸引孔から同時に採取できるようにした。さらに、管路区間の側面からは、圧力計を水路高さの中央位置 ($Z=100\text{mm}$) において流れ方向に 7 箇所設置した。また、電磁流速計は、サンドベッド下流端から 0.25m 下流の位置で水路床から上方に 2 箇所 ($Z=20, 100\text{mm}$) 設置した。なお、開水路区間の下流端部には高さ 0.2m の越流堰を設置し、管路区間を満管状態にした。

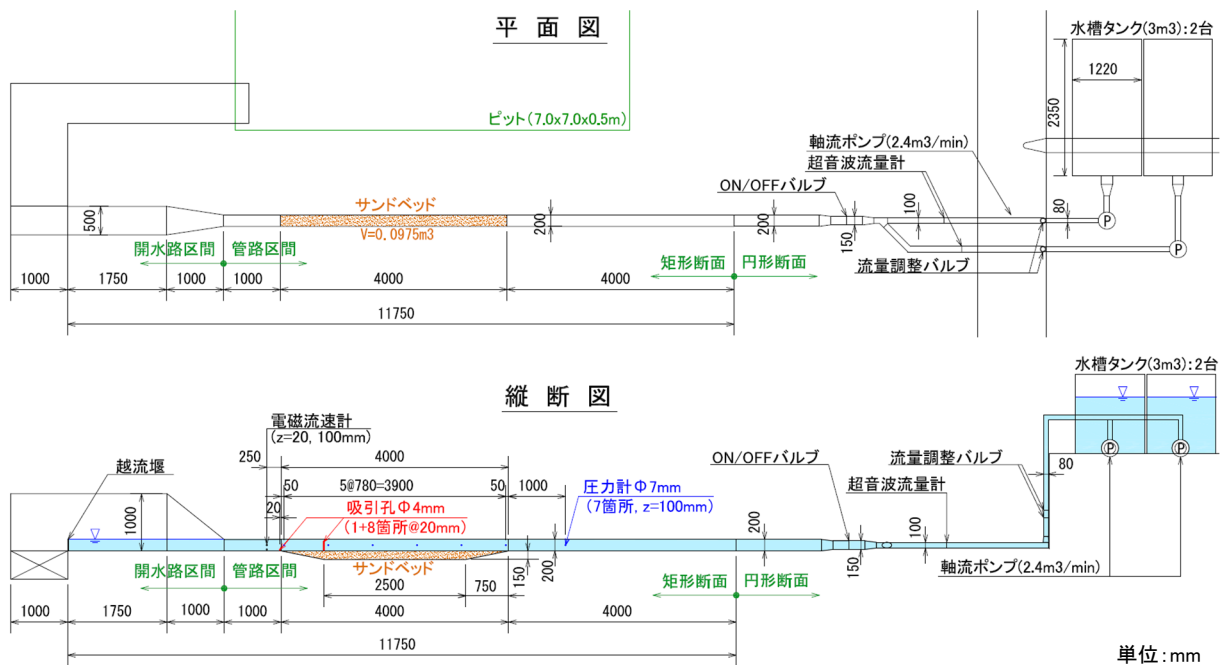


図-4.1 巻き上げ試験装置 概要図

4.1.2. 底質模型

試験体のうち底質模型は、表- 4.1 に示す粒子径・粒子密度・含水比等が異なる 5 ケースを設定した。各底質模型の設定理由は以下の通りとした。

- ・シリカフェーム（写真- 4.1 (a)）：粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の底質により、流れによるせん断応力が底質の限界せん断応力を大きく上回る条件を模擬した。さらに含水比を 3 ケース設定して粘性の影響を評価した。
- ・フライアッシュ（写真- 4.1 (b)）：へドロ粒径相当の底質により、実際の黒津波を模擬した。
- ・硅砂 6 号（標準的な砂）：既往研究との比較・検証用に選定した

ここで、シリカフェームとは、電気炉によるフェロシリコンや金属シリコンの精錬過程で発生する副産物であり、二酸化ケイ素の超微粒子である。フライアッシュとは、ボイラ内で燃焼により生じた熔融状態の微細な灰粒子が高温の燃焼ガス中を浮遊した後、ボイラ出口における温度低下に伴い球形微細粒子となったもので、主な含有元素はシリカとアルミナである。

表- 4.1 底質模型

No.	材料名		中央粒径 d_{50} [μm]	粒子密度 ρ_s [g/cm^3]	かさ密度 ρ_b [g/cm^3]	含水比 w [%]
1	シリカフェーム	SF1	0.31	2.27	0.29	208.5 ^{**}
2		SF2				150.0
3		SF3				100.0
4	フライアッシュ	FA	3.81	2.34	0.77	76.8 ^{**}
5	硅砂 6 号	SA	412	2.65	1.24	30.0 ^{**}

※材料を静水中に自然沈降させた時の含水比（≒飽和含水比）とする。



(a) シリカフェーム¹⁾

(b) フライアッシュ²⁾

写真- 4.1 フライアッシュおよびシリカフェームの顕微鏡写真

【出典】

- 1) ユニオン化成株式会社：シリカフェーム，<https://unionkasei.co.jp/silicafume/>，参照 2022.1.31.
- 2) 一般財団法人石炭フロンティア機構：フライアッシュ，
<http://www.jcoal.or.jp/ashdb/ashqa/whatash/ashtype/flyash/>，参照 2022.1.31.

底質材料の飽和含水比は、図-4.2 に示す通り、各材料をメスシリンダー内で水と攪拌・混合し、自然沈降させて上澄水を除去した質量比から算定した。なお、移動床の条件で試験を実施する際には、水路外の別容器において、あらかじめ設定した含水比になるように底質材料と水を計量して攪拌し、これをサンドベッドに敷き均した後、静かに水を流入させて管路内を満管状態にした。

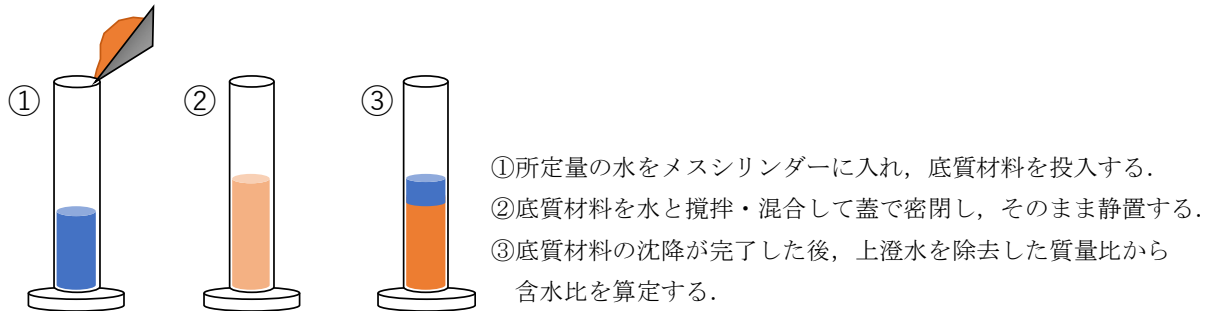


図- 4.2 飽和含水比の設定方法

① 粒度分布

本試験に使用した底質材料および現地調査で採取した底質の粒度分布を図-4.3、中央粒径 d_{50} を表- 4.2 に示す。なお、現地調査で採取された底質は、海底表層 20cm 分のサンプルを対象としたため、ヘドロだけでなく粘土や砂などを含む粒度分布と考えられる。

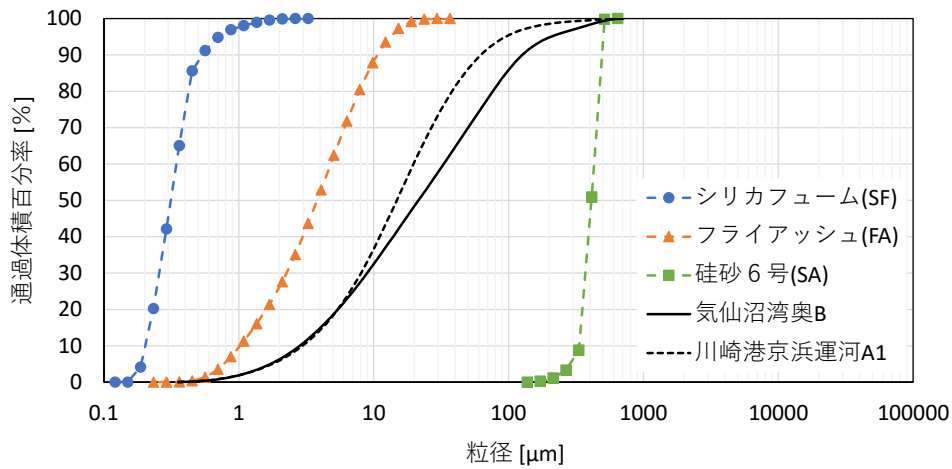


図- 4.3 底質模型の粒径加積曲線

表- 4.2 底質模型の中央粒径と現地調査結果との比較

底質種類	中央粒径 d_{50} [μm]
シリカフェーム	0.314
フライアッシュ	3.81
硅砂 6 号	412
気仙沼湾奥 B	21.5
川崎港京浜運河 A1	14.8

② 比重

本試験に使用した底質材料および現地調査で採取した底質の比重を表- 4.3 に示す.

表- 4.3 底質模型の比重と現地調査結果との比較

底質種類	比重 [-]
シリカフェーム	2.27
フライアッシュ	2.34
珪砂 6 号	2.65
気仙沼湾奥 B	2.70
川崎港京浜運河 A1	2.64

③ 含水比

本試験に使用した底質材料の飽和含水比および現地調査で採取した底質の含水比を表- 4.4 に示す.

表- 4.4 底質模型の含水比と現地調査結果との比較

底質種類	含水比 [%]
シリカフェーム	208.5
フライアッシュ	76.8
珪砂 6 号	30.0
気仙沼湾奥 B	118.8
川崎港京浜運河 A1	359.3

4.2. 巻き上げ試験

4.2.1. 試験概要

巻き上げ試験は、海底に堆積した底質（底泥やヘドロなど）の性状と巻き上がり条件の関係を整理することを目的に実施した。本試験では、管路区間（幅 0.2×高さ 0.2m）と開水路区間（幅 0.5×高さ 1.0m）を有する 2 次元水路を用い、管路区間には底質模型をセットするサンドベッドを設置した。津波を模した流れは、水路上流に設置した水槽タンクからの流れをポンプの回転数で調整し、流速 4 ケースおよび加速度 3 ケースを設定した。底質模型は、粒径・比重・含水比の異なる 5 種類とした。本試験は、以下の手順で実施した。

- ①予備試験：サンドベッドに底質模型を敷き均した移動床条件で、ポンプにより流速を徐々に上げ、底質が動き始める流速から限界摩擦速度および限界シールズ数を推定した。
- ②固定床試験：サンドベッドに蓋をした固定床条件で、PIV により管路内の流速分布を求めた。
- ③移動床試験：底質模型を敷き均した移動床条件で、設定した流速および加速度により巻き上がった底質の濃度分布を計測した。試験ケースとしては、同条件で各 3 ケースを行い、全 39 ケースを実施した。

以降に詳細を示す。

4.2.2. 試験方法

(1) 計測項目

① 底質の限界せん断応力

移動床のセットアップとしてサンドベッド内に底質模型を敷き均し、ポンプの回転数を徐々に上げ、流速を連続的に増加させた。水路側面から撮影した動画から、底質模型が動き出し始める断面平均流速 \bar{u}_s 、底質模型全体が流体として大きく流れ始める断面平均流速 \bar{u}_y をそれぞれ求めた。管路内の流速分布は対数則で表されると仮定し、藤井ら(1998)¹⁾より限界摩擦速度 u_{*s} 、 u_{*y} を式 4-1、限界シールズ数 τ_{*s} 、 τ_{*y} を式 4-2 で推定した。

$$\frac{u_{*s}}{\bar{u}_s} = \frac{\kappa}{\ln(h/z_0) - 1}, \quad \frac{u_{*y}}{\bar{u}_y} = \frac{\kappa}{\ln(h/z_0) - 1} \quad (4-1)$$

$$\tau_{*s} = \frac{u_{*s}^2}{sgd}, \quad \tau_{*y} = \frac{u_{*y}^2}{sgd} \quad (4-2)$$

ここで、 κ は Karman 定数 (=0.4)、 h は水深 (=0.10 m ; 水路高の半分)、 z_0 は粗度高さ ($z_0=k_s/30$)、 k_s は相当粗度 ($k_s=d$)、 d は底質の粒子径 ($d=d_{50}$)、 s は底質の水中比重 ($s=(\rho_s-\rho_w)/\rho_w$)、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度とした。

② 管路内の流速分布

固定床のセットアップとして、サンドベッドに粗度板（底質模型の各材料を貼り付けた板）で蓋をし、PIV (Particle Image Velocimetry ; 粒子画像流速計) により管路内の流速分布を計測した (図-4.4)。本計測は、水路内の流れが定常状態になった後、ナイロン粒子 (粒径 30 μ m) のトレーサーを水路に投入して流れで分散させ、水路上面からレーザーライトシートを照射し、水路側面から高速度カメラで撮影した動画より流速分布を解析した (写真-4.2)。サンドベッドの吸引孔位置 (図-4.5) で得られた流速分布 (横軸に水路床からの高さ z 、縦軸に流速 u をした片対数グラフ) から、高橋ら(2011)²⁾を参考に Prandtl-Karman の対数分布則により摩擦速度 u_* を式 4-3、シールズ数 τ_* を式 4-4 で推定した。

$$\frac{u}{u_*} = A_r + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{k} \Rightarrow u = \frac{u_*}{\kappa} \ln z + A \quad \left(\because A = A_r u_* - \frac{u_*}{\kappa} \ln k \right) \quad (4-3)$$

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} \quad (4-4)$$

ここで、 A_r と A は定数であり、 A は A_r 、 u_* 、 κ 、 k により算定される定数として整理されるため、 k を設定することなく、得られた流速分布の対数近似式から u_* を算定できる。

PIV 解析の精度は、電磁流速計の設置位置 (図-4.5) の水路床から 20, 100mm の高さに設置した電磁流速計による流速値との比較により検証した。また、水路側壁の摩擦の影響を確認するため、サンドベッド位置で水路中央と側壁近く (側壁から 20mm の位置) の 2 測線について流速分布を比較した。

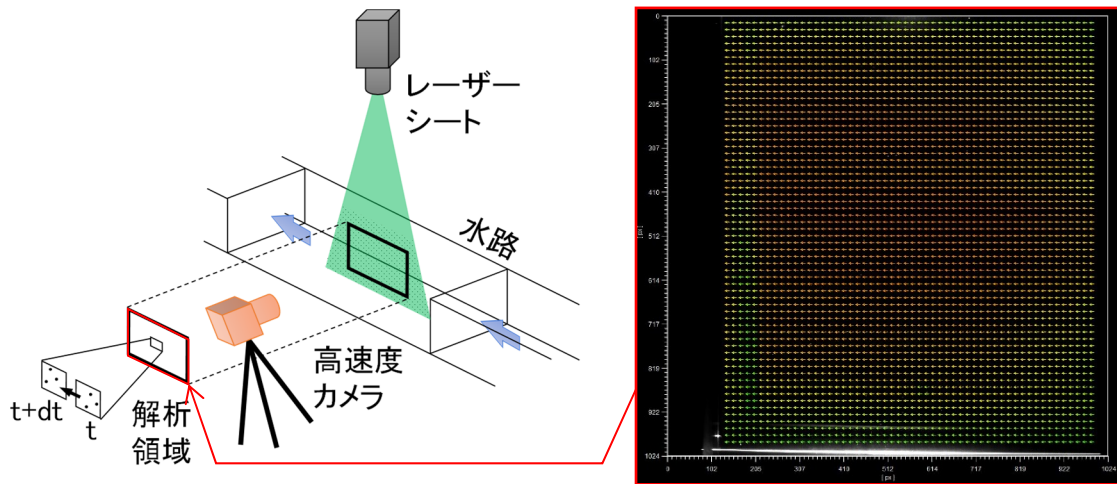


図-4.4 PIVによる流速分布の計測

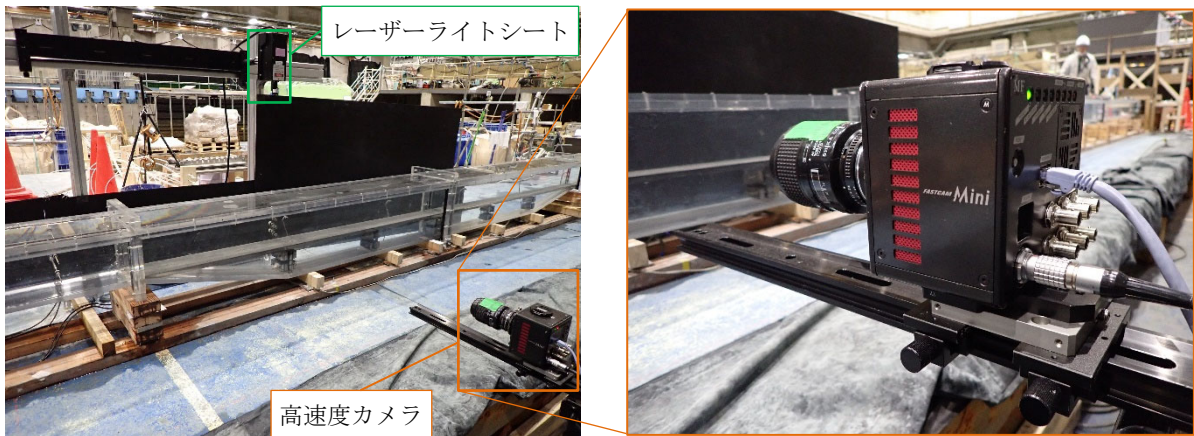


写真-4.2 PIV計測装置の設置状況

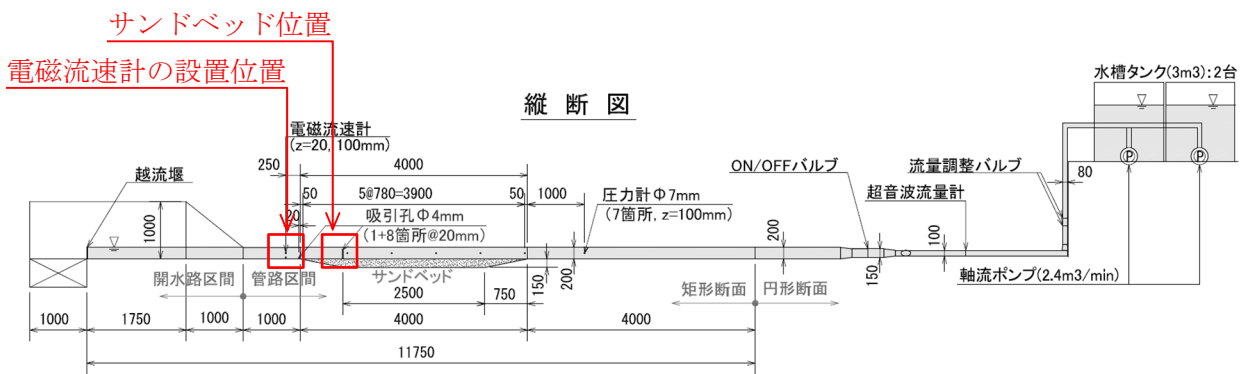


図-4.5 PIVによる流速分布の計測位置

③ 底質の濃度鉛直分布

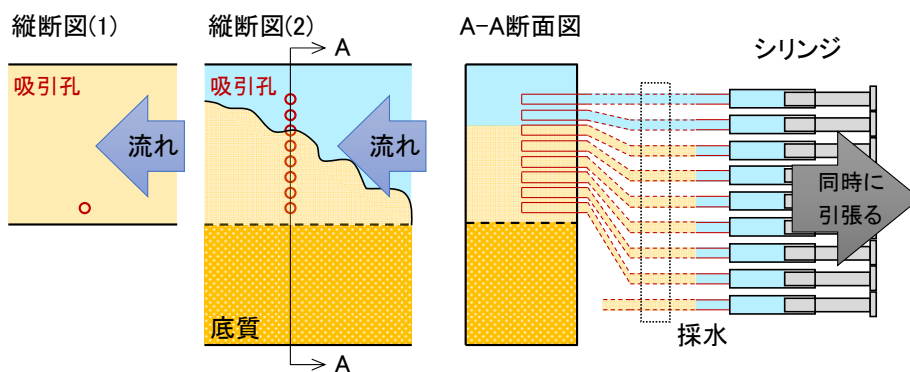
流れにより巻き上がった底質を含む濁水を採取するため、サンドベッド下流端から 750mm 上流の位置において水路床から鉛直上方向に 20mm 間隔で 8 箇所と、サンドベッド下流端から 20mm 下流の位置において水路床から 20mm 上方に 1 箇所を、水路側壁から内径 $\phi 4\text{mm}$ の吸引孔として設けた (図-4.6 (a))。ここでは、内径 $\phi 4\text{mm}$ × 長さ 200mm のパイプを水路断面中央位置まで延ばし、外側の端部にチューブとシリンジを取り付け、各シリンジを同時に引っ張ることにより濁水を採取する機構とした (図-4.6 (b))。なお、濁水の採取時間については、「サンドベッド上を通過した定常流が吸引孔に到達した後の時間」を設定した。

移動床のセットアップとしてサンドベッドに底質模型を敷き均し、所定の流速および加速度で流れを発生させて底質を巻き上げた。底質を含む濁水の採取は、所定の時間において各吸引孔から抜き取り、チューブ内にある濁水をサンプル瓶に約 10mL 採取した。その後、サンプル瓶内の濁水を攪拌し、マイクロピペット (写真-4.3 (a)) で定格体積 $V (=8\text{cm}^3)$ を測り採り、定温乾燥機 (写真-4.3 (b)) で水分を蒸発させ、乾燥後の底質材料の質量 M_s を電子天びん (写真-4.3 (c)) により計測した。その結果から、濁水密度 ρ [g/cm^3]、体積濃度 C_v [%]、SS 濃度 SS [mg/L] を式 4-5、式 4-6、式 4-7 により求めた。なお、 ρ_s は底質材料の密度、 ρ_w は水の密度とした。

$$\rho = \frac{M_s + (V - M_s/\rho_s) \cdot \rho_w}{V} \quad (4-5)$$

$$C_v = \frac{M_s/\rho_s}{V} \times 100 \quad (4-6)$$

$$SS = \frac{M_s}{V} \quad (4-7)$$



(a) 吸引孔設置位置：縦断方向

(b) 濁水の採取：A-A 断面

図-4.6 濁水の採取方法



(a) 体積測定：マイクロピペット



(b) 試料乾燥：定温乾燥器



(c) 質量測定：電子天びん

写真-4.3 底質濃度の計測機器

(2) 試験手順

① 予備試験

サンドベッドに底質模型を敷き均し、流速を連続的に徐々に上げ、底質模型が動き出し始めるタイミングと全体が流れ出すタイミングを撮影した動画から判定し、それぞれの断面平均流速を求めた。得られた結果から限界摩擦速度および限界シールズ数を推定した。

一部先行した移動床試験結果と合わせて、底質模型と流速・加速度の組合せにより濃度計測を行う 13 ケースを設定し、各 3 回ずつ実施した。

② 固定床試験：流速鉛直分布の計測

サンドベッドに各底質材料を貼り付けた粗度板で蓋をし、①で設定した各ケースの流速および加速度で流れを発生させ、管路内の流速鉛直分布を PIV により計測した。得られた流速分布から、Prandtl-Karman の対数分布則により摩擦速度およびシールズ数を推定した。

③ 移動床試験：濃度鉛直分布の計測

サンドベッドに底質模型を敷き均し、①を参考に設定した所定の流速・加速度で流れを発生させ、底質を巻き上げた。サンドベッド下流端より 750mm 上流の位置で水路床から鉛直上方向に 20mm ピッチで 8 箇所、サンドベッド下流端より 20mm 下流の位置で水路床から鉛直上方向に 20mm の位置 1 箇所において設置した内径 $\phi 4\text{mm}$ の吸引孔から、所定時間において濁水を採取した。その後、濁水試料の定格体積 8cm^3 をマイクロピペットで測り採り、定温乾燥機で水分を蒸発させ、底質の乾燥質量を電子天びんで測ることで、濁水密度・体積濃度・SS 濃度の鉛直分布を求めた。

(3) 試験ケース

巻き上げ試験（移動床試験）のケースとして設定した条件を表- 4.5 に示す。なお、同一条件での試験回数は3回とし、合計39ケースを実施した。ここで、流速は目標断面平均流速を4ケース（V1=0.5m/s, V2=1.0m/s, V3=1.5m/s, V4=2.0m/s）、加速度は目標断面平均流速に達するまでの時間を調整して3ケース（AL : 0.09m/s², AM : 0.27m/s², AH : 1.2m/s²）を設定した。

巻き上げ試験（移動床試験）のケース一覧を表- 4.6 に示す。

表- 4.5 巻き上げ試験（移動床試験）ケースの設定

底質模型			流速・加速度						
			V1	V2		V3		V4	
材料	記号	含水比[%]	AL	AL	AM	AH	AL	AH	AH
シカフェーム	SF1	208.5	—	○	—	—	—	—	—
	SF2	150.0	○	○	○	—	—	—	—
	SF3	100.0	—	○	—	○	○	○	○
フライッシュ	FA	76.8	—	○	—	○	○	—	—
硅砂6号	SA	30.0	—	—	—	—	○	—	—

※○：採用13ケース×繰返し3回＝全39ケース

表-4.6 巻き上げ試験（移動床試験）ケース一覧

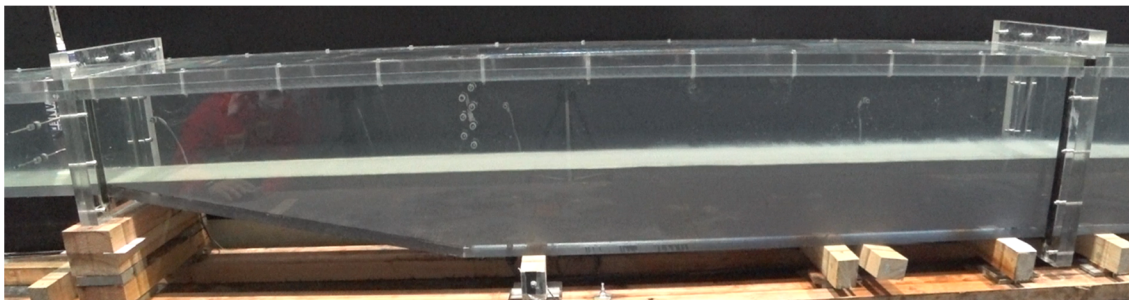
No.	ケース名	材料	含水比[%]	流速 (V1,V2,V3,V4)	加速度 (AL,AM,AH)	試験 回数
1	SF1-V2-AL-1	シリカフェーム	208.5	V2	AL	1
2	SF1-V2-AL-2					2
3	SF1-V2-AL-3					3
4	SF2-V1-AL-1		150.0	V1	AL	1
5	SF2-V1-AL-2					2
6	SF2-V1-AL-3					3
7	SF2-V2-AL-1			V2	AL	1
8	SF2-V2-AL-2					2
9	SF2-V2-AL-3					3
10	SF2-V2-AM-1				AM	1
11	SF2-V2-AM-2					2
12	SF2-V2-AM-3					3
13	SF3-V2-AL-1		100.0	V2	AL	1
14	SF3-V2-AL-2					2
15	SF3-V2-AL-3					3
16	SF3-V2-AH-1				AH	1
17	SF3-V2-AH-2					2
18	SF3-V2-AH-3					3
19	SF3-V3-AL-1			V3	AL	1
20	SF3-V3-AL-2					2
21	SF3-V3-AL-3					3
22	SF3-V3-AH-1				AH	1
23	SF3-V3-AH-2					2
24	SF3-V3-AH-3					3
25	SF3-V4-AH-1		V4	AH	1	
26	SF3-V4-AH-2				2	
27	SF3-V4-AH-3				3	
28	FA-V2-AL-1	フライアッシュ	V2	AL	1	
29	FA-V2-AL-2				2	
30	FA-V2-AL-3				3	
31	FA-V2-AH-1			AH	1	
32	FA-V2-AH-2				2	
33	FA-V2-AH-3				3	
34	FA-V3-AL-1		V3	AL	1	
35	FA-V3-AL-2				2	
36	FA-V3-AL-3				3	
37	SA-V3-AL-1	珪砂6号	V3	AL	1	
38	SA-V3-AL-2				2	
39	SA-V3-AL-3				3	

【参考文献】

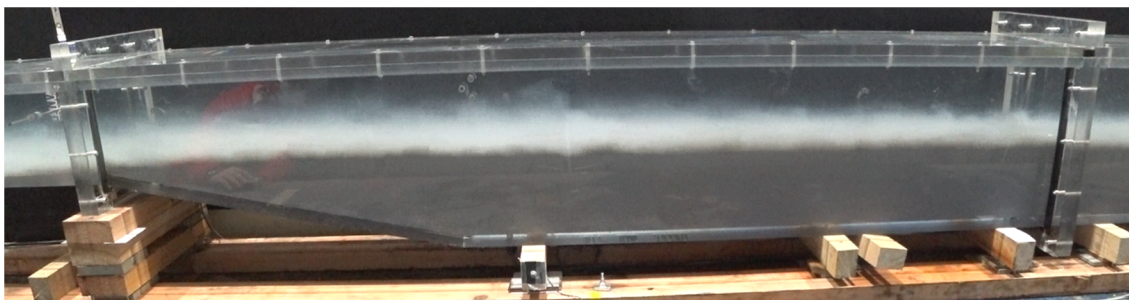
- 1) 藤井直樹, 大森政則, 高尾誠, 金山進, 大谷英夫: 津波による海底地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.376-380, 1998.
- 2) 高橋智幸, 黒川貴博, 藤田将孝, 島田広昭: 津波による土砂移動の粒径依存性に関する水理実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.231-235, 2011.

4.2.3. 予備試験結果

本試験では、大坪ら(1980)¹⁾を参考に、底質模型が動き出し始めるタイミングを「流送限界 (s)」, 底質模型全体が大きく流れ始めるタイミングを「破壊限界 (y)」とした。写真-4.4のように水路側面から撮影した動画から各タイミングを判定し、断面平均流速 \bar{u}_s, \bar{u}_y をそれぞれ求めた。管路内の流速分布は対数則で表されると仮定し、断面平均流速を用いて粗面乱流に対する抵抗則から摩擦速度 u^* およびシールズ数 τ^* を式 4-1, 4-2 より推定した。得られた結果を表-4.7 に示す。



(a) 移動限界



(b) 破壊限界

写真-4.4 予備試験における移動限界・破壊限界の判定例

表-4.7 限界摩擦速度および限界シールズ数の推定

底質模型	材料	シリカフェーム			フライアッシュ	硅砂6号
	含水比 [%]	208.5	150.0	100.0	76.8	30.0
	記号	SF1	SF2	SF3	FA	SA
移動 限界 (s)	断面平均流速 \bar{u}_s [m/s]	0.322	0.293	0.330	0.222	0.340
	限界摩擦速度 u_s^* [m/s]	0.009	0.008	0.009	0.007	0.017
	限界シールズ数 τ_s^* [-]	18.67	15.46	19.61	1.00	0.04
破壊 限界 (y)	断面平均流速 \bar{u}_y [m/s]	0.445	0.538	0.610	0.641	—
	限界摩擦速度 u_y^* [m/s]	0.012	0.014	0.016	0.020	—
	限界シールズ数 τ_y^* [-]	35.65	52.11	66.99	8.30	—

【参考文献】

- 1) 大坪国順, 村岡浩爾, 高野恒雄, 栗谷陽一: 粘性土の限界掃流力について, 衛生工学研究討論会講演論文集, 第16巻, pp.140-146, 1980.

4.2.4. 固定床試験結果

(1) 管路内の流速分布

本試験では、底質材料（シリカフェーム、フライアッシュ、珪砂 6 号）を貼り付けた各粗度板に対して流速 4 ケース（V1～V4）の管路内における流速鉛直分布を取得した。計測方法については、高速度カメラで撮影された画像から PIV 解析を行い、図- 4.7 に示すように 1 秒間の時間平均流速を計算し、それぞれ画像左上原点からの水平位置における鉛直分布を平均して求めた。なお、同条件において計測を 3 回繰り返し、ばらつきを確認した。

サンドベッド上の吸引孔位置における中央測線（SC）で得られた結果のうち、各粗度板の流速鉛直分布を図- 4.8～図- 4.10、粗度板による比較を図- 4.11 に示す。これらの結果から、水路床付近における流速の低減は、粗度の大きい珪砂 6 号が最も大きく、シリカフェームとフライアッシュがほぼ同程度であることが確認できた。

サンドベッド上の吸引孔位置における壁際測線（側壁から 20mm 離れた位置；SS）でのシリカフェームの粗度板による流速鉛直分布を図- 4.12、中央測線との比較を図- 4.13 に示す。これらの結果から、水路側壁による摩擦の影響については、中央測線（SC）での水路床から 20mm の流速と、壁際測線（SS）での鉛直位置 100mm 付近の流速がほぼ整合していることが確認できた。

電磁流速計の設置位置における中央測線（MC）でのシリカフェームの粗度板による流速鉛直分布を図- 4.14、サンドベッド上の吸引孔位置との比較を図- 4.15 に示す。これらの結果から、PIV による流速鉛直分布と電磁流速計の流速値が概ね一致したため、PIV の妥当性を確認できた。

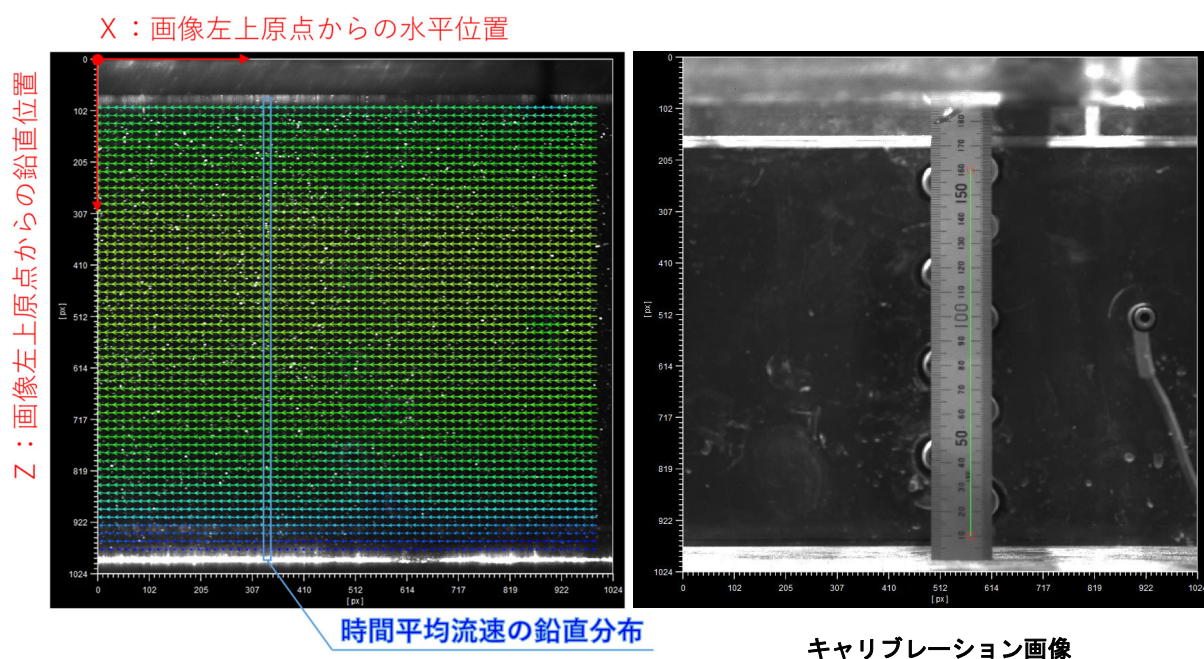
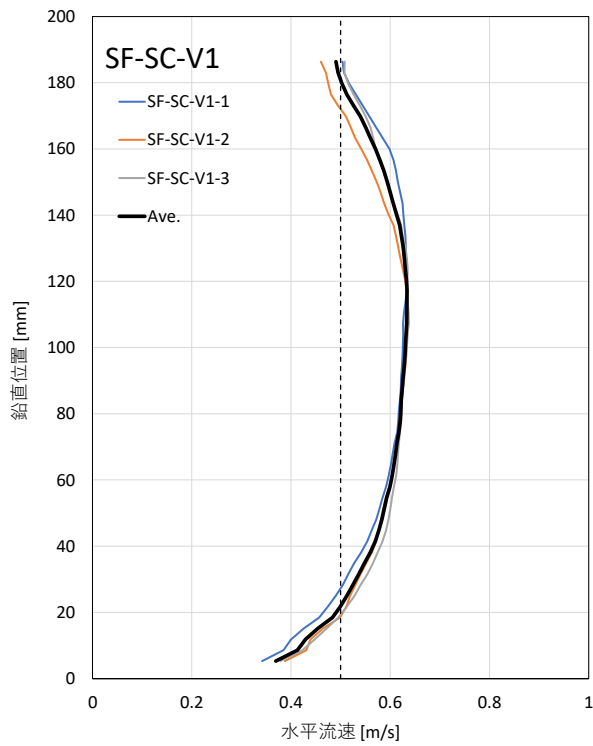
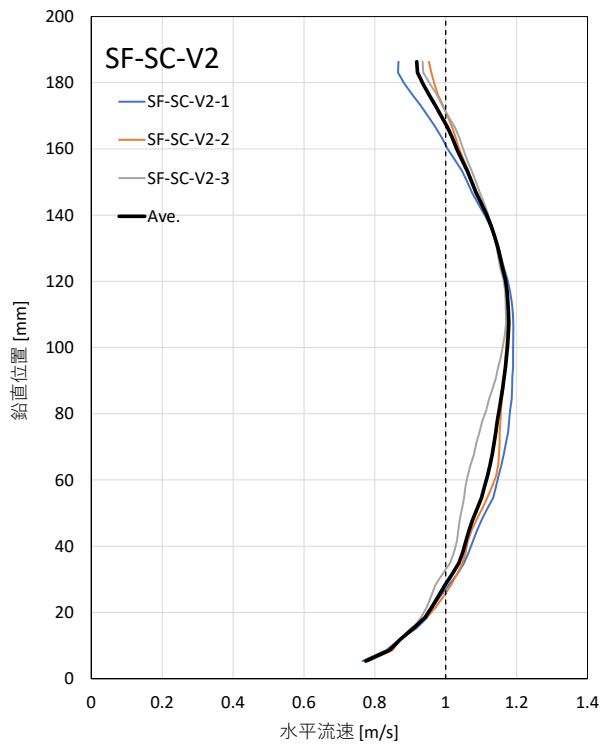


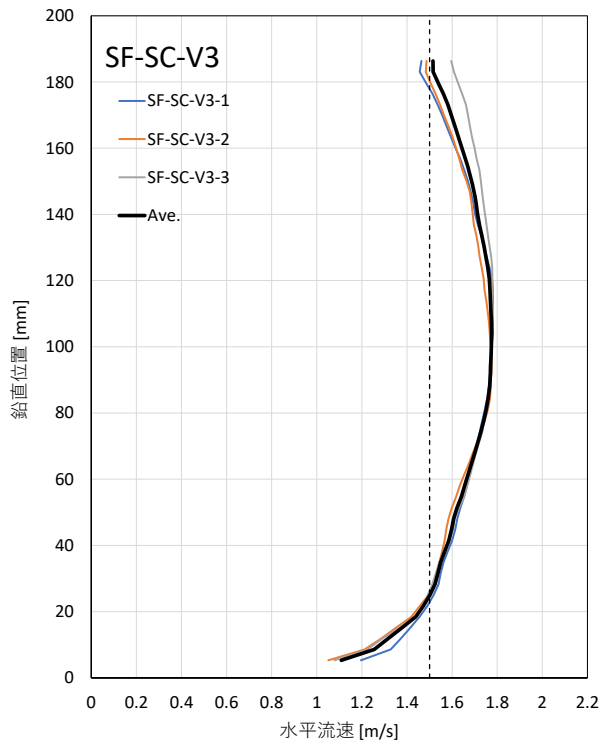
図- 4.7 PIV による画像解析から得られた時間平均流速の鉛直分布例



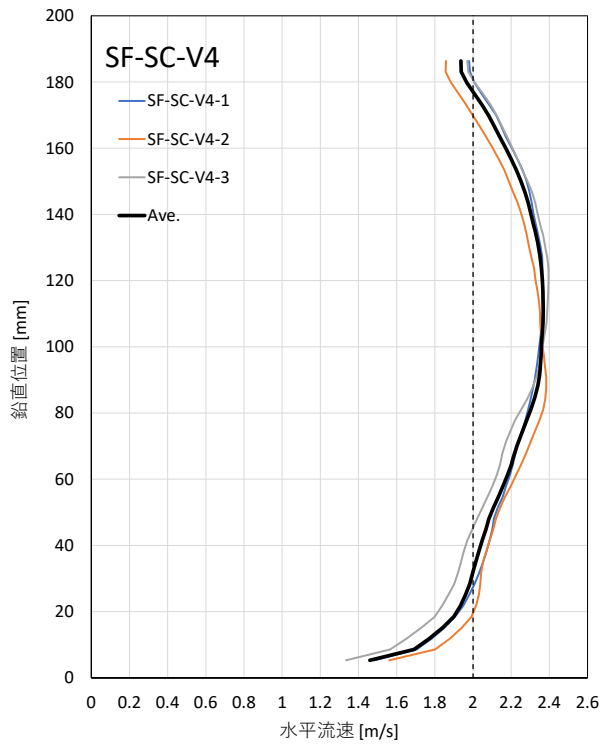
(a) V1 : 目標断面平均流速 0.5m/s



(b) V2 : 目標断面平均流速 1.0m/s



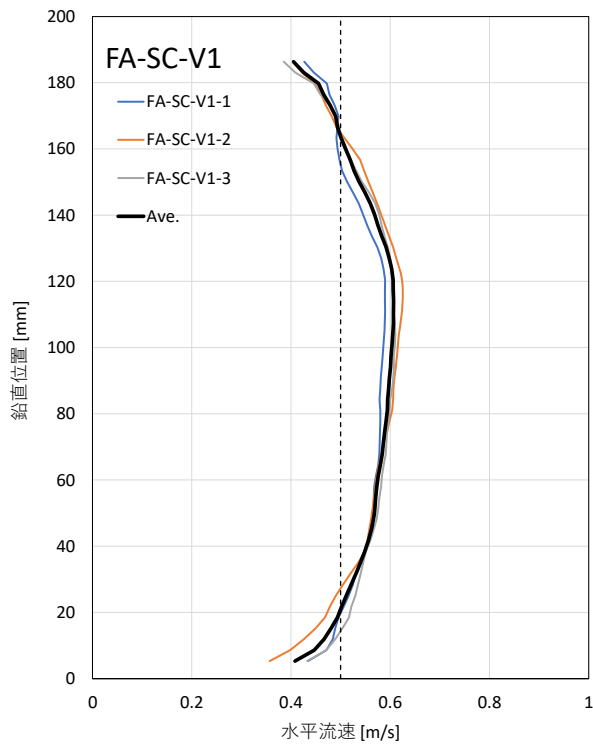
(c) V3 : 目標断面平均流速 1.5m/s



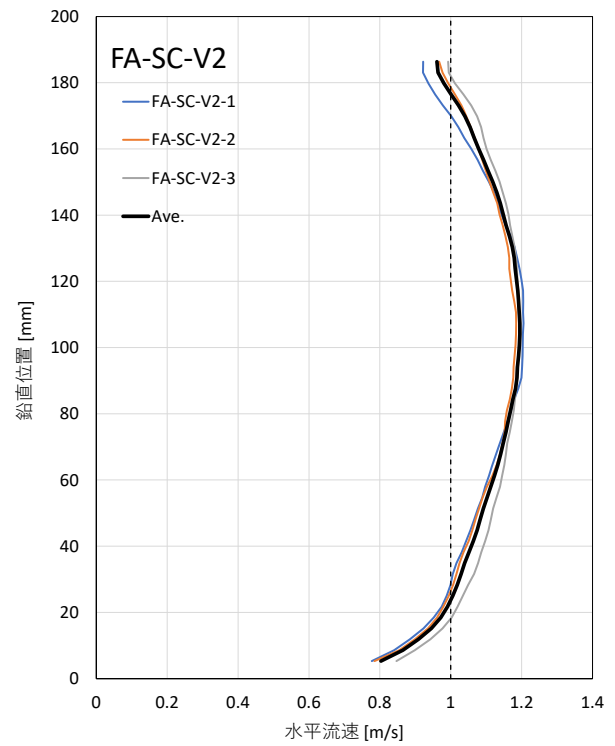
(d) V4 : 目標断面平均流速 2.0m/s

図-4.8 PIVによる管路内の流速鉛直分布

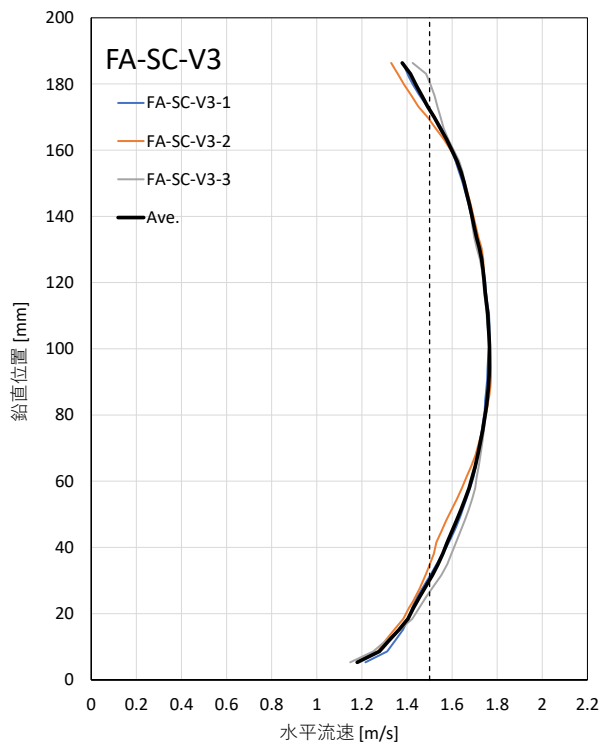
(SF : シリカフェームの粗度板, S : サンドベッド上の吸引孔位置, C : 中央測線)



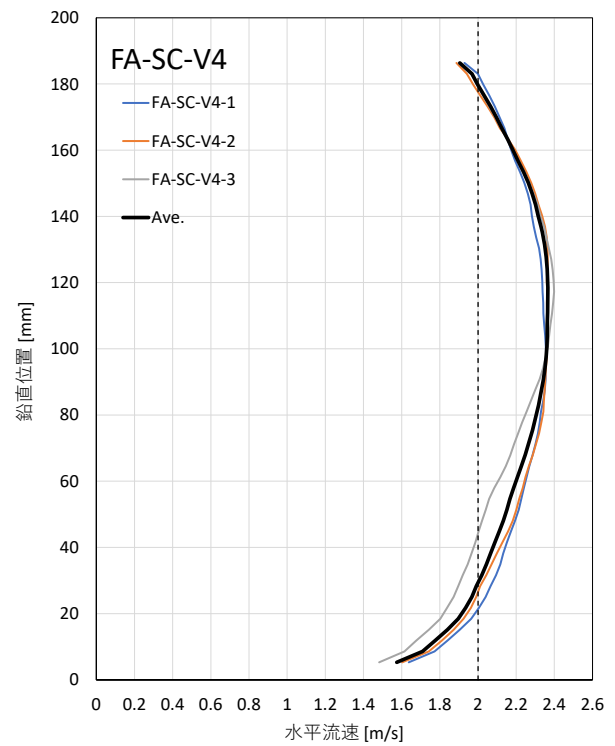
(a) V1 : 目標断面平均流速 0.5m/s



(b) V2 : 目標断面平均流速 1.0m/s



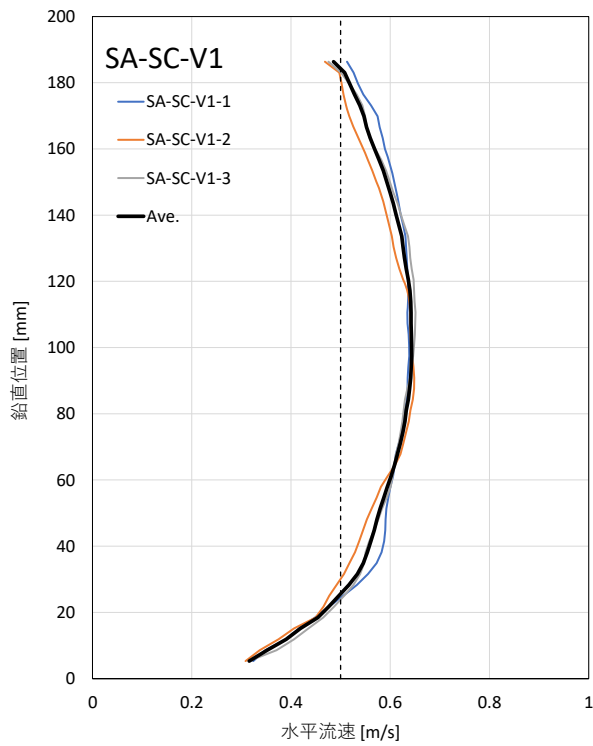
(c) V3 : 目標断面平均流速 1.5m/s



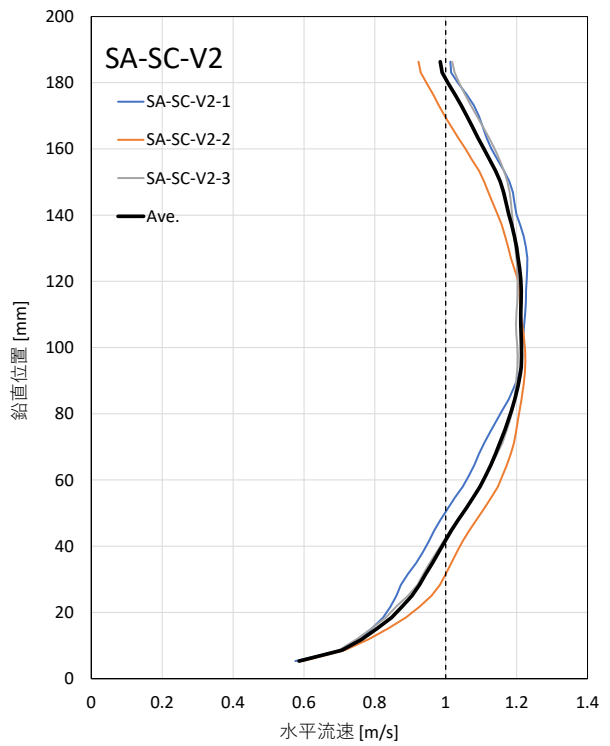
(d) V4 : 目標断面平均流速 2.0m/s

図-4.9 PIVによる管路内の流速鉛直分布

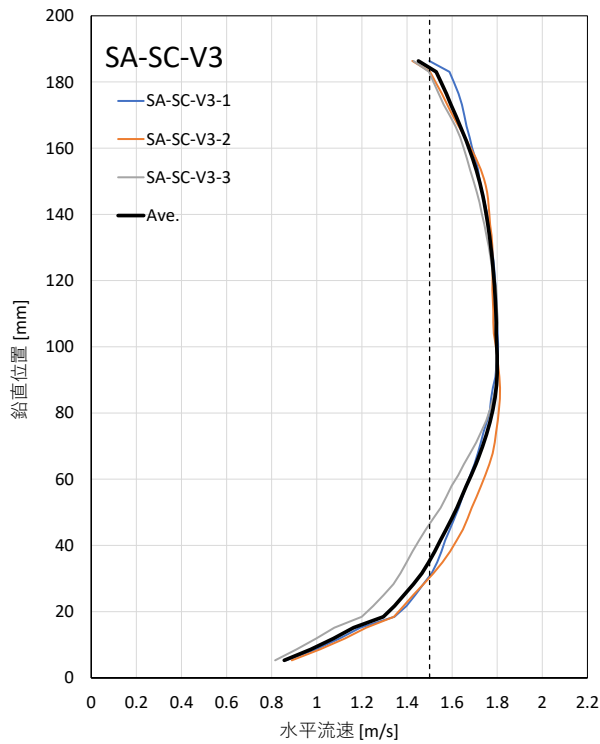
(FA : フライアッシュの粗度板, S : サンドベッド上の吸引孔位置, C : 中央測線)



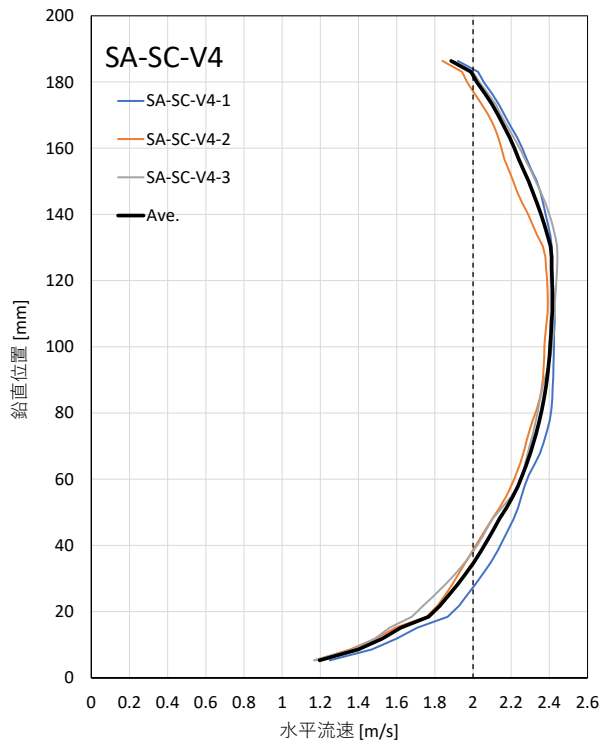
(a) V1 : 目標断面平均流速 0.5m/s



(b) V2 : 目標断面平均流速 1.0m/s



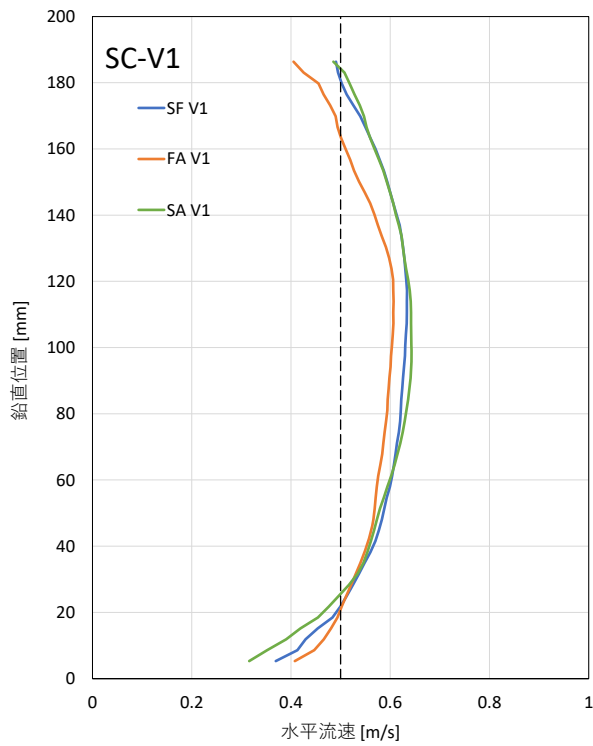
(c) V3 : 目標断面平均流速 1.5m/s



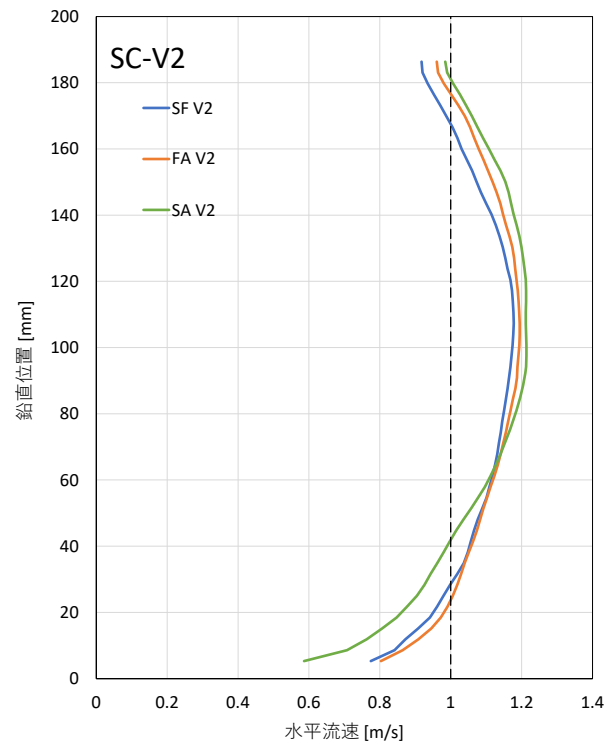
(d) V4 : 目標断面平均流速 2.0m/s

図- 4.10 PIV による管路内の流速鉛直分布

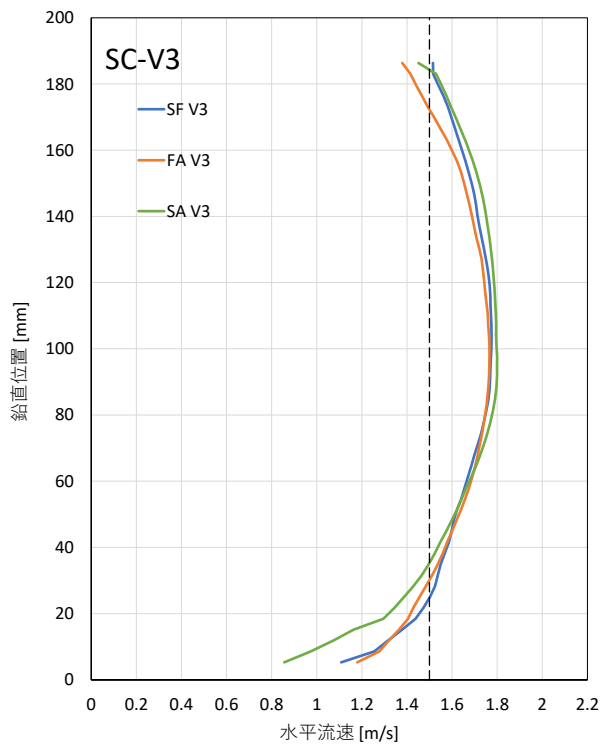
(SA : 珪砂 6 号の粗度板, S : サンドベッド上の吸引孔位置, C : 中央測線)



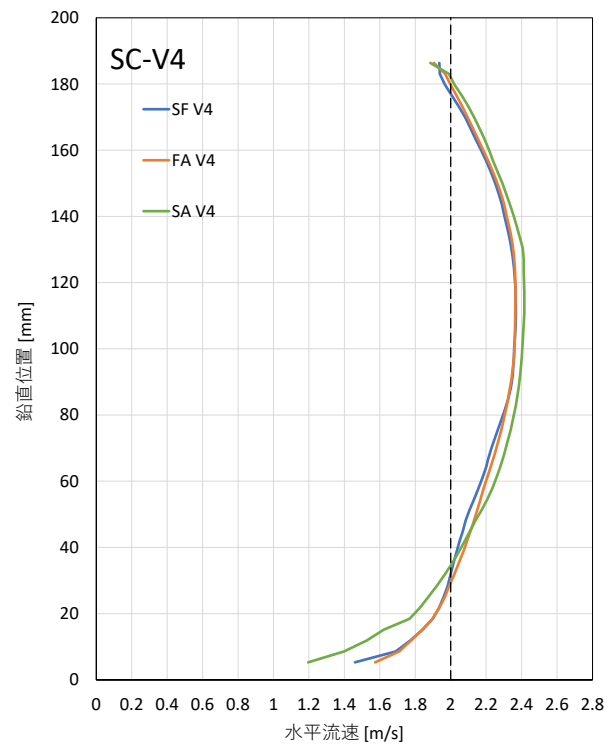
(a) V1 : 目標断面平均流速 0.5m/s



(b) V2 : 目標断面平均流速 1.0m/s

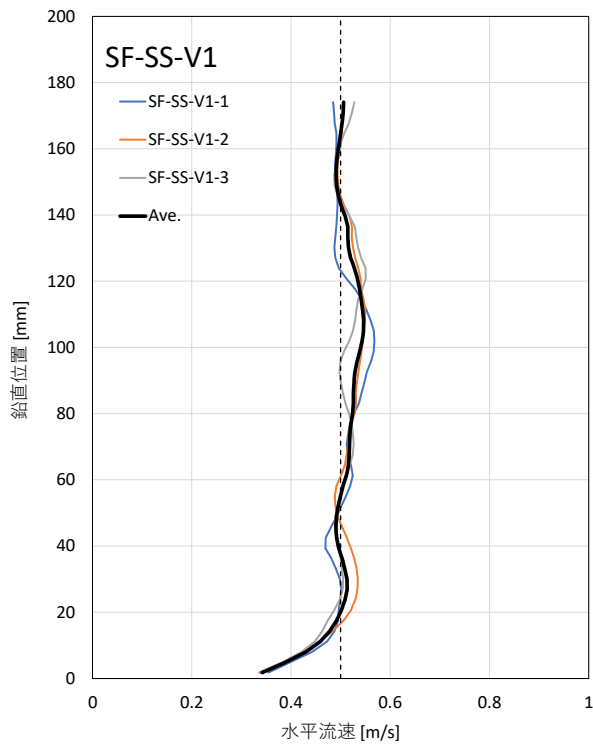


(c) V3 : 目標断面平均流速 1.5m/s

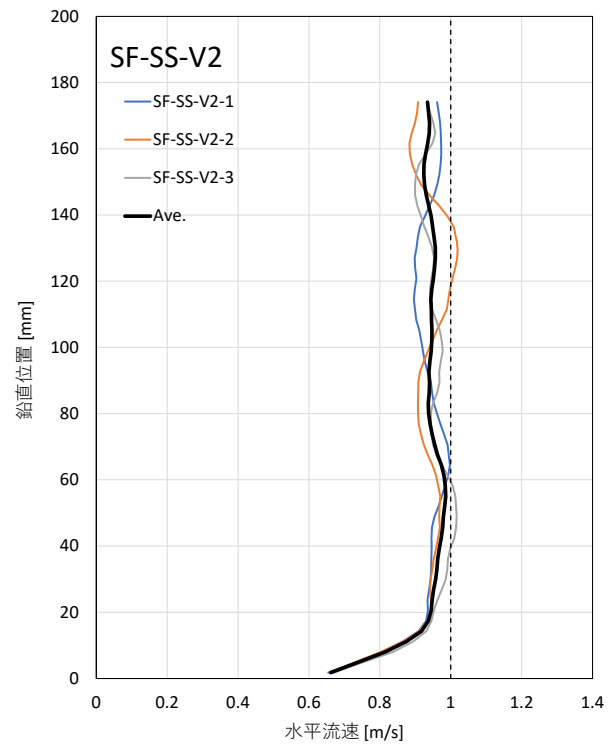


(d) V4 : 目標断面平均流速 2.0m/s

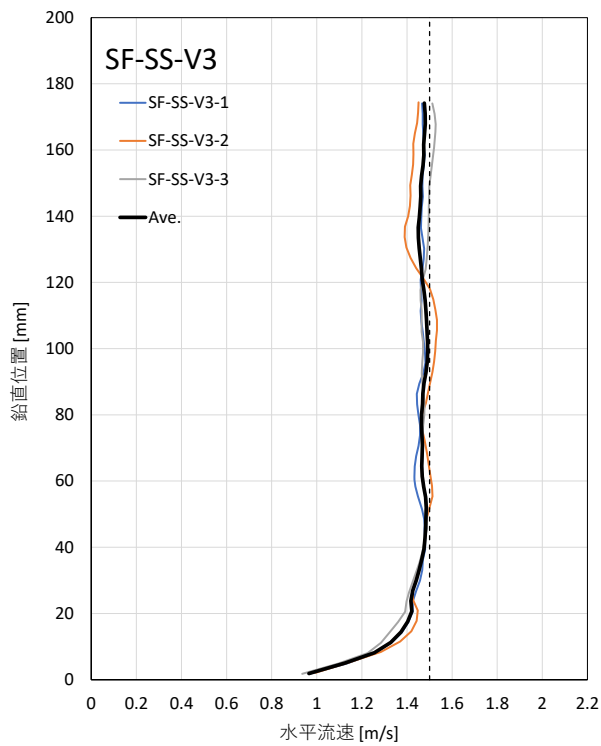
図-4.11 PIVによる管路内の流速鉛直分布の比較
(S : サンドベッド上の吸引孔位置, C : 中央測線)



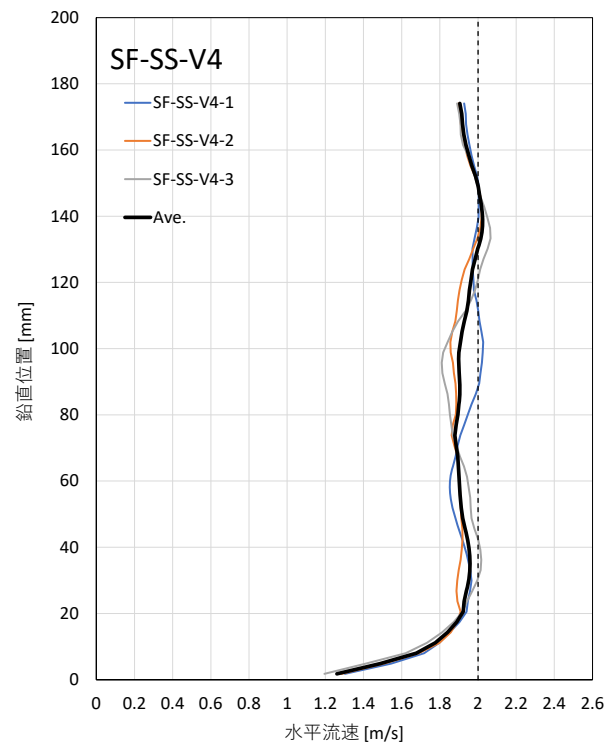
(a) V1 : 目標断面平均流速 0.5m/s



(b) V2 : 目標断面平均流速 1.0m/s



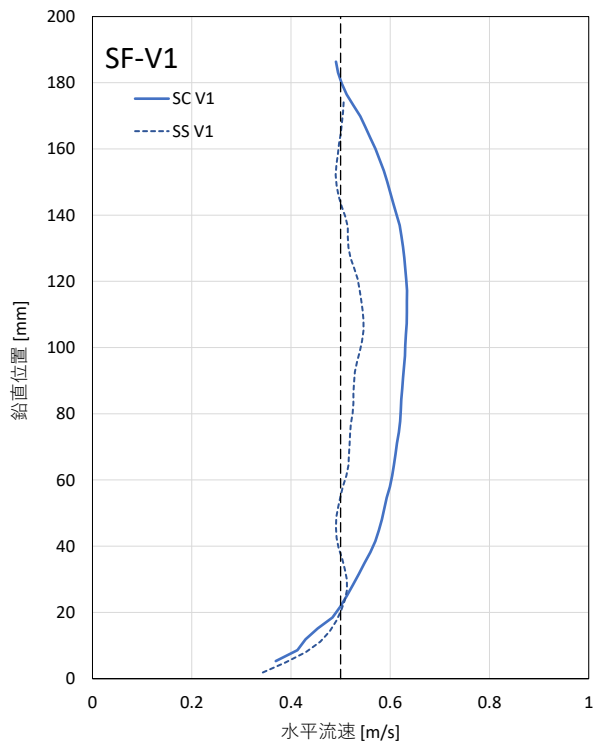
(c) V3 : 目標断面平均流速 1.5m/s



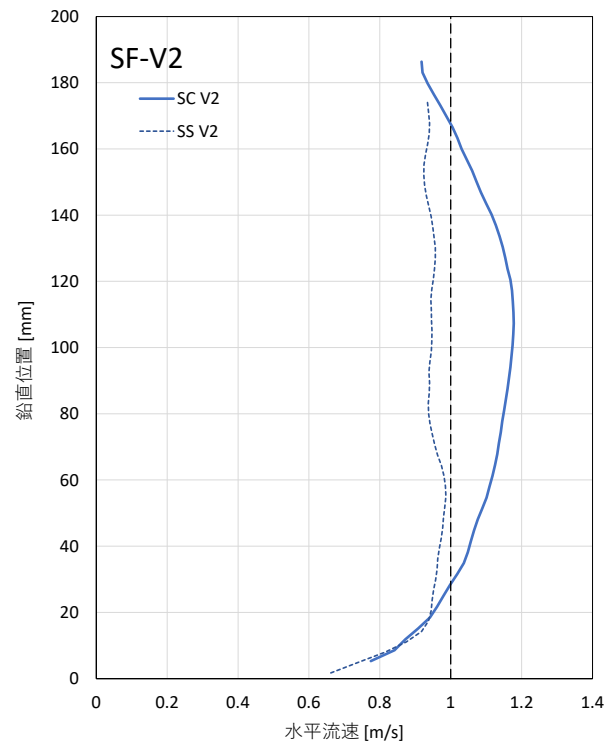
(d) V4 : 目標断面平均流速 2.0m/s

図- 4.12 PIV による管路内の流速鉛直分布

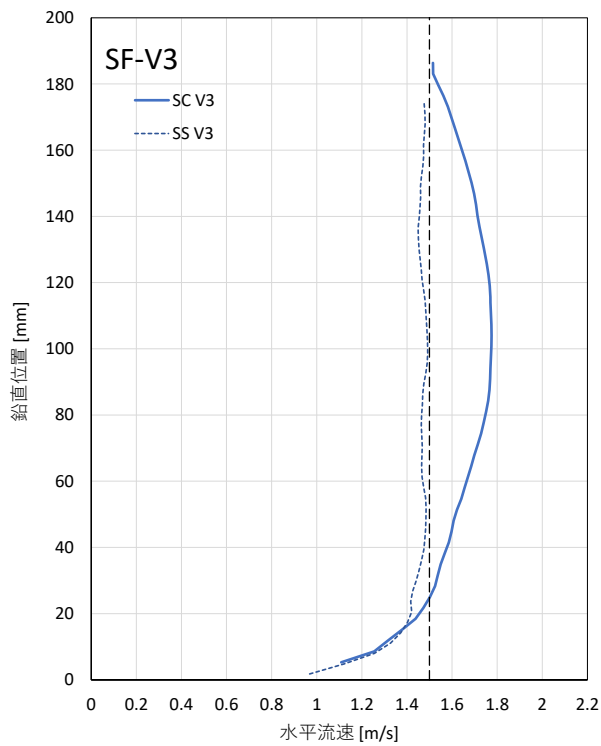
(SF : シリカフェームの粗度板, S : サンドベッド上の吸引孔位置, S : 壁際測線)



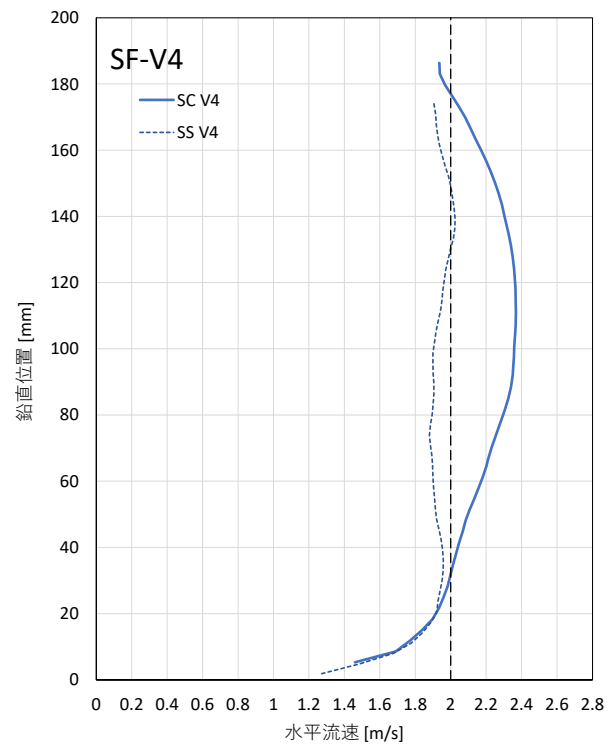
(a) V1 : 目標断面平均流速 0.5m/s



(b) V2 : 目標断面平均流速 1.0m/s



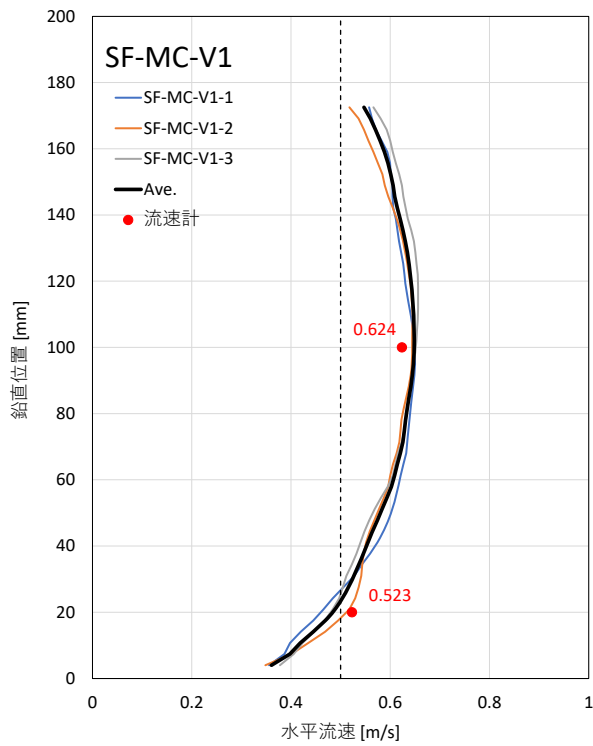
(c) V3 : 目標断面平均流速 1.5m/s



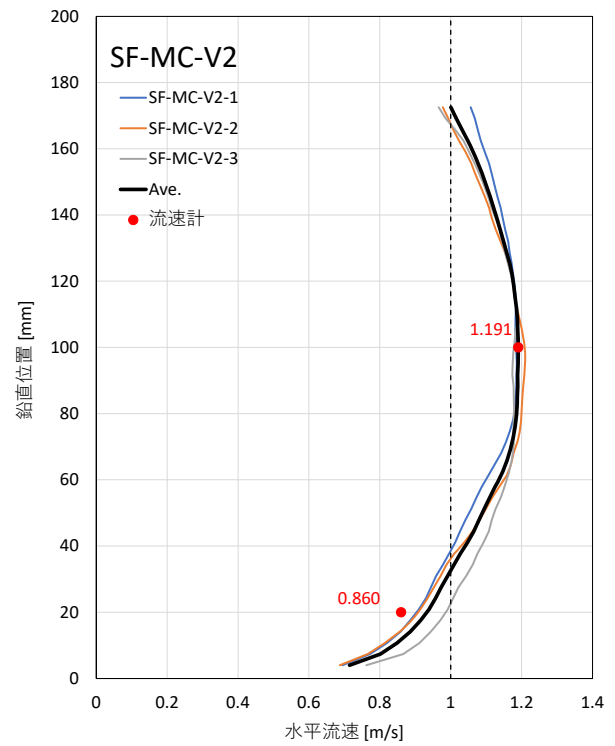
(d) V4 : 目標断面平均流速 2.0m/s

図-4.13 PIVによる管路内の流速鉛直分布の比較

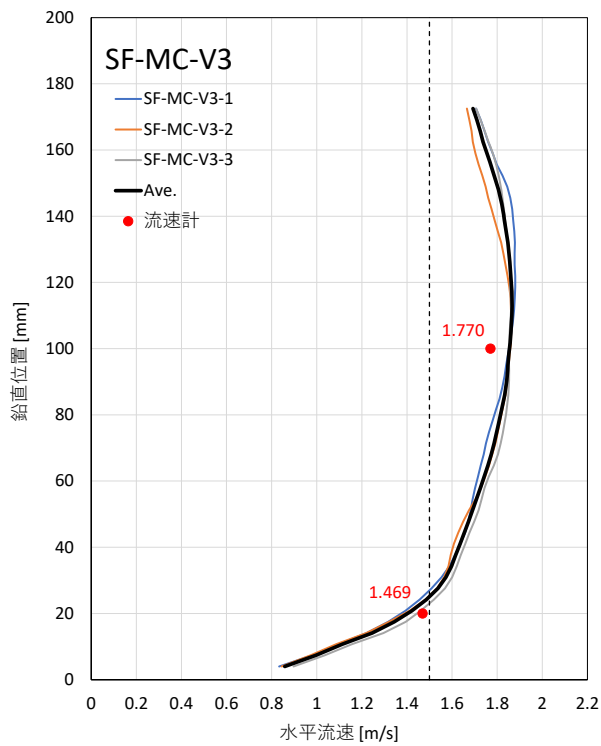
(SF : シリカフェームの粗度板, S : サンドベッド上の吸引孔位置, C : 中央測線, S : 壁際測線)



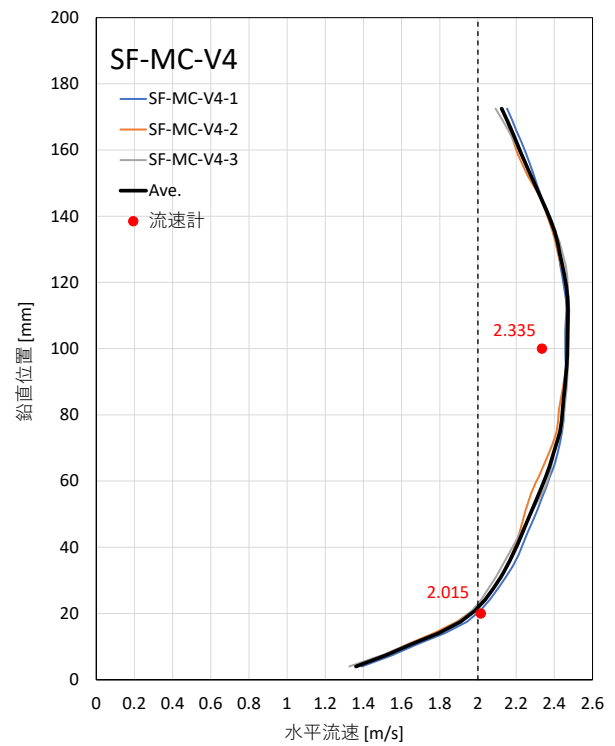
(a) V1 : 目標断面平均流速 0.5m/s



(b) V2 : 目標断面平均流速 1.0m/s



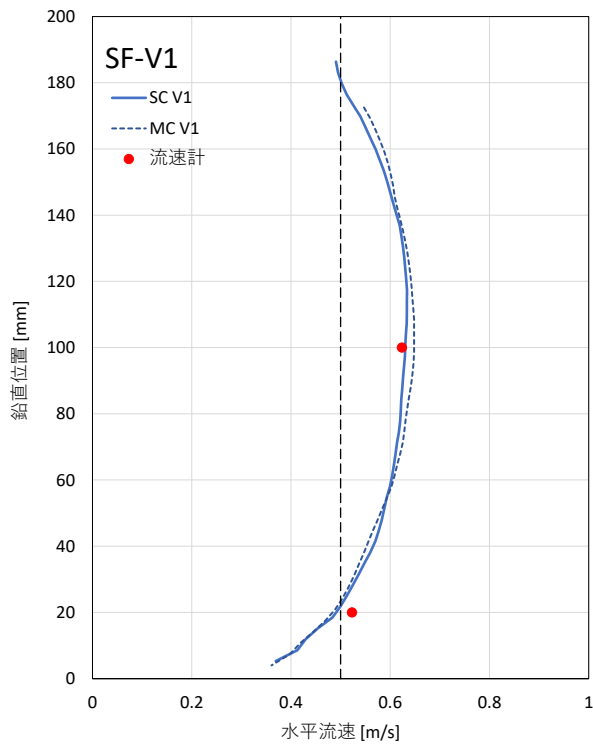
(c) V3 : 目標断面平均流速 1.5m/s



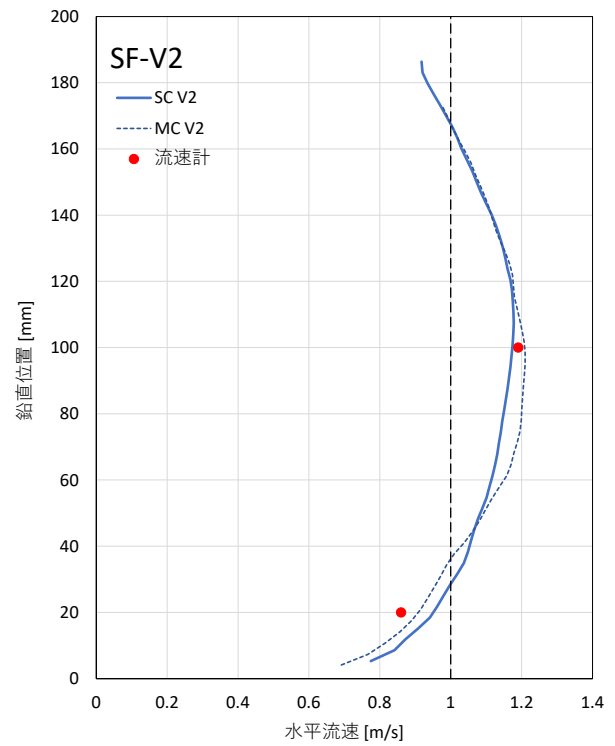
(d) V4 : 目標断面平均流速 2.0m/s

図-4.14 PIVによる管路内の流速鉛直分布

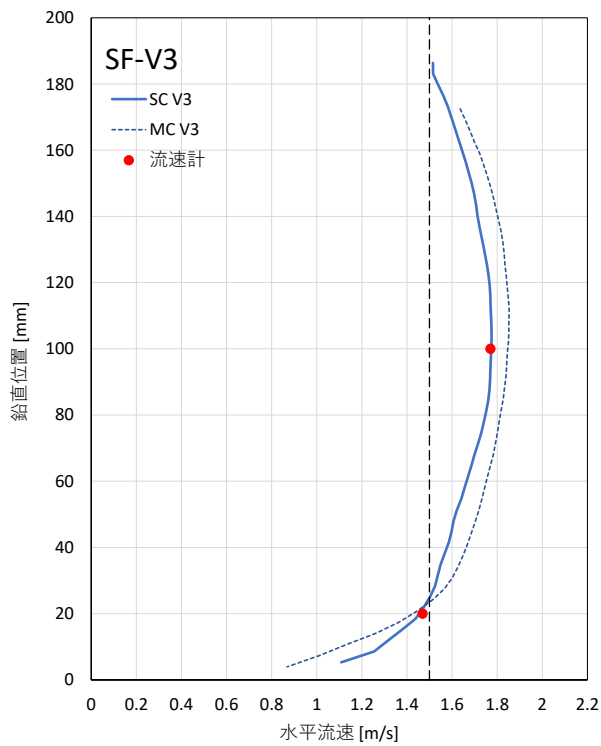
(SF : シリカフェームの粗度板, M : 電磁流速計の設置位置, C : 中央測線)



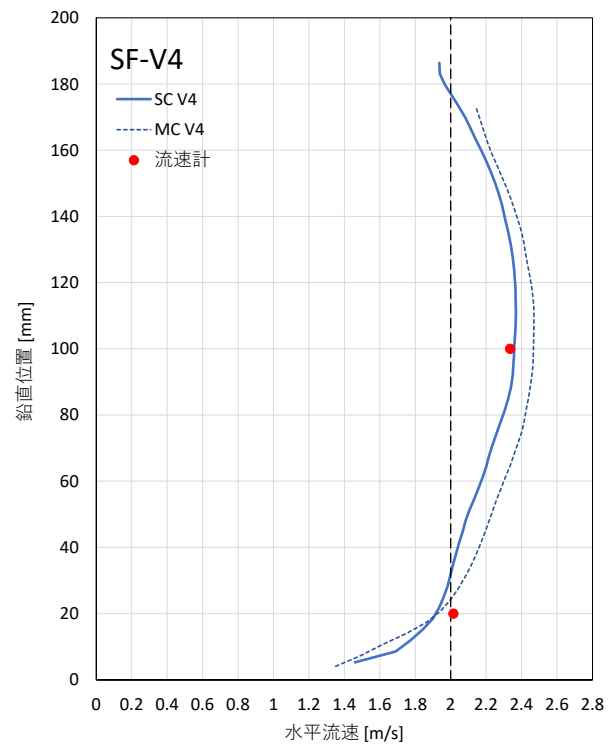
(a) V1 : 目標断面平均流速 0.5m/s



(b) V2 : 目標断面平均流速 1.0m/s



(c) V3 : 目標断面平均流速 1.5m/s



(d) V4 : 目標断面平均流速 2.0m/s

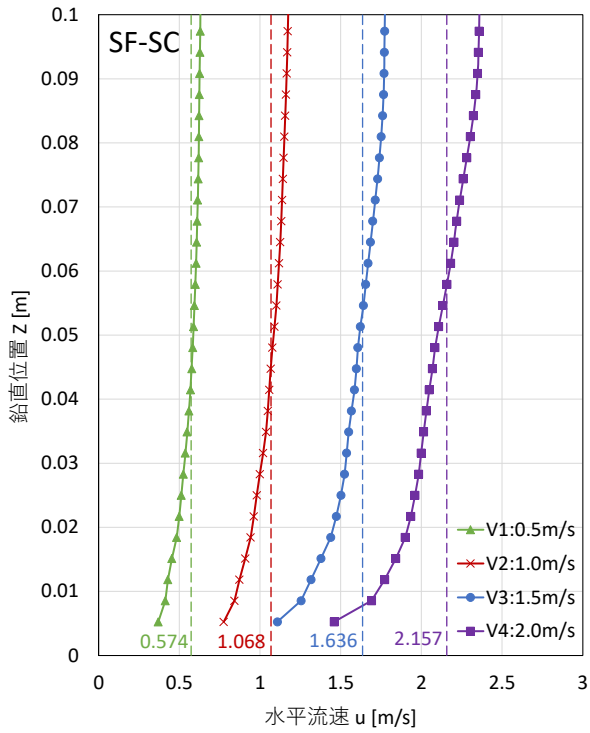
図-4.15 PIVによる管路内の流速鉛直分布の比較

(SF : シリカフェームの粗度板, S : サンドベッド上の吸引孔位置,
M : 電磁流速計の設置位置, C : 中央測線)

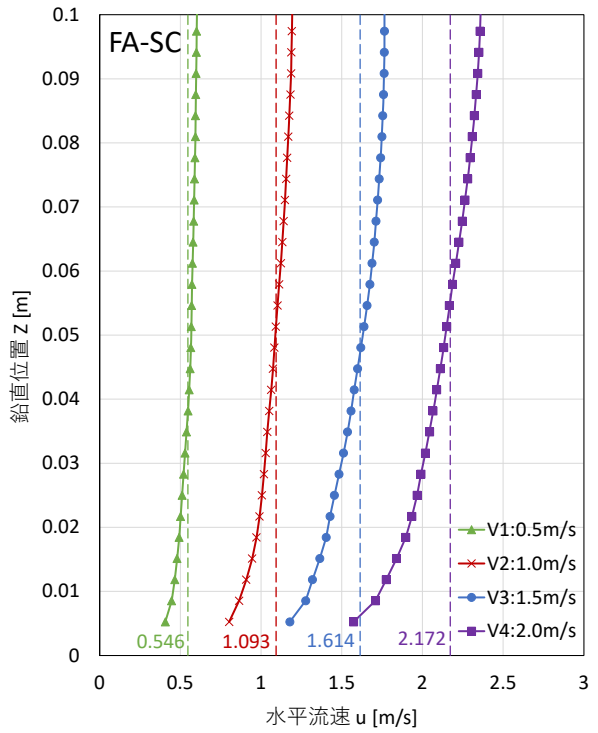
(2) 摩擦速度およびシールズ数

サンドベッド上の吸引孔位置における中央測線 (SC)の流速鉛直分布を図- 4.16 に再掲する. 同図内の破線は, V1~V4 の鉛直平均流速を示している. ここで, 得られた流速鉛直分布を片対数グラフとして, 図- 4.17 に示す. 4.2.2(1)②に示す通り, Prandtl-Karman の対数分布則から式 4-3 により摩擦速度 u_* , 式 4-4 によりシールズ数 τ_* を推定した.

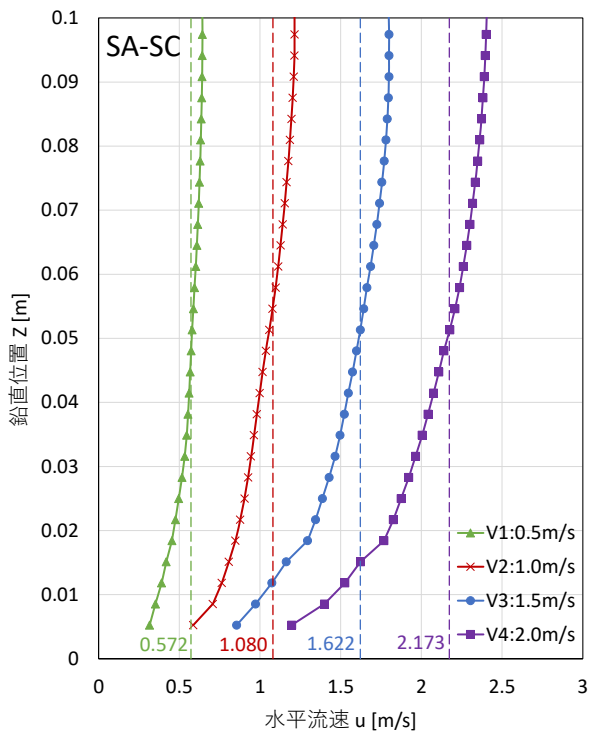
図-4.17 より, 水路床から 0.03m 以下における対数近似曲線を示しており, 対数近似式の傾きは u_*/κ , 切片は A に相当する. Prandtl-Karman の対数分布則による各底質模型の摩擦速度およびシールズ数を表- 4.8 に示す.



(a) SF : シリカフェーム

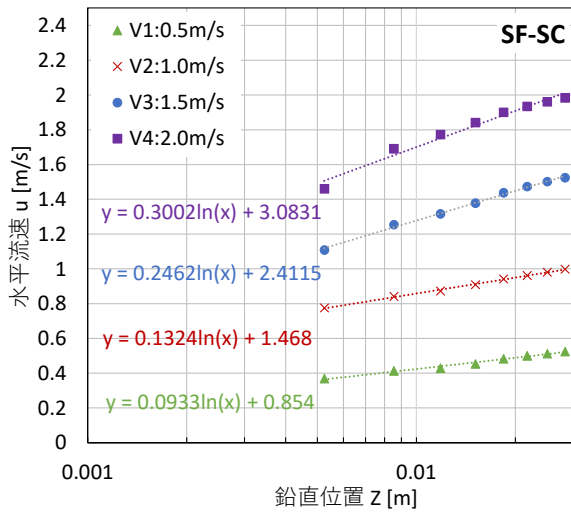


(b) FA : フライアッシュ

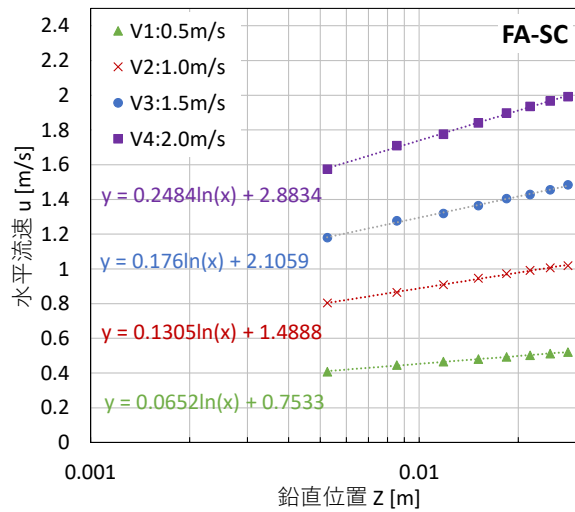


(c) SA : 珪砂 6号

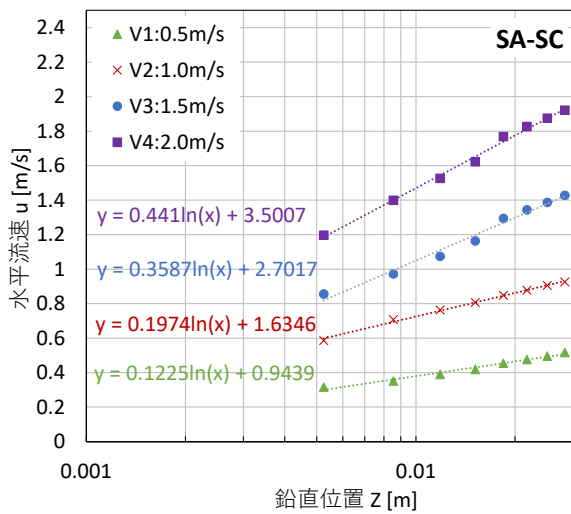
図-4.16 サンドベッド上の吸引孔位置での中央測線における流速鉛直分布



(a) SF : シリカフェーム



(b) FA : フライアッシュ



(c) SA : 珪砂 6号

図- 4.17 本試験で得られた流速の対数分布図

表- 4.8 Prandtl-Karman の対数分布則による摩擦速度およびシールズ数の推定

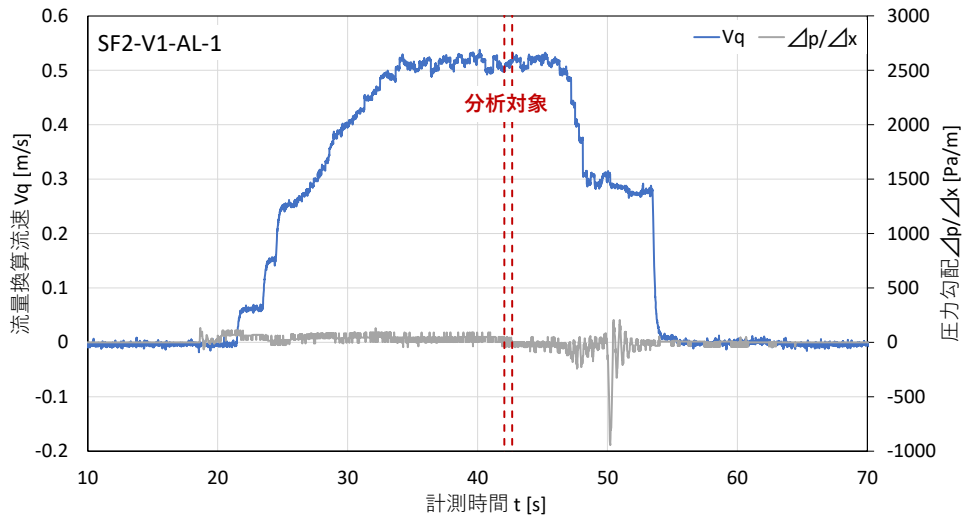
粗度板	項目	流速ケース			
		V1:0.5m/s	V2:1.0m/s	V3:1.5m/s	V4:2.0m/s
シリカフェーム	対数近似曲線の傾き u_*/κ	0.0933	0.1324	0.2462	0.3002
	摩擦速度 u^* [m/s]	0.0373	0.0530	0.0985	0.1201
	シールズ数 τ^* [-]	356	717	2478	3686
フライアッシュ	対数近似曲線の傾き u_*/κ	0.0652	0.1305	0.1760	0.2484
	摩擦速度 u^* [m/s]	0.0261	0.0522	0.0704	0.0993
	シールズ数 τ^* [-]	14	54	99	197
珪砂 6号	対数近似曲線の傾き u_*/κ	0.1225	0.1974	0.3587	0.4410
	摩擦速度 u^* [m/s]	0.0490	0.0790	0.1435	0.1764
	シールズ数 τ^* [-]	0.36	0.94	3.09	4.67

4.2.5. 移動床試験結果

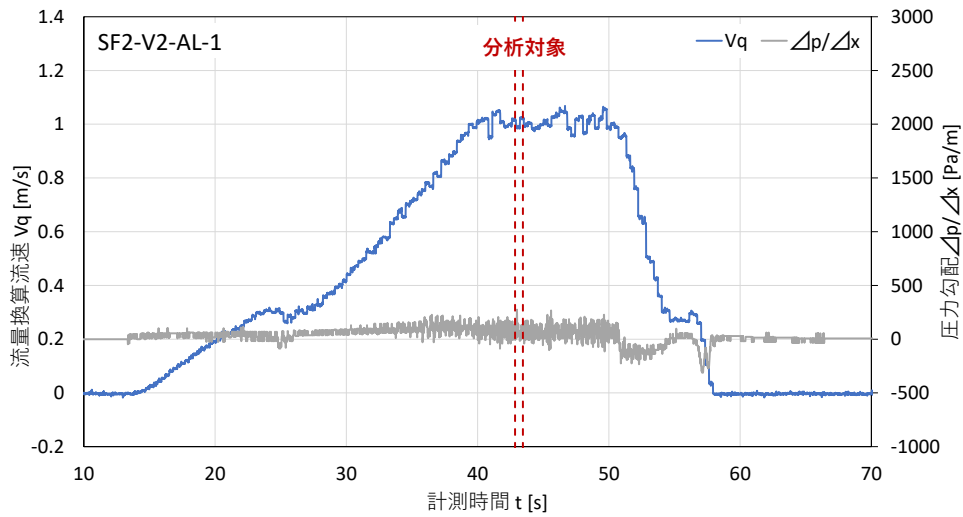
(1) 底質の濃度鉛直分布

本試験における濁水の採取時間については、「サンドベッド上を通過した定常流が吸引孔に到達した後の時間」を設定した（図-4.18～図-4.20）。なお、図中には濃度分析の対象となる区間を赤破線で示した。

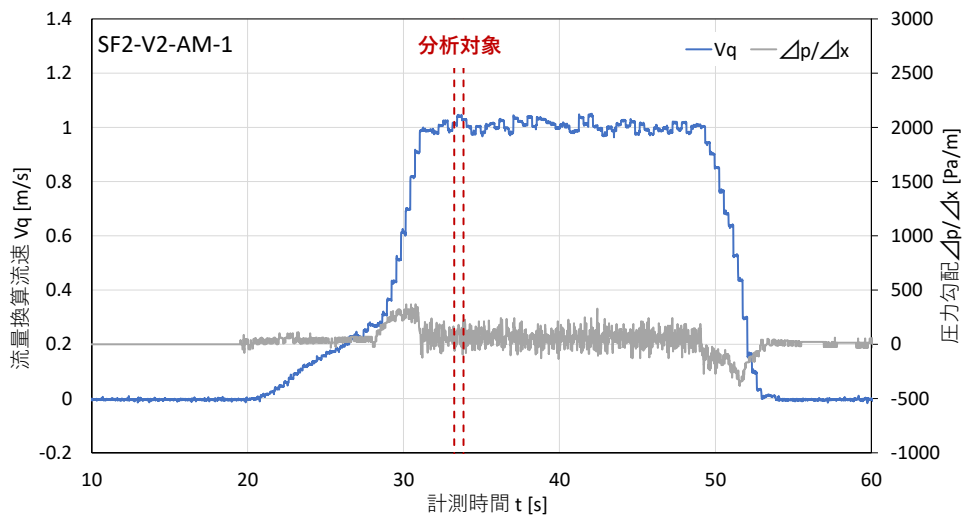
濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布について、各ケースの結果を図-4.21～図-4.33に示す。なお、図中の赤破線は、サンドベッドにセットした底質模型の濁水密度・体積濃度を示している。サンドベッドで鉛直方向に8箇所設置した吸引孔による結果から、底質模型が同じ場合には流速が大きいほど鉛直分布の傾きは大きくなり、流速が同じ条件でも粘性が高い底質模型では鉛直分布の傾きは小さい傾向にあることが分かった。ただし、サンドベッド内の底質の粘性が低い（含水比が低い＝濃度が低い）と巻き上がり量自体が少ないため、粘性が高い底質模型よりも鉛直分布の傾きが小さくなる場合があった。また、サンドベッド下流で水路床から20mm上方に1箇所設置した吸引孔による結果から、サンドベッド内の底質に破壊が生じて流動化しているか否かを判断した。底質模型表層の一部が流動化した場合、サンドベッド下流側の吸引孔における濃度がサンドベッド内の濃度と同程度に増加する。得られた結果より、流速が同じ条件に対し、加速度が小さい場合には濃度が上流側と同程度で破壊が生じていない状態であっても、加速度が大きくなると濃度が高くなり破壊が生じていることが確認できた。なお、流れの加速度や底質の粘性による流動化範囲（深さ）については、今後さらに検討が必要である。



(a) 流速 $V1:0.5\text{m/s}$, 加速度 $AL:0.09\text{m/s}^2$

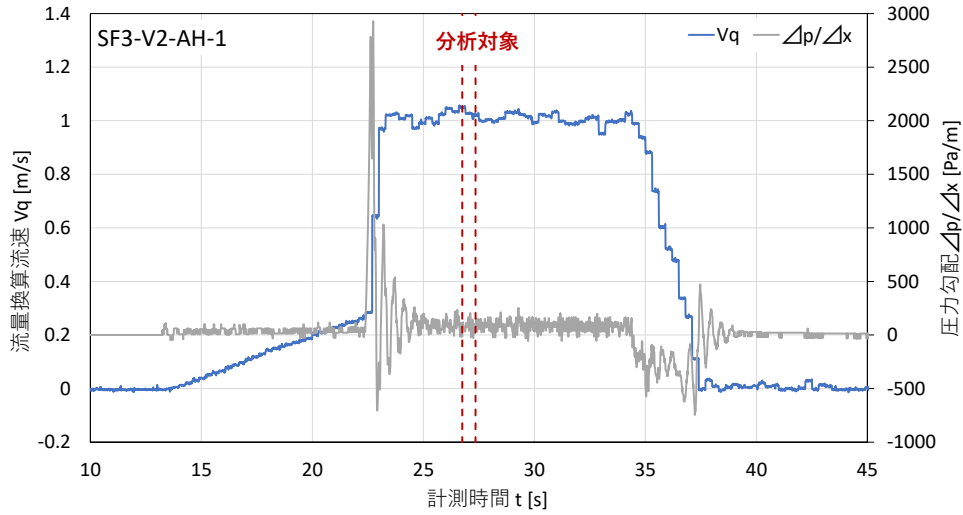


(b) 流速 $V2:1.0\text{m/s}$, 加速度 $AL:0.09\text{m/s}^2$

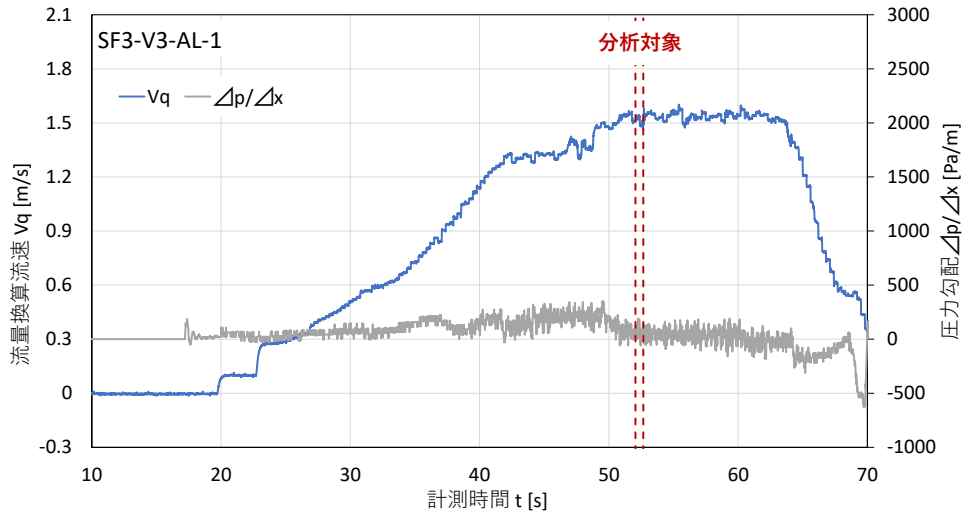


(c) 流速 $V2:1.0\text{m/s}$, 加速度 $AM:0.27\text{m/s}^2$

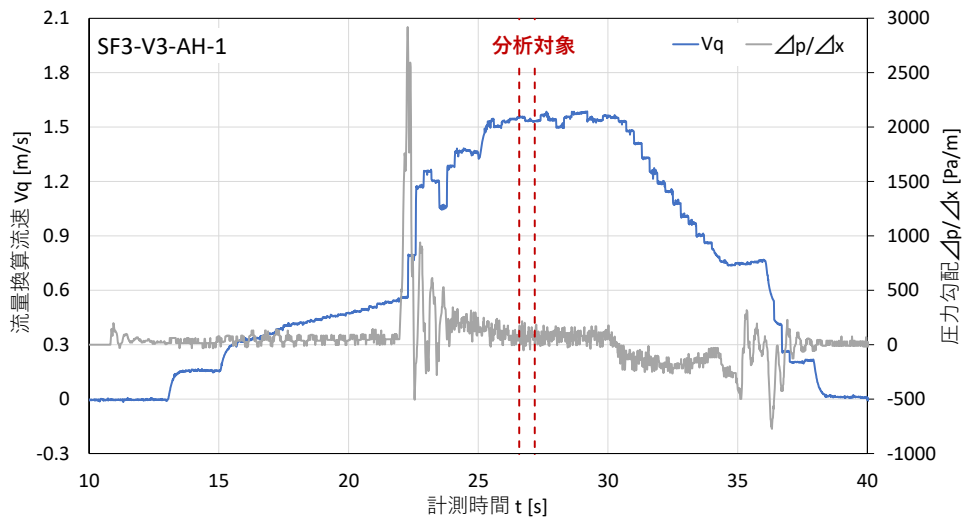
図- 4.18 濁水試料の採取時間 (1)



(a) 流速 V2:1.0m/s, 加速度 AH:1.2m/s²

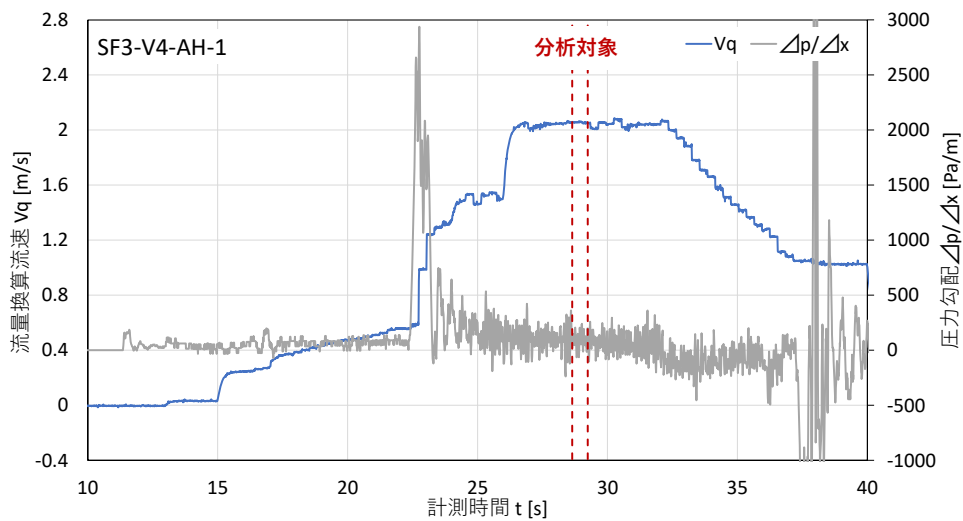


(b) 流速 V3:1.5m/s, 加速度 AL:0.09m/s²



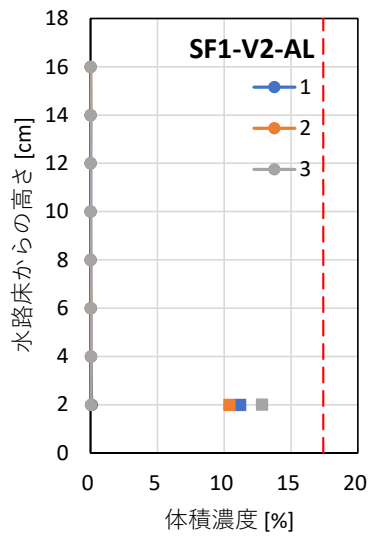
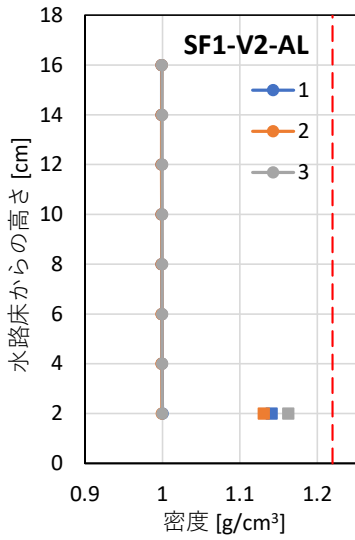
(c) 流速 V3:1.5m/s, 加速度 AH:1.2m/s²

図- 4.19 濁水試料の採取時間 (2)



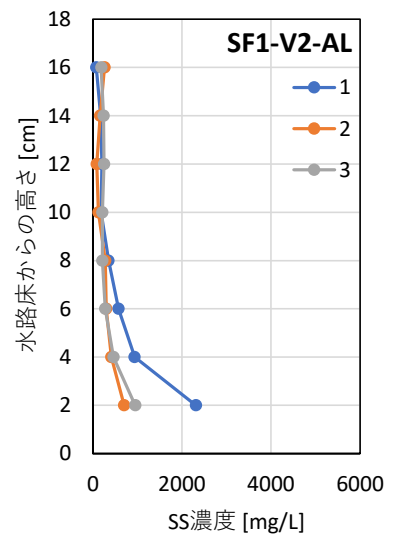
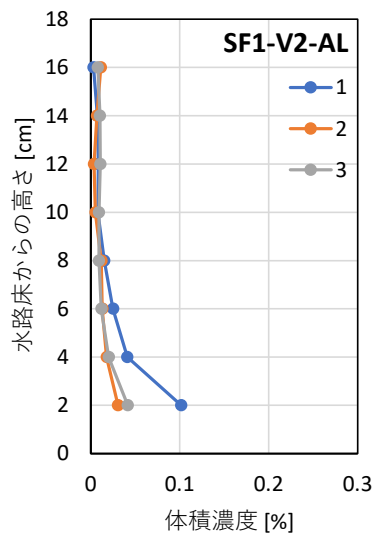
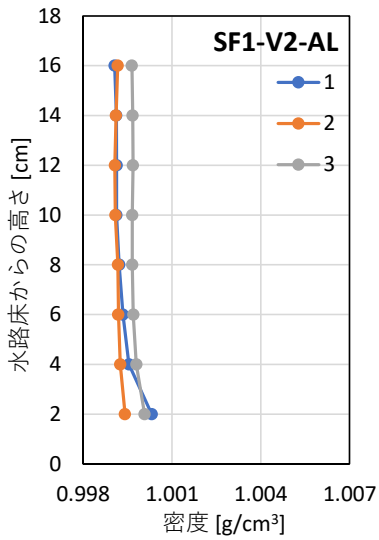
(a) 流速 V4:2.0m/s, 加速度 AH:1.2m/s²

図- 4.20 濁水試料の採取時間 (3)

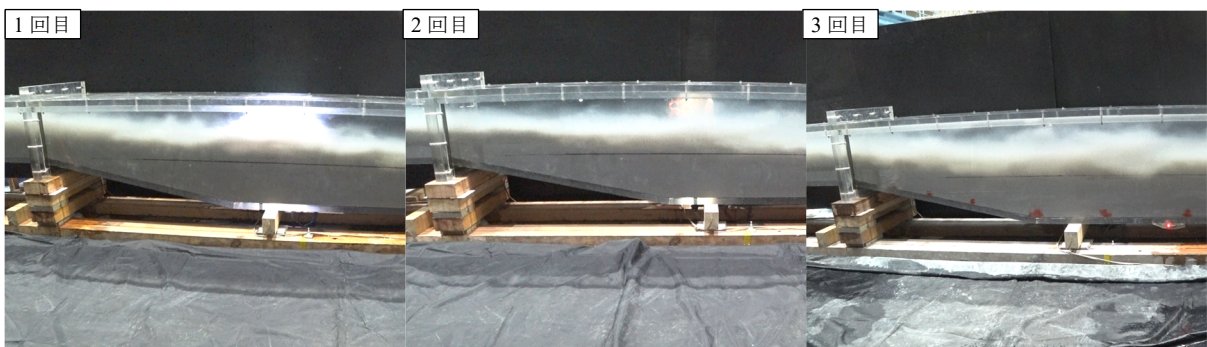


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

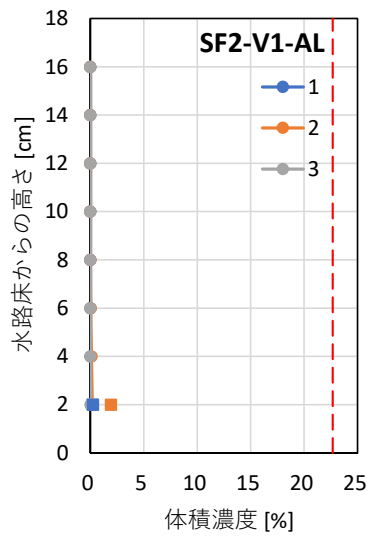
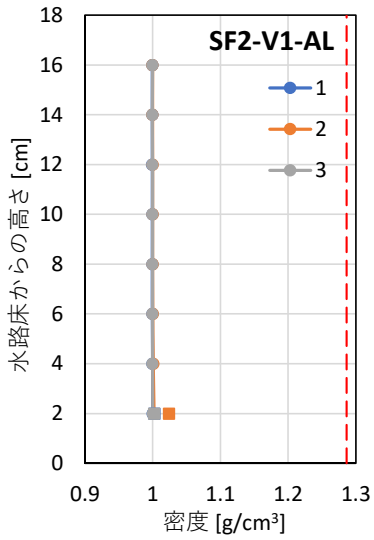


(b) 拡大表示



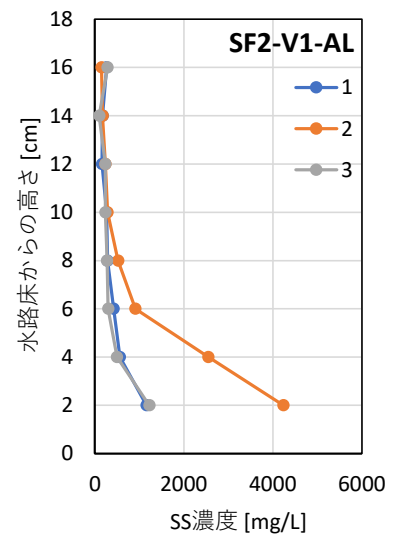
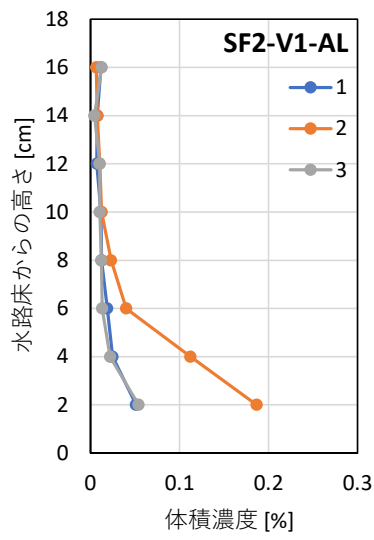
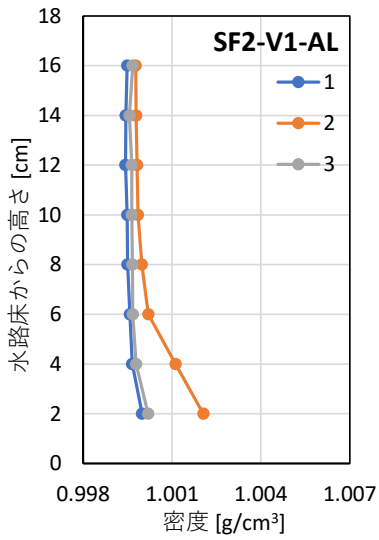
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図-4.21 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF1-V2-AL : シリカフェーム, $w=208.5\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$)

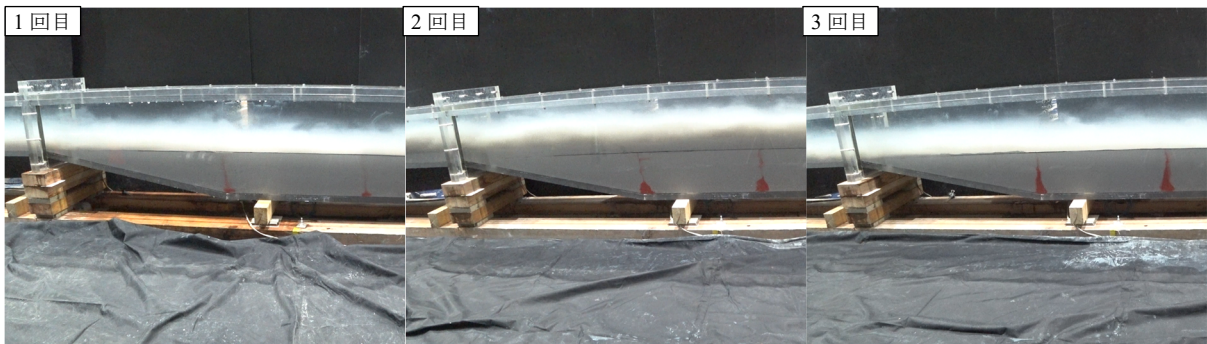


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

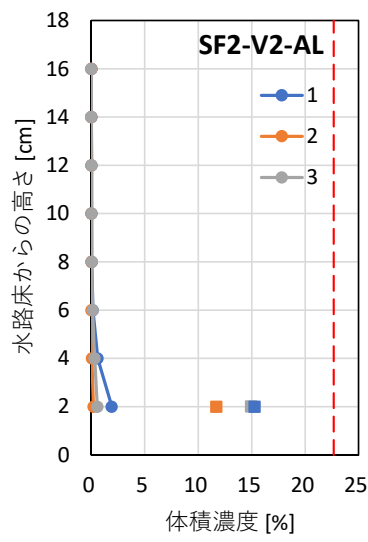
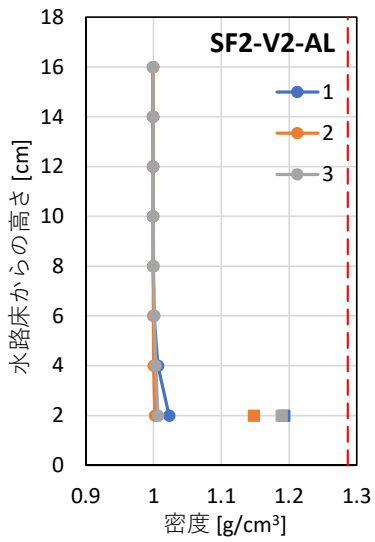


(b) 拡大表示



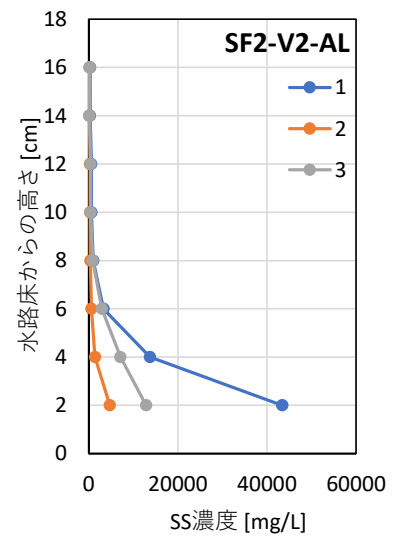
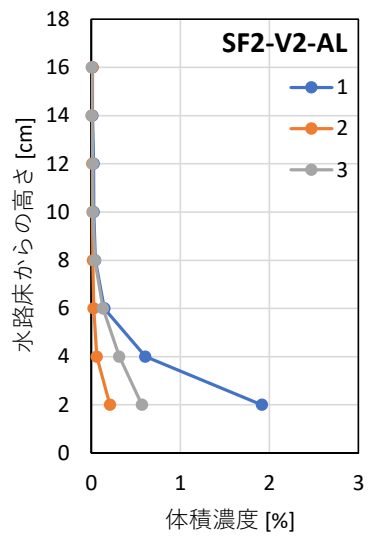
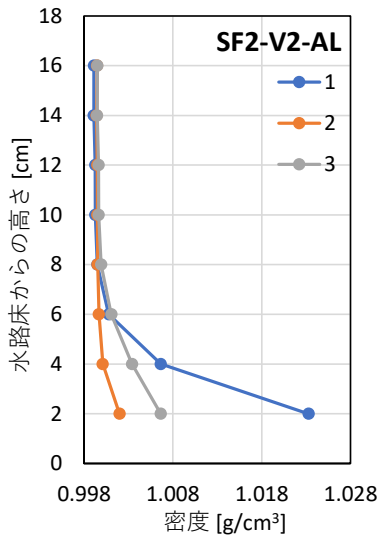
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図- 4.22 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF2-V1-AL : シリカフェーム, $w=150.0\%$, $V1:0.5m/s$, $AL:0.09m/s^2$)

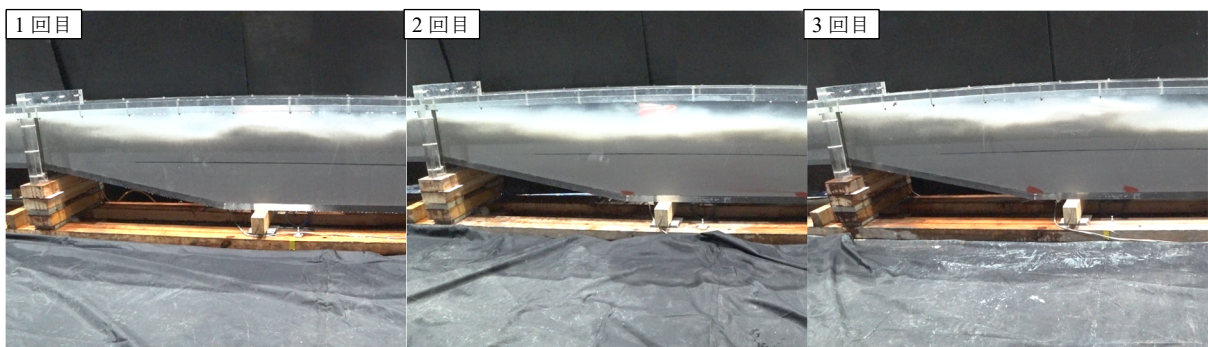


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

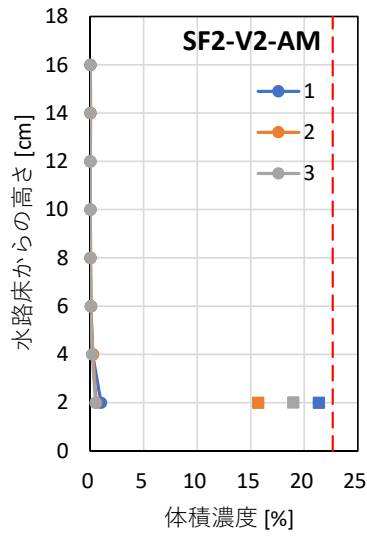
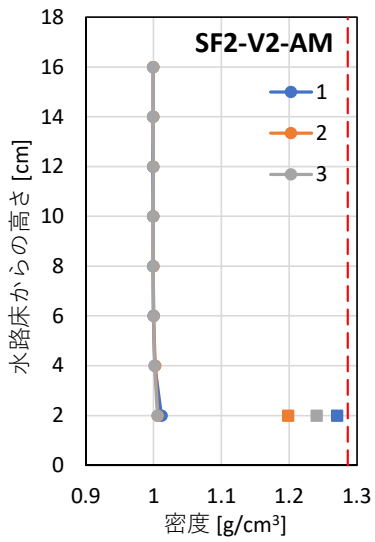


(b) 拡大表示



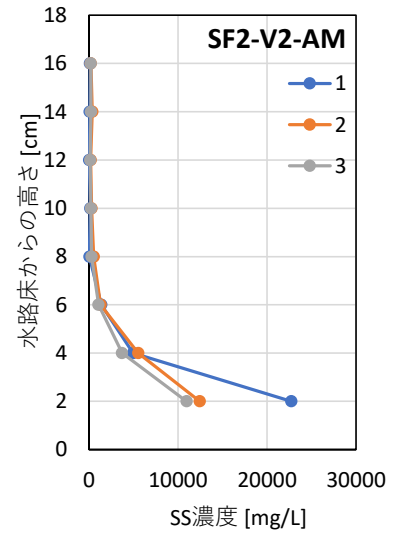
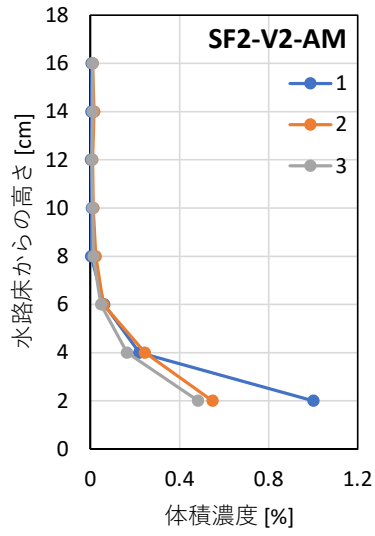
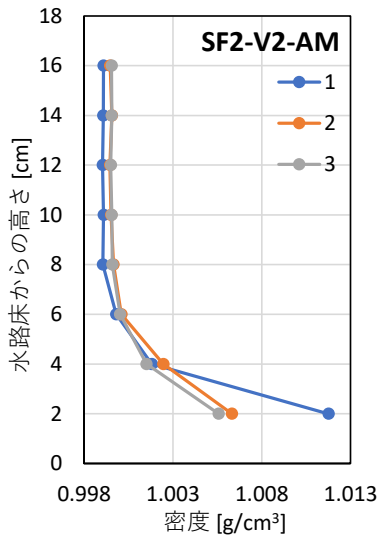
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図- 4.23 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF2-V2-AL : シリカフェーム, $w=150.0\%$, $V2:1.0m/s$, $AL:0.09m/s^2$)

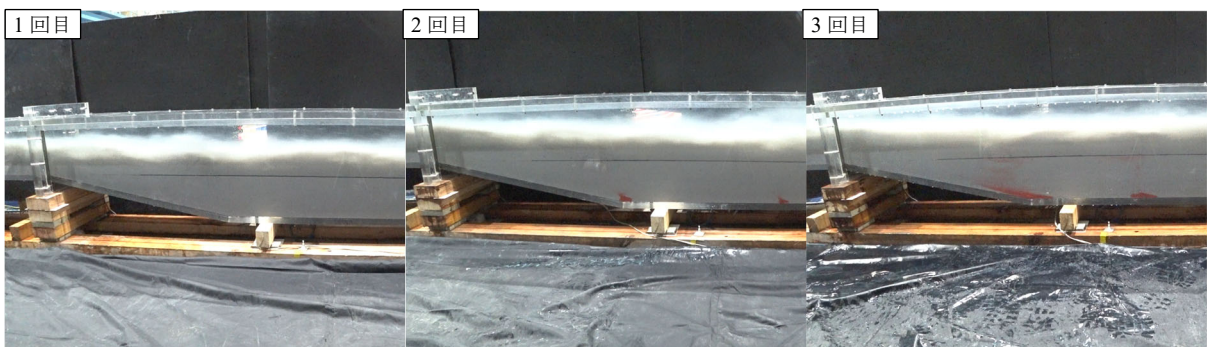


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

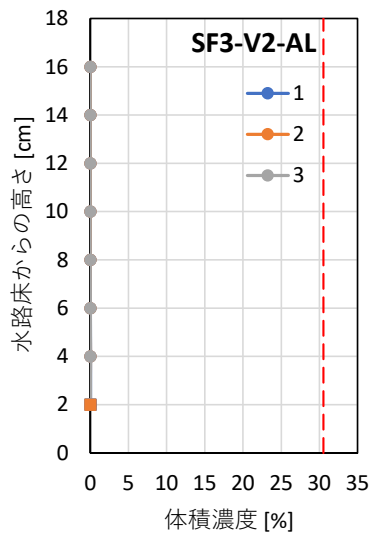
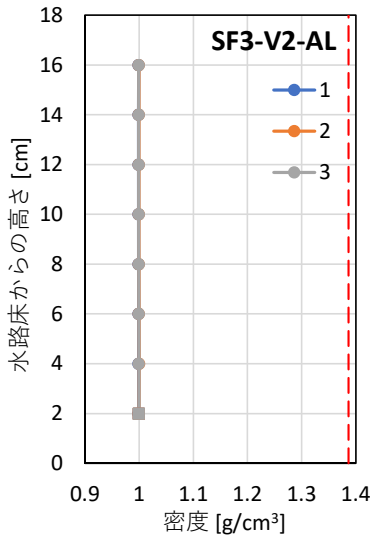


(b) 拡大表示



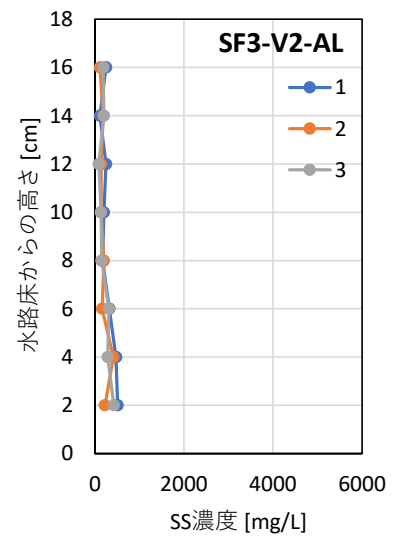
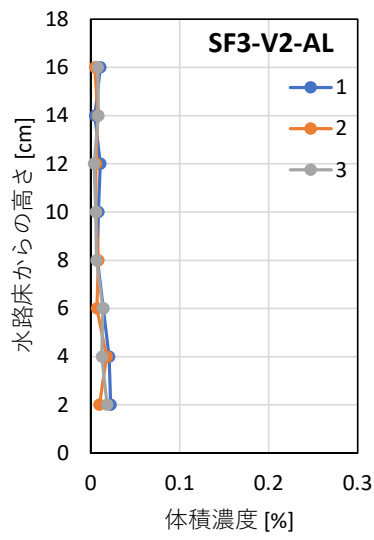
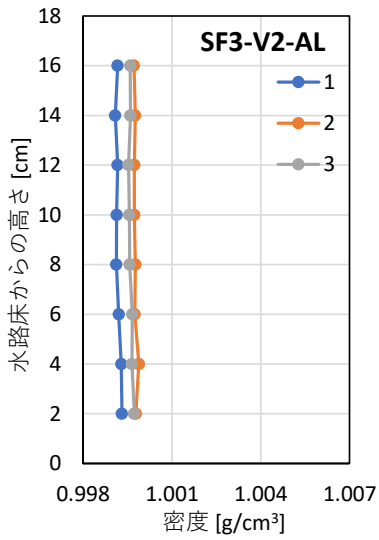
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図-4.24 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF2-V2-AM : シリカフェーム, $w=150.0\%$, $V2:1.0m/s$, $AM:0.27m/s^2$)

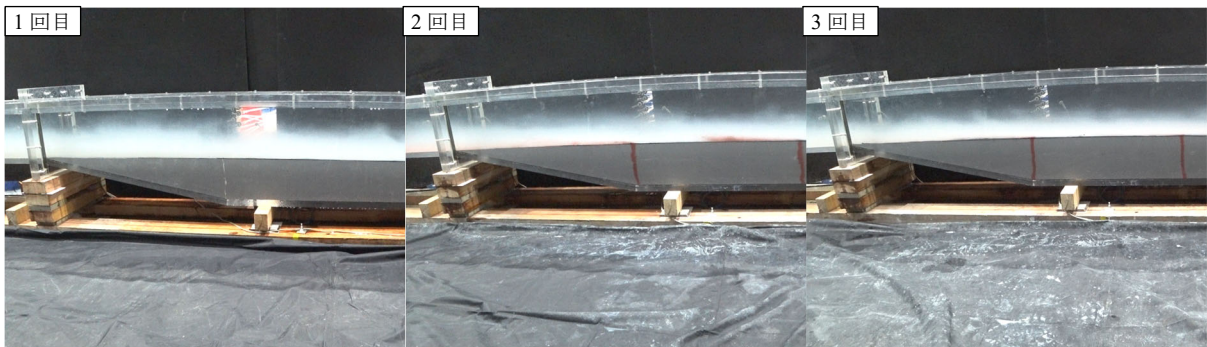


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

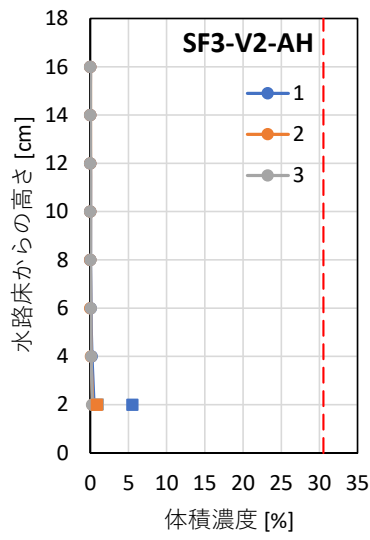
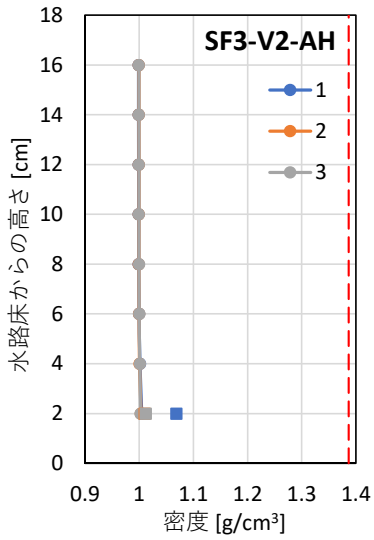


(b) 拡大表示



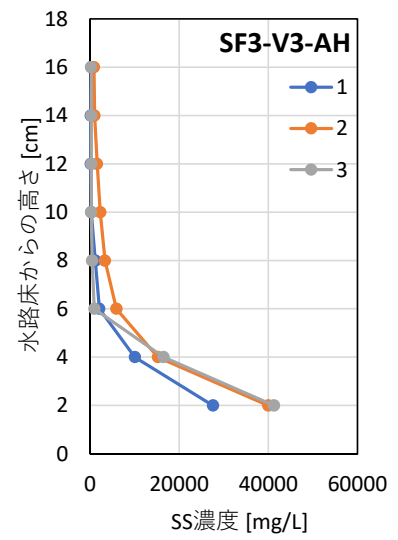
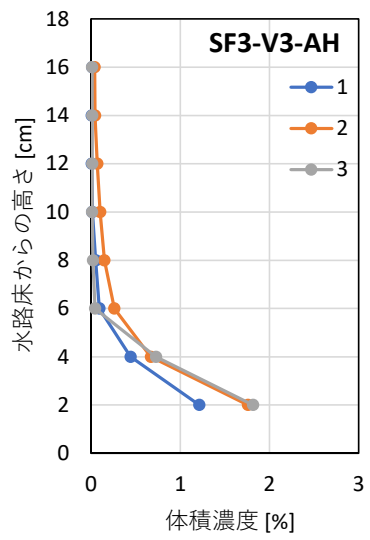
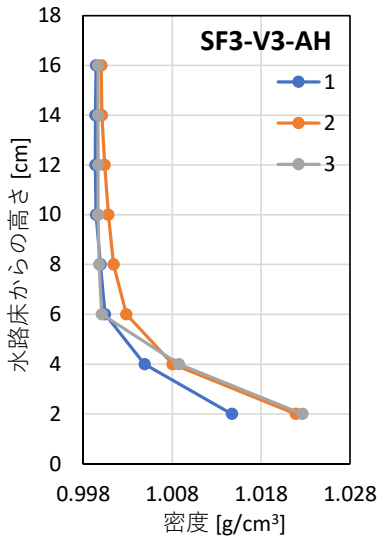
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図- 4.25 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF3-V2-AL : シリカフェーム, $w=100.0\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$)

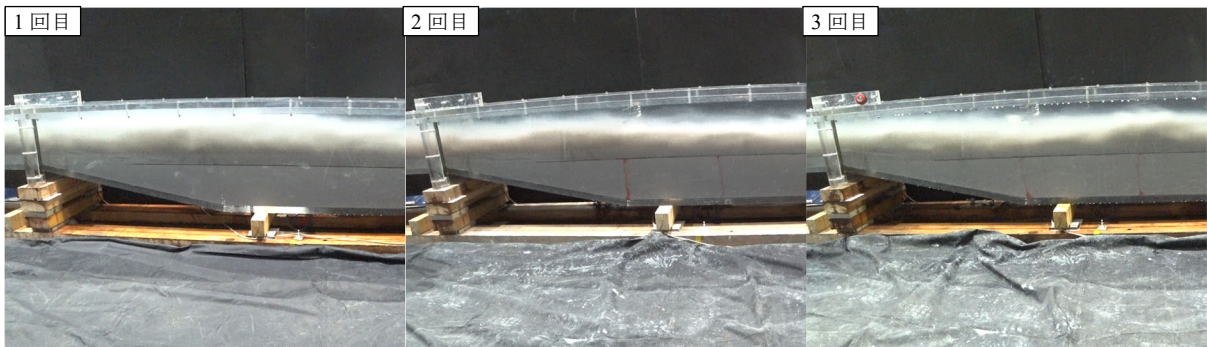


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

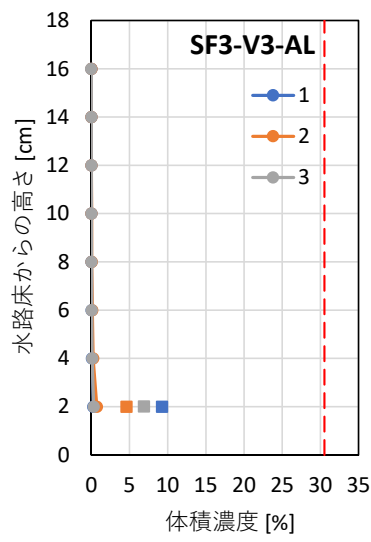
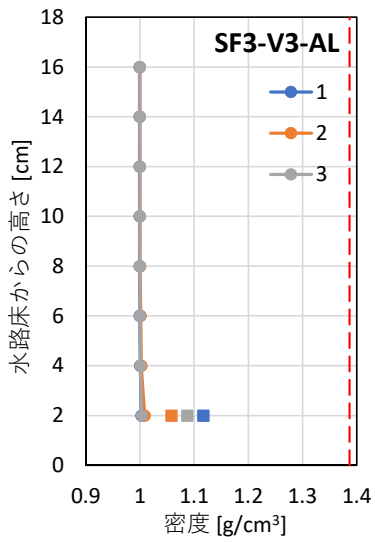


(b) 拡大表示



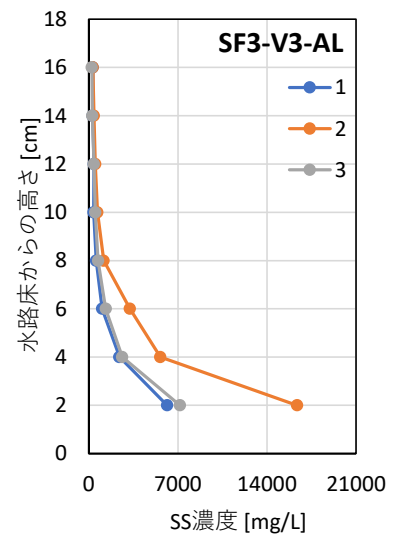
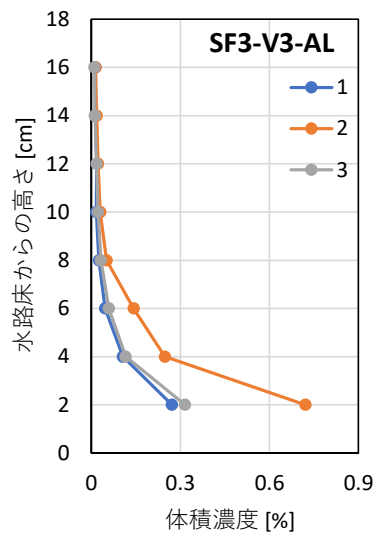
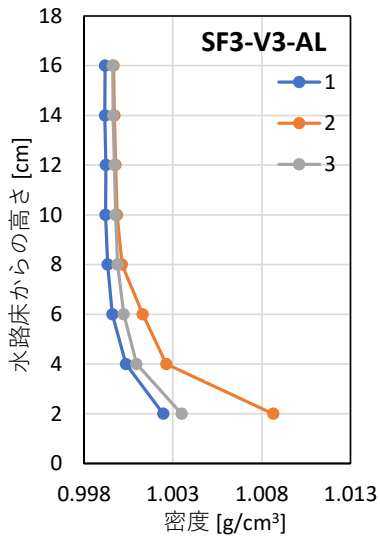
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図- 4.26 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF3-V2-AH：シリカフェーム， $w=100.0\%$ ， $V2:1.0\text{m/s}$ ， $AH:1.2\text{m/s}^2$)

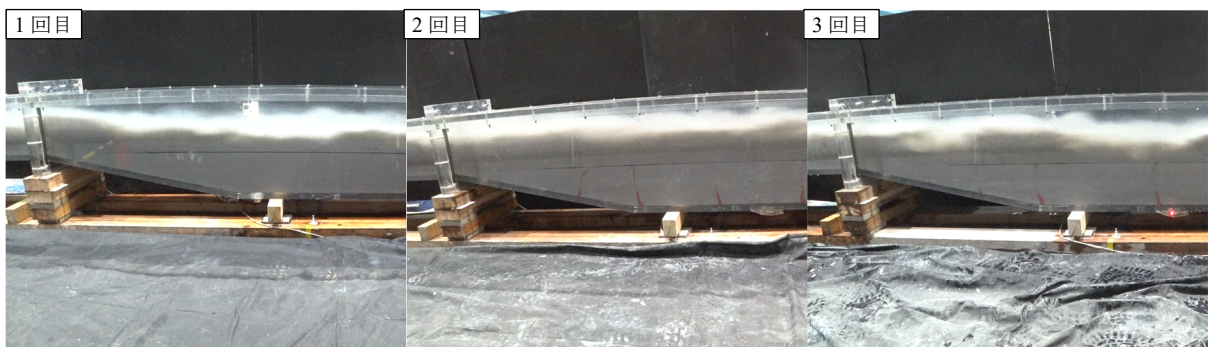


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

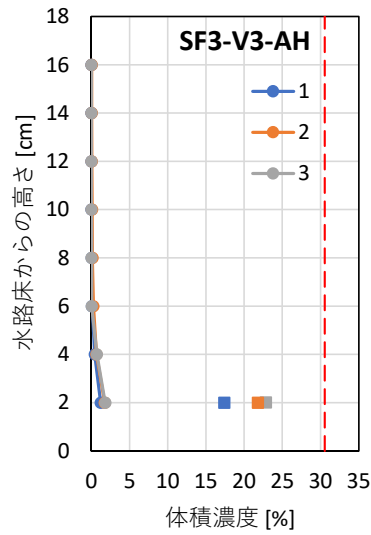
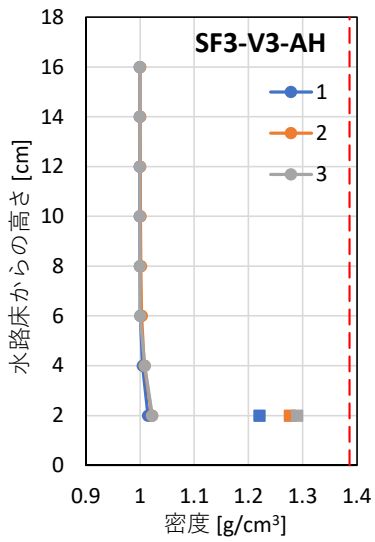


(b) 拡大表示



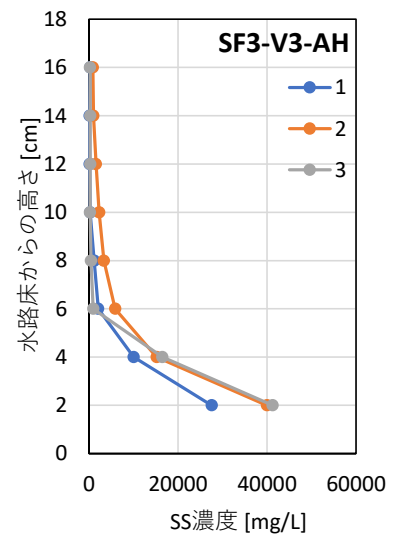
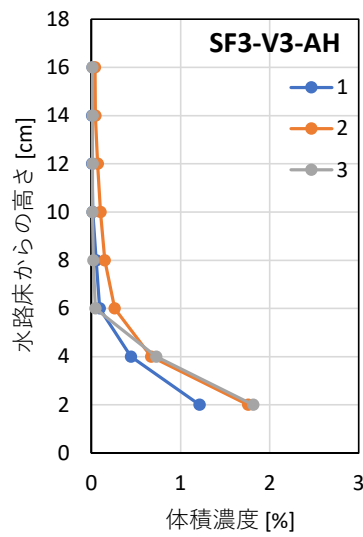
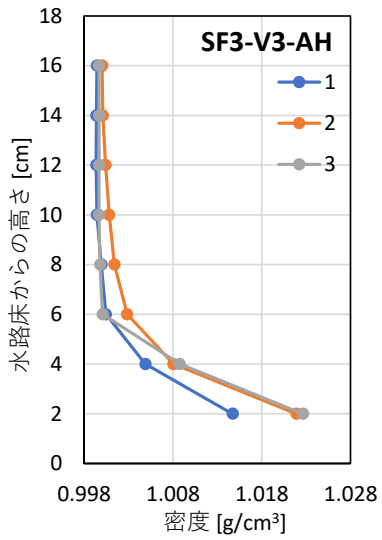
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図-4.27 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF3-V3-AL : シリカフェーム, $w=100.0\%$, $V3:1.5m/s$, $AL:0.09m/s^2$)

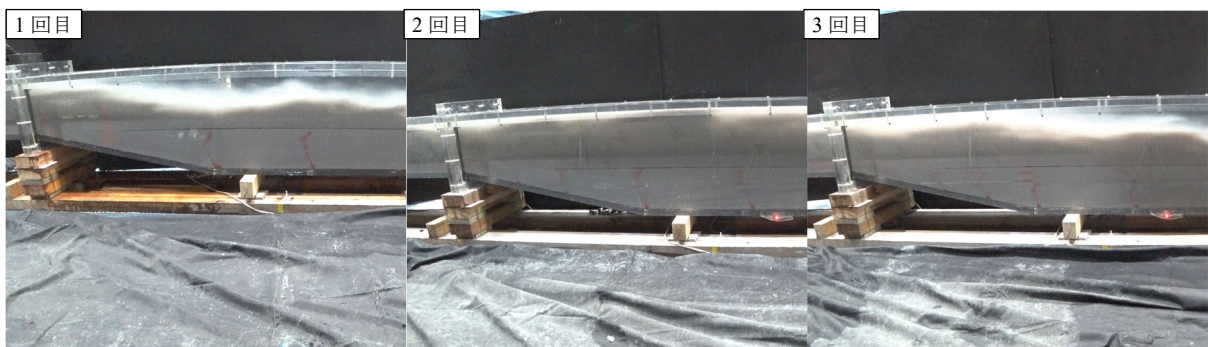


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

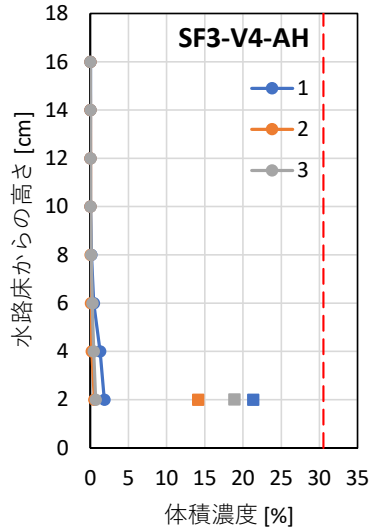
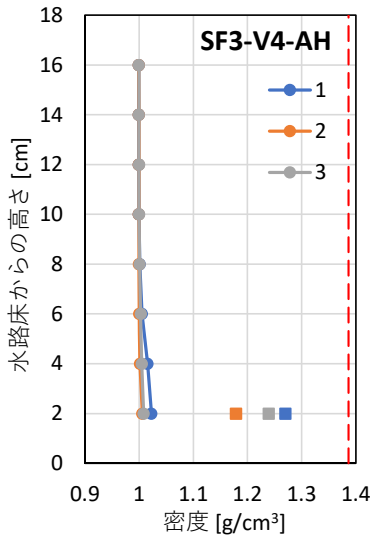


(b) 拡大表示



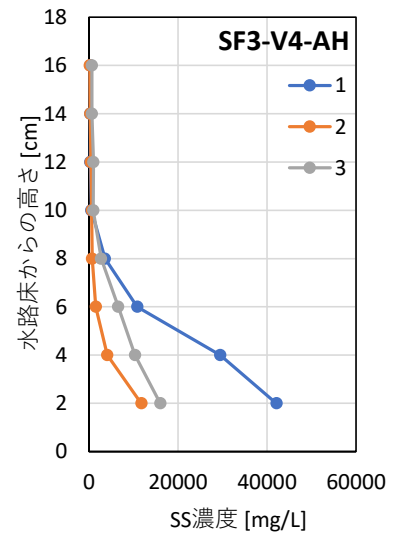
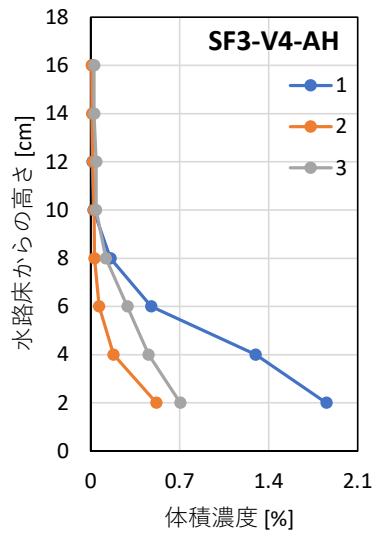
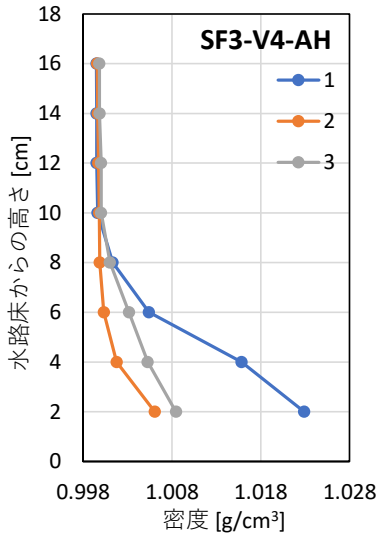
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図-4.28 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF3-V3-AH：シリカフューム， $w=100.0\%$ ， $V3:1.5m/s$ ， $AH:1.2m/s^2$)

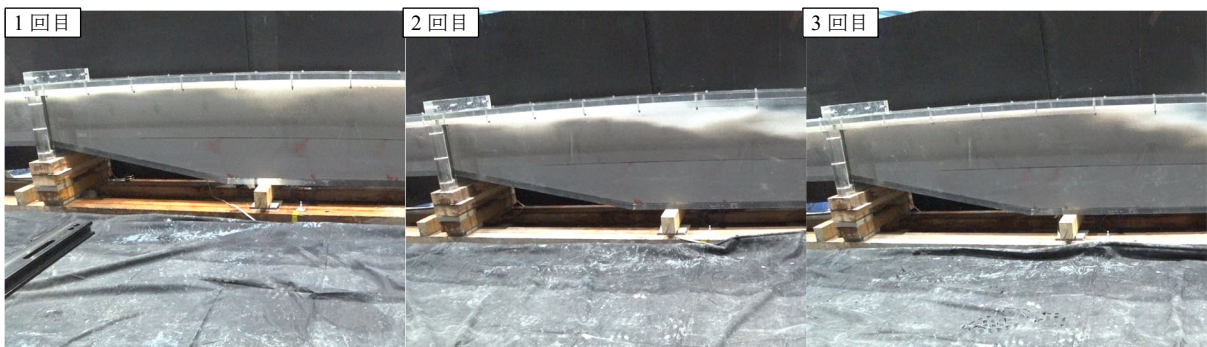


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

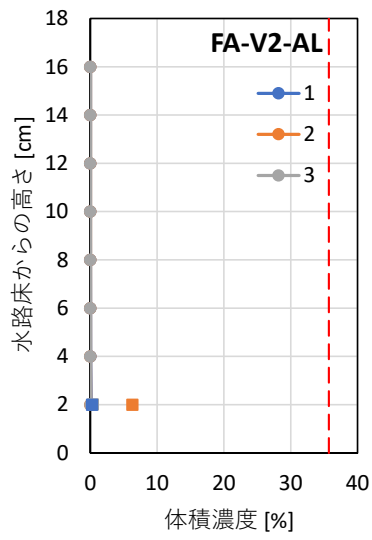
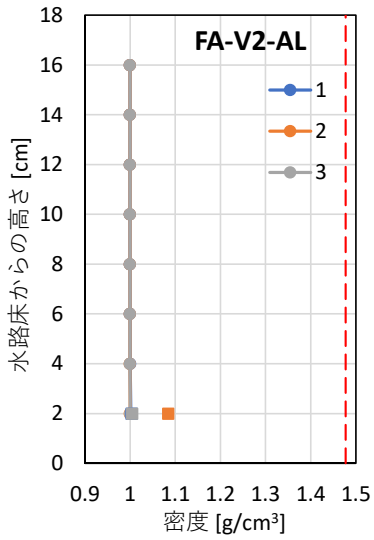


(b) 拡大表示



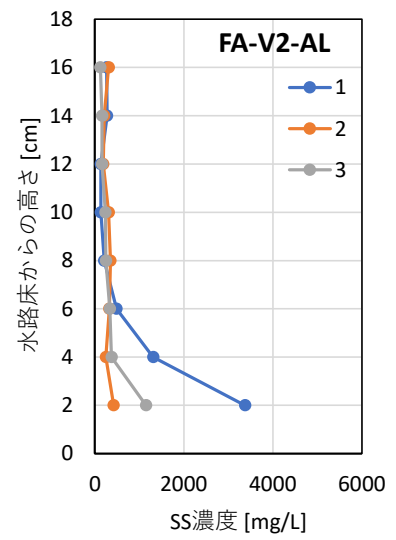
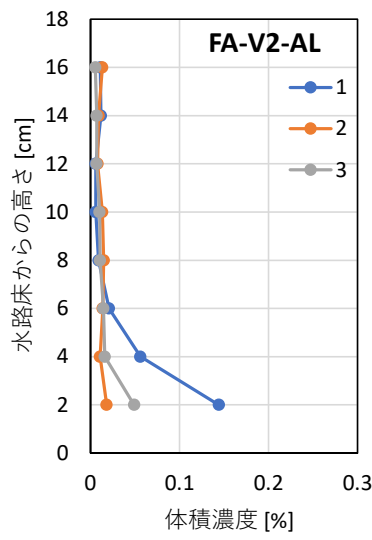
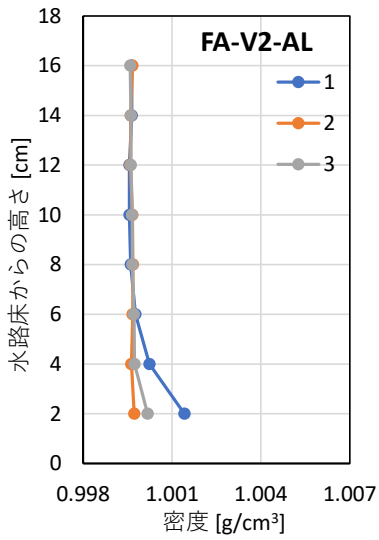
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図- 4.29 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SF3-V4-AH : シリカフェーム, $w=100.0\%$, $V4:2.0m/s$, $AH:1.2m/s^2$)

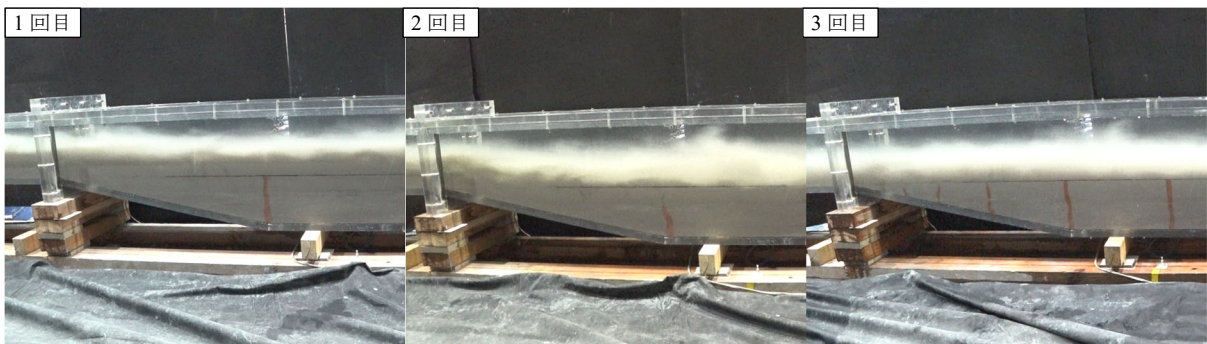


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示



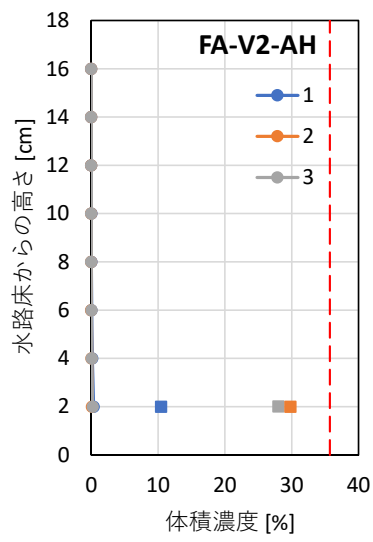
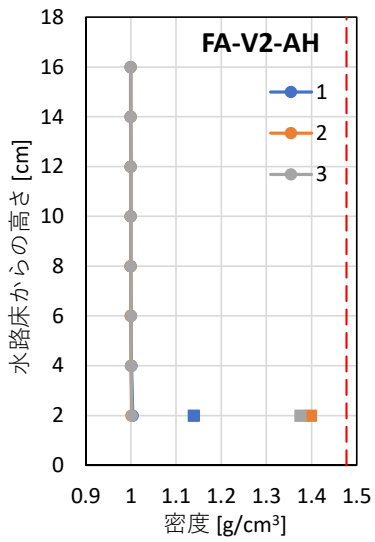
(b) 拡大表示



(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

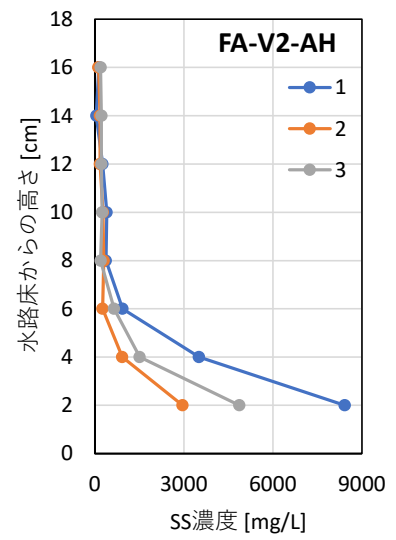
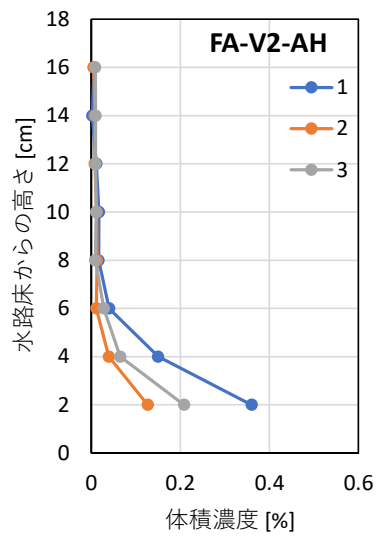
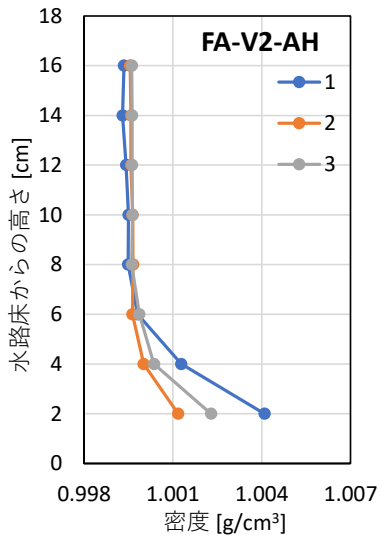
図- 4.30 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布

(FA-V2-AL : フライアッシュ, $w=76.8\%$, $V2:1.0m/s$, $AL:0.09m/s^2$)

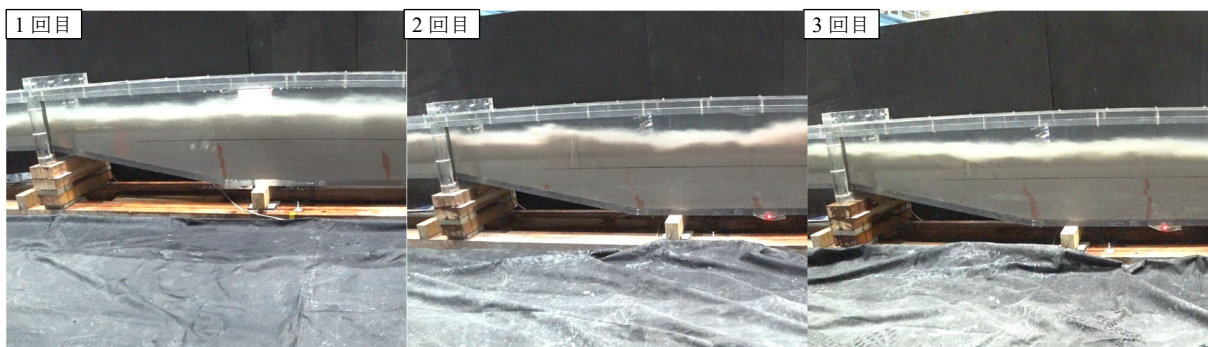


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

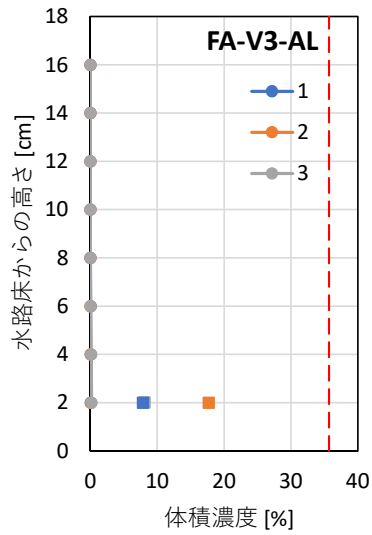
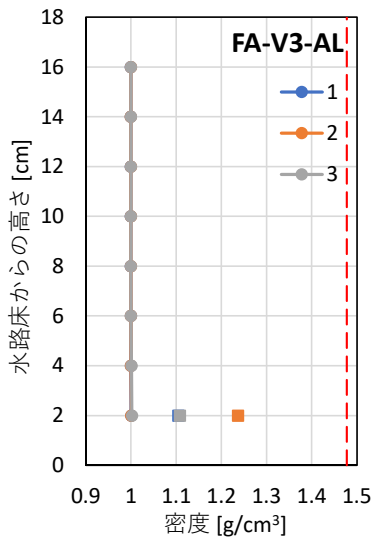


(b) 拡大表示



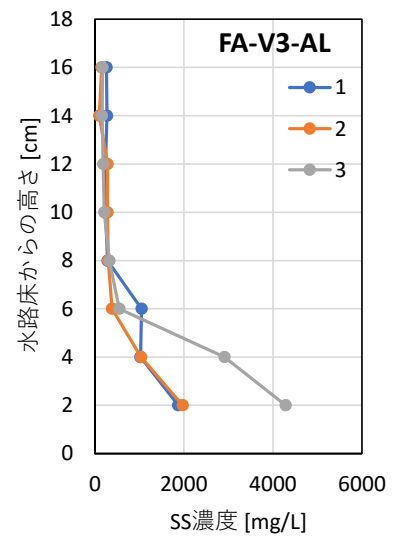
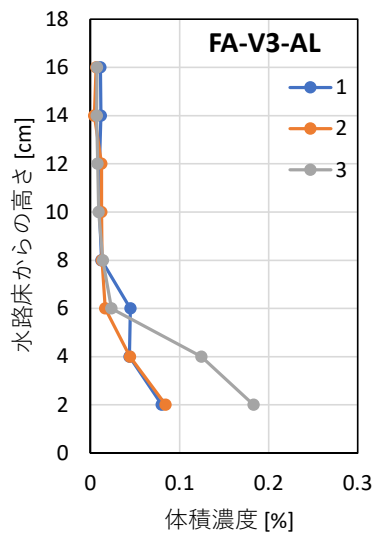
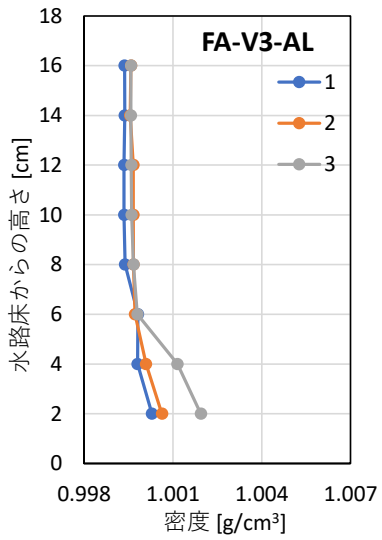
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図- 4.31 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(FA-V2-AH : フライアッシュ, $w=76.8\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AH:1.2\text{m/s}^2$)

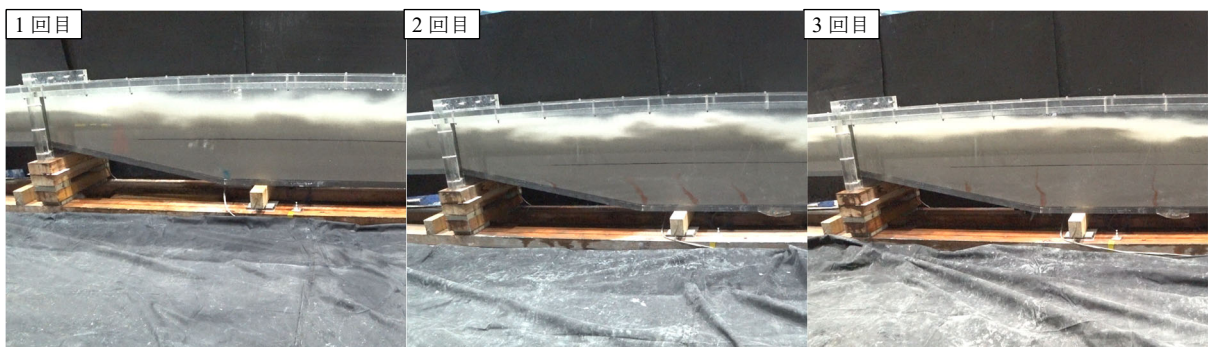


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示

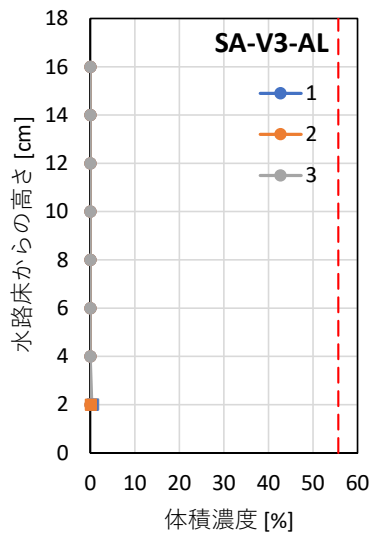
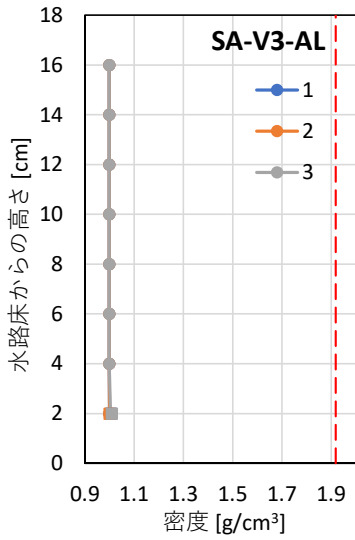


(b) 拡大表示



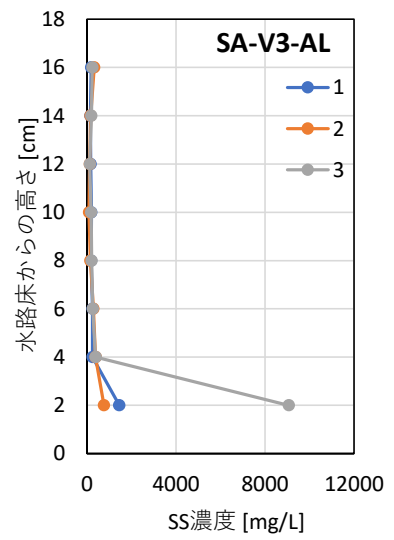
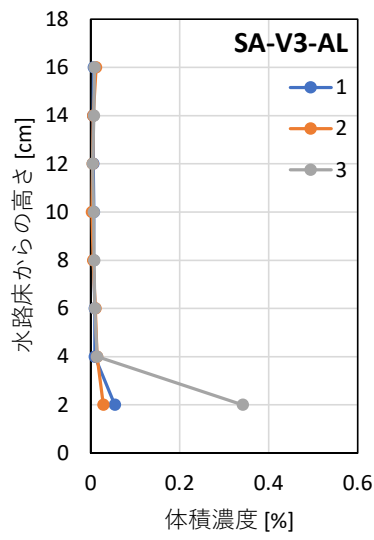
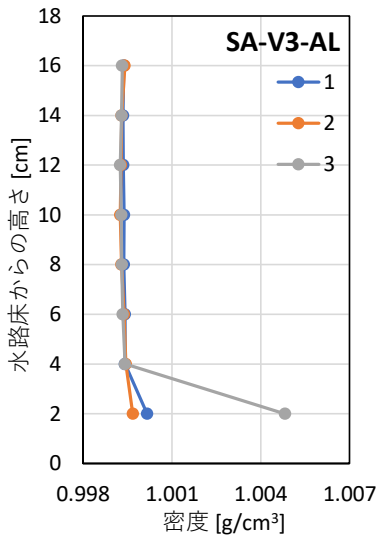
(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図- 4.32 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(FA-V3-AL : フライアッシュ, $w=76.8\%$, $V3:1.5m/s$, $AH:1.2m/s^2$)

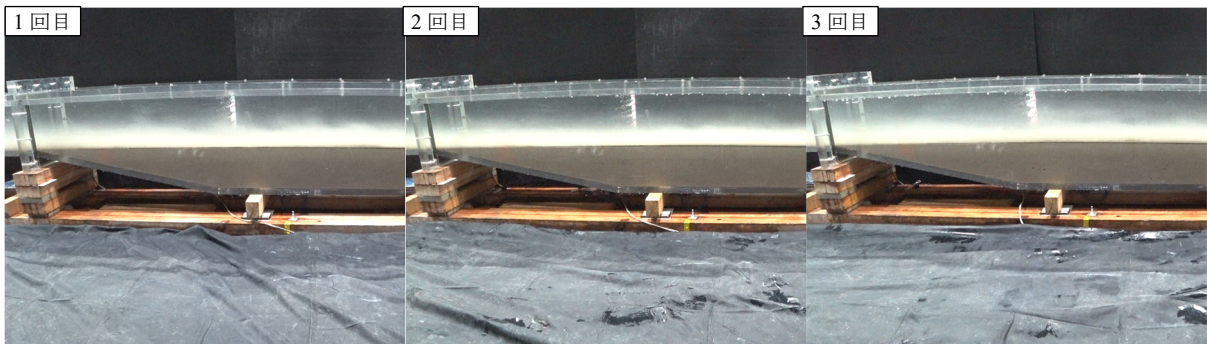


※赤破線：サンドベッド内の値

(a) 全体表示



(b) 拡大表示



(c) 鉛直分布に対応した巻き上がり状況

図- 4.33 濁水密度・体積濃度・SS濃度の鉛直分布
(SA-V3-AL : 珪砂6号, $w=30.0\%$, $V3:1.5\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$)

得られた底質の体積濃度から、累乗近似式 4-8 および指数近似式 4-9 を用いて濃度鉛直分布を推定した。

$$C(Z) = C_b a \left(\frac{h}{Z} - 1 \right)^b \quad (4-8)$$

$$C(Z) = C_b \exp[-A(Z - Z_0)] \quad (4-9)$$

ここで、 $C(Z)$ は体積濃度の鉛直分布、 Z は水路床からの高さ、 C_b は基準面高さ Z_0 での体積濃度、 a, b, A は係数である。なお、 C_b, Z_0, a, b, A は最小二乗法により算定し、 C_b の最大値はサンドベッド内の体積濃度とした。

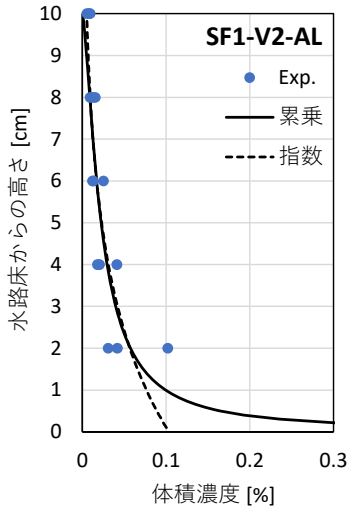
累乗近似式における C_b, a, b は表- 4.9, 指数近似式における C_b, Z_0, A は表- 4.10 に示す。これらのパラメータを用いた体積濃度の推定分布のうち、シリカフェームの結果を図-4.34, フライアッシュの結果を図-4.35, 珪砂 6 号の結果を図-4.36 に示す。表-4.9, 表-4.10 より、流速が大きいほど各近似式のパラメータは大きくなる傾向は見られた。しかし、加速度や底質の粘性による明確な傾向は確認できなかったことから、今後追加の検討が必要である。

表- 4.9 底質の体積濃度分布に対する累乗近似式の設定パラメータ

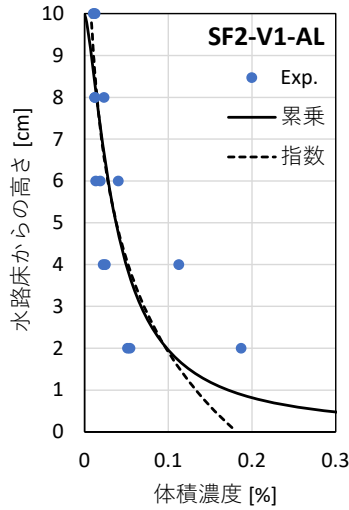
底質模型	含水比 w [%]	流速 ケース	加速 ケース	基準濃度 C_b [%]	係数 a [-]	係数 b [-]
シリカフェーム	208.5	V2:1.0m/s	AL	7.10	3.156E-03	6.770E-01
	150.0	V1:0.5m/s	AL	15.07	2.499E-03	6.905E-01
		V2:1.0m/s	AL	15.07	1.295E-02	1.104E+00
			AM	15.07	7.861E-03	1.261E+00
	100.0	V2:1.0m/s	AL	17.49	7.477E-04	2.506E-01
			AH	17.49	5.261E-03	9.690E-01
		V3:1.5m/s	AL	10.58	1.059E-02	9.785E-01
			AH	6.06	5.769E-02	1.103E+00
		V4:2.0m/s	AH	17.49	2.393E-02	6.676E-01
	フライアッシュ	76.8	V2:1.0m/s	AL	10.08	2.187E-03
AH				28.72	1.784E-03	1.087E+00
V3:1.5m/s			AL	3.07	1.481E-02	6.878E-01
硅砂 6 号	30.0	V3:1.5m/s	AL	40.96	1.514E-04	2.260E+00

表- 4.10 底質の体積濃度分布に対する指数近似式の設定パラメータ

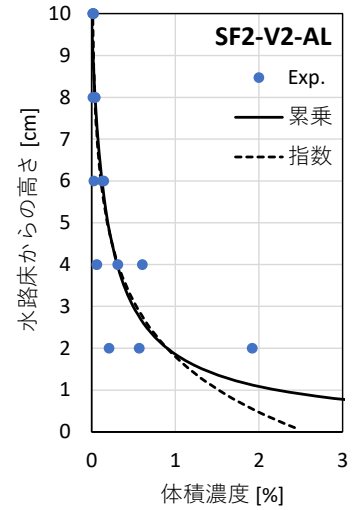
底質模型	含水比 w [%]	流速 ケース	加速 ケース	基準濃度 C_b [%]	係数 A [-]	基準高さ Z_0 [mm]
シリカフェーム	208.5	V2:1.0m/s	AL	0.10	3.01E-01	0.2
	150.0	V1:0.5m/s	AL	0.15	3.12E-01	0.6
		V2:1.0m/s	AL	1.32	5.21E-01	1.3
			AM	1.14	5.99E-01	1.1
	100.0	V2:1.0m/s	AL	0.02	1.19E-01	0.4
			AH	0.62	4.53E-01	0.7
		V3:1.5m/s	AL	0.74	4.56E-01	0.8
			AH	2.52	5.19E-01	1.1
		V4:2.0m/s	AH	1.39	3.21E-01	1.1
	フライアッシュ	76.8	V2:1.0m/s	AL	0.12	3.62E-01
AH				0.41	5.07E-01	0.9
V3:1.5m/s			AL	0.18	3.18E-01	0.6
硅砂 6 号	30.0	V3:1.5m/s	AL	0.47	1.12E+00	0.9



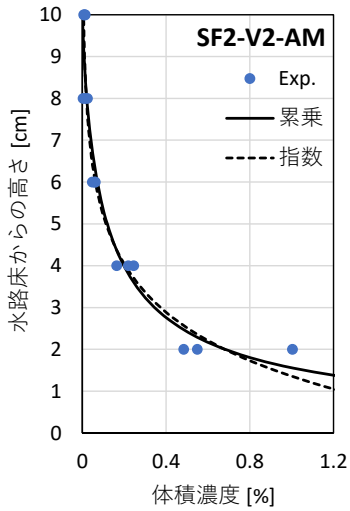
(a) $w=208.5\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$



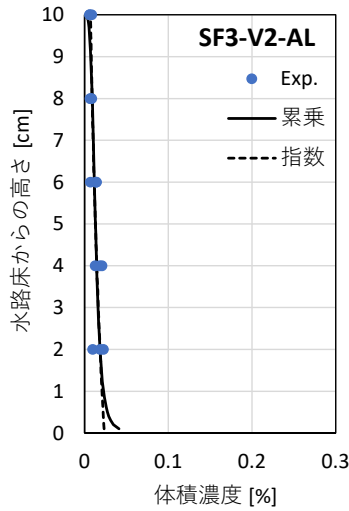
(b) $w=150.0\%$, $V1:0.5\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$



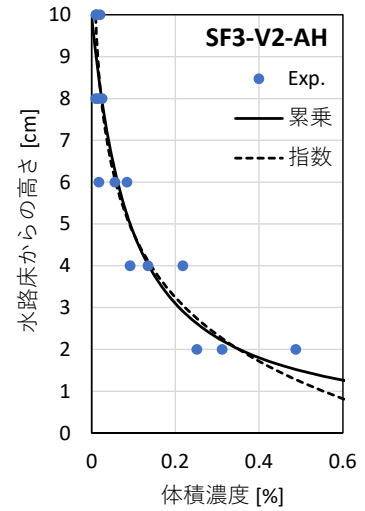
(c) $w=150.0\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$



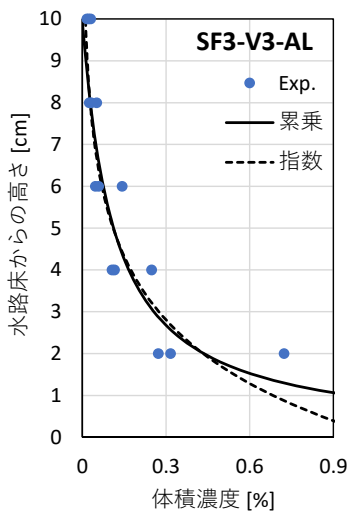
(d) $w=150.0\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AM:0.27\text{m/s}^2$



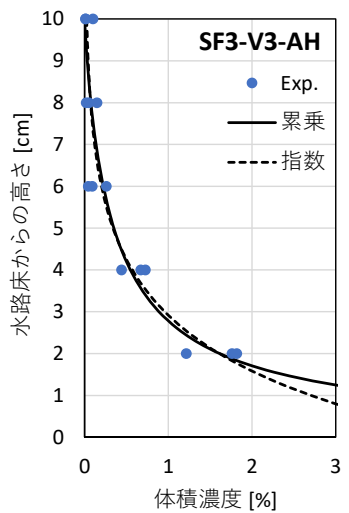
(b) $w=100.0\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$



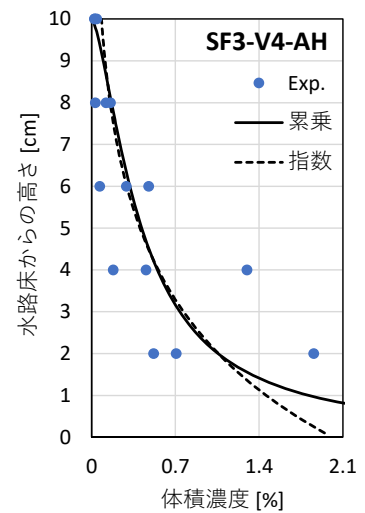
(c) $w=100.0\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AH:1.2\text{m/s}^2$



(e) $w=100.0\%$, $V3:1.5\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$

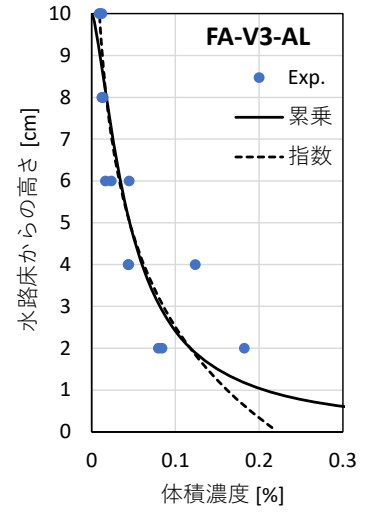
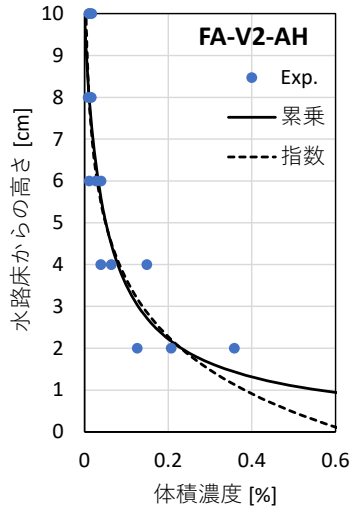
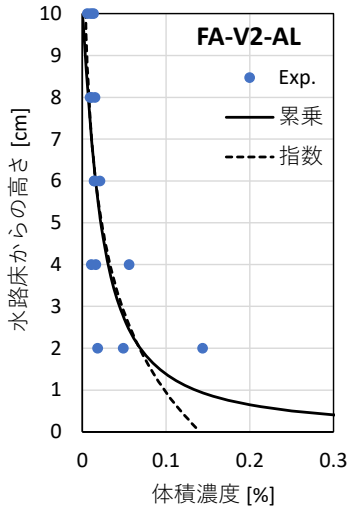


(c) $w=100.0\%$, $V3:1.5\text{m/s}$, $AH:1.2\text{m/s}^2$



(f) $w=100.0\%$, $V4:2.0\text{m/s}$, $AH:1.2\text{m/s}^2$

図-4.34 底質の体積濃度の推定分布 (シリカフェーム)

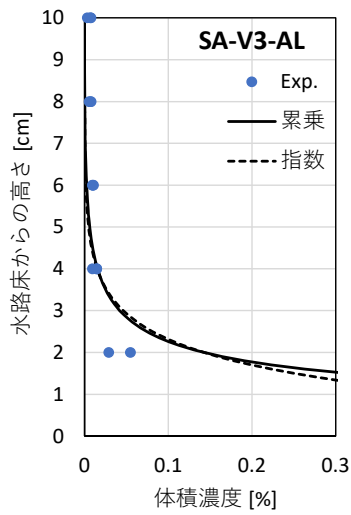


(a) $w=76.8\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$

(b) $w=76.8\%$, $V2:1.0\text{m/s}$, $AH:1.2\text{m/s}^2$

(c) $w=76.8\%$, $V3:1.5\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$

図- 4.35 底質の体積濃度の推定分布 (フライアッシュ)



(a) $w=30.0\%$, $V3:1.5\text{m/s}$, $AL:0.09\text{m/s}^2$

図- 4.36 底質の体積濃度の推定分布 (珪砂 6 号)

(2) 底質の巻き上げ速度

単位時間・単位面積当りの巻き上げ量を巻き上げ速度 E [$\text{mg}/\text{cm}^3/\text{s}$]と定義し、式 4-10 から推定した。

$$E = \frac{Q}{(h + t_s)} \int_0^{h+t_s} SS(z) dz \cdot \frac{1}{BL} \quad (4-10)$$

ここで、 h : 水路高さ [cm], t_s : 推定洗堀深 [cm], SS : サンドベッドの底質表面からの高さ z における SS 濃度 [mg/L], Q : 流量 [cm^3/s], B : 水路幅 (=20) [cm], A : サンドベッド上流端から吸引孔までの距離 (上流傾斜部の洗堀による距離短縮を考慮) [cm]とした (図-4.37)。なお、各ケースの推定洗堀深は、図-4.21 (c)~図-4.33 (c)に示す画像より推定した。

本試験により得られた巻き上げ速度 E と有効せん断応力 τ/τ_{e-1} の関係を図-4.38 に示す。ここで、 τ_e は流送限界(s)の限界せん断応力として、表-4.7 の流送限界摩擦速度 u_s^* と底質の粒子密度 ρ_s から $\tau_e = \rho_s u_s^{*2}$ で算定した。図-4.38 (b)には村上ら(1989)¹⁾の実験結果との比較を示しており、本試験結果は概ね同じ傾向を示したが、試験ケースが限られていることや推定洗堀深の判定が困難であったこと等から参考値とする。

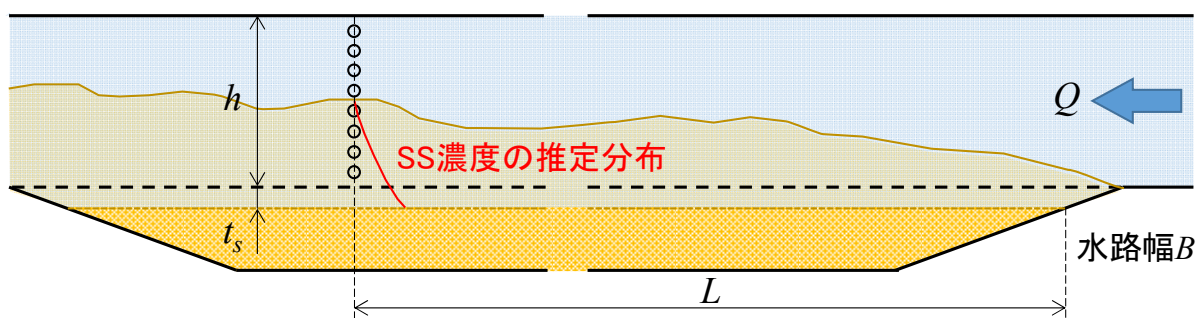
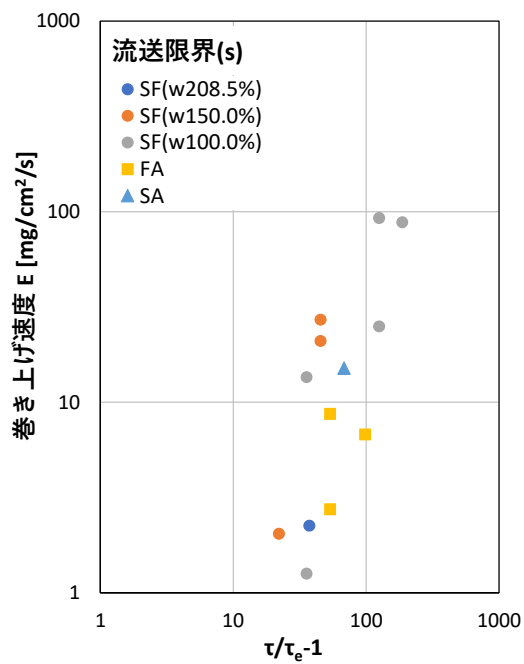
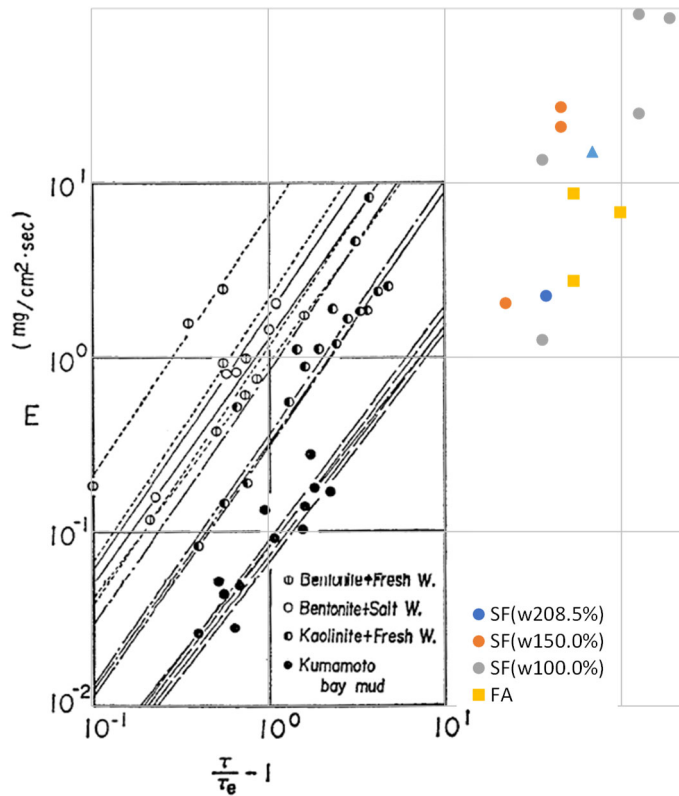


図-4.37 巻き上げ速度の推定方法



(a) 流送限界における巻き上げ速度



(b) 既往研究との比較¹⁾

図- 4.38 各底質モデルの巻き上げ速度の推定結果

【参考文献】

- 1) 村上和男, 菅沼史典, 佐々木均: 底泥の巻き上げ現象とそのモデル化に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.319-323, 1989.

4.3. 粘性評価

(1) 試験装置

写真-4.5 (a)に示すレオメーター（粘度・粘弾性測定装置）を使用して、粘性を計測した。なお、本装置はアタッチメントを替えることが可能で、今回は写真-4.5 (b), (c)に示す二重円筒型粘度計とペーン型粘度計を使用した。

各型式の特徴を以下に示す。

- ・二重円筒型粘度計：非ニュートン流体に対しても精度良く計測可能。
砂粒等が混入する流体は計測不可。
- ・ペーン型粘度計：砂粒等が混入する流体も計測可能。ただし、せん断速度は算定不可。

(2) 試験方法

本試験は、Thermo Scientific 社製の HAAKE Viscotester iQ Air レオメーター（写真-4.5）を使用し、二重円筒型およびペーン型の粘度計による粘性試験からせん断速度 $\dot{\gamma}$ に対するせん断応力 τ を確認した。また、現地調査でサンプリングした底質試料は、ペーン型粘度計により粘性試験を行い、底質模型の結果との相対比較から粘性を評価した。



(a) レオメーター（粘度・粘弾性測定装置）

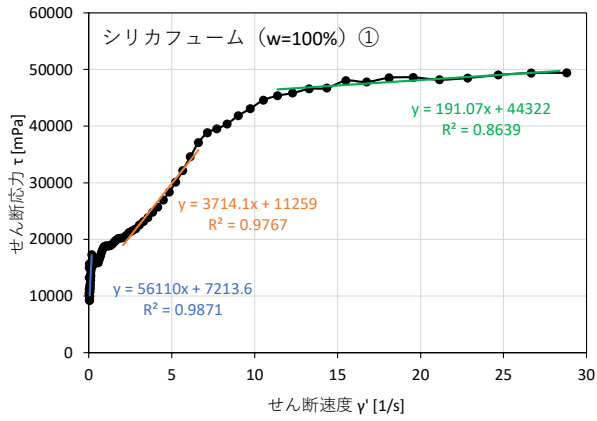
(b) 二重円筒型

(c) ペーン型

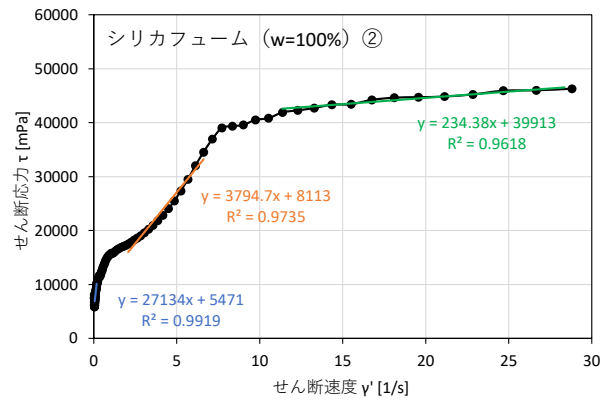
写真-4.5 粘性評価試験装置

4.3.1. 底質模型の粘性

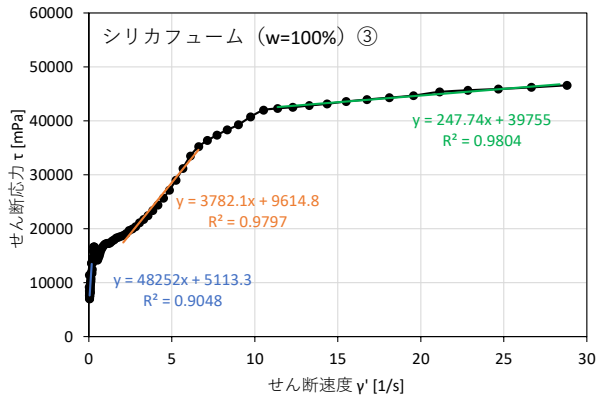
巻き上げ試験に用いた底質材料のうち、シリカフェームおよびフライアッシュの含水比を変化させ、二重円筒型粘度計により粘性を確認した。なお、同条件における試験を3回繰り返し実施した。本試験により得られた結果のうち、せん断速度 $\dot{\gamma}$ 'に対するせん断応力 τ を図-4.40～図-4.49に示す。各図中には、3本（青・橙・緑）の線形近似曲線を示しており、各近似式の傾きを粘度 η_0, η_1, η_2 、切片を降伏せん断応力 $\tau_{y0}, \tau_{y1}, \tau_{y2}$ として整理した。その結果として、シリカフェームおよびフライアッシュの含水比による粘度および降伏せん断応力を図-4.50を示す。同図より、底質模型の含水比が大きくなるほど降伏せん断応力は小さくなり、両者の関係は累乗近似式で整理できることが分かった。また、図-4.51より、既往研究¹⁾の粘性試験結果と比較すると、本試験結果は概ね同じ傾向であることが確認できた。



(a) 1回目



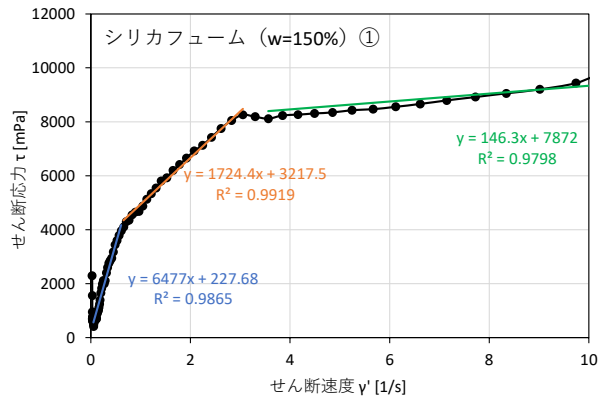
(b) 2回目



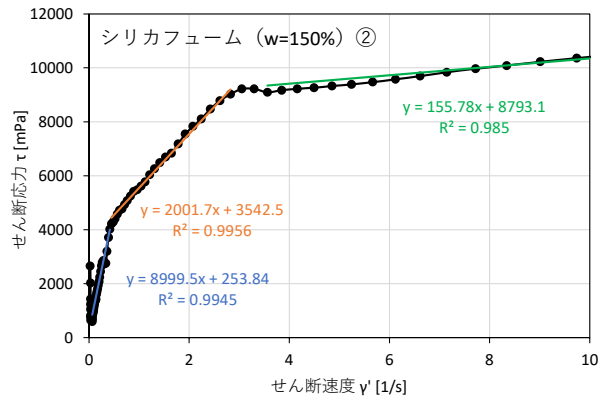
(c) 3回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

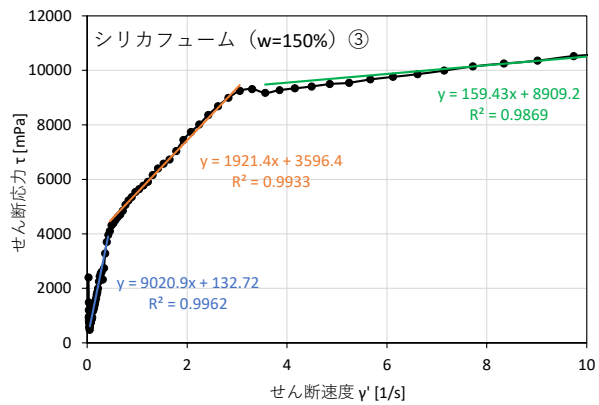
図- 4.39 二重円筒型粘度計による試験結果 (シリカフューム, w=100%)



(a) 1 回目



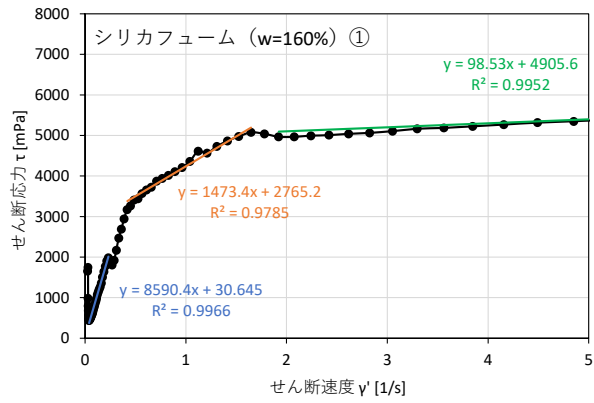
(b) 2 回目



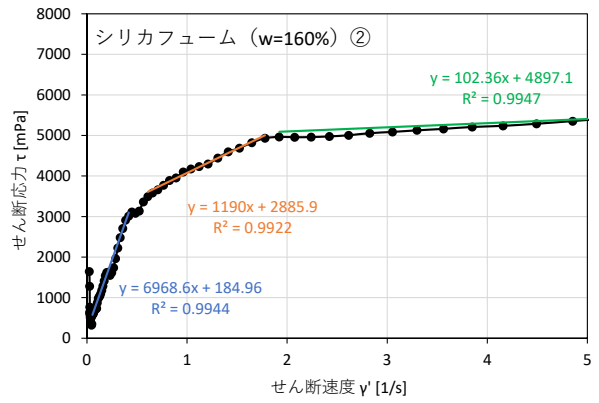
(c) 3 回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

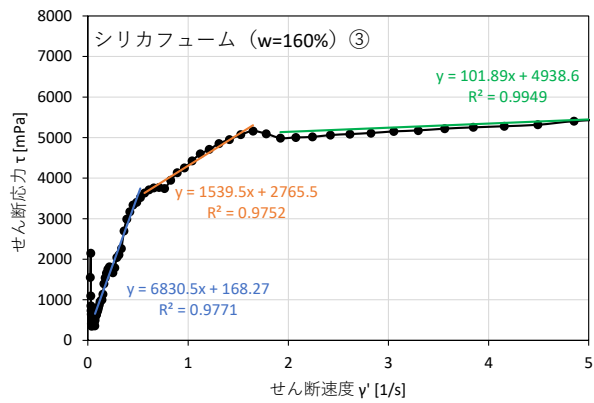
図- 4.40 二重円筒型粘度計による試験結果 (シリカフューム, $w=150\%$)



(a) 1 回目



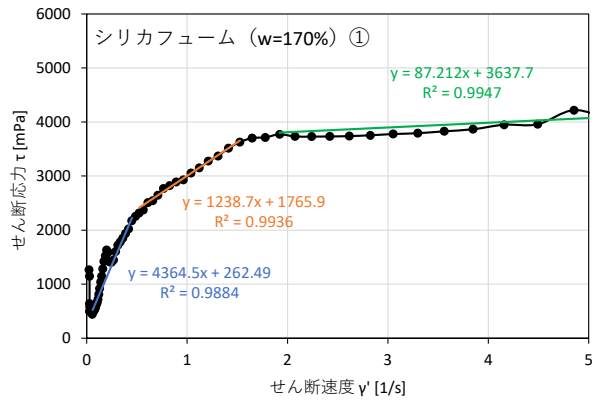
(b) 2 回目



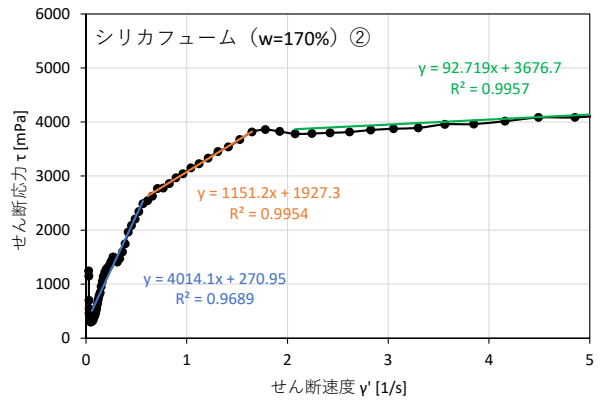
(c) 3 回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

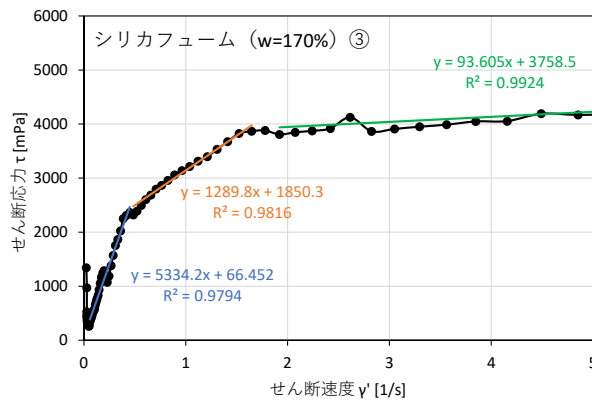
図-4.41 二重円筒型粘度計による試験結果 (シリカフューム, w=160%)



(a) 1回目



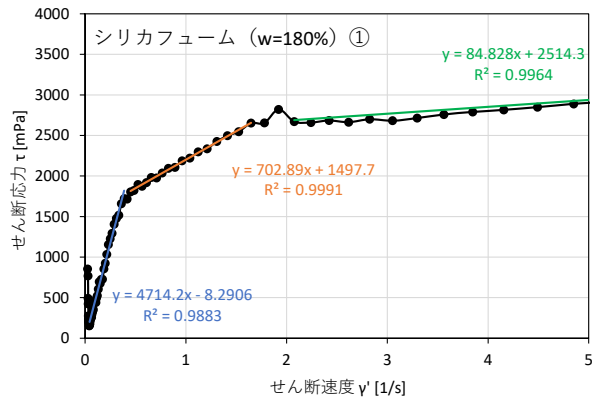
(b) 2回目



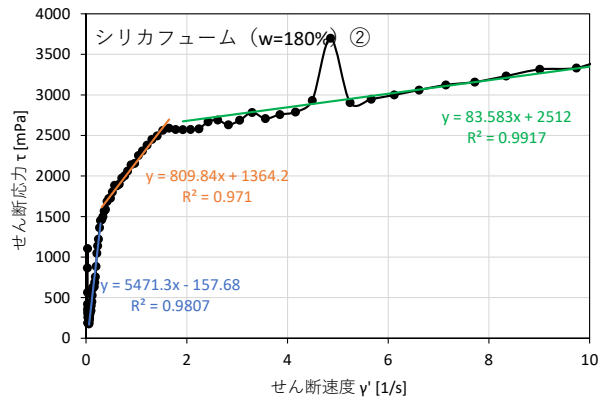
(c) 3回目

— : 傾き η_0 , 切片 τ_0
 — : 傾き η_1 , 切片 τ_1
 — : 傾き η_2 , 切片 τ_2

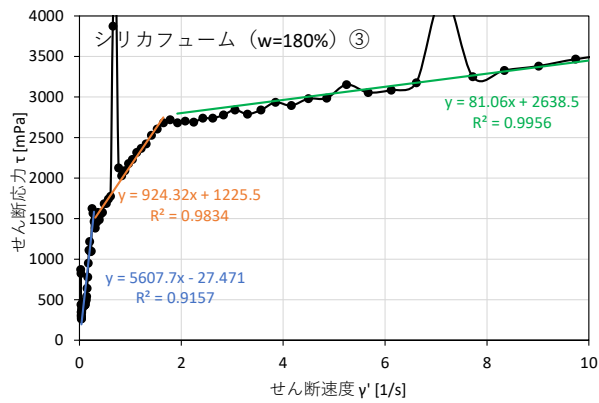
図-4.42 二重円筒型粘度計による試験結果 (シリカフューム, $w=170\%$)



(a) 1回目



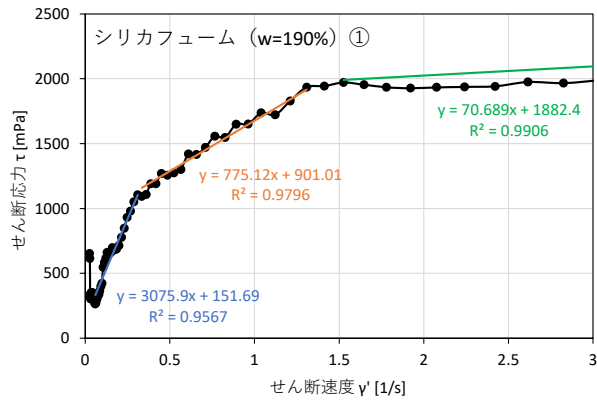
(b) 2回目



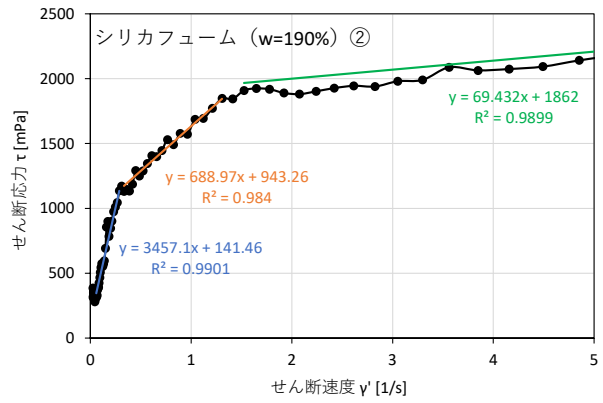
(c) 3回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

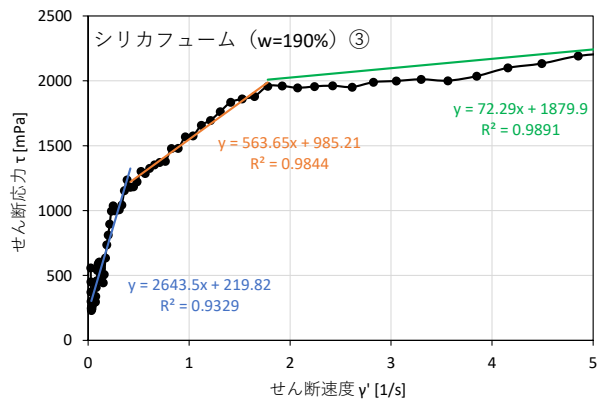
図-4.43 二重円筒型粘度計による試験結果 (シリカフューム, $w=180\%$)



(a) 1 回目



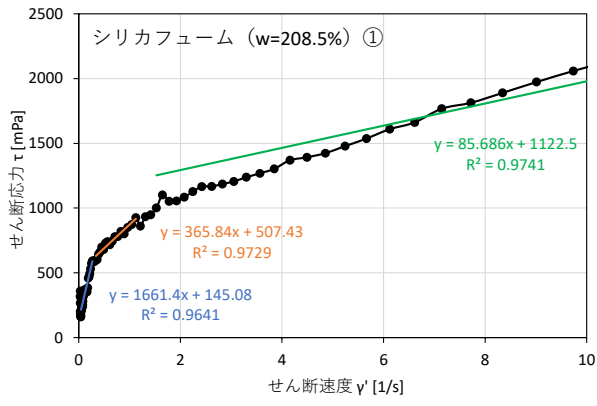
(b) 2 回目



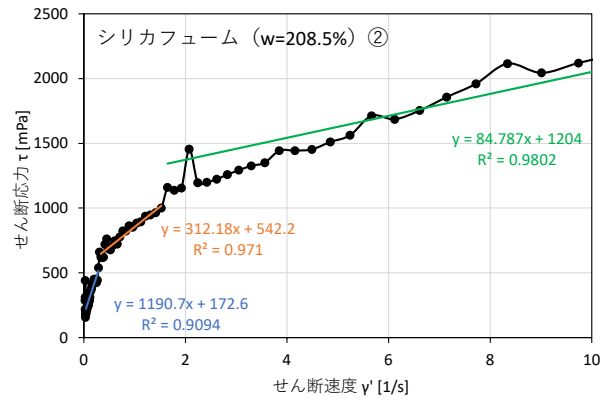
(c) 3 回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

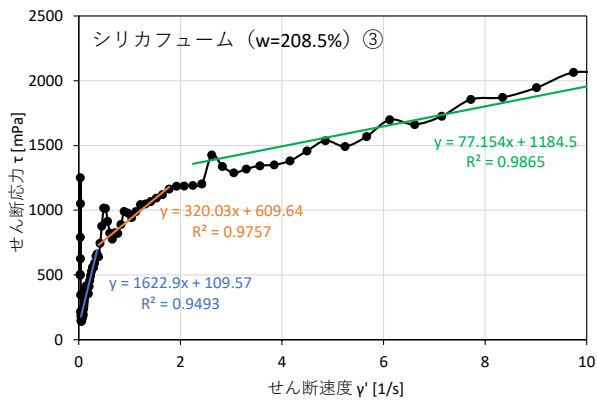
図- 4.44 二重円筒型粘度計による試験結果 (シリカフューム, w=190%)



(a) 1 回目



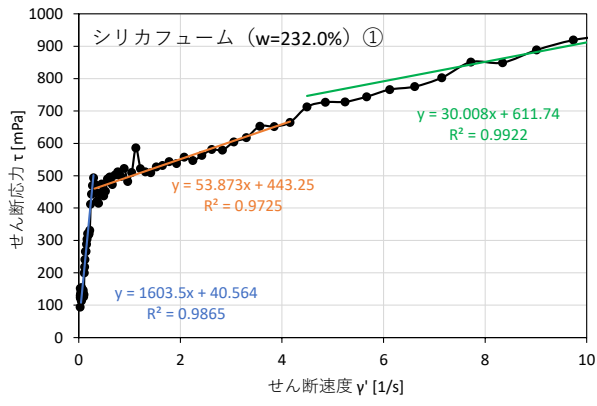
(b) 2 回目



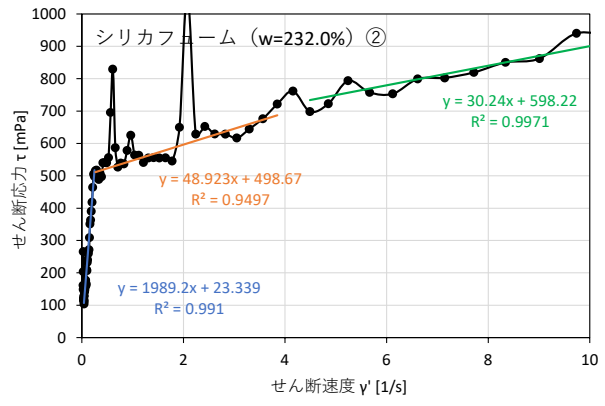
(c) 3 回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

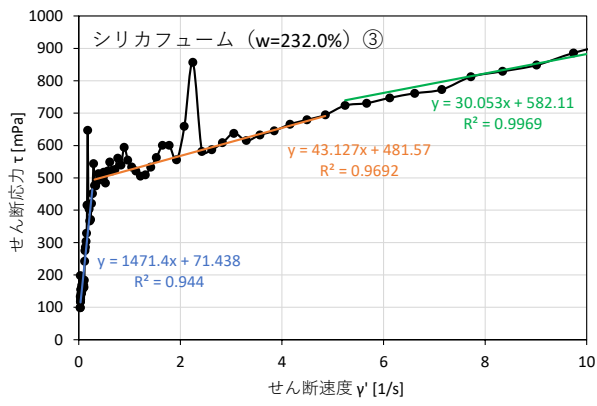
図-4.45 二重円筒型粘度計による試験結果 (シリカフューム, $w=208.5\%$)



(a) 1 回目



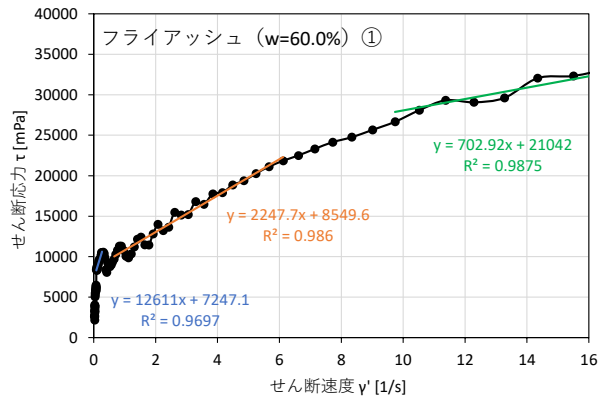
(b) 2 回目



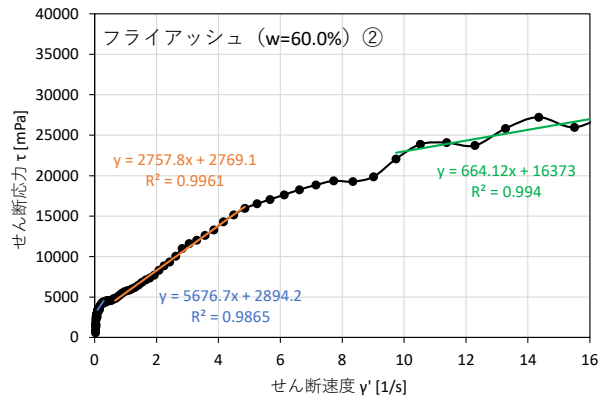
(c) 3 回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

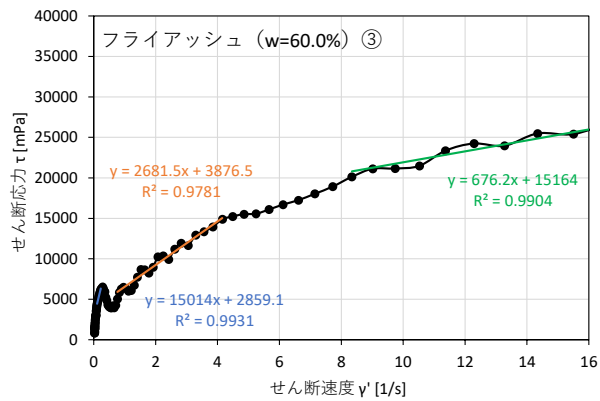
図-4.46 二重円筒型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, $w=232.0\%$)



(a) 1回目



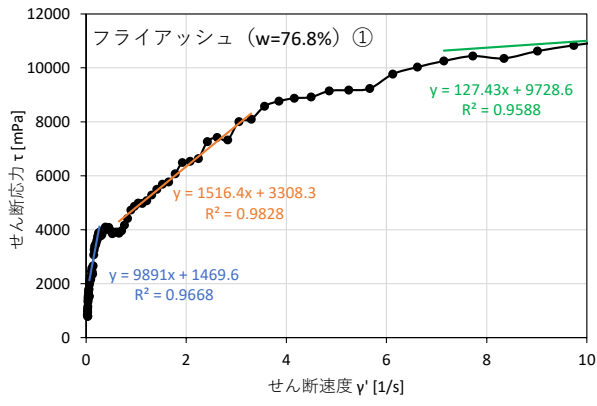
(b) 2回目



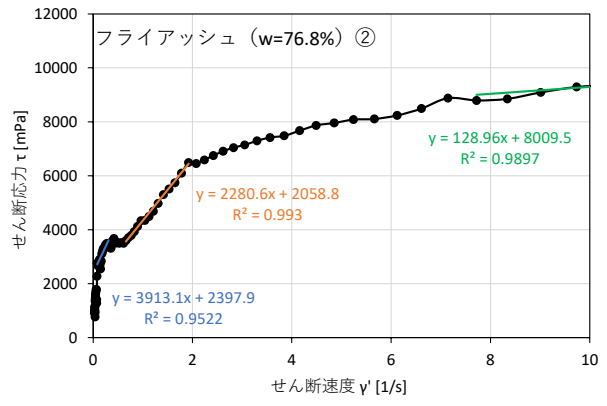
(c) 3回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

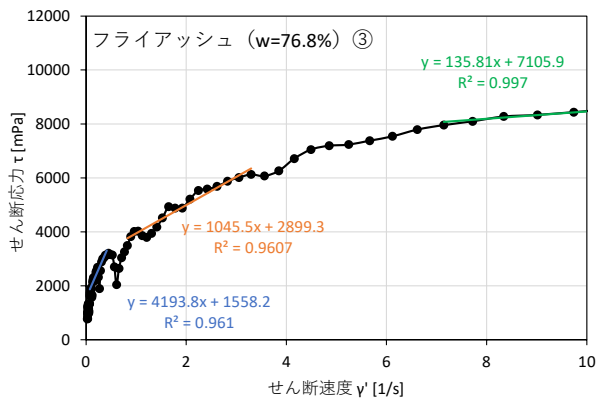
図-4.47 二重円筒型粘度計による試験結果 (フライアッシュ, w=60.0%)



(a) 1回目



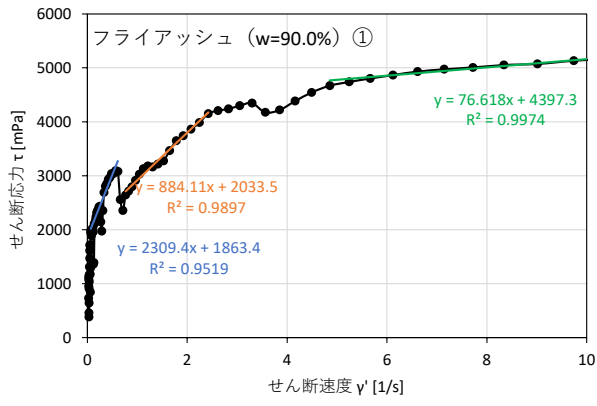
(b) 2回目



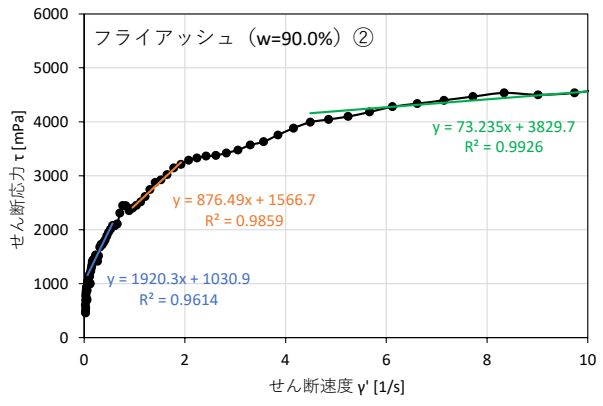
(c) 3回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

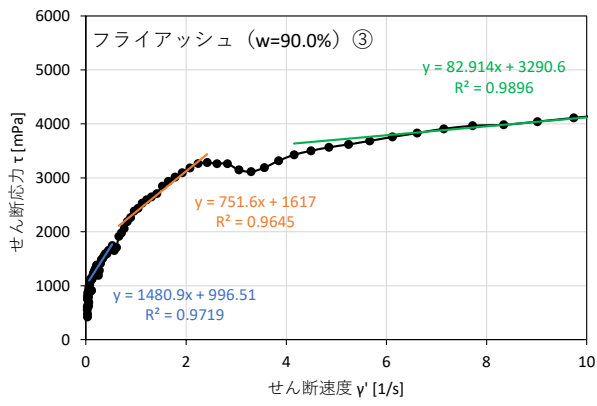
図-4.48 二重円筒型粘度計による試験結果 (フライアッシュ, $w=76.8\%$)



(a) 1 回目



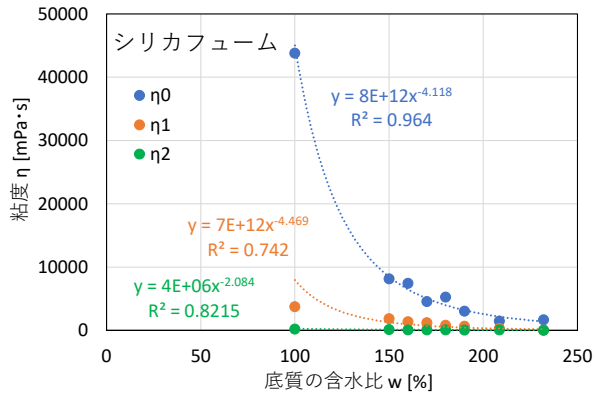
(b) 2 回目



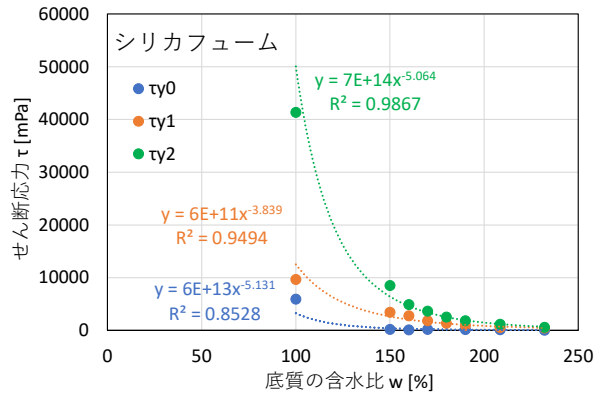
(c) 3 回目

- : 傾き η_0 , 切片 τ_0
- : 傾き η_1 , 切片 τ_1
- : 傾き η_2 , 切片 τ_2

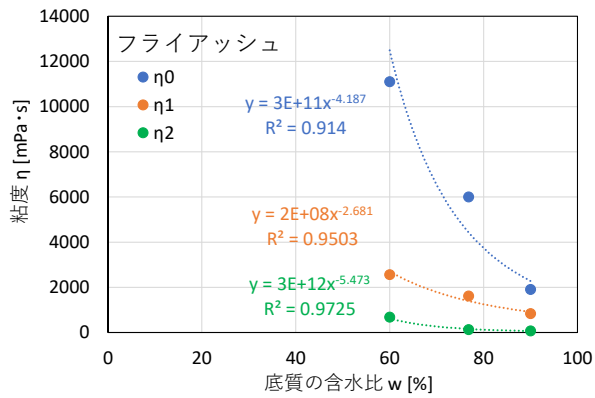
図-4.49 二重円筒型粘度計による試験結果 (フライアッシュ, $w=90.0\%$)



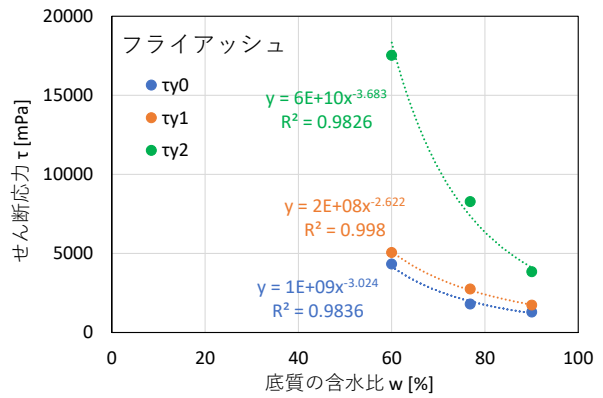
(a) シリカフェーム：粘度 η



(b) シリカフェーム：せん断応力 τ



(c) フライアッシュ：粘度 η



(d) フライアッシュ：せん断応力 τ

図- 4.50 底質の含水比による粘度および降伏せん断応力（二重円筒型粘度計）

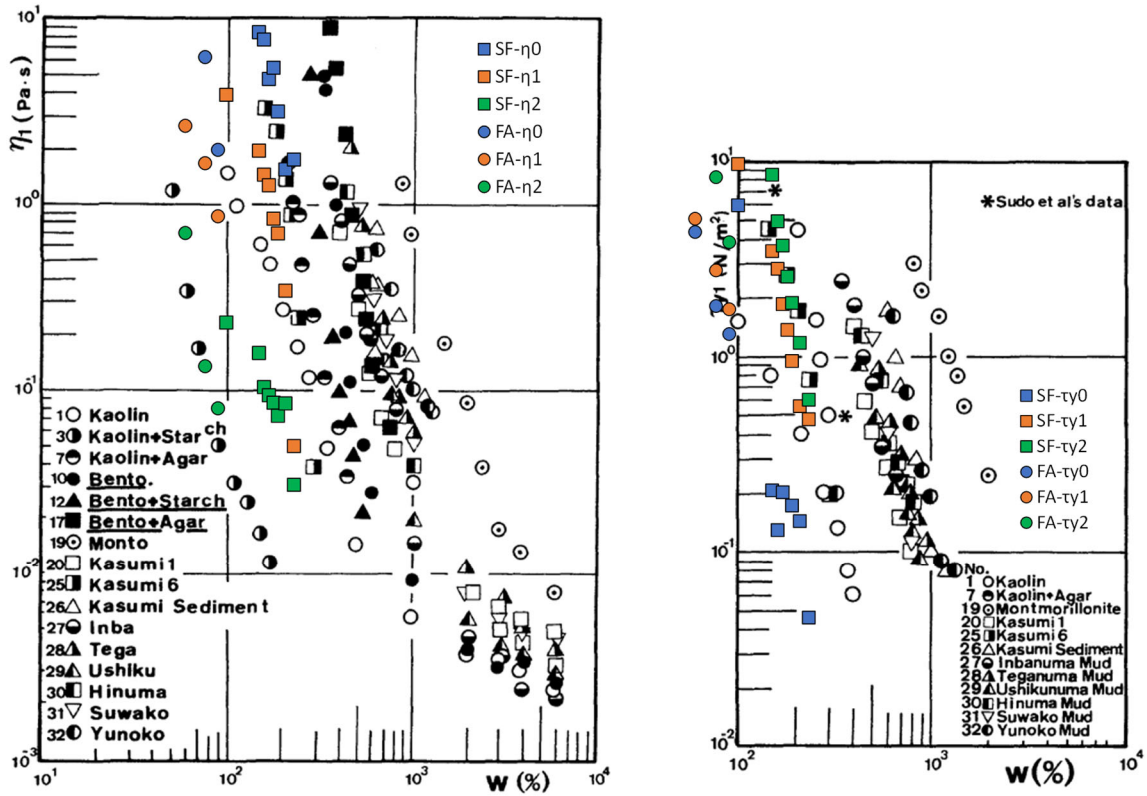


Fig. 6 Dependence of viscosity on water content. Fig. 7 Dependence of yield value on water content.

図- 4.51 底質の含水比による粘度および降伏せん断応力の既往研究¹⁾との比較

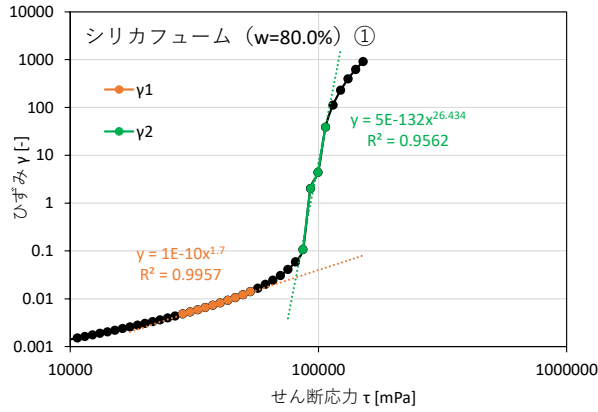
【参考文献】

- 2) 大坪国順, 村岡浩爾: 底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第363号, II-4, pp.225-234, 1985.

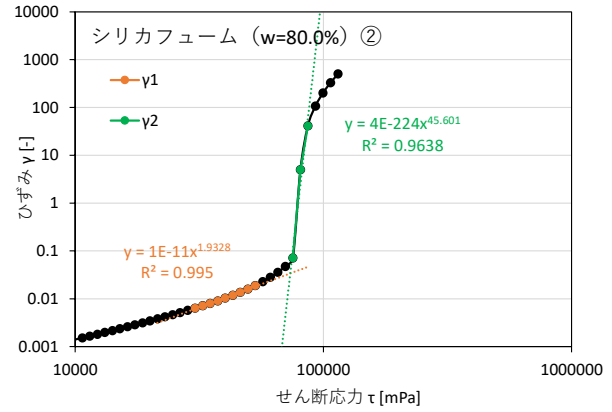
4.3.2. 現地採取試料との比較

巻き上げ試験に用いた底質材料のうち、シリカフェームについて含水比を変化させ、ベーン型粘度計により粘性を確認した。なお、同条件における試験を2回繰り返して実施し、せん断応力 τ に対するひずみ γ を図-4.52～図-4.61に示す。また、現地採取試料については、3.現地調査で示す気仙沼湾奥の地点B (KE-B)および川崎港京浜運河の地点A1 (KA-A1)で採取された海底表層20cmの底質を、水道水と攪拌・混合し、底に蓋をしたアクリル製のパイプ（直径 ϕ 8cm）に入れ、所定期間（1,4,6週間）を自然沈降させて堆積させたものを使用した。この試験については各1回を実施し、せん断応力 τ に対するひずみ γ を図-4.62～図-4.64に示す。図中には、2本（橙・緑）の累乗近似曲線を示しており、近似曲線の交点を降伏せん断応力 τ_y として整理した。

底質模型（シリカフェーム）と現地採取試料の降伏せん断応力の比較結果を図-4.65に示す。同図(a)はシリカフェームの含水比による降伏せん断応力、(b)は現地採取試料の沈降・堆積期間による降伏せん断応力を示している。なお、図-4.65(a)には、現地採取試料の沈降・堆積期間1週間における降伏せん断応力を破線で示しており、シリカフェームの含水比 $w=100\%$ の底質模型が概ね同じ降伏せん断応力であることが確認できた。

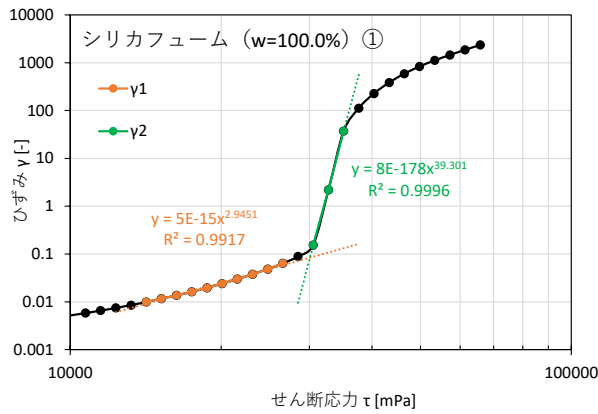


(a) 1 回目

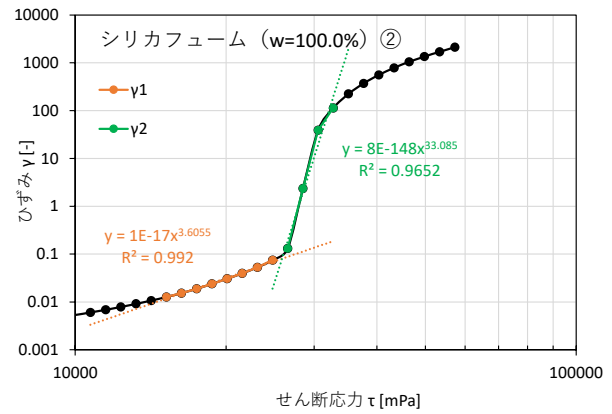


(b) 2 回目

図- 4.52 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=80.0%)

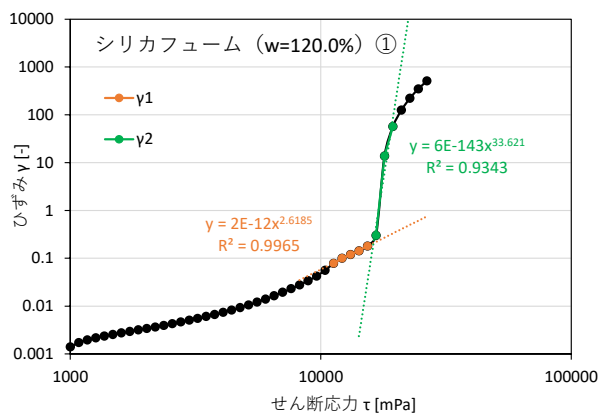


(a) 1 回目

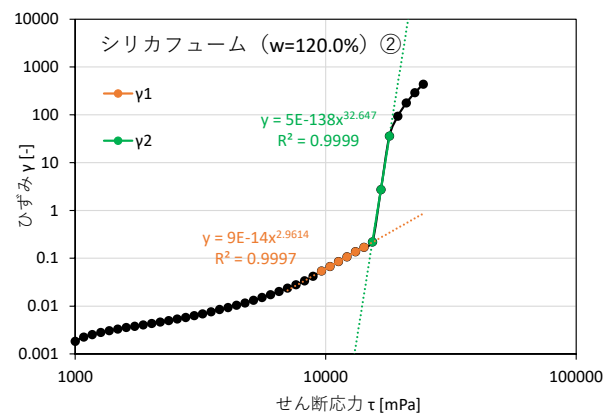


(b) 2 回目

図- 4.53 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=100.0%)

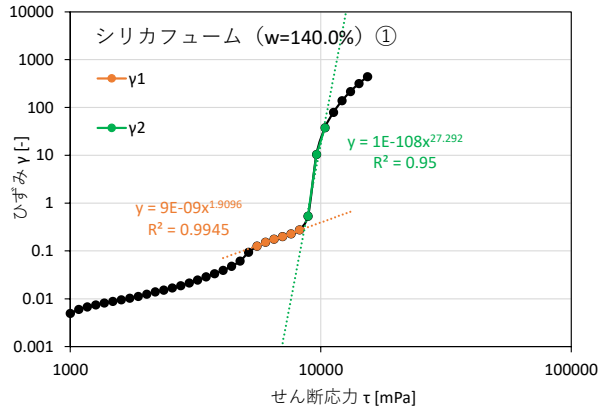


(a) 1 回目

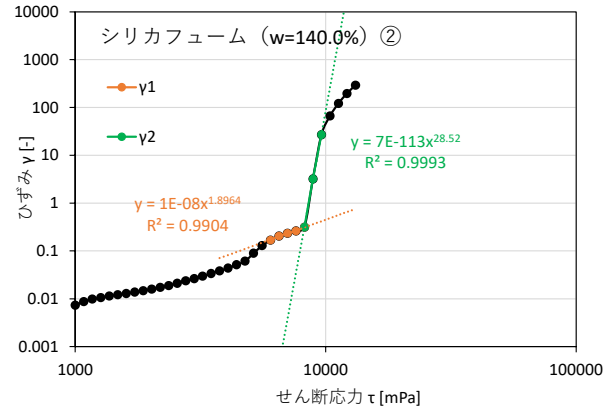


(b) 2 回目

図- 4.54 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=120.0%)

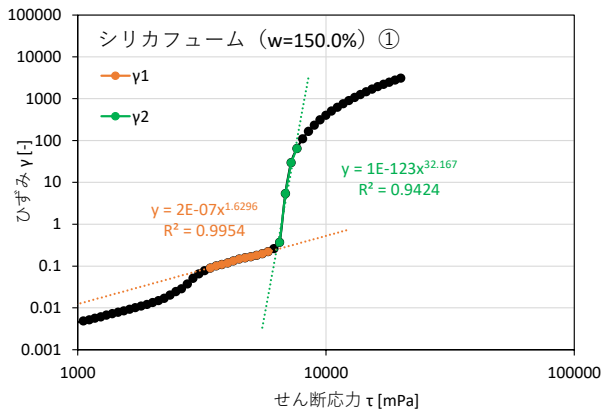


(a) 1 回目

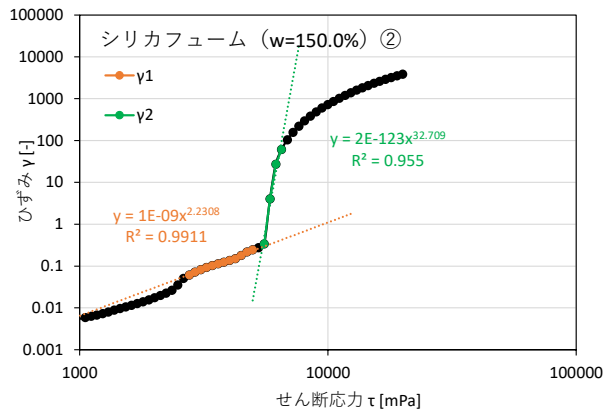


(b) 2 回目

図- 4.55 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=140.0%)

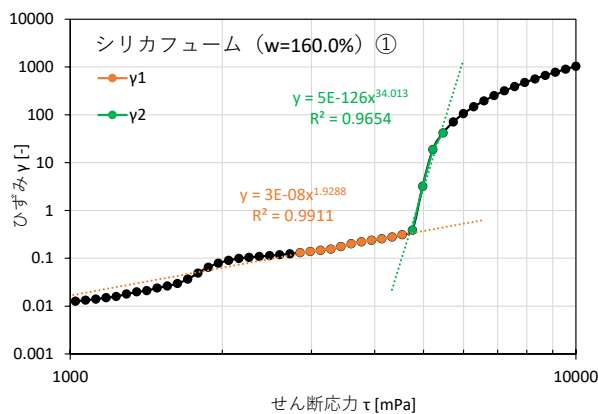


(a) 1 回目

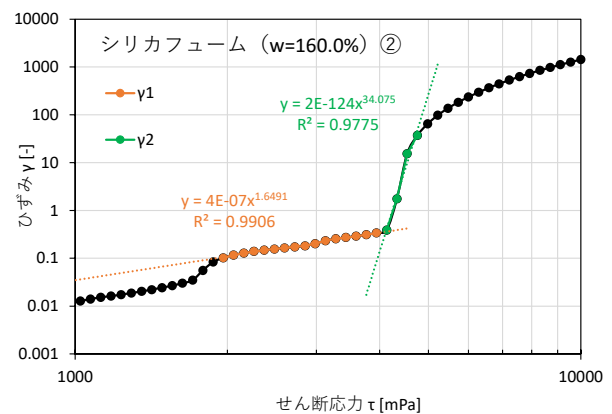


(b) 2 回目

図- 4.56 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=150.0%)

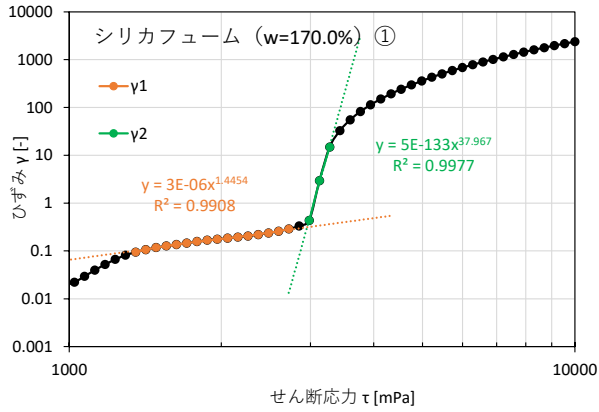


(a) 1 回目

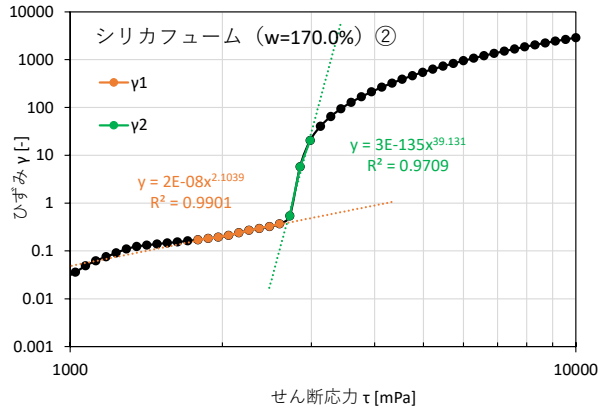


(b) 2 回目

図- 4.57 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=160.0%)

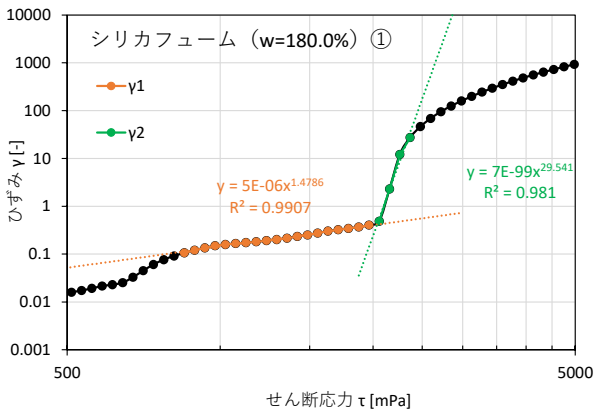


(a) 1 回目

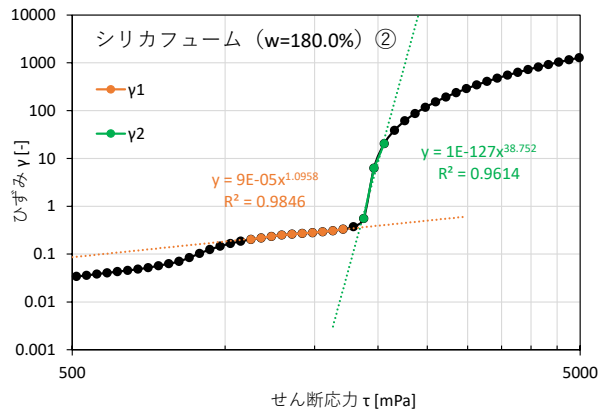


(b) 2 回目

図- 4.58 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=170.0%)

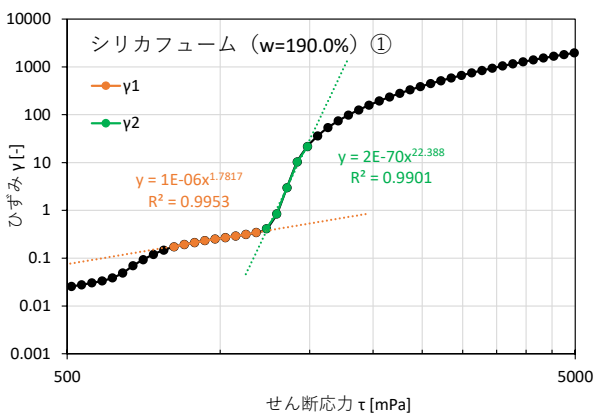


(a) 1 回目

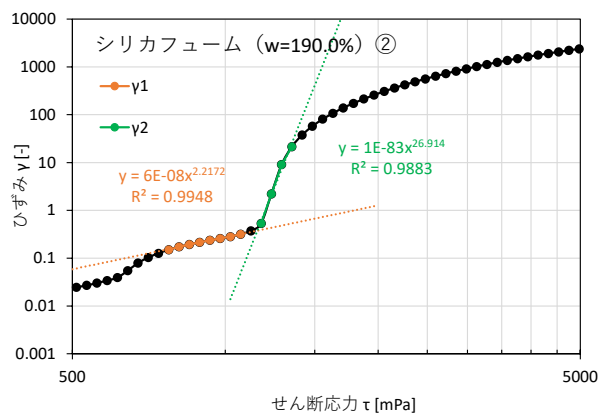


(b) 2 回目

図- 4.59 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=180.0%)

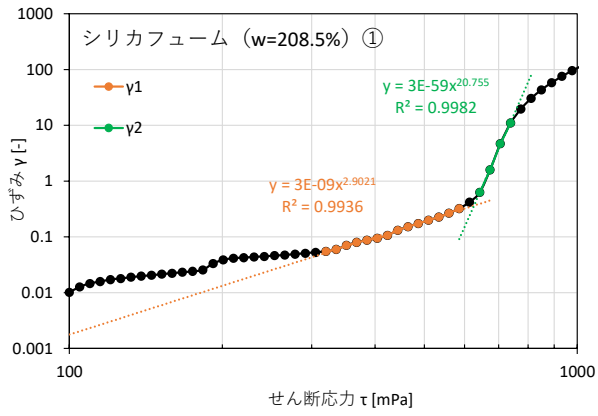


(a) 1 回目

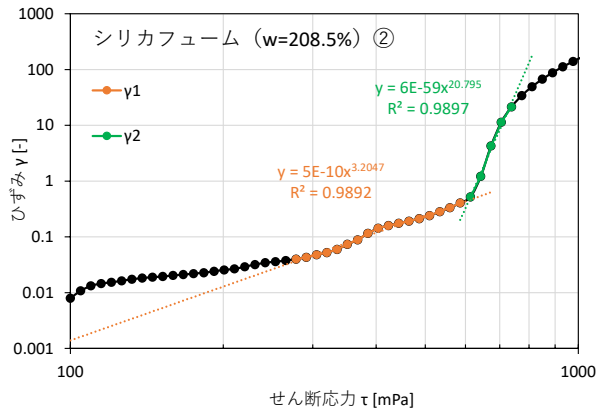


(b) 2 回目

図- 4.60 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=190.0%)

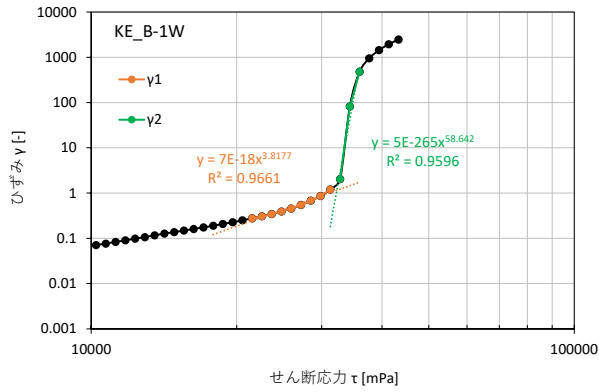


(a) 1 回目

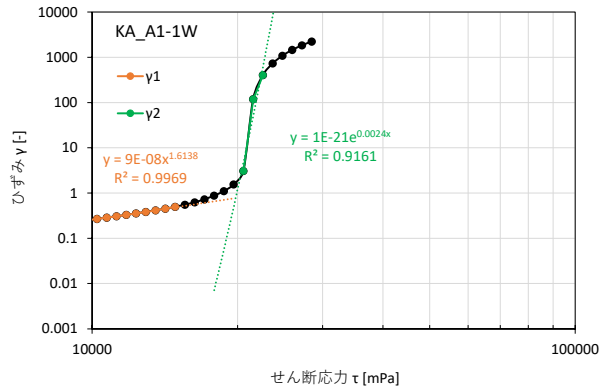


(b) 2 回目

図- 4.61 ベーン型粘度計による試験結果 (シリカフェーム, w=208.5%)

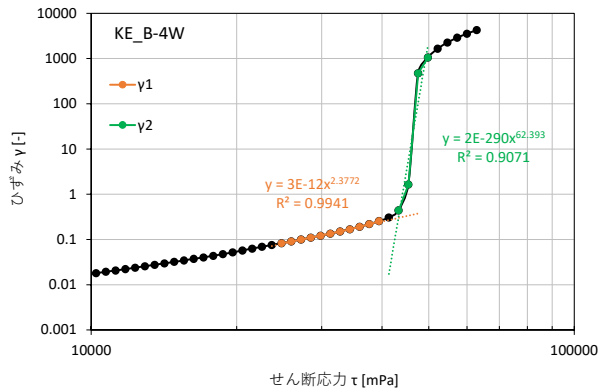


(a) KE-B : 気仙沼湾奥 地点 B

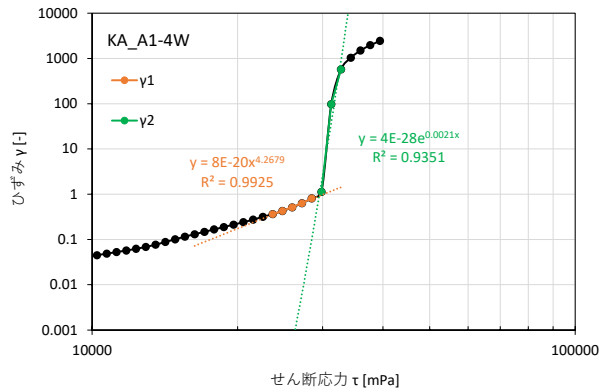


(b) KA-A1 : 川崎港京浜運河 地点 A1

図- 4.62 ベーン型粘度計による試験結果 (1W : 沈降・堆積 1 週間後)

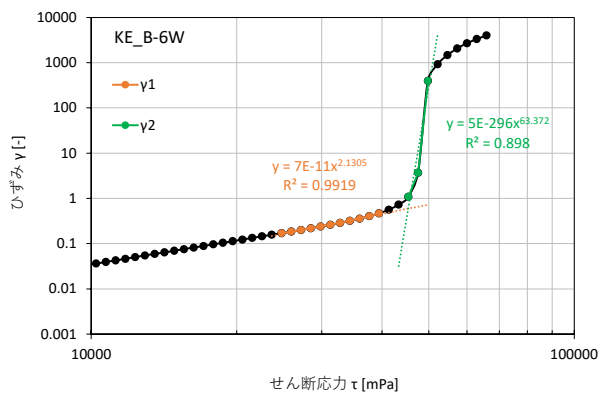


(a) KE-B : 気仙沼湾奥 地点 B

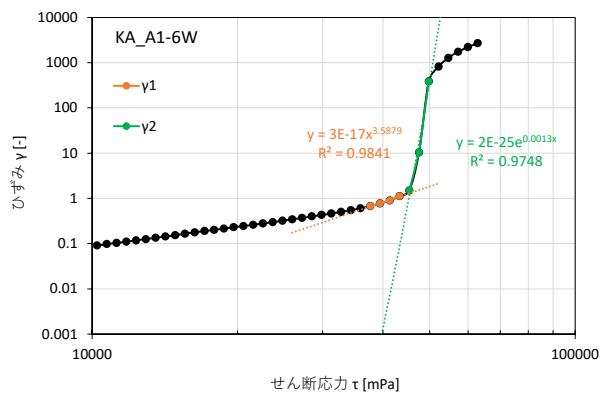


(b) KA-A1 : 川崎港京浜運河 地点 A1

図- 4.63 ベーン型粘度計による試験結果 (4W : 沈降・堆積 4 週間後)

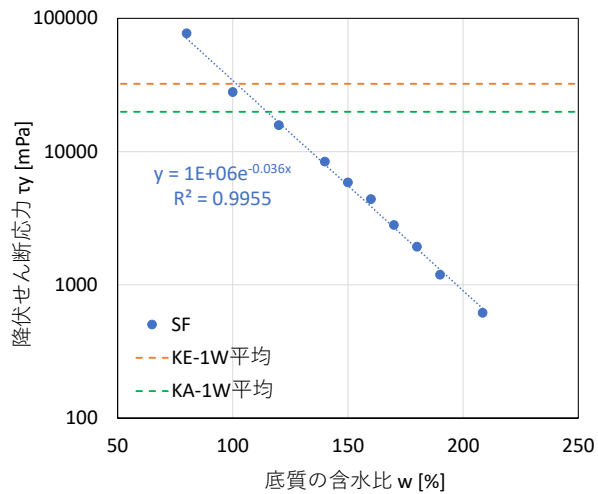


(a) KE-B : 気仙沼湾奥 地点 B

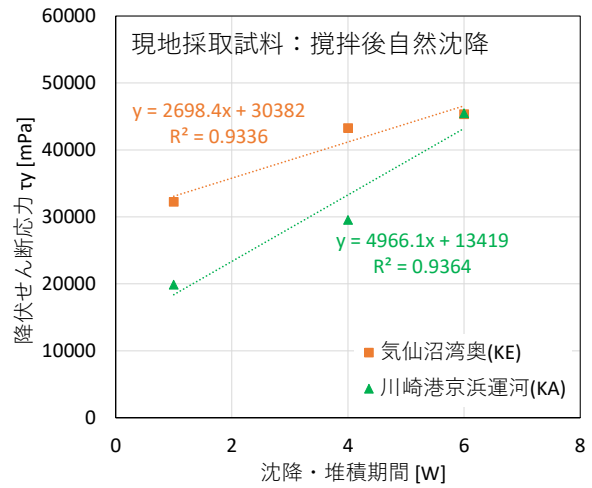


(b) KA-A1 : 川崎港京浜運河 地点 A1

図- 4.64 ベーン型粘度計による試験結果 (6W : 沈降・堆積 6 週間後)



(a) シリカフェームの含水比による結果



(b) 現地試料の沈降・堆積期間による結果

図- 4.65 底質模型と現地採取試料の比較 (ベーン型粘度計による降伏せん断応力)