J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 160, p.13～27 (2025)

論　文
Original Paper

上層に粗大なろ過材と下層に細かい石英砂を配した二層ろ過における土砂懸濁液の粒径分布の深さ方向及び時間変化

原口暢朗 [1]

Changes in suspended particle size distribution with depth and time during filtration of double filter layer composed of a large artificial semi-cylindrical filter material in the upper and small quartz sand in the lower

Noburo HARAGUCHI[1]

Abstract: The purpose of this paper was to examine the changes in suspended particle size distribution with depth and time during filtration using double filter layer composed of a large artificial semi-cylindrical material in the upper and small quartz sand in the lower. As influent, clay suspension was adjusted to the maximum particle diameter of 70 and 10 μm and the concentration of about 4,600 mg L^{-1}. At elapsed time 60, 120 and 240 min, the amount of the trapped particles in the upper layer, in the boundary between the upper and the lower layer, and in the lower layer was measured. Particle size distributions of the inflow and the outflow suspension, and the trapped particles mentioned above were also measured using laser diffraction scattering particle size distribution analyzer. The results showed the following; (i) in the case of the maximum particle diameter of 70 μm, the main capture site at elapsed time 60 min was the upper layer, but it shifted to the boundary at elapsed time 240 min. On the other hand, in the case of the maximum particle diameter of 10 μm, the capture sites of the sediment were both the upper layer and the boundary at elapsed time 60, 120 and 240 min, (ii) in all cases, the particle size distribution of the suspended particle reaching the lower layer was finer enough to enter the lower layer due to the trapping of the particles in the upper layer and the boundary, (iii) as the coarser part of the suspended particle was trapped in the lower layer, the particle size distributions of outflow suspension were similar to each other, independent of the maximum particle diameter and the elapsed time.

Key Words : double filter layer filtration, capture of the suspended particle, particle size distribution of suspended particle, laser diffraction scattering particle size distribution analyzer

1. はじめに

農地から流出する土砂が海域まで達すると，水産業や観光業に少なからぬ影響を及ぼすため，その流出軽減は重要な課題である．これまで様々な土砂流出軽減対策が図られてきたが（中ら, 1992; 農林水産技術会議事務局, 2002; 塩野ら, 2007），粒径 74 μm 以下のシルト及び粘土粒子の流出軽減は依然として課題であり（中ら, 1992），沈砂池におけるろ過を原理とした対策が検討された（中ら, 1997; 日下ら, 2004）．その結果，流入土砂の粒径に対してろ過材の粒径が粗い場合には土砂捕捉が十分でなく，ろ過材の粒径が細かい場合にはろ過層の早期の目詰まりが生じることが明らかになった．この問題を解決する基礎的な知見を得るため，前報（原口, 2024）では，上層に粗大な半円筒ろ過材，下層に粒径の小さい石英砂を配した二層ろ過層の石英砂単層と比較したろ過持続時間の延長効果を室内実験により検討した．その結果，単層では層表面で捕捉された土砂により間隙が短時間で閉塞して流出フラックスが短時間で低下したのに対し，二層では上層及び上層と下層の境界（以下，「境界」と記す）に多量の土砂が捕捉されたにも関わらず，流出フラックスは長時間にわたって徐々に低下し，単層と比較したろ過持続時間が顕著に増大することを明らかにした．加えて，単層では土砂の捕捉部位が表面付近に集中したのに対し，二層では単層と同じ材料から成る下層の内部でも土砂が捕捉された．下層の内部で土砂が捕捉されるためには，下層に達する土砂の粒径が下層の間隙径に比べて十分小さいことが必要である．このことは，前報で扱った二層ろ過では，流入土砂の粒径分布が上層と境界における土砂の捕捉を通じて，下層に達した際に細粒側にシフトしたことを示唆している．

ろ過に伴う懸濁液中の粒子の粒径分布の変化に関して，上水道工学等の水処理工学分野において既往の研究がある．Mackie and Bai（1992）は，内径 13.8 cm のカラムに直径 0.6 ～ 0.7 mm のガラスビーズを 40 cm 充填し，ろ過層の表面から 7.5 cm の地点に懸濁液サンプリング用の横穴を設けた．彼らはろ過実験に先立ち，コール

[1] 元農研機構 農村工学研究部門
2025 年 2 月 6 日受稿　2025 年 4 月 27 日受理

ターカウンターを用いて流入懸濁液の粒径分布を 4 つの粒径区分における頻度として求め，これをろ過開始から 3 時間後にサンプリングされた懸濁液の粒径分布と比較した．その結果，サンプリングされた懸濁液の粒径分布は，流入懸濁液の粒径分布の粗粒部分がカットされ，細粒側にシフトしたことを示した．Darby and Lawler（1990）は，内径 3.8 cm のカラムに直径 0.5 ～ 0.6 mm のガラスビーズを深さ 14 cm 充填し，ろ過層の表面上 1.0 cm 及び表面からの深さ 1.0，5.5，9.0 cm の 4 地点に懸濁液サンプリング用の横穴を設け，平均粒径 2 μm のモデル粒子を用いた約 12 mg L^{-1} の懸濁液を流入させ，ろ過開始から 240 分まで約 10 分の時間間隔で懸濁液を採取し，コールターカウンターを用いて懸濁液中の粒径分布を測定した．彼らは懸濁液の粒径分布を 3 つの粒径に区分し，深さ 9 cm でサンプリングされた粒子の区分ごとの平均粒径を流入懸濁液の平均粒径と比較した．その結果，1.89 ～ 2.32 μm の区分では，深さ 9 cm における平均粒径は流入懸濁液と比較してわずかに増加したことを示し，その理由は流入懸濁液のうちの細かい粒子がろ過層に捕捉されたことによると考察した．また，平均粒径 2.85 ～ 4.23 μm の区分では，深さ 9 cm における平均粒径は流入懸濁液と比較して顕著に増加したことを示し，その理由はろ過層内で形成されたフロックの剥離によると考察した．次いで，Darby et al.（1991）は，内径 7.6 cm のカラムに直径 1.4 ～ 1.7 mm のガラスビーズを深さ 22 cm 充填し，ろ過層の表面上 1.0 cm 及び表面からの深さ 3.8，8.3，16.5 cm の 4 地点に懸濁液サンプリング用の横穴を設け，約 1 ～ 100 μm の粒径分布を有する 3.7 ～ 9.6 mg L^{-1} の懸濁液を流入させ，ろ過開始から 600 分まで約 30 分の時間間隔で流入懸濁液と深さ 16.5 cm 地点の懸濁液を採取し，コールターカウンターを用いてこれらの粒径分布を測定した．彼らは流入懸濁液を基準とした深さ 16.5 cm 地点での粒子の捕捉効率を計算し，ろ過開始から 180 分及び 480 分ともに粒径 5 ～ 40 μm の捕捉効率が顕著に増加したこと，粒径 2.5 μm 以下の捕捉効率はろ過時間の経過とともに増加したことを示した．彼らはこの結果について，捕捉効率は懸濁液中の粒子の粒径に大きく依存する，と述べるに止まった．Clark et al.（1992）は，内径 7.6 cm のカラムに直径 0.8 mm のガラスビーズを深さ 22 cm 充填し，ろ過層の表面上及び表面からの深さ 3.8，8.3，16.5 cm の地点に懸濁液サンプリング用の横穴を設けた．彼らはコールターカウンターを用いて測定されたろ過開始から 2 時間後の流入懸濁液，深さ 3.8 及び 16.5 cm における 0.1 ～ 20 μm の範囲の粒径分布を比較し，深さの増加に伴い懸濁液の粒径分布は細粒側にシフトしたことを示した．これらの研究では，ろ過層はいずれも単層であり，懸濁液中の粒子の粒径ごとの深さ方向及びろ過時間の経過に伴う捕捉効率の増加（ろ過材に捕捉された粒子が新たな捕捉部位となって生じる現象）の解析に重点が置かれている．そこでは，粒径分布の測定値は捕捉効率の計算に使われ，懸濁液の流入から流出までの粒径分布の深さ方向及び時間的変化に関する考察はほとんど行われていない．

一方，二層ろ過では，上層における土砂の捕捉により下層への流入負荷が軽減されて，単層に比べて目詰まりするまでの時間が延長される効果が指摘されている（例えば，穂積ら, 1995）．上層での土砂捕捉による下層への流入負荷軽減は単層ろ過に無い視点であり，その内容として，下層へ流入する土砂濃度の低下及び粒径分布の変化が挙げられる．このうち，粒径分布の変化を検討するためには，流入土砂懸濁液，上層に捕捉された土砂及び下層に達する土砂懸濁液の粒径分布の測定が必要であるが，二層ろ過においてこれらの粒径分布を測定した既往の研究は，筆者の知る限り見当たらない．

以上を踏まえ，本報では二層ろ過を対象として，流入から流出に至る土砂懸濁液及び捕捉された土砂の粒径分布の深さ方向及び時間的変化を実験的に検討することを目的とした．

2. 実験方法及び材料

2.1 ろ過実験

本報では前報（原口, 2024）における二層ろ過の実験結果をベースとするため，実験装置，ろ過材及び流入土砂，実験手順は前報に準じ，本報で特有な実験条件を 2.1.3 に記した．

2.1.1 ろ過実験装置

ろ過実験装置の構成は，土砂懸濁液の貯留タンク（以下,「タンク」と記す），タンクから土砂懸濁液をろ過塔上部に輸送するためのペリスタポンプ，純水供給用のマリオット管，ろ過塔，定圧ろ過とするための余水吐とした（Fig. 1）．余水吐の位置は，ろ過層表面に達するまでの

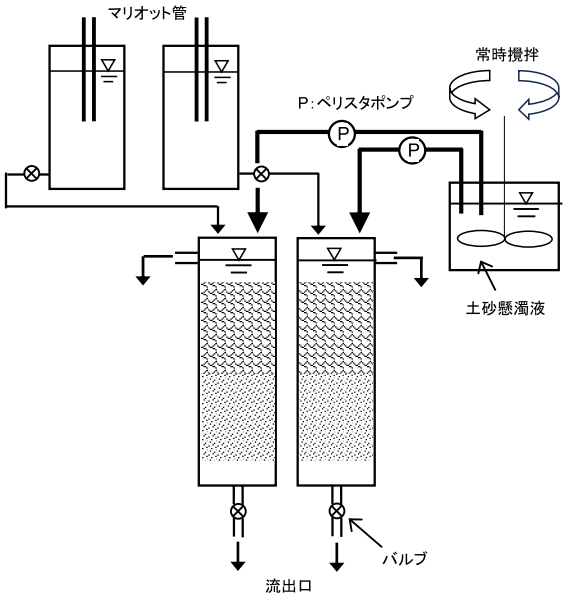


Fig. 1 ろ過実験装置の全体図.
Overall diagram of experimental setup.

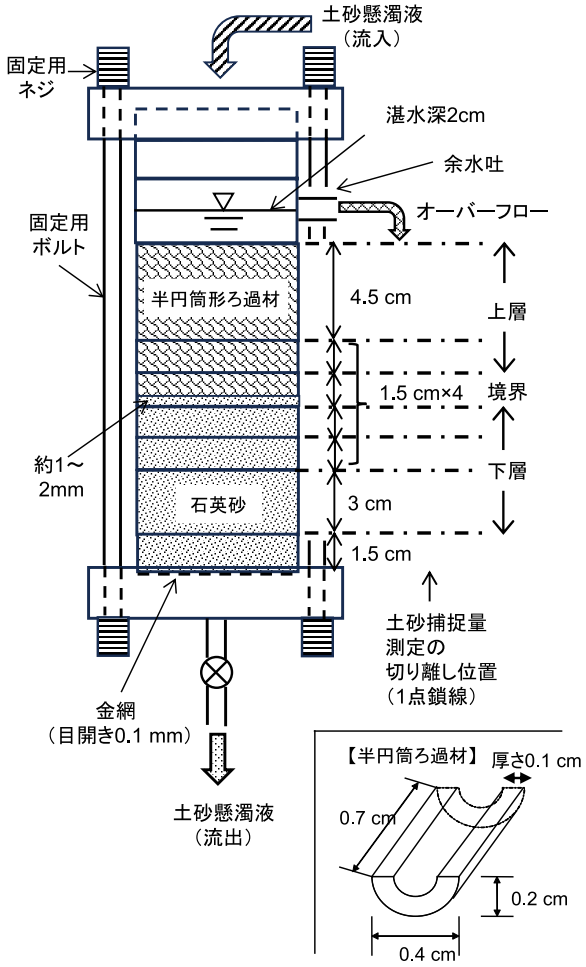


Fig. 2　二層ろ過塔と半円筒形ろ過材.
Double filter layer and semi-cylindrical filter material.

Table 1　実験条件一覧 .
A list of experimental conditions.

流入土砂の粒径（μm）	ろ過打ち切り時間（分）	土砂懸濁液採取時刻（分）	
		流量 · 土砂濃度測定用	粒径分布測定用
70	60	0, 10, 20,30, 60	60
70	120	0, 10, 20, 30, 60, 90,120	120
70	240	0, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240	240
10	60	0, 10, 20, 30, 60	60
10	120	0, 10, 20, 30, 60, 90, 120	120
10	240	0, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240	240

* 各処理につき，Fig. 1 に示す二連で反復した

懸濁液中の土砂の粒径分布の変化を避けるため，ろ過層表面からの湛水深が約 2 cm となるようにした．ろ過塔は二層の二連（反復）とし，内径 7.5 cm，高さ 1.5，3.0，4.5 cm のアクリル製中空円筒（以下，カラム）を Fig. 2 のように積み重ねたものとした．

2.1.2 ろ過材及び流入土砂

二層ろ過の上層と下層にはそれぞれ半円筒ろ過材（Fig. 2，ポリ塩化ビニル製，比重 1.16）及び粒径 0.1 ～ 0.2 mm の石英砂（型番 80 ～ 150 メッシュ）を用いた．流入土砂として市販の木節粘土（伊賀木節粉末，三光鉱山比重 2.6）を脱気した蒸留水（以下，「脱気水」と記す）に投入し，ストークスの沈降法則に基づき，最大粒径 70 μm（以下，「粒径 70 μm」と記す）及び 10 μm（以下，「粒径 10 μm」と記す）の土砂懸濁液を作成し，脱気水を加えて土砂濃度を約 4,600 mg L^{-1} に調整してタンクに投入した．

2.1.3 ろ過打ち切り時間の設定

二層ろ過における上層，境界及び下層における土砂の捕捉とこれに伴う懸濁液の粒径分布の時間的変化を明らかにするため，ろ過の打ち切り時間（以下，「打ち切り時間」と記す）を 60，120 及び 240 分の 3 条件に設定した（Table 1）．

2.1.4 ろ過実験手順

マリオット管の出口をろ過塔の流出口に接続し，下から脱気水を供給して，湛水中で石英砂を深さ約 8 cm，半円筒ろ過材を深さ約 7.5 cm 充填した．その際，石英砂層の上端が層の境界のカラムに約 1 ～ 2 mm 食い込むように充填して，後述する土砂捕捉量測定のためのカラムの切り離しを容易にした（Fig. 2）．ろ過材充填後，下部から脱気水を供給して，石英砂の破砕粒子などの不純物を余水吐からオーバーフローさせて除去した．その後，マリオット管の出口をろ過塔最上部に設置し，前報と同様に浄水施設における 2 次ろ過の流出フラックス（約 6×10^{-3} cm s^{-1}，流量換算で約 0.26 cm^3 s^{-1}）となるようにバルブを調整して脱気水を供給した後，マリオット管を閉じて脱気水の供給を停止すると同時に，タンクからペリスタポンプによって土砂懸濁液の流入を開始し，その時刻を 0 とした．土砂懸濁液の流入フラックスは，タンクから懸濁液をろ過塔に輸送するチューブ内の土砂の沈積を防ぐため，約 1.27×10^{-2} cm s^{-1}（流量換算で約 0.56 cm^3 s^{-1}）とした．その後，流入，余水吐からのオーバーフロー（以下，「オーバーフロー」と記す）及び流出土砂懸濁液を，流量及び土砂濃度測定用と粒径分布測定用に分けて，Table 1 に記す時刻に採取した．前者は炉乾燥して流量及び土砂濃度を測定し，後者は 2.2 に記す粒径分布測定に供した．

その後，Table 1 に記す時刻で土砂懸濁液の流入を停止してろ過を打ち切り，バルブを絞ってろ過塔に残った懸濁液を 1 時間以上かけて下端から流出させて除去した．その後，Fig. 2 に示す位置でカラムを切り離し，各カラムに含まれる土砂とろ過材を目開き 74 μm の篩に投入して湛水中で手で攪拌し，ふるいを通過した固形物を捕捉された土砂とみなした．うち，ろ過層表面から 6 cm の捕捉部位を上層，その下 1.5 cm の捕捉部位を境界，その下 6 cm の捕捉部位を下層として区分した（Fig. 2）．上層と境界に捕捉された土砂を別々に 500 cm^3 のポリ容

器に入れ，一部を粒径分布測定，残りを炉乾燥による質量測定に供し，粒径分布用に分けた土砂量を補正して捕捉量とした．下層に捕捉された土砂は全て炉乾燥による質量測定に供し，捕捉量とした．

ここで，ろ過の打ち切り後にろ過塔に残った懸濁液を下端から除去する過程で上層，境界及び下層における土砂の捕捉は継続する．懸濁液の除去ではバルブを絞り，ろ過の打ち切り前より低い流出フラックスとなっており，捕捉される土砂量はろ過の打ち切り前より若干多くなる可能性があるが，ろ過の打ち切り前の流出フラックスの下で捕捉される量との差は小さいと考え，前述の手順に従った測定値を土砂捕捉量とした．

また，下層に捕捉された土砂を粒径分布測定に供しなかった理由は以下のとおりである．この捕捉部位では土砂の量より石英砂の量がはるかに多く，目開き 74 μm のふるい上に湛水して石英砂と土砂を分けるために手でかき混ぜる必要があるが，その際に水がわずかに白濁し，きわめて細かい石英砂の破片が土砂に混入することが避けられなかった．この程度の石英砂の混入が土砂の質量に及ぼす影響は小さいと考えられたが，2.2 に記す粒径分布測定では細かい粒径クラスの測定値に影響を及ぼす可能性が考えられた．

2.2 粒径分布測定

2.2.1 測定装置

一般的な粒径分布測定方法である比重計法，ピペット法で測定に必要な土砂の乾燥質量は各々約 65 g，10 g であるが，2.1.4 に記した粒径分布測定用試料の土砂の乾燥質量は 15 mg ～ 10 g であり，これらの方法では統一した粒径分布測定ができない．そこで本研究では，測定に必要な土砂の乾燥質量が約 10 mg ～ 10 g の範囲であるレーザー回折／散乱式粒子径分布測定装置（LA-950，堀場製作所，以下「本装置」と記す）を粒径分布測定に用いた．本装置では，懸濁液中の土粒子に半導体レーザー光（赤色光，波長 650 nm）及び LED が発する青色光（波長 405 nm）が照射され，その散乱角と散乱光の強度が前方，側方及び後方に配置された検出器によって測定される．測定される散乱光強度は検出器の配置と粒径により，以下の Mie の式で表される．

$$I(\theta) = I_0 \frac{\lambda^2 (i_1 + i_2)}{8\pi^2 R^2} \tag{1}$$

（1）式において，$I(\theta)$ は散乱角 θ における散乱光強度，I_0 は入射光強度，λ は入射光の波長，R は光の発信位置から検出位置までの距離，i_1 および i_2 は，粒子の相対屈折率，粒子径，レーザー光の波長をパラメータとして含む関数である．各検出器による測定結果は，本装置に接続されたパソコン内の専用ソフトウェアを介して粒径分布に変換される．本装置により測定される粒径の範囲は 0.01 ～ 3,000 μm，測定結果は 92 の粒径にクラス分けされ，体積ベースの粒径加積曲線もしくは粒径分布曲線として出力される．

2.2.2 レーザー回折／散乱法による粒径分布測定における屈折率の最適化

レーザー回折／散乱法による粒径分布測定に影響を及ぼす主な要因は，粒子の相対屈折率（複素数，以下「屈折率」と記す）と赤色光の透過率である（椿 · 早川, 2001）．うち，屈折率は粒径分布の測定結果に及ぼす影響が大きいことが指摘されており，純物質の屈折率が最適とは限らず，測定機種に依存する一種の装置定数であるとされている（椿 · 早川, 2001）．一方，透過率が小さい，すなわち粒子濃度が大きいと，ある粒子に当たったレーザーの散乱光が別の粒子に当たって散乱光の角度が大きくなる結果，測定される粒径分布は細粒側にシフトすることが指摘されている（椿 · 早川, 2001）．ただし，透過率が粒径分布に及ぼす影響の程度は屈折率に比べて小さい（椿 · 早川, 2001）．

以上のことから，本研究では透過率をメーカーが推奨する 80 ～ 90 % の範囲で調整し，木節粘土に対する最適な屈折率を以下の手順で試行錯誤により検討した．

1) 粒径を調整していない木節粘土の粒径分布を農業土木分野で一般的に用いられる比重計法により測定し，本装置を用いた測定における屈折率最適化の基準とした．
2) はじめに，実部のみの屈折率を用いて粒径加積曲線を求め，比重計法の粒径加積曲線に適合するかを検討した．十分な適合性が得られないと判断された場合，比重計法の粒径加積曲線との偏差平方和の平均を適合度の基準として，「実部固定，虚部変動」，「虚部固定，実部変動」，「実部固定，虚部変動」の順に検討し，比重計法の粒径加積曲線と最も良く適合する屈折率の実部と虚部を決定した．

3. 結果及び考察

3.1 ろ過実験結果

3.1.1 打ち切り時間ごとの流量と濃度の反復結果

粒径 70 μm，打ち切り時間 60，120，240 分における流入，オーバーフロー，流出流量の経時変化の反復結果を各々 Fig. 3(a) ～ (c) に，流入，オーバーフロー，流出土砂濃度の経時変化の反復結果を各々 Fig. 3(d) ～ (f) に示す．3 通りの流量の反復間の相対誤差の平均は，3 通りの打ち切り時間全てにおいて 2.5 % 未満であった．また，3 通りの土砂濃度の反復間の相対誤差の平均は，打ち切り時間 60 分のオーバーフローのみ約 8 % であった以外は 3 % 未満であった．以上より，反復誤差はごく小さく，二連で行った粒径 70 μm のろ過実験では十分な再現性があると判断された．

次に，粒径 10 μm の場合の 3 通りの打ち切り時間における流量及び濃度の経時変化の反復結果を，それぞれ Fig. 4(a) ～ (c) 及び Fig. 4(d) ～ (f) に示す．3 通りの流量の反復間の相対誤差の平均は，打ち切り時間 120 分の

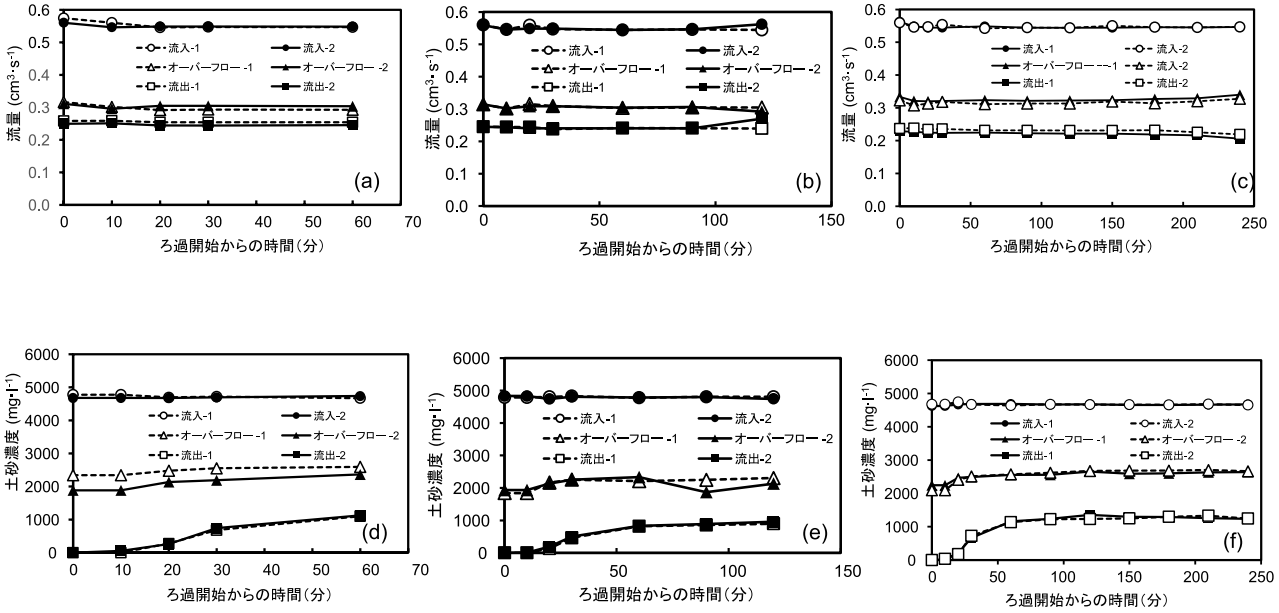


Fig. 3　打ち切り時間ごとの流量及び土砂濃度の経時変化の反復結果（70 μm）.
Repeated results of temporal change in flow rate and particle concentration at close time of 60, 120 and 240 min (70 μm）.

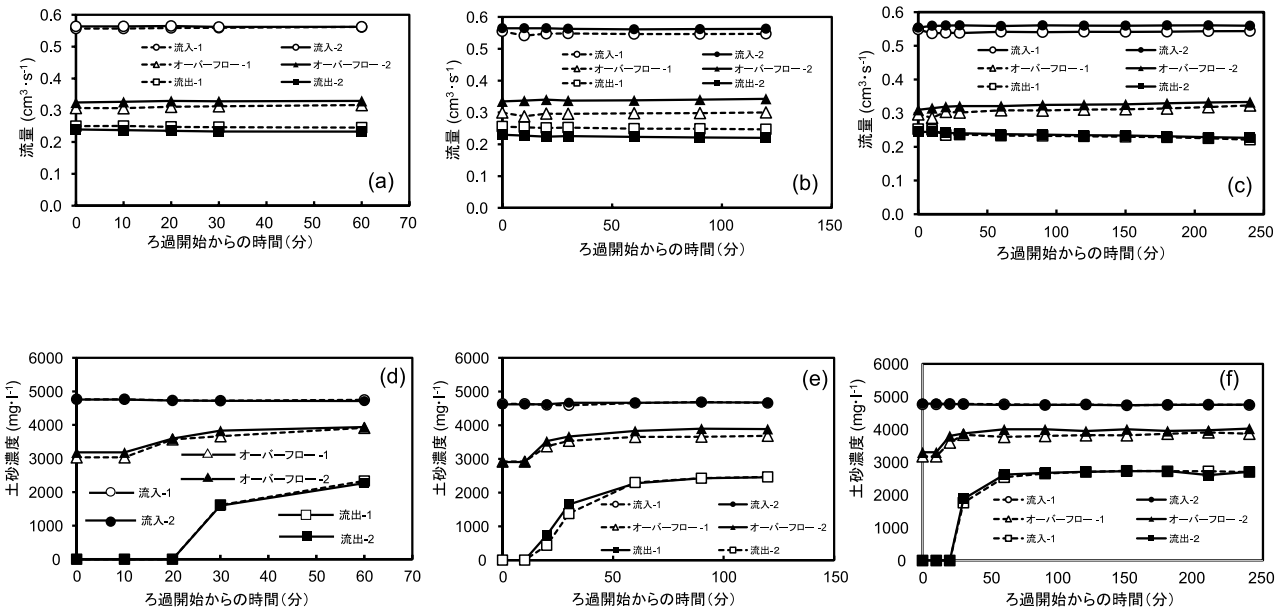


Fig. 4　打ち切り時間ごとの流量及び土砂濃度の経時変化の反復結果（10 μm）.
Repeated results of temporal change in flow rate and particle concentration at close time of 60, 120 and 240 min (10 μm）.

オーバーフローと流出において約 6 % であった他は 3 % 未満であった．また，3 通りの土砂濃度の反復間の相対誤差の平均は，3 通りの打ち切り時間全てにおいて 2.5 % 未満であった．以上より，反復誤差はごく小さく，二連で行った粒径 10 μm のろ過実験では十分な再現性があると判断された．

上述の検討に基づき，これ以降は二連のうち一方の結果を記す．

3.1.2 3 通りの打ち切り時間における流量と濃度の経時変化の連続性

粒径 70μm，3 通りの打ち切り時間を同一のグラフにまとめた流量の経時変化を Fig. 5(a) に，土砂濃度の経時変化を Fig. 5(b) に示す．複数のデータがあるろ過開始から 120 分までの各採取時間を対象に，打ち切り時間 240 分の流量と土砂濃度の測定値を基準として相対誤差を計算した．その結果，3 通りの流量の相対誤差の平均は 2.5 % 以下，土砂濃度の相対誤差の平均は流入で約 1 %，オーバーフローで約 7 %，流出で約 14 % であった．流出土砂濃度の相対誤差により，3.1.4 に記す流出土砂量の打ち切り時間 60 分及び 120 分の計算値は約 14 % 過小評価されるが，粒径 70 μm の場合の流出土砂量は流入，オーバーフロー土砂量及び捕捉される土砂量に比べ

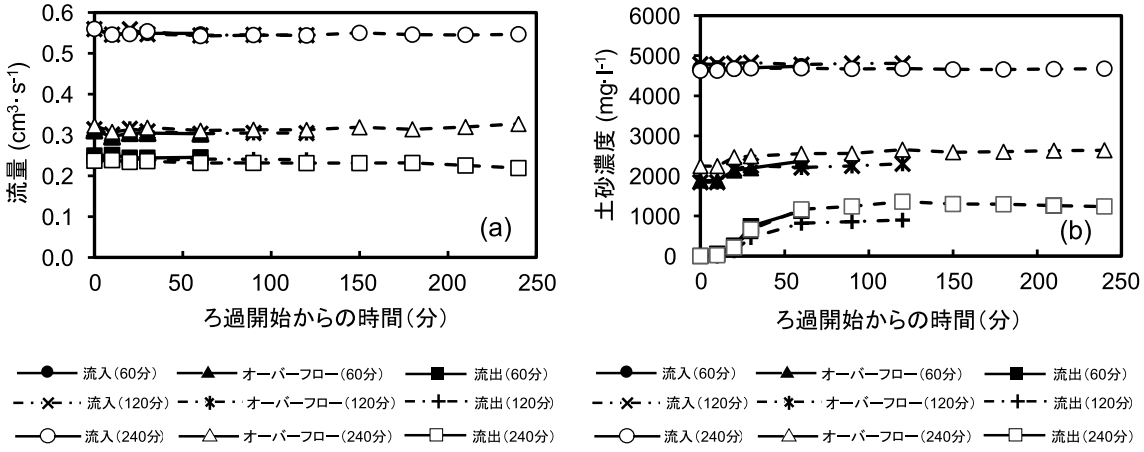


Fig. 5 流量及び土砂濃度の経時変化（70 μm）.
Changes in flow rate and particle concentration over time (70 μm）.

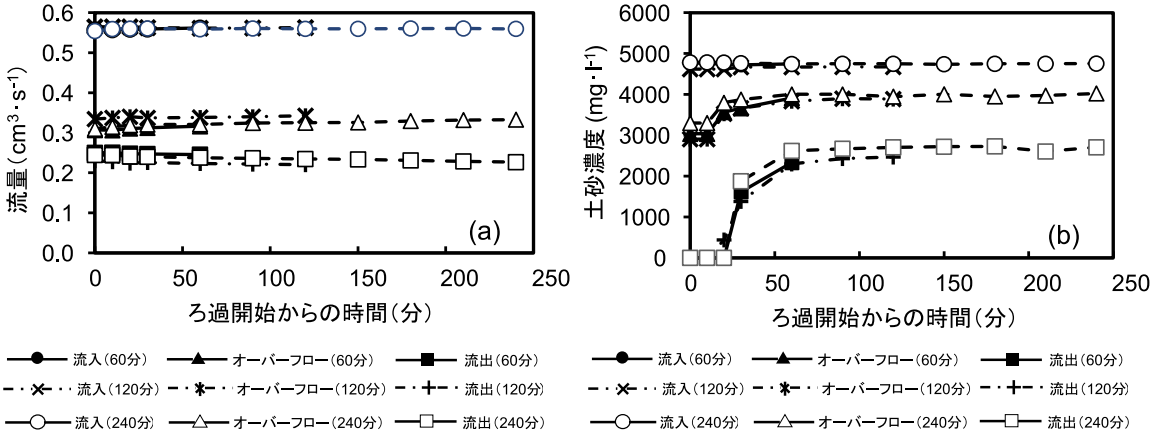


Fig. 6 流量及び土砂濃度の経時変化（10 μm）.
Changes in flow rate and particle concentration over time (10 μm）.

て小さいと予想されたことから，過小評価の影響は小さいと判断した．これらのことから，3 通りの打ち切り時間における流量と濃度は時間的に連続した変化とみなせると判断した.

次に，粒径 10 μm，3 通りの打ち切り時間を同一のグラフにまとめた流量の経時変化を Fig. 6(a) に，土砂濃度の経時変化を Fig. 6(b) に示す．粒径 70 μm の場合と同様な手続きで相対誤差を計算した結果，3 通りの流量の相対誤差の平均は対象とした時間において 3 % 以下，土砂濃度の相対誤差の平均は流入で約 1 %，オーバーフローで約 3 %，流出で約 7 % であった．これらのことから，3 通りの打ち切り時間における流量と濃度を時間的に連続した変化とみなした.

以上の検討から，打ち切り時間 60，120 分の実験結果は，打ち切り時間 240 分の実験結果の途中経過を表すとみなして，次項以降の結果と考察を記述した.

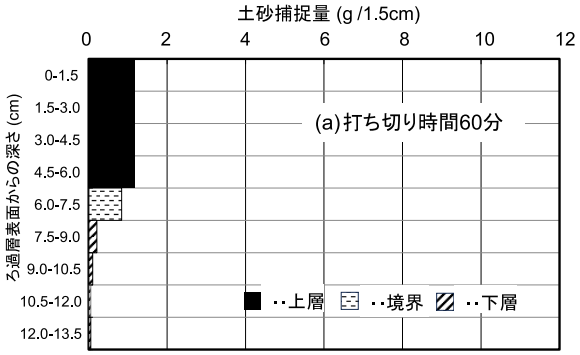
3.1.3 土砂捕捉量の鉛直分布

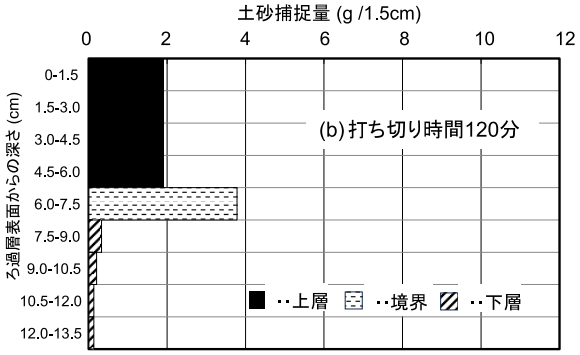
粒径 70 μm，3 通りの打ち切り時間における土砂捕捉量の鉛直分布を Fig. 7(a) ～ (c) に示す．図から，ろ過の初期には上層における土砂捕捉が卓越するが（Fig. 7(a)），時間の経過とともに上層における土砂捕捉が頭打ちとなり，土砂の捕捉部位が境界に移行する過程が窺える（Fig. 7(b) 及び (c)）.

次に，粒径 10 μm，打ち切り時間 60，120，240 分における土砂捕捉量の鉛直分布を Fig. 8(a) ～ (c) に示す．図から，ろ過開始から 240 分まで上層と境界の両方での捕捉土砂量は増加傾向にあり，打ち切り時間 240 分での境界での捕捉量の増大が顕著であった.

3.1.4 土砂収支

ろ過開始から各打ち切り時間までの流入土砂量は, Fig. 5 及び Fig. 6 の各観測時刻間での流入土砂濃度の平均に観測時刻間の流入流量を乗じ，これを打ち切り時間全体で合計することにより計算することができる．オーバーフロー土砂量及び流出土砂量も，これと同様な手続きで計算することができる．このようにして求めた打ち切り時間ごとの流入，オーバーフロー，流出土砂量に上層，





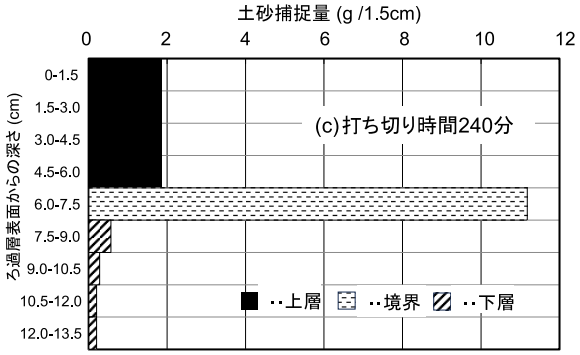
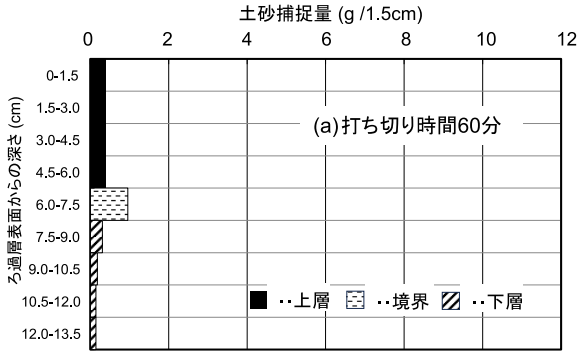
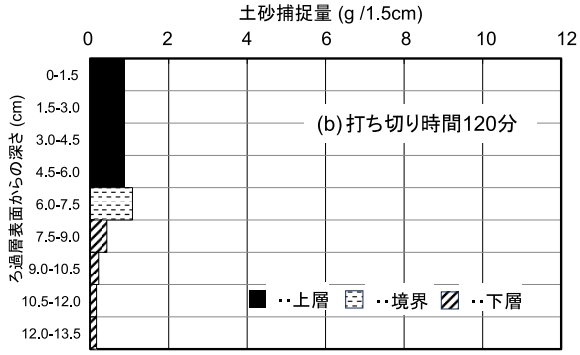


Fig. 7 土砂捕捉量の鉛直分布の経時変化（70 μm）.
Vertical distribution of trapped sediment weight over time (case of 70 μm).





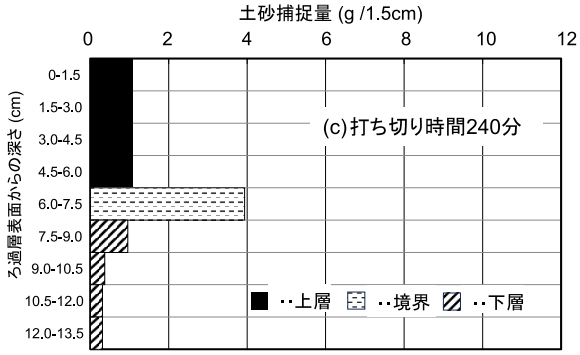


Fig. 8 土砂捕捉量の鉛直分布の経時変化（10 μm）.
Vertical distribution of trapped sediment weight over time (case of 10 μm).

境界及び下層での土砂捕捉量を加えた粒径 70 μm の土砂収支を Table 2(a) に，粒径 10 μm の土砂収支を Table 2 (b) に示す．流入土砂量からオーバーフロー土砂量を差し引いた値は，ろ過層表面に達した土砂の量であり，以下「正味の流入土砂量」と記す．表から，以下のことが示される．

- 粒径 70 μm と 10 μm の各打ち切り時間における流入土砂量に大きな差はないが，オーバーフロー土砂量は粒径 10 μm の場合が粒径 70 μm より大きかった．この要因は，懸濁液中の土砂に働く力の点から，以下のように考察される．余水吐付近において懸濁液中の土砂に対して「重力＋流出方向の流体力」及び「余水吐への流れに伴う流体力」が作用する．粒径が大きいほど前者の作用が卓越し，粒径が小さいほど後者の作用が卓越するため，粒径が小さい土砂ほど余水吐への流れに乗り，オーバーフローしやすい．この結果，粒径の小さい土砂の割合が大きい粒径 10 μm の方が，粒径 70 μm より多くの土砂がオーバーフローしたと考えられる．
- 粒径 70 μm において，上層，境界及び下層での土砂捕捉量の和（以下,「全土砂捕捉量」と記す）を正味の流入土砂量で除した比率は，打ち切り時間 60 及び 120 分で 86.9 %，240 分で 79.9 % であり，打ち切り時間 240 分まで概ね一定割合の土砂が捕捉された．このことは，ろ過開始後約 60 分から 240 分までの流出濃度が概ね一定で推移した傾向（Fig. 5(b)）と合致した．また，上層と境界での土砂捕捉量の和を全土砂捕捉量で除した比率は，打ち切り時間 60 分で 89.1 %，120 分で 93.5 %，240 分で 93.7 % であり，全土砂捕捉量のほとんどがこれらの部位で捕捉されたことを示している．これは，粗い粒子を多く含む粒径 70 μm において重力沈降やさえぎりと

Table 2　打ち切り時間ごとの土砂収支.
Sediment balance in filtration experiments using double filter layer.

項　目	打ち切り時間（分）		
	60	120	240
① 流入土砂量 （g）	9.37	18.89	36.73
② オーバーフロー土砂量 （g）	2.66	4.82	11.82
③ 正味の流入土砂量（①-②）（g）	6.71	14.07	24.91
④ 土砂捕捉量（上層）（g）	4.27	7.65	7.46
⑤ 土砂捕捉量（境界）（g）	0.92	3.78	11.18
⑥ 土砂捕捉量（下層）（g）	0.64	0.80	1.26
⑦ 流出土砂量（g）	0.50	1.07	3.58
差し引き（③-④-⑤-⑥-⑦）（g）	0.37	0.77	1.44
正味の流入土砂量に対する全捕捉土砂量の比率 (④+⑤+⑥) / ③（%）	86.9	86.9	79.9
全土砂捕捉量に対する上層+境界での土砂捕捉量比率 (④+⑤) / (④+⑤+⑥)（%）	89.1	93.5	93.7

項　目	打ち切り時間（分）		
	60	120	240
① 流入土砂量 （g）	9.54	18.18	38.32
② オーバーフロー土砂量 （g）	3.99	8.48	18.38
③ 正味の流入土砂量（①-②）（g）	5.55	9.70	19.94
④ 土砂捕捉量（上層）（g）	1.57	3.55	4.34
⑤ 土砂捕捉量（境界）（g）	0.96	1.08	3.93
⑥ 土砂捕捉量（下層）（g）	0.78	0.97	1.95
⑦ 流出土砂量（g）	0.99	2.82	7.84
差し引き（③-④-⑤-⑥-⑦）（g）	1.25	1.29	1.86
正味の流入土砂量に対する全捕捉土砂量の比率 (④+⑤+⑥) / ③（%）	59.6	57.7	51.3
全土砂捕捉量に対する上層+境界での土砂捕捉量比率 (④+⑤) / (④+⑤+⑥)（%）	76.4	82.7	80.9

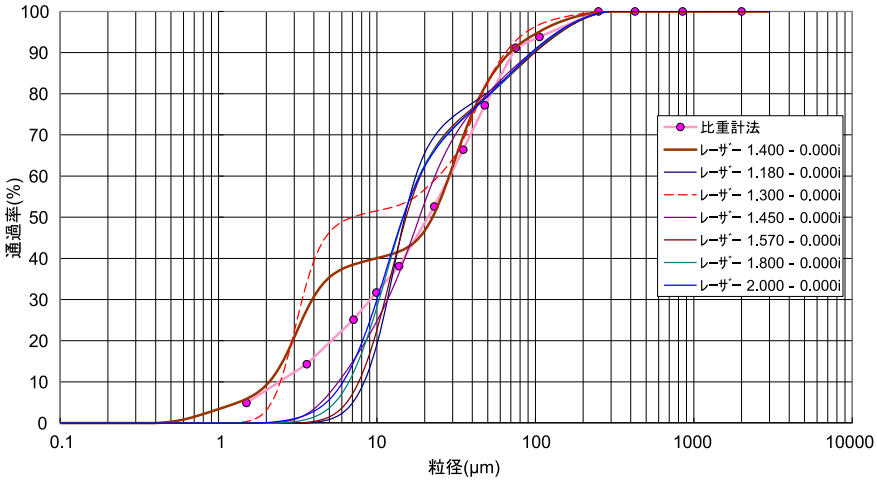


Fig. 9　比重計法による粒径加積曲線と屈折率の実部を変化させたレーザー回折／散乱法による粒径加積曲線との比較（屈折率の虚部を 0 とした場合）.
Comparison between particle size accumulation curve measured by hydrometer method and those measured by laser diffraction scattering particle size distribution analyzer (imaginary part of refraction index = 0).

いった土砂捕捉の機構（海老江, 1975）が作用しやすかったためと考えられる.

- 粒径 10 μm において，全土砂捕捉量を正味の流入土砂量で除した比率は，打ち切り時間 60 分で 59.6 %，120 分で 57.7 %，240 分で 51.3 % であり，打ち切り時間 240 分まで概ね一定割合の土砂が捕捉された．このことは，ろ過開始後約 60 分から 240 分までの流出濃度がほぼ一定で推移した傾向（Fig. 6(b)）と合致した．また，上層と境界での土砂捕捉量の和を全土砂捕捉量で除した比率は，打ち切り時間 60 分で 76.4 %，120 分で 82.7 %，240 分で 80.9 % であり，粗い粒子を多く含む粒径 70 μm より小さかった.
- 差し引きに記された土砂量は，主にろ過を打ち切った後に下端から流出した土砂量とオーバーフローした土砂量から構成されていると考えられた.

3.2 レーザー回折／散乱法における屈折率の最適化に関する結果

3.2.1 屈折率の虚部を 0 として実部を変化させた場合

屈折率の虚部を 0 に固定し，赤色レーザー光の透過率を 80 ～ 90 % の範囲に設定し，実部を 1 ～ 2 の範囲で変化させた粒径加積曲線を比重計法による粒径加積曲線と対比した結果を Fig. 9 に示す．図より，実部 1.4 を除き，2 μm 以下の粒子割合がほとんど 0 であり，比重計法と比較して 2 μm 以下の粒子割合を著しく過小評価した．また，実部 1.4 の粒径加積曲線は，2 μm 以下の粒子割合を一定程度反映したものの，比重計法の測定結果との差が大きいと判断された.

以上より，実部のみで表される屈折率によって，測定対象とした木節粘土の粒径分布を適切に反映することは困難と考えられた．

3.2.2 屈折率の実部を固定して虚部を変化させた場合

3.2.1 に記した結果を踏まえ，屈折率の実部を木節粘土の主要な粘土鉱物であるカオリナイトの文献値である 1.57，赤色レーザー光の透過率を 80 ～ 90 % の範囲に設定し，虚部を 0 ～ 2 の範囲で変化させて，比重計法による粒径加積曲線との差を偏差平方和の平均で表した結果を Fig. 10 に示す．図から，偏差平方和の平均の計算範囲を 30 μm 以下，70 μm 以下，加積曲線全体とした場合には 2 つの極小値が存在する不規則な変化であるが，計算範囲を 13 μm ないし 10 μm 以下とした場合には虚部 0.2 で 1 つの極小値を取ることが分かった．このことから，木節粘土の粒径分布を適切に反映する屈折率の虚部の候補は 0.2 であると判断された．

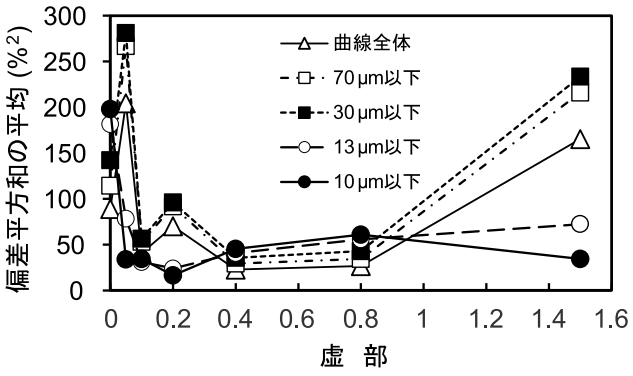


Fig. 10　比重計法による粒径加積曲線と屈折率の虚部を変化させたレーザー回折／散乱法による粒径加積曲線との偏差平方和の平均（屈折率の実部を 1.57 とした場合）．
Mean sum of squared deviations between particle size accumulation curve measured by hydrometer method and those measured by laser diffraction scattering particle size distribution analyzer as affeted by imaginary part of refraction (real part of refraction index = 1.57).

3.2.3 屈折率の虚部を 0.2 として実部を変化させた場合

3.2.2 に記した結果を踏まえ，屈折率の虚部を 0.2 に固定し，赤色レーザー光の透過率を 80 ～ 90 % の範囲に設定し，実部を 1 ～ 2 に変化させて，比重計法による粒径加積曲線との差を偏差平方和の平均で表した結果を Fig. 11 に示す．図から，偏差平方和の平均の計算範囲を 13 μm ないし 10 μm 以下とした場合に実部 1.4 で極小値を取ることが分かった．このことから，実部の候補は 1.4 であると判断された．

以上より，測定対象とした木節粘土の粒径分布を適切に反映しうる屈折率の実部は 1.4，虚部は 0.2 に絞られた．

3.2.4 屈折率の実部を 1.4 として虚部を変化させた場合

3.2.2 及び 3.2.3 の結果を踏まえ，実部を 1.4 に固定し，赤色レーザー光の透過率を 80 ～ 90 % の範囲に設定し，虚部を 0 ～ 2 に変化させて，比重計法による粒径加積曲線との差を偏差平方和の平均で表した結果を Fig. 12 に示す．図から，偏差平方和の平均の計算範囲を 13 μm ないし 10 μm 以下とした場合に虚部 0.2 で極小値を取ることが分かった．

既往の知見によると，レーザー光の波長が数百 nm の場合，屈折率の影響が大きいのは概ね粒径 10 μm 以下の粒子であり，10 μm より大きい粒子への影響は小さいとされている（堀場製作所, 2013）．このことから，粒径 13 μm ないし 10 μm 以下の適合度が最も良好であった屈折

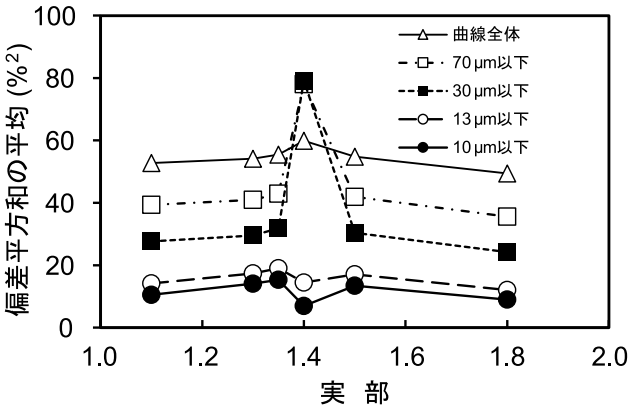


Fig. 11　比重計法による粒径加積曲線と屈折率の実部を変化させたレーザー回折／散乱法による粒径加積曲線との偏差平方和の平均（屈折率の虚部を 0.2 とした場合）．
Mean sum of squared deviations between particle size accumulation curve measured by hydrometer method and those measured by laser diffraction scattering particle size distribution analyzer as affeted by real part of refraction index (imaginary part of refraction index = 0.2).

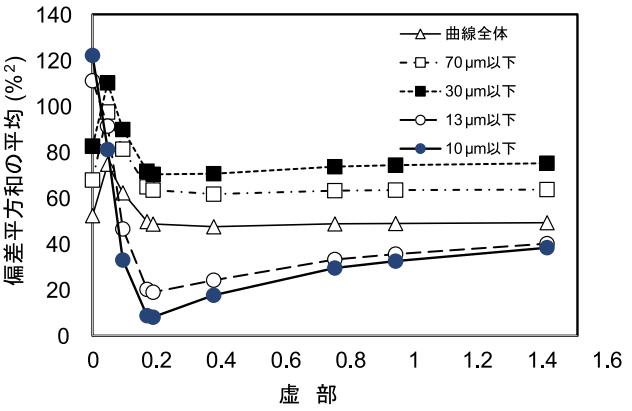


Fig. 12　比重計法による粒径加積曲線と屈折率の虚部を変化させたレーザー回折／散乱法による粒径加積曲線との偏差平方和の平均（屈折率の実部を 1.4 とした場合）．
Mean sum of squared deviations between particle size accumulation curve measured by hydrometer method and those measured by laser diffraction scattering particle size distribution analyzer as affeted by imaginary part of refraction index (real part of refraction index = 1.4).

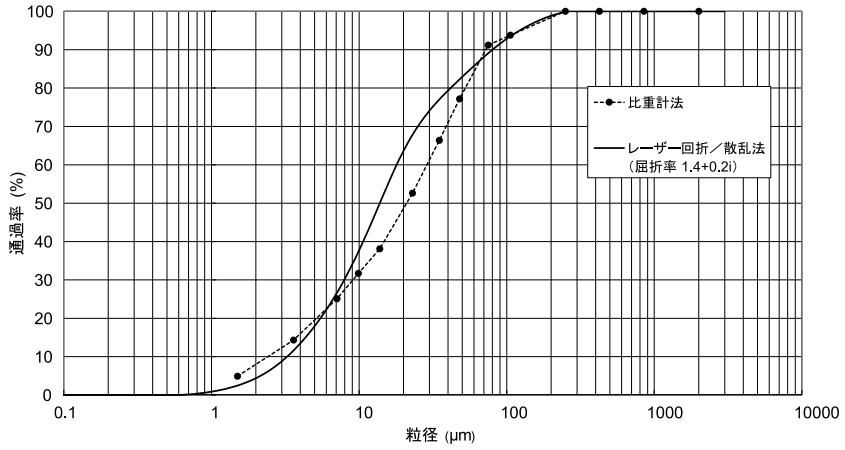


Fig. 13 比重計法による粒径加積曲線と屈折率の最適値を用いたレーザー回折／散乱法による粒径加積曲線との比較.
Comparison between particle size accumulation curve measured by hydrometer method and that measured by laser diffraction scattering particle size distribution analyzer using optimized refraction index.

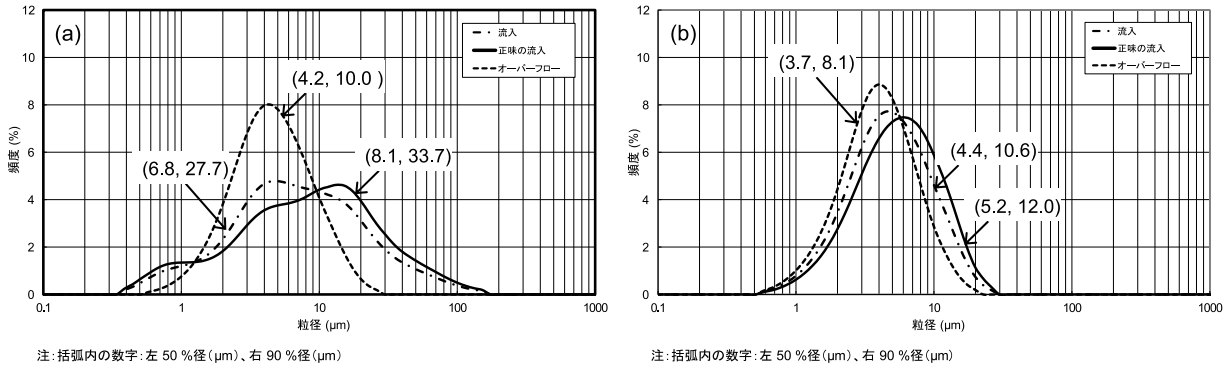


Fig. 14 流入土砂の粒径分布とオーバーフロー土砂の粒径分布の比較例．(a) 粒径 70 μm，打ち切り時間 60 分，(b) 粒径 10 μm，打ち切り時間 60 分.
Examples of comparison among particle size distributions of the influent suspension, the overflow suspension and the net inflow suspension.

率 $1.4+0.2i$ を 3.3 節の粒径分布測定に用いることとした．屈折率の最適値を用いたレーザー回折／散乱法による粒径加積曲線と比重計法による粒径加積曲線との比較を Fig. 13 に示す．図から，屈折率の最適値を用いた粒径加積曲線は，10 μm 以下と 70 μm 以上の粒径では比重計法と概ね一致し，10 ～ 70 μm の粒径では比重計法よりやや高めに外れた．

3.3 流入から流出までの土砂の粒径分布の変化

3.3.1 正味の流入土砂の粒径分布の算出

3.2 で最適化した屈折率を用いて測定した粒径 70 μm 及び 10 μm における流入土砂とオーバーフロー土砂の粒径分布曲線（以下，単に「粒径分布」と記す）の一例を各々 Fig. 14(a) 及び (b) に示す．図からオーバーフロー土砂の粒径分布は，流入土砂のそれより細粒側にシフトしたことが示される．Fig. 14(a) 及び (b) の縦軸は各粒径クラスの体積頻度を表すので．粒子の比重が一定であるとすると質量ベースの頻度と同等である．従って，流入土砂の各粒径クラスの頻度に流入土砂量（Table 2）を乗じることにより，流入土砂の質量ベースの粒径分布が求められる．同様に，オーバーフロー土砂の各粒径クラスの頻度にオーバーフロー土砂量（Table 2）を乗じることにより，オーバーフロー土砂の質量ベースの粒径分布が求められる．そこで，正味の流入土砂の質量ベースの粒径分布は次式で計算することができる．

$$\begin{aligned}&（流入土砂の各粒径クラスの頻度 \times 流入土砂量\\&\quad - オーバーフロー土砂の各粒径クラスの頻度\\&\quad \times オーバーフロー土砂量）\\&\div（流入土砂量 - オーバーフロー土砂量）\end{aligned} \tag{2}$$

（2）式で得られた正味の流入土砂の粒径分布の一例を Fig. 14(a) 及び (b) に示す．図から，正味の流入土砂の粒径分布が流入土砂のそれより粗粒側にシフトしたことが明らかであり，図に示す 50 % 及び 90 % 径からも読み

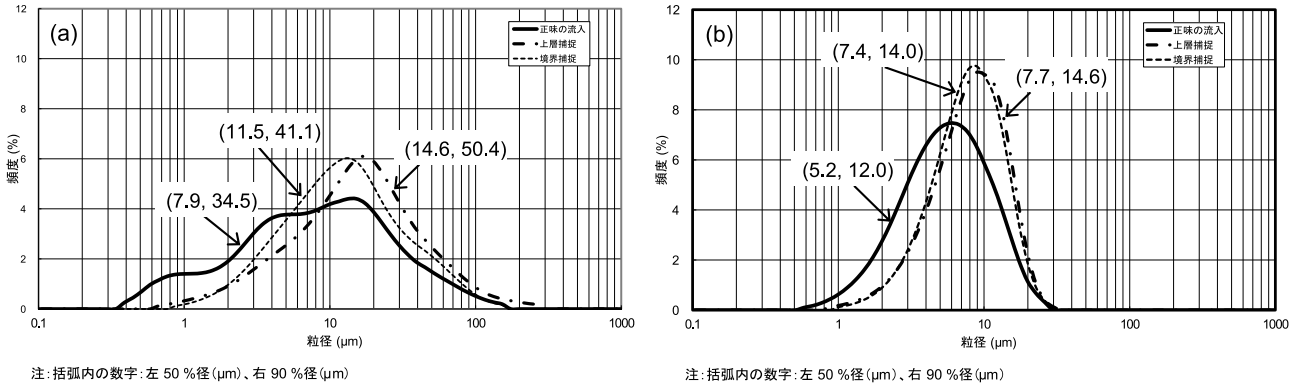


Fig. 15　正味の流入土砂，上層及び境界で捕捉された土砂の粒径分布の比較例．(a) 粒径 70 μm，打ち切り時間 60 分，(b) 粒径 10 μm，打ち切り時間 60 分．
Examples of comparison among particle size distributions of the net inflow suspension, trapped particles in the upper filter layer and those in the boundary .

取れる．そこで，流入土砂と正味の流入土砂の 50 % 及び 90 % 径の一覧を Table 3 に示す．

3.3.2 上層及び境界での土砂捕捉に伴う土砂懸濁液の粒径分布の変化

粒径 70 μm 及び 10 μm において，正味の流入土砂の粒径分布の計算値，及び上層と境界で捕捉された土砂の粒径分布の測定値の一例を各々 Fig. 15(a) 及び (b) に示す．

（2）式と同様な考え方に基づき，境界に達した土砂及び下層に達した土砂の質量ベースの粒径分布は，Table 2 に記す土砂捕捉量を用いてそれぞれ（3）及び（4）式により計算される．

$$\begin{aligned}&(\text{正味の流入土砂の各粒径クラスの頻度}\\&\quad\times\text{正味の流入土砂量}\\&\quad-\text{上層での土砂捕捉量の各粒径クラスの頻度}\\&\quad\times\text{上層での土砂捕捉量})\\&\div(\text{正味流入土砂量}-\text{上層での捕捉土砂質量})\end{aligned}\tag{3}$$

$$\begin{aligned}&(\text{正味の流入土砂の各粒径クラスの頻度}\\&\quad\times\text{正味流入土砂量}\\&\quad-\text{上層での土砂捕捉量の各粒径クラスの頻度}\\&\quad\times\text{上層での土砂捕捉量}\\&\quad-\text{境界での土砂捕捉量の各粒径クラスの頻度}\\&\quad\times\text{境界での土砂捕捉量})\\&\div(\text{正味の流入土砂質量}-\text{上層での土砂捕捉量}\\&\quad-\text{境界での土砂捕捉量})\end{aligned}\tag{4}$$

ここで，Fig. 15(a) に示されるように，粒径の大きいクラスにおいて，正味の流入土砂の頻度が 0 であるにも関わらず，上層の捕捉土砂の頻度が存在する場合が 3 例あった．捕捉された土砂がろ過塔内でフロック化して流入土砂の最大粒径より大きくなる可能性も考えられるが，捕捉された土砂を十分攪拌して本装置に投入する際にフロックは破壊されやすく，その可能性は低いと考えられた．これらの粒径クラスでは差し引きの頻度が負の値を取るが，負の頻度の絶対値の合計は 5 % 未満であり，粒径分布全体に及ぼす影響は小さいと考えられたことから，計算に当たりこれらの粒径クラスの差し引きの頻度を 0 とした．

Table 3　流入土砂及び正味の流入土砂の 50 % 径及び 90 % 径．
D50 and D90 of the influent suspesion and the net inflow suspension.

粒径（μm）	打ち切り時間（分）	50 % 径（μm）		90 % 径（μm）	
		流入土砂	正味の流入土砂	流入土砂	正味の流入土砂
70	60	6.8	7.9	27.7	34.5
	120	7.1	8.7	30.5	34.5
	240	6.6	9.5	30.3	40.2
10	60	4.4	5.2	10.6	12.0
	120	4.1	4.4	9.1	9.8
	240	3.9	4.4	8.8	9.5

粒径 70 μm 及び 10 μm の各打ち切り時間における計算結果を Fig. 16(a) ～ (f) に示す．これらの図より，以下の傾向が示される．

- 粒径 70 μm の打ち切り時間 60 分において，境界に達した土砂の粒径分布は正味の流入土砂の粒径分布から大きく細粒側にシフトした（Fig. 16(a)）．このことは，正味の流入土砂の粗粒部分のほとんどが上層で捕捉されたことを示している．打ち切り時間 120 分では，境界に達した土砂の粒径分布は打ち切り時間 60 分のそれより粗粒側にシフトした（Fig. 16(b)）．このことは，上層で捕捉しきれない正味の流入土砂の粗粒部分が境界に達したことを示してい

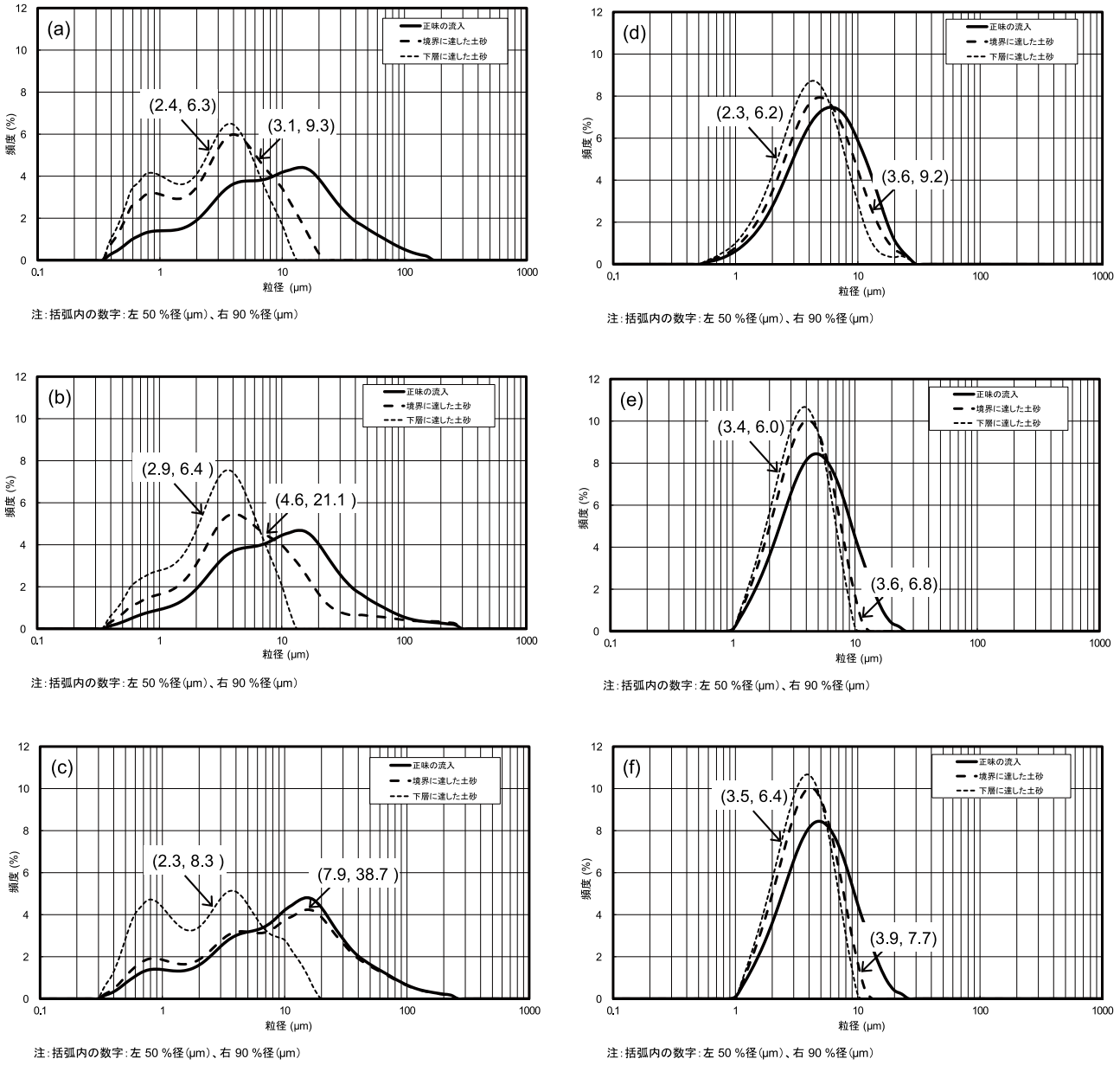


Fig. 16 正味の流入土砂，境界に達した土砂，下層に達した土砂の粒径分布．(a) 粒径 70 μm，打ち切り時間 60 分，(b) 粒径 70 μm、打ち切り時間 120 分，(c) 粒径 70 μm，打ち切り時間 240 分，(d) 粒径 10 μm，打ち切り時間 60 分，(e) 粒径 10 μm，打ち切り時間 120 分，(f) 粒径 10 μm，打ち切り時間 240 分．
Particle size distributions of the net inflow suspension, the suspension reaching the boundary and the suspension reaching the lower layer.

る．打ち切り時間 240 分では，境界に達した土砂の粒径分布は，正味の流入土砂のそれとほぼ一致した（Fig. 16(c)）．このことは，上層での土砂捕捉が限界に達し，正味の流入土砂のほとんどが上層を通過して境界に達したことを示している．上層での土砂捕捉が限界に達した要因の一つとして，一度捕捉された土砂が剥離する現象が指摘されている（海老江, 1976）．本研究では，土砂は主に凹部が上を向いた半円筒ろ過材に堆積して捕捉されると考えられる．ろ過の時間の経過に伴い，捕捉された土砂の堆積厚さが増加して，新たな土砂が一時的に捕捉されても剥離しやすくなり，捕捉の限界に達したと考えられる．以上より，3.1.3 に記した粒径 70 μm での土砂捕捉部位の移行現象は，粒径分布の時間変化と合致した．

次に，粒径 10 μm では，境界に達した土砂の粒径分布はいずれの打ち切り時間でも正味の流入土砂より細粒側にシフトしており（Fig. 16(d) ～ (f)），上層は打ち切り時間 240 分を通じて土砂を捕捉した．Table 2 より，粒径 10 μm の打ち切り時間 240 分の上層での捕捉量は粒径 70 μm の打ち切り時間 60 分のそれとほぼ等しいことから，ろ過開始後 240 分において上層での土砂捕捉は限界に達していなかったと考えられる．

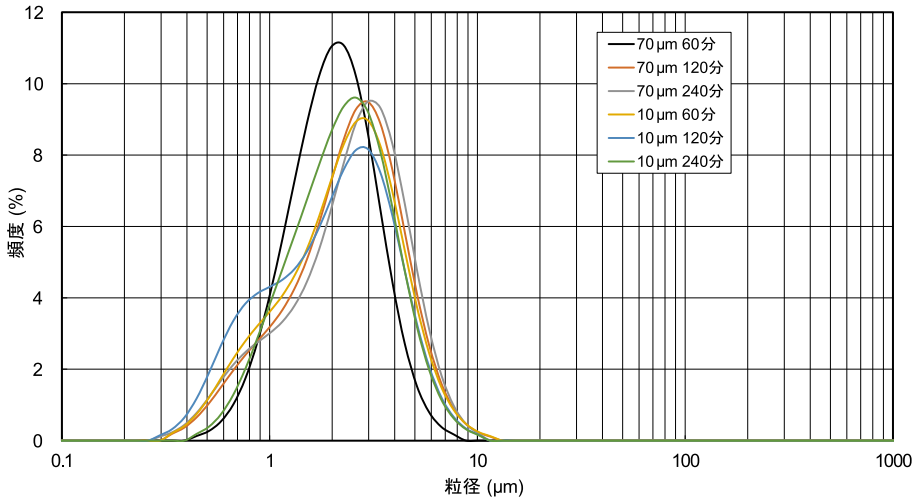


Fig. 17 流出土砂の粒径分布.
Particle size distributions of the outflow suspension of all the experimental conditions.

Table 4 下層に達した土砂及び流出土砂の 50 % 径及び 90 % 径.
D50 and D90 of the suspesion reaching the lower layer and the effluent.

粒径 (μm)	打ち切り時間 (分)	50 % 径 (μm)		90 % 径 (μm)	
		下層に達した土砂	流出土砂	下層に達した土砂	流出土砂
70	60	2.4	1.9	6.3	3.1
	120	2.9	2.3	6.4	4.5
	240	2.3	2.4	8.3	4.6
10	60	2.3	2.2	6.2	4.4
	120	3.4	2.0	6.0	4.2
	240	3.5	2.1	6.4	4.2

- 下層に達した土砂の粒径分布は，粒径 70 μm 及び 10 μm の打ち切り時間のいずれの場合でも境界に達した土砂の粒径分布より細粒側にシフトした．このことは，境界が打ち切り時間 240 分を通じて上層で捕捉されなかった土砂の捕捉部位として機能したことを示している．また，下層に達した土砂の 90 % 径は 6 ～ 8 μm 以下であり，下層の等価間隙径 60 ～ 79 μm（原口, 2024）と比較して小さく，下層内部に侵入しうる土砂の粒径分布に変化した．

3.3.3 流出土砂の粒径分布

粒径 70 μm 及び 10 μm，打ち切り時間 60，120，240 分における下層に達した土砂及び流出土砂の 50 % 及び 90 % 径を Table 4 及び Fig. 17 に示す．表から，下層に達した土砂に対する流出土砂の 90 % 径の低下が明らかである．このことは，下層に達した土砂のうち相対的に粗い粒径が下層で捕捉された結果，Fig. 17 に示されるように，6 種類の粒径分布が概ね類似したと考えられた．

4. まとめ

上層に粗大な半円筒ろ過材，下層に粒径の細かい石英砂を配した二層ろ過層に，最大土砂粒径 70 μm 及び 10 μm，土砂濃度約 4,600 mg L^{-1} の木節粘土の懸濁液を流入土砂としたろ過実験を行い，流入及び流出土砂懸濁液の濃度及び粒径分布の経時変化，上層，境界，下層に捕捉された土砂量と粒径分布の経時変化の測定を通じて，ろ過の一連の過程の特徴を検討した．粒径分布測定には，屈折率を最適化した上で，レーザー回折／散乱式粒子径分布測定装置を用いた．得られた主要な結果は以下のとおりである．

I 粒径分布測定に用いたレーザー回折／散乱式粒子径分布測定装置の屈折率の最適値を，比重計法により求めた粒径加積曲線を基準として試行錯誤的に検討し，$1.4+0.2i$ を得た．

II 粒径 70 μm では，ろ過時間 240 分のうち最初の 60 分まで上層が粒径の粗い土砂の主要な捕捉部位として機能したが，ろ過時間 120 分以降粗い粒径の土砂の捕捉部位は次第に境界に移行し，ろ過時間 240 分で上層は土砂の捕捉部位としてほぼ機能せず，主要な捕捉部位が境界に移行する現象が確認された．一方，粒径 10 μm では，ろ過時間 240 分を通じ，上層と境界の両方が捕捉部位として機能した．これらの結果について，上層における土砂捕捉の限界の点から考察した．

III 上層で捕捉されなかった土砂のうち，主として粗い粒径の土砂が境界で補足され，下層へ達した土砂の粒径分布はその内部に侵入しうるほど細粒側にシフトした．

IV 下層に達した土砂のうち相対的に粗い粒径が下層で捕捉されたことにより，粒径 70 μm 及び 10 μm 並

びにろ過の経過時間によらず，流出土砂の粒径分布は概ね類似した．

農地から流出する土砂は高濃度でかつ，その最大粒径及び粒径分布は降雨イベントに依って多様である（大澤ら, 2004）．このような実態を踏まえ，前報では，単層では短時間で目詰まりする粒径を有する流入土砂に対して粗大な上層を有する二層ろ過の有効性を見出した．本報では，上記のⅡ～Ⅳに記した知見を得て，二層ろ過層の各捕捉部位の役割を粒径分布の点から明らかにしたことに意義があると考える．しかし，流出土砂の粒径分布が特定されても，最大粒径の異なる流入土砂に対する捕捉率を予測することは困難である．すなわち，上層と境界において粒径の粗い土砂のみが選択的に捕捉される訳ではなく，下層内部に侵入しうる細かい土砂の一部も捕捉されるからである．これには捕捉された土砂が新たな捕捉部位として機能するという既往の知見（例えば，吉田 · 中野, 1995）が関係していると思われる．農地から流出する土砂に対する二層ろ過を用いた流出予測に関して，さらなる研究の余地があると考える．

謝辞

ろ過実験及び粒径分布測定の遂行とデータの取りまとめに当たり，鹿児島大学籾井和朗名誉教授，同大学修論生の松坂琢実氏，卒論生の松永正光氏には多大なご協力を賜った．ここに記して謝意を表する．また，引用文献に記した「現場で役立つ粒子計測技術」は，屈折率の実験計画 · 遂行に役立った．本書を紹介していただいた中野恵子博士に謝意を表する．

引用文献

Clark, S.C., Lawler, D.F. and Gushing, R.S. (1992): Contact filtration: particle size and ripening. Journal of American Water Works Association, 84–12: 61–71.

Darby, J.L. and Lawler, D.F. (1990): Ripening in depth filtration: Effect of particle size on removal and head loss. Environmental Science & Technology, 24–7: 1069–1079.

Darby, J.L., Lawler, D.F. and Wilshusen, T.P. (1991): Depth filtration of waste water: particle size and ripening. Research Journal of Water Pollution Control Federation, 63–3: 228–238.

海老江邦雄 (1975): 急速ろ過ろ層における抑留物質の挙動 — 懸濁粒子輸送の卓越因子の検討 —. 水道協会雑誌, 409: 25–46.

海老江邦雄 (1976): 急速ろ過ろ層における抑留物質の挙動 — 定常ろ過時の剥離とその作用機構の検討 —. 水道協会雑誌, 507: 20–34.

原口暢朗 (2024): 沖縄地域における浸透性沈砂池を活用した赤土流出軽減に向けた二層ろ過に関する実験的研究. 土壌の物理性, 158: 5–19.

堀場製作所 (2013): 粒子径 · 粒度分布測定 【基礎編】. https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Scientific/Exhibitions/2013/JASIS2013/NewTechnologyDocument/JASIS2013_PSA_Basis.pdf （2025.1.31 確認）

穂積 準, 吉田英樹, 上田浩伸, Michel, N.B.T and de Silva, D.G.V. (1995): 2 階床直接沪過における合成粗大炉材の沪過特性. 水道協会雑誌, 725: 13–23.

日下達朗, 篠崎桂一, 深田三夫, 西山壮一 (2004): 多孔質素材の利用による赤土系土壌の浄化機能. 農土論集, 229: 1–5.

Mackie, R.I. and Bai, R. (1992): Suspended particle size distribution and the performance of deep bed filters. Water Research, 26–12: 1571–1575.

中 達雄, 穴瀬 真, 鬼塚宏太郎 (1992): 渦動排砂管を用いた造成地内の流出土砂制御工法の実用化. 農土論集, 161: 91–97.

中 達雄, 島崎昌彦, 常住直人, 桐 博英, 臼杵宣春 (1997): 浸透性沈砂池工法による浮遊土砂制御 — 濁水制御のための浸透性沈砂池工法の室内水理実験 (I) —. 農土論集, 190: 113–119.

農林水産技術会議事務局 (2002): 亜熱帯地域での農地からの細粒赤土流出防止技術の確立と海洋生態系への影響解明に関する研究. プロジェクト研究成果シリーズ 380, pp. 56.

大澤和敏, 酒井和人, 吉永安俊, 田中忠次, 島田正志 (2004): 農業流域での多点同時観測による浮遊土砂動態の検討. 農土論集, 229: 101–108.

塩野隆弘, 原 貴洋, 山元伸幸, 原口暢朗, 生駒泰基 (2007): 草生帯およびソバ栽培導入による営農的赤土流出防止対策. 農業農村工学会誌, 75(9): 25–28.

椿淳一郎, 早川 修 (2001): 現場で役立つ粒子計測技術, pp.161. 日刊工業社, 東京.

吉田修一郎, 中野政詩 (1995): 砂層への粘土粒子の集積. 農土論集, 176: 69–76.

要　　旨

本研究は，上層に粗大な半円筒ろ過材，下層に粒径の細かい石英砂を配した二層ろ過層を対象として，ろ過層内での土砂の捕捉を通じた土砂懸濁液の粒径分布の深さ及び時間的な変化を検討することを目的とした．最大粒径 70 及び 10 μm，濃度約 4,600 mg L^{-1} の土砂懸濁液を流入させた後，60, 120, 240 分でろ過を打ち切り，上層，境界，下層における土砂捕捉量の経時変化，及びレーザー回折／散乱式粒子径分布測定装置を用いた土砂懸濁液及び捕捉された土砂の粒径分布を測定して，土砂懸濁液の粒径分布の深さ及び経時変化を検討した．その結果，(i) 最大粒径 70 μm の場合，ろ過の経過に伴って主要な捕捉部位が上層から境界へ移行したこと，(ii) 上層と境界における土砂の捕捉によって，下層に達した土砂の粒径分布は下層内部に侵入しうるほど細粒側にシフトしたこと，(iii) 下層では相対的に粗い土砂が捕捉された結果，流出土砂の粒径分布は土砂懸濁液の最大粒径及びろ過の経過時間によらず概ね類似したこと，を明らかにした．

キーワード：二層ろ過，土砂の捕捉，土砂の粒径分布，レーザー回折／散乱式粒子径分布測定装置