J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 158, p. 5～ 19 (2024)

論　文
Original Paper

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

原口暢朗 [1]

Filtration experiment of double filter layer to reduce the red soil runoff using a settling basin equipped with an underdrain and a filter layer in Ryukyu Islands

Noburo HARAGUCHI[1]

Abstract: In Ryukyu Islands, to reduce the red soil runoff, a settling basin equipped with an underdrain and a filter layer was proposed and it is expected that finer soil particles are trapped in the filter later by filtration. However, rapid clogging in the filter layer caused by trapped soil particles which shortens filtration duration is a problem to be solved. In this paper, filtration experiment was conducted using double filter layer composed of a large artificial semi-cylindrical filter material in the upper and quartz sand in the lower, to study an extent of filtration duration compared to the single filter layer of quartz sand. Clay suspension of three levels of particle size (maximum diameter of 70, 10, 6 μm) and two levels of suspension concentration (1,500 and 4,500 mg L^{-1}) was put into the single and the double filter layer and temporal changes of effluent flux, water pressure profile were measured. The time when effluent flux decreases to 70 % of the initial flux was regarded as filtration duration. The results showed that in cases of the clay particle diameter of 70 μm and 10 μm, effluent flux decreased rapidly in the single filter layer caused by clogging at the surface and less clay particles were trapped. In contrast, in the double filter layer, effluent flux decreased gradually, and many clay particles were trapped both in the upper filter layer and on the surface of the lower filter layer. Filtration duration of double filter layer was about 4 ～ 26 times longer than that of the single filter layer. In case of the clay particle diameter of 6 μm, clay particle size was too small to be trapped in the upper filter layer and the particles were trapped inside the quartz sand layer. In this case, filtration duration of double filter layer was about only 1.6 times longer than that of the single filter layer. From these results, the double filter layer composed of a large filter material in the upper and the sand filter in the lower is a promising method to extent filtration duration in case that the particle size in the suspension is large compared to the pore diameter in the lower filter.

Key Words : sediment runoff reduction, settling basin, double layer filtration, large filter material, filtration duration

[1] 元農研機構 農村工学研究部門
2024 年 8 月 11 日受稿　2024 年 10 月 30 日受理

1. はじめに

沖縄地域において，豪雨時の土壌侵食により発生する土砂が農業排水路，沈砂池を経て海洋に達し，沿岸域の生態系や水産業に深刻な影響を及ぼしている（大見謝, 2003）．このため，土砂流出の軽減は当該地域における重要な課題である．これまで，土砂の主要な発生源である畑地の排水改良による雨水の浸透促進（農林水産技術会議事務局, 2002），草生帯の設置（塩野ら, 2007），農業排水路に流出した土砂の渦動管による捕捉（中ら, 1992）など，様々な土砂流出軽減対策が行われてきた．渦動管によって捕捉される土砂の最小粒径は 2 mm が限界であり，これより小さい粒径，特に粒径 74 μm 以下の土砂の流出軽減は依然として課題であった（中ら, 1992）．

粒径 74 μm 以下の土砂の流出軽減のため，中ら（1997）は，流出経路の末端に位置する沈砂池の底部に暗渠を，その上に砂層を配して，土砂の重力沈降の促進と砂層におけるろ過による土砂捕捉を狙いとする浸透性沈砂池を提案した．中ら（1997）は，浸透性沈砂池を模したアクリル製のモデル水槽において，暗渠の上に 3 種類のろ過材（粒径 0.25 ～ 2.0 mm の砂，2.0 ～ 9.5 mm 及び 9.5 ～ 40 mm の礫）を 25 cm 充填したろ過層に，最大粒径 74 ～ 2,000 μm の土砂を 3 段階の濃度（2,500，5,000 及び 10,000 mg L^{-1}）で 5 ～ 20 分流入させ，土砂の重力促進効果，ろ過材での土砂捕捉による暗渠流出水の土砂濃度低減効果を検討した．その結果，礫を用いたろ過層で土砂は捕捉されなかったが，砂を用いたろ過層では土砂が捕捉され，暗渠流出水の土砂濃度は約 600 mg L^{-1} まで低減されたと報告した．しかし，延べ 40 分間の土砂の投入により，砂層の透水係数は初期の 70 % まで低下したことから，土砂の捕捉に伴う目詰まり対策が課題であると指摘した．日下ら（2004）は，浸透性沈砂池における土砂流出軽減を意図して，ペレット状のろ過材（原文では粒径未記載）を 30 ～ 50 cm 充填したモデルろ過層

に，粒径 74 μm 以下で濃度 1,500 mg L^{-1} の土砂を流入させ，流出濃度の軽減効果を検討した．その結果，ろ過開始から 400 ～ 700 分で土砂流出が発生し，その後流出濃度は単調に増加して 700 ～ 1,000 分で沖縄県規定値の 200 mg L^{-1} を超えた．これらの研究結果は，土砂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を表している．このことから，与えられた土砂粒径 · 土砂濃度の下で土砂捕捉能力に優れ，長時間目詰まりしないろ過材及びろ過層に関して検討の余地がある．

土壌物理学及び農業土木分野においてろ過現象を物理的に検討した既往の研究は，上記した中ら（1997），日下ら（2004）の他，吉田 · 中野（1995）くらいしか見当たらない．他方，水道工学分野では，浄水施設のろ過に関して多くの研究が行われてきた．1 次的な水処理を行う急速ろ過では，粒径 0.45 ～ 0.7 mm の砂を 60 ～ 70 cm 充填したろ過層が標準的であるが（水道設計指針, 2012），早期の目詰まりを生じる場合が少なくない（穂積ら, 1995）．これを改善するため，砂層の上に粒径の粗いろ過材を順に積み重ねた複層ろ過に関する研究が行われた（玉井, 1966; Mohanka, 1969）．複層ろ過の中で最も単純な構造である二層ろ過では，上層に砂より粗い粒状のろ過材を用いることにより，砂単層に比較してろ過持続時間が延長されることが明らかにされた（篠原 · 網谷, 1971）．しかし，上層でも少なからぬ水頭損失があり（篠原 · 網谷, 1971），上層に用いるろ過材に改善の余地があると指摘された（穂積ら, 1995）．このため，上層に円筒形（丹保ら, 1984）や繊維状（中野, 1993）などの特殊な形状の合成ろ過材を用いた二層ろ過に関する研究が行われた．例えば，穂積ら（1995）は，上層に半円筒形の粗大ろ過材を配した二層ろ過の実験を行った結果，上層における水頭損失が極めて小さく，単層と比較したろ過持続時間が約 1.5 ～ 4 倍となったと報告した．

このように，水道工学分野において，単層及び二層ろ過に関して多くの研究が行われているが，そこで得られた知見を浸透性沈砂池におけるろ過に直接適用することは以下の理由により困難と考えられる．第一に，水道工学分野で採用されているろ過材の粒径は 0.3 ～ 1 mm の範囲に限定され，凝集剤でフロック化される流入土砂の粒径は不明である．一方，沈砂池に流入する土砂の最大粒径は 0.25 ～ 100 μm の範囲であり（大澤ら, 2004），土砂捕捉に有効であるろ過材の粒径は不明確である．第二に，沈砂池に流入する土砂懸濁液の濃度は約 1,500 ～ 8000 mg L^{-1} であり（大澤ら, 2004），水道工学分野が対象とする濃度（最大で 100 mg L^{-1}）とは大きく異なる．

以上のことから，本報では，沈砂池に流入する土砂を想定して，上層に粗大ろ過材を配した二層ろ過による単層ろ過と比較したろ過持続時間の延長及び土砂捕捉量の増大効果を実験的に検討するとともに，その結果を土砂の粒径とろ過材の間隙径の関係から考察することを目的とする．

2. 方法

2.1 実験装置及び材料

2.1.1 実験装置

実験装置を Fig. 1 に示す．装置は，所定の粒径 · 濃度に調整した土砂懸濁液の貯留タンク（以下，「タンク」），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，2 種類のろ過塔（単層，二層），及び水圧測定用の水マノメーター（以下，「マノメーター」）で構成される．

2.1.2 ろ過筒

Fig. 2 に単層ろ過塔，Fig. 3 に二層ろ過塔を示す．各ろ過塔は内径 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 及び Fig. 3 のように積み重ねて，上下でシャフトとネジで固定した．カラムの継ぎ目からの漏水防止のため，カラムの上部と下部に切り込みを設け，O リングを嵌めた．各ろ過塔の上部は中空であり，最下部の流出口の上部に流量調整用のバルブ（以下，「バルブ」）を接続した．定圧ろ過とするため，ろ過塔の上部に余水吐を配置した．ろ過の進行に伴う鉛直方向の水圧分布の変化を測定するため，Fig. 2 及び Fig. 3 に示す位置でマノメーターに接続した．以下では，単層ろ過塔に 1 種類のろ過材が充填されたろ過層を「単層」，二層ろ過塔に 2 種類のろ過材が充填されたろ過層を「二層」と記す．

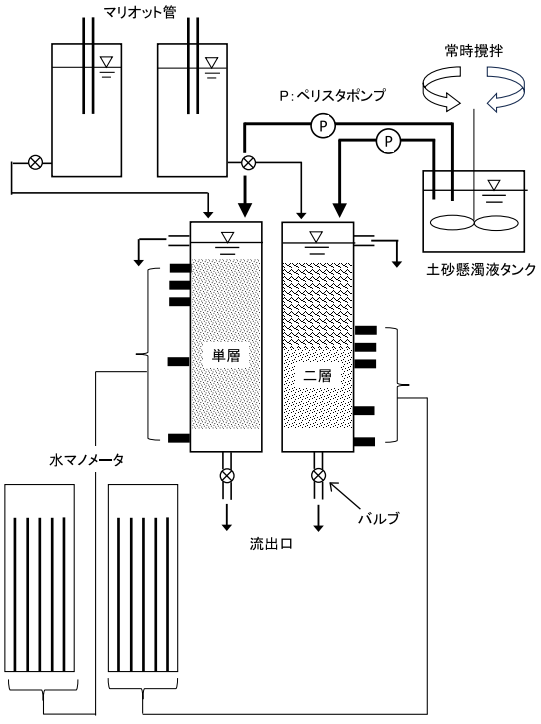


Fig. 1 （実験装置の全体図.
Overall diagram of experimental setup.

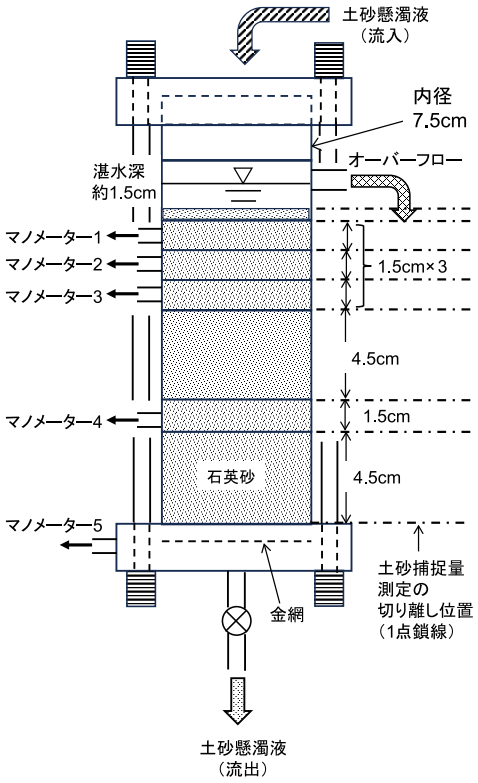


Fig. 2　ろ過塔（単層）.
Single filter layer.

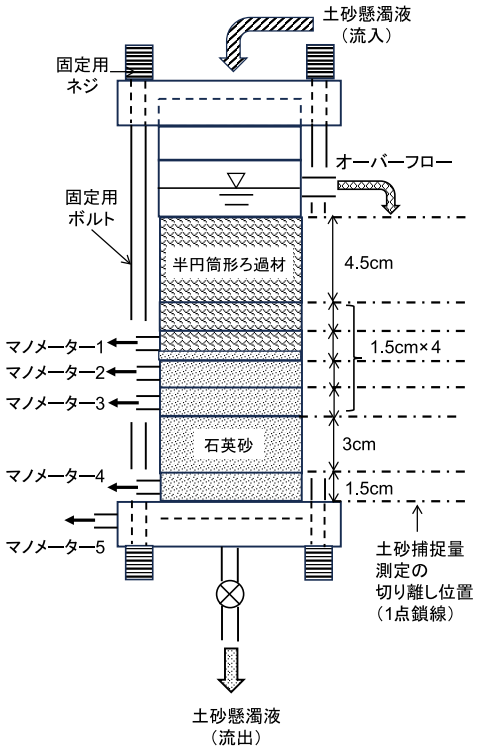


Fig. 3　ろ過塔（二層）.
Double filter layer.

2.1.3 砂ろ過材の粒径の選定に係る予備試験

単層及び二層の下層に用いる砂ろ過材の粒径を選定するため，粒径 0.1 ～ 0.2 mm，0.25 ～ 0.36 mm 及び 0.5 ～ 0.8 mm の 3 種類の石英砂を Fig. 2 の単層ろ過塔に充填し，土砂懸濁液の最大粒径を 30 μm に調整して予備的なろ過実験を実施した．

第一に，マリオット管の出口をろ過塔の流出口に接続し，バルブを開けて下から純水を供給して，湛水中に 3 種類の石英砂を投入し，Fig. 2 に示すように約 15.8 cm の高さまで充填した．石英砂の充填密度は粒径 0.1 ～ 0.2 mm では 1.46 g cm^{-3}，0.25 ～ 0.36 mm 及び 0.5 ～ 0.8 mm では 1.44 g cm^{-3} であり，間隙率は約 0.43 であった．その後，石英砂層が膨張しないよう下部から約 7.5×10^{-3} cm s^{-1} のフラックスで純水を供給して，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．

第二に，粒径の異なる 3 種類の石英砂単層に流入する土砂として市販の木節粘土（伊賀木節粉末 NET 25 kg 三光鉱山，比重 2.6）を用いた．木節粘土を実験に用いた理由は，a）木節粘土の主要な粘土鉱物は，沖縄地域で土砂流出が問題になっている国頭マージの主要な粘土鉱物と同じカオリナイトであり，沈降特性に大差ないと考えられたこと（渡嘉敷ら, 1982; 日本セラミックス協会, 2023），b）市販の木節粘土は，産地から採掘された原料に種々の材料（陶石，珪砂など）を合成して一定の品質に調整されており， 2.1.5 で記す土砂懸濁液の再現性が保証されると考えられたことによる．土砂懸濁液の最大粒径が沈砂池に流入する土砂粒径の範囲（0.25 ～ 100 μm）である 30 μm になるよう，以下の方法で調整した．球形の土粒子を仮定したとき，ストークスの法則により，流体中の土粒子の沈降速度 v は次式で表される．

$$v = \frac{d^2(\rho_s - \rho_w)g}{18\eta} \tag{1}$$

（1）式において，d は土粒子の直径，ρ_s，及び ρ_w はそれぞれ土粒子及び流体の密度，g は重力加速度，η は流体の粘性係数である．粘土粒子が温度 25 °C の水中で沈降する場合，$\rho_s = 2.6 \times 10^3$（kg m^{-3}），$\rho_w = 1.0 \times 10^3$（kg m^{-3}），$g = 9.807$（m s^{-2}），$\eta = 0.894 \times 10^{-3}$（kg m^{-1}s^{-1}）を（1）式に代入して整理すると，v（m s^{-1}）と d（m）との関係は次式で表される．

$$v \cong 1 \times 10^6 d^2 \tag{2}$$

（2）式より，粒径 30 μm の土粒子が 10 cm 沈降するのに要する時間は 1.9 分である．そこで，20 リットルのポリバケツに 1 kg の木節粘土と純水を投入し，撹拌機で 5 分攪拌した後，1.9 分自由沈降させ，上澄み 10 cm を採取することにより，最大粒径 30 μm となる土砂懸濁液を得た．次いで，大澤ら（2004）の観測結果を参考にして，土砂濃度が約 5,000 mg L^{-1} になるように純水を加えて Fig. 1 のタンクに投入した．その後，バルブを閉じて，マリオット管の出口をろ過塔最上部に設置し，浄

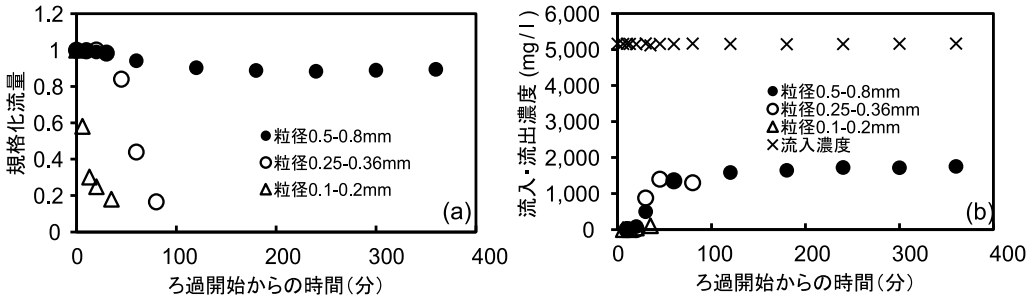


Fig. 4 石英砂粒径の選択に係る予備試験.
Results of preliminary filtration experiment for selecting the quautz sand size.

水施設における 2 次ろ過（緩速ろ過）の流出フラックス（約 6×10^{-3} cm s^{-1}）となるようにバルブを調整して純水を供給した．マリオット管を閉じて純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，流出フラックス及び流出濃度の経時変化を観測した．その結果を Fig. 4（a）に示す．Fig. 4（a）の縦軸（規格化流量）は土砂懸濁液流入後の流出フラックスを初期フラックス（純水供給時）で除して規格化した値である．粒径 0.1 ～ 0.2 mm の石英砂ではろ過開始後約 6 分で初期フラックスの約 70 %，粒径 0.25 ～ 0.36 mm の石英砂ではろ過開始後約 50 分で初期フラックスの約 70 % まで低下したのに対し，粒径 0.5 ～ 0.8 mm の石英砂ではろ過開始後約 360 分でも初期フラックスの約 90 % に維持された．一方，流出土砂濃度は，粒径 0.1 ～ 0.2 mm の石英砂では約 100 mg L^{-1}（流入濃度の約 2 %），粒径 0.25 ～ 0.36 mm の石英砂では約 1,300 mg L^{-1}（流入土砂濃度の約 25 %），粒径 0.5 ～ 0.8 mm の石英砂では約 1,700 mg L^{-1}（流入土砂濃度の約 33 %）であった（Fig. 4（b））．本報では，上層に用いる粗大ろ過材のろ過持続時間延長効果を明確にするため，流出フラックスが最も短時間で低下した粒径 0.1 ～ 0.2 mm の石英砂を単層及び二層の下層のろ過材として用いることとした．

粒径 0.1 ～ 0.2 mm の石英砂層の水分特性曲線を以下の手順で求めた．（i）高さ 5 cm，内径 7.5 cm のカラムを Fig. 1 のろ過塔に 10 段（計 50 cm）積み重ねて石英砂を充填し，Fig. 1 に示すマリオット管の下端を流出口に接続してバルブを開けて下から純水を供給して飽和した，（ii）バルブを閉じてマリオット管を外した後，流出口にビニルチューブをつないで流出高さをカラム下端に合わせてバルブを開けて排水させた，（iii）排水終了後，カラムを切り離して各カラムに残った水の量を体積で除して体積含水率を算出するとともに，各カラムからカラム下端までの距離（以下，「サクション」）と体積含水率との関係を求めた（Fig. 5）．別途測定した石英砂の飽和透水係数は約 2×10^{-2} cm s^{-1} であった．

2.1.4 二層の上層に用いる粗大ろ過材

二層ろ過層の上層に用いる粗大ろ過材に関して，穂積ら（1995）は，流入土砂濃度 20 mg L^{-1} の条件で，円筒形ろ過材と半円筒形ろ過材の土砂捕捉率を比較し，凹部を持つ半円筒形ろ過材が土砂捕捉に優れていることを見出した．この結果に基づき，半円筒ろ過材（Fig. 6）を二層の上層に用いることとした．単層及び二層ろ過層の厚さは，2.2.3 に記す土砂捕捉量の測定の便宜のため，約 15.8 cm とした（Fig. 2）．二層ろ過層における上層と下層の厚さの比に制約はないため，本研究では約 1 : 1 とした（Fig. 3）．

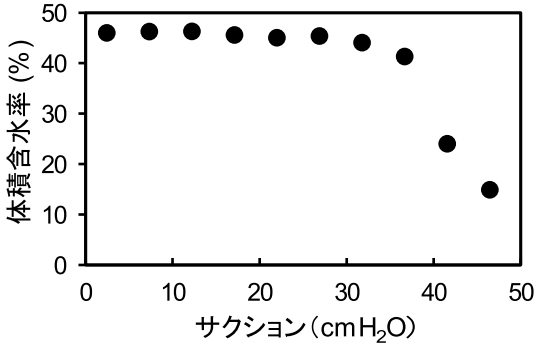


Fig. 5 石英砂の水分特性.
Water retention of the quautz sand.

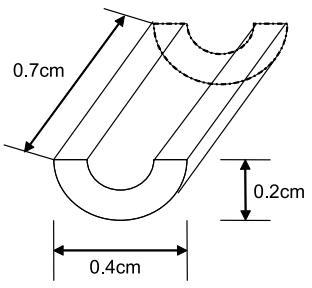


Fig. 6 半円筒ろ過材.
Semi-cylindrical filter material.

2.1.5 流入土砂の粒径及び濃度

前述したように，沈砂池に流入する土砂の最大粒径は 0.25 ～ 100 μm の範囲であり，中でも粒径 74 μm 以下の土砂流出が課題であることから（中ら, 1992），実験に用いる土砂懸濁液の最大粒径として，粒径約 70 μm を採用した（以下，「粒径 70 μm」）．加えて，土砂粒径による二層のろ過持続時間延長効果の違いを検討するため，最大粒径 10 μm 及び 6 μm を採用した（以下，「粒径 10 μm」及び「粒径 6 μm」）．これらの最大粒径を有する土砂懸濁液を 2.1.3 に記した（2）式を用いて以下のように調整した．（2）式より，粒径 70 μm，10 μm，6 μm の粒子が 10 cm 沈降するのに要する時間はそれぞれ 0.34 分，16 分，55 分である．そこで，2.1.3 と同様に 20 リットルのポリバケツに 1 kg の木節粘土との純水を投入し，撹拌機で 5 分攪拌した後，上記の時間自由沈降させ，上澄み 10 cm を採取することにより，最大粒径 70，10，6 μm となる土砂懸濁液を得た．次いで，大澤ら（2004）の観測結果を参考にして，粒径 70 μm 及び 10 μm では土砂濃度約 4,500 mg L^{-1} 及び約 1,500 mg L^{-1}，粒径 6 μm では約 4,500 mg L^{-1} になるように純水を加えてタンクに投入した．実験条件を Table 1 に示す．以下，Fig. 7 から Fig. 11 の実験条件を Table 1 の実験番号で表す．

2.2 実験手順

2.2.1 ろ過開始まで

2.1.3 で記した手順と同様に，下から純水を供給して，Fig. 2 に示すように粒径 0.1 ～ 0.2 mm の石英砂を単層では約 15.8 cm，Fig. 3 に示すように二層では約 8 cm 充填した．二層では石英砂上に湛水しながら，半円筒ろ過材を約 7.5 cm 充填した．石英砂の充填密度は 1.46 g cm^{-3} で間隙率は 0.43，半円筒ろ過材の充填密度は 0.42 g cm^{-3} で間隙率は 0.64 であった．ろ過材充填後，下部から純水を供給して，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，バルブを閉じて，マリオット管の出口をろ過塔最上部に設置し，流出フラックスが約 6×10^{-3} cm s^{-1} となるようにバルブを調整して純水を供給し，この時の 5 個のマノメーターの測定値を初期値として記録した．

2.2.2 ろ過の開始と終了

マリオット管を閉じて純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．以下，単層では 5, 10, 15, 20, 30, 40 分後，これ以降は 10 ～ 15 分ごとに，二層では 5, 10, 15, 20, 30 分後，これ以降は 15 ～ 60 分ごとに流入土砂懸濁液，余水吐からオーバーフローする土砂懸濁液，流出する土砂懸濁液を採取し，単位時間当たりの流量と採取液に含まれる土砂濃度を炉乾燥により測定するとともに，5 個のマノメーターの値を記録した．流出フラックスが純水透水時の 70 % 以下になるまでろ過を継続した後，土砂懸濁液の流入を停止し，バルブを閉じてろ過を打ち切った．本研究では，便宜的に流出フラックスが純水透水時の 70 % になった時刻をろ過持続時間とした．土砂懸濁液の流入中，タンク内での土砂の自由沈降による流入土砂濃度と粒径の変化を防止するため，撹拌機（Photo 1）により継続的に撹拌した．

2.2.3 ろ過終了後における土砂捕捉量の測定

バルブを開いて，ろ過塔に残った懸濁液を 1 時間以上かけて除去した後，Fig. 2 および Fig. 3 に示す位置でカ

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

実験番号	流入土砂の性質		ろ過層
	ストークス径 (μm)	濃度 (mg L^{-1})	
1-1	70	4,500	単層　二層
1-2			単層　二層
2-1	70	1,500	単層　二層
2-2			単層　二層
3-1	10	4,500	単層　二層
3-2			単層　二層
4-1	10	1,500	単層　二層
4-2			単層　二層
5-1	6	4,500	単層　二層
5-2			単層　二層



Photo 1　撹拌機.
A machine for mixing sediment suspension in the tank.

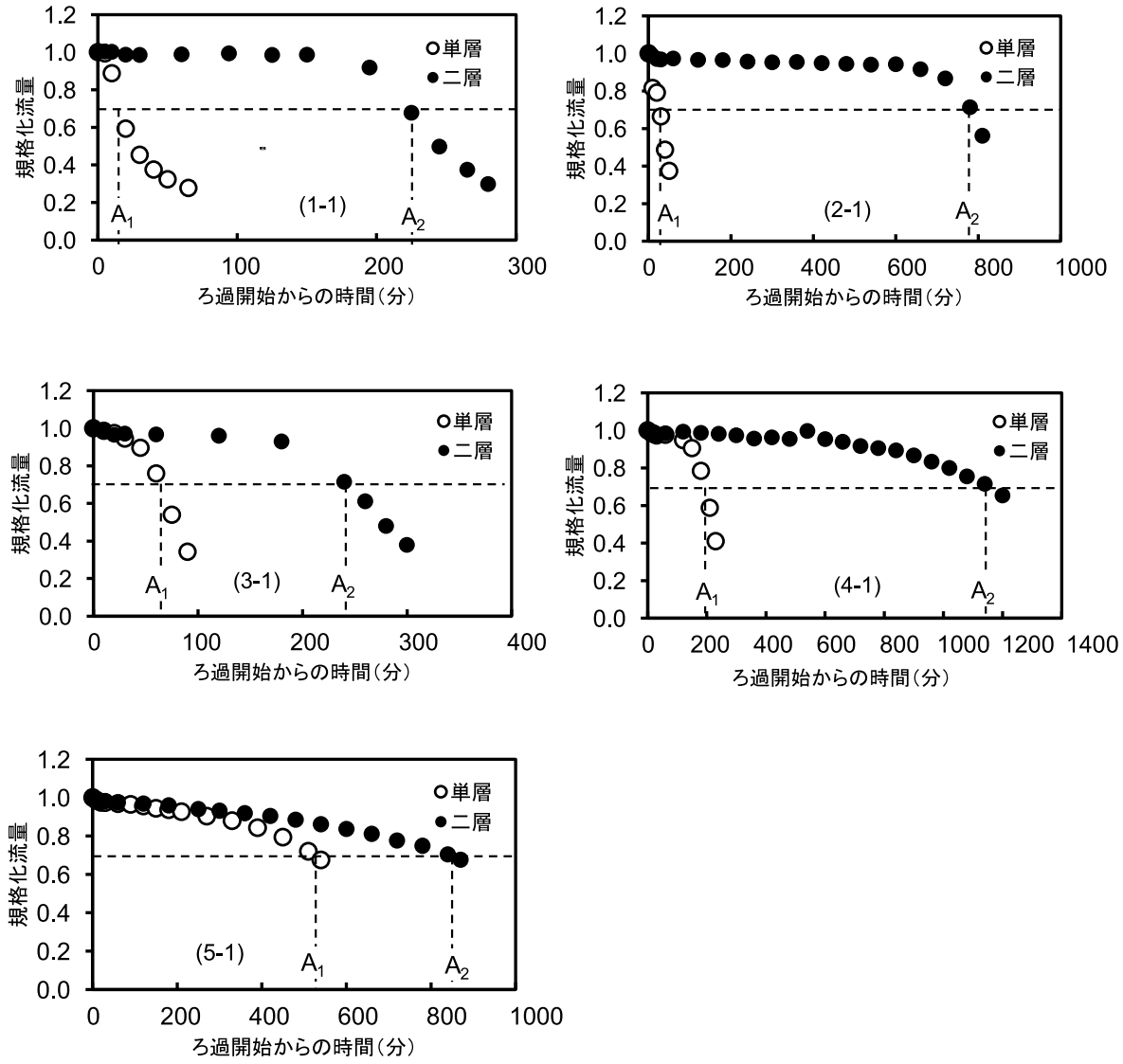


Fig. 7 流出フラックスの経時変化.
Changes in outflow flux over time.

Table 2 ろ過持続時間.
Filtration duration.

実験番号	ストークス径 (μm)	濃度 (mg L^{-1})	ろ過持続時間 (分)*		二層の単層に対する比
			単層 (A1)	二層 (A2)	
1-1	70	4,500	20	225	11.3
1-2			15	225	15.0
2-1	70	1,500	30	780	26;0
2-2			35	780	22.3
3-1	10	4,500	68	250	3.7
3-2			55	250	4.5
4-1	10	1,500	195	1,140	5.8
4-2			150	1,360	9.1
5-1	6	4,500	525	840	1.6
5-2			225	750	3.3

*A1, A2 は，Fig. 7 に示すように，規格化流量が初期の 70 % になったろ過時間を表す

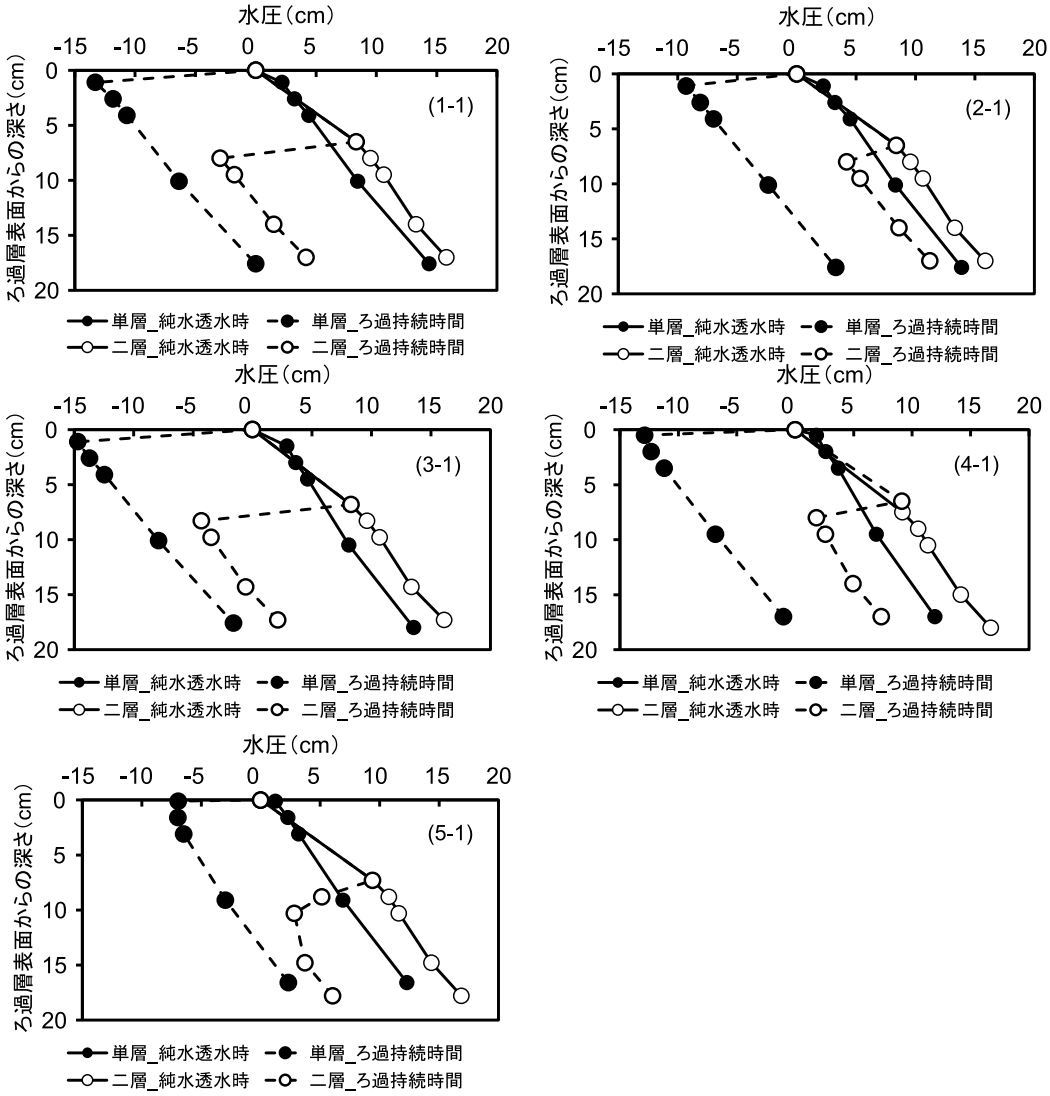


Fig. 8　水圧の鉛直分布.
Vertical distribution of water pressure.

ラムを切り離し，各カラムに含まれる土砂とろ過材を 74 μ m のふるい上で洗い，ふるい通過分を捕捉土砂とみなして，その質量（以下，「土砂捕捉量」）を炉乾燥法により求めた.

3. 実験結果

3.1 流出フラックスの経時変化とろ過持続時間

流出フラックスの経時変化を Fig. 7（1-1）～（5-1）に示す．縦軸は，各観測時間の流出フラックスを初期フラックス（純粋透水時）で除して規格化した値である．図において，ろ過持続時間を単層では点 A_1，二層では点 A_2 で表し，これらに対応する数値を Table 2 に示す．Table 2 から，粒径 70 μm の場合，単層ではろ過開始後，短時間で流出フラックスが急速に低下してろ過持続時間は 20 ～ 30 分であったが，二層ではろ過開始後しばらくの間，流出フラックスは緩慢に低下し，ろ過持続時間は 225 ～ 780 分であり，単層に比較した二層のろ過持続時間の比は約 11 ～ 26 であった．粒径 10 μm の場合，単層ではろ過開始後，比較的短時間で流出フラックスが低下してろ過持続時間は 68 ～ 195 分であったが，二層では粒径 70 μm の場合と同様に流出フラックスは緩慢に低下し，ろ過持続時間は 250 ～ 1,140 分であり，単層に比較した二層のろ過持続時間の比は約 4 ～ 9 であった．一方，粒径 6 μm の場合には，単層及び二層とも流出フラックスは緩慢に低下し，ろ過持続時間は各々 525 及び 840 分であった．単層に比較した二層のろ過持続時間は約 1.6 倍であり，粒径 70 μm 及び 10 μm の場合と比べて二層のろ過持続時間の延長効果は小さかった.

3.2 水圧及び土砂捕捉量の鉛直分布

Fig. 7 に示した流出フラックスの低下要因を考察するため，Fig. 8（1-1）から（5-1）に水圧の鉛直分布を，Fig. 9（1-1 単層）から（5-1 二層）に土砂捕捉量の鉛直分布

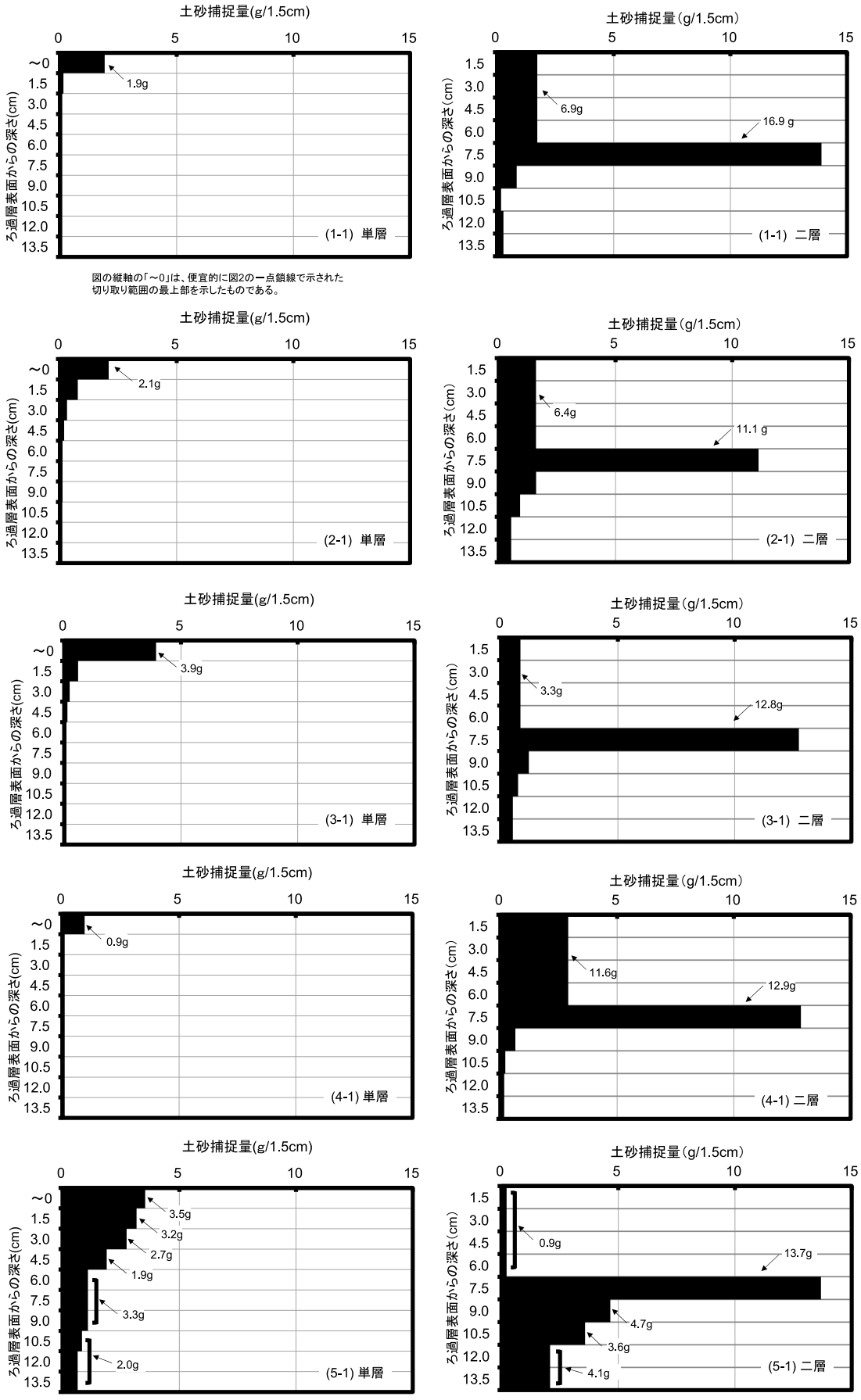


Fig. 9 土砂捕捉量の鉛直分布.
Vertical distribution of trapped sediment weight.

を示す．ここで，ろ過の打ち切り時間はろ過持続時間より大きいため（Fig. 7），鉛直方向各層の土砂捕捉量は，ろ過持続時間における土砂捕捉量を過大評価する．そこで，Fig. 9（1-1 単層）から Fig. 9（5-1 二層）に示す各部位での土砂捕捉量を以下の式により求めた．

ろ過持続時間における各層の土砂捕捉量
＝測定された各層の土砂捕捉量 × ろ過持続時間　(3)
/ろ過の打ち切り時間

粒径 70 μm（Fig. 8（1-1）及び（2-1））と 10 μm（Fig. 8（3-1））の場合，単層では石英砂表層で大きな水頭損失が生じたが，それ以下の層の水頭損失は小さかった．一方，二層の上層での水頭損失はごく小さかった．これは，半円筒ろ過材の凹部に捕捉された土砂は土砂懸濁液の流路となる間隙の径を狭めないためであると考えられる（穂積ら, 1995，図-7）．二層における大きな水頭損失は下層の石英砂表層で生じ，それ以下の石英層の水頭損失は小さかった．これらの結果は，Fig. 9（1-1 単層）から（4-1 二層）に示すように，単層及び二層とも石英砂表層における土砂捕捉量が大きく，それ以下の層における土砂捕捉量がごく小さいことと整合する．一方，流入土砂粒径 6 μm の場合，単層及び二層とも石英砂表層だけでなく，それ以下の層でも水頭損失が生じた（Fig. 8（5-1 単層）及び（5-1 二層））．これは，単層及び二層の石英砂表層のみならず，それ以下の層において少なからぬ土砂捕捉量があることと整合する．

Fig. 9（1-1 単層）と（1-1 二層）を比較すると，二層の下層表面での土砂捕捉量が，同じ表面の単層に比較して顕著に大きかった．また，Fig. 9 の他の実験条件においても同様な傾向であった．二層の下層表面で顕著な土砂捕捉が生じる現象は，水道工学における既往の研究で言及されていない知見であり，4 章で考察する．

3.3 土砂捕捉率

流入，流出及び余水吐からのオーバーフロー土砂濃度の経時変化の一例を Fig. 10 に示す．Fig. 10 から．オーバーフロー土砂濃度は流入土砂濃度より小さかった．これは．単層及び二層の最表面に到達する土砂濃度（以下，「正味の流入土砂濃度」）が流入土砂濃度より大きいことを示している．そこで，（4）式により正味の流入土砂濃度を計算した．

正味の流入土砂濃度＝(流入土砂濃度 × 流入流量
－オーバーフロー土砂濃度 × オーバーフロー流量)　(4)
/流出流量

正味の流入土砂濃度と流出土砂濃度の経時変化の一例を Fig. 11 に示す．Fig. 11 において，2 点の観測時刻の正味の流入土砂濃度の平均に時間間隔を乗じてろ過持続時間（Fig. 11 の C 点）まで足し合わせることにより，正味の積算流入土砂量が得られる．同様な手続きにより，積算土砂流出量が得られる．これらを用いて，土砂捕捉率を以下の式で定義した．

土砂捕捉率
＝(正味の積算流入土砂量 － 積算流出土砂量)　(5)
/(正味の積算流入土砂量)

（5）式による計算結果を Table 3 に示す．Table 3 における規格化した積算流出量（PV）は，積算流出量を 1 PV（1 PV はろ過層上部の湛水面から流出口までの全間隙率で，単層では 462.4 cm^{-3}，二層では 533.8 cm^{-3}）で除した値である．Table 3 から，粒径 70 μm の単層及び粒径 10 μm· 土砂濃度 4,500 mg L^{-1} の単層では，ろ過持続時

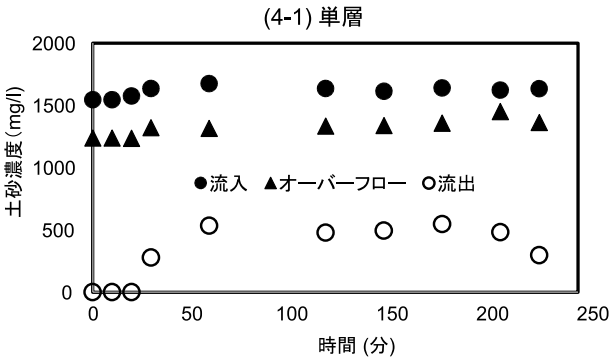


Fig. 10　流入–流出–オーバーフロー濃度の経時変化の一例.
An example of the changes in inflow, overflow and outflow concentration over time.

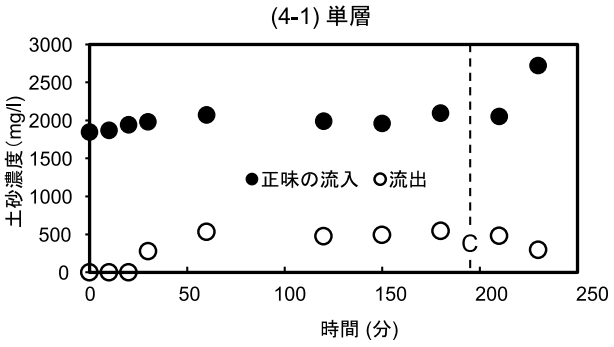


Fig. 11　正味の流入濃度及び流出濃度の経時変化の一例.
An example of the changes in net inflow sediment concentration and outflow concentration over time.

Table 3　土砂捕捉率.
Sediment capture efficiency.

ストークス径 (μm)	流入濃度 (mg L^{-1})	ろ過層	正味の流入濃度 (mg L^{-1})	流出濃度 (mg L^{-1})	規格化した積算流出量 (PV)	土砂捕捉率
70	4,500	単層	7,630	—	0.39	—
		二層	7,570	392	5.3	0.95
70	1,500	単層	2,770	—	0.91	—
		二層	2,750	106	21.4	0.95
10	4,500	単層	6,110	—	2.1	—
		二層	6,860	586	6.5	0.89
10	1,500	単層	2,020	427	6.2	0.77
		二層	2,110	649	30.9	0.68
6	4,500	単層	5,360	2,240	15.1	0.55
		二層	5,790	2,220	21.0	0.57

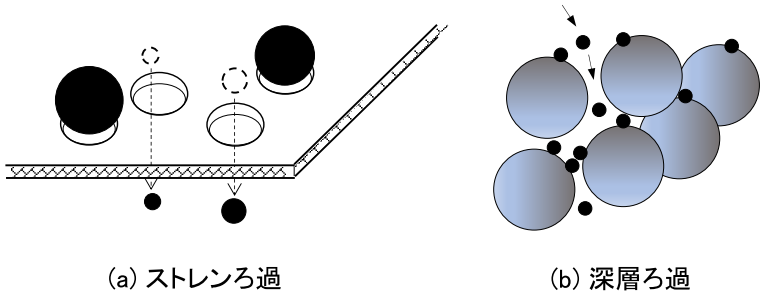


Fig. 12　ストレンろ過と深層ろ過の模式図.
Schematic diagram of strain filtration and deep bed filtration.

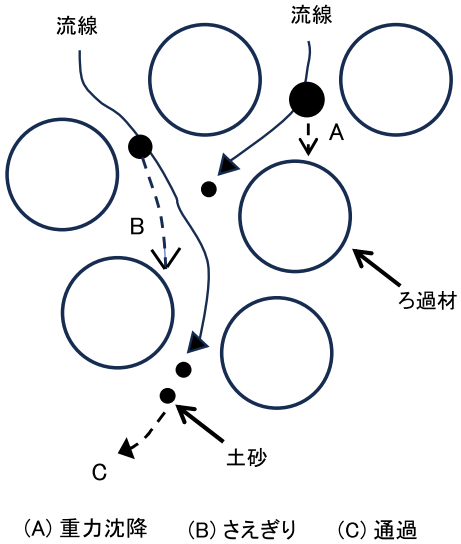


Fig. 13　重力沈降とさえぎりの模式図.
Schematic diagram of gravitational sedimentation and blocking.

間までの積算流出量が 1 PV に達しないため，流出土砂濃度は 0 であり，土砂捕捉率は定義できなかった．同じ条件における二層の土砂捕捉率は 90 ～ 95 %，ろ過持続時間は単層に比較して顕著に長く（Table 2），二層の優位性は明らかであった．粒径 10 μm· 土砂濃度 1,500 mg L^{-1} では，単層，二層とも土砂捕捉率は同等（60 ～ 70 %）であったが，ろ過持続時間が長い分二層が優位であった．粒径 6 μm· 土砂濃度 4,500 mg L^{-1} では単層，二層とも土砂捕捉率は同等（55 ～ 57 %）であり，単層に比較した二層のろ過持続時間は粒径 70 μm 及び粒径 10 μm の場合に比べて長くないため（Table 2），粒径 70 μm の単層及び粒径 10 μm，二層の優位性は明確でなかった．

4. 考察

4.1 ろ過現象のタイプと土砂捕捉メカニズム

ろ過現象には「ストレンろ過」,「深層ろ過」及び「ケークろ過」の 3 つのタイプがあるとされている（杉本, 1992）．うち，ストレンろ過は，ろ過層の間隙径より大きい粒径の土砂が，ろ過層の表層で捕捉される現象であり（Fig. 12 (a)），深層ろ過は，ろ過層の間隙径より小さい粒径の土砂がろ過層内部で捕捉される現象である（Fig. 12 (b)）．

既往の研究（O'Melia and Stumm, 1967; 海老江, 1975）で言及された微視的な土砂捕捉のメカニズムを Fig. 13 に示す．Fig. 13 に示す通り，相対的に粒径の小さい土砂は，流線の中心に沿って下方へ運搬され，ろ過層に捕捉される確率は低い．一方，相対的に粒径の大きい土砂は，重力の作用により，流線の中心から下方に外れてろ過材に接触し，その場所で捕捉される確率が高い（以下，「重力沈降」）．両者の中間の粒径を持つ土砂は，重力と流れの作用が拮抗する結果，流線の中心から斜め方向に外れてろ過材に接触し，その場所で捕捉される確率が生じる（以下，「さえぎり」）．

以下では，上述したろ過現象のタイプと土砂捕捉のメカニズムに基づき，単層と二層のろ過持続時間及び土砂捕捉量の鉛直分布の違いについて，土砂粒径とろ過材の間隙径との関係に着目して考察する．

4.2 ろ過持続時間と土砂捕捉量の鉛直分布に及ぼす土砂粒径とろ過材の間隙径との関係

4.2.1 粒径 70 μm の場合

Fig. 5 より，石英砂層からの主要な脱水はサクション約 38 ～ 50 cmH_2O の間に生じている．このサクションに対応する多孔体の半径 R は，以下のジュレンの式により計算される（近藤, 1991）．

$$R = \frac{2\sigma\cos\theta}{\rho g h} \tag{6}$$

（6）式において σ は水の表面張力，θ は接触角，ρ は水の密度，g は重力加速度，h はサクションである．（6）式に $\sigma = 0.0728$（$N\,m^{-1}$），$\theta = 0°$，ρ =1,000（$kg\,m^{-3}$），g =9.80665（$m\,s^{-2}$）を代入すると，サクション h（cmH_2O）と直径 d（cm）の関係は次式で表される．

$$d = 2R \cong 0.3/h \tag{7}$$

（7）式より，サクションが 38 及び 50 cmH_2O に対応する石英砂の間隙径（以下，「等価間隙径」）は各々 79 μm 及び 60 μm であり，流入土砂の最大粒径 70 μm はこれらとほぼ同程度かやや大きい．このため，単層では土砂が表面に重力沈降して，そこでストレンろ過が生じた結果，層表面の間隙が一気に閉塞して流出フラックスが短時間で低下したと考えられる（Fig. 9（1-1 単層））．一方，二層の上層である半円筒ろ過層の等価間隙径の導出に関する既往の文献はない．このため，本研究では便宜的に半円筒ろ過材と同体積の球を仮定すると，その直径は 2,510 μm となり，石英砂の直径 150 μm（0.1–0.2 mm の中央値）の 16.7 倍である．球の疎充填（土壌物理学会, 2002）を仮定すると，その等価間隙径は，石英砂の 60 ～ 79 μm の 16.7 倍の 1,002 及び 1,320 μm と計算され，流入土砂の最大粒径 70 μm より十分大きい．従って，流入土砂は半円筒ろ過層の内部に侵入して粒径の大きな土砂は主に重力沈降により凹部に捕捉されたと考えられる．凹部に捕捉された土砂は懸濁液が通過する間隙を塞がないと考えられるため（穂積ら, 1995，図-7），上層で目詰まりが生じない．この結果，下層表面に到達する土砂粒径及び濃度は小さくなり，下層表面でストレンろ過による間隙の一気の閉塞が起こらず，流出フラックスは緩慢に低下したと考えられる（Fig. 7（1-1）及び（2-1））．

ろ過の進行に伴い，上層での土砂捕捉が限界に達すると，下層表面に達する土砂粒径及び濃度は大きくなるが，3.2 で述べたように下層表面で捕捉される土砂量は単層表面よりはるかに大きかった．この現象は以下のように考察される．

ろ過終了時における単層と二層の土砂捕捉の様子を Photo 2（a）及び（b）に示す．二層の下層表面において捕捉された土砂は部分的に山状に堆積しているが（Photo 2（a））．単層の同じ表面で捕捉された土砂は薄い膜状（Photo 2（b））である．二層の下層表面における山状の土砂の捕捉要因を検討するため，Table 1 の 1-1 の実験条件で上層と下層を分離した二層ろ過実験を行い，下層表面での土砂捕捉を観察した結果を Photo 3 に示す．写真より，下層表面において土砂は部分的に山状に堆積しており，Photo 2（a）の土砂捕捉の状況と同様である．加えて，土砂が捕捉されない表面が存在しているので，そこで透水が維持される．これを上層と下層が連続している場合に適用すると，Fig. 14 のように模式化される．図は，上層及び下層との境界における半円筒形ろ過材の充填状況，並びに土砂捕捉の状況を模したものである．Fig. 14 は，下層表面の一部で土砂が捕捉される一方，半円筒形ろ過材の下部では流れが遮断され，土砂が流入しにくい空間（以下，「死角となる空間」）が生じることを表している．死角となる空間では透水が継続する結果，上層での土砂捕捉が限界に達して下層表面で土砂が捕捉されても，流出フラックスは依然として緩慢に低下したと推察される．さらにろ過が進行すると，死角となる空間にも土砂が侵入して捕捉され，最終的に下層表面全体の間隙が閉塞して流出フラックスが初期の 70 % まで低下したと考えられる．

以上より，粒径 70 μm の場合，二層ろ過の初期では深



Photo 2 (a)　二層ろ過層の石英砂表面における土砂堆積の状況（粒径 70 μm, 濃度 4,500 mg L^{-1}）.
Sediment deposition status at the surface of the quauzt sand in the double filter layer (in case of 70 μm, 4,500 mg L^{-1}).

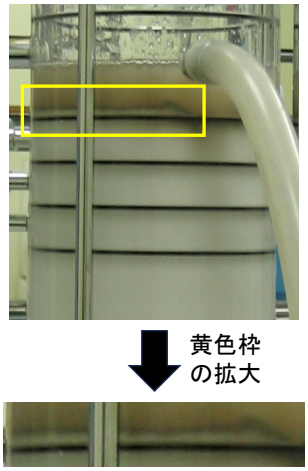


Photo 2 (b)　単層ろ過層の石英砂表面における土砂堆積の状況（粒径 70 μm, 濃度 4,500 mg L^{-1}）.
Sediment deposition status at the surface of the quauzt sand in the single filter layer (in case of 70 μm, 4,500 mg L^{-1}).

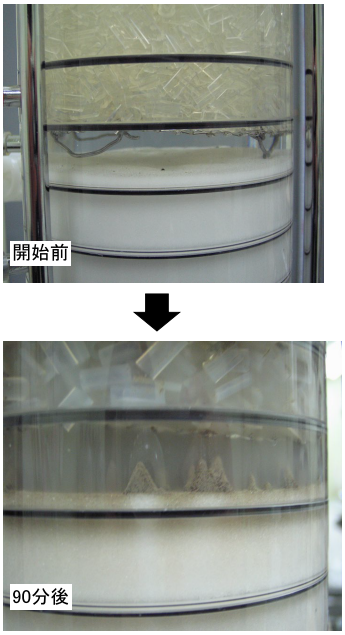


Photo 3　二層ろ過層における下層表面での部分的な土砂捕捉の状況（粒径 70 μm, 濃度 4,500 mg L^{-1}）.
Partial sediment trappings at the surface of the lower filter in the double filter layer (in case of 70 μm, 4,500 mg L^{-1}).

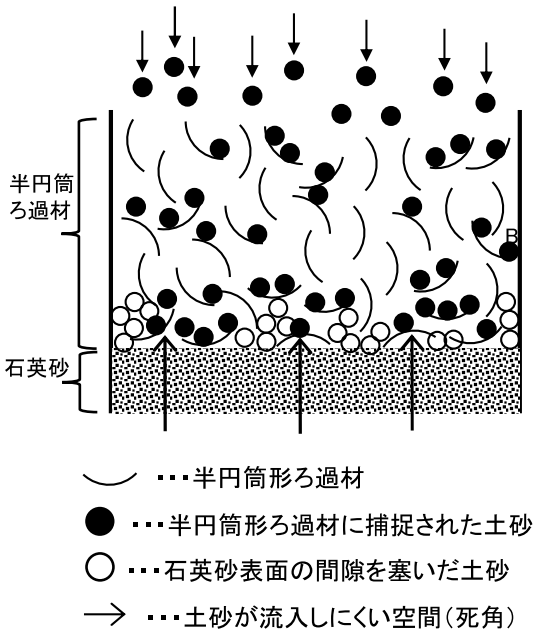


Fig. 14　二層ろ過層の上層と下層の境界における土砂捕捉の模式図.
Schematic diagram of sediment trapping at the boundary between upper and lower filter in the double filter layer.

層ろ過現象により，上層において主に重力沈降による土砂捕捉が生じたこと，上層での土砂捕捉が限界に達した後でも下層表面で土砂捕捉が部分的に進行したことにより透水が継続する表面が存在したことが，単層と比較したろ過持続時間が約 11 ～ 26 倍に延長された要因と考えられた．

4.2.2 粒径 10 μm の場合

粒径 10 μm は，石英砂の等価径の約 1/6 ～ 1/8 である．単層において，土砂は単層表面及びその直下でさえぎりによる土砂捕捉が生じ，徐々に石英砂の間隙は狭められると考えられる．捕捉された土砂は，新たな捕捉部位として機能し（吉田 · 中野, 1995），石英砂の間隙がさらに狭まった結果，層表面の間隙が比較的短時間で閉塞して流出フラックスが低下したと考えられる（Fig. 7（3-1）及び（4-1），Fig. 9（3-1 単層）及び（4-1 単層））．一方，二層では粒径 70 μm の場合と同様に，ろ過の初期では深層ろ過現象により上層で土砂が捕捉され，上層での土砂捕捉が限界に達した後は下層表面での部分的な土砂捕捉が進行したと考えられる．

以上より，粒径 10 μm の場合には，さえぎりによって，4.2.1 で記した粒径 70 μm の場合と同様に，上層での土砂捕捉及び下層表面で部分的な土砂捕捉が生じた結果，単層と比較した二層のろ過持続時間が約 4 ～ 9 倍に延長されたと考えられる．

4.2.3 粒径 6 μm の場合

粒径 6 μm は，石英砂の等価間隙の直径の 1/10 ～ 1/13 であり，粒径 70 μm 及び 10 μm の場合と比較して，二層の上層で重力沈殿やさえぎりによる土砂捕捉が生じにくい．このため，二層の上層で土砂はほとんど捕捉されず（Fig. 9（5-1 二層）），単層及び二層とも土砂は石英砂層内部に侵入してそこで捕捉される現象，すなわち深層ろ過（Fig. 12（b））が生じたと考えられる．深層ろ過における土砂捕捉に関して，岩崎（1938）は以下の式を提案した．

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial z} = -\alpha(z,t)N(z,t) \tag{8}$$

（8）式において z はろ過層表面からの深さ，t はろ過開始からの時間，$N(z,t)$ は z 及び t においてろ過層表面に到達する単位面積 · 単位時間当たりの土砂粒子数，α は z において捕捉される土砂粒子の割合である．水道工学分野において，α はろ過係数と呼ばれている（杉本, 1992）．α が z 及び t に依存しない条件で，（8）式を z で積分すると以下の式が得られる．

$$N(z) = N_0 e^{(-\alpha z)} \tag{9}$$

（9）式で N_0 は $z = 0$，すなわちろ過層表面に到達する単位面積 · 単位時間当たりの土砂粒子数である．（9）式を z で微分して -1 を掛けると，深さ z における単位面積 · 単位時間当たりの土砂捕捉量 β が得られる．

$$\beta = N_0 \alpha e^{(-\alpha z)} \tag{10}$$

（10）式は，β が z の増大に伴って指数関数的に減少する傾向を表しており，単層及び二層の下層における土砂捕捉量の分布はこの傾向と一致した（Fig. 9（5-1 単層）及び（5-1 二層））．

このように，石英砂層の間隙に比較して土砂の粒径が小さい場合では，二層の上層で土砂はほとんど捕捉されず，単層及び二層ともに土砂は石英砂層内部に侵入して捕捉される．この場合には，上層における土砂捕捉機能がほとんど発揮されず（Fig. 9（（5-1 二層），単層と比較した二層のろ過持続時間延長効果（約 1.6 倍）は小さかったと考えられる．なお，粒径 6 μm の場合においても，二層の下層表面で顕著な土砂捕捉が生じた．これは，4.2.1 で記した死角となる空間で透水が継続した結果と関係があると推察されるが，粒径 6 μm の場合には重力沈降やさえぎりによって下層表面に土砂が堆積したとは考えにくく．詳細なメカニズムは検討の余地がある．

4.3 ろ過持続時間に及ぼす土砂濃度の影響

Table 3 より，粒径 70 μm の場合の単層と二層の正味の流入土砂濃度の平均はそれぞれ約 7,600 及び 2,750 mg L^{-1} で，濃度比は約 2.8 である．一方，流入土砂濃度の違いによる単層のろ過持続時間の比（約 1.9）は流入濃度比より小さく，二層のろ過持続時間の比（約 3.5）は，流入濃度比より大きかった（Table 2）．同様に，粒径 10 μm の場合の正味の流入土砂濃度はそれぞれ約 6,480 及び 2,060 mg L^{-1}，濃度比は約 3.1 である．一方，単層のろ過持続時間の比（約 2.8）は流入濃度比よりやや小さく，二層のろ過持続時間の比（約 5.0）は，流入濃度比より大きかった．仮に，土砂流入濃度 X が Y の 3 倍であるとすると，理想的には同じ土砂捕捉量に達する時間は X の場合は Y の場合の 1/3 となる．本研究では，前述のとおり，単層のろ過持続時間は濃度比より小さく，二層のそれは濃度比より大きい傾向であった．この傾向については，今後の検討課題と考えられた．

5. まとめ

浸透性沈砂池を活用したろ過による沖縄地域における赤土流出防止のためには，流入土砂粒径に応じたろ過材の選択が重要である．本研究では，水道工学分野の既往の知見に基づき，上層に半円筒ろ過材，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．主要な結果は，以下のとおりである．

I 流入土砂粒径が石英砂層の間隙に比べて相対的に大きい場合（最大粒径 70 及び 10 μm），単層ではストレンろ過となり，土砂が表面で捕捉されて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，二層では上層では深層ろ過となり，重力沈降やさえぎりによる土砂捕捉が生じるとともに，二層の下層表面では土砂捕捉が部分的に進行して流出フラックスは緩慢に低下した．これらにより，単層と比較した二層のろ過持続時間は，それぞれ 10 ～ 20 倍及び 4 ～ 9 倍となり，単層と比較した二層の優位性は明確であった．

II 流入土砂粒径が石英砂層の間隙に比べて小さい場合（最大粒径 6 μm），土砂は二層の上層と石英砂表面を通過し，単層及び二層とも深層ろ過のメカニズムによって石英砂層内部で捕捉された結果，二層の上層における土砂捕捉機能がほとんど発揮されず，二層の単層と比較した持続時間は約 1.6 倍であり，二層の優位性は顕著でなかった．

III Ⅰ及びⅡより，単層と比較した二層のろ過持続時間の優位性は，流入土砂の粒径と上層及び下層の間隙径との関係に依存する．従って，全ての粒径の土砂を効果的に捕捉する万能なろ過層の設計は困難であり，捕捉対象とする粒径を定める必要がある．大澤ら（2004）によると，沖縄県の沈砂池に流入する土砂の最大粒径が大きいほど土砂濃度も大きいので，粒径の大きい土砂を捕捉対象とすることは妥当である．そこでは，上層に粗大な半円筒形ろ過材を配した二層の適用が有力であると考えられる．

謝辞

ろ過実験の遂行と実験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．

引用文献

土壌物理学会編 (2002): 土壌物理学用語辞典, p. 183. 養賢堂.

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

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.

岩崎富久 (1938): 沪過阻止率の計算 白陶土と一二の微生物の沪過に就て (其の一）. 土木学会誌, 24(8): 827–853.

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.

Mohanka, S.S. (1969): Theory of multilayer filtration. Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the Society of Civil Engineering, SA.6, 1079–1095.

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.

中野 仁 (1993): 球形繊維ろ材を用いた二次処理水の高速沪過. 用水と排水, 35(6) : 24–31.

日本セラミックス協会:(2023): https://www.ceramic.or.jp/museum/yakimono/contents/genryou.html. (2024.10.26 確認）

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, p. 56.

O'Melia, C R. and Stumm, W. (1967): Theory of water filtration. AWWA, 59-11: 1393–1412.

大見謝辰男 (2003): 赤土等の流出によるサンゴ礁の汚染. 沿岸海洋研究 40(2): 141–148.

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.

篠原 紀, 網谷 力 (1971): 複層ろ過の効率に影響を与える諸因子について. 土木学会論文報告集, 194: 71–82.

杉本泰治 (1992): 沪過 — メカニズムと沪材・沪過助剤, p. 405. 地人書館.

水道設計指針, 浄水施設 (2012): https://www.mlit.go.jp/common/830003584.pdf. (2024.9.22 確認）.

近藤連一編著 (1991): 多孔材料 —性質と利用 —, p. 395. 技報堂出版.

玉井義弘 (1966): 逆粒度組成の沪過池に関する実験. 水道協会雑誌, 3 83: 17–37.

丹保憲仁, 松井佳彦, 岡本裕三 (1984): 高容量濾過池の研究-2-ラシヒリング床の除去機構の評価. 水道協会雑誌, 598: 16–23.
渡嘉敷義浩, 志茂守孝, 大屋一弘 (1982): 国頭マージ地域における流出赤土の粘土鉱物と 2,3 の理化学性について. 琉球大学農学部学術報告, 29: 7–18.
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

沖縄地域において浸透性沈砂池を活用した赤土流出軽減のため，上層に粗大な半円筒形ろ過材，下層に石英砂を配した二層ろ過による石英砂単層ろ過と比較した持続時間（流出フラックスが初期の 70 % に低下した時間）の延長効果を定圧ろ過実験により検討した．流入土砂の最大粒径が 70 μm 及び 10 μm の場合，単層では表面における土砂の捕捉により，石英砂の間隙が閉塞して流出フラックスは短時間で低下した．他方，二層では流出フラックスは長時間維持され，この間に上層と下層表面に多量の土砂が捕捉された．単層と比較した二層の持続時間は各々約 11 ～ 26 倍及び約 4 ～ 9 倍であった．流入土砂の最大粒径が 6 μm の場合，単層及び二層とも土砂は石英砂層内部に侵入し，単層と比較した二層の持続時間は約 1.6 倍であった．流入土砂の粒径が上層の間隙に比較して小さく，下層の間隙に比較して大きい場合，上層に粗大なろ過材を配した二層ろ過は，持続時間の延長と土砂捕捉に有効であると考えられた．

キーワード：土砂流出軽減，沈砂池，二層ろ過，粗大ろ過材，ろ過持続時間