

新潟大学災害・復興科学研究所
共同研究報告書

雪・水・火山砕屑物による混合流の粘性評価

桂木 洋光¹⁾ 小田 憲一²⁾ 新屋 啓文³⁾

1) 大阪大学 2) 日本大学 3) 新潟大学

研究要旨

積雪状態にある火山が噴火した場合、火山砕屑物(テフラ)が雪や水と混合した泥流状態で流下することとなる。特に大量の雪解け水を伴う泥流は麓に大きな被害をもたらすこともあり、このような融雪型火山泥流の流動特性を理解することは防災・減災の観点からも重要となる。しかし、このような多成分混合系の流動特性の一般的理解は容易ではない。特に雪の持つ付着性により泥流中には固体成分による凝集体が構成される可能性もある。このような複雑泥流の特性理解を目指し、本研究ではこれまで、雪・水・テフラ混合流中での凝集体形成の可能性について実験的研究を行ってきた。得られた実験結果と次元解析的検討から、実際の融雪型火山泥流中に巨視的サイズを持つ凝集体が形成される可能性は低いことが明らかになった。そこで、凝集体のような複雑な構造体が存在しない状態の泥流の物理的特徴付けを目指し、泥流の粘性計測に取り組むこととした。昨年度は予備の実験として、水とテフラのみの混合流の粘性計測を回転式粘度計により行った。しかし、回転式粘度計を用いた粘性計測にはいくつかの技術的問題があり、正確な粘性計測が難しいことが分かった。そこで本年度は、泥流のような複雑流動体の粘性をより信頼性高く評価するために、音叉式粘度計による粘性計測に取り組んだ。その結果、比較的大きなせん断率領域(概ね 100 s^{-1} 程度)では、せん断率の増加に伴い粘性が減少する傾向が確認された。また、テフラ濃度が著しく大きい場合(概ね 30%程度)、粘性は水の 1000 倍程度まで達することも示唆された。今後は水とテフラに加えて雪を含む泥流における粘性計測が課題となる。

A. 研究目的

融雪型火山泥流がひとたび発生すると、火山砕屑物(テフラ)は、雪と雪解け水を含む状態で麓まで泥流として流下することとなる。この融雪型火山泥流は、流下時には大気とも相互作用するため、その挙動理解は極めて難しい問題となる。その解明は十分に進んでいない。また、このような多成分混合複雑流体の流動特性の基礎理解は、火山泥流以外の様々な現象とも関連すると考えられ、基礎科学的側面から見ても意義深いものと言える。

融雪型火山泥流の理解を目指した研究として、沖田ら(2018)[融雪型火山泥流の流動性に与える雪の影響, 沖田竜馬, 河島克久, 松元高峰, 片岡香子, 渡部俊, 寒地技術論文・報告集, Vol. 34, I-007 (2018)]はテフラ・水・雪の混合物を人工斜面上で流下させる実験を行った。実験は 0°C の低温室内

で行われ、彼らは流下の初期段階で泥流中に凝集体が形成されることを発見した。このような凝集体の形成は泥流の流動特性に大きな影響を及ぼすと考えられるため、その詳細検討が必要となる。

そこで、本研究では雪を含む泥流中で凝集体が形成される条件を系統の実験により明らかにしてきた。具体的には、融雪型火山泥流の状態を模倣するためにテフラ・水・雪の混合物を回転ドラム中で流動させ、どのような凝集体が形成されるかについて、実験条件を変化させつつ観察した。その結果、ある一定の条件下で凝集体が形成されることが明らかになった。また、形成された凝集体についての圧縮試験も行い、凝集体の力学的強度特性についても明らかにした。しかし、得られた実験結果から実際の泥流中で凝集体が形成されるかどうかについて次元解析的に見積もったところ、実際の泥流中では凝集体が形成される可

能性が高くないことが明らかになった[Formation conditions and mechanical properties of aggregates produced in tephra-water-snow flows, H. Niya, K. Oda, D. Tsuji, and H. Katsuragi, Earth, Planets and Space, Vol. 72, 148:1-14 (2020)]. このことは、融雪型火山泥流中でテフラが凝集するというような複雑な現象を考える必要がないことを示唆している。

これらの背景を受け、本研究では泥流の流動特性理解のためには粘性の計測が重要な要素になると考えた。粘性の正確な見積もりは、泥流の流下範囲の推定等のためには欠かすことができない基礎情報となる。泥流中で凝集体等の複雑な構造が形成されないとするとその流動特性は比較的単純に特徴付けられる可能性もあり、粘性のせん断率依存性などを詳細に調べることにより、複雑泥流の物理特性の一面を明らかにできる可能性は高い。

昨年度、泥流の粘度測定の予備的実験として、水とテフラの混合物の粘性を回転式粘度計（ブルックフィールド、DV-II）を用いて計測した。粒径が 32-63 μm 、125-250 μm 、250-500 μm のテフラを体積濃度で 5% もしくは 10% 含む混合液の粘性を測定した。その結果、せん断率が 1 s^{-1} 程度の状態で、粘性が水のおよそ 20 倍程度となることが分かった。また、粘性のせん断率依存性は強くないものの、せん断率の増加に伴い粘性が上昇する傾向（シア・シックニング）が見られることも確認した。しかし、テフラは水中で比較的短時間のうちに沈殿してしまい、回転式粘度計で正確な粘性を計測することの難しさも実験の中で明らかになった。そこで、本年度は泥流のような複雑流動体の粘性の計測に対してより有効と考えられる音叉式粘度計を用いた粘性計測を試みることにした。

B. 研究方法

雪を含む泥流の計測は低温環境の整備などが必要となり技術的な難易度が高いため、まずは水とテフラの混合物の粘性計測に取り組むこととした。粒径が 32-63 μm 、125-250 μm 、250-500 μm のテフラを体積濃度 5%、10%、20%、もしくは 30% 含む混合物を作成し、音叉式粘度計（A&D RV-10000A；図 1）を用いてそれらの粘性計測を行った。測定中にテフラが水中に分散した状態を維持

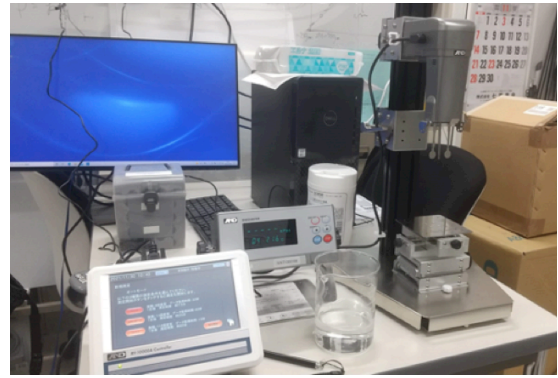


図 1：音叉式粘度計（A&D RV-10000A）のシステム全体像。

するために、サンプルをマグネティック・スターラーにより常時攪拌流動させて計測を行った。ただし、大きなサイズのテフラの濃度が高い場合、スターラーにより流動させることができないことがあり、上記の条件で全ての計測を行うことはできなかった。スターラーによる強制流動が難しい場合でも、250-500 μm テフラを 30% 混合させた系についてのみ、流動させない状態でプローブがテフラにかかるような配置で計測を行った（図 2）。

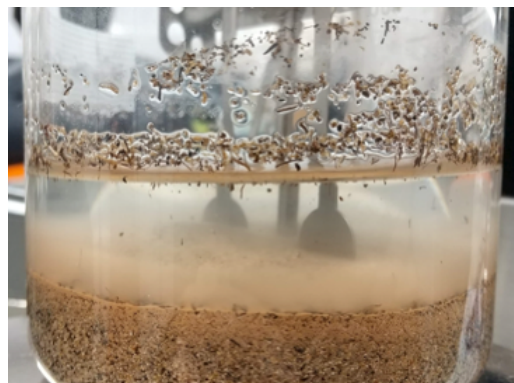


図 2：スターラーによる強制流動（攪拌）を用いない状態での計測。

用いた音叉式粘度計の計測原理を以下に簡単に概説する。音叉式粘度計では、サンプル中に配置したプローブを共振周波数（今回用いた装置では 30 Hz）で一定振幅振動させる。この定常振動実現のために必要な加振力から応力を算出し、振幅を制御することによりせん断率を変化させることができる。これらにより求まる応力とせん断率の関係から粘性が算出できる。この方式では、中心面に対して対称的に振動する 2 つのプローブを用いるなどの方法により、本実験のようにスタ

ーラーなどで強制的な流動状態にあるサンプルの粘性も計測することが可能となる。

C. 研究結果

粘性計測の結果を図3に示す。テフラ濃度が5%もしくは10%のサンプルはいずれもほぼせん断率に依らない定粘性であり、その粘性値（～1 mPa s）は水の粘性に近い値となった。しかし、テフラ濃度が上がると粘性は大きくなり、30%濃度では、32 – 63 μm のテフラで水のおよそ10倍、250 – 500 μm のテフラでおよそ1000倍まで増加した。この結果はテフラと水の混合系の粘性がテフラ濃度に大きく依存することを示しており、粘性の適切な概算のためには、泥流中のテフラ濃度を正しく見積もる必要があることを意味している。

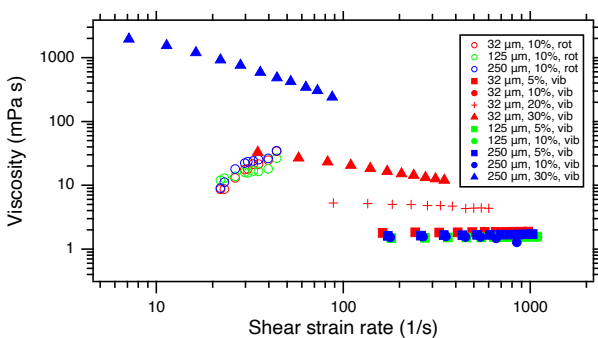


図3：粘性計測結果。白抜きシンのデータ点は回転式粘度計による結果のデータで、その他は音叉式粘度計による結果。

D. 考察

図3において白抜きシンボルで示されている点は、昨年度に回転式粘度計で計測された粘性値（テフラ濃度10%の場合）を示している。粘性値は10 mPa s程度であり、この値は、今回の音叉式粘度計での計測値（1 mPa s程度）とはおよそ1桁程度異なる値となっている。この相違は、計測方法の違いによるサンプル内部状態の相違によるものと考えられる（回転式粘度計ではプローブ自体が回転することによりサンプル内に流動が起こり、音叉式粘度計の計測はスターラーによる強制攪拌下で行われた）。実際の泥流中でも複雑で多様な流れ場が実現されているはずで、これらの実験結果は局所的粘性が泥流中で大きなばらつ

きを持つ可能性を示唆していると言える。

また、昨年度行った回転式粘度計による計測では、シア・シックニングの傾向が認められたが、今回の音叉式粘度計による計測では、シア・シニングの傾向が認められた。両者の計測の主たるせん断率領域が異なることもあるが、この質的な違いがどのような状況の違いにあたるものか、今後さらなる検討が必要と考えている。

また、実際の融雪型火山泥流への展開を考えると、雪を混合した状態での粘性計測も今後必須となる。今年度はその準備的予備実験として、水とテフラのみの混合物の粘度を計測した。

E. 結論

様々な粒径のテフラと水の比率を変化させつつ混合した泥流模擬サンプルを作成し、その粘性を音叉式粘度計で計測した。実験の結果、テフラ濃度が低い場合の粘性は水とほぼ変わらず、せん断率依存性も大きくないことが分かった。一方でテフラ濃度が高い場合は、粘性がせん断率にシア・シニング的に依存することが分かった。また粘性の値は、テフラ濃度が30%程度になると水に比べて1桁以上大きくなることも明らかになった。これらの結果は、回転式粘度計で測られたものと明らかな差異を示すものであり、その理由の解明と、雪を混合した系の粘性計測が今後の課題となる。

F. 研究発表

1. 論文発表 なし

2. 学会発表（学会名・発表年月・開催地なども記入）

融雪型火山泥流の粘度計測に関する検討，小田憲一，新屋啓文，桂木洋光，雪氷研究大会2021オンライン，2021年9月13-16日。

雪を含む火山泥流における凝集体の形成条件と力学特性，新屋啓文，小田憲一，辻大輔，桂木洋光，地球惑星科学連合大会2022年大会，2022年5月22-27日，千葉幕張（発表予定）。

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む） なし