

新潟大学災害・復興科学研究所  
共同研究報告書

火山砕屑物を含む複雑泥流の降伏挙動

桂木 洋光<sup>1)</sup> 小田 憲一<sup>2)</sup> 新屋 啓文<sup>3)</sup>

1) 大阪大学 2) 日本大学 3) 新潟大学

研究要旨

冠雪火山における噴火がもたらす融雪型火山泥流は、火山砕屑物（テフラ）・土砂・雪・雪どけ水などが複雑に混合しながら流下する災害現象である。融雪型火山泥流の複雑流動特性を正しく把握することが、災害による被害を軽減するために重要な要素であることは言うまでもない。しかしながら、液体、気体、複数種の固体（土砂および雪）が混合する複雑流体の流動特性の基礎は未だ十分に理解が進んでおらず、災害理解に資する十分な知見は得られていない。そこで、本研究では、火山砕屑物（テフラ）、雪、水が混合した泥流の流動特性理解を目標に掲げ、実験的研究を展開してきた。当初、雪粒子の影響によりテフラが泥流中で凝集体クラスターを形成する可能性が室内実験より示唆されていた。しかし、系統的实验により、自然の融雪型火山泥流中では、凝集体の形成はみられないことを次元解析等により明らかにした。続いて、テフラ、雪、水が混合した複雑泥流の流動特性を明らかにするべく、粘性計測を行った。回転式粘度計、音叉式粘度計等を用いて系統的計測を行い、泥流の粘性がせん断率にほぼ依存しないこと、泥流の粘性がテフラおよび雪を合わせた固体成分の固体分率によりほぼ決定されることなどを明らかにした。以上の結果が前年度までの成果となる。これらを受け、本年度は、泥流の流れ始めや停止の条件に関連する降伏強度測定に取り組んだ。ペーン式せん断試験機を用い、テフラと水の混合物の降伏強度等を系統的に（特に水の飽和度を系統的に変化させ）計測した。その結果、強度値は概ね1 kPa から10 kPa のオーダーに分布し、飽和度50%付近で大きな値を持つ傾向が結果より明らかになった。今後は、雪を含めた泥流の降伏強度も系統的に計測し、昨年度までに計測した粘性と合わせて、融雪型火山泥流の粘塑性構成関係の確立を目指したい。

A. 研究目的

融雪型火山泥流は、火山砕屑物（テフラ）を含む土砂などの固体成分のほか、雪や雪が解けた水を多く含有し、一般の火山性泥流に比べて流動性が著しく高い。そのため、融雪型火山泥流は、ひとたび発生すると大きな被害をもたらすことが多い。泥流中でテフラは、雪や雪解け水と複雑に混合しつつ流下する。加えて、泥流中には大気を取り込みなどの相互作用もあり、その挙動の正確な予測は極めて困難である。このような複雑泥流の流下距離推定の精度を向上させることは、融雪型火山泥流による災害の被害想定などを行う際に特に重要となる。

複雑泥流の流動挙動は、複雑流体の基礎科学の観点からも興味深い研究対象となる。しかし、そ

の複雑挙動を十分な精度で定量的に記述する具体的構成関係などはこれまで構築されてこなかった。本研究で扱う複雑流動体の流動特性の基礎理解は、火山泥流の他にも多様な産業現場（ウェットな材料のハンドリング現場など）についても重要な知見をもたらし得る。そこで、本研究ではシンプルな室内実験を通して、このような複雑泥流の基礎流動特性を理解することを目指し、研究を行うこととした。

融雪型火山泥流の複雑挙動に関して、本研究に先立ち沖田ら(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、この研究により、流下の初期段階で泥石流中に凝集体が形成される可能性が高いことが発見された。さらに、凝集体形成は泥石流の流動性を著しく低下させる可能性があることも示唆された。このような凝集体の形成が実際の複雑泥石流内でも発生すれば、凝集体の挙動は複雑泥石流の流動特性に大きな影響を及ぼすこととなる。

そこで、本研究の初期段階では、複雑泥石流中の凝集体形成条件について、実験的に調べた。具体的には、融雪型火山泥流を模擬した「テフラ、水、雪の混合物」を回転ドララムで流動攪拌し、凝集体が形成される流動条件を実験的に明らかにした。また、泥石流中にできた凝集体の圧縮試験も行った。以上の実験結果に基づき、実際の複雑泥石流中の凝集体形成条件についてスケーリング等により検討し、一般的な複雑泥石流状態では凝集体形成が起こりにくいことを明らかにした [Formation conditions and mechanical properties of aggregates produced in tephra-water-snow flows, H. Niiya, K. Oda, D. Tsuji, and H. Katsuragi, Earth, Planets and Space, Vol. 72, 148:1-14 (2020)]. この結果は、融雪型火山泥流の流動挙動において、凝集体形成による影響は無視可能であることを示している。

そこで、続いての課題として、凝集体が形成されない複雑泥石流の流動特性として「粘性」の計測に着手した。具体的には、テフラと水、雪の混合複雑泥石流の各種濃度等を系統的に変化させ、粘性計測を行った。まず、最も簡単な回転式粘度計による粘性計測を行った。しかし、テフラ粒子の沈殿に要する時間スケールが粘性計測に要する時間スケールに比べて短いことが分かり、正確な粘性計測は困難であった。そのため、続いて、音叉式粘度計を用いた粘性計測を行った。その結果、音叉式粘度計は、回転式粘度計に比べ、安定して複雑泥石流の粘性を計測可能であることが分かった。しかし、流動最中の複雑泥石流状態の粘性計測のためには、泥石流サンプルを十分に流動化させる必要があり、その程度を制御することは簡単ではなかった。そこで、回転パン装置により複雑泥石流を常に流動化させつつ、その状態で音叉式粘度計により粘性を計測する実験も行った。また、テフラの粒子形状が泥石流の流動特性に与える影響を明らかにするために、テフラの代わりにガラスビ

ーズを用いた粘性計測の実験も行った。その結果、複雑泥石流の粘性は、テフラ（もしくはガラスビーズ）と雪をあわせた全固体成分の体積濃度の関数として（Krieger-Doherty の経験式を用いて）近似的に見積もり可能であることを明らかにした。しかし、全固体成分の濃度が高い領域で、粘性の計測値は大きなバラツキを示した。

以上の、昨年度までの実験的研究により、複雑泥石流の粘性挙動は概ね明らかにされた。計測された粘性は、いずれも、せん断率への依存が弱く、十分流動化した複雑泥石流は概ねニュートン流体的に振る舞うことが明らかになった。一方、複雑泥石流が流れ始める状態や流れが止まる際の状態については、このような定常的粘性測定のみでその全貌を明らかにすることは難しい。そこで、本年度は、複雑泥石流の降伏強度について計測し、複雑泥石流の総合的構成関係の構築を目指した着実な一歩を刻むことを目標とした。

## B. 研究方法

水とテフラもしくはガラスビーズを混合した泥石流の降伏強度測定のために、ペーン式せん断試験機を用いた（図1）。計測は新潟大学災害・復興科学研究所内で行った。粒径が 32-63  $\mu\text{m}$ 、125-250  $\mu\text{m}$ 、250-500  $\mu\text{m}$  のテフラもしくは、平均粒径が 38  $\mu\text{m}$ 、177  $\mu\text{m}$ 、350  $\mu\text{m}$  のガラスビーズを、飽和度が 0%、20%、40%、60%、80%、100%となるよう水と混合させ、500 ml のビーカーにみかけの体積が 500 ml となるように充填した。テフラもしく



図1：本実験で用いたペーン式せん断試験機

はガラスビーズと水の混合は、全体で一様に混ざるよう段階的に混合させるなど、鉄拳手順の随所で工夫をこらした。作成したサンプルにベーン式せん断試験機を用いて荷重を加え、その荷重と回転変位の関係を記録した。

### C. 研究結果

得られた実験結果をもとに、まずは、せん断応力と回転変位の関係を調べた。典型的な試験結果の例を図2に示す。初期は、変位がほとんど起こらず、せん断応力が一気に増大している様子が確認できる。また、あるせん断応力で泥流が降伏を示した後は、徐々に強度が低下している。このような典型的挙動を示す試験結果に基づき、まずは、降伏強度値（試験中のせん断応力の最高値）の実験条件依存性を確認することとした。

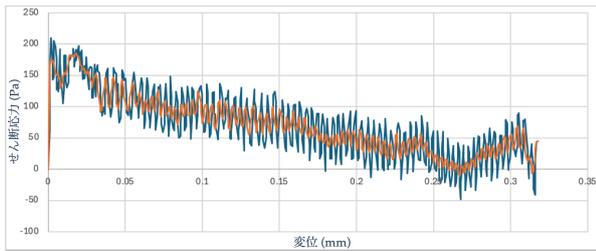


図2：試験機で計測されたせん断応力と変位の関係の典型例データ。

得られた降伏強度の飽和度依存性の実験結果を図3に示した。図3より、降伏強度は概ね 1 kPa から 10 kPa 程度の値を持っていることが分かる。これは含水粉体層の強度値としては典型的なレンジであり、とりわけ斬新なデータ挙動というわけではない。ただし、降伏強度値は飽和度に依存して非単調な変化を示すことも図3より分かる。この傾向は、テフラやガラスビーズのサイズに依らず普遍的に見られる傾向であった。降伏強度は、水を加える（飽和度を上げる）ことにより徐々に大きくなるが、飽和度 50%程度で最大の値をとり、その後飽和度の上昇にともなって降伏強度は減少する傾向を示す。このような非単調な降伏強度挙動は必ずしも自明な傾向ではない。通常の含水粉体層の強度は、ある飽和度までは概ね一定の値を示し、その飽和度が高い領域では著しい降伏強度の低下が見られる（e.g. S. Herminghaus, Wet

granular matter, World Scientific, 2013)。このような典型的な挙動とは異なる特異な挙動がみられた原因等については現時点では未解明であり、その詳細検討は今後の課題と言える。

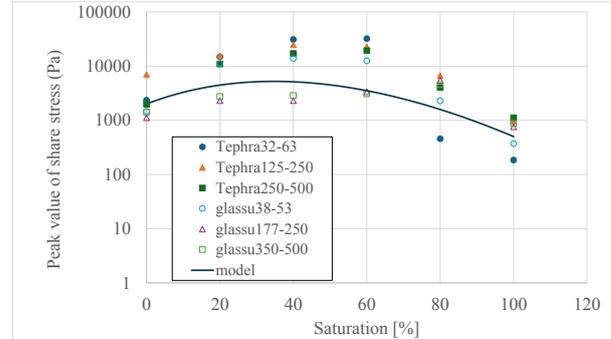


図3：泥流の降伏強度の飽和度依存性。異なるシンボルは異なる固体粒子のサイズを表す。実線はモデルによるフィッティング。

### D. 考察

この非単調に飽和度に依存する降伏強度挙動をモデルにより表現するために、以下のような経験的表式を導入した。

$$\tau = \tau_0 \left( 1 + \frac{\phi}{\phi_{MAX}} \right)^{(\alpha\phi_{MAX} - \beta\phi)}$$

ここで、 $\tau$ は降伏応力値、 $\tau_0$ は飽和度 0%でのせん断応力（降伏強度）値（本研究では 2000 Pa で固定）、 $\phi$ は飽和度、 $\phi_{MAX}$ は最大飽和度（本研究では 100%=1.0）、 $\alpha$  (=6.0) と  $\beta$  (=8.0)はフィッティングパラメータである。図3の曲線はこの表式によるフィッティングの結果を表している。

この表式は、昨年度、濃厚粒子分散溶液の実効粘性のモデルとして用いた Krieger-Doherty の式と似た形式としている。Krieger-Doherty の式は以下のように表される。

$$\eta = \eta_0 \left( 1 + \frac{\phi}{\phi_{max}} \right)^{-\alpha\phi}$$

ここで、 $\eta$ ,  $\eta_0$ ,  $\phi$ ,  $\phi_{max}$ ,  $\alpha$ はそれぞれ、泥流粘性、溶媒（水）の粘性、固体成分の体積分率、その最大値、粒子形状等に依存するパラメータである。粘性と降伏強度がいずれも似た表式で記述できることは興味深く、今後、複雑泥流の流動構成関係式を統一的に記述する際に助けとなる可能性が高い。ただし、背後にある物理的な意味等についてはまだ十分に検討が進められておらず、今後、

さらなる検討が必要となる。

また、今年度の実験では雪を含む泥流の降伏強度計測は実施できていない。雪を含めた場合の挙動を確認することも今後の重要な課題である。

## E. 結論

本年度はとくに、ベーン式せん断試験機を用いて、様々な粒径のテフラもしくはガラスビーズと水を混合させた泥流の降伏強度測定を行った。テフラもしくはガラスビーズの粒径、飽和度を系統的に変化させて実験を行ったところ、降伏強度は飽和度に非単調に依存することが明らかになった。どのような粒子を用いた場合も、概ね飽和度50%程度で降伏強度は最大となった。今後は、得られた結果の解釈、雪を含む複雑泥流の降伏強度計測、などを行うことが課題となる。それらの結果を合わせて、融雪型火山泥流の一連の流動特性を記述する実験式を構築することが本研究の当面の目標となる。

## 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)

新屋啓文, 小田憲一, 桂木洋光: 火山砕屑物と雪を含む複雑泥流の粘性特性, 雪氷研究大会 (2024・長岡), 2024年9月, アオーレ長岡 (新潟県長岡市)

新屋啓文, 小田憲一, 桂木洋光: 火山砕屑物と雪を含む複雑泥流の粘性特性, 地球表層における粒子重力流 2024, 2024年11月, 京都大学宇治おうばくプラザ (京都府宇治市)

## G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

なし