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レオロジー特性 _{桂木 洋光}¹⁾ 小田 憲-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

融雪型火山泥流とは、冠雪した火山において噴火が起こった場合に発生する火山砕屑物(テフラ)・土 砂・雪・雪どけ水の混合複雑泥流である.複雑流動体である融雪型火山泥流の流下距離や速度は、泥流 の構成要素の比率や地形に依存して大きく変化する.融雪型火山泥流は頻繁に起こる災害ではないもの の、ひとたび発生すると麓に大きな災害をもたらすこともある。そのため、融雪型火山泥流の流動特性 の基礎を理解することは、防災・減災の観点から極めて重要となる.しかし、さまざまな構成要素(テ フラ、土砂、雪、水、空気など)を含む三相混相系である複雑泥流の流動特性は極めて複雑となる.と くに、雪粒子は付着性を持つ固体流粒子であり、泥流中で凝集体を発生させる可能性がある.本研究で は、このように高度な複雑性を内包する融雪型火山泥流の物理特性理解が大きな目標となる. 前年度ま での一連の研究の中で、以下のような成果を得た、まず、雪・水・テフラ混合流中における凝集体形成 の可能性について実験的研究を行った. その結果に基づき, 実際の融雪型火山泥流の規模においては巨 視的サイズを持つ凝集体が形成される可能性が低いことを明らかにした。そのため、凝集体を含まない 複雑泥流の物理的特徴付けのために、泥流の粘性を計測することとした。粘性計測は、回転式粘度計お よび音叉式粘度計を用いて行い、後者が複雑泥流の粘性計測に適していることを明らかにした.これま で、水とテフラの混合系、水・雪・テフラの混合系について様々な条件下で粘性計測を行い、複雑泥流 の粘性がせん断率の変化にほぼ依存しないニュートン流体的特性を持つことが分かった.この特性は, 固体粒子として球形のガラスビーズを用いた場合でも同様に確認されたため、固液気三相混相の複雑泥 流の基本的特性と言える.しかし,前年度までの実験では,粘性を計測した泥流のパラメータ範囲が限 られていた.その一つの要因として、テフラや雪を高濃度で含む泥流の流動化が容易でないことがあっ た.そのため、今年度の本研究では、定常的な泥流の流動化を実現するために回転パンを用いた.その 結果、回転パンで流動化された泥流の粘性を音叉式粘度計で計測することにより、広いパラメータ範囲 で粘性を計測することに成功した.ただし、雪の濃度が高くなった場合に粘性計測値のバラツキは大き くなる問題が残された、この問題が計測系の改善等により解決可能なものであるのか、固化する状態に 近い複雑泥流の持つ本質的不均一性に由来するものであるのか,今後検討が必要である.また,固体成 分の濃度が大きい場合、複雑泥流は実効的に固化する.この固化状態の特性は、降伏応力などの測定に より特徴づけられるべきである.降伏応力と粘性の計測結果を結びつけることにより,融雪型火山泥流 の複雑流動特性に関する有効な構成関係を構築していくことが今後の課題となる.

A. 研究目的

融雪型火山泥流は土砂や火山砕屑物(テフラ) のほか,雪や雪解け水を多く含有する.そのため, 一般の火山性泥流に比べて流動性が著しくなり, 発生すると大きな被害をもたらす.泥流中でテフ ラは雪や雪解け水と複雑に相互作用しながら流 下する. さらに, この泥流では大気との相互作用 もあり, その挙動予測は極めて難しい. 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, その被害想定などを行う際に重要となる. このような複雑泥流の流動挙動の理解は, 基礎 学理的観点からも興味深い研究項目となる. しか し、その複雑な挙動を十分な精度で定量的に理解 する具体的研究はこれまで十分に行われてこな かった.本研究で扱う多成分混合複雑流動体の流 動特性の基礎理解は、火山泥流の他にも多様な湿 式材料プロセス等の産業現場においても重要な 知見となることは間違いない.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 泥流の基礎的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,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℃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流中 に凝集体が形成されることが発見された.その結 果、この凝集体形成により流動が阻害される可能 性が示唆された.このような凝集体の形成が実際 の複雑泥流内でも発生するのであれば、凝集体挙 動は複雑泥流の流動特性に大きな影響を及ぼす こととなる.

そこで、これまでの本研究では複雑泥流中での 凝集体形成条件について、まずは調べた.融雪型 火山泥流を模擬した「テフラ、水、雪の混合物」 を回転ドララムにより流動撹拌し、凝集体が形成 される流動条件を実験的に明らかにした.更に、 形成された凝集体の圧縮試験も行った.これらの 実験結果に基づき、実際の複雑泥流中での凝集体 形成条件について検討し、一般的な複雑泥流状態 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)].これは、 融雪型火山泥流の流動において、凝集体形成によ る影響は無視して良いことを示唆している.

凝集体の形成がない場合でも複雑泥流の流動 直制は複雑になると考えられる.そこで,テフラ と水,雪の混合複雑泥流の系統的粘性計測に続い て取り組むこととした.最初に最も簡単な回転式 粘度計により粘性計測を試みた.しかし,テフラ 粒子の沈殿が粘性計測の時間スケールに比べて 短く,正確な粘性計測は難しかった.そのため, 次に音叉式粘度計を用いて粘性計測を行った.音 叉式粘度計では、回転式粘度計に比べて安定して 粘性を計測することが可能となったが、流れてい る複雑泥流状態の粘性計測のためには、泥流サン プルを十分流動化させる必要があり、その程度は 昨年度までの実験では十分ではなかった.

そこで、本年度の研究では、雪を含むテフラ・ 水・雪混合系の幅広い混合状態での粘性計測を目 指して、回転パン装置により複雑泥流を流動化さ せ、その状態で音叉式粘度計により粘性を計測す ることとした.テフラの粒子形状影響等を確認す るために、ガラスビーズを用いた実験も行った. また、昨年度までの計測結果との比較も行った.

B. 研究方法

雪と水を含む (テフラもしくはガラスビーズに よる) 泥流の粘性計測のために,回転パン装置 (AS-ONE PZ-01R) と音叉式粘度計 (A&D RV-10000A)を用いた (図 1).粘性計測は新潟大学災 害・復興科学研究所内の低温室 (0℃環境) で行っ た.粒径が 32-63 µm, 125-250 µm, 250-500 µm の テフラもしくは,平均粒径が 38 µm, 177 µm, 350 µm のガラスビーズを体積濃度 5%, 10%, 20%, 30%, 35%, 40%含む水と粒子の混合系を作成し, その粘性を計測した.また,雪濃度も 5%, 10%, 15%, 20%の範囲で変化せ,テフラと水の混合系に 加え,その粘性を計測した.テフラと水の混合系に 加え,その粘性を計測した.テフラと水の混合系に が著しく難しくなり,本実験系を用いてもその流 動化は困難であった.



図1:粘度計測中の様子.テフラ・水・雪混 合系は回転パンで流動化されている.

C. 研究結果

昨年度行った粘性計測との整合性の確認を最 初に行った.テフラまたはガラスビーズと水の混 合泥流の粘性計測結果について昨年度の結果と 今年度の結果を比較したものを図2に示す.昨年 度の計測では,泥流の撹拌にマグネティックスタ ーラーを用い,今年度の計測では回転パン装置を 用いている.図2中の+シンボルが昨年度の計測 結果であり,●,■,▲シンボルで示されるデー タが今年度取得した結果となる.両者は概ね一致 していることがわかる.回転パン装置の導入によ り,固体成分の濃度の高い領域まで計測が可能と なったが,計測された粘性値のバラツキは高濃度 領域で特に大きくなった.



続いて、テフラと水の混合泥流に雪を混合させ、 雪の濃度と混合複雑泥流の粘性計測を行った.そ の結果を図3に示す.図2と比べることにより、 雪の付加で泥流の粘性は有意に増加しているこ とが分かる.雪濃度と粘性の間には弱い正の相関 も認められる.これ以上雪の濃度を増加させると、 泥流が実行的に固化し、粘性計測が不可能となる. 続いて、泥流中に含まれる全固体成分(テフラと



雪の和)の体積分率と粘性の関係を図4に示す (図中のシンボルは図2,3と同様).データのバ ラツキは大きいものの,全固体成分の濃度と粘性 の間には正の相関が確認される.



図4:雪とテフラをあわせた全固体成分の堆積 濃度と泥流粘性の関係.

D. 考察

る.

図4において確認された粘性の全固体成分濃 度依存性について,濃厚粒子分散溶液の実効粘性 のモデル化に用いられるKrieger-Dohertyの式を 適用させた結果が図4の実線として表されてい る.Krieger-Dohertyの式は以下のように表され

 $\alpha\phi$

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

ここで, η , η_0 , ϕ , ϕ_{max} , α 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. 固体粒子が球形で希薄な場合は $\alpha = 2.5$ となる. 図 4の実線では, $\alpha = 5.5$, $\phi_{max} = 0.5$ (50%)とした. バラツキは大きいものの, 概ね実線は実験結果の 傾向をとらえている.

このことは、雪とテフラが混合した複雑泥流の 粘性は、両者の体積濃度を合わせた全固体成分濃 度により近似的に見積もれることを示している. 雪粒子は付着性が高いため、テフラに比べてより 粘性値を増加させる傾向があると考えられるが、 実験の結果、その効果は今のところ限定的である と言える.計測された粘性のバラツキは全固体成 分の濃度が大きくなると著しくなる.これは、実 効的な固化状態が近づくために系の非一様性が 増しているためと考えられる.しかし、この実効 的固化が実験系のサイズや流動化手法の限界に よる人工的要素である可能性もあり、今後さらな る検討が必要となる.

E. 結論

本年度はとくに、様々な粒径のテフラもしくは ガラスビーズと水、雪の混合比率を変化させつつ 泥流模擬サンプルを作成し、その粘性計測を行っ た.流動化のためには回転パン装置を用い、粘性 計測には音叉式粘度計を用いた。その結果、複雑 泥流の粘性は、テフラ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の式を 用いて)近似的に見積もることができることを明 らかにした。しかし、全固体成分の濃度が高い領 域で、粘性は大きなバラツキを示し、今後はこの バラツキの要因等について検討を進める必要が ある.また、流動していない状態からせん断応力 をかけた場合の降伏応力についても今後明らか にしていく必要がある.

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)

音叉式粘度計を用いた雪・水・火山砕屑物によ る混合物の粘性特性計測に関する検討,小田憲一, 新屋啓文,桂木洋光,雪氷研究大会(2023・郡山), 2023年9月3-6日,日本大学工学部

G. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む) なし