

新潟大学災害・復興科学研究所
共同研究報告書

擬集体を含む水・雪・火山砕屑物混合物の流れ特性

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

火山砕屑物（テフラ）と雪・水が混在する冠雪活火山の噴火にともなう火山泥流は、流下により大きな被害をおよぼす可能性を持つ災害の一つである。しかし、テフラ・雪・水が周囲の大気をも巻き込みながら流下する融雪型泥流の物理特性等を正確に把握することは容易ではない。この複雑混相流の基礎特性を理解することは、防災・減災を考える上でも重要と考えられるが、技術的な難しさ等もあり、これまで十分に研究が進展していない。そこで本研究では、融雪型火山泥流の基礎的流動特性理解を目指した室内実験およびその結果の解析を行うこととした。具体的には、昨年度までに明らかにされた「テフラ・雪・水混合凝集体」の形成条件や力学特性を基に、実際の火山泥流の条件下で凝集体が形成され得るのかについての検討を次元解析的手法により行った。その結果、実際の泥流条件においては凝集体を安定的に形成するのが難しいということが分かった。続いて、実際の泥流の基礎的な流動特性を評価する準備として、テフラと水の混合系の粘度測定を試みることにした。その結果、大きなテフラ粒子は比較的短時間で沈殿してしまい、小さなテフラのみが分散した状態となることが分かり、その状態での典型的粘度が数 10 cP 程度であることが分かった。実際の泥流の流動特性を正しく把握するためには、沈殿している底部に近い部分の粘度を知る必要もある。今後は雪を混合させた泥流での粘度測定、さらには深部流動特性の解明を行うことが課題となる。

A. 研究目的

冠雪火山の噴火により発生する融雪型火山泥流は、火山砕屑物（テフラ）が雪、雪解け水、周囲大気などと混合しながら流下することにより発達していくと考えられている。このような多相が混合した複雑流体はその扱いが難しく、基礎流動特性の解明等が十分に進んでいない。このような複雑混相流の流動様式を調べるために、沖田ら（2017）は融雪型火山泥流を模擬したテフラ・水・雪の混合物を人工斜面に流下させ、その様子を観察する実験を 0℃ の低温室内で行った。その中で、泥流は流下の初期段階で凝集体を形成し、その凝集体の影響により泥流の流れが阻害される可能性があることを明らかにした。しかし、どのような条件で凝集体が形成され、形成された凝集体がどのように泥流の流れ特性に影響を与えるかについての系統的な研究はこれまでになされていなかった。

そこで本研究では、融雪型火山泥流の状態を模倣したテフラ・水・雪の混合物を回転ドラムを用いて混合させて凝集体形成条件を明らかにする実験にこれまで取り組んで来た。昨年度までに様々な条件を変化させて系統的低温室実験を行い、どのような条件で凝集体が形成されるのか、また、形成された凝集体がどのような力学特性（圧縮応答）を示すのかについて明らかにしてきた。今年度は、これらの実験結果を吟味し、実際の泥流条件と比較することにより、天然の泥流中での凝集体形成の可能性について調べた。また、泥流の流動特性を最も良く特徴付ける量として、その粘度を計測するための予備的実験にも取り組んだ。この予備的実験により、粘度の第一次近似的概算値を求めるとともに、泥流の粘度測定において困難となる点などの洗い出しをすることを目的とした。

B. 研究方法

まず、凝集体の形成条件等について昨年度までに得られた実験データの解析、整理を進め、実際に観測された泥流の条件等との比較を行った。実際の泥流との比較においては、レイノルズ数などの無次元数を用いた次元解析的手法を用いることとした。

続いて、回転式粘度計（ブルックフィールド、DV-II）を用いてテフラと水の混合液の粘度を測定した。粒径が 32-63 μm 、120-250 μm 、250-500 μm のテフラを体積濃度 5%、10%含む混合液を作成し、回転粘度系で粘度の測定を行った。ただし、粒径の小さなテフラを用いた場合は安定的に分散した泥流状態が実現されたが、粒径の大きなテフラを用いた場合は、テフラが直ちに沈殿し、上澄み部での粘度測定となった。

C. 研究結果

これまで行ってきた室内実験により形成された凝集体はおおよそ 30 mm 程度の大きさを持つものであったが、凝集体形成時の流動流速等の条件については、実際の泥流と室内実験では異なる。実際の泥流と室内実験との流体力学的状態を比較するためには、無次元数を用いることが有用となる。具体的には以下で定義されるレイノルズ数を用いる。

$$Re = \frac{\rho_b U d}{\mu} \quad (1)$$

ここで、 ρ_b 、 U 、 d 、および μ はそれぞれ流体のバルク密度、流速、凝集体サイズ、流体の粘性係数（粘度）である。本研究では粘性係数を計測していないため、レイノルズ数の値を直接算出することは難しいが、その他の量は実験条件や結果から求まる。実験で凝集体が形成された条件を代入することにより、凝集体形成時には $Re\mu = 3.36 - 5.28$ となることが分かった。実際に観測された泥流における密度や流速の値をこの関係に代入し、泥流の粘度が実験のそれとほぼ同様であることを仮定することにより、泥流中の凝集体サイズを見積もることができる。Cronin et al. 1996, Lube et al. 2009 による泥流の流速および密度の値を用いると、泥流中に形成される凝集体のサイズは $d = 0.26 - 2.72$ mm となった。この値は雪粒子のサイズ程度に相当する。すなわち、実際の泥流中

に十分大きな凝集体を形成することは、流体力学的相似則によると必ずしも簡単ではないということが示唆されたと言える。

また、昨年度までに行った凝集体の圧縮試験により、凝集体の実効的強度が $F_c = 10^4$ Pa 程度であることも明らかになっている。この強度に相当する応力と泥流中で生じる動圧 ($P = \rho_b U^2 / 2$) を比較することにより、泥流中で凝集体が安定的に存在し得るか否かについて評価することが出来る。実際の泥流の流動状態の物性値を入れることにより、両者の比が $F_c/p = 0.08 - 2.86$ となることが分かった。これは、流体動圧が凝集体の強度にほぼ匹敵することを表している（凝集体を形成した実験においてこの比は $F_c/p \sim 10^3$ となっており、安定的に凝集体を形成できる条件である）。すなわち、実際の泥流では、凝集体が形成されたとしても流動中に壊れてしまうことが予想される。

以上の次元解析的検討の結果、実際の泥流条件下で、テフラと雪による凝集体形成が容易でないことが明らかになった。しかし、検討の過程で様々な仮定等をおいたため不定性も大きく、まだ実際の泥流中で凝集体が形成されることを完全に否定することも難しい。検討の過程で用いた仮定の中でも特に重要なのは、泥流の粘度が天然と実験室とで同一になるというものである。粘度は泥流全体の流動特性を決定するキーパラメータであるが、テフラや雪が混合した融雪型火山泥流における粘度の値は既知ではなく、詳細な実験的評価が必要となる。ひとたび粘度の値を評価することが出来れば、その値を用いた数値計算等も可能となる。

そこで、本研究では複雑泥流の粘度を定量的に計測することを次なる目標として設定し、その予備的実験を行った。粒径 32-63 μm 、120-250 μm 、250-500 μm のテフラを様々な濃度で水と混合させた懸濁液を作成したところ、図 1 に示すように、粒径が大きい場合には、テフラが短時間のうちに沈殿してしまうことが分かった。これは現実の泥流でも起こり得る現象であり、泥流で活発に流れている部分は比較的小さな粒径のテフラと水（と雪）の混合物で構成されている可能性がある。本研究では、粘度計測に用いた計測系の制約もあつ

て沈殿層上部の上澄み部のテフラ・水混合系の

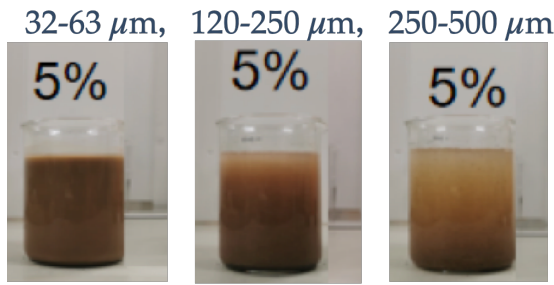


図1：テフラ，水混合溶液の分散・沈殿。

粘度を計測することとした。

テフラ・水混合系の計測に先立ち，標準校正液を用いて粘度計の校正を行い，校正係数を得てから，系統的計測を行った。

図2に，粘度の計測結果を示す．上記の沈殿の効果もあり，上澄み部の粘度についてのテフラ濃度依存性は明確には見られなかった．せん断率の上昇に伴い，粘度が上昇する傾向（シアースICKにニング）は全ての混合液で普遍的にみられた．また，粘度の値はいずれの場合も $10\text{--}30\text{ cP} = 0.01\text{--}0.03\text{ Pa s}$ の範囲に分布しており，テフラと水混合液の実効的粘度値を得ることには成功したと言える。

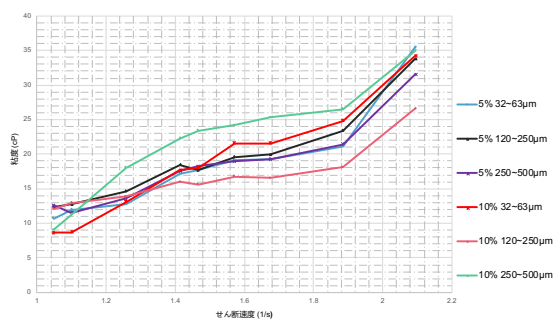


図2：テフラ・水混合系の粘性計測結果。

D. 考察

本年度の予備的実験により，粒径の小さいテフラのみが泥流中には分散し，その粘度はおよそ 10 cP 程度ということが分かった．しかし，数値計算等で用いる粘度値等を正確に議論するためには，大きなテフラが沈殿している底部に近い部分での粘度計測も必要となる．本年度の実験で用いた回転粘度計では，粘度の計測可能範囲等の仕様の

限界により底部領域での粘度計測は不可能であった．今後は，音叉式など異なる粘度計測手法を用いて，底部粘度を計測することが課題となる．また，今年度は水とテフラのみの混合物の粘度を計測した．実際の融雪型火山泥流の粘度を評価するためには，雪を混合させることも必要であり，それも今後の課題と言える．

E. 結論

室内実験で形成された，テフラ・雪・水の混合凝集体が実際の融雪型火山泥流の中で形成されるかどうかについて次元解析的検討を行い，実際の泥流中で cm スケールより大きいような凝集体が形成される可能性は低いことが分かった．しかし，凝集体を含むかどうかにかかわらず，融雪型火山泥流の粘度を把握することは防災・減災上も重要であるため，テフラと水の混合物についての粘度測定を行った．その結果，テフラの沈殿等の問題は見られたが，小さなテフラが分散している状態では，粘度がおよそ 10 cP 程度となり，せん断率の上昇にともない粘度も上昇する傾向が見られた．今後は，沈殿している部分や雪を混合させた場合の粘度測定が課題となる．

F. 研究発表

1. 論文発表

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).

2. 学会発表 (学会名・発表年月・開催地なども記入)

融雪型火山泥流に含まれる凝集体の成長に関する検討，小田憲一，新屋啓文，桂木洋光，雪氷研究大会 2020 オンライン，2020年11月16-18日。

融雪型火山泥流に含まれる凝集体の物理特性と力学特性に関する検討，小田憲一，新屋啓文，桂木洋光，混相流シンポジウム 2020，2020年8月21-23日。

G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

なし