

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	李 長澤
論文題目	On the Dynamic Mechanisms Governing Rock Avalanche Hypermobility: Insights from Coupled DDA-SPH Numerical Modeling (岩屑なだれの超流動性を支配する動的機構に関する数値的研究：DDA-SPH結合モデルによる新たな知見)		
(論文内容の要旨)			
岩屑なだれは、乾燥した岩塊が高速かつ長距離にわたって移動する、いわゆる超流動性を示す自然現象であり、時として地域社会に甚大な被害をもたらす。しかし、このような超流動性を示す岩屑なだれにおいて、移動岩塊の体積が増大するにつれて流動性が顕著に高まるメカニズムについては、依然として十分に解明されていない。本論文は、岩屑なだれが示す極めて長い到達距離（超流動性）と、その移動性が規模の増大とともに顕著に強化される「体積効果」の物理的起源を解明することを目的とする。岩屑なだれの超流動性に関しては、これまでに、運動土塊の破碎・流動化、すべり面付近における液状化や溶融による摩擦抵抗の低下、さらには運動土塊と基盤との相互作用など、多様な仮説が提案されてきた。しかし、地質条件に依存せず普遍的に観測される体積効果を統一的に説明し得る物理機構は、いまだ確立されていなかった。そこで本研究では、岩屑なだれの運動過程において必然的に生じる三つの動的過程、すなわち①衝突時の反発挙動、②速度・変位・拘束圧に依存した摩擦弱化、③摩擦に伴う岩塊形状の進化に着目し、これらが超流動性に及ぼす影響を数値解析により体系的に検討した。本研究により得られた主な成果は以下のとおりである。 1) 崩壊岩塊の衝突時におけるエネルギー散逸機構に着目し、岩塊間の反発係数を考慮可能な高精度三次元不連続変形法（DDA）解析手法を構築した。解析の結果、岩塊間反発係数が高い条件では、内部衝突によるエネルギー損失が抑制され、後続岩塊から先端部岩塊への運動量移送が促進されることが示された。一方、岩塊－地盤間反発係数は基盤におけるエネルギー散逸を支配しており、これが低い場合には、岩塊－地盤間の摩擦抵抗が低下しても、長距離移動は達成されにくいことを明らかにした。 2) 実験的知見に基づく摩擦弱化則をDDAに導入し、規模の異なる岩屑なだれおよび実在の崩壊事例に適用した。その結果、大規模な崩壊ほど高応力・高速度条件が形成され、摩擦弱化が顕著となることで、初期加速および崩壊土塊の流動性が著しく促進されることが示された。これにより、摩擦弱化が体積効果に直接寄与する主要因であることが、定量的に示された。 3) 崩壊岩塊の運動中に生じる摩擦に伴う岩塊形状の進化を考慮可能な新たな数値手法を提案し、摩擦試験結果に基づく較正を行った。さらに、実在の崩壊事例に対する解析を実施した。その結果、規模の大きな岩屑なだれほど衝突頻度および応力水準が増大し、岩塊の丸み化が進行して回転運動が卓越し、結果として移動性が向上することが示された。これは、形状進化が体積依存的な超流動性に寄与する可能性を示した、初めての数値的証拠である。 以上より、本論文は、衝突時の反発挙動、摩擦弱化、および摩擦に伴う形状進化という三つの動的機構が相互に作用することによって、岩屑なだれの体積依存的超流動性が発現することを示した。本成果は、岩屑なだれの移動挙動に関する物理的メカニズムの理解を深化させる重要な学術的貢献であるとともに、自然災害のリスク評価や防災対策の高度化に向けて、重要な示唆を提供するものである。			

(論文審査の結果の要旨)

岩屑なだれは、乾燥した岩塊が極めて高速かつ長距離を移動する超流動性を示す重力性地盤災害であり、発生した場合には地域社会に甚大な人的・物的被害をもたらすことが知られている。これまで、岩屑なだれの発生および運動機構について多くの研究が行われてきたが、とりわけ移動規模の増大に伴って流動性が顕著に高まる「体積効果」の物理的起源については、未だ統一的な理解が得られていない。

本論文において申請者は、岩屑なだれの超流動性を支配する力学的要因として、運動過程において普遍的に生じる三つの動的過程、すなわち衝突時の反発挙動、速度・変位・拘束圧に依存した摩擦弱化、および摩耗に伴う岩塊形状進化に着目し、これらが相互に作用することで体積依存的な移動性の増大が生じるとの仮説を提示した。申請者は、この仮説を検証するため、不連続変形法解析 (DDA) と粒子法 (SPH) を結合した高度な数値解析手法を構築・改良し、体系的な数値実験を通じて検討を行っている。

まず、岩塊の衝突挙動に関する検討において申請者は、反発係数を組み込んだ高精度に再現可能な三次元DDA手法を新たに構築し、岩塊間および岩塊―地盤間衝突に伴うエネルギー散逸機構を定量的に評価した。その結果、岩塊間反発係数が高い条件では内部衝突によるエネルギー損失が抑制され、後続岩塊から先端部の岩塊への運動量移送が促進されることを明らかにした。一方で、岩塊―地盤間反発係数が基盤でのエネルギー散逸を支配しており、この値が低い場合には、岩塊―地盤間の摩擦抵抗が低下しても岩屑なだれの長距離移動が実現しにくいことを示した。これらの成果は、従来ほとんど考慮されてこなかった衝突反発挙動の重要性を明確に示すものである。

次に、申請者は実験的研究に基づく摩擦弱化則をDDAに導入し、規模の異なる岩屑なだれモデルおよび実在事例に適用した。その結果、大規模な崩壊ほど高応力・高速度条件が形成され、摩擦弱化が顕著となることで初期加速および運動岩塊の流動性が促進されることを定量的に示した。この結果は、摩擦弱化が単なる補助的要因ではなく、体積効果を生み出す主要な力学的要因の一つであることを明確に示している。

さらに申請者は、摩耗に伴う岩塊形状進化に着目し、摩耗試験結果に基づいて校正した形状更新モデルを新たに提案し、実在事例の数値解析に組み込んだ。その結果、規模の大きな岩屑なだれほど衝突頻度および応力水準が増大し、岩塊の丸み化が進行することで回転運動が卓越し、岩塊の移動性がさらに向上することを明らかにした。これは、形状進化が体積依存的な超流動性に寄与することを示す初めての数値的証拠であり、本研究の独創性を示す重要な成果である。

以上のように、本論文は、岩屑なだれの超流動性と体積効果について、衝突反発挙動、摩擦弱化、および摩耗による形状進化という三つの動的機構を統合的に捉え、その力学的基盤を数値解析により明確に示したものである。本研究は、岩屑なだれの移動機構に関する理解を大きく深化させるとともに、崩壊岩塊の到達距離予測や災害リスク評価の高度化に資する重要な知見を提供する。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分な学術的価値を有するものと評価される。なお、令和8年1月14日に論文内容および関連事項について試問を実施した結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降