

論文審査の結果の要旨

氏名 佐藤広幸

本論文は、5章からなる。第1章はイントロダクションであり火星における地滑り地形や、先行研究の紹介とその問題点、本論文の概要などが説明されている。第2章は地滑り地形の形態解析がまとめられており、特に縞状の構造に着目した解析が述べられると共に、対象地域の地すべり形成に関する新しい概念モデルが提唱されている。第3章では第2章で提案されたモデルに基づいた数値解析が述べられ、このモデルの妥当性が示されている。第4章はモデルの詳しい議論が展開され、特に流動性に関する体積効果の原因や、地すべりに対する制約条件が示され、とそこから得られるマリネリス峡谷の環境進化に対する示唆を与えている。第5章では、本論文の結論がまとめられている。

本論文は、火星のマリネリス渓谷に多数存在する地滑り地形の形成過程、および形成に必要な周囲の環境条件に制約を与えることを目的として、地形解析および数値実験の2つのアプローチから研究を行ったものである。火星上の地すべりに関して、これまでも流れの物理や崩壊物の物性について議論が行われてきているが、本研究では解像度や周波数、量の意味で格段に向上した近年獲得されたデータを最大限に利用することで、従来行われてきた長さや幅といった形態的な統計量の比較に留まらず、堆積物の規模や表面構造を定量的に議論し、具体的な流動プロセスについて検討が行われている。

まず地形解析では、地すべり地形の表面に縦縞模様を呈する場合があることに着目し、縦縞の有無で形態を分類して定量的な議論を行っている。そして縦筋を伴う地滑りは、(1) 縦筋を伴わない複雑な形状の地滑りに比べ薄く延び広がること、(2) 堆積物がある一定のアスペクト比を保つこと、(3) 縦筋は崩壊物の移動・堆積と同時に形成されたこと、(4) 縦筋は規則正しく平行かつ直線的で、一定の幅・厚さの比を保つこと、という重要な形態的特徴を明らかにし、縦縞の構造はある種の自己組織化によって形成されていることが示した。その結果、観察された地すべりの形成を最も矛盾無く説明できるのは、乾燥した岩石粒子の流動体(粉体流)であり、特に不安定性から成長する縦渦と、岩石粒子の分級に伴う先端部分の分岐が、縦縞を形成したとするモデルを提唱した。

このように乾燥した岩石が流動したとするモデルは、例えばスロープストリークやデブリエプロンなど火星上の他の現象の形成過程においても過去に議論がされている。しかしこうしたモデルは、潤滑効果の欠如による流動性の低下が最大の欠点であるとされている。本論文ではこの問題点を十分に認識し、数値実験を行うことで、火星上における地すべりの流動性について検討している。その結果、粒子数(すなわち体

積)と重力の増加に伴って、流動中の内部歪が長時間にわたって底部付近に集中し、全体としては摩擦が減少して流動性が増すことを明らかにした。歪の伝播はシステムサイズに強く依存するために、体積増加の際には相対的に伝播が遅れ、歪が底部に集中すると説明している。これは流動性という側面からも、火星の特に縦縞を呈す地滑りが乾燥した粉体流で矛盾無く説明できることを示す重要な結果であると共に、従来定量的に検討されてこなかった体積と重力の効果が、粉体流の流動性において重要な役割を果たすことを明らかにしたものであるため、火星に限らず乾燥した斜面崩壊一般に見られる問題に対しても有益な新しい知見である。

こうして得られた結果を元に、1)乾燥粒子流における底部への歪集中の原因、2)地形学的証拠に基づいた縦筋形成モデルの検証、3)粉体流実験に基づいた縦筋形成モデルの検証、4)火星地滑りの形成条件、そして5)地滑り発生時における火星マリネリス溪谷周辺環境への示唆、の5つの点についても考察されている。特に縦筋形成モデルについては、地形学的証拠から粉体流中に発生する縦渦と粒子サイズ分離による先端部の分岐が最も妥当な形成モデルであると提唱されたが、縦渦については粉体流実験からその発生条件を火星地滑りが満たしていることが数値的に示唆されている。これらを総合的に判断すると、縦筋を伴う火星地滑りは、乾燥した状態の流れで形成されたという制約条件を得ることができる。興味深いことに、縦筋を呈す地滑りは、アマゾニア代前期以降、マリネリス溪谷内で急速に割合が増えており、溪谷内部がこの時期に乾燥状態にあったことを示唆している。

本研究では、これまで注目されて来なかった堆積物表面の縦縞模様という地形的に重要な特徴に着目し、詳細な観測からその形成プロセスを絞り込むことに成功した。一方で、乾燥した粒子流の流動性について粉体物理の側面から検証を行い、特に重力や体積の流動性に関する重要な知見を得た。ここで得られた結果は、火星地形学・環境変動学のみならず、他天体に見られる斜面崩壊や、非平衡系における粉体物理への応用が可能であり、高い一般性を有する。

なお、本論文第3章は、独立行政法人海洋研究開発機構、坂口秀氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となってシミュレーション、解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。