

学 位 論 文 題 名

火砕流の運動・堆積機構と災害防除に関する砂防学的研究

学位論文内容の要旨

火山地域における土砂災害をもたらす現象として、溶岩流、火砕流、火山泥流、土石流、山体崩壊、などがあるが、中でも火砕流はその発生が突発的であり、高温、高速で流下するため、最も危険な現象の一つである。火砕流による犠牲者は1902年プレー火山では28,000名、最近では、1991年雲仙普賢岳で44名、1993年マヨン火山で70余名に達している。

火砕流についてのこれまでの研究は、流下・堆積状態の定性的な記載や堆積層序、堆積物の組成から流れの状態を推定した火山地質学的なアプローチが主体であり、砂防学的観点からその運動・堆積機構・防災対策に焦点を当てたものはほとんどない。

火砕流災害の防止・軽減には、まず火砕流災害の実態と特性の把握、その運動・堆積現象に適合した力学モデルの作成が必要である。そして、火砕流の流下・堆積範囲を高い精度で予測できる数値シミュレーション手法の開発と、これに基づくハザードマップの作成が必要である。そして災害軽減のための火砕流対策工法の開発が求められている。

本論文は、火砕流の運動・堆積機構、ならびに火砕流災害の防除手法に焦点をあてた端緒的研究であり、以下の6章から構成されている。

第1章は研究方法である。

第2章では、火砕流による災害実態とその特性を明らかにした。まず初めに様々なタイプの火砕流を砂防学的に分類し、本研究で取り扱う火砕流を火山学で定義される「小規模な火砕流」に位置付け、代表的事例

である1902年ブレー火山、1783年浅間山鎌原火砕流災害の概要を既往資料により明らかにした。次いで、1991年雲仙普賢岳災害について、主として航空写真解析により、火砕流本体部・熱風部による災害実態を調べた結果、本体部は家屋などを完全に破壊、燃焼させ、高熱堆積物で被覆すること、熱風部は本体部よりも広範囲にわたって流下し、家屋などを倒壊、燃焼させる危険が高いこと、熱風部の温度は最低300～400℃以上であり、その風速は20～60m/secであることを明らかにした。また、浅間山の鎌原火砕流災害については、現存する本質岩塊の堆積状況、堆積物の堆積構造と物性を調べた結果、鎌原火砕流が火口から発生して柳井沼に流入し、沼地内の水と混合して火山泥流化したことを明らかにした。

第3章では、火砕流の運動・堆積特性を明らかにした。まず初めに、スメル火山、雲仙普賢岳での火砕流の運動状況を撮影したVTRを解析した結果、勾配（ I ）と本体部の速度（ v ）との間には $v = \alpha I^\beta$ の関係があること、 β は2.0程度、流速係数は3～7程度で地形や勾配に影響されて流下すること、一方熱風部は流路屈曲部で本体部から遊離して独自に流下する場合があること、雲仙普賢岳で観測された熱風部の密度は $0.7 \sim 6 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ であったこと等を明らかにした。また、雲仙普賢岳の火砕流堆積物において調査トレンチを掘削し、詳細な観察と室内試験を行ったところ、堆積構造は無層理で分級程度が悪く、マトリックスの中央粒径は約1mm程度であること、火砕流本体部と熱風部の境界付近にはサージ状の流れが存在する場合があることを明らかにした。さらに、雲仙普賢岳中尾川流域での治山ダムによる火砕流の捕捉状況から、航空写真・VTR解析、ダムの安定計算などにより、火砕流本体部の流体は 7.7t on/m^2 以下と小さかったことを明らかにした。

第4章では、第3章で得られた知見を基に、火砕流の運動・堆積機構を実験的に検討し、基礎的情報を得た。まず初めに、流路底面から空気を供給することにより、安息角以下の勾配でも砂を流動化できる特殊な

流路を用いて乾燥砂の定常流れを作り、火砕流本体部の運動に大きな影響を与えるパラメーターを検討した。その結果、勾配、空気上昇速度が重要であること、流速係数は3～7程度で実現象に近いこと、本体部の流速分布はダイラタント流体に近いこと、勾配が増加するにつれて全土砂濃度が増加すること、濃度分布型としては、底面付近が相対的にやや低く、流れの深さの中央付近が高いことなどを明らかにした。また、火砕流本体部の堆積形状に影響を及ぼすパラメーターとして勾配、空気上昇速度が重要であること、流路幅の2倍程度に分散して堆積すること、火砕流の流速が遅い場合は流下に伴う礫の分級が早くなされること等を明らかにした。

第5章では、火砕流の運動モデルを作成し、流下・堆積範囲をある程度の精度で予測できる数値シミュレーション手法を提案した。火砕流本体部の運動モデルは、本体部を構成している粒子同志の衝突によって生成される圧力、粒子間の個体摩擦によって生成される剪断力によって流れが支持されているとしたものである。熱風部の運動モデルは、本体部から供給される上昇気流が、火山灰などに浮力を及ぼすことによって形成・発達する平面2次元ながれであるとした。数値シミュレーション手法は、本体部、熱風部の運動方程式、連続式、本体部の土砂の連続式、本体部の土砂濃度式を連立させ、陽形式の差分式によって解くことにより、時々刻々の両者の運動を追跡する手法である。この数値シミュレーション手法を用いて雲仙普賢岳で発生した火砕流の流下・堆積範囲に関する再現計算を実施したところ、適切な粒子間個体摩擦係数の値を与えれば、比較的高い精度で、本体部の流下・堆積範囲を再現できること、本体部の流れにそった熱風部の運動に限れば、ある程度の精度での再現は可能であることを明らかにした。

第6章では、火砕流対策の基本的な考え方を提案した。ソフト対策としては、第4章で提案した数値シミュレーション計算によって火砕流の流下・堆積範囲、到達時間、流動深等を概略把握し、ハザードマップを

作成することが重要であることを明らかにした。さらに、浅間山の天明噴火による泥流災害のように、火砕流が水域に突入したことが誘因となって泥流災害を引き起こす場合を想定し、その場合の泥流の運動を予測する方法の基本的な考え方を明らかにした。ハード対策については、本体部と熱風部の運動機構の違い、自然地形や構造物等が火砕流の流下・堆積に及ぼす影響等を基に、本体部を扇状地等で捕捉する遊砂地、本体部の流向を制御するための導流堤、本体部と熱風部を人為的に遊離させるための曲流流路工、熱風部の乱れのスケールを低減させて浮遊粒子を沈降させるためのスリット工法等の可能性を示し、それらの基本的考え方を明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 新 谷 融
副 査 教 授 梅 田 安 治
副 査 教 授 藤 原 滉一郎
副 査 助教授 中 村 太 士

学 位 論 文 題 名

火砕流の運動・堆積機構と災害防除に関する砂防学的研究

本論文は、図87、表10、写真27を含む総頁数130ページの和文論文で、他に参考論文13編が添えられている。

火山地域の土砂災害のうち、その発生が突発的で高温・高速で流下する火砕流は最も危険な土砂移動現象である。

火砕流の研究は、これまで火山地質学的なアプローチが主体で、砂防学的観点からその運動・堆積機構と防災対策に焦点を当てたものはほとんどない。

本研究は、火砕流の災害特性とその運動・堆積機構の解明、ならびに、火砕流流下・堆積範囲の予測手法と火砕流対策工法の開発を試みたものである。内容は以下のように要約される。

〔1〕過去の代表的火砕流災害について資料解析を行い、砂防学的見地から火砕流現象を本体部と熱風部に区分している。そして、1783年浅間山鎌原火砕流の資料解析と堆積物調査とから、山頂火口から流下した火砕流が柳井沼地内の水と混合して火山泥流化し吾妻・利根川に流入したものと推測している。また1991年雲仙普賢岳災害についての写真解析と現地調査により、火砕流本体部による家屋の完全な破壊・燃烧と、高熱堆積物による農林地埋没と土石流発生との激化、ならびに熱風部による広域な家屋の倒壊、燃烧（熱風部温度：最低300～400℃以上、風速：20～60m/s）などの災害特質を抽出している。

〔2〕インドネシアのスメル火山と雲仙普賢岳でのVTRを解析し、本体部については、勾配（ I ）と速度（ v ）に $v = \alpha I^\beta$ の関係があり、流速は5～100m/s、流速係数は3～7程度、 β は2.0程度と土石流にくらべ大きいこと、一方熱風部は流路屈曲部等で本体部から遊離して直進する場合があること、等の運動特性を指摘している。また、堆積特性については、雲仙普賢岳火砕流堆積物のトレンチ観察と室内試験とから、無

層理で分級程度が悪いことを示唆している。さらに、治山ダムによる火砕流捕捉状況と航空写真・VTR解析、ダム安定計算などから、堆積域での本体部流体力は比較的小さいとの新知見を得ている。

〔3〕これらの知見を基に、火砕流本体部の運動・堆積機構を実験的に検討している。まず土砂量・粒径・勾配・空気上昇速度と流速変化に関する実験から、運動機構に大きな影響を与えるパラメーターとして、勾配、空気上昇速度が重要であること、さらに本体部は、実現象に近い3～7の流速係数、ダイラタント流体に近い速度分布、流動深中央付近で高い濃度分布を有すること、などの運動特性に関する基礎的知見を得ている。また、堆積機構にも勾配、空気上昇速度が重要であること、分散程度は土石流よりやや低いこと等を指摘している。

〔4〕火砕流の運動モデルを構築した。これは、本体部については、粒子衝突による圧力と粒子間固体摩擦による剪断力とによって流れが支持されるものとし、熱風部については、本体部からの上昇気流が火山灰などに浮力を及ぼす平面2次元流れであるとしたものである。つぎにこの運動モデルの数値シミュレーションによって雲仙普賢岳火砕流の再現計算を実施したところ、適切な粒子間固体摩擦係数(0.2～0.3)を与えることによって、流下・堆積範囲の予測が比較的良好な精度で可能となることを明らかにしている。

〔5〕数値シミュレーション計算を基に作成されたハザードマップ(災害予測図)は、火砕流災害予防・軽減の主方式となる危険区域の設定や警戒避難対策を実行する上で極めて有効であることを論じている。また、対策工法については、本体部の捕捉工(遊砂地)、流向制御工(導流堤)、本体部と熱風部との分離工(曲流流路)、さらに熱風部の浮遊粒子沈降工(スリット・ネット)等の可能性を提起している。

以上のように本研究は、雲仙普賢岳火砕流災害の実態からその運動・堆積機構を明らかにするとともに、火砕流対策の基本方式を提起したものであり、この成果は学術的に高く評価されるとともに、火山防災技術の発展に寄与するところが極めて大きい。

よって審査員一同は、別に行った学力確認試験の結果とを合わせて、本論文の提出者、山田 孝は博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。