

ふりがな	しょうじ あつし
氏名	庄司 淳
学位	博士（学術）
学位記番号	新大院博（学）第181号
学位授与の日付	平成19年9月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
博士論文名	ブロック雪崩の運動と衝撃に関する力学的特性

論文審査委員	主査 教授 和泉 薫
	副査 教授 高濱 信行
	副査 教授 西村 浩一
	副査 准教授 河島 克久

#### 博士論文の要旨

【背景と目的】 ブロック雪崩とは、春から夏にかけて山岳地の急斜面上に残る雪渓の一部が崩落し、高密度の雪塊や氷塊が細かく粉碎されないまま、落石のように転動、あるいは跳躍しながら落下する雪崩を指す。これまで日本ではブロック雪崩によって44名が死亡しており、最近では2000年6月に新潟県魚沼市浅草岳で遭難者の遺体収容中の警察官などがブロック雪崩に直撃され4名が死亡、5名が重軽傷を負っている。ブロック雪崩は高密度な雪塊による落石のような雪崩であるため、一般的な雪崩とは異なる運動特性や衝撃特性をもつと考えられる。しかしこれまでブロック雪崩に関する調査・研究はほとんど行われていない。

本研究はブロック雪崩の力学的特性を明らかにすることを目的に、斜面上で落下する雪塊の挙動観測によりブロック雪崩の運動特性を解析し、この運動特性を表現できる運動モデルを構築して数値シミュレーションを行い、さらに雪氷塊の衝突実験でブロック雪崩の衝撃力や破壊過程などの衝撃特性を明らかにした。

【方法と結果】 ① 実際の雪渓とスキージャンプ台において雪塊を落下させてブロック雪崩の運動特性を把握し、落石とブロック雪崩の運動特性を比較した。雪渓上を落下する雪塊の運動形態は、転がり・跳躍運動が主であり、流体的に落下する一般的な雪崩とは異なり落石に近い挙動を示した。等価摩擦係数と速度残存係数の比較により、ブロック雪崩の落下速度は抵抗の大きい斜面を落下する落石と同程度であること、ブロック雪崩は落石と比較して密度が小さく回転しやすいため、線速度エネルギーに対する回転エネルギーの割合が大きく、持ち込みエネルギーが落石の2倍程度になること、ブロック雪崩は落石に比べ斜面上を落下する過程での消耗が無視できないことなどブロック雪崩特有の運動特性が明らかにされた。

② ブロック雪崩の運動と落下速度を推定するために、落石で用いられる数値シミュレーションの手法を応用し、ブロック雪崩の運動モデルとして「変動多要素点モデル」を構築した。変動多要素点モデルは、重心の運動に周辺を取り巻く複数の要素点の運動を加えることにより、質点一つの運動モデルでは再現できなかった物体の形状や回転および消耗の効果を表現できることが特徴である。また、斜面の影響による運動形態

の遷移を既往の手法より簡略化した乱数処理によって表現したことも特徴の一つである。この運動シミュレーション解析を、雪渓とスキージャンプ台における高密度雪塊の落下実験に適用した結果、落下速度、回転状態、形状変化、および跳躍状況などの点で実際の実験結果とよく一致し、変動多要素点モデルがブロック雪崩の運動モデルとして優れていることが明らかにされた。さらに、この変動多要素点モデルを浅草岳での災害事例に適用した結果、犠牲者へのブロック雪崩の衝突速度は  $10 \text{ ms}^{-1}$  程度であること、雪塊の跳躍高さは 2 m 未満で運動はほぼ転がり運動であることなどがわかった。従って、雪面の大きな凹凸でブロック雪崩の襲来が見えにくい雪渓では、ブロック雪崩の雪塊に突然  $10 \text{ ms}^{-1}$  程度の速度で衝突される可能性がある。本研究によりブロック雪崩の危険性がこのように数値的にも把握できるようになった。

③ 高密度雪塊の衝撃力特性を把握するため、 $10 \text{ ms}^{-1}$  前後の速度で衝突する、様々な密度の雪氷塊の衝撃力を測定し、併せて高速度ビデオカメラによる雪塊の破壊状況の観察も行った。雪氷塊の最大衝撃力は密度とともに増加するとともに衝撃力波形は鋭い形状になり継続時間が短くなった。しかし、雪質や密度に関わらず、雪氷塊の衝突直前の運動量と受圧板の受ける力積はほぼ等しかった。すなわち、最大衝撃力の増加は力積の増加ではなく、破壊過程の違いによる力積の時間変化の違いによることが明らかにされた。

一方、高速度ビデオカメラによる雪塊の破壊状況の観測から、高密度雪氷塊は衝突直後に雪塊の後部まで至る亀裂が生じ、いくつかの大きな破片に分かれる破壊形式であることがわかった。このため、衝突直後の短時間に雪塊全体の運動量が変化し、低密度雪塊と比較して最大衝撃力が非常に大きく、継続時間の短い衝撃力波形となることがわかった。また、高密度雪氷塊の衝突角度による衝撃圧の違いを調べたところ、同じ雪質・形状・質量の高密度雪氷塊であっても、遇角的衝突では平面的衝突と比較して実質の衝突面積が減少するため、最大衝撃圧が 2～3 倍程度大きくなることが明らかにされた。また  $12 \text{ ms}^{-1}$  以下の衝突速度領域の氷の最大衝撃圧は 2.5 MPa であったことから、この衝突速度領域における雪氷塊の衝撃圧の上限値は 2.5 MPa とすることができ、衝突面積がわかれば雪氷塊の衝突による最大衝撃力の推定が可能となった。

## 審査結果の要旨

本研究は、これまでに災害となって多数の死傷者を出しながら調査・研究がほとんど行われていないブロック雪崩の力学的特性に着目し、ブロック雪崩を構成する高密度雪塊の斜面落下実験、衝突実験の遂行、独自の運動モデルの構築などによって、ブロック雪崩の運動特性、衝撃力特性を明らかにし、実際の現象に合致した運動シミュレーションを可能にするなど、極めて独創性、新規性に優れた研究である。本研究は雪氷学の分野でこれまで手薄であった高密度雪の物性について知見を進展させるばかりでなく、得られた力学的特性は高密度雪氷塊を含む雪崩現象全般に適用可能であることから、雪崩防災の工学分野にも有用な数値的指標を与えるものであり、学際的研究として高く評価される。

よって、本論文は博士(学術)の論文として十分であると認定した。