

学 位 論 文 題 名

Studies on Internal Structure of Powder Snow Avalanche and Growth of Snow Cloud

（混合型雪崩の内部構造と雪煙の発達に関する研究）

学位論文内容の要旨

斜面上の乾いた積雪が崩壊し流動化しながら流下すると、速度の増加とともに下部に密度の大きい「流れ層」、上部に「雪煙」が存在する「混合型雪崩」へと発達するケースが多い。これまでの雪崩研究では防災上の観点から高密度で破壊力の大きい流れ層のみが重要視されてきたが、1999年の欧州大寒波の際などには混合型雪崩の雪煙が流れ層より長距離を滑走し予想外の被害をもたらした例もあり、近年雪煙部の研究が急務となっている。

雪崩雪煙部の直接観測は、減速過程にある低速（10m/s 前後）のケースを捕えた1例があるのみである。相似則を考慮した室内実験も行われているが、流れ層から雪煙が発達する過程を再現することは事実上不可能である。そこで、雪煙が発達過程にある混合型雪崩の内部構造の解明を目的として、黒部峡谷志合谷で雪崩観測を行い3例のデータを取得することに成功した。衝撃圧の記録から雪の速度を、また雪崩内外の差圧分布から雪煙部の速度を算出した結果、30～60m/sの大規模な雪崩の速度構造が求められた。流れ層を構成する雪塊や流動化した雪の不均一な分布にともなう、雪煙部の速度が細かく時間変動する様子も明らかになった。ちなみに差圧から雪煙部の速度を算出する方法は、本研究が初めての試みである。さらに衝撃圧や差圧の周波数解析を行った結果、流れ層には長さが約10～15m程度の波状構造が存在し、雪塊や流動化した雪の分布および速度の変動はこれに対応することが確認された。

システムの限界から観測では雪煙最下部の情報しか得られないため、流れ全体の内部構造を調べる目的で、小規模の混合型雪崩を再現する野外実験を実施した。北大天塩研究林内の斜面に長さ36mのシュートを設置し、20または40kgの乾雪を流した実験では、流れの速度は10m/s以上に達し、各種センサの出力からは混合型雪崩と共通する層構造や波状構造が存在することが確認された。超音波風速計に加えて、風向・風速・静圧を測定可能な圧力測定管を新たに導入し雪煙部の測定を行った結果、波状構造の第1波先端に強い上昇流があり、これにともなう雪煙が発達する一方、波の後部では上昇流がしだいに減少する様子が明らかになった。さらに各種センサ出力を比較検討した結果、雪煙は第1波だけでなく、後続の波の先端部分からも再度発達している様子が確認された。

上記の観測および野外実験から、雪煙の発達には流れ層の波状構造が密接に関わっていることが示されたが、雪崩の波状構造に関する研究例は皆無に等しい。そこで、本研究では波状構造の発生条件や波長・波高等の特性について理論的な考察を行った。その結果、発生条件は開水路流れに現れる波状構造（転波列）の理論が適用できるほか、その特性も転波列と同様に走路の粗度を表すパラメータ（乱流摩擦係数： ξ ）によって変化することが明らかになった。雪崩の場合、 ξ は雪質、すなわち雪の流動性にも依存する点を考慮す

ると、雪質や走路の粗度によって波状構造の特性が変化し、これが原因となって雪煙の発達にも影響が及ぶことが推定される。

そこで、雪煙の発達に及ぼす雪質・走路等の影響を定量的に評価する目的で、流れ層の周囲流体（雪煙部）の運動を $k-\epsilon$ モデルを用いて計算した。計算では雪煙の高さに関与する斜面に鉛直方向の風速成分のほか、雪煙の密度に関与する流れ層上面から雪煙への雪粒子の輸送量（雪粒子フラックス）を、吹雪や飛砂の研究で使用される「せん断応力に比例して雪粒子フラックスが増加する」というメカニズムに従って算出した。波状構造の特性を変化させて計算した結果、新雪などの軟らかい積雪や粗度の小さい走路上を流下する雪崩では、雪粒子フラックスは大きい鉛直方向の風速成分は小さく、一方、硬い雪面上や峡谷など粗度の大きい走路上を流下する雪崩では、フラックスは小さいのに対し鉛直方向の風速成分は大きくなった。このことから、前者では密度が大きく背の低い雪煙が、後者は背が高く密度の小さい雪煙がそれぞれ発達すると結論される。

本研究において、混合型雪崩全体にわたる内部構造に加えて、雪煙の発達と雪質・走路の粗度の関係が明らかになったことは、流れ層と雪煙部を統合した雪崩運動モデルの構築など、今後の雪崩研究と災害防止の施策に大きく貢献すると期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 畑 哲 夫
副 査 教 授 本 堂 武 夫
副 査 助 教 授 白 岩 孝 行
副 査 主任研究員 西 村 浩 一

(防災科学技術研究所・長岡雪氷防災研究所)

学 位 論 文 題 名

Studies on Internal Structure of Powder Snow Avalanche and Growth of Snow Cloud

(混合型雪崩の内部構造と雪煙の発達に関する研究)

乾雪表層雪崩は、下部に高密度の流れ層、上部に雪煙が存在する混合型雪崩とよばれる運動形態をとる場合が多い。これまでは防災上、破壊力の大きい流れ層が注目されてきたが、雪煙による被害も現実には多数報告されており、当該研究分野ではこの部分の研究が課題となっている。

本研究では、まず混合型雪崩全体の内部構造を解明する目的で、黒部峡谷での雪崩観測を実施した。その結果、大規模な雪崩の流れ層と雪煙両者の速度の算出に成功し、雪塊や流動化した雪の不均一分布にともなう速度が変動する様子を明らかにした。また、周波数解析により、この変動が長さ約10～15mの波状構造に対応することが確認された。一方、野外実験は2種類行った。一つは傾斜が約40度の雪崩斜面に長さ40mのシュートを設置し、そこに20～40kgの積雪を流し、雪崩の発達した下部で測定を行った。もう一つは、スキージャンプ台を利用し、ピンポン玉を放出し同じく流れが定常状態に達した下部で測定を行う実験であった。前者では、志合谷での混合型雪崩と共通な層構造や波状構造が存在する流れの再現に成功した。雪煙の速度・風向・静圧のデータ等の解析により、雪煙は流れ先端のほか後続波の先端部からも上昇流にともない発達することが明らかになった。またピンポン玉雪崩では、流れ層の構造の可視化に成功するとともに、複数の波状構造から雪煙発生の原因となる上昇気流が発生し、粒子が浮遊状態になる過程が観測された。これらの観測で、雪崩には波状構造が存在することが確認され、雪煙はそれぞれの波状構造の先端から発達していることが明らかになった。

雪煙の発達に密接に関与する波状構造について考察した結果、発生条件については開水路流れに現れる波状構造(転波列)の理論が適用できること、また波高等の特性が転波列と同様に走路の粗度を表す乱流摩擦係数に規定されることを明らかにした。雪崩の場合、

乱流摩擦係数は雪質にも依存することから、波状構造は雪質や走路の粗度によって変化し、その結果、雪煙の発達にも影響を及ぼすことも指摘した。

最後に、波状構造の変化にもとづく雪煙の発達と運動に関する数値計算を行なった。その結果、新雪や粗度の小さい走路上を流れる雪崩からは、密度が大きく背の低い雪煙が、硬い雪面や峡谷など粗度の大きい走路上を流れる雪崩では、密度の小さく背の高い雪煙が発達することが示し、条件によって雪煙の状況も大きく異なることを示した。

以上の申請者が得た成果は、通常測定が困難とされる混合型雪崩全体にわたる内部構造を新しい測定機器、また野外実験手法を用いて初めて解明したことに加えて、雪煙の発達と雪質・走路の粗度の関係、状況による雪煙発達の差異を明らかにしたことに特色があり、雪崩の構造についての理解を一段と進めた点、そしてこれらの研究が雪崩のモデル化、災害予測に大きく役立てられることが高く評価できる。また研究者として誠実かつ熱心であり、研究業績等などもあわせ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。