

学位論文題名

Experimental study of the snow-drift  
saltation and splash process

(吹雪の粒子跳躍とスプラッシュ過程に関する実験的研究)

学位論文内容の要旨

吹雪に関する研究はこれまで数多く行われてきたが、その多くは特定の地域や場所における吹雪対策を目的としたものであった。そのためそれぞれの研究者によって得られた経験式（例えば吹雪量）が相互に2桁以上も異なっている点に関しては、ほとんど研究が行われていなかった。相違の見掛けの原因は、場所によって風、気温、雪質などが異なるため、ということができる。しかし、吹雪における雪粒子の輸送は、基本的に雪面からの粒子供給と風との相互作用によって決まるはずであるから、相違が生じる最も重要な原因は雪面近傍の粒子運動過程にあると考えられる。したがって、これまでほとんど研究の行われなかった雪質を考慮して雪面近傍の粒子運動過程を明らかにすることにより、相違が説明されると予想される。

本研究では以上の考察を基礎にして、雪面近傍における雪粒子の挙動を雪質に着目して詳細に調べるために、次の2つの実験を行った。1つは、雪質を決める重要なパラメータである粒径に着目して吹雪量を調べる実験であり、他の1つは2種類の雪粒子を用いて雪粒子が雪面に衝突、反発、射出する過程、すなわちスプラッシュ過程を詳細に調べる実験である。いずれの実験も、使用した風洞の温度は $-15^{\circ}\text{C}$ で、粒子間の付着力が無視できる条件で行われた。第1の実験では、摩擦速度を $0.15, 0.23, 0.30, 0.39\text{ms}^{-1}$ と変化させた際の吹雪粒子数を粒径別に計測する装置（Snow particle counter）により、粒径別吹雪粒子数フラックスの高度分布を求めた。第2の実験では、摩擦速度を、しまり雪では $0.19$ と $0.25\text{ms}^{-1}$ 、新雪では $0.17\text{ms}^{-1}$ にし、強力なレーザー光により可視化された雪粒子のビデオ画像からスプラッシュ過程における雪粒子の速度、角度および粒子数を求めた。

第1の実験では、粒子形状は球形で、密度は水の密度に等しいと仮定し、計測された吹雪粒子数フラックスから吹雪質量フラックスを算出した。粒径別に求められた吹雪質量フラックス $q_d$ は、雪面からの高さ $z$ とともに指数関数的に減少した（ $q_d = A_d \exp(-B_d z)$ ）。粒径別吹雪質量フラックスの減少率 $B_d$ を、高さのスケールで規格化することにより無次元量 $\lambda_d$

( $\lambda_0 = B_d(u_*^2/2g)^{-1}$ ;  $g$ :重力加速度,  $u_*$ :摩擦速度) が導入された.  $\lambda_0$ は-0.3~0.3の値をとったが, 粒径の増加とともに一定値(0.2)に近づいた. 粒径が約0.25mmより小さい時の $\lambda_0$ の値は小さく, マイナスの値をとることもあったが, これは浮遊メカニズムによる粒子輸送と考えられる. つまり粒径約0.25mmを境に, 雪粒子の運動形態が跳躍から浮遊に移ることが明らかにされた. また雪面における吹雪質量フラックス $A_d$ にも, 粒径約0.25mmを境に異なる摩擦速度依存が見られた.

吹雪質量フラックスを雪面から高さ方向に積分して求められる吹雪量は摩擦速度のべき乗で増加したが, べき指数は粒径によって変化し, およそ5から3の間をとった. すなわち粒径が大きくなると減少し, 跳躍による粒子輸送と考えられる粒径約0.25mm以上ではほぼ3に漸近した. これはBagnold(1941)による跳躍運動の理論的研究において, べき指数が3になるという結果に一致する. 粒径が小さい場合に大きなべき指数をとるのは, 運動形態が跳躍から浮遊に移るためと考えられる. つまり, 雪質の違いにより粒径が異なれば, 輸送に対する粒子跳躍と浮遊の寄与の度合いが異なり, 異なった地域や場所における吹雪量の測定結果に違いが生じることになる.

第2の実験では, 任意の速度と角度で衝突する雪粒子がどのような速度と角度で跳ね返るか, また何個の他の雪粒子を弾き出すかを記述する統計関数(スプラッシュ関数)を求めた解析は, 衝突速度1.00, 1.50, 2.00,  $2.50 \pm 0.25 \text{ms}^{-1}$ , 衝突角度5.0, 10.0,  $15.0 \pm 2.5 \text{deg}$ .の範囲で行われた. 雪粒子の衝突前後の鉛直方向速度比で定義される鉛直反発係数, 水平方向速度比で定義される水平反発係数, および射出粒子数を求めた結果, いずれの値も広い範囲に分布することが明らかとなった. 鉛直反発係数は0~10の値をとり, 水平反発係数は-1~1.5の値をとった. 両者の違いは, 衝突前の鉛直速度成分は水平成分に比べ一般に小さく, 衝突後, 粒子は様々な角度で跳ね返るためと考えられる. また, 鉛直反発係数は衝突速度と衝突角度に依存し, 1より大きい値をとる衝突も見られた. 鉛直反発係数が大きい値をとるということは, 雪粒子がより高い高度に達して風からエネルギーを受けることを意味し, 吹雪発達の本質的メカニズムと考えられる. 本研究においては, 鉛直反発係数と雪質および摩擦速度の間には依存性は見られなかった. 水平反発係数は, マイナスの値をとる衝突, すなわち風上に向かって射出する衝突も見られ, 衝突速度, 衝突角度, 摩擦速度, 雪質に依存した. 射出粒子数は摩擦速度と衝突角度にはほとんど依存せず, 衝突速度と雪質によってほぼ決定する. 以上の複雑なスプラッシュ過程を記述する鉛直反発係数, 水平反発係数および射出粒子数のスプラッシュ関数が求められた. 関数形としては鉛直, 水平反発係数に対してそれぞれガンマ分布および正規分布が使用された. これらのスプラッシュ関数は吹雪を含む種々の粒子輸送の研究分野で初めて求められたものである. この結果, これからは, 粒子跳躍による吹雪発達の数値計算を高い精度で行うことができるようになった.

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 前野 紀 一  
副査 教授 小林 大二  
副査 教授 香内 晃  
副査 助教授 高橋 英 紀  
副査 助教授 上田 博 (理学研究科)

学位論文題名

## Experimental study of the snow-drift saltation and splash process

(吹雪の粒子跳躍とスプラッシュ過程に関する実験的研究)

吹雪に関する研究はこれまで数多く行われてきたが、その多くは特定の地域や場所における吹雪対策を目的としたものであった。そのためそれぞれの研究者によって得られた経験式（例えば吹雪量）が相互に2桁以上も異なる根本原因である雪面近傍の粒子運動過程、特にその雪質に関する研究がほとんど行われなかった。本研究では雪面近傍における雪粒子の挙動を雪質に着目して詳細に調べるために、次の2つの実験を行った。1つは、雪質を決める重要なパラメータである粒径に着目して吹雪量を調べる実験であり、他の1つは2種類の雪粒子を用いて雪粒子が雪面に衝突、反発、射出する過程、すなわちスプラッシュ過程を詳細に調べる実験である。いずれの実験も、使用した風洞の温度は $-15^{\circ}\text{C}$ で、粒子間の付着力が無視できる条件で行われた。第1の実験では、摩擦速度を変化させた際の吹雪粒子数を粒径別に計測し、第2の実験では、強力なレーザー光により可視化された雪粒子のビデオ画像からスプラッシュ過程における雪粒子の速度、角度および粒子数を求めた。

第1の実験では、計測された吹雪粒子数フラックスから吹雪質量フラックスを算出した。粒径別に求められた吹雪質量フラックスは、雪面からの高さと共に指数関数的に減少した。粒径別吹雪質量フラックスの減少率を高さスケールで規格化することによりされた無次元量の値は $-0.3\sim 0.3$ であったが、粒径の増加と共に一定値(0.2)に近づいた。粒径が約0.25 mmより小さい時の値は小さく負の値をとることもあったが、これは浮遊メカニズムによる粒子輸送と考えられる。つまり粒径約0.25 mmを境に、雪粒子の

運動形態が跳躍から浮遊に移ることが明らかにされた。また雪面における吹雪質量フラックスの値にも、粒径約 0.25 mm を境に異なる摩擦速度依存が見られた。

吹雪質量フラックスを雪面から高さ方向に積分して求められる吹雪量は摩擦速度のベキ乗で増加したが、ベキ指数は粒径によって変化しおよそ 5 から 3 の値をとった。すなわち粒径が大きくなると減少し、跳躍による粒子輸送と考えられる粒径約 0.25mm 以上ではほぼ 3 に漸近した。これは Bagnold(1941)による跳躍運動の理論的研究の結果に一致する。粒径が小さい場合大きなベキ指数をとるのは、運動形態が跳躍から浮遊に移るためと考えられ、雪質の違いにより粒径が異なれば、輸送に対する粒子跳躍と浮遊の寄与の度合いが変わり、異なった地域や場所における吹雪量の測定結果に違いを生じることになる。

第 2 の実験では、任意の速度と角度で衝突する雪粒子がどのような速度と角度で跳ね返るか、また何個の他の雪粒子を弾き出すかを記述する統計関数（スプラッシュ関数）を求めた。解析は、衝突速度  $1.0\sim 2.5\text{ ms}^{-1}$ 、衝突角度  $5.0\sim 15.0\text{ deg.}$  の範囲で行われた。雪粒子の衝突前後の速度比で定義される鉛直反発係数、水平反発係数、および射出粒子数を求めた結果、いずれの値も広い範囲に分布することが明らかとなった。鉛直反発係数は  $0\sim 10$  の値をとり、水平反発係数は  $-1\sim 1.5$  の値をとった。両者の違いは、衝突前の鉛直速度成分は水平成分に比べ一般に小さく、衝突後、粒子は様々な角度で跳ね返るためと考えられる。また、鉛直反発係数は衝突速度と衝突角度に依存し、1 より大きい値をとる衝突も見られた。鉛直反発係数が大きい値をとるということは、雪粒子がより高い高度に達して風からエネルギーを受けることを意味し、吹雪発達の本質的メカニズムと考えられる。本研究においては、鉛直反発係数と雪質および摩擦速度の間に依存性は見られなかった。水平反発係数は負の値をとる衝突、すなわち風上に向かって射出する衝突も見られ、衝突速度、衝突角度、摩擦速度、雪質に依存した。射出粒子数は摩擦速度と衝突角度にはほとんど依存せず、衝突速度と雪質によってほぼ決定する。以上の複雑なスプラッシュ過程を記述する関数の関数形としては鉛直、水平反発係数に対してそれぞれガンマ分布および正規分布が使用された。これらのスプラッシュ関数は吹雪を含む種々の粒子輸送の研究分野で初めて求められたものであり、この結果粒子跳躍による吹雪発達の数値計算を高い精度で行うことができるようになった。

本研究は吹雪の粒子衝突過程を雪質に着目して調べた初めての研究である。特に、衝突の際の複雑な物理過程を記述する統計関数（スプラッシュ関数）を、自然の雪粒子を用いて数式化した世界で最初の研究であり、きわめて高い価値を持っている。本研究の成果により、これまでは不可能であった吹雪の衝突運動の現実的な数値計算が実施できることになった。よって審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者が堅実

かつ熱心であり、研究者としての十分な資質を備えているものと認め、大学院課程における研究や単位取得等も併せ、申請者が博士(地球環境科学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと判断した。