

学位論文題名

Studies on the dynamics of saltation in drifting snow

(吹雪における粒子跳躍動力学の研究)

学位論文内容の要旨

吹雪における雪粒子の運動形態は、ころがり (creep)、跳躍 (saltation) および浮遊 (suspension) の三種類に分けられるが、これらのうち、跳躍は、吹雪過程で輸送される雪の総量の80%以上を占めることもあるため、もっとも重要な運動と考えられている。一方、跳躍運動は、吹雪過程の中でころがりと浮遊に連続的につながっており、また運動力学的にはそれらと本質的に区別することは出来ない。この意味においても、跳躍は極めて重要な運動過程といえる。しかしながらこれまで、粒子跳躍運動の物理過程に関する詳しい研究はほとんど行われなかった。この理由は、粒子跳躍運動の研究の困難さにあった。すなわち、粒子跳躍運動の本質は、多数の粒子からなる雪表面に粒子が衝突し、微視的傾斜面の非鏡面衝突・反発と同時に、他の粒子を飛び立たせるという、統計的あるいは確率的過程にあると考えられ、この過程を系統的に明らかにするのが困難であったためである。本研究は、これまでほとんど研究が行われなかった、この統計的粒子衝突過程(以後スプラッシュ (splash) 過程と呼ぶ)を詳細に調べ、その特性を記述する関数を見出すことにある。

研究は大きく三つの部分に分けられる。第一の部分では、氷粒子の充填面に氷粒子を種々の速度、角度で衝突させ、そのスプラッシュ過程を詳細に調べる実験を実施し、スプラッシュ過程を記述する関数(以後これをスプラッシュ関数と呼ぶ)を得る。第二の部分では、スプラッシュ実験に用いたと同じ氷粒子による吹雪の風洞実験を行い、粒子跳躍の発生の確認と粒子濃度の鉛直分布の測定を行う。第三の部分では、得られたスプラッシュ関数を用いて粒子跳躍の数値シミュレーションを行い、粒子濃度の分布を記述する関数形について、実験と計算の結果を比較する。

スプラッシュ実験に用いた氷粒子は、純水を液体窒素の中に滴下する事によって作成された。氷粒子の大きさは、直径  $2.78 \pm 0.08 \text{ mm}$  にふるいで調整された。約 7000 個の氷粒子を直径 9 cm、高さ 1.8 cm の円形容器に詰め、表面を平滑に仕上げる事によって、スプラッシュ実験用の再現性のよい衝突面を作成した。スプラッシュ実験はその面に同じ直径の氷粒子を種々の速度、角度で衝突させることによって行われた。衝突速度は 3.5、5、7.5、10 m/s の 4 点、衝突角度は 10、20、30 度の 3 点、温度は  $-18^\circ\text{C}$  である。ただし、角度は水平面からの値である。

氷粒子と氷粒子充填面の様子はビデオ撮影（毎秒 60 駒）され解析された。照明光には 400 Hz のストロボ光を用いたため、ビデオの 1 駒には氷粒子の約 7 位置が撮影され、粒子の各瞬間の軌跡と速度が求められた。衝突速度と反発速度はこれらの点から衝突瞬間の値を外挿して求めた。

実験結果の概略は次のようになる。どの衝突速度においても、入射角度と反射角度の間には明瞭な鏡面関係はなく、衝突面の凹凸による無秩序な様相を示す。一方、反射速度と衝突速度の比、すなわち反発係数の値は、やはり大きな分布を示すが、平均的には衝突角度の増加とともに減少する。値の最大値は約 0.9 という大きな値を示し、水の物性値としての直衝突に対応している。入射角度に対する反発係数の平均的減少は、衝突面を構成する氷粒子群との相互作用によるエネルギー損失の増加による。

上述した氷粒子の衝突過程を記述するスプラッシュ関数として、 $S_v$ 、 $S_h$ 、 $S_s$  の三つが提案された。 $S_v$  と  $S_h$  は、それぞれ粒子の鉛直運動成分と水平運動成分に関するスプラッシュ関数、 $S_s$  は他の粒子をはじき飛ばす過程に関するスプラッシュ関数である。本研究では、吹雪の発達にもっとも寄与の大きいと考えられる鉛直運動に関するスプラッシュ関数  $S_v$  を求めことを目的とした。

$S_v$  を求める解析では、氷粒子の鉛直運動を記述する物理量として、反射速度の鉛直成分と入射速度の鉛直成分の比で定義される、鉛直反発係数 ( $e_v$ ) が用いられた。粒子跳躍の発達では、 $e_v > 1$  の出現確率がもっとも重要な要素である。各衝突速度において、鉛直反発係数を入射角度の関数として求めると、上述した反発係数の場合と同じような、微視的衝突面の凹凸に起因する確率的分布と、入射角度に対する平均的減少を示す。各入射角度における  $e_v$  の出現ヒストグラムが、求めるスプラッシュ関数に盛り込むべき情報である。一方、各入射角度において鉛直反発係数の衝突速度依存

を調べてみると、有意な関係はほとんど見出されなかった。これは、速度が増加すると、それに線形に依存するような衝突過程が進行し、実験が行われた速度範囲では、速度増加によって新しい型の衝突現象が発生していないことを意味する。

以上の解析の結果、鉛直反発係数  $e_v$  の出現確率を示すスプラッシュ関数として次の式が得られた。

$$S_v(e_v) = [1/\beta \Gamma(\alpha)](e_v/\beta)^{\alpha-1} \exp(-e_v/\beta)$$

ここで、 $\Gamma(\alpha)$  はガンマ関数、 $\alpha$  と  $\beta$  は、分布の形を決める定数で、

$$\alpha = 0.056 \theta_i + 3.8$$

$$\beta = 4.9 \theta_i^{-1.8}$$

である。 $\theta_i$  は入射角度である。

粒子跳躍の風洞実験は、スプラッシュ実験と同じ氷粒子を用いて同じ温度  $-18^\circ\text{C}$  で行われた。用いた風洞はゲンツチンゲン式の回流型で、実効長 8 m、断面積 50 cm x 50 cm である。風洞の底面に長さ 250 cm、厚さ 2.5 cm にわたって氷粒子を敷き詰め、風上に少量の種粒子を供給することによって粒子跳躍実験を行った。粒子跳躍の様子はビデオ撮影され、中心風速 7 m/s の時の粒子濃度の解析が行われた。粒子濃度の鉛直分布は指数関数で表された。

各時刻における粒子跳躍の様子は、1個の氷球に作用する空気抵抗と重力の効果を計算することによって求まる。粒子跳躍のシミュレーションは、中立状態で卓越する対数分布の風の中での氷球の運動として計算された。このとき雪面との衝突現象は、粒子が雪面に達したときスプラッシュ関数をアト・ランダムに発生させることによってシミュレートされた。得られた粒子軌跡からは、平均的な粒子濃度の鉛直分布が求められた。このようにして見積もられた粒子濃度の鉛直分布においても、濃度と高さの間には明瞭な指数関係が現れた。上述の風洞実験の結果と照らし合わせ、これは粒子跳躍による寄与と考えることが出来る。

結論として、本研究は、氷粒子が同じ氷粒子からなる不規則な凹凸面に衝突するときの複雑な衝突現象、すなわちスプラッシュ過程を実験的に明らかにし、その様子を記述するスプラッシュ関数の定量的な表示を得た。この結果は、粒子跳躍の数値シミュレーションに有効に活用され、その結果の正当性は、同じ氷粒子を用いた風洞実験によって示された。

# 学論文審査の要旨

主 査 教 授 前 野 紀 一  
副 査 教 授 菊 地 勝 弘  
副 査 教 授 小 林 大 二  
副 査 助 教 授 石 川 信 敬

学 位 論 文 題 名

Studies on the dynamics of saltation in drifting snow

(吹雪における粒子跳躍動力学の研究)

吹雪における雪粒子の運動形態のうち、跳躍は雪の総輸送量の80%以上を占めることもあるため、もっとも重要な運動と考えられている。粒子跳躍運動の本質は、多数の粒子からなる雪表面に粒子が衝突し、微視的傾斜面の非鏡面衝突・反発と同時に、他の粒子を飛び立たせるという、統計的確率的過程にある。本研究は、これまでほとんど研究の行われなかった、この統計的粒子衝突過程を詳細に調べ、その特性を記述する関数を見出したものである。

研究は大きく三つの部分に分けられる。第一の部分では、氷粒子の充填面に氷粒子を種々の速度、角度で衝突させ、その衝突過程を詳細に調べる実験を行った。その結果、どの衝突速度においても、入射角度と反射角度の間には明瞭な鏡面関係はなく、衝突面の凹凸による無秩序な様相を示す。一方、反射速度と衝突速度の比、すなわち反発係数の値は、やはり大きな分布を示すが、平均的には衝突角度の増加とともに減少する。値の最大値は約0.9という大きな値を示し、氷の物性値としての直衝突に対応する。衝突過程を記述するために、粒子の鉛直運動成分に関するスプラッシュ関数、水平運動成分に関するスプラッシュ関数、他の粒子をはじき飛ばす過程に関するスプラッシュ関数が提案され、本研究では吹雪の発達にもっとも寄与の大きいと考えられ

る鉛直運動に関するスプラッシュ関数 $S_v$ が求められた。 $S_v$ は、氷粒子の鉛直反発係数の出現頻度分布を表す関数である。各衝突速度において、鉛直反発係数は平均的に入射角度の減少とともに増加するが、各入射角度において衝突速度にはほとんど依存しない。これは、速度が増加しても、速度増加によって新しい型の衝突現象が発生しないことを意味する。結局、鉛直反発係数の出現確率を表すスプラッシュ関数としてガンマ分布が求められ、ガンマ分布関数の二つのパラメーターが粒子の衝突角度と衝突速度で表現された。ただし、上述した通り速度依存は見いだされなかった。

研究の第二の部分では、スプラッシュ実験に用いたと同じ氷粒子による吹雪の風洞実験を行い、粒子跳躍の発生が確認され、粒子濃度の鉛直分布が測定された。用いた風洞はゲンツチンゲン式の回流型で、測定された粒子濃度の鉛直分布は指数関数で表された。第三の部分では、得られたスプラッシュ関数を用いて粒子跳躍の数値シミュレーションを行った。計算は中立状態の対数分布の風の中での氷球の運動として行われ、雪面との衝突は粒子が雪面に達したときスプラッシュ関数をランダムに発生させることによってシミュレートされた。得られた粒子軌跡から求めた平均的な粒子濃度の鉛直分布は指数関数で表され、風洞実験の結果と一致した。

以上のように、本研究は吹雪跳躍運動の基本過程である氷粒子の複雑な衝突過程を実験的に調べることにより、その過程を記述するスプラッシュ関数の定量的な表示に成功したものである。同時に、その結果が粒子跳躍の数値シミュレーションに有効に活用できること、そしてその計算の正当性を同じ氷粒子を用いた風洞実験で示したものである。粒子跳躍のスプラッシュ関数の定量的表示は、吹雪だけでなく砂嵐等の一般の粒子跳躍運動研究で最初のものであり、今後この研究分野の発展に非常に大きな寄与をするものと予想される。審査員一同は申請者が博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を持つものと認める次第である。