

風洞実験と数値モデルによる吹雪の素過程の解明: 吹雪の発達過程に着目して

Drifting snow dynamics with wind-tunnel experiment and numerical modeling

鈴木 貴 [1]; 根本 征樹 [2]; 小杉 健二 [2]; 佐藤 威 [2]; 西村 浩一 [3]

Takashi Suzuki[1]; Masaki Nemoto[2]; Kenji Kosugi[2]; Takeshi Sato[2]; Kouichi Nishimura[3]

[1] 新潟大・自然; [2] 防災科研; [3] 名古屋大

[1] Niigata Univ.; [2] NIED; [3] Nagoya Univ.

吹雪の発達プロセスは、[1] 気流による粒子の取り込み、[2] 粒子の軌道変化、[3] 粒子と雪面との衝突（スプラッシュ）、[4] 風速の変化、といった4つの素過程から成ることが知られている（Bagnold, 1941）。Nemoto and Nishimura (2004) はこれらの全物理過程を組み込んだ吹雪のランダムフライトモデルを開発し、風洞実験や野外観測の結果を高い精度で再現することに成功した。しかし、素過程のうち [1] と [3] に関しては、実験の困難さもあって、未だに多くの課題が残されている。

こうした背景のもと、本研究では吹雪の発達過程に着目した風洞実験と数値モデル実験を実施し、両者を比較することで吹雪の素過程に関する考察を行った。

風洞実験は、防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの雪氷防災実験棟にある低温風洞を用いて行われた。長さ 14 m、幅と高さがそれぞれ 1 m の測定域にふるいで細かく粉碎した雪粒子を敷き詰め、風上から風速を与えて吹雪を発生させた。吹雪粒子の数と大きさは Snow-Particle-Counter を、風速は超音波風速計をそれぞれ用いて測定した。雪面上の同じ高さに設置された両者の位置を水平、鉛直方向に移動させて、吹雪が空間的に発達する様子を計測した。

数値モデル実験には、Nemoto and Nishimura (2004) によって構築された吹雪のランダムフライトモデルが用いられた。これは、個々の吹雪粒子の運動方程式から軌道を計算するというラグランジュ的視点に立ったモデルで、上述した吹雪の4つの素過程のほか、大気乱流、雪粒子の慣性効果、さらに粒径分布の効果が組み込まれており、吹雪の全体像の記述が可能である。

吹雪は、雪粒子が風によって大気中に取り込まれることで誘起される。したがって、吹雪発達の初期段階は、粒子と雪面との衝突（スプラッシュ）過程に比べて風による粒子の取り込み過程が卓越すると考えられる。そこで、まず吹雪発達の初期の段階に着目し、『1) 風による粒子の取り込み過程』について考察し、続いて、1) の結果を踏まえた上で、『2) スプラッシュ過程』についても議論を行った。

1) 数値モデルでは、風によって空気中に取り込まれる粒子の個数は、風のせん断応力と吹雪発生臨界応力との差に比例するという考え方に基づき計算される（Anderson and Haff, 1988, 1991; Shao and Li, 1999）が、その比例定数については未だ定量的な実測値が得られていない。そこで、本研究では吹雪発達の初期段階での吹雪の質量輸送（吹雪量）に着目し、風洞実験と数値モデルを比較検討の上、両者の結果が一致する値を決定した。得られた値は、飛砂に対して提案された Shao and Li (1999) の値より大きく、吹雪の場合では彼らの理論は取り込まれる粒子数を過大評価してしまう可能性が示唆された。

2) 風による粒子の取り込みに加えて、粒子と雪面との衝突過程（スプラッシュ）も十分に発達していると考えられる位置（吹走距離 $x = 10$ m）において、風洞実験と数値モデルの比較を試みた。その結果、摩擦速度 u_* が 0.27 m/s では両者は良く一致したが、より風速の大きい条件では数値モデルにより計算された吹雪量は実験結果を上回った。このことから、吹雪粒子と雪面との衝突によって弾き出される粒子数などを決定するスプラッシュ関数（Sugiura and Maeno, 2000）が、彼らの実験条件に近い $u_* = 0.27$ m/s では成り立つが、それ以上の風速条件では射出粒子数を過大評価している可能性がある。しかし、同じ風速のもとで、スプラッシュによる新たな粒子の射出を考慮せずに数値計算を行った結果においても、モデル計算の結果は風洞実験の値よりも大きくなることから、上述の吹雪量の不一致の原因は、射出粒子数以外にも存在することが示唆される。そこで、風洞実験結果とモデルによる飛雪粒子の粒径分布の出力を比較した結果、 $u_* = 0.27$ m/s では両者は良く一致したが、風速の大きい条件ではモデルの方が大粒子がより高い位置まで輸送されていた。実測に基づくスプラッシュ関数（Sugiura and Maeno, 2000）では、鉛直方向の反発係数（射出速度 / 入射速度）が、水平方向に比べて大きい。一方、射出速度の粒径依存性は考慮されていないため、風速の増加と伴に入射粒子の速度が上昇した場合に、本モデル計算では、多くの大粒子が実際よりも大きい鉛直速度を持って射出される。その結果が、高い位置での粒径分布の不一致をもたらしたと推定され、スプラッシュ過程の粒径依存性の解明が吹雪量輸送メカニズムの定量的評価に向けた次の課題であることも明らかになった。