

吹雪粒子の鉛直分布と挙動

Vertical profile and motion of drifting snow particles

竹内 政夫¹

Masao Takeuchi¹

Corresponding author: masao.takeuchi@gmail.com

吹雪粒子は転動、跳躍および浮遊という3つの運動形態で移動する。吹雪量をリアルタイムで測定する唯一の方法として、乱流拡散理論に基づいて飛雪量の鉛直分布を雪面まで外挿して全層の吹雪量を求めていた。それは浮遊粒子が雪面を発生源として見なしたもので、雪面から雪が舞い上がるイメージをつくりあげた。しかし雪面近傍のより詳細な鉛直分布は跳躍粒子が乱流渦によって浮遊粒子に転化することを示し、転動、跳躍から浮遊まで有機的に繋がったイメージが得られた。

1. はじめに

吹雪量は乱流拡散方程式で与えられる¹飛雪量 (mass flux) 鉛直分布を、雪面まで外挿して求めることが多い。しかしそれは乱流拡散の浮遊粒子の発生源を雪面と見なし、雪面近傍の転動や跳躍量を無視したことになる。雪面が発生源とするイメージ²が一般に知られているが、雪面では乱流渦動拡散のエネルギーが小さいことから矛盾する。定着した浮遊粒子の発生イメージであるが、吹雪研究の成果として継承することに疑問がある。そこで浮遊と跳躍粒子が混在する雪面近傍の飛雪量鉛直分布によって、改めて雪粒子の挙動について考える。

2. 吹雪粒子鉛直分布と吹雪量

2.1 浮遊粒子の鉛直分布

吹雪の飛雪量や濃度 (n) は高さ (z) によって異なり、雪面から飛雪層全体を合計した吹雪量は降雪量等と違って、1点だけの測定では求められない。塩谷³らは高さ5 cm から5 m までの飛雪分布の鉛直分布を測定し、両対数で直線分布になる乱流拡散方程式 (1) を適用し、飛雪量分布を雪面まで外挿して吹雪量を求めた。

$$\log \frac{n(z)}{n_0} = -k_2 \log \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

塩谷自身は地表近くを移動する転動・跳躍粒子が流れるように動くことから「流雪」とよび、乱流拡散理論が適用される浮遊粒子と区別した。この吹雪量測定法は受け継がれ、Budd *et al.*³による南極の大規模なプロジェクト研究などでも全層の吹雪量測定法として使われた。

乱流拡散とは乱流粒子濃度の高いところから低いところへ拡散することであり、分布の外挿は発生源を雪面としたことになる。また低い地吹雪の輸送量 (以降、低い地吹雪量) が無視されていることの疑問もある。

2.2 跳躍粒子の鉛直分布

浮遊粒子を含まない低い地吹雪でも大きな吹きだまりができる。低い地吹雪量は無視するには大きく、雪面を発生源とした乱流拡散方程式で求める吹雪量は転動と跳躍量の分だけ過小評価になると考えられた。放物線の軌跡を描く跳躍粒子の飛雪流量 (q) には、次の運動力学方程式 (2) が与えられている⁴。

$$\log q(z) = -k_1 z \quad (2)$$

竹内⁵は浮遊粒子と跳躍・転動粒子が混在する雪面から高さ30 cm までの間で飛雪量鉛直分布を測定した。転動・跳躍からなる低い地吹雪量が、乱流拡散方程式 (1) で求めた浮遊量より、小さいという予想外の結果であった。

2.3 雪面近傍の飛雪量鉛直分布

この結果に当時は、発生後十分発達していない石狩の吹雪の特徴ではないかという疑問が持たれた⁵。追試のため広大な米国ワイオミング州で石狩と同一方法で測定し、図1の飛雪量鉛直分布が得られた⁶。高さ約10 cm 以下の飛雪量分布は直線が下方に屈曲し、石狩の吹雪と同様に、外挿するより小さい値を示した。

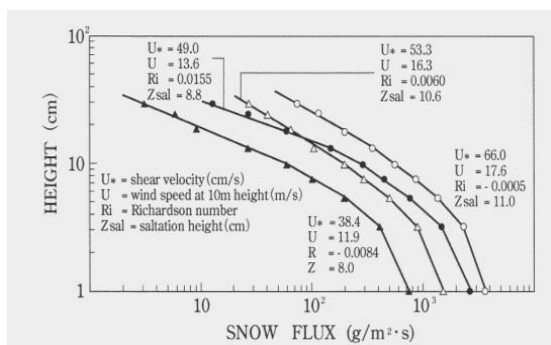


図1 飛雪流量鉛直分布 (両対数グラフ) ⑥

図1を跳躍に焦点をあてるため片対数で表すと、図1で屈曲が始まる高さから下は直線になる(図2)。これは(2)式の跳躍粒子の分布の形で、約10 cmの屈曲点の上は浮遊粒子、下は雪面まで跳躍粒子が卓越していることを示している。

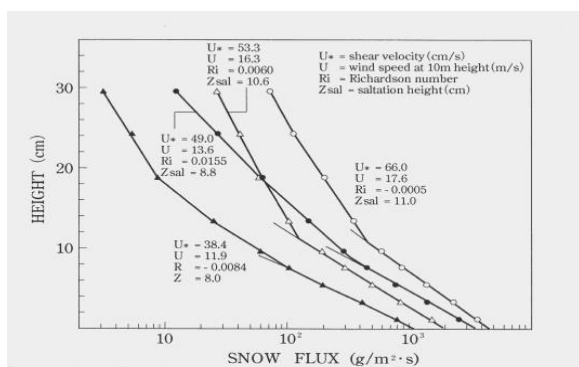


図2 飛雪流量鉛直分布 (片対数グラフ) ⑥

3. 吹雪粒子の運動と挙動

3.1 吹雪粒子の運動形態

雪面の雪粒子が重力と風の抗力で動き始める転動と跳躍の二つの運動形態は、Bagnold(1941)の飛砂の研究以来知られてきた。浮遊運動は乱流拡散理論によって理解される様になった運動形態である。Mellor(1965)は浮遊粒子の発生源を雪面として、雪粒に対する風の剪断応力による「かき乱し」で生まれる雪面の渦によって空中に持ち上げる仮説を出した。これが雪面から竜巻の様に浮遊粒子が発生するイメージ図となったと推測される²⁾。しかし雪面近傍の飛雪鉛直分布はMellor(1965)のイメージを否定している。

3.2 転動と跳躍

鉛直分布でみる雪面(高さ0)の飛雪流量は、跳躍量を雪面まで外挿したのと量的には全く同じである。また転動粒子が雪面の凹凸を越えて瞬

間的にでも雪面を離れるのを跳躍の発生とすれば、転動も跳躍の一部とも考えられる。

3.3 浮遊粒子の発生と発生源

飛雪鉛直分布からは浮遊粒子は跳躍の頂点部を発生源に発生している様に見える。仮説であるが、これが雪粒子を拡散させるに十分な渦拡散係数になる高さと考えられる。

4. まとめ

雪粒子が転がり、雪面の凹凸を越える時に転動から跳躍粒子に変わる。跳躍粒子は風からエネルギーを得て勢いを増して、雪面に衝突し、より高く跳ぶ。高さの関数の乱流渦の強さが跳躍粒子を運ぶのに十分になると、跳躍粒子は放物線軌道を外れ浮遊粒子に変わる。このように鉛直分布からは、吹雪粒子の挙動は転動から浮遊まで有機的に結びついているイメージが見える。

5. あとがき

強い風で雪面の雪が引き剥がされバラバラに砕けた雪塊から跳躍粒子や浮遊粒子が発生することもある。また転がりや滑りで雪面を移動する粒子の存在も否定はできない。しかし一般的には吹雪粒子は転動から跳躍そして浮遊へと発達すると考えられる。しかし仮説とした跳躍粒子がどの様に渦拡散して浮遊粒子に転化するか、発生源の高さなど理論的な裏付けが必要である。

参考文献

- 1) 塩谷正雄, 1953: 吹雪密度の垂直分布にたいする一考察, 雪氷, **15**(1), 6-9.
- 2) Mellor, M., 1965: *Blowing Snow*, Cold Regions Science and Engineering part III, Section A3c, Hanover, NH, U.S. Army, CRREL, p79.
- 3) Budd W.F. *et al.*, 1966: The Byrd snow drift project: outline of basic results, *Studies in Antarctic Meteorology*, Antarctic Research Series, American Geophysical Union, **9**, 71-134.
- 4) 河村龍馬, 1948: 風による砂の運動, 科学, **18**(11), 24-30.
- 5) 竹内政夫, 石本敬志, 野原多喜男, 1975: 吹雪量と飛雪量垂直分布, 雪氷, **27**(3), 114-121.
- 6) 竹内政夫, 2012: 吹雪の飛雪分布からみた構造, 2012 雪氷研究大会, 講演要旨集.