

## 吹雪の構造-跳躍から浮遊へ

## -Structure of blowing snow-from saltation to suspension-

竹内政夫 (雪氷ネットワーク)

Masao Takeuchi

## 1. まえがき

吹雪粒子には転動、跳躍、浮遊という 3 種類の運動形態があることは良く知られている。これら吹雪粒子がどのような形で混在しているかなど、吹雪の立体構造についての研究は少ない。また、吹雪には二つの理論があるとされているが、それらの適用範囲や関わりを明らかにし、これまで曖昧なままであった吹雪構造のイメージを視覚化する。

## 2. 二つの吹雪理論—運動力学理論と乱流拡散理論—

吹雪には運動力学理論と乱流拡散理論の二つの理論がある。前者は跳躍粒子、後者は浮遊粒子の物理である。筆者は、跳躍粒子の鉛直分布に転動粒子の存在する地表面までも合うことから、転動粒子は跳躍粒子の初期の状態で本質的には同じと考えている。ここでは二つの運動形態に対しての二つの理論があるとする。二つの理論から導かれる飛雪粒子(流量や濃度)の鉛直分布の違いに着目し、鉛直分布の実測<sup>1), 2), 3)</sup>によって議論する。歴史的には運動力学理論が先であるが理解しやすさから乱流拡散理論より始める。

## 2-1. 乱流拡散理論

一旦空中に運ばれた粒子が着地することなく漂う浮遊粒子を扱うのが乱流拡散理論である。乱流拡散理論による浮遊粒子濃度 $n(z)$ の鉛直分布式を単純化した(1)式のように、濃度の対数は高さの対数に逆比例する。

$$\log n(z)/n_0 = -k_2 \cdot \log z/z_0 \quad (1)$$

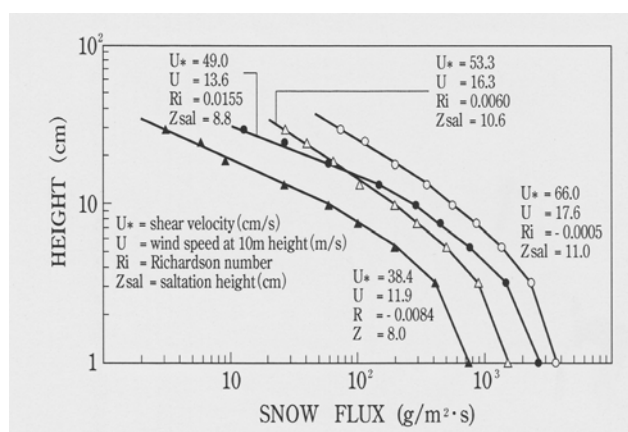


図-1. 飛雪流量鉛直分布 (両対数グラフ)

表から 30cm の高さまで実測した流量鉛直分布である。高さ約 10cm 以上で直線になるのは理論通りの浮遊粒子の分布であることを示す。逆に、それ以下地表面までが直線にならないのは浮遊粒子の分布でないからである。

浮遊粒子の源の高さが  $z_0$  で、 $z_0$  の高さの濃度が  $n_0$ 、 $k_2$  は常数項である。(1) 式は浮遊粒子(最大濃度:  $n_0$ )が高さ方向に風の乱れで拡散することを表している。実際に吹雪計で測定するのは飛雪の流量:  $q(z)$  (濃度:  $n(z)$  に風速:  $u(z)$  を掛けたもの)である。関数形は(1)と異なるが地表面の凹凸程度の空気力学的粗度の近傍までは濃度分布と同じように両対数グラフで表すと直線になる。運動力学理論の流量で表される分布との比較で示す。図-1 は  $q$  が地

## 2-2. 運動力学理論

運動力学理論は放物線の軌跡を描いて運動する跳躍粒子の運動理論である。流量の鉛直分布は、流量の対数  $\log q(z)$  が、高さ： $z$  に反比例するのが特徴である<sup>4)</sup>。(2) 式

( $k_1$ ：常数項)は運動力学理論である河村の式を単純化したもので、 $\log q(z)$ と $z$ を片対数で図示すれば直線になる。

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

跳躍粒子の飛雪流量鉛直分布の理論と実測との一致は、竹内他<sup>1)</sup>の飛雪流量の測定(図-2)、によって得られた。地表から約10cmの高さまでは、図-1のように、乱流拡散理論で

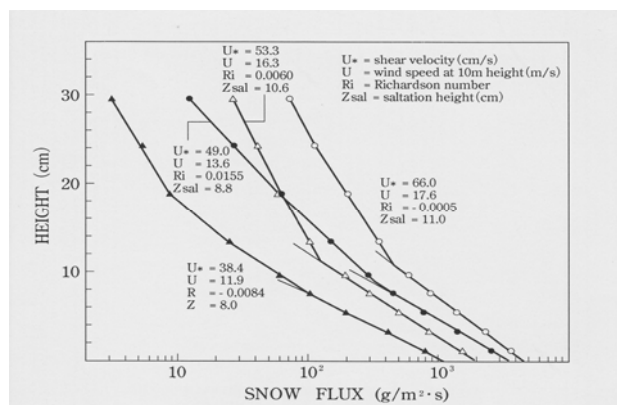


図-2. 飛雪流量の鉛直分布、片対数表示

説明できなかった領域であるが、図-2の地表近くが片対数で直線であるということは、そこでは跳躍粒子の存在が卓越した分布になっていることを意味している。即ちこの中では浮遊粒子の存在はあったとしても跳躍粒子の分布に影響しない程度の無視できる量であることを示している。

地表面まで跳躍粒子の分布になっていることは、跳躍も地表面の転動も同じ運動力学理論で扱えることを示す。つまり運動力学理論では跳躍と転動は同一とみなせる。地表近くまで飛雪分布を測定した例に、Budd 他<sup>5)</sup>の10mから3.125cmの高さまで測定した南極でのプロジェクト研究がある。乱流拡散理論に拠ったもので鉛直分布はほぼ地表面まで直線であった。竹内他<sup>1)</sup>は北海道の観測が吹雪発生箇所(川岸)から300m程度の離れであったことから、南極と違ってもしかしたら乱流が地表面まで十分に発達していないために、鉛直分布が地表面まで直線分布しない可能性があると考えた。検証のため同じ方法で吹走距離が十分長いワイオミング州で測定した<sup>3)</sup>。その結果は竹内他<sup>1)</sup>と全く同じものであった。Budd 他<sup>5)</sup>を否定する結果であるが、乱流拡散理論は当然ながら地表面までは適用できない。そのことを次に述べる。

## 2.3 乱流拡散理論の適用限界と測定方法の問題

### 1) 浮遊粒子の発生源は地表にはない

濃度の高いところから低いところに向かって拡散されるのが乱流拡散理論である。もし浮遊粒子の発生源が地表面であるなら、地表面の雪粒子は他のどこより最も濃度が高く浮遊状態になければならないことになる。静止状態の地表面の雪粒子の中から運動を始めるのは転動(跳躍)粒子であり、それには無理がある。運動力学理論では、浮遊粒子と跳躍粒子を区別していないか、浮遊粒子の存在を過小評価していると思われる。逆に乱流拡散理論では跳躍粒子の存在や浮遊粒子との関わりについては曖昧であった。

### 2) 測定時間－昇華による消失－

Budd 他<sup>5)</sup>の測定では浮遊粒子が地表近くまで存在するとしたが、竹内他<sup>1)</sup>は地表近くでは跳躍粒子に占められるとした。測定方法の違いも一因と考えられる。Budd 他<sup>5)</sup>は口

ケット型の吹雪計で、測定時間は一定しないが概ね 60 分間で測定している。捕捉された雪粒子は、空気が常に流入出する環境におかれるので、時間が長いと昇華損失は大きくなる。飛雪粒子は篩い分けされ昇華しやすい細かい粒子ほど高く浮遊し昇華も大きくなる。捕捉された雪が集まって塊になれば空気に晒されにくくなり昇華量も減少する。このことから考えて捕捉量が少なく強い風に晒される高いところほど相対的に測定値の信頼性は小さくなる。吹雪の定常状態が続く時間は短く頻繁に吹雪は断続するため、竹内他<sup>1)</sup>はできるだけ短時間の定常状態の中で測定できるように吹雪計の流入口を大きくした。そして、飛雪流量の測定時間は流量に応じて長くて 5 分程度から、飛雪量が多いときは短く 1~2 分であった。測定時間の問題とロケット型吹雪計での流量の多い地表面付近での測定には無理があると考えられる。

### 3. 吹雪の構造

吹雪粒子の鉛直分布からは地表近くでは跳躍粒子、高いところでは浮遊粒子で占められていることがわかる。そして、その境界は図-2 の地表からの直線分布が折れるところまでが跳躍層と考えられる。以上のようにこれまでにわかったことから、吹雪の発生から発達そして吹雪構造は次のように要約できる。雪表面は雪粒子と同程度の凹凸があり、突出した雪粒子が風を受けて転がり始めるのが吹雪の始まりである。転がりながら雪表面の凹凸を越えるときにジャンプし跳躍粒子になる。跳躍粒子が空中で風のエネルギーを得て、より速度を増して地表に衝突しさらにより高く跳ぶと同時に雪面から雪粒子を弾きだしながら量を増す。跳躍粒子はある高さを超えると放物線の運動を保てなくなり風の乱れに巻き込まれ高く飛び出し浮遊粒子になる。吹雪量の増加は吹雪の発達でもあるが、風速が臨界値を超えて跳躍粒子から浮遊粒子になるのも質的な発達である。乱流拡散理論が成り立つのに必要な浮遊粒子の源泉は跳躍粒子の上限にあり、ここでは無数の雪粒子が浮遊状態にある。このイメージを概念図にする。

#### 1) 転動から跳躍へ

雪粒子が転がり地表面の雪粒子の凸部を速度を増して乗り越えるときに、ジャンプすると跳躍粒子になり跳躍を繰り返して滞空時間が長くなるに従ってより高く跳び、風のエネルギーを蓄え着地の時に表面の雪粒子を弾くようになる。

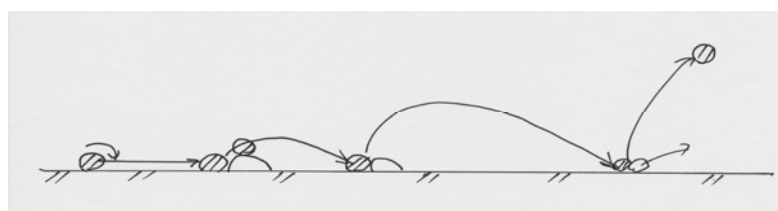


図-3. 転動粒子から跳躍粒子への変換（イメージ図）

#### 2) 吹雪構造 跳躍粒子から浮遊へ、跳躍層の高さ

跳躍粒子はある高さを超えると放物線の運動を保てなくなり、風の乱れに巻き込まれ浮遊粒子になる。跳躍粒子の高さ（跳躍層）の上限近傍には浮遊粒子密度の最も高いところ（1）式の  $z_0$  があり、浮遊粒子はそこから乱流に巻き込まれ高く拡散される。

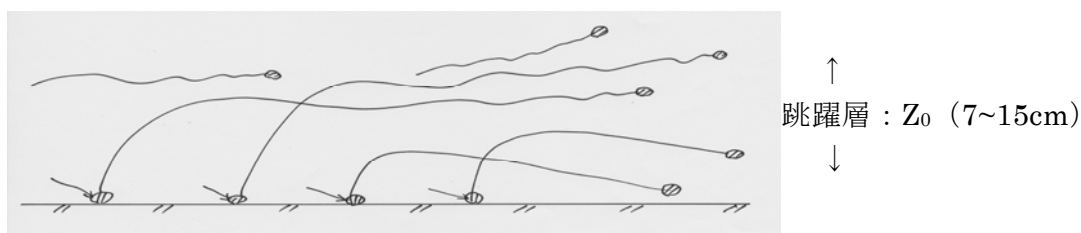


図-4. 跳躍粒子から浮遊粒子への変換 (イメージ図)

#### 4. あとがき

最近、海外で出版された雪崩の教科書的な本の中で、吹雪の乱流拡散を説明するのに地表面から煙のように湧き昇る 1965 年の Mellor と殆ど変わらない図が載っていた。乱流拡散の誤解を解き正しいイメージを伝える必要性を感じたのが本文のきっかけである。ここでは、吹雪は転動から始まり跳躍から浮遊へと転変するとしたが、始めから浮遊粒子になることもある。例えば、転がることはできない微細な粒子が、表面の雪が薄い板状の塊で剥離して滑り出し、まもなく粉々に吹き飛びそのまま浮遊粒子になる場合もある。また、構造物のまわりのように、風速や風向が激しく変化するところでは雪面が風食されて直接浮遊粒子になる。これからの吹雪研究の課題でもある。

#### 5. 文献

- 1) 竹内政夫、石本敬志、野原他喜男、1975 : 雪氷, 37. (3)、8-15.
- 2) Takeuchi, M. 1980: vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport, *Journal of Glaciology*, vol. 26, No. 94, 481-492.
- 3) 竹内政夫、ワイオミングの吹雪とその対策、1981、25 回開発局技研、274-281.
- 4) 河村龍馬、1948 : 風による砂の運動、科学, 18, 11, 24-30. —
- 5) Budd, Dingle, and Radok, 1966: A.G.U., Antarctic Research. Ser. 9, 71-134.
- 6) Mellor, M., 1965 : Blowing snow, CRREL monograph, Part III, Section A3c, Hanover, U.S. Army Corps of Engineers, CRREL, NH. 77pp.