

論 文

降雪粒子の落下速度と落下中の粒径および融解直径の関係

椎名 徹[†] 村本健一郎^{††}

Relations between Fall Velocity, Diameter of Snow Particles and Melted Diameter

Toru SHIINA[†] and Ken-ichiro MURAMOTO^{††}

あらまし 地上付近の降雪粒子の落下運動を解析することは、粒子生成のメカニズムを解明する上で重要である。特に落下中の降雪粒子の落下速度、粒径、密度を同時に測定することは、落下形態を定量的に解析するために重要である。本研究では、画像処理手法を用いて降雪粒子の映像を解析し、それらのデータの中から粒径、落下速度および密度データを抽出し、降雪粒子の落下現象の定量的な解析を行うことを目的とした。最初に、粒径と融解直径の関係を導き、粒径を変数とした落下速度の式から融解直径を変数とした落下速度の式に変換し、両式の間を求めた。更に、Reynolds数と抵抗係数を求め、これら物理量が落下速度と粒径および融解直径に与える影響を調べ、密度との関係を明らかにした。最後にこれらを考慮して、画像処理手法により得られた落下中の降雪粒子の観測データのみを用いて降雪強度を求め、画像処理手法による降雪強度の自動測定が可能であることを示した。

キーワード 画像計測, 降雪粒子, 落下速度, 融解直径, 降雪強度

1. ま え が き

北陸地方の降雪は、雪結晶が単独で降ることは非常にまれであり、結晶同士が併合、分裂して降雪粒子は複雑な形状となり、雪片あるいはあられの形態として降る。また、雪片を構成する雪結晶には多くの雲粒が付着するため[1]、雪片の密度が大きく変化し、降雪強度に影響する。この複雑な降雪粒子の落下運動の解析は、粒子生成のメカニズム解明、降雪量の推定等のために重要である。

降雪粒子の落下現象の研究は、降雪粒子の落下速度の理論解析[2]、終端速度の測定を中心にこれまで多くの研究が行われてきた。特に、Langleben[3]は雪片の融解直径 D を用いて落下速度 v を関係式 $v = k \cdot D^n$ の形で導出した。Langlebenは、落下中の雪片の一部を写真撮影し、その残像より落下速度を求めた。また、落下してくる雪片をろ紙で受け取り、溶けてろ紙に浸み込んだ面積から、水に換算したときの直径、すなわち融解直径を雪片の直径として代用した。さまざまな研究者によって雪片の落下速度の測定結果に、上記の関係式が適用された[4]~[6]。個々の雪片の粒径ではなく融解直径を用いることにより、この関係式は降雪雪片の密

度(雪質)に依存しないため、ほとんどの雪片に適用できる優れた式である。また、雪片の雲粒付着割合が大きくなると、 k , n の値はいずれも大きくなる傾向にあった。しかしながら、これまでの研究では、落下中の降雪粒子の3次元的な形状および粒径を直接測定せずに、落下後の2次元的な形状(面積)から間接的な融解直径を求めていた。また、カメラによるマニュアル撮影のため、大きな雪片だけを測定したので[7]、測定する雪片の個数が増加すると関係式の k および n が異なる値になる等の問題点があった[3]~[5]。

我々はこれまで高解像度のCCDカメラと画像処理手法を用いた降雪粒子の観測を行い、落下中の個々の粒子の粒径と落下速度および空間数密度を測定した[8]。従来のカメラを用いた降雪観測では人手により個々の粒子を測定するため、短い時間間隔で変化する降雪現象を観測できなかったが、CCDカメラ映像と画像処理手法を用いることにより高速に大量の降雪粒子を測定することが可能になった。更に、粒子観測の結果から大量のデータを用いても落下中の粒径 d と落下速度 v との間に $v = \kappa \cdot d^\epsilon$ の関係式が成り立つことがわかった。本手法を用いた降雪観測では、落下中の降雪粒子の粒径を測定するため、降雪粒子の密度により、 κ , ϵ が特徴的に変化した。すなわち、 κ , ϵ を求めることにより、降雪粒子の雪質の情報を得ることが可能となった。しかしながら、多くの研究に使われている融解直

[†] 富山工業高等専門学校電気工学科, 富山市

Toyama National College of Technology, Toyama-shi, 939-8630 Japan

^{††} 金沢大学工学部電気・情報工学科, 金沢市

Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kanazawa-shi, 920-8667 Japan

径 D を用いたLanglebenの関係式と直接比較することはできなかった。

次に、電子天秤を用いた降雪強度測定と画像処理手法を用いた降雪観測を併用することにより、降雪粒子の密度を測定するシステムを提案した[9]。このシステムは観測されるすべての降雪粒子の1分ごとの平均粒径、平均落下速度および電子天秤の降雪重量から1分ごとの平均密度を求めるものである。平均密度は粒子の雪質を定量的に表す重要な因子であり、1分ごとの定量的な雪質測定が可能になった。しかし、密度を粒径の関数として表しただけで、降雪粒子の密度が落下運動に与える影響について考察されていなかった。

本論文では、種々の降雪粒子の落下現象を規定する物理量として、1分ごとの落下中の降雪粒子の粒径、落下速度および密度を直接的に自動測定し、これら測定量と粒子のReynolds数と抵抗係数との関係から落下運動を定量的に明らかにすることを目的とする。そこで、画像処理手法によって観測された降雪粒子データの中から粒径、落下速度および密度のデータを統合し、粒径と融解直径の関係を導く。次に粒径 d を変数とした $v = \kappa \cdot d^e$ の関係式から融解直径 D を変数としたLanglebenの関係式 $v = k \cdot D^n$ に変換する式を導き、画像処理による観測データとLanglebenのパラメータ k , n とを直接比較し、雪片の雲粒付着割合等について議論する。更に、Reynolds数と抵抗係数を求める。従来、融解直径 D とこれらとの関係が調べられてきたが、本論文では、これら物理量が落下速度 v と落下中の粒径 d の関係式に与える影響について明らかにし、密度との関連を調べる。最後にこれらを考慮して、画像処理手法により得られた落下中の降雪粒子の観測データのみを用いて降雪強度を求める。

2. 観測装置

降雪粒子の観測方法については既に報告したので[8]、ここでは落下速度に関連する観測方法を中心に説明する。図1に降雪粒子観測装置を示す。観測塔内を落下してくる降雪粒子をCCDカメラを用いて撮影し、パソコンに組み込まれた画像処理ボードにより2値化処理の後、粒子映像の解析を行った。映像は1/30秒ごとに連続4画面の画像メモリに格納され、1画素の長さが0.5 mmとなるように画像処理ボードの分解能（縦横各240画素）に対する撮影空間（縦横各12 cm）を調整した。また、シャッタースピードが1/60秒に設定されたCCDカメラから取り込んだ映像は、鉛直方向に流

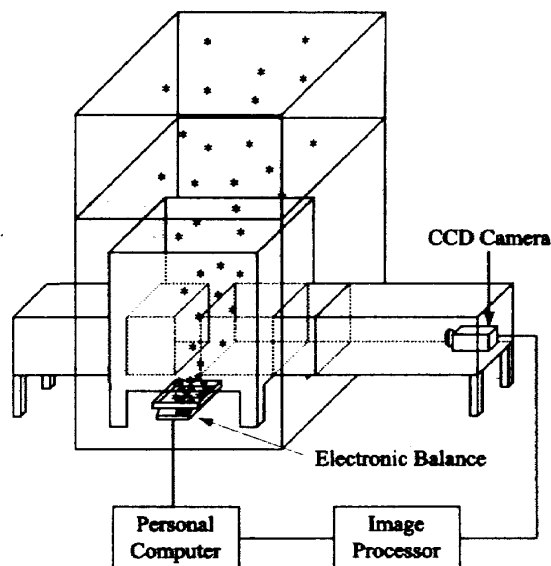


図1 降雪粒子観測装置

Fig. 1 Configuration of equipments for measuring snowflakes.

れた残像を描く。これら個々の粒子映像の残像の最大縦幅、最大横幅、面積（総画素数）を求め、観測データとして保存した。降雪粒子を球形と仮定し、粒子残像から落下速度を求めた。連続した4画面の測定は5秒ごとに繰り返す。1分ごとにまとめて（48画面分のデータ）シーケンシャルファイルに保存した。

なお、観測は1996年1月に富山高専電気棟屋上（富山市本郷町、標高50 m）にて行った。

3. 全降雪粒子の平均密度と粒径

ある時刻に降っている全降雪粒子の平均密度は、観測空間中を落下する全降雪粒子の総体積と総重量より得られる。電子天秤を用いることにより、単位面積当りに降り積もった重量を測定することが可能なので、単位面積を通過する降雪粒子の総体積と天秤の重量から平均密度を求めた。

落下中の降雪粒子の形状は複雑で、雪片の密度を求める場合にはこの複雑な形の雪片の体積をどのように見積もるかが大きな問題である。降雪粒子の形状および落下姿勢の解析によれば[10]、雪片の最短径と最長径は鉛直および水平断面積ともほぼ同じ値であり、横方向から見た雪片の断面積（鉛直断面積）を用いて、体積はその断面積と同じ投影断面積をもつ球の体積として密度の計算が行われている[7]。また、最短径と最長径の比が1/3以下の細長い粒子の落下姿勢においても、水平からの角度が0度付近と90度付近に主軸の分布をもつことが報告されている。北陸地方の観測では、丸形と逆円錐形の雪片が全粒子の大半を占め、縦

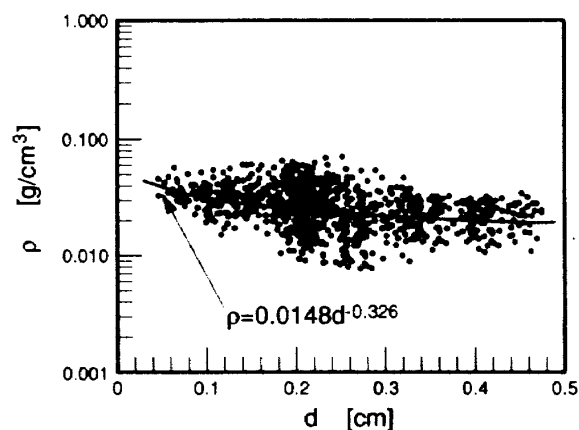


図2 平均粒径と平均密度の関係
Fig. 2 Density versus diameter of snowflakes.

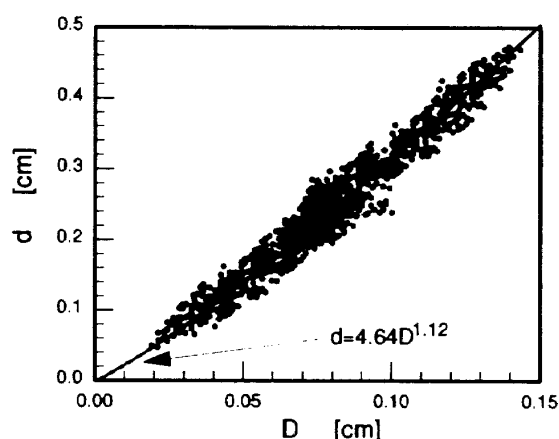


図3 融解直径と粒径の関係
Fig. 3 Melted diameter versus apparent diameter.

横比の同じ円錐の場合には、球との差は数パーセントと報告されている[7]。そこで、これらを考慮して本論文では球形と仮定して議論する。

個々の降雪粒子を粒径ごとに分類して、粒径 d の平均落下速度を v_d 、単位空間に存在する個数を n_d とする。単位時間に単位面積を通過する全降雪粒子の総体積は

$$V = \sum \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 \cdot n_d \cdot v_d \quad [cm/s] \quad (1)$$

となる[9]。また、単位時間当りに単位面積に降り積もる全降雪粒子の総重量 $M(g/cm^2s)$ は、電子天秤から直接測定できる。従って、全降雪粒子の平均密度 ρ は

$$\rho = \frac{M}{V} \quad [g/cm^3] \quad (2)$$

より求められる。図2に1996年1月9日の1分ごとに観測された全粒子の平均粒径と平均密度の関係を示す。粒径の小さい粒子の数が指数関数的に多いので平均粒径 d は小さくなり、0.2 cm付近に多く分布している。密

度は粒径が大きくなると減少するので、密度を粒径 d の関数として

$$\rho = \rho_0 \cdot d^{-r} \quad (3)$$

と表す。図中のすべてのデータについて回帰曲線を計算すると、 $\rho_0 = 0.0148$ 、 $r = 0.326$ となる。図中にこの回帰曲線を実線で示す。

Langlebenの用いた融解直径は、個々の雪片の重さをそのまま天秤で測定し、その重さに等しい水滴の直径を意味する。従って、粒径 d の降雪粒子の密度 ρ とその融解直径 D の間には次の関係式が成り立つ。

$$\rho = \left(\frac{D}{d}\right)^3 \quad (4)$$

この式と図2から求めた融解直径と粒径の関係を図3に示す。次に、式(3)と式(4)より、粒径と融解直径は次のような関係式で表される。

$$d = \rho_0^{-\frac{1}{r-3}} D^{\frac{3}{r-3}} \quad (5)$$

これにより融解直径と空中での粒径との関係が求まる。図中にはデータから求めた回帰曲線を示す。

4. 降雪粒子の落下速度

4.1 落下速度と粒径および融解直径

Langlebenは個々の粒子をカメラで撮影、捕そくして、その写真映像と捕そく質量から、落下速度 v と融解直径 D を求め、

$$v = k \cdot D^n \quad (6)$$

の関係式を求めた[2]。人手により測定したためデータ数は少ないが、密度を直接含まずに融解直径と落下速度の関係を初めて明らかにした。一方、CCDカメラによる映像を画像処理した降雪観測では、落下中の降雪粒子の粒径と落下速度の同時測定が可能であり、式(6)と同様に

$$v = \kappa \cdot d^\epsilon \quad (7)$$

の関係があることが示されている[8]。画像処理手法を用いた自動観測は短い時間間隔で連続して大量に降雪粒子を測定することができるので、式(7)のパラメータ κ 、 ϵ の経時変化を求めることが可能である。また、式(7)は粒子の密度に大きく依存するため、雪質を知る上で κ 、 ϵ は重要なパラメータである。式(6)と式(7)を比較することは大変興味深いだが、そのためには融解直径 D と落下中の粒子の粒径 d との関係を求める必要がある。3.の画像処理手法を用いた降雪粒子観測データと密度の

測定結果を用いて、式(4)を式(7)に代入すると

$$v = \kappa \cdot d^\epsilon$$

$$= \kappa \cdot \rho_0^{-\frac{\epsilon}{r-3}} \cdot D^\epsilon \quad (8)$$

を得る。すなわち、密度の測定を行うことにより画像処理手法を用いた観測データを式(7)から式(6)の関係へ変換することが可能となる。更に、密度を粒径の関数で近似する式(3)を用いて

$$v = \kappa \cdot \rho_0^{\frac{\epsilon}{r-3}} \cdot D^{\frac{-3\epsilon}{r-3}} \quad (9)$$

を得る。従って、式(6)と式(7)のパラメータの間に次のような関係が成り立つ。

$$k = \kappa \cdot \rho_0^{\frac{\epsilon}{r-3}} \quad (10)$$

$$n = \frac{-3\epsilon}{r-3} \quad (11)$$

図4に画像処理手法を用いた降雪観測から得られた粒径と落下速度の関係を示す。測定期間は、図2と同じ時間帯であり、1分ごとのこれらのデータから回帰曲線式(7)を求めると、 $\kappa = 100.4$ 、 $\epsilon = 0.279$ であった。 κ 、 ϵ および図2における式(3)のパラメータ $\rho_0 = 0.0148$ 、 $r = 0.326$ を用いて、式(10)、(11)からLanglebenの関係式のパラメータは各々 $k = 155.8$ 、 $n = 0.313$ に相当することがわかった。画像処理手法による降雪観測では、 κ 、 ϵ のみ計算され、直接、Langlebenの関係式のパラメータ k 、 n と比較できなかったが、式(10)、(11)より比較が可能になった。これまでの報告では、 k は数十から数百の値をもち、 n は0.2から1.0前後の値である[3]~[5]。式(10)、(11)から求めた値 $k = 155.8$ 、 $n = 0.313$ は、この範囲の中にあり、その中でも比較的中間の値をもつことがわかる。このことから、測定した時間帯において

は雪片に付着した雲粒の割合があまり多くないことがわかる。

4.2 Reynolds数と抵抗係数

粒径および融解直径と落下速度の関係が求められると、Reynolds数および抵抗係数を計算することができる。Reynolds数と抵抗係数は、降雪粒子の落下速度を決定する重要な物理量であり、式(6)と式(7)のパラメータ n 、 k と ϵ 、 κ をそれぞれ関連づける大切な因子である。

最初に、Reynolds数は

$$R_e = \frac{d \cdot v}{\nu} \quad (12)$$

から求まる。ここで、 ν は空気の運動粘性係数であり、0°Cにおいて $1.33 \times 10^{-1} \text{ (cm}^2/\text{s)}$ である。観測地における降雪時の気温は平均0°C前後であったので、この値を用いる。

次に、地上付近を落下する降雪粒子は、重力と空気抵抗が釣り合って終端速度で落下するので、抵抗係数 C_D は

$$m \cdot g = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot v^2 \cdot C_D \cdot S \quad (13)$$

から求めることができる。ここで、 m は降雪粒子の質量、 ρ_a は空気の密度で $1.29 \times 10^{-3} \text{ (g/cm}^3)$ 、 g は重力加速度、 S は降雪粒子の断面積である。ここでは、重力に対して降雪粒子の浮力は小さいので無視した。また、降雪粒子は球形と仮定しているため、粒径 d を用いて断面積 $S = \pi \cdot (d/2)^2$ とした。

図2の降雪粒子のReynolds数と抵抗係数の分布を図5に頻度分布にて示す。図中の数字は1分を1単位とする頻度を表す。Reynolds数は80から200の範囲、抵抗係数は0.2から7の間に分布することがわかる。また、

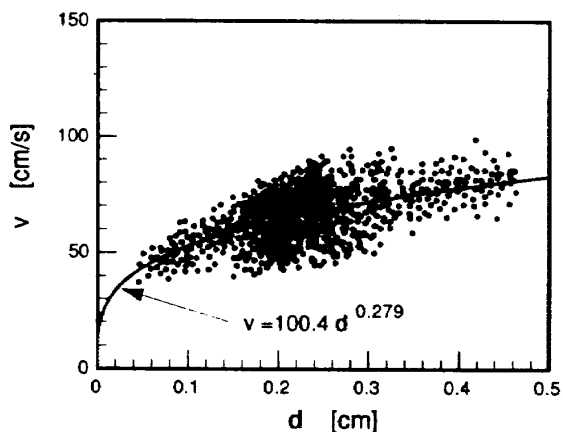


図4 粒径と落下速度の関係

Fig. 4 Relationship between the fall velocity and the diameter.

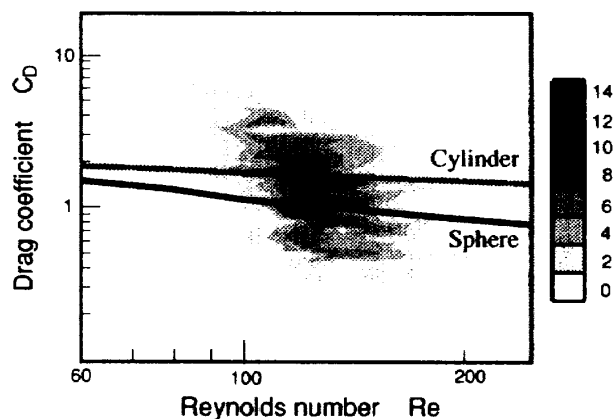


図5 Reynolds数と抵抗係数の関係

Fig. 5 Reynolds number versus Drag coefficient of snowflakes.

Reynolds数の増加と共に抵抗係数が減少していくことがわかる。図中に参考として流体力学から得られる球体および円柱（半径と高さが同じ）のReynolds数と抵抗係数の関係曲線を示す。本論文では降雪粒子を球と仮定して、落下速度等を計算してきた。図中の曲線と頻度分布を比較すると、分布はかなりばらつきがみられるが、球と円柱付近は頻度が高いことがわかる。

4.3 落下速度と物理量の関係

これまでの研究では、Reynolds数と抵抗係数を求め、Langlebenの関係式(6)の融解直径に対するパラメータ k , n との関係調べていた[7]。しかし、Reynolds数と抵抗係数は落下中の降雪粒子の落下速度を決める重要な物理量であるため、融解直径よりも落下中の粒子の形状、粒径および密度と落下速度の関係を求めることが重要である。そこで、落下中の降雪粒子の粒径を用いて、式(6)だけでなく式(7)とこれら物理量の関係を導く。

物理量と式(6)との関係については、Fujiwara [11]により抵抗係数がReynolds数のべき乗に比例することを仮定した式(14)を用いて求めている。

$$C_D = a \cdot (d \cdot v)^j \tag{14}$$

但し、 a および j は定数であり、本論文でもこの仮定を用いる。式(13)と式(14)より、

$$v = \left(\frac{4g}{3a\rho_a} \right)^{\frac{1}{j+2}} \cdot \rho_0^{\frac{1}{j+2}} \cdot d^{\frac{j+1}{j+2}} \tag{15}$$

を得る。この式において、 ρ もまた粒径の関数である。そこで、式(3)を用いて

$$v = \left(\frac{4g}{3a\rho_a} \right)^{\frac{1}{j+2}} \cdot \rho_0^{\frac{1}{j+2}} \cdot d^{\frac{j-r+1}{j+2}} \tag{16}$$

となる。この式と式(7)を比較すると、落下速度のパラメータは

$$\kappa = \left(\frac{4g}{3a\rho_a} \right)^{\frac{1}{j+2}} \cdot \rho_0^{\frac{1}{j+2}} \tag{17}$$

$$\varepsilon = \frac{-j-r+1}{j+2} \tag{18}$$

のようになる。粒径と密度の関係から ρ_0 , r が、Reynolds数と抵抗係数の回帰式から a と j が得られ、落下速度のパラメータ κ , ε が式(17), (18)から計算される。

κ , ε の特徴を調べるために、1分間に観測されたすべての降雪粒子の粒径と落下速度から回帰曲線（式(7)）を求め、得られた1分ごとの κ と ε を図6に示す。

式(17), (18)より ρ_0 が増えると κ が大きくなり、 r が増えると ε が大きくなり、結果として落下速度が大きくなると考えられる。また、 j が小さくなると κ と ε は大きくなるが、 κ はべき乗で変化するのに対して ε は比較的緩やかに変化するため図6のような分布関係になると考えられる。

これらの結果を確認するため、Langlebenの式(6)のパラメータも同様の手順で、式(8)を用いることにより

$$v = \left(\frac{4g}{3a\rho_a} \right)^{\frac{1}{j+2}} \cdot \rho_0^{\frac{1}{-r+3}} \cdot D^{\left(\frac{3}{j+2} - \frac{3}{-r+3} \right)} \tag{19}$$

を得る。これは石坂の導いた結果[7]と一致していることがわかる。式(16)~(18)は本システムを利用して初めて得られるものであり、落下中の降雪粒子の落下速度を表す重要な関係式である。

図2の観測データから得られた回帰曲線のパラメータ ρ_0 , r と、図5から回帰曲線を求めて得られる式(14)のパラメータ a , j とを使って求めた式(17), (18)の各値を表1に示す。表の下部には石坂の雲粒付着度によって分類された3タイプ（A, BおよびCタイプ）のデータを比較のために示す[7]。雲粒が比較的少なく構成結晶が明瞭にわかるものをAタイプ、雲粒が多く結晶が明瞭でないものをBタイプ、Bタイプの雪にあられ状の雪塊が混入しているものをCタイプとして分類している。

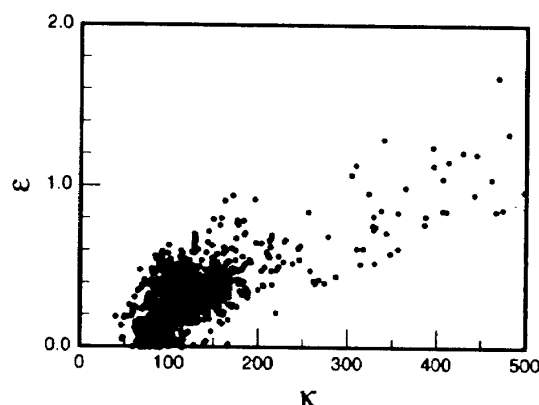


図6 落下速度パラメータの関係
Fig. 6 κ versus ε .

表1 落下速度に関する各定数
Table 1 Parameters of relationships with fall velocity.

| | j | a | κ | ε |
|-----------|-------|------|----------|---------------|
| This work | -0.22 | 2.65 | 128 | 0.255 |
| A type | -0.28 | 3.04 | | |
| B type | -0.24 | 2.48 | | |
| C type | -0.20 | 1.92 | | |

論文/降雪粒子の落下速度と落下中の粒径および融解直径の関係

本論文の a, j の値は A タイプと C タイプの間にあることがわかる。図 6 は 1 分ごとに κ, ϵ をプロットしたものであり、表 1 に示す κ, ϵ は 1 分ごとのデータを 1 点として全観測時間帯について回帰曲線を求めて得られたものである。従って、表 1 の値は図 6 のほぼ平均値を示していると考えられる。

5. 降雪強度の算出

落下速度と物理量の関係が明らかになったので、画像処理手法による降雪観測データのみを用いて降雪量を推定する。降雪量は降雪強度を時間で積分することによって得られるので、ここでは降雪強度を直接求める。

粒径 x に対する粒子数 $N(x)$ は指数分布に従い、

$$N(x) = N_0 \exp(-\lambda x) \tag{20}$$

で表される。ここで、 N_0, λ は定数である。図 7 に粒径に対する粒子数を示す。なお、使用したデータは図 2 と同じ時間帯である。図には式(20)で、 $N_0 = 512, \lambda = 1.12$ のときの関係を破線で示す。

降雪強度は、1 時間当りに降り積もる降雪量を降水量 (mm/h) に換算した高さで表される。従って、降雪強度は粒径 x の数密度 $N(x)$ 、落下速度 $v(x)$ と密度 $\rho(x)$ を用いて

$$R = \int_{x=0}^{x=\infty} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{x}{2}\right)^3 \cdot \rho(x) \cdot v(x) \cdot N(x) \cdot dx \tag{21}$$

により求めることができる。ここで、粒径 x の落下速度 $v(x)$ と密度 $\rho(x)$ は式(7)および式(3)を用いて、更に式(20)を代入して、

$$R = \frac{\pi}{6} \int \rho_0 \cdot \kappa \cdot N_0 \cdot x^{3+\epsilon-r} \cdot \exp(-\lambda x) \cdot dx \tag{22}$$

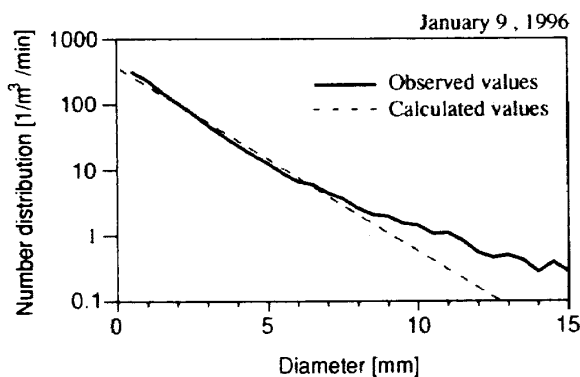


図 7 降雪粒子の粒径分布
Fig. 7 Distribution of snowflakes.

を得る。この積分を求めることは容易ではないが、4. の観測結果から x の指数部の ϵ と r はほぼ等しいので、 $3 \gg \epsilon - r$ と仮定することが可能となり、積分は解析的に解けて、

$$R = \frac{\pi}{6} \int \rho_0 \cdot \kappa \cdot N_0 \cdot x^3 \cdot \exp(-\lambda x) \cdot dx \tag{23}$$

$$= \frac{\pi}{\lambda^4} \cdot \rho_0 \cdot \kappa \cdot N_0$$

となる。ここで、 $\epsilon = r$ は、密度と落下速度の積が粒径によらず一定になることを意味している。すなわち

$$\rho(d) \cdot v(d) = \rho_0 \cdot \kappa \tag{24}$$

を仮定したことになる。図 8 に $\rho \cdot v$ の分布を示す。分布にかなりばらつきがみられるが、粒径による変化が少ないことがわかる。以上のように、画像処理手法を用いた降雪観測データのみから落下中の降雪粒子の降雪強度を式(23)を用いて求めることが可能となった。

図 9 (a) は、1996 年 1 月 9 日に観測された画像データか

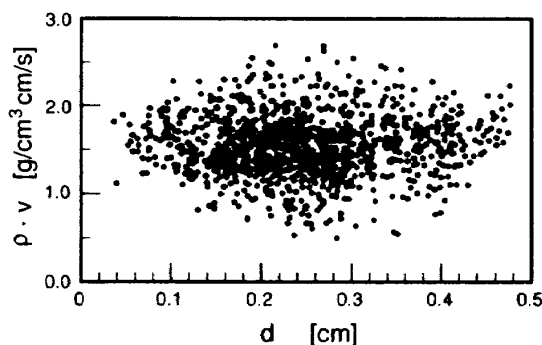


図 8 $\rho \cdot v$ と粒径の関係
Fig. 8 $\rho \cdot v$ versus diameter of snowflakes.

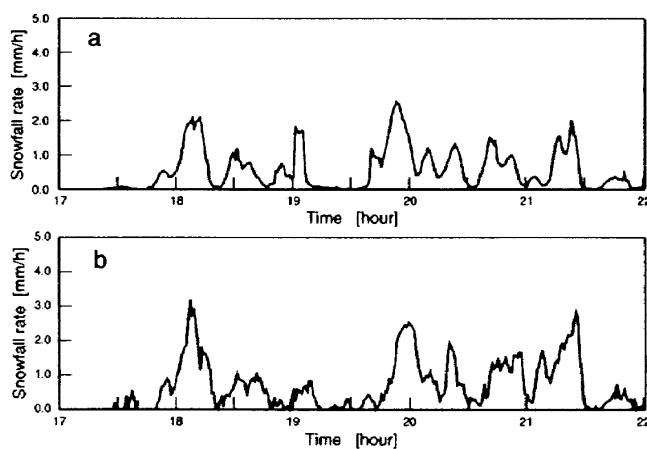


図 9 降雪強度の時間変化
Fig. 9 Time series of snowfall rate.
(a) calculated by image data.
(b) measured by an electronic balance.

ら求めた落下中の降雪粒子の降雪強度である。また、図9(b)には従来の電子天秤を用いた降り積もった降雪粒子の降雪強度測定結果を示す。両方の曲線のこの時間帯での重なりを求めたところ83%の一致が得られた。電子天秤の風による影響は±0.5 mm/h程度含まれるため、本提案手法は電子天秤による測定法と比較しても実用上有効と言える。

6. む す び

地上付近の降雪粒子の落下運動を解析することは、粒子生成のメカニズムを解明する上で重要である。特に、落下中の個々の降雪粒子の落下速度、粒径、密度を同時に測定することは、種々の落下運動を定量的に解析する上で大切である。

本研究では、画像処理手法によって観測された降雪粒子のデータの中から1分ごとの平均粒径、落下速度および平均密度データを抽出し、粒径と密度の相関から空中を落下中の粒径と融解直径の関係を導いた。次に、この関係を利用して、粒径 d を変数とした落下速度の式 $v = \kappa \cdot d^\varepsilon$ を融解直径 D を変数とした落下速度の式 $v = k \cdot D^n$ に変換し、両式のパラメータの変換式を求めた。これにより直接Langlebenの値と比較することが可能になった。更に、Reynolds数と抵抗係数を1分ごとに求め、これらの物理量が落下中の降雪粒子の落下速度と粒径および融解直径の間に与える影響を調べた。Reynolds数と抵抗係数の回帰式からパラメータ a , j が落下速度のパラメータ k , n および κ , ε に影響することがわかり、各値を求めた。最後にこれらを考慮して、画像処理手法により得られた落下中の降雪粒子の観測データのみを利用して降雪強度を求めたところ、良好な結果が得られた。電子天秤による降雪強度の測定は、天秤の最大秤量に達する前に天秤に降り積もった雪を人手により取り除く必要がある。また、風の影響により天秤の重量が変化し、これにより測定精度が制限された。本手法を用いることにより、降雪強度の自動測定が冬季期間連続して可能となり、年間降水量を求めることができる。

本手法を微小空間でより短い時間間隔で観測することにより、更に信頼性が高められるが、個々の降雪粒子の落下速度、粒径および密度を同時に測定することは今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は文部省科学研究費補助金(09750529および09555124)によるものである。

文 献

- [1] T. Harimaya and M. Sato, "The riming proportion in snow particles falling on coastal area," J. Meteorol. Soc. Japan, vol.70, pp.57-65, 1992.
- [2] C. Magono and T. Nakamura, "Aerodynamic studies of falling snowflakes," J. Meteorol. Soc. Japan, vol.43, pp.139-147, 1965.
- [3] M.P. Langleben, "The terminal velocity of snowflakes," Quart. J. Roy. Meteor. Soc., vol.80, pp.174-181, 1954.
- [4] I. Imai, M. Fujiwara, I. Ichinura, and Y. Toyama, "Radar reflectivity of falling snow," Papers Meteor. Geophys., vol.6, pp.130-139, 1955.
- [5] I.V. Litvunov, "Determination of the steady state velocity of falling snow particles," IZV. Akad. Nauk. SSSR Ser. Geofiz. vol.7, pp.853-856, 1956.
- [6] 梶川正弘, "降水粒子の落下速度について," 天気, vol.21, pp.317-332, 1974.
- [7] 石坂雅昭, "雲粒付雪片の落下速度について," 雪氷, vol.57, no.3, pp.229-238, Sept. 1995.
- [8] 村本健一郎, 椎名 徹, "画像処理による降雪粒子の大きさと落下速度の自動測定," 信学論(D-II), vol.J72-D-II, no.9, pp.1382-1387, Sept. 1989.
- [9] 村本健一郎, 松浦弘毅, 椎名 徹, "落下中の降雪粒子の密度と降雪強度の測定," 信学論(D-II), vol.J77-D-II, no.12, pp.2353-2360, Dec. 1994.
- [10] 村本健一郎, 松浦弘毅, 椎名 徹, "領域および輪郭線による降雪雪片の形状解析," 信学論(D-II), vol.J76-D-II, no.5, pp.949-958, May 1993.
- [11] M. Fujiwara, "Note on collision frequency of snowflakes," 75th Anniv. Vol. of J. Meteorol. Soc. Japan, pp.57-64, 1957.

(平成9年6月13日受付, 9月12日再受付)



椎名 徹 (正員)

昭59東北大・工・通信卒。昭61同大大学院修士課程了。同年(株)富士通研究所入社。昭62富山高専電気工学科助手。現在同学科助教授。この間、光回路・部品等の開発ならびに画像計測の研究に従事。応用物理学会、日本雪氷学会各会員。



村本健一郎 (正員)

昭46富山大・工・電気卒。昭48同大大学院修士課程了。同年富山高専助手。同高専電気工学科助教授を経て平3より金沢大学工学部電気・情報工学科助教授。現在同教授。工博・医博。この間、生体情報処理、画像計測、パターン認識の研究に従事。情報処理学会、計測自動制御学会、画像電子学会、日本ME学会、日本雪氷学会、IEEE、米国神経科学学会各会員。