

降雪粒子の落下運動パターンと形状の関係

澤木啓之¹⁾ 村本健一郎¹⁾ 久保守¹⁾ 椎名徹²⁾

¹⁾金沢大学 工学部 情報システム工学科
〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20
076-234-4890

²⁾富山工業高等専門学校 電気工学科
〒939-8630 富山市本郷町 13 番地

muramoto@t.kanazawa-u.ac.jp

降雪粒子の衝突併合成長に、影響を及ぼしている因子の一つである落下運動の揺らぎが、降雪粒子の形状とどのような関係にあるのかを調べるために、鉛直方向にカメラを設置し落下中の降雪粒子の観測を行った。降雪粒子の水平面上の運動を撮影するため鉛直方向から複数の粒子映像を連続的に撮影するシステムを開発した。実際に降雪粒子の落下運動を撮影し、目視により運動パターンを3つに分類し、様々な形状特徴量と運動特徴量の関係を調べた。運動パターンは、降雪粒子の移動方向、移動距離および曲率半径の特徴量より分布が異なった。また、降雪粒子の濃淡分布の偏り方によって、その降雪粒子の自転角度の大きさが異なった。

キーワード 画像計測, 降雪粒子, 形状情報, 落下運動, 運動パターン

Relationship between the falling motion pattern and the shape of snow particles

Hiroyuki SAWAKI¹, Ken-ichiro MURAMOTO¹, Mamoru KUBO¹, Toru SHIINA²

¹Department of Information and System Engineering
Faculty of Engineering, Kanazawa University,
2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa 920-8667, Japan
+81-762-34-4890

²Department of Electrical Engineering,
Toyama National College of Technology
13, Hongo-machi, Toyama 939-8630, Japan
muramoto@t.kanazawa-u.ac.jp

Relations between shape and movement of snow flakes have been analyzed. Simultaneous images of both movement and shape are needed to perform analysis. In this study, a system using multiple cameras has been developed, including on camera pointing straight up. The moment and shape feature of snowflakes were calculated from the obtained images. Using this system, movement pattern and shape can be analyzed in detail.

Keywords: snowflake, shape, moment

1. まえがき

地上で観測される降雪粒子は、上空の降雪雲内での氷晶の発生および拡散成長と雲内での力学過程により成長すると考えられている [1]。降雪粒子は、雲粒補促成長と衝突併合成長により複雑な形状となり地上へ降りてくる [2]-[5]。特に、降雪粒子の衝突併合成長では、降雪粒子同士の落下速度の違いや降雪粒子の落下するときの揺らぎが関係している。降雪粒子に関するこれまでの研究の多くは地上に落下した降雪粒子を観測しており [6]-[8]、空中での立体的な実際の形状とは必ずしも一致していなかった。

本研究では、降雪粒子の衝突併合成長に影響を及ぼしている因子の一つである落下運動の揺らぎが降雪粒子の形状とどのような関係にあるのかを調べるため、地面に対して水平方向に CCD カメラを設置した。また、新たに鉛直方向にも CCD カメラを設置し、降雪粒子の落下運動の揺らぎを 2 方向から観測するシステムを開発した。降雪粒子の形状と落下運動を同時に観測するためには、高い解像度で、かつ広い撮影範囲が必要であるので、撮影空間を狭くした 2 台のカメラを鉛直方向に設置した。これにより詳細な形状を撮影しながら運動についても調べることができるようにした。

2. 降雪粒子観測装置

図1に今回用いた降雪粒子観測装置を示す。高さ13mのタワー内(金沢大学工学部情報システム工学科棟中庭)に降ってくる降雪粒子を撮影するための CCD カメラを複数台設置した。降雪粒子を撮影するカメラは、地面に対して水平方向に2台、鉛直方向に1台設置した。それぞれの CCD カメラの撮影範囲は詳細な形状撮影するために、水平方向の CCD カメラは横 6.4cm、縦 4.8cm。鉛

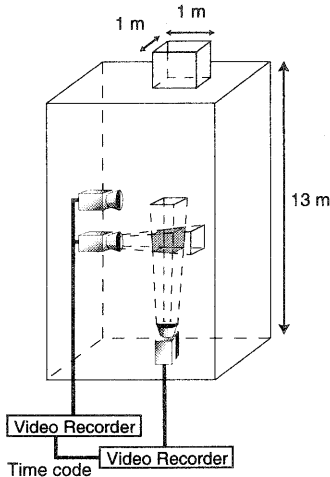


図1 降雪粒子観測装置

直方向の CCD カメラは横 10cm、縦 7.5cm の撮影範囲にし、シャッタースピードはすべて 1/4000 秒に設定した。図2は水平方向と鉛直方向の CCD カメラの撮影範囲を図示したものである。観測空間は 250W のハロゲンランプ3台により照射されている。また、粒子の運動が風の影響を受けないように観測に用いたタワーは、四方をトタン板で囲み、照明の反射をなくするために内壁を黒色に塗装した。タワーの屋根に縦 1m、横 1m の穴をあけ、降雪粒子がタワー内に入ってくるようにした。すべての CCD カメラを同期させ、撮影した映像はタイムコードを合わせてビデオテープに録画した。観測は 2000 年 1 月から 3 月に行った。

3. 解析方法

3.1 解析画像の作成

ビデオテープで録画した降雪粒子の映像は、画像処理ボード(分解能:横 640 画素、縦 240 画素、濃淡:256 階調)を使いコンピュータに取り込む。図3はコンピュータで取り込んだ各方向の映像である。取り込んだ映像を、1 フィールド(1/60 秒) 間隔で画像を取り出し、形状や運動に関係すると考えられるパラメータを算出した。

3.2 モーメント

1 フィールド間隔に取り出した画像の降雪粒子の領域についてモーメント法 [9] を用いて解析を行った (図4)。座標 (x, y) における濃度 $f(x, y)$ の $(p+q)$ 次のモーメント m_{pq} は、

$$m_{pq} = \iint_S f(x, y) \cdot x^p y^q dx dy \quad (1)$$

で定義される。

今回、式 (1) の $f(x, y)$ の部分を判別 2 値化法で求めた 2 値化レベル Th 以上を 1、それ以外を 0 として算出する方法と、2 値化レベル Th 以上を $f(x, y)$ 、それ以外を 0 として算出する方法を行った。これらは、降雪粒子の濃淡

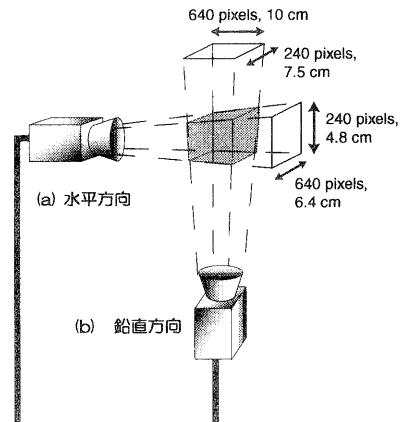


図2 観測範囲

分布の偏りを算出するために用いる。

3.2.1 面積

粒子の断面積は、粒子領域の濃度をすべて1または $f(x,y)$ として、式(1)で定義される0次のモーメント m_{00} から求めることができる。

3.2.2 重心

式(1)より求められる1次モーメント m_{10}, m_{01} を面積で正規化することにより、粒子領域内部の重心 (x_G, y_G) を求めることができる。

$$\begin{aligned} x_G &= \frac{m_{10}}{m_{00}} \\ y_G &= \frac{m_{01}}{m_{00}} \end{aligned} \quad (2)$$

図5に示すように解析する降雪粒子の画像は濃淡分布を持っており、その分布は複雑である。そこで、判別2値化法で求めた2値化レベル Th で求めた重心 G_0 をその降雪粒子の形状の重心とし、濃淡分布を含めて求めた重心 G_1 とのずれをその粒子の濃淡分布の偏り gap とする。濃淡分布の偏り gap は式(3)を用いて算出する。

$$gap = |G_1 - G_0| \quad (3)$$

3.2.3 正規化モーメント

重心を中心としたモーメント M_{pq} は特に重心モーメントと呼ばれ、

$$M_{pq} = \iint_S f(x,y) \cdot (x-x_G)^p (y-y_G)^q dx dy \quad (4)$$

次に、2次の重心モーメントは慣性モーメントとも呼ばれている。形状に依存する成分を取り出すため、同一面積をもつ円の慣性モーメントで正規化した慣性モーメント Mn は、

$$Mn = \frac{2\pi(M_{02} + M_{20})}{m_{00}^2} \quad (5)$$

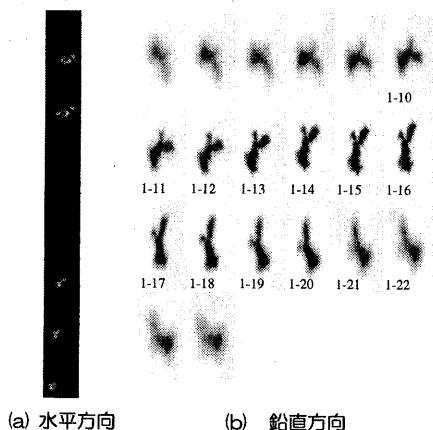


図3 降雪粒子映像

を用いる。正規化慣性モーメント Mn は、領域の大きさ、座標および回転に関して不変な特徴量を持つ。 Mn は形状が円のときに最小値1となり、円より変形するにしたがって大きな値となる。

3.2.4 長軸, 短軸

降雪粒子の x 軸, y 軸についてそれぞれの2次重心モーメント M_{20}, M_{02} より、降雪粒子の長軸 $2a$ と短軸 $2b$ は、

$$a = 2\sqrt{\frac{2\{M_{20} + M_{02} + \sqrt{4M_{11}^2 + (M_{20} - M_{02})^2}\}}{m_{00}}} \quad (6)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{2\{M_{20} + M_{02} - \sqrt{4M_{11}^2 + (M_{20} - M_{02})^2}\}}{m_{00}}} \quad (7)$$

で表される。長軸と短軸の比は、粒子の扁平率を表すので、伸長度 e として、

$$e = \frac{b}{a} \quad (8)$$

を定義する。

3.3 運動特徴量

3.3.1 移動距離

モーメント法より求めた降雪粒子の重心座標をもとに、フィールド間での重心の移動距離 L を計算することにより求まる。

3.3.2 移動方向

図6のように各フィールドの降雪粒子の重心座標を直線で結び、3点の重心座標から作られる角を移動方向 θ とした。移動方向は、 n_2 が n_0, n_1 を通る直線の左側にあるときの角度を正とし、 n_2 が右側にあるときの角度を負とした。移動方向の範囲は $-180^\circ < \theta < 180^\circ$ である。

3.3.3 曲率半径

移動距離 L と移動方向 θ の絶対値より運動軌跡の曲率

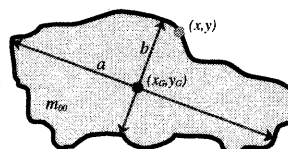


図4 モーメント

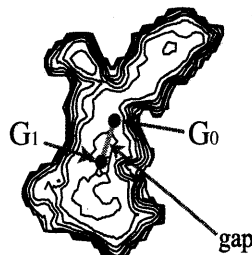


図5 形状と濃淡分布の重心

半径Rが式(9)より求まる。

$$R = \frac{L}{|\theta|} \quad (9)$$

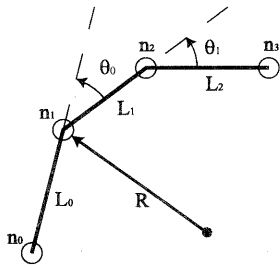


図6 運動特徴量

3.3.4 自転角度

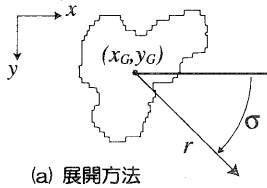
降雪粒子の自転角度 δ は、図7aのように降雪粒子の濃淡分布をモーメント法で求めた重心をもとに極座標形式で展開した分布(図7b)を各フィールドごとに作成し、式(10)を用いて算出する。

$$F(t) = \frac{\left| \iint f(r,\sigma) \cdot g(r,t-\sigma) dr d\sigma \right|^2}{\int f(r,\sigma) dr d\sigma \cdot \int g(r,\sigma) dr d\sigma} \quad (10)$$

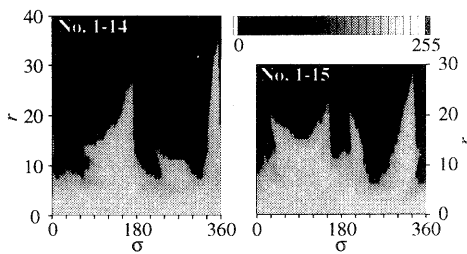
ここで、 $f(r,\sigma)$ は第(n)フィールドの画像、 $g(r,\sigma)$ は第(n+1)フィールドの画像である。式(10)は相関関数で、 0° から 360° まで σ を変位させ、 $F(t)$ が最も高い値になったときの σ を自転角度 δ とする。

4. 解析結果

3.で説明した解析方法を用いて観測した各降雪粒子の特徴量を算出した。今回、鉛直方向から撮影した48個の降雪粒子について解析を行った。



(a) 展開方法



(b) 展開した濃淡分布

図7 濃淡分布の展開

4.1 目視による運動パターン分類

降雪粒子の運動パターンは実際の映像から目視により図8に示す3つのパターン(円弧(図(a)), 直線(図(b)), 静止(図(c)))に分類し、また、運動パターンが複雑で判断ができない粒子をその他に分類した。結果、各運動パターンの粒子数は図9のようになった。

4.2 運動パターンと粒子の運動特徴量

それぞれの降雪粒子の形状特徴量ならびに運動特徴量について解析し、目視による運動パターン別に示す。

図10は横軸を移動距離L、縦軸を面積でプロットしたものである。移動距離が大きくなると面積の分布が広がっていることがわかる。

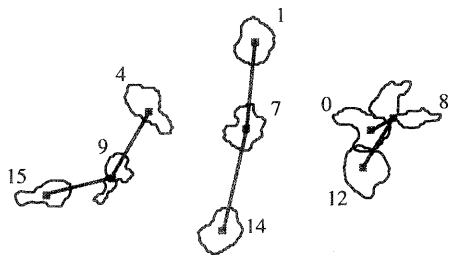


図8 運動パターン

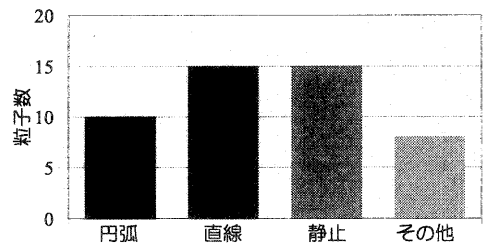


図9 各運動パターンの粒子数

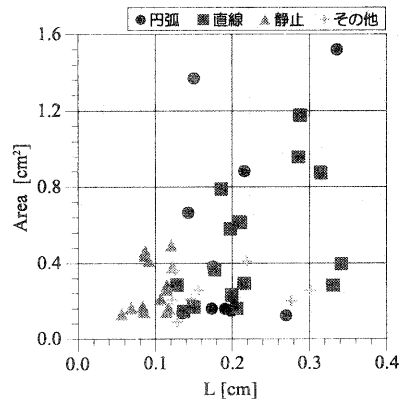


図10 移動距離 vs 面積

図11は、横軸を移動距離L、縦軸を移動方向 θ としてプロットしたものである。静止に分類した降雪粒子は、移動方向に関係なく移動距離が0.12cm以下範囲に分布していた。移動距離が0.12cm以上で、直線運動は移動方向が $\pm 4^\circ$ 以内の範囲に分布し、円弧運動は移動方向が $\pm 4^\circ$ 以上の範囲で分布していた。その他の運動パターンの降雪粒子は、各運動パターンの境界付近に分布していた。これは、その運動パターンが2つ以上の運動パターンの特性を持っているためと考えられる。図12は、横軸を移動距離L、縦軸を曲率半径Rとしてプロットした。L>0.12cmについて直線運動が異なる分布となったのはRが大きいくほど運動方向のうちの直線成分が大きくなるからである。以上のことからことから、降雪粒子の運動パターンは表1のようにまとめることができる。

表1 運動特徴量と運動パターン

	移動距離	移動方向	曲率半径
円弧	長い	大きい	短い
直線	長い	小さい	長い
静止	短い	—	—

図13は、横軸を慣性モーメントMn、縦軸を伸長度eとして各運動パターンの粒子をプロットしたものである。全体としては慣性モーメントと伸長度は同じ傾向となっているが、円弧の粒子は、慣性モーメントMnが約3以下の範囲に分布している。これから、円弧の粒子は他の運動パターンの粒子よりも円に近い形状であることがわかる。

4.3 粒子の濃淡分布と運動特徴量

降雪粒子の濃淡分布が粒子自身の運動にどのような影響を与えているか調べるために、3.2で説明した方法で2値画像の重心と濃淡画像の重心を求め、2つの重心の差を濃淡分布の偏りgapとする。図14は、曲率半径Rと濃淡分布の偏りgapとの関係をプロットしたものである。円弧運動では濃淡分布の偏りが小さい傾向が見られた。次に、図15は自転角度 δ と濃淡分布の偏りgapの関係をプロットしたものである。直線運動と静止運動では濃淡分布の偏りが小さいときに自転角速度が速い傾向が見られた。

4.4 運動軌跡と運動特徴量

運動パターンが円弧の場合の自転角度と粒子の移動方向との関係を調べた。図16は横軸が移動方向 θ 、縦軸が自転角度 δ である。移動方向 θ 、自転角度 δ ともに正の値が反時計回り、負の値が時計回りの方向である。70%の粒子が第1象限と第3象限に分布しており、自転と移動方向は同じで、その大きさは正の相関の傾向が見られた。

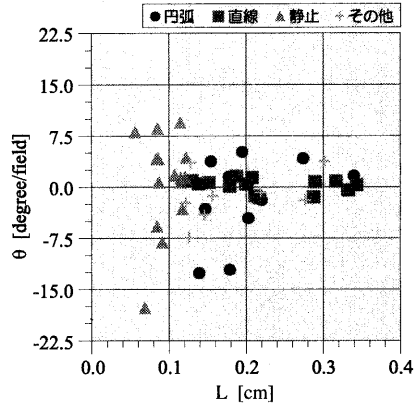


図11 移動距離 vs 移動方向

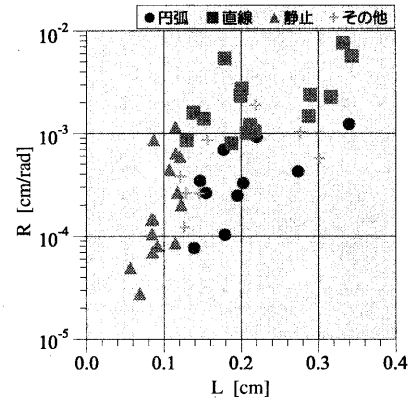


図12 曲率半径 vs 移動距離

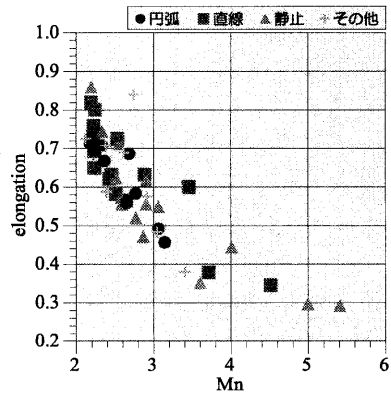


図13 慣性モーメント vs 伸長度

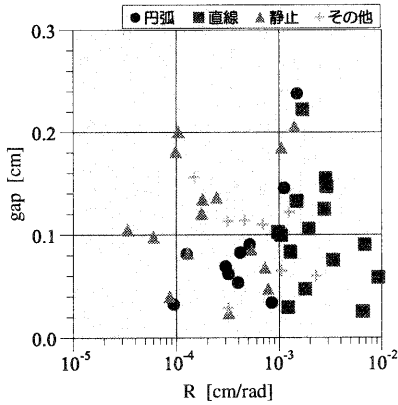


図14 曲率半径 vs 濃淡分布の偏り

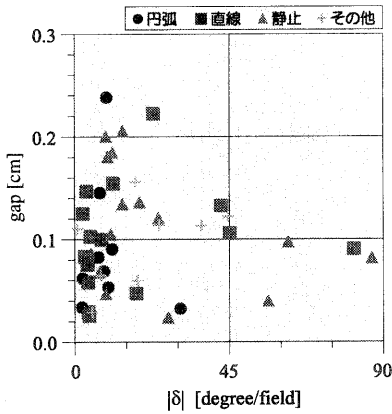


図15 自転角度 vs 濃淡分布の偏り

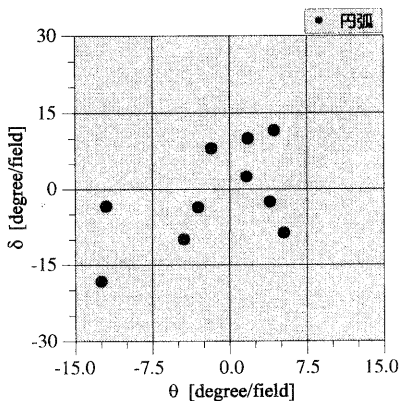


図16 移動方向 vs 自転角度

5. むすび

高速シャッタースピードのCCDカメラを水平方向および鉛直方向に設置し、落下中の降雪粒子の運動と形状を測定するシステムを開発した。このシステムより降雪粒子の運動パターンは、移動方向、移動距離および曲率半径で特徴付けられることがわかった。これらのパラメータを用いることによって運動パターンの自動分類を行うことができる。また、円弧を描いて運動する降雪粒子は、自転方向と公転方向が同じ方向に回る傾向が見られた。運動パターンと形状の関係では、降雪粒子の濃淡分布の偏りが自転の速さに影響を与えていることがわかった。

目視で行った運動パターンの判別を自動化することによって、より多くの降雪粒子を解析でき、運動パターンと形状の関係についてより詳しく調べることが期待される。

謝辞 本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院理学研究科播磨屋敏生氏より御助言を頂いたことに感謝します。尚、本研究の一部は科学研究補助金(12875079)によるものである。

文献

- [1] R. R. Rogers and M. K. Yau, "A short course in cloud physics," Pergamon Press, 1989.
- [2] K. Higuchi, "On the coalescence between plane snow crystals," J. Meteor., vol. 17, pp. 239-243, 1960.
- [3] J. Jiusto and H. K. Weickmann, "Types of snowfall," Bull. Amer Meteor. Soc., vol. 54, pp. 1148-1162, 1973.
- [4] K. K. Lo and R. E. Jr. Passarelli, "The growth of snow in winter storms: an airborne observational study," J. Atmos. Sci., vol. 39, pp. 697-706, 1982.
- [5] L. Vardiman, "The generation of secondary ice particles in clouds by crystal-crystal collision," J. Atmos. Sci., vol. 35, pp. 2168-2180, 1978.
- [6] M. P. Langleben, "The terminal velocity of snowflakes," Quart. J. Roy. Soc., vol. 80, pp. 174-181, 1954.
- [7] K. Iwai, "Three-dimensional structures of natural snow crystals shown by stereo-photo micrographs," Atmos. Res., vol. 11, pp. 137-147, 1989.
- [8] D. C. Rogers, "The aggregation of natural ice crystals," Rep. No. AR110, Dept. Atmos. Resources, University of Wyoming, pp. 1-35, 1974.
- [9] K. R. Castleman, "Digital Image Processing," Prentice-Hall, Englewood Cliffs N. J., 1979.