

論 文

降雪粒子映像の画像解析と粒子分類への応用

椎名 徹[†] 村本健一郎^{††}

Image Processing of Snow Particles and Classification into Snowflakes and Graupels

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

あらまし レーダ反射因子と降雪強度の関係を解析するためには、降雪粒子に含まれる雪片とあられの割合を知ることが重要である。本研究では、シャッタースピード及び倍率の異なる2台のCCDカメラを用いて同一の降雪粒子を同時に撮影し、個々の粒子映像を画像処理して、雪片とあられに自動分類する手法を提案する。最初に、雪片とあられの落下速度と形状の特徴量をそれぞれ抽出する。降雪粒子の落下速度を得るため、1台のCCDカメラのシャッタースピードを低速の1/60秒に設定し、その残像と粒径を用いて落下速度分布を求める。このカメラの視野は比較的大きな範囲に設定して、粒径分布も同時に求める。次に、形状特徴量を求めるためにもう1台のカメラのシャッタースピードを高速の1/8000秒に設定し、視野を前述のカメラに対して1/5の大きさに設定する。2値画像及び濃淡画像を用いて形状特徴量を抽出する。以上の落下速度と形状の特徴量をパラメータとして、降雪粒子を雪片とあられに分類することにより、1分ごとに雪片とあられの含まれる割合を求めることが可能となった。

キーワード 降雪粒子, 自動分類, 画像処理法, 形状特徴量, 濃淡画像

1. ま え が き

水資源の一つとして、山岳地帯に積もった冬季の雪が春先以降に溶けて流出する水資源が考えられる。その際にどこにどのくらいの降雪量があったかを知ることが、積雪融水を利用する場合の基礎データとして重要である。

雪雲からの電磁波反射エコーを利用するレーダ観測では、降雪粒子の空間数密度、粒径分布、降雪強度の時間変化・空間的分布を算出することが可能であり、広域の山岳地帯に適用できるため特に有用である。気象庁ではレーダ反射因子(Z)から換算した降水強度(R)を約17km四方に1地点設置されたアメダス観測による実測雨量で校正し、5km四方ごとの空間分布で全国の1時間積算雨量を毎時間求めている。降雨に関しては数多くのZ-R関係が報告され、また降雨の種類とエコーの特徴との関係が調べられているが、降雪粒子についてはそれほど多く研究されていない[1]~[4]。大雪時のレーダエコーは、間隔数十km、幅10~20kmであり、各種レーダにより数百m~数十kmのメッシュ上での反射因子データと約10km程度離れた数地点での降雪

強度が観測されている[5]~[7]。

レーダ反射因子と降雪強度のZ-R関係は、降雪粒子の密度、誘電率、導電率、散乱断面積等の雪質によって大きく変化する。特に、降雪粒子の中でもあられと雪片は、その質量が大きいことから降雪強度に大きく影響を与える。また、あられと雪片はその生成、発達過程が異なることから雪質が大きく異なり、両者を分けてZ-R関係を求め、それぞれのZ-R関係が大きく異なることが報告されている[8]。したがって、レーダを用いた降雪強度算出において、降雪粒子をあられと雪片とに分類することはとても重要である。一方、通常の降雪ではあられと雪片は同時に降り、その割合が時間とともに変動するため、全降雪粒子に対するそれぞれの個数割合を求める方がより実用的である。しかしながら、従来の観測では、降雪粒子を捕捉し目視にてあられと雪片を区別する方法しかなく、両者の割合を求めることは不可能であった。なお、雪の結晶は国際雪氷学会によって10種類に大別され、そのうち3種があられに属する[9]。あられは、白色不透明、半透明な直径約2~5mmの氷の粒である。一方、雪片は雪結晶が数個から数百個付着・併合したものであり、温帯地方に降る雪の多くは単結晶の形よりはむしろ雪片の形をとる場合が多い[10]。

落下中の降雪粒子映像を画像処理装置に取り込み、パソコンによりリアルタイム処理し、粒径(横幅)と

[†] 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

落下速度を長期間にわたって解析するシステムについては既に報告した[11]. また, オフラインで少数の雪片を選んで, 形状を詳細に解析する方法についても提案した[12]. しかし, これらの方法では, 長期間にわたって自動的に大量の粒子の形状と落下速度を同時に求めることは不可能であった.

本研究では, シャッタースピード及び倍率の異なる2台のCCDカメラを用いて同じ降雪粒子を同時に撮影し, 個々の映像を画像処理する. 次に, 落下速度と形状の新しい特徴量をそれぞれ同時に求め, これらをもとに降雪粒子を雪片とあられに自動分類することを目的とする.

雪片とあられの落下速度による分類を行うため, 1台のCCDカメラのシャッタースピードを低速の $1/60$ 秒に設定し, その残像と後述の形状特徴量から得られた粒径を用いて粒径と落下速度の関係を求める. また, このカメラの視野は従来と同じ範囲に設定して[11], 粒径分布及び空間数密度を同時に求める.

降雪粒子の形状を求めるため, もう1台のカメラのシャッタースピードは高速の $1/8000$ 秒に設定し, 視野を従来の $1/5$ に設定し, 粒子映像の2値画像及び濃淡画像から幾何的特徴量を抽出する. 一般に, あられの落下速度は, 同じ粒径の雪片の落下速度よりも大きく, あられの形状は丸く, 雪片は扁平な形状をもつことが多い[12]. 目視によりあられと雪片を分類する場合, それぞれの落下速度の違いと, 光学レンズ等を使って拡大した輪郭形状の相違によって判別する方法が一般的といえる. 本研究においても最初に落下速度と粒子の輪郭形状(2値画像)を解析して, 粒子の分類に役立つ

特徴量を求めた. しかしながら, 2値画像による粒子の輪郭形状では, あられと小さな粒径をもつ雪片とを明確に分類する形状特徴量が得られなかった. そこで, 粒子の濃淡画像を利用した新しい形状特徴量を提案し, 画像解析を行った. その結果, この形状特徴量は, あられと雪片に大きな相違が見られた.

最後に, 落下速度と濃淡画像からの形状特徴量をパラメータとして, 降雪粒子を雪片とあられに分類し, 1分ごとの空間数密度とその中に雪片とあられが含まれる割合を求める.

なお, 解析に用いたデータは, 1997年1月11日より29日までに新潟県南魚沼郡六日町三国川ダム管理所付近にて連続観測されたものである.

2. 降雪粒子の観測方法

2.1 観測装置

図1に雪片とあられを分類するための降雪粒子観測装置を示す. 降込み型の防風タワー内にハロゲンランプ(岩崎電気(株)製, 防滴・反射鏡付フラッド型250 W, 左右各2台)の平行光線により照射空間を図1(b)のように形成した. 防風タワー内を落下する降雪粒子が照射空間を通過するときだけ白く反射するので, その降雪粒子を低速と高速のシャッタースピードに設定した2台のCCDカメラで同一視野を異なる倍率で撮影した. この二つの映像をビデオミキサで1画面に合成して, 画像処理装置に毎分約80画面ずつ取り込み, リアルタイム処理した. なお, 粒子の濃淡映像を用いるため, 照明用電源は独立した照明制御用電力盤にて安定供給した. また, 防風タワーを2重の防風ネットで囲み, タ

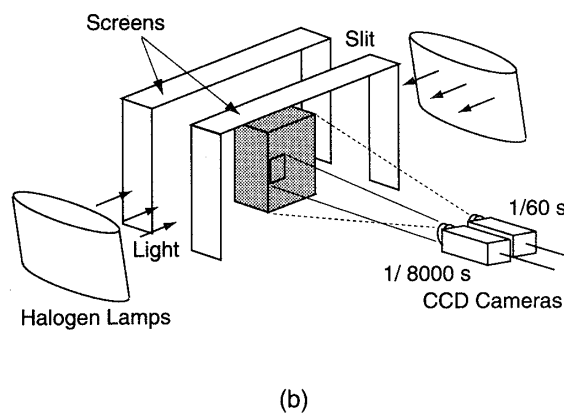
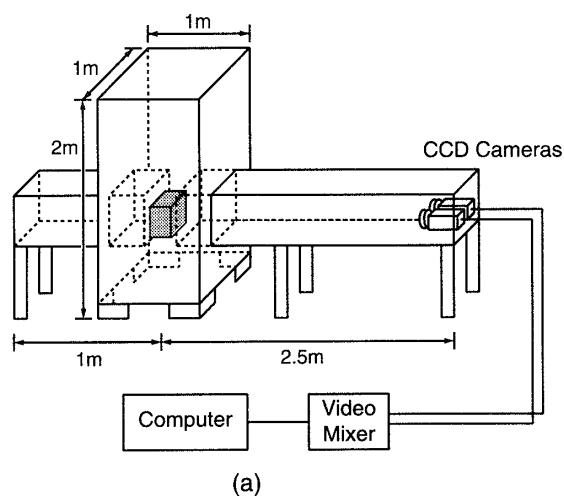


図1 降雪粒子観測システム

Fig. 1 Configuration for measuring of shape and fall velocity of snow particles.

ワー内は黒く塗装したアルミ製にすることにより、昼と夜の日射強度変化による照射空間内の光強度の変化を除去し、照射空間内の明るさを測定して一定照度となるよう設定した。

図2(a)に観測された降雪粒子の映像例を示す。1台のカメラのシャッタースピードは、低速の1/60秒に設定し、比較的低い倍率で観測空間全体を撮影した。低速のシャッタースピードに設定されたカメラで撮影した画面右側(図中の1点鎖線より右側の部分)は、残像により縦方向に長く伸びた映像となっている。この残像の長さから画面左側より得られる形状から落下速度を求める[11]。また、もう1台のカメラのシャッタースピードは、粒子の実際の形状を撮影するために、高速の1/8000秒に設定し、低速の観測空間の一部を5倍に拡大して撮影して、形状解析する。図中の1点鎖線より左側の部分がその映像であり、落下速度解析用の画面右側の破線で囲まれた空間が、形状解析のために拡大された観測空間に相当する。

降雪粒子の落下速度だけでなく、空間数密度を求めるために、落下速度解析用の観測空間(縦横の寸法)として比較的大きな空間を選んだ。一方、形状解析用の撮影空間は狭くして、拡大映像の撮影を優先することにした。撮影空間の奥行きは、被写界深度による誤差及び粒子同士の映像が重ならないように選び、7cmとした。

図中には本研究に用いた画像処理ボードの分解能(縦240×横480画素)と撮影空間の大きさ(距離)を示す。本画像処理ボードの鉛直方向の分解能は水平方

向の半分である。これらの対応から、形状解析及び落下速度解析用の各画面での水平方向の1画素の長さは0.1mm及び0.5mmとなる。あられの粒径は数mm以下でその落下速度も速いが、形状解析用のシャッタースピードを1/8000秒にすることにより、形状の誤差は8%以内、落下速度の誤差は6%以内となった[12]。

2.2 粒子検索

図2(a)の映像は、判別分析2値化法により粒子映像を背景から分離すると、図2(b)のようになる。2台のCCDカメラにより同一空間を撮影し、ビデオミキサにより1画面に合成したので左右に同一粒子が存在する。しかし、2台のカメラの倍率、カメラの設定位置等が異なるため、左右の映像の位置座標のみから、同一粒子を判別することは難しい。本研究では、左右の画像から粒子同士の対応をとるために、ファジー検索の手法を用いた[13]。以下に、その手順を示す。

(1) 図2(b)の画面全体を左右に分けて粒子検索を行い、粒子映像の中心座標 (x_c, y_c) と横及び縦方向の長さ x_w, y_w を求める。なお、画面の左右において1画素の長さが異なるため、左右の画像を画素単位の位置座標から実際(実寸)の位置座標に変換して、中心座標 (x_c, y_c) と長さ x_w, y_w を求める。

(2) 画面左側の各粒子に対して、画面右側のすべての粒子と対応をとるため、以下のメンバシップ値を求める。

$$mx = \exp \left\{ -ax \left(\frac{|x_{cl} - x_{cr}|}{x_{wl}} \right)^{bx} \right\}$$

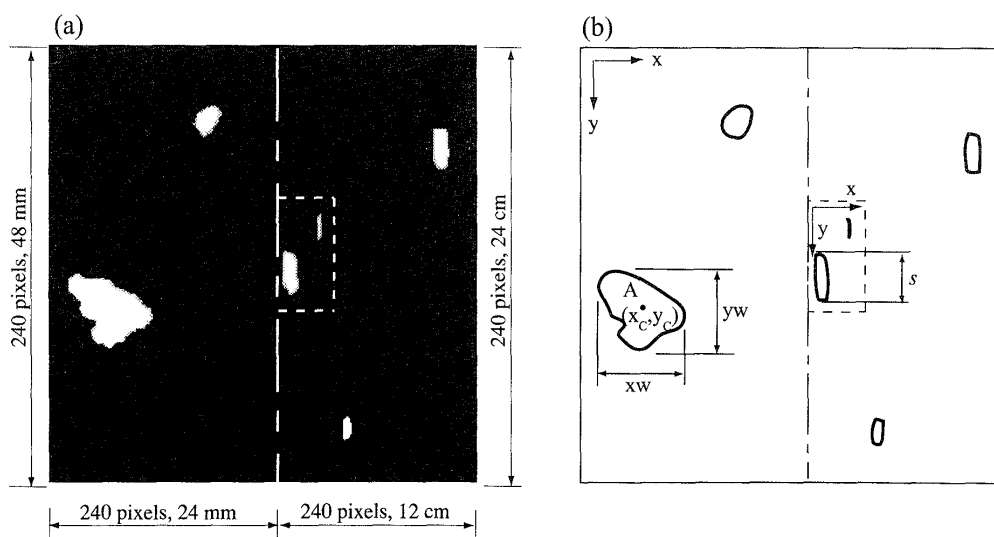


図2 降雪粒子映像の例
Fig. 2 Typical image of falling snow particles.

$$\begin{aligned}
 my &= \exp \left\{ -ay \left(\frac{|yc_l - yc_r|}{yw_l} \right)^{by} \right\} \\
 mw &= \exp \left\{ -aw \left(\frac{|xw_l - xw_r| - cw}{xw_l} \right)^{bw} \right\}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、画面の左側(l)と右側(r)の粒子映像をそれぞれ区別するために、添字 l 及び r を付記した。また、 $ax, ay, aw (> 0)$, cw 及び bx, by, bw は定数であり、 mx, my, mw が0から1の値となるように選ぶ。

(3) 各々のメンバシップ値より適合度を次式より求める。

$$m = \frac{(mx + 1)(my + 1)(mw + 1)}{8} \quad (2)$$

(4) 画面左側の1個の粒子映像に対して画面右側の破線で囲まれた観測空間内の全粒子映像の適合度を求め、ある基準値(0.5)以上で最大の適合度をもつ右画面の粒子映像を左画面の映像と同一の粒子であると判定する。

本手法により、同一粒子として対応付けされた降雪粒子数は全左画面の粒子数に対して平均95.5%であった。なお、計算には $0.3 < ax, ay, aw < 9.0$, $cw = 2.0$ 及び $bx = by = bw = 2.0$ を用いた。

3. 降雪粒子の特徴量

2.で検出された降雪粒子の輪郭追跡によって得られる輪郭線情報を8方向のチェーンコードで表し、以下の降雪粒子の落下速度と形状に関する特徴量を求める。

3.1 落下速度

粒子の残像から落下速度を求めるため、画面右側の映像を判別分析2値化法により得られたしきい値にて2値化した後、落下速度と空間数密度を計算した[14]。

粒子の粒径は後述の画面左から得られる等価粒径 D を用いて、毎秒の落下速度 v は画面右側の残像の長さ s から

$$v = (s - D) / (1 / 60) \quad (3)$$

と計算できる。なお、残像のぼけによる影響は2値化することにより除去できた。

3.2 粒径分布と空間数密度

粒径は等価粒径を用い、画面右側の撮影空間の粒径別個数より、単位空間当りの粒径分布及び空間数密度を求めた。

3.3 形状特徴量

形状解析には画面左側の映像を用い、2値化した映像から粒子を検索し、発見された粒子の輪郭線をチェーンコード化する。この輪郭線に囲まれた領域内の画像の濃淡情報(256階調)をもとに以下の形状特徴量をモーメント法により求めた。モーメントを用いることにより、座標及び回転に対して不変的な形状特徴量を求めることが可能である。

座標 (x, y) における画像濃度 $f(x, y)$ の $(p+q)$ 次のモーメント m_{pq} は

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y f(x, y) \cdot x^p y^q \quad (4)$$

で定義される[15]。ただし、 $f(x, y)$ は輪郭線で囲まれた領域内で256階調の濃度値をとり、その他の領域では0となる半しきい値処理または2値化処理を行った。また、重心を中心とした $(p+q)$ 次のモーメント M_{pq} を

$$M_{pq} = \sum_x \sum_y f(x, y) \cdot (x - x_G)^p (y - y_G)^q \quad (5)$$

とする。ただし、 (x_G, y_G) は重心の座標であり、式(4)の0次及び1次モーメントから求まる。

3.3.1 2値画像

(1) 面積と粒径

降雪粒子の断面積 A は、粒子の領域内の濃度がすべて1とし、式(4)の0次モーメント m_{00} より求められる。また、降雪粒子の粒径として、面積 A から得られる等価粒径 $D = 2\sqrt{A/\pi}$ を用いた。

(2) 円形度

降雪粒子の形を表す指標として、円形度を用いる。円形度 ϕ は、輪郭線長さを L とすると

$$\phi = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (6)$$

で表される。

あられのような円形状ではほぼ1.0となり、雪片のような複雑な形では1.0よりもかなり小さな値となる。

(3) 慣性モーメント

2次モーメントは慣性モーメントと呼ばれ、形状と回転との関係を表す物理量である。降雪粒子と同じ面積をもち、領域内の濃淡が一定(階調値:128)である円形状の2次モーメントにより正規化した慣性モーメント

$$M_n = \frac{(M_{02} + M_{20})}{128 \cdot \left(\frac{m_{00}}{2\pi} \right)} \quad (7)$$

を求めた。この正規化慣性モーメントの逆数を形状特

微量の一つとした。

(4) 慣性主軸と伸長度

降雪粒子の x 軸及び y 軸に対する2次重心モーメント M_{02}, M_{20}, M_{11} より、粒子の慣性主軸である短軸 $2a$ と長軸 $2b$ は、

$$a^2 = 2 \left\{ M_{02} + M_{20} - \sqrt{4M_{11}^2 + (M_{02} - M_{20})^2} \right\} / m_{00}$$

$$b^2 = 2 \left\{ M_{02} + M_{20} + \sqrt{4M_{11}^2 + (M_{02} - M_{20})^2} \right\} / m_{00} \quad (8)$$

与えられる[16]。短軸と長軸の比は、粒子の扁平の割合を表すので、伸長度 e として

$$e = \frac{a}{b} \quad (9)$$

を定義し、形状特徴量とする。

3.3.2 画像の濃淡分布

新しい形状特徴量を導入するため、粒子映像の濃淡画像を解析した。2値化映像から粒子を検出した後、その輪郭線で囲まれた領域内及びその周囲について濃淡分布を求めた。すなわち、粒子映像についてその階調値 l ごとの画素数 $A(l)$ を求めた。この画素数の階調値による微分変化量 $B(l)$

$$B(l) = \frac{1}{A(l_0)} \frac{dA(l)}{dl} \quad (10)$$

を計算する。ただし、この値は規格化するために、2値化のしきい値 $l=l_0$ での画素数 $A(l_0)$ にて除算する。

4. 雪片とあられの特徴量の観測

降雪粒子の落下速度と形状に関する特徴量を求め、あられと雪片の分類に役立つ特徴量を抽出することが本章の目的である。なお、あられと雪片の特徴量をそれぞれ求めるため、観測期間(1997年1月11日~29日)の全降雪(約2週間分)の中から、目視により降雪粒子が分類できた全時間帯のデータを解析した。本章では特に代表的な25日のデータを示す。

4.1 粒径と落下速度の関係

あられと雪片の粒径と落下速度の関係を図3に示す。落下速度 v と粒径 d は

$$v = \kappa \cdot d^\varepsilon \quad (11)$$

の関係があることが実験的に報告されている[17]。ここで、 κ, ε は定数である。図よりあられと雪片で異なる κ, ε をもつことがわかる。粒径の大きな範囲では、落下速度をもとにしてあられと雪片を区別することが容易であることを示している。

4.2 2値画像の形状特徴量

目視により分類された降雪粒子について、3.3.1の2値画像に対する形状特徴量を求めた。降雪粒子の面積と形状特徴量の関係を図4に示す。一般にあられの粒径は数mm以下であり、雪片の粒径は数mm以下から2,3cmの大きな雪片までさまざまな粒径をもつ。あられと雪片との両者を十分に分類するためには、粒径が同じ範囲内に存在する数mm以下での分類が重要である。そこで、雪片の面積を 10 mm^2 を境にして大きな雪片群 Snowflake1 と小さな雪片群 Snowflake2 に分類し、あられと比較して形状特徴量を求めた。

図4(a)は、円形度 ϕ と面積 A の関係を示す。雪片は、面積が大きくなると、円形度が小さくなり、次第に輪郭線の凹凸が増えてくるのがわかる。また、あられは、ほぼ同じ面積をもつ小さな雪片よりも円に近い形状をもつことが図より求められる。

図4(b),(c)はモーメント法により求めた伸長度 e 及び慣性モーメントの逆数 $1/M_n$ と面積の関係を示す。雪片は、面積が大きくなると、伸長度及び慣性モーメントの逆数は小さな値となり、扁平な形状になることがわかる。また、あられとほぼ同じ面積をもつ小さな雪

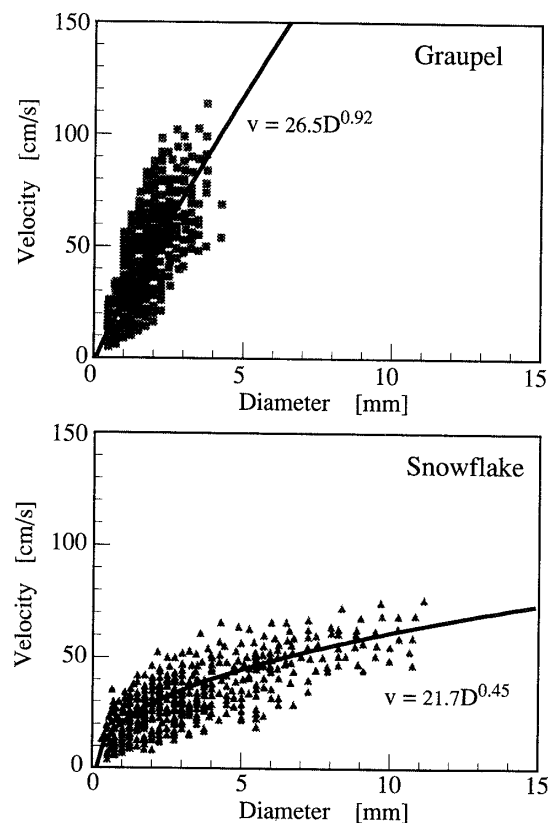


図3 落下速度と粒径の関係
Fig. 3 Fall velocity versus diameter of snow particles.

片は比較的広い範囲に分布するが、あられは1に近い値に分布し、円に近い形状をもつことがわかる。

本論文の高倍率の画像より得られる2値画像の形状特徴量を用いることにより、あられと大きな雪片が明確に区別できることがわかる。しかしながら、粒子の断面積が10 mm²より小さい場合には、円形度 ϕ 、慣性モーメント $1/M_n$ 、伸長度 e からあられと雪片を明確に分類することは図4のように困難である。そこで、次節のような形状解析用の左側画像の濃淡情報を画像解

析する。

4.3 濃淡画像の形状特徴量

あられと雪片の濃淡分布(階調値)の例を図5に示す。G1,G2はあられの階調値 l の等高線を表し、S1,S2は大きな雪片、S3,S4は小さな雪片の等高線を示す。ほぼ同じ面積をもつあられと小さな雪片を比較すると等高線の形状に相違が見られる。雪片の画像において、階調値が高いところ($l=256$ 付近)では等高線に囲まれた領域の形状が急激に変化し、その形状も円形ではないことがわかる。一方、あられについては等高線で囲まれた領域はほぼ円形であり、階調値に関係なく同じ形をしていることがわかる。

次に、階調値 l ごとの等高線の面積 $A(l)$ を図6(a)に示す。なお、粒子同士を比較するため、階調値の低いときの面積で規格化している。階調値が高くなると面積は減少するが、大きな雪片では面積の減少が少なく、階調値の高いところでも比較的大きな面積比をもつ。一方、小さな雪片の階調値ごとの面積は、値が大きくなると急激に減少し、同じ面積をもつあられよりもその低下が激しいことがわかる。あられの密度は雪片の密度より大きいため、照明光からの反射率が高く、同じ面積の雪片よりも階調値による変化が小さいと考えられる。これにより、大きな雪片、あられ、小さな雪片の順に階調値による面積変化が小さいと考えられる。

図6(b)は階調値による面積の変化を式(10)より求めた結果である。いずれも階調値 $l=48$ 付近で $A(l)$ は急激に変化するので、 $B(l)$ は最大値をとる。小さな雪片が最も大きな変動を伴うことがわかる。階調値が $l=200$ から255までの $A(l)$ の平均値と $B(l)$ の最大値の関係を図7に示す。雪片とあられが別の曲線群に分布していることがわかる。この分布を用いることにより、雪片とあ

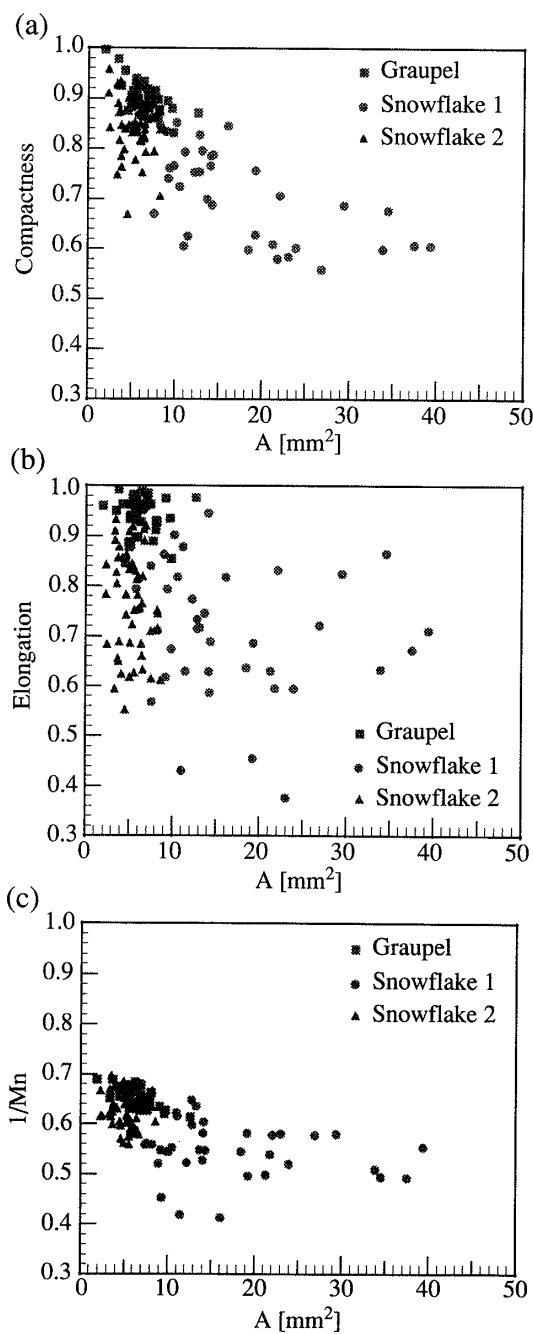


図4 形状特徴量と面積の関係

Fig. 4 Relationship between the feature parameters and the area.

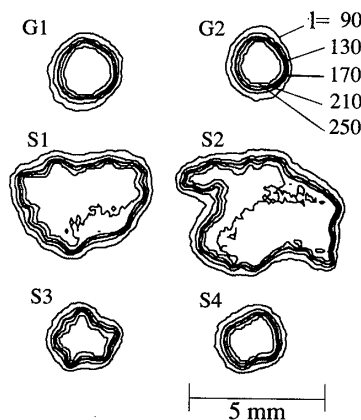


図5 降雪粒子映像の濃淡分布

Fig. 5 Contour maps of image intensity.

られとを容易に分類することが可能である。なお、図中の破線は、2週間分の全降雪データから求めた境界線を表す。

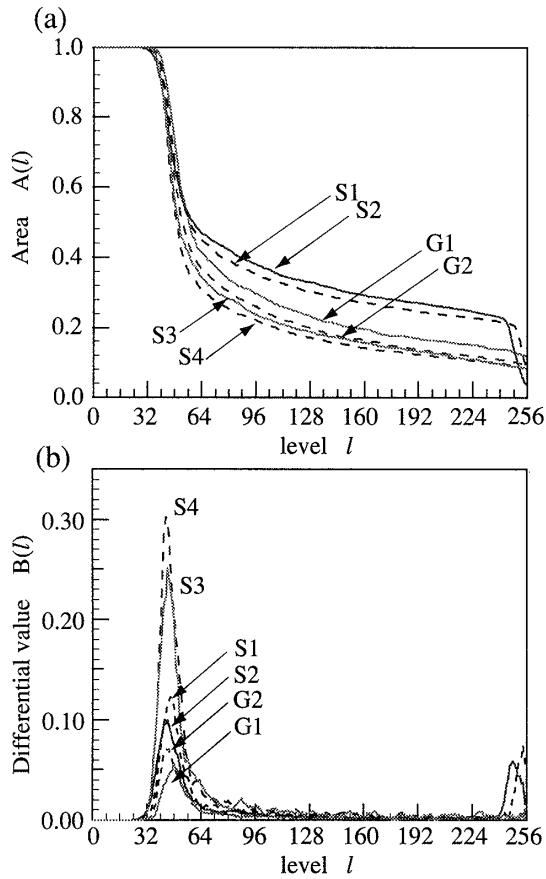


図6 階調値による形状変化
Fig. 6 Shape variation by brightness-level slicing.

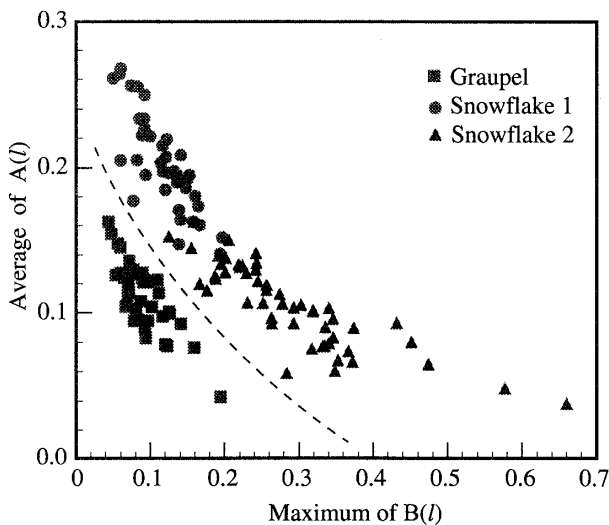


図7 $A(l)$ と $B(l)$ の関係
Fig. 7 $A(l)$ versus $B(l)$.

5. 降雪粒子の自動分類

4. で得られた落下速度と形状特徴量をもとに降雪粒子の自動分類を行う。なお、形状特徴量には2値画像から求めた円形度 ϕ 、慣性モーメント $1/M_n$ 、伸長度 e と濃淡画像から求めた特徴量があるが、あられと雪片

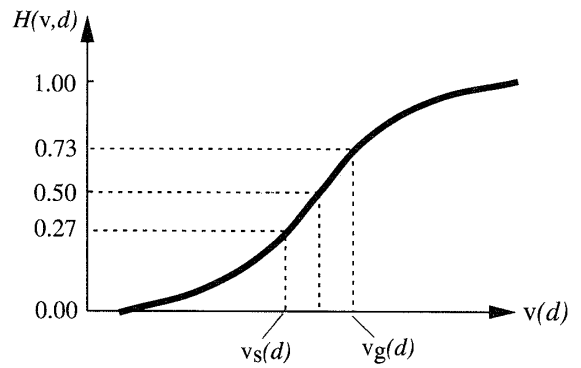


図8 特徴量の正規化
Fig. 8 Normalization of feature parameter.

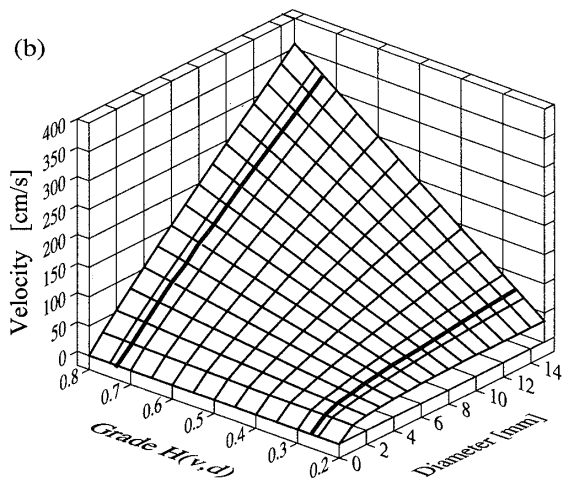
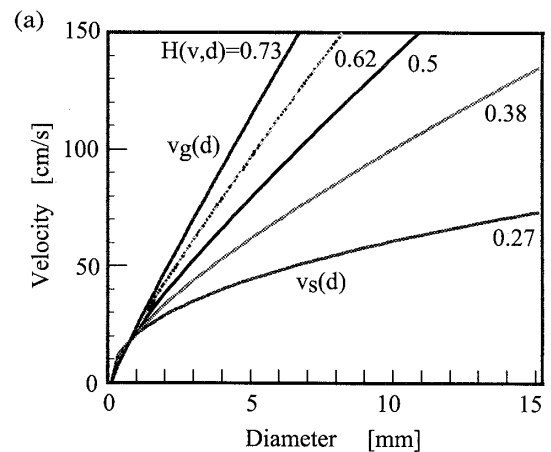


図9 落下速度特徴量の正規化関数
Fig. 9 Normalized function of fall velocity.

論文/降雪粒子映像の画像解析と粒子分類への応用

を明確に分類するために4.3の濃淡画像の形状特徴量を用いることにする。

粒径と落下速度の関係を表す図3より、あられでは $\kappa=26.5$, $\epsilon=0.92$, 雪片では $\kappa=21.7$, $\epsilon=0.45$ としたときに特性曲線式(11)と約2週間分の全降雪データとが最も一致した。あられの特性曲線を $v_g(d)$, 雪片の曲線を $v_s(d)$ として、個々の粒子の粒径と落下速度がこれらの曲線のどこに位置するかにより分類を試みた。粒径 d に対する落下速度 v を次式のように正規化して、個々の粒子のあられの度合 $H(v,d)$ を求める。

$$H(v,d) = \frac{1}{1 + \exp \left\{ -2a \frac{v - b(v_g(d) + v_s(d))}{v_g(d) - v_s(d)} \right\}} \quad (12)$$

ここで、 $a(>0)$, b は定数である。この値は落下速度が雪片の特性曲線 $v_s(d)$ に近づくと0, あられの特性曲線 $v_g(d)$ に近づくと1になる。図8に $a=1.0$, $b=0.5$ のときの $H(v,d)$ を示す。図9に $H(v,d)$ の値と落下速度分布の関係を示す。図8の $a=1.0$, $b=0.5$ を用いると、落下速度が雪片の特性曲線 $v_s(d)$ に乗ると $H(v,d)=0.27$, あられの特

性曲線 $v_g(d)$ に乗ると0.73になる。この正規化関数を個々の粒子に適用し、あられの度合を求める。なお、粒径及び落下速度の小さな範囲では、両者を分離することは目視においても難しく、降雪強度への影響が少ない範囲である。粒径が2 mm以下で落下速度が40 cm/s以下の範囲の分類不可能な粒子群は、正規化関数を適用しないで、あられの度合を $H(v,d)=0.5$ と仮定した。

次に、形状特徴量を用いたあられと雪片の分類を行うために、降雪粒子の濃淡画像から得られる図7の $A(I)$ 及び $B(I)$ の分布を利用する。図7の破線より上方に位置するときは雪片、下方に位置するときをあられと判断し、正規化された形状特徴量に関するあられの度合 I を定める。個々の降雪粒子の濃淡画像から形状特徴量を求めて、あられと判定された場合に $I=1$ とし、雪片と判定されたときに $I=0$ となるように選ぶ。

粒径と落下速度の関係及び濃淡画像から求めた形状特徴量 $A(I)$ 及び $B(I)$ のそれぞれについて正規化されたあられの度合関数 $H(v,d)$ 及び I を用いて、雪片とあられの判別関数 R を次式で定義する。

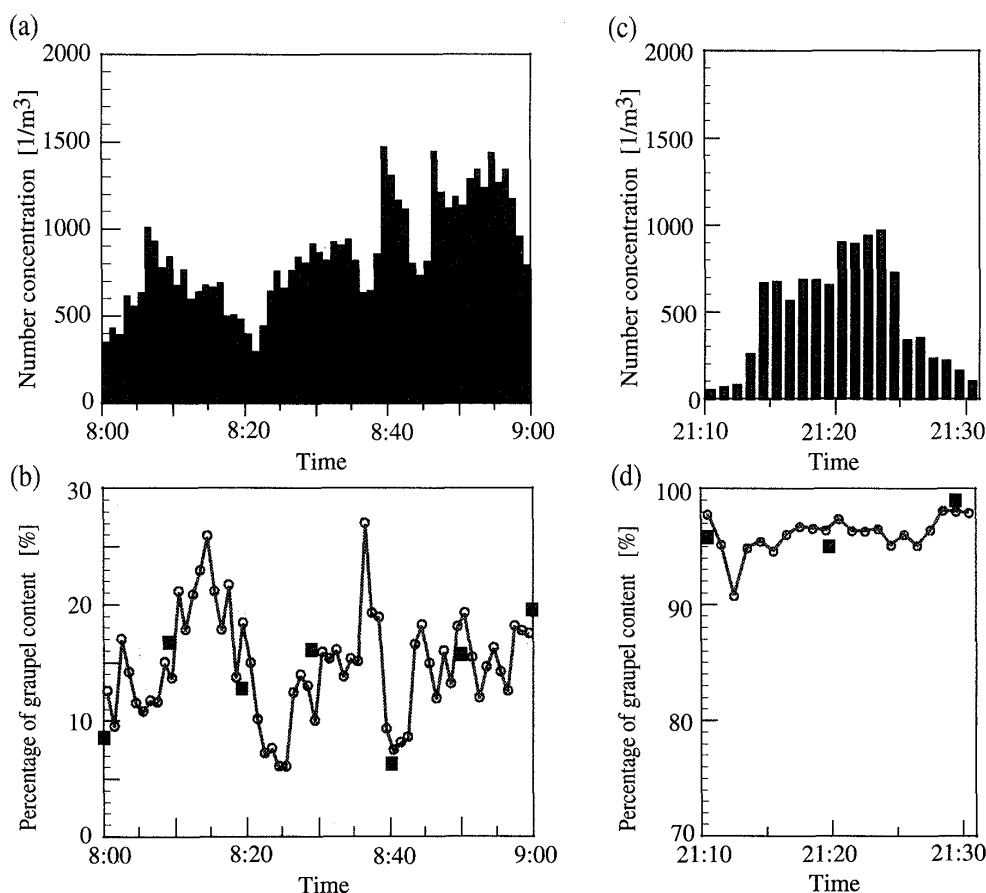


図10 空間数密度とあられ含有割合の時間変化
Fig. 10 Time series of number concentration and percentage of graupel content.

$$R = p H(v, d) + (1 - p) I \quad (13)$$

個々の降雪粒子の判別関数 R を求め、その値が0.5以上のときにはあられであると判断する。1分ごとに全降雪粒子に対してあられの判別関数を個々に適用し、全粒子に対してあられと判断された粒子の割合をあられ含有割合として計算した。観測された空間数密度と全降雪粒子中のあられ含有割合の計算結果を図10に示す。観測日は1997年1月25日であり、図10(a),(b)は比較的大きな雪片が安定して降り続いた期間、図10(c),(d)はあられが降った期間である。あられだけが降る期間は一般に30分以内と短いため、図10(c),(d)の横軸は図10(a),(b)の2倍に拡大している。図中の○印は1分ごとのあられ含有割合の計算結果であり、■印は10分ごとに目視で求めたあられ含有割合である。なお、 $p=0.4$ 、 $q=0.6$ として判別を行った。

目視によるサンプリングを観測地点の付近で同時刻に複数箇所で行った結果、目視によるあられ含有割合は観測場所によって最大10%の差があった。また、目視にて観測されたあられの含有割合の平均値と本手法で得られた結果との差は最大6%であった。本手法で得られた値が目視による値のばらつき範囲以内にあることから、本手法で用いた判別関数が全降雪粒子中のあられ含有割合の測定に有効であることがわかる。

6. む す び

レーダ反射因子と降雪強度の関係を解析するためには、降雪粒子を雪片とあられに分類することが重要である。本研究では、シャッタースピード及び倍率の異なる2台のCCDカメラを用いて同じ降雪粒子を同時に撮影し、個々の映像を画像処理して、雪片とあられに自動分類するシステムを作成した。最初に、雪片とあられの落下速度と形状の特徴量をそれぞれ抽出した。形状の特徴量を求めるため2値画像と濃淡画像から物理的特徴量を抽出し、あられと雪片のそれぞれの分布の違いが濃淡画像を用いることによりめりりようになった。次に、これら落下速度と形状の特徴量を判別関数に用いて、個々の降雪粒子を雪片とあられに分類し、1分ごとに雪片とあられの含まれる割合を求め、その有効性を示した。約3週間の連続観測により、日中や夜間の降雪に関係なく良好な結果が得られたが、更に降雪時の気象条件、観測場所等により、式(11)の κ , ϵ 、式(12)の a , b 、式(13)の p 及び判別のしきい値を検討する必要がある。また、粉雪の降る北海道のような寒冷地では

観測空間を小さくする必要があるため、観測条件の異なる場合について図7の分布を調べるのが課題である。

目視によるあられと雪片の観測は、ビロード布上に降った降雪粒子を人手により解析するため時間と労力を要する。また、1回のサンプル数が少なく、サンプリング間隔が長いため誤差を伴うため、あまり利用されていなかった。本システムを利用することにより、冬期間連続してあられと雪片の自動分類が可能となった。

北陸・信越地方の降雪では、あられまたは雪片が別々に降ることはまれで、両者が混ざり合って降るのがほとんどである。あられと雪片ではそれぞれのレーダ反射強度が異なるため、全降雪粒子に対するあられの割合を求めることにより、レーダ観測を用いた積雪・降雪量推定に役立つことが期待される。

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いただいたことに感謝します。本研究の一部は文部省科学研究費助成金(09555124, 09750529)によるものである。

文 献

- [1] R.I.Boucher and J.G.Wieler, "Radar Determination of snowfall rate and accumulation," *J. Climate Appl. Meteor.*, vol.24, pp.68-73, 1985.
- [2] R.E.Carlson and J.S.Marshall, "Measurement of snowfall by radar," *J. Appl. Meteor.*, vol.11, pp.494-500, 1972.
- [3] C.C.Collier and P.R.Larke, "A case study of the measurement of snowfall by radar: An assessment of accuracy," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, vol.104, pp.615-612, 1978.
- [4] Y.Fujiyoshi, T.Endoh, T.Yamada, K.Tsuboki, Y.Tachibana, and G.Wakahama, "Determination of a Z-R relationship for snowfall using a radar and high sensitivity snow gauges," *J. Appl. Meteor.*, vol.29, pp.147-152, 1990.
- [5] H.Konishi, K.Muramoto, T.Shiina, T.Endoh, and K.Kitano, "Z-R relation for gaupels and aggregates observed at Showa station, Antarctica," *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, vol.5, pp.97-103, 1992.
- [6] T.Harimaya and M.Sato, "The riming proportion in snow particles falling on coastal areas," *J. Meteor. soc. Japan*, vol.70, pp.57-65, 1992.
- [7] 村本 健一郎, 吉 康志, 藤田博之, 北野康一, "降雪のZ-R関係と降雪粒子の諸特性," *信学論(B-II)*, vol.J78-B-II, no.8, pp.568-572, Aug. 1995.
- [8] T.Harimaya, "Observation of size distribution of graupel and snowflake," *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser., VII*, vol.5, pp.67-77, 1978.
- [9] B.J.Mason, "The physics of clouds," 2nd ed., Clarendon Press, p.671, 1971.
- [10] C.Magono and H.Oguchi, "Classification of snow flakes and their structures," *Sci. Rep. Yokoham Nat. Univ., Sec. 1*, vol.4,

論文／降雪粒子映像の画像解析と粒子分類への応用

pp.47-57, 1955.

- [11] 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.
- [12] 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特徴解析,” 信学論(D-II), vol.J76-D-II, no.5, pp.949-958, May 1993.
- [13] A.Kaufmann and M.M.Gupta, “Introduction to fuzzy arithmetic,” Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [14] R.C.Gonzalez and R.E.Woods, “Digital Image Processing,” Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [15] E.L.Hall, “Computer Image Processing and Recognition,” Academic Press, 1979.
- [16] M.R.Teague, “Image analysis via the general theory of moments,” J. Opt. Soc. Am., vol.70, 8, pp.920-930, 1980.
- [17] M.P.Langleben, “The terminal velocity of snowflakes,” Quart. J. Roy. Meteor. Soc., vol.80, pp.174-181, 1954.

(平成10年6月29日受付, 9月11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。現同学科助教授。この間、光回路・部品等の開発並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、米国神経科学会各会員。