

研究速報

2台のカメラを使った降雪粒子の形状と落下速度の同時測定

正員 村本健一郎[†] 正員 高木 繁則^{††}
 正員 椎名 徹^{†††} 正員 松浦 弘毅[†]

Simultaneous Measurement of Shape and Fall Velocity of Snow Particles Using Two Cameras

Ken-ichiro MURAMOTO[†], Shigenori TAKAGI^{††}, Toru SHIINA^{†††} and Kohki MATSUURA[†], Members

[†] 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 Japan

^{††} インテック・システム研究所, 富山市

INTEC SYSTEMS LABORATORY INC., Toyama-shi, 930 Japan

^{†††} 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 Japan

あらまし 降雪粒子の雪片とあられの分類は重要である。2台のテレビカメラで同一の視野を撮影することにより、粒子の形状と落下速度を同時に解析するシステムを開発し、更に実際の観測結果に適用することにより、降雪粒子を自動分類する手法を提案する。

キーワード 画像計測, 降雪粒子, 雪片, あられ, 自動分類

1. まえがき

落下中の降雪粒子の定量的解析は、レーダエコーや気象ゾンデによる雪雲の観測との対応等に不可欠である^{(1)~(4)}。特に、レーダ反射因子と降雪強度の関係を解析するためには、降雪粒子の雪片とあられの分類が重要である^{(5),(6)}。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^{(7),(8)}。また、オフラインで少数の雪片を手により選んで、形状を詳細に解析する方法も既に提案した⁽⁹⁾。しかし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方法は、まだ開発されていなかった。

本研究では、シャッタースピードの異なる2台のテレビカメラを用いて同一の視野を撮影することにより、粒子の詳細な形状と落下速度を同時に解析するシステムを開発し、更に実際の観測結果に適用することにより、降雪粒子を雪片とあられに自動分類する手法を提案する。

2. 観測システム

図1は観測装置である。観測装置の中の照射空間内を落下する降雪粒子を毎分約180回ずつ、高速と低速

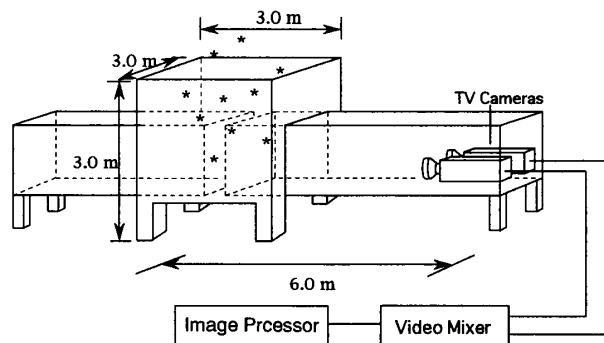


図1 降雪粒子観測システム

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

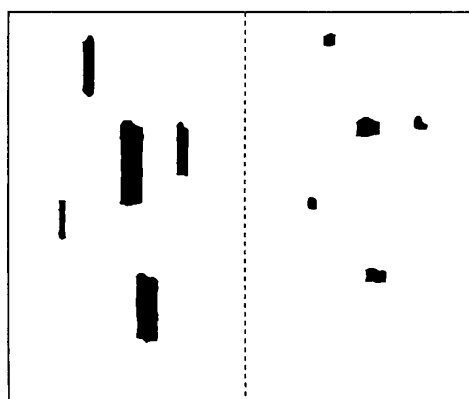


図2 2値化処理した粒子像の表示例

Fig. 2 Typical snow particle images photographed by two cameras.

のシャッタースピードに設定した2台のテレビカメラで同一の視野を撮影し、ビデオミキサーで1画面に合成して画像処理装置に取り込み、リアルタイムで処理した。高速のシャッタースピードは1/2000秒に設定し、形状解析用とし、低速のシャッタースピードは1/60秒に設定し、落下速度解析用とした。

3. 解析方法

図2は観測中の粒子映像の例である。高速シャッタースピードカメラで撮影された映像(図2右側)は、実際の形状を示しているが、低速シャッタースピードカメラで撮影された映像(図2左側)は、残像により縦方向に長く伸びた映像となっている。撮影空間(縦:12.8 cm, 横:12.8 cm)と分解能(256×256画素)を対応させることにより1画素の長さは0.5 mmとなる。これらの映像は、まず、判別分析2値化法により⁽¹⁰⁾、粒子を背景から分離し、次に低速シャッタースピードカメラで撮影された画面上を探索して粒子画像を抽出し、それに対応する高速シャッタースピードカメラで撮影さ

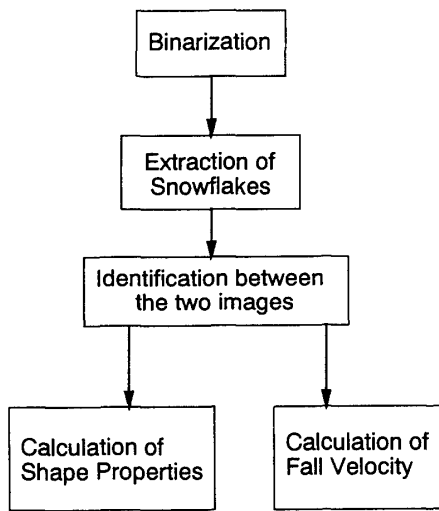
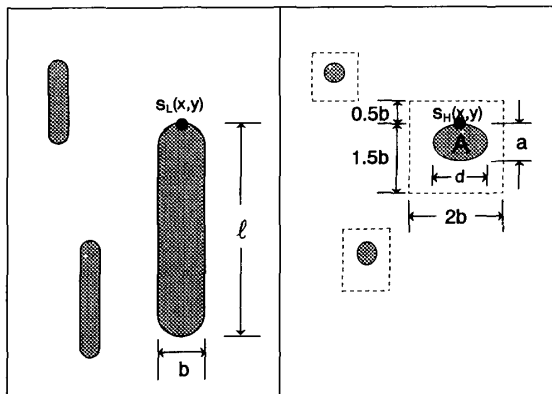


図3 処理手順
Fig. 3 Block diagram of the image processing.



Criterion
 $d = (0.9 \sim 1.1) b$

図4 2画面間の対応付け
Fig. 4 Identifying between the two images.

れた画面上の粒子を指定した条件で探し出す。高速シャッタースピードカメラの映像を用いて形状解析を、低速シャッタースピードカメラの映像を用いて落下速度の計算を行う。図3は処理手順である。

3.1 2画面の対応

高速および低速シャッタースピードカメラで撮影された同一粒子の映像の対応付けは以下の条件とする(図4)。

(a) 低速シャッタースピードカメラで撮影された粒子映像の最上位の画素 $S_L(x, y)$ の座標と同一の位置に対応する高速シャッタースピードカメラの画面上の座標 $S_H(x, y)$ を基準点とする。

(b) 低速シャッタースピードカメラで撮影された粒

子映像の横幅を b とすると、高速シャッタースピードカメラによる画面上の検索範囲は、基準点の上方向へ $0.5b$ 、下方向へ $1.5b$ 、更に左右方向へそれぞれ $1.0b$ の範囲とする。

(c) (a)および(b)で設定される範囲内に粒子が存在し、その横幅は b に対して、90~110%の大きさである。

これらの条件が満たされるとき、2画面の粒子映像を同一とみなした。

3.2 粒子映像の処理

リアルタイム処理で観測画像から粒子の2値化映像を抽出し、その輪郭の追跡によって順次得られる輪郭線情報を8方向のチェインコードで求め⁽¹⁰⁾、次にそのデータから以下の特徴量を計算した。カメラのシャッタースピードが低速の画面からは、残像の長さを利用して落下速度を、シャッタースピードが高速の画面からは、輪郭線情報により粒子形状を得ることができる。

3.2.1 粒径分布

粒子の粒径は、等価粒径 $D=2\sqrt{A/\pi}$ により計算した。但し、 A は高速シャッタースピードカメラによる粒子映像の断面積である(図4)。粒径分布は粒径別の粒子数を集計し、単位空間当りの粒径分布特性を求めるものである。

3.2.2 落下速度

カメラのシャッタースピードが1/60秒の画面上での粒子映像の縦幅を l [画素]、1/2000秒の画面の粒子映像の縦幅を a [画素] としたとき毎秒の落下速度 v [mm/s] は

$$v = (l - a) \times 0.5 \times 60 \quad (1)$$

で計算できる(図4)。低速と高速のシャッタースピードカメラによる残像の長さの誤差は3%である。また、低速のシャッタースピードカメラによる動きぼけの影響は2値化により処理できた。

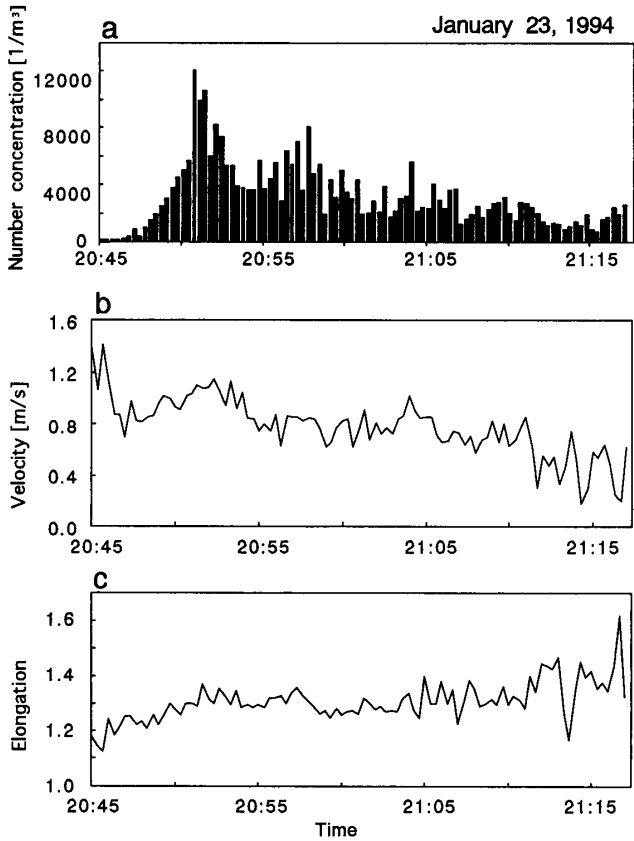
3.2.3 伸長度

座標 (i, j) における画像 $f(i, j)$ の $(p+q)$ 次の重心を中心とするモーメントは

$$\mu_{pq} = \sum_i \sum_j (i - i_c)^p (j - j_c)^q f(i, j) \quad (2)$$

で与えられる⁽¹¹⁾。検出した雪片は2値画像であるから、 $f(i, j)$ は粒子の領域内で1、背景で0とした。雪片をだ円と仮定したとき、だ円の長軸 a と短軸 b は

$$a^2 = \frac{2\{\mu_{20} + \mu_{02} + (4\mu_{11}^2 + (\mu_{20} - \mu_{02})^2)^{1/2}\}}{\mu_{00}}$$



(a) Number concentration (b) Fall velocity (c) Elongation
 図5 各特微量の経時変化
 Fig. 5 Time series of the feature parameters.

$$b^2 = \frac{2\{\mu_{20} + \mu_{02} - (4\mu_{11}^2 + (\mu_{20} - \mu_{02})^2)^{1/2}\}}{\mu_{00}} \quad (3)$$

により求まるので⁽¹²⁾, 伸長度 e は, 次式の a と b の比で定義した.

$$e = \frac{a}{b} \quad (4)$$

e は円形るとき 1.0 となり, 細長い形状になるにつれて大きな値となる. また, この特微量は領域の大きさ, 並進および回転に関して不変な値である.

4. 解析結果および雪片とあられの判別

4.1 解析結果

1994年1月23日, 富山市で観測された降雪粒子について, 粒子数, 落下速度および伸長度の解析結果を示す. この期間の粒子は雪片とあられの頻繁な変動が見られた. 図5 aは粒子数, bは落下速度, cは伸長度の各1分ごとの平均値の経時変化である. 次に, 図5の観測期間のうち, 目視により, 雪片と判定できた期間とあられと判定できた期間のそれぞれについて, 各特微量の粒径に対する大きさを求めた.

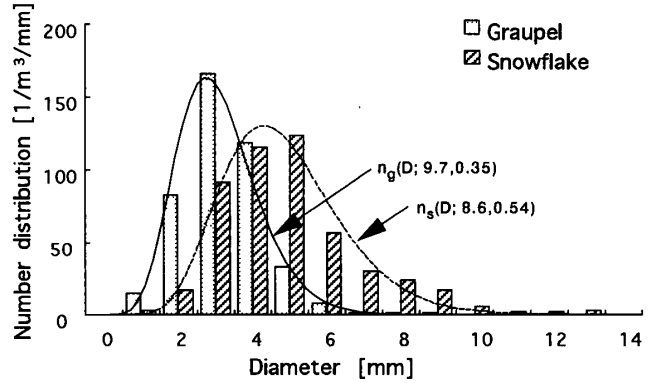


図6 粒径分布
 Fig. 6 Number distribution.

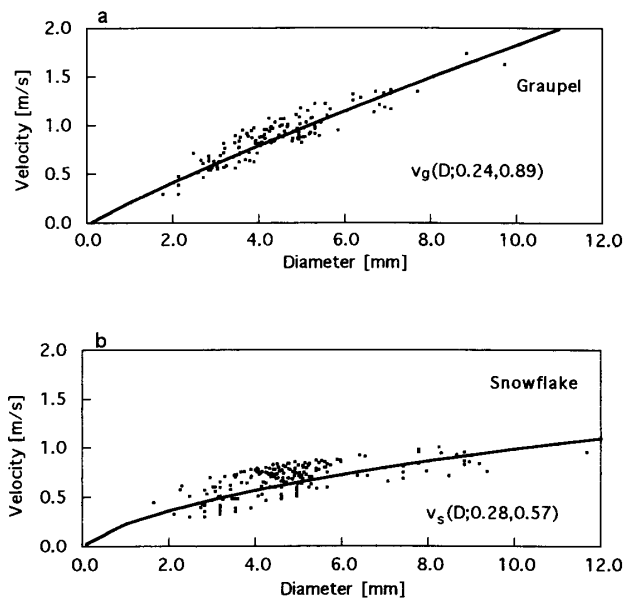


図7 落下速度と粒径の関係
 Fig. 7 Relationship between the fall velocity and the diameter.

4.2 雪片とあられの判別

図6は雪片とあられのそれぞれについて, 粒径 D を変数として粒子数を表したものである. これより, 粒径別の粒子数は, α, β をパラメータとして次式のガンマ分布

$$n(D; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} D^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{D}{\beta}\right) \quad (5)$$

で表すことができ⁽¹³⁾, あられでは, $\alpha=9.7, \beta=0.35$, 雪片では, $\alpha=8.6, \beta=0.54$ としたときに分布曲線と最も一致した. 一方, 粒径別の落下速度は, 図7より, χ, ε をパラメータとして,

$$v(D; \chi, \varepsilon) = \chi D^\varepsilon \quad (6)$$

で表すことができ⁽¹⁴⁾, あられでは, $\chi=0.24, \varepsilon=0.89$,

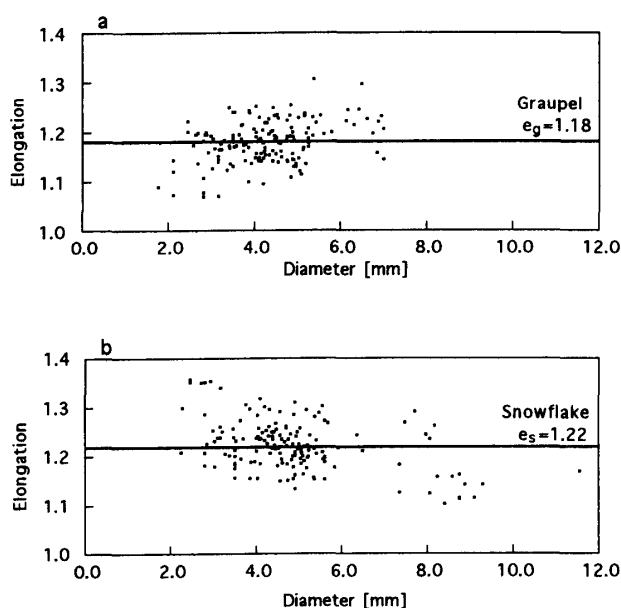


図8 伸長度と粒径の関係

Fig. 8 Relationship between the elongation and the diameter.

雪片では、 $\kappa=0.28$, $\epsilon=0.57$ としたときに特性曲線と最も一致した。また、伸長度 e は、図8より、

$$e=c \tag{7}$$

で表すことができ、あられでは、 $c=1.18 \pm 0.0018$ (平均±分散)、雪片では、 $c=1.22 \pm 0.0027$ となった。両者の値は統計的に有意差があった (t検定, 危険率=1%)。これらの結果より、あられの場合は、雪片と比較して、粒径は小さく、落下速度は速く、伸長度は小さい値となった。次に、これらの特徴量を0と1の間の値で正規化し、雪片の場合が0、あられの場合が1へ近づくように粒径分布、落下速度および伸長度を次式により正規化した。

$$G(X) = \frac{1}{1 + \exp\left\{-a\left(\frac{X}{b} - 1\right)\right\}} \quad (a > 0) \tag{8}$$

但し、 X は、式(5)~(7)で特定される n , v , e の値である。図6~図8のあられの特性式である $n_g(D; 9.7, 0.35)$, $v_g(D; 0.24, 0.89)$, e_g の場合に

$$G(X) = \frac{1}{1 + e^{-1}} = 0.73 \tag{9}$$

の値をとり、同様にして、雪片の特性式である $n_s(D; 8.6, 0.54)$, $v_s(D; 0.28, 0.57)$, e_s の場合に

$$G(X) = \frac{1}{1 + e} = 0.27 \tag{10}$$

の値をとるように、 a と b の値を次式で定めた。

$$a=1.0$$

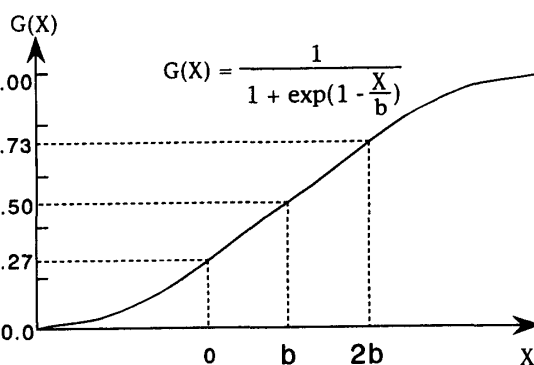


図9 各特徴量の正規化

Fig. 9 Normalization of each feature.

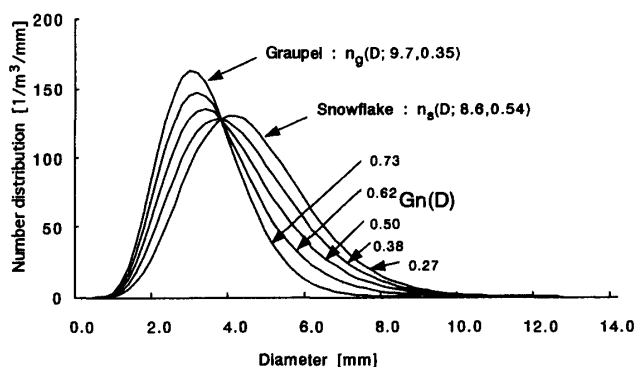


図10 粒径分布特徴量の正規化関数

Fig. 10 Normalized function of number distribution.

$$b = \frac{1}{2}(f_g(D) + f_s(D)) \tag{11}$$

$$\begin{aligned} & (f_g(D), f_s(D)) \\ & \in \{(n_g(D; 9.7, 0.35), n_s(D; 8.6, 0.54)), \\ & (v_g(D; 0.24, 0.89), v_s(D; 0.28, 0.57)), \\ & (e_g, e_s)\} \end{aligned}$$

図9は、式(9)~(11)の値を式(8)に代入したときの $G(X)$ のグラフである。 X の値により、 $G(X)$ は0から1の間の値をとり、 $X=0, b, 2b$ のとき、それぞれ $G(X)=0.27, 0.5, 0.73$ となる。

図10の $G_n(D)$ および図11の $G_v(D)$ は、このようにして、粒径分布 $n(D; \alpha, \beta)$ (図6) および粒径と落下速度の関係 $v(D; \kappa, \epsilon)$ (図7) について、あられの度合を正規化して示したものである。

粒径分布、粒径と落下速度の関係および伸長度のそれぞれについて正規化されたあられの度合関数 $G_n(D)$, $G_v(D)$ および $G_e(D)$ を用いて、雪片とあられの判別関数 $G(D)$ を次式で定義した。

$$G(D) = pG_n(D) + qG_v(D) + rG_e(D) \tag{12}$$

図12は、式(12)の各定数の値を $p=0.5, q=0.4, r$

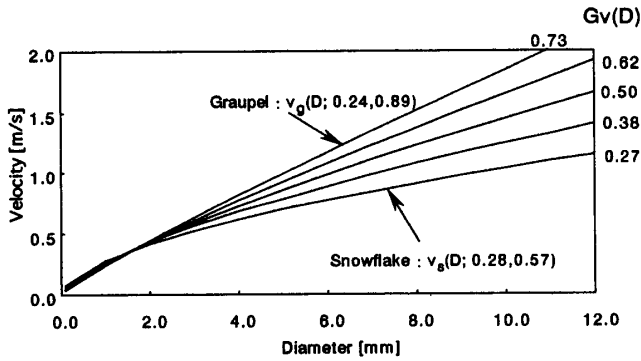


図 11 落下速度特徴量の正規化関数
Fig. 11 Normalized function of fall velocity.

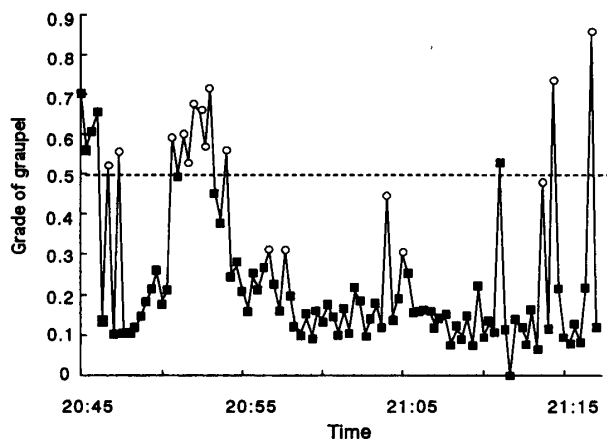


図 12 あられの度合関数
Fig. 12 Grade function of graupel.

=0.1 としたときのあられの度合を計算した結果である。図の白丸は目視によりあられ、黒四角は雪片と判定された期間を示す。あられと判定された期間と $G(D)$ の値がほぼ 0.5 以上の場合とかなりよく一致した。

5. むすび

降雪粒子の形状と落下速度を同時に定量的に測定できるシステムを作成した。この測定データより、降雪粒子を雪片とあられに分類する方法を提案した。降雪時の気象条件等により、式(5)~(7)のパラメータの値、式(11)の a と b の値、式(12)の p , q , r の割合および雪片とあられを判別するしきい値の大きさは検討する必要があるが、本方法により、雪片とあられの自動判別が可能になった。

地上における本システムとレーダやゾンデを使った

降雪雲との同時観測を行うことにより、本方法は降雪粒子の生成メカニズムの解明に有用となることが期待される。

文 献

- (1) Boucher R. I. and Wieler J. G. : "Radar determination of snowfall rate and accumulation", J. Climate Appl. Meteor., **24**, pp. 68-73 (1985).
 - (2) Carlson R. E. and Marshall J. S. : "Measurement of snowfall by radar", J. Appl. Meteor., **11**, pp. 494-500 (1972).
 - (3) Collier C. C. and Larke P. R. : "A case study of the measurement of snowfall by radar : An assessment of accuracy", Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **104**, pp. 615-621 (1978).
 - (4) Fujiyoshi Y., Endoh T., Yamada T., Tsuboki K., Tachibana Y. and Wakahama G. : "Determination of a Z-R relationship for snowfall using a radar and high sensitivity snow gauges", J. Appl. Meteor., **29**, pp. 147-152 (1990).
 - (5) Konishi H., Muramoto K. Shiina T., Endoh T. and Kitano K. : "Z-R relation for graupels and aggregates observed at Showa station, Antarctica", Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **5**, pp. 97-103 (1992).
 - (6) 小池俊雄, 水津 武, 藤田敏和, 田中洋一 : "レーダによる降雪定量観測アルゴリズムの開発と時世代レーダの設計", 河川情報研究, **1**, pp. 9-18 (1993).
 - (7) 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), **J72-D-II**, 9, pp. 1382-1387 (1989-09).
 - (8) 村本健一郎, 椎名 徹, 北野孝一 : "降雪粒子の粒径分布と落下速度のデータベース", 信学論(D-I), **J74-D-I**, 8, pp. 586-589 (1991-08).
 - (9) 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), **J76-D-II**, 5, pp. 949-958 (1993-05).
 - (10) Gonzalez R. C. and Woods R. E. : "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company (1992).
 - (11) Hall E. L. : "Computer Image Processing and Recognition", Academic Press (1979).
 - (12) Teague M. R. : "Image analysis via the general theory of moments", J. Opt. Soc. Am., **70**, 8, pp. 920-930 (1980).
 - (13) Wong R. K. W. and Chidambaram : "Gamma size distribution and stochastic sampling errors", J. Climate Appl. Meteor., **24**, pp. 568-579 (1985).
 - (14) Langleben M. P. : "The terminal velocity of snowflakes", Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **80**, pp. 174-181 (1954).
- (平成 6 年 11 月 14 日受付, 7 年 2 月 3 日再受付)