

## 落下中の降雪粒子の密度測定

村本 健一郎<sup>†</sup> 藤田 博之<sup>†</sup> 藤城 孝史<sup>†</sup>  
 松浦 弘毅<sup>†</sup> 古川 政弘<sup>†</sup> 椎名 徹<sup>††</sup>

<sup>†</sup>金沢大学 工学部 電気・情報工学科  
 〒920 金沢市小立野2丁目40番20号

<sup>††</sup>富山工業高等専門学校 電気工学科  
 〒939 富山市本郷町13番地

あらまし 落下中の降雪粒子の密度を長時間にわたって自動的に測定するために、地上に落下する全ての粒子の重量を電子天秤を用いて測定した。このとき同時に画像処理を用いた降雪観測法により、落下中の個々の降雪粒子の粒径と落下速度を測定した。粒子の粒径と落下速度のデータより得られる単位空間を通過する全ての粒子の体積とそれらの粒子の重量のデータより、落下中の粒子の密度を計算した。更に、粒子の密度に影響を与える因子について考察することにより、画像処理データだけを使って、降雪強度を計算する手法を提案し、実際に適用した結果、実測値との良い相関が得られた。

和文キーワード 画像計測, 雪質, 降雪強度, 自動測定

## Measurement of Density of Snowflakes

Ken-ichiro MURAMOTO<sup>1</sup>, Hiroyuki FUJITA<sup>1</sup>, Takashi FUJIKI<sup>1</sup>,  
 Kohki MATSUURA<sup>1</sup>, Masahiro FURUKAWA<sup>1</sup> and Toru SHIINA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Computer Engineering,  
 Faculty of Technology, Kanazawa University,  
 2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa 920, Japan

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering,  
 Toyama National College of Technology

Abstract In order to measure the snowfall rate every minute, weight of snowflakes in a bucket was automatically recorded using a electric balance and computer system. This system was synchronized with the TV camera for analyzing the image of snowflakes. Temporal density of snowflakes was analyzed from the images and weight of snowflakes. Moreover, the snowfall rate was calculated using the image data and it was consistent with the directly measured one.

英文 key words image processing, snow quality, snowfall rate, automatic measurement

## 1. ま え が き

雨, 雪, ミヅレ, アラレ, ヒョウなどの降水粒子は電波伝搬に対して吸収散乱損失による減衰を生じさせることが知られている<sup>(1)~(3)</sup>。特に, 降雪時における電波減衰量は雪質により大きく変動することが報告されている<sup>(4)~(6)</sup>。この雪質は降雪粒子の密度(含水量)に大きく依存している<sup>(7)</sup>, 密度の測定は, 重要である。これまでの密度の測定には, 地上で人手により粒子を濾紙を受けて, 粒子の融解水による痕跡の広がりから測定する方法が用いられているが<sup>(7)~(9)</sup>, この方法では地上へ落下後の粒子しか測定することができなかった。しかも測定できる粒子の数には限界があった。

本研究では, 落下中の粒子の密度を長時間にわたって自動的に測定することを目的として, まず, 画像処理による降雪観測法を用いて, 空中を落下中の個々の降雪粒子の粒径と落下速度を測定した<sup>(10), (11)</sup>。更に同時に地上に落下する全ての粒子の重量を電子天秤を用いて測定した。粒子の粒径と落下速度のデータより得られる単位空間を通過する全ての粒子の体積の値とそれらの粒子の重量のデータより, 落下中の粒子の密度の計算をした。更に, 粒子の密度に影響を与える因子について考察することにより, 画像処理データだけを使って, 降雪強度を推定する手法を提案する。

本論文のデータは, 1993年1月に富山市で観測したものである。

## 2. 雪質の定義とその算出法

### 2.1 降雪の分類

降雪中の電波減衰量は, 同一降水強度でもかなりの変動がみられ, 降雪の分類が必要である。降雪の分類には含水量を基準にした国際分類がある<sup>(12)</sup>。

### 2.2 降雪粒子の密度

降雪粒子を各雪質に分類する上で重要となる密度の算出法について述べる。ここで降雪粒子の密度とは, 落下中の降雪粒子の空中での密度のことである。降雪粒子の密度 $\sigma$ は単位体積当たりの降雪粒子の総体積を $V(\text{cm}^3)$ , 総重量を $M(\text{g})$ とすると,

$$\sigma = \frac{M}{V} \quad [\text{g}/\text{cm}^3] \quad (1)$$

により求められる。しかし, 実際に降雪粒子の重量を測定する場合には単位面積当たり降り積った重量が測定できるだけで, 単位体積当たりの重量を測定することはできない。そのために総体積 $V$ も単位体積に降り積った降雪粒子の空中での体積, つまり単位面積を通過した降雪粒子の総体積を求める必要がある。ここで, 降雪粒子の落下速度を $v$ , 観測空間の体積を $V_0$ とすると, 単位面積を単位時間に通過する降雪粒子の個数 $n$ は,

$$n = \frac{v}{V_0} [\text{cm}/\text{s} \cdot \text{l}/\text{cm}^3] \quad (2)$$

より求まる。単位面積を通過した降雪粒子の総体積は, 式(2)から個々の降雪粒子について単位面積を単位時間に通過する個数を求め, この値にそれぞれの降雪粒子の体積を掛けることにより求められる。従って, 降雪粒子の落下速度のデータも必要となる。

また, 体積については, 降雪粒子は複雑な形状をしておりその体積を求めることは困難である。そこで降雪粒子の空中での体積の測定には通常は楕円体近似が用いられているが, 粒子は複雑な運動を伴って落下してくるので, その形状も時々刻々変動する。大量の粒子を観測することにより, 横方向から観測した粒子映像の断面積は, 上方向に対して約90%であることが調べられている<sup>(13)</sup>。従って, 粒径については, 横方向は上方向に対して約95%であるので, 粒子はほぼ球形と見なすことができる。

1個の降雪粒子が観測された場合の単位面積を単位時間に通過する降雪粒子の体積 $V$ は, 観測された降雪粒子の粒径(直径)を $D$ , 落下速度を $v$ とすると,

$$V = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^3 \frac{v}{V_0} [\text{cm}^3 \cdot \text{cm}/\text{s} \cdot \text{l}/\text{cm}^3] \quad (3)$$

となる。これより, 観測空間内に観測された粒径別の個数, 平均落下速度をそれぞれ,  $n_s$ ,  $v_s$ とすると, 粒径別の単位時間に単位面積を通過する降雪粒子の総体積 $V_s$ は

$$V_s = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^3 n_s \frac{v_s}{V_0} [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (4)$$

となる。この $V_s$ を全ての粒径 $D$ について積算すると次式となる。

$$V = \sum_D \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D}{2} \right)^3 n_s \frac{v_s}{V_0} \quad [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (5)$$

これより、単位時間に単位面積を通過する降雪粒子の総体積 $V$ が求められる。一方、単位時間当たり単位面積に降り積る降雪粒子の総重量 $M$  ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )は直接測定できる。従って、降雪粒子の密度 $\sigma$ は、

$$\sigma = M/V \quad [\text{g}/\text{cm}^3] \quad (6)$$

により求められる。

### 3. 降雪粒子の大きさと落下速度の測定

降雪粒子の観測法については既に報告したので<sup>(10)</sup>、ここではその概略だけを述べる。図1

\*

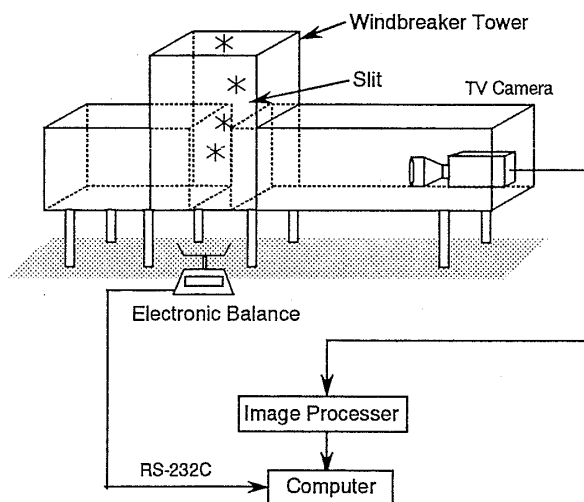


図1 降雪粒子および降雪強度観測システム

は降雪粒子と降雪強度の観測システムである。観測塔の中を落下してくる降雪粒子映像をCCDテレビカメラで撮影し、パソコン制御方式の画像処理装置に取り込む。テレビカメラから取り込んだ映像は1/60秒のシャッタースピードの間に鉛直方向に流れた長い棒状となる。撮影空間(縦:12.8cm, 横:12.8cm)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0.5mmとなる。一方、1/60秒間に取り込んだ個々の降雪粒子の映像より、図2に示す最大縦幅( $l$ )、最大横幅( $a$ )を求める。2.2で述べたように、粒子の形はほぼ球形であるので、最大横幅を粒径とする。一方、落下速度 $v$ は、1/60秒間の落下距離( $l-a$ )をを使って、次式より計算する。

$$v = (l - a) \times 0.5 \times 60 \quad [\text{mm}/\text{s}] \quad (7)$$

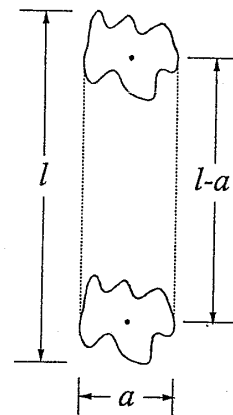


図2 降雪粒子映像の解析図

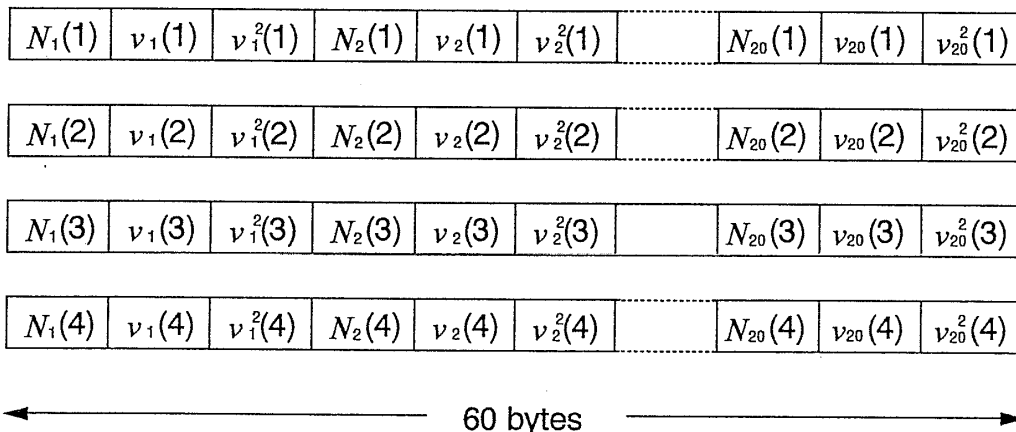


図3 検索システムのファイル構造

本研究では、任意の期間の1分毎の個々の粒子の大きさや落下速度の情報を必要とするので、取込み時のファイルから1分間を最小単位時間として、任意の時間間隔で粒径(最大横幅)別の粒子数と落下速度の平均および分散を高速に検索できることを目的として、ある時刻 $t$ [分]における各粒径(横幅,  $i = 0.5 \sim 10\text{mm}$ , 間隔は $0.5\text{mm}$ )ごとの $N_i(t)$ 個の粒子の $m$ 番目の落下速度を $v_{i,m}(t)$ とし、粒径別落下速度 $v_i(t)$ および落下速度の2乗和を図3に示すように1分毎に60バイトで格納し、4分間のデータを1レコードとするランダムファイルを作成した。このように、あらかじめ必要な計算を行い、その結果をデータベースに登録しておく方法を用いることにより、検索時の処理時間を短縮することができた<sup>(11)</sup>。

#### 4. 降雪強度の測定

降雪強度は地上におかれた容器の中に単位時間内に鉛直に落下してきた降雪粒子を溶かして、液体である水に換算したときの水柱の高さ(mm/h)として表わした値である。

降雪の場合には、降雨に比べていろいろな種類の粒子が、数分~数10分のかなり短い時間間隔で変動し、しかもその重量は大きくない。従って、雪質の測定には、短い時間間隔で感度の高い測定法が不可欠となる。気象庁で従来より使用されている転倒ます型雨量計では、降水量の最小目盛は $0.5\text{mm}$ であるので、雪質の測定用としては不十分である。

本研究では、受雪用の広い面積を有する容器に積もった降雪粒子を1分毎に電子天秤を使って重量を直接測定し、そのデータをRS-232Cによりコンピュータに転送して、単位時間当たり単位体積に降り積った降雪粒子の総重量に対して水の密度を $1.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ として降雪強度を計算した。

電子天秤は風による影響を受けやすいために、周囲に風避けを設置して、容器に蓄積された粒子の重量を測定した。この電子天秤による強度測定法は、雪を水に変換して測定する従来の溢水式や温水式の雪量計に比べ、雪の重量を直接測定するために時間の遅れや加熱による蒸発の誤差がなく、また、受け皿として直径 $35\text{cm}$ の円

筒容器を用いると、天秤の最小感度 $0.1\text{g}$ 、に対して、 $0.062\text{mm}/\text{h}$ の微少な降雪強度を、任意の時間間隔で連続して自動的に収録ができる等の利点がある。しかし、天秤の秤量による観測期間の限界があり、最大秤量を越える前に容器内の雪を捨てなければならないという問題がある。

#### 5. 観測データからの密度の計算法

画像処理による降雪粒子の粒径および落下速度の測定と電子天秤による降雪強度の測定との時刻は同期させて1分毎に測定しているので、これらの値より落下中の粒子の密度を求める。

まず、画像処理により測定された個々の粒子の粒径(横径)と落下速度の値は、図3のように粒径毎の粒子数と落下速度の平均値として記録されているが<sup>(11)</sup>、各粒径毎の落下速度の分散は、あまり大きくないので<sup>(10)</sup>、<sup>(11)</sup>、粒子の落下速度は、各粒径についての落下速度の平均値を用いても良いと言える。次に、粒子の粒径は時々刻々変動するが、2.2で述べたように粒子はほぼ球形と見なすことができる。実際の計算では、データベースに格納されている1分毎の粒径別の粒子数と平均落下速度の値を使って総体積を計算する。更に、画像処理法による粒子の粒径および落下速度の測定と、電子天秤による降雪強度 $R$ の測定とは、いずれも時間を同期させて1分間毎の積算値として測定されているので、これらにより1分毎の粒子の密度 $\sigma$ は(6)式により求められる。

#### 6. 結果と考察

##### 6.1 観測結果

図4は、1993年1月20日16時30分から21時までの降雪観測結果である。図4 a, b, cは、それぞれ画像処理により求めた空間数密度、平均粒径および平均落下速度の経時変化である。図4 dは電子天秤により測定した降雪強度、図4 eは式(6)より求めた粒子の密度の経時変化である。これらより、空間数密度と(a)と降雪強度(d)のグラフの変化はかなり一致していると言える。これは、平均粒径(b)と平均落下速度(c)の変化は少なく、数密度の変化が大きいためである。一方、粒子の密度(e)は $0.01 \sim 0.08$ の間でかなり大きく変動している。

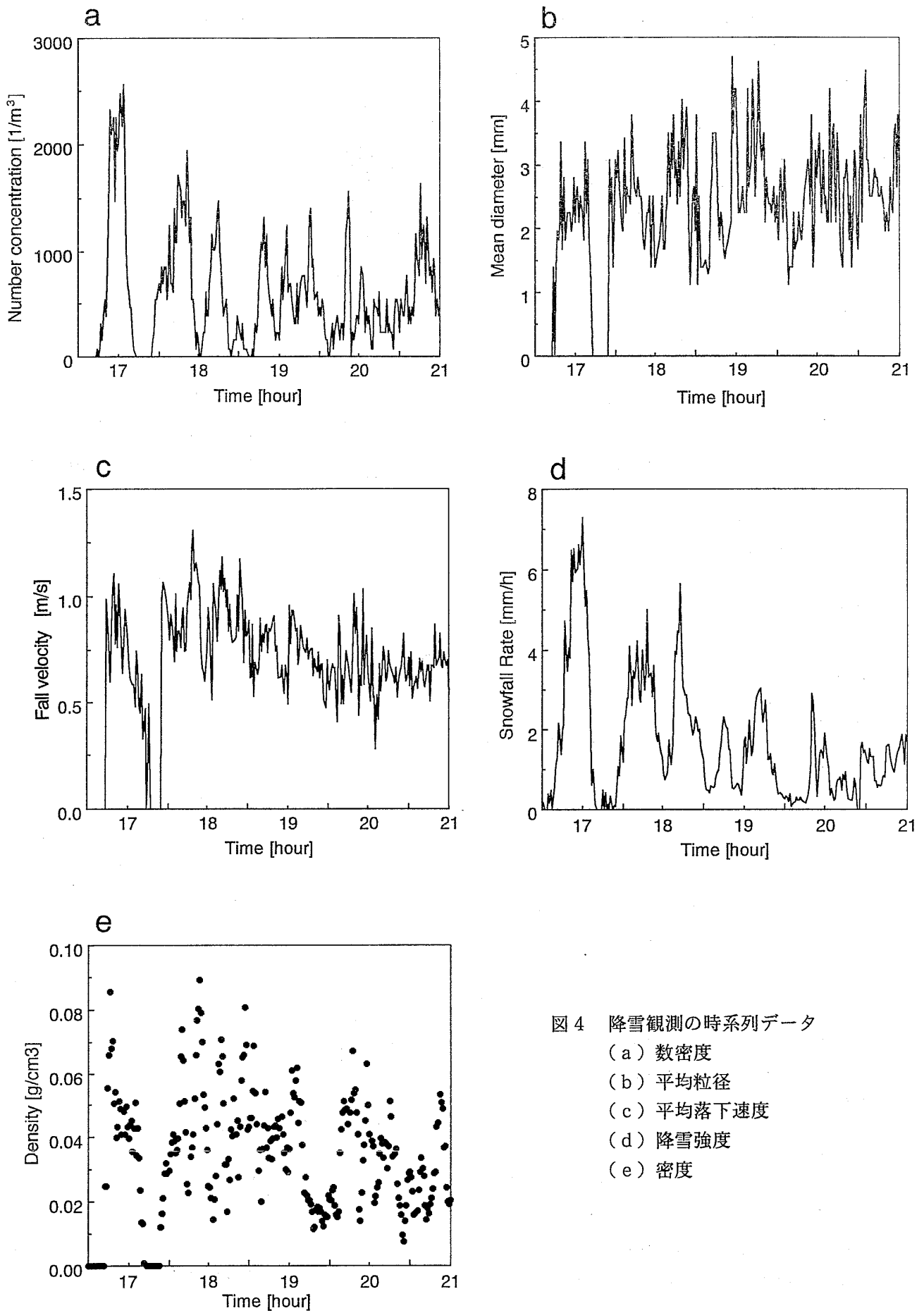


図4 降雪観測の時系列データ  
 (a) 数密度  
 (b) 平均粒径  
 (c) 平均落下速度  
 (d) 降雪強度  
 (e) 密度

### 6.2 画像処理データを用いた降雪強度の算出法

電子天秤を用いずに画像処理データだけを使って、降雪強度を求める方法について述べる。雨滴の場合には、密度は一定値の  $1.0 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  と考えてよいので、体積と落下速度だけで、降雨強度は計算できるが<sup>(14), (15)</sup>、降雪の場合には、密度は一定ではないので、密度を画像処理データより計算するための近似式を導出する。降雪粒子の粒径を  $D$ 、粒径別の落下速度、個数および密度を、それぞれ  $v(D)$ 、 $N(D)$ 、 $\sigma(D)$  とすると、降雪強度  $R$  は

$$R = \int \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \sigma(D) v(D) N(D) dD$$

$$= \frac{\pi}{6} \int D^3 \sigma(D) v(D) N(D) dD \quad (8)$$

により求めることができる。1993年1月20日16時30分～21時に観測された全ての降雪粒子について、粒径別粒子数分布(図5)および粒径と落下速度の関係(図6)を求めた。図5より、粒径と粒子数は

$$N(D) = N_0 \exp(-\lambda D) \quad (9)$$

で表すことができ<sup>(16)</sup>、この場合は  $N_0 = 855$ 、 $\lambda = 0.366$ であった。以下の図中の破線は特性式のグラフである。一方、図6より粒径と落下速度は

$$v(D) = \kappa D^\varepsilon \quad (10)$$

で表すことができ<sup>(17)</sup>、この場合は  $\kappa = 0.512$ 、 $\varepsilon = 0.406$ であった。更に粒径と密度の関係を調べると、図7のようになり、(10)式の  $\varepsilon$  を使って

$$\sigma(D) = \sigma_0 D^{-\varepsilon} \quad (11)$$

で近似できる。 $\varepsilon = 0.406$ に対して、 $\sigma_0 = 0.048$ とおくと、粒径と密度の関係をかなりよく近似できた。式(9)～(11)を式(8)へ代入すると、

$$R = \frac{\pi}{6} \int D^3 \kappa N_0 \exp(-\lambda D) dD \quad (12)$$

となり、粒子の密度を用いずに、画像処理データより得られる  $N_0$ 、 $\kappa$ 、 $\lambda$  の各定数と、粒径別

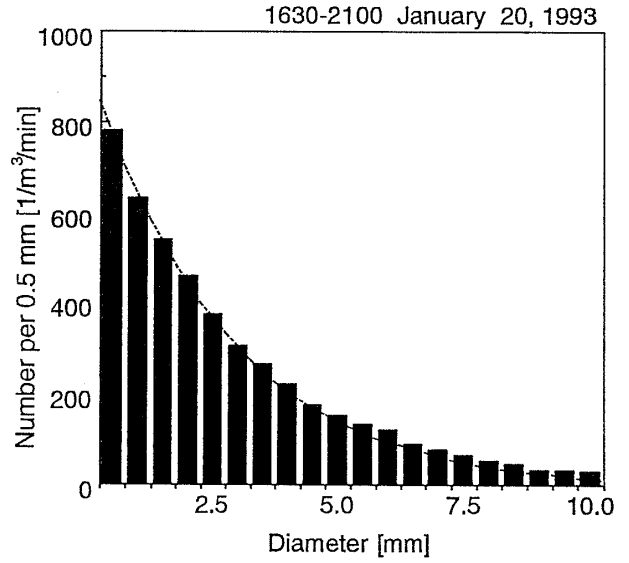


図5 降雪雪片の粒径分布

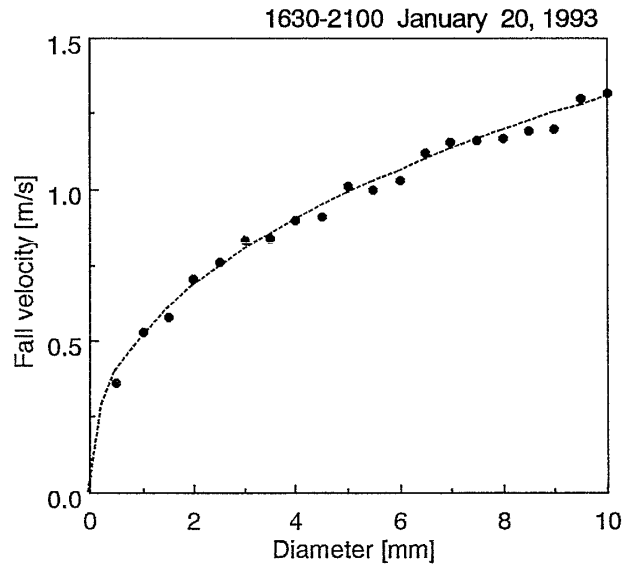


図6 粒径と落下速度の関係

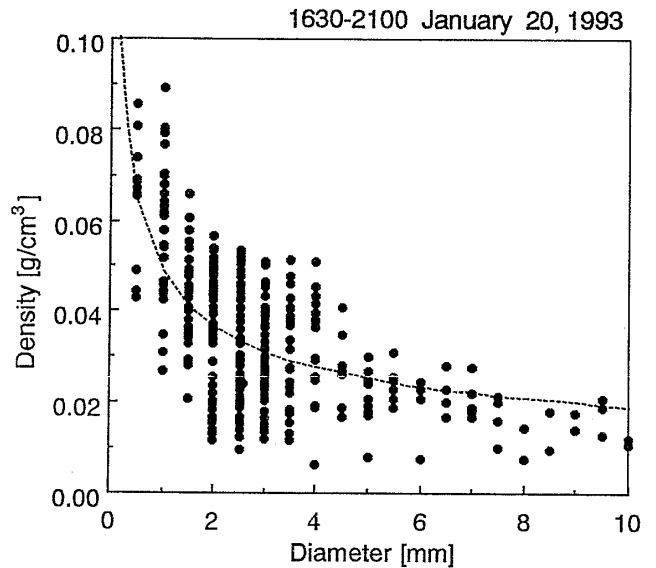


図7 粒径と密度の関係

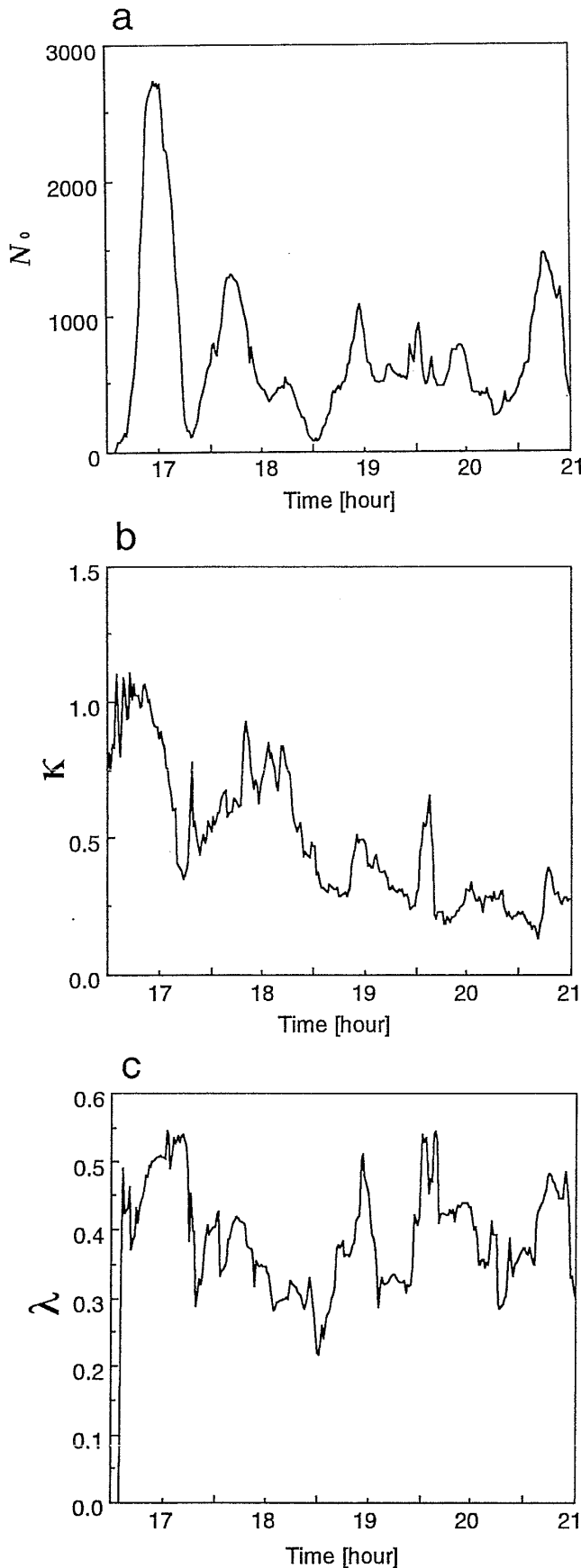


図8 各パラメータの経時変化  
(a)  $N_0$ , (b)  $\kappa$ , (c)  $\lambda$

の粒子数により、降雪強度を求めることができる。図8 a, b, cは、1月20日16時30分から21時までの各時刻の前後各5分間の移動平均により求めた毎分の $N_0$ ,  $\kappa$ ,  $\lambda$ の経時変化である。1分間隔の図8の $N_0$ ,  $\kappa$ ,  $\lambda$ の値および図3のように記録されている粒径別の粒子数の値を式(12)に代入することにより、降雪強度を計算することができる。図9は、式(12)により計算した1分毎の降雪強度である。図4 dと比較すると、かなりよく一致していると言える。

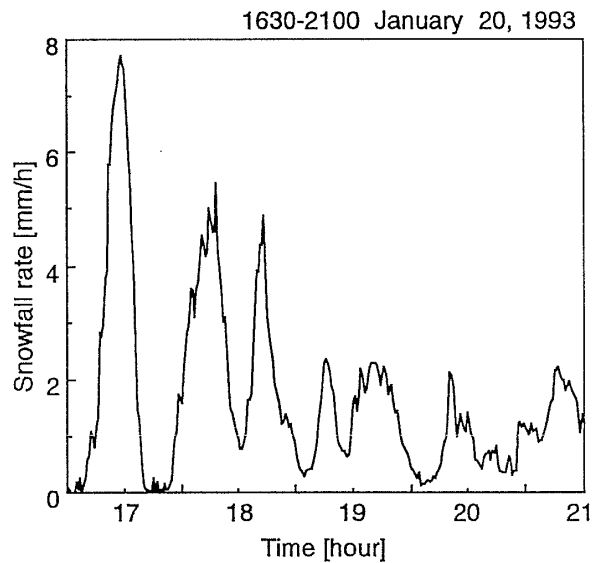


図9 画像処理データより求めた降雪強度

### 7. むすび

落下中の降雪粒子の密度は水分含有率に大きく依存すると考えられるので、雪質を表わす指数として有効である。

画像処理データと電子天秤データを用いて、落下中の降雪粒子の密度を1分間隔で計算することができた。更に、粒径別粒子数、降雪粒子の粒径と落下速度の関係、および粒径と密度の関係を求めることにより、電子天秤を用いずに、画像処理データだけから降雪強度を求めることができるようになった。4で述べたように、従来の転倒ます型雨量計による降雪強度の測定法では、測定感度が低く、また電子天秤法では、風の影響や、一定量毎に雪を捨てる必要があったが、画像処理法では、このような制限がないので、強度測定として有効な方法と言える。

10GHz以上の高い周波数が使用される無線通信では、降雨や降雪による影響が大きく、回線

設計に際しては降雨や降雪による減衰を正確に把握する必要があり，短い時間間隔の降雨や降雪強度の定量的な把握が必要であり<sup>(18)</sup>，本手法は，降雪強度と電波減衰の関係を定量的に解析する上で有効となることが期待される。

今後の課題として，どのような雪質のときでも本方法により，降雪強度の測定が有効であるかの検討が必要である。

謝辞 本研究を進めるにあたり，北海道大学理学部播磨屋敏生教授から貴重な御助言および資料の提供を頂いたことに感謝します。尚，本研究の一部は文部省科学研究費補助金(05041077)によるものである。

### 文 献

- (1) 小口知宏，細矢良雄：“雨滴による電波の散乱吸収”，信学誌，60，4，pp.368-375(1972).
- (2) 森田和夫，山田松一：“降雨中の電波伝搬”，信学誌，60，4，pp.375-382(1972).
- (3) Medhurst R.G. "Rainfall attenuation of centimeter waves: comparison of theory and measurement", IEEE Trans. Antennas & Propagat., AP-13, pp.550-564, (1965).
- (4) 浅利英吉：“降雪中のマイクロ波伝搬について”，信学論(B)，52-B，11，pp.663-668(1969).
- (5) 浅利英吉：“含水雪中のマイクロ波の減衰”，信学論(B)，57-B，8，pp.481-488(1974).
- (6) 西辻昭：“降雪時における電波減衰量の計算方法”，信学論，54-B，1，pp.22-29(1971).
- (7) 中村勉：“雪片の含水率の測定法について”，雪氷，22，145-146(1960).
- (8) Magono C. and Nakamura T.:"Aerodynamic studies of falling snowflakes", J. Meteor. Soc. Japan, 43, pp.139-147(1965).
- (9) Sasyo Y., Mori T. and Onozaki O., : "Observation of the liquid water content of melting snowflakes with a new instrument", J. Meteor. Soc. Japan, 69, pp.83-90(1991).
- (10) 村本健一郎，椎名徹：“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).
- (11) 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).
- (12) 吉田順吾：“雪の分類”，北大低温研資料，pp.1-3(1953).
- (13) 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).
- (14) 村本健一郎，椎名徹，中田克男，土合昌文：“画像処理による雨滴の大きさと落下速度の測定”，信学会春季大会，D-434(1990.3).
- (15) 村本健一郎，松浦弘毅，奥村昌和，樋口吾郎：“雨滴の形状と落下速度による降雨量算出”，信学会春季大会，D-415(1992.3).
- (16) Gunn K.L. and Marshall J.S. : "The distribution with size of aggregate snow flakes", J. Meteor., 15, pp.452-461(1958).
- (17) Langleben M.P.:"The terminal velocity of snowflakes", Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 80, pp.174-181(1954).
- (18) CCIR:"Propagation data and prediction methods required for earth-space telecommunication system", Report 564-4, V, ITU(1990).