

論 文

落下中の降雪粒子の密度と降雪強度の測定

正員 村本健一郎[†] 正員 松浦 弘毅[†] 正員 椎名 徹^{††}

Measurement of Density of Snow Particles and Snowfall Rate

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

あらまし 落下中の降雪粒子の雪質を測定することは、降雪時における電波減衰を解析するために重要である。雪質は降雪粒子の密度(含水量)に大きく依存しているため、雪質は密度により表すことができる。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、落下中の個々の降雪粒子の粒径と落下速度を測定した。このとき同時に地上に落下したすべての粒子の重量を電子天びんを用いて測定した。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すべ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し、実際に適用した結果、実測値との良い相関が得られた。

キーワード 画像計測, 密度, 降雪強度, 自動測定

1. まえがき

雨, 雪, みぞれ, あられ, ひょうなどの降水粒子は電波伝搬に対して吸収散乱損による減衰を生じさせることが知られている^{(1)~(3)}。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^{(4)~(6)}。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ため⁽⁷⁾、短い時間間隔での連続的な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ろ紙に受けて、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^{(7)~(9)}。しかし、これら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、ある時刻における特定の粒子について測定されたものであり、大量の粒子についての短い時間間隔での連続的な測定法はまだ開発されていない。

本研究では、落下中の粒子の1分ごとの平均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^{(10),(11)}。更に同時に地上に落下するすべての粒子の重量を電子天びんを用いて測定した。粒子の粒径と落下速度のデータを用いて得られる単位空間を通過するすべ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1分ごとの平均密度を計算した。次に、降雪の諸特性を調べることにより、降雪粒子の粒径分布、粒径と落下速度の関係、粒径と密度の関係には、それぞれ固有の特性式が成り立つことが明らかになった。そこで、これらの特性式を用いることにより、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. 降雪粒子の密度

2.1 降雪の分類と密度

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見られ、降雪の分類が必要である。降雪は国際分類によって、7種類に分類されており⁽¹²⁾、分類に最も関係しているのは粒子の密度であることが示されている。

2.2 密度の算出法

降雪粒子を分類するときに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

[†] 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

^{††} 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

の降雪粒子の空中での密度のことである。ある時刻に降っているすべての降雪粒子の平均密度 σ は単位体積当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りに降り積もった重量が測定できるだけで、単位体積当りの重量を直接測定することはできない。そのために粒子の総体積 V も単位面積に降り積もった降雪粒子の空中での体積、つまり単位空間を通過する降雪粒子の総体積を求めることになる。

次に、降雪粒子は複雑な形状をしており、その形状も時々刻々変動するので、体積を求めることは困難である。しかし、大量の粒子を観測することにより、横方向から測定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⁽¹³⁾。従って、粒径については、横方向は上方向に対して約 95% となるので、粒子はほぼ球形とみなすことができる。

1 個の降雪粒子が単位空間を単位時間に通過するときの粒子の体積 V は、粒子の粒径(直径)を D 、落下速度を v 、観測空間の体積を V_0 とすると、

$$V = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3 \frac{v}{V_0} \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{cm}/\text{s} \cdot 1/\text{cm}^3] \quad (2)$$

となる。これより、観測空間内に観測された粒子のうち、ある大きさの粒径についてのすべての粒子の個数、平均落下速度をそれぞれ、 n_D 、 v_D とすると、その大きさのすべての粒子が単位時間に単位空間を通過する総体積 V_D は

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

となる。この V_D をすべての粒径 D の粒子について積算した式(4)により、単位時間に単位空間を通過する降雪粒子の総体積 V_s が求められる。

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

一方、単位時間当り単位面積に降り積もる降雪粒子の総重量 $M_s(\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ は電子天びんにより直接測定できる。従って、降雪粒子の密度 σ は、式(5)により求められる。

$$\sigma = \frac{M_s}{V_s} \quad [\text{g}/\text{cm}^3] \quad (5)$$

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⁽¹⁰⁾、ここではその概略だけを述べる。図1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: 12.8 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。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。

$$v = (l-a) \times 0.5 \times 60 \quad [\text{mm}/\text{s}] \quad (6)$$

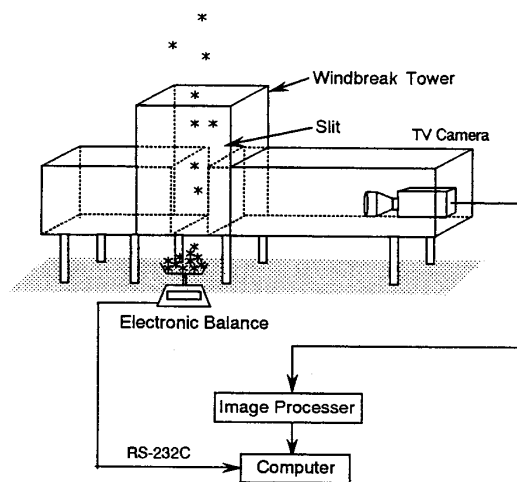


図1 降雪粒子および降雪強度観測システム
Fig. 1 Configuration of equipments for measuring snowflakes and snowfall rate.

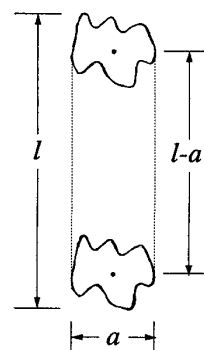


図2 降雪粒子映像の解析図
Fig. 2 Model of snowflake.

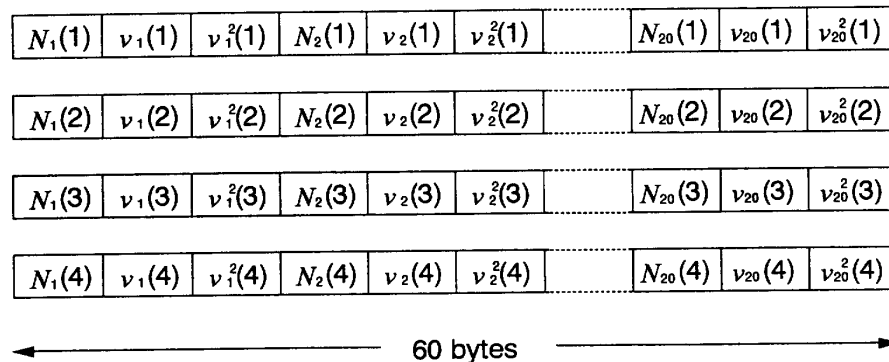


図3 検索システムのファイル構造
Fig. 3 Format of the file for search system.

これらのデータ量は膨大であるので、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たデータベースシステムが既に構築されている⁽¹¹⁾。そのシステムでは、ある時刻 t [分]における各粒径(横幅, $i=0.5\sim 10$ mm, 間隔は 0.5 mm)ごとの $N_i(t)$ 個の粒子の粒径別落下速度 $v_i(t)$ および落下速度の2乗和を図3に示すように1分ごとに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により構成されている。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している。

4. 降雪強度の測定

降雪強度は地上に置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～数十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、密度の測定には、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 mm であるので、密度の測定用としての感度は不十分である。

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分間ごとに電子天びん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面積に降り積もった降雪粒子の総重量[g]に対して水の密度を 1.0 [g/cm³]として降雪強度[mm/h]を計算した。

測定時には、電子天びんは風により振動しやすいので、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。この電子天びん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 cm の円筒容器を用いると、ここで使用した天びんの最小感度を 0.1 g に対して、0.062 mm/h の微小な降雪強度を、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、天びんの秤量による観測期間の限界があり、最大秤量を超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びんによる降雪強度の測定との時刻は、同期させて1分ごと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以下の方法により求める。

まず、画像処理により測定された個々の粒子の粒径(横幅)と落下速度の値は、図3のように粒径ごとの粒子数と落下速度の平均値として記録されているが⁽¹¹⁾、各粒径ごとの落下速度の分散は、あまり大きくないので^{(10),(11)}、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よいと言える。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みなすことができる。実際の計算では、データベースに格納されている1分ごとの粒径別の粒子数と平均落下速度の値を使って1分ごとの全粒子の総体積を計算する。更に、この粒径および落下速度の測定と、電子天びんによる降雪粒子の総重量の測定とは、いずれも時間を同期させて1分ごとの積算値として測

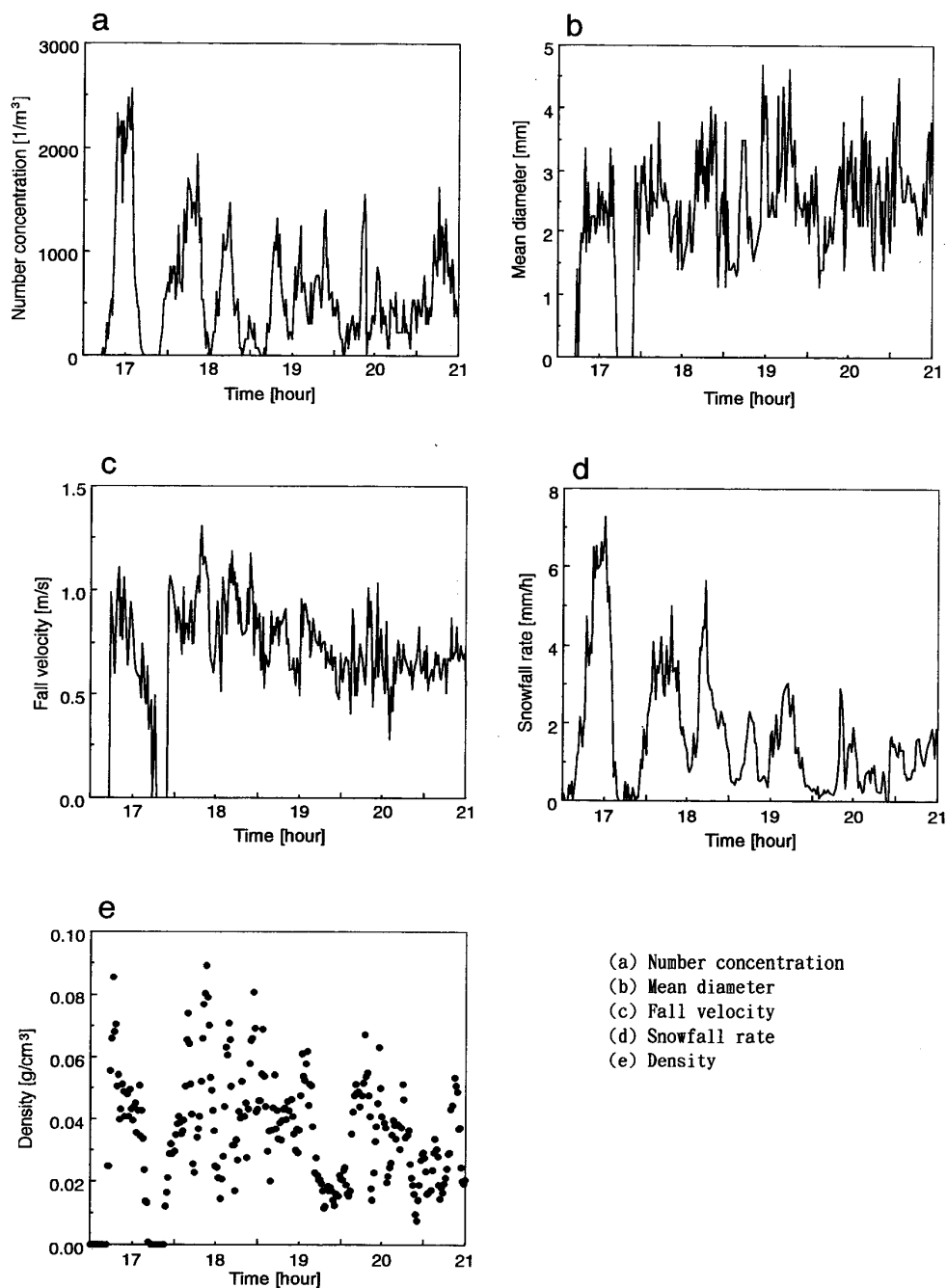


図4 降雪観測の時系列データ

Fig. 4 Time series of characteristics of observed snowfall data.

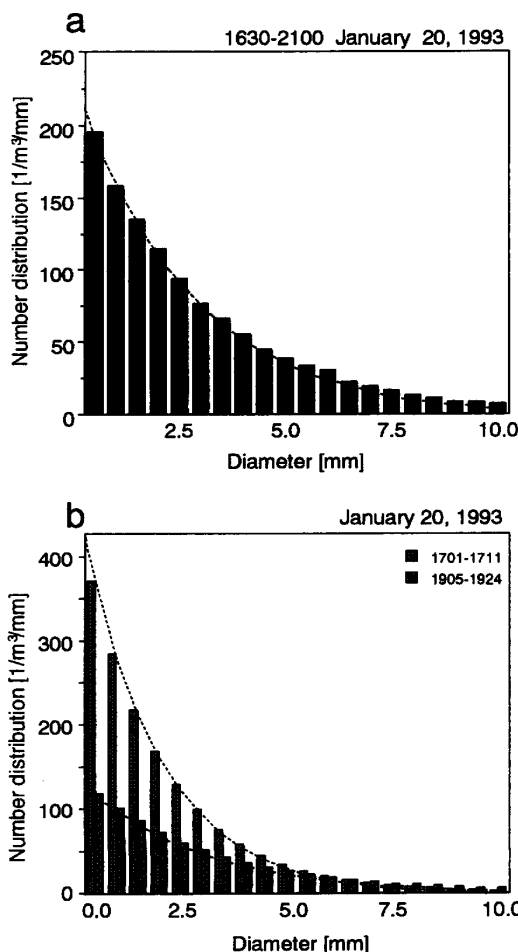
定されているので、これらにより1分ごとの粒子の密度は式(5)により求められる。

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(1m³当りの粒子数)、全粒子の平均粒径および平均落下速度の1分ごと

の経時変化である。図4(d)は電子天びんにより測定した降雪強度、図4(e)は式(5)より計算した1分ごとの粒子の密度の経時変化である。これらより、空間数密度(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)の変動は比較的少なく、数密度の変動が大きいためである。一方、粒子の密度(e)は0.01~0.08の間でかなり大きく変動している。



(a) Average distribution of all snowflakes
(b) Cases of a large and a small number of snowflakes

図5 降雪雪片の粒径分布
Fig. 5 Frequency distribution of snowflakes.

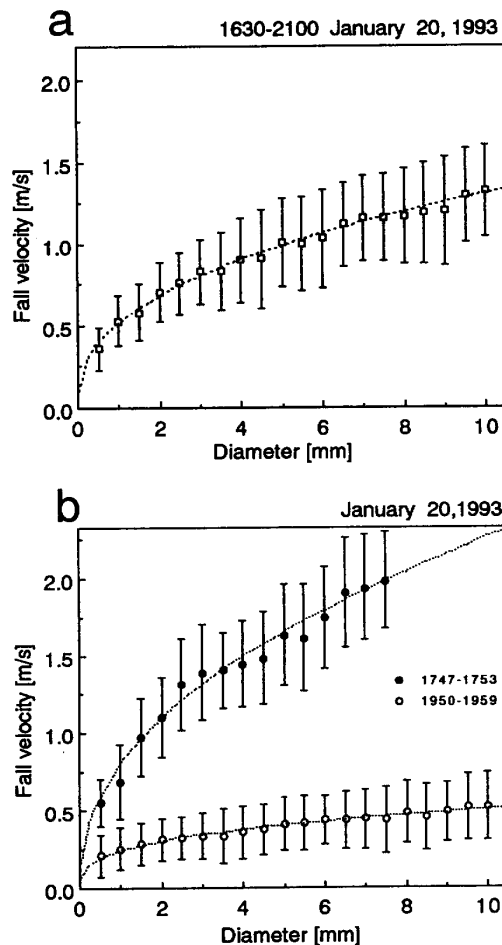
6.2 画像処理データを用いた降雪強度の算出法

電子天びん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 $1.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ 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⁽¹⁴⁾、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

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

$$= \frac{\pi}{6} \int D^3 \sigma(D) v(D) N(D) dD \quad (7)$$

により求めることができる。



(a) Average velocity of all snowflakes
(b) Cases of the high and low velocity

図6 粒径と落下速度の関係
Fig. 6 Fall velocity versus diameter of snowflakes.

6.3 降雪の特性式

粒径別の粒子数 $N(D)$ は N_0, λ を定数として $N(D) = N_0 \exp(-\lambda D)$ (8) で表すことができる⁽¹⁵⁾。一方、粒径別の落下速度 $v(D)$ は、 κ, ϵ を定数として $v(D) = \kappa D^\epsilon$ (9) で表すことができる⁽¹⁶⁾。

1993年1月20日16時30分～21時に観測された降雪粒子について、式(8)および式(9)の関係を調べた。図5(a)は観測期間内の全粒子の平均粒径別粒子数分布である。この場合は $N_0 = 214$ 、 $\lambda = 0.366$ とすると、特性式(8)は実際の粒径分布とよく一致した。以下の図中の破線は特性式のグラフである。図5(a)の分布は降雪の種類により変動し、例えば小さい粒径の粒子が多く降る場合(図5(b), 17:01～17:11)には、特性式のグラフの傾きは急になり、大きい粒径の場合(図5(b),

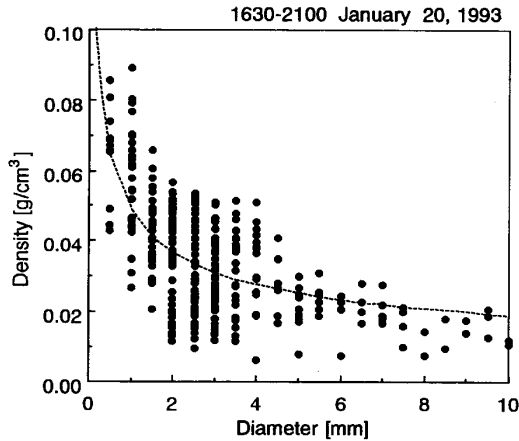


図7 粒径と密度の関係

Fig. 7 Density versus diameter of snowflakes.

19:05~19:24)には、緩やかになる。しかし、いずれの場合も N_0 と λ の値が変化するだけで、粒径と粒子数の分布は式(8)で表すことができた。一方、図6(a)は観測期間内の全粒子の粒径と落下速度の関係を粒径別の平均値と分散で表したものである。この場合は $\kappa = 0.512$, $\epsilon = 0.406$ とすると、特性式(9)は実際の粒径と落下速度の関係によく一致した。図6(a)の関係についても、あられのように落下速度の速い場合(図6(b), 17:47~17:53)と、ぼたん雪のように落下速度の遅い場合(図6(b), 19:50~19:59)にも、 κ と ϵ の値が変化するだけで、粒径と落下速度の関係は式(9)で表すことができた。

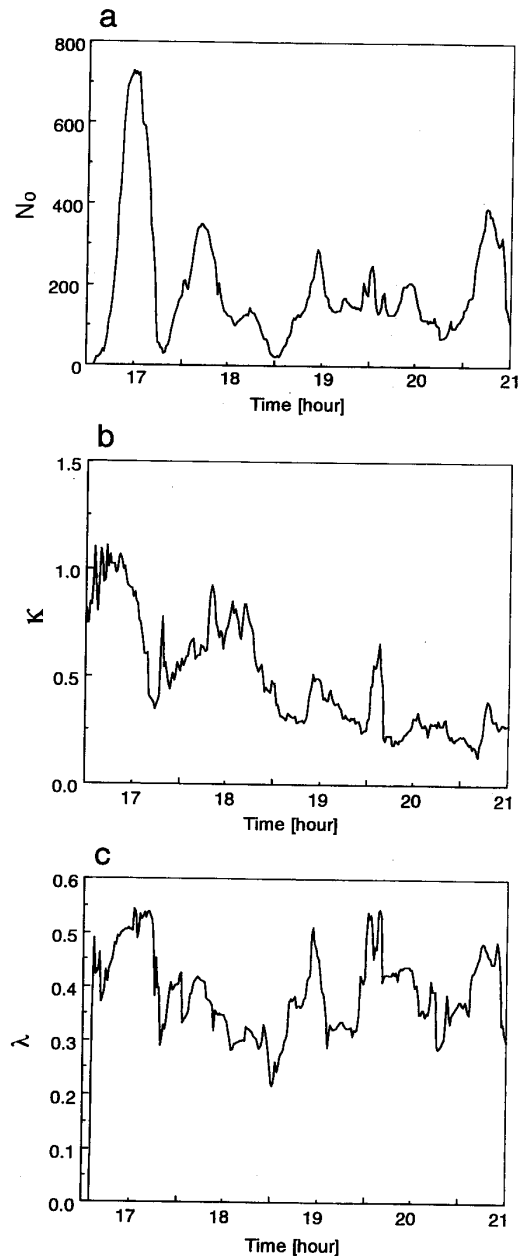
更に、1分ごとの全粒子の平均粒径(図4(b))と平均密度(図4(e))との値より、各時刻の粒径と密度の関係を調べると、図7のようになり、式(9)の ϵ を使って

$$\sigma(D) = \sigma_0 D^{-\epsilon} \quad (10)$$

で近似できる。図6(a)の場合の $\epsilon = 0.406$ 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(8)~(10)を式(7)へ代入すると、

$$R = \frac{\pi}{6} \int D^3 \sigma_0 \kappa N_0 \exp(-\lambda D) dD \quad (11)$$

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, κ, λ の特性値、粒径別の粒子数および定数 σ_0 により、降雪強度を求めることができる。実際の計算では、1分ごとの各値を連続的に求めるためには、観測された粒子数が少なかったため、各時刻の前後各5分間の移動平均により毎分の N_0, κ, λ を計算した。図8(a), (b), (c)は、1月20日16時30分から21時までの1分ごとの N_0, κ, λ の計算値である。1分ご



(a) N_0 (b) κ (c) λ

図8 各パラメータの経時変化

Fig. 8 Time series of characteristics of each parameter.

とに計算された N_0, κ, λ の値を式(11)に代入し、更に図3のように記録されている粒径別の粒子数で積算することにより、1分ごとの降雪強度を計算することができる。図9は、式(11)により計算した1分ごとの降雪強度である。図4(d)の実測値と比較すると、各特性値の計算に移動平均を用いたので、変動がやや滑らかになっているが、全体としては、かなりよく一致しているので、ここで提案した手法は有効と言える。

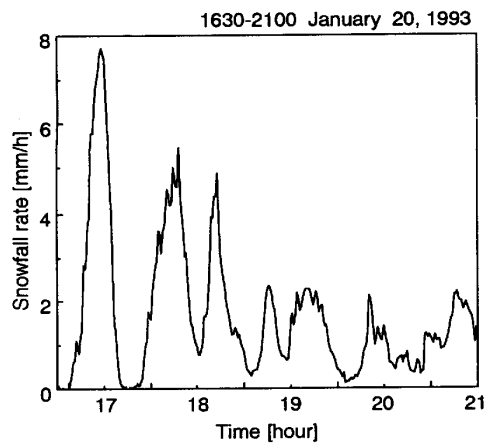


図9 画像処理データより求めた降雪強度

Fig. 9 Time series of snowfall rate calculated by image data.

7. むすび

降雪の種類は、落下中の降雪粒子の密度に大きく依存していると考えられるので、密度の測定は重要である。

画像処理データと電子天びんデータを用いて、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、電子天びんを用いずに、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、また電子天びん法では、風の影響や、一定量ごと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、短い時間間隔で長期間にわたる強度の測定法として有効な方法と言える。

10 GHz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測定値が必要となる⁽¹⁷⁾。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とき有効となることが期待される。

今後の課題として、どのような種類の降雪のときでも、本方法による降雪強度の測定法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。なお、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 (1969-11).
- (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 (1974-08).
- (6) 西辻 昭: “降雪時における電波減衰量の計算方法”, 信学論(B), **54-B**, 1, pp. 22-29 (1971-01).
- (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.: “Observation of the liquid water content of melting snowflakes with a new instrument”, J. Meteor. Soc. Japan, **69**, 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 (1989-09).
- (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 (1991-08).
- (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 (1993-05).
- (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”, 1990 信学春季全大, D-434.
- (15) Gunn K. L. and Marshall J. S.: “The distribution with size of aggregate snowflakes”, J. Meteor., **15**, pp. 452-461 (1958).
- (16) Langleben M. P.: “The terminal velocity of snowflakes”, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **80**, pp. 174-181 (1954).
- (17) CCIR: “Propagation data and prediction methods required for earth-space telecommunication system”, Report 564-4, V, ITU (1990).

(平成6年6月27日受付)

**村本健一郎**

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。医博。この間、生体情報処理、画像計測の研究に従事。情報処理学会、計測自動制御学会、画像電子学会、日本リモートセンシング学会、日本ME学会、日本雪氷学会、IEEE各会員。

**松浦 弘毅**

昭38 名大・工・電子卒。昭43 同大大学院博士課程了。同年金沢大学工学部助手。昭57 同電子工学科教授。現在同電気・情報工学科教授。工博。この間、光波応用計測、画像計測、生体情報処理の研究に従事。情報処理学会、計測自動制御学会、日本ME学会、テレビジョン学会、日本脳波・筋電図学会各会員。

**椎名 徹**

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。現在同学科講師。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。応用物理学会会員。