

長岡における雪片の落下速度の測定と Z-R 関係への適用について

上 田 博*・八 木 鶴 平*

国立防災科学技術センター

Measurement of the Fall Velocity of Snowflakes in Nagaoka and its Application to the Z-R Relation.

By

Hiroshi Uyeda and Tsuruhei Yagi

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

The fall velocity of snow particles and their size distributions were measured simultaneously at Nagaoka, Niigata Prefecture in 1979.

The fall velocity V in cm/sec of snowflakes was given by $V=107 D^{0.29}$, where D is the diameter in mm of the water drop formed by the melting of the snowflakes. The Z-R relation obtained by utilizing the fall velocity was $Z=3200 R^{1.9}$.

The radar reflectivity Z which was calculated from the measured fall velocity was found to be larger than Z which was calculated using the fall velocity of Kajikawa (1974). The maximum increment reached to 68% at a certain precipitation intensity R .

The importance for the measurement of the fall velocity of snow particles and application to the calculation of the Z-R relation is discussed in order to improve the accuracy of the Z-R relation.

1. 緒 言

これまでレーダーを用いて降水強度を求めようとする試みが種々なされてきた。これが実用化すると、防災気象の面においてレーダーはより重要な観測手段になると考えられる。

レーダーによる降水強度の測定は雨の場合には徐々に成果をあげつつあるが、雪の場合には種々の理由により実用化されづらい状況にある。一つには、雪のレーダー反射強度が弱いためにエコーの強さの程度を何段階かに分けて表示しづらい。次に、雨滴と異なり、降雪粒子は形態・密度・含水量等に相異があり、このため落下速度や粒度分布が各降雪ごとに変化し、 Z （レーダー反射因子）と R （降水強度）の関係を決定しづらい。さらに、降雪粒子の

* 第1研究部異常気候防災研究室

落下速度は雨滴のそれより一桁ほど小さいために、上空のある降雪域の降水強度をレーダーで求めても、それが地上に到達するまでに風で数10km程度流される場合もあるので降雪分布と対応させるのがむずかしいなどの問題がある(岡村・舟田, 1979)。

エコー強度が弱いことに対しては、エコーのグレイ表示の段階を細かくするなどの工夫がなされつつある。一方降雪粒子の形態・密度・含水量の相異によるレーダーに関する因子の違いを決定するためには、落下速度と粒度分布を正確に測定する必要がある。また風に流される問題を考えるためには風速とともに落下速度は重要な要素である。このように、レーダーを用いて雪の降水強度を測定するためには種々の問題を解決しなければならないが、今回はそのなかで一つの重要な要素である落下速度の問題をとりあげた。

これまでの降雪粒子の落下速度の測定例としては、Langleben (1954) が雪片の落下速度を融解直径に対して求めており、Magono and Nakamura (1965) は雪片の落下速度を雪片の大きさに対して求めている。Imai *et al.* (1955) は雪片の落下速度を測定して Z-R 関係を求めている。日本における最近の研究としては、梶川 (1974 a) の雪片の落下速度、Kajikawa (1975) の霰の落下速度の測定がある。また梶川 (1974 b) は降水粒子の落下速度のまとめを行なっている。個々の場合の降雪粒子の落下速度はかなり測定しづらい現状では、降雪粒子の落下速度と粒度分布等との同時観測をもっと試みておく必要があると考えられる。さらに、Z-R 関係等も測定した落下速度を用いて計算するのが好ましいと考えられる。

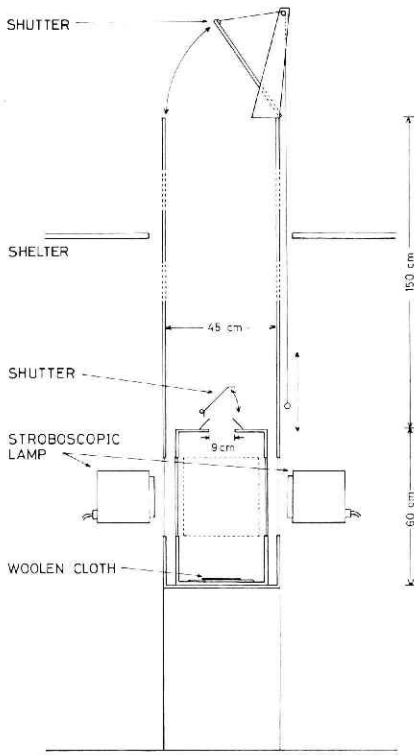
長岡における粒度分布の観測(八木・清野, 1978; 八木・上田, 1979)において、粒度分布の計算に必要な落下速度の式は長岡に比較的近く、同じ日本海側の秋田における梶川 (1974 a), Kajikawa (1975) のものを用いた。しかし、落下速度は降雪粒子の特徴によって大きく変わるので、粒度分布の観測と同時に落下速度を測定することが望ましい。そこで今回は1979年1月24日から2月4日までの粒度分布の観測(八木・上田, 1979)と同時に落下速度も測定した。さらに雪片については、測定した落下速度を用いてレーダー反射因子と降水強度との関係を求め、Z-R 関係に対する落下速度の違いによる差異を検討した。

2. 測定方法

落下速度の測定は粒度分布の測定(八木・上田, 1979)を行なったのと同じ場所の観測室内で行なった。写真1の右の観測室の屋根から出した装置に降雪粒子を自然落下の状態で導いた。落下速度の測定装置は図1に示したものであり、ほぼ梶川(1974 a)と同様のものを用いた。今回は装置の下部にある内箱の直前のシャッターにより、内箱に入る降雪粒子の数を調節した。二灯式



写真1 右側、観測室(左側はレーダー車)。
Photo. 1 Shelter for observation (right) and mobile radar (left).



のストロボで降雪粒子を断続的に照明し、図に垂直な方向からステレオ撮影し、落下速度を求めた。落下した降雪粒子を装置の最下部に置いた黒いピロードに受け、それを装置から取り出し、すばやく接写した後に、八木・清野(1979)が粒度分布測定に使用した加湿箱に入れて融解させた。これをウォーターブルー処理をした汙紙に吸収させ、その痕跡から融解直径を求めた。

写真2の(a)に示したように、落下中の写真から降雪粒子の結晶型及びストロボの発光間隔(1秒間に100回発光)ごとの落下距離がわかる。さらに、写真2の(b)に示したように、落下した各降雪粒子のピロード布上の落下位置がわかり、これを融解させて汉紙に吸収させることにより、落下中

図1 落下速度測定装置

Fig. 1 Apparatus for measurement of fall velocity. The unit was set in the shelter for observation.

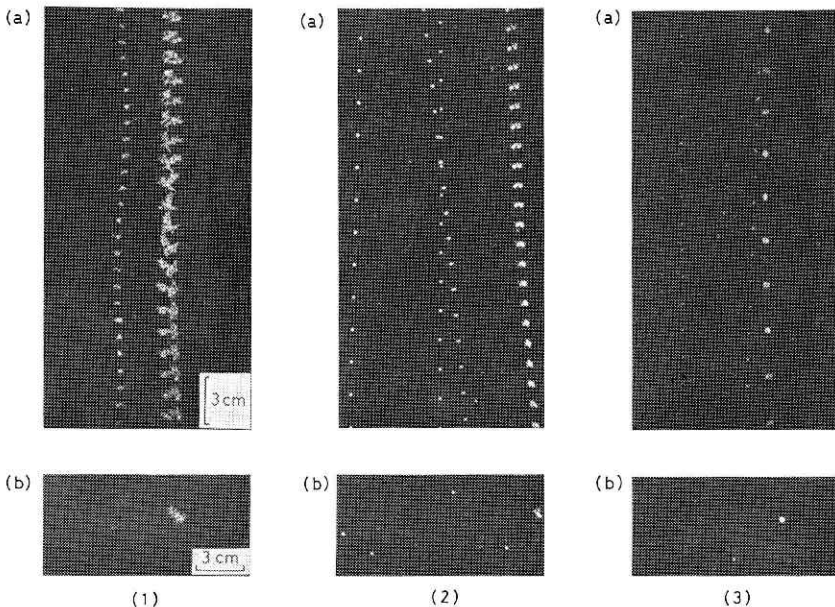


写真2 落下速度決定の一例。(a)ストロボ撮影(発光間隔は1秒間に100回)。(b)接写。(1)雪片。(2)雪片と粉雪。(c)霰と粉雪。

Photo. 2 Measurement of fall velocity. (a) stroboscopic photograph of falling particles at 1/100 sec. intervals. (b) photograph of particles by close-up camera. (1) snowflakes. (2) snowflakes and powdered snow. (3) graupel and powdered snow.

の写真に撮影された降雪粒子に対応する粒子の融解直径が測定される。写真2の(1)の雪片の融解直径は1.5mmと0.4mmであり、融解直径0.4mm程度の降雪粒子でも雪片であることがよくわかる。写真2の(2)は写真右側の雲粒の多い雪片と、同時に降った粉雪であり、融解直径は、雪片0.9mm粉雪0.4mmであった。落下中の写真の中央部の左から右に少し斜めに落下する降雪粒子はむしろ濃密雲粒付と言ったほうがよいものである。写真2の(3)の最大のもは霰であり、融解直径は1.5mmである。このように落下中の降雪粒子の写真から、雪片、粉雪、霰の分類は比較的容易にできた。

3. 落下速度の測定結果

粒度分布の観測(八木・清野,1979;八木・上田,1979)では、地上気温0.5°Cを境として、霰と粉雪について粒度分布の計算に使用する落下速度の式を変えた。ところが1979年の観測期間中の地上気温はほとんど0.5°C以上であり、地上気温0.5°C以上のときに、雪片102個、粉雪72個、霰12個の落下速度の値を得た。そこで、雪片と粉雪について地上気温0.5°C以上の場合についての結果を報告する。

図2に雪片の落下速度(V :cm/sec)を融解直径(D :mm)に対してプロットした。落下速度の値は多少広い範囲に広がっている。大きな落下速度を示す雪片について写真を詳しくみると、雲粒が多数付着していた。測定例がもっと多いと、これらを雲粒の多いものとして分離できるが、今回の観測では雲粒の多いものの割合は小さかったので、全測定値から一つの落下速度の式を求めた。図2の実線は測定値を $V=kD^n$ に回帰させた曲線で $V=107D^{0.29}$

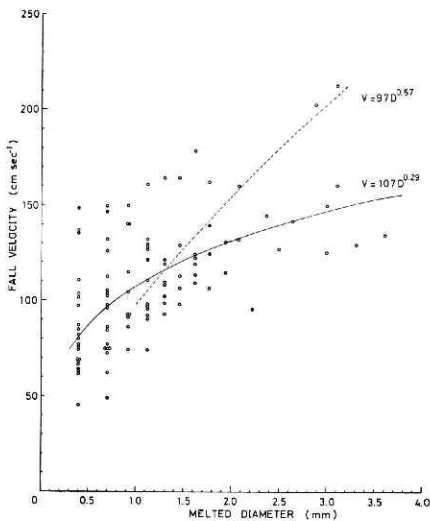


図2 雪片の落下速度と融解直径の関係
Fig. 2 Relation between fall velocity and diameter of the water drop formed by melting of snowflakes.

である。破線は1978年及び1979年の雪片の粒度分布等の計算に用いた落下速度 $V=97D^{0.67}$ の曲線である。この場合、融解直径0.9mm未満の粒子は粉雪として扱われたので、破線は融解直径0.9mm以上について示した。同時測定された落下速度 $V=107D^{0.29}$ を V :cm/sec, D :cmで表わすと $V=209D^{0.29}$ であり、これはLangleben(1954)の雪片に対する落下速度 $210D^{0.283}$ に非常に近いものであった。

図3に粉雪の落下速度(V :cm/sec)を融解直径(D :mm)に対してプロットした。ここでいう粉雪とは、八木・清野(1979)で定義されたように融解直径0.9mm以下の粒状の降雪粒子をさすが、落下した粒子一個一個の構成要素を逐一調べていないので、粉雪というなか

には濃密雲粒付結晶といった方がよいものも含んでいる。ただし、雪片の場合は融解直径が0.9mm以下でも区別できるので、今回の落下速度の測定では雪片は粉雪から分離して扱った。実線は測定値から得られた回帰曲線で $V = 173D^{0.37}$ であり破線は Kajikawa (1975) による秋田での霰の落下速度の式で $V = 202D^{0.53}$ である。融解直径0.9mmまでしかプロットしていないので回帰曲線自体にはほとんど意味はないが、ほぼKajikawa(1975)による霰の式で粉雪の落下速度の式をあらわせる。

4. 雪片のZ-R関係の計算結果

レーダーを用いて降水強度を求めるためには Z-R 関係を決めておく必要がある。Z-R 関係を定めるためには前に述べたように粒度分布測定と同時に落下速度を測定するのが望ましい。1979年の観測では、落下速度を粒度分布と同じ場所で同時に測定し、雪片については落下速度の式を得た。そこで、1979年の雪片について、同時測定した落下速度の式を用いて計算した Z-R 関係と梶川 (1974 a) による落下速度の式を用いて計算した Z-R 関係を比較する。

図4に1979年の雪片について、レーダー反射因子を Z (mm^6m^{-3}) を降水強度 R (mm hr^{-1}) に対してプロットした。白丸は同時に測定した落下速度の式を用いて計算したもの、黒丸は梶川による落下速度の式を用いて計算したものである。同じ降水強度に対する両者のレーダー反射因子の差を2点を結ぶ実線で示した。黒丸に対する白丸の増加は最大のもので68%であった。

図4における差を Z-R 関係式のグラフで表わしたものが図5である。実線は1979年の雪片について測定した落下速度の式を用いて計算したZ-R関係を示す直線であり、 $Z = 3400R^{1.9}$ であった。

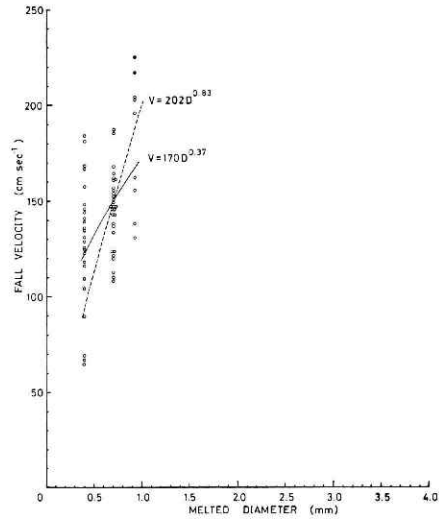


図3 粉雪の落下速度と融解直径の関係。
Fig. 3 Relation between fall velocity and diameter of the water drop formed by melting of powdered snow.

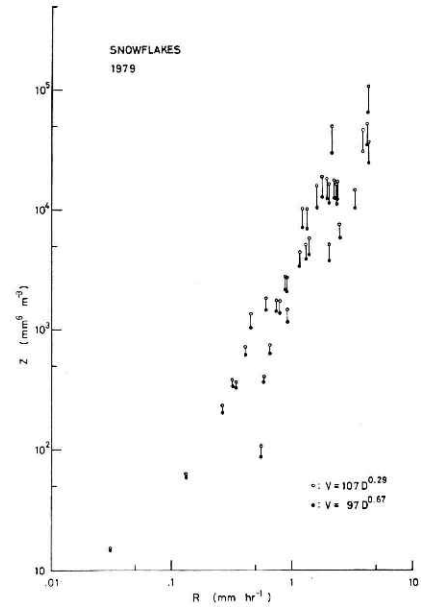


図4 雪片の Z-R 関係。白丸は $V = 107D^{0.29}$ 、黒丸は $V = 97D^{0.67}$ を用いた場合。
Fig. 4 Z-R relation for snowflakes. Open circles are calculated using the fall velocity equation $V = 107D^{0.29}$. Solid circles are calculated using the fall velocity equation $V = 97D^{0.67}$.

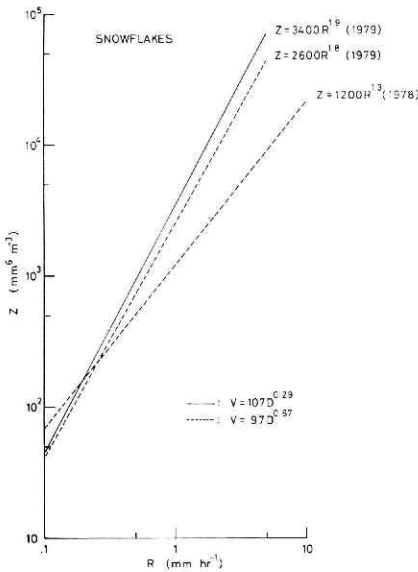


図5 雪片の Z-R 関係 (1978年と1979年について)。て実線は $V=107D^{0.29}$, 破線は $V=97D^{0.67}$ を用いた場合。
 Fig. 5 Z-R relation for snowflakes of 1978 and 1979. Solid line is calculated using the fall velocity equation $V=107D^{0.29}$. Broken line is calculated using the fall velocity equation $V=97D^{0.67}$.

度を一本の式で代表させた。

測定した雪片の落下速度の値は融解直径 1.5mm を越える付近から梶川 (1974 a) による落下速度の値より小さくなり、3mm程度になるとかなりの差になっている。この理由は1979年は、低気圧ないしは前線の通過に伴う降雪が多く、冬のモンスーンが発達して粉雪を多く降らせた豪雪タイプの1978年と違い、雪片への雲粒の付き方が概して少なかったためと考えられる。

1979年の観測では粉雪の降雪機会が少なかったために測定数は少ないが、粉雪の落下速度はほぼ Kajikawa (1975) の霰の落下速度の式で表わせると考えられる。降水強度等には小さな粒子の寄与は小さいので、粉雪が少ない場合には粉雪の落下速度の違いはほとんど問題にならない。ただし豪雪時には粉雪が多いので、豪雪の特徴を調べるためには粉雪の構成要素を詳しく調べて落下速度の測定を行なう必要があると考えられる。

雪片の落下速度の差が Z-R 関係にも反映されていて、測定した落下速度の式と、梶川による落下速度の式を用いた場合とを比較すると、図5に示したように、1979年の雪片において、同じ降水強度に対してレーダー反射因子が最大68%増大している。これは大きな雪片の落下速度が小さいことがきいているものである。このことから、5割程度のレーダー反射因

破線は梶川による落下速度の式を用いた場合の直線であり、1979年の雪片は $Z=2600R^{1.8}$ (八木・上田, 1979), 1978年の雪片は $Z=1200R^{1.3}$ (八木・清野, 1979) である。実線の方が1979年についての破線より大きな値を示した。また、1978年の破線と1979年の破線との差の方が、実線と1979年の破線との差より大きかった。

5. 考 察

粒度分布と落下速度の同時観測という意味では、一枚の沓紙上の降雪粒子に対して一つの落下速度の式を求めるのが望ましいが、実行上、10分間程度の短時間に落下速度の値を多数測定するのはむずかしい。また1979年は暖冬であり降雪頻度も少なかったので測定例は少なかった。しかし、観測期間を通して降雪はほぼ低気圧ないしは前線の通過に伴うものであり、豪雪時とは違って、雲粒が多数付着した雪片は少なく、雪片の種類の変化も少なかったため、観測期間中の雪片の落下速

子の差を問題にする場合には落下速度の詳しい測定は重要であると考えられる。この差を平均的に求めるのではなく、一枚の沓紙ごとの違いを扱う場合にはなおさらである。

一方、1979年の雪片について、測定した落下速度の式を用いて計算した Z-R 関係式と梶川による落下速度の式を用いて計算した Z-R 関係式の差と、1978年と1979年の雪片について共に同一の梶川による落下速度の式を用いて計算した両年の Z-R 関係式の差を比較すると、前者より後者の方がずっと大きかった。これは落下速度の差以上に粒度分布の違いが大きな差になって現われたものと考えられる。それゆえ、八木・上田(1979)が1978年と1979年の降雪粒子の粒度分布の差を論じたことは十分意味のあることと考えられる。

これまでに降雪粒子の落下速度、粒度分布等の観測例はかなり蓄積されてきているので、レーダーを用いた雪の降水強度の測定によって降雪量を予測する実用的方法を考えてもよい時期にあると考えられる。レーダーを用いて降水強度を測定する際には、用いるべき Z-R 関係式を決めておく必要がある。このためには、気象状況ごとに降雪粒子の種類が違っているので、気象状況と卓越する降雪粒子の種類との対応を地域ごとに調べておく必要がある。一つの方向として、降雪粒子の粒度分布と落下速度の同時測定を詳しく行ない、落下速度、Z-R 関係、気象状況の間の関係を明らかにしておくことが重要であると考えられる。

6. 結 語

降雪粒子の落下速度の測定を行ない、雪片については落下速度の式 $V=107D^{0.29}$ を得た、これは低気圧ないしは前線の通過に伴う降雪の場合の雪片の落下速度の特徴を示したものと考えられた。

この測定値を用いて1979年の雪片の Z-R 関係を計算した。1979年の雪片について、測定した落下速度の式を用いると、梶川(1974a)による落下速度の式を用いた場合より、同じ降水強度について、レーダー反射因子は最大で68%増大した。それゆえ、レーダー反射因子について50%程度の精度を問題にする場合には落下速度と粒度分布の同時測定が重要であることが示された。

また、1979年の雪片について、測定した落下速度を用いて計算した Z-R 関係式と梶川による落下速度の式を用いて計算した Z-R 関係式との差と、1978年と1979年の雪片について共に同一の梶川による式を用いて計算した両年の Z-R 関係式の差とを比べると、前者より後者のほうがずっと大きかった。このことから、粒度分布の違いが Z-R 関係には顕著に現われることが確認された。

謝 辞

観測にあたっては、国立防災科学技術センター雪害実験研究所に種々便宜を計っていただいた。記して感謝の意を表わしたい。

本研究は科学技術庁特別研究促進調整費による「豪雪時における降雪の監視システム並びに降雪過程に関する総合研究」(昭和51~53年度)の一環として行なわれたものである。

参 考 文 献

- 1) Imai, I., M. Fujiwara, I. Ichimura and Y. Toyama (1955): Radar reflectivity of falling snow. *Papers in Meteor, Geophys.* **6**, 130-139.
- 2) 梶川正弘 (1974 a): 雪片の落下速度の測定. 秋田高専研究紀要, **9**, 83-87.
- 3) 梶川正弘 (1974 b): 降水の落下速度について. 天気, **21**, 317-332.
- 4) Kajikawa, M. (1975): Measurement of falling velocity of individual graupel particles. *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 476-481.
- 5) Langleben, M. P. (1954): The terminal velocity of snowflakes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **80**, 174-181.
- 6) Magono, C. and T. Nakamura(1965): Aerodynamic studies of falling snowflakes. *J. Meteor. Soc. Japan*. **43**, 139-147.
- 7) 岡村敏夫・舟田久之 (1979): レーダーエコーと降雪分布について. 天気, **26**, 761-773.
- 8) 八木鶴平・清野 裕 (1979): 長岡における降雪粒子の Z-R 関係および粒度分布の特徴 I. 国立防災科学技術センター研究報告, No.22, 49-97.
- 9) 八木鶴平・上田 博 (1979): 長岡における降雪粒子の Z-R 関係および粒度分布の特徴 II. 国立防災科学技術センター研究報告, No.23, 29-38.

(1979年12月24日 原稿受理)