



Title	札幌における一冬間の降雪強度と視程の同時観測
Author(s)	藤吉, 康志; FUJIYOSHI, Yasushi; 若浜, 五郎 他
Citation	低温科学. 物理篇, 42, 147-156
Issue Date	1984-03-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18490
Type	departmental bulletin paper
File Information	42_p147-156.pdf



札幌における一冬間の降雪強度と視程の同時観測*

藤吉康志・若浜五郎・遠藤辰雄

入川真理・小西啓之

(低温科学研究所)

竹内政夫

(北海道開発局 土木試験所)

(昭和58年10月受理)

I. 緒言

降雪あるいは飛雪による視程の悪化は、各種交通機関にとって障害となることから、これまでいくつかの観測例が報告されている¹⁻³⁾。我が国における降雪時の視程に関する報告は、目視のデータを使っている。目視による観測では、視程の値が不連続となること、観測者によって差が生じ易いこと、降雪強度の空間的不均一さによって生ずる視程の観測誤差を補正できないこと等の欠点がある。また、降雪粒子の種類によって、視程と降雪強度の相関関係がどのように変化するのかについては、O'Brien³⁾が報告しているのみであるが、一部目視のデータを使用していること、データ数が少ないことにより、いまだ一般的な結論は得られていない。

そこで著者らは、1983年1月から3月まで、札幌にある北海道大学低温科学研究所屋上で、光学視程計を用いて視程の連続観測を行い、同時に降雪強度を観測して、これら両者の相関関係を調べた。以下にその結果を報告する。また、視程と雪粒子の空間分布とから、雪粒子の形状を求める方法についても考察を行ったので合わせて報告する。

II. 観測方法

視程は、透過率測定型の視程計(明星電気株式会社製、TZE-2 T型)を用いて測定を行った。

光の透過率を T とし、投受光間隔を L とすると、光の消散係数 σ は、Bouguer-Lambert の法則から、

$$\sigma = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{T} \quad (1)$$

となる。視程 V と光の消散係数 σ とは、Koschmieder の式

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2593号

$$V = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad (2)$$

で結ばれる。ここで、 ε は人間の目の明暗対照の臨界値である。本観測では、

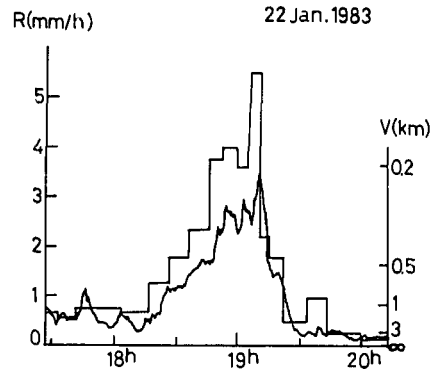
$$L = 30 \text{ m}$$

$$\varepsilon = 0.02$$

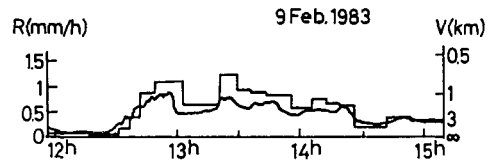
とした⁹⁾。視程の観測に視程計を用いることにより、先に述べた目視による観測の欠点を克服することができる。

降雪強度は、同じく低温研屋上で、ほぼ5分間隔で受雪面積が2260 cm²の角型容器を用いて降雪粒子を直接受け、重さを測る方法によって測定した。容器の露出時間は秒まで、重さは0.1 gまで記録した。これと同時に、降雪粒子の種類、雪片を構成する雪の結晶形や雲粒付きの程度も記録した。

第1図に降雪強度 R (mm/h) と視程 V (km) の時間変化の例を示した。時間的に不連続な変化を示している方が降雪強度である。第1図(a)は、1983年1月22日、寒気の吹き出し時に形成された帯状雲からの降雪についての観測結果であり、また、第1図(b)は、1983年2月9日、温暖前線前面の層状性の雲からの降雪についての観測結果である。どれも、視程の変化と降雪強度の変化とが良く対応している。



(a) 帯状雲からの降雪



(b) 層状性の雲からの降雪

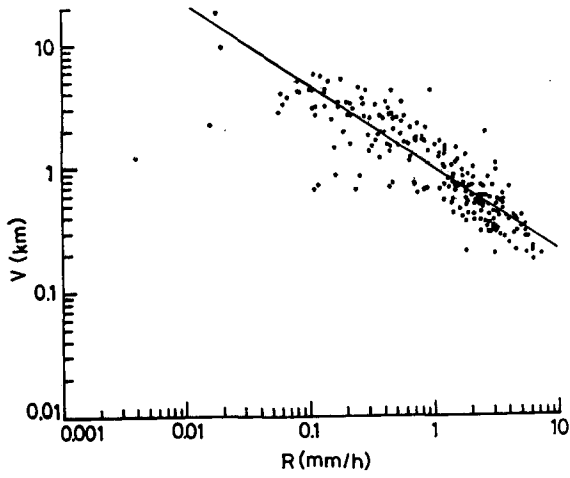
第1図 降雪強度 R と視程 V の時間変化

III. 結 果

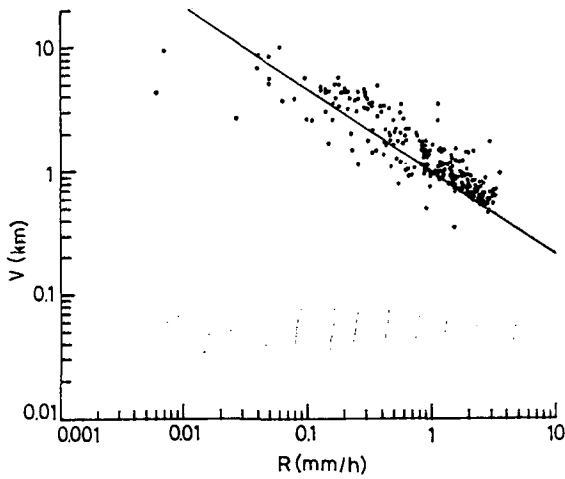
1. 降雪をもたらす雲による $V-R$ 関係の違い

札幌に降雪をもたらす雪雲は、大きく分けると、寒気吹き出し時に形成される帯状雲と低気圧に伴う雲の二つがある。前者からは、濃密雲粒付きの樹枝状結晶の雪片やアラレが主に降り、後者からは、それ以外に、砲弾集合、交差角板、角柱、針等多種類の雪結晶が降ってくる。低気圧に伴う雲といっても、温暖前線面上に形成される雲と寒冷前線付近で形成される雲とでは雲の種類が異なるが、ここでは簡単のために、一括して低気圧に伴う雲とした。気圧配置、低気圧の移動は、地上天気図から調べ、雲の区別は、静止気象衛星ひまわりの画像によって行った。

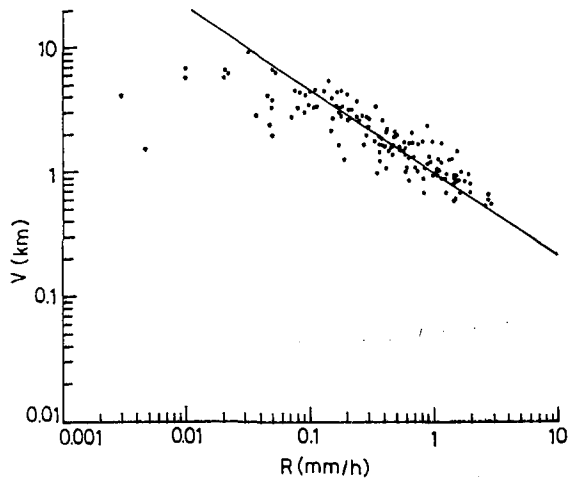
第2図(a), (b), (c)にはそれぞれ、帯状雲、低気圧に伴う雲、両者が混在してどちらとも判然としない雲からの降雪時の降雪強度と視程の相関を示したものである。視程は、降雪強度を測定した時間内の平均値を用いた。第2図中の実線は、岩井⁵⁾が得た、



(a) 帯状雲からの降雪



(b) 低気圧に伴う雲からの降雪



(c) 帯状雲と低気圧に伴う雲とが混在したときの降雪

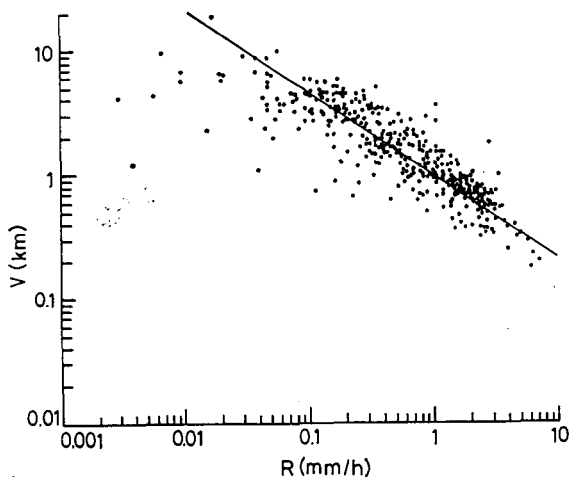
第2図 降雪強度と視程の関係

$$V \sim 1.0 R^{-\frac{2}{3}} \quad (3)$$

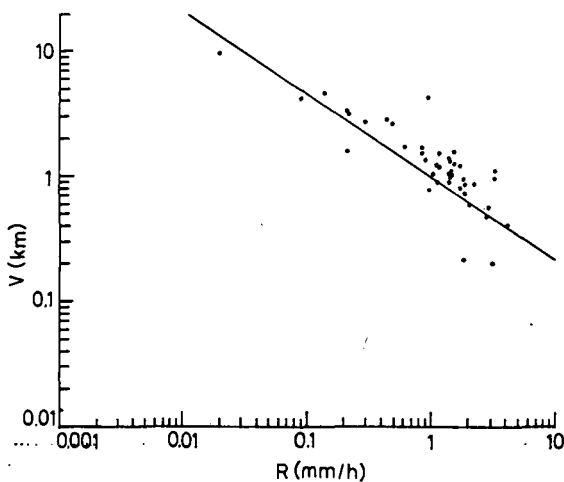
を示したものである。 $R < 0.1 \text{ mm/h}$ では、後で考察を行うように、誤差が生じ易いため、 $R \geq 0.1 \text{ mm/h}$ の領域で降雪強度と視程の相関関係を見る。

第2図(a), (b), (c)に示したどれのデータも傾きはほぼ同じで、(3)式に平行に点が分布している。低気圧に伴う雲からの降雪の方が他の雲からの降雪に比べて、同じ降雪強度ではやや視程が良い傾向にある。また、帯状雲からの降雪では、他の雲からの降雪に比べて値のばらつきがやや大きい。

降雪をもたらす雲の種類によって、降雪強度と視程の関係を求めたのは、実用的見地からであり、より詳しく降雪強度と視程との関係を調べるためには、降雪粒子の種類、雪片を構成する雪結晶の形等を考慮する必要がある。



(a) 降雪粒子が雪片の場合



(b) 降雪粒子がアラレないしは、アラレ状の雪粒子の場合

第3図 降雪強度と視程の関係

2. アラレと雪片による $V-R$ 関係の違い

札幌のような寒冷地においても、降雪粒子の主なものは雪片とアラレである。第3図(a), (b)は、それぞれ、雪片が降っているとき、およびアラレないしはアラレ状の雪粒子が降っているときの降雪強度と視程との相関を示したものである。図中の実線は(3)式である。アラレは、降水持続時間が短いため、雪片に比べてデータが少ない。

図から分るように、アラレと雪片共に、 V はほぼ $R^{-\frac{2}{3}}$ に比例している。しかし、雪片の方がアラレよりも、同じ降雪強度に対して、やや視程が悪い (V の値が小さい) 傾向にある。

3. 雪片の構成要素による $V-R$ 関係の違い

雪片を構成する雪結晶の形には様々なものがある。厳密に言えば、同時に採取した雪片同士でも、構成要素の粒径分布や、結晶形の種類、数が異なっている。構成要素別に詳細に雪片の分類を行っても、データ数の不足によって統計的意味が失われ、また、実用的意味もなくなる。そこで、ここでは、(1) 雲粒が全く付着していない (n. r.) か、あるいは軽度付着した (l. r.) 樹枝状の雪結晶からなる雪片、(2) 雲粒がより重度に付着した (r. ~ h. r.) 樹枝状の雪結晶からなる雪片、(3) 温暖前線面上の雲から降ることが多い、砲弾集合、交差角板、角柱からなる雪片 (この場合には、雲粒付きの程度によっては分けず、結晶形が判別できるものであれば、同じ分類に入れた) の3種類に分けて、降雪強度と視程の相関を調べた。(1), (2), (3) に対応して得た図が、第4図(a), (b), (c)であり、図中の実線は(3)式である。

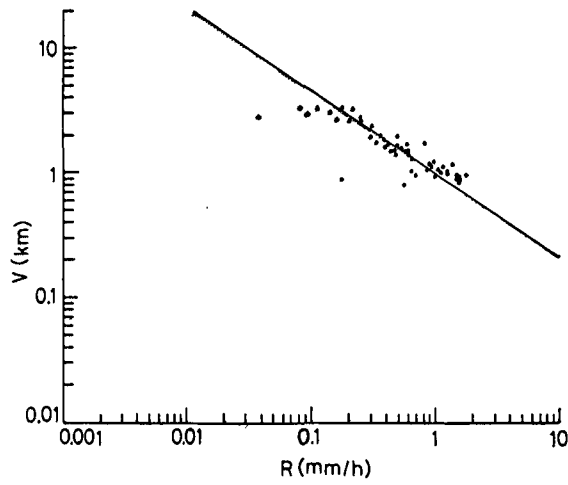
すべての雪片についてまとめた、第3図(a)の $V-R$ 関係と比べると、値のばらつきが小さい。(1)~(3) のどれも、 V は $R^{-\frac{2}{3}}$ に比例していると見て良いであろう。一方、同じ R に対しては、樹枝状結晶からなる雪片に比べて、砲弾集合、交差角板、角柱からなる雪片の方が視程が良い傾向にある。(n. r. ~ l. r.) の樹枝状結晶からなる雪片と、(r. ~ h. r.) の樹枝状結晶からなる雪片とでは、明確な差が見られない。

IV. 考 察

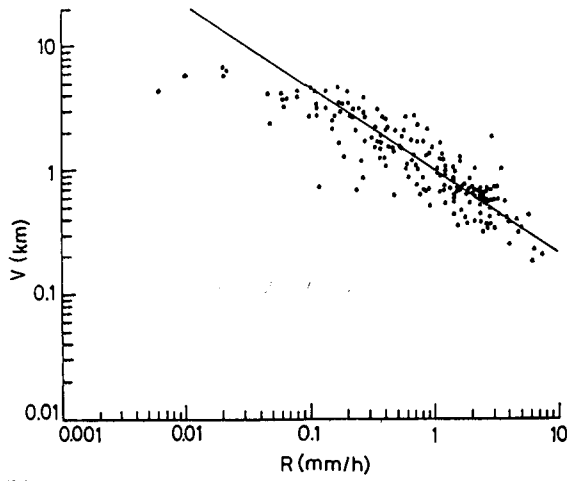
全データをまとめたものが第5図である。図には、他の観測者によって得られた結果も実線で示してある。我々が得たデータは、岩井⁵⁾ が得た実線3を中心にして値がばらついている。(注： 図中、由田⁹⁾ のデータが岩井⁵⁾ の論文の値と異なっているのは、岩井が引用した黒岩¹⁰⁾ の著書中に、由田のデータが誤って引用されたためである。)

$R < 0.1$ mm/h では、(3)式よりも視程が悪くなる方向に外れ、かつ値がばらついている。その理由としては、視程計の出力と視程との較正曲線の傾きが、 R が小さい (すなわち出力が小さい) ほどゆるやかになるため、読み取り誤差が大きくなること、また、 R が小さいときには、容器の露出時間が長くなるため、視程を長い時間で平均することによって誤差が生じ易いこと、大気中のエアロゾルが視程におよぼす影響が無視できなくなることが考えられる。この他、本データでは、風が強く、飛雪と降雪の区別がつかないようなときのデータは含んでいないが、 R が小さいときには、弱風でも空中に浮き上がるような微細雪粒子の影響が考えられる。

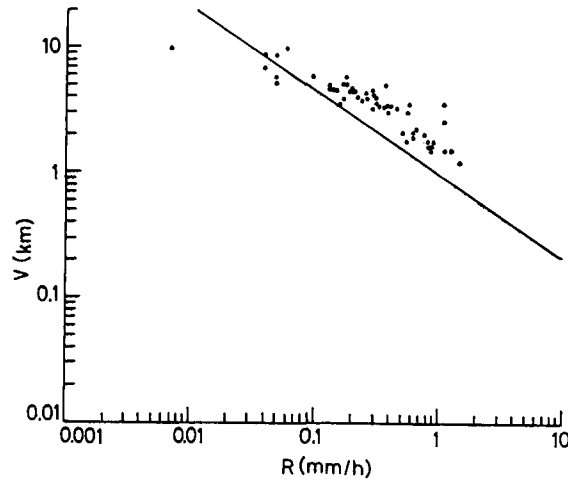
第3, 4図は、雪片とアラレ、あるいは、雪片の構成要素の違いによって、同じ降雪強度でも視程が異なっていることを示している。降雪粒子が単分散していると仮定すれば、 V と R



(a) 雲粒が全く付着していないか、あるいは軽度に付着した樹枝状の雪結晶からなる雪片

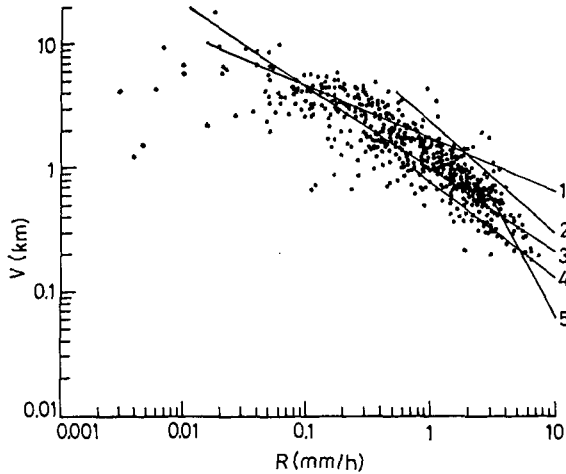


(b) 雲粒がより重度に付着した樹枝状の雪結晶からなる雪片



(c) 砲弾集合、交差角板、角柱からなる雪片

第4図 雪片が降っているときの降雪強度と視程の関係



第5図 降雪強度と視程の全データをまとめてプロットしたもの。図中の直線1は Mellor¹⁾, 2は鈴木²⁾, 3は岩井⁵⁾, 4は斎藤⁴⁾, 5は由田⁹⁾の観測結果である

の関係は,

$$\sigma = K\pi r^2 N \quad (4)$$

K : 粒子の散乱面積係数

r : 降雪粒子の半径

N : 単位体積あたりの降雪粒子数

と,

$$R = \frac{4}{3} k\pi r^3 v \rho N \quad (5)$$

k : 単位変換のための常数

v : 降雪粒子の落下速度

ρ : 降雪粒子の密度

とを使うと、岩井⁵⁾が導いたように,

$$V \propto \frac{1}{\sigma} \propto (k\rho v)^{-\frac{2}{3}} \cdot N^{-\frac{1}{3}} \cdot R^{-\frac{2}{3}} \quad (6)$$

となる。雪片とアラレとを比較すると、 ρ , v ともアラレの方が大きく、逆に、同じ R であれば(5)式から判るように、 ρ , v が大きいのでアラレの N は小さくなる。したがって、雪片とアラレとを比べると、アラレの方が同じ R に対して視程が良い(V が大きい)であろう。

樹枝状の雪結晶からなる雪片と、砲弾集合、交差角板、角柱の雪結晶からなる雪片とを比較すると、後者の方が雪結晶個々の粒径が小さく密に併合している。また、後者の方は、温暖前線前面上の雲から降ることが多く、地上気温が 0°C に近いので、みぞれに近い状態で降ってくるが多かった。したがって、後者の方が ρ , v とも、前者に比べて大きく、同じ R の場合には、(5)式から N が小さくなることにより、樹枝状の雪結晶からなる雪片に比べて、同じ

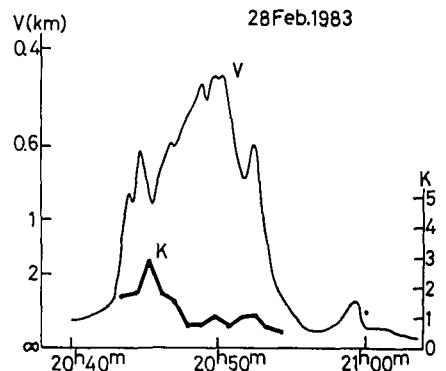
R では、後者の雪片の方が視程が良い (V が大きい) と考えられる。

同じ樹枝状の雪結晶からなる雪片でも、雲粒付着の少ない場合 (n. r. ~ l. r.) と大きい場合 (r. ~ h. r.) とでは、後者の方が、個々の結晶が重い分だけ、 ρ , v が大きくなると予想され、したがって、同じ R に対しては N が小さくなることから、同じ降雪強度 R に対しては、(n. r. ~ l. r.) の結晶からなる雪片に比べて、(r. ~ h. r.) の結晶からなる雪片の方が視程が良くなると考えられる。しかし、実際のデータ (第4図) では、両者の間で明確な差は見られない。雲粒付着の有無によって、形成される雪片の粒径分布ないしは密度、落下速度がどのように変化するかを明らかにすること、あるいは、結晶形による、より詳細な分類を行う必要があると考えられる。

(4) 式において、 K は粒子の散乱面積係数であり、Mie 散乱の場合、粒子が大きくなると2に近づくことが知られている。しかし、竹内⁸⁾ は、光の波長に比べて雪粒子がはるかに大きく、最早 Mie 散乱領域では無く、降雪の場合には散乱というよりも幾何光学的に取扱われるべきものであることを指摘した。この場合には、光は雪による反射 (遮蔽) によって減衰し、光の一部は屈折透過することから、 K は1より小さい値となる。

O'Brien は、本研究で用いた視程計と原理的には同じ方法で、光の減衰率から σ を求め、同時に雪粒子のレプリカをとって、 $\sum_{i=1}^n N_i \pi r_i^2$ を求め、2つの値を比較することによって、 K を求め、樹枝状結晶で0.352、粉雪と、角板および角柱からなる雪片で0.166の値を得た。ただし、O'Brien は半径 r としては、粒子の最大半径をとっているため、雪粒子の形が K の値に影響をおよぼすことになる。すなわち、雪粒子が球ではなく楕円球に近い形をしているとすると、長軸と短軸の比が大きくなるほど、 $\sum_{i=1}^n N_i \pi r_i^2$ を実際よりも大きくとることになり、(4) 式から判るように、 K の値を過小評価することになる。逆に、 K の値が別の方法で与えられたとするならば、O'Brien と同様の方法で求めた K の値は、雪粒子の非球形度を示す指標となり得ると考えられる。以下で、その可能性を検討する。

観測は、1983年2月28日20時43分から21時04分にかけて行った。雪粒子の空間分布は、鉛直風洞中を落下する雪粒子に、ストロボ光を当てて1/8秒の露出で写真を取り、これを1分間隔で行うことにより求めた (この方法の詳細は、小西他¹¹⁾ の報告を参考のこと)。O'Brien と同様の方法で K を求めると、 $R \geq 0.1$ mm/h の時間帯で、 $K = 0.52 \sim 2.91$ となる。第6図に K の値と視程の時間変化を示した。図から判るように、大きい K の値を示したのは、観測初期であり、それ以降は1前後の値を示している。このことは、前半に比較的長細い形状の粒子が降り、その後は球に近い形状であったと解釈できる。降雪粒子のストロボ写真から、前半部では雪片が卓越して降り、後半はアラレが卓越して降っていたことが読み取れる (形、特に、長軸と短



第6図 1983年2月28日に観測した視程 V と、計算から求めた散乱面積係数 K の各時間変化

軸の比までは読み取れなかった)。このことは、先の K の値の変化から予想される雪粒子の非球形度の時間変化と矛盾はしない。

降雪粒子の個数や最大粒径は、比較的容易に測定し記録できるが、形状に関する情報を自動的に長時間記録することは容易ではない。しかしながら、視程の記録と、降雪粒子の個数と最大粒径の記録とを組み合わせると、上述のような方法を使って、形状に関する情報が記録できる可能性がある。

V. ま と め

札幌において、一冬間、光学視程計を用いて、視程 (V) を測定するとともに、降雪強度 (R) の測定を行い、両者の相関を調べた。その結果、値は、

$$V(\text{km}) = 1.0 R^{-\frac{2}{3}} (\text{mm/h})$$

を中心に分布していることが分かった。 R と V のこの関係は、降雪をもたらす雪雲の種類によっては、明確な差異は見られなかった。降雪粒子の種類および雪片を構成する雪結晶の形別に、 R と V の関係を調べると、どれも V は $R^{-\frac{2}{3}}$ に比例しているが、同じ R に対して最も視程が良いのは、砲弾集合、交差角板、角柱からなる雪片、次いでアラレで、最も悪いのは、樹枝状結晶からなる雪片であった。樹枝状結晶で構成される雪片の場合、結晶の雲粒付着の程度によっては、視程に差がほとんど見られなかった。また、視程と雪粒子の空間分布から、雪粒子の形状に関する情報を得る可能性についても検討を行った。

今回の観測結果は、実用的見地を重視し、あくまでも第一次近似として、視程と降雪強度との関係を求めたものである。また、光学視程計から得られた光の消散係数を使って計算した視程と、目視による視程とでは、残像効果によって、必ずしも一致しないという指摘もある⁹⁾。今後より厳密な関係を求めるためには、本研究で行った観測項目以外に、雪粒子の粒径分布、雪粒子個々の光の透過率を測定する必要がある。また、落下中の降雪粒子の形状を写真等で撮影し、粒子の散乱面積係数との関係も明らかにする必要がある。

終りに、観測に便宜を計って頂いた、低温科学研究所山田知充氏、ならびに北海道開発局土木試験所の方々に深く感謝いたします。また、有益な助言を頂いた、低温科学研究所小林俊一氏に、厚く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) Mellor, M. 1966 Light scattering and particle aggregation in snow storms. *J. Glaciol.*, **6**, 237-248.
- 2) 鈴木弥幸 1963 視程と降雨(雪)強度との関係について. 研究時報, **15**, 483-487.
- 3) O'Brien, H. W. 1970 Visibility and light attenuation in falling snow. *J. Appl. Met.*, **9**, 671-683.
- 4) 斎藤博英 1971 降雪の強さと視程. 国立防災科学技術センター研究報告, **5**, 33-40.
- 5) 岩井邦中 1975 長野市における降雪中の視程について. 天気, **22**, 27-29.
- 6) 小林俊一・牧野勤俊 1975 昭和基地における強風時の光を利用した飛雪観測(予報) 南極資料, **53**, 45-52.

- 7) Schmidt, R. A. 1979 Measuring visibility in blowing snow. Snow removal and ice control research, Spec. Rep. 185. *In Proc. 2nd Internatl. Symp.* [Hanover, N. H., May 15-19, 1978] Natl. Acad. Sci., Washington, D.C., 200-207.
- 8) 竹内政夫 1980 吹雪時の視程に関する研究. 土木試験所報告, **74**, 1-31.
- 9) 由田建勝 1971 降雪(ふぶき)による悪視程について. 日本雪氷学会北海道支部談話会資料, 3-5.
- 10) 黒岩大助 1972 スキーヤーのための雪の科学. 共立出版, 114-115.
- 11) 小西啓之・若浜五郎・遠藤辰雄・藤吉康志 1983 降雪粒子の粒径と落下速度の時間変化. 日本気象学会秋季大会講演予稿集, **44**, 227.

Summary

Snowfall intensity R (mm/h) and visibility V (km) were simultaneously observed from January to March in 1983 in Sapporo, using an attenuation meter in measurements of visibility. The results showed that the whole values of R and V satisfy approximately the following relation:

$$V(\text{km}) = 1.0R^{-\frac{2}{3}}(\text{mm/h})$$

Changes in $V-R$ relation with types of snow clouds as well as snow particles were then investigated.

Consequently, it was found that snow particles from band clouds and those from other types of clouds had almost the same $V-R$ relation with each other.

The followings were also found: V varied almost in proportion to $R^{-\frac{2}{3}}$ when graupel particles or snowflakes fell. However, the magnitude of the visual range seemed to vary with types of snow particles and also snow crystals when both had the same snowfall intensity. The visual range was largest when falling snowflakes were composed of an assemblage of bullets, crossed-plates and columns. It was also large when graupel particles fell. The smallest visual range was observed when falling snowflakes were composed of dendrites; and dependence of the visual range on the degree of riming of dendrites was not clear.

Finally a discussion was made of a possibility of obtaining information on the shape of snow particles from observations of visibility and size distribution of snow particles.