

551.508.7 : 551.521.3 : 53.087.4

赤外線を利用した降雪強度計の研究

斎藤博英*・福井 篤**・木村恭三

清水増治郎・五十嵐高志・監物勝英

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

On the Snowfall Intensity-Meter using the Scattering of Infrared Rays

By

Hirohide Saito*, Atsushi Fukui**, Kyoza Kimura,
Masujiro Shimizu, Takashi Ikarashi and Katsuei Kenmotsu

Institute of Snow and Ice Studies, Nagaoka

Abstract

It is well-known that light emitted in one direction will be reduced due to scattering of the rays by snow particles in the air, and a portion of it reflected back due to the scattering can be observed. We utilized this phenomenon for measuring the intensity of snowfall.

Infrared rays emitted from a xenon lamp were measured through two receivers. One was set in front of the lamp at distances of 5 to 30 meters. The other was set near the lamp to receive the rays reflected backwards.

Attenuation of radiation by falling snow is represented by the formula 3.1, so the intensities of the rays arriving at the receiver B in Fig. 3.1 are expected to agree with the formula 3.2, in which the symbols are the same as shown in Fig. 3.1. We can obtain the value of the extinction coefficient by the formula 3.3.

The intensities of the back-scattered rays arriving at the receiver D are expressed by the formula 3.5, or approximately by 3.6. So I_d may be proportional to the scattering coefficient σ . As k and σ are related to the intensity of the falling snow " δ ", we can know the value of " δ " by observing the value of I_b or I_d .

Now we don't have the single definition of the word "intensity of the falling snow", however, generally it means the quantity of snow having deposited in

* 本論文執筆代表者 (The writer responsible for the present paper)

** 昭和42年5月15日在職中死亡 (Died in office on May 15, 1967.)

1 cm² horizontal surface of the ground in 1 minute. According to this definition, δ should be represented by the summation of the products of mass and falling velocity of each snow flake, as seen in formula 3.7.

The time lag of this meter owing to the use of an integral circuit is discussed in section 4. The devices which were made for the purposes of correct measurements of the intensity of falling snow and the falling velocities of snow flakes are presented in sections 5 and 6.

The accuracy of the snowfall intensity-meter is examined in section 7, compared with the value obtained by correct measuring. The extinction of the emitted light related to the intensity of snowfall is shown in Fig. 7.2. Back-scattered light related to the intensity of snowfall is shown in Figs. 7.3, 7.4 and 7.5. These 4 figures prove that the meter is more accurate than we had thought before this experiment.

The reason of such close relation between the values written by this meter and the intensities of snowfall must be that the conditions of snowfall were not so different from each other cases, as the correct measuring¹ of the snowfall intensities was severely restricted by the wind speed condition which was less than 3 m/sec.

In case of falling snow flakes only, we have got the above results. But contrary to our wishes, in cases of soft hails the values of our meter were about one third of the correct intensities, because the hail particles could scatter the light not so much as snow flakes and fell down more speedily. And to make the matters worse when the soft hails were falling with snow flakes, the records of this meter took the values of any rate from one to one third of the correct intensities. So we could not find any accurate method for measuring the intensity of falling soft hail.

An advantage of this meter is that the value of record is not affected by the wind speed. So if we use this meter in company with another one, for instance with the rain-gauge-type snowfall intensity-meter, the meters are expected to correct the defects mutually.

目	次
1. まえがき	23
2. 降雪強度計の構造と機能	23
3. 測定の基礎的理論	26
4. 降雪強度計の記録値のおくれ	28
5. 降雪強度の標準値	30
6. 雪片落下の数および速度の測定器	30
7. 降雪強度計による観測の精度	32
7.1 観測にあたっての注意	32

7.2 透過光による記録値……………	33
7.3 後方散乱光による記録値……………	35

8. 雪片の大小と光の散乱……………	39
9. ま と め……………	42

1. ま え が き

道路上に積もりつつある降雪の強さを知ること、道路の除雪作業を計画する際の最初の問題である。現在、降雪の強さを測る機械がないので、除雪・排雪作業の管理をおこなう部門から、降雪強度計の開発が要望されている。

気象庁では、降った雪を融かして、降水量として測っている。これは、降水・流出・蒸発などの水収支を調べたり、利用できる水量を水資源として調べたりする目的には便利である。しかし、このために、降雪量の観測値が存在しないのは残念なことである。

降雪量を積もった雪の深さで示すのは、新積雪の深さという。新積雪の深さを測る時間間隔としては、3時間、6時間、24時間などが使われている。降雪の強さを測るために、3時間新積雪深何cmというやり方は、実用的のようであるが、甚だ不便である。何故なら、3時間で新積雪が10cmだったとしても、この10cmという深さは時間と共に縮んでいく。しかも、その縮む速さは上からの圧力・積雪の密度・雪の温度などの条件で大きく異なるからである。気象官署では、1日3回にわけて観測した新積雪の深さを三つ合計して24時間の新積雪深の代りに使っているが、これは誤りである。

実際、強い降雪の際に、雪が積もるのを観察すると、新しく1cm積もるのに5分位しかかからない。しかしそんな降り方で1時間続いても、12cmはおろか10cmにも達しない。風の弱い日にしんと積もる雪は、20cm位の深さであれば、その密度は $0.06 \sim 0.08 \text{ g/cm}^3$ くらいことが多いが、今積もりたての1cmくらいをとって測ると、その密度は 0.02 g/cm^3 くらいのものである。このように、積雪の深さは、特に新しく積もって間のないところは、時々刻々変るので、降雪の強さを短時間の新積雪の深さで示すことは一般的でない。それで、降雪の強さは、やはり、単位時間に降り積もる雪の単位面積当りの重さで示すのがよい。

このような降雪強度を測るには、一定面積の受雪口を持つ容器で降雪を受けながら、その重さを記録して時間変化を求めるとよい。この型では、

ヘルマン型自記雪量計が現在使われている。この種の測器の欠点は、①風が強いと、受雪口から雪が入ってくれないこと、②風によって生ずる空気の擾乱のため、受雪部の重量が見かけ上振動的に変る、の2点であるが、両者共、現在の降雪強度を求める上では、大きな障害である。

気象研究所では受雪器で受けた雪を融かして、水滴にして落とし、2分間に何滴落ちたかを記録させる測器を試作⁽¹⁾し、上の②の欠点を除いた。これは機械が単純で非常によい記録が得られている。この研究は本総合研究の中の一つとしておこなわれた。しかし残念なことには、上の①の欠点は除き得ないことは明らかである。

①の欠点を除くためには、雪を容器に受けることを止めるとよい。現在重量式積雪計と呼んでいる機械の感度を上げて、時間変化を測る方法が考えられる。この場合には、周囲の雪との連結状況の変化と上述②の風による障害とが重なることになり、信用できる測定は不能であろう。

雪を容器に受けずに、その重さを測ることは確かに難しい。空間にある降雪片の量を、雪片が光を吸収・散乱する性質を利用して、測定することを考えた。この方法は次のような問題を持っている。それは、①雪片が光を散乱する量は、雪片の大きさ、結晶の形などによって異なる筈で、散乱光量から空間に分布する雪片の重量を推定することは誤差が大きい、②空間に分布する雪片の量が求められても、雪片の落下速度は1片毎に異なるので、地面に落ちる量は空間にある雪片分布密度に比例するとは限らない、の二つが主である。

問題点はあるが、実際に誤差がどの程度であるか、その誤差は補正する方法がないか、調べてみる必要がある。実際、相当の誤差を認めるなら、霧の濃度を測るVI計(早川電機工業株式会社で作製・販売している。)で、降雪の強さを実的に判断できることが、最近わかって来た。こうして、可能性と必要性が増しているので、今回総合研究の1項として取り上げた次第である。

2. 降雪強度計の構造と機能

この実験で使用した降雪強度計は、概略次のような機能を持つ各部分から成り立っている。

投光機はクセノンランプを用い非常に強い瞬間

発光をおこない、その光を放物面反射鏡を用いて、あまり広がらないように収束して、水平に近い角度で空間に投射するようにした。

クセノンランプの発光は波長 $9,000 \text{ \AA}$ 付近の赤外部に鋭いピークを持ち、他の波長では著しく弱いので、単光とみて良いくらいである。光度は大体 10^8 cd で、その発光時間は 0.3×10^{-3} 秒くらいである。発光間隔は5秒・15秒・30秒の3段階に調整できるようになっている。

受光部は、投光機から発した光以外のものをできるだけ避けるため、開口角を 3° (立体角)としたフードをつけ、そこに入って来た光をレンズで集め、光電変換素子に投射させるようになっている。散乱と吸収とを区別して観測したいので、受光部は後方散乱光用と透過光用と二つ用意した。

光電変換素子は、クセノンランプの光を受けるに適するものとして早川電機工業株式会社のSPD-111を使用した。この分光感度特性は波長 $9,000 \text{ \AA}$ で最大感度を示し、波長 $5,000 \text{ \AA}$ でその20%、 $1,100 \text{ \AA}$ でその16%に減少する。クセノンランプから出る光の波長に対するエネルギー分布とSPD-111光電変換素子の感度の波長による変化とを、図2・1に見やすく対応させて示した。両者の特性がよく一致していることが認められる。

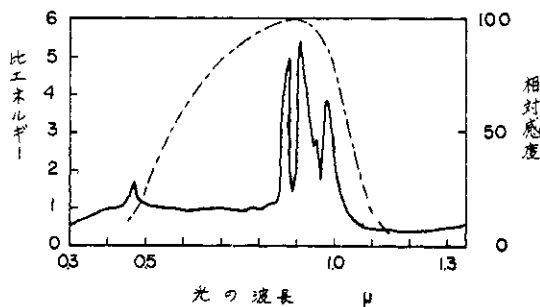


図2・1 クセノンランプからの光のエネルギーとSPD太陽電池の感度
 Energy of light output from xenon lamp(full line) compared with sensitivity of SPD photo cell (broken line), each vs. wavelength.

光電変換素子で受光量にしたがって生じた電気信号は前置増幅器により2段で約30倍に増幅されてから、減衰器に導かれる。

減衰器はクセノンランプ発光量の経年的変化と光電変換素子の温度変化による電流電圧の変化を補正するために設けたものであり、自動利得校正装置により、16段階の減衰度の中から適当な減衰度を選んで、増幅率を補正するように制御される。

こうして増幅率の補正により、クセノンランプの発光量の変化や光電変換素子の感度と変化を補正された電気信号は、交流増幅器に導かれ約2000倍に増幅されてから、積分回路に導かれる。

積分回路*では、交流増幅器から入って来た信号を小容量のコンデンサー C_1 にチャージし、それを次の発光までの間に大容量のコンデンサー C_3 に移し、次の発光による信号はもう一つの小容量のコンデンサー C_2 にチャージし、それは更にその次の発光までの間にコンデンサー C_3 に移し、同時にコンデンサー C_1 の残存電荷をディスチャージする。このやり方を交互にやって行くと、 C_1 、 C_2 のコンデンサーには1回毎に受光量に応じたチャージがおこなわれ、 C_3 のコンデンサーは1回毎に C_1 または C_2 との間にチャージのやりとりをしながら、過去数回の受光量の平均的強さに対応したチャージを保つことになる。

この C_3 コンデンサーの荷電量を積みとりまたは記録させるために、直流増幅器を用いて電流増幅をし、感度調整ボリュームを通じて、電流計、記録計に導く。

したがって、この機械による記録は1回毎の発光についての散乱光、減垂光の強さを示すのではなく、数回前までの発光についての、それらの残存効果を持った、移動平均的な値を示している。この場合の残存効果の強さはコンデンサー C_1 、 C_2 と C_3 との容量の比と、両コンデンサーの間にある抵抗の大きさ、発光時間間隔などによって変ることになる。

装置自体から出る電氣的雑音や外部の電波による雑音が入るので、それらを拾わないように、信号を受け取る時間をできる限り短くすることにした。これは信号が積分回路へ導かれる部分で、タイマー回路によるスイッチングの規制によっておこなわれる。この実験に使った機械では、クセノンランプの発光の約 2×10^{-2} 秒前にスイッチ

* 図4・1 参照

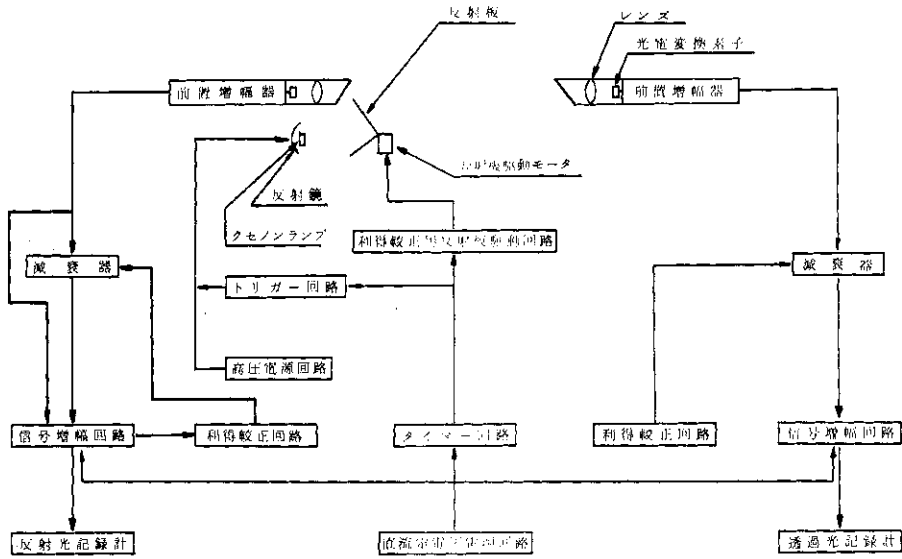


図 2・2 降雪強度計のブロック連結図
Block diagram of snowfall intensity meter.

が入り、発光の後約 5×10^{-3} 秒にはスイッチが切れて信号が入らなくなっている。タイマー回路はこの他に、クセノンランプ発光のトリガー回路、自動利得校正装置のパルス計数回路を含み、それらの駆動を制御している。

自動利得校正装置は、8回の発光毎に1回だけ、交流増幅器に接続され、その時には、受光部は外部からの光を受けず、クセノンランプの発光を直接反射板を経て受けるように仕組みられている。この駆動制御もタイマー回路でおこなっている。したがって、この時には、クセノンランプの発光の一部が校正用光电変換素子に達し、そこで生じた電気信号は、他の7回の時と同じく、前置増幅器、減衰器、交流増幅器にやってくるが、そこから積分回路へは行かずに、自動利得校正装置へ導かれる。自動利得校正装置はこの電気信号の大きさに応じた数のパルスが発生させ、そのパルスの数に応じて減衰器の減衰度を規制する。

こうして、使用電圧が上ってクセノンランプの発光が強くなった場合には、減衰度が1段下って、全体の増幅率が小さくなり、正常の発光量の場合と等しい信号の強さに補正されることになる。

これらの電気回路は温度の変化によって複雑な誤差を生ずるおそれがあるので、電子恒温槽に入

れてある。

これらの機能を持った降雪強度計のブロックの連結を一覧図に示すと、図2・2のようであり、その外観は写真2・1, 2・2, 2・3のようである。

次に、投光部の反射鏡、前面ガラス、受光部のレンズ系などの曇りが、光学的な障害となり、測定に大きな誤差を生ずることがある。これには、長い期間に徐々に汚れる場合と、雨や雪の付着によって急に障害を受ける場合とがある。長い期間の徐々に起こる曇りは、一冬の間でそう大きくなることはないので、自動利得校正装置によって補正される範囲内にあり、特に考えなくてよい。しかし、雪が付着すると、光が殆んど通らない位の強い障害になる場合もある。したがって、これはブローで雪を吹き払い、付着してしまった雪は電熱で融かすこととし、両方の装置を取りつけてある。

また、透過光を測定するための受光器は、投光機との間の相対位置と向きとの相対角度が変わると、受光量が大きく変わることになる。このため、設置の際に充分注意して、観測の途中で変ることのないようにしなければならない。

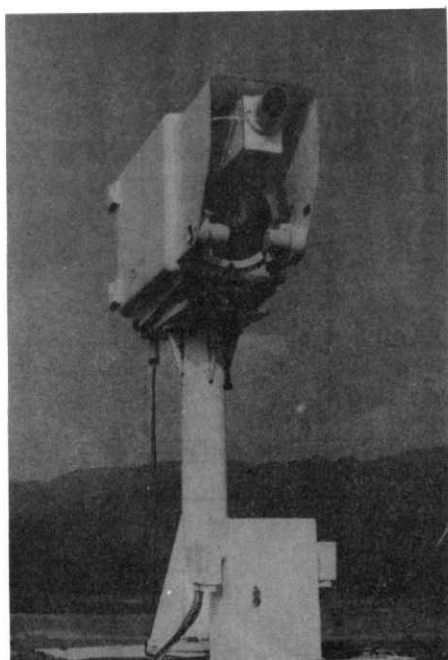


写真2・1 降雪強度計投光部および後方散乱受光部
 Emitter and receiver for back-scattered light.

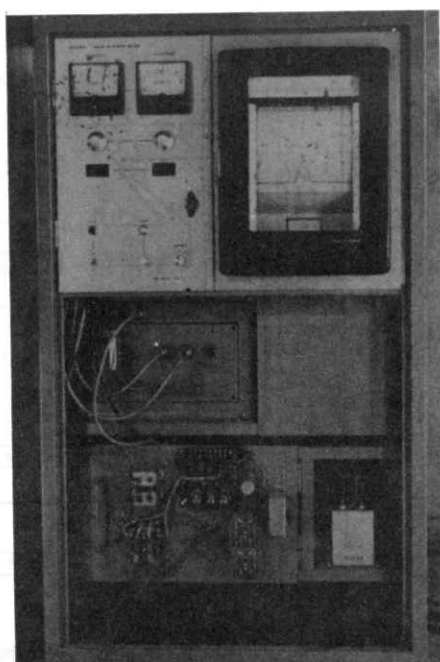


写真2・3 降雪強度計の制御部
 Control box of the snowfall intensity meter.

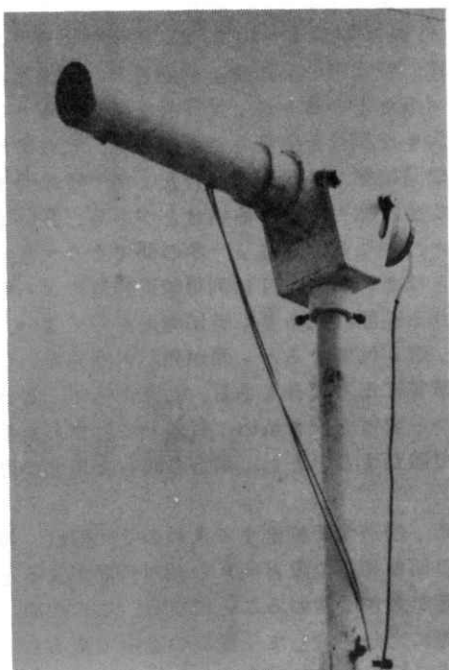


写真2・2 透過光受光部
 Receiver for transmitted light.

3. 測定の基礎的理論

降雪中の空間を進む光は、雪片によって吸収されたり散乱されたりして、距離と共にそのエネルギーを失っていく。このことは既によく知られているし、霧や煙霧などの場合と類似した形で、数学的にも扱える。

われわれが扱っている場合について、模式的に図示すると、図3・1のようである。すなわち、A点のクセノンランプで出された光は反射鏡m、m'で反射し、 Ω の立体角を持って、右方へ向って、広がりながら進む。透過光の受光部はBに置いてあり、後方散乱光の受光部はDにあるとする。受光部の開口角は ω とし、受光レンズの面積は a とする。式の表示を簡単にするため、立体角 Ω 、 ω の幾何学的頂点をそれぞれA'、D'とする。

クセノンランプから1回の発光で出される光量を I_0 とすると、これが立体角 Ω で広がりながら進むので、単位立体角当りの光量は I_0/Ω である。今、A'から r の距離にある、立体角 Ω 内の任意の点Oについてみると、その光に直角な単位面積当りの光量は $I_0/\Omega r^2$ となるわけである。しかし、この空間のA'からの距離が r_0 より大き

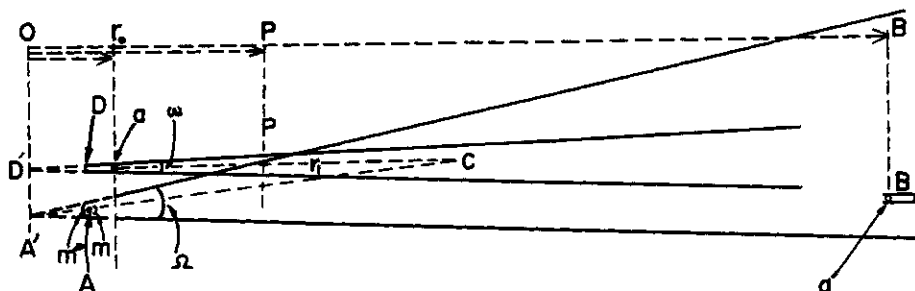


図3・1 光と機械の関係位置図
Location of apparatus and paths of light.

い部分には雪片があり、そのために光は吸収と散乱によって弱る。その減衰係数を k とすると、C 点を右向きに通る光の強さ I_c は、

$$I_c = \frac{I_0}{\Omega r^2} \exp\{-k(r-r_0)\} \quad (3.1)$$

となる。

透過光受光器 B の位置が A' から B の距離にあるとすると、受ける光量 I_b は、レンズの面積が a であるから、

$$\begin{aligned} I_b &= \frac{a I_c}{\Omega r^2} \exp\{-k(B-r_0)\} \\ &= I_B \exp\{-k(B-r_0)\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

ただし I_B は雪片等のないとき B が受ける光量となる。 I_B は受光器 B の位置によって決まる定数と考えてよいから、 I_b が測定されると、 k の値が求められる。 k をわかりやすく表現するなら、

$$k = \frac{\ln I_B - \ln I_b}{B - r_0} \quad (3.3)$$

と示される。 k の値は雪片の空間分布密度の函数であるから、これによって降雪の強さを表現してもよい。

k の値はまた、雪片の大きさ、形や個々の雪結晶の形によって、雪片の空間分布密度が同じでも、異なることが考えられる。しかし、普通の降雪では、実用的には、 k の値は雪片の空間分布密度に比例する、とみてもあまり支障がない程度がある。したがって、降雪の強さは、近似的には、 I_b の対数と直線的関係にある。

後方散乱光については、散乱係数を σ とすると、O 点における値は σI_c である。これは、散乱現象の性質上、全方向へ均等の強さで散乱されるわけではないが、もし不均等の状況がわかれば補正できるので、今は均等に分散すると考える。すると、散乱光の受光器 D の受ける光量 I_d は、レンズの面積が a であるから、C から D までの距離を r_1 とすると、

$$I_d' = \frac{\sigma a I_c}{4\pi r_1^2} \exp(-k r_1^2) \quad (3.4)$$

となる。このような O 点は、図 3・1 で、A'

を頂点とする Q の立体角を持つ円錐と、 D' を頂点とする ω の立体角を持つ円錐の共有部分の中に存在するものが皆該当するわけである。両円錐の共有部分が始まる所の D' からの距離を p とする。また、図からわかる通り、 O から D' までの距離は、 A' と D' がすぐ近くにあるので、 r にほとんど等しい。そして、 D と D' の間の長さは大体 r_0 に等しい。したがって、受光器 D の受ける光の全量 I_d は、 I'_d を D' を頂点とする円錐について、 $r \geq p$ の全域について積分し、

$$I_d = \frac{a}{4\pi} \int_p^\infty \frac{\sigma I_0}{(r-r_0)^2} \exp\{-k(r-r_0)\} \omega r^2 dr$$

または、

$$I_d = \frac{a\omega I_0}{4\pi Q} \int_p^\infty \frac{\sigma}{(r-r_0)^2} \exp\{-2k(r-r_0)\} dr \quad (3.5)$$

となる。 σ は降雪片の空間分布密度の函数であり近似的にはほぼ比例する。これは厳密には r の函数であるが、今の場合は巨視的にみているので、場所による違いを無視して扱い、 k と同じように定数と考えると、積分記号の外へ出される。

次に、上式の積分は厳密に求めることは難かしいが、有限の値を持つことはわかっている。現在の問題では、 k の値が非常に小さいので、 $\exp\{-2k(r-r_0)\}$ の項は r の値が p から p の数倍まで変わっても、 0.99 ぐらいから 0.9 ぐらいまでしか変わらない。その間に $(r-r_0)^{-2}$ の方は何 10 分の 1 と小さくなるので、

$$I_d = \frac{a\omega I_0 \times 0.95}{4\pi Q(p-r_0)} \sigma \quad (3.6)$$

としても、その誤差はせいぜい 2% 以内である。

σ の値は当然、 k の値と関連を持ち、雪片の大きさ、形や個々の結晶の形によって、雪片の空間分布密度が同じでも、異なることが考えられる。しかし、普通の降雪では、実用的には、雪片の空間分布密度に比例して変る。したがって、降雪の強さは、近似的には、 I_d と直線関係にある。

さて、上の議論では、降雪の強さは降雪片の空間分布密度に比例するものと考えているが、降雪の強さを単位時間内に単位面積の水平地面上に積もる雪の重さで示すならば、それは降雪片の空間分布密度と雪片の落下速度の積で表わされる。雪片の落下速度はその形、大きさおよび重さによ

て異なるので、量的には個々の雪片の重さを m_i 、落下速度を v_i 、単位体積の空間内にある雪片の個数を N とすると、

$$\begin{aligned} \text{降雪の強さ} &= \sum_{i=1}^N m_i v_i = N \bar{m} \bar{v} \\ &+ \sum_{i=1}^N \Delta m_i \cdot \Delta v_i \end{aligned} \quad (3.7)$$

となる。ただし、 \bar{m} 、 \bar{v} はそれぞれ m_i 、 v_i の平均値を、 Δm_i 、 Δv_i はそれぞれ m_i 、 v_i の平均値からの偏差を示す。

上の式の右辺第2項はどの位の値になるかわからないが、これが大きいと、空間分布密度 $N \bar{m}$ がわかっても、降雪の強さはわからない。また、第1項の \bar{v} はどんな雪片が多いかによって変り、あられなどは普通の雪片の2倍以上の値を持つ。これらを理論的に普遍的に取り扱うことは現在不可能であるので、実験によって、どの程度の確かさで降雪強度を求め得るか、どんな雪に対してそれが可能かを調べることになる。

4. 降雪強度計の記録値のおくれ

2節で触れたように、この機械の記録値は1回毎の発光についての散乱光、減衰光の強さを示すのではなく、数回前の発光についても、それらの残存効果を持っている。このことを説明しよう。

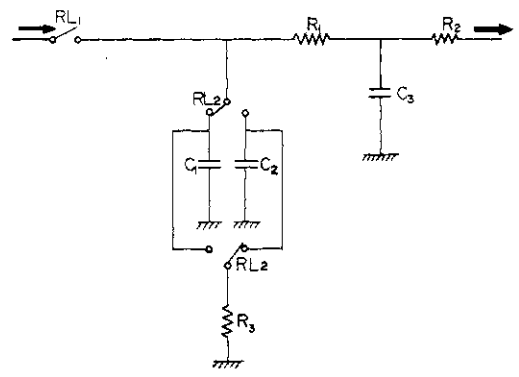


図4・1 積分回路の模式図

Schematic diagram of integral circuit.

図4・1には積分回路を模式的に示す。観測の際、第 n 回目の発光直前のコンデンサー C_3 の電圧が E_{n-1} であったとする。その直後に第 n 回の発光があると、それに対応する散乱光または透過

光を受けることにより、図 4・1 のコンデンサー C_1 が充電される。コンデンサー C_1 と同 C_2 とはスイッチ S と抵抗 R とで結ばれているから、電流は電圧の高いコンデンサーから電圧の低いコンデンサーへ流れる。コンデンサー C_1 の容量を C_1 、同 C_2 の容量を C_2 、抵抗 R の抵抗値を R とする。今発光があって、それを受け入力によって、コンデンサー C_1 の電荷が瞬間的に $Q_{1,n}$ となり、電圧が V_n になったとする。そのときコンデンサー C_2 には $Q_{2,n-1}$ の電荷があったとする。

コンデンサー C_1 が充電されてから t 秒後までにコンデンサー C_2 に移る電荷を Q とすると、

$$\frac{Q_{1,n} - Q}{C_1} = \frac{Q_{2,n-1} + Q}{C_2} - R \frac{dQ}{dt} \quad (4.1)$$

となる。この式を、 $t=0$ で $Q=0$ 、 $t=\infty$ で $Q \neq \infty$ の条件でとくと、

$$Q = \frac{C_2 Q_{1,n} - C_1 Q_{2,n-1}}{C_1 + C_2} \times \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{C_1 + C_2}{RC_1 C_2} t\right) \right\} \quad (4.2)$$

となる。今、発光時間間隔を t_0 とすると、次の発光の直前における時刻は t_0 とみてよいので、その時のコンデンサー C_2 の電圧を E_n とすると、その値は

$$E_n = \left\{ 1 - \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{C_1 + C_2}{RC_1 C_2} t_0\right) \right\} \right\} \times E_{n-1} + \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{C_1 + C_2}{RC_1 C_2} t_0\right) \right\} V_n \quad (4.3)$$

となる。この時に、スイッチ S はコンデンサー C_1 から同 C_2 へと切り替わる。そして、次の瞬間に第 $n+1$ 回の発光が起る。この発光によって、コンデンサー C_2 の電荷が瞬間的に $Q_{2,n+1}$ となり、電圧は V_{n+1} となるとする。すると、コンデンサー C_1 には、その瞬間から電荷が移り始める。そして、第 $n+2$ 回目の発光直前には、コンデンサー C_3 の電圧 E_{n+1} は、コンデンサー C_2 の容量が C_1 に等しいので、前のとくと同じ変化をたどり、

$$E_{n+1} = (1-\alpha)E_n + \alpha V_{n+1} \quad (4.4)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{C_1 + C_2}{RC_1 C_2} t_0\right) \right\}$$

となる。

さて、いま入力が 0 であって、コンデンサー C_3 に電荷がなかった状態から、急に 1 回毎の発光に対応する入力が、コンデンサー C_1, C_2 に交互に V_0 の電圧を生ずるようにすると、上の式により、 $E_0 = 0$ であるから、 $E_1 = \alpha V_0$ 、 $E_2 = (1-\alpha) \times \alpha V_0 + \alpha V_0$ 、 $E_3 = (1-\alpha) \{ (1-\alpha) + 1 \} \alpha V_0 + \alpha V_0$ となり、 nt_0 秒後には、

$$E_n = \alpha V_0 \{ 1 + (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \dots + (1-\alpha)^{n-1} \} = V_0 \{ 1 - (1-\alpha)^n \} \quad (4.5)$$

となり、 n の増加に伴って V_0 に近づく。

次にコンデンサー C_3 の電圧が E_0 であるとき急に入力のない状態に変えらると、 $E_1 = (1-\alpha)E_0$ 、 $E_2 = (1-\alpha)^2 E_0$ となり、 nt_0 秒後は、

$$E_n = (1-\alpha)^n E_0 \quad (4.6)$$

となって、 n の増加に伴って 0 に近づく。

この状態を検定するために、次の方法をとった。雪の降らない、空気の澄んだ日を選んで、降雪強度計の発光部の前 1 m の位置に反射板を置き、透過光を完全になくし、一定の散乱反射を作った。こうして、透過光の記録値が 0 を示し、後方散乱光の記録値が 90 を示して増減しなくなったとき、反射板を取り去った。すると、そのときから、発光回数の増加と共に、透過光の記録値は (4.5) 式に従って増加し、後方散乱光の記録値は (4.6) 式に従って減少し、図 4.2 のようになった。

この記録値からの α の値を求めると、透過光の記録値については 0.34、後方散乱光の記録値については 0.11 となった。この場合発光時間間隔は 1.5 秒としてあったので、時間変化に換算するならば、 $t = 1.5n$ とするとよい。図 4.2 にはこのような時間を記してある。

記録値は、厳密には、発光と発光の間 (n が整数でない時間) の変化は、(4.3) 式の t_0 を t と

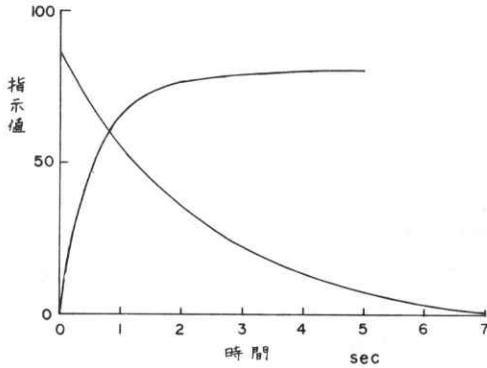


図4・2 記録値のおくれ・上昇：透過光，
 下降：後方散乱光
 Response curves; rising: transmitted
 light, falling: back - scattered
 light.

した式で示されるので、発光毎に時間で微分した微分係数が不連続に変るのが普通である。この点については、通常の観測では、特に注意する程のことはない。

5. 降雪強度の標準値

降雪強度計が正しい測定値を示してくれるか、その測定値の誤差はどの程度かなどを調べるには降雪強度の正しい値が必要である。

降雪強度の測定を正確におこなえる機械があるなら、この研究は不要である。しかし、降雪の強さを正確に測らなければ、この研究は不可能となる。

雪を容器に受ける場合、風があれば容器に入る量は著しく減るので、容器に受ける種類の測定は精度がよくないが、風がない場合には、雪は真直ぐに落ちて、比較的狭い受雪口にも充分入ってくれる。したがって、風のない時には、降雪を容器に受けて、その重さの増加を記録させる方式で降雪の強さをかなり正確に求めることができる。

こうして、降雪強度計の精度をチェックできることになる。勿論、これは風の弱い場合のチェックであるから、風があるときについても同じように正しいかどうかは疑わしい、とも考えられる。しかし、雪片の空間分布密度を光の散乱で測る場合には、風の影響は直接的にはない筈であるから今の問題についてはこの方式でチェックすることとした。

このような目的で、風のない場合に降雪の強さを測るために、次のような微重量降雪計を作った。その構造は受雪口を10 cm×10 cmとし、その下に受雪皿を置き、受雪皿はひずみ計に吊してある。降雪が受雪口から入り、受雪皿に積ると、その重みがひずみ計にひずみを生じさせるので、それを記録することになる。増幅を適当にして、20gでフルスケールになるよう調整し、その1/100の精度で記録した。この微重量降雪計の外観は写真5・1のようである。

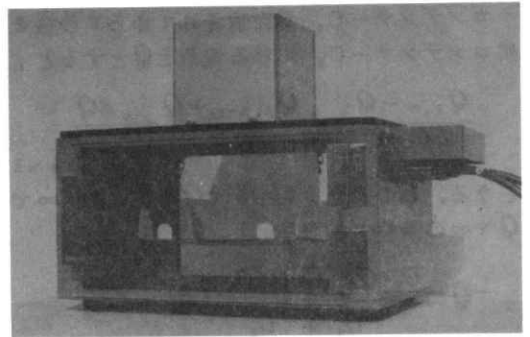


写真5・1 微重量降雪計（標準観測用）

Apparatus for correct measurement
 of snowfall intensity.

微重量降雪計の記録値は1分毎に読みとり、その差を求めて1分間の降雪量とした。

6. 雪片落下の数および速度の測定器

第3節でも触れたように、降雪の強さは空間を落下しつつある雪片の量とその速度の積によって定まるので、降雪強度計の精度には雪片の落下速度を考慮に入れる必要がある。それで、一定面積の水平面を一定時間内に通過する雪片を、5段階の速度階級に区分し、各区分に入る雪片の数を指示し、かつ記録する装置を作った。

この機械は投光部と受光部を外におき、制御部を室内に置いて観測するようにした。図6・1に投光部と受光部の構造を示す。

投光部の光源は15Wのタングステン電球を用い、電源は直流5Vを使用した。この光は集光レンズにより、ほぼ平行光線となって、受光部に照射する。受光部には撮影用レンズ(Cine-Nikkor 100m/m, F2.8)、2個の太陽電池(20mm×5mmの細長い長方形のものを8mmの間隔で平行に置く。)2組の前増幅器などが組み込まれている。レン

ズと太陽電池の相互位置は、写真機のレンズとフィルムとの関係になっている。

投光器と受光器の間に落ちてくる雪片は、光束をさえぎり、太陽電池面に像を結ぶ。雪片の落下に伴い、像は下の太陽電池から上の太陽電池へと

動いていく。この雪片の像の通過によって、二つの太陽電池からそれぞれパルス状の電気信号が作り出される。二つのパルスの時間差は雪片像が二つの太陽電池の間の距離を移動するに要した時間に

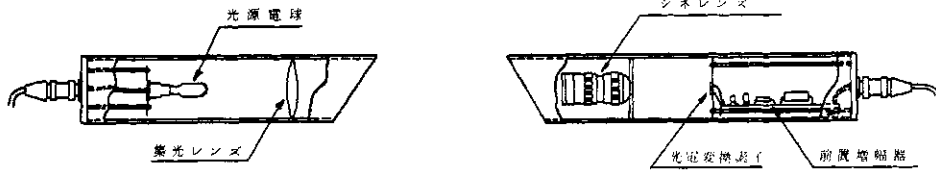


図6・1 雪片落下速度計の投光部(左)と受光部(右)

Emitter (left) and receiver (right) of the snow falling velocity - meter.

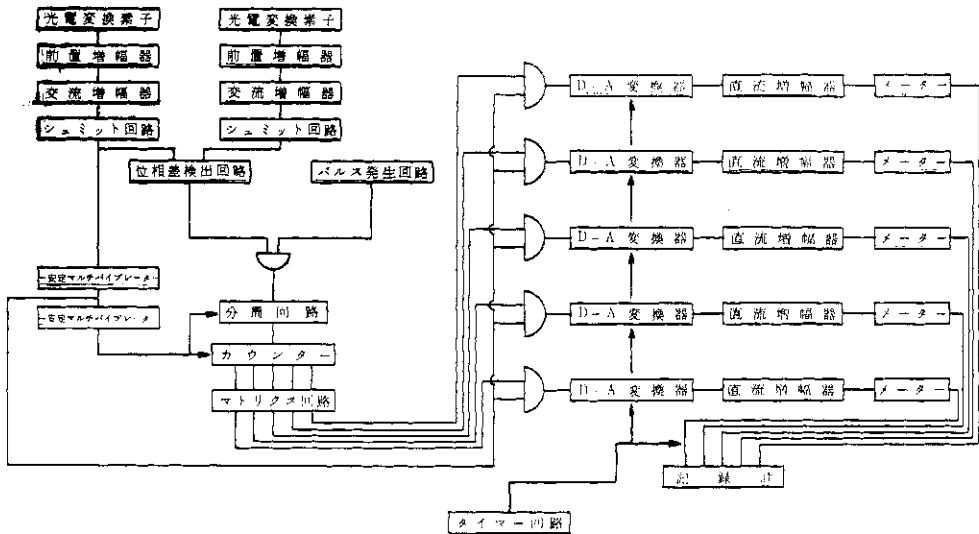


図6・2 雪片落下速度計のブロック連結図

Block diagram of the snow falling velocity - meter.

に等しい。

図6・2には信号経路を示すブロックダイアグラムを記してある。太陽電池から出た電気信号は、それぞれの前置増幅器を経て、制御部に送られる。制御部ではまず交流増幅器で増幅されてから、シュミット回路に入る。ここで、山形であったパルスの波形を方形にする。これは位相差を検出する際にパルスの形の違いによる誤差をさけるためである。方形波は位相差検出回路へいく。

位相差検出回路ではこの二つの方形波の位相差をパルス幅とする一つの方形波を作る。一方、パルス発生回路では一定周波数の方形波クロックパルスが作られている。位相差パルスとクロックパルスとのパルス幅の関係は、雪片の落下速度の最大のときの位相差パルス幅を T_{min} 、落下速度の最小のときの位相差パルス幅を T_{max} とすれば、クロックパルス幅 T_c は

$$\frac{T_{\max}}{30} < T_c < \frac{T_{\min}}{4} \quad (6.1)$$

となるように定めてある。

クロックパルスと位相パルスはゲート回路に導かれる。ここでは、位相差パルスと同時にやって来たクロックパルスのみが次へ導かれるようになっている。したがって、位相差のパルス幅が、クロックパルスのパルス数におき換えられることになる。こうして、次の分周回路には、1個の雪片の通過によって、その通過時間に比例する数の1団のクロックパルスが入ることになる。

分周回路ではクロックパルスの数を1/4に減らし、次の計数回路に送る。計数回路では6個の出力口から、パルス数を2進法で表わしたそれぞれの組み合わせの出力を生ずる。その6個の出力をマトリックス回路に導く。マトリックス回路では5個の出力口があり、計数回路からの入力との組み合わせに応じて、パルス数の各区分に対応した出力口から一つのパルスを出すようになっている。

ノイズによる誤動作を防ぐために、シュミット回路の出力を1安定マルチバイブレーターを通じて得られるパルスとマトリックス回路の出力とが同時に入ってくる時のみ一つの出力が得られるようなゲートを五つ設けてある。一方、分周回路および計数回路をリセットして、次のクロックパルス群に備えるための信号には、シュミット回路の出力を2個の1安定マルチバイブレーターを通して時間の遅れを持たせて利用している。

こうして、雪片が一つ落下する毎にマトリックス回路の5個の出力口の中、その落下速度(すなわちパルス数)に対応する出力口から一つの信号が出て来る。この信号はD-A変換回路で一定の電荷に変換され、2000μFのコンデンサーに蓄積される。コンデンサーの出力は直流増幅器で電流増幅され、それぞれのメーターに入る。また、記録計には電流量を電圧に変換し、リレーを通して導いている。

この機械の観測は、測定2分間、記録とリセットを合わせて1分間、合計3分間で1巡する。その作動制御の信号は、別にタイマー回路で作られ、各回路に送られて自動的に作動するようになっている。記録計には、測定とリセットの時間には弱い負電圧を加え、0点と区別している。この機械の外観は写真6.1および6.2のようである。

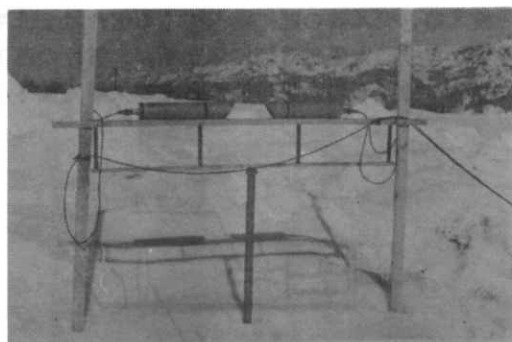


写真6.1 雪片落下速度計の投光部・受光部
 Emitter and receiver of the snow falling velocity-meter.

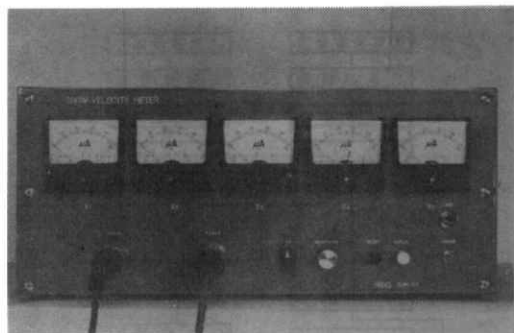


写真6.2 雪片落下速度計の制御部
 Control box of the snow falling velocity-meter.

7. 降雪強度計による観測の精度

7.1 観測にあたっての注意

透過光を利用する観測で基本的問題は投光器と受光器の間の距離である。距離が長いと、地形・地物や土地の使用権などの問題が生ずることもあり、一般的に使用が難しくなる。できれば数m程度、長くても数10mの範囲でおこなわねばならない。しかし、降雪中での光の減衰率についての明確な知識がなかったので、どの程度の距離でおこなうべきかがわからず、最初の年は5mから始めた。実験をくり返している間に、減衰率の点から、実用的な距離は30~50mと求められた。この実験では30mとしておこなった。

また、受光器Bの投光器に対する位置によって、

距離 B が等しくても I_B の値が幾分異なる。これは投光器からの光が投光範囲 Q の中で均等分布していないことによる。しかし、観測値を $3 \cdot 3$ 式に従うとして、 I_B/I_b で処理するならば、このことは特に問題にならない。

受光器の開口角が狭いので、受光器は投光器の方向に正確に向いていなければならない。観測の途中で何かの故障などがあり、受光器に触れる場合には特に注意する必要がある。実際に何回かたがいが経験を持った。

後方散乱光を利用する方では、受光器 D は投光器 A に固定してある（別々にする必要がない）ので、上のような心配は全く不要である。

次に機械の地上または雪面上の高さについては、取り扱い上はなるべく低くすることが望ましいが、雪面にあまり近くなると、発射光の雪面での散乱光が受光器に入って誤差を生ずるおそれがある。この点については、実験中常に注意して監視したが、雪面上 70cm 以上の高さを維持しておこなった観測の間で、雪面の影響らしいものは一度も認められなかった。

風雪の時には、受雪器の筒の中に雪が飛び込んで溜るので、これを電熱で融かし流したが、この時、稀ではあるが、集光レンズに微水滴が付着し、大きな誤差を生じた。この点については、改善の方法を講じなければならない。

さて、透過光・後方散乱光の記録は写真 7・1 のようである。透過光の記録は 100% の値から降雪の強さと共に減少し、後方散乱光による記録は 0 から降雪の強さと共に増加するので、強い降雪の場合は両曲線は交錯する。したがって、ペンを同時に記録紙の時刻目もりに一致させることができないので、透過率の方を 2mm だけ時刻の早い方にずらしてある。

写真 7・1 でわかるように、透過光の方はベース（降雪のない時の 100% の値）が振動している。これで既に 1% の誤差を含んでいることがわかる。この振動は除去できず、更に増加して 2% に達している記録も多い。また、この方に数時間の間にもっと大きな幅でベースが変る例も多かった。透過光のベースが不安定であったのは器械製作上の問題であったかも知れないが、終始悩まされたので記しておく。

次に、データの整理の説明を理解していただくために、図 7・1 を掲げる。これは、 1967 年

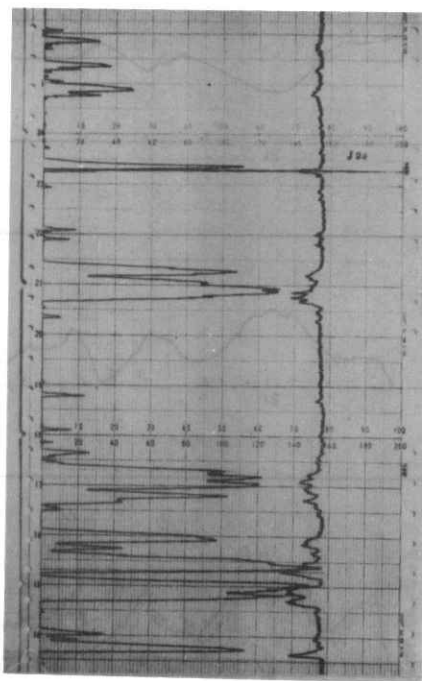


写真 7・1 降雪強度計の記録，左：後方散乱光，右：透過光

Record written by the snowfall intensity-meter. Left: back-scattered light; right: transmitted light.

2月16日の例である。1番上の曲線が透過光による記録，次が後方散乱光による記録のそれぞれ模写であり，1番下の柱状グラフ（柱と柱の境の線は消してある）は微重量降雪計によって求めた1分間降雪量で，それと重複している曲線は4・4式によって，1分間降雪量を後方散乱光による記録に合わせるように計算して求めたものである。

比較するための正しい降雪強度を測る微重量降雪計は雪面の上に水平に置いて測定した。風速 3m/sec を越える場合は，この測定値は標準にならないことは初めから考えていたが，風速にかまわず観測してみた。しかし，風速 4m/sec 以上の時が含まれる測定値は，降雪強度計の記録と比べてみると，非常にまちまちの点の分散が示されたので，それらの測定値は全部捨てた。

7. 2 透過光による記録値

第4節で調べたところによると，透過光の記録

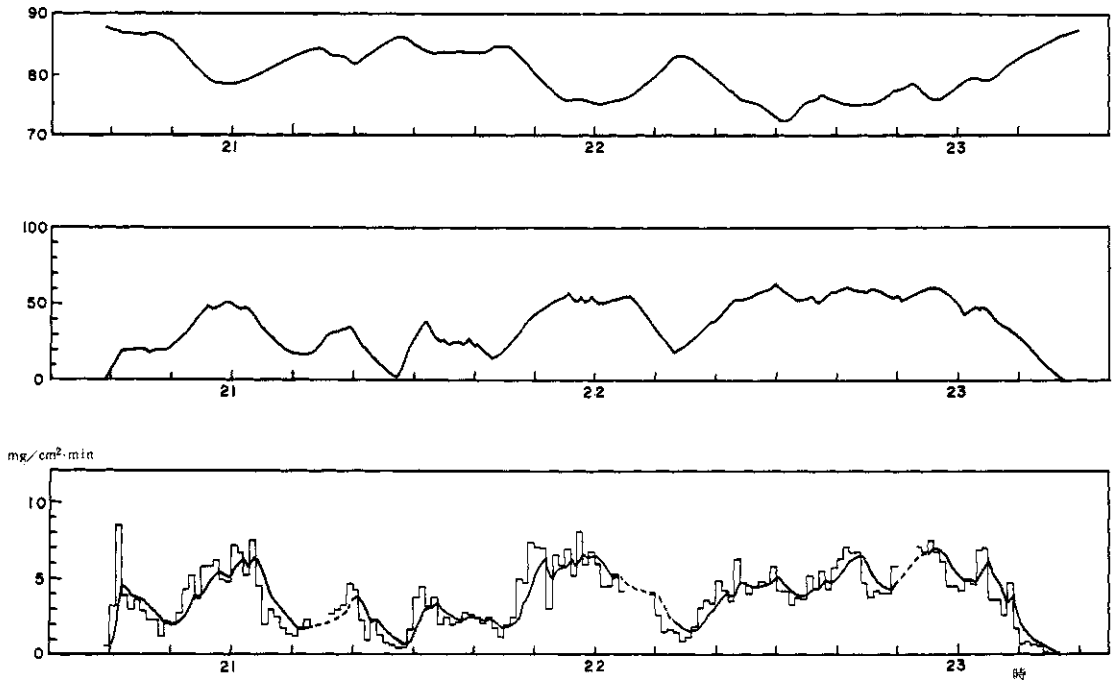


図7・1 降雪強度計の記録〔上：透過光，中：後方散乱光〕と微重量降雪計による測定値（下）

Record of snowfall intensity - meter (upper:transmitted, middle:back-scattered) related to correct snowfall intensity (lowest).

値は遅れが少なく、4・4式の α の値が大きいので、2分間くらいの平均の降雪の強さとかなり良く対応する筈である。したがって、第5節で説明した微重量降雪計の記録の1分毎に読み取り値の差をとって作った1分間降雪量のピークの値（図7・1の1番下の柱状グラフ参照）とその前1分間の値との平均値を求め、それと記録値のピークとを対応させて比較した。その関係は図7・2に示す。

図7・2では降雪の強さ S は $\text{mg}/\text{cm}^2\text{min}$ を単位とし、透過光の記録値をそのまま縦軸に示してある。透過光の記録値は、この範囲では I_b の値と直線関係にあり、しかも比例している。第3節で調べたところでは、降雪の強さは $\ln(I_B/I_b)$ に比例する筈であった。しかし、この図を見ると、降雪の強さと I_b が直線関係にあるとしか見えない。このことは、この機械を使う場合に、甚だ実用的で便利である。

しかし、一般的関係としては、 I_b/I_B の値で表

わした方がよいので、それになおして関係を求めると、降雪の強さを $S\text{mg}/\text{cm}^2\text{min}$ として、

$$S = 4.17 \left(1 - \frac{I_b}{I_B} \right) \quad (7.1)$$

となる。これは図7・2に実直線で示す。

さて、 S と I_b の関係はどうして直線的になるのであろうか？ 第3節では、減衰係数 k が大体 S に比例するだろうことを考えていたが、7・1式と3・3式から、両者の関係を求めると、

$$k = -\frac{1}{B-r_0} \ln \left(1 - \frac{S}{4.17} \right) \quad (7.2)$$

となり、 S が大きくなるにつれて、 S に伴って増加する k の増加率が大きくなる傾向があることを示している。 S が大きくなると、一般に雪片の数が多くなり、光の進路上に雪片が重なる確率が増加するので、 k の増加率はむしろ減少すべきである。したがって、7・2式の関係は論理的には是

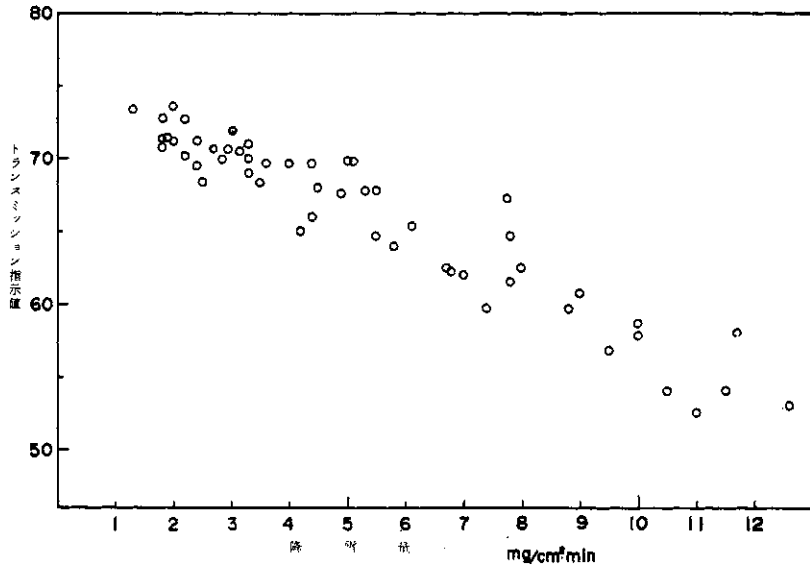


図7・2 透過光の記録値と2分間平均降雪量との関係
Recorded value for transmitted light vs. snowfall intensity in two-minute mean.

認し難い。

ところで、図7・2では点の分散はかなり大きいのであるから、(7.1)式の直線だけが妥当な関係であると断言することも危険性はある。試みに k が S に比例する場合を考えてみよう。すると、仮定により、

$$k = \beta S \quad (7.3)$$

と記せるので、これを(3.3)式に代入して、

$$S = \frac{\ln I_B - \ln I_b}{\beta(I_B - I_b)} \quad (7.4)$$

となる。そこで、(7.1)式と(7.4)式の違いについて考えると、今の場合、

$$I_B \geq I_b \geq 0.7 I_B$$

であるので、(7.4)式と(7.1)式の違いは偶然誤差の範囲を越えない程度であることがわかる。すなわち、

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{I_B}{I_b} \right) &= \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right)^2 \\ &+ \frac{1}{3} \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right)^3 - \dots + \frac{(-1)^{n-1}}{n} \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right)^n + \dots \\ \left(1 - \frac{I_b}{I_B} \right) &= \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right) - \left(\frac{I_B}{I_b} \right)^2 \end{aligned}$$

$$+ \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right)^3 - \dots + (-1)^{n-1} \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right)^n + \dots$$

であるから、

$$\begin{aligned} \ln \left(\frac{I_B}{I_b} \right) - \left(1 - \frac{I_b}{I_B} \right) &= \frac{1}{2} \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right)^2 \\ - \frac{2}{3} \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right)^3 &+ \dots + \frac{(-1)^n (n-1)}{n} \left(\frac{I_B}{I_b} - 1 \right)^n \\ &+ \dots \quad (7.5) \end{aligned}$$

となり、右辺の値は最大で0.05である。したがって、 β の値を適当に選ぶと、(7.1)式と(7.4)式の値の比は0.94と1.06の間におさまってしまうことになる。その β の値は約 $0.9 \times 10^{-5} \text{ cm min mg}^{-1}$ となる。

7.3 後方散乱光による記録値

降雪強度計の後方散乱光 I_d を受けたときの記録値を k_d とすると、両者の関係は大體

$$I_d = \gamma \exp(2.09 \delta K_d \times 10^{-2}) \quad (7.6)$$

と表わされる。

上式の γ および δ の値は途中の増幅率・感度調整のやり方によって変る定数であり、この降雪強度計を作った時の標準の観測状態では、 $\gamma = 3.0$ 、 $\delta = 1.0$ であったが、実験の途中でいろいろの故

障を修理し調整し直して
 いる間に、その値はかな
 り変ってしまった。

1968年の実験では、
 $\gamma = 2.0$ 、 $\delta = 1.0$ とお
 くと、大体、前年の結果
 と似た値となる。それで、
 以下の所論には、この値
 も使っている。

後方散乱光の記録値で
 は、(4.4)式の α の
 値が小さいので、遅れが
 大きい。それで、微重量
 降雪計によって観測した
 1分間降雪量 S のピーク
 時とその前5分間の合計
 6分間の S の平均値と後
 方散乱光の記録値 K_d の
 ピークの値とを対応させ
 て、その関係を求めると、
 図7.3のようになる。

図7.3の K_d を、
 (7.6)式に $\gamma = 2$ 、

$\delta = 1$ とおいた式によって、 I_d に変え、 I_d は
 $1x, S$ は $mg/cm^2 min$ を単位として、点の分散する
 範囲の上・下の限界線を求めると、

$$I_d = 1.2(S + 2), \quad (7.7)$$

$$I_d = 0.8(S + 2) \quad (7.8)$$

となり、図7.3に二つの曲線で示してあるよ
 うに、ちょうど良く適合している。

この程度に明瞭な関係にあるなら、実用的には
 一応合格とみてよいであろう。しかし、誤差の範
 囲が $\pm 20\%$ に達するのでは、科学的な資料とし
 ては甚だ不十分である。これにはいろいろの理由
 があり得るので、他の観点からも解析してみる必
 要がある。

上述の例では、記録値のピークの値と前6分間
 の平均降雪強度との比較であるから、正確な意味
 での対応にはなっていない。そこで、降雪の強さ
 の観測値を(4.4)式によって計算し、降雪強度計
 の記録と同じ性質の曲線に変える。このようにし
 て作った曲線の1例は図7.1の1番下の段に
 示してある。

図7.1の1番下の曲線が示す値を S' とす

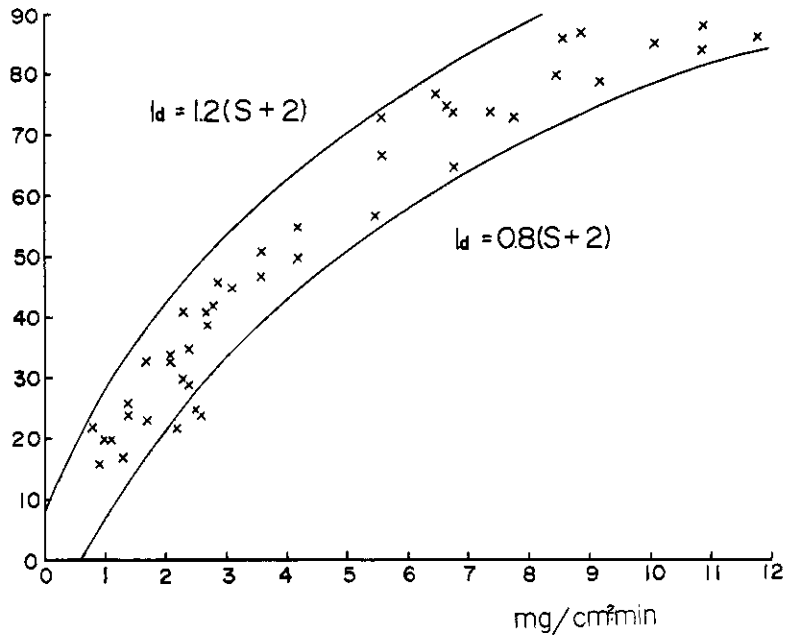


図7.3 後方散乱光の記録値と6分間平均降雪強度

Recorded value for back-scattered light vs. snowfall
 intensity in 6-minute mean.

る。これと同図中央の曲線の値 K_d とを対応させ
 る。その際、変化の急な部分は誤差が大きくなる
 ので、両曲線のピークまたは平らになっている部
 分について対応点を求める。このようにして、
 1967年2月1日と同2月16日の観測につい
 て比較したのが図7.4である。

図7.4では、 I_d と K_d の関係がまだ正しく、
 (6.6)式の $\gamma = 3.0$ 、 $\delta = 1.0$ であったとき
 の観測値であるから、 I_d と S' とを直接対比さ
 せている。単位は $1x$ と $mg/cm^2 min$ である。

図7.4について、点の散布している領域の
 上限と下限は同図に示した直線をとると、それら
 は

$$I_d = 1.5(S' + 2), \quad (7.9)$$

$$I_d = 1.0(S' + 2) \quad (7.10)$$

と表わされる。

次に、最も実用的とも思われる比較の仕方をし
 よう。写真7.1および図7.1によって、
 雪の降り方の強弱の変化は如何にも明瞭であるの
 で、前後に比べ相対的に強く降っている降雪期間
 をとり出して、それを「ひと降り」と呼ぶ。この

ひと降りの降雪毎に、平均の強さを、後方散乱光の記録から \bar{K}_d 、微重量降雪計の観測値から \bar{S} として求め、両者の関係を示すと、図 7・5 のようになる。この場合、 \bar{K}_d には (4・6) 式によって、雪が降り止んでからの補正値を加えてある。

図 7・5 の点の散布領域の上限と下限は曲線になっている。これは 1968 年の 1・2 月の測定であるから (7・6) 式で $r=2$ 、 $\delta=1$ として、 \bar{K}_d から \bar{I}_d に変換して、 \bar{I}_d と \bar{S} の関係で表わすと、上限・下限はそれぞれ

$$\bar{I}_d = 1.4 (\bar{S} + 1) \quad (7 \cdot 11)$$

$$\bar{I}_d = 1.0 (\bar{S} + 1) \quad (7 \cdot 12)$$

となる。

以上 3 通りの比較によって、幾分の相異があるが、これには、それぞれの理由がある。この三つの比較の中、最も誤

差を小さくして対応させようとした第 2 の方法 (図 7・4、式 (7・9)、(7・10) で、点の分散が最も大きくなり、第 3 のひと降りの平均値で大雑把にみえる比較をした場合に、点の分散が最も小さくなっていることは、注目値する。

この比較観測では、降雪強度の標準値を求めるために、微重量降雪計を使用した。この測器には種々の欠点があるが、最も明確なことは、狭い面積の受雪口から入る雪の量を相手にしていることである。1 分間降雪量のような場合、降雪の強さは時間的、空間的分散性がかなり大きいため、数 m の距離での同時観測をおこなっても、その対応はあまりよくない (相関係数で 0.8 くらい) ことと、その時間を数分程度に延ばすと、対応がよく (相関係数で 0.9 以上) なることが、最近わかった。

一方、降雪強度計では、透過光では 30 m の距離の間の平均的な降雪の強さに近く、後方散乱光でも 10 m 程度の長さの間の平均的な値を示すこ

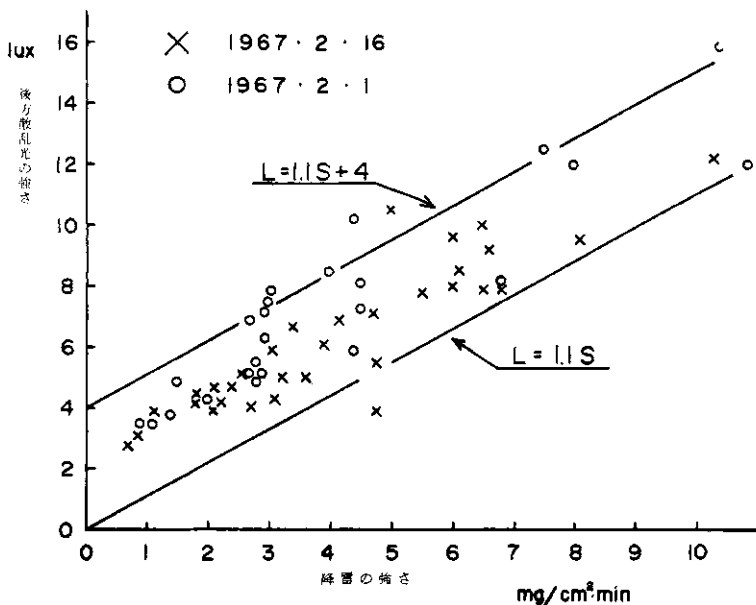


図 7・4 後方散乱光の強さと降雪の強さ

Intensity of back-scattered light vs. intensity of snowfall.

とになる。しかし、この方は時間については 1 瞬間の偶然状態を 1 分間に四つしかとっていない。このための偶然誤差は、やはり相当に大きいかも知れない。

こういう点からみると、上の三つの方法の比較で、正確に近いと考えた対応よりも、平均する時間を長くする方が両者の関係が濃くなる事実は、上に示した各比較図での点の分散の何割かは降雪現象そのものの不規則性によるものであることを示している。

これらのことを考慮して本節の各図を見直すと、むしろ相関関係が良過ぎるように思われる。これは、標準値を求めるための測器が、風の弱いときでなければ使えないため、資料を得たときの降雪状態 (雪片の形、結晶の形、落下速度など) が比較的变化に乏しかったことによるかも知れない。しかし、雪片の大きさについては、直径 1 mm 以下の微細なものばかりの降雪から、直径数 cm の大雪片を主体とする降雪まで、いろいろ含まれている。

8. 雪片の大小と光の散乱

降雪片の大小の構成の時間変化を追跡するためには、名古屋大学の高橋勲氏から雪ゾンデを借用した。この機械の構造や機能については、高橋・熊沢の論文(2)を参照されたい。これによって、降雪片の影写真を細大もらさず40分間連続撮影されるので、雪片の大小の分布状態は連続的に求められ、その時間を追っての変化ははっきり知られる。

一方、黒い布に降雪を数秒間受けて、それを現寸大に接写する方法もおこなった。これは5分～10分おきの観測になるが、結晶の形がはっきり見えるので、上の影写真と平行しておこなった。写真8・1ないし8・6に、典型的な降雪の場合を選んで示した。それらの属する降雪は次のようである。

写真8・1：微細雪片および小雪片の例(1)・2月2日(1968)17時01分～同31分の30分間に降ったもので、aは17時20分、bは同25分の状態である。

写真8・2：微細雪片および小雪片の例(2)・1月31日(1968)10時0分から同24分までに降った降雪で、aは10時0分、bは同20分の状態である。

写真8・3：中・小雪片混合の例・1月28日(1968)10時0分から同40分まで降った降雪で、aは10時15分、bは同25分の状態である。

写真8・4：大・中・小雪片混合の例：1月28日(1968)10時56分から11時20分までに降った降雪で、aは11時15分、bは同25分の状態である。

写真8・5：大雪片主体の例・2月5日(1968)10時22分から同52分まで降った降雪。aは10時26分、bは同31分の状態である。

写真8・6：あられが多く混った例・2月3日(1968)11時43分から12時43分までの降雪で、aは11時55分、bは12時03分の状態である。

以上の各写真に対応する降雪について、降雪の

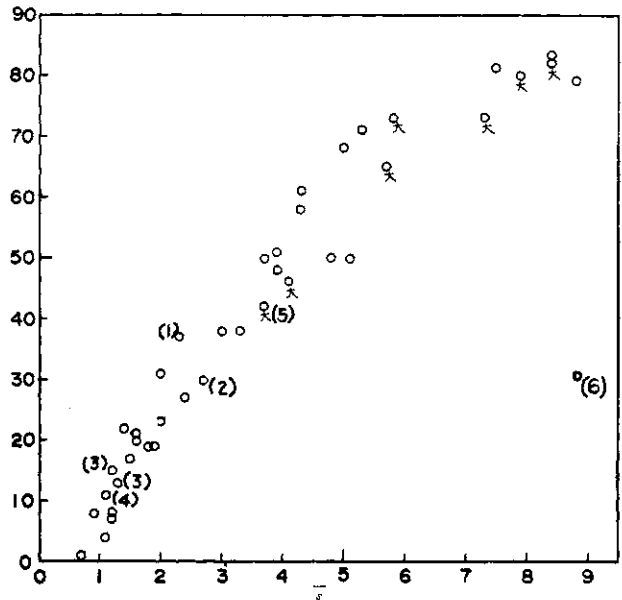


図7・5 ひと降りの雪についての \bar{K}_d と \bar{S} との関係
 \bar{K}_d vs. \bar{S} for each showery snowfall.

強さと降雪強度計の記録値との関係は、図7・5の中で(2)などの数字で示した点によって示される。この()内の数字が写真8・1～8・6の右側の数字に対応している。

図7・5では、大雪片が多く混じっている点の横に、“大”と印してある。一般に大雪片の場合は、この降雪強度計の記録は降雪の弱い方(図の下限に近い)に偏している。すなわち、降雪の同じ強さに対して、大雪片では、後方散乱光の強さは他の雪片の場合に比べて少ない方にある。また、極く微小な雪片であった(1)の例では、降雪の強さの同じである他の場合に比べ、散乱光が2～3割強いことを示している。(2)の例が小雪片であるに係らず逆に散乱光が弱いのは、写真をよく見ると小さなあられが含まれているためであるらしい。

あられの1例として、図7・5に(6)の点を記してある。この場合は、とんでもない所に点がある。あられの場合は落下速度が大きいため、空間にある雪片の分布密度が同じでも、降雪の強さは

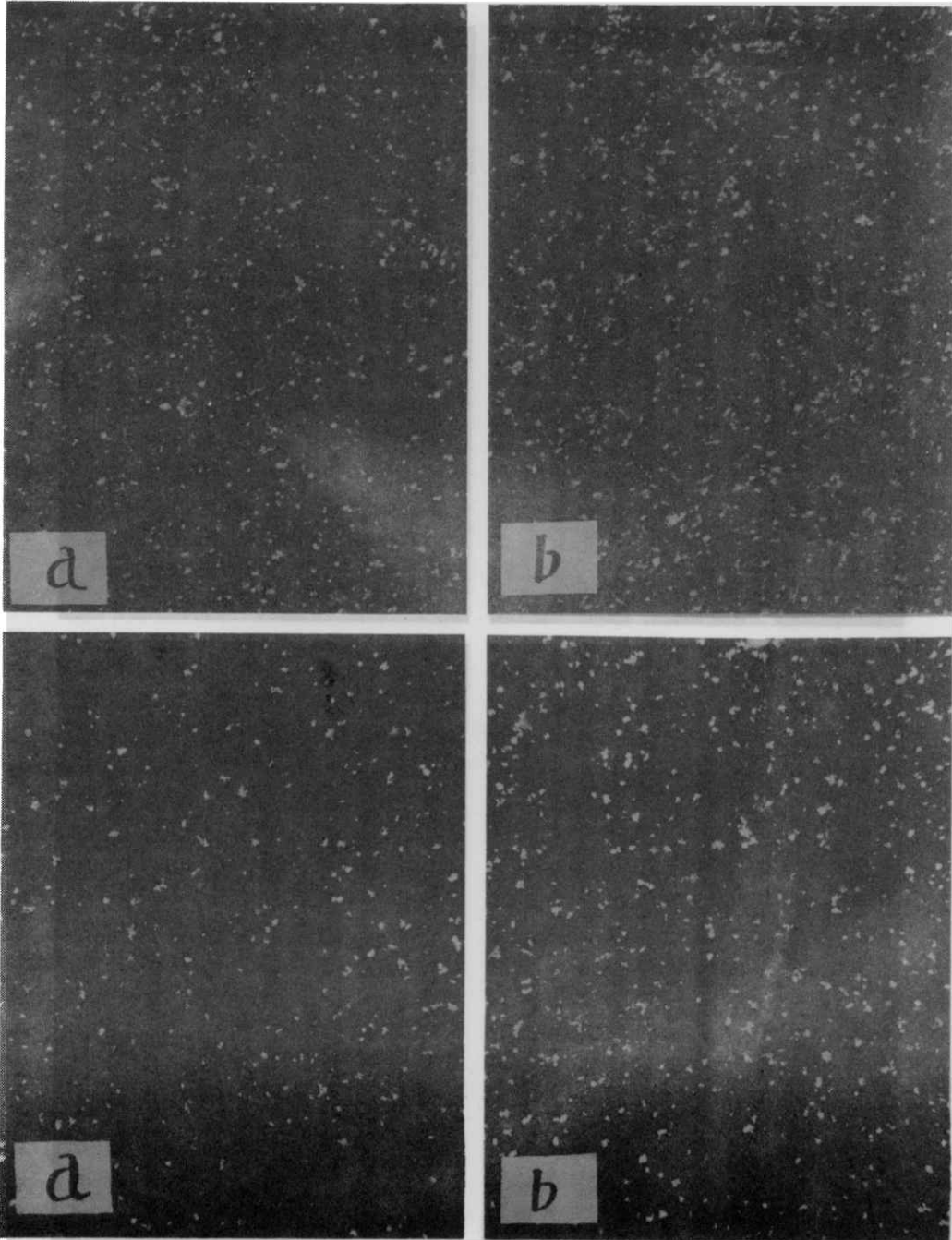


写真 8・1 (上の2枚) 微細雪片と小雪片(1)
Upper: fine and small flakes (1).

写真 8・2 (下の2枚) 微細雪片と小雪片(2)
Lower: fine and small flakes (2).

(3) 7 式の通りで強くなる。また、雪片と同じ質量のあられの玉が、その雪片と同じくらい光を乱

反射する筈がないことも明らかである。この二つの効果があられを全く異なった存在にしている。

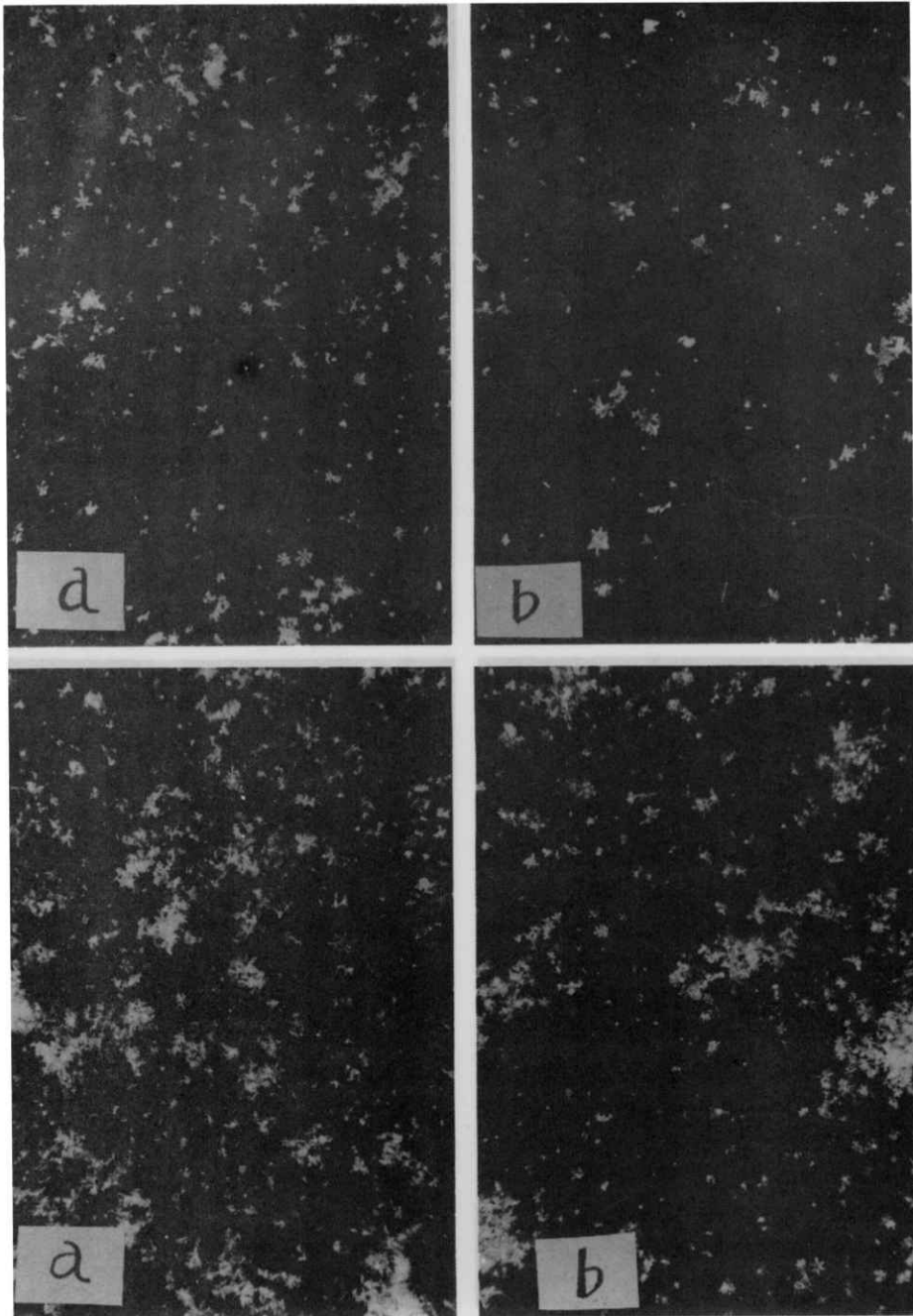


写真 8・3 (上) 中・小雪片
Upper: small and medium
flakes.

写真 8・4 (下) 大中小雪片混合
Lower: mixing with small,
medium and large flakes.

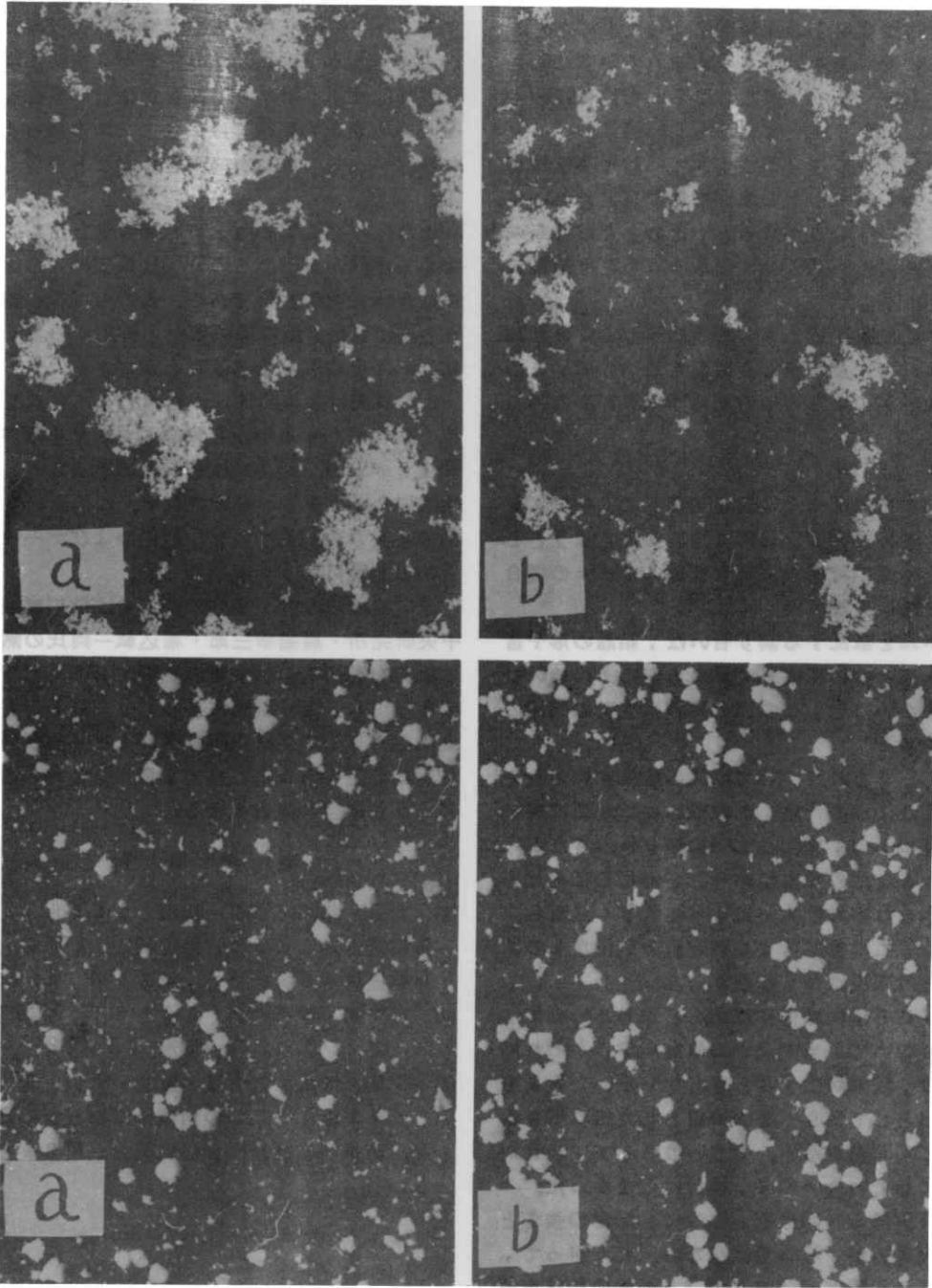


写真 8・5 (上)大雪片
Upper: large flakes.

写真 8・6 (下)あられまじり
Lower: mixing with soft hail.

また、あられは地物に衝突するとはねかえるのでこの微重量降雪計の値も信用をおけない。更に、こ

の場合風速が1時的にはあるが、 8 m / sec に達しているので、検定資料からは除外してある。

あられについて充分検討する資料はないが、雨量計型降雪強度計との比較(3)によって調べたところではこの降雪強度計から求められる降雪の強さの3倍くらいであり、大粒のあられでは更に強く6倍くらいになることもあるらしい。

また、大雪片の場合には、大ていは中小雪片がまじっているので、その値があまり目立たないが、もし大雪片のみの雪が降ると、そのときは前節の各図の下限の線から飛び出すであろうことは想像に難くない。

幸いに、大雪片ばかりの降雪は珍しく、また純粹のあられで大量に積もることもないので、この降雪強度計がでたらめの値を示す機会が少ないことになる。

9 ま と め

雪片の光を散乱する性質を利用して、空間における雪片の分布密度から降雪強度を捉えようとして、新しい型の降雪強度計を試作し、種々の場合について性能を調べた。

雪片が光を散乱する割り合いは、結晶の形や雪片の大きさの違いによって異なるが、その違いは比較的少ないので、この種の降雪強度計の実用の可能性はある。

しかし、あられについては光の散乱率の減少と落下速度の増加のため、この機械の記録値は実際の降雪量の $\frac{1}{3}$ 、稀には $\frac{1}{5}$ の値しか示さなかった。しかも、この比率はあられと雪片の混合比率およびあられの粒の大小によって大きく異なる。このため、この機械による測定値を適正なものにする補正の方法は得られなかった。

また、この機械は雨には殆んど感じないので、みぞれについても当然過小の値を示す。みぞれについては、積雪が生ずるときも生じないときもあり、降雨として扱うべきか降雪として扱うべきかについても問題がある。そういうことで、当初から問題にしていないので、検討はしなかった。

あられが降る時間は短かいので、降雪の強さとしては大きいですが、降る量は少ない。したがって、あられによる誤差は省略して、この種の器械を使い得るとも考えられる。しかし、注意して観測すると、あられまじりの雪はかなり多く、特にしゅう雨性の季節風の雪ではその機会が多いので、この種の降雪強度計の大きな欠陥となることがわかった。

降雪の強さは一定時間に地上に積もる雪の量で

表わされる。しかし、除雪が完全に行われるようになると、雪の交通障害は降雪片の視程障害の方が大きくなるかも知れない。また、道路に積もる雪は降雪ばかりでなく、飛雪がひどい場合もある。そういう現象の観測には、ここで取り扱ったような機械が一つの有力な武器となることが考えられる。

また、現在は風の強い時の降雪量を正しく観測できる機械がない。この機械は風速による影響を受けないことが長所である。この点で他の器械、たとえば雨量計型降雪強度計と併用すると、両者は互いにその欠点を補うことができる。

この研究は故福井篤氏が計画し、木村氏ほか3名と共に昭和41年から実施したのであるが、昭和42年5月、福井氏は病のため逝去され、木村氏は病のため東京へ転勤された。このため、両氏のあとを斎藤が受けつぎ、観測およびデータのまとめは斎藤ほか3名が行なった。

測定器械の設計・調整については早川電機工業中央研究所・馬場幸三郎・堀込敏一両氏の熱心なご協力を得、名古屋大学の高橋勲氏からは雪ソンドを借用し、野外観測に当っては国鉄新潟支社・丸山久一氏および村上保線区および小国保線区沼沢線路分区の方々のご協力を得た。これらの方々から感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 丸山・北川・草野・横田(1969): 降水量測定方式による降雪強度測定法の研究・防災科学技術総合研究報告, 第21号, 43-50.
- (2) 高橋勲・熊沢義郎(1966): 影写真を用いた雪ソンドの試作. 雪氷, 25, 28, -22.
- (3) 斎藤・清水・五十嵐・監物・丸山・北川(1969): 二つの新型降雪強度計の比較観測. 防災科学技術総合研究報告, 第21号, 51-54.