

降雪の強さと視程

齋藤博英

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

Visibility in Snow Storms

By

Hirohide Saito

Institute of Snow and Ice Studies, Nagaoka

Abstract

Visual ranges have been measured at the time of falling snow, and the relation between the visual ranges and the intensities of snowfall has been searched. The result is compared with those of other authors.

Though the visual range is closely related with the intensity of snowfall, the relation between these two conditions is not simple, as the visual range varies with the movement of snow flakes and the contrast of brightness between target and sky. These effects are discussed theoretically, using the light attenuation theory and an assumption of mechanism on the nervous process of human eyes in seeing some objects.

1. まえがき

積雪期の自動車道路の除雪が、良く行なわれるようになり、車のスピードは上がって来る。また、現在計画されている高速自動車道路が雪の多い地方へ伸びることも決まっている。そうになると、降雪による視界悪化が事故の原因になり、また、速度制限の主要素になることが考えられる。したがって、降雪中の視程についての明確な知識が必要となる。

降雪の強さと視程の関係を調べた研究は少ない。鈴木弥幸(1963)は高田測候所の定時観測の資料を整理して、10分間降水量で表わした降雪の強さと、視程との関係を求めた。この時間の長さは、降雪の強さが数分間にどんどん変わることを見ると、良い関係を得るには、若干無理である。そして、その関係は非常に大きな範囲に分散している。

M. Mellor (1966) はアメリカの Hanover, N.H. で 1964~1965年の冬に、詳しい観測を行なって、報告している。この観測では、① 空が完全に曇っている、② 風がほとんどない、③ 降雪の強さが、時間的にも、空間的にも定常的であるという三つの条件を満足している時を選んで行なった。①は視程の観測のため、②は降雪の強さの観測のため、③は両方の観測値が、

その観測空間内の平均値に近くなるために、それぞれ必要な条件である。このように注意して求めたデータであるから、かれの求めた降雪の強さと視程との関係は、分散が少なく、良い結果になっている。しかし、このような条件を満たすことは、日本海岸の季節風時の雪では、まれなことであり、通常の状態でない。また、強い降雪が含まれていないこともさびしい。

筆者は、1968年2月初めの季節風による強い降雪の場合に測定したので、その結果をここに報告する。

また、Mellor は視程と光の減衰率との関係が、霧や雨で一般に知られている関係と著しく異なり、視程から求めた光の減衰率は、実測して求めた減衰率の2倍になる、という結果を得た。かれはこれを観測条件の問題に帰しているが、筆者はこれを人間の目の感覚の機構から生ずる問題と考え、一つの私見を提示する。

2. 観測の方法

視程を測るための目標物は、天空を背景にした黒い物体を選ぶことになっている。また、目標の大きさは、鉛直方向の視角 0.5° 以上で、左右の幅は 5° 以下のものを選ぶことになっている。これは、目標の明るさや大きさによって、見分けえなくなる距離が異なるからである。しかし、自然の地物を選ぶ場合には、必ずしも、これらの条件を満足できない。今回は、特に目標を造ることはせず、雪害実験研究所から見える常緑樹、家および電柱を選んだ。これは気象庁の観測においても使っていることである。理論的には若干の差はあるが、視程としての実用には、むしろこの方が適当であるともみられる。

目標物の所在は図1と写真1とで示す。残念なことには、500~700 m の間に目標物がない。それで、不正確のきらいはあるが、その間は 400 m あたりの目標物の見え方で判定した。

降雪の強さは、降雪強度計の観測の検定を行なった際に使った微重量降雪計（斎藤博英ほか、1969）の2分間の降雪量を平均して、 $\text{mg}/\text{cm}^2\text{min}$ で表わすこととした。

季節風の降雪では、通常ひと降りの雪は 15~20 分のことが多い（斎藤博英・清水増治郎、1970）。そのため、降雪の強さは数分間に全く変わることも普通である。これは降雪をもたらす積乱雲（対流雲）の直径が数 km~10 数 km ぐらいであるためで、しかも、その中でまたいくつもの小さな細胞状に分かれていることが多い。したがって、空間的にも、数 100 m の範囲で降雪の強さは変化している。自分の近くに強い降雪が来ている時は視程が悪くなるのはもちろんであるが、自分の近くでは降雪が弱くても、目標物の近くで強い降雪があれば、視程は当然悪くなる。

このように、ある1点での短時間の降雪強度の測定値は、あまり信頼できる代表性を持たないが、2~3分間の平均強度は、その辺数 100 m の範囲の代表性を持つものと見てよいであろう。しかし、数分間以上の長さを取ると、その時間内での大規模な強度変化が生じてしまうことが多い。これらの理由から、今回の研究では、2分間の降雪強度と、その間の視程とを対

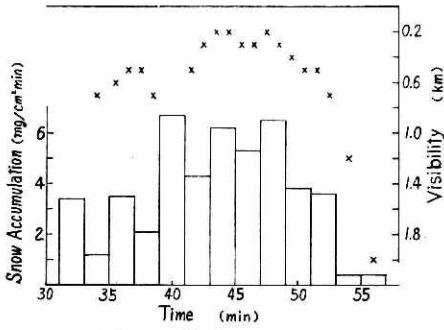


図2 1降雪の間の観測例

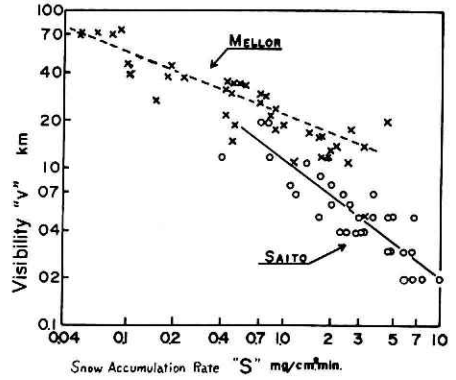


図3 長岡における降雪強度と視程の関係。Mellorの観測と比較して示す。

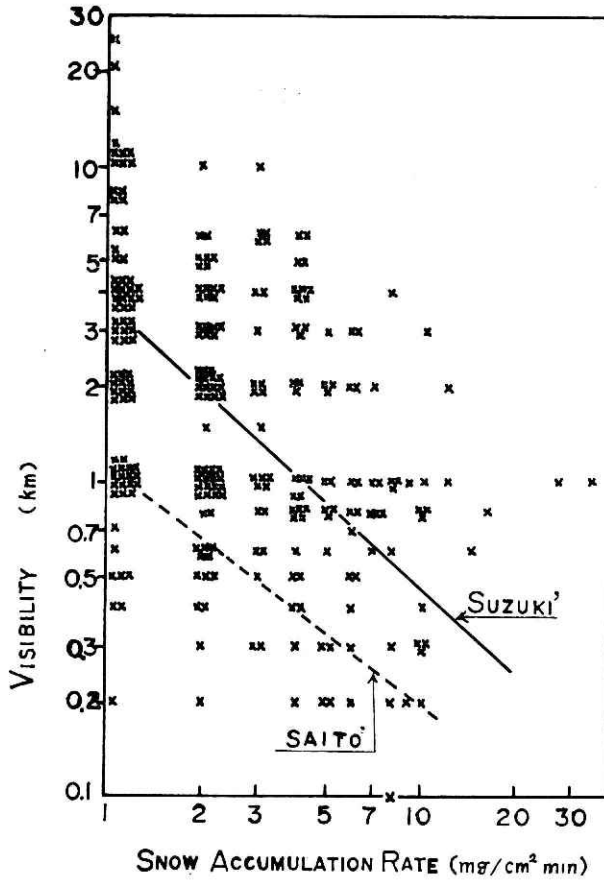


図4 高田における観測(鈴木, 1963)と今回の結果と比較して示す。

江別市で、自動車が約 500 台、延々 3km 余にわたって連なり、1 夜を明かし、翌日の昼ごろになって、かろうじて整理された。この時の原因は、1 台の自動車がふぶきで視程が悪化した所で、雪の壁に突っ込み、動きがとれなくなったことである。そのあとに続く車もまた対向車も、ともに引き返しもできぬうちに、それぞれあとからの車が詰めかけて、車の列ができてしまったわけである。

今回の測定結果を整理すると、図 3 のようになる。この図は横軸に降雪強度“S”を、縦軸に視程“V”をそれぞれ対数目盛で示してある。参考のために、Mellor の論文に示されているデータを×印で示し、今回の測定値を白丸印で示し、一つの図に入れた。これで見ると、降雪強度の強い所では、Mellor の測定と大きな違いが目立つ。

次に、鈴木弥幸(1963)の調べた高田測候所における測定値と比較すると、図 4 のようである。この図では複雑になるので、鈴木氏の図を再現し、それに、図 3 で求めた今回の直線を破線で示してある。この図でみると、今回のデータは高田のデータの分散している下方のグループを代表しているともみられる。

以上三つの結果を式で示すと、視程を V km, 降雪の強さを S mg/cm² min とし、次のように表わされる。

$$\text{Saito: } V=1.15 S^{-0.76},$$

$$\text{Mellor: } V=2.17 S^{-0.421},$$

$$\text{Suzuki: } V=3.70 S^{-0.89}.$$

最後の式は鈴木氏のデータから筆者が求めた。

このように比べてみると、降雪の強さと視程との関係は、何か他の要素によって、大きく乱されているものと考えざるをえない。しかも、図 3 および図 4 の点の分散状況から見ると、それぞれの値が、式でみるように大きな差異とも言えないようである。

4. 点が分散することについての考察

4.1 測定条件による相違

降雪時の雪片は、直進する光をさえぎるとともに、反射による散乱光を出している。今雪片による光の減衰率を σ とするとき、明るさ B_0 を持った物体を r の距離から見ると、その明るさ B_{0r} は、 σ を定数とすると、

$$B_{0r}=B_0 \exp\left(-\int_0^r \sigma dr\right)=B_0 \exp(-\sigma r) \quad (4.1)$$

と表わされる。

雪片による散乱光の明るさを、距離 r と $r+dr$ の間にある雪片から来るものを $B_s dr$ とすると、それが目に到達する時には、 r の距離を通るので、その明るさ $B_s dr$ は

$$B_s dr=B_s \exp(-\sigma r) dr$$

となる。これが大気中のどの部分からも来るので、実際に目に到達する光の量は

$$\int_0^r B_{sr} dr = \frac{1}{\sigma} B_s \{1 - \exp(-\sigma r)\} \quad (4.2)$$

となる。

また空の明るさは、 $r \rightarrow \infty$ まで雪片が均等に分布しているものと仮定すると、

$$\int_0^{\infty} B_{sr} dr = B_s / \sigma \quad (4.3)$$

である。

いま距離 r にある物体を見ると、背景の空の明るさと物体の明るさの明暗対照は (4.1)、(4.2)、(4.3) から、

$$\frac{\text{空の明るさ} - \text{物体からの明るさ}}{\text{空の明るさ}} = \left(1 - \frac{\sigma B_0}{B_s}\right) \exp(-\sigma r) \quad (4.5)$$

となる。

人間の目が識別できなくなる明暗対照の値を ϵ とすると、視程 V の時は、距離 V km のとき、見ようとする物体の明るさと背景の空の明るさとの明暗対照の値が ϵ であるという意味になる。すなわち、その時には視程 V と光の減衰率 σ との関係は

$$\left(1 - \frac{\sigma B_0}{B_s}\right) \exp(-\sigma V) = \epsilon \quad (4.6)$$

となる。物体が完全に黒いものであれば、 $B_0 = 0$ であるから、その時は

$$\sigma V = -\ln \epsilon \quad (4.7)$$

であり、通常 $\epsilon = 0.02$ ぐらいとされている。

さて、実際には、黒い物体として選んだものは必ずしも充分黒くはない。今回選んだ目標も常緑樹である松と杉が主体で、それに家も含んでいる。これらは降雪がその上に積もると、黒い面積が小さくなり、目標としての充分の機能を維持できなくなる。高田測候所の観測では、周囲に目標になる物が多いので救われているのかともみられる。Mellor の場合は丘の上の樹林で、今回の目標と似ているのではないかと思われる。

次に空の明るさ B_s は、雲の厚さや太陽高度・方向によって、かなりの差がある。したがって、(4.7)式の条件を充たさないときは、(4.6)式によって、 B_0/B_s できくことになる。たとえば、対流型の厚い雲と温暖前面での比較的層状の雲では、前者の方が B_s が小さく、 V が小さくなることが考えられる。長岡の今回の測定が、Hanover の Mellor の測定に比べて、同じ降雪の強さに対して、視程が小さく求められたのは、こんな影響かとも考えられる。

4.2 雪片が動くための影響

霧などでは粒子の動きは見え、明るさは統計的量として取り扱ってもよいが、雪の場合には、一片一片が相当の距離まで白く尾を引く状態で認められる。これは人間の目の残像のためである。これについては、前記の鈴木弥幸 (1963) は影響がないとしたが、それは、人間の目

が光の刺激を受けたとき、それを蓄積する速さと減衰させる速さとが等しいと考えたためである。しかし、これが等しいという確実な根拠はないようである。

今、1個の雪片が x 方向に u cm/sec で動いているときについて考える。問題を簡単にするため、雪片の大きさは x 方向に D cm, y 方向には 1 cm とし、 x 方向の一次元だけで取り扱い、背景の明るさは考えないことにする。この雪片の明るさを B_f とし、光の刺激が視神経に蓄積される率を μ_s とする。この雪片がある点を時間 $t=0$ から $t=D/u$ の間で通過するとき、目に感ずる明るさを B' とすると、 $t=0\sim D/u$ で、

$$B' = B_f \{1 - \exp(-\mu_s t)\} \quad (4.8)$$

となる。そして、 $t > D/u$ では、その点から光が来ないので、視神経に蓄積された刺激は時間とともに減衰する。この減衰率を μ_a とすると、 $t > D/u$ では、

$$B' = B_f \{1 - \exp(-\mu_s D/u)\} \exp\{-\mu_a(t - D/u)\} \quad (4.9)$$

と表わされる。

1点についてのこのような刺激の強さの時間変化は、雪片の動く方向へ向かって、雪片と同じ速さで伝搬するので、それを時空間分布で表わすと、時刻 τ には、

$0 < x < (u\tau - D)$ の範囲で

$$B' = B_f \{1 - \exp(-\mu_s D/u)\} \exp\{-\mu_a(\tau - D/u - x/u)\}. \quad (4.10)$$

また、 $(u\tau - D) < x < u\tau$ の範囲で

$$B' = B_f \{1 - \exp\{-\mu_s(\tau - x/u)\}\} \quad (4.11)$$

となっている。

この視神経の感じている刺激の強さを、 $x=0$ から $u\tau$ まで積分した値 B_i が、時刻 τ で目に感じている全刺激である。それは、

$$B_i = B_f \left[D + u \left(\frac{1}{\mu_a} - \frac{1}{\mu_s} \right) \{1 - \exp(-\mu_s D/u)\} - \frac{u}{\mu_a} \{1 - \exp(-\mu_s D/u)\} \exp\{-\mu_a(\tau - D/u)\} \right] \quad (4.12)$$

となる。この式では、 τ が充分大きければ、右辺の最後の項は小さくなり、除外してもよい。したがって、

$$B_i \doteq \left[D + u \left(\frac{1}{\mu_a} - \frac{1}{\mu_s} \right) \{1 - \exp(-\mu_s D/u)\} \right] B_f \quad (4.13)$$

としてよい。この式において次のことが明らかである。

$$u=0 \text{ (雪片静止) ならば, } B_i = B_f D,$$

$$\mu_s = \mu_a \text{ ならば, } B_i = B_f D.$$

すなわち、どちらでも、動いている影響はないことになる。

しかし、 $\mu_s \neq \mu_a$ であるときは (4.13) の右辺の第2項がきいて来る。今、静止している雪片より動いている雪片の方がより多くの刺激量を目に蓄積する可能性を調べるため、後者の場合

を前者の場合で割ると、

$$\frac{B_i}{B_T D} = 1 + \frac{u}{D} \left(\frac{1}{\mu_a} - \frac{1}{\mu_s} \right) \{1 - \exp(-\mu_s D/u)\} \quad (4.14)$$

となる。これをもっとわかりやすい形にするため、 $\mu_s = \alpha \mu_a$ とおき、 $\mu_s D/u = \beta$ とおくと、(4.14)式は

$$\frac{B_i}{B_T D} = 1 + (\alpha - 1) \left(1 - \frac{\beta}{2!} + \frac{\beta^2}{3!} - \frac{\beta^3}{4!} + \dots \right) \quad (4.15)$$

となる。 β は小さい値であるから、今の場合には上式の最後の () 内は初めの1項か2項を考慮だけでよい。

筆者は α の値についての知識がないので、今は詳細に論ずることができないが、一般に光を感じる速度は残像の減衰の速度より大きいと考えられているので、 $\alpha > 1$ であり、静止している物体に比べて、動いている物体の方が刺激蓄積量が大きくなるものとみられる。

もちろん、明るい背景の中を黒い物体が動くときは、この反対の説明が可能であり、動くために、目に感ずる刺激の違いが少なくなり、視程の妨害も少なくなる。

このように雪片が動いていることは、人間の目に刺激蓄積総量の増大をもたらすほか、感情的にも、動くものに目をうばわれやすいこともあざかり、雪片の運動はより多く視程の悪化に影響しているとみられる。

5. む す び

降雪中の視程を測り、降雪の強さと視程との関係を調べ、他の条件下のそれと比較した。

降雪中の視程は時間的にも空間的にも大きく変わる。

降雪中の視程は降雪の強さと密接な関係を持つが、他の種々の要素がきくので、その時の条件により大きな違いを生ずる。この点について、比較的大きな効果を持つ要素のきき方について、分析した。

参 考 文 献

- 1) 鈴木弥幸 (1963): 視程と降雪(雪)強度との関係. 気象庁研究時報, 15, No. 7, 483—487.
- 2) Mellor, Malcolm (1966): Light scattering and particle aggregation in snow-storms. *J. Glaciol.*, 6, No. 44, 237—248.
- 3) 斎藤博英ほか (1969): 赤外線を利用した降雪強度計の研究. 防災科学技術総合研究報告, 第21号, 21—42.
- 4) 斎藤博英・清水増治郎 (1971): 長岡における降雪の日変化. 国立防災科学技術センター研究報告, 第5号, 25—31.

(1969年12月10日原稿受理)