

大気中の雪粒子と視程

竹 内 政 夫*

Visual Range in Airborne Snow Particles

Masao TAKEUCHI*

Abstract

Snow particles are large enough comparing with the wavelength of light and can be seen by eyes from a limited distance. At this point snow is different from invisible particles such as haze and fog of which radii are within several wavelengths. The mechanisms of the extinction of light by particles that float in the air are also different depending on their sizes. Rayleigh electromagnetic theory applies to the particles of radius very much less than wavelength and Mie theory applies to the particles of between about 0.1 and 10 times of the wavelength, however geometrical optics is applied to most of snow particles which are very large compared with the wavelength of light.

The visible snow particles leave the trail of their afterimages. It is suggested observationally and theoretically that the visible sizes and the afterimages of snow particles work on visual range shortening in snow conditions.

Poor visibility in blowing snow, which causes road closures and traffic accidents are major concerns for the maintenance of safety road traffic. A few characteristics of visibility on road are introduced.

I. はじめに

降雪や強風で積雪表面から雪粒子が目の高さに舞い上がると、視程が悪くなる。一般には視界という言葉が使われているが、視界は左右の広がりという意味し、視程は奥行きすなわち物体を視認できる距離のことである。強い降雪でも視程が200m以下になることはめったにないが、降雪に強風とともに地吹雪が加わると、吹きつける雪で歩行者は、まともには目も口も開けていられず進むこともできなくなる。最悪の場合は、雪一色のホワイトアウトとも呼ばれる状態になり、車も人も進退きわまる。道路交通が発達し、除雪や防雪施設が整備された昨今の道路では、吹きだまりによる障害は大きな問題でなくなり、替わって視程障害が道路の通行止めや交通事故の誘因となっている。

視程の研究は、Middleton (1952) によって集大成されているが、その中で見られるように従来は霧やダストなどのように、極微小なものから光の波長の数倍程度の大きさの空間浮遊物が対象とされてきた。そして視程は、浮遊物による光の減衰量に反比例というかたちで与えられてきた。浮遊物粒子の大きさが、光の波長の十分の一程度までは Rayleigh 散乱、数倍までは Mie 散乱の形で光が減衰されることが知られている。しかし、雪粒子は目に見える大きさのものも含まれるという特徴があり、散乱によって光が大気中において均等に減衰しそれに伴って視程が低下するという、従来の光の一樣減衰の考えだけでは説明できない。鎌田ほか (1971) は、吹雪時における飛雪量および光の減衰量と視程の観測から、また斎藤 (1971) は理論的にそれぞれ雪粒子の残像効果の視程に及ぼす影響を示唆した。また竹内・福沢 (1976) は、光の減衰は雪粒子の形状や大きさの影響が大きく、視程も雪粒子の形状、大きさや残像など人間の心

* 北海道開発局開発土木研究所

* Civil Engineering Research Institute, Hokkaido Development Bureau

理的なものも関与することを示した。しかし、このような雪粒子と視程に関する基礎的な研究は少なく、むしろ道路交通の流れと安全の確保を目的とした道路気象からの研究が多い。視程計も道路気象調査の必要から開発されている。例えば竹内・鎌田 (1972) は透過率計をベースにした視程計を、Schmidt (1977) は雪粒子の大きさ数を測るスノーパチクルカウンターを視程計とした。視程計の交通管理への応用については Tabler (1977), 竹内 (1986) などがある。また、視程障害対策については竹内 (1980), 石本ほか (1980) のほかに『新編防雪ハンドブック』(日本建設機械化協会, 1989), 『道路防雪便覧』(日本道路協会, 1990) などがある。

本稿では、雪粒子による視程および道路における視程の特徴について述べる。

II. 浮遊粒子の発生

視程に影響する雪粒子は降雪と地吹雪によるものである。地吹雪の飛雪粒子の運動形態は、雪表面十数 cm 以下の高さを跳ぶ転動と跳躍、および高く舞上がる浮遊とがある。転動と跳躍だけの地吹雪は低い地吹雪、風が強くなって浮遊粒子が混じったのが高い地吹雪という。この高い地吹雪に降雪が加わったものが、いわゆる吹雪である。視程に直接関わるのは高い地吹雪である。風が強くなると、跳躍粒子のなかから乱流の渦に巻き込まれ浮遊粒子に転ずるものがあらわれる。これが視程を悪くする浮遊粒子の、そして高い地吹雪の発生である。浮遊粒子の発生は乱流拡散現象によるものである。乱流拡散による浮遊物の垂直分布に関する式は (1) で与えられている (例えば、塩谷, 1953)。

$$-\frac{\partial}{\partial Z} \left(\varepsilon \frac{\partial C}{\partial Z} \right) + w_0 \frac{\partial C}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

Z : 雪面からの高さ, ε : 渦動拡散係数, C : 飛雪濃度, w_0 : 雪の落下速度

$$\varepsilon = \frac{\tau}{\rho} \frac{du}{dZ} = \frac{k u_* Z}{\varphi}$$

k : カルマン定数, u_* : 摩擦速度

中立大気では $\varphi = 1$

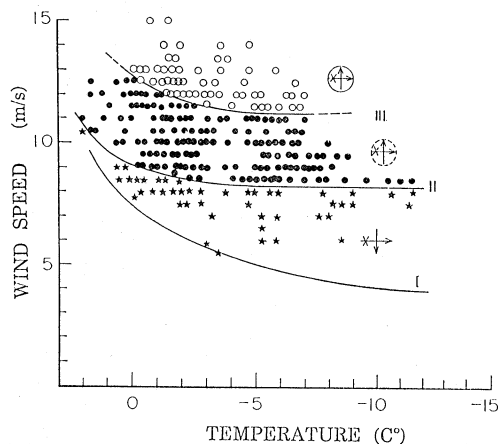


図 1 吹雪発生臨界風速 (降雪時)

I の曲線をこえると低い地吹雪が発生し、II 以上で断続的な高い地吹雪が、III 以上では連続した高い地吹雪になる。

Fig. 1 Dynamic threshold wind speed for saltation and suspension of snow particles related to temperature

Curve I shows saltation threshold, II intermittent threshold of suspension and III that of continuous suspension.

これらの条件で式 (1) を解くと

$$\frac{C}{C_h} = \left(\frac{Z_h}{Z} \right)^{\frac{w_0}{k u_*}} \quad (2)$$

Z_h : 浮遊粒子の発生する高さ, C_h : 高さ Z_h における飛雪濃度

これは、飛雪粒子は落下速度が小さく、雪面粗度が大きく、大気が不安定なほど、また風速が大きいほど、浮遊しやすく浮遊粒子の量も多くなることを示している。大気の安定度と浮遊粒子の発生については、研究されていないようであるが、不安定の時には小さい竜巻き状のものも見られる。また、筆者はロッキー山脈の東斜面で、安定したカタバ風に加えて乾燥大気のため飛雪が昇華し、非常に安定した状態の地吹雪を観測した際に、風速 15m/s になっても浮遊粒子が発生しなかったのを見たことがある。

広い平坦な雪原で、安定度がほぼ中立な降雪時において観測した浮遊粒子の発生条件を、平均風速と気温との関係で示したのが図 1 である (竹内ほか, 1986)。観測時間 5 分の間で定常的に浮遊

粒子が見られたのが図の曲線Ⅲで、曲線Ⅱは断続的な浮遊の発生限界を、曲線Ⅰは跳躍の発生限界を示す。0°C 前後を除くと、風速が 8.5m/s 以上になると視程が悪くなる。特に、風速 11m/s を超え同時に強い降雪があると、通常の道路交通の維持が困難な猛吹雪になる。降雪の場合、視程が目の高さによって異なることはないが、吹雪や地吹雪では飛雪濃度が(2)式に示されるように高さの対数分布をしているため、視程は地表に近づくに従い急激に悪くなる。

地表十数 cm の高さを跳ぶ跳躍粒子も、切土部や路側に堆積した高い雪堤がある等地形、植生の環境条件や道路構造によって、風の剝離や発生した渦に巻き込まれ浮遊粒子に転じて視程を悪くすることがある。

III. 雪粒子による視程の特徴

1) 雪による光の減衰

視程は物体を識別できる最大距離のことであるが、気象学では物体の大きさ(視角で $0.5^\circ \sim 5^\circ$)、色(黒)が定められている。物体が見えなくなるのは、大気に含まれる物質や霧、雪などの空間浮遊物によって物体からの光が減衰され、目が刺激されなくなるのと、光は十分届いているが、物体の明るさと周囲の明るさを見分けることができないのがある。一般に物が見えなくなるのは、物体の大きさ、色の他に、形、発光の強さ、光の継続の仕方などの物体自身の要素と、湿度など大気の状態、空間浮遊物の量や形状による光の散乱、吸収、反射の程度、人間の目がどの程度まで刺激や刺激の違いを感じるとかという心理学上の問題も関係している。

黒い物体を見ながら遠ざかると、その物体の見かけの明るさが増えて白っぽくなり、ついには背景の明るさと見分けがつかなくなる。これは、物体と目の間にある大気物質や空間浮遊物によって太陽光などが散乱、反射されて目に達するからで、実際には空間の明るさを見ていることになる。空間の明るさは物体と目の間が長いほど、また空間浮遊物が多いほど明るくなる。ある空間の微小部分の明るさは光の消散係数に比例する。すなわち、

視程は消散係数に反比例し、次のように表わされる(Koshmieder, 1924)。

$$V = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\epsilon} \quad (3)$$

V: 視程, σ : 光の消散係数, ϵ : 人間の目の明暗対照の臨界値

光の消散係数は、一般的には空間浮遊物による光の散乱、反射、吸収によって決まるものである。散乱は光の回折干涉による現象で、空間浮遊物が光の波長に比べて十分小さい場合には Rayleigh 散乱になる。波長と同程度ならば Mie 散乱になるが、Brillouin (1949) によると可視光では粒子の直径が 20μ まで Mie 散乱の領域で、 40μ 以上になると屈折反射の幾何光学で取り扱われ、 $20 \sim 40\mu$ の間はこの中間領域である。直径が 40μ 以上になると光は反射(遮蔽)によって減衰し、一部は屈折透過する。また、氷による光の吸収係数は 10/m のオーダーであることから、雪粒子の場合吸収は反射に比べて無視できる。飛雪粒子の大きさは、空中において昇華するので、無限に小さいものも含まれるが、量的には大部分 40μ 以上である(例えば、Budd, 1966)。これらのことから、雪粒子の場合、光は反射によって減衰すると考えられる。そして、光の減衰は雪粒子の断面積に比例し、消散係数は次式で表わされる。

$$\sigma = \sum_{i=1}^n N_i \cdot R_i \cdot \pi r_i^2 \quad (4)$$

N_i : 半径 r_i の粒子の個数, R_i : 粒子の反射面面積係数

ここで R_i は、Mie 散乱における粒子の散乱面積係数に相当するもので、光の一部は透過することから 1 より小さい値となる。式(4)は、光の消散係数は雪の空間濃度に比例し、粒子の半径に反比例することを示している(竹内, 1980)。雪粒子の反射率の測定例は多くないが、O'Brien (1970) は降雪による雪結晶と大きさおよび光の減衰の測定から、乾いた六華の結晶で 0.352、粉雪および角板と角柱の集合では 0.166 を得ている。

Mie 散乱では粒子が大きくなると 2 に近づくが、1 より小さい値が得られていることから、光は雪の反射によって減衰されていることがわかる。

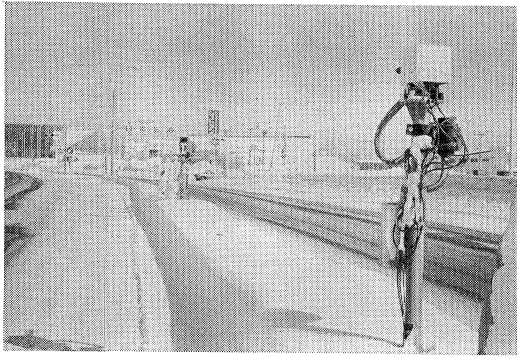


写真 1 透過型視程計
Photo 1 Transmissometer type of visibility meter

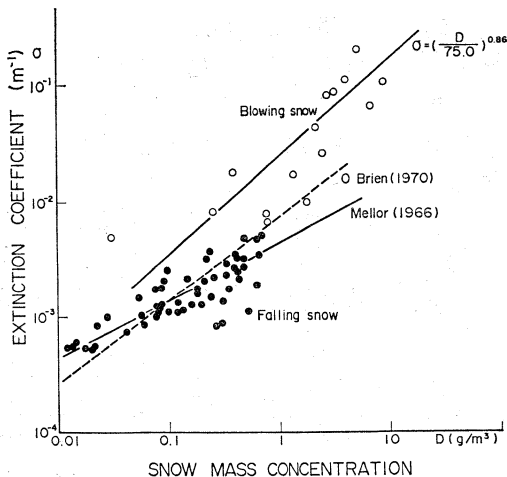


図 2 雪の空間濃度と光の消散係数
Fig. 2 Observed extinction coefficient of light vs snow mass concentration in blowing snow and falling snow

2) 光の減衰と視程

式 (4) によって、雪粒子の数と粒径分布から光の消散係数を求めるのは、特に吹雪など測定そのものが難しいだけでなく、反射率が結晶によって大きな違いがあるため、現実的でない。そのため以下で示すように、平行光線を投光し一定距離はなれた受光量との比から透過率を測り、光の消散係数を求めている (写真 1)。

明るさ B の平行光線が、距離 dL を通過した時の光の減衰量 dB は B に比例し、次式で表わされる (Bouguer-Lambert の法則)。

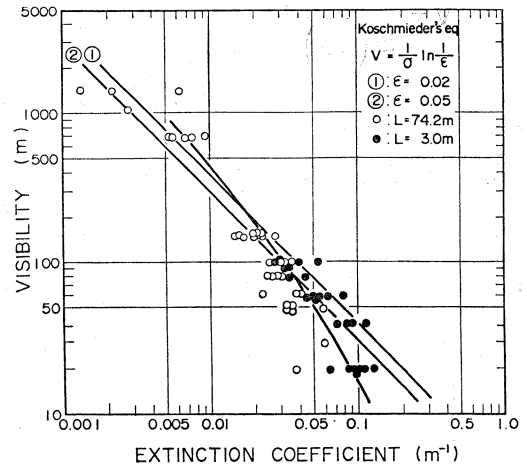


図 3 視程と光の消散係数
Fig. 3 Visibility vs extinction coefficient

$$dB = -\sigma dL$$

$$B = B_0 e^{-\sigma L} \quad (5)$$

ここで B は投光の明るさで、 $B/B_0 = T$ は光の透過率であるから、光の消散係数は次式で与えられる。

$$\sigma = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{T} \quad (6)$$

ここで L は光の通過距離で、測定器の投受光間隔である。

吹雪時の光の消散係数と雪の空間濃度の測定結果を、降雪の例と比較したものが図 2 である。同じ空間濃度でも吹雪のほうが光の消散係数が高いが、これは吹雪での飛雪は雪面での衝突などによって、破壊されたりまるめられ、降雪粒子より小さくなっているためと考えられる。

また吹雪時に行なった、光の消散係数と視程の目視観測の結果を図 3 に示す。図からわかるように、視程と光の消散係数の関係は視程が 100m 以下になると、Koschmieder の式で予想したものより、視程観測値は低いほうにずれている。これは雪の場合の視程の特徴でもあるが、このことについては後で述べる。

Koschmieder の式と Bouguer-Lambert の法則より導かれた (6) 式とから、視程と光の透過率との関係は次式で与えられる。

$$V = \frac{L}{\ln\left(\frac{1}{T}\right)} \ln \frac{1}{\varepsilon} \quad (7)$$

これが透過率から視程を求める場合の透過型視程計の基本式である (竹内, 1980)。

3) 雪粒子の空間濃度と視程

雪による光の減衰は雪の空間濃度に比例するので、降雪量や飛雪量と視程の関係が観測されてきた。そのいくつかについてまとめたのが、図4で

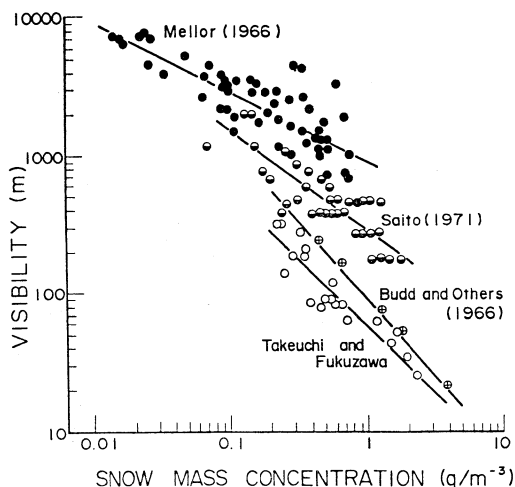


図4 雪の空間濃度と視程

Fig. 4 Visibility vs snow mass concentration
The data of Mellor (1966), Saito (1971), Budd and others (1966) and Takeuchi and Fukuzawa (1976) were obtained respectively in conditions of windless falling snow, falling snow in seasonal wind, Antarctic blizzard, and blowing snow.

ある。これらはそれぞれ、Mellor (1966) は無風時の降雪、斎藤 (1971) は季節風による降雪、Budd and Others (1966) は南極の地吹雪、竹内・福沢 (1976) は吹雪において観測したものである。視程と雪の空間濃度は、観測された現象一つ一つについて見ると、それぞれよい反比例の関係になっている。しかし、例えば風の無い時には視程が1,000m ある空間濃度でも、吹雪時には80mしかない結果になっており、現象による違いは著しいものがある。この違いは、飛雪が降雪と比べて小さいために、同じ空間濃度でも光の消散係数が降雪より大きくなるということを考慮しても、大きすぎる。

4) 雪による視程と残像の影響

雪は目の近くでは粒子の一個一個を識別でき、残像現象のためそれが尾を引いて目に映る。これは、古くから知られている光覚の漸増と漸消という現象があるからで、目に光の刺激が作用してから光覚が起るまでには、若干の時間を要しその後光覚は盛んになる。刺激が去った後も光覚はすぐには消失せず、若干時間の後次第に消える。このように動いている雪が尾を引いて見えるのは、光の刺激の蓄積とその減衰で説明される。明るさが0とみなせる黒い視程板を背景に、 u の速度で、明るさ B_f で動く方向に D の大きさをもつ一つの雪について考えてみる。図5のように、この雪がある点 $t=D/u$ の間を通過する時、目に感ずる明るさを B' とすると、刺激の蓄積量 dB は B と B'

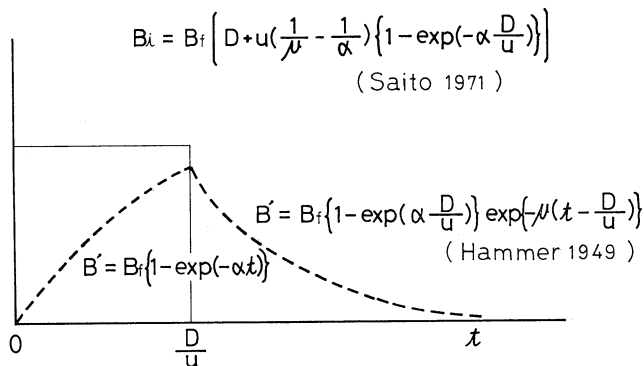


図5 刺激の蓄積と減衰

Fig. 5 Accumulation and extinction of eyesight stimulation

の差に比例する。そこで、 α を刺激の蓄積量とすると、 B' は次式で表わされる。

$$B' = B_i \{1 - \exp(\alpha t)\} \quad (8)$$

$t = D/u$ の位置で雪からの光が消えるとなると、 $t > D/u$ の範囲では蓄積された刺激は時間とともに減衰する。実験心理学で知られているように、減衰率を μ とすると、 B' は次式で与えられる (例えば、Hammer, 1949)。

$$B' = \left\{1 - \exp\left(\alpha \frac{D}{u}\right)\right\} \cdot \exp\left\{1 - \mu\left(t - \frac{D}{u}\right)\right\} \quad (9)$$

光を感じてから蓄積された刺激が消えるまでの時間で積分した値 B を、目が感ずる全刺激とすると、次式が導かれる (斎藤, 1971)。

$$B_i = B_f \left[\left\{ D + u \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\alpha} \right) \right\} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\alpha \frac{D}{u}\right) \right\} \right] \quad (10)$$

B_i は、刺激の強さなどの条件によって種々の値をもつが、一般に $\alpha > \mu$ と考えられるので、雪のように白い物は黒い背景にした時は動いているほうが、また速度が大きいほど、刺激が大きいことになる。このように空間浮遊物が雪の場合は、残像によっても視程が低下する。

5) 雪の移動量と視程

間接的であるが残像の影響は、目の高さにおける雪の移動量と視程の関係に表われるであろう。そこで、図4の視程と雪の空間濃度の関係を、目の高さの雪の移動量に改めて表わしたのが図6である。ここで雪の移動量は、降雪については雪の落下速度と目の高さの風速から、ベクトル合成した雪の移動速度と雪の空間濃度との積として、また吹雪、地吹雪は飛雪濃度と風速との積で表わした。

視程を雪の移動量で示すと、雪の空間濃度の場合のような現象による違いはなくなり、視程10mから4,000mの広い範囲にわたって一つの曲線で表わされる。

このように、視程を表わすのに雪の空間濃度よりも移動量のほうがよりよいということも、目に見える雪粒子の残像の影響を示したものと考えら

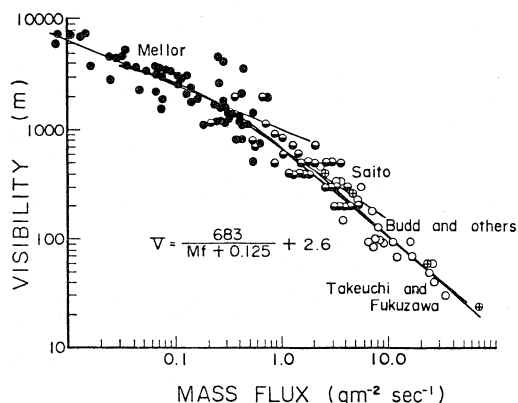


図6 視程と雪の移動量
Fig. 6 Visibility vs mass flux of snow

れる。また、図6で見るように、全体として視程が低くなるにつれ、雪の移動量に対する視程の低下率 (曲線の勾配) が大きくなっている。これは、人の目が雪を認識し得る距離は雪粒子の大きさによるがそれには限度があり、その距離の視程との比は視程が短いほど大きい。このことと雪が目に見える大きさをもつことで、視程が低いほど低下率が大きいことや、光の消散係数と視程の目視観測によって、図3の視程が100m以下で Koschmieder はの式で予想されるより低いほうにずれることが説明できる。

このように、雪粒子が一般の浮遊物と違って目に見える大きさのため、同じ形状の雪でも目の近くの雪と遠くにあって識別されないものでは、視程に与える影響は異なり、視程は光のよう減衰だけでは説明できない。例えば、雪の夜ヘッドライトに反射し輝く近くの雪のため前方が全く見えない状態の時に、ライトを消すと遠くまでも見透せることがある。これなども、強く輝く雪に目を奪われることもあるが、目に見える雪が輝くことによってその影響が拡大されることと、消灯すると暗いために近くの雪も識別できなくなり、光のよう減衰に近い状態になるためである。

IV. 道路交通と視程

視程が悪くなると種々の障害が発生する、このことを視程障害と呼んでいる (写真2)。視程障害に最も影響されるのが、ドライバー一人一人の



写真 2 道路における視程障害
Photo 2 Poor visibility on highway

視覚によって情報を得、それによって運転操作している道路交通であろう。軌道もなく位置選択の幅も広く、車の性能も異なり様々な技量をもつドライバーが混入している道路では、視程障害による視覚情報の喪失は致命的でさえある。交通と視程についての研究は多くないが、竹内（1980）は国道 230 号中山峠において視程と交通状況を観測して、視程が悪くなっても 100m 以上あれば車の速度が 1～2 割程度低下するものの交通の流れは維持され、50m 以下では低速運転や渋滞し 30m 以下になると通行不能になるという結果を得ている。吹雪による通行不能のほかに交通事故の発生も、その多くは視程障害に起因している。ここでは、雪粒子、特に吹雪・地吹雪時の道路における視程の特徴のいくつかについて、簡単に述べる。

1) 潜在視程と顕在視程

一般に視程観測では黒い視程板を視標にしているが、雪を被った道路では雪と見分けることのできるような物（目標物）が常にあるとは限らない。視標になり得る適当な物体のない道路では、路側にできる雪堤などによって道路の端や幅を判断するが、視程が悪くなると白い物は降雪や飛雪によって見分けにくくなる。最悪の状態がホワイトアウトである。このような白一色の状態ではホワイトアウトになるような場合でも、黒や黄色など雪と区別できる物体があると、意外に遠く離れていても見えることがある。気象学でいう視程は視標がほぼ連続している時の観測値であるが、そのような目標物の得られない道路では、視標になり得

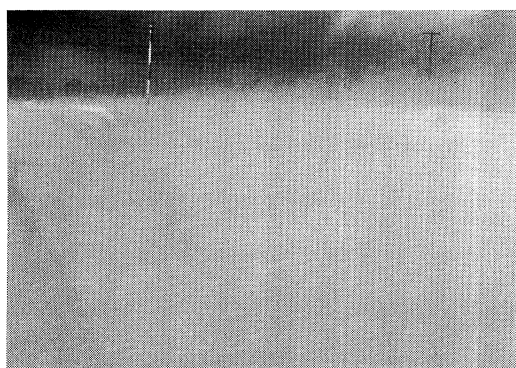


写真 3 路側の雪堤からの飛雪がもたらした視程障害

Photo 3 Poor visibility caused by drifting snow from roadside snow bank

る物の有無やその状態によって、全く同じ気象条件のもとでもドライバーの見る視程は非常に違ってくる。このように雪道では、本当の視程はポテンシャルとして潜在していることが多い。その意味で、実際に感じている視程は顕在視程といえよう。潜在視程の顕在化は、防雪とともに冬の道路交通の安全と流れの確保に極めて重要であり、視線誘導施設もその効果が大きい。そのため道路林や自発光式のものも含め、各種のスノーポールが設けられている。

2) 目の高さによる視程の違い

視程を悪くする浮遊雪粒子の濃度や飛雪流量は、約 10 cm の跳躍粒子の層（Z）から上では、高さと両対数で直線になる高さ分布をしている（竹内，1981）。また、10cm 以下の跳躍層では対数で表わした飛雪流量が、雪表面からの高さと片対数で直線になる（竹内ほか，1975）。すなわち、飛雪流量は雪表面に近づくに従って急増し、視程も急速に悪くなる。乗用車が視程障害で苦しんでいる時でも、運転席の高いトラックが楽に走行できることがあるのはこのためである。

路側に高い雪堤があり飛雪がそれを越えて吹き込むと、ドライバーの目は相対的に雪表面に近づくのと同じことになり視程を悪くする。特に、雪堤が目の高さを越えるようになると、写真 3 のように通行が困難な視程障害になる。

3) 視程の変動

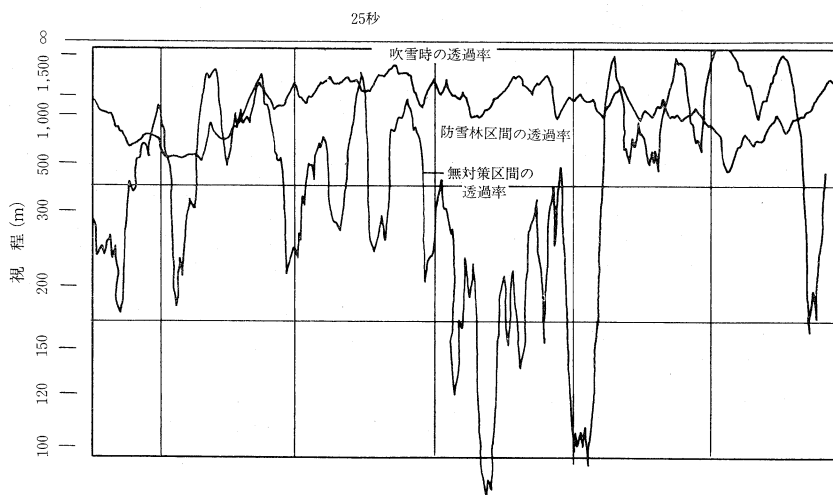


図 7 視程の変動
Fig. 7 Fluctuation of visibility in blowing snow

霧や降雪時にも視程は変化するが、その変動は吹雪や地吹雪に比べるとゆっくりしたものである。飛雪量は風速、降雪量の変化に連動するため視程の変動も激しい。石本ほか (1980) が視程計によって測定した視程の変動例を図 7 に示す。道路上においては、道路の環境条件——例えば植生、地形、土地利用の実態——や道路構造によっても飛雪量や視程は異なってくる (竹内, 1980)。また、車の走行によって巻き上がる飛雪も短時間であるが視程を悪くする。このため、車が道路環境や道路構造の不連続部を通過したり、車が擦れ違う時にも視程が急変する (福沢ほか, 1990)。このような視程の変動は交通事故の誘因となっている。冬期交通の発達、特に高速化に伴って最近多くなっている数十台の車を巻き込んだ多重衝突事故もその例である。車が通行できなくなるような視程障害と異なり、視程の変動による事故は気象条件がそれほど悪くない高速走行時に、短時間の視程悪化によっても発生する。そして、どこでも起こり得るので発生箇所も特定できず、その対策を難しくしている。

V. あとがき

大気中に浮かぶ雪と視程の関係について、これまでの研究の中から概要を紹介した。ここで紹介

したのは、気象や雪氷学の分野の研究ばかりである。そのため、例えば視程にたいする雪粒子の大きさや、残像の影響も定性的に示唆するにとどまっている。視程は人間の感覚の問題であり、これらを定量的なものにするには、実験心理学の分野からのアプローチも必要である。

雪による視程障害は、寒冷地の空港においても問題になっているが、人間の視覚情報にたよることの多い道路交通で最も被害が大きいの。道路交通の発達と高速化によって、大型多重衝突事故の多発など、この傾向はますます増大している。後段において、道路における視程の特徴についてふれたのはそのためである。ここでは、現在活発に行なわれている視程障害対策の研究については述べなかったが、これも雪氷学、気象学、交通工学等いくつかの分野に関連した問題である。

文 献

- Brillouin, L. (1949): The scattering cross section of spheres for electromagnetic waves. *Jour. Appl. Phys.*, **20**, 1111-1125.
- Budd, W. F. and others (1966): The drifting of nonuniform snow particles. *A. G. U. Antarct. Ser.*, **9**, 59-70.
- Hammer, E. (1949): Temporal factors in figural after effect. *Amer. Jour. Psy.*, **62**, 337p.
- 福沢義文・竹内政夫・石本敬志・磯部圭吾 (1990): 降

- 雪時における自動車の巻き上げによる視程障害. 平成2年度日本雪氷学会予稿集.
- 石本敬志・竹内政夫・福沢義文・野原他喜男 (1980): 道路防雪林による吹雪時の視程障害緩和効果. 土木試験所月報, No. 320, 7-18.
- 鎌田新悦・竹内政夫・福沢義文 (1971): 吹雪時の視程について, 第15回北海道開発局技術研究発表会論文集, 244-247.
- Koshmieder, H. (1924): Theorie der Horizontalen Sichtweite. *Beitr. 2. Phys. d. ferein Atm.*, **12**, 33-53.
- Mellor, M. (1966): Light scattering and particle aggreation in snow storms. *Jour. Glaciol.*, **6**-44, 237-248.
- Middleton, W. E. K. (1952): *Vision through the atomosphere*. Univ. Tronto Press, Canada, 250 p.
- 日本建設機械化協会 (1989): 新編防雪工学ハンドブック. 527p.
- 日本道路協会 (1990): 道路防雪便覧. 383p.
- O'Brien, H. W. (1970): Visibility and light attenuation in falling snow. *Jour. Appl. Met.*, **9**, 671-683.
- 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.
- Schmidt, R. A. (1977): A system that measures blowing snow. *U. S. Forest Serv. Res. Rep. RM*, **194**, 1-80.
- 塩谷正雄 (1953): 吹雪密度の垂直分布にたいする一考察. 雪氷, **15**-1, 6-9.
- Tabler, R. D. (1977): Visibility in blowing snow and applications. *Sym. on driver visibility under varying adverse weather conditions, Trans, Res. Board, Nat. Res. Counc.*, p. 7.
- 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.
- 竹内政夫 (1981): ワイオミングの吹雪とその対策. 第24回北海道開発局技術研究発表論文集, 424-429.
- 竹内政夫 (1986): 道路管理のための気象観測とその利用. 雪と道路, No. 7, 41-48.
- 竹内政夫・福沢義文 (1976): 吹雪時における光の減衰と視程. 雪氷, **38**-4, 9-14.
- 竹内政夫・鎌田新悦 (1972): 吹雪時における視程の実態と特徴. 土木技術資料, **14**, 9-13.
- 竹内政夫・石本敬志・野原他喜男 (1975): 吹雪量と飛雪量垂直分布. 雪氷, **37**-3, 8-15.
- 竹内政夫・石本敬志・野原他喜男・福沢義文 (1986): 降雪時の高い地吹雪の発生限界風速, 昭和61年度日本雪氷学会予稿集.
- (1990年12月10日受付, 1991年2月18日受理)