

解 説

吹雪とその対策 (2)¹⁾ ——吹雪と視程——

竹 内 政 夫²⁾

要 旨

雪粒子は光の波長と比べて大きく光は主に反射によって減衰する。また、目の近くの雪粒子一個一個が目に見えることが、その残像も含め視程にも悪く影響している。雪道では吹雪によってホワイトアウト (白い闇) の状態になることもあり、交通の安全を阻害し時には交通の確保を困難にしている。吹雪時の視程は、風速と降雪強度の変化や沿道環境の不連続によって、大きく変動しそれが事故の誘因となっている。また、白い背景に吹き舞う白い雪は、人の目を奪い本来あるべき視程 (潜在視程) も見えなくしている。

雪粒子による光の減衰機構、視程への影響を述べ、道路における視程の特徴について紹介した。

キーワード：吹雪、光の減衰、視程、視程障害、ホワイトアウト、冬の道路交通

Key Words: blowing snow, drifting snow, light attenuation, visual range, visibility, poor visibility, white-out, traffic in winter

1. まえがき

風で舞い飛ぶ雪粒子は視程を低下させ、時には視界全体を白く塗りつぶすホワイトアウトをもたらす。特に道路交通はドライバーの視覚情報に頼るため、霧や雪等による視程の低下の影響は大きく、運転不能、交通の渋滞や事故の誘因となる。冬の道路交通の発達と高速化は、視程障害を誘因とした大規模な多重衝突事故の発生にみられるように、吹雪や降雪による視程の低下の影響をますます大きなものにしていく。

視程は空間浮遊物に関係するが、Middleton (1952) など視程に関する研究で取り扱われてきたものの多くはダストや霧のように、極微小なもののから光の波長の数倍程度の大きさの空間浮遊物であった。そして、視程は空間浮遊物による光の

減衰に反比例する関数で表されてきた。空間浮遊物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 散乱で光が減衰されることが知られている (Brillouin 1949)。しかし、光の波長に比べ十分に大きい雪粒子の場合は、主として光は反射によって減衰される (竹内, 1980)。視程は、このように雪粒子によって光が反射されて減衰されるだけでなく、雪粒子の一個一個が目に見えることとその残像効果も視程に影響する。鎌田他 (1971) は光の減衰と視程の観測から、斉藤 (1971) は理論的に雪粒子の残像の影響を示唆し、竹内・福沢 (1976)、竹内 (1980) は光の減衰は雪粒子の形状・大きさに、視程はこれらに加えて残像など心理的なものに影響されることを示した。吹雪の場合の視程は、飛雪粒子の垂直分布や時間的な変動などによって、降雪や霧によるものと違った幾つかの特徴がある (竹内, 1980 ; Ishimoto, 1995)。そして、そのことが道路交通をはじめとし各種交通機関に様々な障害を与えている。このためもある、吹雪と視程に関する研究の多くは、道路交通の安全確保を目的と

1) For the control of blowing snow (2)-Visibility in blowing snow

2) 日本気象協会北海道本部

〒064-8555 札幌市中央区北4条西23丁目

(Masao Takeuchi, Japan Weather Association
Hokkaido Office, N4 W23 Chuo-ku, Sapporo 064-8555)

したものが多い。ここでは、空間浮遊物が雪粒子の場合の視程、特に吹雪時の視程と道路交通について紹介する。

2. 雪粒子が空間浮遊物の場合の視程の特徴—吹雪や降雪と視程—

降雪や吹雪によって視程が低下し、それによって交通等に影響するのが視程障害である。雪国の道路も除排雪のサービスレベルが向上し高速走行が可能になり、吹雪や雪煙と呼ばれることもある車が巻き上げる雪による視程障害は、交通機能をマヒさせ交通事故の誘因となるなど冬（積雪期）の最も大きな交通の障害要因になっている。視程は大気中の空間浮遊物の濃度に関係する物理量であるが、同じ空間浮遊物でも、霧などの微細な空間浮遊物と目に見える大きさを持つ雪粒子では、視程に与える影響や特徴も異なっている。ここでは、空間浮遊物が雪粒子の場合の視程の特徴について述べる。

2.1 雪粒子による光の消散と視程

離れて行くと物が見えなくなるのは、大気や浮遊物によって物体からの光が消散（減衰）され目が刺激されなくなるのと、光は届いているがその明るさと周囲の明るさの違いを識別できなくなる場合とがある。視程観測は明るさが0とみなせる黒い視程板を視標にすることになっているが、視程板から遠ざかるとそのみかけの明るさが増して白っぽくなり、ついには背景の明るさと見分けがつかなくなる。このように、物体（視程板）の明るさ B_d と背景の明るさ B_h の比が視程に関係する。(1) 式で表される物体と背景の明るさの比 C が、人間の目が区別できる限界の明るさの比である識閾 ε に等しくなった場合の物体までの距離が視程 V で、光の消散係数 σ との関係で (2) 式で与えられる。識閾 ε は標準的には0.02であるが夜間や交通関係では0.05が使われている。

$$|B_d - B_h| / B_h = \varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon = e^{-\sigma V} \quad (2)$$

(2) 式から、大気が一様に分布することを前提にした、視程に関する Koschmieder (1924) の式

(3) が得られる。

$$V = 1/\sigma \cdot \ln 1/\varepsilon \quad (3)$$

物体と背景の明るさの比が区別できなくなるのは、物体と目の間の大気や空間浮遊物によって太陽などの光が散乱、反射、吸収されて目に達するからで、目と物体との間の空間の明るさを見ていることになる。そのため、距離が長いほど、光が散乱、反射、吸収される度合いが高いほど物体は明るく見えるようになる。（水蒸気を含めた大気や汚染物質による光の消散は、雪や霧などが空間浮遊物の場合と比べると、小さいので吹雪や降雪の場合には無視できる。）ある空間の微小部分の明るさは、光の散乱、反射、吸収によってきまる光の消散係数に比例する。散乱は光の回折干渉による現象で、空間浮遊物が光の波長に比べて十分小さいと Rayleigh 散乱、波長と同程度ならば Mie 散乱になる。Brillouin (1949) によると、可視光では粒子の直径が 20μ の大きさまでが 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。飛雪粒子の大きさは、空中で昇華するので、無限に小さいものも含まれるが、量的には大部分が 40μ より大きい（例えば、Budd, 1966）。また、氷による光の吸収係数は 10^{-3}m のオーダーで非常に小さい。これらのことから、空間浮遊物が雪の場合に光は反射（遮蔽）によって消散し、一部は屈折透過すると考えられるので、光の消散（反射）係数は雪粒子の断面積に比例し (4) 式で表される。

$$\sigma = \sum R_i \cdot n_i \cdot \pi r_i \quad (4)$$

R_i : 粒子の反射面積係数,

n_i : 単位体積当たりの半径 r_i の粒子の個数

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ので1より小さい値となる。 πr_i^2 は $\pi r_i^3 / r_i$ と表せるので形として (4) 式は光の消散係数は雪の空間濃度（単位空間体積当たりの雪粒子の質量）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). すなわち, 同じ空間濃度では粒径の小さいもの (数が多い) ほど光の消散量は大きくなる. 間接的であるが, 視程を雪の空間濃度との関係で議論してきたのもこのためである. 雪粒子による光の反射係数の測定例は少ないが, O'Brien (1970) は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 0.166 を得ている. Mie 散乱では粒子が大きくなると光の散乱係数は 2 になるので, この 1 より小さい値が得られていることも光が雪粒子の反射によって消散していることを示している.

2.2 光の消散と視程

光の消散機構が散乱, 反射にかかわらず, 光の消散は視程に関係する重要な物理量であることには変わりがない. そのため, 光の消散係数と雪粒子の空間濃度や視程の研究が行われてきた. 雪粒子の粒径分布から (4) 式によって光の消散係数を求めるのは, 吹雪などでは測定そのものが難しいだけでなく, 反射率が雪の結晶によっても大きな違いがあるので現実的とはいえない. そのため平行光線を投光し一定距離はなれて測定した受光量との比から透過率を測り, 以下のようにして光の消散係数が求められている.

明るさ B の平行光線が dL 通過した時の光の消散量 dB は B に比例し, 次式で表される (Bouguer-Lambert の法則).

$$\begin{aligned} dB &= -\sigma B_d L \\ B &= B_0 e^{-\sigma L} \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

B_0 は投光の明るさ, $B/B_0 = T$ は光の透過率で, 光の消散係数は次式で表される.

$$\sigma = 1/L \cdot \ln(1/T) \dots \dots \dots (6)$$

ここで, L は光の通過距離で, 測定器 (透過率計) の投受光間隔である.

光は雪の空間濃度に比例して消散すると考えられる. 雪の空間濃度と光の消散係数を, 吹雪と降雪での測定例が図 1 である. 同じ空間濃度でも, 吹雪のほうが降雪と比べて光の消散は大きい. これは, 吹雪粒子は降雪粒子より小さいためと考えられる.

Koshmieder の (3) 式と Bouguer-Lambert の法則より導かれた (6) 式とから, 次式のように視程は透過率との関係で表される.

$$V = L / \ln(1/T) \ln(1/\epsilon) \dots \dots \dots (7)$$

これが透過型視程計の基本式 (竹内, 1980) である. しかし, 吹雪時に目視観測した視程と光の消散係数の関係は図 2 のように, 視程が 150 m 以下になると, Koshmieder の式で予想されたものより, 観測値は低いほうにプロットされている. これは雪の場合の視程の特徴でもあるが, これについては後で述べる.

2.3 雪粒子の知覚と視程

視程は光の消散係数に反比例するという Koshmieder の式のなかで, 光の消散係数は雪の空間濃度に比例するので, 視程を雪の空間濃度と関係づけようと研究されてきた. そのいくつかをまとめたのが, 図 3 である. 図中それぞれ, Mellor (1966) は無風時の降雪, 斎藤 (1971) は季節風による降雪, Budd 他 (1966) は地吹雪, 竹内・福沢 (1976) は吹雪で観測したものである. それぞれの観測した現象だけでは, 視程は空間濃度に反比例している. しかし, 同じ空間濃度でも

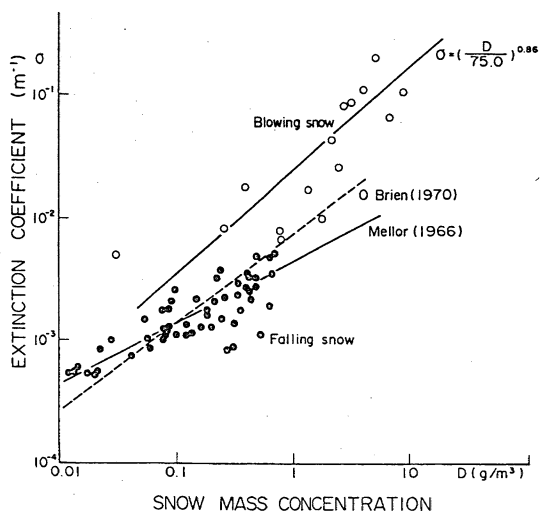


図 1 弱雪粒子の空間濃度と光の消散係数
Relation between extinction coefficient of light and snow mass concentration comparing with in blowing snow and falling snow.
同じ空間濃度でも粒径の小さい吹雪粒子のほうが光の消散係数は大きい.

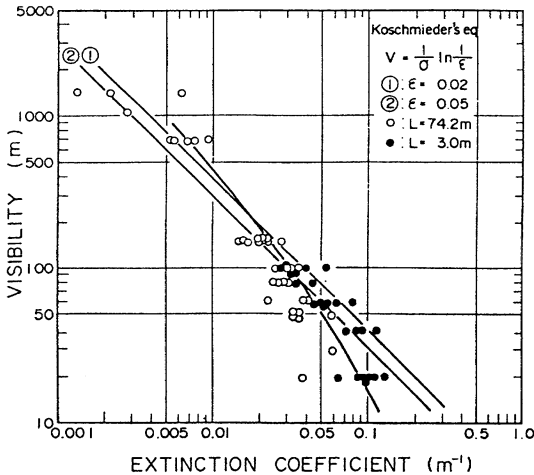


図2 視程と光の消散係数

Relation between visibility and extinction coefficient of light.

光の消散係数と目視による視程観測の結果は、雪粒子の見えることの影響で距離が近い領域では Koshmieder(1924)の式から視程の低いほうに外れている。

降雪（無風）の1000 mと吹雪時の80 mと、現象によって大きな違いが見られる。これは、飛雪粒子が降雪粒子と比べて小さくより光を減衰させることを考慮しても大きすぎる。このように、視程を雪粒子による光の消散だけで説明するには無理があるように思われる。霧や大気汚染物と比べて雪粒子は大きく、光は反射によって消散される。さらに、近くにある雪粒子は一個一個が識別されるだけでなく、残像現象のため尾を引いて目に映る。これは、図4のように、目に刺激が作用してから光覚が起こるまでには若干の時間を要して光覚が盛んになり（漸旺）、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しだいに消える（漸消）からである。明るさが0とみなせる黒い板（視程板）を背景に、明るさ B 、速度 u で、移動している D の大きさをもつ一つの雪について考えてみる。図のように雪からの光が $t=0$ で現れ、 $t=D/u$ で消えるとして、 $t=0$ から $t=D/u$ までの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' の差に比例する。そこで α を刺激の蓄積係数とすると、 $dB' = \alpha (B - B')$ dt から B' は式(8)で表される。

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

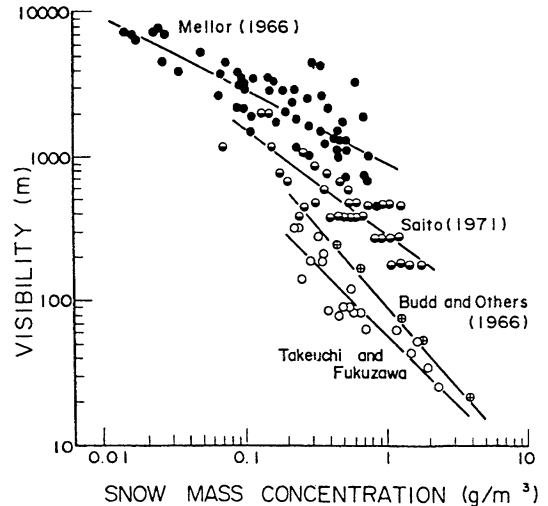


図3 視程と雪粒子の空間濃度

Relation between visibility and snow mass concentration comparing with in blowing snow and snow fall.

Budd 他(1966)、竹内・福沢(1976)は吹雪、齊藤(1971)は季節風、Mellor(1966)は無風状態の降雪で観測した。現象による違いは非常に大きい。

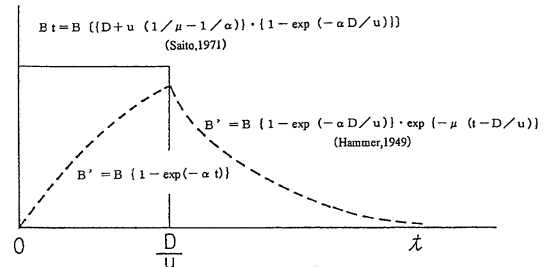


図4 刺激の蓄積と減衰

Accumulation and extinction of eyesight stimulation.

目に光の刺激が作用して光覚が起こるまでには時間がかかり、刺激が去った後も光覚は残りしだいに消える。

次に $t = D/u$ で雪からの光が消えたとすると、 $t > D/u$ 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' は式(9)で与えられる（例えば、Hammer,1949）。

$$B' = B \{1 - \exp(-\alpha D/u)\} \cdot \exp\{-\mu(t-D/u)\} \dots\dots\dots (9)$$

斎藤(1971)は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に、物体の動く速度 u を乗じた値 B_i を目が感じた全刺激とし (10) を得た。

$$B_i = B \left[\{D + u (1/\mu - 1/\alpha)\} \cdot \{1 - \exp(-\alpha D/u)\} \right] \dots \dots \dots (10)$$

B_i は、刺激の強さなどの条件によって値はかわるが、一般に $\alpha > \mu$ と考えられている。このため、雪のように白い物が黒を背景にした場合は、動いていて速度が大きいほど全刺激が大きくなり、視程も低下する。図3のように視程が雪の空間濃度でみると現象による違いの大きいのも、雪は目に見えることと残像の影響によるものと考えられる。

2.4 目の前の雪の移動量 (フラックス) と視程

雪のように目に見える大きさをもつ空間浮遊物では、粒子の大きさや残像も視程に影響すると考えられるが直接的には確かめられていない。残像は動く速度が大きいほど大きく働くので間接的ではあるが、目の高さの空間濃度と速度の積である目の前を横切る雪の移動量で表すと、より良い視程の関係が得られるであろう。この考えから図3と同じデータを用いて視程を雪の移動量との関係に直したのが図5である。図で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ものを雪の移動速度とし、雪の移動速度と雪の空間濃度との積を雪の移動量としている。このように、視程は目の前を横切る雪の移動量で表すと、現象による違いは小さくなり、視程 10 m から 4000 m の広い範囲が一つの曲線で表される。また、この図は風速と降雪強度から視程が求められることも示している (松澤・竹内, 1998)。遠くにあったり小さくて目に見えない粒子は、反射と散乱という違いはあるが大気汚染物質等のように光を消散させることによって視程に影響する。目に見える雪粒子は、光の消散に加えて、目に見えることとその残像によっても視程に影響する。そのため、視程が低い場合は目に見える雪粒子の影響する割合が大きくなると考えられる。図5で視程が低くなるにつれて、雪の移動量に対する視程の低下の割合

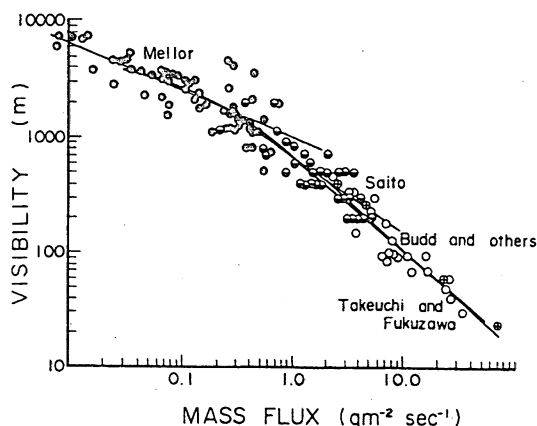


図5 視程と雪粒子の移動量 (フラックス)
Relation between visibility and snow flux comparing with in blowing snow and snow fall.
視程を目の高さの雪粒子の移動量で表すと現象による違いはなくなる。雪粒子が見えることと残像の影響と考えられる。

(曲線の勾配) が大きくなっているのも、既に述べたように、光の消散係数と視程の関係からも同じ様に視程 150 m 以下で、観測値が Koshmieder から予想されるものより低いほうにプロットされたのもこのことで説明される。

このように、雪粒子は大きいために形や大きさが同じであっても、目に近いものと遠くにあつて識別されないものとは視程に与える影響は異なる。例えば、降雪や吹雪の夜にヘッドライトをハイビームにすると照らされた雪が強く輝いて前方が全く見えない時でも、ライトを消すと遠くまで見透せることがある。これは、強く輝く雪に目を奪われ残像も含めて見えることの影響が大きくなったことと、消灯すると暗いために近くの雪も見えなくなり近くから遠くの雪粒子まではほぼ一様な光の消散によって視程が低下するからである。このように、空間浮遊物が雪の場合は、大気が一様に光を消散させるという仮定のもとで視程を求める Koshmieder の式には限界があり、視程は直接的には証明されていないが人間の生理的・心理的な影響も含まれるようだ。

3. 吹雪による視程障害の特徴

車が安全に走れる速度は、視程と路面の滑りによって決まるように (Baker, 1975)、道路交通において視程は非常に重要な要素でもある。この視

程が必要以下になる視程障害(写真1)によって、道路では交通渋滞、通行不能や交通事故、空港では運休などが発生する。特に、軌道もなく走行位置の決定から状況に応じた様々な運転操作が要求される道路交通では、視覚情報の喪失は致命的である。ここでは、道路における吹雪・地吹雪による視程障害の特徴のいくつかを紹介する。

3.1 潜在する視程

一般に視程の目視観測は、視角(0.5~5°)を一定にするために、遠くのものほど大きい黒い視程板を視標にすることになっている。しかし、雪道では雪と見分けることのできる指標になるような物(目標物)があるとはかぎらない。目標になる物体がなければ、除雪によって路側にできる雪堤等で道路の端や幅を判断し車の走行位置をきめることが多い。雪は光を乱反射するため影ができ難くしたがって凹凸もはっきりせず、視程が低下すると、雪堤のような白い目標物は白い降雪や飛雪粒子によってますます見え難くなる。最悪の状態が視界全体が白一色のホワイトアウト(白い闇)である。背景全体が雪の状態ではホワイトアウトになっても、視界に黒い樹木など白以外の物体があると、それは意外に離れていても見えることが多い。視程は指標が連続的にあることを仮定した値であるが、気象条件は全く同じであっても道路においては目標物の有無やその状態によって、ドライバーが感じることのできる視程には非常に大きな違いが生ずる。このように雪道では本当の意味の視程はポテンシャルとして潜在している(竹内, 1980)ことが多い。視程障害対策として潜在

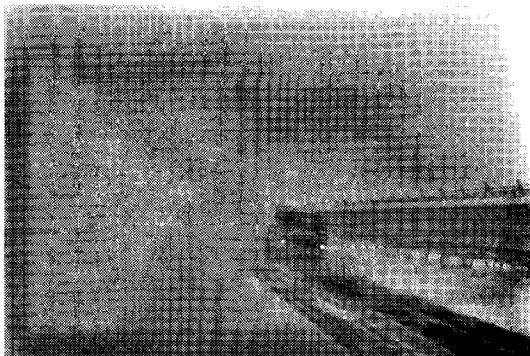


写真1 吹雪による視程障害
白い雪道を背景に視程が悪くなるとホワイトアウト(白い闇)になることも珍しくない。

する視程の顕在化は、防雪とともに冬の交通の確保と安全に重要になっている。視程の顕在化と視線を誘導し交通の安全を図るための視線誘導施設として、スノーポール、自発光デリニエーターや道路林等が設けられている。

3.2 目の高さによる視程の違い

吹雪・地吹雪時の飛雪粒子の濃度や流量は地表面からの高さに依存し、視程を低下させる飛雪流量は雪面に近づくに従って指数関数的に急増する(例えば、竹内・松澤, 1991)。吹雪や地吹雪で運転席の低い乗用車が視程障害に苦しんでいる時でも、バスやトラックが楽に走行できることがあるのも視線の高さの違いによるものである。路側に高い雪堤ができた道路では地吹雪粒子が雪堤を越えて吹き込むため、ドライバーの目は雪堤の高さだけ雪面に近づいたのと同じことになり、視程は著しく低下する。

特に、雪堤が目の高さからそれ以上になると、写真2のように走行困難な視程障害になりやすい。雪堤が高くなると路面に吹きだまりができやすくなり視程障害を大きくするので、冬の道路管理では雪堤を低くすることが重要になっている。

3.3 視程の変動

視程を低下させる雪の移動量(フラックス)は、時間変動幅の大きい風速や降雪量に連動して変化するため、吹雪時の視程は激しく変化する(図6)。視程は霧や降雪の場合も変化するが、吹雪と比べ



写真2 路側にできた雪堤から吹き込む地吹雪による視程障害

低い地吹雪では雪粒子の100%は10cm以下の低いところを跳ぶ。路側の雪堤が車の運転席より高くなると晴れていても対向車が見えない視程障害になることがある。

るとゆっくりとしたもので、変動強度は小さく変動レベルは吹雪の1/1000程度である。吹雪時の視程は周期が短く大きな変動幅で変動するのが特徴である(Ishimoto,1995)。このように、吹雪では視程自体の変動が激しいだけでなく、同じ気象条件でも道路では沿道環境(地形、植生、土地利用の実態、雪堤、道路構造等)によって飛雪粒子のフラックスが変わりそれにとまって視程も変わる。そのため、沿道環境の境界では極端な場合には、それまでは数百mあった視程が一瞬にしてホワイต์アウトになることも稀ではない。図7は車載した視程計で走行しながら視程を連続測定したもので、風上側が林の切土部から畑に変わった盛土部で視程が急降下した例である(Takeuchi et al,1993)。このような視程の急変は、吹雪の他に車の走行によって路面の雪を巻き上げる(雪煙)ことによっても発生し(写真3)、とくに大型車に追い越されたりすれ違ったりする時には短時間ではあるがホワイต์アウトの状態になることも多い。これらの視程の急変は、滑りやすい雪氷路面と相まって交通事故の誘因となっている。特に、冬期交通が高速化するにともなう、視程の急変による多重衝突事故が増えている。高速道路で百数十台の車を巻き込んだ事故が発生したのも、視

程の急変と凍結路面によるスリップが誘因となったものである。視程が低下して車の走行ができなくなるのとは異なり、視程の変動による事故は気象条件がそれほど悪くなく、高速走行が可能な時にも発生するので対策を難しくしている。雪煙による視程障害は、人為的なものであり無作為に加害者になることもある。十分な距離をおいてから追い越すことで避けることができるので注意したいものである。

4. あとがき

雪粒子が空間浮遊物の場合の視程と道路交通における視程障害の特徴について紹介した。濃霧による海上や航空における視程障害は、まだ多少の課題は残っているもののレーダーや無線誘導の発達によって克服されつつある。しかし、道路交通が運転者の視覚情報に頼っている限り、視程の問題は避けて通れない。同じ道路でも経験等運転能

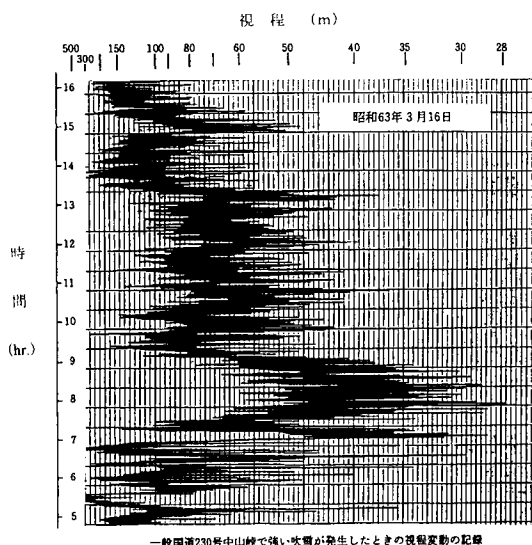


図6 吹雪時の視程の変動

Example of variation in visibility in blowing snow. 吹雪時には風速や降雪強度の変化によって、視程は大きく変動する。

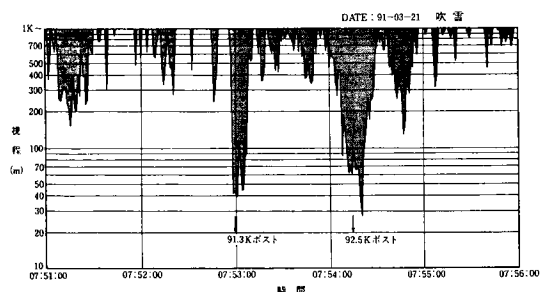


図7 沿道環境による視程の変化

Variation in visibility measured traveling along highway.

吹雪時の視程は沿道の地形や植生等の環境条件によっても大きく変動する。

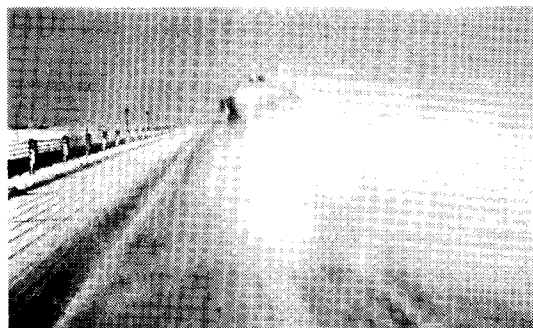


写真3

大型車が巻き上げる雪による視程障害

路面に雪が残っているとスピードを上げて走る車の巻き上げる雪で視程障害になり、事故を誘発させる。

力の異なる様々な運転者が混在しており、突然変わる視程に対しても様々な反応をする。吹雪の中では運転台の高さによっても視程が異なり、雪氷路面では車による制動性能も差がある。このような人の反応と車の動きの違いが、冬の事故を大きくしている。交通の安全には人・車・道路それぞれの面からの対応が必要とされているが、視程障害は最も遅れている交通事故におけるヒューマンファクターの研究の場を提供していると考えられる。視程障害対策については改めて紹介するが、まだまだ視程と路面の雪氷は雪国の道路交通の残された大きな課題である。

引用文献

- Baker, R. F., editor, 1975: Handbook of highway engineering. Van nostrand Reinhold Co., N. Y., 894pp.
- Brillouin, L., 1949: The scattering cross section of spheres for electromagnetic waves. J. Appl. Phys., **20**, 1111-1125.
- Budd, W. F., 1966: The drifting of nonuniform snow particles. A.G.U. Antarct. Res. Ser., **9**, 59-70.
- Budd, W., Dingle, R. and Radok, U., 1966: The Byrd snow drift project: outline and basic results. A. G. U. Antarct. Res. Ser., **9**, 59-70.
- Hammer, E., 1949: Temporal factors in figural after-effect. Amer. J. Phys., **62**, 337.
- Ishimoto, K., 1995: Studies on the visibility fluctuation by airborne snow particles. 開発土木研究所報告, 57pp.
- 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.
- Koschmieder, H., 1924: Theorie der horizontalen sichtweite. Beitr. 2, Phys. d. freien Atm., **12**, 33-15.
- 松澤 勝, 竹内政夫, 1998: 降雪強度と風速から視程を推定する手法に関する研究. 北海道の雪氷, **17**, 13-14.
- Mellor, M., 1966: Light scattering and particle aggregation in snow storms. J. Glaciol., **6**, 237-248.
- Middleton, W.E.K., 1952: Vision through the atmosphere. Univ. Toronto Press, Canada, 250pp.
- O'Brien, H. W., 1970: Visibility and light attenuation in falling snow. J. 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.
- 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**, 9-13.
- 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**, 31 pp.
- 竹内政夫・松澤 勝, 1991: 吹雪粒子の運動と垂直分布. 雪氷, **53**, 309-315.
- Takeuchi, M., Fukuzawa, Y. and Ishimoto K., 1993: Variation in motorist visual range measured by vehicle-mounted sensor. Transportation Research Record, No. 1387, Transportation Research Board, National Research Council, 173-177.

(1999 年 3 月 25 日受付)