

第68回(2024年度) 北海道開発技術研究発表会論文

飛雪粒子の残像を考慮した吹雪時における CCTVカメラの露光時間

寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 雪氷チーム
寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 雪氷チーム
釧路開発建設部 施設整備課

○櫻井 俊光
武知 洋太
國分 徹哉

吹雪時において、人の目による視程とCCTVカメラ等による視距離には差異があり、原因は人の目による飛雪粒子の残像と言われている。本研究では、人の目の残像が吹雪時の視程に及ぼす影響を考慮し、人の目による視程と同程度になるように石狩吹雪実験場に設置したCCTVカメラの露光時間を変更した。その結果、CCTVカメラの露光時間を0.013～0.016秒の間にすることで、人の目と同程度の視距離を認識することが可能であることが分かった。

キーワード：吹雪の視程、CCTV、残像、露光時間

1. はじめに

近年、大規模な吹雪や多量降雪により、多数の車両の立ち往生や長期間に亘る通行止めなどの障害が発生しており、吹雪災害の防止・軽減は喫緊の課題である。吹雪による道路通行止めの判断は、担当職員や維持業者による現地パトロールによって、視程障害と吹きだまりの発生状況を直接把握し行われている。また、現地パトロールの出動の判断はCCTV（Closed-Circuit Television）カメラ（図-1）による映像を主な材料としている¹⁾。しかし、国道に設置されているCCTVカメラは高性能である。このため、現地に視程障害が発生していたとしても、鮮明な画像を取得するため視程障害として認知できず、正確に吹雪の状況を把握できない場合が多い。

そこで本研究は、CCTVカメラと人の目による吹雪の見え方の違いについて検討し、吹雪の状況を把握するためのCCTVカメラにおける露光時間の設定値について提案することを目的とする。



図-1 CCTVカメラの外観

本稿では、吹雪の視程に関する既往研究を紹介し、人の目による吹雪の視程とCCTVカメラの設定について述べ、CCTVカメラの最適な露光時間について調査したので報告する。

2. 吹雪の視程

(1) 視程の一般的な概念

一般的に視程とは、地表付近の大気の大気混濁の程度を見通しの距離で表したもので、昼間の視程は、その方向の空を背景とした黒ずんだ目標を肉眼で識別できる最大距離である。また計器で計測するときには気象光学距離（MOR; meteorological optical range）を利用し、大気や浮遊する粒子によって散乱吸収され減衰し、元の光の強さの5%になるまでの距離とする²⁾と定義される。MORは国際気象機関（WMO: World Meteorological Organization）が定めた定義である。

一般的な視程は、主に霧やエアロゾル（大気中を浮遊する固体や液体の微粒子）などに利用される用語である。濃霧やエアロゾルにより視程が悪化するとき、対象物と背景を肉眼で識別できるコントラストの臨界値 ε と大気中を光が透過して観測者の識別限界まで減衰する距離 y は ε と消散係数 σ を用いて、

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

として表現され³⁾、式(1)はKoschmiederの式と言われる⁵⁾。Koschmiederの式で表される視程は、式(1)の性質上、大気中の粒子が様に分布したときに成り立つ。すなわち霧やエアロゾル粒子による光の減衰を現すものである。霧

粒やエアロゾル粒子の大きさは可視光の波長程度（350～700nm）である。肉眼では目に見えないが、可視光を散乱・吸収するため、MORが長くなれば光が減衰して肉眼で対象物を識別できなくなる。

(2) 吹雪の視程における経験則

吹雪の視程において明確な定義はないが、既往研究に基づき吹雪の視程について紹介しておきたい。

吹雪は、飛雪粒子が風によって空中を舞う現象であり、任意の高さ $z(m)$ における飛雪粒子の移動量は飛雪流量 $q(z)(gm^{-2}s^{-1})$ で表される。

$$q(z) = Nu \quad (2)$$

ここで、 $N(gm^{-3})$ は高さ $z(m)$ における飛雪空間密度、 $u(ms^{-1})$ は $z(m)$ における風速である。また、吹雪の視程 $Vis(m)$ は $q(z)$ の関数で表現される⁷⁸⁹⁾。

武知ら¹⁰⁾は、被験者の肉眼による視程と計器の視程を比較し、計器の視程よりも肉眼による視程の方が低い値を示すことを明らかにした。また被験者による視程と $q(z)$ の関係について既往研究⁸⁾を踏まえて次の関係式を導いた。

$$\log(Vis(z)) = -0.886 \log(q(z)) + 2.648 \quad (3)$$

ただし、視程100m以下では被験者による視程の方が式(3)の値よりも低い値が得られた¹⁰⁾。これは、既往研究⁷⁾が指摘しているように、 $q(z)$ が高いほど人の目による飛雪粒子の残像の効果が顕著に表れるものと推察されたが、人の目による残像が吹雪の視程にどの程度の影響を及ぼすのか、よく分からなかった。

(3) 残像を取り入れた吹雪の視程に関するモデル

残像には、固視残像と眼球運動を伴うサッカード(saccade)残像がある¹¹⁾¹²⁾。残像を描写するとき、視覚的に持続する時間を視覚的持続時間と言い（人の目の時間分解能とも解される）、固視・サッカード残像ともに視覚的持続時間は、0.04～0.12秒の間にあると考えられる。この視覚的持続時間を数式で表現できれば、吹雪時における人の目による視程のモデルを構築できる。そこで、Sakurai et al.(2023)¹³⁾は、図-2に示す概念を基に残像を取り入れた吹雪の視程に関するモデルを構築し、被験者による目視の視程と、残像を取り入れたモデルによる視程が良く一致したことを示した（図-3）。人の目の視覚的持続時間による残像が吹雪の視程に影響することを立証する結果となった。

以上から、人の目には目の前を横切る飛雪粒子が残像として認識されるため、吹雪の視程は霧やエアロゾル等の視程とは異なると言える。

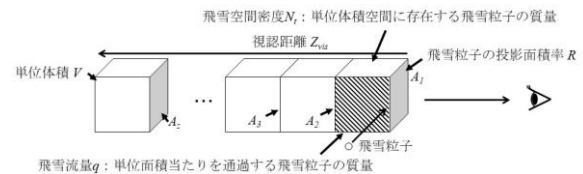


図-2 観測者の視野を x 方向に 1 m 毎に区切った単位空間あたりの飛雪粒子に関する概念図¹³⁾

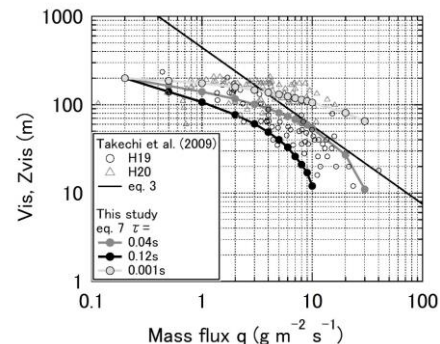


図-3 被験者による目視の視程と、視覚的持続時間（0.04 秒、0.12 秒、0.001 秒）の視程¹³⁾

(4) CCTVカメラの設定と本研究の目的

CCTVカメラで吹雪による道路への影響を監視するとき、人の目と同程度の視距離にするには、どのような設定にすれば良いか。ここで、CCTVカメラ等で認識できる最大の距離を視距離とし、人の目の視程と区別する。

動画を撮影するカメラ等の機器の設定には、fps (Frames Per Second)、ホワイトバランス、露光時間などを設定することができる。ここでfpsは単位時間の1秒間に処理するフレームの数（フレームレートとも言う）のことである。通常のカメラで動画を撮影するときのfpsは、一般的に30～60fps程である。視覚的には、fpsが高ければ滑らかな動画、fpsが低ければカクカクした動画という印象を持つ。つまり、1秒間のフレーム数を変更したとしても、残像には寄与しないと考えられる。次に、ホワイトバランスは、光の色の補正をする機能であり、これも残像には影響しないと考えられる。最後に露光時間であるが、露光時間はカメラ等の素子を光に露出させる時間である。飛雪粒子が移動する様子を露光時間を長くして撮影すれば、飛雪粒子は線として描写される。露光時間を短くして撮影すれば、飛雪粒子は点として描写される。このように、露光時間を適した値に設定することで、CCTVカメラでも吹雪における人の目の視程を視距離として再現することが可能であると考えられる。

本研究は、石狩吹雪実験場に設置したCCTVカメラの露光時間を変更して吹雪時の視距離を測定し、視程計で測定された視程値と人の目の視程を比較することで、再現可能なCCTVカメラの露光時間の設定値を明らかにすることを目的とする。

3. 実験方法

寒地土木研究所が所有する石狩吹雪実験場に、令和4年度に新設したCCTVカメラ（WV-S6530、Panasonic社製）2台を利用して、吹雪の動画を撮影した。利用したCCTVカメラの1つは視程板を監視するCCTVカメラA、1つは試験道路を監視するCCTVカメラBである（図-4）。常時録画した動画のうち、本研究に利用した期間は令和5年3月2日9時～14時である。



図-4 石狩吹雪実験場のCCTVカメラと視程計の配置

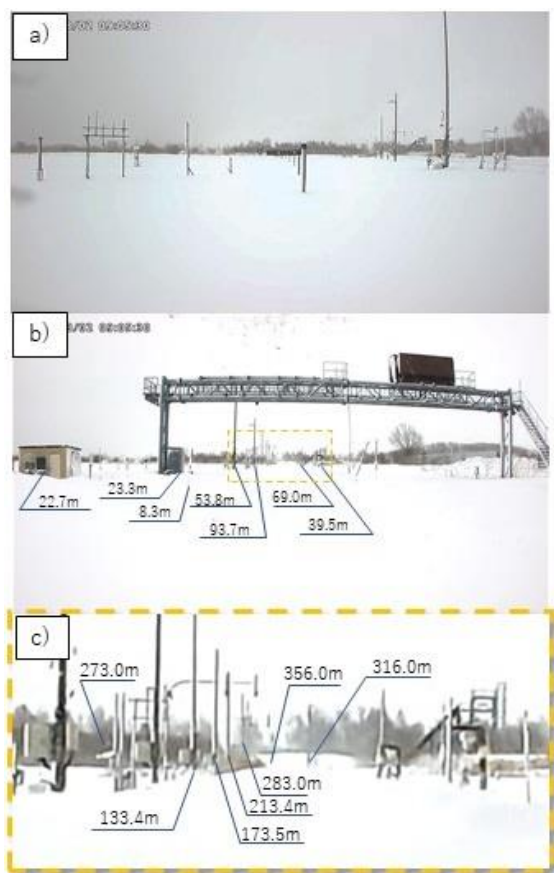


図-5 CCTVカメラの視野と対象物までの距離。
a)CCTVカメラA、b)CCTVカメラB、c)CCTVカメラBの視野（黄色点線枠）の拡大図

本研究で利用したCCTVカメラの露光時間を変更するまでの時間は1秒程度であり、露光時間は約0.03～0.0001秒の範囲で可変である（表-1）。

視程板を監視するCCTVカメラAの露光時間を変更せずにAutoで撮影し、通常監視する場合の参考として動画を保存した。試験道路を監視するCCTVカメラBの露光時間を変更し、1分以上撮影して動画を保存した。露光時間以外の設定値はデフォルトである。

撮影終了後、動画を1秒毎に停止して、画像から対象物が見えなくなるまでの視距離を判定した。視距離を解析した画像の間隔は1秒で、4時間分（約14,400枚）について解析した。CCTVカメラBにおける視距離の判断に利用した対象物の距離を図-5b,cに示す。各対象物におけるCCTVカメラBからの距離を巻き尺を利用して測定した。測定された距離の値は衛星画像からも整合していることを確認した。

測器による視程の測定にはCCTVカメラAから約25mほど離れた場所に設置された視程計（TZE-4、明星電気社製）を利用した（図-4）。測定間隔は1秒である。

表-1 露光時間の設定値

設定値	換算値	単位
1/30	0.033	秒
3/120	0.025	
2/100	0.020	
2/120	0.017	
1/100	0.010	
1/120	0.0083	
1/250	0.0040	
1/500	0.0020	
1/1000	0.0010	
1/2000	0.00050	
1/4000	0.00025	秒
1/10000	0.00010	

4. 実験結果

図-6に、CCTVカメラBによる結果を示す。露光時間0.001秒で11時30分00秒のとき視認距離は213.5mであった（図-6a）。直後に露光時間0.02秒に変更し、11時30分01秒のとき視認距離は22.7mであり、ほぼホワイトアウトの状態であった（図-6b）。このときの動画をよく観察すると、露光時間0.001秒では降雪を伴う吹雪と認識しにくい、露光時間0.02秒では降雪を伴う吹雪であることを容易に確認できた。画像中の視認できる構造物の最大の距離を視認距離とし露光時間0.02秒のとき視認距離は22.7mで、視程計の視程123mから大きく乖離する。したがって、CCTVカメラで人の目の視程を表現する露光時間は0.001～0.02秒の間にあると考えられる。

図-7に、露光時間を0.001～0.02秒の間で変化させた一



図-6 CCTVカメラBで撮影された画像。a)露光時間0.001秒、b)露光時間0.02秒



図-7 露光時間の違いによる CCTV カメラ B の視野。露光時間はそれぞれ a)0.02秒、b)0.01秒、c)0.004秒である。赤丸は視認距離に用いた箇所である。

例を示す。露光時間を徐々に短くした結果、定性的な表現ではあるが画像の視認距離が徐々に長くなるように見える。人の目による視程と視程計で測定した視程値が一致するCCTVカメラの露光時間が存在するはずである。

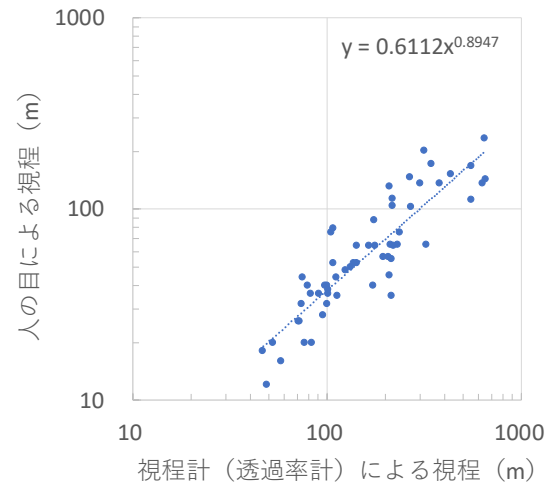


図-8 視程計で得られた視程値と人の目による視程の関係。武知ら¹⁰⁾の図4を再掲。

CCTVカメラの露光時間を変更することで、人の目と同程度の値になるようにするためには、人の目による視程値と視程計による視程値の関係を明らかにする必要がある。武知ら¹⁰⁾によれば、視程計による視程と人の目の視程には図-8の関係があることを明らかにした。この回帰線を利用し、図-9に視程計で測定した値を人の目の視程相当として換算した値を示す。この値を基準視程とし、CCTVカメラの露光時間を変更した時の視程を視程比で表現した。視程比の計算式を式(4)に示す。

$$\text{視程比} = \frac{\text{CCTVカメラによる視認距離}}{\text{人の目の視程に換算した視程計の値}} \quad (4)$$

1秒毎の視程計の視程値と、同時刻におけるCCTVカメラによる視程距離を露光時間0.02～0.0001秒まで変化させた値を視程比として表現すると図-10が得られた。ここで、視程比が1であれば人の目と同じであることを

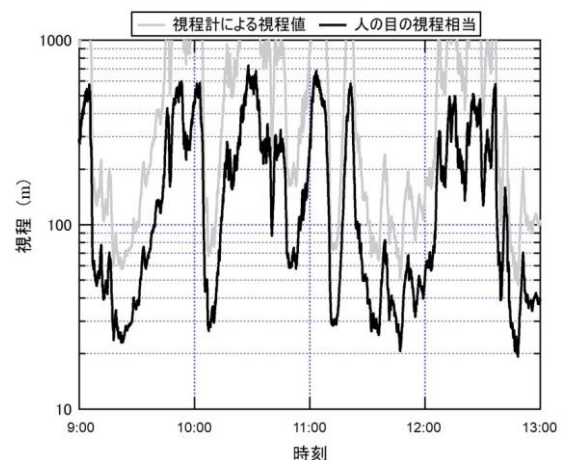


図-9 視程計による視程値と、人の目の視程相当に換算した視程計の値

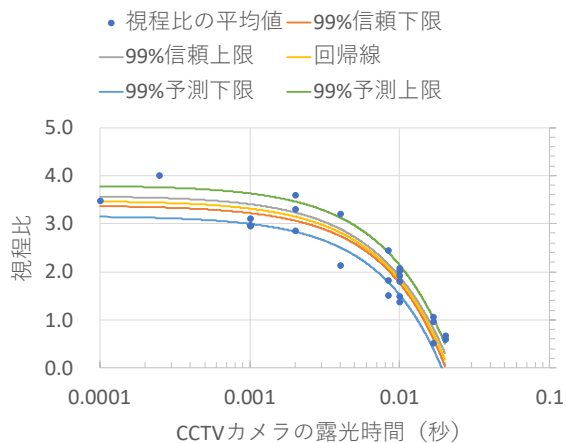


図-10 視程比と CCTV カメラの露光時間の関係。人の目の視程と CCTV カメラの露光時間を変更した時の視認距離を比で表現した。

意味する。図-10の視程比1に接する回帰線は、予測区間から露光時間0.013~0.016秒の範囲にある。この範囲の露光時間であれば、人の目の視程と同等の動画をCCTVカメラで描写できると考えられる。

図-10は、露光時間を0.001秒より短くすると、人の目の視程よりも3倍以上の距離を見通せることが可能であることも示している。ただし、飛雪空間密度（あるいは飛雪流量）が高い場合は露光時間が短くても、飛雪粒子が多すぎることで遠くを見通せるようになるとは限らないと考えられるので、注意が必要である。

5. まとめ

吹雪の視程は、霧やエアロゾル等の一般的な視程とは異なり、飛雪粒子が目視可能な大きさであることから残像の影響を考慮する必要がある。そこで本研究は過年度に得られた人の目による視程、視程計で測定された視程と、CCTVカメラの露光時間を変更した時の視認距離を比較したところ、人の目の視程と一致するCCTVカメラ

の露光時間の設定値は0.013~0.016秒の間にあることを明らかにした。また、たとえば露光時間0.001秒以下にするなど露光時間がより速ければ、より遠くを見通せることが可能であることもわかった。

参考文献

- 1) 永田泰浩、萩原亨、金田安弘、川村文芳、田宮敬士：吹雪多発路線におけるCCTVカメラの画像を利用した視界情報提供システムの検証、土木計画学研究・論文集、Vol.26(5)、pp.969-978、2009
- 2) 高橋徹：暴風雪災害への取り組み、日本風工学会誌、Vol.42、No.34(No.152)、pp.237-241、2017
- 3) 気象庁：気象観測の手引き、第10章視程、p.46、1998
- 4) Middleton, W.E.K.: *Vision through the atmosphere*, University of Toronto Press, 250p, 1952
- 5) 竹内政夫：吹雪時の視程に関する研究、土木試験所報告、No.74、pp.1-31、1980
- 6) Budd, W.F.: The drifting of nonuniform snow particles, *Studies in Antarctic meteorology, American Geophysical Union, Antarctic Research Series*, 9, pp.71-134, 1966
- 7) 竹内政夫、福沢義文：吹雪時における光の減衰と視程、雪氷、38(4)、pp.9-13、1976
- 8) 松沢勝、竹内政夫：気象条件から指定を推定する手法の研究、雪氷、64(1)、pp.77-85、2002
- 9) Matsuzawa, M., Y. Kajiyu, and M. Takeuchi: The development and validation of a method to estimate visibility during snowfall and blowing snow, *Cold Regions Science and Technology*, 41, pp.91-109, 2005
- 10) 武知洋太、松澤勝、中村浩：吹雪時に人間が感じる視程と視程計や吹雪計による計測値との関係、北海道の雪氷、No.28、pp.17-20、2009
- 11) Sogo, H., and N. Osaka: Effects of inter-stimulus interval on perceived locations of successively flashed perisaccadic stimuli, *Vision Research*, 42(7), pp.899-908, 2002
- 12) 渡邊淳司、坂本憲久、則武厚、前田太郎、館暲：サッカー残像の視覚的持続時間の研究、映像情報メディア学会誌、58(12)、pp.1808-1814、2004
- 13) Sakurai, T., H. Takechi, T. Kokubu, M. Matsuzawa: The visibility of the human eye in blowing snow with the effect of suspended snow particles' afterimages, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 21, pp.76-85, 2023