

XRAINの降水強度とCCTVカメラの画像を用いた冬期道路の視界状況評価に関する研究

中村 裕貴¹・萩原 亨²・永田 泰浩³・
高橋 翔⁴・鶴巻 亮一⁵・松岡 直基⁶

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: ynakamura.hokudai@gmail.com (Corresponding Author)

²フェロー 北海道大学大学院教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: hagiwara@eng.hokudai.ac.jp

³非会員 一般社団法人 北海道開発技術センター (〒001-0011 札幌市北区北11条西2丁目2-17)
E-mail: nagata@decent.or.jp

⁴正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail: stakahashi@eng.hokudai.ac.jp

⁵非会員 株式会社 北海道気象技術センター (〒064-0824 札幌市中央区北4条西23丁目1-18)
E-mail: ryoichi.tsurumaki@howtecc.jp

⁶正会員 株式会社 北海道気象技術センター (〒064-0824 札幌市中央区北4条西23丁目1-18)
E-mail: naoki.matsuoka@howtecc.jp

冬期の北海道では、吹雪により道路上で視界不良が発生し、事故などのリスクが高まる。冬期道路の視界状況は降雪や風、地形などの影響で変化するため、道路監視用 CCTV カメラの画像に加え、道路路線に沿った高い時空間分解能を有する降雪情報の利用が望まれる。本研究では、XRAIN の降水強度の降雪情報としての適用可能性について検証した。XRAIN の降水強度と CCTV カメラの画像の WIPS に相互相関を用い、両者の影響度合いと時間遅れを調べた。その結果、西風で降雪が観測されたとき、降水強度の時間変化は WIPS の時間変化に影響し、降水強度に対し WIPS が遅れて変化する状況が明らかとなり、降水強度を降雪情報として用いることの有用性が示された。両者の変化が異なるとき、風向風速や道路周辺の環境に関する情報が必要なことも明らかとなった。

Key Words: road management, visibility condition, XRAIN, CCTV camera, WIPS

1. はじめに

冬期の北海道では、気温が低く乾いた雪質の粒子が地上に堆積し、風が強まることで吹雪が発生する。道路上で吹雪が発生すると突発的な視界不良を誘発し、交通規制や事故のリスクを増加させる¹⁾²⁾³⁾。近年、北海道では急激に発達した低気圧により、吹雪の発生頻度がこれまで比較的低かった地域においても、吹雪による道路交通への影響が生じる事例が増えている。積雪寒冷地における吹雪による災害対策として、防雪柵の整備などハード面からの対策もされているが、整備には多くの費用と時間を要する。一方、財政制約の観点から、道路管理のコスト低減を計りつつ、効率的な道路管理が求められてい

る。吹雪による視界不良は突発的・瞬間的な現象であるため、時空間的な変動が大きく、その実態を定量的に把握することは難しい。実際の冬期道路管理では、地域の気象条件に精通した道路維持担当者の経験や勘により支え続けられている側面も大きい。時空間的に大きく変動する道路上の視界不良をリアルタイムかつ的確に把握し、その情報を道路管理者やドライバーに提供できれば、行動判断の支援や、効率的な道路管理およびコスト低減への貢献が期待できる。

永田・萩原らは、道路状況やトンネル防災の監視、気象把握を主目的として国道沿いに整備されている閉鎖回路テレビカメラ（以降、Closed-circuit TeleVision カメラ：CCTV カメラ）の画像を画像処理し、視界評価の指標と

なる Weighted Intensity of Power Spectra (以降, WIPS) を算出し, 自動的かつ大量に視界状況の評価および把握を行うシステムを構築した. システムにより CCTV カメラの画像から評価値 (WIPS) を求め, 冬期道路上の視界状況を評価した^{4,5)}. 中村らは, 北海道にある国道 244 号と国道 272 号に設置された複数の CCTV カメラの画像からシステムにより WIPS を求め, 風や雪による視界不良の検知を試みた. その結果, 気象データと WIPS を用いて, 複数の地点で無降雪条件時における強風による視界不良を評価できることを示した⁶⁾.

次に, 道路上の地点ではなく路線としての視界情報を生成するために, 中村らは道路パトロールカーに搭載した車載カメラの走行画像から WIPS を求め, CCTV カメラと組み合わせて道路上の視界状況を評価した. その結果, 車載カメラの WIPS はドライバの道路前方の視界評価と関連しており, 道路上で視界が変化しやすい地点を示していた⁷⁾. しかし, 道路パトロールカーの走行頻度は限られており, 時空間的に大きく変動する道路上の視界不良をリアルタイムに把握するには, 路線に沿った視界状況の予測が不可欠となる. 降雪や風, 道路周辺の環境や地形などの情報が予測に必要となる. しかし, 地域気象観測システム (以降, アメダス) は観測地点が限られており, 道路路線に沿った高い時空間分解能を有する降雪情報が望まれる^{8,9)}.

本研究では, 時空間分解能の高い降雪情報として, 国土交通省の運用する高性能レーダ雨量計ネットワーク (以降, eXtended RAdar Information Network : XRAIN) で観測された降水強度 (mm/h) を利用し, 地上の視界状況の評価への適用可能性について検討する. XRAIN は空間分解能が 250m メッシュ, 観測間隔が 1 分間であるため, 高頻度かつ細かく降水強度を観測できる. Xバンド MP レーダ雨量計 (以降, X-MP 雨量計) を用いて, 地上における吹雪の発生状況を面的かつリアルタイムに把握できる見込みがあることが明らかになりつつある. 大宮らは, 積雪寒冷地である北海道で, XRAIN を用いた地上の吹雪の定量的な把握について研究している. 上空における飛雪流量の面的な推定値を地上の実測値と比較した結果, 風による粒子の移流を考慮することで, 両者の間には正の相関があることを示した. さらに X-MP 雨量計を用いて推定した地上の飛雪流量をスノー・パーティクル・カウンター (SPC) による実測飛雪流量と比較したところ, 両者のバラツキは大きかったものの, 正の相関があり定性的に概ね整合することが示された^{10,11)}. さらに, 大宮らは X-MP 雨量計を用い, レーダから求めた降雪の強さと風速より, 上空における吹雪の強さ (飛雪流量) を推定した. 推定された飛雪流量から地上の視程を推定し, 地上実測値との比較検証により, 飛雪流量・視程ともに推定結果が概ね妥当であることが確認



図-1 CCTVカメラと地域気象観測システムの位置

された¹²⁾. XRAINを用いて, 冬期の降雪や吹雪をリアルタイムに把握できる可能性がある.

本研究では, X-MP 雨量計と Cバンド MP レーダ雨量計 (以降, C-MP 雨量計) で構成される仕様の XRAIN で観測された降水強度の, 道路沿いの降雪情報としての適用可能性について検証する. 具体的には, 相互相関を用い, XRAINの降水強度と CCTVカメラの WIPSの時間変化の影響度合いや時間遅れを求め, XRAINの降水強度の時間変化が道路上の視界状況に与える影響を明らかにする. このとき, 冬期道路上の視界状況は, 降雪が弱くても風により雪が舞う影響で変化することもある⁹⁾. XRAINの降水強度に加え, アメダスの風向風速データを併せて用い, 風向風速の時間変化が道路上の視界状況に与える影響について考慮する. これらの結果を用いて, 冬期道路上の視界状況の評価において, XRAINの降水強度, アメダスの風向風速データ, CCTVカメラの画像の WIPSを組み合わせて視界状況を評価することの利点を示す.

2. 分析対象地域と分析に用いるデータ

(1) 分析対象の地域と日時

本研究で対象とする地域は, 図-1に示す北海道開発局留萌開発建設部管理の国道 232 号の 22km 区間 (K.P. 56.0 ~ K.P. 78.0) とした. K.P.は, キロポスト (距離標) のことである. 図-1には, 国道 232 号の 22km 区間におけるキロポスト地点, 7 箇所の CCTV カメラ, 2 箇所の地域気象観測システム (アメダス) の位置を示している. この区間は, 冬期に吹雪による視界不良が発生しやすい傾向がある. 表-1 は, 分析対象とした 2020 年 12 月の 4 日間の平均気温, 平均風速, 主な風向をそれぞれ示している. 表-1に示す時間帯は, 吹雪による視界不良が発生する可能性が高かった. また, 雪氷の付着やカメラの撮影方向が変わる影響を避けるため, 7 箇所の CCTV カメラのうち, これらの影響がほとんどない 2 箇所の CCTV カメラ (K.P. 67.8 と K.P. 72.0) を分析に使用した. 表-2 に

CCTV カメラの主な仕様を示す¹³⁾。現在、CCTV カメラは HD 画質 (1280×720) が標準であるが、分析に用いる羽幌地域の CCTV カメラは SD 画質 (720×480) である。

図-2 は、本研究の対象地域に近い XRAIN の函岳観測所の位置と、対象地域を含む羽幌地域の 10km メッシュを示している。10km メッシュは、降水強度を提供するための 100 個の 1km メッシュから構成される。

(2) 分析に用いるデータ

本研究で対象とする現象は、吹雪による視界不良である。冬期の北海道では、気温が低く乾いた雪質の粒子が地上に堆積し、風が強まることで吹雪が発生する。吹雪による視界不良は、降雪および積雪量の観測が数センチでも発生する。このような気象条件下において、冬期の道路路線に沿った視界状況の変化を分析するために、4 種のデータを用いた。

a) XRAIN の降水強度 (mm/h)

XRAIN は、河川の維持管理や防災活動のために、国土交通省が開発したリアルタイム雨量観測システムである。土屋らは、X-MP 雨量計で構成される初期の仕様の XRAIN による雨量観測は、レーダ近傍は観測精度が高いが、レーダから離れるにつれて過小傾向を示していたことを明らかにした¹⁴⁾¹⁵⁾。過小評価の要因として、X-MP 雨量計は、使用する波長帯の特性から降雨による電波の減衰 (降雨減衰) が大きい。そのため、強雨域では電波が大きく減衰し、観測不能領域 (電波消散域) が発生する可能性があることを示した¹⁶⁾¹⁷⁾。山地らは、X-MP 雨量計と降雨減衰が小さく電波消散域が発生し難い C-MP 雨量計の連携技術について検討した。その結果、C-MP 雨量計と X-MP 雨量計の合成により、観測された雨量情報の 1 分間隔配信の広域化と電波消散域が発生しにくい観測の安定化を可能とする成果を得た¹⁸⁾。五十嵐らは、2018 年より一般へのデータ提供が開始された新しい仕様の XRAIN (C-MP 雨量計と X-MP 雨量計を合成したもの) を用いて、合成されたレーダ雨量計では、X-MP 雨量計で発生していた強雨による電波の減衰の影響で発生する消散がないことを確認した¹⁹⁾。

従って、X-MP 雨量計と C-MP 雨量計が合成された新しい仕様の XRAIN では、降雨減衰や電波消散の影響が少なく、道路路線に沿った降水強度を把握できる可能性があると考えられる。ただし、XRAIN の降水強度は大気中の雨粒子の観測に基づいており、冬期には空気中の雨粒子の多くは雪粒子である。雪粒子の粒径は雨粒子より小さく、レーダの反射強度による観測が降雨と異なる可能性がある。さらに、上空から落下する雪粒子が地面に到達するまでの移流について考慮する必要がある¹⁰⁾²⁰⁾。冬期の降雪や吹雪を把握するために XRAIN の降水強度を降雪情報として用いる上で、雪粒子に対するレーダの

表-1 吹雪による視界不良が発生しやすい時間帯の一覧

年月日	時間帯	平均気温 (°C)	平均風速 (m/s)	主な風向
2020/12/26	12:00-16:00	-5.7	10.5	西北西
2020/12/27	11:00-15:00	-4.5	8.0	西または西北西
2020/12/29	10:00-14:00	-5.4	9.7	西
2020/12/31	12:00-13:30	-7.2	3.3	南南東
	13:40-16:00	-6.6	11.9	西北西

表-2 国土交通省が設置する CCTV カメラの仕様

撮像素子	単板 CCD (カラー)
有効画素数	約 38 万画素以上
解像度	水平：480 本以上
S/N	47dB 以上
最低被写体照度	電子感度 OFF：0.4ルクス以下 電子感度 ON：0.007ルクス以下
カメラケース	ワイパ・デフロスタ付き

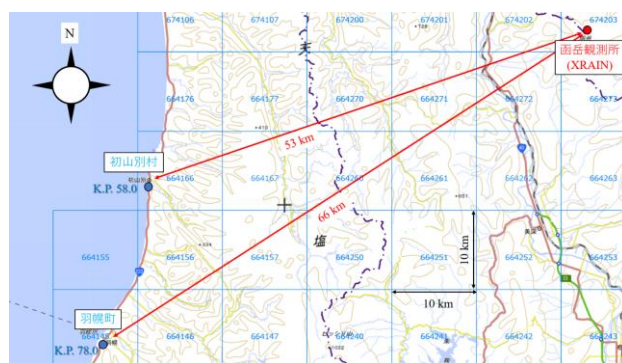


図-2 羽幌地域の 10km メッシュと函岳観測所の地図

反射強度や移流については今後も検討すべき課題である。降水強度 (mm/h) の原データとして、データ統合・解析システム (DIAS) から「国土交通省 XRAIN CXMP composite データセット」をダウンロードした²¹⁾。このデータセットは、C-MP 雨量計と X-MP 雨量計の地域単位の合成雨量データから構成される。降水強度の空間分解能は 250m メッシュ、観測間隔は 1 分間、情報配信までの時間は約 1 分間である。本研究では、250m メッシュの平均値から求めた 1km メッシュの降水強度から、10 分前から現在時刻までの平均値を求め、現在時刻の降水強度 (mm/h) とした。

b) CCTV カメラの画像

CCTV カメラは高さ 8~10m に設置されており、道路状況やトンネル防災の監視、気象把握を主目的としている。国土交通省では、効率的で高度な維持管理などに必要な無線通信網や光ファイバネットワーク等の電気通信関係の施設を整備し、この光ファイバネットワークに CCTV カメラなどを接続することで、道路管理者が直接動画像を確認できる²²⁾。CCTV カメラの画像は、CCTV カメラで撮影された動画から切り出されており、画像が

動画から切り出される間隔は5分である。

c) 地域気象観測システムの気温・風向風速

分析対象地域には、2箇所に地域気象観測システム（アメダス）があり、主に降水量・気温・風向風速・日照の4要素を観測している。本研究で対象とする国道232号では西風による吹雪が発生しやすいことから、分析に用いたCCTVカメラに近い羽幌特別地域気象観測所（以降、羽幌アメダス）の気温・風向・風速のデータを10分間隔で収集した。

d) CCTVカメラの画像のWIPS

Weighted Intensity of Power Spectra (WIPS) は、道路上の視界状況を評価するために萩原らによって開発された指標である⁹⁾。本研究では、冬期道路上の視界の評価指標として、CCTVカメラの画像からWIPSを算出した。WIPSは、人間のコントラスト感度関数に基づいて画像内の空間周波数の差を表し、道路上の視界を評価することができる^{9,23)}。WIPSを算出するための画像処理方法は、以下の通りである^{4,9)}。

CCTVカメラの動画から切り出された画像（720×480ピクセル）を使用する。次に、道路の遠方を含み、電柱や対象物の影響を避けるように範囲を定め、画像から256×256ピクセルの2次元画像を切り出す。そして、256×256ピクセルの2次元画像に記録されている赤緑青（RGB）成分の強度から、各画素のグレースケール強度を算出した。グレースケール強度は、0から255の範囲である。さらに、2次元高速フーリエ変換（FFT）を用いて、画像を空間周波数成分ごとに分解した。FFTによって計算されるパワースペクトルの強度は、1度ごとの周期に対する空間周波数の振幅に相当する。最後に、1.5～18周期/度の範囲のパワースペクトルの強度を合計したものがWIPSとなる。数値が高いほど視界は良好、数値が低いほど視界は不良となる。晴天時には、道路上の画像の各空間周波数成分のパワースペクトルが大きく、WIPSは大きくなる。霧や雪など視界が悪い時は、パワースペクトルは小さくなる。その結果、WIPSは小さくなる。WIPSが8.0より高いとき、前方の視界はおよそ500～1,000mである。WIPSが7.5から8.0のとき、前方の視界はおよそ200～500mである。WIPSが7.5より低いとき、前方の視界はおよそ100～200mである。

(3) 雪氷の付着がWIPSへ与える影響

雪氷の付着により、CCTVカメラの画像は前方の視界とは異なる状況となり、的確な視界評価は難しくなる。このため、雪氷が付着しない画像を対象とし、これまでも視界評価を行ってきた^{9,7)}。ただし、CCTVカメラのケース前方のガラス面にはワイパやデフロスタが装備されており、雪氷の付着を防ぐ対策がなされている²⁰⁾。このため、多くの場面で雪氷の付着は軽度なものとなる。し

かし、降雪があり強風となったとき、ケースのガラス面に雪氷が付着する。付着した雪氷で前方を視認できなくなりそうとき、道路管理者はカメラの方向を反対に向けるなどの対策を行う。

分析に用いたK.P.67.8、K.P.72.0の2箇所のCCTVカメラは、冬期間においてカメラの撮影方向がほとんど変わらなかったことから、雪氷の付着が起きにくいカメラと言えた。実際、表-1の分析対象日時において、WIPSの算出および視界状況の把握に大きく影響する程度の雪氷の付着はなかった。2020年12月26日と12月29日に、WIPSを算出する範囲に雪氷が若干付着した。このとき、画像内のコントラストがやや小さくなり、WIPSが視界状況より低い値となった。ただし、雪氷が付着した時間は短く、かつWIPSの変化に対する影響は小さかったことから、道路上の視界状況の評価に用いた。一方、国道232号の22km区間にある他の5箇所のCCTVカメラでは、冬期間にカメラの撮影方向が変わったり、視界状況を把握できないほどの雪氷の付着があった。

3. 相互相関関数による降水強度とWIPSの分析

(1) 降水強度とWIPSの相互相関

相互相関関数は、時間的に変化する2変数間の関係の類似度を示すもので、2つの時系列変数の位相の時間遅れ(τ)の関数として表される²⁴⁾。本研究では、時間的に変化する2変数間（降水強度とWIPS）の相互相関を求めた。式(1)に示すようにWIPSを y_i 、降水強度を x_i とし、両者の相互相関を計算した。位相の時間遅れ(τ)の単位は（分）である。相互相関の値の符号が負の場合、降水強度の増加後、遅れてWIPSが低くなることを意味する。

$$C(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(y_{i+\tau} - \bar{y})}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right\} \left\{ \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right\}}} \quad (1)$$

$C(\tau)$: 相互相関

τ : 位相の時間遅れ (分)

N : データ数 ($i = 1, \dots, N$)

x_i : 降水強度 (mm/h)

y_i : WIPS

\bar{x} : 降水強度の平均値 (mm/h)

\bar{y} : WIPSの平均値

(2) 相互相関の時間間隔

本研究で用いる相互相関 $C(\tau)$ の時間間隔は5分間隔とした。CCTVカメラの画像は5分間隔で動画から切り出される。一方、XRAINの降水強度は1分間隔となる。しかし、2変数間の相互相関を求めるには、両者の時間間隔を揃える必要がある。CCTVカメラのWIPSと降水強度の観測状況を可能な限り重ねるため、相互相関の時間間隔を5分間隔とした。例えば、8時25分から8時30分の間に撮像されたCCTVカメラの画像からWIPSを求め8時30分のWIPSとし、8時21分から8時30分までの降水強度の平均値を同時刻の降水強度とした。同様に、8時30分から8時35分の間に撮像されたCCTVカメラの画像からWIPSを求め8時35分のWIPSとし、8時26分から8時35分までの降水強度の平均値を同時刻の降水強度とした。このように両者の観測時刻を5分間隔とし、相互相関を計算した。

4. 風向風速・降水強度とWIPSの変化の分析

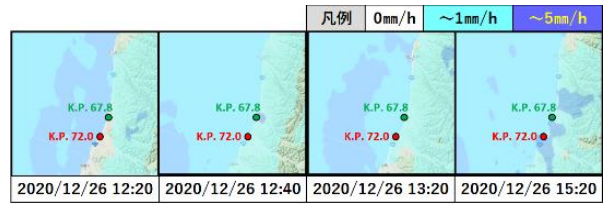
(1) 分析に用いる図の構成について

図-3、図-4、図-5、図-6に示す各図のa)は、X/CバンドMPレーダ(XRAIN)リアルタイム雨量情報による、降水強度がピークとなった時刻の分析対象地域上空の降水強度分布である。上空の色が濃くなるほど降水強度は強まり、図中の緑点がK.P.67.8、赤点がK.P.72.0の位置をそれぞれ示している。各図のb)は、羽幌アメダスの風速の時間変化およびWIPSと降水強度の時間変化である。縦軸が上にいくほど風速と降水強度は強まり、WIPSの値は低くなり、視界状況は不良となる。羽幌アメダスの風速の時間変化の図には、その時間帯の主な風向を図中に示した。WIPSと降水強度の時間変化では、WIPSの変化の中で、視界不良や降水強度がピークとなったところを赤点で示した。各図のc)はK.P.67.8、d)はK.P.72.0における、分析対象日時内で降水強度がピークとなった時刻の前後30分を含む降水強度とWIPSの相互相関の分布を示している。縦軸が相互相関係数の値、横軸が時間遅れ(分)である。2020年12月27日は、K.P.67.8で降水強度のピークが観測されなかったため、図-4ではK.P.72.0の相互相関の分布のみ示している。各図のe)は、WIPSと降水強度の時間変化の図の赤点に対応するCCTVカメラの画像とそのときのWIPSである。画像内の赤枠がWIPSの算出位置である。

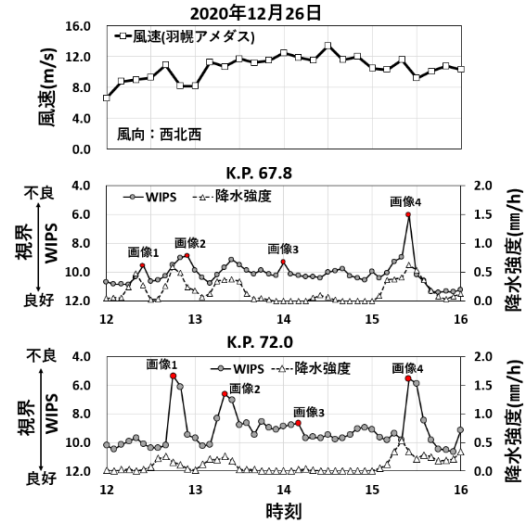
(2) 2020年12月26日

図-3a)は、2020年12月26日のK.P.67.8とK.P.72.0を含む分析対象地域上空の降水強度分布である。図-3b)は、2020年12月26日の羽幌アメダスの風向風速の変化、K.P.

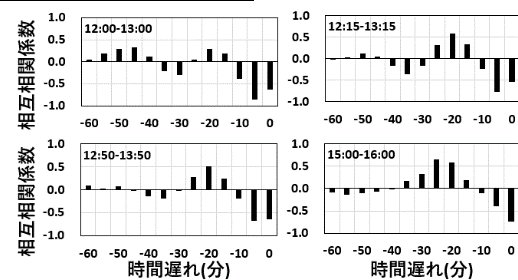
a) 分析対象地域上空の降水強度分布



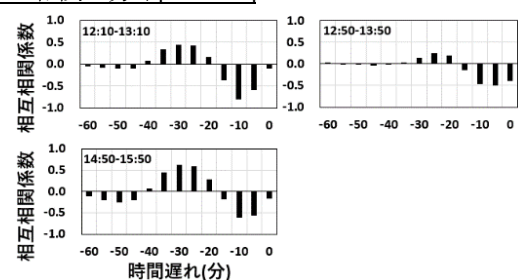
b) 風向風速・降水強度とWIPSの変化



c) 相互相関の分布[K.P.67.8]



d) 相互相関の分布[K.P.72.0]



e) CCTVカメラの画像とWIPS

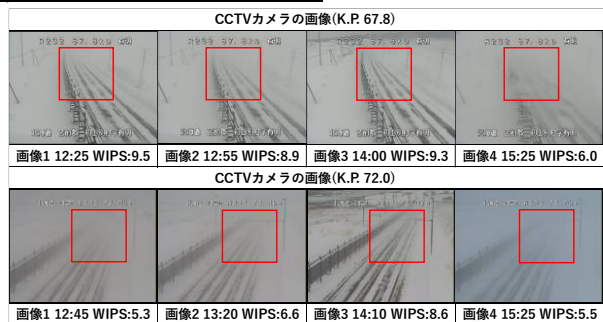


図-3 風向風速・降水強度とWIPSの変化[2020年12月26日]

67.8とK.P.72.0におけるWIPSと降水強度の変化である。

12時から16時にかけて、降水強度のピークはK.P.67.8で4度、K.P.72.0で3度観測された。また、降水強度の増減に対し、WIPSも時間遅れでそれに合わせた増減を繰り返した。図-3 e)に示す赤点時の画像から、道路前方で雪が舞い視界不良が発生していることがわかる。K.P.67.8の画像4のWIPSが他より低いのは、カメラに軽度の雪水の付着があったためである。K.P.72.0で、14時10分まで降水強度が0 (mm/h) に対してWIPSがやや低い値を推移したのは、画像遠方で雪が舞っていたためである。

図-3 c), d)によると、降水強度がピークとなった時刻の前後30分における降水強度とWIPSの相互相関係数の最大値は、K.P.67.8で12時00分-13時00分が-0.85 (時間遅れ5分)、12時15分-13時15分が-0.77 (時間遅れ5分)、12時50分-13時50分が-0.67 (時間遅れ5分)、15時00分-16時00分が-0.73 (時間遅れ0分) となった。K.P.72.0では、12時10分-13時10分が-0.80 (時間遅れ10分)、12時50分-13時50分が-0.49 (時間遅れ5分)、14時50分-15時50分が-0.61 (時間遅れ10分) となった。相互相関係数の最大値の符号は負で、降水強度の増減に対しWIPSが遅れて変化する結果となった。

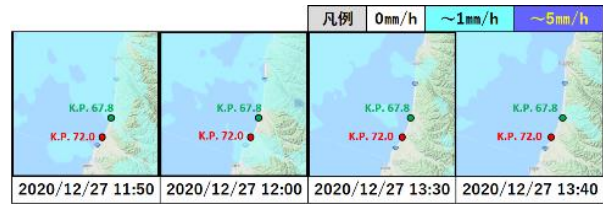
2020年12月26日の気象データとWIPSの変化において、K.P.67.8とK.P.72.0の双方で、降水強度が増加した後にWIPSが低くなった。K.P.72.0では、降水強度が減少してもWIPSは低い値で推移した。このことから、降水強度の増減に伴い遅れて道路上の視界が変化する状況と、降水強度が減少してもWIPSが低い値で推移する状況を、降水強度とWIPSから捉えることができた。

(3) 2020年12月27日

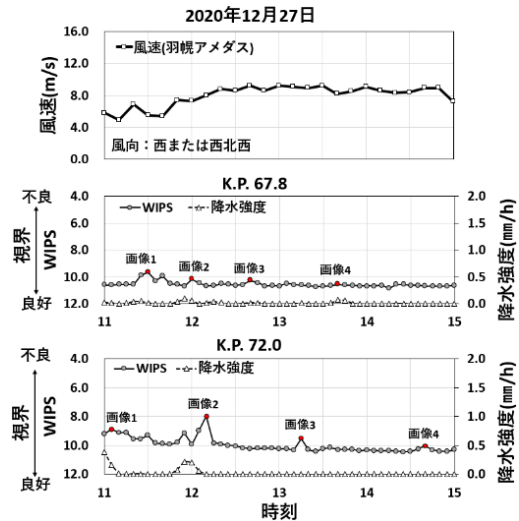
図-4 a)は、2020年12月27日のK.P.67.8とK.P.72.0を含む分析対象地域上空の降水強度分布である。図-4 b)は、2020年12月27日の羽幌アメダスの風向風速の変化、K.P.67.8とK.P.72.0におけるWIPSと降水強度の変化である。K.P.67.8では、11時から15時にかけて降水強度は0 (mm/h)、WIPSはほとんどが10.0から11.0の間を推移した。降水強度がないとき、WIPSの変化はほぼ一定で、図-4 e)に示す画像遠方の視界は良好だった。K.P.72.0では、11時から12時にかけて降水強度の増減に対し、WIPSも時間遅れでそれに合わせた増減を繰り返した。また、降水強度のピークは1度観測された。図-4 e)に示す赤点時の画像から遠方がもやもやしていることがわかる。12時30分以降は、WIPSはほとんどが10.0から11.0の間を推移した。13時15分にWIPSが9.5となったのは、軽く雪が舞ったためである。

図-4 d)によると、K.P.72.0における降水強度とWIPSの相互相関係数の最大値は、11時30分-12時30分が-0.76 (時間遅れ10分) となった。相互相関係数の最大値の符号は負で、WIPSが遅れて変化する結果となった。

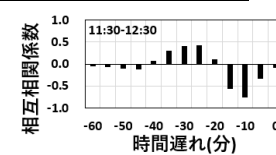
a) 分析対象地域上空の降水強度分布



b) 風向風速・降水強度とWIPSの変化



d) 相互相関の分布[K.P.72.0]



e) CCTVカメラの画像とWIPS

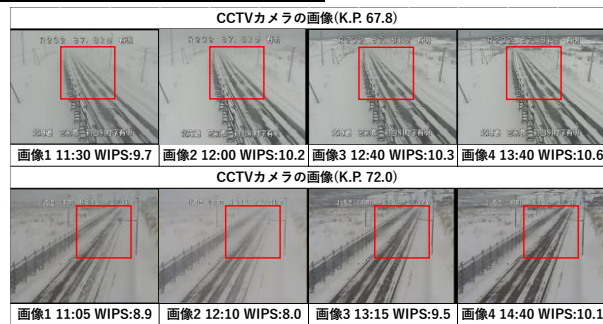


図-4 風向風速・降水強度とWIPSの変化[2020年12月27日]

2020年12月27日の気象データとWIPSの変化において、K.P.67.8とK.P.72.0の双方で、降水強度がほとんど増加せず、WIPSも大きく変化しなかった。このことから、天候が良好なとき視界は良好で、その様子を降水強度とWIPSから確認できた。

(4) 2020年12月29日

図-5 a)は、2020年12月29日のK.P.67.8とK.P.72.0を含む分析対象地域上空の降水強度分布である。図-5 b)は、2020年12月29日の羽幌アメダスの風向風速の変化、K.P.67.8とK.P.72.0におけるWIPSと降水強度の変化である。10時から14時にかけて、降水強度のピークはK.P.67.8で

10時台に2度、K.P.72.0で10時台と11時台にそれぞれ1度観測された。また、降水強度の増減に対し、WIPSも時間遅れでそれに合わせた増減を繰り返した。図-5 e)に示す赤点時の画像から、画像遠方で雪が舞う様子や、視界不良が発生していることがわかる。K.P.67.8で画像1のWIPSが他よりやや低いのは、軽度な雪氷の付着があったためである。K.P.72.0において、12時台に降水強度が0 (mm/h) に対してWIPSが変化したのは、軽度な雪氷の付着や車両が通行した影響である。また、図-4 e)に示す画像4では、地吹雪の影響で視界不良が発生した。12時25分と12時55分に車両の通行があり、WIPSがやや高くなった。一方、12時20分は道路上で軽く雪が舞ったため、WIPSがやや低くなった。また、図-5 e)に示す画像4では、地吹雪の影響で視界不良が発生した。

図-5 c), d)によると、降水強度がピークとなった時刻の前後30分における降水強度とWIPSの相互相関係数の最大値は、K.P.67.8で10時00分-11時00分が-0.55 (時間遅れ5分)、10時30分-11時30分が-0.79 (時間遅れ5分)となった。K.P.72.0では、10時00分-11時00分が-0.67 (時間遅れ5分)、11時00分-12時00分が-0.79 (時間遅れ5分)となった。相互相関係数の最大値の符号は負で、WIPSが遅れて変化する結果となった。

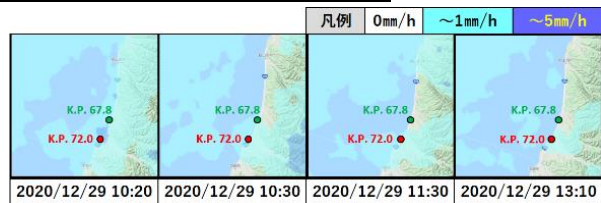
2020年12月29日の気象データとWIPSの変化において、K.P.67.8とK.P.72.0の双方で、降水強度が増加した後にWIPSが低くなった。K.P.72.0では、降水強度が減少してもWIPSは低い値で推移した。このことから、12月26日と同様に、降水強度の増減に伴い遅れて道路上の視界が変化する状況および降水強度が減少してもWIPSが低い値で推移する状況を、降水強度とWIPSから捉えることができた。

(5) 2020年12月31日

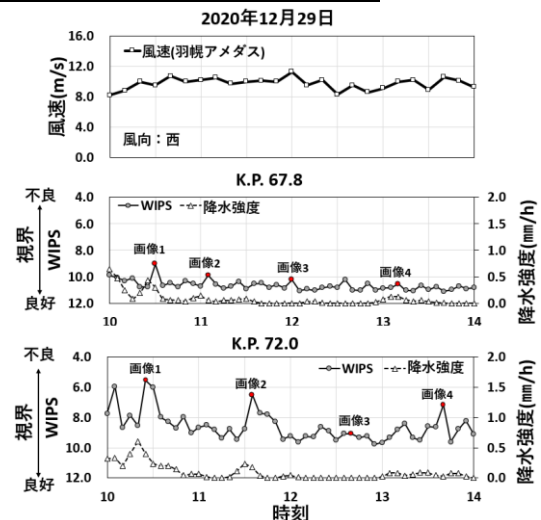
図-6 a)は、2020年12月31日のK.P.67.8とK.P.72.0を含む分析対象地域上空の降水強度分布である。図-6 b)は、2020年12月31日の羽幌アメダスの風向風速の変化、K.P.67.8とK.P.72.0におけるWIPSと降水強度の変化である。12時から16時にかけて、降水強度のピークは両カメラでそれぞれ2度観測された。

K.P.67.8では、12時から14時にかけて降水強度の増減に対し、WIPSも時間遅れでそれに合わせた増減を繰り返した。図-6 e)に示す赤点時の画像から、視界不良が発生していることがわかる。14時から15時にかけては、降水強度の増減に対し、WIPSの増減は異なった。理由として、地吹雪の影響が考えられる。14時以降の羽幌アメダスの風速は12.0 (m/s) より大きく、13時台の降雪が風速の上昇により舞い上がり、地吹雪による視界不良が発生した。画像3では、道路上で雪が舞い視界不良の状況が確認できる。15時から16時にかけては降水強

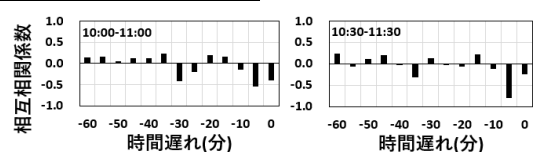
a) 分析対象地域上空の降水強度分布



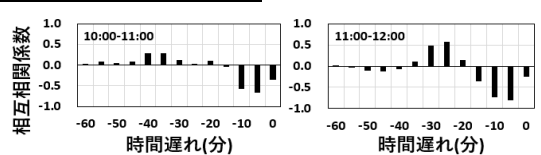
b) 風向風速・降水強度とWIPSの変化



c) 相互相関の分布[K.P.67.8]



d) 相互相関の分布[K.P.72.0]



e) CCTVカメラの画像とWIPS

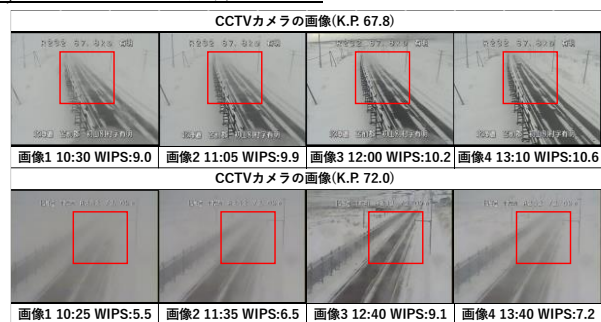


図-5 風向風速・降水強度とWIPSの変化[2020年12月29日]

度が増加し、画像4で雪が舞っている様子が確認できる。14時台と比べてWIPSが低い値に変化しなかったのは、画像赤枠内に映り込んだ防雪柵や路面により、コントラストが大きくなったためである。

図-6 c)によると、降水強度がピークとなった時刻の前後30分における降水強度とWIPSの相互相関係数の最大値は、K.P.67.8で13時10分-14時10分が-0.62 (時間遅れ

5分), 14時40分-15時40分が0.50(時間遅れ20分)となった。14時40分-15時40分で相互相関係数の最大値の符号が正となったのは, 降水強度の増減と WIPS の増減が異なったためである。

K.P. 72.0 では, 13 時台に降水強度の増減に対し WIPS の増減が異なった。図-6 e)に示す赤点時の画像から, 降水強度が増加した13時から13時30分にかけては, 視界不良は発生しておらず, 13時40分以降に時間差で視界不良が発生したことがわかる。理由として, 降水強度が増加した13時から13時30分の羽幌アメダスの風向風速は, 南南東・4.0 (m/s) 前後だった。その後, 13時40分以降に風向風速は西北西・12.0 (m/s) 前後へ変化した。海岸方向からの強い風により地吹雪が発生し, 視界不良となった。13時40分から15時30分にかけて, 10.0 (m/s) を超える風速と降水強度の観測により, WIPS は8.0未滿を推移し視界不良が継続した。15時30分以降は降水強度が減少し, WIPS は高い値へと変化した。

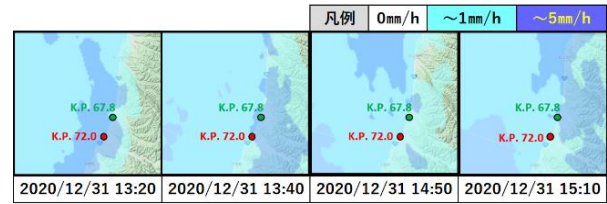
図-6 d)によると, 降水強度がピークとなった時刻の前後30分における降水強度と WIPS の相互相関係数の最大値は, K.P. 72.0 で12時45分-13時45分が-0.78(時間遅れ25分), 14時20分-15時20分が-0.68(時間遅れ0分)となった。相互相関係数の最大値の符号は負で, WIPS が遅れて変化する結果となった。12時45分-13時45分で25分の時間遅れが生じた理由として, 降水強度が増加した後に風向風速が変化し, その影響で WIPS が変化したためである。

2020年12月31日の気象データと WIPS の変化では, 降水強度の増加後に風向風速が変化し, 遅れて WIPS が低くなった。その後, 降水強度が減少しても風が強く, WIPS は低い値で推移し, 視界不良が継続した。再び降水強度が増加したが, 防雪柵や路面の影響で WIPS は雪が舞ってもやや高くなった。気象状況によっては, XRAIN の降水強度の時間変化と WIPS の時間変化が異なる場合がある。このとき, XRAIN の降水強度に加え, アメダスの風向風速データを併せて用い, 風向風速の時間変化が道路上の視界状況に与える影響について考慮することで, XRAIN の降水強度, アメダスの風向風速データ, CCTV カメラの画像の WIPS を組み合わせて冬期道路上の視界状況を評価することの利点を示した。

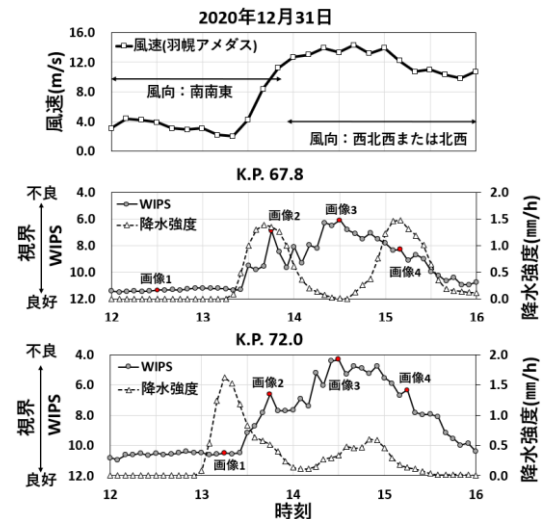
(6) 相互相関による分析結果

相互相関を用いて, XRAINの降水強度と CCTVカメラの画像から求めた WIPS の類似度と時間遅れを求めた。表-3は K.P. 67.8, 表-4は K.P. 72.0 の CCTVカメラで, 相互相関係数の符号が負で, かつ降水強度と WIPS の増減が比較的整合していたときの相互相関係数の最大値とそのときの時間遅れである。相互相関を用いて, カメラごと

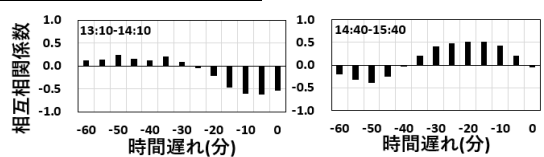
a) 分析対象地域上空の降水強度分布



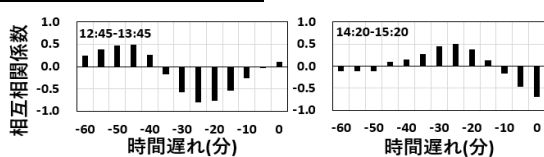
b) 風向風速・降水強度と WIPS の変化



c) 相互相関の分布[K.P. 67.8]



d) 相互相関の分布[K.P. 72.0]



e) CCTVカメラの画像と WIPS

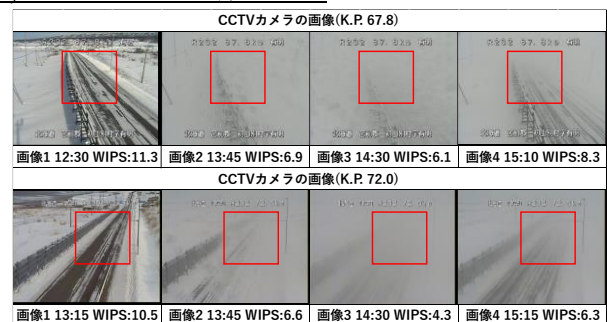


図-6 風向風速・降水強度と WIPS の変化[2020年12月31日]

した結果, K.P.67.8では時間遅れ5分, K.P.72.0では時間遅れ5分または10分が多い結果となった。これらの結果より, 風向が西のときに上空で降雪が観測されたあと, 雪粒子が落下して地上の視界が変化する状況を, XRAINの降水強度と CCTVカメラの画像の WIPS から説明できた。

5. まとめ

本研究では、XRAINの降水強度を道路上の降雪情報として用い、道路上の視界状況を評価できるか検証した。具体的には、XRAINの降水強度とCCTVカメラの画像から求めたWIPSに相互相関を用い、両者の時間変化から、降水強度によるWIPSへの影響度合いとその時間遅れを求め、両者の関係を分析した。その結果、風向が西で降雪が観測されたとき、降水強度の時間変化はWIPSの時間変化に影響しており、降水強度に対しWIPSが遅れて変化する状況が明らかとなった。

2020年12月31日の風向風速・降水強度・WIPSの変化では、13時から13時30分の間にK.P. 72.0で降水強度が増加した。風向が南南東かつ風速4.0 (m/s)前後と、地吹雪が発生する条件に該当しなかったため、WIPSは高い値を推移した。その後、風向が西北西、風速が12.0 (m/s)前後へ変化し、13時30分から14時にかけてK.P. 72.0のWIPSは低くなった。14時台は、K.P. 67.8とK.P. 72.0の双方で降水強度が減少した。海岸方向からの強い風により地吹雪となり、降水強度が減少してもWIPSは低い値を推移した。XRAINの降水強度の増減だけでは評価が難しい地上の視界状況を説明するとき、CCTVカメラの画像のWIPS、地上で観測された風向風速などの気象データを組み合わせ、視界状況を評価することが望ましいと言える。

これらの結果から、吹雪により道路上の視界が変化する状況の分析において、レーダ観測であるXRAINの降水強度を降雪情報として用いることの有用性が示された。また、吹雪により道路上で発生する視界不良は、局地性が強く評価および予測が難しい現象であるため、XRAINの降水強度とWIPSの変化が異なるとき、風向風速など地上観測の気象データと、防雪柵など道路周辺環境に関する情報が、道路上の視界状況の分析に必要であることも明らかとなった。

今後、観測データを増やすことでXRAINの降水強度による雪粒子に対するレーダの反射強度や移流についてのさらなる検証が必要である。さらに、複雑な気象条件による吹雪が発生しやすい路線において本手法を用い、XRAINの降水強度とCCTVカメラの画像を組み合わせた視界評価を試みるのが望ましい。また、CCTVカメラが設置されていない地点で視界が悪化することも多く、車載カメラの画像とXRAINの降水強度を用いた同様の手法により、路線としての視界情報生成を目指していきたい。

謝辞：本研究では、国土交通省水管理・国土保全局河川計画課河川情報企画室が提供する国土交通省XRAIN CXMP composite データセットを利用した。またこのデー

表-3 相互相関の最大値と位相の時間遅れ τ (分) [K.P.67.8]

位相の時間遅れ τ (分)・相互相関係数[K.P. 67.8]			
2020/12/26		2020/12/29	
12:00-13:00	5分, -0.85	10:00-11:00	5分, -0.55
12:15-13:15	5分, -0.77	10:30-11:30	5分, -0.79
12:50-13:50	5分, -0.67	2020/12/31	
15:00-16:00	0分, -0.73	13:10-14:10	5分, -0.62

表-4 相互相関の最大値と位相の時間遅れ τ (分) [K.P.72.0]

位相の時間遅れ τ (分)・相互相関係数[K.P. 72.0]			
2020/12/26		2020/12/29	
12:10-13:10	10分, -0.80	10:00-11:00	5分, -0.67
12:50-13:50	5分, -0.49	11:00-12:00	5分, -0.79
14:50-15:50	10分, -0.61	2020/12/31	
2020/12/27		12:45-13:45	25分, -0.78
11:30-12:30	10分, -0.76	14:20-15:20	0分, -0.68

タセットは、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で、収集・提供されたものである。

参考文献

- 1) Kajiya, Y., Kaneda, Y. and Tanji, K.: Factors Inducing Multi-vehicular Collisions During Visibility Reduced by Blowing snow, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1745, pp. 61-66, 2001.
- 2) Matsuzawa, M., Kajiya, Y. and Takeuchi, M.: The development and validation of a method to estimate visibility during snowfall and blowing snow, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 41, Issue 2, pp. 91-109, 2005.
- 3) 加治屋安彦, 松澤勝, 鈴木武彦, 丹治和博, 金田安弘: 降雪・吹雪による視程障害条件下のドライバーの運転挙動に関する一考察, 寒地技術論文・報告集, Vol. 20, pp. 325-331, 2004.
- 4) Nagata, Y., Hagiwara, T., Kaneda, Y., Araki, K. and Murakami, K.: Simple way to use closed-circuit television road images for poor-visibility information, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1980, pp. 105-116, 2006.
- 5) Hagiwara, T., Ota, Y., Kaneda, Y. and Araki, K.: Method of processing closed-circuit television digital images for poor visibility identification, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1973, pp. 95-104, 2006.
- 6) 中村裕貴, 萩原亨, 永田泰浩: CCTVカメラの画像処理を用いた暴風雪時の視程障害検知に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) 特集号, Vol. 74, No. 5, pp. I_165-I_172, 2018.
- 7) 中村裕貴, 萩原亨, 永田泰浩: 固定カメラと車載カメラによる冬期道路管理向け視界情報評価に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) 特集号, Vol. 75, No. 6, pp. I_599-I_607, 2020.
- 8) Matsuzawa, M., Kajiya, Y. and Yamagiwa, Y.: Effects of the

- Provision of Wide-Area Snowstorm Information on Winter Driving, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1948, pp. 152-160, 2006.
- 9) Nakamura, Y., Hagiwara, T., Nagata, Y. and Takahashi, S.: Development of Visibility Estimation Model on Winter Road Conditions using Image-based Driver's Visibility Index by On-Board Video Camera, *Proceedings of 2022 JSAE Annual Congress* (Spring), No. 20225234, 2022.
 - 10) 大宮哲, 國分徹哉, 松下拓樹, 高橋丞二, 松澤勝: XバンドMPレーダによる地上吹雪の定量的把握の可能性, *日本雪氷学会誌 雪氷*, 82 卷 3 号, pp. 145-156, 2020.
 - 11) 大宮哲, 松下拓樹, 大久保幸治, 菅原邦泰, 西村敦史: XバンドMPレーダを用いたVVP法による地上吹雪の面的推定, *寒地技術論文・報告集*, Vol. 37, pp. 63-68, 2021.
 - 12) 大宮哲, 大久保幸治, 松下拓樹, 菅原邦泰, 西村敦史: XバンドMPレーダを用いた地上吹雪分布のリアルタイム推定手法の提案, *寒地土木研究所月報*, 第831号, pp. 13-23, 2022.
 - 13) 国土交通省: CCTVカメラ設備機器仕様書(案), 2017.1.
 - 14) 土屋修一, 山地秀幸, 川崎将生: XRAIN雨量観測の実用化技術に関する検討資料, *国土技術政策総合研究所資料*, No. 909, 2016.
 - 15) 土屋修一, 川崎将生, 五道仁実: 降雨減衰補正と合成雨量作成手法の改良によるXRAIN観測雨量の精度向上, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol. 71, No. 4, pp. I_457-I_462, 2015.
 - 16) 岩波越, 前坂剛, 木枝香織, 真木雅之, 三隅良平, 清水慎吾: Xバンド偏波レーダによる降雨観測における簡易減衰補正, *日本気象学会大会講演予稿集*, p. 128, 2007.
 - 17) 中北英一, 金原知穂, 山口弘誠: Xバンド偏波レーダによる雨滴粒径分布の時空間構造の推定と非偏波レーダへの利用, *京都大学防災研究所年報*, No. 54B, pp. 397-409, 2011.
 - 18) 山地秀幸, 土屋修一, 川崎将生: CバンドMPレーダ雨量計とXRAINによる高精度広域雨量観測, *土木技術資料* 58-7, pp. 26-29, 2016.
 - 19) 五十嵐孝浩, 竹林洋史, 浜田裕貴, 的場萌実, 飛岡啓之, 澤田悦史, 平川了治, 上村雄介: 平成29年7月九州北部豪雨におけるC-X合成レーダ雨量による土砂災害危険度判定, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol. 74, No. 5, pp. I_1033-I_1038, 2018.
 - 20) Derin, Y., Anagnostou, E., Anagnostou, M. and Kalogiros, J.: Evaluation of X-Band Dual-Polarization Radar-Rainfall Estimates from OLYMPEX, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 20 (9), pp. 1941-1959, 2019.
 - 21) Kawasaki, A., Yamamoto, A., Koudelova, P., Acierto, R. A., Nemoto, T., Kitsuregawa, M. and Koike, T.: Data Integration and Analysis System (DIAS) Contributing to Climate Change Analysis and Disaster Risk Reduction, *Data Science Journal*, Vol. 16, No. 41, pp. 1-17, 2017.
 - 22) 小木曾俊夫: 国土交通省における情報通信ネットワークの現況と活用について, *建設マネジメント技術*, 2007年8月号, pp. 12-14, 2007.
 - 23) Nakamura, Y., Hagiwara, T., Nagata, Y. and Takahashi, S.: Development of poor visibility assessment method in winter using images taken by on-board video camera, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 14, pp. 1824-1841, 2022.
 - 24) Oktaviani, F., Miftahuddin and Setiawan, I.: Cross-correlation Analysis Between Sea Surface Temperature Anomalies and Several Climate Elements in The Indian Ocean, *Parameter: Journal of Statistics*, Vol. 1(1), pp. 13-20, 2021.

(Received June 17, 2022)

(Accepted January 17, 2023)

A STUDY ON VISIBILITY EVALUATION ON THE ROAD IN WINTER USING PRECIPITATION INTENSITY OF XRAIN AND IMAGES CAPTURED BY CCTV CAMERA

Yuki NAKAMURA, Toru HAGIWARA, Yasuhiro NAGATA,
Sho TAKAHASHI, Ryoichi TSURUMAKI and Naoki MATSUOKA

In winter Hokkaido, poor visibility occurs due to snowstorm on the road and increases the risk of accidents and traffic restrictions. Visibility conditions on the road are affected by snowfall, wind, and roadside environments, it is desirable using not only still image captured by Closed-circuit TeleVision (CCTV) camera but also snowfall information along the road. In this study, we attempted to verify the applicability of precipitation intensity observed by eXtended RADar Information Network (XRAIN) as snowfall information along the road. Using cross-correlation, we investigated degree of influence of precipitation intensity of XRAIN on value of the WIPS calculated from still image captured by CCTV camera. As a result, when snowfall was observed and wind direction was west, the time variation of precipitation intensity by XRAIN affected that of value of the WIPS, and it was revealed that the change of value of the WIPS was related to that of precipitation intensity with time lag. It was indicated that using precipitation intensity observed by XRAIN as snowfall information was usefulness. On the other hand, it was also revealed that information such as wind speed, wind direction, roadside environment, and so on is necessary when the time change between precipitation intensity and value of the WIPS was different.