

カルマンフィルターを用いた 視界情報予測手法の研究

永田 泰浩¹・萩原 亨²・滝谷 克幸³・金田 安弘⁴

¹正会員 (財)日本気象協会北海道支社 (〒064-8555 札幌市中央区北4条西23丁目)
E-mail: naga@sapporo.jwa.or.jp

²正会員 北海道大学大学院工学研究院 (〒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, (財)日本気象協会北海道支社

⁴非会員, (社)北海道開発技術センター

著者らは道路監視用CCTVカメラの画像に画像処理を行い、視界情報として視界不良の状況を推定する視界情報提供システムを構築してきた。また既存研究において、気温が0℃未満の条件においては風速、降雪量が視界情報に大きな影響を及ぼすことが確認できている。本研究の目的は視界情報とこれらの気象要素の予測データを用いて視界状況を予測することである。予測モデルとしては重回帰モデルとカルマンフィルターを用いた。実際に2010年冬期に吹雪の頻発する稚内開発建設部で蓄積した視界情報提供システムの視界に関する情報と、同期間の風速、降雪量、気温の実況データ、予測データを用いた分析の結果、1時間前の視界情報と風速、気温、降雪量の気象予測データを用いたカルマンフィルターによる予測が変化する視界情報に対する追従性が高いことが確認できた。

Key Words : 冬期道路管理、視界情報提供システム、気象予測情報、カルマンフィルター

1. はじめに

冬期に吹雪による視程障害、吹きだまり障害が頻発する北海道では、除雪などの道路維持作業や通行規制などの道路管理のために、現地の吹雪の状況を把握する必要がある。永田らは道路監視用CCTVカメラの動画から静止画をキャプチャーし、画像から視界情報を自動的に生成する図-1に示す装置（以後“視界情報提供システム”と称す）を提案してきた^{1) 2)}。これにより視界に関する時空間的な情報の生成と記録を行い、現地の視界状況を道路維持担当者にリアルタイムに伝達が可能である。永田らはこの視界情報提供システムを用いて情報提供実験を実施し、提供した視界情報が道路維持管理に有益との評価を道路管理者や道路維持業者から得た³⁾。また萩原らが2009年12月から2010年2月の冬期（以降、2009-2010冬期）に釧路地方と稚内地方において行った実験では、72箇所の道路監視用CCTVカメラ画像から生成する視界情報が、降雪や吹雪のダイナミックな変化状況を直接的に示す情報となり、冬期の道路維持管理の高度化に資する「雪」情報になりうるという結果を得た⁴⁾。視界情報は道路の維持管理に必要な現在の視界状況を把握する上

で有効な情報であった。

著者らは現在の吹雪がどの程度継続するのか、視界状況が悪化するのか、改善するのか、吹きだまりはさらに成長するのかといった将来的な吹雪の状況を予測、把握することが、効果的、効率的に道路維持作業、道路管理には重要と考えた。永田らは既存研究において、視界情報を求める際に視界情報提供システムが算出する視認性指標値と風速、降雪量、気温に深い関係があることが示しており²⁾、南らはこれらの気象要素の実況値から視認性指標値を推定する方法を分析している⁵⁾。

本研究の目的は視界情報提供システムが算出する視界に関する情報と実際の気象予測情報を用いて、数時間先の視界、吹雪の状況を予測することである。実際に2010年冬期に吹雪の頻発する稚内開発建設部で蓄積した視界情報提供システムの視界情報と、同期間の風速、降雪量、気温の実況データ、予測データを材料として、視界状況を予測するモデルを構築した。本研究では視界情報の予測モデルとして、重回帰モデルとカルマンフィルターを用いた。それぞれのモデルでの予測結果と当該時刻に視界情報提供システムの算出した視界状況の実測値を比較して、予測の正確性と課題を分析した。

2. 使用データ

(1) 視界に関する情報

視界に関する情報として、視界情報提供システムのデータベースに蓄積されたWeighted Intensity of Power Spectrum（以後“WIPS”と称す）とWIPSの階級値である視界情報を用いた。吹雪や地吹雪による視程障害が頻発する稚内開発建設部管内一般国道40号の道路監視用CCTVカメラ5台（図-1参照）を対象地点とした。2010年1月と2月の2ヶ月間の情報を収集した。WIPSおよび視界情報については15分間隔で情報を記録しているが、気象予測データは毎正時の情報であることと、視界情報は日中の画像に対する正確性が高いことを考慮して、8時～16時のデータを収集した。

収集した視界に関する情報を表-1に整理した。視界情報の視界レベルはレベル1が視程500m以上、レベル2が視程200～500m、レベル3が視程100～200m、レベル4が視程100m未満を示す。WIPSと視界情報の全てのデータが収集できた場合は1地点あたり9時間×59日で531データとなる。しかし、静止画像の取得エラーや異常画像があり、収集できた情報はカメラ①と③が523データ、カメラ②が525データ、カメラ④が519データ、カメラ⑤が419データとなった。カメラ⑤のデータが少ないのは、2010年2月17日に道路拡幅工事の関係でCCTVカメラが移設されたためである。表-1のように、カメラ①とカメラ⑤は視界レベル4、視界レベル3といった視界不良の発生頻度が高かった。逆にカメラ②やカメラ③は視界不良の発生頻度が低かった。



図-1 実験対象区間と視界情報を収集したCCTVカメラ

表-1 収集した視界に関する情報のデータ数

道路監視用 CCTVカメラ	カメラ①	カメラ②	カメラ③	カメラ④	カメラ⑤	
合計(9時間×59日)	531	531	531	531	531	
画像取得エラー	4	3	4	5	3	
異常画像(青一色)	4	3	3	3	51	
画角エラー(別方向撮影)	0	0	1	0	58	
着雪・着氷	0	0	0	4	0	
収集データ数 (視界情報)	(WIPS)	523	525	523	519	419
	視界レベル1	470	498	498	473	373
	視界レベル2	19	23	17	29	20
	視界レベル3	15	2	5	12	12
	視界レベル4	19	2	3	5	14

(2) 気象予測データ

2010年1月～2010年2月の日中時間帯（8時～16時）を対象として、気象予測データを収集した。対象とした道路監視用CCTVカメラ5地点は現地気象観測を行っていないため、日本気象協会の所有する1kmメッシュ気象データから予測対象地点である道路監視用CCTVカメラの位置での気象データを抽出した。収集した観測要素は永田らや南らの研究結果を踏まえ、気温、風速、降雪量の3要素とした。

気温のデータは気象庁のGlobal Spectral Model (GSM)の値に、気象庁のアメダスや気象官署、北海道開発局の道路および河川テレメータ、日本気象協会のマメダスといった現地気象観測データを加味して再計算した日本気象協会の1kmメッシュデータを用いた。更新は毎正時であり、1時間間隔で24時間先までの予測値を有しているが、降雪量の予測時間にあわせて0時間（現況推定値）から6時間先までの予測データを収集した。降雪量の1kmメッシュデータは気象庁の降水短時間予測データと前述の気温の1kmメッシュデータから推定されている。降水部分も気象庁の現地気象観測データを踏まえており、気温データと同様に現地気象観測結果も含めて推定された値となっている。更新は毎正時であり、1時間間隔で0時間（現況推定値）から6時間先までの予測値を収集した。風速のデータも気温と同様に気象庁のGSMでの現況推定値および予測値が元になっている。ただし、風速については局所的に値が大きく変化することがあり、現地気象観測データは考慮されていない。風速のデータも更新は毎正時であり、1時間間隔で0時間（現況推定値）から6時間先までの予測値を収集した。

3. 予測モデル

(1) 重回帰モデル

重回帰モデルについては、はじめに気温、風速、降雪量の現況推定データ（0時間予測データ）を説明変数、WIPSを目的変数として予測対象期間中の回帰係数を定めた。その上で求めた回帰係数と気象予測データからWIPSを予測した。重回帰モデルの式を以下に示す。

$$WIPS_{ctj} = \beta_{0c} + \beta_{1c}x_{1mj} + \beta_{2c}x_{2mj} + \beta_{3c}x_{3mj}$$

β_{0c} : 定数項

$\beta_{1c}, \beta_{2c}, \beta_{3c}$: 回帰係数

x_{1mj} : 説明変数（気象予測データ-気温 : K）

x_{2mj} : 説明変数（気象予測データ-風速 : m/s）

x_{3mj} : 説明変数（気象予測データ-降雪量 : cm/h）

c : CCTVカメラの番号（1~5）

m : カメラ位置の1kmメッシュデータのコード

t : 予測時間

j : 現在時刻

2章で収集したWIPSデータ、気象予測データを用いて重回帰分析を行った結果を表-2に示した。重回帰係数は0.36のカメラ①が最も高く、カメラ②とカメラ⑤が0.29、カメラ④が0.23で、カメラ③が最も低く0.20であった。気温の回帰係数は全地点でプラスであったが、風速と降雪量はマイナスであった。気温が高く、風速が小さく、降雪量が少ないほどWIPSが大きくなる（視界が良くなる）傾向にあった。

表-2 現況推定データによる重回帰分析の結果

地点名	決定係数	説明変数	回帰係数	t値
カメラ①	0.36	x_{1t} : 気温(K)	0.042	6.5
		x_{2t} : 風速(m/s)	-1.007	-13.8
		x_{3t} : 降雪量(cm/h)	-0.080	-7.8
カメラ②	0.29	x_{1t} : 気温(K)	0.041	6.7
		x_{2t} : 風速(m/s)	-1.031	-11.9
		x_{3t} : 降雪量(cm/h)	-0.040	-3.9
カメラ③	0.20	x_{1t} : 気温(K)	0.048	8.5
		x_{2t} : 風速(m/s)	-0.721	-7.3
		x_{3t} : 降雪量(cm/h)	-0.022	-2.5
カメラ④	0.23	x_{1t} : 気温(K)	0.079	9.0
		x_{2t} : 風速(m/s)	-0.879	-6.8
		x_{3t} : 降雪量(cm/h)	-0.056	-4.4
カメラ⑤	0.29	x_{1t} : 気温(K)	0.085	9.2
		x_{2t} : 風速(m/s)	-0.844	-7.6
		x_{3t} : 降雪量(cm/h)	-0.053	-4.5

(2) カルマンフィルター

カルマンフィルターは、状態をN次元ベクトルの x で表す。Nは自由度、 x の各要素は各格子点上の変数である。本研究では x は3次元（気温、風速、降雪量の気象予測データ）のベクトルとした。以下に観測方程式と、時刻更新、観測更新の式を示した。これらの式を用い、図-2に示すフローのように現況から3時間後までのWIPSを予測した。

観測方程式 $y_i^0 = H_i(x_i)$

時刻更新 (2式) $x_i^f = x_{i-1}^a$

$$P_i^f = P_{i-1}^a + Q$$

観測更新 (3式) $x_i^a = x_i^f + K_i(y_i^0 - H_i(x_i^f))$

$$P_i^a = (I - K_i H_i) P_i^f$$

$$K_i = P_i^f H_i^T (H_i P_i^f H_i^T + R_i)^{-1}$$

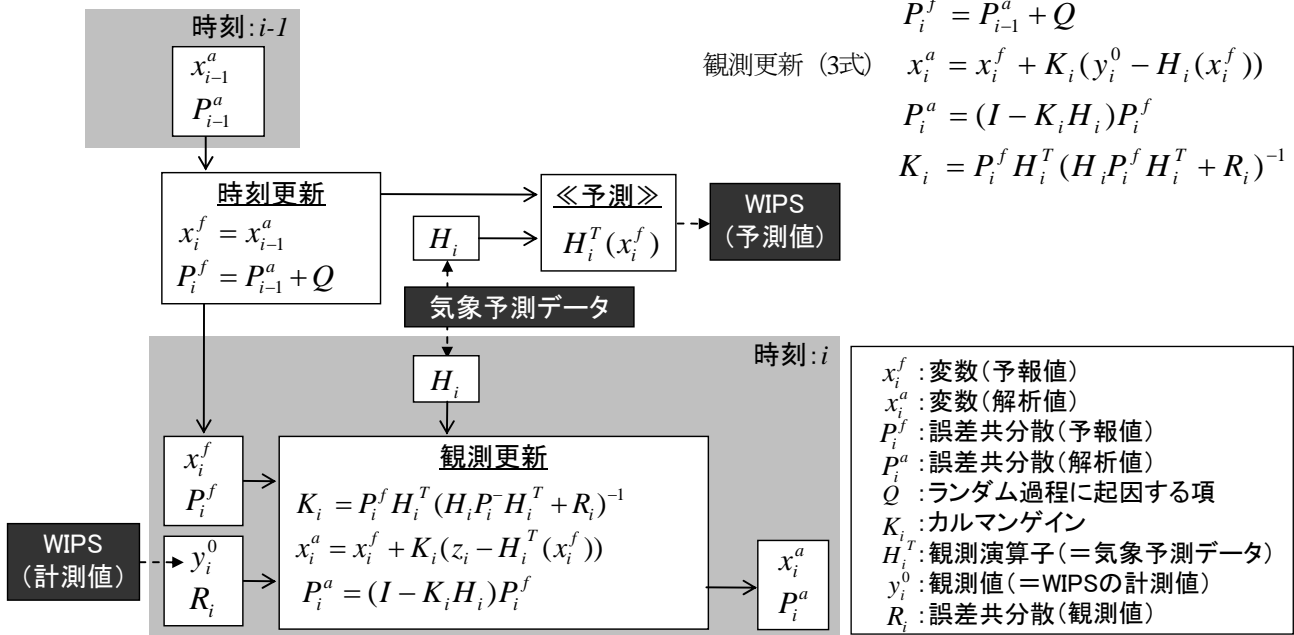


図-2 本研究で用いたカルマンフィルターのフロー

4. 相関係数による予測結果の比較

重回帰モデルとカルマンフィルターによって予測した現況および1時間後～3時間後のWIPSと、予測した時刻に視界情報提供システムが算出したWIPSの実測値（以後、“実測WIPS”と称す）の相関係数を比較した。比較結果を図-3に示した。

カルマンフィルターを用いた場合、図のように予測時間が現況に近くなればなるほど、確実に相関係数が大きくなっていった。いずれの地点でも3時間後の予測が最も相関係数が低く、2時間後、1時間後と相関係数は上昇し、現況の推定で最大の相関係数となっていた。重回帰モデルを用いた場合でも、予測時間が現況に近くなるほど相関係数が上昇する傾向はあったが、カメラ①やカメラ④は、2時間後の予測に比べて3時間後の予測の相関係数が高かった。カメラ⑤の3時間後および2時間後の予測を除き、重回帰モデルでの予測に比べてカルマンフィルターでの予測の相関係数が高かった。カルマンフィルターを用いた場合に最も相関係数が高かったのはカメラ①であり、現況の推定では相関係数が0.71となった。カメラ⑤が最も相関係数が低かったが、それでも現況の相関係数は0.66となった。重回帰モデルを用いた場合に最も相関係数が高かったのがカメラ①の現況での0.60であった。重回帰モデルに比べるとカルマンフィルターの相関性が高かったと判断できる。

5. 予測結果の時系列的な比較

(1) 予測結果の経過

図-3において、実測WIPSに対する相関係数が最も高かったカメラ①のWIPSの予測値および実測WIPSの経過を図-4、図-5に示した。四角は重回帰モデルによる予測結果、三角はカルマンフィルターによる予測結果を示している。白抜きの四角と三角はいずれもその時刻の実測WIPSを示しており、値は等しい。図より実測WIPSと予測値の差は、重回帰モデルに比べてカルマンフィルターの方が小さい。重回帰モデルでの予測結果は、実測WIPSとの差が1度大きくなるとその差は小さくなりづらかった。カルマンフィルターは1時間前のWIPSを参考に行っているため、予測結果が実測WIPSの変化を追従するような経過を示していた。視界不良時であっても緩やかに視界状況が変化する1月13日、2月5日、12日、20日は、カルマンフィルターによるWIPSの予測値と実測WIPSの差が小さい。カルマンフィルターによって予測したWIPSは重回帰モデルで予測したWIPSに比べて実測WIPSとの差が小さく、特に視界状況が緩やかに変動するような場合にWIPSの変動をうまく予測していた。

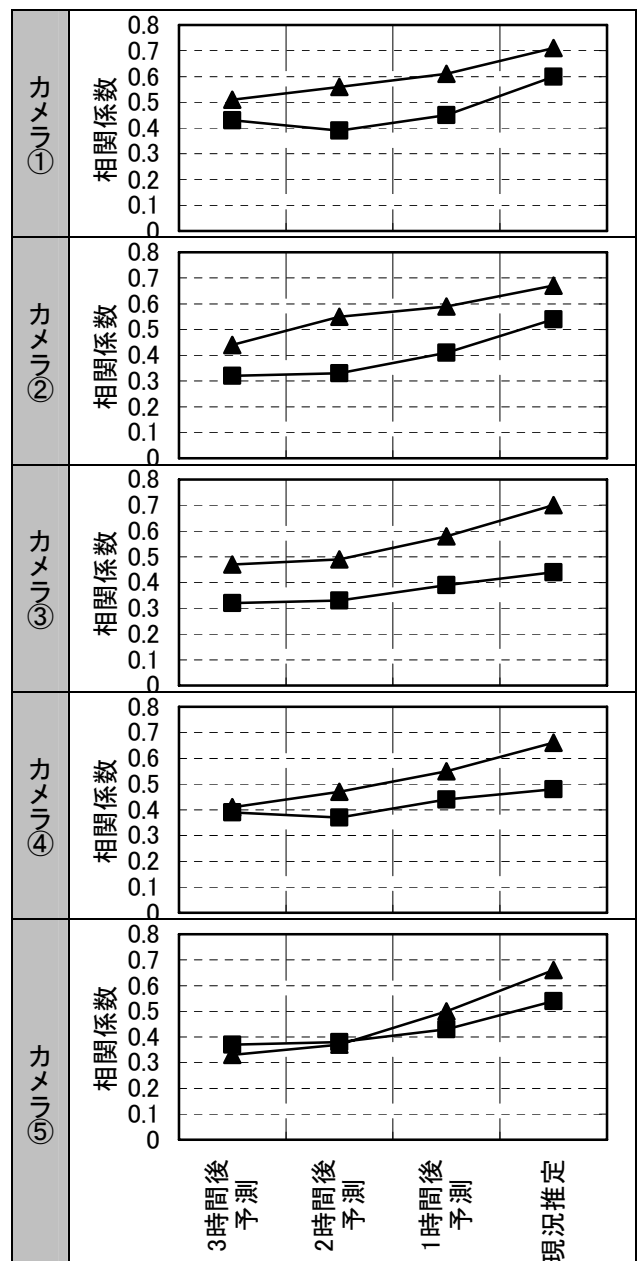


図-3 相関係数の比較 (■:重回帰モデル、▲:カルマンフィルター)

一方、1月21日、2月8日、2月10日は実測値（白抜き）の右側に黒と灰色のマーク（予測値）が並んだ状態となっていた。図-4の1月21日では、実測WIPSが急激に上昇しているが、予測値がそれに追いつかず1時間ずつ遅れて実測WIPSを追いかけている状態となっている。1月4日、1月16日、2月9日、2月15日も実測WIPSとカルマンフィルターの予測結果の差が大きい。こちらの事例では、実測WIPSが1時間ごとに大きく振幅しており、それを1時間遅れで予測値が追従している。そのため、実測WIPSと予測値が互い違いに上下を繰り返すような状況となっていた。いずれの事例も気象条件があまり変化していない状況で実測WIPSが急激に変化したために、カルマンフィルターの予測値がうまく追従できなかった可能性が考えられる。(2)ではこのような事例を分析した。

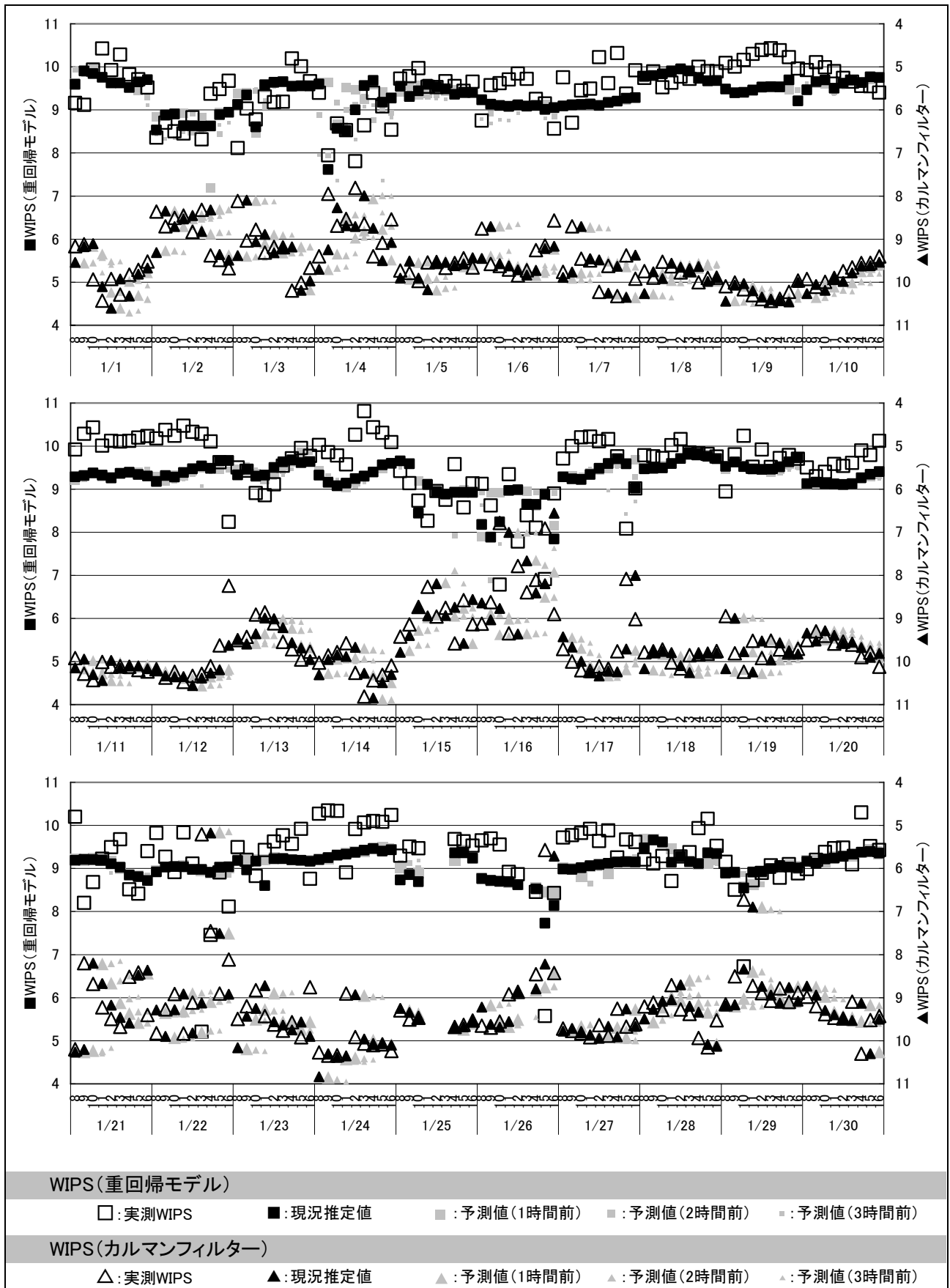


図-4 カメラ①の予測結果と実測値の経過 (2010年1月1日~1月30日)

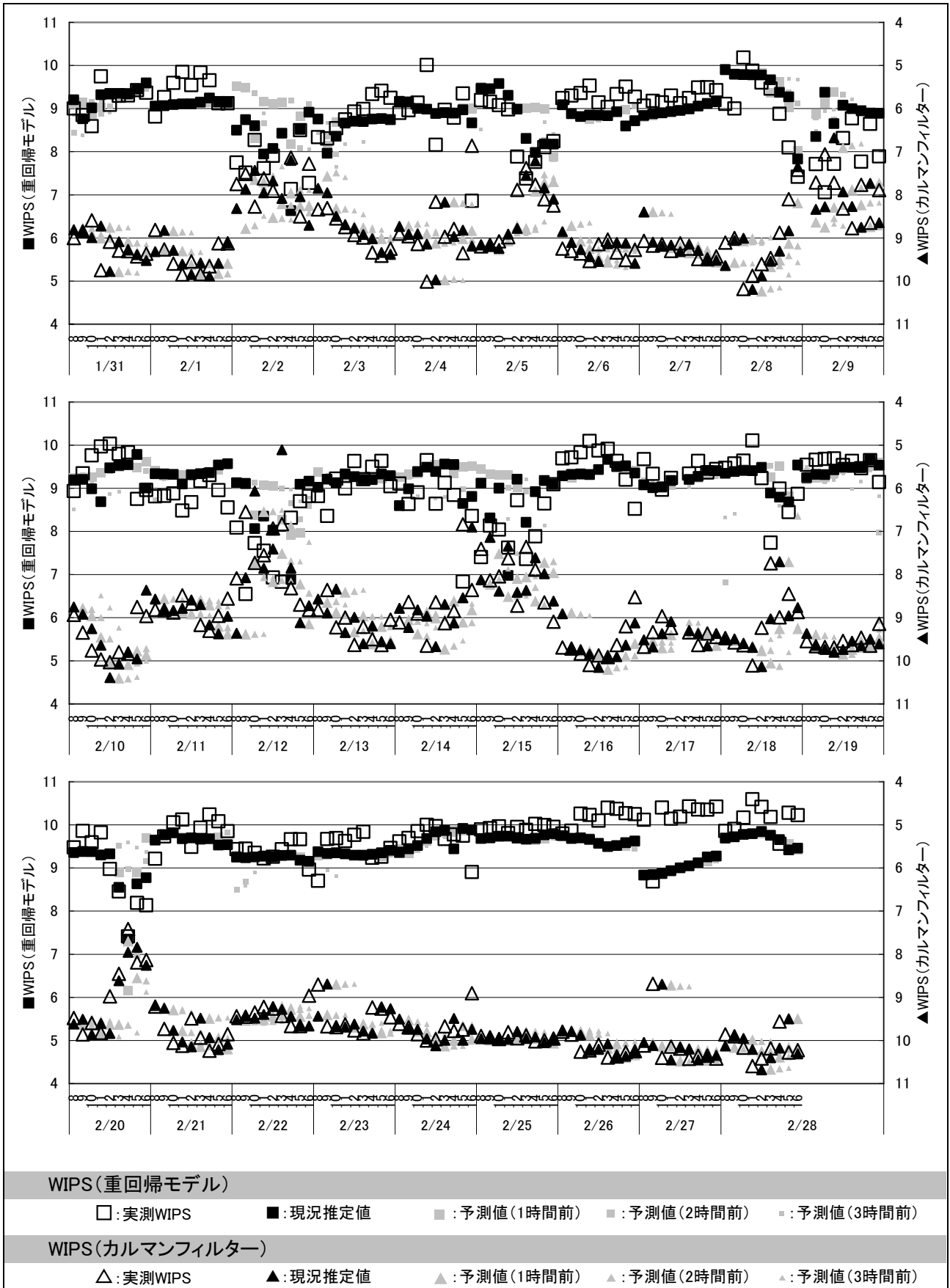


図-5 カメラ①の予測結果と実測値の経過 (2010年1月31日～2月28日)

(2) 事例による比較

カルマンフィルターによる予測と実測WIPSの差が大きかった2010年1月16日のカメラ①の視界情報予測結果と、視界情報提供システムによって算出された視界情報の実測値（以後“視界情報実測値”と称す）、気象予測データを表-3に示した。なお、視界情報の予測結果には視界情報実測値との差が最も小さい現況推定値を示した。

2010年1月16日9時の気象条件は風速は7.9m/s、降雪量1cm、気温-9.7℃で、視界情報実測値が視界レベル1であった。10時は風速8.0m/s、降雪量0.7cm、気温-8.3℃であり、既存文献⁶⁾を考慮すると吹雪発生に関する気象条件の差は小さいと言える。カルマンフィルターを用いた予測モデルは1時間前の9時の実測WIPSを考慮し、10時の視界情報を視界レベル1と推定した。しかし、視界情報実測値は視界レベル4であった。12時と13時については気温は0.1℃の差であるが、降雪量は0.3cm増加し、風速も0.3m/s大きくなっており、12時に比べると13時は吹雪の発生しやすい気象条件となっていた。カルマンフィルターを用いた予測モデルは12時の実測WIPS（視界レベル3）と13時の気象データから、13時の視界情報を視界レベル3と推定している。しかし13

時の視界情報実測値は視界レベル1であった。10時と11時、11時と12時、15時と16時も同様にカルマンフィルターを用いたモデルの推定結果と実測値に大きな差が生じている。気象データのみから評価する重回帰モデルは、気象条件のほぼ等しいこのような視界レベルの急変を評価できない。カルマンフィルターは1時間前の実測WIPSを考慮しているが、1月16日の事例では予測値と視界情報実測値の差が大きくなっていた。

図-6には2010年1月16日と、1月16日と同様に視界レベルが1まで低下するような厳しい視程障害が発生しているものの、カルマンフィルターによる予測結果と視界情報実測値の差が小さかった2010年2月12日の15分間隔の視界情報実測値の経過を示した。図のように、2月12日は視界不良が連続的に発生しているのに対し、1月16日は視界不良の継続時間が非常に短い。視界不良の発生が突発的であり、その回復も早かった。

2010年1月16日の事例で予測値と視界情報実測値の差が大きくなっていた理由として、気象条件がほぼ等しい状況で視界情報が大きく変化している点が挙げられる。吹雪時の視程は時間的変動が非常に大きい。10時の風速、気温が9時50分から10時までの10分間の平均値

表-3 2010年1月16日の視界情報（現況推定値と実測値）と気象予測データの経過（カメラ①）

	視界情報の予測結果と実測値			気象条件(実況推定値)			
	重回帰モデル (現況推定値)	カルマンフィルター (現況推定値)	視界情報実測値	風速(m/s)	降雪量(cm/h)	気温(℃)	
8:00	視界レベル2	視界レベル1	視界レベル1	8.0 m/s	0.7 cm/h	-9.8 ℃	8:00
9:00	視界レベル3	視界レベル1	視界レベル1	7.9 m/s	1.0 cm/h	-9.7 ℃	9:00
10:00	視界レベル2	視界レベル1	視界レベル4	8.0 m/s	0.7 cm/h	-8.3 ℃	10:00
11:00	視界レベル1	視界レベル4	視界レベル1	8.0 m/s	0.0 cm/h	-7.9 ℃	11:00
12:00	視界レベル1	視界レベル1	視界レベル3	8.1 m/s	0.0 cm/h	-7.3 ℃	12:00
13:00	視界レベル1	視界レベル3	視界レベル1	8.4 m/s	0.3 cm/h	-7.2 ℃	13:00
14:00	視界レベル1	視界レベル1	視界レベル2	8.8 m/s	0.3 cm/h	-6.3 ℃	14:00
15:00	視界レベル1	視界レベル2	視界レベル4	9.6 m/s	0.0 cm/h	-6.1 ℃	15:00
16:00	視界レベル3	視界レベル4	視界レベル1	9.8 m/s	1.0 cm/h	-5.7 ℃	16:00



□ 視界レベル1 □ 視界レベル2 □ 視界レベル3 □ 視界レベル4 ⊗ 視界情報なし(画像取得エラー)

図-6 予測と実測の差が大きかった日（2010年1月16日）と小さかった日（2010年2月12日）の比較

であり、10時の降雪量が9時から10時までの1時間の累積値であるのに対し、WIPSや視界情報は10時に撮影した画像から求めた瞬間的な値である。画像を取得した瞬間だけ吹雪が弱まった場合や、逆に取得した瞬間だけ吹雪が悪化した場合には、平均値や累積値である気象データとの差が大きくなったことが考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究では視界情報提供システムが算出する視界に関する情報と実際の気象予測情報を用いて、数時間先の視界、吹雪の状況を予測した。予測モデルとして重回帰モデルとカルマンフィルターを用い、それぞれのモデルでの予測結果と実測値を比較した。結論として、重回帰モデルに比べるとカルマンフィルターを用いたモデルの方が、予測値と実測WIPSの差が小さかった。本研究で用いた重回帰モデルは気象予測データ（風速、気温、降雪量）のみを説明変数として用いているが、この3要素の関係だけで吹雪の状況を予測することは難しかった。一方、カルマンフィルターを用いたモデルは、1時間前の実測WIPSの値を学習することで、重回帰モデルよりも実測WIPSと近い値を予測できていた。特に視界状況が緩やかに変動するような場合にはWIPSの変動をうまく予測できており、視界が悪化するのか、改善するのかといった将来的な視界状況を把握する上で、一つの情報として活用できる可能性を示すことができた。

一方、視界が急変するような場合には、重回帰モデル、カルマンフィルターのいずれを用いても視界状況をうまく予測することができなかった。ひとつの理由として、気象データと視界情報の時間的な位置づけの違いが考えられる。本研究で用いた気象予測データは10分間の平均値や1時間の累積値であるのに対し、視界情報提供システムの算出するWIPSや視界情報は瞬間的な値である。WIPSや視界情報は15分間隔で算出されており、複数の情報を収集するなどの方法によって気象予測データの時間に揃えるか、近年提供が始まっているより短時間の気象予測を用いてWIPSや視界情報の時間に揃えていく必要があると考えられる。また、カルマンフィルターについては、現在は非常に初歩的な観測方程式を用いている。吹雪時の飛雪や視程に関しては竹内⁷⁾をはじめ多くの研究が実施されている。このような既存研究も踏まえた観測方程式の改良によって予測精度の向上が可能と考えている。

謝辞：本研究にあたり、視界情報提供システムによる算出データを提供して頂いた国土交通省北海道開発局稚内開発建設部の関係各位に対し、厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Nagata Yasuhiro, Hagiwara Toru, Kaneda Yasuhiro, Araki Keiji and Sasaki Hirokazu : Application of Road Visibility Information System to Winter Maintenance, Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No.2055, pp.128-138 (2008).
- 2) 永田泰浩、萩原亨、金田安弘、荒木啓司、佐々木博一：「道路監視用 CCTV カメラの画像を利用した視認性情報システムの実用可能性についての研究」, 交通工学研究会、交通工学 Vol.44, No.3, pp.89-99, 2009.
- 3) 永田泰浩、萩原亨、金田安弘、川村文芳、田宮敏士：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, pp.969-978, 2009.Shepard, F. P. and Inman, D. L. : Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction, *Trans. AGU.*, Vol.31, No.2, 1950.
- 4) 萩原亨, 永田泰浩, 川村文芳, 金田安弘 : 冬期道路の管理に資する CCTV 画像を用いた道路視界情報生成に関する研究, 第 37 回土木計画学研究発表会.
- 5) Minami, M., Kato, R., Hagiwara, Y., Araki, K., Nagata, Y., and Takitani, K.: Development of a Visibility Estimation Model Based on Visibility Information from Road Images Captured in Winter. In Transportation Research Board 87th Annual Meeting Final Program, Washington, D.C. (2008) .
- 6) 雪氷調査法, 社団法人 日本雪氷学会北海道支部編, 北海道大学図書刊行階会 (1991) .
- 7) 竹内政夫：吹雪時の視程に関する研究, 土木試験所報告 第 74 号, 北海道開発局土木試験所 (1980) .

(2011.5.6 受付)