

気象メッシュデータを用いた路面雪氷状態予測の広域化に関する一検討

齊田光*1, 中島知幸*2, 佐藤賢治*1, 徳永ロベルト*1, 佐藤昌哉*1

1. はじめに

路面温度や路面雪氷状態は冬期道路管理の適正化を進める上で必要不可欠な情報であり、これらの予測手法は国内外を問わず様々な研究機関で開発されている。近年における路面雪氷状態予測手法は、より高度な冬期道路管理の実現や道路利用者への詳細な情報提供などの要求に応えるため、路線全体・地域全体における予測を可能とする手法が主流となりつつある。

筆者らは広域にわたる路面雪氷状態予測を実現するために、高解像度気象メッシュデータを用いた熱収支法による路面温度予測手法を提案した¹⁾。本手法は郊外の平野部などの沿道環境が単調な条件下では他の路面温度予測手法に近い予測精度を有しているが、路面雪氷状態の予測には至っていない。

そこで本研究では、上記手法で得られた路面温度予測値と降雪量メッシュデータを用いて路面雪氷層の凍結融解量を求めることで、広域にわたる路面雪氷状態を簡易的に推定する手法を提案し、予測精度および計算時間について検証を行った。以下に得られた結果を示す

2. 路面雪氷状態の簡易推定手法

2.1 雪氷質量の簡易推定手法

従来の路面雪氷状態推定手法では、最初に参考文献1)に示す手法により気温メッシュデータから仮想サーマルマッピングデータ（路線縦断方向の路面温度の高低を示すデータ）を生成し、路線の各地点における路面温度を推定する。その後、路面雪氷の融解・質量を雪氷層表面における長波放射フラックス、顕熱・潜熱フラックスおよび伝導熱フラックス等から推定する（図1参照）。従来の手法では路面雪氷層の凍結・融解質量 $M_m(\text{kg})$ は次式で求められる。

$$l_m \frac{dM_m}{dt} = (1 - \alpha_s)S + \varepsilon_s L_d - \varepsilon_s \sigma T_s^4 - \rho_a C_p C_h (T_s - T_a) - \rho_a l_e C_e (q_s - q_f) \quad (1)$$

ここに、

l_m : 凝固・融解潜熱 (J/kg)

α_s : 雪氷層のアルベド

S : 全天日射量 (W/m^2)

ε_s : 雪氷層の射出率

L_d : 大気放射量 (W/m^2)

T_s : 雪氷層の温度 (K)

σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($=5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$)

ρ_a : 空気の密度 (kg/m^3)

C_p : 空気の定圧比熱 ($=1005 \text{J}/\text{kgK}$)

C_h : 雪氷層表面の顕熱バルク係数 (m/s)

l_e : 蒸発潜熱 ($=2.50 \times 10^6 \text{J}/\text{kg}$) または蒸発潜熱 ($=2.83 \times 10^6 \text{J}/\text{kg}$)

C_e : 雪・氷の昇華または水の蒸発バルク係数 (m/s)

q_s : 雪氷層表面の飽和比湿 (kg/kg)

q_f : 大気の比湿 (kg/kg)

である。本手法は従来の手法で必要な長期間にわたる道路気象データの蓄積やサーマルマッピングデータの実測作業を必要としないため、広範囲にわたる路線で路面雪氷状態推定を実施する際の初期費用を大幅に抑えることが可能である。一方で、本手法を用いて路面雪氷状態推定を行うためには多くの気象データが必要であり、多数区間の予測を行う場合は計算負荷が非常に大きくなるという課題を有する。また、本手法では式(1)から明らかなように路面雪氷層の凍結・融解質量を求める際に舗装表面-雪氷層間の熱移動が考慮されておらず、熱収支的な誤差により路面雪氷状態の推定精度が低下する可能性がある。

そこで本研究では、上記の課題を解決するために次式を用いて路面雪氷層の凍結・融解質量を求めた。

$$l_m \frac{dM_m}{dt} = M_s C_s \frac{dT_s}{dt} + \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_f^4) + \rho_a C_p C_h (T_s - T_f) + \rho_a l_e C_e (q_s - q_f) + \frac{(T_s - T_f)}{\frac{Z_p}{\lambda_p} + \frac{D_c}{2\lambda_c}} \quad (2)$$

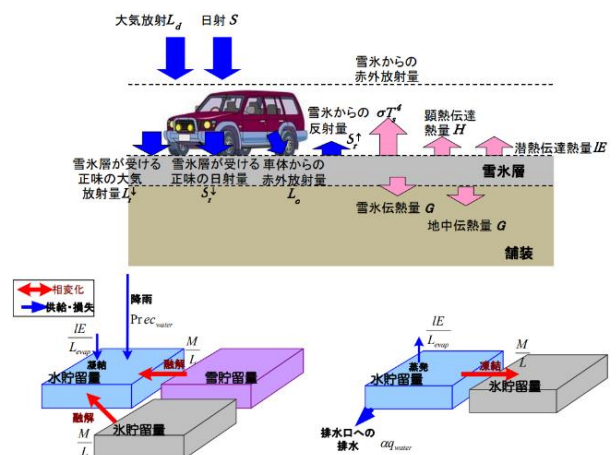


図1 路面雪氷状態簡易推定手法の概要

*1 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所

*2 北海道開発局 帯広開発建設部

ここに、

$M_s C_s$: 雪氷層の体積熱容量 (J/m^3K)

T_f : 雪氷層の融解温度 (K)

Z_p : 舗装厚さ (m)

λ_p : 舗装の熱伝導率 (W/mK)

D_c : 雪氷層厚さ (m)

λ_c : 雪氷層の熱伝導率(W/mK)

である。これにより、路面からの熱移動を考慮するとともに、全天日射量 S 、大気放射量 L_d 、気温 T_a 、大気の水蒸気比 q_a を用いることなく路面雪氷質量の凍結・融解質量を簡易的に求める。また、本結果に加えて降雪・降雨による雪および氷質量の増加、蒸発・昇華による水、雪および氷質量の変化、路外への排水による水質量の減少などを考慮することで任意の時刻における路面の水、雪および氷質量を推定する。

2.2 路面雪氷状態計算の高速化

従来の路面雪氷状態予測では、およそ 100m 区間毎に凍結融解量推定モデル (式(1)) により凍結融解量を推定し、さらに雪氷質量収支モデルを用いて水、雪および氷質量を推定している。一方で、これらモデルの入力値となる気象メッシュデータは 1km 格子であるため、100m 区間毎に前記モデルを用いることは非効率である。そこで、本研究で提案する手法ではまず路線上 1km 毎に凍結融解量推定モデル (式(2)) により融解・凍結質量を推定し、雪氷質量収支モデルを用いて路面雪氷層の水、雪および氷質量を推定する。その後、得られた水、雪および氷質量をおよそ 100m 区間毎に線形内挿することで計算時間の短縮を試みた(図 2 参照)。

3. 路面雪氷状態推定精度および計算時間の検証実験

本研究では提案手法による路面雪氷状態の推定精度および計算時間の短縮効果を検証するために、一般国道230号KP1~KP46および一般国道231号KP0~KP19 (図3参照)を対象として実験を行った。実験では、図4に示す冬期走行環境計測車両で検証対象区間を走行し、路面温度を赤外放射温度計で、路面すべり抵抗値 (HFN) を連続路面

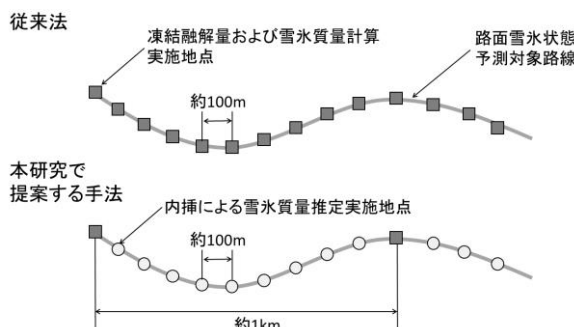


図2 路面雪氷状態推定計算の高速化の概要

すべり抵抗測定装置でそれぞれ路線に沿って線的に計測するとともに目視による路面雪氷状態を記録した。また、2. で提案した手法 (提案法) および従来の手法 (従来法) により路面温度および路面雪氷状態の推定を行い、得られた推定結果を実測値と比較することで路面温度および路面雪氷状態の推定精度を検証した。なお、路面雪氷状態の推定精度検証では路面雪氷状態の推定値は提案法および従来法で推定された水、雪および氷質量の比率から判別した値 (乾燥, 湿潤, シャーベット, 積雪および凍結の5分類) を、実測値はHFN計測結果と目視による路面雪氷状態判別結果から求めた値をそれぞれ用い、両者が一致した場合を的中と見なし的中率を求めた。

計算時間短縮効果の検証では、上記路線を対象として従来法および提案法により16時間先までの路面雪氷状態を1時間毎に推定し、計算に要した時間を計測した。なお、本検証では一般的なデスクトップPC (CPU: Intel CORE i5-3550 3.30GHz) を用いて路面雪氷状態推定を行った。

4. 検証の結果

4.1 路面温度の推定精度

表1は検証対象区間における天候毎、昼夜毎および沿道環境毎の路面温度の平均平方二乗誤差(RMSE)を示す。全



図3 路面雪氷状態推定精度および計算時間検証実験の対象区間



図4 冬期走行環境計測車両

ケースにおける従来法のRMSEは2.72℃、提案法のRMSEは2.47℃であり、提案法の路面温度の予測精度は従来法と同等以上であることが確認された。

沿道環境別のRMSEに着目すると、提案法では山間区間、峠区間および橋梁区間でRMSEが小さく、DID区間および郊外区間でRMSEが大きくなる傾向にあった。この理由としては、DIDおよび郊外区間では道路南側にある建築物などにより日射が遮蔽されたことにより日射量の空間変化が大きくなり、日陰となる区間で路面温度を過大に推定したためと考えられる。一方で、本検証対象路線における山間区間、峠区間および橋梁区間では道路南側に山地

や建築物などの日射を遮る地物が少なく日射量の空間変化が小さいために上記の要因による路面温度予測誤差が小さくなったと推察される。なお、本検証路線のうちアンダーパス区間ではロードヒーティングの影響により路面温度が高くなっていたが、従来法および提案法ではロードヒーティングが路面温度に及ぼす影響が考慮されていないためRMSEは著しく大きくなった。

天候別のRMSEに着目すると、提案法では晴天時にRMSEが高く、降雪時にRMSEが低くなった。この理由としては、晴天時は日射および日陰による影響により路面温度は空間的に大きく変動するが、降雪時に路面が雪氷

表1 検証対象区間における天候毎、昼夜毎および沿道環境毎の路面温度の平均平方二乗誤差 (RMSE)

		: RMSE<1.5℃									: RMSE>3℃									単位:℃		
国道	天気	昼夜	新モデル									従来モデル										
			全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダーパス区間	橋梁区間	トンネル区間	全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダーパス区間	橋梁区間	トンネル区間				
R230	全天気	全日	2.47	2.30	2.47	1.66	1.50	6.14	1.06	2.19	2.72	2.62	2.57	2.03	1.70	3.92	3.94	4.26				
		夜間	2.78	2.49	3.23	1.93	1.47	5.21	1.41	2.58	2.93	2.94	3.00	1.82	1.71	3.26	4.42	4.50				
	全天気	日中	2.16	2.10	1.70	1.38	1.53	7.07	0.72	1.80	2.52	2.30	2.13	2.24	1.70	4.57	3.46	4.02				
		晴天	全日	3.47	3.52	3.69	2.10	1.69	6.85	1.48	2.51	3.48	3.81	3.47	2.24	1.91	4.15	4.31	4.30			
	曇天	全日	2.42	2.16	2.32	1.64	1.56	6.97	1.13	2.28	2.75	2.84	2.63	1.99	1.70	3.31	4.05	4.35				
		降雪	全日	1.53	1.24	1.42	1.25	1.23	4.43	0.57	1.77	1.94	1.16	1.58	1.87	1.50	4.41	3.44	4.11			
R231	全天気	日中	2.45	2.57	2.26					2.32	2.46	2.51	2.33					1.82				
		晴天	日中	3.49	3.81	3.30					1.03	3.79	4.09	3.62				0.63				
	曇天	日中	2.62	2.46	2.72					2.63	2.70	2.56	2.80					2.05				
		降雪	日中	1.84	2.01	1.51					3.30	1.66	1.70	1.45					2.76			

		: RMSE<1.5℃									: RMSE>3℃									単位:℃		
国道	天気	昼夜	新モデル									従来モデル										
			全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダーパス区間	橋梁区間	トンネル区間	全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダーパス区間	橋梁区間	トンネル区間				
R230	晴天	夜間	3.92	3.69	4.85	2.60	1.81	5.40	1.87	3.13	3.81	4.18	4.16	2.13	2.06	2.92	4.81	4.67				
		曇天	夜間	2.67	2.21	3.14	2.01	1.64	5.74	1.57	2.61	2.82	2.89	2.83	1.81	1.74	2.83	4.48	4.60			
	降雪	夜間	1.22	1.11	0.94	0.83	0.70	4.14	0.50	1.71	1.80	1.17	1.53	1.36	1.12	4.43	3.74	4.11				
		晴天	日中	2.81	3.27	1.94	1.35	1.52	9.03	0.89	1.58	2.98	3.26	2.44	2.40	1.69	5.99	3.57	3.75			
	曇天	日中	2.16	2.10	1.50	1.26	1.48	8.21	0.69	1.95	2.69	2.80	2.44	2.18	1.65	3.79	3.61	4.11				
		降雪	日中	1.73	1.33	1.74	1.52	1.58	4.63	0.63	1.80	2.03	1.16	1.62	2.20	1.75	4.39	3.24	4.12			

表2 検証対象区間における天候毎、昼夜毎および沿道環境毎の路面雪氷状態の的中率

		: 適中率>0.7									: 適中率<0.3									
国道	天気	昼夜	新モデル									従来モデル								
			全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダーパス区間	橋梁区間	トンネル区間	全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダーパス区間	橋梁区間	トンネル区間		
R230	全天気	全日	0.55	0.63	0.49	0.54	0.72	0.55	0.45	0.30	0.50	0.62	0.48	0.44	0.38	0.56	0.41	0.29		
		夜間	0.59	0.68	0.46	0.66	0.76	0.63	0.47	0.32	0.53	0.69	0.46	0.47	0.37	0.65	0.38	0.32		
	全天気	日中	0.51	0.58	0.51	0.42	0.68	0.47	0.44	0.27	0.48	0.55	0.50	0.41	0.38	0.47	0.44	0.26		
		晴天	全日	0.36	0.55	0.08	0.37	0.77	0.83	0.25	0.21	0.26	0.57	0.07	0.07	0.10	0.88	0.05	0.11	
	曇天	全日	0.39	0.38	0.41	0.33	0.62	0.57	0.25	0.19	0.35	0.35	0.41	0.31	0.26	0.57	0.29	0.27		
		降雪	全日	0.93	1.00	1.00	0.97	0.80	0.22	0.90	0.51	0.93	1.00	0.98	0.97	0.80	0.22	0.90	0.50	
R231	全天気	日中	0.37	0.33	0.40					0.17	0.29	0.25	0.33					0.17		
		晴天	日中	0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.00	0.00				0.00		
	曇天	日中	0.13	0.00	0.21					0.00	0.13	0.00	0.21					0.00		
		降雪	日中	0.67	0.67	0.69					0.52	0.50	0.55					0.50		

		: 適中率>0.7									: 適中率<0.3									
国道	天気	昼夜	新モデル									従来モデル								
			全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダーパス区間	橋梁区間	トンネル区間	全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダーパス区間	橋梁区間	トンネル区間		
R230	晴天	夜間	0.44	0.60	0.09	0.61	0.74	0.76	0.42	0.35	0.30	0.63	0.07	0.11	0.16	0.83	0.08	0.18		
		曇天	夜間	0.50	0.54	0.48	0.50	0.62	0.72	0.33	0.20	0.47	0.54	0.48	0.47	0.15	0.72	0.42	0.36	
	降雪	夜間	0.95	1.00	1.00	0.99	1.00	0.28	0.75	0.45	0.95	1.00	1.00	0.99	1.00	0.28	0.75	0.47		
		晴天	日中	0.26	0.48	0.06	0.00	0.81	0.94	0.00	0.00	0.20	0.49	0.06	0.00	0.00	0.94	0.00	0.00	
	曇天	日中	0.27	0.22	0.34	0.16	0.61	0.43	0.17	0.18	0.24	0.16	0.34	0.16	0.36	0.43	0.17	0.17		
		降雪	日中	0.92	1.00	0.99	0.96	0.67	0.19	1.00	0.55	0.91	1.00	0.97	0.95	0.67	0.19	1.00	0.51	

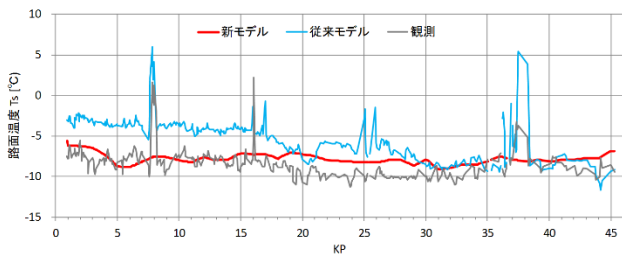


図5 路面温度の推定値および実測値の空間分布

で覆われた場合は路面温度の空間的な変動が小さくなるためと考えられる。

時刻別のRMSEは夜間において日中より小さくなる傾向にあり、この傾向は晴天時に特に顕著であった。これは夜間の放射冷却による路面からの熱損失を過小に見積もったことが主な要因であると考えられる。

図5は2016/1/18 午前9時における一般国道230号の路面温度の実測値と推定値の空間分布を示す。路面温度推定値は概ね実測値と同様の傾向を示し、本時刻におけるRMSEは1.88℃であった。一方、KP19～KP32では路面温度予測値は実測値と比較して2℃から3℃程度高くなった。これは路面温度予測時に当該区間南側の山地による日射遮蔽の影響を過小評価したためだと考えられる。

4.2 路面雪氷状態の推定精度

表2は検証対象区間における天候毎、昼夜毎および沿道環境毎の路面雪氷状態の的中率を示す。提案法による路面状態の適中率は、全天気・全日・全区間でみると従来法と概ね同程度であった。天候別では、従来法・提案法ともに晴天時は精度が低下し、降雪時の精度は良好であった。また、昼夜別では、従来法・提案法ともに夜間において的中率が高くなる傾向が見られた。区間別では、沿道環境が比較的単調かつ交通量の変動が少ない峠区間での中率が高い一方で、DID区間や郊外区間では的中率が低くなった。これらの特徴は路面温度のRMSEと類似しており、路面状態は路面温度に強く依存していることを示している。

図6は2016/1/18 日午前9時における一般国道230号の路面状態推定結果とHFN実測値の関係を示す。郊外区間であるKP16～KP45の路面状態推定結果は一部区間を除いて乾燥路面であり、HFN実測値が示す路面状態(HFN>80：乾燥路面)と概ね一致した。対照的に、KP1～KP16の市街地区間では、沿道建築物による日陰の影響や交差点付近の車両熱による影響などでHFN実測値は短い距離で大きく上下したが路面状態推定値は路面状態の急変を再現できなかった。これは凍結融解量推定による雪氷状態予測を1km間隔で行っているためである。

4.3 路面温度および路面雪氷状態の計算時間

表3は検証対象区間において提案法および従来法を用い

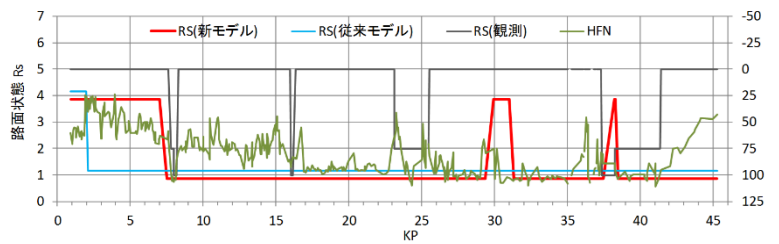


図6 路面状態の推定値およびHFN実測値の空間分布

計算ケース	従来モデル	新モデル
R230_20160114	779	80
R230_20160118	779	84
R230_20160119	780	84
R230_20160129	780	82
R230_20160201	775	87
R230_20160204	777	85
R230_20160218	781	86
R230_20160225	778	86
R230_20160229	775	86
R231_20171227	292	37
R231_20180112	290	37
R231_20180119	291	38
R231_20180126	291	36
R230平均	778	84
R231平均	291	37

て16時間先までの路面温度および路面雪氷状態計算に要した時間を示す。なお、表中の計算ケース列は対象路線の路線番号および計算対象年月日を示す。計算時間は気象条件などの違いにより同一路線を計算対象とした場合でも僅かに異なるが、一般国道230号を対象とした路面温度および路面雪氷状態計算では従来法の778秒に対し提案法では84秒、一般国道231号を対象とした路面温度および路面雪氷状態計算では従来法の291秒に対し提案法では37秒となり、提案法では従来法と比較して約10%程度まで計算時間が短縮された。

5. おわりに

本研究で提案した路面雪氷状態予測手法は、道路近傍（特に南側）に山地や建築物などが無い比較的単純な条件下であれば、路面温度に加えて路面雪氷状態を高速に予測できることが明らかとなった。今後は北海道郊外の平野部などで本手法による予測情報提供を試行することを目指す。

参考文献

- 1) 藤本明宏, 中島知幸, 佐藤賢治, 徳永ロベルト, 高橋尚人, 石田樹: 気温メッシュデータを用いた路面温度予測の広域化に関する一検討, 雪氷研究大会講演要旨集, p.228, 2016.