

冬期路面予測の広域化推進手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 1

担当チーム：寒地交通チーム

研究担当者：石田樹、高橋尚人、徳永ロベルト、
佐藤賢治、中島知幸、藤本明宏、
佐藤昌哉、齊田光、星卓見、
高田哲哉

【要旨】

本研究では、広域にわたる路面雪氷状態を高精度かつ実用的な労力および計算時間で予測する技術を開発することを目的として、路面雪氷状態予測に必要な路面温度の道路縦断方向分布（サーマルマップ）を計測車両の実測によらず取得する手法を開発するとともに、沿道環境が単調な条件下において計算量を削減するアルゴリズム等を開発することで路面雪氷状態予測に要する計算時間の短縮を行い、路面雪氷状態の予測精度および計算時間について検証を行った。その結果、本研究で開発した手法を用いるとサーマルマップの実測作業を行うことなく路面雪氷状態を従来手法とお概ね同等の精度かつ 1/10 程度の時間で予測することが可能となり、既存の路面雪氷状態予測手法と比較して少ない労力で広域にわたり路面雪氷状態の予測が可能となることが明らかになった。
キーワード：路面雪氷状態予測、熱収支法、サーマルマップ

1. はじめに

積雪寒冷地において、除雪や凍結防止剤・すべり止め材の散布は基本的な冬期道路管理作業として実施されているが、維持管理コストの縮減や散布による環境負荷を低減させる観点から、散布の一層の効率化が必要である。数時間から数日程度先までの路面の積雪状況や滑りやすさ（路面雪氷状態）に関する情報は冬期道路管理作業を効率的に行う上で欠かせない情報であり、このような背景から寒地土木研究所では冬期道路における路面温度と路面雪氷状態を予測する技術を開発した。これまでに開発した路面雪氷状態予測技術では北海道内の一般国道約 600km の予測が可能であるが、総延長は約 6700km におよぶため、北海道全域の一般国道を対象として路面雪氷状態予測を行うためにはより広域にわたる路面雪氷状態の予測手法を構築する必要がある。

本研究では、より広域にわたり路面雪氷状態を予測する手法を構築し、高精度かつ実用性の高い広域冬期路面予測技術を開発することを目的とする。

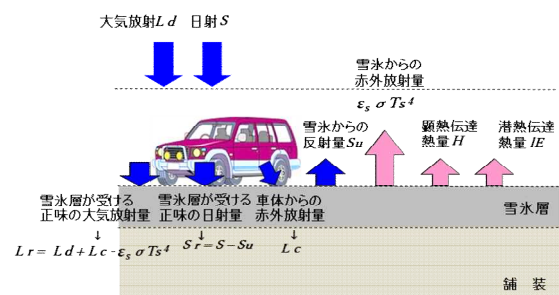
手順② 雪氷層表面における長波放射フラックス、顕熱・潜熱フラックスおよび伝導熱フラックスなどから路面雪氷層の凍結・融解質量を予測（図 1）。

手順③ 雪氷質量収支モデルを用いて路面雪氷層の雪質量、氷質量および水質量を予測¹⁾。

手順④ 雪質量、氷質量および水質量の予測値から路面雪氷状態を推定。

2. 1 高解像度気象メッシュデータを用いた仮想サーマルマップ作成手法の開発

従来の路面温度および路面雪氷状態予測手法では、予測対象区間の路面温度初期値を決定するために路



2. 研究方法

これまでの研究で開発した路面雪氷状態の予測手順の概略を以下に示す。

手順① サーマルマップ（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予測。

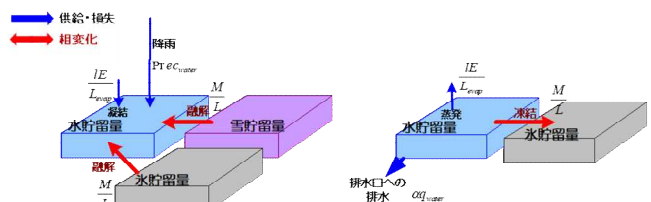


図 1 路面雪氷状態予測手法の概要

路面温度実測値の空間分布データ（サーマルマップ）が必要となる。サーマルマップを得るためには一定の気象条件下で計測機器を搭載した車両により路面温度の計測を行う必要がある。このため、広域にわたる路面温度および路面雪氷状態予測を行うためには多大な費用と時間をかけてサーマルマップを取得する必要があり、路面温度および路面雪氷状態予測広域化の妨げとなっていた。

そこで本研究では、近年になり高解像度化が進んでいる気象メッシュデータを用いてサーマルマップを仮想的に生成する手法を提案し、従来手法より安価かつ少ない労力で路面温度および路面雪氷状態予測を行う手法を開発した。

図2に気象メッシュデータを用いた路面温度予測の広域化手法の概念図を示す。本手法では、気温と路面温度の相関式を作成し、気温メッシュデータから路面温度メッシュへ変換することで、仮想サーマルマップを作成する。本研究では、2014年および2015年の1月および2月に一般国道230号札幌市内区間で気温と路面温度の相関を求めるとともに、本手法により作成した仮想サーマルマップの路面温度推定精度を検証した。

図3は気温と路面温度の相関関係であり、同図(a)は全区間（延長44.2km）、同図(b)は郊外区間（延長12.0km）の結果を示す。後述の図4に示すが、当該区間にはロードヒーティングが埋設されたアンダーパス区間と延長1124mのトンネル区間がある。同図(a)の赤丸の箇所はトンネルやアンダーパスの区間の結果であり、他と比べて路面温度が高い。同図(b)の郊外区間は短い橋梁を除けば全て土工部であり、郊外区間における気温と路面温度は高い相関関係にある。その決定係数R²は0.92であった。

図4は2016年1月9日夜間を例に、測定した路面温度分布（TM実測）と、計測路面温度分布および統計路面温度分布を用いて予測した路面温度分布（以下、計測TM予測、統計TM予測）を示す。また、土工部、トンネル、アンダーパスなどの道路構造別の気温と路面温度の相関式を用いて作成した統計TMによるTM予測（以下、統計TM予測）も併せて示す。今回の例では、計測TM予測はTM実測と概ね一致している。統計TM予測もTM実測よりやや低いものの大差ない。統計TM予測はTM実測におけるアンダーパスおよびトンネルの区間の温度上昇を概ね再現できた。夜間の計102回の走行試験におけるTM実測と計測TM予測および統計TM予

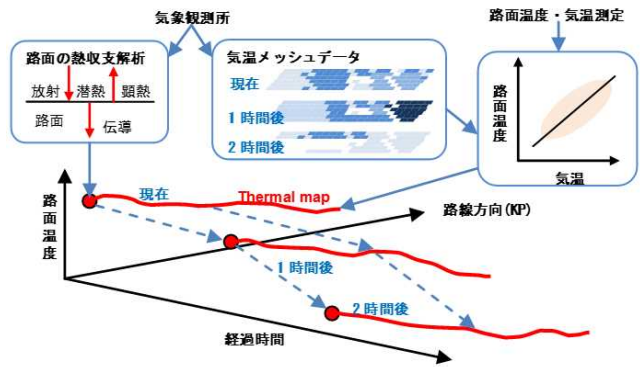
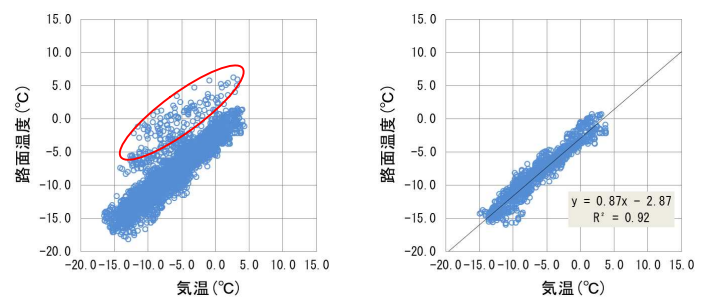


図2 気象メッシュデータを用いた路面温度予測の広域化手法の概念図



(a) 全区間 (b) 郊外区間
図3 気温と路面温度の相関関係

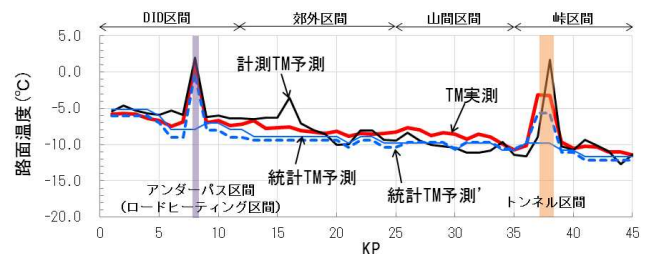


図4 路面温度路線分布の実測値と予測値の比較

測の平均二乗誤差RMSEは両者ともに2.3°Cで差がなかった。

2.2 仮想サーマルマップを用いた高速な路面温度および路面雪氷状態予測手法の開発

1) 路面雪氷層の融解・凍結質量の予測

前述2.の手順②において、従来は路面雪氷層の凍結・融解質量Mm(kg)を式(1)（以下、従来モデル（凍結・融解質量））を用いて求めていたが、舗装表面-雪氷層間の熱移動が考慮されていない。他方、舗装表面-雪氷層間の伝熱量は雪氷層の性状を精度良く求める上で重要な要素の1つであり、例えば藤本ら

2)は気象や通過交通が路面雪氷層に与える影響に加えて舗装からの熱移動が路面雪氷層に与える影響を考慮することで路面雪氷状態を精度良く推定する手法を提案している。

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

ここに、

l_m : 凝固・融解潜熱 (J/kg)

S : 全天日射量 (W/m²)

S_u : 雪氷層からの反射日射量 (W/m²)

L_d : 大気放射量 (W/m²)

L_c : 車体からの赤外放射量 (W/m²)

ε_s : 雪氷層の射出率

σ : Stefan-Boltzmann定数 (=5.67×10⁻⁸W/m²K⁴)

T_s : 雪氷層の温度 (K)

ρ_a : 空気の密度 (kg/m³)

C_p : 空気の定圧比熱 (=1005J/kgK)

C_h : 雪氷層表面の顕熱バルク係数 (m/s)

T_a : 気温 (K)

l_e : 蒸発潜熱 (=2.50×10⁶J/kg) または蒸発潜熱 (=2.83×10⁶J/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。

そこで、本研究では舗装表面-雪氷層間の熱移動を考慮し、路面雪氷層の凍結・融解質量を簡易かつ精度良く求めることができる予測モデル（以下、新モデル（凍結・融解質量））を提案した（式(2)）。

式(2)右辺最終項は雪氷層から舗装面への伝熱量に関する項で、分子に舗装厚さ Z_p 、舗装の熱伝導率 λ_p 、雪氷層厚さ D_c 、雪氷層の熱伝導率 λ_c を用いて舗装体および雪氷層内部の熱移動抵抗の大きさを求めることで、従来モデル（凍結・融解質量）の課題であった舗装表面-雪氷層間の熱移動を考慮している。また、全天日射量 S 、大気放射量 L_d 、気温 T_a 、大気の比湿 q_a を計算に用いることなく路面雪氷層の凍結・融解質量を算出できる。

式(2)による路面雪氷の凍結・融解質量の算出結果に加え、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して、任意の時刻における路面の水、雪および氷質量を予測した¹⁾。

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

ここに、

$M_s C_s$: 雪氷層の体積熱容量 (J/m³K)

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。

2) 路面雪氷状態計算の高速化

路面雪氷状態を予測する際に、約100m区間毎に従来モデル（凍結・融解質量）により算出した凍結・融解質量を基に、雪氷質量収支モデル¹⁾を用いて路面雪氷層の水、雪および氷質量を予測していた。しかし、1km格子の気象メッシュデータをこれらのモデルに入力して約100m区間毎に路面雪氷層の水、雪および氷質量を予測（従来手法）するには計算に長い時間を要していた。

そこで本研究では、まず路線1km毎に新モデル（凍結・融解質量）により凍結・融解質量を算出し、雪氷質量収支モデルを用いて路面雪氷層の水、雪および氷質量を予測する。その後、路線1km毎に得られた水、雪および氷質量を約100m区間毎に線形内挿（提案手法）することで計算時間の短縮を試みた（図5）。

2.3 路面温度および路面雪氷状態の予測精度および予測時間検証

路面温度および路面雪氷層の凍結・融解質量の予測に従来モデルおよび新モデルを用いた場合の、路面雪氷状態の予測精度および計算時間の短縮効果を検証した。検証対象区間は、一般国道230号 KP=0.8

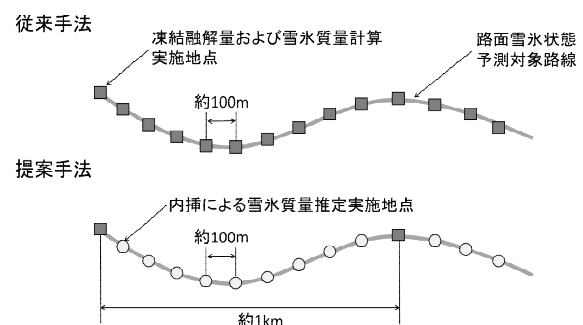


図5 路面雪氷状態予測計算の高速化の概要

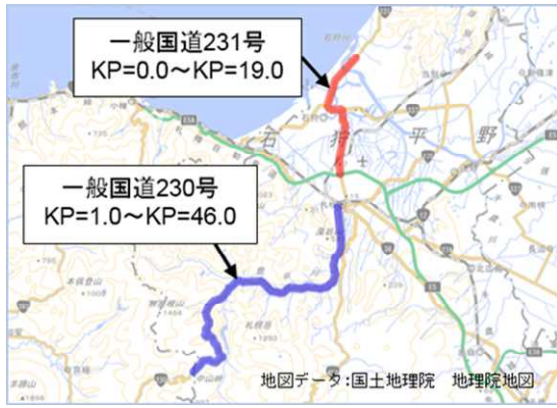


図6 路面雪氷状態予測精度および計算時間検証実験の対象区間



図7 冬期走行環境計測車両

～KP=45.0 および一般国道 231 号 KP=0.0～KP=19.0 として実験を行った（図6）。実験では、図7に示す冬期走行環境計測車両で検証対象区間を複数回走行し、路面温度を赤外放射温度計で、路面すべり抵抗値（以下、HFN）を連続路面すべり抵抗測定装置³⁾で計測するとともに、路面雪氷状態を目視で判別して記録した。

路面雪氷状態の予測精度の検証では、従来モデルおよび新モデルを用いて予測した水、雪および氷質量の比率から路面雪氷状態を判別（乾燥、湿潤、シャーベット、積雪および凍結の5分類）した結果を予測結果とし、HFN計測結果と目視により路面雪氷状態を判別した結果を実測結果として、予測結果と実測結果の両者が一致した場合を的中と見なして的中率を求め、予測精度を検証した。

また、計算時間の短縮効果の検証では、上記の検証対象区間において、従来モデルおよび新モデルを用いて16時間先までの路面雪氷状態を1時間毎に予測し、計算に要した時間を計測して比較した。なお、検証には市販のデスクトップPC（CPU: Intel CORE i5-3550 3.30GHz）を用いた。

3. 路面雪氷状態の予測精度および予測時間の検証

3.1 路面温度および路面雪氷状態の予測精度検証

表1は検証対象区間における天候別、昼夜別および沿道環境別の路面温度の二乗平均平方根誤差（以

表1 検証対象区間における天候別、昼夜別および沿道環境別の路面温度の二乗平均平方根誤差（RMSE）

 : RMSE ≤ 1.5°C : RMSE ≥ 3.0°C 単位：°C

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	2.52	3.48	3.81	3.47	2.24	1.91	4.15	4.31
	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
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				
R230	晴天	夜間	3.92	3.69	4.85	3.60	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
	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
	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

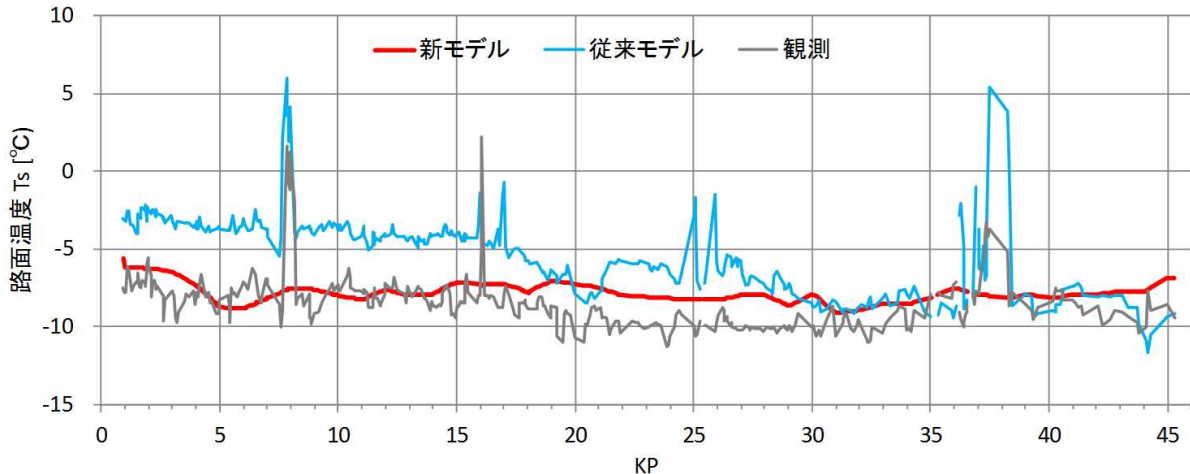


図8 路面温度の予測値および実測値の空間分布 (2016年1月18日 午前9:00)

下、RMSE)を示す。全区間における従来モデルのRMSEは 2.72°C 、新モデルのRMSEは 2.47°C であり、新モデルの路面温度の予測精度は従来モデルと同等以上であることを確認した。

沿道環境別のRMSEに着目すると、新モデルでは山間区間、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で日射量の空間変化が大きく、日陰となる区間で路面温度を過大に予測したためと考えられる。一方で、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RMSEが小さくなったと推察される。

なお、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るが、従来モデルおよび新モデル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、新モデルでは晴天時にRMSEが高く、降雪時にRMSEが低くなった。この理由として、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、降雪時は路面が雪氷で覆われ、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。

昼夜別のRMSEは、夜間において日中よりも大きくなる傾向にあり、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8は2016年1月18日午前9時(曇天・日中)における一般国道230号の路面温度の実測値と従来モデルおよび新モデルによる予測値の空間分布を示す。路面温度予測値は従来モデル、新モデルともに実測値と概ね同様の傾向を示し、当該時刻の新モデルによる路面温度予測値のRMSEは 1.88°C であった。一方、 $\text{KP}=19.0\sim\text{KP}=32.0$ では新モデルによる路面温度予測値は実測値より 2°C から 3°C 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と考えられる。

表2は検証対象区間における天候別、昼夜別および沿道環境別の路面雪氷状態的中率を示す。全天気・全日・全区間でみると新モデル(凍結・融解質量)を用いた場合の路面状態の適中率は、従来モデル(凍結・融解質量)を用いた場合と概ね同程度であった。天候別では、従来モデル・新モデル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、従来モデル・新モデルともに夜間において的中率が高くなる傾向が見られた。沿道環境別では、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の的中率が高くなった。これらの特徴は路面温度のRMSEの傾向と類似しており、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9は2016年1月18日午前9時(曇天・日中)における一般国道230号の路面状態目視判別値および予測結果とHFN実測値の関係を示す。郊外区間である $\text{KP}=16.0\sim\text{KP}=45.0$ の路面状態予測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)³⁾と概ね一致した。対照的に、 $\text{KP}=1.0\sim\text{KP}=16.0$ の市街地区間では、沿

表 2 検証対象区間における天候別、昼夜別および沿道環境別の路面雪氷状態の的中率

■ : 的中率 > 0.7 ■ : 的中率 < 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
	晴天	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
		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
R231	全天気	日中	0.37	0.33	0.40				0.17		0.29	0.25	0.33				0.17	
		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				0.50		0.52	0.50	0.55				0.50

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
	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
	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

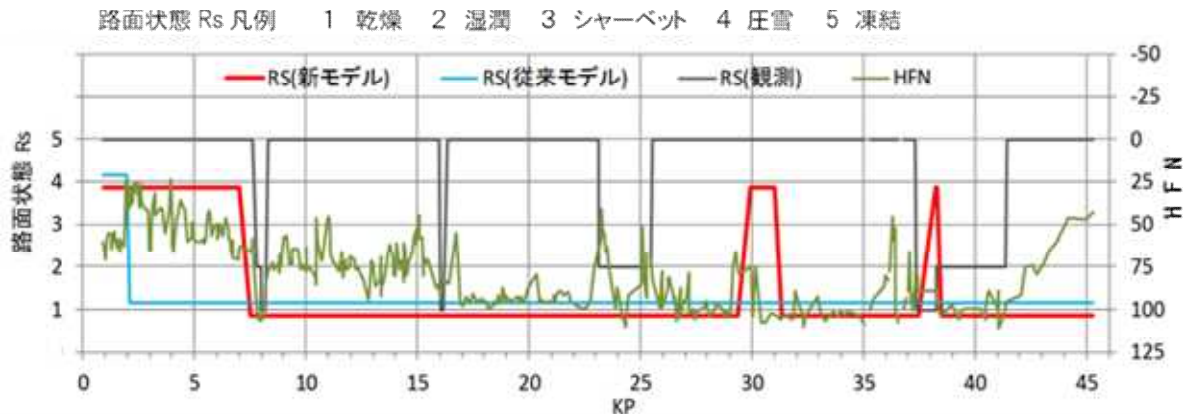


図 9 路面状態の予測値および HFN 実測値の空間分布

道建築物による日陰の影響や交差点付近の車両熱の影響などで HFN 実測値は短い距離で大きく上下したが、路面状態予測結果は路面状態の急変を再現できなかった。これは路面雪氷層の凍結・融解質量の予測結果から路面の雪氷状態を 1km 間隔で予測しているためである。なお、当該時刻の路面状態目視判別値はほとんどの区間で凍結路面であったが、路面状態予測結果は KP=1.0~KP=7.5、KP=30.0~KP=31.0 および KP=38.0 付近を除いて乾燥路面であった。路面状態目視判別値と HFN 実測値の関係に着目すると、路面状態が凍結路面と判別された区間の大部分で HFN が 80 以上となっており、実際には路面凍結は生じていなかった可能性が高い。この

ため、路面状態の予測結果は概ね実際の路面状態と一致していると推察される。

3.2 路面温度および路面雪氷状態の予測計算時間検証

表 3 は検証対象区間において、路面温度と路面雪氷層の凍結・融解質量の算出に従来モデルおよび新モデルを用いて、16 時間先までの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。ここで、一般国道 230 号(対象区間延長 L=44.2km)において、従来モデルでは 423 区間に分割して各区間で路面雪氷状態を計算しているのに対し、新モデルでは 45 区間(1km 間隔)に分割して各区間で路

表 3 検証対象区間における路面雪氷状態
計算時間(秒)

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

表 4 路面雪氷状態予測計算サーバーの性能一覧

項目	内容
CPU コア数	4
CPU	Intel(R) Xeon(R) Gold 6132 CPU @ 2.60GHz 64bit
メモリ	4GB
OS	CentOS 6.10
ネットワーク	仮想ネットワークアダプタ 10Gbps
ストレージ	500GB

面雪氷状態を計算後、100m 区間毎に線形内挿して路面雪氷状態を推定している。一般国道 231 号（対象区間延長 L=19.3km）についても、同様の区間割によって路面雪氷状態を推定している。

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雪氷状態計算時間の平均値は、従来モデルの 778 秒に対し新モデルでは 84 秒、一般国道 231 号を対象とした計算時間の平均値は、従来モデルの 291 秒に対し新モデルでは 37 秒となり、新モデルでは従来モデルと比較して約 10%程度まで計算時間が短縮された。

4. 路面雪氷状態の広域予測時の負荷検証および冬期道路マネジメントシステムによる予測結果配信

本研究では、上記の路面雪氷状態予測手法の実用性を確認するために、北海道内の一般国道全区間に相当する距離の路線を対象に路面雪氷状態予測（計算負荷試験）を行い、計算に要する時間や計算機の性能について検証を行った。また、本研究で開発した路面雪氷状態予測手法を冬期道路マネジメントシステム（北海道内国道の路面温度・凍結リスクの予測結果や道路テレメータの現況値、CCTV カメラ画像等を配信するシステム）に適用し、路面雪氷状態等の配信試験を行った。以下に詳細を示す。

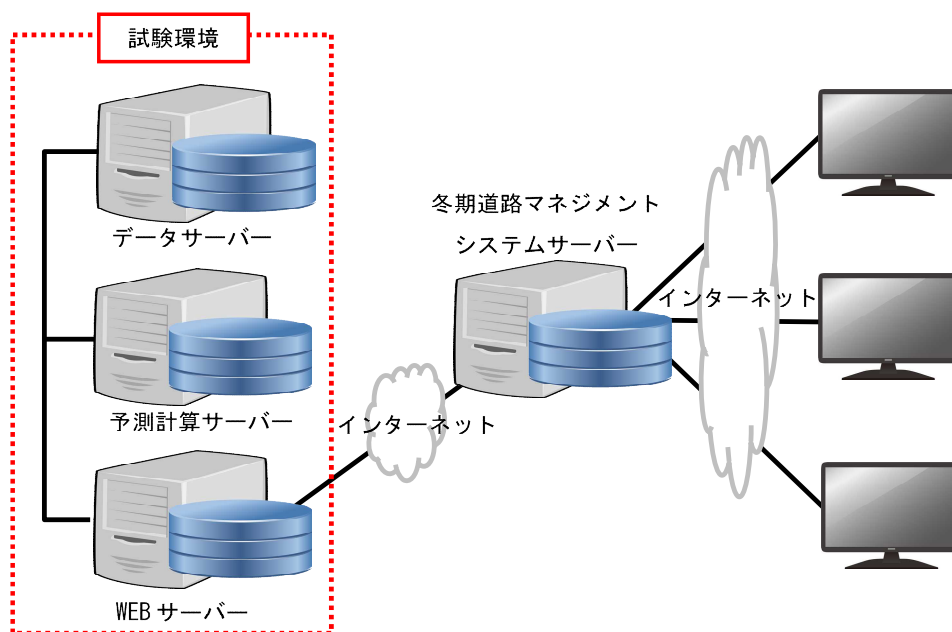


図 10 計算負荷試験に用いたシステムの概念図

表 5 計算負荷試験の実施条件

項目	内容
予測対象路線・距離	924 路線 (28 路線×33) ・約 6,600km
予測要素	路面温度および凍結リスク
予測時間	実況値および 16 時間先までの予測値(1 時間毎に更新)
予測実施期間	令和元 (2019) 年 11 月 14 日 0 時～23 時 令和元 (2019) 年 11 月 22 日 0 時～23 時 (負荷が低いと推定) 令和元 (2019) 年 12 月 12 日 0 時～23 時 令和元 (2019) 年 12 月 16 日 0 時～23 時 令和元 (2019) 年 12 月 28 日 0 時～23 時

表 6 計算負荷試験の結果

(路面雪氷状態予測計算サーバー1 台使用時)

項目		予測処理に要した時間	CPU 使用率	メモリ	ストレージ増加量	ネットワーク帯域占有幅		Disk I/O		ロードアベレージ	システム障害
						rx	tx	read	write		
						(MB/sec)		(MB/sec)			
2019/11/22	最大値の平均	00:33:46	44.5	445.8	0.4	7.3	0.3	33.7	44.8	1.56	なし
	最大値	00:34:39	45.0	461.0	0.5	9.8	1.5	35.4	48.6	2.00	

(路面雪氷状態予測計算サーバー2 台使用時)

2019/11/14	最大値の平均	00:15:48	44.7	388.0	0.2	0.0	0.2	6.2	44.2	0.86	なし
	最大値	00:16:24	45.5	451.1	0.3	0.0	1.1	22.3	48.7	1.11	
2019/11/22	最大値の平均	00:15:30	39.5	353.0	0.2	0.0	0.1	0.9	45.3	0.81	なし
	最大値	00:16:11	45.3	366.1	0.2	0.0	0.1	6.9	48.5	0.96	
2019/12/12	最大値の平均	00:15:33	39.2	383.3	0.2	0.0	0.1	1.2	45.4	0.83	なし
	最大値	00:16:16	45.3	398.6	0.2	0.0	0.1	5.8	48.4	1.09	
2019/12/16	最大値の平均	00:15:45	44.9	385.8	0.2	0.0	0.1	2.1	45.4	0.81	なし
	最大値	00:16:07	45.6	405.1	0.2	0.0	0.1	28.5	48.8	0.99	
2019/12/28	最大値の平均	00:15:52	44.8	399.8	0.2	0.0	0.1	0.9	45.7	0.82	なし
	最大値	00:17:09	45.6	426.0	0.2	0.0	0.1	13.9	48.6	1.21	

4. 1 計算負荷試験の方法

1) 試験用サーバーの設定

計算負荷試験用の路面雪氷状態予測計算サーバーは、国土交通省北海道開発局向けに試行運用している冬期道路マネジメントシステムで用いているサーバー群と同様に、各種計算元データを格納したデータサーバーや冬期道路マネジメントシステムに情報を受け渡す WEB サーバーと接続し、WEB サーバーはインターネットを介して冬期道路マネジメントシステムサーバーがデータを取得できるようにネットワークを設定した。図 10 に計算負荷試験に用いた

システムの概念図を、路面雪氷状態予測計算サーバーの性能を表 4 にそれぞれ示す。

2) 計算負荷試験用の路線データの設定

計算負荷試験用の路線データは、冬期道路マネジメントシステムで用いている約 200km の路線データを基とし、路線データを複製することで北海道内の一般国道全区間(L=6,515km) と同等の約 6,600km の路線データを作成した。

3) 計算負荷試験の実施条件

上記の方法で作成した試験環境を用いて路面温度

および路面状態の広域予測時の計算負荷試験を行った。予測対象路線および距離は2)で設定した北海道全域に相当する約 6,600km、予測要素は路面温度および凍結リスク、予測時間は実況および 16 時間先までの 1 時間毎の予測とした。予測実施期間は、路面状態、または、気象状況の変化が小さく予測計算サーバーの負荷が小さいと推定される日を 1 日間(24 回)と路面状態、気象状況の変化が大きく負荷が大きいと推定される 4 日間(96 回)の合計 5 日間(合計 120 回)とした。表 5 に計算負荷試験の実施条件を示す。

4. 2 計算負荷試験の結果

表 6 は路面雪氷状態予測計算サーバーを 1 台または 2 台使用した場合の計算負荷試験の結果を示す。予測計算サーバーを 1 台とした場合、CPU 使用率、メモリ、ストレージ容量、ネットワーク帯域占有幅、Disk I/O に負荷が過多となる問題は生じなかった。予測処理に要した時間は約 35 分であり、予測に用いるテレメータやメッシュデータ等の処理と合わせると、1 時間毎の情報提供が間に合わないことが想定される。また、ロードアベレージが 1 を超えており、サーバーの処理能力を超える負荷となっていた。

また、路面雪氷状態予測計算サーバーを 2 台使用することを想定し、予測計算の対象路線を予測計算サーバー1 台あたり約半数の 3,400km とした結果、予測処理に要した時間は約 16 分まで短縮し、ロードアベレージの最大値もほぼ 1 を下回るようになった。CPU 使用率、メモリ、ストレージの増加量、ネットワーク帯域占有幅、Disk I/O も問題となる数値は発生しなかった。

以上の結果より、本研究で開発した路面雪氷状態予測手法は北海道内の全一般国道を対象とするような大規模な計算を行った場合においても実用的な計算負荷で路面雪氷状態を予測することが可能であることが明らかとなった。

4. 3 冬期道路マネジメントシステムによる予測結果配信

本研究では、2.および 3.で開発した路面雪氷状態予測手法を既存の冬期道路マネジメントシステムに適用し、一部区間の路面温度および路面雪氷状態を本研究で開発した手法により予測を行い、予測結果を配信した。冬期道路マネジメントシステムは 2016 年度から 2019 年度の冬期(11 月～翌年 3 月)に運用を行い、運用期間中は 1 時間毎に気象メッシュ実況値および予報値、道路テレメータ設置地点におけ

る気温、路面温度および路面雪氷状態の実況値および予報値と表 7 に示す区間の路面温度および凍結リスクの予測値を配信した。

本配信では、路面温度および路面雪氷状態の予測対象区間は 2015 年度以前と比較して 70km 以上増加したが、予測対象区間の増加に伴う計算時間の増大や予測結果の配信遅延は生じなかった。また、冬期道路マネジメントシステム Web サイトへのアクセス数は気象条件によって大きく変化するが平常時で 100 回/日以上、大雪などの異常気象時には 400 回/日以上であった。

5. まとめ

本研究では、従来の路面雪氷状態予測手法を改良し、広域にわたる路面雪氷状態を高精度かつ実用的な労力および計算時間で予測する手法の開発を行った。以下に得られた知見を列挙する。

- 従来手法の課題であった路面温度の道路縦断方向分布(サーマルマップ)の実測を不要にするために、気温メッシュデータを用いて仮想的にサーマルマップを生成する手法を開発した。本手法で得られた仮想サーマルマップは実測によるサーマルマップの結果と概ね一致し、沿道環境が単調であれば仮想サーマルマップを用いた路面雪氷状態予測ができる可能性があることが明らかとなった
- 上記の仮想サーマルマップデータを用いて路面雪氷状態を計算する手法を開発するとともに、沿道環境が単調な路線において計算量を削減することで路面雪氷状態予測に要する時間の短縮を試みた。その結果、本手法による路面雪氷状態予測は従来の実測によるサーマルマップを用いた手法とお概ね同等の予測精度を有しており、計算に要する時間は従来手法の 10%程度まで短縮できることが明らかとなった
- 上記手法を用いて北海道内の全一般国道に相当する距離に対して路面雪氷状態予測計算を行ったところ、複数台の比較的安価な予測計算用コンピュータを用いて実用的な時間で路面雪氷状態予測を実現可能であることが示された

表7 路面温度および路面雪氷状態の予測対象路線
(2019年度、斜体で示す区間は本報告書2. および3. で開発した手法による
路面温度・路面雪氷状態予測を実施)

路線・区間	
1.	一般国道5号 KP=271.5~277.7 一般国道274号 KP=0.0~14.0 (札幌新道) : 上下車線別
2.	一般国道231号 KP=0.0~19.3 (起点~八幡)
3.	一般国道230号 KP=0.0~45.5 (起点~中山峠)
4.	一般国道5号 KP=261.8~271.5 (山口~宮の沢) 一般国道337号 KP=87.2~101.8 (花畔~山口)
5.	一般国道274号 KP=14.0~23.0 (大谷地~西の里)
6.	一般国道36号 KP=0.0~15.0 (北1西3~里塚)
7.	一般国道12号 KP=0.0~10.0 (北1西3~大谷地)
8.	一般国道453号 KP=0.0~18.0 (豊平~常盤)
9.	一般国道272号 KP=46.0~74.0 (西春別~上春別)
10.	日高自動車道 KP=4.0~40.0 (沼の端西IC~日高富川IC)
11.	一般国道274号 KP=121.0~155.0 (日高~日勝峠頂上)
12.	一般国道274号 KP=155.0~176.0 (日勝峠~清水)
13.	一般国道40号 KP=198.0~225.0 (幌延IC~幌富バイパス・豊富バイパス~豊富北IC)
14.	一般国道39号 KP=77.0~107.0 (大雪トンネル~留辺薬町)
15.	旭川紋別自動車道 KP=47.0~67.0 (浮島IC~白滝IC)
16.	深川留萌自動車道 KP=5.0~35.0 (深川西IC~留萌幌糠IC)
17.	一般国道230号 KP=46.0~67.0 (中山峠~喜茂別)
18.	帯広広尾自動車道 KP=4.0~29.0 (芽室帯広IC~中札内IC)
19.	一般国道5号 KP=0.0~25.0 (函館市内~函館新道~大沼)
20.	一般国道38号 KP=285.0~298.0 および 一般国道44号 KP=0~22 (釧路市大楽毛~釧路市街~釧路町・厚岸町界)
21.	一般国道38号 KP=170.0~192.0 (帯広市西25条~幕別町明野)
22.	一般国道12号 KP=118.0~136.0 および 一般国道39号 KP=0.0~7.0 (神居古潭~旭川市永山)
23.	一般国道5号 KP=278.0~282.0 (北34西2~北1西1)
24.	一般国道275号 KP=0.0~15.0 (北1東13~江別市角山)
25.	一般国道5号 KP=238.5~261.8 (小樽市内~山口)
26.	一般国道337号 KP=44.7~85.0 (江別市江別太~石狩市生振)
27.	一般国道12号 KP=10.0~25.6 (札幌市厚別区大谷地~江別市江別太)
28.	一般国道12号 KP=25.6~43.1 (江別市江別太~岩見沢市並木町)

- 本研究で開発した路面雪氷状態予測手法を冬期道路マネジメントシステムに組み込むことにより、予測処理に要する時間をほとんど増加させることなく予測対象区間を増やすことが可能であることを確認した

pp.202-213、2007.

- 3) 徳永ロベルト、舟橋誠、高橋尚人、浅野基樹、中野雅充:連続路面すべり抵抗値による冬期路面管理の高度化に関する研究、寒地土木研究所月報、No.661、pp.11-18、2008.

参考文献

- 1) 高橋尚人、徳永ロベルト、浅野基樹、石川信敬:冬期路面管理支援システムの構築と運用、寒地土木研究所月報、No.652、pp.8-17、2007.
- 2) 藤本明宏、渡邊洋、福原輝幸:輻射一透過を伴う路面薄雪氷層の融解解析、土木学会論文集E、Vol.63、No.2、

A STUDY ON DEVELOPMENT OF ROAD SNOW AND ICE CONDITION FORECAST TECHNOLOGY FOR WIDE AREA

Research Period : FY2016-2019

Research Team : Cold-Region Road Engineering

Research Group (Traffic Engineering)

Author : ISHIDA Tateki

TAKAHASHI Naoto

TOKUNAGA Roberto

SATO Kenji

NAKAJIMA Tomoyuki

FUJIMOTO Akihiro

SATO Masaya

SAIDA Akira

TAKADA Tetsuya

Abstract : This study aims to develop the forecast model for road snow and ice condition with high forecast accuracy and fast calculation. We developed virtual thermal mapping method (road surface temperature distribution acquiring method) without measuring on actual road. We also developed fast forecast algorithm for flat and rural road, and verified forecast accuracy and calculation time. As a result, proposed forecast method can forecast road surface temperature and road snow and ice condition precisely without thermal mapping and calculation time is 1/10 of existing forecast method.

Key words : Road Weather Information System(RWIS), road snow and ice condition, forecast method