

雪氷作業判断を支援する冬期路面状態予測システム

古川和幸*1, 土橋博文*2, 吉田重美*2, 佐藤純平*2, 丹治和博*3, 吉田直人*3

1. はじめに

冬期路面管理を高度化するためには、現状の路面状態を正確に把握することが重要である。次に、気象予測データをもとに、その後の路面状態の変化を予測するシステムの構築が必要である。これにより、雪氷路面の発生範囲や発生時刻を把握することが可能となり、道路管理者が雪氷作業判断の意思決定のための材料が提供される。

ネクスコ東日本東北支社では、以上を実現するために、「冬期路面状態予測システム」を開発した。

2. 冬期路面状態予測システムの構成

冬期路面状態予測システムの構成は図1に示すとおりで、情報収集機能・予測機能・情報提供機能から構成される。

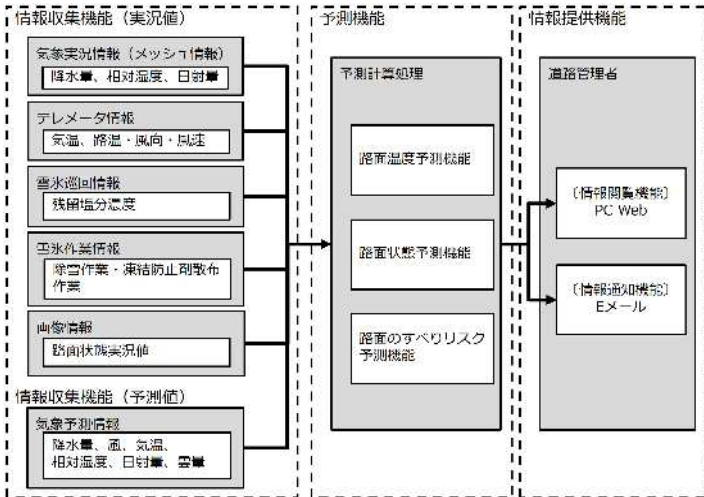


図1 冬期路面状態予測システムの構成

情報収集機能は、実況値と予測値の入力からなる。実況値は、気象実況値の他、路面状態実況値や残留塩分濃度計測値からなり、当初の予測や逐次補正に利用される。予測値は、気象予測情報を指し、将来的な路面状態の予測計算に利用される。

予測機能は、情報収集機能で入力されたデータを用い、路面温度・路面状態・路面のすべりリスクを予測する機能である。予測機能のアルゴリズムを図2に示す。

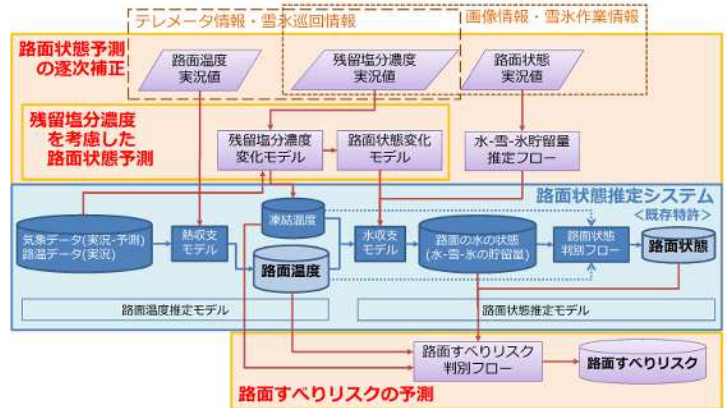


図2 予測機能のアルゴリズム

予測機能は、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所と一般財団法人日本気象協会が共同開発した「固定観測点及び路線における路面状態推定システム」（特許第4742388号：平成23年5月20日）を基本とした。路面状態推定システムは、同図の青枠で示した。

同システムに、逐次補正・残留塩分濃度を考慮した路面状態予測・すべりリスク予測を加えて、新たな路面状態推定モデルを構成した。

3. 路面状態推定システムで採用する推定モデル

既存の路面状態推定システムは、路面温度推定モデルと路面状態推定モデルからなる。

路面温度推定モデルは熱収支モデル（図3）が基礎となっている。熱収支モデルは、気温・風速などの気象観測値や交通量を入力条件として、路面上での大気・地中との熱交換量を解析して、路面温度を出力するモデルである。

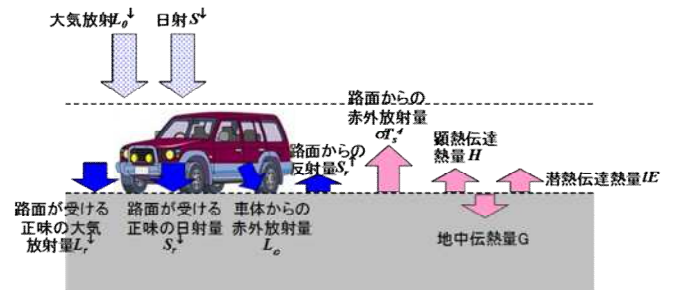


図3 熱収支モデルの概念図 [1]

*1 東日本高速道路株式会社東北支社 *2 株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北
*3 一般財団法人日本気象協会

路面に供給されるエネルギーは、日射量・大気放射量などの合計である。一方、路面から失われるエネルギーは、路面からの赤外放射量、顕熱、潜熱、地中への伝熱量の合計である。路面に供給されるエネルギーと、失われるエネルギーが等しくなるように、それぞれの項の値を求め、路面温度を推定する方法である。

路面状態推定モデル（図4）は、水収支モデルと路面状態判別フローから成り立つ。

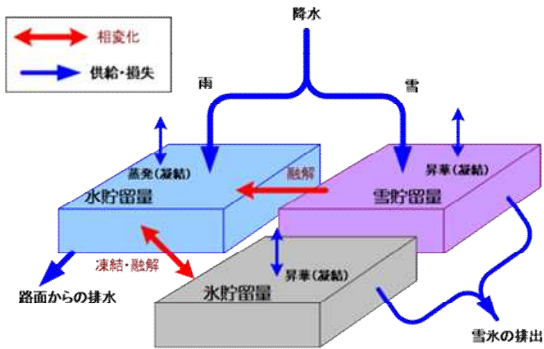


図4 路面状態推定モデルの概念図 [1]

水収支モデルでは、水は液体の H_2O 、雪・氷はそれぞれ固体の H_2O を意味し、降雪として供給された H_2O を雪、水が凍結した H_2O を氷に分ける。このように、路面上の H_2O を水、雪、氷の3つ形態に分けて相互の収支を計算して、路面上に残る水、雪、氷の量を評価するのが水収支モデルである。例えば、雪が融けて再凍結したものは氷として計算される。水、雪、氷の貯留量 (kg/m^2) をそれぞれ q_{water} 、 q_{snow} 、 q_{ice} で表す。

水収支モデルは、水、雪、氷の貯留量を表現するが、水の相変化は、降水・気温等の気象条件だけでなく、道路交通・除雪・排水等の影響を受け、複雑に変化する。

冬期路面状態推定モデルでは、水収支モデルにより算出された水貯留量 q_{water} 、氷貯留量 q_{ice} 、雪貯留量 q_{snow} の割合から、路面状態を表1の5分類に判別する。

表1 分類する路面状態

路面状態	乾燥, 湿潤, シャーベット, 積雪, 凍結
------	------------------------

4. 逐次補正・残留塩分濃度を考慮した予測機能の拡張

冬期の道路では、除雪や凍結防止剤散布などの雪氷作業を実施する。そのため、上記の予測モデルによる路面状態の推定結果は、雪氷作業の影響を受け、異なる推移を見せる。

そこで、上記モデルに「逐次補正」および「残留塩分濃度考慮」のアルゴリズムを取込み、推定精度の向上を試みた。

(1) 逐次補正

逐次補正は、路面状態のモニタリングにより、雪氷作業による路面状態の急変を推定結果に反映するものである。また、気象実況値の逐次補正を取り入れることにより、気象予測誤差や推定モデル誤差も補正することが可能となった。

逐次補正では、実況値を予測情報への反映は図5のとおり行った。

	09時	10時	11時	12時	13時	14時	15時	16時	17時	備考
入力データ	①気象予測データ		更新			更新				3時間ごと更新
	②管内テレメータ									5分値データ
	③メッシュ実況データ									毎正時データ
	④塩分濃度観測情報									最新の観測データ
予測処理	予測作成処理									
	予測情報発表		10時予測発表		13時予測発表			16時予測発表		

図5 各種実況値の予測情報への反映タイミング

(2) 残留塩分濃度を考慮した路面状態の推定

凍結防止剤を散布することにより、路面上の水分の凍結温度が低下する。そのため、残留塩分の有無および残留塩分濃度が路面状態の変化を左右する。

当初は、路面温度が凍結温度を下回った場合、路面に水分があれば、すべて凍結するとしていた。しかし、実際には、路面温度が凍結温度を下回った場合、水分の一部が凍結し、水と氷が共存する状態となる。そこで、この状態を表現できるよう、残留塩分濃度を考慮した路面状態推定を行うアルゴリズムを作成した。

残留塩分濃度を路面状態の推定に反映するためには、残留塩分濃度の実況値を測定する必要がある。このために道路巡回車に残留塩分濃度測定器を搭載し、線的な測定を行っている（図6）。



図6 車載式残留塩分濃度測定システム [2]

残留塩分濃度は、気象条件や時間によって変化する。そこで、残留塩分濃度変化モデルを作成し、数時間先の残留塩分濃度予測を行った。

次に、推定した残留塩分濃度から路面上の水と氷の量を補正する路面状態変化モデルを作成した。これにより、

路面上の水、氷、雪の貯留量を基に機械学習などの手法で、乾燥、湿潤、シャーベット、積雪、凍結の路面状態の推定を可能とした。

(3) 路面のすべりリスクの予測

路面状態変化モデルで推定した路面状態をもとにして、路面のすべりリスク予測を行った。雪氷路面では、路面上の水、氷、雪の貯留量により、すべりリスクが大きく変動する。そこで、実測値から得た路面のすべり抵抗値による機械学習の結果から、水収支モデルで得た氷貯留量やその割合を説明変数として、すべりリスクを予測した。

5. 冬期路面状態予測システムの実装状況

現時点の冬期路面状態予測システム（以下、システム）の実装状況は表2のとおりである。

表2 システム実装状況

分類	項目	2020-2021 冬期	2021-2022 冬期	備考
主システム	主システム構築	○		
逐次補正	気象実況情報・テレメータ情報の反映	○		
	道路巡回情報(路温・残留塩分濃度)の反映	○		巡回車による残留塩分濃度測定データを活用
	雪氷作業(除雪・路面凍結防止剤散布)の反映	-	○	
	路面状態実況値の反映	-	○	Web カメラ画像から AI 判別
残留塩分濃度	残留塩分濃度を考慮したアルゴリズムの反映	○		
すべりリスク	すべりリスク予測アルゴリズムの反映	○		

2020-2021 冬期までは、表2に○を付した項目のシステム導入を完了し、運用を行った。2021-2022 冬期には、雪氷作業・路面状態実況値を反映してシステムを運用する計画である。

2020-2021 冬期は、表3の通りシステムを運用した。表4は、運用したシステムによる予測表の例である。

表3 システム運用内容

項目	内容
運用期間	2020年12月～2021年3月
対象	テレメータ地点を対象とした点予測・IC間を対象とした線予測
内容	路面温度・路面状態・路面のすべりリスク
時間	24時間先までの毎時予測
間隔	3時間ごと(1時, 4時, 7時, 10時, 13時, 16時, 19時, 22時)
提供方法	pdf形式の予測表をWEB表示

表4 予測表の例

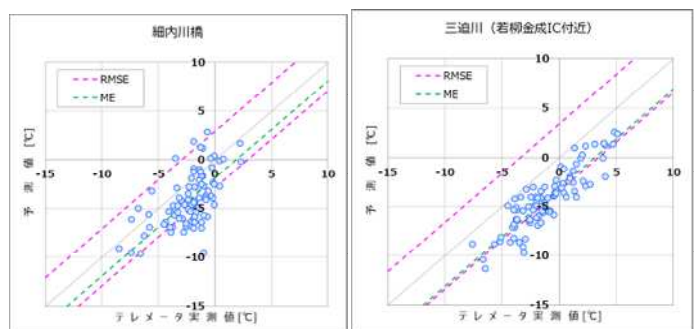
地点	要素	16時	17時	18時	19時	20時	21時	22時	23時	24時	01時	02時	03時
有馬川	路面温度(°C)	1.7	0.8	0.0	0.6	0.9	-1.1	-1.3	1.5	-1.8	-2.0	-2.2	-2.3
	路面状態												
	すべり抵抗値	80	80	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40
三迫川	路面温度(°C)	3.5	2.6	1.9	1.4	0.9	0.5	0.2	-0.1	0.6	-0.9	-1.2	-1.4
	路面状態												
	すべり抵抗値	80	80	80	80	80	80	80	30	30	30	30	30
善光寺川	路面温度(°C)	4.0	3.0	2.5	2.0	1.3	1.0	0.6	0.3	0.0	-0.4	-0.6	-0.9
	路面状態												
	すべり抵抗値	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
江合川	路面温度(°C)	3.2	2.3	2.0	1.4	0.8	0.5	-0.1	0.4	-0.8	-1.0	-1.4	-1.7
	路面状態												
	すべり抵抗値	80	80	80	80	80	80	30	30	30	30	30	30
大田	路面温度(°C)	1.9	1.1	0.8	0.4	-0.1	-0.6	-0.9	-1.2	-1.6	-1.8	-2.0	-2.3
	路面状態												
	すべり抵抗値	80	80	80	80	40	30	40	40	40	40	40	40
駒場川橋	路面温度(°C)	1.8	1.0	0.6	0.2	-0.3	-0.7	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-2.1	-2.4
	路面状態												
	すべり抵抗値	80	80	80	80	40	40	40	40	40	40	40	40
吉田川	路面温度(°C)	2.7	1.9	1.6	1.0	0.4	-0.1	-0.5	0.7	-1.1	-1.4	-1.7	-2.0
	路面状態												
	すべり抵抗値	80	80	80	80	80	40	40	40	40	40	40	40

6. 精度検証

精度検証は、2020-2021冬期のデータを使用して行った。

(1) 路面温度

路面温度はシステムによる推定結果とテレメータ観測値を比較することにより行った。図7が精度検証結果である。



RMSE(二乗平均平方根誤差)=2.9°C, ME(平均誤差)=-1.9°C RMSE=3.4°C, ME=-3.1°C

図7 路温の予測値と実測値の比較(2020-2021冬期)

同図の左が多雪地、右が少雪地での検証結果である。システムによる推定値は路面の表面であるのに対し、テレメータ観測値は地中1cm深にあるため、テレメータ観測値の路温が2~3°C高い傾向にある。多雪地では路面に堆雪するとテレメータ観測値が0~-3°C程度で一定になる傾向が見られた。路面温度に関しては今後さらに検証を継続する。

(2) 路面状態

路面状態は、システムによる推定結果（予測）と web カメラ画像を目視判別した結果（実況）を比較することにより行った。

検証では、雪氷路面と通常路面の判別精度を表す適中率とそれぞれの路面状態の判別精度を表すカテゴリ一致率の2通りで行った（表5）。

表5 路面状態の判別精度の評価

項目	内容
適中率	雪氷路面と通常路面の判別精度を表す
カテゴリ一致率	それぞれの路面状態の判別精度を表す

2020-2021冬期の適中率とカテゴリ一致率を表6に示す。

表6 路面状態推定精度（実況：Webカメラ目視判別）
(2020- 2021冬期)

細内川橋		実況					合計	
		通常路面		雪氷路面				
		乾燥	湿潤	シャーベット	積雪	凍結		
予測	通常路面	乾燥	77	22	21	6	14	140
		湿潤	14	166	47	45	8	280
	雪氷路面	シャーベット	0	3	56	266	2	327
		積雪	0	0	26	509	0	535
		凍結	0	8	47	58	3	116
合計			91	199	197	884	27	1398
			適中率		89.1%			
			カテゴリ一致率		58.0%			

若柳金成IC		実況					合計	
		通常路面		雪氷路面				
		乾燥	湿潤	シャーベット	積雪	凍結		
予測	通常路面	乾燥	607	151	16	2	38	814
		湿潤	144	244	47	10	1	446
	雪氷路面	シャーベット	4	20	88	41	4	157
		積雪	0	3	17	8	0	28
		凍結	16	12	44	48	2	122
合計			771	430	212	109	45	1567
			適中率		89.2%			
			カテゴリ一致率		60.6%			

適中率は約90%であり、雪氷路面と通常路面の判別精度は高い。通常路面と雪氷路面の判別に関しては十分実用的である。

なお、5つの路面区分ごとの一致率を示すカテゴリ一致率は60%程度であり、詳細なカテゴリ区分の点ではやや課題を残す結果であった。

しかし、次の冬期において、路面状態実況値を逐次補正に反映する予定であり、さらに高精度での実用化が期待できる。

7. 今後の展望

冬期路面状態予測システムは、路面上の残留塩分濃度を反映して路面状態予測を実施した。加えて、テレメータや気象メッシュによる気象実況値を活用し逐次補正を

行うことによって、通常路面と雪氷路面の判別率は約90%になり、実用レベルに達したと考える。

今後、雪氷作業情報や路面実況値を逐次補正に反映する予定であり、これによりさらに精度向上が期待できる。

近年、各種モニタリングシステムが開発されてきており、今後も新たな技術が開発されていくと考えられる。これらのモニタリング値を取り込むことにより、本システムの精度向上が期待できる。

確実性の高い情報提供により、道路管理者の雪氷作業判断が確実化される。われわれは、より正確な路面状態予測情報の提供を目指していく所存である。

〈参考文献〉

[1] 高橋尚人, 徳永ロベルト, 浅野基樹, 石川信敬 (2007), 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第652号

[2] https://www.yamada-giken.co.jp/en/products/salinity_sensor