

降雪水準の変化に対応した冬期路面予測技術の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：寒地交通チーム

研究担当者：高橋 尚人、徳永 ロベルト、
佐藤 賢治、中島 知幸、藤本 明宏

【要旨】

本研究では、降雪水準の変化に対応した冬期路面予測技術の開発を目的に、試験道路および実道において野外観測を実施し、大気放射量の推定精度の向上、路面温度推定モデルおよび路面状態推定モデルの改良を行った。また、冬期道路管理に関する道路管理者の意思決定を支援するためにこれらのモデルによる計算結果を道路管理者に公開した。さらに、道路管理者との意見交換を通じてより実用性の高いツールを開発した。
キーワード：冬期道路管理、路面温度、路面状態、大気放射量、予測・推定技術

1. はじめに

1. 1 研究の背景

積雪寒冷地では、凍結防止剤や防滑材の散布によって滑り易い路面の回避に努めている。しかしながら、路面凍結が気象のみならず交通、沿道環境および道路構造等の影響を受けて発生するため、適切に散布を実施することは依然として容易でない。また、作業員の人材不足が懸念される昨今、作業員の熟練度や技能に関係なく、散布作業の統一性を担保していくことも重要となっている。今後、散布作業の質を維持・向上させるためには、凍結発生の場所や時期を的確に捉える技術が必要となる。

当研究所では、気象予報データから路面温度および路面状態を予測する手法（路面凍結予測手法、特許第 4742388 号）をこれまでに開発した。路面凍結予測手法は、路面温度推定モデル¹⁾と路面状態推定モデル²⁾から構成される。前者は、道路テレメータ地点において路面温度を予測し、サーマルマップ（路線温度分布）を計算に組み入れることで道路テレメータ地点だけでなく線的に路面温度を予測できる。後者は、道路テレメータ地点のみであるが、路面温度に加えて路面状態（乾燥、湿潤、シャーベット、圧雪、アイスバーン等）を予測できる。こうした路面凍結予測手法によって科学的・定量的に路面温度や路面状態を知ることが可能になった。これらの情報は道路管理者の意志決定を支援し、適切な冬期道路管理の実施に活用されている。

1. 2 路面凍結予測手法の課題

路面凍結予測手法に残された課題を以下に列挙する。

(1) 大気からの長波放射量の推定精度向上

路面の熱収支において大気からの長波放射量（以下、大気放射量）は、夜間における支配的な影響因子である。通常、大気放射量はアメダスや道路テレメータでは計測されていないため、推定しなければならない。その値は気温、相対湿度および雲量等に依存し、晴天時と曇天時ではおよそ $50\sim 100\text{ W/m}^2$ 異なる。そのため、大気放射量の推定精度は路面温度や路面状態の予測結果に多大な影響を与える。これまでに大気放射量に関する様々な推定式が提案されており、各推定式の精度を比較検証し、精度が高い推定式を選定する必要がある。

(2) 路面温度推定モデルの改良

国土交通省では、平成 22 年度より道路維持管理に関する全国統一基準を明確に設定し、経費の一層の縮減に取り組んでいる。除雪事業に関しては、「原則 5～10cm の降雪量で除雪を実施」と定め、除雪水準を緩和させた。これにより、路面上の雪氷残存量は以前より増える傾向になった³⁾。路面温度推定モデルは非積雪路面（乾燥・湿潤路面）を想定して構築されたため、除雪水準の変更に伴い積雪路面（圧雪・氷板路面等）が増えたことにより、路面温度の推定精度が低下した。こうした背景より、除雪水準の変化に対応した路面温度推定モデルの開発が急務となっている。また、上述したように路面温度推定モデルは、サーマルマップを用いて路面温度予測を点



図-1 サーマルマップの繋ぎ目で発生する温度ギャップ

から路線に拡大させている。そのため、図-1 に示すように、気象条件によってはサーマルマップ同士の交点で路面温度に急変が生じる。

(3) 路面状態推定モデルの改良

路面状態推定モデルは、熱・水分収支を基に路面上の水、氷および雪の質量を計算し、路面状態を推定する。熱・水分収支に関連する様々なパラメータの内、雪氷のアルベド（日射の反射率）、熱伝導率および排水速度係数については工学的な根拠が乏しく、更なる検討の余地がある。また、水・氷・雪質量から路面状態に変換する手法は十分に検証されているとは言い難く、現状モデルの計算精度（再現率 70%）を鑑みても、モデルの改良が望まれる。

1. 3 研究の目的

本研究は、上記の課題(1)～(3)の解決を目的とする。また、路面凍結予測手法を運用し、道路管理者の意思決定を支援するとともに、道路管理者との意見交換を通じてより実用性の高い路面凍結予測手法の開発を目指すものである。

2. 研究方法

2. 1 大気放射量の推定精度向上

2. 1. 1 大気放射量推定式の机上検討

大気放射量推定式の文献調査を実施した。本研究では、既往研究を踏襲し、晴天日の大気放射量は近藤の式、山本・Brunt の式、Brutsaert の式、Prata の式を、曇天日の大気放射量はBolzの式、Sellersの式、近藤の式をそれぞれ対象とした⁴⁾。

2. 1. 2 試験道路での気象観測および精度検証

平成 24 年度に苫小牧試験道路において気象観測（図-2 左上の拡大図）を実施した。本気象観測では、気温、相対湿度および大気放射量を測定した。

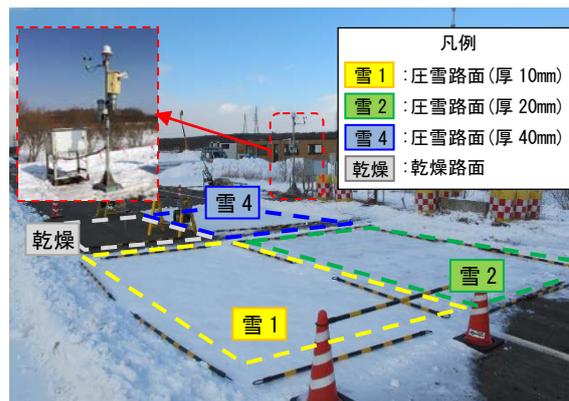


図-2 気象観測および路面温度測定（苫小牧試験道路）



図-3 定点気象観測（江別市）

大気放射量の推定に必要なとなる雲量は新千歳空港（本気象観測地点との直線距離：約 15 km）の観測データを用いた。本研究では、これらの気象観測値を用いて晴天日と曇天日を区別して大気放射量を推定し、実測値との比較から大気放射量の推定式の精度を検証した。

2. 1. 3 実道での気象観測および精度検証

平成 24 年度に札幌市、平成 25 年度に江別市および平成 26 年度に滝川市でそれぞれ気象観測を実施した。本報告書では、一例として江別市における気象観測の様子を図-3 に示す。気象観測では、苫小牧試験道路での気象観測と同様に、気温、相対湿度および大気放射量を測定した。また、後述する路面状態推定モデルの検証に用いるために、日射量、風速、時間降雨量、降雨強度および路面温度も測定した。これらの気象観測値を用いて大気放射量を推定し、実測値との比較することで大気放射量の推定式の精度を検証した。

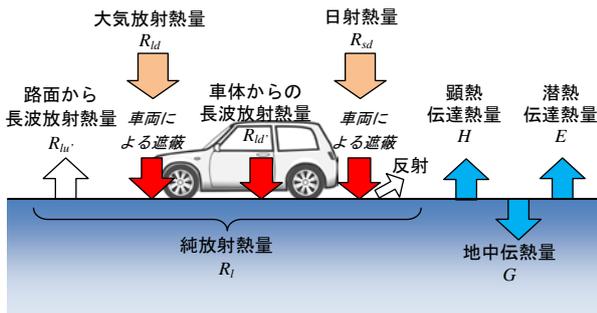


図-4 路面温度推定モデルの概念図



図-5 サーマルマップの調査状況

2. 2 路面温度推定モデルの改良

2. 2. 1 路面温度推定モデルの概要

図-4 に路面温度推定モデルの概念を示す。本モデルは、気温、風速、相対湿度、大気放射量、日射量などの気象条件や交通量を入力条件に路面の熱収支を解析して路面温度を出力する。路面温度推定モデルおよびその理論の詳細については参考文献1)を参照されたい。

2. 2. 2 試験道路での野外観測およびモデル検証

平成 24 年度および平成 25 年度に苫小牧試験道路において野外観測を実施した。野外観測では、乾燥路面と厚さの異なる 3 つの圧雪路面を人為的に作製し、気象観測および路面温度測定を行った(図-2)。

路面温度推定モデルの改良では、舗装のアルベドと熱伝導率を変化させる感度解析を実施し、路面温度の観測値と計算値の比較を通じて、舗装のアルベドと熱伝導率をそれぞれ決定した。

2. 2. 3 実道での野外観測およびモデル検証

平成 27 年度に一般国道 5 号、337 号および 231 号を対象にサーマルマップ調査(図-5)を実施した。

当該区間は図-6 に示すように、5 つのサーマルマップ(区間①~⑤)を用いて路線の路面温度を予測している。本研究では、図中の区間①、②、③の路線の交点であるポイント A、および区間③、④、⑤の路線の交点であるポイント B に注目し、温度ギャップについて計算値と実測値を比較検証し、その解消手法を構築した。

2. 3 路面状態推定モデルの改良

2. 3. 1 路面状態推定モデルの概要

路面状態推定モデルは、前述の路面温度推定モデルに路面上の水・氷・雪の質量収支を組み込んだものであり、気温、相対湿度、降雨量などの気象条件と交通量を入力すると、路面上の物質の相変化(凍結や融解)や路面内外を出入りする物質の質量を解



図-6 サーマルマップ調査区間

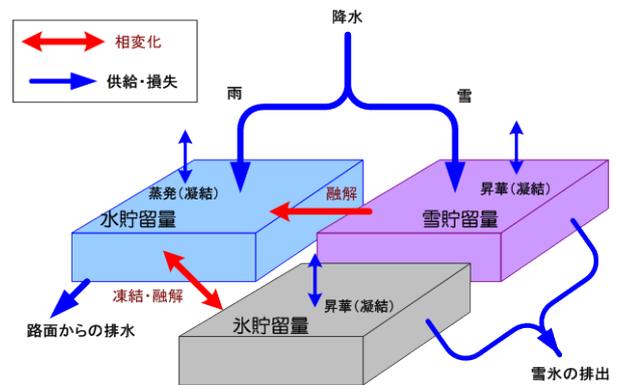


図-7 路面状態推定モデルの概念図

析し、路面温度に加えて路面上の水・氷・雪の貯留量を算出する(図-7)。さらに、路面状態判定フローを用いてこれらの水・氷・雪質量から路面状態を判定する。

2. 3. 2 試験道路での野外観測およびモデル検証

平成 24 年度および平成 25 年度に苫小牧試験道路において野外観測を実施した。野外観測は、2. 2. 2 に記載した観測と併せて実施され、図-2 に示すように、気象観測とともに人為的に圧雪路面を作製し、圧雪層の厚さ、密度および含水率を 2 時間間隔



図-8 冬期路面管理支援システムの画面

で計測した。

路面状態推定モデルの改良では、これらの実測値とモデルによる計算値との比較を通じて、モデルに用いられる熱・水分移動に関するパラメータ（アルベド、熱伝導率および排水速度係数）を決定した。

2. 3. 3 実道での野外観測およびモデル検証

平成 25 年度および平成 26 年度に江別太除雪ステーション構内および滝川道路事務所構内で気象、路面状態および路面温度観測を実施した。なお、江別太除雪ステーション構内での観測は図-3 に示される。また、CCTV カメラを用いて観測値近郊の道路状況画像を取得し、路面状態を観測した。路面状態の種類は「凍結」、「積雪・シャーベット」、「湿潤」および「乾燥」の 4 種類とした。ここでは、路面状態について実測値と計算値の比較検証を行い、路面状態判定手法を新たに構築した。具体的には、水・氷・雪質量を説明変数、路面状態を目的変数とした判別分析を実施し、実測値に合うように路面状態判定に用いる水・氷・雪質量の閾値を決定した。実測値と計測値の比較では、計算に用いる気象条件を現地観測値と気象予報値の 2 種類とし、前者では気象予報のエラーを除いて本モデルによる路面状態予測の再現率を評価し、後者では気象予報のエラーを含む本モデルによる路面状態予測的中率を評価した。

2. 4 道路管理者の意思決定支援

2. 4. 1 情報提供システムの運用

当研究所では、冬期道路管理の効率性向上を支援するために冬期道路マネジメントシステムの試行運用を行っている。当該システムは、冬期路面管理支援システム（図-8）と冬期路面すべり抵抗モニタリングシステムの 2 つのサブシステムで構成される。路面凍結予測情報等は冬期路面管理支援システムに

よって道路管理者に提供されている。

冬期路面管理支援システムは平成 17 年度から冬期間の情報提供を始めた。提供される情報は、気象予測情報、路線温度予測情報、路線凍結リスク予測情報、定点路面状態予測情報および CCTV カメラによる道路状況である。気象予測情報は最大 6 時間先まで、路線温度予測情報、路線凍結リスク予測情報および定点路面状態予測情報は最大 16 時間先まで、閲覧できる。

2. 4. 2 道路管理者からのフィードバック

平成 24 年度から平成 27 年度に亘り、使用者（道路管理者）に対して冬期道路マネジメントシステムに関するアンケート調査を実施した。調査内容は、冬期道路マネジメントシステムの使いやすさ、改善点、予測情報の精度等である。また、平成 25 年度からは道路事務所等において監督・代理人等に対してヒアリング調査も実施した。調査内容は、主としてシステムの利用状況や問題点等とした。

3. 研究結果

3. 1 大気放射量の推定精度の検証

図-9 に大気放射量の推定精度検証の一例として、平成 26 年度の滝川市の結果を示す。

推定値は晴天日が Prata の式⁴⁾で、曇天日が近藤の式を用いて計算されたものである。このようにして、試験道路および 3 か所での実道において、各種推定式による推定値と観測値を比較し、推定精度を RMSE で評価した。その結果をまとめたものが表-1 である。

RMSE が最小となる推定式は、晴天式では Prata の式が多く、曇天時では全て近藤の式であった。なお、札幌市・晴天時の Prata+近藤の RMSE は 18.4W/m^2 であり、Brutsaert+近藤に近い値であった。

本研究により、大気放射量の推定誤差は 3.8W/m^2 改善できた。

3. 2 路面温度推定モデルの改良結果

3. 2. 1 舗装のアルベドと熱伝導率の最適化

図-10 に感度解析の一例を示す。同図の計算条件は舗装のアルベド α を 0.8 に固定し、熱伝導率 λ を 0.6、0.8、1.0、1.2 および 1.4 W/mK の 5 ケースとした。

この計算条件の場合、観測値と計算値の RMSE は、 $\lambda=1.0\text{W/mK}$ で最小となった。このようにして、乾燥路面および圧雪路面における全日の最小 RMSE をまとめたものが表-2 である。同表より、アルベドは乾燥路面と圧雪路面に分けてそれぞれ 0.05 および

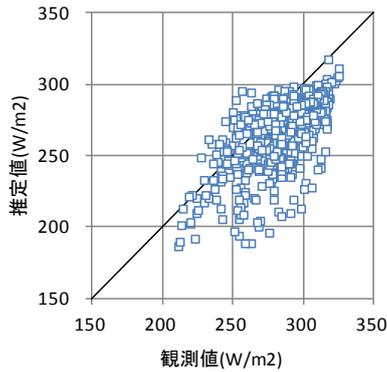


図-9 大気放射量の推定値と観測値の比較
(平成 26 年・滝川市)

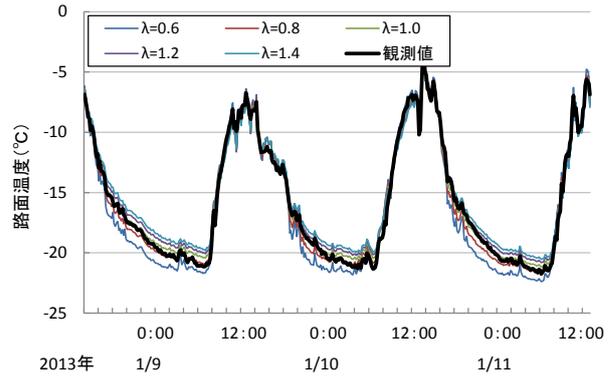


図-10 路面温度の感度解析結果一例

表-1 大気放射量推定式の検討結果一覧
(RMSE が最小の推定式を表記)

調査地点	晴天式	曇天式	最小 RMSE
試験道路	Prata	近藤	22.5 W/m ²
札幌市	Brutsaert	近藤	17.1 W/m ²
江別市	Prata	近藤	24.2 W/m ²
滝川市	Prata	近藤	28.4 W/m ²

表-2 路面温度の感度解析(全日)における最小 RMSE のアルベドと熱伝導率

路面状態	アルベド	熱伝導率	RMSE
乾燥	0.05	1.5	1.92
圧雪	厚 7.4 mm	0.80	0.50
	厚 17.5 mm	0.90	1.14
	厚 31.3 mm	0.90	0.3

0.8 程度で与えられるが、圧雪路面の熱伝導率は厚さによって異なり、圧雪層が厚いほど熱伝導率は小さくしなければならないことが分かった。

3. 2. 2 路線交点における温度ギャップ解消手法の構築

図-11 に温度ギャップ解消手法の模式図を示す。同図に示すポイント A (複数の路線交点) における温度ギャップは次の方法で補正される。

- i. 複数のサーマルマップを用いて推定されたポイント A における路面温度の平均値 T_{mean} を求める。
- ii. ポイント A において T_{mean} と各路面温度 T_A の差 ΔT_A を求める。
- iii. 予測基準点 (道路テレメータ地点) からの距離を x 、予測基準点を $x = x_0$ 、ポイント A 地点を $x = x_1$ 、 x における路面温度を T_s とし、補正後の x における路面温度 T_s' を次式で求める。

$$T_s' = T_s + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \Delta T_A \quad (2)$$

補正量は予測基準点でゼロ、ポイント A で ΔT_A となるように予測基準点からの距離に応じて線形内挿で与えられる。

本研究により、複数路線の交点 (図中ポイント A) における不自然な路面温度推定値の急変は解消され、

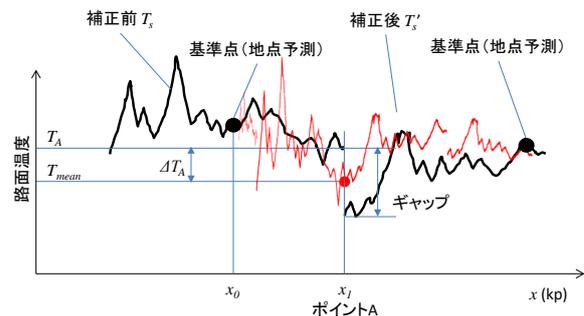


図-11 路線交点における温度ギャップ解消手法の概念図

より信頼性の高いモデルを構築できた。

3. 3 路面状態推定モデルの改良結果

3. 3. 1 熱・水分移動に関するパラメータの最適化

図-12 に苫小牧試験道路で実施した野外観測で得られた圧雪路面の水・氷・雪質量の実測値と路面状態推定モデルによる計算値の比較結果を示す。同図の計算条件は圧雪のアルベド=0.55、圧雪の熱伝導率=0.50 W/mK、排水速度係数=0.16 である。実測値について、水・氷・雪の質量は、日中に日射や気温の上昇によって低下し、夜間は殆ど変化がない。計算値はこうした質量変化を良好に再現できた。本報告では割愛するが、こうした比較検証を圧雪のア

ルベド、圧雪の熱伝導率および排水速度係数を変えて行い、最も RMSE が小さくなるようにこれらのパラメータを決定した。その結果、初期厚さが約 20mm の圧雪路面では、圧雪のアルベド=0.55~0.60、圧雪の熱伝導率=0.30~0.50 W/mK、排水速度係数=0.10~0.16 で計算値と実測値は良好に一致した。

3. 3. 2 モデルの改良と精度検証

本研究では、路面状態判別手法として線形判別分析と決定木を検討した。本報告書では決定木について記載する。決定木とは、誤判別率が小さくなるように説明変数の閾値を与えて条件分岐を行う方法である。本検討では、水、氷および雪質量 (M_{water} 、 M_{ice} および M_{snow}) 等を説明変数とし、路面状態の観測結果と決定木による判別結果より、各説明変数の閾値を決定した。本研究で得られた決定木の一例を図-13 に示す。

図-14 に滝川での観測で得られた路面状態の実測値と計算値の比較を示す。同図において、緑四角のシンボルは観測値、細線は従来モデルの計算値、太線は路面状態判別手法を改良したモデルの計算値である。なお、路面状態の出現率は、表-3 に示すように江別太と滝川で異なり、滝川における路面状態は比較的に積雪路面の出現率が高い。

表-4 は江別太と滝川におけるモデルの再現率（入力条件に気象観測値を使用し、気象のエラーを含まないモデルの計算精度）と的中率（入力条件に気象予報値を使用し、気象のエラーを含むモデルの計算精度）をまとめたものである。同表に示されるように、モデルの再現率は、路面状態判別手法の改良により 69.3%から 78.1%へと約 10%向上した。また、モデルの的中率は江別太において 40.3%から 68.1%に向上した。このように路面状態の出現率が異なるものの、決定木で決定された水・氷・雪質量の閾値は江別太と滝川で大差なかった。これは本研究で構築した路面状態判別手法の他地域への適用可能性や汎用性の高さを示すものと考えられる。

3. 4 アンケートおよびヒアリング調査の結果

アンケート回答数は、平成 24 年度から平成 27 年度の順で、19、35、39 および 31 件であった。主な結果として、回答者の 65%が当システムは作業の判断支援に役立つと答えた。平成 24 年度の調査において、当システムに追加・改良してほしい機能の質問に対して、スマートフォン対応サイトの改善が第一位であった。この要望に応え、平成 27 年度よりスマートフォンやタブレットでも閲覧し易いようなサ

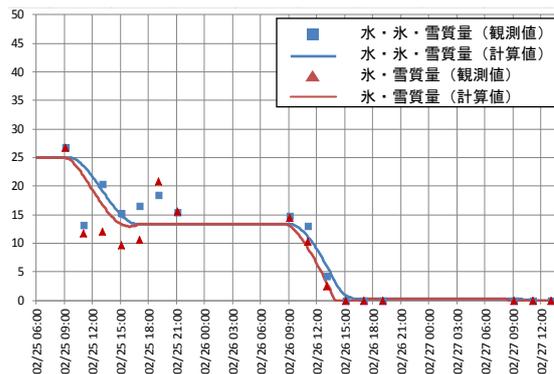


図-12 路面状態（路面上の水・氷・雪質量）の実測値と計算値の比較

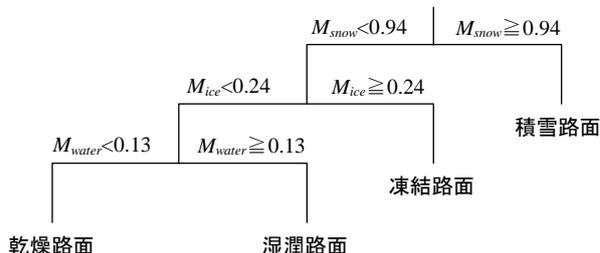


図-13 決定木による路面状態判別手法の例

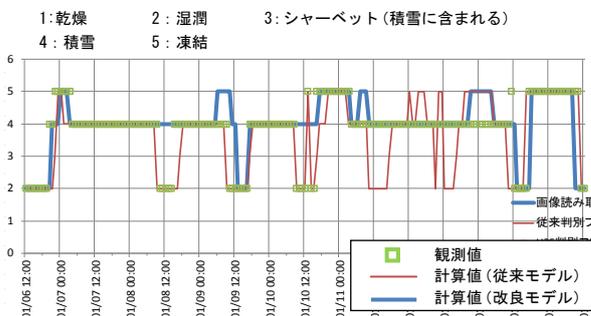


図-14 路面状態の観測値と計算値の比較

表-3 路面状態の出現率 (%)

場所	乾燥	湿潤	積雪	凍結
江別太	19	27	30	24
滝川	0	11	65	23

表-4 路面状態推定モデルの精度検証結果

項目	場所	従来モデル	改良モデル
再現率 (%)	江別太	69.3	78.1
	滝川	65.8	79.3
的中率 (%)	江別太	40.3	68.1

イトを構築し、公開を開始した。ヒアリング調査では、道路維持作業の実態を把握するとともに、道路維持作業において必要な情報を伺った。

4. まとめ

本研究では、降雪水準の変化に対応した冬期路面予測技術の開発を目的に、大気放射量の推定精度の向上、路面温度推定モデルおよび路面状態推定モデルの改良について検討を行った。また、冬期道路管理に関する道路管理者の意思決定を支援するためにこれらのモデルによる計算結果を公開した。本研究により、以下の知見が得られた。

- 1) 大気放射量の推定は、晴天日には Prata の式、曇天日には近藤の式を用いると RMSE が最小となることが分かった。
- 2) 路面温度推定モデルにおける舗装のアルベドと熱伝導率を変化させると、圧雪路面でのモデルの推定精度が向上できることが分かった。また、路面上の圧雪層の厚さに応じた両パラメータの値を決定できた。
- 3) 路面温度推定モデルにおいて、路線交点で発生する温度ギャップの解消手法を構築した。これにより、路線交点における不自然な路面温度推定値の急変は解消され、より信頼性の高いモデルを構築できた。
- 4) 野外観測による実測値との比較検証より、路面状態推定モデルにおける圧雪のアルベド、圧雪の熱伝導率および排水速度係数を決定できた。
- 5) 路面状態推定モデルにおける路面状態判別手法を新たに構築した。これにより、従来の手法と比べて路面状態の再現率は 10% 程度、的中率は 30% 近く向上できた。

本研究により、大気放射量の推定精度向上や路線交点での温度ギャップの解消を行うとともに、モデルにおける熱・物質移動に関するパラメータの最適化により積雪路面や圧雪路面に対する路面凍結予測手法の計算精度を向上させることができた。しかしながら、路面凍結予測手法を線的・面的に拡張するにはサーマルマップを要し、サーマルマップを作成するための時間や労力の負荷が手法の広域化を遅延させている。今後は、当手法の広域化を促進させる新たな方法を確立し、信頼性とともに対応性や汎用性にも優れたモデル構築を目指す。

参考文献

- 1) 高橋尚人、浅野基樹、石川信敬：熱収支法を用いた路面凍結予測手法の構築、寒地技術論文・報告集、Vol. 21、pp. 201-208、2005
- 2) Takahashi, N., Tokunaga, R., Sato, T. and Ishikawa, N.: Road surface temperature model accounting for the effects of surrounding environment、雪氷、Vol. 72、No. 6、pp. 377-390、2010
- 3) 徳永ロベルト、高田哲哉、高橋尚人：寒冷地域における冬期道路の性能評価、土木計画学研究発表会、Vol. 43、論文番号 322、2011
- 4) 高橋尚人、川端優一、藤本明宏、徳永ロベルト、石井吉之：曇天時における大気放射量推定に関する研究、雪氷研究大会（2013・北見）、p. 91、2013

A STUDY ON DEVELOPMENT OF PREDICTION METHOD FOR WINTER ROAD SURFACES CORRESPONDING TO CHANGE OF SNOW REMOVAL LEVEL

Budged : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Cold-Region Road Engineering
Research Group (Traffic
Engineering Research Team)

Author : Naoto Takahashi
Roberto Tokunaga
Kenji Sato
Tomoyuki Nakajima
Akihiro Fujimoto

Abstract : In order to develop of a prediction method for winter road surfaces corresponding to the change of snow removal level, improvements of sky radiation which is the input data for the method, estimation models for road surface temperature and condition were carried out based on field observations in this study. And, the computational results obtained by these models were released to the road administrators in order to support their decision making regarding the winter road management. In addition, more highly practical method was developed through exchanges of information and opinions with the road administrators.

Key words : winter road management, road surface temperature and condition, prediction method