

機関番号：13401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21710169

研究課題名（和文） 路面滑り摩擦係数の推定による凍結防止剤の最適化に関する研究

研究課題名（英文） A study on optimization of salting by estimation of sliding friction coefficient on road

研究代表者

藤本 明宏 (FUJIMOTO AKIHIRO)

福井大学・大学院工学研究科・研究機関研究員

研究者番号：90456434

研究成果の概要（和文）：

本研究では、車両熱および凍結防止剤散布の影響をそれぞれ組み込んだ熱・水分収支による路面雪氷状態モデル(車両熱モデルおよび凍結防止剤モデル)を構築し、実験結果との比較からモデルの妥当性を検証した。

車両熱モデルによる計算結果は、乾燥路面温度の実測値、圧雪路面の融解過程における雪氷厚および雪氷密度の実測値とそれぞれ良好に一致した。凍結防止剤モデルの計算結果は、凍結防止剤散布路面の凍結および融解過程における舗装温度および塩分濃度の実験値と概ね一致した。

本研究により、車両熱と凍結防止剤を考慮して路面温度および路面雪氷状態を計算することが可能になった。

研究成果の概要（英文）：

In this study, heat and moisture balance models was developed to predict the road surface temperature and snow and ice conditions on a road that is subject to the thermal effects of vehicles and salting (hereafter referred to as vehicle model and salting model). To evaluate the validity of the proposed models, we compared experimental results with calculated results.

As a result, the road surface temperature under dry condition and the thickness and density of snow/ice layer on road calculated by the vehicle model were in good agreement with the measured ones. The road surface temperature and the salt concentration calculated by the salting model were in good agreement with measured ones for both freezing and melting processes.

The proposed model made it possible to calculate the road surface temperature and the snow/ice conditions on the road taken into consideration the thermal effects of vehicles and salting.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：総合新領域

科研費の分科・細目：社会システム工学・安全システム

キーワード：安全システム、冬期道路、路面凍結、凍結防止剤、熱移動、数値解析

1. 研究開始当初の背景

冬期道路において、降雪－圧雪－凍結－融解に起因する路面雪氷状態の多様な変化は、道路管理の時期、方法および凍結防止剤の散布量などの決定を困難にさせている。その一方で、雪寒事業費は年々減少しており（平成20年度予算は平成10年度比で約70%減）、道路管理の効率化は急務である。今後、雪寒事業費を削減させつつ、道路交通の安全水準を向上させるためには、路面雪氷状態モデルが必要となる。

既往の熱収支による路面雪氷状態モデルの多くは自然要因に重点が置かれ、車両や凍結防止剤散布などの人為要因は殆ど考慮されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、路面滑り摩擦係数（ μ ）を推定するモデル（ μ 推定モデル）を構築し、凍結防止剤の適切な散布量と散布時期を決定する手法（凍結防止剤散布の最適化手法）を開発することにある。

本課題では、車両熱および凍結防止剤をそれぞれ組み込んだ熱・水分収支型路面雪氷状態モデル（車両熱モデルおよび凍結防止剤モデル）を構築し、実験結果との比較から各モデルの妥当性を検証する。

3. 研究の方法

本研究は、車両熱モデルと凍結防止剤モデルに関する研究に大別される。前者では、乾燥路面および圧雪路面を対象とした観測を実施し、モデルの妥当性を検証する。また後者では、塩化ナトリウム散布路面の凍結および融解過程における実験を実施し、モデルの妥当性を検証する。

(1) 車両熱のモデリング

① 乾燥路面

間欠的に発生する車両熱の時間変化を考慮した熱収支路面温度モデルを構築した。

図1および図2は、2009年8月に一般国道8号（福井県越前市地先）で実施した自然走行部における観測の様子と、2009年12月に一般国道416号幾久第二交差点（福井県福井市地先）で実施した信号部における観測の様子をそれぞれ示す。実験では気象観測、交通量調査および路面温度測定を実施した。

これらの野外観測結果との比較からモデルの妥当性を検証するとともに、路面温度に及ぼす車両の熱的影響を分析・検討した。

② 圧雪路面

サーモグラフィーを用いて車両底面の熱画像を撮影した。これを基に車両輻射熱を考慮した熱・水分収支路面雪氷状態モデルを構築し、以下に詳述する野外実験結果との比較

からモデルの妥当性を検証した。

図3は、福井大学文京キャンパス構内のア



図1 自然走行部における乾燥路面温度測定地点と気象観測



図2 信号部における乾燥路面温度測定地点と気象観測

スファルト舗装で実施した車両輻射熱による路面融雪実験の概要を示す。実験では、積雪路面上に車両をアイドリング状態で停止させることで路面積雪を融解させた。実験中は、気象観測および車両下の路面雪氷物性の測定を行った。車両下の路面雪氷物性は、1時間間隔で車両を実験区間外へ移動させ、図中に示す車両の前部（m.p.-F）、中部（m.p.-M）および後部（m.p.-R）の地点で雪氷厚および雪氷密度をそれぞれノギスおよび円管サンプラーで測定した。

実験当日、路面上の積雪は均一でなかった

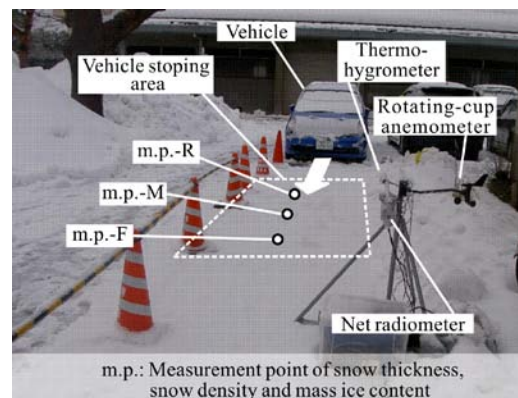


図3 車両輻射熱による融雪実験

ので、8:00 にすべて取り除いた。その後、20:00 までの降雪で堆積した約 70mm の積雪路面を実験の初期状態とした。

(2) 凍結防止剤のモデリング

① 凍結過程

凍結防止剤の熱・物理・化学的影響をモデル化し、路面雪氷状態モデルに組み込んだ。

図 4 は低温恒温室で実施した NaCl 散布路面の凍結実験の概要である。実験では、NaCl 粉体を散布した舗装を舗装供試体の下に設置した電子冷却器を用いて冷却させることで、大気中の水蒸気の舗装表面への凝縮・凝結を促進させた。実験の間、塩分濃度は NaCl 溶液を吸水紙でサンプリングしてコンパクト塩分計で、路面温度は放射温度計で、凍結量は電子天秤（最小目盛 0.01g）で、それぞれ 30 分間毎に測定した。また、気温および相対湿度は温湿度計により、下向き長波放射は放射収支計により、舗装の代表温度は舗装表面の中央で舗装上面から 15 mm 下方に埋設した熱電対により、それぞれ 1 分間隔で計測した。

② 融解過程

上記の凍結過程と同じ装置を用いて NaCl 散布路面の融解実験を行った。まず、約 12 時間に亘り、舗装上面に凝結による凍結層を作成した。この状態を初期条件とし、冷却装置を停止させることで舗装温度を上昇させ、凍結層を融解させた。

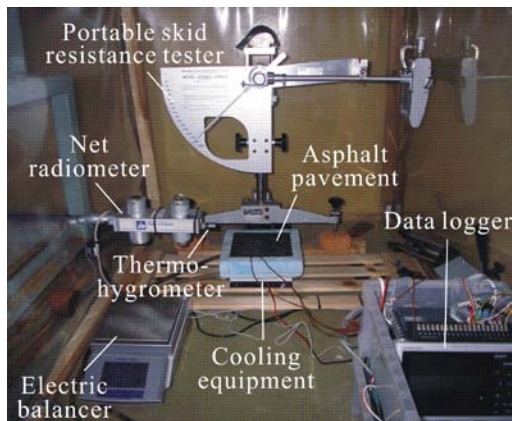


図 4 凍結および融解実験装置

4. 研究成果

(1) 車両熱のモデリング

① 乾燥路面

図 5 は、自然走行部で撮影した夏の日中（12:00）における路面温度 T_s 分布を示す。車両通過部の地点 G、J、I および L の T_s は、非車両通過部の地点 H および K の T_s に比べて約 1~3°C 低い。

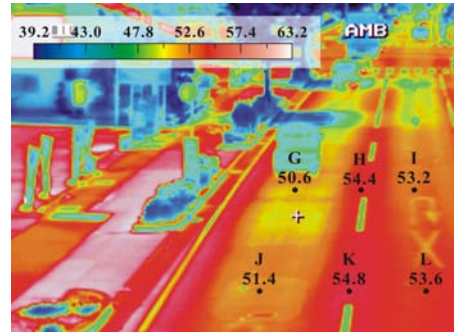


図 5 路面温度分布（自由走行部）

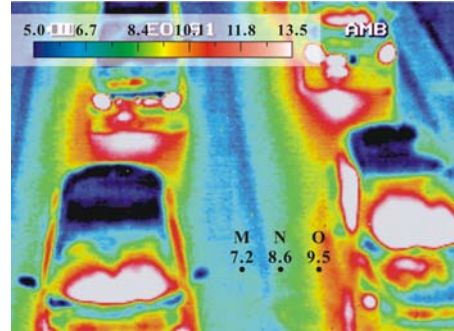


図 6 路面温度分布（信号部）

図 6 は信号部における観測で撮影した冬の夜間（21:00）の T_s 分布である。同図より、ルーフなどを除いて車体温度は T_s より高いことが知れる。また、非車両通過部の地点 M、N および O の T_s は 7.2、8.6 および 9.5°C であり、車両通過部に近づくにつれて T_s は上昇した。

本研究によりこれまで見過ごされていた路面温度に及ぼす車両熱の特性が明らかになった。本研究で構築した車両熱モデルはこうした車両熱に起因した T_s の時間変化を再現することができた。

② 圧雪路面

図 7 は車両底面の写真である。車両底面の熱画像より、車両底面温度 T_v は 110~120°C のエンジン部が最も高く、エキゾーストマニホールド→フロントパイプ→キャタライザー→センターパイプ→マフラーといった排気ガスの通過経路で 60~100°C 程度と比較的

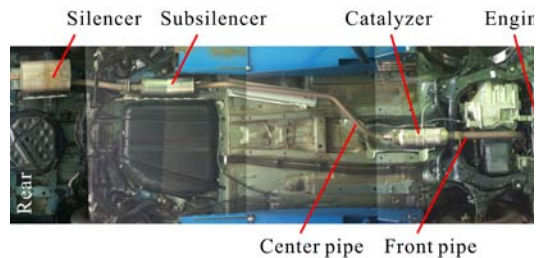


図 7 車両底面

高いことが分かった。また T_v は、排気ガスの

通過経路から離れにつれて低下し、車両中部から後部の大部分では $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ 程度であった。なお T_v の平均は 30.8°C であった。

図 8 および図 9 は、車両輻射熱による路面融雪実験の概要における実験開始時と 4 時間後の路面雪氷状況を示す。写真の破線内は車両停止領域を、実線内は舗装の露出（乾燥、湿潤、黒シャーベット状態の路面）領域を意味する。

実験開始の路面は一様に積雪状態であった。1 時間経過後、車両前部中央付近に舗装の露出が出現した。この露出領域は、車両中央に向かう車両縦方向への広がりが増大し、その後、次第に車両中部から車両前部の全域へと拡大した。実験終了の 6 時間後には、車両中部から車両前部の大部分は露出した。



実験開始時（初期状態）



実験開始から 4 時間後

図 9 路面雪氷状態の時間変化
(車両輻射熱による路面融雪実験)

本研究で構築した車両熱モデルは、積雪層の融雪課程における雪氷密度および雪氷厚の時間変化を良好に再現することができた。

本研究により車両熱モデルを構築し、乾燥路面および積雪路面におけるモデルの妥当性を得ることができた。

以上の車両熱に関する研究の成果は、アメリカ気象学会および日本雪工学会へ査読論文として投稿する予定であり、現在論文を作成している。

(2) 凍結防止剤のモデリング

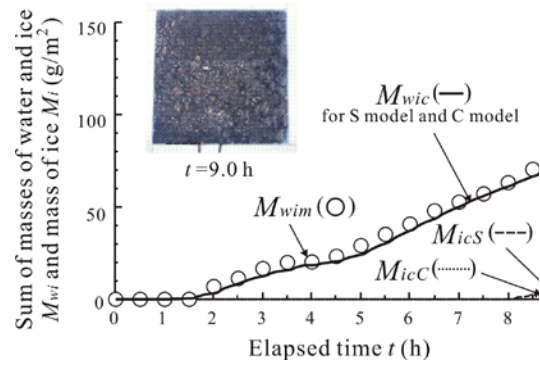


図 10 凝結量および凍結量の時間変化
(NaCl 散布路面の凍結実験)

① 凍結過程

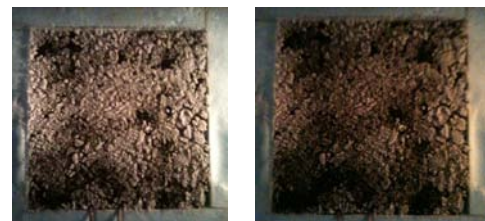
図 10 は散布量 = 10 g/m^2 の凍結実験における路面凍結量の経時変化を示す。同図には計算結果を併せて示す。

図中の M_{wi} は凝縮・凝結量および M_i は凍結量を意味する。 M_{wi} の実験値 M_{wim} (○) は、開始からの経過時間 $t = 1.0\sim 1.5\text{ h}$ の間で検出され、時間とともに増大した。その時間増加率は、 $3.0 \times 10^{-3}\text{ g/m}^2\text{s}$ 程度であった。 M_{wi} の計算値 M_{wic} (実線) は、実験値を良好に再現した。

本研究では NaCl の散布量を 5, 10 および 20 g/m^2 の 3 ケースと非散布路面で実験を行った。いずれのケースにおいても路面凝縮・凝結量および塩分濃度の計算値は実測値と良好に一致し、モデルの妥当性を示すことができた。

② 融解過程

図 11 は NaCl 散布路面の融解実験における路面結露状況の時間変化を示す。実験開始時、



実験開始

40 分後



80 分後

120 分後

図 10 融解過程における路面雪氷状態
(NaCl 散布路面の融解実験)

路面は一様に凝結している。同図より路面凝結は時間とともに融解していることが分かる。この融解水により路面上の塩分濃度は低下した。こうした路面凝結の融解過程において、塩分濃度の計算値と実測値は概ね一致し、モデルの妥当性を示すことができた。

本研究により、凍結防止剤を考慮した熱・水分収支による路面雪氷状態モデルを構築することができた。これにより、晴天日夜間に橋梁や高架橋で発生しやすい霜凍結の予測と凍結を回避するための適切な凍結防止剤の散布量を計算することが可能になった。これらの成果は日本雪工学会へ査読論文として投稿している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計2件)

1. A. Fujimoto, Heat transfer analysis on road surface temperature near a traffic light, 17th ITS World Congress, October 2010, Busan, Korea.
2. A. Fujimoto, Influence of vehicle related heats on 'black ice', 13th REAAA Conference, September 2009, Seoul, Korea.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 明宏 (FUJIMOTO AKIHIRO)

福井大学・大学院工学研究科・研究機関研究員

研究者番号: 90456434

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし