

令和 4 年 10 月 17 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01350

研究課題名（和文）路面凍結防止剤散布効果の簡易評価ソフトウェアの開発

研究課題名（英文）Development of simple evaluation software for spraying effect of anti-icing agent on road surface

研究代表者

藤本 明宏（Fujimoto, Akihiro）

福井大学・学術研究院工学系部門・講師

研究者番号：90456434

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：冬期道路では、路面凍結を防ぐために凍結防止剤が散布されているが、道路予算の縮減や道路構造物への塩害を背景にその効率化が課題となっている。本研究では、室内実験や野外実験を通じて、路面すべり摩擦係数を指標にした凍結防止剤散布評価ソフトウェアを開発した。また、路面凍結の推定には路面上の水膜厚が重要であることから、路面上の水膜厚を連続して測定する車載式装置を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは散布した凍結防止剤の量やタイミングの妥当性を評価し難かったが、本研究により気象予報、交通条件、舗装種別を基にした路面凍結予測と、凍結が発生する場合には最適な凍結防止剤散布の量・時期の推定が可能になった。また、車載式路面水膜厚計測装置を開発したことにより、路面水膜厚の路線分布の評価ができるようになり、路面凍結の発生箇所や重点的な散布の必要性などを、事前に把握することが可能になった。

研究成果の概要（英文）：On winter roads, anti-freezing agents are sprayed to prevent road surface freezing. Improvement of their efficiency has become a problem due to reduction of road budget and salt damage to road structures. In this research, we have developed a software for evaluation of sprayed anti-freezing agent using road sliding friction coefficient as an index through indoor and outdoor experiments. In addition, since the water film thickness on the road surface is important for estimating road surface freezing, we have developed a vehicle-mounted measuring device that continuously measures the water film thickness on the road surface.

研究分野：複合領域

キーワード：防災 路面凍結 凍結防止剤 路面すべり摩擦係数 路面水膜厚

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

冬期道路では、路面凍結対策として凍結防止剤が散布されるが、その散布効果の評価技術は十分に確立できていない。現状では、適切な量・時期で散布しているか否かを正確に評価することは難しい。この問題解決のために、申請者はこれまでに、熱・水分・凍結防止剤収支による路面すべり摩擦係数予測（以下、 μ ）モデルを開発した。しかしながら、このモデルは導入や運営の費用が障害となり、実際の道路管理に普及できていない。そこで、簡単に誰でも使用できるようにエクセルを用いた凍結防止剤の事後散布評価ソフトウェアを独自に開発した。これまでの研究では、北海道の極寒冷地を対象にしたが、本課題ではこれを全国に拡張し、凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアの開発を目的とした。なお、凍結防止剤の事後散布とは凍結後に散布し、路面雪氷の融解を目的とした散布方法であり、事前散布とは凍結前に散布し、路面水分の凍結防止を目的とした散布方法である。

2. 研究の目的

本研究では、凍結防止剤散布効果を冬期道路の安全性を客観的に示す μ で評価する。そのために、 μ と関係性があると考えられる路面上の水質量を計算する。路面上の水質量は降雪や路面上の水分の凍結によって発生し、路面上の水分は降雨、蒸発、道路勾配に伴う排水、車両通過に伴う飛散などによって規定される。以上より、本研究における凍結防止剤の散布効果は気象条件、交通条件、路面状態、凍結防止剤散布条件および舗装種別を入力条件として与え、路面の水収支を計算することで路面上の水質量さらには μ を計算して評価する。なお、凍結防止剤は主に塩化ナトリウムと塩化カルシウムが使用されており、本課題では最も使用量の多い塩化ナトリウムを対象とした。以下では、凍結防止剤を「塩」と総称する。

本研究では、上記に示すプロセスを経て得られる μ を指標にした凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアを開発するために、次の5の研究を実施した。

- (1) 湿潤路面における固形塩の溶解速度の解明
- (2) 塩溶液の凍結過程における μ 特性の解明
- (3) 車両通過による飛散水量の定量的評価
- (4) 新たな車載式路面水膜厚計測装置の開発とその検証
- (5) 凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアの構築とその検証

上記の(1)および(3)の知見を踏まえて上述したように路面の水収支を基本とした上記(5)の凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアを構築する。また、野外試験を実施し、その妥当性を検証する。

本研究は、当初上記(1)、(2)および(5)を目的に研究を開始したが、研究の進捗とともに、研究内容を一部変更した。計画では、塩化カルシウムの散布も考慮する予定であったが、北陸地方での散布実績が少ないことを理由に優先度を下げ、本研究から除外した。その代わりに上記の(3)と(4)の研究を追加した。(4)を着手した理由について述べる。凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアは路面状態として路面水膜厚を入力する必要がある。路面水膜厚は同じ路線であっても橋梁と土工部、日照時間、地形などの違いによって空間的に変化し、それによって局所的に路面凍結が発生することがある。走行しながら路面水膜厚を測定することにより、路面凍結の発生や μ の変化を広域に評価することが可能になる。

3. 研究の方法

(1) 湿潤路面における固形塩の溶解速度の解明

本研究は、湿潤路面への塩散布において塩の固相から液相への溶解を計算するために室内実験と数値解析から固相塩の溶解速度定数を定量的に評価したものである。固相塩の溶解速度定数は塩分濃度の時間変化が実験値と計算値で一致するように決定される。実験は低温恒温室内で行われ、図1に示すように舗装上に作成した水膜に固相塩を散布し、固相塩の溶解に伴う塩分濃度の上昇を屈折計で測定する。

塩分濃度の時間変化の計算方法を以下に記載する。本計算では、路面に散布された塩を球体と見做すことで、塩の溶解現象を数値化して表現した。微小時間における固相塩の溶解量の変化は、Noyes-Whitneyの式を用いて与え、溶解が生じても塩の形状は球体を維持するものとして、球体の半径を縮小させ、塩の体積と表面積を減少させた。こうした計算の中では溶解速度定数が唯一の未知数となり、塩分濃度の実験値と計算値が一致した時の値を溶解速度定数として決定した。

(2) 塩溶液の凍結過程における μ 特性の解明

本研究では、塩溶液の凍結過程（水・氷・塩の混相状態）における μ と路面水膜厚の関係を定量的に評価するために低温恒温室内にて室内実験を実施した。実験では、舗装上の水膜に固相塩を散布し、室内を規定温度まで下げることで路面を水・氷・塩の混相状態にした。規定時間後、振り子式すべり抵抗測定器（図2）により路面すべり抵抗値(BPN)を、屈折計により塩分濃度を、それぞれ測定した。路面上の水質量は塩分濃度と実験開始時の路面上の水質量および塩質量から算出できる。

(3) 車両通過による飛散水量の定量的評価

本研究では、試験道路において走行試験を実施し、飛散量を水膜厚と走行速度を用いて定量的

に評価した。図3は走行試験の概要である。本試験は密粒度アスファルト舗装の試験道路で実施され、走行区間は350m、散水区間は60mおよび測定区間は10mとした。試験手順は次のとおりである。(i)散水車を用いて路面に散水し、路面を湿潤状態にする。(ii)タイヤ通過部の路面水膜厚を測定する。(iii)試験車両を走行させる。(iv)再びタイヤ通過部の路面水膜厚を測定する。(v)試験車両通過前後の路面水膜厚の差から1台通過当たりの飛散水フラックスを算出する。試験車両は小型乗用車とし、タイヤはノーマルタイヤ(195/55R16)である。走行速度は20、40、60および80 km/hとした。

路面水膜厚は路面上の水分を吸水してその重量から高さに換算する吸水法(図3左上参照)により3か所で測定し、その平均値とした。タイヤ通過部は図3に示すように路面に30cm幅の誘導線を設けることで固定した。

(4) 新たな車載式路面水膜厚計測装置の開発とその検証

本研究では、車載に搭載し走行しながら連続して路面水膜厚を測定する理論、方法、装置を提案した。また、車両に実装し、路面水膜厚を出力するためのシステムを構築した。さらに、試験道路での走行試験結果との比較から路面水膜厚の測定精度を検証した。本装置は、タイヤによって飛散した水分から路面水膜厚を測定することから、タイヤ水はね式路面水膜厚装置と名付けた。

図4はタイヤ水はね式路面水膜厚装置の概要図であり、同図を用いて以下に本装置による路面水膜厚の測定原理を述べる。本装置は、2個の車載式塩分濃度センサーを車両に装着する必要がある。本測定車両では後両輪タイヤの後方に塩分濃度センサーを1個ずつ取り付けた。後右輪では、同図に示すようにタイヤからセンサー部に飛散した水分(以下、飛散水と呼称)から路面塩分濃度を測定する。後左輪では、車内からの供給される塩溶液(以下、供給水と呼称)によってセンサー部を常に濡らしておき、飛散水が生じた場合に、供給水と飛散水の混合塩分濃度を測定する。この2つの塩分濃度と供給水の流量とその濃度から飛散水量は求められる。また、走行試験を実施し、飛散水量と路面水膜厚の関係式を事前で作成した。以上より、本装置は路面水膜厚を連続して検出することができる。

図5は混合塩分濃度センサーの設置状況である。混合塩分濃度センサーは、塩分濃度センサーに供給水の導水スリット、供給水と飛散水の混合エリアおよび保護カバーが付加される。供給水は車内タンクからポンプによって導水スリットを通して混合エリアに送られる。そこで飛散水と混合させ、その混合液体の塩分濃度を下部に設置した塩分濃度センサーで測定する。保護カバーはタイヤから跳ねた水分が塩分濃度センサーに直接接触しないように設けられる。塩分濃度センサーにはワイパーが取り付けられ

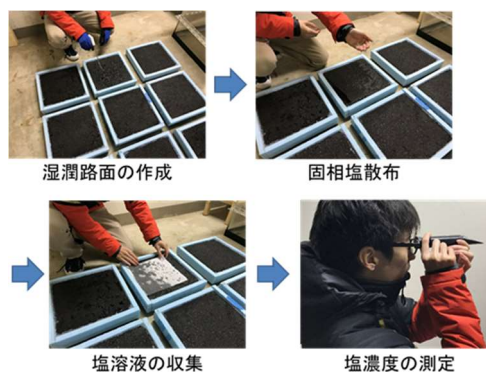


図1 固相塩の溶解速度に関する室内実験



図2 塩溶液の凍結過程におけるすべり特性に関する室内実験



図3 車両飛散に関する走行試験の概要図

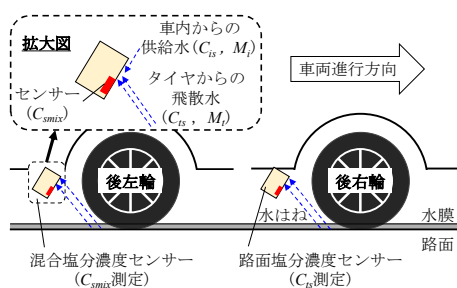


図4 タイヤ水はね式路面水膜厚装置の概要

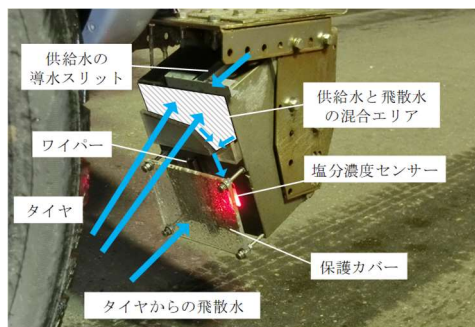


図5 混合塩分濃度センサーの設置状況

ており、センサー部が水分を感知すると塩分濃度を計測した後にワイパーが回転し、その水分が拭き取られる。これにより、前の測定の影響を軽減させて、走行しながら連続的に供給水と飛散水の混合塩分濃度を測定できる。

本装置による路面水膜厚の測定精度を検証するために野外試験を実施した。試験手順として、散水車を用いて試験道路の200m区間に散水し、吸水法によって路面水膜厚を測定する。その路面上で本装置を搭載した試験車両を走行させ、路面水膜厚を測定し、吸水式による値と比較することで、本装置の測定精度を検証した。

(5) 凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアの構築とその検証

図6は凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアの概念図を示す。ここでは凍結防止剤を「塩」と呼ぶ。入力条件は、降水量、降雪量、固相塩散布量、交通量および路面温度 T_s である。加えて、初期の路面状態として、路面上の水質量、氷質量および塩質量が必要になる。なお、本論文では T_s は気温と同値とする。

凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアは、これらの入力および初期条件を基に、路面における水・氷・塩の質量収支を計算し、最終的に気象の変化、塩散布および通過交通を伴う条件下における路面すべり摩擦係数 μ の時間変化を出力する。

凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアを検証するための走行実験は、平成31年1月16日～17日の夕方から夜間に亘って、苫小牧寒地試験道路において実施された。

実験は以下の(i)～(v)の手順で行われた。(i)走行区間300mのうち散水区間50mを3区間(a～c)設ける。(ii)各区間へ固相塩を散布する。(iii)3.(3)と同様に路面水膜厚 H_w を測定、屈折計により塩分濃度 C_s を測定する。(iv)連続路面すべり抵抗値測定装置(Continuous Friction Tester: CFT)1)を装着した車両を用いて路面すべり抵抗値(HFN)を測定する。(v)(iii)、(iv)を1時間間隔で繰り返す。

実験条件について述べる。区間a～cの距離は各50m、 H_w は1mmを目安に散水した。凍結防止剤は塩化ナトリウムを使用し、散布量は1日目が区間aおよびcにおいて17.1および51.4 g/m^2 とした。2日目が区間a～cにおいてそれぞれ28.6、57.1および85.7 g/m^2 とした。なお、1日目の区間bは路面状態が芳しくなかったため評価しない。CFT搭載車両の v は30 km/h である。また、過去の研究より μ とHFNの関係は以下のように定式化されている。

$$\mu = 0.94 \times 10^{-2} HFN - 0.16 \quad (1)$$

本実験はHFNから換算した μ (μ_m)とWiRISによって推定した μ (μ_c)のMAEを求め、凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアの妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 湿潤路面における固形塩の溶解速度の解明

図7は固相塩の溶解速度に関する実験結果であり、塩分濃度の実験値 C_{sm} と計算値 C_{sc} を比較したものである。 C_{sm} は散布直後から急激に上昇し、 $t=30min$ ほど経過すると概ね一定になった。溶解速度定数 $K=16.5m/s$ において C_{sc} は C_{sm} と良好に一致した。

(2) 塩溶液の凍結過程における μ 特性の解明

図8に μ (BPNより換算)と路面水膜厚 H_i の関係を示す。 μ は H_i の増大につれて指数関数的に低下した。なお、 $H_i=0$ の μ は、路面温度 $=1^\circ C$ および路面水膜厚 $=1.0mm$ の条件で測定したものである。この μ と H_i の関係は、次式で近似できる。

$$\mu = 0.61 \exp(-2.16 H_i) + 0.16 \quad (2)$$

なお、 μ の実測値と計算値との間の相関係数は0.97であり、両者の間には高い相関性が認めら

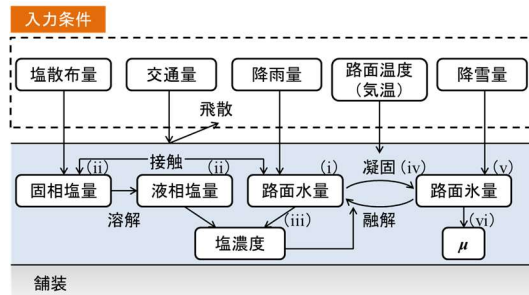


図6 凍結防止剤事前散布評価ソフトウェア

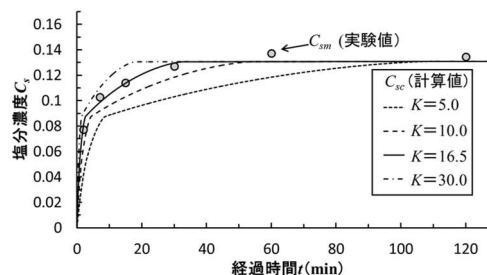


図7 固相塩の溶解速度実験の結果

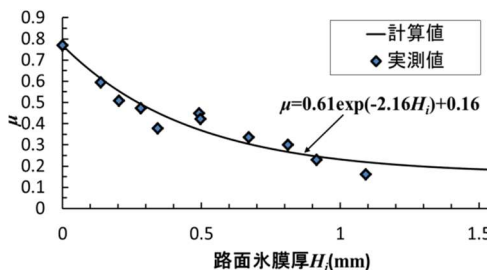


図8 μ と路面氷膜厚の関係

れる。

(3) 車両通過による飛散水量の定量的評価

図9は車両飛散に関する走行試験結果の一例として、走行速度 $V=60\text{km/h}$ における1台通過当たりの飛散水フラックス $m_{w,v}$ と路面水膜厚 H_w の関係を示す。同図に示すように $m_{w,v}$ は H_w が增大するにつれて指数関数的に増大した。その関係は式(2)で近似できる。

$$m_{w,v} = aH_w \exp(H_w) \quad (3)$$

ここで a は係数であり、本試験の結果から a と V の関係は式(3)のように与えられた。

$$a = -0.05 \exp(-0.07V) + 0.05 \quad (4)$$

以上より、飛散水フラックスを走行速度と路面水膜厚を用いて定量的に評価できた。

(4) 新たな車載式路面水膜厚計測装置の開発とその検証

図10は路面水膜厚の測定精度を検証するために野外試験の結果であり、タイヤ水はね式路面水膜厚装置から得られた路面水膜厚 H_{w-tire} の平均値 ($\overline{H_{w-tire}}$) と吸水式によって測定した路面水膜厚の平均値 $\overline{H_w}$ を比較したグラフである。 $\overline{H_{w-tire}}$ は $\overline{H_w}$ と概ね一致した。この $\overline{H_{w-tire}}$ の測定精度を平均絶対誤差を用いて定量的に評価すると、 $\overline{H_w}$ に対する $\overline{H_{w-tire}}$ の偏差は $-0.12 \sim 0.13\text{mm}$ の間にあり、その平均絶対誤差は 0.08mm であった。

(5) 凍結防止剤事前散布評価ソフトウェアの構築とその検証

図11は μ_m と μ_c の比較を示す。 μ_m と μ_c の MAE は $0.02 \sim 0.13$ の間にあり、その平均値は 0.06 であった。

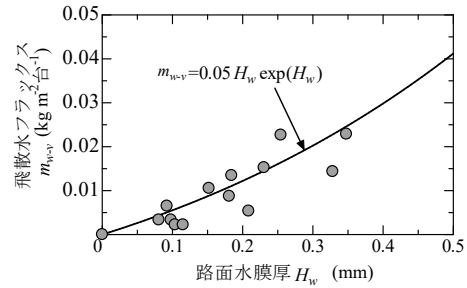


図9 飛散水フラックスと路面水膜厚の関係(走行速度=60 km/h)

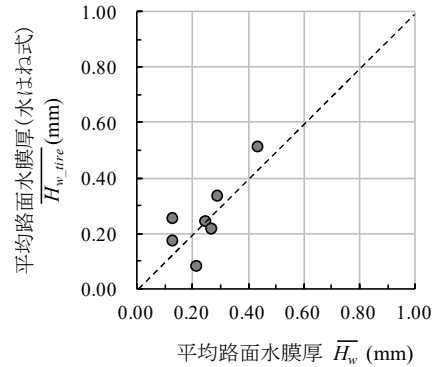


図10 タイヤ水はね式路面水膜厚装置の測定精度

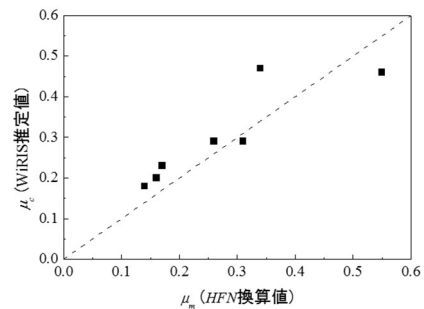


図11 μ の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 藤本明宏、山田忠幸、大皿和正、奥野遼太郎、寺崎寛章	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 車載式塩分濃度センサーを用いた路面水膜厚測定装置の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集E1（舗装工学）	6. 最初と最後の頁 1_1-1_8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮本真吾、大皿和正、藤本明宏
2. 発表標題 凍結防止剤散布後の路面すべり摩擦係数推定に関する研究
3. 学会等名 平成30年度全国大会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤本明宏、山田忠幸、山田健雄、山田耕嗣
2. 発表標題 タイヤによる跳ね上げ水を利用した新しい高精度路面水膜厚測定装置の開発と検証
3. 学会等名 ふゆトピア研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 路面状態予測プログラム及び情報処理装置	発明者 藤本明宏	権利者 福井大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-221099	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 路面水膜厚の測定方法及び測定装置	発明者 藤本明宏、山田忠幸	権利者 福井大学、山田 技研株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-221962	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------