

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：82114

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350492

研究課題名(和文) 路面すべり摩擦予測による防滑材湿式散布の適正化手法の構築

研究課題名(英文) Development of optimum method for hot water sanding based on road friction estimation

研究代表者

藤本 明宏 (FUJIMOTO, AKIHIRO)

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所(寒地土木研究所)・研究員(移行)

研究者番号：90456434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：積雪寒冷地において、防滑材は冬期道路の路面すべり抵抗値HFNの改善を目的に散布されるが、風や車両通過に伴う飛散によって短時間で路面上から消失する場合がある。本研究では、水分の凝固を利用して防滑材の路面定着性を高める加熱水と防滑材の混合散布(防滑材加熱水混合散布HWS)に着目する。本研究目的は、HFNを用いてHWSを最適化することにある。そのために、(i)加熱水の温度と混合割合が防滑材の路面定着性に及ぼす影響の評価、(ii)通過車両による防滑材の飛散特性の解明、(iii)路面上の防滑材質量とHFNの関係の解明、(iv)HFN推定モデルの構築および検証、を行った。

研究成果の概要(英文)：In snowy cold regions, abrasives are applied with the aim of improving a tire-road friction resistance (HFN), but they can be lost from road surface in a few hours as they are scattered by wind and passing vehicles. This study is focused on a method of spreading a mixture of heated water and sand called Hot Water Sanding (HWS) to enhance the abrasive fixation on road by making the most of the water freezing. The objectives of this study is to optimize HWS by using HFN. To achieve these objectives, the four studies are conducted as follows: (i) Quantitative evaluation of the effects of the temperature of heated water and its mixing rate on the abrasive fixation on road. (ii) Clarification of behavioral characteristics of abrasives scattered by passing vehicles. (iii) Clarification of the relationship between the mass of abrasives remaining on road surface and HFN. (iv) Formulation and verification of an HFN estimate model (HWS-HFN model) in consideration of aspects in (ii) and (iii).

研究分野：雪氷学、舗装工学

キーワード：冬期道路管理 路面すべり止め材 防滑材 凍結路面 路面すべり摩擦係数

1. 研究開始当初の背景

積雪寒冷地において、凍結や圧雪などの滑りやすい路面はスリップ事故の危険性を高める。滑りやすい路面の回避策として、凍結防止剤（塩化ナトリウムや塩化カルシウムなど）や防滑材（砂や碎石）の散布は広く実施されている。厳しい財政の中では、こうした冬期道路管理に伴う経済的負担の軽減は道路管理者にとって重要な課題となる。

凍結防止剤は、路面温度が低くなるほど融氷や凍結防止の効力が低下する。そのため、北海道では気温 -8 を目安に、凍結防止剤の代わりに防滑材が散布されている。防滑材は、路面すべり摩擦係数 μ を改善させる目的で散布されるが、風や車両通過に伴う飛散によって数時間で路面上から消失する場合がある。この課題を克服するために防滑材と路面との間の定着性（以下、防滑材 - 路面定着性）の向上に関する研究は様々な機関で行われてきた。

本研究では、ノルウェーで提案された加熱水と砂を混合する散布（以下、防滑材加熱水混合散布、Hot Water Sanding: HWS）に着目する。HWS は路面での加熱水の凝固を利用して防滑材 - 路面定着性を高める散布方法である。冬期道路管理における HWS の実用化には、次の2点が重要となる。

- (1) 防滑材の路面定着性あるいは μ の改善効果を基にした適切な加熱水条件（温度、量）の決定
- (2) HWS の効果の減衰や持続期間を考慮した適切な防滑材の散布量とHWSのタイミングの決定

しかしながら、これらの2点にはともに課題がある。(1)については、加熱水の温度および防滑材との混合割合の組み合わせが無限にある中、一部の温度でしか適切な混合割合を評価できていない。(2)に関しては、通過車両に伴う防滑材の飛散特性および防滑材が μ に及ぼす影響に関する知見が乏しく、HWS 効果の減衰や持続期間の評価方法を確立できていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の課題(1)および(2)を解決し、 μ （本研究では μ と関連のある路面すべり抵抗値 HFN）を用いて HWS の最適化を図ることにある。そのために、以下の(i)～(iv)を具体的な研究目的に定めた。

- (i) 加熱水の条件が防滑材の路面定着性に及ぼす影響の定量的評価
- (ii) 通過車両による防滑材の飛散特性の解明
- (iii) 路面に残留する防滑材の質量（以下、防滑材残留量）と HFN の関係の解明
- (iv) (ii)および(iii)を加味した HFN 推定モデル（HWS-HFN モデル）の構築および検証

3. 研究の方法

本研究では室内試験と野外試験を実施し、室内試験から(i)に、野外試験から(ii)および(iii)に、それぞれ取り組んだ。また、野外試験結果との比較より HWS-HFN モデルの妥当性を検証した。

(1) 室内試験

本室内試験の目的は、加熱水の条件が防滑材の路面定着性に及ぼす影響の定量的評価にあり、加熱水の条件として温度、防滑材との混合割合および塩濃度を対象とした。塩濃度に着目した理由について記載する。防滑材散布車に加熱水を搭載する場合、特に加熱水温度が低温であれば水分の凍結・膨張によるタンクや配管の破損に注意を払わなければならない。加熱水に塩分を負荷することで凝固点降下の作用によりこうした破損の可能性を軽減できる。一方で、塩濃度が高くなるほど、その凝固点降下は防滑材 - 路面定着性を低下させる。本研究では、塩分を含む加熱水の防滑材 - 路面定着性を明らかにするため、塩濃度を実験条件に加えた。

室内試験は低温恒温室内でタイヤ走行模擬試験機を用いて行われた（写真1）。タイヤ走行模擬試験機は2個の試験タイヤとドーナツ状の舗装供試体で構成され、試験器を稼働させると舗装供試体が回転することで、タイヤが路面上を転がる。

試験の手順を述べる。(i)舗装供試体上に噴霧器で水分を与えて氷膜を作製する。(ii)舗装供試体表面に事前に描いていた格子の交点に防滑材を2個ずつ配置する。(iii)分注器を用いて規定の温度・混合割合・濃度で加熱水を防滑材に供給する（写真1の右上拡大図）。(iv)加熱水が凍結後、タイヤ走行模擬試験機を稼働させ、氷膜上にタイヤを通過させる。(v)5、25、100、500 および 2500 回のタイヤ通過後に防滑材の個数をカウントし、防滑材残留量 M_s (g/m^2) を求める。

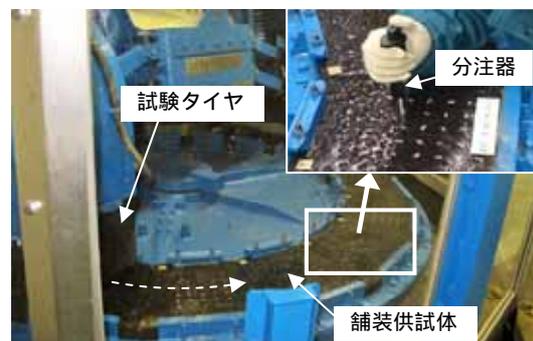


写真1 室内試験の概要

試験条件について述べる。室内温度は -8 とした。舗装に供給した水分量は 1.0 kg/m^2 であり、水膜厚に換算すると約 1 mm である。防滑材には 7 号碎石を使用し、散布量 M_{si} (g/m^2) は 140 g/m^2 とした。加熱水の温度 T_w

()は0、5、10、20、40 および 60 の6ケース、混合割合 r_s は0(乾式) 0.12、0.18、0.25、0.31 および 0.47 の6ケース、塩濃度 C は0、2、4、6、8 および 20%の6ケース、輪荷重 F は2000 および 4000 Nの2ケースとした。試験では、 T_w のみが異なる条件の試験(試験A)、 r_s のみが異なる条件の試験(試験B)、 F のみが異なる条件の試験(試験C)、および C のみが異なる条件の試験(試験D)を実施した。舗装供試体は密粒度アスファルト混合物(13F)である。走行条件として、タイヤは165/80R13、その空気圧は170 kPa、通過速度は30 km/hとした。

(2) 野外試験

野外試験は、2015年1月27日の夜間に苫小牧寒地試験道路で行われた。試験道路は、全長2700mの周回コースであり、直線で縦断勾配のない密粒度アスファルト舗装である。

野外試験の条件を以下に記載する。散布方式はHWSであり、防滑材の散布量(加熱水を含む)は100、150、200 および 250 g/m²の4ケースとした。以下はこれらの条件をHWS100、HWS150、HWS200 および HWS250と呼ぶ。防滑材は7号砕石である。 T_w は40に設定し、 r_s は0.30とした。また、比較のために $M_{si} = 150$ g/m²の乾式散布(以下ではDRY150と呼称)も実施した。走行条件として、車種は小型・普通乗用車であり、タイヤはスタッドレスタイヤである。通過速度は40 km/hである。

野外試験の手順は次のとおりである。(i)散水車を用いて散水し、試験区間に氷膜を形成させる。(ii)散布車を用いて乾式散布およびHWSを行う。(iii)模擬車両を走行させる。(iv)規定の通過台数 $N_t = 0、50、100、150$ および 200台後にHFNと M_s を測定する。試験では、17:50から散水を開始し、19:00に路面凍結を確認した。凍結路面のHFN測定を行った後、HWSを行い、20:00に全ての散布を完了した。HFNおよび M_s を測定し、模擬車両の走行を20:30から開始した。試験終了時刻は22:30である。

写真2は散水直後の試験道路である。各散布区間の延長は50mとし、散布区間同士の干渉を防ぐため、同写真に示すように各区間の間に50mの無散水・無散布区間を設けた。

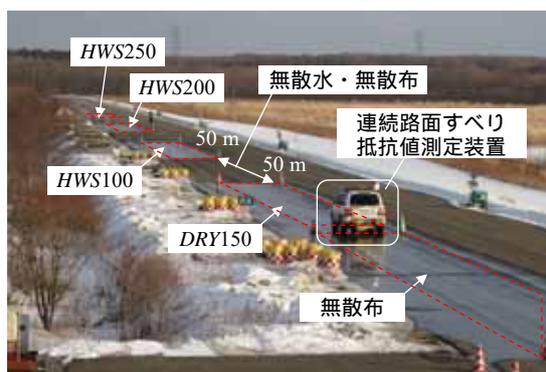


写真2 野外試験の概要

HFNおよび M_s の測定方法について記載する。HFNは、写真2に示す連続路面すべり抵抗値測定装置(Continuous Friction Tester: CFT)12)で測定した。CFTは車体後部に装着することで、走行しながらHFNを計測できる。その値はタイヤ空転時(抵抗最小)を0、良好な露出路面走行時を通常80から100(路面温度に依存)となるように較正されており、凍結路面のように滑りやすい時に小さくなり、湿潤や乾燥路面のように滑り難い時に大きくなる。 M_s に関して、規定サイズの枠を車両右輪のわだち部に当たる路面上に置き、枠内の路面状態を写真で記録し、試験後に枠内の防滑材の個数を数えた。 M_s は、この個数と質量の関係から算出した。

写真3はHWSの状況であり、熱画像も示す。散布車は国土交通省北海道開発局で多く使用されている機種を用いた。散布車には水を加熱する機構と加熱水を保温・貯留するタンクが搭載されている。散水時には加熱水と防滑材が別系統で同時に散布円盤に送られ、散布円盤が回転することで防滑材と加熱水は車線の範囲内に散布される。

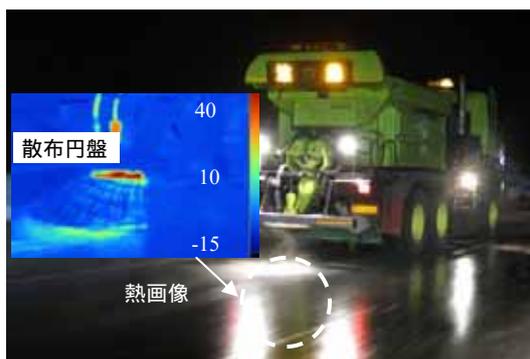


写真3 HWSの稼働状況

4. 研究成果

(1) 室内試験

加熱水条件が防滑材残留量に及ぼす影響

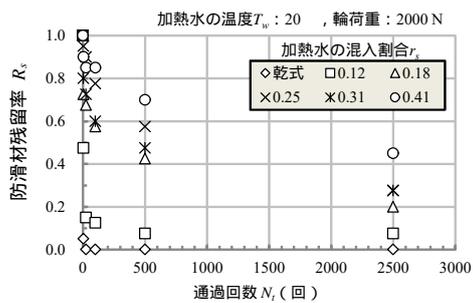
図1は室内試験の結果であり、タイヤの通過回数 N_t (回)と防滑材残留率 R_s (防滑材の散布量に対する防滑材残留量の比、 M_s/M_{si})の関係を示す。

同図(a)の試験Aでは、 R_s は T_w が高いほど大きく、いずれも N_t の増大とともに低下した。 N_t 100回に注目すると、 $T_w = 0$ および 5の R_s は10以上のそれに比べて明らかに小さい。

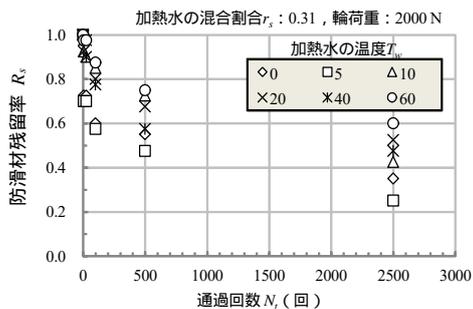
同図(b)に示す試験Bでは、乾式や $r_s = 12\%$ では、 $N_t = 5$ 台後の R_s は0.2以下であり、タイヤ通過に伴う R_s の低下が著しい。 $r_s = 18\%$ では、 R_s は N_t の増大につれて指数関数的に減少し、 r_s が高いほど R_s の低下率は小さい。

同図(c)の試験Cを観ると、 $r_s = 18\%$ において、4000 Nの R_s は2000 Nと比較して減少が顕著である。

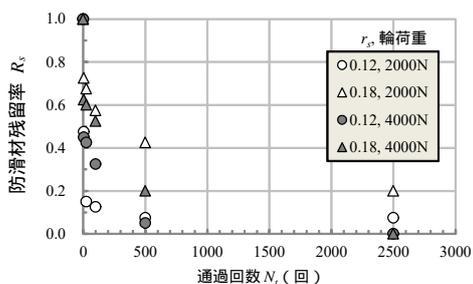
同図(d)の試験Dでは、少しでも(濃度2%)



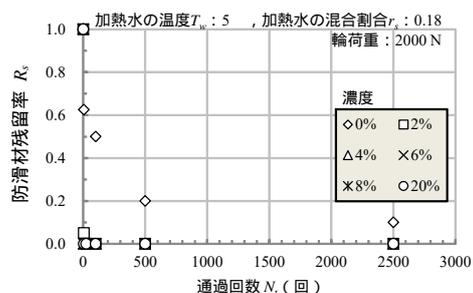
(a) 試験 A



(b) 試験 B



(c) 試験 C



(d) 試験 D

図 1 室内試験の結果

の) 塩分を加熱水に付加すると、防滑材 - 路面定着性は著しく低下することが分かった。

(2) 野外試験

気象

当日の天候は晴れであった。気温は試験開始時 (19:00) の -1.6 から終了時 (22:30) の -5.2 に低下した。風速は数 m/s を推移し、時間とともに弱まる傾向にあった。長波放射熱フラックスは 230 ~ 290 W/m² の範囲を変動した。RH_a は 65% 前後を推移した。

通過車両が防滑材残留量に及ぼす影響

写真 4 は DRY 150、HWS 150 および HWS 250 における散布直後と $N_v = 200$ 台後の路面状態を示す。まず、DRY 150 に着目すると、 $N_v = 200$ 台後には路面上に防滑材を殆ど確認できない。一方、HWS では $N_v = 200$ 台後でも、路面上に防滑材が残留していることが分かる。なお、散水直後の水膜厚は 0.8 mm であり、形成された路面上の水膜の厚さは 0.5 mm 前後であった。

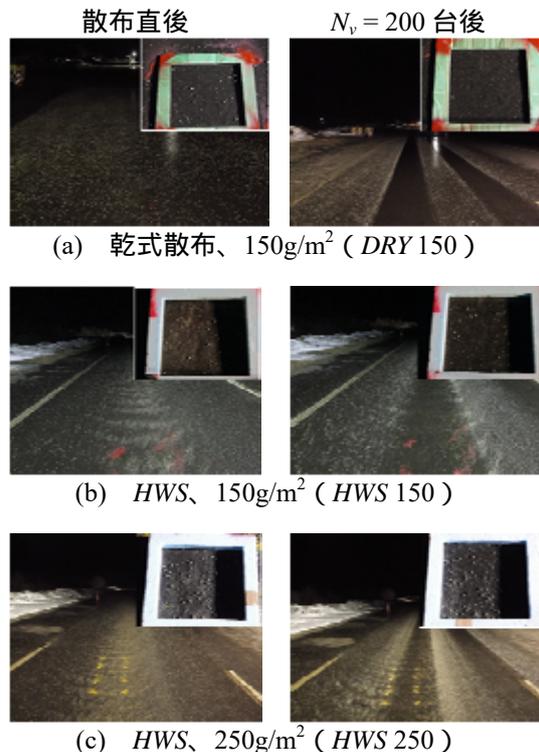


写真 4 散布直後と 200 台車両通過後の路面状態

図 2 は R_s と N_v の関係である。DRY 150 に注目すると、50 台通過後の R_s は 0.07 となり、50 台通過後には散布量の大半が路面から失われた。他方、HWS の R_s は、HWS 250 を除いて類似の分布形を呈し、 N_v の増大につれて指数関数的に減少した。 R_s は、 $N_v = 200$ 台でも 0.3 以上であり、HWS の防滑材の路面定着性が高いことが確認できる。HWS 250 はその他の HWS の結果と比べて R_s が高い。この原因は、写真-5(c)の右写真から分かるように、加熱水 250 の M_s の計測箇所が模擬車両のわだち部の中央からずれていたことにある。本論文では、HWS 250 を除き、 R_s と N_v の関係を次式で近似した。

$$R_s = 0.63 \exp(-1.2 \times 10^{-2} N_v) + 0.37 \quad (1)$$

路面すべり抵抗値と防滑材残留量の関係

図 3 は M_s と HFN の関係である。 $M_s = 0$ の HFN は約 40 であり、 μ に換算すると 0.2 程度である。HFN は M_s が増えるにつれてべき関数的に増大した。 M_s と HFN の関係は式(2)で表される。

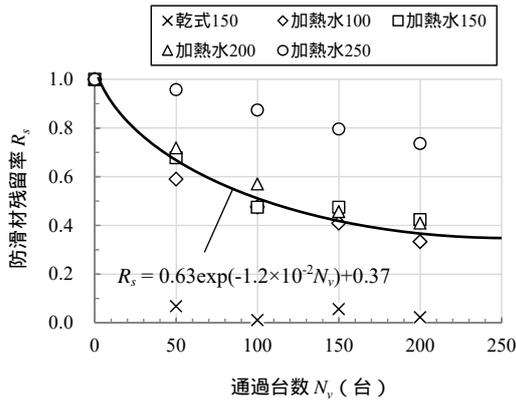


図2 防滑材残留率と通過台数の関係

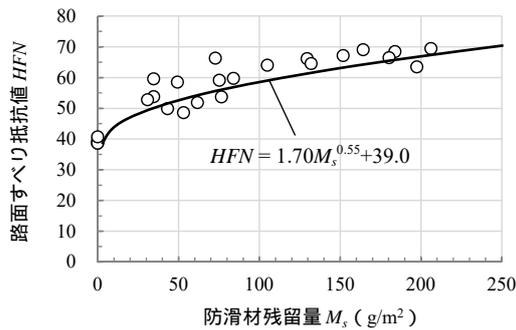


図3 路面すべり抵抗値と防滑材残留量の関係

$$HFN = 1.70M_s^{0.55} + 39.0 \quad (2)$$

(3) HWS-HFN モデル モデルの概要

HWS-HFN モデルは、凍結防止剤と車両を考慮した熱・水分・塩収支による路面凍結モデル (A. Fujimoto et al.: A road surface freezing model using heat, water and salt balance and its validation by field experiments, Cold Regions Science and Technology, 106-107, 1-10, 2014) を改良して構築される。図4は HWS-HFN モデルの概念図である。本モデルでは、気象、道路構造、車両、凍結防止剤および防滑材を入力条件として、路面雪氷層、舗装および防滑材の熱・物質移動解析が行われ、路面温度、路面雪氷層の水・氷質量および空气体積が出力され、路面雪氷状態の時間変化が得られる。また、式(1)を用いて M_s の時間変化が、式(2)を用いて HFN の時間変化が求められる。

本論文では、新たに追加した防滑材の物質収支のみ以下に記載する。その他の理論やモデルの詳細については上記の参考文献を参照されたい。

M_s の時間変化率は、式(3)で与えられる。

$$\frac{\partial M_s}{\partial t} = v(t) \cdot (R_s^{N_v-1} - R_s^{N_v}) \cdot M_{si} \quad (3)$$

ここに、 t は時間 (s)、 $v(t)$ は車両通過の判別

変数および R_s は N_v 後の R_s である。車両通過が有る場合は $v(t) = 1$ 、車両通過が無い場合は $v(t) = 0$ とする。

本論文では、HWS-HFN モデルに対して以下の仮定と条件を与える。

- (i) 計算の対象はタイヤ通過部とする。
- (ii) 車両は常に道路上の同じ部分を通過し、タイヤもまた同じ箇所を通過する。
- (iii) 車両の通過時間間隔は時間交通量の時間均等配分とする。
- (iv) M_s は通過車両の飛散によってのみ減少する。実際の道路では、降雪によって防滑材が積雪内に埋まり、その効果が失われることがあるが、こうした現象は本論文では対象外とする。

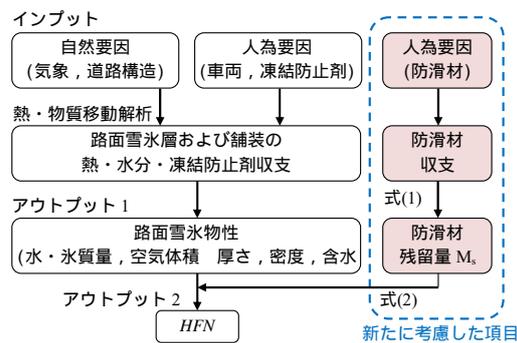


図4 HWS-HFN モデルの概念図

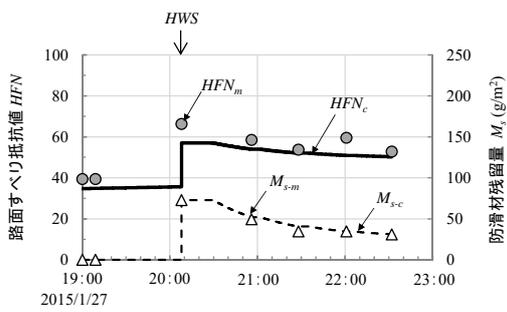
図5(a)~(d)は HWS100、HWS150、HWS200 および HWS250 における HFN および M_s の時間変化である。以下、添え字_m は実測値を、_c は計算値を意味する。

M_{s-m} は 20:00 に実施した HWS によって増大した。散布直後の M_{s-m} は設定した値より全体的に小さかったため、 M_{s-c} の初期条件にはこの散布直後の M_{s-m} を与えた。 M_{s-m} は時間 (通過車両台数の増大) とともに減少し、 M_{s-c} はこの M_{s-m} の変化を良好に再現した。ただし、HWS250 については、上述したように M_s の計測箇所が模擬車両のわだち部の中央からずれていたため、 M_{s-c} が M_{s-m} を下回った。散布前の HFN_m は 38~41 の範囲にあった。HWS によって、 HFN_m は増大し、 M_{s-m} とともに低下した。HWS250 を除き、 HFN_c は HFN_m と概ね一致した。

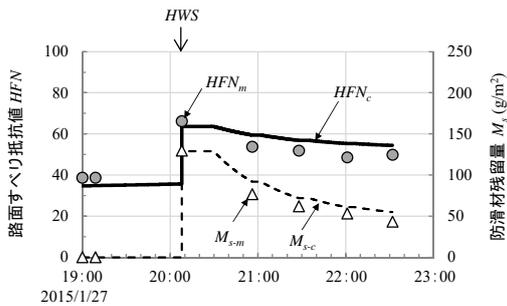
5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

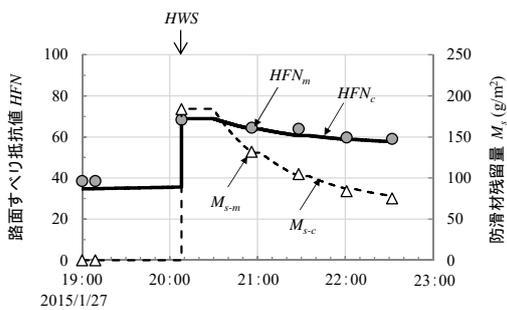
- (1) 防滑材加熱水混合散布における加熱水条件の検討と路面すべり抵抗値推定法の提案、中島知幸・藤本明宏・佐藤賢治・徳永口ベルト・住田則行・高橋尚人・丸山記美雄・石田樹、寒地技術論文・報告集、Vol. 31, pp. 84-88, 2015
- (2) 防滑材加熱水混合散布を考慮した路面すべり抵抗値推定モデルの構築と検証、藤本明宏・佐藤賢治・中島知幸・徳永口ベ



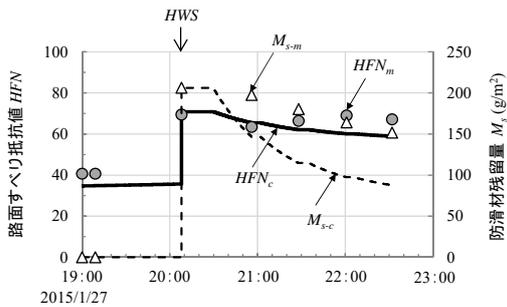
(a) HWS100



(b) HWS100



(c) HWS200



(d) HWS250

図5 実測値と計算値の比較

ルト・住田則行・高橋尚人・石田樹、寒地技術論文・報告集、Vol. 32、pp. 178-180、2016

〔学会発表〕(計1件)

- (1) 加熱水混合散布による防滑材残留量とすべり抵抗値の関係、中島知幸・藤本明宏・佐藤賢治・徳永口ベルト・住田則行・高橋尚人・石田樹、雪氷研究大会(2015・松本)、2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)
取得状況(計0件)
〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本明宏 (FUJIMOTO AKIHIRO)

国立研究開発法人土木研究所・土木研究所
(寒地土木研究所)・研究員(移行)

研究者番号: 90456434

(2) 研究分担者

なし:

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし