

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：82114
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2011～2012
課題番号：23710191
研究課題名（和文） 走行車両および凍結防止剤散布の影響を考慮した路面すべり摩擦予測モデルの開発
研究課題名（英文） Development of road sliding friction prediction model with influence of vehicle and road salt
研究代表者 藤本 明宏（FUJIMOTO AKIHIRO） 独立行政法人土木研究所・その他部局等・研究員 研究者番号：90456434

## 研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、車両と凍結防止剤の影響を考慮した路面すべり摩擦（ $\mu$ ）予測モデルを開発することにある。そのために、野外実験を実施し、通過車両に伴う飛散塩量および車両への付着塩量を定式化し、 $\mu$  と路面氷膜厚の関係を明らかにした。また、野外試験との比較を通して本研究で構築した  $\mu$  予測モデルの妥当性を検証した。

その結果、路面氷膜厚、路面残塩量およびすべり抵抗値について  $\mu$  予測モデルの計算値は実測値を概ね再現した。本研究により凍結防止剤散布後の路面雪氷状態や  $\mu$  の変化を計算することが可能になった。

## 研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to develop a road sliding friction prediction ( $\mu$ ) model considering influence of vehicles and road salt. Some field experiments have been carried out in order to formulate amount of salt scattered by passage vehicles and amount of salt that adheres to the surface of vehicles, and to investigate the relationship between  $\mu$  and thickness of ice film on the road. Moreover, validity of the  $\mu$  model has been verified through a comparison with field experiments.

The results indicated that thickness of ice film, amount of salt and skid resistance on the road were satisfactorily calculated by the  $\mu$  model. Consequently, the  $\mu$  model has made it possible to calculate the time variations of the snow/ice condition and skid resistance on a road after a road salt work.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

## 研究分野：総合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：冬期道路管理、路面すべり摩擦係数、凍結防止剤、熱・水分移動、路面雪氷状態

## 1. 研究開始当初の背景

積雪寒冷地では、道路雪害対策費の縮小や道路維持作業員の高齢化や減少を背景に、より一層の冬期道路管理の効率化が求められている。

路面凍結モデルは冬期道路管理を支援するツールとして国内外の様々な研究機関で

開発されてきた。これらのモデルが抱える主要な課題は2つ挙げられる。

一つは車両や凍結防止剤などの人為要因を十分に考慮できていないことにある。最近になって路面に及ぼす車両の熱的影響は研究が進み、モデルに組み込まれるようになった。一方、凍結防止剤に関しては車両熱に比べて

モデリングが遅れている。

従来モデルのもう一つの課題は、凍結防止剤散布作業を改善するため指標として抽象的な計算出力である。すなわち、路面凍結モデルは路面温度や路面雪氷状態（凍結・圧雪・湿潤・シャーベット等）を出力することができるが、路面温度や路面雪氷状態は冬期路面のスリップに対する危険性を必ずしも的確に表現していない。そのため、どのくらい凍結防止剤散布すればスリップ事故や登坂不能車両の発生を回避できるかについては不明瞭のままである。

今後、合理的・統一的な凍結防止剤散布を推進させるには、凍結防止剤のモデル化に加えて、冬期道路の安全性を最も客観的に表現する路面すべり摩擦係数 $\mu$ の予測モデル（ $\mu$ 予測モデル）の開発が肝要と考える。

申請者は前科研費（路面すべ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、2009～2010）において、車両および凍結防止剤のモデリングを行い、路面凍結モデルに組み込んだ。しかしながら、凍結防止剤のモデリングについては気象や路面上の水分移動が限定された室内実験での検証に留まっており、実用化させるには冬期道路における凍結防止剤（塩）移動の定量化が必要となった。また、 $\mu$ をモデルに組み込むために必要となる $\mu$ と路面雪氷物性の関係に関する知見は乏しく、定式化するには新たな実験が必要となった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、道路上の塩移動の定量化と、 $\mu$ 予測モデルの構築および妥当性検証に大別される。前者では「道路勾配に伴う道路系外への排出塩量」、「通過車両に伴う飛散塩量」、「車両への付着塩量」の定量化を行う。後者では、本研究で明らかにする塩移動と凍結防止剤散布路面における $\mu$ と路面氷膜厚の関係をモデルに組み込むとともに、野外実験を通じてモデルの妥当性を検証する。

## 3. 研究の方法

以下に、道路塩移動の定量化実験および $\mu$ モデルの妥当性検証に関する散布・走行実験の方法をそれぞれ記載する。道路勾配に伴う道路系外への排出塩量の定量化については、文献調査の結果、既に定式化されていたために、ここでは実験項目から除外した。

### (1) 道路塩移動の定量化実験

#### ① 通過車両に伴う飛散塩量

図1は通過車両に伴う飛散塩量を調べた野外実験の様子である。本実験では散水車を用いて作成した湿潤路面上で車両を通過させ、路面上の水分を飛散させた。飛散塩量は、車両走行部の横に設けた吸水紙から得られる

飛散水量に塩濃度を乗じて求めた。また、路面上の規定面積の水分を吸水紙で採取し、その重量を測定することで路面上の水膜厚を求めた。

実験条件として、車両種別は小型、普通、中型の3種類とし、タイヤはノーマルとスタッドレスの2種類を用いた。試験地は福井県大野市南六呂師の駐車場であり、舗装は密粒度アスファルトである。



図1 車両通過に伴う飛散実験

#### ② 車両への付着塩量

車両への付着塩量を測定するために、2013年1月24日、28日および31日の3日間の夕方から深夜にかけて、苫小牧寒地試験道路で野外実験を実施した。試験道路は、全長2700mの水平な周回道路であり、1900mの密粒度アスファルト舗装区間と600mの粗面系舗装区間で構成される。

次の手順で試験を実施した。(i)路面温度 < 0°Cを確認した後、散水車を用いて凍結防止剤散布区間（400m）の路面に散水する、(ii)気温の低下によって道路表面水を完全に氷化させ、氷膜路面を作成する、(iii)氷膜路面に凍結防止剤を湿式散布する、(iv)車両付着塩測定車2台を含めた計5台の走行車両を周回させる、(v)10周回毎に路面上の水膜厚、氷膜厚、残塩量および車両付着塩量を測定する、(vi)60周回（計測回数：6回）に達するまで(iv)および(v)を繰り返す。

試験条件について記載する。使用した凍結防止剤は塩化ナトリウムと濃度30%の塩化カルシウム水溶液を重量比9:1で混合したものであり、散布量は20 g/m<sup>2</sup>に設定した。車両付着塩測定車は、Toyota Harrierを測定車A、Toyota istを測定車Bとした。表1は各測定車の部位の表面積を示す。なお、予備試験の結果を参考に、ルーフ、サイドガラスには塩の付着がないものとし、測定対象から除外した。試験では測定車Aを先頭に、測定車B、その他3台の車両の順で走行させ、走行速度は40 km/hとした。

表 1 車両付着塩測定車の部位表面積

測定車	A	B
車名	Harrier	ist
フロントガラス	1.02	0.95
ボンネット	1.95	1.65
底面	8.14	6.62
前方両側面	2.74	2.36
後方両側面	2.54	1.88
バック	1.36	1.14
リアガラス	0.59	0.48
合計	18.34	15.08

[単位：m<sup>2</sup>]

車両付着塩量の測定方法を以下に記載する。(i)図2に示すように車両付着塩測定車に車両付着塩の回収テープをフロントガラス、ボンネット、底面、前方側面、後方側面、バックおよびリアガラスにそれぞれ6枚ずつ貼付する、(ii)10周回走行後に各部位に張られたテープをそれぞれ1枚剥がし、テープに付着した水分を完全に乾かす、(iii)規定量の淡水とテープに析出した塩を混ぜ、その混合水の塩濃度を測定し、テープに付着した塩量を算出する、(iv)テープの表面積を測定し、表面積比から測定車全体に付着した塩量(車両付着塩量)を推定する。

## (2) 散布・走行実験

図3は散布・走行実験の概要図である。本試験は、前述の3.(1)②車両への付着塩量の野外実験の一部と併せて、2013年1月21日、28日および31日の3日間の夕方から深夜にかけて苫小牧寒地試験道路で実施された。試験の手順を述べる。(i)前述の3.(1)②(iii)の後で、放射温度計を装着した車両を用いて路面(氷膜表面)温度を測定する、(ii)3箇所の定点観測地点で路面の氷膜と水膜をサンプリングする、(iii)路面表面水の塩濃度を測定する、(iv)試験車両を50台通過させる、(v)(i)~(iv)を試験車両の通過台数が300台(50台×6セット)に達するまで繰り返す。試験中あるいは試験後に、回収した氷膜および水膜サンプルの重



図2 車両付着塩回収テープの貼付状況

量を測定し、氷膜厚および水膜厚を求める。また、水膜厚と塩濃度の測定値から路面残塩量を算出する。試験条件については3.(1)②を参照されたい。

試験では、図3左上の拡大図に示すように気象観測機器を設置し、気温、相対湿度、風速、日射フラックス、天空放射フラックス、舗装温度を1分間隔で自動記録した。

以下に氷膜厚の測定方法を説明する。同図右上に氷膜のサンプリング状況を示すように、氷膜路面上に面積20×20mmの吸水紙を置き、その上に底面をアルミ板(厚さ1mm)、側面を断熱材(厚さ50mm)で成形した箱を載せる。箱の中に約90℃の熱湯を注ぎ、氷膜を融解させる。融氷水は吸水紙に吸収される。路面上の氷膜が完全に融解したことを確認した後、吸水紙を高気密性ビニール袋に保管する。同図から、氷膜サンプリング後の路面は乾燥状態になっており、路面上の氷膜を良好に採取できたことが知れる。また、水膜厚のサンプリングも吸水紙を用いた。

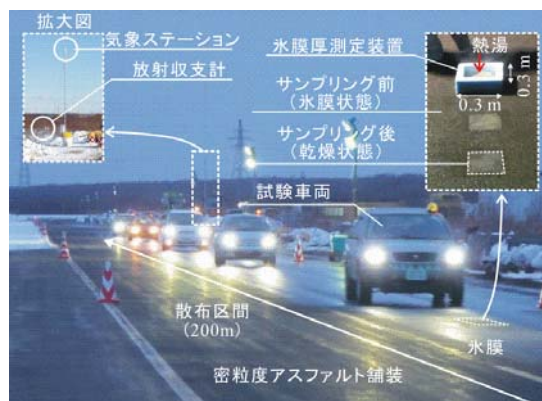


図3 散布・走行試験の概要

## 4. 研究成果

### (1) 道路上の塩移動の定量化

#### ① 道路勾配に伴う道路系外への排出塩量

道路勾配に伴う道路系外への排出水量  $m_{wr}$  (kg/m<sup>2</sup>/s) は、Sass (1992) によって提案された次式で求められる。

$$m_{wr} = k(V_{wc} - V_w)$$

ここに、 $k$ : 流出速度係数 (1/s)、 $V_{wc}$ : 路面限界貯留水膜厚 (m) および  $V_w$ : 路面水膜厚 (m) である。ここでは、Sass (1992) を参考に ( $k = 0.003$  1/s および  $V_{wc} = 0.5$  mm) とした。また、 $V_{wc} > V_w$  の場合は、 $m_{wr} = 0$  とした。

上記の式を路面凍結モデルに組み込むことで、道路勾配に伴う道路系外への排出水量の計算が可能になった。これに塩濃度を乗じれば、道路勾配に伴う道路系外への排出塩量が求められる。

<参考文献>

Sass, B.H., 1992: A numerical model for prediction of road surface temperature and ice. J.

②通過車両に伴う飛散塩量

図4に普通車・スタッドレスタイヤにおける飛散水量  $M_{ws-ns}$  ( $\text{g/m}^2$ ) と路面水膜厚  $h_w$  (mm) の関係を示す。同図に示すように  $M_{ws-ns}$  は  $h_w$  の増大とともに線形的に増加した。この関係は次式で与えられる。

$$M_{ws-ns} = R_s h_w$$

ここに、 $R_s$  は走行速度変化率 (-) であり、概ね車両走行速度  $V_v$  (km/h) の増大とともに大きくなる。両者の関係は図5に示すように次式で与えられる。

$$R_s = 0.13V_v$$

図6は普通車におけるノーマルタイヤの飛散水量  $M_{ws-nm}$  ( $\text{g/m}^2$ ) とスタッドレスタイヤの飛散水量  $M_{ws-ns}$  ( $\text{g/m}^2$ ) を比較したものである。両者の関係は、

$$M_{ws-nm} = 0.98M_{ws-ns}$$

であった。

図7は  $M_{ws-ns}$  と軽自動車および中型車の飛散水量  $M_{ws-s}$  および  $M_{ws-ms}$  ( $\text{g/m}^2$ ) をそれぞれ比較したものであり、以下の関係にあった。

$$M_{ws-s} = 0.59M_{ws-ns}$$

$$M_{ws-ms} = 2.59M_{ws-ns}$$

本試験では、飛散水量と路面水膜厚の関係を明らかにし、飛散水量の車両走行速度依存性を定量的に評価した。また、タイヤ種別(ノーマルタイヤ、スタッドレスタイヤ) および車両種別(軽自動車、普通車、中型車) が飛散水量に及ぼす影響を明らかにすることができた。

以上より、路面凍結モデルにおいて通過車両条件(走行速度、タイヤ種別、車両種別)を入力条件として与えることで飛散水量(飛散塩量)の計算は可能になった。ただし、今回の試験は路面水膜厚 0.5~2.0mm の範囲で実施したため、それ以外の領域の飛散水量については更なる実験が必要となる。

③車両への付着塩量

ここでは、2013年1月28日に実施した車両付着塩量の測定結果について記載する。

1月28日は晴天であり、気温は16:00の約-3°Cから22:00(試験終了)の約-9°Cまで低下した。この気温の低下に伴い16:30頃に路面温度が氷点下になったので散水を行った。路面上の水分は17:15までに完全に凍結し、氷膜路面が形成された。その後、17:30頃に凍結防止剤散布を実施した。

図8は走行距離(時間)に伴う車両付着塩量、路面水膜厚および塩濃度の変化を示す。路面水膜厚は散布直後の約0.10mmから、車両の通過に伴う車両への付着や飛散等により走行距離(時間)とともに低下した。24km

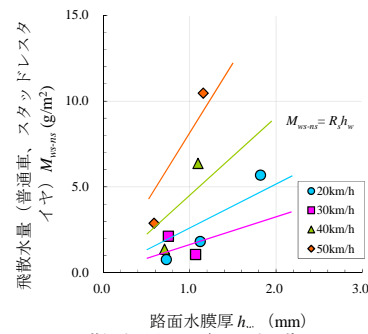


図4 飛散水量と路面水膜厚の関係 (普通車、スタッドレスタイヤ)

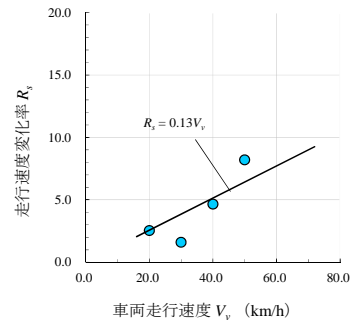


図5 走行速度変化率と車両走行速度の関係 (普通車、スタッドレスタイヤ)

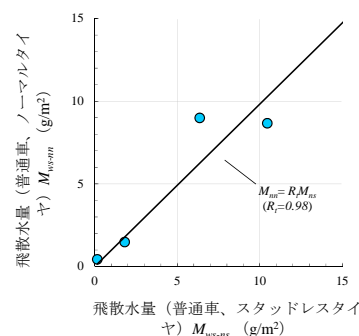


図6 タイヤ種別と飛散水量の関係

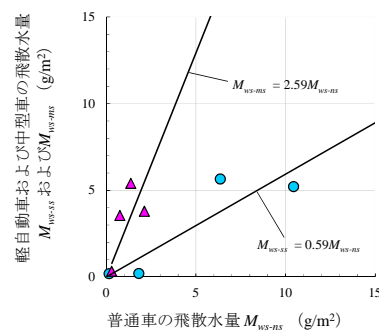


図7 車両種別と飛散水量の関係

走行(60周回)後には0.01 mm以下になった。塩濃度は0.7前後を推移し、大きな変化はなかった。車両付着塩量は、試験日の路面状態や車両付着塩回収テープの貼付位置の違い

によって、多少のばらつきが見られるものの8~14 gの範囲にあった。当初、車両付着塩量は走行距離とともに増加すると予測していたが、今回の試験では走行距離に伴う明確な変化はなかった。この要因の一つは、時間とともに路面水膜厚が低下したためと推察される。実際、目視観測でも試験開始(散布)直後はタイヤスプレー(車両通過に伴う水しぶき)の発生を確認できたが、走行距離8 kmや12 km以上になると路面上に殆ど水分がなくなり、タイヤスプレーの量は著しく減った。以上より、今回の試験では車両付着塩量の大半は走行距離8 km未満で生じたと推察される。

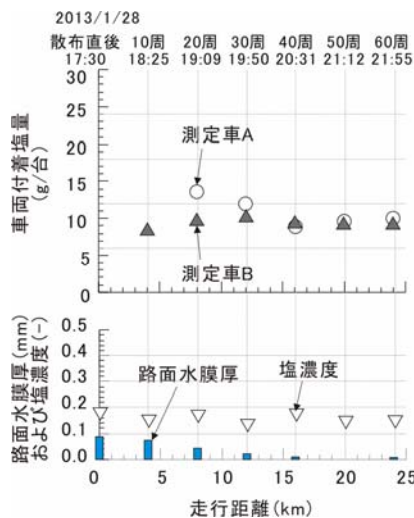


図8 車両付着塩量、路面水膜厚および塩濃度の変化

図9は、車両付着塩量比(=車両部位の車両付着塩量/車両全体の車両付着塩量)を円グラフで表したものであり、測定車Aの結果を示した。同図より、前方両側面の車両付着塩量比が最も大きく、43%を占めた。次いで後方両側面が大きく、底面とバックがその後に続く。リアガラス、ボンネット、フロントガラスの車両付着塩量比は2%以下で小さい。

本試験により、車両への付着塩量を定性的

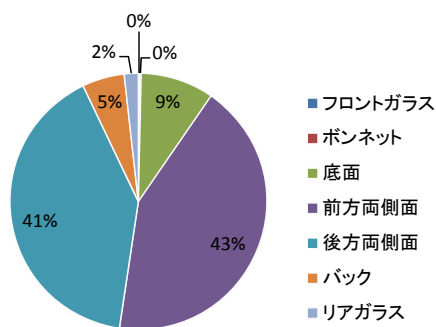


図9 車両付着塩量比

に把握することができた。しかしながら、定量的に評価するためにはデータが不十分であったため、今後も追加試験を実施し、検討を継続する必要がある。

(2) 散布・走行試験結果およびモデルの検証  
ここでは、まず $\mu$ (今回は $\mu$ の代わりにすべり抵抗値  $HFN$  を採用)と氷膜厚の関係を示し、その後、路面温度、塩濃度、路面残塩量、路面氷膜厚および  $HFN$  について、試験結果と計算結果の比較を通じてモデルの妥当性を検証する。なお、 $HFN$ は100で割った値がおおよそ $\mu$ に相当する。

図10は散布・走行試験から得られたすべり抵抗値( $HFN$ )と路面氷膜厚 $h_w$ の関係を示す。 $HFN$ は $h_w$ の増大につれて指数関数的に低下した。両者の近似式は、

$$HFN = 58.8 \exp(-6.9h_w) + 33.2$$

であった。

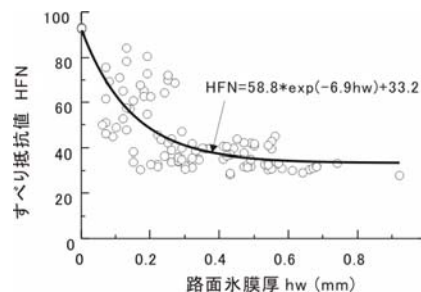


図10 すべり抵抗値( $HFN$ )と路面水膜厚の関係

図11は1月31日の試験結果を用いた $\mu$ 予測モデルの検証結果であり、(a)路面温度、(b)塩濃度および路面残塩量、(c) $HFN$ の実測値と計算値を示す。

まず(a)路面温度に着目する。路面温度の計算値は実測値を良好に再現できた。なお、計算値の塩散布直後の急激な低下は、凍結防止剤と氷との接触によって起こる溶解熱(吸熱)と融解熱によるものである。

次に(b)塩濃度および路面残塩量について述べる。塩濃度の実測値は6.2~8.5%の範囲にあった。路面残塩量の実測値は、塩散布時の20 g/m<sup>2</sup>から指数関数的に低下した試験終了時にはほぼゼロになった。塩濃度および路面残塩量の計算値は概ね実測値と一致した。

最後に、路面氷膜厚と $HFN$ について記載する。路面氷膜厚の実測値は塩散布によって約0.2 mmの低下が発生し、その後緩やかに低下した。 $HFN$ の実測値は散布直後に僅かな増大が確認できるが、試験期間を通して大きな変化はなかった。路面氷膜厚の計算値は散布直後の急激な低下の後、微増した。これは凝結(大気中の水蒸気から路面の水への相変化)によるものである。 $HFN$ の計算値は実測値と一致しているが、路面氷膜厚については

差異がある。これは舗装の物性値、車両走行位置、道路微気象などの相違やばらつきによるものと推察される。

本研究より、氷膜路面への凍結防止剤散布に限定されるものの、通過車両および凍結防止剤散布を考慮して $\mu$ 予測モデルを構築することができた。

本モデルは、凍結防止剤散布後の路面雪氷状態のみならず、塩濃度や路面残塩量を評価することができるため、実用化されれば凍結防止剤散布の適正化への貢献が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- (1) A New Approach to Modeling Vehicle-Induced Heat and Its Thermal Effects on Road Surface Temperature, A. FUJIMOTO・A. SAIDA・T. FUKUHARA, the Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51, 11, 1980-1993, 2012. 査読有り
- (2) 通過車両を考慮した路面入射長波放射熱フラックスの評価法, 藤本明宏・福原輝幸・高橋尚人, 寒地技術論文・報告集, 28, 109-113, 2012. 査読有り
- (3) 固形塩化ナトリウムの溶解を伴う路面霜凍結解析, 藤本明宏・渡邊洋・福原輝幸, 日本雪工学会誌, 27, 275-285, 2011. 査読有り

〔学会発表〕(計3件)

- (1) 交差点におけるつるつる路面発生に関する一考察, 藤本明宏・福原輝幸・高橋尚人, 第56回(平成24年度)北海道開発技術研究発表会, 2013年2月.
- (2) Analysis of freezing of sodium chloride solution on road surface, A. FUJIMOTO・A. SAIDA・T. FUKUHARA, Proceedings of the 7TH International Conference on Snow Engineering 7, Fukui, Japan, 415-426, June, 2012.

〔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)

独立行政法人土木研究所・その他部局等・研究員

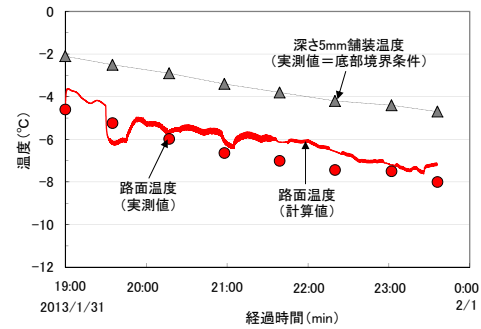
研究者番号: 90456434

(2) 研究分担者

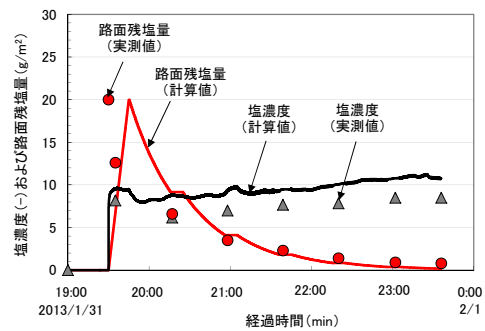
なし

(3) 連携研究者

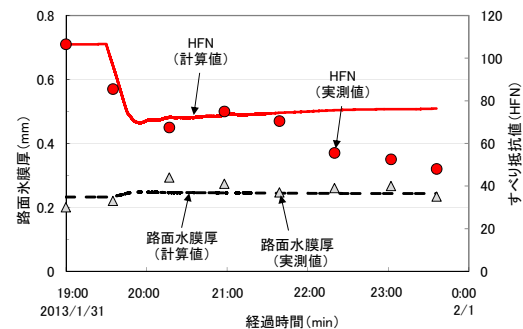
なし



(a) 路面温度



(b) 塩濃度および路面残塩量



(c) 路面水膜厚およびHFN

図11  $\mu$ 予測モデルの検証