

## IV-12 凍結防止剤の開発および効率的利用に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：新材料チーム、舗装チーム

研究担当者：西崎 到、富山禎仁、  
久保和幸、寺田 剛

【要旨】スパイクタイヤの使用禁止以降、凍結防止剤の使用量が増大傾向にあり、過剰散布による雪寒事業費への経済的圧迫及び道路沿道環境への影響が懸念され、環境に優しく持続性のある新たな凍結防止剤の開発及び凍結防止剤の効果的・効率的な散布手法の確立が望まれている。本調査では、従来の塩化物型凍結防止剤の性能はそのままに、道路構造物や周辺環境への負荷が少ない新たな凍結防止剤の開発に取り組みとともに、その効率的な散布方法についての検討、また、凍結防止剤の効果的な散布手法を提案するため、熱エネルギー収支に基づく路面状態予測モデルの確立、路面残留薬剤濃度等の冬期路面状況を線的に計測する技術の検討及び塩分濃度ピーク・減衰予測手法の検討を行った。この結果、塩化カルシウムと同等の凍結防止性能を有し、鋼板に対する腐食性、生物に対する毒性が塩化物よりも低い酢酸ナトリウム（無水塩）を開発及び効果的・効率的な凍結防止剤散布方法の提案を行うことができた。この結果に基づき「非塩化物型凍結防止剤（酢酸ナトリウム）の散布基準（暫定案）」を作成した。

キーワード：凍結防止剤、非塩化物、環境負荷、すべり摩擦、雪氷路面温度、残留薬剤濃度

### 1. はじめに

積雪寒冷地域では快適で安全な道路交通確保のため、除排雪、凍結防止剤散布等の冬期路面対策がとられている。凍結防止剤としては塩化ナトリウム、塩化カルシウム等の塩化物が主に使用されているが、スパイクタイヤの使用規制以降その使用量は増加する傾向にあり、道路構造物や車両への塩害、動植物等周辺環境への影響が懸念されている。

そこで本研究では、①道路構造物や車両への塩害、動植物等周辺環境への影響がない非塩化物型凍結防止剤の開発と性能評価、②凍結防止剤の使用量を減らすため、塩分濃度に着目した効果的・効率的な凍結防止剤散布方法について検討を行った。

### 2. 研究概要

#### 2.1 非塩化物型凍結防止剤の開発と性能評価

従来の塩化物型凍結防止剤の性能はそのままに道路構造物や周辺環境への負荷が少ない新たな凍結防止剤の開発に取り組み、試作した新規薬剤について各種性能を評価した。また、これらと並行して薬剤の実用化に向け現道で散布試験を実施し、すべり摩擦抵抗、雪氷路面温度、路面残留薬剤濃度等のデータを収集することにより、開発した薬剤の効率的な散布方法について検討した。

#### 2.2 効果的・効率的な凍結防止剤散布方法の検討

凍結防止剤は、散布後残留する塩分濃度の量によって、凍結防止の効果が決まる。そこで、路面上の凍結防止剤の残留薬剤濃度等を線的に計測できる計器の検討、シャーベト、圧雪、氷等路面状態がどうなるかによって凍結防止剤の散布量や散布時期を判断するため、路面状態を予測することができる熱エネルギー収支に基づく路面状態予測モデルの確立、及び凍結防止剤の適切な散布量や散布時期を判断するため散布毎の塩分濃度増加量と塩分濃度の減衰量を予測できる式の検討、並びに路面管理上適切な塩分濃度の検討を行い、効果的・効率的凍結防止剤の散布方法の提案を行った。

### 3. 非塩化物型凍結防止剤の開発と性能評価

平成 10～13 年度に実施された「降雪時における路面凍結等の対策に関する試験調査」での検討結果から、非塩化物型凍結防止剤としては酢酸化合物が適しており、中でもナトリウム塩は分子量が比較的小さく性能面でも優れていることが明らかとなった<sup>1)</sup>～<sup>5)</sup>。そこで平成 14 年度から実施された本検討では、酢酸ナトリウム（無水塩）を用いた新たな凍結防止剤(図-1)を試作し、路面のすべり摩擦抵抗による性能評価、鋼構造物や生物への影響評価等を行った。

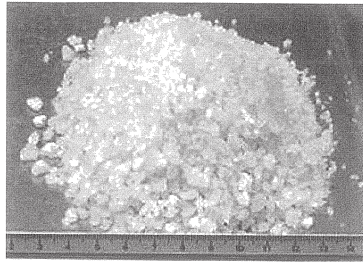


図-1 酢酸ナトリウム（無水塩）を用いて試作した非塩化物型凍結防止剤

### 3.1 すべり摩擦抵抗測定試験

#### 3.1.1 試験装置の概要

すべり摩擦抵抗測定装置（図-2）は、リニアドモーターにより一定速度でスライダを牽引し、その際発生する荷重をロードセルによって検出する単純な構造を有する。スライダ先端の下部には路面すべり測定標準タイヤと同じゴム製の板（縦横 10cm 厚さ 1cm）が取り付けられており、これが机上に固定された試験体上を、試験体と接触しながら滑る。ゴム板と試験体との接触面に加える垂直荷重は、スライダ上部に載せるおもりによって 20~150N の範囲で調整可能である。

試験体としては、アクリル樹脂製容器（30×50cm）の内部に密粒度アスファルトを敷き均したものを使用した。この容器に水を入れ室温を下げることで、模擬的な雪氷路面を再現した。

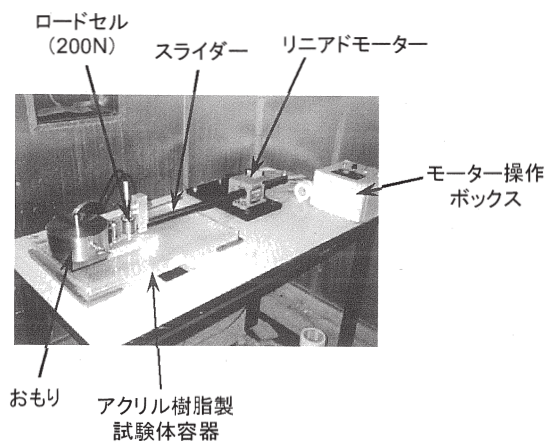


図-2 すべり摩擦抵抗測定装置

#### 3.1.2 試験方法

市販の塩化物型凍結防止剤（塩化ナトリウムおよび塩化カルシウム）と、試作した非塩化物型凍結防止剤（酢酸ナトリウム（無水塩））について、以下の手順ですべり摩擦抵抗の測定を行った。なお、測定

装置におけるスライダの牽引速度は 3cm/sec とし、垂直荷重は 100N とした。

- (1) 低温実験室において、試験体のアクリル容器中に水を入れる。このときの液量は、アスファルト面上にできる水膜の厚さが 2mm となるように調整する。
- (2) 室温を 2°C で一定にしたのち、150g/m<sup>2</sup> を目安に薬剤を散布する。
- (3) 散布から 1.5 時間後に室温を -5°C まで下げ、さらに 4 時間経過した後に -10°C まで下げる。
- (4) すべり摩擦抵抗の測定は、薬剤散布前及び 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 時間後に行う。
- (5) 各測定時に写真撮影、路面温度、室温を記録する。

#### 3.1.3 試験結果

図-3 に各薬剤のすべり摩擦抵抗測定結果を示す。すべり摩擦抵抗の大小は、スライダを牽引するために必要な水平方向の荷重をゴム板と試験体との接触面に加えた垂直荷重で除した値、すなわちすべり摩擦係数によって整理した。なお、比較のために代表的な非塩化物型凍結防止剤である、CMA（酢酸カルシウム・マグネシウム）の結果もグラフに示した。

いずれの走行区間においても、塩化ナトリウムは散布後およそ 5 時間まですべり摩擦係数は低下せず、凍結防止効果の持続性が最も高いことがわかる。酢酸ナトリウムの結果を見ると、走行位置 6~11cm あるいは 11~16cm で、すべり摩擦係数が塩化カルシウムよりもやや低くなる場合が見受けられたが、全

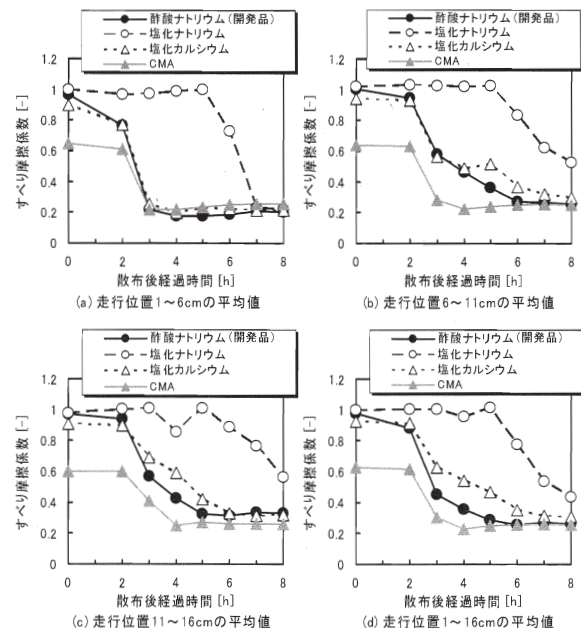


図-3 すべり摩擦抵抗測定試験の結果

体的に見ると塩化カルシウムに近い値で推移していることがわかる。また、酢酸ナトリウムは、全試験時間を通じて CMA よりも高いすべり摩擦係数を維持していることがわかる。

これらの結果から、本研究で開発した薬剤は従来の非塩化物型凍結防止剤よりも凍結防止性能が向上しており、塩化カルシウムに近い性能を有することが明らかとなった。

### 3.2 鋼構造物への影響に関する検討

#### 3.2.1 試験方法

凍結防止剤による鋼板の腐食性を、JIS Z 2371「塩水噴霧試験方法」に準拠した試験方法により評価した。評価対象とした薬剤は、市販の塩化物型凍結防止剤（塩化ナトリウム）および試作した非塩化物型凍結防止剤（酢酸ナトリウム（無水塩））である。複合サイクル試験機（スガ試験機：ISO-3-CY.R 型）を使用して実験を行った。試験片は、6mm 厚の SS400 鋼板を 2mm 厚まで研削後、70mm×150mm の寸法に切り出し作製した。各凍結防止剤 5±0.5% 水溶液を調製し 35℃ の環境下で鋼板に噴霧したときの、鋼板の重量変化、厚さ変化等を調べた。

#### 3.2.1 試験結果

塩水噴霧試験後の鋼板試験片表面には、著しい発錆が認められた。試験片を酸洗して腐食生成物を除去したところ、いずれの試験片も孔食が生じていることが明らかとなった（図-4）。

塩水噴霧試験前後の鋼板の重量を測定し腐食減量を求めた結果を図-5(a)に、酸洗後の腐食面における孔食深さを測定した結果を図-5(b)に示す。これらの図を見ると、いずれも塩化ナトリウムの値は試験時間の増加とともに、加速的に増加する様子が見られる。これは、塩化ナトリウム水溶液によって鋼板表面に形成される腐食生成物の層が、ほとんど防食効果を持たないため、と推察される。一方で、酢酸ナトリウムを噴霧した場合の鋼板の劣化は、塩化ナトリウムに比べ緩やかに進行した。これらの結果から、鋼構造物に対する影響は塩化ナトリウムよりも酢酸ナトリウムの方が軽微であることが明らかとなった。

### 3.3 生物への影響に関する検討

#### 3.3.1 試験方法

市販の塩化物型凍結防止剤（塩化ナトリウム、塩化カルシウム）および試作した非塩化物型凍結防止

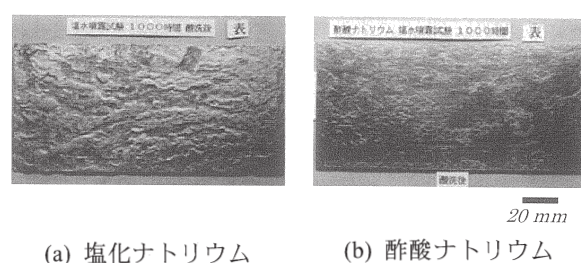


図-4 凍結防止剤水溶液 1000 時間噴霧後の鋼板の腐食外観（酸洗後）

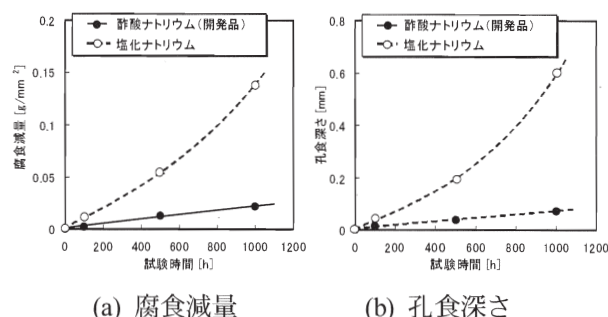


図-5 凍結防止剤水溶液噴霧時における鋼板の腐食減量および孔食深さの経時変化

剤（酢酸ナトリウム（無水塩））について、JIS K 0102.71 に準拠し、ヒメダカに対する急性毒性試験を実施した。1g/L、10g/L、15g/L の濃度になるように、脱塩素水道水中に各薬剤を溶解させ、試験溶液を調製した。対照液には脱塩素水道水を用いた。試験中に溶存酸素が不足しないように、希釈試料中の溶存酸素の量は 4mgO/L 以上（温水魚の場合）を保つようにした。各試験溶液 1L 中にヒメダカ 10 匹を暴露し、24 時間後、48 時間後、72 時間後、96 時間後に死魚数を記録した。

#### 3.3.2 試験結果

各種凍結防止剤の添加量とヒメダカの死亡率の関係を図-6 に示す。いずれの凍結防止剤水溶液においても、時間の経過と共にヒメダカの死亡率が上昇する傾向が見られた。塩化ナトリウムおよび酢酸ナトリウムでは、本試験の凍結防止剤最大添加量である 15g/L において、ヒメダカの死亡は認められなかった。凍結防止剤の種類で比較すると、塩化カルシウム水溶液中における死亡率が最も高く、次いで塩化ナトリウム、酢酸ナトリウムの順となった。この結果から、開発した非塩化物型凍結防止剤は従来の塩化物型凍結防止剤に比べて、生物への影響が小さいことが確認された。

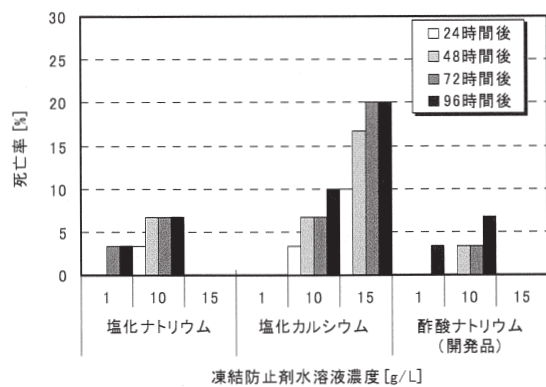


図-6 凍結防止剤の影響によるヒメダカの死亡率

#### 4. 効果的・効率的な凍結防止剤散布方法の検討

##### 4.1 路面上の凍結防止剤の残留薬剤濃度等を線的に計測できる計器の検討

###### 4.1.1 試験方法

凍結防止剤の散布後、残留する塩分濃度の量によって、凍結防止の残効果が決まる。塩分濃度が無くなれば除雪や再度、凍結防止剤を散布する。通常は、塩分濃度の量は分からないため、除雪や散布時期の決定は、道路パトロール車を用いた路面状況の目視、降雪量や気温の面的な予測結果と道路管理者の経験に基づく状況判断によって行われているのが現状である。そこで、路面上の凍結防止剤の残留塩分濃度等を路線の縦断方向に線的に計測できる計器の検討を行った。

試験は、一般国道 18 号線と 122 号線において、事前散布状態の路面（湿潤路面、シャーベット路面、圧雪路面）において、実際の残留塩分濃度を手動式塩分センサと今回開発を行った車載型路面残留塩分濃度計測センサの両方で 1m おきに計測した。図-7 に今回開発を行った車載型路面残留塩分濃度計測センサの写真を示す。路面残留塩分濃度を計測する技術は、写真に示すように、タイヤで跳ね上げた雪氷の水溶液中に含まれる塩分濃度を光の屈折率が変化する原理を利用してセンサーで計測するものである。

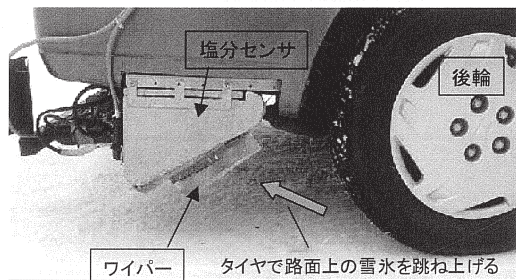


図-7 車載型路面残留塩分濃度計測センサ

###### 4.1.2 試験結果

一般国道 18 号線における手動式塩分センサで計測

した実際の残留塩分濃度と車載型路面残留塩分濃度計測センサで計測した塩分濃度との乖離を比較した結果を図-8 に示す。路面状態はシャーベット路面で 422m の距離で試験した。その結果、乖離値は-1.5%~+1.4%であった。また、122 号線における実際の塩分濃度との乖離を比較した結果を図-9 に示す。路面状態は湿潤路面で 70m の距離で試験した。その結果、乖離値は-0.4%~+0.4%であった。このことより、今回開発した車載型路面残留塩分濃度計測センサは、現場で十分に活用できる計器であることが分かった。なお、湿潤やシャーベットなど限られた路面状態では、車載型センサで計測できることを確認したが、圧雪路面では雪片を跳ね上げず、計測できなかった。

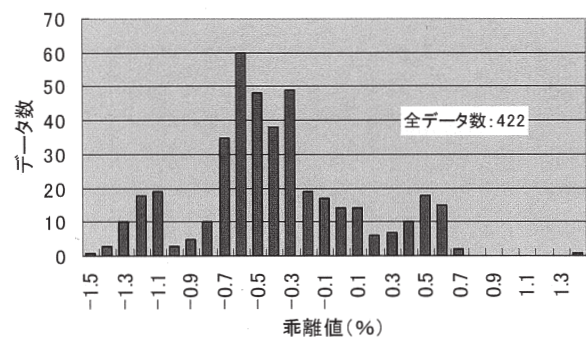


図-8 一般国道 18 号線における塩分濃度比較試験結果

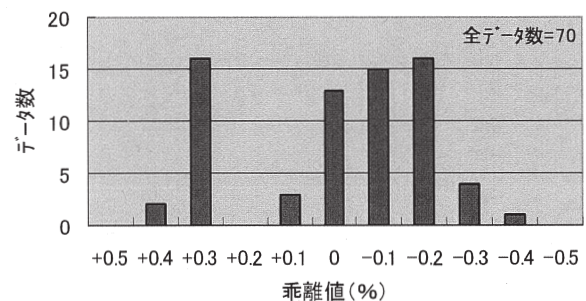


図-9 一般国道 122 号線における塩分濃度比較試験結果

#### 4.2 路面状態予測モデルの確立

##### 4.2.1 雪氷路面における熱エネルギー収支

凍結防止剤散布のタイミング判断に資するため、従来の路面凍結予測に使用されている気象の影響、地盤からの影響に、路面に残留している凍結防止剤及び通過交通車両の影響を加味して、熱エネルギー収支から、路面状態の変化を予測する手法の検討を行い、タイヤ-圧雪層-舗装間の伝熱モデルを作成した。

図-10 に路面状態予測の基本的考え方を示す。

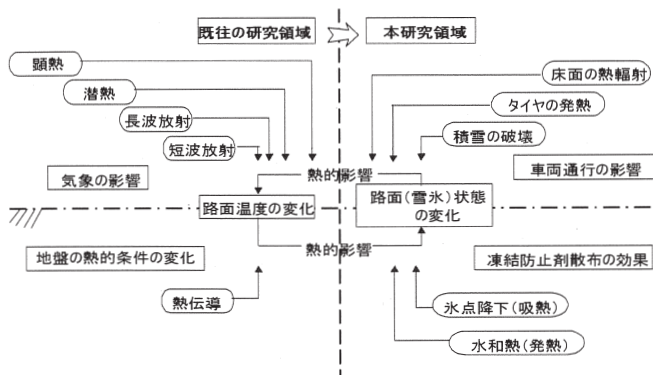


図-10 路面状態予測の基本的考え方

#### 4.2.2 試験方法

雪氷路面における熱エネルギー収支の計算は、図-11 に示す一般国道 18 号新潟県妙高高原町二俣定点観測データを用いて、乾燥路面および湿潤路面の熱収支解析を行った。熱収支の説明変数は、雪氷路面状態の変化に影響を及ぼす図-11 に示す 7 項目の熱エネルギーとした。

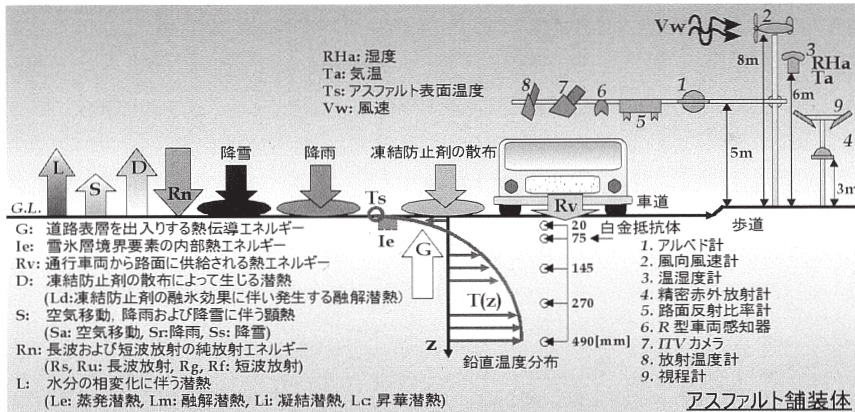


図-11 雪氷路面における熱エネルギー収支の概要

また、車両走行によって生じる車両タイヤの摩擦発熱が雪氷路面に及ぼす影響を明らかにするため、図-12 に示す低温実験室内でホイールトラッキング試験を実施し、タイヤトレッド、舗装体、圧雪に図-13 に示す深さに熱電対を埋め、それぞれの温度を測定し、熱収支を計算し、舗装温度車両タイヤの発熱が圧雪を介して舗装へ向かう伝熱特性を把握した。

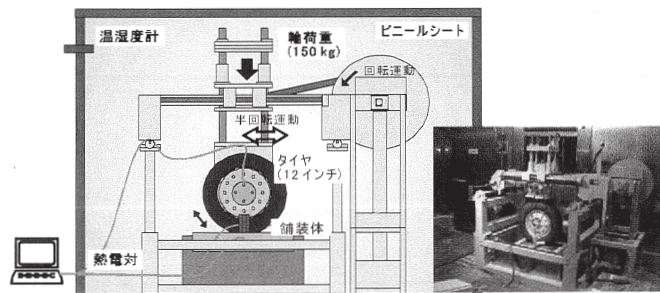


図-12 ホイールトラッキング試験機の概要

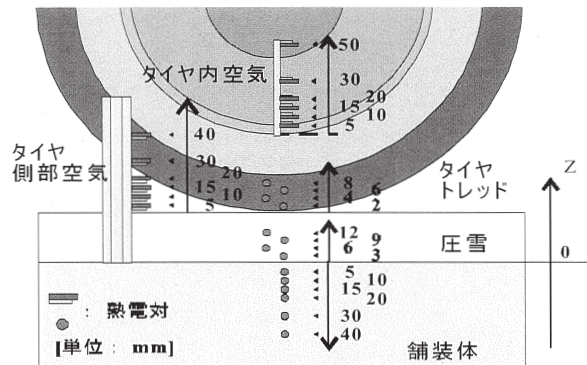


図-13 温度計測と計測位置

#### 4.2.3 試験結果

ホイールトラッキング試験の結果、図-14 に示すようにタイヤ、気温の影響を受けて、雪中、舗装体の温度が変化していることが分かる。これらの結果からタイヤ-圧雪-舗装間の伝熱を確認し、熱収支の考えから雪氷路面における内部熱エネルギーの時間的変化

を求めることができるモデル(式-1)を作成した。

また、図-15 にタイヤ走行回数(1000~9000回)毎に変化する舗装温度の鉛直方向分布の実測値とモデル(式-1)から求めた計算値の結果を示す。この結果、モデル式から求めた舗装温度の計算値結果は、実測値と良好に一致しており、モデルの妥当性が確認できた。

$$\frac{\partial I_e}{\partial t} = G - L - S + Rn + Rv + D + Rt \quad \text{式-1}$$

$\frac{\partial I_e}{\partial t}$  : 雪氷路面における内部熱エネルギーの時間的変化

説明変数: 図-2 参照

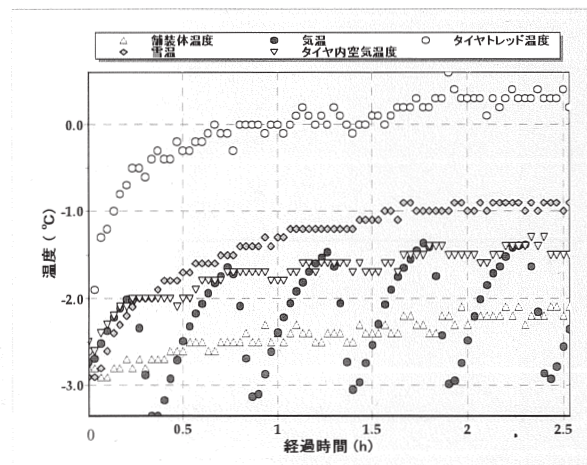


図-14 タイヤ、圧雪、舗装温度経時変化(室温:-6°C)

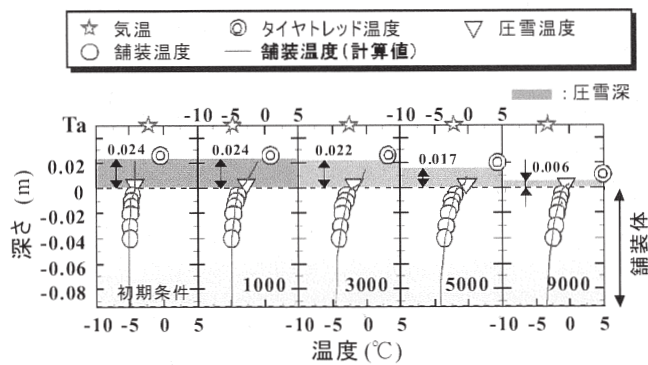


図-15 舗装体温度の鉛直方向分布の経時変化

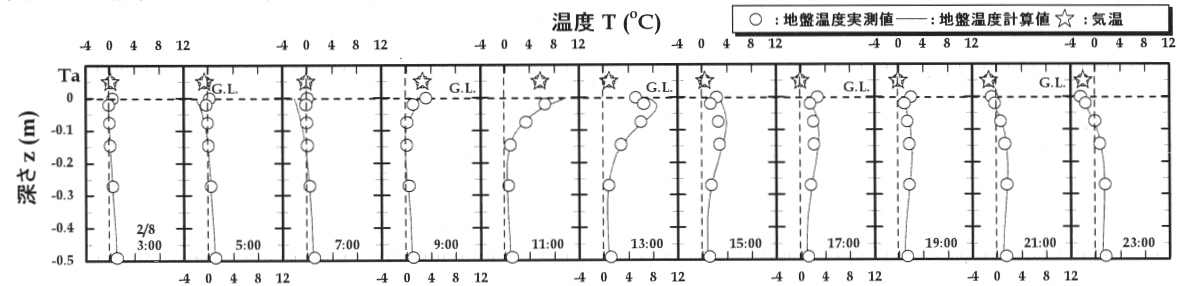


図-16 地盤温度の鉛直方向分布の経時変化 (湿潤)

### 3.3 効果的・効率的凍結防止剤の散布手法の提案

効率的な凍結防止剤の散布方法を確立するためには以下に示した3つの課題がある。本研究では、この3項目に着目して検討した結果について述べる。

図-17 に効率的な凍結防止剤の散布方法イメージを示す。

- ① 散布量毎の塩分濃度増加量の推定 (散布量の指標)
- ② 塩分濃度の減衰の推定 (散布時期の指標)
- ③ 路面管理上必要な塩分濃度

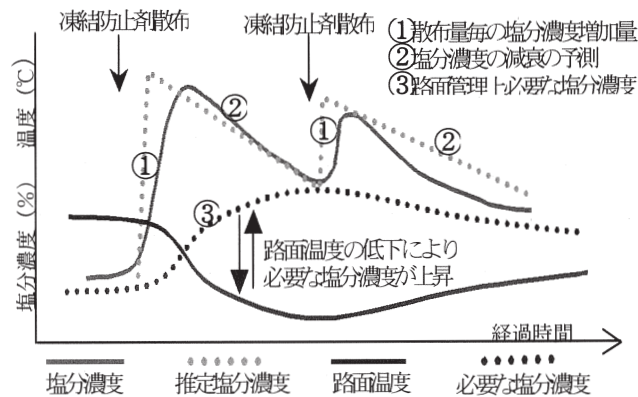


図-17 効率的な凍結防止剤の散布方法イメージ

#### 3.3.1 試験方法

散布量毎の塩分濃度増加量の推定、塩分濃度の減衰の推定をするための式の作成及び路面管理上必要な塩分濃度の検討に使用するデータを収集するた

一般国道 18 号新潟県妙高高原町二俣定点観測データを用いて、実際の道路におけるモデル式の妥当性を検証した。湿潤路面の熱収支解析を行った結果、図-16 に示すように、2 時間毎に変化する地盤温度の鉛直方向分布の計算値結果は、実測値と良好に一致しており、モデルの妥当性が確認できた。これにより、地盤温度の予測が可能となるため、路面状態を予測し、凍結防止剤散布のタイミング判断に資することができる

めに、一般国道 18 号の新潟長野県境付近に位置する二俣地区において自動観測機器を用いた観測を実施した。観測項目および観測方法を表-1 に観測実施箇所を図-18 に、観測機器設置状況を図-19 に示す。対象とした凍結防止剤は、塩化ナトリウムである。

表-1 観測項目及び方法

観測項目	方法
塩分濃度	二俣：自動観測 (4 極式塩分濃度センサー) 藤沢：手観測 (屈折式塩分濃度計)
路面性状 (湿潤、シャーベット、積雪、凍結)	二俣：VTR 映像 藤沢：目視
気象観測	二俣：自動観測 (10 分間隔) 藤沢：手観測 (30 分間隔)
通過車両台数	二俣：自動観測 (トラフィックカウンター) 藤沢：目視



図-18 実施箇所

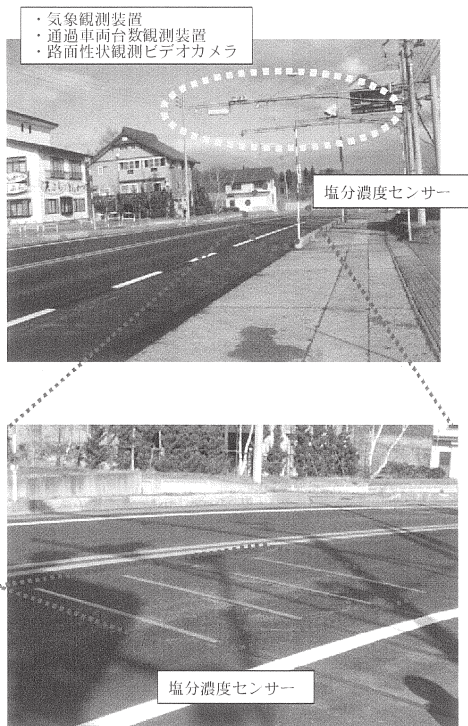


図-19 二俣地区観測機器設置状況

### 3.3.2 試験結果

#### (1) 散布毎の塩分増加量の推定

##### 1) 湿潤路面時における散布量毎の塩分増加量の推定

図-20 に示したように凍結防止剤散布後、塩分濃度は増加し、ピークを過ぎた後に減衰し始める。ここでは湿潤路面時における散布後のピーク濃度を推定することを目的にピーク濃度と気象データ及び散布量等のデータの解析を行った。使用したデータは、平成16年度冬期に観測された湿潤時の35事例(35データ)である。

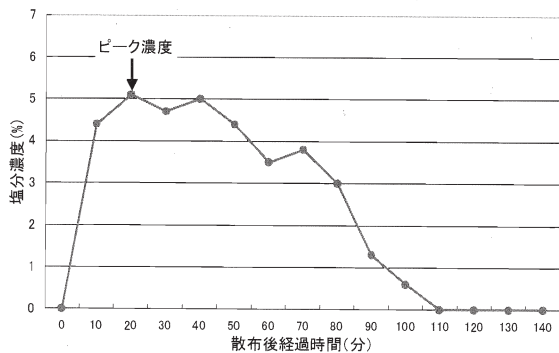


図-20 凍結防止剤散布後の塩分濃度の推移例

ピーク濃度(%)を目的変数として、散布量(g/m<sup>2</sup>)、交通量(台/h)、降雪深(cm/h)、気温(℃)の4項目を説明変数として重回帰分析を行った結果、説明

変数として散布量(g/m<sup>2</sup>)、交通量(台/h)の2項目が採用され、重相関係数(R)が0.63の下記に示す(式-1)が得られた。

得られた推定式は散布量が多く交通量が少ないほどピーク濃度が高くなるというものである。降雪深が、説明変数として採用されなかった理由としては、湿潤時においてはいずれの場合も降雪が弱いため大きな影響を及ぼさなかったことが考えられる。

$$Y = 0.63X_1 - 0.01X_2 - 4.57 \dots \dots \dots (式-1)$$

ここで

Y : ピーク濃度 (%)

X1 : 散布量(g/m<sup>2</sup>)

X2 : 交通量(台/h)

また、実際の路面管理時においては、必要な塩分濃度に到達させるには何g/m<sup>2</sup>散布すれば良いかというのが求められるため(1式)を変形した(式-2)を作成した。

$$Y = -1.59X_1 + 0.02X_2 + 7.25 \dots \dots \dots (式-2)$$

ここで

Y : 散布量 (g/m<sup>2</sup>)

X1 : 必要なピーク濃度(%)

X2 : 交通量(台/h)

##### 2) 推定式の妥当性の確認

推定式の妥当性を確認するために、各観測データにおける実測値のピーク濃度と推定式(1式)から求めたピーク濃度の推定値を比較したものを図-21に示す。この結果、一部合っていないものもあるが、ほとんどの箇所では合っており、今回算出した推定式の妥当性が検証できた。

また、図-22に示したように湿潤時には散布後30分程度でピーク濃度へ達することがわかった。

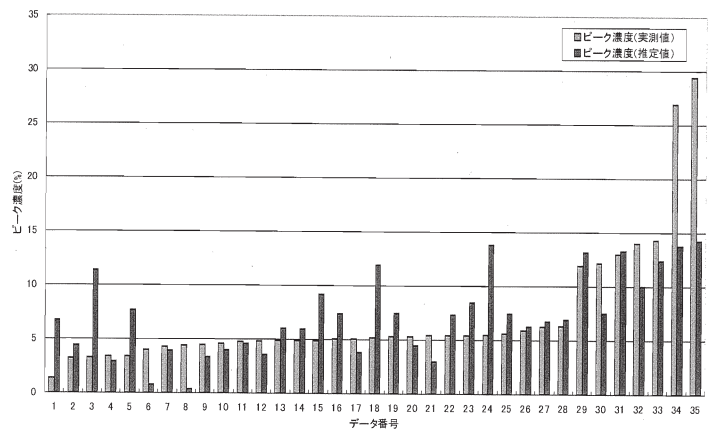


図-21 湿潤路面時における実測値と推定値のピーク濃度

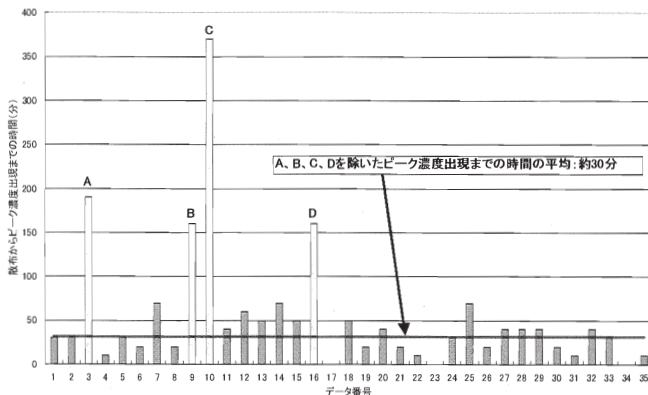


図-22 湿潤時におけるピーク濃度出現までの時間

### 3) シャーベット及び圧雪路面時の散布量と濃度の関係

湿潤路面時と同様にシャーベット及び圧雪路面状態における散布後のピーク濃度を推定することを目的にピーク濃度と気象データ及び散布量等のデータについて解析を行った。使用したデータは、平成16年度冬期に観測されたシャーベット：27事例、圧雪：23事例である。

湿潤時と同様に重回帰分析を行った結果、全ての変数において有意な相関はみられず、推定式を作成することはできなかった。推定式が作成できなかった理由としては、シャーベットおよび圧雪路面のピーク濃度は散布時の雪氷厚に大きな影響を受けるためであると考えられる。よって、気象データ等から推定することが困難であるため、ここでは、路面上の雪氷の厚さと密度から散布後の濃度を推定する方法を提案する。

雪氷厚 (t) の路面上の液相と固相を合わせた水の量 (g/m<sup>2</sup>) は (式-3) で得られる。

$$Y=10000\rho t \cdots \cdots \text{(式-3)}$$

ここで

Y：舗装面上の水の量 (g/m<sup>2</sup>)

t：雪氷厚 (cm)

ρ：密度(g/cm<sup>3</sup>)

なお、一般国道18号において観測された雪氷の密度の範囲はシャーベット(つぶ雪を含む)：0.5~1.0g/cm<sup>3</sup>、やわらかい圧雪：0.4~0.7g/cm<sup>3</sup>、かたい圧雪0.5~0.9g/cm<sup>3</sup>である。

例えば0.5cmの厚さのシャーベット路面に30g/m<sup>2</sup>の散布量で凍結防止剤を散布し、完全に融解したとすると、期待されるピーク濃度は30(g/m<sup>2</sup>)/5000~2500(g/m<sup>2</sup>)×100=0.6~1.2(%)となる。

同様に1cmの厚さの圧雪路面に30g/m<sup>2</sup>の散布量

で凍結防止剤を散布し完全に融解したとすると、期待されるピーク濃度は30(g/m<sup>2</sup>)/9000~4000(g/m<sup>2</sup>)×100=0.3~0.8(%)となる。

ここで仮に各路面雪氷の密度をシャーベット0.8g/cm<sup>3</sup>、やわらかい圧雪：0.6g/cm<sup>3</sup>、かたい圧雪0.7g/cm<sup>3</sup>とすると散布量と路面雪氷厚とピーク濃度は表-2に示したとおりとなる。

表-2 各路面性状における散布量と路面雪氷厚とピーク濃度の関係

散布量 (g/cm <sup>2</sup> )	シャーベット(%)					やわらかい圧雪(%)					かたい圧雪(%)				
	20	30	40	50	雪氷厚 (cm)	20	30	40	50	雪氷厚 (cm)	20	30	40	50	雪氷厚 (cm)
20	2.5	0.5	0.3	0.1	0.1	3.5	0.7	0.3	0.2	0.1	3	0.6	0.3	0.1	0.1
30	4	0.8	0.4	0.2	0.1	5	1	0.5	0.3	0.1	4.5	0.9	0.4	0.2	0.1
40	5	1	0.5	0.3	0.1	6.5	1.3	0.7	0.3	0.1	5.5	1.1	0.6	0.3	0.1
50	6.5	1.3	0.6	0.3	0.1	8.5	1.7	0.8	0.4	0.2	7	1.4	0.7	0.4	0.1
雪氷厚 (cm)	0.1	0.5	1	2	5	0.1	0.5	1	2	5	0.1	0.5	1	2	5

※密度をシャーベット0.8g/cm<sup>3</sup>、やわらかい圧雪:0.6g/cm<sup>3</sup>、かたい圧雪0.7g/cm<sup>3</sup>と仮定した場合

## (2) 塩分濃度減衰予測式の作成

### 1) 湿潤路面における塩分濃度減衰式の作成

湿潤路面において1時間後の塩分濃度を推定することを目的に気象データ及び散布量等のデータの解析を行い、塩分濃度減衰予測式を以下に示した考え方で作成した(図-23参照)。使用したデータは、平成16年度冬期に観測された湿潤時の35事例(588データ)である。

- ①散布直後：散布時の各データおよび推定ピーク濃度を基に散布から1時間後の塩分濃度を推定
- ②散布0.5時間後：散布から0.5時間後までに得られたデータを基に散布から1時間後の塩分濃度を推定(以降同様に継続)

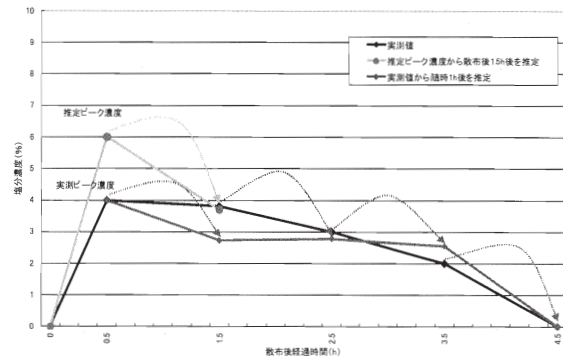


図-23 塩分濃度減衰予測方法

1時間後の塩分濃度を目的変数(Y)、現在塩分濃度(%), 散布量(g/cm<sup>2</sup>), 経過時間(分), 平均気温(°C), 平均気温(°C), 路面温度(°C), 平均路面温度(°C), 1h降雪深(cm/h), 1h降雪深(cm/h), 散



布前1h交通量(台/h)、散布後1h交通量(台/h)の11項目の観測データを説明変数として重回帰分析を行い推定式を作成した。

解析の結果、説明変数として現在塩分濃度(%)、散布量(g/c㎡)、散布後1h交通量(台/h)が採用され重相関係数(R)が0.66の(式-4)が得られた。

$$Y = 0.486X1 - 0.033X2 - 0.002X3 + 1.961 \dots \text{(式-4)}$$

ここで

- Y : 1時間後塩分濃度 (%)
- X1 : 現在塩分濃度 (%)
- X2 : 散布量 (g/c㎡)
- X3 : 散布後1h交通量 (台/h)

## 2) 推定式の妥当性の確認

推定式の妥当性を確認するために、各観測データにおける1時間後濃度の実測値と(式-4)から求めた1時間後濃度の推定値を比較したものを図-23に示す。この結果、だいたい合っており、今回算出した推定式の妥当性が検証できた。

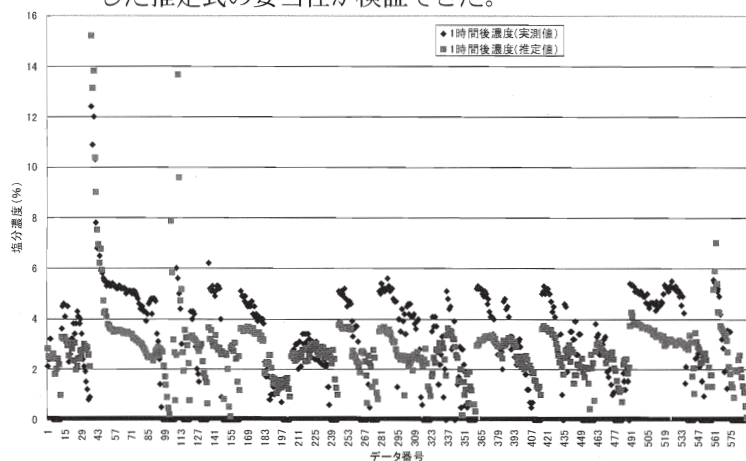


図-23 湿潤路面時における実測値と推定値の1時間後濃度

## (3) 路面管理上必要な塩分濃度の指標の検討

### 1) 検討方法

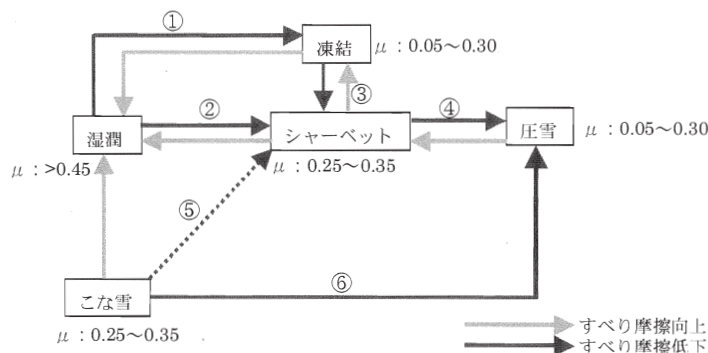
路面温度、路面性状(湿潤、シャーベット、圧雪)及び塩分濃度には密接な関係にあり、路面温度が下がれば路面性状は、湿潤からシャーベットへ、シャーベットから圧雪へ変化する。よって、路面を適切に管理するには、路面性状を悪化させないために凍結防止剤を散布し、必要な塩分濃度を確保する必要がある。よって、路面状況毎に必要な塩分濃度とは路面管理上適切なすべり摩擦を保つのに必要な濃度という考えの下検討を行った。

### 2) 検討結果

雪氷路面のすべり摩擦の低下は路面性状の変化に

伴い図-24に示したとおり以下の6つの状況下で発生する。

- ①湿潤から凍結
- ②湿潤からシャーベット
- ③シャーベットから凍結
- ④シャーベットから圧雪
- ⑤こな雪からシャーベット
- ⑥こな雪から圧雪



※μの範囲は、北海道開発局冬期路面管理マニュアル(案)を基に各路面分類を統合し作成

図-24 路面性状の変化とすべり摩擦の変化

このため適切なすべり摩擦を保つには、現在の路面性状からより滑りやすい路面性状へと変化させることを防ぐのに必要な濃度であると考えられる。そこで、二俣地区において観測した各路面性状における塩分濃度と路面温度の関係をプロットした。その結果を図-25に示す。図-25から、湿潤とシャーベット、シャーベットと圧雪の境界の回帰式を求めた。この式から求められる塩分濃度が路面性状を悪化させないために路面管理上必要な濃度であるとした。以下にその式を示す。

湿潤路面 :  $Y > -0.03x^2 - 1.64x - 4E-1$

シャーベット :  $Y > -0.6x$

ここで

Y : 路面性状を悪化させないために必要な濃度 (%)

X : 路面温度 (°C)

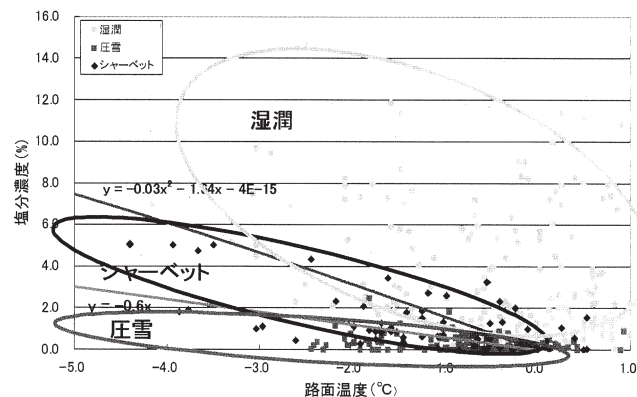


図-25 各路面性状における塩分濃度と路面性状の関係

#### 4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

##### 4.1 非塩化物型凍結防止剤の開発と性能評価

- 1) すべり摩擦抵抗測定試験の結果、本研究で開発した薬剤は従来の非塩化物型凍結防止剤よりも凍結防止性能が向上しており、塩化カルシウムに近い性能を有することが明らかとなった。
- 2) 塩水噴霧試験の結果、酢酸ナトリウムを噴霧した場合の鋼板の劣化は、塩化ナトリウムに比べ緩やかに進行した。この結果から、鋼構造物に対する影響は塩化ナトリウムよりも酢酸ナトリウムの方が軽微であることが明らかとなった。
- 3) 生物への影響に関する検討の結果、塩化カルシウム水溶液中における死亡率が最も高く、次いで塩化ナトリウム、酢酸ナトリウムの順となった。この結果から、開発した非塩化物型凍結防止剤は従来の塩化物型凍結防止剤に比べて、生物への影響が小さいことが確認された。

##### 4.2 効果的・効率的な凍結防止剤散布方法の検討

- 1) 路面上の凍結防止剤の残留薬剤濃度等を線的に計測できる計器の検討の結果、湿潤路面及びシャーベット路面で十分に活用できる車載型路面残留塩分濃度計測センサを開発することができた。
- 2) 路面状態予測モデルの検討の結果、2時間毎に変化する地盤温度の鉛直方向分布の計算値結果は、実測値と良好に一致しており、熱収支モデルの妥当性が確認できた。これにより、地盤温度の予測が可能となるため、路面状態を予測し、凍結防止剤散布のタイミング判断に資することができる。
- 3) 効果的・効率的凍結防止剤の散布手法として、凍結防止剤の適切な散布量の指標となる塩分濃度増加量の推定式、適切な散布時期の指標となる塩分濃度減衰予測式、路面管理上必要な塩分濃度を提案することができた。

#### 参考文献

- 1) 井良沢道也、林 健一、荒川智之：「非塩化物凍結防止剤を用いた現地実証試験」、平成 13 年度北陸地方整備局管内技術研究会論文集, pp.349-352, 2001
- 2) 中村敏彦、明嵐政司：「すべり摩擦力測定による凍結防止剤評価方法の検討」、第 24 回日本道路会議一般論文集 (A) , pp.360-361, 2001
- 3) 井良沢道也、林 健一、荒川智之：「非塩化物凍結防止剤を用いた現地実証試験」、第 24 回日本道路会議一般論文集 (A) , pp.362-363, 2001
- 4) 林 健一：「非塩化物型凍結防止剤を用いた散布実験について」、日本雪氷工学会誌, 第 17 巻, 第 4 号, pp.21-22, 2001.10
- 5) 武士俊也、林 健一、小林一治、安藤達弥：「非塩化物型凍結防止剤を用いた散布実験 (2)」、日本雪氷工学会誌, 第 18 巻, 第 4 号, pp.75-76, 2002
- 6) 荒川智之・林健一・市ノ瀬榮彦：熱収支法による路面凍結解析－乾燥、湿潤及び積雪路面における熱的挙動－、寒地技術論文報告集 Vol. 16, 1999
- 7) 安藤達弥、荒川智之、林健一、井良沢道也、：冬期道路の路面凍結予測に関する研究－MASS センサーを用いたすべり摩擦計測に関する検討、寒地技術論文報告集 Vol. 17, 2001
- 8) 武士俊也、福原輝幸、渡邊洋 他：熱収支法による路面凍結解析－車両タイヤ－圧雪層－路面間の熱移動－寒地技術論文報告集 Vol. 18, 2002
- 9) 藤本明宏、福原輝幸)、武士俊也、他：タイヤ発熱に伴う圧雪層－舗装間の伝熱特性、土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集、V-076、2002
- 10) 花岡正明、小林一治、久保和幸、寺田剛、池田慎二：塩分濃度を指標とした効率的な凍結防止剤散布に関する試験調査、雪みらい研究発表会、2006.2