

非塩化物系凍結防止剤の活用促進と開発に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 30～令 3

担当チーム：寒地交通チーム

研究担当者：佐藤昌哉、畠山乃、大廣智則、
徳永ロベルト、佐藤賢治、
齊田光、高田哲哉、村上健志

【要旨】

積雪寒冷地域の道路では、基本的な凍結路面对策として凍結防止剤の散布が実施されている。凍結防止剤には価格・入手し易さ・融氷性能が優れる塩化ナトリウムが主に利用されているが、道路構造物や植物等の沿道環境への負荷が懸念されている。本研究では、沿道環境への負荷が小さい凍結防止剤の候補物質として、コハク酸二ナトリウム・六水和物の適用可能性を確認するため室内試験を実施した。また、過年度の研究で凍結防止剤としての可能性を検討したプロピオン酸ナトリウムも含めて散布効果を検証するため、寒地試験道路と実道において野外散布試験を実施した。その結果、プロピオン酸ナトリウム及びコハク酸二ナトリウム・六水和物を塩化ナトリウムに一定量混合することで金属腐食を抑制し、塩化ナトリウム単体と同程度の散布効果が得られることを明らかにした。

キーワード：凍結防止剤、プロピオン酸ナトリウム、コハク酸二ナトリウム・六水和物、腐食、非塩化物

1. はじめに

積雪寒冷地の安全で円滑な冬期交通の確保をするため、凍結防止剤散布が凍結路面对策として実施されている。凍結防止剤は価格、融氷性能および入手・取り扱い易さに優れる塩化ナトリウム（以下、塩ナト）などの塩化物系が主に使用されている。一方、塩化物系凍結防止剤の使用による、道路構造物や植生などの沿道環境への負荷が懸念されている¹⁾。寒地交通チームでは富山県立大学と共同で、沿道環境への負荷が小さい非塩化物の化学物質の抽出および凍結防止剤としての利用可能性を検証してきた。本研究では、非塩化物系凍結防止剤として利用可能性のある新たな候補としてコハク酸二ナトリウム・六水和物を選定し、室内・野外での試験を通して凍結防止剤としての適用可能性を検証した。また「非塩化物系の凍結防止剤の開発に関する研究」（平成 26～29 年度）で冬期道路管理への適用可能性を検討したプロピオン酸ナトリウムについて、寒地試験道路および実道で凍結防止剤散布効果を検証した。

2. 新たな凍結防止剤候補物質の選定

非塩化物系の凍結防止剤には、酢酸カルシウム・マグネシウムや蟻酸ナトリウムなどの有機化合物が存在し、金属腐食が少ないことで知られている²⁾³⁾。これを参考に、様々な有機化合物の価格、凝固点および臭気

を調査した。その結果、凍結防止剤として優れた性質が見込める物質として、プロピオン酸ナトリウム（以下、プロナト）を選定し、室内試験等で適用性を確認した⁴⁾。プロナトは、日本国内での年間流通量が 30～40t 程度のため、大量の需要が発生した際の供給に懸念がある。そこで本研究では、選択肢の多様化の観点から、次の候補物質として同じ有機化合物の中からコハク酸塩を選定した。コハク酸塩の原料となるコハク酸は、バイオプラスチックなどへの利用で今後急速に需要が増大することが見込まれており、発酵による大量生産や低価格化も期待されている⁵⁾⁶⁾。

表-1 に 4 種類のコハク酸塩の試薬品について調査した結果を示す。コハク酸二ナトリウムは、吸湿性があ

表-1 コハク酸塩の調査結果

調査対象試薬		試薬品 価格 (円/kg)	水溶液 濃度 (%)	凝固点 (℃)	臭気
塩化ナトリウム 【参考】		900	5	-1.5	なし
			10	-8.3	
			15	-13.5	
			20	-19.8	
コハク酸 化合物	コハク酸二ナトリウム	10,400	20	-11.6	なし
	コハク酸二ナトリウム・ 六水和物	3,200	20	-5.9	なし
	コハク酸カリウム・ 三水和物	16,000	20	-6.3	なし
	コハク酸二アンモニウム	12,000	20 30	-10.6 -21.0	なし

り、保管・作業時の吸湿が懸念されるため除外した。コハク酸カリウム（三水和物）は、海外で凍結防止剤としての研究・販売実績がある⁸⁾ため除外した。コハク酸二アンモニウムは、価格が高いため除外した。コハク酸二ナトリウム・六水和物は、国内で食品添加物として流通し、安全性が見込めることから、当該物質を候補とした。

コハク酸二ナトリウム・六水和物 (Disodium Succinate Hexahydrate、以下、DSH) (図-1) は、国内で主に食品添加物やメッキ剤の原料として流通し、国内の年間流通量は3000t程度である¹⁰⁾。輸入品の価格は、1フルコンテナ(18t)取引の場合、320円/kg程度であり、塩ナト(25円/kg程度)と比べると高価である。価格に加え、DSHは凍結防止剤として使用するには凝固点が高いため、塩ナトとDSHの混合物も試験の対象とした。

3. 室内試験の実施

3.1 凝固点

3.1.1 概要

DSH および塩ナト・DSH 混合物の凝固点を測定した。混合物は重量比 8:2、9:1 および 19:1 とした。いずれも濃度 20%の試験水溶液を作成して測定した。

3.1.2 測定方法

- i) 冷却器中に入れたステンレス製デュアー瓶の中に冷媒であるアセトンを入れる。
- ii) 約 0°C に冷やしたアセトンに、試験水溶液の入った試験管を浸した後、徐々に冷却する。
- iii) 30 秒ごとに凝固点降下が起こるまで試験水溶液の温度変化を記録する。凝固点は、過冷却が起き


外観	
分子式	$C_4H_{16}Na_2O_{10}$ <chem>NaO=C(CC(=O)O[Na])O[Na].6H2O</chem>
質量	270.142g/mol
溶解度	349kg/m ³ (35°C)
水素イオン指数(pH)	7 - 9

図-1 コハク酸二ナトリウム・六水和物⁹⁾

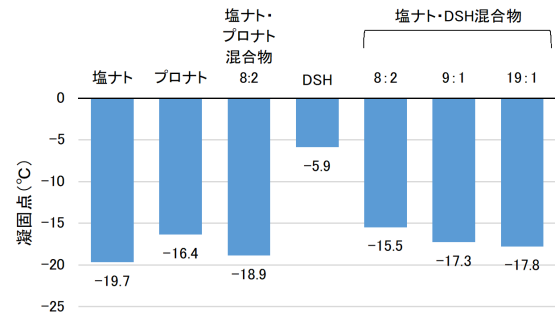


図-2 凝固点測定結果

た後に達した最高温度とした。測定は、各試験対象剤で2回ずつ行い、その平均値を測定値とした。

3.1.3 測定結果

図-2 に凝固点測定の結果を示す。DSH の凝固点は塩ナトやプロナトより高いが、塩ナトと混合することで、塩ナトの凝固点に近づくため、主に塩ナトを散布している積雪寒冷地域全域で適用可能と考えられる。

3.2 金属腐食

3.2.1 概要

DSH および塩ナト・DSH 混合物の金属腐食性を調べるため、北海道立総合研究機構工業試験場が定める凍結防止剤の腐食試験を実施した。試験対象剤は、凝固点測定で用いたものに加え、比較用に蒸留水を用いた。本試験では、試験対象剤を溶解した水溶液中へ試験片を浸漬し、取り出して乾燥させる工程を繰り返すことで発生する腐食(錆)の量を調べた。

3.2.2 試験方法

- i) 鉄製ハルセル陰極板を半断した試験片 (67×50×0.3mm) を作成し、洗浄・乾燥した後、初期重量を計測する。
- ii) 蒸留水に対し 3%の割合で試験対象剤を混ぜ、水溶液を作成する。
- iii) 試験片 1 枚を水溶液に 24 時間浸漬した後、試験片を取り出し 24 時間放置する。
- iv) 浸漬と放置を 7 日間繰り返し、8 日目に取り出して試験片に発生した錆を除去し、乾燥させた後、試験片の重量を計測する。

腐食量 (Cr) (mg/dm²/day) は、次式で求められる。

$$Cr = \frac{W_i - W_f}{A \times D} \quad (1)$$

ここに、 W_i は試験片の初期重量 (mg)、 W_f は試験片の最終重量 (mg)、 A は試験片の表面積 (dm²)、 D は浸漬・放置した日数 (day) である。

写真-1 に試験の実施状況を示す。試験対象剤 1 種類



写真-1 金属腐食試験実施状況

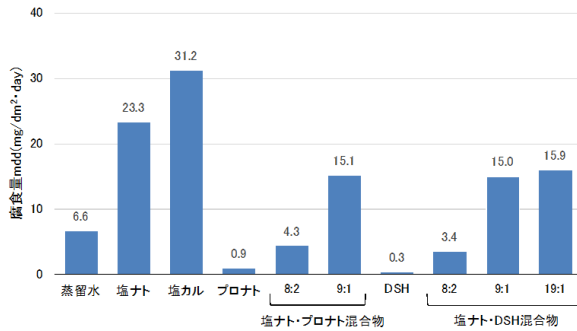


図-3 金属腐食試験結果

につき試験片 2 枚試験し、平均値を結果とした。

3.2.3 試験結果

図-3 に試験結果を示す。DSH は、プロナトと同様にほとんど金属腐食を発生させないことがわかった。また、塩ナト・DSH 混合物（重量比 8:2）は、塩ナトの約 15%かつ蒸留水の約 52%まで金属腐食量を抑えられることがわかった。更に、塩ナト・DSH 混合物（重量

比 9:1 および 19:1）は、塩ナトの約 64~68%まで金属腐食量を抑えられることができ、プロナト同様に金属腐食抑制効果があることがわかった。

3.3 安全性

DSH の安全性を調べるため、道路用凍結防止剤として使用する塩ナトの品質規程¹¹⁾に準じ、DSH 飽和水溶液が、水質汚濁防止法の排水基準¹²⁾のうち 16 種類の有害物質の基準値に適合するか調べた。表-2 に各有害物質の基準値および基準値への適合可否を示す。DSH は、16 種類全ての有害物質の基準値に適合していることがわかった。

3.4 融氷性能

3.4.1 概要

DSH および塩ナト・DSH 混合物の融氷性能を調べるため、融氷量試験を実施した。表-3 に試験条件を示す。融氷量試験は、寒地土木研究所内の低温恒温室内で実施した。試験対象剤は、DSH および塩ナト・DSH 混

表-3 融氷量試験条件

試験対象剤	塩ナト DSH 塩ナト・DSH混合物(重量比8:2)
剤の粒径	0.3~1.0 mm
散布量	5 g (250g/m ² 相当)
試験温度(°C)	-2、-5、-8、-15
経過時間(分)	5、10、20、30、60、120、180

表-2 有害物質試験結果

有害物質の種類	単位	基準値(許容限度)		定量下限	試験結果	適/不適
		一律排水基準 ※1	上乘せ排水基準 ※2			
カドミウム	mg/L	0.03	0.01	0.001	0.001未満	適
全シアン	mg/L	1	検出されないこと※3	0.1	0.1未満	適
有機リン	mg/L	1	検出されないこと※3	0.1	0.02未満	適
鉛	mg/L	0.1		0.005	0.005未満	適
六価クロム	mg/L	0.5	0.05	0.005	0.05未満	適
ヒ素	mg/L	0.1	0.05	0.005	0.002未満	適
総水銀	mg/L	0.005	0.0005	0.0005	0.0005未満	適
アルキル水銀	mg/L	検出されないこと※3		0.0005	0.0005未満	適
PCB	mg/L	0.003		0.0005	0.0005未満	適
チウラム	mg/L	0.06		0.0006	0.001未満	適
シマジン	mg/L	0.03		0.0003	0.001未満	適
チオベンカルブ	mg/L	0.2		0.002	0.002未満	適
セレン	mg/L	0.1		0.002	0.002未満	適
ホウ素	mg/L	10(海域以外) 230(海域)		0.02	0.01	適
フッ素	mg/L	8(海域以外) 15(海域)		0.1	0.1未満	適
アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物	mg/L	100		0.22	0.05未満	適

備考 ※1 「排水基準を定める省令」に定める排水基準許容限度
 ※2 北海道が条例で定める排水基準許容限度
 ※3 「検出されないこと」とは、環境大臣が定める方法により水溶液を検定した場合において、その結果が当該検定方法の定量下限を下回ることをいう。

合物（重量比 8:2）とし、比較用に塩ナトを用いた。本試験では、一定の室温に保たれた室内において試験対象剤を氷上に散布した際の融出水の質量（以下、融氷量）の経時変化を調べた。

3.4.2 試験方法

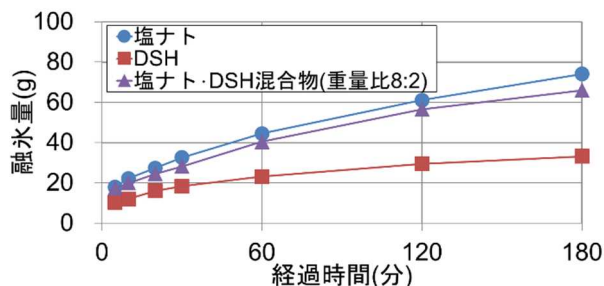
- i) ステンレス製バット（185×140×27mm）に水道水 200ml を入れ、室温-5℃で凍らせた後、室温を試験温度に設定する。
- ii) 試験対象剤を氷表面に散布し、各経過時間後の融氷量を計測する（写真-2）。融氷量は、吸水性の高い紙で融出水を吸い取り、重量計で計測した。融氷量は、同一条件につき 3 サンプル計測し、平均値を結果とした。

3.4.3 試験結果

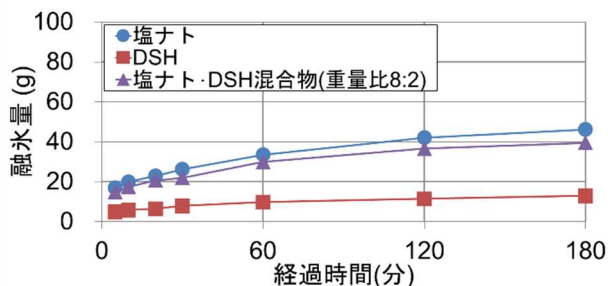


写真-2 試験対象剤の散布状況

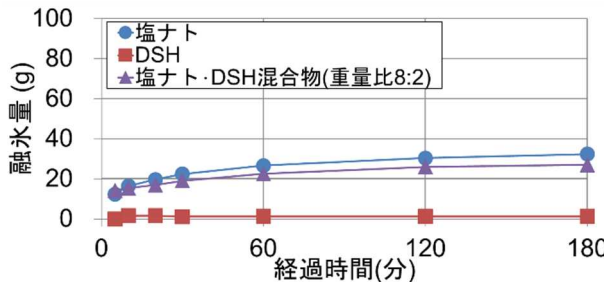
(a) 試験温度-2℃



(b) 試験温度-5℃



(c) 試験温度-8℃



(d) 試験温度-15℃

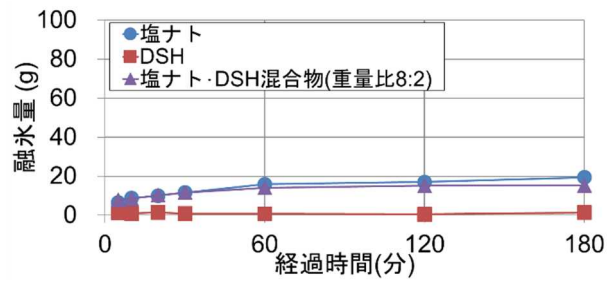


図-4 融氷量試験結果

図-4 に各試験温度における融氷量の経時変化を示す。全試験温度で最終的な融氷量は、塩ナト、塩ナト・DSH 混合物（重量比 8:2）、DSH の順に多く、試験対象剤の種類に関わらず、試験温度が低下すると融氷量が低下している。試験温度-2℃および-5℃での DSH の融氷量は、塩ナトの融氷量と比べて 3~4 割程度だが、試験温度-8℃および-15℃では、融氷量が無いに等しい。

他方、試験温度-2℃および-5℃での塩ナト・DSH 混合物（重量比 8:2）の融氷量は、塩ナトの融氷量と比べて約 9 割であり、試験温度-8℃および-15℃では、約 8 割だった。以上の試験結果から、DSH の融氷性能は塩ナトより小さいが、塩ナト・DSH 混合物（重量比 8:2）は、塩ナトの融氷性能に近いことを確認した。

3.5 植物への影響

3.5.1 概要

DSH および塩ナト・DSH 混合物が植物の生育へ与える影響を調べるため、植物に対する害に関する栽培試験の方法¹³⁾に準拠し、こまつなを供試植物とした栽培試験を実施した。表-4 に試験条件を示す。試験対象剤は、融氷量試験と同様に塩ナト、DSH および塩ナト・DSH 混合物（重量比 8:2）とした。本試験では、試験対象剤をこまつなの生育土壌へ混合したときの、生育状況や土壌性質等を調べた。

3.5.2 試験方法

- i) 供試土壌 500 ml に対し規定の肥料を施肥する。
- ii) 試験対象剤を 1 mm のふるいを通して均質化し、

表-4 栽培試験条件

試験対象剤	塩ナト DSH 塩ナト・DSH混合物(重量比8:2)
土壌添加量(g)	1.0、2.0、4.0、8.0、0.0(無添加)
調査項目	植物
	土壌
	発芽率(%) 葉長(mm) 生体重(g) 生育状況
	pH 塩化物イオン濃度(mg/mg)

施肥後の供試土壌に添加してよく混和した後、試験容器のノイバウエルポットに詰める。

iii) 土壌水分を調節し、こまつなの種子を試験容器あたり 20 粒播種する。

iv) 規定の管理方法で栽培し、播種後 21 日目に収穫する。

写真-3 に栽培試験中の状況を示す。各試験対象剤・各添加量につき 2 鉢試験し、平均値を結果とした。

3.5.3 試験結果

図-5 に収穫直前の生育状況および試験結果を示す。塩ナトおよび塩ナト・DSH 混合物(重量比 8:2) は、土壌添加量の増加に伴い生育が低下し、8.0 g では、全試験対象剤で発芽しなかった。塩ナトの 2.0 g では、生育不良と葉の黄化がみられ、4.0 g では、全く発芽しなかった。また、DSH の添加量が増えるにつれ塩化物イ

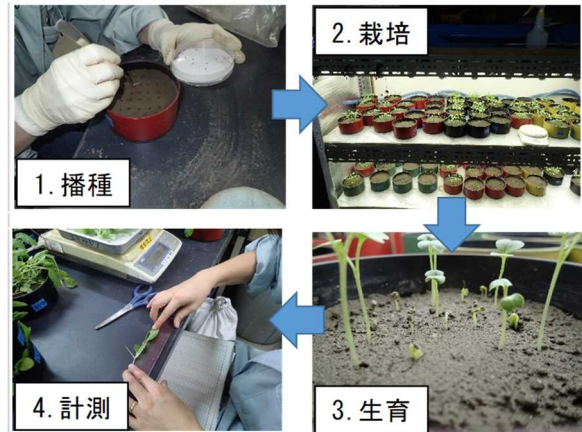
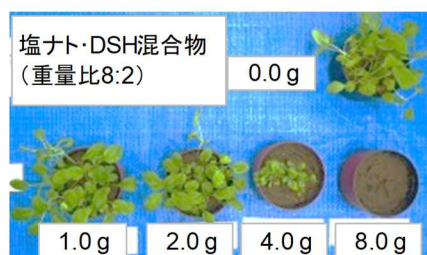
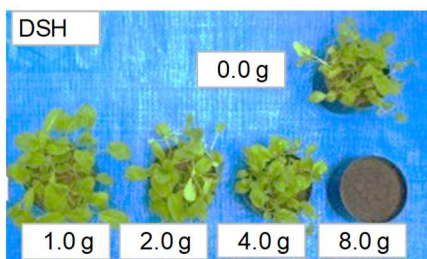
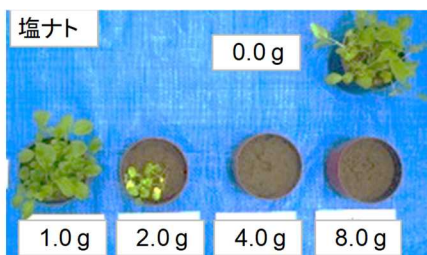


写真-3 栽培試験の状況

オン濃度が上昇した。DSH の 1.0 g および 2.0 g では、0.0 g(無添加)と同程度かそれ以上の生育がみられた。

また、DSH の添加量が増えるにつれ pH が上昇し土壌が弱アルカリ性になった。塩ナト・DSH 混合物(重量比 8:2) の 1.0 g、2.0 g および 4.0 g では、0.0 g(無添加) および DSH 単体と比べて生育は劣るものの、塩ナト単体の同添加量と比べて生育が良好だった。DSH は、動植物の体内に存在し、代謝に重要な役割を果たすことから、少量の添加で生育が促進されたと考えられる。土壌条件や植生の多様性を考慮すると、一概に結論付けることはできないが、こまつなの発芽・生育に対し



	土壌添加量 (g)				
	0.0	1.0	2.0	4.0	8.0
発芽率 (%)	100	100	97.5	0	0
葉長 (mm)	128.0	96.6	53.0	0	0
生体重 (g)	7.73	6.29	1.13	0	0
pH	5.2	5.1	5.3	5.5	5.3
塩化物イオン濃度 (mg/mg)	16	800	1900	4400	9200

	土壌添加量 (g)				
	0.0	1.0	2.0	4.0	8.0
発芽率 (%)	100	100	100	100	0
葉長 (mm)	128.0	146.0	125.0	99.0	0
生体重 (g)	7.73	11.65	10.97	8.79	0
pH	5.2	6.3	7.0	8.0	9.0
塩化物イオン濃度 (mg/mg)	16	18	23	27	37

	土壌添加量 (g)				
	0.0	1.0	2.0	4.0	8.0
発芽率 (%)	100	100	93.0	65.0	0
葉長 (mm)	128.0	110.0	87.0	50.0	0
生体重 (g)	7.73	7.91	4.11	1.39	0
pH	5.2	5.2	5.4	5.8	6.2
塩化物イオン濃度 (mg/mg)	16	810	1500	3300	6500

図-5 栽培試験の結果

て塩化物イオン濃度の上昇が阻害要因となるため、塩ナト・DSH 混合物を用いることで阻害要因を緩和できると考えられる。

3.6 コンクリートへの影響

3.6.1 概要

塩ナト・DSH 混合物がコンクリートのスケーリング劣化に与える影響を調べるため、RILEM-CDF¹⁴⁾に準拠し、室内凍結融解試験を実施した。表-5 に試験条件およびコンクリート供試体（以下、供試体）の配合条件を示す。RILEM-CDF は供試体のスケーリング抵抗性を調べる試験だが、本試験では試験手順中で供試体への吸水工程に用いる水溶液を塩ナト水溶液（濃度 3%）および塩ナト・DSH 水溶液（濃度 3%）とし、それぞれのスケーリング量を調べた。

表-5 凍結融解試験条件および供試体配合条件

セメント種類	普通ポルトランドセメント				
目標スランプ	8.0 ± 2.5cm				
目標空気量	4.5 ± 1.0%				
試験対象剤	塩ナト				
	塩ナト・DSH混合物(重量比9:1)				
水セメント比	%	50	粗骨材(G1)	kg/m ³	642
細骨材費	%	44	粗骨材(G2)	kg/m ³	429
水(W)	kg/m ³	145	AE減水剤	C×%	1.015
セメント(C)	kg/m ³	290	AE剤	C×%	0.0044
細骨材(S)	kg/m ³	850			

3.6.2 試験方法

- i) 10×10×40 cm の供試体を作成し成型後 1 日で脱型する。
- ii) 材齢 7 日まで 20℃ で水中養生し、その間に供試体を 10×10×20 cm に切断する。
- iii) 20℃、60%Rh で気中養生し、材齢 21～27 日の間に試験面以外をアルミテープでシールする。
- iv) 材齢 28 日目から、供試体の打設面下部が 5 mm 程度、試験水溶液に浸るよう容器に設置し、7 日間事前吸水させる。
- v) 試験器に入れた後 ±20℃ の凍結融解サイクルを 28 サイクル与える（図-6）。
- vi) 8、14、28 サイクル毎にスケーリング片を採取し、乾燥質量を計測する。

供試体は、試験対象剤毎に 5 個作成・試験した。また、スケーリング片の乾燥質量 (g) をスケーリング量 (g/m²) に換算して平均値を結果とした。

3.6.3 試験結果

図-7 に平均スケーリング量の推移を示す。また、図

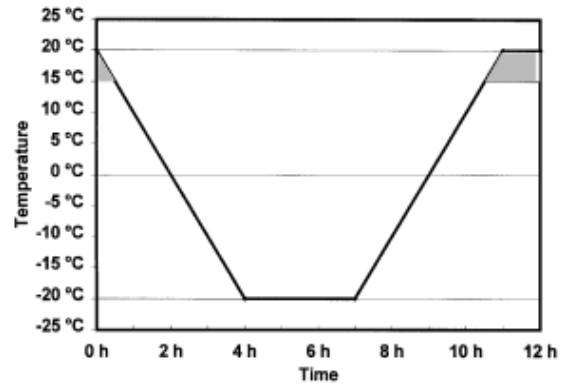


図-6 試験機の温度制御サイクル¹⁵⁾
(灰色部は温度の範囲)

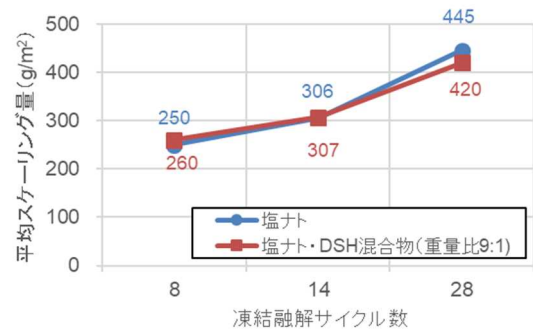


図-7 平均スケーリング量の推移

-8 に吸水前後とサイクル毎の供試体の状態の一例を示す。両試験対象剤の平均スケーリング量は、いずれのサイクルにおいても同程度だった。

4. 野外散布試験

4.1 試験の概要

散布による路面すべり抵抗値改善効果を検証するため、プロナトおよび DSH を用いて、当研究所所有の苫小牧寒地試験道路において散布試験を実施した。試験道路は 1 周 2,700m であり、本試験は密粒度アスファルト区間の直線部で、2019 年 1 月 24 日および 2020 年 1 月 20 日に実施した。

4.2 試験の方法

散布量は国土交通省北海道開発局における冬期路面管理マニュアル(案)¹⁵⁾を参考にし、路面凍結後の事後散布試験は 30g/m²、路面凍結前の事前散布試験は 15g/m²を設定した。また、散布方法は湿式散布とした。湿式散布とは、塩ナトなどの固形剤を水溶液状にした塩化ナトリウム等の凍結防止剤溶液に混合して散布する方法で、路面への付着性がよく、風や通行車両による飛散を少なくし、即効性や持続性が優れた散布方法である。またプロナトおよび DSH は水溶液状にした湿式剤として固形剤の塩ナトに混合して散布を行った。

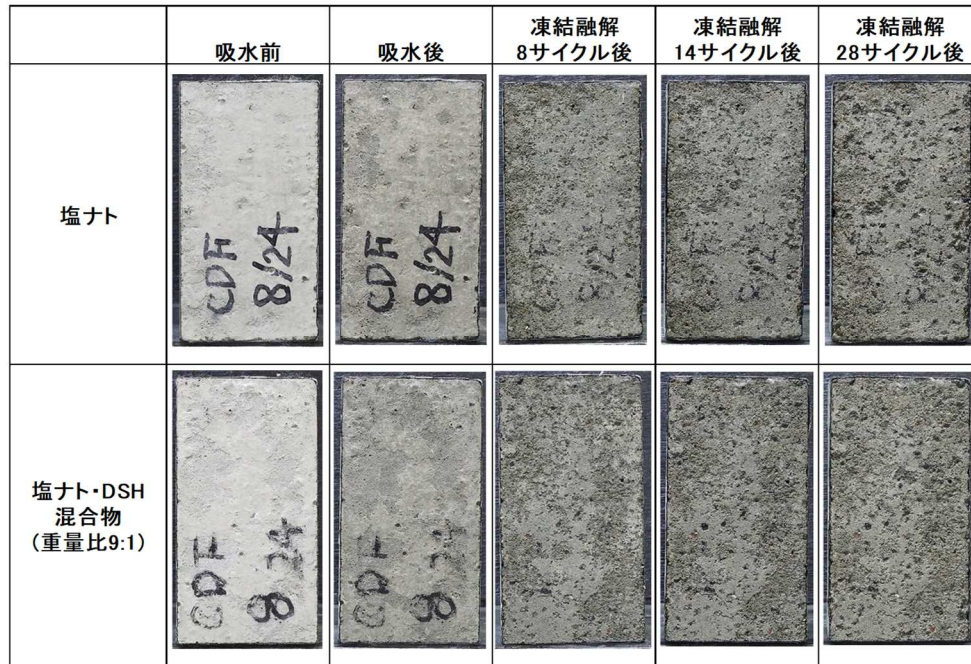


図-8 供試体の状態変化の一例

表-6 散布混合比

	凍結防止剤		薬剤比率 (重量比)	散布量 (g/m ²)
	固形剤	湿式剤		
事後 散布	塩ナト	塩ナト水溶液 (濃度25%)	塩ナト:プロナト 9:1	30
	塩ナト	プロナト水溶液 (濃度30%)		30
	塩ナト	DSH水溶液 (濃度15.3%)		塩ナト:DSH 19:1
事前 散布	塩ナト	塩ナト水溶液 (濃度20%)	塩ナト:プロナト 9:1	15
	塩ナト	プロナト水溶液 (濃度25%)		15
	塩ナト	DSH水溶液 (濃度15.3%)		塩ナト:DSH 19:1

固形剤（塩ナト）と湿式剤（プロナト、DSH）の散布混合比については、凝固点測定結果、金属腐食性試験結果、剤の価格を考慮した結果、塩ナト・プロナト混合物は重量比9:1、塩ナト・DSH混合物は重量比19:1になるようにし、表-6に示すとおりとした。比較のため、非塩化物系凍結防止剤を使用しないケースとして、塩ナト（固形剤）に塩ナト水溶液（湿式剤）を混合したケースを設定した。

4.3 計測装置

散布によるすべり抵抗値の効果を確認するため、連続路面すべり抵抗値計測装置¹⁶⁾（写真-4）を用いて、すべり抵抗値を測定した。連続路面すべり抵抗値計測装置（Continuous Friction Tester: CFT）とは、車両後部に計測輪を設け、計測輪を車両進行方向に対して1~



写真-4 連続路面すべり抵抗値計測装置

2°程度の角度を与え、計測輪が回転する際に発生する横力を計測し、連続的に路面のすべり値を計測する装置である。すべり抵抗値は、当該装置の開発者が独自に設定したHFN（Halliday Friction Number）と呼ばれる値で、すべり難い路面ほど高い値を示し、すべり易い路面ほど低い値を示す。HFNはすべり摩擦係数(μ)との相関が高いことがわかっており¹⁷⁾、測定値はすべり摩擦係数換算値を用いた。

4.4 試験手順

散布試験のレイアウトは図-9のとおりである。試験の手順を述べる。

- i) 夕方、試験道路の直線区間に散水車による散水を行い、氷膜路面（事後散布試験）または湿潤路面

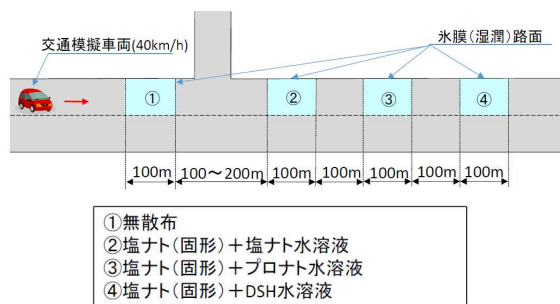


図-9 散布試験レイアウトと散布方法

(事前散布試験) を作製する。

- ii) 散水した水が凍結し氷膜路面になった後に各凍結防止剤の散布を行う。(事前散布試験の場合は氷膜路面になる前に各凍結防止剤を散布)
- iii) 路面すべり抵抗値を測定する。
- iv) 車両の走行による路面状態の変化を計測するため、交通模擬車両を 50 台通過させる。交通模擬車両の走行速度は約 40km/h とし、普通乗用車を使用した。
- v) 路面すべり抵抗値 (μ) を測定する。
- vi) 手順 iv)~v) を通過台数が 300 台 (50 台×6 セット) に達するまで繰り返す。

各凍結防止剤の散布区間は 100m である。散布区間同士の干渉を避けるために、各区間の間には 100~200m の無散布区間を設けた。

4.5 試験結果

4.5.1 事後散布試験

図-10 に路面凍結後の事後散布試験における交通模

擬車両通過台数の増加に伴う μ の変化を示す。また、同図に μ 測定時の外気温及び路面温も併せて示す。試験中の外気温は、 $-4.8\sim-3.1^{\circ}\text{C}$ 、路面温度は、 $-4.2\sim-2.9^{\circ}\text{C}$ で推移した。また、20 時頃 (交通模擬車両 200 台走行後) から 1cm/h 以下の降雪があった。

散水後、散布前 (凍結) の μ は $0.28\sim0.32$ であったが、散布直後の μ は、無散布区間は 0.36 であり、プロナト湿式剤区間は 0.22 、DSH 湿式剤区間は 0.23 、塩ナト湿式剤区間は 0.23 となり、無散布区間の μ を下回った。これは、凍結防止剤が氷膜の一部を融解し、氷膜上に水膜を形成したために一時的にすべり易くなったものと考えられる。交通模擬車両 50 台走行後は、散布効果が現れ無散布区間以外の μ は $0.13\sim0.19$ 上昇し、プロナト湿式剤区間は 0.35 、DSH 湿式剤区間は 0.43 、塩ナト湿式剤区間は 0.39 の値を示し、無散布区間の 0.27 より高い値を示した。100 台走行後から 200 台走行後までの μ は、プロナト湿式剤区間は平均 0.39 、DSH 湿式剤区間は平均 0.43 、塩ナト湿式剤区間は平均 0.37 を示し、プロナト湿式剤区間および DSH 湿式剤区間の μ は、塩ナト湿式剤区間の μ より高い値を示した。交通模擬車両 250 台走行後からは、プロナト湿式剤区間の μ が、交通模擬車両 300 台走行後では塩ナト湿式剤区間の μ がそれぞれ低下した。これは、降雪の影響を受けたものと思われる。交通模擬車両 50 台走行後から 300 台走行後までの全走行を通して最も μ が改善したのは、DSH 湿式剤区間で、平均値は 0.43 であった。また、プロナト湿式剤区間の平均値は 0.35 、塩ナト湿式剤区間の平均値は 0.36 、無散布区間の平均値は 0.30 であった。

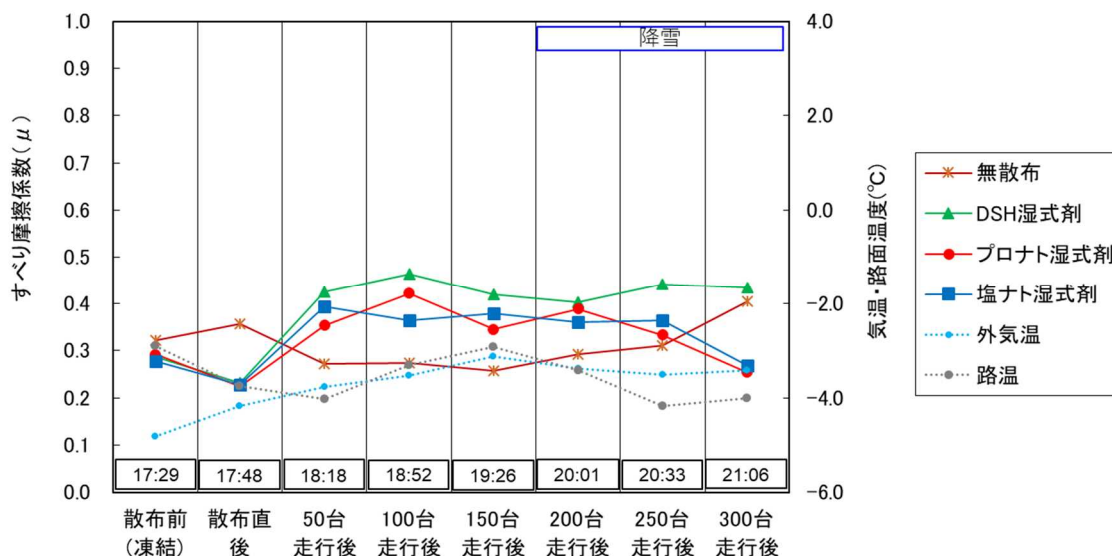


図-10 路面すべり摩擦係数の変化 (事後散布試験)

以上の結果より、事後散布試験を行った結果、 μ にばらつきが見られるものの、塩ナトとプロナト水溶液の湿式散布および塩ナトと DSH 水溶液の湿式散布は、従来の塩ナト（固形剤）と塩ナト水溶液の湿式散布と比較して遜色なく μ を改善できることがわかった。

4.5.2 事前散布試験

図-11 に路面凍結前の事前散布試験における交通模擬車両通過台数の増加に伴う μ と外気温、路温の変化を示す。散布直後から試験終了までの外気温は、1.4～-0.1℃、路面温度は 0.3～-2.9℃で推移した。また、本試験期間中、降雪はなかった。

散布直後の μ は、無散布区間は 0.35 であり、塩ナト湿式剤区間は 0.94、プロナト湿式剤区間は 0.97、DSH 湿式剤区間は 0.97 の値を示した。交通模擬車両 50 台走行後から 300 台走行後までは、塩ナト湿式剤区間の μ は 0.93～0.42 の間で推移、プロナト湿式剤区間の μ は 0.95～0.55 の間で推移、DSH 湿式剤区間の μ は 0.95～0.83 の間で推移し、各薬剤散布区間は、無散布区間の μ (0.29～0.30 の間で推移) より高い値であった。各散布区間ともに交通模擬車両 250 台走行後以降は、 μ が徐々に低下した。特にプロナト湿式剤区間、塩ナト湿式剤区間の μ は 250 台走行後以降、大きく低下した。交通模擬車両 300 台走行後までの全走行を通して、プロナト湿式剤区間および DSH 湿式剤区間の μ は、交通模擬車両 100 台走行後までは、塩ナト湿式剤区間とほぼ同じ値の μ であった。交通模擬車両 150 台走行後からは、プロナト湿式剤区間および DSH 湿式剤区間の μ は、塩ナト湿式剤区間より高い値の μ であった。

以上の結果より、事前散布試験を行った結果、塩ナ

トとプロナト水溶液の湿式散布および塩ナトと DSH 水溶液の湿式散布は、従来の塩ナト（固形剤）と塩ナト水溶液の湿式散布と同様に、凍結路面の発生を抑制できることがわかった。

5. 実道でのプロナト散布検証

5.1 試験の概要

プロナトを実道で散布した場合の散布効果を評価するため、中日本高速道路株式会社と共同で、高速道路本線（東海北陸自動車道五箇山 IC～白川郷 IC）においてプロナトの散布（試行導入）を実施した。

使用する薬剤は固形塩ナトに 25%濃度プロナト水溶液を付加したものとし、散布方法は湿塩散布（以下、プロナト湿塩散布）とした。薬剤中の塩ナトとプロナトの重量比率は 9:1 とした。また効果検証における比較区間は、試行導入区間に隣接する福光 IC から五箇山 IC とした。比較区間で使用する薬剤は固形塩ナトに 25%濃度塩ナト水溶液を付加したものとし、散布方法は、湿塩散布（以下、塩ナト湿塩散布）である。

5.2 路面のすべり抵抗性

5.2.1 検証の概要

路面のすべり抵抗性の検証は、比較区間および試行導入区間で実施した。検証方法として、4.3 節で示した寒地土木研究所が所有する連続路面すべり抵抗値計測装置を用いて、目視による路面状態の確認と併せ、凍結防止剤散布前後の HFN を計測し、HFN の改善効果を確認した。写真-5 に HFN の計測状況を示す。福光 IC を起終点、白川郷 IC を折り返し地点として、上下線で規制速度内で計測している。

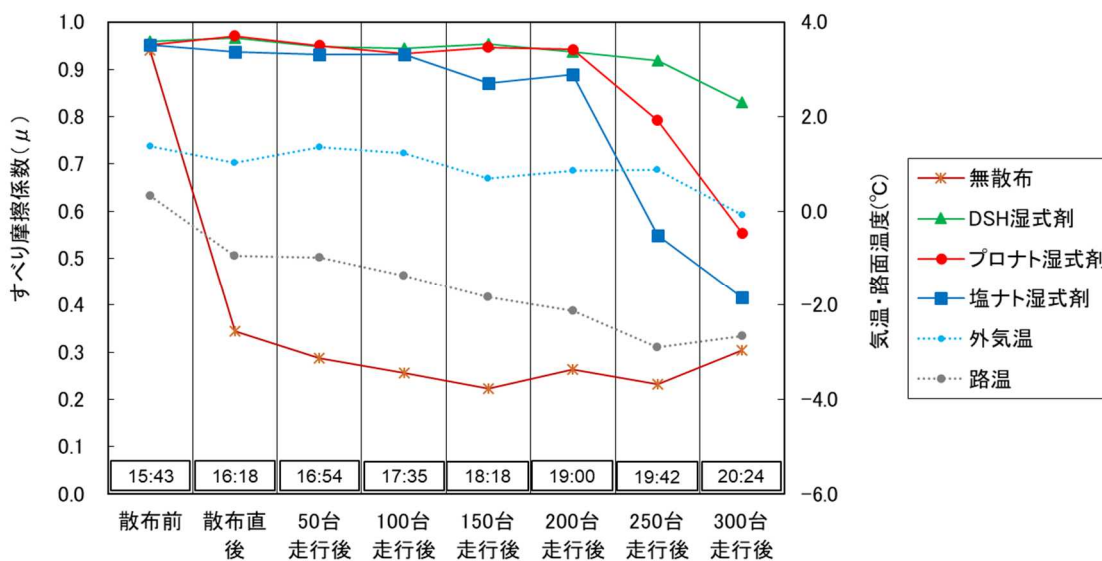
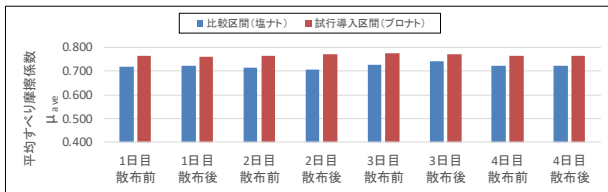


図-11 路面すべり摩擦係数の変化（事前散布試験）

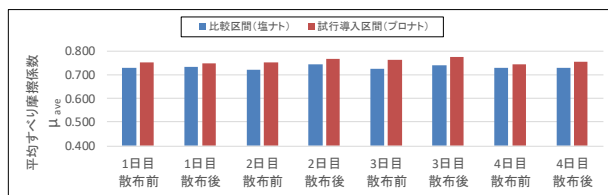


写真-5 すべり抵抗値計測状況



下り線	1日目	1日目	2日目	2日目	3日目	3日目	4日目	4日目
計測時期	散布前	散布後	散布前	散布後	散布前	散布後	散布前	散布後
主な天候	曇	曇	雨	雨	雨	雨	曇	曇
主な路面状態	湿潤	乾燥	湿潤	湿潤	湿潤	湿潤	湿潤	湿潤

図-12 すべり抵抗値の計測結果（上り線）



上り線	1日目	1日目	2日目	2日目	3日目	3日目	4日目	4日目
計測時期	散布前	散布後	散布前	散布後	散布前	散布後	散布前	散布後
主な天候	曇	曇	雨	雨	雨	雨	雨	曇
主な路面状態	湿潤	乾燥	湿潤	湿潤	湿潤	湿潤	湿潤	湿潤

図-13 すべり抵抗値の計測結果（下り線）

5.2.2 検証の結果

検証は、凍結防止剤の散布を行わないトンネル区間を除いた実散布区間で行った。実散布区間の延長は、比較区間が約 5.9 km、試行導入区間が約 5.2 km である。計測結果を図-12、図-13 に示す。計測の結果、いずれの区間も μ は高い値を示した。

5.3 金属腐食抑制効果

5.3.1 検証の概要

比較区間および試行導入区間における金属腐食抑制効果の検証を実施した。検証方法として鉄製の試験片で試験区間に設置して腐食を測定する方法によった。検証は、メッキや塗装を施していない鉄製の試験片(67×100×0.3mm)の初期重量を計測し、本線路肩および中央分離帯に設置されたスノーポールの箇所にプラスチックバンドで固定した。設置から2日後に回収し、薬品で錆を除去した後、試験片の重量を計測した。評

比較(塩ナト)区間 本線スノーポール (路肩)		試行導入(プロナト)区間 本線スノーポール (路肩、中央分離帯)	
塩ナト	27.1	プロナト	2.7
塩ナト	34.7	プロナト	3.9
		プロナト	3.2

図-14 回収後の試験片状況とmdd

価指標は、試験片の初期重量から錆除去後の試験片重量を引いた重量を試験片の面積と日数で除した腐食減少量 (mg/dm²/day、以下 mdd) とした。設置箇所毎に2枚ずつ設置し、2枚の mdd の平均値で評価した。

5.3.2 検証の結果

図-14 に回収後の試験片の状況（代表1枚を明示）と平均の mdd を示す。プロナト湿塩散布試行導入区間の mdd は 2.7~3.9 と、塩ナト湿塩散布を実施した比較区間の mdd (27.1 および 34.7) と比べて大幅に低い値であった。本検証では、室内試験の結果と同様にプロナトの高い金属腐食抑制効果を確認できた。

6. まとめ

本研究では、DSH およびプロナトの冬期道路管理における適用性検討の一環として、DSH の凝固点測定、室内融氷量試験、室内栽培試験、室内金属腐食性試験、室内コンクリート凍結融解試験、プロナトおよび DSH の散布効果を検証するため、野外散布試験を実施した。また、プロナトについては実道で散布した場合の検証も行った。その結果、以下の知見を得られた。

- 1) DSH は、有害物質を含まず、塩ナトと DSH を 8 : 2 で混合した場合、従来凍結防止剤と同程度の融氷効果が得られる。また、金属腐食をほとんど発生させず、塩ナトと混合した場合、塩ナトと比べて大幅に金属腐食の進行を抑制し、かつ植物の生育の影響が抑えられる。
- 2) 塩ナトとプロナトの重量比 9 : 1 の混合散布および塩ナトと DSH の重量比 19 : 1 の混合散布は、従

来の塩ナトと塩ナト水溶液の散布と比較して同程度に路面すべり摩擦係数を改善できる。

- 3) プロナトを実道で散布した場合の散布効果を検証した結果、路面のすべり摩擦係数は、塩ナトとプロナトを重量比 9 : 1 で混合散布した場合においても、従来の塩ナト単体散布と比べて劣ることはなかった。また、室内試験の結果と同様にプロナトの金属腐食抑制効果が確認できた。

以上のことから、塩ナトにプロナトまたは DSH を 5%~10%混合して使用することで、道路構造物の長寿命化に貢献できる可能性が示された。更に、塩ナトに対して 5%~10%程度の混合なので、導入コストの上昇も緩和できる。今後は、プロナトおよび DSH の混合による凍結防止剤散布の利用の拡大に向けて取り組んで参りたい。

参考文献

- 1) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書、NEXCO 東日本・NEXCO 中日本・NEXCO 西日本、2014.
- 2) 長谷川崇：凍結防止剤の性能等の取りまとめ調査について、北陸地方整備局事業研究発表会、2015.
- 3) 独立行政法人土木研究所ほか：非塩化物型凍結防止剤等に関する共同研究報告書、第 293 号、2003.
- 4) 佐藤賢治、中島知幸、徳永ロベルト、高橋尚人、中島範行：新しい非塩化物系凍結防止剤の冬期道路管理における適用性検討、平成 29 年度国土交通省国土技術研究会、2017.
- 5) 経済産業省生物化学産業課：バイオテクノロジーが生み出す新たな潮流～スマートセルインダストリーの実現に向けて～、
<http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/nourin/5kai/siryos3.pdf>、2017. (最終閲覧日：2022 年 5 月 31 日)
- 6) 経済産業省バイオ小委員会：三菱化学グループの生物による物質生産の取組み、
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shomu_ryutsu/bio/pdf/003_11_00.pdf、2016. (最終閲覧日：2022 年 5 月 31 日)