

第 32 回ふゆトピア研究発表会 論文一覧 目次

セッションⅢ【冬期インフラ管理】

No.	発表題名	発表者所属	著者名	頁
1	道央道の豪雪区間（岩見沢）における冬期交通確保の向上に向けた取り組み ～気象情報収集ツール（SIGN）を活用した雪氷対策作業の事例報告～	①東日本高速道路株式会社 北海道支社 道路事業部 保全課 ②東日本高速道路株式会社 北海道支社 岩見沢管理事務所 ③株式会社ウェザーニューズ	①北川 純一 ①本多 裕 ②上杉 隆則 ③岩井 佑樹	117
2	雪氷作業の高度化と効率化に向けた技術開発と情報提供について	株式会社ウェザーニューズ	吉永 創 川畑 貴義 山口 隆志 竹内 茜 大鹿 美希	121
3	新潟県における冬期道路交通確保とICT技術を活用した防災教育の取り組み ～円滑な道路交通確保に向けた雪崩災害対応と今後の除雪体制維持に向けて～	①新潟県 土木部 道路管理課 雪寒事業係 ②町田建設株式会社 ③株式会社長岡計器	①吉田 あみ ②町田 敬 ③竹内 祐貴	125
4	道路施設における冠雪対策試験の観測結果について ～滑雪性能の検証～	日本サミコン株式会社 仙台事務所	小野 政利 明田 剛史	129
5	冬期乾燥路面における残留塩分濃度測定方法の提案	中日本ハイウェイ・メンテナンス名古屋株式会社 名古屋事業所	小幡 洋介 武石 眞博	133
6	カメラ画像を活用した吹雪自動検知技術の活用 ～道東地域の道路吹雪対策高度化に向けて～	①国土交通省 北海道開発局 釧路開発建設部 道路計画課 ②一般財団法人北海道開発技術センター 調査研究部	①山内 良輔 ①石郷岡和則 ②金田 安弘 ②永田 泰浩	137
7	冬期の立ち往生車発生傾向と予防的対策について	国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 道路交通安全研究室	高橋 歩夢 池原 圭一 川瀬 晴香 小林 寛	141
8	除雪機械の下回り塗装の試行について	①国土交通省 東北地方整備局 秋田河川国道事務所 防災課 ②国土交通省 東北地方整備局 青森河川国道事務所 防災課	①田中 誠 ①泉 実 ②落合 信孝	145
9	無散水消融雪施設の長寿命化を目指した融雪用放熱管内の洗浄による機能回復効果	日本地下水開発株式会社	伊藤 健大 山口 正敏 鈴木 和則	149
10	【i-Snow】ロータリ除雪車による投雪作業自動化 ～除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組～	国土交通省 北海道開発局 事業振興部 機械課	小野寺 敬太 高本 敏志 岸 寛人	153

No.	発表題名	発表者所属	著者名	頁
11	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	①山田技研株式会社 ②福井大学学術研究院工学系部門	①山田 忠幸 ①山田 健雄 ①山田 耕嗣 ②藤本 明宏	157
12	雪氷作業への新型路面センサの導入	①中日本高速道路株式会社 金沢支社 敦賀保全・サービスセンター 施設課 ②中日本高速道路株式会社 金沢支社 環境・技術管理部 品質検査課	①岡田 大輝 ①四本木 久一 ②中村 貴男	163
13	除雪機械の情報化施工技術の開発	国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 施工調査・技術活用課	橋本 隆志 小浦方 一彦 山田 拓	167
14	サラウンドビューによる除雪機械作業時の安全対策	株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道	東 忍 大廣 智則	173
15	旅客上家屋根電気融雪装置用積雪センサを活用した最適制御システムの展開と効果について	①東日本旅客鉄道株式会社 新潟支社 新潟建築技術センター ②山田技研株式会社	①原 宏 ①阿部 真季 ①船山 花穂 ②酢谷 浩 ②徳永 透	177
16	遠赤外融雪面の積雪深シミュレーションと最適運転条件	①長岡技術科学大学 ②長岡技術科学大学大学院 ③町田建設株式会社	①上村 靖司 ②代田 俊登 ③町田 敬	181
17	寒中コンクリート工事の合理化に向けた基礎検討	①地方独立行政法人北海道立総合研究機構 建築研究本部 北方建築総合研究所 ②株式会社佐川建設 ③室蘭工業大学大学院	①谷口 円 ①月館 司 ①高橋 光一 ②佐川貴康 ③濱 幸雄	187
18	関越道湯沢 IC における酢酸系液状凍結防止剤を用いたスタック対策について	北海道日油株式会社	畠 友昭 小川 貴 中地 章	191
19	道路情報板支柱の冠雪による危険な落雪防止対策の検討	①株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道 ②東日本高速道路株式会社 北海道支社 ③北海道科学大学 ④NPO法人 雪氷ネットワーク	①大廣 智則 ②渥美 尚大 ③細川 和彦 ④竹内 政夫	197
20	白鳥大橋の雪氷対策 ～積雪寒冷地ならではの吊橋技術の紹介～	国土交通省 北海道開発局 室蘭開発建設部 室蘭道路事務所	横田 法久 堀田 暢夫 佐々木 慎一	201
21	仮想サーマルマッピングを用いた路面雪氷状態予測の高速化に関する一検討	国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所	齊田 光 星 卓見 徳永 ロベルト 佐藤 昌哉	205

No.	発表題名	発表者所属	著者名	頁
22	凍結防止剤散布支援技術による散布作業の負担軽減および的確性向上について	①国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路研究グループ 寒地交通チーム ②国土交通省 北海道開発局 札幌開発建設部 夕張川ダム総合管理事務所 川端ダム管理支所	①徳永 明太郎 ①齊田 光 ①星 卓見 ①佐藤 昌哉 ②佐藤 賢治	209
23	北海道における冬期路面管理の適正化 ～凍結防止剤散布効果検討～	①北海道建設部 建設政策局 維持管理防災課 維持グループ ②株式会社シーイーサービス 企画開発部	①松本 俊春 ①角丸 大輔 ②井上 昌幸 ②鹿 美麗	215
24	冬期道路管理支援に向けた吹きだまり予測システム（吹雪丸）の開発とその試行	①株式会社シーイーサービス ②北海道大学大学院工学研究院 ③一般社団法人北海道開発技術センター	①村上学 ①正岡久明 ①星野洋 ②萩原亨 ③金田安弘 ③越後謙二 ③永田泰浩	221
25	R C床版(新設)の複合劣化対策の取り組みについて	国土交通省 東北地方整備局 福島河川国道事務所	高橋 正晴 高橋 大輔	227
26	合体作業での効率UPについて (既設のウニモグと小型散布機の融合による効率化の試行)	株式会社ネクスコ・メンテナンス東北 北上事業所	小田嶋 康弘 鈴木 克彦	231
27	雪に起因する“通行止め時間の最小化”に向けた取り組み	①中日本高速道路株式会社 金沢支社 保全・サービス事業部 保全計画課 ②中日本高速道路株式会社 金沢支社 敦賀保全・サービスセンター 保全計画課	①松浦 智典 ①堀江 悟 ②草野 智之	235
28	V P I Sを活用した除雪作業車両位置広報サービス「除雪NAV I」について	①中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 株式会社 営業部 営業課 ②中日本高速道路(株) 金沢支社	①松本 剛明 ①長谷川 敬 ②坂 宗樹 ②坂田 圭亮	239
29	橋梁塩害対策の効率的な手法に関する岐阜（保）の取り組み	中日本高速道路株式会社 名古屋支社 岐阜保全・サービスセンター 保全計画課	倉戸 伸浩	243
30	北海道における再生可能エネルギーを利用した歩道融雪の可能性検討	①一般社団法人北海道開発技術センター 調査研究部 ②株式会社興和木工部	①大川戸貴浩 ②藤野 丈志	247
31	下向き短波放射と雪面の反射率が空撮図化に及ぼす影響	①株式会社構研エンジニアリング防災施設部 ②北見工業大学	①高橋浩司 ①長沼芳樹 ②白川 龍生	251

No.	発表題名	発表者所属	著者名	頁
32	新規供用した東北中央自動車道の冬期雪氷障害と雪害対策工について	①東日本高速道路株式会社 東北支社 仙台管理事務所 ②株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北	①山田 光雄 ②土橋 博文	255
33	雪崩点検における汎用 UAV の活用	①東日本高速道路株式会社新潟支社 湯沢管理事務所 ②株式会社ネクスコ・エンジニアリング新潟 湯沢道路事務所 ③株式会社ネクスコ・メンテナンス新潟 湯沢事業所	①鴻江 雄太 ①細川 迭男 ②古川 健 ③阿部 勲	259
34	北陸道における「平成 30 年豪雪」後の雪氷強化対策とその効果	①中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社 金沢道路事務所 ②NEXCO 中日本 金沢保全・サービスセンター	①青山 翔平 ①太田 雅次 ①川瀬 拓也 ②吉枝 護 ②桑子 淳一	261
35	北陸自動車道の安全で効率的なチェーン規制作業を目指して	中日本ハイウェイ・メンテナンス北陸株式会社	水口 大司 見方 功	265
36	冬期登坂不能車の抑制に関する検討 ～冬期登坂不能車データ集積による登坂不能車マップ作成及び分析～	国土交通省 北陸地方整備局 北陸雪害対策技術センター 北陸技術事務所 雪害防災減災課	小泉 倫彦 神代 悠介	269
37	非積雪寒冷地の無人 S I C の対策とその結果検証	中日本高速道路株式会社 名古屋支社 羽島保全・サービスセンター 施設課	峰尾 竜哉	273
38	E41 東海北陸自動車道 白鳥～飛騨清見間の 4 車線化に伴う雪氷対策作業の効率化について ～4 車線化事業により雪氷対策作業はどう変わったか～	①中日本高速道路株式会社 名古屋支社 高山保全・サービスセンター ②中日本ハイウェイ・メンテナンス名古屋株式会社 高山事業所	①新家 俊明 ①濱中 亨 ②下嶋 稔	277
39	矢板工法トンネルの漏水対策～つららをなくせ～	中日本高速道路株式会社 技術・建設本部 技術支援部	山崎 哲也 八木 弘	281

道央道の豪雪区間（岩見沢）における冬期交通確保の向上にむけた取り組み ～気象情報収集ツール（SIGN）を活用した雪氷対策作業の事例報告～

北川 純一*1 本多 裕*1 上杉 隆則*2 岩井 佑樹*3

1. はじめに

広大な北海道の高速道路は、道都札幌を中心として、東西南北に主要都市間を結び、都市間の物流、空港・港湾アクセスなど経済や生活活動の重要な交通インフラとしてネットワークされている。特に東日本高速道路（株）岩見沢管理事務所（以下、岩見沢（管）という。）が維持管理する道央自動車道（以下、道央道という。）札幌IC～奈井江砂川IC間（図1）は、旭川・稚内などの道北方面や北見・網走の道東方面のアクセスの起点部を担っている。日断面交通量は約13,000～19,000台の交通量であり、特に都市間高速バス（1日あたり約300便）やトラック・営業車などの商業ドライバーが交通の多くの割合を占めている。

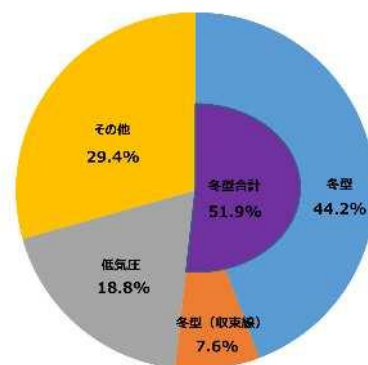


図2. 気象特性分布（平成26～30年度）



図3. 石狩湾収束線のメカニズム

図1. 北海道の高速道路ネットワーク

北海道における冬期の気象特性分布（図2）によると、冬型気圧配置が約半数以上を占めている事が分かる。

岩見沢（管）管内は、冬型気圧配置になると断続的に雪雲が流れ込みやすい地形であり、道内でも有数の豪雪地帯として知られている。その中でも特に、石狩湾収束線（以下、「収束線」という。）と呼ばれる石狩湾上で風がぶつかり合うことで発生するライン状の雪雲（図3）が、管内へ時間3cmを超えるような降雪（以下、「強雪」という。）をもたらし、降雪に起因した交通事故による「事故通行止め」や長時間の「吹雪通行止め」となることがある。そのため、気象情報を効率的に収集し予測することで、作業の時間の短縮や雪氷対策作業の効率化を図っていく事が重要であると考えられる。

そこで、気象情報収集の効率化及び雪氷作業の高度化を図るために、リアルタイムな気象予測と周辺の気象を一括監視するための除雪作業支援コンテンツ「SIGN（Switch operation Immediately Get ready for Notification alert）」を立ち上げた（「2015年ゆきみらい」論文報告）。本論文では、平成26年以降に、SIGNを活用した雪氷対策作業に関する取り組み内容を報告する。

2. 気象情報収集ツール（SIGN）について

収束線は、刻一刻と南北へ移動したり停滞を続けるため、位置の特定をすることが非常に難しい。さらに強弱をつけながら雪を降らせたり、風速についても一時的に強くなることから、突然の吹雪となるケースも存在する。従って、通行止めの長期化や除雪作業の遅れ等にも繋がっている。そのため、収束線の状況をリアルタイムに捉え、広域且つ

- *1 東日本高速道路株式会社 北海道支社 道路事業部 保全課
- *2 東日本高速道路株式会社 北海道支社 岩見沢管理事務所
- *3 株式会社ウェザーニューズ

複数の実況データを1画面に一元化し、効率的な情報収集を行うとともに、短期のリアルタイム降雪予測を行う事が重要となってくる。収束線の雪雲は、風上にあたる石狩湾から本線に流れ込むため、高速道路上の変化を捉えるには、石狩湾周辺の状況を把握することが重要である。そのため、岩見沢（管）管内の気象特性や前述の課題事項を踏まえ、収束線発生時における通行止め条件や石狩湾沿岸及び高速道路上の気象との関連性などを調べ、過去のデータ整理・分析を行った。

その一例として、平成25年3月21日に発生した多重事故による通行止め前の風上にあたるアメダス観測局（浜益）と高速道路上の気象観測局（幌向川）の風の状況を分析（図4）した。これによると、風速のピークは浜益で6時頃、幌向川で7時頃であった事がわかり、日本海から雪雲が到達するまでの時間（以下、リードタイムという。）を確保でき、作業開始の時間を早められる可能性があることがわかる。

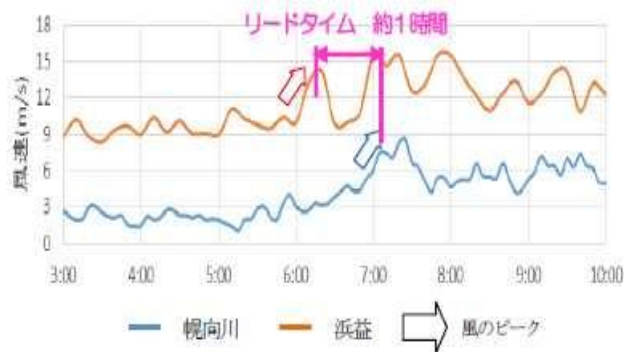


図4. 平成25年3月21日の風の状況

同様に、平成29年1月11日のアメダス観測局（石狩）と高速道路上の気象観測局（幌向川・岩見沢）の風の状況を分析（図5）した。風速のピークは石狩で4時頃、幌向川・岩見沢で5時頃であった事がわかり、同様にリードタイムが確保できていることが確認できる。

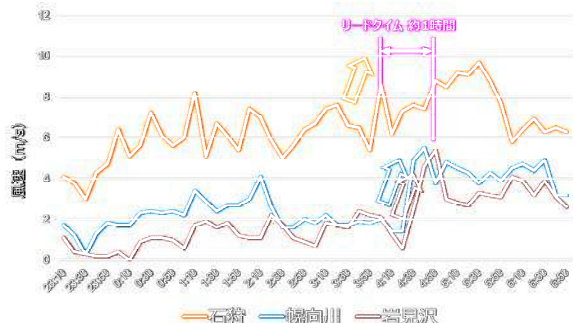


図5. 平成29年1月10日～11日の風の状況

さらに、平成23年から平成25年までの過去3年間の通行止め事例において、風上側である石狩湾沿岸のアメダス観測局データを分析し、リードタイムが確保できるか検証を行い、高速道路上への影響（通行止め実施・解除）となる風向風速の目安を算出した。その一例として、ア

メダス浜益と高速道路上（岩見沢IC～三笠IC）に対する分析結果（図6）を示す。



図6. 岩見沢IC～三笠ICに対するアメダス浜益風速分布

アメダス浜益の平均風速が11m/s以上、風向が西北西になると、その後、本線上でも風が強まり、吹雪が発生する目安となる事を表している。

次に、特性分析の結果を踏まえ、除雪作業開始判断や通行止め解除の判断など雪氷対策作業の戦略や通行止め時に必要となる気象データ及び見やすさなどのビジュアル面の整理を行い、石狩湾沿岸と高速道路上の気象状況を一元的に監視できるコンテンツを構築した。

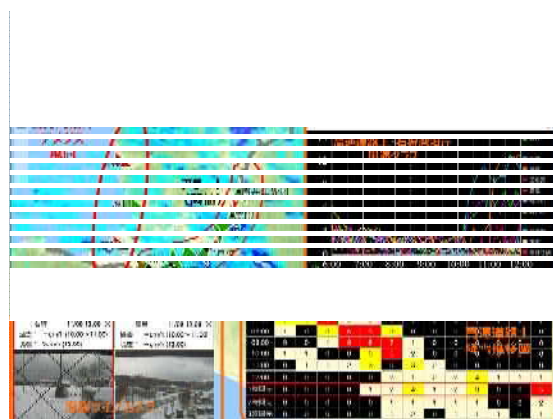


図7. 除雪作業支援コンテンツ（SIGN）

SIGNの構成は、石狩湾沿岸に設置されたカメラ（留萌・浜益・厚田・石狩など）、広域レーダー画像、石狩湾沿岸のアメダスと本線気象観測局（風速）、本線積雪深及び3時間先までの降雪予測からなり、閾値（吹雪や強降雪の目安値）を超過した際にアラートによる注意喚起を行う仕組みとなっている。平成30年度までに、必要となるアメダスやライブカメラの地点の見直しを行い、改良を進めてきている。

あわせて、岩見沢（管）では除雪方法と基地体制の見直しを進め、堆雪部先行拡幅除雪（パワー除雪、図8）の導入や除雪作業体制を分散させた上下線の同時除雪などの除雪作業の効率化を図ってきている。

以上のことから、収束線が予想される際には、雪氷担当者がSIGNを監視し気象変化を把握することで、移動する雪雲に迅速に対応するためリアルタイムな気象予測を

入手した。これらをもとに、降雪区間に除雪車を集中配備し、雪氷巡回や除雪作業開始の判断を行っている。



図8. パワー除雪の様子

3. SIGNを活用した雪氷対策作業の事例報告

岩見沢（管）管内において、SIGNを活用して効率的な雪氷対策作業を実現した事例を報告する。通行止めの可能性があった条件下において通行止めを防ぐことができたり、通行止め時間の短縮にも寄与出来た事例を対象とする。

（1）平成30年11月23日（冬型気圧配置）

本事例は、北海道上空1,500m付近に-12度以下の寒気が流れ込んだ強い冬型の気圧配置となり、石狩湾収束線が形成された。図9に示すように、上空の風は西北西であり、岩見沢IC～美唄IC周辺に雪雲が断続的に流れ込んだ。

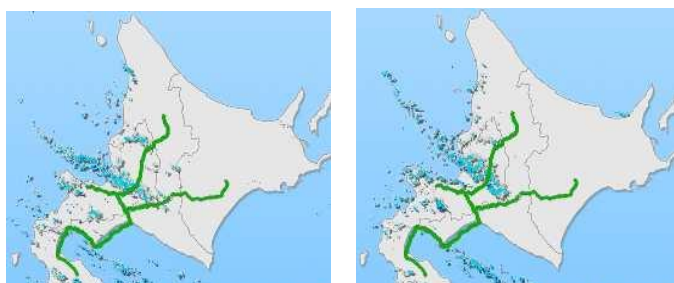


図9. 雪雲の様子（左：15時、右：17時）

当時のSIGNによる監視（図10）では、吹雪の予兆アラートと合わせ、石狩湾沿岸の厚田・石狩の風速が通行止め可能性相当で変化していた。

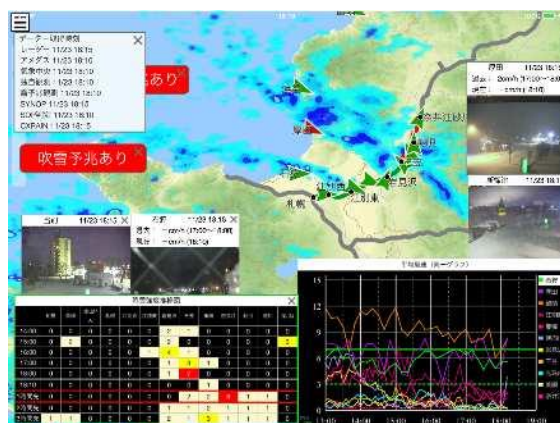


図10. 当時のSIGNの画面（23日18時現在）

また、岩見沢IC～美唄ICにおいて、断続的に降雪が予測されていたことから、同区間へ除雪車を集中させ、集中的に除雪作業を実施した。実際に、強雪が続いたが、事故を誘発するような積雪路面を防ぐ事ができ、雪による通行止めを防ぐ事が出来た。

（2）平成30年11月24日（冬型気圧配置）

本事例は、北海道上空1,500m付近に-12度以下の寒気が流れ込んだ強い冬型の気圧配置となり、石狩湾収束線が形成された。図11に示すように、上空の風は西北西であり、岩見沢IC～美唄IC周辺に雪雲が断続的に流れ込んだ。また、当時の雪氷巡回の写真（図12）から、現場は吹雪となっており、路面にも積雪が確認できる。



図11. 雪雲の様子（左：0時、右：3時）



図12. 当時の巡回の様子（三笠IC～美唄IC間）

当時のSIGNによる監視（図13）では、吹雪の予兆アラートと合わせ、岩見沢IC～美唄ICに断続的に雪雲が流れ込むことを予測していたことから、同区間へ除雪車を集中させ、集中的に除雪作業を実施した。

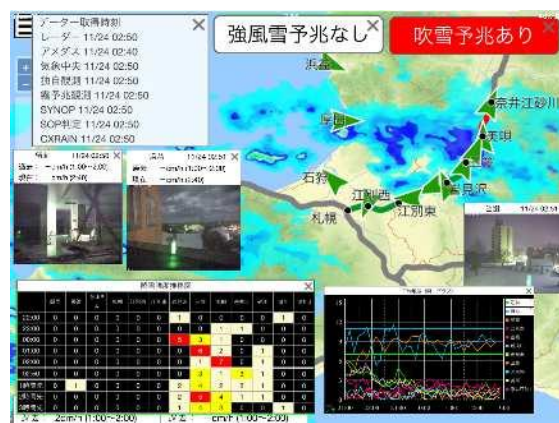


図13. 当時のSIGNの画面（24日03時現在）

さらに、強雪が見込まれることから、拡幅作業を同時に実施した。実際に、強雪が続いたが、事故を誘発するような積雪路面を防ぐ事ができ、雪による通行止めを防ぐ事が出来た。

(3) 平成30年12月9日（冬型気圧配置）

本事例は、北海道上空1,500m付近に-15度以下の寒気が流れ込んだ強い冬型の気圧配置となり、石狩湾収束線が形成された。図14に示すように、上空の風は西よりであり、岩見沢IC～美瑛IC周辺に雪雲が断続的に流れ込み、時間5cm相当が継続し、同区間にて吹雪通行止めとなった。

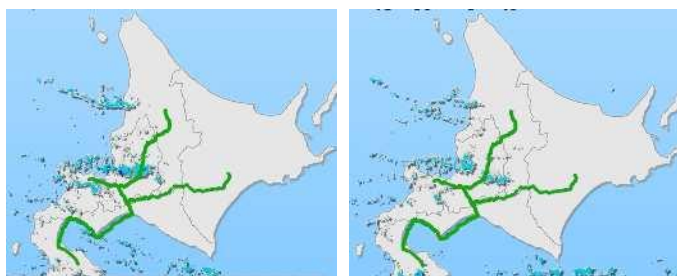


図14. 雪雲の様子（左：12時、右：15時）

当時のSIGNによる監視（図15）では、吹雪の予兆アラートと合わせ、岩見沢IC～美瑛IC周辺に断続的に雪雲が流れ込むことを予測していた。当時は、石狩湾沿岸の風が非常に強く、現場では地吹雪となっていた。そのため、同区間では視程不良に伴う吹雪通行止めとなっていた。



図15. 当時のSIGNの画面（09日12時現在）

風上の風速の弱まりに着目し、解除タイミングの見極めを監視した。解除目安である基準を上回る状況が続いていたが、15時頃から石狩湾沿岸の風が弱まったため、視程回復の可能性を見極め、降雪が続く状況の中、吹雪による通行止めを早期に解除する事が出来た。

4. まとめ

SIGNを活用することで、収束線発生時における石狩湾沿岸の風の予兆から、高速道路上への影響を把握することができ、結果として通行止め回避及び通行止め時の早

期解除に貢献できた。今後、リスク管理の強化を行うために事例を蓄積し、より幅広い雪氷対策作業の実現を目指す。また、分析を重ねることで、内陸冷氣に伴う吹き出しが弱まり風向が変化したのち、札幌JCT付近への収束線の流れ込みや小低気圧発生及び通過に伴う強雪となる傾向が見えてきた。これらを踏まえ、各アラートの条件見直しを行い、各気象現象における着眼点の整理や監視要素を追加を行っていく。

また、北海道支社内においては、平成29年度より、岩見沢（管）管内と同様に豪雪区間を抱える旭川管理事務所や札幌市内から新千歳空港へのアクセス路を管理する札幌管理事務所向けにSIGNの試行導入を行った。両事務所においては、岩見沢（管）管内と同様に石狩湾から流れ込む収束線の把握が重要となっており、リスクがある区間のアラートをさせる仕掛けとなっている。引き続き、試行導入したSIGNを使用しながら、岩見沢（管）管内と同様に評価を進め、各事務所毎のアラートの条件など検証を行う。

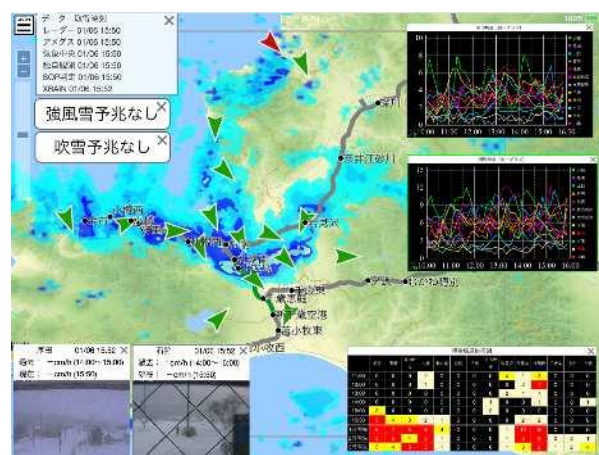


図16. 札幌（管）にて試行中のSIGN（1月6日16時現在）

5. 今後の展開にむけて

SIGNを活用し、石狩湾収束線の動向を把握することに効果があることは継続的に確認できた。また、それに応じた、除雪作業の効率化にもつなげることができた。一方で、現在は、現地での活用面に関する運用に課題が残った。合わせて、人事異動に伴う技術継承のために、SIGNの活用度向上のための研修も必要になってくると思われる。コンテンツ面においても、必要な情報を整理して、コンテンツの充実化や現場での活用できる仕掛けを考察したい。

また、北海道支社においては、冬型時における交通確保が他事務所管内においても重要なテーマである。同様に、各々の過去事例を分析し、他事務所への展開など、冬期の交通確保に向けて引き続き検討を進めたいと考える。

雪氷作業の高度化と効率化に向けた技術開発と情報提供について

吉永 創、川畑 貴義、山口 隆志、竹内 茜、大鹿 美希*1

1. はじめに

昨今の異常気象による気象現象の極端化に伴い、2019年夏期には台風15号や19号などによる大規模災害が多発したが、冬期においても例外ではなく、2018年1月22日の南岸低気圧による首都圏大雪事例や同年2月5～8日の福井豪雪など、記録的豪雪の発生が増加する傾向にある。豪雪の発生は特に道路における影響は大きく、路面積雪や路面状況悪化により事故やスタック車両が発生し、長時間の車両滞留等や通行止めとなり、経済や一般生活に甚大な影響が出た。このような豪雪に対する安全な道路交通を確保するためには、豪雪の発生による路面積雪や路面状況悪化を早期把握し、迅速かつ的確なタイミングで雪氷作業を行うことが求められる。この路面積雪や路面状況悪化の把握は、現状は積雪深計などの気象観測機やライブカメラなどが用いられるが、いずれも路面積雪や路面状況悪化が発生したあとに観測データやカメラ画像で判断することとなるため、雪氷作業へのリードタイム確保に課題がある。

一方で、雪氷作業オペレーターの高齢化による生産年齢人口の減少や高度な運転技能が求められる雪氷作業オペレーターの技術・技能伝承も大きな課題とある。雪氷作業出勤の判断材料となる路面積雪や路面状況悪化の判断は、経験ある雪氷作業オペレーターの目視判断に依存するところが大きく、かつ雪氷作業の対象路線すべてを監視し判断することは現実的には難しい。

これらの課題を解決するため、最新の気象観測・解析技術を用いた路面積雪や路面状況悪化を早期把握する手法と、雪氷作業の意思決定に直結する情報提供を開発し、雪氷作業の高度化と効率化を目指す。

2. リアルタイムかつ的確な路面状態の把握

2.1. 背景

現在、雪氷作業判断は、主に気象予測と気象観測機及び定点ライブカメラや巡回による目視によって行われている。このなかで、ライブカメラは路面状況悪化を最も確実に把握できる手段として有用であるが、数十カ所に及ぶライブカメラ画像を人の目視判断で確認するには限界がある。このため、ライブカメラ画像から雪質や路面状況の変化をいち早く察知するためにシステム面からの支援、特にカメラ画像の画像処理技術や人による判断をシ

ステム化するAIモデルの技術を適用していくことが、本課題への解決策になると考える。

近年では、人・顔・車などを認識するAIモデルの開発は進んでいる。しかし、路面に積もった雪の状態や雪質の状況を詳細に認識できる判定できるAIモデルはまだ存在していない。また、従来の画像処理の手法は、カメラのアングルや明るさの変化に対応できないため、アングルを頻繁に操作して監視を行う雪氷作業の業務実態に照らし合わせると、不向きな側面もある。

2.2. 技術的手法

AIモデルの設計を見直すとともに、雪質や路面状況の教師データをライブカメラ画像から抽出し、その教師データをAIモデルに学習させることで、カメラの向きや設置場所の変化に対応しながら、多様な雪の状態を認識できる世界初のAIモデルを開発した。このAIモデルにより、定点カメラの映像/画像から路面状態をリアルタイムに自動認識する「AI道路管理支援システム」のプロトタイプを開発した。(図1、2)。この「AI道路管理支援システム」を用いることにより、下記のような解析と活用が可能になると考える。

(1) 定点ライブカメラの画像を「AI道路管理支援システム」にて認識し、定点ライブカメラ周辺の道路の路面状況(乾燥、湿潤、シャーベット、積雪等)を自動解析し、その解析結果を遠隔地からもリアルタイムかつ定量的に把握することが可能。

(2) リアルタイムかつ定量的な路面状況が安定的に取得できることで、気象予測と組み合わせて道路の路面状態予測を行う場合の初期値として活用することで、より実態に近い路面状態予測への応用が可能。

(3) 数多くの定点ライブカメラ画像に対して、「AI道路管理支援システム」を用いて系統的に解析することで、人による判断では限界のある雪氷作業管轄道路内の広域な路面状況の早期把握が可能。

*1 株式会社ウェザーニューズ



図1. ライブカメラ画像

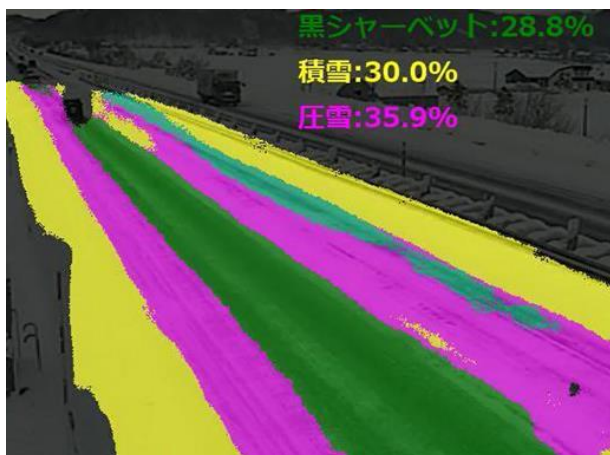


図2. 「AI道路管理支援システム」による画像解析結果

3. 雪氷作業を要する短時間強雪の早期把握

3.1. 背景

現在、雪氷作業の判断は路面状態の実況の変化を見て判断することに加えて、降雪が強まる時間帯・路線や降雪強度を把握する気象予測に知見・経験をさらに加えて路面状況悪化が予想される時間帯や路線を事前に判断し、雪氷作業オペレーターの配置や作業出動の指示を行っている。この判断において、雪雲が発生し流入する路線や時間帯に大きく依存する上空の風の動きを把握することは、非常に有効である。特に冬型の気圧配置時に広範囲で大雪をもたらすJPCZ（Japan Sea Polar Air Mass Convergence Zone：日本海寒帯気団収束帯、図3）が発生する場合、JPCZにより非常に発達した雪雲がライン上に形成され、雪雲が流入する路線で激しい短時間強雪が発生する。この雪雲が流入する路線や時間帯は、上空の風向風速の変化で大きく変化するため、停滞や移動を繰り返しながら流入する路線に短時間強雪をもたらし、急激な路面状況悪化を発生させる。前述の福井豪雪も、JPCZが発生し停滞することで、長時間に渡る短時間強雪が発生することとなり、大規模な滞留車両が発生する結果となった（図4、5）。

ただし、この上空の風向風速の変化を把握するには気象観測網が不十分であり、変化するタイミングや風向において事前に的確な予測を行うことが難しい。このため、気象実況の急変により雪氷作業を行うべき路線や時間帯に変化が生じ、路面状況の急激な変化への対応に支障が出る場合がある。



図3. JPCZのメカニズム

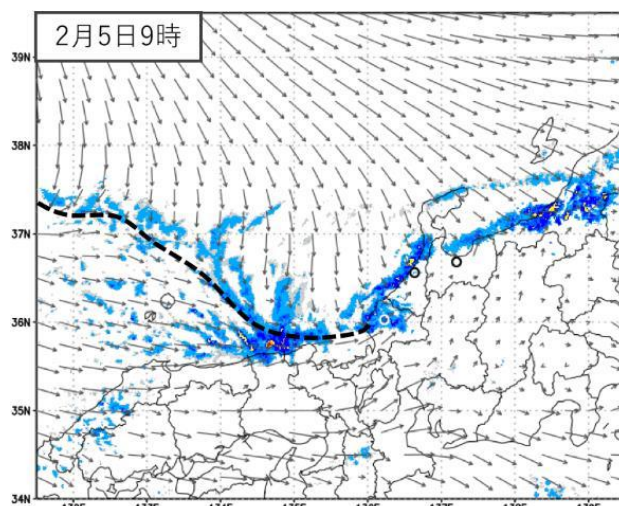


図4. JPCZによる雪雲の様子（点線がJPCZ）

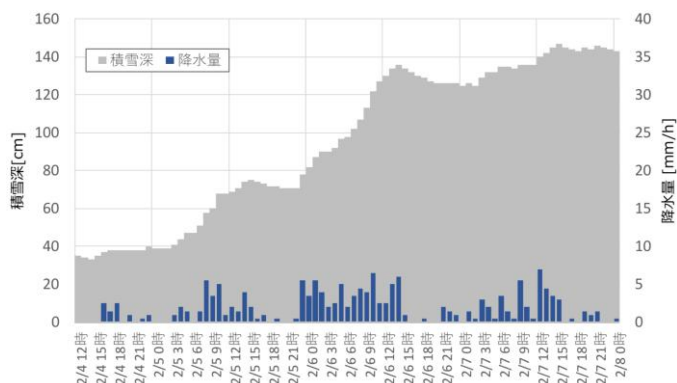


図5. 福井豪雪時のアメダス福井の積雪深変化

3.2. 技術的手法

この課題を解決するため、対象路線から見て雪雲が流入する上流側に位置する場所で、かつ上空の風向風速の観測に適した標高の高い箇所を現地調査より特定し、その箇所に気象観測機を独自に設置した。この観測データをリアルタイムで入手し、事前の予測が難しい微妙な風向変化・強雪有無を実況で早期に捉えることで、雪氷作業が必要な路線・時間帯を2～3時間前から「予兆」として解析し、予測と実況にずれが生じた際もリードタイムを確保した雪氷作業を支援できる技術を開発した。以下、その具体的な例を記載する。

中日本高速道路株式会社名古屋支社彦根保全・サービスセンター（以下、「彦根HSC」という）は、冬型気圧配置時に日本海からの発達した雪雲が若狭湾から琵琶湖の北岸～琵琶湖を抜けて管内に流れ込み、名神高速道路及び北陸自動車道のほぼすべて管内で短時間強雪が発生する。かつ、名神高速道路は日本有数の交通量を誇る大動脈であり、ノーマルタイヤで走行する車も非常に多いことから、ほんのわずかな路面状況の悪化に対しても交通に重大な支障をきたす可能性があり、雪氷作業管理が非常に難しい。このため、管内のどの路線・時間帯に短時間強雪が発生するかを特定することは、雪氷作業を支援するうえでは有用であり、彦根HSCから見て上流に位置する琵琶湖北岸の標高の高い地点への気象観測機設置が可能な場所の現地調査を行った。調査の結果、「箱館山」が観測機設置個所として最適であると判断し、箱館山山頂に独自に風向風速計とライブカメラを設置し（図6）、彦根HSC管内の短時間強雪発生の予兆観測が可能かどうか、観測データの収集・分析を実施した。

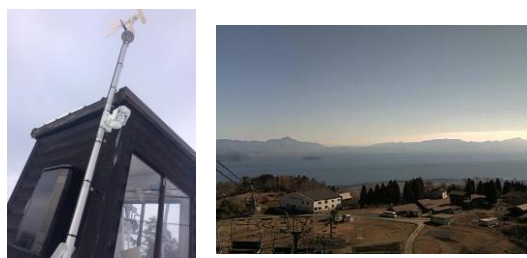


図6. 箱館山山頂に設置した気象観測機及びライブカメラ

この分析結果は以下の二つに大別される。一つ目は風向風速の分析結果である。箱館山の風向風速データを分析した結果、彦根HSC管内の雪の降り方の特性と関連性があることが判明し、箱館山が上空の風向風速の予兆観測点で有用であることが確認された。具体的には、ある一定以上の風速条件において、西寄りの風となる場合は北陸自動車道中心に雪雲が流入する。風速がやや弱まり北成分の風向となり始めると名神高速道路の関ヶ原方面にも流入が始まる。風速がさらに弱まり北寄りの風となる

と名神高速道路の八日市方面に雪雲が流入する。これを整理したのが図7である。



図7. 箱館山と彦根HSC管内の雪雲流入関係模式図

二つ目は、ライブカメラ画像の分析結果である。箱館山のライブカメラ画像と彦根HSC管内での降雪状況を分析した結果、彦根管内で路面積雪に至るほど強雪となる場合は、箱館山のカメラ画像で視界不良を伴う雪雲に覆われていることが判明し、箱館山ライブカメラ画像は、彦根HSCから見て上流側における強雪を伴う雪雲の有無に対する判定条件として活用が可能である。これをもとに、箱館山ライブカメラ画像を画像解析した結果、日中は山の稜線（図8）、夜間は電灯の光（図9）に着目して判定を行うことで、箱館山周辺での雪雲有無を検知することに成功した。

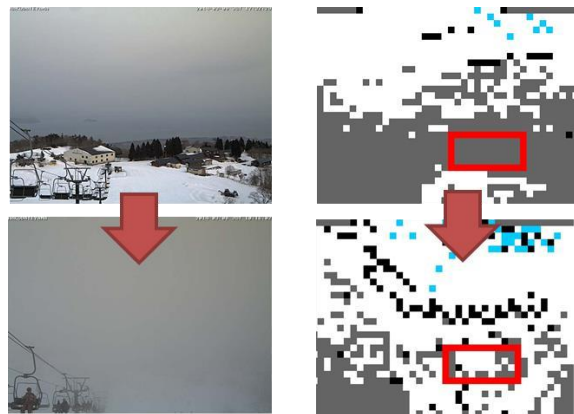


図8. 日中のライブカメラ画像の判定



図9. 夜間のライブカメラ画像の判定

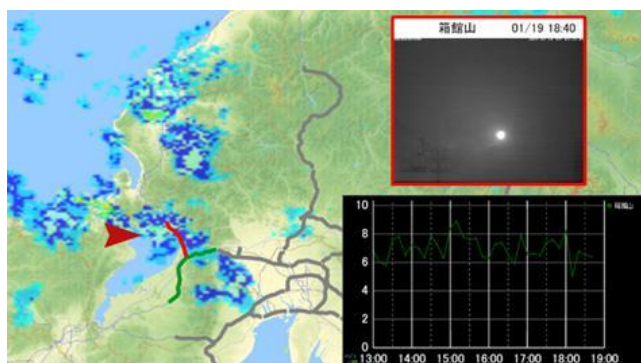
以上の二つの結果をもとに、彦根HSC管内で積雪を伴う雪雲流入の条件を表1の通り整理した。

表1. 箱館山風向風速計及びライブカメラ画像判定による彦根HSC管内への雪雲流入条件の関係

対象路線	作業判定	箱館山ライブカメラ降雪判定	箱館山風向	箱館山風速
米原JCT～長浜 長浜～木之本	除雪	有	西	5m/s以上
			西北西	5m/s以上
関ヶ原～米原JCT 米原JCT～彦根	除雪	有	西	5～8m/s
			西北西、北西	5m/s以上
彦根～八日市	除雪	有	北西、北北西	5m/s以上

4. 情報提供

表1のとおり、箱館山風向風速計と彦根HSC管内の強雪との関係性が条件化されたため、この条件に合致した場合に強雪の発生する路線を、予兆として事前にアラートする監視システムも開発した。このシステムはSIGN（Switch operation Immediately Get ready for Notification alert）というもので、タブレット端末等で情報提供可能なものとする事で、彦根HSC職員や雪氷作業オペレーターにとっても監視等に活用しやすいシステムとし、迅速な判断が求められる雪氷作業判断のリードタイム確保の支援を行った（図10）。



作業判定	対象路線
平常	関ヶ原IC～米原JCT
除雪	米原JCT～彦根IC
除雪	彦根IC～八日市IC
除雪	米原JCT～長浜IC
平常	長浜IC～木之本IC

図10. SIGNの画面例

整合を行い社内検証を進め、2020年度雪氷期における本システム開発を目指すものとする。

5. 今後の展望

雪氷車両オペレーターの生産年齢人口の減少や技術・技能伝承の課題に対して、将来的には人材不足や知識・経験不足による影響が出ない雪氷車両の自動運転化を取り入れることが解決策の1つとして考えられる。この解決策を実行するには、リアルタイムで的確な路面状態の把握と除雪作業を要するタイミング・区間の早期把握とを合わせることが必要となってくる。さらに、AI道路管理支援システムによる路面状態の把握については、固定のライブカメラ画像の解析だけでなく、巡回車両などに設置した動画カメラ映像を解析することで路線全体の路面状態把握を目指す。また、SIGNについては、今後は気象観測データに加えて路面状態把握の結果もシステム化し、路面状況の急変に対する迅速かつリードタイムを確保した雪氷対策の支援につながるシステム強化を図るものとする。

2. のリアルタイムかつ的確な路面状態の把握（AI道路管理支援システム）については、完成したプロトタイプ版の検証を目的に、2019年度雪氷期において彦根HSCのご協力を頂き、道路巡回による路面状態実況データとの

新潟県における冬期道路交通確保と ICT 技術を活用した防災教育の取り組み ～円滑な道路交通確保に向けた雪崩災害対応と今後の除雪体制維持に向けて～

吉田 あみ*1・町田 敬*2・竹内 祐貴*3

1. はじめに

我が国屈指の豪雪県である新潟県では、30市町村全てが豪雪地帯対策特別措置法に基づき豪雪地帯に、さらにそのうち18市町村が特別豪雪地帯に指定されており、冬期積雪期における道路交通確保は、県民の日常生活や社会活動を維持するためにきわめて重要である(図-1)。毎年定める新潟県管理の冬期道路交通確保計画では、機械除雪を主体に、消雪パイプ、流雪溝等の消融雪施設の有効利用を図りながら、道路管理者相互の緊密な連携のもとで効率の良い除雪を目標としている。平成30年度は、車道確保計画の管理道路実延長は5364.1kmで、そのうち除雪計画延長は4554.4kmにも及ぶ。

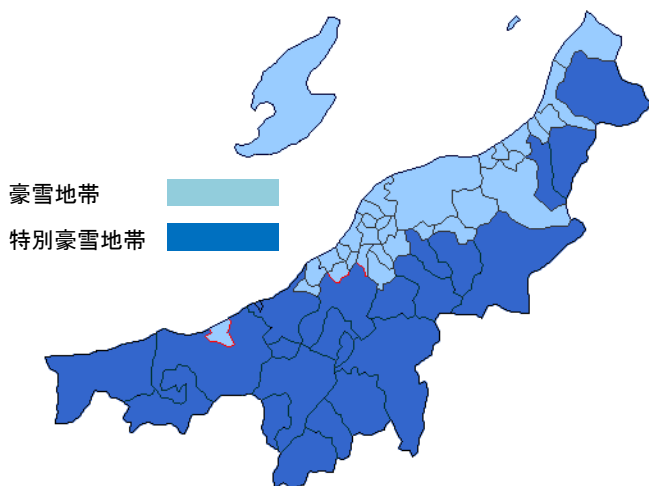


図1 新潟県（豪雪地帯 一全県指定）

2. 新潟県の冬期道路交通確保と雪崩災害

2.1 冬期道路交通確保計画と雪崩災害

前述のとおり、新潟県は全国有数の豪雪地帯であり、円滑な冬期道路交通確保に努めているが、雪崩による通行規制は毎年のように発生している。2018-19 年冬期の降雪状況は、過去 10 ヶ年と比較してもやや少雪であったが、新潟県が管理する道路においては、雪崩発生及び雪崩の危険性により 20 件の通行規制を実施した(図-2)。こうした現状に対して雪崩による被害を減らすために、施設整備等ハード面の雪崩対策事業に加えて、雪崩パトロールや雪底処理等、日常的な維持管理として応急対応も積極的に行っている。県内地域整備部においては、雪崩発生のおそれのある道路において、斜面の積雪や植生の状況、施設効果を的確に把握し、発生の危険が認められる場合は速やかに適切な措置を講じ、冬期交通の安全確保を図ることを目的とし、雪崩パトロールを実施している。平成 30 年冬期道路交通確保計画においては、全県で 231 箇所の道路雪崩パト

ロール箇所を定めている。出動基準は積雪量、降雪量、気温上昇により雪崩発生の恐れがある場合としているが、地域特性、地形により統一基準は定めていない。また、通行止め基準も同様に、地域毎に斜面状況、発生履歴から判断を行う。適切な措置としては、雪底処理や雪堤設置が主な応急対応となる。ま H30 年度の雪底処理費用は約 4 億円だが、道路事故防止や通行止めによる社会活動に対する経済的損失を防ぐため、適切な管理が求められている(写真-1、2)。

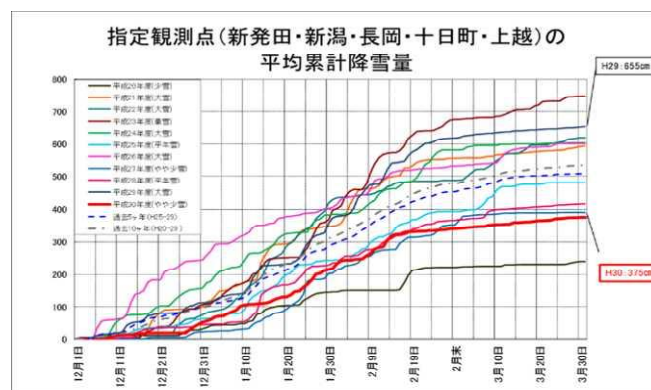


図2 過去10ヵ年の新潟県平均累計降雪量



写真1 橋梁部の維持管理（雪底処理）状況



写真2 斜面の維持管理（雪底処理）状況

*1 新潟県土木部道路管理課雪寒事業係, *2 町田建設株式会社, *3 株式会社長岡計器

2.2 ICT 技術を活用した規制解除及び雪崩災害対応

雪崩パトロールは春先の冬期通行不能区間の規制解除前にも実施している。近年ではマルチローター方式の無人航空機（Unmanned Aerial Vehicle：以下「UAV」）を活用し、斜面を上空から確認する取り組みも行っている。規制解除前に道路上から確認できない斜面上部の積雪状況等を確認し、除雪作業の安全性を確保するものである。また、同様に雪崩災害時にも UAV を使用し、通行規制後、二次災害発生の恐れがある場合の現地確認や目視ができない発生源の確認等を行い、規制解除の判断として活用している。平成31年2月には、十日町市で大規模雪崩が発生し、全面通行止めを実施したが、UAV を活用した現地確認により、迅速な規制解除となった。また、規制解除後も定期的に上空からの定点観測を行うことで、監視体制解除の有用な判断材料となった。このような ICT 技術を活用することで、雪崩災害の軽減や迅速な通行規制解除の判断を行うことができる（写真-3、4）。



写真3 UAVによる上空からの雪崩発生斜面状況確認



写真4 平成31年2月の雪崩災害(国道353号,十日町市)

3. 雪崩防災教育の取り組み

3.1 官民連携による雪崩対応訓練

新潟県南魚沼地域整備部では、平成29年及び30年に職員を対象とした雪崩対応訓練及び講習会を実施した。この訓練は、災害発生後の初動対応や情報伝達について

考察すると共に、本活動を通じて平時から地域整備部職員および関係者の危機管理対応力の向上を図ることを目的としている。講習会には南魚沼地域整備部ほか、消防本部、警察署、市役所、雪崩専門家等が参加し、雪崩対応訓練を実施した。国道が雪崩により全面埋塞したという想定の下、南魚沼市消防本部及び地域整備部職員が出勤し、以下のフローで訓練を行った。



図3 訓練当日のフロー

訓練の実施状況は以下のとおりである。

13:00～13:05

一般通行車両の運転手が発見、地域整備部に通報。同部から関係業者へ情報を伝達、かつ現地への出勤を要請。

13:20～13:30

関係者が現地へ集結して現地対策本部を設置。現場で雪崩発生状況や被災状況等を確認、通行規制実施。

13:30～13:55

人や車両等が雪崩に巻き込まれていないか確認。ゾンデ棒による搜索訓練開始。雪崩に埋もれた被害者（ダミー人形）を発見、病院へ搬送。



写真5 雪崩対応訓練の全景

14:05～14:15

搜索活動の終了を受け、残雪処理、道路上の排雪作業。

14:20

道路の安全を確認、通行規制を解除し、関係機関に通知。

現地対策本部を解散して訓練終了。



写真6 雪崩対応訓練救助隊の様子

3.2 防災教育による雪崩災害対応の有用性

本訓練は道路管理者、交通管理者、消防本部、除雪関係者が一堂に会して訓練を行った官民連携の点に最大の特徴がある。特に現地対策本部の指揮の引き継ぎについては、関係機関で意見交換を行い、役割分担と指揮系統の明確化について、対応方針を以下のとおりとした。

- ・人命救助及び搜索活動－消防本部
- ・排雪及び道路開放－道路管理者、除雪関係業者

また、現地対策本部の地域整備部職員については、指揮官、パトロール班、リエゾンの役割分担を明確にし、道路管理者と消防本部の引き継ぎを徹底した。このように道路管理者、消防救助関係者が一堂に会して雪崩対応訓練を行う事例は他になく、関係機関との横の連携を強化する貴重な機会であった。また本訓練を通じて日頃からの防災意識向上等、雪崩防災教育としての有用性が示された。訓練後には職員を対象とした UAV 機器操作、ゾンデ訓練、積雪観測研修を行い、初動対応や ICT 技術について理解を深める良い機会となった。

これら実働訓練の実施や講習会等により、平成 31 年 2 月に発生した雪崩災害においても適正な初動対応の成果が実証され、UAV 活用による雪崩斜面確認や規制解除、監視体制解除の判断や、関係機関との連携によるスムーズな通行規制や規制解除、搜索活動等の迅速な初動対応など、防災教育の有用性が示された。



写真7 雪のハンドテストを体験



写真8 ゾンデ棒による搜索体験

4. 冬期道路交通確保における課題への取り組み

4.1 除雪オペレータの人材確保チームの立ち上げ

新潟県では円滑な冬期道路交通確保に向けて、様々な取り組みを行っているが、現在、冬期道路交通確保において抱えている課題の一つが道路除雪オペレータの高齢化、オペレータの担い手不足である。これまで本県が実施してきた道路除雪オペレータ確保の取組としては、①基本待機料、固定費支払い制度の創設、②オペレータ技術講習会の開催、③将来の担い手となる高校生への除雪実習の開催などを行っている。しかし、除雪オペレータの年齢構成を見てもわかるように、担い手不足に伴う高齢化により、将来的な除雪体制の維持や技術の伝承が困難になるといった課題が浮き彫りとなっている。



図3 新潟県管理道路の除雪オペレータ年齢構成

現在の水準を保ったまま機械除雪を行った場合、15年後には道路除雪オペレータが不足するという推計もあり、この将来的な課題について検討策を見つけるべく、令和元年度、新潟県若手職員による政策提案推進事業の一環として、建設産業活性化に向けた除雪オペレータの担い手確保プロモーションチームを立ち上げた。

4.2 担い手確保の課題に対する検討

本チームでは、除雪の水準を落とさず、将来的な除雪

労働力確保に向けて先を見据え、中長期的な実現可能な人材確保、育成に関する項目において提案と検証を行うこととし、以下の手順で検討を行っている。

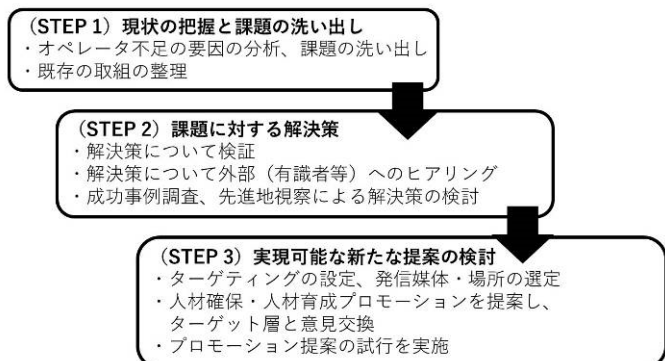


図4 担い手確保の課題に対する検討フロー図

まずは現状の把握として、要因と課題について、洗い出しを行ったところ、除雪オペレータ減少の要因は

- ①社会的人口の減少
 - ②県道除雪を担う建設産業への入職者数の減
 - ③将来の担い手に対する理解不足（除雪の重要性）
- また、除雪オペレータ減少の課題への取り組みとして
- ①設産業への入職者増とオペレータ確保（魅力 PR）
 - ③除雪オペレータへの意識・関心を深める広報
 - ④除雪作業の効率化（AI、IoT 技術活用）

を定めた。その他、他産業からの人材確保についても検討を行った。現在、建設産業以外で新潟県管理道路の除雪に従事している除雪業者数は、全 351 社の内、全体の 3%に留まっている。そこで、垣根を越えた人材確保に対する取り組みが可能か、冬場が繁忙期となる除雪と反対に夏場が繁忙期である農業、林業、水産業の県内就業人口について確認したが、農林業や漁業の高齢化率は建設業よりも高く、将来的な担い手不足は同様の傾向であり新たな分野との共存や新たな提携による取り組みについても今後の検討課題の一つであると認識した。

4-3 実現可能な新たな提案の検討

(1) AI・IoT 技術の活用による除雪体制維持

現在、除雪作業はオペレータと助手の 2 名体制が原則だが、自動運転やカメラ等の活用により 1 人乗車による対応が可能か検討する。また、除雪機械の位置情報の蓄積によるルート最適化や気象予測情報の精度向上による除雪オペレータが減少しても除雪体制が維持できるような取り組みを行うため、産官学による共同研究を検討している(図 5)。

(2) 広報による除雪オペレータ予備軍への取り組み

将来の除雪オペレータとなる小中学生をターゲットとし、除雪に興味を持ってもらうための広報についても検討を行っている。除雪の理解を深める小中学生向け

の教材や広報媒体、除雪オペレータのモチベーションが上がるためのコンテストや、イベントカーやアニメ、ゲーム活用、建設産業の地位向上に資する新たな視点も視野に入れた検討を進めていく。



図5 除雪稼働状況管理システムの活用イメージ

5. おわりに

現在、新潟県土木部においては、担い手確保に係る取り組みとして、マンパワーアップ総合支援事業やコミュニケーション行政推進事業により、土木行政 PR 講座や若者、女性入職促進 PR 事業などを促進している。将来の担い手確保は、建設産業全体における喫緊の課題の一つでもある。少子高齢化に伴い、建設産業及び除雪オペレータがやりがいを持ち、魅力のある産業として持続的に継続していけるよう、関係者一丸となって取り組む必要がある。

また、新潟県における円滑な冬期道路交通確保に向けた取り組みは、人材育成から技術力の伝承等、その意義は極めて大きい。新技術活用による効率化や職員の負担軽減、関係機関との連携強化は今後のキーワードである。将来を見据え、安全・安心な冬期道路交通確保を進めていくため関係機関と連携し、新潟県として今後も継続的に取り組み、冬期の円滑な道路交通の確保に向けて努めていく。

道路施設における冠雪対策試験の観測結果について 滑雪性能の検証

小野 政利 *1 明田 剛史 *1

1. はじめに

降雪地帯における冬季の道路施設（雪底防止板や案内標識）の着雪後の落雪により、通行車両が損傷する事象が起きている。

その対策として冠雪しにくい形状にすることが考えられるが、既設の施設では、現実的ではなく、その対応可能な対策が望まれている。

今回、既設の施設に対して着雪時間を短くする方法を探すことを目的としてシール系と塗料系に着目して試験施工を行ったので、観測結果を報告する。



写真1. 雪底防止板・道路案内標識への着雪・冠雪

2. 3. 使用材料

シール系材料7種類、塗料系材料3種類の計10種類の材料について観測した。

表1. 材料一覧

種類	開発会社	材料名	番号
シール系材料	A社	PET系フィルム	A-1
		オレフィン系フィルム	A-2
	B社	シリコンオイル溶剤希釈塗布	B-1
		シリコンレンジ/シリコンオイル溶剤希釈(少)塗布	B-2
		シリコンレンジ/シリコンオイル溶剤希釈(多)塗布	B-3
		シリコンゴム製シール材	B-4
		耐候PET/アクリル系ハードコート/フッ素系防汚添加剤	B-5
塗料系材料	C社	2液弱溶剤系合成樹脂クリア塗料	C
	D社	低汚染形セラミック変性弱溶剤フッ素樹脂塗料	D-1
		アルキド樹脂塗料	D-2

2. 4. 施工

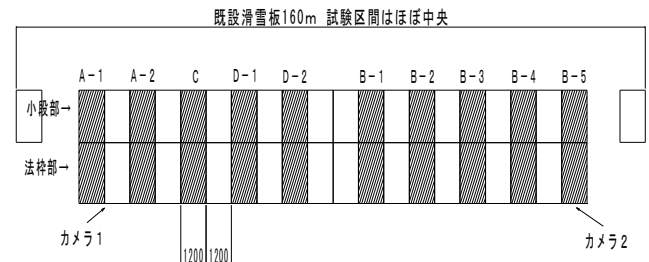


図1. 各材料の配置図

2. 試験の概要

2. 1. 試験場所

山形県西村山郡西川町本道寺地内の国道112号沿いにあるコンクリート製法枠上に設置されている滑雪板に対して実施した（図2参照）。

滑雪板は、アルミ積層複合板にフッ樹脂塗装が施されている。平成25年に設置され5年経過しているが着雪が見られ、それが成長して大きな雪塊となり落雪する前に人力で撤去している。

試験施工は滑雪板の角度が水平面に対し45°（小段部）と60°（法枠部）の2種類に対して行った。

2. 2. 試験期間

塗布・貼付時期：平成30年10月16日（Cのみ8月に実施）

観測時期：平成30年12月20日～平成31年2月18日

（カメラによる観測は、前後1か月近くあるが少雪のため整理を省いた。）

小段部と法枠部合わせて3.7m²に対して、各材料を塗布または貼付けを行った。

また材料毎に状況が干渉しないように施工幅と同じ1.2mの無処理箇所を設けた。

シール系・塗料系ともに同等の素地調整（汚れ落とし、脱脂）を行った。

観測内容は、1時間毎の写真データ（カメラ2台）、日時、気温を記録した。

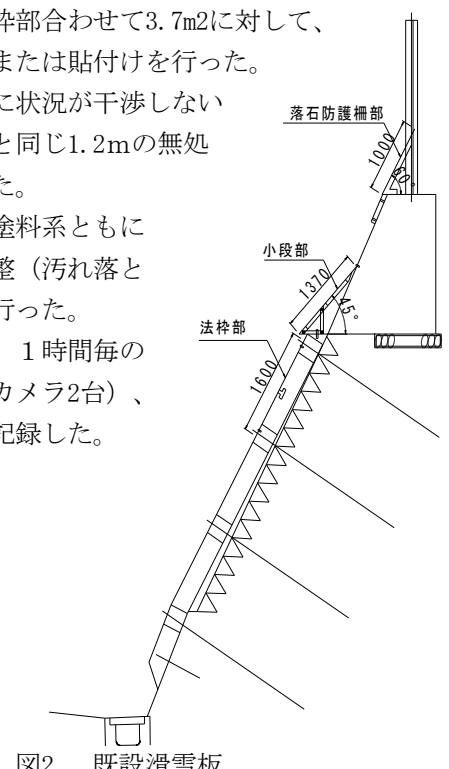


図2. 既設滑雪板

*1 日本サミコン株式会社 仙台事務所

3. 結果

表2. 各材料の施工工程

		シール系							塗料系		
		A-1	A-2	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	C	D-1	D-2
施工工程	素地調整	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	1層塗(貼)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2層塗								○	○	
	3層塗									○	

表3. 観測結果一覧表

No.		落下物防止柵部	A－1	A－2	C	D－1	D－2	B－1	B－2	B－3	B－4	B－5
滑雪開始 気温(℃)	Av.	1.49	1.10	0.84	1.04	1.01	1.73	0.90	0.54	0.05	0.81	1.62
	Min	-4.8	-2.3	-3.0	-4.6	-4.6	-1.8	-4.8	-4.8	-5.2	-5.2	-1.8
	Max	8.3	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	6.5	6.5	8.6	8.6
滑雪順番	Av.	2.59	2.28	1.84	2.03	2.00	2.69	2.39	2.25	2.04	2.29	2.96
	Min	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Max	5	6	5	4	4	6	5	4	4	4	7
滑雪時間差 (H)	Av.	0.00	-0.88	-1.44	-1.13	-1.22	-0.28	-0.64	-0.68	-1.07	-0.68	0.11
	Min	0	-18	-20	-20	-20	-10	-10	-10	-11	-10	-10
	Min(2)	0	-9	-8	-4	-8	-7	-6	-4	-6	-4	-2
	Max	0	4	4	4	4	5	5	6	5	5	5
種類	無	シール系			塗料系			シール系				
カメラ番号	-	カメラ1						カメラ2				



写真3. 試験箇所と無処理箇所

3.1. 施工性

塗料系（D-2除く）材料は、重ね塗りを行うために、前塗料の乾燥時間を必要とし、小さな面積の割には、時間を要した。

対してシール系材料は、液だれのための養生も必要としないため作業性はよかった。

また、A社の材料（シール系）は、親水性であるため湿潤状態での施工が可能である。

しかし、シール系材料は、小さなボルト部（凸凹）への対応に時間を要し、今後、検討が必要とされる。

3.2. 経済性

材料費のみで比較を行うと塗料系に比べ、シール系は5～8倍ほど高価である。シール系の作業の単純性を考慮しても、初期投資のみの経済比較は、塗料系が優位である。

3.3. 耐久性

耐久性は、1シーズンのデータでは判断が難しい。

3.4. 滑雪性

表3. は、具体的に性能の違いが分かるようにまとめた表である。

写真データ、日時、気温について着雪回数毎の滑雪開始時間、滑雪順番、滑雪時間差について、平均値（Av.）、最小値（Min）、最大値（Max）をまとめた（表3. 参照）。

10種類の材料の他に落石防護柵部（無処理）の場所についてもデータをまとめた。

写真3. でもわかるように各材料とも無処理個所に比べて、滑雪開始気温も含めた滑雪性（滑雪順番・時間

差の平均値)が発揮されていることがわかる。

しかし、どの材料も非着雪までの性能は見られず、ある温度帯以下になると着雪した(写真4. 参照)。

詳細観測時期として61日間の写真データを確認した。着雪回数は、カメラ1(32回)・カメラ2(28回)であった。カメラのレンズに着雪した時期があり、その際のデータは省いている。着雪回数に違いが出たのは、省いた日数の差である。

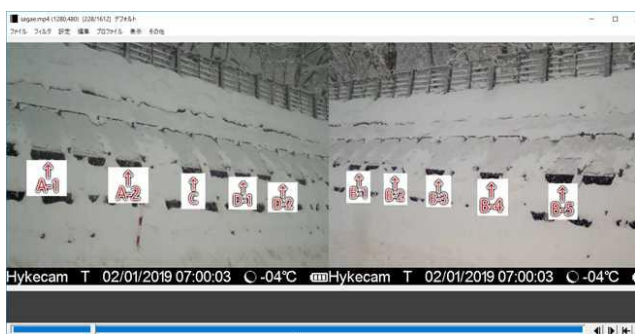


写真4. 全材料着雪した状況

滑雪開始気温は、着雪後、滑雪を始めた時点の気温とした。

滑雪順番は、1番初めに滑雪し始めた材料を“1”として、順番を付けた。観測は、1時間間隔で長かったため、すべての材料が“1”となることもあった。

滑雪時間差は、落石防護柵部が滑雪し始めた時間を基準(“0”)として、各材料毎に時間差を算出した。無対策部より先に滑雪始めてた場合はマイナス時間、無対策箇所より後になった場合は、プラス時間で算出した。

今回の試験では、12月末に大寒波が来て、着雪がはじまり、長時間の降雪と低温が続き、冠雪が大きくなった現象が見られた(写真5. 参照)。

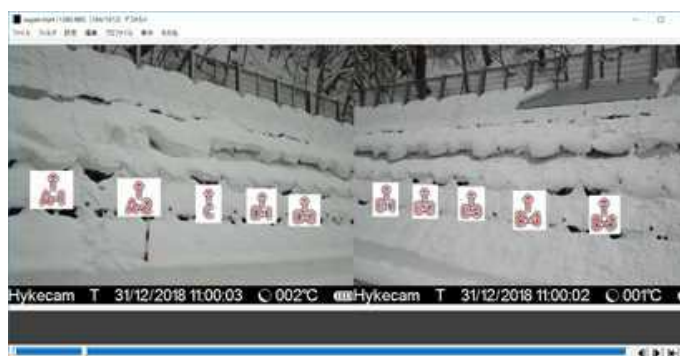


写真5. 冠雪が大きくなった状況

4. 考察

4.1. 施工性

単純な作業時間については、シール系・塗料系の差は小さい。

ただし、対象物に対して養生や足場の必要性などの現場条件によっては、シール系が有利になる可能性があることがわかった。

また、塗料系は、工場での塗布ではなく現地での作業になるので、作業経験の有無により均一な品質を保持できるか耐久性に対する影響を及ぼすことも考えられる。

それに対して、シール系は、単純作業なので作業経験の差による影響が小さいと思われる。

また、A社の材料(シール系)は、少雨での施工も可能であるため、塗料系と違い天候による制約は少ない。

4.2. 経済性

今回の試験施工では、材料価格の差があることがわかったが、性能や耐久性も含めた総合で比較するべきと考える。

4.3. 耐久性

3.の結果で述べた通り、次シーズンの観測結果を待ちたい。

4.4. 滑雪性

表3.の滑雪開始気温と順番の項目でもわかるように落石防護柵部(無処理)よりもほとんどの材料が低い気温で、早く滑雪し始めていた。

A-2のシール系材料は、他の材料に比べて滑雪する時間も順番も早いことが多く、無処理部に比べて平均1.44時間早く滑雪している(写真6. 参照)。

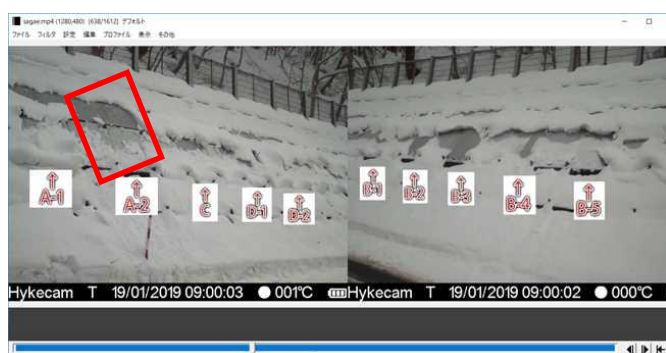


写真6. A-2が早く滑雪している状況

B-3のシール系材料は、他の材料に比べて低い気温で滑雪を始めていることが何度か確認されている。B-3・B-4のシール系材料は、滑雪開始温度が-5.2°Cを記録している。

低い気温で滑雪し始めるということは、着雪している時間が短くなると考えられる。

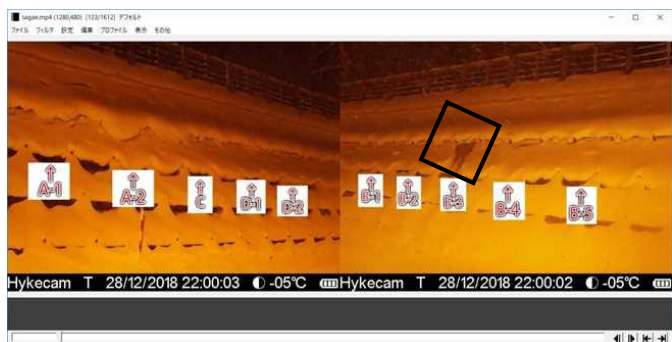


写真7. B-3の滑雪開始状況

写真内の温度表記は誤差が大きいことから今回の記録のまとめは温度計の温度を採用している

写真7. は、B-3のシール系材料が -4.1°C で滑雪したときの写真である。

平均滑雪開始気温が、結果的に“+”になっているが、少雪で暖冬傾向にあったため、滑雪開始気温が突然上昇している記録も存在しており、その数字が影響していることが考えられる。

ほとんどの材料は、小段部（ 45° ）より、角度がある法枠部（ 60° ）から先に滑雪していることが多かった。その中でA-2のシール系材料は、小段部の緩勾配でほかの材料より、先に滑雪する傾向にあった（写真8. 参照）。

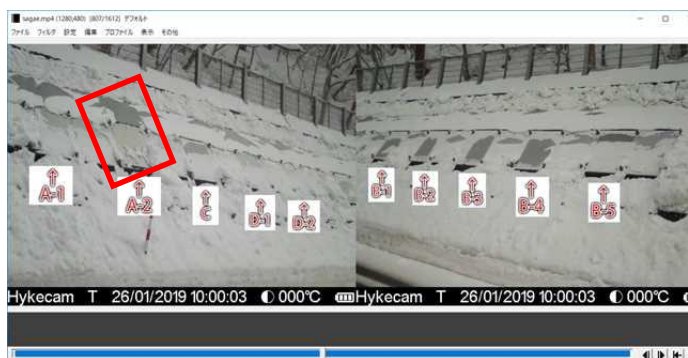


写真8. 緩勾配の部分がA-2のみ
早く滑雪している状況

今回の観測で、一番の問題は、マイナスの気温の際に降雪がはじまると対象物に着雪が始まり、マイナスの気温がそのまま続くと着雪した雪は大きくなり、滑雪しない状況が続くことが観測された（写真5参照）。その状態から気温が緩むと大きな塊のまま滑雪している。

5. まとめ

どの材料も差はあるけれども気温が -1°C 以上で滑雪する傾向にあり、 $-2\sim-4^{\circ}\text{C}$ で着雪が始まり、その気温が長く続くほど着雪量が多くなり、大きな雪塊になる。この滑雪する温度帯を広げることが課題と考えられる。

滑雪開始気温の平均値から、B-3のシール系材料が良い結果が得られている。滑雪順番・時間差の平均値では、A-2のシール系材料が特に良い結果が得られた。

このことにより、塗料系材料よりシール系材料の方が、滑雪性能が上回ることが見て取れるが、耐久性の評価を行い、総合的な判断が必要であると考えている。

今回の試験では、様々な材料について、実証フィールドでの確認ができ、1シーズンのデータではあるが、可能性のある材料も確認できた。

継続観測することで、性能及び耐久性がわかり、総合的な経済性の判断ができるものと考えている。この現場では次シーズンも観測を実施することが決定している。

シール系の材料については実際の使用に向けて、他にいくつかの実証フィールドにおいて観測をしていく予定である。

着雪、冠雪で苦労されている現場への普及を目指して様々な項目を確認し、実用化に向けて作業を進めていきたい。

今回の試験においては、道路管理者である国土交通省東北地方整備局山形河川国道事務所寒河江国道維持出張所様、および、維持工事会社である國井建設（株）様、また、材料を提供を頂いた各社様に大変なご協力を頂いたことに感謝申し上げます。

この試験結果が、各材料メーカー様の今後の製品開発の参考になることを期待したい。

冬期乾燥路面における残留塩分濃度測定方法の提案

小幡 洋介^{*1}、武石 眞博^{*1}

1. はじめに

名古屋事業所の管内は冬期は気温低下はあるものの除雪の頻度は少ない。しかし冬の晴天時には、鋼床版橋等の路温が急激に低下し、路面付近の水蒸気の結露に起因する無降水凍結に至る恐れがある。

当事業所では降雪予報がない日でも気温の低下が基準値を下回る場合は無降水凍結に備えて凍結防止剤散布を実施している。しかし、現在使用している塩分濃度計は試料が液状でないと使用できない為、乾燥路面に残留する塩分濃度の把握は困難であり、曖昧な経験的手法で凍結防止剤散布の頻度が決められていた。

そこで、乾燥路面の残留塩分濃度を定量的に現場で簡易に測定できる手法が求められていた。

2. 現在の路面凍結対策とその課題

現在の名古屋事業所の剤散布後の路面管理は巡回車による目視、路温測定、塩分濃度計による塩分濃度測定によって管理されている。この内塩分濃度の計測には一般的に用いられているATAGO S28Eを使用しているが、試料が液体に限定されることから、やむなくジョイントや轍の溜り水で計測していた。しかしこの溜り水は溶け出した塩が溜まっていることが考えられるため、測定した塩分濃度の評価に不安があった。また、管内全体の散布状況を知るためには、試料が液体状でなくても測定できる手段の確立が必要であった。本研究では、現場巡回班が簡易な道具で素早く塩分濃度を測定できないかに着目し、試験器具及び試験方法の検討を行った。

3. 塩分測定方法の実験的検証

凍結防止剤を散布した路面を再現する為に高機能舗装のサンプリングコア（写真-1）に試料として塩化ナトリウム溶液を塗布した。塩化ナトリウム溶液の濃度と凍結温度の関係（表-1）より残留塩分濃度5%のとき、凍結温度-2℃まで凍結しないとされている。一方、鋼床版では放射冷却により路温が急激に低下し気温が2℃を下回ったとき無降水凍結に至ることが経験から分かっている。そこで無降水凍結する目安とされている2℃を補填する濃度である5%の食塩水を今回の実験では使用した。

表1 塩化ナトリウム溶液の温度と凍結温度の関係^{*2}

残留濃度	凍結温度
5%	-2℃
10%	-5℃
15%	-8℃

3.1 実験器具

塩分濃度計はPEN-SW(W)（以下新型塩分濃度計と呼ぶ）（写真-2）を使用し、従来の液体の屈折率を利用したATAGO S28E（以下従来の塩分濃度計と呼ぶ）（写真-3）と比較検討を行った。

3.2 新型塩分濃度計の特徴

① 計測器を液体に浸けて測定

② 固形物体に計測器を直接接触させて測定

①、②の2ケースどちらでも選択が可能である。食品業界では②の方法で魚や肉の塩分濃度を測定するのに使用している。そこで今回②の計測方法に着目し、アスファルト舗装面に直接当該塩分濃度計を接触させ測定できないか検証を行った。

3.3 検証に用いた塩分濃度計の仕様

①新型塩分濃度計 PEN-SW(W) の仕様

測定方法：液体に付けて測定も固形物に直接接触させて測定も可能。

測定範囲：食塩水濃度 0.0~28.0%(g/100g)

分解能：食塩水濃度 0.1%

測定精度：食塩水濃度±0.2%

温度補正範囲：10~40℃

液浸可能温度：10~100℃

使用環境温度：10~40℃

寸法・重量：160(W)×38(D)×18(H)mm,70g

②従来の塩分濃度計 ATAGO S28E の仕様

測定方法：液体試料をプリズム面に垂らして測定する

測定範囲：食塩水濃度 0.0~28.0%(g/100g)

測定精度：±0.2g/100g

最小目盛：0.2g/100g

*1 中日本ハイウェイ・メンテナンス名古屋株式会社名古屋事業所



写真-1



写真-2



写真-3

3.4 実験準備（供試体の作成）

① 食塩水の塗布

剤散布後の路面を再現するため、コア表面に濃度5%に調整した食塩水を全面に塗布する（写真-4）。

② コア表面を乾燥させる

剤散布後に舗装面が乾燥した状態を再現するために、しばらく放置し、表乾状態になるまで自然乾燥させる。

③ 結露した路面の再現

明け方の結露を再現する為に乾燥したコア表面にペットボトルのキャップ1杯7.5ml（大匙1杯程度）の水を均一に振りかけた。

3.5 塩分濃度測定方法

新型塩分濃度計と従来の塩分濃度計の2つの計測器を使い、塩分濃度の計測方法として以下の3ケースで比較検討した。

① 直接測定する方法

コア表面に直接濃度計を当てて塩分濃度を測定した（写真-5）。

② ティッシュによる路面水を吸収させる方法

結露を再現した路面の水分をティッシュに吸収させて塩分濃度を測定した（写真-6）。

③ 綿棒で路面水を吸収する方法

綿棒でコア表面の水分をふき取る。綿棒に塩分濃度計を当て付着した塩分濃度を計測した（写真-7）。



写真-4



写真-5



写真-6



写真-7

4. 実験結果

3ケースの実験的検討の評価結果を表2に示す。

① 直接測定した場合

新型塩分濃度計では舗装面を模したコア表面に振り掛けた水が直ぐに浸透してしまい計測器を当てても舗装表面の凹凸で面接触が出来ず点接触となった為、数値が得られず測定出来なかった。また従来の塩分濃度計を使用した場合では測定に必要な十分な試料が回収できず測定出来なかった。

② ティッシュを使用した場合

新型塩分濃度計では塩分濃度を計測することは出来るものの、計る場所によるばらつきが大きかったことから今回の路面に存在する残留塩分濃度を測るのには適さないと判断した。一方従来の塩分濃度計を使用した場合では若干の液体状の試料を回収することは出来たが、計測に必要な試料には不足したため塩分濃度を測定できなかった。

③ 綿棒を使用した場合

コア表面に付着した試料を綿棒で拭き取ることで回収した結果、新型塩分濃度計を使用した場合は綿棒に直接計測器を当てるだけで塩分濃度を計測できた。一方、従来の塩分濃度計を使用した場合では、綿棒に塩が吸着してしまい、計測に必要な試料を確保できなかったため塩分濃度を測定できなかった。

表2 塩分濃度計測定結果

凡例	
—	試験できなかった
×	数値が小さく値を拾えなかった
△	ばらつきが大きく精度が低い
○	ばらつきが小さく測定できる

	直接測定	ティッシュ	綿棒
PEN-SW(W)	—	△	○
S-28E	—	×	×

表3 濃度5%の食塩水における濃度計の計測結果

	直接測定	ティッシュ	綿棒
PEN-SW(W)	—	—	4.4%
S-28E	—	—	—

表3に濃度5%の食塩水における塩分濃度珪素計測結果を示す。表3より、綿棒を使用した場合、新型塩分濃度計で塩分濃度4.4%となった。乾いたコア表面に水道水をかけたことから塩分濃度が薄まっていることを踏まえてもおおよそ、5%に近い値となっていることから、PEN-SW(W)と綿棒の組み合わせた計測方法は効果的であるといえる。

5. まとめ

新型の塩分濃度計（PEN-SW(W)）は水分が少ない結露路面のモデルでも採取方法を工夫することにより塩分濃度を測定できた。一方、従来の塩分濃度計(ATAGO S28E)は十分な液状の試料が必要な為、結露を再現した水分量が非常に少ないケースでは塩分濃度の測定が出来なかった。

6. 今後の対策

今回得られた結果より新型塩分濃度計PEN-SW(W)と綿棒を組み合わせた計測方法を用いることで一定の精度をもった塩分濃度を測定できることが分かった。今回の実験では結露路面を再現するためにとペットボトルのキャップ1杯とそれに相当する水を使用した。今後の実験では現場で生じる結露に近い均一な湿潤面を再現するために霧吹きを用いた試験を行いたい。霧吹きする回数をルール化することで実験条件の均一化が可能になると考えた。今後、更なる実験を行うことでPEN-SW(W)を直接路面に当てただけで塩分濃度を測定できる手段の更なる改善を進めていく。

またPEN-SW(W)を実際の雪氷作業の中で使用して計測データの収集と問題点の洗い出しも同時に進めていきたい。

7. 参考文献

名古屋支社雪氷対策作業の手引き（平成28年度版） pp.2-4-98

カメラ画像を活用した吹雪自動検知技術の活用 — 道東地域の道路吹雪対策高度化に向けて —

山内 良輔^{*1}、石郷岡 和則^{*1}、金田 安弘^{*2}、永田 泰浩^{*2}

1. はじめに

北海道の国道における冬期通行止めの7～8割は吹雪が原因となっている（図1）。近年は、道東を中心に9人の死亡者を出した2013年3月の暴風雪、根室管内羅臼町で6度の通行止めにより延べ197時間の孤立をもたらした2015年1～3月の暴風雪（以上、北海道開発局資料による）など、社会や市民生活に甚大な影響を及ぼす大規模な暴風雪が頻発する状況にある。発生規模、発生期間の長さなど、最近は異常気象が叫ばれる中、暴風雪の様相も変わりつつある。

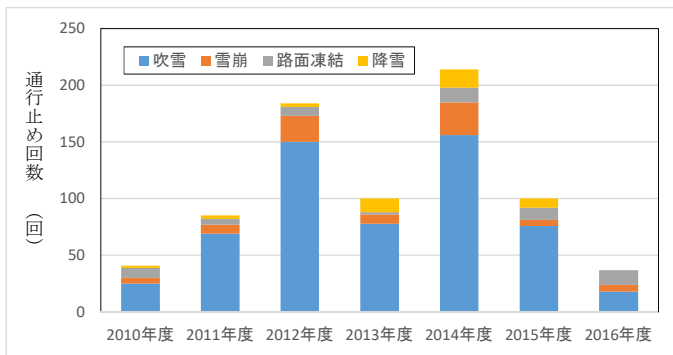


図1 北海道の国道における通行止め要因

暴風雪による道路交通への影響を最小限に留めるためには、時間変動が激しく局所的な気象特性を持つ吹雪の発生を迅速かつ正確に把握し、タイムリーな通行規制を実施する必要がある。また、気候変動により吹雪の発生パターンが変わりつつある中で、防雪柵、防雪林等、適切な吹雪対策施設を整備するためには、吹雪発生の危険個所を詳細かつ定量的に把握しておくことが重要である。

道路の吹雪状況を把握するための手段の1つに、道路管理用CCTVカメラがある。CCTVカメラの長所は表1のように、吹雪状況の時間変化を把握しやすいことである。一方、短所として、CCTVカメラだけでは路線全体の状況を把握できないことなどが挙げられる。近年、道路パトロール車にドライビングレコーダーが導入されていることから、道路の吹雪状況把握での利用が考えられた。このような走行動画は、路線上の吹雪状況を連続的に把握できることが長所であるが、道路状況を把握するためには、人間が再度、動画を見直す必要がある。また、ドライブレコーダーには数日分の動画

表1 吹雪把握でのCCTVカメラと車載カメラの長短所

種類	長所	短所
道路管理用CCTVカメラ	同一地点の吹雪状況を連続的に把握可能。低気圧の動きなど、気象の推移とともに吹雪がどう変わるかの状況変化の情報収集に有効。	カメラは路線全線を網羅しておらず、カメラ設置箇所付近の吹雪状況しかわからない。また、吹雪危険個所に必ずしもカメラが設置されているわけではない。
車載カメラ	路線上の吹雪状況を連続して把握可能。ピンポイントでの吹雪危険個所の抽出など、吹雪障害の線的な情報収集に有効。	道路パトロールの実施は限られているため、一部の時間帯での吹雪状況しか把握できない。撮影された動画は再度見直す必要があり、多大な時間と労力がかかる。

しか記録できず、データの受渡しは人手を介するため、煩雑で手間のかかることがネックとなり、冬期道路管理に走行画像を有効に活用するには至っていなかった。

これらの課題を解決する目的で、ドライビングレコーダーで撮影したカメラ画像に対して画像処理技術を適用し、車載のカメラ画像から路線上の吹雪状況を自動的に検知する試験を実施した。本稿では、カメラ画像に関する試験結果とともに、その結果を踏まえた吹雪視程障害の検知や吹雪危険箇所抽出など、今後のカメラ画像を活用した道路吹雪対策高度化の可能性について報告する。

2. カメラ画像による吹雪自動検知技術

(1) 本調査で用いた画像処理技術

人間の目は、目標物が小さくなるとそれを判別できなくなるなど、目標物の大きさによって感度が異なる。また、対象物のコントラストが小さくなると判別できなくなる。CCTVカメラや車載カメラで撮影した画像は、図2のように、好天時はコントラストがはっきりしているが、吹雪によって視界が悪くなるとコントラストが低下する。萩原ら¹⁾はこの画像のコントラストに着目し、静止画像の画像処理によって人間の目の見やすさを評価する手法を開発した。人間の目が感じやすい領域のコントラストの大小を画像評価値WIPS (Weighted Intensity of Power Spectra) という数値で示し、その大小と、人間がその画像を見て感じる視認性の関係が強いことを示した。この画像評価値WIPSを用いるこ

*1 国土交通省 北海道開発局 釧路開発建設部 道路計画課 (0154-24-7267)

*2 一般社団法人 北海道開発技術センター 調査研究部 (011-738-3363)

とで、吹雪時の視界の程度を定量的に評価することができる。さらに、WIPSと人間が感じる視程を、各地点の視界環境に応じて関係づけることで、WIPSを階級別の視程(視界レベル)に変換することが可能である。²⁾ 本調査では、この画像処理技術を用いて吹雪による視界不良を自動的に検知し、分析や検討を行った。

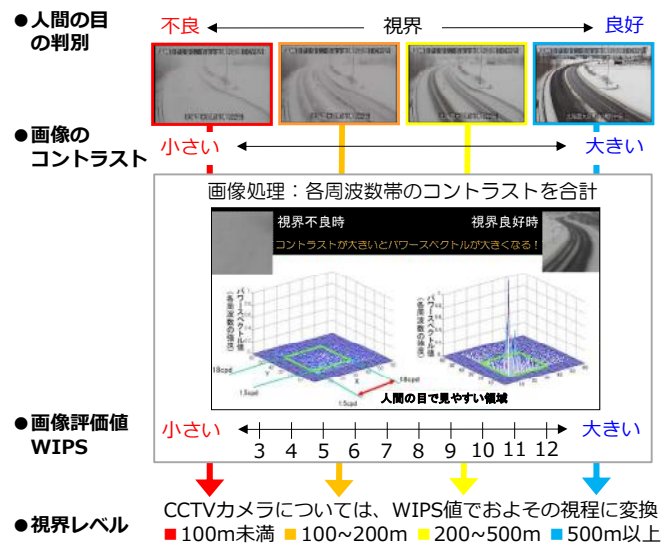


図2 カメラ画像による吹雪自動検知技術の概要

3. 道路管理用 CCTV カメラ画像による吹雪検知

表2は、道路管理用 CCTV カメラ画像から上記の画像処理技術を用いて自動処理で算出した視界レベル（レベル1：視程 500m 以上、レベル2：200～500m、レベル3：100～200m、レベル4：100m 未満）と、ドライバーの目線を想定し、路側の高さ 1.2m に設置したカメラの画像の目視判別結果（釧路開発建設部管内 4 箇所の平均）を比較したものである。管内では、冬期、降雪がなく強風で地表面の雪が舞い上がる地吹雪が多く、その際は地表面付近だけ視界が悪化する。同じ吹雪でも、降雪を伴う吹雪と伴わない地吹雪では、視界不良の状況が異なることから、吹雪と地吹雪に分けて検証を行った。

吹雪時の視界レベルの一致率は 90%で、広義一致率（一致するか、1 ランク以内のずれ）は 100%であった。一方、地吹雪発生時の視界レベルの一致率は 86%、広義一致率は 99%で、吹雪時よりもやや一致率が小さい。これは、道路管理用 CCTV カメラ画像は地上から十数 m の高い位置からの画像であることから、画像にはカメラから地上までの空間の視界状況が反映されているのに対し、地吹雪は地表面付近 1m 程度より下の高さでの現象であるため、高い位置にある道路管理用カメラでは地吹雪の全貌を捉えきれないためと考えられた。

上記の検証結果から、カメラの画像処理で得られる

視界状況は、視程計の様に数 m の視程まではわからないものの、100m 単位の視界レベルでは、冬期道路管理上、十分な実用精度を保持していると言える。

表2 道路管理用カメラ画像による視界レベルの検証結果

「吹雪時」の検証結果						
		道路管理用カメラ画像から自動判別した視界レベル				計
		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	
高さ1.2mのカメラ画像の目視判定による視界レベル	レベル1	2443	70	0	0	2513
	レベル2	187	229	42	0	458
	レベル3	0	9	53	13	75
	レベル4	0	0	1	52	53
計		2630	308	96	65	3099
		一致率:90%			広義一致率:100%	
「地吹雪時」の検証結果						
		道路管理用カメラ画像から自動判別した視界レベル				計
		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	
高さ1.2mのカメラ画像の目視判定による視界レベル	レベル1	2260	110	0	0	2370
	レベル2	225	148	17	0	390
	レベル3	20	28	31	3	82
	レベル4	1	2	6	7	16
計		2506	288	54	10	2858
		一致率:86%			広義一致率:99%	

図4は、釧路開発建設部管内の国道の道路管理用 CCTV カメラ画像を用いて算出した視界レベルから、冬期間の視程 200m 未満の総視程障害時間を求め、大きい順に地点を並べたものである。もっとも視程障害時間の大きいのは美幌峠の約 350 時間で、峠部の 3 地点で視程障害時間が 100 時間を超えている。このように定量的な指標を基に比較することで、地点間の吹雪の程度の違いが明確となり、客観的な吹雪対策優先度決定に資することができる。

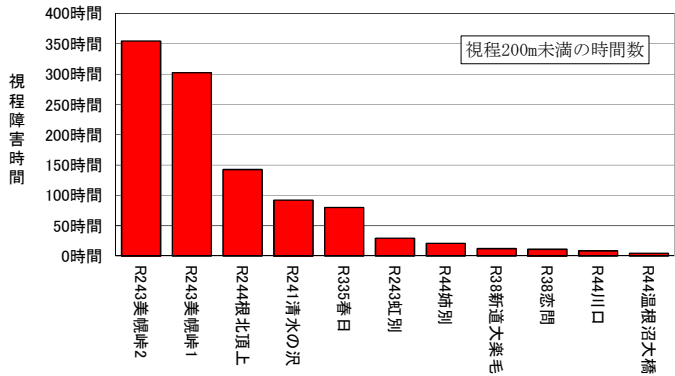


図4 カメラ画像の視界レベルを用いた吹雪対策優先度の検討例

ここでは蓄積データの活用例として、吹雪対策施設整備での活用を示したが、画像の視界情報をリアルタイムで Web に掲載することで、冬期道路維持管理での吹雪発生監視にも活用可能である。

道路管理用 CCTV カメラが冬期道路管理で有用である一方、カメラ地点以外の路線全体の連続的な吹雪状況の把握のために、車載カメラでの走行画像を吹雪検知に使えないか否かが課題として挙げられた。

4. 車載カメラ画像による吹雪検知の可能性検討

(1) 使用した車載カメラ画像

ここでは、釧路開発建設部管内でも吹雪による道路障害の多い一般国道272号において、道路巡回時に撮影されたドライビングレコーダーの動画データを用いた分析結果について述べる。分析には動画画像を1秒毎にキャプチャした静止画像を用いた。

(2) 車載カメラ画像の分析事例

図5に車載画像の分析事例として、2014年度冬期に一般国道272号の終点からKP57.9まで走行した際の画像評価値 WIPS の平均値(100m 間隔)と、実際の撮影画像を示した。WIPS 値は、視界が悪くなると小さくなり、視界が良くなると大きくなる。図5の赤線は一部区間で地吹雪があったがほぼ視界良好であった1月18日の事例、青線は終点付近以外で連続的に視界不良が発生した2月2日の事例である。1月18日のグラフのように、走行中の画像から求めた WIPS の値は、好天時であっても映り込む地物により幾分、変化する。一方、吹雪が発生した2月2日は、好天時(1月18日)に比べて WIPS の値がかなり小さく、発生した吹雪のため変動も大きい。

2月2日の一般国道272号の終点付近は比較的 WIPS 値が大きかったが、KP95に向けて低下し、KP95付近から起点側では断続的に視界不良が続いていた。図に示した画像からも、終点付近に比べて KP95 付近の視界が悪いことが顕著であった。KP90付近からは徐々に WIPS 値が上昇する傾向にあり、KP85.5付近では、WIPS 値が9近くまで上昇し、画像でも視界がかなり回復している。

中標津町の市街部を抜けた KP78.0 は、2月2日の事例で WIPS 値が最も低下しており、WIPS 値は5未満となっていた。

KP78.0 について、1月18日の画像も図に示した。WIPS の差も大きい、画像から確認できる視界状況の差も顕著であった。さらに、KP62.2付近は、2月2日の事例で2番目に WIPS が低下していた区間であり、図中の画像からもホワイトアウトに近い状態が確認できる。この区間については、1月18日も WIPS 値が低下していた。図の1月18日の画像から、地吹雪によって視界不良が発生していたことが確認できる。

3章の分析結果はあくまで定点の道路管理用カメラから得られた“点”の吹雪状況であり、路線全体の吹雪状況が把握できるわけではない。今回、移動しながら撮影された車載カメラ画像から WIPS 値を求めることで、定点カメラでは知りえない局所的な吹雪視界不良の発生など、路線上の連続した“線”としての詳細な吹雪の状況を把握できることがわかった。

(3) 車載カメラ画像活用による吹雪危険箇所の抽出

ここでは、図5のような事例の吹雪視界情報(WIPS 値)を蓄積することで、吹雪時に視程障害が発生しやすい区間や吹雪時の危険箇所を抽出することが可能であるかを検証した。

図6に、2014年度冬期に吹雪が発生した4日間、計17事例(内、1つは図5の事例)について、WIPS 値の平均を色分けして示した。図中に青枠で示した KP62~KP63 付近、KP70~KP72 付近、KP94~KP95 付近では、複数の走行日に WIPS 値の低下が確認できる。これらの区間は、

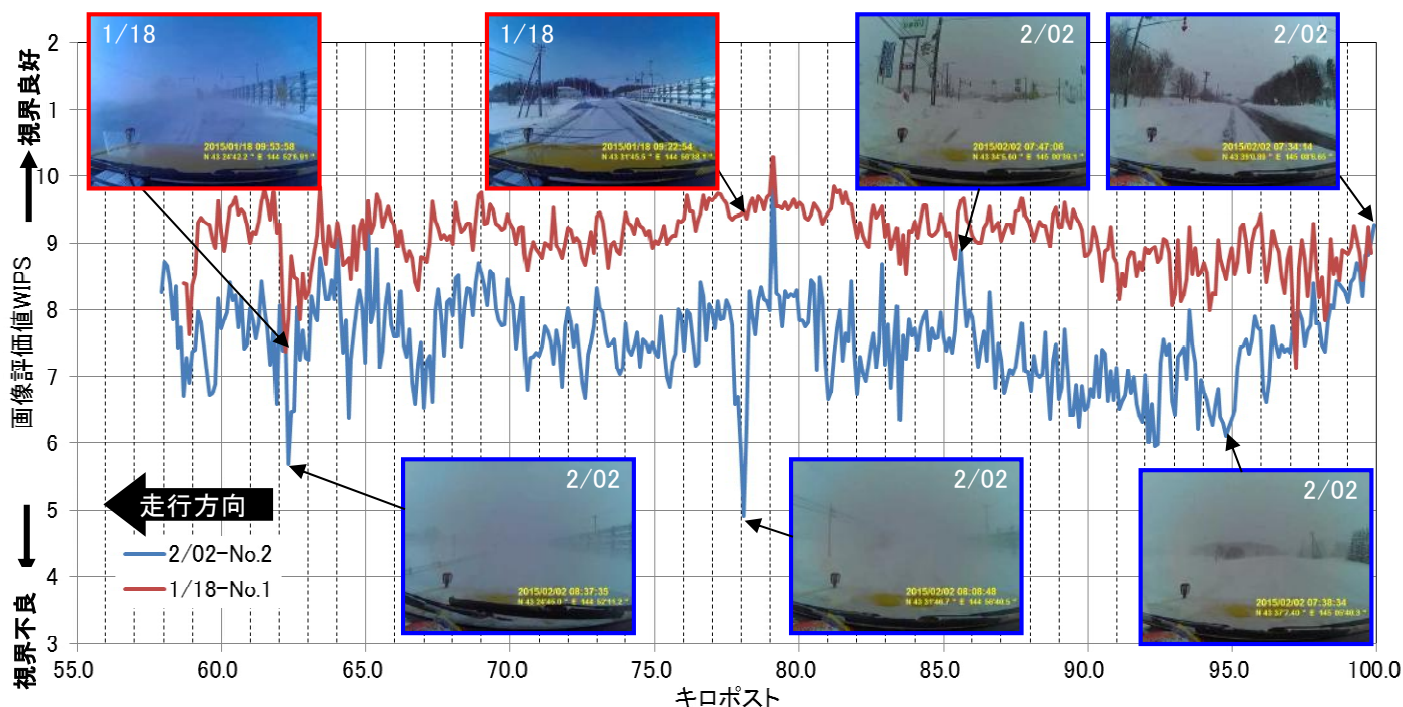
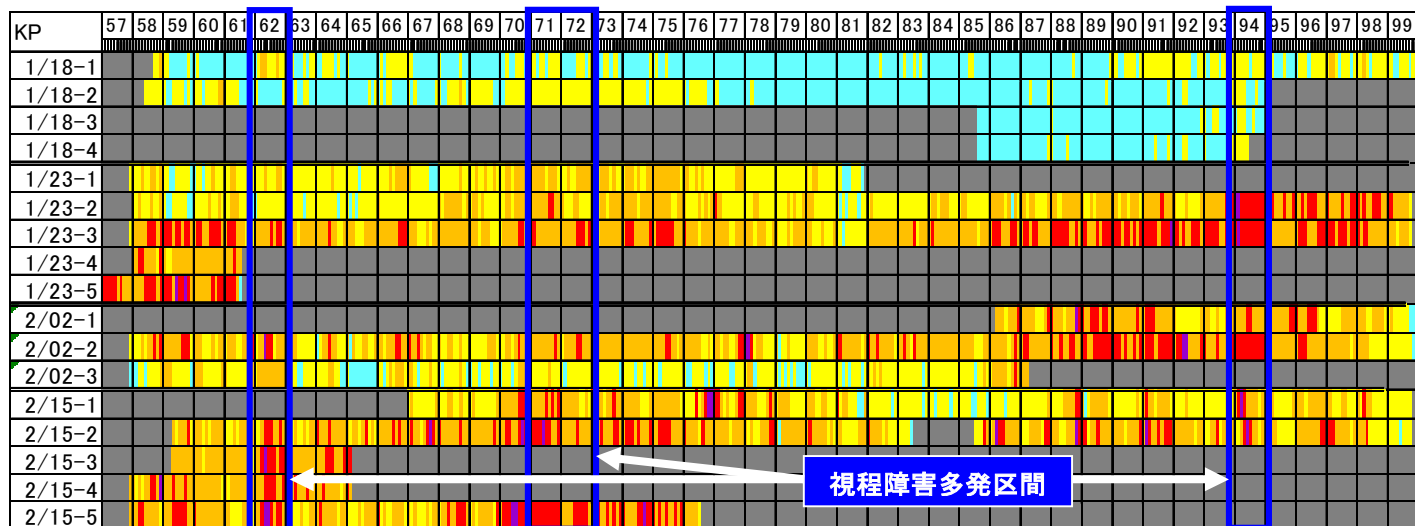


図5 1月18日 No.1 (図6の1/18-1) と2月2日 No.2 (図6の2/02-2) の WIPS 値の推移



■WIPS 値:6.0 未満、■WIPS 値:7.0 未満、■WIPS 値:8.0 未満、■WIPS 値:9.0 未満、■WIPS 値:9.0 以上

図6 一般国道272号を走行した17事例(2015年1月~2月)の視界情報(WIPS値)の蓄積例

冬期を通じて吹雪による視程障害が発生しやすい区間である可能性がある。KP62~KP63付近は、図5の事例の画像でもホワイトアウトに近い状況となっていたほか、KP70~KP72付近、KP94~KP95付近は複数日に、吹雪による視程障害が発生していたことが画像から確認できている。

以上のように、道路パトロールの動画や画像を記録し、画像処理によって視界情報(WIPS値)に変換して蓄積することで、吹雪時に視程障害が発生しやすい区間や吹雪時の危険箇所を、経験だけに頼らずにデータとして確認できることがわかった。しかし、WIPS値は視程障害を表す相対的な指標で、直接、視程には結びついていない。視界レベルでの表現など、より直観的に理解できる指標への変換は、今後の検討課題と言える。

5. まとめ(今後のカメラ画像の活用に向けて)

本調査の結果より、時系列的に連続して画像を記録している道路管理用 CCTV カメラの画像処理により、吹雪の発生日や、管内の広域的な吹雪発生の危険箇所を定量的に把握できることがわかった(図4)。また、路線上の線的な映像を連続して記録している車載カメラの画像の処理結果を分析することで、抽出した吹雪発生日や吹雪障害の厳しい区間について、吹雪発生の危険箇所をより詳細に把握できることがわかった(図5、6)。表1に示した道路管理用 CCTV カメラの画像のメリットと、車載カメラの画像のメリットを活かし、吹雪時の時系列的な変化や線的な変化、吹雪対策施設整備や整備後の評価のための活用が期待できる。今回の試験調査結果から、道路吹雪対策でのカメラ画像の更なる活用の有効性を確認できたと言える。

本技術のもうひとつのメリットとして、冬期道路維持管理におけるリアルタイムでの吹雪状況の把握が挙げられる。図7に、車載カメラ画像の活用イメージを示す。走行中に車内でカメラ画像を処理し、演算された視界状況データやサイズの小さいサムネイル画像をリアルタイムで送信する。視界状況データを Web の地図上に表示することで、PC やスマホでどこからでも吹雪状況を確認できるようになる。今後、実証試験を積み重ねることで問題点を抽出し、実運用に向けた課題と活用方策を整理していく必要がある。

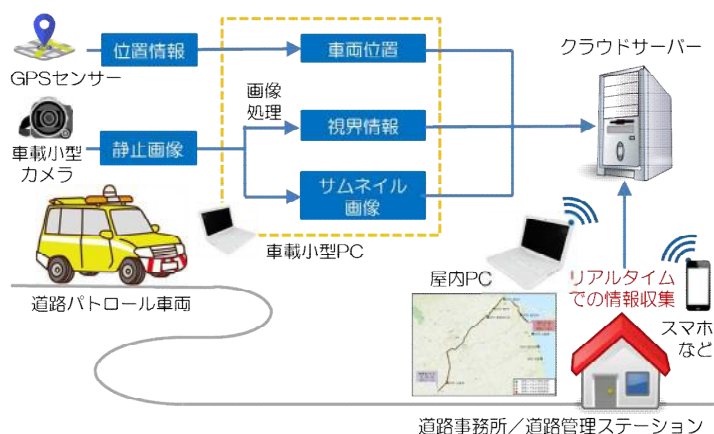


図7 冬期維持管理での車載カメラの活用イメージ

【参考文献】

- 1) Hagiwara, et.al.: Development of Visibility Assessment Methods with Digital Images under Foggy Conditions. (2004) : In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1862, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 95-108.
- 2) 永田泰浩, 萩原亨, 金田安弘, 荒木啓司, 佐々木博一(2009): 道路監視用CCTVカメラの画像を利用した視認性情報システムの実用可能性についての研究, 機関誌「交通工学」, Vol.44, No.3, pp.89-99.

冬期の立ち往生車発生傾向と予防的対策について

高橋 歩夢^{*1}、池原 圭一^{*1}、川瀬 晴香^{*1}、小林 寛^{*1}

1. はじめに

近年、大雪に伴う大規模な車両滞留や長時間の通行止めが問題となり、このような交通障害は、雪の多い地域以外でも局所的な大雪により度々発生している。このような中、国土交通省にて「冬期道路交通確保対策検討委員会」が設置され、2018年5月に「大雪時の道路交通確保対策 中間とりまとめ」において、集中的な大雪に対する道路交通への障害を減らすための対策等の提言がとりまとめられた。

国土技術政策総合研究所では、近年の大規模な車両滞留や長時間の通行止めの発生を踏まえ、図1に示すように、立ち往生車の発生箇所の特徴を整理し、立ち往生に強い道路構造（幅広の路肩、登坂車線など）などの予防的対策の内容や、適用条件、効果の検討を行っている。

2017年度には、全国の国道事務所の管理路線で発生した「登坂不能車発生箇所データ（2011年～2016年度、合計4,578箇所）」を分析し、全国的な発生傾向を整理した。また、北陸地方整備局管内（以下、「北陸」という。）を対象に立ち往生車発生状況を調査し、発生要因などを整理した。¹⁾

本報告では、2018年度に実施した、北陸に加え北海道開発局、東北地方整備局管内（以下、「北海道、東北」という。）も含めた3地域の立ち往生の発生傾向と予防的対策の内容についてまとめた結果を報告する。

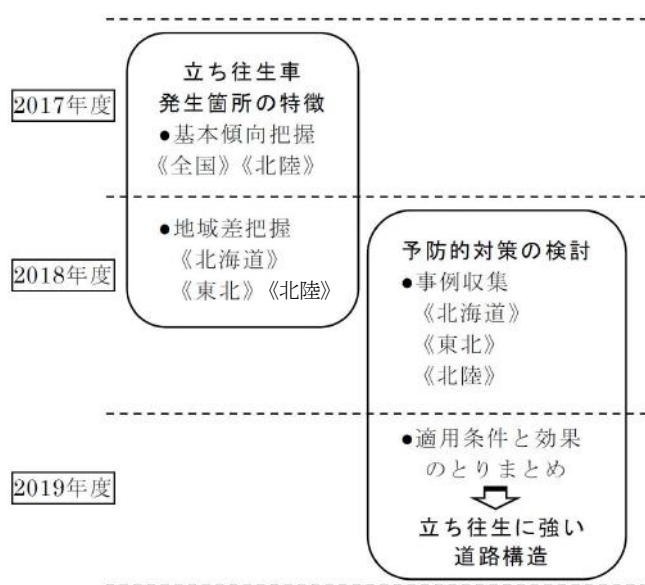


図1 検討内容

2. 調査方法

2.1 調査方法及び調査対象地域

北海道、東北、北陸では、立ち往生車が毎年のように発生しているが、冬期の気象条件（冬期の平均気温と降水量）は、図2に示すように、北海道は平均気温が0.0℃以下と低く、東北や北陸では、平均気温が高く、降水量が多い傾向が見られるなど差異がみられる。そこで、本調査は、北海道、東北、北陸を対象に発生傾向と予防的対策の内容を把握するためのアンケート調査及びヒアリング調査を行った。

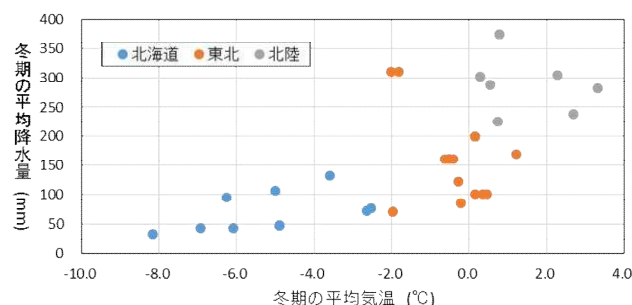


図2 各地域の冬期の気象条件

2.2 アンケート調査対象箇所

北海道、東北、北陸における調査対象箇所は、経年の立ち往生の発生状況、気象状況、道路及び交通状況などから選定した。全35箇所、内訳は、北海道10箇所、東北15箇所、北陸10箇所ずつ選定した。

2.3 アンケート調査内容

アンケート調査内容を表1に示す。主な内容としては、対象箇所における、立ち往生の「主な発生要因」、「気象特性」「対策の実施状況」等である。

表1 アンケート調査内容

調査内容	選択肢
主な発生要因	路面凍結、積雪 等
気象特性	時間降雪量が多い、吹雪 等
利用者特性	冬タイヤ・チェーンのみ装着 等
道路構造特性	急勾配、カーブ、信号機 等
被害拡大につながる道路特性	高速道路の通行止め、代替路がない 等
対策の実施状況	・実施有無 ・対策の効果(高・中・低、不明)

*1 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路交通研究部 道路交通安全研究室（TEL. 029-864-4539）

3. 調査結果

3.1 調査箇所のカテゴリ

地域差を分析するにあたって、調査箇所を分類した。平地部と山地部では、速度が低下する要因が異なり、必要な対策も異なると考えられることから、図3・図4に示すように、調査箇所を平地部と山地部に分け、さらに前項に示した冬期の気象条件の分布をもとに、平均気温が比較的高く、降水量が多い地域を「地域a（東北・北陸）」、平均気温が0.0℃以下と低い地域を「地域b（主に北海道）」とに分けた4分類を分析の基本とすることとした。

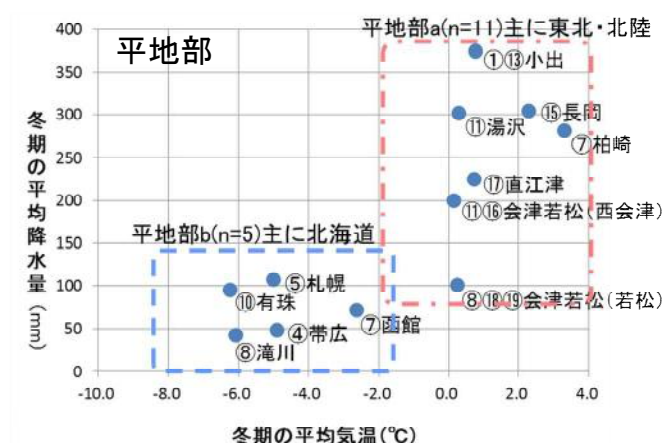


図3 調査箇所のカテゴリ（平地部）

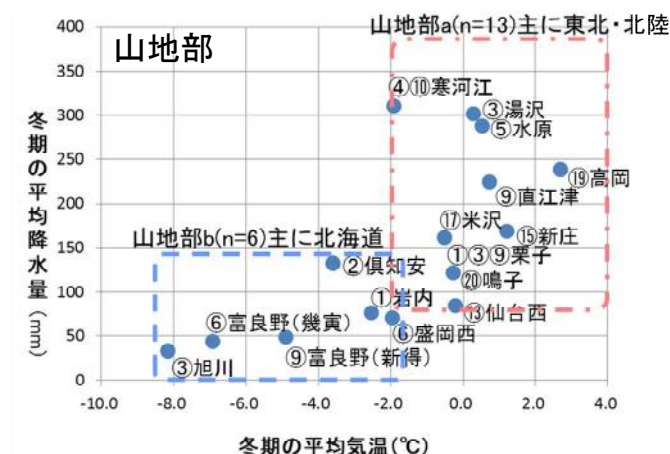


図4 調査箇所のカテゴリ（山地部）

3.2 立ち往生車発生の特徴整理

1) 主な発生要因

立ち往生の主な発生要因を図5に示す。グラフは各調査箇所のカテゴリごとの選択率を示している。地域aでは平地部山地部ともに「積雪」による発生が多く、平地部では、「路面凍結」での発生も多い。平地部bでは「視程障害」や「吹き溜まり」による発生が多く、山地部bでは「路面凍結」や「積雪」、「視程障害」での発生が多い。

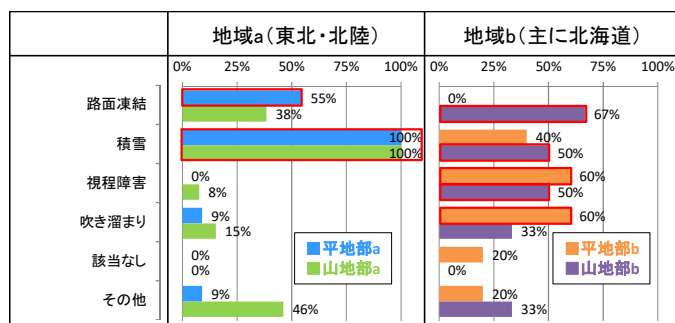


図5 分類別主な発生要因

2) 気象特性

立ち往生の発生要因となる気象特性を図6に示す。地域aでは平地部山地部ともに「時間降雪量が多い」と「気温が氷点下以下」が多い。平地部bでは「吹雪」と「地吹雪」が多く、山地部bでは「気温が氷点下以下」と「吹雪」が多い。

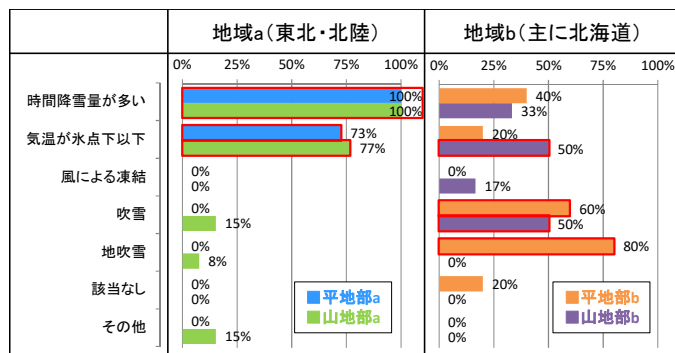


図6 分類別気象特性

3) 利用者特性

立ち往生の発生要因となる利用者特性を図7に示す。地域aでは平地部山地部ともに「冬タイヤ・チェーン未装着」が多い。また、平地部aでは「冬タイヤの劣化・摩耗」や「冬道に不慣れな運転」、「過積載の貨物車」、「空車の貨物車」なども多く、利用者の準備不足により立ち往生が発生している傾向がみられる。平地部bでは「該当なし」が多く、利用者の問題ではない場合が多い。山地部bでは「冬タイヤ・チェーン未装着」や「冬タイヤの劣化・摩耗」、「過積載の貨物車」が多い。

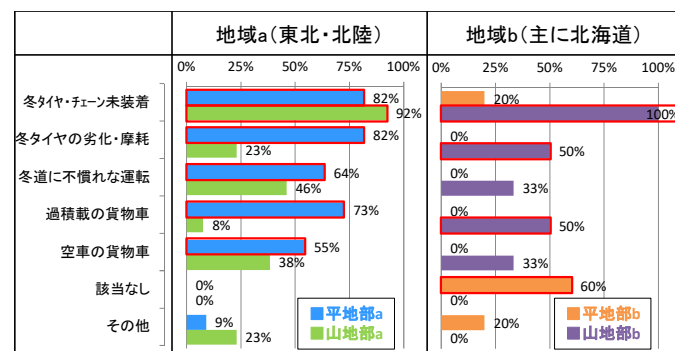


図7 分類別利用者特性

4) 道路構造特性（速度低下要因）

速度低下要因となる道路構造特性を図8に示す。地域aの平地部山地部、山地部bでは「急勾配」や「長い坂道」、「カーブ」による発生が多い。平地部bでは「該当なし」が多く、道路構造以外の影響が考えられる。

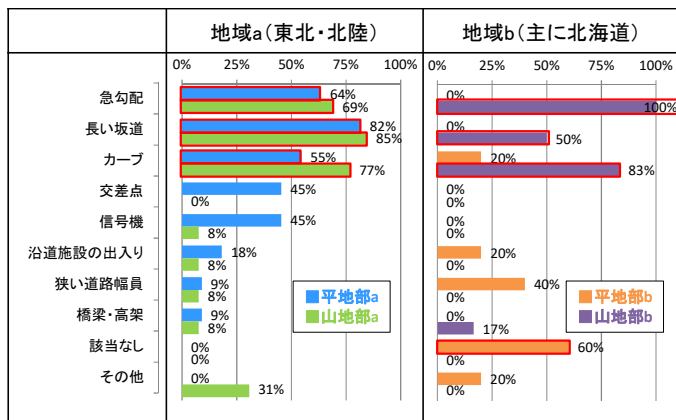


図8 分類別道路構造特性

5) 被害拡大につながる道路特性

立ち往生車発生時の被害拡大につながる道路特性を図9に示す。平地部aでは「高速道路の通行止め」が多く、山地部aでは「代替路がない」が多い。平地部bでは「高速道路の通行止め」と「代替路がない」、「すれ違いが困難な幅員」が同程度で、山地部bでは「代替路がない」と「中央分離帯により追い越しやUターンが困難」が多い。

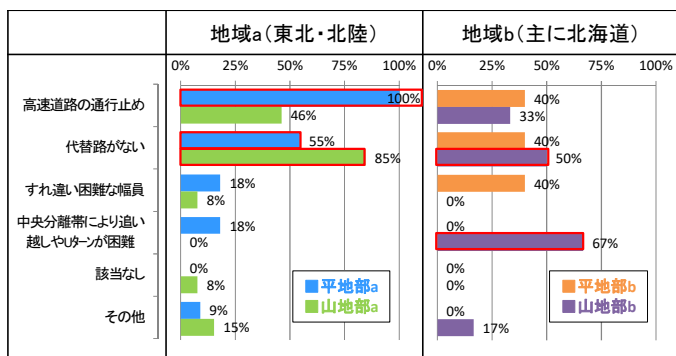


図9 分類別利用者特性

3.3 立ち往生車発生要因のツリー図作成

調査箇所分類ごとに立ち往生車発生の特徴をツリー図で整理した。ここでは、例として平地部a（図10）と平地部b（図11）を示す。

平地部aでは、主な発生要因は、積雪や路面凍結であり、気象特性は時間降雪量が多い大雪時や気温が氷点下以下の時に発生している。利用者特性は冬タイヤ・チェーンのみ装着や冬道に不慣れな運転、過積載の貨物車など多岐にわたっている。道路構造特性として、急勾配や、長い坂道、カーブがある区間で速度が低下することにより発生しており、高速道路の通行止めや代替路がない箇所

が多く、立ち往生車発生時に被害拡大に繋がる恐れがある。一方、平地部bでは、主な発生要因として、視程障害や吹き溜まりであり、気象特性は吹雪や地吹雪による発生が多い。利用者特性や道路構造特性による発生要因はあまりみられず、被害拡大要因も平地部aと比較すると少ない傾向が見られた。

【ツリー図凡例】
アンケートの回答が50%以上の選択肢を赤の太枠、25~50%を細枠、25%未満を破線枠、ヒアリングで把握したことを青の吹き出しで表示



図10 立ち往生車発生の特徴（平地部a）



図11 立ち往生車発生の特徴（平地部b）

3.4 予防的対策の実施状況と効果

調査箇所のカテゴリ別の予防的対策の実施状況と効果について整理した。整理するにあたって、立ち往生の発生可能性や発生頻度を小さくする「防災」の観点と、発生した際の被害を小さくする「減災」の観点で対策を分類し、整理を行った。ここでは、例として平地部a（図12）と平地部b（図13）を示す。

平地部aでは、「防災」の観点として、黄信号点滅の導入率が高く、効果が高い傾向が見られた。また、「減災」の観点として、ITVや訓練などの導入率が高く、効果も高い傾向がみられた。

また、平地部bでは、視線誘導標が多く導入されており、隣接工区との連携除雪や関係機関との連携が図られている傾向が見られた。

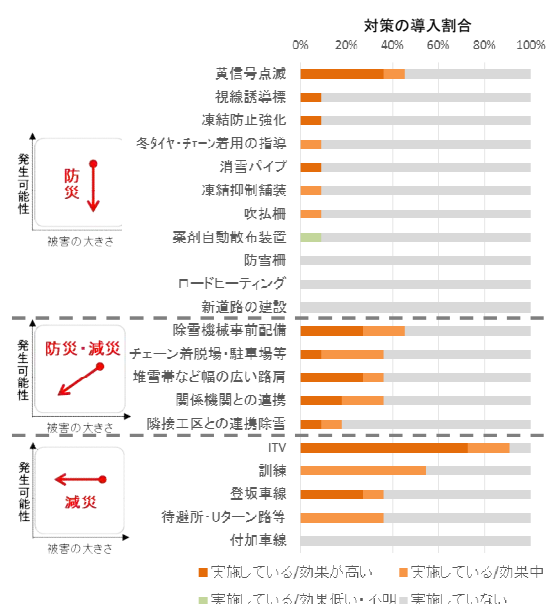


図12 予防的対策実施状況・効果（平地部a）

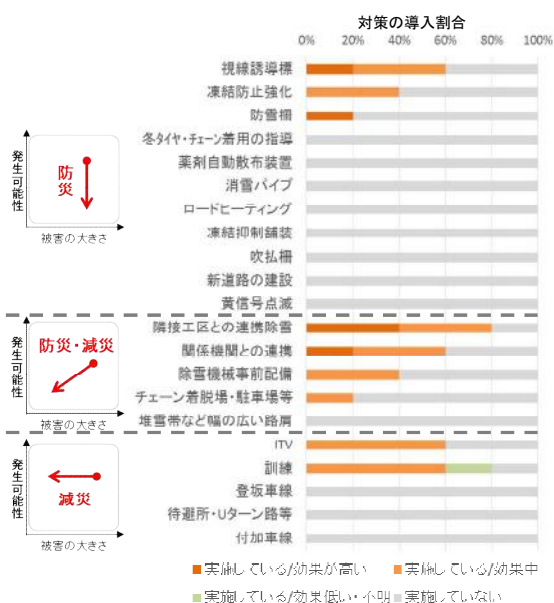


図13 予防的対策実施状況・効果（平地部b）

3.5 予防的対策のとりまとめ

調査箇所のカテゴリ別の予防的対策の実施状況と効果についての整理結果から、各予防的対策について表2にとりまとめた。どのような観点（防災・減災）で、どのような地域（地域a・b、平地部・山地部）で、どのような発生要因を解決したいかによって講ずべき対策の選択が必要であると考えられる。「防災」の観点では、視線誘導標が多く箇所で導入されており、効果も比較的高い。「減災」の観点では、ITVが多く箇所で導入されており、効果も高い。

ただし、3地域で調査対象箇所が35箇所とサンプル数が少ないため、実際の対策状況と合わない場合がある。例えば、地域aの山地部の消雪パイプや地域bの吹払柵などは、アンケートで導入されている箇所はなかったが、実際は整備されている実態がある。このため、今後は、サンプル数の充実により精度を向上させていく必要がある。

表2 予防的対策のとりまとめ

観点	予防的対策	地域a		地域b		対応する主な発生要因
		平地部	山地部	平地部	山地部	
防災	消雪パイプ					気象(積雪)
	ロードヒーティング					気象(積雪・凍結)
	薬剤自動散布装置					気象(凍結)
	凍結抑制舗装					気象(凍結)
	凍結防止強化					気象(凍結)
	視線誘導標					気象(視程障害)
	防雪柵					気象(吹雪・地吹雪)
	吹払柵					気象(吹雪・地吹雪)
	新道路の建設					道路構造(勾配・カーブ)
	黄信号点滅					道路構造(信号機)
防災・減災	冬タイヤ・チェーン着用の指導					利用者
	堆雪帯など幅の広い路肩					道路構造(狭い道路幅員)
	チェーン着脱場・駐車場等					利用者
	関係機関との連携					気象・被害拡大
	除雪機械事前配備					気象・被害拡大
	隣接工区との連携除雪					気象・被害拡大
	ITV					被害拡大
	登坂車線					被害拡大
	付加車線					被害拡大
	待避所・Uターン路等					被害拡大
減災	訓練					被害拡大
	待避所・Uターン路等					被害拡大
	付加車線					被害拡大
	待避所・Uターン路等					被害拡大
	付加車線					被害拡大
	待避所・Uターン路等					被害拡大
	付加車線					被害拡大
	待避所・Uターン路等					被害拡大
	付加車線					被害拡大
	待避所・Uターン路等					被害拡大

4. まとめと今後の予定

本報告では、立ち往生の発生傾向と予防的対策の内容を、北海道・東北・北陸の3地域で、平地部・山地部別に整理を行った。今後は対策の適用条件を整理するためのサンプルの充実や特にソフト的な対応や工夫に関する情報収集を進めていく予定である。また、ETC2.0プローブ情報等を活用し、客観的な効果（速度低下の低減等）を整理する予定である。加えて、立ち往生に強い道路構造（幅広の路肩、登坂車線等）について、予防的観点から整備する考え方をまとめる予定である。

文献

- 1) 池原，川瀬，小林：冬期道路の立ち往生車発生傾向，土木技術資料，vol. 61，pp. 46～49，2019. 4

除雪機械の下回り塗装の試行について

田中 誠*1・落合 信孝*2・泉 実*1

1. はじめに

近年、維持管理予算が削減されてきている中、建設機械の維持にかかる費用は縮減することができず、維持管理予算を圧迫している状況である。そこで、機械の信頼性を損なうことなく機械寿命の延命や、修理費の縮減ができないかを検討し、その中でシャシフレームの腐食が機械寿命に大きく影響する除雪機械に着目し、各種防錆塗料を試行的に実施した。

2013～2015年度納入車両に新車時から2種類の防錆塗装を実施し、継続的に発錆状況を比較検証した結果、その防錆効果に確認がとれたことから検証結果を報告するものである。

2. 試行対象車両と塗装仕様

2.1 試行対象車両の選定

試行対象車両の選定にあたり、除雪機械の機種別の平均寿命を調査した結果、短命1位は表-1に示すとおり凍結防止剤散布車である。

また、同じトラックシャシを使用している除雪トラックは、凍結防止剤散布装置を搭載しているものと除雪作業のみの専用車があり、前者と後者では下回りの腐食進行度合いに差があることから、腐食の原因は自らが散布する凍結防止剤の影響であると言える。除雪トラックの近年における使用実績年数は比較的長くなっているものの、腐食が顕著で毎年の整備に多額の整備費用がかかっており、整備や維持管理に苦慮している。これらの凍結防止剤散布車両はシャシフレームの腐食による強度低下が原因で更新されていることから、腐食が抑えられれば延命化につながると考え「凍結防止剤散布車」と「凍結防止剤散布装置付除雪トラック」の2機種を試行対象機種として選定した。

表-1 除雪機械機種別使用年数
(東北管内過去5ヶ年実績)

機 械 名	更新年数	短命順位
除雪トラック	19.3	4
除雪グレーダ	22.1	5
ロータリ除雪車	16.9	2
小型除雪車	18.7	3
凍結防止剤散布車	14.8	1
平均	18.4	

ち、2013～2015年度にかけて納入された表-2に示す新車3台とし、公正な防錆の評価を得るため車両納入直後の現場で使用する前に、防錆効果が高いとされている2種類の下回り塗装を実施した。

なお、追跡調査対象車両のうち1台は散布装置無しの専用車である除雪トラックであるが、配備工区の凍結防止剤散布量が事務所管内でトップクラスであり、更新車両の腐食が激しかったことから、凍結防止剤の影響が大きいものと考え、検証材料として試行調査対象車両とした。

表-2 追跡調査対象車両

機 械 名	規 格	試行開始年度
除雪トラック	10t 6×6 MT P ATG	2015 新車時
	10t 4×4 P ATG MS	2013 新車時
凍結防止剤散布車	4×4 MS	2014 新車時

※規格欄の「MS」は凍結防止剤散布装置を表す。

2.2 各種下回り塗料の特徴

各種下回り塗料の特徴を下記に示す。(表-3)

水性パスターはシャシブラックとも呼ばれるごく一般的な塗料で、除雪機械においても標準塗料となっている。

これに代え試行として採用した試行塗料Aは塗料中の特殊セラミックとエポキシ樹脂との組み合わせにより高い防錆効果を発揮する。試行塗料Bは2種類の塗料で構成され、下地のステンレスフレーク含有塗料で重防食性を発揮し、パラフィンワックスを主剤とする上層塗料で水分を弾き腐食環境を作らせないことで防錆効果を発揮するものである。

表-3 各種下回り塗料の特徴

塗装種別	仕様又は主成分
水性パスター	合成樹脂系又は水溶性樹脂系
試行塗料A	エポキシ変性アルキド樹脂系
試行塗料B	B 1 ポリ塩化ビニリデン変性エポキシ樹脂+ステンレスフレーク
	B 2 主剤=パラフィンワックス

※塗料Bについては初年度B 1 + B 2にて施工、以降次年度からB 2のみ施工。

3. 車両の下回り状況

3.1 水性パスター（標準塗料）

写真-1は、水性パスター塗装のまま10シーズン程度経過した車両の整備前状況である。シャシフレーム内側の外観は3シーズンを経過した辺りから概ね、この状態となる。

対象車両の選定については、事務所管内の該当機種のう

*1 東北地方整備局 秋田河川国道事務所 防災課

*2 東北地方整備局 青森河川国道事務所 防災課

水性パスターは試行塗料のような防錆機能を有していないため、それほど防錆効果は高くなく、毎年整備で下回りを全面下地処理・全面塗装を実施しているにも関わらず腐食の進行が早い。稼働が終了する頃には塗装の下にある錆が膨れることにより塗装膜を破壊し、フレームの素地が剥き出しとなっていることも少なくない。そしてこのまま年々シャシフレームの板厚が減少していく。

錆によるダメージは顕著かつ深刻であり、最終的に鋼材の減肉が進行し、写真-2のようにフレームに穴が開くような状態となる。

この状態になると修繕に多額の費用がかかることになる。また、サブフレーム程度であればフレームごと交換することで修繕対応は可能であるが、メインフレームになると修繕は不可能で、車検を通すことができず稼働不能となってしまう。



写真-1 シャシフレーム内側状況



写真-2 シャシ後部サブフレーム穴あき状況

3.2 試行塗料A

写真-3～4は、試行塗料Aを新車納入直後、現場配備前に施工し、6シーズンが経過した車両の整備前の状況で

ある。

シャシフレーム内外面共に平面部の発錆は無く、非常に良好な状態である。端部や継ぎ目部に少々錆汁は見られるが軽度であり、水性パスターのように全面的下地処理・塗装をする必要がなく、部分的な下地処理・塗装のみで作業完了となる。



写真-3 塗料A シャシフレーム外側状況



写真-4 塗料A シャシフレーム内側状況

3.3 試行塗料B

写真-5～6は、試行塗料Bを新車納入直後、現場配備前に施工し、5シーズンが経過した車両の整備前状況である。

試行塗料Aと同じくシャシフレーム内外面共に平面部の発錆は無く、非常に良好な状態で、端部や継ぎ目部に少々錆汁がある程度で軽度であることから、部分的な下地処理と上層の塗料であるB 2塗料のみの施工で作業完了となる。



写真-5 塗料B シヤシフレーム外側状況



写真-6 塗料B シヤシフレーム内側状況

3.4 試行塗料B（除雪専用車の除雪トラック）

写真-7～8は、試行塗料Bを新車納入直後の散布装置無し除雪専用車である除雪トラックへ、現場配備前に施工し、3シーズンが経過した車両の整備前状況である。

この車両についても同じく非常に良好な状態を維持できている。



写真-7 塗料B 除雪専用車シャシフレーム外側状況



写真-8 塗料B 除雪専用車シャシフレーム内側状況

3.5 参考データ（新車ではない車両に試行塗料A施工）

参考として、水性パスターのまま数年稼働した車両を全面下地処理のうえ試行塗料Aを施工し、2シーズン経過した車両の状況を写真-9～10に示す。

水性パスターのまま継続するよりは錆の進行が抑えられているが、新車納入直後に施工した車両のように良好な防錆効果を発揮しないことを確認した。

一度広範囲に発錆してしまうと下地処理で全ての錆を除去することが困難であり、結局残った錆部分が内側から塗膜を破壊しつつ広がっていくものと思われる。

このことから、シャシフレームの鉄素地が健全な状態で防錆性能に優れた下回り塗装を施すことが重要であることが分かる。車両製造段階でこれら防錆性能に優れた塗装が施されていることが、コスト的にもシャシフレームの防錆性能的にも最良の結果が得られる最も有効な手段と考える。



写真-9 途中から試行塗料Aを施工した車両状況 1



写真-10 途中から試行塗料Aを施工した車両状況2

4. 各塗装仕様におけるコスト比較

各塗装におけるコスト実績を基に、機械寿命を一律15年と仮定し、下回り塗装のランニングコストを比較した結果を図-1に示す。

生涯の下回り塗装にかかる費用は、塗料単価にはあまり左右されず、下地処理にかかる工数をどれだけ低減できるかが最重要となる。

4.1 水性パスター（標準塗装）

錆の進行が早いことから下地処理に要する費用が年々増加していく。3年経過時点辺りから費用増が顕著になり、15年間のコストとしては最も高くなるか、または15年を待たずに稼働不能に陥り車両更新の必要に迫られる可能性がある。

4.2 試行塗料A

防錆性能が高く、下地処理に要する費用を抑えることができるほか、新車納入直後における塗装施工費用についても、軽度な下地処理でよいことから費用が大幅に抑えられ、現時点では試行した中で下回り塗装ランニングコストが最も経済的であると推測される。

15年間の水性パスターと試行塗料Aで要する総コストを見ると、試行塗料Aにかかる費用は約3分の1に縮減でき、単純平均で1台当たり年間180千円程度縮減される試算となる。1台当たりではごく少額だが、当事務所の対象車両は14台あるため、全台で試行を行うと年間2,500千円以上の縮減となり、仮にこれが地整全体となると該当車両が約200台、年間36,000千円以上の維持管理費を縮減できることになる。これは凍結防止剤散布車を追加で1台交換できるほどの縮減額である。

4.3 試行塗料B

試行塗料Aに比べ初期費用が大きくなっている。これ

は下層塗料であるB1塗料が少々高価であることと、この塗装を施工するために水性パスターを全て除去する必要がある、下地処理工数がかかることが要因となっている。しかし最初に施工してしまえば以降の補修は上層のB2塗料のみでよく、試行塗料Aと同様に防錆性能が高いことから下地処理工数を抑えられる。これにより初期投資はかかるものの、8年経過時点でランニングコストが水性パスターと逆転し、15年間の水性パスターにかかる総コストと比較すると試行塗料Bで要するコストは約半分程度になるものと推測される。

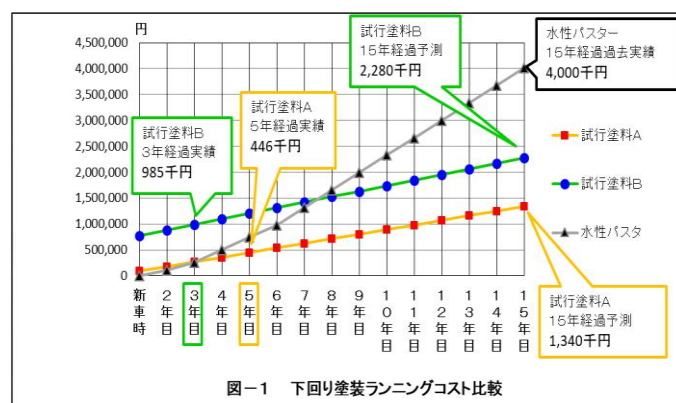


図-1 下回り塗装ランニングコスト比較

4.4 コスト比較の考察

トラックシャシをベースとした除雪機械について試行塗料Aと試行塗料Bを比較検証した結果、防錆性能はいずれも良好で、現時点では補修塗装にかかる費用に差が無いことから、試行塗料Bは初期塗装時にB1塗料を施工するための下地処理工数が嵩む分、コスト差を挽回できない。これにより、同等の性能で総コストで安価な試行塗料Aが優位と推測される。

5. おわりに

試行の結果、車両納入後直ちに防錆塗装を実施することが発錆を抑えるため非常に重要であり、防錆塗装を実施することで除雪機械寿命の延命化と、維持管理コスト縮減に大きく寄与することが期待できる。機械寿命を延命化できることになれば更新サイクルの延びに伴う購入コストを含めた全体コストの縮減額は非常に大きなものとなる。本試行結果については、本局の機械購入担当課へ情報発信し、今年度から凍結防止剤散布装置付除雪トラック一括購入の仕様書に試行塗料Aが試験的に反映されると共に、東北管内の他事務所にも情報提供し取組の拡大を図っている。

今後も各試行塗料の経年による状態を確認しつつ、また、他に有効な塗料があれば試行に取り入れながら継続して検証し、最終的な評価を行いたい。

無散水消融雪施設の長寿命化を目指した 融雪用放熱管内の洗浄による機能回復効果

伊藤 健大, 山口 正敏, 鈴木 和則*1

1. はじめに

降雪地域では、消・融雪施設の導入が各地で行われたことで、冬季の安全な通行空間が確保されている。舗装体内部にパイプを埋設し、熱媒を循環することで舗装体を温め、路面の融雪を行う無散水融雪施設では、ボイラーにより温水を供給するものもあるが、多様な再生可能エネルギーが熱源として利用されている。温泉地では温泉排湯を利用したもの、都市部では下水熱を利用したものなどがある一方で、比較的場所を選ばずにどこでも利用できる地中熱や地下水熱を熱源とした施設も見られる。年間を通じて温度変化の少ない地中から得られる地下水の熱は、温度レベルこそ低いものの、その莫大な量を利用することが可能で、無散水融雪施設への利用も盛んに行われている。

地球温暖化対策が急務となっている昨今、電力使用量の削減や化石燃料消費量の削減を念頭に、再生可能エネルギーの利用が注目を浴びている。古くから地下水を利用した無散水融雪施設が整備されてきているが、今後、更なる効率化や省エネ化、そして、現状施設の長寿命化などの観点から、改善の余地は残されていると言える。

本報では、地下水を熱源とした無散水融雪施設の長寿命化に向けたメンテナンスの事例として、放熱管内のピグ洗浄工法について紹介する。

2. 地下水を熱源とした無散水融雪施設のメンテナンス

(1) 施設の概要

地下水を熱源とした「地下水還元方式」は、非常にシンプルな構成である。揚水井内に設置された水中モーターポンプより地下水を揚水し、舗装体内に設置された放熱管内を通水し放熱した後、注入井から地中へと還元される(図1)。

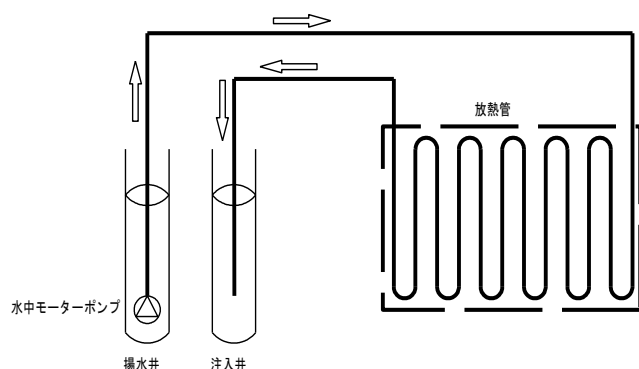


図1 地下水還元方式の無散水融雪施設概要

稼働の発停は、降雪を感知した場合に連続稼働で融雪運転を行うほか、気温が低下した場合には、間欠稼働で路面の凍結防止が、気象状況に応じて自動的に行われる。

(2) 放熱管内閉塞とその障害

地下水の水質によっては、放熱管や本管内部へのスケール(金属成分が酸化し錆として析出したもの)およびスライム(地下水中のバクテリアと金属成分が反応し粘着質となったもの)が管内壁へ付着し、閉塞することがある(写真1)。その結果、所定の地下水量を供給できず、本来の融雪効果が発揮されなくなってしまう(写真2)。このような状態が続けば、放熱管内での凍結に至り、配管および舗装の破損を誘発し、施設の寿命自体を縮めてしまう可能性もある。



写真1 洗浄前管内閉塞状況



写真2 放熱管洗浄前の融雪状況

*1 日本地下水開発株式会社

舗装の破損や路面への漏水等が発生してしまった場合は、舗装ごと既存放熱管を撤去し新しい施設に更新する必要があるが、施工中の交通への影響や、施工にかかるコストなどが新たに生じることになる。そうした事態を防ぐために、定期的に放熱管内のスケールを洗浄作業により除去し、融雪機能を維持していくことは、施設の長寿命化と全体の維持費低減のために大きく寄与することになる。

(3) 放熱管内のピグ洗浄工法

放熱管内の洗浄作業の工法として、近年、配管の内部に樹脂製の玉（ピグ）を挿入し高圧水による圧力で配管内を通過させ汚れを除去する、ピグ洗浄工法が行われている。高圧水のみで洗浄する場合に比べ、ピグが固着スケールに直接接触し管内壁から剥離させるため、汚れの除去能力が高い。また、薬品を使用する化学洗浄では、排水の中和処理やpH管理が必要となるが、ピグ洗浄では清掃による効果を目視で確認でき、施工性と改善効果が分かり易い。

洗浄イメージを図1に、作業手順フローを図2に示す。また、放熱管内に付着したスケールを、ピグ洗浄工法を用いて洗浄している作業状況を写真3に示す。

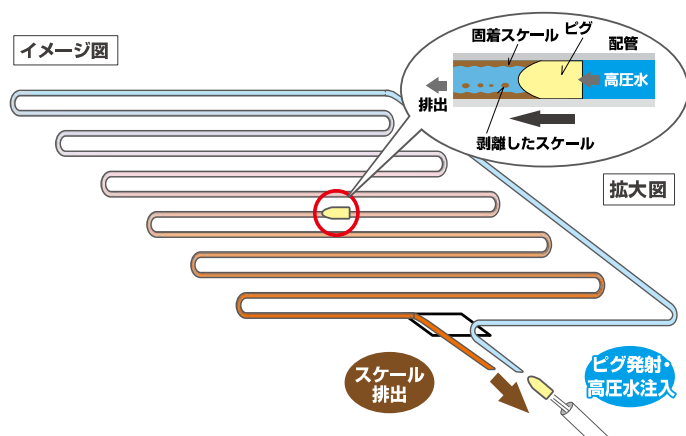


図1 ピグ洗浄イメージ図

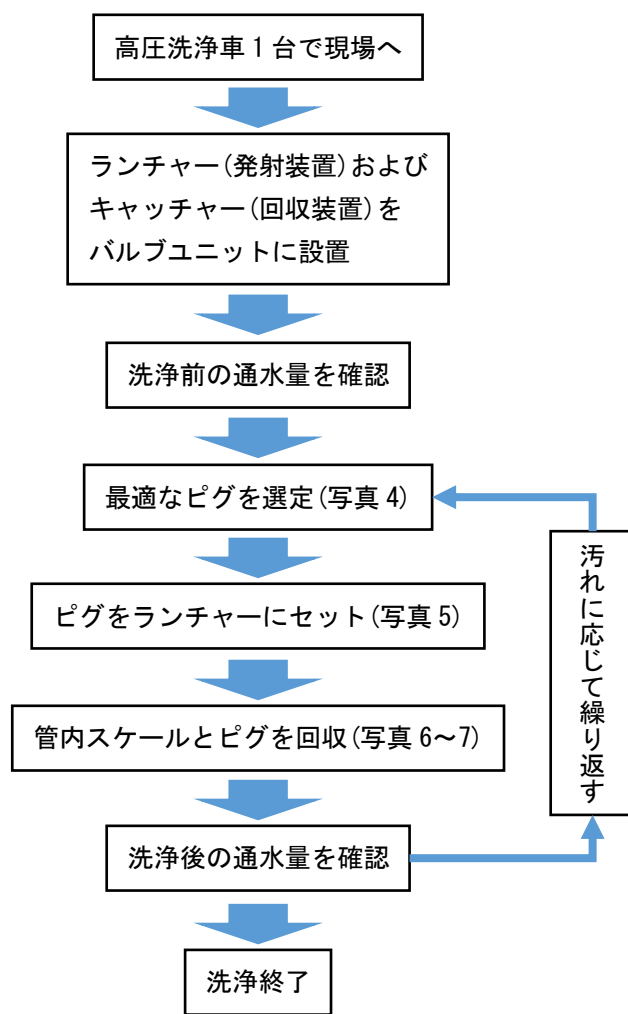


図2 ピグ洗浄フロー図

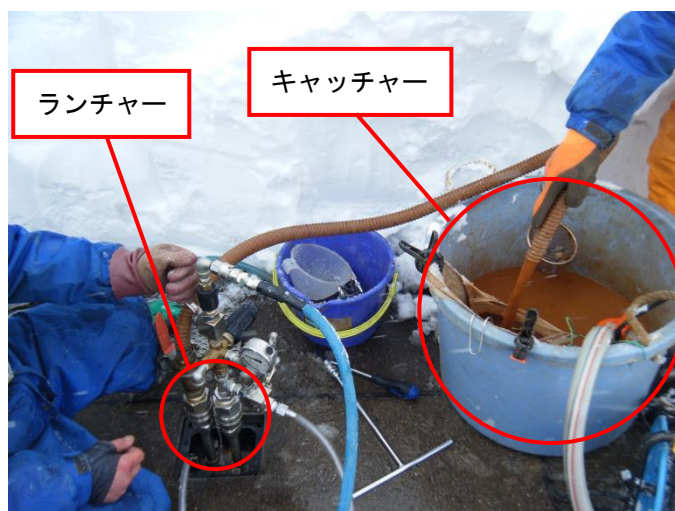


写真3 ピグ洗浄状況



写真4 洗浄用ピグ（樹脂製）



写真7 回収されたピグおよびスケール



写真5 洗浄用ピグのランチャーへの挿入状況



写真6 キャッチャーでのスケール回収状況



写真8 洗浄後管内スケール除去確認



写真9 放熱管洗浄後の融雪状況

これまで放熱管内へのスケール付着により、大幅に送水量が減少して融雪効果に難があったセットに対し、このような洗浄作業を実施した結果、放熱管内のスケール除去（写真8）と、本来の融雪効果を回復する状況が確認できる（写真9）。

3. 放熱管更新とのコスト比較

以上の放熱管洗浄作業について、既設の舗装および放熱管を撤去し新しい施設に更新する放熱管更新作業と、コストを比較する。

表1に、概算コスト比較を示す。実施頻度は、ピグ洗浄工法では融雪機能維持の観点から放熱管更新よりも短めの年数を想定し、ピグ洗浄で5年、放熱管更新で15年を見込んでいる。

表1 融雪機能回復作業の概算コスト比較

ピグ洗浄工法(5年ごと)	放熱管更新(15年ごと)
洗浄・通水確認 1セット 54,000円	既設舗装取壊し 20m ² 40,000円 放熱管設置 20m ² 260,000円 Co打設養生 2m ³ 38,000円
計 54,000円 (1年あたり10,800円)	計 338,000円 (1年あたり22,600円)

※施工費は1セット(20m²)あたりの直接工事費

※材工共、機器損料含む

※コンクリート(Co)舗装 t=10cm

表1に示す通り、放熱管内が完全に閉塞し、舗装の破損や路面への漏水等の影響が出てしまってから施設の更新を行うよりも、一定期間ごとに洗浄作業を行い管内をきれいに保つことで、融雪施設の機能を維持し、メンテナンスにかかるコストを抑えることができるといえる。また、放熱管更新に比べ作業スペースがコンパクトで、作業開始から交通開放までに要する時間も1セットあたり1～2時間程度(これまでの施工実績より)と舗装の養生を要する放熱管更新よりはるかに短いというメリットもある。

4. まとめ

無散水消融雪施設を今後も長期的に利用していくにあたり、配管内の目詰まりにより消融雪効果が減少した施設に対し、配管内の洗浄作業を定期的の実施することで、消融雪効果の回復、施設の長寿命化、ライフサイクルコストの低減等が可能となる。

地下水等の再生可能エネルギー利用施設の長期利用とライフサイクルコスト低減が可能になることで、環境負荷の少ない低炭素社会実現に向けて大きな足掛かりとなることを期待したい。

【i-Snow】ロータリ除雪車による投雪作業自動化 -除雪現場の省力化による生産性・安全性の向上に関する取組-

小野寺 敬太*1、高本 敏志*1、岸 寛人*1

1. はじめに

積雪寒冷地に住む人々の生活にとって冬期の円滑な道路交通確保は必要不可欠であり、冬期の道路維持管理（除雪）については非常に高いニーズがある。

一方、除雪作業の現場においては、除雪機械オペレータの担い手が減少、かつ高齢化が進んでいる。（図-1）

また、近年は異常気象による暴風雪等の冬期災害が頻発し、長時間の通行止めが増加傾向にある。（図-2）

今後も継続的に冬期道路交通を確保するため、持続可能な道路除雪の取り組みを構築し、除雪作業の効率化を進める必要性が高まっている。



図-2 冬期通行止め回数、時間の変化

2. 「i-Snow」の発足

第8期北海道総合開発計画（平成28年3月29日閣議決定）では計画の推進方策として、「プラットフォーム」の形成をかかげている。

持続可能な道路除雪の実現に向けた取り組みを構築するにあたり、平成29年3月に除雪現場の課題、研究・開発の動向、除雪技術等に関する情報の共有を図るほか、除雪現場の改善への取組について、産学官民が連携して取り組むプラットフォーム「i-Snow」を発足させた。

i-Snowでは、近年の除雪現場における課題に対応するための活動を展開し、生産性・安全性の向上に資する除雪現場の省力化を進めている。（図-3）



出典：日本建設機械施工協会北海道支部資料により集計

図-1 除雪機械技術講習会参加者の推移

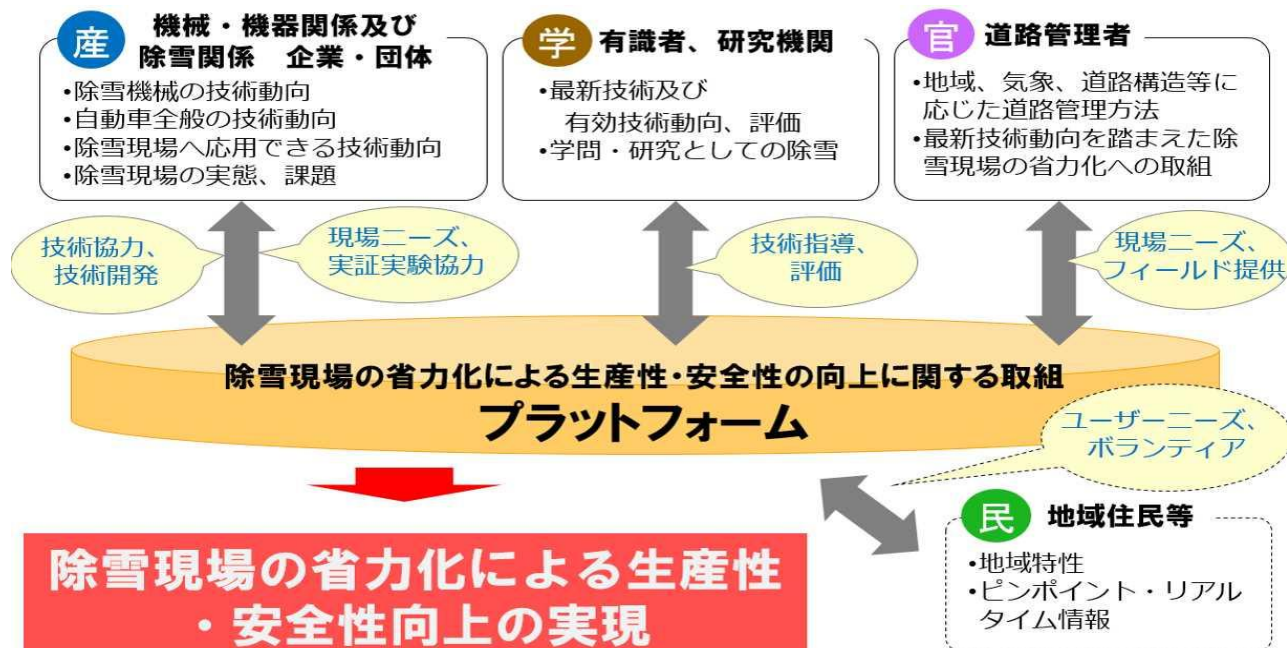


図-3 プラットフォームのイメージ

*1 北海道開発局 事業振興部 機械課

i - S n o wでの具体的な取組の一つとして一般国道334号知床峠における除雪作業省力化に向けた「除雪装置自動化実証実験」の取組を紹介する。

3. 「除雪装置自動化実証実験」の取組み

(1) 実証実験フィールド

実験フィールドは、冬期通行止めのため一般車両への影響がない一般国道334号知床峠を選定した。(図-4)

知床峠での除雪作業は、冬期間に降り積もる積雪深が数mを超えることから、複数台のバックホウとロータリ除雪車による啓開除雪が行われ、後方のセンターラインを確認しながら前進して除雪作業を行うなど、熟練オペレータの感覚と経験が必要となっている。(図-5)



図-4 実証実験箇所

(2) 除雪作業省力化のイメージ

i - S n o wにおける除雪効率化の当面の目標は、現在、2人乗車体制で行っているロータリ除雪車での作業を、除雪車の運転以外の操作の自動化、省力化により、熟練の技術や経験がなくても、1人乗車体制(ワンマン化)で作業できるようにすることのほか、暴風雪時など視界不良時においても安全で効率的な除雪を可能にすることである。(図-5)

効率化・省力化のイメージは、除雪作業に必要な①自車位置の把握、②作業装置の操作、③安全確認(障害物等)、④車両運転(操舵・加減速)を最新技術でフォローすることによる①②③の自動化である。

(3) 3Dマップ(道路データ)の作成

自動化にあたり、知床峠頂上を含む約24kmの区間を対象にMMS(モバイルマッピングシステム)測量し、このうち啓開除雪の際に人力で見出しポールを設置している5kmの区間について高精度3Dマップを作成した。(図-6)

ロータリ除雪車の運転支援用に点群データから、道路形状を表す中央線、外側線、導水縁石(内側)を抽出することで3D道路データを作成している。(図-7)



図-5 除雪作業の効率化・省力化イメージ

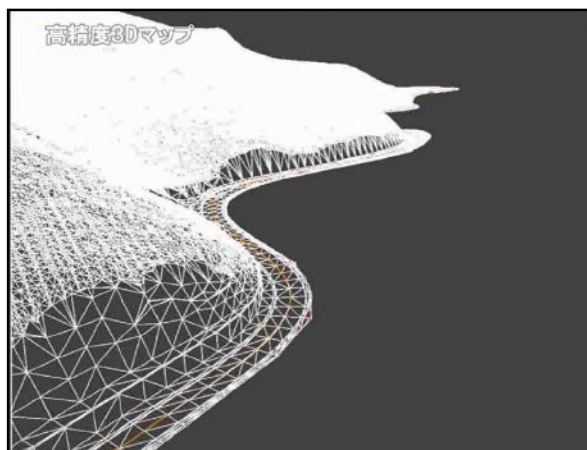


図-6 高精度3Dマップ

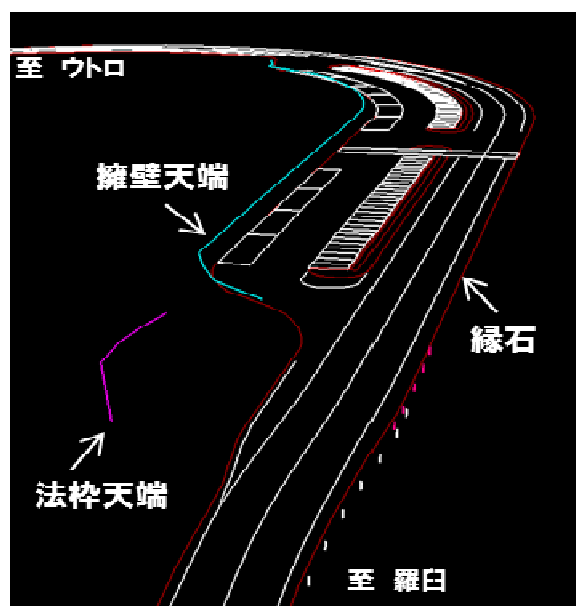


図-7 3D道路データ

(4) i-Snow仕様ロータリ除雪車の概要

i-Snow仕様ロータリ除雪車は【2.6m級(MSシュート)】をベースとした。これに視界不良時やセンターラインが見えない啓開除雪などでも運転手が道路線形を把握できる様に、準天頂衛星「みちびき」と「高精度3Dマップデータ」を活用した運転支援ガイダンスと通常は助手が操作する投雪方向自動制御機能を合わせたシステムを搭載した。(図-8)

また、オペレータの負担をより軽減させるため、運転席の操作レバーの集約(11本→3本)や除雪速度制御装置(除雪負荷に応じた除雪速度自動コントロール)など、操作の省力化を図る装置を搭載している。

外観は、北海道開発局の除雪機械で採用している塗装色の「フレッシュグリーン」と宇宙をイメージした「ミッドナイトブルー」のツートン色で、i-Snowのロゴを強調したスタイリッシュなロータリ除雪車とした。

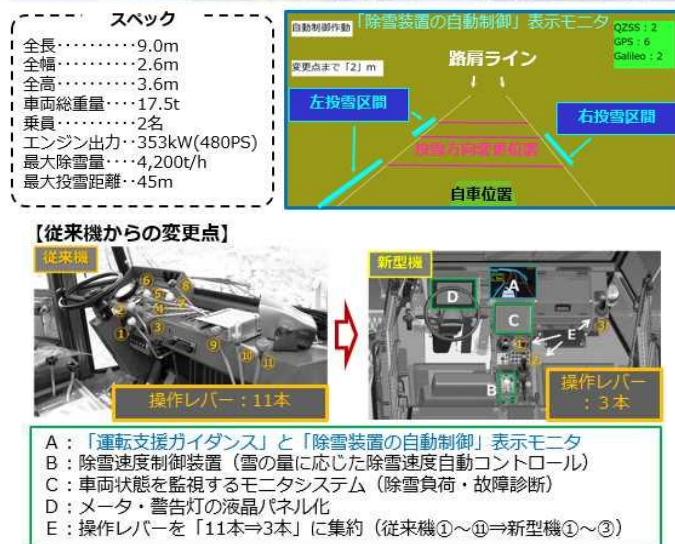


図-8 i-Snow仕様ロータリ除雪車の概要

4. 実証実験結果

i-Snow仕様ロータリ除雪車を使用し、平成31年3月19日に報道関係者を対象とした実証実験公開デモを実施した。

運転支援ガイダンスシステムとブロー投雪の自動化、みちびきの受信状況調査、各種センサによる作業装置の状態把握等を行った。

主要な実験結果として、運転支援ガイダンスシステムについては、視界を遮蔽してガイダンス機能のみの走行試験を実施したが、システム上にリアルタイムの舵角が表示されず、必要以上にステアリング操作を行い蛇行する結果となったため、さらなる改良が必要であることが確認された。

ブロー投雪の自動化においては、予め設定された投雪方向の変化点において、ブロー装置の旋回を自動制御し投雪方向を変更できることを確認した。(図-9)

みちびき受信状況調査は、平成30年11月から本格運用を開始した「みちびき」だが、一部不安定な状況があり、受信機のアップデートが複数回あったため、今後も継続調査を実施する。



図-9 ブロア装置の投雪方向自動制御



図-11 吹雪時の映像鮮明化運用イメージ



図-10 シュート投雪の自動化イメージ

5. 今後の展開

知床峠実証実験のスタートにより、i-Snowの取組は第一歩を踏み出したところだが、令和元年6月26日に開催された第5回プラットフォームでは、4社の民間企業と1団体が構成員に加わり、新たな技術の導入や各種システムにおける精度向上が期待されている。

令和元年度は、知床峠において、シュート装置の自動化（図-10）および、周辺探知技術による安全対策等の実証実験を行う。

併せて、視界不良が頻発する札幌市近郊の一般道において、試験車両による吹雪時の映像鮮明化技術の検証を行う。（図-11）

また、次年度以降に予定するi-Snow仕様ロータリ除雪車の一般道での実証実験に向け、北海道内の複数の峠を対象とした3D道路データを作成中である。

今後も、維持除雪の効率化に向け、様々な最新技術動向を調査し、各種自動化のセンサー類が苦手としている使用条件の厳しい積雪寒冷地での実証を行ったうえで、必要な仕様を見極め、プラットフォーム「i-Snow」にてさらなる発展を目指していく所存である。

参考文献

・i-Snowウェブサイト

『<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/splaat0000010dmm.html>』



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

山田忠幸*1, 藤本明宏*2, 山田健雄*1, 山田耕嗣*1

1. はじめに

1.1 研究の背景

凍結防止剤散布は、路面上の水分に塩化物を混合させることで、その凝固点を降下させて路面凍結を防止する冬期道路管理の一つである。供用開始から40年を超える北陸自動車道路では、長年に亘って散布された凍結防止剤は1 km 当たり累計で1,000 tonを超える区間があり、塩害による橋梁の早期劣化が深刻な社会問題に発展している¹⁾。加えて、道路予算は年々縮減されており、凍結防止剤散布の効率化は依然として重要な課題である。

凍結防止剤散布に関する研究として、大廣ら²⁾は自動路面状態判別システムを活用したスマート凍結防止剤散布システムを開発した。これは、路面雪氷状態を判別し、路面雪氷状態に応じて自動的に散布するシステムであり、凍結防止剤散布の適正化が期待できる。ただし、比較的積雪が少なく、寒冷度の低い地域で問題となる湿潤路面の凍結に対して、散布前にいつ・どれくらい散布すればよいかを評価することは依然として容易でない。その理由は、路面凍結の発生や凍結防止剤の散布量に関係する路面温度、路面水分量および路面塩分量の把握が難しいことにある。路面水分量や路面塩分量は、降雨、路面雪氷の融解、路肩からの融雪水の流入、蒸発・凝縮、通過車両による飛散、道路勾配に伴う排水など、様々な影響を受けて時間的および空間的に多様に変化する。したがって、凍結防止剤事前散布の効率化を促進させるには、少なくとも散布時における空間的な路面水膜厚や路面塩分濃度の変化を正確に捉えておくことが肝要になる。

1.2 既往の研究

路面水膜厚および路面塩分濃度の路線分布を把握するには、走行しながら連続的に測定する装置が必要になる。

路面塩分濃度については、伊藤ら³⁾によって車載式塩分濃度センサーが開発されている。この装置はタイヤ後方の水や泥が跳ねる部分に塩分濃度センサー(光学式屈折計)を取り付け、タイヤから飛散した水分から路面塩分濃度を連続して測定する。

路面水膜厚の測定方法は、吸水式、非接触式、埋設式などが挙げられる。吸水式は吸水紙を用いて路面上の水分を吸い取り、その重量を厚さに換算して求める方法である。非接触式は、近赤外線やマイクロ波などの光量を路面に照射して、その乱反射の光量や波長から湿潤、凍結、圧雪な

どの路面雪氷分類のみならず路面の水膜厚や氷膜厚を計測する方法である。例えば堤ら⁴⁾や渡邊ら⁵⁾の研究がある。これらの手法はすでに市販されており、路面の安全性を表す客観的指標である路面すべり摩擦係数 μ まで出力する装置や車両に装着して走行しながら計測できる装置もある。ただし、この方法は路面塩分量を測定することができない。また、多くのセンサーでは照射とその反射から水膜厚や μ を導くアルゴリズムはブラックボックスになっている。埋設式はセンサー表面がおおよそ路面の高さになるように舗装に埋め込み、路面温度や路面水分の導電率などから路面雪氷分類、塩分濃度、水・氷膜厚を計測する。埋設式もすでに商品化されているが、道路修繕時の取り扱いや定点測定のため空間的に不均一な路面状態に適応できないなどの問題がある。

このように路面水膜厚測定には様々な装置や方式が存在する。しかしながら、路面凍結問題に必要な測定精度を有し、走行しながら測定できる装置は見当たらない。過去に行った試験結果⁶⁾より、路面凍結が発生するような状況では、路面水膜厚は1 mm以下の場合が多い。また、水膜厚0.1 mmと0.3 mmの路面に対して同じ塩分濃度にするには、後者は前者の3倍の散布量が必要になることから分かるように、路面凍結問題では0.1 mmオーダーの路面水膜厚の測定精度が必要になる。

1.3 研究の目的

本研究では、走行しながら高精度で路面水膜厚と路面塩分濃度を測定可能な装置として、山田技研株式会社が開発した車載式塩分濃度センサーを利用した新しい路面水膜厚測定装置を開発し、その測定精度を検証する。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、以下では水はね式と呼称する。

2. タイヤ水はね式路面水膜厚装置の概要

図1は水はね式の概要図であり、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。

水はね式は、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 C_s (%)を測定する。

*1 山田技研株式会社 *2 福井大学学術研究院工学系部門

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 C_{smix} (%)を測定する。1秒間あたりの供給水および飛散水の重量を M_i および M_t (g/s)とすると、 C_{smix} は以下の式で与えられる。

$$C_{smix} = \frac{M_{is} + M_{ts}}{M_i + M_t} \times 100 \quad (1)$$

上式に示す M_{is} および M_{ts} は1秒間に流れる供給水および飛散水に含まれる塩重量(g/s)である。ここで、供給水の塩分濃度 C_{is} (%)および飛散水の塩分濃度 C_{ts} (%)は、それぞれ以下の式で与えられる。

$$C_{is} = \frac{M_{is}}{M_i} \times 100 \quad (2)$$

$$C_{ts} = \frac{M_{ts}}{M_t} \times 100 \quad (3)$$

式(1)に式(2)と(3)を代入して、 M_t を左辺にして整理すると次式が得られる。

$$M_t = \frac{C_{is} - C_{smix}}{C_{smix} - C_{ts}} M_i \quad (4)$$

式(4)において、 M_i および C_{is} は設定項目であり、 C_{ts} および C_{smix} は測定されるため、右辺の未知数は無くなり、 M_t は得られる。最後に、路面水膜厚 H_w (mm)は後述の4章に記載する H_w と M_t の関係式より求められる。なお、以下では C_{is} および C_{smix} を測定するために後右輪および後左輪の泥除け部に取り付けたセンサーを、それぞれ路面塩分濃度センサーおよび混合塩分濃度センサーと呼ぶ。

図2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 C_{smix} を測定できる。

3. 走行試験の方法

図3を参照しながら、3.1では H_w と M_t の関係を定量的に評価するための走行試験について、3.2では水はね式から得られる H_w (H_{w-tire})の測定精度を検証するための走行試験について、それぞれ述べる。両試験ともに2019年1月16日～18日の3日間に亘って苫小牧寒地試験道路で実施した。

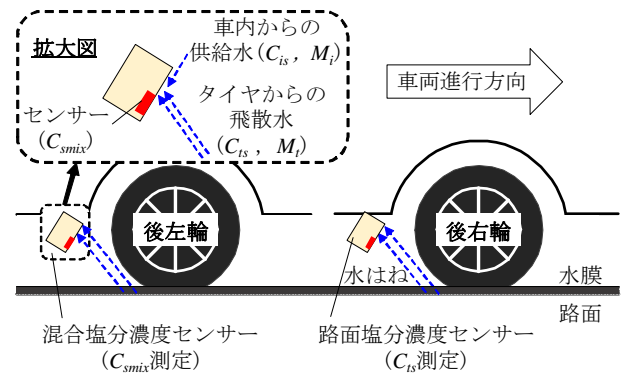


図1 タイヤ水はね式路面水膜厚装置の概要図

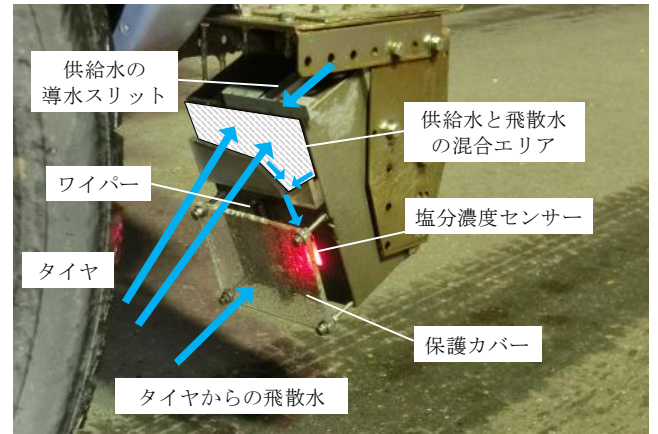


図2 混合塩分濃度センサーの設置状況

試験中に降雨や降雪はなかった。試験道路は全長2,700 mの水平な周回道路であり、試験区間は直線300 mの密粒度アスファルト舗装である。試験車両にはスタッドレスタイヤを装着した普通乗用車を採用し、その車体重量は約1,400 kgである。

3.1 路面水膜厚と飛散水重量の測定方法

試験は以下の(i)～(v)の手順で行われた。(i)散水車を用いて試験区間300 mのうち50 mの路面に散水する。(ii)散水区間内の2地点、各地点3箇所において吸水式により H_w (H_{w-mass})を測定する(図3左下図)。(iii)(ii)の作業と並行して吸水スポンジを路面塩分濃度センサーの前面に装着する(図3右図)。(iv)すみやかに規定の走行速度 V (km/h)で試験区間を試験車両で走行し、散水区間を通過後に車両を停止させる。(v)走行前後の吸水スポンジの重量差を求める。この重量差、すなわち吸水スポンジに含まれた飛散水の重量を、吸水スポンジと供給水と飛散水の混合エリアとの表面積比から、その混合エリアへの飛散水の重量に換算する。これを散水区間の走行時間で除したものを M_t とする。試験は、様々な H_w で実施した。 V は20, 40, 60および80 km/hの4ケースとした。



図3 走行試験の概要図

3.2 路面水膜厚の測定精度の検証方法

試験手順について述べる。散水車を用いて試験区間 300 m のうち原則 200 m の路面上に散水し、上記(1)の試験と同様に H_w を測定する。その路面上を混合塩分濃度センサーに規定の塩溶液を流しながら試験車両を走行させる。得られた C_{smix} と C_{ts} を式(4)に代入することで M_t が算出され、後述する H_w と M_t の関係を用いて得られた H_w を本装置による計測値 H_{w_tire} (mm) とする。 C_{smix} と C_{ts} は 1 秒間隔で記録される。

試験は、 $V = 40$ km/h とし、 H_w を変えて計 7 回実施した。本試験において C_{ts} は常に 0% であった。供給水について、実道路における路面上の塩分濃度は 5% 以内が多い⁷⁾ ことを考慮すると、 C_{ts} は濃いほど測定精度が向上すると推測できるため、飽和塩分濃度に近い 18.3% とした。 M_t について、 M_i と M_t の混合塩分濃度 C_{smix} を測定することから、 M_t に対して M_i が過小であっても過大であっても H_w の測定精度は低下する。ここでは、予備試験を実施し、 H_{w_tire} の測定精度が高かった $M_i = 0.88$ g/s とした。なお、散布車の稼働時間は通常 1.5 時間程度であり、この M_i での散布作業に必要な供給塩溶液は 5 リットル程度となり、溶液の準備や設置など作業員に生じる実用上の負担や道路沿道環境への負荷は小さい。

4. 路面水膜厚と飛散水重量の定式化

4.1 吸水式による路面水膜厚の測定精度

本論文では、吸水式による H_w (H_{w_mass}) を基に研究を展開するため、以下に H_{w_mass} の測定精度について述べておく。

吸水式の測定精度は、規定重量の水を道路上の規定面積に散水し、吸水紙を用いてその水分を回収して、散水重量に対する回収重量の比を算出することで調べられる。この実験を行った結果、 $0.1 \text{ mm} \leq H_w < 1.0 \text{ mm}$ の範囲にお

いて、回収重量/散水重量の比、すなわち H_{w_mass} の評価精度は平均で約 0.93 であり、 H_{w_mass} は H_w の真値に対して 7% 程度を過小に測定することが分かった。なお、 H_{w_mass} の評価精度は吸水紙の表面積に依存すると考えられる。参考までに本試験に用いた吸水紙の表面積は 0.03 m^2 である。以下では、水式によって得られた路面水膜厚を 0.93 で除した値を路面水膜厚の真値とする。

4.2 路面水膜厚と飛散水重量の関係

図4は $V = 20, 40, 60$ および 80 km/h における H_w と M_t の関係を示す。同図(a)の $V = 20$ km/h の結果に着目すると、 H_w は M_t の増大に伴い累乗関数的に増大することが分かる。その他の V の結果を見ると、 $V = 20$ km/h と同様に M_t と H_w の間には式(5)のような累乗関係が認められる。図中にはそれぞれの近似式を示す。

$$H_w = aM_t^b \quad (5)$$

式(5)中の a および b は係数であり、図4中に示すように係数 b は一定値であるが、係数 a は V に依存する。この係数 a と V の関係を示したものが図5である。 a は V の増加につれて指数関数的に減少した。これらの関係はそれぞれ次式で表される。

$$a = 0.43 \exp(-0.007V) \quad (6)$$

$$b = 0.45 \quad (7)$$

以上より、 H_w を M_t と V によって定量的に評価することが可能になった。ただし、図4および図5ならびに式(5)～(7)は車両・タイヤ条件、道路・舗装条件、塩分濃度センサーの設置条件等によって異なることが想定される。したがって、実際に本提案装置を用いて H_w を評価する場合には、本論文で示す試験を実施し、式(6)および(7)の係

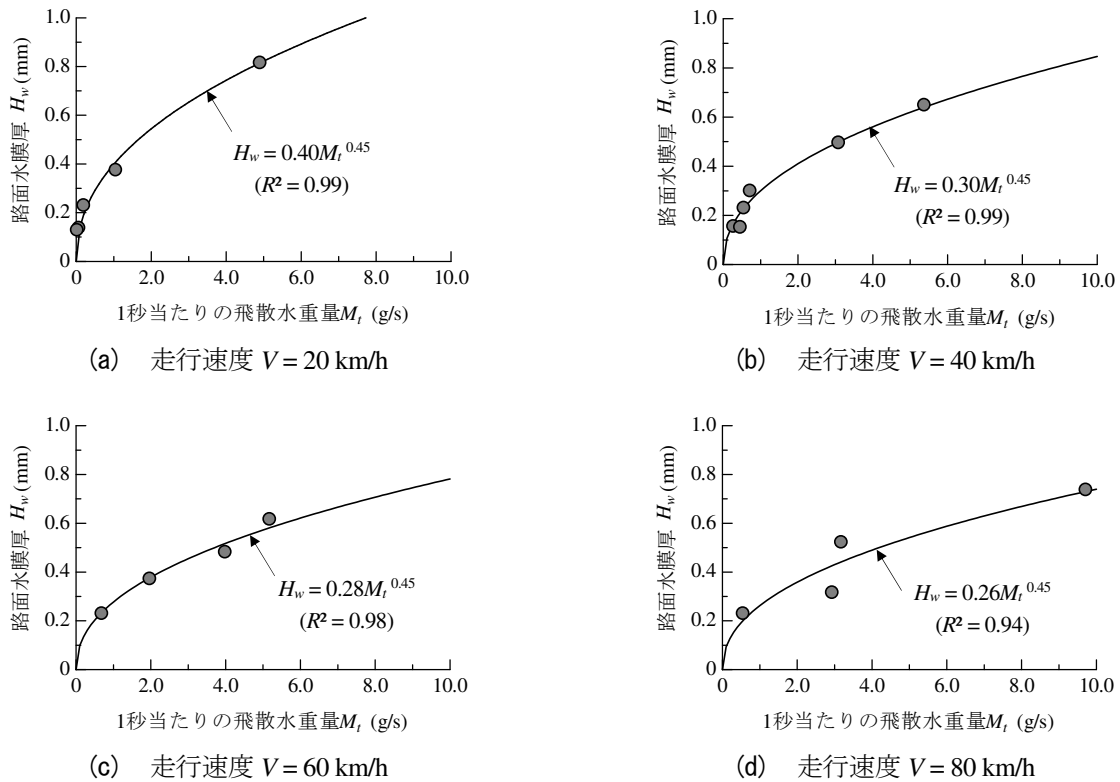


図4 路面水膜厚と飛散水重量の関係

数を改めて設定する必要がある。なお、図4から分かるように本試験での H_w は厚くても $0.7 \sim 0.8$ mm であり、それ以上の H_w での試験はできなかった。その理由として、散水直後にはそれ以上の H_w も存在するが、道路横断勾配に起因した排水によって散水後から僅か数分程度で H_w が低下したためである。実際の道路でも降雨中やその直後、あるいは轍ぼれなど水が溜まり易い状況でない限り、道路表面流の発生と道路外への排水により、 1.0 mm を超えるような厚い H_w の湿潤路面は出現し難いと考えられる。

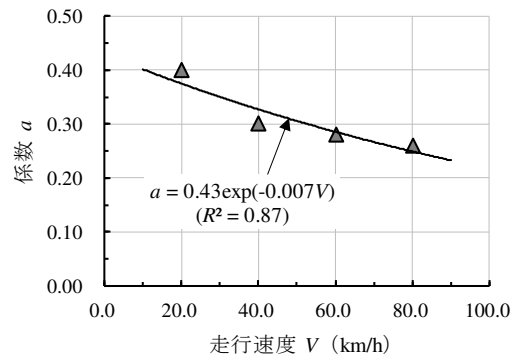


図5 式(5)中の係数 a と走行速度の関係

5. タイヤ水はね式路面水膜厚装置の測定精度

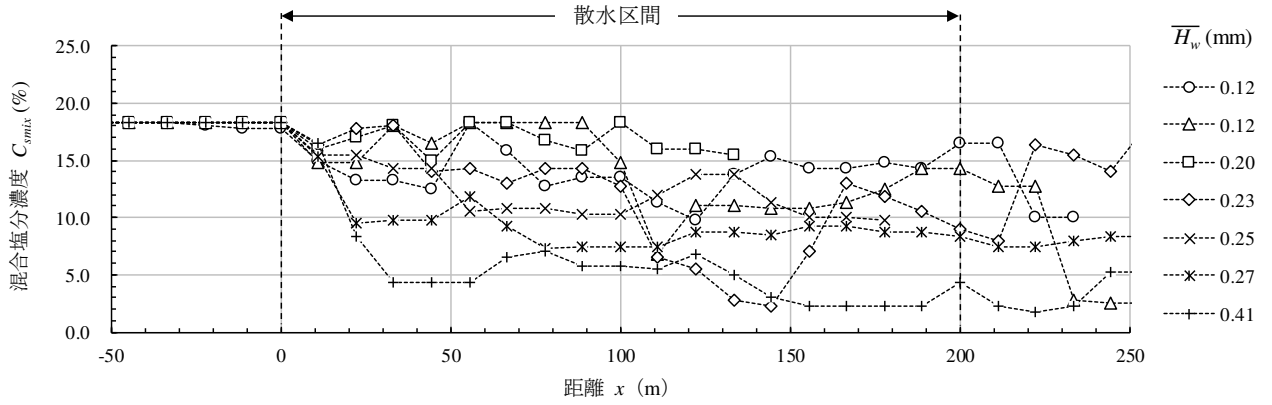
5.1 測定値の空間的変動性

図6(a)および(b)は水はね式から得られた C_{smix} および H_{w-tire} の空間分布であり、各測定における $H_w (= H_{w-mass}/0.93)$ の平均値 ($\overline{H_w}$) を図中の凡例に示す。同図の横軸は距離 x (m) であり、基本的には $x = 0 \sim 200$ m が散水区間である。同図における試験車両の進行方向は左から右である。

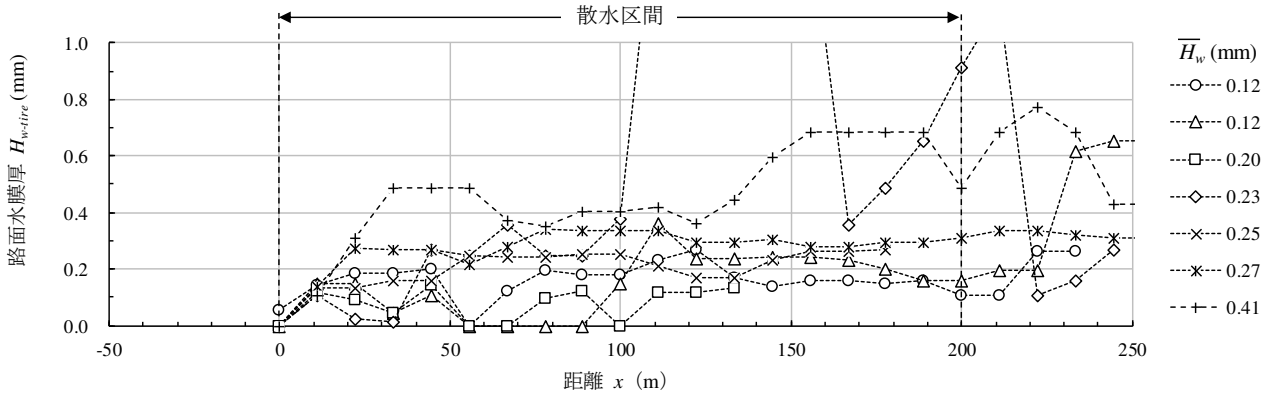
まず、同図(a)の C_{smix} について述べる。 C_{smix} は、散水区間に試験車両が到達するまで、供給水の塩分濃度 (C_{is}) の 18.3% である。試験車両が散水区間に到達すると、飛散水によって C_{is} が希釈されるため C_{smix} は低下した。本試験条件の $V = 40$ km/h では、この C_{smix} の低下が落ち着くまでに $x = 20 \sim 40$ m の距離を要した。 C_{smix} は低下後も上下の変動が認められる。なお、散水区間後の C_{smix} は試験車両による

散水区間からの水分の引きずりによって路面が濡れていたため、必ずしも $18.3\% (= C_{is})$ とはならない。また、散水区間より短いデータ ($\overline{H_w} = 0.20$ および 0.25 mm) は散水車の貯水不足により散水区間を狭めたためである。

次に同図(b)の H_{w-tire} に注目する。同図から C_{smix} の変動が H_{w-tire} に影響を及ぼすことが分かる。 H_{w-tire} の上下変動が激しい $\diamond$ および $+$ のシンボルで示す試験は $\overline{H_w}$ が 0.23 および 0.41 mm であり、比較的 $\overline{H_w}$ の厚い実験において推定値の変動が顕著に観られた。こうした H_{w-tire} の極端な増大は、要因として局所的な飛散水の増加や混合エリアでの飛散水が供給水と十分に混合されないまま混合塩分濃度センサーに接触したなどが推察されるが、その解明は今後の



(a) 混合塩分濃度



(b) 路面水膜厚

図6 水はね式から得られた測定値の空間分布

課題である。なお、図中に収まらなかった $\overline{H_w} = 0.23$ mm の結果は拡大して示した。

次に、こうした C_{smix} の変動が H_{w-tire} に及ぼす影響について述べる。図7に図6に示した H_{w-tire} の分布からその標準偏差 $S_{hw-tire}$ を求め、 S_{csmix} との関係を示す。 $S_{hw-tire}$ は 0.05 から 0.19 mm の範囲にあり、 S_{csmix} とともに増大した。本試験において $S_{hw-tire}$ は S_{csmix} に対して約 0.04 倍で変化した。こうした C_{smix} や H_{w-tire} の変動はクラック、凹凸、わだちなどの路面の不均一性の他、先述したようなタイヤから混合塩分濃度センサーへの飛散量のばらつき、飛散水と供給水の混合エリアでの混合具合のばらつき、などが要因として挙げられる。しかしながら、現時点ではその特定は難しく、今後、試験を繰り返し実施し、水はね式の特徴や信頼性をより詳しく分析する必要がある。

5.2 測定精度

図8は $\overline{H_w}$ と試験区間における H_{w-tire} の平均値 $\overline{H_{w-tire}}$ 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

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \overline{H_{w-tire}}^i - \overline{H_w}^i \right| \quad (8)$$

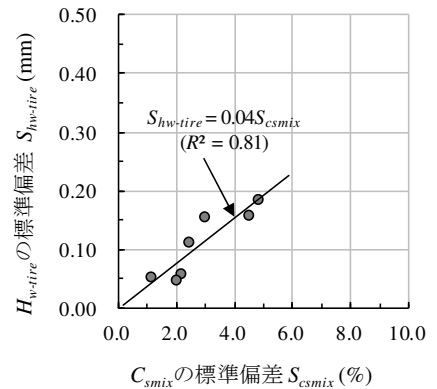


図7 路面水膜厚の空間的変動性

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 ~ 0.13 mm の間にあり、その MAE は 0.08 mm であった。なお、本結果はやや過大評価であったため、偏差が小さくなるような $\overline{H_{w-tire}}$ に低減係数を乗じると MAE は最小で 0.07 mm と僅かであるが改善した。この時の低減係数は 0.90 である。

6. おわりに

本研究では、車載式塩分濃度センサーを利用したタイヤ水はね式路面水膜厚装置(以下、水はね式)を開発し、走行試験を通してその測定精度を検証した。得られた成果を以下に列挙する。

- (1) 車内から塩分濃度センサーへの供給水とタイヤから塩分濃度センサーへの飛散水の混合塩分濃度を測定する装置を開発し、路面塩分濃度と混合塩分濃度から飛散水重量を導く理論を構築した。
- (2) 路面水膜厚は飛散水重量と累乗関係にあり、同じ飛散水重量であっても走行速度が速いほど路面水膜厚は薄い。これらの関係を定式化したことにより、飛散水重量と走行速度から路面水膜厚の推定が可能になった。
- (3) 水はね式による路面水膜厚の空間的変動は0.05~0.19 mmの範囲にあり、混合塩分濃度のそれに対して約0.04倍であった。
- (4) 水はね式による路面水膜厚の推定値の平均絶対誤差は-0.13~0.12 mmの間にあり、その平均値は0.08 mmであった。

本研究により、水はね式は路面凍結問題に必要となる0.1 mmオーダーの精度で路面水膜厚を測定できる可能性が示された。本装置の開発により、走行しながら簡単に縦断勾配・線形、橋梁・トンネル区間、日向・日陰区間、舗装種別などの道路条件に伴い変化する路面水膜厚の空間的な連続データを取得することが可能になる。

今後の課題として、本装置の検証は限られた条件で行われており、様々な気象、舗装、交通および道路条件などでの測定精度の検証が不可欠であり、本装置の特徴や信頼性を深く分析する必要がある。また、耐久性や経済性を含めた装置の改良など、実用化に向けた研究も進める予定である。

謝辞：走行試験は、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所寒地交通チームの協力を得て実施しました。また、本研究は科研費(課題番号 JP 17K01350)の助成を受けました。ここに記して感謝申し上げます。

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，<https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/committee/>，2014。
- 2) 大廣智則，高倉清，桜庭拓也，花塚泰史，萩原亨：自動路面状態判別システムを活用したスマート凍結防止剤散布システムの開発，交通工学論文集，Vol. 5，No. 4，pp. B_7-B_15，2019。

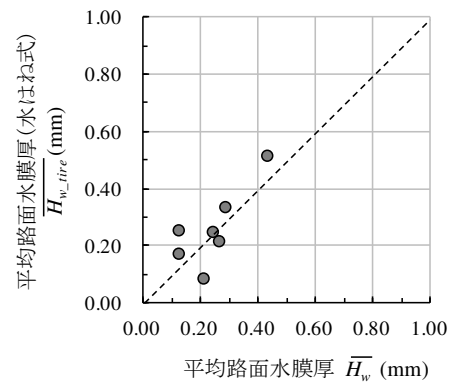


図8 水はね式による路面水膜厚の測定精度

- 3) 伊藤玲次，山田忠幸，酢谷浩，徳永透：路面情報を連続測定する技術・装置を活用した冬期道路の路面管理，ふゆトピア研究発表会論文集，Vol. 26，p. 29，2014。
- 4) 堤大祐，波通隆，堀武司，長尾信一，渡辺伸央，村上康之，磯田和志，池上貴志樹：近赤外光吸収画像による水・氷の検知に関する研究（第二報），北海道立工業試験場報告，No. 298，pp145-150，1999。
- 5) 渡邊直樹，榎本浩之，舘山一孝，山本朗人，田中聖隆，高橋修平，岩本明子，佐々木亮介，スアスムグリ・アリマス：マイクロ波放射計を用いた路面状態自動判別システムの開発，雪氷，Vol. 73，No. 4，pp. 213-224，2011。
- 6) Fujimoto A., Tokunaga R., Kiriishi M., Kawabata Y., Takahashi N., Ishida T., Fukuhara T.: A Road Surface Freezing Model Using Heat, Water and Salt Balance and Its Validation by Field Experiments, Cold Regions Science and Technology, Vol. 106, No. 1, pp. 1-10, 2014。
- 7) 沼田実，長門幸朗，栗林直義，川平吉則，稲沢太志，浦野隆：凍結防止剤散布の最適化技術手法に関する評価試験報告，寒地技術論文・報告集，Vol. 22，pp. 218-223，2006。

雪氷作業への新型路面センサの導入

岡田 大輝*1、四本木 久一*1、中村 貴男*2

1. はじめに

冬季の高速道路において、お客さまの安全な交通を確保するため、路面凍結・積雪の防止・抑制、除雪等の作業（以下、「雪氷作業」）が重要な役割を担っている。雪氷作業は、気象・路面状況を注視しながら、NEXCO中日本グループ社員の総力を結集し、各種連携を取りながら迅速かつ適切な作業の実施と対応が求められる。雪氷作業の実施に至る判断フローを図1に示す。



図1. 雪氷作業の判断フロー

2018年2月に北陸地方を襲った北陸豪雪では、道路交通に多大な影響を与え、今後の雪氷作業について、ハード・ソフト面の強化を求められる結果となった。ハード面の強化として、散水融雪・薬液散布、本線監視カメラ設備及び雪氷車両の増強を進めている。また、ソフト面では地域連携、交通運用方法等、種々の訓練により体制強化に取り組んでいる。

2. 今日の雪氷作業における新たな課題

現在表面化している「雪氷作業」での新たな課題を下記に示す。

- ・経験の浅い雪氷車両オペレーターの増加
- ・個人差による雪氷作業判断のバラツキ

雪氷車両のオペレーターは、社会的な労働力不足や熟練者の高齢化・退職を背景に、減少している。雪氷車両の操作は個人の経験・技量に依存する部分が大きく、経験が少ないオペレーターが活躍できるようになるまでに多くの時間が必要となる。

また、当番班長に必要とされる路面状況や、気象予測からの雪氷作業の実施判断には明確な基準が無く、定性的なものとなっている。そのため個人の経験差によるバラツキが生じやすく、同じ気象条件において作業内容が変わる可能性がある。

上述より、雪氷作業は品質・精度が変動しやすく、経験の浅い者にとって難解なものとなっており、雪氷作業の品質を維持するために、より容易に運用判断が可能な仕組みを構築する必要がある。

3. 新型路面センサの導入

本件は、車載式の新型路面センサ（以下、「路面センサ」）を導入し、雪氷作業全般を支援する枠組みを構築することで課題解決を目指したものである。この路面センサは、現状の気象情報、雪氷巡回等から報告される路面状態等の断片的な雪氷情報を補い、連続データを得ることが可能で、より現地の実態に即したデータ収集が行えると共に、種々のシステム構築にも活用可能なデータとなる。

3-1. すべり摩擦係数

路面センサの重要な機能として、路面管理を定量的に行うためのすべり摩擦係数（以下、「摩擦係数」）が計測できる点がある。摩擦係数は路面が滑りやすくなるほど値が低くなる。（社）日本自動車タイヤ協会が示す積雪と路面の摩擦係数の関係[1]を図2に示す。

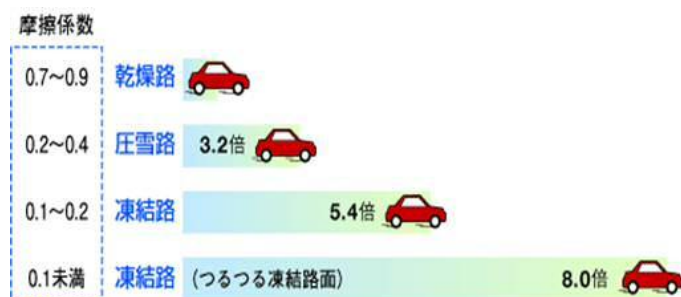


図2. 積雪と路面の摩擦係数の関係

他の地方では、路面の残留塩分濃度を路面管理の指標としている所もあるが、北陸では塩化化合物に加えてロードヒーティング（以下、「RH」）や酢酸等を併用し路面管理を行っている。以上から摩擦係数を用いて管理に反映することが、定量化するために望ましいと判断した。

*1 中日本高速道路株式会社 金沢支社 敦賀保全・サービスセンター 施設課

*2 中日本高速道路株式会社 金沢支社 環境・技術管理部 品質検査課

3-2. 路面センサの概要

路面センサは路面に赤外線を照射し測定する原理で、摩擦係数に加え、外気温測定等も可能なオールインワン機能となっている。道路巡回車への路面センサの取付位置を図3に、センサの仕様を下記にそれぞれ示す。



図3. 道路巡回車の路面センサ構成

路面センサ 仕様

測定方式) 光学式 (赤外線)

測定間隔) 0.5sec

測定項目) 摩擦係数、路温、気温、湿度、
露点温度、路面状態、厚さ

路面センサが取得した諸データは、車載端末で閲覧できる他、Webを介して雪氷本部のPCへ送られる。端末の車載例を図4に示す。



図4. 端末の車載例

雪氷本部では、路面センサを搭載した車両が走行した経路の計測結果をリアルタイムに閲覧できる。雪氷本部で閲覧する各地点の計測データ例を図5に示す。

計測データは地図上に軌跡がプロットされ、数値に応じて着色される。その数値はグラフでも閲覧できる他、同箇所の走行映像も同時に確認できる。この様に場所毎のデータが視覚化されるため、重点的な雪氷作

業が実施でき、効率化につながる。また、計測データによって、定量的な基準を設定することできめ細やかな雪氷作業を実現できる。

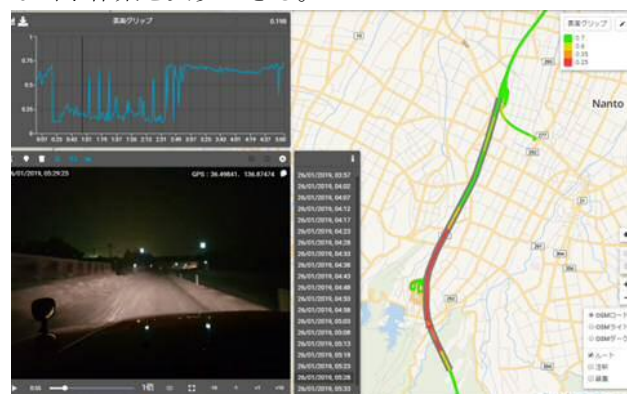


図5. 雪氷本部での計測結果閲覧例

4. 路面センサの精度検証

今回導入した路面センサは、既に欧州で運用されており、路面の摩擦係数を含め各種データを定量的に計測することが出来る。寒地土木研究所では、同メーカーのセンサと、車両に取付けた試験輪に発生する横反力を測定することで摩擦抵抗値を算出する装置とを比較し、精度の検証を行っている[2]。同論文では、検証結果として、2種類の測定結果には良い相関関係があり、路面状態を確認するには十分な精度であると述べている。

しかし欧州や寒地土木研究所のある北海道と北陸では緯度が異なる。緯度が高ければ気温・湿度も低下し、雪も湿気を含まない粉雪となる。一方、北陸は湿度が高く気温低下も少ないため、雪は水気を含んだ重い雪となる。これらから、今回導入した路面センサが北陸地方特有の重い雪においても対応可能か確認するために現地検証を行った。

4-1. 気象観測データとの関係

高速道路に設置された気象観測局の気温、路温データと、路面センサが測定したデータの相関を求めた。データ間の相関を表したグラフを図6, 7にそれぞれ示す。

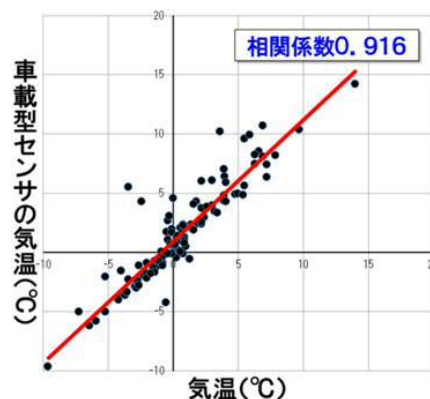


図6. 気温データとの相関

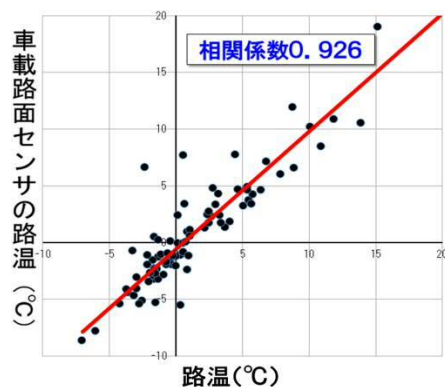


図7. 路温データとの相関

一般に、二つの要因間の相関係数が0.7～1.0のとき、かなり強い正の相関があると判断できる。現地検証の結果、路側の気象観測局の気温、路温と路面センサの値は、いずれも相関係数が0.9を超えており、極めて高い相関が得られた。

4-2. 路面摩擦係数との関係

積雪路面等の摩擦係数を図8に示すポータブルスキッドテスト (British Pendulum Number, 以下、「BPN」と路面センサが計測したデータの相関を求めた。検証の結果、相関係数0.8と高い相関が得られた。データ間の相関を表したグラフを図9に示す。



図8. BPN

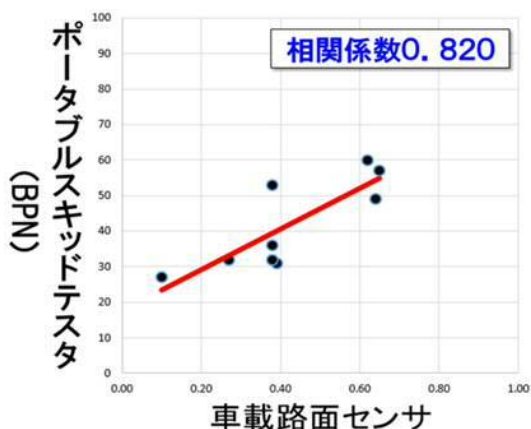


図9. BPNとの相関

現地にて、気象観測データ、BPNと路面センサとの相関関係を検証した結果、いずれも強い相関関係があることが確認できた。検証結果から、北陸地方においても、路面センサは十分活用可能と考える。

5. 雪氷作業支援ナビゲーションシステム

路面センサの実用性が確認できたことから、NEXCO中日本で開発された車両位置情報システム（以下、「VPIS」）との連携を図り、新たに雪氷作業支援システムの開発中である。雪氷作業支援システムの全体イメージを図10に示す。

※VPISとは、車載端末に内蔵したGPSから位置情報を取得し、高速道路本線での位置情報を乗務員が確認するためのものである。また、同端末を搭載した車両の位置情報は雪氷本部のPCからも確認できる。



図10. 雪氷作業支援システムの全体イメージ

5-1. リアルタイム気象情報収集

VPISと路面センサとの連携により収集データが一元化される。これにより、道路管理に必要な気象関連データベースがより高度化される。

路面管理を行う際に特別な技能や知識を必要とせず、車両を走行するだけで必要なデータの収集が可能となる。このデータを活用し、種々の作業と情報が共有され、効率よく作業が行える。

5-2. 乗務員ガイダンス機能

路面センサの取得データから得られた作業内容をリアルタイムにオペレーターへVPISから視聴覚情報として伝達することで、オペレーターに委ねていた作業を画一的に指示できるようになり、品質と精度が向上される。

また、合わせてオペレーターの経験・技量への依存も軽減される。乗務員ガイダンスのイメージを図11に示す。



図 1.1. 乗務員ガイダンスのイメージ

5-3. 作業装置操作・監視（自動制御含）

雪氷車両の作業装置は一般的な建設機械と異なり、特にオペレーターの経験・技量が必要な作業となる。また、製造メーカーや型式等の違いから様々な仕様の機器が統合されることなく設置されている。

本機能はVIPSの車載端末に作業装置のインターフェイスを簡略化して取込み、オペレーターの技量、判断に左右されない簡単な操作端末を開発する。また、将来、訪れる「女性、高齢者対応」も見据え、汎用性を向上させた自動制御の導入を計画している。作業装置のインターフェイスのイメージを図12に示す。



図 1.2. 作業装置のインターフェイスのイメージ

5-4. AIシステムの構築

前項までに述べた各種機能の実現を踏まえ、気象予測、現地測定データ等定量化されたデータ群から、最適な作業計画を立案する「AIシステム」の構築を進めている。AIシステムの導入により、個人の経験・技能差による判断のズレを解消し、より安全で効率的な雪氷作業が実現される。

現在、AIシステム構築に必要なデータを蓄積する環境を整え、雪氷作業を通じてデータ蓄積を行い、実用化を目指す。

6. まとめと今後の展望

本件では、経験の浅い雪氷車両オペレーターの増加、

個人差による雪氷作業判断のバラツキという従来の雪氷作業における課題を解決するため、路面センサにより摩擦係数を計測し、路面管理を行う手法を見出した。現地検証の結果、路面センサを用いることで、人の経験や知識、感覚に依存することなく、定量的に路面状態を計測することが可能であると確認できた。

今後、路面センサとVIPSを連携させた雪氷作業支援システムを構築に向け、路面センサを設置する道路巡回車の台数を増やし、データ蓄積を進める。また、路面センサを雪氷車両へ展開し、作業のシステム化に向けた実証実験を行う。これにより雪氷作業の管理目標に応じた設定値を確立させていきたい。

また、雪氷車両の操作環境の改善に加え、オペレーターに課せられる定型業務の効率化・自動化（Robotic Process Automation, 以下「RPA」）の検討に着手し、導入を目指す。RPAの導入により、雪氷作業に付随して発生していた書類作成等の業務が低減され、働きやすい就労環境が整い、人材確保の一助となる。

雪氷作業は、高速道路事業だけでなく、寒冷地域を支えるインフラ事業に共通した管理技術テーマである。今後もこれら技術の開発と高度化を図り、日本の物流の根幹を支えるインフラの安心・安全・信頼性向上に寄与して行きたい。

参考文献

- [1]一般社団法人 日本自動車タイヤ協会「適正使用に関する安全情報の提供」,
<<http://www.jatma.or.jp/winterdrive/>>, (2019年9月17日閲覧)
- [2] N.Takahashi, M.Kiriishi, R. Tokunaga, “Comparative Study of Friction Measurement Devices”, Proceedings of SIRWEC17th International Road Weather Conference, 2014.

除雪機械の情報化施工技術の開発

橋本 隆志 ※1 小浦方 一彦 ※1 山田 拓 ※1

1 はじめに

北陸地方整備局では、管内（新潟県・富山県・石川県）の直轄国道管理区間14路線、合計約1,076kmの冬期道路交通を確保するため、約500台の除雪機械を配備し除雪作業を実施している。（写真1）

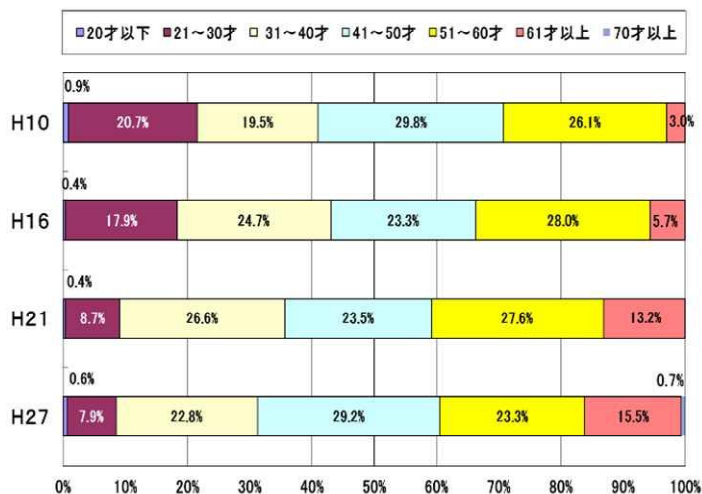


写真1 除雪作業状況

各除雪機械の運転は、路面状況、道路構造、沿道状況等の変化に適応させた操作が必要であり、経験と熟練した操作技術が必要である。

昨今においては、除雪機械の熟練技能を持つオペレータの高齢化に伴う引退や新規入職者の減少により、担い手の確保が重要な課題となっている。（表1）

表1 除雪機械オペレータ年齢構成
（新潟・富山・石川県）直轄および地方公共団体



資料：（一社）日本建設機械施工協会北陸支部調べ

このような背景のもと、北陸技術事務所では初心者でもベテラン並に安全で作業効率のよい除雪作業が可能となるよう、ICT（情報通信技術）を活用した「除雪機械の情報化施工技術」の検討に取り組んでいる。

2010年度から2018年度までに凍結防止剤散布車、ロータリ除雪車、歩道除雪車、一次除雪機械（除雪トラック）の4機種の作業ガイダンス装置開発し、順次現場への導入を進めてきており、現在は、将来目標である除雪機械のマシンコントロール化（以下「MC化」という）に向け、一次除雪機械（除雪トラック）のMC化を検討中である。

（表2）

表2 検討の経緯

年度 機械名	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	将来
凍結防止剤散布車	ガイダンス開発						ガイダンス改良			M C 化
ロータリ除雪車				ガイダンス開発			ガイダンス改良			
歩道除雪車						ガイダンス開発				
一次除雪機械 (除雪トラック)								ガイダンス開発 M C化検討		

本稿では、2017～2018年度に開発した一次除雪機械（除雪トラック）の作業ガイダンス装置及びMC化の検討について報告するものである。

2 作業ガイダンス装置の開発

2.1 機能の検討

除雪トラックの作業ガイダンス装置は、過去に開発したロータリ除雪車の作業ガイダンス装置をベースとし、除雪トラックの作業補助に必要となる機能を追加及び改良することで開発した。

①接近警告機能

基本的なガイダンス機能は、道路構造物との接触事故防止、作業注意区間への接近警告機能とし、進行方向、横断方向ごとに設定した。

（写真2～4）



写真2 進行方向のガイダンス対象（障害物）



写真3 進行方向のガイダンス対象（作業注意区間）



写真4 横断方向のガイダンス対象（路側端）

②作業装置の状態に応じた離隔基準切替

作業装置は、フロントプラウとグレーダ装置の2種類で構成されており、グレーダ装置は助手席側に張り出し、プラウは角度の変更が可能であるため、装置端部の位置が作業状況ごとに異なる。（写真5）



写真5 除雪トラックの作業装置

よって、フロントプラウとグレーダ装置の状態ごとに路肩端・道路中心線への離隔基準を設定し、各設定条件に応じて接近警告ができるように作業装置の離隔基準を切替可能な仕様とした。（図1）

離隔基準の種類	表示	内容
プラウ（自動）	プラウ 自動 左流し	プラウ（自動）に設定されており、除雪車位置により「左流し」を自動選択中であることを示す
	プラウ 自動 前送り	プラウ（自動）に設定されており、除雪車位置により「前送り」を自動選択中であることを示す
プラウ（左流し）	プラウ 左流し	プラウ（左流し）を選択中であることを示す
プラウ（前送り）	プラウ 前送り	プラウ（前送り）を選択中であることを示す
グレーダ（全張出）	グレーダ 全張出	グレーダ（全張出）を選択中であることを示す
グレーダ（張出無）	グレーダ 張出無	グレーダ（張出無）を選択中であることを示す

図1 作業装置離隔基準切替機能

③作業速度に応じたガイダンス

除雪トラックの作業速度は約30km/hであり、作業中にオペレータが画面を注視することが難しい。

そのため、容易に確認できるように画面表示（文字+矢印）と音声により接近警告を行う仕様とした。

（図2～3）



図2 画面全体での障害物への接近表示（進行方向）

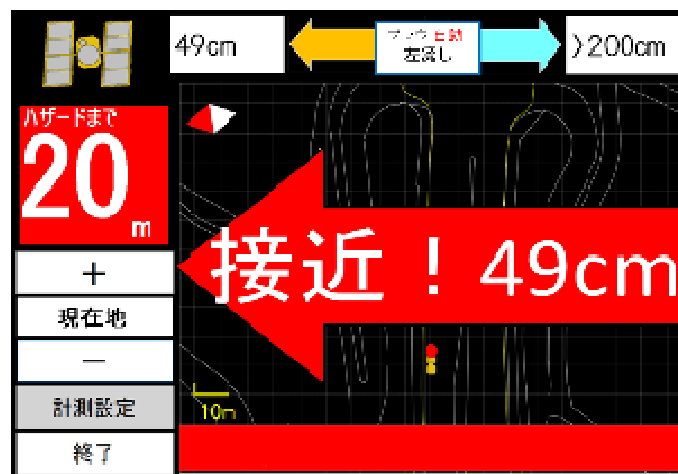


図3 画面全体での障害物への接近表示（横断方向）

④ガイダンス開始の設定値

進行方向のガイダンス開始の設定値は、一般的なカーナビゲーションシステムを参考とし、除雪トラックと一般車両の速度差（除雪トラック：30km/h 一般車両：50km/h）で換算し、設定した。（表3）

表3 近接警告開始の設定値

警告種類	内容（音による案内・警告も含む）
距離表示の開始 （対象物500m手前）	「あと〇〇m」の表示を開始、到達するまで継続して点滅表示
1回目の音声案内 （対象物300m手前）	障害物…「□□m先に障害物があります」と1回発声 注意区間…「□□m先に注意区間があります」と1回発声
2回目の音声案内 （対象物100m手前）	障害物…「障害物が近づきました」と1回発声 注意区間…「注意区間が近づきました」と1回発声
警告 （対象物50m手前）	到達するまで警告音を再生 警告画面を表示
※接近警告（表示・音声案内）開始距離は、標準値以外にも自由に設定可能	

なお、ガイダンス開始の設定値は、容易に変更可能な仕様となっている。（図4）

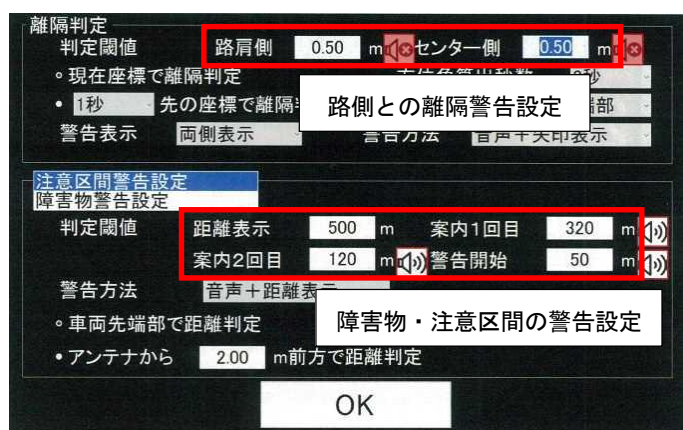


図4 ガイダンス開始

⑤測位方式

測位方式は、一般的なICT建設機械で使用実績があり、センチメートル単位で正確な測位が可能となるVRS方式を採用した。（表4）

表4 測位方式概要

測位方式	概要	測位誤差
VRS方式	① サービス事業者より、リアルタイムで自車位置の補正データを受信。 ② 基準局を必要とせず、GPS受信機1台で高精度の測位が可能であるが、通信料が必要	水平 2～3cm 標高 3～4cm

⑥地図データ

地図データは、計測した路肩端、道路中心線データと、国土地理院の背景地図データを組み合わせて作成し、計測精度は10cm以内となるよう設定した。

また、視界不良時の位置確認、土地勘のないオペレータの作業を補助するため、国土地理院の地図データをベースに距離標、交差点名を表示するよう改良した。

（図5）



図5 地図データ

2.2 機器・画面構成

完成したガイダンス装置の車載状況（写真6～7）、機器構成・画面構成（図6）は、次のとおりである。



写真6 アンテナ設置箇所



写真7 ガイダンス装置本体車載例



図6 機器構成・画面構成

2.3 実用性の検証

①進行方向解析

通常の ICT 建設機械は、位置測位を行うアンテナ 2 基で構成されているが、本ガイダンス装置はコスト削減のため 1 基としている。

この場合、アンテナの移動軌跡から車両の進行方向を解析する必要があるが、解析完了まで正確なガイダンスを行うことが出来ない。この解析時間が実作業へ与える影響を検証するため、停車状態から方向解析完了までに必要な時間と距離を計測した。

結果、解析時間が平均して約 6 秒、必要距離は 5m～15m であった。（図 7）

停車、方向転換を頻繁に繰り返す場合は、追加でセンサー又はアンテナを設置する必要があるが一次除雪作業は直進が主体となっている。

よって、6 秒程度の解析時間であれば影響は少ないと判断し、アンテナ等は追加設置しないこととした。



図7 進行方向解析完了前のガイダンス画面

②測位精度

今回採用した機器・地図データは、ロータリ除雪車の作業ガイダンス装置で使用実績があり、基本的な性能は確認済みである。

ただし、過去に開発したロータリ除雪車（5km/h 以下）と今回開発した除雪トラック（約 30km/h）では、作業速度が大きく異なるため、一次除雪作業の速度下でも正確な測位を行うことが可能か、試験コースを平均速度 30km/h で走行し、検証した。

結果、水平誤差は平均 10cm 以内と各機器の公称精度内に収まっており、正常に動作することが確認できた。

2.4 導入効果

①安全性・施工性向上

除雪作業に直接的な障害となる障害物をガイダンスすることにより、接触事故防止の安全性向上が見込まれる。

この他、作業注意区間（ランプ・パーキングエリア）を登録し、事前ガイダンスすることによりヒューマンエラー防止による施工性向上も期待できる。

②除雪作業支援効果

背景地図機能により自車位置を確認できるのため、工区間応援で土地勘のない地域で作業を行う場合や吹雪等による視界不良時に有効である。

3 一次除雪機械 MC 化の検討

3.1 検討方針

除雪トラックはフロントプラウ、グレーダ装置、サイドシャッター操作のため、多様なレバー操作が必要である。

この作業装置類を完全自動化することを目標に、2017 年度より MC 化の検討に取り組んでおり、2018 年度に実施したサイドシャッター装置の MC 化の検討結果について報告する。（写真 8～9）



写真8 簡素化イメージ



写真9 操作レバー

3.2 検討スケジュール

除雪機械の作業装置 MC 化を行うためには、次の 3 点の技術を組み合わせたシステムを構築していく必要がある。（表 5）

表 5 MC 化に必要な技術

No.	要素技術	候補技術	要素技術から得られる情報	要素技術による操作制御
1	精度の高い衛星受信機	・VRS受信機 ・準天頂衛星システム「みちびき」 ・慣性計測装置 等	自車、作業装置の位置情報の把握	車両位置情報での作業装置動作制御（誤差は数 cm）
	精度の高い地図データ	・MMSデータ ・ダイナミックマップ 等		
2	センサー技術	・傾斜計 ・ストローク計 等	路面積雪量、雪抱え込み量、作業装置の状況 等 把握	雪の量に合わせた作業装置の角度、押付圧等の動作制御
3	AI技術	・画像認識技術 ・車線、障害物等認識技術	積雪の有無、障害物・人間等の感知 車線の把握 オペレータ作業履歴の蓄積 等	作業装置動作タイミングの自動化 制御 障害物・歩行者等の回避制御

このうち、高精度の自車位置情報、センサー技術については、既存技術の組み合わせで対応可能と推定される。

上記2点の技術を基に状況を判断し、作業装置を自動制御するAI技術が必要となるが既存技術では対応が難しい。

当面は作業装置毎に段階的に自動化の検討を進め、技術開発の動向を踏まえ、各技術を組み合わせた MC 化の検討を行う予定である。（表 6）

表 6 検討スケジュール

検討年度	H29	H30	H31	R2	将来
①位置情報と合わせたマシンコントロール化					自動運転化
	マシンガイドンス				
	サイドシャッタ操作				
	ブラウ操作				
	グレーダ操作				
②センサー技術と合わせたマシンコントロール化	数年後に実用化の可能性あり				自動運転化
③AI技術等によるマシンコントロール化	市場の技術開発に応じて実用化を検討				

3.3 サイドシャッター装置のMC化検討

サイドシャッターは、グレーダ装置で除雪した雪を交差点や乗入部に残さないよう、シャッターを閉めることで一時的に雪を抱え込む装置である。（写真 1 0）

このサイドシャッターの自動制御は、開閉操作を行う位置情報のみで制御が可能なることから、表 5 に示した3技術のうち、高精度の自車位置情報を使用したMC化に取り組んだ。



写真 1 0 サイドシャッター動作状況

①衛星測位システム

MC化の検討では、2018年11月より正式運用された準天頂衛星システム（みちびき）のセンチメートル級測位補強サービス（CLAS）を採用した。

移動体の公称精度は水平誤差12cm、垂直誤差24cmであるが、今回、新潟市内から福島県境にかけて片道68kmを試験走行した結果、誤差30cm以下が6割程度という結果であった。

平野部では公称精度内に収まるが、トンネル等の上空遮蔽物、樹木の影響がある衛星不感地帯で大きな誤差が生じていた。

2019年度は、慣性計測装置（IMU）を併用することで衛星不感地帯での測位を補うシステムとしており、検証を予定している。

②地図データ

MMS（モービルマッピングシステム）で取得したレーザー一点群データから、除雪装置の制御に必要な道路中心線、縁石、障害物等を抽出した地図データを製作した。

（写真 1 1）（図 8）

MMS の公称精度は、水平・垂直誤差ともに 25cm であるが、今回製作した地図データは、水平誤差 5cm、垂直誤差 6cm であった。



写真 1 1 MMS搭載車両

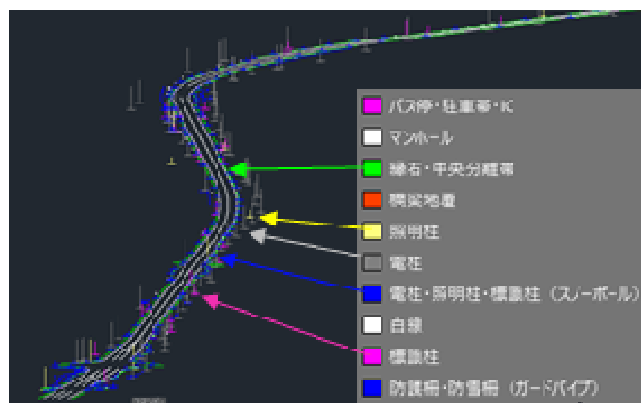


図 8 作成地図データ

③運転技術データ

サイドシャッタの自動制御を行うため、ドライブレコーダー、データロガーにてオペレータの作業装置の操作に関するデータを収集し、整理、解析を行った。

(図9)

解析したデータは、MMSで製作した地図データに反映させ、除雪作業用地図データを製作した。(図10)



図9 サイドシャッタ運転データ

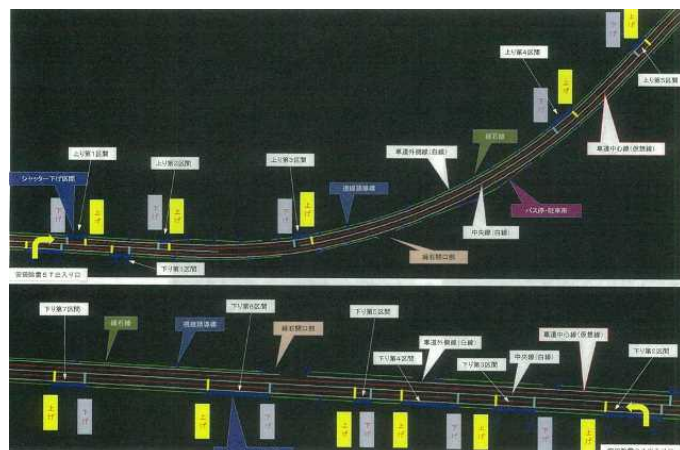


図10 除雪作業用地図データ

④制御ユニット

サイドシャッタ MC 化の制御ユニットは、除雪作業用地図データをインストールしたタブレット PC、衛星測位システム、制御装置（サイドシャッタへ信号を出力する機器）で構成した。

各機器を LAN 通信で交信させて制御を行い、自転車位置と地図の基準点が一致した際に制御信号出力を行う仕様とした。(図11)

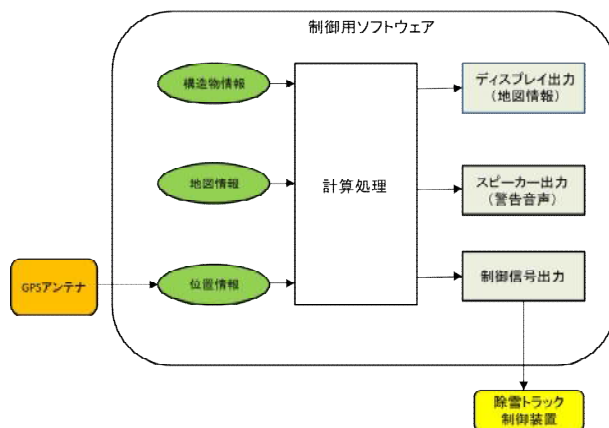


図11 制御ユニットイメージ

⑤動作確認試験

製作した制御ユニットにて動作確認試験を行った。

試験条件は実際の除雪作業と同等の 25～30km/h とし、1km の試験区間内に設定した、14 箇所の基準点通過時の動作タイミングを計測した。

なお、基準点は容易に確認できるよう乗り入れ等に設置されている視線誘導標とした。(写真12)

結果、作動誤差は平均して 0.42 秒、距離にして約 1m であり、実用レベルであることを確認した。



写真12 基準点

4 おわりに

2010 年度から行ってきた作業ガイダンス装置の開発は、今回、一次除雪機械（除雪トラック）の開発が完了したことにより一通り完了した。

ICT（情報通信技術）は日進月歩であることから、今後は市場の技術開発動向を踏まえ、開発した各除雪機械ガイダンス装置をフォローアップしていきたい。

また、将来目標の除雪機械自動運転化に向け、各除雪機械作業装置の操作自動化（マシンコントロール）に向け技術開発を行い、除雪作業における安全性、施工性、生産性の向上に努めていきたい。

サラウンドビューによる除雪機械作業時の安全対策

東 忍*1 大廣 智則*1

1. はじめに

高速道路での除雪作業や路面凍結防止作業は、お客様へ安全・安心で快適な走行環境を提供するため、欠かすことのできない重要な作業である。北海道内の高速道路で雪氷作業にあたった作業車の総走行距離は雪氷期間で約 30 万 km に及び、主に大型除雪機械により行っている。

大型除雪機械は普通自動車と比較して死角が圧倒的に大きい。そのため、熟練運転手が除雪作業の操作や運転にあたり、運転助手による視認確保が重要である。一方、近年熟練運転手や運転助手など除雪作業担い手の確保が困難になり始めている。そこで筆者らは¹⁾ 将来の除雪作業ワンマン化への対応の一つとして、除雪機械の死角を無くし事故を未然に防ぐ除雪機械の周囲を俯瞰可能なサラウンドビューを開発している。

本研究では、実地検証の結果を基にサラウンドビューの改良を行った状況について報告する。また、除雪作業や凍結防止剤散布作業時の安全対策としての機能を示す。



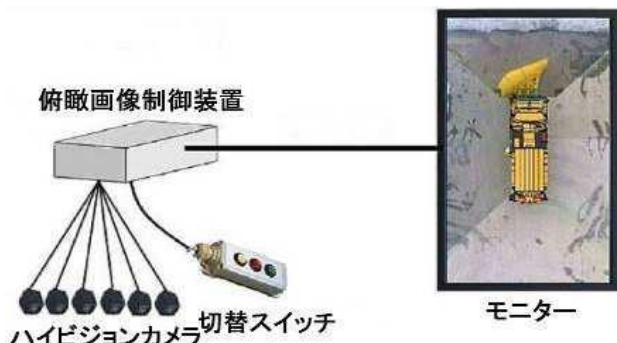
(b) 湿塩散布車へのカメラ設置位置（6箇所）



(c) 俯瞰画像表示状況

2. サラウンドビューの概要

サラウンドビューは、カメラ 6 個、俯瞰画像制御装置、モニター、切替スイッチからなり、制御装置によりカメラ映像をリアルタイムに合成して車両全体の 2D 俯瞰画像を表示する。図 1 にサラウンドビューを示す。図 1(a)は、機器構成を示している。図 1(b)は、湿塩散布車でのカメラの設置状況を示している。図 1(c)は、俯瞰画像表示状況を示している。俯瞰画像は、ビュー切替スイッチにより作業用途に合わせた俯瞰レイアウト（6 レイアウト）を用意している。



(a) 機器構成

図 1 サラウンドビュー

3. サラウンドビューの改良

3.1 カメラ視認範囲向上によるカメラ台数削減

冬季間積雪路面を走行する場合、大型除雪機械は特に雪の巻き上げや飛雪によりカメラレンズに付着するため、融雪ヒーター付カメラケースが必要となる。

カメラケース内に配置するカメラの視認可能範囲は 190° である。これまでカメラへの着雪を防止するための融雪ヒーターはBOX型のカメラケースを用いてきた。BOX型のカメラケースは内部にカメラが収納されるため、視認可能範囲は160° となる。このため、4個のカメラでは死角が発生する。結果6個のカメラが必要となりカメラの性能を十分に生かしきれていなかった。そこで、大廣ら²⁾ が開発した透明ヒーターをサラウンドビュー用に適合するように検討した。

透明ヒーターは対象面に真空にて透明導電膜を成膜し、その両端に一对の電極を形成し、通電することで発熱する。図 2 に透明ヒーターの原理を示す。

* 1 (株) ネクスコ・エンジニアリング北海道

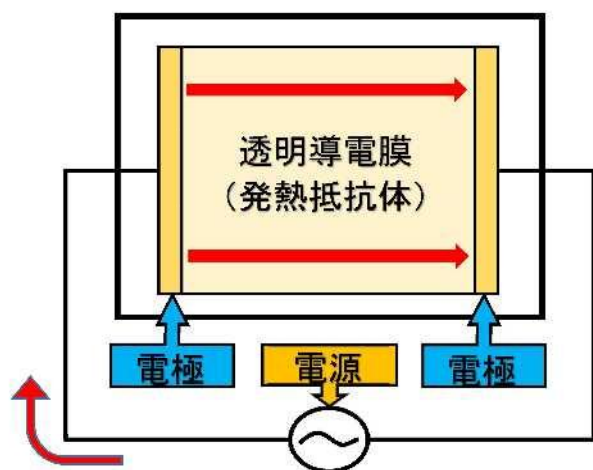


図2 透明ヒータの原理

曲面の透明ヒーターは全面に透明導電膜を成膜すると温度差によるクラックが入り、ヒーターとして動作しない。そこで、電極を円弧上に成形し、側面部に切り欠きを入れて電極間の距離の均一化を図った。曲型カメラケースの温度分布図を写真1に示す。

温度分布図で確認できるように、温度差がほとんどない。電極の成形方法を変更し、電極間の距離を均一にすることで、安定したヒーター効果が得られる。

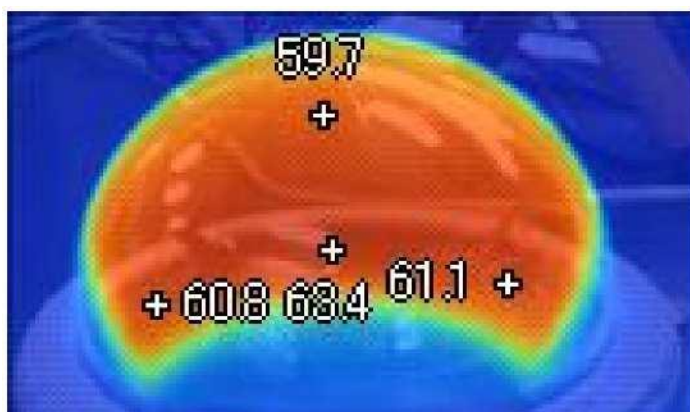
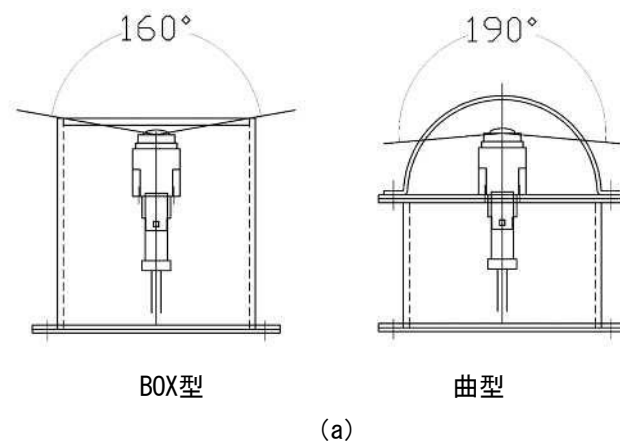


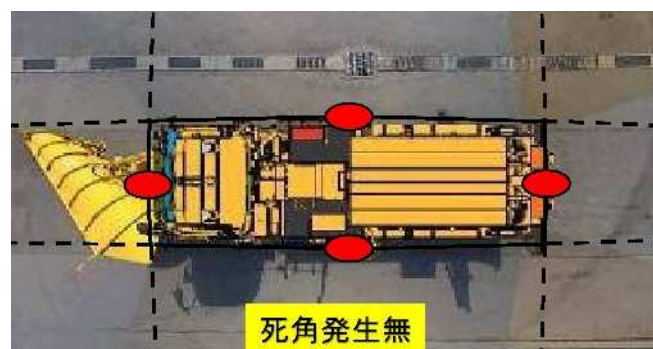
写真1 曲面カメラケースの温度分布図

透明ヒーターによるカメラケースは図3(a)に示すようにカメラ視認可能範囲は190°である。つまり図3(b)に示すように、カメラの特性を十分に生かすことができる。

4個のカメラで死角発生無しに大型車両の全周囲を俯瞰することが可能である。図3にカメラケースの違いによる視認範囲の比較を示す。写真2に曲型カメラケースの設置状況を示す。



(a)



(b)

図3 カメラケースの違いによる視認範囲の比較



写真2 曲型カメラケースの設置状況

3.2 立体俯瞰画像

大型車両の立体俯瞰画像をモニタリングするため、基幹システムに3D SURROUND MULTI VIEW³⁾を採用した。作業者が俯瞰画像の確認を容易とするため、2D俯瞰画像に加え、立体的な映像を追加した。3D俯瞰画像は後続車からの接近や走行・追越車両の確認、交差点などの右左折時の確認が容易となる。標準のモニタリングレイアウトは切替スイッチにより切替可能で6レイアウトの表示を用意している。写真3に通常走行時レイアウトを示す。写真4に示す右左折レイアウトおよび写真5に示す後方レイアウトは、車両信号に連動して切替表示する。後方・巻込確認時のモニターによる即時確認が可能である。

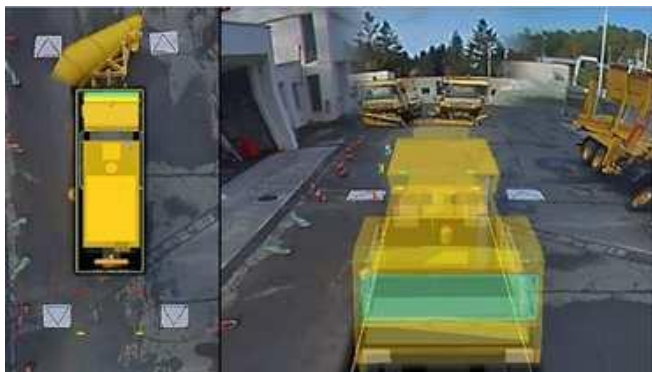


写真3 通常走行時レイアウト



(a) 左折



(b) 右折

写真4 右左折レイアウト

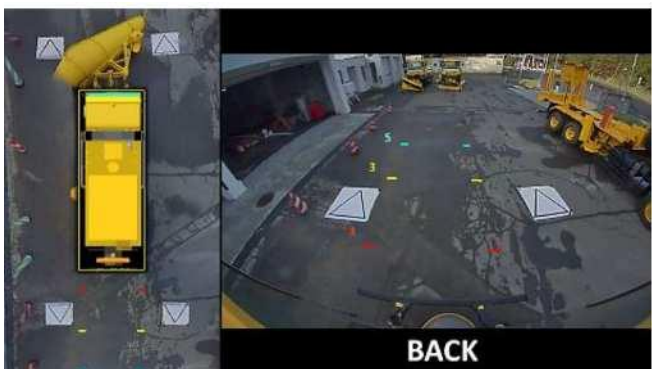


写真5 後方レイアウト

除雪作業は写真 6(a) に示すように凍結防止剤散布車では追越車線側状況確認レイアウト、また写真 6(a) の反転のため示さないが、除雪作業では路肩側状況確認レイアウトが有効である。その他、写真 6(b) に示す前方確認レイアウトや写真 6(c)、写真 6(d) に示す俯瞰レイアウト（遠方レイアウト）（後方重点レイアウト）は SA・PA 等の作業に有効である。



(a) 追越車線側状況確認レイアウト



(b) 前方確認レイアウト



(c) 3D 俯瞰レイアウト（遠方レイアウト）



(d) 3D 俯瞰レイアウト（後方重点レイアウト）

写真6 各種レイアウト

3.3 除雪作業や凍結防止剤散布作業時の安全対策

除雪機械の作業者へヒアリングを行った結果、走行する道路の種類、除雪機械の種別により必要なレイアウトが異なることが分かった。

4. まとめ

除雪機械等の作業時の安全対策として、筆者らが開発したサラウンドビューについて実地検証の結果を基に改良を行った。改良点を以下に要約する。

- ・WEBカメラ用に開発した透明ヒーターをサラウンドビュー用に適合するように検討した。その結果、4個のカメラで死角発生無しに大型車両の全周囲を俯瞰することが可能となった。

- ・作業者が俯瞰画像の確認を容易とするため、2D俯瞰画像に加え、立体的な映像を追加した。

- ・走行する道路の種類により、各除雪機械ごとに作業状況に対応したレイアウト設定が可能となった。

5. 今後の予定

今後、画像処理や各種センサー等により、車両検知・人体検知システム機能を追加する予定である。

なおこれらの機能は、既存のシステムにオプションとして追加可能であり、画面上での警告表示およびアラームでの警報報知を予定している。

参考文献

- 1) 東忍、大廣智則：除雪機械サラウンドビューモニターの改良報告、第31回ゆきみらい研究発表会論文集、P39、2019.
- 2) 大廣智則、森雅則、小林智宏：透明ヒーターを活用したWEBカメラ着雪対策の実地検証報告、2017年ふゆトピア研究発表会論文集、P41、2017.
- 3) ICHIKOH INDUSTRIES, LTD.、2017. http://www.ichikoh.com/products/am/market/special/3D_SURROUND_MONITOR.html、2019.

旅客上家屋根電気融雪装置用積雪センサを活用した 最適制御システムの展開と効果について

原 宏*1・阿部 真季*1・船山 花穂*1・酢谷 浩*2・徳永 透*2

1. はじめに

鉄道の駅には、ホームで列車を待つお客様が雨雪に濡れることを防ぐための建造物である屋根、「旅客上家」が設置されている。多雪地域の駅の場合、降雪・積雪により屋根から線路上空に張り出すいわゆる「雪庇」によるパンタグラフの破損事故や落雪による旅客傷害事故などの防止を目的に、屋根軒先に融雪マット（ヒーター）を設置している（写真1）。



写真1 雪庇防止用屋根融雪装置

これら融雪装置は安心・安全な旅客設備を提供するため自動制御により運転を行なっている。

従来は、降雪センサや気温センサによる自動制御（以下気温制御）の方法だったが、水分感知や温度による制御の場合だと、どうしても設定が安全側にならざるを得ない。例えば屋根上に積雪がないにもかかわらず、気温が低くなっただけで設備を稼働させてしまうなど、無駄になる運転が発生していた。そのため地域の性格上、雪氷期にはシーズンを通してほとんど連続運転している結果となっており、電力料金の支出（及びCO₂の排出）に課題があった。

J R 東日本新潟支社管内の冬期雪氷対策において、現場第一線での技術開発にてこれらの課題解決のための「画像処理による制御システム（以下積雪センサシステム）」を開発した。当初は2年間の試験施工からスタートし、安定した設備の提供と電力料金の削減の両立のほか、大幅なCO₂の削減も達成することができた。こうした十分な効果が認められた上で、上越線の小出駅と越後湯沢駅（在来線）の現場に本導入され、その後順次複数駅に展開されることとなった。これらの経緯及び効果について紹介する。

2. 制御システム概要

2-1 開発経緯

従来の気温制御では、融雪マット上に実際積雪があるかどうか把握できない。そのためどうしても安全側の制御になってしまう。融雪マット部を直接見るようなセンサの開発が課題であった。種々検討を重ねた結果、道路の路面融雪用に開発・実用化された装置の中で、福井県雪対策・建設技術研究所（当時）の画像処理で積雪を検知する方式を活用した屋根融雪用の装置を、2年（2011～2012年度）の現場試行を経て開発するに至った。その結果、融雪効果及び運転時間削減についての効果が検証され、現場導入に至った。¹⁾

2-2 積雪センサシステム構成（概要）

図1にシステム構成を示す。画像処理判定用カメラで撮影した静止画をネット経由で遠隔制御PCに送付。制御PCが画像を解析し積雪ありと判定すると、今度は運転信号を再びネット経由で制御盤に送信する仕組みで動作させる。

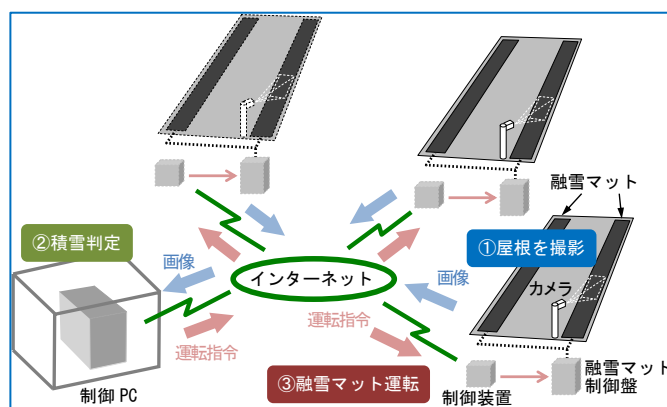


図1 積雪センサシステムの構成

2-3 機器及び設置状況（写真2）

（1）カメラ

カメラ装置は汎用的な Web カメラを使用し、積雪判定用ペイントが適切な視野に入る位置に設置する。設置箇所は当該箇所にか線橋があれば活用するが、適当な構造物がない場合は上家上に架台を設け設置する。

（2）赤外線投光器

夜間検知用に、列車の運行に支障のない不可視タイプの赤外線投光器を設置する。

（3）積雪判定用ペイント

積雪検知用に、融雪マット上で路面用システムと同等の

*1 東日本旅客鉄道(株) 新潟支社 新潟建築技術センター *2 山田技研(株)

効果を出すため、黒いマット表面に決められたサイズで帯状に白くペイントを施す。



写真2 機器及び設置状況

2-4 閲覧用ソフトウェア

積雪判定のため取得した画像を、そのまま監視カメラの画像閲覧用に活用できるソフトウェアを開発した。三場面構成になっており、まずメイン画面として全融雪制御箇所の画像と融雪装置の稼働状況を表示する(図2・図3)。



図2 閲覧メイン画面(積雪なし)



図3 閲覧メイン画面(積雪あり)

メイン画面の各現場の詳細ボタンをクリックすると、現場ごとの主画像と過去24時間の融雪稼働状況グラフが表示される(図4)。

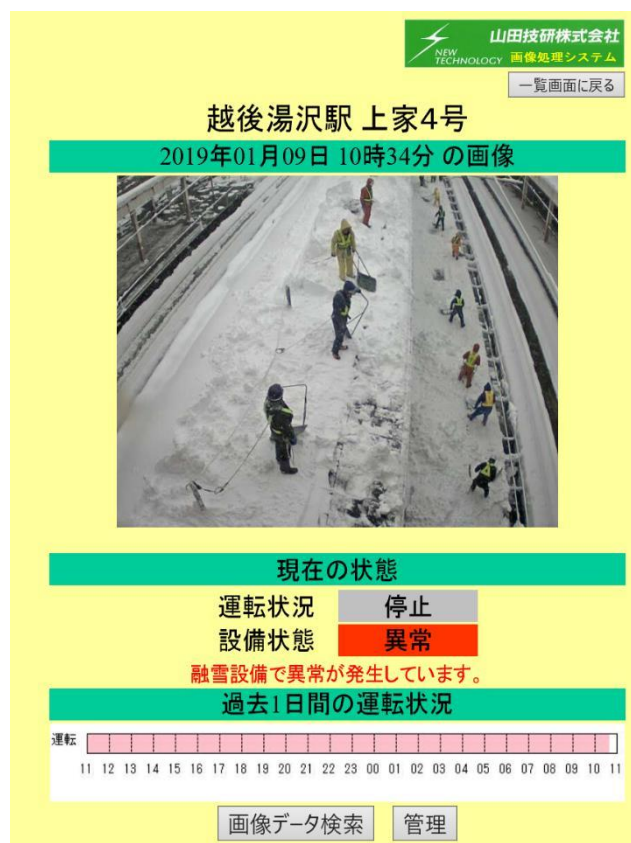


図4 各現場状況画面

次に画像データ検索画面で15分ごとの過去の全箇所全画像が検索できる。現場の降雪・積雪の推移あるいは融雪状況の検証や確認が可能である。例えば融雪が必要な時のみ稼働していることが過去画像から確認することもできる(図5)。



図5 画像検索画面

3. 気温制御との稼働時間の比較

2014年の上越線・小出駅と越後湯沢駅への本導入以降順次導入が進み、2018年度までに5駅、計9上家（9つの融雪箇所）において、システムが設置された。本導入後、毎年気温制御との稼働時間比較検証を実施している。ちなみに気温制御の気温データは、近傍の気象庁アメダスのデータを元としている。

そのうち2018年度の分析結果を表1に示す。9箇所の融雪装置稼働期間である12月～3月の積雪センサシステムによる稼働時間と、気温データに基づくシミュレーションによるものを比較した。気温の稼働条件は、従前より適用していた「5℃以下で運転、7℃以上で停止」を適用。4カ月間の積雪センサシステムによる削減率は、最大で小出上家4号の79.5%、最小で越後湯沢上家3号の51.6%、9箇所平均で64.1%の削減率であった。

2018年度冬期の各地の降雪状況は、小出周辺は2017年度より少なく平年並の降雪だった一方、越後湯沢周辺は平年並みかやや多いだった（図6）。そのため小出やその近辺の越後川口・十日町では削減率は7割以上となった。越後湯沢・石打では平年並みの降雪だったが、2月～3月の降雪が少なかったこともあり、最終的には平均して5割以上の削減となった。

気温制御は12月～2月は全時間の8割以上で稼働しており（2月は100%稼働）、3月でも降雪はなくとも気温はまだ低いため、7割の稼働となっている。導入以来の傾向であるが、終冬期でより顕著に稼働時間の差が表れる結果となった。

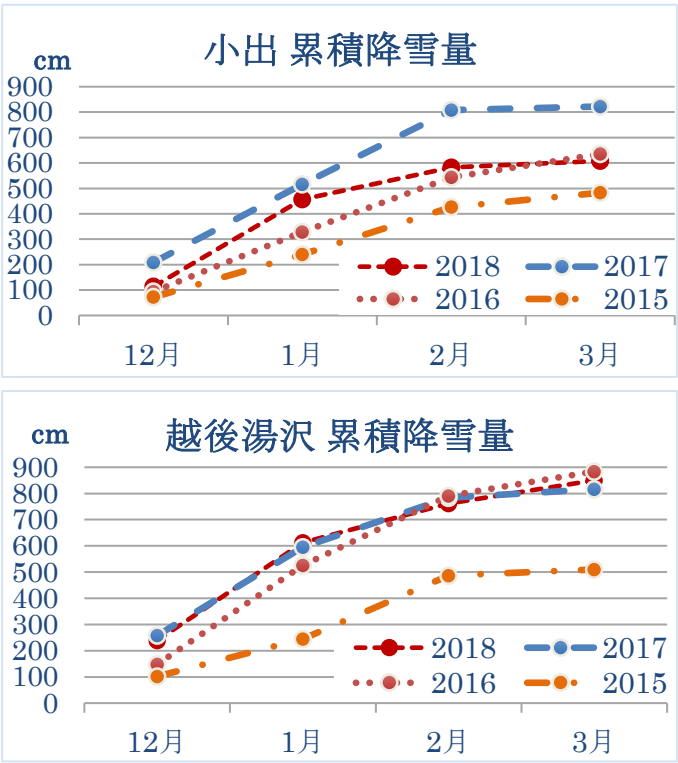


図6 小出・越後湯沢 過去3年累積降雪量推移グラフ

融雪が必要な時のみ稼働していることによって、大幅な稼働時間短縮が図られていることが毎年確認できている。

4. 制御パラメータ追加によるさらなる改善

当システムの一歩の課題は、早朝に日射が入った時に融雪マットが濡れていると検知範囲付近が明るく映ったり、霜が付着した時などに、「積雪」と誤検知してしまうことである。誤検知により融雪装置が稼働するため安全側でのエラーなの

気温を条件とした屋根融雪装置稼働時間シミュレーション			
	12月～3月		
	画像稼働時間a	気温稼働時間b	削減率(b-a)/b
小出3号	684	2,504	72.7%
小出4号	513	2,504	79.5%
湯沢1号	1,171	2,546	54.0%
湯沢3号	1,232	2,546	51.6%
湯沢4号	963	2,546	62.2%
湯沢6号	1,090	2,546	57.2%
十日町2098号	691	2,573	73.1%
石打1号	1,106	2,546	56.6%
越後川口4号	741	2,504	70.4%
計	8,192	22,815	64.1%

画像処理による屋根融雪と比較するため、気温による融雪装置の稼働時間をシミュレーションして算出した。
稼働条件は、気温5℃以下で融雪開始し、7℃以上で融雪停止。

削減率70%以上

	12月			1月			2月			3月		
	画像稼働時間a	気温稼働時間b	削減率(b-a)/b	画像稼働時間a	気温稼働時間b	削減率(b-a)/b	画像稼働時間a	気温稼働時間b	削減率(b-a)/b	画像稼働時間a	気温稼働時間b	削減率(b-a)/b
小出3号	180	617	70.8%	221	744	70.3%	184	629	70.7%	99	514	80.8%
小出4号	193	617	68.7%	196	744	73.7%	92	629	85.4%	32	514	93.8%
湯沢1号	312	616	49.3%	496	742	33.1%	203	649	68.8%	160	539	70.3%
湯沢3号	345	616	44.0%	506	742	31.8%	230	649	64.6%	151	539	72.0%
湯沢4号	282	616	54.2%	495	742	33.3%	131	649	79.9%	56	539	89.7%
湯沢6号	313	616	49.2%	480	742	35.3%	170	649	73.8%	127	539	76.4%
十日町	191	627	69.6%	326	744	56.1%	111	652	82.9%	63	550	88.6%
石打1号	297	616	51.8%	518	742	30.2%	222	649	65.8%	69	539	87.2%
川口4号	245	617	60.3%	384	744	48.3%	79	629	87.5%	33	514	93.6%

表1 2018年度 従来制御との稼働時間比較

で安全上の問題はなく、また全稼働時間における誤検知の割合は数%であり、削減金額に比して大きな影響はなかった。

ただ、より安全で精度の高い制御システムの確立を目指していくため、2018年度に試行的に気温を制御要素に加え（積雪とのand条件）、仮に誤判定をしても気温が低くなければ稼働させない制御を越後川口駅で実施した。結果は約4時間の稼働停止増加でそれほど大きな数字ではなかったが、日射の影響で誤判定が発生している他の駅もあるため、今後は新設箇所から順次基本仕様として採用することとした。

5. 電力料金及びCO2削減状況

表2にて積雪センサシステム制御と気温制御における電力料金削減額とCO2削減量を算出した。方法としては、各駅各上家の融雪ヒーターの全体容量（KW）に稼働時間と電気料金を用いて、それぞれの制御による電力料金を導き、気温制御から積雪センサ制御の値を引いて算出した。

2018年度は、9上家の合計で約1,100万円の電力料金削減となり、CO2削減量は174トン（杉の木CO2吸収量換算：約12,400本に相当）であった。当システムの削減効果から、導入箇所の増加に比例して、合計の削減金額・削減量もそれに比して増加することになる。

6. まとめ

安全かつ安定的な輸送と経費削減の両立を目指す場合、まずは安全を優先して設備するのが一般的であるが、本システ

ムは雪の有無を確実に捉えることから従来の自動制御センサより安全であり、またそのことにより必要な時のみ稼働するのでかなりの省エネも実現できる。さらに近年の豪雪対策としても有効に機能しており、5年間の本稼働で安定した稼働も実証されている。

コスト面では、積雪センサシステムの初期投資に対し、融雪マットの面積にもよるが、メンテナンス費を考慮しても2～3年で電力料金の削減により回収できる。

本装置は既設の融雪装置にほとんど改良を加えることなく導入可能である。融雪マットの面積が大きいほど、省エネ効果のメリットが大きいため、管内の融雪マット設置箇所に優先順位をつけ、毎年少しずつ導入箇所を増やし、支社内水平展開を順次図っている状況である。

今後も本システムが冬期に快適にご利用いただける駅の実現とサービス品質向上に寄与することを広く周知し、導入促進に積極的に取り組む所存である。

(参考文献)

- 1) 山崎 三知朗：路面積雪センサを応用したホーム屋根融雪制御システムの開発 ～検知・監視能力を活かした鉄道分野への適用～ ふゆトピア 2014 釧路 第26回研究発表会論文集

			従来気温制御		画像処理システム制御		従来-画像	
構内	名称	全体容量a (kW)	稼働時間 (h)	電力料金(円)a	稼働時間 (h)	電力料金 (円)b	電力料金(円) 削減額(a-b)	CO2削減量(t)
越後湯沢	1号	31.4	2,546	1,841,919	1,171	847,167	994,752	24
越後湯沢	3号	17.8	2,546	1,044,145	1,232	505,258	538,887	13
越後湯沢	4号	48.8	2,546	2,862,600	963	1,082,751	1,779,849	42
越後湯沢	6号	19.1	2,546	1,120,403	1,090	479,670	640,733	15
小出	3号	55.0	2,504	3,173,069	684	866,765	2,306,304	55
小出	4号	23.8	2,504	1,373,073	513	281,305	1,091,769	26
十日町	2101号	16.4	2,573	972,223	691	261,098	711,125	17
石打	1号	33.0	2,546	1,935,775	1,106	840,914	1,094,861	26
越後川口	4号	49.8	2,504	2,873,070	741	850,217	2,022,852	48
	9棟		17,765	17,196,277	8,191	6,015,145	11,181,132	174

※0.000545

※東北電力2016 自営電力発電所の単位発電量あたりのCO2排出量(0.545kg-CO2/kwh)により算出

※ 電力料金は、設計総電力をもとに電気使用量を算出
電気料金は、東北電力 融雪用電力 BⅡ契約 (23.04円/kwh) により算出

CO2削減量(本)
12,422

表2 2018年度 各現場ごと電気料金及びCO2排出量削減状況

遠赤外融雪面の積雪深シミュレーションと最適運転条件

上村靖司*¹ 代田俊登*² 町田敬*³

1. はじめに

平成 27 年度より，トンネル坑口上部のせり出し防止柵に遠赤外線融雪装置を設置し，落雪対策の実証実験を実施している．当初降雪検知器による自動運転を行っていたが，平成 28 年度には積雪深検知器に置き換えて運用改善を試み，さらに平成 29 年度には積雪深二値制御による更なる運転時間と費用の削減効果を検証してきた．これらの成果として融雪装置の運転制御方法を工夫することで稼働時間の大幅な短縮に成功し，人力除雪に対して競争力のあるコストで運用できることを示した¹⁾．

本報告では，運転制御方法の違いによる運転時間削減効果の検証とともに，運転条件の最適化を目指して，遠赤外線融雪面の積雪深と積雪重量を再現するシミュレーションモデルを構築し，装置に求められる熱出力，発停を制御する積雪深設定値の最適値を求めた結果を報告する．

2. 実証試験施設の概要と制御方式

2.1 実証実験施設の概要

現地での実証実験の詳細は，既報²⁾に譲るが，本論文の内容に関わる事項について概要を説明する．現地は新潟県越後湯沢地内にある国道 17 号線の芝原トンネル新湧側坑口である．図 1 に示すように，トンネル坑口の上部には高さ 3.8m のせり出し防止柵が設置されており，雪底の形成を防止するとともに，後方斜面からの雪崩の越流を防止している．しかし豪雪の冬にせり出し防止柵の上端付近まで雪が堆積してしまうと，雪崩が柵を超えて流れ出したり，雪底がせり出して崩落してしまう恐れがある．そのため，必要に応じて人手による除雪を実施しているが，そもそも雪崩の危険性がある箇所での作業であり，常に事故のリスクをはらんでいる．加えて除雪を担う作業員の確保が年々難しくなっており，省力化への要望も高まっていた．

図 2 に実証実験施設における機器の配置を示す．トンネル坑口直上から右側のせり出し防止柵がやや低くなっている西側コーナー部分に合計 4 基の遠赤外線融雪装置（熱出力 4 kW）を 3.5 m の高さに設置した．坑口上部の 2 基の融雪装置の間の柵に制御用の積雪深計を，その南東側（図では左側）の柵上に自然積雪観測用の積雪深計を設置した．降雪検知器はトンネル坑口南東側の制御盤を設置した電柱に設置した．融雪の様子を確認するために，融雪装置と自然積雪深計の間と南西側斜面の樹木上に，通信機能をもつ



図 1 実証施設外観

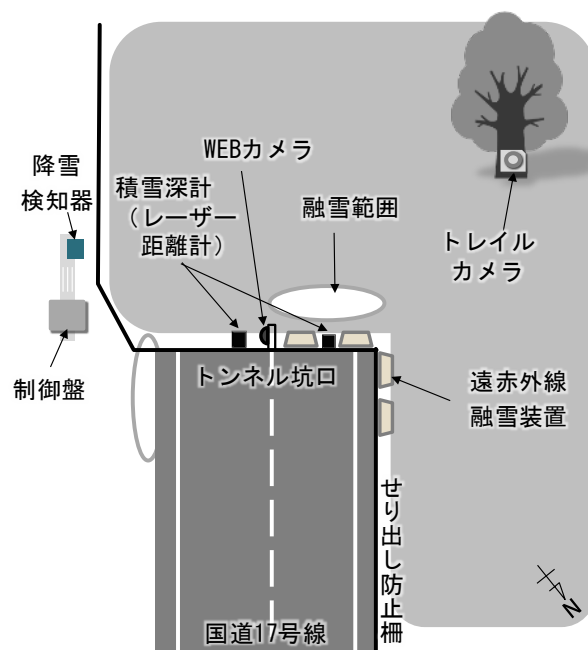


図 2 実証施設における機器配置

カメラを設置し，遠隔で観測できるようにした．

* 1 長岡技術科学大学（〒940-2137 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

* 2 長岡技術科学大学大学院（〒940-2137 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

* 3 町田建設株式会社（〒949-6407 南魚沼市島新田 374）

2.2 融雪装置の制御方式

図3に実証実験での3種の制御方式の概念を示す。「①降雪制御」方式は、降雪の有無のみを判定して、降雪有りの時に融雪装置の運転を開始し、雪が降りやんだあとタイマーによって所定時間運転を継続したのちに装置を停止する方式である。「②積雪深一値制御」方式は、設定された積雪深を超えた場合に融雪装置の運転を開始し、積雪深が設定値を下回った後に、降雪制御と同様にタイマー運転を継続したのちに停止する方式である。「③積雪深二値制御」方式は、積雪深の上限値を上回った時に融雪装置の運転を開始し、積雪の融解が進んで積雪深下限値を下回った時に装置の運転を停止する方式である。

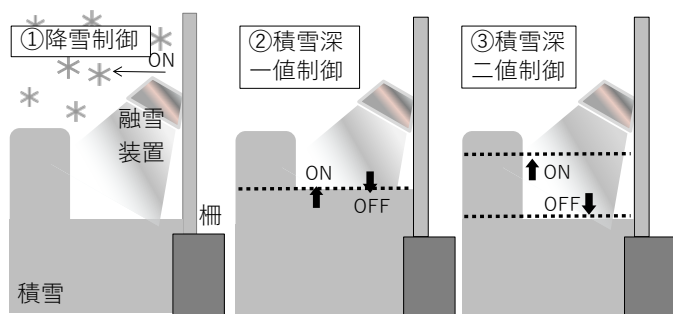


図3 融雪装置の制御方式

一般に知られている3つの方式の長所、短所を整理すると次のようになる。

①降雪制御：

- 反射光検知方式などで構造が単純で安価。
- × 積雪が少なくても運転するため無駄が多い。
- × 装置の運転／停止の回数が多くなる。

②積雪深一値制御：

- 反射光検知方式であれば構造が単純で安価。
- × 装置の運転／停止の回数が多くなりがち。
- × 吹きだまりなどにより誤動作することがある。

③積雪深二値制御：

- 反射光検知方式であれば構造が単純で安価。
- × 吹きだまりなどにより誤動作することがある。
- 積雪深計方式なら、任意の積雪深範囲に対して高精度制御が可能。
- 残雪深制御で無駄運転を最小にできる。
- × 信頼できる積雪深計を使うと高価になりがち。
- × 吹雪時に積雪深の精度と信頼性が低下。

以上の通り、精度が良く安価でかつ吹雪等の影響を受けにくい積雪深計があれば、それを運転制御に使うことによって、支障のない範囲での残雪を許容することで融雪装置の無駄運転を減らし、かつ運転回数を減らして、ヒーターの高寿命化をはかることができることになる。

本研究においては、H27年度に反射光検知方式の降雪制御を、H28、H29年度に反射光検知方式の積雪深一値制御（200 cmで稼働）、H29、H30年度と積雪深計方式の積雪深二値制御（上限値 250 cm, 下限値 200 cm）を現地に実装して、比較検討した。積雪深計方式については、汎用のレーザ距離計を用い、短時間で複数回の計測値を取得し、そのデータ処理によって、吹雪時でも安定して積雪深を計測できるシステムを構築した。

図4に4冬季の実験結果を示す。棒グラフがその冬の累計降雪深を、折れ線グラフが融雪装置の稼働時間を示している。降雪制御であったH27に比べ、積雪一値制御を導入したH28は、累計降雪量が1.7倍であったにも関わらず稼働時間は4分の1に減っている。さらに積雪深二値制御を導入したH29以降は、H28に比べてさらに半分以下の稼働時間となった。遠赤外線融雪ヒーターの消費電力は一定であるので、稼働時間は運転費を表す。

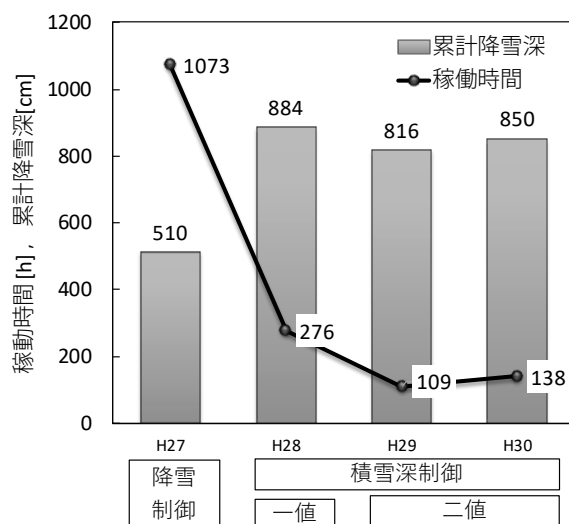


図4 実証実験の結果

3. シミュレーションモデルの構築

3.1 シミュレーションの必要性

積雪深二値制御によって、遠赤外線融雪装置の稼働時間の大幅な短縮ができたことを示したが、この時の運転条件（融雪能力 300 W/m^2 、制御のための積雪深上限値 250 cm / 下限値 200 cm）は、機器の特性やこれまでの経験から決められたが、それらが妥当であるかは不明である。さらには、より効率の良い最適条件が探索できるならば、さらなる省エネルギーやコスト削減の可能性も検討できる。

そこで、気象データを用いて、融雪面の積雪深を再現するためのシミュレーションモデルを構築することにした。実験のみでなく計算が必要である理由は次の通りである。

- (1) 年毎の降雪量差を反映した統一的評価
- (2) 異常豪雪時を想定した信頼性確保

(3) 装置設計における能力と運転条件の最適化

3.2 熱・物質収支の計算モデル

ある時点の積雪の量は、降雪によって持ち込まれる雪、日射、風、地熱等による融解量などのバランス（熱・物質収支という）によって定まるものである。計算によって積雪の増加・減少を再現する代表的な計算モデルとしては、例えば Snowpack（スイス雪・雪崩研究所が開発し、防災科学技術研究所が日本の気候特性に適應させるように改良し、雪崩予測などに広く応用している）があげられる。積雪の層ごとの変成を精度よく再現するモデルとなっているが、気温、湿度、風速、降水量、日射量、長波放射量、降水量または積雪深といった多様で多数のデータを必要としており、これだけのデータが入手しうる地点は限られる。

一方、気象水文分野で古くから活用されている Degree-day 法という簡便な手法を使えば、気温と降水量データのみで算定が可能である。しかし主に融雪期（厳冬期以降の時期）に適用されることが多く、本稿で対象とする積雪期（降り始めから厳冬期終了時まで）に対しての適応例はあまり多くない。

3.3 推計すべき物理量と計算時間単位

計算モデルに求められる条件は次の通りである。

- ① どのような条件で装置の運転／停止が制御されるか
- ② 融雪によってどれだけ雪の量が減るか

本稿で取り上げる融雪装置の場合には、①では降雪の有無もしくは積雪深であるから、まずはこれらのデータが得られなくてはならない。また②は積雪に対して投入されたエネルギーによって融かされる質量の見積もりが必要となる。すなわち、①の稼働制御のモデル化には「積雪深」が必要で、②の融雪量の見積もりには「積雪質量（重量）」が必要ということになる。

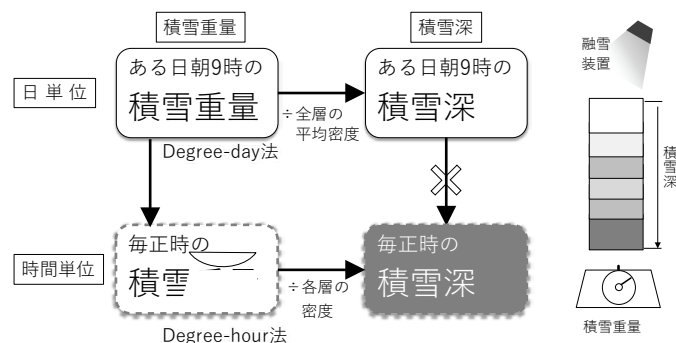


図5 毎時と毎日の積雪重量と積雪深

さらに、その計算においては、短時間に雪崩が流入した場合に迅速に融雪が開始されないといけなことから、日単位の計算では不十分で、少なくとも時間単位での計算が不可欠となる。以上のことから、モデル構築においては、

「日単位での積雪深および積雪重量の両方を推定するモデル」が必要となる（図5）。

3.4 日単位での積雪深と積雪重量の計算モデル

本研究で対象とするのは山間地のトンネル坑口であり、気象官署からは遠く離れている。トンネルから最寄のAMeDAS観測点は越後湯沢で、直線距離で4kmほどであるが標高差が410m（トンネル750m、越後湯沢340m）あって、参考データとしては使えるが、シミュレーションの入力としては使いにくい。幸いなことに、芝原トンネルのすぐ脇に新潟県が設置したテレメータがあり、ここで観測した気温、降水量、積雪深の毎時データが活用できることから、時間単位での融雪面の積雪深と積雪重量の両方を推測できるモデルを構築する。

入手しうる気象データが限られることから、ここでは上村らによる改良Degree-day法による積雪重量推計式²⁾を基礎としてモデルを構築することとする。

$$M_n = M_{n-1} + bP_n - aT_n - R_n \quad (1)$$

ここで、 M_n は n 日目の、 M_{n-1} はその前日の積雪重量[kg/m²]、 P_n と T_n はそれぞれ日降水量[kg/m²d]と日平均気温[°C]、 R_n は融雪装置による融解量[kg/m²d]、 a は融雪係数[kg/m²d°C]、 b は降水中の氷分率[-]である。この式により、基本的に気温と降水量データのみで積雪重量が推定できるモデルとなっている。図6に2005年（平成18年豪雪と命名された豪雪年）の M_n の計算結果を示す。図6の左軸が積雪深、右軸が積雪重量を表し、積雪全層平均密度 $\rho_n = 300$ kg/m³のときに積雪深と積雪重量が重なるようになっている。積雪期には自然積雪深の実測値 H_n と M_n は離れているが、積雪全層がザラメ雪になる融雪期にはよく一致していることがわかる。

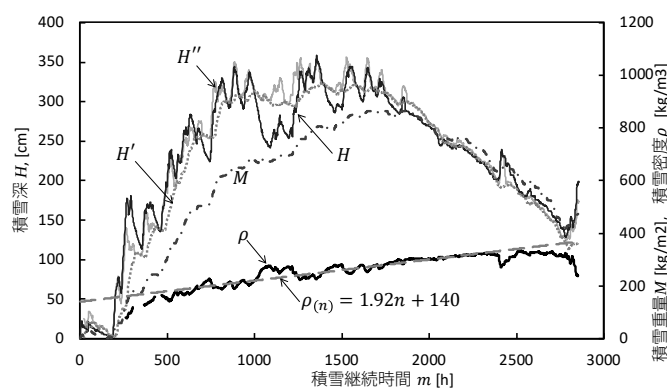


図6 自然積雪深の推計手順と結果

次に ρ に注目すると、これは積雪重量を積雪深で除した値、すなわち $\rho = M/H$ と定義される。そこで、(1)式で求めた M_n を自然積雪深の実測値 H_n で除して求めた ρ_n を図6に示す。これを見ると、積雪深が50 cmを超えるような期間に限定すれば、積雪期間に比例して増加していることが

わかる．そこで，積雪全層平均密度を積雪期間の日数関数として

$$\rho_{(n)} = 1.92n + 140 \quad (2)$$

と近似することにする．(1)式の両辺を $\rho_{(n)}$ で除すことにより，日積雪深 H'_n を推計することができる．

$$H'_n = \frac{M_n}{\rho_{(n)}} = \frac{(M_{n-1} + bP_n - aT_n - R_n)}{\rho_{(n)}} \quad (3)$$

(3)式により計算した H'_n を図6に示す（なお $r_n = 0$ としている）．これを見ると H' の変化のトレンドは H と概ね一致していることがわかる．次に(3)式を前日積雪と当日融雪の項，当日新積雪の項に分離して整理すると次のようになる．

$$H'_n = \frac{M_{n-1} - R_n}{\rho_{(n)}} + \frac{(bP_n - aT_n)}{\rho_{(n)}} \quad (4)$$

次に計算間隔を1時間に細分化し， n を m に置き換え，当日新積雪の項を24時間の各時間の計算の合計で表現すると次のようになる．

$$H'_m = \frac{M_{m-24} - R_m}{\rho_{(m)}} + \sum_{i=-23}^0 \frac{bP_i - aT_i}{\rho_i} \quad (5)$$

すなわち前日までの積雪については，全層平均密度関数 $\rho_{(m)}$ を用いて積雪深を計算し，直近の24時間分については，各時間の降雪と自然融雪の総和として計算して足し合わせることになる．なお，時間単位の計算となるため P_m, T_m, R_m の単位は $[\text{kg}/\text{m}^2\text{h}]$ に， a の単位は $[\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}]$ となり，(2)式の $\rho_{(m)}$ は $\rho_{(n)} = 0.08n + 140$ と書き換えられる．

さらに，現地での時間単位の積雪深観測データが使えることから，(5)式の第2項を時間積雪深の実測値 ΔH を用いることにすると次のようになる．

$$H''_m = \frac{M_{m-24} - R_m}{\rho_{(m)}} + \sum_{i=-23}^0 \Delta H_i \quad (6)$$

この(6)式によって，当日の積雪深 H''_m が推計できることになる．図6に示す通り， H'' は H の小さな変動まで良く再現しており，実用上問題のない精度で自然積雪深を推計することができている．ここまでは $R_m = 0$ としているが，これ以降の計算では， R_m を適宜与えることで融雪シミュレーションを進めていく．

3.5 融雪シミュレーション

2005年度の気象データを用いた融雪シミュレーションの結果を図7に示す．融雪装置の稼働／停止を判断する積雪深(H_u, H_l)は，現地実験で設定していた(250, 200) cmを与え，融雪能力 r_m [W/m^2]は現地で使用している融雪装置の300 W/m^2 に加え，20, 50, 100 W/m^2 の場合についても検討した．なお，(6)式中の R_m [$\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$]と r_m [W/m^2]の関係は，氷の融解潜熱 L (=334 kJ/kg)を用いて $R_m = 3.6r_m/L$

と表される．

図7を見ると，許容できる最大積雪深を300 cmとすると，20 W/m^2 の融雪能力では許容最大積雪深を超える場合があり，能力として不十分であることがわかる．融雪能力が50 W/m^2 の場合には，一時的に稼働判断の上限値である250 cmを超えている時間帯もあるが300 cm以下は維持できていることがわかる．融雪能力が100 W/m^2 以上の場合には，能力を上げて積雪深についてはそれほど大きな影響がないことがわかる．融雪装置の稼働回数は，融雪能力が100 W/m^2 のときに一冬で3回となり，非常に少ない発停回数で所定の積雪深範囲を維持できることがわかる．

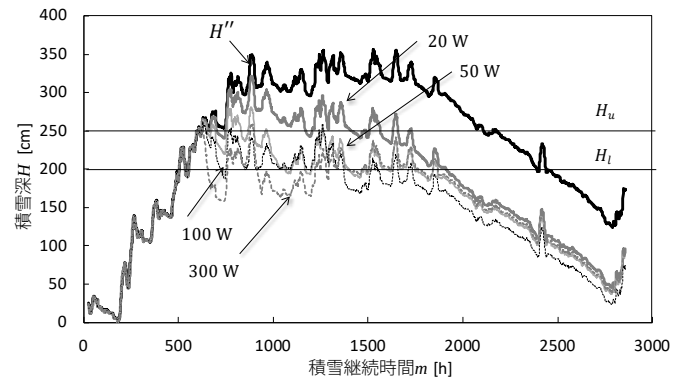


図7 融雪シミュレーションの結果

4. 融雪装置の融雪能力と稼働判断基準の最適化

上で提案した積雪深推計モデル(6)式に，記録の豪雪であった2005年冬季のデータを入力し，総融雪量，融雪時間，融雪装置の稼働回数，一冬の中での最大積雪深を評価した．このとき，融雪装置の稼働／停止を判断する積雪深(H_u, H_l)の組合せは表1の場合について検討し，融雪能力 r_m は0～500 W/m^2 の範囲で可変させて計算した．

表1 稼働／停止を判断する積雪深(H_u, H_l)の組合せ

$H_l \backslash H_u$	250	200	150
250	250, 250	—	—
200	250, 200	200, 200	—
150	250, 150	200, 150	150, 150

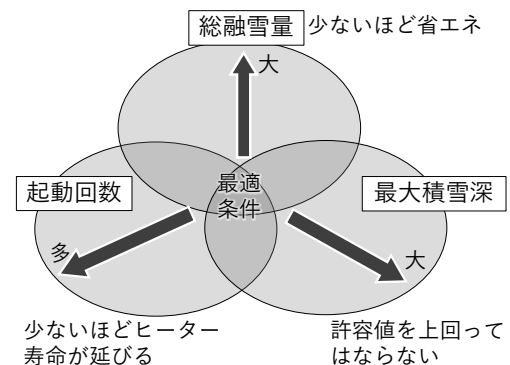


図8 融雪装置の最適条件の考え方

融雪装置の最適条件の探索にあたり、その考え方を整理して図8に示す。省エネルギーの観点から言えば、一冬の間に融雪装置で融かした雪の総量は少ないほど良い。融雪熱出力が一定のシステムなので、それは装置の運転時間から評価できる。融かす量を減らすには適切な量の残雪を許容することが効果的となる。次に、装置の信頼性の観点から、集中豪雪のような厳しい状況であっても、許容積雪深（柵高さや融雪装置設置高さなどで決まる）を超えないことが求められる。そのため、最大積雪深は一冬を通じて所定の値を超えないことを確認する必要がある。そして、遠赤外線ヒーターのフィラメントの寿命の観点から、頻繁に発停を繰り返すのは好ましくなく、一旦稼働し始めたらある程度連続的に運転するようにして、一冬の間の装置の発停回数をできる限り少なくする方が良い。以上の観点にもとづいて、最適条件を探索していく。

4.1 総融雪量と融雪時間

総融雪量と融雪時間の計算結果を図9に示す。一冬の総融雪量は、融雪能力が大きくなると急激に増加するが、 50 W/m^2 を超えるとその増加率はわずかとなる。 (H_u, H_l) の組合せによる違いを見ると、一値制御の $(150, 150)$ の場合が最も多く、 $(250, 250)$ が最も小さい。これは下限値が残雪量を表しており、残雪は自然が融かすことになるので、この値が大きいほど融雪装置による融解量は少なく済むことになる。上限値と下限値を変えた二値制御の場合には、上記の一値制御の2条件の間にすべて入っている。一方融雪時間は融雪能力が大きくなると急激に減少し、 (H_u, H_l) の組合せによる違いはそれほどないことがわかる。

次に一冬の装置稼働回数の計算結果を図10に示す。これを見ると、融雪能力が 50 から 300 W/m^2 の範囲で、一値制御の3条件すべてが10回以上の稼働回数となっているのに対して、二値制御の3条件はすべて3回以下の稼働となっており、二値制御の優位性が顕著に表れている。参考までに降雪制御の場合（降雪有りで運転開始、降雪無しで停止）についても計算すると一冬に283回運転運転することになり、一冬でフィラメント寿命を大幅に短縮することが予想される。

最後に、融雪面の最大積雪深の計算結果を図11に示す。融雪能力が増加すると、最大積雪深は減少するが、これも 100 W/m^2 以上では大きな差はなくなる。 (H_u, H_l) の組合せによる違いを見ると、一値制御の $(150, 150)$ の場合が最も小さく、 $(250, 250)$ が最も大きい。これは上限値を大きく設定しているからであって、当然の結果である。二値制御の組泡の場合は、一値制御の2条件の間にあって、設定値に応じた妥当な結果となっている。

以上の結果から、融雪能力としては豪雪年であって 50

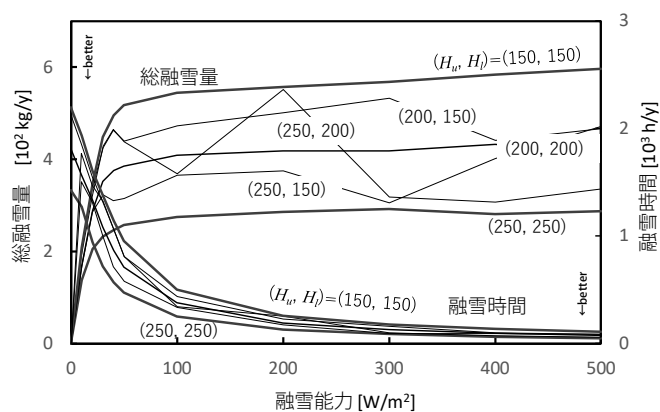


図9 一冬の総融雪量と融雪時間の計算結果

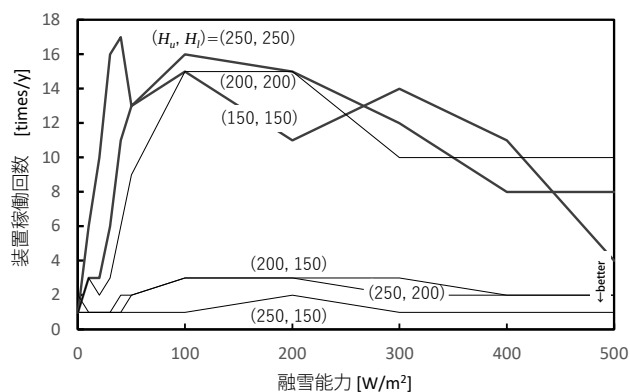


図10 一冬の融雪装置稼働回数の計算結果

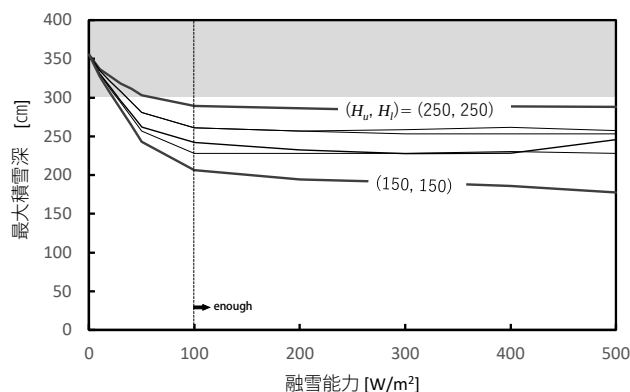


図11 融雪面の最大積雪深の計算結果

W/m^2 あれば十分であり、余裕を見ても 100 W/m^2 を与えておけば実用上全く問題ないことがわかる。これは現在設置している融雪装置の能力から3分1に減らしても問題ないことを意味する。遠赤外線融雪装置の特性上、単純に通電する電流や電圧量を変えて能力を3分の1に減らすことは難しいが、例えば出力の小さなヒーターに置き換えれば、電力契約のアンペア数を減らして電力基本料を下げるができる。また、あるいは反射板構造の工夫によって3倍の面積を融かすことにして、雪崩被害予防用のポケットの容積を広げることも可能である。

(H_u, H_l) の組合せについては、稼働回数をできるだけ少

なくするという観点からは、やはり一値制御ではなく、二値制御とすべきである。組合せの最適値については、条件ごとの差異はそれほど大きくないが、当初設定した(250, 250)が、総融雪量を少なくする、信頼性を確保する、という観点から妥当な選択と結論付けられる。

今後は、トンネル坑口上部の斜面からの雪崩発生リスクについても検討し、柵付近に持ち込まれるであろう雪崩の量とタイミングを組み込んだモデルを構築していく予定である。

5. まとめ

トンネル坑口上部のせり出し防止柵に設置した遠赤外線融雪装置について、4 冬季に亘る現地実験の結果を概観したのち、その制御方法の違いによりあらわれた装置の運転状況や融雪効果の違いの意味について検討を加えた。

年毎の降雪量が変動するため現地実験だけでは統一の評価が難しいこと、また異常豪雪時を想定して装置の信頼性を確保する必要があること、さらには装置設計における能力と運転条件の最適化を進めるために、気象データを用いて融雪面の積雪深を再現するためのシミュレーションモデルを構築した。融雪効果の評価には積雪重量データ必要で、制御のシミュレーションには融雪面積雪深データが必要となるので、その両者について時間単位での気温、降水量、積雪深データを入力として、実用的に支障のない精度でシ

ミュレーションできるモデルを構築した。

構築したモデルを用いて、種々の条件下でシミュレーションしたところ、融雪能力は現行の 3 分の 1 である 100 W/m^2 で必要十分あること、装置の発停を制御する積雪深上限値と下限値は、現行の 250 cm と 200 cm で妥当であることを示した。

なお本研究は、国道交通省北陸地方整備局長岡国道事務所および湯沢維持出張所の関係各位の全面的な理解とサポートにより遂行されたことを記し深く謝意を表する。また(株)興和および(株)ユニ・ロットの関係者からは遠赤外線融雪装置の特性に関する情報提供、現地実験のサポート、データ整理に関する助言など多大な支援を受けたことを記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 柴田 優作・上村 靖司・町田 敬, 2019: 積雪深二値制御を組み合わせた遠赤外線融雪装置のコスト削減効果—トンネル坑口の落雪・雪底対策への適用—, ゆきみらい 2019 新庄, 研究発表会講演論文集, http://www.thr.mlit.go.jp/yukimirai_shinjou/assets/doc/35.pdf
- 2) 上村靖司・梅村晃由, 1996: 屋根融雪装置の能力設計に関する提案, 雪氷, 12(3), pp.212-217.

寒中コンクリート工事の合理化に向けた基礎検討

谷口 円*1, 佐川貴康*2, 月館司*1, 濱幸雄*3, 高橋光一*1

1. はじめに

北海道において寒冷期の建設工事を行うことは、通年雇用の確保や安定的な経済活動の維持の観点から不可欠である。特に氷点下環境では、湿式工事となるコンクリート工事で技術的課題が多い。そのため、第二次大戦後すぐに課題解決のための取り組みが行われ、調合、養生計画手法が確立、寒中施工指針等がまとめられ、広く施工が行われている。

寒冷期のコンクリート工事は上屋で囲い、ジェットヒーター等で採暖、0℃以上に保温することに依存する。その労力や消費されるエネルギー、発生するCO2量も多大であることは容易に推測される。これらの状況を鑑み、建設工事をより持続的に進めていくためには、寒中施工においても合理化を進め、環境負荷の低減を目指すことは喫緊の課題である。

以上をふまえ、比較的小規模なコンクリート工事となる住宅基礎（擁壁等と同等の形状を持ち汎用性があると想定）について、断熱性の高いシートの活用による無加温養生の可能性を検討した。合わせて、これまで提示されていない初期凍害被害範囲の診断手法を確立すべく、検討を行った事例を報告する。

2. 実験概要

2.1 模擬試験体の作製方法

模擬試験体の概要を図1に示す。寒冷地における住宅の布基礎を想定し、立上がり部を厚さ150 mm、高さ900 mm、奥行き900 mmとした。上富良野町の屋外に3体作製した。フーチング部は2018年12月7日11時に打設し、保温養生を一切行わなかった。立上がり部は12月11日12時に打設し、「2.2 保温養生方法の検討」の通り、各種シート等で保温養生を行った。打設日の気温は、後述する結果で示す。

使用したコンクリートはレディーミクストコンクリートとし、セメントは普通ポルトランドセメント、呼び強度27 N/mm²、スランプ18 cm、空気量4.5 %、粗骨材最大寸法20 mm、高性能AE減水剤を使用した。

2.2 保温養生方法の検討

寒中コンクリート工事の合理化を目指し、布基礎立ち上がり部の無加温で各種シート養生（保温養生方法）を行った場合の温度履歴について検討した。用いたシートはブルーシートおよび比較的安価で施工性も良い気泡緩衝材（ブ

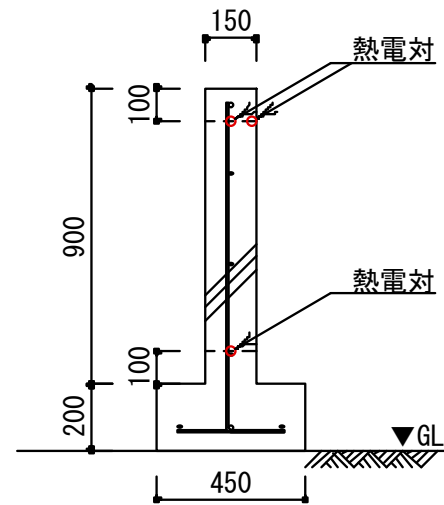


図1 模擬試験体概要

表2 実験計画

番号	覆い種類	温度計測位置	
1	ブルーシート 1重	上部（天端より100下がり）	中心
2			表層10mm
3		下部（フーチングより100上がり）	中心
4	気泡緩衝材 1重	上部（天端より100下がり）	中心
5			表層10mm
6		下部（フーチングより100上がり）	中心
7	気泡緩衝材 3重	上部（天端より100下がり）	中心
8			表層10mm
9		下部（フーチングより100上がり）	中心
10	外気温		



図3 養生状況

チプチシート）とした。

表2に実験計画を示す。養生方法は、ブルーシート1枚、気泡緩衝材1枚、気泡緩衝材3枚重ねの3通りとし、型枠の上から全面被覆した。図3に養生状況を示す。いずれもタ

ッカーにより端部にできるだけ隙間が生じないように固定した。

計測は、T熱電対を埋設し計測した。試験体立上がり部上端より100 mm下に表層から10 mmと75 mm（基礎厚中心），下端より100 mm上で表層から75 mm位置で計測を行った。また、現地の外気温も同時に測定した。測定はコンクリートの打設完了時から10日間にわたり継続した。

2.3 初期凍害の診断

模擬試験体の一部（フーチング部）はあえて保温養生を行わず、意図的に初期凍害を発生させ、既存の非破壊検査手法を適用し、初期凍害の診断可能性について検討した。

作製した模擬試験体の脱枠は、立ち上がり部分は打設から10日目、フーチング部は46日目に行った。脱枠後の試験体はブルーシートで覆った。模擬試験体に対する初期凍害の診断は、打設後46日（翌年1月26日）に行った。

計測項目は、表層の目視観察、日本建築仕上学会材料性能評価委員会塗り床材料性能ワーキンググループによるひっかき試験機を用いたひっかき試験、透気係数（トレント法）およびJISA1155にある反発度（リバウンドハンマー）とした。

なお、計測日の天気は晴れ、外気温-3.5℃であった。

3. 結果と考察

3.1 保温養生方法の検討

(1) 計測結果

図4に各測定部位における温度測定結果を示す。ブルーシート1重を青色、気泡緩衝材1重を橙色、同3重を赤色、外気温とAMeDAS気温をそれぞれ緑、紺色で示している。

外気温は測定初日の夜間に-10℃を下回ったほか、その後数日にわたり-10℃付近まで低下した。

ブルーシートでは1日経過後0℃以下となり、以降外気なりの変動であった。気泡緩衝材1枚では、0℃以下になるのは1日目以降の夜間の最低温度時となり、ブルーシートと同様であるものの、それ以降も日中の温度上昇が大きかった。気泡緩衝材3枚では打設ご3日まで躯体温度が0℃以下とならず、以降も日中の温度上昇が大きい結果となった。

(2) 保温性能と日射吸収性能

各種シートの効果を比較するために、以下の伝熱モデルを設定して重回帰分析をおこなった。

$$cV\Delta\theta_c = \{K_s A_s (\theta_s - \theta_c) + K_o A_o (\theta_o - \theta_c) + a A_o S - R\} \Delta t \quad (1)$$

$\Delta\theta_c$: 基礎コンクリートの温度上昇 ($\theta_c - \theta_c'$)

Δt : 時間間隔 (1h)

θ_s : 地面温度 (0℃と仮定)

θ_o : 外気温

c : コンクリートの体積比熱

V : 基礎コンクリートの体積

K_s : コンクリート・地面間の伝熱係数

A_s : コンクリート・地面間の面積

K_o : コンクリート・外気間の伝熱係数

A_o : コンクリート・外気間の面積

a : 日射吸収率

S : 日射量 (水平面)

R : 長波長放射量

$\Delta t = 1$ とし、(1)を変形して、

$$\Delta\theta_c = \alpha\theta_c + \beta(\theta_o - \theta_c) + \gamma S + \delta \quad (2)$$

$$\alpha = -K_s A_s / (cV), \quad \beta = K_o A_o / (cV)$$

$$\gamma = a A_o / (cV), \quad \delta = (K_s A_s \theta_s - R) / (cV)$$

図5に得られた回帰式による推定温度と実測温度の比較例（気泡緩衝材1重、 α , δ 指定の場合）、表2に得られた回帰係数を示す。

回帰式による推定温度は実測温度と良い対応を示した。

回帰係数を用いて、断熱効果や日射吸収硬化の比較を行う。断熱性を表す係数 β は地中との伝熱に影響され、明確な結果が得られなかった。そこで、地中との伝熱をどの

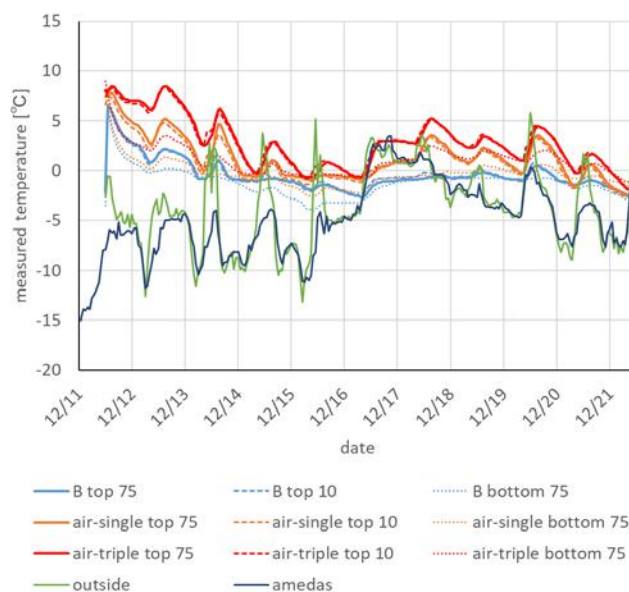


図4 温度測定結果

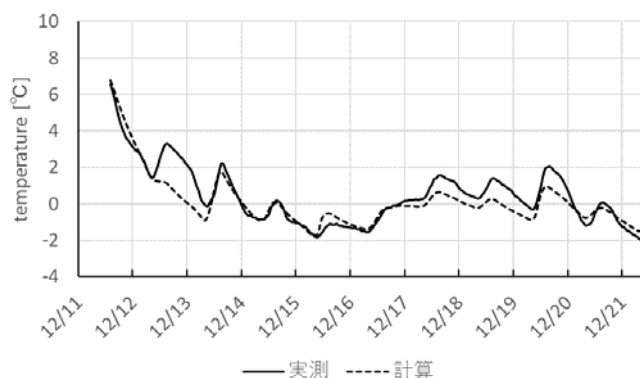


図5 実測温度と回帰式による計算温度の関係

表2 回帰係数

	ブルーシート	気泡緩衝材1重			気泡緩衝材3重		
			α 指定	$\alpha \delta$ 指定		α 指定	$\alpha \delta$ 指定
α (地中)	-0.0289	-0.0019	-0.0289	-0.0289	0.0201	-0.0289	-0.0289
β (断熱)	0.0171	0.0239	0.0208	0.0150	0.0271	0.0138	0.0076
γ (日射)	0.0008	0.0018	0.0018	0.0019	0.0020	0.0020	0.0022
δ (地中その他)	-0.0288	0.0196	0.0196	-0.0288	0.0287	0.0287	-0.0288

試験体も同じとして解析した場合には、気泡緩衝材3枚重ねの断熱性が高い（係数 β あるいは K_0 が小さい）結果となった。

日射の吸収を表す係数 γ は、ブルーシートが最も小さく、気泡緩衝材1枚・3枚重ねはおよそ2.5倍程度となっている。気泡緩衝材による被覆では、断熱性能があるため、コンクリート自体の水和発熱と透過性を有するために得られた日射取得熱により保温することが可能と考えられる。

3.2 初期凍害の診断

(1) 目視観察結果

写真1に表層の写真を示す。代表してブルーシート養生のフーチング部と立ち上がり部を示した。フーチング部は線状の凍結跡が残存していた。これは、フレッシュコンクリート中の水分の凍結による氷晶跡であり、初期凍害を受けたと判断された。立ち上がり部の表層には、凍結跡等は見当たらなかった。温度も 0°C 以上であり、初期凍害を受けていないと判断された。

以下、初期凍害部と記述した場合はフーチング部の表層、健全部は立ち上がり部の表層を示すこととする。

(2) ひっかき試験

写真2にひっかき試験状況を示す。本手法では、ブルーシートで養生したものの評価を行った。健全部では、ひっかき試験により、測定値は最大幅 0.5mm となり、表面強度がある、と判断された。初期凍害部分では、圧着させるだ

けでひっかき針が埋もれてしまい、計測不可能となった。表層が想定以上に脆弱であるためと考えられる。

(3) 透気係数（トレント法）

表3に透気係数 kT （ $\times 10^{-16}\text{m}^2$ ）の結果を示す。

初期凍害部で計測値が得られず、当該部位のチャンバ一設置位置には計測後水分が浮き出ている。初期凍害部位



写真1 表層の状況

(上：フーチング部，下：立ち上がり部)



写真2 ひっかき試験の状況

(左：フーチング部，右：立ち上がり部)

表1 透気係数試験結果 (kT (×10⁻¹⁶m²))

ブルーシート		エアキャップ1重		エアキャップ3重	
フーチング (初期凍害部)	立ち上がり (健全部)	フーチング (初期凍害部)	立ち上がり (健全部)	フーチング (初期凍害部)	立ち上がり (健全部)
計測不可 (水の跡)	1.9	計測不可 (水の跡)	0.36	計測不可 (設置不可)	0.0081

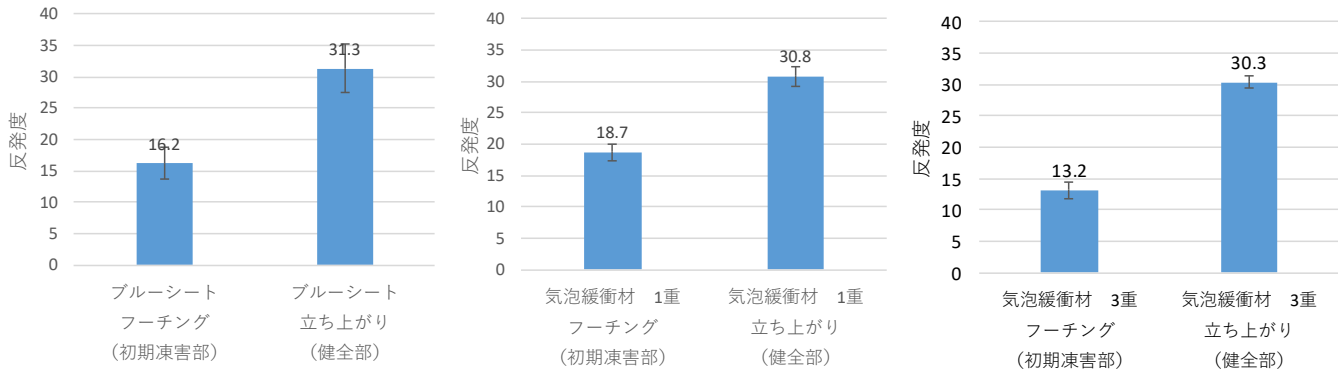


図2 反発度の結果

には、内部に水分が残存し、真空吸引により、表層に浸出したと考えられる。健全部では、計測値が得られ、ブルーシート養生→気泡緩衝材1重→3重の順で透気係数が小さくなった。これは計測の順番に対応した。計測はそれぞれの壁体で、健全部を計測した後、劣化部を計測した。そのため、計測装置が初期凍害部の計測時に水分を吸い込むことで、正常に動作せず、異常な値が得られたと考えられる。

(4) 反発度

図6に反発度の結果を示す。10点の平均値と標準偏差を示した。いずれも初期凍害部で低く、健全部で高い値となった。健全部は3体とも30程度の反発度となった。初期凍害部はブルーシートで16.2、エアキャップ1重で18.7、エアキャップ3重で13.2と模擬構造体により差が認められた。初期凍害部と健全部では明らかに値に差が認められた。反発度の計測により、初期凍害による損傷程度の判断ができるものと考えられる。

以上から、初期凍害を受けた範囲を明らかにするための診断手法として、反発度を適用できる可能性を示した。本手法では面的な範囲を同定可能であるが、深さ方向の診断については、さらなる検討を必要とする。

4. まとめ

本研究で得られた成果は以下の通りである。

- ・日射透過性を持ち、断熱性の高いシートを活用することにより、無加温養生をできる可能性を示した。
- ・初期凍害被害範囲の診断手法として、反発度法を適用できる可能性を示した。深さ方向の診断には、さらなる検討を必要とする。

関越道 湯沢ICにおける酢酸系液状凍結防止剤を用いたスタック対策について

島 友昭、小川 貴、中地 章*1

1. はじめに

近年、積雪寒冷地の一般道、高速道の坂道、ランプ部そしてジャンクション等での冬期交通障害として車両の登坂不能、いわゆるスタックが課題のひとつとなっている。特に、大型車両がスタックした場合は、長時間にわたって交通障害を発生させる可能性があり、これを未然に防止する事が、強く望まれています。

関越自動車道の湯沢インターチェンジ（以下、湯沢IC）では、従来から除雪作業と凍結対策を組み合わせた冬期路面管理が実施されている。具体的には、除雪車両と薬剤散布車を組み合わせた梯団作業による効率的な冬期路面管理が実施されている。このような梯団作業による冬期路面管理によっても、気象状況、車両の通行状況等の因子の組合せによっては、冬期シーズン中に登坂不能となる車両が発生することがあった。さらに湯沢ICは、関越トンネルの直近のインターチェンジであり、スキー客などの車両も多く、スタック車両が発生した場合の影響が大きいことから、その対策が課題となっていた。

このような状況の中、高速道路での設置例が増えている酢酸系液状凍結防止剤の定置式自動散布装置を湯沢ICに設置し、登坂不能対策としての有効性について検証を試みたので報告する。

2. スタック対策箇所と対策方法について

湯沢ICのAランプ（上り方面のONランプ）と本線との合流部の手前付近では、従来から大型車両が登坂不能となる事がシーズン中に何度か発生することがあった。そこで、この箇所の登坂不能対策として、酢酸系液状凍結防止剤の定置式自動散布装置（以下、自動散布装置）を設置した。図1、図2に、湯沢ICでの自動散布装置の設置状況を示した。自動散布装置は、薬剤の噴射をコントロールする本体部、薬剤を貯留するタンク部、タンクの薬剤を噴射箇所へ送液するポンプボックス部、送液された薬剤を一時的に貯留する分離ボックス部、そして薬剤を路面に噴射させる2本ノズルを収納したノズルボックス部などで構成されている。

薬剤の噴射は、気温により制御されており、設定温度より1℃低い温度より気温が下回ると噴射を開始し、設定温度に達すると噴射を停止する。ノズルからの標準的な噴射は、1回の噴射時間が約1.2秒で、その噴射量は約50mlであり、2本のノズルで左右の轍部に薬剤を噴射する。薬剤

の噴射量は、1時間当りの噴射回数をセットする事で、コントロールする仕組みである。また、遠隔システムも搭載されており、事務所のパソコンにて自動散布装置の監視、制御も可能となっている。

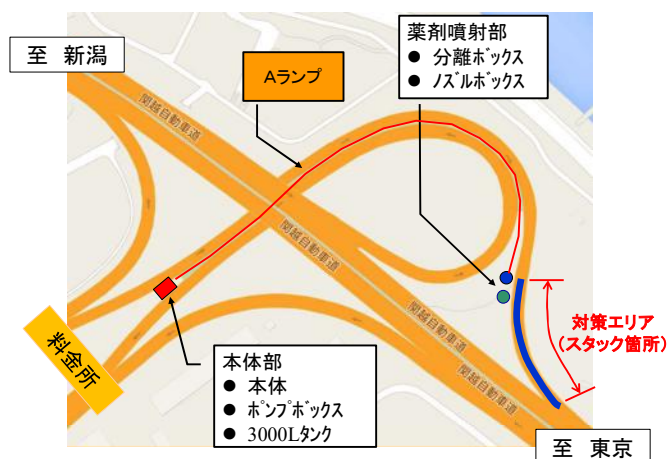


図1 湯沢ICと定置式散布装置の設置概要



図2 湯沢ICに設置し定置式散布装置

使用する薬剤は、酢酸系液状凍結防止剤（以下、酢酸系薬剤）であり、酢酸カリウムを主成分とする水溶液である。その特長は、第1に塩素を含まない成分から構成

されており塩害の心配がない事、第2に凝固点が-43℃と低いことから高い凍結防止効果を発揮する事、第3に拡散性、定着性を増大させる成分を添加していることから、薬液が広く拡散し定着することで、その効果をさらにアップさせる事である。このような特性から、定置式自動散布装置の薬剤として特に優れた性能を発揮している。

3. 湯沢ICでの運用方法

湯沢ICでは、通常の降雪時は、除雪と薬剤散布を組み合わせた梯団作業による雪氷対策を実施している。これに対して気象予報などで降雪強度が強くなることが予想される場合には、梯団作業に加えて自動散布装置も稼働させ、

*1 北海道日油株式会社

登坂不能対策を万全にする体制とした。

自動散布装置の稼働条件は、設定温度を 2°C として運用を開始した。基本的には、降雪や凍結が始まる前に酢酸系薬剤の噴射を開始し、路面に噴射された薬剤が通行車両によって前方に拡散され、降雪や凍結に備える運用とした。

4. スタック対策状況の検証

4.1 2015年度シーズンにおける対策と検証

2016年2月9日と10日、自動散布装置を稼働させた状況での湯沢ICのAランプの路面状況の観察を行った。図3は、2月9日と10日の気温と降雪量のグラフである。2月9日の14時頃から降雪が始まり、強い降雪強度が10日まで継続する状況であった。

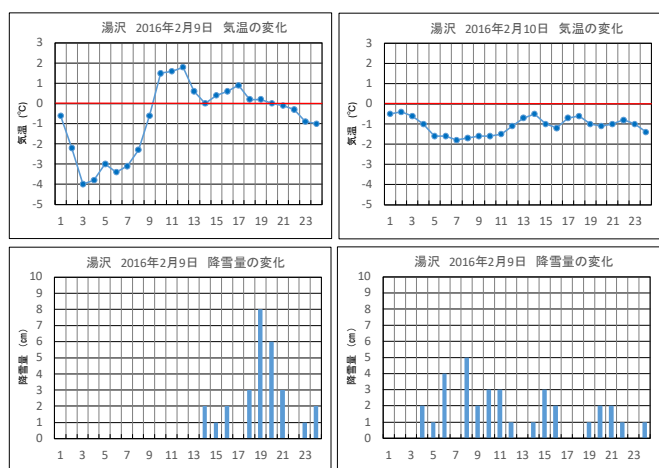


図3 2月9、10日の湯沢の気象状況

図4にAランプでの路面観察地点を示した。図5は、2月10日15:29時点の降雪が続いている状況での路面観察結果である。地点①と②は、酢酸系薬剤の噴射箇所手前の路面状況である。地点③、④は、酢酸系薬剤の噴射箇所での路面状況であるが、酢酸系薬剤が噴射させている箇所のみで、路面が露出している状況であった。

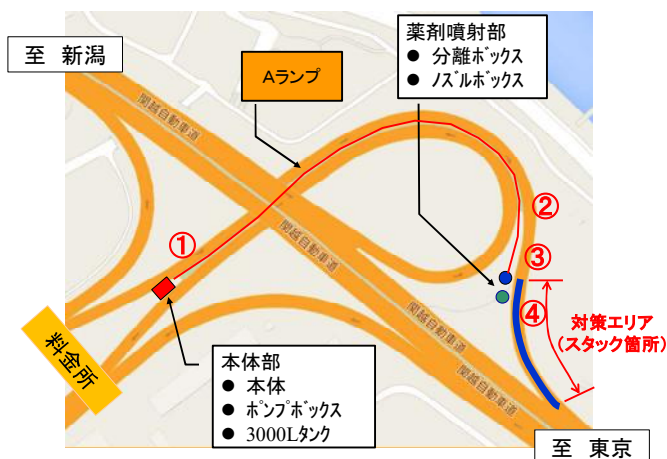


図4 Aランプの路面観察地点（地点①、②、③、④）



図5 2月10日15:29の路面状況（地点①、②、③、④）

図6は、2月10日16:31、降雪が止み除雪車による除雪作業が実施された直後の路面観察結果である。地点①と②は、酢酸系薬剤の噴射箇所の手前の路面状況で、除雪直後ではあるが雪氷が路面に残った状況であった。図6の地点③、④は、酢酸系薬剤の噴射箇所とそれ以降の薬剤が拡散した箇所の路面状況であるが、雪氷が観測されず路面が露出している状況であった。

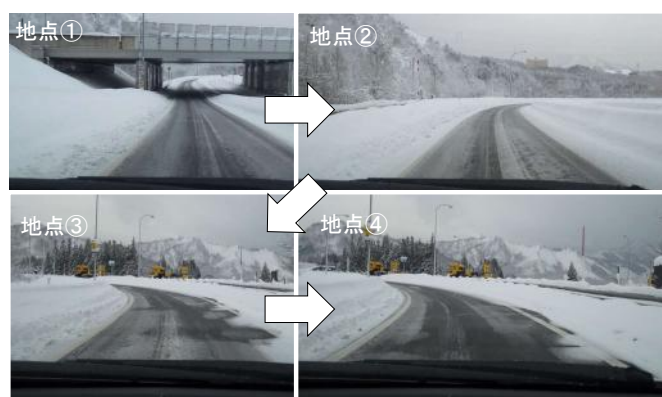


図6 2月10日16:31の路面状況（地点①、②、③、④）

このような雪氷部分（以下、固着層）の形成が、スタックを引き起こす要因のひとつと考えられるが、酢酸系薬剤が積雪層の下で凍結防止効果を発揮し、このような固着層が形成され難い状況となり、酢酸系薬剤の噴射箇所の手前で、除雪後の路面に大きな違いが認められたと考えられる。

4.2 2016年度シーズンにおける対策と検証

2015年度シーズンは、対策箇所以降での登坂不能車両は認められなかったが、対策箇所の手前で登坂不能が発生した。そこで、2016年度は、図7に示すように、2箇所の散布箇所を増設しAランプ全体の対策が可能になるよう散布装置の改造を実施した。



図7 散布箇所の増設状況と路面観察箇所

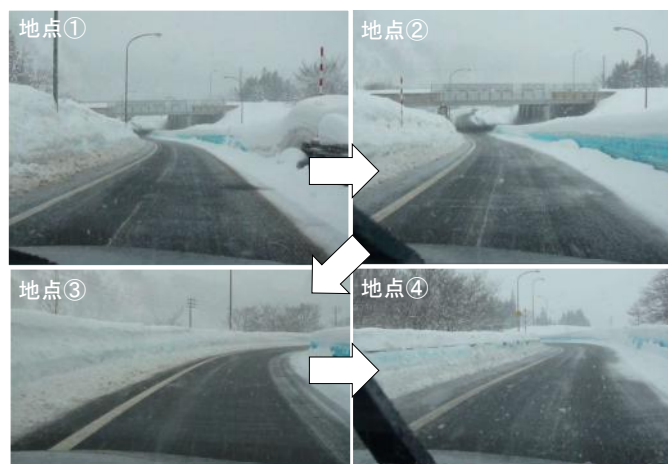


図10 2017年2月12日9:26の路面状況(地点①、②、③、④)

この改造後の2017年2月11日と12日に、自動散布装置が稼動した状況で路面観察を行った。図8は、2月11日と12日の気温と降雪量のグラフである。2月11日の22時頃から降雪が始まり、12日も断続的に降雪が続く状況であった。

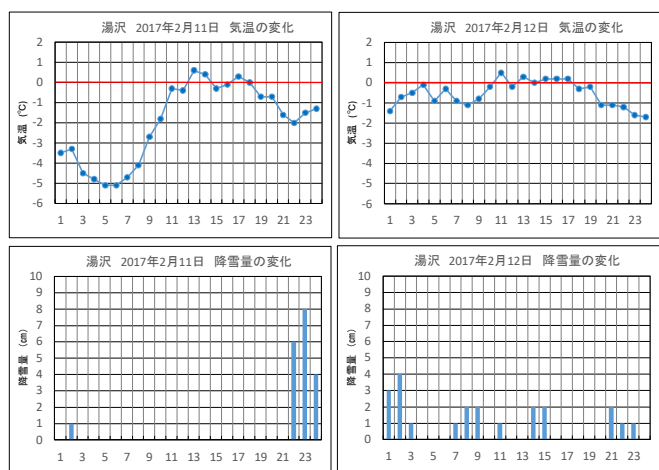


図8 2017年2月11、12日の湯沢の気象状況

図9は、2月12日8時頃の降雪が続いている状況での路面観察結果である。酢酸系薬剤が噴射している箇所は判別できるが、それ以外では路面の露出は確認できない状況であった。



図9 2017年2月12日8:02の路面状況(地点①、②、③、④)

図10は、2月12日9:26、降雪が止み除雪作業が実施された直後の路面観察結果である。地点①、②、③、④のいずれにおいても、固着層は、確認できず路面が露出している状況であった。

これは、2015年度シーズンの対策箇所と同様の状況であり、対策範囲を広げたことで、Aランプ全域で酢酸系薬剤の効果が発揮された結果と思われる。

5. 2018年度シーズンにおける検証

5.1 2018年度シーズンにおける検証方法

これまでの検証は路面観察のみであり、すべり摩擦測定などの定量的評価は実施できていなかった。すべり摩擦測定の方法は、寒地土木研究所が示しているように¹⁾、いくつかの方法知られている。その一つに、加速度センサーを利用したすべり摩擦係数の測定がある。この方法は、測定器を搭載した車両で、急制動をかけてタイヤをロック状態にして、すべり摩擦係数を測定するものである。当然であるが高速道路上で一般走行しながら、この方法での評価することは不可能である。

そこで、今回採用したのは、VAISALA社製のDSC-111を使用した非接触式のすべり摩擦測定方法である。この方法は、3種のレーザー光を路面に照射し、反射光を解析することで、水膜、氷膜、雪膜の厚さを測定、これらの厚さを一定のアルゴリズムによってすべり摩擦係数に換算して測定するものである。図11に示すように車両に搭載し、通常走行しながら非接触ですべり摩擦を測定することが可能となっている。



図 1 1 車両に搭載した非接触式すべり摩擦測定器

5.2 2018年度シーズンにおける検証結果

2019年2月17日に、凍結防止剤散布装置が稼働した状況で路面観察を行った。図 1 2 は、2月17日の気温と降雪量のグラフである。2月16日から降雪が始まり、17日も断続的に降雪が続く状況であった。

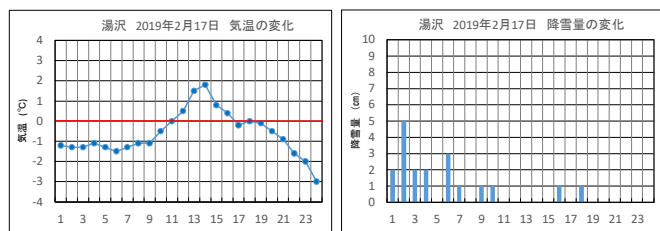


図 1 2 2019年2月17日の湯沢の気象状況

酢酸系薬剤を散布していないBランプの観測地点と路面状況を図 1 3 に示した。図 1 4 は、2月17日3:19、このBランプでのすべり摩擦測定結果である。地点②、③など低いすべり摩擦係数となっている。酢酸系薬剤を散布したAランプの観測地点と路面状況を図 1 5 に示した。図 1 6 は、2月17日3:46、このAランプでのすべり摩擦測定結果である。②、③、④地点など、すべり摩擦の改善が認められた。これらの地点は、いずれも酢酸系薬剤の噴射箇所付近であるが、これらの地点の間では、低いすべり摩擦の値も観測された。図 1 8 は、2月17日6:49、酢酸系薬剤を散布しているAランプのすべり摩擦測定結果であるが、②、③、④地点など、すべての箇所ですべり摩擦の改善が認められた。図 2 0 は、2月17日8:18、酢酸系薬剤を散布していないBランプのすべり摩擦測定結果である。①、②、④地点などで、低いすべり摩擦係数が観測された。



地点① すべり摩擦係数:0.41

地点② すべり摩擦係数:0.14~0.20



地点③ すべり摩擦係数:0.15



地点④ すべり摩擦係数:0.66

図 1 3 2月17日3:19のBランプの観測地点と路面状況

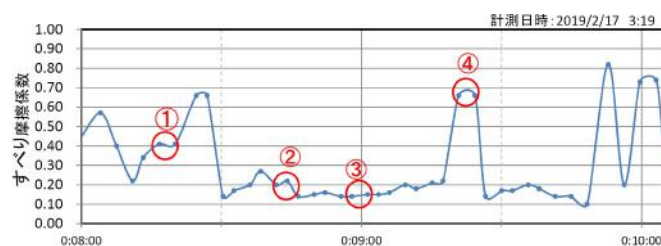


図 1 4 2月17日3:19のBランプのすべり摩擦測定結果



地点① すべり摩擦係数:0.67

地点② すべり摩擦係数:0.35



地点③ すべり摩擦係数:0.50



地点④ すべり摩擦係数:0.74

図 1 5 2月17日3:46のAランプの観測地点と路面状況

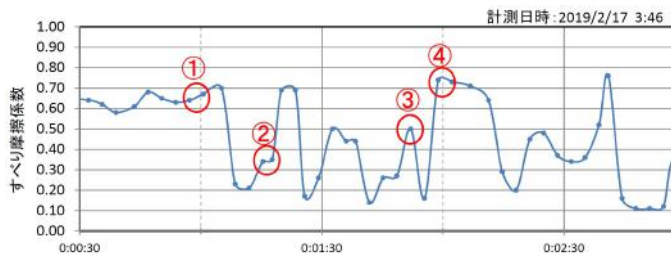


図 1 6 2月17日3:46のAランプのすべり摩擦測定結果

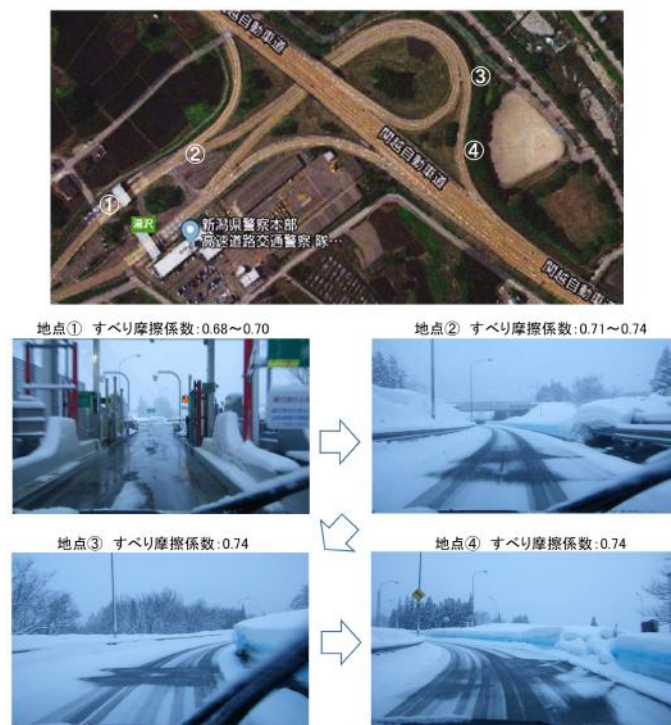


図 1 7 2月17日6:49のAランプの観測地点と路面状況



図 1 8 2月17日6:49のAランプのすべり摩擦測定結果

雪氷路面の改質が行われたことを示す結果となった。



図 1 9 2月17日8:18のBランプの観測地点と路面状況

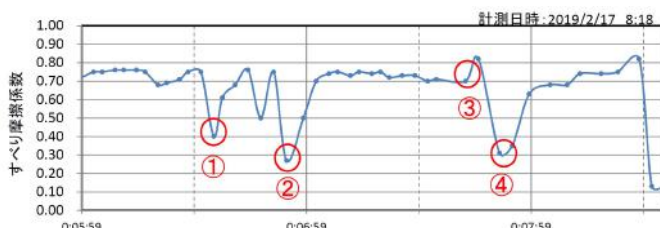


図 2 0 2月17日8:18のBランプのすべり摩擦測定結果

但し、2月17日3:46、Aランプのすべり摩擦は、酢酸系薬剤の散布箇所では高い値を示したものの、酢酸系薬剤の散布箇所の間では、低いすべり摩擦も観測されている。

2016年度と2017年の検証から、酢酸系薬剤の効果範囲では、その効果によって積雪層の下に固着層が形成され難い可能性が高いことが示されており、この2月17日3:46のAランプでも、低いすべり摩擦係数の箇所でも、同様に積雪層の下に固着層が形成されていなかったと想定される。非接触式すべり摩擦測定器は、雪氷表面から約1mmの深さのデータを取得しており、雪氷表面より1mm以上深い部分の状況は判別できないため、今回の様な低いすべり摩擦になったと考えられる。但し、この推定については、今後の確認が必要である。

6. まとめ

湯沢 I C に導入した酢酸系薬剤の自動散布装置の効果を検証した。その結果、酢酸系薬剤の効果により、スタ

酢酸系薬剤を散布していないBランプでは、降雪強度が比較的強かった17日3:19の時点でランプ部のほぼすべての地点で低いすべり摩擦であったが、酢酸系薬剤を散布しているAランプでは、Bランプとほぼ同様の気象条件であったが、すべり摩擦の改善が認められた。その後、降雪強度が弱まった17日6:49の段階では、Aランプのすべての地点で、すべり摩擦の改善が認められたが、17日8:18のBランプでは低いすべり摩擦も観測された。以上の結果から、すべり摩擦測定においても酢酸系薬剤を散布したAランプが散布していないBランプと比較し

ックを引き起こす要因のひとつと考えられる固着層が形成され難い事が確認できた。すべり摩擦測定においても、酢酸系薬剤の効果により、すべり摩擦の改善が認められた。但し、積雪層の下でも固着層が形成されずに、すべり摩擦が改善されているかについては、今後の確認が必要である。

参考文献

- 1) 切石亮、徳永ロベルト、高橋尚人：冬期路面状態評価手法の比較試験について、寒地土木研究所月報第702号、pp.50-55 2011

道路情報板支柱の冠雪による危険な落雪防止対策の検討

大廣智則*1, 渥美尚大*2, 細川和彦*3, 竹内政夫*4

1. はじめに

道路情報板や道路標識は、お客様へ交通情報や気象情報、路面情報を提供する重要な交通施設である。道路情報板や道路標識は、視認性を確保するために走行車線の上部や道路を横断して設置されている。このような状況の中で積雪寒冷地では、冬期間、降雪が伴うと、情報板や道路標識、支柱の上部へ雪が堆雪する。ある程度以上の降雪があると、図1に示すように情報板や支柱の上部に積もった雪が雪庇となって垂れ下がる（冠雪）。これらが、落雪すると、事故や交通の妨げの原因となるため、除去しなければならない。冠雪が大きくなると、除去作業は、図2に示すように高所作業車による作業となり、車線規制を必要とするため、多大な労力と時間を要している。これらを防止する道路情報板や道路標識、支柱の冠雪による危険な着雪・落雪防止対策は必要不可欠な状況である。

これまで道路情報板や道路標識の着雪・落雪防止対策は、屋根型や傾斜板を設置したもの、カバー型でもコラム型やシート型等が考案されてきた^{1), 2)}。これらは、建設時に対策を実施するのであれば十分な対策を検討することができる。しかし、既設の支柱に対策を実施する場合、支柱の耐力や基礎の地耐力を考慮すると、風荷重のかからないもの、自重の軽いものでなければ、対策品を設置することが困難となる場合がある。近年、温暖化の影響なのか、建設時に道路情報板や道路標識、支柱への着雪・落雪の問題が無かった箇所がクローズアップされるようになってきた。

一方、竹内³⁾によると、冠雪は、格子フェンス⁴⁾により冠雪の成長や落下を抑制することが可能であり、橋梁の冠雪防止実験では、種々の対策の中で格子フェンスだけが冠雪の落下を防止することができ、格子フェンス設置以降、落雪事故は皆無となったと報告されている。格子フェンスは風荷重がかかる面積が小さく、重量も軽い。著者らはこれまで、竹内³⁾が開発した格子フェンスを応用し、道路情報板支柱の冠雪による危険な落雪を防止する形状の開発を行ってきた^{5), 6)}。

本研究では、道路情報板支柱の冠雪による危険な落雪を防止するため、これまで検討した格子形状（格子高さ、格子頂角、格子間隔など）の格子フェンスを深川JCT（ジャンクション）上りの道路情報板の支柱に試験設置し、無対策箇所との比較から格子フェンスの道路情報板支柱の冠雪による危険な落雪を防止する効果を検証する。



図1 道路情報板に発生した冠雪



図2 道路標識に発生した冠雪の除去作業

2. これまでの道路情報板支柱の冠雪による危険な落雪防止対策

これまで、表1に示すように、市販のものを3タイプ試験設置し、道路情報板支柱の冠雪による危険な落雪防止対策を検討してきた。超撥水シートと融雪ナノマットと雪割りである。超撥水シートは、支柱上部に雪が堆雪し効果が無かった。試験設置した箇所が-20℃程度の低温になること、支柱の径が19cmあることが影響していると考えられる。融雪ナノマットは、着雪を防止することができた。しかし、危険な氷柱が発生し効果が得られなかった。雪割りは、白色と茶色の2種類で試験した。雪割りの上部に堆雪した雪は、白色より茶色の方が落下しやすい。しかし、どちらも着雪した雪は大きな塊となって落下し効果が得られなかった。既存の市販品では、道路情報板支柱への危険な落雪を防止するには不十分である。

*1 株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道, *2 東日本高速道路株式会社 北海道支社,

*3 北海道科学大学, *4 NPO法人雪氷ネットワーク

3. 格子フェンスの冠雪抑制効果

降雪があると図3 (a) に示すように支柱の上に雪が着雪する。降雪が続くと支柱上部の着雪は大きくなり冠雪が発生すると、図3 (b) に示すように巻き垂れとなり、大きな塊となって落雪する。

一方、図3 (c) に示すように格子フェンスを設置した状態では、冠雪を抑制し、格子外での小さな落雪を容認し、格子内に溜まった雪は日射とともに消雪させることができる。格子内外の雪は一時的には繋がり、格子内の雪は圧密が進行する。しかし、格子外の雪は、格子により内外に分けられ、格子外の雪の深さでの圧密となるため圧密の進行は小さい。このような雪の落雪は大きな塊となって落雪しない限り交通の障害になることは小さい。

著者ら^{5), 6)}はこれまで、格子フェンスの格子間隔には最適な大きさがあると考え、格子間隔を変化させ着雪・落雪対策の効果検証を行ってきた。これまでの研究で得られた最適な格子間隔は、□100×100mmである。

4. 実験方法

1.1 検証期間

格子フェンスを道路情報板支柱に設置し、危険な落雪を防止する効果に関する検証は、2018年11月16日から2019年3月31日の期間に行った。

1.2 検証箇所

検証箇所は、深川JCT上りの道路情報板の支柱で行った。

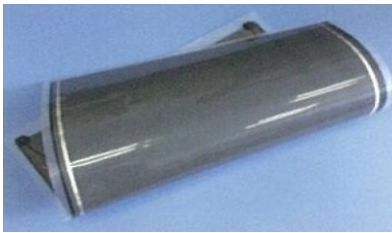
1.3 落雪対策

格子フェンスの形状は、格子高さが支柱センターから350mm、格子の頂角が60°、格子間隔が□100mm×100mm、長さが4.0mである。格子フェンスの形状を図4に、道路情報板支柱への設置状況を図5に示す。

1.4 検証機器

検証に用いた機器は、タイムラプスカメラである。メ

表1 これまでの道路情報板支柱の冠雪による落雪防止対策

対策	超撥水シート	融雪ナノマット	雪割り
概要			
対策状況			
結果	効果無し	氷柱の発生	茶色の方が落雪し易い。しかし、2色ともに着雪し、まとまった雪が落雪



(a) 支柱への着雪



(b) 冠雪による巻きだれ



(c) 格子フェンスの冠雪防止

図3 格子フェンスの冠雪による危険な落雪防止効果

ーカーはBrinno、型式はMAC200DNダレカである。カメラの解像度は92万画素、解像度は1280x720の720Pである。

5. 実験結果

期間の中で、図6に示すような無対策箇所から大きな雪の塊となって落雪したイベントが7回発生した。一方、格子フェンス設置箇所からは、大きな雪の塊となって落雪した事例はなかった。無対策箇所から危険な落雪があったときの気象状況を表2に示す。累計降雪量は、深川JCTに設置した積雪深計の値を使用した。また、気温は、オキリカップ川の気象観測局のデータを用いた。累計降雪量に着目すると、支柱の上部に20cm程度の累計降雪があると落雪している。気温に着目すると、降雪量が20cmを超え、気温が高くなったときに落雪している。格子フェンスは、危険な落雪を防止できている。格子フェンスは、想定していたように30cm程度までの累計降雪量に対し、危険な落雪を防止する効果があることを確認した。

一方、2番目の事例に着目すると、支柱上部の降雪が多くなり過ぎている（図7）。支柱上部の着雪は、無対策箇所からの落雪後すぐに除去作業が行われた。格子フェンス上部からの落雪はなかったものの、格子フェンス上部の積雪量が多い。今後、格子フェンスが許容する気象条件を検討する必要がある。

以上より、格子フェンスの設置により、道路情報板支柱の冠雪による危険な落雪を防止でき、除去作業の頻度を減少させることが可能と考えられる。

6. おわりに

本研究では、道路情報板の支柱の上に着雪した雪が大きな塊となって落雪しないように、格子フェンスを設置した。支柱上部の格子フェンス内に雪を堆雪するスペースを確保し、支柱上部に着雪した雪の付着力を格子フェンスがある程度の大きさで分離させ、落雪の塊を小さくさせることができた。考案した格子フェンスは、道路情報板支柱の冠雪による大きな雪の塊の落雪を防止することが可能である。

今回対策を行ったのは、道路情報板の支柱のみである。道路標識の支柱についても同様の形状のため、冠雪による危険な落雪を防止する効果が得られると考えられる。一方、道路情報板の上部や梁については検討がなされていない。今後は、道路情報板の上部、梁、支柱を含めた、道路情報板全体について、大きな雪の塊の落雪を防止する対策を考案する必要がある。また、格子フェンスが許容する気象条件を検討し、冠雪による危険な落雪を防止するメカニズムを明らかにする必要がある。

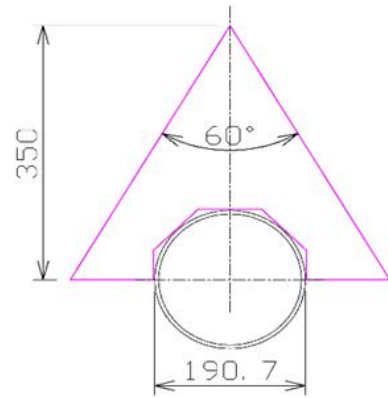


図4 格子フェンスの形状



図5 格子フェンスの道路情報板への設置状況



図6 無対策箇所からの落雪



図7 支柱上部の多量降雪

表 2 落雪時の気象状況

No.	年月	降雪開始日時	落雪日時	気温の推移	累計降雪量
1	2018 年 12 月	18 日 0:00	21 日 15:38	-7～0℃	230mm
2	2018 年 12 月	23 日 20:00	30 日 13:00	-11～0℃	890mm
3	2018 年 12 月	31 日 22:00	翌 1 月 4 日 16:30	-8～-1℃	220mm
4	2019 年 1 月	5 日 9:00	10 日 12:01	-13～0℃	280mm
5	2019 年 1 月	10 日 17:00	15 日 16:59	-18～0℃	180mm
6	2019 年 1 月	21 日 17:00	25 日 15:13	-11～-2℃	210mm
7	2019 年 1 月	31 日 20:00	2 月 3 日 17:28	-10～0℃	190mm

【参考・引用文献】

- 1) 雪氷チーム, 2008: 道路案内標識の着雪・落雪対策について, 寒地土木研究所月報, 658, 45-48.
- 2) 雪氷チーム, 2012: 道路案内標識の雪氷雪対策に関する研究, 国立研究開発法人土木研究所 平成24年度 土木研究所成果報告書, No. 21, 1-11.
- 3) 竹内政夫, 2008: 三角格子フェンスによる冠雪から成長する雪庇発生抑止と落雪防止, 北海道の雪氷, 27, 29-32.
- 4) 竹内政夫, 岳本秀人, 植野英睦, 浅野豊, 2005: 橋梁の落雪防止のための格子フェンス, 日本雪工学会全国大論文報告集, 22, 19-20.
- 5) 竹内政夫, 佐々木勝男, 大廣智則, 2017: 道路施設からの落雪危険防止について, 北海道の雪氷, 36, 81-84.
- 6) 細川和彦, 佐々木勝男, 竹内政夫, 大廣智則, 2018: 道路施設からの落雪危険防止について, 北海道の雪氷, 37, 123-124.

白鳥大橋の雪氷対策 ～積雪寒冷地ならではの吊橋技術の紹介～

横田法久 * 1、堀田暢夫 *1、佐々木慎一 * 1

1. はじめに

白鳥大橋(写 1)は、我が国で唯一、積雪寒冷地に架けられた長大吊橋である。積雪、結氷、結露など積雪寒冷地ならではの厳しい気象環境の中でも、安全で円滑な交通を確保するため、様々な工夫・対策が取り入れられている。本稿では、冬季における本橋の気象環境、維持管理状況等を概説するとともに、積雪寒冷地ならではの吊橋技術などを紹介する。

2. 白鳥大橋の概要

本橋は、北海道室蘭市に位置し、室蘭港を横断する海上吊橋(図 2)である。一般国道 37 号白鳥新道(第 1 種 3 級、自動車専用道路、設計速度 60km/h)に架かる橋長 1,380m、中央径間長 720m、主塔高 139.5m の 3 径間 2 ヒンジ補剛吊桁形式の長大橋梁で、1998 年 6 月に供用が開始され、昨年、開通 20 周年を迎えた。

本橋の位置する室蘭は馬蹄形に突き出た陸継地で、三方を海に囲まれた地形であり、鉄鋼・造船業を中心に古くから栄えた、北海道を代表する重工業都市である。

本橋は、南側にある港湾・工業施設と北側に広がる住宅地・新興工業地域とを環状に結んでおり、機能的な市街ネットワークを構築するとともに、高速道路網との連絡や近隣地域との広域医療ネットワークなど、北海道全域につながる重要な道路網を形成している(図 1)。



写 1 白鳥大橋



図 1 位置図

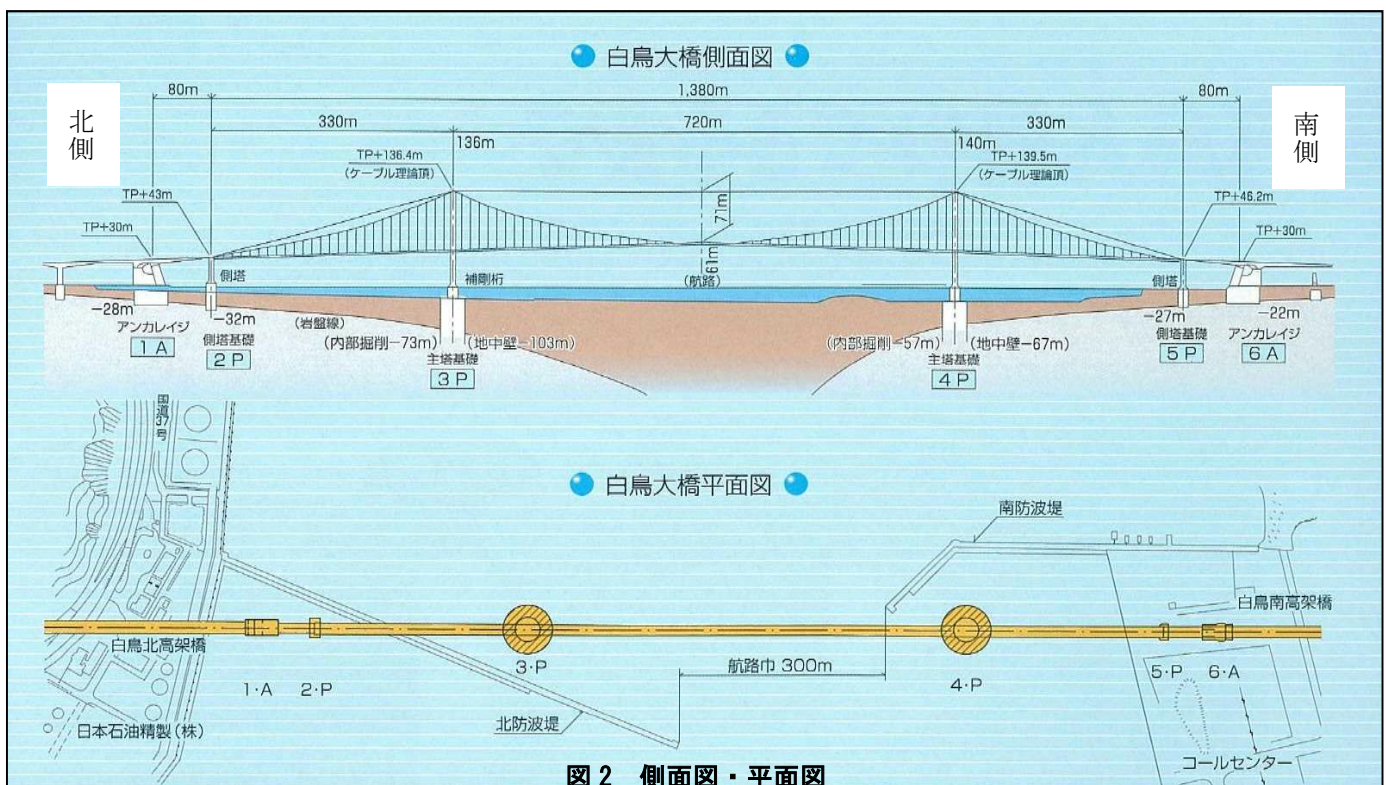


図 2 側面図・平面図

* 1 国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部室蘭道路事務所

3. 本橋の気象環境

(1) 室蘭地域の特徴

本橋の気象環境を定量的に示すため、気象庁の統計データをもとに、気温、雪、風に関する観測値を表 1 にまとめた。本橋の位置する室蘭は積雪寒冷地とはいえ、道内主要都市と比較すると、冬季の気温が比較的高く、降雪は少ない。その一方で、道内主要都市の中では風の発生頻度が高く、風速 15m/s 以上の強風が発生し易い地域であるという特徴がある。

表 1 道内主要都市の気象環境

◆平均気温(月ごとの平年値)

	札幌	旭川	函館	室蘭
12月	-0.9	-4.3	0.0	0.5
1月	-3.6	-7.5	-2.6	-2.0
2月	-3.1	-6.5	-2.1	-1.9
3月	0.6	-1.8	1.4	0.9

◆最低気温(月ごとの平年値)

	札幌	旭川	函館	室蘭
12月	-4.1	-7.9	-3.5	-1.8
1月	-7.0	-12.3	-6.2	-4.2
2月	-6.6	-12.7	-5.9	-4.1
3月	-2.9	-6.3	-2.6	-1.5

◆積雪深(月ごとの平年値)

	札幌	旭川	函館	室蘭
12月	46.0	56.0	23.0	10.0
1月	77.0	79.0	35.0	19.0
2月	97.0	90.0	41.0	21.0
3月	81.0	85.0	29.0	16.0

◆平均風速(月ごとの平年値)

	札幌	旭川	函館	室蘭
12月	3.3	3.0	3.9	6.0
1月	3.5	2.6	3.9	5.8
2月	3.4	3.0	3.9	5.2
3月	3.8	3.4	4.2	4.9

◆風速15m/s以上の発生日数(月ごとの平年値)

	札幌	旭川	函館	室蘭
12月	0.2	0.0	0.3	2.9
1月	0.1	0.0	0.2	2.2
2月	0.2	0.1	0.1	0.9
3月	0.2	0.2	0.5	1.4

※気象庁 HP (過去の気象データ) より集計。1981 年～2010 年の統計期間における月ごとの平年値を使用。

(2) 風の特徴

本橋は室蘭港の先端を南北方向に横断した海上橋で、西側は内浦湾が広がり、東側には室蘭港が位置しており、道内における強風地域である室蘭地域の中でも、とりわけ風の影響を強く受ける。本橋の風の特徴として、図 3 に 2018 年における強風発生日数を示すが、冬季(12 月～3 月)は風速 10m/s 以上の頻度が非常に高いとともに、15m/s 以上の風も冬季に集中する傾向にあることがわかる。また、図 4 には 2018 年の風向頻度を示すが、年間を通して、海に面する東西方向に風向が集中しており、そのうち冬季は殆どが西風であった。

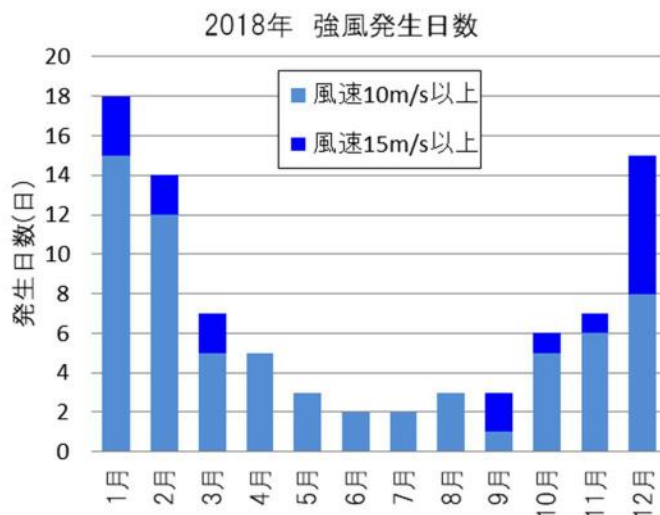


図 3 本橋の強風発生日数

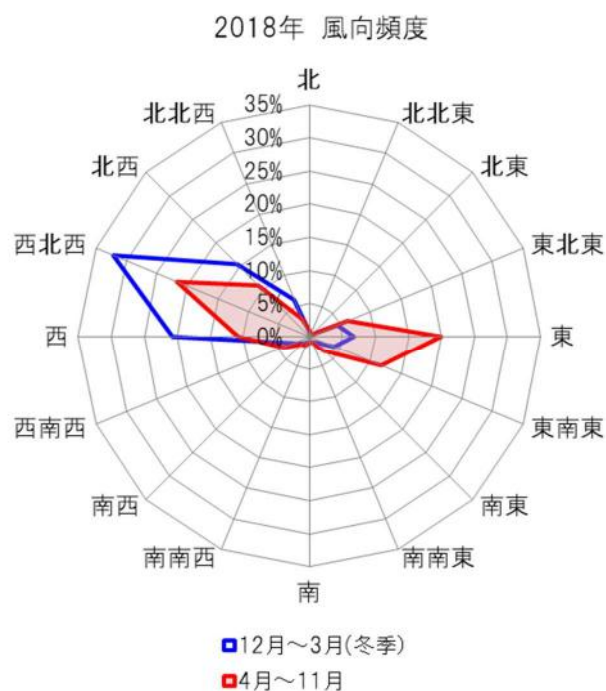


図 4 本橋の風向頻度

4. 本橋における冬季の気象影響

本橋では、1998 年の供用開始以降、昨年末までに延べ 85 回の通行止めが実施されている。表 2 及び図 5 に通行止めが回数を原因別に示す。

通行止めの主な原因は強風と着雪が全体の 95%を占めており、その内訳は強風が通年で 69 件(81%)、着雪が 12 件(14%)、地震が 4 件(5%)である。なお、強風のうちの約 6 割(39 件)は冬季に発生しており、冬季に着目すると全 85 件中、51 件(60%)が冬季の発生となる。

強風、着雪ともに本橋特有の気象環境によるものであり、本橋ならではの冬季の交通特性と云える。

表 2 通行止めの原因別発生数

	4月～11月			12月～3月(冬季)			合計
	強風	地震	小計	強風	着雪	小計	
1998	2		2	1		1	3
1999	2		2	4		4	6
2000	1		1	2	2	4	5
2001				2		2	2
2002	1		1	1		1	2
2003				1		1	1
2004	5		5	3		3	8
2005	1		1		3	3	4
2006	2		2	1		1	3
2007	1		1	2		2	3
2008							
2009					2	2	2
2010	1		1		4	4	5
2011		1	1	2		2	3
2012	3		3	4		4	7
2013	2		2	6		6	8
2014	2		2	1		1	3
2015	2		2	2	1	3	5
2016	2		2	2		2	4
2017	2		2	2		2	4
2018	1	3	4	3		3	7
計	30	4	34	39	12	51	85
発生率	35%	5%	40%	46%	14%	60%	100%

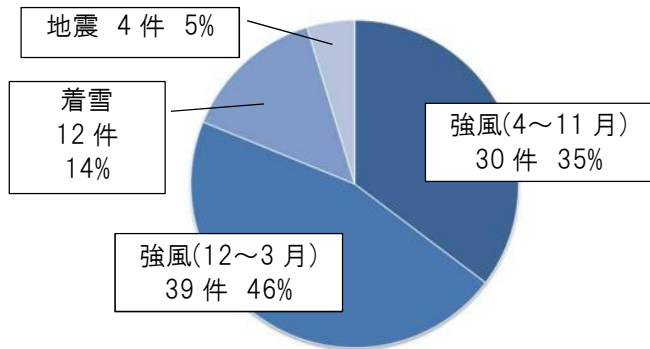


図 5 通行止め発生原因の比率

5. 本橋における着雪事象

冬季における通行止め原因のひとつである着雪について概説する。本橋では主塔やケーブルに着雪(写 2, 3)し、塊となった雪氷が車道に落下するという交通障害が発生する。この現象は気象環境に直接的な影響を受け、一般的には表 3 に示す条件の場合に発生し易いとされ、本橋の気象環境と合致することから、本橋独特の交通障害と考えられる。通過車両の安全性を確保するため、このような現象が生じる恐れがある場合は、交通規制(通行止め)を実施し、付着した雪氷の除去を進めるよう管理している。



写 2 主塔への着雪



写 3 ケーブルへの着雪

表 3 着雪事象が発生しやすい気象条件

天 候	「雪」または「みぞれ」
湿 度	90%以上
風 速	8m/s以上
気 温	-1.5℃～1.5℃

6. 冬季の道路管理

本橋は北海道開発局が管理しており、他の国道橋と同様に、定期的な道路巡回(写4)を通年実施、また室蘭開発建設部管内の国道(11路線、約680km)は室蘭道路事務所に設置された道路情報管理室(写5)で、一元的に監視業務(24時間体制)を実施しており、本橋の道路情報も同様に道路情報室に集約され、CCTV(写6)、テレメータ等を活用しながら強風や吹雪等による交通障害への迅速な対応を実施している。



写 4 冬季道路巡回



写 5 室蘭道路事務所
道路情報室



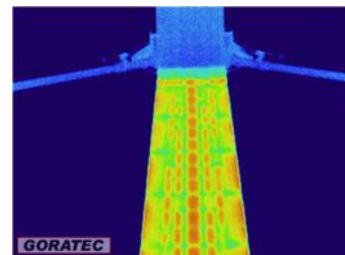
写 6 CCTV カメラ画像

7. 本橋の雪氷対策技術

本橋では、前述した本橋ならではの厳しい気象環境の中、独自の雪氷対策を取り入れ、冬季における安全で円滑な交通の確保を図っている。本節では、それら独自の技術を数例紹介する。

(1) 主塔ヒーティング設備

当初、主塔の着雪には橋上へ大型の高所作業車を設置し、人力で除去していたが、この方法では作業車が車道を塞ぎ、除去作業の終了まで交通規制が解除できないため、交通の円滑性を阻害してしまう。そのため、07, 08年に主塔にヒーティング設備を設置し、着雪の発生を予防する手法に切り替えた。本橋で採用した構造は、塔の内面にアルミ箔ヒータを貼付け、鋼製の壁面を内側から暖める構造である。写7に運転時の状況、写8に内部構造を示す。外気温、風向風速、降雪、躯体温度、通電時間をもとに自動的に運転制御しており、現在、表4に示す条件で運転を実施している。



写 7 ヒーティング運転状況



写 8 アルミ箔ヒータ

表 4 ヒーティングの運転条件

	項目	条件
運転ON	外気温	-2℃～+4℃
	風速	5m/s以上 25m/s未満
	風向	東風 or 西風
	降雪の有無	有り
運転OFF	躯体温度	1℃以上
	通電時間	1時間

(2) ケーブルバンドカバー

ケーブルバンドは、一般部のケーブル断面に比べ凹凸部が多く、着雪し易い構造である。着雪を未然に防ぐため、滑雪性のあるシートでカバーする対策が採用されている。06, 07年にかけて、ステイバンドを除いた216バンドに設置された。現在、約10年が経過し、シートの破れ、摩耗などによる破損が徐々に発生しているため、破損した箇所から順次、交換を実施している。着雪時の状況写真とカバー設置状況を写9, 10に示す。



写9 ケーブルバンドへの着雪状況



写10 カバー設置状況

(3) S字形ワイヤーによるケーブルラッピング

従来、吊橋のケーブル防食方法は丸形ワイヤーによるラッピングが主流であったが、ケーブルの伸縮により、ラッピング間の隙間変動によりケーブル内部へ雨水が浸入するという課題があった。特に積雪寒冷地に建設される本橋では、浸入した雨水が凍結膨張し、ケーブル防食構造に影響を与える懸念があった。そのため、ワイヤー同士の噛み合わせによる水密性確保が可能な、S字形ワイヤー(図6)によるラッピング技術を世界で初めて採用した。ケーブルラッピングの概要図を図7に示す。

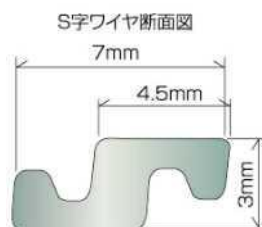


図6 S字形ワイヤーの形状

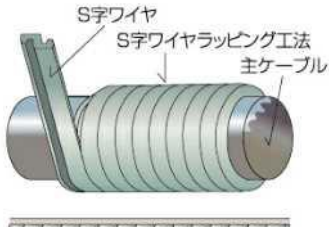


図7 ケーブルラッピング概要図

(4) 補剛桁の内面除湿システム

本橋の補剛桁は箱桁形式であり、内面の塗装塗り替えには多額のコストを要する。桁の内面は昼夜の寒暖差が大きく、特に冬季において結露による高湿度化で腐食が促進されることが課題であった。08, 09年にかけて桁内面に除湿システム(図8)を配置、腐食を抑制するため湿度制御を実施しており、補剛桁(全18ブロック)を2ブロックずつ9区画に分割、各区画に除湿機(写11)を配置して桁内全域をカバーしている。各区画毎に湿度が60%以下となるよう個別制御を実施している。

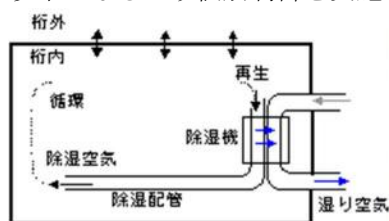


図8 除湿システム概要図



写11 桁内除湿機

(5) フェアリング専用除雪車

本橋は港湾を跨ぐ海上橋であるため、海上交通の安全性確保も重要である。本橋の桁には耐風安定性を向上させるためのフェアリング(図9)が補剛桁外側に設置されている。フェアリング上面に堆積した雪氷が航路に落下し、通行船舶に被害が及ぶのを防ぐため、フェアリング専用除雪車を開発・運用している。空港滑走路等で実績のある空気による吹き飛ばし方式を採用し、往復1時間ほどで除雪が可能である。

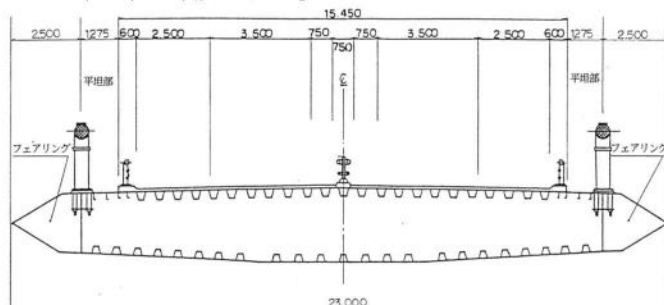


図9 補剛桁断面図

表5 除雪装置仕様

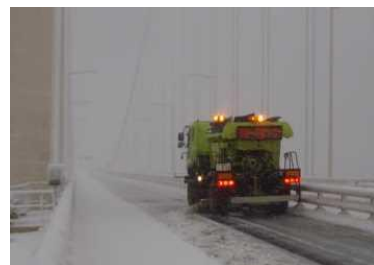
送風機	ターボファン形 2基
最大風量	(1基あたり)500m ³ /分
最大風速	150m/秒
駆動方式	油圧駆動
ノズル装置	(送風機に対し上下各1個)
伸縮量	(上部のみ)1700mm
補助装置	ブラシ装置



写12 除雪状況

(6) 凍結防止剤

本橋は架け替えのできない鋼橋(吊橋)であり、通常、国道等で散布している塩化物系の凍結防止剤では橋体の腐食促進、健全性の早期低下が懸念される。そのため金属腐食への影響が少ない蟻酸系、酢酸系凍結防止剤を散布することで橋梁の長寿命化を図っている。



写13 融雪剤散布状況

8. おわりに

本橋は我が国で唯一、積雪寒冷地に架けられた長大吊橋である。積雪寒冷地ならではの厳しい気象環境に対し、様々な工夫・対策を取り入れながら、安全で円滑な交通の実現を図っている。本橋における冬季の吊橋管理技術が他橋の維持管理に少しでも貢献出来れば幸いである。

最後に本稿執筆に際し、協力頂いた関係各位に深く感謝する。

仮想サーマルマッピングを用いた路面雪氷状態予測の高速化に関する一検討

齊田 光*1, 星 卓見*1, 徳永 ロベルト*1, 佐藤 昌哉*1

1. はじめに

路面の雪氷状態は、より高度な冬期道路管理の実現や道路利用者への詳細な情報提供を行う上で必要不可欠な情報であり、これらの予測手法は国内外を問わず様々な研究機関で開発されている。近年における路面雪氷状態の予測手法は、路線全体や地域全体といった広域的な予測と、予測に関わる計算時間の高速化を可能とする手法の両立が求められている。

路面雪氷状態を予測するためには、まず路面温度の予測が必要となる。筆者らは路面温度を広域的に予測するため、高解像度気温メッシュデータを用いた熱収支法による路面温度予測手法を提案した¹⁾。この路面温度予測手法は、郊外の平野部などの沿道環境が単調な条件下では既往の路面温度予測手法に近い予測精度を有している。一方で、この路面温度予測手法で得られた路面温度予測値を用いて路面雪氷状態予測を行うまでには至っていなかった。

そこで本研究では、熱収支法による路面温度予測値と気象メッシュデータを用いて路面雪氷層の凍結・融解質量を求めることで、広域にわたる路面雪氷状態を簡易かつ高速に推定する手法を提案するとともに、予測精度および計算時間について検証した。

検証結果を以下に詳述する。

2. 路面雪氷状態の予測手法

路面雪氷状態の予測手順の概略を以下に示す。

- 手順1 気温メッシュデータからサーマルマップ（路線縦断方向の路面温度の高低を示すデータ）を生成し、路線の各地点における路面温度を予測
- 手順2 雪氷層表面における長波放射フラックス、顕熱・潜熱フラックスおよび伝導熱フラックス等から路面雪氷層の凍結・融解質量を予測（図1参照）
- 手順3 雪氷質量収支モデルを用いて路面雪氷層の雪質量、氷質量および水質量を予測
- 手順4 雪質量、氷質量および水質量の予測値から路面状態判別フローにより路面雪氷状態を推定

2. 1 路面温度の予測

本論文で提案する手法では、手順1において高解像度気

温メッシュデータを用いた熱収支法による路面温度予測手法により仮想サーマルマップを生成することで、長期間にわたる道路気象データの蓄積や移動気象観測が不要な路面温度予測モデルを用いた¹⁾。これにより、広範囲にわたる路線で路面雪氷状態を予測する際の事前準備に要する費用を大幅に抑えることを試みた。

2. 2 路面雪氷層の凍結・融解質量の予測

手順2において、従来の手法²⁾では路面雪氷の融解・質量を雪氷層表面における長波放射フラックス、顕熱・潜熱フラックスおよび伝導熱フラックス等から推定している（図1参照）。従来の手法では路面雪氷層の凍結・融解質量 M_m (kg) は次式で求められる。

$$l_m \frac{dM_m}{dt} = (1 - \alpha_s)S + \varepsilon_s L_d - \varepsilon_s \sigma T_s^4 - \rho_a C_p C_h (T_s - T_a) - \rho_a l_e C_e (q_s - q_f) \quad (1)$$

ここに、

l_m : 凝固・融解潜熱 (J/kg)

α_s : 雪氷層のアルベド

S : 全天日射量 (W/m^2)

ε_s : 雪氷層の射出率

L_d : 大気放射量 (W/m^2)

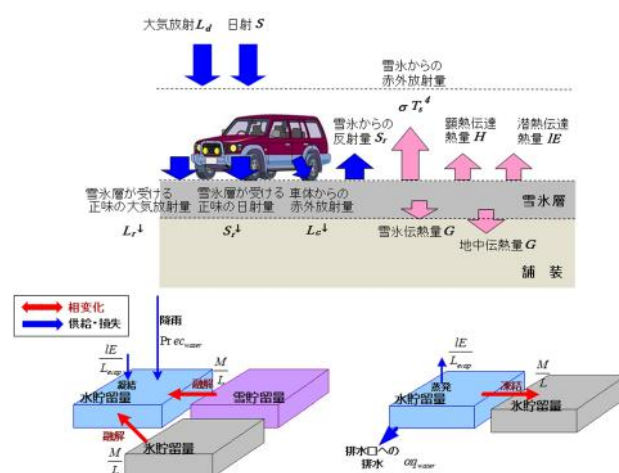


図1 路面雪氷状態予測手法の概要

*1 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所

T_s : 雪氷層の温度 (K)

σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($=5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$)

ρ_a : 空気の密度 (kg/m^3)

C_p : 空気の定圧比熱 ($=1005 \text{J/kgK}$)

C_h : 雪氷層表面の顕熱バルク係数 (m/s)

T_a : 気温 (K)

l_e : 蒸発潜熱 ($=2.50 \times 10^6 \text{J/kg}$) または蒸発潜熱 ($=2.83 \times 10^6 \text{J/kg}$)

C_e : 雪・氷の昇華または水の蒸発バルク係数 (m/s)

q_s : 雪氷層表面の飽和比湿 (kg/kg)

q_f : 大気比湿 (kg/kg)

である。従来の手法では式(1)から明らかなように路面雪氷層の凍結・融解質量を求める際に舗装表面-雪氷層間の熱移動が考慮されておらず、熱収支的な誤差により路面雪氷状態の推定精度が低下する可能性がある。そこで本研究では、上記の課題を解決するために次式を用いて路面雪氷層の凍結・融解質量を求めた。

$$l_m \frac{dM_m}{dt} = M_s C_s \frac{dT_s}{dt} + \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_f^4) + \rho_a C_p C_h (T_s - T_f) + \rho_a l_e C_e (q_s - q_f) + \frac{(T_s - T_f)}{\frac{Z_p}{\lambda_p} + \frac{D_c}{2\lambda_c}} \quad (2)$$

ここに、

$M_s C_s$: 雪氷層の体積熱容量 ($\text{J/m}^3 \text{K}$)

T_f : 雪氷層の融解温度 (K)

Z_p : 舗装厚さ (m)

λ_p : 舗装の熱伝導率 (W/mK)

D_c : 雪氷層厚さ (m)

λ_c : 雪氷層の熱伝導率 (W/mK)

である。これにより、路面からの熱移動を考慮するとともに、全天日射量 S 、大気放射量 L_d 、気温 T_a 、大気比湿 q_a を用いることなく路面雪氷質量の凍結・融解質量を簡易的に求める。また、本結果に加えて降雪・降雨による雪および氷質量の増加、蒸発・昇華による水、雪および氷質量の変化、路外への排水による水質量の減少などを考慮することで任意の時刻における路面の水、雪および氷質量を推定する。

2. 3 路面雪氷状態計算の高速化

従来の手法では、路面雪氷状態の予測は式(1)により算出した凍結・融解質量を基に、雪氷質量収支モデルを用いて路線方向の約 100m 毎に路面雪氷層の水、雪および氷質量を求めることで実現していた。しかしながら、雪氷質量収支モデルの入力値として用いる気象メッシュデータは空間分解能が 1km であるため、100m 毎に路面雪氷層

の水、雪および氷質量を予測することは非効率的である。

そこで本研究では、まず路線上 1km 毎に式(2)を用いて凍結・融解質量を算出し、路面雪氷層の水、雪および氷質量を予測する。その後、路線上 1km 毎に得られた水、雪および氷質量を約 100m 区間毎に線形内挿することで計算時間の短縮を試みた (図2)。

3. 路面雪氷状態の予測精度および計算時間の検証実験

本研究では、路面温度および路面雪氷層の凍結・融解質量の予測に従来手法および新手法を用いた場合の、路面雪氷状態の予測精度および計算時間の短縮効果を検証した。

本検証の対象区間は一般国道230号KP=1.0~KP=46.0および一般国道231号KP=0.0~KP=19.0とした。実験では、冬期走行環境計測車両で検証対象区間を走行し、路面温度を赤外放射温度計で、路面すべり抵抗値 (HFN) を連続路面すべり抵抗測定装置で計測するとともに、路面雪氷状態を目視で判別して記録した。

路面雪氷状態の予測精度の検証は、従来手法および新手法を用いて予測した水、雪および氷質量の比率から路面雪氷状態を判別 (乾燥, 湿潤, シャーベット, 積雪および凍結の5分類) した結果と、HFN計測結果および目視により路面雪氷状態を判別した結果を比較し、両者が一致した場合を的中と見なして的中率を求めることで行った。

また、計算時間の短縮効果の検証は、上記の検証対象区間において、従来手法および新手法を用いて16時間先までの路面雪氷状態を1時間毎に予測し、計算に要した時間を計測して比較した。なお、検証には市販のデスクトップPC (CPU: Intel Core i5-3550 3.30GHz) を用いた。

4. 検証の結果

4. 1 路面温度の予測精度

表1は検証対象区間における天候別、昼夜別および沿道環境別の路面温度の二乗平均平方根誤差 (以下, RMSE) を示す。全区間における従来手法のRMSEは 2.72°C 、新手法

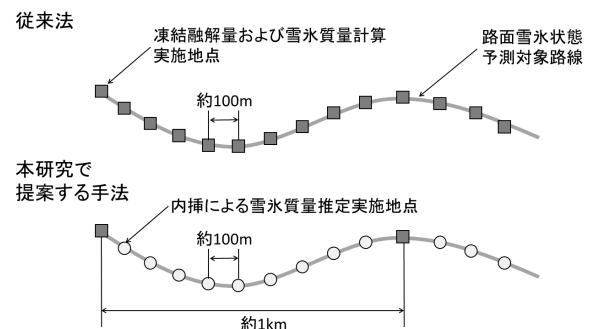


図2 路面雪氷状態推定計算の高速化手法の概要

表 1 検証対象区間における天候毎，昼夜毎および沿道環境毎の路面温度の平均平方二乗誤差 (RMSE)

			: RMSE<1.5℃					: RMSE>3℃												単位:℃
国道	天気	昼夜	新モデル								従来モデル									
			全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダー バス区間	橋梁区間	トンネル 区間	全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダー バス区間	橋梁区間	トンネル 区間		
R230	全天気	全日	2.47	2.30	2.47	1.66	1.50	6.14	1.06	2.19	2.72	2.62	2.57	2.03	1.70	3.92	3.94	4.26		
	全天気	夜間	2.78	2.49	3.23	1.93	1.47	5.21	1.41	2.58	2.93	2.94	3.00	1.82	1.71	3.26	4.42	4.50		
	全天気	日中	2.16	2.10	1.70	1.38	1.53	7.07	0.72	1.80	2.52	2.30	2.13	2.24	1.70	4.57	3.46	4.02		
	晴天	全日	3.47	3.52	3.69	2.10	1.69	6.85	1.48	2.51	3.48	3.81	3.47	2.24	1.91	4.15	4.31	4.30		
	曇天	全日	2.42	2.16	2.32	1.64	1.56	6.97	1.13	2.28	2.75	2.84	2.63	1.99	1.70	3.31	4.05	4.35		
	降雪	全日	1.53	1.24	1.42	1.25	1.23	4.43	0.57	1.77	1.94	1.16	1.58	1.87	1.50	4.41	3.44	4.11		
R231	全天気	日中	2.45	2.57	2.26				2.32		2.46	2.51	2.33				1.82			
	晴天	日中	3.49	3.81	3.30				1.03		3.79	4.09	3.62				0.63			
	曇天	日中	2.62	2.46	2.72				2.63		2.70	2.56	2.80				2.05			
	降雪	日中	1.84	2.01	1.51				3.30		1.66	1.70	1.45				2.76			
			: RMSE<1.5℃					: RMSE>3℃												単位:℃
国道	天気	昼夜	新モデル								従来モデル									
			全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダー バス区間	橋梁区間	トンネル 区間	全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダー バス区間	橋梁区間	トンネル 区間		
R230	晴天	夜間	3.92	3.69	4.85	2.60	1.81	5.40	1.87	3.13	3.81	4.18	4.16	2.13	2.06	2.92	4.81	4.67		
	曇天	夜間	2.67	2.21	3.14	2.01	1.64	5.74	1.57	2.61	2.82	2.89	2.83	1.81	1.74	2.83	4.48	4.60		
	降雪	夜間	1.22	1.11	0.94	0.83	0.70	4.14	0.50	1.71	1.80	1.17	1.53	1.36	1.12	4.43	3.74	4.11		
	晴天	日中	2.81	3.27	1.94	1.35	1.52	9.03	0.89	1.58	2.98	3.26	2.44	2.40	1.69	5.99	3.57	3.75		
	曇天	日中	2.16	2.10	1.50	1.26	1.48	8.21	0.69	1.95	2.69	2.80	2.44	2.18	1.65	3.79	3.61	4.11		
	降雪	日中	1.73	1.33	1.74	1.52	1.58	4.63	0.63	1.80	2.03	1.16	1.62	2.20	1.75	4.39	3.24	4.12		

表 2 検証対象区間における天候毎，昼夜毎および沿道環境毎の路面雪氷状態の的中率

			: 適中率>0.7					: 適中率<0.3														
国道	天気	昼夜	新モデル								従来モデル											
			全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダー バス区間	橋梁区間	トンネル 区間	全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダー バス区間	橋梁区間	トンネル 区間				
R230	全天気	全日	0.55	0.63	0.49	0.54	0.72	0.55	0.45	0.30	0.50	0.62	0.48	0.44	0.38	0.56	0.41	0.29				
	全天気	夜間	0.59	0.68	0.46	0.66	0.76	0.63	0.47	0.32	0.53	0.69	0.46	0.47	0.37	0.65	0.38	0.32				
	全天気	日中	0.51	0.58	0.51	0.42	0.68	0.47	0.44	0.27	0.48	0.55	0.50	0.41	0.38	0.47	0.44	0.26				
	晴天	全日	0.36	0.55	0.08	0.37	0.77	0.83	0.25	0.21	0.26	0.57	0.07	0.07	0.10	0.88	0.05	0.11				
	曇天	全日	0.39	0.38	0.41	0.33	0.62	0.57	0.25	0.19	0.35	0.35	0.41	0.31	0.26	0.57	0.29	0.27				
	降雪	全日	0.93	1.00	1.00	0.97	0.80	0.22	0.90	0.51	0.93	1.00	0.98	0.97	0.80	0.22	0.90	0.50				
R231	全天気	日中	0.37	0.33	0.40				0.17		0.29	0.25	0.33				0.17					
	晴天	日中	0.00	0.00	0.00				0.00		0.00	0.00	0.00				0.00					
	曇天	日中	0.13	0.00	0.21				0.00		0.13	0.00	0.21				0.00					
	降雪	日中	0.67	0.67	0.69				0.50		0.52	0.50	0.55				0.50					
			: 適中率>0.7					: 適中率<0.3														
国道	天気	昼夜	新モデル								従来モデル											
			全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダー バス区間	橋梁区間	トンネル 区間	全区間	DID区間	郊外区間	山間区間	峠区間	アンダー バス区間	橋梁区間	トンネル 区間				
R230	晴天	夜間	0.44	0.60	0.09	0.61	0.74	0.76	0.42	0.35	0.30	0.63	0.07	0.11	0.16	0.83	0.08	0.18				
	曇天	夜間	0.50	0.54	0.48	0.50	0.62	0.72	0.33	0.20	0.47	0.54	0.48	0.47	0.15	0.72	0.42	0.36				
	降雪	夜間	0.95	1.00	1.00	0.99	1.00	0.28	0.75	0.45	0.95	1.00	1.00	0.99	1.00	0.28	0.75	0.47				
	晴天	日中	0.26	0.48	0.06	0.00	0.81	0.94	0.00	0.00	0.20	0.49	0.06	0.00	0.00	0.94	0.00	0.00				
	曇天	日中	0.27	0.22	0.34	0.16	0.61	0.43	0.17	0.18	0.24	0.16	0.34	0.16	0.36	0.43	0.17	0.17				
	降雪	日中	0.92	1.00	0.99	0.96	0.67	0.19	1.00	0.55	0.91	1.00	0.97	0.95	0.67	0.19	1.00	0.51				

法のRMSEは2.47℃であり，新手法の路面温度の予測精度は従来手法と同等以上であることを確認した。

沿道環境別のRMSEに着目すると，新手法では山間区間，峠区間および橋梁区間でRMSEが小さく，DID区間および郊外区間でRMSEが大きくなる傾向にあった。この理由としては，DIDおよび郊外区間では，道路南側にある建築物などにより日射が遮蔽されたことで日射量の空間変化が大きく，日陰となる区間で路面温度を過大に予測したためと考えられる。

一方で，山間区間，峠区間および橋梁区間では，道路

南側に山地や建築物などの日射を遮る地物が少なく，日射量の空間変化が小さいためRMSEが小さくなったと推察される。

なお，アンダーパス区間ではロードヒーティングの影響により路面温度が高くなっているが，従来手法および新手法ではロードヒーティングが路面温度に及ぼす影響が考慮されていないためRMSEは著しく大きくなった。

天候別のRMSEに着目すると，新手法では晴天時にRMSEが高く，降雪時にRMSEが低くなった。この理由として，晴天時は日射および日陰による影響により路面温

度は空間的に大きく変動するが、降雪時は路面が雪氷で覆われ、路面温度の空間的な変動が小さくなるためと考えられる。

昼夜別のRMSEは、夜間において日中よりも小さくなる傾向にあり、この傾向は晴天時に特に顕著であった。これは夜間の放射冷却による路面からの熱損失を過小に見積もったことが主な要因であると考えられる。

4. 2 路面雪氷状態の予測精度

表2は検証対象区間における天候別、昼夜別および沿道環境別の路面雪氷状態の的中率を示す。全天気・全日・全区間でみると新手法を用いた場合の路面状態の適中率は、従来手法を用いた場合と概ね同程度であった。天候別では、従来手法・新手法ともに晴天時は精度が低下し、降雪時の精度は良好であった。また、昼夜別では、従来手法・新手法ともに夜間において的中率が高くなる傾向が見られた。沿道環境別では、沿道環境が比較的単調かつ交通量の変動が少ない峠区間の的中率が高い一方で、DID区間や郊外区間では的中率が低くなった。これらの特徴は路面温度のRMSEと類似しており、路面状態は路面温度に強く依存していることを示している。

4. 3 路面温度および路面雪氷状態の計算時間

表3は検証対象区間において、路面温度と路面雪氷層の凍結・融解質量の算出に従来手法および新手法を用いて、16時間先までの路面雪氷状態計算に要した時間を示す。なお、表中の計算ケース列は対象路線の路線番号および計算対象年月日を示す。

ここで、一般国道230号（対象区間延長 $L=45.2\text{km}$ ）において、従来モデルでは423区間に分割して各区間で路面雪氷状態を計算しているのに対し、新モデルでは45区間（1km間隔）に分割して各区間で路面雪氷状態を計算後、100m区間毎に線形内挿して路面雪氷状態を推定している。一般国道231号（対象区間延長 $L=19.3\text{km}$ ）についても、同様の区間割によって路面雪氷状態を推定している。

計算時間は気象条件などの違いにより同一路線を計算対象とした場合でも僅かに異なるが、一般国道230号を対象とした路面雪氷状態計算時間の平均値は、従来手法の778秒に対し新手法では84秒、一般国道231号を対象とした計算時間の平均値は、従来手法の291秒に対し新手法では37秒となり、従来手法では従来手法と比較して約10%程度まで計算時間が短縮された。

表3 検証対象区間における路面雪氷状態
計算時間(秒)

計算ケース	従来モデル	新モデル
R230_20160114	779	80
R230_20160118	779	84
R230_20160119	780	84
R230_20160129	780	82
R230_20160201	775	87
R230_20160204	777	85
R230_20160218	781	86
R230_20160225	778	86
R230_20160229	775	86
R231_20171227	292	37
R231_20180112	290	37
R231_20180119	291	38
R231_20180126	291	36
R230平均	778	84
R231平均	291	37

5. おわりに

本研究で提案した路面雪氷状態予測手法は、道路近傍（特に南側）に山地や建築物などが無い比較的単純な条件下であれば、路面温度に加えて路面雪氷状態を高速に予測できることが明らかとなった。今後は北海道郊外の平野部などで本手法による予測情報提供を試行することを目指す。

参考文献

- 1) 藤本明宏, 中島知幸, 佐藤賢治, 徳永ロベルト, 高橋尚人, 石田樹: 気温メッシュデータを用いた路面温度予測の広域化に関する一検討, 雪氷研究大会講演要旨集, p.228, 2016.
- 2) 高橋尚人, 徳永ロベルト, 浅野基樹, 石川信敬: 冬期路面管理支援システムの構築と運用, 寒地土木研究所月報, No.652, pp.8-17, 2007.9.