



Title	高速道路における冬期路面管理の高度化に関する研究
Author(s)	大廣, 智則
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第14237号
Issue Date	2020-09-25
DOI	10.14943/doctoral.k14237
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/91544
Type	theses (doctoral)
File Information	Ohiro_Tomonori.pdf



[Instructions for use](#)

博士論文

高速道路における冬期路面管理の高度化
に関する研究

(A Study on Advanced Winter Road Surface
Management on Expressways)

2020年9月

大廣智則

高速道路における冬期路面管理の高度化に関する研究

目 次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景.....	2
1.2 北海道の気象特性.....	3
1.2.1 世界各国の人口と降雪量.....	3
1.2.2 北海道の気象特性.....	3
1.3 労働人口の変化.....	8
1.4 北海道の高速道路における冬期路面管理.....	9
1.4.1 通行止量と累計降雪量.....	9
1.4.2 雪氷処理作業.....	10
1.5 機械除雪.....	11
1.5.1 機械除雪の高度化（マルチ除雪）.....	11
1.5.2 機械除雪の高度化（パワー除雪）.....	13
1.5.3 機械除雪の高度化後の通行止量と累計降雪量.....	14
1.6 凍結防止剤散布.....	15
1.6.1 凍結防止剤散布量.....	15
1.6.2 凍結防止剤の環境への影響.....	16
1.7 冬期における路面状態の客観的な自動計測装置.....	19
1.7.1 路面に直接接触し路面状態を判別するタイプ.....	19
1.7.2 路面状態をカメラ等で画像認識するタイプ.....	23
1.7.3 路面に直接接触しない非接触のタイプ.....	24
1.8 本研究の目的.....	26
1.9 本研究の構成と内容.....	27
第1章参考文献.....	30
第2章 既存の凍結防止剤散布方法.....	33
2.1 はじめに.....	34
2.2 気象および路面等の情報収集.....	35
2.2.1 道路気象予測.....	35
2.2.2 気象観測等のデータ.....	36
2.2.3 CCTV（Closed Circuit Television）映像.....	38

2.2.4	道路巡回報告書（雪氷巡回）	39
2.3	作業実施判断（既存の凍結防止剤散布作業実施判断プロセス）.....	40
2.3.1	路面状態の定義	41
2.3.2	路面状態に応じた散布条件	42
2.3.3	凍結防止剤散布量	43
2.4	作業実施のための準備（凍結防止剤の積込み）	44
2.5	作業の実施（約 5km 区間毎に凍結防止剤散布）	45
2.6	まとめ	46
	第 2 章参考文献	46
第 3 章	自動路面状態判別システム（CAIS）の研究開発	47
3.1	自動路面状態判別システム（雪氷巡回車）	48
3.2	当初導入した自動路面状態判別システム（CAIS）	48
3.2.1	路面状態判別の方法	49
3.2.2	タイヤ加速度波形の特徴.....	50
3.2.3	CAIS 路面判別アルゴリズム	51
3.2.4	CAIS 導入時（2008 年度）の路面状態毎の正答率	55
3.3	CAIS 路面判別精度向上へ向けた改良	56
3.3.1	改良した CAIS の路面判別アルゴリズム	56
3.3.2	CAIS 改良後（2009 年度）の路面状態毎の正答率	60
3.4	機器構成	61
3.5	路面状態を確認する仕組み.....	62
3.6	まとめ	63
	第 3 章参考文献	64
第 4 章	凍結防止剤最適自動散布システム（ISCOS）の研究開発	65
4.1	凍結防止剤最適散布システム（ISCOS）による凍結防止剤散布フロー	66
4.2	自動路面状態判別システム（雪氷巡回車）	68
4.3	凍結防止剤適量積込システム（凍結防止剤倉庫）	69
4.4	凍結防止剤自動散布システム（凍結防止剤散布車）	71
4.4.1	凍結防止剤を 100m 区間毎に自動散布する方法	71
4.4.2	機器構成.....	73
4.4.3	凍結防止剤を自動散布する仕組み	74
4.5	ISCOS の散布方法.....	75
4.6	ISCOS の試行導入箇所を選定.....	76
4.7	ISCOS の実現可能性の現地検証.....	76

4.8	ISCOS の試行導入.....	80
4.9	ISCOS 導入計画の立案.....	82
4.10	ISCOS の課題.....	83
	第4章参考文献.....	84
第5章	スマート凍結防止剤散布システムの構築.....	85
5.1	スマート凍結防止剤散布システムによる凍結防止剤散布フロー.....	86
5.2	補完システムの開発.....	88
5.3	2015年度版補完システムの散布判断プロセス.....	89
5.4	2018年度版補完システムの散布判断プロセス.....	91
5.5	2018年度版補完システムによる凍結防止剤散布量の低減効果の具体例.....	93
5.6	2017年度と2018年度の凍結防止剤の低減量の比較.....	95
5.7	スマート凍結防止剤散布システムの路線拡大.....	97
5.8	スマート凍結防止剤散布システムの導入状況と凍結防止剤の低減量.....	100
5.9	2018年度における管理事務所別の凍結防止剤の低減量.....	101
5.10	北海道の高速道路における事故件数と平均速度の変化について.....	102
5.11	スマート凍結防止剤散布システムによる凍結防止剤散布量の低減効果..	104
	第5章参考文献.....	105
第6章	結論.....	106
6.1	本研究の成果.....	107
6.2	今後の課題.....	108
	第6章参考文献.....	108
	謝 辞.....	109

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

冬期間(11月～翌3月),ドライバーに安全安心で快適な走行環境を提供するため,冬期路面管理は重要な役割を果たしている. NEXCO 東日本が管理する高速道路の管理延長約 3,943km の中で約 2,500km が積雪寒冷地域に指定されており,冬期の円滑な交通の確保は重要な課題である. このため, 図 1.1 に示すように冬期交通確保するためにドライバー, 交通警察隊および道路管理者が相互に協力し, それぞれの立場で最善の努力・様々な対策を行っている. 冬期間における安全かつ確実な交通を確保するために, NEXCO 東日本では大別して, 雪氷処理作業・気象および路面情報収集・防雪対策・広報の四つの雪氷対策を行っている. 雪の多い北海道で, 時として生活路線ともなる高速道路を安心・安全・快適に走れる状態に保つことが重要である.

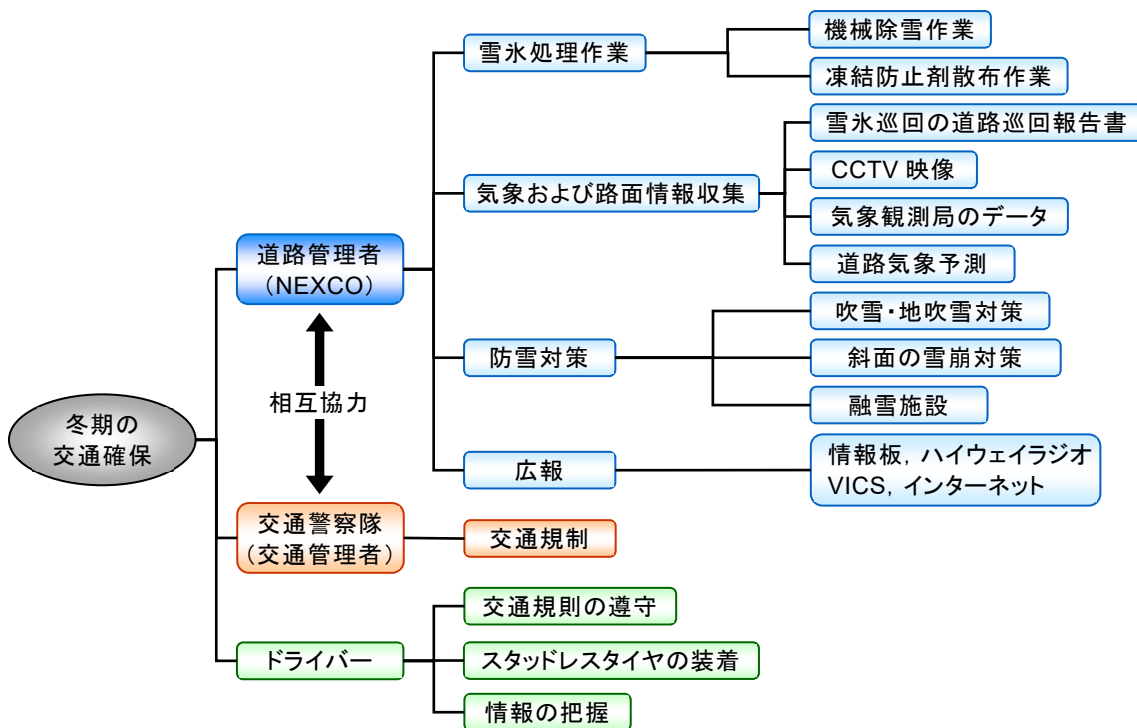


図 1.1 高速道路における冬期交通確保

1.2 北海道の気象特性

1.2.1 世界各国の人口と降雪量

冬期間の北海道における気象特性¹⁾は、国内で比べると冬の訪れが早く、気温が氷点下となる期間および降雪期間が長い。降雪量の合計値は地域により大きく異なるが、札幌では 630 cm、最大積雪深は 100 cm 程度、2 月の平均気温は -3.5℃ である。図 1.2 に示すように、世界的に人口 100 万を超える大都市がこのような低温で多量降雪地域に存在するのは極めて異例である。このような環境の中、北海道の高速道路での円滑な冬期交通を確保するには、効率的で効果的な雪氷対策が不可欠な状況である。

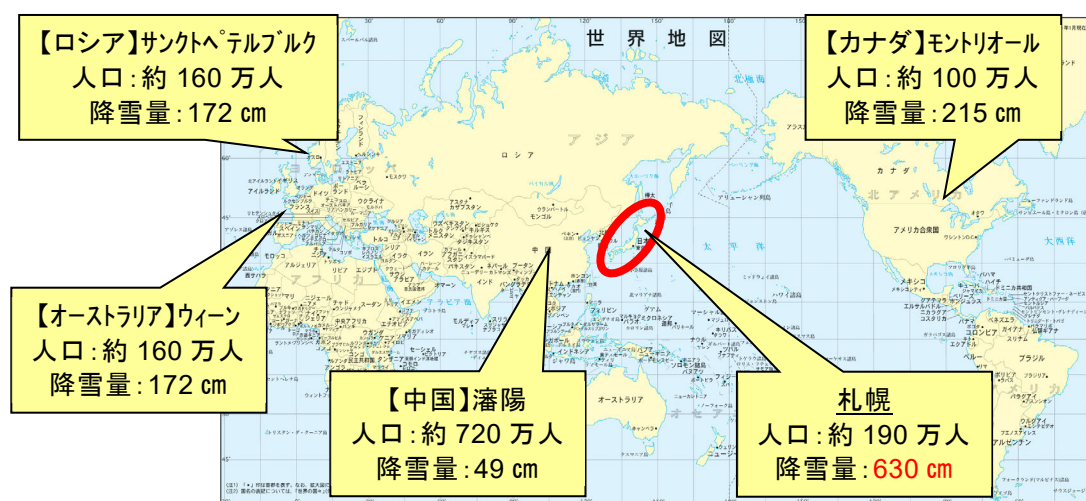


図 1.2 世界各国の人口と降雪量

1.2.2 北海道の気象特性

北海道の天候は、北海道は太平洋、日本海、オホーツク海の特徴の異なる三つの海に囲まれていることや、大雪山系や日高山脈などの地形により、地域によって大きく異なる気候特性を持っている。北極や大陸からの寒気の影響を強く受ける冬期は、日本海側で曇りや雪の日が多く、太平洋側では晴れの日が多くなり、オホーツク海側はその中間的な特徴を持っている。冬の北海道で大雪となるのは、冬型の気圧配置、収束線、小さな低気圧、発達した低気圧のおおよそ 4 つのパターンで、それぞれ以下のような特徴を有している。

① 冬型の気圧配置

西に高気圧、東に低気圧で日本付近は等圧線が込んでいることから、北西の風および寒気が流れ込み、日本海側で雪または雨、太平洋側では晴天といった天気をもたらす。日本海付近で等圧線がくの字型に曲がる「里雪型」と、日本付近で等圧線が平行になる「山雪型」とに細分される。

② 収束線

石狩湾は暑寒別岳や手稲山など 1,000m 級の山に囲まれている。雪氷期は西高東

低い冬型気圧配置となることが多く、これらの山を避けるように、石狩湾上で北西と西北西の風がぶつかり（収束）、ライン上に発達した雪雲、石狩湾収束線（以降、収束線）が発生する。収束線が発生すると、道央圏（岩見沢、旭川）に局地的な大雪をもたらす。

③小さな低気圧

北海道では、冬型の気圧配置が緩み始めると、北海道の西海上に小さな低気圧が発生する。小さな低気圧は、低気圧の南側から西側にかけて等圧線が非常に混み合い、風が強まり雪雲も発達する。この低気圧が陸上に進入すると局地的な大雪や暴風雪となることがある。

④発達した低気圧

発達した低気圧は、低気圧の位置で大雪となる地域が変わる。山岳に吹き付ける風が大きく関係し、等圧線の混み合った箇所を中心に風が強まり、猛吹雪となることがある。北海道を発達した低気圧が通ると、特定の地域で記録的な大雪と暴風雪となる。

図 1.3 に示すように、各年度の気圧配置の発生状況を把握することで、各年度の北海道の気象特性を把握することができる。2014年度は、小さな低気圧の発生回数が多かったため、太平洋側で降雪が多くなった。2015年度は、収束線の発生回数が多かったため、日本海側で降雪が多くなり、札幌や帯広でドカ雪をもたらした。2016年度は、発達した低気圧の影響で札幌から苫小牧にかけて記録的な大雪となるケースがあった。2017年度は、発達した低気圧の影響で北海道各地で大雪となった。2018年度は、冬期の気圧配置が多かったため、岩見沢付近、道東道西部区間の降雪が多かった。北海道では、年に冬型の気圧配置となることが50回程度あり、発達した低気圧の通過は20回を超える。その他に収束線や小さな低気圧の影響があり、冬期間は非常に厳しい気性条件下にある。図 1.4 に各年度の冬期間における平均気温を、図 1.5 に累計降雪量を示す。表 1.1 に図 1.3～1.5 の内容をまとめ、各年度の気象配置・累計降雪量・気温の傾向を示した。

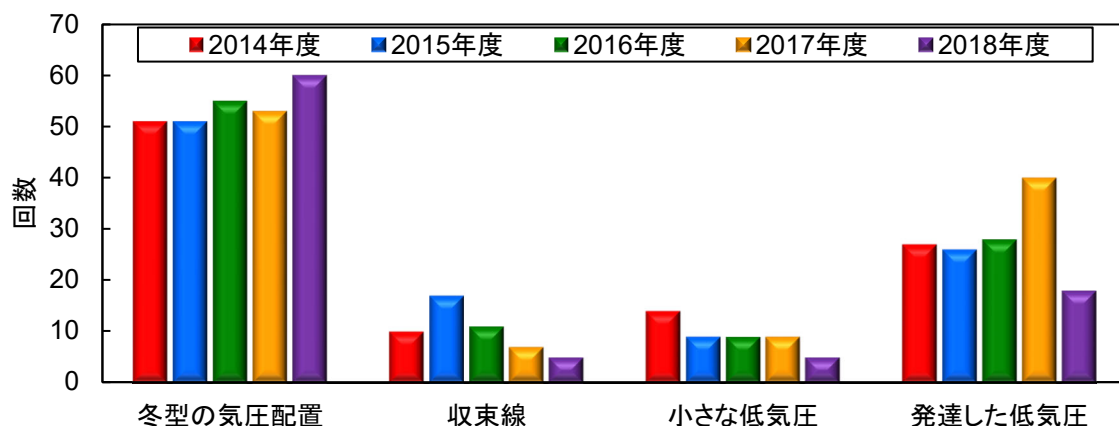
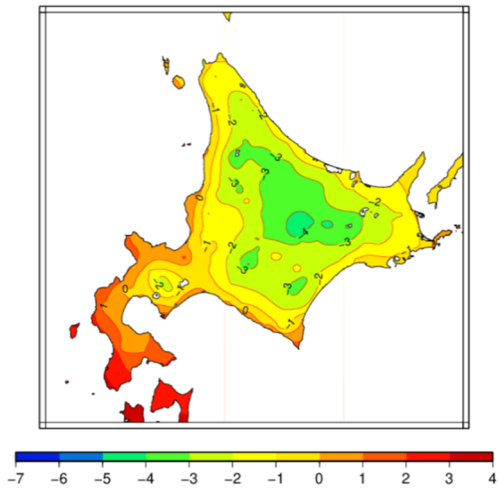
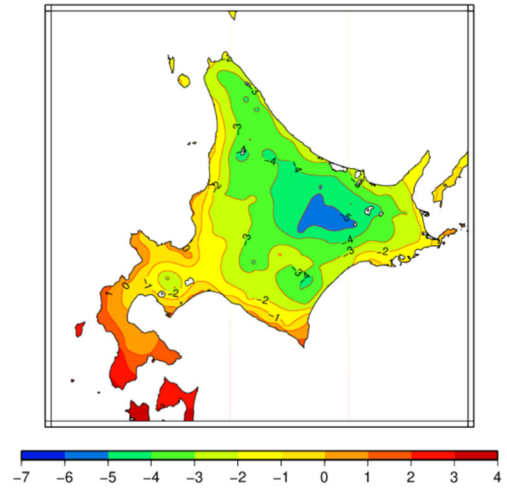


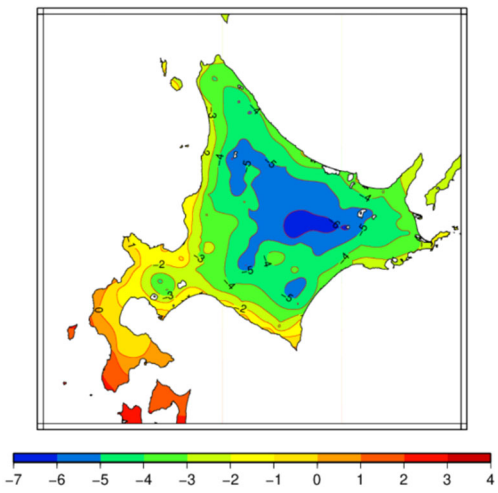
図 1.3 各年度の気圧配置の発生状況



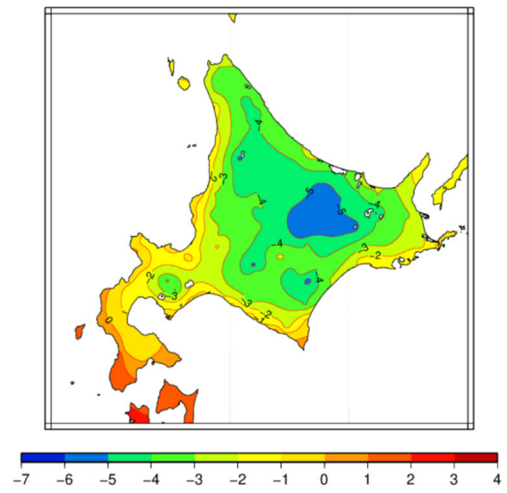
(a) 2014 年度



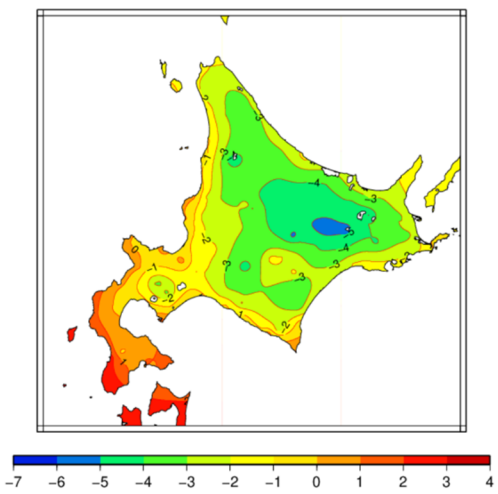
(b) 2015 年度



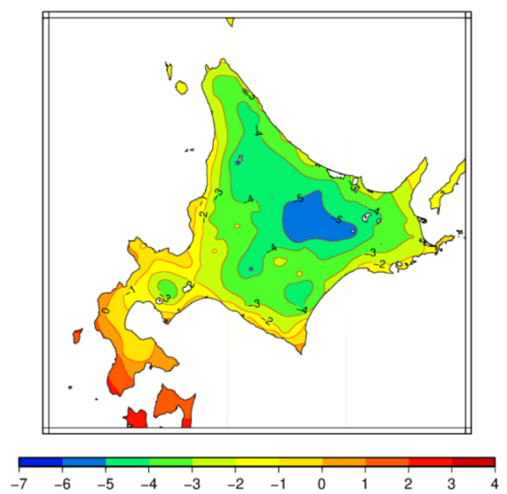
(c) 2016 年度



(d) 2017 年度



(e) 2018 年度



(f) 平年値

図 1.4 各年度の冬期間(11月～翌3月)における平均気温

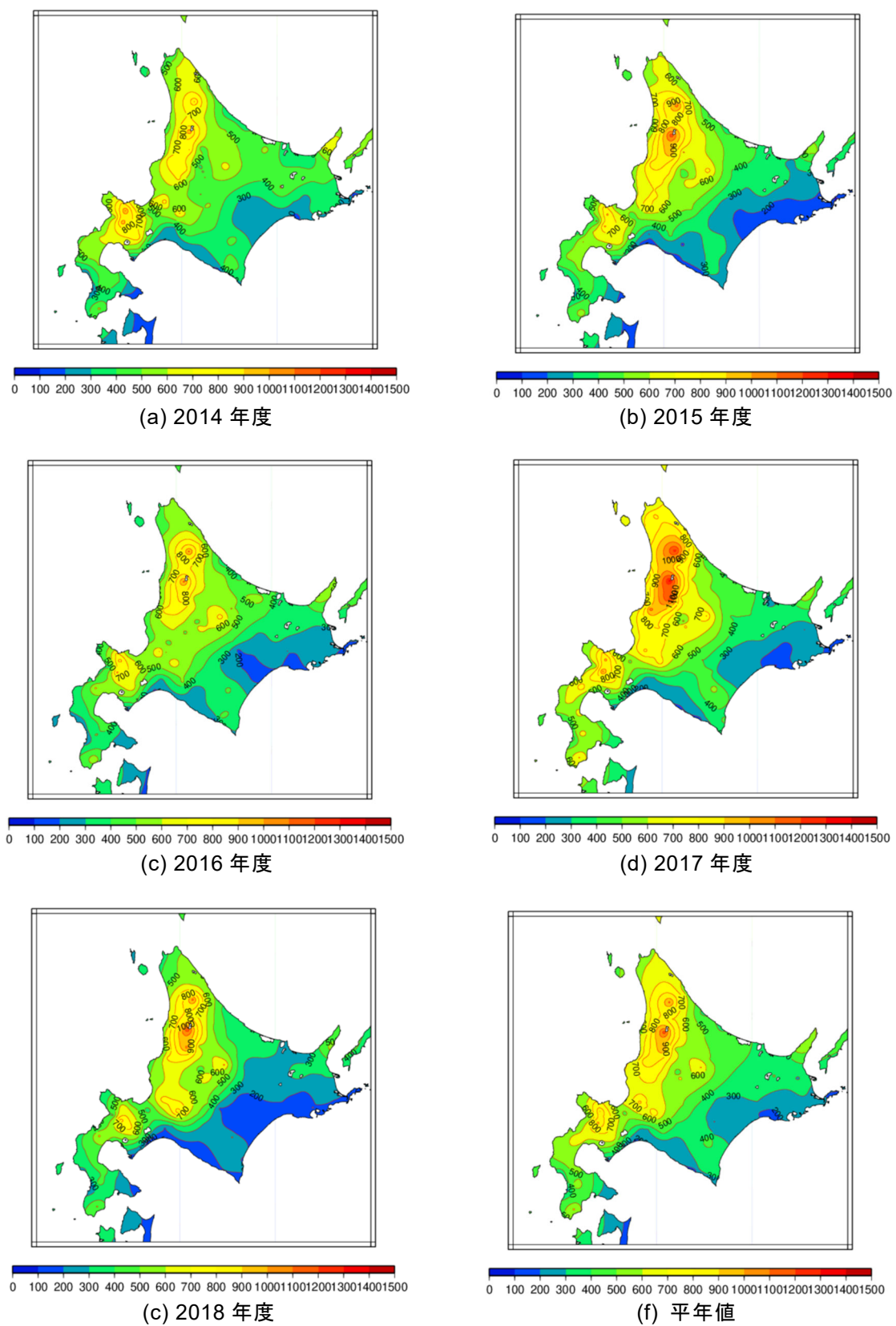


図 1.5 各年度の冬期間(11月～翌3月)における累計降雪量

表 1.1 各年度の北海道の気象特性

年度	項目	気象特性
2014	気圧配置	・ 平年よりも冬型の気圧配置や収束線が発生した回数は少なかった。 ・ 平年よりも小さな低気圧が発生した回数は増加した。
	累計降雪量	・ 平年よりも日本海側で少なく、太平洋側が多かった。
	気温	・ 平年よりも全道的に暖冬であった。
2015	気圧配置	・ 平年よりも冬型の気圧配置や収束線が発生した回数が多かった。 ・ 発達した低気圧がたびたび接近し、大荒れ(記録的な大雪)の日があった。
	累計降雪量	・ 平年よりも日本海側で多く、太平洋側で少なかった。 ・ 11月に札幌では62年ぶりに、帯広では68年ぶりに積雪40cm超を記録した。しかし、12月に札幌では47年ぶりに9日間連続で最高気温5℃以上を記録したため、ドカ雪による積雪がゼロになった。
	気温	・ 平年よりも全道的に気温が高く暖冬であった。
2016	気圧配置	・ 平年よりも冬型の気圧配置が発生した回数が多かった。 ・ 平年よりも収束線や小さな低気圧の気圧配置が発生した回数が少なかった。
	累計降雪量	・ 平年よりも札幌～苫小牧の降雪量が多かった。 ・ 例年であれば北海道の北を進む低気圧や本州太平洋沖を進む低気圧が北海道の南岸を通過し、記録的な大雪となるケースがあった。
	気温	・ 10月～12月は、平年よりも負偏差の領域や偏西風の蛇行により、北からの強い寒気が北海道付近へ流れ込み低温となるケースがあった。 ・ 平年よりも全道的に低温傾向であった。
2017	気圧配置	・ 平年よりも発達した低気圧(「日本海低気圧」,「津軽海峡低気圧」,「二つ玉低気圧」)の発生した回数が多かった。
	累計降雪量	・ 12月は日本海を低気圧が通り、その後、西寄りの季節風が流入したため旭川や室蘭などで大雪となった。 ・ 1月以降は津軽海峡や太平洋側を低気圧が通り、苫小牧や帯広管内で大雪となった。このため、全道的に降雪量が多くなる地域が多く、季節風と低気圧の両方の影響を受けた室蘭では特に降雪量が多かった。
	気温	・ 平年よりも低温であったが、3月に高温となったため、値は平年値並みとなった。
2018	気圧配置	・ 12月～2月中旬は冬型の気圧配置となり、暴風雪や大雪となる日が多かった。 ・ 平年よりも発達した低気圧(「日本海低気圧」,「津軽海峡低気圧」,「二つ玉低気圧」)が減少した。これにより、太平洋側でのまとまった降雪は少なく、特に帯広や苫小牧で降雪量が少なかった。
	累計降雪量	・ 平年よりも冬型の気圧配置が多く、旭川や岩見沢などの日本海側は平年に近い降雪量となった。 ・ 気圧の谷の通過は平年より多く、局所的な降雪が多くなった。 ・ 風向が西北西となったため、雪雲が入りやすい岩見沢付近、道東道西部区間などでは、平年より降雪量が多かった。その他は全般に少なかった。
	気温	・ 平年に比べまとまった降雪となる時期は遅めとなった。
	気温	・ 平年並みかやや高めであった。

1.3 労働人口の変化

我が国の人口は、1967年に1億人を突破し、1971年から1974年の第2次ベビーブーム期において、年率1.4%程度の高い人口増加率を示した。しかしその後、増加率は低下を続け、総人口は2004年に12,779万人でピークを迎えた。国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口（平成29年推計）」、総務省「人口推計（平成28年）」より経済産業省作成の資料によると、それ以降、総人口は長期の減少過程に入る。2030年の1億1,522万人を経て、2046年には1億人を割って9,938万人となり、2055年には、我が国の総人口は8,993万人になると推計されている（図1.6）。生産年齢（15～64歳）人口は、戦後一貫して増加を続け、1995年に8,716万人に達したが、その後減少局面に入り、2005年に8,409万人となった。2012年には8,000万人を割り、2055年には4,595万人になると推計されている。人口の割合は、2005年の66.1%から減少を続け、2020年に60.0%となった後、2055年には51.1%となる。老年（65歳以上）人口は、2005年の2,576万人から、2012年に3,000万人を上回り、2042年に3,863万人でピークを迎える。その後は一貫した減少に転じ、2055年には3,646万人になると推計される。人口の割合は、2005年の20.2%から、2013年に25.2%、2035年に33.7%に、2055年には40.5%、すなわち2.5人に1人が老年人口となると推計されている。

一方、NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路では、毎冬期1,000名を超える雪氷体制を構築している。現在、前述した人口構造の変化により、実際に熟練運転手や運転助手など機械除雪作業や凍結防止剤散布作業の担い手確保が困難になり始めた。今後、熟練オペレータが減少していくことが予想され、現在のサービスレベルを落とすことなく、かつ、少ない人員での作業が余儀なくされる。

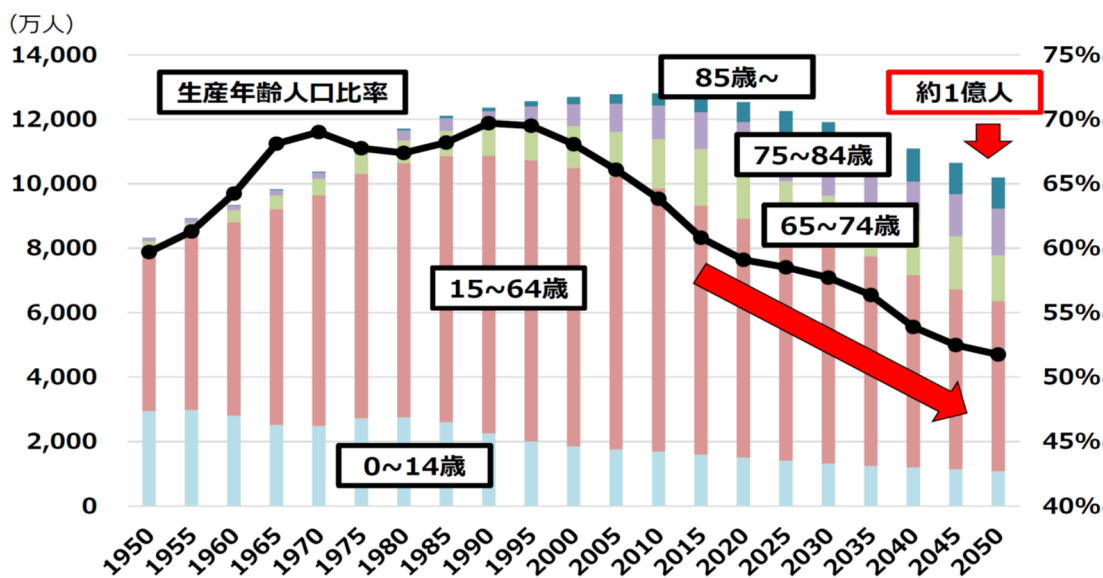


図 1.6 将来人口および生産年齢人口比率の予想

※出典：2050年までの経済社会の構造変化と政策課題について（平成30年9月 経済産業省）

1.4 北海道の高速道路における冬期路面管理

1.4.1 通行止量と累計降雪量

北海道の人口は、約 530 万人である。北海道は日本の北方に位置し面積が広く都市が点在した広域分散型社会を形成している。北海道の政治・経済の中心的都市は札幌であり、札幌市の人口は約 197 万人である。北海道の都市人口が最も多い札幌市と主要都市間を連絡する高速道路は、道民の社会・経済活動において必要不可欠なものとなっている。

北海道の高速道路²⁾は、1971年12月に開通し、48年が経過した2019年12月時点で719.9km供用され、通行量は、約20万台/日である。冬期間の降積雪は、通行止めや事故、交通の妨げの原因となり、冬期間の通行止めは、2008年度から2012年度の5年度の平均で約54,850km・h発生している(図1.7)。お客様へのサービス向上、料金収入確保の観点から、通行止めを限りなく0に近づける必要がある。

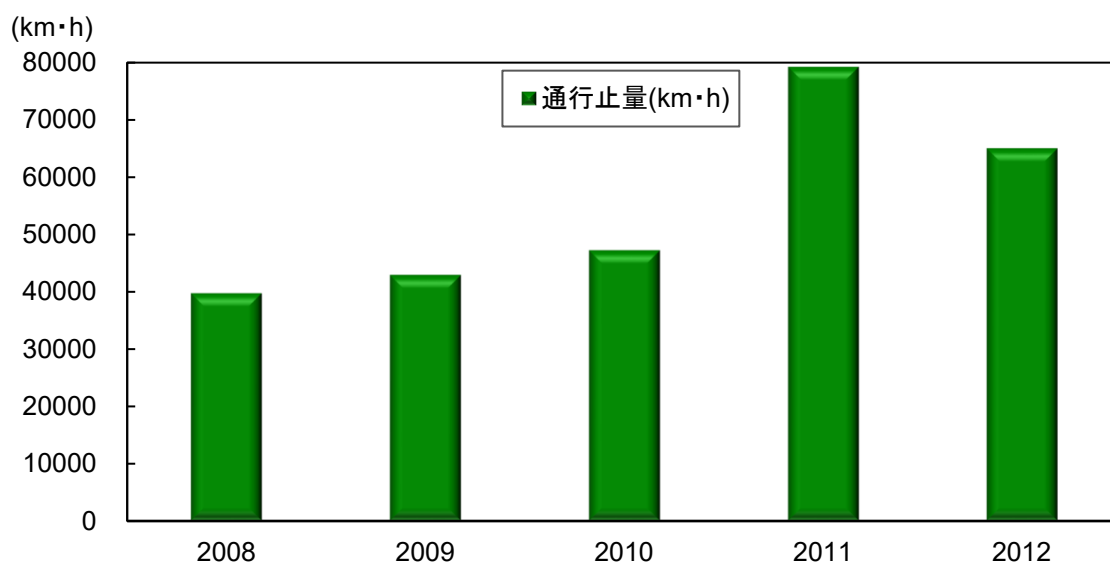


図 1.7 通行止量

1.4.2 雪氷処理作業

雪氷対策の目的は、「事故が起きないように、できるかぎり通行止めにならないよう、冬期間における安全かつ確実な交通の確保」である。雪氷対策の中でも重要なのは、可能な限り雪氷障害の程度を小さくすること、そして、雪氷障害の期間を短くすることを目的とした雪氷処理作業である。雪氷処理作業とは、積雪の除去（除雪）と氷層の発生防止（路面凍結対策）を行う作業である。これらの雪氷現象および作業は、再現性が低く時間の経過により状況が変化していくものである。雪氷処理作業は、冬期間における道路機能確保および回復を目的とした雪氷対策の方策であり、気象および路面情報収集、防雪対策、広報、交通規制と一体となって実施されるものである。雪氷処理作業（図 1.8）は、大別して積雪を除去する機械除雪と氷層の発生を防止する凍結防止剤散布の二つの作業を行っている。雪氷処理作業の種類は図 1.9 に示す通りである。



(a) 機械除雪

(b) 凍結防止剤散布

図 1.8 雪氷処理作業

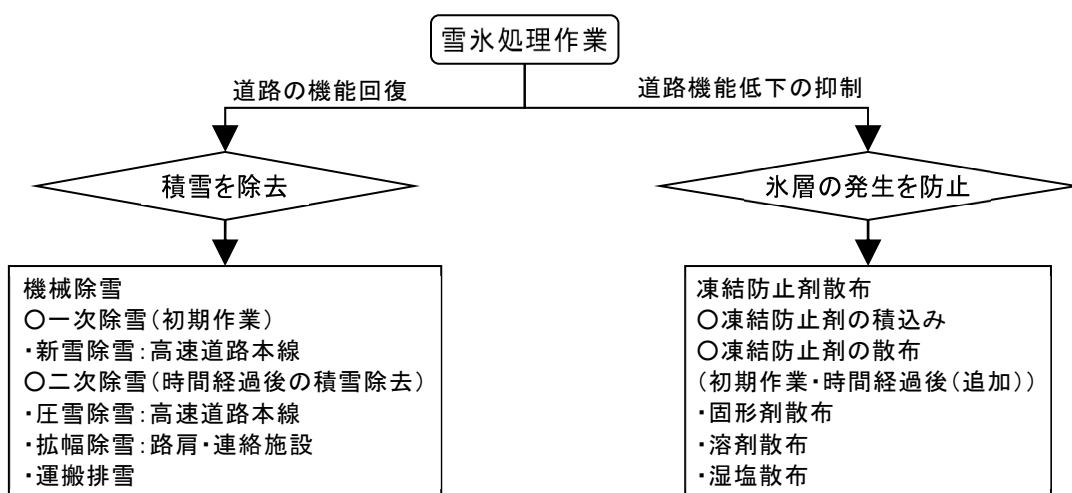


図 1.9 雪氷処理作業の種類

1.5 機械除雪

1.5.1 機械除雪の高度化（マルチ除雪）

札幌市を横断する高速道路の通行量は約5万台／日と最も多く、札幌南インターチェンジ（以降，IC）～札幌西IC間21.9km（以降，橋梁高架区間）は，**図 1.10**に示すように高架橋に高速道路，高架下は一般国道で構成されている．交通量が最も多く高架下には一般国道，降雪量が多く平均気温が低温なため，除・排雪作業には特に留意が必要である．



図 1.10 札幌自動車道の橋梁高架区間

このような状況にあるため、橋梁高架区間ではマルチ除雪が行われている。通常除雪（図 1.11(a)）は、路面上に降り積もった雪を、除雪車 3 台と標識車 1 台がチームを組んで除雪を行っている。1 番目の除雪車が追越車線から中央へ堆積した雪を寄せ、2 番目の除雪車が中央から走行車線に寄せ、3 番目の除雪車が走行車線から路肩に寄せて除雪している。通常、2 つの IC を往復 1~2 時間ほどかけて作業を行っている。このため、ランプ除雪を行う際、追越車線や走行車線を除雪する本線の除雪車 2 台は待機しなければならない。一方、マルチ除雪（図 1.11(b)）は、ランプ除雪に伴う渋滞を避けるため、通常除雪に比べランプ専用の除雪車 4 台を多く配置し、除雪車 7 台と標識車 2 台がチームを組んで行っている。このため、マルチ除雪の際、本線の除雪車は、除雪速度が 30~40 km/h で止まることなく連続して除雪することができ、除雪作業により問題となる渋滞は抑制される。

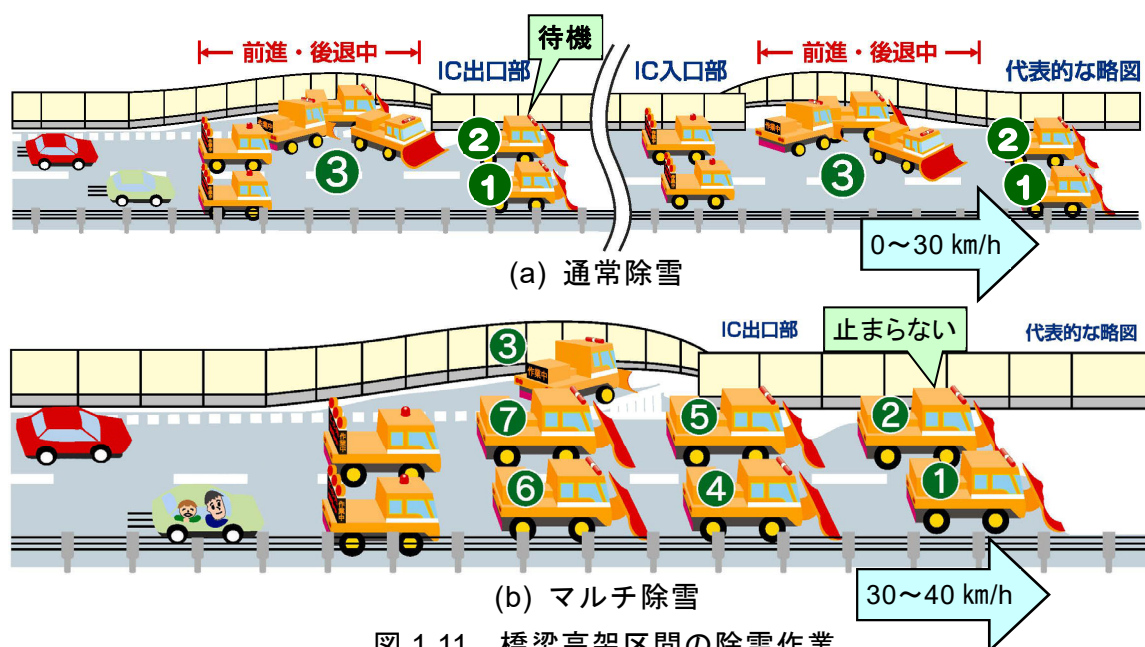


図 1.11 橋梁高架区間の除雪作業

1.5.2 機械除雪の高度化（パワー除雪）

路肩に雪が堆積している場合に想定以上の降雪があったとき、もしくは、5 cm/h以上の降雪が継続したときに除雪作業（図 1.12(a)）を行うと路肩の堆雪スペースが限界となる。除雪した雪が車線に跳ね返り車線幅員を減少させ、長時間の通行止めや交通事故誘発の原因となる。このため、路肩の堆雪スペースを確保するため、2時間を要する通常除雪が終了後、さらに1～2時間要する拡幅除雪を行っている。しかし、多量降雪時には、通常除雪を優先するため拡幅除雪を行うことが困難である問題が生じていた。そこで、岩見沢等の収束線と言われる5～30 kmの帯状の雪雲が狭い範囲で、同一箇所を短時間に強い降雪強度で降雪が発生する箇所では、通常除雪の体制に路肩専用の除雪車を1台追加配備し、路肩専用の除雪車を先行させることで、通常除雪に拡幅除雪を兼ねて行うことができるパワー除雪（図 1.12(b)）を2013年度から行っている。パワー除雪により、多量降雪時に路肩の堆雪スペースを確保することが可能となり、作業時間の短縮と除雪容量のアップを図ることで雪による通行止めの大幅な低減を図っている。

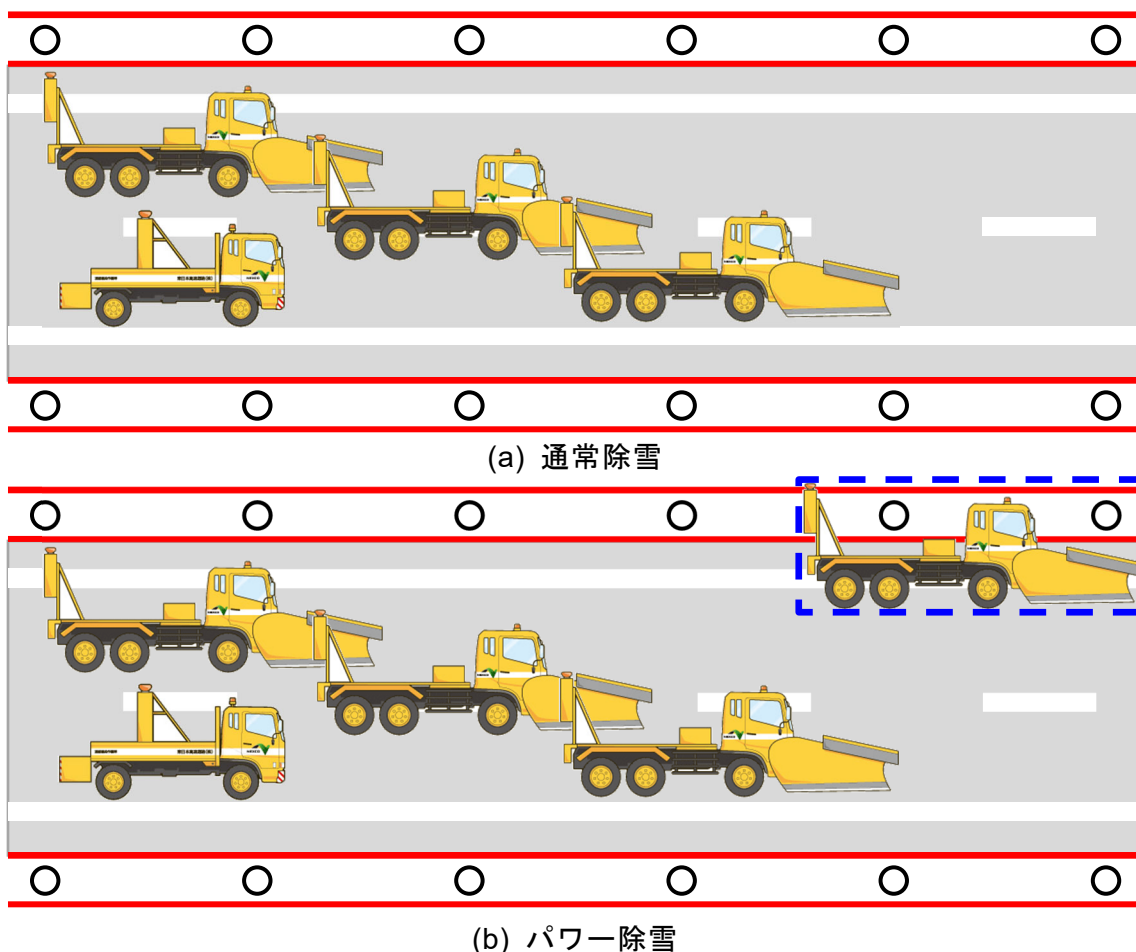


図 1.12 多量降雪箇所の除雪作業

1.5.3 機械除雪の高度化後の通行止量と累計降雪量

図 1.13 に機械除雪の高度化後の通行止量と累計降雪量の関係を示す。2013 年度にパワー除雪を導入し、各種雪氷対策により、通行止量が大幅に小さくなってきている。冬期間の通行止めの発生は、大きく分けて、路面への降雪・視界不良・路面凍結の 3 つの原因がある。パワー除雪はこの中で、路面への降雪に伴う通行止量の低減に貢献している。

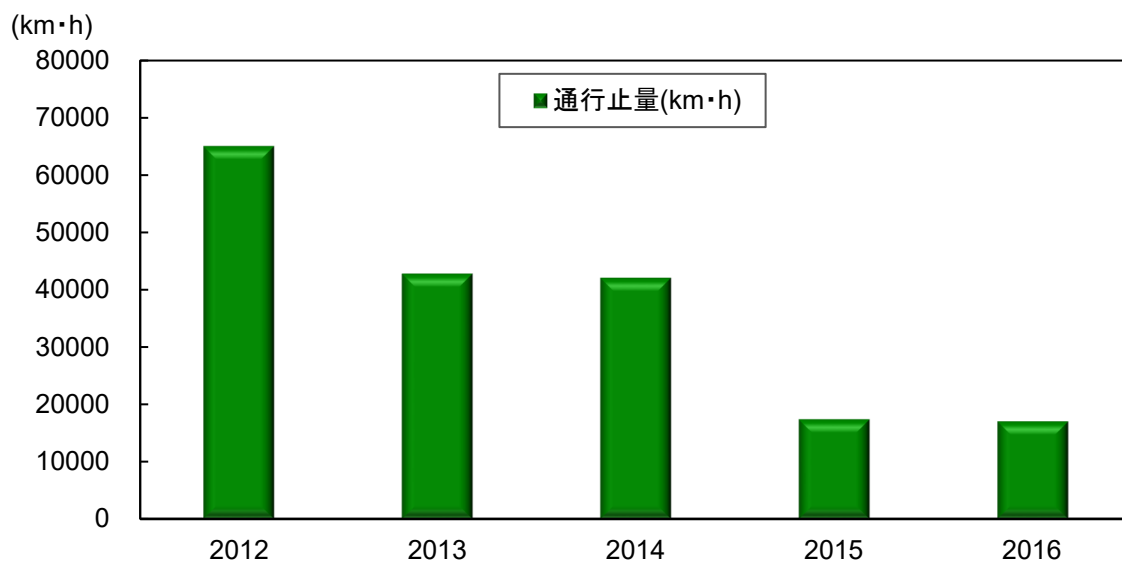


図 1.13 機械除雪の高度化後の通行止量

1.6 凍結防止剤散布

1.6.1 凍結防止剤散布量

NEXCO 東日本では、凍結路面の発生を抑制するため、凍結防止剤を散布している¹⁾。凍結防止や融氷剤として、塩化ナトリウムや塩化カルシウム、塩化マグネシウムなどの塩化物ベースの凍結防止剤は、費用対効果と有用性から一般的に使用されている^{2), 3)}。図 1.14 に 2008～2014 年度までの NEXCO3 社が管理する高速道路の積雪寒冷地（10 年間平均最大積雪深が 30cm 以上の地域）の延長と凍結防止剤散布量を示す。積雪寒冷地延長は微増であるが、凍結防止剤散布量は、増加傾向にある⁴⁾。一方、NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路では、冬期間に約 2.8 万 t の凍結防止剤（主に塩化ナトリウム）を散布している。凍結防止剤の費用は、図 1.15 に示すように雪氷対策費全体の約 18%を占めており、凍結防止剤散布量を低減し、道路管理費を縮減することは、重要な課題である。

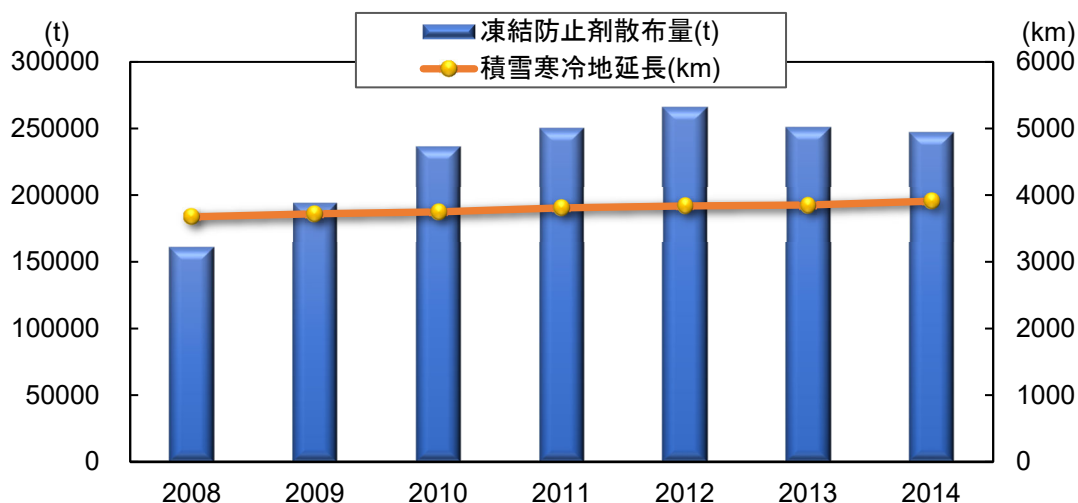


図 1.14 2008～2014 年度の NEXCO3 社が管理する高速道路の積雪寒冷地の延長と凍結防止剤散布量

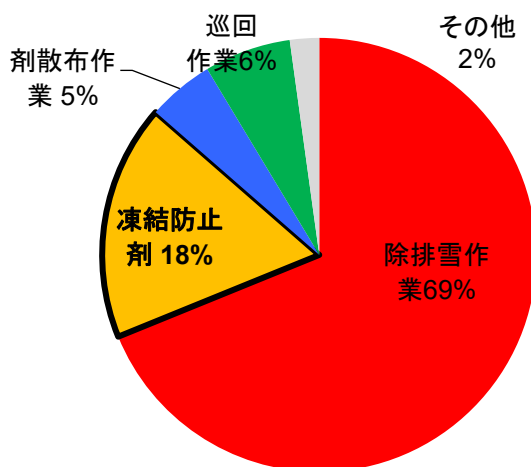


図 1.15 2014 年度の NEXCO 東日本北海道支社における雪氷費の内訳

1.6.2 凍結防止剤の環境への影響

凍結防止剤(塩化ナトリウム)による道路構造物への塩害が報告されている⁵⁾⁶⁾。塩害環境下における橋梁のRC床版コンクリートは、鉄筋腐食に伴う「浮き・剥離」や「土砂化」等の劣化が発生しており、損傷が著しい橋梁については、特定更新の対象となり床版取替工事等が行われている。凍結防止剤散布量を低減し、道路構造物を延命させることは、喫緊の重要課題である。

橋梁の変状は、凍結防止剤が主要な原因とされている⁷⁾。伸縮装置、排水管の変状の大部分が漏水を伴っている。凍結防止剤が溶け込んだ塩化ナトリウム溶液の漏水により上部工、下部工、支承周辺、検査路等の塩害が著しくなっている。また、これらの漏水に加え、壁高欄の隙間、上下線の隙間からの漏水や排水管流末不備により橋梁が塩害を受けている。さらに、漏水により、下部工天端に滞水し、これが原因で凍害も発生している。桁端部における伸縮装置や排水管からの漏水のメカニズムを図1.16に示す。また、これらによる橋梁の塩化ナトリウム溶液の漏水による塩害状況を図1.17に示す。

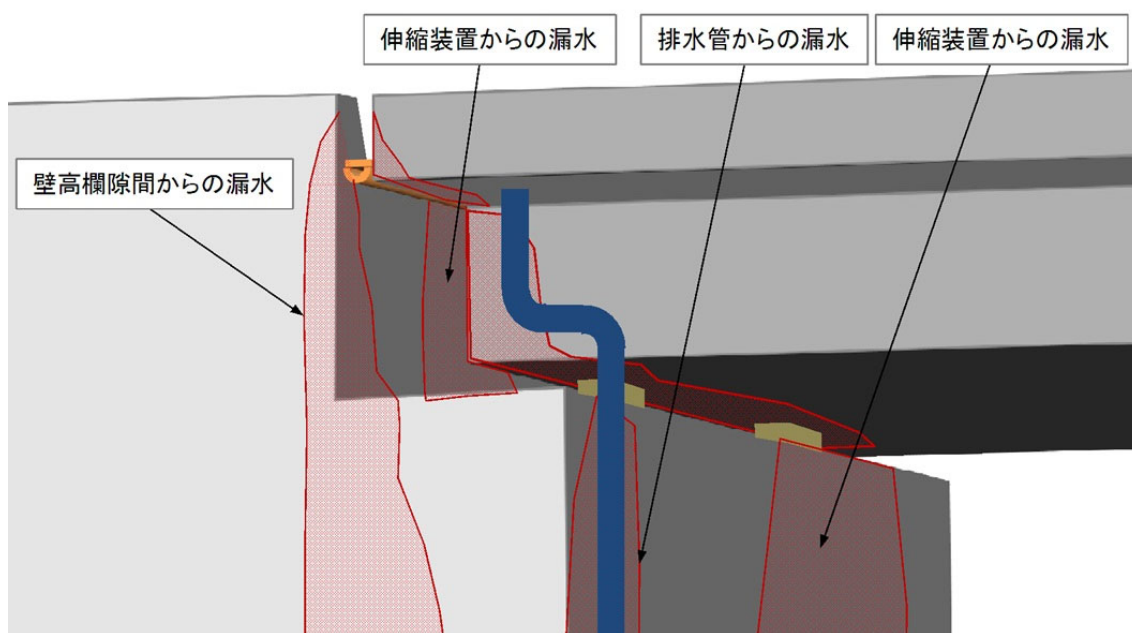


図 1.16 桁端部における伸縮装置や排水管からの漏水のメカニズム

① 図 1.17(a)伸縮装置

図 1.17(a)は、伸縮装置からの塩化ナトリウム溶液の漏水による変状である。伸縮装置自体を激しく劣化させ、さらに、樋の流末処理がなされていないため、図には示していないが、樋の排水口から流れ出た水が沓座を経由して橋台前面に至り、この部分も劣化させている。

②図 1.17(b)壁高欄の隙間

図 1.17(b)は、壁高欄の隙間から塩化ナトリウム溶液を含んだ路面排水が流れ出て、張出床版端部が劣化している状況である。塩害により水切り部が剥落し、漏水が橋梁全体に広がっている。壁高欄のひび割れ防止のために隙間を設ける方法は古い時代の橋梁にはよく見られた。しかし、ここからの漏水により変状を起こしているケースも少なくない。

③図 1.17(c)掛け違い部の壁高欄の隙間

図 1.17(c)は、伸縮装置によって壁高欄が大きく開口しており、ここからの漏水により床版や伸縮装置が変状を起こしている。この場合、伸縮装置自体の漏水と判断されてしまう場合もあるが、隙間を塩化ナトリウム溶液が漏水したことが原因である。

④図 1.17(d)桁端からの漏水が桁側面に波及

図 1.17(d)は、張出床版端部には橋軸方向に水切りを付けている。しかし、桁端部の橋軸直角方向には水切りは付いていない。伸縮装置で漏水が始まると、この桁端部から桁側面に波及し床版下面まで漏水が回り込み劣化させている。

⑤図 1.17(e)鋼橋 RC 床版

図 1.17(e)は、床版打継目から遊離石灰が漏出し、この付近のコンクリートが大きく剥離し、剥離していた部分が完全に剥落してしまった。鋼橋 RC 床版は他の構造部材と比較して薄いため、変状の進行は構造物としての耐久性を損ない易く、その変状の進行については注意を払う必要がある。

⑥図 1.17(f)高力ボルト継手

図 1.17(f)は、鋼橋の高力ボルト継手が局部的に腐食して断面減少している。橋梁全体としての塗膜は比較的健全ともいえる中での局部腐食である。近接目視を行わない限り見過ごされやすい状況にある。特にトラス橋では継手個所が多く、1 個所の継手の不具合が橋梁全体の安全性に影響するにも関わらず、検査路による近接目視の範囲が限られている。また、一般に桁下高の高いトラス橋は遠望目視では継手部の腐食は十分に確認できない。目視困難な個所で継手部の腐食が進行している可能性も考えられ、点検方法には留意が必要であり、早めの塗替が必要な状況である。



(a) 伸縮装置



(b) 壁高欄の隙間



(c) 掛け違い部の壁高欄の隙間



(d) 桁端からの漏水が桁側面に波及



(e) 鋼橋 RC 床版



(f) 高力ボルト継手

図 1.17 橋梁の塩化ナトリウム溶液の漏水による塩害状況

1.7 冬期における路面状態の客観的な自動計測装置

路面上に水分がある場合、凍結防止剤を散布することで、凍結温度を下げる事ができる。気象状況や気象予測等による最低温度の凝固点以上の路面の塩分濃度を保つことで凍結防止が可能となる。北米などの凍結防止剤の散布は、事前散布が一般的であり、事後散布よりも事前散布の方が路面の摩擦係数の低下を低減することができる^{8),9)}。北海道の高速道路においても降雪予測や低温予測、交通量が増加する朝夕のラッシュ前などに事前散布を行っている。しかし、北海道は北米等とは気象状況が異なり、降雪頻度が高く昼夜を問わず路面が雪氷で覆われる期間が長く、事後散布を行うことが多い¹⁰⁾。事後散布を効果的で効率的に実施するには、冬期における凍結防止剤の効果を維持しつつ、散布前の路面状態を的確かつ細かい区間別に把握する客観的な自動計測装置の開発が必要である。

これまで、冬期における路面状態の把握は、定期的に出動する雪氷巡回車に乗車した連絡員（以降、連絡員）の目視観測によって判別する主観的な手法が行われてきた。この手法は、天候や時間帯等による路面状態の視認性の問題、判別の難しい路面状態が存在した場合に連絡員の経験による影響を受けやすいなどの個人差から、定量的な判定が難しいとの課題があり、客観的な自動測定装置が望まれていた¹¹⁾。路面状態の自動測定装置には大別して3種類ある。1つ目は、路面に直接接触し路面状態を判別するタイプである。2つ目は路面状態をカメラ等で画像認識するタイプである。3つ目は路面に直接接触しない非接触のタイプである。

1.7.1 路面に直接接触し路面状態を判別するタイプ

(1) 路面すべり測定車

図 1.18 にすべり摩擦係数の測定原理を示す。すべり摩擦係数 (μ) は、摩擦力 (F) と荷重 (W) の比から、式 (1) にて求めることができる。

$$\mu(\text{すべり摩擦係数}) = \frac{F(\text{摩擦力})}{W(\text{荷重})} \quad (1)$$

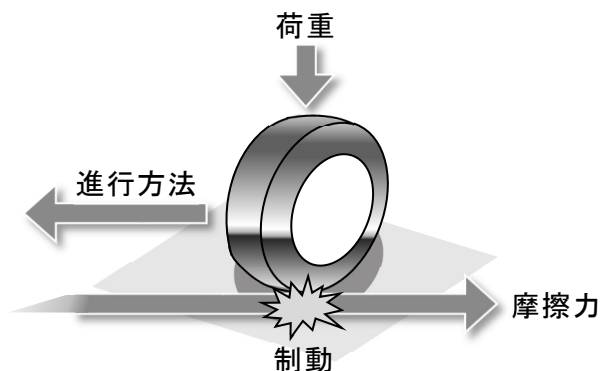


図 1.18 すべり摩擦係数の測定原理

図 1.19 は、道路管理分野における路面のすべり摩擦係数の標準的な計測装置として位置付けられている路面すべり測定車である。路面すべり測定車は、車両に測定輪（第 5 輪）を設置した試験車両である（図 1.19（右））。この装置は、車両を走行させた状態で測定輪を制動（ロック）させ、一定の荷重（ W ）で接地させたまま一定速度で走行させ、その際に発生する摩擦力（ F ）と荷重（ W ）の比からすべり摩擦係数（ μ ）を求めている。また、その測定方法から LWFT（Locked Wheel Friction Tester）と呼ばれている。

当初、路面すべり測定車は、冬期路面状態の計測ではなく、アスファルト舗装とコンクリート舗装のすべり摩擦係数の比較など夏期路面（非雪氷路面）を対象に計測を行ってきた。しかし、道路整備の進展と交通需要の増加などによって、冬期の雪氷路面のすべり計測に適用されるようになった¹²⁾。美馬ら¹³⁾は、冬期路面管理マニュアル（案）¹⁴⁾で示した路面分類とすべり摩擦係数の関係の測定試験を行った。

このようなタイヤを制動（ロック）して路面のすべり摩擦を計測する計測装置は、タイヤを制動した地点での測定であり、場所によって変化する路面の連続すべり摩擦を測定できない。また、路面すべり測定車を冬期路面状態の計測に用いるためには、路面すべり測定車の車両に大幅な改良を要する。さらに、全国に十数台しか無く¹⁵⁾非常に高価なことから、冬期における路面状態の客観的な自動計測装置として使用することは困難である。



図 1.19 路面すべり測定車（左：測定車，右：測定輪）

(2) スリップ率による計測

走行車両の対路面速度とタイヤの回転速度に差がある場合をスリップ率のあるすべり摩擦状態という¹⁶⁾。タイヤが自由に路面上を転がっている場合のスリップ率は0%で、車輪がロックされた状態はスリップ率100%となる。スリップ率を利用した方式には、スリップ率固定方式のTWO (Traction Watcher One) (図1.20)等がある。TWOの測定輪は2輪あり、1つの車輪がもう1つの車輪より遅く回転し、遅く回転する車輪から発生した抵抗力からすべり摩擦係数を計算する¹⁷⁾。装置は比較的安価だが、特殊な専用タイヤを用いるためランニングコストは高価である。牽引式は装置が大掛かりとなり、安全パトロールが目的の雪氷巡回車には適用できない。



図 1.20 Traction Watcher One (TWO)

(3) 連続路面すべり抵抗値測定装置

連続路面すべり抵抗値測定装置¹⁸⁾ (Continuous Friction Tester: (以下, CFT) (図 1.21) は, フレームに保持された, 回転可能な測定輪を牽引する構造となっている. 測定輪には, 車両進行方向に対して約 2 度の角度が与えられ, タイヤが回転する際に発生する横力から路面のすべり抵抗値を測定する (図 1.21(右)). CFT は, 測定輪に制動をかける必要がなく, 走行しながら一般の交通の支障とならずに路面のすべり抵抗値を連続して測定することができる. 測定に特別な操作 (機器操作, 制動および走行速度維持等) を必要としないという利点がある. また, 測定輪には市販のタイヤを使用し, 装置のウエイトと油圧装置によって一般的な乗用車と同等の圧力で測定輪を接地させている. さらに, 牽引車両には一般的な乗用車より車幅が広い車両を用いることで, タイヤ部分が多く通過する轍部に測定輪が接地し, 轍部分の路面のすべり易さを計測する構造となっており, 実際の車両走行環境に近い条件で測定することが可能である. CFT によって計測されたすべり抵抗値は, 測定輪に掛かる横力が低いほど (路面がすべり易いほど) 低い値になり, 横力が高いほど (路面がすべり難いほど) すべり抵抗値は高い値になる. CFT は 0.1 秒間隔で連続してすべり抵抗値を測定することが可能であり, CFT を用いることで, 路線の路面の滑り易さの状況を詳細にモニタリングすることが可能となる. アメリカの一部の州とスウェーデンでも試験的な導入と活用方法の検討がなされている¹⁹⁾. ほか, 徳永ら²⁰⁾や高橋ら²¹⁾ は, 道路パトロールカーなど乗用車で牽引する CFT を用いて一般国道で計測を行い, 冬期路面状態を連続的・定量的に把握できることを示している.

しかしながら, 牽引式は装置が大掛かりとなり, 安全パトロールが目的の雪氷巡回車には適用できない.



図 1.21 連続路面すべり抵抗値測定装置 (CFT) 外観 (左) と測定概念図 (右)

1.7.2 路面状態をカメラ等で画像認識するタイプ

(1) CCTVカメラの映像から路面状態を画像処理で判定

国土技術政策総合研究所は、道路利用者の安全確保と道路管理の効率化の観点から、CCTVカメラの映像から路面状態を画像処理で判定する可視画像式路面センサの冬期路面管理への活用の可能性について検討を行っている(図 1.22)。これまで、可視画像式路面センサが路面状態の変化を面的かつリアルタイムに把握でき、道路管理への展開が可能であることが明らかにされてきた^{22),23)}。しかし、これらはCCTVカメラ等の定置式のシステムであり、車両など移動式への設置が検討されていない。また、村田ら²⁴⁾は、道路管理用のCCTVカメラ画像情報を活用した路面判別技術の開発に取り組んだ。CCTVカメラの画像情報から、RGB輝度分析とエントロピー分析(CCTVカメラ画像をグレイ画像に変換し、白色と黒色の混在度合いを数値化する分析)を行い、さらに、昼夜の明るさの違いを考慮してバックグラウンド補正を行って、路面状態を判別する手法である。しかし、RGB解析を行うため、夜間の路面判別は、道路照明がある地点のみと限定される。また、本手法も車両など移動式への設置が検討されていない。

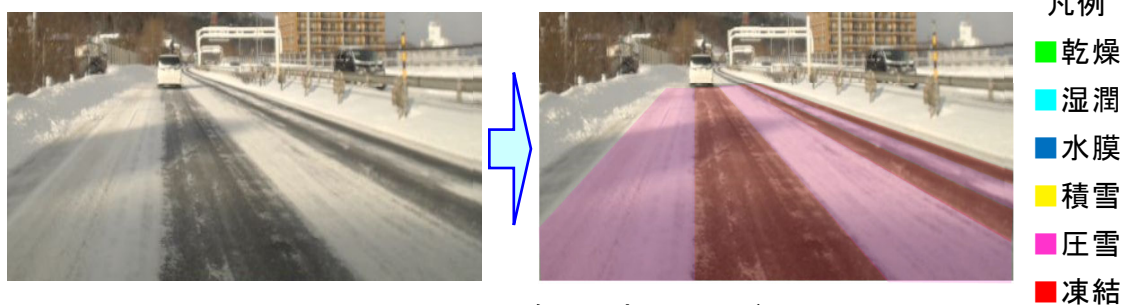


図 1.22 路面判定イメージ

(2) CCTVカメラの映像から路面状態を画像処理で判定

図 1.23 に CCTVカメラ等の映像から路面状態を画像処理で判定するイメージを示す。車両に取り付けた単眼カメラにより路面状態をリアルタイムに把握するシステムが提案されている^{25), 26)}。これらは、路面判別する種類がいくつか限定されており、種類が増えると精度低下が示唆されている。

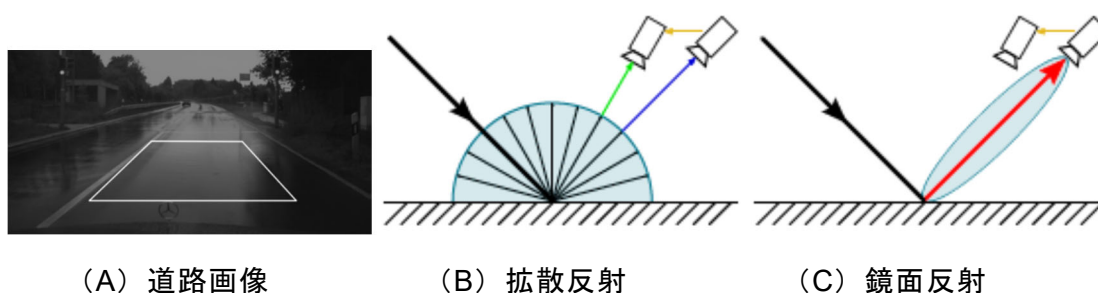


図 1.23 路面判定イメージ

1.7.3 路面に直接接触しない非接触のタイプ

(1) 加速度計

加速度計による路面のすべり摩擦係数の測定方法は、加速度計を設置した車両に急制動をかけ、そのときに得られる負の加速度（減速度）を測定することによりすべり摩擦係数を求める。なお、その測定方法により、減速度計とも呼ばれている。スウェーデン、ノルウェーおよびフィンランドでは、冬期道路管理における路面のすべり摩擦係数計測機器として使用されている（図 1.24）²⁷⁾。加速度計の長所は、機器が安価であること、設置に関して車両に特別な改造を必要としないこと等である。一方、加速度計の短所は、オペレータおよび車両の違いによる影響を受けること、データを記録できる機器がほとんどないこと、制動が必要なため交通量の多い道路での使用に適さないこと、地点での測定であること、道路勾配が測定値に影響を与えることなどである¹⁷⁾。武田ら²⁸⁾や舟橋ら²⁹⁾は、日本の冬期路面管理への導入可能性を検証した。その結果、加速度計を用いて雪氷路面状態の定量的評価が可能であるが、車両の急制動を要するため、測定を行うことができる道路条件、交通状況に限られることを指摘した。このような測定装置を高速道路本線で使用することはできない。



図 1.24 加速度計

(2) IR センサによる非接触のタイプ

IR センサによる非接触のタイプ（以降、非接触路面センサ）が各種製造業者から開発されている。Patrik ら³⁰⁾や中島ら³¹⁾は、水や氷が特定波長の近赤外線を吸収する性質を利用して、路面状態判別や摩擦係数を推定可能なことを報告している。Haavasoja ら³²⁾による Vaisala DSC111 は、加速度計による計測と比べ高い相関関係を示す。しかし、切石ら³³⁾は、連続測定において不規則にタイムラグがあり、氷膜を測定できないことを指摘した。また、Johan ら³⁴⁾は、5つの異なる非接触路面センサ（(a) Vaisala DSC211, (b) Metsense 2DRoad, (c) Teconer RCM411, (d) Metsense MetRoadMobile, (e) Lufft MARWIS）について路面状態の判別結果を評価した（図 1.25）。一般的な路面判別アルゴリズムは優れているが、凍結と湿潤の判別には問題があることを指摘した。非接触路面センサは路面の表面状態を測定する原理のため、凍結路面の上に水膜があると湿潤と判別することがある。北海道のような温度低下が顕著な地域においては、凍結防止剤の散布により凍結路面の表面のみ融解し、凍結路面の上に水膜がある場合の状態が存在することが多い。このように、各々のシステムの課題からいずれの自動測定装置も NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路の路面状態判別には適さないと言えた。

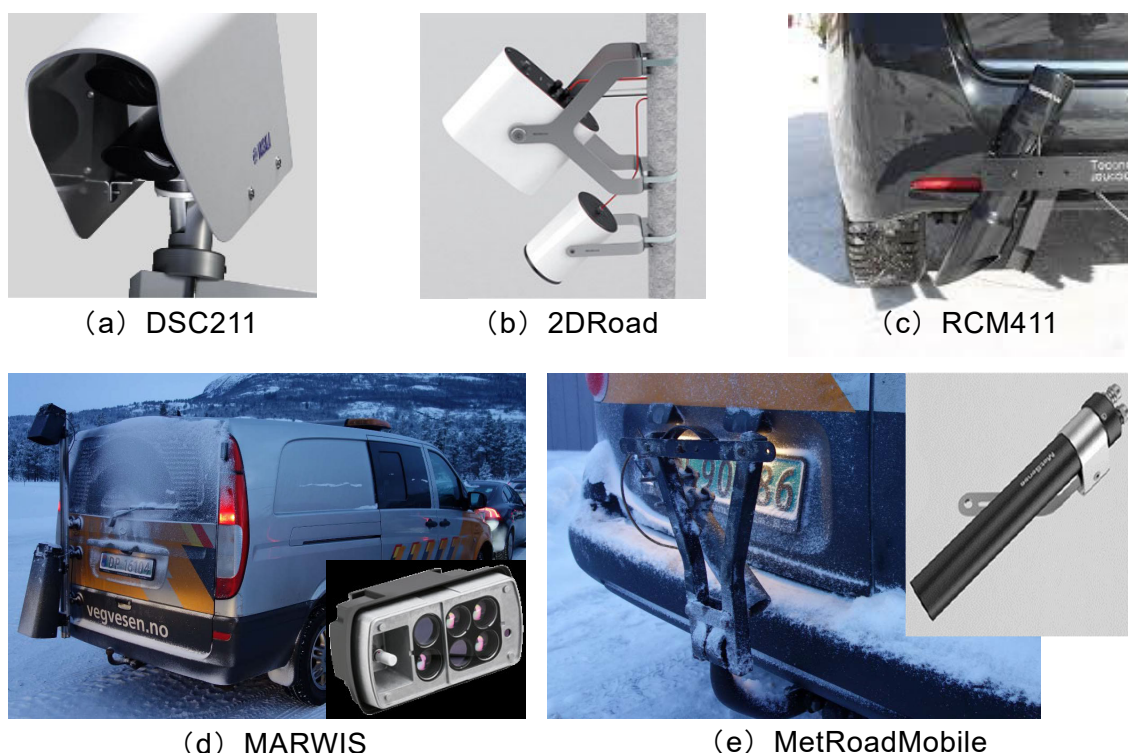


図 1.25 5つの異なる非接触路面センサ

1.8 本研究の目的

冬期間、ドライバーに安全安心で快適な走行環境を提供するため、冬期路面管理は重要な役割を果たしている。NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路では、凍結路面の発生を抑制するため、凍結防止剤を散布している。凍結防止や融氷剤として、塩化ナトリウムや塩化カルシウム、塩化マグネシウムなどの塩化物ベースの凍結防止剤は、費用対効果と有用性から一般的に使用されている。近年、安全への意識の高まりから冬期間に約 2.8 万 t の凍結防止剤（主に塩化ナトリウム）を散布している。凍結防止剤の散布量は、増加傾向にある。また、凍結防止剤（塩化ナトリウム）による道路構造物への塩害が報告され、橋梁の変状は、凍結防止剤が主要な原因とされている。現在、鋼橋 RC 床版から、より耐久性の高いプレキャスト PC 床版への取替作業が進められている。このような状況の中、凍結防止剤散布量を低減し道路管理費を縮減することは、喫緊の重要課題である。冬期道路交通の安全を維持しつつ凍結防止剤の散布を低減するこのような課題は、積雪寒冷地における冬期道路管理者にとって共通である。このため、凍結防止剤の散布量を低減する様々な技術開発が世界中でなされてきた。しかし、実際の冬期路面管理において実用化に至った新たな技術はほとんどない。

本研究では、これら課題を解決するための手段として、冬期道路管理に必要なプロセスを自動化することについて着目し、冬期路面管理を高度化する仕組みを構想し、具現化（システムを作る）する。具体的には、100m 区間毎に路面状態を自動判別、次に散布が必要かどうかを判断し、必要な 100m 区間のみ凍結防止剤を自動散布（以降、100m 区間散布）する仕組みを構築し、冬期における凍結防止剤の効果維持しつつ凍結防止剤散布の低減に資する、スマート凍結防止剤散布システムの開発・運用を行う。

以上の背景から、本研究の目的は、「冬期間、ドライバーに安全安心で快適な走行環境を提供しつつ、凍結防止剤散布量を低減する」である。

1.9 本研究の構成と内容

本論文の構成を図 1.26 に示す。本論文は、第 1 章から第 7 章で構成される。

「第 1 章 序論」では、本研究の背景に関する高速道路における冬期路面管理の課題をまとめており、研究の目的とともに論文の構成を示している。特に、冬期間における凍結防止剤散布の重要性やそれに起因する塩害による問題が顕在化したことを背景とし、ドライバーに安全安心で快適な走行環境を提供しつつ、凍結防止剤散布量を低減することを研究目的としたことについて詳細に記述している。

「第 2 章 既存の凍結防止剤散布方法」では、北海道の高速道路における冬期路面管理の現状を把握し、既存の凍結防止剤散布方法について整理している。凍結防止剤散布量を低減するためには、路面状況の把握・判断が重要である。現在の凍結防止剤散布は、路面状態を目視により評価し、その結果に基づいて実施されている。目視での路面状態を把握する間隔は、約 5km 区間毎に行っている。この約 5km 区間の中に乾燥などの散布が不要な路面が含まれていても凍結防止剤を散布している。また、凍結防止剤散布車への凍結防止剤の積込みは、0.5t が最小単位となる。このため、必要となった凍結防止剤散布量を 0.5t 単位で切上げて積込むため、凍結防止剤積込量は必要な散布量より多くなる。既存の凍結防止剤散布方法には、安全と関係の無いところで無駄があり、改善・改良の余地がある。凍結防止剤の散布を効果的で効率的にするためには、散布前の路面状態を的確かつ細かい区間別に把握する先進システムの開発が必要であることを示している。

「第 3 章 自動路面状態判別システム (CAIS) の実用化」では、自動路面状態判別システム (以降、CAIS) のシステム構成、原理を詳細に示し、実用化へ向けて開発した機能を示している。1 章で示した課題を解決するための手段として、CAIS の実用化へ向けた開発が必要と考えた。CAIS は、タイヤ (加速度センサ) が路面に接地 (タイヤの踏込み～タイヤの蹴り出し) しているときの加速度振動波形をセンシングし、その加速度振動波形の特徴から凍結防止剤散布の判断に必要な 6 つの路面状態 (乾燥, 半湿, 湿潤, シャーベット, 圧雪・凍結, 積雪) を 100m 区間毎に自動判別する仕組みである。高速道路の冬期路面管理で活用するために、2009 年度から行った様々な改良や機能構築を示している。

「第 4 章 凍結防止剤最適自動散布システム (ISCOS) の開発」では、2013 年度に行った凍結防止剤最適自動散布システム (以降、ISCOS) の実現可能性の実地検証により、CAIS 路面判別結果に応じて凍結防止剤を自動で散布する ISCOS は実現可能で有用であることを示している。2014 年度に行った ISCOS の試行導入結果では、ISCOS による凍結防止剤散布量の低減効果を既存の凍結防止剤散布方法と比較することで示している。また、凍結防止剤散布量の低減量に基づいた導入計画も示している。1 章で示した課題を解決するための手段として、3 章で実用化した CAIS に加え、ISCOS の開発が必要と考えた。ISCOS は 3 つのシステム「CAIS」、「凍結防

止剤適量積込システム（以降、DD（Divide Device）ホッパー）」、「凍結防止剤自動散布システム」で構成する。ISCOSは、100m区間毎に路面状態を自動判別、次に散布が必要かどうかを判断し、散布が必要な100m区間のみ凍結防止剤を自動散布する仕組みである。一方、既存の凍結防止剤散布方法は、約5kmの区間で凍結防止剤の散布判断を行っており、この約5kmの区間の中に散布不要な路面が混在していても凍結防止剤を散布する仕組みである。ISCOSでは散布不要な100m区間では凍結防止剤を散布しないことから、既存の凍結防止剤散布方法より凍結防止剤の低減が可能になることを示している。また、DDホッパーは、0.1t単位で凍結防止剤を凍結防止剤散布車に積込むことを目的として開発した（これまでは0.5t単位）。凍結防止剤散布後の凍結防止剤散布車に残った凍結防止剤は、再利用はできなく、0.1t単位で積込むことから端数となる凍結防止剤を減らせることができ、凍結防止剤散布量の低減につながることを示している。

「第5章 スマート凍結防止剤散布システムの開発および実用化」では、ISCOSには3つの課題があり、これらの課題を解決するために補完システム開発し、ISCOSのシステム制御に組入れ、スマート凍結防止剤散布システムとして開発・実用化を行ったことを示している。当初開発した補完システム（2015年度版補完システム）には改良すべきいくつかの点があり、それらの改良点を詳細に示し、改良後である2018年度版補完システムによる凍結防止剤の低減効果を定量的に示している。スマート凍結防止剤散布システムの導入は、年々増加し、2018年度にNEXCO東日本北海道支社が管理する高速道路の全ての基地・全ての車両に搭載できた。スマート凍結防止剤散布システムを実際に使用したときの散布量と既存の凍結防止剤散布方法を使用したと仮定したときの推定散布量との差から、スマート凍結防止剤散布システムの運用により凍結防止剤散布量が低減されたことを定量的に明らかにしている。加えて、これら凍結防止剤散布量が低減された状況において、冬期における北海道の高速道路の安全性や快適性が保たれたかどうかについて冬期の事故件数および走行速度の年変動から明らかにしている。さらに、スマート凍結防止剤散布システムの導入により、増加傾向にあった凍結防止剤散布量を減少させることができたことを示している。

「第6章 結論」では、本研究の成果として得られた知見をまとめ、今後の課題を示している。

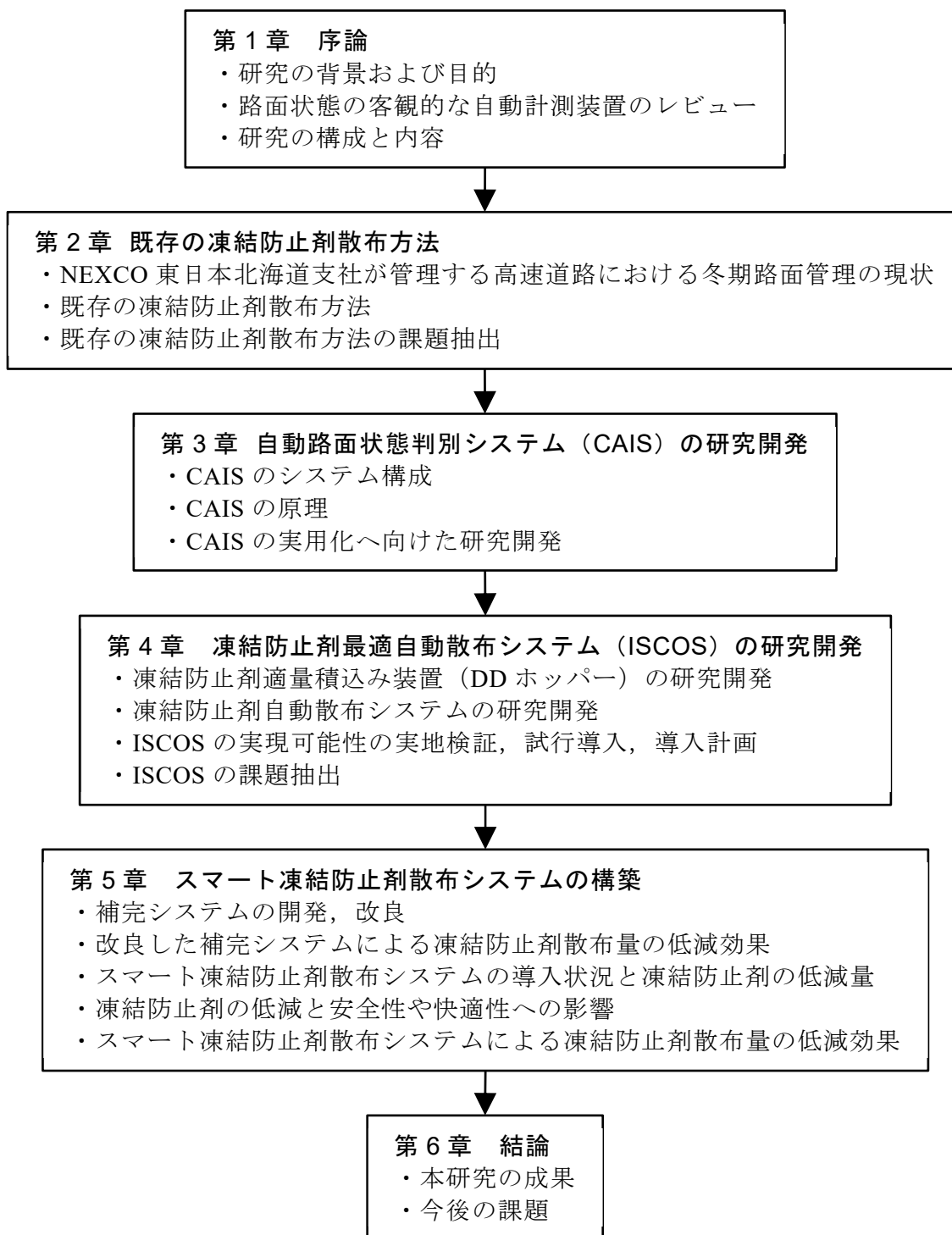


図 1.26 本論文の構成

第 1 章参考文献

1. 財団法人高速道路技術センター：写真でみる雪氷管理，東京，財団法人高速道路技術センター，65pp, 2005.
2. Fay, L., Volkening, K., Galloway, C. and Shi, X. : Performance and impacts of current deicing and anti-icing products: User perspective versus experimental data. Transportation research record, TRB 87th Annual meeting paper, 08-1382, 1-23, 2008.
3. World Road Association : Comité technique 2.4. Snow and ice data book 2014, 223pp, 2015. <https://www.piarc.org/ressources/publications/8/22925,SIDB-EN-Winter-Service-World-Road-Association.pdf> (2020.08.13 閲覧).
4. 松坂敏博，森山陽一，小笹浩司，太田秀樹，藤野陽三，宮川豊章，西村和夫：高速道路の構造物における大規模更新および大規模修繕の導入と課題. 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント) , 73 (1) , 1-18, 2017.
5. 紫桃孝一郎：道路構造物の維持管理. コンクリート工学, 51 (1), 90-93, 2013.
6. Shi, X., Fay, L., Yang, Z., Nguyen, T. and Liu, Y. : Corrosion of deicers to metal in transportation infrastructure: Introduction and recent developments. Corrosion reviews, 27 (1-2) , 23-52, 2009.
7. 萩原直樹：NEXCO における大規模更新の現状，第 32 回鋼構造基礎講座 鋼橋の大規模修繕・大規模更新－最新動向と今後の展望－，土木学会鋼構造委員会鋼構造継続教育推進小委員会, 1-61, 2016.
http://library.jsce.or.jp/Image_DB/committee/steel_structure/book/62307/62307-0001.pdf (2020.08.13 閲覧).
8. Cui, N. and Shi, X. : Improved user experience and scientific understanding of anti-icing and pre-wetting for winter maintenance in North America. Transportation research record, TRB 94th Annual meeting paper, 15-5823, 1-18, 2017.
9. Mahoney, J., Larsen, D. A. and Jackson, E. : Reduction in nonfatal injury crashes after implementation of anti-icing technology. Transportation research record: Journal of the transportation research board, 2613, 79-86, 2017.
10. 藤本明宏，山田慎也，田中俊輔，高橋尚人，武市靖：通過車両の影響を考慮した凍結防止剤事後散布後の路面すべり抵抗推定法の構築と検証. 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 71 (2) , 81-96, 2015.
11. National Cooperative Highway Research Program : Feasibility of using friction indicators to improve winter maintenance operation and mobility. NCHRP Web document 53 (Project 6-14), Contractor' s final report, 105pp, 2002.
12. 建設省土木研究所道路部道路研究室：雪氷路面のすべりに関する報告書，土木研究所資料, 2848, 1990.
13. 美馬大樹，高木秀貴，傳章則：一般道路の雪氷路面におけるすべり摩擦係数につ

- いて、北海道開発局技術研究発表会, 39, 77-84, 1996.
14. 北海道開発局:冬期路面管理マニュアル(案), 北海道, 北海道開発局, 46pp, 1997.
 15. 国土総合政策研究所道路研究部道路研究室:平成 17 年度路面すべり測定車合同比較試験報告書, 国総研資料, 356, 2006.
 16. 小野田:路面のすべり, アルファルト, 46, 214, ISSN0912-0793, 3-10, 2003.
 17. Baard., N.: The use of friction measurement techniques in winter maintenance in Norway, XI International winter road congress, CD-ROM, 2002.
 18. Halliday Technologies Inc.: <http://www.hallidaytech.com/> (2020.02.07 閲覧).
 19. Jeffrey, S. T., Scott. S. K., Jennifer, G., Diana, C. and Don, H.: Measurements of pavement condition and road weather environment within North Dakota using a tow-hitch mount road grip tester, 4th National conference on surface transportation weather and 7th international symposium on snow and ice control technology, Transportation research circular, No.E-c126, 2008.
 20. 徳永ロベルト, 舟橋誠, 高橋尚人:すべり抵抗値活用による冬期路面管理技術の高度化に関する研究. 北海道開発局技術研究発表会, 52, ふー04, 2009.
 21. 高橋尚人, 徳永ロベルト, 浅野基樹, 石川信敬, 岡村智明:冬期路面管理の高度化に関する実践的研究. 土木計画学・論文集, 26 (5) , 901-911, 2009.
 22. 平井節生, 牧野浩志, 山崎勲, 大久保康雄:冬季道路管理業務への可視画像式路面センサの活用. ITS シンポジウム, 4, 1-6, 2005.
 23. 国土交通省国土技術研究会:IT 技術を活用した道路管理の効率化. 土木技術資料 , 47, 40-45, 2005. http://www.pwrc.or.jp/thesis_shouroku/thesis_pdf/0503-P040-045_kiyasu.pdf (2020.08.13 閲覧).
 24. 村田藤麿, 吉田 健一, 上原麻子:画像情報を活用した路面判別技術に関する基礎研究, 第 18 回ゆきみらい研究発表会, 2006.
 25. Amthor, M., Hartmann, B. and Denzler, J.: Road condition estimation based on spatio-temporal reflection models. GCPR(German Conference for Pattern Recognition) 2015, LNCS(Lecture Notes in Computer Science), 9358, 3-15, 2015.
 26. Almazen, E.J., Qian, Y. and Elder, J.H.: Road segmentation for classification of road weather conditions. Proceedings of the 4th workshop on computer vision for road scene understanding and autonomous driving, ECCV 2016, Springer, 96-108, 2016.
 27. Wallman, C. G. and Åström, H.: Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety : A literature review, Swedish national road and transport research institute, Project code 80435, 2001.
 28. 武田祐輔, 川村和幸, 阿部篤:加速度計によるすべり摩擦係数の測定, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 5, 49, 28-29, 1994.
 29. 舟橋誠, 徳永ロベルト, 高橋尚人, 浅野基樹:雪氷路面のすべり摩擦係数計測機

- 器の比較試験と海外事例報告, 北海道の雪氷, 25, CD-ROM, 2006.
30. Patrik, J., Torgeir, V., Felix, D. and Benny, T. : Road condition imaging -- Model development. Transportation research record, TRB 94th Annual meeting paper, 15-0885, 1-19, 2015.
 31. 中島知幸, 高橋尚人, 舘山一孝 : 近赤外線およびマイクロ波を用いた路面状態の評価. 寒地土木研究所月報. 773, 28-33, 2017.
 32. Haavasoja, T. and Pilli-Sihvola, Y. : Friction as a measure of slippery road surfaces. SIRWEC(Standing International Road Weather Commission) 2010, Conference paper, 1-8, 2010.
 33. 切石亮, 川端優一, 徳永ロベルト, 高橋尚人 : 非接触式すべり抵抗計測装置の冬期路面管理への適用性に関する研究. 北海道の雪氷, 31, 73-76, 2012.
 34. Johan, W., Patrik, J. and Henrik, B. : Laboratory test of five different optical road condition sensors, SIRWEC(Standing International Road Weather Commission) 2016, Conference paper, 1-5, 2016.

第 2 章 既存の凍結防止剤散布方法

2.1 はじめに

図 2.1 に NEXCO 東日本北海道支社が行っている既存の凍結防止剤散布方法のフローを示す。既存の凍結防止剤散布は、STEP1：気象および路面等の情報収集・STEP2：散布作業実施判断・STEP3：散布作業実施ための準備・STEP4：散布作業の実施の4つのSTEPで行われる。

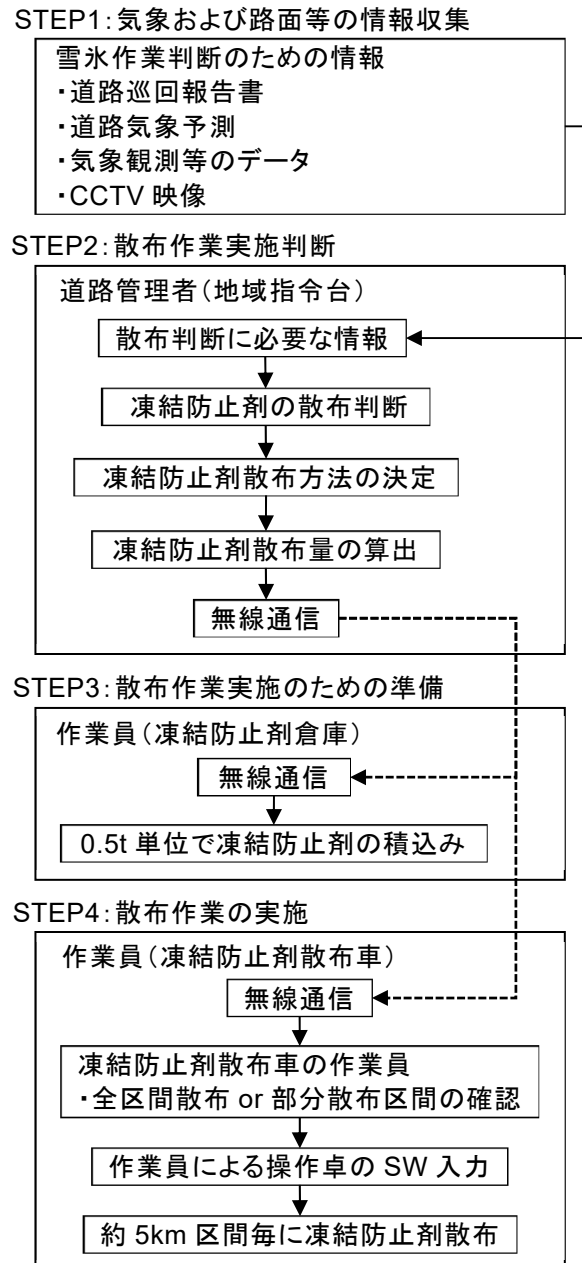


図 2.1 既存の凍結防止剤の散布方法のフロー

凍結防止剤の散布は、事前散布と事後散布の 2 種類の方法がある。事前散布は、乾燥路面であっても気象予測等の情報から、事前（雪が降る前）に凍結防止剤散布を行い雪氷路面の発生抑制に努めるものである。一方、事後散布は、路面状態を確認し、雪氷路面に対して、雪氷路面の発生抑制および改善を目的に凍結防止剤散布を行うものである。北海道は、降雪頻度が高く昼夜を問わず路面が雪氷で覆われる期間が長いため事後散布を行っている。

既存の凍結防止剤の散布方法では、凍結防止剤散布判断のための材料として、道路気象予測、気象観測等のデータ、CCTV 映像、道路巡回報告書を収集する。道路管理者は、これら散布判断に必要な情報を基に凍結防止剤の散布判断・凍結防止剤散布方法の決定を行う。その後、道路管理者は凍結防止剤散布区間（散布方法）の決定と同時に凍結防止剤散布量を予め用意しておいた一覧表から確認する。次に道路管理者より無線連絡を受けた凍結防止剤倉庫の作業員は、指示のあった凍結防止剤散布量を 0.5t 単位で凍結防止剤散布車に積込む。また、道路管理者より無線連絡を受けた凍結防止剤散布車の作業員は、全区間散布または部分散布区間を確認し、全区間散布のときは、凍結防止剤散布車が担当する全ての区間に凍結防止剤散布する。また、部分散布のときは、約 5km 区間毎に凍結防止剤散布車の操作卓の SW を手入力することにより凍結防止剤を散布する。

2.2 気象および路面等の情報収集

冬期の安全で円滑な交通確保を図り、効率的な雪氷対策を実施するためには、最新の気象および路面等の情報収集を行い、得られた情報を総合的に判断することが必要である。これらの気象情報は、高速道路にある情報板等により道路利用者にも提供している。雪氷対策には 4 つの気象情報（①気象コンサルタントが発表する「道路気象予測」、②道路沿線に設置された「気象観測等のデータ」、③気象の変化点や IC に設置されている「CCTV 映像」、④雪氷巡回時に作成する「道路巡回報告書」）が必要である。

2.2.1 道路気象予測

雪氷対策期間においては、通常の定時道路気象予測が 7 時と 16 時に 1 日に 2 回、気象コンサルタントより配信される。図 2.2 に道路気象予測データを示す。道路気象予測データの要素は、天気、降雪量 cm、降水量 mm、風向、風速 m/s、気温℃、路温℃、吹雪指数である。これらの要素を 1h 毎に、また、IC 毎に予測した数値が一覧表で入力されている。NEXCO 東日本北海道支社の地域指令台では、これらの気象予測データを参考に、当日の雪氷作業内容や人員配置等の判断を決定する。また、気象の急変時には、必要に応じて臨時道路気象予測が配信される。



図 2.3 気象観測機器

①気温計

気温計は、現時の外気温を観測する機器である。気温データは、降雪の予想および路面状況の推移を判断するための要素の1つとしている。

②路温計

路温計は、高速道路本線車線部の路面表面から3cmの深さに設置され、土工部または橋梁部の路温を観測する機器である。路温データは、温度変化の推移を観測することによって路面の凍結の予測を行い、凍結防止剤散布作業等の出動判断の要素の1つとしている。

③降水探知器

降水検知器は、雨および雪の有無を観測する機器であり、路面の濡れの有無や降雪の有無を検知している。

④雨雪量計

雨雪量計は、雨および雪の量を測定する機器である。雪の量の測定方法には、降雪した雪を溶かして水の量として測定するものと、光波を利用して直接測定する方法がある。

⑤風向風速計

風向風速計は、吹いてくる風の方向および風の強さを測定する機器である。風向風速計のデータは、吹雪や地吹雪の発生を判断する1つの目安となっている。

⑥視程計

視程計は、主に吹雪や地吹雪などの発生時に視認可能な距離の目安を測定する機器である。視程計のデータは、交通規則や視程障害による通行止めの判断の要素としている。

⑦透過率計（Visibility Index Meter, VI 計）

VI 計は、霧や降雨時に視認可能な距離（視程）の目安を測定する機器である。

⑧積雪深計

積雪とは降った雪が自然に地面に積もった状態をいう。積雪深とは、地面に積もった雪などの固形降水の深さ（鉛直方法の深さ）をいい、cm 単位で表したものである。つまり、その時点での「積もっている雪の深さ＝積雪」である。積雪深計は、1 時間毎に雪面に向かってレーザー光を当て、レーザー光が雪面に反射して戻ってくるまでの時間を用いて求めている。一方、降雪の深さ（降雪量）はある時間内に、地表に降り積もった雪などの固形降水の深さをいう。気象庁（NEXCO 東日本）では、正時値と 1 時間前の正時値との差を求め正の値を正時値の降雪量としている。降雪量は、前の時間から積雪が何センチ増えたかの差を表している。

2.2.3 CCTV（Closed Circuit Television）映像

図 2.4 に示す CCTV 映像は、交通状況等を監視するためのテレビ装置である。雪氷管理では、気象状況や視程状況、路面状況などを把握するために CCTV 映像を活用している。設置場所は、気象の変化点（急変箇所）や交通渋滞が予想される箇所など交通管理上危険性の高い場所に設置している。また、トンネル内にある CCTV は、除雪作業によるトンネル内の持ち込み雪を監視するために活用している。

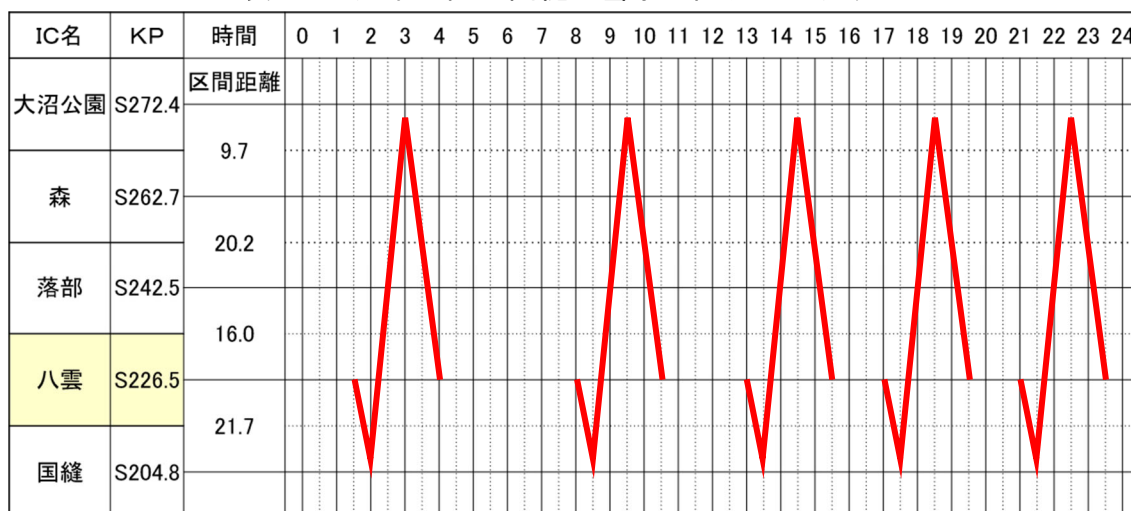


図 2.4 CCTV 映像

2.2.4 道路巡回報告書（雪氷巡回）

雪氷巡回は、3～5 時間毎，路面状態，天候状況，視界状況，路面の残留塩分濃度を把握することを目的としている¹⁾。雪氷巡回車の連絡員（以降，連絡員）は，担当区間を雪氷巡回した際に，約 5km 区間毎に細分化された部分散布区間の路面状態・天候状況・視界状況・路面の残留塩分濃度を調べ，地域指令台の道路管理者（以降，道路管理者）に道路巡回報告書として取りまとめたものを報告する¹⁾。このとき連絡員は，約 1km 区間毎に路面状態を目視で判別し，約 5km 区間毎に細分化された部分散布区間に危険側となる路面状態と代表的な路面状態を記載する。また，連絡員は，約 5km 区間毎に細分化された部分散布区間に雪氷巡回車を降りて手持ち式の塩分濃度計を使って路面の残留塩分濃度を計測し記載する。表 2.1 に雪氷巡回の一例として，大沼公園～国縫の雪氷巡回ダイヤグラムを示す。

表 2.1 大沼公園～国縫の雪氷巡回ダイヤグラム



2.3 作業実施判断（既存の凍結防止剤散布作業実施判断プロセス）

スマート凍結防止剤散布システムを導入する以前の NEXCO 東日本北海道支社が行ってきた既存の凍結防止剤散布作業実施判断のプロセス（以降、既存の散布判断プロセス）を図 2.5 に示す。STEP1 に示すように、道路管理者は気象コンサルタントより配信される道路気象予測、気象観測局に設置されている気象観測等のデータ・CCTV 映像を収集する。また、連絡員は、通常、3～5 時間毎に 2 つの IC 間程度を一つとした区間を巡回する。巡回区間を分割した約 5km の部分区間別に観測した気象・路面状態等を道路巡回報告書（紙ベース）に記載し、道路管理者に提出する¹⁾。次に、STEP2 で、道路管理者は凍結防止剤の散布の有無を判断する。このとき、道路巡回報告書に記載された部分区間別の路面状態が散布判断に最も影響する。散布の有無に加え、道路管理者は散布する区間を決定する。凍結防止剤を散布する区間には、前述の約 5km の部分区間とそれらを合わせた全区間とがある。最後に STEP3 として、散布車に凍結防止剤を積込み、STEP2 で決まった区間に手動で凍結防止剤を散布する。

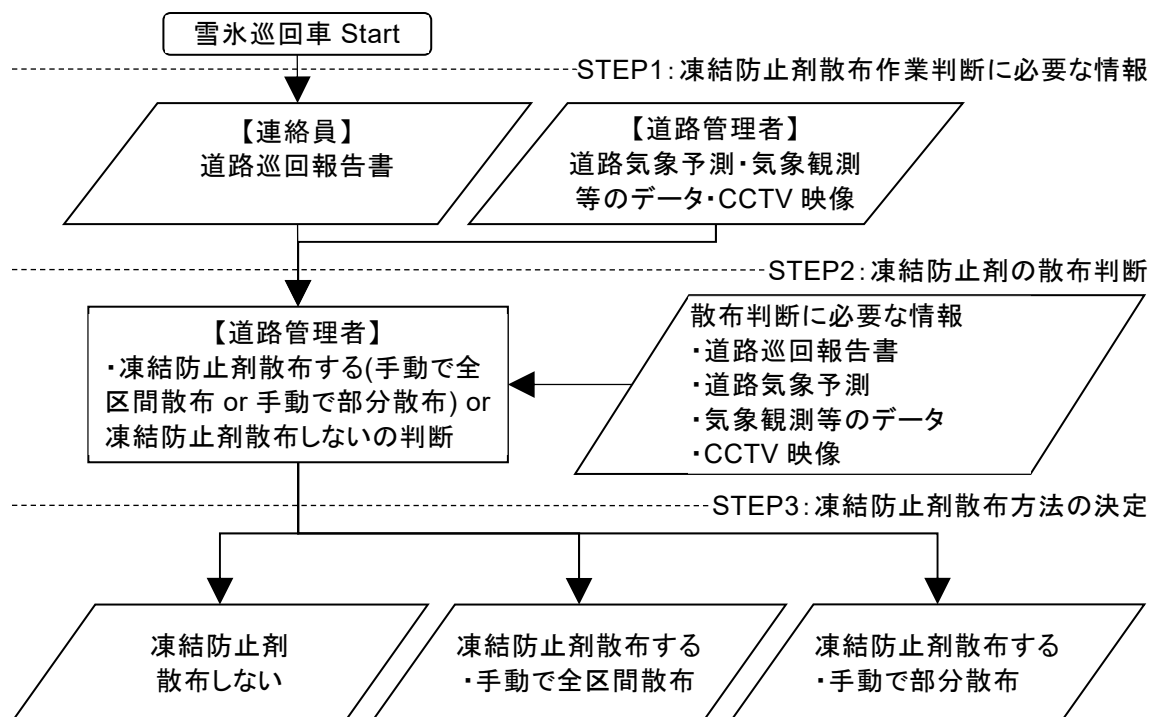


図 2.5 既存の散布判断プロセス

2.3.1 路面状態の定義

NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路における路面状態の定義を以下にまとめ、図 2.6 に示す。

乾燥：路面に雪氷が無く，路面の濡れが無い状況

半湿：路面の濡れがあり，タイヤからの水はねが見える状況

湿潤：路面に水膜がある状況

シャーベット：タイヤのトレッド跡が有り，雪が水分を多量に含んでいる状況

積雪：路面に雪が積もっており，踏み固められていない状態でその雪が水分を多量に含んでいない状況

圧雪：路面に雪があり，踏み固められた状態で黒光りが無くタイヤのトレッド跡があまり付かない状況

凍結：路面に雪氷があり，黒光りしている状況

連絡員は，これらの定義に従い走行している車両から路面を目視で判別している。



図 2.6 NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路における路面状態の定義

2.3.2 路面状態に応じた散布条件

NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路において、2.3.1 項の路面状態に応じて凍結防止剤の散布が判断される。路面状態に応じた散布条件は、図 2.7 に示すように半湿、湿潤、シャーベット、圧雪、凍結のとき、凍結防止や融氷を目的に凍結防止剤を散布する。一方、乾燥および積雪のとき、凍結防止剤を散布しても効果が小さいため散布しない。半湿・湿潤は、その後の気象状況が低温になると予想されているときに散布する。シャーベットは、路面の雪の厚みが厚いときは除雪作業を行い、路面の雪の厚みが薄いときは凍結防止剤を散布する。降雪量がある程度に達すると、新雪除雪作業や圧雪処理を行っても路面上に踏み固められた圧雪の発生は避けられない。したがって、ここでいう圧雪とは、新雪除雪作業や圧雪処理等を行っても、路面に残る雪の厚みが薄い状態を示している。なお、圧雪と凍結の区分は、路面が黒光りしているか否かによる判断の差である。圧雪と凍結のときは、どちらも凍結防止剤散布条件となる。このため、ISCOS とスマート凍結防止剤散布システムでは、圧雪と凍結を圧雪・凍結とした。

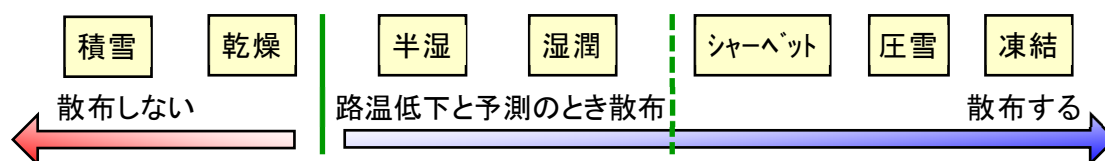


図 2.7 路面状態に応じた散布条件

凍結防止剤の散布は、その後の気象状況（気温や降雪の有無等）や除雪作業等を考慮し、総合的に判断している。特に、凍結防止剤の散布判断方法は、路面状態のほかに、路面温度と路面の残留塩分濃度が関係する。そこで、図 2.8 に路面温度と路面の残留塩分濃度を考慮した凍結防止剤の散布判断方法を示す。凍結・圧雪・シャーベットのときは、路面温度や路面の残留塩分濃度に関係なく散布する。降雪量がある程度に達すると、新雪除雪作業を行っても路面上に踏み固められた圧雪の発生は避けられない。高速道路では、路面上に踏み固められた圧雪を除去するため、圧雪を除雪する作業が行われる。したがって、ここでいう圧雪とは、路面の雪の厚みが薄い状態を示している。シャーベットは、路面の雪の厚みが厚いときは除雪作業を行い、路面の雪の厚みが薄いときは凍結防止剤を散布する。なお、路面状態が圧雪、シャーベットのとき、除雪作業と同時に凍結防止剤を散布する場合がある。半湿・湿潤は、その後の気象状況が低温になると予想されているときで、かつ、路面の残留塩分濃度と路温の関係から凝固点以下になるとき、もしくは、なると予測されたときに散布する。路面状態が乾燥・積雪のときやそれ以外は散布しない。

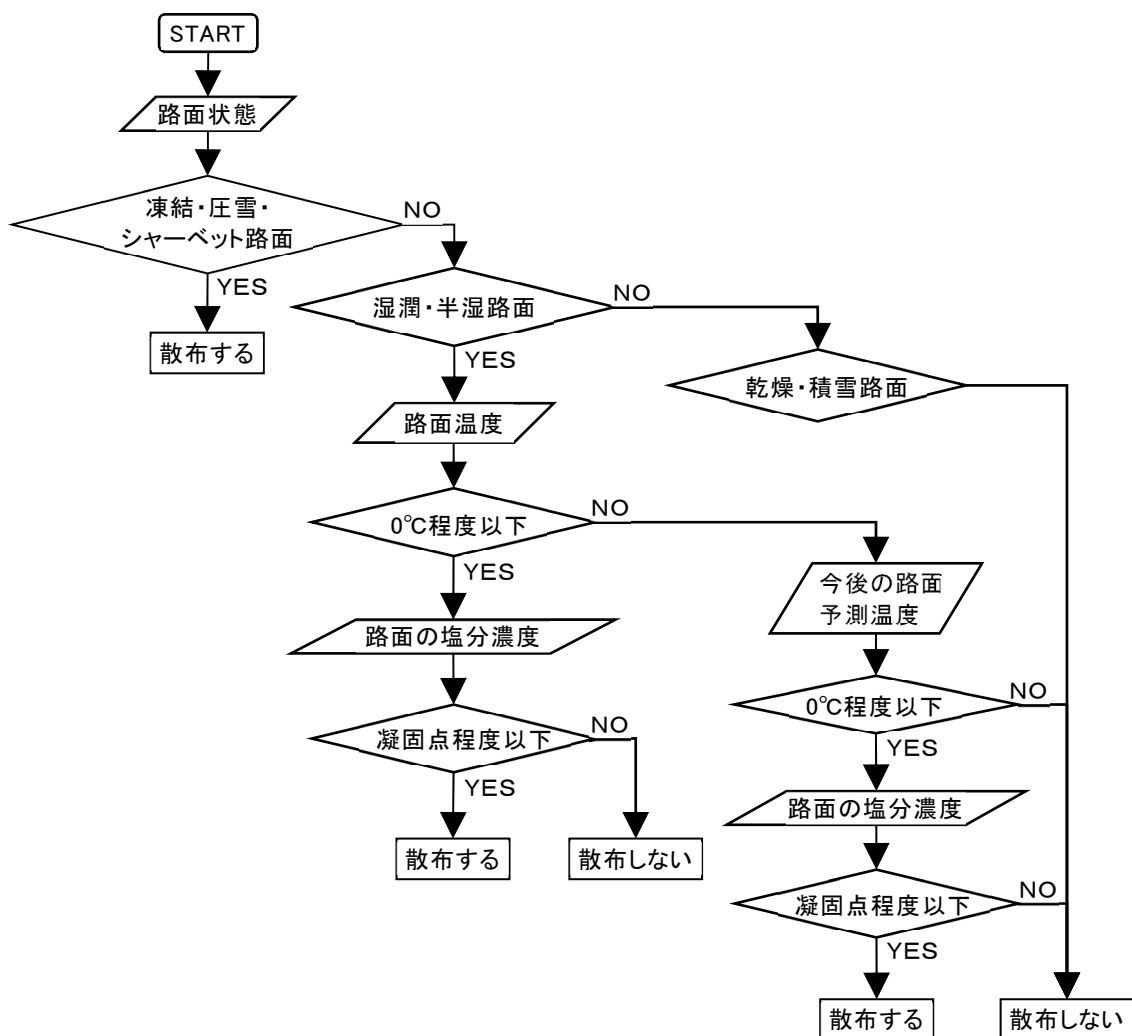


図 2.8 凍結防止剤の散布判断方法

2.3.3 凍結防止剤散布量

NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路では、通常、凍結防止剤の散布方法として湿塩散布（ウェットソルト）で実施している。湿塩散布は、散布直前に固形剤と溶剤を混合して散布する方法である。固形剤は、凍結を抑制する速効性は小さいが持続性がある。一方、溶剤は、凍結を抑制する持続性は小さいが速効性があり、凍結防止剤が飛散しない効果が期待できる。湿塩散布は、混ぜ合わせて散布することにより、路面への付着効果が高く速効性・持続性があり、固形剤が飛散しない効果を期待したものである。¹⁾ 凍結防止の散布量は、固形剤 $14\text{g}/\text{m}^2$ と溶剤 $6\text{g}/\text{m}^2$ を混合した $20\text{g}/\text{m}^2$ である。溶剤の濃度は 20%なので、固形剤換算すると $1.2\text{g}/\text{m}^2$ であり、湿塩散布のときの散布量は $15.2\text{g}/\text{m}^2$ となる。固形剤散布のみのときの散布量は $15\text{g}/\text{m}^2$ である。散布幅は、4 車線区間のとき 6.0~7.0m で、暫定 2 車線区間のとき 3.0~3.5m である。一方、地域指令台別のハザードマップに基づいて 100m 区間毎

の凍結防止剤散布量を増やす場合がある。例えば、橋梁区間は橋下から冷やされる等の理由により凍結路面になりやすい。トンネル坑口は寒暖差の影響で融雪量が多くなり凍結防止剤の残留塩分濃度が低下する。IC の加減速車線の手前やカーブ区間等も潜在的リスクがある。このような区間や実際に事故の多い区間等へは、凍結防止剤の散布を $30\text{g}/\text{m}^2$ に増量する。凍結防止剤散布車の作業員は、凍結防止剤散布作業で増量となったとき、このような区間において手動で凍結防止剤散布量を変えてオペレートする。

2.4 作業実施のための準備（凍結防止剤の積み込み）

凍結防止剤散布車への凍結防止剤の積み込みは、図 2.9 に示すように 2 階建ての凍結防止剤倉庫の 1 階に凍結防止剤散布車を配置して行われる。凍結防止剤散布車タンクでの凍結防止剤の固結を防ぐため、積み込んだ凍結防止剤は全量散布する。0.5t あるいは 1t のフレコンパック（凍結防止剤が入った袋）を 2 階の投入口（グレーチング）まで移動し、1 階の凍結防止剤散布車に積み込む。

凍結防止剤散布車への凍結防止剤の積み込みは、0.5t が最小単位である。このため、必要となった凍結防止剤散布量を 0.5t 単位で切り上げて積み込んでいる。八雲 IC から長万部 IC までの部分散布としたときの区間別の凍結防止剤の積み込み量および全区間散布としたときの凍結防止剤の積み込み量を表 2.2 に示す。部分散布としたとき、全区間散布としたとき、いずれも凍結防止剤の積み込み量は必要な散布量より多くなる。例えば、1 区間目の部分散布量が 63kg に対して、積み込み量は 500kg なる。同様に凍結防止剤散布車が担当する全区間（1 区間目・2 区間目・3 区間目・4 区間目・5 区間目）散布のときも、散布量 1,012kg に対して積み込み量が 1,500kg なる。

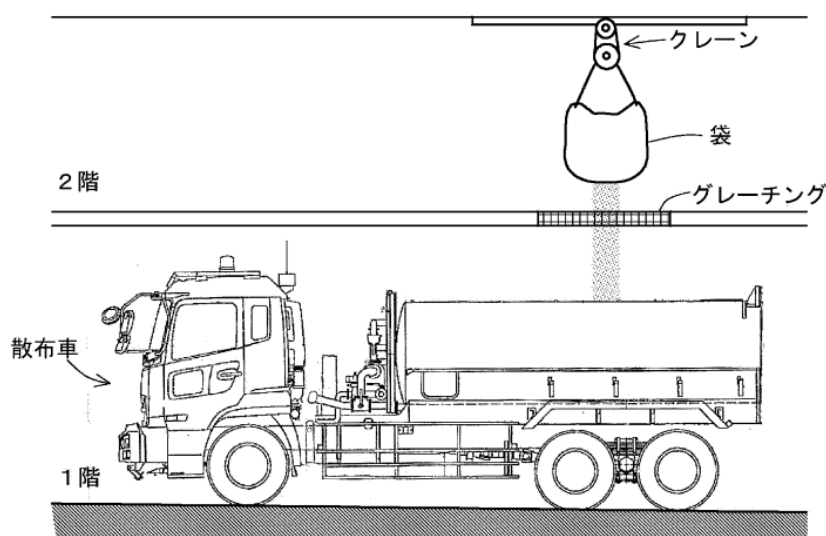


図 2.9 凍結防止剤散布車への凍結防止剤の積み込み方法

表 2.2 区間別の凍結防止剤散布量および積込み量（下り車線）

区間	八雲IC	225.0KP	221.0KP	219.0KP	210.0KP	国縫IC	201.4KP	197.7KP	長万部IC
KP	S226.5	S225.0	S221.0	S219.0	S210.0	S204.8	S201.4	S197.7	S193.7
路面状態判別区間	1区間目	2区間目	3区間目	4区間目	5区間目	6区間目	7区間目	8区間目	
距離	1.5 km	4.0 km	2.0 km	9.0 km	5.2 km	3.4 km	3.7 km	4.0 km	
走行車線の路面状態	湿潤 半湿	湿潤 半湿	湿潤 半湿	湿潤 半湿	湿潤 乾燥	湿潤 乾燥	湿潤 乾燥	湿潤	
付加車線の路面状態	—	—	半湿	—	—	—	半湿	—	
路面塩分濃度	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	5%	
部分散布としたときの 区間別の散布量	63 kg	185 kg	109 kg	391 kg	256 kg	218 kg	248 kg	168 kg	
全区間散布としたときの 散布量	1,012 kg					542 kg			
部分散布としたときの 区間別の積込み量	500 kg	500 kg	500 kg	500 kg	500 kg	500 kg	500 kg	500 kg	
全区間散布としたときの 凍結防止剤の積込み量	1,500 kg					1,000 kg			

2.5 作業の実施（約 5km 区間毎に凍結防止剤散布）

表 2.2 に、連絡員から報告された路面状態判別結果と路面の残留塩分濃度の例を示す。また、既存の凍結防止剤散布方法による部分散布としたときの区間別の凍結防止剤散布量と全区間散布としたときの凍結防止剤散布量を示す。表 2.2 に示すように、八雲 IC から長万部 IC における目視による路面状態判別は、IC や付加車線（追越車線）、U ターン路（雪氷車両が上下線を行き来するための通り道）などを区切りとした 8 区間別（上下線の場合は 16 区間）に行っている。既存の凍結防止剤散布方法は、図 2.10 に示すように、短い区間で 1.5km、長い区間で 9.0km である。既存の凍結防止剤散布方法は 16 箇所である。

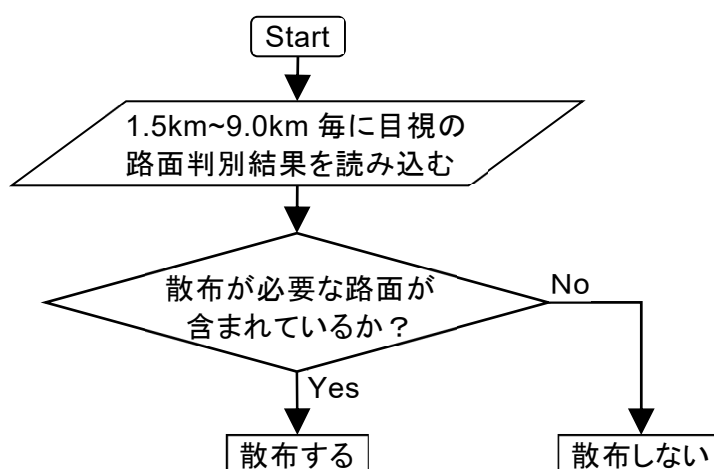


図 2.10 既存の凍結防止剤散布

2.6 まとめ

NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路における冬期路面管理の現状を把握し、既存の凍結防止剤散布方法について整理した。凍結防止剤散布量を最適化するためには、路面状況の把握・判断が重要である。現在の凍結防止剤の散布は、路面状態を目視により評価し、その結果に基づいて実施されている。目視による評価は、点検者の認識・判断力や熟練度、点検時の視認領域に依存するため定性的であり、時として安全側の評価となる場合がある。目視での路面状態を把握する間隔は、約 5km 毎に行っている。目視では、細かいピッチでの把握は困難である。この約 5km の中に乾燥などの散布が不要な路面が含まれていても凍結防止剤を散布している。

また、凍結防止剤散布車への凍結防止剤の積込みは、0.5t が最小単位となる。このため、必要となった凍結防止剤散布量を 0.5t 単位で切り上げて積込むため、凍結防止剤の積込量は必要な散布量より多くなる。多めに積み込んだ凍結防止剤は余分に散布している。

つまり、既存の凍結防止剤散布方法には、安全と関係の無いところで無駄があり、改善・改良の余地があり、冬期における凍結防止剤の効果を維持しつつ、散布前の路面状態を的確かつ細かい区間別に把握する先進システムの開発が必要である。

第 2 章参考文献

1. 財団法人高速道路技術センター：写真でみる雪氷管理，東京，財団法人高速道路技術センター，65pp, 2005.

第3章 自動路面状態判別システム（CAIS）の研究開発

3.1 自動路面状態判別システム（雪氷巡回車）

これまで、冬期における路面状態の把握は、2.2.4 項に示したように定期的に出動する雪氷巡回車に乗車した連絡員の目視観測によって判別する主観的な観測が行われてきた。この手法は、天候や時間帯等による路面の視認性の問題、判別の難しい路面が存在した場合に連絡員の経験による影響を受けやすいなどの個人差から、定量的な判定が難しいとの課題があり、客観的な自動計測装置が望まれていた¹⁾。

また、1.7 節に示す冬期における路面状態の客観的な自動計測装置は、各々のシステムの課題からいずれの自動測定装置も NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路の路面状態判別には適さないと言えた。

そこで、上述した課題を解決するための手段として、凍結防止剤散布作業のプロセスを自動化することで作業を効率化し、これら課題を解決することができると仮説を立てた。まず初めに、路面状態をきめ細かく把握する必要があると考え、自動路面状態判別システム（以降、CAIS）の実用化の開発を行った。

著者らはこれまで、花塚ら²⁾が開発したタイヤ内面の加速度センサにより路面状態を判別するシステムを応用し、高速道路の冬期路面における CAIS を開発してきた^{3),4)}。本研究では、CAIS の原理、システム構成を詳細に示し、実用化へ向けて開発した機能を示す。

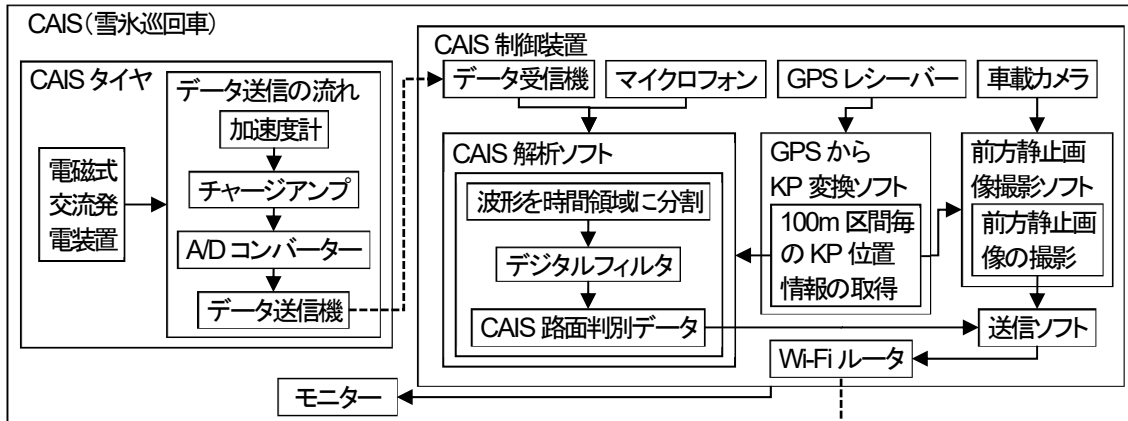
3.2 当初導入した自動路面状態判別システム（CAIS）

図 3.1 に自動路面状態判別システム（CAIS）のシステム構成を示す。このシステム構成図の中心はデータセンターと呼ばれ、WEB サーバに、車載カメラからの前方静止画像（以降、道路画像）などから作成する画像データベース、CAIS 路面判別データなどから作成する路面データベースなどを管理する機能が組み込まれている。なお、CAIS 路面判別データとは、CAIS が路面状態を判別した結果である。また、システム構成図の中に CAIS 路面判別データおよび道路画像を閲覧する地域指令台の道路管理者（以降、道路管理者）が含まれている。

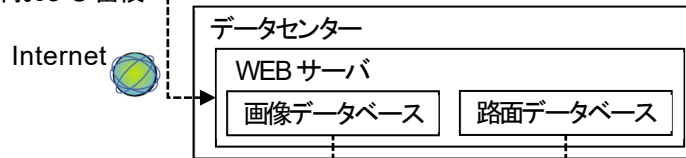
CAIS 路面判別データおよび道路画像の確認は、STEP1：CAIS 路面判別および送信・STEP2：データの取得および蓄積・STEP3：路面等のデータの確認の 3 つの STEP で行われる。図 3.1 に示すように、

GPS から KP（高速道路のキロポスト）変換ソフトが GPS の緯度・経度から高速道路の 100m 区間毎の KP を KP 標の設置位置で検出する。このタイミングに合わせて CAIS 路面判別データの出力・道路画像の撮影が行われる。CAIS 路面判別データ・道路画像は、送信ソフトから Wi-Fi ルータを介してデータセンターへ 100m 区間毎に送信される。道路管理者は、専用のビューアソフトを使用して路面等のデータや道路画像を確認する。なお、図 3.1 の実線は有線接続、点線は無線接続（Internet 含む）を示している。

STEP1:CAIS 路面判別および送信



STEP2:データ取得および蓄積



STEP3:路面等のデータの確認

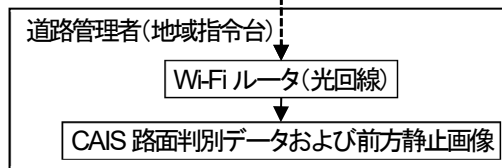


図 3.1 CAIS のシステム構成図

3.2.1 路面状態判別の方法

タイヤ接地時のタイヤ振動波形をセンシングする図 3.2 に示す加速度計は 1 軸電荷出力タイプで、タイヤの内面のセンター部の 1 箇所に装着される。チャージアンプで増幅された加速度信号は、A/D コンバーターによりデジタルデータに変換され、データ送信機によってホイールハウス内のデータ受信機へ連続的に送信し車内の CAIS 解析ソフトに送られる。タイヤの内面での計測およびデータ送信に必要な電力はタイヤの内面に貼付けられている電磁式交流発電装置で発電される。CAIS は、タイヤ（加速度センサ）が路面に接地（タイヤの踏込み～タイヤの蹴り出し）しているときの加速度振動波形（図 3.3）をセンシングし、その加速度振動波形の特徴から凍結防止剤散布の判断に必要な 6 つの路面状態（乾燥、半湿、湿潤、シャーベット、圧雪・凍結、積雪）を判別する。これらの路面状態は、2.3.1 項に示した連絡員による路面状態の判別に合わせたものとなっている。

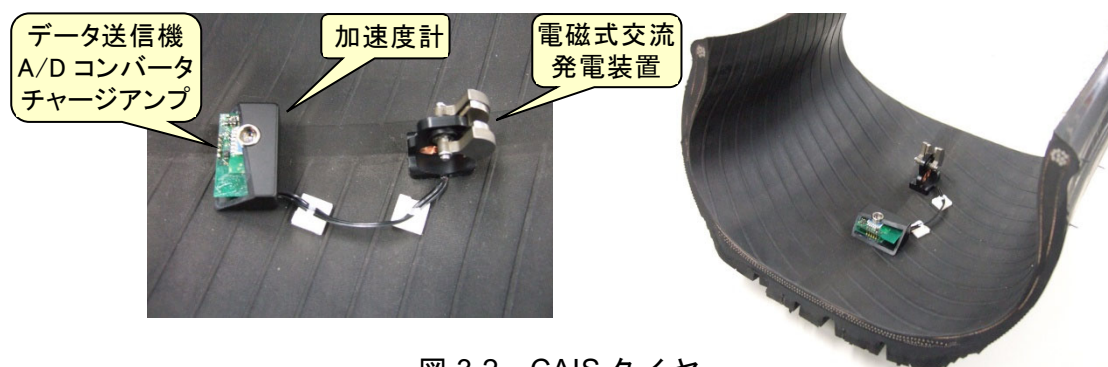


図 3.2 CAIS タイヤ

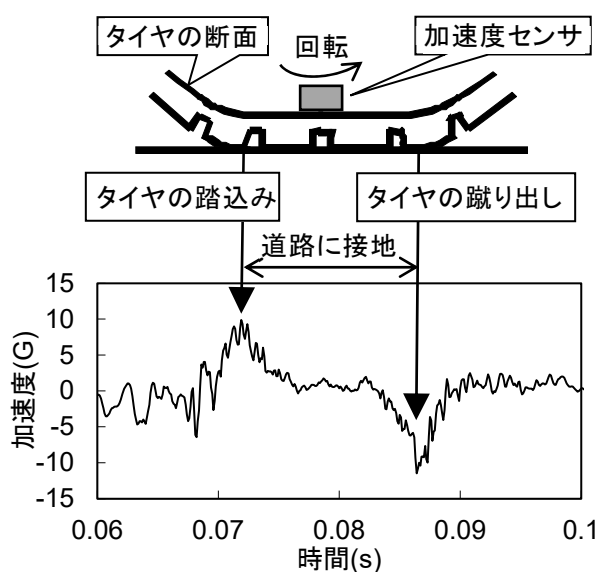
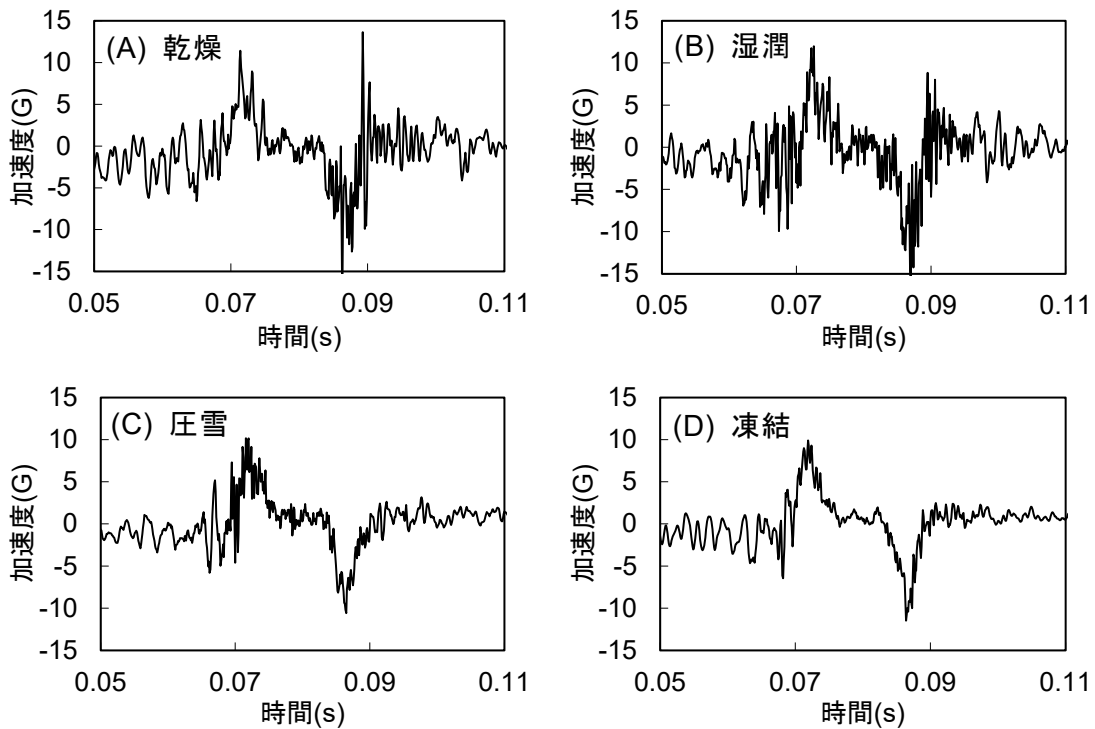


図 3.3 タイヤ接地面の加速度波形

3.2.2 タイヤ加速度波形の特徴

タイヤ周上の任意の一点に着目すると、任意の一点は、タイヤの回転によって路面を踏込み、その後、接地した状態が約十数 cm 続き、路面を蹴り出すという一連の接地状態を繰り返す。周方向の加速度を検知すると、タイヤ加速度波形は、踏込み位置と蹴り出し位置にピークを持つ非定常性の強い波形を示す。この接地状態におけるタイヤ加速度波形の特徴は、路面状態によって変化する。このタイヤ加速度波形が路面状態によって変化することを示す例を図 3.4 に示す。湿潤路面走行時は、乾燥路面走行時と比較し、タイヤが路面と接地する前に水膜と衝突するため大きな振動が発生する。また、圧雪や凍結などの滑りやすい路面では、乾燥路面走行時と比較し、路面蹴り出し後の振動レベルが低下する。路面とタイヤ間の摩擦係数が低く両者間の拘束力が低いことから、路面蹴り出し時における剪断力開放によるドレッドゴムの固有振動が低下していると考えられる。



Note: 1.0G \doteq 9.81 m/sec²

図 3.4 加速度波形

3.2.3 CAIS 路面判別アルゴリズム

図 3.5 に CAIS 路面判別の方法を示す。振動の特徴を定量化するため、まず時系列波形を窓掛けして加速度波形を分割する。次にフィルタリングすることで特定時間位置かつ特定周波数帯の波形を抽出する。その波形の振動レベルを算出し特徴量として 2 値判別器へ入力する。なお、2 値判別器とは、2 つのグループのどちらに属するかを判別するものである。以下に CAIS 路面判別アルゴリズムを説明する。

(1) CAIS 加速度波形を時間領域に分割

30km/h で走行時の CAIS 加速度波形を代表例として、特徴量の算出方法について説明する。CAIS 加速度波形は、図 3.6(A)に示すように蹴出し位置を基準として 5 つの時間領域、①踏込み前：-0.03s~-0.02s、②踏込み：-0.02s~-0.01s、③接地面：-0.01s~-0.006s、④蹴出し：-0.006s~0.005s、⑤蹴出後：0.005s~0.015s に分割する。

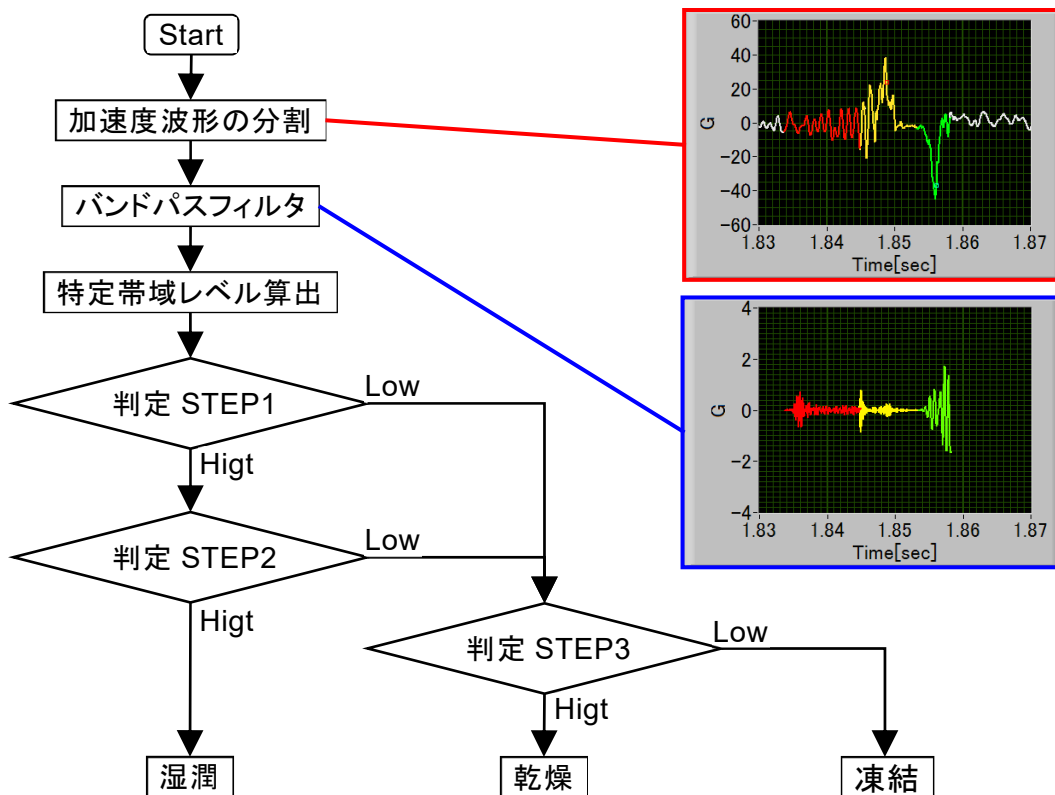


図 3.5 CAIS 路面判別の方法

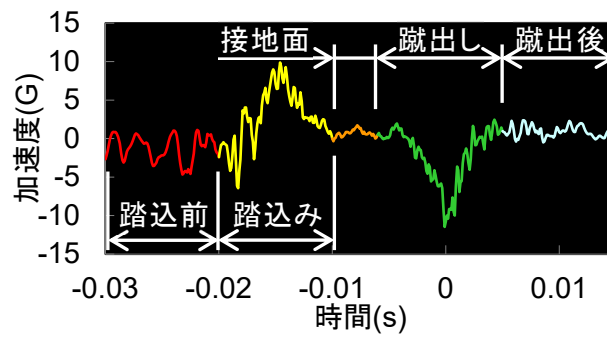
(2) バンドパスフィルタ

各時間領域内で窓関数にハミング窓を用いたデジタルフィルタにより，バンドパスフィルタ処理を行う．ここで，使用する時間領域と周波数領域は比較対象で異なる．例えば，乾燥と湿潤の比較の場合，図 3.6(B)，図 3.6(C)に示すように，時間領域は踏込前の CAIS 加速度波形を使用し，2000Hz 以下および 8000Hz 以上の周波数帯を遮断し，それ以外を透過させる．また，乾燥と凍結の比較の場合，図 3.6(C)，図 3.6(D)に示すように，時間領域は蹴出しの CAIS 加速度波形を使用し，500Hz 以下および 4500Hz 以上の周波数帯を遮断し，それ以外を透過させる．

(3) 特定帯域レベル算出

使用した時間領域内で，バンドパスフィルタを透過したそれぞれの波形の時系列のパワー値の平均値を特徴量とする．つまり t 番目のウィンドウにおける特徴量： x は式 (2) によって求めることができる． G はフィルタ透過後の波形の時系列， s はフィルタ特性のインデックスの集合， N は窓に含まれるデータ数， i はデータポイントのインデックスである．

$$x_{ts} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10 \log (G_{tis}^2) \quad (2)$$



(A) CAIS 加速度波形のウィンドウ位置例

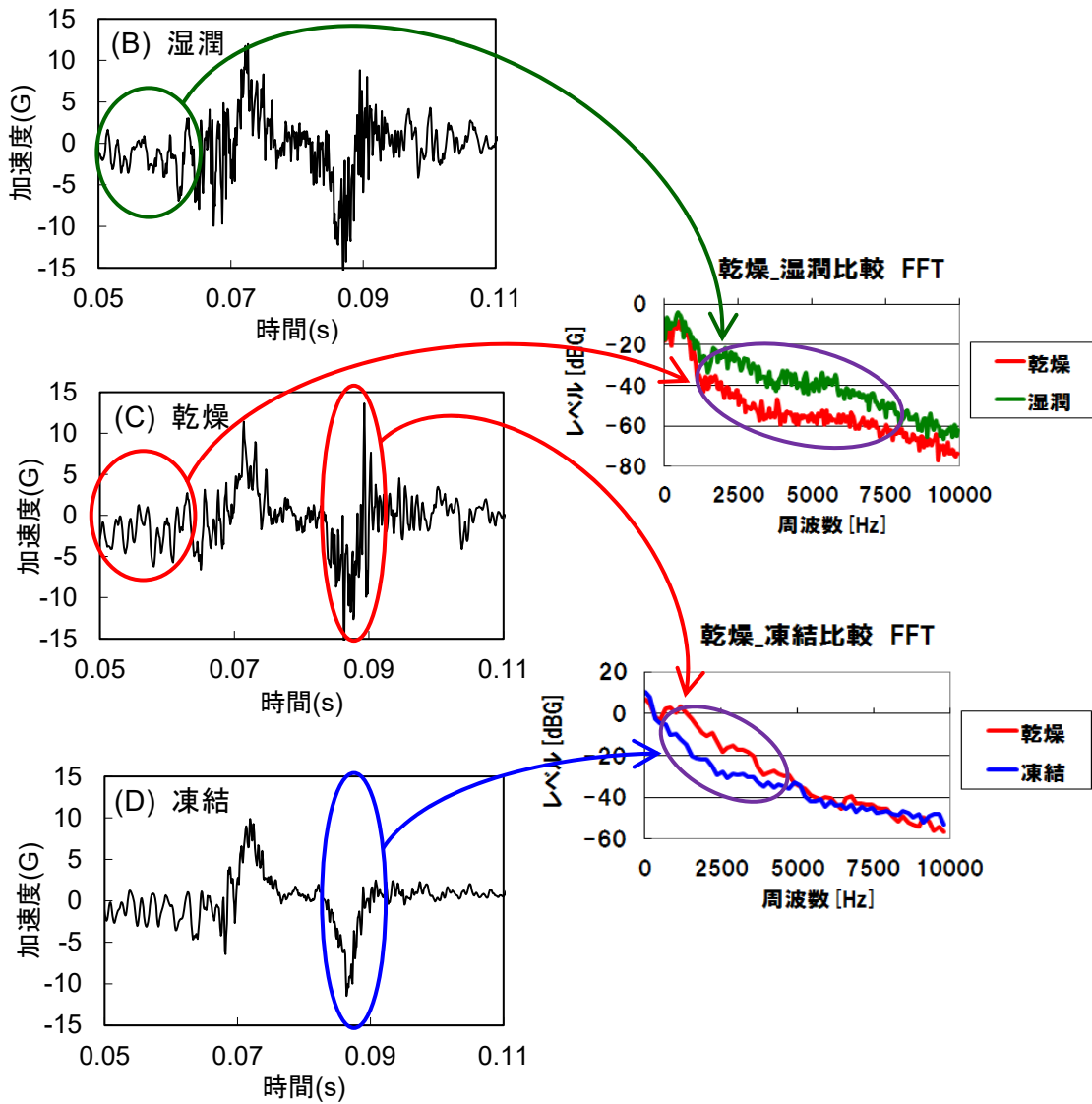


図 3.6 CAIS 加速度波形の分割

(4) 判定 STEP (乾燥と凍結の比較の場合)

判定 STEP は, 乾燥と凍結の比較の場合 (図 3.5 判定 STEP3 に相当), 図 3.6(C), 図 3.6(D)に示すように, 時間領域は蹴出しの CAIS 加速度波形を使用し, 500Hz 以下および 4500Hz 以上の周波数帯を遮断し, それ以外を透過させ, 透過したそれぞれの波形の時系列のパワー値の平均値を式 (2) で求め特徴量とする. 求めた特徴量は, 図 3.7 に示す 2 値判別器から Low か High かを求める. Low のとき凍結となり, High のとき乾燥となる. 6 つの路面状態の判別は, 各振動レベルを特徴量として算出した 2 値判別器を複数組み合わせる路面状態を判別している (図 3.8). 雪氷巡回車に搭載された CAIS は, 高速道路本線を走行すると自動で 100m 区間 (高速道路の KP) 毎に路面状態を判別する. タイヤの直径が約 0.6m であることから 100m 区間で 50 回前後タイヤが路面に接地し, 路面状態の判別が行われる. 乾燥, 湿潤, シャーベット, 積雪は, 約 50 回の判別結果から最頻値となった路面状態を 100m 区間の路面状態とする.

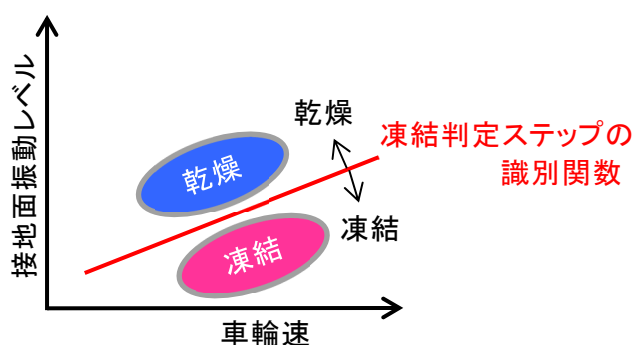


図 3.7 判定 STEP3 の 2 値判別器

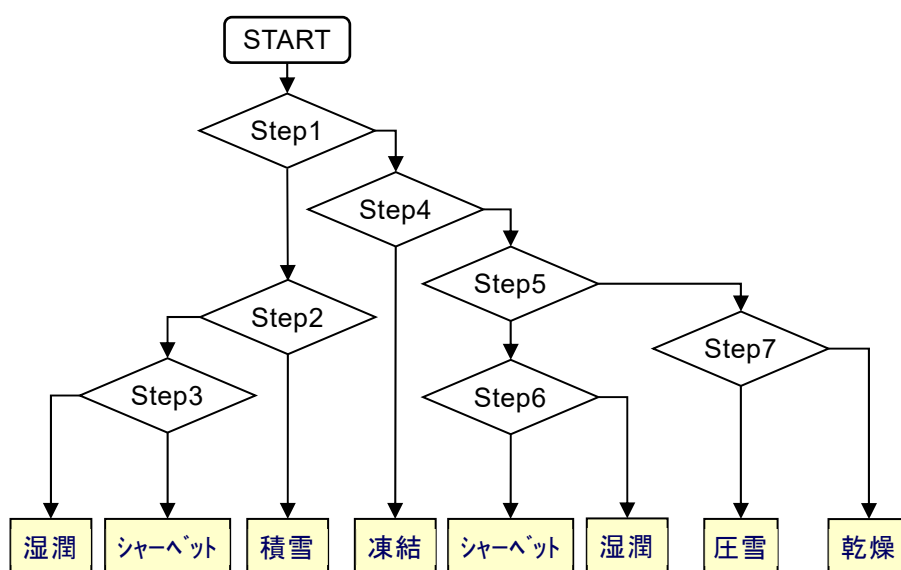


図 3.8 CAIS 路面判別アルゴリズム (判別フロー)

3.2.4 CAIS 導入時（2008 年度）の路面状態毎の正答率

CAIS 路面判別結果の精度検証を目的に 2008 年度に精度検証試験を実施した。検証期間は 2008 年 12 月から 2009 年 3 月である。検証場所は士別市近郊の 100km 程度の 2 つのコースを設定し、週に 3～5 日走行した。検証者は正確性を期すため、士別市内の自動車運送事業者へ外部委託した。検証方法は実験車両の助手席に目視判定員が同乗し正誤状況等を記録した。正誤判定方法は当てれば○、間違っていれば×、ほぼ半数ずつだと△の 3 段階とした。正答率の算出方法は正答を 1、正誤が半数だと 0.5 とカウントして判定総数で除した。図 3.9 に 2008 年度 CAIS 導入時の路面状態毎の正答率を示す。乾燥、湿潤、積雪、凍結の精度は 70%～90%と概ね良好であった。しかし、シャーベット、圧雪の精度が低く、この路面判別精度が課題である。全体の正答率は 74%であった。

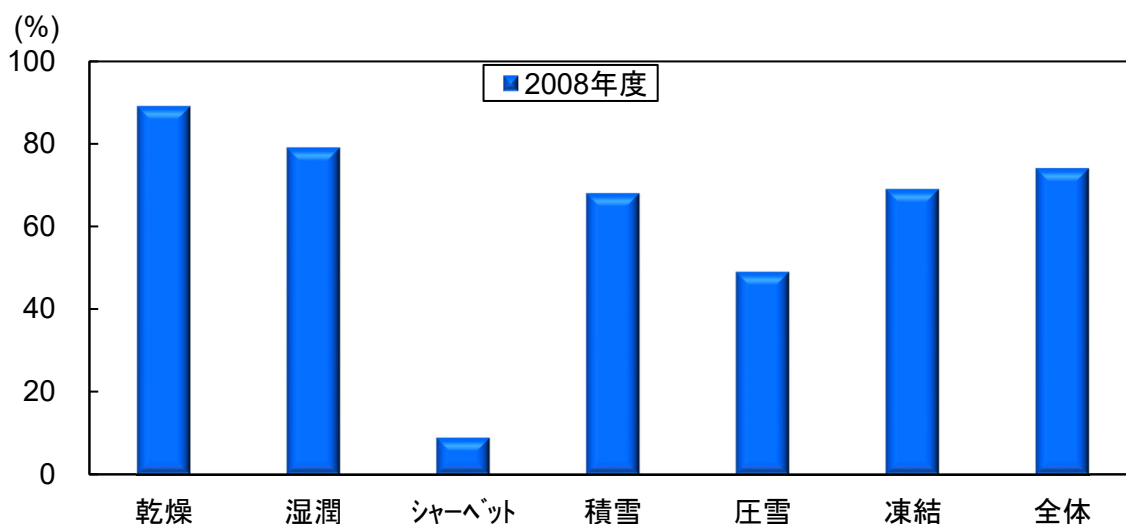


図 3.9 2008 年度 CAIS 導入時の路面状態毎の正答率

3.3 CAIS 路面判別精度向上へ向けた改良

3.3.1 改良した CAIS の路面判別アルゴリズム

(1) 2 値判別器の改良

目視と同様の判定を行うためには、半湿判定が必要である。このため、CAIS の路面状態の判別には、タイヤ接地時の振動波形の他に、タイヤが回転するときが発生する音を使用した。タイヤ回転時の音をタイヤハウス内のマイクロフォンで計測し、振動波形に特徴が現れないような薄く濡れている程度の半湿および湿潤の検出に用いる。半湿および湿潤では、タイヤ回転時の音が 1kHz 以上の高周波となる特徴がある。図 3.10 の Step4,8 がマイクロフォンによる判定であり、それ以外は 2 値判別器による判定である。マイクロフォンは、前輪のタイヤが踏込んだ際の音も検知できるようにするため、後輪のタイヤハウス内に設置している。

一方、凍結防止剤を散布すべき区間を散布しない区間と判別することを防ぐため、圧雪・凍結と半湿の判別は、最頻値を用いていない。圧雪・凍結では、実験に基づく経験則から 50 回の路面状態判別結果の中で 15 回以上（走行距離が約 30m 以上）圧雪・凍結となったとき、その 100m 区間の路面状態を CAIS は圧雪・凍結と判別している。このような例外処理を設けた理由は、圧雪・凍結を走行するのはすべり易く危険なため、圧雪・凍結との判定の割合を高める必要があると判断したためである。圧雪・凍結の判定結果は、最も優先されるようになっている。また、半湿は連続して出現することはほとんどなく、乾燥あるいは湿潤との混在となる。湿潤が最頻値のとき路面状態を湿潤と判別するが、50 回の路面状態判別結果で乾燥が最頻値となり、かつその中に半湿が 3 回以上（走行距離が約 6m 以上）となったとき路面状態を半湿と判別する。このような例外処理を設けた理由は、特に初終冬期に半湿は局所的に出現するケースが多い。少しでも温度低下とともに凍結となる可能性を減らし、安全側となる路面管理を実現するためである。なお、半湿判定は、後輪のタイヤハウス内に設置したマイクロフォンで検出しており、前輪と後輪のタイヤが踏込んだ際の音を検知したときは、走行距離が 6m 以下でも検出できる。

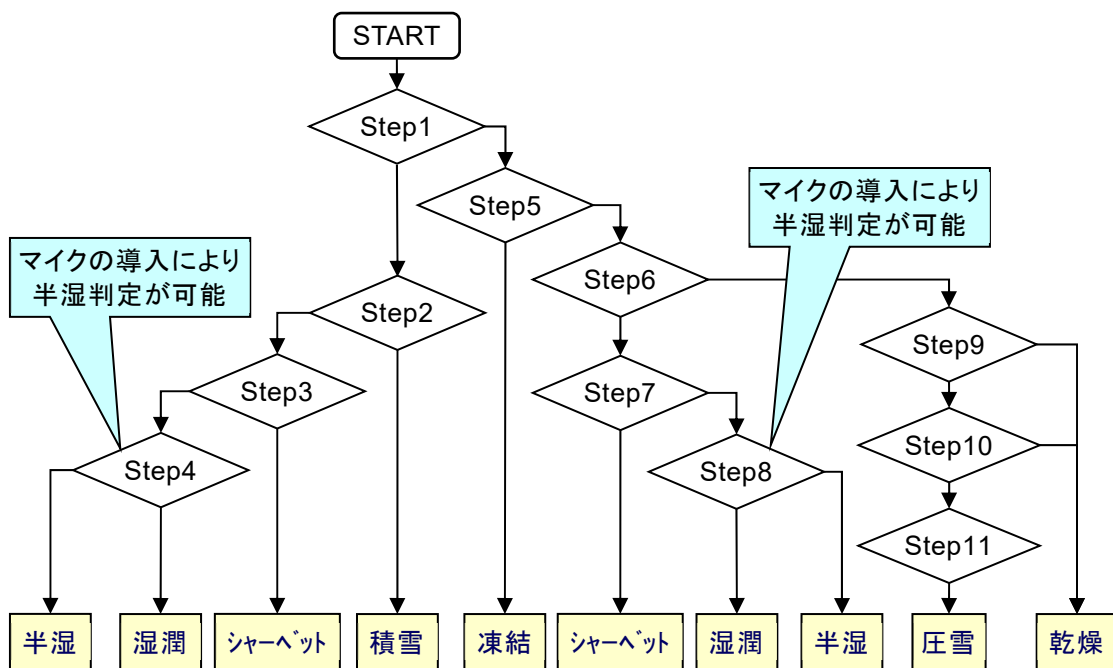


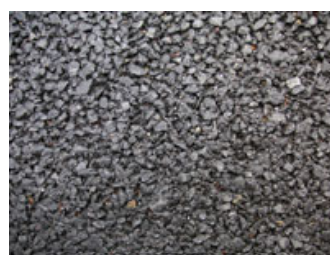
図 3.10 路面判別アルゴリズム (判別フロー)

(2) 乾燥判別精度向上へ向けた改良 (排水性舗装考慮)

2008 年度の CAIS 路面判定アルゴリズムでは、乾燥は密粒舗装 (図 3.11 (A)) で定義していた。このため、高速道路本線で主に使用されている排水性舗装 (図 3.11 (B)) 舗設箇所を走行時に圧雪と判定する誤判定が発生していた。そこで、乾燥判別精度向上へ向けた改良として、図 3.10 に Step10 を新設し、排水性舗装の乾燥と圧雪の 2 値判別器を定義した。



(A) 密粒舗装



(B) 排水性舗装

図 3.11 乾燥判別精度向上へ向けた改良 (排水性舗装考慮)

(3) 圧雪判別精度向上へ向けた改良（粉雪考慮）

圧雪は、路面の雪氷が厚い圧雪と浅い圧雪など多様である。2008年度の路面判定アルゴリズムでは、これを考慮できていなかった。2008年度の路面判定アルゴリズムの圧雪と乾燥の2値判別器の誤判定の状況を詳細に分析すると、粉雪がのっているような圧雪で精度が低いことがわかった。

図 3.12 (A) に通常の圧雪路面を走行した時の波形と図 3.12 (B) に粉雪がのっている路面を走行した時の波形を比較した。すると、粉雪路面の踏込みで雪粒の摩擦によって生じていると思われる振動が増大していることがわかった。従来、踏込みの CAIS 振動加速度が増大したときは乾燥路面と判別していた。そこで、図 3.12 (C) に示すように、粉雪路面の踏込みの CAIS 振動加速度は乾燥よりも大きいため、これを粉雪の特徴として粉雪を判定するステップを図 3.10 の Step11 に新設した。なお、図 3.12 (C) は、実際の判別にはこれ以外の振動レベルも用いているため、多次元空間になるが、可視化するために2次元で表している。

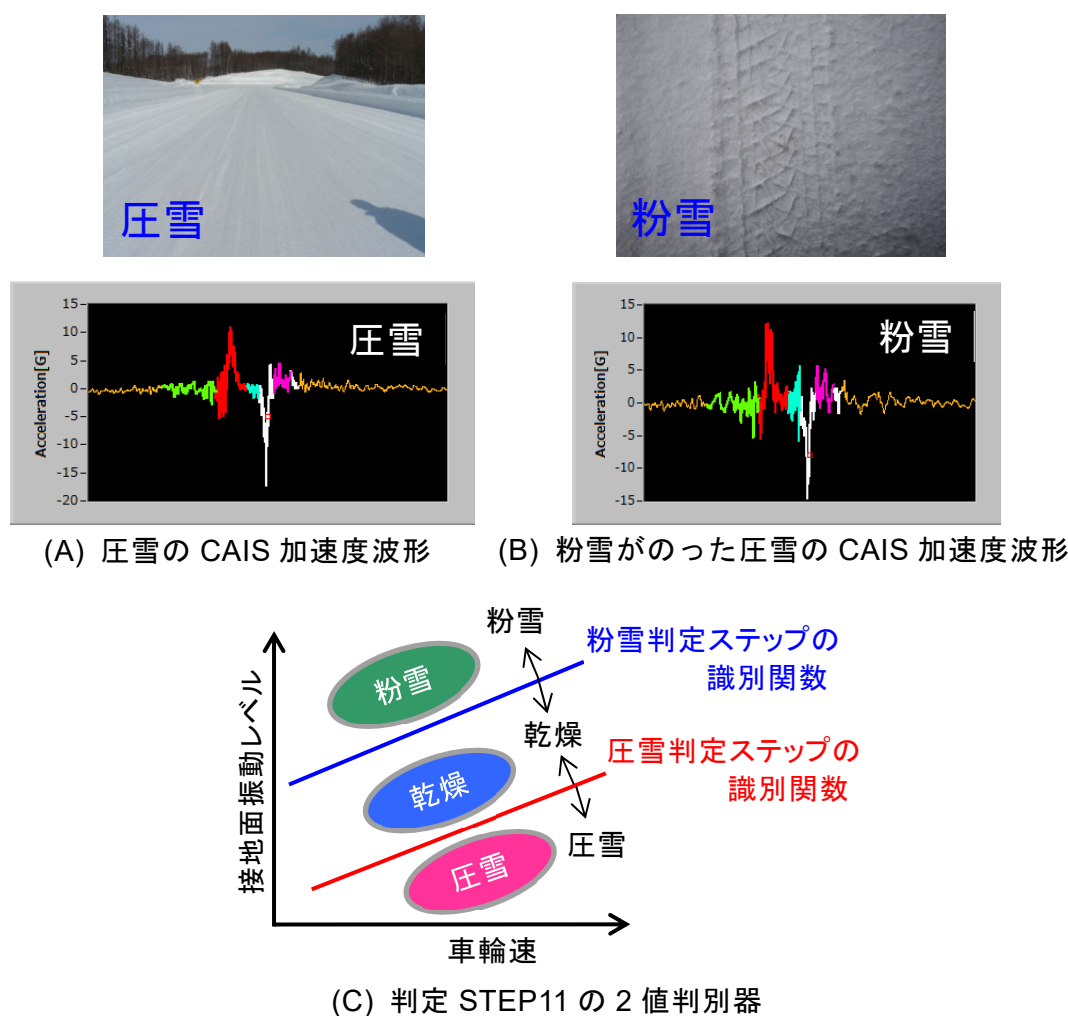


図 3.12 圧雪判別精度向上へ向けた改良（粉雪考慮）

(4) シャーベット判別精度向上へ向けた改良

これまで、シャーベットと湿潤の判別は踏込みの振動波形の特徴を用いていた(図 3.13 (A)). 図 3.13 (B) は、踏込みでの湿潤とシャーベットのそれぞれの FFT 波形である. 6500~9500Hz の周波数帯で特徴差が見られる. しかし、図 3.13 (C) に示すように浅いシャーベットを追加したデータで比較してみると、湿潤と区別がつかない. 路面踏込みは水膜や雪との衝突で特徴的な波形が生じる半面、水深や積雪深の影響が大きく、そのデメリットが大きいことがわかった. そこで蹴出しの CAIS 振動加速度に着目した. 図 3.13 (D) は、蹴出しの FFT 波形である. 6500~10000Hz の周波数帯で浅い深い含めてシャーベットと湿潤の特徴差が有ることがわかる. このことから図 3.10 の Step3 と Step7 のアルゴリズムを改良した.

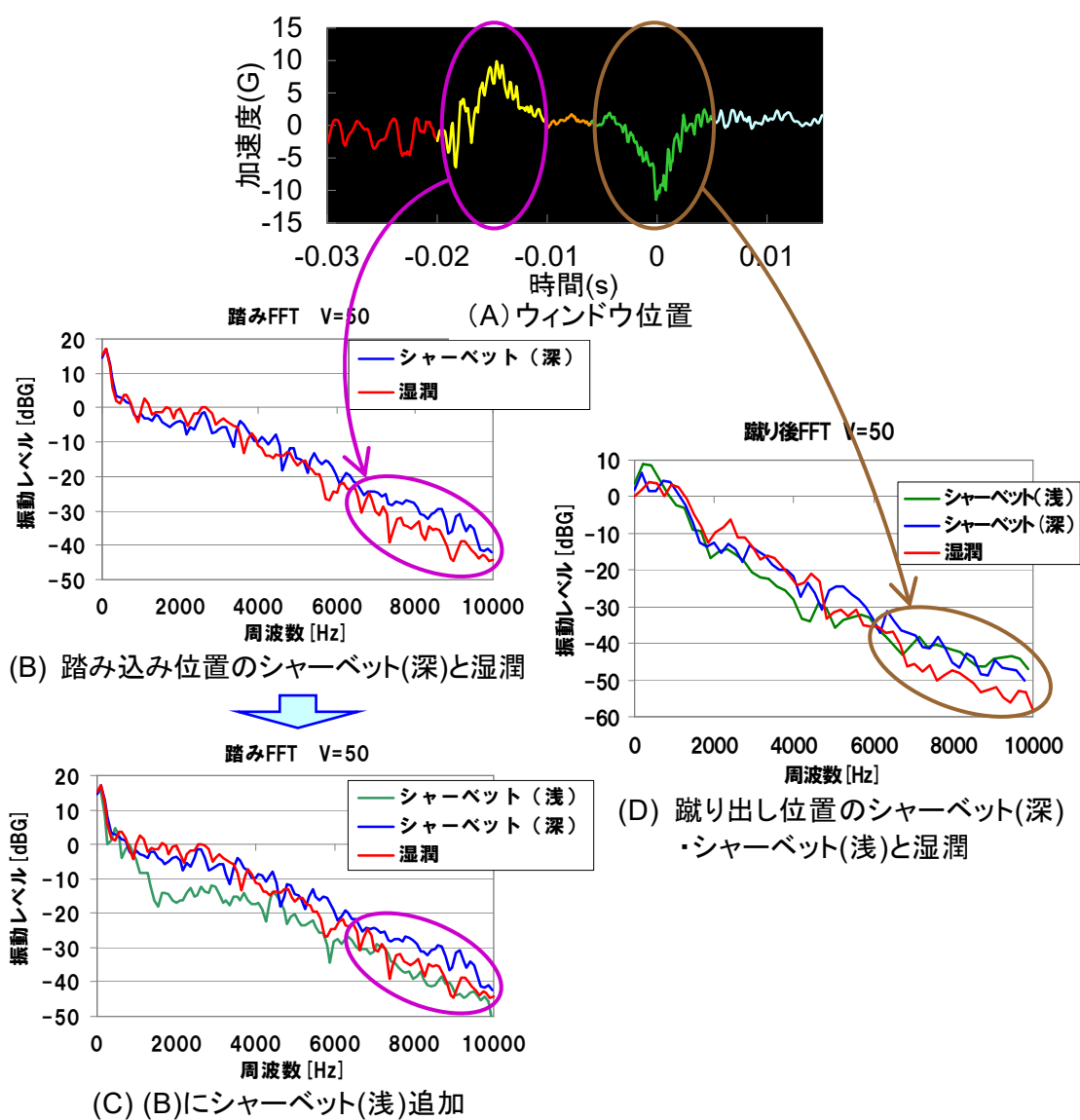


図 3.13 シャーベット判別精度向上へ向けた改良

3.3.2 CAIS 改良後（2009 年度）の路面状態毎の正答率

CAIS 改良後の CAIS 路面判別結果の精度検証を目的に 2009 年度に精度検証試験を実施した。検証期間は 2009 年 12 月から 2010 年 3 月である。検証場所、検証者、検証方法、誤判定方法、正答率の算出方法は、前年度の 3.2.4 項と同様である。図 3.14 に 2009 年度 CAIS 改良後の路面状態毎の正答率を示す。

CAIS 改良後の CAIS 路面判別精度は、圧雪路面は圧雪判別精度向上へ向けた改良（粉雪考慮）を行った結果、正答率が 88%に向上した。また、シャーベット判別精度向上へ向けた改良を実施した結果、正答率が 57%に向上した。シャーベットの正答率の精度は高いとは言えないが、誤判定結果のほとんどが湿潤と積雪である。これは、シャーベットは湿潤と積雪の変化に対する過渡的な状態であるためと考えられる。全体の正答率は 82%と、前年度よりも 8%向上することができた。

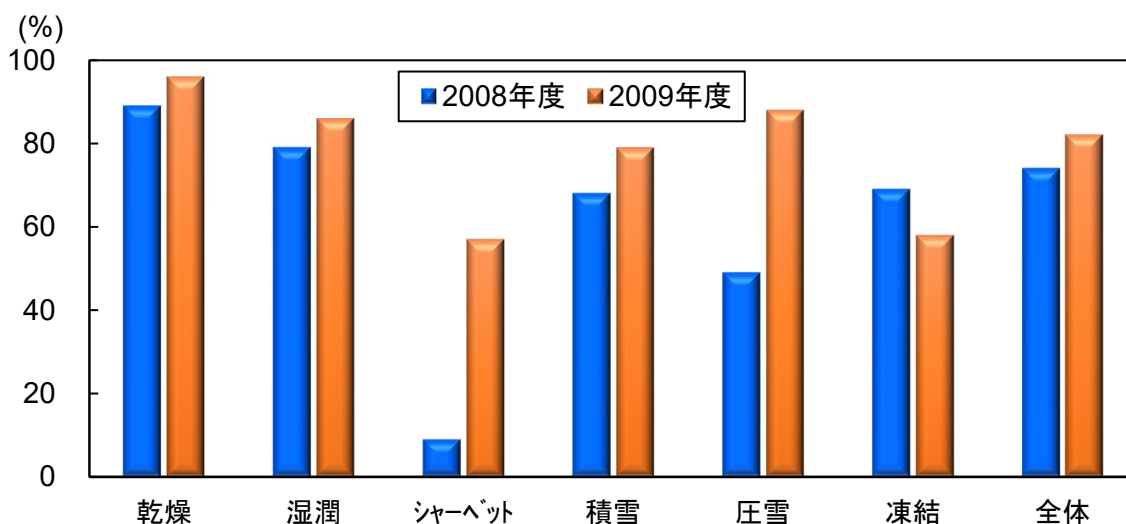


図 3.14 2009 年度 CAIS 改良後の路面状態毎の正答率

3.4 機器構成

表 3.1 に雪氷巡回車へ搭載した CAIS の機器構成を示す。雪氷巡回車へ搭載した CAIS は、CAIS タイヤ、データ受信機、マイクロフォン、GPS、車載カメラ、Wi-Fi ルータ、CAIS 制御装置（CAIS 解析装置が組み込まれている）モニターからなる。雪氷巡回車へ搭載した CAIS は、エンジン ON とともに自動起動し、エンジン OFF とともに自動シャットダウンするオートマチック仕様である。

表 3.1 雪氷巡回車へ搭載した CAIS の機器構成

CAISタイヤ	GPS, 車載カメラ
	
データ受信機	Wi-Fi ルータ, CAIS 制御装置 (解析装置)
	
マイクロファン	モニター
	

3.5 路面状態を確認する仕組み

地域指令台の道路管理者は、WEBビューアソフトを使用し、GIS地図上に表示された路面判別結果や道路画像をリアルタイムに確認することができる(図3.15)。WEBビューアソフトの再生ボタンをクリックすると、100m区間毎のCAIS路面判別結果と道路画像が自動再生する。WEBビューアソフトのコマ送り戻りボタンは、任意のKPにおけるCAIS路面判別結果および道路画像を確認できる。



図 3.15 WEBビューアソフト

また、路面ダイヤグラムを自動作成するため、路面状態をきめ細かく確認することができる(図3.16)。路面ダイヤグラムとは、横軸にKP、縦軸を時間としたグラフであり、色分けした記号は、CAISが判別した各路面状態を示している。路面ダイヤグラムは、視覚的にCAIS路面判別結果を確認することができ、一日の路面状態の変化の確認も容易となる。図3.16に示すように、CAIS路面判別結果を示す記号にマウスを移動すると、道路画像が表示する仕組みである。図3.16の事例では、8時に225KPで圧雪・凍結、8時15分に210KPで湿潤、8時30分に195KPでシャーベットだったことが確認できる。

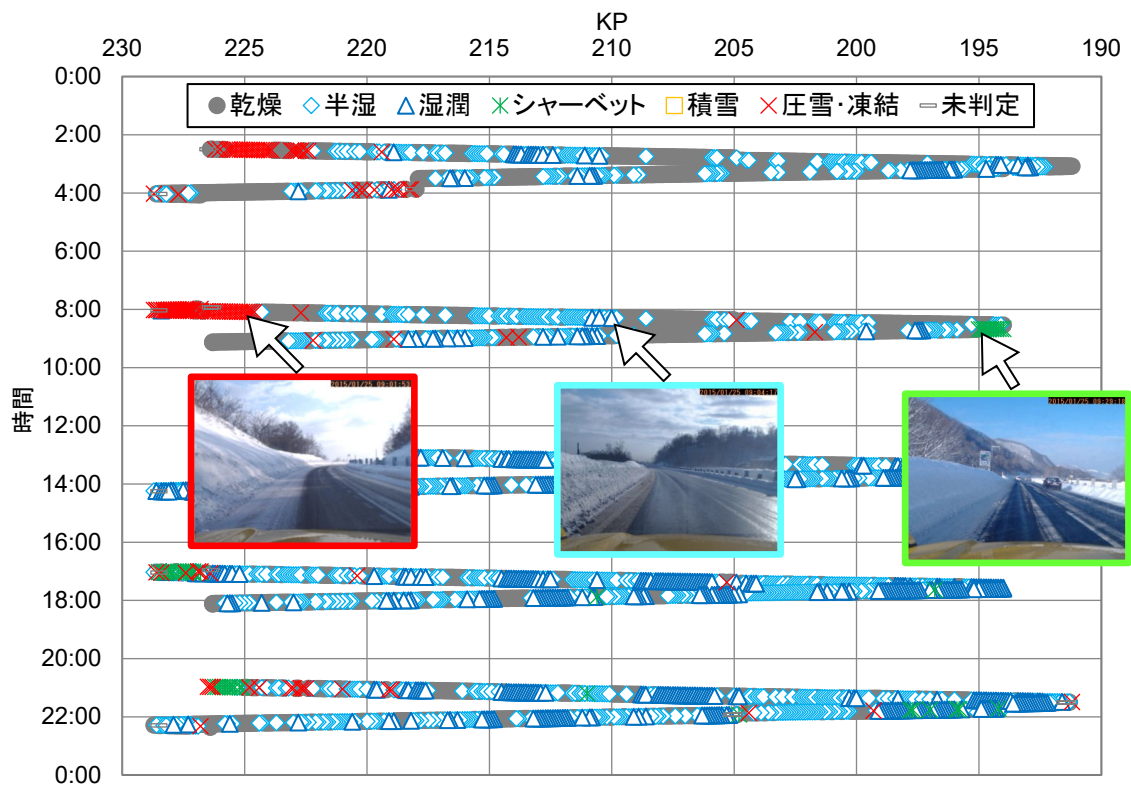


図 3.16 路面ダイヤグラム

3.6 まとめ

1.8 節で示したとおり，本研究の目的は，「冬期間，ドライバーに安全安心で快適な走行環境を提供しつつ，凍結防止剤散布量を低減する」である。2.6 節では，既存の凍結防止剤散布方法には，安全と関係の無いところで無駄があり，改善・改良の余地があることを示した。3.1 節では，上述した課題を解決するための手段として，凍結防止剤散布作業のプロセスを自動化することで作業を効率化し，これら課題を解決することができるという仮説を立てた。そこで，まず初めに，路面状態をきめ細かく把握する必要があると考え，CAIS の実用化の開発を行った。得られた成果は以下の通りである。

- ・深いシャーベットを考慮したアルゴリズムに変更することでシャーベットの精度を向上させた
- ・粉雪を考慮したアルゴリズムに変更することで圧雪の精度を向上させた
- ・排水性舗装を考慮したアルゴリズムに変更することで乾燥と圧雪の精度を向上させた
- ・マイクの導入により，半湿判定を可能とし，目視と同様に路面判別できるようにした

第 3 章参考文献

1. National Cooperative Highway Research Program : Feasibility of using friction indicators to improve winter maintenance operation and mobility. NCHRP Web document 53 (Project 6-14), Contractor' s final report, 105pp, 2002.
2. 花塚泰史, 後藤嵩人, 若尾泰道, 中澤一真 : 高度車両制御への適用を目指したタイヤ振動を用いた路面状態判別技術の開発. 公益社団法人自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集, 341-345, 2015.
3. Ohiro, T., Takakura, K., Maruyama, T. and Morinaga, H. : Efficient winter road management using a contact area information sensing (CAID)-based road surface condition judgement system. XIV International winter road congress, Issue: 05. Operation approaches, Equipment and products, 1-12, 2014.
4. Saito, T., Ohiro, T., Takakura, K., Hanatsuka, Y. and Hagiwara, T. : Introduction of an intelligent salting control optimization system for expressways in Hokkaido. XV International winter road congress, T6-6: Chemical use, 1-10, 2018.

第4章 凍結防止剤最適自動散布システム（ISCOS）の研究開発

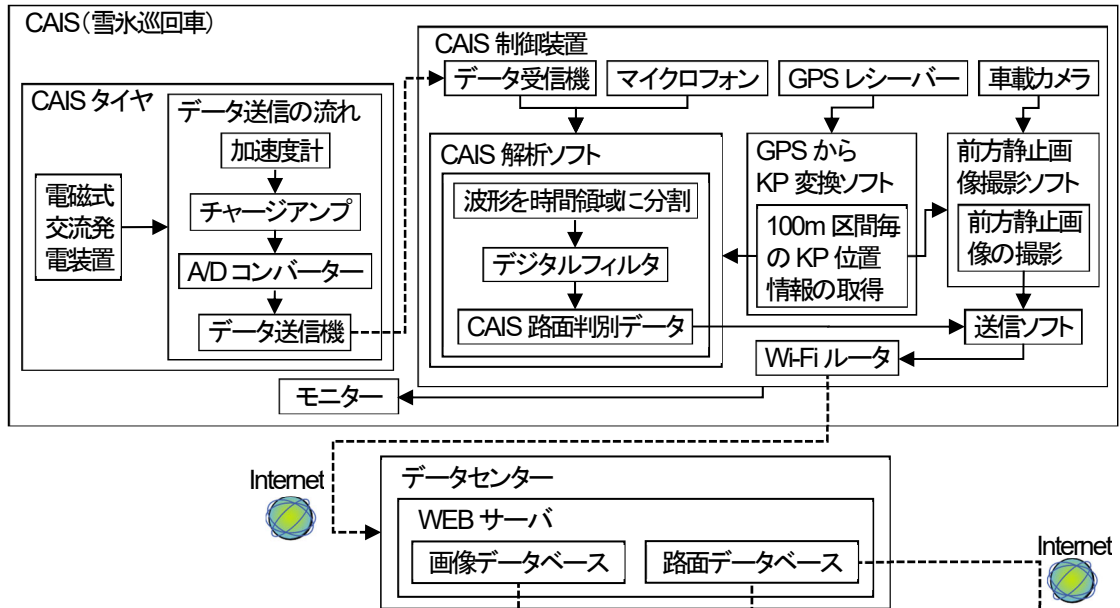
4.1 凍結防止剤最適散布システム（ISCOS）による凍結防止剤散布フロー

前章の検討において、凍結防止剤自動散布を実行するためには、WEB サーバや道路管理者まで考慮した凍結防止剤散布フローの構築が必要であることが分かった。

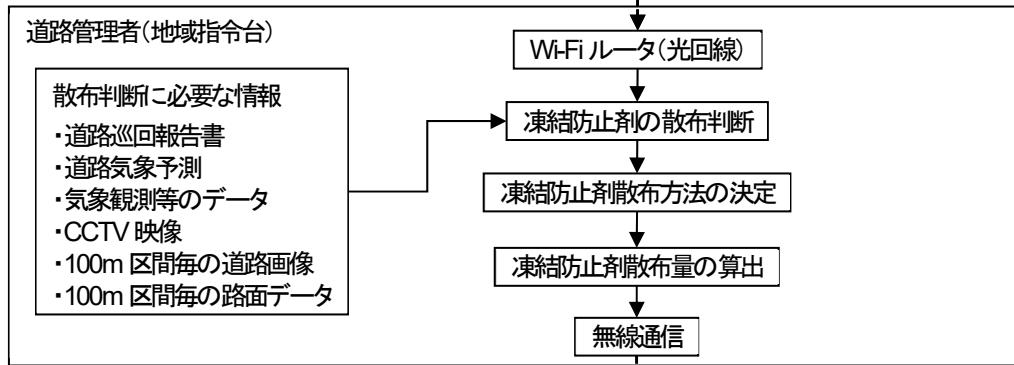
図 4.1 に ISCOS を構成する 3 つのシステム「CAIS（雪氷巡回車）」、「DD ホッパー（凍結防止剤倉庫）」、「凍結防止剤自動散布システム（凍結防止剤散布車）」とそれらをつなぐ凍結防止剤散布フローを示す。この凍結防止剤散布フローの中心はデータセンターと呼ばれ、WEB サーバに、車載カメラからの前方静止画像（以降、道路画像）などから作成する画像データベース、CAIS 路面判別データなどから作成する路面データベースなどを管理する機能が組み込まれている。なお、CAIS 路面判別データとは、CAIS が路面状態を判別した結果である。また、凍結防止剤散布フローの中に凍結防止剤の散布を最終判断する道路管理者が組み込まれている。

凍結防止剤の散布は、STEP1：路面等の情報収集・STEP2：散布作業実施判断・STEP3：散布作業実施のための準備・STEP4：散布作業の実施の 4 つの STEP で行われる。ISCOS では、凍結防止剤の散布判断のための材料として、既存の凍結防止剤の散布方法のフローの道路気象予測、気象観測等のデータ、CCTV 映像、道路巡回報告書に加え、100m 区間毎の路面データや道路画像を収集する。道路管理者は、散布判断に必要な情報を基に凍結防止剤の散布判断・凍結防止剤散布方法の決定を行う。その後、道路管理者は凍結防止剤散布方法の決定と同時に凍結防止剤散布量を算出する。道路管理者より無線通信で連絡を受けた凍結防止剤倉庫の作業員は、指示のあった凍結防止剤散布量を、新たに開発した凍結防止剤を 0.1t 単位で凍結防止剤散布車へ積込むことが可能な DD ホッパーを使用して 0.1t 単位で凍結防止剤散布車に積込む。また、道路管理者より無線通信で連絡を受けた凍結防止剤散布車の作業員は、データセンターの WEB サーバからダウンロードした路面データに応じて、あるいは全区間について凍結防止剤自動散布を実施する。

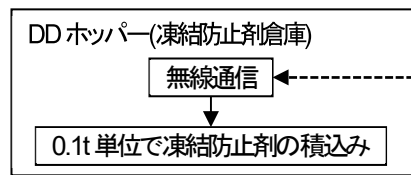
STEP1: 路面等の情報収集



STEP2: 散布作業実施判断



STEP3: 散布作業実施のための準備



STEP4: 散布作業の実施

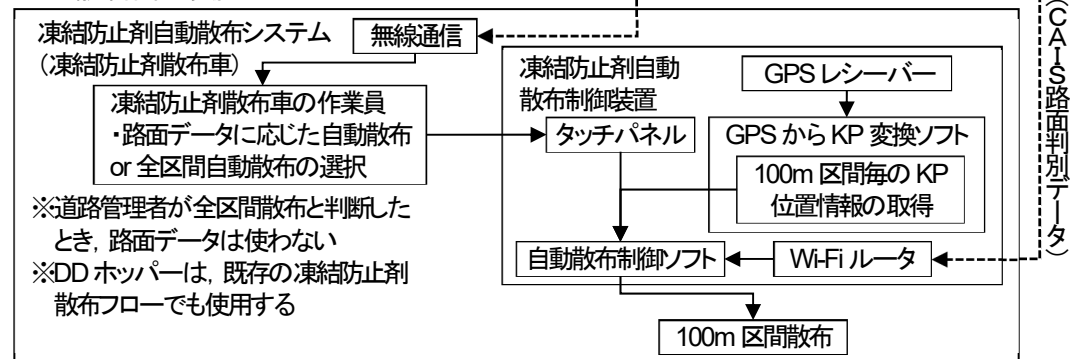


図 4.1 ISCOS による凍結防止剤散布フロー

4.2 自動路面状態判別システム（雪氷巡回車）

CAIS を搭載した雪氷巡回車が走行すると、図 4.2 に示すように、GPS から KP 変換ソフトが、予め作成してある 100m 間隔の高速道路の位置情報を示すデータベースと照合を行い、GPS の緯度・経度から高速道路の 100m 区間毎の KP を KP 標の設置位置で検出する。このタイミングに合わせて CAIS が自動で 100m 区間毎に 6 つの路面状態（乾燥、半湿、湿潤、シャーベット、積雪、圧雪・凍結）を判別する（これまでは、目視により約 5km 間隔で路面状態を判別）。また、道路画像の撮影が行われる。図 4.2 に示すように CAIS の 100m 区間毎に路面状態を判別した結果（CAIS 路面判別データ）・路面判別時（KP 標の設置位置）の道路画像は、送信ソフトから Wi-Fi ルータを介してデータセンターへ 100m 区間毎に送信される。

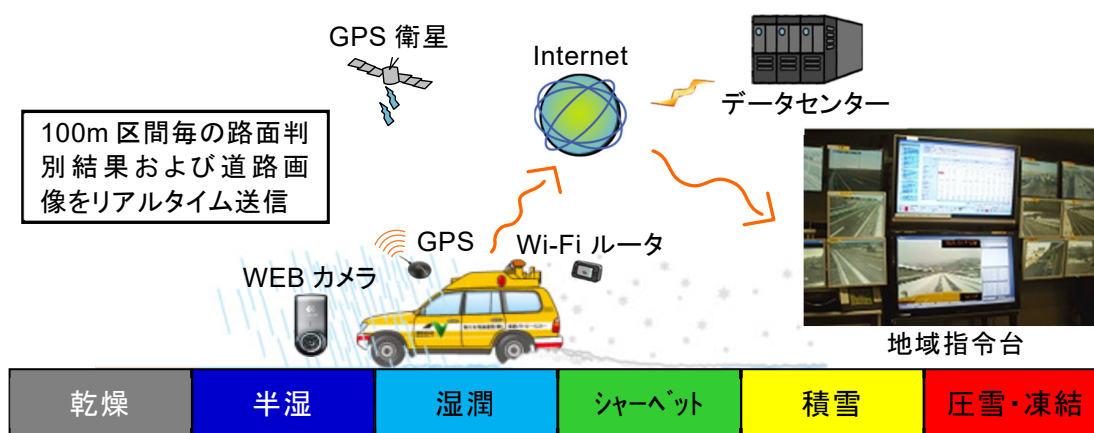


図 4.2 CAIS が判別した路面状態を確認する仕組み

4.3 凍結防止剤適量積込システム（凍結防止剤倉庫）

前章の検討において、凍結防止剤散布車に凍結防止剤を 0.5t 単位で積込んでいたのでは、凍結防止剤散布量は低減できないことが明らかとなった。そこで、DD ホッパーは、0.1t 単位で凍結防止剤を凍結防止剤散布車に積込むことを目的として開発した。図 4.3 に DD ホッパーを示す。凍結防止剤倉庫の作業者は、道路管理者からの無線連絡のあった凍結防止剤散布量を、DD ホッパーを用いて 0.1t 単位で凍結防止剤散布車へ積込む。



図 4.3 DD ホッパー

DD ホッパーの構造は、図 4.4(a)に示すように頂部を下方に向けた円錐形状を有するホッパーとホッパーの側面に設けられたハンドル操作に応じて下端部に設けられたポッパーの排出口を開閉するバタフライバルブからなる。このホッパーには、収容された凍結防止剤の重量を計測し、それを目視できる目盛が付属する。ホッパーに投入された凍結防止剤の排出速度を高めつつ適切なホッパー収容量となることを考慮しホッパーの角度を実験から決定した。実験結果から、ホッパーの角度は塩の安息角($30^{\circ} \sim 40^{\circ}$)よりも大きいことが必要なことが分かった。そのため、ポッパーの側面の角度を約 45° （図 4.4 (a)）とした。

また、凍結防止剤を均一に排出するためインナーコーンを中央部に取り付けた。インナーコーンが無い場合、図 4.4 (b)の点線で示すように、凍結防止剤が排出しやすいホッパー中央側から排出されるため、中央位置が凹んでしまい凍結防止剤がスムーズに排出しないことが分かった。図 4.4(c)の実線で示すように、インナーコーンを取付けた場合、側面からの流れとインナーコーンからの流れが合流し、凍結防止剤が均一かつスムーズに排出されるようになった。実験から、ホッパー外周寸法に対し、インナーコーンの底部の大きさは、外周寸法の半分程度が適していた。

凍結防止剤散布後の凍結防止剤散布車に残った凍結防止剤は、再利用はできなく、

DD ホッパーを使用すれば 0.1t 単位で積込むことから、表 2.2 に示す 1 区間目の部分散布量が 64kg に対して、積込み量は 100kg となり、既存の積込み方法と比べて 0.4t の低減となる。同様に凍結防止剤散布車が担当する全区間（1 区間目・2 区間目・3 区間目・4 区間目・5 区間目）散布のときも、散布量 1,012kg に対して積込み量が 1,100kg なり、既存の積込み方法と比べて 0.4t の低減となる。このように DD ホッパーを使用することで端数となる凍結防止剤を減らせることができ、凍結防止剤の使用量の低減につながる。

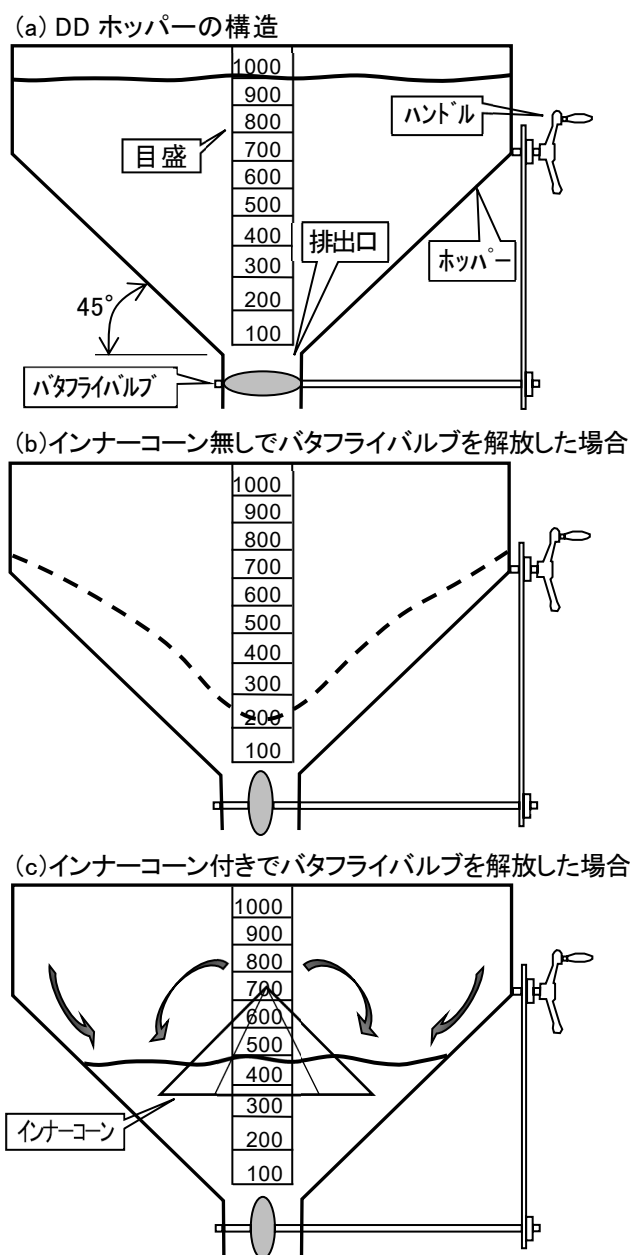


図 4.4 DD ホッパーの原理

4.4 凍結防止剤自動散布システム（凍結防止剤散布車）

4.4.1 凍結防止剤を 100m 区間毎に自動散布する方法

凍結防止剤自動散布システムは、CAIS による 100m 区間毎の路面判別結果に応じて凍結防止剤を自動で散布することを目的に開発した。図 4.5 は凍結防止剤を 100m 区間毎に自動散布する方法を示している。

凍結防止剤自動散布システムは、エンジン ON とともに自動で車両毎に設定された散布区間の設定値、散布条件の設定値を読み込み、WEB アクセスし、散布区間に対応する 100m 区間毎の CAIS 路面判別データと凍結防止剤の散布をするかどうかの散布条件データを取得する。このとき、凍結防止剤の総散布量が算出されるため、事前に凍結防止剤散布量を確認することができる。

次に、凍結防止剤散布車の作業者は、道路管理者より凍結防止剤を散布するとの指示を無線通信で連絡を受けた後、事前に設定されている散布区間の設定値・散布条件の設定値を確認し、問題がなければ凍結防止剤の自動散布制御を実施する選択をすると、凍結防止剤自動散布制御装置の自動散布制御システムが ON となる。散布区間や散布条件が違ふときは、タッチパネルで CAIS 路面判別結果に応じた自動散布、もしくは、全区間自動散布の選択をすると、Wi-Fi ルータを介して WEB サーバへアクセスし、散布区間データをダウンロードし、凍結防止剤自動散布する準備が完了する。

事前の設定が終了し、凍結防止剤散布車が散布区間の始点から走行を開始すると、GPS から KP 変換ソフトが GPS の緯度・経度から現在の自車位置を検出し、予め作成してある 100m 間隔の高速道路の位置情報を示すデータベースと照合を行い、自車位置に対応する進行方向（上りあるいは下り）と高速道路の 100m 区間毎の KP を KP 標の設置位置で検出する。現在の 100m 区間が特定されると同時に取得した散布区間データに従って現在の 100m 区間の散布条件で散布信号を出力する。現在の 100m 区間が終了すると次の 100m 区間へ移行し、路面状態に基づいた凍結防止剤の散布を散布区間が終了するまで 100m 区間毎に凍結防止剤自動散布が実施される。ただし、散布と判断された 100m 区間の 100m 手前から凍結防止剤を散布する。

また、対象路線が全区間散布になったとしてもこのシステムを使って凍結防止剤は自動散布される。このとき、WEB サーバから取得した 100m 区間毎の散布区間データは無視される。なお、凍結防止剤自動散布システムによる散布作業は、地域指令台別のハザードマップに基づいて、100m 区間毎に凍結防止剤を自動的に増量して散布でき、全区間散布のときもこのシステムにより、凍結防止剤の散布区間であるかどうかの判断に加え、散布量の調整も自動となることから、凍結防止剤散布車の作業者の負担は大幅に軽減される。

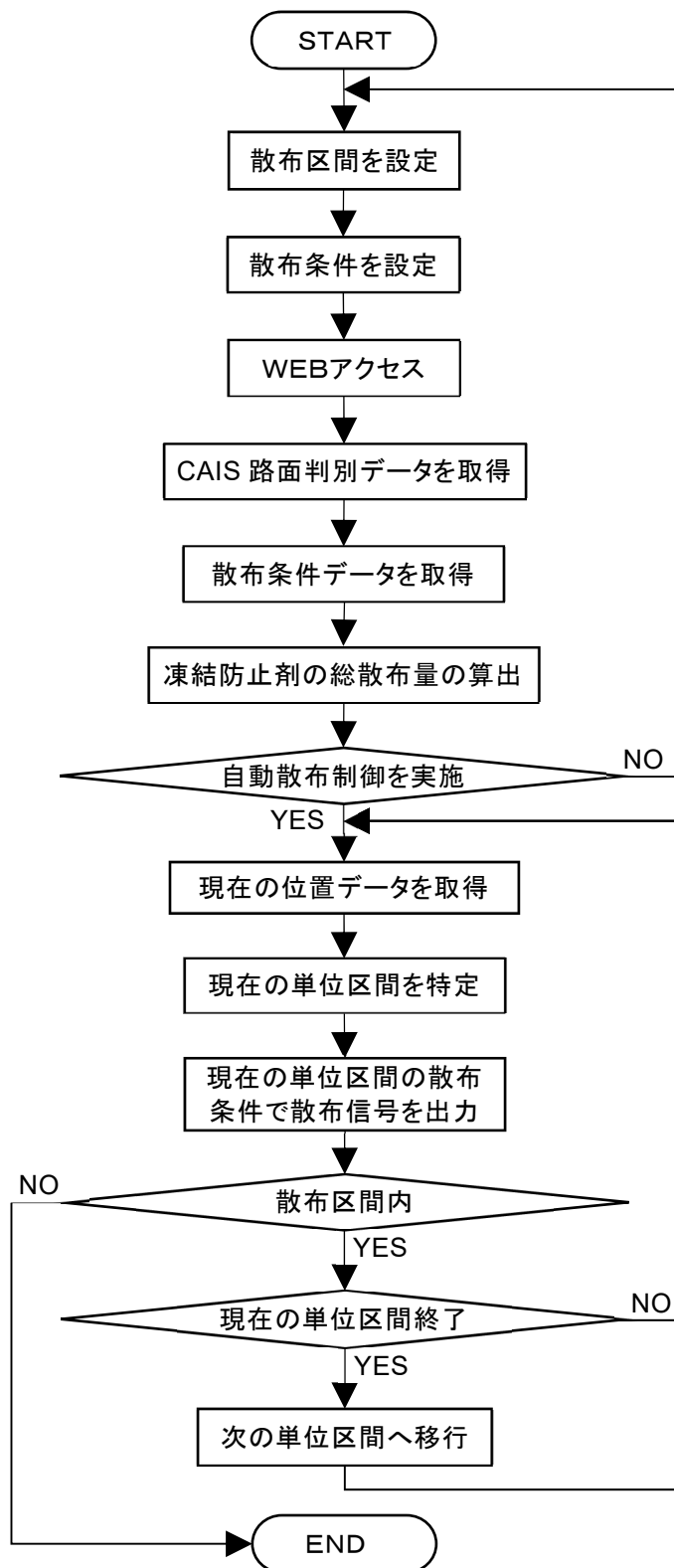



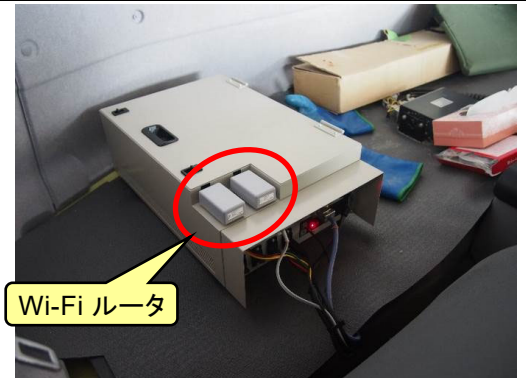


図 4.5 凍結防止剤を 100m 区間毎に自動散布する方法

4.4.2 機器構成

表 4.1 に凍結防止剤散布車へ搭載した凍結防止剤自動散布システムの機器構成を示す。凍結防止剤散布車へ搭載した凍結防止剤自動散布システムは、タッチパネル、GPS、Wi-Fi ルータ、凍結防止剤自動散布制御装置、自動散布制御プログラムからなる。凍結防止剤散布車へ搭載した凍結防止剤自動散布システムは、CAIS と同様にエンジン ON とともに自動起動し、エンジン OFF とともに自動シャットダウンするオートマチック仕様である。

表 4.1 凍結防止剤自動散布システムの機器構成

凍結防止剤散布車	GPS
	
タッチパネル	Wi-Fi ルータ, 凍結防止剤自動散布制御装置
	 <p data-bbox="799 1464 959 1498">Wi-Fi ルータ</p>

4.4.3 凍結防止剤を自動散布する仕組み

図 4.6 は、凍結防止剤自動散布システムを使用して KP に対応する 100m 区間毎の CAIS による路面状態から判別された散布区間に応じて、凍結防止剤を自動で散布している状況を示している。また、対象路線の全区間散布となったとしてもこのシステムを使って凍結防止剤は自動散布される。このとき、WEB サーバから取得した 100m 区間毎の散布区間データは無視される。このシステムにより、凍結防止剤の散布区間であるかどうかの判断に加え、散布量の調整も自動となることから、凍結防止剤散布車の作業者の負担は大幅に軽減される。凍結防止剤散布車の作業者は、道路管理者より凍結防止剤の散布指示の無線連絡を受けた後、タッチパネルで CAIS 路面判別データに応じた散布、もしくは、全区間散布を実施する選択をすると、Wi-Fi ルータを介して WEB サーバへアクセスし、凍結防止剤自動散布制御装置の自動散布制御プログラムが ON となる。自動散布制御プログラムは、GPS から KP 変換して 100m 区間を把握し、取得した散布区間データに従って、100m 区間毎に凍結防止剤が散布される。ただし、散布と判断された 100m 区間の 100m 手前から凍結防止剤を散布する。また、前述した地域指令台別のハザードマップに基づいて、100m 区間毎に凍結防止剤を自動的に増量して散布できる。

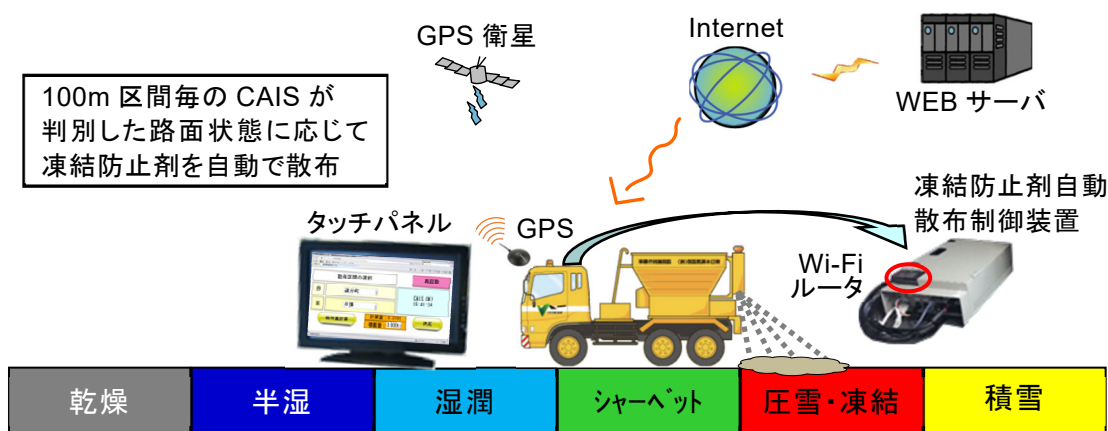


図 4.6 凍結防止剤を 100m 区間毎に自動散布する仕組み

4.5 ISCOS の散布方法

表 4.2 に示すように、既存の凍結防止剤散布方法は、八雲 IC から長万部 IC における路面判別は、IC や付加車線（追越車線）、U ターン路（雪氷車両が上下線を行き来するための通り道）などを区切りとした 8 区間別（上下線の場合は 16 区間）に行っている。既存の凍結防止剤散布方法における単位区間は、図 4.7(a) に示すように、短い区間で 1.5km、長い区間で 9.0km である。

一方、ISCOS の散布方法は、図 4.7(b) に示すように、100m 区間毎に行われる。ISCOS では、表 2.2 に対応する八雲 IC から長万部 IC における路面判別は、上下線含めて 656 箇所区間に細分し路面判別とそれに対応した散布判断が行われる。図 4.7(a) に示す既存の凍結防止剤散布方法は 16 箇所であり、ISCOS は、41 倍細かく散布判断を実施することが可能である。

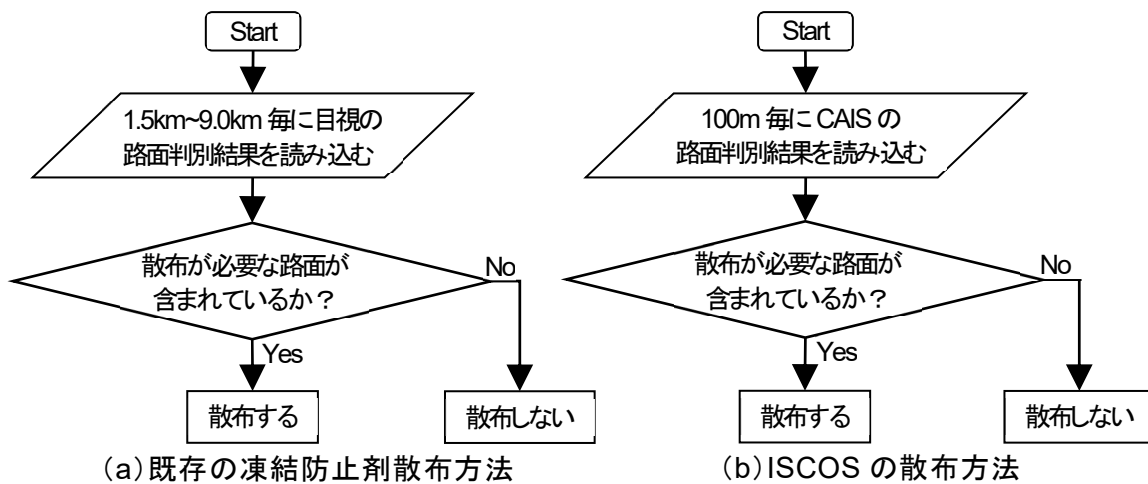


図 4.7 既存の散布方法と ISCOS の比較

4.6 ISCOS の試行導入箇所の選定

2014 年度に ISCOS の試行導入を行った。年間散布量が多く（図 4.8）、線形・構造からも NEXCO 東日本北海道支社を代表した検討結果が得られると考え、銭函を試行基地とした。ISCOS の試行運用期間は 1 月 14 日～3 月 25 日である。

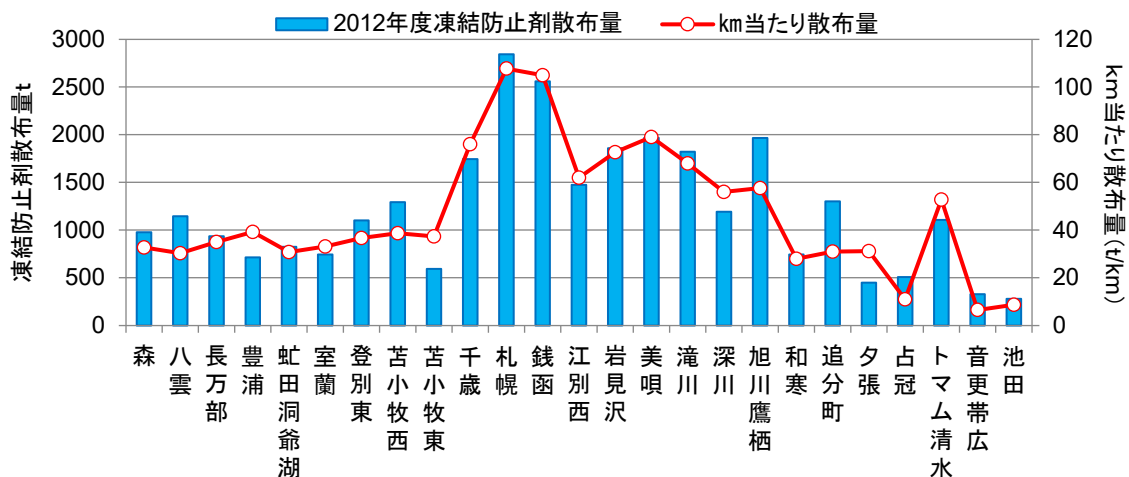


図 4.8 2012 年度の各雪氷基地の凍結防止剤散布量

4.7 ISCOS の実現可能性の現地検証

2012 年度終冬期、融雪による浸み出し箇所への自動散布試験を実施し、CAIS 路面判別結果に応じて凍結防止剤を自動で散布する ISCOS の実行可能性の現地検証を行った。

(1) システム構成

3 章にて、2 章で示した目視観測による路面状態判別の課題を解決するための手段として、自動で路面状態判別が可能な CAIS を実用化するための開発を行ってきた。しかし、凍結防止剤を散布するところまで自動化しなければ凍結防止剤散布量は低減できないと考えた。そこで、CAIS 路面判別結果に応じて凍結防止剤散布量を変えながら凍結防止剤を自動散布することが可能な凍結防止剤自動散布システムのプロトタイプを開発した。本システム（図 4.9）は、3 つの STEP で構成する。まず、①CAIS が路面状態を自動判別し、散布が必要な区間を特定し、路面判別結果を WEB サーバへ送信する。次に、②WEB サーバでは、CAIS 路面判別結果から路面データベースを作成し、凍結防止剤散布量の自動計算が可能となる。これにより凍結防止剤の必要量のみ凍結防止剤散布車へ積込むことができる。最後に、③凍結防止剤自動散布システムは、その路面データをダウンロードし、凍結防止剤の散布が必要な区間のみ凍結防止剤を自動で散布する仕組みである。

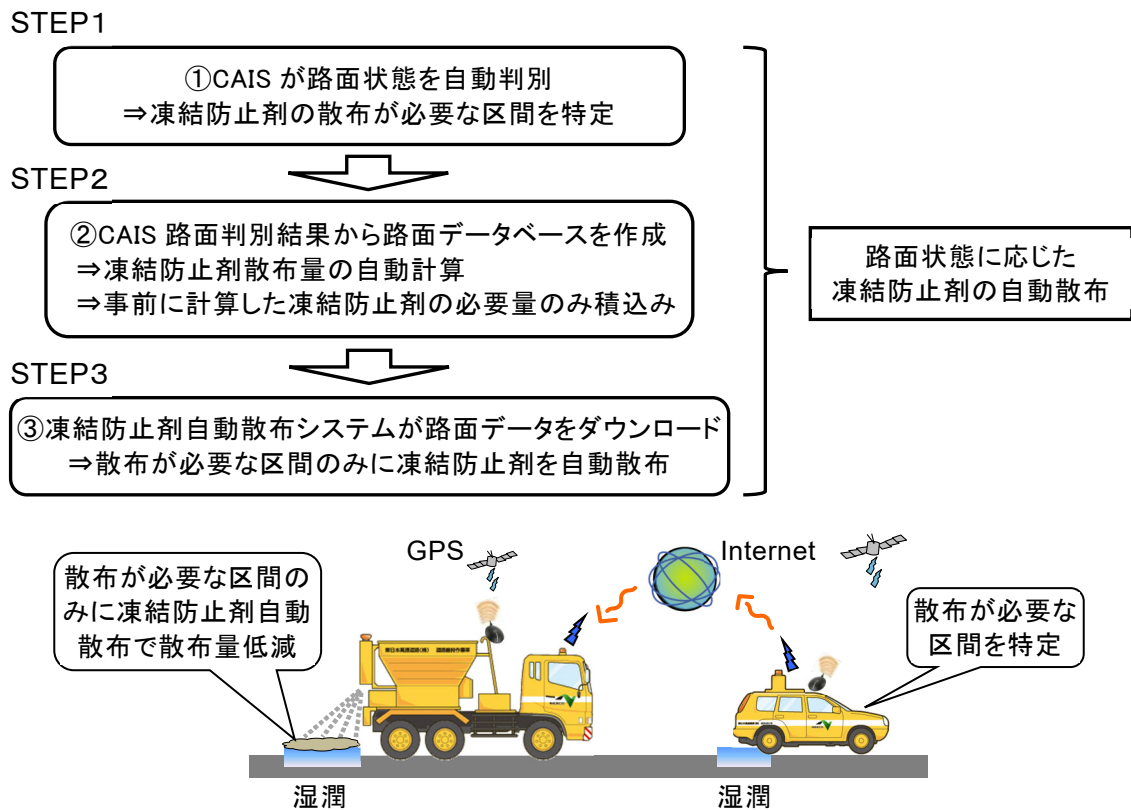


図 4.9 凍結防止剤自動散布システムのプロトタイプ

(2) 検討方法

自動散布試験は、2013年3月27日、2013年4月4日、2013年4月10日の3日間に行った。融雪による浸み出しにより凍結防止剤散布が必要な区間を CAIS が特定し、そこに凍結防止剤自動散布システムが凍結防止剤を自動散布した。検討内容は以下の3点である。

- ① 浸み出しにより凍結防止剤散布が必要な区間のみ自動散布できたかの確認
- ② 路面状態に応じて凍結防止剤を自動散布したときの散布量の確認
- ③ 凍結防止剤自動散布するときの散布条件の検討

(3) 浸み出し箇所の自動散布試験結果

CAIS が浸み出しにより凍結防止剤散布が必要な区間を特定、そこに凍結防止剤自動散布システムが 100m区間毎に凍結防止剤を自動散布した。結果、浸み出し区間を外すことなく適正に散布できることを確認した。図 4.10 に浸み出しにより凍結防止剤散布が必要な区間のみ凍結防止剤自動散布実施状況を示す。



図 4.10 浸み出しにより凍結防止剤散布が必要な区間のみ凍結防止剤自動散布実施状況

(4) 路面状態に応じて凍結防止剤を自動散布したときの散布量の確認結果

表 4.2 に凍結防止剤自動散布システムの計算による散布量と実際の散布量の比較結果を示す。凍結防止剤自動散布システムの計算した散布量は、ほぼ実際の散布量と相違無いことを確認した。

表 4.2 凍結防止剤自動散布システムの計算による散布量と実際の散布量の比較結果

番号	実施日	路面状態	路面出現距離	計算散布量	実散布量
1	3月27日	湿潤	7.6km	0.49t	0.50t
2	4月4日	湿潤	2.3km	0.23t	0.25t
3	4月10日	湿潤 半湿	0.5km 2.2km	0.23t	0.24t

(5) 凍結防止剤自動散布するときの散布条件の検討結果

2013年4月4日のデータを基に目視散布を参考に自動散布するときの散布条件の検討を行った。表 4.3 に目視散布量と自動散布の散布条件を変化させた散布量を示す。

- ①前後 100m 区間余分に散布する設定では、散布量がやや多くなる
- ②浸み出し箇所のみ 100m 区間毎に散布する設定では、散布量は少なくなる
- ③手前側へ 100m 区間余分に散布する設定では、ほぼ同一の値になる

散布した直後の凍結防止剤は、走行車両の風圧により進行方向へ移動する。このため、熟練の作業員は少し手前から散布していた。従って、自動散布の散布条件は、③が良いと考えられる。

表 4.3 目視散布量と自動散布の散布条件を変化させた散布量

番号	散布方法	散布条件	散布量
1	目視散布	熟練作業員の操作	0.178t
2		前後 100m 区間余分に散布	0.228t
3	自動散布	染み出し箇所のみ散布	0.132t
4		手前 100m 区間余分に散布	0.186t

(6) まとめ

終冬期の融雪による浸み出し箇所への自動散布試験を行った結果を以下に要約する：

- ①CAIS が浸み出しにより凍結防止剤散布が必要な区間を特定し，そこに凍結防止剤自動散布システムが 100m 区間毎に凍結防止剤を自動散布できる。
- ②凍結防止剤自動散布システムの計算上の凍結防止剤散布量は，ほぼ実際の凍結防止剤散布量に等しい。
- ③凍結防止剤自動散布の散布条件は，手前 100m 区間余分に散布するのが良い。

2012 年度終冬期，融雪による浸み出し箇所への自動散布試験を実施した結果，CAIS 路面判別結果に応じて凍結防止剤を自動で散布する ISCOS は実現可能で有用である。今後は厳冬期に自動散布試験を行い，熟練の作業員のノウハウを参考に，CAIS 路面状態に応じた ISCOS の最適化を図っていく必要がある。また，路面状態に応じて適正な散布条件（散布量，湿式割合）を自動設定するためには，散布アルゴリズムの開発が必要である。

本検討により，事前に凍結防止剤散布量の把握ができて，凍結防止剤散布車へ凍結防止剤を 0.5t 単位で積込んでいたのでは，凍結防止剤散布量は低減できないことが分かった。凍結防止剤散布量の低減には，DD ホッパーの導入が重要である。また，凍結防止剤自動散布システムによる凍結防止剤自動散布を実行するには，WEB サーバや道路管理者まで考慮した凍結防止剤散布フローの構築が必要である。

4.8 ISCOS の試行導入

(1) ISCOS の稼働率の把握

図 4.11 に ISCOS の稼働率を示す。ISCOS の稼働率が 100%になるまで 2 週間を要した。この間に全ての関係者にレクチャーし合意形成を図った。

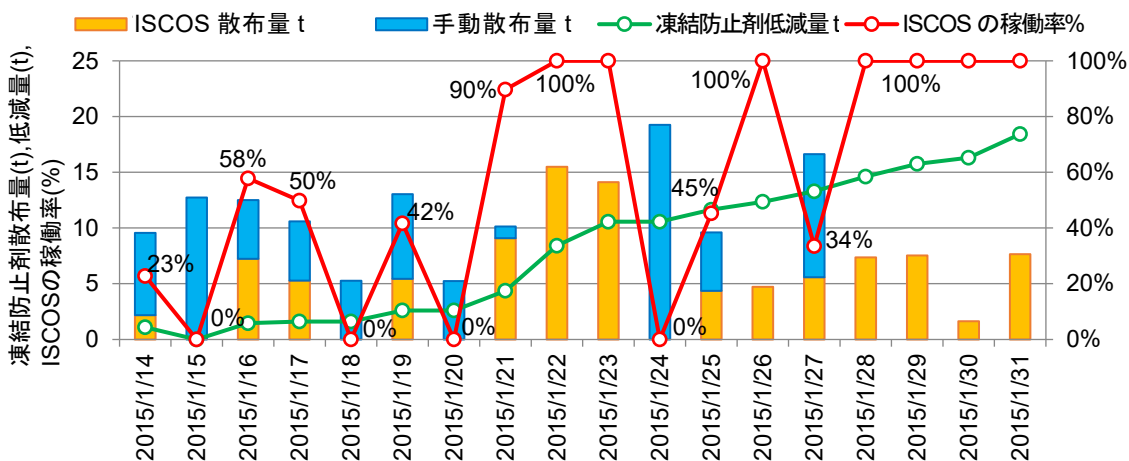


図 4.11 ISCOS の稼働率

(2) 指示系統の明確化

- ・ 指令台で凍結防止剤散布量を計算し，現場へ積込み指示
- ・ 凍結防止剤散布量は指令台で把握し記入
- ・ 現場では 0.1t 単位で凍結防止剤の積込み
- ・ 凍結防止剤自動散布システムの作業員は，タッチパネル操作を実施

(3) 操作ミスへの対応

- ・ 24 時間携帯電話での対応を実施
- ・ 遠隔操作により，現場等での操作ミスを把握しその場で修正

(4) フェールセーフ対策

- ・ 順序を間違えて入力できないようにソフト改良を実施
- ・ 入力画面のみを表示するようソフト改良を実施

(5) 凍結防止剤の低減量

図 4.12 に ISCOS による凍結防止剤の低減量および低減割合を示す。全区間散布を行っても、DD ホッパーにより凍結防止剤の低減が可能であり、その総量は 42t である。凍結防止剤自動散布システムによる低減量は 51t である。1 月 14 日～3 月 25 日の期間内の ISCOS による低減量は 93t であり、低減割合は 19% となった。図 4.12 は、1 基地だけの運用で、筆者が凍結防止剤の散布判断に参加した事例である。ISCOS の試行導入により、凍結防止剤散布量は 19% 低減可能なことを示した。

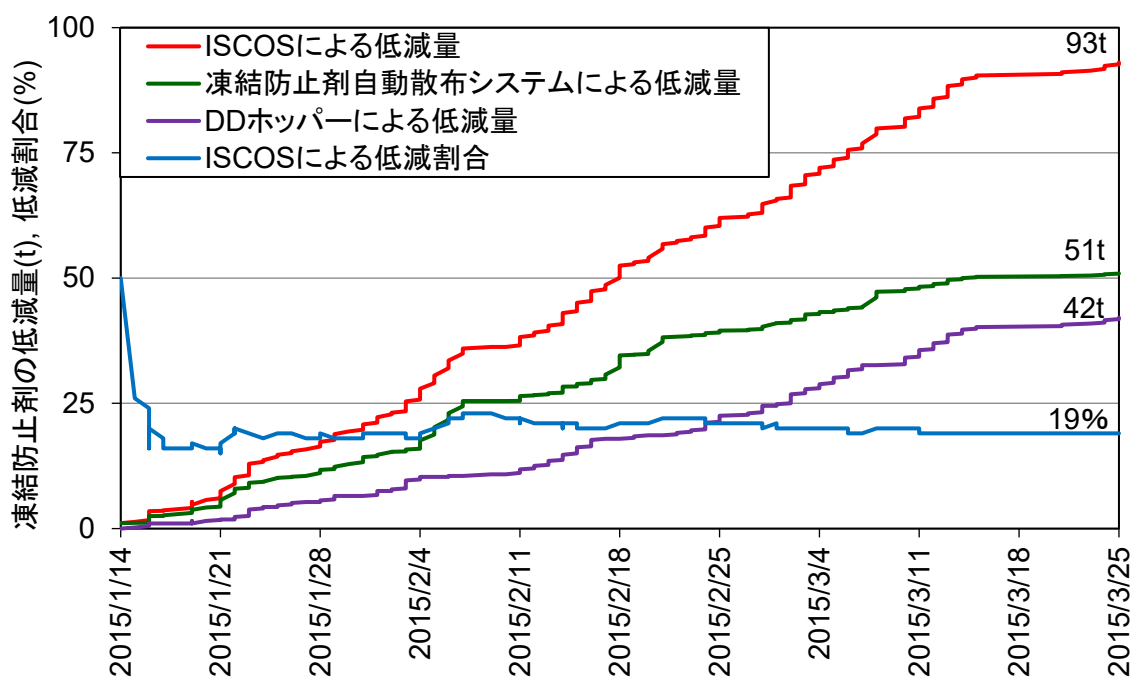


図 4.12 ISCOS による凍結防止剤の低減量および低減割合

4.9 ISCOS 導入計画の立案

図 4.12 から ISCOS の導入により、凍結防止剤散布量が 19%低減可能なことが示された。つまり、ISCOS を導入する基地の選定は、散布量が多い基地とした方が低減量が多くなり経済的効果がある。表 4.4 に基地毎の凍結防止剤散布量のランキング（10 位以内）を示す。2015 年度以降の ISCOS の本運用へ向けた導入は、散布量のランキングやメンテナンスの容易さ、路線の重要度を考慮し、2015 年度は 6 基地（銭函、札幌、美唄、岩見沢、千歳、江別西）を予定し、2016 年度は 11 基地（銭函、札幌、美唄、岩見沢、千歳、江別西、旭川鷹栖、滝川、深川、苫小牧西、追分）への導入を予定する。2017 年度は 17 基地（銭函、札幌、美唄、岩見沢、千歳、江別西、旭川鷹栖、滝川、深川、苫小牧西、追分、苫小牧東、苫小牧西、登別東、室蘭、虻田洞爺湖、夕張）への導入を予定する。2018 年度に 26 の全基地（銭函、札幌、美唄、岩見沢、千歳、江別西、旭川鷹栖、滝川、深川、苫小牧西、追分、苫小牧東、苫小牧西、登別東、室蘭、虻田洞爺湖、夕張、豊浦、長万部、八雲、森、占冠、トマム、十勝清水、音更帯広、池田）への導入を予定する。

全基地に導入した際のランニングコストは、約 6 千万円である。凍結防止剤の単価は約 2 万円であり、年間約 2.8 万 t の凍結防止剤を散布している。凍結防止剤散布量を 11%以上低減できれば、システム導入費用よりも凍結防止剤の低減費用が上回ることとなる。

表 4.4 基地毎の凍結防止剤散布量のランキング（10 位以内）

順位	基地	2010 年度	2011 年度	2012 年度	2013 年度	平均
	全て	24,880	30,427	30,463	25,619	27,847
1	札幌	1947	2620	2843	1976	2347
2	銭函	1858	2226	2560	1605	2062
3	旭川鷹栖	2050	1774	1966	2421	2053
4	美唄	1808	1895	1966	1393	1766
5	滝川	1681	1713	1821	1623	1710
6	岩見沢	1668	1865	1859	1397	1697
7	千歳	1372	1490	1744	1341	1487
8	江別西	1049	1606	1473	1001	1282
9	深川	1248	1219	1191	1003	1165
10	苫小牧西	1092	1283	1293	947	1154

4.10 ISCOS の課題

ISCOS を構成する，雪氷巡回車で路面状態を 100m 区間毎に判別する CAIS の課題は主に 3 つある．①凍結防止剤を散布する路面（半湿，湿潤，シャーベット，圧雪・凍結）を散布しない路面（乾燥，積雪）と誤って判別するケース，②判別できないケース，③凍結防止剤を散布する路面と散布しない路面が交互に入り混じったときに凍結防止剤を連続して散布すべきケースがあることである．

最初の課題は，CAIS の加速度センサが接地している箇所の路面状態を誤判別する場合である．接地箇所における CAIS 路面判別データの判別精度は目視との比較にて 82%の正答率となることを花塚ら⁴⁾は報告している．雪氷路面（シャーベット，圧雪・凍結，積雪）では，表面の粉雪の有無や交通量などによって雪の硬さや表面の粗さが変化する．このような表面の粗さが振動波形に影響し，凍結・圧雪を乾燥と判別することなどが起きる．

次の課題は，走行車線と追越車線の路面状態が異なる場合である．CAIS は走行していない車線の路面状態を判別できない．雪氷巡回車は，走行車線を利用することが多く，追越車線の利用は少ない．走行車線は乾燥であるが，追越車線は凍結・圧雪というケースがあり，CAIS はこの区間を散布しない区間と判別してしまう．

最後の課題は，CAIS 路面判別データは正しいが，凍結防止剤を散布すべき路面状態と散布すべきではない路面状態が交互に入り混じった場合である．このような路面状態では，凍結防止剤を連続して散布した方が良いと判断できる場合がある．これらの 3 つの課題への対応が，**図 4.1** のシステムを実用するとき重要となる．

第 4 章参考文献

1. 花塚泰史, 後藤嵩人, 若尾泰道, 中澤一真 : 高度車両制御への適用を目指したタイヤ振動を用いた路面状態判別技術の開発. 公益社団法人自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集, 341-345, 2015.
2. Ohiro, T., Takakura, K., Maruyama, T. and Morinaga, H. : Efficient winter road management using a contact area information sensing (CAID)-based road surface condition judgement system. XIV International winter road congress, Issue: 05. Operation approaches, Equipment and products, 1-12, 2014.
3. Saito, T., Ohiro, T., Takakura, K., Hanatsuka, Y. and Hagiwara, T. : Introduction of an intelligent salting control optimization system for expressways in Hokkaido. XV International winter road congress, T6-6: Chemical use, 1-10, 2018.
4. 花塚泰史, 森永啓詩, 若尾泰通 : インテリジェントタイヤによる路面状態判別. 雪氷研究大会 (2010・仙台) 講演予稿集, 24, 2010.

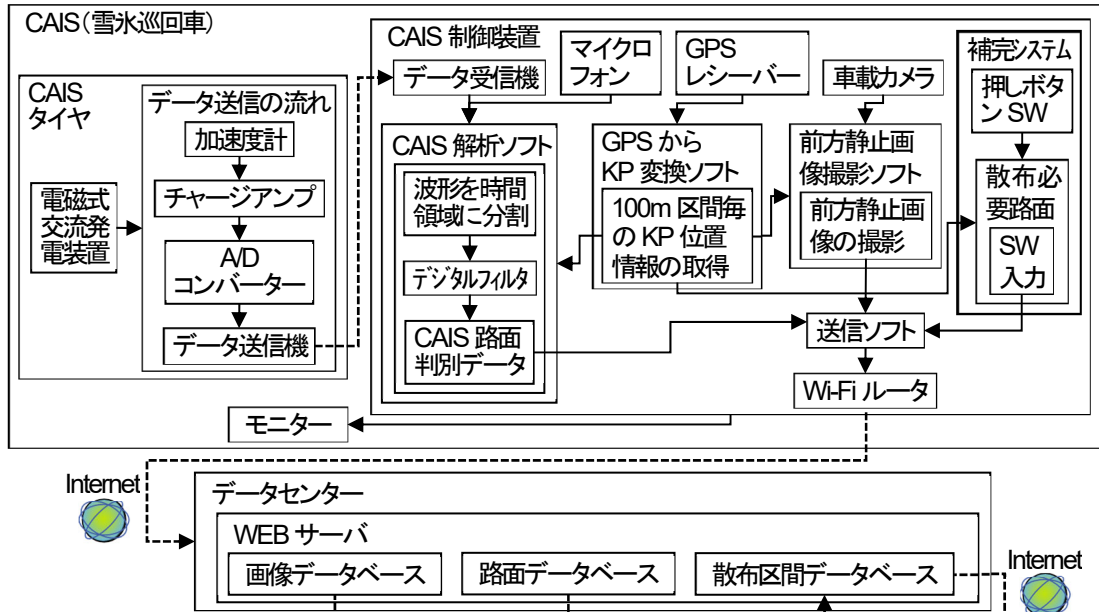
第 5 章 スマート凍結防止剤散布システムの構築

5.1 スマート凍結防止剤散布システムによる凍結防止剤散布フロー

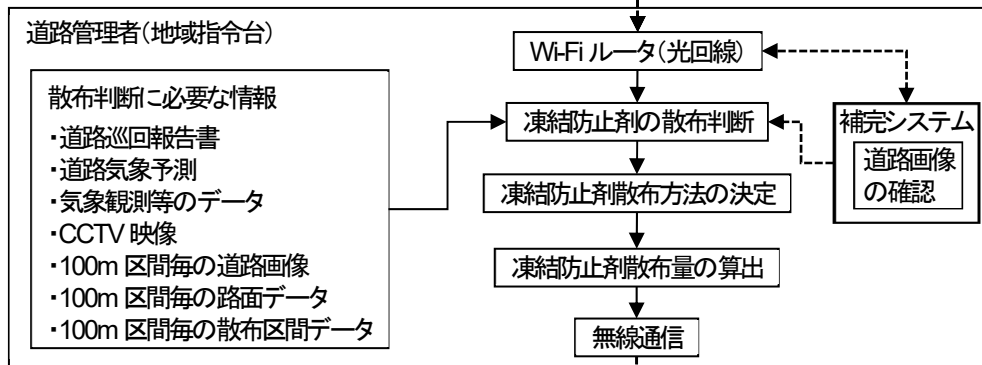
4章で開発した ISCOS には自動化による課題があり、凍結防止剤の散布判断を安全とするため、自動化を補完するための手動システムが必要と言えた。そこで、補完システムを開発し ISCOS のシステム制御に組入れ、冬期道路交通安全性・快適性が損なわれない冬期路面管理となるようにしつつ、凍結防止剤散布量の低減に資する、スマート凍結防止剤散布システムとして開発・実用化を行った^{1),2),3)}。図 5.1 に、スマート凍結防止剤散布システムを構成する 4 つのシステム「補完システム（雪氷巡回車と地域指令台）」、「CAIS（雪氷巡回車）」、「DD ホッパー（凍結防止剤倉庫）」、「凍結防止剤自動散布システム（凍結防止剤散布車）」とそれらをつなぐ凍結防止剤散布フローを示す。この凍結防止剤散布フローの中心は ISCOS と同様にデータセンターと呼ばれ、WEB サーバに、道路画像などから作成する画像データベース、CAIS 路面判別データなどから作成する路面データベース、これに加え、散布区間データベースなどを管理する機能が組み込まれている。なお、散布区間データとは、CAIS 路面判別データなどから作成した凍結防止剤の散布方法の情報である。また、ISCOS と同様に凍結防止剤散布フローの中に凍結防止剤の散布を最終判断する道路管理者が組み込まれている。

凍結防止剤の散布は、STEP1：路面等の情報収集・STEP2：散布作業実施判断・STEP3：散布作業実施のための準備・STEP4：散布作業の実施の 4 つの STEP で行われる。スマート凍結防止剤散布システムでは、凍結防止剤の散布判断のための材料として、ISCOS のフローの道路気象予測、気象観測等のデータ、CCTV 映像、道路巡回報告書、100m 区間毎の道路画像および路面データに加え、補完システムの散布区間データを収集する。道路管理者は、散布判断に必要な情報を基に凍結防止剤の散布判断・凍結防止剤散布方法の決定を行う。その後、道路管理者は凍結防止剤散布方法の決定と同時に凍結防止剤散布量を算出する。道路管理者より無線通信で連絡を受けた凍結防止剤倉庫の作業者は、指示のあった凍結防止剤散布量を DD ホッパーを使用して 0.1t 単位で凍結防止剤散布車に積込む。また、道路管理者より無線通信で連絡を受けた凍結防止剤散布車の作業者は、データセンターの WEB サーバからダウンロードした散布区間データに応じて、あるいは全区間について凍結防止剤自動散布を実施する。

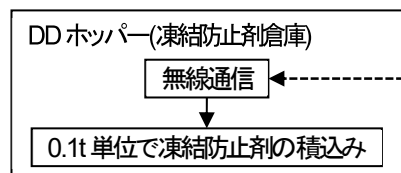
STEP1: 路面等の情報収集



STEP2: 散布作業実施判断



STEP3: 散布作業実施のための準備



STEP4: 散布作業の実施

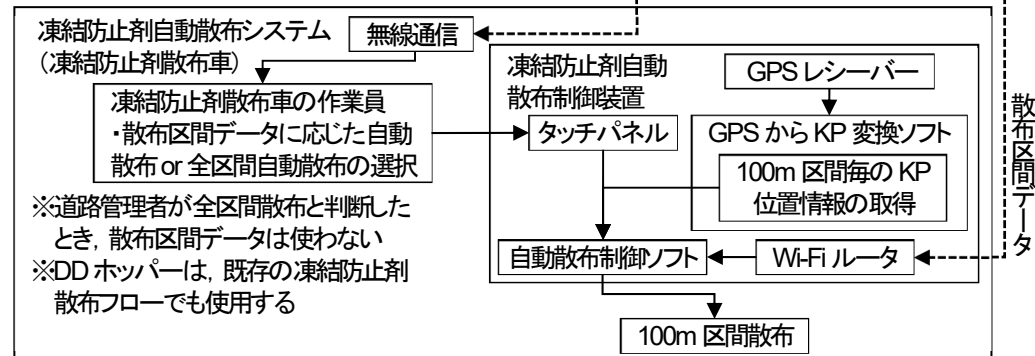


図 5.1 スマート凍結防止剤散布システムによる凍結防止剤散布フロー

5.2 補完システムの開発

図 5.2 に補完システムを示す。自動化システムだけではどうしても対応できない場合がある。例えば、CAIS が凍結を乾燥と誤判定した場合である。これは、未散布となるため避けなければならない。CAIS はタイヤ走行軌跡のみの判定である。走行軌跡が集中する箇所は乾燥になり易い。このため、路面全体で見ると誤判定となることがある。また、追越路面だけが濡れている状態などでは、CAIS では判定できない。そこで、これらの課題を解決するために補完システムを開発した。CAIS の路面判別結果は、モニターに表示されている。これを見て、誤判定しているときや、追越車線のみ圧雪や湿潤路面など、CAIS が測定できない路面状態だと SW を押す。

図 5.2 (a) に示すように押しボタン SW を押すと、押ししている区間が散布必要路面（散布区間データ）となる。安価で使い勝手が良いプレゼンテーションで使用するフィンガーマウスを押しボタン SW として活用するためにソフトを開発し、CAIS 制御装置に組み入れた。

地域指令台では、道路管理者が道路画像を確認し、図 5.2 (b) に示すように散布必要路面で未散布箇所の道路画像をクリックすると、クリックした道路画像の区間が散布必要路面（散布区間データ）となる。道路管理者の道路画像の確認作業の負担を軽減するために、未散布箇所の道路画像のみを確認できるようにもしている。

このように 2 つの機能を持った補完システムにより、CAIS 路面判別結果の誤判別した場合の影響を最小化し、より安全に管理することが可能となる。人による判断を優先させ、人の介在と自動化システムを融合させたシステム構成である。

(a) 雪氷巡回車: 散布必要路面で押しボタン SW を押して散布区間データとする



(b) 地域指令台: 散布必要路面で未散布箇所の道路画像をクリックして散布区間データとする



図 5.2 補完システム

5.3 2015年度版補完システムの散布判断プロセス

現場担当者の意見をシステムに組入れ、図 5.1 の STEP2 に示す道路管理者による凍結防止剤散布作業実施判断のプロセスを改良した。2015 年度にスマート凍結防止剤散布システムを実用化した。図 5.3 に 2015 年度版補完システムを加えたスマート凍結防止剤散布システムの散布作業実施判断のプロセス（以降、2015 年度版補完システムの散布判断プロセス）を示す。2015 年度版補完システムの散布判断プロセスは、既存の散布判断プロセスに、スマート凍結防止剤散布システムと 2015 年度版補完システムを組み合わせたものになっている。

STEP1 は、凍結防止剤散布作業判断に必要な情報を示している。図 2.5 に示す散布判断に必要な情報に、100m 区間毎の CAIS 路面判別データと 100m 区間毎の道路画像が加わった。図 5.3 の点線で囲った 2015 年度版補完システムは 4.10 節で示した ISCOS の課題をカバーすることを目的としている。2015 年度版補完システムでは、連絡員が CAIS 路面判別データに応じて散布不能と判断したとき、ダッシュボード（助手席側）の前に設置されたスイッチ（以降、SW）を押す。SW を押した 100m 区間は散布が必要な区間となる（散布区間データ）。CAIS が記録する CAIS 路面判別データの 100m 区間毎の項目は、日時分秒・KP・走行速度・CAIS 路面判別データである。これらの項目に、散布区間データが加わる。

STEP2 では、道路管理者は凍結防止剤散布の有無の判断を行う。散布が必要で、かつ CAIS 路面判別データおよび散布区間データに応じた散布が可能なことの報告があったとき、道路管理者は 100m 区間毎の道路画像を連絡員が SW を押した区間を重点的に目視で確認し、STEP1 で得られた散布判断に必要な情報を勘案し、100m 区間散布が可能かどうかを判断する。

STEP3 の凍結防止剤散布方法の決定では、連絡員から道路管理者へ CAIS 路面判別データおよび散布区間データに応じて散布可能なことの報告があり、道路管理者が道路画像を目視で確認し、100m 区間散布が可能と判断したとき、100m 区間散布を実施する。一方、道路管理者が 100m 区間散布ができないと判断したとき、または、連絡員から報告が無かったとき、連絡員と道路管理者のどちらかがチェックできなかつたとき、全区間散布あるいは手動で部分散布を実施する。

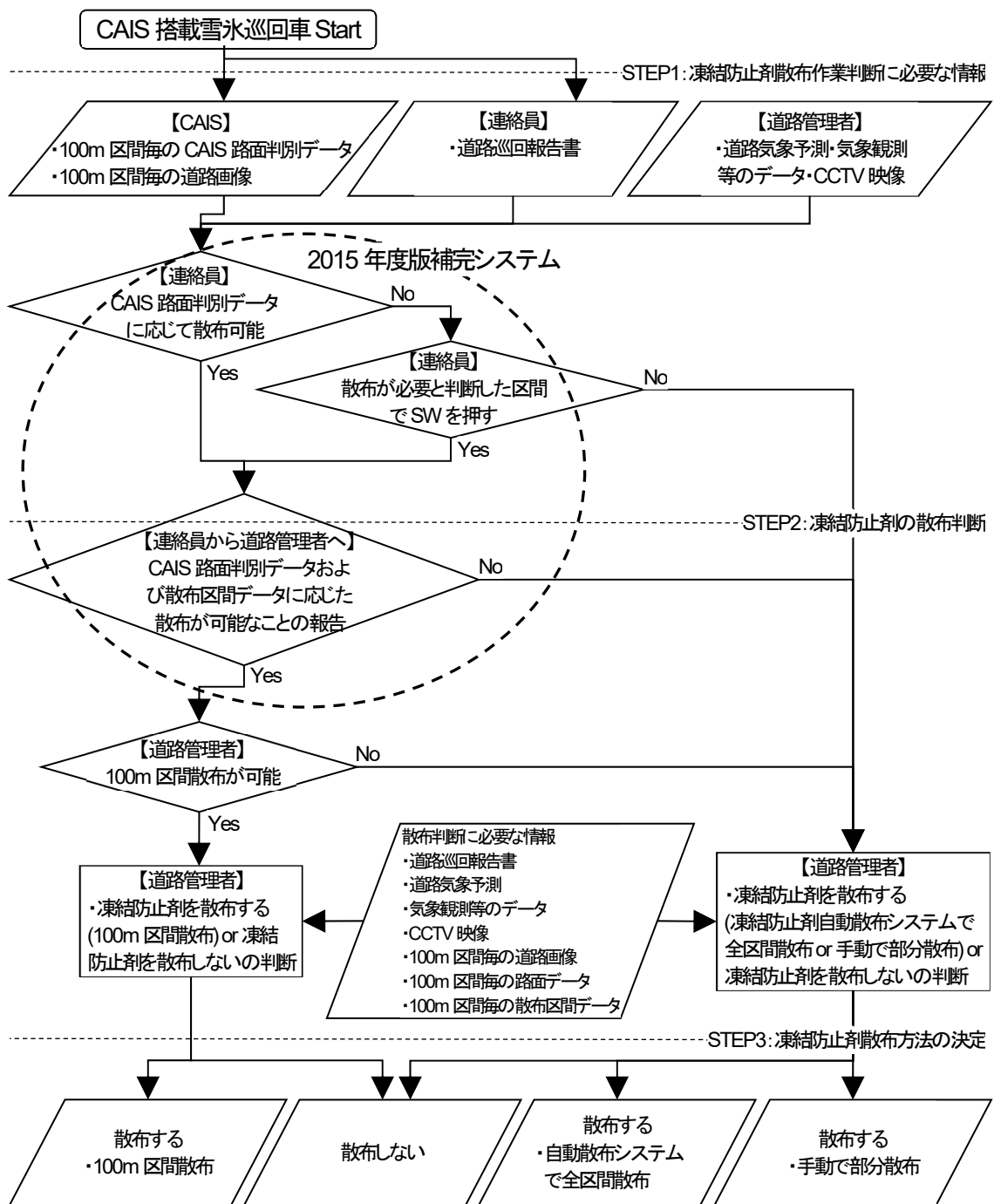


図 5.3 2015 年度版補完システムの散布判断プロセス

5.4 2018年度版補完システムの散布判断プロセス

図 5.3 のフローは、図 2.5 に比べ連絡員・道路管理者の作業が増えている。図 5.3 の 2015 年度版補完システムの散布判断プロセスでは、連絡員と道路管理者の CAIS 路面判別データのチェックが重複するときがある。連絡員は雪氷巡回車で CAIS 路面判別データをチェックする。雪氷巡回後に、道路管理者も道路画像を使って CAIS 路面判別データをチェックする。この作業に時間と労力を要していた。このため、道路管理者が 100m 区間散布を選択しないことが多くなった。図 5.3 のフローに示すように、連絡員が CAIS 路面判別データに応じた散布の可否を判断できなかったとき、全区間散布あるいは手動で部分散布となる。これらのため、100m 区間散布の実施が少なくなった。そこで、2018 年度から 100m 区間散布の利用を拡大するため、表 5.1 に示す 2018 年度版補完システムを開発した。図 5.4 に 2018 年度版補完システムを加えたスマート凍結防止剤散布システムの凍結防止剤散布作業実施判断のプロセス（以降、2018 年度版補完システムの散布判断プロセス）を示す。

STEP1 では、2015 年度版補完システムの散布判断プロセスと同様に道路管理者は CAIS 路面判別データに加え凍結防止剤散布作業に必要な情報を収集する。2018 年度版補完システムでは連絡員に道路管理者へ 3 つの報告をすることを義務化した（①CAIS 路面判別データに応じて散布可能かどうかの報告、②散布必要と判断した区間で SW を押したかどうかの報告、③CAIS 路面判別データを他の業務のためチェックできなかった区間の報告）。また、連絡員の負担を減らすため、SW を利用しやすくなるよう工夫した（表 5.1 A）。

2018 年度版補完システムでは、STEP2 の凍結防止剤散布判断で、道路管理者による CAIS 路面判別データの確認が容易となるよう改良した。CAIS 路面判別データおよび散布区間データに応じた散布が可能かどうかの報告があったとき、道路管理者による道路画像の確認作業を省略できるようにした（表 5.1 B）。連絡員から CAIS 路面判別データを他の業務のためチェックができない区間があったとの報告があったとき、その区間のみの道路画像を道路管理者は目視で確認し、100m 区間散布が可能かどうかを判断するシステムを追加した（表 5.1 C）。CAIS 路面判別データで凍結防止剤を散布しないと判別した区間の道路画像のみを表示する機能を追加した（表 5.1 D）。さらに、これらの確認作業をしながら、道路管理者は、散布しない 100m 区間の画像を表示している PC からワンクリックで散布に変更できる機能を加えた（表 5.1 E）。これらの改良から、道路管理者が 100m 区間散布を利用しやすいようにした。

STEP3 に凍結防止剤散布方法の決定を示す。道路管理者が前述の改良により 100m 区間散布を選択しやすいようになった。連絡員がチェックできなかった区間であっても道路管理者が 100m 区間散布が可能と判断できるようになるなど、100m 区間散布を選択するケースが多くなった。一方、連絡員と道路管理者の両者が CAIS 路面判別データをチェックできなかったとき、100m 区間散布は実施しない。

表 5.1 2018 年度版補完システムの改良点

記号	項目	2015 年度版補完システム	2018 年度版補完システム
A	SW の接続方法	有線の SW	ワイヤレスで指輪タイプの SW
B	CAIS 路面判別データのチェック	常に連絡員と道路管理者がチェック	基本的に連絡員のみでチェック, 連絡員が確認できなかった区間は道路管理者もチェック
C	道路管理者による道路画像の確認方法	複数のソフトを使用し, 全データからチェックができない区間の道路画像を抽出して確認	1つのソフトで, チェックができない区間のみの道路画像を選択して確認
D	道路画像の表示方法	走行区間の道路画像が全て表示	散布しない区間の道路画像のみ表示
E	道路管理者による散布区間の変更	変更する機能無し	散布しない区間の道路画像をクリックして散布する区間に変更可能

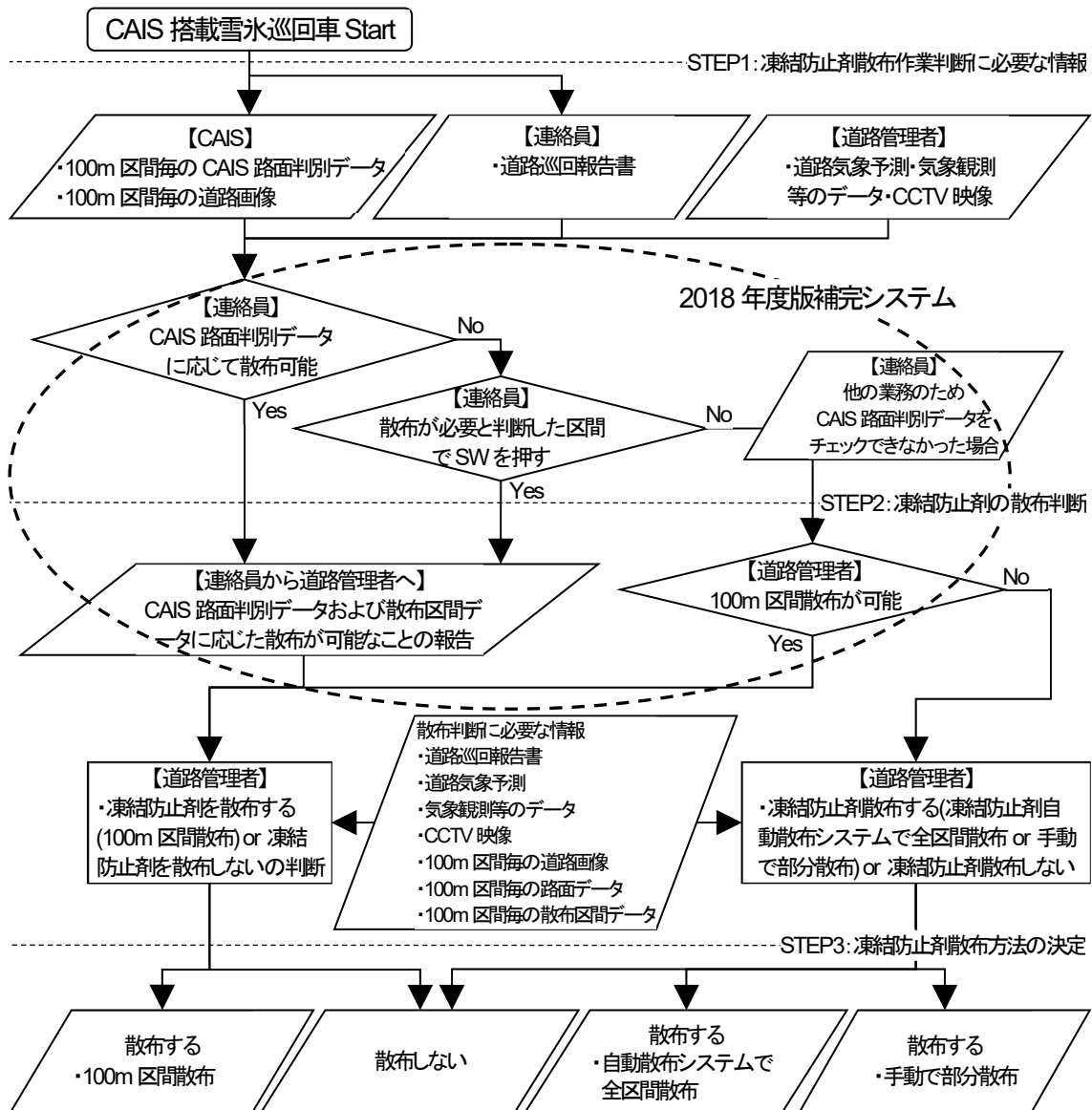


図 5.4 2018 年度版補完システムの散布判断プロセス

5.5 2018年度版補完システムによる凍結防止剤散布量の低減効果の具体例

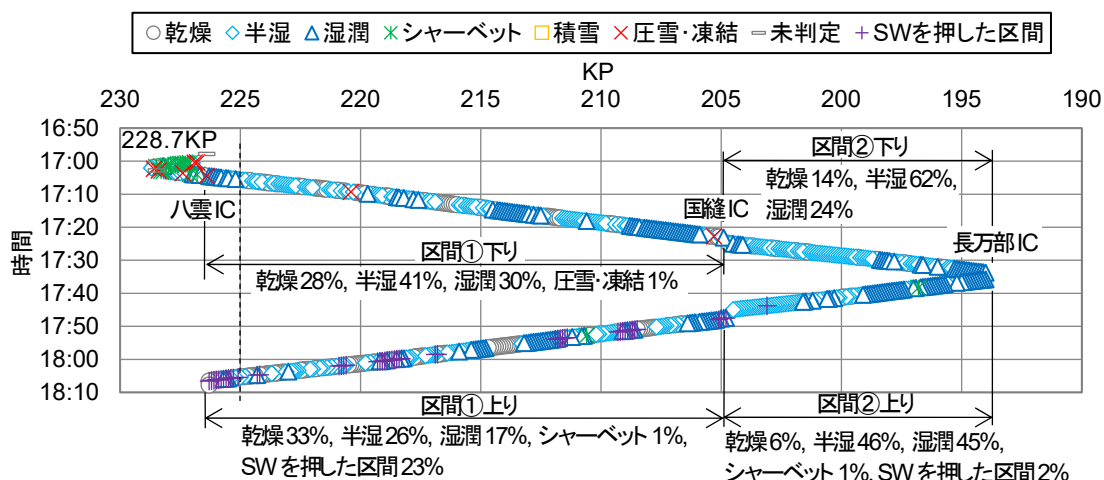
図 5.5 は 100m 区間毎の CAIS 路面判別データとそれに連絡員が散布すべきと判断した 100m 区間（以降、SW を押した区間）を重ねた路面判別結果を示している。

図 5.5 は 2018 年度版補完システムの散布判断プロセスを用いており、連絡員が SW を押した区間はあったが、100m 区間散布が行われた。図 5.5(a)は 2019 年 2 月 18 日 17 時に八雲 IC～国縫 IC および国縫 IC～長万部 IC を走行した雪氷巡回車による路面判別結果を示す。図 5.5(b)は 2019 年 2 月 22 日 17 時における同区間の路面判別結果を示している。雪氷巡回車は、最初に八雲 IC 出入口のノーズ（高速道路本線とランプとの接続端）間の状況を把握するため、八雲 IC を出発後、八雲パーキングエリアに向かう。228.7KP で U ターンし、国縫 IC を通過し長万部 IC に向かう。その後、長万部 IC で U ターンし、国縫 IC を通過し八雲 IC に戻る。表 5.2 に両事例別に 2018 年度版補完システムの散布判断プロセスを用いた散布量（以降、2018 年度版補完システムによる散布量）（結果）を示す。また、2015 年度版補完システムの散布判断プロセスと仮定（図 5.3 のフローで凍結防止剤散布作業を行ったと仮定）したときの凍結防止剤散布量（以降、2015 年度版補完システムと仮定したときの散布量）（推定値）も示す。なお、八雲 IC～国縫 IC 区間（区間①の上りと下り）への散布を 1 台目の散布車が担当し、国縫 IC～長万部 IC 区間（区間②の上りと下り）への散布を別の散布車が担当する。

図 5.5(a)の八雲 IC⇒国縫 IC（区間①下り）・国縫 IC⇒長万部 IC（区間②下り）・長万部 IC⇒国縫 IC（区間②上り）では、連絡員がほぼすべての区間で CAIS 路面判別データに応じて散布可能と判断したことがわかる。ただし、長万部 IC⇒国縫 IC（区間②上り）における SW を押した区間 2%を除く。一方、国縫 IC⇒八雲 IC（区間①上り）の CAIS 路面判別データは半湿と湿潤を合わせて 43%、乾燥が 33%となった。その中で、CAIS 路面判別データで乾燥と判別した区間で連絡員が SW を押した区間が多数あり、その割合は 23%となった。SW を押した区間は乾燥と半湿もしくは湿潤が交互に入り混じった区間となっており、CAIS 路面判別データと異なる判断を連絡員が行った。雪氷巡回後、連絡員は道路管理者に SW を押した区間を含めた CAIS 路面判別データで散布が可能であることを報告した。道路管理者は 100m 区間散布を選択した。2018 年度版補完システムによる散布量は八雲 IC～国縫 IC で 1.5t、国縫 IC～長万部 IC で 1.0t となった（表 5.2）。

一方、図 5.3 のフローと仮定したとき、区間①上りで SW を押した区間が広範囲となったことから八雲 IC～国縫 IC では全区間散布、区間②上りで SW を押した区間が一部であった国縫 IC～長万部 IC では 100m 区間散布となる。2015 年度版補完システムは、散布しない区間のみの道路画像を確認する仕組みになっていない。道路管理者は SW が押された道路画像を走行区間の全道路画像から選択表示し、それらから路面状況を確認する。区間①上りは、SW を押した区間が広範囲に点在して

(a) 2019年2月18日17時巡回の事例



(b) 2019年2月22日17時巡回の事例

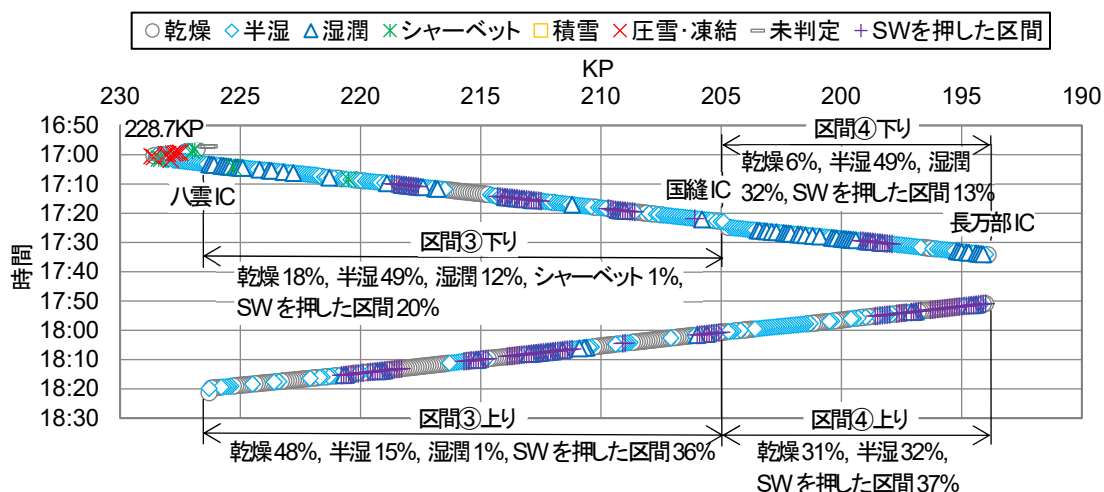


図5.5 2019年2月18日17時と2019年2月22日17時に八雲IC～国縫ICおよび国縫IC～長万部ICの路線の路面判別結果(路面判別結果をもとに100m区間散布を行った事例)

いる。このため、道路管理者は道路画像217枚をほぼ全て確認する必要がある。散布作業の準備までの時間は短く、区間①上りのようなSWを押しした区間の状況では、道路管理者は全区間散布を選択すると考えられる。図5.3のフローで凍結防止剤散布作業を行ったと仮定したときの八雲IC～国縫ICにおける散布量(推定)は2.1tとなる。2018年度版補完システムにより、八雲IC～国縫ICは0.6tの低減となる。

図5.5(b)の八雲ICから長万部ICのCAIS路面判別データは、区間③の上りと下り、区間④の上りと下りの複数区間において半湿・湿潤・乾燥が混在していた。また、区間③の上りと下り、区間④の上りと下りの複数区間で連絡員がSWを押しした区間が多数あった。その割合は、八雲IC⇒国縫ICで20%(区間③下り)、国縫IC⇒八雲ICで36%(区間③上り)、国縫IC⇒長万部ICで13%(区間④下り)、長万部

IC⇒国縫 IC で 37% (区間④上り) であった。雪氷巡回後、連絡員から道路管理者に SW を押した区間を含め CAIS 路面判別データで散布可能なことが報告された。道路管理者は 100m 区間散布を選択した。八雲 IC～国縫 IC における散布量は 1.4t, 国縫 IC～長万部 IC は 0.9t となった (表 5.2)。一方、図 5.3 のフローと仮定したとき区間①と区間②とも全区間散布となる。道路管理者が全ての区間の画像を確認する時間はなく、道路管理者は全区間散布を選択する。八雲 IC～国縫 IC における全区間散布による散布量 (推定) は 2.1t, 国縫 IC～長万部 IC における全区間散布による散布量 (推定) は 1.1t となる。2018 年度版補完システムにより、八雲 IC～国縫 IC は 0.7t, 国縫 IC～長万部 IC は 0.2t の低減となる。

表 5.2 2018 年度版補完システムによる散布量 (結果) と 2015 年度版補完システムと仮定したときの散布量 (推定値) とそれらの差 (低減量)

年月日	区間	路線	路面判別結果の構成率	A: 2018 年度版補完システムによる散布量 (結果) (t)	B: 2015 年度版補完システムと仮定したときの散布量 (推定値) (t)	低減量 (t) (B-A)
2018年2月18日	区間① 下り	①八雲 IC⇒ 国縫 IC	乾燥 28%, 半湿 41%, 湿潤 30%, 圧雪・凍結 1%	1.5	2.1	0.6
	区間① 上り	①国縫 IC⇒ 八雲 IC	乾燥 33%, 半湿 26%, 湿潤 18%, シャーベット 1%, SW を押した区間 23%			
	区間② 下り	②国縫 IC⇒ 長万部 IC	乾燥 14%, 半湿 62%, 湿潤 24%,	1.0	1.0	0
	区間② 上り	②長万部 IC ⇒国縫 IC	乾燥 6%, 半湿 46%, 湿潤 45%, シャーベット 1%, SW を押した区間 2%			
2018年2月22日	区間③ 下り	③八雲 IC⇒ 国縫 IC	乾燥 18%, 半湿 49%, 湿潤 12%, シャーベット 1%, SW を押した区間 20%	1.4	2.1	0.7
	区間③ 上り	③国縫 IC⇒ 八雲 IC	乾燥 48%, 半湿 15%, 湿潤 1%, SW を押した区間 36%			
	区間④ 下り	④国縫 IC⇒ 長万部 IC	乾燥 6%, 半湿 49%, 湿潤 32%, SW を押した区間 13%	0.9	1.1	0.2
	区間④ 上り	④長万部 IC ⇒国縫 IC	乾燥 31%, 半湿 32%, SW を押した区間 37%			

5.6 2017 年度と 2018 年度の凍結防止剤の低減量の比較

凍結防止剤の散布区間と事務所を同じとし、2017 年度と 2018 年度の凍結防止剤の低減量を比較した。2017 年度は、2015 年度版補正システムを用いている。検証対象とした区間は、札幌自動車道 (小樽 IC～札幌ジャンクション (以降, JCT)), 道央自動車道 (豊浦 IC～士別剣淵 IC), 道東自動車道 (千歳恵庭 JCT～むかわ穂別 IC), 深川留萌自動車道 (深川 JCT～深川西 IC), 日高自動車道 (苫小牧東 IC～沼ノ端西

IC) である。また、地域指令台は 6 箇所（札幌管理事務所、岩見沢管理事務所、旭川管理事務所、苫小牧管理事務所、室蘭管理事務所、帯広管理事務所）である。

表 5.3 に 2017 年度と 2018 年度においてスマート凍結防止剤散布システムが適用されたときの凍結防止剤の低減量の比較を示す。2017 年度におけるスマート凍結防止剤散布システムの運用期間中（2017 年 10 月 16 日～2018 年 4 月 9 日）、それによる 100m 区間散布の散布回数は 101 回であった。また、既存の散布判断プロセス（図 2.5）と比べたときの凍結防止剤の低減量は 61.6t であった。このうち、連絡員が CAIS 路面判別データに応じて散布可能と判断したケースの低減量は 54.8t であった。また、CAIS 路面判別データに SW を押した散布区間を含めたときの低減量は 6.8t であった。一方、2018 年度におけるスマート凍結防止剤散布システムの運用期間中（2018 年 10 月 30 日～2019 年 4 月 27 日）、それによる 100m 区間散布の散布回数は 372 回であった。また、既存の散布判断プロセス（図 2.5）と比べたときの低減量は 184.3t であった。このうち、連絡員が CAIS 路面判別データに応じて散布可能と判断したケースの低減量は 106.3t であった。また、CAIS 路面判別データに SW を押した散布区間を含めたときの低減量は 78.0t であった。

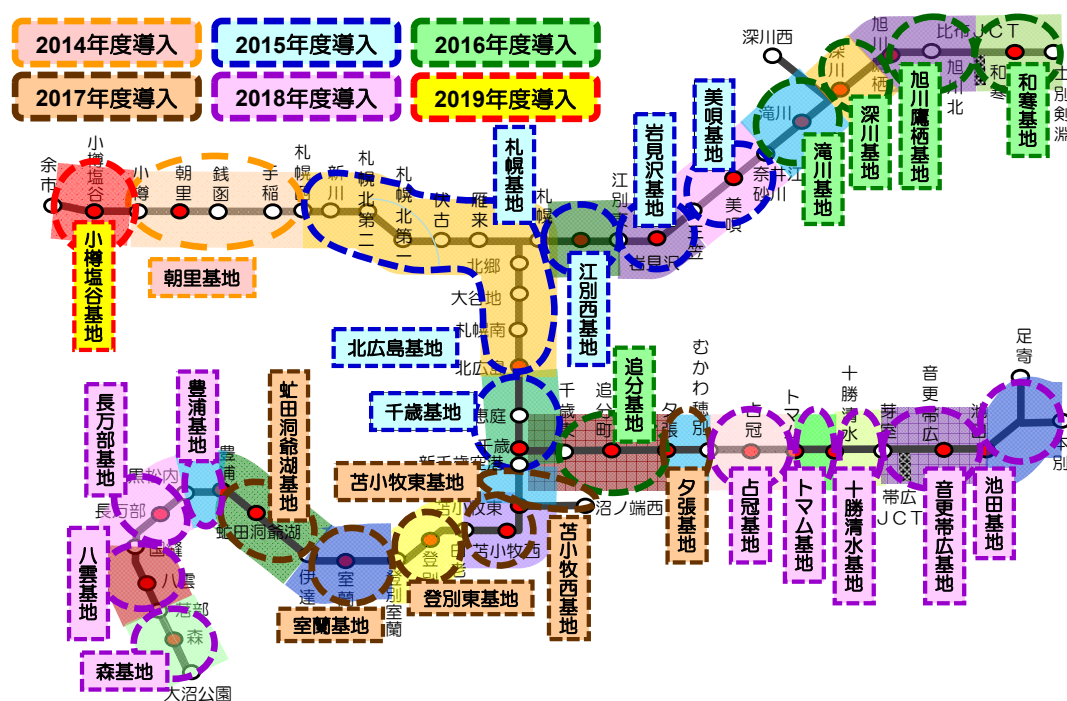
2017 年度と 2018 年度を比べると、2018 年度において凍結防止剤の散布回数は 271 回増え、凍結防止剤の低減量は 122.7t 増加した。2018 年度において、CAIS 路面判別データに SW を押した散布区間を含めたときの凍結防止剤の低減量が 10 倍強となった。これは、2018 年度版補完システムで、連絡員と道路管理者のどちらかが CAIS 路面判別データを確認すればよくなったこと、および道路管理者の道路画像確認作業が容易となったことがプラスとなり、CAIS 路面判別データを用いた 100m 区間散布の選択が容易となったためと考えられる。

表 5.3 2017 年度（2015 年度版補完システム）と 2018 年度（2018 年度版補完システム）の 100m 区間散布による凍結防止剤低減量

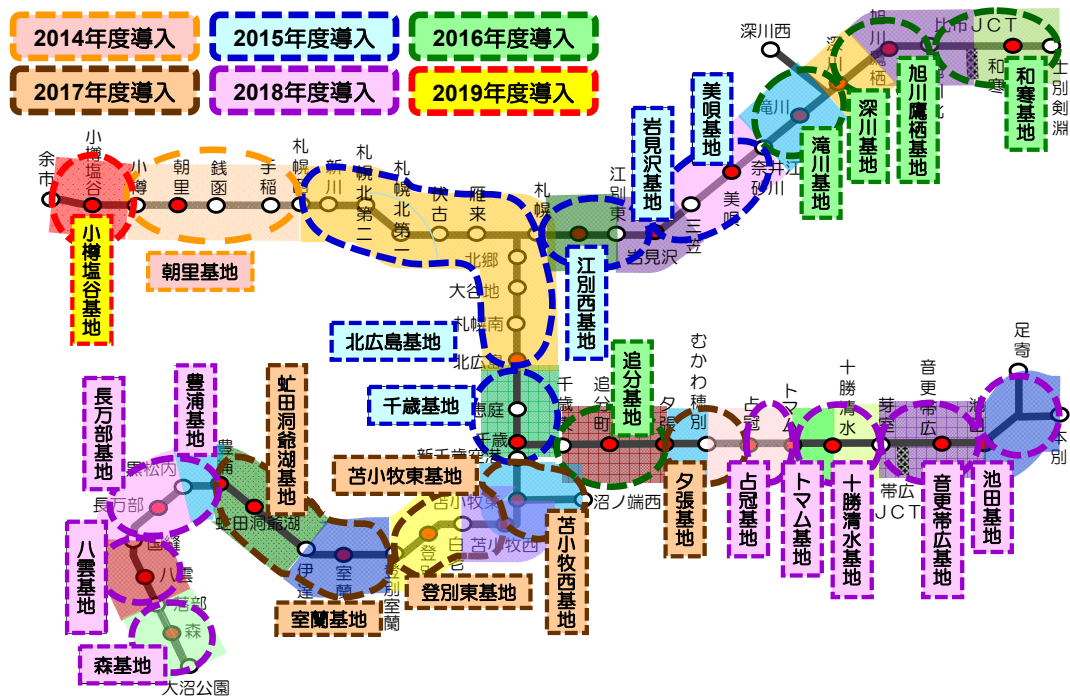
年度	2017 年度	2018 年度	2017 年度と 2018 年度の比較
100m 区間散布の回数(回)	101	372	+271
100m 区間散布による凍結防止剤の低減量(t) (A+B)	61.6	184.3	+122.7
A:CAIS 路面判別データに応じて散布可能と判断したケース(t)	54.8	106.3	+51.5
B:SW を押した散布区間を含め CAIS 路面判別データに応じて散布可能と判断したケース(t)	6.8	78.0	+71.2

5.7 スマート凍結防止剤散布システムの路線拡大

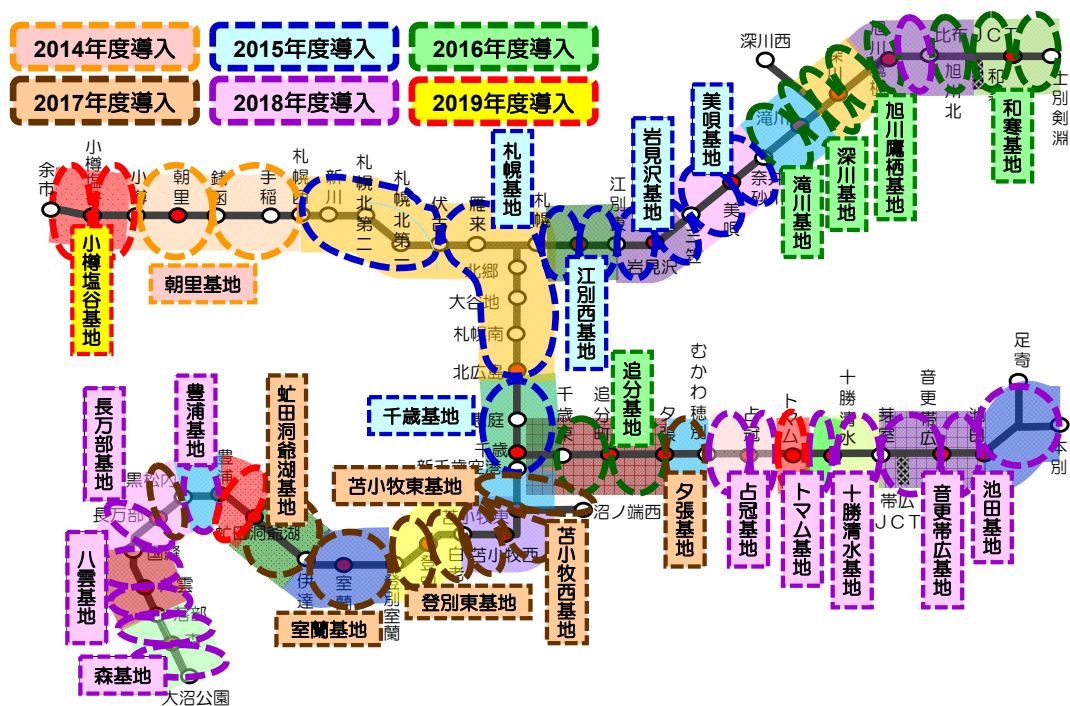
スマート凍結防止剤散布システムの導入は、NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路で交通量や凍結防止剤散布量が多い基地から展開を図った。図 5.6 (a) に示すように 2015 年度は道央圏を中心に導入を行い、2016 年度は札幌、岩見沢、旭川管理事務所の全基地に導入した。2017 年度は、苫小牧、室蘭の一部、帯広の一部に導入した。2018 年度は残りの基地へ導入し、全基地への展開となり（当時）、凍結防止剤を散布する関係車両全てにスマート凍結防止剤散布システムを導入した。CAIS を搭載した雪氷巡回車は 20 台（図 5.6 (b)）、自動凍結防止剤散布システムを搭載した凍結防止剤散布車は 44 台（図 5.6 (c)）、DD ホッパーを導入した基地は 26 基地（図 5.6 (d)）、補完システムを導入した地域指令台は 6 箇所（図 5.6 (d)）である。なお、後志自動車道（余市 IC～小樽 JCT）が 2018 年 12 月 8 日に開通された。本区間は、本論文の対象外である。



(a) スマート凍結防止剤散布システムの導入基地



(b) CAIS の導入基地および雪氷巡回区間



(c) 凍結防止剤自動散布システムの導入基地および凍結防止剤散布区間

5.8 スマート凍結防止剤散布システムの導入状況と凍結防止剤の低減量

スマート凍結防止剤散布システムの導入は、NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路で交通量や凍結防止剤散布量が多い基地から展開を図った。表 5.4 の上段にスマート凍結防止剤散布システムの導入状況を示す。スマート凍結防止剤散布システムの導入は、年々増加し、2018 年度に NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路で全基地・全車両に搭載した。2015 年度は道央圏を中心に導入を行い、2016 年度は札幌、岩見沢、旭川管理事務所の全基地に導入した。2017 年度は、苫小牧、室蘭の一部、帯広の一部に導入した。2018 年度は、室蘭、帯広の残りを加え、全基地と地域指令台（6 箇所）に導入した。CAIS を搭載した雪氷巡回車は 20 台、DD ホッパーを導入した基地は 26 基地、凍結防止剤自動散布システムを搭載した散布車は 44 台となった。2017 年度までは 2015 年度版補完システムが利用され、2018 年度からは 2018 年度版補完システムが利用された。

表 5.4 の中段にスマート凍結防止剤散布システムによる年度別の凍結防止剤散布量および推定した低減量の比較を示す。低減量の検証期間は、2015 年度は 2015 年 11 月 27 日～2016 年 3 月 25 日、2016 年度は 2016 年 12 月 6 日～2017 年 4 月 13 日、2017 年度は 2017 年 10 月 16 日～2018 年 4 月 9 日、2018 年度は 2018 年 10 月 30 日～2019 年 4 月 27 日である。スマート凍結防止剤散布システムを使用したときの散布量と既存の凍結防止剤散布方法を使用したと仮定したときの推定散布量との差から、凍結防止剤の低減量を求めた。低減量を明らかにするため、予めスマート凍結防止剤散布システムの使用時であっても、既存の方法による凍結防止剤散布判断を連絡員に依頼した。連絡員の判断を記載した報告書をベースに、既存の凍結防止剤散布方法による散布量を推定した。一方、スマート凍結防止剤散布システムは、既存の凍結防止剤散布方法と併用して運用された。ただし、既存の凍結防止剤散布方法であっても、図 4.3 の DD ホッパーは利用された。表 5.4 の中段に示すように、凍結防止剤の低減量はスマート凍結防止剤散布システムの導入の拡大に伴って 2015 年度の 685.0t から 2018 年度の 1858.2t まで増えた。

表 5.4 の下段に 100m 区間散布した凍結防止剤の散布回数と低減量を示す。なお、各年度で運用数が異なるため割合も示した。2015 年度は、記録が残っていないため対象外とした。2016 年度は、100m 区間散布した凍結防止剤の散布回数割合は 2.0% であり、低減割合は 13.8%であった。2017 年度は、100m 区間の散布回数割合が 1.1%、低減割合が 4.6%となり、2016 年度より低下した。これは、100m 区間散布を選択するには、道路管理者による道路画像の確認作業の負担が大きくなっていったためと考えられる。一方、2018 年度は、100m 区間の散布回数割合が 6.6%、低減割合が 17.5%と上昇した。2018 年度版補完システムから、連絡員と道路管理者が情報を共有し、重複していた路面監視を解消し効率的な凍結防止剤散布作業実施判断の意思決定を行うことが可能になったためと考えられる。

表 5.4 スマート凍結防止剤散布システムの導入状況と凍結防止剤の低減量

年度	2015	2016	2017	2018
補完システムの種類	2015 年版	2015 年版	2015 年版	2018 年版
管理延長(km)	144.3	295.2	434.2	696.3
雪氷基地数(基地)	6	11	17	26
雪氷巡回車数(台)	5	9	13	20
凍結防止剤散布車数(台)	11	21	29	44
補完システムを導入した地域指令台(箇所)	2	3	6	6
A: スマート凍結防止剤散布システムによる凍結防止剤の総散布回数(回)	3830	7397	9192	10291
B: スマート凍結防止剤散布システムの凍結防止剤散布量(結果) (t)	9818.6	19126.6	23397.8	24531.8
C: 既存の凍結防止剤散布量(推定値) (t)	10503.6	20251.5	24734.5	26390.0
D: 凍結防止剤の低減量(t) (C-B)	685.0	1124.9	1336.7	1858.2
E: 凍結防止剤の低減割合(%) (D/B×100)	7.0	5.9	5.7	7.6
F: 100m 区間散布した凍結防止剤の散布回数(回)	—	147	101	679
G: 100m 区間散布した凍結防止剤の散布回数割合(%) (F/A×100)	—	2.0	1.1	6.6
H: 100m 区間散布による凍結防止剤の低減量(t)	—	155.0	61.6	324.7
I: 100m 区間散布による凍結防止剤の低減割合(%) (H/D×100)	—	13.8	4.6	17.5

5.9 2018 年度における管理事務所別の凍結防止剤の低減量

表 5.5 に 2018 年度における管理事務所別の凍結防止剤の低減量を示す。スマート凍結防止剤散布システムの運用期間中(2018 年 10 月 30 日～2019 年 4 月 27 日), それによる散布量は 24531.8t であった。札幌が 6472.8t, 岩見沢が 3384.0t, 旭川が 4998.2t, 苫小牧が 2575.5t, 室蘭が 4333.7t, 帯広が 2767.6t である。また, 低減量は 1858.2t であった。札幌が 315.7t, 岩見沢が 164.5t, 旭川が 355.3t, 苫小牧が 196.0t, 室蘭が 659.8t, 帯広が 166.9t である。このうち, 凍結防止剤自動散布システムを使用したときの低減量は 907.4t であった。札幌が 80.2t, 岩見沢が 83.1t, 旭川が 218.1t, 苫小牧が 106.2t, 室蘭が 355.5t, 帯広が 64.3t である。

事務所別に比べると, 散布量は, 札幌が最も多く, 次に旭川, 室蘭の順となっている。しかし, 低減量は室蘭が最も多く, 札幌の倍程度となった。また, 凍結防止剤自動散布システムを使用したときの低減量が特に多い。これは, 室蘭は管内で平均気温が高い地域であるため, 乾燥の路面出現率が高く, 100m 区間散布が実施可能な条件の頻度が高くなったためと考えられる。

表 5.5 2018 年度における管理事務所別の凍結防止剤の低減量

管理事務所	札幌	岩見沢	旭川	苫小牧	室蘭	帯広	合計
散布量(t)	6472.8	3384.0	4998.2	2575.5	4333.7	2767.6	24531.8
低減量(t)	315.7	164.5	355.3	196.0	659.8	166.9	1858.2
DD ホッパーのみ(t)	235.5	81.4	137.2	89.8	304.3	102.6	950.8
自動散布低減量(t)	80.2	83.1	218.1	106.2	355.5	64.3	907.4
低減割合(%)	4.9	4.9	7.1	7.6	15.2	6.0	7.6

5.10 北海道の高速道路における事故件数と平均速度の変化について

2015 年度からのスマート凍結防止剤自動散布システム導入により、表 5.4 に示すように凍結防止剤散布量は低減された。一方、凍結防止剤が過剰に低減されると、安全性と快適性が損なわれるかもしれない。そこで、スマート凍結防止剤自動散布システムが導入された 2015 年度から 2018 年度までの冬期の北海道の高速自動車国道における物損事故件数と NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路全区間における車両平均速度の推移を求めた。対象とした冬期間は、各年度とも 11 月 1 日から翌年 3 月 31 日までとした。

冬期の物損事故の発生および走行速度の低下は、冬期の気象状況の厳しさに影響を受ける。そのため、北海道の冬期の状況を調査した。表 5.6 に 2015 年度から 2018 年度までの冬期における北海道 7 地点（アメダス：旭川，網走，札幌，帯広，根室，寿都，函館）の気象データを示す。2017 年度の最深積雪と降雪量が突出して多く、逆に 2018 年度はこの 4 年間で雪の少ない冬であったことがわかる。また、気温傾向から、2016 年度と 2017 年度の冬期がこの 4 年間で気温が低い冬であったことがわかる。

表 5.6 年度別の北海道 7 地点の気象データ（北海道 7 地点（旭川，網走，札幌，帯広，根室，寿都，函館）のアメダス観測所の観測データの平均値）

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	平年値
平均気温 (°C)	-0.5	-1.6	-1.2	-0.5	-1.3
最高気温 (°C)	3	1.8	2.3	2.9	2.2
最低気温 (°C)	-4.2	-5.3	-5.1	-4.3	-5.2
最深積雪 (cm)	67.4	61.4	81.9	55.6	47.1
降雪量合計 (cm)	310	333.7	381.7	286.4	416.7

表 5.7 に 2015 年度から 2018 年度までの北海道の高速自動車国道における事故件数を示す。物損事故件数は、冬期および夏期（4 月から 10 月）ともに年々増加傾向にある。冬期の物損事故件数の 4 年間の平均は、夏期に比べて約 1.7 倍多くなった。一方、人身事故件数は、冬期および夏期ともに年度によりばらつきがある。冬期の人身事故件数の 4 年間の平均は、夏期に比べて約 1.4 倍多くなった。2018 年度の冬期の物損事故件数および人身事故件数は 4 年間のほぼ平均値であった。2018 年度の冬期は、雪は少ないが気温は他の年度とほぼ同じであった。2018 年度の冬期は、他の 3 年度と比べてスマート凍結防止剤散布システムを導入した管理延長が最も長く、凍結防止剤の低減量も最多となっている（表 5.4）。

表 5.7 年度別の北海道の高速自動車国道における事故件数

年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	4 年間の平均
物損事故(件): 冬期	1519	1619	1795	1723	1664
物損事故(件): 夏期	871	1007	984	1070	983
物損事故: 冬期/夏期	1.74	1.61	1.82	1.61	1.69
人身事故(件): 冬期	40	49	43	46	45
人身事故(件): 夏期	30	41	27	34	33
人身事故: 冬期/夏期	1.33	1.20	1.59	1.35	1.36

齊田ら⁴⁾は、走行速度は、路面すべり抵抗値の減少（路面状態悪化）に伴い低下する傾向があり、通過に要する時間のばらつきが大きくなることを指摘している。表 5.8 に 2015 年度から 2018 年度までの NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路全区間における冬期の車両の平均速度とその標準偏差を示す。平均速度は、NEXCO 東日本北海道支社管内の主に IC と IC の中間付近 67 箇所に設置してあるトラフィックカウンターのデータから求めた。2018 年度の冬期の平均速度は 85.5km/h であり、2016 年度の冬期および 2017 年度の冬期と同程度である。この 4 年間の標準偏差は 10km/h 前後であり、2018 年度の冬期はほぼその分布の中央付近の値となった。

表 5.8 年度別の NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路全区間における冬期の車両の平均速度とその標準偏差

年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	4 年間の平均
平均速度(km/h)	87.0	85.4	85.1	85.5	85.8
平均速度の標準偏差	9.4	10.1	11.2	10.1	10.2

5.11 スマート凍結防止剤散布システムによる凍結防止剤散布量の低減効果

図 5.7 に NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路の凍結防止剤散布量と累計降雪量の関係を示す。この図は、緑色の棒グラフが各年度の凍結防止剤散布量を示しており、オレンジ色の折れ線が累計降雪量を示している。累計降雪量の値は、加重平均することによって求めた。自動積雪深計は、高速道路本線近傍の各 IC に設置されている。各 IC の降雪量： $snow_1$, $snow_2$, $snow_3$, … , $snow_n$ に対する降雪量の占める道路延長： A_1 , A_2 , A_3 , … , A_n とするとき、降雪量の加重平均 \overline{snow} は、式 (3) で求めることができる。

$$\overline{snow} = \frac{\sum_{i=1}^n snow_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3)$$

図 5.7 から、累計降雪量が増えると凍結防止剤散布量が増える傾向にある。そこで、単位累計降雪量当たりの凍結防止剤散布量を求めた。2009 年度は、累計降雪量が 454 cm、凍結防止剤散布量が 23855.2t である。単位累計降雪量当たりの凍結防止剤散布量の値は、52.5t/cm である。この 2009 年度の値を基準して各年度の増減を算出した。図 5.8 に単位累計降雪量当たりの凍結防止剤散布量の各年度の増減を示す。この図から、2016 年度までは凍結防止剤散布量が増加傾向にあることが確認できる。しかし、スマート凍結防止剤散布システムの導入が増えた 2017 年度、さらに 2018 年度には、減少させることができていた。2017 年度から減少させることができたのは、5.9 節に示すように、管内で低減量が最も多い室蘭や苫小牧の地域が運用区間に加わったためと考えられる。

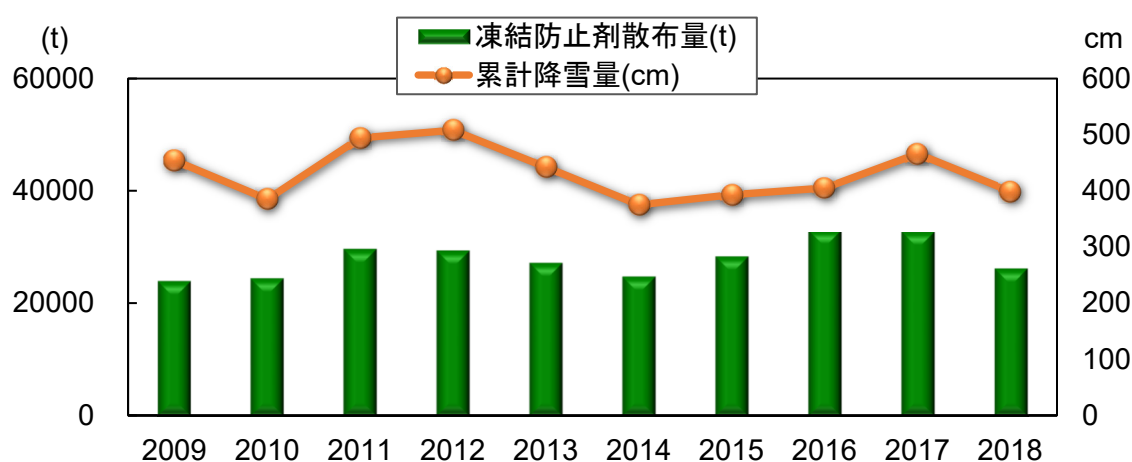


図 5.7 NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路の凍結防止剤散布量と累計降雪量の関係

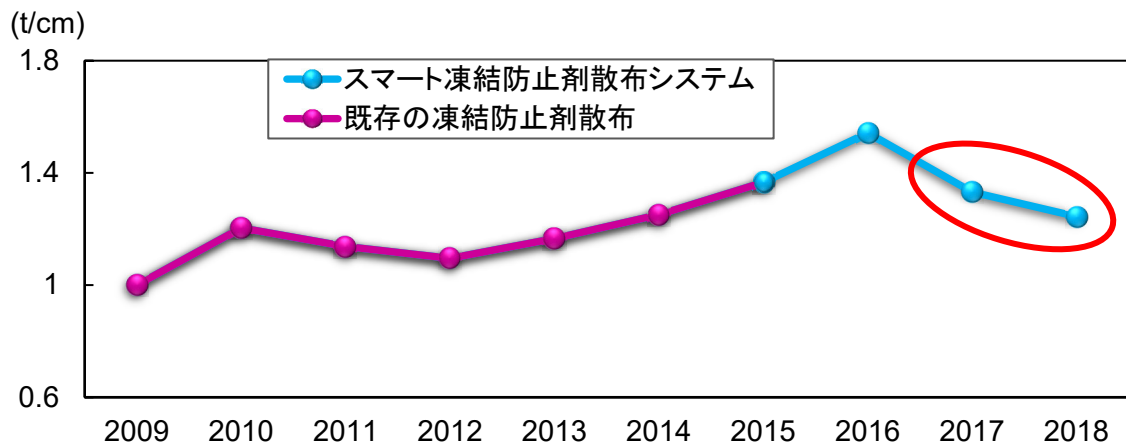


図 5.8 単位累計降雪量当たりの凍結防止剤散布量の各年度の増減

第 5 章参考文献

1. Ohiro, T., Takakura, K., Sakuraba, T., Hanatsuka, Y. and Hagiwara, T. : Development of advanced anti-icing spray system using automated road surface condition judgement system, Transportation research record, TRB 98th Annual meeting paper, 19-04400, 1-15, 2019.
2. Ohiro, T., Hagiwara, T., Takakura, K., Nakamura, H. and Hanatsuka, Y. : A smart salting system that incorporates road managers' judgements into an automated process towards safe, Efficient winter road maintenance and management, Transportation research record, TRB 99th Annual meeting paper, 20-03354, 1-15, 2020.
3. 大廣智則, 萩原亨, 花塚泰史, 高倉清, 中村広美:安全で効率的な冬期道路管理を実現するための道路管理者と協調したスマート凍結防止剤散布システムの開発, 日本雪氷学会誌「雪氷」, 82, 6, 2020. (印刷中).
4. 齊田光, 佐藤信吾, 大浦正樹: 冬期路面および堆雪状態の変化が車両走行速度および時間信頼性に及ぼす影響の評価. 北海道開発技術研究発表会, 62, 管-13, 2018.

第 6 章 結論

6.1 本研究の成果

スマート凍結防止剤散布システムは凍結防止剤散布量を低減できるが、自動化による課題があり、凍結防止剤の散布判断を安全とするため、自動化を補完するための手動システムが必要と言えた。そこで、凍結防止剤の散布方法を自動化する一方、手動システムである 2015 年度版補完システムを開発し、システム制御に組入れた。このように、冬期道路交通の安全性・快適性が損なわれない冬期路面管理となるようなシステムとし、スマート凍結防止剤散布システムを開発し実用化してきた。また、スマート凍結防止剤散布システムで散布量を低減させるには、100m 区間散布することが重要である。しかし、100m 区間散布を採用するには、道路の安全運用に責任を持つ道路管理者の同意が必要となる。CAIS を用いた 100m 区間毎の散布判断は完全ではない。そこで、凍結防止剤を運用する様々な現場の担当者の意見をシステム制御に組入れることとし、安全かつ安心を確保しつつ散布量を低減することに貢献する 2018 年度版補完システムを開発した。2018 年度版補完システムは、CAIS 路面判別データのミス等を手動で修正することで安全かつ安心な路面管理を実現する一方、連絡員と道路管理者が情報を共有し、重複していた路面監視を解消することで効率的な凍結防止剤散布作業実施判断の意思決定を行う。2018 年度版補完システムの改良点を詳細に示し、2015 年度版補完システムから変わったことによる 100m 区間散布した凍結防止剤の低減量を比較した。さらに、スマート凍結防止剤散布システムを利用したことによる影響の有無を知るため、北海道の高速道路の冬期の事故件数および走行速度の年変動を示した。

本研究では、2015 年度から 2018 年度、NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路においてスマート凍結防止剤散布システムを運用した。スマート凍結防止剤散布システムの導入は、年々増加し、2018 年度に NEXCO 東日本北海道支社が管理する高速道路の全ての基地・全ての車両に搭載された。スマート凍結防止剤散布システムを実際に使用したときの散布量と既存の凍結防止剤散布方法を使用したと仮定したときの推定散布量との差から、スマート凍結防止剤散布システムの運用により凍結防止剤散布量が低減されたことを定量的に明らかにした。また、2018 年度版補完システムは、CAIS 路面判別データの課題等を現場の連絡員が手動で修正し道路管理者へ報告するプロセスを追加した。また、道路管理者の路面監視の負担を連絡員と道路管理者が情報を容易に共有できる仕組みを追加することで軽減した。これらの仕組みを追加したことから、道路管理者が 100m 区間散布を採用する回数が増えた。2017 年度において 100m 区間散布の回数は 2016 年度に比べ減少していたが、2018 年度において 100m 区間散布が 271 回増え、凍結防止剤散布量はそれに伴い 122.7t 減った。さらに、スマート凍結防止剤散布システムによる凍結防止剤の全低減量を検証した。2015 年度から 2017 年度までは 2015 年度版補完システムを用い、2018 年度は 2018 年度版補完システムを用いた。凍結防止剤の低減量はスマー

ト凍結防止剤散布システムの導入の拡大に伴って 2015 年度の 685.0t から 2018 年度の 1858.2t まで増えた。一方、冬期の事故件数および走行速度の年変動から凍結防止剤が過剰に低減されたときに懸念される安全性や快適性の低下が、スマート凍結防止剤散布システムが運用された 2015 年度冬期から 2018 年度冬期において見られなかった。つまり、スマート凍結防止剤散布システムの運用により、冬期間における高速道路の安全性や快適性の低下はなく、冬期路面管理によるサービスレベルは保たれていた。また、スマート凍結防止剤散布システムの導入により、増加傾向にあった凍結防止剤散布量を減少させることができたことを明らかにした。

スマート凍結防止剤散布システムのメリットを活かしつつ NEXCO 東日本が管理する高速道路の北海道全体にそれを普及させることができた理由として、補完システムの存在を挙げることができる。もし、補完システムがなければ、CAIS 路面判別データがミスとなったときなど道路管理で最重要な安全性が軽視されることになり、現場でのシステム利用は進まなかったと考えられる。本研究は凍結防止剤の低減に寄与するシステムを開発し実用化したことが主な成果であるが、自動化等の先進システムの実用化には自動化システムだけでは現場で受け入れ難く、自動化システムのエラーを人がカバーする手動システムと組み合わせることが重要であることを実際のシステムで示したことも本研究の成果と言える。

6.2 今後の課題

今後、スマート凍結防止剤散布システムを使用し、100m 区間散布の実施が増えれば凍結防止剤の更なる低減が可能となる。そのためには、CAIS の課題を解消するシステム開発が必要である。具体的には、CAIS と画像処理による面的路面状態判別システムの開発である。走行軌跡のみの CAIS の路面判別を画像処理による路面判別がカバーし、接触しなければ判らない凍結路面の判別などを CAIS が担当する。このような改良により、連絡員あるいは道路管理者による路面状態の再判定などの関与（補完システムへの依存）を軽減し、100m 区間散布の実施を可能とする場面を増やすことが必要となる。また、路面予測システムを確立し、路面状態の変化を先読みして事前散布にもスマート凍結防止剤散布システムを活用し、さらなる凍結防止剤散布量の低減を図っていきたい。

第 6 章参考文献

1. Mori, T., Ohiro, T., Hanatsuka, Y. and Higuchi, T. : Data driven road condition forecasting with high spatial resolution: Utilizing tire-centric road condition monitoring technology, 23rd IEEE International conference on intelligent transportation systems, 1-8, 2020.

謝 辞

本研究は、著者が北海道大学大学院工学院 北方圏環境政策工学専攻 社会人博士後期課程在籍中に、先端モビリティ工学研究室、萩原亨教授の指導のもとに行ったものです。本研究は、多くの方の御指導や御支援に支えられてきました。ここに謝意を表します。

萩原亨先生には、社会人学生として研究時間が制約された中、常に今後の進むべき方向を示していただきました。特に論文の書き方は尊敬の念に堪えません。萩原亨先生のご指導がなければ、博士論文をとりまとめるに至りませんでした。また、公私にわたり多大なるご指導や温かいお言葉を頂きました。深甚なる敬意と感謝の意を表します。

論文審査を通して、貴重な御意見を下さった北海道大学大学院の高野伸栄先生、内田賢悦先生に謹んで感謝の意を表します。

北海道科学大学の苫米地司理事長には、博士取得の必要性や地域に根差した研究（雪氷）が重要なことを公私にわたりご指導ご鞭撻いただきました。また、論文審査を通して、貴重な御意見をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

株式会社ブリヂストンの花塚泰史様とは、2009年10月に雪氷研究大会2009・札幌で初めてお会いしてから、CAISの実用化へ向けた研究を共にさせて頂きました。研究が何度も頓挫しそうになりましたが、熱意で乗りきることができました。共同研究を通してお互いに、研究者として・組織人として成長できたと実感しております。ここに深く感謝申し上げます。また、小松秀樹常務執行役員様を始め、株式会社ブリヂストンの社員の皆さまには多くのご協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

CAISの路面状態に応じて凍結防止剤を自動散布するきっかけを与えていただいたのは、株式会社ネクスコ・メンテナンス北海道の高倉清取締役保全部長（当時）です。また、株式会社ネクスコ・メンテナンス北海道の社員の皆さまには、凍結防止剤自動散布作業を通して開発したシステムを使用し、改良点をフィードバックして頂きました。ここに深く御礼申し上げます。

スマート凍結防止剤散布システム (ISCOS) の研究開発・実用化は、NEXCO 東日本北海道支社に事業化して頂いたものです。研究段階では技術企画課，実用段階では，事業統括課・保全課の皆さまにご協力頂きました。また，私の知り得ないところも含めて，NEXCO 東日本の多くの皆様にご協力を頂きました。ここに深く御礼申し上げます。

著者が所属する株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道の馬場敦美社長（当時）には，CAIS の実用化へ向けた研究から，スマート凍結防止剤散布システムの運用に至るまで全てのプロセスで承認して頂きました。また，社会人博士後期課程への入学をご快諾頂きました。馬場敦美社長がいなければこの研究ができなかったと言っても過言ではございません。また，外塚信テクノセンター長（当時）には，私に高速道路での研究をする機会を与えて頂きました。技術開発室（旧テクノセンター）のメンバーには，研究を協力して頂きました。株式会社ネクスコ・エンジニアリング北海道という職場は，研究・開発で終わりではなく，実用化から運用に至るまで，すべてのプロセスに関わることができ，素晴らしい環境であったと実感しております。ここに深く御礼申し上げます。

最後に，私事になりますが，丈夫な体に生み育ててくれた両親に感謝します。また，どんなに疲れていても息子，蒼の笑顔を見ると癒され力が湧いてきました。業務と並行しながら論文の執筆を行うことができたのは，妻，友香の支援があったからに他なりません。常に心の支えとなり，時には励まされ，勇気づけられてきました。妻の友香と息子の蒼に心から感謝いたします。