

## 残雪深制御による消融雪施設の省資源化と高効率化

○小野寺誠<sup>1</sup>, 田中日菜<sup>1</sup>, 杉原幸信<sup>2</sup>, 上村靖司<sup>2</sup>

(1:長岡技術科学大学 機械工学分野 2:長岡技術科学大学 技学研究院)

### 1. 緒言

温暖かつ多量の雪が降る北陸地域では、円滑な交通を維持するために、年間を通して温度がほぼ一定な地下水を散水して道路上の雪の消融雪を行う散水型消融雪装置、いわゆる「消雪パイプ」が広く普及している。しかし、冬季間の多量な地下水の汲み上げにより、地下水位が著しく低下する事例が観測されている。実際に、新潟県内の様々な地域で翌冬までに地下水位が回復しておらず、一度低下した地下水位が元に戻るためには長い時間を要する。このため、節水を目的として、積雪状況に応じた散水消融雪装置の高度な制御が求められている。

さらに、近年は地球温暖化の影響で、年間に降る雪の量は減少の傾向にあるが、比較的短時間で多量の雪が降り積もる、いわゆる「ドカ雪」の頻度が増えている。この影響により、冬季には大規模な車両滞留が発生しており、1000台以上の車が大雪の中道路に取り残された事例がある。このようなゲリラ豪雪から生じる交通麻痺等の雪害への対応も考慮する必要がある。

本研究では、散水消融雪装置の「省資源化」と「高効率化」を同時に実現しつつゲリラ豪雪にも対応しうる条件を探ることを目的とし、消雪パイプの地域別の最適な制御方法及び融雪熱量を検討した。また理論上の最適条件下での車両滞留危険度について評価を行った。

### 2. 融雪シミュレーションについて

路面上の積雪重量を求める為、上村らの改良 Degree-day<sup>[1]</sup>法を用いる。式(2-1)に積雪重量計算式を示す。

$$M_m = M_{m-1} + bP_m - aT_m - R_m \quad (2-1)$$

ここで、 $P_m$ と $T_m$ は、 $m$ 時間目の時間降水量 $[\text{kg m}^{-2}]$ 、と平均気温 $[\text{°C}]$ を意味する。 $R_m$ は融解量 $[\text{kg m}^{-2}]$ である。気象データは新潟県の5地点(表2参照)での AMeDAS 観測点のデータ(気温、降水量、積雪深の毎時データ)を用いた。ここでは、累計降雪深、最大積雪深、気温が異なるように地点を選定している。分析データは、2005年から2015年までの10年間について11月1日から翌年3月30日までの1時間毎のデータを用いた。このとき、1年のデータは3624時間分となる。そして、残雪深 $H_m$ は雪密度 $\rho_s$ を表1のように設定し、 $M_m/\rho_s$ より求めた。

散水消融雪装置の出力方法には固定出力と可変出力があり、固定出力が一般的でありイニシャルコストも低いが、無駄撒きが発生してしまう可能性が高い<sup>[2]</sup>。一方可変出力は無駄な出力を抑えつつ残雪も抑制できる可能性が示唆されているが、イニシャルコストが高い。可変出力の切り替えは、上村ら(2009)が「自動車に対して、路面を無雪状態にするのが理想であり、

このときのサービス水準は最大になるが、そのためのコストは膨大である。そこで、通常は所定量の残雪を許容(一般的には10cm以下)しながら道路除雪が行われる<sup>[3]</sup>と述べていることから、残雪深 $H_m$ より判定を行い、 $H_m \leq 5 \text{ cm}$ のときに定常融雪能力で融雪し、 $H_m > 5 \text{ cm}$ のとき高融雪能力で融雪を行う。以上の出力方法をまとめたものが表3である。

### 3. 制御方式と評価項目

散水消融雪装置の融雪量は、式(2-1)中の $R_m$ で表される。融雪装置を稼働する際は $R_m$ に融解量を与え、装置を停止するときは $R_m$ に0を与える。装置の発停は制御方式によって異なるが、今回は代表して以下の手法を用いて融雪シミュレーションを実施した。

降雪検知制御は降雪センサを用いて降雪を検知し、散水ポンプの発停を行うものであり、フローチャートを図1に示す。ここで、 $S_{f,m}$ は $m$ 時間目の時間降雪量 $[\text{cmh}^2]$ であり、式(2-1)中の、 $bP_m - aT_m$ の値が正となるときに運転を行うよう制御する。 $J_m$ は $m$ 時間目の散水消融雪装置の運転状況(停止時0, 運転時1)である。降雪検知制御は導入の際のイニシャルコストが安く、

表1 地域別の降雪密度

地域	新潟	柏崎	長岡	安塚	十日町
降雪密度 $\rho_s [\text{kg m}^{-3}]$	80	80	70	70	70

表2 シミュレーションの対象にする地域の AMeDAS 観測地域と平年値

地域	平均値(1991~2000年)		
	冬季平均気温 [°C]	冬季降水量 [mm]	
新潟	平野部	3.7	521.8
柏崎		3.8	805.4
長岡		2.6	826.7
安塚	山間部	1.5	1016.4
十日町		0.8	1045.7

表3 散水消融雪装置の出力方式

出力方式	融雪能力	初期費用
固定出力	常時一定	低
可変出力	$H_m \leq 5 \text{ cm}$ で低出力 $H_m > 5 \text{ cm}$ で高出力	高

技術的にも簡単で取り入れやすいため制御方式の主流とな

っている。しかし、降雪を検知した段階で動作してしまうため、路面状態を考慮した運転の発停が難しい。このため、無駄な運転が多く、省資源化の観点では問題があり、路面の残雪状態も不安定となる傾向がある<sup>1)</sup>

### 3.2 残雪深制御

残雪深制御は路面の残雪の有無を検知して散水消融雪装置を稼働させる制御方式である。フローチャートを図2に示す。降雪検知制御との違いは、運転判定が $m$ 時間目の時間降雪量 $S_{fm}$  [cmh<sup>-1</sup>]ではなく、 $m$ 時間目の残雪深 $H_m$  [cm]である点である。残雪深制御は路面に雪が存在しない限り装置が作動しないため、降雪検知制御で問題視されている無駄な運転が抑えられ、かつ路面の残雪が長時間にわたって発生しにくい特徴がある<sup>1)</sup>。本研究では、残雪深 $H_m$ が1cmとなるタイミングを基準に発停を行っており、残雪深が1cm未満になったときに装置を停止する。したがって、1時間散水し続けられない場合がある。この場合、1時間ごとの融雪熱量と残雪量から半端運転時間を決定する。

### 3.3 複合制御

複合制御は、散水消融雪装置の稼働制御には降雪検知制御、停止制御には残雪深制御を用いる制御手法であり、フローチャートを図3に示す。複合制御は、1時間前の運転状況 $J_{m-1}$ に応じて $m$ 時間の装置の運転状況 $J_m$ を判定する。停止中( $J_{m-1} = 0$ )であれば運転の判断を時間降雪量 $S_{fm}$ で判定し、運転中( $J_{m-1} = 1$ )であれば停止の判断を残雪深 $H_m$ で判定する。シミュレーションの終了判定に関しては各制御方式と同様である。現在このような制御方法を行う融雪装置は存在しないので、あくまで仮想のものである。二種類の検知器の両方

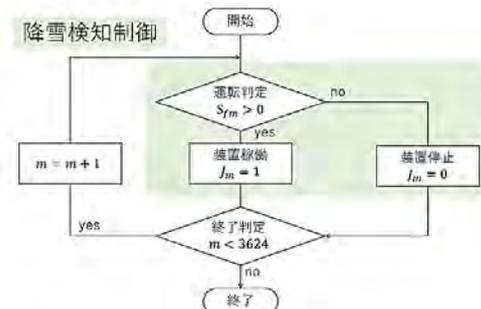


図1 降雪検知制御

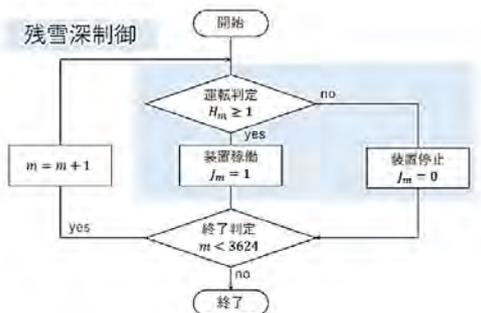


図2 残雪深制御

を使用するため初期費用が高くなるが、両制御方式の欠点を補いあって高いサービスと省資源化を実現できる可能性がある。3.1~3.3の制御方式をまとめたものが表4である。

## 4. 残雪深制御の有効性評価

### 4.1 評価項目

シミュレーション結果を評価する項目として、①最大残雪深(安全・信頼性評価)、②散水熱量(コスト評価)、③重みづけ残雪時間(サービス評価)の3つを定め、降雪検知、残雪深および複合制御の有効性を検討した。

①では、10年間の最大残雪深の平均値 $\overline{H_{max}}$ を算出し、その値が大きいほど立ち往生が発生し、長時間の渋滞や通行止めにつながる恐れがあるため、低く抑えることが望ましい。

$$\overline{H_{max}} [\text{cm}] = \frac{bP_m - aT_m [\text{kg m}^{-2}]}{\rho_s [\text{kg m}^{-2}]} \times 100 \quad (4-1)$$

②では、10年分の散水熱量 $Q_w$ を評価し、散水熱量は地下から汲み上げる地下水消費量と密接に関係している。この値が小さいほど地下水の消費を削減できる。ここで、融雪能力 $r_m$ は $200 \text{ W m}^{-2}$ を1として計算する。また、稼働時間 $T$ について、1時間撒き続けた場合は1、撒き続けなかった場合はどのくらいの時間で融雪したかを算出し( $<1$ )、その値を掛けることとした。

$$Q_w [\text{J m}^{-2}] = r_m [\text{W m}^{-2}] \times T [\text{h}] \quad (4-2)$$

③では、道路上に残雪が1cm以上ある時間の合計を総残雪時間と定義し、これを道路のサービス水準の指標とした。この値が少ないほどドライバーにとって安全で運転しやすい道路サービスを提供していることとなる。ここで、重みづけ係数を1とし、残雪深が10cm未満の場合は、重みづけ係数を0から1まで比例の関係で増加させることとした。重みづけ残雪時間 $T_s$ は「重みづけ係数×残雪時間」より算出し、10年分の重みづけ総

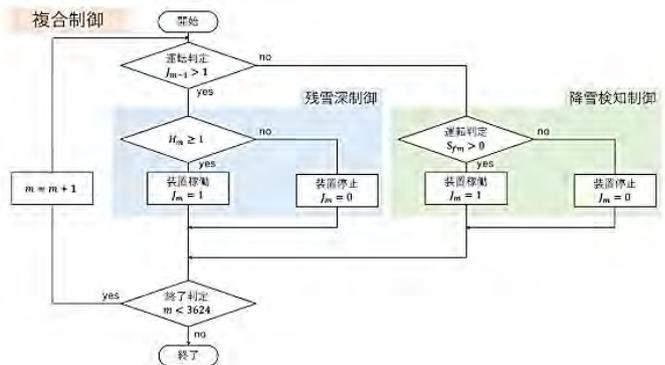


図3 複合制御

表4 制御方式と出力方法の一覧

制御方式	装置 ON	装置 OFF
降雪検知制御	$bP_m - aT_m > 0$	$bP_m - aT_m \leq 0$
残雪深制御	残雪深 1cm以上	残雪深 1cm未満
複合制御	$bP_m - aT_m > 0$	残雪深 1cm未満

残雪時間 $T_s$ を評価した

$$T_s = H_m \times 0.1 \text{ [h]} \quad (0 < H_m < 10)$$

$$T_s = 1 \text{ [h]} \quad (10 \leq H_m) \quad (4-3)$$

#### 4.2 融雪必要熱量について

本研究では、降雪検知制御における固定出力での稼働を基準として、その他二つの制御方式及び融雪熱量の組み合わせについて検討を行い、最適な稼働条件について検討を行う。ここで、基準となる降雪検知制御における固定出力での稼働について、融雪熱量の値を定める必要がある。そこで、路面消・融雪施設等設計要領<sup>4)</sup>に基づき、その値を算出した。式(4.4)に融雪必要熱量算出式を示す。

$$q_1 = \frac{\rho_s h_s (J + C_s |T_s|)}{360\eta} \quad (4-4)$$

降雪密度 $\rho_s$ および設計時間降雪深 $h_s$ は日降雪深より算出するため地域により異なる。氷の融解潜熱 $J$ は $334 \text{ kJ (kg}^\circ\text{C)}^{-1}$ 、氷の比熱 $C_s$ は $2.1 \text{ kJ (kg}^\circ\text{C)}^{-1}$ 、降雪の温度 $T_s$ は $-1^\circ\text{C}$ とした。熱効率 $\eta$ は一般に土木部は $0.8\sim 0.9$ としている<sup>5)</sup>ため、本研究では $0.8$ とした。

#### 4.3 残雪深制御の有効性評価

4.2 節にて説明した融雪シミュレーションを用いて、従来法である降雪検知制御の固定出力での稼働を基準とし、各制御方式及び融雪熱量の最適な組み合わせについて検討した結果を報告する。また、シミュレーション結果に基づいて、最適な稼働条件について提案する。残雪深制御及び複合制御の可変出力でのシミュレーション条件を表5に示す。最後に4.1項に示す3つの項目を用いて総合的に有効性を判断する。

図4に、十日町市において最も優れた評価結果であった制御方式及び融雪熱量の組み合わせでの削減率を示す。これより、残雪深制御の固定出力または可変出力での運転が望ましいことが分かる。また図4より、可変出力と固定出力では、削減率がおおむね一致していることが分かる。これは5地域すべてに当てはまっている事象であった。初期費用の観点から、固定出力の方が安く抑えられるため、固定出力の高融雪熱量で稼働することが適していると考えられる。表6および図5には、各地域での最適な制御条件をまとめたものを示す。どの地域においても、残雪深制御で高い融雪能力の場合が最も削減率が良い組み合わせであった。

表5 融雪シミュレーション条件

		高融雪熱量				
		100	150	200	250	300
定常 融雪 熱量 [Wm <sup>2</sup> ]	50	○	○	○	○	○
	100	△	○	○	○	○
	150	△	△	○	○	○
	200	△	△	△	○	○
	250	△	△	△	△	○

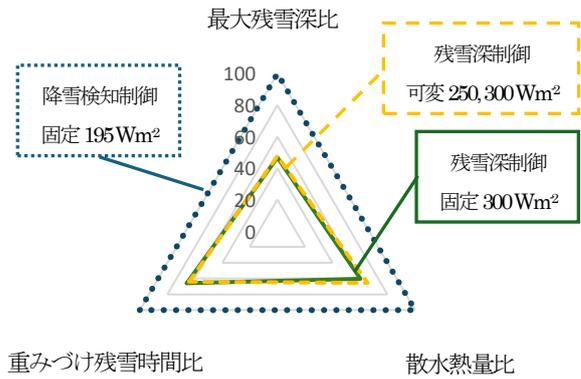


図4 十日町市の最適稼働条件での各評価項目の削減率

表6 地域別の最適な制御条件

地域	新潟	柏崎	長岡	安塚	十日町
制御方式	残雪深制御				
可変出力	定常				
	高				
	250 Wm <sup>2</sup>				
	300 Wm <sup>2</sup> (図5)				

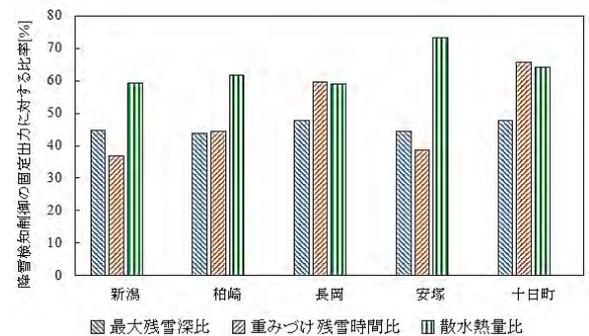


図5 残雪深制御の固定出力(300 Wm<sup>2</sup>)における削減率の比較

### 5. 車両滞留危険度評価

#### 5.1 車両滞留危険度評価について

本研究では、河島<sup>6)</sup>の調査を参考に、それぞれの稼働条件における車両滞留危険度評価を行った。河島らは、車両滞留発生時の降雪量、気温、風速に着目した気象特性の解析から、新潟県や北陸地域のような温暖多雪地域では、雪による車両滞留発生前に長時間且つ多量の降雪があり、降雪時の気温のほとんどが氷点下で推移することを明らかにした。これより、各地域の気象データを用いて車両滞留の潜在的危険度を評価するシステムを構築した。このシステムは、大規模な車両滞留を未然に防ぐための意思決定を支援するものである。

本研究で使用する危険度ランクごとの気象指標の閾値は表7に示す。特筆すべき点として、道路上の除雪は通常は所定量の残雪を許容したうえで行われるため、新たにこのシステムのランクに「新雪換算 10 cm 以下」で「支障なく走行が可能」である領域を追加した。

## 5.2 十日町市の車両滞留危険度評価

1 冬季(2014~2015)の残雪深制御の高融雪能力での稼働における,十日町市の車両滞留危険度評価の結果を図 6 に示す。装置を稼働させない場合は、「非常に危険」の領域に入るが,装置を稼働させることで,「支障なく走行が可能」,「今後の情報等に留意」の領域に収めることができる。これらのことを踏まえると,最適な稼働条件(残雪深制御, 300W m<sup>2</sup>)で装置を稼働させることで車両滞留を抑制することが可能であることを示唆している。

## 6.まとめ

本研究では, 累計積雪深, 最大積雪深, 標高が異なる代表 5 地域での散水消融雪装置の稼働における, 各制御方式及び出力方法の有効性について調査してきた。その結果, どの地域でも最適な稼働条件は残雪深制御の高融雪熱量であり, かつ可変出力と固定出力での削減率おまぼ同程度であったことから, コスト面を考慮すれば, 固定出力での稼働が最適であると考える。よって, 今回示したどの地域でも残雪深制御の固定 300 W m<sup>2</sup> で稼働させることで, サービス面, コスト面共に従来法である降雪検知制御に比べて有効である可能性が示された。

また, 最適な稼働条件(残雪深制御の固定 300W m<sup>2</sup>)の下で散水消融雪装置を稼働させることで, ゲリラ豪雪の場合も含めて車両滞留の発生を抑制でき, サービスおよび信頼性の向上につながることを示された。

## 文献

- [1] 上村靖司, 梅村晃由, “屋根融雪装置の能力設計に関する提案” 日本雪氷学会誌, 12(3), pp. 10-15, 199
- [2] 上村靖司, 善哉広大, “路面融雪装置の設計熱負荷 第 3 報: サービス水準と消費熱の総合評価指標の提案,” 日本雪氷学会誌, 81(6), pp. 269-281, 201
- [3] 上村靖司, 楠田翼, 藤野丈志, 路面融雪装置の設計熱負荷 第 2 報: 残雪許容が熱負荷に与える効果, 2009 年, 日本雪氷会誌
- [4] 路面消・融雪施設等設計要領編集委員会, 路面消・融雪施設等設計要領, 社団法人日本建設機械施工協会北陸支部, 2008, p. 19
- [5] 国土交通省 国土技術政策総合研究所, “B-DASH プロジェクト No.35 ヒートポンプレスで低 LCC と高 COP を実現する下水熱 融雪システム導入ガイドライン(案),” 国土技術政策総合研究所資料第 1158 号, 2021
- [6] 河島克久, 伊豫部勉, “大雪による車両滞留の危険度評価システムの開発と試験的運用,” 雪氷研究大会(2021・千葉・オンライン)講演要旨集, p. 62, 2021

表 7 本研究で使用する危険度ランク毎の気象指標の閾値<sup>9)</sup>

ランク	24 時間平均気温	24 時間で路面に積もる累計降雪量
非常に危険	1°C 未満	40cm 以上
警戒	1-2°C	20-40cm
今後の情報等に留意	2°C 以上	20cm 未満
支障なく走行が可能	×	新雪換算 10cm 以下

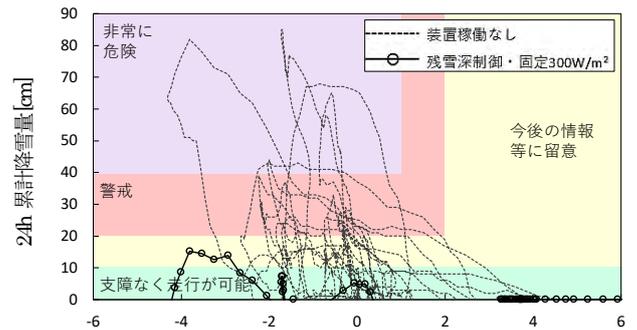


図 6 十日町市の車両滞留危険度評価