

融雪シミュレーションによる散水融雪装置の最適制御方法の検討

BATBAYAR LKHAGVACHULUUN¹・田中日菜²・BAASANDORJ MUNGUNTUUL¹・杉原幸信³・上村靖司³

(1:長岡技術科学大学工学部 2:長岡技術科学大学工学専攻 3:長岡技術科学大学)

1. はじめに

比較的院段であるにも関わらず、大量の雪が降る北陸地域では、地下水を散水して道路融雪を行う散水融雪装置、いわゆる消雪パイプが広く普及している。散水融雪装置は年間を通じて温度が一定な地下水を散水するシステムであり、比較的 low コストで道路交通を維持できることから、雪国に欠かせない存在となっている。しかし、地下水の過剰なくみ上げによって散水ができなくなる問題が度々発生する。こうした問題を防ぐためには、サービス水準を維持しつつ、稼働時間や散水量などのコストを減らす、散水融雪装置の効率化が必要になる。そこで、本研究では散水融雪装置の出力を固定出力、可変出力、交互散水、可変＋交互散水の4種類それぞれについて融雪シミュレーションを行い比較する。それに加え、降雪検知制御、残雪深制御、複合制御の各制御方式において、出力を一定とした場合のシミュレーションの結果も調査し、散水融雪装置を効率的に制御する手法を検討する。

2. 融雪シミュレーションモデル

本研究では、上村らの改良 Degree-day 法を用いて、1 時間毎の積雪重量 M_m を求めた。

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

ここで、 P_m と T_m は、 m 時間目の時間降水量 [kg m^{-2}]、と平均気温 [$^{\circ}\text{C}$] を意味する。 R_m は融解量 [kg m^{-2}] である。気象データは新潟県十日町市の 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。これは、2005 年から 2015 年までの 10 年間について 11 月 1 日から翌年 4 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 4344 時間分となる。そして、残雪深[cm]は雪密度を 100 kg m^{-2} 一定として $M_m/100$ より求めた。融雪能力 r_m は定常時出力を 200 W m^{-2} 、高出力時を 250 W m^{-2} とした。なお、 R_m と r_m の関係は氷の融解潜熱 $L = 334 \text{ [kJ kg}^{-1}\text{]}$ を用いて $R_m = 3.6r_m/L$ と表される。

3. 制御方式と評価項目

制御方法は降雪検知制御と残雪深制御に加え、降雪検知制御と残雪深制御を組み合わせた複合制御の計3種類についてシミュレーションを行った。表 1 にそれぞれの制御方式において装置が ON/OFF になる条件を示す。

表1 制御方式の一覧

制御方式	装置 ON	装置 OFF
降雪検知制御	降雪あり	降雪なし
残雪深制御	残雪深 1 cm 以上	残雪深 1 cm 未満
複合制御	降雪あり	残雪深 1 cm 未満

表2 3つの評価項目

最大残雪深	総融雪時間	総残雪時間
小さければ安全に車が走行でき交通流の確保につながる (安全・信頼性評価)	少なければ地下水消費を削減できる (コスト評価)	少なければ路面の状況がよくなる (サービス評価)

また、シミュレーション方式の有効性を検討するため、表 2 に3つの評価項目を定めた。それぞれの意味は表中に記載した通りである。総残雪時間については、図 1 に示すように重みづけして、残雪が無い場合は 0、超える場合は 1 とし、残雪がその間の場合は比例して増える重みづけを与えることとした。

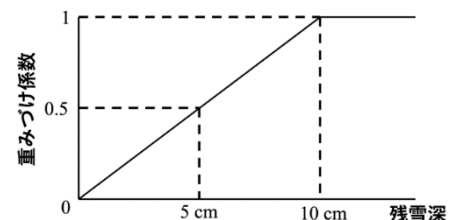


図1 重みづけ係数の計算

4. シミュレーション結果

4.1 各制御による出力一定の結果

図 2 に出力を 100 W m^{-2} ・ 200 W m^{-2} ・ 250 W m^{-2} のそれぞれで一定とした際の、各制御による融雪能力の比較を示す。比較を行うための評価項目として、図1で示したものを用いた。最大残雪深は、新潟県十日町市の AMeDAS 観測点の気象データ 10 年間のうち、各年の最大残雪深を 10 年間で平均したものを平均最大残雪深として使用した。総融雪時間は 10 年間分の資源消費量を使用した。総残雪時間は道路上に残雪が 1cm 以上あるときの合計を総残雪時間と定義し、10 年間の総残雪時間を使用した。

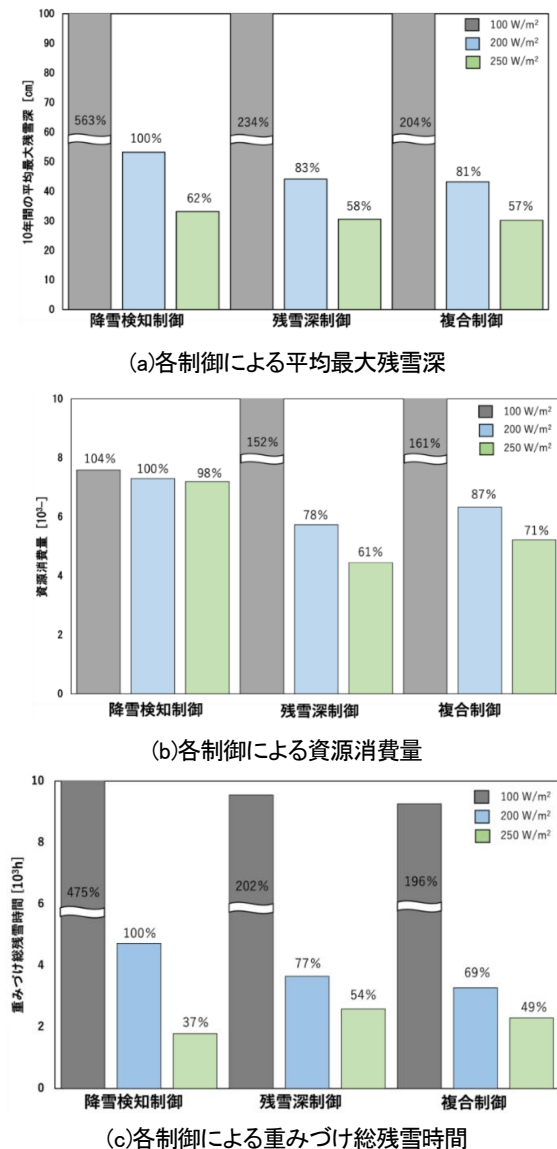


図2 出力一定時の各制御における融雪能力の比較

図 2(a)より残雪深制御と複合制御の平均最大残雪深は、降雪検知制御に比べて 60%~80%と低く抑えることが確認された。また、図 2(b)より降雪検知制御では、出力を変えても資源消費量はさほど変化しなかったが、残雪深制御では、資源消費量を 2~3 割削減できることがわかった。複合制御においても、降雪検知制御と比較すると資源量が減少しているため効果があることが分かるが、装置の運転判断に降雪検知制御を用いているため残雪深制御に比べて資源消費量が高いことがわかる。図 2(c)に関しては、重みづけ総残雪時間の結果を示している。重みづけ係数の計算を図 1 に示す。残雪深が 10cm 以上の場合、重みづけ係数を 1 にする。また、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。そして、重みづけ総残雪時間は総残雪時間に重みづけ係数を掛け合わせたものである。重みづけの計算をした総残雪時間は、どの制御方式でも大幅に減少し、

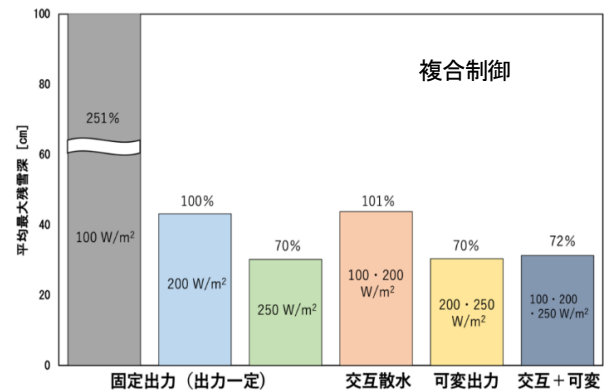
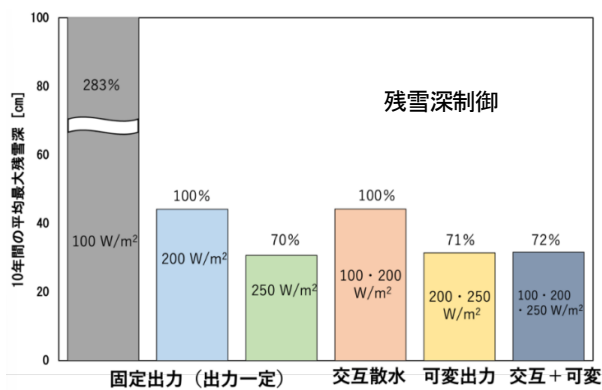
高出力では 10 年間の残雪時間を 3700 時間以下に抑えることができた。また、降雪検知制御を 250 W m⁻²で運転させるとき、最も重みづけ総残雪時間が小さくなることがわかった。これは、降雪検知制御は大雪時、連続的に融雪装置を運転させているからであると考えられる。

4. 2 各出力方法の融雪能力比較の結果

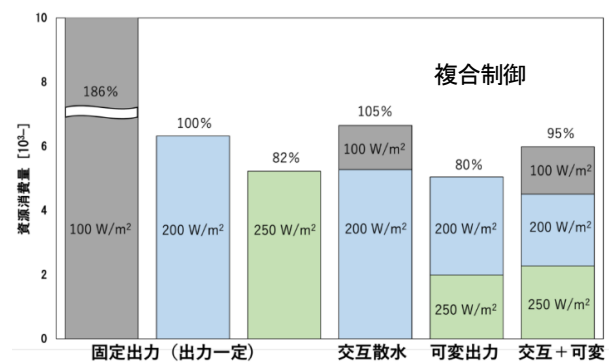
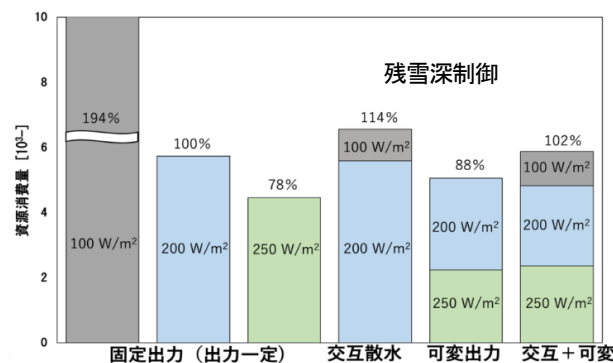
図 3 に残雪深制御と複合制御における各出力方法の融雪能力のシミュレーション結果を示す。ここで、200 W m⁻²を基準として、100 % としている。図 3 より、固定出力 250 W m⁻²と可変出力の結果が融雪においてより効果があることが確認された。可変出力の融雪装置は高価であり、制御も複雑化するため、普及することは困難であると考えられる。しかし、固定出力は設計された出力よりも降雪強度が小さい場合、無駄な運転が発生し、逆に大きいときは出力不足で路面に残雪を発生させてしまう。それに対し、可変出力は降雪強度や積雪量に応じて段階的に出力を可変させて融雪を行うため、無駄な出力を抑えつつ残雪も抑制できる。よって、可変出力は固定出力よりも有効であると考えられる。また、交互散水のシミュレーション結果は、固定出力(200 W m⁻²一定)の結果とほぼ一致した。残雪深制御と複合制御はどの評価項目でも交互散水と可変+交互散水で大きな削減効果が得られないことがわかった。

5 まとめ

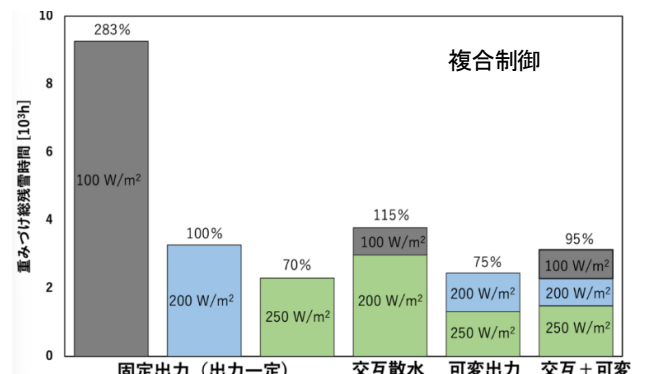
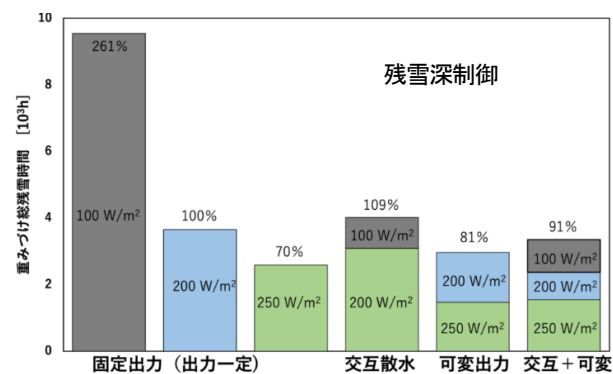
散水融雪装置の制御方式や出力方法の有効性を融雪シミュレーションにより調査し、散水融雪装置を効率的に制御する手法の検討を行った。制御方式について、残雪深制御は平均最大残雪深と資源消費量と重みづけ総残雪時間がすべて減少し、信頼性の向上、地下水の削減、サービス向上が達成できることが明らかになった。また、複合制御においては、可変出力時に残雪深制御と同様に平均最大残雪深と資源消費量と重みづけ総残雪時間がすべて減少することが分かった。出力方法について、可変出力は融雪装置が高価であり、制御も複雑であるため、普及は困難であると考えられるが、本研究で行ったシミュレーション結果より、固定出力シミュレーション結果より有効であることが確認された。また、交互散水については、地下水が不足する地域において散水距離を延ばす効果もあり普及し、地下水の節水率は 40%~50%であるが、本研究で行った交互散水シミュレーション結果より、度の評価項目でも大きな削減効果が得られないことが分かった。今後は、各制御方式において出力値を変化させた時の融雪能力を確認し、それぞれの制御方式・出力方法の有効性を調査する。



(a) 各出力方法における 10 年間の平均最大残雪深



(b) 各出力方法における 10 年間の資源消費量



(c) 各出力方法における 10 年間の重みづけ総残雪時間

図3 残雪深制御と複合制御における各出力方法の融雪能力の比較

文献

- [1] 上村靖司, 梅村晃由, 1996: 年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), 212-217
- [2] 十日町市ホームページ, 2020 年 8 月 17 日: 「地下水利用 / 十日町市ホームページ」
<http://www.city.tokamachi.lg.jp/kurashi/tetuduki/A004/A008/1454068627597.html>
- [3] 上村靖司, 善哉広大, 2019: 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), 269-281
- [4] 上村靖司, 楠田翼, 藤野丈志, 2009: 残雪許容が熱負荷に与える効果, 日本雪氷学会誌, 71(6), 445-454