

降雪強度を考慮したインバータ制御による消雪パイプシステムの実証試験

水工学研究室 八戸 剛志
指導教官 福島 祐介

1.はじめに

新潟県長岡市は湿潤な雪が降る典型的な豪雪地帯である。このような雪の排除方法として昭和 36 年頃から消雪パイプが用いられている。地下水が 10 以上と高いことから、降雪との温度差を利用して、道路に散水して雪を融かすものである。消雪パイプは極めて有効な消雪方法であるが、その欠点は地下水を大量に汲み上げて散水するため、冬季後期には地下水位が下がり、消雪パイプそのものが機能しない、地盤条件によっては深刻な地盤沈下が発生することである。

従来の消雪パイプは、手動でポンプの運転を行っていたり、降雪検知器と連動させていても、地下水の揚水ポンプをオン・オフするだけで、無駄に地下水を汲み上げていた。このような現状から、地下水節水型消雪パイプの発想が生まれた。すなわち、降雪強度計の出力によって、揚水インバータ制御することで地下水の汲み上げを最小限とし、消雪パイプの使用する地下水を節約しようとする発想である。

本研究では、在来型と地下水節水型とを比較し、新システムの有効性の検証をし、実用化への検討を行うことを目的とする。

2.実証試験の概要と測定項目

新システムを設置したのは長岡市中島 4 丁目、比較のための在来型消雪パイプは隣接する中島 6 丁目である。検討は、2003 年度（平成 15 年 1 月 18 日から平成 15 年 3 月 15 日）、2004 年度（平成 15 年 12 月 15 日から平成 16 年 2 月 15 日）の実証試験結果に基づいて行った。

主たる測定項目は次の通りである。

- (1)降雪量...新型に取り付ける降雪強度計(茅ら、1995)のデータを収集する。
- (2)揚水流量...新型、在来型両方に流量計設置し、実際に使用された水量(揚水量)を計測する。

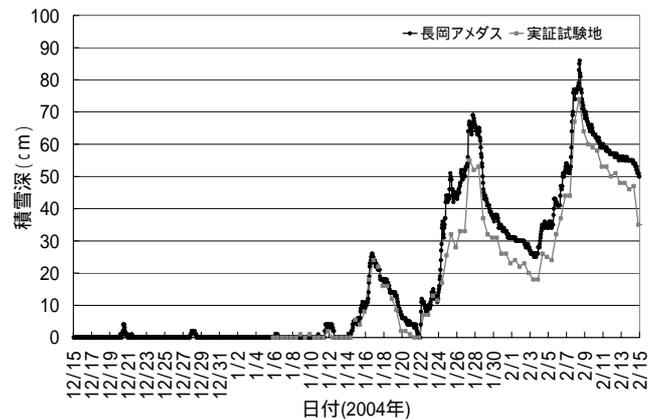


図-1 2004 年度冬季の積雪量

- (3)使用電力量...新型のみに設置し、既設電力使用量との比較に用いる。
- (4)地下水位...新型側に投げ込み圧力式水位計を設置し、揚水量と水位との関係および季節(冬季の初期と終期)と水位等を測定する。
- (5)外気温...新型制御盤に設置し、ポンプ運転強度と外気温との相対関係を調べる。
- (6)管内圧力...揚水管内に設置し、流量計との相関を調べることにより、流量計の代替として使えるか否かを検討する。
- (7)積雪深...中島中央公園内に測量用のスタッフを取り付け、これを 10 分置きに撮影し、後に読み取ることにより、積雪深を測定した。

3.測定したデータの解析

図-1 に、2004 年度のアメダスデータ、中島 6 丁目(中島中央公園内)でカメラの画像から判読した積雪深の経日変化を示す。1 月中旬に短期的な大降雪、下旬には長期的な大降雪があったが、例年に比べ小雪であった。

図-2 に今冬季の降雪強度(1 日あたりの降雪深の累計)と最大地下水の時間変化を示す。降雪があり、揚水ポンプが作動すると、一時的に地下水位が低下

しているのがわかる。図-3 に在来型と新型のポンプによる揚水量の日変化、図-4 に在来型と新型のポンプによる使用電力量の日変化、表-1 に揚水量と使用電力量の比較を示す。当然ながら降雪強度が大きい場合には在来型、新型ともに盛んに運転され、地下水は汲み上げられている。しかし、揚水量には大きな差があり、1,2 の例外はあるが、新型の揚水量は在来型に比べ、1/2 から 1/3 にも減少している。特に降雪強度が小さい場合には新型の消雪パイプは盛んに揚水変化するため、節水効果は大きい。使用電力についても同様の効果が見られる。これより、新型の消雪パイプシステムの節水が効果的であることがわかる。

表-1 計測結果のまとめ

	総揚水量(m ³)	使用電力量(kwh)
新型	9.546	2.248
在来型	18.194	4.824

4. 消雪パイプの流れに関する水理学的検討

図-5 に示すような消雪パイプを考える。消雪パイプの総延長距離を L とし、その中に N 箇所の散水地点があり、さらに i 番目の散水地点には n_i 個のノズルがあるものとする。i 地点では、基準面からの高さ z_i、断面積 A_i を持つ消雪パイプ本管での断面平均流速 U_i、圧力 P_i、n_i 個のノズルからの流出量の総和を q_i とする。

ここで、i 番目の散水地点と i+1 番目の散水地点に対して、摩擦損失水頭 h_{fi}、ノズルからの流出に伴うエネルギー損失 Δ_i を考慮する。流れを定常と仮定し、一次元ベルヌイの式を考慮すると以下のようなになる。ただし、管路の曲がりなどによる損失は全て無視することにする。

$$\frac{P_i}{\rho g} + z_i + \frac{\alpha_i U_i^2}{2g} = \frac{P_{i+1}}{\rho g} + z_{i+1} + \frac{\alpha_{i+1} U_{i+1}^2}{2g} + h_{fi} + \Delta_i \quad (3.2.1)$$

ここで、 ρ は水の密度、g は重力加速度、 α_i はエネルギー補正係数である。問題を簡略化するため、以下のような仮定を置く。

() 消雪パイプは水平に設置されているものとする。

これより、

$$z_i = 0 \quad (3.3.1)$$

$$z_0 = -H \quad (3.3.2)$$

ここで、H は圧力センサーの位置とノズルの位置の高度差である。

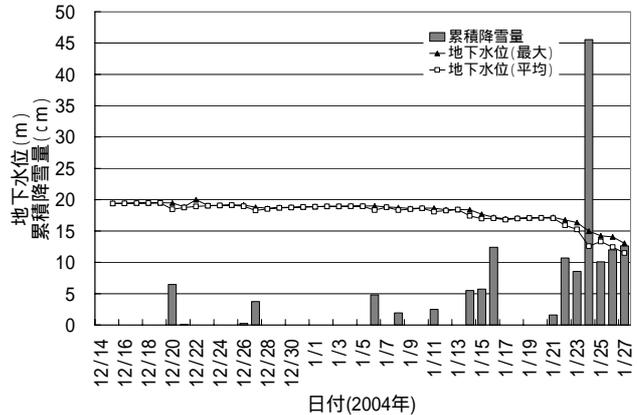


図-2 1 日当たりの累積降雪深と最大地下水位と平均地下水位の経日変化

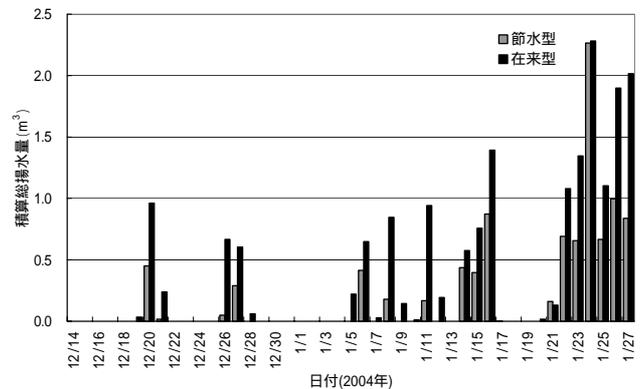


図-3 1m 当たりの積算揚水量

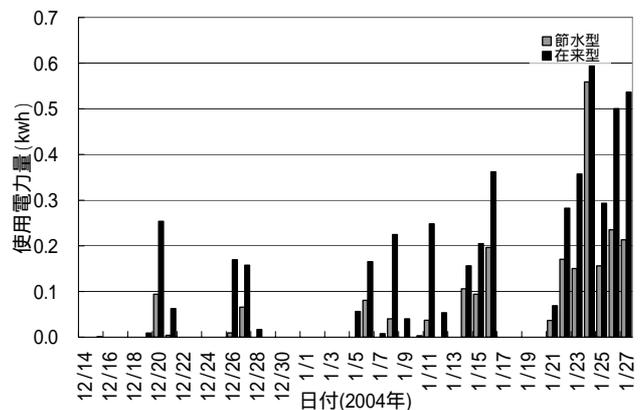


図-4 1m 当たりの使用電力量

()消雪パイプの直径は一定であり d で表される .

$$d_i = d \quad (3.3.3)$$

このとき ,本管の断面積も一定となり A で表される .すなわち ,

$$A_i = A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (3.3.4)$$

()散水地点の間隔は一定であり l で表される .

$$l_i = l = \frac{L}{N-1} \quad (3.3.5)$$

()本管の摩擦係数 f_i , ノズルからの流出に伴う係数 c_{0i} は一定であり , それぞれ , f , c_0 で表される .

$$f_i = f \quad (3.3.6)$$

$$c_{0i} = c_0 \quad (3.3.7)$$

()ノズルの形状が半径 d_i 円形状をなしているものとし , 全てのノズルからの散水量は一定であるものとする . 点 i での流出量 (散水量になる) の和を q とすると ,

$$a_i = a = \frac{1}{\pi} d_i^2 \quad (3.3.8)$$

$$q_i = q = \frac{Q_0}{N} \quad (3.3.9)$$

これより , 全揚水量 , すなわち全散水量 Q_0 を求めると次のようになる .

$$Q_0 = \left\{ \frac{\left(\frac{P_0}{\rho g} - H \right) 2gA_0^2}{f \left(\frac{L}{d} \frac{N-1}{6N} + \frac{H}{d} \right) - 1 + \frac{c_0}{n_0 N} \left(\frac{A_0}{a_0} \right)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.3.24)$$

ここで , ノズルからの流出に伴う損失係数 c_0 については , よくわかっていない . そこで , この係数については , 実験結果より算定することにする . c_0 を求める式は次のようになる .

$$c_0 = \left(\frac{a_0}{A_0} \right)^2 n_0 N \left\{ \frac{\left(\frac{P_0}{\rho g} - H \right)}{\frac{U_0^2}{2g}} - f \left(\frac{L}{d} \frac{2N-1}{6N} + \frac{H}{d} \right) + 1 \right\} \quad (3.3.25)$$

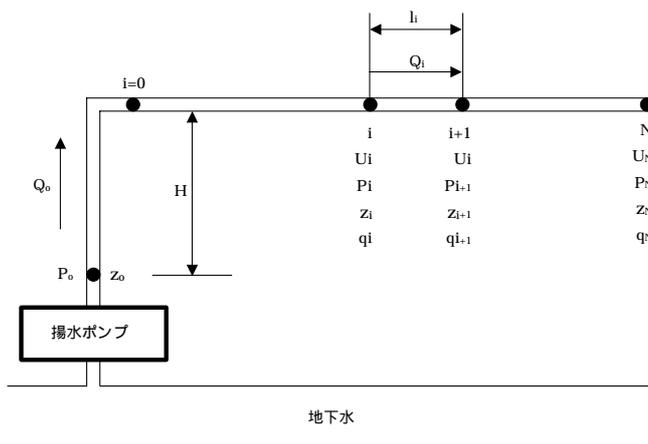


図-5 消雪パイプの模式図

5. 現場試験による係数の同定と流量の算定

ノズルからの流出に伴う損失係数 c_0 の算出には次の条件を満たす試験結果を使用した .

- 降雪があり , 揚水が行われている時間のデータ
- 揚水量が $1.0\text{m}^3/\text{min}$ から最大揚水量である $1.125\text{m}^3/\text{min}$ の範囲にあるデータ (定常流を仮定しているため)
- 2004 年度の試験結果 (制御システムが安定しているため)

2004 年度試験における一分間隔の瞬時値データの内 , 上記の条件を満たすデータは 2244 個あった . そして , 算出した 2244 個のノズルからの流出に伴う損失係数 c_0 の平均は 0.06520 となった .

図-5 は算定流量と実測流量の散布図である . 実測流量は実際に流量計で計測された値であり , 算定流量は計測されたときの圧力から算定した流量である . また , 同データから相関係数を求めたところ 0.826 となった . 散布図からもわかるように , データは完全一致を示す直線付近に多く見られるが , それ以外のところにも多少分布している . 実測流量が小さく算定流量が大きい点の分布の原因としては , 圧力を指定してから実際に流量が変化するためのタイムラグが考えられる . 実測データは一分毎に採取してあるが , データをとる際に流量が変化する前にデータを読み取った場合ずれが生じる . それに対し , 算定流量は圧力から算定しているためタイムラグが生じない . 図-6 は節水型消雪パイプシステムを流量計よる揚水量制御から圧力センサーによる揚水量

制御に切り替えて運転した時の結果を示す。目標流量と実測流量の推移をみると概ね目標通りの揚水量を実際に汲み上げていることがわかる。これより、圧力センサーの制御によって目標揚水量通りの揚水を行える事がわかる。短期間で激しく揚水量が変化すると一致しない場合もあるが、これは、圧力が変化した瞬間に実際の流量が変化することは不可能であり、本システムでも圧力が変化してから 10～15 秒経過後実際の流量が変化するためだと考えられる。

6.まとめ

地下水節水型消雪パイプシステム有効性検証の結果、従来の降雪検知器による消雪パイプシステムと比較し、揚水量を 1/2 程度に節水できることがわかった。また、運転時間、電力量も 1/2 程度に減少していることから省エネルギー効果も高いこともわかった。また、圧力センサーによる地下水揚水量の測定法の理論を検討し、実際の超音波流量計で測定された値と比較したところ、かなりの確度で一致した。この理論を節水型消雪パイプシステムに導入し、検証試験も行った。その結果から、圧力センサーを用いても流量計によって地下水揚水量を測定した結果と同様の値を得ることができた。

7.参考文献

- 1) 散水消雪施設設計施工マニュアル編集委員会 (2000): 散水消雪施設設計施工マニュアル, 建設省北陸地方建設局道路部監修, pp.10.
- 2) 茅亮・石丸民之永・加藤務・宮越秀己 (1995): 水滴計式降雪強度センサー・CSN-501, 雪氷北信越, pp.46
- 3) 日野幹雄 (1983): 明解水理学, 丸善, pp.174.

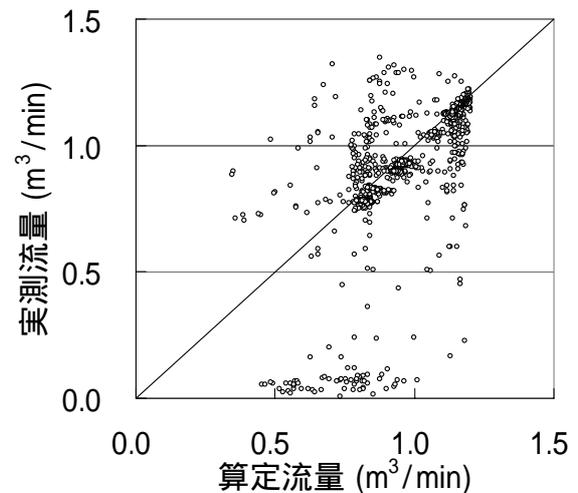


図-5 算定流量と実測流量の散布図
(2004 年度試験データ使用)

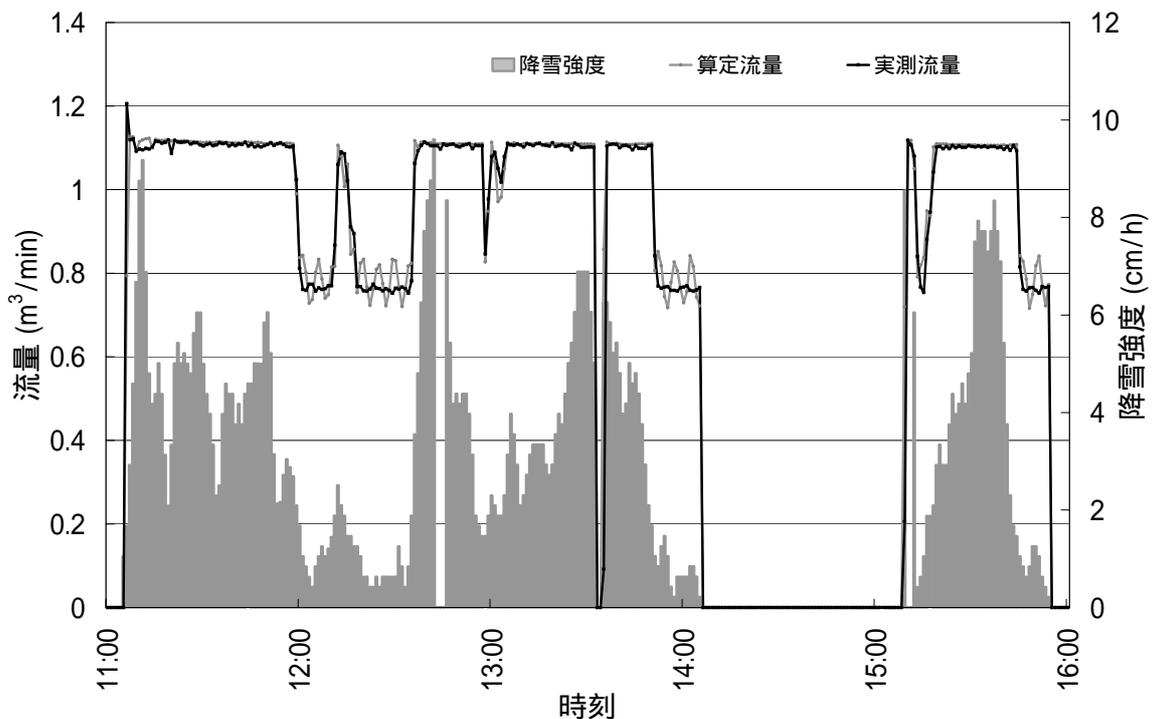


図-6 圧力センサーによる流量制御の計測結果