

札幌市手稲区星置における融雪試験について

松浦 和也*¹・柳 博文*¹・松岡 茂*²

概 要

北海道をはじめとする積雪寒冷地では、散水融雪を採用した場合には路面凍結の恐れがあり、無散水融雪であるロードヒーティングが有効的と考えられる。特に、地中熱利用による融雪システムは初期費用が比較的高価であるが、ランニングコストと環境負荷の面で優位性が認められる。しかし、他の伝熱方式等に比べ低温な地中熱をエネルギー源とするため、北海道などの厳しい気象条件下ではボイラー等の補助熱源が必要となるケースが多い。このため、地中熱単独の融雪利用の有効性については明確な評価はされていない。低コスト化の観点から、札幌市内において地盤から得られる低温度の熱エネルギーのみを活用した無散水融雪試験を実施したので、その結果について報告するものとする。

キーワード：地中熱，ロードヒーティング，融雪，凍結防止

SNOW THAWING TEST IN HOSHIOKI TEINE－KU OF SAPPORO CITY

Kazuya MATSUURA*¹ Hirofumi YANAGI*¹ Shigeru MATSUOKA*²

Abstract

In heavy snowfall districts such as Hokkaido, since thawing snow by sprinkling water would cause road surface freezing, heating roads without sprinkling water is more effective. Although the snow thawing system using geothermal heat needs comparatively high initial cost, it is excellent in terms of both operating cost and environmental impact. However, since this type of system uses geothermal heat that is at a lower temperature than other heat transmission systems, an auxiliary heat source such as boiler is often necessary in Hokkaido and in other severe climate districts. Effectiveness of utilization of geothermal heat alone for snow thawing has not been precisely evaluated. In view of cost reduction, thawing snow without sprinkling was tested, using low temperature geothermal heat only obtained in Sapporo city. This paper reports the results of this test.

Keywords: geothermal heat, road heating, snow thawing, freeze prevention

*1 Geotechnical Engineering Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

*2 Deputy General Manager, Technology Center, Engineering Division

札幌市手稲区星置における融雪試験について

松浦 和也*¹・柳 博文*¹・松岡 茂*²

1. はじめに

北海道をはじめとする積雪寒冷地では、散水融雪を実施した場合には路面凍結の恐れがあり、無散水融雪であるロードヒーティングが有効的である。特に、地中熱利用による融雪システムは初期費用が比較的高価であるが、ランニングコストと環境負荷の面で優位性が認められる。

しかし、積雪寒冷地で融雪システムを導入するにあたっては、ヒートポンプなどの補助熱源を併用しているケースが多く見られ、この補助熱源を必要とするならばこのような長所が没却されかねない。しかし、既往の文献^{1)~3)}に見られるように、これまで北海道などの厳しい気象条件下での地中熱のみを利用した融雪システムの有効性についての明確な確認はされていない。

そこで、他の伝熱方式等に比べ低温な地中熱を唯一の熱源とする融雪システムの有効性を確認するため採熱試験及び放熱試験を実施した。本報では、積雪寒冷地での循環水の流量と採熱量並びに循環水の温度上昇との相関性を明らかにし、さらに気象条件の厳しい積雪寒冷地においても、地中熱から得られる低温度エネルギーのみでも効果的な融雪及び凍結防止効果が得られることが確認できた。

2. 試験概要

当融雪システムの概要図とその写真を図-1、写真-1に示す。熱交換杭は二重管方式とし、熱交換杭の内管内部を下方方向に向かって流れる循環水は熱交換杭下端で外管に移動し、外管と内管の間を上昇する間に地盤より熱エネルギーを採取する。このように熱交換杭により温めら

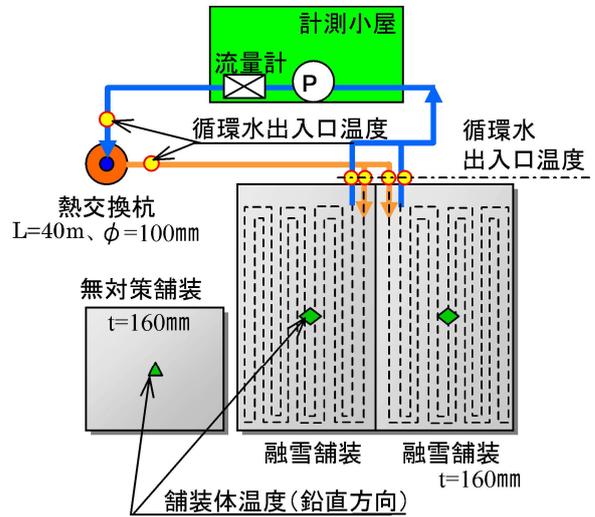


図-1 融雪システム概要図

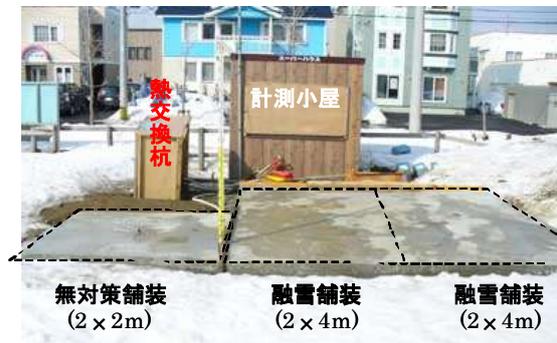


写真-1 融雪システム全景

れた循環水は、融雪舗装体に埋設された放熱管(φ15mm, 被り50mm)へと流れ込み、この舗装内部に配した放熱管内を流れることで熱エネルギーを放出(融雪)し、再び熱交換杭の内管に戻る循環システムである。融雪システムの各部位の諸元は表-1のとおりである。

試験の手順として、熱交換杭の採熱能力の試験を採熱試験にて実施する。熱交換の媒体であ

*1 エンジニアリング本部 技術センター 地盤グループ

*2 エンジニアリング本部 技術センター 副所長

表－1 融雪システム諸元表

部 位	仕 様, 形 状	数 量
熱交換杭	外管 VP100 内管 VP50	L=40m
循環水	ポリプロピレングリコール 50%	—
融雪舗装体	2m×4m t=160 mm 2ブロック 普通コンクリート 18N/mm ²	A=16m ²
無対策舗装体	2m×2m t=160 mm 1ブロック 普通コンクリート 18N/mm ²	A=4m ²
放熱管	SGP-B 15A	—

表－2 札幌市手稲区付近気象データ

時 期 (2005～2006)	平均気温 (°C)	最高気温 (°C)	最低気温 (°C)	平均風速 (m/s)	降水量 (mm)	日照時間 (h)
12月	-3.1	5.7	-11.8	2.5	82.0	90.7
1月	-4.7	3.5	-16.2	3.2	134.0	45.7
2月	-3.4	6.9	-13.3	2.9	53.0	78.3
3月	0.4	8.4	-12.7	3.4	99.0	103.4

る循環水の流量をパラメータとして、 $Q=20\text{L}/\text{min}$ から $15\text{L}/\text{min}$, $10\text{L}/\text{min}$, $5\text{L}/\text{min}$ と連続的に変化させ、最終的に最大流量 $22.5\text{L}/\text{min}$ で試験を終了し、この時の熱交換杭の出入り口温度差から熱交換杭による採熱量を把握した。熱交換杭については、外管 $\phi 100\text{ mm}$ (内管 $\phi 50\text{ mm}$) の塩ビ管 $L=40\text{m}$ を採用している。

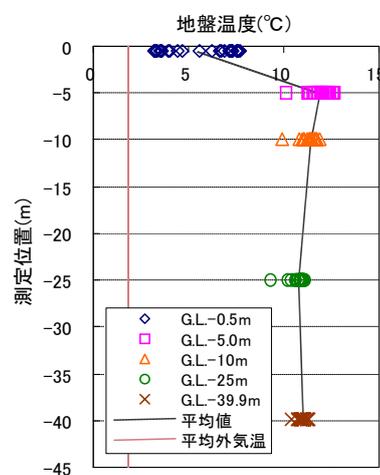
次に、融雪試験を上記と同様に流量をパラメータとして $Q=20\text{L}/\text{min}$, $10\text{L}/\text{min}$, $5\text{L}/\text{min}$ で実施し、融雪舗装体出入り口部の循環水の温度差から融雪能力の把握を行った。試験期間中 (概ね 1 ケース 10 日～15 日間) は舗装体の鉛直方向の温度分布及び融雪舗装体出入口部の循環水温度を採熱試験の計測項目に加え計測している。融雪量及び積雪量は、適時ロットにて目視確認を行った。

3. 気象条件

積雪寒冷地である札幌市手稲区付近の気象データ (2005 年 12 月～2006 年 3 月: 気象庁) を表－2 に示す。また、熱交換杭設置時に測定した地盤温度分布を図－2 に示す。

地盤温度は、5m 以深でほぼ一定の値を示しておりその値は外気温の変動の影響を受けずに

概ね $10\sim 12^{\circ}\text{C}$ となっている。この温度については、1 年間を通じてほぼ一定の数値を示していると考えられる。



図－2 地盤温度分布

4. 採熱試験

4. 1 試験手順

採熱試験においては、熱交換杭の採熱能力に着目するため、融雪舗装体に残雪を堆積させた状態で試験を行った。図－3 に熱交換杭の概要図と温度計測箇所を示す。温度計測は外気温の

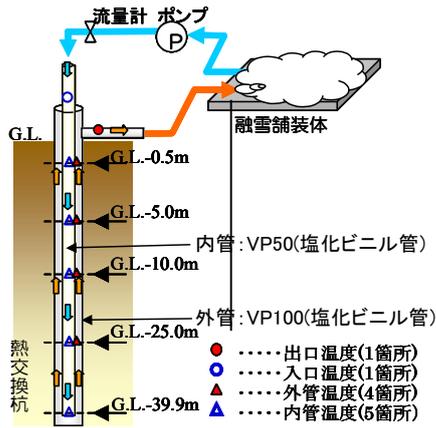


図-3 熱交換杭概要図

ほか、熱交換杭出入り口の循環水温度（各1箇所）及び熱交換内部の鉛直方向の温度分布（計9箇所）である。流量は、20L/min, 15L/min, 10L/min, 5L/min, 22.5L/min と連続的に変化させ、各流量においては出入口温度が定常状態もしくは90分～120分経過した時点でバルブにより順次流量を切り替えた。

4.2 試験結果

各流量と循環水の温度上昇（出口温度と入口温度との差）の関係を図-4に示す。今回の試験の範囲では、流量と温度上昇の関係は一次式で近似することができ、流量が増加するとともに循環水の温度上昇分が減少するといった負の比例関係が認められる。

次に、循環水の温度差に流量を乗じて得た熱量と流量の関係を図-5に示す。熱量については、熱交換杭の長さで除し、杭の単位長さ当たりの採熱量として表している。当該試験結果において、20L/minまでは流量の増加に比例して採熱量も増加しているが、22.5L/minになるとその増加分は減少していることがわかる。図中に文献1)として福井大学で行われた採熱試験結果¹⁾を併せて記載している。文献1)では、杭長70mであり材質はポリエチレン管（内管φ56mm外管φ90mm）となっており、循環水はポリプロピレングリコール20%を使用している。本試験の結果と文献1)との採熱量の違いは、杭材の熱貫

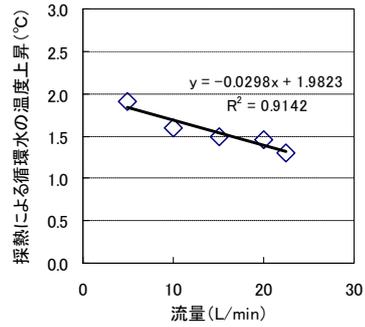


図-4 各流量と温度上昇との関係

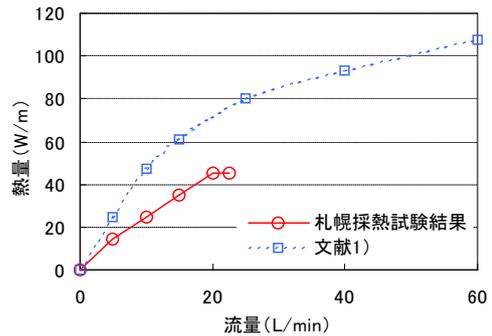


図-5 各流量と採熱量との関係

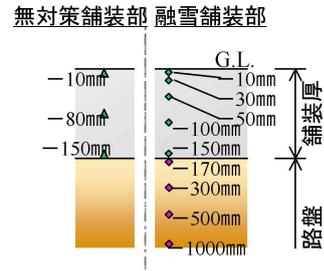


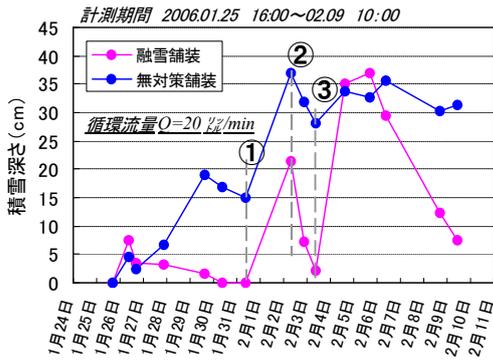
図-6 舗装体温度測定位置

流率並びに循環水の濃度の違いが現れていると考えられるが、熱交換杭が二重管構造であることから、単に杭材の熱貫流率の比による補正のみでは一義的には決めることができない。熱交換杭の採熱量については、今後試験を重ねるとともに、杭材の熱伝導率及び循環水の層流時の影響等を加味した、定量的な評価手法を検討する必要がある。

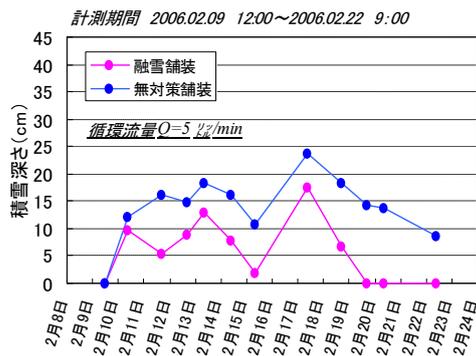
5. 融雪試験

5.1 試験手順

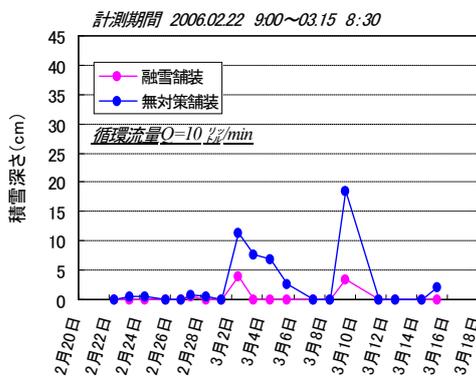
融雪試験については図-1と同様のシステムで行っており、融雪舗装体の脇には、融雪効果



a) 流量 Q=20L/min



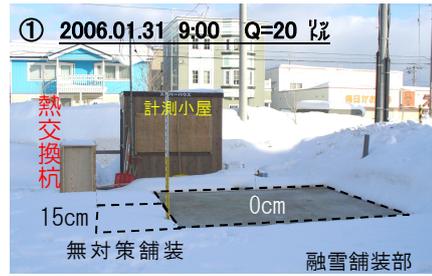
b) 流量 Q=5L/min



c) 流量 Q=10L/min

図-7 積雪量変化

の比較のために無対策の舗装を設置している。融雪試験は流量をパラメータとし、流量を 20 L/min, 5L/min, 10L/min と変化させている。各試験ケースにおいては、積雪状況に応じて 10 日～20 日程度連続運転を行い、採熱試験の計測項目に加え、各舗装体の鉛直方向温度分布（図-6）及び融雪舗装体出入口部の循環水温度を計測した。融雪量及び積雪量は、適時ロットにて直接確認している。



a) 積雪前



b) 積雪時



c) 融雪後

写真-2 積雪（融雪）状況

5. 2 試験結果

(1) 融雪状況

融雪状況について、積雪（融雪）量の経時的な変化を表したグラフを図-7（a）～（b）に示す。全体的に無対策舗装に比べて融雪舗装の方が、積雪量が少なくなっていることがわかる。また、急激な融雪性能は期待できないが、積雪量が 30 cm を超える状況下においても、降雪時の積雪開始を遅らせる効果とあわせて、概ね 2～3 日程度で完全に融雪されているのがわかる。

試験結果のうち、流量が 20 L/min 時の図-7 a) 中における①～③の状況を写真-2 a)



写真-3 舗装体表面の状況

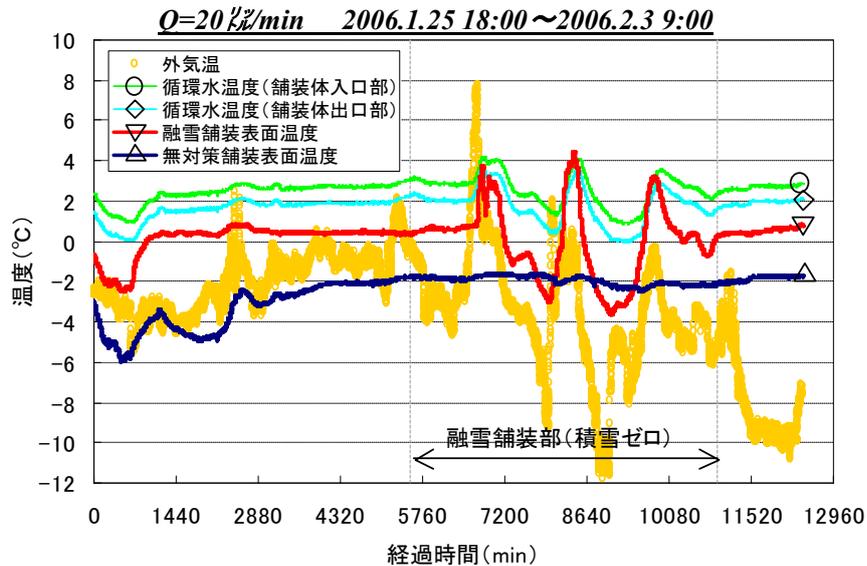


図-8 舗装表面及び循環水温度変化 (20L/min)

～c) に示す。この場合、降雪後の積雪ピーク時から24時間後には舗装体の表面が現れだしているのがわかる。

なお、図-7のグラフ中で融雪舗装体の方が積雪量の多い時点があるが、これは融雪舗装体に地吹雪等で雪が堆積した影響と考えられる。

次に、融雪されていない場合の舗装表面状況の目視確認を行った。その時の状況を写真-3に示す。確認を行ったのは、1月26日で気温-3.5°C、積雪量は融雪舗装体が7.6cm、無対策舗装体は4.6cmであった。融雪舗装体について一部の残雪を取り除くと、舗装表面近傍ではシャーベット状になっており融雪効果が確認できた。このことより、完全に融雪されていなくても除雪の容易さ並びに車や歩行者が通行

することによる融雪の促進が期待できる。

一方、無対策舗装体については完全に凍結しており舗装体に残雪がこびり付いている状態であった。

(2) 舗装体の温度分布

次に、流量が20L/min時の舗装表面と循環水の経時的な温度変化を図-8に示す。舗装出入口の循環水の温度差は概ね一定で推移しており、安定した熱量の供給がされているのがわかる。また、積雪の状況下では舗装表面温度も融雪舗装、無対策舗装ともに一定値を示しており、融雪舗装体については、外気温が-10°Cを下まわっている状況においても表面温度は0°C以上を示し、舗装表面の凍結が防止されていることがわかる。ここで、舗装体の表面温度が0°Cを

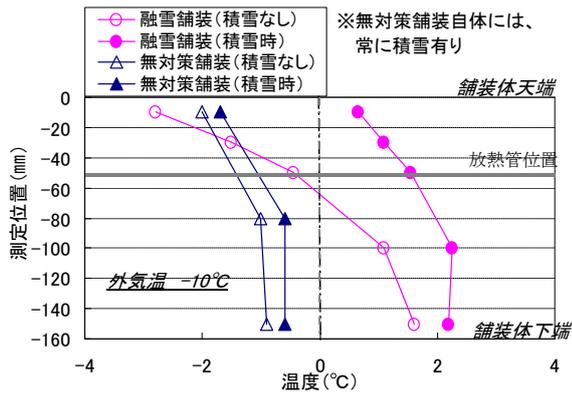


図-9 舗装体鉛直温度分布

下まわっている状態を凍結と定義するものとする。

一方、完全に融雪されている状態（積雪なし）では、舗装表面温度は外気温の影響を大きく受けて変動しており、気温が -3°C ～ -4°C より低い場合には舗装体表面も凍結している状態になっていることがわかる。

積雪時並びに積雪ゼロ時（写真-4）のそれぞれの状況に応じた舗装体鉛直方向の温度分布を図-9に示す。積雪時には、無対策舗装では舗装全体が凍結している状態にあるが、融雪舗装については積雪の保温効果もあり、全体的に循環水の熱により温められ、融雪・凍結防止効果が現れている。融雪後の積雪のない状態では外気温変化の影響を受けるため、融雪舗装の表面温度は -3°C 近くまで低下しており、放熱管から上部の範囲においてはその影響の程度が大きい。なお積雪状態にある無対策舗装と比べても、舗装表面付近の温度については逆に温度が低く現れている。

6. 熱量収支について

6.1 採熱量と放熱量との関係

融雪試験の各流量ケースにおける、融雪に利用した放熱量並びに融雪試験時の熱交換杭の採熱量と循環水流量との関係を図-10に示す。なおグラフ中には、当初の採熱試験で得られた採熱量と流量との関係を併せて記載している。図-11には、融雪に利用した放熱量と、それに照応する熱交換



写真-4 計測時の積雪状況

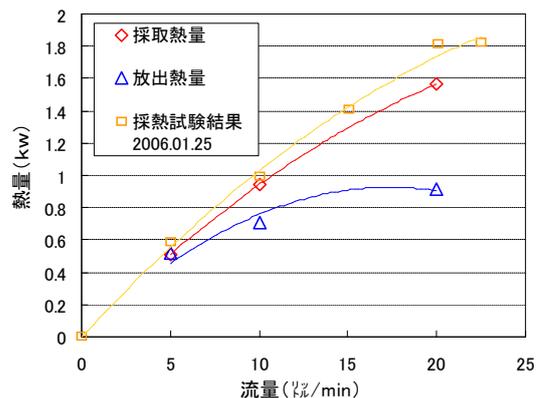


図-10 流量と熱量の関係

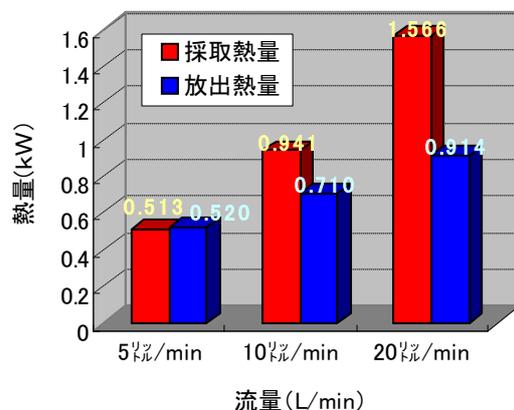


図-11 熱量収支比較

杭の採熱量とを棒グラフにて比較している。

今回の試験の範囲において、融雪能力すなわ

ち放出熱量は循環水の流量が多いほど大きくなるが、流量が 10L/min 以上の範囲では採取熱量と放出熱量との乖離が大きく現れ、同一流量の下では採取熱量に比べて放出熱量は小さい値となっている。

ここで融雪能力を考える時に、当該融雪システムでは、熱交換杭から出た循環水は一旦二つに分岐され、それぞれ 2 ブロックに分けられた融雪舗装体に流れているものであるから、各融雪舗装体に流れる流量は熱交換杭に流れている流量の半分になっており、その 2 ブロックの流量の合計と熱交換杭に流している流量が照応していることに留意する必要がある。

6. 2 熱交換杭の評価

熱交換杭の熱交換能力の理論的な評価はあまり行われておらず、行われていたとしても適用範囲が狭く、その実証は数値実験にとどまっている。現在、熱交換杭の設計においては、種々の熱交換杭の形状に対して実験的に求められた固有的な採熱能力に基づいて検討されている事が多い。今後、熱交換杭については追加実験の実施や適用事例の資料を活用することで、理論的かつ定量的な評価の確立が課題となる。

当該融雪システムの熱交換杭について、その単位長さ当たりの採熱能力は、図-5 より式(1)として表すことができる。このときの適用範囲は ($0 < Q \leq 22.5$, $L=40\text{m}$) である。

$$q(W/m) = -0.0403Q^2 + 2.974Q \quad (1)$$

ここで、図-10 に見られるように、採熱試験結果と融雪試験結果を比較し、連続運転による効率低下を考慮すると、採熱試験時と比べて平均して 15% 程度の能力の低下が見られる。このことから式(1)に 15% の能力低下を考慮した式(2)を適用すれば安全側といえる。

$$q(W/m) = -0.0343Q^2 + 2.528Q \quad (2)$$

6. 3 融雪舗装体の評価

融雪舗装体の定量的な評価はこれまでもいくつか報告されている。その中で、循環水のレイノルズ数や放熱管の熱伝導率等の比較的詳細な項目についても加味されている「歩道無散水と車道散水のセット化融雪設計要領」⁵⁾ の放熱管理設融雪の融雪能力計算式を用いることとした。これにより、舗装体出口における循環水温度及び放出熱量を算出することができる。舗装体出口の循環水温度 ($^{\circ}\text{C}$) の式を式(3)に、単位面積当たりの、舗装上面への放熱量 (W/m^2) については式(4)に示す。

循環水の出口温度について、試験結果と計算値との比較を行った。その結果を図-13 に示す。使用した実験データについては、流量 $Q = 20\text{L}/\text{min}$ 時のうち積雪状態にあった、2月2日～2月3日の 24 時間の各計測結果を用いた。

$$T_{po} = \left[T_{pi} - \left\{ f \times T_s + (1-f) \times T_g \right\} \right] \times \exp\left(-\frac{U_u}{Q_o \times \rho \times c \times f} \right) + \left\{ f \times T_s + (1-f) \times T_g \right\} \quad (3)$$

$$q_{uo} = Q_o \times \rho \times c \times f \times \left[T_{pi} - \left\{ f \times T_s + (1-f) \times T_g \right\} \right] \times \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{U_u}{Q_o \times \rho \times c \times f} \right) \right\} + U_u \times (1-f) \times (T_g - T_s) \quad (4)$$

$$U_u = \frac{1}{\frac{P_p}{\pi \times h \times D_i} + \frac{P_p \times \log(D_o/D_i)}{2 \times \pi \times \lambda_p} + \frac{P_p}{\lambda_{cu} \times S_u} + \frac{1}{S_n}}$$

$$U_u = \frac{1}{\frac{P_p}{\pi \times h \times D_i} + \frac{P_p \times \log(D_o/D_i)}{2 \times \pi \times \lambda_p} + \frac{P_p}{\lambda_{ce} \times S_e}}$$

$$f = \frac{U_u}{U_u + U_\ell}$$

$$h = 4.36 \times \lambda_w / D_i \quad (\text{Re} < 2,300)$$

$$h = 0.0395 \text{Re}^{3/4} \text{Pr}^{1/3} \lambda_w / D_i \quad (\text{Re} \geq 2,300)$$

$$d_{iu} = 1.16L_{cu} - 1.64D_o + 0.04P - 0.008$$

$$d_{i\ell} = 1.16L_{ce} - 1.64D_o + 0.04P - 0.008$$

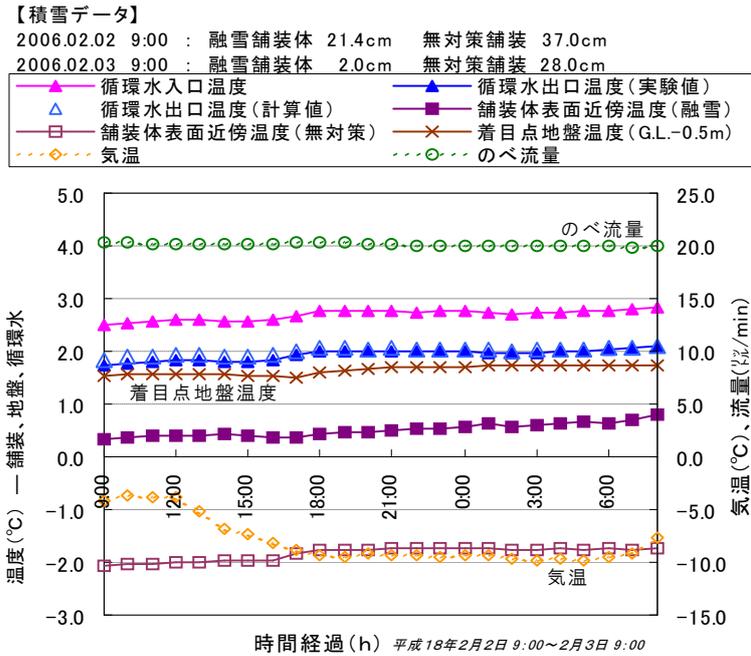


図-13 舗装体出口における循環水温度の評価

融雪能力を定量的に評価することができた。

6) 熱交換杭の採熱能力と、融雪舗装の融雪能力は概ね 10 L/min で均衡する。

次に、今後の課題について述べると、熱交換杭の採熱能力については、地盤温度等の環境条件・熱交換杭の内外管の熱伝導率及び循環水の物性値の影響を加味した採熱能力の定量的な評価を確立する必要がある。また、需要者の要求性能の見極め並びに低コストを目的とし効率を高める必要がある。さらには、循環水の流れの性質及び物性値が熱伝導（採熱能力）に与える

影響を把握する必要があると思われる。

最後に、本研究に対して福井大学の福原輝幸教授から貴重なご助言を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大竹英雄「地中熱源ヒートポンプ式ロードヒーティングシステム」日本機械学会誌, vol.107, No.1032, p44, 2004.11
- 2) 布施浩司ほか「省エネルギー型ロードヒーティングの性能評価試験」北海道開発土木研究所月報, No.594, pp24-31, 2002.11
- 3) 岡喜秋ほか「鋼板を利用したロードヒーティングシステムの開発」北海道立工業試験場報告, N0.294, pp77-82, 1995
- 4) 大木政弘ほか「掘削杭熱交換方式による地盤蓄熱と路面温度制御」水工学論文集, 第41巻, pp.587-592, 1997
- 5) 福井県雪対策・建設技術研究所 年報地域技術第18号, pp143-145, 2005.7
- 6) 福原輝幸ほか「放熱管を有する舗装体の融雪能力特性」水工学論文集, 第36巻, pp.721-724, 1992

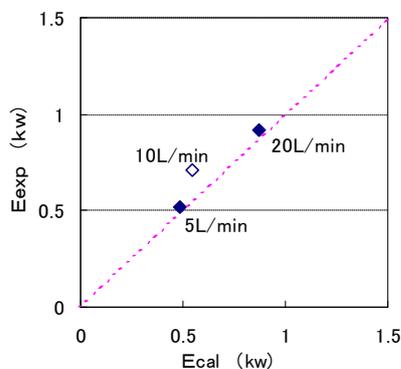


図-14 総放出熱量の計算値と実験値との比較