



Title	地下熱を利用した融雪槽の省エネルギー性に関する実験と評価
Author(s)	濱田, 靖弘; 窪田, 英樹; 中村, 真人 他
Description	第9回衛生工学シンポジウム (平成13年11月1日 (木) -2日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 1 建築環境とエネルギー利用 . P1-6
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 9, 27-32
Issue Date	2001-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7138
Type	departmental bulletin paper
File Information	9-1-6_p27-32.pdf



1-6

地下熱を利用した融雪槽の省エネルギー性に関する実験と評価

濱田 靖弘 (北海道大学)	窪田 英樹 (北海道大学)
中村 真人 (北海道大学)	斎藤 央 (北海道大学)
○小家 浩輔 (北海道大学)	横山 真太郎 (北海道大学)
落藤 澄 (北海道大学)	増田 均 (北菱産業)
小山 仁志 (北菱産業)	

はじめに

札幌をはじめ豪雪地帯に位置する都市にとって、交通の寸断など積雪が生活に与える悪影響は深刻である。現在、多くの都市では雪処理を運搬排雪に頼っているが、都市の密集化により雪捨場が不足し、運搬時に排出される排気ガスが環境に与える負荷は無視できなくなっている。

そこで、これからの都市の融雪システムのあるべき姿として、自然エネルギーや排熱を利用したオンサイト型融雪システムが推奨される。本研究ではまず、雪処理施設の不足、経済性の問題などを抱える自治体の一つとして、北海道奈井江町を取り上げ、雪処理施設整備構想を示すと共に、その一環として地下熱を利用した融雪槽の実験を行う。次いで、直接循環型融雪槽を想定した融雪システムの評価シミュレータを作成し、実測値との比較を行い、実用性を検討するとともに、融雪槽の適正な規模を決定する設計指針を提案する。また、地下埋設型の融雪槽および融雪路盤の融雪特性を明らかにするために、北海道大学構内に実験施設を建設し、地下熱を利用した融雪システムに関する実験経過について述べる。

1. 奈井江町における雪処理施設整備構想の概要

1.1 計画の概要

奈井江町では例年4m~5mの降雪量があり、従来は運搬排雪で雪処理を行っていたが、町内の主要道路沿いに融雪槽、流雪溝を配置する計画が街づくり計画の一環として進んでいる¹⁾。中心街にオンサイト型の融雪施設を整備することで、冬期間における安全で快適な道路空間の確保、夏期は非常用水池として利用することが計画の目的である。

表-1 各種熱源の経済性の比較

項目	灯油式	ガス式	電気式
融雪必要熱量	15,537 MJ/年		
発熱量	35.2 MJ/L	20.9 MJ/m ³	3.6 MJ/kWh
単価	45 円/L	51 円/m ³	7.88 円/kWh
年間消費量	422 L/年	742 m ³ /年	4,136 kWh/年
着火熱源	400 (100V) kWh/年		
融雪槽1箇所当りの年間熱源費用	36,018 円	53,970 円	44,709 円
熱源費用	○	×	△
雨水桟兼用適否	×	×	○
安全性	×	×	○

1.2 融雪槽の設計

第一次整備計画（平成4年に着工，平成8年に共用開始）の熱源には下水処理水を用いたが、水量不足のため第二次整備計画以降の利用が不可能となった。そこで、他の熱源として表-1に示した電気、ガス、灯油に着目し、経済性の比較を行った¹⁾。比較の結果、安全性、雨水桟との兼用の適否を考慮して、第二次整備計画以降の熱源には、電気を用いた。

槽本体の規模は貯雪スペース及び非常用水のスペースを考慮し、縦1.5m，横1.5m，高さ1.5mとした。

1.3 他の融雪システムとの比較

融雪槽の熱源として1槽あたり2kWの電気ヒーターを2台設置した場合と、他の融雪システムとの比較を行った。

表-2に運搬排雪、融雪槽、ロードヒーティングの各融雪システムについて、年建設費とランニングコストの両面を考慮に入れた雪処理単価を示す¹⁾。融雪槽を用いたシステムは従来の運搬排雪よりも雪処理単価で約29%のコスト削減効果が得られ、経済的にも有用性が高いとされた。また、ロードヒーティングの雪処理単価は非常に高価で、運搬排雪の約4.6倍、融雪槽の6.4倍であった。

融雪槽、ロードヒーティングのほかにも、流雪溝や消雪パイプ、融雪機、薬剤散布などの融雪システムが全国で実施されているが、流雪溝や消雪パイプは適用できる気象条件や地形の条件に多くの制限があり、融雪機や薬剤散布は、将来的にも自然エネルギーや廃熱の利用が見込めないことから今回の比較対象から除外するものとした。

表-2 各種融雪システムの雪処理単価

	運搬排雪	融雪槽	ロードヒーティング*
年建設費 [千円/(km・年)]	---	4,671	6,908
年間運用費 [千円/(km・年)]	9,600	2,178	11,880
コスト合計 [千円/(km・年)]	9,600	6,879	18,788
年間雪処理量 [m ³ /km]	42,000	42,000	18,000
雪処理単価 [円/m ³]	229	163	1,044

注 雪密度 100 kg/m³として試算
融雪槽の電気料金を受益者負担として試算

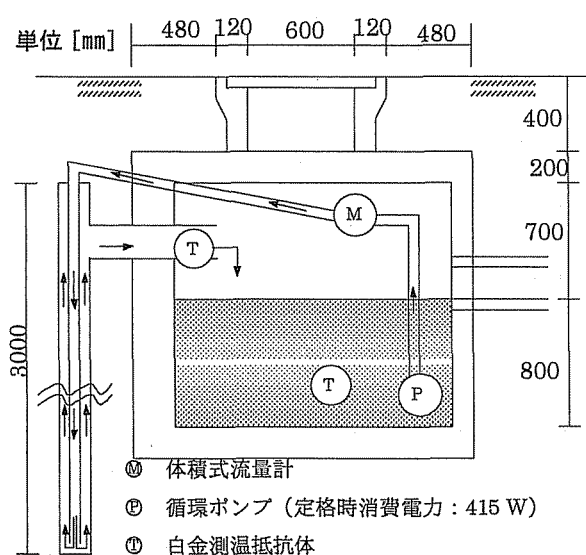


図-1 垂直型地中熱交換器を用いた直接循環型融雪槽の概要

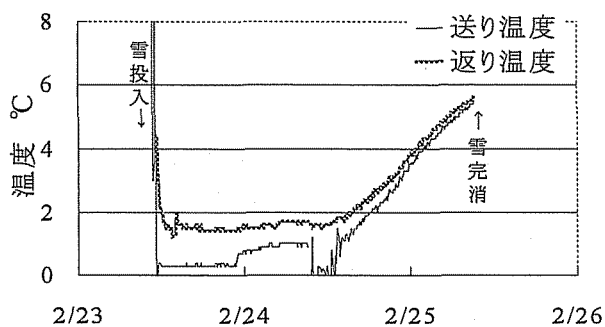


図-2 直接循環型融雪槽の運転実績

2. 垂直型地中熱交換器を用いた直接循環型融雪槽の実測

自治体独自のエネルギー対策、環境保全に対する指針を策定することを目的として、奈井江町地域新エネルギービジョン策定委員会が1999年に発足した。1.における雪処理施設整備構想に関連して、筆者らの研究室において、これまで有効性の実証を行ってきた地下熱利用システム²⁾を用いた融雪システムの試験的な導入を行った。図-1に深さ30mの垂直型地中熱交換器を擁する融雪槽の概要を示す。融雪槽の躯体部分は1.と同様の仕様であり、効率を高めるために、水中ポンプで汲み上げた融雪水を、鋼管井戸型地中熱交換器(黒ガス管:外径89.1mm,肉厚4.2mm)によって昇温する直接循環型構造とした。融雪槽1樹あたりの対象面積を $20\text{ m} \times 3.5\text{ m} = 70\text{ m}^2$ と設定した。

実測結果の一例として、2000年2月の運転実績を示す。槽に雪750kgを投入し、雪がなくなるまで連続運転を行った。融雪水の熱交換器への送り温度と返り温度を継続的に計測した結果が図-2である。24日の12時頃までは、融雪水返り温度は1.6°C程度で安定した推移を示している。残雪量が少なくなるにつれ、送り・返り温度差は徐々に小さくなり、25日9時過ぎに雪がなくなった。この実験結果から求めた地盤

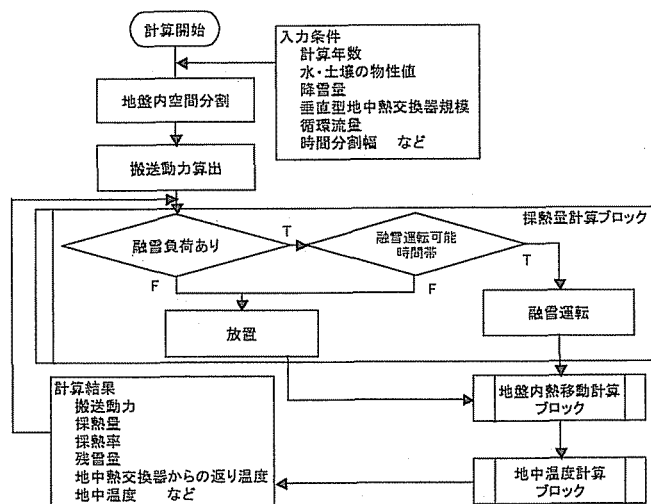


図-3 解析プログラムの全体構成

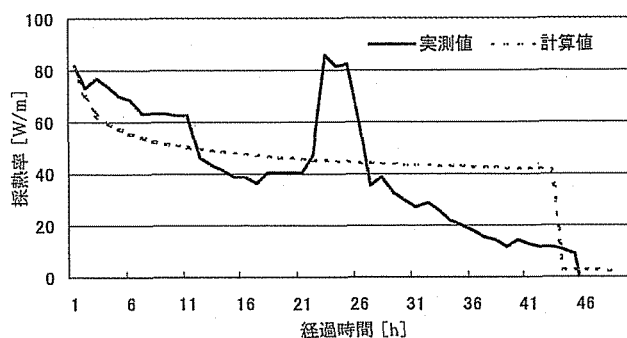


図-4 地盤からの採熱率の実測値と計算値の比較

からの平均採熱率は45.1 W/mとかなり高い値を示した。電気ヒーター式の融雪槽に対する一次エネルギー削減率は73%という結果が得られた。

3. 融雪システム評価シミュレータの概要

垂直型地中熱交換器を擁する直接循環型融雪槽を想定した融雪システム評価シミュレータを作成した。図-3に解析プログラムの全体構成を示す。プログラムに降雪量、地中熱交換器規模、循環流量などを入力すると、搬送動力、地盤からの採熱量、採熱率、残雪量などを出力することができる。残雪量とは、雪投入量のうち一日の地盤からの採熱のみでは、処理できなかった残雪の体積としている。また、計算は地盤内を埋設管を中心に円筒形に空間分割して行った。計算の簡略化のために、融雪槽と外界との熱交換は、今回は考慮していない。地中熱交換器は熱媒として融雪水を直接循環する二重管構造を想定している。1日に降った雪を、0°Cの液水になるまで昇温・融解するのに必要な熱量を融雪負荷と考え、融雪槽運転開始設定時刻から雪がなくなる時刻まで運転を行うものとした。

表-3 融雪槽の稼働時間・採熱量の比較

	実測値	計算値
稼働時間	45時間55分	43時間20分
平均採熱量	45.1 W/m	48.1 W/m
採熱量	217 MJ	218 MJ

表-4 一次エネルギー消費量

一次エネルギー消費量 [MJ/m ³]	
地下熱	0.15
灯油	33.9
ガス	33.9
電気ヒーター	96.6

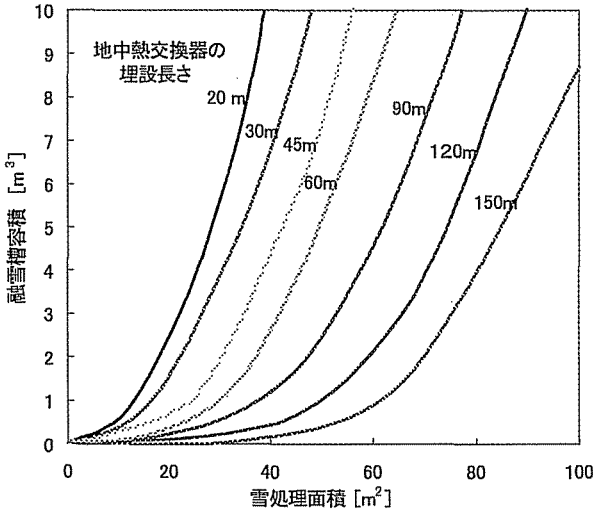


図-5 融雪槽の容積と雪処理面積との関係

表-5 雪処理面積 1 m²あたりに必要な垂直型地中熱交換器の埋設長さ

	埋設長さ [m/m ²]
融雪槽	1.0~2.0 ^{†1}
ロードヒーティング ^{†2}	4.27~5.18 ^{†2}

注 †1 融雪槽は容積 3 m³、雪処理面積 20~80 m²として試算
 †2 値は高熱伝導性路盤（標準施工）の場合

合の降水を降雪とみなし、雪の温度は湿球温度に等しいとした。今回用いた札幌の気象データは、新雪密度を 70 kg/m³とすると、年間降雪量は約 5 mであった。投入時の槽内の雪密度を 500 kg/m³と考え、1日ごとの残雪量を求めた。年間の最大降雪日の降雪を1日で処理するために必要な融雪槽の容積を決定すると、極端に大きくなることから、残雪量の多い年間上位3日間は、評価から除外した。また、循環流量については、地中熱交換器の規模によって決定し、搬送動力の低減化を目的として、十分な採熱量が得られる範囲でできるだけ小さく設定した。

図-5を用いて融雪システム規模を選択する一例をあげると、融雪槽の容積を 2 m³、雪処理面積を 50 m²とすると、必要な垂直型地中熱交換器規模は 90 mと推定される。

さらに、地下熱を利用した場合と他の熱源を利用した場合の一次エネルギー消費量の比較を行った。表-4に埋設管長さ 60 m、雪処理面積 70 m²、循環ポンプの定格時電力消費を 10 Wとした場合の一次エネルギー消費量比較を示す。地下熱を利用した融雪槽に必要な入力、循環ポンプの搬送動力だけであるので、搬送系の適正化を図ることによって、一次エネルギー消費量を従来方式の数%以内に低減できる可能性があることがわかった。

5.2 融雪槽方式とロードヒーティングとの比較

ロードヒーティングは、人力による投雪作業が不要で、なおかつ路面の凍結を防ぎ高い融雪レベルが得られる点で、理想的な融雪システムといえる。ただし、地下熱を利用したシステムでは高温の温水を得ることは難しく、路面を乾燥させるまで路面温度を上げることは現実的でない。転倒事故や車両のスリップを防ぐために、降った雪がシャーベット状になるまで融雪し、路面を凍結させない程度の使用が望ましい。

表-5に今回検討を行った地下熱を利用したロードヒーティング方式、融雪槽方式における、札幌並みの気象条件の地域で雪処理面積 1 m²あたりに必要な垂直型地中熱交換器の

4. 実験結果と数値計算結果の比較

今回作成した融雪システム解析プログラムを用いて、2.における実測と同条件下でシミュレーションを行い、実測値と計算値を比較し、解析プログラムの実用性について検討した。

実測実験と同時刻に 750 kg の融雪負荷を与えて融雪運転のシミュレーションを行った。図-4に、シミュレーションで得られた地盤からの採熱量と実測値との比較結果を示す。実測値と計算値には、比較的良好な一致が見られた。

表-3に融雪槽の稼働時間、採熱量の比較を示す。雪完消までに要した時間は実測値、計算値ともに、ほぼ同程度であった。また、雪完消までに要した地盤からの採熱量についても良く一致しており、これらの比較から、今回用いた融雪システム評価シミュレータは実測値を比較的良好に再現していると考えられる。

5. 融雪システムの設備容量設計に関する考察

5.1 雪処理面積と融雪槽容積との関係

図-5に札幌並みの降雪量を例とした場合の雪処理面積と、垂直型地中熱交換器を擁する直接循環型融雪槽の容積との関係を示す。図の作成にあたっては、今回作成した融雪シミュレーションを用いて、融雪効率を 0.9 と仮定している。降雪量は拡張アメダス気象データ³⁾による札幌における標準年の降水量と湿球温度を用いて、湿球温度が 0°Cを下回った場

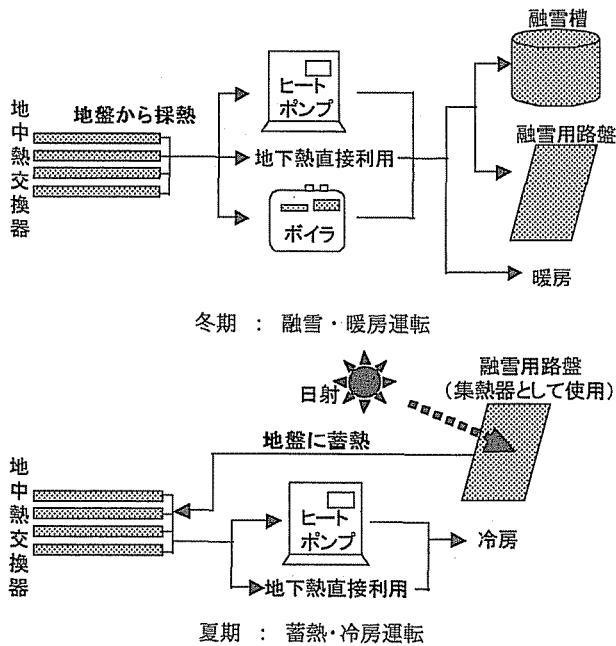


図-6 自然エネルギー実験施設概念図

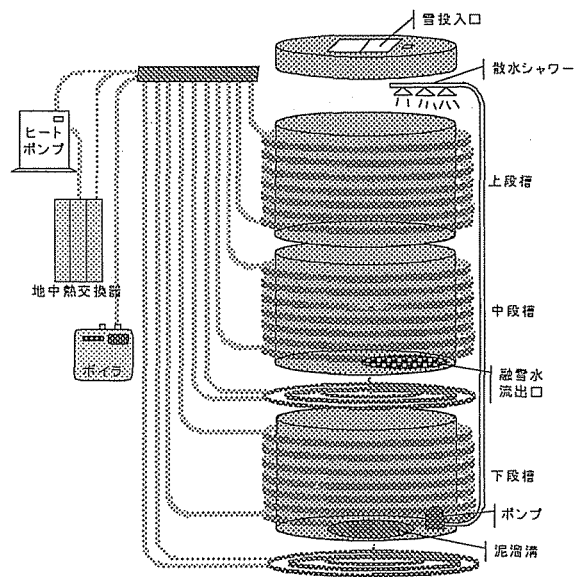


図-8 融雪槽の概要

表-6 融雪システムの仕様

融雪槽	間接熱交換型融雪槽 投雪容量 1.7 m ³
熱源機器	灯油ボイラ(36 kW)
熱媒体	プロピレングリコール水溶液 質量濃度 35 wt%
測定項目	熱媒送り・返り温度 融雪槽外壁・壁内・底部温度 循環流量 投入雪量

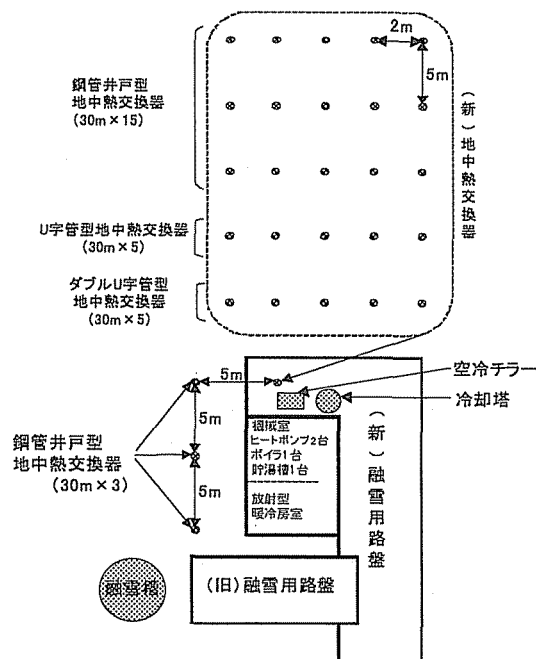


図-7 自然エネルギー実験施設完成予定平面図

埋設長さを示す⁴⁾。比較の結果、ロードヒーティングに必要な垂直型地中熱交換器の規模は融雪槽方式の約3~4倍になった。このことから、都市における融雪システムを選択する際、融雪にかかるエネルギー消費削減のためには、ロードヒーティングは交差点や勾配の大きな坂道など、降雪によって交通に大きな影響を受ける場所や、病院、福祉施設関係、そのほかにも人力での除雪作業が特に困難と思われる場所に限定して使用し、他の場所では融雪槽を優先的に選択するのが望ましいと言える。

6. 北海道大学構内における実験

2. から5. で検討を行ってきた直接循環型融雪槽は、低密度な地下自然エネルギーを最大限に活用するためには、極めて望ましい利用形態の一つと考えられる。一方、太陽エネルギー、排熱などの長期蓄熱サイクル、雪の冷熱貯蔵などを考慮した複合システムを構築するためには、熱効率は若干劣るものの、融雪水を直接循環せずに、密閉された管内に不凍液を循環させる間接熱交換方式を採用する必要がある。このような観点から、図-6、図-7に示す北海道大学構内の自然エネルギー実験施設において、間接熱交換方式を用いて地下熱を利用する融雪槽と融雪用路盤を備えた実験施設を建設中である。熱源として埋設深さ30mの鋼管井戸型地中熱交換器を3本、100mのダブルU字管型地中熱交換器を1本備えている。さらに30mの鋼管井戸型地中熱交換器15本、シングルU字管型地中熱交換器5本、ダブルU字管型地中熱交換器を5本の計25本を新設し、計29本の垂直型地中熱交換器を擁している。導入した融雪用路盤は、旧融雪用路盤：鋼板製、約30m²、新融雪用路盤：標準施工、約130m²の2種類であり、居室部の冷暖房も地下熱を用いて行うものである。また、夏期には融雪用路盤を集熱器として利用し、日射によ

表-7 融雪実験の実験条件と結果

実験No.	①	②	③	④	⑤
投雪日	1/27	2/5	2/21	3/1	3/12
不凍液循環流量 [L/min]	9.6	9.9	10.1	10	6.5
散水	有	有	有	無	有
熱媒送り平均温度 [°C]	37.1	13.9	14	14.6	14.3
投雪前槽内温度					
上段 [°C]	33.6	12.3	13.2	13.2	11.5
下段 [°C]	37.1	13.7	15.4	14.6	12
投雪量 [kg]	420	420	420	420	420
雪密度 [kg/m ³]	200	400	300	300	300
融雪負荷 [MJ]	147.7	147.7	147.7	140.6	140.6
雪処理所要時間 [h]	23	51	48	54	46
供給熱量					
積算値 [MJ]	208.7	117.3	115.1	216.3	161.2
運転時間平均値 [kW]	2.52	0.64	0.67	1.11	0.97
ポンプ発熱 [MJ]	20.7	45.9	43.2	-	41.4
熱効率 [-]	0.64	0.91	0.93	0.65	0.69

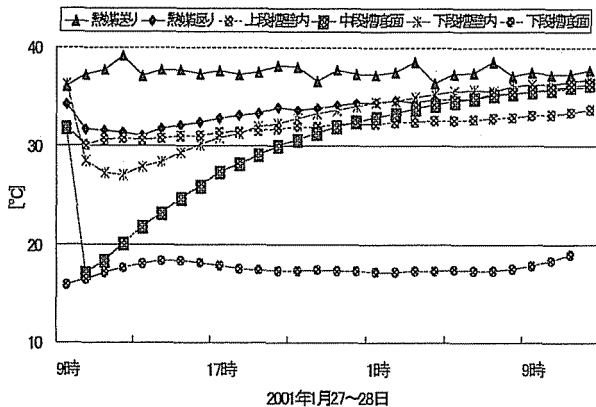


図-9 融雪槽躯体温度および熱媒温度の変動 (実験①)

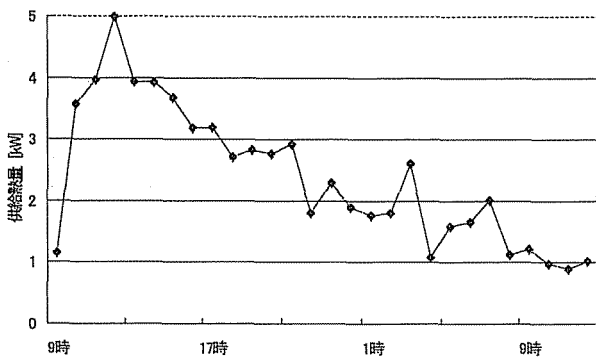


図-10 融雪槽への供給熱量の変動 (実験①)

って暖められた融雪用路盤から地中熱交換器に熱媒を循環させて地盤に蓄熱を行うことを想定している。図-8に今回用いた融雪槽の構造を示す。融雪槽は三層構造となっており、側壁および底部に埋め込んだ配管によって槽内を加熱する。また、下段に設置したポンプは、融雪促進のための散水と排水に用いられる。表-6に融雪システムの仕様を示す。

間接熱交換方式を用いた地下埋設型融雪槽の基本的な特性を明らかにすること、融雪効率が最大となる運転条件を検討することを目的として、熱媒送り温度、熱媒流量、散水の有無について各種の融雪実験を行った。熱源には灯油ボイラ

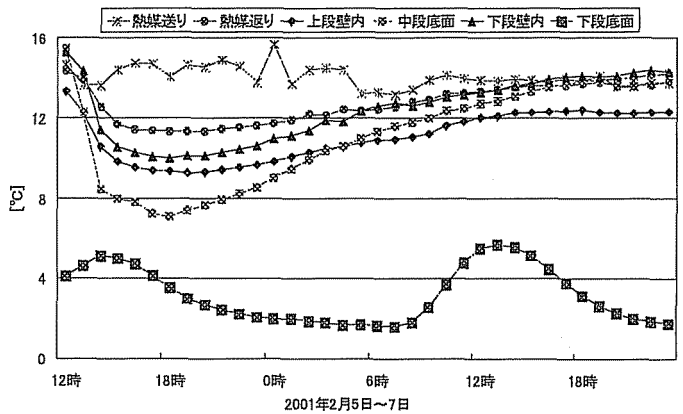


図-11 融雪槽躯体温度および熱媒温度の変動 (実験②)

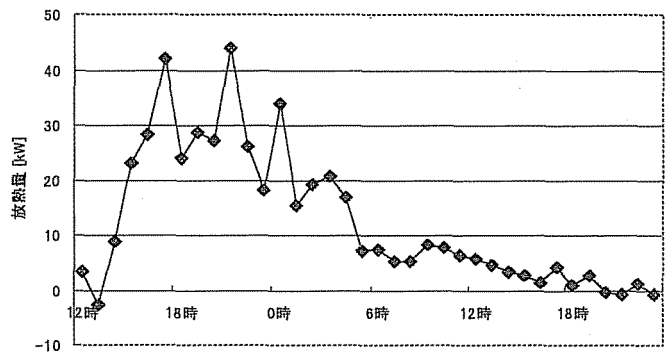


図-12 融雪槽への供給熱量の変動 (実験②)

を用いた。総投雪量を 0°Cの液水に昇温・融解するために要する熱量を融雪負荷とし、融雪槽壁内平均温度が初期条件に回復するまで運転を行った。熱効率を算出する際には、散水ポンプの発熱は全て融雪に使われたものとし、周辺土壌からの熱の流入は無視した。表-7に今回の実験条件と結果を示す。

融雪槽内の温度変化の一例として、図-9に実験①における融雪槽躯体温度および熱媒温度の変動を示し、図-10に融雪槽への供給熱量変動を示す。熱媒送り・返り温度差は最大で約 7.1°Cであり、供給熱量の運転時間平均は 2.52 kWであった。147.7 MJの融雪負荷(雪 420 kg)に対して、熱媒からの放熱量にポンプ発熱を加えた総供給熱量として 229.4 MJを要し、熱効率は 64%で比較的高い数値を得た。また、熱源として地下熱を利用した場合を想定して、低温の条件下で行った実験②の結果を図-11(融雪槽躯体温度および熱媒温度の変動)、図-12(融雪槽への供給熱量の変動)に示す。熱媒送り・返り温度差は最大で約 3.5°Cであり、供給熱量の運転時間平均は 0.64 kWであった。融雪負荷 147.7 MJ(雪 420 kg)の融雪に要した時間は 51 時間、総供給熱量は 163.2 MJであり、熱効率は 91%と非常に高い値を得た。ただし、今回は周辺土壌からの熱の流入を無視して計算しているが、融雪槽の下段底面温度は外気温の影響を受けており、周囲の土壌温度変動

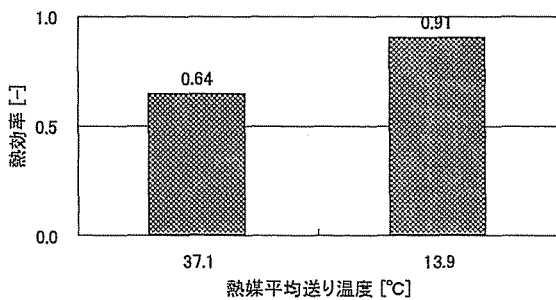


図-13 熱媒送り温度が熱効率に与える影響

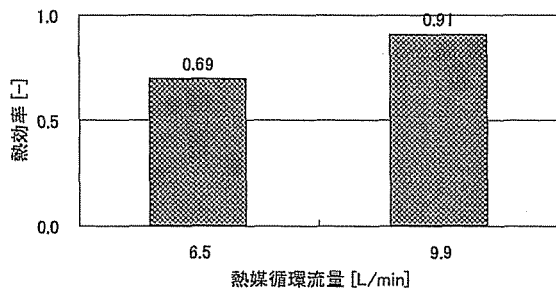


図-14 熱媒循環流量が熱効率に与える影響

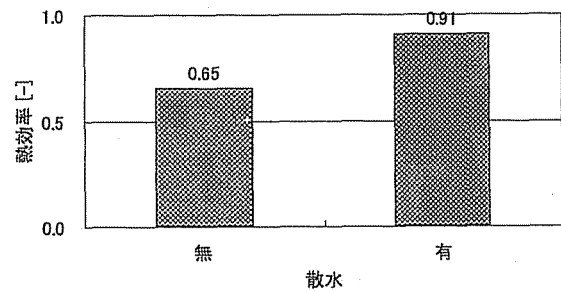


図-15 散水の有無が熱効率に与える影響

による熱の流入があることを裏付けているので実際の熱効率はこの値よりも低下することが予想される。

図-13, 図-14, 図-15 にそれぞれ熱媒送り温度, 循環流量, 散水の有無による熱効率の比較を示す。熱媒平均送り温度を 37.1°C から 13.9°C に低下させた場合, かなり高い熱効率を得られた。しかし低温時には同量の雪の融雪に長時間を要することが課題として挙げられる。次に, 熱媒の循環流量を 6.5 L/min から 9.9 L/min に変化させると, 流量の増大に伴って熱効率の向上が見られた。ただし, 熱効率はある流量でピークをとることが予想されるので, さらに高流量域での実験が必要である。また, 流量を増加させるためにはより大きな搬送動力が必要となるので, 循環ポンプの電力消費を含めた総合一次エネルギー効率が最大となる流量を選択することが求められる。また, 散水を併用することによって熱効率は約 30% 上昇する結果となった。

7. まとめ

- 1) 雪処理施設の不足, 経済性の問題などを抱える自治体の一つとして北海道奈井江町を取り上げ, その雪処理施設整備構想について概説するとともに, 地域新エネルギービジョン策定に関連して, 地下熱を利用した融雪システムの試験的な導入を行った。
- 2) 深さ 30 m の垂直型地中熱交換器を擁する直接循環型融雪槽の実験を 2000 年 2 月に実施した結果, 地盤からの融雪返り温度は 1.6°C 程度, 採熱率は約 45.1 W/m で良好な運転が行われた。

- 3) 融雪システムの評価シミュレータを作成し, 実測値との比較を行った結果, 両者は良く一致し, 十分な実用性があることを示した。また, 融雪システム設計のための雪処理面積, 地中熱交換器規模, 融雪槽容積の特性図を提案した。
- 4) 北海道大学構内の自然エネルギー実験施設において, 間接熱交換型融雪槽の性能試験を開始した。熱媒送り温度 37°C 程度の場合の融雪槽の熱効率は, 64% で比較的高い性能が得られる結果になった。熱媒送り温度を 14°C 程度に低下させると, 熱効率は 91% となり, 非常に高い値が得られた。
- 5) 熱媒流量, 散水の有無を変化させて実験を行った結果, 循環流量の増加によって熱効率の向上が見られた。また, 散水を併用することによって, 熱効率が大きく上昇することを示した。

終わりに, 本研究にご協力頂きました奈井江町役場都市建築課の藤井茂敏氏, 山下 衛氏に深く感謝いたします。

本研究の一部は, 財団法人ゼネラル石油研究奨励財団第 20 回研究奨励助成 00-1 “改良型埋設法による地下熱利用を導入した寒冷地の建築・都市エネルギーシステムの開発” によった。

参考文献

- 1) 奈井江町建設課・北海道開発コンサルタント株式会社: 奈井江町雪処理施設整備構想 概要版 (1996-10)
- 2) K. Ochifuji, M. Nakamura and Y. Hamada Ground-Source Heat Pump Systems in Japan, IEA Heat Pump Center News Letter, 17-1 (Mar, 1999), pp.13-14
- 3) 日本建築学会: 拡張アメダス気象データ (2000-1)
- 4) 永坂茂之・落藤澄 ら: 線源理論を用いた土壤熱利用融雪システムの設計手法, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1997), pp.1081-1084