

III-2 新熱源を利用した道路消融雪技術

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 11～平 14

担当チーム：先端技術チーム

研究担当者：吉田 正、平下 浩史、

山口 崇

【要旨】

近年、未利用エネルギーなどの新熱源を利用した道路消融雪施設において、いくつかの施設で蓄熱技術が試験的に導入されている。しかしながら、これらの試みは、蓄熱槽技術の熱需給の違いを調整する機能に着目した個別事例にとどまっており、空気調和設備で培われた蓄熱技術の実績を十分に活用するまでには至っていない。

このため、本研究では、空気調和設備で培われてきた蓄熱技術の道路消融雪施設への技術移転を行い、無散水の道路消融雪施設の課題であるトータルコストを低減することを目的に、未利用エネルギーの熱源としてのフィージビリティ・スタディと道路消融雪施設における蓄熱技術の導入効果の検討を通じて、道路消融雪施設に蓄熱技術を有効に活用するための効率的な熱の運用について検討を行った。

その結果、蓄熱技術は未利用エネルギーの融雪への適用性を高め、降雪特性によるトータルコストを低減する可能性があることがわかった。また、より有効に蓄熱技術を活用するために効率的な熱運用を可能とするシステム構成と制御方法を提案した。

キーワード：道路消融雪、未利用エネルギー、蓄熱技術

1. はじめに

我が国では積雪寒冷地域が国土面積の約 6 割を占め、全人口の 2 割の人々がこの地域で生活している。この地域の冬期道路交通の確保は、国土政策における重要課題であり、除雪、防雪等の雪寒事業に大きな努力が払われてきている。

この雪寒事業の一つに消融雪設備の整備がある。これは道路に常時設置される設備であり、そのため機械除雪作業に比べ、初期降雪に対して迅速な対応が可能である。さらに、機械除雪作業の様に一般交通を妨害することもなく、円滑な冬期道路交通を確保できる。また、歩道等における冬期バリアフリーへも容易に対応できるという特徴を有している。

消融雪設備は、大別して地下水等を路面に直接散水する散水融雪、電熱線や温水配管によって、路面を温める無散水融雪の 2 種類がある。散水融雪は、地下水枯渇による地盤沈下の発生により条例等で地下水の利用制限を受けることも少なくない。また、舗装面の劣化、気温が氷点下時の路面凍結等の問題も懸念される。一方、無散水融雪は熱源の種類を選択することで場所の制限を受けることなく整備することが可能である。反面、建設コスト、維持管理コスト面や電力等の消費エネルギーが莫大なものになる点に課題を有している。

そこで、近年、道路消融雪施設の維持管理コスト低減を目的に、未利用エネルギーを熱源に利用することが着目されている。しかし、一般的に未利用エネルギーは、温度や熱量が時間変動するため利用可能な熱量が一定でなく、降雪時に必要な熱量を十分に確保できない場合がある。このため、熱源の安定化と熱量不足時の補給を可能とする蓄熱技術を試験的に道路消融雪施設へ導入する試みがいくつかの施設で実施されている。しかしながら、これらの試みは、蓄熱槽技術の熱の需要と供給の大きさの違いや時間の差を調整する機能に着目した個別事例にとどまっており、空気調和設備で広く利用され多くの研究がなされてきた蓄熱技術の実績を道路消融雪施設に導入し十分に活用するまでには至っていない。また、維持管理費は低減するが、薄く広く存在することの多い未利用エネルギーを利用するため、その熱源設備が大規模となり建設コストを増大させる場合もある。よって、建設と維持管理のコストのトータルを低減することが望まれている。

このため、空気調和設備で培われた蓄熱技術を道路消融雪施設へ技術移転し、未利用エネルギーの特徴を補い併せてトータルコストを低減することを目的に、蓄熱技術の道路消融雪施設における有効な活用について検討を行った。

2. 研究方法

2.1 未利用エネルギーの熱源としてのフィージビリティ・スタディ

無散水の道路消融雪設備のニーズと技術開発項目を確認するために、施設管理者に行ったアンケート結果と無散水の道路消融雪設備の設置状況及び既存システムの経済比較を分析した。

また、道路消融雪用熱源として未利用エネルギーを利用することが可能か検証するために、融雪必要熱量と未利用エネルギー賦存量の熱収支の検討を行った。検証は、積雪寒冷特別地域内の人口10万人以上の31都市における、未利用エネルギーの賦存量と、融雪に必要な熱量を試算し、都市単位というマクロなスケールで表-1の未利用エネルギーを対象に熱収支の分析を行った。

表-1 熱源の区分と形態

熱源区分		熱源形態	
自然エネルギー	未利用エネルギー	地下水	地熱
		太陽熱	風力
		空気熱	河川水熱
		海水熱	温泉熱
リサイクルエネルギー	都市排熱	下水熱	地下鉄排熱
		変電所排熱	ビル排熱
		工場排熱	廃棄物熱
		コージェネ排熱	
化石エネルギー		化石燃料・電力	

さらに、分析の結果評価の高かった下水熱源について、青森市で実施した実測調査結果をもとに、その特性を分析した。

2.2 蓄熱技術の導入効果の検討

未利用エネルギーを利用した無散水の道路消融雪施設に蓄熱技術を導入したときの効果を確認するために、蓄熱技術の導入効果を理論的に分析した。分析は、熱源の安定化と熱量不足時の補給による融雪必要熱量の安定供給、熱源設備の小規模化、汎用ヒートポンプの適用について行った。

また、蓄熱技術を導入した場合のコスト面での効果について、実際の降雪データを用いて具体システムを想定したコスト比較を行った。

2.3 効率的な熱運用の検討

効率的な熱運用を実現するために、蓄熱槽を活用した道路消融雪施設のシステムの構成とその制御方法を検討した。検討に際しては、道路消融雪施設の熱運用シミュレーションを作成し、熱運用の効率を分析した。また、蓄熱槽の熱損失を分析するための実験とシミュ

レーションの検証実験を行った。実験に際しては、蓄熱技術を活用した既存の道路消融雪施設を活用し、ヒートポンプや三方弁などの制御温度を変更して施設の状態を実測した。実験期間は平成15年1月29日～3月13日までであり、降雪が予想された時期に延べ5日間、現場にて実験を行い、残りの期間は自動計測を行った。計測に関しては、施設に整備されている計装装置を活用した。また、4系統22ヘッダ370回路ある放熱管のうち1系統に関して、「行き」と「戻り」の放熱管内ライン（不凍液）の温度を各ヘッダと機械室に簡易温度計を設置して自動計測した。機械室の行き配管の流量も超音波流量計を用いて自動計測した。なお、計装装置で2000年1月から計測しているデータについても提供を受け検討に活用した。

実験に利用した施設は、日本海に面した国道沿いのチェーン脱着場を兼ねた駐車場に設置されている。近辺の道路は坂路でカーブとトンネルが続く散水融雪が整備された道路である。冬期に高速道路が通行止めになると迂回路として多くの車両が集まり渋滞が発生するような場所であり、また通常もトラックの往来が多く、海が見える眺望の良い崖の上にあるこの駐車場を利用する車両は少なくなかった。

3. 研究結果

3.1 未利用エネルギーの熱源としてのフィージビリティ・スタディの結果

3.1.1 無散水の道路消融雪施設のニーズと技術開発項目

融雪設備の課題を分析するため、全国の無散水融雪設備施設管理者を対象に行ったアンケート結果を元に、課題を分類した（図-1）。その6割が経済性に関する事項であり、無散水融雪設備のコストが特に高いことが伺える。

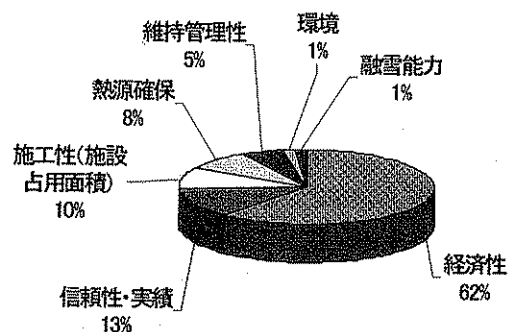


図-1 既存融雪設備の課題

「無散水消雪施設調査業務委託（平成5年度：東北地方整備局）」

無散水融雪設備の設置状況は図-2に示す通り、設備の9割近くが人口密集地域に集中している。これより人口密集地域、すなわち都市部に設備ニーズが高いことが伺える。

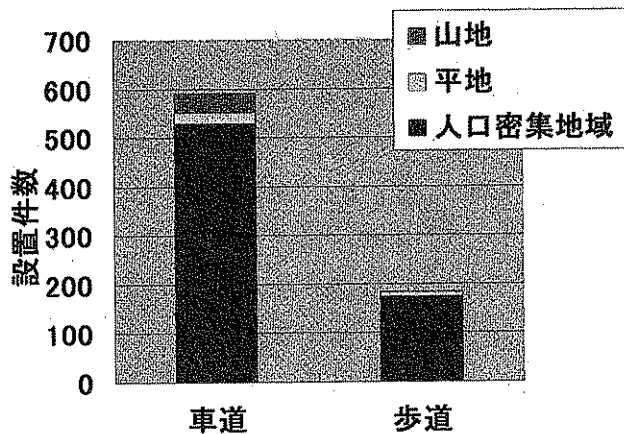


図-2 無散水融雪設備設置状況

ニーズの分析より、融雪設備が目指すべき技術開発の方向は、都市部の特性を活用したコスト低減と導かれる。よって、イニシャルコストとランニングコストの合計であるトータルコストを低減する都市部で導入可能な技術の開発が望まれていることがわかる。

代表的な無散水融雪設備のコストの実例は図-3に示す通りである。ここで、コスト比較の算定条件は融雪面積 2,000 m²、170W/m²を適用した。またランニング期間は、機器の耐用年数を考慮して 15 年としている。

図-3の中で、最も一般的に採用されているのは、電熱線方式とボイラー方式である。これらの方式は、エネルギー密度の高い化石燃料を熱源とすることから、設備がコンパクトで大きな熱出力が得られる。しかし、必要な熱を全て化石燃料よりまかなう事から、燃料の

消費量が多くランニングコストが高い。

そこで近年、ランニングコストの低減を図るべく、未利用エネルギーの利用が注目されている。中でも、設備ニーズの高い都市部には、未利用エネルギーである都市廃熱が多く賦存する(表-1参照)。

一方、地中熱、空気熱等を利用した未利用エネルギー利用融雪設備の実例では、化石燃料利用システムに比べ、イニシャルコストが一般に高い傾向を示す。これは、必要とする設計熱量に対して、化石燃料利用はエネルギーを容易に確保できるのに対し、未利用エネルギー利用はエネルギーが微弱で不安定であり、設備側で十分な熱を採取、供給できるよう手当てする必要があるためである。したがって未利用エネルギーの適用には、イニシャルコストを削減しうる技術開発が求められる。

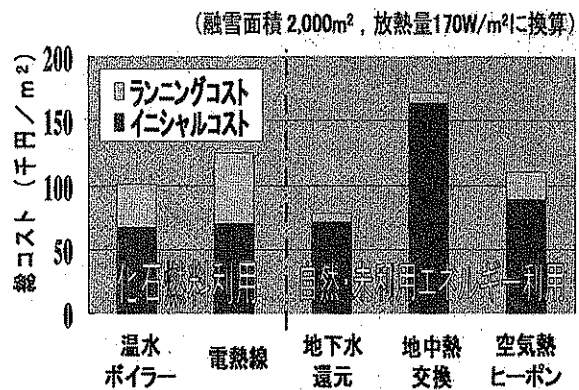
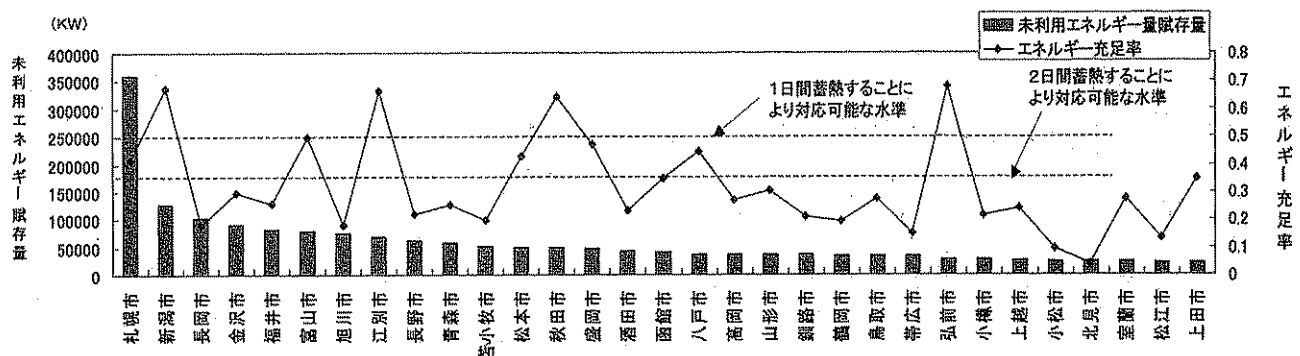


図-3 既存無散水融雪システムの経済性

3. 1. 2 融雪必要熱量と未利用エネルギー賦存量の熱収支検討

熱収支分析の結果、最大降雪時には31の全ての都市で、融雪必要熱量を賦存量が賅うことが出来なかった。(図-4参照)しかし、熱の充足率が1/3以上の都市が11箇所も存在する。これは、融雪必要熱量を賦存量で賅うためには2日分の熱を蓄熱すれば融雪可



注) エネルギー充足率 = 各都市に賦存する未利用エネルギー量 ÷ 消融雪に必要なエネルギー量

図-4 未利用エネルギー賦存量とエネルギー充足率(最大降雪時)

能という裏付けになる。そこで、降雪のない日に蓄熱を行えば最大降雪時にも対応できる地域が、多いものと推測できる。

次に、対象とした31都市を1kmのメッシュに分割し、メッシュ毎に賦存量と融雪必要熱量を試算し、主要道路を中心とした熱収支分析を行った。

図-5のメッシュ分析の結果より、融雪に必要な熱量を、未利用エネルギーのみで賄えるメッシュは、ゴミ焼却場、下水処理場等のスポット的に大きな熱源が存在するメッシュ、下水の量が豊富で、下水管渠から多く採熱できる都市部中心メッシュ、であることが明らかになった。

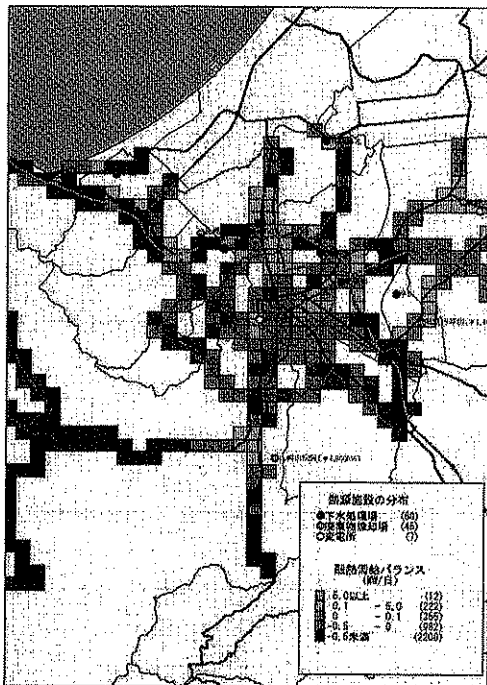


図-5 メッシュ分析結果の例
(札幌市、最大降雪時)

熱収支分析より、以下の可能性を確認できた。

- ①蓄熱によって、未利用エネルギーを用いた融雪が、可能となる地域が広がる
 - ②人口密度の高い都市部中心地域は下水熱の賦存量が多く、融雪に必要な熱を賄える可能性が高い。
3. 1. 3 下水熱源の特性の分析

下水道管渠内の未処理下水温度は、冬期においても12~15℃は確保される。日中は低温の雪解け水が下水道管渠に流入するため、流量が増加し、温度が低下する。

図-6は、枝管である口径600mm下水管(青森市内)

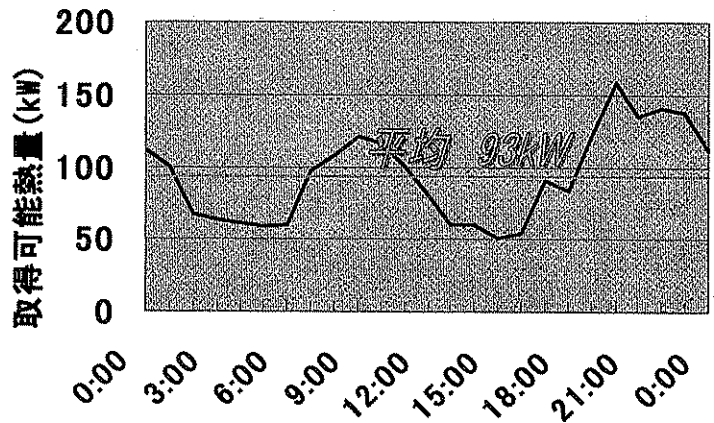


図-6 下水管渠(φ600mm)から採取可能な熱量
(青森市内、実測値より換算)

を流れる未処理下水から取得可能な熱量を示したものである。下水の流量と温度を、平成13年3月9日~11日の3日間、1時間毎に測定し、5℃まで採熱するものと仮定し算出した。下水管渠内の熱量の1日の時間変化は、図-6に示すように、早朝(2:00~6:00頃)および昼過ぎ(12:00~16:00頃)に採熱可能熱量が少なく、一方、水道利用量の多い早朝(8:00~12:00頃)、および夕・夜間(18:00~1:00頃)に採熱可能熱量が多くなる。取得可能熱量の時間平均は93kWとなった。

ここで、融雪必要熱量を図-3の比較条件と同じ170W/m²と仮定すると、93kWは540m²の面積に相当する。この結果は、歩道で幅2m、距離270mの融雪を可能とする。これは、下水熱の、融雪への高い適用性を示すものと判断できる。

しかし、下水の流量と温度は人の密度や活動等の生活様式に依存するため、取得可能熱量は時間帯により変動がある。特に、人の活動が静まる深夜から早朝にかけては、流量がほとんどなく、微少の降雪にも対応できない。

したがって、下水をはじめとした都市廃熱を融雪に利用するには、採熱量の安定化(熱源の安定化)が必要である。

3. 2 蓄熱技術の導入効果の検討

3. 2. 1 融雪必要熱量の安定供給

降雪は一定かつ連続するものではない。そのため未利用エネルギーを融雪設備の熱源とした場合、降雪のない時間帯の未利用エネルギーは利用されることなく廃棄され、設計降雪強度以上の降雪時には熱が不足し残雪が発生することとなる。そこで、融雪に利用していない降雪の合間の熱を蓄え、その熱を融雪必要熱の不足する時間帯に利用することを可能とする蓄熱技術

を導入する。これにより、取得可能熱量の不安定な未利用エネルギーを用いた場合でも、安定した熱の供給が可能となる。

具体的には、図-7に示すとおりである。グラフの縦軸を熱量、横軸を時間に設定すると、熱源（未利用エネルギー）からの採熱量は破線のように変動する。ここで熱源を下水廃熱に例えるとその採熱量の変動は、人の活動に応じて変動することとなる。図-7の破線の変動のイメージは、左から昼→夜→朝のサイクルとなる。まずグラフの一番左は、昼食時で採熱量が比較的多い時間帯である。次の山は、夕食、入浴時で、その時間帯までの間は、採熱量が少なくなり、夕食、入浴の時間帯に採熱量が増えることとなる。そして、深夜から早朝の就寝の時間帯は、人の活動がほとんどなく採熱量が最も少なくなり、最後の山の朝食や洗濯などの家事の時間帯に再び採熱量が増加するサイクルとなる。ここで、図-7の採熱量が少ない深夜から早朝までの時間帯に降雪があった場合、融雪必要熱量の時間変化は実線のようになる。

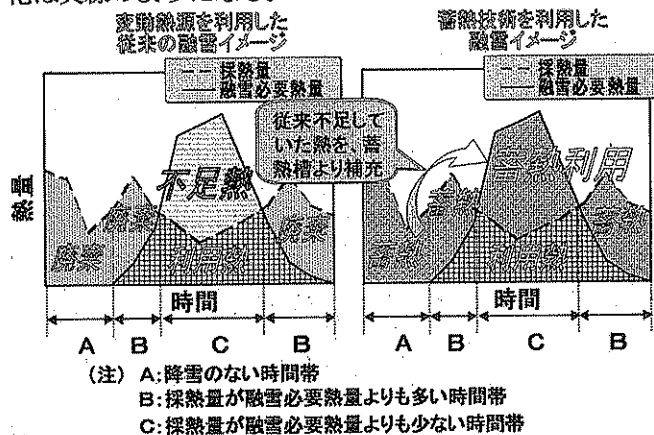


図-7 融雪必要熱量の安定供給

この図-7を3つの時間帯に分類する。時間帯毎の特徴は、従来の融雪イメージ（非蓄熱式）を表している左のグラフにおいて、時間帯Aでは、熱源より採熱が出来るものの、降雪がない。従って、その採熱された熱は利用されることなく自然界へ廃棄される。また、時間帯Bでは降雪があるため、採熱の一部を融雪に利用できる。しかし、余った熱は利用されることなく、自然界へ廃棄される。一方、時間帯Cでは、採熱量の少ない時間帯であり融雪必要熱量が採熱量を上回り熱が不足し、完全に融雪できない。

そこで、蓄熱技術を利用した融雪イメージを表している右のグラフでは、時間帯A、Bで利用されなかった熱を蓄熱し、その熱を採熱量が不足した時間帯Cで利用する。

これにより、採熱量の不安定な熱源を用いて、安定した融雪が行え、さらに、従来利用することなく廃棄していた熱を、有効に利用することが出来る。

3. 2. 2 熱源設備の小型化

蓄熱技術のもう1つの導入効果は、熱源から熱を採取する設備（ヒートポンプ、熱交換器など）の小規模化である。（図-8参照）

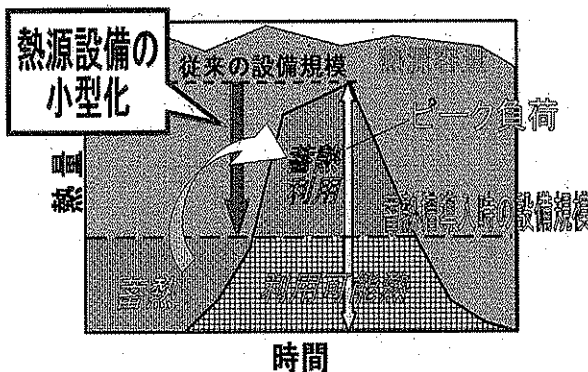


図-8 熱源設備の小型化

従来のシステム（非蓄熱式）では、熱源から採取した熱を直接融雪に使用している。このシステムでは、降雪量に応じて融雪に必要な熱量の供給をまかなうために、降雪ピーク時の負荷（熱量）をまかなえる容量の熱源と、熱源設備を必要とする。一方、蓄熱技術を導入したシステムでは、蓄熱槽が熱の需要供給の調整機能を果たすため、熱源からの採熱と降雪に伴う放熱管への熱供給を別々に取り扱うことが可能である。そのため、熱源設備は降雪の有無とは直接的に関係なく、熱源（未利用エネルギー）と蓄熱槽の状態に合わせて、熱源から熱を採取し、採取した熱を蓄熱槽に蓄える。また、降雪時には、熱源の容量や熱源設備規模に関係なく、融雪に必要な熱量を蓄熱槽に蓄えた熱エネルギーから供給することが可能となる。したがって、熱源設備の規模をピークの降雪負荷に合わせる必要がない。よって、図中の下向き矢印に相当する小規模化が図れ、コストダウンが可能となる。

3. 2. 3 空調用汎用ヒートポンプの利用

ヒートポンプ融雪システム（非蓄熱式）は、ヒートポンプで熱源から採熱した熱を直接融雪に用いている。ヒートポンプは、一般的には居住空間の空調用に利用される機械で、その仕様は暖房運転時で供給温度45～50℃程度である。このヒートポンプを融雪に適用した場合、熱応力による舗装への悪影響を防止するため、放熱部への供給温度を20℃前後とする必要がある。そのため、空調用汎用ヒートポンプの供給温度よ

り25~30℃程度低い20℃前後の供給温度が可能な融雪専用のヒートポンプを開発し適用している。

一方、蓄熱型システムにおいては、熱源から採熱した熱は、蓄熱槽に貯蔵する。貯蔵した熱は融雪時に熱交換器を用いて放熱部へ供給することとなる。したがって、ヒートポンプの供給温度は、放熱部への供給温度とは無関係に蓄熱槽の蓄熱温度によって決定される。そこで、蓄熱温度を45~50℃とすることで、汎用の空調用ヒートポンプの採用が可能となる。また、蓄熱温度を放熱温度より高くすることで蓄熱槽の利用温度差を大きくすることができ蓄熱設備の小型化も合わせて可能となる。これらにより、コストダウンを図ることができる。

3. 2. 4 蓄熱技術のコスト

北陸地方（上越市）と東北地方（山形市）の降雪データ(1996~2000年)をもとに、従来システムと蓄熱槽システムの設備規模を試算し、トータルコストを算出した。従来システムと蓄熱槽システムの具体システム概要は、図-9のとおりである。なお、蓄熱型融雪システムの熱源設備（ヒートポンプ、下水熱交換器）、および蓄熱設備の規模は、残雪日数という能力評価を用いて定めた。

蓄熱槽の有無によるトータルコストの比較は図-10のとおりである。蓄熱型システムは熱源設備の小規模化に伴い、図-10のグラフ中の下向矢印に相当するコ

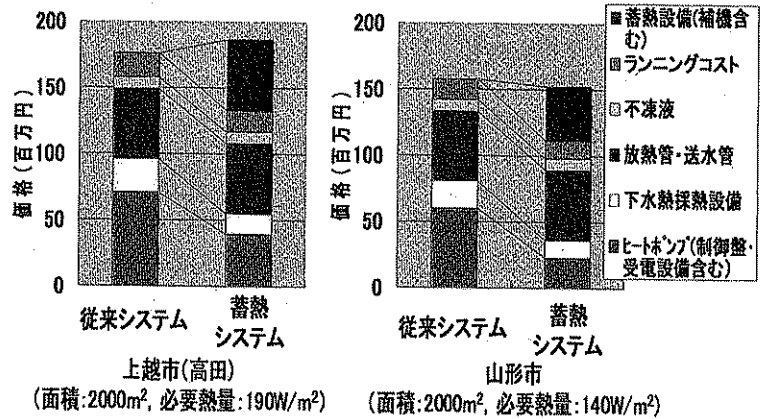


図-10 システム別、地域別コスト比較

スト削減が図れる反面、蓄熱設備構築による追加コスト（上向矢印）が加算される。その結果、上越の気象条件では全体で約6%のコストアップ、山形では全体で約4%のコストダウンとなった。この違いは、蓄熱設備の規模が1降雪あたりの連続降雪時間や積雪深に大きく依存するためである。この結果は、蓄熱技術の導入による融雪システムのトータルコスト削減の可能性を示すものとする。

3. 3 効率的な熱運用の検討

3. 3. 1 システムの構成と制御方法の検討

蓄熱システムでは、ハード設計のみならず、それを有効に活用するためのソフト（運用、制御）の技術開発が不可欠である。

例えば、蓄熱槽から放熱側の制御が不適切なため、融雪後も大気へ余分な放熱を行ったとする。このようなケースでは、蓄熱槽内の熱が失われてしまい、次の降雪時に必要量の熱を確保できず、蓄熱槽の設計容量を十分に生かすことが出来ない。

したがって、蓄熱槽システムの性能を十分に発揮するには、熱を無駄なく運用するシステム構成と制御方法を検討する必要がある。

効率的な熱運用を検討するに当たり、2つの損失について、その効率化をシステム構成と制御方法の観点から検討した。一つは熱量の損失であり、もう一つはエクセルギーの損失についてである。熱量の損失は、放熱部からの融雪必要熱量以外の放熱量について、システム構成と制御方法による違いを検討した。エクセルギーの損失は、蓄熱槽に蓄えた熱について、高温水と低温水の混合によるエクセルギーの損失を低減するシステム構成と制御方法を空気調和設備における蓄熱槽を参考に検討した。なお、エクセルギーとは、与えられた状態のエネルギーから、一定の外界条件のもと

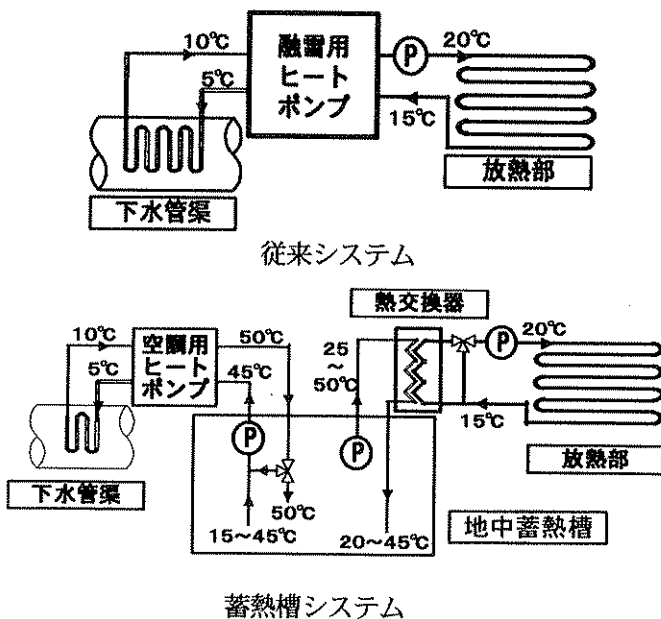


図-9 具体システム

で、理論上取り出しうる最大の仕事のことである。高温水と低温水が混合すると熱量は変化しないが、その有用性は減少する。そのため、エクセルギーの損失が起ることとなる。また、蓄熱媒体は実績が多く安価で入手が容易な水とした。

以下に、基本とするシステム構成と制御方法を示す。

①蓄熱槽の構造

「連結温度成層型蓄熱槽」

蓄熱槽は、槽内の温度の異なる水の混合によるエクセルギー損失を避けるため、高温と低温の水の混合がしづらい構造とすることが蓄熱槽効率の向上に望ましい。この目的のため連結完全混合型蓄熱槽と温度成層型蓄熱槽がある。連結完全混合型蓄熱槽は、多数の蓄熱槽を直列に数多くつなげることで、一つ一つの蓄熱槽内の水は混合しても槽全体では水の混合を抑制することが可能な蓄熱槽である。20槽以上の槽数があればかなりの混合が抑制されるとされている。また、温度成層型の蓄熱槽は、温度による水の密度差により低温と高温の水が混合せずに中間的な遷移層を挟んで分離する性質を利用した蓄熱層である。このため、水の出し入れによる蓄熱槽内の水の混合を水の吸い込み口や吹き出し口の位置や構造などで抑えるように工夫しており、槽数が少ない場合に効力がある。

道路消融雪施設に用いる蓄熱槽は設置スペースから大きな規模の蓄熱槽は適用が困難なため、蓄熱槽の構造上必要となる中壁を利用して槽数を確保することを想定すると、20槽以上の槽数を確保することは、難しいと考えられる。したがって、連結温度成層型蓄熱槽を基本の蓄熱槽構造とする。低温と高温の水の混合がしづらい構造にすることで、エクセルギーの損失を抑え蓄熱槽効率の向上が図られ、効率的な熱運用が可能となる。

なお、蓄熱槽の容積が 40m^3 、 80m^3 、 110m^3 、 280m^3 の鉄筋コンクリート製の地中埋設型蓄熱槽を想定して、通常の構造設計を行った結果では、中壁により4～9槽の槽数に分割された。

②ヒートポンプの制御

「定格運転のON/OFFを蓄熱槽温度により制御。なお、ヒートポンプ出口温度を一定とするため三方弁を用いた入口温度一定制御を行う。」

ヒートポンプの効率を考慮して定格運転のON/OFF制御を基本とした。ただし、熱源の変動と採熱量の制限から採熱量の制御が必要な場合も考えられる。また、蓄熱槽に戻る高温水の温度を一定

にすることで蓄熱槽内の吹き出し口での混合を抑制する。このため、ヒートポンプの入口温度を一定制御にすることとした。これによりエクセルギーの損失を抑えて蓄熱槽効率の向上を図り、効率的な熱運用が可能となる。

③熱交換器一次側（蓄熱槽側）の制御

「熱交換器入口と出口の温度差を確保するために二次側流量に連動した流量制御を行う。」

蓄熱槽に戻る低温水の蓄熱槽内の吹き出し口での混合を抑制するために、出口温度が設定値以上にならないように流量を制御することとした。流量制御は、熱交換器二次側の制御方法にもよるが、二次側の温度差が確保されている場合は、二次側の水当量（流量 $[\text{m}^3/\text{s}] \times$ 比重 $[\text{kg}/\text{m}^3] \times$ 定圧比熱 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ）と一次側の水当量の比が一定になるように制御することとした。これにより、エクセルギーの損失を抑えて蓄熱槽効率の向上を図り、効率的な熱運用が可能となる。

④熱交換器二次側（放熱部側）の制御

「三方弁を用いた温度一定制御と融雪負荷に対応した流量制御を行う。」

放熱部で融雪負荷に対応して放熱量を制御するために制御対象として考えられるのは、放熱管を流れるラインの温度と流量である。考えられる制御の組み合わせは、流量一定/温度変動、流量変動/温度一定、流量変動/温度変動である。両方を負荷にあわせて同時に制御することは、煩雑な制御となる。また、熱交換器一次側の熱交換器入口と出口の温度差を確保するには、熱交換器二次側の温度差を確保する必要があるため、温度一定制御と流量のみを負荷に合わせて変動制御することとした。次項のシミュレーションを用いて、負荷に対応した制御を行わない場合と上記制御を行う場合のシステムの熱運用効率（ $(\text{放熱量} - \text{放熱量損失}) / \text{蓄熱量}$ ）を計算した。結果は、64%と75%となり、熱量の損失が低減され、効率的な運用が可能となることを確認した。

ここで用いた蓄熱槽効率は、「理論的に蓄熱槽に蓄えることができ、利用できる熱量」に対する「実際に蓄熱槽に蓄えることができ、利用できる熱量」の比で表される率で、エネルギーの損失を意味するものではない。理論的に必要な蓄熱槽容量を蓄熱槽効率で除したものが実際に必要な蓄熱槽容量となるため、蓄熱槽効率の向上は蓄熱槽の小型化を図る上で重要である。

①～③はエクセルギーの損失を低減し蓄熱槽効率を向上させるために採用を検討したシステム構成と制

御方法であり、④は融雪システム全体の熱運用の効率を向上（放熱側からの熱損失を低減）させるために検討したシステム構成と制御方法である。したがって、①～③の採用の是非については、蓄熱槽の設置スペース及び制御の高度化にかかる費用を考慮して検討する必要がある。すなわち、①～③を基本のシステム構成と制御方法としたのは、道路消融雪施設において蓄熱槽の設置スペースを確保するためにコストがかかる又は困難な場合を考え、蓄熱槽の小型化が図れる制御方法を基本としたためである。よって、実際の設計にあたって蓄熱槽の設置スペースが十分に確保できる場合は、蓄熱槽構造や制御方法の高度化を図る費用と蓄熱槽設計容量の増加に伴う費用を勘案する必要がある。

3. 3. 2 熱運用シミュレーション

蓄熱技術を活用した道路消融雪設備の熱運用シミュレーションを作成した。シミュレーションの対象としたシステムの構成は図-11 のとおりである。熱源から熱を汲み上げるヒートポンプ、汲み上げた熱を蓄える蓄熱槽、蓄えた熱を放熱管に供給する熱交換器と各ポンプ及び三方弁からなるシステムである。熱運用シミュレーションの基本構成は、図-12 のとおりである。シミュレーションは、まず、蓄熱槽の容量や融雪面積などの設備規模や舗装体の熱伝導率やラインの比熱などの物性値をパラメータとして設定する。次いでステップ時間当たりの降雪深を入力することで、制御方

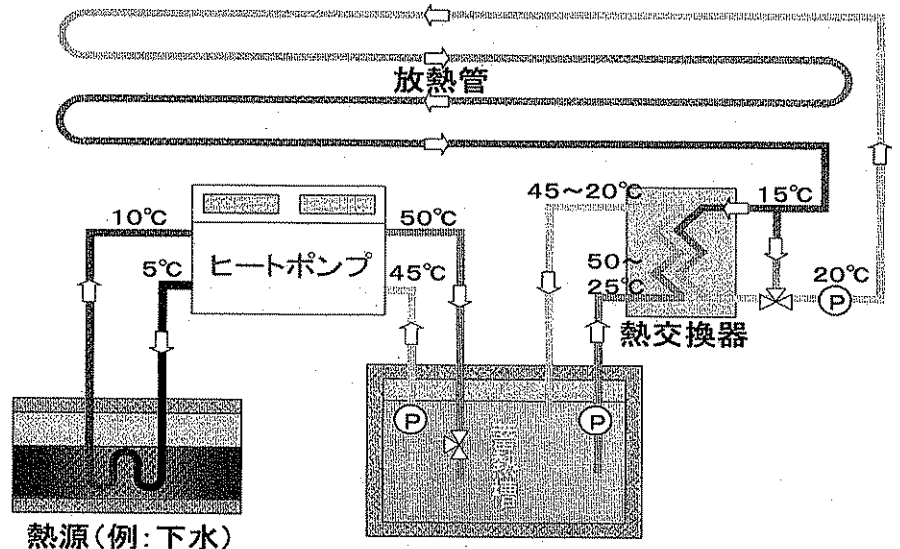


図-11 シミュレーションの対象システム構成

法に沿った構成機器の制御値を算出し、放熱部、熱交換器、蓄熱槽および融雪の状態変化を計算する。結果として、ステップ時間毎の蓄熱槽の温度や熱交換器の出口温度及びライン流量などの融雪設備の状態と路面の融雪状態を得ることが可能である。このシミュレーションを用いることで、施設設計時に、実際の降雪データを用いて、蓄熱槽とヒートポンプの規模や制御方法等の最適化を検討することが可能となる。

なお、前項④熱交換器二次側の制御を検討するに当たり、この熱運用シミュレーションを用いてシステム全体の効率を比較した。比較した制御方法は、融雪負荷に対応した流量制御を行うときに温度制御をどの程度するかを比較するために以下の3通りとした。

- ①三方弁を用いた温度一定制御と融雪負荷に対応した流量制御
- ②三方弁を用いた熱交換機入口温度の上限制御と融雪負荷に対応した流量制御

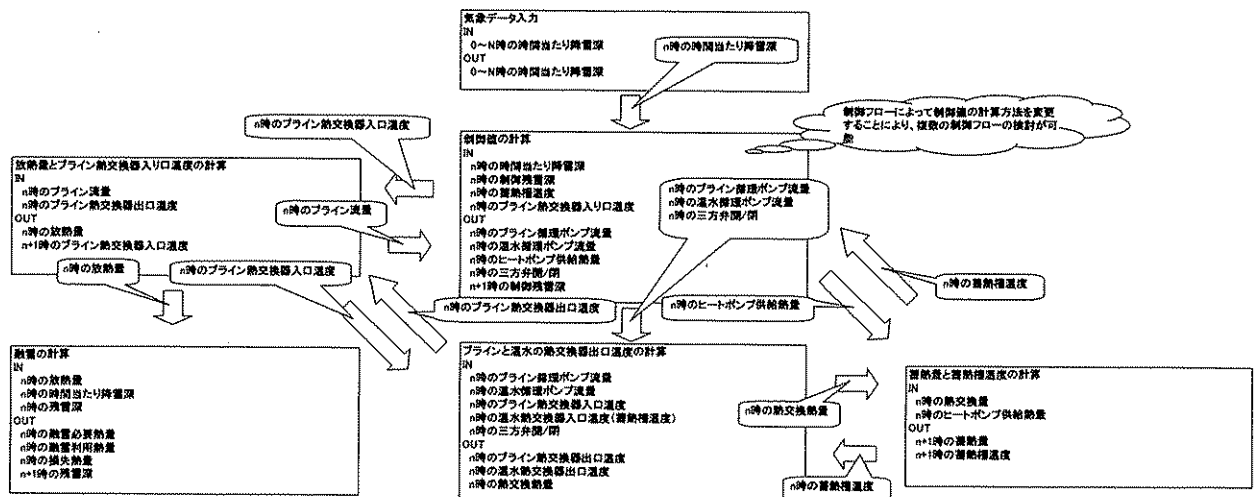


図-12 熱運用シミュレーションの基本構成

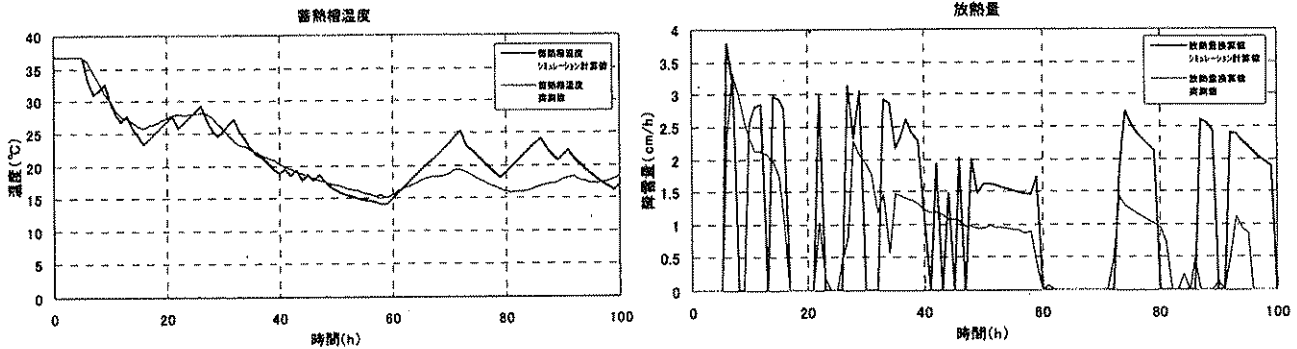


図-13 熱運用シミュレーションの計算値と実測値の比較

③融雪負荷に対応した流量制御

結果、システムの熱運用効率（(放熱量-放熱量損失) / 蓄熱量）は、①75%、②71%、③66%となり①の効率が良いことがわかった（放熱量損失には始動時の路盤への蓄熱を含む）。比較は、熱交換器二次側の制御以外は同一制御とし仮想降雪モデルを与えて行った。

この熱運用シミュレーションを検証するために蓄熱槽と空気ヒートポンプを用いた既存融雪施設のシステムにおいて状態データを実測し、シミュレーションの計算結果と比較した。結果は、図-13 のとおりである。計算値と実測値は概ね一致しているが、放熱量は、シミュレーションの計算値が全体的に大きくなっている。原因としては、大きく分けて2つ考えられる。一つは、シミュレーションの計算に与えているアスファルトの熱伝導率などのパラメータと実際の値との間の誤差である。アスファルトの熱伝導率は1.2~1.6W/m²程度でありシミュレーションにおいては1.4 W/m²を用いているが、仮に実際の値が1.2W/m²であった場合、シミュレーションにおける放熱量は15%程度減少すると考えられる。もう一つの原因は、シミュレーションの放熱モデルの計算に起因するもので、路盤に蓄熱された熱を融雪運転が終わった時点で損失として路盤の状態を初期状態に戻しているため、運転停止を繰り返す場合に始動時の負荷が実際に比べて大きくなっていること、またブラインの温度変化による路盤内の温度勾配が変化したときに変化前の蓄熱量が変化後の蓄熱量より多い場合（放熱負荷が変動せず、ブライン温度が下がる場合など）の差を全て熱損失として計算しているため、負荷が大きくなっていることが考えられる。これらの課題については、大気や地中への熱損失及び路面の凍結防止運転への対応なども含めて、シミュレーションの高度化のため引き続き検討を続けて行く。

なお、図-13 の放熱量のグラフにおいてシミュレーションの計算値が測定値で継続している時に ON/OFF を繰り返すのは、シミュレーションに用いている降雪

データが正時の瞬時データのため、正時以外の降雪による放熱量を反映していないためであるが、降雪データの実測値の時間間隔を短く取るか、1時間の平均値を用いる等のシミュレーションに用いる降雪データを工夫することで解決が可能である。

3. 3. 3 蓄熱槽熱損失の検討

蓄熱容量が600m³の地中埋設のコンクリート製蓄熱槽において、施設管理のために設置されている温度計の測定値から熱の需要と供給がない時間帯のデータを用いて蓄熱槽の熱損失を分析した。データは2000年1月~2003年3月までの毎分の測定値の中から冬期で熱の需給がない時間帯を選定した。また、測定点は蓄熱槽の上下方向に3点、水平方向に4点の計12点あり、その平均値を分析に用いた。熱の需給がない時間帯の蓄熱槽温度変化の例は図-14 のとおりである。図-14 から分かるように熱損失は、蓄熱材と蓄熱槽周囲との温度差に比例するため、初期の傾きは大きく次第に緩やかな傾きで損失していく傾向となる。図-15 に経過時間と日当たりの熱損失率の関係を示すと、初期は8%程度の値を示すが10日前後では4%程度になることが分かる。また、10日間全体の熱損失率は、初期温度によって違いはあるが約40%程度であった。蓄熱技術の

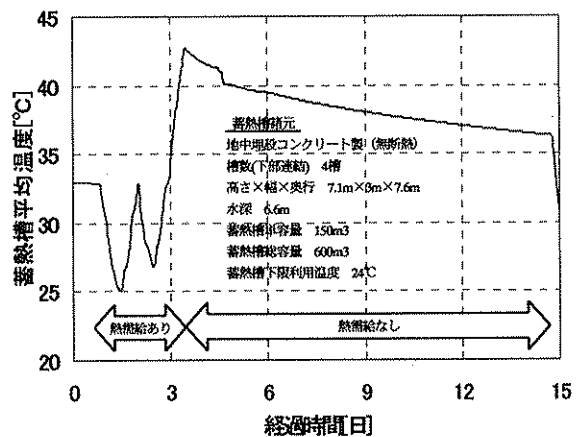


図-14 蓄熱槽温度変化 (例)

導入による効果を十分に活用するためには、熱の需要がない時（非降雪時等）の蓄熱槽からの熱の損失を少なくすることが重要であると考えられる。そのため、インターネットなどで簡単に入手可能なピンポイントの週間天気予報などの気象情報を用いて、施設運用時に降雪と降雪の間隔が長くなると予想される場合、蓄熱を一時停止するか蓄熱温度を下げ蓄熱槽からの熱損失を少なくし、降雪が予測された時に蓄熱を再開し降雪に備える運用が効果的である。また、蓄熱技術を活用すると熱源からの蓄熱運転と降雪負荷に対応した放熱運転を独立して行うことが可能なため、蓄熱運転を停止しても直ぐに融雪に対応ができなくなることはない。

なお、分析の際の蓄熱槽下限利用温度は、蓄熱槽の温水から放熱管のラインへ熱を供給する熱交換器のライン側（低温側）の熱交換器入口温度の上限設定値が24℃ということから、本例では24℃としている。

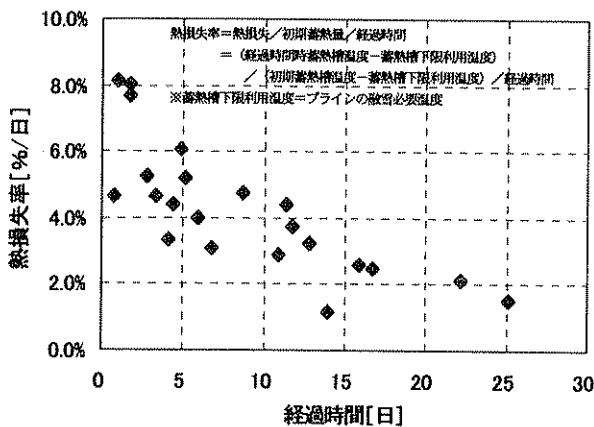


図-15 経過時間による日当たり熱損失の変化

4. まとめ

本研究では、未利用エネルギーを利用した道路消融雪施設への蓄熱技術の導入について検討を行った。その結果、以下の成果を得た。

- ①蓄熱技術を活用することで未利用エネルギーを利用した融雪が可能となる地域が広がること、また人口密度の高い都市部には下水熱の賦存量が多く融雪必要熱量を賄える可能性が高いことがわかった。
- ②蓄熱技術の導入により熱源設備の小型化、空調用の汎用ヒートポンプの採用が可能となり、熱源設備がコストダウンされることがわかった。ただし、蓄熱槽の建設費の増分があり、トータルコストの増減は蓄熱槽の規模が大きく影響することがわかった。また、蓄熱槽の規模（容量）は、連続降雪時間、降雪量及び降雪間隔に大きく依存することもわかった。

③放熱部の熱損失と蓄熱槽内のエクセルギー損失を低減し、効率的な熱運用が可能となる基本的なシステム構成と制御方法を提案した。

④設計時に、制御方法や蓄熱槽とヒートポンプの規模等の最適化を実際の降雪データを基に検討するための熱運用シミュレーションを作成した。

⑤熱の需給が無い期間が長く続くと蓄熱槽の熱損失のトータルが無視できない大きくなる場合があることがわかった。そのため、施設運用時に気象情報などから降雪と降雪の間隔が長くなると予想される場合、蓄熱を一時停止するか蓄熱温度を下げ蓄熱槽からの熱損失を少なくし、降雪が予測された時に蓄熱を再開し降雪に備える運用が効果的であることがわかった。

また、本研究の検討結果を基に蓄熱技術を活用した道路消融雪施設の基本設計に活用できる基礎技術資料をとりまとめた。表-2は、目次構成である。

表-2 蓄熱技術を活用した道路消融雪施設の基礎技術資料目次

1.	総論
2.	対象施設の基本条件の整理
3.	熱源の特性の整理
4.	熱運用モデルの作成
5.	システム構成の選定
6.	制御方法の選定
7.	設備規模の算定
8.	機器設置必要スペースの算定
9.	コスト試算
10.	導入効果の比較

今後は、蓄熱技術を活用した道路消融雪設備の最適な設計を合理的に行うために、熱源や融雪負荷の変動の簡便な評価手法や便益の評価手法の検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 建設省北陸地方建設局：路面消・融雪施設等設計要領、pp133-214、2000
- 2) 社団法人空気調和・衛生工学会：蓄熱式空調システム 基礎と応用、pp27-79、1995
- 3) 土木研究所資料第3749号：新熱源を利用した道路消融雪施設の検討 都市部における道路消融雪施設への未利用エネルギー活用検討（その1：フィージビリティ・スタディ）、2000
- 4) 日本機械学会：機械工学便覧 A6 熱工学、pp94-153、1985
- 5) 日本機械学会：機械工学便覧 B6 熱交換器空気調和冷凍、pp1-24、1985