

# 都市廃熱を利用した道路消融雪技術の研究

平下浩史\* 土屋慶恭\*\* 吉田 正\*\*\*

## 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車両の交通流を妨げることもなく、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、大別して地下水や海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。

そこで土木研究所では、地下水の散水を行わない無散水融雪の特徴を活かしつつ、建設・維持管理のコストを抑える技術の開発を平成11年度から14年度までの計画で進めている。融雪のためのエネルギー源として都市廃熱等の未利用エネルギーの利用を考えており、そのためにエネルギー変動を吸収するための蓄熱設備や熱運用技術を研究している。

本稿では、これまでの調査結果として無散水融雪設備の現状について述べるとともに、未利用

エネルギーを活用した道路消融雪設備の基礎的な技術として蓄熱技術と熱運用技術に関する考察を報告する。

## 2. 融雪設備の実態

### 2.1 無散水融雪設備のニーズ

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。

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。

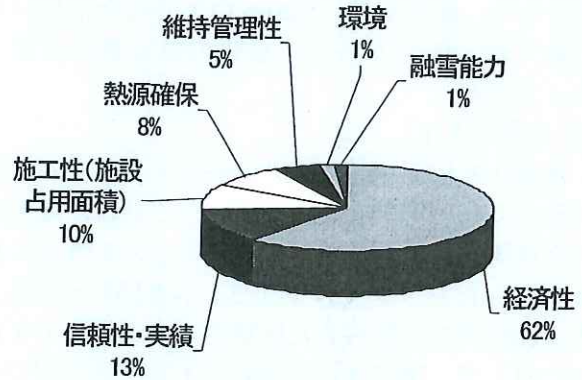


図-1 既存融雪設備の課題  
「無散水消雪施設調査業務委託(平成5年度:東北地方建設局)」を分析した結果

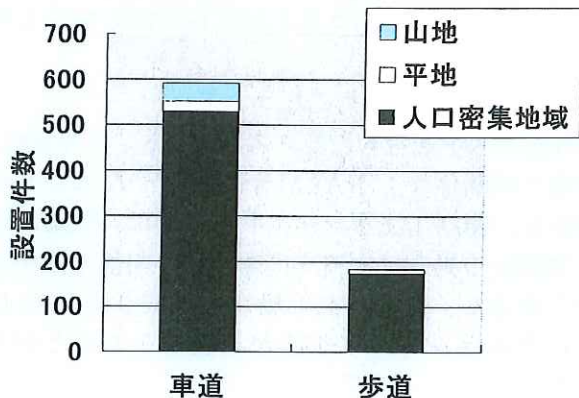


図-2 無散水融雪設備設置状況



## 2.2 無散水融雪設備に求められる技術開発項目

前項の分析結果より、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削減と導かれる。そこで本研究では、イニシャルコストとランニングコストの合計を総コストと考え、それを削減しうる要素技術の開発を行うこととしている。

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 2,000m<sup>2</sup>、170W/m<sup>2</sup>を適用した<sup>1)</sup>。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、自然・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)。

一方、地中熱、空気熱等を利用した自然・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、自然・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。したがって自然・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。

## 3. 都市廃熱の利用可能性

表-1に示す都市廃熱には、大別すると、一ヶ所に集中する点熱源(工場廃熱等)と熱を採取できる個所が線的に分布する線熱源(地下鉄廃熱等)がある。ここでは、広範囲に取得の可能な線熱源であ

る下水熱を例に、その利用可能性を示す。

図-4は、枝管である口径600mm下水管(青森市内)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。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/m<sup>2</sup>と仮定すると、93kWは540m<sup>2</sup>の面積に相当する。この結果は、歩道で幅2m、距離270mの融雪を可能にすることより、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

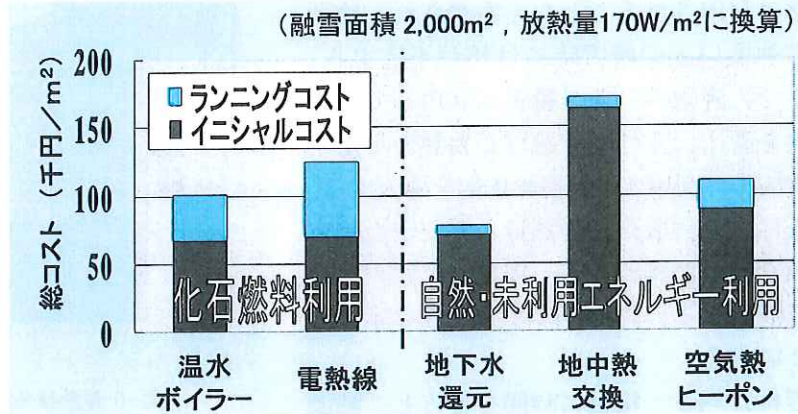


図-3 既存無散水融雪システムの経済性

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
		都市廃熱 下水熱 地下鉄廃熱 変電所廃熱 ビル廃熱 工場廃熱 廃棄物熱 コージェネ廃熱
化石エネルギー		化石燃料 電力

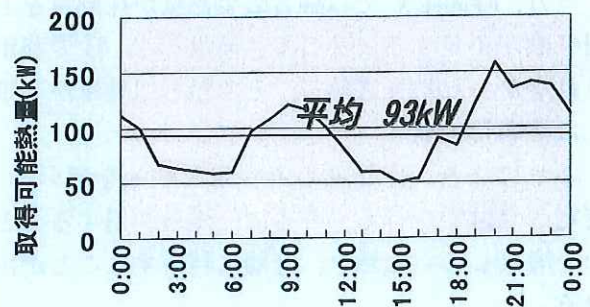


図-4 下水管渠(φ600mm)から取得可能な熱量(青森市内, 実測値より換算)



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。

#### 4. 蓄熱槽の導入効果

##### 4.1 融雪必要熱の安定供給

降雪は一定かつ連続するものではない。そのため都市廃熱を融雪設備の熱源とした場合、降雪のない時間帯の熱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する。そこで、降雪の合間の融雪に利用していない熱を蓄え、その熱を融雪必要熱の不足する時間帯に利用する、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都市廃熱を用いた場合でも、安定した熱の供給が可能となる。具体的には、図-5に示すとおりである。

縦軸に熱量、横軸に時間をとると、熱源(都市廃熱)からの採熱量は図の破線のように変動する。この時間内に降雪があった場合、融雪必要熱量の時間変化は、実線のようにになる。この図を、3つの時間帯に分類し、時間帯毎の特徴を述べる。

時間帯 A は、熱源より採熱出来るものの、降雪がない。従って、その熱は利用されることなく自然界へ廃棄される。

時間帯 B は降雪があり、採熱の一部を融雪に利用する。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 では融雪必要熱量が採熱量を上回り熱が不足する。そこで、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に補う。

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。

##### 4.2 熱源設備の小規模化

蓄熱技術のもう1つの導入効果が、熱源から熱

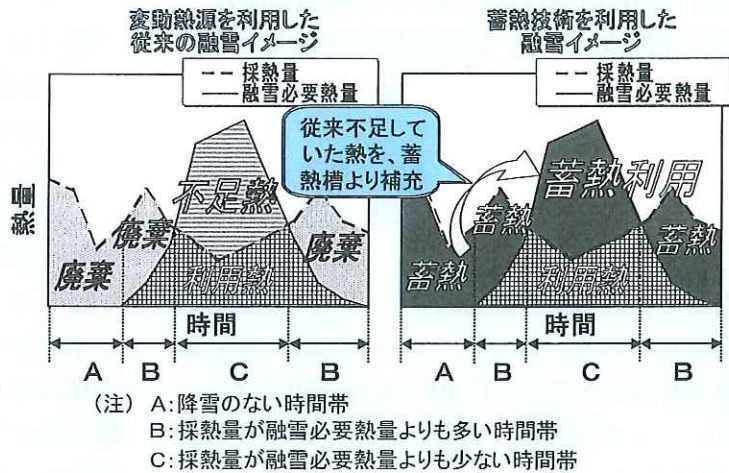


図-5 蓄熱技術導入効果①(熱源の安定化)

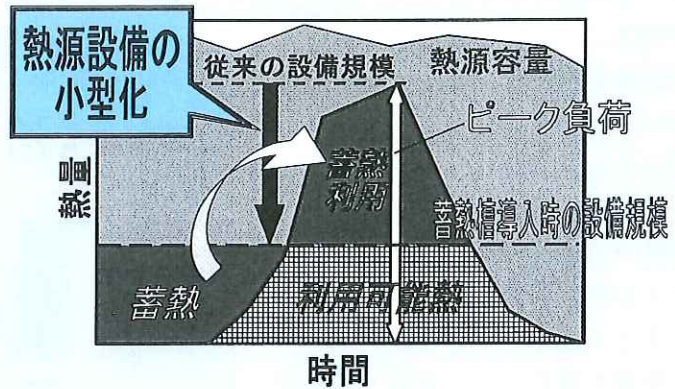


図-6 蓄熱技術導入効果②(熱源設備の小規模化)

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-6参照)。

従来の非蓄熱式のシステムでは、ピーク時の負荷(熱量)をまかなえる容量の熱源と、熱源設備を選定していた。

一方、蓄熱技術を導入したシステムでは、負荷ピーク時に不足する熱を蓄熱槽から補うため、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。したがって、図中の下向きの黒矢印に相当する小規模化が図れる。

#### 5. 蓄熱槽を導入した具体システム

ここで、蓄熱技術の具体的な導入効果を得るために、下水熱源ヒートポンプ方式を例に、蓄熱槽の有無による比較を行う(図-7)。

##### 5.1 システム概要

従来システムは、ヒートポンプを用いて下水から熱を取得し、その熱を直接放熱部へ供給する。熱応力発生に伴う舗装の劣化を抑制するため、放熱部への供給温度は、通常 20℃ 前後である。



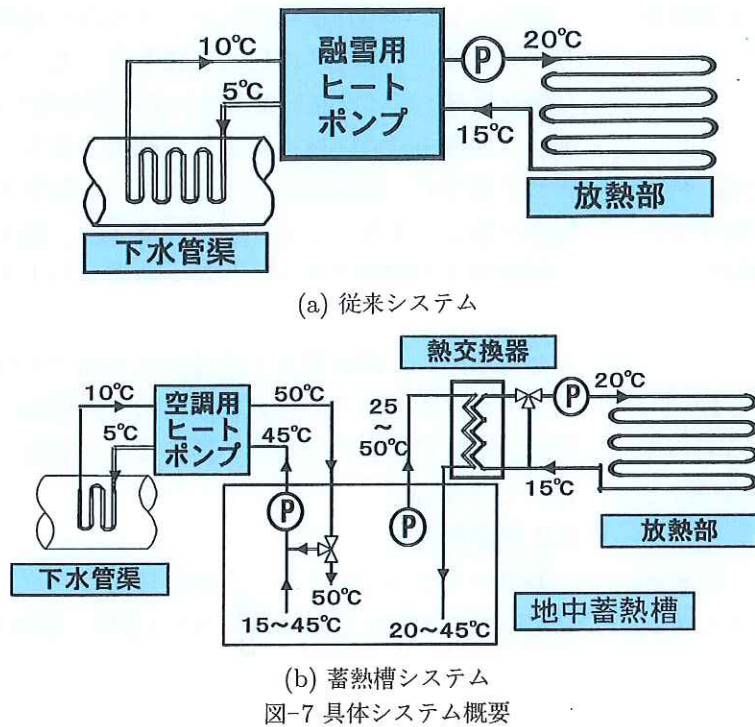


図-7 具体システム概要

想定面積：2,000m<sup>2</sup> (車道 L ≒ 286m, W ≒ 7m)  
 放熱量：q<sub>1</sub> = 190W/m<sup>2</sup>

$$q_1 = 1/\eta \times (q_s + q_n)$$

$$q_s(\text{顕熱}) = 2.78 \times (C \cdot \Delta\theta \cdot h_s \cdot \rho_s)$$

$$q_n(\text{融解熱}) = 2.78 \times (J \cdot h_s \cdot \rho_s)$$

ここに、

- 雪の比熱  $C = 2.1\text{J/g} \cdot ^\circ\text{C}$
- 雪熱を 0°C まで高める温度  $\Delta\theta = 1.8^\circ\text{C}$
- 時間降雪深  $h_s = 2.5\text{cm/h}$
- 降雪の密度  $\rho_s = 0.07\text{g/m}^2$
- 氷の融解潜熱  $J = 334\text{J/g}$
- 熱効率  $\eta = 0.9$  (通常舗装)

図-8 算定条件

表-2 具体システム設備規模

設備	従来システム	蓄熱層システム
ヒートポンプ	融雪用ヒートポンプ 出力 380kW	空調用ヒートポンプ 出力 155kW
下水熱採熱設備	下水熱採熱管 採熱量 380kW	下水熱採熱管 採熱量 155kW
蓄熱設備	なし	水蓄熱槽 210m <sup>3</sup> (コンクリート現場打ち地中設置型)
熱交換器	なし	プレート式熱交換器 交換熱量 380kW

なお、汎用性の高い空調用ヒートポンプは、供給温度が高く (45~50°C 程度) 適用できない。そのため、一般には専用に設計された高価な融雪用を用いる。融雪用ヒートポンプは、供給側出口温度が低いため、成績係数 (COP) が高く効率の良い運転を行える。

一方、蓄熱槽システムにおいては、供給温度の

高い一般空調用ヒートポンプを適用することで、蓄熱温度を高温化し、蓄熱槽の小規模化が図れる。放熱部へは、熱交換器を用いることで低温の熱を供給する。ただし、蓄熱槽を都市部へ適用するには、道路地下空間への設置が課題となる。

## 5.2 経済性

北陸地方の代表的積雪地域である上越市 (高田) の降雪データ (1996~1998 年) をもとに、図-8 の算定条件において従来システムと蓄熱槽システムの設備規模を試算した (表-2)。なお、蓄熱槽システムの熱源設備および蓄熱設備の規模は、過去

5 年間の降雪データを元に 1 時間間隔の熱収支計算を行い、従来システムと同等の融雪効果が得られるよう決定した。

これらより、概算総コスト (15 年間) を試算した (図-9)。蓄熱槽システムは熱源設備の小規模化に伴い、図中下向矢印に相当するコ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、全体で約 6% のコストアップとなった。ただし、同様の比較を設備の設計条件の異なる地域で実施した場合は、結果が異なる。特に蓄熱槽の規模は、連続の降雪時間や降雪深などの気象条件に大きく依存する。そこで、連続降雪の少ない地域や、大雪時における残雪日数の評価の尺度を見直すことで、蓄熱設備の小規模化を図ることができる。

したがって、今後蓄熱槽の設計の最適化を検討することによりコストダウンを図ることが可能であると考える。

## 6. 具体システムの実現化に向けた取り組み

蓄熱槽の設計を最適化するために、本研究では、蓄熱槽の建設に関する要素技術と、蓄熱槽の運転に関する要素技術の研究開発も進めている。

### 6.1 蓄熱槽建設技術

蓄熱槽はビル等の空調の分野で多く適用されているが、道路消融雪設備への適用例は少ない。そこで、道路消融雪設備への適用性に優れた蓄熱槽



建設技術を検討する。蓄熱槽検討における留意事項は、次の2点である

- ・都市部に設置可能であること
- ・建設コストの低減

都市部(人口密集地域)では、道路の近傍に利用可能な用地が乏しく、地上に蓄熱槽を設置するのは困難である。したがって、地中設置を前提とし、場所打ちコンクリートタイプ、鋼管杭タイプについて、コスト試算を行った(表-3)。

場所打ちコンクリートタイプは、道路を開削して、箱形の蓄熱槽を道路の地下に構築するものである。なお、地下埋設物(共同溝、上下水管等)と上下の干渉を回避するため、土被り5mとした。

鋼管杭タイプは鋼管杭(直径1~2m、杭長約15m)を構築し、その内部空間を蓄熱槽として利用するものである。このタイプは地下埋設物を回避しながらの構築が可能のため、土被りを1mとした。

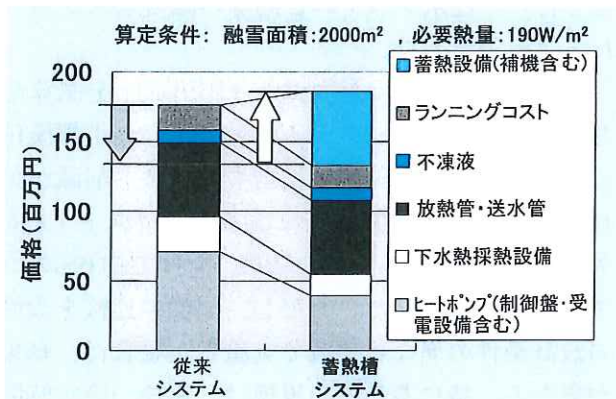


図-9 システム別コスト比較

表-3 地中蓄熱槽コスト比較

	場所打ちコンクリートタイプ(箱型)	鋼管杭タイプ
概念図		
土被り	5m	1m
価格比(直接工事費)	1.0(基準とする)	0.65

結果として経済性は鋼管杭タイプの方が場所打ちコンクリートタイプに比べ有利となった。ただし鋼管杭タイプは、地下埋設物の多い都市部では、干渉の回避のため、杭を隣接して構築できないことが予想され、試算値を上回るコストが発生する可能性がある。また、このタイプは構造上、施工時の断熱加工が困難であり、さらに表面積が大きいため周辺土壌への熱損失が大きい。

したがって、鋼管杭タイプはコスト面で十分メリットがあるものの、その適用性は、断熱施工の可否、必要性を含めた検討の結果により判断されることとなる。

### 6.2 熱運用技術

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)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、融雪後に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、熱を無駄なく供給、蓄熱、運用する熱制御技術を確認する必要がある。加えて蓄熱システムでは、蓄熱槽の容量を大きくするとヒートポンプの能力(容量)は小型化でき、その逆も成り立つ。これらの容量は、相反する関係にあることから、総コストミニマムとなる設備規模の算定方法を確立する必要もある。

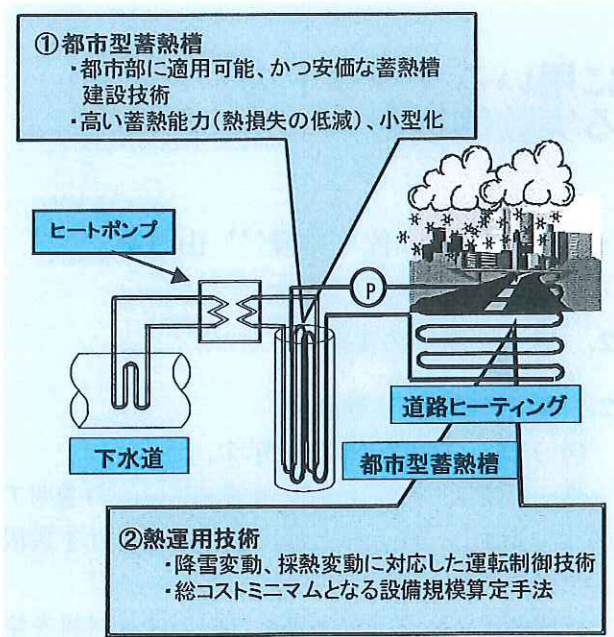


図-10 蓄熱システム実用化への研究課題

そこで、蓄熱槽システムを構成する以下の機器の制御方法を、小規模モデル実験(融雪面積5~10m<sup>2</sup>程度)を実施し、運転制御技術を確立する予定である。

- (1) ヒートポンプ
- (2) 熱源ポンプ
- (3) 熱交換器一次側ポンプ(蓄熱槽側)
- (4) 熱交換器二次側ポンプ(放熱部側)
- (5) 熱源機側三方弁
- (6) 熱交換器二次側三方弁(放熱部側)

運転制御技術の確立により、採熱、蓄熱、放熱の熱収支シミュレーションを構築する。これに降雪データなどの諸条件を入力する事で、最適な蓄熱槽容量とヒートポンプ容量を算定する手法を得ることとしている。

## 7. まとめ

蓄熱槽の導入によって、融雪必要熱の安定供給、設備の小規模化、総コストの低減の可能性があったことが分かった。今後は、総コストの削減を目指して、図-9に示す要素技術の開発が必要である。同時に、下水熱のみならず、それ以外の都市廃熱の利用を視野に入れ、適用性の高く、安価な融雪システムの開発に取り組んでいきたい。

最後に、本研究を進めるにあたり、国土交通省の地方整備局の融雪設備管理者各位には、技術資料の提供を頂いた。誌面を借りて深く謝意を表すものである。

## 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, p213, 2000.

平下浩史\*



独立行政法人土木研究所技術推進本部先端技術チーム研究員  
Hirofumi HIRASHITA

土屋慶恭\*\*



(前) 技術推進本部先端技術チーム交流研究員  
Yoshiyasu TSUCHIYA

吉田 正\*\*\*



同 技術推進本部先端技術チーム主席研究員  
Tadashi YOSHIDA