

## 暖気を利用した融雪舗装の融雪量シミュレーションに関する検討

前田道路（株）技術研究所 正会員 ○芹田 美佳  
 前田道路（株）技術部 市岡 孝夫  
 前田道路（株）北海道支店 本間 政弘

## 1. はじめに

積雪寒冷地域では、冬期バリアフリー対策のひとつとしてロードヒーティングが整備されている。ロードヒーティングは電気および化石燃料等のエネルギーを利用するため、ランニングコストが割高となることやCO<sub>2</sub>排出量の増加が課題となっている。そこで筆者らは、未利用エネルギーである下水管内の暖気に着目し、この暖気を活用した融雪舗装の検討を行っている。本文は、施工後の融雪舗装において測定した暖気の温度および路面露出率等のデータから、融雪量シミュレーションを行った結果について報告するものである。

## 2. 融雪舗装の仕組み

一般的に、下水管内の暖気の温度は冬期においても5℃～10℃を保っている。この暖気を活用した融雪舗装（以下、本舗装）の仕組みは、図-1の概念図に示すとおり、住宅等から排出される生活排水によって暖められた暖気を下水管から送風機によって舗装体内へ取り込み、舗装を暖めることによって融雪を行うものである。

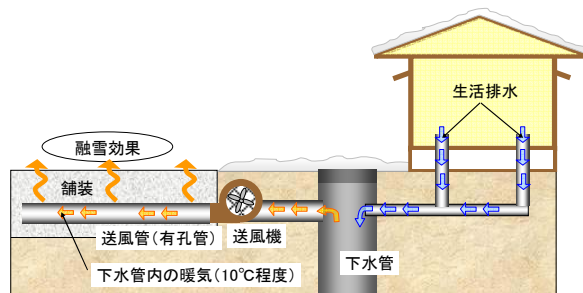


図-1 融雪舗装概念図

## 3. 融雪効果の検証

本舗装の融雪効果を検証するため、札幌市内の駐車場において施工を実施した。表-1に施工概要を示す。なお、使用する送風機は12～3月の4ヶ月間連続運転した。

表-1 施工概要

| 施工面積 |         | 幅員5m×延長20m                   |
|------|---------|------------------------------|
| 使用材料 | 表層      | 開粒度アスファルト混合物(13)             |
|      | 路盤      | 透水性セメント安定処理路盤                |
|      | 送風管(外側) | 硬質塩化ビニル管 VP75 (外径89mm、厚さ6mm) |
|      | 送風管(内側) | 硬質塩化ビニル管 VU50 (外径60mm、厚さ2mm) |
|      | レベリング層  | 7号砕石+普通セメント                  |

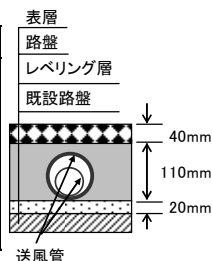


写真-1に本舗装の融雪状況を、図-2に、2009年2月の降雪量と路面露出率の推移を示す。路面露出率は、路面全体が積雪で覆われたときを0%、融雪後路面全体が露出したときを100%とし、写真-1に示す融雪調査期間中に車両を駐車させない箇所において算出した。図より、降雪が終了してから1～2日程度で路面露出率が100%となり、暖気を舗装体へ連続供給することにより融雪が可能であることが確認できた。



写真-1 融雪状況

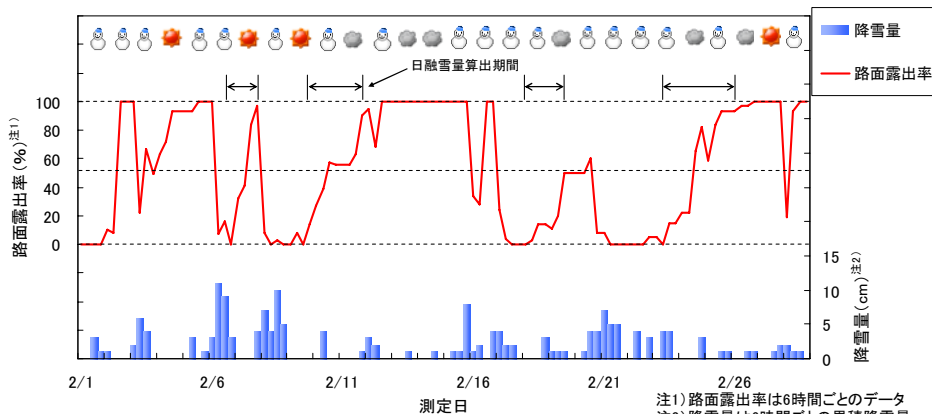


図-2 降雪量と路面露出率の推移

注1) 路面露出率は6時間ごとのデータ  
 注2) 降雪量は6時間ごとの累積降雪量

キーワード 融雪舗装, 下水熱, 未利用エネルギー, 融雪量シミュレーション, 熱収支

連絡先 〒141-8665 東京都品川区大崎 1-11-3 前田道路株式会社 本店 技術部 TEL. 03-5487-0030 FAX. 03-5487-0036

## 4. 熱量計算による融雪量シミュレーションに関する検討

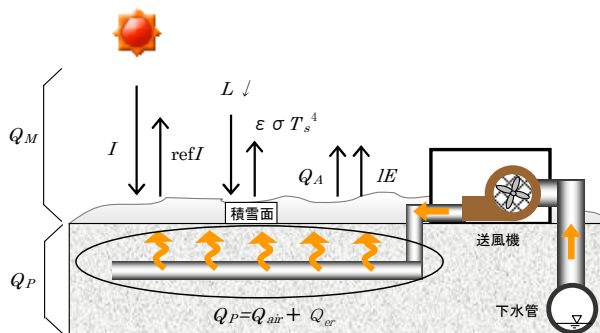


図-3 熱収支の概念図

本舗装において、舗装体に供給する暖気の温度および舗装表面温度と、気象庁の観測による外気温や風速等のデータから、熱量計算による融雪量の算出を行い、実際の融雪量と比較した。

実際の融雪量は、図-2に示す日融雪量算出期間において、降雪量と路面露出率の関係から算出<sup>1)</sup>した。また、熱量計算による融雪量は、図-3に示す熱収支の概念図より、積雪面の熱収支<sup>2)</sup>から求めた大気中の熱量 $Q_M$ と舗装体内に供給する熱量 $Q_P$ の総和を融雪熱量 $Q$ とし、融雪熱量 $Q$ が融雪に必要な熱量 $Q_S$ と等しくなるときの値として、数値解析によるシミュレーションを行った。表-2に、数値解析に用いた値を、表-3に日融雪量の算出方法を示す。

実際の日融雪量とシミュレーションによる日融雪量の関係を図-4に示す。図より、それぞれの日融雪量は4つの日融雪量算出期間においてほぼ同程度となり、今回用いた算出方法は、本舗装における融雪量の推定に有効であることがわかった。今後は、施工場所における降雪量、風速、日射等の観測データを収集し、より正確な数値解析手法となるよう検討する必要がある。解析精度を向上させ、過去10年程度の降雪量、下水管内の暖気の温度等の測定結果を数値解析に利用することで、適用場所の条件に応じた本舗装の最適な設計が可能になると考える。

## 5. おわりに

本検討の結果、適用場所における暖気の温度等の実測データおよび気象庁の観測データから、熱量計算による融雪量の推定がある程度可能であることがわかった。空気を媒体とした融雪舗装の融雪量シミュレーションに関する試みはまだ実施例が少ないが、数値解析に必要な要因、項目等の不明な点を精査し、より正確なシミュレーションを行うことで本舗装の効率的な設計の一指標となると考える。

## 【参考文献】

- 1) 森嶋ほか：下水熱を活用した融雪舗装の検討，(社)日本土木学会第63回学術講演会概要集（平成20年9月）
- 2) 八田茂実：豪雪地帯における貯水池の融雪流入予測に関する研究（財）北海道河川防災研究センター 研究紀要（平成19年10月）
- 3) 道路防雪便覧：(社)日本道路協会（平成2年5月）

表-2 日融雪量の算出に用いた値

| 項目                          |                                            | 記号               | 単位                               | 値                     |
|-----------------------------|--------------------------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 空気 <span>の</span> 密度        |                                            | $\rho$           | kg/m <sup>3</sup>                | 1.299                 |
| 積雪 <span>の</span> 密度(こしまり雪) |                                            | $\rho_s$         | kg/m <sup>3</sup>                | $0.25 \times 10^3$    |
| 送風面積                        |                                            | $A$              | m <sup>2</sup>                   | 20                    |
| 定数                          | 空気 <span>の</span> 定圧比熱                     | $c_p$            | J/kg・K                           | 1006                  |
|                             | 雪 <span>の</span> 比熱                        | $c_s$            | J/kg・K                           | 2090                  |
|                             | 水 <span>の</span> 気化潜熱                      | $l$              | kJ/kg                            | 2495.3                |
|                             | 水 <span>の</span> 融解潜熱                      | $l_M$            | kJ/kg                            | 334                   |
|                             | 雪面 <span>の</span> 射出率                      | $\varepsilon$    | —                                | 0.9                   |
|                             | ステファン・ボルツマン定数(W=J/s)                       | $\sigma$         | W/m <sup>2</sup> ・K <sup>4</sup> | $5.67 \times 10^{-8}$ |
|                             | バルク係数                                      | CH               | —                                | 0.002                 |
|                             | 蒸発効率                                       | $\beta$          | —                                | 1.05                  |
|                             | 平均アルベド <sup>*</sup>                        | ref <sup>f</sup> | —                                | 0.64                  |
| 下部放熱率                       |                                            | $\xi_d$          | —                                | 0.3                   |
| $Q_M$                       | 大気放射量(W=J/s)                               | $L \downarrow$   | W/m <sup>2</sup>                 | 273                   |
|                             | 積雪 <span>の</span> 温度                       | $T_s$            | ℃                                | -4.7                  |
|                             | 外気温                                        | $T_a$            | ℃                                | <b>-2.7</b>           |
|                             | 風速                                         | $U$              | m/s                              | 4.0                   |
|                             | 飽和比湿                                       | $q_{SAT}$        | kg/kg                            | $3.09 \times 10^{-3}$ |
|                             | 比湿                                         | $q$              | kg/kg                            | $2.16 \times 10^{-3}$ |
|                             | 全天日射量(1日 <span>の</span> 積算量)               | $I$              | MJ/m <sup>2</sup>                | 7.3                   |
| $Q_{air}$                   | 送風機 <span>の</span> 送風量                     | $Q_f$            | m <sup>3</sup> /h                | <b>500</b>            |
|                             | 舗装入口 <span>の</span> 暖気温度(湿度80%と仮定)         | $T_f$            | ℃                                | <b>10.6</b>           |
|                             | 舗装表面温度                                     | $T_p$            | ℃                                | <b>2.0</b>            |
| $Q_{er}$                    | 舗装入口 <span>の</span> 暖気 <span>の</span> 水蒸気量 | $q_f$            | g/m <sup>3</sup>                 | 7.8                   |
|                             | Tp <span>の</span> 時 <span>の</span> 飽和水蒸気量  | $q_{SATp}$       | g/m <sup>3</sup>                 | 5.6                   |

※)太字・斜体文字は、熱電対による2月の測定結果の平均値であり、その他は定数気象庁の観測結果および計算値である

表-3 日融雪量の算出方法

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 【日融雪量Tの算出方法】                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |
| <大気中の融雪熱量 $Q_M$ >                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
| $Q_M = (Q_L + Q_A + IE) \times 3600 \times 10^{(*)} + I_{day}$<br>$Q_L = \text{放射量の収支} = L \downarrow - \varepsilon \sigma (T_s + 273.15)^4 = 8.0 \text{ (W/m}^2\text{)}$<br>$Q_A = \text{顕熱輸送量} = c_p \times \rho \times CH \times U (T_s - T_a) = -20.9 \text{ (W/m}^2\text{)}$<br>$IE = \text{潜熱輸送量} = l \times \rho \times \beta \times CH \times U (q_{SAT} - q) = 25.3 \text{ (W/m}^2\text{)}$<br>$I_{day} = \text{日平均日射量} = (1 - \text{ref}) \times I = 2.63 \times 10^6 \text{ (W/m}^2\text{)}$<br>※) 日射等による融雪時間を10時間とする |  |
| <舗装体内の融雪熱量 $Q_P$ >                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |
| $Q_P = \text{下水管内の暖気による熱量}(Q_{air}) + \text{凝結(結露)潜熱}(Q_{er})$<br>$Q_{air} = Q_f \times \rho \times c_p (T_f - T_p) \times 24 / A = 6.74 \times 10^6 \text{ (W/m}^2\text{)}$<br>$Q_{er} = l \times Q_f (q_f - q_{SATp}) \times 24 / A = 3.29 \times 10^6 \text{ (W/m}^2\text{)}$<br><b>1日あたりの融雪熱量 <math>Q = Q_M + Q_P = 12.7 \times 10^6 \text{ (W/m}^2\text{)}</math></b>                                                                                                                                                       |  |
| <融雪に必要な熱量 $Q_S = (Q_A + q_{le}) \times (1 + \xi_d)$ >                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |
| $Q_A = \text{顕熱} = c_s \times \Delta t \times \rho_s \times T = 2.46 \times 10^6 T \text{ (W/m}^2\text{)}$<br>$q_{le} = \text{潜熱} = l_m \times \rho_s \times T = 83.5 \times 10^6 T \text{ (W/m}^2\text{)}$<br>※) $\Delta t$ は雪の温度を0°Cまで高める温度(°C)、Tは融雪量(m)<br><b>1日あたりの融雪に必要な熱量 <math>Q_S = 111.7 \times 10^6 T \text{ (W/m}^2\text{)}</math></b>                                                                                                                                                                                |  |
| $Q = Q_S$ のとき、 $12.7 \times 10^6 = 111.7 \times 10^6 T$ $T = 11.4 \text{ (cm)}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |

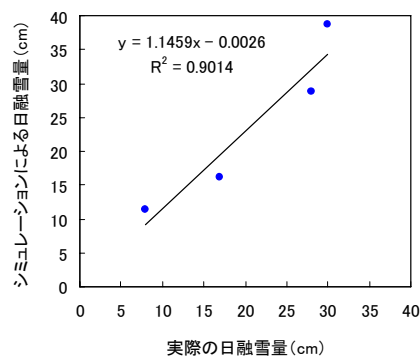


図-4 実際の日融雪量とシミュレーションによる融雪量の関係