

換気排熱を利用する空気式ロードヒーティングシステムに関する研究 (第3報) — 融雪検証実験 —

富田 和彦, 白土 博康, 保科 秀夫, 長野 伸泰

Study on Air Type Road Heating System using Ventilation Exhaust Heat (part III) — Field Experiment to Investigate Snowmelt Performance —

Kazuhiko TOMITA, Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Nobuhiro NAGANO

キーワード：換気排熱, ロードヒーティング, 路盤構造, 空気, 融雪, シミュレーション, CFD解析

1. はじめに

熱交換を行わない第3種セントラル換気システムにおいては、20℃付近の室内空気は熱回収されることなく昼夜を通し屋外にそのまま排気されている。この換気排熱を玄関前通路等の融雪用熱源として利用できれば、化石燃料に頼らない地球環境に優しいロードヒーティングシステムが実現可能となる。著者らはこれまで、換気排熱を利用する玄関前通路用融雪路盤として、伝熱フィン付き仕切板を用いて路盤内を上下2層に分割する2種類の路盤モデル（熱交換Uターン方式、二層混合方式）を提案し、CFD（Computational Fluid Dynamics）解析を用いた仕切板形状の最適化により、融雪ムラの少ない良好な路盤を設計できることを明らかにしてきた^{1,2)}。本報告は、熱交換Uターン方式による最適路盤の検証実験であり、融雪能力など定量的な評価を行うとともに、CFD解析による計算結果と比較検討を行った。

2. 融雪実験

2.1 実験路盤

前報²⁾のCFD解析から、熱交換Uターン方式（図1）における融雪ムラを解消させる最適な伝熱フィンの仕様は、通気路筐体にコンクリート製側溝（U150トラフ）を使用した場合、圧力損失を考慮すると、フィン厚1.2～1.6mm、フィン間隔30mm（無次元間隔：0.2）であり、上層フィンは舗装材に、下層フィンは通気路筐体底に各々接触させる必要があ

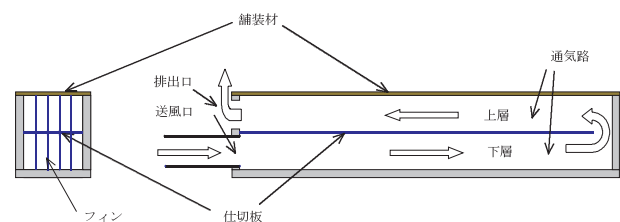


図1 熱交換Uターン通风方式の路盤モデル

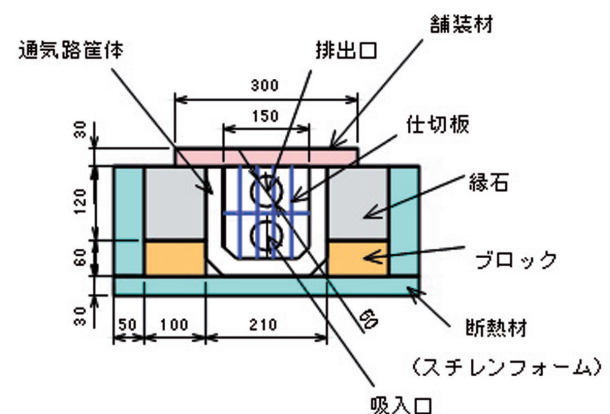


図2 実験路盤の断面構造

ることを見出した。そこで、前報¹⁾で使用した実験施設を利用し、通気路筐体内に解析結果を満足する最適形状の伝熱フィン付き仕切板を設置した融雪路盤を試作し、試験に供した（図2）。この融雪路盤は、通気路筐体として長さ600mmのU150トラフおよび舗装材として長さ600mm、幅300mm、厚さ30mmの御影石平板を使用し、各々8個直列に配置し、段差調整用として両側を幅100mmのコンクリート製の縁石（厚さ120mm）とブロック（厚さ60mm）で挟んでいる。全

事業名：外部資金活用研究

課題名：換気排熱を利用する空気式融雪路盤の最適設計

長4,800mmで、底と側面はスチレンフォームで断熱している。また、厚さ50mmのスチレンフォームで通気路筐体の前後を塞いでおり、前方のスチレンフォームの上下に内径50mmの排出口と送風口を設けている。本実験路盤では御影石表面(1.44㎡)とその両側の縁石表面(0.53㎡)が融雪面積に含まれるが、ここでは縁石表面での融雪は無いものとし融雪面積を御影石表面のみとして整理する。なお、御影石の熱伝導率は約3.0W/(m・K)である。

試作した伝熱フィン付き仕切板の外観を図3に示す。板厚1.5mm、高さ73mm(上層用)と75mm(下層用)のアルミニウム製フィン、板厚2mmのアルミニウム製仕切板上下に両面テープとアルミテープを用いて30mm間隔で固定した。なお、前方の送風口と排出口から100mmまでの間隔は、気流の助走区間として仕切板のみでフィンを取り付けていない。また、後方のUターン部は、開口部として仕切板を蓋から100mmの間隔を開けて設置した。

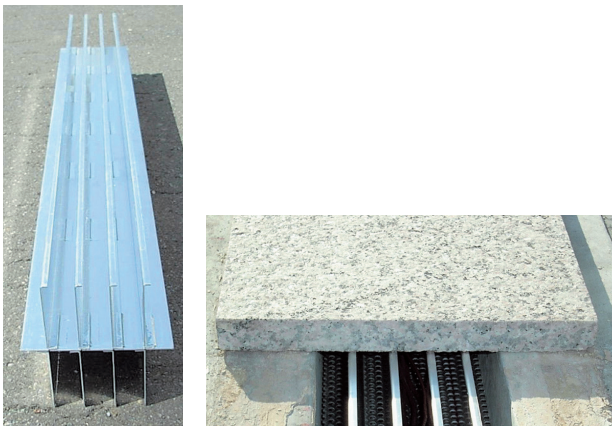


図3 試作仕切板の外観と設置状況

2.2 実験装置および方法

2.2.1 温風発生装置

前報¹⁾の温風発生装置を使用し、外気を所定温度に加温し、送風機をインバータ制御することで所定風量の温風を発生させた。本実験では、設定温風温度を22℃、設定風量を43.2m³/hに固定して行った。この風量は、換気量150m³/hで融雪面積5㎡と仮定した時の本モデル融雪面積1.44㎡に相当する。

2.2.2 計測

温風温度測定用に、送風口と排出口、および通気路筐体内の上層フィン間中央付近6カ所に800mm間隔でT熱電対を配置し、風量測定用として送風機出口と路盤送風口間に風量検定済み熱線風速センサーを配置した。また気象観測用として、外気温、風速、日射量および降雪量のセンサー・機器類、並びに路面状況の監視用としてネットワークカメラを設置した。

融雪実験は、温風を24時間連続して路盤に流し、この間の路面状況をネットワークカメラを用いて5分間隔で自動録画

し、同時に温風温度、外気温、日射量、風速等をデータロガーを用いて1分間隔で測定した。

3. 実験結果

融雪実験は、2009/2/1～2009/2/12の期間にかけて実施したが、本報告では代表日として、12cmの降雪があった2009/2/3および26cmの大雪が降った2009/2/6(札幌気象台観測値)の結果について示す。

3.1 「降雪量が少ない日」(2009/2/3)の結果

3.1.1 降雪状況

2009/2/3の気象データを図4に示す。降水量のデータから分かるように、降雪は6:00～8:00の時間帯に集中しており、この2時間の積算降水量は、1.4mm(6:00～7:00が0.5mm、7:00～8:00が0.9mm)であった。ちなみに札幌気象台の観測値では、降水量は6:00～7:00が0.5mm、7:00～8:00が1.0mmとなっており、ほぼ同じ降雪状況にあったことがわかる。気象台では降雪量も測定しており、6:00～7:00、7:00～8:00の時間帯とともに3cmを記録している。なお、この降雪が集中する6:00～8:00の平均外気温は-5.8℃(気象台-6.0℃)であった。

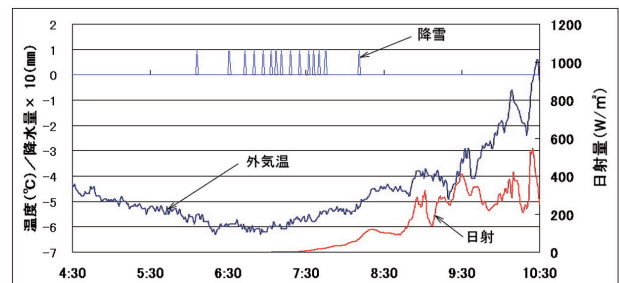


図4 2009/2/3の気象状況

3.1.2 温風温度と融雪能力

2009/2/3における路盤出入口の温風温度、および融雪能力の指標となる出入口温度差と風量等を用いて算出される路面加熱量を図5に、路盤内上層フィン間中央付近の温風温度を図6に示す。図6の凡例の数値(400mm～4,400mm、800mm間隔)6点は、路盤内の排出口から後方のUターン部に向かう距離を示す。

これらの図から、6:00～8:00の降雪時間帯においては、早朝で日射の影響がほとんど無く、外気変動も小さいこともあって、各測定値はほぼ一定値を示すことがわかる。これらの測定値を2時間平均で表すと、路盤入口の温風温度21.7℃、路盤出口の温風温度11.9℃で、風量44.5m³/hから路面加熱量は148W(融雪面積当たり102W/㎡)であった。また、図6の路盤内温風温度は、400mmの点が9.5℃、1,200mmが8.1℃、

2,000mmが8.5℃, 2,800mmが8.2℃, 3,600mmが9.2℃, 4,200mmが10.5℃である。融雪ムラの指標となる最大温度差は2.4℃であり, この差が小さいほど舗装材表面の温度ムラも小さくなると推測される。仕切板を挿入しない通常の直通方式路盤の最大温度差は, 路盤の出入口温度差にほぼ等しく, 風量と融雪能力を本実験路盤と同じと仮定すると, その温度差は9.8℃と約4倍大きいことから, Uターン方式の温度ムラ解消の優位性がうかがえる。

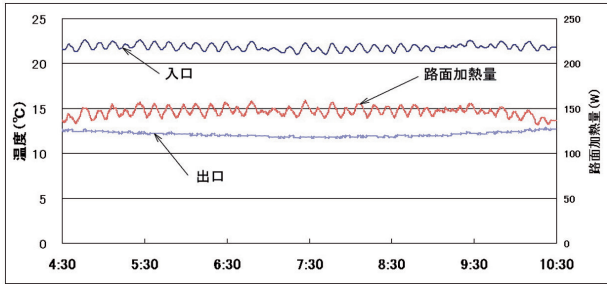


図5 路盤の出入口温風温度・加熱量

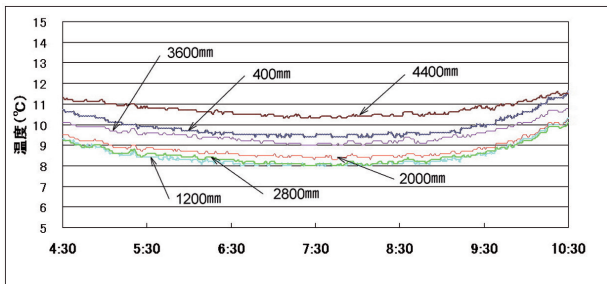


図6 通風路管内の温風温度

3.1.3 降雪時の路面状況

6:00~8:00の降雪時間帯(15分間隔), およびこれより1時間経過後の路面状況を図7に示す。この間の降雪状況は, 3.1.1項で述べたように, 6:00~7:00が降水量0.5mm(降雪量3cm), 7:00~8:00が降水量0.9mm(降雪量3cm)である。図7から, 路盤全体としてはおおむね均一に融雪の進んでいる様子が見て取れる。また融雪能力については, 6:00~7:00の路面状況と降水量との関係から, 融雪負荷として降水量0.5mm/h程度まで対応可能であり, 通常のロードヒーティングのように路面を積雪のない状態に保つことが可能である。さらに, 歩行に支障が少ないと考えられる積雪2cmを許容する場合(7:00~8:00の路面状況)は降水量0.9mm/h, 降雪量にして3cm/h程度までは対応可能であることがわかる。



図7 2009/2/3の路面状況

3.2 「降雪量が多い日」(2009/2/6)の結果

3.2.1 降雪状況

大雪の降った2009/2/6における5:00~18:00までの気象データを図8に, この時間帯における降水量の時間積算値を気象台データと比較して表1に示す。また, 表1に外気温の

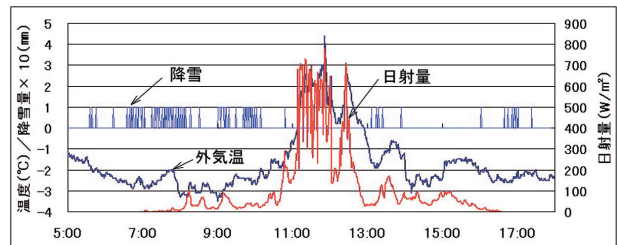


図8 2009/2/6の気象状況

表1 2009/2/6の降水量

| 時 | 工試 | | 札幌気象台 | |
|----|----------|-----------|-------|-----------|
| | 外気温 ℃ | 降水量 mm | 降水量 | 降雪量 cm |
| 6 | -1.7 | 0.3 | 1.0 | 1 |
| 7 | -2.5 | 1.3 | 0.5 | 1 |
| 8 | -2.5 | 2.1 | 2.5 | 4 |
| 9 | -3.0 | 0.7 | 2.0 | 5 |
| 10 | -2.6 | 2.3 | 2.0 | - |
| 11 | -1.8 | 0.3 | 0.5 | 1 |
| 12 | 1.8 | 0.0 | 0.0 | - |
| 13 | 0.8 | 0.0 | 0.5 | - |
| 14 | -1.3 | 0.5 | 1.5 | 3 |
| 15 | -2.5 | 0.0 | 0.5 | - |
| 積算 | | 7.5 | 11.0 | 15 |

時間平均値を併記した。表1より、降雪時の外気温は-2~-3℃程度で、7:00~8:00および9:00~10:00の時間帯に2mm/hを超える降水量（气象台データの降雪量4~5cm/h）を記録している。

3.2.2 融雪能力

2009/2/6, 5:00~18:00における路盤出入口の温風温度と路面加熱量の結果を図9に示す。2009/2/3と同様、これらの値は測定期間中ほぼ一定しており、12時間の平均で示すと、路盤入口温風温度21.8℃、出口温風温度12.2℃で、路面加熱量144W（100W/m²）であった。

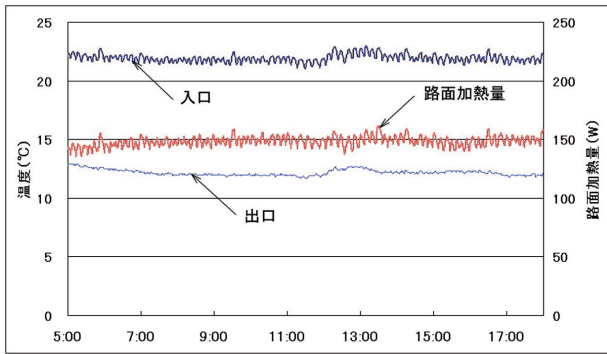


図9 路盤の出入口温風温度・加熱量

3.2.3 降雪時の路面状況

2009/2/6, 5:00~15:00の路面状況を図10に示す。大雪の降った7:00~10:00の路面状況を見ると積雪が進行しており、144W程度の加熱量では2mm/hを超える降水量（融雪負荷）に対応できず、歩行に支障の来す恐れのあることがわかる。しかし、雪の止んだ10:00以降は、時間の経過とともに積雪量は徐々に減少し、2009/2/3の路面状況と同様、後方にやや溶けの悪い箇所が見られるものの、比較的融雪ムラの少ない路面状況を呈しているのが見て取れる。

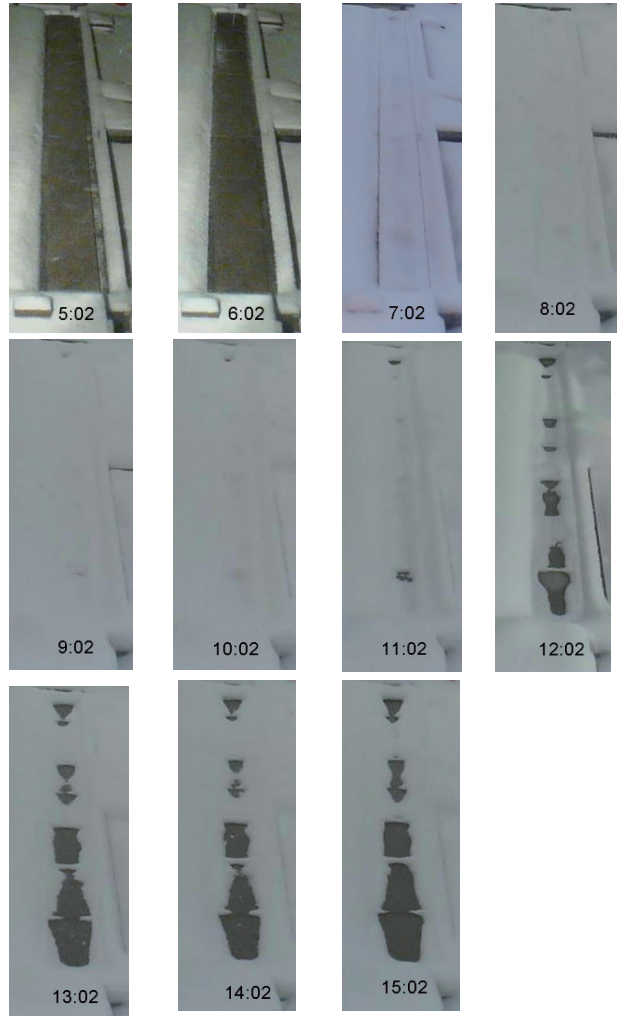


図10 2009/2/6の路面状況

4. CFD解析

4.1 解析モデルおよび条件

市販ソフトウェアのSolidWorksを用いて作成した、熱交換Uターン解析モデルの外観を図11に示す。本解析モデルは、2.1項の実験路盤をほぼ忠実に再現し、各構成部材の形状、寸法、材質（材料物性）は同じ値を採用している。

熱流体解析にはCOSMOSFloWorksを用い、融雪に関する舗装材表面とその両側面のコンクリート製縁石表面につ

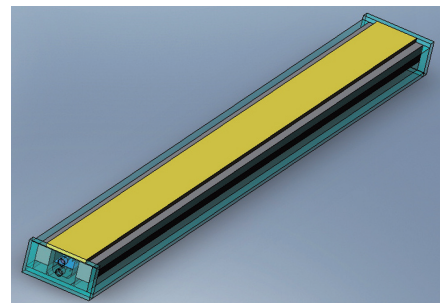


図11 シミュレーション解析モデル

いては、負荷条件として外界温度 0℃、熱伝達率233W/m²を与えた。また、温風条件として路盤入口に2009/2/6の融雪実験と同じ温度21.8℃、風量44.5m³/hを与えた。なお、舗装材の熱伝導率には、御影石の実測値3.0W/(m・K)を与えた。

4.2 路盤内温風温度の解析結果

図12に、温風流れ方向中心軸垂直断面における温度分布の解析結果を、前方入口付近(a)、中央付近(b)、後方Uターン付近(c)について示す。

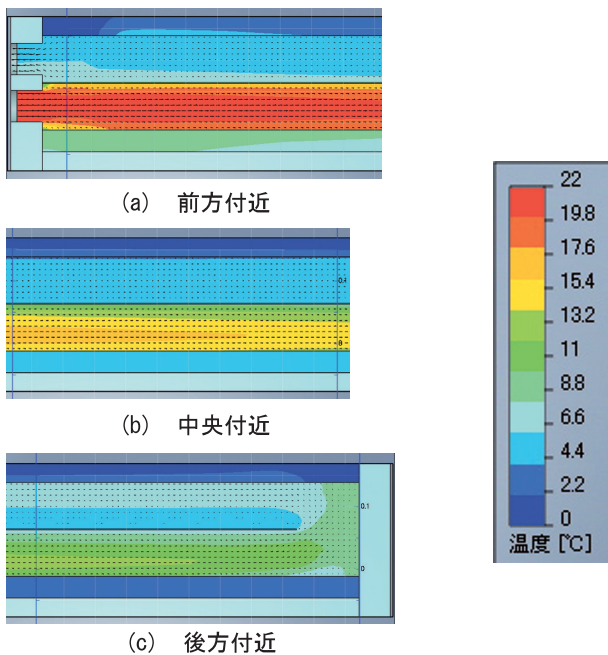


図12 流れ方向垂直断面温度分布

これらの図より、送風口から入った温風は、仕切板とUトラフ間の下層部を後方に向かって流れていく間に温度を降下させ、Uターン付近で向きを反転させて仕切板と舗装材間の上層部に移動した後、前方の排出口に向かって流れていくが、この間、下層部内が9℃～22℃程度の広い温度分布を示すのに対し、上層部内の温風温度は5～6℃程度のほぼ均一な温度分布を呈しているのがわかる。

また、上層部内の流れ方向中心軸の温風温度の解析値を実測値と比較し、図13に示す。解析値は実測値と比べ、全体的に3℃程度低い値を示すものの、前方および後方付近が、その間の長さ1～3m付近よりも高い温度を示しており、温度分布としては実測値をほぼ再現する様子がわかる。なお、解析値と実測値の相違は、実験路盤を製作する際、仕切板と舗装材の接触が十分ではないことに起因するものと思われる。

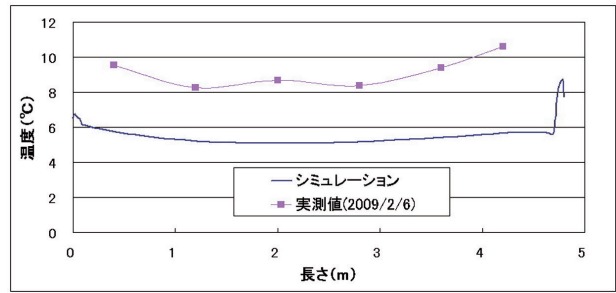


図13 上層部温風温度の比較

4.3 路面温度と融雪能力の解析結果

舗装材表面温度分布の解析結果を図14に示す。路面温度は、ほぼ均一な温度分布を呈しているが、前述の路盤内上層部における温風温度分布と同様、前方と後方部分の路面温度がやや高い温度を示しているのがわかる。なお、路面温度の最大値は1.6℃、最小値0.1℃、平均値0.4℃である。この路面温度分布と融雪実験の路面状況(図10)を比較すると、融雪の進行に伴う路面の露出割合が路面温度分布にほぼ対応している様子がうかがえる。

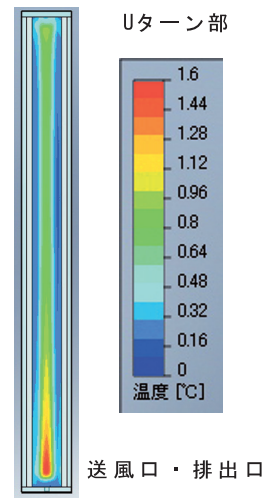


図14 路面温度分布

表2に、融雪能力の指標である路面加熱量の解析結果を実測値と比較して示す。路面加熱量は、実測値149W、解析値246Wとなり、解析値は実測値の1.7倍となっている。この差は、シミュレーションソフトのメッシュ分割に伴う計算精度、路面境界条件(温度、熱伝達率)のほか、主として前述のように実験路盤における仕切板と舗装材の接触状態に起因するものと思われる。また、路面熱流束の解析結果は95.3W/m²である。この値は、3.2.2項で示した融雪能力100W/m²と同様な値を示すが、ここで留意することは、解析、実験ともに融雪面積に舗装材表面積を用いているのに対し、路面加熱量については実験が舗装材と縁石の両方、解析では縁石をの除いた舗装材のみの加熱量から算出しており、そのまま比較することはできない。仮に、解析値を基準に実験値による舗装

表2 路面加熱能力の比較

| 2009/2/6 | 路盤入口 | | 路盤出口 | | 路面加熱量 W | 路面熱流束 W/m ² |
|----------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|------------|---------------------------|
| | 温風温度 ℃ | 風量 m ³ /h | 出口温度 ℃ | 風量 m ³ /h | | |
| 実測値 | 21.8 | 44.5 | 12.0 | - | 149 | - |
| シミュレーション | 21.8 | 44.5 | 5.1 | 41.8 | 246 | 95.3 |

材のみの路面加熱量を予測すると、解析値 $95.3\text{W}/\text{m}^2$ を1.7で除した $56\text{W}/\text{m}^2$ 程度となる。

5. まとめ

換気排熱を利用する玄関前通路用として、CFD解析により最適化を図った熱交換Uターン方式の融雪路盤について検証実験を行い、融雪能力など定量的な評価を行うとともに、CFD解析による計算結果と比較検討を行った。以下に、結果を要約する。

- (1) コンクリート製側溝（U150トラフ）と御影石舗装材からなる通気路筐体に、CFD解析結果を満足する最適形状の伝熱フィン付き仕切板を挿入させた熱交換Uターン方式の実験用融雪路盤を試作した。舗装材寸法は、幅300mm、長さ4,800mm、融雪面積 1.44m^2 である。
- (2) 融雪実験では、換気排熱を想定して設定温風温度を 22°C 、設定風量を $43.2\text{m}^3/\text{h}$ とした。この風量は、換気量 $150\text{m}^3/\text{h}$ で融雪面積 5m^2 と仮定した時の本モデル融雪面積に相当する。
- (3) 融雪実験の代表日として、12cmの降雪があった2009/2/3と26cmの大雪が降った2009/2/6について整理した。
- (4) 融雪実験の結果、降雪時間帯における路盤排出口の温風温度は 12°C 程度とほぼ一定であり、路面加熱量は 144W 程度、舗装材表面積当たり $100\text{W}/\text{m}^2$ であった。
- (5) 舗装材表面の温度ムラに影響を及ぼす路盤内上層フィン間の温風最大温度差は 2.4°C で、ほぼ均一な温度分布を示した。
- (6) 融雪負荷として降水量 $0.5\text{mm}/\text{h}$ 程度までは、通常のロードヒーティングのように路面を積雪のない状態に保つことが可能である。また、歩行に支障が少ないと考えられる積雪2cmを許容する場合は、降水量 $0.9\text{mm}/\text{h}$ 程度まで対応可能である。
- (7) さらに、降水量 $2\text{mm}/\text{h}$ を超える大雪の条件では、 144W 程度の加熱量では対応できず積雪が進行する。雪の休止後は、時間の経過とともに積雪量は減少し、融雪ムラの少ない路面状況を呈する。
- (8) 実験路盤をほぼ忠実に再現した解析モデルを作成し、CFD解析を行った。その結果、路盤内上層部の温風温度は実測値に比べ 3°C 程度高い値を示すが、温度分布としては実測値をほぼ再現する。
- (9) また、舗装材表面温度分布は、融雪実験における融雪の進行に伴う舗装材表面の露出割合にほぼ対応する。
- (10) 路面加熱量は実測値の1.7倍となった。これら実験値と解析値との相違は、メッシュ分割に伴う計算精度、および実験路盤における仕切板と舗装材の接触状態に起因するものと思われる。

謝辞

本報は、JSTの平成19年度「シーズ発掘試験」の追試として実施した。ここに謝意を表します。

また、本研究を実施するに際し、㈱ホクスイ設計コンサルの大内克行氏より、実験装置の製作に際し多大な協力を頂いた。ここに記して感謝を表します。

引用文献

- 1) 富田ほか：換気排熱を利用する空気式ロードヒーティングシステムに関する研究－玄関前通路用融雪路盤体の提案－、北海道立工業試験場報告、No.306、pp.127-132、(2007)
- 2) 富田ほか：換気排熱を利用する空気式ロードヒーティングシステムに関する研究（第2報）－シミュレーションによる融雪路盤の最適設計－、北海道立工業試験場報告、No.307、pp.41-46、(2008)