

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

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-2 Optimum Design of Entryway Pavement Structure for Snowmelt by CFD Analysis

Kazuhiko TOMITA, Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Nobuhiro NAGANO

抄 録

換気排熱を利用する玄関前通路用融雪路盤として、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種類の路盤モデルを提案し、汎用ソフトウェアを用いたCFD解析による最適化を検討した。上層フィンを舗装材に接触させるなど、両モデルとも、それぞれの通風方式に見合った仕切板を最適化することで、表面温度を均一化し、融雪ムラの少ない良好な路盤を設計できることが示された。

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, CFD解析

Abstract

We proposed two new models of air channel for snowmelt pavement using ventilation exhaust, which shall be installed for a house entryway. Each air channel is divided into upper and lower layers by a finned partition plate. We also analyzed each air channel model to optimize its thermal effect by using general-purpose CFD software. By connecting upper finned partition plate directly to the backside of the pavement surface etc, these two optimized air channel partition plate design realized uniform temperature distribution on pavement surface, which indicate the optimum air channel design for valid snowmelt pavement.

KEY-WORDS : ventilation exhaust, road heating, pavement structure, air, snowmelt, CFD analysis

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等においては、換気は昼夜を通し屋外に排出されている。この無駄に捨てられている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、地球環境に優しい極めて省エネルギーなロードヒーティングシステムが実現可能となる。著者らは前報^{1,2)}で、換気排熱を融雪用熱源として効率よく利用する路盤構造を検討し、そのなかで路面温度を均一化する熱交換Uターン

通風方式による路盤モデルを提案するとともに、市販材料を使った融雪路盤による検証実験で換気排熱の融雪用熱源としての利用可能性や路盤モデルの有効性を確認した。しかし、降雪量の大きい時など融雪ムラが発生する場合が見られ、満足できる路盤モデルとは言い難い。そこで本報では、この融雪ムラの解消を図るため、汎用ソフトウェアを用いたCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析による路盤モデルの最適化を検討した。

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

2. 熱交換Uターン通風方式の路盤モデル

2.1 解析モデル

CFD解析に用いた熱交換Uターン通風方式の路盤モデルを図1に、解析モデルの断面を図2に示す。

路盤内の通気路は、仕切板で上下2層に分割されており、温風は一端の下層に設けた送風口から入り、下層部を長手方向に沿って流れ、他端に設けた開口部でUターンした後、上層部を通して排出口より排出される。この間、下層部を流れる高温空気と放熱等によって温度低下した上層部を流れる低温空気との間で熱交換が行われ、通気路内温度と路面温度の均一化が図られる。

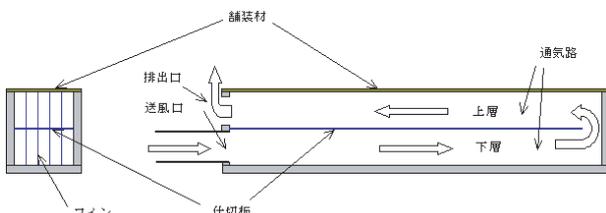


図1 熱交換Uターン通風方式の路盤モデル

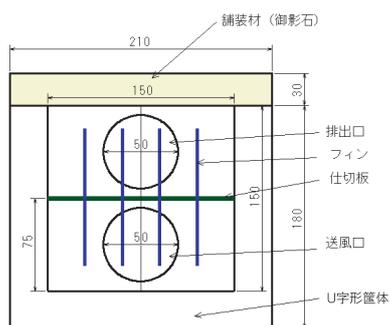


図2 熱交換Uターン通風方式路盤解析モデルの断面

解析モデルの形状寸法は、図2に示すように、前報²⁾で使用した実験路盤に従い、150mm×150mmの空洞断面を有する、横210mm×高さ180mm×長さ4800mmのU字形筐体とした。この上に、厚さ30mm、横210mm×長さ4800mmの舗装材を置いて通気路を形成し、この中に板厚2mm、横150mm×長さ4700mmのアルミニウム製仕切板(フィン：有・無)を底面から75mmの高さに配置し、さらにこの両端を、210mm×210mm角、厚さ50mmのキャップ材(断熱材)で塞いだ。この片側(図1の左端)のキャップ材に、直径50mmの空洞を上(排出口)下(送風口)2カ所設けた。また、Uターン開口部に当たる右端のキャップ材内面と仕切板との間隔は100mmとした。

2.2 解析条件

通気路内の上下2層間における熱伝達を促進する手段として、仕切板にフィンを取り付けて伝熱面積を大きくすることが有効と考えられるが、反面、材料コストに加え圧力損失も増大する。このため、最適なフィン形状を決めるため、舗装

材表面温度分布、舗装材表面放熱量、および出入口差圧を評価指標とするCFD解析を行った。解析には市販ソフトウェアであるSolidWorks及びCOSMOSFloWorksを使用した。

フィン形状は、フィン高さ(上層/下層：25/25、50/50、72/73、73mm/73mm)、フィン間隔(10、15、30、50mm)、およびフィン厚(0.8、1.2、1.6、2mm)の3条件とし、材質は仕切板と同じアルミニウムとした。また、フィン無し仕切板の他に、仕切板を使用せず、排出口を図1の右端に配置する直通方式についても解析を行った。

境界条件として、U字形筐体とキャップ材は断熱壁とし、舗装材表面上に温度-10℃、熱伝達率20 W/m²の負荷を与えた。また通風条件として、温度20℃、通風量43.2 m³/hを与えた。この通風量は、換気量150 m³/hで融雪面積5 m²(30 m³/(h・m²))と仮定した場合の本モデルの融雪面積1.44 m²(300mm×4,800mm：実験用御影石寸法)に相当する。なお、舗装材の熱伝導率は、御影石の実測値3.0 W/(m・K)を用いた。

2.3 解析結果

2.3.1 フィン高さの影響

図3に、フィン間隔15mm、フィン厚0.8mmのフィン高さを変化させた場合の熱交換Uターン通風方式における舗装材表面温度分布の解析結果を、直通方式と比較して示す。ここで、フィン高さ72/73と73/73の相違は、73/73が上層フィンと舗装材とが接触した状態にあるのに対し、72/73は舗装材との間に1mmの隙間のあることを示す。

図3から、直通方式では左手送風口付近が、熱交換Uターン方式では反対に右手折り返し付近の温度が高くなっているのがわかる。また、熱交換Uターン方式が直通方式に比べ何れも温度均一性に優れること、フィン高さ25mmが最も均一性に優れ、それ以上高くすると逆に悪化することがわかる。しかし、さらにフィンを高くし舗装材に接触させると、左手送風口付近においても温度の上昇がみられ、舗装材全体にわたって表面温度が大きく上昇することから、通気路内の上下2層間で効率よく熱交換が行われると推測される。

次に、上層フィンを舗装材に接触させた状態で、下層フィン高さを変化させた場合の結果を、フィン間隔30mm、フィン厚1.2mmについて図4に示す。この場合は、フィン高さの影

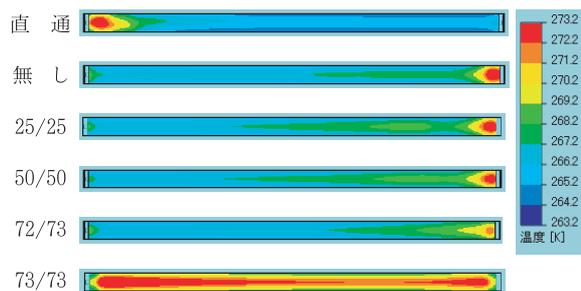


図3 舗装材表面温度(フィン高さの影響1)

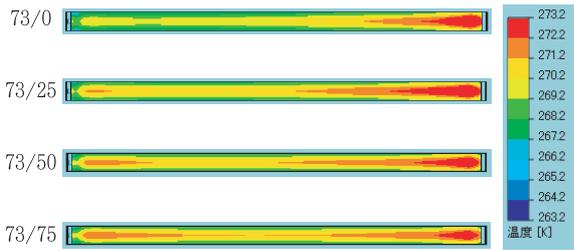


図4 舗装材表面温度（フィン高さの影響2）

響が現れ、高さが増すほど表面温度は高く、均一性にも優れることがわかる。

図5に、フィン高さで出入口差圧および舗装材表面放熱量の関係を示す。舗装材表面の放熱量についてみると、図3の温度分布と相関を示し、フィンが舗装材に接触しない場合の放熱量は74~81W/m²であるのに対し、接触する場合は、これらの2倍の157 W/m²を示す。また出入口差圧については、フィン高さが大きくなるに伴い、増加するのがわかる。フィン無しで31Pa、舗装材に接触する場合で49Pa、その比率は1：1.6である。なお、標準的規模の2階建て住宅（約38坪）を対象とした第3種セントラル換気システム設計の試算³⁾によると、総合圧力損失は約34Paとなっており、本路盤モデルの出入口差圧とほぼ同等な値を示すことから、フィンによる圧力損失の増加は無視できないことがわかる。

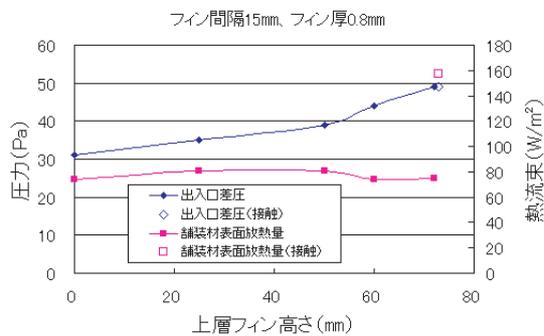


図5 フィン高さで出入口差圧および放熱量の関係

2.3.2 フィン間隔の影響

図6に、フィン間隔と出入口差圧および放熱量の関係を示

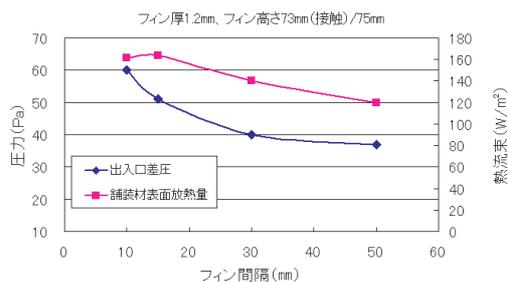


図6 フィン間隔と出入口差圧および放熱量の関係

す。フィンの枚数を増やして間隔を狭めるほど、放熱量は上昇するが、出入口差圧も急増するのがわかる。フィン間隔50mmと10mmと比較すると、放熱量では120 W/m²と161 W/m²で、比率は1：1.34であり、差圧では各々37Paと60Paで、比率は1：1.62となる。

2.3.3 フィン厚の影響

図7に、フィン厚と出入口差圧および放熱量の関係を示す。フィン厚を0.8mmから2mmに変化させた場合、差圧の上昇はわずかであり、放熱量については129 W/m²~154 W/m²の範囲、最大で1.2倍程度の差であることがわかる。

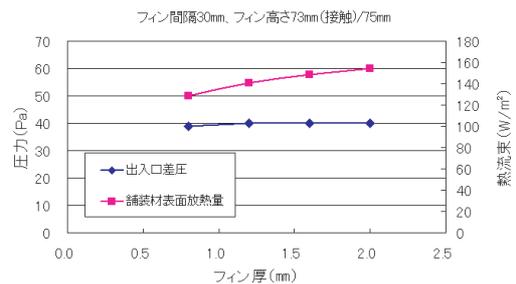


図7 フィン厚と出入口差圧および放熱量の関係

2.3.4 解析結果のまとめ

以上の解析結果から、熱交換Uターン方式における融雪ムラを解消させるためのフィン形状としては、上層フィンを舗装材に接触させ、下層フィンを高く、フィン間隔を狭め、フィンを厚くすることが有効と言える。特に、舗装材とフィンとの接触は、通路内上下2層間の熱交換だけでなく、舗装材への熱伝達に有効であり、舗装材温度の上昇や表面温度の均一化、放熱量の増大に大きく作用する。しかし、これら形状はどれも圧力損失の増大につながるから、この影響を極力少なくするには、フィンを舗装材に接触させる必要上、フィン間隔を広げることで対応することになり、本モデルにおいては30mm（無次元距離：0.2）間隔が適当と思われる。またフィン厚については、圧力損失の影響は少ないものの、材料費を考慮すると1.2~1.6mmが適当と思われる。

3. 二層混合通風方式の路盤モデル

3.1 二層混合通風方式の提案

前述の熱交換Uターン方式の路盤モデル（図1）では、排出口の位置は、送風口の直上（玄関前通路においては玄関先）付近に限定される。また、融雪水や雨水の通路内部への侵入や換気自身からの結露を考慮した場合、仕切板上に水が溜まらないようにするには、Uターン部でのレベルを送風口部分よりも下げることで、侵入水をUターン開口部へ導き、ここを通過させ、U字形筐体の底（透水構造）より排出させる必要がある。これら排出口の位置や仕切板レベルの制約を回避するため、図8に示す二層混合通風方式の路盤モデルを

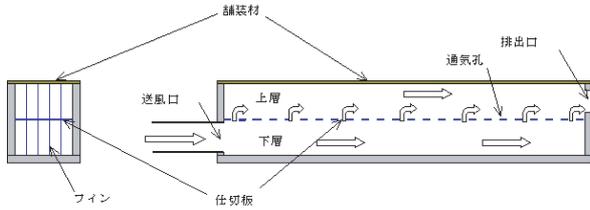


図8 二層混合通風方式の路盤モデル

新たに提案する。

本モデルでは、多数の孔を設けた仕切板で通路内を上下二層に分割し、排出口は送風口の反対側の上部部に配置する。これらにより、通路内の侵入水は仕切板のレベルに関係なく、仕切板の孔を通して速やかに排出され、また温風は送風口の反対側から排出させることができる。本モデルにおいては、仕切板に開けられた孔から温風を均一に吹き出させることが、舗装材表面温度を均一化させる上で重要と考えられる。そこで、仕切板の孔径と開口率の最適値を求めるためのCFD解析を行った。

3.2 二層混合通風方式における仕切板のCFD解析

3.2.1 解析モデルおよび解析条件

本モデルは、仕切板と排出口の位置以外は前述の熱交換Uターン通風方式の解析モデルと同様である。仕切板は材質が断熱材、フィン無しで厚さ2mmとし、孔の配列は角穴千鳥、孔径(W)と孔間隔(sp)を適当に組み合わせることで開口率を変化させた。通風条件(20℃, 43.2 m³/h)、熱負荷条件(-10℃, 20 W/m²)は熱交換Uターン通風方式と同様である。

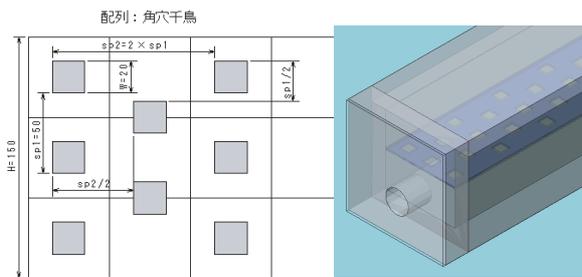


図9 二層混合通風方式の仕切板と解析モデル

3.2.2 解析結果

図10に孔径9mmにおける開口率を変化させた場合の舗装材表面温度分布を、図11に開口率22.5%における孔径を変化させた場合の解析結果を示す。図10より開口率が小さくなるほど、また図11より孔径が小さくなるほど均一な表面温度分布を示す。この理由として、開口率や孔径が大きくなると、下層部内での圧力が均等にはならず、通風抵抗の小さな送風口付近でより多くの温風が上層部に移動するためと考えられる。本通風条件下で表面温度を均一化させるには、孔径が6~9mm、開口率10~20%が適当と思われる。しかし、表面温度は、

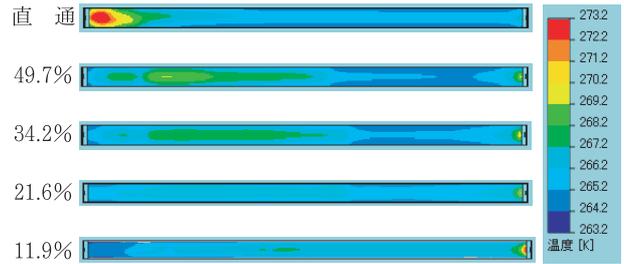


図10 舗装材表面温度 (W=9mm)

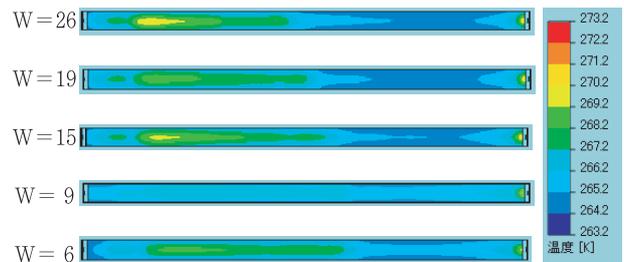


図11 舗装材表面温度 (開口率22.5%)

直通方式(図10)と同程度であり、仕切板にフィンを設けた熱交換Uターン通風方式(図4)に比べ、かなり低い値を示すことから、二層混合通風方式においても仕切板にフィンを取り付ける必要のあることがわかる。

3.3 CFD解析による両路盤モデルの比較

3.3.1 解析モデル

二層混合通風方式と熱交換Uターン通風方式について同一条件でのCFD解析による比較検討を行った。解析モデルは、フィン有無の2通り、材質はアルミニウムで両方式とも同一形状とし、フィン高さ73mm/75mm、フィン間隔30mm、フィン厚1.2mm、上層フィンを舗装材に接触させた。仕切板は、材質がアルミニウム、板厚2mmとし、二層混合通風方式では、図12に示すように孔径W=12mm、開口率19%と孔径W=6mm、開口率16%の2種類を用いた。ただし、開孔パターンは角穴並列とした。送風条件は、これまで同様20℃、43.2 m³/hであり、熱負荷条件は積雪状態を想定し、0℃、233 W/m²とした⁴⁾。

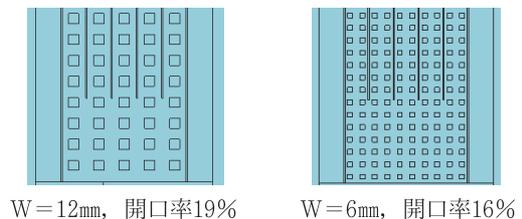


図12 二層混合通風方式の仕切板開孔パターン

3.3.2 解析結果

熱交換Uターン通風方式(記号:A)、孔径12mm、開口率16%の二層混合通風方式(記号:B)、および孔径12mm、開口

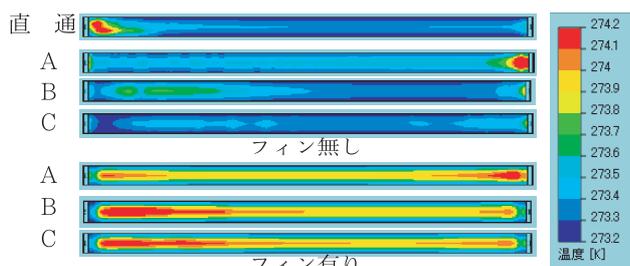


図13 各種通風方式における舗装材表面温度分布

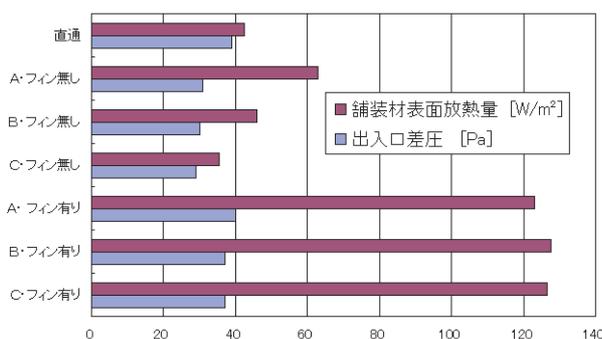


図14 各種通風方式における法熱量と出入口差圧

率19%の二層混合方式（記号：C）の各々フィン有・無での表面温度分布の結果を、直通方式と比較し、図13に示す。また、舗装材表面放熱量と出入口差圧の結果を図14に示す。

フィン無しの場合、表面温度の均一性については、図13から、C、B、A、直通の順に優れることが見て取れ、また舗装材表面放熱量については、図14から、これとは反対にA（62.9 W/m²）が最も大きく、B（46.0 W/m²）、C（35.5 W/m²）の順になっており、B（孔径12mm，開口率19%）の放熱量は熱交換Uターン方式の73%程度、C（孔径6mm，開口率16%）は56%程度であることがわかる。以上の結果は、前述の3.2項で示したCFD解析結果と同様であり、二層混合通風方式では仕切板にフィンをつけない場合、孔径と開口率が小さいほど舗装材表面温度の均一性には優れるが、舗装材表面の平均温度と放熱量は低下する。

フィン有りの場合、図13に示すように、熱交換Uターン通風方式、二層混合通風方式ともに表面温度は大きく上昇し、ほぼ同様な温度分布を示すことから、表面温度の均一性は同程度であることわかる。また放熱量についても大きく上昇し、図14に示すように、3ケースとも同程度で、Aの熱交換Uターン方式では123.2 W/m²（フィン無しの1.96倍）、Bの二層混合通風方式では、127.62 W/m²（同、3.59倍）、Cでは126.7 W/m²（同、3.57倍）となっている。

また、出入口差圧についてみると、Aのフィン有りUターン方式では40Pa、B、Cのフィン有り二層混合方式ではともに37Paであり、各々フィン無しに比べ7～9Pa程度上昇するが、直通方式（39Pa）と同等であることがわかる。

以上のことから、仕切板にフィンをつけ、これを舗装材に接触させることが、二層混合方式においても、Uターン方式

と同様、通気路内の熱交換および舗装材への熱伝達が促進され、ひいては表面温度の均一化、融雪能力の向上、融雪ムラの解消につながるものと期待される。

4. まとめ

換気排熱を利用する玄関前通路用融雪路盤として、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ターン通風方式、二層混合通風方式）を提案し、汎用ソフトウェアを用いたCFD解析による最適化を検討した。上層フィンを舗装材に接触させるなど、両モデルとも、それぞれの通風方式に見合った仕切板を最適化することで、表面温度を均一化し、融雪ムラの少ない良好な路盤を設計できることが示された。以下に、CFD解析結果を要約する。

- (1) 熱交換Uターン通風方式における融雪ムラを解消させるためのフィン形状として、上層フィンを舗装材に、下層フィンを通気路底部に接触させ、フィン間隔を狭め、フィンを厚くする。これら形状は通気路の出入口差圧の増大につながるが、本モデルにおいては、フィン間隔は30mm（無次元距離：0.2）、フィン厚は、1.2～1.6mmが適当と思われる。
- (2) 舗装材と上層フィンの接触は、通気路内上下2層間の熱交換だけでなく、舗装材への熱伝達に有効であり、舗装体品温の上昇や表面温度の均一化、放熱量の増大に大きく作用する。
- (3) 二層混合通風方式では、仕切板の孔径および開口率を小さくするほど表面温度分布が均一となる。換気排熱の通風を想定した場合、孔径が6～9mm，開口率10～20%の条件が適当と思われる。しかし、表面温度および舗装材放熱量は熱交換Uターン通風方式よりも低い値を示す。
- (4) 仕切板に最適形状のフィンを付け、上層フィンを舗装材に接触させることが、二層混合通風方式においても、表面温度の均一化、融雪能力の向上、融雪ムラの解消に有効である。

今後は、本解析で示された最適設計の路盤モデルを製作し、実証試験とCFD解析による計算結果との比較・検討を行う予定である。

謝辞

本報は、JSTの平成19年度「シーズ発掘試験」により実施した。ここに謝意を表します。

また、本研究を実施するに際し、(株)ホクスイ設計コンサルの大内克行氏より、実験装置の製作や除雪作業の面で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—，空気調和・衛生工学会北海道支部，第41回学術講演論文集，pp.165-168（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－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)

3) ジェイベック㈱：ダッチマン物語, pp43-49 (2003)

4) 月館ほか：ロードヒーティングの期間融雪負荷シミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, No.61, Apr. (1996)