研究論文

再生可能エネルギー活用型 敷地内雪処理・空調複合システムの実測と評価

Field Measurements and Analyses on a Hybrid System for Snow Storage/melting and Air Conditioning by Using Renewable Energy

濱 田 靖 弘*
Yasuhiro Hamada

斎 藤 央**** Hisashi Saitoh · 中村 真 人**
Makoto Nakamura

· 窪 田 英 樹*** Hideki Kubota

令 木 雅 幸*****・ 今 昭 典** Masayuki Suzuki Akinori Kon

(原稿受付日2004年8月27日, 受理日2005年4月12日)

Abstract

This study aims to propose a hybrid system for snow storage/melting and air conditioning by using renewable energy resources, and clarify the effects of an actual realized application.

First, the outline of the system installed at an office building, which was completed in Sapporo in 2001, was shown. The hybrid system is composed of an underground thermal utilization for snow melting by using vertical earth heat exchangers and a space cooling through seasonal cold storage of snow-and-ice cryogenic energy.

Second, at the comparatively severe climatic conditions (the lowest outdoor air temperature -9.2°C and the amount of daily snowfall 8.1 cm), it was found that the underground thermal utilization system contributes to preventing freezing of a road surface, and that the rate of the snow covered surface area was approximately 90%. The effectiveness of this system on energy conservation, environmental protection and cost was verified through numerical analyses. Also, as a result of measuring snow storage characteristics and space cooling performance, the effective amount of snow stored on the first day of the space cooling period was approximately 74%, which gave comparatively good agreement with the predicted value.

1. まえがき

日本の積雪地帯の面積は国土の約半分を占めている。雪が降り積もることによって、雪国独特の文化や産業が育まれる一方,冬の生活や社会活動に大きな支障が生じている。これらの障害を克服するために、地域の特性に応じた様々な工夫と対策が講じられてきた。一方、最近の著しい都市化と高齢化ならびに生活環境の向上によって、より高度で広範な雪対策が求められるようになった。多雪都市における雪処理は一般に運搬排雪、および融雪槽、流雪溝、路面融雪などを利用した施設融雪が主な手段である。しかし、都市の過密化と環境保全が進むに伴い雪捨て場が減少する傾向にあり、運搬排雪による諸問題が顕在化するとともに、雪対策費用は自治体経済を逼迫させる大きな要因となっているのが現状である。

*北海道大学大学院工学研究科空間性能システム専攻助教授 E-mail:hamada@eng.hokudai.ac.jp

〒060-8628 札幌市北区北13条西8

〒060-0042 札幌市中央区大通西4

環境負荷を増すことなく、積雪寒冷都市を活力に満ちた 安全なものにするためには、雪を冷熱源として最大限活用 する一方で、凍結防止など安全に関わる場所のみに再生可 能エネルギーを活用した最小限の雪処理施設を設ける分散 型の雪利用・雪処理複合システムが有効であると考える.

近年,環境への負荷が少ない自然エネルギーや都市排熱,下水,廃棄物燃料などの未利用エネルギーが着目されている2²⁻¹⁵⁾.最近の動向として,地下熱を利用した低温水循環型路面融雪に関する研究が数多く報告されているのが特徴である。一方,雪氷冷熱利用に関しては,媚山らの一連の研究¹⁶⁻¹⁸⁾,北欧における大規模な導入事例¹⁹⁾などが特筆される。当初は農作物の低温貯蔵を主な利用法として始まったが,最近では,事務所,集合住宅などの冷房に利用する技術が各地で注目を集めている²⁰⁻²²⁾.このような機運の高まりから,2002年の新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法の政令改正により,雪氷冷熱エネルギーが新エネルギーとして認定された。

筆者らの研究室においては、これまで、再生可能エネルギーを活用した融雪システムのあり方について検討を進めるとともに、地下熱の利用可能性に焦点をあてた路面融雪と融雪槽の実証実験と評価を実施してきた²³⁻²⁶.

本研究は,積雪地において,地下熱を利用した雪処理と 雪氷冷熱の貯蔵を行うとともに,冷房に適用する複合シス Vol. 26 No. 4 (2005) 295

テムを提案し、札幌市内に竣工した事務所における導入効果を明らかにすることを目的としたものである。まず、地下熱利用システムの路面凍結防止効果を実測するとともに、数値解析により省エネルギー性の検討を行う。さらに、雪氷庫内の貯雪特性と雪冷房の実測とそれに基づく評価を実施する。

2. 対象施設および実測概要

表1に札幌市厚別区に建設された事務所施設の建物概要と雪氷庫の仕様を示す。本事務所施設では、敷地内の雪処理と空調に再生可能エネルギー利用手法を導入している。

2.1 敷地内雪処理システム

図1,図2にそれぞれ再生可能エネルギー活用型敷地内雪処理・空調複合システムの平面図、地下熱利用システムの系統図を示す。温水式路面融雪配管が公道から屋内へのスロープ部分(296m²)と半屋内駐車場(200m²)に敷設されている(温水配管:外径17mm、肉厚2.1mmの架橋ポリエチレン管、配管間隔:150mm、舗装:アスファルト50mm、コンクリート70mm)。線源理論による予測結果²⁷)

表1 建物概要と雪氷庫仕様

竣工年月		2001年12月	
所在地		札幌市厚別区	
	延床面積	8546.9 m ²	
事務所	構造	SRC 造	
	階数	地上2階,地下2階	
雪氷庫	雪氷庫容積	174.8 m ³	
	有効貯雪量	158 m³	
	断熱仕様	硬質ウレタンフォーム(現場発泡品)	
		100 mm	
	冷水槽容積	7.8 m ³	

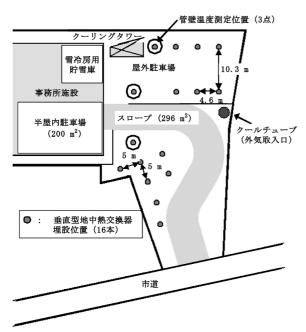


図1 再生可能エネルギー活用型敷地内雪処理・空調複合 システムの平面図

と敷地の制約から図1のように垂直型地中熱交換器(U字管型76m)を計16本配置した. 地中熱交換器にはポリエチレン製のU字管(内径27mm, 肉厚3mm)型を採用した. 補助システムとして, ガスエンジンコージェネレーションシステム(Cogeneration System:CGS)(定格発電出力9.8kW, 排熱回収熱出力17.7kW), ガス焚温水ボイラ(定格熱出力210kW)が利用可能である(図2). 路盤側, CGS系統の熱媒には不凍液を用い, 地盤側系統には水を熱媒に用いた.

1年目は、初冬,春先の外気温度の高い時期に地下熱を用い、厳寒期の運転は補助システムを用いるものとした。地下熱を利用する場合には連続運転とし、補助システムに関しては、降雪の有無、路面温度(5 $\mathbb C$)によってON-OFF制御を行った。また、2年目は地下熱利用システムのより積極的な活用のために、外気温度条件(-5 $\mathbb C$)に応じて両システムの自動切替運転を実施した。

2.2 雪冷房システム

雪氷庫には、100mmの断熱材(硬質ウレタンフォーム)を施しており、雪氷庫容積、有効貯雪量はそれぞれ174.8m³、158m³である(表1、図1). 図3に雪冷房システムの設備系統図を示す。事務所内の冷房(雪冷房対象面積:1637m²)には、熱交換冷水循環(融解水)・直接冷風循環併用方式を適用した。熱交換冷水循環方式は、雪氷の融解水を7.8m³の冷水槽に貯蔵し、熱交換器を介して冷房を行うものである。熱交換後の冷水を雪氷庫内に戻し、雪氷庫内下部にて

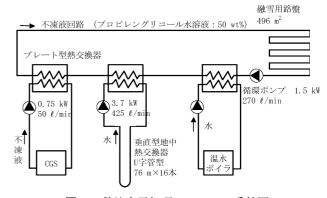


図2 敷地内雪処理システムの系統図

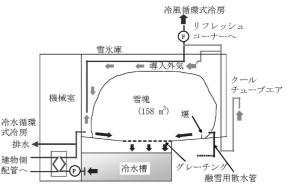


図3 雪冷房システムの系統図

 296
 エネルギー・資源

散水することによって、冷熱を回収するものとした.融解水量が冷水槽の容量を越えた場合には、強制的に槽外に排水する.一方、直接冷風循環方式は、1・2階のリフレッシュコーナーに雪氷庫内の冷気をファンによって直接送風するものである.雪氷庫内に誘引する外気は、クールチューブにより予冷を行うものとし、供給温度は、雪氷庫内の空気とクールチューブによる予冷外気の混合によって調節するものとした.

3. 敷地内雪処理システムの実測と評価

3.1 外界気象条件と路面状況

運転1年目における対象期間として、2002年3月1日から5日までを取り上げた.合計で12.1cmの降雪があり、最低外気温度は−9.2℃に達する厳寒期であった.図4に積算降雪量7.9cm時点における路面状況を示す.図4の左上部は雪処理を行っていない箇所であり、地下熱利用システムによりスロープ部分の雪処理が進んでいると判断できる.図5は同日のスロープ下部の状況である.熱源から離れた下部ではわずかに残雪が見られるが、比較的良好な路面状況が得られている.路面の露出率は9割程度であった.



図4 屋外駐車場と路盤の比較(2003年3月2日 12:30)



図5 路面融雪状況 (2003年3月2日 14:30)

3.2 雪処理システムの運転実績

図 6 に熱媒温度・路面温度の変動を示す。路盤への熱媒送り温度の平均値は6.7°、返り温度は5.6°であった。路面温度については常に0°〇以上を維持しており、路面凍結が発生していないことを画像・目測により確認した。地中熱交換器への熱媒送り温度の平均値は6.7°、返り温度は7.3°であった。熱交換器を介さずに直接熱媒を路盤に供給した場合にはさらに効率向上が期待される。また、送り・返り温度差は1°C未満と小さく、現在の循環流量は 425ℓ /min(搬送ポンプ:3.7kW)であるが、搬送系の適正化によるエネルギー消費量の低減が可能であると考えられる。

図7に路盤供給熱量,および地中熱交換器の単位長さあたりの採熱率の変動を示す.期間中に地盤から総計6.4GJを採熱し,搬送系の発熱を含めて路盤へ平均23kW,総計8.7GJを供給した.エネルギー使用効率(Energy Efficiency Ratio:*EER*)[=供給熱出力/搬送動力]は4.4であったが,上述の通りさらなる省エネルギー化が可能である.地盤からの平均採熱率は16.7W/m(3月2~4日の平均値)となり,筆者らの研究室における過去の実測結果(11~19W/m)²⁵⁾と比較して高い採熱能力を示した.

外界気象条件が比較的近い条件であった代表日を選定し、補助システム(2002年2月14日)と地下熱利用システム(2002年3月2日)の運転実績の比較を行った. 表2は以下の値を用いて計算した:ボイラ熱効率80%,二酸化炭

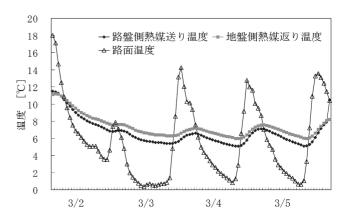


図6 地下熱利用システム稼動期間の熱媒温度・路面温度

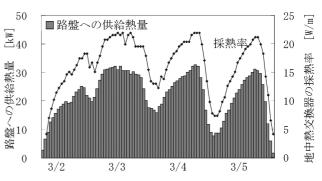


図7 路盤供給熱量·地中熱交換器採熱率

Vol. 26 No. 4 (2005)

表2 代表日における運転実績の比較

運転方式		補助システム	地下熱利用
平均外気温度	[°C]	-5. 1	-4. 9
降雪量	[cm]	7. 5	8. 1
積算日射量	$[\mathrm{MJ/m^2}]$	9. 7	7. 5
路盤供給熱量	[MJ]	15778	1987
一次エネルギー消費	量 [MJ]	20915	1280
二酸化炭素排出量	[kg-C]	241	17
コスト	[円]	27913	1607
路面露出率	[%]	100	90

素排出係数(電力0.139kg-C/kWh²⁸⁾,都市ガス13A 0.642 kg-C/m^{3 29)},コスト(電力12.88円/kWh³⁰⁾,都市ガス13A 76.98円/m^{3 31)}).常時完全消雪を行う補助システムと比較して,路面露出率約9割程度となった地下熱利用システムの一次エネルギー消費量,二酸化炭素排出量の日積算値は,共に10%以下の値となった。運用コストについても大幅に削減された。両システムは得られる融雪レベルが異なるため単純な比較はできないものの,補助システム稼動時のエネルギー消費の削減が求められるとともに,地下熱利用システムの高い省エネルギー性を示す結果となった。

図8に地中熱交換器の管壁温度の長期変動を示す。ここで,管壁温度は図1の丸印で示した測定用地中熱交換器の深さ38mにおける管外壁温度測定値の平均を示している。3月上旬には,路面融雪運転によって,6℃程度までの温度低下が見られるものの,3月下旬以降の外気温度,日射の影響もあり,比較的早期に温度が回復していると考えられる。

運転 2 年目(2002年11月23日~2003年 3 月31日)における降雪量は、1 年目の値と比較すると約1.6倍と大きくなっており、期間積算降雪量は約4.4mであった。また、外気温度も1 年目を平均で2.5℃下回っており、期間平均値は約-3℃であった。 $\mathbf{表}$ 3 に $1\cdot 2$ 年目の運転実績の比較を示す。ここで、1 年目の運転開始日が2001年12月27日であったことから、比較のため 2 年目の12月26日以前は集計対象から除外している。地下熱利用システムと補助システムの運転切替の自動化によって、地下熱利用システムの稼働時間が282時間から743時間に向上した。また、12月26日以

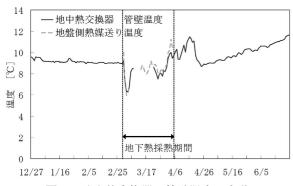


図8 地中熱交換器の管壁温度の変動

表3 1・2年目の運転実績の比較(12月27日~3月31日)

運転期間		2001 年度	2002 年度
積算降雪量	[cm]	230	369
平均外気温度	$[^{\circ}\!\mathbb{C}]$	-0.8	-3. 3
平均熱媒送り温度	$[^{\circ}C]$	25. 6	21. 2
平均熱媒返り温度	$[^{\circ}C]$	18. 3	15. 5
平均路盤供給熱出力	[kW]	80. 5	75. 8
地下熱利用時間	[h]	282	743
CGS 利用時間	[h]	424	586
ボイラ利用時間	[h]	615	1100

前の稼働時間を含めると1207時間であった。

3.3 実測結果と数値計算結果の比較

既報における路面融雪解析プログラム^{24), 25), 32)} と地下熱利用解析プログラム³³⁾ を連動し、対象施設の数値計算を実施した^{注1)}. 垂直型地中熱交換器上下端部の影響を考慮しない無限の長さを有する管における地下水流れ方向の水平二次元問題を取り上げ、前進差分法を用い、地下水の移流項には風上差分を適用している。本解析プログラムの詳細は既報^{24), 25), 32), 33)} によるが、大略・要点を注[注1)] に示す。

2001年12月28日から2002年4月4日までの気象条件と熱 媒温度の実測値を与えた解析を行った結果, **図9**に示され るように路盤供給熱量の計算値と実測値は比較的よく一致 した.また,2002年3月1日から5日までの地盤からの採 熱率を与えた解析を行った.**図10**に示されるように,実測 値が計算値より高く推移する傾向が見られるが,その差は 比較的小さい結果となった.

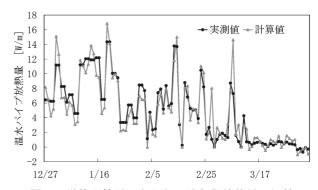


図9 単位配管長さあたりの路盤供給熱量の比較

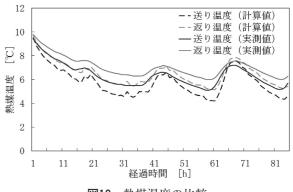


図10 熱媒温度の比較

298 エネルギー・資源

3.4 省エネルギー・環境保全・経済性

前節の解析プログラムを用いて本施設と同規模のシステ ムを利用した路面融雪の数値解析を行った. 路盤構造に関 しては、配管間隔150mm, 埋設深さ60mmとし、表層に高 熱伝導性コンクリート (熱伝導率2.8W/(m・K))³⁴⁾ の使用 を想定した. 拡張アメダス標準年気象データによる札幌の 気象条件を入力し、地下水流速は40m/年とした. 表 4 に 補助システムを全く稼動させなかった場合の解析結果を示 す. 搬送系の適正化を目的として、循環流量175ℓ/minに 低減させた解析を行った結果、EERは8.8に改善した. 路 面状況に関しては、総計510cmの降雪に対して、期間中に 路面上に1cm以上の積雪が発生する時間の割合は9%で あり、歩行、駐車場等の利用には支障のないサービスが得 られている。融雪運転期間(11月1日~3月31日)終了時 には、地盤温度が7.8℃程度に低下したが、放置期間にお ける回復により,経年的な地盤温度の低下は見られなかっ た. 今回の計算条件と同規模の路面融雪を灯油ボイラ式で 賄った場合に対する地下熱利用システムの一次エネルギー 削減率, 二酸化炭素削減率, コスト削減率は, それぞれ 74%,82%,71%という結果となった.

4. 雪冷房システムの実測と評価

4.1 雪氷庫内の貯雪特性の解析

汎用熱負荷解析プログラム³⁵⁾ を用いて、雪氷庫内の貯雪 特性の解析を行った.雪氷庫内の温度は、媚山らの文献^{16), 36)} を参考にして3℃とした。図11に月別損失熱量と残雪量の 推移(雪氷庫への雪投入日:3月1日)を示す。冷房運転 開始を予定した6月1日までに約3.4GJの熱損失があるが、 雪氷庫に投入した雪の約85%を貯蔵しておくことが可能と の計算結果が得られた。

4.2 実測結果と考察

屋外駐車場に堆積した雪 (373kg/m^3) をロータリーブロアを用いて2002年 3 月 1 日に雪氷庫内に投入した(雪密度517 kg/m^3)。2002年 3 月から 7 月における外気温度の実測値は、平年値と比較して最高で2.2°C、平均で0.9°C高い

表 4 地下熱利用システムの解析結果

総雪処理量	[cm]	510	
降雪時間	[h]	254	
積雪 1 cm 以上の時間割合	[%]	9. 1	
路面温度 0℃以下の時間割合		[%]	6.6
熱媒温度	[%]	送り	6. 5
然殊価及 		返り	5. 3
平均熱出力	Γ1 ₋ w7	全期間	24. 2
平均热田刀	[kW]	積雪時	41.6
地盤からの総採熱量		[GJ]	431.3
地中熱交換器採熱率	[W/m]	13. 4	
EER		[-]	8.8

値であった。また、平均日射量は、実測値の方が0.3MJ/ (m²・日) 高かったが、ほぼ平年並みであったと言える. 当初の冷房開始計画日であった6月1日の時点における残 雪量の実測結果は74%であり、予測値を若干下回る結果と なった. この差については、定期点検などのための断熱扉 の開閉、雪密度のむら、地下への熱損失などの影響が考え られるが、今回の実測結果と計算結果は比較的近い値を示 したと考えられる. 1年目の実際の冷房開始時期は約1カ 月遅れ7月となったことが影響し、有効利用冷熱量は約 20%にとどまった。一方、2年目においては、2003年2月 17日に約76トンの雪を投入し、表5の日程で運転を行った. 期間中、冷水循環方式が71時間、冷風循環方式が196時間 稼動した. 供給冷熱量は, 冷水循環方式が6806MJ, 冷風循 環方式が453MJとなり、合計で7259MJであった. 供給冷熱 量を雪質量に換算すると21.6トンであり、初期貯雪量の約 28%に相当する. 雪冷房を行った期間に関する従来方式 (ガス冷温水機) に対する一次エネルギー削減率, 二酸化

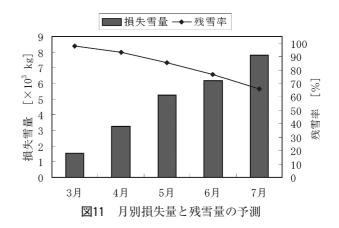


表5 2年目における雪冷房システムの運転実績

	冷水循	環方式	冷風循環方式		
日程	運転時間 [h]	供給熱量[MJ]	運転時間 [h]	供給熱量 [MJ]	
5月26日	0. 2	91. 3	0.8	1.7	
5月27日	0.0	0.0	8.0	16.8	
5月28日	4. 3	127. 7	8.0	19.6	
5月29日	5. 3	433. 1	8.0	22.5	
5月30日	2. 3	325.0	3.8	9.8	
5月31日	0.0	0. 0	0.0	0.0	
6月1日	0.0	0.0	0.0	0.0	
6月2日	0.0	0.0	9.0	20.6	
6月3日	3.8	797. 7	9.0	24.9	
6月4日	0.0	0.0	9.0	19.8	
6月5日	0.0	0.0	9.0	22.1	
6月6日	0.0	0.0	9.0	23.5	
6月7日	0.2	53. 3	0.0	0.0	
6月8日	0.0	0.0	0.0	0.0	
6月9日	0. 2	52. 2	9.0	23.5	
6月10日	0.0	0.0	9. 0	23.2	
6月11日	3. 3	660. 8	9.0	25.3	
6月12日	4. 3	388. 0	9.0	25.4	
6月13日	0.0	0.0	9.0	23.7	
6月14日	0.0	0.0	0.0	0.0	
6月15日	0.0	0.0	0.0	0.0	
6月16日	2. 7	175. 5	9.0	24. 2	
6月17日	3. 7	480. 9	9. 0	26.6	
6月18日	5. 0	946. 6	9.0	25.5	
6月19日	8. 0	869. 4	10.0	22.6	
6月20日	6. 0	369. 5	10.0	24.4	
6月21日	0.0	0.0	0.0	0.0	
6月22日	0.0	0.0	0.0	0.0	
6月23日	8. 5	651. 0	10.0	14.8	
6月24日	8. 0	290. 7	10.0	9.2	
6月25日	5. 0	93. 5	10.0	3.0	
合計	70.8	6806. 1	195. 7	452. 5	

Vol. 26 No. 4 (2005) 299

炭素削減率は、それぞれ29.3%、26.8%であった. 建物の総冷房需要(105GJ)のうち、雪冷房分は約7%を占める結果となった.

5. まとめ

積雪寒冷地における事務所敷地内において、地下熱を利用した雪処理と雪氷冷熱の貯蔵を行うとともに、夏期の冷房に適用する複合システムを提案し、実規模の施設における実測と評価を実施した。まず、2001年に札幌市内に竣工した事務所における再生可能エネルギー活用型敷地内雪処理・空調複合システムの概要を示した。路面融雪に垂直型地中熱交換器を擁する地下熱利用システムを適用するとともに、屋外駐車場に堆積した雪を雪氷庫に貯蔵する雪冷房を導入している。次いで、最低外気温度−9.2℃、降雪量8.1cm/日の比較的厳しい外界条件において、地下熱利用システムが凍結防止に寄与し、約9割の路面露出率を達成することを実証するとともに、数値解析により省エネルギー効果が高いことを示した。また、雪氷庫内の貯雪特性と雪冷房の実測を行った結果、冷房開始計画日までの残雪量は74%であり、概ね予測値に近い値となった。

終わりに、本論文作成にあたって、ご協力頂きました本研究室の小家浩輔氏、尚和泰宏氏、伊藤潤一氏に深く感謝いたします。また、本研究の遂行にあたり、セイコーエプソン株式会社の関係諸氏、株式会社システック環境研究所札幌事務所所長の小林理浩氏、株式会社日伸テクノ代表取締役の柴田和夫氏に多大なご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

注

注1) 地下熱利用解析プログラムでは、まず、地盤の熱特性解析において、建設地点の地質、地下水性状などの調査を実施し、以下の基礎方程式を用いた手法によって、地中温度を予測し、シミュレーションに適用する.

$$\begin{split} &\frac{\partial (\theta_{a}\rho_{v})}{\partial t} + \frac{\partial (\theta_{i}\rho_{i})}{\partial t} + \frac{\partial (\theta_{i}\rho_{i})}{\partial t} = \nabla (D_{\theta v}\nabla\theta_{i}) + \nabla (D_{\theta i}\nabla\theta_{i}) \\ &+ \nabla (D_{\tau v}\nabla T) + \nabla (D_{\tau i}\nabla T) - \rho_{i}g\,\frac{\partial K}{\partial z} & \cdots (1) \end{split}$$

$$\frac{\partial (c\rho\,T)}{\partial t} + L_b \frac{\partial (\theta_a\,\rho_v)}{\partial t} - L_f \frac{\partial (\theta_i\,\rho_i)}{\partial t}$$

 $= \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(h_{\nu}D_{\theta\nu}\nabla\theta_{\iota}) + \nabla(h_{\iota}D_{\theta\iota}\nabla\theta_{\iota})$

$$+\nabla(h_{\nu}D_{\tau\nu}\nabla T)+\nabla(h_{l}D_{\tau l}\nabla T)-\rho_{l}g\frac{\partial(h_{l}K)}{\partial z}\qquad \cdots (2)$$

$$RH = \exp\left(\frac{M\phi_m}{\rho_l R\Pi}\right) \quad \dots \qquad (3)$$

$$\theta_l = Tua \left| T \right|^{Tub}$$
 $(T \le T_f)$ (4)

式(1)の右辺における土壌内の水分の移動に関しては、

飽和土壌内の熱移動解析については、以下の基礎方程式 による地下水の流動(右辺第2項)を考慮した手法を用い ている。

$$\frac{\partial (c\rho T)}{\partial t} - L_f \frac{\partial (\theta_i \rho_i)}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + \nabla (h_i K \nabla \phi) \qquad \cdots \cdots (5)$$

上記の手法により地下熱利用システムの特性解析を行い、路面融雪部分の解析と連動する.融雪路盤内の配管が並列に多数埋設された断面を計算領域とし、四角形要素法により、温水配管に対して垂直方向の平面で空間分割を行った.計算領域は、水平方向はパイプ間のピッチ中央部まで、垂直方向は不易層までの範囲(0.075m×10m)とした.路盤内は二次元熱伝導であり、路盤表面については、乾き路面、積雪状態、降雪の有無、融雪の有無の条件によって、路面供給熱量、融雪熱量、日射受熱、対流熱伝達、放射熱伝達、蒸発潜熱の項から構成される熱収支の解析を行った.総合評価部においては、年間の省エネルギー性、二酸化炭素排出量を推定し、従来方式との比較を行うとともに、初期投入を考慮したペイバックタイムを予測する.

記号 c: 土壌の比熱 $[J/(kg \cdot K)]$, D_n : 温度勾配による液水拡散係数 $[kg/(m \cdot s \cdot K)]$, D_n : 温度勾配による水蒸気拡散係数 $[kg/(m \cdot s \cdot K)]$, D_n : 体積含水率勾配による液水拡散係数 $[kg/(m \cdot s \cdot (m^3/m^3))]$, D_n : 体積含水率勾配による液蒸気拡散係数 $[kg/(m \cdot s \cdot (m^3/m^3))]$, g: 重力加速度 $[m/s^2]$, h_i : 液水のエンタルピー [J/kg], h_i : 水蒸気のエンタルピー [J/kg], K: 透水係数 $[kg/(m \cdot s \cdot Pa)]$, L_n : 水の蒸発潜熱 [J/kg], L_n : 水の凍結潜熱 [J/kg], M: 水分 1 mol あたりの質量 [kg/mol], R: 一般気体定数 $[Pa \cdot m^3/(mol \cdot K)]$, RH: 相対湿度 [-], T: 土壌温度(セルシウス温度) $[^{\circ}C]$, T_i : 土壌の凍結開始温度 $[^{\circ}C]$, Tua: 実験定数 [-], Tub: 実験定数 [-], t: 時間 [s], z: 地表面基準の鉛直下向き距離 [m], θ_a : 体積気相率 $[m^3/m^3]$,

 θ_i :体積含水率 $[m^3/m^3]$, θ_i :体積含水率 $[m^3/m^3]$, λ :熱 伝導率 $[W/(m \cdot K)]$

 Π : 土壌温度(絶対温度)[K], ρ : 土壌の密度 $[kg/m^3]$, ρ_i : 氷の密度 $[kg/m^3]$, ρ_i : 液水の密度 $[kg/m^3]$, ρ_v : 水蒸気の密度 $[kg/m^3]$, ϕ : 土中水のポテンシャル[Pa], ϕ_m : マトリックポテンシャル[Pa]

参考文献

- 1) 落藤 澄,谷口孚幸;未利用エネルギーを活用したオンサイト型都市融雪システムの実際と計画,(2000),理工図書.
- 2) 浦上晃一, 佐藤 守; 低温な地下水を用いた道路融雪の実験, 温泉工学会誌, 19-2/3 (1985), 41-62.
- 4) 梅宮弘道,大高敏男;無雪道路の熱設計に関する研究,日本 機械学会論文集(B編),56-532(1990),274-282.
- 4) 中原崇文, 山中敏彦, 小島 晋, 竹内繁千代, 谷口 博, 工藤一彦; 道路融雪における地中蓄熱利用による性能向上の研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 52 (1993), 49-57.
- 5) 竹内正紀, 木村照夫, 宮本重信, 坪田諭治;基礎くい利用地 熱融雪法の開発と数値シミュレーション, 空気調和・衛生工 学会論文集, 52 (1993), 59-69.
- 6) 鈴木立美;廃熱と太陽熱を利用した蓄熱・融雪システムの開発,日本雪工学会誌,10-4(1994),76-77.
- 7) 中村資紀, 二川原雅哉, 山田忠雄, 千葉 隆, 杉原伸一, 斉藤政芳, 林 英雄;温泉水利用ヒートパイプ式ロードヒーティングシステム, 寒地技術論文・報告集, 11 (1995), 777-782.
- 8) 盛田耕二;大地の恵みを雪国の暮らしに活かす,日本エネルギー学会誌,76-2 (1997),82-90.
- 9) 高松康廣;札幌市における融雪技術への取り組み, ENERGY, (1997), 89-92.
- 10) 渡邊 洋,大木政弘,福原輝幸,森山和馬;掘削杭熱交換システム (BHES) による駐車場融雪と路面温度制御,日本雪工学会誌,15-1 (1999),10-18.
- 11) 森山和馬, 林 拓男, 田中雅人; 地中熱利用のBHESシステム, 自然・未利用エネルギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集. (1999), 9-14.
- 12) 福原輝幸, 阪本信弘, 石野圭史郎, 森井和弘; 国道9号道の 駅での地中熱利用の融雪設備施工事例, 自然・未利用エネル ギーによる雪寒対策技術シンポジウム論文集, (1999), 31-34.
- 13) 安彦宏人,後藤宣明,堀野義人,沼澤喜一,山谷 陸;地下 水熱・太陽熱利用の道路融雪技術,自然・未利用エネルギー による雪寒対策技術シンポジウム論文集,(1999),35-42.
- 14) 福井県雪対策・建設技術研究所:調査研究報告(雪対策技術研究グループ), 地域技術, 13(2000), 1-40.
- 15) 横辻 宰, 高橋 浩, 加賀屋誠一; ローカルエネルギーを活 用したコミュニティー融雪槽の実証実験, 寒地技術論文・報 告集, 16 (2000), 460-465.
- 16) 媚山政良;冬期間の自然冷熱エネルギーの利用に関する研究, 日本機械学会論文集(B編),53-495 (1987),3358-3362.

- 17) 媚山政良;何故,雪が資源であることを忘れていたのか,日本エネルギー学会誌,76-2 (1997),101-112.
- 18) 媚山政良;雪による冷房,空気調和・衛生工学,72-3 (1998), 215-223。
- K. Skogsberg and B. Nordell; The Sundsvall Hospital Snow Storage, Cold Regions Science and Technology, 32 (1996), 63-70.
- 20) 橋本良明;雪氷利用による蓄熱-氷室システム-, 日本エネルギー学会誌, 81-8 (2002), 707-712.
- 21) 新エネルギー・産業技術総合開発機構;雪氷冷熱エネルギー導入ガイドブック,(2002).
- 22) 北海道経済産業局;雪氷冷熱エネルギー活用事例集,(2001).
- 23) 落藤 澄ら;融雪・雪利用委員会活動報告,空気調和・衛生 工学会,(1990).
- 24) 落藤 澄, 長野克則, 中村真人, 半澤 久ら; 低温水型ロードヒーティングの実験と解析 (第1~7報), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (1990~1992).
- 25) 落藤 澄, 長野克則, 中村真人, 永坂茂之, 半澤 久ら; 自然エネルギーを利用した融雪システムに関する研究(第1~4報), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集,(1995~1996).
- 26) 濱田靖弘, 中村真人, 斎藤 央, 小家浩輔, 窪田英樹, 横山 真太郎, 落藤 澄;北海道N町における地下熱を利用した融 雪槽の省エネルギー性に関する実験と評価, 日本雪工学会誌, 19-2 (2003), 3-12.
- 27) 尚和泰宏,濱田靖弘,中村真人,窪田英樹,落藤 澄ら;地下熱利用を導入した寒冷地の建築・都市エネルギーシステムに関する研究-改良型埋設法による雪処理システムの特性とその評価-,空気調和・衛生工学会北海道支部第36回学術講演会論文集,(2002),151-154.
- 28) 地球環境に関する委員会;地球環境時代における建築設備の 課題,(1995),空気調和・衛生工学会.
- 29) 省エネルギーハンドブック編集委員会;省エネルギーハンドブック'98, (1998), 住宅・建築 省エネルギー機構.
- 30) 北海道電力株式会社;電気料金単価表, (2002).
- 31) 北海道ガス株式会社;ガス料金単価表,(2002).
- 32) 永坂茂之,濱田靖弘,中村真人,落藤 澄;線源理論を用いた土壌熱利用融雪システムの設計手法,空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集,(1997),1081-1084.
- 33) 濱田靖弘, 落藤 澄, 長野克則, 中村真人, 横山真太郎, 永 坂茂之;標準熱回収率による地下熱利用システムの評価方法 および住宅への導入効果に関する研究,空気調和・衛生工学 会論文集,71 (1998),53-62.
- 34) 月館 司,富田和彦;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,61 (1996),57-65
- 35) 建築環境・省エネルギー機構; SMASH for Windows Ver.2 住宅用熱負荷計算プログラム, (2000).
- 36) 媚山政良,永桶裕明,安丸定男,合田清二,伊藤重則,宗田利秋;ウェストパレス 集合住宅での雪利用の冷房システム,空気調和・衛生工学,75-11 (2001),1006-1009.