

〈特別研究課題〉 ヒートポンプ給湯を利用する  
省エネルギー無人融雪システムの開発  
助成研究者 名古屋大学 西村 浩一



## ヒートポンプ給湯を利用する 省エネルギー無人融雪システムの開発

西村 浩一  
(名古屋大学)

## Development of Automatic Snow-Melting System utilizing Heat Pump Water Heater

Kouichi Nishimura  
(Nagoya University)

### Abstract :

We have started to develop an Automatic Snow-Melting System which utilizes the heat pump water heater. A small snow-melting system was constructed in the snowy area, Ohsyu, Iwate, Japan. Thirty-seven thermocouples were set in the system and the temperatures including at the inlet and the outlet water, around the water pipe, in the concrete body and at the concrete surface were recorded during the whole winter of 2015. An automatic weather station (AWS) was also set up and air and snow surface temperature, wind speed and direction, short-wave and long-wave radiation and snow depth were measured. Further, the snow accumulation on the concrete surface of the system and the change in general meteorological conditions were observed with a time-lapse camera. Recordings revealed that the automatic snow-melting system had enough power to melt all the snow on the concrete surface including the duration of the strong snow fall intensity at 2.4 cm/h. Analysis of the heat balance on the concrete surface and the heat transfer in the system could evaluate the supplied heat flux from the system was around 95 to 135 W/m<sup>2</sup>.

### 1. はじめに

北海道、東北並びに甲信越、北陸、中国の豪雪地帯では、除雪中の転落事故、落雪事故、路面での転倒事故等の雪害による年間の死者数は百人を超える<sup>1)</sup>。こうした事故の主な原因は、高齢化と

過疎化により除雪作業の担い手が老人になってしまった点にあり、問題の根本的な解決には、無人融雪システムを構築が不可欠である。また愛知県や首都圏においても、降雪に伴って転倒事故が相次ぐなど、雪に不慣れな人や除雪作業が困難な女性や子供が多い地域では、融雪システムのニーズは高い。

地下水を用いる融雪システムには散水管方式と埋設管方式があり、いずれも既に実用化に至っている<sup>2)</sup>。しかし、例えば長岡市での散水管方式では地下水を用いているため、地盤沈下の発生、さらには地下水に含まれる鉄分で道路に赤錆が付着すると言った弊害が起きている。埋設管にボイラーからの温水を流す埋設管方式、埋設した電熱ヒーターで直接加熱する方式のロードヒーティングも実用化されてはいるが、電熱ヒーターは維持管理が困難な上に、与えた電力以上の融雪能力を發揮できないことから、ランニングコスト(電気料金)が割高となってしまう。本研究の共同研究者である長谷川は、ヒートポンプの省エネ性に着目し、劣化したヒートポンプ実機に小型凝縮器を追設することによる再生技術の実証、水冷の凝縮器の追設による給湯実証試験を行った。さらに、追設する熱交換器の能力を予め推定することを目的に、冷媒流れを定常準一次元流れと仮定し、サイクルと性能を予測できるヒートポンプシミュレーター(シミュレーションプログラム)を開発した<sup>3)</sup>。またこのシミュレーターを応用して、オゾン層破壊、地球温暖化の原因物質の一つとされるフロン冷媒に対してだけでなく、二酸化炭素等の自然冷媒にも対応できるノンフロンヒートポンプシミュレーターを構築し、二酸化炭素ヒートポンプの設計を行った<sup>4)</sup>。しかし、試験機でのサイクル及び性能評価は圧縮機前後、熱交換器前後、膨張弁前後の温度測定のみで評価していたため、二酸化炭素ヒートポンプの特徴である圧縮後に冷媒が超臨界状態になり、給湯、熱交換した後に冷媒が亜臨界状態になること、つまり、温度だけでなく圧力の変化を伴う現象であることが考慮されていないという問題があった。また、圧縮機を断熱圧縮モデルで、膨張弁をキャピラリーチューブモデルで扱っていたため、サイクルを定量的に表現できていないと言う欠点があった。さらに、本研究で扱う水平展開方式地中熱利用ヒートポンプは、既存の例が無く、基礎データも揃っていないのが現状である。

こうした背景を踏まえ、本研究では、外気よりも高温の地中を熱源とし、与えた電力の数倍の熱エネルギーを加熱に利用できる二酸化炭素ヒートポンプ給湯器と省資源性に優れた埋設管方式を採用した温水循環により家屋周辺の無人融雪を行なうシステム(図1)を設計し、小型システムによる基本計測と高精度シミュレーションにより最適化を進め、実用化を目指すことを目的とした。

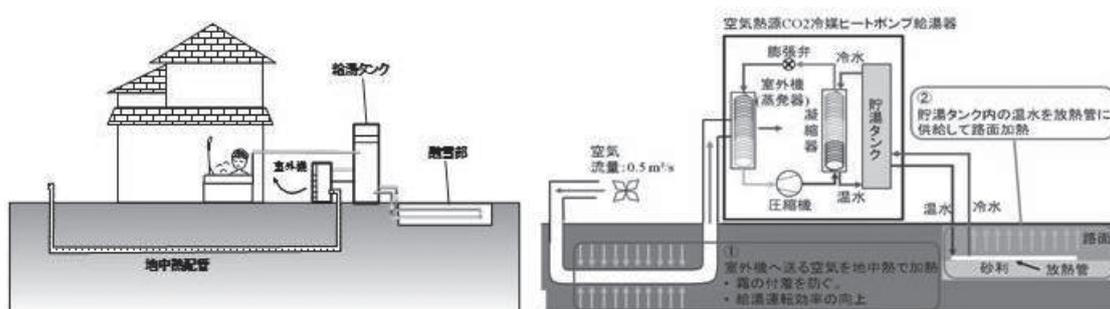


図1. ヒートポンプ給湯融雪システムのイメージ(左)と概要(右)

研究にあたっては、初めに基本となる小規模融雪システムを設計し、これを岩手県奥州市の工藤建設(株)の敷地内に敷設し、温水パイプからコンクリートへの熱伝達率を求めるとともに、自動気

象観測システム(AWS)によるデータを用いて熱収支解析を行った。なお、工藤建設(株)では既に地上から2 mの深さに外径21 mm、内径16 mm、肉厚2.5 mmで外側にフィンが付いた塩ビ管を水平に50 m 埋設した水平展開式地中熱利用システム(ジオプロムナード、図2)を商品化しており、夏期・冬期において地中温度が一定であることを利用して空調を行う実証試験を行っている。



図2. 水平展開式地中熱利用システム(ジオプロムナード)の施工状況

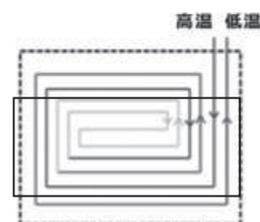


図3. 渦巻き型融雪配管

## 2. 研究方法

本研究で対象とする融雪システムは、玄関先、家屋周辺、駐車場の路面内に温水を供給回収する架橋ポリエチレン製の融雪パイプを渦巻き型に埋め込んだコンクリートたたき(図3)である。研究にあたっては、まず共同研究者である長谷川(名古屋大学エコトピア科学研究所)が、図3に示す渦巻き型融雪配管融雪システムの基本要素である直線部、曲がり部(U字部)を含む小規模融雪システムを設計し、これを岩手県奥州市の工藤建設株式会社の敷地内に施工した(図4)。

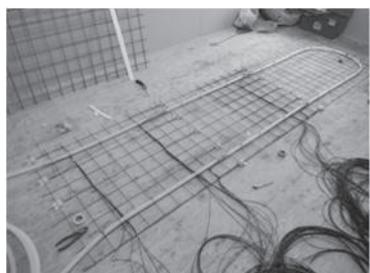


図4. 小規模融雪システムの施工状況

システムは、図1(右)に示すように、ヒートポンプ給湯機で供給した温水を貯留する貯湯槽(温水循環ポンプ(毎時340L)内蔵)、架橋ポリエチレン製の融雪パイプ(外径21.5 mm、内径16.5 mm、埋設部の長さ6.83 m、ピッチ0.6 m)、コンクリート舗装体(面積3.7 m<sup>2</sup>、深さ100 mm)から構成される。融雪パイプ内(入口、中間部、出口)、およびAからDの4箇所それぞれで融雪パイプ表面、パイプに直角で水平方向に100 mm離れた2箇所、コンクリート表面の計37箇所にK型熱電対を設置し(図5)、2015年1月23日から1時間間隔で室内のデータロガー(GRAPHTEC、GL820、図6)を用いて温度データを収録した。そしてこれらのデータを用いて融雪パイプからコンクリートへの熱伝達の解析を行った。

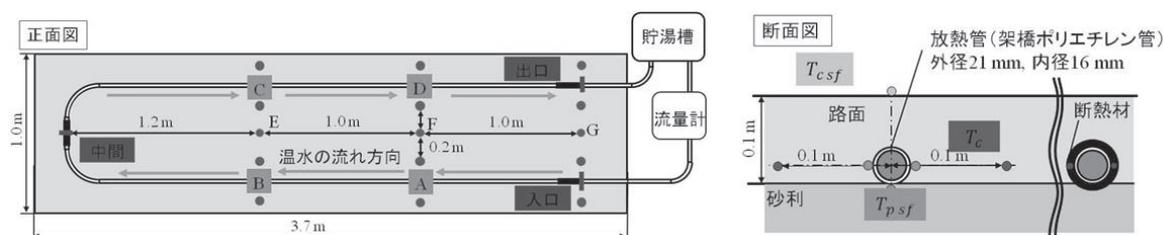


図5. 小規模融雪システムの概容と熱電対による温度計測箇所(図中の丸印)

一方、小規模融雪システムの近傍には、自動気象観測システム(AWS、(株)フィールドプロ、図7)を設置して、風向・風速、積雪深、気温、湿度、長波・短波放射、積雪表面温度を、2015年1月31日より10分間隔で測定した。また、インターバルカメラ(ガーデンウォッチカム、(株)バイコム)を図7中の白丸の箇所に設置し、1時間ごとに撮影することで気象状況の推移とコンクリート路面上の状態のモニタリングを行った。



図6. 室内に設置されたデータロガー



図7. 小規模融雪システム近傍に設置された自動気象観測装置とインターバルカメラ(白丸の位置)

### 3. 測定結果

#### 3.1 小規模融雪システムの温度分布

2015年1月23日より融雪システムの計37箇所において1時間間隔で測定されたK型熱電対による温度データの内、1月24日から2月3日の値を図8と図9に示す。図8は融雪システム入口と出口における水温のデータを示したもので、29℃から30℃で流れ込んだ温水が、約7mのパイプ内で約2℃低下し流出している様子が見える。一方、図9は図2のAとCにおいて測定された、パイプ表面、水平方向に

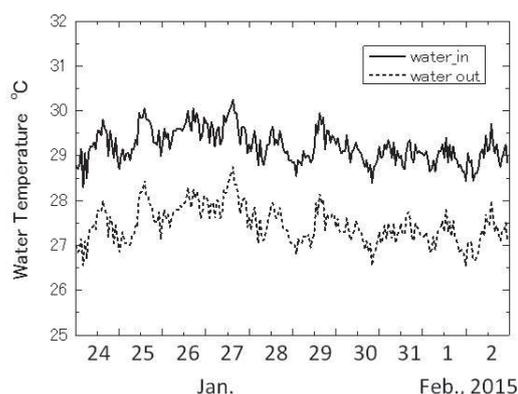


図8. 小規模融雪システムの入口と出口で測定された水温の例(2015年1月24日～2月2日)

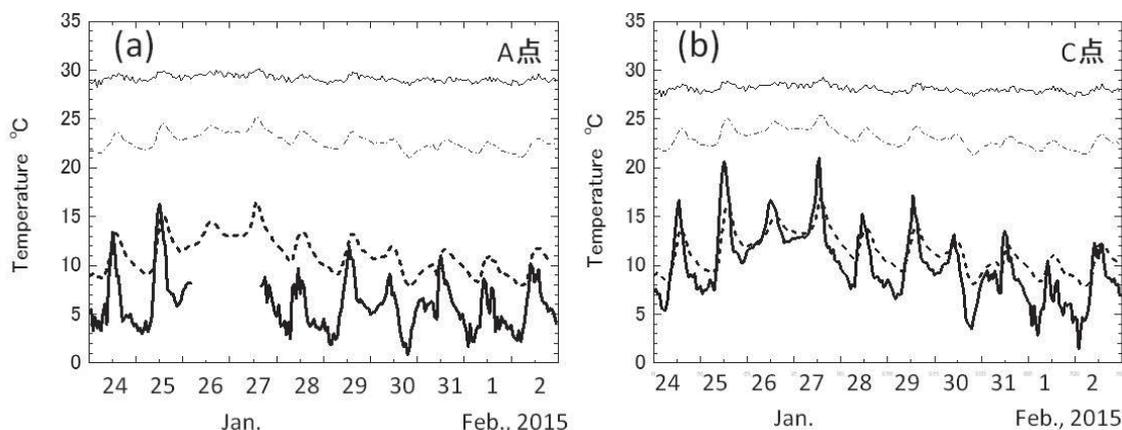


図9. A((a):左図)とC((a):左図)で測定された、水温(実線)、パイプ表面(点線)、水平方向に10 cm離れたコンクリート内部(太破線)、コンクリート表面(太実線)の温度変化。

10 cm離れたコンクリート内部そしてコンクリート表面の温度変化を示している。また参考までに、図9(a)にはシステム入口、図9(b)には出口の水温のデータも加えた。温度の絶対値は、パイプ内の水温、パイプ表面の温度、コンクリート内の温度、そしてコンクリート表面温度の順に低くなっているが、C地点では日中にコンクリート表面の温度が、コンクリート内部より高くなっているケースが見られた。A地点に比べC地点の方が下流に位置し、パイプ内の水温も1~2℃低下していること、またパイプ表面の温度やコンクリート内部の温度は両地点ともにほぼ同一であることを考慮すると、コンクリート表面に設置された熱電対の器差、設置状態(表面からの露出の有無)もしくは日中の日射の当たり具合の相違が起因してC点の測定値に何らかの影響を与えたことが推測される。

### 3.2 観測期間中の気象の推移

2015年2月1日から3月26日にかけて、AWSにより測定された気温、湿度、風向、風速の変化を図10に示す。2月から3月上旬の気温はほぼ0℃を中心に-5℃から+5℃の範囲で推移しているが、3月中旬以降は最低気温もプラスとなり最高気温は+10℃を超える日が続いた。風速(10分間平均値)は一般に2 m/sと弱いが、2月中旬、3月初め、そして2月10日過ぎには、発達した低気圧の通過とその後の強い冬型の気圧配置に伴い、4 m/s程度まで増加した。風向は当該地点の地形を反映して、東(90度)と西(270度)の頻度が高い分布を示しており、風速が大きい場合は西風になっている様子が見られる。

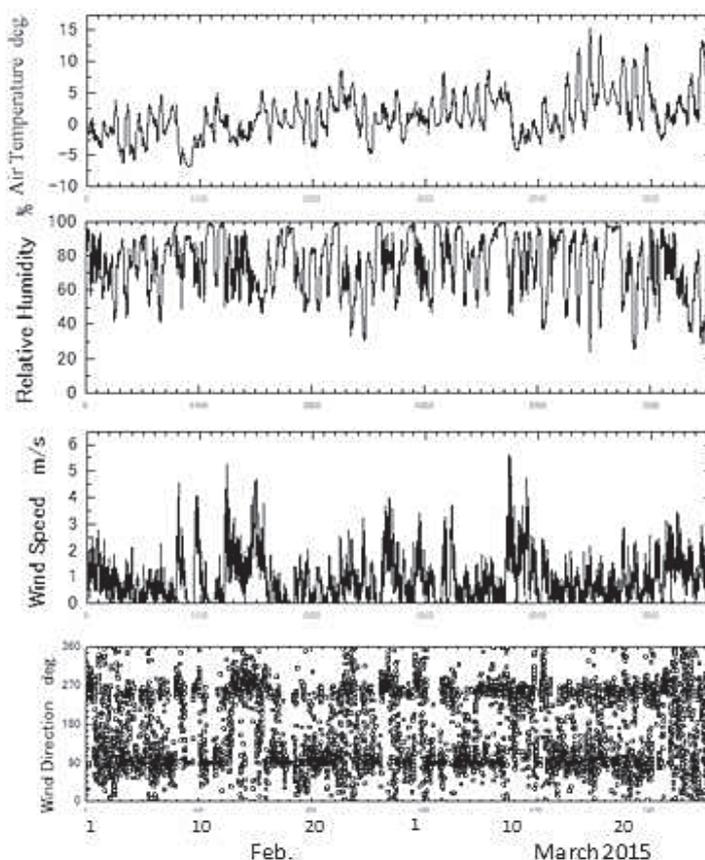


図10. 自動気象観測装置で測定された気温、湿度、風向、風速の変化(2015年2月1日~3月26日)

図11にはAWSに設置された長短波放射収支計により測定された、下向きと上向きの長波と短波放射量とそれらの和を取った放射収支量を示す。2月は地表面が積雪に覆われていた日も多かったことからアルベドが大きく、日射を反射した上向きの短波放射量が大きかったこともあり、放射収支量は日中でも200 W/m<sup>2</sup>程度と小さかった。しかし、その後積雪が融解し、土壌面が露出してアルベドが低下するようになると上向きの短波放射量は減少し、さらに下向きの短波放射量(日射量)の増加もあって、放射収支量(地表面が受ける放射エネルギー)は、3月10日前後の荒天時を除いて600 W/m<sup>2</sup>を記録するようになった。

図12は同期間中の積雪深の変化を示す。2月1日の観測開始時には約10 cmの積雪があり、15日には約40 cmに達したが、23日には消失した。その後3月10日以降の数日間を含め、何回か積雪イベントはあったものの、13日以降は1cm以上の値は記録されていない。

一方、インターバルカメラにより記録された観測点の様子を、最大積雪が観測された2月15日(図10参照)を含む14日から16日、および10 cmの積雪があった3月11日から13日について図14と15に示す。実際に小型融雪システムが設置されたのは、画面奥の気象観測装置の左側であるが、手前のコンクリート路面も同じ条件で融雪システムが稼働しているため状況は同一と考えて良い。いずれの期間とも対象とするコンクリート路面には全く積雪が無かったことが確認できる。

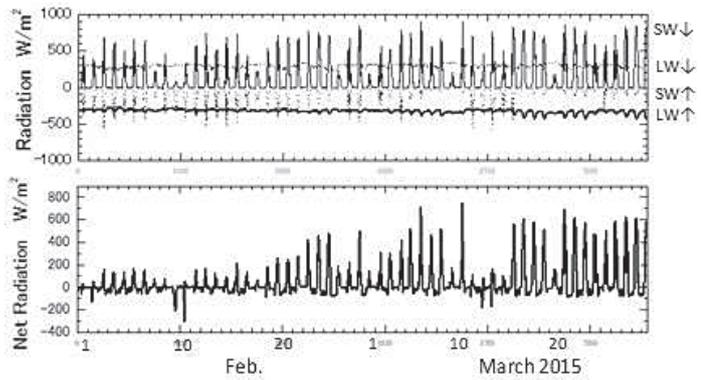


図11. 長波(LW)と短波放射量(SW)の測定結果(↓:下向き, ↑:上向き)(上)と放射収支量(下)(2015年2月1日~3月26日)

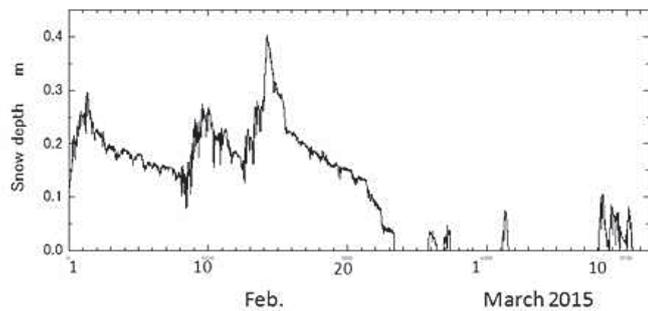


図12. 積雪深の変化(2015年2月1日~3月13日)

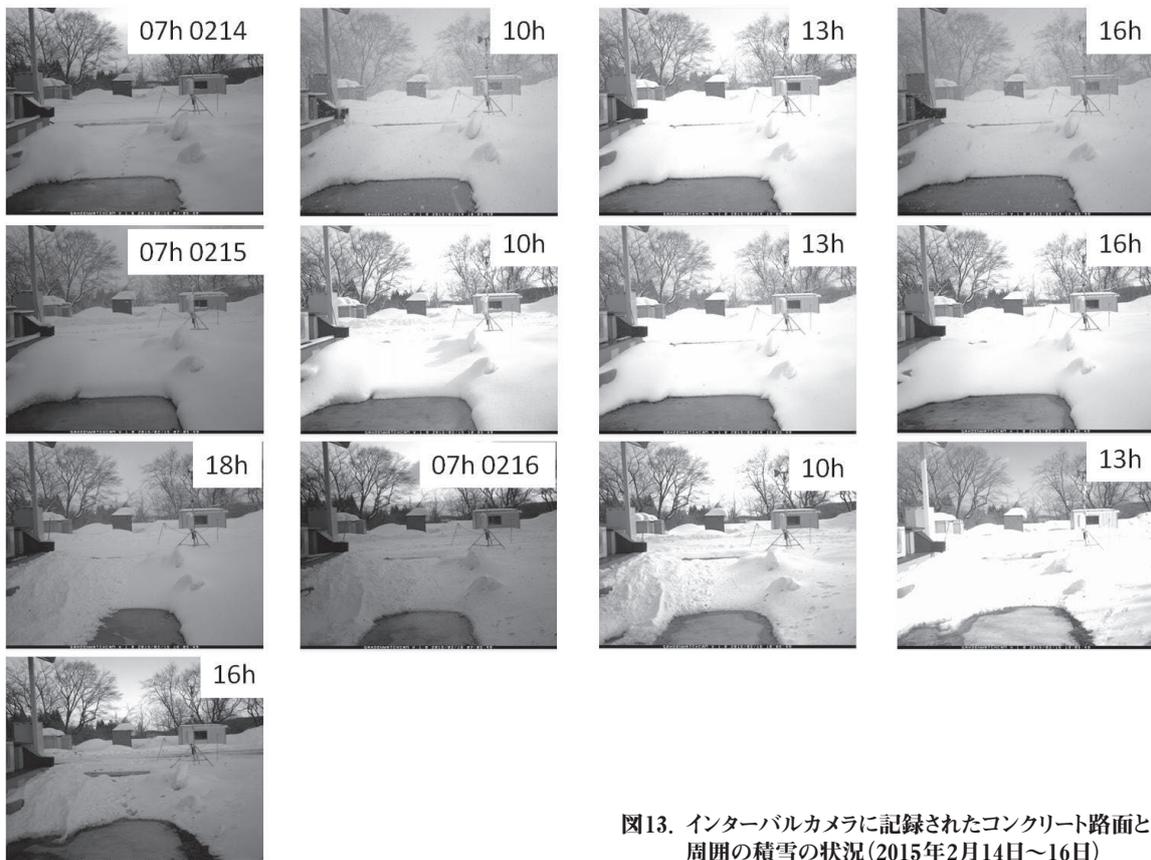


図13. インターバルカメラに記録されたコンクリート路面と周囲の積雪の状況(2015年2月14日~16日)

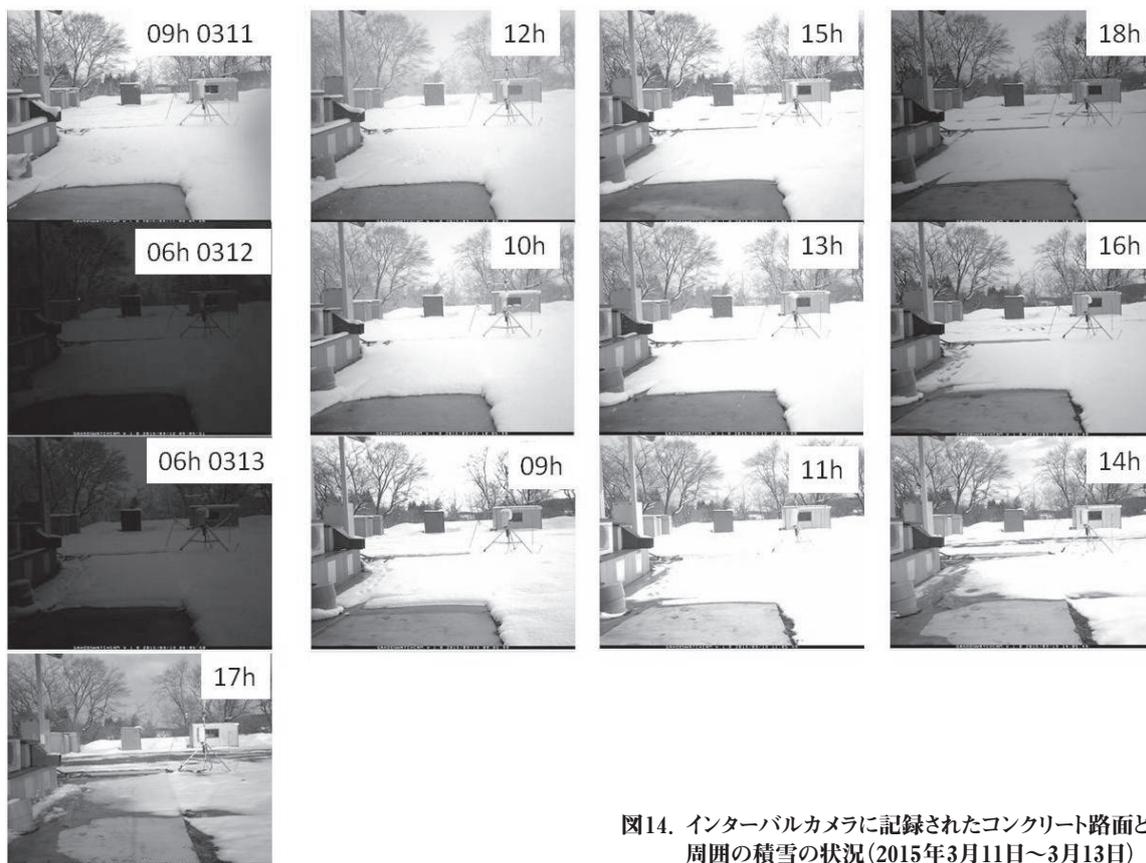


図14. インターバルカメラに記録されたコンクリート路面と周囲の積雪の状況(2015年3月11日～3月13日)

図15は小規模融雪システム上のAとC(図1参照)における表面温度とAWSで測定された値を2015年3月の10日から下旬にかけて比較したものである。11日から12日にかけては降雪があったものの、13日以降は前者の地表面はほぼ乾燥したコンクリートであるのに対し、後者は積雪もしくは土壌である。このため、前者の表面温度の絶対値は後者に比べて著しく大きい。日変化の位相はほぼ一致している。Aに比べてCの方が高温であることは図9にも示したとおりで、推測される原因については先に記述したとおりである。降雪期間中は、AWSの測定結果は表面温度がマイナスになっているが、コンクリート表面(A)では最低でも0℃が維持されており、図14に示したようにシステムの融雪機能が十分に作用することで、コンクリート面が露出していた事実を支持している。

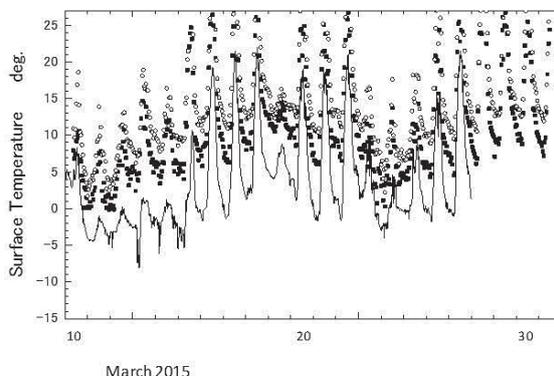


図15. 小規模融雪システム上のAとCおよび自動気象観測装置で測定された表面温度(2015年3月10日～3月31日)

#### 4. 解析結果

##### 4.1 積雪構造の推定

今回の観測では、対象地点の積雪について、雪質、密度、温度構造等の測定は行われていない。そこで、気象データから積雪構造を推定するモデルを用いた推定を試みた。積雪の変質過程の計算

には、スイス国立雪・雪崩研究所において開発された「SNOWPACK」を用いた。このモデルは、図16に示すように気温、降雪量、下向きの長・短波放射量、相対湿度、風向・風速等の入力から積雪表面の熱収支と質量収支を計算し、雪質、密度、雪温等を時系列データとして出力する。元来ヨーロッパアルプスの高山域の積雪を対象としていることもあり、当初は日本を含む温暖積雪地域での観測結果との間に相違がみられた。しかし、アルベドの値、初期積雪密度、融雪過程

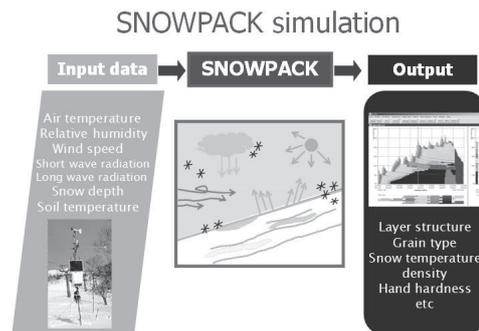


図16. 積雪変質モデルSNOWPACKの概念図

の計算手法等に改良を加えることで、北海道のニセコ、本州の新庄、長岡等での積雪断面観測の値とも高い精度で一致するようになり、実用可能なレベルに達した。融雪システムを設置した地点に設置したAWS(図7)により得られたデータ(図10から図12)を入力して求められた、2015年1月31日から3月14日に至る積雪構造(雪質)の計算結果を図17に、また密度分布を図18に示す。これらによれば、例えば積雪深が約40 cmに達した2月15日は、積雪表面から15 cmは新雪からこしまり雪で積雪密度は150 kg/m<sup>3</sup>、それより以深はざらめ雪から成り、とりわけ地表面から12 cmまでは400 kg/m<sup>3</sup>という高密度の雪が積もっていた様子が見られる。3月10日以降の降雪も、当初は10 cmを超える新雪から成る積雪をもたらしたが、気温の上昇に伴って、約1日後には全層が密度200 kg/m<sup>3</sup>程度のざらめ雪に変質している。以上の結果は、当該個所に仮に融雪システムが設置されていなかった場合に、どのような構造をもった積雪がどの程度の量、積もっていたかを示すものであるが、先に述べたように、今回性能試験を実施した小規模融雪システムは、これらを完全に融かしてしまう能力を有していたことになる。

なお、2月15日は図12や図17に示すように、0時から5時にかけての5時間で12 cmの積雪の増加があった。つまり、本融雪システムは2.4 cm/hの強度をもつ降雪に対しても、それらを全て融解しコンクリート路面を露出する機能を有していたことが観測から明らかになった。

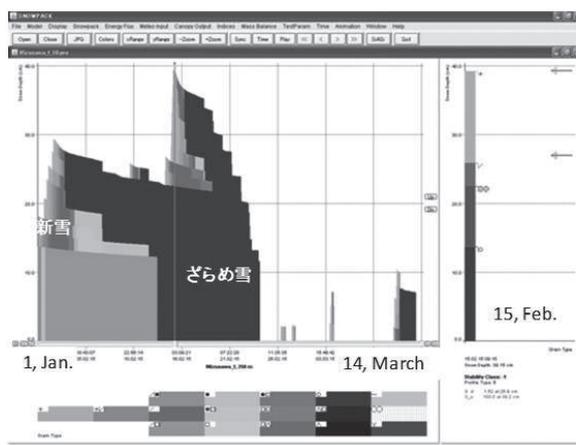


図17. SNOWPACKで計算された積雪構造I (雪質)

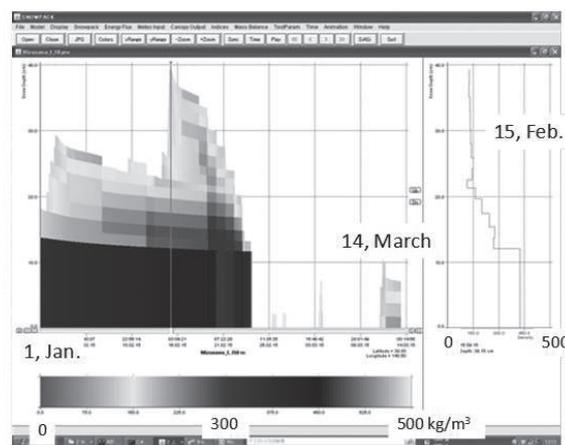


図18. SNOWPACKで計算された積雪構造II (積雪密度)

## 4.2 融雪システムがもたらす熱流束の見積り

以下では、本融雪システムからコンクリート表面にもたらされる熱流束の大きさを、気象観測データとシステム内で計測された温度結果を用いて概算する。

地表面における熱収支は、一般に以下のように表すことが出来る。

$$S \downarrow + S \uparrow + L \downarrow + L \uparrow = H + IE + G \quad (1)$$

ここで $S$ は短波放射量( $W/m^2$ )、 $L$ は長波放射量( $W/m^2$ )で $\downarrow$ は下向き、 $\uparrow$ は上向きを表す。また、 $H$ は顕熱フラックス( $W/m^2$ )、 $IE$ は潜熱フラックス( $W/m^2$ )、 $G$ は地中熱流量( $W/m^2$ )であるが、ここでは、融雪システムの温水パイプからコンクリートを経て表面に供給される熱量(熱流束)に対応する。なお、上向きの短波放射量は $S \uparrow$ は、コンクリートのアルベド(0.4)を用いると、

$$S \uparrow = -0.4 S \downarrow \quad (2)$$

さらに上向きの長波放射量は $L \uparrow$

$$L \uparrow = -\sigma T_s^4 \downarrow \quad (3)$$

とあらわすことができる。ここで、 $\sigma$ はStefan Boltzman定数( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ )、 $T_s$ は融雪システムのコンクリートの表面温度(K)である。

また、顕熱輸送量 $H$ は、以下のバルク式で推定が可能である。

$$H = C_p \rho_a C_H U (T_s - T_a) \quad (4)$$

$C_p$ は空気の定圧比熱( $= 1005 J/kg K^{-1}$ )、 $C_H$ は顕熱輸送に関する交換係数(バルク係数)で、

$$C_H U = 0.0027 + 0.003 U^{0.5} \quad (5)$$

$T_a$ は気温(K)、そして $U$  (m/s)は水平風速を表す。ここで、コンクリート表面が乾燥していると仮定すると、潜熱輸送 $IE$ の寄与は無視できから、(1)式に(2)から(5)式を代入することで、

$$(1 - 0.4) S \downarrow + L \downarrow - \sigma T_s^4 - C_p \rho_a C_H U (T_s - T_a) = G \quad (6)$$

が得られる。下向きの短波 $S \downarrow$ 、長波放射量 $L \downarrow$ 、気温 $T_a$ 、そして風速 $U$ は、AWSのデータ(図10、図11)が、また $T_s$ は熱電対による測定値があることから、左辺を計算することで、残差項である右辺の $G$ 、つまり融雪システムによるコンクリート表面への熱フラックスが求められる。(6)式では短波放射量(日射)が他の項に比べて日中は絶対値が著しく大きく、かつ変化量も多大である。そこで日射の寄与が無視できる夜中(午前0時)を対象に、図5のAについて、3月16日、18日、22日、27日の4日間について、 $G$ を算出した結果を表1に示す。表中には、Aにおいてコンクリートに埋め込まれたパイプの表面と水平方向に10 cm( $= \Delta X$ )離れたコンクリート内部の温度差( $\Delta T$ )から、次式を用いて算出した熱流束 $Q$ も記した。

$$Q = -\kappa \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (7)$$

なお、 $\kappa$ はコンクリートの熱伝導率( $= 1.2 W/m K$ )である。熱収支の残差から算出した値の方

表1. 融雪システムのコンクリート表面から供給された熱フラックスの推定値  
 ①熱収支の残差、②温水パイプとコンクリート内部の温度差から算出

	March 16	March 18	March 22	March 27	
①	118	109	109	96	W/m <sup>2</sup>
②	135	136	121	124	

が、潜熱の寄与を無視したこともあってやや小さめではあるが、パイプの表面とコンクリート内部の温度差から求めた値とおおよそ一致しており、およそ95～135 W/m<sup>2</sup>の熱量が融雪システムから供給されていたことが推測される。

## 5. まとめと今後の課題

地中を熱源とし、二酸化炭素ヒートポンプ給湯器と埋設管方式による温水循環で家屋周辺の無人融雪を行なうシステムの開発を目的に、本研究ではまずシステムの基本要素である直線部、曲がり部(U字部)を含む小規模融雪システムを岩手県奥州市の試験地に施工した。そして計37箇所K型熱電対を設置して、2015年1月23日から温度データを収録した。また、システム近傍に自動気象観測システム(AWS)を設置して、風向・風速、積雪深、気温、湿度、長波・短波放射、積雪表面温度を測定した。また、インターバルカメラにより気象状況の推移とコンクリート路面上の状態のモニタリングを行った。その結果、本融雪システムは2.4 cm/hの降雪強度の期間も含めた全冬期間、積雪に覆われることなくコンクリート面を露出させる機能を有していることが明らかになった。観測された温度と気象データを用いて、熱収支解析と簡単な熱伝達の解析を行った結果、本システムは95～135 W/m<sup>2</sup>の熱量を供給していることも確認された。

一般に1 cm/hの降雪強度の場合には、100 W/m<sup>2</sup>の設備で降雪をほとんど即時に融かすことができるとされている<sup>9)</sup>。今回の測定結果はほぼそれと一致するが、2月15日の2.4 cm/hの降雪強度に対しても十分対応できることが確認された。一方で、一日中、雪が平均的に降っている場合はほとんど雪は残らないが、10 cm/hを超える大雪の場合には仮にシステムの能力が追いつかず数cmの雪が積もっている状態でも、その日のうちに消えてしまえば十分満足できるとすると、1月から2月は100 W/m<sup>2</sup>、12月や3月頃は70 W/m<sup>2</sup>またはそれ以下で良いとの報告もある<sup>9)、10)、11)</sup>。

今後は、熱電対により計測された温度データを詳細に解析することで、本システムの温水、パイプ、コンクリートそれぞれの間の熱伝達特性を再現するモデル(シミュレーター)を構築し、これをもとに実用化に向けた最適なシステムの設計に着手したい。また、前述のようにシステムの熱供給量を抑えた状態でも十分な融雪効果が期待できることから、温水の流量を調節する等の方法で更なる省資源化を目指し、引き続き現地での測定を継続していく予定である。

## 謝辞

本研究成果は、名古屋大学大学院エコトピア科学研究所 長谷川達也教授との共同研究によるものである。また、融雪システムの施行と冬期間の観測にあたっては工藤建設(株)の全面的な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 2014年2月3日 朝日新聞 名古屋支社朝刊.
- 2) 高橋博、中村勉編著、雪氷防災 ー明るい雪国を創るためにー、白亜書房、p.194、1986.
- 3) 宮本年男、大内田聡、長谷川達也、劣化およびレトロフィットを伴うヒートポンプシステムのサイクルシミュレーション、日本機械学会論文集、B編、76(767)、1075-1081、2010.
- 4) Hasegawa, T., Murayama, K., and Nagano, H., Cycle Simulation of Heat Pump, International Symposium on EcoTopia Science 2013, Nagoya, December 9-11, P-3-24, 2013.
- 5) Bartelt, P. and M. Lehning. 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part I. numerical model. Cold Reg. Sci. Technol. 35(3), 123-145.
- 6) Hirashima, H., Nishimura, K., Baba, E., Hachikubo, A. and M. Lehning, SNOWPACK model calculations of snow in Hokkaido, Japan. Annals of Glaciology, Vol. 38, 123-129, 2004.
- 7) Yamaguchi, S., Sato, A. and Lehning, M., Application of the numerical snowpack model (SNOWPACK) to the wet-snow region in Japan. Annals of Glaciology, Vol. 38, 266-272, 2004.
- 8) Nishimura, K., Baba, E., Hirashima, H. and Lehning, M. Application of SNOWPACK model to snow avalanche warning in Niseko, Japan. Cold Regions Science Technology, 43, 62-70, 2005.
- 9) 安濃恒友、高梨良一、齊藤周次、消雪システムに関する研究. 山形大学記要(工学)、15、1、1-18、1978.
- 10) 安濃恒友、可逆管装置による道路の消雪(太陽熱利用を兼ねた消雪方式の54年度冬期における実験経過). 地下水とエネルギー、3、2-11、1980.
- 11) 安濃恒友、可逆管装置による道路の消雪(55年度冬期の実験経過). 地下水とエネルギー、5、1-10、1981.