

## 太陽熱集熱器とPCMを組み合わせた外気負荷削減装置の開発 その3 数値モデルによるシステムの検討と積雪による日射量の変化

正会員 ○高山裕香子\*1      同      森 太郎\*2  
同      石戸谷裕二\*3      同      菊池 洋\*4  
同      羽山 広文\*5      同      菊田 弘輝\*6

### 4. 環境工学-8. 熱 太陽熱集熱器、PCM、外気負荷削減、数値モデル、日射量

#### 1. はじめに

近年、北海道の住宅は高断熱・高气密化の進展により断熱性能や気密性能が高まり、これ以上の断熱性能の向上による省エネルギー化が厳しい現状となっている。そこで今後、より省エネルギー化を目指すためには日射を利用した外気負荷の削減に注目する必要がある。しかし、日射を得ることができる時間帯は在宅人数の少ない日中のみであるという点から、太陽熱を夜間に移行できる蓄熱システムと組み合わせることが重要になる。

そこで本研究では、既往の研究<sup>1), 2)</sup> から蓄熱材の一つであるPCMに注目し、太陽熱集熱器と組み合わせることにより、日中得られる太陽熱の夜間利用を可能とする外気負荷削減装置の開発を目的とし、実験、解析、実測によってシステムの実用性を検討した。

以前の報告<sup>3)</sup>では、太陽熱集熱器とPCMを組み合わせた実験装置を作成し、実験を行った。その結果、PCMによる太陽熱の夜間移行が可能だということ、太陽熱集熱器の効率が約41%、放熱時間が短かったため今後はPCMの融点の設定が必要であることが明らかになった。本報では、システムの実用性を検討するため、シミュレーションを行っ

た。さらに、太陽熱集熱器を実験住宅に取り付け、積雪による日射量の変化を調べた。

#### 2. 数値モデルによる検証

##### 2.1 数値モデルの作成

図1の実験装置を作成し、表1の計6通りの実験を行い、装置内の空気温度とPCMの表面温度を測定した。その実験を基に数値モデルを作成し、表2の計算条件において実験結果との整合性を検証した。モデルは図1の実験装置のPCMの設置部分とし、そのモデルを10分割にして各空間内の空気温度を算出した。風量、空気とPCM間の熱伝達率、PCMの質量をパラメータとして解析を行った。実験においてのPCM2通過後の中間位置の空気温度を実験値の出口温度、解析においてモデルの外に空気が流れる直前の空気温度を解析値の出口温度とし、比較した。

##### 2.2 実験結果と解析結果の比較

図2、3は実験A1、B1の結果である。ともに実験値と解析値が概ね一致したといえる。また実験A2、B2においても同様な結果が得られた。さらに、表3より融解、凝固ともに風量が小さいほど空気とPCM間の熱伝達率が小さいことがわかった。しかし、実験A3、B3では実験値と解析値に差

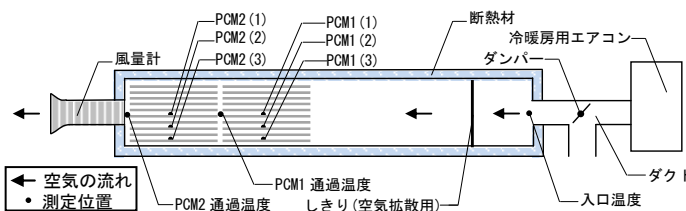


図1 実験装置の平面図、測定位置の名称

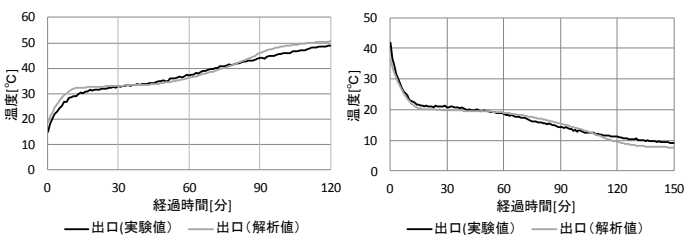


図2 解析結果(実験A1)

図3 解析結果(実験B1)

表1 実験条件

PCM	加熱 (50°C)			冷却 (10°C)			
	風量 [m³/h]	120	60	20	120	60	20
実験名	A1	A2	A3	B1	B2	B3	

表2 計算条件

空気の比熱 [J/kg・K]	1006
空気の密度 [kg/m³]	1.2
モデルの容積 [m³]	0.081
断熱材の面積 [m²]	0.81
断熱材の容積比熱 [J/m³・K]	30
断熱材の容積 [m³]	0.0405
断熱材中心までの熱貫流率 [W/m²・K]	1.38
PCMの面積 [m²]	0.1064
PCMの融点 [°C]	26
PCMの凝固点 [°C]	24
PCMの融解潜熱量 [J/kg]	200000
PCMの比熱 [J/kg・K]	2400 (相変化時以外)
	100000 (相変化時)

Development of the System Reducing Fresh Air Load Using Solar Collector and PCM

Part3 Examination of System by Numerical Model and Solar Radiation Change by Snow Accumulation

TAKAYAMA Yukako et al.

が生じた。その要因として、この2通りの実験では風量が小さいため、実験装置内の上下方向に温度分布が生じ、場所によって融解または凝固の速さが異なっていることが考えられる。ただし、風量60m<sup>3</sup>/h以上のときの実験値と解析値の相対誤差による平均二乗平方根が4~12%だったため、本モデルの使用に問題はないとした。

### 3. シミュレーション

#### 3.1 シミュレーション概要

システムの実用性を検討するため、シミュレーションソフトESP-r<sup>4)</sup>を用いて図4、表4、5の住宅モデルを作成し、室温変動と室内の外気負荷を算出した。この住宅モデルは実際に建設された住宅を参考にした。また、太陽熱集熱器の台数、PCMの質量、PCMの融点によるシステムの実用性の違いを検討するため、前章の数値モデルを用いて、表6の14通りのシミュレーションを実施した。空気の流れはPCMを設置しないcase1、8のとき、太陽熱集熱器から直接室内とし、PCMを設置する他のケースは太陽熱集熱器から前章のモデル、室内の順とした。シミュレーション時の条件として、前章の解析結果から風量を60m<sup>3</sup>/h、PCMの熱伝達率を6W/m<sup>2</sup>K、以前の報告による実験結果より太陽熱集熱器の効率を40%としてシミュレーションを

実施した。札幌、釧路、旭川、函館の計4か所の気象データを用い、対象期間を外気負荷が多い10月~5月とした。図5に各地点の10月~5月の月平均日射量と月平均外気温を示す。

#### 3.2 外気負荷削減量の算出

図6より太陽熱を得られる昼間に外気負荷削減量が多くなるが、この時間帯は在宅人数が少ない。よって、PCMによる夜間移行が可能かを検証するため、自然換気によって室温が20.5℃以上の時間をオーバーヒート(以下OH)と定義し、OH以外の外気負荷削減量を以下の式より算出した。

$$H_{SW} = \rho V (\theta_{SW} - \theta_{out}) \quad (1)$$

$$H_{PCM} = \rho V (\theta_{PCM} - \theta_{out}) \quad (2)$$

式(1)、(2)より得られた外気負荷削減量を1ヵ月ごとに積算し、各地点別、各ケース別に算出した。また各地点別、各ケース別の室内外気負荷に対する外気負荷削減率を算出し、8ヵ月分の削減率の平均値を算出した。それらの結果を図7に示す。case1、8ではPCMを設置していないため、太陽熱を有効に利用しておらず、OH以外では削減量が小さい。一方、PCMを設置している他のケースでは、case1、8に比べ削減量が大きく、これによりPCMによる太陽熱の夜間移行が可能となった。また地点別にみると、全てのケースで釧路の削減

表3 パラメータ

実験名	風量 [m <sup>3</sup> /h]	熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> ·K]	PCMの質量 [kg]
A1	120	11	11.4
A2	60	6	10.26
B1	120	11	10.26
B2	60	6	9.12

表5 各部材の仕様

モデル名	部位名	材料名	厚さ [mm]
住宅	外壁	wood board	10
		EPS	180
		wood board	10
		glasswool	100
	床	wood board	10
		wood board	20
	天井	aluminium	3
		air gap	300
		glasswool	300
	床下	外周面	EPS
concrete			150
地盤面		EPS	50
		earth std	200
		gravel based	150
		EPS	100

表6 シミュレーション内容

太陽熱集熱器	PCMの質量 [kg]	PCMの融点 [°C]	ケース名
1台	PCMなし	26	case1
		17	case2
		12	case3
		12	case4
	34.2	26	case5
		17	case6
		12	case7
		12	case8
2台	PCMなし	26	case9
		17	case10
		12	case11
		26	case12
	34.2	26	case13
		17	case14
		12	
		12	

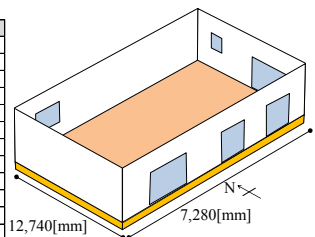


図4 住宅モデル(屋根省略)

表4 住宅モデルの概要

間口×奥行 [mm]	12740×7280
床面積 [m <sup>2</sup> ]	92.7
高さ [mm]	床下: 400、住宅: 2700
換気方法	自然換気
換気回数 [回/h]	床下: 0、住宅: 0.5
暖房設定温度	20℃

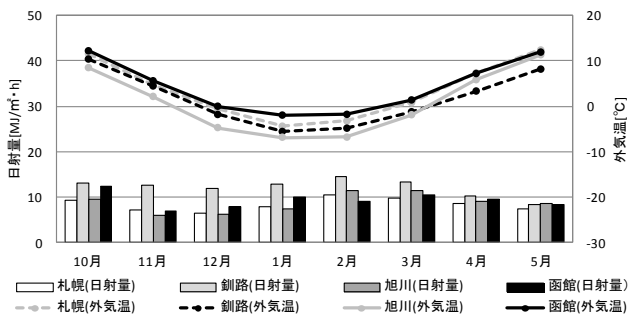


図5 各地点の月平均日射量と月平均外気温

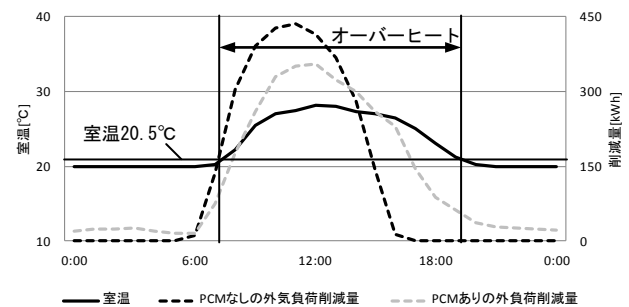


図6 オーバーヒートの定義

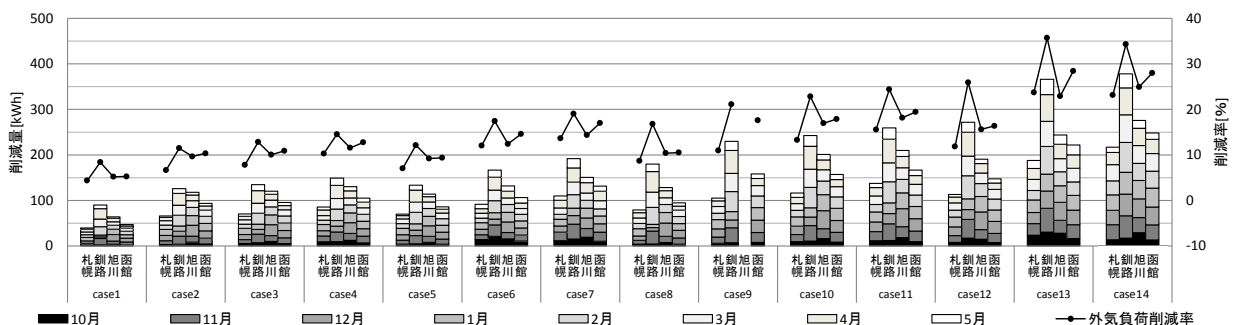


図7 各地点の月別外気負荷削減量と外気負荷に対する月平均外気負荷削減率

量が最も大きいことがわかった。その要因として、図5より釧路は他の地点よりも冬季の日射量が大きく、そのため集熱量が大きくなったからだと考えられる。

### 3.3 システムの検討

システムの検討を行うため、太陽熱集熱器の台数、PCMの質量、PCMの融点をパラメータとした解析を行った。このときの解析で用いた気象データは札幌のみとし、各ケース別に10～5月のOH以外の外気負荷削減量を算出し、積算した。その結果を図8、9、10に示す。

#### (1) 太陽熱集熱器の台数別

図8より、太陽熱集熱器の台数を増やす場合、PCMの条件に関わらず削減量の増加がみられ、中でもPCMの質量が大きく、融点が低いcase6、13(□)とcase7、14(○)では大幅な削減量となった。つまり太陽熱集熱器の台数を増やす際に、さらに削減量を大きくしたい場合は融点が低めのPCMを多く設置しなければいけない。

#### (2) PCMの質量別

図9よりcase10、13(□)とcase11、14(○)のみ大きな削減量がみられた。これらに共通している条件は太陽熱集熱器を2台設置している点だが、同様に太陽熱集熱器を2台設置しているcase9、12(△)は削減量の増加がみられなかった。つまりPCMの質量を変化させる際には、太陽熱集熱器を2台設置し、かつPCMの融点が低い条件以外では削減量の増加は見込めない。

#### (3) PCMの融点別

図10より太陽熱集熱器を1台設置しているcase2～7(▲、■)では融点の変化及びPCMの質量の大小に関わらず、削減量の著しい増加はみられなかった。

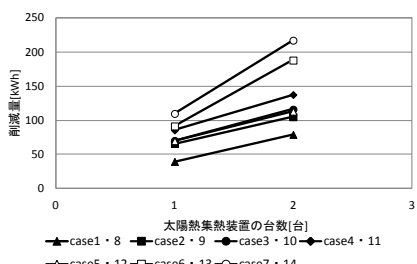


図8 太陽熱集熱器の台数別の削減量

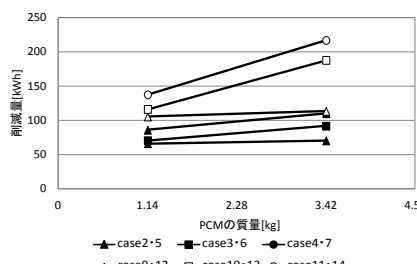


図9 PCMの質量別の削減量

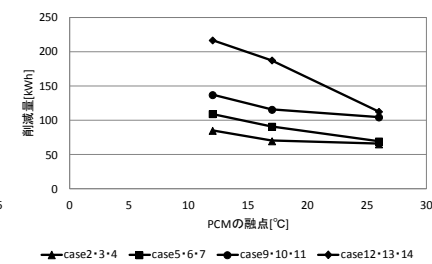


図10 PCMの融点別の削減量

表7 実験住宅の概要

名称		パッシブソーラ実験住宅	
所在地		北海道江別市	
竣工		平成10年11月	
面積	建築延床面積	143.37㎡	
	暖房面積	142.56㎡	
建築構法		新在来工法・横間柱構法・基礎断熱構法	
断熱仕様	外壁	GW100mm(細16K)+GWボード25mm(64K)	
	屋根	GW200mm(細16K)	
	窓	PVCサッシ Low-Eペア	
基礎	基礎	基礎: FP100mm(B-3)	
	土間下	土間下: FP30mm(B-2)	
南面窓仕様	窓面積	26.63㎡(18.26㎡)	
	窓断熱(南面)	断熱スクリーン	
断熱性能	熱損失	166W/K	
	熱損失係数	1.62W/㎡・K	
	総隙間相当面積	40cm <sup>2</sup>	
設備	換気方式	パッシブ換気	

た。一方、太陽熱集熱器を2台設置しているcase9～14(●、◆)ではPCMの質量が大きいcase12～14(◆)のみ大幅な削減量の増加がみられた。これより、さらに外気負荷を削減するためには、太陽熱集熱器を2台設置し、かつPCMの質量が大きいシステムのみPCMの融点の検討が必要と考えられる。しかし、PCMの融点が低いケースでは冬季以外の期間にPCMが1日融解しており、夜間の外気負荷の削減が少なくなるため、外気負荷を削減したい期間を考慮して、融点を決める必要がある。以上の点を考慮し、今後さらなるシステムの向上を目指していく。

## 4. 実測

### 4.1 実測の概要

実際に太陽熱集熱器を実験住宅に取り付け、実測を行った。実験住宅の概要を表7、実験住宅の平面図を図11、実験住宅の外観を写真1に示す。太陽熱集熱器は写真2のように南面の外壁に設置した。実測期間は積雪があった3月13日～4月15日とし、5分間隔で日射量、外気温、太陽熱集熱器からの空気温度を測定した。また日射量は鉛直面日射量、地表面の積雪による反射を除いた鉛直面日射量、積雪による反射のみの鉛直面日射量の3種類を測定した。太陽熱集熱器のパネル面に取り付けた日射計で鉛直面日射量を測定し、南面の窓に2台の日射計を取り付け、日射計の間に窓に対して垂直にしきりを設け、しきりの上部の日射計で地表面の積雪による反射を除いた鉛直面日射量、下部の日射計で積雪による反射のみの鉛直面日射量を測定した。

### 4.2 実測結果

図12に実測期間中、最も鉛直面日射量が多い3

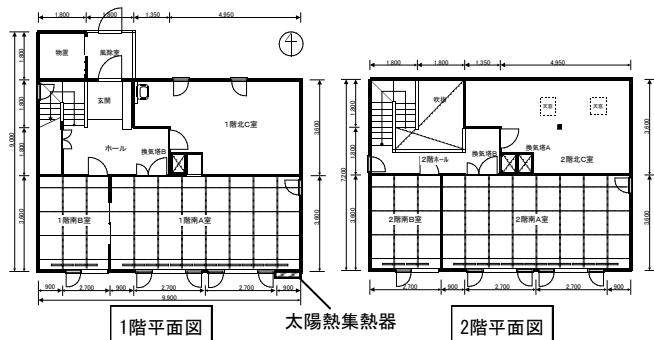


図11 実験住宅の平面図

月14日の各日射量の推移を示す。鉛直面日射量は積雪による反射の影響により、地表面の積雪による反射を除いた鉛直面日射量に比べて大きいことがわかった。また日積算地表面の積雪による反射を除いた鉛直面日射量と積雪による反射のみの鉛直面日射量の結果を図13に示す。さらに日積算鉛直面日射量に対する日積算積雪による反射のみの鉛直面日射量の割合を算出し、図13に示す。期間は3月13日～19日のみとした。図13より、天気に関わらず、積雪による反射のみの鉛直面日射量の割合が約30%だということが確認された。つまり、積雪時には日射量が増加するため、集熱量の増加が期待でき、解析以上の外気負荷の削減が予想される。

#### 4.3 集熱量による太陽熱集熱器の効率の算出

太陽熱集熱器の効率を調べるため、太陽熱集熱器による集熱量を以下の式より算出した。

$$Q_{SW} = \frac{cpV(\theta_{in} - \theta_{out})}{A_{SW}} \quad (3)$$

式(3)で算出した集熱量と日射量に対する近似直線の傾きが太陽熱集熱器の効率となるため、図14より効率が約37%であることがわかった。以前の報告では約41%という結果となったが、ほぼ同様な結果が得られたといえる。しかし、本実測では太陽熱集熱器から室内へと空気を流すためのダクトが外気にふれており、太陽熱集熱器からの空気が冷やされた恐れがあるため、本来ではさらに良い効率が期待できる。



写真1 実験住宅の外観



写真2 太陽熱集熱器

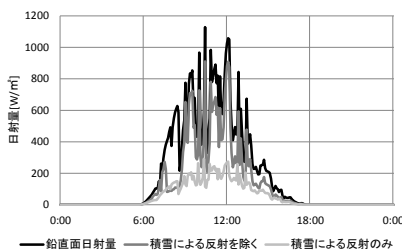


図12 日射量の推移

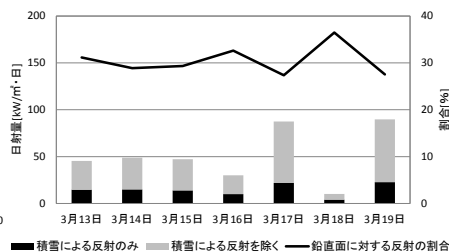


図13 積雪による日射量の比較

#### 記号表

$H_{SW}$	: PCMなしの時のOH以外の外気負荷削減量[W]
$c$	: 空気の比熱[J/kg・K]
$\rho$	: 空気の密度[kg/m³]
$V$	: 風量[m³/s]
$\theta_{SW}$	: PCMなしの時の出口温度[°C]
$\theta_{out}$	: 外気温度[°C]
$H_{PCM}$	: PCMありの時のOH以外の外気負荷削減量[W]
$\theta_{PCM}$	: PCMありの時の出口温度[°C]
$Q_{SW}$	: 面積あたりの集熱量[W/m²]
$\theta_{in}$	: 太陽熱集熱器からの空気温度[°C]
$A_{SW}$	: 太陽熱集熱器のパネル面積[m²]

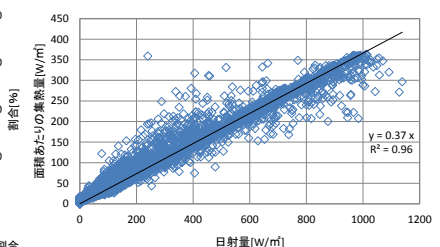


図14 集熱量と日射量の比較

## 5. 総括

太陽熱集熱器とPCMによるシステムにおいて、数値モデルを用いてシミュレーションを行った。その結果、PCMによる夜間移行が確認できた。また気象条件やPCMの融点等の設定により、さらなるシステムの向上が期待できる。さらに、実測結果から積雪によって日射量の増加が期待できる。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、JSR株式会社の宮地巧氏、株式会社マツナガの松永潤一郎氏、北海道電力総合研究所の小笠原一隆氏、北海道職業能力開発大学の三浦誠氏、三浦ゼミの学生の皆様には多大なる御協力を賜りました。記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 石戸谷裕二、潜熱蓄熱材(PCM)を適用した放射暖冷房システムに関する研究、北海道職業能力開発大学校紀要第26号、pp. 45-55、2009. 12
- 2) 長野克則他、粒状潜熱蓄熱材利用による給気調温効果と夏季における住宅の換気システムへの適用可能性、日本建築学会計画系論文集第562号、pp. 61-67、2002. 12
- 3) 高山裕香子他、太陽熱集熱器とPCMを組み合わせた外気負荷削減装置の開発、空気調和・衛生工学会北海道支部第48回学術講演会論文集、pp. 7-10、2014. 03
- 4) 小玉祐一郎他、ESP-rとRadianceによる建築環境シミュレーション入門、オーム社、2011

\*1 北海道大学大学院工学院 修士課程  
 \*2 北海道大学大学院工学研究院准教授・博士(工)  
 \*3 室内気候研究所・博士(工)  
 \*4 コーナー札幌株式会社  
 \*5 北海道大学大学院工学研究院教授・博士(工)  
 \*6 北海道大学大学院工学研究院助教授・博士(工)

Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.  
 Assoc. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.  
 Institute of Indoor Climate  
 Kona Sapporo Co., Ltd.  
 Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.  
 Assis. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.