



Title	空気直接接触型潜熱蓄熱材の熱交換特性
Author(s)	武田, 清香; 長野, 克則; 持田, 徹 他
Description	第9回衛生工学シンポジウム (平成13年11月1日 (木) -2日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 1 建築環境とエネルギー利用 . 1-8
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 9, 38-43
Issue Date	2001-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7140">https://hdl.handle.net/2115/7140</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	9-1-8_p38-43.pdf



1-8

空気直接接触型潜熱蓄熱材の熱交換特性

武田清香(北海道大学)、長野克則(北海道大学)、持田徹(北海道大学)、嶋倉一實(北海道大学)

1. はじめに

現在、電力負荷の平準化やピークカットの達成のために蓄熱は欠かすことのできない技術である。潜熱蓄熱は物質固有の潜熱を利用した蓄熱技術で、融解と凝固の相変化時にそれぞれ吸熱、放熱を行う。コンクリートなどの躯体を利用した顕熱蓄熱に比べ一定温度での熱授受が可能であり、一般に大きい蓄熱密度を持つ。潜熱蓄熱材(Phase change materials,以下 PCM と略)としては無機塩類やパラフィンが有望であり<sup>1)</sup>、無機水和塩を用い深夜電力を利用した潜熱蓄熱式床暖房はこれまでに多くの実施例がある<sup>2)</sup>。最近ではパッシブ的な利用方法として、ペレット化された PCM を建材に混入する技術も注目されている<sup>3), 4), 5)</sup>。一般に潜熱蓄熱システムでは、PCM は金属、プラスチックの容器や、カプセルなどに封入して使用される。その際、凝固時に容器内壁の固相が熱抵抗となり、蓄熱速度や熱の取り出し速度が大きく減少する欠点があった<sup>6), 7)</sup>。またこれまで多くのシステムにおいては熱の利用のためには熱媒と熱交換する必要があった。PCM を熱媒に直接接触させることで熱抵抗を増やさない熱のやり取りが提案され、パラフィンを水やエチレングリコールなどの液体の熱媒と直接接触させ熱交換を行った研究がある<sup>8), 9)</sup>。一方、空気を熱媒とした潜熱蓄熱システムでは容器やカプセルを用いた研究はあるものの<sup>10)</sup>、直接熱交換を行う例はない。そこで本研究では、パラフィンを顆粒状のセラミックスに含浸させた粒状 PCM と空気を直接接触させて熱交換するシステムを新たに提案する。この潜熱蓄熱システムは、粒状 PCM の充填層に空気を通風させて熱交換させるので、シンプルな熱伝達の機構でありながら充填層の形状は自在に決定できる、小さな温度差でも優れた熱伝達係数が得られる、といった特徴を有する。本論文では粒状 PCM を充填したカラム実験とその熱伝達特性について検討したので報告する。

2. 粒状 PCM を用いた通風実験

2.1 粒状 PCM の熱特性

今回用いた PCM はパラフィン系有機物を粒状セラミックスに含有したものである(RUBITHERM GmbH 製 GR25)。粒径は1~3mm、重量組成はセラミックス 65%、パラフィン 35%である。表1は示差走査熱量計(Differential Scanning Calorimeter: 以下 DSC と略)により昇温レート

表 1. DSC による PCM の熱特性

(昇温レート: 1.0°C/min)

融点 [°C]	凝固点 [°C]	潜熱量 [kJ/kg]
23.5	24.9	41.9

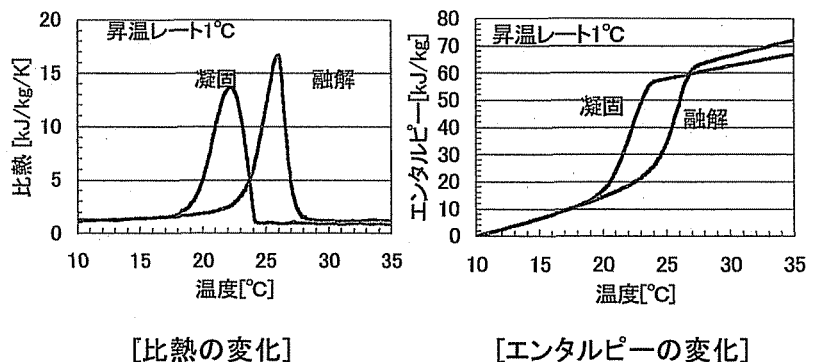


図 1. PCM の比熱とエンタルピー

1.0°C/min で測定した融点、凝固点、潜熱量を示す。融点は 23.5°C、凝固点は 24.9°Cであった。図 1 はそれぞれ DSC より得た比熱とエンタルピーの温度変化である。表 2 に PCM の物性値を示す。かさ密度は 0.78g/cm<sup>3</sup>、間隙率は 42.8%であった。熱伝導率は、非定常線熱源ヒートプローブ法により測定した。凝固時と融解時はほぼ同じで、約 0.13W/m/K であった。

表 2. PCM の物性値

密度[g/cm <sup>3</sup> ]		間隙率[%]
かさ密度	真密度	
0.78	1.36	42.8

熱伝導率 [W/(m·K)]		
5.0°C	15.2°C	42.2°C
0.128	0.130	0.129

## 2.2 カラム実験

### 2.2.1 実験装置の概要

粒状 PCM と空気との直接熱交換の特性を調べるため、円筒カラムを用いた通風実験を行った。実験中、試験室内気温は 20°C 前後、相対湿度は(45±5)%程度であった。実験装置の断面図を図 2 に示す。装置本体は内径 50mm、肉厚 5mm の塩化ビニル管を用いて作成した。PCM 充填層は装置下部 120mm 地点から 230mm で、352g 充填し、かさ密度は 0.78g/cm<sup>3</sup>であった。空気が均一に分散するように高さ 60mm 地点に整流板として穴あき塩化ビニル板を取り付けた。供給空気は恒温庫からエアポンプにより装置下部に送り出された。PCM 充填層を通過した後上部より排気され、流量を測定した。装置本体は約 300mm 角の断熱ボード製の箱に収納し、箱内にはグラスウール 24K を詰め密閉した。T 型熱電対により、円筒中心部における温度を計 17 点について一分ごとに測定した。また充填層の圧力損失を測定した。

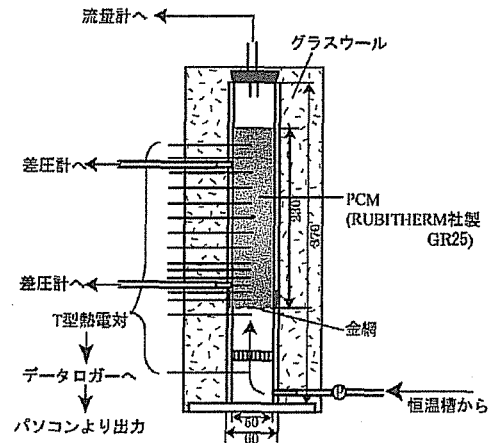


図 2. 実験装置の断面図

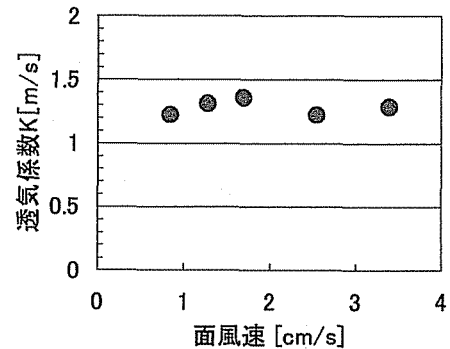


図 3. 透気係数

### 2.2.2 透気係数の測定

給気温度の平均が約 28°C の時の圧力損失を、風量を変え測定した。式(1)に示される透気係数  $K$  を計算し、図 3 に示す。

$$K = v \cdot \Delta H / \Delta p \quad \dots(1)$$

(ここで、 $K$ : 透気係数 [m/s]、 $v$ : 面風速 [m/s]、 $\Delta p$ : 水頭差 [m]、 $\Delta H$ : 高さの差 [m])

図より透気係数  $K$  はこの面風速の範囲では  $1.3 \pm 0.1$  [m/s] となった。

### 2.2.3 実験方法と実験条件

実験の温度条件を入口温度から図 4 のように設定した。このとき融点または凝固点を挟むように初期温度、設定温度を定めた。CASE1 の温度条件は相変化温度に対し上下に約 10°C とし、CASE2 では上下に約 5°C、CASE3

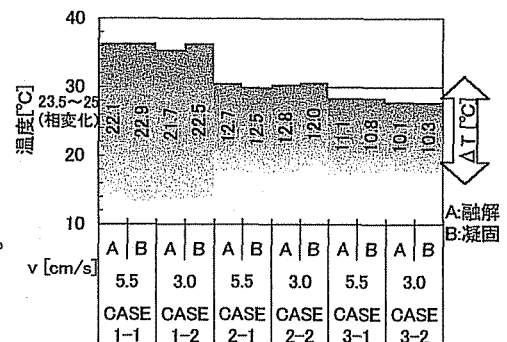


図 4. 実験条件

では上に約 3°C、下に約 5°Cに定めた。それぞれ面風速 5.5cm/s と 3.0cm/s の場合について測定した。図中の、条件 A は蓄熱(融解)、条件 B は放熱(凝固)の過程である。いずれの場合も、実験装置内は十分に融解または凝固をさせ、カラム内の PCM の温度が定常に達した後に、恒温庫の設定温度を変更し実験を開始した。

### 2.2.4 実験結果と考察

充填層入口から高さ 5cm までの、1cm 毎の温度変化を図 5 に示す。融解過程においては全ての条件で、22.5°Cから 24.5°Cの範囲において温度変化の勾配が小さくなっているのがわかる。凝固過程の場合については、25.5°Cから 25.0°Cにおいて温度変化の勾配がほぼ水平になっている。こ

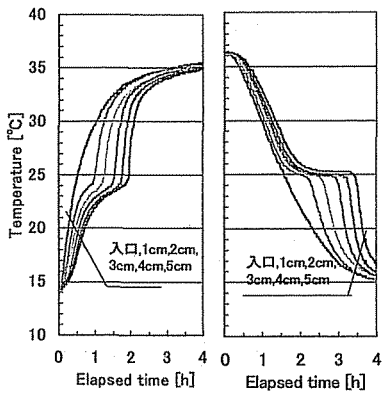


図 5.a 各高さ温度の経時変化(CASE1-1)

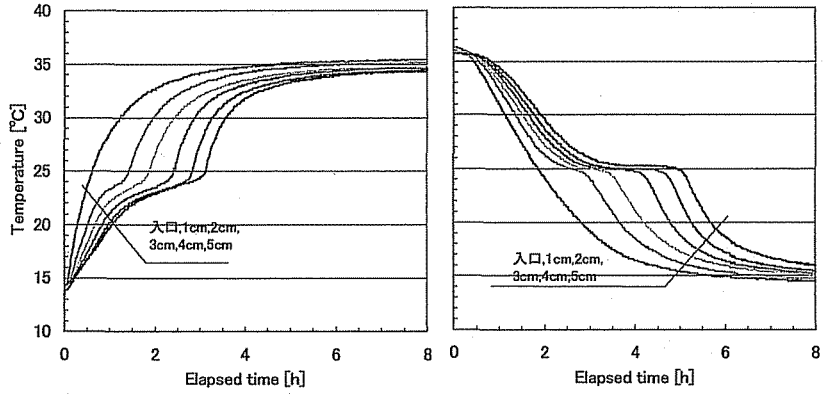


図 5.b (CASE1-2)

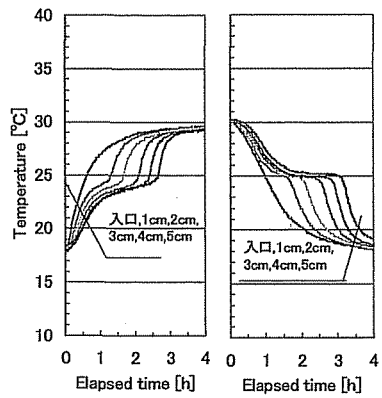


図 5.c (CASE2-1)

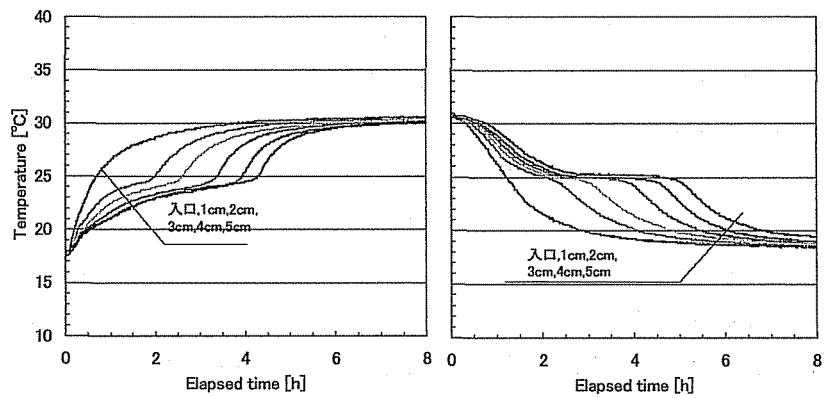


図 5.d (CASE1-2)

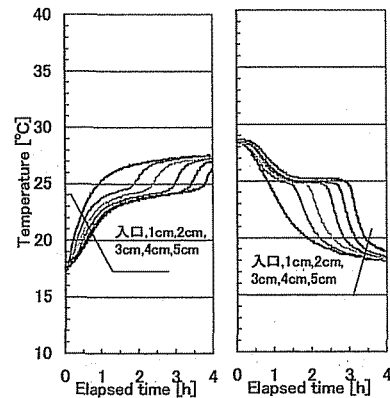


図 5.e (CASE3-1)

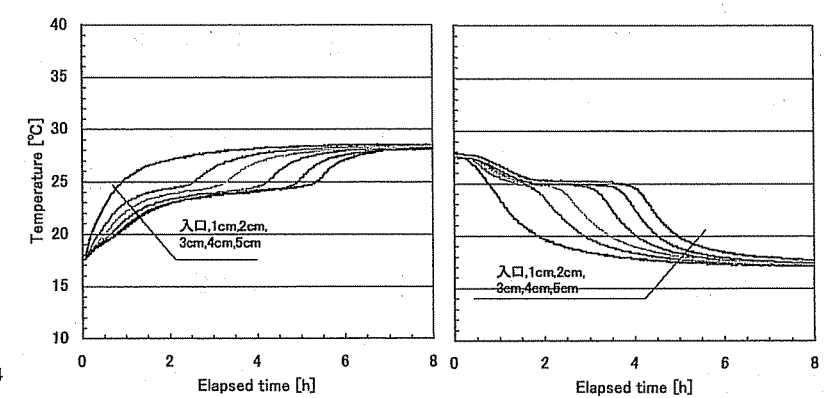


図 5.f (CASE3-2)

れらは PCM の相変化のためである。カラム実験から得られる相変化の温度は上記の DSC 測定結果と一致している。温度変化から過冷却はおこっていないことがわかる。次に相変化の持続時間を検討する。面風速の異なる CASE1-1 と CASE1-2、CASE2-1 と CASE2-2、CASE3-1 と CASE3-2 をそれぞれ比較すると、相変化に要する時間は面風速に応じて減少した。また面風速が同じ場合には、相変化温度と実験後の設定温度との差に大きく依存することがわかる。

そこで式(2)に示す、時間  $t$  を滞留時間  $t'$  で除した無次元時間  $t^*$  を導入して、式(3)で表される単位時間、単位面積あたりの交換熱量  $q_a$  を検討する。

$$t^* = t/t' \quad \dots(2)$$

ここで

$t^*$	: 無次元時間	[-]
$t$	: 時間	[s]
$t' = l/v$	: 滞留時間	[s]
$l$	: 高さ	[m]
$v$	: 出口における面風速	[m/s]

$$q_a = c_{p_a} \cdot \rho_a \cdot v (T_{a0} - T_{al}) \quad \dots(3)$$

ここで

$q_a$	: 単位時間, 単位面積あたりの熱量	[W/m <sup>2</sup> ]
$T_{a0}$	: 時刻 $t$ における入口空気温	[°C]
$T_{al}$	: 時刻 $t$ における高さ $l$ での空気温	[°C]
$c_{p_a}$	: $T_{al}$ に対する空気の比熱	[J/g/K]
$\rho_a$	: $T_{al}$ に対する空気の密度	[g/m <sup>3</sup> ]

図 6 は高さ 5cm での  $t^*$  と  $q_a$  の関係を示したものである。  $q_a$  の正側は融解過程、負側は凝固過程を表している。融解過程において比較すると、温度条件がほぼ同じで  $t'$  が約 1.83 倍異なる CASE1-1 と CASE1-2 では、ほぼ同じ無次元時間  $t^*$  において相変化が起こっていることがわかる。このとき  $q_a$  は CASE1-1 で 580W/m<sup>2</sup>、CASE1-2 で 350W/m<sup>2</sup> であり、  $q_a$  は  $v$  とほぼ比例関係になっていることがわかる。また  $q_a$  が大きく保たれる持続時間は  $t^*$  で  $5 \sim 6 \times 10^3$  程度であった。次に  $v$  が一定で温度幅が異なる CASE1-1, CASE2-1, CASE3-1 を比較する。実験開始後の設定温度と相変化開始温度の差を  $\Delta T_0$  とすると、CASE2-1 の  $\Delta T_0$  は CASE1-1 の 55%、CASE3-1 は 38% となっているのに対し、その時の  $q_a$  の比はそれぞれ 53%、38% である。そのことからピークの高さは  $\Delta T_0$  にほぼ比例することがわかる。また融解過程では安定した吸熱が行われるため、冷房への利用に適しているといえる。一方、凝固過程では融解過程と異なり  $q_a$  は初期に小さく時間とともに増加し、ピークは凝固の終了を表している。ピークの高さはまた  $\Delta T_0$  に比例した。以上より、  $q_a$  は  $\Delta T_0$  と  $t^*$  の影響をうけることがわかる。

式(4)～(7)に従い、相変化が終了するまでの時間を一般化して示す。一般的なステファン数  $Ste$  に熱交換開始からの顕熱分を考慮した(6)式に示す修正ステファン数  $Ste'$  と、無次元積算熱量  $\Sigma Q_a^*$  を導入して大きな  $q_a$  が得られる熱交換が終了するまでの時間について検討する。図 7 は横軸に  $t^*$  と  $Ste'$  の積をとり、  $\Sigma Q_a^*$  の変化を表したものである。横軸  $t^{*i}$  は、  $t^*$  に熱交換開始から終了までの顕熱分を補正したものである。

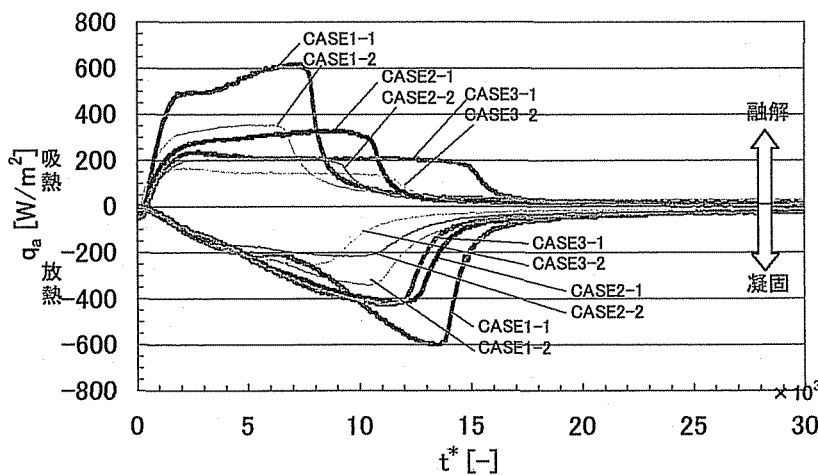


図 6. 無次元時間と空気による交換熱量の関係

$$Q_a = q_a \cdot A \cdot \Delta t \quad \dots(4)$$

$$\Sigma Q_a^* = \Sigma Q_a / \Sigma Q_a \quad \dots(5)$$

$$Ste' = (T_\infty - T_s) / \{L / c_{pPCM} + (T_s - T_0)\} \quad \dots(6)$$

$$t^{*'} = t^* \cdot Ste' \quad \dots(7)$$

ここで、

$\Delta t$	: 測定時間幅	[s]
$Q_a$	: $\Delta t$ 間の交換熱量	[J]
$A$	: 容器の断面積	[m <sup>2</sup> ]
$\Sigma Q_a^*$	: 積算無次元熱量	[-]
$\Sigma Q_a$	: 積算熱量	[J]
$\Sigma Q_a$	: 定常に達した時の積算熱量	[J]
$t^{*'}$	: 修正無次元時間	[-]
$Ste'$	: 修正ステファン数	[-]
$c_{pPCM}$	: 固相,液相時の PCM 充填層の比熱	[J/g/K]
$T_\infty$	: 定常時の PCM 充填層の温度	[°C]
$T_0$	: 初期給気温度	[°C]
$L$	: 潜熱量	[J/g]

図より各条件において、 $t^{*'}$ が $(2.0 \pm 0.5) \times 10^3$ の範囲で  $\Sigma Q_a^*$ の増加する割合が急激に小さくなっていることがわかる。この点は相変化を伴う熱交換が終了した時点を表し、潜熱量が全て放出された点といえる。相変化終了時の  $t^{*'}$ に幅が生じたのは、今回の実験で給気に用いた恒温庫の加熱速度や冷却速度の相違が原因と考えられる。また、 $\Sigma Q_a^*$ の傾きが急激に小さくなる地点での  $\Sigma Q_a^*$ の高さの差は、潜熱量に対する保有顕熱量の差である。面風速や温度条件の違いに関わらず、

相変化終了までに要する  $t^{*'}$ の範囲が決定されたことにより、今後修正無次元時間  $t^{*'}$ は PCM 利用時の蓄熱・放熱時間予測の指標として利用できるといえる。

#### 4. まとめ

本論文で得られた結果を要約する。

- 1) DSC により測定した粒状 PCM の融点・凝固点はそれぞれ 23.5°C、24.0°Cであり潜熱量は 43.7J/gであった。
- 2) 円筒カラムに PCM を充填した通風実験から、相変化温度幅は、融解時は 22.5°C~24.5°C、凝固時は 25.5°C~25.0°Cであった。これらは DSC 測定の結果とほぼ一致した。
- 3) 相変化に要する時間は面風速に応じて減少した。また、交換熱出力  $q_a$ は面風速に比例し、最終到達温度と相変化温度の差  $\Delta T_0$ に比例することがわかった。また融解過程では安定した吸熱が行われ、持続時間は CASE1 の時無次元時間  $t^*$ で  $5 \sim 6 \times 10^3$ だった。
- 4) 無次元積算交換熱量  $\Sigma Q_a^*$ の検討から、無次元時間  $t^*$ に修正ステファン数  $Ste'$ を乗じた修正無次元時間  $t^{*'}$ は、相変化が終了するまでの時間を予測するのに用いることができるといえる。今回の実験では、いずれの場合も  $t^{*'}$ が $(2.0 \pm 0.5) \times 10^3$ で相変化が終了していた。

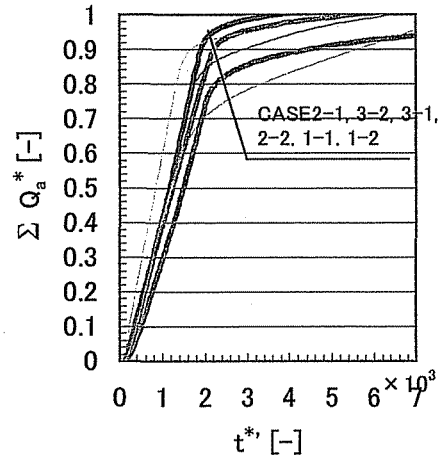


図 7a.  $\Sigma Q_a^*$  の  $t^{*'}$  による変化  
(融解時)

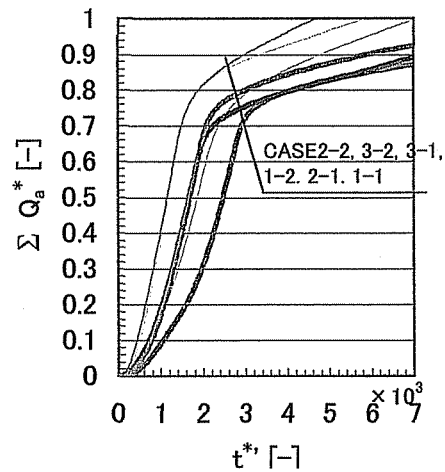


図 7b.  $\Sigma Q_a^*$  の  $t^{*'}$  による変化  
(凝固時)

参考文献

- 1) 小坂岑雄, 朝比奈正: 蓄熱の研究(その 7)冷暖房・給湯用潜熱型蓄熱材について, 名古屋工業技術試験所報告, pp.53~61, 1980
- 2) 鳩野正和, 浅野良晴: 学校建築における深夜電力を利用した潜熱蓄熱式床暖房の予測制御法に関する研究, 日本建築学会論文集, No.469, P.25, 1995
- 3) 近藤武士, 射場本忠彦, 坪田裕二, 鎌田元康: 潜熱蓄熱壁体による躯体蓄熱システムに関する研究 潜熱蓄熱ボードの性能把握および適応効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, pp.23~29, 2001
- 4) Ival O. Salyer, Anil K. Sircar, Sudhakar Dantiki: Advanced Phase Change Materials and Systems for Solar Passive Heating and Cooling of Residential Buildings, Final Technical Report of University of Dayton Research Institute, pp.97~123, 1989
- 5) Ival O. Salyer and Anil K. Sircar: Development of PCM Wallboard for Heating and Cooling of Residential Buildings, Proceedings of the U.S. Department of Energy Thermal Energy Storage Research Activities Preview, 1989
- 6) 朝比奈正, 小坂岑雄, 埜田博史: 蓄熱の研究(第 3 報)無機水和塩の凝固時における熱移動プロセス, 名古屋工業技術試験所報告, pp.84~91, 1979
- 7) 朝比奈正, 田尻耕治, 山田康雄, 西尾敏幸: 蓄熱の研究(第 10 報)カプセル型潜熱蓄熱体における熱伝達性の評価, 名古屋工業技術試験所報告, pp.1~4, 1988
- 8) 斎藤明宏, 斎藤彬夫, 宇高義郎, 奥田健一, 片山功蔵: 直接接触凝固・融解による潜熱蓄熱の基礎研究—第 2 報: n-エイコサンを PCM とした直接接触凝固の伝熱特性—, 日本冷凍協会論文集, pp.51~59, 1986
- 9) Hideo Inaba, Kenji Sato: Latent Cold Heat Energy Storage Characteristics by means of Direct-Contact-Freezing between Oil Droplets and Cold Water Solution, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No.13, pp.3189~3200, 1997
- 10) 山羽基, 祝京子, 見崎信也: 空調 2 次側に設置する潜熱蓄熱システムの熱特性に関する研究, 日本建築学会論文集, 2000