

二重管形潜熱蓄熱槽の伝熱特性 Heat Transfer Characteristics of a Double-tube Latent Heat Storage Column

高島 武雄, 飯田 嘉宏*

Takeo TAKASHIMA and Yoshihiro IIDA*

1. はじめに

熱エネルギーを蓄える蓄熱方式には, いくつかの種類があるが, このうち潜熱を利用する方法は, 熱エネルギーの放出に伴う温度変化が少ないことや, 蓄熱密度が大きいという利点を持っている. このため, 太陽熱エネルギーや低温廃熱の蓄熱器として利用するための研究が行われている. しかしながら, 一般に蓄熱材の熱伝導率は小さいため, 熱伝達特性が悪いという問題がある. 従って, この欠点を克服するために, 実用化に当たってはフィンを用いること⁽¹⁾や, 蓄熱材をカプセルに詰めること⁽²⁾, さらにカプセル内の蓄熱材に高熱伝導性の炭素繊維を添加する⁽³⁾方法などが提案されている. これらの方法の有効性を調べるために斎藤ら⁽²⁾は, 水平に置かれたカプセル型蓄熱槽の蓄熱および放熱特性についての実験と数値解析を行っている. 一方, 斎藤ら⁽⁴⁾は, 垂直円柱の場合についての数値解析を行って, それぞれの方法の有効性を確認評価している.

しかしながら潜熱蓄熱槽の基礎的な動特性については十分なデータが得られていないと思われる. そこで本報告では, 蓄熱槽を熱交換器と考え, そのもっとも基本的なタイプである垂直二重管型潜熱蓄熱槽の動特性について実験と数値解析を行ない, その伝熱特性を評価した.

主な記号

c_p : 比熱	$[J/(kg \cdot K)]$
h : 熱伝達率	$[W/(m^2 \cdot K)]$

k : 固相時の熱伝導率	$[W/(m \cdot K)]$
L : 融解潜熱	$[J/kg]$
Q : 熱量	$[J]$
r : 半径	$[m]$
s : 固液界面半径	$[m]$
T : 温度	$[K]$
t : 時間	$[s]$
w : 体積流量	$[m^3/s]$
ρ : 密度	$[kg/m^3]$

添字

f : 流体
mp : 融点
s : 蓄熱材

2. 蓄熱槽内の挙動

Fig.1 は放熱過程の蓄熱槽の挙動のうち蓄熱材が固化する過程を, 透過光によって撮影したものである. 撮影に用いた蓄熱槽は円筒形で内径が42mm, 長さが420mmの亚克力管で, 伝熱管は外径10mmの黄銅製である. 蓄熱材には融点が319Kの n-パラフィン⁽⁵⁾を440g用いた. 蓄熱槽からの放熱を防ぐため, 蓄熱槽周囲にヒーターを巻いて保温した.

撮影は以下の手順で行った. あらかじめ伝熱管に高温水を流して蓄熱材全体を融解する. 写真(1)はこのときの様子を示している. 次に, 下方から冷水を流し放熱を開始する. 冷水を流し始める時間を $t=0$ とする. 蓄熱材の固化は冷水入口(下方)から始まり, 出口方向に進行する.

写真(2)は, 180秒後の様子を撮影したもので, 出口付近の伝熱管周囲では蓄熱材が固化しはじめて

* 横浜国立大学工学部物質工学科教授

いる。そして半径方向にも固化が進み、420秒後には固液界面がほぼ直線となることが分かる(写真(3))。

1200秒(20分)後の写真(4)では、入口付近で固化が終了している。写真(5)に示した1800秒(30分)後には、端部の影響を受ける出口付近を除いて、ほぼ全域で固化が終了している。そして3600秒(1時間)後の写真(6)を見ると、固化に伴う体積減少によって出口付近の蓄熱材上部の空間が成長している。

これに対して蓄熱時の蓄熱材の融解の様子は、伝熱管に接している部分から融解するため、固相状態で不透明な蓄熱材では観察することはできない。しかし、放熱時とは逆に、伝熱管周囲で融解した蓄熱材が、上部の自由空間に上昇してくるのは観察できた。

以上の放熱、融解時の蓄熱材の挙動の観察にもとづいて数値解析モデルを作成した。

3. 数値解析モデル

3.1 解析の考え方と仮定

数値解析に当たっ

て以下の仮定を設けた。

(1) 軸方向の熱移動は、半径方向に比べて小さく無視できる。

(2) 蓄熱材の物性値は温度によらず一定とする。

(3) 伝熱管および蓄熱槽の熱容量は、蓄熱材の熱容量に比べて十分小さく無視できる。

(4) 蓄熱槽の外部は十分断熱されているものとする。

(5) 蓄熱材液相の粘度は大きく、自然対流による熱の移動は無視できる。

Fig.2に蓄熱槽の蓄熱過程の解析を行うためのモデルを示した。伝熱管周囲が液相になっている。数値解析を行う際の差分式を導出するために、蓄熱槽を軸方向に $n-1$ 等分する。各分割長さを Δx とする。そして2つの分割要素 i と $i+1$ の間のエネルギー収支を考える。

解析は蓄熱時、放熱時とも、蓄熱材の状態によって、(Ⅰ)固相状態、(Ⅱ)固液共存状態、(Ⅲ)液相状態の3種類に分けて行った。

3.2 蓄熱過程の差分式の導出

蓄熱過程の

(Ⅰ)固相状態($T_s < T_{mp}$)および(Ⅲ)液相状態

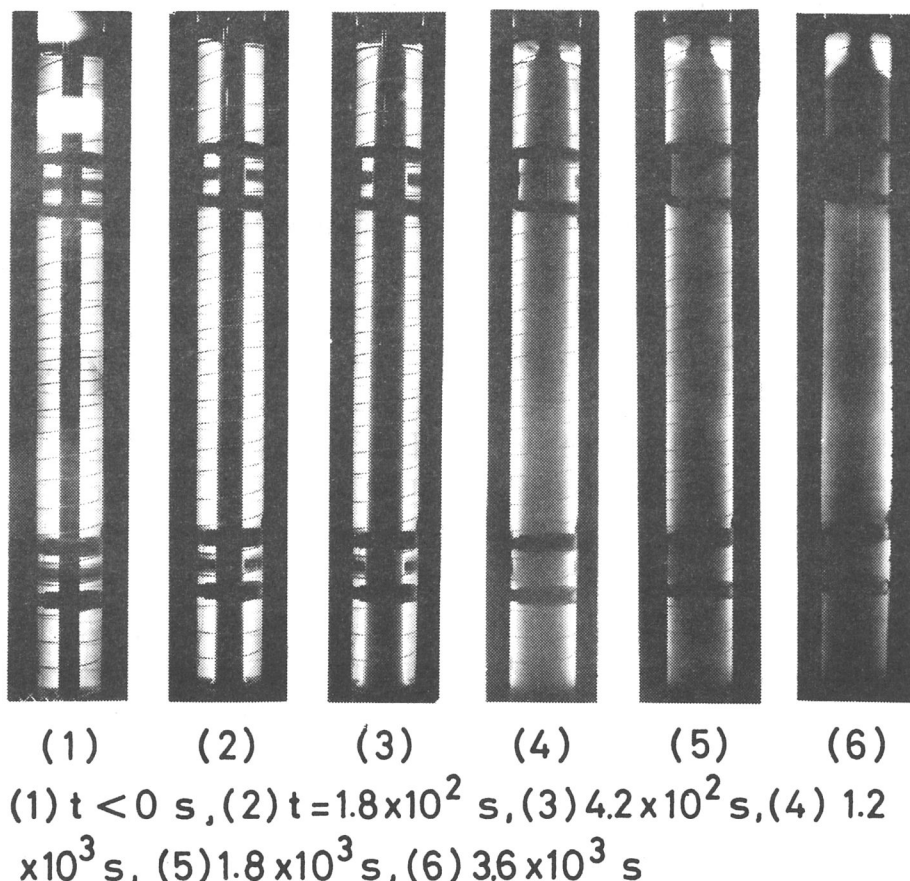


Fig.1 Photographs of storage material on discharge process

二重管形潜熱蓄熱槽の伝熱特性

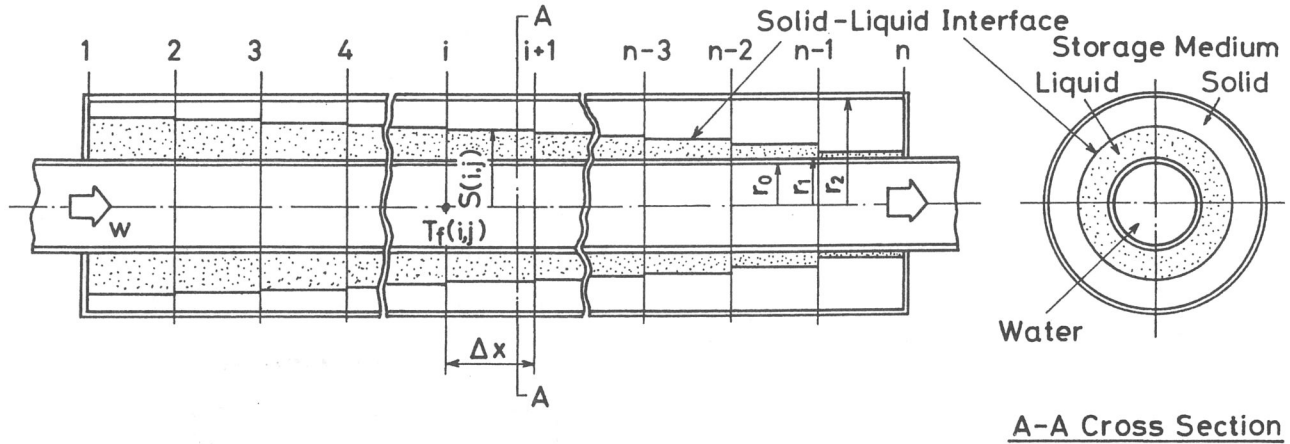


Fig.2 Analytical model

($T_s > T_{mp}$)では蓄熱材温度は一様とする.

この場合, 流体が Δt 時間に放出する熱量 ΔQ_1 は, Δt 時間後には位置も移動するので, 次式となる.

$$\Delta Q_1 = w \rho_f c_{pf} \Delta t \{T_f(i, j) - T_f(i+1, j+1)\} \quad (1)$$

ここで, w は体積流量, ρ は密度, c_p は比熱を示し, 時間分割幅 Δt と Δx の間には $\Delta t = \Delta x / u$ の関係がある. u は流速を表す.

次に流体から蓄熱材に移動する熱量 ΔQ_2 は対流による熱移動であるから次式となる.

$$\Delta Q_2 = 2\pi r_0 h_f \Delta x \Delta t \{T_f(i, j) - T_s(i, j)\} \quad (2)$$

ここで, h_f は, 円管内の流体と伝熱管の間の対流熱伝達率で, 実験の範囲で流れは層流なので層流熱伝達の実験式から算出する.

さらに, 蓄熱材に蓄えられる熱量 ΔQ_3 は次式となる.

$$\Delta Q_3 = \pi(r_2^2 - r_1^2) \Delta x \rho_s c_{ps} \{T_s(i, j+1) - T_s(i, j)\} \quad (3)$$

$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \Delta Q_3$ となるので, これらの式から流体温度, 蓄熱材温度の差分式は, それぞれ式(4), (5)と求まる.

$$T_{f(i+1, j+1)} = T_{f(i, j)} - \frac{2\pi r_0 \Delta x \{T_{f(i, j)} - T_s(i, j)\}}{w \rho_f c_{pf}} \quad (4)$$

$$T_{s(i, j+1)} = T_{s(i, j)} + \frac{w \rho_f c_{pf} \Delta t \{T_{f(i, j)} - T_{f(i+1, j+1)}\}}{\pi(r_2^2 - r_1^2) \rho_s c_{ps} \Delta x} \quad (5)$$

(II) 固液共存状態($T_s = T_{mp}$, $r_1 \leq S \leq r_2$)においては, ΔQ_1 , ΔQ_2 は固相状態, 液相状態と同様に考える. しかし, 蓄熱材に蓄えられる熱量 ΔQ_3 は, 潜熱のみとすると式(6)となる.

$$\Delta Q_3 = \rho_s L \Delta x \pi \{S_{(i, j+1)}^2 - S_{(i, j)}^2\} \quad (6)$$

ここで, L は融解潜熱である.

以上のことから, 固液界面の半径 S は, 式(1)と(6)から式(7)となる.

$$S_{(i, j+1)} = \sqrt{S_{(i, j)}^2 + \frac{w \rho_f c_{pf} \Delta t \{T_{f(i, j)} - T_{f(i+1, j+1)}\}}{\rho_s L \pi \Delta x}} \quad (7)$$

なお, 式(7)中の流体温度 T_f は式(4)で, T_s を T_{mp} で一定として計算した値を用いる.

3.3 放熱過程の差分式の導出 蓄熱材の初期温度は融点より高くしかも一様とする. 液相時($T_s > T_{mp}$)は, 蓄熱時の固相時あるいは液相時と同様に考える. 熱の流れが逆になるだけなので, 式(4), (5)によって得られる.

固液共存時($T_s = T_{mp}$, $r_1 \leq S \leq r_2$)は, 伝熱管の周囲に析出した固相が半径方向に成長していく過程である. 蓄熱材から流体に移動する熱量 ΔQ_2 は, 固液界面と流体間の熱通過と考え式(8)とする.

$$\Delta Q_2 = \frac{2\pi \Delta x \Delta t [T_{mp} - T_{f(i, j)}]}{\frac{\ln[S_{(i, j)}/r_1]}{k_s} + \frac{1}{h_{f0}}} \quad (8)$$

ここで, k_s は蓄熱材の固相の熱伝導率である.

流体温度 T_f の差分式は, 式(1), (8)から式(9)と

なり、蓄熱槽の厚さ S は式(10)から求める。

$$T_{f(i+1,j+1)} = T_{f(i,j)} + \frac{2\pi r_0 \Delta x k_s h_f \{T_{mp} - T_{f(i,j)}\}}{w \rho_f c_{pf} [h_{f0} \{\ln S(i,j)/r_1\} + k_s]} \quad (9)$$

$$S_{(i,j+1)} = \sqrt{S_{(i,j)}^2 + \frac{w \rho_f c_{pf} \Delta t \{T_{f(i+1,j+1)} - T_{f(i,j)}\}}{\rho_s L \pi \Delta x}} \quad (10)$$

最後に固相時 ($T_s < T_{mp}$) における、蓄熱材と流体の間の熱交換は、蓄熱材の熱伝導率が小さいことから、熱伝達による熱抵抗に比べて、熱伝導による熱抵抗が大きいと推測される。従って、蓄熱材から流体に移動する熱量 ΔQ_2 は、熱伝導のみを考えると、固相内の定常状態の温度分布から式(11)となる。

$$\Delta Q_2 = \frac{2\pi k_s \Delta x \Delta t \{T_{2(i,j)} - T_{f(i,j)}\}}{\ln(r_2/r_1)} \quad (11)$$

また蓄熱材が放出する熱量 ΔQ_3 は、固相温度の変化に相当する顕熱量の変化となる。そして固相温度の変化は、固相内の定常温度分布から計算される温度変化で表現する。すなわち蓄熱材外側の温度 T_2 を用いて表すと式(12)となる。

$$\Delta Q_3 = \pi \rho_s c_{ps} \Delta x \left\{ r_2^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \ln(r_2/r_1)} \right\} \{T_{2(i,j+1)} - T_{2(i,j)}\} \quad (12)$$

従って、式(1), (11), (12)を連立させることによって、流体温度と蓄熱材外側温度の差分式が得られ、それぞれ式(13), (14)となる。

$$T_{f(i+1,j+1)} = T_{f(i,j)} + \frac{2\pi \Delta x k_s \{T_{2(i,j)} - T_{f(i,j)}\}}{w \rho_f c_{pf} \ln(r_2/r_1)} \quad (13)$$

$$T_{2(i,j+1)} = T_{2(i,j)} + \frac{w \rho_f c_{pf} \Delta t \{T_{f(i+1,j+1)} - T_{f(i,j)}\}}{c_{ps} \rho_s \Delta x \pi \left\{ r_2^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \ln(r_2/r_1)} \right\}} \quad (14)$$

以上の式を用いることで、蓄熱時と放熱時の蓄熱槽をそれぞれ液相時、固相時、固液共存時に分けて、流体温度、蓄熱材温度、固相厚さ、蓄熱材外側温度を数値計算することができる。

計算は蓄熱槽を10から16分割して行った。そのときの要素長さ Δx は0.12mから0.192mとなる。

4. 実験装置と方法

Fig.3(a)に実験装置の系統図を示した。水槽および高温水槽の容量は、それぞれ $2.6 \times 10^{-2} \text{ m}^3$, $4.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ とした。蓄熱槽入口には、3方コックを設置して流体温度をステップ状に入力できるようにした。

蓄熱時の実験は、最初に冷水を循環させて、蓄熱槽内の温度を一様にする。次に配管部分を高温水によって温める。槽入口までの温度が一様になっ

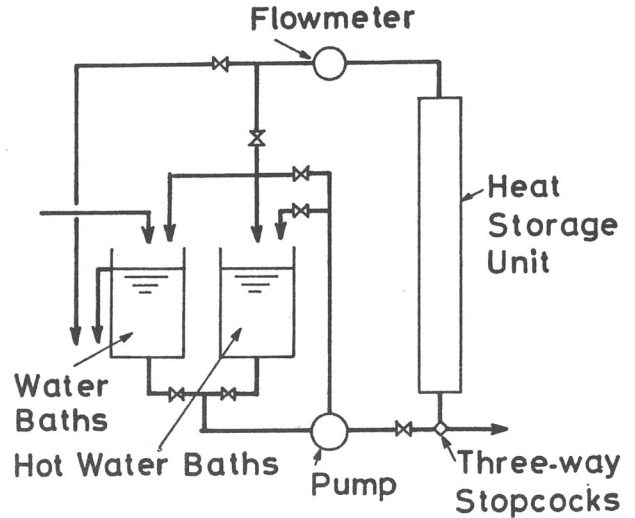


Fig.3(a) Experimental apparatus

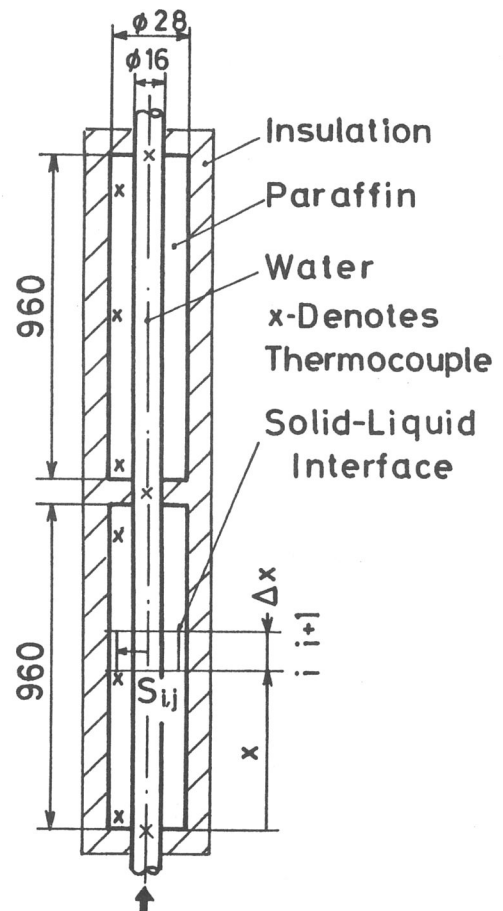


Fig.3 (b) Storage column

二重管形潜熱蓄熱槽の伝熱特性

たことを確認して、3方コックを蓄熱槽側に切り換えて蓄熱を開始する。蓄熱槽を出た水は再び高温水槽に戻る。このように蓄熱実験は、高温水を循環させる閉ループで行った。

一方、放熱時の実験は以下の手順で行った。高温水を循環させて蓄熱材を融解したあとで、冷水によって配管をすばやく冷やし、コックを切り換えて、試験部にステップ状に冷水を流す。水槽は常にオーバーフローの状態にして流量の変動を防いだ。

Fig.3(b)は、蓄熱槽を示したもので、蓄熱槽は長さ960mmのものを2本直列に接続した構造とした。蓄熱材には約640gのn-パラフィンを用いた。その固相時の熱伝導率 k_s は $0.13 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、融解潜熱 L は $147 \text{ kJ}/\text{kg}$ である。蓄熱管は内径14mm、厚さ1mmの銅管を用いた。断熱材は発泡スチロールを蓄熱管の形状に合わせて成型して取り付けた。

5. 実験結果および計算結果

Fig.4は放熱過程の実験結果と計算結果を比較したものである。縦軸は蓄熱材初期温度 T_0 と流体温度 T_f の温度差をとり、横軸にはコックを開いてからの時間をとった。実線が測定値、破線は計算値を示す。実験は $T_0 = 325.7 \text{ K}$ 、 $w = 1.92 \text{ cm}^3/\text{s}$ の条件で行った。

蓄熱槽入口では流体温度がほぼステップ状に温度変化していることがわかる。出口および中間点

流体温度は急速に低下している。約15分後の出口温度は、入口温度より約10 K高くなっている。20分付近の変曲点は、蓄熱材の相変化の終了を示すと思われる。計算結果は実験結果の温度変化の傾向まで表しており、比較的一致している。

Fig.5は、このときの固液界面の成長の計算結果である。縦軸は伝熱管外表面からの距離、横軸は蓄熱槽長さを無次元で表した。実線より上が液相、下が固相となる。

2分後に伝熱管の半分近くまで固相が析出し、約5分後に伝熱管全域が固相で覆われている。伝熱管を固相が覆う時間付近で、流体温度の変化がなめらかになることから、蓄熱材の固相の熱伝導率が放出熱流量を決める大きな要因であること推定される。

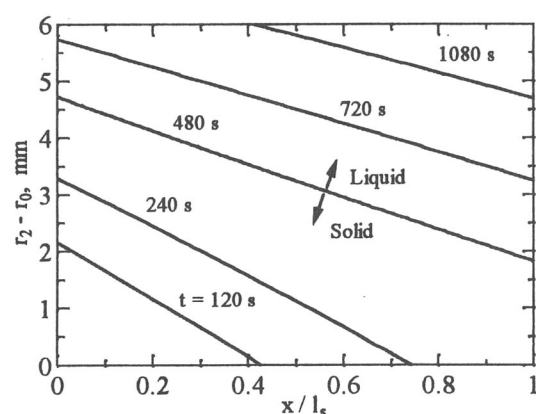


Fig.5 Calculated changes of thickness of solid layer

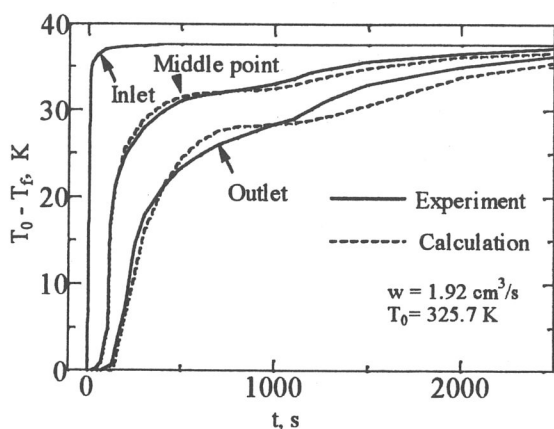


Fig.4 Comparison of experiment and calculation on temperature changes of discharge process

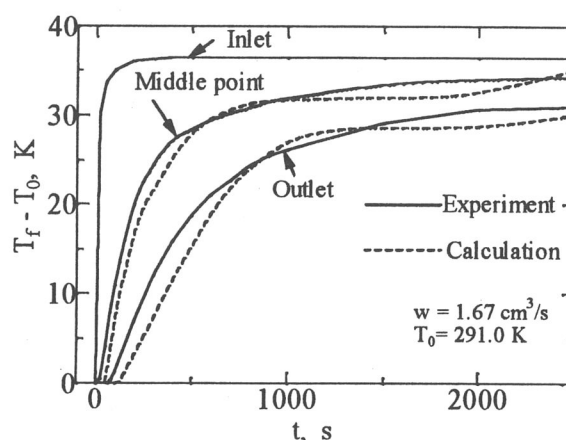


Fig.6 Comparison of experiment and calculation on temperature changes of storage process

さらに8分後に全蓄熱材の約半分が固化し、さらに固化が進行したときの計算例として18分後の結果を示した。計算で相変化が終了する付近の時間に対応して、Fig.4に示したように出口の流体温度の測定値に変曲点が見られる。このことは、計算結果と実験値の一致を示すものである。

Fig.6は蓄熱過程の実験結果と計算結果を比較したものである。縦軸は流体温度と初期蓄熱材温度の差をとった。時間 $t=0$ 付近の両者の差は、流体が上昇流であることに伴う伝熱管内の軸方向の自然対流の効果によるものと推定される。また11分付近までは、実験値の温度変化の方が大きいのは、実験では融解が広範囲に起こっているためと推定される。また液相部分の成長につれて、蓄熱槽内で対流が発生し、蓄熱材上部の温度上昇が起こることも、計算値との差の原因となる。

Fig.7は、同一流量での蓄熱時と放熱時の交換熱流量 Q' の時間変化の実験値である。初期状態で蓄熱材と流体温度間温度差が5 K異なるため、初期段階では、放熱過程のほうの Q' が大きくなっている。また約20分経過後は放熱流量が蓄熱流量

を下まわり、 Q' の変動が大きい。

6. まとめ

二重管型潜熱蓄熱槽の蓄熱過程、放熱過程の伝熱特性の解析を行い、実験結果と比較した。その結果、本実験のような小型で低温度差で運転される蓄熱槽の計算では、分割を軸方向のみにとり、固相の温度分布を定常と見なした解析でも、実験値をよく表現できることがわかった。

しかし熱容量が大きくなるにつれて、蓄熱材の半径方向の温度分布を考慮することと、自然対流の影響を考慮することが必要になる。

終わりに本研究に協力頂いた寺町吉見氏(THK)、竹中悟氏(大日本印刷)に謝意を表する。

文 献

- (1)平澤・ほか2名, 管群型潜熱蓄熱槽の凝固特性に関する実験的研究, 第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集, B153,(1996)89.
- (2)斎藤・広瀬, 球カプセル潜熱蓄熱ユニットの性能シュミレーション, 日本機械学会論文集B, 51(466),1867(1985).
- (3)大石ら, 蓄熱材複合化による潜熱蓄熱槽の放熱特性の改善, 第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集, F142,(1998)241.
- (4)斎藤・ほか3名, 潜熱蓄熱の伝熱に関する研究(第4報, たて形潜熱蓄熱カプセルの蓄熱特性), 日本機械学会論文集B, 52(475),1070(1986).

小山工業高等専門学校 機械工学科
E-mail : takasima@oyama-ct.ac.jp
(受理年月日 1999年9月3日)

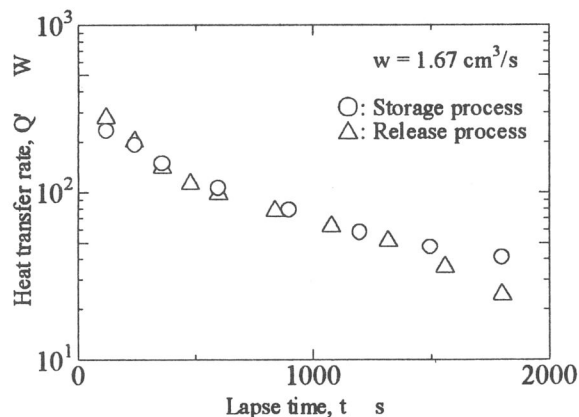


Fig.7 Heat transfer rate at storage and discharge process