

潜熱蓄熱用円筒カプセルの放熱特性

伊 藤 定 祐

Heat Transfer Problems of a Cylindrical Capsule Used for a Latent Heat Thermal Energy Storage

Sadasuke Ito

Abstract

The heat transfer from a cylindrical capsule used for a latent heat thermal energy storage was studied. The analysis assumed a quasi-steady conditions and it was solved by a very simple numerical method for problems of variable wall temperatures.

The capsule used in the experiments was cylindrical acrylic tube with the outside diameter of 36 mm and inside diameter of 29.8 mm. A paraffine, n-Octadecane, was used as a phase change material. The capsule initially maintained nearly at the solidification temperature was cooled by dropping water on the tube and the heat flux from the wall was measured by a heat-flux meter.

The analytical results showed good agreements with the experimental results even for the variable wall temperatures at the changing rate of about 0.5 degrees per minute.

1. ま え が き

太陽エネルギーを有効に利用するにあたり、エネルギー供給量の不安定性の故に蓄熱の問題が非常に重要である。蓄熱方法には主に顕熱として貯える方法と潜熱として蓄熱する方法がある。融解・凝固の相変化に伴う潜熱を利用する蓄熱方法は、凝固点または融点附近で多量の熱量を出し入れできる蓄熱密度の高い蓄熱方法で、実用の可能性が大きい。太陽熱発電の場合は 300°C 以上の高温で融解するような熔融塩を利用するようであるが、蓄冷の場合は 5°C から 15°C 程度の低い融点をもつ蓄熱材(蓄冷材)が要求されている。潜熱蓄熱材として熔融塩が特に有望であり、パラフィンも考慮されているが、腐食、劣化、伝熱、安全性および価格の問題等で多くの解決すべきことが残されている。一般的に潜熱蓄熱においては融解または凝固の速度が時間と共に遅くなり、熱の出し入れが速やかに行われにくくなるので、蓄熱装置の設計のため伝熱問題は重要である。融解・凝固の相変化に伴う伝熱問題は非定常の問題であり、我が国では熱伝導の偏微分方程式を階差法により数値計算を行なった片山ら¹⁾の研究報告や、対流をも考慮し、差分法によ

り数値計算を行なった斎藤・広瀬²⁾や片山ら³⁾の研究がある。また、神本ら⁴⁾は蓄熱材として硝酸ナトリウムとその混合塩を用い、伝熱問題を実験的に研究し、階差法による数値解と比較している。

甲藤・西村⁵⁾は準定常解により固液境界面の位置および温度分布を壁温一定の条件で求めているが、蓄熱材が潜熱集中形の場合で、冷却面温度と凝固点との差が極端に大きくない場合に適用できる簡単な解法である。最近では、管壁温度が一定の場合および変化させた場合に対して準定常解により凝固量を求め、実験結果と比較した報告^{6),7)}がある。また、大塚・春川⁸⁾は蓄冷装置の蓄冷量を求めるのに準定常解を用いている。

融解・凝固を伴う伝熱問題の研究では、固液境界面の位置、融解あるいは凝固量、または温度分布を検討しているものが大部分であり、蓄熱においては放熱量や吸熱量の時間的変化が重要な問題にもかかわらずそれらを主に考慮したものは少なく、特に実験的研究が為されているのはまれである^{1),3)}。

本研究では、潜熱集中形の蓄熱材を充てんした円筒容器からの放熱量を準定常解で求め、実験結果と比較検討した。本解法は管の熱抵抗および管外壁の熱伝達を考慮に入れ、壁温が緩やかに変動する場合も含むもので、偏

微分方程式を差分の形にし、数値的に解く方法に比べて非常に簡単な方法であり、それぞれが異なった状態にある多数の蓄熱容器を内部に有しているカプセル型潜熱蓄熱装置の総合的な解析に応用するのに適したものであると考える。

2. 主 な 記 号

- a_0 : 式 (3) で定義される量, 無次元
- a_2 : 式 (15) で定義される量, 無次元
- L : 融解熱または凝固熱, J/kg
- q : 管の単位長さ, 単位時間当りの管壁からの放熱量, W/m
- r : 半径方向の距離, m
- r_1 : 管内壁半径, m
- r_2 : 管外壁半径, m
- s : 固液境界面の半径, m
- T : 温度, $^{\circ}C$
- T_c : 管中心温度, $^{\circ}C$
- T_0 : 管まわりの流体 (伝熱媒体) の温度, $^{\circ}C$
- T_s : 凝固点
- t : 冷却しはじめてからの時間, s
- t_n : 時間 t を n 分割したときの最終時間 t に相当する時間, s
- t_i : n 分割された時間 t の i 分割目後の時間, s
- t_{i-1} : n 分割された時間 t の $(i-1)$ 分割目後の時間, s
- t_0 : 冷却開始はじめての時間, $t_0=0, s$
- X : 式 (7) または (17) で定義される無次元時間, 無次元
- Y : 凝固率 (式 (6) 参照), 無次元
- α : 管外側の平均熱伝達率, $W/(m^2 \cdot K)$
- θ : $\theta = T - T_s, ^{\circ}C$
- θ_0 : $\theta_0 = T_0 - T_s, ^{\circ}C$
- $\theta_{0,i}$: t_i における $\theta_0, ^{\circ}C$
- $\theta_{0,i-1}$: t_{i-1} における $\theta_0, ^{\circ}C$
- θ_2 : $\theta_2 = T_2 - T_s, ^{\circ}C$
- $\theta_{2,i}$: t_i における $\theta_2, ^{\circ}C$
- $\theta_{2,i-1}$: t_{i-1} における $\theta_2, ^{\circ}C$
- $\bar{\theta}_2$: θ_2 の時間平均, $^{\circ}C$
- λ_1 : 蓄熱媒体の固相の熱伝導率, $W/(m \cdot K)$
- λ_2 : 管の熱伝導率, $W/(m \cdot K)$
- ρ : 蓄熱媒体の密度, kg/m^3

3. 準定常法による放熱量の求め方

凝固の相変化を伴う熱伝導問題の準定常法による解法は、円筒容器の壁温が一定の場合に対してすでに報告した⁶⁾。一般に蓄熱材の潜熱は大きいので、壁温が一定で凝固点より極端に低くないときは過程の進行が遅く、近似的に準定常法で問題を解くことができるが、壁温が徐々に変化するときも同様に考えれば準定常法により求めることができる。本解法では、壁温が変化する場合を考慮し、放熱量を求める。

本解法は、ある一定温度で凝固し、発熱する潜熱集中形蓄熱材の初期温度が凝固点にある場合に対するもので、相変化によって密度の変化は起こらないものとし、固液境界面の管長手方向に直角な断面は管と同心円であるものと仮定する。Fig. 1 に示すように蓄熱材の凝固点

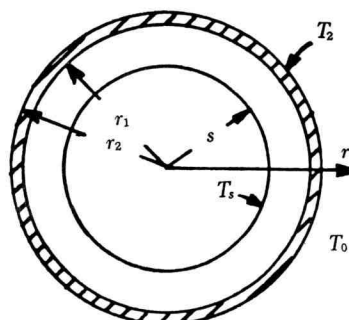


Fig. 1 Schematic of sectional view of cylindrical capsule

より低い温度の伝熱媒体中に、凝固点にある液相蓄熱材の充てんされた円筒蓄熱容器が置かれた場合を考える。蓄熱容器は冷却され、内部の蓄熱材は凝固し、凝固の潜熱と、固体の温度の低下に伴う顕熱が伝熱媒体に放出されるが、本解法においては伝熱媒体の温度が凝固点よりあまり低くなく、顕熱が潜熱に比べて無視できる場合を考える。

伝熱媒体の温度を T_0 とし、管内半径 r_1 、管外半径 r_2 、固液境界面半径 s のそれぞれの温度を T_1 、 T_2 および T_s とする。任意の温度 T と凝固点との差を θ とし、 θ_0 、 θ_2 をそれぞれ伝熱媒体の温度と凝固点の差および管外壁温度と凝固点との差で表す。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \theta &= T - T_s \\ \theta_0 &= T_0 - T_s \\ \theta_2 &= T_2 - T_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

過程が準定常であると考えるので、半径 s と r_1 の範

管内の任意の半径 r の位置における温度差 θ は、二重管の定常熱伝導問題と同様に考えて得ることができ、次式で示される。

$$\theta = \theta_0 \frac{\ln \frac{r}{s}}{\ln \frac{r_1}{s} + \alpha_0} \quad (2)$$

ただし、

$$\alpha_0 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\lambda_1}{\alpha r_2} \quad (3)$$

ここに、 λ_1 , λ_2 はそれぞれ蓄熱材および管の熱伝導率で、 α は管外壁の平均熱伝達率である。

ρ , L をそれぞれ蓄熱材の密度および凝固熱 (融解熱) とすれば、境界面での固相を熱伝導で流出する熱量と凝固熱とが等しいので次式を得る。

$$2\pi s \lambda_1 \left(\frac{d\theta}{dr} \right)_{r=s} dt = 2\pi s \rho L ds \quad (4)$$

α_0 の値が時間と共に一定である場合、式 (2) を式 (4) に代入し、 $t=0$ で $s=r_1$ なる条件を用いて両辺を積分すると次式を得る。

$$Y + \frac{1}{1+2\alpha_0} (1-Y) \ln(1-Y) = X \quad (5)$$

ただし、 Y は次式で示されるように蓄熱材中の固相部の体積割合 (凝固率) で、 X は無次元時間である。

$$Y = 1 - \frac{s^2}{r_1^2} \quad (6)$$

$$X = - \frac{4\lambda_1}{(1+2\alpha_0)\rho L r_1^2} \int_0^t \theta_0 dt \quad (7)$$

θ_0 が一定のとき上式は次式で表わされる。

$$X = - \frac{4\lambda_1 \theta_0}{(1+2\alpha_0)\rho L r_1^2} t \quad (8)$$

式 (5) からわかるように $X=1$ のとき $Y=1$ となり凝固が完了する。

θ_0 が時間の関数として与えられると X が計算されるが、積分が容易に出来ない場合、時間 t を n 個の微小時間間隔の和として次式のように表わせば、 X を近似的に式 (10) で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} t &= \sum_{i=1}^n \Delta t_i \\ \Delta t_i &= t_i - t_{i-1} \\ t_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$X = - \frac{4\lambda_1}{(1+2\alpha_0)\rho L r_1^2} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{0,i} + \theta_{0,i-1}}{2} \Delta t_i \quad (10)$$

ここに $\theta_{0,i}$, $\theta_{0,i-1}$ はそれぞれ $t=t_i$ および $t=t_{i-1}$ の θ_0 の値である。

単位時間、管単位長さ当りの凝固に伴う放熱量 q は単位時間、単位長さ当りの相変化量に密度と凝固熱を乗じたものであるので次式を得る。

$$q = \rho L \pi r_1^2 \frac{dY}{dt} \quad (11)$$

あるいは上式は次式で表わされる。

$$q = \rho L \pi r_1^2 \frac{dY}{dX} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (12)$$

式 (5) と (7) より上式は次式で表わされる。

$$- \frac{q}{\lambda_1 \theta_0} = \frac{4\pi}{2\alpha_0 - \ln(1-Y)} \quad (13)$$

なお、上式は二重円筒の定常解で得られる放熱量より直接求めることもできる。

θ_0 が時間の関数として与えられれば、任意の時間における X の値が式 (7) または式 (10) より求まり、次に式 (5) で Y の値が求まる。その Y の値を式 (13) に代入することによって無次元放熱量および管からの放熱量 q を計算することができる。

t と θ_0 の関係が与えられて式 (7), (8) または (10) で X が算出されても、そのときの Y の値を式 (5) で直接求めることはできない。ここでは数値的に求める一方法を示しておく。

X が X_g のときの Y の値 Y_g を求める場合を Fig. 2 を参照して考える。0 から 1 の範囲にある任意の Y の値 Y_1 を選び、 Y_1 に対する X の値 X_1 を式 (5) より算出する。 X_g と X_1 の差を ΔX_1 とするとき、点 (X_1, Y_1)

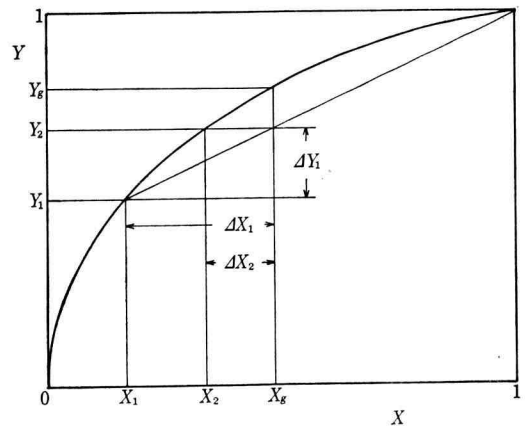


Fig. 2 Numerical way of finding Y from given X

と点 (1, 1) を結ぶ直線の勾配を $\Delta Y_1/\Delta X_1$ とすると, X_g に対する Y_g のよりよい近似値として Y_2 を次のごとく得る。

$$Y_2 = Y_1 + \frac{\Delta Y_1}{\Delta X_1} \Delta X_1 = Y_1 + \frac{1-Y_1}{1-X_1} (X_g - X_1) \quad (14)$$

次に $Y=Y_2$ として式 (5) に代入し, Y_2 に対する X の値 X_2 を得る。 X_2 が与えられた X_g に十分近ければ, Y_2 は Y_g の近似値とすることができるが, そうでない場合は同様にしてよりよい近似値 Y_3 を得る。この過程をくり返し, Y_g を得る。計算は簡単で, プログラム可能な電卓で計算できる。

$t=t_i$ における Y の値を求めるとき, t_i と t_{i-1} の差 Δt_i が小さければ, Y の最初の近似値 Y_1 として t_{i-1} で得られたときの Y の値を用いれば Y と Y_1 はすでに十分近いのでくり返しが必要でなくすむ。

熱伝達係数 α を無限に大きいものと考えれば, 管表面温度は伝熱媒体温度と等しくなるので, 伝熱媒体の温度及び管外側の熱伝達係数が問題に与えられるかわりに管外壁温度が与えられている場合, 式 (2) 以降の式において α を無限とし, θ_0 のかわりに θ_2 を用いればよい。したがって,

$$a_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (15)$$

とすれば,

$$Y + \frac{1}{1+2a_2} (1-Y) \ln(1-Y) = X \quad (16)$$

$$X = -\frac{4\lambda_1}{(1+2a_2)\rho L r_1^2} \int_0^t \theta_2 dt \quad (17)$$

または,

$$X = -\frac{4\lambda_1}{(1+2a_2)\rho L r_1^2} \sum_{i=1}^n \frac{\theta_{2,i} + \theta_{2,i-1}}{2} \Delta t_i \quad (18)$$

$$-\frac{q}{\lambda_1 \theta_2} = \frac{4\pi}{2a_2 - \ln(1-Y)} \quad (19)$$

で示される。これらの式は以前に得られた式の θ_0 の代わりに θ_2 を用い, a_0 の代わりに a_2 を用いた式である。

Fig. 3 は無次元放熱量: $-q/(\lambda_1 \theta_0)$ と無次元時間 X との関係を示したものである。同様な無次元放熱量: $-q/(\lambda_1 \theta_2)$ と X の関係は a_2 と a_0 が同じ値のとき図 3 に示されたものと全く同様である。式 (8) からわかるように, 温度差 θ_0 が一定のとき X は時間に比例するが, a_0 の値が小さいときすなわち管の熱抵抗が小さく, 管の熱伝導率のよい場合, 放熱量は初期に非常に多く, 時間の経過と共に急激に減少することがわかる。 a_0 の値が大

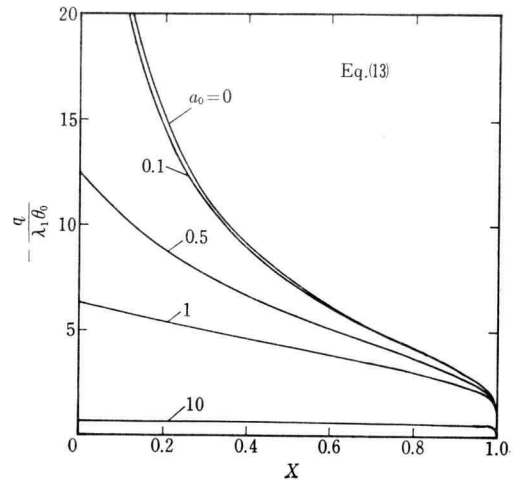


Fig. 3 Variation of dimensionless heat transfer rate with dimensionless time

きくなるにしたがって初期の放熱量は少なくなり, 時間と共に放熱量の減少する程度が小さくなっていく。

後に実験結果と計算結果を比較する際, 次の物性値を用いた。

n -オクタデカン, $C_{18}H_{38}$

融解熱 (凝固熱): 241.3 kJ/kg^9

熱伝導率 (固相): $0.42 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}^6$

密度 (液相, 30°C): 775 kg/m^3^9

アクリル樹脂 (ポリメタクリ酸メチル)

熱伝導率: $0.15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}^{10}$

n -オクタデカンを本研究に用いた理由は, 物性値がわかっており^{9),10)}, 融点が 28°C で, 腐食性のない取扱いやすい材料であることによる。なお, 蓄熱材は液相の状態であって, 凝固するものと仮定し, 密度として液相の密度を使用した。

4. 実験装置及び実験方法

Fig. 4 に実験装置の概略図を示す。透明アクリル板でできた槽のほぼ中央の高さのところにパラフィン (n -オクタデカン, $C_{18}H_{38}$, 純度 99%, 融点 28°C) の充てんされたアクリル管が水平に設置されており, この管の上方に, 1列の多数の孔が下側に開けられた黄銅管が2本取付けてある。実験は液相パラフィンをほぼ凝固点にして開始するが, そのため恒温槽 A ではほぼパラフィンの凝固点にした水を上側の黄銅管に導き, 管の孔より噴出させ, 下側の黄銅管の表面を経てアクリル管にかける。一

方, 凝固させるときアクリル管にかける水は恒温槽 B, 温度安定用水槽 A, 流量安定用水槽 B を循環するようにしておき, 恒温槽 B で一定温度に設定しておく。実験を開始するとき, まず, 上部の黄銅管への給水を止め, 実験槽のドレインより水を抜きとる。次に三方弁 C を切り換え, 水槽 A の水を下側の黄銅管に導き, 管の孔より噴出させてアクリル管を冷却する。水がアクリル管にかかった時点から時間を計測する。槽に水が十分溜ったとき, 三方弁 A, B を調節し, 水が恒温槽 B, 水槽 A および実験槽を循環するようにする。恒温槽 B は冷凍機またはヒータとしても使用できるが, アクリル管の表面温度を降下させるときはヒータのスイッチを切り, 冷凍機のみを使用する。

Fig. 5 はアクリル樹脂でできた円筒カプセル詳細図である。管の内径, 外径, 長さはそれぞれ 29.8 mm, 36 mm および 410 mm で管の端は透明アクリル製のフタで締めである。管壁の熱流束を測定するために管下側中央に幅 13 mm, 長さ 29 mm, 厚さ 150 μm の R&F 社 (米国) 製熱流束計 (熱電対列) が管長手方向に沿って接着剤では

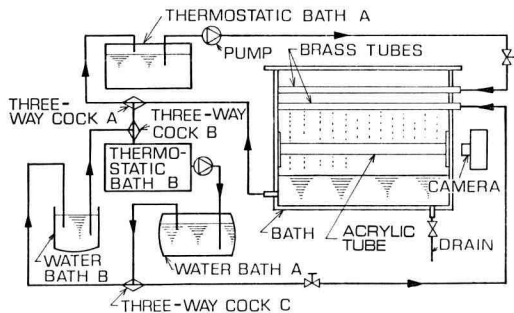


Fig. 4 Experimental apparatus

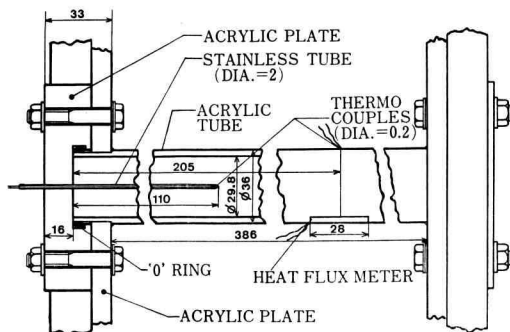


Fig. 5 Details of cylindrical capsule

り付けてある。管断面中心温度 T_c を測定するため, 外径 2 mm のステンレス管に入れられた直径 0.2 mm の銅-コンスタンタン熱電対を管側面より 110 mm の所まで挿入してある。また, 管外壁温度を測定するため管中央上部の位置に熱電対を微量のアクリル樹脂系接着剤で接着してある。熱電対列の起電力, および熱電対の起電力より得られる温度は江藤電気製データロガ (サーモダック III) により計測し, 放熱量は, 得られた起電力から検定された換算計数を用いて算出した。データロガによる温度測定精度は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ である。

5. 実験結果及び検討

Fig. 6 に壁温一定で $\bar{\theta}_2$ の平均値 $\bar{\theta}_2$ が -7.7°C のときの放熱量 q と時間 t の関係を示す (時間と共に変化しなくなったときの管中心温度を凝固点であると考えたと凝固点 T_s は 28.0°C であった)。同図に管壁温度 T_2 , 管中心温度 T_c も示してある。時間が経過するに従って放熱量は減少していくのがわかる。管中心温度が丁度下がりはじめるところで凝固が完了し, 温度が降下しはじめ

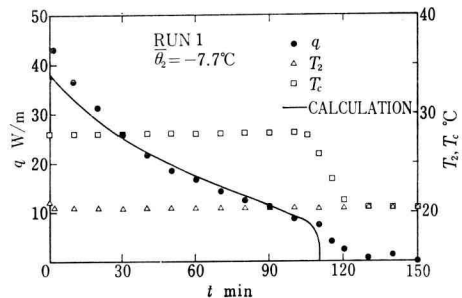


Fig. 6 Time variation of heat transfer rate per unit length and of temperatures of wall and center of capsule

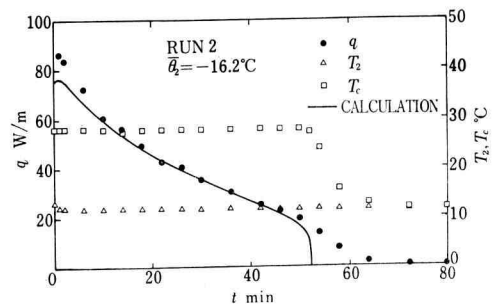


Fig. 7 Time variation of heat transfer rate per unit length and of temperatures of wall and center of capsule

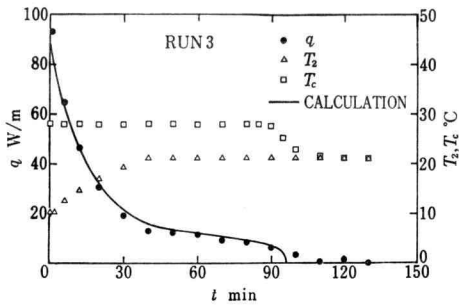


Fig. 8 Time variation of heat transfer rate per unit length and of temperatures of wall and center of capsule

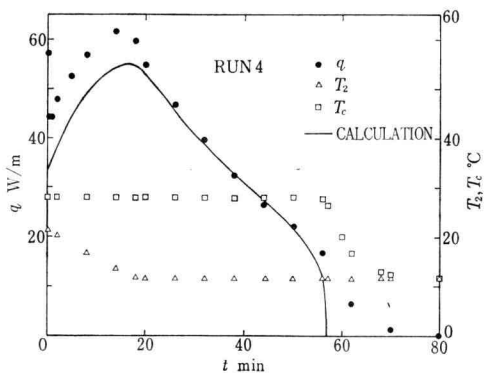


Fig. 9 Time variation of heat transfer rate per unit length and of temperatures of wall and center of capsule

るものと考えられるが、その時点からしばらくの間少量の放熱があるのは固相の温度がさらに下がり、管壁の温度になるまでに顕熱が放出されるからであると考えられる。凝固点にある液相の蓄熱材が凝固し、最終的に管外壁と均一な温度になるまでに管単位長さ当りから放出される総熱量は、単位長さ当りに含まれる蓄熱材の凝固の際に放熱される潜熱量と、凝固点にある固相およびアクリル管が外壁温度まで下がる時に放出される顕熱量の和であり、蓄熱材の質量、潜熱、及び、比熱とアクリル管の質量及び比熱より求められる。 $\bar{\theta}_2$ が -7.7°C の場合では総放熱量は蓄熱材の潜熱量の 1.10 倍になる。一方、実験での総放熱量は q を時間 t で積分したものすなわち同図の q の曲線と横軸で囲まれた部分の面積になるが、実験による総放熱量は蓄熱材の質量より計算された潜熱量の 1.06 倍となっており、両者の総放熱量の違いは 4% で、熱流束計で得られた放熱量はほぼ妥当であると考え

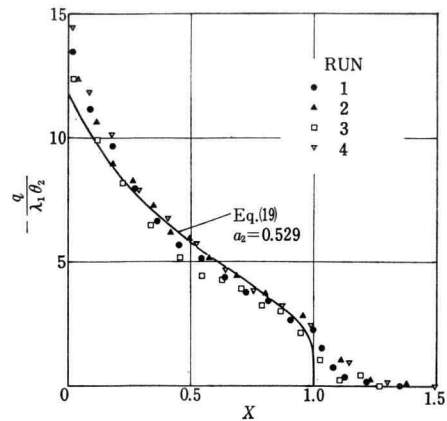


Fig. 10 Variation of dimensionless heat transfer rate with dimensionless time

られる。

同図に実線で示したものは実験の際の t と θ_2 との関係に対する放熱量 q の理論解である。理論解は顕熱量を考慮していないので、凝固が完了するとき放熱を終えることになるが、実験による放熱完了時の時間とはほぼ一致している。凝固完了時までの放熱量の変化は理論と実験において定性的によく一致している。

Fig. 7 は $\bar{\theta}_2$ が -16.2°C のときの壁温一定での実験結果を示したものであるが、実験において計測された総熱量は得られるべき値より 6% 小さかった。 $\bar{\theta}_2$ は -7.7°C のときのおよそ 2 倍であるが、式 (16) から式 (19) でわかるように $\bar{\theta}_2$ が 2 倍のとき、 t は半分で両者の X の値は同じになり、 Y および $-q/(\lambda_1 \theta_2)$ の値も両者においてそれぞれ同じになる。したがって半分の時間のところで 2 倍の放熱量を得る。本実験においても、例えば $\bar{\theta}_2$ が -7.7°C のとき、 t が 60 分で q の値は 15.5 W/m を示しているが、 $\bar{\theta}_2$ が -16.2°C の実験で t が 30 分のとき (厳密にはこれらの温度のときは 28.5 分) のとき q は 35 W/m となり、ほぼ倍の放熱量になっていることがわかる。

次に θ_2 が -17.8°C の初期の状態から徐々に壁温を上げていき、およそ 40 分経過した頃に θ_2 を -6.8°C 一定にしたときの結果を Fig. 8 に、逆に、 θ_2 が -6.5°C から徐々に壁温を下げていき約 20 分経過後に θ_2 を -16.5°C 一定とした場合の結果を Fig. 9 に示す。それぞれ実験による放熱量は理論結果とかなりよく一致している。

Fig. 10 に以上の結果を無次元放熱量と無次元時間との関係で示した。縦軸、横軸および実験点を連ねた曲線で囲まれる面積は総放熱量に比例するが、最終的な管壁

の温度が低く,したがって顕熱量の多く放出された RUN 2 と 4 の面積は RUN 1 と 3 の面積より大きくなっていることがわかる。

本実験に使用した管は熱抵抗が大きく, 理論解の無次元放熱量と無次元時間の関係 (図 3) からわかるように, 管に熱抵抗がない ($a_2=0$) 場合と比べると初期における放熱量は非常に小さくなっている。

6. 結 び

潜熱が一定温度で集中して得られる n -オクタデカンをアクリル管に充てんし, 放熱実験を行った結果, 壁温が変化する場合も含めて, 準定常法による解析結果とよく一致した。この方法により, 円筒型カプセル型潜熱蓄熱容器からの放熱特性を簡単な方法で予測することができる。

一定温度で冷却する場合, 管および管まわりの伝熱媒体の熱抵抗が小さければ, 初期において非常に多量の熱量が放出され, 時間と共に急激に放熱量が減少していくが, 管外壁面における熱伝達率が悪い場合や, 本実験のように管の熱抵抗が大きい場合は初期の放熱量が少なくなり, 時間と共に放熱量の減少する程度が小さくなる一方, 放熱を完了する時間は長くなる。

謝 辞

本研究は卒業研究の一つのテーマとして行われているもので, 研究に携っている本学機械工学科 4 年生の内田勝美君, 海野勝則君, および田口恒彦君に装置の製作, 実験およびデータの整理に協力を頂いたので深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 片山ほか, 第 16 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1979), 208.
- 2) 斉藤・広瀬, 第 18 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1981), 67.
- 3) 片山ほか, 第 17 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1980), 508.
- 4) 神本ほか, 太陽エネルギー, 6-1 (1980), 2.
- 5) 甲藤・西村, 日本機械学会論文集, 26-165 (1960), 715.
- 6) 伊藤・三浦, 冷凍 56-645 (1981), 7.
- 7) 伊藤, 第 18 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1981), 64.
- 8) 大塚・春川, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 9 (1979), 1.
- 9) Bathelt, A.G., et al., ASME Paper 78-HT-47 (1978).
- 10) 日本化学会, 化学便覧 基礎編 II (改訂 2 版) (1975), 986.