

水平円管容器による潜熱蓄熱の研究

伊 藤 定 祐・三 浦 直 勝・渡 辺 文 雄

A Study on Thermal Energy Storage
by Using Phase Change Material in a Horizontal Tube

Sadasuke ITO, Naokatsu MIURA Fumio WATANABE

Abstract

The area of the solidified or melted part of a paraffin, $C_{18}H_{38}$, at one of the end sections of a horizontal copper tube cooled or heated at about a constant surface-temperature was measured from the picture of the section. From the results, the effect of the initial paraffin temperature and the wall temperature on the rate of the phase change was studied. Also, the effect of a metal plate or a cross type insertion into the pipe was studied experimentally.

The following results were obtained. The influence of initial temperatures on the solidification rates appeared in a short time at the beginning of the experiments. For the paraffin maintained at the solidification temperature initially, the experimental results showed that the speed of the solidification was linear to the temperature difference between the wall and the solid paraffin. The results agreed well with the available simple theoretical results, which are obtained assuming quasi-steady conditions. For melting, the experimental and the theoretical results agreed initially, but there appeared the influence of natural convection in the experiments resulting faster melting. The heat transfer rate also increased due to the drop of the solid part on the tube wall. The insertions in the tube increased the heat transfer greatly being effective for capsule-type thermal energy storages.

1. ま え が き

潜熱方法の一つとして融解熱を利用する方法は、蓄熱材の融点附近で多量の熱量を出し入れできる利点があり、最近関心が高まっているが、相変化に伴う体積変化、槽や容器の腐蝕、過冷却、融解および凝固の繰返しによる潜熱の変化、伝熱等に解決すべき多くの問題が残されている。

潜熱蓄熱においては、熱の出し入れをすみやかに行うことが比較的困難なので、伝熱の問題は重要であるが、この分野の研究報告はまだ少なく、特に実験的研究による報告はあまりされていない。片山¹⁾は、ナフタリンを詰めた円筒容器の融解または凝固時の熱流束を実験的に求め、階差法による理論解と比較している。神本²⁾は、蓄熱材として無機塩を用い、シェル・アンド・チューブ型蓄熱容器の伝熱問題を実験的に研究し、階差法による解析結果と比較している。Sparrow³⁾らは、水平円柱ヒ-

タのまわりにある硝酸ナトリウムと水酸化ナトリウムの混合塩に対し、融解実験を行い、対流の影響の強いことを報告している。また Bathelt⁴⁾らは、水平円柱まわりのパラフィンの融解または凝固の伝熱問題⁴⁾や、フィン付円柱のフィンの伝熱促進効果⁵⁾を報告している。

ある凝固点または融点で凝固または融解が起こる物質に対する準定常法による解法は、最も簡単な解法の一つであるが、厳密には蓄熱材の比熱が無視できる場合に成立するものである。しかし、比較的潜熱が大きく、変化の遅い相変化の問題では、対流がなく、かつ、伝熱面温度と融点または凝固点との差があまり大きくないときは近似的に成立する場合が多い。この解法は簡単であるので応用が広く、有用である。

本報では、円筒容器にパラフィンを詰めたいわゆるカプセル型蓄熱容器の壁温をほぼ一定にして、パラフィンを融解または凝固させた場合の伝熱問題を実験的に研究し、準定常法による解析結果⁶⁾と比較検討した。次に、容器に金属板または金属板を十字形に組んだものを挿入

し、それらの伝熱促進効果を検討した。蓄熱材として、凝固点及び融点がそれぞれ 27.6°C 及び 27.4°C のパラフィン (n-Octadecane, $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$, 純度 99%) を使用した。このパラフィンを使用した理由は、比較的純度の高いものが得られる事、物性値が知られている事、液相において透明であり、凝固点及び融点が室温に近いので実験が容易に行えることによる。

記号

- A : 相変化を起こしていない部分の断面積 $[\text{m}^2]$
 A_0 : 初期の蓄熱媒体の断面積 $[\text{m}^2]$
 A_1 : 管の断面積 (挿入物のない場合は A_0 に同じ) $[\text{m}^2]$
 a : 式 (9) で定義された無次元量 $[-]$
 L : 融解熱または凝固熱 $[\text{J/kg}]$
 p : 凝固過程の場合: $p=1$
 融解過程の場合: $p=-1$
 \dot{q} : 管の単位長さ当り, 単位時間当りの放熱量 $[\text{W/m}]$
 r : 半径方向の距離 $[\text{m}]$
 r_1 : 管内壁半径 $[\text{m}]$
 r_2 : 管外壁半径 $[\text{m}]$
 s : 管中心から固液境界面までの距離 $[\text{m}]$
 T : 温度 $^{\circ}\text{C}$
 T_2 : 管外壁温度 $^{\circ}\text{C}$
 T_c : 管中心温度 $^{\circ}\text{C}$
 T_m : 融点 $^{\circ}\text{C}$
 T_s : 凝固点 $^{\circ}\text{C}$
 t : 時間 $[\text{s}]$

ギリシャ文字

- δ : 挿入板の厚さ $[\text{m}]$
 θ : 式 (1) で定義された温度差 $^{\circ}\text{C}$
 θ_2 : 式 (1) で定義された温度差 $^{\circ}\text{C}$
 $\bar{\theta}_2$: 時間平均の θ_2 $^{\circ}\text{C}$
 λ_1 : 相変化した部分 (固液境界面の外側) の熱伝導率 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$
 λ_2 : 管の熱伝導率 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$
 ρ : 蓄熱媒体の密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$
 τ : 無次元時間, 式 (10) で定義 $[-]$

2. 準定常法による解析

甲藤, 西村⁶⁾がすでに、凝固の相変化を伴う熱伝導問題の準定常法による解法を示している。その解法は、初期の温度が凝固点にあり、一定の管外壁温度で冷却する場合で、現象は準定常で、伝導のみによって熱移動があ

り、固液境界面が滑らかな面であると仮定している。対流が起こらないものと仮定した融解の場合を含め、管の厚みを考慮した場合も同様にすれば解を得ることができるが、ここに、以後に示される実験結果の検討を容易にするために、対流が起こらないものと仮定した融解の場合をも含め、固液境界面の位置と時間、および単位時間当りの放熱量と時間との関係を簡単に示しておく。

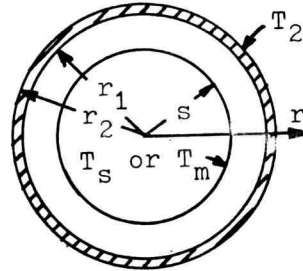


Fig. 1 Solidification or melting of phase change material in a cylinder

図 1 に示すように内半径 r_1 , 外半径 r_2 の円管に相変化を起こす蓄熱媒体が充てんされている場合を考える。凝固問題の場合は、初期の液相の温度が凝固点にあり、融解問題の場合は融点にあるものとする。管外壁温度 T_2 を一定にしてから時間 t 経過した後、相変化が半径 s のところまで進行したものと考える。したがって、凝固過程の場合は、管中心から半径 s 以内にある媒体は凝固点にある液相で、半径 s から r_1 までの間は固相である。一方、融解過程の場合は、中心から半径 s 以内には融点にある固相が存在し、 s から r_1 までの間は液相が存在する。

相変化後の相すなわち固液境界面の外側の相の熱伝導率を λ_1 とし、管のを λ_2 とする。また、温度 T と凝固点 T_s または融点 T_m との差を θ で表す。すなわち、 θ と θ_2 を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \text{凝固過程: } \theta &= T - T_s \\ \theta_2 &= T_2 - T_s \\ \text{融解過程: } \theta &= T - T_m \\ \theta_2 &= T_2 - T_m \end{aligned} \quad (1)$$

過程を準定常と仮定している ので、管の単位長さ当り、単位時間当りの放熱量 \dot{q} および温度差 θ は、円筒の定常熱伝導の解と同じであるから、

$$\dot{q} = -2\pi\lambda_1 \frac{\theta_2}{\ln \frac{r_1}{s} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

$$\theta = 0 \quad 0 < r \leq s \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\theta_2}{\ln \frac{r_1}{s} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{s}, \quad s \leq r \leq r_1 \quad (4)$$

境界面の位置が dt 時間に ds ($ds < 0$) 変化したものとすれば、顕熱が無視できる場合、固相内を熱伝導で外部に放出される熱量と、液相が凝固して発生する熱量が等しい。一方、融解の場合では、液相内を熱伝導で流入する熱量と融解に要する熱量とが等しい。したがって、

$$\lambda_1 \left(\frac{d\theta}{dr} \right)_{r=s} \cdot 2\pi s dt = \rho p L \cdot 2\pi s ds \quad (5)$$

ここに、

$$p = 1: \text{凝固 (発熱) の場合} \quad (6)$$

$$p = -1: \text{融解 (吸熱) の場合}$$

で、 ρ は蓄熱媒体の密度、 L は凝固熱 (または融解熱) である。

$$t = 0: s = r_1 \quad (7)$$

の条件を用いて式 (5) を積分すれば

$$\begin{aligned} \left(\frac{s}{r_1} \right)^2 \left[1 - \ln \left(\frac{s}{r_1} \right)^2 + 2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_1}{r_2} \right] \\ = 1 + 4 \frac{\lambda_1 \theta_2 t}{\rho p L r_1^2} + 2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \end{aligned} \quad (8)$$

初期の媒体断面積すなわち管断面積 A_1 、時間 t における相変化していない相 (初期の相と同じ相) の部分の断面積を A とし、

$$a = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (9)$$

$$\tau = - \frac{\lambda_1}{\rho p L} \cdot \frac{\theta_2 t}{r_1^2} \quad (10)$$

と表せば、

$$\frac{A}{A_1} \left(1 - \ln \frac{A}{A_1} + 2a \right) = 1 - 4\tau + 2a \quad (11)$$

ここに a は、 λ_2 が λ_1 に比べて非常に大きく、 r_2 と r_1 の比が 1 に近い場合は小さな値となり、無視できる。

放熱量 \dot{q} は、顕熱が無視できる場合、凝固量または融解量の時間的変化より算出できる。すなわち、

$$\dot{q} = \rho p L \frac{d}{dt} (A_1 - A) \quad (12)$$

あるいは、

$$\frac{\dot{q}}{\pi \lambda_1 \theta_2} = - \frac{d}{d\tau} \left(1 - \frac{A}{A_1} \right) \quad (13)$$

式 (11) を τ で微分することにより、(13) 式の右辺が

求められ、結果的に式 (13) は次式となる。

$$\frac{\dot{q}}{\lambda_1 \theta_2} = \frac{4\pi}{\ln \frac{A}{A_1} - 2a} \quad (14)$$

式 (11) からわかるように、相変化した量の割合は、無次元時間 τ と a のみの関数となる。この関係を、 $a=0$ の場合について図 2 に示す。初期に相変化の進行が速く起こり、時間が経つにつれて遅くなっていく。

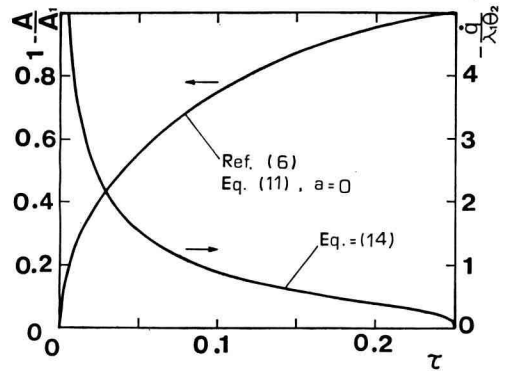


Fig. 2 Variation of solid portion and heat released

式 (14) で得られた放熱量と無次元時間との関係を同図に示す。式 (13) からわかるように、放熱量は図 2 の相変化量の割合を示す曲線の微係数の絶対値に比例するもので、同図に示すように、初期には大きく、漸時小さくなっていくことがわかる。

3. 実験装置及び実験方法

図 3 及び図 4 にそれぞれ実験装置本体の写真及び円筒容器の詳細図を示す。アクリル板でできた槽のほぼ中央の高さのところに、内径 30.8 mm、外径 34.9 mm、長さ 414 mm の銅管が水平に設置され、その内部に液相の状態に満たされたパラフィンが詰めてある。この管の上部に、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。

凝固実験の場合は、各実験開始前のパラフィンの温度を一定に設定するために、恒温槽 (三田村理研工業製、ユニバーサル・サーモ・バス) で一定温度にした水を最上部の管に導き、その管の下部に開けられた多数の孔より噴出させる。噴出した水は上から 2 番目にある黄銅管の表面を流れて銅管にかかる。槽の下部に溜った水は循環ポンプを使って再び恒温槽にもどす。このような循環

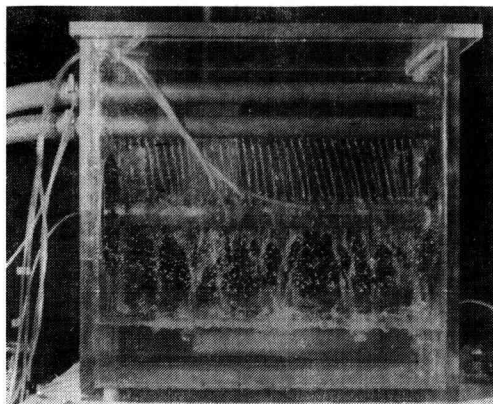


Fig. 3 Picture of experimental apparatus

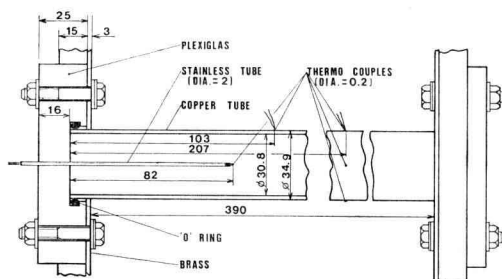


Fig. 4 Details of cylindrical thermal energy-storage

を2時間程行わせる。

凝固実験開始時に上部の管への給水が止められ、循環ポンプ付冷却器（クールニット、大洋科学工業製）より凝固点以下の設定温度に下げられて槽手前で循環していた水は、上から2番目の黄銅管に導かれ、下部に1列に開けられた孔より銅管の表面に向かって噴出し、銅管を強制的に冷却する。銅管の端は厚さ16mmの透明アクリル製のフタで締めてあり、槽の側面よりパラフィンの凝固過程を観察できる。管断面中心温度は、外径2mmのステンレス管に入れられた直径0.2mmの銅-コンスタンタン熱電対を管側面より82mmのところまで挿入し、デジタルマルチメータで計測した。管表面温度は、管壁にハンダ付けされた熱電対で測定した。管の中央のところの上部、中部および下部の3点と、管壁に近いところの左右2点で温度計測したところ、それぞれの位置間の温度差はほとんど認められなかったため、以後の実験においては管中央上部の温度のみ計測した。経過時間 t は、冷却水が銅管にかかった瞬間からストップウォッチ

ではかり、凝固量は、熱電対が挿入されていない方の管側面を写真撮影し、写真の凝固部の面積をプランニメータおよび物尺を用いて測定することにより得た。凝固実験においては、まず、蓄熱材の初期温度の凝固速度に与える影響を調べた。次に、初期温度がほぼ凝固点にある場合に対し、3通りの異なった壁温で実験を行った。

融解実験においては、冷却器でパラフィンの初期温度をほぼ融点に設定し、恒温槽で一定温度にした水を銅管にかけてパラフィンを融解させた。固相のパラフィンは液相よりも密度が大きいので、管の内側に接した部分が融解した場合、支持するものがないと落下する。本実験では片側の管側面は熱電対挿入管で支持されている。管の他端の中心部は、樹脂で直径2.5mmの突起をつくり、固相部を支持するようにした。

伝熱促進のために用いた金属板は厚さ0.3mmまたは1mmの銅板、あるいは1mmの18-8ステンレス鋼板で、一枚の板の場合は水平に挿入して実験を行った。

4. 実験結果

図5に初期の液相の温度が凝固点および凝固点より20.0°Cと39.8°C高い場合の凝固実験の結果を示す。横軸に時間 t をとり、図の左側の縦軸に管断面積に対する凝固部分の割合を、右側の縦軸には管外壁および管中心温度をとっている。初期温度がほぼ凝固点にある場合は、壁の温度をごく短い時間に一定にすることができた

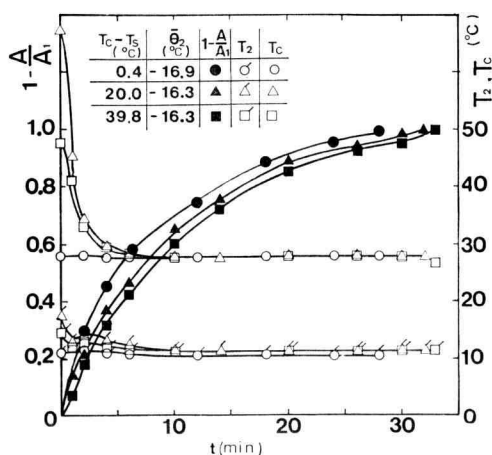


Fig. 5 Influence of initial temperature on solidification of liquid

が、凝固点より約 20°C および 40°C 高い温度にある場合は、管内の高い温度にある液相の影響を受け、ほぼ設定温度の壁温にするのに5分程かかった。同図に示されている $\bar{\theta}_2$ は温度が安定してから壁温と凝固点の差の平均値である。初期の液相の温度が凝固点よりも高い場合は、冷却により、まず液体の顕熱が主に奪われるので、凝固点にある場合に比べて、同じ時間に対する凝固量は少なくなっている。管中心温度も壁温と時間的にはほぼ同様に急激に低下し、凝固点に近づくので、液相の顕熱は比較的早い時期に奪われ、以後、凝固は凝固点にある場合のものとはほぼ同様に進行していき、時間が経つにつれ初期温度の影響が少なくなってくる。この傾向は平板の片側が断熱されている場合と同様である⁷⁾。同実験において、初期温度が凝固点より 39.8°C 高い場合でも、ごく初期の固液境界面と円管に多少の偏みがあるだけで、以後はほぼ同心円状に凝固するのが観察された。

図6に、壁温を一定にした場合で、 $\bar{\theta}_2$ が -4.6°C 、 -8.0°C および -16.6°C のときの管壁温度、管中心温度および凝固率 $(1-A/A_1)$ の実験結果を示す。管中

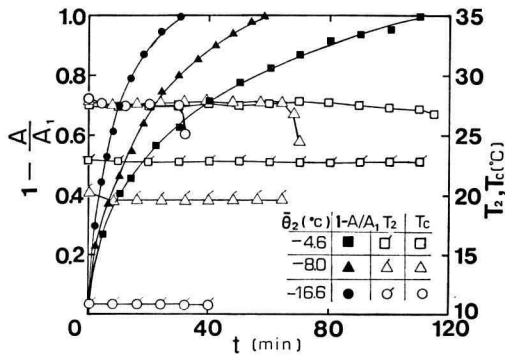


Fig. 6 Variation of solid portion with time

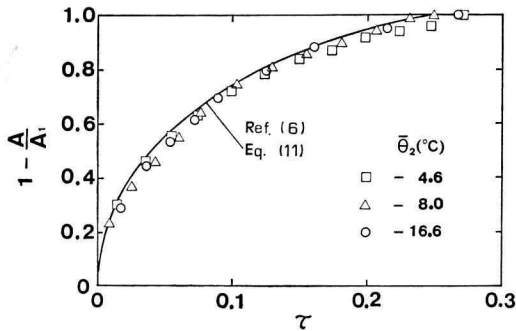


Fig. 7 Experimental and analytical results of solidified portion

心温度が低下しはじめるとき凝固が完了するものと考えられるが、同図においてわかるように、側面からの観察によるものと、管中心温度より知られる凝固完了時間はほぼ一致している。また、95% 程度凝固したとき、管からパラフィンを取り出し、管の長手方向中央で切断し、管側面と中央部での孔のそれぞれの直径を比較したところ差異は認められなかったことから、本実験においては壁の影響は無視できるものと考えられる。

つぎに図6に示された同実験に対し、図7に縦軸に凝固率を、横軸に無次元時間をとって示す。比較のため式(11)で得られる理論解も示す。理論的に無次元時間 τ と凝固率 $(1-A/A_1)$ の間には異なった $\bar{\theta}_2$ に対しても一つの関係が成立するが、実験結果においても同様の関係が得られ、また定量的にも実験結果と理論解とはよい一致を示した。

なお、パラフィンの物性値は以下の値を使用した。ここで、実測値 (* で示された値) 以外のものは文献(4)に示された値を用いた。

n-Octadecane ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}$, 純度 99%) の物性値

融点 T_m : 27.4°C

凝固点 T_s : 27.6°C

融解熱 (凝固熱) L : $241.3 \times 10^3 \text{ J/kg}$

熱伝導率 (液相) λ_l : $0.149 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

(固相) λ_s : $0.421 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

(λ_s は昭和電工製 Shotherm QTM-D2 により測定)

密度 (液相, 30°C) ρ_l : 775 kg/m^3

(固相, 16°C) ρ_s : 869 kg/m^3

理論解においては、蓄熱媒体の密度 ρ は一定であると仮定しているが、実際の場合は相変化により多少変化する。理論解に用いる ρ を液相と固相の平均密度と仮定し、その密度を用いて式(10)を定義したものであると考えることにより、実験値の τ を求めるときは ρ に液相と固相の平均密度を用いた。もし、固相の密度を用いると、平均値の密度より6% 大きくなり τ は6% 減少する。また、液相の密度を用いると τ は6% 増加する。

つぎに融解の実験結果の一例として、壁温が融点より 7.6°C 高い場合を図8に示す。記号 A は融解実験の場合、管断面の固相部の面積である。管中心温度は A/A_1 が0に達する以前、すなわち融解が完了する以前にすでに上昇しているが、その理由は、対流の影響で上部の固相部がより早く融解し、時間が経つと上部の固液境界面が管中心まで達し、管中心にある熱電対で支持されていた固相部が支持されなくなり、途中で落下するからである。同図に解析結果も示すが、管断面積の40% 程度ま

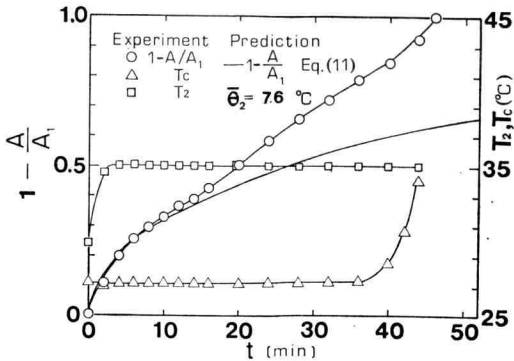


Fig. 8 Variation of melted portion with time

で融解する間は、理論値と実験値とはよい一致を示しているが、以後両者の差は大きくなっていく。この理由は、実験においては対流の影響で熱伝達がよくなり、融解がより速い速度で行われることによる。また熱電対が取付けられている管側面と反対側にある写真撮影用管側面の中心に突起を設けて固相部が落下しないようにしてあるが、固相の上部が管中心まで融解すると支えがなくなり、残りの固相部が管下部の管内壁上に落下するので管との熱伝達が容易になり、すみやかに融解するために、実験結果は理論結果より速い速度で融解する。

凝固と融解の固液境界面の相違を示すためにその一例とし、 $\bar{\theta}_2$ が -8.0°C および 7.6°C の場合の 12 分、20 分及び 28 分後のそれぞれの管側面写真を図 9 に示す。融解の場合においても 12 分後ぐらいまでは境界面が管とほぼ同心円状に移行していくが、20 分後のときには対流の影響で上部の方がより多く融解しているのがわかる。28 分後ではその影響はさらに大きく表れている。管壁面に接した液相パラフィン温度が高くなり、したがって密度が小さくなって上昇し、上部中央までいってから

固相部の上部に向い、その表面をより速い速度で融解させるからであると考えられる。

図 10 に、管内に厚さ 1 mm の銅板またはステンレス板を挿入した場合と挿入しない場合の凝固速度の比較を示す。図 11 の写真結果からもわかるように、特に熱伝導率の大きい銅板を挿入すると伝熱がよく改善され、熱の放出がより容易に行われる。なお図中の A_0 は $t=0$ のときの液相の断面積である。面積 A_0 に対する融解した部分の面積の割合が縦軸にとってあるので、管断面積 A_1 に対する融解した面積の割合を求めるときは縦軸に示された値に A_0/A_1 を乗すればよいが、挿入板の断面積が小さいのでその影響は小さい。写真でみられるように熱伝導率のよい銅板を挿入した場合は板が一樣な温度になりやすいので、 t が 3 分のような初期の頃においても挿入板にはば一樣な厚さで凝固しているのに対し、熱伝導率の比較的悪いステンレス板の場合は、板の中央部における凝固量は少なくなっている。

同様に厚さ 0.3 mm の銅板または銅板を十字形にしたものを挿入した場合の結果を図 12 に示す。比較のため厚さ 1 mm の結果も示す。図 11 の写真結果からもわかるように、熱伝導率が非常によい銅の場合でも板の厚さが薄いと、熱伝導率の悪いステンレス板と同様に初期の板中央における凝固量は少なくなっている。厚さ 1 mm の板は、0.3 mm 厚の板でできた十字形のもが管壁に接する部分の板の総厚さより大きく、初期の頃には凝固速度は幾分大きい。しかし、時間が経つにつれて十字形のもの凝固速度のほうが大きくなっている。これは、初期の凝固速度の大きい時期には特に挿入体の熱伝導の良否が大きく影響し、管に接近している板厚の総和の影響が大きいが、板の両側にある程度固相ができた頃は伝熱面積が大きな影響を与えるようになり、伝熱面積のより大きな十字形のものの方が凝固速度が大きくなるから

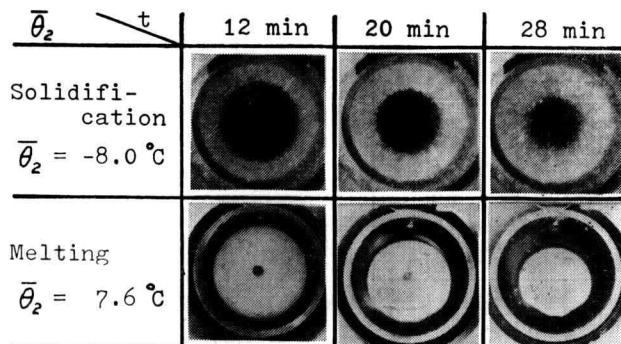


Fig. 9 Boundary shapes in solidification and melting

であると考えられる。

図 13 に融解の場合に対する上と同様の挿入体の影響を示す。凝固の場合と同様に伝熱が促進され融解が速くなる。管の側面に固着している固相が融解すると落下

し、管壁または挿入体に接触するので伝熱がよくなり、融解の速度が非常に速くなる。実際のカプセル型蓄熱容器の場合においても、固相を固定するものがないかぎり同様の現象の起こることが予想される。

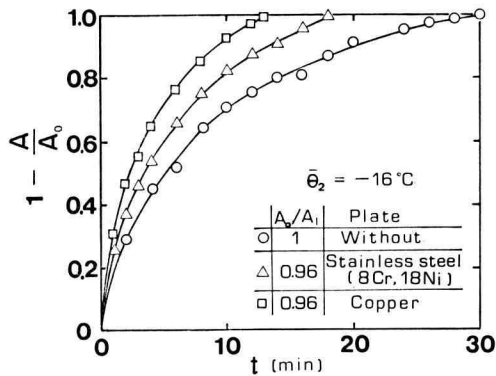


Fig. 10 Effect of plates inserted into tube on generation of solid

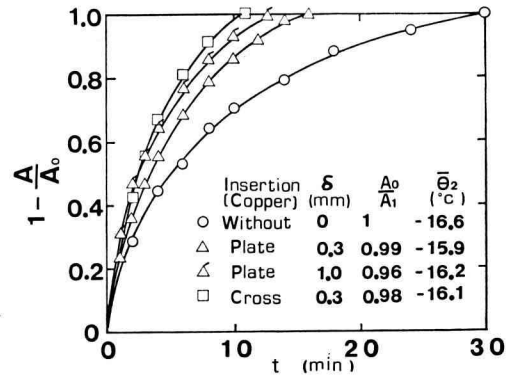


Fig. 12 Effect of insertions on generation of solid

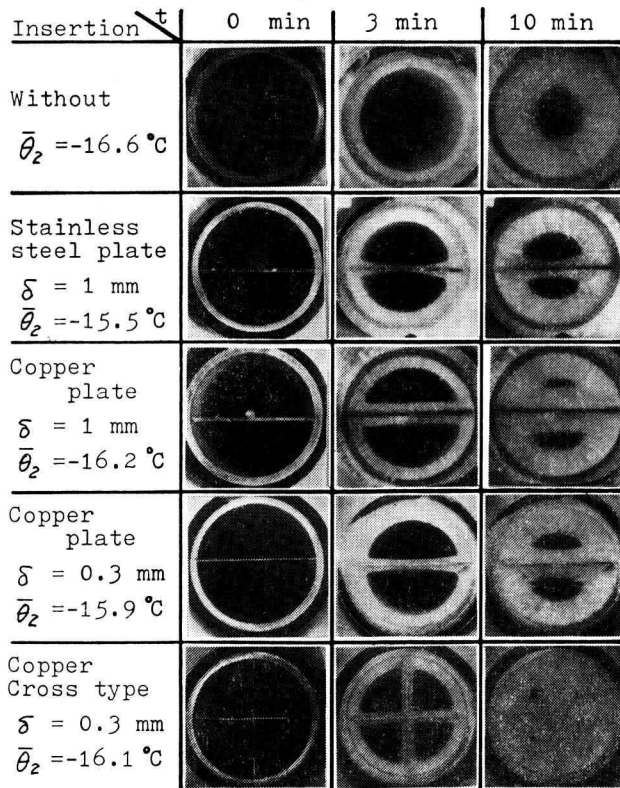


Fig. 11 Pictures of solidification of liquid

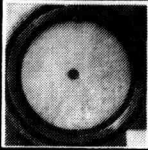
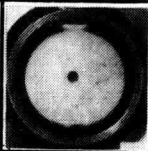

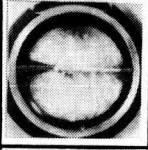
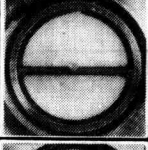

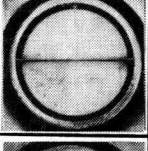

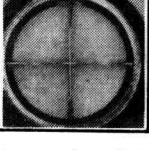
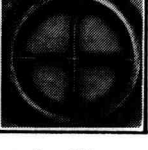
Insertion \backslash t	2 min	6 min
Without $\bar{\theta}_2 = 15.9^\circ\text{C}$		
Stainless steel plate $\delta = 1\text{ mm}$ $\bar{\theta}_2 = 15.7^\circ\text{C}$		
Copper plate $\delta = 1\text{ mm}$ $\bar{\theta}_2 = 16.0^\circ\text{C}$		
Copper plate $\delta = 0.3\text{ mm}$ $\bar{\theta}_2 = 16.1^\circ\text{C}$		
Copper Cross type $\delta = 0.3\text{ mm}$ $\bar{\theta}_2 = 15.9^\circ\text{C}$		

Fig. 13 Pictures of melting of solid

5. 結 び

本実験装置を用いて、蓄熱媒体の初期温度を凝固点または融点に設定し、ほぼ壁温一定の条件で凝固または融解の実験を行うことができ、相変化量を写真撮影することにより計測できた。実験による凝固量は準定常法によ

る解析結果とよい一致を示した。融解量は、初期の時期には実験結果と、対流を考慮しない理論結果とよい一致を示したが、時間が経過すると対流の影響が表れ、実験においてより早く融解した。熱伝導率の良い板または十字形挿入体を用いることにより伝熱を著しく促進することができた。カプセル型蓄熱容器において、融解の場合で、固相を固定するものがない場合は、固相部が落下することにより伝熱は著しく促進された。

謝 意

Dr. A. G. Bathelt より本研究において使用したパラフィンに関する情報を戴いたこと、昭和電工(株)の木村氏の御好意によりパラフィンの熱伝導率を測定していただいたこと、実験装置の製作において、機械工学科の横井技術員にお手伝い戴いたこと、および実験において本学機械工学科 54 年度及び 55 年度の 4 年生で本研究をテーマとして卒業研究を行っていた学生諸君の協力を得たことに深く謝意を表す。

引 用 文 献

- 1) 片山・ほか 6 名, 第 16 回伝熱シンポジウム講演論文集 (1979), 208.
- 2) 神本・ほか 3 名, 太陽エネルギー, Vol. 6, No. 1 (1980), 2.
- 3) Sparrow, E.M., ほか 2 名, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 100 (1978), 11.
- 4) Bathelt, A.G., ほか 2 名, ASME Paper 78-HT-47 (1978).
- 5) Bathlet, A.G. and Viskanta, R., ASME Paper 80-HT-10 (1980).
- 6) 甲藤・西村, 機械学会論文集, 26, 165 (昭 35-5), 715.
- 7) 伊藤・手塚, 第 14 回空調・冷凍講演論文集 (1980) 73.