蓄熱円筒カプセル内部に多孔体金属を挿入した場合の融解特性の研究

小木浩通[○] (検査開発(株)), 井上敦良(茨大工), 椎名保顕 (原研), 稲垣照美 (茨大工)Study on melting characteristics of liquid
in heat storage cylindrical capsules with porous metals

Hiromichi OGI, Atsuyoshi INOUE, Yasuaki SHIINA and Terumi INAGAKI

ABSTRACT

Effect of porous metal immersed in cylindrical capsules on melting of solid phase by forced convection was studied by flow visualization technique. Experiment was compared with numerical analysis. Melting characteristics without porous metal agreed with the numerical results based on the non-uniform heat transfer coefficient on the capsule surface. Porous metal inserted in the capsules reduces the surface temperature of the capsules and suppresses natural convection. Finally, increase in effective thermal conductivity due to porous metal reduces melting time of the phase change fluid. The shape of the solid liquid boundary became more concentric by inserting the porous metal.

Keywords: Heat Storage, Porous Metal, Forced Convection

1. はじめに

相変化を利用した潜熱蓄熱方式は、一定温度で大量の熱の貯蔵ができるという点で他の蓄熱方式より優れた特徴を有している。しかし、固液相変化の伝熱は相変化物質 (PCM) 内部の自然対流及び熱伝導が支配的であり、PCM の熱伝導率は小さいことから、伝熱速度が小さい。したがって、潜熱蓄熱の実用化のためには、相変化速度を高くすることが必要である。そのためフィンを用いる等の工夫が考えられているが、PCM 中に多孔体金属を挿入する等により、実効熱伝導率を高くすると一層効果的であると考えられる⁽¹⁾。

しかし、PCM 中に多孔体金属を挿入すると自然対流が抑制されるため、融解速度が低下する可能性がある。本研究では、カプセル内の PCM 中に多孔体金属を挿入した場合の空気流中での融解実験を行い、固相の融解特性の測定及び相変化界面の可視化を行い、相変化に及ぼす PCM 内の多孔体金属の有効性を調べた。

2. 実験

2.1 融解実験

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。実験では金属繊維を挿入した円筒カプセルと挿入しない円筒カプセルを空気流中に設置し、融解特性の違いを調べた。図 1(a)は実験に用いた空気流路及び流路に配置された2つの円筒カプセルを示す。空気流路は断面が100mm×100mm、長さ1000mmの亚克力製吸い込み型流路で、流路入口から300mm下流に、図に示すように2本の円筒カプセルを設置した。流路内には、入口部から流路を上下2つの等間隔の流路に分けるように、厚さ0.5mmのステンレス板を水平に設置し、2本の円筒カプセルが上下2つの流路の中央に配置されるようにした。図1(b)に1つの円筒カプセルの概略図を示す。円筒カプセルは銅製で、内(外)径18(20)mm、長さ100mmである。円筒中心に0.5mmφのK型シース熱電対を取り付けるとともに、中心から少し下の位置に外径0.5mmφのSUSパイプを取り付け、固相の浮力による移動を防いだ。また、銅管外側表面によどみ点から90°おきに50μmφのCA熱電対を取り付

け、表面温度を測定した。実験で使用したPCMは水及びテトラデカンである。テトラデカンの物性値をTable 1に示す。多孔体金属として気孔率0.95の発泡ニッケル及び気孔率0.9及び0.95とした銅繊維を円筒カプセルに挿入した。実験は、内部にそれぞれPCMのみ及びPCMと多孔体金属を入れた2本の円筒カプセルを凝固させた後、空気流路の試験部に水平に設置して、強制対流による融解過程を調べた。実験では中心温度及び表面温度の測定、固液界面形状の観察及びビデオ撮影等を行った。

Table 1 Thermal properties of Tetradeane

$T_f(^{\circ}\text{C})$	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	$C_p(\text{J}/\text{gK})$	$\lambda(\text{W}/\text{mK})$	$L(\text{J}/\text{g})$
5.9	0.81(s)	1.8(s)	0.43(s)	229
	0.77(l)	2.1(l)	0.14(l)	

T_r : melting point, l : liquid, s : solid, ρ : density, C_p : specific heat, λ : thermal conductivity, L : latent heat

(a) Experimental apparatus for forced convection

(b) Configuration of a cylindrical capsule

Fig. 1 Outline of experimental apparatus

2.2 実効熱伝導率測定実験

固液相変化は相変化潜熱が大きい相変化過程は準定常として取り扱うことができる。初期温度が融点近傍の液体が凝固する場合には、凝固時間は近似的に以下のように求められる⁽¹⁾。

$$t = \frac{D_i^2(\rho C_p)_{ef}}{16St} \left(\frac{1}{(\lambda_{fs})_{ef}} + \frac{4}{D_0 h_0} + \frac{2}{\lambda_w} \ln \frac{D_o}{D_i} \right) \quad (1)$$

ここで t : 時間, D_i, D_o : 円筒カプセル内外径, St, h_0 : ステファン数及び熱伝達率, λ_w : 円筒壁の熱伝導率である。また, $(\cdot)_{ef}$ は多孔体金属に含浸させた PCM の物性値の実効値を示し, $(\lambda_{fs})_{ef}$: PCM 固相の実効熱伝導率である。 St 等も実効値で定義する。(1)式中の物性値のうち, $(\lambda_{fs})_{ef}$ 以外は多孔体金属の気孔率 ε 及び金属と PCM の物性値により求めることができる。したがって、(1)式で未知の値は h_0 及び $(\lambda_{fs})_{ef}$ である。そこで、銅の円筒カプセル中に熱伝導率が既知の PCM (水) を入れて、低温循環恒温水槽の一定位置に設置し、凝固時間を測定して(1)式から h_0 を求め、次に、円筒カプセルに熱伝導率を測定する PCM + 多孔体金属を入れ、低温循環恒温水槽の同じ位置に設置して凝固時間を測定し、 h_0 を用いて実効熱伝導率を求めた。銅繊維は円筒軸に垂直に挿入した。実効熱伝導率の測定結果を Table 2 に示す。

Table からわかるように、実効熱伝導率は銅繊維の場合には 6 倍から 10 倍程度に、発泡ニッケルの場合には、約 3 倍程度に増加させることができる。実効熱伝導率のバラツキは多孔体金属の挿入具合によるものと考えられる。これらの値は平澤⁽²⁾による理論値と比べて約 30% 程度小さいが、これは接触熱抵抗によるものと考えられる。

2.3 可視化実験

図 1(b)に示す融解実験用円筒カプセルを用いると、多孔体金属が光の透過を妨げるため相変化界面の観察ができなかった。そこで、銅カプセルの厚みを 10mm とし、両側に銅パイプと同じ外径の亚克力栓および亚克力パイプを接続し、図 1(b)と同じ寸法にしたカプセルを用いて可視化実験を行った。PCM は銅カプセル部にのみ挿入し、亚克力カプセルには何も挿入しなかった。可視化実験は、銅繊維および発泡ニッケルで試みたが、銅繊維の場合は界面が不明瞭であるため、発泡ニッケルのみで実験を行った。実験は融解実験と同様の手順で行い、多孔体金属を挿入したカプセル及び挿入しないカプセルを同時に観察し、ビデオ撮影を行った。

3. 数値解析

相変化を考慮した熱伝導解析を行い、実験と比較した。

Table 2 Effective thermal conductivity

PCM	Water	Tetradecane
	$(\lambda_{fs})_{ef}$ (W/mK)	$(\lambda_{fs})_{ef}$ (W/mK)
	2.3	0.43
Copper Wire + PCM		
$\varepsilon = 0.95$	6 ~ 6.5	1.8 ~ 2.3
$\varepsilon = 0.90$	9.6 ~ 14.1	4.1 ~ 4.6
Nickel + PCM		
$\varepsilon = 0.95$	5.3 ~ 6.3	1.3

数値解析では以下の熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \rho L \frac{\partial G}{\partial t} \quad (2)$$

を表面熱伝達率を与えて解いた。ここで G は固相率である。解法は文献(1)と同じである。表面熱伝達率は Eckert らの実験結果及び Schmidt ら及び五十嵐らの非均一熱伝達率分布の相関式を用いた⁽¹⁾。2 章に記述したように、本実験では 2 つの円筒カプセルの実験条件を等しくするために流路中央に仕切り用 SUS 板を取り付けたが、このため、流路幅と円柱径の比 $d_o/H=0.4$ となる。この場合、円柱回りの熱伝達率分布は一樣流とは大きく異なるものと考えられる。円柱による流路閉塞率の高い場合の実験は松和田⁽³⁾により行われており、背面側の熱伝達率が高くなることが報告されている。それらは高 Re 数領域の実験であり、本実験に適用できるかどうかは明らかではないが、定性的には同様の現象が生じると考えられる。そこで、文献(3)を基に熱伝達率の修正を行いそれに基づいて解析を行った。(1)式中の ρ, c, λ, L の物性値は実効値であり、熱伝導率は実測値を用いた。

4. 結果と考察

Fig. 2 に $Re=3200$, PCM=水を気孔率 0.90 の銅繊維に含浸させた場合と PCM のみの場合の温度の時間変化の実験結果及び解析結果を示す。図で記号は実験結果であり、黒記号は PCM のみの場合、白い記号は PCM+多孔体金属の場合を示す。実線等は解析結果を示す。解析には非一樣熱伝達率を用いたが、カプセルが銅のため、表面温度はほとんど一樣となる。図から、融解時間が多孔体金属を挿入する方が短縮されること及び、多孔体金属を挿入する方が表面温度が低くなることがわかる。融解時間は解析の方が実験より大きい。この原因として、カプセル周りの熱伝達率が実際と異なること、解析で用いた実効熱伝導率と実際の値の違い、PCM のみにおける内部の自然対流の影響等が考えられる。しかし、多孔体金属を挿入した場合の不一致は小さい。また、後

Fig. 2 Plot of temperature against time during melting with and without copper wire (water, $Re=3200$, $D_o=20mm$)

述の実験と解析の一致から、熱伝達率の違いは小さいと考えられ、実効熱伝導率の影響及び内部自然対流の影響が大きいと考えられる。多孔体金属を挿入すると、多孔体金属の存在による PCM 量の減少を考慮に入れても、融解時間は約 6 割に減少することがわかる。(1)式からわかるように、レイノルズ数が高くなると熱伝達率が増加するため、多孔体金属を挿入したことによる融解時間の低減率はレイノルズ数が小さい場合より大きくなる。

多孔体金属の挿入による表面温度の減少は実効熱伝導率の増加によるものと考えられる。多孔体金属が挿入されると表面温度が低下するため、伝熱流体との温度差が増大し、流入熱量が増加して融解が促進される。一方、表面温度と融点との温度差の減少及び多孔体による流動抵抗の増大のため、自然対流は抑制され、自然対流による伝熱は低下する。したがって、実効熱伝導率を増加させることによる伝熱促進は、両者の効果を考慮する必要があるが、この場合には伝熱が促進されることがわかる。この場合、実験の壁温は解析に比べて高くなっている。解析では実験で得られた実効熱伝導率の最大値を用いたが、実験における値はこれより小さいこと等によって考えられる。

Fig. 3に $Re=400$, PCM=テトラデカンを気孔率 0.95 の発泡ニッケルに含浸させた場合と PCM のみの場合の融解実験結果及び解析結果を示す。この場合、多孔体金属を挿入した場合の解析結果は実験結果とよく一致する。一方、PCM のみの場合には実験の融解時間の方が短い。これは融解時に円筒カプセル内に生じる自然対流の影響であると考えられる。図からわかるように多孔体金属を挿入した場合と PCM のみの場合の表面温度の挙動は顕著に異なる。PCM の場合の上に凸の形状に対し、多孔体金属の場合には下に凸の形状を示す。上に凸となるのは自然対流の影響であると考えられる。多孔体金属がある場合の表面温度等の実験と解析の結果から、この場合には自然対流の影響はほとんどないと考えられる。多孔体

Fig. 3 Plot of temperature against time during melting with and without nickel foam (tetradecane, $Re=400$, $Do=20mm$)

金属を挿入した場合の融解時間は挿入しない場合に比べ約 2 割減少していることがわかる。

Fig. 4 に $Re=3200$, PCM=テトラデカンを気孔率 0.95 の発泡ニッケルに含浸させた場合と PCM のみの場合の融解実験結果及び解析結果を示す。Figs. 2, 3 と同様に多孔体金属を挿入した場合には PCM のみの場合に比べ壁温が低くなり、表面温度のばらつきが小さくなる。また多孔体金属を挿入した場合には実験と解析はよく一致するが、PCM のみの場合には実験と解析の一致はよくない。この場合においても多孔体金属を挿入した場合は内部自然対流が抑制されているが、挿入しない場合は内部自然対流の影響が大きいと考えられる。多孔体金属を挿入した場合の融解時間は挿入しない場合に比べ約 3 割減少していることがわかる。

Fig. 2~4 からわかるように銅繊維及び発泡ニッケルの挿入により壁温のばらつきが小さくなり融解時間は約 2 割~4 割減少している。多孔体金属を挿入することで実効熱伝導率が増加し、表面温度の低下により外部から流入する熱量が増加して融解が促進される。一方、多孔体金属を挿入すると自然対流が抑制され、PCM 内部における対流熱伝達は低下する。したがって、多孔体金属の挿入は、実効熱伝導率の向上による伝熱促進と、内部自然対流の抑制による伝熱劣化の 2 つの効果を考慮する必要がある。また、実効熱伝導率の向上による伝熱促進効果は外部伝熱流体のレイノルズ数が高くなると大きくなるため、この影響も考慮する必要がある。内部自然対流はカプセル径が大きい場合に増大されるため、大きなカプセルを用いる場合には自然対流の抑制による伝熱劣化の効果が大きくなる可能性がある。しかし、本実験の範囲においては、多孔体金属の挿入により自然対流が抑制されるが、全体としては相変化時間は短縮されるため、実験に用いたカプセル径の範囲では多孔体金属の挿入は相変化速度の向上に有効であるといえる。

Fig. 5 及び Fig. 6 に $Re=400$ 及び 3200 , PCM=水、金属

Fig. 4 Plot of temperature against time during melting with and without nickel foam (tetradecane, $Re=3200$, $Do=20mm$)

多孔体=発泡ニッケルの場合の相変化界面の形状を示す。
Fig. 7 は $Re=3200$, PCM=テトラデカン 多孔体金属=発泡

(a) Without nickel foam (b) with nickel foam
Fig. 5 Shapes of liquid solid boundary ($D_o=20mm$, water, $Re=400$)

(a) Without nickel foam (b) with nickel foam
Fig. 6 Shapes of liquid solid boundary ($D_o=20mm$, water, $Re=3200$)

ニッケルを用いた場合の結果である。いずれも(a)は多孔体金属を挿入しない場合、(b)は多孔体金属を挿入した場合の結果である。水だけの場合 (Fig. 5(a)) は固相形状は同心円に近い形状で融解する。テトラデカンだけの場合 (Fig. 7(a)) は融解後半から上部の融解が早くなり、また固相が上にとがった形状になっている。どの場合においても、多孔体金属が挿入された場合の方が早く融解しており、多孔体金属の挿入は相変化速度の向上に有効であることがわかる。

5. まとめ

融解実験及び可視化実験から PCM を多孔体金属に含浸させることにより相変化時間を大きく短縮できることを示した。これはカプセル内に多孔体金属を挿入することで実効熱伝導率の増加させ、表面温度の低下により外部から流入する熱量が増加して融解が促進されるためである。また、レイノルズ数が高くなると多孔体金属を挿入したことによる融解時間の低減率はレイノルズ数が小さい場合より大きくなる。多孔体金属を挿入すると内部自然対流は抑制され、伝熱は劣化すると考えられるが、実験の範囲では、実効熱伝導率の増加による融解促進効果の方が大きい。

参考文献

- 1) 椎名他, 機論 B 編, 69-681(2003),1233
- 2) 平澤他, 機論 B 編, 60-575(1994),2491
- 3) 桧和田他, 機論 B 編, 46-409 (1981), 1750

(a) Without nickel foam (b) with nickel foam
Fig. 7 Shapes of liquid solid boundary ($D_o=20mm$, tetradecane, $Re=3200$)