蓄熱カプセル内に金属繊維を挿入した場合の融解特性の研究

吉沢大輔[○](茨城大学), 椎名保顕(原研), 稲垣照美(茨城大学)

Study on melting of fluid in heat storage capsules with metal wire

Daisuke YOSHIZAWA, Yasuaki SHIINA and Terumi INAGAKI

Effect of metal wire immersed in cylindrical capsules on melting of solid phase by natural convection was studied by flow visualization technique. Experiment was compared with numerical analysis. Melting time agreed with the numerical results obtained by the use of empirical correlation of natural convection in the capsules. Metal wire decreases the surface temperature of the capsules and suppresses natural convection in the capsules. Increase in effective thermal conductivity due to metal wire reduces melting time of the phase change fluid. The shape of the solid liquid boundary became more concentric by inserting the metal wire.

Keywords: Visualization, Melting, Heat storage, Metal wire, Natural convection

1. はじめに

相変化を利用した潜熱蓄熱は、顕熱蓄熱と比較して一定温度で大量の熱を貯蔵することができるため、家庭用のみならず各産業への応用が期待されている。また、潜熱蓄熱を利用して、熱伝達流体の温度変動を吸収・低減化することが可能であり、これは、高温ガス炉の熱利用系の温度変動等が原子炉系に影響するのを防ぐ熱負荷変動吸収等のために利用することができる。その場合、流体との熱伝達特性を高くするために、蓄熱媒体をカプセルに封入したり、熱伝導特性の高い多孔体中に含浸させることにより実効熱伝導率を高くして蓄熱・放熱を行う等の工夫が必要となる。本研究では、実効熱伝導率を高くするために円筒カプセルに金属繊維を挿入した場合に、金属繊維が相変化流体の融解特性及びカプセル内自然対流に及ぼす影響について、相変化界面を可視化すること等により調べたので報告する。

2. 実験装置及び実験方法

Fig.1に実験装置の概略図を示す。(a)図は実験に用いた円筒容器概略図である。円筒はアクリル製で、内(外)径 8(10), 35(40)mm、長さ 100mm の2種類を用いた。円筒中心に 0.5mmφの K 型シース型熱電対を取り付けるとともに、中心から少しずらした位置に外径 0.5mmφのステンレスパイプを取り付け、固相が浮力により移動するのを防いだ。また、アクリル外側表面に 90°おきに 50μmφの K 型熱電対を取り付け、表面温度を測定した。(b)図に自然対流実験装置の概略を示す。装置は縦×横×高さ=350×350×600mm のアクリル密閉容器で構成され、容器内にはカプセル表面が結露することを防ぐため、シリカゲル約 1kg を容器床及び天井に設置し除湿した。実験で使用した流体は水及びテトラデカンである。また、金属繊維として直径 0.2mmφの銅線を適量らせん状に燃ったものを用いた。実験は、円筒カプセル内に流体及び金属繊維を入れ、それを約-10°C 以下の温度に保持して凝固させた後、自然対流実験用容器に水平に設置して、融

解過程の測定を行った。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を行った。自然対流実験における実験開始時におけるグラスホフ数

$Gr = g\beta(T_{\infty} - T_w)\rho_0^3/\nu^2$ 範囲は $2 \times 10^3 \leq Gr \leq 1.7 \times 10^5$ である。

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。解析は軸対称円筒座標系で行い、円筒表面で周方向に一樣な熱伝達、及び熱放射を考慮した。基礎式は次のように表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{L}{c_p} \frac{\partial G}{\partial t} \quad (1)$$

解析では相変化により生じる体積変化は無視した。また、固相率を導入し、あるコントロールボリュームで固相率が 0 になったとき融解が完了し、界面が次に移動するものとした。解析では内部自然対流を無視した熱伝導のみの場合(図中 Conduction)及び、内部自然対流の効果を熱伝達相関式として考慮した場合(図中 Correlation)の

(a) Configuration of a cylindrical capsule

(b) Experimental apparatus for natural convection

Fig.1 Outline of experimental apparatus

計算を行った。円筒カプセル内部自然対流熱伝達相関式としては, Kuhen ら⁽¹⁾の式を用いた。カプセル外部の流体との表面熱伝達率は

$$\frac{2}{Nu_d} = \ln\left(1 + \frac{2.475}{C Ra^n}\right) \quad n = 0.25 + 1/\left(10 + 5 Ra^{0.175}\right),$$

$$C = 0.75 \cdot \left(\frac{Pr}{2.4 + 4.9\sqrt{Pr} + 5Pr}\right)^{0.25} \quad (2)$$

から求めた⁽²⁾。金属繊維をカプセル内部に挿入した場合には実効的な物性値を用いて解析を行った。実効値は金属繊維が円筒内に均一に存在するとして次式で求めた。

$$\rho_e = \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_m, \quad L_e = \varepsilon \rho_f L_f / (\rho_e = \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_m),$$

$$C_{pe} = (\rho_f \varepsilon C_{pf} + \rho_m (1 - \varepsilon) C_{pm}) / (\rho_e = \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_m), \quad (3)$$

また, 実効熱伝導率は,

$$\lambda_e / \lambda_f = \varepsilon + A(1 - \varepsilon)^n (\lambda_m / \lambda_f) \quad (4)$$

により⁽³⁾評価した。ここで $A = 0.195$, $n = 0.763$ である。

4. 近似解析

固液相変化は一般に潜熱が大きく, 界面の移動速度が遅いので, 液相及び固相とも準定常を仮定して熱伝導方程式を解いた。その結果, 円筒カプセル表面温度は次式のように求められる。

$$T_w = \frac{T_f + T_\infty \left\{ (h_0 R / \lambda_f) \ln R_f / s + (h_0 R / \lambda_w) \ln R / R_f \right\}}{1 + (h_0 R / \lambda_f) \ln R_f / s + (h_0 R / \lambda_w) \ln R / R_f} \quad (5)$$

ここで, s は固相の半径である。これを用いて, $s = 0$ となるときに融解時間 t を求めると,

$$t = \frac{R_f^2}{4 \cdot Ste} \left(\frac{1}{\kappa_f} + \frac{2\rho_f C_{pf}}{\lambda_w} \cdot \ln \frac{R}{R_f} + \frac{4\rho_f C_{pf}}{\lambda_a} \cdot \frac{1}{Nu_d} \right) \quad (6)$$

となる。相変化流体の熱伝導率が大きくなる場合, 右辺第1項が小さくなる。したがって融解時間は小さくなるが, その効果は右辺の3項の大きさによって異なる。

5. 実験結果及び考察

Fig.2 に $d_o = 10\text{mm}$, 流体=水, 銅繊維のない場合の融解時の温度変化を示す。図中に温度の測定位置と記号を示す。実線及び点線はそれぞれ解析により求めた壁温及び中心温度である。細線は熱伝導のみの解析結果, 太線は

Fig.2 Plot of temperature against time during melting for water and $d_o = 10\text{mm}$ without copper wire

円筒内自然対流熱伝達相関式を用いた解析結果を示す。

実験の壁温はばらついているが, 解析の壁温は実験の平均値とほぼ一致するとともに, 熱伝導解析から求めた温度変化は実験と良く一致している。熱伝達相関式を考慮すると融解時間が短くなるが, 自然対流の効果は小さく, 実験との違いはさほど大きくはない。

Fig.3 に $d_o = 10\text{mm}$, 流体=水, 銅繊維を体積割合で 20% 挿入した場合の融解時の温度変化を示す。実線と点線は Fig.2 と同様解析結果を示す。この場合には解析結果の方が実験よりも融解時間が早い。銅線はらせん状にして挿入したので, 必ずしも均一とはいえず, (4)式で求めた実効熱伝導率を実際より大きく評価している可能性がある。そのため, 解析における融解時間が小さくなったと考えられる。(5)式から λ_f が大きくなると円筒表面温度 T_w は低下することが分かる。実際, 図から T_w は Fig.2 と比べ

Fig.3 Plot of temperature against time during melting for water and $d_o = 10\text{mm}$ with 20% copper wire

Fig.4 Plot of temperature against time during melting for water and $d_o = 40\text{mm}$ without copper wire

て低くなっていることが示される。また、 T_w の解析結果は実験よりいくらか低くなっている。 $d_o=10\text{mm}$ の場合には円筒内部のレイリー数は約 2000 程度と低いため、内部自然対流の影響は小さいと考えられる。

Fig.4 に $d_o=40\text{mm}$ 、流体=水、銅繊維のない場合の結果を示す。この場合は熱伝導のみの計算から求めた融解時間は実験よりかなり大きい、熱伝達相関式を用いた解析は実験と比較的良く一致している。また、密度逆転のために円筒の頂部の温度が低くなるのが観察される。

Fig.5 に $d_o=40\text{mm}$ 、流体=テトラデカン、銅繊維のない場合の結果を示す。この場合、円筒内部の自然対流の影響により、円筒上部壁温が $t=9000$ 秒以降で急速に高くなっているのが分かる。熱伝導のみの数値解析は実験結果よりかなり大きな融解時間を示すが、熱伝達相関式を用いた解析では実験結果との差は 20% 程度になる。

Fig.6 に $d_o=40\text{mm}$ 、流体=水、銅繊維が 10% の場合の結

Fig.5 Plot of temperature against time during melting for tetradecane and $d_o=40\text{mm}$ without copper wire

Fig.6 Plot of temperature against time during melting for water and $d_o=40\text{mm}$ with 10% copper wire

果を示す。Fig.4 と Fig.6 の解析結果を比較すると、熱伝導のみの解析結果と熱伝達相関式を用いた解析結果の融解時間の差は、銅繊維がない方が大きいことが分かる。これは、銅繊維の挿入により実効熱伝導率が大きくなって、自然対流と熱伝導による伝熱量の差が小さくなったことを示すと考えられる。Fig.6 の場合、融解時間の実験結果と解析結果との差は小さい。また、表面温度は融解の後半で実験と数値解析の差が開いていることが分かる。Fig.7 に $d_o=40\text{mm}$ 、流体=テトラデカン、銅繊維が 10% の場合の結果を示す。この場合熱伝導のみの計算結果は実験よりいくらか大きい融解時間を示している。また、実験では、融解後半で表面温度のばらつきが大きくなる。特に円筒頂部温度は $t=9000$ 秒を超えると高くなっていることが示され、自然対流の影響が認められる。Fig.5 の銅のない場合に比べると自然対流の影響は明らかに小さくなっていることが認められるが、表面温度のばらつきは水に比べると大きいことから、テトラデカンの方が水よりも自然対流の影響が大きいことが分かる。解析では表面温度は実験と比較してかなり低く抑えられる。表面温度が低い場合、外部流体との間の伝熱量は大きくなるが、この場合は、円筒内部の自然対流の影響が無視できないことを示していると考えられる。

Figs.8,9 に $d_o=40\text{mm}$ 、水及びテトラデカンを用いた場

合の相変化界面の形状の変化を示す。(a)-(c)は銅繊維のない場合、(d)-(f)は 10% の銅繊維が挿入された場合の結果である。水を用いた場合には(Fig.8)、自然対流の影響があまり大きくないために、界面は同心円に近い形状を保ったまま融けていくことがわかる。銅繊維が挿入されると界面形状が繊維により隠されて見にくくなるが、同心円に近い形状が保たれている。テトラデカンの場合(Fig.9)、銅繊維がない場合には自然対流の影響を受けて固相は円筒下に位置する (Fig.9 (c))。しかし、銅繊維

Fig.7 Plot of temperature against time during melting for tetradecane and $d_o=40\text{mm}$ with 10% copper wire

Ti (°C)	Ta (°C)	Latent Heat (J/g)	Properties	Melting time(sec)
-8	15.5	330.5	Water	2906
-8	15.5	264.4	Water	2369
-8	15.5	Effective value (copper 20%)	Effective values	2172

Table 1 Melting times with or without copper wire

が挿入されると、界面は同心円により近くなる。銅繊維を挿入した場合と挿入しない場合の実験は、雰囲気温度が異なる条件で行ったので、融解時間の差を直接比較することができなかった。しかし、雰囲気温度がほぼ等しい Fig.2 と Fig.3 を比較すると、金属繊維を挿入する方が 10 数%融解時間が低下していることが分かる。この場合には、銅繊維の挿入により潜熱量が減少する影響を考慮する必要があるため、数値解析によりその効果を比較した結果を Table 1 に示す。解析では、水だけの場合、潜熱量だけ 20% 少なくした場合、潜熱及び物性値を銅繊維 20% を挿入した場合の 3 通りを行った。これによると、潜熱量のみ 20% 少なくして、その他の物性値を水の値にした場合に比べて、実効熱伝導率等を考慮した場合では、融解時間は約 8% 程度低下することがわかる。(6) 式から、実効熱伝導率の効果は外部流体との熱伝達が高いほど大きいことが示されるので、強制対流を用いた場合や、液体を用いた場合等では相変化流体の実効熱伝導率を向上させることは蓄熱・放熱の促進にとって有効であると考えられる。

6. 結論

- 融解過程においてカプセル径が大きくなるとカプセル内の自然対流の影響が顕著になり、実験と熱伝導のみの解析との差は大きくなるが、実験と円筒内自然対流熱伝達相関式を用いた解析は比較的良い一致を示す。
- カプセル内に銅繊維を挿入すると、表面温度が低下するため外部から流入する熱流束が増加する。また、容器表面温度が低くなるため、内部自然対流は抑制される。
- 2 の相反する効果を考慮しても、カプセル径が小さい場合には、銅繊維を挿入することにより、相変化時間を短縮することができる。その効果は外部流体との熱伝達率が高いほど大きい。

[記号] C_p : 比熱, d_o : 円筒カプセル外径, g : 重力加速度, G : 固相率, Gr : グラス数, h_0 : 円筒表面熱伝達率, L : 潜熱, Nu_d : 円筒表面ヌセルト数 $= qh_0/\lambda_a$, Pr : プラントル数, q : 熱流束, $R := d_o/2$, R_i : 円筒内半径, R_a : レイリー数, Ste : ステファン数 $= C_p(T_\infty - T_w)/L$, T_w : 円筒表面温度, T_∞ : 外部流体温度, (ギリシヤ文字) ϵ : 空隙率, ν : 動粘性係数, ρ : 密度, β : 膨張係数, λ : 熱伝導率, κ : 温度拡散率, (subscript) f: 相変化流体, a: 外部流体, w: 円筒容器壁, m: 金属, e: 実効値

<参考文献>

- (1) Kuhen, T.H. et al., Int.J.Heat Mass Transfer, **19**, pp.1127-

Fig.8 Shapes of liquid solid boundary (water)

Fig.9 Shapes of liquid solid boundary (tetradecane)

1134(1976)

(2) 伝熱工学資料、改訂第4版

(3) Calmidi, V.V. et al., Trans.ASME. Ser.C, **121**, pp.466-471(1999)