229 蓄熱カプセル内金属繊維による融解促進の研究

久保田啓介(茨大工), 井上敦良[○](茨大工) 椎名保顕(原研), 稲垣照美(茨大工)

Study on melting promotion by metal wire in heat storage capsules

Keisuke KUBOTA, Atsuyoshi INOUE, Yasuaki SHIINA and Terumi INAGAKI

Effect of metal wire 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 time agreed with the numerical results obtained by the use of non-uniform heat transfer coefficient on the capsule surface of small diameter. Metal wire decreases the surface temperature of the capsules and suppresses natural convection in the capsules. Finally, 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, Forced 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、潜熱蓄熱を利用すると、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。潜熱蓄熱技術を実用化するためには、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、実効熱伝導率を向上させることにより伝熱流体との熱伝達特性を高くして蓄熱・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。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の融解時間の違いを同じ条件で測定するために、2つの円筒カプセルを試験部に並列に配置した。(a)図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。実験に用いた流路は断面が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取り付けた。流路内には入口部から厚さ0.5mmのステンレス板を水平に設置し、流路を等間隔に上下2つに仕切ることにより、それぞれの円筒カプセルが上下2つの流路の中央にくるようにした。(b)に1つの円筒カプセルの概略図を示す。円筒カプセルは亚克力製で、内(外)径8(10)、36(40)mm、長さ100mmの2種類を用いた。円筒中心に0.5mmφのK型シーす型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、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。実験で使用した流体は水及びテトラデカンである。金属繊維として銅箔を細かに裁断した厚さ70μm幅約1mmの銅繊維を適量円筒カプセルに挿入した。金属繊維は始めランダムに挿入したが、相変化界面が観察できなかったため、らせん状に束ねて挿入した実験も行った。実験は、内部にそれぞれ相変化流体のみ及び流体と金属繊維を入れた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。実験におけるレイノルズ数($Re = Ud_o/\nu$)範囲は $300 \leq Re \leq 6200$ 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。解析は円筒座標系で行い、円筒表面に熱伝達率を与え(非均一及び均一熱伝達率)、円筒内部は熱伝導のみとし

(a) Experimental apparatus for forced convection

(b) Configuration of a cylindrical capsule

Fig.1 Outline of experimental apparatus

た解析, 及び均一表面熱伝達率と融解後の円筒内液相で生じる自然対流を熱伝達相関式として考慮する解析の3つを行った. 基礎式は次式で表される.

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

数値解析では固相率を導入し, 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. 伝熱流体との熱伝達率は一様流中に円筒をおいた場合の Eckert の実験⁽¹⁾及び Schmit ら及び五十嵐らの相関式⁽²⁾を用いた. Eckert の実験は次式で近似した.

$$Nu = 0.894 Re^{0.5} \left\{ 1 - (\theta/130)^2 \right\}, (0 \leq \theta \leq 120), (20 \leq Re \leq 1000) \quad (2)$$

$$Nu = 0.321 Re^{0.5} \left\{ (\theta/90) - 1 \right\}^{0.6}, (120 \leq \theta \leq 180) \quad (2)$$

Schmit ら及び五十嵐らの相関式は次式で表される.

$$Nu = 1.0 Re^{0.5} \left\{ 1 - (\theta/90)^3 \right\}, (0 \leq \theta \leq 86.5), 10^3 \leq Re_d \leq 10^5$$

$$Nu = 0.172 Re^{2/3} \left\{ (\theta - 77)/103 \right\}^{2/3}, (86.5 \leq \theta \leq 180) \quad (3)$$

円筒表面の均一熱伝達率は(2)(3)式を周方向に平均したものを用いた. 円筒カプセル内部自然対流熱伝達相関式は, Kuhen ら⁽³⁾の式を用いた. 金属繊維をカプセル内部に挿入した場合の実効的な物性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.

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

$$C_{pe} = (\rho_f \varepsilon C_{pf} + \rho_m (1 - \varepsilon) C_{pm}) / (\rho_e = \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_m), \quad (4)$$

$$C_{pe} = (\rho_f \varepsilon C_{pf} + \rho_m (1 - \varepsilon) C_{pm}) / (\rho_e = \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_m), \quad (4)$$

$$\text{実効熱伝導率は } \lambda_e / \lambda_f = \varepsilon + A(1 - \varepsilon)^n (\lambda_m / \lambda_f) \quad (5)$$

により⁽⁴⁾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準定常を仮定して近似的に解くことができる. その結果, 円筒カプセル表面温度及び融解時間は次式のように求められる⁽⁵⁾.

$$T_w = \frac{T_f + T_\infty \left\{ (h_0 R / \lambda_f) \ln R_f / s + (h_0 R / \lambda_w) \ln R / R_f \right\}}{1 + (h_0 R / \lambda_f) \ln R_f / s + (h_0 R / \lambda_w) \ln R / R_f} \quad (6)$$

$$t = \frac{R_f^2}{4 \cdot Ste} \left(\frac{1}{\kappa_f} + \frac{2 \rho_f C_{pf}}{\lambda_w} \cdot \ln \frac{R}{R_f} + \frac{4 \rho_f C_{pf}}{\lambda_a} \cdot \frac{1}{Nu} \right) \quad (7)$$

ここで, s は固相の半径, Nu は円筒表面のヌッセルト数である. 相変化流体の熱伝導率が高い場合, (7)式の右辺第1項が減少して融解時間は小さくなるが, その効果は右辺の3つの項の大きさによって異なる. つまり, Nu が大きい場合には右辺第1項が融解時間に占める割合が相対的に大きくなり, λ_f を大きくすることにより融解時間を効果的に短縮することができる.

4. 実験結果及び考察

Fig.2 に流体=水, $d_0=10\text{mm}$, $Re=300$, 銅繊維を5%挿入した場合の融解時の温度変化を示す. 銅繊維はらせん状に挿入した. 図中に温度の測定位置と対応する記号を示す. これらは以後の図で共通である. 図中の実線等は銅繊維

を挿入しない場合の非均一熱伝達率を用いた解析結果及び円筒内部の自然対流熱伝達相関式を用いた解析結果である. 細い実線は円柱中心温度及びよどみ点温度を, 点線及び破線は背部及び側部表面温度を示す. 太い実線及び点線はそれぞれ熱伝達相関式を用いた場合の円筒中心及び表面温度を示す. この場合には実験と2つの解析は比較的良く一致している. よどみ点の温度が最も高くなっていることから, 内部自然対流の影響は小さいと考えられる. 図中2本の垂直の点線は銅繊維のある場合(1780秒)及びない場合(1880秒)の融解終了時間を示す. 氷は小さくなると浮き上がるため上部表面温度が低下するが, 融解完了後再び上昇する. そこで, 温度が上昇を始めた位置とビデオ観察の結果を合わせて融解終了時間を定めた. 図から銅繊維を挿入すると円柱表面温度が低下していることが分かる. これは(6)式からも確認できる. 表面温度の低下により外からの流入熱量が増加し, 融解時間が短縮されると考えられる.

Fig.3 に $Re=2800$, その他の条件は Fig.2 と同じ場合の実験結果を示す. よどみ点位置の表面温度は金属繊維がある場合と比べて低下している. 熱伝達相関

Fig.2 Plot of temperature against time during melting with and without copper wire (water, $d_0=10\text{mm}$, $Re=300$)

Fig.3 Plot of temperature against time during melting with and without copper wire (water, $d_0=10\text{mm}$, $Re=2800$)

式による解析と実験との一致が悪いのは表面温度のばらつきが大きいこと、Kuhénら⁽³⁾が整理した熱伝達相関式と異なるためであると考えられる。レイノルズ数が高くなると銅繊維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。

Fig.4 に流体=水、 $d_o=40\text{mm}$ 、 $Re=450$ 、銅繊維を 10% 挿入した場合の実験結果を示す。この場合、銅繊維はランダムに挿入した。図中に水の場合の非均一熱伝達率分布を用いた数値解析結果及び熱伝達相関式による解析結果を示す。数値解析結果と実験結果は大きく異なるが、この原因としては第 1 に内部自然対流の影響が考えられる。銅繊維を挿入しない場合、約 2000 秒後から上部表面温度が急に上昇し、それ以降最高温度を示している。したがって、カプセル内部における自然対流の影響は大きい。第 2 に円筒カプセルが狭い流路内におかれることによる流路閉塞の影響が考えられる。2 章に記述したように、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、 $d_o=40\text{mm}$ の場合には $d_o/H=0.8$ 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

Fig.4 Plot of temperature against time during melting with and without copper wire (water, $d_o=40\text{mm}$, $Re=450$)

Fig.5 Plot of temperature against time during melting with and without copper wire (water, $d_o=40\text{mm}$, $Re=6200$)

桧和田ら⁽⁶⁾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。

図から、銅繊維を挿入した場合でも上部表面温度が最も高くなっていることから、円柱内部の自然対流の影響が大きいことが推察される。また、銅繊維を挿入した場合の表面温度はいずれも挿入しない場合と比較して低くなっていることが観察される。

Fig.5 に $Re=6200$ 、その他は Fig.4 と同じ条件の場合の実験結果を示す。銅繊維は同様にランダムに挿入した。図で特徴的なことは表面温度が全体に高いこと、Fig.4 に見られた温度のばらつきが非常に小さいことである。これから、 $d_o/H=0.8$ の場合の円柱表面の熱伝達率分布が $Re=450$ の場合と $Re=6200$ の場合で大きく異なることが示唆される。すなわち、 $Re=6200$ の場合には円柱全面にわたって熱伝達率が高く、周方向の差は小さいと考えられる。外部流体との熱伝達率が高いことから、円柱内部の自然対流の影響は Fig.4 ほど大きくはない。熱伝達相関式を用いた解析と実験の一致が比較的良好なのは、表面温度のばらつきが小さいためであると考えられる。

Fig.6 Plot of temperature against time during melting with and without copper wire (tetradecane, $d_o=10\text{mm}$, $Re=300$)

Fig.7 Plot of temperature against time during melting with and without copper wire (tetradecane, $d_o=10\text{mm}$, $Re=6200$)

Table 1 Melting time with and without copper wire (fluid=tetradecane, T=tetradecane, E=effective values calculated by (4) and (5))

Re, Ti, Ta	Re=300, Ti=-5.2 Ta=15.8			Re=2800, Ti=-5.5 Ta=12.3		
L(J/g)	229	206	E	229	206	E
Properties	T	T	E	T	T	E
Melting time(sec)	2019	1841	1623	1730	1571	1016

Figs.6 及び 7 に流体=テトラデカン、 $d_o=10\text{mm}$ 、銅繊維挿入量が 5%、Re 数がそれぞれ 450 及び 6200 の場合の結果を示す。両方とも銅繊維はらせん状に挿入した。よどみ点温度の方が上部温度よりも高くなっていることから、内部自然対流の影響は小さいと考えられる。融解時間に及ぼす銅繊維の効果は $\text{Re}=2800$ の方が大きい。

銅繊維はらせん状及びランダムに挿入したが、円筒表面温度はランダムに挿入の方が低下するため、らせん状の場合には実効熱伝導率 λ_e は小さいと考えられる。そこで、銅繊維の効果の評価するために λ_e を変えた場合の融解時間を数値解析により求め、Table 1 に示す。流体としてテトラデカンを用い、銅繊維が 10%挿入されたものとした。Table には相変化流体の減少分を潜熱の減少として評価した解析、物性値として(4)(5)式を用いた解析結果を示した。これから、銅繊維の挿入により融解時間が減少すること、特に、Re 数が大きくなると融解時間の減少率が大きいことがわかる。

Figs.8 及び 9 に $d_o=10\text{mm}$ 、 $\text{Re}=300$ 及び 2800 の場合の相変化界面の形状を示す。Fig.8 はテトラデカン Fig.9 は水を用いた場合の結果である。銅繊維はらせん状に挿入した。 $\text{Re}=300$ の場合には(2)式からわかるように熱伝達率の非均一性が高いが、この場合、図から固相形状の同心円からのずれが大きくなることがわかる。また、銅繊維が挿入された場合には固相形状は同心円に近く、非均一熱伝達率が均一化されていることが示されている。

5. 結論

1. カプセル内に銅繊維を挿入すると、実効熱伝導率の増加による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。また、銅繊維は表面非均一熱伝達率分布を均一化する。
2. カプセル径が大きくなるとカプセル内自然対流の影響が大きくなるが、外部熱伝達率が高いと、その影響は相対的に低下する。
3. 銅繊維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。また、この効果は熱伝達率が高い方が大きいことが示された。

[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, Re :レイノルズ数, h_o :表面熱伝達率,L:潜熱,Nu:表面ヌセルト数, $R_o=d_o/2$, R_i :円筒内半径,Ste:ステファン数, T_w :円筒表面温度,Ta:外部流体温度,e:空隙率, ρ :密度, λ :熱伝導率, κ :温度拡散率,

(subscript) f:相変化流体,w:円筒壁,m:金属,e:実効値,i:初期値;

<参考文献>

(1) Eckert.E.R. et al.,Trans.ASME,74 (1952), 343

(a) Without copper wire

(b) with copper wire (10%)

Fig.8 Shapes of liquid solid boundary ($d_o=10\text{mm}$, tetradecane, $\text{Re}=300$)

(a) Without copper wire

(b) With copper wire(10%)

Fig.9 Shape of liquid-solid boundary ($d_o=10\text{mm}$, Water, $\text{Re}=2800$)

(2) 伝熱工学資料、改訂第4版

(3) Kuhen,T.H.et al., Int.J.Heat Mass Transfer, 19,1127(1970)-

(4) Calmidi,V.V. et al., Trans.ASME. Ser.C, 121, 466- (1999)

(5) 吉沢ら, 可視化情報, 20, Suppl.No.1(2000), 132

(6) 桧和田ら, 機論 B 編, 46 (1980), 1750