水平円柱内固相の接触融解過程

根本寛幸(茨大)[○], 小木浩通(茨大), 椎名保顕(原子力機構), 稲垣照美(茨大)

Close Contact Melting of Solid in a Horizontal Cylindrical Capsule

Hiroyuki NEMOTO, Hiromichi OGI, Yasuaki SHIINA and Terumi INAGAKI

Closed contact melting of solid phase change material (solid PCM) in a horizontal circular cylinder under constant heat transfer coefficient was investigated by an experiment and an analysis. Solid PCM of water and teradecane filled in an acrylic and a copper circular cylinder was melted by natural and forced convection. Melting velocity measured by visualized solid liquid boundary increased with time under the constant heat transfer coefficient. This agrees with the analysis. Observation of the solid liquid boundary shows that for case of the melting in the copper cylinder, solid phase is melted mainly by contact heat transfer, but effect of natural convection can not be ignored for case of the melting in the acrylic cylinder.

Keywords: Close contact melting, Horizontal circular cylinder, Forced convection, PCM

1. はじめに

固相と伝熱面が非常に薄い液層を介して接触する接触融解は高い熱伝達特性を示すことが報告されている⁽¹⁾。近年エネルギー有効利用のために注目されている潜熱蓄熱では、その実用化に相変化時の伝熱促進が重要とされており、固相と液相の密度差により生じるこの接触融解を利用することにより伝熱促進を図ることが可能である。一方、潜熱蓄熱の伝熱促進の方法として、蓄熱媒体(PCM)中に発泡金属を含浸させ実効熱伝導率を高くすることが検討され、放熱時の伝熱促進には極めて有効であることが示されている⁽²⁾が、この方法は融解時には接触融解を利用することができないため、蓄熱・放熱時を含めた総合的な伝熱促進の有効性の評価を行うには、潜熱蓄熱技術における接触融解の評価が必要である。従来の接触融解の研究は、その多くは伝熱面が等温の場合に限られてきた⁽³⁾。しかし、実際の蓄熱・放熱過程では伝熱面は等温ではなく、熱伝達率一定と考えられるため、その場合の接触融解特性を明らかにする必要がある。本研究では、相変化時の熱抵抗低減に有効であるカプセル型潜熱蓄熱方式に着目し、伝熱流体中に水平円柱潜熱蓄熱カプセルがおかれた場合の接触融解特性を実験及び解析により調べ、両者の比較をするとともに、固液相変化界面形状を可視化・観察して接触融解を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。Fig.1(a)は強制対流融解実験用の空気流路及び自然対流融解実験用のアクリル製箱を示す。強制対流試験部は断面 100mm×100mm、長さ 1000mm、アクリル箱は 400mm×300mm×300mm である。また、Fig.1(b)は円柱カプセルの模式図を示す。円柱カプセルとして外径 40mm、内径 36mm のアクリル円柱及び外径 40mm、内径 38mm の銅円柱を用いた。両円柱とも長さは 110mm である。円柱カプセルには、内面上部及び下部に深さ約 0.3mm の矩形溝を中央から端部まで設け、50 μ m の CA 熱電対素線を溝に埋めて設置した (Fig.1(b)参照)。円柱カプセル外側には、内面熱電対の外

側及び90度おきに50 μ mのCA熱電対素線を取り付けた。PCMとして、水とテトラデカンを用いた。テトラデカンの物性値を Table 1 に示す。アクリル及び銅円柱カプセルの両端は、固液相変化界面形状の可視化のため厚さ 8mm のガラス栓で蓋をした。片側のガラス栓に、液注入用および空気抜き用の穴を取り付け、SUS パイプにビニールチューブを取り付けた。空気抜き用チューブは、円柱内に満たした PCM が凝固・融解により体積変化を生じるため、体積調節用としても用いた。

実験は以下のようにして行った。PCM を満たした円筒カプセルを、低温循環水槽に入れて凝固させる。凝固し

(a) Experimental apparatus for forced convection

(b) Configuration of a circular cylindrical capsule

Fig.1 Outline of experimental apparatus

Fig.2 Physical coordinate of a capsule

Table 1 Thermal properties of Tetradecane¹⁵

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

て一定温度に保たれた円柱カプセルを取り出し、強制対流試験部または自然対流用アクリル箱内に設置し (Fig.1(a)参照)、融解実験を開始する。円柱表面温度の時間変化を PC により収録するとともに、円柱カプセル端部から光を当て、一定時間おきにビデオにより撮影を行う。実験終了後、ビデオ写真の固液界面位置を計測して固相の融解速度を求めた。

融解実験は自然対流及び強制対流条件下で行った。強制対流実験のレイノルズ数は約 400 及び 3200 である。

3. 解析

Fig.2 に解析の座標系を示す。椎名らは、円柱カプセル外表面の熱伝達率一定の条件で、円柱内面から PCM への熱入力は、円柱カプセル内面と固相の「接触面」のみで生じるという仮定の下に接触融解の解析を行い、以下の結果を得ている⁽⁴⁾。

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \left(\frac{5}{192}\right)^{0.25} \frac{(Ar \cdot Pr)^{0.25}}{Ste} G^{0.75} \left\{ \frac{3 \cos^{-1} \xi - 3\xi \sqrt{1-\xi^2}}{\sqrt{1-\xi^2} (-3\xi^4 + \xi^2 + 2)} \right\}^{0.25} \quad (1)$$

ここで $\xi = s/2R_i$, $\tau = Fo \cdot Ste$, $Fo = \kappa t/R_i^2$, $Ste = C_p(T_{\infty} - T_f)/L$, $Ar = gR_i^3|\rho_s - \rho_l|/\nu^2\rho_l$ であり、 s は固相上面 (水の場合下面) と円柱上面 (水の場合円柱下面) との距離、 R_i は円柱カプセル内半径である。また、融解による固相の沈下 (氷の場合は浮上) 速度を V_0 とすると、固相と伝熱面の隙間 δ は $\delta = \kappa G/V_0 \cdot \cos \theta$ と与えることができ、 G は次式で与えられる。

$$2G^2 + G \left(20 + 3Ste + \frac{7 \text{Re} \text{Pr} \sin \theta_A}{\pi B_{ie}} \right) - 20Ste + \frac{20 \text{Re} \text{Pr} \sin \theta_A}{\pi B_{ie}} = 0$$

ここで、 θ_A は固相と円柱が接する最大角度である (Fig.2 参照)。 B_{ie} は円柱内面の熱通過率を用いたビオー数である。(1)式を積分することにより ξ の時間変化が得られるが、 $Ste \ll 1$ の場合には次式が得られる。

$$d\xi/dt = \pi B_{ie} \cdot Ste \nu / 2 \text{Pr} R_i^2 \sqrt{1-\xi^2} \quad (2)$$

これを積分して次式を得る。

(a) Acrylic cylindrical capsule

(b) Cooper cylindrical capsule

Fig.3 Time traces of temperatures during melting at Re=400 for water as PCM

$$\xi \sqrt{1-\xi^2} + \sin^{-1} \xi = \pi B_{ie} \cdot Ste \cdot \tau \quad (3)$$

$Ste \ll 1$ の場合、融解終了時間 t_e は以下ようになる。

$$\tau_e = 1/2 B_{ie} \cdot Ste \quad (4)$$

4. 結果と考察

4.1 伝熱実験結果 Fig.3 に PCM=水、Re=400 の場合の円柱温度の時間変化を示す。Fig.3(a)はアクリル円柱、(b)は銅円柱の場合の結果である。氷の融解が始まると、氷は浮上するため、Fig.3(a)に示されるように、アクリル円柱の場合には円柱上部温度は低温に保たれ、下部温度は逆に上昇する。アクリル円柱の場合、表面温度はばらつきながら、時間とともに上昇している。Re=400 の場合、よどみ点熱伝達率は 90 度離れた上下面の熱伝達率より約 2 倍高くなる⁽⁹⁾が、氷の浮上により、円柱下部の温度は 6000 秒以降でよどみ点よりも高くなることが示されている。図には融解完了の近くで円柱下部温度が低下するのが見られるが、これは融解による水の体積収縮に伴い、空気抜きチューブ内に保持した水が内部に流入し、低温液が円柱下部に降下したことにより生じたと考えられる。銅円柱の場合には、Fig.3(b)に示すように融解完了までの間、銅表面温度のばらつきは非常に小さく、温度

(a) Acrylic cylindrical capsule

(b) Cooper cylindrical capsule

Fig.4 Time traces of temperatures during melting at $Re=3200$ for tetradecane as PCM

も時間とともに徐々に上昇するものの、融点近傍に保持されることがわかる。

Fig.4にPCM=テトラデカン、 $Re=3200$ の場合の結果を示す。Fig.4(a)(b)は、それぞれ、アクリル円柱及び銅円柱の結果を示したものである。テトラデカンの場合には融解に伴い固相は沈下するため、アクリル円柱の場合にはFig.4(a)に示すように円柱上部温度が上昇し、よどみ点温度より高くなるのが見られる。また、円柱下部の内外表面温度差に比べ、上部の内外表面温度差は非常に小さくなっている。これから、固相が「接触」しない上部表面から液相への熱の流入は非常に小さいと考えられる。一方、Fig.3(a)の場合には、内外表面温度差は固相が「接触」しない下面においても上面と同程度大きいことから、下面からの熱流入量は「接触面(上面)」からの熱流入量と比較して無視し得ないと考えられる。Fig.4(b)に示す銅円柱の場合には、よどみ点及び上部円柱温度が高温を示すものの、Fig.3(a)と同様に表面温度のばらつきは小さく、時間とともに温度が上昇しているのが観察される。

4.2 融解速度 固液界面のビデオ写真から s を測定して、固相の移動速度を測定した。 $Re=3200$ 、PCM=水の場合の $\xi = s/2R_i$ と t/t_e の関係をFig.5に示す。図で破線及び実

線は(1)式を積分して得られた解析結果であり、点線は円柱カプセル表面温度が一定の場合の解析結果⁽³⁾である。また、記号は銅円柱及びアクリル円柱の実験結果である。図よりわかるとおり、壁温が一定の場合には、 ξ と t/t_e の関係は上に凸となるが、熱伝達率一定の場合には下に凸となる。すなわち、等温の場合には融解初期に融解速度が大きく、次第に融解速度が小さくなるのに対して、熱伝達率一定の場合には、融解初期には融解速度が小さく、次第に大きくなる。実験と解析結果は比較的良い一致を示している。

融解速度 $d\xi/dt$ と t/t_e の関係をFig.6に示す。図はPCMが水の場合で、 $Re=3200$ と 400 の場合の結果を示したものである。図で丸記号と実線及び三角記号と点線は、それぞれアクリル円柱及び銅円柱の場合を示し、記号は実験結果を、線は解析結果を示す。また、黒記号及び白抜き記号はそれぞれ $Re=400$ および 3200 の場合を示す。実験結果は、ばらつきはあるものの解析結果と比較的良好一致を示し、時間の経過とともに融解速度が増加する傾向を示している。また、 $Re=400$ の場合、解析結果ではアクリル円柱の方が銅円柱に比べて融解速度が大きくな

Fig.5 Plot of $s/2R_i$ against non-dimensional melting time

Fig.6 Plot of melting velocity against non-dimensional melting time

ることが示されているが、これは、アクリル円柱を用いた実験時の空気温度が、銅円柱を用いた実験時よりかなり高かったことによるものである (Fig.3 参照)。

4.3 固液界面形状の可視化

Re=3200 の場合における固液界面形状を Figs.7,8 に示す。Fig.7 は PCM としてテトラデカンを、Fig.8 は水を用いた場合の結果である。それぞれの図の(a)はアクリル円柱を、(b)は銅円柱の場合を示す。Fig.7 から、銅円柱の場合 (Fig.7(b)) には、固相上部の形状が円柱内面上部形状とほぼ相似形になる、すなわち固相上面の曲率半径が円柱内半径 R_i にほぼ等しくなるのに対し、アクリル円柱の場合には、固相上部の曲率半径は R_i と比べて小さくなることが観察される。これは、銅円柱の場合には、固相上面からの融解は少ないが、アクリル円柱の場合には、固相上面側においても、特に円柱内面と近接する領域において融解が大きいことを示すと考えられる。

Fig.8 は水の場合の結果であるが、この場合もテトラデカンの場合と同様の現象が観察される。アクリル円柱は銅円柱に比べて熱伝導率は非常に低いにもかかわらず、銅円柱と同程度の融解速度を示している (Fig.6 参照)が、

これは、内部自然対流の影響によると考えられる。円柱カプセル内の接触融解に及ぼす内部自然対流の影響は今後の研究課題である。

5. 結論

熱伝達率一定の場合の水平円柱カプセル内相変化物質の接触融解の研究を行い、以下の結論を得た。

1. 融解速度は等温の場合とは異なり、時間の経過とともに増加する。
2. 銅円柱の場合の融解は主に「接触面」で生じるが、アクリル円柱の場合には「接触面」以外における融解を考慮する必要がある。
3. 融解速度の理論と実験は比較的良く一致する。

[記号] Bi: ビオー数 $= h_e R_i / \lambda$, Cp: 比熱, g: 重力加速度, h_w : 表面熱伝達率, L: 潜熱, Re: レイノルズ数, R_i : 円柱内半径, s: 固相上面 (水の場合下面) と円柱上面 (水の場合円柱下面) との距離, Ste: ステファン数, t: 時間, t_c : 融解終了時間, T_f : 融点, T_∞ : 外部流体温度, ρ : 密度, λ : 熱伝導率, κ : 温度拡散率 [subscript]l: 液相, s: 固相,

<参考文献>

- (1) Moallemi, M.M. et al., Trans. ASME, C., 108, pp.894-899(1986)
- (2) SHIINA, Y. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 48, pp.373-383(2005)
- (3) Bahrami, P.A. et al., Trans. ASME, C., 109, pp.806-809(1987)
- (4) 椎名保顕他、第43回日本伝熱シンポジウム予稿集 D224(2006).
- (5) Eckert, E.R., Trans. ASME, 74, pp.343-347(1952)

t=1800sec

t=4200sec

t=3000sec

t=5400sec

(a) Acrylic cylindrical capsule

t=2400sec

t=4800sec

t=3600sec

t=6000sec

(b) Copper cylindrical capsule

Fig.7 Solid liquid boundary for Re=3200 (PCM=tetradecane)

t=3000sec

t=5400sec

t=4200sec

t=6600sec

(a) Acrylic cylindrical capsule

t=3300sec

t=5100sec

t=4200sec

t=6000sec

(b) Copper cylindrical capsule

Fig.8 Solid liquid boundary for Re=3200 (PCM=water)