

低温潜熱物質を芯物質とする微細カプセル混合水を用いた  
蓄放冷システムに関する基礎研究\*  
(第3報, 空気-微細カプセル化潜熱物質混合水の  
直接接触熱交換法による放冷熱特性)

稲葉英男<sup>\*1</sup>, 森田慎一<sup>\*2</sup>

Fundamental Study of Cold Energy Storage and Energy Release Systems  
of Fine Capsulated Latent-Heat Storage Material-Water Mixture  
3rd Report, Measurement of Cold Energy Release Characteristics  
in Direct Heat Exchanger between Air and Water Laden  
with Fine Capsules Containing Latent Heat Material)

Hideo INABA and Shin-ichi MORITA

This paper deals with cold energy release characteristics of a fine capsulated latent-heat storage material-water mixture as a latent-heat-storage material having a low melting point of the core material (pentadecane,  $C_{15}H_{32}$ , freezing point 283.1 K). A direct-contact heat exchange method for an air-fine capsulated latent heat storage material-water mixture was selected to investigate the cold energy release characteristics from the mixture layer including the solidified core latent-heat-storage materials. The temperature effectiveness, the sensible-heat release time and the latent-heat release time were measured as experimental parameters. Useful nondimensional correlation equations for those parameters were derived in terms of nondimensional level of the mixture layer dimension, Reynolds number for air flow, Stefan number and heat capacity ratio.

**Key Words:** Cold Energy Release, Fine Capsulated Latent-Heat Storage Material, Phase Change, Direct Contact Heat Exchange, Latent Heat, Temperature Effectiveness

1. 序論

微細な潜熱物質を水と混合した潜熱蓄冷熱材料は、水中の潜熱物質が凝固した状態においても未凍結の連続相(水)により流動性を保持し、凝固潜熱体の搬送が可能であり、潜熱蓄冷熱システムの構築に新たな発展が期待できる。

前報においては、低温潜熱物質であるペンタデカン( $C_{15}H_{32}$ , 融点  $T_f=283.1$  K, 潜熱量  $L=158$  kJ/kg) にメラミン樹脂被覆を施した微細カプセル潜熱物質を連続相である水に混合した微細カプセル混合水の熱物性<sup>(1)</sup>、輸送特性において重要となる粘性評価<sup>(2)</sup>を行った。さらに、微細カプセル混合水のコイル状2重管式熱交換器を用いた潜熱蓄冷熱(凝固)実験を行い、流動、熱伝達および蓄冷熱時間についても明らかにしてきた<sup>(3)</sup>。

潜熱蓄冷熱材料の冷熱(融解潜熱)を利用する際の有利点は、潜熱蓄冷熱体の融解時にその融点付近の一定温度を安定的に利用することができることである。このような潜熱蓄冷熱材料の融点付近の一定温度を低温熱源として効率的に利用する方法の一つとして、凝固した芯物質を含む微細カプセルと被冷却媒体としての暖か

い空気との直接接触式熱交換によるの放冷熱が考えられる。

Mersmannら<sup>(4)</sup>は、固体粒子および水中に空気を流動させた場合の熱伝達係数に関する検討を行っている。また、著者らも新しいタイプの暖房器を目指した研究で温水層に微細な空気泡を吹き込み、空気温度と湿度制御を同時に効率的に行う気液直接接触熱交換器の提示を行っている<sup>(5)</sup>。さらに著者らは、低温潜熱蓄熱材料としてのO/W型エマルジョンと暖かい空気との直接接触熱交換法による放冷熱特性についての検討を行った<sup>(6)</sup>。

本研究は、微細な潜熱体にカプセル被覆を施した潜熱物質を水に混合した材料と空気との直接接触式熱交換に関して、微細な凝固体としての芯物質の相変化を伴う潜熱放冷熱特性について検討したものである。すなわち、微細カプセル化された微細潜熱蓄冷熱体を含む微細カプセル混合水の充填槽下部から、暖かい空気を多数の円形ノズルより吹き込んだ場合の放冷熱特性を実験的に検討するものである。ここでは、潜熱体としての芯物質(ペンタデカン)の基本的放冷熱特性を検討する立場から、取り扱いの容易なように微細カプセル混合水の充填槽は円筒形容器とし、さらに、ノズルも単一直径の円形を採用してある。その放冷熱特性に影響を及ぼす実験パラメータとして微細カプセル混合水中の

\* 原稿受付 1995年2月2日。

\*<sup>1</sup> 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

\*<sup>2</sup> 正員, 岡山大学大学院。

潜熱物質である微細カプセルの質量割合、充填槽内の微細カプセル混合水の液位、微細カプセル混合水の初期温度、空気の入口温度およびノズル噴出空気流速を検討してある。最終的に、これらの実験パラメータがこの種の放冷熱システム構築において重要となる顕熱および潜熱放冷熱時間そして潜熱放冷熱時の熱交換後の低温空気温度に及ぼす影響を実験的に明らかにするものである。

### 主な記号

$A_n$ : ノズル面積  
 $A_{ves}$ : 放冷熱装置の試料充填円筒形容器底面積  
 $C_{pa}$ : 空気の比熱,  $C_{pca}$ : 微細カプセル混合水の比熱  
 $C_p, C_w$ : ペンタデカンおよび水の質量割合  
 $d_n$ : 空気泡平均水力直径,  $d_n$ : ノズル直径  
 $d_{ves}$ : 放冷熱装置の試料充填円筒形容器直径  
 $FOI$ : 潜熱放冷熱時間のフーリエ数  
 $FO_s$ : 顕熱放冷熱時間のフーリエ数  
 $G_a$ : 空気の質量流量,  $h^*$ : 熱量比  
 $L$ : ペンタデカンの潜熱量  
 $L_{ca}$ : 微細カプセル混合水の潜熱量  
 $M_{ca}$ : 質量,  $n$ : ノズル本数,  $N$ : サンプル数  
 $P_{cr}$ : 式(3)により定義される相変化率  
 $Q_{tot}$ : 微細カプセル混合水の総放冷熱量  
 $Q_l$ : 微細カプセル混合水の潜熱放冷熱量  
 $Q_s$ : 微細カプセル混合水の顕熱放冷熱量  
 $Q_{los}$ : 微細カプセル混合水と外気の温度差に伴う損失熱量,  $Re$ : ノズル噴出空気流速のレイノルズ数  
 $Stc$ : ステファン数  
 $t$ : 時間,  $t_l$ : 潜熱放冷熱時間,  $t_s$ : 顕熱放冷熱時間  
 $T_{ain}$ : 空気入口温度,  $T_{aout}$ : 空気出口温度  
 $T_{ca}$ : 微細カプセル混合水の温度  
 $T_{cai}$ : 微細カプセル混合水の初期温度  
 $T_f$ : 融点,  $T_w$ : 水の温度  
 $U_n$ : 空気のノズル噴出流速(=  $V/(n \times A_n)$ )  
 $V$ : 空気流量,  $z$ : 微細カプセル混合水の液位  
 $z^*$ : 微細カプセル混合水の無次元深さ  
ギリシャ文字  
 $\alpha_a$ : 空気の温度伝導率  
 $\alpha_{ca}$ : 微細カプセル混合水の温度伝導率  
 $\phi_a$ : 温度効率,  $\psi_a$ : 空気の相対湿度  
添字  
 $a$ : 空気,  $ain$ : 入口空気,  $aout$ : 出口空気  
 $ca$ : 微細カプセル混合水,  $f$ : 融点,  $i$ : 初期,  $l$ : 潜熱  
 $los$ : 熱損失,  $s$ : 顕熱,  $ves$ : 試料充填容器

### 2. 実験装置および実験方法

表1は、本研究に用いた供試微細カプセル混合水のペンタデカンの質量割合  $C_p$ 、水の質量割合  $C_w$ 、および微細カプセルの質量割合  $C_{ca}$  組成を示したものである。ここで、本研究に用いられた微細カプセル混合水に関して、予め行われたカプセル混合水の約1000時間にわたる流動耐久試験の結果、カプセルの破壊は認められず、さらに水溶液中のカプセルの分散混合状態も安定であることが確認されている。これらの各種微細カプセル混合水のデータ整理に用いる諸物性値は、前報<sup>(1)(2)</sup>による値を用いてある。参考までにカプセルの平均径は1.17  $\mu\text{m}$  としてカプセル混合水濃度  $C_{ca} = 20.4 \text{ mass\%}$  における密度は  $\rho_{ca} = 980 \text{ m}^3/\text{kg}$  である<sup>(1)</sup>。

図1は、凝固芯物質を含む微細カプセルの混合水の放冷熱(融解)実験装置の概略を示したものである。放冷熱媒体としての空気はコンプレッサによって吐出され、フロート式流量計で体積流量を測定された後、電気ヒータにより所定の温度に調節され微細カプセル混合水の充填された試験部に円形ノズルを介して噴出される。熱媒体としての空気流量計は、コンプレッサによる加圧およびヒータによる空気温度の変化を考慮して、温度および圧力により予め得られた校正曲線により本実験時の空気流量が決定された。使用したフロート式空気流量計の測定精度は、最大流量  $V=9.13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  に対して  $\pm 3\%$  以内である。

表1 微細カプセル潜熱物質の混合水の組成質量割合

Fine capsule $C_{ca}$ , mass%	Pentadecane $C_p$ , mass%	Melamine resin $C_{me}$ , mass%	Water $C_w$ , mass%
40.8	34.4	6.4	59.2
30.6	25.8	4.8	69.4
20.4	17.2	3.2	79.6
10.2	8.6	1.6	89.8

実験装置本体は、側壁面厚さ20 mm、上部および底部壁面厚さ10 mmの亚克力製直方体容器と凝固潜熱体を含む微細カプセルの混合水が充填される内径89 mm、高さ500 mmおよび厚さ3 mmの円筒亚克力容器である放冷熱試験部により構成される。放冷熱試験部である円筒容器と直方体容器の間の空間は、ダイヤフラム式真空ポンプにより7.99 kPaまで減圧することにより真空断熱を行い、さらに直方体容器外側を厚さ50 mmのスタイロフォーム断熱材にて覆うことにより、外気と微細カプセル混合水との温度差に伴う熱損失を極力防ぐ構造としてある。

供試微細カプセル混合水および空気の温度測定は、素線径0.1 mmのT型熱電対を用いて行われた。放冷熱量計算に用いられた試験部入口および出口の温度測定は、温度測定精度を向上させる目的から5組の熱電対を組合せたサーモパイルにより行われた。なお、円筒形試験部入口空気およびバイパス部の温度測定点の直前には空気流混合のためのミキサを設置し、各部の混合平均温度を測定している。熱電対の検定は、標準温度計を用いて行い、 $\pm 0.05$  Kの精度で測定可能である。熱交換を終えた微細カプセル混合水層の空気出口温度は、出口空気混合および微細カプセル混合水の付着を防ぐ目的でプラスチック樹脂メッシュによる覆いを施した移動可能なサーモパイルを微細カプセル混合水の液面より30~50 mmの位置に設置して測定した。試料充填容器半径方向の微細カプセル混合水層そして空気出口温度分布は、 $\pm 0.3$  K以内であり、ほぼ円筒軸方向に一次的に扱えることを確認してある。

放冷熱試験部の入口および出口空気の湿度測定は、電子式湿度計(測定可能相対湿度範囲0~90%，測定精度 $\pm 3$ %)を試験部入口部直前の空気流入管路および微細カプセル混合水層上部の前記サーモパイルと同じ場所に設置することにより行った。

空気噴出円形ノズルは、図1に示されるように直径 $d_n = 2.0$  mmであり試験部底部の厚さ10 mmの亚克力板に中心より10 mm間隔、円周方向に $30^\circ$ 間隔で計 $n=49$ 箇所設置してある。微細カプセル混合水と空気の直接接触熱交換効率向上のためには前報<sup>(5)</sup>で述べたようにノズル直径の小さいものほど良いと考えられる。しかし、供試微細カプセル混合水は、微細カプセルが含まれるためノズルより空気を噴出したときに発泡が観察された。従って、本放冷熱実験装置の空気噴出円形ノズル直径 $d_n$ は、予備実験より種々検討した結果小さなノズル直径ほど泡立ちがみられ、泡立ちのほとんどみられない最小直径である $d_n = 2.0$  mmとした。空気噴出ノズル底部には、撥水性四フッ化エチレン樹脂フィルタ(保留粒子径2.0  $\mu\text{m}$ 、厚さ0.55 mm)が設置され、微細カプセル混合水が空気を流入させない状態でもノズル下部に漏洩しない構造となっている。

凝固芯物質を含む微細カプセル混合水の放冷熱実験は、所期の流量、温度・湿度の空気を得るためにバイパスラインを用いた空気流量制御とヒータ出力調整により実験条件の設定を行い、前報<sup>(3)</sup>の蓄放冷装置で潜熱体としてのペンタデカン(芯物質)を100%凝固した低温微細カプセル混合水を放冷熱円筒試験部に充填した後、バルブ切り替えにより円形ノズルを介して放冷熱試験部下部へ所定の空気を噴出させて開始した。円形ノズル噴

出空気流速 $U_n$ (=空気流量 $V$ /円形ノズル断面積( $n \times \frac{\pi}{4} d_n^2$ ))および空気入口温度 $T_{ain}$ は、それぞれ所期の値に対して $\pm 1.08 \times 10^{-2}$  m/s以内および $\pm 0.1$  K以内に制御された。入口空気湿度による影響は、乾き空気が微細カプセル混合水中に円形ノズルより噴出し飽和空気として微細カプセル混合水より取り出される場合について計算を行い、総水分伝達熱量が微細カプセル混合水の潜熱量 $L_{ca}$ の4%以下との結果を得た。入口空気湿度による影響が比較的小さいことが明らかであるが、本研究においては、各温度条件において入口空気の相対湿度を $\psi_a = 5 \sim 20$ %の範囲で実験を行った。

本研究は、この種の微細カプセル混合水の基本的な放冷熱特性を明らかにする目的で、次のような実験条件のもとで実験が行われた。

- 円形ノズル噴出空気流速  $U_n = 1.48 \sim 5.93$  m/s.
- 空気入口温度  $T_{ain} = 303.1 \sim 322.1$  K.
- 微細カプセルの質量割合  $C_{ca} = 10.2 \sim 40.8$  mass%.
- 微細カプセル混合水の液位  $z = 32 \sim 241$  mm.
- 微細カプセル混合水の初期温度  $T_{cai} = 274.0 \sim 282.4$  K.

### 3. 凝固芯物質を含む微細カプセル混合水中の気泡直径

供試微細カプセル混合水は、前報<sup>(1)(2)</sup>で述べたように白色を呈する不透明な流体である。このため、放冷熱実験装置に充填された状態の微細カプセル混合水中の気泡形状および浮上挙動を観察することは困難である。ここでは、本実験による多数の円形ノズルによる気泡群の流動挙動とは少し異なるが、気泡挙動の本質は損なうことがないとの立場より、可視化可能な単一円形ノ

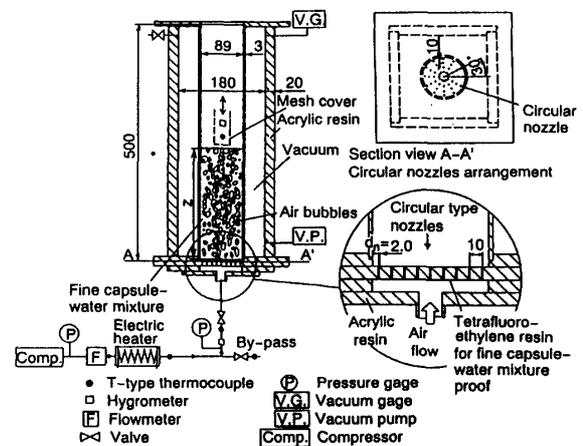


図1 放冷熱実験装置概略図

ズルよりの微細カプセル混合水中の空気泡直径について検討するものである。本研究においては、空気泡直径測定装置として薄い透明直方体容器を用い、芯物質が凝固した状態の微細カプセル混合水中の空気泡直径の測定を行った。空気泡直径の測定装置は、前報<sup>(6)</sup>において用いられた幅100 mm、高さ500 mm、奥行き幅30 mmの厚さ10 mmの亚克力製容器であり、放冷熱実験装置と同じ直径 $d_n = 2.0$  mmの円形単一ノズルが微細カプセル混合水充填槽下部に設置してある。空気泡直径の測定は、微細カプセル混合水中を浮上する空気泡の可視化写真を用いて行われた。浮上空気泡の可視化は、芯物質が凝固した状態の微細カプセル混合水を液位350 mmまで充填し、円形ノズルより所定の温度 $T_{in} (= 303.1 \text{ K})$ および流速 $U_n$ にコントロールされた暖かい空気を噴出させ、可視化装置後部に設けた500 W円筒型光源による間接光により行った<sup>(7)</sup>。

図2は、空気泡の可視化写真に基づいて測定された水中および微細カプセル混合水中の空気泡の水力直径 $d_a$ と空気の円形ノズル噴出流速 $U_n$ の関係を示したものである。気泡平均水力直径 $d_a$ は、可視化装置内に充填された微細カプセル混合水中の全ての空気泡の平均水力直径を測定した値であり、測定サンプル数は、 $N=40 \sim 50$ である。図2中に示される気泡平均水力直径 $d_a$ は、水中の場合においてノズル噴出流速 $U_n$ の増加に対してほぼ一定値を示している<sup>(5)</sup>。しかしながら、微細カプセル混合水中の空気泡は、ノズル噴出流速 $U_n$ の増大と共に空気泡の合一が促進されるため、増加する傾向にある。一方、微細カプセルの質量割合 $C_{ca}$ の増加に対しても気泡平均水力直径 $d_a$ は増加する傾向がみられる。これは、微細カプセル質量割合 $C_{ca}$ の増加に伴い、相対的に微細カプセル混合水の粘性が大きくなるため<sup>(2)</sup>ノズル噴出直後の空気泡の上昇が抑制されることにより空気泡同士の合一が促進されることが原因と考えられる。以上の結果より、微細カプセルの質量割合の増加は、空気泡の浮力を大きくする気泡平均水力直径 $d_a$ の増大および空気泡の上昇を抑制する粘性増加となるため双方の作用により浮上時間(微細カプセル混合水中での気泡の滞留時間)が決定されると考えられる。

#### 4. 実験結果およびその考察

##### 4.1 顕熱放冷熱過程

図3は、放冷熱試験部内に水または微細カプセルの質量割合 $C_{ca}=40.8 \text{ mass\%}$ の100%凝固した芯物質を含む微細カプセル混合水を液位 $z=241 \text{ mm}$ まで充填し、空気入口温度 $T_{in}=322.1 \text{ K}$ 、ノズル噴出空気流速 $U_n=5.93 \text{ m/s}$ の

条件にて各放冷熱特性の比較を行った場合の水温 $T_w$ 、微細カプセル混合水の温度 $T_{ca}$ および空気出口温度 $T_{aout}$ の経時変化を示したものである。水のみを充填した場合の空気出口温度 $T_{aout}$ は、実験開始直後よりほぼ水温 $T_w$ よりも若干高い温度を示しながら上昇する。

一方、芯物質が凝固した微細カプセル混合水を充填した場合の空気出口温度 $T_{aout}$ は、空気噴出直後において急激な温度下降がみられ、その後、徐々に増加し始め、時間の経過と共に微細カプセル混合水の温度 $T_{ca}$ よりも若干高い温度を示しながら上昇する傾向となる。これは、前述の単一ノズルから微細カプセル混合水への流入空気泡挙動において観察されたように微細カプセル混合水の粘性による滞留時間の長期化により、空気泡の微細カプセル混合水の液面への到達に遅れが生じることおよび空気泡水力直径が水よりも大きく十分に熱交換されないことが原因と考えられる。さらに時間経過し、 $t=37$ 分後より一定温度 $T_{aout}$ 経過が $t=58$ 分まで続き、この領域で凝固した芯物質(ペンタデカン)の融解による潜熱放冷熱が起こるところの潜熱蓄冷熱材料特有の温度挙動を示すことになる。この一定空気出口温度 $T_{aout}$ は、ペンタデカンの融点 $T_f=283.1 \text{ K}$ より少し高い温度であるが、この差は芯物質(ペンタデカン)自体そして微細カプセルの被覆(メラミン樹脂)等の熱抵抗によるものと考えられる。

図3中には、水および芯物質の凝固した微細カプセル混合水の保有する蓄冷熱量に関する後述の熱バランスにより算定された顕熱放冷熱時間 $t_s$ と潜熱放冷熱時間 $t_l$ を示してある。顕熱放冷熱時間 $t_s$ と潜熱放冷熱時間 $t_l$ は、それぞれ、放冷熱実験開始から一定温度に到達するまでの時間、一定温度を示す時間である。

図4は、総放冷熱量 $Q_{tot}$ 、芯物質の凝固した微細カプセル混合水の顕熱放冷熱量 $Q_s$ 、微細カプセル混合水の

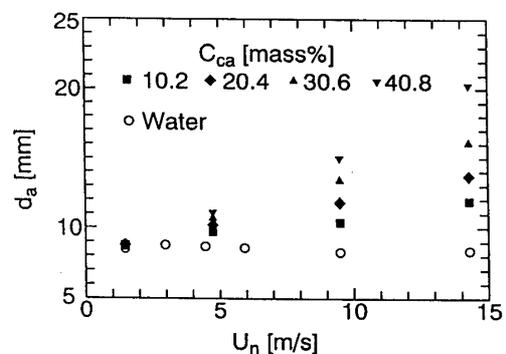


図2 微細カプセル混合水中の空気泡平均水力直径 $d_a$ と円形ノズル噴出流速 $U_n$ の関係

潜熱放冷熱量  $Q_l$  および放冷熱装置内の微細カプセル混合水から外気への損失熱量  $Q_{los}$  の経時変化を下記の熱バランスより算定した結果を示したものである。

総放冷熱量  $Q_{tot}$  は、空気の比熱  $C_{pa}$ 、質量流量  $G_a$  および入口空気と出口空気の温度差  $(T_{ain} - T_{aout})$  より算定され、微細カプセル混合水の顕熱放冷熱量  $Q_s$ 、潜熱放冷熱量  $Q_l$  および放冷熱装置内の微細カプセル混合水と外気との損失熱量  $Q_{los}$  との熱バランスより次式(1)のように表わされる。

$$Q_{tot} = \int C_{pa} \times G_a \times (T_{ain} - T_{aout}) dt$$

$$= Q_s + Q_l + Q_{los} \dots \dots \dots (1)$$

微細カプセル混合水の顕熱放冷熱量  $Q_s$  は、微細カプセル混合水の比熱  $C_{pca}$ 、質量  $M_{ca}$  および微細カプセル混合水の初期温度  $T_{cai}$  より次式(2)により算定される。

$$Q_s = C_{pca} \times M_{ca} \times (T_{ca} - T_{cai}) \dots \dots \dots (2)$$

損失熱量  $Q_{los}$  は、放冷熱装置内に任意温度の水を充填攪拌し、その際の水と外気との温度差に伴う損失熱量を水温の経過より推定する方法より求めた。本研究における損失熱量  $Q_{los}$  は、総放冷熱量  $Q_{tot}$  の3%以下である。

なお、次で述べる潜熱放冷熱量  $Q_l$  の経時変化は、式(1)の熱バランスの関係より求めることになる。

潜熱放冷熱量  $Q_l$  および凝固した芯物質を含む微細カプセル混合水の保有する総潜熱  $L_{ca}$  より算定される相変化率  $P_{cr}$  の経時変化を図5に示す。相変化率  $P_{cr}$  は、次式(3)により表わされる。

$$P_{cr} = \frac{Q_l}{M_{ca} \times L_{ca}} \times 100 = \frac{Q_l}{M_{ca}(C_p/100)L} \times 100 \dots \dots (3)$$

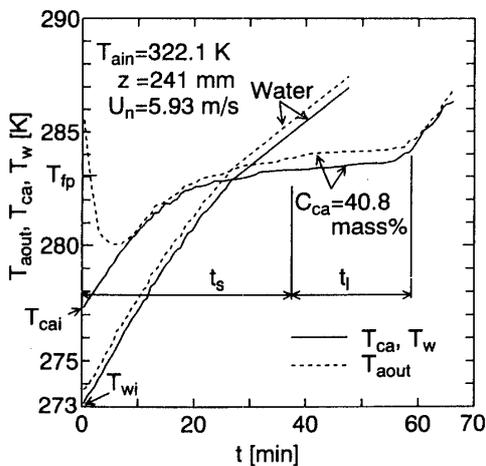


図3 水の温度  $T_w$ 、微細カプセル混合水 ( $C_{ca}=40.8 \text{ mass\%}$ ) の温度  $T_{ca}$  および空気出口温度  $T_{ain}$  の経時変化

ここで、 $L$  は、ペンタデカンの潜熱量 ( $L=158 \text{ kJ/kg}$ ) である。

相変化率  $P_{cr}$  は、顕熱放冷熱の終了後に時間と共に直線的に増加する傾向にある。これは、空気の比熱が小さく、空気が潜熱蓄冷体と直接接触熱交換するために、高効率な熱交換が行われるためと考えられる。

図6は、顕熱放冷熱時間  $t_s$ 、空気の温度伝導率  $\alpha_a$  およびノズル直径  $d_n$  で算出されるフーリエ数  $Fo_s (= \alpha_a \times t_s / d_n^2)$  と熱量比  $h^*$  の関係を示したものである。熱量比  $h^*$  は、実験条件から定まる理想的な実験因子として、初期温度から潜熱体の融解温度の範囲で微細カプセル混合水の持つ単位時間・面積当りの顕熱エンタルピー移動量と単位時間・単位面積当りに流入空気の持つ顕熱エンタルピー移動量の割合を表す量で、次式(4)により定義される。

$$h^* = \frac{C_{pca} \times M_{ca} \times (T_f - T_{cai}) \times \alpha_a}{C_{pa} \times G_a \times (T_{ain} - T_f) \times A_{ves}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $A_{ves}$  は、放冷熱装置の微細カプセル混合水充填容器の底面積である。

図6より無次元顕熱放冷熱時間であるフーリエ数  $Fo_s$

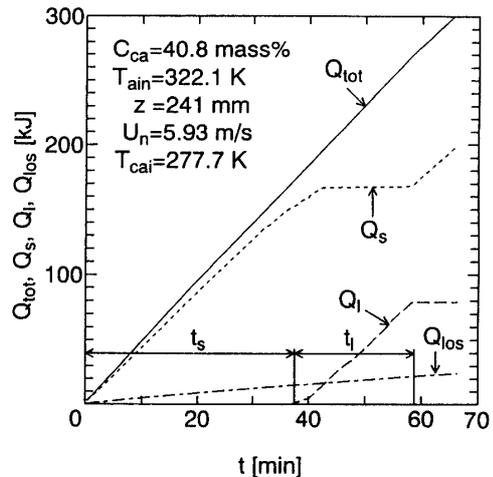


図4 総放冷熱量  $Q_{tot}$ 、微細カプセル混合水の顕熱放冷熱量  $Q_s$ 、微細カプセル混合水の潜熱放冷熱量  $Q_l$  および損失熱量  $Q_{los}$  の経時変化

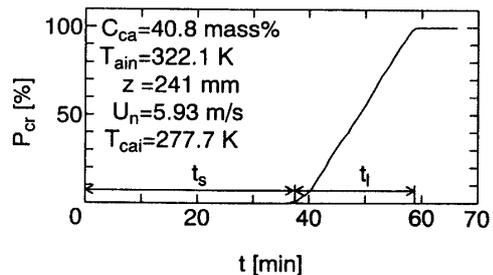


図5 微細カプセル混合水の放冷熱時の相変化率  $P_{cr}$  の経時変化

と熱量比  $h^*$  の関係は、ほぼ直線的な関係にあることが明らかとなり実測値と標準偏差  $\pm 9\%$  以内で一致する次式 (5) を得た。

$$Fo_s = 4.96 \times 10^4 \times h^* \dots \dots \dots (5)$$

適用範囲は、 $C_{ca} = 10.2 \sim 40.8 \text{ mass\%}$ ,  $z^* = 16.0 \sim 120.5$ ,  $Re = 166 \sim 724$ ,  $T_{ain} = 303.1 \sim 322.1 \text{ K}$  および  $T_{cai} = 274.0 \sim 282.4 \text{ K}$  である。ここで、ノズル噴出空気のリノルズ数  $Re$  は、代表寸法を噴出ノズル直径  $d_n$  とする次式 (6) により計算される。

$$Re = \frac{U_n \times d_n}{\nu_a} \dots \dots \dots (6)$$

図 6 中に示される実線は、式 (5) による計算結果を示したものである。

4.2 潜熱放冷熱過程

図 7 は、微細カプセル混合水の初期温度  $T_{cai} = 277.8 \text{ K}$ ,  $279.1 \text{ K}$  より放冷熱したときの微細カプセル混合水 ( $C_{ca} = 40.8 \text{ mass\%}$ ) の温度、および空気出口温度  $T_{aout}$  の経時変化を微細カプセル混合水の液位  $z$  を  $32 \text{ mm}$  および  $241 \text{ mm}$  とした場合について示したものである。顕熱放冷熱時間  $t_s$  および潜熱放冷熱時間  $t_l$  は、微細カプセル混合水の液位  $z$  が小さくなるほど微細カプセル混合水の充填質量  $M_{ca}$  が減少するために短縮される。

潜熱放冷熱時の空気出口温度  $T_{aout}$  と微細カプセル混合水の温度差は、微細カプセル混合水の液位  $z$  が小さくなるほど大きな差となっている。これは、空気泡の浮上距離が、微細カプセル混合水の液位  $z$  の低下と共に短縮され熱交換が完了する以前に水面に到達するためと考えられる。

図 8 は、次式 (7) に示される温度効率  $\phi_a$  と微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*$  の関係を示している。潜熱放

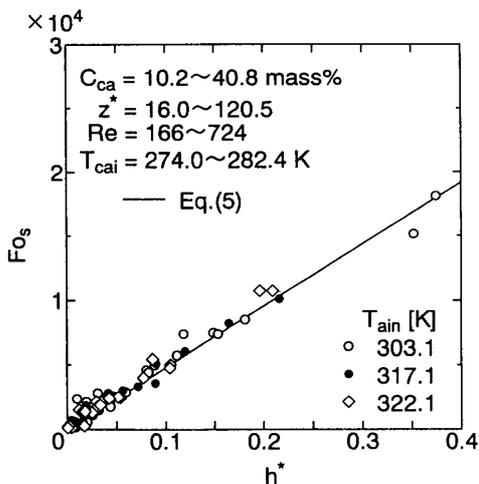


図 6 顕熱放冷熱時間のフーリエ数  $Fo_s$  と熱量比  $h^*$  の関係

冷熱システムにおいては、熱媒体の出口温度がどの程度になるかが重要な問題となる。ここでは、冷却後の空気出口温度  $T_{aout}$  を次式 (7), (8) で示す温度効率  $\phi_a$  と微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*$  との関係で検討する。

$$\phi_a = \frac{T_{ain} - T_{aout}}{T_{ain} - T_f} \dots \dots \dots (7)$$

微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*$  は、微細カプセル混合水の液位  $z$  とノズル直径  $d_n = 2.0 \text{ mm}$  の比として次式のように定義する。

$$z^* = \frac{z}{d_n} \dots \dots \dots (8)$$

図 8 は、これらの 2 つのパラメータを座標にとった場合の実測結果を示したものであり、各実験パラメータの範囲は、図 8 中に示してある。本実験範囲において温度効率  $\phi_a$  は、0.92 以上と非常に高効率である。また、微細カプセル混合水の温度効率  $\phi_a$  は、 $z^*$  値の増大に伴う空気泡浮上距離の増加により、空気出口温度  $T_{aout}$  がペンタデカンの融点温度  $T_f$  に漸近するために無次元液位  $z^*$  が大きくなると共に増大する傾向を示している。本実験の空気の入口温度  $T_{ain} = 303.1 \sim 322.1 \text{ K}$ 、微細カプセル潜熱物質の割合  $C_{ca} = 10.2 \sim 40.8 \text{ mass\%}$  そしてレイノルズ数  $Re = 166 \sim 724$  の範囲では、無次元液位  $z^*$  以外の実験パラメータの効果は、図中の I 印の範囲以内の程度となる結果を得た。微細カプセル潜熱物質の混合水の温度効率  $\phi_a$  と無次元液位  $z^*$  の関係は、指数式による近似を行い実測値と  $\pm 9.6\%$  以内で一致する次式 (9) を得た。

$$\phi_a = 0.904 \times z^{*0.0106} \dots \dots \dots (9)$$

式 (9) による計算結果は、図 8 中の実線で示してある。微細カプセル混合水と空気を熱交換したときの潜熱放

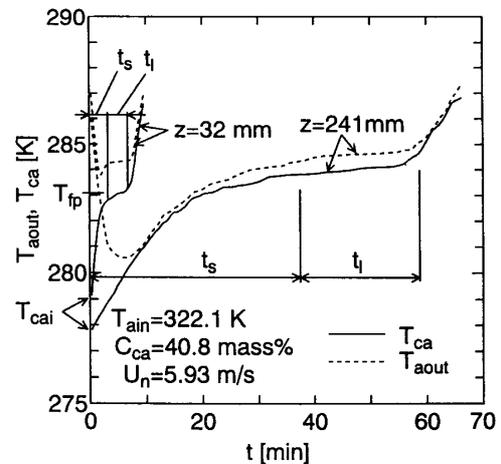


図 7 微細カプセル混合水の液位  $z$  を変化させた場合の微細カプセル混合水 ( $C_{ca} = 40.8 \text{ mass\%}$ ) の温度  $T_{ca}$  および空気出口温度  $T_{aout}$  の経時変化

冷熱時の空気の出口温度  $T_{out}$  は、式(9)より求めることが可能となる。

図9は、潜熱放冷熱時間  $t_l$  と微細カプセルの質量割合  $C_{ca}$  の関係を空気入口温度  $T_{ain}=322.1$  K の場合について示したものである。潜熱放冷熱時間  $t_l$  は、微細カプセル混合水の液位  $z$  および微細カプセル混合水の質量割合  $C_{ca}$  の増加に伴い、潜熱量が大きくなるため長時間となり、ノズル噴出空気流速  $U_n$  の増大と共に短縮される結果となる。

図10は、無次元潜熱放冷熱時間であるフーリエ数  $FO_l (= \alpha_a \times t_l / d_n^2)$  と微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*$  の関係を空気入口温度  $T_{ain}=322.1$  K の場合について示してある。潜熱放冷熱時間のフーリエ数  $FO_l$  は、微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*$  の増加に伴い微細カプセル混合水の潜熱量が大きくなるために増大する傾向となる。潜熱放冷熱時間のフーリエ数  $FO_l$  と微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*$  の関係は、最小二乗法による近似

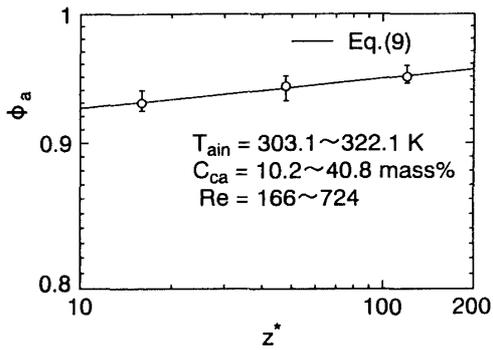


図8 温度効率  $\phi_a$  と微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*$  の関係

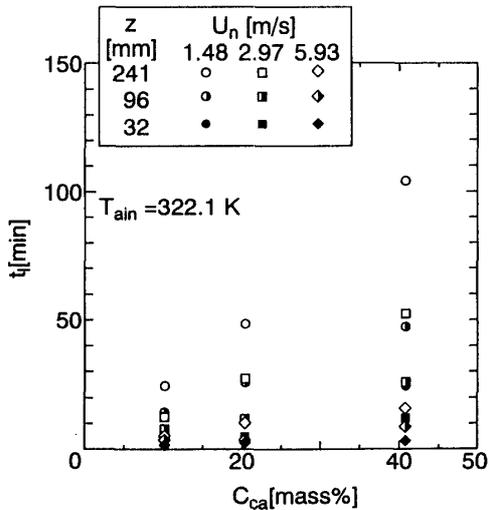


図9 潜熱放冷熱時間  $t_l$  と微細カプセルの質量割合  $C_{ca}$  の関係

計算を行い本実験範囲の空気入口温度  $T_{ain}$ 、レイノルズ数  $Re$  および微細カプセルの質量割合  $C_{ca}$  には余り依存せず次式(10)の関係にあることが明らかとなった。

$$FO_l \propto z^{*0.810} \dots\dots\dots(10)$$

前述の無次元潜熱放冷熱時間であるフーリエ数  $FO_l$  とレイノルズ数  $Re$  の関係を図11に示す。フーリエ数  $FO_l$  は、レイノルズ数  $Re$  が大きくなるに従い、ノズルより噴出される空気の流量、および空気泡の微細化や熱伝達率の増加<sup>(5)</sup>により微細カプセル混合水の時間当り潜熱放冷熱量が増加するために減少する傾向にある。潜熱放冷熱時間のフーリエ数  $FO_l$  とレイノルズ数  $Re$  の関係は、最小二乗法により次式(11)に示す関係にあることが明らかとなった。

$$FO_l \propto Re^{-1.00} \dots\dots\dots(11)$$

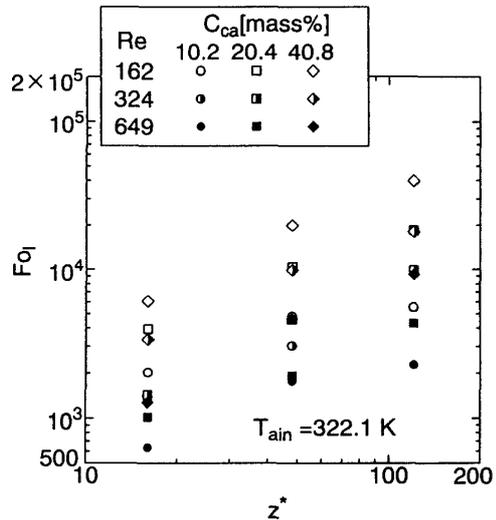


図10 潜熱放冷熱時間のフーリエ数  $FO_l$  と微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*$  の関係

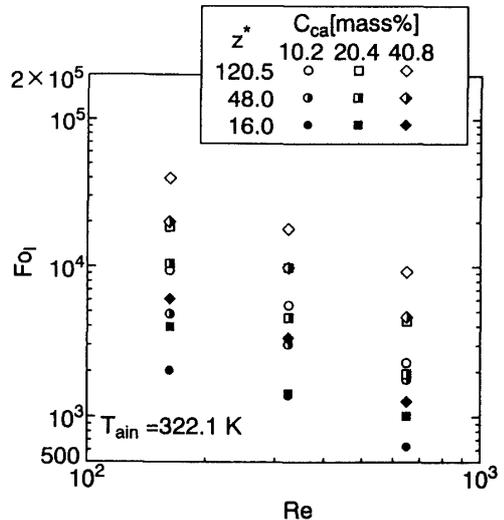


図11 フーリエ数  $FO_l$  とレイノルズ数  $Re$  の関係

図12は、無次元潜熱放冷熱時間のフーリエ数  $F_{O1}$  とステファン数  $Ste$  の関係を微細カプセル混合水の無次元深さ  $z^*=120.5$  の場合を例にとり示したものである。ステファン数  $Ste$  は、空気入口温度  $T_{ain}$  および微細カプセル混合水の潜熱量  $L_{ca}=(C_p/100) \times L$  を用いて次式(12)により計算される。

$$Ste = \frac{C_{pca} \times (T_{ain} - T_f)}{(C_p/100) \times L} \dots\dots\dots(12)$$

フーリエ数  $F_{O1}$  は、ステファン数  $Ste$  が空気入口温度  $T_{ain}$  および微細カプセルの質量割合  $C_{ca}$ (ペンタデカンの質量割合  $C_p$ ) の影響を含むために各レイノルズ数  $Re$  においてステファン数  $Ste$  の $-0.711$ 乗で変化する次式(13)の関係を得た。

$$F_{O1} \propto Ste^{-0.711} \dots\dots\dots(13)$$

式(10)、(11)および(13)に示される結果より、横軸を  $z^{*0.810} Ste^{-0.711} Re^{-1.00}$  として、潜熱放冷熱時間のフーリエ

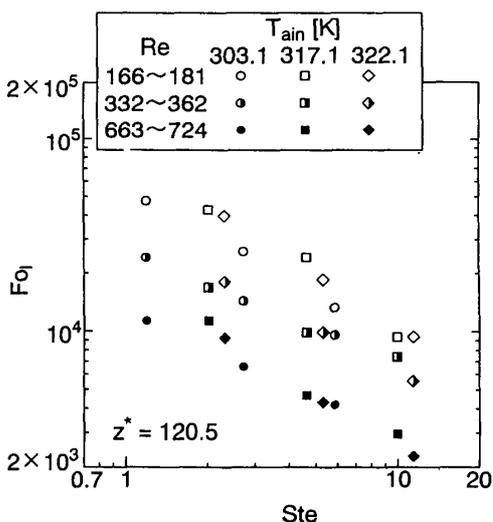


図12 フーリエ数  $F_{O1}$  とステファン数  $Ste$  の関係

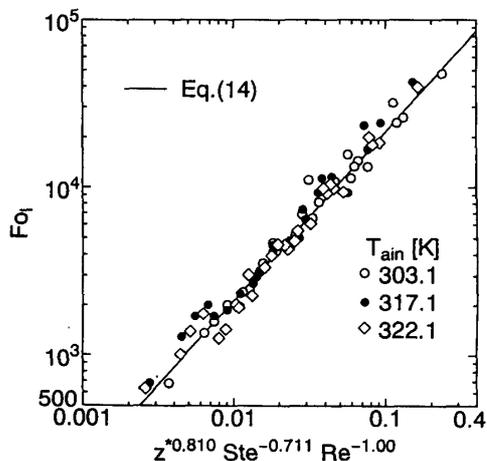


図13 フーリエ数  $F_{O1}$  と  $z^{*0.810} Ste^{-0.711} Re^{-1.00}$  の関係

数  $F_{O1}$  をプロットした結果を図13に示す。フーリエ数  $F_{O1}$  は、 $z^{*0.810} Ste^{-0.711} Re^{-1.00}$  に対して直線的に変化する関係にあり、実験値と標準偏差 $\pm 9.8\%$ 以内で一致する次式(14)を得た。

$$F_{O1} = 2.85 \times 10^5 \times z^{*0.810} Ste^{-0.711} Re^{-1.00} \dots\dots\dots(14)$$

式(14)の適用範囲は、 $C_{ca}=10.2 \sim 40.8 \text{ mass\%}$ ,  $T_{ain}=303.1 \sim 322.1 \text{ K}$ ,  $Ste=1.08 \sim 11.4$ ,  $z^*=16.0 \sim 120.5$  および  $Re=166 \sim 724$  である。放冷熱開始より、微細カプセル潜熱物質混合水の潜熱放冷熱完了までの総放冷熱時間は、無次元顕熱放冷熱時間を表わす式(5)の  $F_{O_s}$  と潜熱放冷熱時間を表わす式(14)の  $F_{O1}$  の和の形で表わされる。

5. 結論

低温潜熱蓄冷熱材として、凝固状態の芯物質(ペンタデカン)を含む微細カプセル混合水を用い空気微細カプセル混合水の直接接触熱交換法による放冷熱実験を行った。その結果として、潜熱放冷熱システム構築に重要な因子である温度効率、顕熱および潜熱放冷熱時間に関する実測および微細カプセル混合水中の空気泡浮上挙動の観察より次の結論を得た。

- (1) 微細カプセル混合水中の単一ノズルより噴出した空気泡の平均空気泡直径は、微細カプセルの質量割合およびノズル噴出流速の増加と共に大きくなることが判明した。
- (2) 空気出口温度は、微細カプセル混合水の液位の増加と共に潜熱融点の温度に近づく結果を得た。また、空気出口温度を算定可能な温度効率と微細カプセル混合水の液位とノズル直径の寸法比を表わす微細カプセル混合水の無次元深さの有用な関係式を得た。
- (3) 放冷熱時間に関して、相変化が開始されるまでの顕熱放冷熱時間および潜熱放冷熱時間に関する測定を行い、任意の微細カプセル混合水の初期温度  $T_{cai}$  から放冷熱した場合の顕熱放冷熱時間のフーリエ数  $F_{O_s}$ 、および潜熱放冷熱時間のフーリエ数  $F_{O1}$  の有用な実験整理式の誘導に成功した。

参考文献

- (1) 稲葉、森田、熱物性、9-1(1995)、掲載予定。
- (2) 稲葉、森田、機論、(1995)、掲載予定。
- (3) 稲葉、森田、機論、(1995)、掲載予定。
- (4) A. Mersmann et al., Int. Chem. Eng., 22-1,(1982),16.
- (5) 稲葉、他3名、日本機械学会中四国支部第31期講演論文集、935-1(1993)、178.
- (6) 稲葉、森田、機論、61-583, B(1995)、掲載予定。
- (7) Kreith,F and R. F. Boehm, Direct- contact heat transfer, (1988), 131, H.P.C..
- (8) 化学工学協会編、気泡・液滴・分散工学(基礎と応用)、(1982)、21、横書店。