

低温潜熱物質を分散体とした O/W 型エマルジョンを用いた 蓄冷システムに関する基礎研究*

(第3報, 空気-エマルジョン直接接触熱交換法による放冷特性)

稲葉英男*¹, 森田慎一*²

Fundamental Study of Cold Heat-Storage System of O/W-Type Emulsion Having Cold Latent-Heat-Dispersion Material (3rd Report, Cold Heat-Release Characteristics of Emulsion by Air-Emulsion Direct-Contact Heat Exchange Method)

Hideo INABA and Shin-ichi MORITA

The thermal properties, the flow and cold heat-storage characteristics of the O/W-type emulsion were reported in the first and the second report, respectively. This paper deals with cold heat-release characteristics of the oil (tetradecane, $C_{14}H_{30}$, freezing point 278.9 K)/water emulsion as a latent heat-storage material having a low melting point. An air-emulsion direct contact heat exchange method was selected for the cold heat-release from the solidified emulsion layer. The temperature effectiveness, the sensible heat release time and the latent heat release time were measured as experimental parameters. The useful nondimensional correlation equations for those parameters were derived in terms of nondimensional emulsion level expressed the emulsion layer dimensions, Reynolds number for air flow, Stefan number and heat capacity ratio.

Key Words: Cold Heat Release, O/W-Type Emulsion, Phase Change, Air-Emulsion Direct Contact, Latent Heat, Temperature Effectiveness

1. 序論

熱媒体としての水中に低温潜熱蓄冷物質を分散混合した潜熱蓄冷材は, その凝固状態においても未凍結の熱媒体により流動性を保持し, 凝固熱媒体の流動搬送が可能であり, 蓄冷システムの構築に新たな発展が期待できる。

このような流動性に富む潜熱蓄冷材を対象として前報においては, 低温潜熱物質であるテトラデカン($C_{14}H_{30}$, 融点 $T_f=278.9$ K, 潜熱量 $L=229$ kJ/kg) を連続相である水に微細分散した Oil/Water 型エマルジョンの熱物性⁽¹⁾, 輸送特性において重要となる粘性評価⁽²⁾を行った。さらに, コイル状二重管式熱交換器を用いた潜熱蓄冷(凝固)実験を行い, 流動, 熱伝達および蓄冷時間についても明らかにしてきた⁽³⁾。

潜熱蓄冷材料の冷熱(融解潜熱)を利用する際の有利点は, 潜熱蓄冷材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材融点付近の一定温度を低温熱源として効率的利用するためには, 分散質としての凝固潜熱体と被冷却媒体としての暖かい空気との直接接触熱交換に

よるエマルジョンの放冷が有効と考えられる。

気液接触式熱交換に関する従来の研究では, 加藤⁽⁴⁾らが水道水およびカルボキシメチルセルローズ中に空気を噴出したときの気液界面積を測定し, さらに, 亜硫酸水溶液中への酸素の吸収速度, イオン交換水中への炭酸ガスの吸収速度の測定より液相側物質伝達係数の算出を行っている。Mersmannら⁽⁵⁾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, 著者らも新しい型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, 空気温度と温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⁽⁶⁾。しかしながら, 空気と流動微細固体との直接接触式熱交換に関して, 微細凝固体の潜熱相変化を伴う放冷過程を扱った研究は見当たらない。

本研究は, この種の潜熱エマルジョン蓄冷システムの基本的放冷特性を把握する目的より分散質である低温微細凝固潜熱蓄冷体を含む O/W 型エマルジョン充填槽下部から, 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特性を実験的に検討するものである。ここでは, 凝固エマルジョンの基本的放冷特性を検討する立場から, 取り扱いの容易なようにエマルジョン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。その放冷特性に影響を及ぼす実験パラメータとしてエマルジョン中の潜熱物質であるテトラ

* 原稿受付 平成6年4月21日。

*¹ 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

*² 正員, 岡山大学大学院。

デカン油濃度, エマルジョン液位, 初期エマルジョン温度, 入口暖空気温度および空気ノズル噴出速度を検討してある. すなわち, これらの実験パラメータがこの種の放冷システム構築において重要となる顕熱および潜熱放冷時間そして潜熱放冷時の熱交換後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} : 放冷装置のエマルジョン充填円筒形容器底面積
 C_{pa} : 空気の比熱, C_{pe} : エマルジョンの比熱
 C_t, C_s, C_w : テトラデカン, 界面活性剤および水の質量濃度
 d_a : 空気泡平均水力直径, d_n : ノズル直径
 d_{ves} : 放冷装置のエマルジョン充填円筒形容器直径
 F_{o1} : 潜熱放冷時間のフーリエ数
 F_{o2} : 顕熱放冷時間のフーリエ数
 G_a : 空気の質量流量, h^* : 熱量比
 L : テトラデカンの潜熱量, L_e : エマルジョンの潜熱量
 M_e : 質量, n : ノズル本数, N : サンプル数
 P_{cr} : 式(4)により定義される相変化率
 Q_{tot} : エマルジョンの総放冷熱量
 Q_l : エマルジョンの潜熱放冷熱量
 Q_s : エマルジョンの顕熱放冷熱量
 Q_{los} : エマルジョンと外気の温度差に伴う損失熱量
 Re : 空気のノズル噴出レイノルズ数, Ste : ステファン数
 t : 時間, t_l : 潜熱放冷時間, t_s : 顕熱放冷時間
 T_{ain} : 空気入口温度, T_{aout} : 空気出口温度
 T_e : エマルジョンの温度, T_{ei} : 初期エマルジョン温度
 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 : エマルジョン液位
 z^* : 無次元エマルジョン深さ
 ギリシャ文字
 α_a : 空気の温度伝導率, α_e : エマルジョンの温度伝導率
 ϕ_a : 温度効率, ψ_a : 空気の相対湿度
 添字
 a : 空気, ain : 入口空気, $aout$: 出口空気
 e : エマルジョン, f : 融点, i : 初期, l : 潜熱
 los : 熱損失, s : 顕熱, ves : エマルジョン充填容器

2. 実験装置および実験方法

表1は, 本研究に用いた供試潜熱O/W型エマルジョンのテトラデカン濃度 C_t , 水の質量割合 C_w , および界面活性剤濃度 C_s 組成を示したものである. 尚, これらの各種エマルジョンのデータ整理に用いる諸物性値は, 前報⁽¹⁾⁽²⁾によるものを用いてある. 本研究に用いたエマル

ジョンは, 放冷実験によるテトラデカンの分離は観察されず十分な安定分散状態を維持する材料である.

低温凝固潜熱エマルジョンの放冷(融解)実験装置の概略を図1に示す. 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エマルジョン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 $V = 9.13 \times 10^{-4} m^3/s$ に対して $\pm 3\%$ 以内である.

表1 供試エマルジョンの組成

C_t wt%	C_w wt%	C_s wt%
40.0	49.3	10.7
35.0	56.0	9.0
25.0	66.7	8.3
15.0	78.5	6.5

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供試凝固潜熱エマルジョンが充填される内径89 mm, 高さ500 mmおよび厚さ3 mmの円筒亚克力容器放冷試験部により構成される. 放冷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, 外気と試料(エマルジョン)との温度差に伴う熱損失を極力防ぐ構造としてある.

供試エマルジョン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. 尚, 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, ± 0.05 Kの精度で測定可能である. 熱交換を終えたエマルジョン層空気出口温度は, 出口空気混合およびエマルジョン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エマルジョン液面より30~50 mmの位置に設置して測定した. エマルジョン充填容器半径方向のエマルジョン層そして

空気出口温度分布は、 ± 0.3 K以内であり、ほぼ円筒軸方向に一次元的に扱えることを確認してある。

放冷試験部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エマルジョン層出口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° 間隔で計 $n=49$ 箇所設置してある。供試エマルジョンは、界面活性剤が含まれるため発泡性のある流動性材料である。従って本放冷実験装置の空気噴出円形ノズル直径は、エマルジョンと空気の直接接触熱交換効率向上のためには前報⁽⁶⁾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が、予備実験より種種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、エマルジョン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。

凝固エマルジョンの放冷実験は、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行い、前報⁽³⁾の蓄冷装置で潜熱体としてのテトラデカンを100%凝固した低温エマルジョンを放冷円形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_b (=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 ± 0.1 K以内に制御された。

入口空気湿度による影響は、乾き空気がエマルジョン中に円形ノズルより噴出し飽和空気としてエマルジョンより取り出される場合について計算を行い、総水分伝達熱量がエマルジョン潜熱量 L_e の4%以下と計算される。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、この種の潜熱エマルジョンの基本的放冷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 $T_{ain} = 303.1 \sim 318.1$ K.
- エマルジョンのテトラデカン濃度 $C_t = 15.0 \sim 40.0$ wt%.
- エマルジョンの液位 $z = 32 \sim 241$ mm.

- 初期エマルジョン温度 $T_{ei} = 273.6 \sim 277.9$ K.

3. 凝固状態エマルジョン中の気泡の上昇挙動

供試凝固状態エマルジョンは、前報⁽¹⁾⁽²⁾で述べたように乳白色を呈する不透明な流体である。このため、放冷実験装置に充填された状態のエマルジョン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ズルよりのエマルジョン中の気泡成長挙動を可視化実験で検討するものである。本研究においては、可視化装置として薄い透明直方体容器を用い、エマルジョン中の気泡直径の測定および浮上状態の観察を行った。図2は、可視化装置の概略を示した図である。可視化装置は、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、放冷実験装置と同じ直径 $d_n = 2.0$ mmの円形単一ノズルがエマルジョン充填槽下部に設置してある。流動する気泡の可視化実験は、凝固エマルジョンを液位350 mmまで充填し、円形ノズルより所定の温度 $T_{ain} (= 303.1$ 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⁽⁷⁾。

気泡の水力直径 d_a の算定は、気泡の可視化写真にもとづいて行った。図3(a), (b), (c)は、円形ノズル噴出流速 $U_n = 4.98$ m/s, 空気入口温度 $T_{ain} = 303.1$ Kの場合の気泡の可視化写真をそれぞれ水, エマルジョン $C_t = 25.0$ および 40.0 wt%について示したものである。図3(a)水中を浮上する気泡は、ほぼ一定の気泡直径で上昇する様

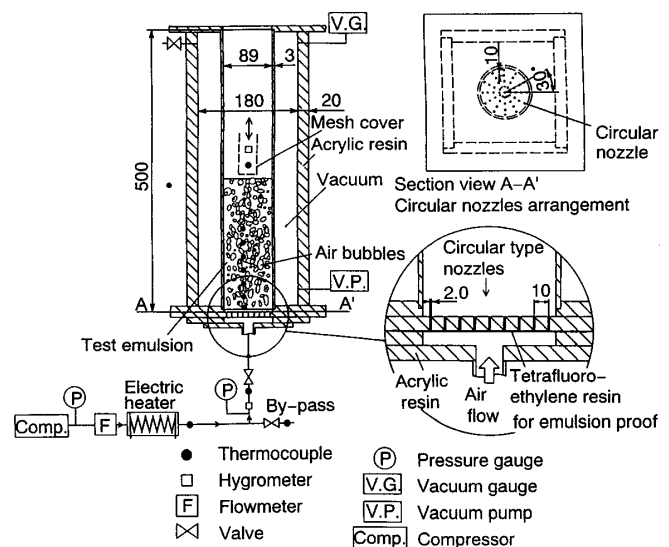


図1 放冷実験装置概略図

子が観察された。一方、図3(b), (c)の凝固エマルジョン中の気泡は、ノズルより噴出された後エマルジョンの粘性が大きいため⁽²⁾ゆっくりと上昇し、後続の気泡と合一⁽⁸⁾することにより十分な浮力を得る大きさになった後に等間隔で上昇する様子が観察された。

図4は、空気泡可視化写真にもとづいて算定された水力直径 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エマルジョン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、 $N=40\sim50$ である。図4中に示される気泡平均水力直径 d_a は、水中

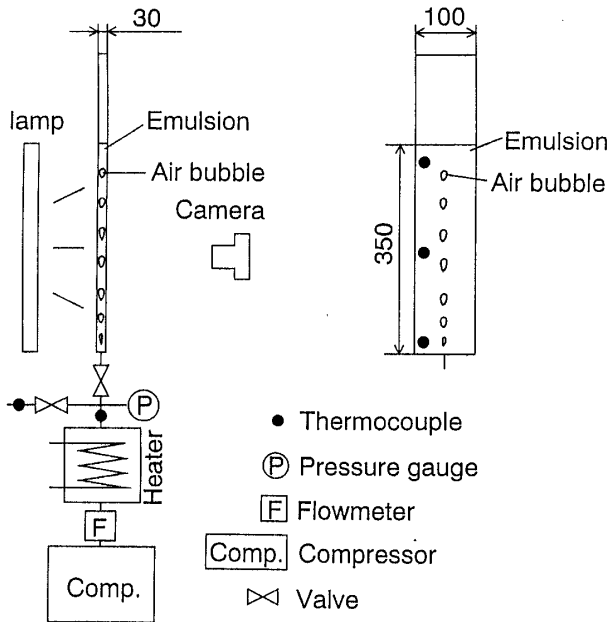
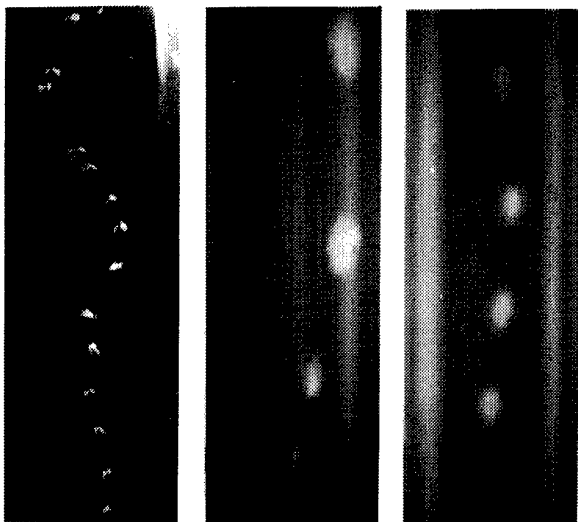


図2 可視化装置概略図



(a) 水 (b) $C_t = 25.0\text{wt}\%$ (c) $C_t = 40.0\text{wt}\%$

図3 水およびエマルジョン中の空気泡可視化写真

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⁽⁶⁾。しかしながら、エマルジョン中の空気泡は、ノズル噴出流速 U_n の増大と共に大きくなる傾向にある。これは、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と考えられる。

一方、エマルジョン濃度 C_t 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、エマルジョン濃度 C_t の増加に伴い、相対的にエマルジョンの粘性が大きくなるため⁽²⁾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合一が促進されることが原因と考えられる。エマルジョン濃度 C_t 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 顕熱放冷過程

図5は、放冷試験部内に水またはテトラデカン濃度 $C_t=40.0\text{ wt}\%$ の100%凝固潜熱エマルジョンを液位 $z=161\text{ mm}$ まで充填し、空気入口温度 $T_{air}=318.1\text{ K}$ 、ノズル噴出空気のレイノルズ数 $Re=724$ (ノズル噴出空気流速 $U_n=5.93\text{ m/s}$)の条件にて各放冷特性の比較を行った場合の水温 T_w 、エマルジョン温度 T_e 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。ここで、ノズル噴出空気のレイノルズ数 Re は、代表寸法を噴出ノズル直径 d_n とする次式(1)により計算される。

$$Re = \frac{U_n \times d_n}{\nu_a} \dots \dots \dots (1)$$

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。

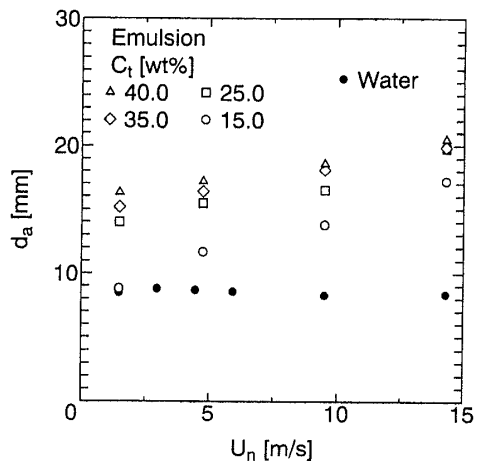


図4 水およびエマルジョン中の空気泡平均水力直径 d_a と円形ノズル噴出流速 U_n の関係

一方、凝固エマルジョン充填の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、時間の経過と共にエマルジョン温度 T_e 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、前述の流入空気泡挙動において観察されたようにエマルジョンの粘性による滞留時間の長期化により、空気泡のエマルジョン液面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、 $t=10$ 分後より一定温度 T_{aout} 経過が $t=29$ 分まで続き、この領域で凝固テトラデカン融解による放冷が起こるところの潜熱蓄冷材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、テトラデカンの融点 $T_f=278.9$ Kより少し高い温度であるが、この差はテトラデカン自体そして界面に形成される界面活性剤ミセル等の熱抵抗によるものと考えられる。

図5中には、水および凝固エマルジョン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時間 t_s と潜熱放冷時間 t_l を示してある。顕熱放冷時間 t_s と潜熱放冷時間 t_l は、それぞれ、放冷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6は、総放冷量 Q_{tot} 、凝固エマルジョンの顕熱放冷量 Q_s 、エマルジョンの潜熱放冷量 Q_l および放冷装置内のエマルジョン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、凝固エマルジョンの顕熱放冷量 Q_s 、潜熱放冷量 Q_l および放冷試験装置内のエマルジョンから外気との損失熱量 Q_{los} との熱バランスより次式(2)のように表わされる。

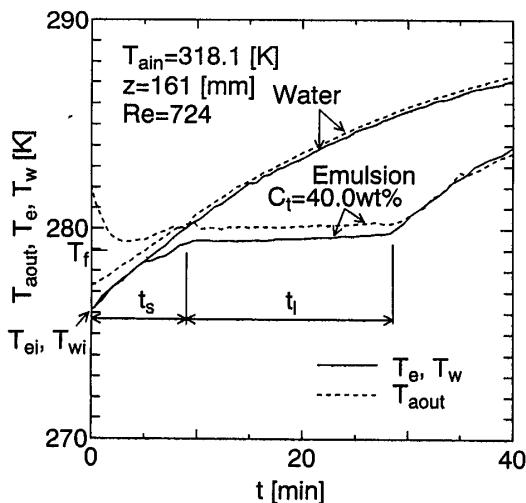


図5 水 T_w 、エマルジョン ($C_l=40.0$ wt%) T_e および空気出口温度 T_{ain} の経時変化

$$Q_{tot} = \int C_{pa} \times G_a \times (T_{ain} - T_{aout}) dt = Q_l + Q_s + Q_{los} \dots \dots \dots (2)$$

凝固エマルジョンの顕熱放冷量 Q_s は、凝固エマルジョンの比熱 C_{pe} 、質量 M_e および初期エマルジョン温度 T_{ei} より次式(3)により算定される。

$$Q_s = C_{pe} \times M_e \times (T_e - T_{ei}) \dots \dots \dots (3)$$

損失熱量 Q_{los} は、放冷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、総放冷量 Q_{tot} の3%以下である。

尚、次で述べる潜熱放冷熱量 Q_l の経時変化は、式(2)の熱バランスの関係より求めることになる。

潜熱放冷量 Q_l および凝固エマルジョンの保有する総潜熱量 L_e より算定される相変換率 P_{cr} の経時変化を図7に示す。相変換率 P_{cr} は、次式(4)により表わされる。

$$P_{cr} = \frac{Q_l}{M_e \times L_e} \times 100 = \frac{Q_l}{M_e \times (C_l/100) \times L} \times 100 \dots (4)$$

ここで、 L は、テトラデカンの潜熱量 (229 kJ/kg) である。

相変換率 P_{cr} は、顕熱放冷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、空気泡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8は、顕熱放冷時間 t_s 、空気の温度伝導率 α_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、初期エマルジョン温度 T_{ei} およびテトラデカン融点 T_f より計算されるエマルジョンの顕熱量と時間当りに噴出される空気の熱量の比で表わされ次式(5)により定義される。

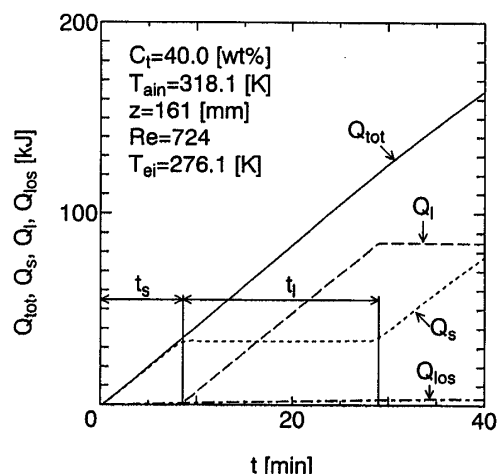


図6 総放冷量 Q_{tot} 、エマルジョンの顕熱放冷量 Q_s 、エマルジョンの潜熱放冷量 Q_l および損失熱量 Q_{los} の経時変化

$$h^* = \frac{Cp_e \times M_e \times (T_f - T_{ei}) \times \alpha_e}{Cp_a \times G_a \times (T_{ain} - T_f) \times A_{ves}} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 A_{ves} は、放冷装置のエマルジョン充填容器の底面積である。

図8より無次元顕熱放冷時間であるフーリエ数 Fo_s 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±13%以内で一致する次式(6)を得た。

$$Fo_s = 4.29 \times 10^5 \times h^* \dots\dots\dots (6)$$

適用範囲は、 $C_t = 15.0 \sim 40.0$ wt%, $z^* = 16.0 \sim 120.5$, $Re = 166 \sim 724$, $T_{ain} = 303.1 \sim 318.1$ K および $T_{ei} = 273.6 \sim 277.9$ K である。図8中に示される実線は、式(6)による計算結果を示したものである。

4.2 潜熱放冷過程

図9は、エマルジョン液位 z を 32 mm および 161 mm とした場合のエマルジョン ($C_t = 40.0$ wt%) 温度、初期エマルジョン温度 $T_{ei} = 276.1$ K, 276.8 K 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。顕熱放冷時間 t_s および潜熱放冷時間 t_l は、エマルジョン液位 z が小さくなるほどエマルジョン充填質量 M_e が減少するために短縮される。

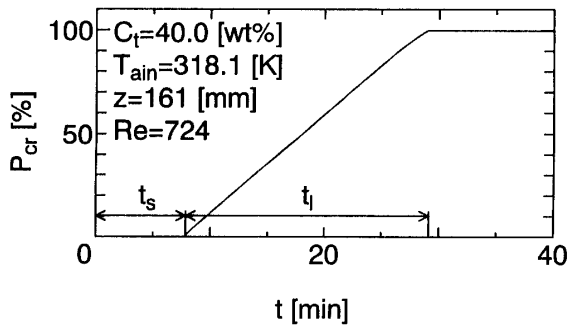


図7 エマルジョンの相変率 P_{cr} の経時変化

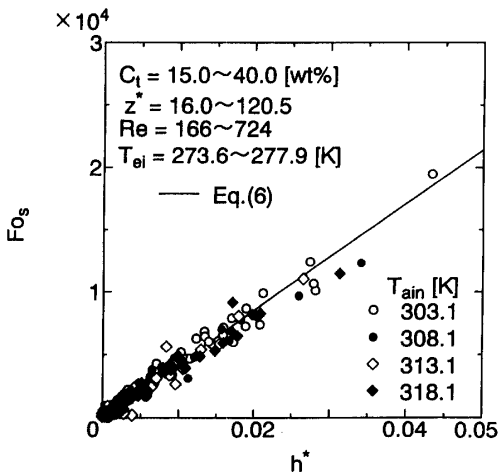


図8 顕熱放冷時間のフーリエ数 Fo_s と熱量比 h^* の関係

潜熱放冷時の空気出口温度 T_{aout} とエマルジョン温度の差は、エマルジョン液位 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、エマルジョン液位 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10は、次式(7)に示される温度効率 ϕ_a と無次元エマルジョン深さ z^* の関係を示している。潜熱放冷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 ϕ_a と無次元エマルジョン深さ z^* との関係で検討する。

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

無次元エマルジョン深さ z^* は、エマルジョン液位 z とノズル直径 $d_n = 2$ 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10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、各実験パラメータの範囲は、図10中に示されてる。本実験範囲において温度効率 ϕ_a は、0.92以上と非常に高効率である。また、温度効率 ϕ_a は、無次元エマルジョン深さ z^* の増大と共に増加傾向を示している。これは、前述の z^* 値の増大に伴うエマルジョン充填高さ増大による空気泡浮上距離の増加に伴う空気出口温度 T_{aout} の低下によるものと考えられる。

他の実験パラメータの効果は、空気入口温度 $T_{ain} = 303.1 \sim 318.1$ K, エマルジョン濃度 $C_t = 15.0 \sim 40.0$ wt% としてレイノルズ数 $Re = 166 \sim 724$ の範囲では、図中の実験データ値の範囲(I印)での変化程度で、それほど大きなものでないことが明らかである。

温度効率 ϕ_a と無次元エマルジョン深さ z^* の関係は、実測値と±7.2%以内で一致する次式(9)を得た。

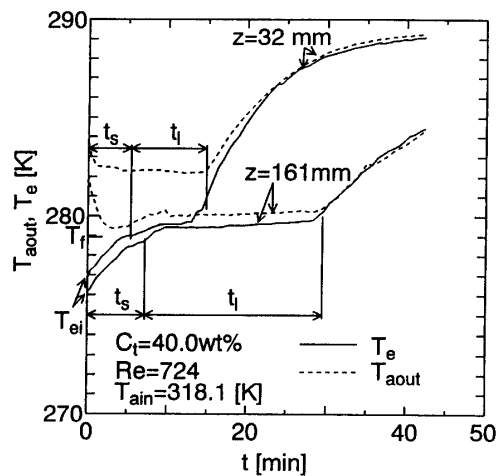


図9 エマルジョン液位 z を変化させた場合のエマルジョン ($C_t = 40.0$ wt%) および空気出口温度 T_{aout} の経時変化

$$\phi_a = -4.26 \times 10^{-6} z^{*2} + 1.06 \times 10^{-3} z^* + 0.911 \dots \dots (9)$$

式(9)は、潜熱放冷時の空気出口温度を明らかにする式であり、その計算値は図10中の実線で示してある。

図11は、潜熱放冷時間 t_l とエマルジョン中のテトラデカン濃度 C_t の関係を空気入口温度 $T_{ain}=318.1$ Kの場合について示したものである。潜熱放冷時間 t_l は、エマルジョン液位 z およびテトラデカン濃度 C_t 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12は、無次元潜熱放冷時間であるフーリエ数 $F_{o1}(=\alpha_a \times t_l / d_n^2)$ と無次元エマルジョン深さ z^* の関係を空気入口温度 $T_{ain}=318.1$ Kの場合について示してある。潜熱放冷時間のフーリエ数 F_{o1} は、無次元エマルジョン深さ z^* の増加に伴いエマルジョンの潜熱量が大きくなるために増大する傾向となる。潜熱放冷時間のフーリエ数 F_{o1} と無次元エマルジョン深さ z^* の関係は、最小二乗法による近似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 およびテトラデカン濃度 C_t には余り依存せず

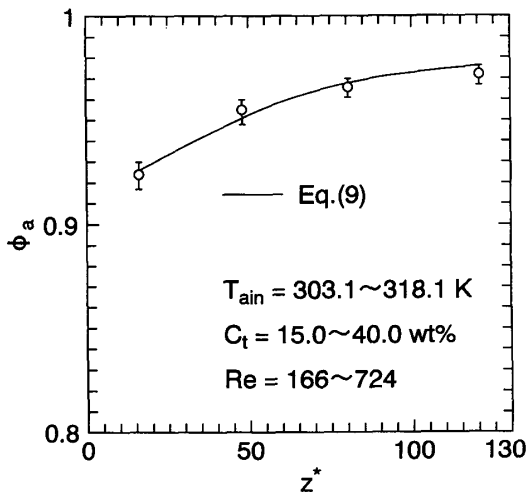


図10 温度効率 ϕ_a と無次元エマルジョン深さ z^* の関係

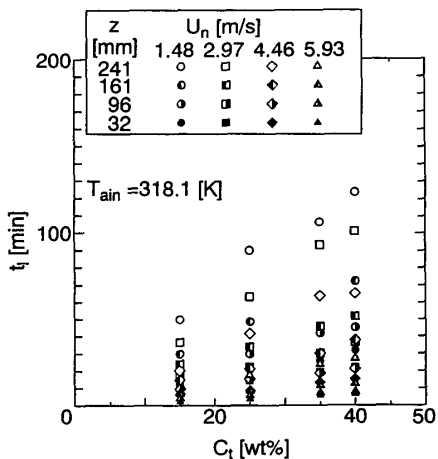


図11 潜熱放冷時間 t_l とテトラデカン濃度 C_t の関係

次式(10)の関係にあることが明らかとなった。

$$F_{o1} \propto z^{*0.822} \dots \dots (10)$$

前述の無次元潜熱放冷時間であるフーリエ数 F_{o1} とレイノルズ数 Re の関係を図13に示す。フーリエ数 F_{o1} は、レイノルズ数 Re が大きくなるに従い、空気泡の微細化や熱伝達率の増加⁽⁶⁾によりエマルジョンの時間当り潜熱放冷量が増加するために減少する傾向にある。潜熱放冷時間のフーリエ数 F_{o1} 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。

$$F_{o1} \propto Re^{-1.02} \dots \dots (11)$$

図14は、無次元潜熱放冷時間のフーリエ数 F_{o1} とステファン数 Ste の関係を無次元エマルジョン深さ $z^*=120.5$

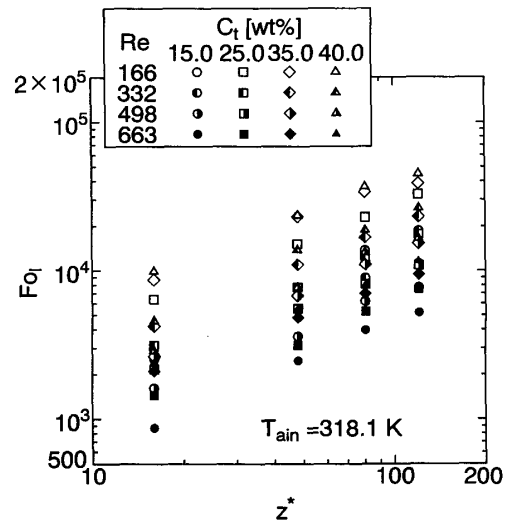


図12 潜熱放冷時間のフーリエ数 F_{o1} と無次元エマルジョン深さ z^* の関係

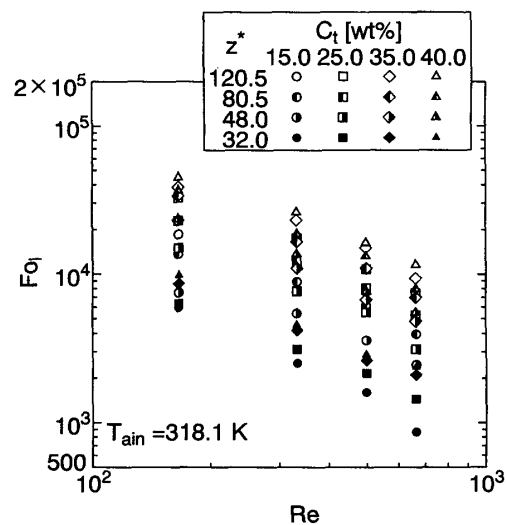


図13 潜熱放冷時間のフーリエ数 F_{o1} とレイノルズ数 Re の関係

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} およびエマルジョンの潜熱量 $L_e (= (C_t/100) \times L)$ を用いて次式 (12) により計算される。

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

フーリエ数 F_{o1} は、ステファン数 Ste が空気入口温度 T_{ain} およびテトラデカン濃度 C_t 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 -0.747 乗で変化する次式 (13) の関係を得た。

$$F_{o1} \propto Ste^{-0.747} \dots \dots \dots (13)$$

式 (10), (11) および (13) に示される結果より、横軸を $z^{*0.822} Ste^{-0.747} Re^{-1.02}$ として、潜熱放冷時間のフーリエ数 F_{o1} をプロットした結果を図 15 に示す。フーリエ数 F_{o1} は、 $z^{*0.822} Ste^{-0.747} Re^{-1.02}$ に対して直線的に変化する

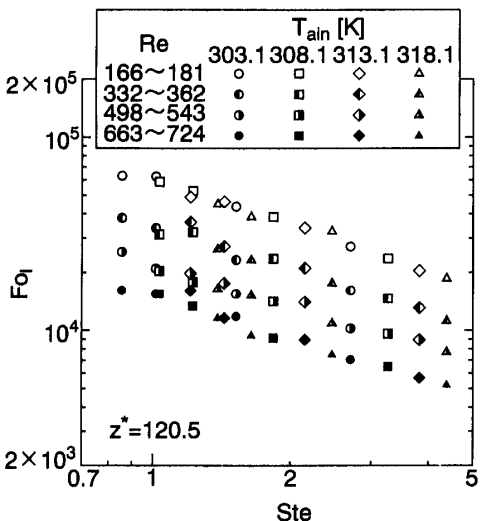


図 14 潜熱放冷時間のフーリエ数 F_{o1} とステファン数 Ste の関係

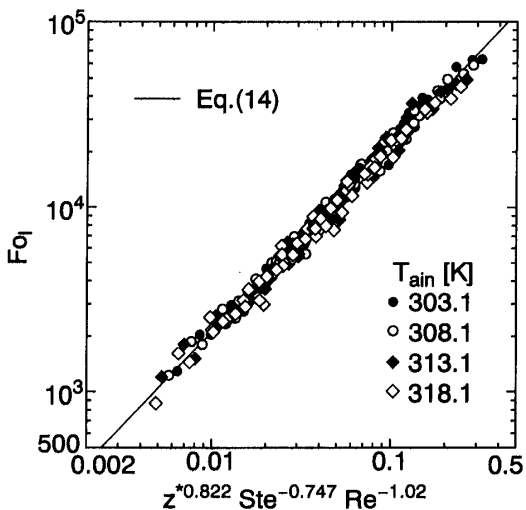


図 15 フーリエ数 F_{o1} と $z^{*0.822} Ste^{-0.747} Re^{-1.02}$ の関係

関係にあり、実験値と標準偏差 $\pm 12.1\%$ 以内で一致する次式 (14) を得た。

$$F_{o1} = 2.28 \times 10^5 \times z^{*0.822} Ste^{-0.747} Re^{-1.02} \dots \dots \dots (14)$$

式 (14) の適用範囲は、 $C_t = 15.0 \sim 40.0$ wt%, $T_{ain} = 303.1 \sim 318.1$ K, $Ste = 0.86 \sim 4.43$, $z^* = 16.0 \sim 120.5$ および $Re = 166 \sim 724$ である。前述の無次元顕熱放冷時間を表わす式 (6) の F_{o0} と潜熱放冷時間を表わす式 (14) の F_{o1} の和が、実験開始より、凝固エマルジョンの潜熱放冷完了までの総放冷時間を表わすことになる。

5. 結論

低温潜熱蓄冷材として、凝固テトラデカンを分散質とした O/W 型エマルジョンを用い空気-エマルジョン直接接触熱交換法による放冷実験を行った。その結果として、潜熱放冷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時間に関する実測およびエマルジョン中の空気泡浮上挙動の可視化の結果より次の結論を得た。

(1) エマルジョン中の単一ノズルより噴出した空気泡は、ある程度の浮力を得るまで合一した後に等間隔で浮上する挙動を示すことが明らかとなった。さらに、平均空気泡径は、エマルジョン濃度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、エマルジョン液位の増加と共に潜熱体触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凝固エマルジョンの充填容器寸法比を表わす無次元エマルジョン深さの関係式を得た。

(3) 放冷時間に関して、相変化が開始されるまでの顕熱放冷および潜熱放冷時間に関する測定を行い、任意の初期エマルジョン温度 T_{ei} から放冷した場合の顕熱放冷時間のフーリエ数 F_{o0} 、および潜熱放冷時間のフーリエ数 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, 野津, 機論, 59-565 (1993), 2882.
- (2) 稲葉, 森田, 野津, 熱物性学会論文, 7-4 (1993), 239.
- (3) 稲葉, 森田, 機論, 60-572 (1994), 1422.
- (4) 加藤, 他 3 名, 化学工学論文, 6-6 (1980), 614.
- (5) A. Mersmann et al., Int. Chem. Eng., 22-1, (1982), 16.
- (6) 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.
- (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, 棋書店.