

低凝固点油滴の凝固を利用した潜熱蓄冷熱に関する基礎研究*

(第5報, 低温水溶液流速を変化させた場合の浮上油滴の流動および凝固特性)

稲葉英男^{*1}, 佐藤憲二^{*2}

Fundamental Study on Latent Cold Heat Storage by Means of Oil Droplets at Low Freezing Point

(5th Report, Flow and Solidification Characteristics of Oil Droplets Ascending in Low-Temperature Water Solution Having Various Flow Velocities)

Hideo INABA and Kenji SATO

Flow and solidification characteristics of tetradecane droplets [melting point of 5.8°C, latent heat of 229.1 kJ/kg, density of 770 kg/m³ (at 6°C)] ascending in ethylene glycol water solution of 30 mass percent at low temperature were investigated experimentally in order to examine the existence of a liquid-liquid or liquid-solid direct-contact-type latent cold heat storage system. Some interesting freezing behaviors of droplets were observed under the conditions of various water solution flow velocities and oil injection nozzle diameters by the visualization technique. Eventually, the relationships between the solidification rate and some experimental parameters were clarified.

Key Words: Latent Cold Heat Storage, Direct Contact Freezing, Tetradecane Droplet, Buoyancy, Solidification Rate

1. 緒 言

著者らは、前報¹⁾において、潜熱蓄冷熱材としての非水溶性油滴と冷熱媒体としての低温水溶液を直接接触熱交換させて蓄冷熱を行う新しい潜熱蓄冷熱法を提案し、潜熱蓄冷熱材油滴の凝固率の測定を行った。その結果、油滴の凝固率と、それを決定する因子である油滴の直径、油のノズル噴射流速および噴射温度、また冷媒水溶液温度との関係を実験的に明らかにした。しかしながら、前報¹⁾においては、試験部内を流動する冷熱媒体としての水溶液の流速は、静止状態に近い一定の低速条件にて凝固特性に関する検討を行った。従って、水溶液の流速が油滴の凝固特性に及ぼす効果の十分な検討はなされていない。本研究では、直接接触熱交換部としての試験部内において、低温水溶液は鉛直下方へと流動し、同上方へと浮上する油滴群と対向流動し、直接接触熱交換を行う。従って、下向きの水溶液流速の増大は、油滴の浮上速度の低下となり、結果的に、一定高さの水溶液中に油滴が滞留する時間の増大となる。この油滴の滞留時間の増加は、油滴の凝固率の増加となることが予想される。

本報告は、前報¹⁾において述べた低温水溶液層内での油滴の凝固特性に関連し、下向きの水溶液流速を増大させた場合の油滴の流動および凝固特性の実験的検討を行い、さらに、水溶液流速を考慮した油滴の凝固率の無次元整理方法を提案するものである。

流動する低温水溶液層中を浮上する油滴の凝固率を支配する因子として、温度条件以外に油滴の大きさ、油滴と水溶液間の熱伝達率、および油滴と水溶液間の熱交換時間が挙げられる。油滴と水溶液間の熱伝達率は、両者間の相対速度により支配されるが、前報¹⁾においては、水溶液流速は一定かつ非常に低速であるため、油滴の絶対浮上速度により、油滴と水溶液間の熱伝達率を表し得た。さらに、油滴の絶対浮上速度は、油滴径により支配され、そして、油滴と水溶液間の熱交換時間、すなわち一定高さの水溶液中における油滴の滞留時間は、油滴の絶対浮上速度により決定される。従って、前報¹⁾においては、これらの三つの因子をまとめて表す無次元パラメーターとして、油滴が凝固を開始する点における油滴の絶対浮上速度を代表浮上速度としたレイノルズ数の定義を行った。しかしながら、下向きの水溶液流速を増加させた場合、対向する油滴の絶対浮上速度は大きく低下し、試験部内における油滴の滞留時間、すなわち凝固進行のための熱交換時間が増加する。よって、この場合、油滴と水溶液間の熱伝達率を支配するレイノルズ数には、油滴と水溶液の間の相対速度を用いる必要があり、さらに水溶液中における油滴の滞留時間を表す無次元パラメーターが必要となる。本報告においては、以上のような観点に基づき、油滴の凝固率データの整理法を提案している。さらに、下向きに流動する低温水溶液と対向する浮上油滴の凝固を伴う流動挙動は、非常に複雑となることが予想されるため、油滴の流動および凝固様式について基本的な検討を行ってある。

* 原稿受付 1996年3月27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。

記 号

- a_c : 水溶液の温度伝導率
 C_D : 抗力係数
 d_n : 円形ノズル直径
 d_p : 油滴径
 $\bar{d}_p$: 油滴の平均相当直径
 Eu : エトベス数 $= g \cdot \Delta \rho \cdot d_p^2 / \sigma$
 Fr : フーリエ数 $= a_c / (Y_0 \cdot U_{pl\infty})$
 g : 重力加速度
 M : $= g \cdot \mu_c^4 \cdot \Delta \rho / (\rho_c^2 \cdot \sigma^3)$
 R : 油滴の凝固率 $= 0 \sim 1$
 Re_p : レイノルズ数 $= (U_p - U_c) \cdot d_p / \nu_c$
 $Re_{pl\infty}$: 油滴の代表レイノルズ数 $= (U_{pl\infty} - U_c) \cdot \bar{d}_p / \nu_c$
 T : 温度
 T_c : 水溶液温度
 T_m : テトラデカンの融点 $= 5.8^\circ\text{C}$
 T_n : 潜熱蓄冷熱材油の噴射温度
 t : 時間
 t_0 : 油滴がノズル離脱後、水溶液表面に到達するまでの時間
 U_c : 水溶液の流速
 U_n : 潜熱蓄冷熱材油の噴射速度
 U_p : 油滴の絶対速度
 $\dot{V}_c$: 水溶液流量
 $\dot{V}_d$: テトラデカン油の流量
 Y : 高さ
 Y_0 : 水溶液層高さ $= 1.6\text{m}$
 Y_c : 油滴が凝固を開始する高さ
 ギリシャ文字
 μ : 粘度
 ν : 動粘度
 θ : 無次元温度比 $= (T_n - T_m) / (T_m - T_c)$
 ρ : 密度
 $\Delta \rho$: 油滴と水溶液の密度差 $= \rho_c - \rho_{dl}$
 σ : 油滴と水溶液間の界面張力
 添字
 c : 水溶液
 d : テトラデカン油
 dl : 液相テトラデカン, 油滴

2. 実験装置および方法

使用した実験装置は、前報⁽¹⁾に述べられているものとはほぼ同様であるが、本実験では、低温水溶液を試験部内にて比較的大きな流量にて流動させることを可能とするために、水溶液循環系統に改造が施されている。供試潜熱蓄冷熱材としては、融点 5.8°C のテトラデカン油 (密度

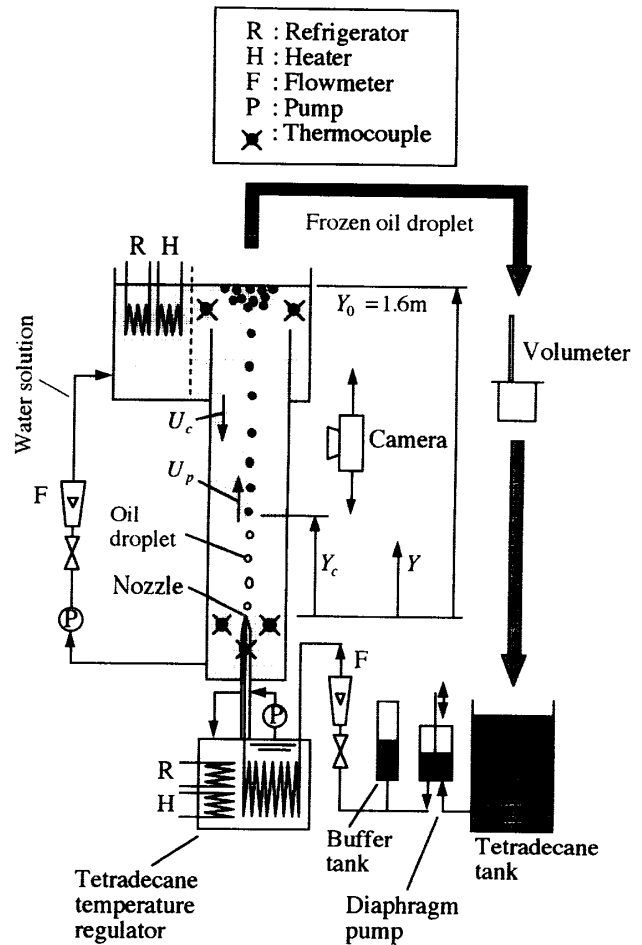


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

$\rho_{dl} = 770\text{kg/m}^3$ (6°C , 液相), 810kg/m^3 (5°C , 固相)), そして低温熱媒体としてのエチレングリコール 30mass% 水溶液 (密度 $\rho_c = 1045\text{kg/m}^3$ (0°C)) を使用しており、それらの諸物性値は前報⁽¹⁾による。以下、前報における実験装置と異なる点について述べる。

図1は、本実験装置の概略を示したものである。試験部は、断面 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、全高さ 2200mm 、および供試円形ノズルから低温水溶液層表面までの高さが $Y_0 = 1.6\text{m}$ の立型矩形ダクトであり、可視観察のために厚さ 10mm の透明アクリル樹脂板にて構成されている。さらに、試験部上部の油滴貯留槽と水溶液用の恒温槽が一体構造となっており、低温水溶液は、遠心ポンプ (最大流量 $2.0 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$) により試験部下部より流出され、同恒温槽へと流入する。水溶液は、試験部内部を鉛直下方へと流動し、試験部内における空塔流速は、最大 $U_c = -0.150\text{m/s}$ (鉛直下向き流れであるため $U_c < 0$) である。試験部内を流下する低温のエチレングリコール 30mass% 水溶液と、供試円形ノズルからの噴射により生成された浮上油滴群とは、対向流状態で直接接触熱交換を行い、油滴の凝固が進行する。

Table 1 Experimental conditions

Nozzle diameter d_n [mm]	Oil flow rate $\dot{V}_d$ [m ³ /s]
2.0	33.3×10^{-8}
0.51	6.67×10^{-8}
Injecting oil temperature T_n [°C]	30 40
Water solution temperature T_c [°C]	0
Water solution velocity U_c [m/s]	-0.030 ~ -0.100
Water solution flow rate $\dot{V}_c$ [$\times 10^{-4}$ m ³ /s]	3~10

上記以外の本実験装置の詳細および実験方法は、前報⁽¹⁾に述べられているものと同様であるため、ここでは、それらの記述は省略する。

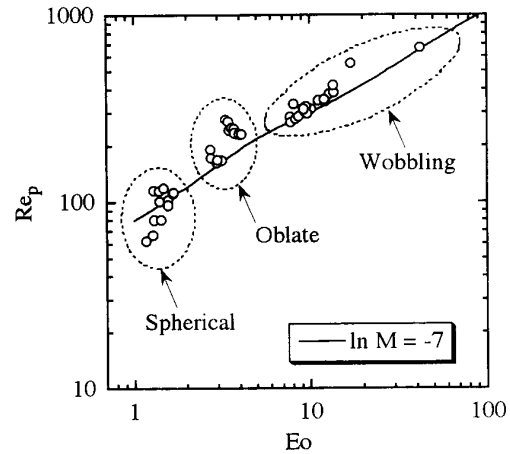
実験条件は表1に示す通りである。表1にあるように、使用した円形ノズルの直径 d_n は2.0mmと0.51mmであり、それぞれの円形ノズル使用時における油の噴射流量は $\dot{V}_d = 33.3 \times 10^{-8}$ m³/sおよび 6.67×10^{-8} m³/sである。また、油の噴射温度 T_n は40°Cおよび30°C、水溶液温度は $T_c = 0^\circ\text{C}$ 一定である。水溶液の流量は $\dot{V}_c = 3 \times 10^{-4} \sim 10 \times 10^{-4}$ m³/sであり、水溶液の試験部内における空塔流速は $U_c = -0.030 \sim -0.100$ m/sである。

3. 実験結果および考察

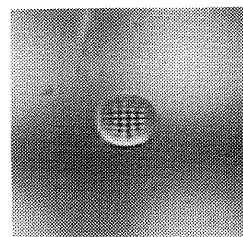
3・1 油滴形状の分類 静止状態の液相中を浮上する、互いに不溶性な液滴の形状は、Kreithら⁽³⁾により、図2(a)のように分類される。図中、横軸および縦軸に示されたエトベス数 Eu およびレイノルズ数 Re_p 、また図中に曲線で描かれた変数 M はそれぞれ以下のように定義される。

$$\left. \begin{aligned} Eu &= g \cdot \Delta\rho \cdot d_p^2 / \sigma \\ Re_p &= (U_p - U_c) \cdot d_p / \nu_c \\ M &= \frac{g \cdot \mu_c^4 \cdot \Delta\rho}{\rho_c^2 \cdot \sigma^3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

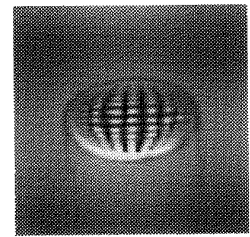
ここで、 g : 重力加速度、 d_p : 液滴の直径、 $\Delta\rho$: 液滴と液体の密度差($=\rho_c - \rho_{dl}$)、 σ : 液滴と液体間の界面張力、 μ_c : 液体の粘度、 U_p : 液滴の速度である。液体中を運動する液滴の形状は、液滴が液体から受ける流動抵抗に基づく変形と、液滴と液体間の界面張力に基づく液滴形状を維持しようとする力の釣り合いにより決まる。 Re_p および Eu はそれぞれ液滴に作用する変形力および界面張力による形状維持力を示すものである。また、変数 M は液滴および液体の物性値による液滴形状の変化を表すものである。図2(a)中の○印は、本実験における油滴形状の条件を示したもので、



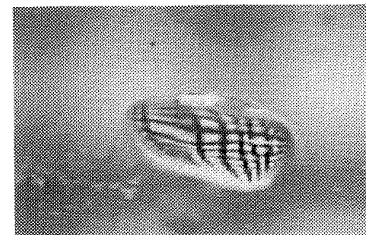
(a) Drop characterization map



(b - 1) Spherical



(b - 2) Oblate



(b - 3) Wobbling

(b - 1) ~ (b - 3) Pictures of droplet on each drop configuration as indicated in Fig. 2(a)

Fig. 2 Distribution of drop shape

球形(Spherical)、楕円形(Oblate)、そして揺動を伴う扁平球形(Wobbling)の様々な形状となる。図2(b-1)、(b-2)および(b-3)は、図2(a)中のそれぞれの形状における、油滴の可視化写真を示したものである。尚、本実験範囲における M の値は、ほぼ e^{-7} 程度となるようである。

3・2 水溶液流速に対する油滴の挙動 図3は、 $d_n = 0.51$ mmの場合における、ノズル先端付近での油の噴射の様子、および噴射により生成された油滴の挙動の可視化画像を示したものである。図3(a)および(b)は、それぞれ水溶液流速が $U_c = -0.030$ m/sおよび -0.055 m/sの場合であり、また、図3(c-1)、(c-2)および(c-3)は、それぞれ $U_c = -0.075$ m/sの場合について時間経過毎の油滴の挙動を示したものである。

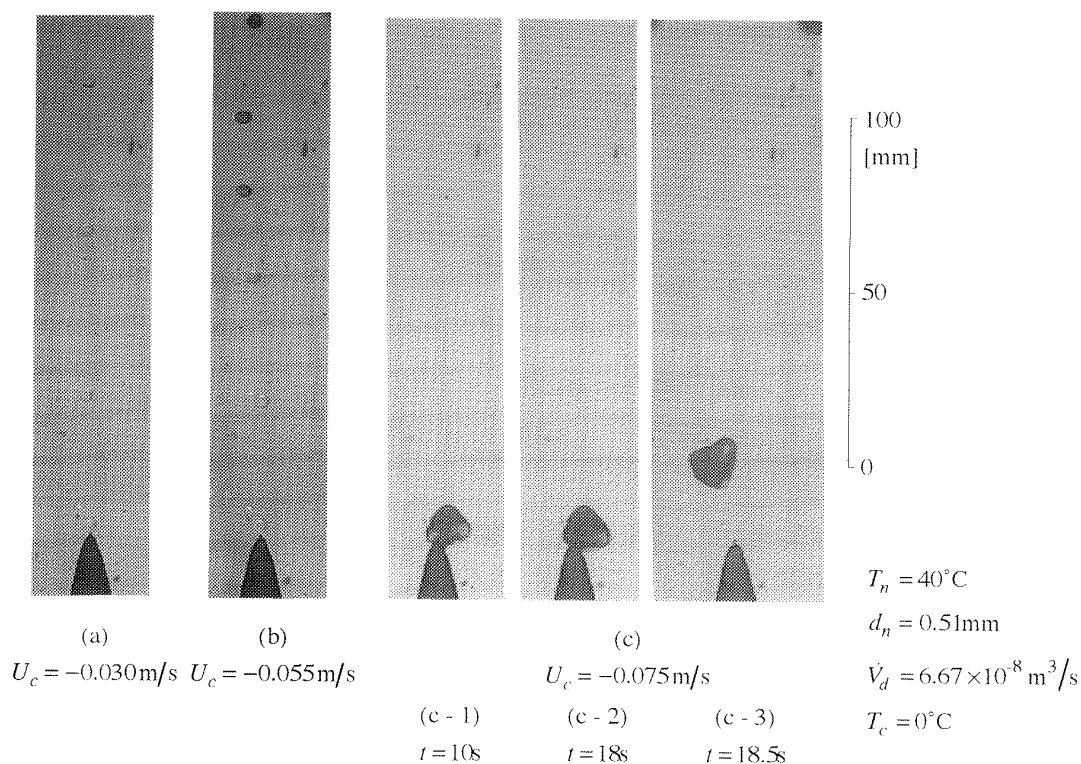


Fig. 3 Characteristics of drop and frozen oil column formation

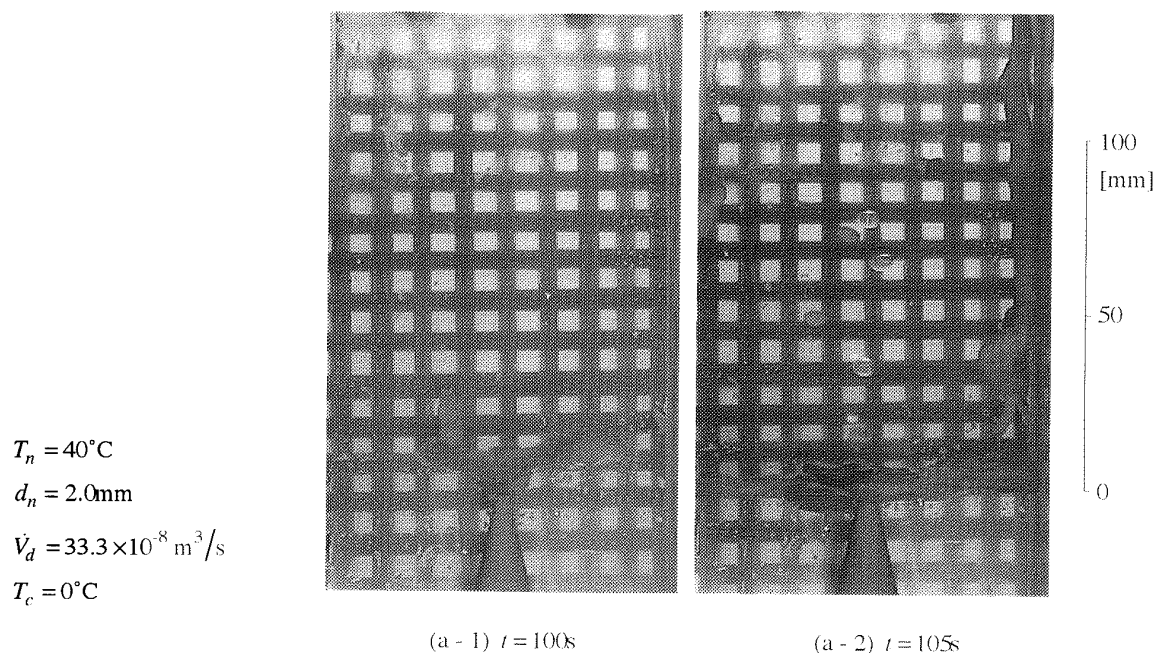
Fig. 4 Behavior of frozen oil column ($U_c = -0.095\text{m/s}$)

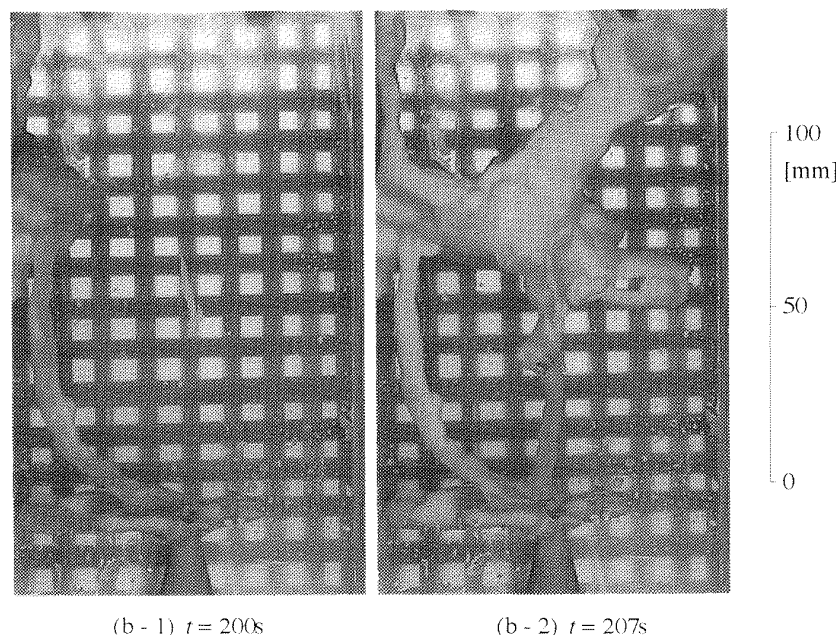
図3(a)に示すように、水溶液流速が比較的小さい場合には、前報⁽¹⁾のように、油滴は規則正しく生成されることが理解できる。

図3(b)に示すように、水溶液流速を $U_c = -0.055\text{m/s}$ へ増大させると、油滴の絶対浮上速度が低下し、その結果、浮上する油滴の間隔は、先の図3(a)の場合に比較して狭められていることが分かる。さらに、図3(b)中の上部の油滴は黒い影がついた状態となり、その不透明さより凝固を開始していることが判断できる。このように、水溶液流速が増大す

ると、油滴の凝固開始が低い位置で行われていることになり、また、油滴が一定高さ(Y_0)を浮上するのに要する時間、すなわち熱交換時間が増大する。

水溶液流速が更に増大し、 $U_c = -0.075\text{m/s}$ の場合になると、図3(c-1)に示すように、浮上する油滴に作用する流下水溶液による流動抵抗が増大し、その結果、ノズル先端にて油滴の離脱が阻止され、油滴の離脱周期が増大する。図3(c-1)の場合は、ノズル先端にて油滴が保持される時間が著しく増大することにより、ノズル先端にて油滴の凝固が

$$\begin{aligned}
 T_n &= 40^\circ\text{C} \\
 d_n &= 2.0\text{mm} \\
 \dot{V}_d &= 33.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \\
 T_c &= 0^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Fig. 4 Continued ($U_c = -0.100\text{m/s}$)

生じ、いわゆる凝固油柱⁽¹⁾が発生している。

凝固油柱は、その表面に凝固層の形成が見られ、その内部では液相の油が流動し、凝固油柱表面の微小な孔から凝固油柱表面に沿って浮力により上方へ向かって流れようとする。しかしながら、油は、鉛直下方へ流動する水溶液による流動抵抗により油柱側方へと押しやられ、そこで凝固する。結果的に、凝固油柱は、図3(c-2)に示すように、水溶液流速が比較的大きい場合には、水平方向へ偏平した形状をとって肥大化する。このようにして成長を続けた凝固油柱は、図3(c-3)に示すように、一定時間の経過後には、ノズル先端より離脱し、水溶液中を浮上する。

図4(a-1)および(a-2)は、それぞれ円形ノズル直径が $d_n = 2.0\text{mm}$ 、水溶液流速が $U_c = -0.095\text{m/s}$ の場合における、ノズル先端における凝固油柱の発生形態を時間を追って示したものである。同図の場合、油の噴射流量が $\dot{V}_d = 33.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ と、前掲の図3の場合 ($6.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$) に比較して大きいことにより、油柱の成長速度が速く、かつ、ノズル径が大きいことにより、油柱がノズル先端より離脱しにくく、結果的に、 $d_n = 0.51\text{mm}$ の場合に比較して凝固油柱は肥大化し、鉛直上方向へ長く伸びた形状となる。

図4(b-1)および(b-2)は、ノズル径が $d_n = 2.0\text{mm}$ 、水溶液流速が $U_c = -0.100\text{m/s}$ の場合の凝固油柱の発生形態を時間を追って示したものである。同図の場合、成長した凝固油柱が試験部内壁に付着し、肥大化しながら成長することが分かる。

3・3 油滴の凝固進行過程 本研究の場合、水溶液中を浮上する油滴のレイノルズ数(式(1)参照)は100以下と小さいため、油滴上部のよどみ点付近が熱伝達率が最も高くなり⁽⁴⁾、その結果、図5右側の下部に示す球状油滴の凝固挙

動の模型図にあるように、油滴最上部において最初に凝固が開始される。しかしながら、固相テトラデカンは液相のそれに比較して密度が高いことより、同模型図の中央および上部に示すように、浮上過程において油滴は回転を始め、同時に油滴最上部にて新たに凝固が開始される。このような動作が繰り返されることにより、油滴の凝固は油滴の全表面で進行することになる。

図5左側は、水溶液中を浮上する油滴の凝固過程を油滴の浮上高さを追って撮影したビデオ画像である。図中、背景に用いた格子部が見える部分が液相で、不透明性の増した灰色の部分が凝固相である。図中最下部の図5(d) ($t = 0\text{s}$) にあるように、油滴の最上部において最初に凝固が開始され、以後、油滴が浮上するに伴い、図5(c) ($t = 0.5\text{s}$) にあるように、凝固部分が油滴の手前側(前面側)に移動し、続いて図5(b) ($t = 1.0\text{s}$) にあるように、凝固部分が油滴の下部に回転移動する。この間、油滴表面の凝固部分は増大し、最終的に図5(a) ($t = 1.5\text{s}$) にあるように、凝固部分は油滴表面全体に広がることになる。

3・4 水溶液流速に対する平均油滴径 図6は、試験部内における水溶液の空塔流速 $-U_c$ に対する、油滴の平均相当直径 $\bar{d}_p$ の関係を表したものであり、ノズル径が $d_n = 2.0\text{mm}$ と 0.51mm の二通りの場合について示されている。図より、いずれの d_n の場合においても、低 $-U_c$ 領域においては、 $-U_c$ の増加に伴い $\bar{d}_p$ の値は緩やかに増加し、一方、高 $-U_c$ 領域においては、 $-U_c$ の増加に伴い $\bar{d}_p$ の値は急増することが分かる。

低 $-U_c$ 領域においては、 $-U_c$ の増加に伴い、油滴に作用する水溶液による流動抵抗が増大し、その結果、ノズル先端にて油滴の離脱が阻止され、油滴の離脱周期が増大し、

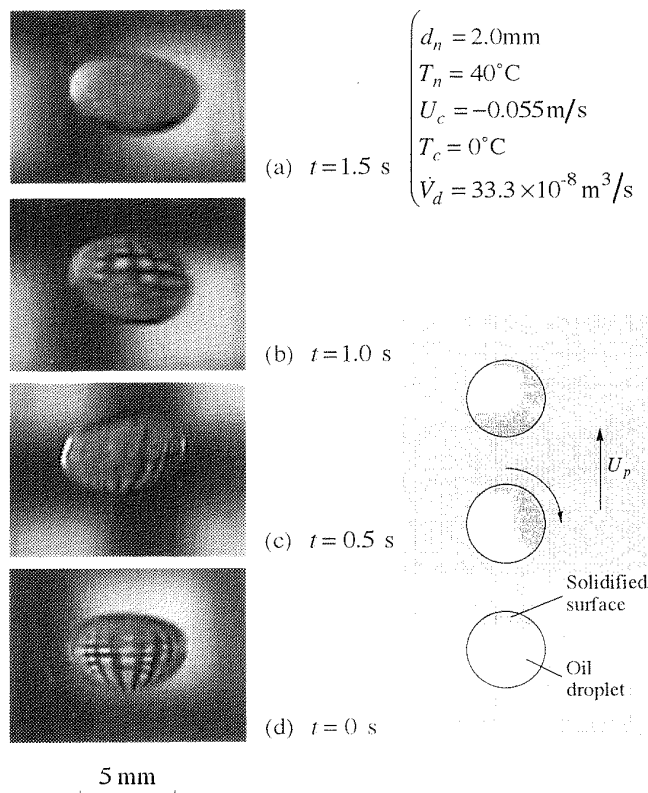


Fig. 5 Behavior of oil droplet in solidifying process

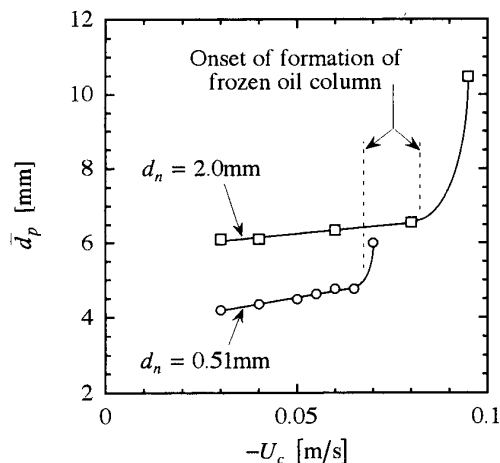


Fig. 6 Equivalent mean diameter of oil droplet vs. water solution velocity

油滴体積が増大することになる。高 $-U_c$ 領域においては、ノズル先端にて油滴が保持される時間が著しく増大することにより、ノズル先端にて油滴の凝固が生じ、いわゆる凝固油柱が発生する。凝固油柱先端より生成される油滴は、通常のそれに比較して、径が著しく増大する傾向となる。図中、 $-U_c$ 値が縦の破線で示された値よりも大きな領域において、凝固油柱が発生する。従って、図中に示されるように、同領域においては、 $\bar{d}_p$ の値は $-U_c$ の増大に伴い急増する。

3・5 水溶液流速に対する油滴の浮上速度 図7は、水溶液の空塔流速 $-U_c$ と、油滴の絶対浮上速度の関係を示したものである。図中の□および○印は、それぞれ円形ノズル直径が $d_n = 2.0\text{mm}$ および 0.51mm の場合における油滴の絶対浮上速度の実測値 U_p を、また、実線は、油滴の終末速度の計算値 $U_{pl\infty}$ を示している。ここで、 $U_{pl\infty}$ は次式で与えられる。

$$U_{pl\infty} = U_c + \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \frac{\rho_c - \rho_{dl}}{\rho_c} g \cdot \bar{d}_p} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 C_D : 油滴の抗力係数⁽²⁾, ρ_{dl} および ρ_c : 油滴および水溶液の密度, $\bar{d}_p$: 油滴の平均相当直径である。

図より、いずれの d_n 値の場合においても、油滴の浮上速度 U_p は、 $-U_c$ の増加に伴い、直線的に減少することが分かる。水溶液に対する油滴の相対速度は、水溶液の絶対速度 $-U_c$ の変化に対してほぼ一定であり、結果的に、 U_p の値は $-U_c$ の増加に伴い、直線的に減少することが分かる。

また、図より、 $d_n = 2.0\text{mm}$ および 0.51mm の場合における油滴の絶対浮上速度の実測値 U_p はほぼ同一であることが分かる。これは、油滴は、直径の増大と共にその浮上速度が増加するが、直径がある一定値以上になると、抗力係数が急増し、直径の増大に対して浮上速度が一定となることによる⁽²⁾。本実験においては、前述の図6に示したように、円形ノズル直径が $d_n = 2.0\text{mm}$ および 0.51mm の場合における油滴の平均相当直径は、 $-U_c$ の値により、それぞれ $\bar{d}_p = 6 \sim 7\text{mm}$ および $4 \sim 5\text{mm}$ となる。そして、これらの $\bar{d}_p$ 値の範囲においては、油滴の浮上速度 U_p は、油滴径 $\bar{d}_p$ によらずほぼ一定となることが分かる。

図中の U_p は、油滴高さが $Y = 0.4\text{m}$ における、凝固を開始する前の油滴の浮上速度であるが、図中に示されるように、 U_p の実測値は、実線にて示される油滴の終末速度の計算値とほぼ一致しており、図中の U_p の実測値は、油滴の終末速度を表すと考えて良い。

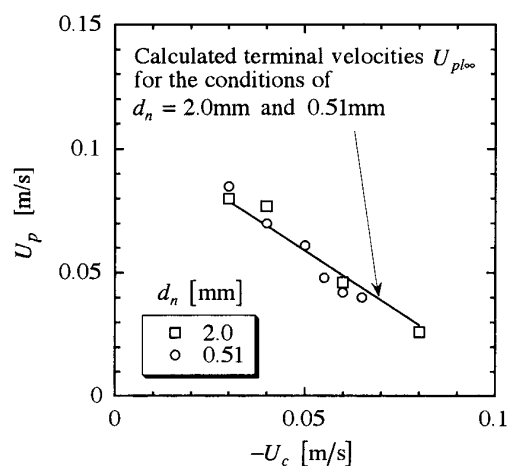


Fig. 7 Ascending velocity of oil droplet vs. water solution velocity

3・6 水溶液流速に対する油滴の凝固率の変化 図8は、水溶液流速 $-U_c$ と油滴の凝固率 R の関係を示したものであり、二種類の円形ノズル直径 $d_n=2.0\text{mm}$ および 0.51mm の場合について示してある。図より、いずれの d_n の値の場合も、水溶液流速 $-U_c$ の増大に伴い、凝固率 R は直線的に増大することが分かる。これは、前述のように、 $-U_c$ の増加に伴い油滴の絶対浮上速度が低下し、油滴が試験部上部の水溶液表面に到達するまでの時間が増大し、油滴と水溶液との間の熱交換時間が増大するためである。さらに、前述のように、水溶液流速に対する油滴の相対速度は、水溶液流速 $-U_c$ の増加に対して、その変化は小さい。従って、油滴と水溶液間の相対速度に支配される両者間の熱伝達率は、 $-U_c$ の増加に対してあまり変化しないことが考えられる。よって、図中に示される、 $-U_c$ の増加に対する R の増加の要因は、主に、水溶液中における油滴の滞留時間の増大、すなわち、両者間の熱交換時間の増大によるものであると考えられる。尚、図6において述べたように、 $-U_c$ の増加に伴い、油滴の平均相当直径 $\bar{d}_p$ は増大する傾向を持ち、これは凝固率を低下させる作用を持つが、 $-U_c$ に対する $\bar{d}_p$ の増加量は小さいため、結果的に R は $-U_c$ の増加に対して増大することになる。

また、前掲の図7にて示したように、 $d_n=0.51\text{mm}$ の場合と $d_n=2.0\text{mm}$ の場合では、油滴の終末浮上速度はほぼ等しいが、図6にて示したように、前者の場合、後者に比較して生成される油滴の径が小さくなる。従って、図8に示すように、 $d_n=0.51\text{mm}$ の場合における凝固率 R は、 $d_n=2.0\text{mm}$ の場合におけるそれに比較して、いずれの $-U_c$ 値においても大きくなる傾向が見受けられる。

図8中に示された凝固油柱の発生開始点よりも $-U_c$ が大きい領域では、前述のように、ノズル先端に凝固油柱が発生することになる。図中に示すように、 $d_n=2.0\text{mm}$ の場合における凝固油柱の発生開始点は、 0.51mm の場合のそれに

比較して、高 $-U_c$ 側に存在することが分かる。これは、本実験においては、凝固油柱発生時の油の噴射流量が $d_n=2.0\text{mm}$ と 0.51mm の場合でそれぞれ $33.3\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{s}$ および $6.67\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{s}$ であり、 $d_n=2.0\text{mm}$ の場合の方が、高温の油がノズル先端に大量に供給されるため、凝固油柱が発生しづらいものと思われる。

図9は、水溶液流速 $-U_c$ と油滴の凝固率 R の関係を油の噴射温度 T_n をパラメーターとして示したものである。同図の場合も、 $-U_c$ の増加に伴い R の値は増大することが分かる。さらに、 $T_n=30^\circ\text{C}$ の場合は $T_n=40^\circ\text{C}$ の場合に比較して凝固率が大きくなることが分かる。これは、噴射温度 T_n が低下するに従い、油滴の凝固開始位置(図1中の Y_c)が試験部下部へと移行し、その結果、油滴が凝固を開始してから試験部上部の水溶液表面に到達するまでの時間が増大するためである。また、図中に示された、凝固油柱の発生開始点は、 $T_n=40^\circ\text{C}$ の場合の方が $T_n=30^\circ\text{C}$ の場合に比較して高 $-U_c$ 値側となっていることが分かる。これは、油の噴射温度が高い程、ノズル先端における油の凝固が抑制されるためである。

3・7 凝固率の無次元整理 次元解析を用いた実験データの無次元整理に関して、前報⁽²⁾においては、油滴の浮上速度を表す無次元数として、油滴が凝固を開始する点における油滴の浮上速度を代表速度としてレイノルズ数を定義した。しかしながら、本研究の場合、前述のように、油滴が凝固を開始する点における油滴の浮上速度は、油滴の終末速度にほぼ等しくなるため、計算により求めることが可能な油滴の終末速度をレイノルズ数の代表速度に用いるのが便利であると思われる。さらに、前報⁽¹⁾においては、水溶液流速が非常に遅く、ほぼ静止状態と考えられたため、油滴の浮上速度には、絶対速度を用いた。しかしながら、本報告における実験の場合、水溶液流速が比較的速く、水溶液流速により油滴の浮上速度が大きく変化する。本来、レイ

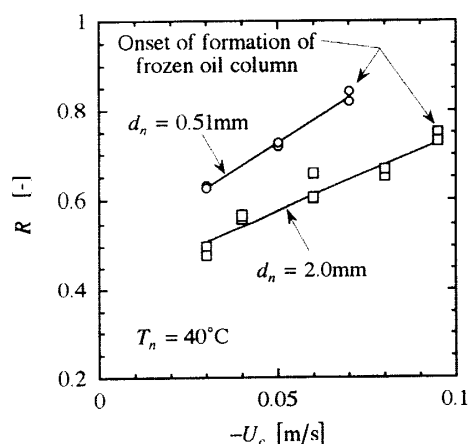


Fig. 8 Solidification rate of oil droplet vs. water solution velocity (d_n as parameter)

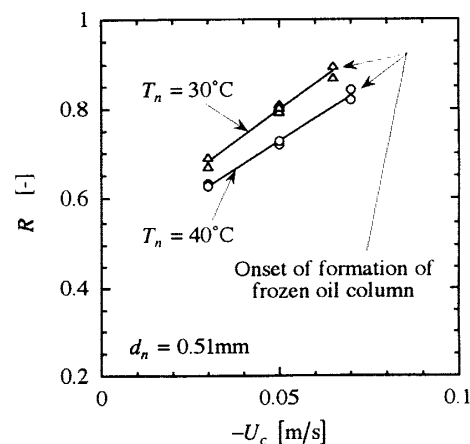


Fig. 9 Solidification rate of oil droplet vs. water solution velocity (T_n as parameter)

ノズル数は、油滴と水溶液間の熱伝達率を支配するパラメーターであり、同熱伝達率は、油滴と水溶液間の相対速度により支配される。従って、本報告においては、油滴速度を表すハルメーターとして、油滴の終末速度と水溶液流速の相対速度を代表速度としたレイノルズ数 $Re_{pl\infty}$ を以下のように定義する。

$$Re_{pl\infty} = (U_{pl\infty} - U_c) \cdot \bar{d}_p / \nu_c \quad (3)$$

ただし、 $Re_{pl\infty}$: 油滴の終末速度、 ν_c : 水溶液の動粘度である。ただし、 $Re_{pl\infty}$ の適用範囲は、凝固油柱の発生範囲外とする。

前述のように、油滴の凝固率は、凝固開始から完了までの時間に大きく依存するため、油滴の水溶液中における滞留時間を表す無次元パラメーターが必要となる。同滞留時間は、油滴の絶対浮上速度と油滴の浮上高さ、すなわちノズル先端から水溶液表面までの高さ (Y_0) に依存する。従って、本研究では、油滴の終末速度 $U_{pl\infty}$ とノズル先端から水溶液表面までの高さ Y_0 を用いたフーリエ数 Fo を以下のように定義する。

$$Fo = \frac{a_c \cdot t_0}{Y_0^2} = \frac{a_c}{Y_0 \cdot Y_0 / t_0} = \frac{a_c}{Y_0 \cdot U_{pl\infty}} \quad (4)$$

ただし、 a_c : 水溶液の温度伝導率、 t_0 : 油滴が供試ノズル離脱後、水溶液層表面に到達するまでの時間、 Y_0 : ノズル先端から水溶液表面までの高さ (=1.6m) である。

次に、油の噴射温度と低温水溶液温度を表すパラメーターとして、前報⁽²⁾においても用いた温度比 θ を以下のように定義する。

$$\theta = (T_n - T_m) / (T_m - T_c) \quad (5)$$

ただし、 T_n : 油の噴射温度、 T_c : 水溶液温度、 T_m : 油滴の凝固点である。

以上の無次元数を用いて整理された凝固率を図10に示す。図中の実線は凝固率の実験整理式であり、以下のよう

になる。

$$R = 2330 Re_{pl\infty}^{-0.689} \theta^{-0.328} Fo^{0.312} \quad (6)$$

式(6)の適用範囲は $Re_{pl\infty}$: 3.5~110, θ : 3.5~4.2, Fo : 9.8×10^{-7} ~ 3.5 である。図10中に示される実測値と式(6)とは、偏差 $\pm 9.5\%$ で一致する。

4. 結 言

本研究は、低凝固点を有するパラフィン系潜熱蓄冷熱システム構築の一環として、低温熱媒体であるエチレングリコール水溶液中を浮上する蓄冷熱材としてのテトラデカン油滴の凝固特性に関連する重要な因子として、下向きに流動する水溶液流速を取り上げて、実験的に検討したものであり、次のような結論を得た。

- (1) 下降する低温水溶液中を浮上するテトラデカン油滴は、水溶液からの流動抵抗によりさまざまな形状に変化し、その凝固挙動も複雑に変化することを可視観察より明らかにした。
- (2) 下降する水溶液流速の増大に伴う低温水溶液層中の凝固油滴の滞留時間の増大が、主に、凝固率の増大をもたらすことを定量的に解明し、さらに、水溶液流速と凝固油柱形成の限界を明らかにした。
- (3) 実際の潜熱蓄冷熱システム設計に必要な、油滴の凝固率を算定するための無次元パラメータを次元解析により求め、さらに最小自乗法により、限られた実験範囲ではあるが凝固率を求めるための、無次元整理法の手がかりを得た。

尚、本研究は、主に下降する低温熱媒体としての低温水溶液の流速を重要な実験因子として扱い、その場合の油滴の流動、凝固挙動に焦点を当てて検討したものである。今後、さらに、正常油滴の発生範囲や関連因子の範囲を広げた研究を行うことを課題としたい。

本研究を行うに当たり、実験遂行において御協力頂きました岡山大学工学部機械工学科四年生の永松英樹氏に感謝の意を表したいと思います。

文 献

- (1) 稲葉・佐藤, 機論, B編, 60-580 (1994-12), pp. 4236-4243.
- (2) 稲葉・佐藤, 機論, B編, 62-593 (1996-1), pp. 325-332.
- (3) Grace, J. R., *Handbook of Fluids in Motion*, Cheremisinoff, N. P. and Gupta, R., Editors, Ann Arbor Science, The Butterfield Group, Ann Arbor, MI, (1983) pp. 1003-1025.
- (4) Clift, R., et al., *Bubbles Drops and Particles*, Academic Press. (1978), p. 117.

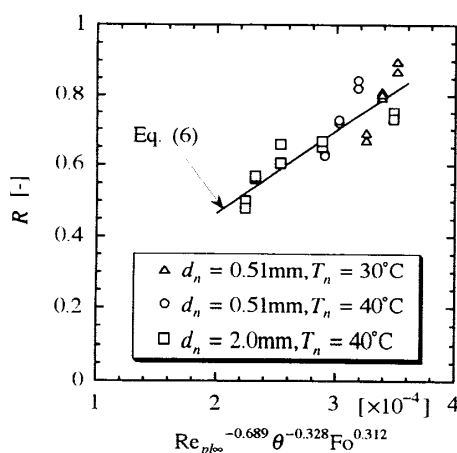


Fig. 10 Result of non-dimensional data reduction of solidification rate