

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4報, 低温水溶液中を浮上するテトラデカン油滴の
流動および凝固特性に関する数値計算)

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
(4th Report, Numerical Calculation of Motion and Solidification Characteristics of
Oil Droplet Ascending in a Cold Water Solution by Buoyancy)

Hideo INABA and Kenji SATO

This paper proposes a numerical calculation method to predict solidification characteristics of paraffin oil droplets (tetradecane, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{CH}_3$, melting point is 5.8°C , diameter is 4~6 mm) ascending in a cold water solution (mixture of ethylene glycol [$\text{CH}_2\text{OH}\cdot\text{CH}_2\text{OH}$] and water, temperature is $-2\sim-10^\circ\text{C}$) by buoyancy. The oil droplets start to ascend with several initial velocities and initial temperatures ($10\sim60^\circ\text{C}$) in the water solution. The oil droplets are decelerated by hydraulic resistance of the water solution. The water solution flows vertically downward at a low velocity of 0.1 m/s. The temperature of the oil droplet decreases due to direct-contact heat transfer with the cold water solution, and the oil droplet starts to solidify when its surface temperature reaches the freezing point. The solidification rate of the oil droplet is calculated based on a combination of flow behavior and solidification characteristics of the oil droplet. As a result, the motion of the oil droplet, the completion height and time for solidification are determined. The parameters used are the diameter, initial velocity and initial temperature of the oil droplet, and temperature and velocity of water solution.

Key Words: Energy Storage, Solidification, Numerical Analysis, Oil Droplet, Direct Contact Heat Exchange, Buoyancy, Ascending Velocity

1. 緒 言

前報⁽¹⁾において、潜熱蓄冷熱材としての油滴と冷媒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について述べた。そして、潜熱蓄冷熱材油滴の凝固率の測定を行い、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、前報では、これらのパラメーターを実験装置の制限上限られた範囲内で変化させており、同パラメーターを広範囲に変化させた場合の凝固率等についての検討は十分にされていない。また、油滴の凝固率に影響を与えるパラメーターとして、前述の因子以外に冷媒水溶液流速が考えられる。従って、前報の実験範囲を超えた、あるいは実験では困難な条件下における油滴の運動および凝固挙動に関する知見を得るためには、適当な物理モデルを設定し、数値計算により予想することが有効である。

前報⁽²⁾においても、油滴の凝固率の予測に関する簡単な計算を行っている。その結果、油滴のノズル噴射温度および水溶液温度の低下に伴い、油滴の凝固率は増加し、また、油滴の浮上速度が増大するに伴って、油滴の凝固率が減少するという結果を得た。しかしながら、同報告中における計算は、油滴の浮上速度は浮上過程において一定と

し、また油滴内部の温度は一様とした場合の諸因子と凝固率の関係を求めたものである。一方、実際に油滴が水溶液中を浮上する際には、ノズル出口から油滴が噴射された後、水溶液の流体抵抗により油滴は減速する。また、浮上過程にある油滴の内部には温度分布が生じているはずである。よって、これらを考慮した計算を行うことにより、より詳細な油滴の凝固挙動に関する評価が可能となる。

本報告は、前報^{(1),(2)}において述べた、低温冷媒水溶液中を浮上するテトラデカン油滴の凝固率を求めるための計算方法の提案と結果の検討を行うものである。本計算方法においては、まず油滴を冷却そして凝固相に変化させた場合の凝固率を求めるための数値計算モデルの検討を行う。続いて、水溶液中における油滴の運動挙動に関する数値計算法の提案を行う。最終的に、油滴の凝固率および運動に関する計算結果を組み合わせ、実際に前報において述べた実験に相当する物理モデルに関しての数値計算を行うものである。対象とするパラメーターは、潜熱蓄冷熱材としての油滴の直径、油のノズル噴射流速および噴射温度、冷媒水溶液の温度および流速である。尚、テトラデカンおよび冷媒水溶液であるエチレングリコール30mass%水溶液の物性値は、前報⁽¹⁾に示す通りである。

記 号

a : 温度伝導率
 C_D : 抵抗係数
 c : 比熱

* 原稿受付 1996年3月15日。

*¹ 正員、岡山大学工学部(〒700 岡山市津島中3-3-1)。

*² 正員、岡山大学大学院。

- d_p : 油滴径
 g : 重力加速度
 K : 仮想質量係数
 N : メッシュ数
 Nu_{in} : 油滴の内部ヌセルト数
 Nu_{lo} : 油滴の外部ヌセルト数
 Nu_{so} : 剛体球 (凝固油滴) の外部ヌセルト数
 n : 時間ステップ
 Pr : プラントル数
 R : 油滴の凝固率 = 0~1
 Re : レイノルズ数
 r : 半径
 r_i : 凝固界面半径
 r_o : 油滴の外半径
 T : 温度
 T_c : 水溶液温度
 T_m : テトラデカンの融点 = 5.8°C
 T_n : 油滴の初期温度, 潜熱蓄冷熱材油の噴射温度
 ΔT : 見かけの比熱が融解潜熱となる温度幅
 t : 時間
 Δt : 時間ステップ間隔
 t_{CF} : 油滴が凝固を完了するのに要する時間
 U_c : 水溶液の流速
 U_n : 油滴の初速度, 潜熱蓄冷熱材油の噴射速度
 U_p : 油滴の絶対速度
 Wc : ウェーバー数
 Y : 高さ
 Y_0 : 実験における水溶液層高さ = 1.6m
 Y_{CF} : 油滴が運動を開始してから凝固を完了するまでに浮上する高さ
 Y_m : 油滴に対する計算から凝固油滴に対する計算へ切り替わる点における油滴高さ

ギリシャ文字

- α : 油滴界面の熱伝達率
 λ : 熱伝導率
 μ : 粘度
 ν : 動粘度
 ρ : 密度
 σ : 油滴と水溶液間の界面張力
 τ : 油滴の運動開始から時刻 t までの間の時間

添字

- c : 水溶液
 dl : 液相テトラデカン
 ds : 固相テトラデカン

2. 物理計算モデル

2.1 単一油滴の凝固に関する計算モデル 前報^{(1),(2)}

において述べたように, 本研究においては, 水溶液中における油滴の体積充填率が非常に小さく, その油滴の挙動はほぼ単一液滴として扱うことが可能である. 従って, 油滴に関しては無限流体中を浮上する単一液滴をモデルとし, 一方, 表面が凝固した凝固油滴は剛体球と見なし, 無限流体中を浮上する単一剛体球をモデルとして計算を行う.

本研究の場合, 水溶液中を浮上する油滴のレイノルズ数は200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⁽³⁾, その結果, 図1の下部に示すように, 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, 図1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. このような動作があらゆる方向へ繰り返されることにより, 油滴の凝固は油滴の全表面においてほぼ均一に進行することになる.

そこで, 本研究では, 油滴内部の凝固挙動に関する物理計算モデルとして, 図2の左上に示すような球形液滴の一次元凝固モデルを仮定することとする. 図中に示すように, 油滴は直径 d_p (半径 r_o) の球であり, 半径 r_i の位置に凝固界面が存在する. 凝固界面の外側は固相, 内側は液相である. 熱は半径方向にのみ流れ, 周方向への熱流は無いものとする. また, 同図中の下部には, 油滴内部の温度分布および温度に対する物性値の分布の概略が示してある. 同図中左下に示されるように, 油滴中心において温度勾配は零となる. また, 図中右下に示されるように, 液相および固相テトラデカンの比熱 c_{dl} および c_{ds} , 密度 ρ_{dl} および ρ_{ds} , 熱伝導率 λ_{dl} および λ_{ds} は, それぞれ凝固点 T_m を境にステップ状に変化する. それらは温度 T の関数として与えられ, 以下のようになる⁽⁴⁾.

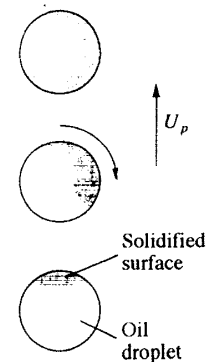


Fig. 1 Solidification proceeds uniformly on entire droplet surface by rolling

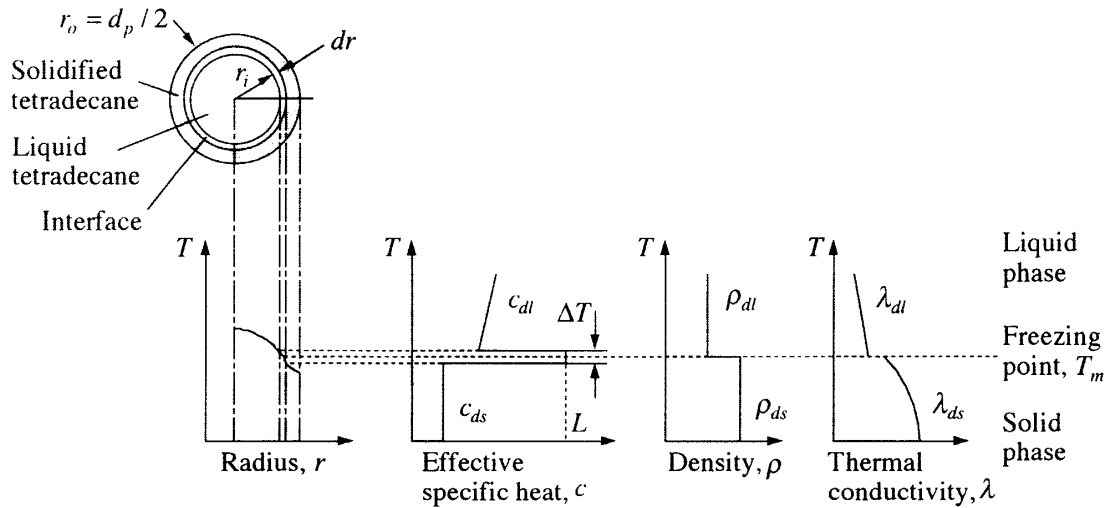


Fig. 2 Calculation model for solidification characteristics of oil droplet

- テトラデカンの比熱(J/kg・°C):
 - 液相: $c_{dl} = 4.18T + 1.98 \times 10^3$ (1)
 - 固相: $c_{ds} = 1.80 \times 10^3$ (2)
- テトラデカンの密度(kg/m³):
 - 液相: $\rho_{dl} = 770$ (3)
 - 固相: $\rho_{ds} = 810$ (4)
- テトラデカンの熱伝導率(W/m・°C):
 - 液相: $\lambda_{dl} = 4.69 \times 10^{-7} T^2 - 1.93 \times 10^{-4} T + 0.173$ (5)
 - 固相: $\lambda_{ds} = -9.03 \times 10^{-6} T^2 - 7.13 \times 10^{-3} T + 0.375$ (6)

ただし、 T はセルシウス温度(°C)である。尚、潜熱分を含む見かけの比熱は、図中に示すように、凝固点 T_m を中心として ΔT の温度範囲においてはテトラデカンの融解潜熱 L (=229.1kJ/kg)とおく。尚、 ΔT は、計算の安定性等を考慮して0.14°Cとした。

本計算において扱う油滴内部の凝固挙動には、次に示すように、球座標系における一次元非定常熱伝導方程式が適用できる。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 c :油滴の比熱、 ρ :油滴の密度、 T :温度、 t :時間、 λ :油滴の熱伝導率、 r :半径である。

境界条件としては、油滴中心において温度勾配が零となること、また油滴表面における熱バランスより、次の条件式を用いる。

- 油滴中心($r=0$)において
 - $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ (8)
- 油滴外表面($r=r_o$)において
 - $-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T - T_c)$ (9)

ここで、 r_o :油滴外表面の半径、 α :油滴界面の熱伝達率、 T_c :水溶液温度である。前述のように、油滴は回転しながら浮上し、油滴の全表面にわたり、凝固が均一に進行することより、 α の値には、油滴界面の平均熱伝達率を用いることとする。 α の値は、油滴に関しては油滴界面の熱伝達率として次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{d_p} \left(\frac{1}{Nu_{lo}} + \frac{\lambda_c}{\lambda_{dl}} \frac{1}{Nu_{li}} \right)^{-1} \dots\dots\dots(10)$$

ただし、 λ_c :水溶液の熱伝導率、 Nu_{lo} :油滴の平均外部ヌセルト数、 Nu_{li} :油滴の内部ヌセルト数である。 Nu_{lo} ⁽⁶⁾および Nu_{li} ⁽⁶⁾はそれぞれ次式により与えられる。

$$Nu_{lo} = 2 + 0.90Re^{0.5} \cdot Pr^{0.5} \dots\dots\dots(11)$$

$$Nu_{li} = 3.75 \times 10^{-3} \frac{\left(\frac{U_p \cdot d_p}{v_{dl}} \right) \left(\frac{v_{dl}}{\lambda_{dl} / (c_{dl} \rho_{dl})} \right)}{1 + (\mu_{dl} / \mu_c)} \dots\dots\dots(12)$$

ただし、 μ_{dl} および v_{dl} :液相テトラデカンの粘度および動粘度、 μ_c :水溶液の粘度である。また

$$Pr = \frac{v_c}{\lambda_c / (c_c \rho_c)} \dots\dots\dots(13)$$

である。ここで c_c 、 λ_c および ρ_c はそれぞれ水溶液の比熱、熱伝導率および密度である。また、凝固油滴の α の値は次式⁽⁷⁾より求める。

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{d_p} Nu_{so} = \frac{\lambda_c}{d_p} \left(2 + 0.57Re^{0.5} \cdot Pr^{1/3} \right) \dots\dots\dots(14)$$

ただし、 Nu_{so} は剛体球表面の平均ヌセルト数である。尚、凝固油滴に関しては、油滴内部の液相部分に対流は無いものとして計算を行う。滴状油表面の凝固相が全体に広がる時間は、ビデオ撮影の結果、0.1秒以下と判断され、瞬時に表面凝固が起こるとの仮定を計算の初期値とした。また、差分計算を行うに当たり、油滴内の半径方向メッシュ数

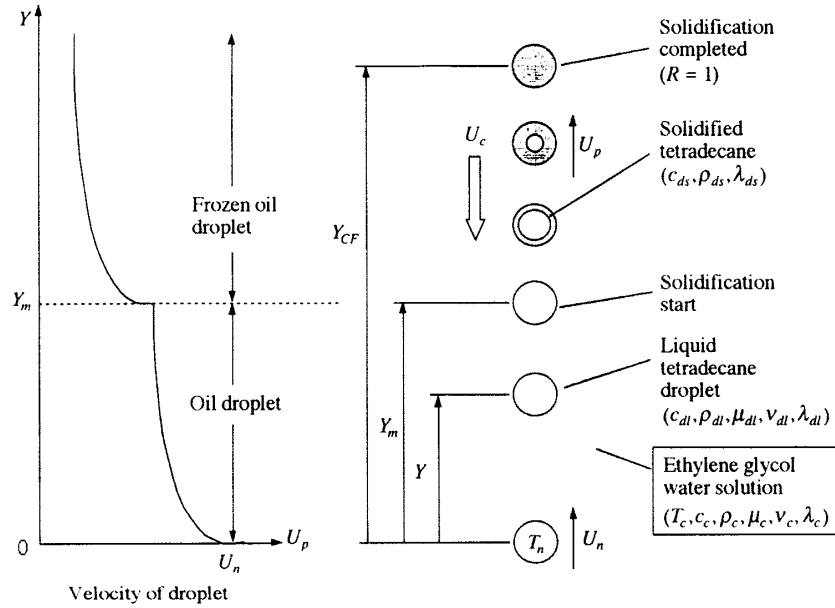


Fig. 3 Combination of calculations for solidification characteristics and velocity variation of oil droplet

は、計算の収束性や計算結果の精度を考慮して80点、時間ステップ間隔は0.1sとした。

2・2 単一油滴の凝固および運動挙動に関する計算の組合せ

図3は、単一油滴の凝固および運動挙動に関する計算の組合せについて示したものであり、図中右側は油滴の凝固挙動、および左側は油滴の浮上速度の概略を示したものである。図中右側に示すように、一様な初期温度 T_n の油滴が、水溶液中において初速度 U_n で運動を開始する。浮上過程において、油滴は周囲の水溶液との直接接熱交換により温度を低下させ、また、図中左側に示すように、水溶液の流体抵抗により減速する。やがて、油滴は高さ Y_m においてその表面が凝固点に達し相変化を開始する。相変化を開始した油滴のことを凝固油滴と呼ぶことにする。凝固油滴は表面が固体であるため、油滴に比較して抵抗係数が増大し、その結果、図中左側に示すように再び大きく減速する。以後、油滴は凝固界面を油滴中心へと移動させながら浮上を続け、高さ Y_{CF} において凝固を完了する。また水溶液は鉛直下方へ速度 U_c (鉛直下向きであるため、 $U_c \leq 0$) で流動している。

2・3 油滴の運動に関する計算モデル 流体中を浮上・沈降する単一粒子の運動方程式はBasset, Boussinesq, Oseen⁽⁹⁾により次のように導かれている。

$$\frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_d \frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{6}\pi d_p^3 (\rho_c - \rho_d)g - \frac{1}{8}\pi d_p^2 C_D \rho_c (U_p - U_c)^2 - K \frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_c \frac{dU_p}{dt} - \frac{3}{2}\sqrt{\pi \rho_c \mu_c} \int_0^t \frac{dU_p}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} \quad (15)$$

ここで、 U_p : 粒子の絶対速度、 U_c : 流体の絶対速度、 ρ_d : 粒子の密度、 ρ_c : 流体密度、 C_D : 抵抗係数、 μ_c : 流体の粘度、

d_p : 粒子径、 K : 仮想質量係数、 t : 時間、 τ : 粒子が運動を開始してから時刻 t までの間の任意の時刻である。式(15)において、右辺第1項は重力項、第2項は流体抵抗による項、第3項は仮想質量力による項、第4項は加速運動中の粒子に作用する粘性抵抗に関する補正項であるBasset項であり、運動開始時刻から時刻 t までの履歴を表す。仮想質量係数 K は、流体中を球が加速度運動する場合、一般に $K=0.5$ が用いられる⁽⁹⁾。式(15)は粒子速度が終末速度に達すると、左辺および右辺の仮想質量力項とBasset項が消え、粒子の浮力と流体抵抗の釣り合いの式となる。

抵抗係数 C_D の値は、単一液滴に対しては、次式が提示されている⁽¹⁰⁾。

$1 \leq Re \leq 80$ の範囲:

$$C_D = 2.28 Re^{-0.193} We^{-0.0326} \quad (16)$$

$Re \geq 80$ の範囲:

$$C_D = 0.195 Re^{0.344} We^{0.622} \quad (17)$$

ここで

$$Re = (U_p - U_c) d_p / \nu_c \quad (18)$$

$$We = \rho_c (U_p - U_c)^2 d_p / \sigma \quad (19)$$

である。ただし ν_c : 流体の動粘度、 σ : 液滴と流体間の界面張力である。

一方、単一剛体球に対する抵抗係数 C_D の値としては次式が提示されている。

$1 \leq Re \leq 700$ の範囲⁽¹¹⁾:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (20)$$

$700 < Re < 1.5 \times 10^5$ の範囲⁽¹²⁾:

$$C_D = \left[\sqrt{\frac{24}{Re}} + 0.34 \left(Re^{0.06} + \frac{1}{1.72 + 0.018 Re} \right) \right]^2 \quad (21)$$

以上に示した式(15)~(21)において液滴、剛体球および流体を本研究における油滴、凝固油滴および水溶液に適用して計算を行う。

計算手順としては、図3の左側において、油滴が時刻 $t=0$ において初速度 U_n^1 で運動を開始し、以後式(16)および式(17)にて与えられる液滴に関する抵抗係数を用いて油滴速度 U_p の計算を行う。高さ Y_m において油滴が凝固油滴に変化すると、抵抗係数の値を式(20)および式(21)によって与えられる剛体球に対するものに切り替えて計算を続行する。

式(15)の差分計算を行うに当たり、図4に示すような計算モデルを油滴と凝固油滴のそれぞれについて採用するものとする。すなわち $t=0$ において初速度 U_p^1 の(凝固)油滴が、十分な時間が経過した後は一定速度になるものとする。そして、その間の時間を $N-1$ 等分し、時間ステップ n における油滴速度 U_p^n を繰り返し計算により求める。境界条件としては、以下の条件を用いる。

○初速度 U_p^1

- ・油滴についての計算において:
 - = 蓄冷熱装置におけるノズル出口でのテトラデカン油の噴射速度

- ・凝固油滴についての計算において:
 - = 油滴の表面温度が凝固点に達したときの油滴速度の計算値

○時刻 $n = N (t = \infty)$ において:

$$dU_p/dt = 0$$

計算メッシュ数は $N = 400$ であり、時間ステップ間隔(メッシュ間隔)は $\Delta t = 0.05s$ である。計算は各 U_p^n の値が $10^{-6} m/s$ 以内に収束するまで繰り返した。前報において述べたように、実験においては、ノズルより噴射されたテトラデカン油滴の油滴径には分布が生じているが、本計算を行うに当たり、油滴径 d_p は一様とする。特に、計算結果と実験結果の比較検討を行う場合は、 d_p として実験における油滴の算術平均径を用いることとする。

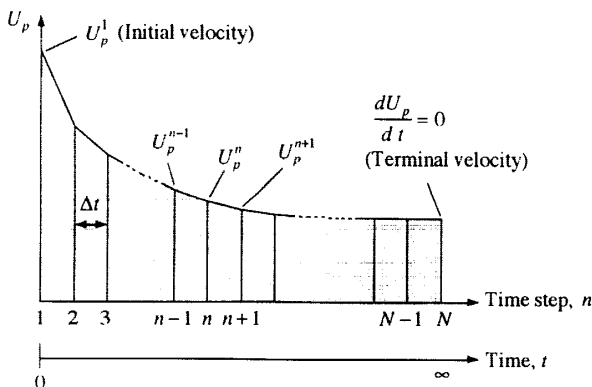


Fig. 4 Calculation model for ascending velocity of oil droplet

3. 計算結果および考察

3.1 単一油滴の凝固に関する数値計算 図5は、2・1項において述べた方法による計算例を示したものである。図中、横軸は半径 r 、縦軸は温度 T である。図中に示された曲線は、任意の時刻における半径方向の温度分布を示している。同図は、油滴径 $d_p = 5.4mm$ 、初期温度 $20^\circ C$ の静止した油滴の表面を瞬時に $0^\circ C$ とした場合の計算結果である。同図より、時間の経過と共に油滴内の温度が低下する様子がわかる。また、 $T_m = 5.8^\circ C$ において、温度分布を示す曲線が急な変曲点を持ち、凝固界面が現れていることがわかる。ここで、凝固相変化界面の半径を r_i とおくと、油滴の凝固率 R は、油滴全体の質量に対する固相部の質量割合として次式で定義される。

$$R = \frac{\rho_{ds} \frac{4}{3} \pi (r_o^3 - r_i^3)}{\rho_{di} \frac{4}{3} \pi r_i^3 + \rho_{ds} \frac{4}{3} \pi (r_o^3 - r_i^3)} = \frac{\rho_{ds} (r_o^3 - r_i^3)}{\rho_{di} r_i^3 + \rho_{ds} (r_o^3 - r_i^3)} \tag{22}$$

ただし、凝固界面の進行による油滴の体積膨張・収縮は小さいため無視してある。

3.2 油滴の運動に関する数値計算 図6(a)~(c)は、2・3項において述べた計算方法により求めた、水溶液の平均空塔流速が $U_c = -0.007m/s$ の場合における油滴および凝固油滴の浮上速度の計算値と実測値を示したものである。同図において、横軸 Y は油滴の浮上高さ、縦軸 U_p は油滴の絶対速度である。 U_p の測定方法については、前報⁹⁾に述べられている。図中、 $Y = 0m$ は前報において述べた実験装置におけるノズル出口を表し、 $Y = 1.6m$ は試験部上部の水溶液表面を表す。また、 $Y = 0m$ における U_p の値はノズル出口でのテトラデカン油の噴射流速 U_n を表す。図中の実線は油滴に関する計算結果を、また破線は凝固油滴に関する計算結果を示したものである。油滴の計算において

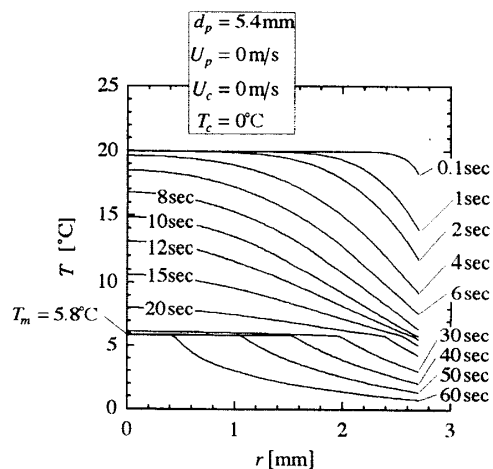


Fig. 5 Example of calculation for temperature distribution in an oil droplet

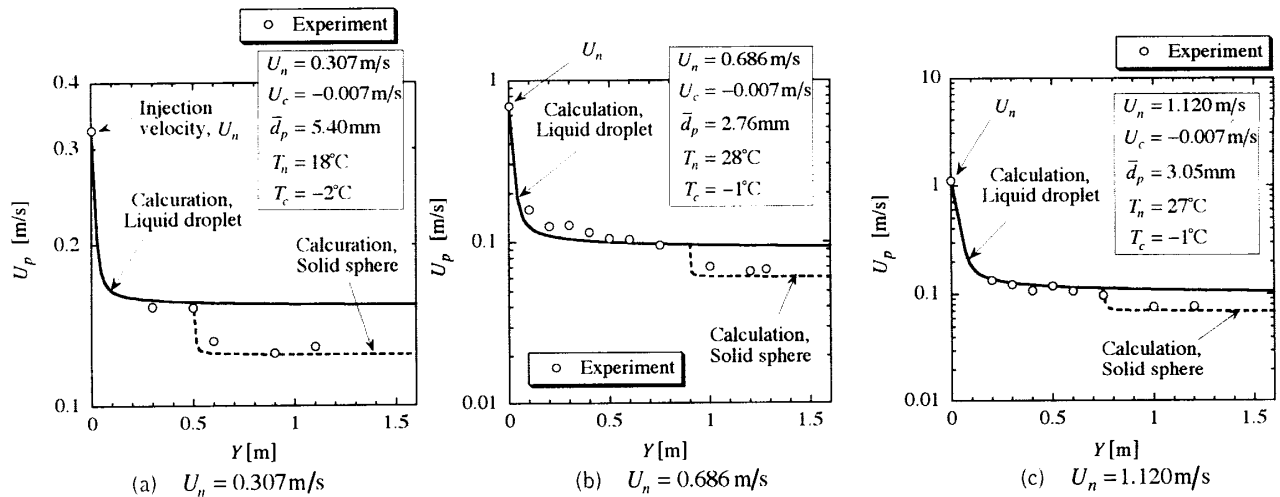


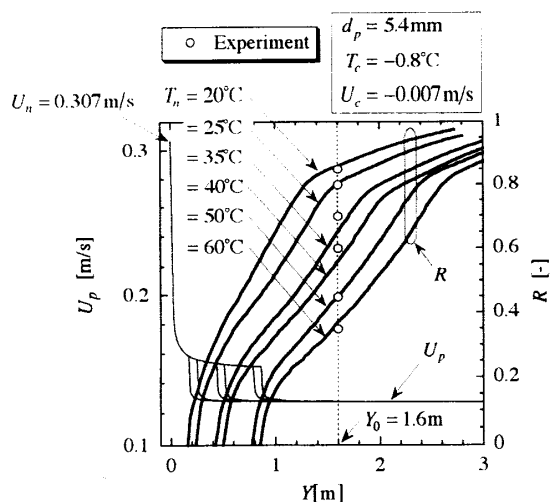
Fig. 6 Ascending velocity of oil droplets by calculation and experiment

は、油滴の初速度として蓄冷熱装置におけるノズル出口でのテトラデカン油の噴射速度 U_n を用いているが、凝固油滴に関しては、図6(a)~(c)の図上の U_p の実測値より油滴の凝固開始位置を決定し、そのときの油滴速度の計算値を初速度として計算を行っている。なお、後述の3・3項以降も凝固発生位置 Y_m は、実測に基づいた値を採用している。図6(a)~(c)より、油滴および凝固油滴のいずれの場合においても、油滴速度の実測値と計算値はおおむね良く一致していることがわかる。しかしながら、図6(a)~(c)のいずれの図においても、凝固油滴に関する実測値と計算値(図中破線)は、油滴高さ Y が比較的小さい場合には、両者に差がみられる。すなわち、凝固油滴に関する計算値は、低 Y 領域において急激に値が減少するのに対し、実測値は緩やかに値が減少している。これは、計算モデルは単一液滴がある浮上高さにおいて表面が凝固し、凝固油滴となり、瞬時に凝固油滴の計算モデルへと切り替わるのに対し、実際に

は、前報において示したように、試験部内において複数の油滴が徐々に凝固油滴となるためであり、その結果、複数の油滴の浮上速度の平均値である U_p の実測値は、緩やかに減少するものであると思われる。しかしながら、計算値と実測値の差は、それほど大きくはない。一方、油滴に関する計算結果および凝固油滴に関する計算において油滴速度が一定値に近づいた領域においては、実測値と計算値とは非常に良く一致している。従って、式(15)により、本研究における油滴および凝固油滴の浮上速度を求めることが可能であると思われる。

3・3 油滴速度を考慮した場合のテトラデカン油滴の凝固挙動の数値計算

3・3・1 数値計算結果と実験結果の比較検討 図7は、油滴高さ Y に対する油滴速度 U_p および油滴の凝固率 R の計算結果を示したものである。図中横軸は油滴高さ Y であり、左側縦軸は油滴速度 U_p を、右側縦軸は凝固率 R を示す。図中細線は U_p を、太線は R を表し、それぞれ油滴初期温度 T_n が図中に示すような $T_n = 20 \sim 60^\circ\text{C}$ にわたる6種類の場合について示してある。油滴速度 U_p については、図中にあるように、 $Y = 0$ mにおいて $U_n = 0.307$ m/sの初速度にて運動を開始した後、油滴が減速することにより速度 U_p が減少する。油滴がある高さに到達した時点において油滴表面が凝固点に達し、その瞬間に剛体球の速度の計算モデルに切り替わる。剛体球に対する計算は、計算モデルが油滴から剛体球に切り替わった瞬間の油滴速度を初速度として扱っている。同図中において、 $Y = 0$ mにおいて油滴が運動を開始後、いずれの T_n の条件においても U_p の値はほぼ同一であるが、 $Y = 0.2 \sim 0.9$ mの間において油滴速度 U_p が順次急激に減少しており、これらの点が、それぞれの T_n の条件において、液滴の計算モデルから剛体球の計算モデルに切り替わった点である。以後、凝固油滴に対する計算において、いずれの T_n の条件においても、 U_p は同一の終末速度

Fig. 7 Variations of ascending velocity U_p and solidification rate R of oil droplets for vertical location Y

へと漸近する結果となっている。一方、油滴の凝固率 R は、 $Y=0\text{m}$ において油滴が運動を開始した直後は油滴が凝固を開始していないため $R=0$ であるが、 $Y=0.2\sim 0.9\text{m}$ の範囲において、油滴表面が凝固を開始すると同時に増加する様子がわかる。図中、縦の破線で示された $Y_0=1.6\text{m}$ は、前報において述べた実験装置の水溶液層の高さである。さらに、図中の○印は同条件における油滴の凝固率の実測値を示している。同図より、本計算値と実測値とはおおむね良好な一致を見せていることがわかる。

3.3.2 凝固完了までに必要となる時間および油滴の浮上高さと諸実験パラメーターとの関係 図8は、油滴が凝固を完了するまでに必要となる時間 t_{CF} と油滴初期温度 T_n との関係を示したものである。パラメーターとしては、水溶液温度 T_c を採用してある。図より、 T_n が増加するに伴い、 t_{CF} が増大する様子が理解できる。また、 t_{CF} は T_n に対して上に凸の曲線であり、 T_n の増加に対して t_{CF} の増加割合は次第に減少する結果となっている。また、 T_c が低

下するに伴い、 t_{CF} は減少する様子が理解できるが、低 T_c においては、 T_c の低下割合に対する t_{CF} の減少割合が小さくなっていることがわかる。

図9は、油滴が運動を開始してから、凝固を完了するまでに必要となる総浮上高さ Y_{CF} と油滴初期温度 T_n との関係を示したものである。パラメーターとしては、水溶液温度 T_c を採用してある。図より、 T_n の増加に対して Y_{CF} が増大する様子が理解できる。また、 Y_{CF} は T_n に対して上に凸の曲線であり、 T_n の増加に対して Y_{CF} の増加割合は次第に減少する結果となっている。また、 T_c が低下するのに伴い、 Y_{CF} が減少しているが、これは、水溶液温度 T_c が低下することにより、油滴から水溶液への伝熱量が増大し、凝固完了時間が短縮されるのに加え、水溶液温度 T_c が低下することにより、水溶液の粘度が増大し、油滴の浮上速度が低下し、それにより浮上高さ Y_{CF} が減少するためであると思われる。

図10は、油滴が凝固を完了するまでに必要となる時間 t_{CF} と油滴径 d_p との関係を示したものである。また、パラ

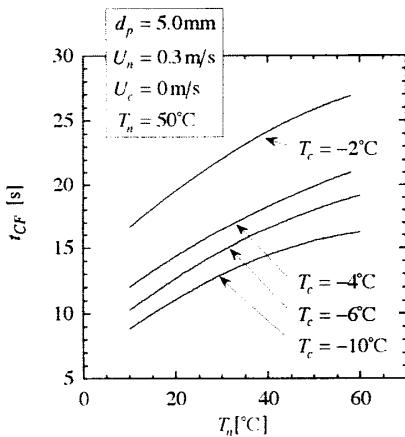


Fig. 8 Completion time of solidification t_{CF} vs. initial droplet temperature T_n

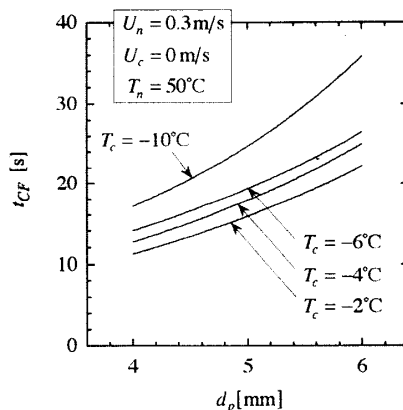


Fig. 10 Completion time of solidification t_{CF} vs. droplet diameter d_p

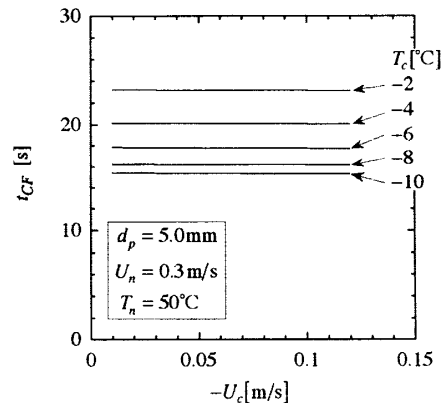


Fig. 12 Completion time of solidification t_{CF} vs. velocity of water solution U_c

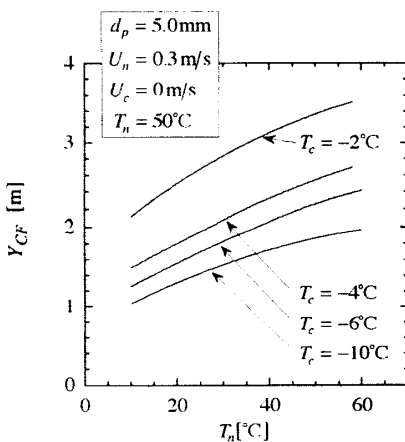


Fig. 9 Ascending height for complete solidification Y_{CF} vs. initial droplet temperature T_n

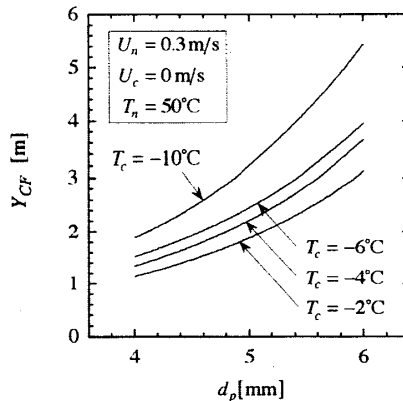


Fig. 11 Ascending height for complete solidification Y_{CF} vs. droplet diameter d_p

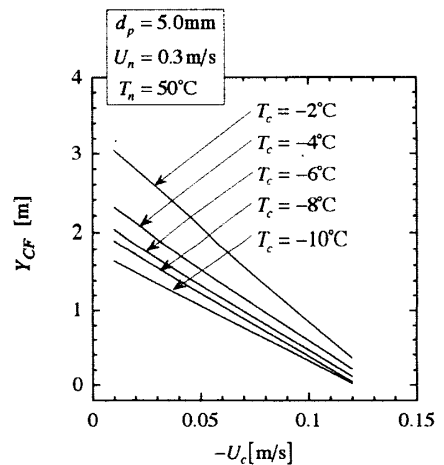


Fig. 13 Ascending height for complete solidification Y_{CF} vs. velocity of water solution U_c

メーターとしては、水溶液温度 T_c を用いてある。図より、 d_p が増加するに伴い、 t_{CF} が増加する様子が理解できる。 t_{CF} は d_p に対して下に凸の曲線であり、 d_p の増加に対して t_{CF} は指数関数的に増大する結果となっている。

図11は、油滴が運動を開始してから、凝固を完了するまでに必要となる総浮上高さ Y_{CF} と油滴径 d_p との関係を示したものである。パラメーターとしては、水溶液温度 T_c を採用してある。図より、 d_p の増加に対して Y_{CF} が増大する様子が理解できる。 Y_{CF} は d_p に対して下に凸の曲線であり、 d_p の増加に対して t_{CF} は指数関数的に増大する結果となっている。これは、油滴径 d_p の増加と共に油滴の体積が増大するため、油滴の凝固が完了するまでの時間が増大し、また、 d_p の増加とともに油滴の浮上速度が増大し、水溶液中における滞留時間が減少することにより、このような結果となるものと思われる。

図12は、油滴が凝固を完了するまでに必要となる時間 t_{CF} と水溶液流速 U_c との関係を示したものである。また、パラメーターとしては、水溶液温度 T_c を採用してある。水溶液は鉛直下方へと流動するため、図中横軸には $-U_c$ の値がとられている。図より、本計算条件の範囲においては、水溶液流速 U_c の絶対値を増加させても凝固完了時間 t_{CF} にはほとんど変化がないことがわかる。これは、水溶液流速を増大させると、水溶液の流体抵抗の増大により油滴の絶対速度が低下するため、油滴と水溶液間の相対速度はあまり増加せず、油滴と水溶液間の熱伝達率があまり向上しないためであると思われる。

図13は、油滴が運動を開始してから、凝固を完了するまでに必要となる総浮上高さ Y_{CF} と水溶液流速 U_c との関係を示したものである。図より、水溶液流速を増大させるに従い、 Y_{CF} は減少する様子が理解できる。先の図12において述べたように、水溶液流速が増大しても凝固完了時間はほとんど変化しない。よって、図13に示される水溶液流速の増大による Y_{CF} の減少は、油滴の浮上速度の減少によるものであると考えられる。また、同図より、水溶液流速の値を大きくすると、油滴の浮上速度が減少し、凝固完了に要する浮上高さ Y_{CF} は0に近づくことがわかる。

以上の図8～図13は、いずれも前報¹⁾において述べた実験条件と近い条件により計算された結果である。同計算結果より、いずれの条件においても、油滴の凝固は浮上高さ Y_{CF} が4m以下で達成されるという結果となっている。

4. 結 言

低温冷媒水溶液中を浮上する潜熱蓄冷熱材油滴の運動および凝固挙動に関する数値計算を行った結果、以下のよう結論を得た。

1. 冷媒水溶液中を浮上し、浮上過程において凝固を生ずるテトラデカン油滴の浮上速度は、粘性流体中を運動する単一粒子に対する運動方程式を油滴と凝固油滴のそれぞれに適用することで求められることが明らかとなった。また、抵抗係数の値としては、油滴に関しては液滴に対するものを、そして凝固油滴に関しては剛体球に対するものを用いることが可能であることがわかった。

2. 冷媒水溶液中を浮上するテトラデカン油滴の凝固率は、単一球の凝固過程に対する計算と粘性流体中を運動する単一粒子の速度解を組み合わせるにより予測可能であることが明らかとなった。

3. 油滴が凝固を完了するまでに要する時間 t_{CF} および浮上高さ Y_{CF} は、潜熱蓄冷材油のノズル噴射温度が増大するにつれそれぞれ増加するが、増加割合は噴射温度の増加と共に減少する結果となった。また、 t_{CF} および Y_{CF} は油滴径の増加と共に増大し、それらの増加割合は油滴径の増大と共に増加する結果となった。しかしながら、 t_{CF} は、水溶液流速の増大に対してはほぼ一定値をとる。これに対し、 Y_{CF} は、水溶液流速の増加に伴い油滴の浮上速度が減少するため、減少する結果となった。

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) Clift, R., et al., *Bubbles Drops and Particles*, Academic Press. (1978), p. 117.
- (4) 稲葉・森田・野津, 機論, B編, 59-565 (1993-9), pp. 2882-2889.
- (5) Conkie, W. R. and Savic, P., "Calculation of the influence of internal circulation in a liquid drop on heat transfer and drag", National Research Council of Canada, Div. Mech. Engng., Report MT - 23 (1953).
- (6) Handlos, A. E. and Baron, T., *AIChE J.*, 3 - 1(1957), 127.
- (7) 坪内・増田, 機論, 30-219 (1964), 1394.
- (8) Hinze, J. Q., *Turbulence* (2nd Ed.), McGraw Hill (1975).
- (9) 例えば, 椿東一郎, 水理学 II, 森北出版 (1978), p. 66.
- (10) Klee, A. J. and Treybal, R. E., *AIChE J.*, 2-4(1956), pp. 444-447.
- (11) Schiller, V. L. and Nauman, A., *Z. Ver. Deut. Ing.*, 77-12 (1935), p. 318.
- (12) Raffi, M. T., Tran-Fu, Y. and Giacomo, M., *AIChE J.*, 17-4 (1971-6), pp. 809-817.