

低凝固点油滴の凝固を利用した潜熱蓄冷に関する基礎研究*
(第1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)

稲葉英男*¹, 佐藤憲二*²

Fundamental Study on Latent Cold Heat Storage by means
of Oil Droplets with Low Freezing Point
(1st Report, Flow and Solidification Characteristics
of Tetradecane Droplets Ascending
in Low-Temperature Water Solution)

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 weight percent at low temperature were investigated experimentally in order to examine the possibility of a liquid-liquid or liquid-solid direct-contact-type latent cold heat storage system. A new type of solidification rate meter is proposed in the present study. As a result, some interesting freezing behaviors of droplets were observed by the visualization technique. From the measurements of solidification rate of tetradecane droplets, 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 論

近年大都市圏における夏期昼夜間電力利用格差是正策の一つとして、安価な深夜電力を利用する潜熱蓄冷システムに関する研究・開発が行われるようになり、氷蓄冷システムを始めとして既に実用化されているものもある。特に潜熱蓄冷システムの蓄冷器、すなわち蓄冷物質と熱媒体の熱交換方法に着目すると、蓄冷物質と熱媒体とが隔離されている隔壁方式と、互いに不溶性の蓄冷物質と熱媒体とを直接接触させる直接接触方式とに分類される。前者の場合、潜熱蓄冷物質を金属あるいは樹脂製容器内に充填し、これらを熱媒体中に設置することにより熱交換を行ういわゆるカプセル型潜熱蓄冷システム⁽¹⁾がその代表例である。この場合蓄冷物質と熱媒体がカプセル壁により隔離されているため、熱媒体の清浄度を高く保てるという利点がある反面、カプセル自体が熱抵抗となり伝熱効率が低下し、熱交換器が大型化する等の欠点を有する。一方、後者は、熱媒体が蓄冷物質と直接接触するため、両者が相互に溶解しない場合はきわめて高い熱伝達効率を得ることができ、また装置が簡単かつ小型化できる等の利点を有している。

本研究では、高性能潜熱蓄冷システムの開発を目的とし、低温冷媒水溶液中に疎水性液相蓄冷物質を噴射注入して微粒化させ、蓄冷物質が密度差により低温水溶液中を浮上しながら低温水溶液との直接接触熱交換により凝固相変化を行い、蓄冷を完了するというシステムを提案

するものである。本研究で対象とする潜熱蓄冷システムにおける熱交換は、分散相液体が凝固相変化を行う液-液、固-液共存型直接接触熱交換となるが、この種の直接接触熱交換に関する研究は、現状では見あたらないようである。従って、本研究は潜熱蓄冷システムの性能向上および分散相液体が凝固相変化挙動を伴う直接接触熱交換に関する諸因子の効果を、まず凝固現象の把握に焦点をあて、実験的に検討するものである。

本実験では蓄冷物質として融点、潜熱量および密度がそれぞれ 5.8°C, 229.1 kJ/kg および 770 kg/m³(6°C)のパラフィン系油であるテトラデカン油(C₁₄H₃₀)を選定し、低温水溶液にはこれと不溶性のエチレングリコール 30wt% 水溶液(以下水溶液)を用いることにより、水溶液中を浮上するテトラデカン油滴の凝固特性を可視実験により定性的に明らかにする。さらに、テトラデカン油噴射温度、速度および低温水溶液温度を実験因子とした場合の油滴凝固率および蓄冷熱量の測定結果より定量的にこの種の蓄冷システムの可能性を検討するものである。

2. 記 号

C : 比熱
 d_n : ノズル直径
 d_p : テトラデカン油滴および凝固油粒直径
 \bar{d}_p : テトラデカン凝固油粒の算術平均直径
 G : 体積流量
 L : テトラデカンの凝固潜熱
 N : 試料数
 Q : 交換熱量

* 原稿受付 平成6年4月4日。

*¹ 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中 3-1-1)。

*² 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科。

- R : 凝固率
 T : 温度
 U_n : テトラデカン噴射流速(= $G_n / \{\pi(d_n/2)^2\}$)
 Y : ノズル出口からの高さ
 ρ : 密度
 添字
 c : 水溶液 n : ノズル, 噴射
 in : 試験部入口 s : 固相
 l : 液相 t : テトラデカン
 m : 融点 Y : 高さ

3. 実験装置および方法

本実験装置は図1に示されるように試験部、水溶液循環系統およびテトラデカン油噴射循環系統から構成されている。水溶液は恒温槽②により調温された後、オーバーフロータンク①を介し、試験部④上部へと流入する。試験部内を下方へと流動した低温水溶液は、流量調節用バルブおよび面積式流量計を経て恒温槽へと戻る。一方潜熱蓄冷材としてのテトラデカン油は、タンク⑧よりダイヤフラムポンプ⑧により圧送され、途中脈動吸収用バッファタンク⑦、流量調節用ニードルバルブ、面積式流量計および温調器⑥を経て、供試ノズル⑤より試験部内へ鉛直上向きに噴射注入される。温調器からノズルまでの配管部は二重管構造となっており、内管内部をテトラデカン油が、また内管と外管との円環状部を温調器により温度調節されたエチレングリコール水溶液が流れることにより、テトラデカンの噴射温度を一定に保つよ

う工夫されている。供試ノズルより噴出したテトラデカン油は分散して微小油滴群を形成し、水溶液との密度差により試験部内を浮上する。浮上過程においてテトラデカン油滴群は、周囲の低温水溶液との直接接熱交換により油滴表面から凝固相変化を開始し凝固油粒となり、次第に油粒中心部へと相変化界面を進行させる。試験部上部の貯留槽⑩に到達したテトラデカン凝固油粒は、完全に凝固したものや中心付近の液相部とそれを取りまく殻状固相部から構成される半凝固状態となるなど、実験条件により様々な凝固率となる。貯留槽に到達した凝固油粒は、逐次5.8℃に調温された恒温水槽中に移されることにより採取時のままで保存され、必要量が確保された時点で固-液体積計⑩によりその凝固率の測定が行われた。また、必要に応じて試験部側面および上部に設置されたカメラ③により、油滴群の浮上過程および貯留槽内水溶液表面における凝固油粒群の撮影が行われ、それらの形状の観察、また粒径の測定等が行われた。固-液体積計による凝固率測定を終えたテトラデカン油は再びテトラデカントタンクへと戻され、再びテトラデカン油循環経路を経て、ノズルより試験部へ噴射される。表1にテトラデカンの主な物性値を示す⁽²⁾。

本実験に使用された試験部および供試ノズルの詳細を図2に示す。図2に示されるように、試験部は断面が100mm×100mm、全高さ2200mmおよびノズルから水溶液表面までの高さが1600mmの立型矩形ダクトであり、可視化実験を行うために厚さ10mmの透明アクリル板にて構成されている。試験部上部およびノズル出

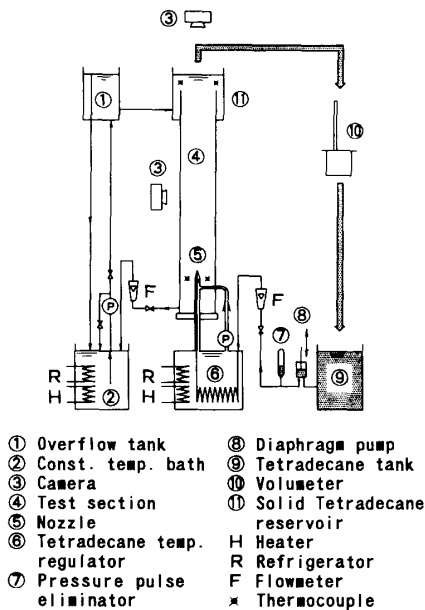


図1 実験装置概略図

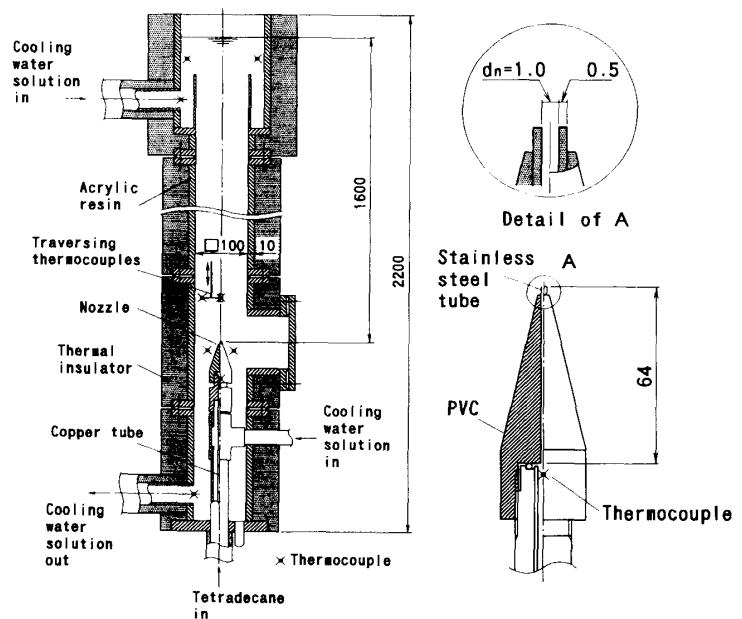


図2 試験部およびノズル

表1 テトラデカンの主な物性値

Melting point (°C)	:	5.8
Latent heat (kJ/kg)	:	229.1
		(Liq.(6°C)) (Sol.(5°C))
Specific heat (kJ/kgK)	:	2.0 1.8
Density (kg/m ³)	:	770 810

口付近にはそれぞれ2箇所ずつ素線径0.32mmのT型熱電対が設置されており、これら4箇所の測定温度の平均値をもって試験部内水溶液温度とした。さらに、試験部内の高さ方向(Y方向)の温度分布測定は、素線径0.1mmのT型熱電対を取付けたトラバース装置により行われた。また試験部は、可視化実験時以外は厚さ50mmのスタイロフォーム断熱材にて保温されている。使用された供試ノズルは内径 $d_n=1.0\text{mm}$ 、肉厚0.5mmおよび長さ64mmのステンレス製細管であり、塩化ビニル製保護材内に挿入されている。なお、本実験におけるノズルの内径 d_n は、テトラデカン圧送ポンプ圧力および噴射油粒径の可視観察の容易さ、および本装置の高さ、水溶液温度を考慮した油粒径による凝固率を考慮して $d_n=1\text{mm}$ に固定してある。ノズル下端には素線径0.32mmのT型熱電対が設置されており、同熱電対の読みとノズル出口におけるテトラデカン油滴温度がほぼ等しいことが確認されたため、この熱電対の指示温度をもってテトラデカンの噴射温度 T_n とした。

実験に使用された固-液体積計は、図3に示されるように、内容積が約200cm³の塩化ビニル製密閉容器と耐圧ガラス管より構成されており、ガラス管内の液位の変位より、同容器内に採取されたテトラデカン凝固油粒の相変化に伴う体積変化を求められるようになっている。実験には2種類の体積計(図4中のNo.1およびNo.2)が使用

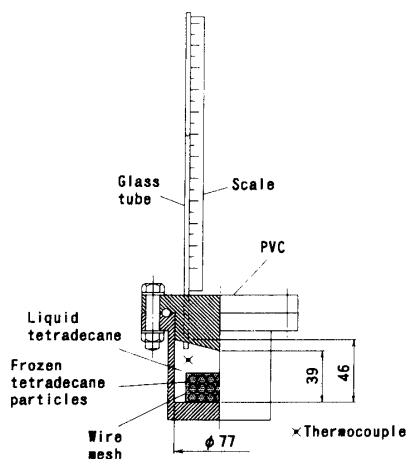


図3 固-液体積計

され、図4中にそれらの検定結果が示されている。図4は質量 m_t の完全固相テトラデカンを採取し融解させた場合のガラス管内液位の変位差 Δh_0 (=テトラデカン液相時の液位-テトラデカン固相時の液位)を表わしたものであり、図中のプロット点にて示される Δh_0 の実測値は、 m_t と直線関係となり、図4中に示す実験整理式と標準偏差 $\pm 2\%$ で一致する結果を得た。以後凝固率の測定にはこれらの実験整理式が用いられた。実験において、測定されるテトラデカン凝固油粒は、金網製の採取箱内に封入され質量 m_t が測定された後、あらかじめテトラデカン液を満たし5.8°Cに調温された同容器内に挿入密閉される。同容器は、速やかに5.8°Cに設定された恒温水槽内に挿入され、このときのガラス管内の液位 h_1 が測定される。続いて同容器は7.0°Cに設定された恒温水槽内へと移され、内部の凝固油粒の融解が完了した時点にて、再びガラス管内の液位 h_2 が測定される。このとき、採取された凝固油粒の凝固率 $R(\%)$ は、ガラス管内液位の変位差を $\Delta h(=h_2-h_1)$ とすると、質量割合として次式で求められる。

$$R(\%) = \frac{m_{fs}}{m_t} \times 100 = \frac{\Delta h}{\Delta h_0} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

ただし m_{fs} は固相部の質量である。

さらに、油滴の凝固現象を知る手掛りとして、図5に示される油滴温度分布測定装置により油滴のY方向温度分布の測定が行われた。油滴温度分布測定装置は、内直径5mm、高さ9mmのポリエチレン製円筒容器の中央部に素線径0.1mmのT型熱電対を設けたものであり、ノズル出口から高さ方向(Y方向)に移動可能な構造となっている。浮上する油滴群は図5に示されるように、円筒容器下部より混合流入し、円筒容器中央部に設

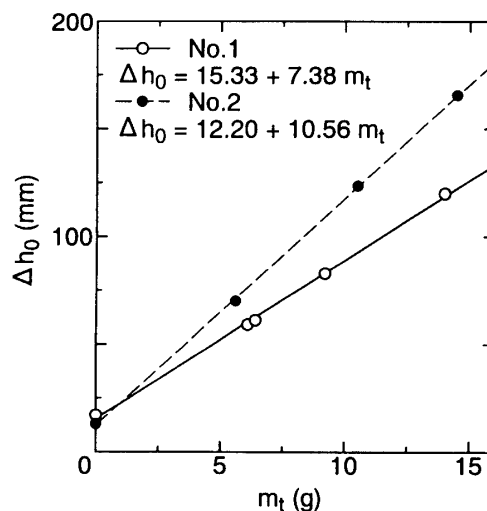


図4 固-液体積計検定結果

表2 実験条件

Tetradecane	
Nozzle configuration : Cylindrical single hole	
Injection direction	: Upward
Nozzle diameter d_n (mm)	: 1.0
Floatation height Y (mm)	: 1600
Injection flow rate G_i (ml/min)	: 14.4 ~ 52.8
Injection velocity U_n (cm/s)	: 30.7 ~ 112.0
Injection temp. T_n (°C)	: 10 ~ 60
Ethylene glycol 30 wt% water solution	
Flow direction	: Downward
Flow rate G_c (ml/min)	: 70
Temperature T_c (°C)	: -10 ~ -1

けた熱電対により、その混合平均温度 T_m が測定されることになる。実験はテトラデカン噴射温度 T_n および流量 G_i 、そして水溶液温度 T_c をパラメータとして表2に示されているような条件にて行われた。実験を行うにあたり、水溶液およびテトラデカンの温度、流量がそれぞれ所定の値になるまで一定時間装置の運転が行われ、系全体が定常状態となったところで各種の測定が行われた。実験手順としては、まず水溶液中を浮上するテトラデカン油粒の流動特性を把握するため、水溶液中でのテトラデカン油滴および凝固油粒挙動の写真撮影による可視化実験を行い、凝固油粒の粒径分布および平均径等が測定された。そして、その結果を基に代表的なテトラデカン油噴射流速 U_n 数種が決定され、表2に示す諸因子のもとでの凝固率の測定が行われた。

4. 実験結果および考察

4・1 浮上油滴群の流動および凝固挙動 本実験において、低温水溶液中における浮上テトラデカン油滴群等の形状および流動挙動は、それらの凝固率に大きく影響を与える重要な因子と考えられる。したがって、まず供試ノズルの特性として、生成されるテトラデカン油粒の算術平均直径および油滴径分布を調べる必要がある。

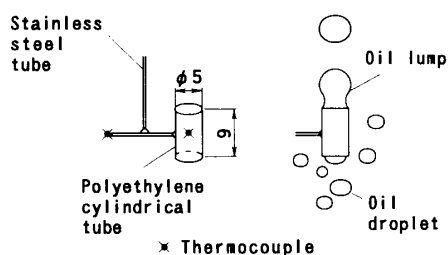


図5 油滴温度測定用プローブ

図6は、試験部上部に到達した凝固油粒の算術平均直径 \bar{d}_p とテトラデカン油噴射流速 U_n の関係を示したものである。なお、球形以外の油粒に関しては、相当直径に換算したものを平均直径としてある。以下に示されるように本実験結果は、従来から行われている液体噴流の油滴平均直径と噴射流速の関係⁽³⁾⁽⁴⁾とほぼ類似した傾向を有するものである。図6の低噴射流速領域においては、 U_n の増加と共に単一油滴の発生(図6中領域I、そして油柱の層流滴化による油粒群の発生領域へと変化し、平均油滴直径 \bar{d}_p が急激に減少し、ほぼ $U_n = 65$ cm/s にて極小の \bar{d}_p 値を示した後、 \bar{d}_p 値の微増となる(領域II)。さらに、高噴射流速領域においては噴射ノズル穴上に形成された油柱先端部の振動による油滴の乱流的分散より、油滴径の漸減がみられる(領域III)。

図7は、テトラデカン油噴射流速 U_n に対する凝固油粒直径 d_p の個数分布 $f(\%)$ の変化を示したものである。図7中 $U_n = 30.7, 39.7$ cm/s の低噴射流速領域(図6の領域I)での単一油滴発生時の凝固油粒径分布 f は油粒直径 d_p のピークが1つ存在した形状となる。さらに U_n の増加にともない領域IIに入ると d_p のピーク値が複数現れる。最終的に、高噴射流速領域(領域III)では広範囲に幅をもった d_p の分布形状へと変化することになる。

図8(a)は、 $T_n = 12^\circ\text{C}, T_c = 0^\circ\text{C}$ の温度条件のもとで供試ノズルから低温水溶液中へのテトラデカン油を噴射した場合の油滴発生挙動および水溶液中を浮上するテトラデカン油滴群の凝固挙動、そして図8(b)は貯留槽上部の水溶液表面に到達した凝固油粒形状(白色粒)の例を前述の油粒径分布の3領域に相当する3種類の噴射流速 U_n について示したものである。また図8(c)は、単一油滴発生領域である $U_n = 30.7$ cm/s の場合に生成される凝固油粒の形状を示したものである。テトラデカン油は液相状態では透明であるが、凝固相状態に変化すると白濁する性質

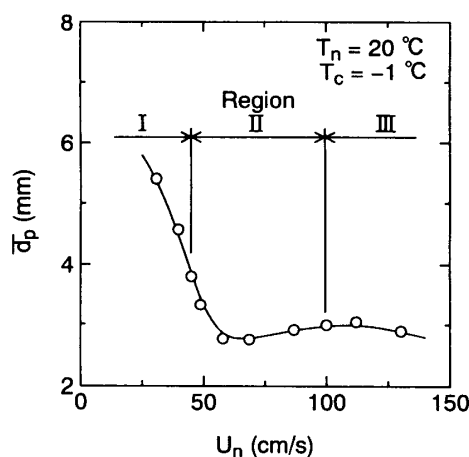


図6 テトラデカン油滴群の算術平均直径

を持つ。図8(a)の写真は、試験部前面に設けたカメラ位置と反対側に面状光源を設置し、その光を半透明膜に透過させることによって得られる間接光により撮影されており、図中の透明(白色球状)および黒色の粒子形状がそれぞれ凝固を開始する以前の油滴および表面より凝固を開始した凝固油粒である。図8(a)左側の $U_n = 30.7 \text{ cm/s}$ の場合においては、噴射流速が非常に小さいため、テトラデカンは単一油滴を形成し、浮上高さの増加とともにその表面から次第に凝固相変化を開始してゆく様子がわかる。さらに、水溶液中を浮上する油滴は水平方向へ強く偏平した回転楕円体に近い形状となるため、図8(b)および(c)に示されるように貯留槽内の水溶液表面にも、同様の形状をした凝固油粒が蓄積されることとなる。前述の領域IIを代表する $U_n = 68.6 \text{ cm/s}$ の場合、ノズル先端にはテトラデカン油の油柱ジェットが形成され、油滴群はこのジェットの先端が分裂することにより生成されるようになる。 $U_n = 30.7 \text{ cm/s}$ の場合に比較して単位時間あたりの発生個数は増大し、平均粒径は減少している。また水溶液中を浮上する油滴の形状はほぼ球形となるため、図8(b)に示されているように貯留槽内の水溶液表面にもほぼ球形の凝固油粒が蓄積される。また油滴径の減少による油滴の終末速度の低下により、浮上過程における油滴および凝固油粒の個数密度が増加していることがわかる。浮上過程における油滴群の凝固開始高さにはやはり分布が生じているが、この場合浮上高さの増加に伴

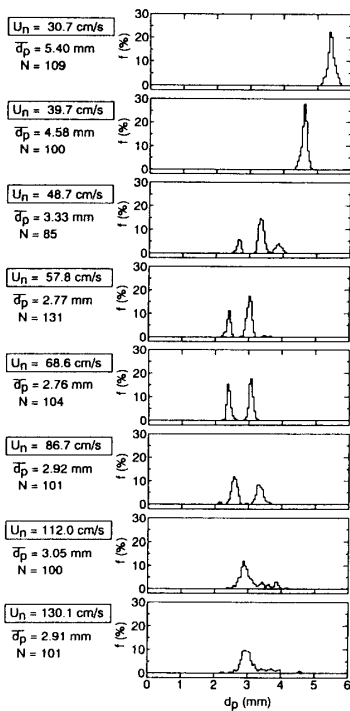
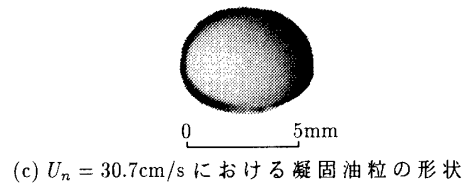
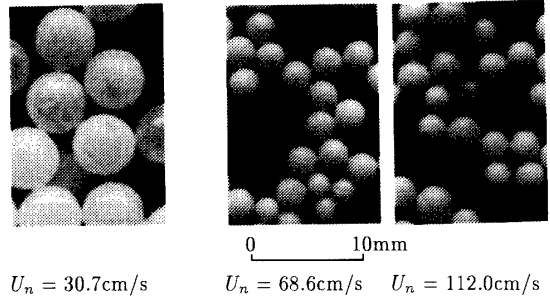


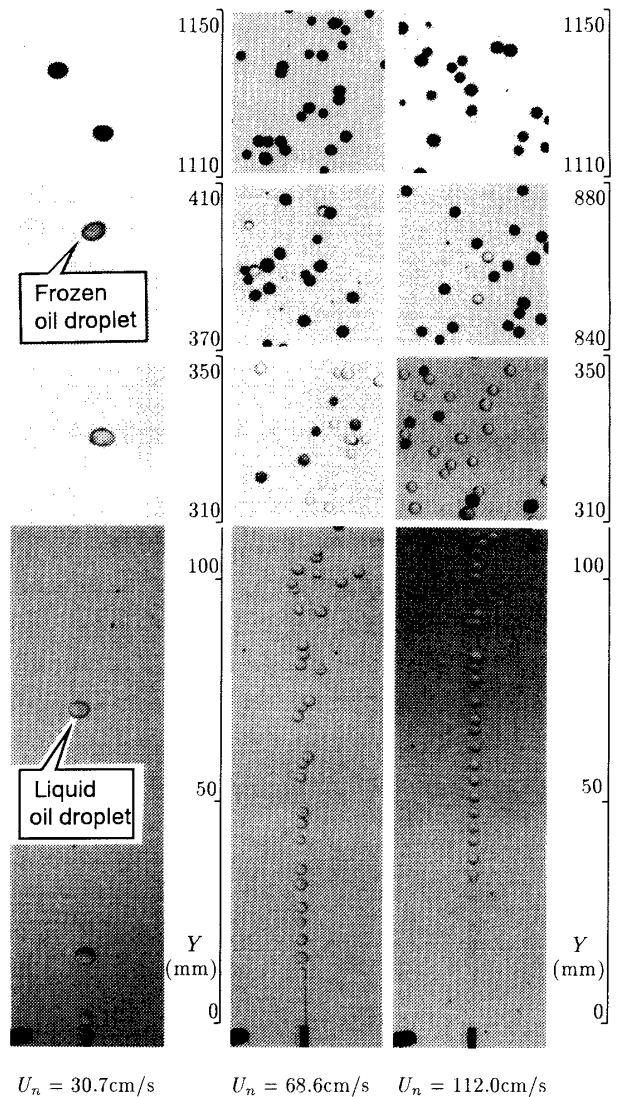
図7 テトラデカン凝固油粒の粒子径分布



(c) $U_n = 30.7 \text{ cm/s}$ における凝固油粒の形状



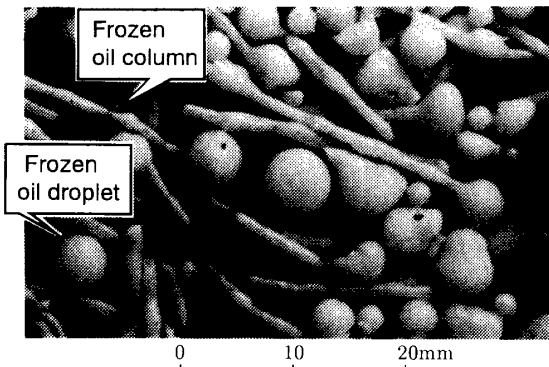
(b) 貯留槽水溶液表面に蓄積された凝固油粒



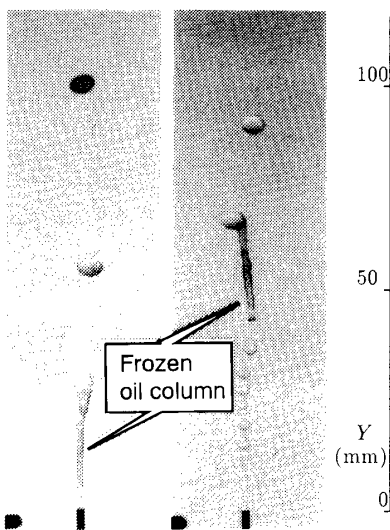
(a) テトラデカン油滴の分散および凝固油粒の挙動

図8 テトラデカン油滴および凝固油粒の挙動

い徐々に凝固開始が行われ、結果的に凝固油粒の個数割合が高さ方向に次第に増加していることが観察できる。また、図8(b)に示される油粒の凝固開始高さの間には明確な相関は認められず、ほぼ同じ粒径の場合でも、油滴と凝固油粒が共存しながら浮上するような現象も観察され、油滴群の凝固開始高さは不規則なものであると考えられる。この凝固開始高さの不規則性は、油粒径と油粒数密度、周囲低温水溶液の温度分布の影響以外に、前報⁶⁾で述べたようなテトラデカン油滴の過冷却現象の存在も原因として考えられる。しかしながら、本実験では、テトラデカン油および低温水溶液を繰り返して使用しており、コロイド状の微細なテトラデカン凝固粒子が水溶液中に分散することと不純物質の水溶液中での拡散により、これらが結晶核となり、清浄な水溶液に比較し、小さな過冷却度で凝固油粒が形成されるものと思われる。結果として、本実験条件の範囲では、貯留槽に到達するまでにはほぼ完全に油滴に凝固層の形成が認められた。 $U_n = 112.0\text{cm/s}$ の場合、ノズル出口に形成されるテトラ



(b) 貯留槽水溶液表面に蓄積された凝固油柱片



(a) 凝固油柱の発生と離脱

図9 凝固油柱の挙動 ($U_n = 68.6\text{cm/s}$)

デカン油柱ジェットの長さはさらに増大し、 $U_n = 68.6\text{cm/s}$ の場合に比較してより高い位置まで油滴群は一列に並んで浮上するようになる。単位時間あたりの油滴発生個数は $U_n = 68.6\text{cm/s}$ の場合に比較してさらに増加し、水溶液中における油滴および凝固油粒の個数密度が増加していることがわかる。凝固開始高さに関しては、 $U_n = 68.6\text{cm/s}$ の場合と同様に分布があり、浮上高さの増加とともに凝固油粒の個数密度が増加していることが理解できる。以上のことより、試験部内にはテトラデカン油柱ジェット、そして凝固油粒が混在しており、それぞれ異なった熱移動特性を有するものであると推定される。

テトラデカン油噴射温度 T_n が、さらに低温の $T_n = -3^\circ\text{C}$ となると、供試ノズル出口においてテトラデカン油柱の凍結が起こり、図9(a)に示されているような凝固油柱が形成されるようになる。この凝固油柱は外周部のみが凝固した管状固体柱であり、ノズル先端より噴射された液相テトラデカンは、凝固油柱の内部を流動し、最終的にその先端より水溶液中に流出するようになる。この場合油柱がノズルの役目を果たすようになり、生成される油滴の径は同油柱の先端径により支配されることになる。凝固油柱は時間とともに成長および図9(a)の右側に示すように離脱を繰り返すが、成長過程において長さとその径を増大させるため、同油柱先端より生成される油滴は通常の噴射に比較して径が増大する傾向となる。この場合貯留槽内の水溶液表面には、図9(b)に示されているように、通常に比較して径の増大した凝固油粒群および凝固油柱片が蓄積されることになる。

4・2 凝固油粒の凝固率 低温水溶液中を浮上する油滴の凝固割合の測定は、本実験因子として重要なものであり、種々のテトラデカン油噴射温度、流速および低温水溶液温度のもとで、前述の固-液体積測定装置を用いて行われた。図10は、油粒分布3領域における代表的な3種の噴射流速 U_n について、テトラデカン油噴射温度 T_n に対する凝固率 R を水溶液温度 T_c をパラメータとしてプロットしたものである。噴射流速 U_n がいずれの値においてもテトラデカン油噴射温度 T_n が高い領域においては、 T_n の減少にともない R の値は徐々に増大する傾向となる。一方、図中破線で示されている低噴射油滴温度領域では、凝固油柱の発生を伴い、 T_n の減少に伴って、逆に R の値は減少する傾向にあることがわかり、 T_n に対して極大の R 値が、各水溶液温度に対して存在することが判明した。この生成される凝固油柱の大きさは、 T_n が低下するほど増大する。さらに凝固油柱はノズルから離脱後、凝固油柱内油道に油を残留させたまま浮上し貯留槽に達し、 T_n の低下にともない R

の値は減少することになる。また、凝固油粒の発生領域において低温水溶液温度 T_c の低下に伴い凝固相の発達が進み、 R の値は増加する傾向となるが、 T_c の減少と共に凝固率の T_n に対する変化割合は減少する傾向となる。これは T_c の減少と共に凝固油粒の固相部厚さが増大し、熱抵抗が増大することが原因であると思われる。さらに図10より、 T_c の低下にともない凝固油柱の消滅する限界における噴射温度 T_n (極大の R を示す T_n 値)が増大していることも理解できる。テトラデカン噴射流速 U_n に対する R 値の変化としては、高い水溶液温度 T_c ($-0.8 \sim -2.5$) においては $U_n = 30.7 \text{ cm/s}$ の場合は他の2種の U_n ($=68.6, 112.0 \text{ cm/s}$) に比較して R の絶対値が特に低くなっていることがわかる。図6からもわかるように、 $U_n = 30.7 \text{ cm/s}$ の場合は他の高噴射流速領域の場合に比較して、テトラデカン油滴および凝固油粒径が増大するため、図10に示されたように R 値の減少が起こるものと思われる。

水溶液温度 T_c の比較的高い領域における、噴射流速 U_n と凝固率 R の関係をより明確に示すために図10(a),(b)および(c)のそれぞれから $T_c = -0.8 \sim -1.0^\circ\text{C}$ の範囲の結果を選び出し、比較したものが図11である。図11より U_n の増加にともない R は増加するが、高噴射流速領域においてはその増加割合が低下し、おおよそ $U_n > 60 \text{ cm/s}$ の領域においては、ほぼ一定か、さらに T_n の比較的大きい場合には逆に R 値が減少する傾向となっている。図6の平均粒子直径 \bar{d}_p の結果から判断すると、 \bar{d}_p が大きく減少する $30 < U_n < 60 \text{ cm/s}$ の領域において、 U_n に対する R の増加が大きくなる。この原因としては \bar{d}_p の減少および浮上速度の減少によって起こる水溶液中での凝固油粒の滞留時間の増大が R 値の増加に寄与していることが予想される。なお、高噴射流速領域においては、 T_n が増加するとテトラデカン噴流

の持ち込む顕熱量が、相対的に水溶液に伝達される熱量に比較して非常に大きくなり、結果的に R 値の増大が抑制され、逆に R 値の減少となる。

4・3 浮上する油滴群の交換熱量 テトラデカン油と低温水溶液との熱交換は、凝固時の潜熱また凝固前後の液相および固相テトラデカンの顕熱により行われる。ここでは凝固層の顕熱量は、凝固層を本実験の最低温度である -10.4°C と見なした計算結果より、潜熱量と液相顕熱量の合計熱量に比較すると、4.9%以下と小さいため無視することとし、液相の顕熱量と凝固潜熱量の関係を前述の凝固率 R から求めることにする。実際の放冷過程において、凝固油粒が融解した後の油の顕熱も利用するとすれば、油滴の顕熱と潜熱との和が凝固油粒の蓄冷熱量となる。凝固油粒の潜熱の値は図10の凝固率の値にテトラデカン油の流量および潜熱を乗ずることにより得られるため、ここではまず油滴の顕熱の取扱について考えることとする。

図12は、前述の図5に示された油滴温度測定用プローブを用い、テトラデカン油噴射温度 $T_n = 11^\circ\text{C}$ の条件にて、水溶液入口温度が $T_{c,in} = 7.0$ および 3.9°C の場合における、テトラデカン油滴の混合平均温度 $T_{m,y}$ および水溶液温度 T_w の高さ方向 (Y 方向) に対する変化の例を示したものである。図12より Y の増加とともに油滴の混合平均温度 $T_{m,y}$ が低下してゆく様子が見られる。なお $T_{c,in} = 7.0^\circ\text{C}$ の場合、油滴の分散が開始される直前において、 $T_{m,y}$ の低下割合が一旦ゆるやかとなる傾向を示す。これはテトラデカン油ジェット先端が分裂した後、油滴群は分散を開始する点までほぼ一列に列んで浮上するため、油滴群周辺の水溶液温度が局所的に上昇し、熱伝達が減少するためであると思われる⁽⁵⁾。なお $T_{c,in} = 3.9^\circ\text{C}$ の場合において、 $Y > 250 \text{ mm}$ となると、テトラデカン油の凝固がおこるために、図12中に示すような融点付近の

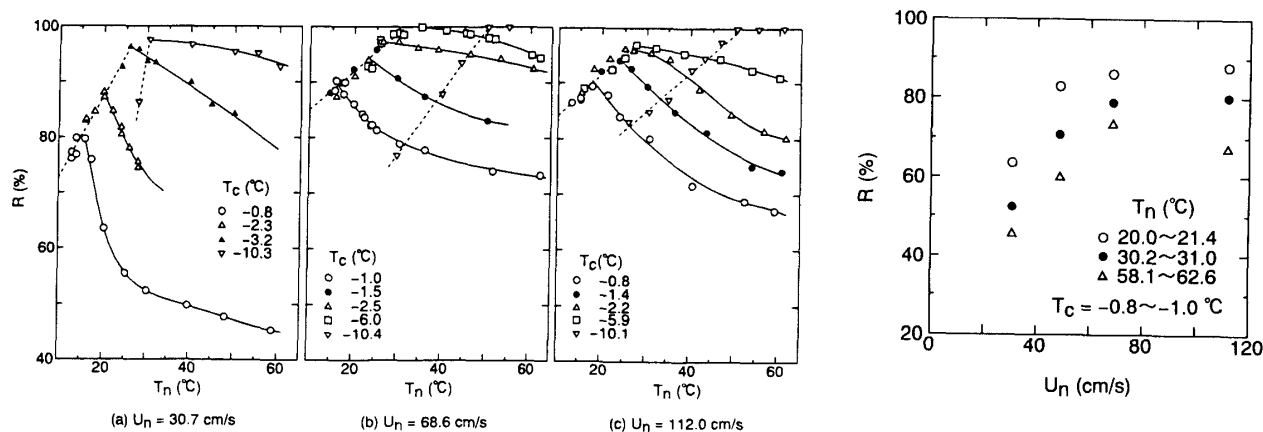


図10 テトラデカン噴射温度と凝固率の関係

図11 テトラデカン噴射流速と凝固率の関係

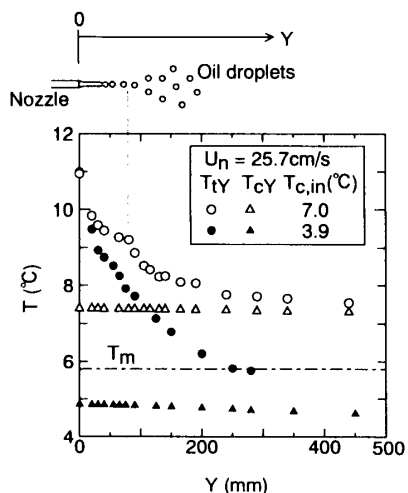


図12 テトラデカン油滴の温度変化

温度が測定された。ここで、油滴の凝固開始においては、油滴温度 T_Y を凝固温度 $T_m (= 5.8^\circ\text{C})$ であるものとし、凝固開始後も凝固油粒中心の液相部の温度は T_m を保つものと仮定すると、油滴の蓄冷熱量 Q はテトラデカン油の凝固までの顕熱分と、凝固率から求められる潜熱分の合計として次式(2)のように表される。

$$Q = \rho_n G_n \left\{ C_n (T_n - T_m) + \frac{R}{100} L \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 ρ_n および G_n はそれぞれ噴射温度 T_n におけるテトラデカン油の密度および体積流量であり、 C_n は噴射温度 T_n と融点 T_m の平均温度におけるテトラデカン油の比熱である。上式を用いて求めた蓄冷熱量 Q をテトラデカン油噴射温度 T_n について示したものが図13である。全体的に T_n の増加に伴って蓄冷熱量 Q の増大が観察される。また蓄冷熱量 Q の内容を検討すると、図10の凝固率 R と T_n の関係より、凝固油柱の発生を見ない高噴射油滴温度領域では、 R の低下による蓄冷熱量の減少に対して T_n の増加による顕熱割合の増大が大きいという結果になっている。さらに凝固油柱の発生しない領域では、水溶液温度 T_c の低下に伴って凝固率 R が増加することにより、 Q の値が増加していることがわかる。一方、凝固油柱の発生する領域では、 T_c の低いものほど Q の値が大きくなるという傾向は必ずしも観察されないという複雑な特徴を有する。また、噴射流速 U_n の増大に伴って相対的な熱伝達率の増大が Q の値の増大をもたらすという結果となっている。

5. 結 論

新しいタイプの冷房用蓄冷システム開発の可能性を検討する目的より、低温水溶液中を密度差により浮上する

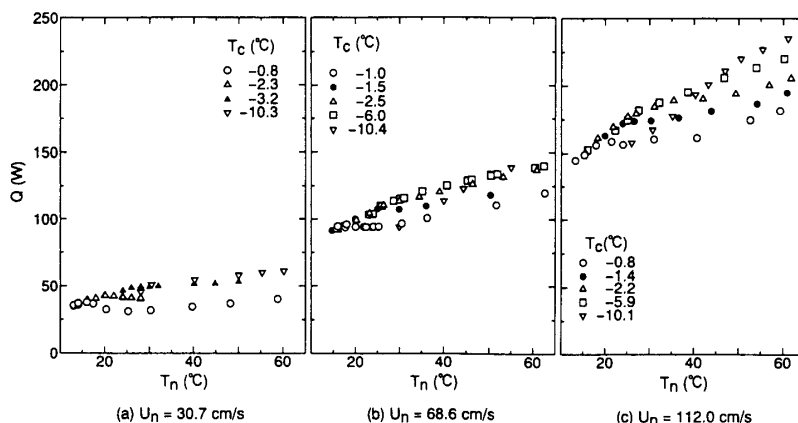


図13 テトラデカン噴射温度と蓄冷熱量の関係

テトラデカン油滴の凝固相変化挙動による蓄冷過程に関する基礎研究が行われ、その結果次のような結論を得た。

(1) 可視観察の結果、低温水溶液中に円形単孔ノズルより噴射された油滴径分布が、噴射流速により単一油滴領域、層流油滴化領域そして乱流的微小油滴群領域に応じて変化することが明らかとなった。

(2) 水溶液温度およびテトラデカン油噴射温度が低い場合には、ノズル出口に凝固油柱が形成され、油滴は油柱中空部より、水溶液中に噴出し、その油粒径分布は油柱中空部に依存することが明らかとなった。

(3) 油粒の凝固率は、凝固油柱形成領域では、油粒噴射温度の増大と共に増加し、凝固油柱の形成を伴わない噴射温度で凝固率の減少となる。結果として、各水溶液温度に応じて、極大の凝固率を示す噴射温度が存在する興味ある結果を得た。

以上の結果、この種の蓄冷システムの凝固特性に関する基礎データから、提案する蓄冷システムの可能性を明らかにすることができ、今後の凝固割合等を定量的に予測する無次元整理式の提案に関する手掛かりを得たものと思われる。

文 献

- (1) 稲葉, 福迫, 機械の研究, 43-11(1991), 81.
- (2) 稲葉, 森田, 第14回日本熱物性学会講演論文集, (1993), 307.
- (3) 棚沢, 豊田, 東北大学工学報告, 19-2(1955), 135.
- (4) 宝沢, 他2名, 化学工学, 33-9(1969), 893.
- (5) 稲葉, 他3名, 第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1993), 418.