

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月11日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560742

研究課題名（和文） 直接接触式熱交換器内の単一液泡および液泡群の熱流動特性解明

研究課題名（英文） Thermal and Flow Characteristics of Single Droplet and Droplets in Direct Contact Heat Exchanger

研究代表者

埜上 洋（NOGAMI HIROSHI）

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：50241584

研究成果の概要（和文）：本研究では潜熱蓄熱を念頭に置いた直接接触式熱交換について、単一液泡および液泡群というマイクロ視点から熱流動特性について小型の熱交換装置を用いて検討した。その結果、ノズルおよび供給条件による液泡の形成挙動、流通および分離の各特性を明確化した。また蓄・放熱による相変化をともなう装置内の状況および流動の変化を明らかにした。これらの知見に基づき装置内の熱交換および蓄・放熱速度の定量化が可能となった。

研究成果の概要（英文）：This study discussed on thermal and flow characteristics in direct contact type heat exchanger. It focused on droplet behavior, in other word, microscopic viewpoint. The result revealed the effect of nozzle and feed conditions on the droplets formation, ascending and separation behaviors. The experiments including phase change phenomena clarified the variation of inside state and flows in the exchanger. These results enabled the quantitative analyses on heat exchange, heat storage and release rate.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：省エネプロセス

### 1. 研究開始当初の背景

物質の熔融潜熱を利用した潜熱蓄熱法は、社会システムの中でエネルギーを高効率に利用していくための省エネルギー技術戦略中の「時空を越えたエネルギー利用」において、エネルギー需給の空間および時間的ミスマッチを解消するための基盤技術の一つとなっている。潜熱蓄熱法は熱を輸送する熱媒と蓄熱を担う相変化物質（Phase Change

Material: 以下 PCM) の間の熱交換方式によりいくつかに分類されるが、本研究では直接接触式を対象とした。

蓄熱槽内の PCM 浴内に熱媒を分散させて直接接触させる直接接触式では、隔壁を介するシェルアンドチューブ型やカプセル型と比較して、伝熱抵抗となる低温度勾配層形成の抑制と同時に、伝熱面積の増大による蓄・放熱速度の向上が期待される。一方で、凝

固・溶融 PCM と熱媒の過混合、熱媒流通に伴う PCM の流出、凝固率が高くなった PCM 層中の熱媒の流通不良が問題となっていた。これは、上述の現象を支配する因子の解明が不十分であり、個々の因子の解明と蓄熱槽の蓄・放熱特性への影響の定量化を行うことが必要となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究で対象とした液-液直接接触系は、相互不溶解 (immiscible) な二流体系に相当し、それ自体は、ガス吸収、脱ガス、液-液抽出など多くの分野で多数の研究が行われているが、その一方が相変化を起こす系については十分に検討されていなかった。これまで報告されてきた、隔壁を有する熱交換系についての実験的・解析的な研究の成果に加え、近年は直接接触式蓄熱槽についても研究が盛んに進められていたが、マイクロ視点に基づいた特性解明を行ったものは見られなかった。そこで本研究では基礎的現象の解明と蓄熱システムへの影響の定量評価を行うことを目的とした。

## 3. 研究の方法

直接接触式蓄熱槽内の熱交換現象を解明するための着目点は、相変化物質中を流通する微小な熱媒液泡であり、小型の蓄熱槽を作成し、液泡の流動・伝熱現象を検討した。図 1 に実験装置の概略を示す。

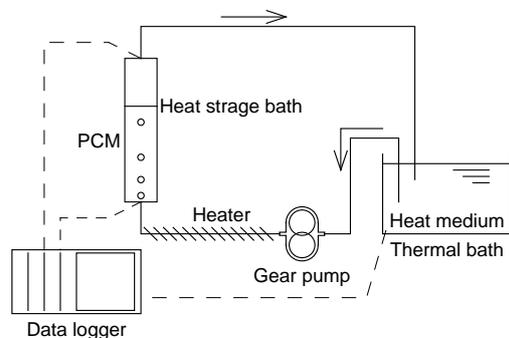


図 1 実験装置概略図

装置の基幹部分となる蓄熱槽は内部の現象を歪みなく観察するため、円筒形透明蓄熱槽を直方体の透明水槽内に設置した二重構造となっており、二重の槽間は熱媒で満たした。内筒の底面に単一のノズルを設置し、ここから温度及び流量を調整した熱媒を供給する。蓄熱槽内筒には蓄熱物質または疑似蓄熱物質を槽下部に充填し、円筒形蓄熱槽の底面中央のノズルからギヤポンプを用いて、蓄熱槽の上部が熱媒により満たされるまで熱媒を注入した。槽内は水と熱媒の比重差により下部の水と上部の熱媒の二層に分かれた状態

となる。この状態からさらに熱媒をノズルから所定流量で注入し、内部の流動および伝熱現象を測定した。測定には接触型センサによる測定に加え、静止画及び動画撮影、高速度ビデオ、PIV などの光学的手法による測定手法を用いた。

## 4. 研究成果

まず、直接接触型の装置において、伝熱面積となる液泡表面積と密接に関与する液泡形成挙動の測定を行った。模擬 PCM として水を用い、ノズル径を 1 から 6 mm とし、熱媒流量  $0.97 \times 10^{-6}$  から  $5.53 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  の範囲で測定を行った。ノズルから流出した熱媒油は界面張力によりノズルに保持されたまま、熱媒油の供給とともに体積が増加して上方に伸長する。その後、ノズルに保持された液泡の先端部分の下部からくびれが生じ、この部分が徐々に細くなって最終的に液泡が離脱する。この液泡形成挙動は、ノズル出口における単一液泡形成 (図 2)、ノズル出口に形成した液柱先端からの単一液泡形成、液柱先端の分裂による複数液泡の同時形成さらにノズル出口での微粒化に大別することが出来る。液泡からの複数液泡の同時形成過程においては、液柱の軸方向に複数のくびれが形成して、これらがほぼ同時に切断して縦列に連続した滴列が形成する場合 (図 3) と、液柱先端が分裂して水平方向に分散した複数の滴群が形成される場合 (図 4) が存在することが、高速度ビデオによる測定から明らかになった。これらの液泡形成挙動は、熱媒流量およびノズル径により整理することができ、熱媒流量の増加およびノズル径の減少に伴って、ノズル出口における単一滴形成、液柱先端からの単一滴形成、液流先端からの複数滴形成からノズル出口における微粒化へと変化することが明らかになった。

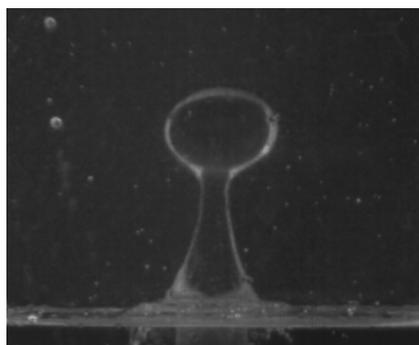


図 2 ノズルからの単一液泡生成

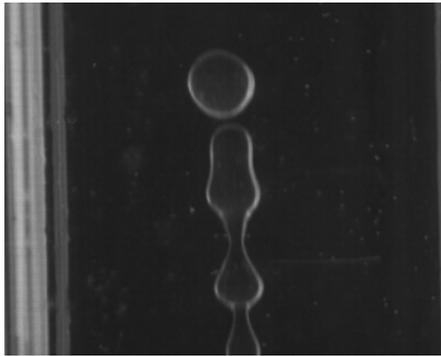


図3 液流からの縦列複数液泡形成

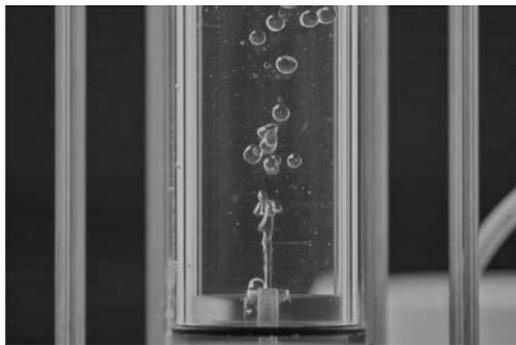


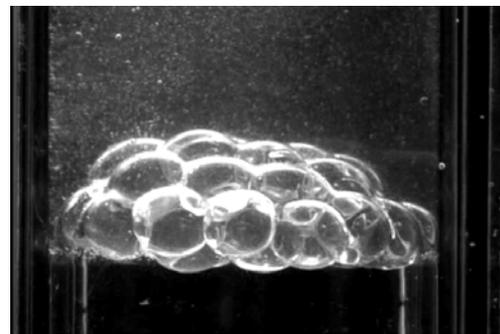
図4 液柱先端の分裂による複数液泡形成

形成される液泡の大きさについては、ノズルからの単一液泡の形成条件においては、液泡径とノズル径の相関は強く、均一な径の液泡が形成される一方、ノズル出口に液柱が形成される条件では、生成液泡とノズル径の関係は弱く、形成される液泡径の分布が広がる傾向があることが明らかになった。

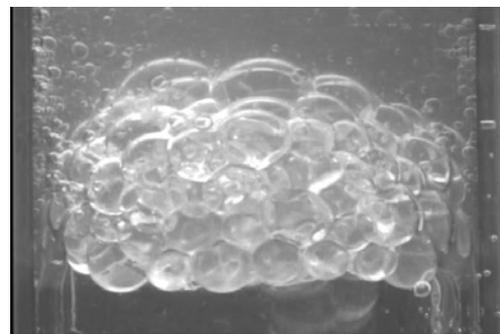
ノズル部における液泡形成後の挙動については、液泡の形成時は比較的円形に近い形状の液泡が形成されるが、離脱後には、離脱時の界面収縮と水-熱媒油間の抵抗により、熱媒油泡は水平方向に扁平な楕円体形状となる。連続的な影響形成により、疑似PCM層内に液泡列が形成する。ノズルおよび液柱からの単一液泡形成および縦列の複数液泡形成時は縦列の液泡列が形成されるが、これは一定の経路のみを通過するのではなく、その経路が常に変化していた。水平方向に分散した複数液泡形成時には、液泡群は互いにランダムな位置関係で層内を上昇した。ノズル出口での微粒化状態になると、層内はエマルジョンの状態となり、全体としては槽内を上昇することになるが、液泡の上昇により形成された疑似PCMの縦方向の循環流に同伴され、上方から下方へと流動する液泡群も観察された。また、蓄熱槽内の液泡上昇速度については、形成される液泡の径が同一ならば液泡の上昇速度は同程度になるものの、熱媒流量が増加すると、PCM層の循環流が強くなるた

め、上昇速度が増加する傾向があることが明らかになった。

液泡が下方からPCM層と熱媒層の界面部分に到達すると、即座に分離して熱媒層に解放されるのではなく、図5に示すように一旦液泡の形態のまま界面付近に停滞する。この停滞液泡内の熱媒は、最終的に上部の油層に放出されることになるが、液泡の供給と放出の速度が釣り合う分量の液泡が界面に存在することになる。これらの停滞した液泡の表面には水膜が存在し、この水膜が破れると隣接する液泡同士が結合して大きな液泡となり、下部から供給される後続の液泡に押し上げられて停滞層状部へと移動し、最終的に停滞層上表面での液泡の破裂により熱媒が上部の熱媒層に放出される。この停滞域での液泡の滞留時間および滞留量は熱媒油流量が大きく、また生成した液泡が小さいほど増加することを明らかにした。



(a) 低流量・大粒径条件



(b) 大流量・中粒径条件

図5 界面への液泡の滞留

蓄熱剤として酢酸ナトリウム三水和物( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )を用い、蓄放熱時の蓄熱槽内の状態を測定・観察した。蓄熱時には常温の蓄熱槽に75℃の熱媒油を供給してPCMを溶解させて蓄熱を行い、放熱時には流入させる熱媒油温度を40℃としてPCMを凝固させつつ熱媒油への放熱を行った。この間の熱媒油の流入・流出温度および蓄熱槽への蓄・放熱速度変化を図6に示す。図中に示した蓄・放熱速度は、蓄熱槽入り口・出口間の熱媒油頭熱差から、蓄熱槽外部の断熱空気層の温度か

ら算出した熱損失を差し引いたものであり、蓄熱を正、放熱を負として表している。蓄熱時には、高温の熱媒油を供給し、その顕熱をPCMに与えるため、熱媒油の流出温度は供給温度よりも低くなっている。蓄熱開始後約130 minで熱媒油温度を切り替えて放熱操作に移行しており、出口温度は入口温度よりも高くなっている。また、放熱時には熱媒油温度を40℃と低く設定しており、放熱速度は蓄熱速度よりも大きくなっている。この条件における蓄熱量・放熱量の総計は、それぞれ54.78および54.27 kJであり、1%程度の誤差となっていた。

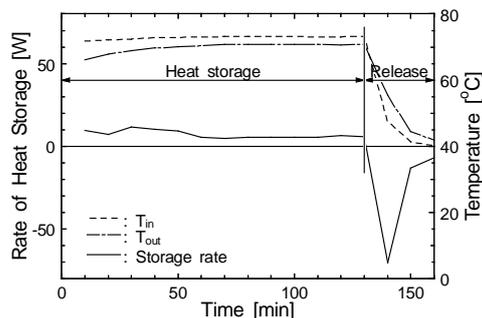


図6 蓄・放熱特性

放熱時の液泡温度を槽内に固定した接触型センサにより測定した結果の一例を図7に示す。高温の液泡がセンサ部分を通過する際に温度上昇があるが、通過時間が短くセンサと液泡が温度平行に達していないことから、測定した液泡上昇速度や各種物性値により温度応答の時定数を用いて、通過液泡の温度を推定し、蓄熱槽内の各位置における平均の液泡温度分布が推定可能となった。

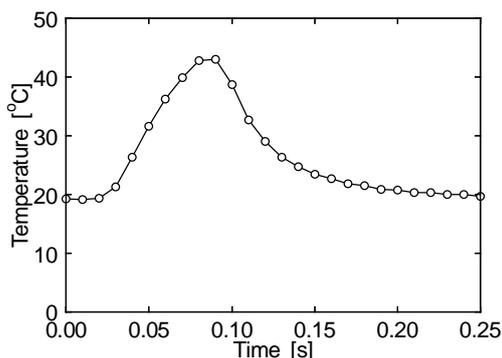


図7 液泡通過時の測定温度変化

蓄熱 (PCM 溶融) 時の蓄熱槽内のPCMの状態は以下のように変化した。蓄熱開始時には、PCMはすべて凝固しており、凝固PCM中の屈曲した間隙を熱媒油が通過している。この流路は熱媒油からの熱供給に伴って拡大し、そ

の後PCM全域が溶融して溶融PCM層中を熱媒油が液泡状態で上昇するようになる。しかし、本研究で使用した蓄熱槽は円筒形でその底面中央に単一のノズルを設置しており、蓄熱槽底面付近の周辺部には十分な熱供給が行われず、本実験での蓄熱時間内にはこの部分のPCMがすり鉢状に溶け残った。この状態における熱媒油の流動状態は水-熱媒油系の条件と同様に、熱媒油が溶融PCM層内を垂直に上昇するわけではなく、不規則な変動を伴いながらPCM層中を上昇した。尚、熱媒油流量を大きくした場合、熱媒油はノズルから液柱状に流通した。

放熱時のPCM層の状態は以下のように変化した。放熱時においても冷間実験と同様、溶融PCM層内を上昇してきた熱媒油泡葉は溶融PCM層-熱媒油層界面付近に一旦滞留し、これが破裂してPCM-熱媒油の分離が生じた。ただし、この条件においては界面付近への熱媒油の滞留は数個程度であった。放熱が進行して溶融PCM層の温度が融点付近まで低下すると、PCM層中を上昇する熱媒油表面付近にPCMの針状結晶が生成し、熱媒油とPCMの分離時にこの結晶が界面付近に分散されるようになる。さらに放熱が進むと、熱媒油の上昇に伴って形成されるPCM層の循環流(中心軸付近を上昇し壁面付近を下降)によって針状結晶が蓄熱槽下部に運ばれ、底部に堆積するようになる。その後、堆積したPCM結晶の間隙のPCMも凝固が進行して全域が凝固状態に至る。この凝固過程においても熱媒油の流通は続くため、凝固PCM層中に屈曲したいくつかの流路が形成された。

これら本研究では直接接触式潜熱蓄熱を念頭に置いた熱交換器内の熱流動特性について種々の項目を明らかにした。これらにより装置性能の定量評価を行う基礎が得られたものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① 榎上 洋, 池内康祐, 佐藤紀子, 佐藤美幸, Thermal and Flow Characteristics in a Small Columnar Latent Heat Storage Bath, 23rd International Symposium on Transport Phenomena, 2012/11/21, Auckland, New Zealand
- ② 榎上 洋, エネルギー回収利用に向けた直接接触式潜熱蓄熱法開発, 平成24年度化学工学会熱工学部会セミナー(招待講演), 2012/07/13, 八戸
- ③ 榎上 洋, 佐藤美幸, 佐藤紀子, Droplet Formation of Heating Medium Oil in Latent Heat Storage Bath, Joint

Symposium on Mechanical - Industrial Engineering, and Robotics 2012 , 2012/01/12, 登別

- ④ 埜上 洋, Fundamental Characteristics of a Small Columnar Latent Heat Storage Bath, 8th Japan-Brazil Symposium on Dust Processing-Energy-Environment in Metallurgical Industries, 2010/11/1, 福岡

6. 研究組織

(1) 研究代表者

埜上 洋 (NOGAMI HIROSHI)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：50241584

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし