

公益社団法人 自動車技術会
運営企画会議議長 殿

2017年7月31日

研究調査事業 実績報告書（2016年度事業分）

「研究調査事業」による助成金を受領した研究が終了しましたので、下記の通り報告します。

委員会名	伝熱技術部門委員会		
委員長名	古畑朋彦	委員長所属機関・部署名	群馬大学大学院・理工学府知能機械創製部門
報告者名	染矢聡	報告者所属機関・部署名	産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門
研究調査テーマ名：PIV技術を用いた温度場、流れ場解析技術の実用化に向けた応用研究			
本会HPでの公開可能年月日	2017年 8月 1日		

記入にあたっての注意事項

- この報告書は、原則として2017年5月末日までにEmailに添付して提出してください。
(提出先：tech@jsae.or.jp)
- 研究助成対象者が報告してください。
- [研究調査事業の内容] は3～4頁程度にまとめてください。
なお、[研究調査の成果] は、この研究の学会発表等より前に、報告者の了解なしに本会が公表することはありません。
- 本助成金による研究の発表論文（発表予定論文を含む）があれば、Emailに添付し [本研究調査事業の成果] に代えても結構です。
- 本報告書は、本会HPでの公開、ならびに運営企画会議に報告します。なお、HPでの公開は、上記の[本会HPでの公開可能年月]に示された年月日以降の公開とします。

2016 年度 研究調査事業実績報告書

1. [研究調査テーマ名]

PIV 技術を用いた温度場、流れ場解析技術の実用化に向けた応用研究

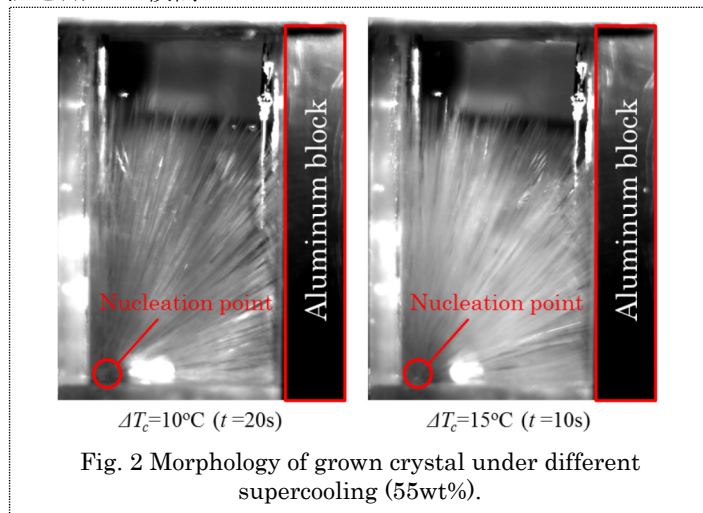
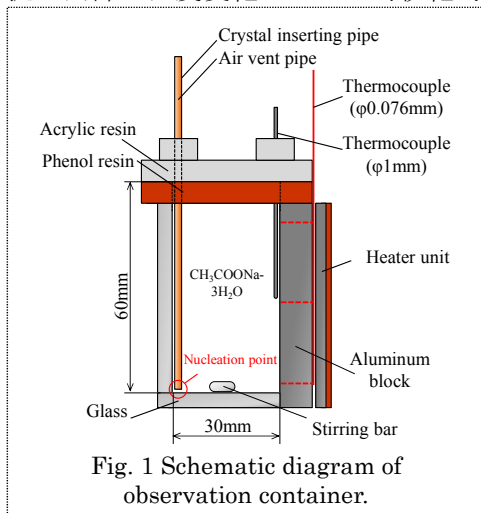
2. [目的]

空間における流れ計測と同時に温度計測を行なう技術開発を、空間での伝熱特性を計測するための技術として確立し、車内空調や様々な温度範囲の熱交換器等を目的とした試験研究に適用可能とする。実用化に向けた応用研究として、車室内空調や暖機/過熱抑制に適用可能な潜熱蓄熱システム、空冷・水冷熱交換器など、排熱活用システムに適用する。

3. [本研究調査事業の内容]

(1) はじめに

58℃付近で大きな融解潜熱(264kJ/kg)を持つ酢酸ナトリウム三水和物は、一般家庭で必要とされる蓄熱温度に近いので、優れた潜熱蓄熱材(PCM)の一つとして期待されている。これまでの酢酸ナトリウム三水和物に関する研究は、大きな過冷却や相分離といった問題を解決するために、過冷却防止技術や相分離防止技術、過冷却解消技術といった研究が主として行われてきた。一方、蓄熱装置の高度な制御を実現するためには多くの情報が必要であるものの、外部との熱交換を考慮する際に重要な相変化時の内部挙動に関する研究はあまり行われていない。そこで、本研究では酢酸ナトリウム三水和物の相変化挙動に着目し、濃度と過冷却度をパラメータとして、種々の条件における結晶成長速度・対流・内部の温度変化について可視化的手法を用いて検討した。



(2) 実験装置・実験方法

酢酸ナトリウム三水和物の相変化時の挙動を観察するために、Fig.1 に示す観察容器を作成した。観察容器は W30×H60×D10mm であり、ガラス・アルミ(アルマイト処理済)・ベークライト・アクリルからなっている。上部蓋より容器下端まで結晶核投入用のパイプと相変化時の体積変化による圧力を逃がすためのパイプが取り付けられており、パイプ位置により核生成位置を変更する。また、アルミブロック近傍に初期温度測定用のシース熱電対(φ1mm)を一本取り付け付けた。Fig.1 に示した観察容器に溶液を充填して恒温水槽内に設置し、溶液の温度制御を行った。使用した溶液の濃度と融点 T_m それぞれ 45wt%($T_m=38^\circ\text{C}$)、50wt%($T_m=54^\circ\text{C}$)、55wt%($T_m=57^\circ\text{C}$)であり過冷却度を 1~15℃の範囲で変化させて実験を行った。結晶成長速度の測定では観察容器にハロゲンランプの光を照射し、CCDカメラ(1200×1600pixel)で撮影を行った。対流の観察及び温度変化の測定では、トレーサ粒子(φ15~20μm)を溶液内に分散させ、レーザー光をシリンドリカルレンズによりシート状(厚さ 1mm 以下)

にして照射し、容器中央断面部に存在する粒子を励起した。パルスジェネレーターによってレーザーと同期させたカメラを用いて粒子像を撮影し、2次元断面内の温度場・速度場の解析を行った。

(3) 結晶成長速度

酢酸ナトリウム三水和物の基本的な特性の一つとしてまず、本実験で使用する観察容器内部での結晶成長速度を測定した。実験では 45, 50, 55wt%の各濃度に対して過冷却度を 5, 10, 15°C と変化させて行った。Fig. 2 に濃度 55wt%過冷却度 10°C(核生成後 20s) と 15°C(核生成後 10s)の成長中の結晶の写真を示す。核生成位置から針状の結晶が放射状に成長することが分かる。結晶成長速度はこの針状結晶の先端位置の移動量を読み取ることで測定した。移動量の読み取りは観察容器内の中心位置付近まで成長した任意の結晶数本の移動量を 6 画像分測定し、平均化して算出した。各濃度における過冷却度 5°C の条件では結晶成長が非常に遅く、結晶自体が細いため成長の途中で結晶が折れる様子が観察された。このことより、結晶成長速度の正確な測定が困難であったため、本測定においては過冷却度 10, 15°C の条件にのみ着目した。Table 1 に測定した結晶成長速度を示す。ここで、 $\pm 1\text{pixel/コマ}$ の誤差を仮定すると、結晶成長速度の算出誤差は $\pm 0.11\text{mm/s}$ である。表に示す結果より、過冷却度が大きくなるほど、あるいは溶液の濃度が高くなるほど、結晶成長速度が大きくなることが分かる。この挙動は酢酸ナトリウム三水和物の結晶成長について述べた先行研究と同様の傾向である。また、結晶成長の様子を撮影した結果、酢酸ナトリウム三水和物の結晶は過冷却度が大きいほど密な状態で成長する傾向が見られた。

Concentration of CH_3COONa [wt%]	Supercooling temperature [°C]	Crystal growth rate [mm/s]
45	10	0.71
	15	1.56
50	10	1.01
	15	2.59
55	10	2.37
	15	4.31

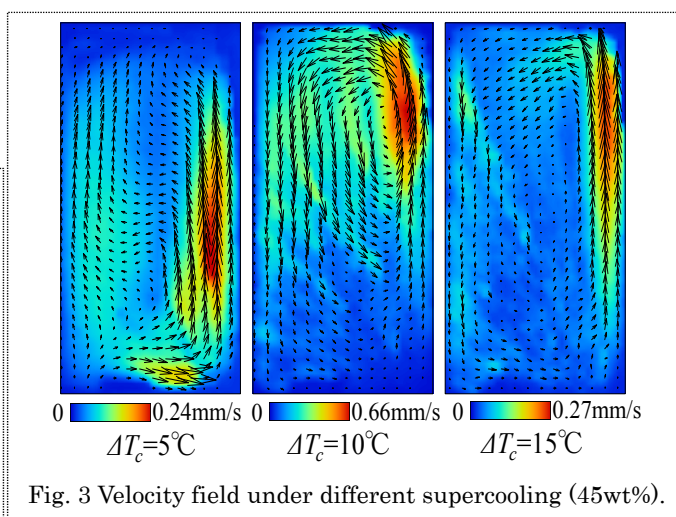


Fig. 3 Velocity field under different supercooling (45wt%).

(4) 対流速度分布

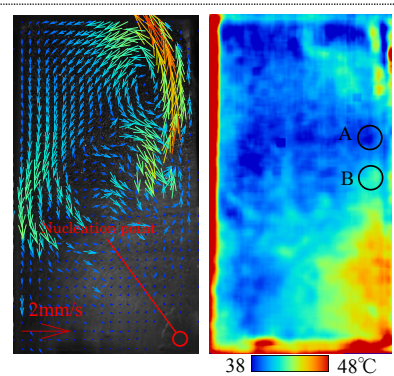
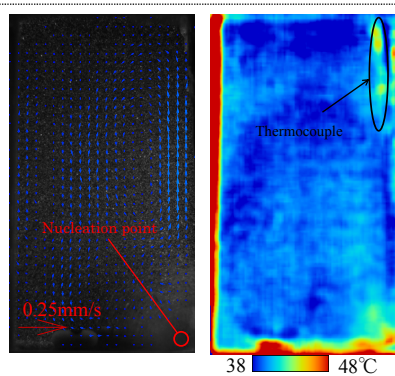
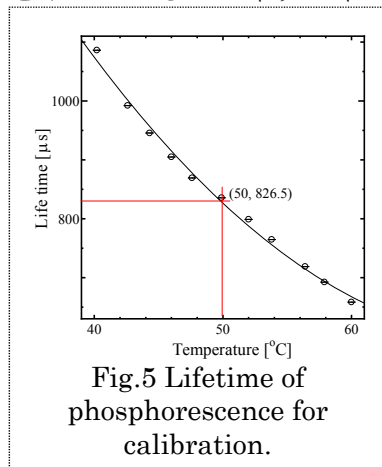
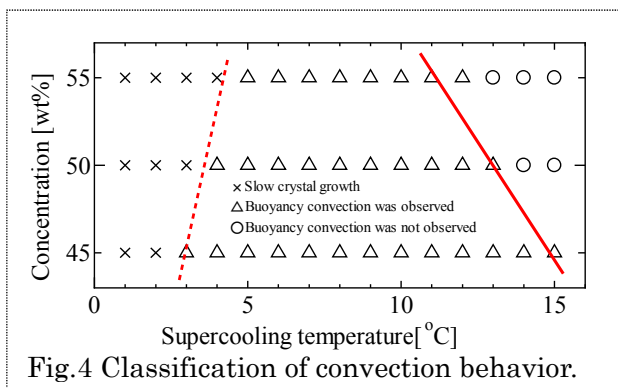
本研究では、直接相互相関による再帰的 PIV(Particle Image Velocimetry)解析を用いて溶液内対流の速度分布を解析した。PIV 解析では、微小時間間隔で撮影した 2 画像中の粒子像の移動量から流体の速度を算出する。予備実験によって各実験条件における対流速度のオーダーを事前に見積もり、PIV 解析に適した時間間隔(4fps, 8fps)で本実験を行った。本節の実験では、Nd:YAG レーザー(532nm, 第 2 高調波)及び CCD カメラ(1200×1600pixel, 8fps: frame per sec)を用いた。ここで、トレーサー粒子が過冷却解除に影響を与える可能性が危惧されたが、本実験では粒子による核生成等の影響は見られなかった。

溶液濃度 45wt%の条件において、観察容器の各位置で得られた速度ベクトルを、核生成から全体が凝固するまで時間平均した結果を Fig.3 に示した。Fig.3 のカラーコンターは各位置における速度の大きさを示している。なお、Fig.3 中のベクトル及びコンターのスケールは各実験条件で異なる。過冷却度 5°C と 10°C の場合を比較すると、過冷却度 10°C の方が上昇流の平均速度が大きく、過冷却度 10°C と 15°C の場合を比較すると、過冷却度 10°C の方が上昇流の平均速度が大きいことが分か

る。したがって、過冷却度と上昇流の平均速度との関係では、ある程度の過冷却度までは潜熱による浮力対流の影響が顕在化するが、過冷却度が大きくなると潜熱に起因した浮力対流が弱まり、上昇流の平均速度が遅くなる事が分かる。浮力対流の影響について過冷却度ごとにまとめた結果を Fig.8 示す。図中×の領域は結晶成長速度が非常に遅く撮影時間内に浮力対流を検出できなかった領域、△の領域は結晶成長とそれに伴う浮力対流が顕在化した領域を示す。○の領域は、結晶成長速度は速いものの液相中の速度が小さく、浮力対流をほぼ検出できなかった領域である。なお、Fig.4 中に実線及び点線で示した各領域の境界は、容器形状やサイズによっても大きく変化すると考えられるため、今後、更なる検討が必要である。このような挙動が測定される原因として考えられるのは結晶成長速度の影響である。Fig.3 に示したように、過冷却度と結晶成長速度には大きな関係があり、過冷却度の大きい条件においては結晶成長速度が大きいため、潜熱による浮力対流が発生・発達するよりも速く全体が凝固したものと考えられる。Fig.4 より各過冷却条件において、酢酸ナトリウムの濃度の高い 50wt%, 55wt% の場合、結晶成長速度がより速くなる。そのため、濃度が高いほど低い過冷却度で、対流の発生・発達より早く全体が凝固し、○で示した領域が現れるものと考えられる。また、特徴的な流れとして、針状に成長する結晶間に溶液が流入する様子が観察された。この対流は Fig.3 の過冷却度 10°C における平均速度分布でも、容器中断左側の縞模様として表れている。

(5) 温度場・速度場同時計測結果

減衰係数が温度に依存する燐光物質を吸着性樹脂粒子に焼結して作成したトレーサー粒子とレーザー(Nd:YAG, 第三高調波 355nm, 10 Hz), 高速度カメラ(384×768pixel, 20000 fps)を用いて溶液内の温度速度分布を計測した。温度の算出には温度と燐光の減衰係数の関係を示す校正関数が必要である。校正実験では、最も融点温度が低く凝固し難い 45wt% の溶液を用い、温度範囲 40~60°C で 2°C ごとに温度を変化させて燐光の減衰を撮影した。例として Fig.5 に 50°C における燐光寿命と温度の関係を示した。図中の○は画像全域における燐光寿命の平均値、エラーバーはその標準偏差を示しており、画像全域における燐光寿命のバラツキが小さいことがわかる。図中の実線は、これらの関係を最小二乗法でフィッティングして得た二次関数を示している。フィッティングの残差は 3μs, 0.15°C であった。



実験は溶液の濃度を 45, 50, 55wt% と変化させて行うが、50, 55wt% の溶液は比較的核生成しやすく、広い温度範囲で校正実験を行うことが難しかった。45wt% の溶液で得た校正関数を 50, 55wt% 溶液に適用したところ、実際の温度よりも低い値となった。高濃度溶液は屈折率が大き

く光学的距離が短いため受光量が多くなり、S/N比に起因して減衰係数が過小評価されるためと考えられる。そのため50、55wt%の溶液を用いた結果に関しては、結晶投入時の最低温度が過冷却状態の溶液温度と同じとなるように、燐光の減衰係数から変換された温度の値をシフトさせて表示した。

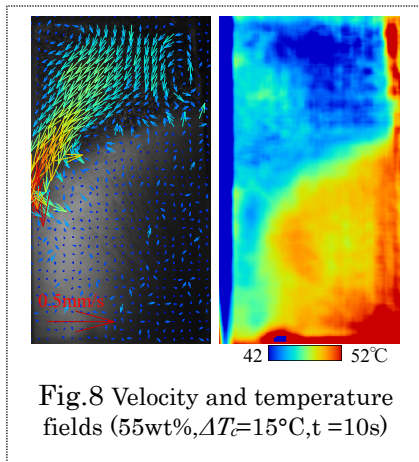


Fig.6, Fig.7, に45wt%, 過冷却度10°Cの結果の内、結晶核投入後40秒と90秒における取得画像と得られた速度・温度分布を、Fig.8に55wt%, 過冷却度15°C, 核投入後10秒における結果を示した。図中の左図は実際の結晶成長の様子を表す可視化画像と、その際に発生した対流の速度分布を表し、右図はその時の温度分布を表している。ここで、右図の外周部に見られる赤い領域は反射、散乱やピンボケによるものであり、右上部の赤い領域は挿入した熱電対による影響である。酢酸ナトリウム三水和物結晶は細く透明度が高いため、特に結晶成長初期の結晶生成量の少ない段階ではFig.6左図のように肉眼では結晶の成長を捉えにくい。しかし、得られた温度場には、結晶成長による温度変化が表れており、PIVによる速度計測だけでなく温度計測も同時に行うことで結晶の存在をより明確に検出できた。時間が経過したFig.7では、より結晶成長が進み、肉眼や左図背景の可視化写真でも結晶の位置を把握できる。Fig.7右図から、結晶の存在する部位で温度が高くなっていることを確認できる。

また、比較的対流速度の大きい液相部(Fig.7右図中A)と、その下側の結晶成長フロント近傍(B)の温度に着目したところ、それぞれ約39°Cと42°Cとなっており3°Cの温度差が生じている。したがって、対流の原因は潜熱放出に伴う浮力対流であると考えられる。ここで、液相と固相が共存している部分に関しては結晶によるレーザーの散乱がわずかにあるものの、液相中の粒子が燐光を発しており、温度の変化を捉えることが出来ている。このことから画像上は結晶化している状態であっても結晶内部には溶液または余剰水分が液相状態で残っていると考えられる。また、Fig.7とFig.8を比較すると、濃度が高くなり、結晶の生成密度が高い条件であるFig.8の方が結晶と液相との境界がはっきりしたものになることが分かった。Fig.8の結晶と液相が共存する付近では比較的低温のままであり、液相の少ない核生成付近で高温となっていることが分かる。

また、比較的対流速度の大きい液相部(Fig.7右図中A)と、その下側の結晶成長フロント近傍(B)の温度に着目したところ、それぞれ約39°Cと42°Cとなっており3°Cの温度差が生じている。したがって、対流の原因は潜熱放出に伴う浮力対流であると考えられる。ここで、液相と固相が共存している部分に関しては結晶によるレーザーの散乱がわずかにあるものの、液相中の粒子が燐光を発しており、温度の変化を捉えることが出来ている。このことから画像上は結晶化している状態であっても結晶内部には溶液または余剰水分が液相状態で残っていると考えられる。また、Fig.7とFig.8を比較すると、濃度が高くなり、結晶の生成密度が高い条件であるFig.8の方が結晶と液相との境界がはっきりしたものになることが分かった。Fig.8の結晶と液相が共存する付近では比較的低温のままであり、液相の少ない核生成付近で高温となっていることが分かる。

4. [本研究調査事業の成果]

酢酸ナトリウム三水和物の相変化について、過冷却度と溶液濃度をパラメータとして変化させ、結晶成長速度・液相の非定常対流速度分布・相変化時の過渡的な内部温度分布について可視化的手法を用いて検討した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 酢酸ナトリウムの濃度が高い、または過冷却度が大きいほど、酢酸ナトリウム三水和物の結晶成長速度が速い。結晶は針状結晶であり、結晶の間を流れる対流が観察される。

(2)

過冷却度が大きく、濃度が高いほど容器内に発生・発達する対流速度が速い。ただし、一定以上結晶成長速度が大きくなると、潜熱によって溶液内に発生する上昇流が十分に発達する前に凝固が完了するため、浮力対流の発生・発達の確認が困難になる条件が存在する。

(3)

燐光トレーサー粒子を用いることで潜熱蓄熱材の相変化時の温度場を定量的に測定できる。相変化物質の温度場と速度場を同時に測定することで詳細な相変化時の結晶の挙動を観察することができる。

5. 委員会活動への影響

今回の研究調査において委員会活動へ影響した点についてご記入ください。

今回の研究調査において委員会活動へ影響した点についてご記入ください。

これまで伝熱技術部門委員会のシンポジウムの他、委員会会合にて情報共有を進めてきた。基盤技術の伝熱委員会として新たな測定法を確立することで、新たな分野での活用等、委員会活動の巾が広がり、活性化が期待できる。

6. 今回の研究調査結果について、発表方法を下記より選択してください（複数回答可）。

- 会誌への記事掲載（__年__月号を予定）
 春季大会オーガナイズドセッションでの発表（2018年春季大会を予定）
 春季大会フォーラムでの発表（__年春季大会を予定）
 シンポジウムでの発表（2018年__月を予定）
 出版物の発行（印刷物、CD-ROM）（__年__月頃の発行を予定）
 その他（具体的にご記入ください）

--

7. 受給額と執行額

受給総額	800,000 円
執行総額	800,000 円

費目	使用例	実際の使用内容	予算額(円)	執行額(円)
印刷製本費	資料印刷費、複写費、編集外注費、CD製作費など			
諸謝金	原稿料			
通信運搬費	運送用レンタカー代、宅配料			
委託費	外部への委託費			
開発費	システム開発費			
資料購入費	参考資料、書籍等購入費			
物品購入費	実験に必要な部品類など			
消耗品費	燃料代、実験に必要な消耗品類	熱電対固定具、温度コントロールシステム、電源他	800,000	800,000
臨時雇用費	アルバイト代			
その他				
合計(円)				800,000

以上