

TED Plaza

多機能性流体の創成と流れ場の定量計測



石井 慶子

中央大学 准教授
 理工学部精密工学科
 大学院理工学研究科精密機械工学専攻
 k.ishii@mech.chuo-u.ac.jp

1. はじめに

あらゆるエネルギー変換では熱損失が発生し、全てのエネルギーは最終的に熱になり宇宙空間に散逸する。このため、熱はエネルギーの墓場とも言われている。熱の有効活用は省エネルギー社会の実現に重要であるが、100度以下程度の低温排熱はほとんど利用されず捨てられている。一次エネルギーを用いた火力等の発電において、エネルギーの半分程度は熱損失となる一方で、配電された電力の半分程度は給湯や空調などに使用される。エネルギー輸送の面で仕方がない一方で、使われずに放出される熱を必要な場所で使用できれば省エネルギー社会に有効であると言える。

エネルギー輸送の高機能化によって、廃熱を有効利用する技術の発展が望まれている。このため、熱利用や機器の高効率化のため、先行研究では作動流体に機能性を付与する試みがなされてきた。

感温磁性流体は室温域の磁場下で温度差があると磁力の非平衡が発生し、自発的に駆動するため、動力の必要ない冷却デバイス・廃熱で駆動するポンプへの応用が期待されている。しかし従来の磁性流体の作成には磁性材を数 nm にしたうえで、粒形を揃える必要があり、大量生産が難しい。また、表面化学特性により、更に高濃度に分散させたい場合は、分散媒に制限がある。高濃度に安定分散可能な作動流体は主にケロシンであり、これは液体として熱伝導率が高くない上、可燃性があることから高温になる装置の冷却に使用するには安全面での懸念がある。微小な粒子は磁場下で界面力によって強固に結びつき、アスファルト状の詰まりが発生する。磁性流体は黒色不透明であるため、内部の流動を水のように粒子画像速度計測法 (PIV: Particle Image Velocimetry) で把握できない。このため、作動上の問題点が明らかにしにくく実用化に至っていない。

このように、機能性流体は内部を連続体として扱いづらい側面がある。流体の数値シミュレーションは混相、非ニュートン流体について万能ではなく、これらの発展のためにも実験的な流動特性データの取得は重要である。しかしながら、これらを定量的に計測する例は多くない。

そこで、筆者は機能性流体の創成を行うとともに、この可視化計測を行うことで実現を目指す研究を進めている。まだまだ道半ばではあるが、研究のコンセプトやこれまでの研究結果について紹介したい。

2. 複数機能を持つ流体の合成とその特性

そこで、筆者と共同研究者らは、任意の物質をマイクロカプセル中に封入することで、動力なしで動き、かつ複数の材料を同時にドーピングさせることで、蓄熱輸送等を実現する多機能性を持つ冷媒の実現を目指している。材料開発を行うとともに、流れ場の可視化計測を行うことで、実現を阻んでいた流動特性を明らかにするという両軸で研究を行っている。

これまで筆者が合成したカプセルを SEM と光学顕微鏡で捉えた画像を図 1 に示す。カプセルに

封入することで、多機能性を持たせることができ、従来までに問題となっていた合体やアスファルト状の詰まりを防ぐことができる。カプセルに封入しても、磁場印加時にはチェーン構造をつくることわかる。これまでポリマーを骨材としたカプセルと、無機材料のみで作成したカプセルの合成に成功している。(Ishii, et al., 2023, 2019)

特に低融点金属であるガリウムを相変化物質として利用することで、更に熱伝導率の高い無機カプセルの合成に成功している。外殻を無機シリカとすることで、機械的強度、耐久性が向上し、かつ熱伝導率を高めることができる。水に対し、カプセルを 1 wt%の割合で分散させ熱伝導率を計測したところ、ガリウムと磁性粒子のコンポジットカプセルは $0.659 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、ガリウムのみのカプセルは $0.694 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ となった。これはそれぞれ、水に対して 9.5, 15.3%熱伝導率が向上していると言え、先行研究のナノ流体と比較しても平均的な値である。このため、本カプセルは熱伝導率の高いナノ流体としても使用が期待できる。

ガリウムと磁性粒子のコンポジットカプセルについて、蓄熱性能も調べた。示差走査熱量測定計を用いて計測を行ったところ、マイクロカプセルは 31.5°C で融解し、 17.3°C と 13.1°C で凝固ピークが生じた。すなわち、それぞれ $14.2, 18.4^\circ\text{C}$ の過冷却が確認された。ガリウムは非常に大きな過冷却を有する事が知られており、これは粒径を小さくするほど大きくなる事が報告されている。バルクのガリウムは 12°C 程度の過冷却を持つことが一般的である。Kumar らはマイクロからサブミクロンサイズのカプセルで 43.9°C から 49.2°C の過冷却を報告している (Kumar, et al., 2015)。山口らは 35 nm のガリウム粒子の過冷却度を 114.1°C と報告している (Yamaguchi, et al., 2015)。Parravicini らは $3\text{--}15 \text{ nm}$ のガリウム粒子で -183°C にしても過冷却解消が見られなかったことを報告している (Parravicini, et al., 2015)。マイクロカプセル化の工程でガリウムに酸化被膜が形成されることで過冷却が上昇する可能性が指摘されている。本研究のカプセルはマイクロからサブマイクロサイズの大きさであるが、Kumar らの先行研究と比較しても過冷却の大きな改善に成功した。これはカプセルの調整過程でアルカリ溶液を使うことから酸化が抑えられたほか、シリカ被膜によっても酸化が抑えられたことによる効果であると考えている。マイクロカプセル化を行うことで、ガリウムの過冷却を低減し、相変化蓄熱材料としての可能性の拡張が期待できる。

磁性流体の安定分散性は粒径が小さいほど高まる一方で、磁化は低下するトレードオフの関係がある。磁性材が大粒径でも良くなるため、磁性粒子の大量生産が容易になる。もちろん粒径が変わることで、従来の磁性流体などと比較して分散性の低下や、液体と個体の一体性に変化が生じるため、この特性をよく理解する必要がある。

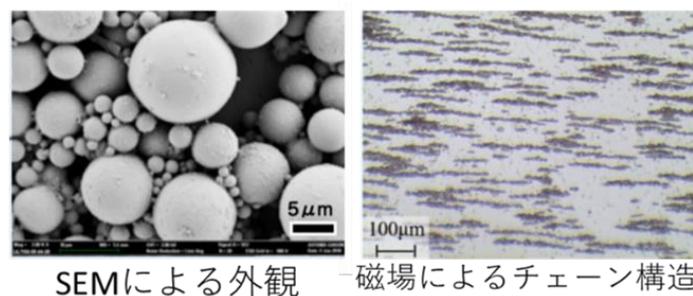


Fig. 1 Appearance of micro-particles. Left: SEM image; Right: Microscope image.

3. 流れ場の可視化計測

3.1 実験方法

磁性流体中の強磁性粒子は黒色かつ微細であるため、粒子個々の可視化が困難であり、磁場供給時における粒子の凝集現象および流動特性の詳細な理解はされていなかった。そこで、著者らは、マイクロカプセルを蛍光標識することで、蛍光顕微鏡を用いて磁場供給時におけるカプセルの流動を定量的に観察することに成功している。マイクロカプセルは磁性流体内の粒子と比較して粒子径が大きくなり、蛍光という機能を加えることで、顕微鏡での観察が可能となる。この蛍光剤をスカ

ラー応答性のあるものに変更すれば、流れ場だけでなく様々なスカラー場も取得することが可能である。

図2に本実験で用いた装置の概略図を示す。実験装置は金属顕微鏡 (Wraymer, BMJ-3400TL) 等の光学系統, シリンジポンプ, 磁場供給部を有する可視化流路, およびヒーターから構成される。シリンジポンプを用いて一定量(250, 500, 750, 100 $\mu\text{l/h}$)のマイクロカプセル溶液を流したのち, 蛍光染料の励起波長の LED 光源 (出力 30W) を流路観察面に照射した。照射光によって観察対象は励起され蛍光を発生し, 4 倍の対物レンズを通してダイクロイックミラーとロングパスフィルターを透過しカメラで撮像される。対物レンズの NA 値は 0.3 であり, Martin の式から被写界深度を計算したところ 55.0 μm であった。レンズの焦点位置によって, $Z=0, 0.5 \text{ mm}$ の断面を観察した。

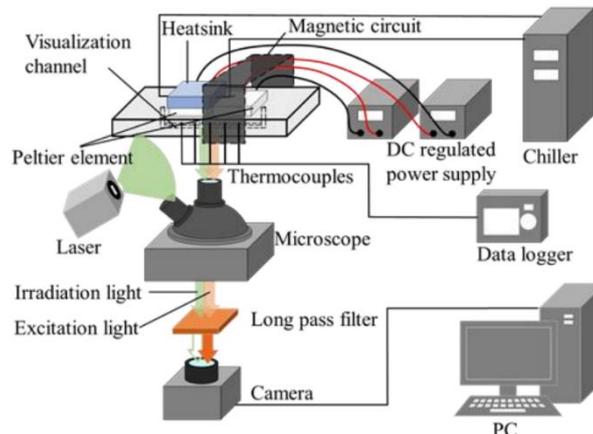


Fig. 2 Experimental system.

これまで、水槽を水平加熱した自然対流、強制対流、閉流路中の熱磁気対流などの可視化計測を進めている。本記事では、もっとも基本的な強制対流場での流れについて得られた結果の一部を紹介する。

3・2 強制対流場での磁場による対流

図3は、取得された粒子画像の例である。1 mm の流路の中に磁性カプセルの懸濁液が満たされており、粒子の輝度パターンが確認できる。十分な精度で PIV が行える画像である。

図4は、PIV 解析を行った結果である。左は磁場なし、右は磁場ありである。磁場を印加しない場合、一般的なポワズイユ流れ様の速度分布が確認できる。一方、磁場を印加すると、対称性があった流れが変化し、速度のピーク位置が磁場に引き寄せられることがわかった。

図5は、壁面近傍の粒子画像と、その速度分布である。壁面近傍には、磁性クラスターが付着していることがわかる。そして、これは磁石より上流側を観察しているため、磁場が最も強い場所に向かってクラスターが移動することがわかった。熱交換器は、温度境界層を薄くすることが効率の向上に重要である。クラスター制御を最適にすることで、より効率の高い磁性流体デバイスの開発が期待できる。また、磁性流体の強制対流冷却では、交流磁場のオンオフによって熱伝達性能が向上することが報告されているが、このように壁面近傍にクラスターが発生し、解除されることによって熱をより効果的に輸送することが示唆される。(Ishii, et al., 2022)

図6は、最も磁場が強い位置でのクラスターの様子である。磁場が強い位置では、クラスターが集積し、流れないことがわかる。このクラスターが疑似的な壁面となり、強制対流の場合は流速が早くなった。時間と共にクラスターは増える。こうなると、磁場の強い位置ではよく熱を運ばない可能性がある。先行研究では、加熱部に磁場を加えると最も熱伝達効率が高まることが報告されるが、熱により磁化が低下することで、クラスターが堆積しにくくなるためだと考えられる。温度場や磁場のデザインを適切にすることで、磁性粒子を用いた冷却システムの高度化が期待できると考えている。

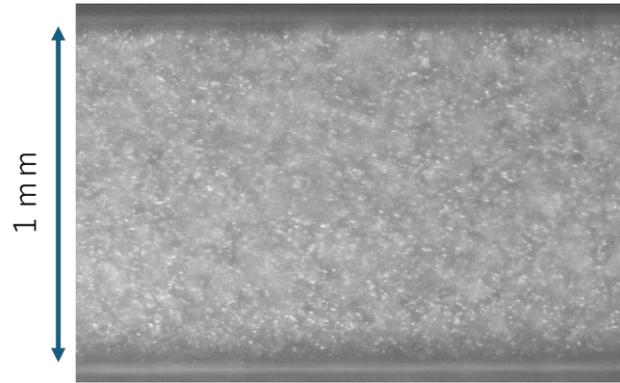


Fig. 3 An image of the measurement area captured by a CMOS camera. (25 °C, without magnetic field)

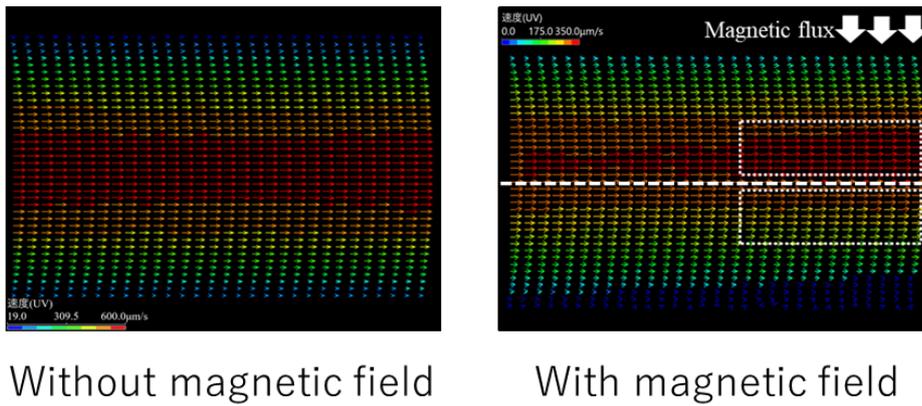


Fig. 4 The calculated velocity distribution.

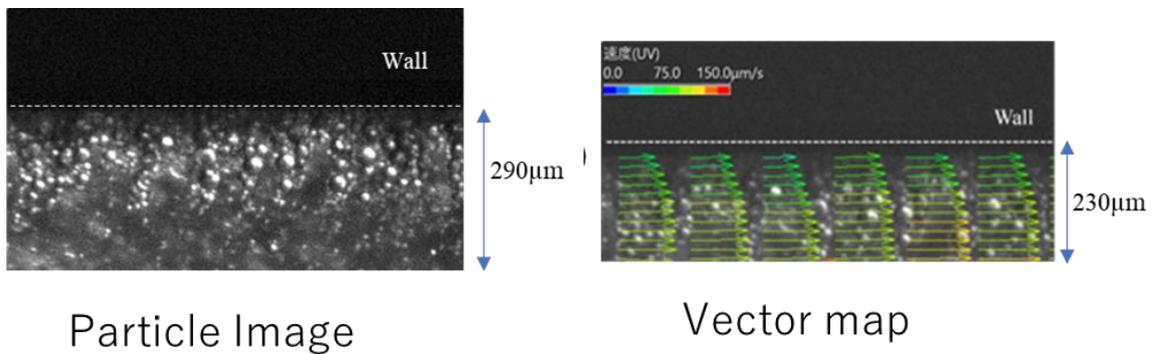


Fig. 5 The dynamics of the cluster near a wall.

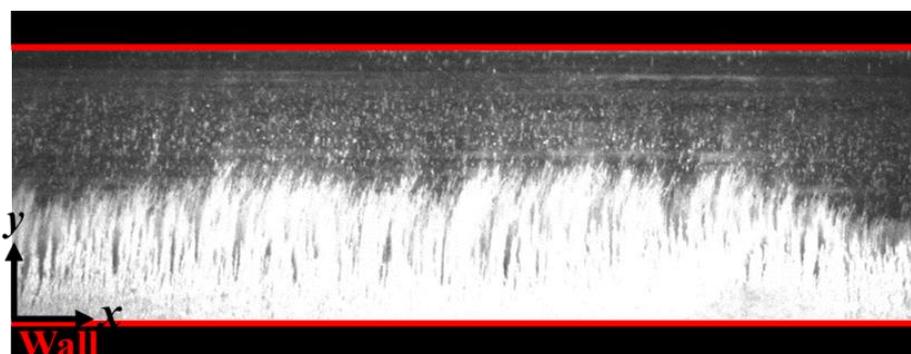


Fig. 6 The stuck clusters near a wall (maximum magnetic field point).

4. おわりに

本稿では、磁性粒子を含んだ多機能型流体を創生し、その可視化計測を行った研究について紹介した。こうして過去の研究結果を振り返りながら原稿を書いていたら、年月の過ぎる早さに対して研究の進捗が遅いと感じ、焦るばかりである。今後の自分の頑張り、学生たちに期待したい。

謝 辞

本研究は、筆者が2017年度から2022年度まで在籍した青山学院大学の麓研究室で実施されました。学位論文とともに研究を行った学生、麓耕二先生に謝意を表します。また、磁性粒子についてはイチネンケミカルズからご提供いただきました。ここに謝意を表します。

文献

- Ishii, K., Aizawa, R., Fumoto, K., Synthesis of temperature-sensitive magnetic microcapsules and visualization of the cluster formation, *Magnetics Letters*, Vol. 10(1) (2019), 8107704.
- Ishii, K., Kawayama, K., Fumoto, K., Synthesis and evaluation of high thermal conductivity magnetic heat storage inorganic microcapsules simultaneously containing gallium and magnetic nanoparticles by sol-gel method, *Journal of Energy Storage*, Vol. 59 (2023), 106426.
- Ishii, K., Ogura, K., Fumoto, K., Optical visualization of the formation behavior of magnetic particle clusters in a forced convection field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 556 (2022), 169433.
- Kumar, V.B., Porat, Z., Gedanken, A., DSC measurements of the thermal properties of gallium particles in the micron and sub-micron sizes, obtained by sonication of molten gallium, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 119 (2015), pp. 1587-1592.
- Parravicini, G.B., Stella, A., Ghigna, P., Spinolo, G., Migliori, A., D'Acapito, F., et al., Extreme undercooling (down to 90K) of liquid metal nanoparticles, *Applied Physics Letters*, Vol. 89 (2006), 033123.
- Yamaguchi, A., Mashima, Y., Iyoda, T., Reversible Size Control of Liquid-Metal Nanoparticles under Ultrasonication, *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 54 (2015), pp. 12809-12813.