

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14077

研究課題名（和文）あらゆる作動流体に適応可能な微小領域における温度速度場定量可視化手法の開発

研究課題名（英文）Development of quantitative visualization method of temperature and velocity field in micro scale applicable to all working fluids

研究代表者

石井 慶子 (Ishii, Keiko)

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号：80803527

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、エネルギー機器内の流体の温度速度場を正確に計測する技術の確立を目的としている。高輝度感温微小粒子の合成及びこれを用いた3次元温度速度同時計測手法を開発した。初期段階では、非定常場及び混相場で使用可能な二色蛍光粒子の合成を行い、温度変化に応じた発光スペクトルの強度変化を利用して測定を行った。昨年度、RGBカメラを用いた発光強度分布の計測から、非定常場での同時計測の可能性を示した。最終年度は、実測試験により1. 当たり1%の温度感度を持つことを確認し、場所に応じた校正を実施した。この研究成果は、不透明流体や複雑な流れの分析に応用可能であり、工学分野での広範な利用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、エネルギー機器内の流体の温度速度場を精密に計測する新技術を開発し、エネルギー効率の向上に貢献する。高輝度感温微小粒子を用いた三次元同時計測手法により、不透明流体や複雑な流れの解析が可能となる。この技術はエネルギー消費削減及び環境負荷低減に寄与し、工学分野での広範な応用が期待される。これにより、学術的及び社会的意義が極めて高い。

研究成果の概要（英文）：This study aims to establish a technique for accurately measuring the temperature and velocity fields of fluids within energy equipment. It developed a method using high-brightness temperature-sensitive micro-particles for simultaneous 3D temperature and velocity measurements. Initially, bi-color fluorescent particles were synthesized for use in transient and multiphase fields, leveraging changes in emission spectrum intensity with temperature changes. Last year, the potential for simultaneous measurements in transient fields was demonstrated using RGB cameras to capture emission intensity distributions. This year's results confirmed a temperature sensitivity of 1% per 1°C, with necessary calibrations performed based on location. This research is applicable to the analysis of opaque fluids and complex flows and is expected to be broadly useful in engineering fields.

研究分野：流体工学

キーワード：流れの可視化 熱工学 光学計測 流体工学

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

エネルギー機器の効率を向上させるために、内部流体の温度速度場の正確な把握は重要である。熱交換機器などの高効率化には微細な管を持つものが多く、温度と流れが密接に関連する複雑な非定常流れ場となる。従って、これらの温度と流れを個別ではなく同時に測定する技術が求められている。既存の測定法として、マイクロPIV法が確立されているが、これは2次元または3次元の速度場の測定に特化している。一方、レーザー誘起蛍光法は温度場の測定に特化している。しかし、温度と速度の両方を同時に測定する技術は未確立であり、共焦点顕微鏡を用いた2色レーザー誘起蛍光法のような3次元温度分布計測法は非定常場の測定には適さない。既存の方法では、任意断面の温度分布の正確な測定や温度速度の同時計測は難しく、微小領域の測定には技術的限界があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、感温センサーを封入した機能性マイクロ粒子を合成し、微小領域における3次元温度速度同時計測手法を確立することである。特に、任意の物質を封入できる特性を活用し、不透明液における流動様相の解明にも取り組む。

本研究の独自性と創造性は、感温性マイクロ粒子を用いることで既存の測定技術の限界を打破し、微小領域での任意断面の3次元温度速度場計測を可能にする点にある。粒子の外殻材を適切に選ぶことで、任意の流体に適用できる計測法が確立できる。また、相変化や濃度変化がある流動場でも高精度な計測が期待できる。

3. 研究の方法

マイクロ粒子の合成：高輝度で温度応答性を持つ燐光分子を封入した機能性マイクロ粒子を合成し、粒子のサイズや形状、外殻材などを調整して測定対象の流体特性に適合する粒子を製造した。

染料は温度に依存する感温染料と、温度に依存しない不感染料の2種類を同時におなじ粒子に混合することで作成する。この2色の比をとることで、温度計測を行う。従来の単色では、励起光強度のムラや濃度の違い、流れによる粒子の不均一性などにより計測精度が落ちる問題があった。2色の比をとることによって、これらのノイズをキャンセルすることが可能である。このような2色法はLIF法で広く用いられてきたが、水にのみ適応が可能であった。粒子に混合させようとする先行研究は存在したが、粒子に吸着させて、作動流体側に漏らさないようにすることに困難があり、十分なシグナルによる計測が叶っていない状況であった。本研究では、これまで検討例のない染料を多く適応することで、よい組み合わせを見つけることとした。

実際に合成した粒子のスペクトル計測結果が図1である。感温染料にPtTFPP、不感染料にFM105を用いている。それぞれの発光スペクトルは十分に離れており、温度依存性を持つことがわかる。

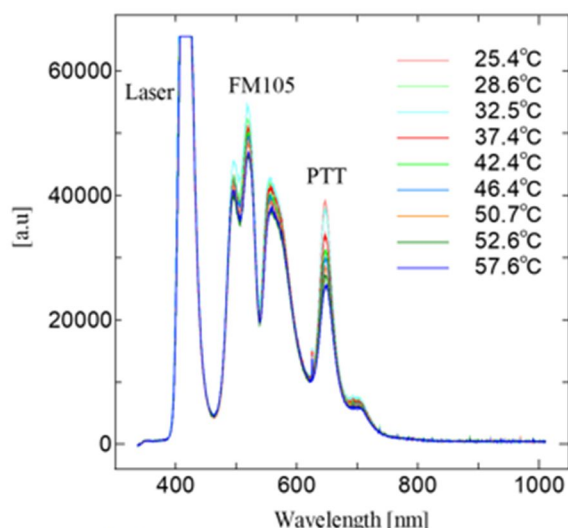


図1 合成した粒子のスペクトル特性

温度・速度の測定技術の開発：合成したマイクロ粒子を微小流路や内部構造を持つ装置内に流し、粒子から発せられる2種類の波長の光を2台のカメラで同時に撮影することで、同一断面で温度と速度の分布を同時に取得した。(図2)得られた画像の例が図3である。一般的な低価格 CMOS カメラで撮影したが、十分な輝度値の粒子画像が得られており、高輝度な粒子の合成に成功したことがわかる。一方で、より輝度値の改善が求められる。

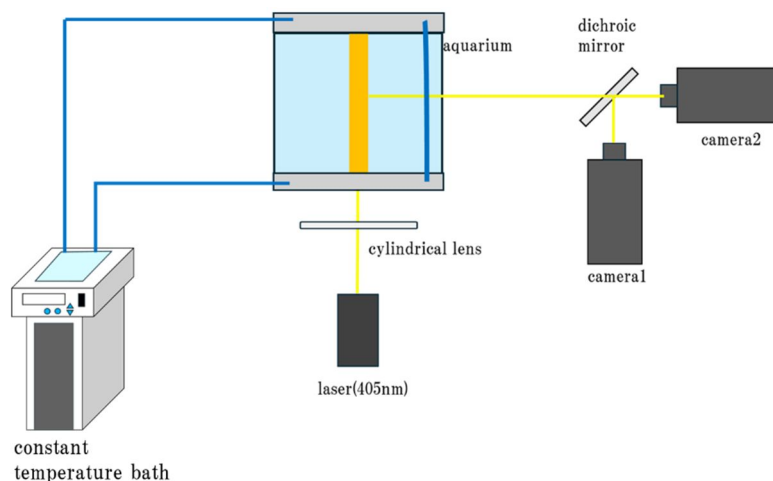


図2 分光計測システム

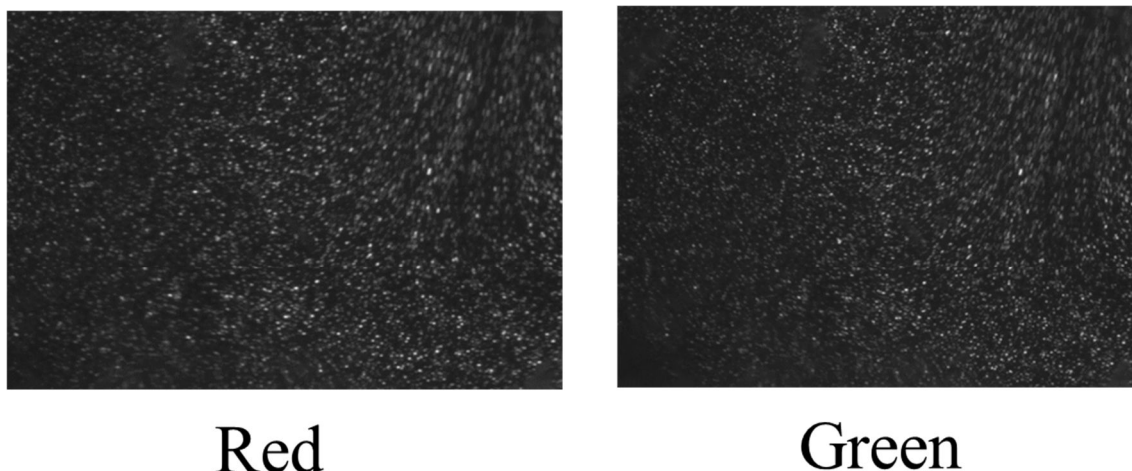


図3 得られた画像

2次元温度・速度計測の確立：取得した画像データを解析し、2次元の断面上で温度と速度の同時計測を行い、複数の断面データを組み合わせることで流路全体の温度・速度分布を把握した。

4. 研究成果

本研究の成果は、エネルギー機器内部の流体温度および速度場を同時に精密計測する技術の確立により、機器の効率向上に貢献した点にある。従来技術では困難であった微小領域での温度および速度計測を可能にするため、本研究では高輝度感温性微小粒子を用いた新たな測定手法の開発を目指した。

初期段階においては、非定常場や混相場においてスカラー場を定量するため、二色蛍光粒子を合成し、温度および速度の同時計測手法を構築した。一方の蛍光剤は温度により発光強度が変化し、もう一方の蛍光剤はリファレンスとして機能する。これにより、温度および速度場の同時計測が可能となった。

昨年度の研究では、蛍光粒子を含むマイクロカプセルの合成に成功し、RGBカメラを用いて発光強度分布を測定することにより、高感度での計測が可能であることを確認した。

この成果は、特に非定常場での利用に効果的であり、機器の設計や評価において

高い応用性を持つ。

本年度は、実際の流体動力的環境での応用を視野に入れ、二台のカメラによる光学システムを構築し、二色蛍光粒子を用いた実測試験を行った。その結果、温度変化に対する感度が 1 あたり約 1%と非常に高いことが確認された。また、測定位置によって感度比が変化するため、場校正を精密に行うことで計測精度を向上させた。

以上の研究により開発された手法は、不透明な液体や複雑な流体の流動様相を定量的に解析する新たな手段を提供し、エネルギー機器にとどまらず多様な工学分野における応用が期待される。特に、微小領域での精密測定が可能な点から、微細加工技術やマイクロ流体デバイスの開発に貢献するものと予想される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fumoto Koji, Ishii Keiko	4. 巻 228
2. 論文標題 Flat plate pulsating heat pipe operating at ultra-low filling ratio	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 120468 ~ 120468
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2023.120468	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishii Keiko, Kawayama Kosuke, Fumoto Koji	4. 巻 59
2. 論文標題 Synthesis and evaluation of high thermal conductivity magnetic heat storage inorganic microcapsules simultaneously containing gallium and magnetic nanoparticles by sol-gel method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Energy Storage	6. 最初と最後の頁 106426 ~ 106426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.est.2022.106426	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishii Keiko, Ogura Kazuki, Fumoto Koji	4. 巻 556
2. 論文標題 Optical visualization of the formation behavior of magnetic particle clusters in a forced convection field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 169433 ~ 169433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2022.169433	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishii Keiko, Ohno Yoshiko, Oikawa Maiko, Onishi Noriko	4. 巻 41
2. 論文標題 Experimental visualization of expiratory diffusion under face-to-face situation with utterance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the Visualization Society of Japan	6. 最初と最後の頁 21 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3154/tvsj.41.21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大高 裕矢、石井 慶子、麓 耕二	4. 巻 22
2. 論文標題 感温塗料を用いた自励振動型ヒートパイプ 内部における温度分布および蛍光染料を用いた流動の同時計測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 67 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11395/jjsem.22.67	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keiko Ishii*, Kazuki Ogura, Koji Fumoto	4. 巻 In press
2. 論文標題 Optical visualization of the formation behavior of magnetic particle clusters in a forced convection field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 In press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 石井慶子
2. 発表標題 複雑熱流体現象への可視化計測実験によるアプローチ
3. 学会等名 日本伝熱学会中国四国支部 & 中四国熱科学・工学研究会 秋の特別講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Otaka, K. Ishii, K. Fumoto
2. 発表標題 The Simultaneous Visualization of Flow and Temperature inside a Pulsating Heat Pipe Using Temperature-sensitive Paint
3. 学会等名 The 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki OGURA, Keiko ISHII, Koji FUMOTO
2. 発表標題 Visualization of clusters in fluorescent magnetic microcapsule dispersions under forced convection
3. 学会等名 Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rikuto SHIMODA, Yuya OTAKA, Koji FUMOTO, Keiko ISHII
2. 発表標題 Simultaneous Measurement of Two-Dimensional Temperature Distribution and Flow Inside a Single Channel Simulating Pulsating Heat Pipe
3. 学会等名 Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ishii Keiko, Omata R., Otaka Y., Fumoto K.
2. 発表標題 Measurement of two-dimensional Temperature Distribution and point Pressure inside Pulsating Heat Pipe Using Temperature-sensitive Paint
3. 学会等名 the Joint 20th International Heat Pipe Conference and 14th International Heat Pipe Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荻山 貴弘, 石井 慶子, 小方 聡, 仁科 勇太, 麓 耕二
2. 発表標題 グラフェンシート懸濁液の熱物性に及ぼす調整過程 の影
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部 第28期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 一野 瑠偉, 石井 慶子, 麓 耕二
2. 発表標題 低伝熱速度を実現する複合材料の開発
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部 第28期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日巻 雅喜, 石井 慶子, 麓 耕二
2. 発表標題 Self-rewetting 溶液中に生じる気泡微細化現象のメカニズム解明
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部 第28期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三股啓一郎, 石井慶子, 麓耕二
2. 発表標題 磁性ナノ粒子を用いた癌の温熱治療法における生体局所加温 特性に関する検討
3. 学会等名 第32回 バイオフロンティア講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大貫凌河, 石井慶子, 麓耕二
2. 発表標題 ガリウムマイクロカプセルスラリーの調製と対流実験による熱輸送評価
3. 学会等名 第 10 回潜熱工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川山昂祐 , 石井慶子, 麓耕二
2. 発表標題 磁性粒子と相変化物質を封入したマイクロカプセルの合成とその観察
3. 学会等名 第 10 回潜熱工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 亮, 石井 慶子, 麓 耕二
2. 発表標題 温度差を有する場の感温磁性マイクロカプセル分散液パッシブ流動の可視化
3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田 健吾, 石井 慶子, 麓 耕二
2. 発表標題 摺動を利用した往復振動流の熱輸送評価
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口 史人, 石井 慶子, 麓 耕二
2. 発表標題 平板型マイクロ自励振動型ヒートパイプの熱輸送性能に及ぼす冷却条件の影響
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮川 滉平, 石井 慶子, 内田 龍貴, 尾畑 聡史, 麓 耕二
2. 発表標題 熱交換セクション比率の変化による扁平自励振動型ヒートパイプの熱輸送特性 - 凝縮部及び蒸発部面積の場合 -
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小倉 一起, 石井 慶子, 麓 耕二
2. 発表標題 蛍光磁性マイクロカプセルが形成するクラスター構造の可視化と強制流動場における流動特性
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大高 裕矢, 石井 慶子, 麓 耕二
2. 発表標題 感温塗料を用いた自励振動型ヒートパイプ内部における熱流動の可視化
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 磁性流体用粒子, 磁性流体および磁性流体の製造方法	発明者 石井慶子	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-28510	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Keiko Ishiiのページ
<https://sites.google.com/view/keiko-ishii/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------