

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20686014

研究課題名(和文) ミクロナノ・スケール熱流動の革新的レーザ計測法の開発

研究課題名(英文) Development of the innovative laser technique for the micro- and nano-scale thermofluid phenomena

研究代表者

川口 達也 (KAWAGUCHI TATSUYA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40376942

研究成果の概要(和文)：

本研究では環境技術に必要な微粒子含む分散系二相流の熱物質移動現象のダイナミック計測システムを開発した。分散粒子群による光散乱の詳細を実験により解析した。1  $\mu\text{m}$ 以下の気泡の溶解促進が初めて動的に観察された。相変化を伴う移動現象の動的センシングをkHz以上の時間分解能にて行い、蒸発過程にある液体の詳細な計測を行った。イオン液体を用い電子顕微鏡下での粒子画像流速測定手法を確立し、メソ・ナノスケール熱物質移動現象の解明に必須の流動センシング技術を構築した。

研究成果の概要(英文)：

In the present research, the innovative measurement systems for the dispersed two-phase flow fields was developed. The laser light scattering by the sphere was analyzed. Bubble dissolution process, which diameter is below several micrometer, was firstly investigated. The system was also applied to the measurement of the behavior of evaporating liquid hydrocarbon with high temporal resolution beyond several kHz. Moreover the meso- and nano-scale particle image velocimetry technique in vacuum was newly developed by means of the scanning electron microscope in conjunction with an ionic liquid.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	16,600,000	4,980,000	21,580,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：熱工学, 流体工学, レーザ計測, エネルギー全般, 光散乱, 混相流, 干渉画像法

## 1. 研究開始当初の背景

燃料の微粒化、蒸発に関連する気液または液々界面での熱物質移動現象を論ずる際にその論拠となす処は、分子スケールに比してマクロ的な時空間スケールの大きい測定結果をもとに、アナロジーからモデルを構築して数値計算などに使用して来た。従来よりも更に微視的メカニズムへの考慮に立ち戻って議論を展開するには、諸量をそれぞれのパラメータに影響を受けない、直接に面・空間の温度・濃度の時間的ゆらぎまでを高時空間分解能にて実際に計測し、諸因子間の相関関係を直接的に調べる手法を確立することが必要となる。現在までに流動中を運動する液滴・気泡などの分散粒子のダイナミック測定を可能とするレーザ散乱イメージングシステムに関する研究が盛んに行われて来ており、開発途上である干渉画像法の計測原理の理論的検証や手法の実験的検証、さらには噴霧場の解析について研究代表者は国内外の研究者らと積極的な情報交換を行い、関連業績などの多くを参照されるに至っていた。

従来の測定法は、燃料噴霧など液滴のマクロ的な現象を主たる対象としていたが、近年では超微細気泡流れにも応用が可能であるという理論的検証を本研究では先駆けて行い、将来的には医療生体計測分野への応用、化学反応、食品衛生、水質制御や環境負荷低減などへの応用が必要とされていた。特にキャビテーションやソノルミネセンス発光など、非定常かつ高い時間分解能が要求される物理現象の解明には、高時空間分解能を有する測定法の開発が不可欠とされていた。蒸発や凝縮、気泡の生成や消滅に代表される、マイクロ・ナノ領域におけるレーザ解析手法開発によるインパクトは、熱機関の効率化に留まらず、集積回路内の選択的熱輸送や、生体内の局所選択加熱治療、機能創生マイクロチップの設計、狭隘流路内の分子流動制御などの幅広い分野に波及するものと考えられ、これら微細な機能性流体制御素子を的確に設計するためには連続体仮定の適用が困難となるマイクロ以下の領域での熱流動構造の解析が必要となる。さらにマイクロ・ナノスケール固有の移動拡散現象を積極的に利用して効率の向上、および新たに発現する機能創生熱流体デバイスの開発が期待されている。即ち分散粒子の挙動のみならず相互干渉する連続相に関するナノスケールの詳細な実験データを得ることができれば、これまでブラックボックスとして近似的なモデルとして扱ってきた移動現象に対する重要な知見が得られることになることが確実視されていた。

## 2. 研究の目的

枯渇性資源である化石燃料を大量に採掘・消費する現行のエネルギーシステムは、長期的にはその代替手段の構築が必要であることは言うまでも無いが、先進国・途上国の短期的な産業社会の発達においては当面、化石燃料の大量使用は回避され得ず、熱機関に対してより一層の効率向上、排出ガスのクリーン化が要求されている。特に電力用や車輦用に用いられる熱機関に対しては、その量的な普及度から、一層の効率改善と有効利用が喫緊の課題とされている。

近年の国際的な環境政策のもとでは、化石燃料からの効率的なエネルギー変換のみならず、排出されるガスの環境負荷低減を同時に達成することが必須要求であるため、液体燃料の素早い微粒化および相変化に関連する混相流の熱物質伝達と、最適な燃料-酸素の混合気生成から燃焼へとつながる化学変化プロセスとの、一連の流体・伝熱現象の基礎過程解明の重要性が益々増大していた。他方、微細な気泡を含む流れは水質浄化や流体抵抗低減などの従来からの応用分野の波及効果の拡大が現実化しており、基礎研究の成果が出始めている段階にあったと言えるが、メソスケールおよびナノスケールにおいて顕在化すると予測されていた電気化学的な性質については理論的な予測にとどまり、実験におけるモデルの実証および工業応用にむけた基礎現象の理解はなかなか進んでいないのが現状であった。

そこで本研究では、含粒子流体、所謂混相流対象として、ミクロスケールからナノスケールにかけての熱物質移動挙動の実験的解明を行う事を目的とした。燃料の液滴噴霧に代表される濃密な微小粒子が乱流中に分散飛翔する場の計測においては、超高速度レーザ撮影光学系を構築し、いままで一定時間の統計的性質を調査するに留まっていた蒸発過程についての理解を一步進めるための実験的手法の開発を行った。他方、微細気泡の測定においては、光学観察の限界に近い数マイクロメートルからサブマイクロメートルスケールでの気泡挙動の観察に主眼を置き、今なお不明な点が多く残されている気泡のブラウン運動の観察や、気泡表面の電気的性質の気泡径依存性について高い確度と精度を有する計測手法を開発することを目的とした、即ち、真に現象を凍結して測定可能とする革新的レーザ計測法の開発および実流動場への適用を目的とした。

## 3. 研究の方法

従来利用されて来た液滴や気泡の粒径速度

同時測定手法である位相法 LDV (レーザドップラ流速測定法) では、測定点を通る粒子の速度と径を同時に高空間分解能にて計測することができるが、乱流や非定常系などにおいて、従来の統計値に基づく総括的な方法論では、問題の内包しているダイナミクスを的確に把握できないが故に限界があった。本研究で開発する手法が従来のレーザ計測法と異なる独創的な点は、高速発振可能なレーザ共振器によるイメージングシステムの開発に依るところが大きい。レーザ複合センシング技術を基盤としてミクロスケールにて顕在化する移動現象の解明を目的として多パラメータを同時に非接触で、しかも点計測ではなく面・空間的広がりのある領域の観察が可能なレーザ計測システムの構築により、複雑系流動の移動現象メカニズムに関する多くの知見が得られる。

#### 4. 研究成果

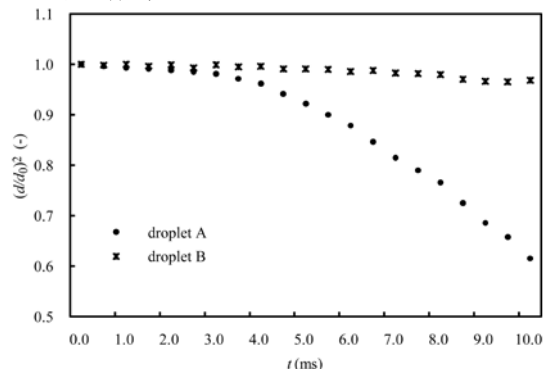


図 1: 加熱気流中を飛翔するエタノール液滴の無次元直径の時間変化. 蒸発速度の異なる環境中に置かれた初期径  $30.0 \mu\text{m}$  の液滴の挙動をマイクロ秒オーダーで比較している.

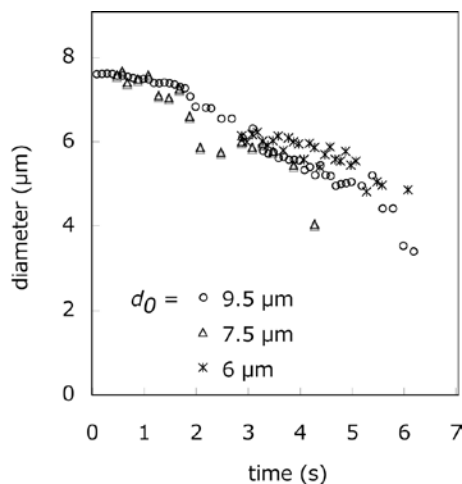


図 2: 飽和酸素溶液中に溶解する酸素気泡の直径変化. 気泡微細化により内圧が上昇し、数秒以内に加速度的に収縮が起こる様子を時々刻々捉えている.

研究成果の一例として、図 1 は加熱空気中において蒸発過程にある直径 30 マイクロメートルのエタノール液滴を最高 250 マイクロ秒おきに画像中に捕捉、その直径を時々刻々と画像により計測した最新の測定結果であり、蒸発速度の異なる条件において計測した結果を比較している。この結果は従来用いられてきた統計的な径や、時間をかけて測定装置を空間トラバースし得られた量ではなく、真に単一液滴が流体中を飛翔する姿を連続的に捉えた初の結果である。図 2 には酸素で飽和させた水中に存在する酸素気泡の径の変化を示す。微細気泡の内圧上昇により局所非平衡となり、加速度的に溶解が進行する様子が時系列で得られた。本手法により従来の単純な画像計測を超えるマイクロ・ナノスケール領域での流動および熱物質移動を実験的に捉えることが出来、当該スケールでの新機能デバイス開発に必要な現象解明に不可欠である物理モデルの検証や、数値計算予測モデルの妥当性検証に必要な実験データを提供することが初めて可能となった。本研究は工学研究の分野創成に寄与しうる革新的な熱流体レーザ計測法の開発を行ったものであり、本研究成果の工学および工業分野への寄与は大きい。

#### 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)

[雑誌論文] (計 2 件)

①齊藤卓志, 川口達也, 佐藤勲. 可視化観察による熱インプリントプロセスの特徴把握と実験的考察, 電気学会論文誌E, 電気学会, Vol. 130, No. 8, pp. 356-362, 2010, 査読有.

②齊藤卓志, 井手慎之介, 伊藤浩志, 安原鋭幸, 川口達也, 佐藤勲. ポリプロピレン薄肉射出成形品のウェルドに関する研究, 成形加工, Vol. 20, No. 10, pp. 776-780, Sep. 2008, 査読有.

[学会発表] (計 3 7 件)

①Takushi Saito, Tatsuya Kawaguchi, Isao Satoh. "Formation of Electro-Conductive Part on Polymeric Material Surface by CO2 Laser Irradiation", *The 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, AJTEC2011-44455. pdf, 2011. 3. 13-17, Hotel Marriott Waikiki.

②Tomohiro Sekiguchi, Tatsuya Kawaguchi, Isao Satoh, Takushi Saito. "Electric Charge of Micro and Nano Bubbles by

Interferometric Laser Imaging Technique”, *The 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, AJTEC2011-44612.pdf, 2011.3.13-17, Hotel Marriott Waikiki.

③神岡紀明, 川口達也, 佐藤勲, 齊藤卓志. マイクロバブルのゼータ電位及び径に与える発生条件・界面活性剤の影響, 日本混相流学会年会講演会, 2010.7.17-19, 静岡大学工学部.

④Takushi Saito, Tatsuya Kawaguchi, Isao Satoh. “Distribution Measurement of Refractive Index in Injection Molded Transparent Products by Interferometric Computer Tomography”, *The 9th Asian Workshop on Polymer Processing*, pp. 366-369, 2010.12.7-10, Hotel Nikko Hanoi.

⑤ Takushi Saito, Tatsuo Kurebayashi, Tatsuya Kawaguchi, Isao Satoh. ” A Study on New Transmission Laser Welding Utilizing Moisture Adsorption of Amorphous Polymeric Material”, *The Polymer Processing Society 26th Annual Meeting*, R02-410.pdf, 2010.10.20-23, Hotel Polat Renaissance Istanbul.

⑥Tatsuya Kawaguchi, Isao. Satoh, Takushi. Saito, Hiroshi Ito. ” PIV analysis of Melt-Transcription Molding Process”, *The 8th International symposium on particle image velocimetry*, PIV09-0074, 2009.8.25-28, Langham Hilton Hotel.

⑦Tatsuya Kawaguchi, ISAO SATOH, TAKUSHI SAITO. ”Novel interferometric laser imaging for spray and microbubble sizing - one of the successful Mie scattering applications”, *The workshop Mie Theory 1908 - 2008: Present developments and interdisciplinary aspects of light scattering*, 2008.9.15-17, University of Halle-Wittenberg.

⑧ Takushi SAITO, Isao SATOH, Tatsuya Kawaguchi. ”Micro Molding System for Thermoplastic Materials Using Strong Ultrasonic Wave”, *The Asian Workshop on Polymer Processing (AWPP2008)*, 2008,8.26-29, Tokyo institute of technology.

⑨Tatsuya Kawaguchi, Isao SATOH, Takushi SAITO. ”Visualization of microscale bubbles in fluid by interferometric laser imaging technique”, *Proceedings of the*

*13th International Symposium on Flow Visualization*, 2008.7.1-4, Nice convention center.

〔図書〕(計3件)

①川口達也「気液混相流の画像計測, 流体の画像計測法の基礎から最先端まで」, 社団法人可視化情報学会, 2010, 120頁.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川口 達也 (KAWAGUCHI TATSUYA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 40376942