

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04223

研究課題名(和文) 固体表面近傍でのコロイド粒子挙動が固液間伝熱へ及ぼす影響の解明

研究課題名(英文) Investigation of solid-liquid interfacial heat transfer influenced by the complex mobility of colloidal particles in the vicinity of a solid wall

研究代表者

白井 克明 (Shirai, Katsuaki)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00634916

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：液体に微粒子を分散させたナノ流体など熱輸送コロイドを念頭に、固体壁との境界面近傍の粒子運動を実験的に調べた。粒子速度計測には、壁面から液中に僅かに浸透するエバネッセント波を用いた2種類の光学計測装置を構築した。実験では粒子を混ぜた試験コロイドを矩形試験流路に流し、回折限界を超える壁面から約200 nm以内の領域で計測を実現した。計測結果から、粒子は概ね周囲の平均的な流れに追従すると分かり、ブラウン運動の影響とみられる流速変動が観察された。さらに平均流速が蛍光粒子の輝度値に基づく線形近似の予想を上回る結果が得られ、粒径に基づく影響で想定よりも深い位置の粒子からの信号が一部で得られたと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子機器では回路集積化により発熱密度が増加し、高効率な冷却が求められる。微粒子を添加したコロイドは単層液体のみと比べ伝熱性能の向上が期待され、流動性を有するため、熱輸送媒体として注目される。しかし伝熱に関わる領域は壁面から粒径程度の極薄い領域で計測は容易ではない。本研究では壁面からコロイドへ僅かに浸透するエバネッセント波に基づく2種類の光学計測を構築し、壁面から約200 nm程度の領域で粒子速度計測を実現した。計測結果から、粒子速度が周囲流体の平均的な流れに追従しブラウン運動の影響を確認し、本手法を用いた現象の計測に加え、理論やモデル構築に繋がる基礎データ取得に活用可能なことを示唆した。

研究成果の概要(英文)：Motions of small particles dispersed in liquid were investigated in the interfacial boundary region between solid and liquid related to heat transferring colloids including nanofluids. For the measurement of particle velocities, two different optical systems were built based on evanescent waves penetrating from a solid wall to test colloid. In the experiment, test colloid with dispersed particles was flown into square-shaped test section and the measurement was accomplished in the region within about 200 nanometers from the solid wall beyond the diffraction limit. From the results, the particles seem to flow with the average velocity of the surrounding fluid exhibiting fluctuating velocities based on Brownian motion. The average velocities exceeded the prediction based on the linear regression of the fluorescence irradiance of the particles, which indicates the signals came from the region deeper into the test liquid than it was expected originally.

研究分野：熱工学

キーワード：コロイド 電気運動学 固液境界 ブラウン運動 マイクロ・ナノスケール ナノ流体 計測 近接場光

1. 研究開始当初の背景

液体に微粒子を分散させたナノ流体や相変化エマルションを念頭に、熱輸送コロイドの分散粒子の挙動と伝熱特性の関連性に着目した。分散粒子は平均的に周囲の流れに追従するとともに、個々の粒子はブラウン運動を含めて荷電状態に基づき複雑な電気運動学的挙動を示す。壁面近傍の流れは伝熱と密接に関わるため、本研究では特に固体壁近傍を流れる流体中の分散粒子の流動挙動に注目した。

従来研究では主に蛍光粒子を用いた顕微鏡観察から粒子挙動が調べられ、固体壁面に近づくにつれ、ブラウン運動に異方性が生ずることなどが報告されていた。また、顕微鏡観察の場合に得られる流速分布が撮像速度の影響や、蛍光顕微鏡観察ではトレーサー粒子としての蛍光粒子の添加による影響が報告され、回折限界により観測可能な粒径が限定される問題もある。

2. 研究の目的

熱輸送コロイドの分散粒子の複雑挙動に着目し、壁面近傍のみに存在するエバネッセント光を利用して粒子の運動速度を計測し、粒径の大きさと周囲温度場に基づく影響を把握することで固液境界面近傍における粒子挙動の解明を目的とした。計測にはエバネッセント光の干渉に基づくレーザードップラー手法(図1を参照)と、画像計測に基づく粒子追跡法による同時計測の実現を目指した。蛍光顕微鏡観察では、壁面での反射・散乱の抑制に蛍光粒子が使われるが、現象に対する影響が懸念された。そこで、非蛍光で粒径 $1\ \mu\text{m}$ 以下の球形粒子で計測可能な最小の粒径を調べる必要が生じた。画像計測では計測結果に対する撮像速度の影響が知られる。画像計測では撮像速度が限定されるが、レーザードップラー計測では高速サンプルが可能であり画像計測での撮像速度の影響を抑制できると考えられた。

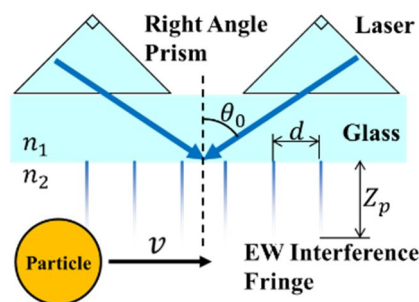


Fig. 1 Schematic of the laser Doppler measurement using evanescent light field at the interfacial boundary between solid wall and colloidal test liquid.

3. 研究の方法

(1) 試験流路と駆動方法

試験流路には試験コロイドを封入した高アスペクト比の矩形断面を有する二次元流路を採用し、試験部の片側は光学計測のためガラス板で作成し、固液境界面付近を観察可能とした。また、駆動方法には電場駆動または圧力駆動を用いた。電場駆動では閉鎖矩形流路の流れ方向の両端に電極を配置して電極間に直流電場を印可し、電気浸透と電気泳動の組み合わせによって駆動した。圧力駆動では PDMS で高アスペクト比の二次元流路を成形し、片側を計測用ガラス壁面で作成し、シリジポンプによる圧力駆動で試験コロイドを流した。当初は直流電場印加による電場駆動を主として用いたが、時間経過とともに流れの状態が変化する非定常性の問題があり、途中から圧力駆動に切り替えた。電気駆動・圧力駆動ともに試験コロイドには、粒径 $1\ \mu\text{m}$ 程度のポリスチレン粒子または蛍光粒子を水に分散させたものを利用した。

(2) 計測手法

計測法には、試験部のガラス壁面内でレーザー入射光を全反射させる際に試験コロイド側へ染み出すエバネッセント光を利用する 2 種類の手法を用いた。片方は、エバネッセント波の干渉を用いたレーザードップラー原理に基づき、ポリスチレン非蛍光粒子の通過によるドップラー周波数シフトから流速を計測した。もう片方は、エバネッセント光を照明光として利用する蛍光粒子の顕微鏡観察であり、粒子濃度を低く抑えた状態で個々の粒子を追跡に基づき流速を計測した。両手法とも、ガラス壁面からのエバネッセント光の浸透深さは、作動流体の屈折率を水と仮定した場合、約 $200\ \text{nm}$ と算出された。これは波長の半分未満であり、計測にエバネッセント光を用いることで、光の回折限界を超える空間分解能で壁面極近傍の流速計測を実現した。

4. 研究成果

(1) 計測手法の実現

計測システムとして、エバネッセント光を用いたレーザードップラー手法と粒子追跡手法を実現し、計測原理の成立をそれぞれ確認した。レーザードップラー手法では、ポリスチレン粒子の場合、非蛍光で最小粒径 $1\ \mu\text{m}$ 程度までは計測可能なことを確認し、それ未満の粒径では計測が難しかった。画像計測による粒子追跡では、蛍光粒子の場合に粒径 $500\ \text{nm}$ 程度までは十分に計測可能と分かり、さらに粒径の小さな蛍光粒子での計測も可能と考えられる。また、両手法による同時計測の実現を目指したが、両手法では計測の時間スケールが異なることから、現状では同時計測は困難なことが分かった。

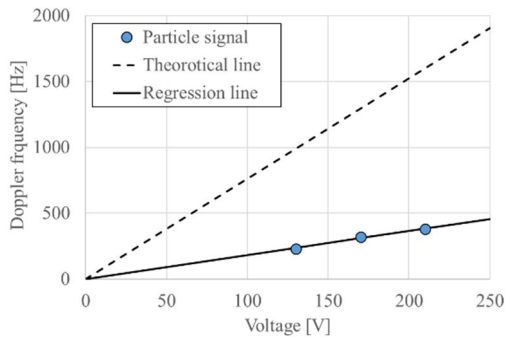


Fig. 2 Measured Doppler frequency with the induced electric field strength on the test colloid.

(2) 電場駆動による計測結果

矩形試験流路に試験コロイドとしてポリスチレン粒子を分散させた水で計測した。直流電場による駆動を用いた計測では、主としてエバネッセント光の干渉によるレーザードップラー手法を適用した。計測結果は図2のように印加電圧に応じたドップラー周波数(すなわち流速)が得られた。理論予想よりも低いのは、印可電場により計測中に粒子の凝集発生の可能性が考えられる。印可電場による粒子の凝集や流れの状態が時間的に変化するため計測時間が限られ、十分は計測サンプル数を得るのが難しく、粒子の通過頻度が極めて低いことが影響したと考えられる。

(3) 圧力駆動による計測結果

シリンジポンプによる圧力駆動を用いた矩形試験部の二次元完全発達流での実験では、主にエバネッセント光の照明による蛍光粒子観察に基づく粒子追跡手法を適用した。図3に典型的な計測結果として、設定流量 0.125 mL/min での流速分布を示す。図3(a)は粒子追跡の結果として得られた個々の粒子の流速分布で、図(b)は(a)のデータを縦軸スケール 0.2 毎に平均した速度分布と最小自乗近似直線を点線で示したものである。図の縦軸は、壁面を原点として壁面からの距離に相当するものである。これは蛍光粒子の単一粒径分布に加え、エバネッセント光が壁面垂直方向に指数関数的に減衰する事実に基づき、個々の粒子の蛍光強度を壁面での蛍光強度と見なされる最大蛍光強度で除して自然対数を取り負符号を取ったものである。壁面からの正確な位置ではないものの、粒子速度が壁面から直線的に増加する様子が図3(b)から分かる。壁面での滑り無し条件に関連して計測速度が零にならない要因は主として有限な粒子径に基づくものであり、蛍光が壁面側粒子表面での励起光によって得られたのに対して、粒子中心はさらに壁面から遠ざかる位置にあり、粒子はその位置での流速に追従して通過したと考えられる。

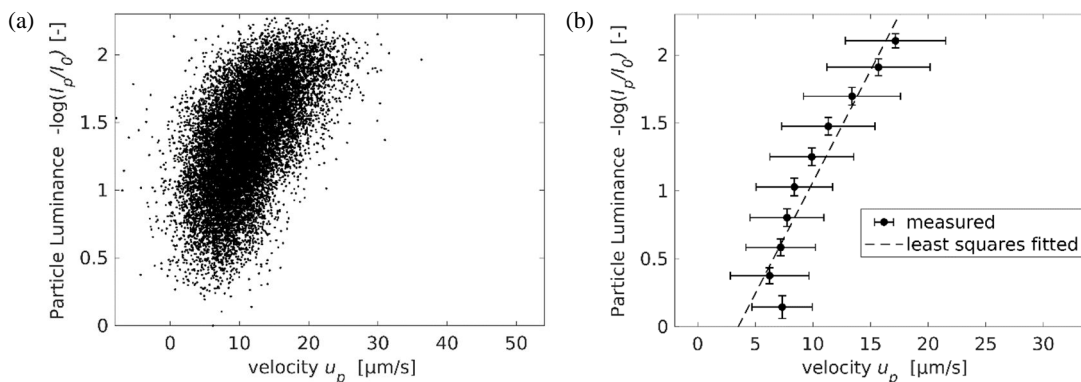


Fig. 3 Velocity distribution obtained by the particle tracking at the flowrate of 0.125 mL/min, (a) velocity distribution of the individual particle, (b) slot-averaged velocity distribution with measurement uncertainty shown as error bars and the least squares fit of the averaged velocity. The vertical axes indicate the wall-normal distance. The intensity of the fluorescence particle is normalized by the maximum intensity of the particles supposed to occur at the wall surface by assuming the mono-dispersity of the fluorescence particles and the exponential attenuation of the irradiance intensity of the evanescent light field.

(4) 今後の研究の展望

今後の研究では粒径と温度場による影響の評価が望まれる。また、レーザードップラー計測での蛍光粒子の利用と、画像計測での非蛍光粒子の利用可能性を検証すべきと考えられる。さらに、現状では困難な壁面からの粒子通過位置の把握に基づく慎重な検証が必要と考えられる。

< 引用文献 >

Katsuaki Shirai, Shoichiro Kaji, Shigeo Hosokawa, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa, Experimental investigation on the electrokinetic motions of colloidal particles at an interfacial boundary between solid and liquid, Proc. ASME-JSME-KSME 2019, 8th Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, USA, 2019, AJKFluids2019-5006.

Atsuhiko Kawaguchi, Kazuki Hirai, Issei Takeuchi, Shohei Matsumoto, Katsuaki Shirai, Measurement of fluctuating velocities of submicrometers colloidal particles close to a solid surface, 32nd International Symposium on Transport Phenomena, Tianjin/online, 2022, ISTP32-77.

Hideaki Kato, Kazuki Hirai, Kanji Maruyama, Katsuaki Shirai, Experimental observation of near-wall motions of colloidal particles based on particle tracking using with evanescent light illumination, 32nd International Symposium on Transport Phenomena, Tianjin/online, 2022, ISTP32-60.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Atsuhiko Kawaguchi, Kazuki Hirai, Issei Takeuchi, Shohei Matsumoto, Katsuaki Shirai |
| 2. 発表標題 Measurement of fluctuating velocities of submicrometers colloidal particles close to a solid surface |
| 3. 学会等名 32nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-32) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hideaki Kato, Kazuki Hirai, Kanji Maruyama, Katsuaki Shirai |
| 2. 発表標題 Experimental observation of near-wall motions of colloidal particles based on particle tracking using with evanescent light illumination |
| 3. 学会等名 32nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-32) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 矢島雅浩, 加藤英明, 平井華月, 白井克明 |
| 2. 発表標題 固体壁近くにおける蛍光粒子挙動の可視化と粒子追跡に基づく流速計測の試み |
| 3. 学会等名 日本機械学会 IIP2022 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 加藤英明, 白井克明 |
| 2. 発表標題 矩形流路内で電場駆動されたコロイド粒子挙動に関する可視化計測 |
| 3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Katsuaki Shirai, Takeru Hatanaka, Yuto Tateishi, Issei Takeuchi |
| 2. 発表標題 31th International Symposium on Transport Phenomena |
| 3. 学会等名 Experimental investigation of colloidal particle velocities in the region close to solid wall using evanescent light field (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Katsuaki Shirai, Shoichiro Kaji, Shigeo Hosokawa, Tsuyoshi Kawanami, Shigeki Hirasawa |
| 2. 発表標題 Experimental investigation on the electrokinetic motions of colloidal particles at an interfacial boundary between solid and liquid |
| 3. 学会等名 ASME-JSME-KSME 2019, 8th Joint Fluids Engineering Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|