

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01381

研究課題名(和文) 決定論と確率論を用いた空間連結モデルによる不連続性液体の対流伝熱特性の評価

研究課題名(英文) Evaluation of Convective Heat Transfer for Discontinuous Fluids Using Deterministic and Stochastic Theory Based Space Connection Model

研究代表者

巽 和也 (Tatsumi, Kazuya)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90372854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：現在、伝熱現象においてスケールが小さくなると全体の方向性を示す決定論に加え、"ゆらぎ"の確率論的要素を考慮する必要がある。本研究では、確率連結型ネットワーク構造を有するナノワイヤ群の熱伝導率や粒子混合流体の対流熱伝達率を求めめるため、2次元サーモフレクタンス法に基づくナノスケールの空間・時間分解能を持つ固体表面温度計測装置を製作してナノワイヤ群の2次元温度分布と伝熱特性、マイクロ粒子が流れるマイクロ流路の輸送特性、そして高分子流体流れの熱伝達率を高い精度で測定することに成功した。これにより、平均の熱伝導率・熱伝達率とともに連結部や粒子通過時等における時間・空間的変動特性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

センサ・電子デバイスに代表されるように、機器の小型化が進んでおり、その中の固体・流体・両者の界面での伝熱現象もマイクロ・ナノスケールで制御・理解することが求められる。微少化すれば、ブラウン運動のように確率的な"ゆらぎ"が事象にて発生し、従来の物理方程式から求まる決定論的要素と合わせて考慮する必要がある。本研究では、ナノワイヤから構成されるネットワーク構造体の伝熱経路・発熱や、マイクロ流路内のマイクロ粒子の輸送特性など確率論的な現象を、ナノの精度で温度計測・運動制御できる独自システムを用いて評価した。これらの知見とモデルは、今後のナノ・マイクロ・複雑系の熱流動システムの評価と設計に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：When the scale decreases in the heat transfer phenomena, stochastic factor of the fluctuation should be considered in addition to the deterministic factor which represents the overall direction. In this study, we developed a solid surface temperature measurement system based on two-dimensional thermo-reflectance method to obtain the thermal conductivity of the nano-wires dispersed on glass substrate and having network structure of stochastic connections. The measurement system has nano-scale time and spatial resolutions, and we measured the two-dimensional temperature distribution and heat transfer characteristic of nano-wire network, and also the transport characteristics of microchannel flow of micro-particle mixed fluid and heat transfer coefficient of dilute polymer solution. The time and spatial fluctuation characteristics caused by the wire connections and particle passing were evaluated using the stochastic functions and statistic analysis using Weibull distribution.

研究分野：伝熱工学

キーワード：決定論・確率論 2次元サーモフレクタンス法 マイクロ流路 対流輸送 伝熱特性 高分子流体 粒子流れ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は粘弾性流体流れによる物質輸送と伝熱促進技術の開発研究として、マイクロ流路内において高分子水溶液の対流熱伝達率、血流(血球流れ)と静脈血栓形成における壁面物質輸送について研究を行ってきたが、その中で混相・混合流体を用いた測定にて重要と考えたのは、高分子や蛋白等の寸法は 10-100nm であり、反応や伝熱の領域寸法は数 μm (血球は 2~20 μm , せん断境界層は~10 μm)ということである。高分子や蛋白の存在と位置により伝熱や反応経路は変化し連続体として扱えず、連結する構造として考えることが必要となる。このような現象は液体・対流だけでなく、固体の熱伝導においても見られる。例えばナノワイヤを無作為に散布した場合の伝熱経路はワイヤ同士の連結の状態により変化する。このように、確率的連結を有する流体や固体(構造体)における伝熱・輸送特性を表す数理モデルは見当たらず、現象の理解と機器の設計指針を示すために、モデルの開発とそれを実証するための実験が必要と考えた。

2. 研究の目的

本課題は、固体・液体において確率連結型の伝熱経路を有する場合の熱伝導・対流伝熱・輸送特性の計測と数理モデルの開発を目的とする。ナノワイヤが連結する構造体や、高分子・蛋白・ナノ粒子溶液では、nm~ μm のスケールで伝熱・物質輸送・反応の経路は確率論的な連結と“ゆらぎ”の特性を示し、現象は複雑となる。そこで構造体・流体・対流全体の平均特性等の決定論と連結・物質の“ゆらぎ”に基づく確率論を組み合わせた確率微分方程式および Weibull 統計分布を用いて空間連結と伝熱経路に関する数理モデルを構築する。計測では 2 次元 Thermal Reflectance Imaging (TRI) 法、センサ付設マイクロ流路、エバネッセント場と蛍光偏光法を用い、ナノワイヤ温度、壁面温度、壁近傍液体温度、粒子輸送に関する数 100nm 分解能の測定と制御を行い、現象解明およびモデル定数導出と妥当性検証を図る。

3. 研究の方法

確率連結型の構造を有する固体として、ナノワイヤを無作為に散布したナノワイヤ群について通電時の温度分布を測定し、連結部における通電および接触抵抗が、ナノワイヤ群全体の温度分布と伝熱特性に与える影響を検討した。さらに、対流伝熱特性の計測では、粒子流れの実験において粒子を整列して流すことで系統的なデータを得ることも必要であるため、誘電泳動力を用いた粒子整列機構の開発と導入も行った。ナノワイヤは線径 100nm の銀 (Ag) ナノワイヤを用いるが、その 2 次元温度分布を測定するには、数 10~100nm の空間分解能を持つ計測技術が必要である。そこで、研究代表者は Thermo-reflectance imaging (TRI) 法を用いた固体表面温度分布の計測装置を製作した。TRI 法は半導体の表面近傍の各材料層の温度や固体の熱伝導率の計測に用いられており、本装置はこれを 2 次元計測が可能な技術に発展させ、壁面温度分布を平面分解能 100~500nm、時間分解能~100ns (周期平均測定) で測定できるものにした。ラマン分光等と比較して空間・時間分解能が高く⁽¹⁾、金属・半導体各種の温度測定が可能である。実験では、Ag ナノワイヤをガラス基板に散布し、周期通電した場合について発熱と温度分布を測定した(図 1 参照)。

また、流路を用いて基板表面を粒子混合流体・血球・高分子流体が流れる場合に粒子運動の制御と計測、流路壁の熱伝達率の測定を行った。粒子制御には、時間・空間にわたり周期的に粒子に誘電泳動力を付加することで整列する機構を開発し、粒子の通過タイミングを制御することで測定精度の向上を図った。これらに加え、エバネッセント場と申請者が開発した蛍光偏光法を用いて壁面から 50~100nm 厚さの領域の温度と伝熱特性を連携研究者の栗山とともに求めた。

4. 研究成果

図 2 (a)-(c)にナノワイヤ群とナノワイヤに周期的に通電し、温度が最大となる位相での温度分布を示す。図 2 (d)と (e)には、温度変化量の確率密度分布と Weibull 分布を曲線回帰した場合のグラフを示す。ナノワイヤ群の温度分布測定に成功するとともに、連結により通電および伝熱機構に不均一性が発生し、通電量に応じて分布特性が変化する。これは、Weibull 関数を曲線回帰した場合での各係数でも示すことが可能である。さらに、倍率を上げた場合での温度計測を行い、1 本のナノワイヤとそれと交わる他のナノワイヤの温度の非正常特性を測定することで、ワイヤの熱物性とナノワイヤ間の接触熱抵抗の見積りに成功した。

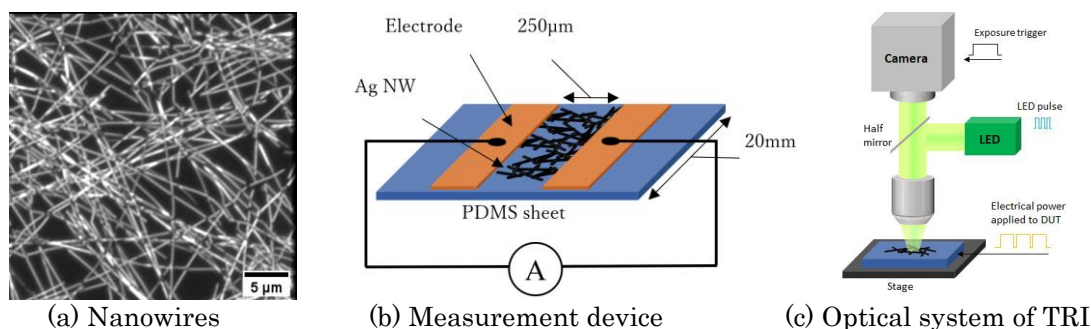


Fig. 1 : Schematic of nanowires (device) and TRI system for temperature measurements.

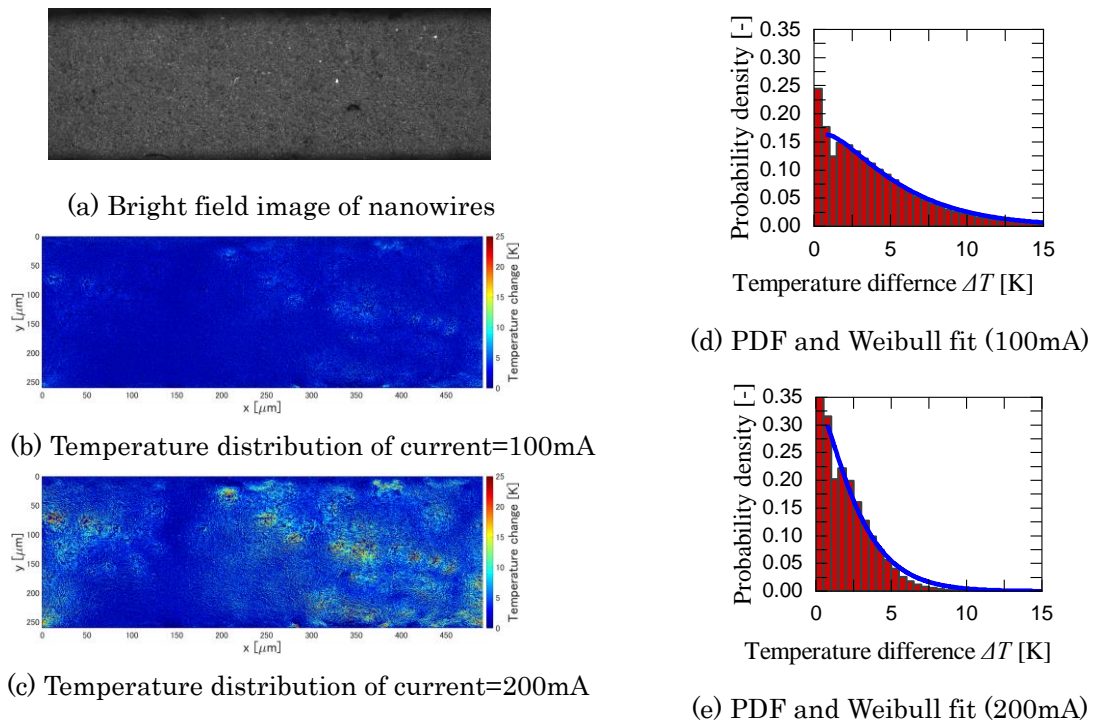


Fig. 2: Temperature distribution of nanowire network structure of current applied case, and probability density function of temperature difference and Weibull fitting.

図3に、流路を流れるマイクロ粒子を Boxcar 型電極を用いて時間と空間にわたり周期的に誘電泳動力を作用して整列する様子を示す。上流ではランダムに流入した粒子が等間隔に整列し、さらに速度と通過タイミングを数 10nm と数 μ s の精度で制御できる技術を開発した。図に示す粒子輸送特性に関する確率密度分布から、その制御精度および“ゆらぎ”の確率論的な特性が読み取れる。本デバイスによる異なる粒径および流速に対する粒子の輸送・運動特性の確率密度分布をそれぞれ求め、決定論と確率論的な要素の評価を行った。これにより、壁面熱伝達率測定において粒子がランダムに流れる場合、整列して流れる場合、ブラウン運動の可否、についてそれぞれの条件を制御することが可能となり、計測精度の向上につながる。

図4にマイクロ流路を流れる粒子と赤血球の数密度分布・運動特性・輸送（拡散）特性の測定結果と求めた解析モデルを示す。微小領域における粒子と赤血球同士の衝突（連結）と輸送特性の現象を明らかにするとともに、実験と解析の一致が示すように、妥当性の高いモデルの開発に成功した。このモデルは、さらに国際共同研究として数値計算に応用展開し、その有効性を発表した。この他に高分子流体であるポリアクリルアミド水溶液を用いて流れ場と熱伝達率分布を測定し、いくつかの無次元量を用いることで、異なる濃度のポリアクリルアミド水溶液でもヌッセルト数に対して良好な相関が得られることを示した。これは2次流れ等の流動特性を表せられることに加えて、壁面近傍の高分子による応力の発生と変動に関する特性を一定量評価できているからである。これについては数値解析により追加の評価を行っており、2022年度に論文を投稿する予定である。

(1) H. Jiang, S. H. Shin, X. Liu, X. Zhang, and M. A. Alam, IEEE Electron Device Letters, Vol. 38, No. 4 (2017), p. 0741-3106.

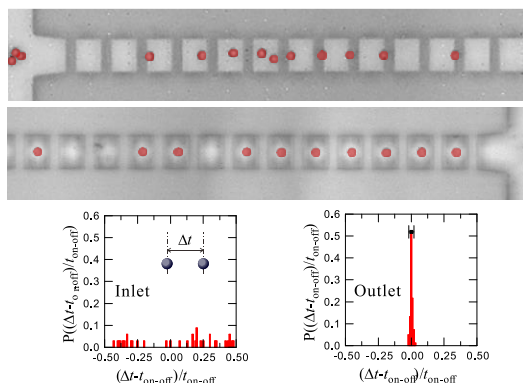


Fig. 3: Particle alignment and probability density distribution of particle properties.

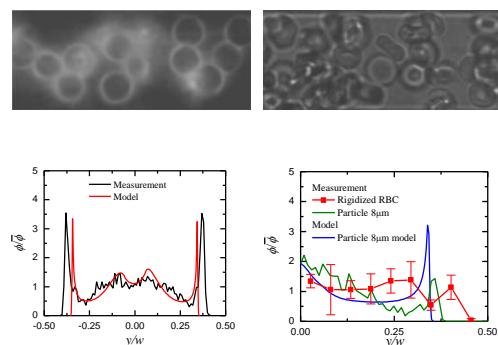


Fig. 4: Particle and cell distribution and transport in microchannel flow.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tatsumi Kazuya, Noguchi Shinnosuke, Tatsumi Akira, Kuriyama Reiko, and Nakabe Kazuyoshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Particle and rigidized red blood cell concentration distributions in microchannel flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 082006 ~ 082006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5111201	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 Tatsumi Kazuya, Nagasaka Wataru, Kimura Ryuichi, Shinotsuka Naoaki, Kuriyama Reiko, Nakabe Kazuyoshi	4. 巻 138
2. 論文標題 Local flow and heat transfer characteristics of viscoelastic fluid in a serpentine channel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 432 ~ 442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.173	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 Tatsumi Kazuya, Kawano Koki, Shintani Hiromichi, Nakabe Kazuyoshi	4. 巻 91
2. 論文標題 Particle Timing Control and Alignment in Microchannel Flow by Applying Periodic Force Control Using Dielectrophoretic Force	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Analytical Chemistry	6. 最初と最後の頁 6462-6470
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.analchem.8b04821	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 Tsuchikawa Shogo, Kuriyama Reiko, Sakanaka Ikuya, Enya Takeshi, Tatsumi Kazuya, Nakabe Kazuyoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Change of flow structure and heat transfer performance of photosensitive micellar solutions with light irradiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 171 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12572-018-0216-y	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 HONMA Renato, TATSUMI Kazuya, KURIYAMA Reiko, NAKABE Kazuyoshi	4. 巻 86
2. 論文標題 Particle separation and alignment technique in microchannel flow by dielectrophoretic force using boxcar-type electrode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00117	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 Tatsumi Kazuya, Noma Atsushi, Honma Renato, Kuriyama Reiko, Nakabe Kazuyoshi	4. 巻 25
2. 論文標題 Particle timing and spacing control in microchannel flow by applying periodic force over space and time	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microfluidics and Nanofluidics	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10404-020-02416-5	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 Chandran Krishna, Dalal Indranil Saha, Tatsumi Kazuya, Muralidhar Krishnamurthy	4. 巻 285
2. 論文標題 Numerical simulation of blood flow modeled as a fluid- particulate mixture	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 104383 ~ 104383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnnfm.2020.104383	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 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 K. Tatsumi, W. Nagasaka, N. Shinotsuka, R. Kuriyama and K. Nakabe
2. 発表標題 Flow and Heat Transfer Characteristics of Viscoelastic Fluid in a Serpentine Channel
3. 学会等名 The 8th International Workshop of Energy Conversion (IWECC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Chandrana, I. Saha Dalal, K. Tatsumi, and K. Muralidhara
2 . 発表標題 Numerical Simulation of Blood Modeled as a Fluid-Particulate Mixture
3 . 学会等名 The 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Tatsumi
2 . 発表標題 Microfluidic Convection - Convective Transport Control of Particles in Microchannel Flow
3 . 学会等名 2nd Transport Phenomena Seminar (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 A. Noma, K. Tatsumi, R. Kuriyama, K. Nakabe
2 . 発表標題 Evaluation of Particle Motion Characteristics in Microchannel Flow Alignment System with Ladder-type Electrodes
3 . 学会等名 6th Micro and Nano Flows Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Tatsumi, S. Noguchi, A. Tatsumi, R. Kuriyama, K. Nakabe
2 . 発表標題 Particle and Red Blood Cell Concentration Distributions in Narrow Microchannel Flows with Wall Effects
3 . 学会等名 6th Micro and Nano Flows Conference (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Tatsumi, A. Noma, R. Honma, R. Kuriyama, and K. Nakabe
2. 発表標題 Timing Control and Alignment of Particles in Microchannel Flow Using Dielectrophoretic Forces
3. 学会等名 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC 2019) (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
研究協力者	栗山 怜子 (Kuriyama Reiko) (70781780)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

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		
インド	IIT Kanpur		