

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01262

研究課題名（和文）ヒト血管系由来のネットワーク型対流伝熱機構の数理モデル構築

研究課題名（英文）Development of mathematical model of network-type convective heat transfer system derived from human circulatory system

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） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：サーモリフレクタンスイメージング法に基づくナノスケールの温度計測技術を構築し、その技術と数値計算を組み合わせることにより、ナノワイヤネットワークの電流経路と接点抵抗分布および発熱・温度・伝熱特性を明らかにした。そして分布と全体特性について確率論に基づいた電流・伝熱の数理モデルを開発した。ネットワーク流路では、流路閉塞と沸騰による流動・圧力損失・伝熱特性への影響を検討し、現象理解と数理モデルの開発には決定論と確率論の両方を考慮する必要があることを示した。これらの知見とモデルをヒト血管系の流れと輸送特性に適用し、血管分布と伝熱特性の解明を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では熱機器における伝熱・流れの現象を考えるとときに決定論的解法に確率論的「事象」と「ゆらぎ」の概念を加えることで、空間および時間軸にわたり現象の理解と解析の精度を高めている。電子デバイスで用いられるナノワイヤネットワークの電流・温度・接点抵抗・伝熱の分布の計測に成功し、電流・熱の経路の生成の特性解明と数理モデルの開発を行った。また、マイクロ流路での確率事象である流路閉塞や沸騰を伴う場合の流動・伝熱の時間発展特性を調べ、確率論に基づく解法と大きく異なることを示し、決定論と確率論の連成解析が必要であることを示した。これらの知見と技術をもとにヒト血管流れでの解析とモデル化を進めている。

研究成果の概要（英文）：We developed a nanoscale temperature measurement technique based on thermo-reflectance imaging, and combined this technique with numerical calculations to successfully obtain the current path and contact resistance distribution, as well as the heat generation, temperature, and heat transfer characteristics of nanowire-networks. Mathematical models based on probability theory were developed for the distribution and overall characteristics of electric current and heat transfer. The effects of clogging and boiling in the network-type channel on the flow structure, pressure drop, and heat transfer characteristics were investigated. We applied the finding and models obtained from these measurements and simulations to the flow and transport characteristics of the human vascular system, and are working to elucidate the vascular pattern and heat transfer characteristics.

研究分野：熱工学

キーワード：サーモリフレクタンスイメージング ナノワイヤネットワーク マイクロ流路 電流と接点抵抗 粒子
流れ 沸騰 確率論

1. 研究開始当初の背景

恒温動物の代謝による内部発熱と体表面での放熱を考えた場合、面積と体積の関係から体寸法と代謝の関係は $2/3$ 乗で効くべきであるが、実際は $3/4$ 乗則に基づく。これは血管による物質輸送と圧力損失、もしくは動脈・静脈間の熱交換により説明できるとされているが、法則が簡単な形であるにも関わらず、その理由は未だ解明されていない。また、ヒト体温(深部体温)も高い精度で一定温度に制御されることを我々はよく知っている。本研究代表者らは、これらの生物における温度制御の法則とメカニズムを理解できれば放熱・温度制御技術へと応用可能であり、工学的にも意義が深い知見が得られるとして研究を行っている。その過程で血管系のようにネットワークを構成する構造体・流路の伝熱特性と温度制御の物理法則を理解しモデル化するためには、流路の節、断面積、数密度、流量、温度、熱流束、熱伝導が与える影響をコンパクトな数理モデルで表す必要があると考えている。

対流伝達率の促進や、対流による物体の加熱と冷却および流体同士の熱交換等の伝熱性能の向上は伝熱工学の基礎となる技術の1つであり、古くから研究がなされ、数多くの知見と技術が確立している。また、人体の温度特性と熱物性に関する知見は医学の分野で収集されており、ヒト血管系の物質輸送特性の解明は医学とバイオの分野にて先端研究として精力的に行われている。しかしながら、ヒト血管系による人体の温度制御や先に述べた $3/4$ 乗則に関しては、特に熱物理・伝熱工学の観点では解明および理論の実証がされていない。さらに、血管系のような複雑系ネットワーク構造体の伝熱特性の評価と数理モデルに関する研究も少ない。本研究は、決定論と確率論の解法を組み合わせることで、このようなネットワークと確率連結構造を有する構造体の伝熱と温度制御特性に関するモデル化できると考え、実験的検証を交えながら新しい技術の開発や現象の解明を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、ネットワーク構造を有する流路の対流伝熱により、物体内の熱と温度を高い効率、安定性、信頼性で制御できる技術の実現に向けて、数理モデルの開発と設計指針の提示および実験・数値解析的検証を行い、ひいては、これらの知見と手法に基づいてヒトの体温調整の原理解明を目指すことを目的とする。ヒト体温は、血管系の対流伝熱により空間・時間的に高い精度で制御されるが、その寸法の異なる流路から構成されるネットワーク構造と伝熱特性について、決定論的性質を持つ幹流路と“ゆらぎ”の確率論的性質を持つ微小流路網を組み合わせたときの確率微分方程式およびWeibull統計分布を用いて数理モデルを構築する。実験ではネットワークを構成する伝導体とマイクロ流路について、サーモリフレクタンスイメージング法、赤外線サーモグラフィカメラ、マイクロ粒子イメージ流速計(PIV)法、蛍光偏光法等を用いて流速、流量、壁面温度、流体温度、圧力損失の測定を行い、流路構造に対する流動と伝熱特性の評価、信頼性の評価、そしてモデル定数導出と妥当性検証を行う。これによりネットワーク型の対流伝熱機構の解明と新しい伝熱制御技術に向けた流路設計の指針を示し、さらにヒト血管系の伝熱と温度制御の法則と原理の解明を目指す。

3. 研究の方法

本研究ではネットワーク構造の構築とモデル化には決定論と確率論的視点を融合して行う。決定論的要素と“ゆらぎ”の確率論的要素を組み合わせた場合の確率微分方程式を解くことで、“太い(幹)”経路(動脈・静脈に対応)と“微小”経路(細脈・毛細血管に対応)の経路寸法および分布と流れ・伝熱・圧力損失との関係を求めることを目指す。また、経路・流路内に確率事象として発生する抵抗・閉塞・沸騰等が局所と全体の空間・時間的特性に与える影響を検討する。これに加えて、流れ・温度・伝熱の特性を評価するには、ネットワーク構造体での流れ・温度・熱輸送の空間と時間分布を表す数理モデルと指標が必要であるが、本研究では個々の事象が鎖状に連結するときの鎖全体の寿命を表す非定常の確率統計関数であるWeibull分布等を活用する。これらのモデルを組み合わせ、ネットワーク構造を有する構造体の相互の空間連結と分布に関する“ゆらぎ”の確率過程を解いて、統計的解釈と融合することで伝熱と流動特性の総合評価と数理モデルの構築を進める。

研究対象は電子デバイス分野におけるナノワイヤネットワーク構造体であり、その構造体での電流・接点抵抗・発熱量・温度・伝熱量を計測する。計測には2次元温度計測技術であるサーモリフレクタンスイメージング法を構築して用いる。流れの系では格子状流路等、確率連結構造・ネットワーク構造を持つマイクロ流路について、粒子流れにおける流路閉塞や沸騰等の確率事象が流動・圧力損失に与える影響を実験的に明らかにすることを目指す。そして実験結果を考察しつつ、数理モデルの開発と実験への適用を行った。

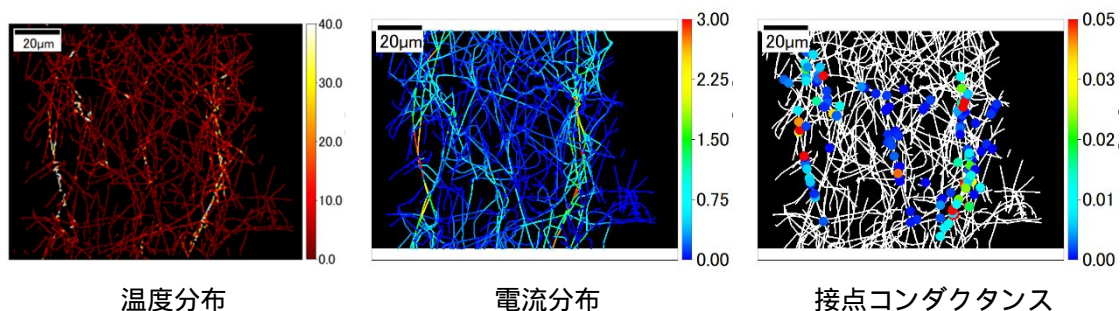
4. 研究成果

4.1 ナノワイヤネットワーク構造体

ガラス基板の電極間に銀ナノワイヤ(線径120-150 nm、長さ20-50 μm)を散布して生成した

ナノワイヤ(NW)のネットワーク構造体に電気を流したときのNWの温度分布をサーモリフレクタンスイメージング法で計測し、数値解析と組み合わせた逆問題解析により電流分布と全接点の接点抵抗を求めることに成功した。これにより、NWネットワークの温度・電流分布が一樣ではなく、電流が特定の経路で流れることを明らかにした。そして、接点抵抗の値がばらつき、そのばらつきが経路を決める重要な要素であることを示した。図1にNWネットワークの温度分布(計測)、電流分布、接点コンダクタンス(抵抗の逆数)の分布をそれぞれ示す。

また、NWネットワークの全体抵抗を計測、数値計算、理論モデルにより求め、それぞれでNWの散布密度に対する関係を求め比較を行った。NWの散布密度がある程度高い場合は、三者とも近い分布を示した。NWの散布密度がさらに高い場合は、実験にてNWは3次元構造を構成し、計算とモデルの結果と比較して抵抗値が増大した。一方、NWの散布密度が減少し、パーコレーション臨界密度に近づくとき実験と計算の値はモデルより大きな値を示し、乖離も大きい。また、実験と計算の結果を比較すると実験の方が全体抵抗は増大する。前者は、モデルが一樣電位とランダム性のみを考えているのに対して、実験と数値計算では電流は特定の経路を形成することに起因する。後者は、実験では接点抵抗にばらつきが存在し、電流経路上にて高い接点抵抗を持つ点が増えることに基づく。すなわち、NWの散布密度が減少すると確率論の解法に決定論的要素を加える必要があることを示した。



温度分布 電流分布 接点コンダクタンス
 図1 銀ナノワイヤネットワークの計測温度、逆問題解析により求めた電流分布と接点での接点電気コンダクタンス。接点コンダクタンスは温度分布に顕著に影響する接点を表示。

4.2 ネットワーク流路での粒子充填(と沸騰)

同様の結論はマイクロ流路における閉塞現象と沸騰でも得られた。格子状マイクロ流路での粒子流れを計測および計算し、流動および圧力損失に与える影響を検討した。その結果、格子領域における粒子充填を確率事象として、各格子での充填と流路閉塞が進展すると考えた場合と比較して、実際は流れの影響を受け、充填領域はランダムに発生したり拡大しないことが分かった。このため圧力損失の時間変化では、実際の場合はより大きな勾配を持ち、短い時間で流路閉塞が起こる。また、その分布も両対数表示で3つの異なる傾きを有することが分かった(図2)。特に粒子充填が発生するとその領域における流動抵抗の増大により流れ場が変化し、流量が増える領域にて粒子充填が発生する。このため、流路内ではランダムな場合と比較してより均一に粒子充填が起こるため、流路全体の流動抵抗の増大率はランダムな場合よりも大きくなった(図3)。また、流路閉塞が起こる直前の時間領域では、実現象では充填がランダムに起こる場合と比較して粒子クラスター同士の連結が連鎖的に発生し、圧力損失が急激に増大した。このように流動と圧力損失は確率論に加えて決定論的現象を考慮する必要があることが分かった。

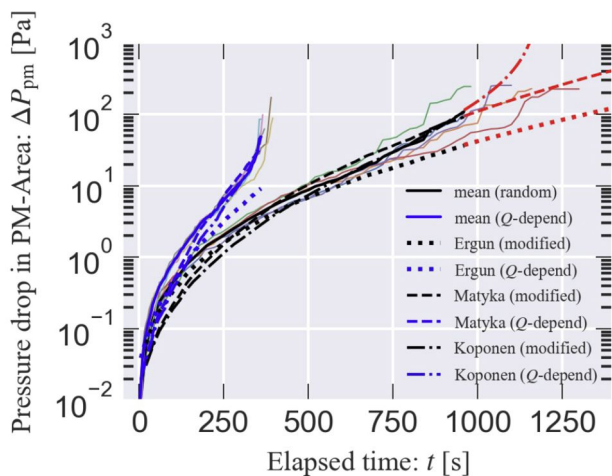


図2 圧力損失の時間変化：格子充填がランダムな場合と流量依存の場合の比較/計算とモデルの比較。

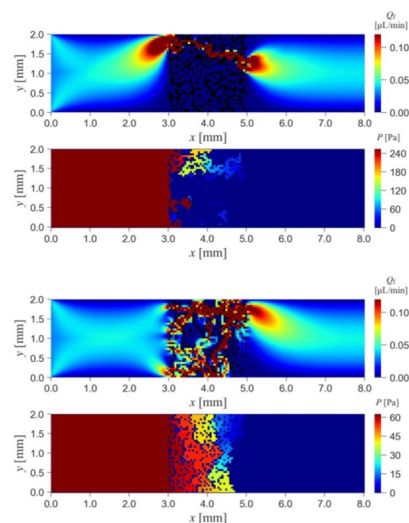


図3 流速と圧力分布(格子充填がランダム(上段)と流量依存(下段))

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4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 Zhu Wule, Duan Fang, Tatsumi Kazuya, Beaucamp Anthony	4. 巻 9
2. 論文標題 Monolithic topological honeycomb lens for achromatic focusing and imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 100 ~ 100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTICA.441670	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 MABUCHI Kenichi, TATSUMI Kazuya, KURIYAMA Reiko, NAKABE Kazuyoshi	4. 巻 88
2. 論文標題 Increase of one-to-one particle encapsulation yield using dielectrophoretic alignment technique with boxcar-type electrodes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 300-312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00300	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 Shiomi Akifumi, Tatsumi Kazuya, Nakabe Kazuyoshi, Shintaku Hirofumi, Umeda Masato	4. 巻 35
2. 論文標題 Extreme deformability of insect cell membranes is governed by phospholipid scrambling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cell Reports	6. 最初と最後の頁 109219 ~ 109219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.celrep.2021.109219	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 Kuriyama Reiko, Nakagawa Tomotaka, Tatsumi Kazuya, Nakabe Kazuyoshi	4. 巻 32
2. 論文標題 Two-dimensional fluid viscosity measurement in microchannel flow using fluorescence polarization imaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 095402 ~ 095402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/abeccb	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18件(うち招待講演 3件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Kazuya Tatsumi
2. 発表標題 Current and Heat Transfer Paths in Nanowire Network Structure
3. 学会等名 9th International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kazuya Tatsumi
2. 発表標題 Current and Heat Transfer Paths in Random Network Structure
3. 学会等名 6th International Symposium on Heat Transfer and Energy Conservation (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Sugihara, R. Umemura, K. Tamai, R. Kuriyama, K. Tatsumi
2. 発表標題 Analysis of Current Flow Path and Temperature Distribution of Ag-Nanowire Network Using Thermoreflectance Imaging
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Tatsumi, K. Araki, K. Tamai, R. Kuriyama, K. Nakabe
2. 発表標題 Measurement of Temperature Effects on Void Generation in Electromigration Using Thermo-Reflectance Imaging
3. 学会等名 The 17th International Heat Transfer Conference, IHTC-17 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Hatta, R. Kuriyama, K. Nakabe, K. Tatsumi
2. 発表標題 Deterministic and Stochastic Modeling of Clogging Effects on Flow in Lattice-shaped Microchannel
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2023 AJK FED2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Tamai, Y. Sugihara, K. Tatsumi, R. Kuriyama, K. Nakabe
2. 発表標題 Analysis of Joule Heating Characteristics in Nanowire Networks Measured by Thermoreflectance Imaging Method
3. 学会等名 8th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村田貴彬, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 局在表面プラズモン共鳴励起増強蛍光を利用した蛍光偏光型液体温度計測ナノプローブの開発
3. 学会等名 日本機械学会第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中康寛, 荒木謙吾, 玉井莞爾, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 TRI法を用いたエレクトロマイグレーションにおけるボイド成長への動作温度の影響
3. 学会等名 日本機械学会第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 児玉将規, 玉井莞爾, 杉原悠太, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 通電加熱した銀ナノワイヤ群の発熱分布と伝熱特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉原悠太, 玉井莞爾, 児玉将規, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 熱変形を伴う銀ナノワイヤに関するTRI法を用いた温度計測の高精度化
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑島良統, 巽和也, ブカン・アントニー, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 多焦点式複眼レンズによるジェル型温度センサーの測定可能距離の拡張
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Tatsumi
2. 発表標題 Alignment and Timing Control of Particles in Microchannel Flow Using Dielectrophoretic Force
3. 学会等名 The 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Inoue, R. Kuriyama, K. Tatsumi and K. Nakabe
2. 発表標題 Measurement of Near-wall Microparticles Motion Under the Influence of Radiation Pressure of Evanescent Field
3. 学会等名 Joint Meeting of the European Society for Clinical Hemorheology and Microcirculation, the International Society for Clinical Hemorheology, the International Society of Biorheology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Tatsumi, K. Mabuchi, R. Kuriyama, K. Nakabe
2. 発表標題 Toward 100% Yield of One-to-One Particle Encapsulation Using Dielectrophoretic Particle Alignment Technique
3. 学会等名 7th Micro and Nano Flows Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉井莞爾, 児玉将規, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 ナノワイヤ群のジュール発熱分布に与えるワイヤ数密度の影響
3. 学会等名 日本機械学関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 児玉将規, 玉井莞爾, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 銀ナノワイヤ群のジュール発熱と温度分布に関する2次元TRI計測と数値解析
3. 学会等名 日本機械学会第12回マイクロ・ナノ工学シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木謙吾, 玉井莞爾, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 2次元TRI法によるAI配線のマイグレーションと温度分布の関係の可視化
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 玉井莞爾, 児玉将規, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 2次元 TR計測によるナノワイヤ群のジュール発熱による温度分布と通電経路の関係
3. 学会等名 日本機械学会年次大会2021
4. 発表年 2021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)		
研究協力者	江利口 浩二 (Eriguchi Koji)		

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
---------	---------