

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20971

研究課題名（和文）パーコレーション理論を用いた連結空間における伝熱のモデル開発

研究課題名（英文）Development of Heat Transfer Model for Connected Space Using Percolation Theory

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：従来の連続体力学が適用できない確率連結を有する構造体における伝熱経路、熱伝導率、伝熱量に関してパーコレーション理論と確率過程を用いたコンパクトな数理モデルを開発した。実験では日本初のThermal Reflectance Imaging法に基づく2次元ナノスケール温度計測装置を構築し連結構造を持つナノワイヤ群の温度計測を行い、数値解析と逆問題解法との比較検討により、ナノワイヤ群の通電・発熱・伝熱特性の解明と開発したモデルの妥当性を示した。さらに、開発した計測技術とモデルは配線でのエレクトロマイグレーションによるボイド生成・成長と配線寿命の現象解析と予測に展開できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度化・複雑化する機器や材料の構造は均質・一様ではなく確率連結を有する構造体である場合がある。これらの構造体の電気・伝熱特性は従来の連続体力学では表せない特性を持ち、新しい数理モデルの開発が必要となる。例えばナノワイヤを無作為に散布した構造体は、ワイヤ同士の連結と連結部の特性により通電や伝熱の経路と輸送量は従来の法則では表せないことがある。本研究では空間連結と確率論に基づく数理モデルを構築し、これらの連結を有する構造体の通電・伝熱特性に適用して実験によりモデルの妥当性を検証した。本モデルの発展は高度化する機械・材料・システムの輸送・性能評価に適用し、新しい設計と信頼性評価への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed a compact thermal model based on percolation theory and stochastic process to solve the problem of heat transfer path, thermal conductivity, and heat transfer rate of a structure composed of stochastic connection which cannot always be solved by conventional continuous mechanics. We built a two-dimensional nanoscale temperature measurement system based on Thermal Reflectance Imaging method and measured the temperature distribution of nano-wire network consisting of connected structure. Comparing the results with the numerical simulation and inverse problem solution, we evaluated the electric current path, Joule heating, and heat transfer characteristics and validated the proposed model. Further, we applied the measurement technique and model to the void generation and growth in the wire meeting electromigration, and showed the possibility of analyzing the phenomena and predicting the failure time of the wire using the proposed model.

研究分野：伝熱工学

キーワード：伝熱 パーコレーション理論 確率統計分布 ワイブル分布 ナノワイヤ 連結構造体 2次元サーマルリフレクタンス法

## 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、体積と面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 (クライバーの法則) に基づく。これは血管による物質輸送もしくは動脈・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、その理由は未だ説明されていない。また、本研究の代表者は対流物質輸送と温度による血管内における血栓形成に与える影響の研究を進めているが、人体の体温制御の重要性とその精度の高さに注目している。例えば、脳では活動領域により発熱量が異なるが、それを血流による対流輸送と熱伝導とで数°C の精度で制御している。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。その過程で血管のように連結 (合流と分岐) を有するネットワーク構造体の流路や物質・物体 (金属ワイヤや高分子の網目構造等) の伝熱量の物理法則を理解しモデル化するためには、その伝熱経路と節、温度、熱流束、断面積、数密度、流量・熱伝導が与える影響を一元化した数理モデルとしてサーマルコンパクトモデルを開発することが重要であると考えている。本研究では、以前から取り組んでいる決定論と確率論の組み合わせによる伝熱特性の評価方法として、パーコレーション理論と“ゆらぎ”の確率過程を用いて、まずはスタートアップの研究としてはじめに固体の連結構造体の伝熱特性を簡便な数式式によりモデルすることを試みるに至った。

## 2. 研究の目的

本研究は、複雑に連結・分布した物質と流路における輸送・伝熱経路、熱伝導率、伝熱量に関して、パーコレーション理論 (Percolation theory) と“ゆらぎ”の確率過程を用いた数理モデルの開発と 2 次元 Thermal Reflectance Imaging (TRI) 法を用いた実験による検証を目的とする。近年の電子機器や熱機器の複雑化に伴い発熱源から周囲環境 (低温源) までの伝熱経路は一様でなく、熱伝導率と対流熱輸送量が空間・時間・条件により変化し、細かく分布して連結構造体を形成する。この連結構造体における伝熱量と局所の温度に関する分布を求めるためには、構造体の伝熱経路と見かけの熱伝導率に関する数理モデルを求めることが重要である。本研究では、物体内における浸透現象の確率統計論であるパーコレーション理論を活用して連結 (ネットワーク) 構造体の伝熱経路と熱伝導率・対流熱輸送に対する形状・物性の各種要素の影響を求め、これに“ゆらぎ”の確率過程を付加することで構造体の伝熱に関する決定論と確率論に基づく数理モデルを開発し、最先端の温度計測である TRI 法によるモデルの妥当性検証を目指す。

## 3. 研究の方法

銀ナノワイヤ (Ag-NW) を散布した基板の両端にて通電または温度差を設け、ナノワイヤに発熱と温度勾配を設ける。そのときのナノワイヤネットワークの温度分布を物質の表面反射率の温度依存性に基づく温度計測手法である 2 次元 TRI 法を用いて測定する。この計測手法はナノスケールの空間と時間分解能で 2 次元温度分布を測定することが可能であり、日本では研究代表者らが初めて構築した。測定で得られた温度分布や局所熱流束は、ナノワイヤ同士の連結と、その頻度および連結したワイヤの継続性と方向によって定まる。これをパーコレーション理論として確率統計論に基づく Weibull 分布関数を導入することでコンパクトな数理モデルで表すことを試みた。

Weibull 分布と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密度分布 (Weibull 過程) であり、その関数は連結の破断確率と連結数を含む連結性状と外乱の影響を示す定数で表される。本研究では 2 次元の連結材料における伝熱問題を考えたときに、伝熱経路、熱伝導率の空間と時間の確率分布として Weibull 分布を適用したモデルを提案する。このとき、Weibull 分布の各変数は、経路内の連結数、連結部の接触熱抵抗、局所の熱膨張や連結部の破断等による影響、ネットワーク全体の伝熱量 (温度差) を表す指標として置き換えることができる。このようにして決定論として求めた確率統計分布に、“ゆらぎ”の確率過程を加えることで熱伝導率や温度等の確率密度分布を求める。この分布から系全体の熱伝導率や伝熱量の導出を試みた。

## 4. 研究成果

### (1) 2 次元 TRI 計測系の構築と Ag-NW の温度分布測定

図 1 に測定試料の写真と 2 次元 TRI 計測装置による温度測定の結果に関する概要図を示す。実験ではガラス基板上的金薄膜電極に挟まれた領域に Ag-NW を無作為に散布し、周期的に通電したときの温度分布を測定した。周期通電とパルス光照射測定により数  $\mu\text{s}$  ~ 数百 ns の高い時間分解能を得ることができる。図 1 の右側には測定した Ag-NW のジュール発熱による温度変

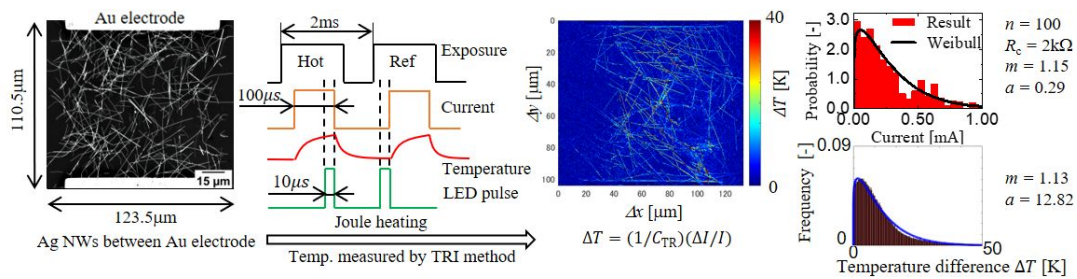


Fig. 1 Temperature distribution of Ag-NWs and its probability density function compared with computation.

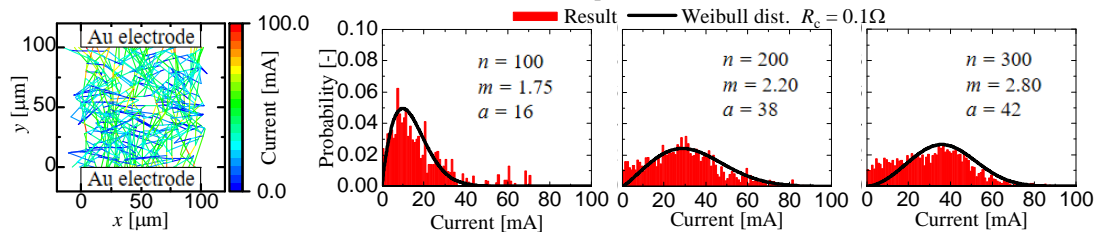


Fig. 2 Current distribution of the NWs and the probability density function of current in relation to the number of wires in the area  $n$ .  $m$  is the shape factor of the Weibull fit.

化 $\Delta T$ の分布とその確率密度分布を示す。ジュール発熱による Ag-NW の温度変化と通電・伝熱経路が高い精度で得られた。さらに温度分布の時間変化からネットワークでの伝熱経路と通電経路の差別化および見かけの熱伝導率を求めることに成功した。

## (2) 確率統計関数を用いた評価

本研究では Ag-NW および Ag-NW 同士の接点での電気伝導・熱伝導率・熱容量を考慮した数値計算により通電時の電流密度分布と温度分布を求めた。図 1 の右端に計算で求めた Ag-NW の電流値の確率密度分布を、図 2 に電流分布と各  $n$  に対する電流値の確率密度分布を示す。また確率密度分布の特性を、確率連結を有する系に関する確率分布である Weibull 分布で評価した。一例として図 1 と図 2 では実験と計算結果を Weibull 分布で評価した場合を示しており、形状パラメータ  $m$  の値はそれぞれ 1.15 と 1.13 であり、両者の値と分布形状は近く、定性的な妥当性が確認できた。また、実験と計算で Ag-NW の散布本数を増加させて温度分布を求めると形状パラメータは増加することを確認できた。これは Ag-NW の接点数と分岐数が増大することで、電流密度と温度分布の一樣性が高まるが、この特性を形状パラメータと寸法パラメータの大小で示すことに成功した。さらに接点抵抗の増減による経路の分散度の変化を確率密度分布を定めるパラメータで表すことができた。

## (3) 配線でのエレクトロマイグレーションによるボイドの連結と時間発展へのモデル展開

本研究の計測手法とモデルをエレクトロニクスデバイスの配線でのエレクトロマイグレーションによるボイド生成・成長・連結の現象解明と配線寿命予測に展開した。図 3 に示すように Al 配線のボイド生成・成長の可視化と TRI 法による温度測定の同時計測に成功した。ボイドの成長過程において、初期ではボイドは成長と縮小を繰り返しながら大きくなることを初めて観測することができた。破断に至るまでに、ランダムに発生するボイドの生成、温度と電流密度変化によるボイドの成長、そしてボイドの連結と成長による破断、と 3 つの過程が存在し、その特性をパーコレーション理論および確率論に基づく関数モデルで表せることを示した。また、温度勾配の大きい領域でボイドの成長が促進され、加速的に大きくなることで配線の破断に至る過程もモデルにより表すことができた。

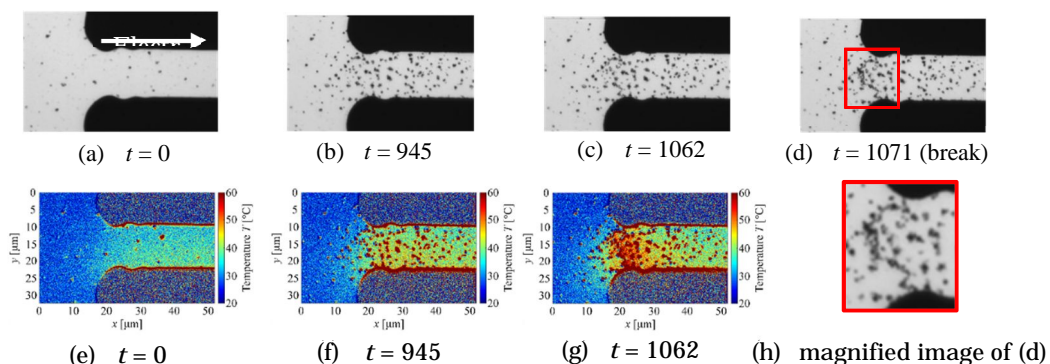


Fig. 3 Images of the void generation and its transition process to wire failure due to the electromigration, and the temperature distributions measured by the TRI simultaneously.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

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

1. 発表者名 玉井莞爾, 栗山怜子, 巽和也, 中部主敬
2. 発表標題 2次元サーモリフレクタンズ法によるナノワイヤ構造体の温度計測
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玉井莞爾, 荒木謙吾, 巽和也, 栗山怜子, 中部主敬
2. 発表標題 2次元サーモリフレクタンズ法を用いたナノワイヤ群のジュール発熱と温度分布計測
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉将規, 栗山怜子, 巽和也, 中部主敬
2. 発表標題 2次元サーモリフレクタンズ法を用いたナノワイヤ群の温度分布測定および伝熱特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2020年度学生員卒業研究発表講演会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	Purdue University			