

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03896

研究課題名（和文）勾配法に基づく放熱用の最適多孔質体構造の提案とその実験的実証

研究課題名（英文）Proposal of optimal porous structure for heat transfer based on gradient method and its experimental verification

研究代表者

佐野 吉彦（Sano, Yoshihiko）

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90720459

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、勾配法と局所体積平均理論の連成により放熱量を高める多孔質体のデザイン手法を確立することである。放熱媒体を想定したSC構造体、FCC構造体、FCCSC構造体、BCC構造体、BCCSC構造体の3次元周期構造多孔質体に注目した形状改善を行った。その結果、全ての構造体において伝熱量の増加を達成することができ、多孔質構造体の巨視的モデル定数の計測およびデータベース化を行った。さらに、変形前後の構造体において伝熱要素解析を実施したところ、構造体と放熱量の定量的な関係を明らかにした。本研究では、目的関数を放熱量から散逸エネルギーと放熱量の2つからなる多目的関数に変更する発展的な改良も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

伝熱量を促進させる多孔質体デザイン手法は、今後の放熱器を設計する際の有用な手段になると考えられる。また、伝熱要素解析にて得られた構造体と伝熱量の関係は放熱器を設計する上で基本的なコンセプトになると考えられる。データベースに関しては、目的関数の変更により遅れは生じているが、目的関数を散逸エネルギーと放熱量の2つからなる多目的関数に変更したことで、より製品開発で求められる計算手法になったと考えており、今後もデータベース化を着実と検討を進めていく予定である。本研究で提案したデザイン手法は多孔質体のみならず、伝熱を伴う熱流体の諸問題に対応でき、その活用用途は広く社会的意義は大きいと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, a design method for porous materials that increase heat transfer has been established by coupling the gradient method with local volume averaging theory. We focused on three-dimensional periodic porous structures, SC, FCC, FCCSC, BCC, and BCCSC structures, and improved their shapes to increase their heat transfer. As results, the proposed method was able to increase the heat transfer in all structures, and we measured and made a database of the macroscopic parameters of the porous structures. Furthermore, we performed heat transfer element analysis on the structures before and after deformation, and clarified the quantitative relationship between the structure and the heat transfer.

研究分野：伝熱工学

キーワード：形状最適化 多孔質体 局所体積平均理論 伝熱

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) 電子機器の発熱密度の増加に伴い、放熱器の性能向上が求められる一方で、開発コストの削減のために設計手法の効率化も同時に要求されていた。
- (2) 放熱器の性能向上のために、多孔質体の採用がこれまでも検討されてきたが、多孔質体を活用した放熱促進には、適切な構造体を選択する必要があり、専門知識と経験が必要とされてきた。
- (3) 多孔質体を利用した放熱器の開発が手探りとなる理由は、多孔質構造体の理論的な設計手法が無いためであり、本研究ではこれを問題提起とした。

### 2. 研究の目的

- (1) 勾配法と局所体積平均理論の連成により物理学に基づく多孔質体のデザイン手法を確立する。
- (2) 本デザイン手法で得られた高い放熱能力を有する多孔質構造体を用いて、伝熱要素解析を実施することで構造体における伝熱促進メカニズムを検討する。
- (3) 2.(1)と2.(2)で得られた結果をもとに、各多孔質構造体の特徴を示したデータベースを構築する。

### 3. 研究の方法

- (1) 2.(1)に関しては、周期構造体を有する多孔質体を研究対象とし、本研究の目的である多孔質体デザイン手法の理論構築を行った。目的関数を構造体表面からの総放熱量とし、Lagrange 関数の物質微分を求め形状勾配を導出した。形状変動は力法を採用し、変動領域を弾性体、導出した勾配を外力として与え、変位を領域変動ベクトルとして形状更新を行うこととした。
- (2) 2.(2)に関しては、多孔質体の形状変動量に対する放熱量の関係を多孔質構造体の各部位で実施することにより、放熱量に与える形状の効果を定量的に議論した。さらに、放熱器の設計で重要となる圧力損失についても同様の検討を実施した。実験では、3D プリンターにて多孔質構造体からなる放熱器を作成し、その性能を実験で検証した。
- (3) 多孔質構造の放熱媒体として、SC 構造体、FCC 構造体、FCCSC 構造体、BCC 構造体、BCCSC 構造体に注目して、一連の検討結果を構造別に整理した。

### 4. 研究成果

- (1) 勾配法と局所体積平均理論の連成による多孔質体デザイン手法の確立

図1に、目的関数を構造体表面からの総放熱量とした際の BCCSC 構造体における変形前（本手法適用前）および変形後（本手法適用後）の多孔質体1ユニット構造を示す。なお、本研究では本手法の工業的な応用の念頭に変形時に体積制約を与えており、図1の条件は気効率 0.8 での計算結果を示す。図1から、変形後の構造体は基本的な初期形状を保ちながらも、局所的に構造径が太くなる箇所、細くなる箇所が見られ、特徴的な凹凸が生じていることが分かる。図2に形状変動の更新回数に対する放熱量を示す。本手法が適用される（形状更新）に従い、放熱量が増加していることが確認できる。さらに本研究では、勾配法と局所体積平均理論を組み合わせることにより、多孔質体の巨視的モデル定数を導出することを目的としている。そこで、上記の計算時に局所体積平均理論を同時に適用し、巨視的モデル定数のひとつである空間平均ヌッセルトを求めた際の形状変動に対する空間平均ヌッセルトを図3に示す。放熱量と同様、空間平均ヌッセルト数が形状更新に従い増加しており、本手法を適用することにより、変形前に比べてより放熱しやすい形状に、多孔質体の変形していく様子が確認できる。一連の結果から、本研究の目的2.(1)は達成することができたと考えられる。

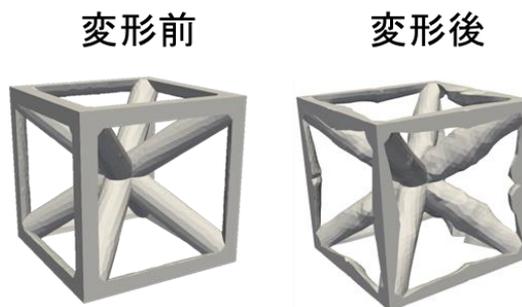


図1. 形状変化 (BCCSC 構造)

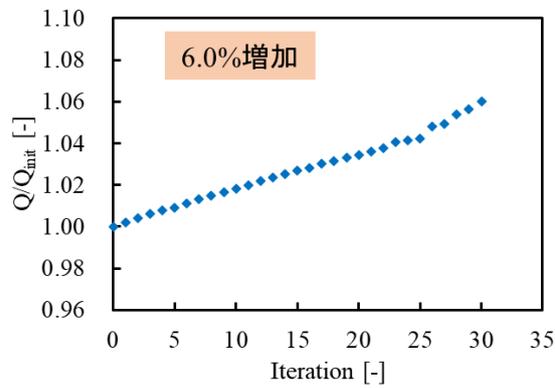


図 2. 放熱量

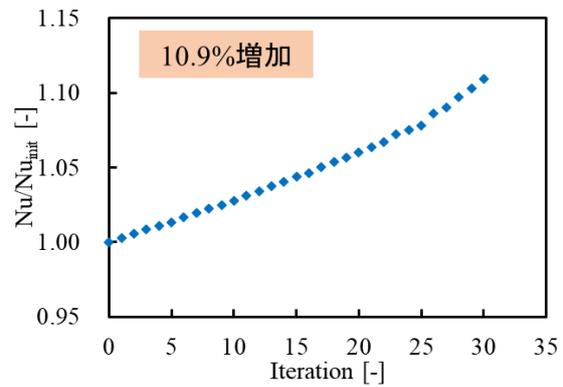


図 3. 空間平均ヌセルト数

(2) 伝熱要素解析による伝熱促進メカニズムの検討および実験的な検証

変形前後の構造体における伝熱挙動を解析することにより、構造体による伝熱促進メカニズムを検討した (図 4 参照)。一連の構造体およびレイノルズ数条件下での伝熱要素解析を実施した結果、伝熱促進のための構造体の変形挙動として、大きく 2 つの傾向があることが分かった。1 つ目は、流れが透過しやすく温度勾配の大きい領域に向けて構造体が拡大することである。2 つ目は、流れと構造体が衝突するよどみ点付近にて構造体が拡大することである。一つ目は構造体による流れの機械的な混合作用により伝熱に寄与する流体の割合を多くする意味合いがあり、二つ目は流れの衝突による伝熱作用を強くする効果があることが分かった。一連の結果から、本研究の目的 2. (2) を達成することができたと考えられる。

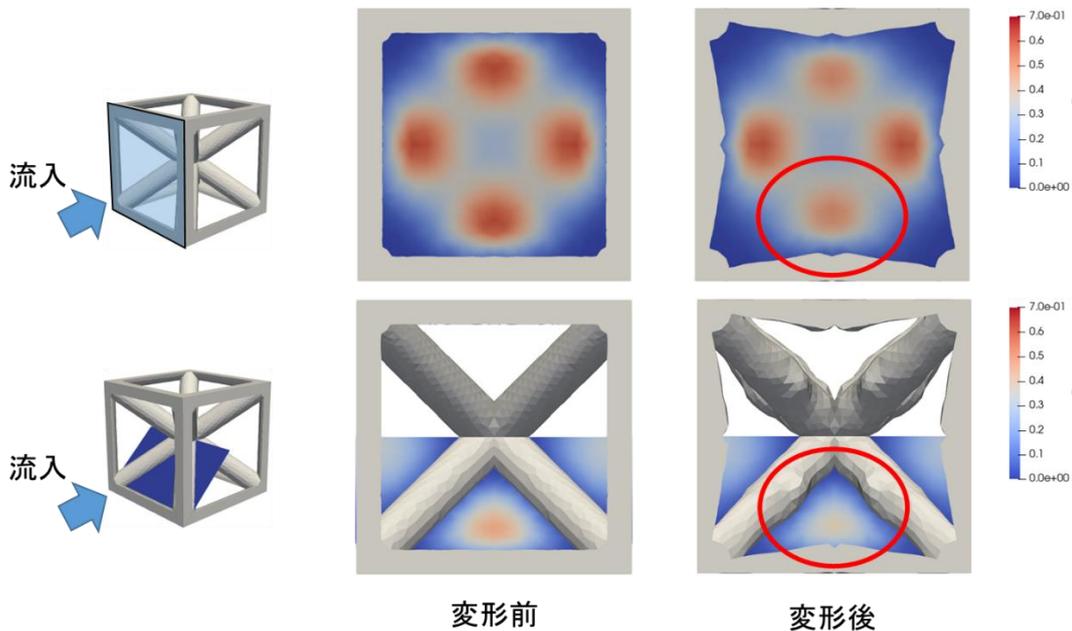
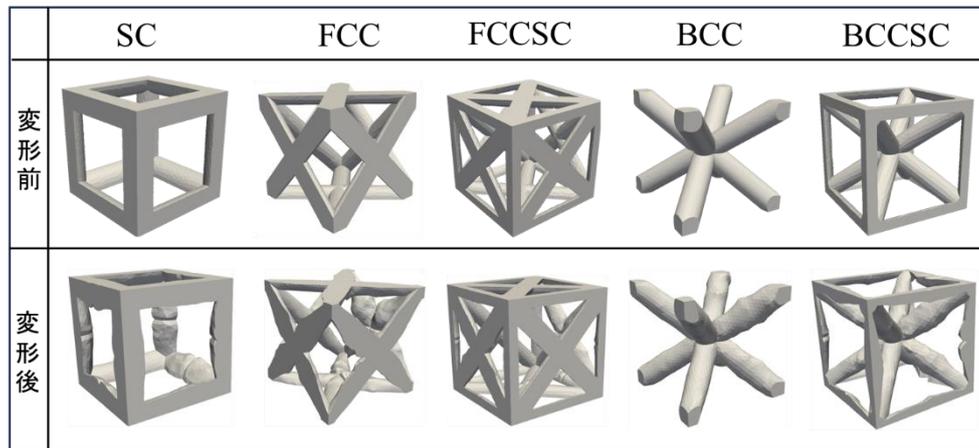


図 4 伝熱要素解析

(3) 各多孔質構造体の特徴を示したデータベースを構築

本研究では、放熱媒体を想定した SC 構造体, FCC 構造体, FCCSC 構造体, BCC 構造体, BCCSC 構造体の 5 種類の 3 次元周期構造多孔質体に注目し、その伝熱量の増加を目的とした形状改善を行った。その結果、全ての構造体において、その伝熱量の増加を達成することが出来た。図 5 に気効率 0.8, レイノルズ数 10 の条件下における変形前後での構造体を示す。ここで、それぞれの構造体における巨視的モデル定数は形状変動時に算出しておりデータベースの作成は着実に進んでいる。

一方、これらの多孔質構造体での放熱器を作成して伝熱実験を行うと、伝熱量を高めると、エネルギー的に伝熱量よりも圧力損失が増加してしまうことが判明した。そこで、多孔質体を通る際の流体の散逸エネルギーと放熱量の 2 つからなる多目的関数を新たに導入して、これまで提案した理論手法の発展的な改良を検討した。改良した新理論にて、流体の散逸エネルギーと放熱量に重みづけを施したうえで SC 構造体, FCC 構造体, FCCSC 構造体, BCC 構造体, BCCSC 構造体



※気孔率0.8, レイノルズ数10条件下

図5. 構造体データベース

の形状改善数値シミュレーションを行った結果、一部の構造体においては流体の圧力損失を減らしたうえで放熱量を増加させることが出来ることが分かった。この検討は、現在も進めており、結果がまとまり次第、データベースの更新を行う予定である。このように、目的関数を放熱量から散逸エネルギーと放熱量の2つからなる多目的関数に変更したことによるデータベースの構築およびその実験的な実証については多少遅れが生じているが、着実に成果を得ている。

#### (4) 総括および成果

4. (1) — (3) の研究成果から、本研究で提案した伝熱量を促進させる多孔質体デザイン手法は、放熱器を設計する際に有用な手段になると考えられる。また、伝熱要素解析にて得られた構造体と伝熱量の関係は放熱器を設計するうえで基本的なコンセプトになると考えられる。データベースに関しては、目的関数の変更により遅れは生じているが、目的関数を散逸エネルギーと放熱量の2つからなる多目的関数に変更したことで、より製品開発で求められる計算を実現できると考えており、今後も着実と検討を進めていく予定である。

以上の成果は、国際学会2件、国内学会7件発表しており、今後はこれらの結果をまとめて、国際論文誌に投稿する予定である。研究当初の目的はおおむね達成しており、順調に遂行できたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 笠原 水城, 桑原 不二郎, 佐野 吉彦
2. 発表標題 伝熱促進を目的とした周期構造多孔質体の形状改善
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水 優太, 佐野 吉彦, 桑原 不二郎
2. 発表標題 傾斜円柱で構成された多孔質構造体における伝熱数値シミュレーション
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森本 涼太, 佐野 吉彦, 桑原 不二郎
2. 発表標題 伝熱促進を目的とした規則配列多孔質体の形状改善問題
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 森本 涼太, 村松 祐志, 佐野 吉彦, 桑原 不二郎
2. 発表標題 伝熱促進を目的とした3次元周期構造体の形状改善
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 森本 涼太, 村松 祐志, 笠原水城, 佐野 吉彦, 桑原 不二郎
2. 発表標題 3 次元周期構造体における伝熱促進を目的とした形状改善
3. 学会等名 日本伝熱学会2022年度東海支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. MURAMATSU, Y. SANO and F. KUWAHARA
2. 発表標題 Shape improvement of the staggered porous structure for enhancing heat transfer
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yushi MURAMATSU, Yoshihiko SANO and Fujio KUWAHARA
2. 発表標題 Shape Improvement for Enhancing Heat Transfer from the Porous Structure
3. 学会等名 JSSUME 2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村松祐志, 佐野吉彦, 桑原不二郎
2. 発表標題 伝熱促進を目的とした勾配法による千鳥配列多孔質構造の形状改善
3. 学会等名 日本伝熱学会東海支部2021年度支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤森拓馬, 佐野吉彦, 桑原不二朗
2. 発表標題 千鳥配列多孔質体の伝熱促進を目的とした形状改善の検討
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

〔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
---------	---------