

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06935

研究課題名(和文) マイクロチャンネルヒートシンクの概念設計支援を目的としたトポロジー最適設計法

研究課題名(英文) Topology optimization method for a conceptual design management of microchannel heatsinks

研究代表者

矢地 謙太郎 (Yaji, Kentaro)

大阪大学・工学研究科 ・助教

研究者番号：90779373

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロチャンネルヒートシンク(MHS)は、マイクロプロセッサ等の液冷式冷却装置として利用されており、従来の空冷式ヒートシンクと比較して高い冷却効率を有し、次世代の冷却装置として期待されている。本研究では、これまでにない革新的なMHSの創成を目的として、MHSの概念設計段階で利用することを視野に入れたトポロジー最適設計法の開発を行った。MHS設計において重要な評価関数である熱交換効率や圧力損失等について多目的最適化計算を行い、膨大でかつ多様な最適解を効率的に生成するために超並列計算機を利用した大規模トポロジー最適化アルゴリズムを開発した。

研究成果の概要(英文)：Microchannel heatsink has been attracted attention as a next generation cooling device. The aim of this study is to generate innovative designs of microchannel heatsink via utilizing a topology optimization method. The optimization problem is formulated as multiobjective problem of the total heat transfer and the pressure loss that are important evaluation indices for the design of microchannel heatsinks. In addition, I utilize a large-scale parallel computer for generating a lot of design candidates and revealing the detailed configuration of optimized designs.

研究分野：最適設計

キーワード：トポロジー最適化 最適設計 設計工学 流体力学 構造最適化 数値流体力学 ヒートシンク 大規模並列計算

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロチャンネルヒートシンク(MHS)は、コンピュータのマイクロプロセッサ等の液冷式冷却装置として利用されており(図1)、従来の空冷式ヒートシンクと比較して、高い冷却効率を有する。近年、電子部品の熱流の増加に伴い、空気冷却のみでは集積回路の適切な動作温度を維持することが困難になっていることから、MHSは次世代の冷却装置として期待されている。

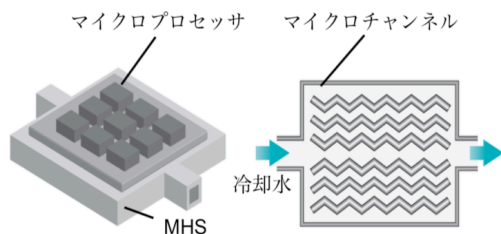


図1 MHSの概略図

このような背景のもと、申請者はMHSの冷却効率向上を目的として、マイクロチャンネルを対象としたトポロジー最適化の研究に取り組んできた。トポロジー最適化とは、設計者の試行錯誤に依存することなく、数値解析により設計対象物の形態(トポロジー)を変更することで最適形状を導き出す数理的最適化手法である。トポロジー最適化は複雑な形状を最適解として許容するため、製造性の観点から実用性は低いとされてきた。しかし、三次元造型機の急速な発展も相まって、近年は学術界のみならず欧米を中心とした機械産業を中心に注目を集めている。

2. 研究の目的

本研究では、MHSの抜本的な性能の向上を目的とした概念設計支援システムの基盤となるフレームワークの開発を目的とした。具体的には、申請者がこれまでに研究を行ってきたマイクロチャンネルを対象としたトポロジー最適化の方法論をもとに、MHS設計において重要となる熱伝達量の最大化と圧力損失の最小化を同時に考慮した最適設計手法の開発を目的とした。さらに、大規模並列計算を利用することにより、最適化結果における微細流路構造を明らかにしつつ、多様な設計案を効率的に生成する最適化アルゴリズムの開発を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、申請者がこれまでに研究を進めてきたトポロジー最適化に基づき、設計者の勘や経験に依存することなく、自動的に有望なMHSの設計案を生成可能な手法の開発を行った。トポロジー最適化とは、図2に示すように、構造最適化問題を材料分布問題に置き換えることで、最適化の過程で構造物の形状と位相(トポロジー)を同時に最適化することができる方法である。

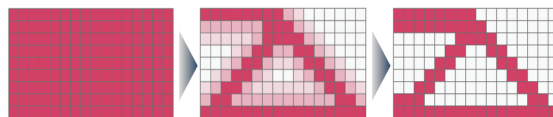


図2 トポロジー最適化(イメージ図)

図2に示すように、トポロジー最適化では初期構造としてすべて構造で満たされた常体を設定していたとしても、設計空間の各点(図中ピクセルに対応)において材料の有無を最適化することにより、最終的に数学的・力学的根拠に基づく有望な最適解を求めることができる。

トポロジー最適化はその考え方が1980年代に提唱されてから、主に構造力学問題に適用されてきたが、2000年頃から熱、電磁波、流体などの他の物理場にも適用され、近年ではそれら複数の物理場を同時に扱った連成問題へ展開した研究も報告されている。本研究では、流体と熱の連成問題を扱ったトポロジー最適化をもとに、MHSの最適設計への応用を図った。

本研究では、MHSの総熱伝達量を目的関数とした最適化問題を定式化し、圧力損失については上限値を規定した制約条件として導入した。これは、実際のMHS設計において、圧力損失はポンプ性能等である程度許容値が確定するためである。すなわち、本研究では規定された圧力損失の下で、総熱伝達量を最大化し得る、MHSのマイクロチャンネル構造の解明が主な目的となる。

具体的に用いたトポロジー最適化の手法については、2003年に米国の研究者らが考案した多孔質材料を固体領域として扱うことで、効率的に流体のトポロジー最適化が可能となる方法を採用し、設計解の更新には、逐次線形計画法と逐次凸関数近似法を状況によって使い分け、最適化計算が概ね100ステップ程度で収束するようにアルゴリズムのチューニングを行った。この意図としては、本研究では提案手法を概念設計支援に应用することを視野に入れていることから、なるべく迅速に多様な解を生成することで、設計計算を効率的に行うためである。

開発した手法をもとに、大規模並列計算用のアルゴリズムを開発した。これは、スーパーコンピュータを活用することで、最適化結果における微細構造を明らかにすると共に、多様な解を効率的に多数生成するためである。並列化の方法としては、OpenMPとMPIによるハイブリッド並列化技法を採用し、スーパーコンピュータは名古屋大学のFX100を用いた。並列化アルゴリズムの開発には名古屋大学情報基盤センターの荻野准教授の協力を得た。なお、流れの解析および最適化には、申請者が2016年に自身の博士学位論文でまとめた格子ポ

ルツマン法に基づくトポロジー最適化を用いた。この方法は並列化計算に適した、いわゆる陽解法に基づく手法である。

4. 研究成果

提案手法をもとに、MHS のマイクロチャンネルの最適化構造を明らかにした。図3 は本提案手法によって得られた流路構造の一例である。



図3 最適化構造 (2次元流路構造)

図に示すように、流路と構造の境界面を増やすことで総熱伝達量を最大化するために複雑な流路構造が得られており、圧力損失の上限値によってその複雑さが決まる。

続いて、スーパーコンピュータを用いて三次元トポロジー最適化を行って得られた結果を図4に示す。

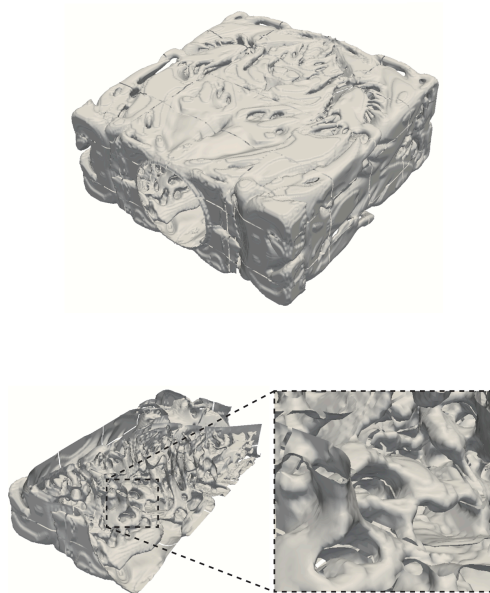


図4 最適化構造 (3次元流路構造)

大規模な三次元トポロジー最適化によって、極めて複雑に分岐する流路構造が最適解として許容されることがわかった。なお、現段階では製造性を考慮していないため、得られた最適解は工学的に有望な流路構造とは言い難い。しかしながら、ヒートシンクのマイクロチャンネル構造を三次元的に形成することによって、ヒートシンクの性能

を大幅に改善し得ることを示唆している。近年急速に発展しつつある三次元造形機と組み合わせることができれば、本研究で得られた知見を活用することで、これまでにない革新的なMHSの設計も可能になることが期待できる。

本研究では、MHSを対象として開発した方法論をもとに、他の流路構造設計への応用も図った。これは、MHSで扱った熱流体問題は、いわゆるスカラー輸送問題として濃度場の輸送問題等へ容易に展開可能であるためである。提案手法の有効性を検証するために、本研究ではフロー電池の流路構造の最適設計についても検討した。

フロー電池は流体と電気化学反応の連成問題として定式化することができるが、本研究では電気化学反応を熱のエネルギー方程式と同様の形式に簡略化した上で、フロー電池の流路構造と多孔質電極構造の最適化を図った。その結果、MHSと同様に複雑な流路構造が得られ、電気化学反応を促進するための流路構造を明らかにすることに成功した。

以上の結果から、提案手法はMHSのみならず、流体とスカラー輸送を扱う設計問題においても有効であることがわかった。いずれにせよ、対象とした数値例題は実設計問題を単純化したモデルであることから、モデルの改良は今後必要になるものの、提案手法のフレームワーク自体は実設計問題に展開しても十分に有効であると考えられる。流体のトポロジー最適化はまだ基礎研究の域を出ていない研究テーマであることから、本研究を皮切りに、提案手法を洗練することで、工学的に有望な設計案を自動生成することが可能な設計手法の開発を今後行っていく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

① K. Yaji, S. Yamasaki, S. Tsushima, T. Suzuki, K. Fujita, Topology optimization for the design of flow fields in a redox flow battery, Structural and Multidisciplinary Optimization, 査読有, Vol.57, pp.535-546, 2018

DOI: 10.1007/s00158-017-1763-8

② K. Yaji, M. Ogino, C. Chen, K. Fujita, Large-scale topology optimization incorporating local-in-time adjoint-based method for unsteady thermal-fluid problem, Structural and Multidisciplinary Optimization, 査読有, published online, 2018

DOI: 10.1007/s00158-018-1922-6

〔学会発表〕（計 6 件）

- ① K. Yaji, S. Yamasaki, K. Fujita, Topology design via physics-based surrogate optimization for complex fluid problems, 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics, The European Community on Computational Methods in Applied Sciences, 2018
- ② K. Yaji, S. Yamasaki, K. Fujita, Topology design via physics-based surrogate optimization for turbulent heat transfer problem, Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, The Asian Society for Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018
- ③ 矢地謙太郎、荻野正雄、陳聰、藤田喜久雄、三次元非定常熱流体を対象とした大規模トポロジー最適化法、第 30 回計算力学講演会、日本機械学会、2017
- ④ 矢地謙太郎、山崎慎太郎、津島将司、鈴木崇弘、藤田喜久雄、レドックスフロー電池を対象とした二次元流動場モデルに基づくトポロジー最適設計、第 27 回設計工学・システム部門講演会、日本機械学会、2017
- ⑤ K. Yaji, S. Yamasaki, S. Tsushima, T. Suzuki, K. Fujita, Optimum channel design of a redox flow battery via topology optimization, 12th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018
- ⑥ 矢地謙太郎、荻野正雄、西脇眞二、藤田喜久雄、流体問題を対象とした大規模トポロジー最適化、第 26 回設計工学・システム部門講演会、日本機械学会、2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢地 謙太郎 (YAJI, Kentaro)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：90779373