

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820032

研究課題名(和文) 格子ボルツマン法に基づく熱流体デバイスのハイブリッドトポロジー最適化

研究課題名(英文) Hybrid topology optimization for thermal fluid devices based on the lattice Boltzmann method

研究代表者

山田 崇恭 (Yamada, Takayuki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30598222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高性能あるいは、新しい機能を持つ革新的な熱流体デバイスの構造創成設計法の開発を目的として、格子ボルツマン法を用いて熱流体場を数値解析し、トポロジー最適化により形状創成を行う数値解析システムを開発した。具体的には、連続系のボルツマン方程式に基づく設計感度解析法を構築し、レベルセット法により形状表現された熱流体場のトポロジー最適化法を開発した。さらに、熱流体場および随伴場は格子ボルツマン法により数値解析し、レベルセット関数は有限要素法を用いた具体的な最適化アルゴリズムを構築した。

研究成果の概要(英文)：This research presents a topology optimization method that deal with two-phase fluid for the design of fluid devices. In the proposed method, the Lattice Boltzmann method (LBM) is employed to compute the multiphase flow field and the adjoint field during the topology optimization process. The topology optimization algorithm is constructed based on the level set method and the Finite Element Method (FEM). Additionally, several numerical examples are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed topology optimization method.

研究分野：設計工学

キーワード：トポロジー最適化 最適設計 格子ボルツマン法 ボルツマン方程式 感度解析 随伴変数法 計算力学 レベルセット法

1. 研究開始当初の背景

近年の微細加工技術の発達に伴い、微小スケールの流路やカプセル型内視鏡等の流体デバイスが、工学、医療、バイオなどの幅広い分野で注目されている。例えば、電子機器の高集積化に起因して除熱技術が益々重要な課題となりつつあり、高熱交換率を持つ微小冷却デバイスの開発が必要不可欠となっている。微小冷却デバイスの性能は、その媒質の流路形状に大きく依存し、その形状設計が重要課題となっている。また、カプセル型内視鏡等のカプセル型の医療機器では、誘起電荷電気浸透現象などを利用して、体内の意図した場所までの輸送が可能となれば、医療技術の新しい道が開拓できる。しかしながら、これらの現象は、流体のみならず、複数の物理現象が複雑に連成する、いわゆるマルチフィジクス問題であるため、所望の機能を持つように設計することは困難である。

このような課題を解決する方法として、構造最適化の適用が考えられる。構造最適化は、力学的観点と、数学的観点に基づいて構造物の最適な形状を同定する方法である。中でもトポロジー最適化は、構造の形状だけではなく、孔の数などの形状形態をも変更可能とする最も設計自由度の高い構造最適化手法である。現在、機械産業や航空機産業を中心に、産業界に利用されつつあるが、これまでの応用例は、剛性最大化や振動特性を目的とした構造力学の分野に限られている。学术界においては、熱、流体、電磁気など、構造力学分野を超えた新しい物理領域への適用が、海外の研究グループから報告されている。このような動向の中、今後のトポロジー最適化の適用が期待される分野は、複数の物理領域の連成を利用したマルチフィジクス問題であると考えられる。世界の多くの研究グループは研究課題の焦点をこのような方向におきつつある。

他方でトポロジー最適化は、幾何学的に極めて複雑な構造や、外形形状を明示的に表現できないグレースケール(中間領域)を最適設計解として許容しているため、工業製品への展開には多くの問題を抱えている。この問題を解決することを目的として、新しい構造最適化法の開発に関する研究も近年、活発に行われている。このような動向の中、研究代表者は、従来法の問題点を抜本的かつ本質的に解決し、さらには、最適形状の幾何学的複雑さを設定可能な方法論を世界に先駆けて開発することに成功し、国際的に高い評価を受けている。さらには、構造、熱流体、電磁気などの多くの最適設計問題へ展開し、産業製品へ展開可能な方法として注目を集めている。

2. 研究の目的

本研究では、今までにはない高性能もし

くは多機能な熱流体デバイスの創成設計法をトポロジー最適化法に基づいて構築する。すなわち、研究代表者が独自に開発した最適設計理論に基づき、所望の目的を満たす各紙的な熱流体デバイスの最適構造創成設計法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

流体場の解析方法として、格子ボルツマン法に注目した。格子ボルツマン法は気体分子運動論におけるボルツマン方程式に基づく数値計算手法であり、流体を仮想粒子の集合体と考え、その粒子の速度分布関数から巨視的な物理量である流速や圧力を算出する。一般に、非圧縮性粘性流体の数値計算では、流れ場の質量保存を満足させるよう、圧力に関するポアソン方程式を解く必要があるが、格子ボルツマン法ではこのような手続きを必要とせず、速度分布関数に関する時間発展方程式を解くだけで良い。そのため、アルゴリズムが単純でありながら、質量および運動量保存性に優れており、これまでに多孔質内流れのように複雑な境界を持つ流れや、二相流のように界面が複雑に変化する流れの数値計算に適用されている。

格子ボルツマン法のトポロジー最適化への展開に関する先行研究としては、格子ボルツマン方程式と呼ばれる離散系の状態方程式を制約条件式として、密度法を用いたトポロジー最適化法が提案されている。この方法では、大規模非対称密行列に対する設計感度解析を必要とするため、実用的な設計課題への展開が極めて困難である。密度法は設計対象とする構造の形状を正規化された連続な密度分布により表現する方法であり、問題設定によっては工学的に有効な最適形状を得ることが困難であることが知られている。

本研究では、これらの課題を解決する方法として、まず、連続系のボルツマン方程式に基づいた設計感度導出方法を構築した。ここで、随伴ボルツマン方程式を導入し、順問題に対するボルツマン方程式と同様の数値解析スキームにより設計感度を評価可能とした。なお、この方法では、格子ボルツマン法だけではなく、ボルツマン方程式に基づく一般の最適設計問題に展開可能な方法である。

次に、レベルセット法に基づく形状表現に基づき、格子ボルツマン法の流れ場を解析する方法を開発した。レベルセット法では、図1に示すように、レベルセット関数と呼ばれるスカラー関数の等位面により、設計対象とする領域の外形形状を表現し、その正負により流体領域(流体により占められた領域)及び構造領域(構造により占められた領域)を識別する。格子ボルツマン法に拡張する際には、設計の対象となる領域の

全体を解析対象としつつ、壁面で流速が零となる条件を満たすように、速度分布関数を拡張する方法を開発した。すなわち、構造領域も仮想的な流体領域と考え、物理的な条件を満たすように、構造領域に恣意的な条件を与える。最初に、単相の流れ場に展開し、方法論の妥当性を検証した。

同様に、随伴ボルツマン方程式においても拡張を行った結果、妥当な結果が得られることを確認した。

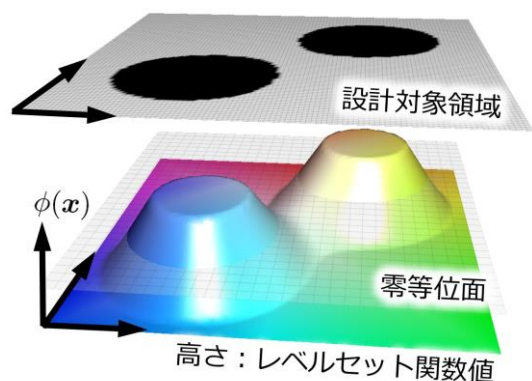


図1 レベルセット関数による形状表現

次に、熱流体問題に拡張を行い、本研究で提案する手法が熱流体問題においても有効であることを示した。

なお、設計変数であるレベルセット関数は有限要素法に基づいた離散化を行っており、有限要素法などの他の数値解析法と連成させた最適設計システムへの拡張が可能な最適化アルゴリズムを構築した。有限要素法と格子ボルツマン法を連成させる方法としては、格子ボルツマン法の格子と有限要素法の節点を対応させることで、逐次補間を行うことなく最適化が可能な方法論を構築した。

他方、格子ボルツマン法では、境界条件の設定法が課題となることが知られている。連続系のボルツマン方程式に基づいて設計感度を行うことで、運動論的な方法論全般に適用可能な方法論となるが、随伴ボルツマン方程式に対する境界条件の導出が困難であることがわかった。そこで、さらなる拡張として、境界条件の情報を保持できるように、離散化を含めて感度解析を行う方法を確立した。この方法により、順問題で設定した境界条件から、随伴ボルツマン方程式の境界条件を導出することが可能になった。

4. 研究成果

本研究では、最初に単相流の問題に展開し、有限要素法に基づく結果と比較し、方法

論の妥当性を検証した。その結果、妥当な結果が得られることを確認した。その後、格子ボルツマン法に基づく利点を生かした最適化問題への展開を行っている。その一例として、図2に熱交換最大を目的とした熱交換器の最適設計例を示す。図に示すように、明瞭な最適構造が得られていることを確認

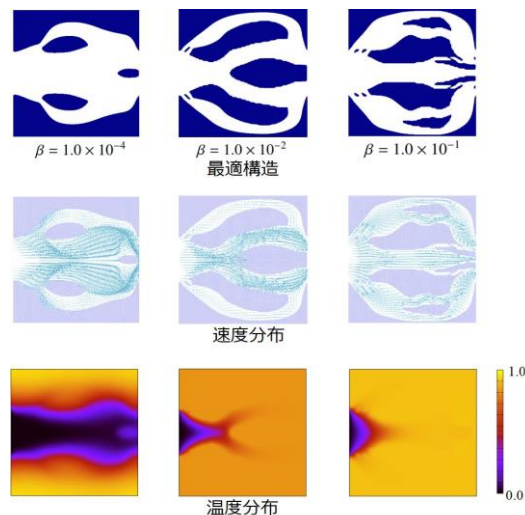


図2 熱交換器の最適化問題への適用例

することができる。

なお、本研究の成果は、数値流体力学分野で最も著名な国際雑誌 *Journal of Computational Physics* に投稿し、掲載されている。今後の展望として、構造解析とを連成させた多領域問題への拡張が考えられる。

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4件)

- ① 矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 等密度の二相系格子ボルツマン法を用いたトポロジー最適化, **計算数理工学論文集**, Vol. 15, No. 09-151204 (2015), pp. 49-54.
[URL:http://gspsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/15/JA159.pdf](http://gspsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/15/JA159.pdf)
- ② Yaji, K., Yamada, T., Yoshino, M., Matsumoto, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Topology optimization in thermal-flow using the lattice Boltzmann method, *Journal of Computational Physics*, Vol.307, (2016), pp.355-377.
DOI:10.1016/j.jcp.2015.12.008

- ③ 矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 流体問題を対象としたトポロジー最適化における離散ボルツマン方程式に基づく感度解析手法, *計算数理工学論文集*, Vol.14, No.16-141206, (2014), pp.67-72.

URL:<http://gpsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCOME/denshi-journal/14/JA1416.pdf>

- ④ Yaji, K., Yamada, T., Yoshino, M., Matsumoto, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Topology optimization using the lattice Boltzmann method incorporating level set boundary expressions, *Journal of Computational Physics*, Vol.274, (2014), pp.158-181.
DOI:10.1016/j.jcp.2014.06.004

[学会発表] (計7件)

- ① 矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 等密度の二相系格子ボルツマン法を用いたトポロジー最適化, 計算数理工学シンポジウム2015, 日本計算数理工学会, 2015年12月4-5日, 伊勢, 三重県, No.09-151204.
- ② 矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 二相系格子ボルツマン法を用いた流路デバイスのトポロジー最適化, 日本機械学会2015年度年次大会, 日本機械学会, 2015年9月14日-16日, 北海道大学, 札幌市, 北海道, J1240104.
- ③ Yaji, K., Yamada, T., Yoshino, M., Matsumoto, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Level set-based topology optimization using the lattice Boltzmann method considering two-phase fluid flows, *Proceedings of 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation (WCSMO-11)*, 7-12 June, 2015, Sydney, Australia, No.1302.
- ④ 矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 流体問題を対象としたトポロジー最適化における離散ボルツマン方程式に基づく感度解析手法, 計算数理工学シンポジウム2014, 日本計算数理工学会, 2014年12月6-7日, 信州大学, 長野市, 長野, No.16-141206.
- ⑤ 原彰宏, 松本敏郎, 山田崇恭, 高橋徹, 飯盛浩司, 格子ボルツマン法による3次元流れ場のトポロジー最適化, 第27回計算力学講演会, 日本機械学会, 2014年11月22-24日, 岩手市, 岩手県, No.1101.

- ⑥ 矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 格子ボルツマン法を用いた熱流体デバイスのレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 第27回計算力学講演会, 日本機械学会, 2014年11月22-24日, 岩手市, 岩手県, No.1102.

- ⑦ 原彰宏, 松本敏郎, 山田崇恭, 高橋徹, 飯盛浩司, 線型展開境界条件を用いた格子ボルツマン法による流れ場のトポロジー最適化, 第24回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2014年9月17-19日, 徳島市, 徳島県, No.1103.

[図書] (計0件)
該当無し

[産業財産権]
○出願状況 (計0件)
該当無し

○取得状況 (計0件)
該当無し

[その他]
該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 崇恭 (YAMADA, Takayuki)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 30598222

(2) 研究分担者
該当無し

(3) 連携研究者
該当無し