

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K19781

研究課題名（和文）流体迷彩構造の設計を指向した非定常問題に対するトポロジー最適化の開発

研究課題名（英文）Development of topology optimization for a transient state for the structural designs of fluid flow cloaks

研究代表者

吉野 正人（YOSHINO, Masato）

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00324228

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、障害物周りの流体を完全に制御し、障害物による流れの乱れをゼロにすることで実現可能な流体クロークの創生設計法の開発を目的とし、埋め込み境界-格子ボルツマン法を用い、流体クロークの周辺の領域において性能評価を行った。また、構造の表現手法としてレベルセット法、最適化構造の解探索手法としてCMA-ESを用い、非定常問題に対するトポロジー最適化を開発した。このようなトポロジー最適化は時間を遡った感度解析が必要であるが、本研究で開発したトポロジー最適化はそれらの煩雑な感度解析を必要とせず、性能の悪い局所的最適解が多く存在する多峰性最適化問題においても初期推定などのトライ&エラーが不要となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

障害物により流体の通過することのできる断面積が減るために、流量の保存則から、クロークされる障害物周辺では流速が速くならざるおえない。本研究の流体クロークの評価値は障害物がない流れ場と障害物がクロークされた流れ場の差を最小化し、クロークがない場合の目的関数値を1とする無次元化をおこなった。障害物周りに流体クロークの構造を設定することで、障害物のみ場合よりもさらに周辺の流速が上昇し、目的関数が1を下回るものが困難であった。これらは、本研究の問題設定においては流体クロークの設計と実現が、物理的に解決が困難であることを示唆しており、障害物がない場合の流れ場の完全な再現は困難であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop a design method for the creation of a fluid cloak that can be realized by completely controlling the fluid around the obstacle and reducing the turbulence of the flow due to the obstacle to zero. Topology optimization for non-stationary problems was developed using the level set method as a structure representation method and CMA-ES as a solution search method for optimized structures. While such topology optimization requires sensitivity analysis going back in time, the topology optimization developed in this study does not require such cumbersome sensitivity analysis and does not require trial and error such as initial estimation even for multimodal optimization problems with many local optimal solutions with poor performance.

研究分野：流体力学

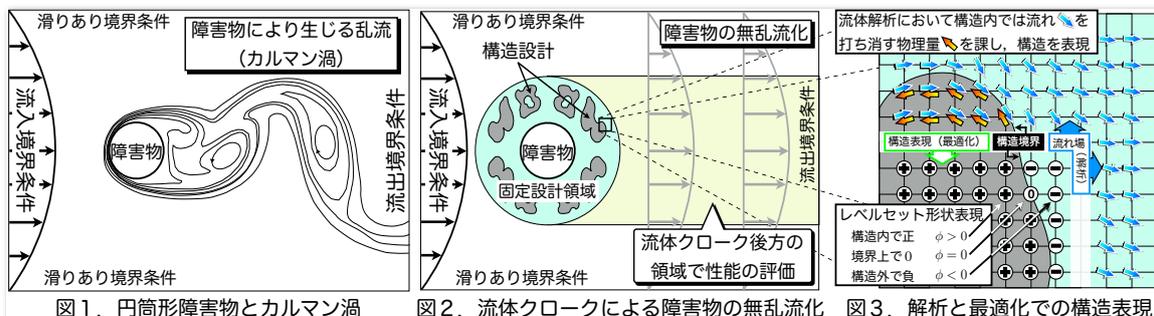
キーワード：流体クローク 埋め込み境界-格子ボルツマン法 トポロジー最適化

1. 研究開始当初の背景

物体を無散乱化することにより透明マント効果を実現する光学クロック（光学迷彩）の提案①②から、光に限らず様々な物理のクロックの研究開発が進められ、音響クロック、サーマルクロック、電流クロックなどが提案されているが、マイクロ構造を集積したデバイスと実験的なアプローチではその設計と作製の困難さゆえ、十分な性能を実現することが難しい。一方で、数値解析に基づいた構造最適化法の1つであるトポロジー最適化③によるクロックの設計④が近年注目されている。トポロジー最適化は最適化の過程で新しい穴の創出を許容することが可能であり、従来の寸法・形状最適化と比較して設計の自由度が高く、これまでに無い性能を実現する構造の設計が可能となりうる。これまでに、研究分担者らは光学クロックのトポロジー最適化⑤を開発し、設計された最適化構造は従来の実験的アプローチにより開発されたクロックと比較し、遥かに良い性能を実現することが可能となった。さらに、光学クロックのアナロジーとして、熱クロック⑥、電流クロック⑦、音響クロック⑧などのトポロジー最適設計にも成功している。しかし、前述のクロックは定常的な問題に対する構造最適化問題であるのに対し、非定常問題である流体制御に関する流体クロックのトポロジー最適化は未だ開発されていない。また、流体クロックの理論は提案されてはいるが、様々な物理におけるクロックの中で最も開発が遅れ、ほぼ進展していない。

研究代表者らはこれまでに単相流から複雑な二相流まで様々な流体の解析法を、格子ボルツマン法に基づいて開発し、それらを用いたトポロジー最適化⑨⑩を行ってきた。しかし、これらの先行研究から、非定常問題のトポロジー最適化は時間を遡った感度解析が必要であり、非常に煩雑な計算を必要とする。さらに、従来の感度解析に基づくトポロジー最適化は最適解が初期解に強く依存するため、多峰性が強く、性能の悪い局所最適解が多く存在する最適化問題においては、様々な構造から最適化計算を繰り返すトライ&エラーを必要とする。さらに各種最適化パラメータの調整も不可欠である。

上記の非定常問題に対するトポロジー最適化の問題点と、クロックの流体制御問題へのアナロジー：すなわち流体クロックへの応用を見越し、本研究では上記の問題を抜本的に解決する手法として、CMA-ESに基づいた解探索法と埋め込み境界-格子ボルツマン法による流れ解析を用いたトポロジー最適化を開発し、開発したトポロジー最適化を用いて流体クロックの設計を行う。さらに、その最適化構造から流体クロックに不可欠な構造因子を明らかにする。



2. 研究の目的

本研究で設計を試みる流体クロックは流体制御問題における光学クロックのアナロジーであり、障害物により生じる流れの乱れ【図1】を限りなくゼロになるよう、障害物周りの流れを制

御することで実現可能【図2】となる。本研究では、埋め込み境界-格子ボルツマン法による流体解析【図3】と、CMA-ES（共分散行列適応進化戦略）【図4】に基づいた最適解探索法を用いた非定常問題に対するトポロジー最適化を開発し、流体クロックのトポロジー最適設計を行う。

3. 研究の方法

本研究では、流体クロックの性能評価手法として埋め込み境界-格子ボルツマン法による非定常流体解析プログラムを開発し、流体クロックの構造最適化法としてレベルセット法に基づいたトポロジー最適化を用い、最適な構造を求める解探索手法としてCMA-ESを用いる。

格子ボルツマン法は流体を多数の仮想粒子の集合体とみなし、各粒子の衝突と並進とを粒子の速度分布関数を用いて逐次計算し、そのモーメントから巨視的な流速、圧力、温度（濃度）などを求める計算手法であり、複雑流れに対してもアルゴリズムが簡単で、並列計算に向いており、さらに質量・運動量の保存性に優れている。

構造最適化は、設計者の勘や経験に基づいた設計とは異なり、所望の性能を実現することが可能な形状や形態を、数学的根拠に基づき決定する手法である。構造最適化法の1つであるトポロジー最適化は、最適化の過程で構造に新しい穴を創出することが可能であり、従来の寸法・形状最適化と比較して設計の自由度が高く、これまでに無い性能のデバイスを設計することが可能となりうる。トポロジー最適化は構造を表現する関数を空間的に離散化し、設計変数として最適化するため、物理空間を正方形（2次元）または立方体（3次元）の格子に離散化する格子ボルツマン法との相性も良い。本研究ではトポロジー最適化において、設計変数の最適解探索にCMA-ESを用いる。CMA-ESは多変量標準正規乱数に基づいて生成する候補解の分布範囲の形、サイズ、中心を、最適化問題の景観に適応させながら、最適解を探索するアルゴリズム【図4】であり、多峰性、変数間依存性、不連続性の強い困難な非線形最適化問題に有効であり、初期解の選択に対しロバストな最適化法である。また、CMA-ESは優秀な解の分布から評価関数の勾配を推定するため【図4(e)】、従来のトポロジー最適化で必要とされる感度の計算が不要となり、非定常問題における煩雑な感度計算を必要としない。さらに、最適化パラメータのすべてに推奨値が設定されているため、その設定と調整に時間をかける必要がない。

4. 研究成果

本研究では、ポアズイユ流れと一様流における流体クロックの設計が可能なトポロジー最適化を開発した。格子ボルツマン法による非定常解析において、流体が静止している状態から解析をスタートする過渡状態も評価に含める場合と、既に安定した流れが生じている初期状態から解析する短時間で完了する場合の2パターンの解析プログラムを開発し、それぞれに基づいてトポロジー最適化をおこなった。

設計領域周辺のクロックによって制御された流速と障害物がない場合の流速の差を最小化するための目的関数を設定し、障害物周りにクロックが無い場合に値が1となるよう、無次元化をおこなった。図5に縦軸に目的関数値、横軸に最適化の世代をプロットした最適化計算過程における目的関数の変動を示す。およそ20世代までは順調に目的関数が小さくなっていったが、そ

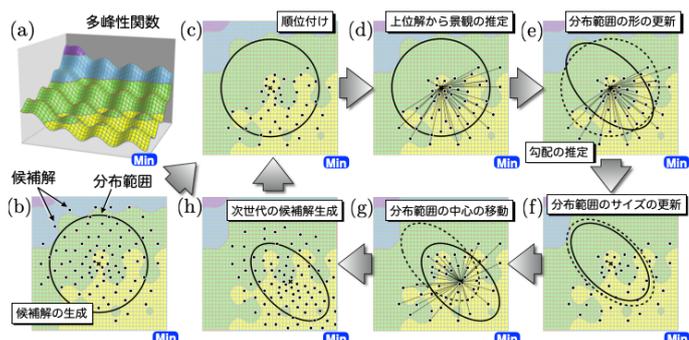


図4. 多峰性関数に対するCMA-ESの最適解 Min 探索

れ以降は目的関数の減少が頭打ちとなり、その値が6.4程度で改善が見られなくなった。クローク自体がない障害物のみの場合の目的関数値が1であるため、これはクロークが無い方が流れの乱れが少ないことを示しており、構造があることで性能がむしろ劣化していることを示している。図6に最適化過程における流体クロークの構造の変化を示す。CMA-ESは乱数生成に基づいて、その乱数による解候補の分布を更新し、最適解を探索するため、初期の構造は細かい構造が多く、周囲長制約によって構造がまとまっていく。しかしながら、最適化計算の途中から目的関数値が改善されないため、周囲長の改善も途中でとまってしまい、 $g=200$ 世代においても十分にまとまった構造が得られていない。このような結果になった理由として考えられるのは、障害物周りに流体クロークとなるべく構造を設定することで、障害物のみ場合よりもさらに流体が通過する断面積が減り、周辺の流速が上昇し、結果として、目的関数が1を下回ることが困難であることが示された。これらは、本研究の問題設定においては流体クロークの設計と実現が、物理的に解決が困難であることを示唆しており、障害物がない場合の流れ場の完全な再現は困難であることが明らかになった。一方で、非定常問題となる流体解析に基づいてトポロジー最適化は一般に時間を遡った感度解析が必要であり、最適解が初期解に強く依存する従来の感度解析に基づくトポロジー最適化に対し、本研究で開発した共分散行列適応進化戦略の基づいたトポロジー最適化はそれらの煩雑な感度解析を必要とせず、性能の悪い局所的最適解が多く存在する多峰性最適化問題においても初期推定などのトライ&エラーが不要となった。

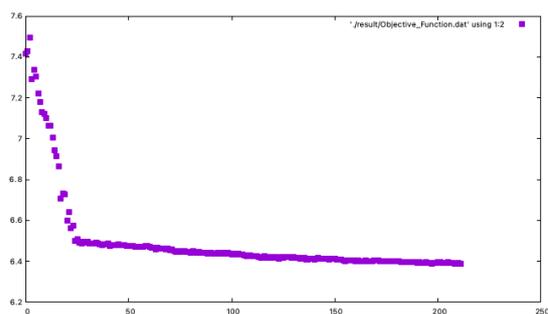


図5 最適化過程での目的関数の変動

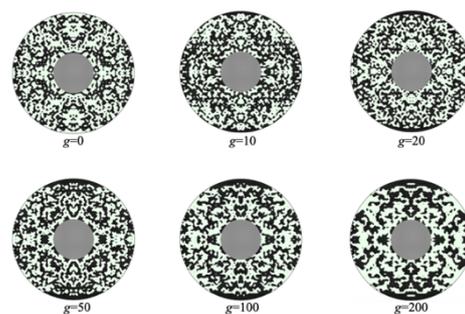


図6 流体クロークの構造の変化

<引用文献>

- ① U. Leonhardt, Optical conformal mapping, *Science* 312 (2006) 1777-1780.
- ② J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, Controlling electromagnetic field, *Science* Vol. 312 (2006), pp. 1780-1782.
- ③ M.P. Bendsøe, N. Kikuchi, Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Vol. 71 (2) (1988), pp. 197-224.
- ④ J. Andkjær, N.A. Mortensen, O. Sigmund, Towards all dielectric, Towards all-dielectric polarization-independent optical cloaks, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 100 (2012), p. 101106.
- ⑤ G. Fujii, M. Takahashi, Y. Akimoto, CMA-ES-based structural topology optimization using a level set boundary expression-application to optical and carpet cloaks, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.* Vol. 332 (2018), pp. 624-643.
- ⑥ G. Fujii, Y. Akimoto, M. Takahashi, Exploring optimal topology of thermal cloaks

by CMA-ES, *Applied Physics Letters* 112 (2018), p.061108.

- ⑦ G. Fujii, Y. Akimoto, M. Takahashi, Direct-current electric invisibility through topology optimization, *Journal of Applied Physics* 123 (2018), p.233102.
- ⑧ G. Fujii, M. Takahashi, Y. Akimoto, Acoustic cloak designed by topology optimization for acoustic-elastic coupled systems, *Applied Physics Letters* 118 (2021), p.101102.
- ⑨ K. Yaji, T. Yamada, M. Yoshino, T. Matsumoto, K. Izui, S. Nishiwaki, Topology optimization using the lattice Boltzmann method incorporating level set boundary expressions, *Journal of Computational Physics* 274 (2014), 158–181.
- ⑩ K. Yaji, T. Yamada, M. Yoshino, T. Matsumoto, K. Izui, S. Nishiwaki, Topology optimization in thermal-fluid flow using the lattice Boltzmann method, *Journal of Computational Physics* 307 (2016), 355–377.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 1件）

1. 著者名 黒岩拓矢, 吉野正人, 鈴木康祐	4. 巻 19
2. 論文標題 熱を考慮した埋め込み境界 - 格子ボルツマン法による二次元攪拌問題の熱流動解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 7-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Xie Suqiong, Yaji Kentaro, Takahashi Toru, Isakari Hiroshi, Yoshino Masato, Matsumoto Toshiro	4. 巻 97
2. 論文標題 Topology optimization for incompressible viscous fluid flow using the lattice kinetic scheme	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers & Mathematics with Applications	6. 最初と最後の頁 251 ~ 266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.camwa.2021.05.032	査読の有無 無
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 Suzuki Kosuke, Ishizaki Kou, Yoshino Masato	4. 巻 33
2. 論文標題 Local force calculations by an improved stress tensor discontinuity-based immersed boundary?lattice Boltzmann method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 047104 ~ 047104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0044268	査読の有無 無
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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 黒岩拓矢, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 熱を考慮した埋め込み境界 - 格子ボルツマン法の正方形ダクト内における水スラリー熱流動問題への適用
3. 学会等名 第56回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒岩拓矢, 吉野正人, 鈴木康祐
2. 発表標題 熱を考慮した埋め込み境界 - 格子ボルツマン法を用いた正方形ダクト内における氷スラリーの熱流動解析
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒岩拓矢, 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 熱を考慮した埋め込み境界 - 格子ボルツマン法による三次元ダクト内の氷スラリー熱流動解析
3. 学会等名 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2020 (TEC20) 東海支部第69期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木康祐, 吉野正人
2. 発表標題 応力テンソルの不連続条件を用いた埋め込み境界-格子ボルツマン法の改良
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム(東京都港区)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 稲室隆二, 吉野正人, 鈴木康祐	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 176
3. 書名 格子ボルツマン法入門	

1. 著者名 藤井雅留太, 平沢一真 (執筆: 54名、技術情報協会)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用	

〔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
研究分担者	藤井 雅留太 (FUJII Garuda) (90569344)	信州大学・学術研究院工学系・准教授 (13601)	
研究分担者	鈴木 康祐 (SUZUKI Kosuke) (10735179)	信州大学・学術研究院工学系・准教授 (13601)	
研究分担者	秋本 洋平 (AKIMOTO Youhei) (20709654)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	

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