

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18823

研究課題名（和文）希薄気体効果を利用した熱流体メタマテリアル構造の創成設計法の構築

研究課題名（英文）Construction of a structural optimization method of thermal fluid metamaterials using rarefied gas effects

研究代表者

西脇 眞二（Nishiwaki, Shinji）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10346041

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）： 気体分子の平均自由行程の大きさが無視できない微小スケールの流体場において、温度場により流れ場が誘起されることが知られている。希薄気体流れと呼ばれるこの現象は、近年、大気圧下においても実証され、注目を集めつつある。本研究では、この希薄気体流れに着目し、この現象および現象の逆、すなわち、流れ場により温度差が生じる性質（負の熱拡散）を持つ特異なメタマテリアルである熱流体メタマテリアルの創成設計法の構築をトポロジー最適化に基づき行った。さらに、その方法論を簡単な熱流体メタマテリアルの設計に適用し、構造設計案の創成を検討し、所望の性能を発揮するメタマテリアルの構造創成を可能であることを検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により希薄気体流れ場においてその性能を発揮する熱流体メタマテリアルの創成設計法を構築でき、またその方法により熱流体メタマテリアル構造創成設計できることを確認できた。本方法は、世界的に見ても類似な報告はなく学術的に見て高い新規性があり、極めて独創的であると考えられる。さらに、これらのメタマテリアルにより、微小デバイスにおいて流れを生じさせ、特定の流れを利用した加熱冷却が可能となり、超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実現が可能となる。これらのデバイスは様々な産業に展開でき、その社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）： It is known that the flow field is induced by the temperature field in the microscale fluid field where the mean free path scale of the gas molecules is not negligible. This phenomenon called as rarefied gas flow is recently observed under the atmospheric pressure, and has gathered attention. In this research, we constructed a shape creation method of thermal-fluid metamaterials which has a peculiar characteristic of flow induction and negative thermal diffusion due the reverse phenomenon where the temperature difference appears due to the fluid flow, based on the topology optimization method. Furthermore, the proposed method was applied to the simple thermal-fluid metamaterial designs, and was confirmed that the proposed method can provide the structural designs that show the desired performance.

研究分野：最適設計

キーワード：構造最適化 トポロジー最適化 熱流体 メタマテリアル 希薄流体効果 ボルツマン方程式

1. 研究開始当初の背景

気体分子の平均自由行程の大きさが無視できない微小スケールの流体場において、温度場により流れ場が誘起されることが知られている。希薄気体流れと呼ばれるこの現象は、近年、大気圧下においても実証され、注目を集めつつあった。さらに、この希薄気体流れに着目し、この現象、すなわち温度差により流れが生じる性質、あるいはその逆、すなわち、流れ場や圧力勾配により温度差が生じる性質を示す特異な材料である熱流体メタマテリアルの設計・利用が検討され始めていた。他方、研究代表者のグループでは、レベルセット法とフェーズフィールド理論に基づく新しいトポロジー最適化の方法を世界に先駆けて開発し、構造問題をはじめ、熱拡散問題、流体問題、電磁波伝搬問題や、熱・構造、熱・流体等のマルチフィジックス問題へ展開してきた。さらに、構造、電磁、音響メタマテリアルを対象とした材料構造設計にも展開し、次の展開としてトポロジー最適化による熱流体メタマテリアルの構造創成設計法の検討を進めていた。

2. 研究の目的

本研究では、トポロジー最適化に基づき、希薄気体流れにおいて、温度差により流れ場が生成される性質や、その逆として、流れ場により温度差が生じる性質（負の熱拡散）を持つ特異なメタマテリアルである熱流体メタマテリアルの創成設計法を構築し、さらに構築した方法論を簡単な熱流体メタマテリアルの構造設計に適用し、所望の性能を発揮する構造案が得られることを検証することを目的とした。

3. 研究の方法

クヌーセン数が1程度の希薄気体を対象とした場合、速度 ζ で運動する気体分子の速度分布関数 f の分布は、以下のボルツマン方程式で記述される。

$$\text{Sh} \frac{\partial f}{\partial t} + \zeta \cdot \nabla f = -\frac{\rho}{k} (f - f^{\text{eq}}) \quad (1)$$

ここで、 f^{eq} は平衡分布関数で、次式で示される。

$$f^{\text{eq}} = \frac{\rho}{(\pi T)^{3/2}} \exp\left(-\frac{\|\zeta - \mathbf{u}\|^2}{T}\right) \quad (2)$$

ρ は気体密度、 T は気体温度、 Sh はストローハル数である。

ここでは、トポロジー最適化における固定設計領域 D 内での取り扱いを可能にするため、上式の拡張を行う。トポロジー最適化の基本的な考え方は、構造最適化問題を材料分布問題に置き換えることにある。ここでは、次式に示すレベルセット関数 $\phi(\mathbf{x})$ を用いて固定設計領域 D 内の希薄気体領域 Ω と物体領域 $D \setminus \Omega$ およびそれらの境界 $\partial\Omega$ を次のように表現し、材料分布問題への置き換えを行う。ここで、 \mathbf{x} は固定設計領域 D のある位置を示す。

$$\begin{cases} 0 < \phi(\mathbf{x}) \leq 1 & \text{for } \mathbf{x} \in \Omega \\ \phi(\mathbf{x}) = 0 & \text{for } \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ -1 \leq \phi(\mathbf{x}) < 0 & \text{for } \mathbf{x} \in D \setminus \Omega \end{cases} \quad (3)$$

すなわち、レベルセット関数 $\phi(\mathbf{x})$ が正の領域は希薄気体領域、負の領域は物体(固体)領域、レベルセット関数の零等値面はそれらの境界となる。さらに、このレベルセット関数から、希薄気体領域を示すために、以下に示す特性関数と関連付ける。

$$\chi_\phi = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi(\mathbf{x}) \geq 0 \\ 0 & \text{if } \phi(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

この特性関数 χ_ϕ を用いて、式(1)の希薄気体領域 Ω 支配方程式を、次式に示すように、物体領域を含む固定設計領域 D 全体へと拡張する。

$$\text{Sh} \frac{\partial f}{\partial t} + \zeta \cdot \nabla f = -\frac{\rho}{k_\eta} (f - f^{\text{eq}}(\rho, \mathbf{u}_\eta, T_\eta)), \quad (5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_\eta(\eta_1)} &= \eta_1 \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_s} \right) + \frac{1}{k_s}, \\ \mathbf{u}_\eta(\mathbf{u}, \eta_2) &= \eta_2 \mathbf{u}, \\ T_\eta(T, \eta_3) &= \eta_3 (T - T_s) + T_s, \end{aligned} \quad (6)$$

である。さらにここで、

$$\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \chi_\phi \quad (7)$$

とする。

次に、熱流体メタマテリアル設計のための最適化問題の定式化について説明する。体積制約のもと評価領域における \mathbf{e}_1 で示した特定の方向の平均流速の最大化を行った。

$$J = - \int_{\Theta} \int_{\Omega_e} \mathbf{u} \cdot \mathbf{e}_1 dDdt \quad (8)$$

制約条件

$$\text{体積制約 } V - V_{\max} \leq 0 \quad (9)$$

ここで、 Ω_e は評価領域、 V_{\max} は体積制約の上限値である。なお、後述の最適化結果では、 \mathbf{e}_1 は x_1 軸の正の方向を示す。

そして上の定式化に基づき、随伴変数法により設計感度を導出し、図 1 に示す最適化アルゴリズムを作成した。

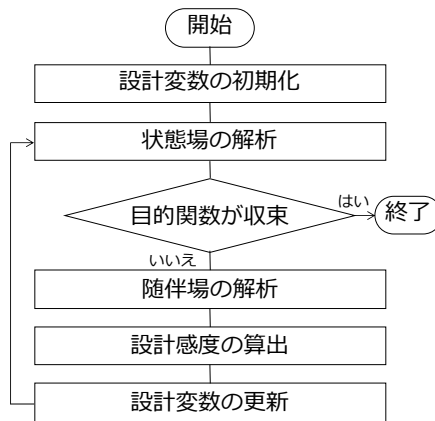


図 1 最適化アルゴリズム

4. 研究成果

まずは、上で述べた拡張された設計領域の拡張の妥当性について検証した結果を示す。ここでは、クエット流の数値解析を通して、拡張した支配方程式の妥当性についての検証を行う。二枚の平板 A、B をそれぞれ $x_2=0$ 、 $x_2=1.0$ の位置に平行に設置し、そのうち平板 A は静止させ、平板 B は x_1 軸の正の方向に一定速度 $u_w=1.0$ で移動させた。平板の温度は A、B とともに $T_w=1.0$ とした。二枚の平板は x_1 方向に無限に続いているとして解析領域の右端と左端には周期境界条件を課し、平板 B には運動する壁についての拡散反射条件を課した。このとき、図 2(a) に示すように平板 A を静止壁として拡散反射条件を課した場合と、図 2(b) に示すように固体領域として解析領域内に包含した場合について解析結果を比較した。数値解析の際に、空間方向は、図 3(a) について 20×20 分割、図 3(b) について 20×25 分割した。また、物体領域についてのパラメータ k_s は、 $k_s = 5.0 \times 10^{-3} \times \sqrt{\pi}$ 、すなわち固体領域中ではクヌーセン数が $Kn = 5.0 \times 10^{-3}$ と見なされるように設定した。

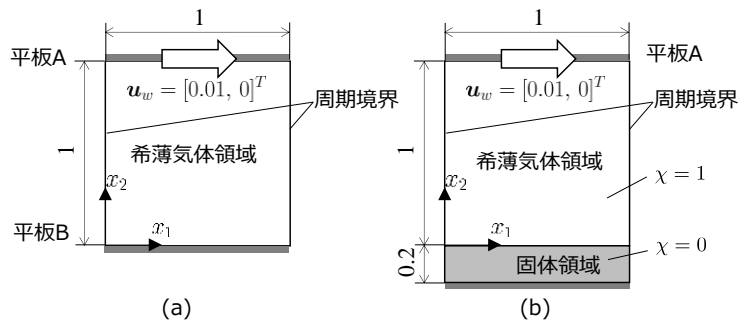


図 2 解析モデルの比較

図 3 に、希薄気体のクヌーセン数 $Kn=0.01, 0.1, 1$ に対して、図 2(a) の場合と図 2(b) のそれぞれの場合について、 $x_1=0.5$ における速度 u_1 を比較した結果を示す。これより、いずれのクヌーセン数においても、二つの解析モデルの結果が精度よく一致していることが分かる。したがって、拡張し

た支配方程式の数値解析により、希薄気体領域と物体領域の界面において静止壁に対する拡散反射条件が模擬できていることが確認できた。

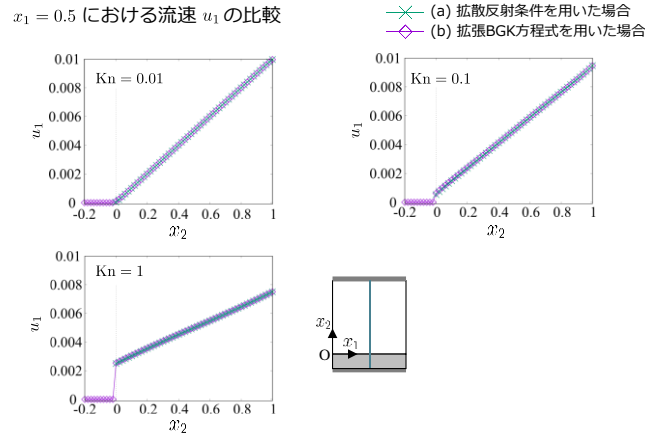


図3 解析モデルの比較結果

次にメタマテリアルの最適化結果を示す。図4に設計領域を示す。図に示したように、 x_1 軸正の方向の流れを最大化した。固定設計領域内には必ず希薄気体領域となる二箇所の非設計領域を設け、この領域を目的汎関数の評価領域とした。流れの励起に必要な温度勾配を生じさせるため、中央部の評価領域をまたいで下側の領域では物体の温度を $T_c = 1.0$ 、上側の領域では $T_h = 2.0$ と設定した。また、解析領域の上下端、左右端には周期境界条件を課した。解析領域は 40×120 分割し、希薄気体のクヌーゼン数は $K_n = 0.5$ 、物体領域中のクヌーゼン数は $K_n = 5.0 \times 10^{-3}$ とし、体積制約の上限値 V_{\max} は、設計領域の体積の 25% とし最適化を図った。

図5に最適構造と最適構造の流速分布と温度分布を示す。なお、最適構造の白色の領域は希薄気体領域、黒色の領域は固体領域を示す。これより、最適構造は、高温の物体領域と低温の物体領域のそれぞれから、返しが突き出ているような流路構造となっていることがわかる。さらに、流速分布と温度分布から、この返しによって希薄気体領域中に x_1 方向についての温度勾配が生じ、流れが強く誘起されていることがわかる。

以上のように、本方法により熱流体メタマテリアルの構造が創成できることがわかった。

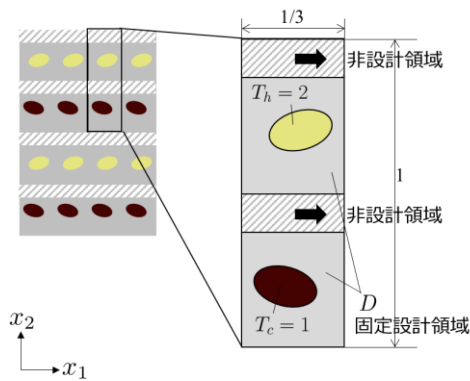


図4 設計領域

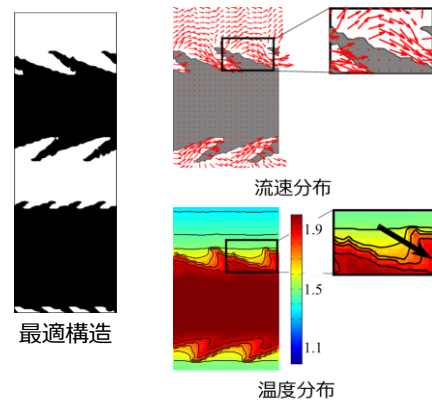


図5 最適構造とその流速・温度分布

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 佐藤綾美, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二	4. 巻 83
2. 論文標題 希薄気体流れを対象としたトポロジー最適化	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 p.17-00135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00135	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 Sato, A., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Takata S.,	4. 巻 395
2. 論文標題 A Topology Optimization Method in Rarefied Gas Flow Problems Using the Boltzmann Equation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 60-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.06.022	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 Sasaki, Y., Sato, Y., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S.	4. 巻 188
2. 論文標題 Topology Optimization for Fluid Flows Using the MPS Method Incorporating the Level Set Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computers and Fluids	6. 最初と最後の頁 86-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2019.05.010	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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Sato, A., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S.
2. 発表標題 An optimum design method for devices using thermal transition flows based on topology optimization
3. 学会等名 The Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2018, (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sato, A., Yamada, T., Matsumoto, M., Nishiwaki, S.
2. 発表標題 Topology Optimization for Channel Flow Problems of Rarefied Gas Based on a Deterministic Approach
3. 学会等名 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤綾美, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二
2. 発表標題 希薄気体流れを利用したマイクロ流体デバイスのトポロジー最適化
3. 学会等名 第13回最適化シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takata, S.
2. 発表標題 nudsen pump and a memory of Prof. Muntz in Kyoto
3. 学会等名 31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤綾美, 岡本崇, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二
2. 発表標題 希薄気体流れを対象としたトポロジー最適化におけるボルツマン方程式に基づく感度解析
3. 学会等名 第22回計算工学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sato, A, Okamoto, S., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Takata S.
2. 発表標題 A topology optimization method for molecular gas dynamics based on the Boltzmann equation
3. 学会等名 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐藤綾美, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二
2. 発表標題 希薄気体を利用した熱流体メタマテリアル創成のためのトポロジー最適化法に関する一考察
3. 学会等名 第27回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2017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
研究分担者	山田 崇恭 (Yamada Takayuki) (30598222)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	高田 滋 (Takata Shigeru) (60271011)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	泉井 一浩 (Izui Kazuhiro) (90314228)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	