

令和 5 年 4 月 27 日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03996

研究課題名（和文）時間発展型マルチフィジックス問題における形状最適化の検証

研究課題名（英文）Verification of shape optimization in nonstationary multi-physics problems

研究代表者

片峯 英次（KATAMINE, Eiji）

岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：00224452

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：基礎的な非定常熱弾性場と非定常熱対流場における形状決定問題に対する数値解法を提案した。熱弾性場問題では、指定された時間区間において熱変形が最小化する形状を決定する剛性最大化問題などが検討された。また熱対流場問題では、部分境界での温度時間履歴を制御する形状決定問題などが検討された。これらの形状設計問題に対して、随伴変数法を用いて形状修正の感度となる形状勾配関数が理論的に導出された。FreeFEMを利用し、導出した形状勾配関数に基づいて最適形状を解析するプログラムが開発された。二次元問題の解析結果に基づいて、提示した解法の妥当性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時間発展型マルチフィジックス問題の形状最適化は、実際の設計現場において要求度の高い課題であるにも関わらず、理論に基づいた研究はこれまでほとんど実施されていなかった。そこで、基礎的な非定常熱弾性場と非定常熱対流場における形状決定問題に対して、最適設計理論等に基づいた数値解析法を提案して、その解析手法の妥当性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：A numerical analysis method is proposed for shape determination problems in fundamental unsteady thermoelastic field and unsteady thermal convection field. In the thermoelastic field problem, the stiffness maximization problem, which determines the shape that minimizes the thermal deformation in the specified time period, was investigated. In the thermal convection field problem, a shape determination problem was set to control the temperature time history at the sub-boundary. For these shape design problems, the shape gradient function, which is the sensitivity of shape updating, was theoretically derived using the adjoint variable method. Numerical programs were developed to analyze the optimal shape based on the derived shape gradient function using FreeFEM. Based on the numerical results of the two-dimensional problem, the validity of the proposed solution was demonstrated.

研究分野：工学

キーワード：最適設計 形状最適化 形状同定 連成問題 有限要素法 随伴変数法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

弾性体、熱伝導場あるいは流れ場などの連続体領域形状を設計対象にした形状最適化問題は、機械構造物を設計する上で重要な課題である。実際の設計現場においては、弾性・伝熱・流れ等の連成を考慮した複雑なマルチフィジックス問題に対して形状設計を行う場合が多い。さらに機器性能の改善を目的とした観点から、非定常性を考慮したマルチフィジックス問題における合理的な形状最適化法の確立が強く望まれている。

2. 研究の目的

伝熱と弾性変形を連成させた熱弾性場、あるいは流れと伝熱を連成させた熱対流場などの連成場問題に対して、時間発展型のマルチフィジックス問題における合理的な形状最適化の解法を提案し、その妥当性を検証する。その中でも、本研究では基礎的な課題として、

- (1) 非定常熱弾性場における熱変形に関して、(a)任意時間内における熱変形が最小となるように形状を決定する剛性最大化問題、(b)熱変形の時間履歴が目標値になるような形状を決定する熱変位制御問題
- (2) 非定常熱対流場に関して、(a)強制熱対流場に対する部分領域において、温度の時間履歴が目標値になるような形状を決定する温度制御問題、(b)自然対流場において回転物体の影響と考慮した問題における部分境界での放熱量最大化問題、(c)自然対流場の支配方程式である Navier-Stokes 方程式の圧力項および粘性項における密度を温度による関数として、微弱な圧縮性効果を考慮した熱対流場の部分境界における放熱量最大化問題

などを取り上げ、それぞれの問題の定式化、形状修正感度関数の理論的導出、解析アルゴリズムの提案を行い、プログラム開発とその数値解析結果に基づいて、解法の妥当性を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

- (1) 非定常熱弾性場問題においては、(1-a)熱変形が最小となるように形状を決定する剛性最大化問題、(1-b)熱変位の時間履歴が目標値になるような形状を決定する熱変位制御問題に対して検証を行った。具体的には、これら問題に対して、問題の定式化を行い、Lagrange 乗数法あるいは随伴変数法を用いて形状修正の感度となる形状勾配関数を理論的に導出した。その後、解法のアルゴリズムを提案した。実際の解析手順は、形状勾配関数を評価するための通常の非定常熱伝導場・熱弾性場解析、随伴非定常熱伝導場・熱弾性場解析、および形状修正解析の合計 5 つの有限要素解析ステップによって繰り返す解析アルゴリズムである。また、形状修正解析では、形状修正の支配方程式を線形弾性問題に置き換えて解く方法 (H¹勾配法) を使用した。この方法は、評価された形状勾配関数の大きさに比例する引張り力を設計境界に作用させたときの弾性変形量を、形状修正量と見なして形状を更新する方法である。最後に FreeFEM を利用した二次元問題のプログラムを開発し、数値解析を行って提案した解法の妥当性を検証した。
- (2) 非定常熱対流場においては、(2-a)時間 $t=0$ から $t=T$ において、ある部分領域での実温度時間履歴と目標とする温度時間履歴との 2 乗誤差積分を最小化する形状最適化問題を定式化した。また熱弾性場問題と同様な手法を用いて、形状修正の感度関数の導出、解析プログラムの開発を行い、簡単な数値解析結果より解法の妥当性を検証した。また(2-b)、(2-c)についても同様な手法を用いた。

4. 研究成果

研究成果の一例として、上記の(2)非定常熱対流場の形状決定に対する研究成果について、解析結果を用いて簡単に紹介する。

まずは回転体の影響を考慮した非定常自然対流場の部分境界における放熱量最大化の結果について紹介する[1]。図1に、放熱量最大化問題の解析モデル、使用した有限要素分割、および数値解析結果を示す。 $D=1.2$, $a=0.36$, $d=0.24$ とし、グラスホフ数 $Gr=10^5$ 、レイリー数 $Ra=7 \times 10^5$ として解析を行った。温度場の境界条件は、熱伝達境界を Γ_{h1} , Γ_{h2} , Γ_{h3} とし熱伝達率を 1×10^{-4} 、外気温を $\theta_f=0$ 、初期温度を $\theta=0$ 、温度既知境界 $\Gamma_{\theta H}$ において $\theta=1$ とした。流れ場の境界条件は、 Γ_{h1} , Γ_{h2} , $\Gamma_{\theta H}$ をいずれも壁境界とし、流速 0 を与えた。 Γ_{h3} は回転体とし、境界条件として回転ベクトル ω を与えた。 Γ_{h2} を設計境界として、外部境界 Γ_{h1} での放熱量最大化を目的とした。設計境界以外は形状更新の際には完全に拘束し、面積制約として面積一定の制約を与えた。時間 $t=0$ から $T=15000$ で解析した。実際の数値解析には FreeFEM を利用した。流速に対しては P2 要素、圧力に対しては P1 要素、温度、形状更新量の解析に対しては P2 要素を用いた。回転体の速度を変化させた 2 つのケースを設定し、Case1, Case2 (Case1 の回転速度 3 倍) の解析を行った。

図1に、Case1, Case2 における最適形状での最終時刻 $T=15000$ における温度分布を示す。最適形状では、初期形状と比較して、高温の熱流体が外側境界へ向かってスムーズに熱移動する形状へ形状更新した。初期形状に対して最適形状では、放熱量がそれぞれ 17% (Case1), 25% (Case2)

向上した。

このことから、提案した手法の基本的な妥当性が確認できた。

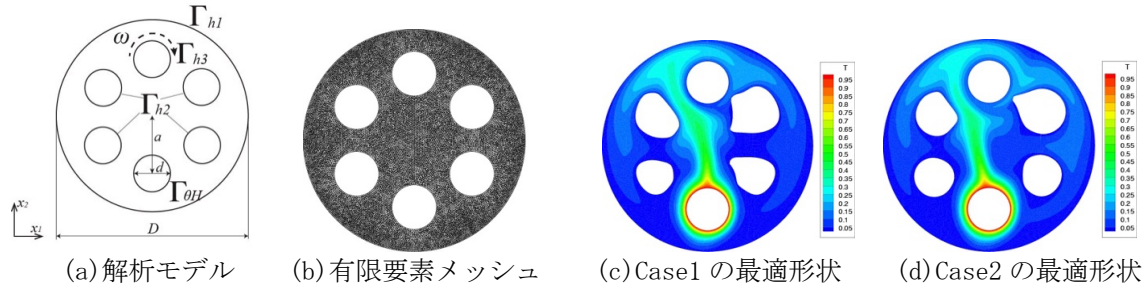


図1 回転体を有する自然熱対流場の解析結果（解析モデル，有限要素メッシュ，Case1，Case2の最適形状における温度分布）

次に，流入口での拍動流を考慮した非定常強制熱対流場の部分領域における温度制御の解析例を紹介する[2]．解析例として，図2に示す分岐・合流管モデルを設定した． $d=1$ とし，流れ場の境界条件は，拍動流入境界ABで $u_{\max}=0.15$ で流入し，境界CDの応力ゼロの自然境界で流出するとした．境界BCおよびDAは壁境界として $u=0$ とした．温度場の境界条件に関しては，境界ABを温度既知境界 Γ_θ として $\theta=1$ とした．境界CDは断熱境界 Γ_q として $q=0$ と設定し，境界BCおよびDAは熱伝達境界 Γ_{h1} として熱伝達率 $h=1$ ，外気温度 $\theta_f=0$ とした．レイノルズ数は100，プラントル数は100で解析した．

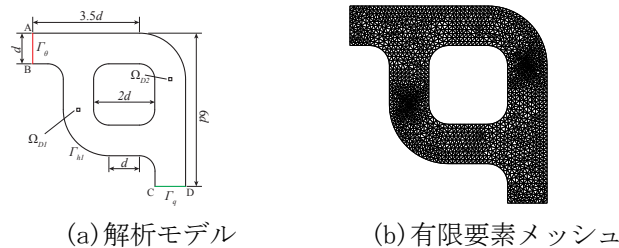


図2 分岐・合流する強制熱対流流路の数値解析の問題設定

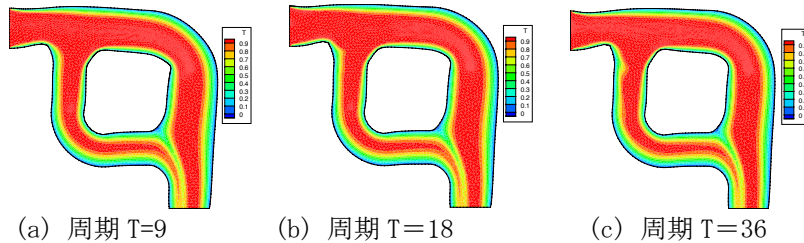


図3 分岐・合流する強制熱対流流路の最適形状（Case A, B, Cの最終時刻の温度）

本解析例では，境界ABでの流入条件を(a)周期 $T=9$ の拍動流(Case A)，(b)周期 $T=18$ の拍動流(Case B)，(c)周期 $T=36$ の拍動流(Case C)の場合に対して解析を行った．それぞれの場合に対して， Ω_{D1} における温度履歴を目標温度履歴 θ_D として， Ω_{D2} の温度履歴が Ω_{D1} におけるその目標温度履歴 θ_D と同一になるように形状設計することを目的とした．なお，実際の形状更新において，形状更新とともに部分領域 Ω_{D1} の温度分布履歴も変更されるため，その形状更新に基づく Ω_{D1} の目標温度履歴 θ_D の変化に追従して， Ω_{D1} と Ω_{D2} の温度履歴が同一になるように形状決定する問題として解析を行なった．時間は $t=0$ から $t=T=300$ とし，設計境界は熱伝達境界 Γ_{h1} として温度既知境界 Γ_θ と断熱境界 Γ_q を完全固定とした．図3に最終時刻 $t=T=300$ における各場合の温度分布を示している．いずれの場合においても， Ω_{D2} の温度履歴が Ω_{D1} における目標温度履歴 θ_D に一致し，目的汎関数がゼロに収束した．

このことから，提案した手法の基本的な妥当性が確認できた。

<引用文献>

- [1] 渡辺聡史，片峯英次，非定常熱対流場における回転体を考慮した形状最適化，日本機械学会2020年年次大会講演論文集，4pages，(2020)，オンライン開催．
- [2] 片峯英次，濱町陸来，拍動流を考慮した非定常強制熱対流場における形状設計，第27回日本計算工学講演会論文集，4pages，(2022)．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 T. Aoki, T. Kurahashi and E. Katamine	4. 巻 13
2. 論文標題 Shape optimization in thermal convection field considering a slight compressibility	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JSIAM Letters	6. 最初と最後の頁 44-47
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 片峯英次, 山口智也, 村山大騎	4. 巻 20
2. 論文標題 非定常一様粘性流中に置かれた孤立物体の揚力を制御する形状設計	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 81-87
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 片峯英次, 青木 崇	4. 巻 19
2. 論文標題 流速時間履歴を規定する非定常自然対流場の形状設計	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 13-18
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 T. Kurahashi, Y. Ozeki and E. Katamine	4. 巻 14
2. 論文標題 Shape optimization analysis considering a rotational body in a flow field based on the adjoint variable and the finite element methods	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2019jfst0004	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 Y. Ozeki, T. Kurahashi and E. Katamine	4. 巻 11
2. 論文標題 Consideration on shape identification for flow channel including a rotational body	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JSIAM Letters	6. 最初と最後の頁 69-72
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 片峯英次, 尾関優汰	4. 巻 84
2. 論文標題 非定常粘性流れ場における形状同定問題の解法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00323	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 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 濱町陸来, 片峯英次
2. 発表標題 拍動流を考慮した非定常強制熱対流場における形状設計
3. 学会等名 日本機械学会第34回計算力学講演会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口智也, 片峯英次
2. 発表標題 流体力規定を目的とした非定常粘性流れ場の形状設計
3. 学会等名 日本機械学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺聡史, 片峯英次
2. 発表標題 非定常熱対流場における回転体を考慮した形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木 崇, 倉橋貴彦, 片峯英次
2. 発表標題 熱対流場において粘性効果が形状最適化の結果に与える影響に関する考察
3. 学会等名 日本機械学会 CMD2020 計力スクエア研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濱町陸来, 片峯英次
2. 発表標題 拍動流を考慮した非定常強制熱対流場における形状最適化
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部令和2年度研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 崇, 倉橋貴彦, 片峯英次
2. 発表標題 微圧縮性を考慮した熱対流場における形状最適化
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年研究部会連合発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 広瀬智史, 倉橋貴彦, 片峯英次
2. 発表標題 随伴変数法および有限要素法に基づく 3 次元熱弾性変形問題に対する形状最適化解析
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第58期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片峯英次, 村山大騎, 尾関優汰
2. 発表標題 揚力最大化を目的とした非定常粘性流れ場の形状最適化
3. 学会等名 第24回日本計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木 崇, 片峯英次, 倉橋貴彦
2. 発表標題 流速分布を規定する非定常自然対流場の形状同定
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片峯英次
2. 発表標題 熱弾性場・熱対流場などのマルチフィジックス問題における形状設計
3. 学会等名 日本計算数理工学会 第37回計算数理工学フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片峯英次, 村山 大騎
2. 発表標題 流体力規定を目的とした非定常粘性流れ場の形状設計
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村山大騎, 片峯英次
2. 発表標題 揚力最大化を目的とした非定常粘性流れ場の形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会第32回計算力学講演会講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡辺聡史, 片峯英次
2. 発表標題 放熱量最大化を目的とした非定常自然対流場の形状決定
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部令和元年度研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 広瀬 智史, 片峯英次
2. 発表標題 非定常熱弾性場の形状設計
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第69期講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 E. Katamine and T. Aoki
2. 発表標題 Solution to Shape Design of Unsteady Natural Convection Fields to Control Time History of Flow Velocity
3. 学会等名 72th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木 崇, 倉橋貴彦, 片峯英次
2. 発表標題 随伴変数法および有限要素に基づく熱対流場ける形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第57期講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片峯英次, 広瀬智史
2. 発表標題 非定常性を考慮した熱弾性場の形状最適化
3. 学会等名 日本応用数理学会2018年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小森太陽, 片峯英次
2. 発表標題 熱弾性場の3次元形状最適化解析
3. 学会等名 日本応用数理学会2018年度年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 広瀬智史, 片峯英次
2. 発表標題 剛性最大化を目的とした非定常熱弾性場の形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会2018熱工学コンファレンス講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小森太陽, 片峯英次
2. 発表標題 Freefem++を利用した3次元熱弾性場の形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会2018熱工学コンファレンス講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 広瀬智史, 片峯英次
2. 発表標題 熱変位のコントロールを目的とした非定常熱弾性場の形状決定
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部平成30年度研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木 崇, 片峯英次
2. 発表標題 流速規定を目的とした非定常自然対流場の形状決定
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第67期講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片峯英次, 濱町陸来
2. 発表標題 拍動流を考慮した非定常強制熱対流場における形状設計
3. 学会等名 第27回日本計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片峯英次, 濱町陸来
2. 発表標題 温度時間履歴を制御する非定常強制熱対流場の形状設計
3. 学会等名 日本設計工学会 2022年度秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北川翔陽, 片峯英次
2. 発表標題 渦度最小化を目的とした非定常粘性流れ場の形状最適化
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部令和4年度研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鳥川星也, 片峯英次
2. 発表標題 日本設計工学会東海支部令和4年度研究発表講演会
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部令和4年度研究発表講演会
4. 発表年 2023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
---------	---------