

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 15 日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560247

研究課題名(和文) 複雑な熱弾性場・熱対流場における多目的形状最適化の解法およびその検証

研究課題名(英文) Solution and Verification for Multi-Objective Shape Optimization on Complicated Thermo-elastic Fields and Heat-convection Fields

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) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：弾性場，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問題である．本研究では，粘性流れ場，熱対流場，熱弾性場において，性能改善を目的としたいくつかの多目的形状設計問題を取り上げ，その問題に対する実用的な解法を提案した．問題の定式化を行い，形状最適化のための形状修正の感度関数の導出，解析プログラムの開発を行って，簡単な2次元問題の数値例から解法の妥当性を示した．

研究成果の概要(英文)：Shape optimization problems of linear elastic bodies, heat-conduction fields, viscous flow fields, etc. are very important problems in mechanical and structural design. In this study, numerical analyses method of some multi-objective shape optimization problems was proposed for improving performance in viscous flow fields, heat-convection fields, and thermo-elastic fields. These multi-objective shape optimization problems were formulated, then shape sensitivity functions for the shape optimization problems are derived theoretically. Numerical analyses program were developed for the shape optimization problems, and the validity of proposed method was confirmed by results of 2D numerical analyses.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：最適設計 形状最適化 連成問題 有限要素法 随伴変数法

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非常に重要な問題である。筆者がこれまでに実施してきた研究対象は、いずれも弾性・伝熱・流れ場が連成しない基本的な単一場問題であり、また単一目的問題に対する検討であった。しかしながら、実際の設計現場においては、連成を考慮した複雑な問題に対して形状設計を行う場合が多く、また複数の目的が混在する多目的問題に対する形状最適化法の確立が強く望まれていた。

2. 研究の目的

これらの複雑な連成場における多目的形状最適化が実現できる形状設計システムの確立を試みた。その中でも、本研究では基礎的な課題として、

(1) 連成場でない粘性流れ場問題を取り上げ、

一様粘性流体中に置かれた孤立剛体に対して、抗力最小化・揚力最大化の多目的形状最適化

粘性流れ場の部分領域において実際の流速分布と目標の流速分布との二乗誤差最小化(流速規定)と、全領域の散逸エネルギーを最小化する多目的形状最適化

(2) 伝熱と流れを連成させた強制熱対流場の部分領域における温度規定と、熱対流場全体で失われるエネルギー最小化の多目的形状最適化

(3) 伝熱と弾性を連成させた熱弾性場の部分境界における熱変形規定と質量最小化の多目的形状最適化

を取り上げ、問題の定式化、形状修正のための感度関数の理論的導出、およびその感度関数を用いた数値解析を行い、その結果から提案する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) 粘性流れ場における多目的形状最適化

抗力最小化・揚力最大化問題

定常一様粘性流体中に置かれた孤立剛体に対して、抗力最小化・揚力最大化の多目的形状最適化の解法を提案し、その解法の妥当性を検討した。はじめに、抗力最小化と揚力最大化の重み付き線形和に設定した目的汎関数に対して、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。その形状勾配関数を評価するための解析アルゴリズムを提案して、二次元のプログラム開発を行い、解析例から提示した解法の妥当性を検証した。なお、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を使用した。実際には、評価された感度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を用いた。

流速分布規定と散逸エネルギー最小化

粘性流れ場の部分領域において流速分布を規定し、流れ場全体での散逸エネルギーを最小化する粘性流れ場の多目的形状最適化問題の解法を試みた。重み付き線形和に基づいて目的汎関数を設定した場合、制約法に基づいて問題を設定した場合の二通りの問題に対して定式化を行い、上記と同様な手順によって、形状修正の感度関数の導出、解析プログラムの開発を行って、簡単な数値解析結果より、解法の妥当性を検討した。

(2) 強制熱対流場の形状最適化

強制熱対流場の部分領域における温度分布規定と、熱対流場全体での散逸エネルギーを最小化する解析を試みた。上記の粘性流れ場問題と同様に、重み付き線形和に基づいて目的汎関数を設定した場合、制約法に基づいて問題を設定した場合の二通りの問題に対して定式化を行い、形状修正の感度関数の導出、解析プログラム開発を行って、簡単な数値解析結果より、解法の妥当性を検討した。なお、本解析手順は、問題の定式化上、その感度関数評価のための粘性流れ場解析、熱伝達場解析、随伴熱伝達場解析、および随伴流れ場解析の 4 つと、形状修正解析の合計 5 つの解析ステップによって繰り返される。

(3) 熱弾性場の形状最適化

熱弾性場の部分境界における熱変形規定と質量最小化の多目的形状最適化の解法を試みた。制約法に基づいて問題を設定し、形状修正の感度関数の導出、解析プログラム開発を行って、簡単な数値例を通じて解法の妥当性を検討した。本解析手順は、問題の定式化上、その感度関数評価のための伝熱場解析、弾性場解析、随伴弾性場解析、および随伴熱伝導場解析の 4 つと、形状修正解析の合計 5 つの解析ステップによって繰り返される。

4. 研究成果

代表的な研究成果として、粘性流れ場における流速分布規定と散逸エネルギー最小化の多目的形状最適化、および強制熱対流場における部分領域での温度分布規定と熱対流場全体での散逸エネルギー最小化の多目的形状最適化について紹介する。

(1) 粘性流れ場の多目的形状最適化

図 1 に示す簡単な二次元問題の解析結果を紹介する〔学会発表欄〕。左側境界 0 から流入し、右側および 8 個の下側境界 1 から流出する問題を考える。下側 8 個の出口境界 1 部付近に流速規定部分領域 Ω を設定し、それらの流速を平均化するように形状を決定した。

形状更新解析では， Γ_{design} 以外の境界を完全拘束した． $Re=100$ で解析を行い，流れ場解析の有限要素には Taylor-Hood 型要素 (P2/P1 要素) を用いて，節点数，要素数はそれぞれ 7,558, 3,615 である．制約法に基づいて，散逸エネルギーの大きさを初期形状の大きさに維持して流速分布規定問題を解析した結果を図 2,3 に示す．図 2 は形状比較，図 3 は初期形状および最適形状における流速分布の違いを示している．図 3 より，最適形状では下側出口境界 Γ_1 での流速分布が目標流速分布 (Target) に近づいて平均化している様子が確認できる．

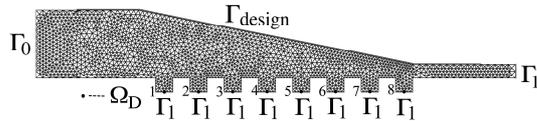


図 1 流速分布規定問題

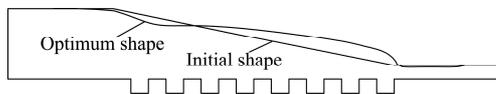


図 2 解析結果：形状比較

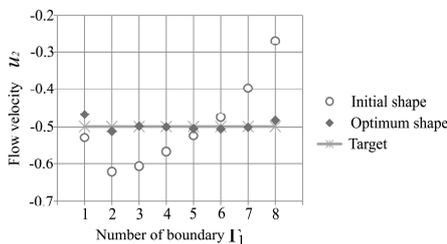


図 3 解析結果：流速分布比較

(2) 強制熱対流場の多目的形状最適化

図 4 に示す合流管流路モデルの解析結果を紹介する〔雑誌論文〕. 流れの境界条件は，流入境界 Γ_{01} および Γ_{02} で Poiseuille 流れ，流出境界 Γ_1 で自然境界とした．温度場の境界条件は，流入境界 Γ_{01} において温度 300, Γ_{02} において温度 100, 流出境界 Γ_1 は断熱境界，全流路壁境界を熱伝達境界 Γ_h として，その熱伝達境界 Γ_h においては熱伝達率 0.05, 外気温度 0 とした．Reynolds 数 $Re=40$, Peclet 数 $Pe=80$ とし，温度規定領域 Ω_D を流出境界 Γ_1 付近に設定し，設計境界 Γ_{design} は下側全境界とした．節点数，要素数はそれぞれ 2,580, 1,199 である．温度規定領域 Ω_D における 3 節点での温度を規定することとし，図 4 の左から順に，100, 98, 96 とし，初期形状における各節点温度よりも約 6 だけ低くなるよう設定した．

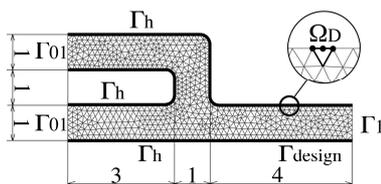
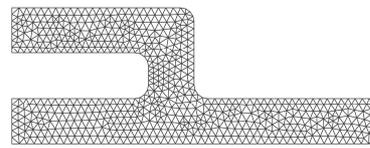
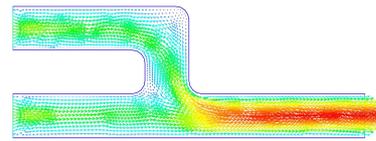


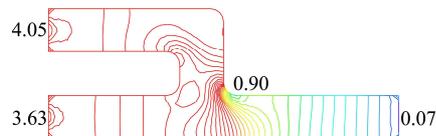
図 4 温度分布規定問題



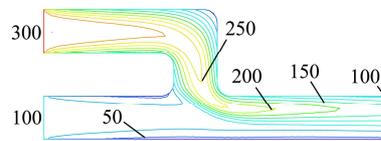
(a) mesh



(b) 流速分布

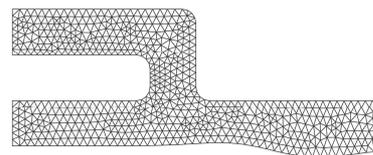


(c) 圧力分布

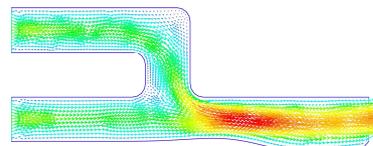


(d) 温度分布

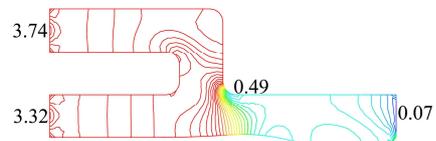
図 5 解析結果：初期形状



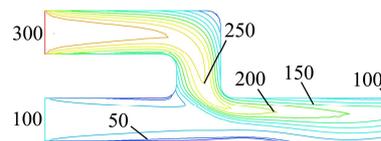
(a) mesh



(b) 流速分布



(c) 圧力分布



(d) 温度分布

図 6 解析結果：最適形状

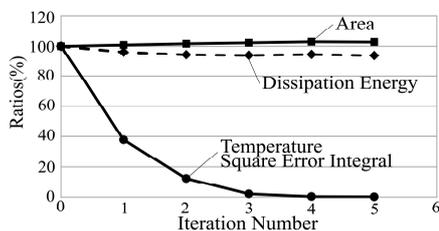


図7 解析結果：収束履歴

制約法に基づいて、散逸エネルギーの大きさを初期形状の値以下に設定して解析を行った場合の結果を紹介する。初期形状および最適化後の形状における流速分布、圧力分布、温度分布を図5および図6に示す。図7に形状更新の繰り返しにおける収束履歴を示す。これらの結果から、規定領域D付近の下側設計境界が膨張した最適形状となっていることが確認できる。この膨張したことによって規定領域D付近で流速が低下して熱輸送の効果が弱くなり、このことが温度を低下させて温度規定を実現したと考えられる。また、図7から、目的汎関数の温度分布二乗誤差は単調に減少して最適形状ではほぼゼロに収束し、散逸エネルギーは制約を満たして最適形状では初期値の93.8%となった。実際、図5と図6の圧力分布に着目してみると、初期形状における入口境界01および02における圧力値がそれぞれ、4.05、3.63であったことに対して、最適形状ではその圧力値がそれぞれ3.74、3.32となり、圧力損失が減少していることが確認できる。

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)

片峯英次, 桐山恭幸, 畔上秀幸, 強制熱対流場における多目的形状最適化, 日本機械学会論文集, 79巻, 806号B編, 2239-2253, 2013, 査読有。

E.Katamine and Y.Matsui, Multi objective shape optimization for drag minimization and lift maximization in low Reynolds number flows, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Volume 61, 83-92, 2012, 査読有。

〔学会発表〕(計10件)

片峯英次, 金井陵真, 流速分布規定と散逸エネルギー最小化を目的とした定常粘性流れ場の多目的形状最適化, 日本機械学会2014年九州支部第67期総会・講演会, (2014-3-14), 九州工業大学。

E.Katamine and Y.Kiriyama, Multi objective Shape Optimization in Forced Heat-convection Field, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on

Computational Mechanics (ISCM2013), (2013-12-12), InterContinental Singapore, Singapore.

片峯英次, 加藤勇希, 熱応力分布を規定する熱弾性場の形状同定問題の解法, 日本機械学会2013年M&M材料力学講演会, (2013-10-12), 岐阜大学。

片峯英次, 柿ヶ野巧, 流速分布を規定する定常粘性流れ場の形状同定問題の解法, 日本機械学会2013年度年次大会, (2013-9-9), 岡山大学。

E.Katamine, H.Yoshioka, Shape Optimization of Thermoelastic Fields for Mean Compliance Minimization, 6th European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering, (2012-9-10), University of Vienna, Vienna, Austria.

E.Katamine, H.Azegami, H.Yoshioka, Shape Optimization of Thermoelastic Fields for Stiffness Maximization, ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, DETC/CIE2012, (2012-8-14), Hyatt Regency McCormick Place, Chicago, USA.

片峯英次, 松井康剛, 低レイノルズ数流れにおける抗力最小化・揚力最大化を目的とした多目的形状最適化, 第61回理論応用力学講演会, (2012-3-8), 東京大学生産技術研究所。

片峯英次, 松井康剛, 定常粘性流れ場の多目的形状最適化, 日本機械学会第24回計算力学講演会, (2011-10-10), 岡山大学。

片峯英次, 松井康剛, 低レイノルズ数流れにおける多目的形状最適化(最適化手法の違いに対する検討), 日本流体力学学会年会, (2011-9-9), 首都東京大学。

E.Katamine, S.Shiraki, H.Azegami, Multi-purpose Shape Optimization in Forced Heat-convection Fields, 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, (2011-6-14), 静岡グランシップ。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片峯 英次 (KATAMINE EIJI)

岐阜工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 00224452