

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：53701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420161

研究課題名(和文) 基礎的なマルチフィジックス問題における多目的形状最適化

研究課題名(英文) Multi-Objective Shape Optimization on Fundamental 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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：基礎的なマルチフィジックス問題における多目的形状最適化として、熱弾性場と自然対流場の問題を取り上げた。熱弾性場問題では、剛性最大化を目指した多目的形状最適化として、温度分布に基づく熱変形によるコンプライアンスの重み付き線形和を目的汎関数に設定し、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。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実現するプログラム開発を行い、二次元問題の解析例から提示した解法の妥当性を示した。また、自然対流場の問題に対しても同様な手法によって解法の妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, thermo-elastic field and natural convection field problems were considered as multi-objective shape optimization in the issue of fundamental multi-physics. For the thermo-elastic field problem, to achieve multi-objective shape optimization for stiffness maximization, compliance evaluated by thermal deformation based on temperature distribution and by mechanical deformation based on surface force or body force is used as an objective functional by using weighting method. Shape gradient of the multi-objective shape problem is derived theoretically using adjoint variable method and the formulae of the material derivative. Numerical analyses program for the shape optimization is developed based on FreeFem++, and the validity of proposed method is confirmed by results of 2D numerical analyses. Using similar method, validity of the multi-objective shape optimization of the natural convection field problem was confirmed.

研究分野：工学

キーワード：最適設計 形状最適化 マルチフィジックス問題 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重要な問題である。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く、そのための合理的な設計手法や、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

伝熱と弾性変形を連成させた熱弾性場、あるいは伝熱と流れを連成させた熱対流場などの基礎的なマルチフィジックス問題に対して、合理的な多目的形状最適化の解法を提案し、その妥当性を検証することを目的とする。その中でも、本研究では基礎的な課題として、

- (1) 定常熱弾性場に対して、剛性の向上を目的とし、温度分布に基づく熱変形最小化を重視した形状設計と、外力に基づく力学的変形最小化を重視した形状設計の両者に対する多目的最適化
- (2) 非定常自然対流場に対して、部分領域において温度分布時間履歴および流速分布時間履歴を規定する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) 定常熱弾性場における多目的形状最適化  
熱弾性場に対して、温度分布に基づく熱変形によるコンプライアンスと、外力に基づく力学的変形によるコンプライアンスに対する多目的形状最適化問題の解法を提案し、その解法の妥当性を検討した。

はじめに、温度分布に基づく熱変形コンプライアンス最小化と外力に基づく力学的変形コンプライアンス最小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。

この形状勾配関数を評価するためには、随伴変数法に基づく定式化の都合上、温度分布と変位分布を解析する通常の熱弾性場の解析に加えて、随伴温度分布と随伴変位分布を解析するための随伴熱弾性場の解析が必要であった。そこで、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。

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

方法を使用した。実際には、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を用いた。なお、実際のプログラム開発には Freefem++ を利用した。

(2) 非定常自然対流場の多目的形状最適化

時間  $t=0$  から  $t=T$  において、ある部分領域での実温度分布履歴と規定された温度分布履歴との 2 乗誤差積分と、ある部分領域での実流速分布履歴と規定された流速分布履歴との 2 乗誤差積分の総和を最小化する多目的形状最適化問題の解法を提案し、その解法の妥当性を検討した。

この最適化問題に対しても、温度分布 2 乗誤差積分と流速分布 2 乗誤差積分の重み付き線形和に設定した目的汎関数に対して、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を理論的に導出した。

この非定常自然対流場の問題では、非定常性を考慮したため、形状勾配関数の評価には、流速分布、圧力分布、温度分布を初期時刻から最終時刻まで解析する通常の非定常自然対流場の解析に加えて、随伴流速分布、随伴圧力分布、随伴温度分布の時間的変化を解析する非定常随伴場解析が必要であった。そこで、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。本数値解析においても、プログラム開発には Freefem++ を利用した。

4. 研究成果

上記の(1) 熱弾性場における多目的形状最適化、(2) 非定常自然対流場の多目的形状最適化に対する研究成果について、解析結果を用いて紹介する。

(1) 熱弾性場における多目的形状最適化

図 1 に示す簡単な二次元問題の解析結果を紹介する〔雑誌論文欄〕。

4 つの円孔を有する曲がり梁の問題である。境界 AD 上の中央部の境界に外気が高温の熱伝達境界  $h$  を設け、境界 BC は低温既知温度境界  $T_c$ 、その他の境界を断熱境界とした。また、境界 AD 中央部を完全固定し、境界 BC 上の下部の境界に表面力  $P$  が作用する。設計境界  $\Gamma_{design}$  を穴境界の断熱境界に設定し、領域の大きさに対する制約は初期形状の面積を維持するように設定した。

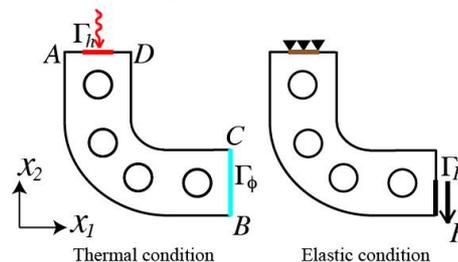
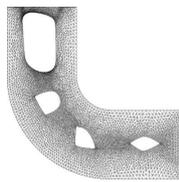
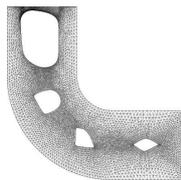


図 1 熱弾性場問題

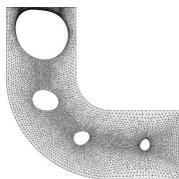
温度分布に基づく熱変形コンプライアンスに対する重み係数  $w$  と外力に基づく力学的変形コンプライアンスに対する重み  $w$  として、それらの重み係数の値を変化させて多目的最適化解析を行った解析結果を図2,3に示す。図2は重みの変化に対する最適形状の違い、図3はパレート解を示す。図の2の結果から、(a)  $w = 0, w = 1$  の場合は、熱変形の影響が無く、曲がり梁根部における断面二次モーメントの大きさを維持するような形状になっていることが確認できる。一方、(c)  $w = 1, w = 0$  の場合は、境界 AD 上の熱伝達境界  $\Gamma_h$  から境界 BC の既知温度境界  $\Gamma_c$  への熱伝導による温度分布に基づいて変形が生じる。そのため、その熱伝導をできるだけ抑制するように、境界 AD 近くの穴境界が拡大し、その結果として、領域全体での熱変形コンプライアンスを小さくするように形状更新したものと推察される。図3の横軸は温度変化に基づく熱変形によるコンプライアンスに対する初期値との割合、縦軸は外力に基づく力学的変形によるコンプライアンスに対する初期値との割合を表す。この結果から通常のパレート解に準じた結果が得られている。



(a)  $w = 0, w = 1$



(b)  $w = 0.5, w = 0.5$



(c)  $w = 1, w = 0$

図2 解析結果：形状比較

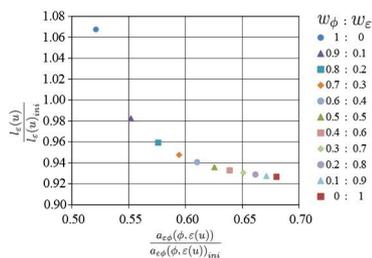


図3 解析結果：パレート解

(2) 非定常自然対流場の多目的形状最適化

図4に示すモデルについて、規定領域での温度分布履歴と流速分布履歴を初期形状に対してそれぞれ20%大きくするような形状同定解析を行った〔学会発表欄〕。

温度分布履歴の規定領域  $D_\theta$  は中央上に配置し、流速分布履歴の規定領域  $D_u$  は中央下に配置した。温度場の境界条件は、下面中央 BC を高温の温度既知境界  $\Gamma_c$  とし、下面 AB, CD, 両側面 FA, ED, 上面 EF を断熱境界とした。流れ場の境界条件は、周囲の境界をすべて壁境界とした。初期条件は、領域全体において流速、温度ともに0とした。内部発熱は無いものとして、圧力は平均値が0となるよう一意に定めた。時間積分は、 $t=0$  から  $t=T=600$  を時間刻み  $\Delta t=0.8$  で行った。設計境界  $\Gamma_{design}$  は両側面 FA, ED の断熱境界のみとし、体積制約は考慮しなかった。

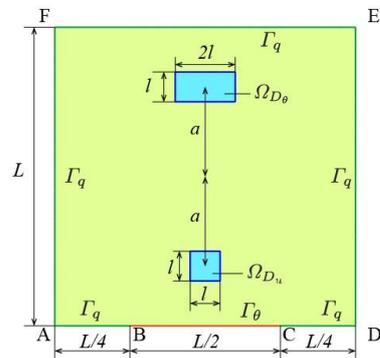
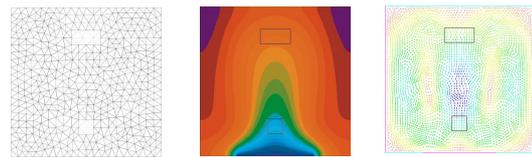
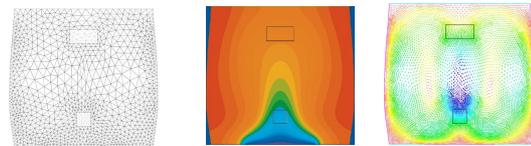


図4 自然対流場問題



Mesh 温度分布 流速分布  
図5 解析結果：初期形状



Mesh 温度分布 流速分布  
図6 解析結果：同定形状  $w = 0.5, w_u=0.5$

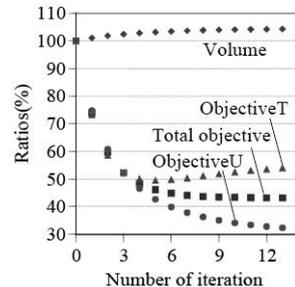


図7 解析結果：

目的汎関数の収束履歴 ( $w = 0.5, w_u=0.5$ )

初期形状でのメッシュと最終時刻  $t=T$  にお

ける温度分布と流速分布を図5に示す。図6,7は温度規定に対する重み係数  $w$  と流速規定に対する重み係数  $w_u$  の値をそれぞれ0.5とした場合の解析を示し、図6は得られた同定形状、図7は形状更新の繰り返しに対する目的汎関数の収束履歴を示している。目的汎関数が減少し収束していることが確認できる。

これらの結果から、提案した手法の基本的な妥当性が確認できた。

## 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3件)

片峯英次, 新井雄斗, 剛性最大化を目的とした熱弾性場の多目的形状最適化, 日本機械学会論文集, 83巻, 845号, 2017, pp.1-12, 査読有,

[DOI:10.1299/transjsme.16-00490]

片峯英次, 今井伸哉, 温度分布を規定する非定常自然対流場の形状同定問題の解法, 日本機械学会論文集, 82巻, 833号, 2016, pp.1-12. 査読有,

[DOI: 10.1299/transjsme.15-00578]

E. Katamine and Y. Katoh. Solution to Shape Identification Problems in Thermoelastic Fields to Prescribe von-Mises Stress Distributions, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Volume 63, 2015, pp.155-163, URL:[https://www.jstage.jst.go.jp/browse/nctam/63/0/\\_contents](https://www.jstage.jst.go.jp/browse/nctam/63/0/_contents), 査読有.

### [学会発表](計10件)

E. Katamine and S. Imai, Solution to Shape Identification of Unsteady Natural Convection Fields to Control Temperature Distribution, American Physical Society 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, (2016-11-21), ポートランド(米国オレゴン州)

石井 航平, 今井 伸哉, 片峯 英次, 自然対流場の多目的形状最適化, 日本機械学会第29回計算力学講演会講演会, (2016-9-22), 名古屋大学(愛知県名古屋市)

新井雄斗, 片峯英次, 熱弾性場の多目的形状最適化, 日本機械学会第29回計算力学講演会講演会, (2016-9-22), 名古屋大学(愛知県名古屋市)

片峯英次, 川端 幹, 熱弾性場において剛性最大化を目的とした多目的形状最適化, 日本機械学会2016年年次大会, (2016-9-14), 九州大学(福岡県福岡市)

片峯英次, 石井航平, 今井伸哉, 放熱量最大化を目的とした非定常自然対流場の形状最適化, 日本応用数理学会2016年度年会, (2016-9-12), 北九州国際会場

(福岡県北九州市)

川端 幹, 片峯英次, 熱弾性体において体積最小化を目指した形状最適化, 日本機械学会2015熱工学コンファレンス講演会, (2015-10-25), 大阪大学(大阪府吹田市)

今井伸哉, 片峯英次, FreeFem++を利用した非定常自然対流場の形状同定問題の解法, 日本機械学会第25回設計工学・システム部門講演会(2015-9-24), 信州大学(長野県長野市)

片峯英次, 今井伸哉, 温度分布を規定する非定常自然対流場の形状同定問題の解法, 日本機械学会2015年年次大会, (2015-9-14), 北海道大学(北海道札幌市)

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, 第63回理論応用力学講演会, (2014-9-28), 東京工業大学(東京都目黒区)

片峯英次, 熱弾性場における形状最適化, 日本応用数理学会2014年度年会(数学協働プログラム: 数理科学の物質・材料科学への応用), (2014-9-4), 政策研究大学院大学(東京都港区)

## 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