

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560216

研究課題名（和文）弾性・流れとの連成を考慮した伝熱場の形状最適化の検証

研究課題名（英文）Verification for Shape Optimization on Heat-conduction Fields Considering Coupling Elastic-body and Flow- fields

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・准教授

研究者番号：00224452

研究成果の概要：

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。本研究では、伝熱と弾性変形を連成させた熱弾性場、および伝熱と流れを連成させた熱対流場において、性能改善を目的としたいいくつかの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。二次元あるいは三次元問題の数値解析例によって、提示した解法の妥当性が検証された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,800,000	0	1,800,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	510,000	4,010,000

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重要な問題である。申請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の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、設計業務に直結した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) 伝熱と弾性変形を連成させた熱弾性場において、熱変形をコントロールする形状決定、軽量化を目的とした形状最適化、さらには、熱伝導率の温度依存性を考慮した解析
- (2) 伝熱と流れを連成させた強制熱対流場において、温度分布をコントロールする形状決定、部分境界での放熱量最大化を目的とした形状最適化

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) 熱弾性場の形状最適化

##### ① 熱変形コントロール問題

定常熱弾性場の部分境界において熱変形をコントロールする形状決定問題では、実変形分布と、コントロールしたい変位分布との 2 乗誤差最小化を目的汎関数として定式化を行った。次に、Lagrange 乗数法あるいは随伴変数法および物質導関数の公式を使用して、形状修正のための感度関数を理論的に導出し、その感度関数を用いた解法のアルゴリズムを提案した。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。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。最後に、提案する手法の妥当性を確認するためにプログラムの開発を行い、二次元あるいは三次元問題の数値解析例によって、提示した解法の妥当性を検証した。

##### ② 体積最小化問題

体積最小化を目的汎関数に設定した形状最適化問題の定式化を行い、上記の熱変形コントロール問題と同様に、感度関数の導出、解法のアルゴリズムの提案、プログラム開発を行い、数値解析例によって提示した解法の妥当性を検証した。

#### (2) 熱対流場の形状最適化

##### ① 温度分布コントロール問題

定常熱対流場の部分領域において温度分布をコントロールする問題を取り上げて定式化を行い、上記の熱弾性場の形状最適化問題と同様に、感度関数の導出、解法のアルゴリズムの提案、プログラム開発を行い、数値解析例によって提示した解法の妥当性を検証した。なお、本解析における解析手順は、流れ場解析、熱伝達場解析、随伴熱伝達場解析、および随伴粘性流れ場解析の 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。

##### ② 放熱量最大化問題

熱対流場の部分境界における放熱量最大化を目的汎関数に設定した形状最適化問題の定式化を行い、上記の温度分布コントロール問題と同様に、感度関数の導出、解法

のアルゴリズムの提案、プログラム開発を行い、数値解析例によって提示した解法の妥当性を検証した。

#### (3) 非定常問題への拡張

当該研究に関するこれまでの多くの研究は定常場に限られてきた。本研究を非定常場問題への拡張を計画しているため、基本的な問題として、非定常熱伝導場において放熱量を最大化、あるいは非定常粘性流れ場において圧力損失を最小化する形状最適化問題の解法について検討し、二次元プログラムを開発して、解析例から解法の妥当性を検討した。

#### (4) 多目的最適化問題への予備的研究

予備的な研究として、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、抗力最小化および揚力最大化を同時に満たす多目的形状最適化の解法について検討した。基本的な二次元問題に対するプログラムを開発して、解析例から提案した手法の妥当性を検討した。

### 4. 研究成果

提示した解法の妥当性を検証するために設定されたいくつかの解析例を紹介する。

#### (1) 熱弾性場の形状最適化

##### ① 熱変形コントロール問題

図 1 に示す簡単な二次元問題の解析例を紹介する[雑誌論文欄⑥]。

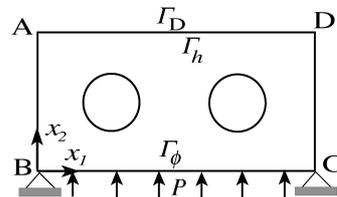
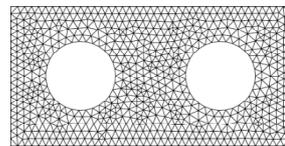
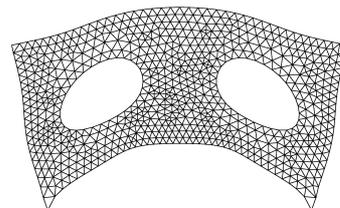


図 1 二次元熱弾性問題



(a) 熱変形前



(b) 熱変形後

図 2 現状(改善前)の形状

上面 A-D が熱伝達境界、下面 B-C は力学的負荷を受ける低温境界である。本

解析例では、上面境界 A-D の上方向の熱変形ができるだけ均一化するように（より水平面を保持するように）境界形状を同定することを目的とした。図2は有限要素分割で表した現状（改善前）の熱変形前および熱変形後の形状を表している。

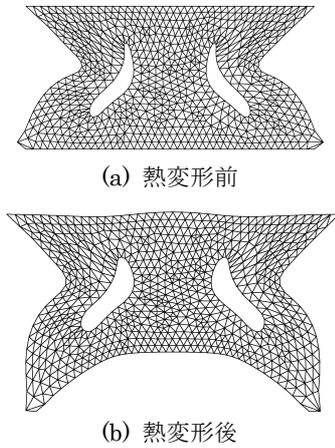


図3 同定形状（熱変形コントロール）

図3は上面境界 A-D および下面境界 B-C を除く境界を設計境界として解析した同定形状と、その同定形状における熱変形を示している。同定形状では、現状（改善前）の形状に比較して、上面の熱変形が均一化している様子が確認できる。

② 体積最小化問題

熱弾性場の部分境界における熱変形を制約条件に入れて、体積最小化を目的汎関数に設定した形状最適化の解析結果を紹介する[学会発表論文欄④]。ここでは、図1の設定問題において、境界 A-D 上方向における熱変形の均一化をできるだけ維持しながら、体積を最小化問題を解析した。

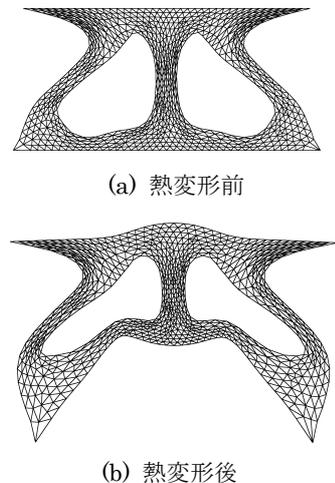


図4 最適形状（体積最小化）

得られた最適形状を図4に示す。最適形状では、境界 A-D における熱変形の均一化を図りながら体積が最小化し、その結果、初期形状の体積に比較して約 41%改善した。

これらの結果から、簡単な解析例を通じて、伝熱と弾性変形を連成させた熱弾性場の形状最適化問題に対して、提案した解法の妥当性が検証できた。

(2) 熱対流場の形状最適化

図5に示す分岐流路モデル対して、部分領域  $\Omega_D$  における温度分布が、目標の温度分布になるように形状を同定する問題の解析例を紹介する[雑誌論文欄④, ⑤]。

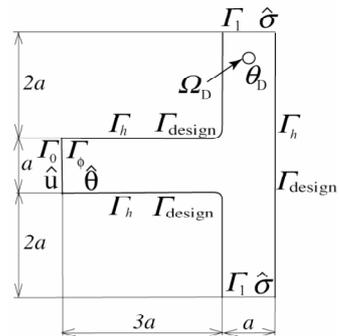
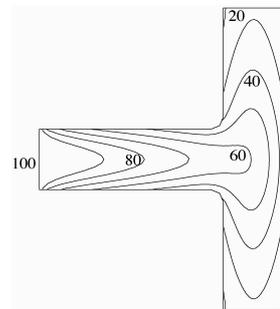


図5 二次元熱対流問題



(a) 初期形状

(b) 同定形状

図6 熱対流場問題における温度分布

熱流体は左側境界から流入し、右側上下二つの境界から流出し、温度分布をコントロールする部分領域 $\Omega_D$ は上側流出部付近に設定されている。流れの境界条件は、左側流入境界で Poiseuille 流れ、流出境界で自然境界としている。本解析における物理量は無次元化され、温度の境界条件は、流入口で温度 100、流出口で断熱境界、壁面境界を熱伝達境界とし、熱伝達率を 0.1、外気温度を 0 とした。Reynolds 数 10, Peclet 数 20 とし、部分領域 $\Omega_D$ における設定温度は初期形状の温度より高温で 40 の一様温度分布とした。設計境界は全壁面境界とし、領域の大きさ制約を初期領域の 85%以下として解析を行った。

解析結果を図 6 に示す。図は、初期形状および得られた同定形状に対する温度分布を示している。同定形状は、流入流路が上側に曲がり、規定領域 $\Omega_D$ 方向へ向かう流量が増加して、高温部が上側出口に広がったことが確認できる。同定形状では、実温度分布とコントロールしたい温度分布との 2 乗誤差から評価した目的汎関数は最小化した。

これらの結果から、流れと伝熱を連成させた熱対流場の基本的な形状決定問題に対して、提案した解法の妥当性が検証できた。

なお、非定常問題への拡張に関する研究成果は雑誌論文欄③、熱伝導率の温度依存性を考慮した解析に関する研究成果は学会発表論文欄①の文献に、それぞれ示されている。

#### 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 6 件)

- ① E. Katamine, Y. Nagatomo, and H. Azegami, Shape Optimization of 3D Viscous Flow Fields, Inverse Problems in Science & Engineering, Vol. 17, No.1, 105-114, 2009, 査読有.
- ② 片峯英次, 西橋直志, 畔上秀幸, 抗力最小化・揚力最大化を目的とした定常粘性流れ場の形状最適化, 日本機械学会論文集, 74 巻, B 編, 2426-2434, 2008, 査読有.
- ③ 片峯英次, 岩田侑太朗, 畔上秀幸, 放熱量最大化を目的とした非定常熱伝導場の形状最適化, 日本機械学会論文集, 74 巻, B 編, 1609-1616, 2008, 査読有.
- ④ E. Katamine, Y. Kawase and H. Azegami, Shape Optimization of Thermal Forced Convection Fields, Heat Transfer Asian Research, Vol. 37, Issue 5, 313-328, 2008, 査読有.
- ⑤ 片峯英次, 河瀬賀行, 畔上秀幸, 強制熱

対流場の形状最適化, 日本機械学会論文集, 73 巻, B 編, 1884-1891, 2007, 査読有.

- ⑥ E. Katamine, H. Azegami and M. Hirai, Solution of Shape Identification Problem on Thermoelastic solids, International Journal of Computational Methods, Vol.3, No.3, 279-293, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 片峯英次, 安江銀次, 畔上秀幸, 温度依存性材料の定常熱伝導場における形状最適化, 日本機械学会 2008 年度年次大会, (2008-8-8), 横浜国立大学.
- ② E. Katamine, Y. Kawase and H. Azegami, Shape Identification of Forced Heat-Convection Fields, Proceedings of the 8th World Congress on Computational Mechanics, (2008-7-5), Venice, Italy.
- ③ H. Azegami, Y. Iwata, S. Kaizu and E. Katamine, Error Estimate of the Shape Gradient for the Stokes Problem by Finite Element Method, Proceedings of the 5th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, (2008-6-16), Jeju Island, Korea.
- ④ 片峯英次, 清水健一, 畔上秀幸, 体積最小化を目的とした熱弾性場の形状最適化, 日本機械学会 2007 年度年次大会, (2007-9-12), 関西大学.
- ⑤ E. Katamine, Y. Nagatomo, and H. Azegami, Shape Optimization of 3D Viscous Flow Fields, Proceedings of Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, (2007-4-18), Miami, Florida, U.S.A.

#### 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・准教授

研究者番号：00224452

(2)研究分担者

(3)連携研究者