

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760114

研究課題名（和文） 熱電素子を用いた変形制御機構の最適設計法の構築

研究課題名（英文） Construction of Optimal Design Method for  
Deformation Control Structures Using Thermoelectric Devices

研究代表者

泉井 一浩（IZUI KAZUHIRO）

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90314228

研究成果の概要（和文）：

構造物の熱変形の局所的な補正を行うことを目的として、熱電素子を用いた変形制御機構の最適設計を行うための方法論を構築した。熱伝導、電流、熱変形の支配方程式にもとづき、トポロジー最適化問題を定式化した。さらに感度解析の結果を元に開発した最適設計法をコンピュータプログラムとして実装し、方法論の有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

In order to reduce local thermal deformation on mechanical structures, a design optimization methodology of thermal deformation control mechanisms using thermoelectric devices were developed. Based on governing equations for heat conduction, electric flow and thermal deformation, topology optimization problems were formulated. Then, sensitivity analysis was conducted, and the developed optimal design methodology was implemented as computer program to confirm the effectiveness of the developed methodology.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：設計工学

## 1. 研究開始当初の背景

工作機械に代表される位置決め機構を持つ機械製品では、駆動装置や加工点から発生する熱、あるいは、環境温度の変動が原因となって構造部材に熱変形が生じ、その結果、位置決め精度が悪化してしまう問題がある。

また、このような問題は、特にリニアモータによる駆動方式を用いた工作機械において顕著である。リニアモータは駆動時に磁界を発生させるために局所的に大きな電力を消費し、その発熱により、周囲の構造部材に熱膨張を生じさせる。これにより、リニアモータ

タと磁石板の距離が変動し、これらの間の磁力が予想外に変化することで駆動機構の動作精度の低下を招く。

これらのような位置決め精度の悪化を抑制する対策として、外部からの熱の流出入を防ぐための恒温室や、構造部材の温度を一定に保つための水冷式の冷却システムが利用されている。しかし、このようなシステムは、工作機械の全体のシステムの構成にかかわるため、製作、利用、維持に膨大なコストがかかることが課題となっている。工作機械では、加工点、あるいは、リニアモーター設置部など、局所的な点のみで位置精度が保たれば良く、したがって、必要な部分のみに適切な熱変形補償機構を組み込むことができれば、全体のシステムに影響を与えることなく低コストな位置決め補償機構を実現することができる可能性がある。

このような機構を実現する方法として、熱電素子のモジュールを用いて熱変形を制御する方法が考えられる。熱電素子は、ペルチェ効果やゼーベック効果などの熱エネルギーと電気エネルギーの相互作用を利用した素子である。熱電モジュールは、熱電素子そのものが持つ熱電変換特性を利用して発電や冷却を行うものであり、タービンのような稼働部を持たず、無振動、静音であるという特徴をもち、メンテナンスフリーかつ信頼性が高く長寿命である。このような特徴をもつ熱電素子を用いて温度の管理を行えば、構造部材の熱変形を制御することが可能となる。また、熱電素子は、温度制御を行いたい部材を直接加熱、あるいは、冷却することができるため、その制御性も良好であると期待される。

## 2. 研究の目的

このようなシステムを構築するためには、工作機械の様々な使用環境や運用形態に対しても、熱電素子による熱制御によって、容易に熱変形の低減を行うことができるような構造形状設計が必要である。しかも、工作機械では、同時に構造部材の剛性を考慮する必要もある。このように、熱電素子を用いた構造変形制御システムの設計問題は非常に複雑な問題となっている、これらの設計要件を満たす設計案を導出する方法を考える必要がある。そこで、構造最適化手法の中でも最も設計自由度の高いトポロジー最適化法を変位制御機構の設計問題に応用し、高性能な変位制御機構を数値計算に基づいて設計するための方法論を構築することを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では、外部からの熱の流入によって熱変形が生じる機械部材に対して、変位を抑制

することの可能な機構をトポロジー最適化法に基づいて設計するための方法論を構築した。このために、熱電素子による熱制御によって変位を抑制可能な構造を設計するためのトポロジー最適設計法の定式化を行う。

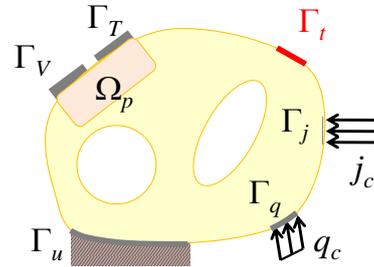


図1 熱電素子の挙動の評価

熱電素子の特性を解析するためには、熱と電気との両者の挙動を同時に評価する必要がある。図1は、熱電素子を含む構造物の挙動を解析するための境界条件を示している。また、以下の式は、温度場と電圧についての平衡方程式である。

$$-\int_{\Omega} \nabla \bar{V} \cdot \bar{j} d\Omega + \int_{\Gamma_j} \bar{V} j_c d\Gamma = 0$$

$$-\int_{\Omega} \nabla \bar{T} \cdot \bar{q} d\Omega + \int_{\Omega} \bar{T} \bar{j} \cdot \nabla \bar{V} d\Omega + \int_{\Gamma_q} \bar{T} q_c d\Gamma = 0$$

ここで、 $T$  および  $V$  は温度、電圧であり、 $q$  は熱流束、 $j$  は電流密度である。

さらに、この設計領域は線形弾性体で構成され、かつ熱弾性体の応力-ひずみ関係には次式が成り立つとする。

$$\sigma_t = \sigma + \mathbf{E} : \delta \beta \Delta T$$

ここで、 $\sigma_t$  は熱応力を含んだ応力テンソル、 $\sigma$  は構造の変形により生じるコーシー応力、 $\mathbf{E}$  は弾性テンソル、 $\delta$  はクロネッカーのデルタ、 $\beta$  は線膨張係数、 $\Delta T$  は変形を生じない温度との温度差である。

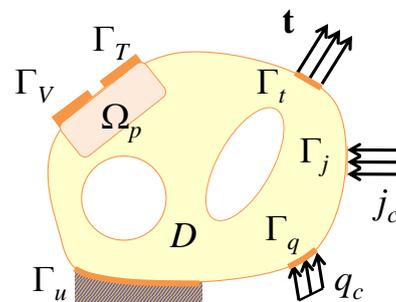


図2 設計領域

図2に本問題の設計領域を示す。本設計問題は $\Gamma_t$ における $t$ 方向の変位 $u$ のノルムの

最小化問題として表現することができる。したがって、目的関数  $F$  は以下の式で定義できる。

$$\text{minimize } F = \int_{\Gamma} \mathbf{u}^T d\Gamma$$

目的関数  $F$  を最小化する構造をトポロジー最適化により求める。

本研究では、トポロジー最適化法を構築する上で、物体の境界を表現するためにレベルセット法を用いた。

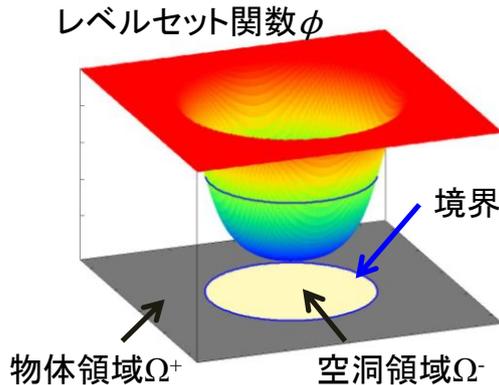


図3 レベルセット関数に基づく境界表現

図3に示すように、レベルセット関数が正の場合に物体が存在し、負となっている領域は空洞領域を示す。ここで、 $\phi$  はレベルセット関数値である。

$$\begin{cases} 0 < \phi \leq 1 & \text{if } \Omega^+ \\ \phi = 0 & \text{if } \partial\Omega \\ -1 \leq \phi < 0 & \text{if } \Omega^- \end{cases}$$

したがって、レベルセット関数が0となる境界が物体境界として表される。

この表現を用いることで、境界が明確な構造が最適解として得ることができ、従来の密度法に基づくトポロジー最適化で大きな課題となっていたグレースケールを自動的に回避することが可能となる。

#### 4. 研究成果

図4に設計問題の一例を示す。 $\Gamma_q$ における変位の最小化を行う。解析領域の上部に熱電素子を配置し、この熱電素子によって構造物の温度制御を行うことで、左下の境界 $\Gamma_q$ から熱が流入しても変形を抑制できる構造を求める。

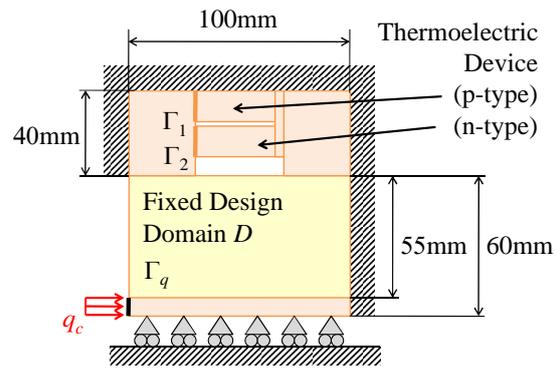


図4 解析モデル

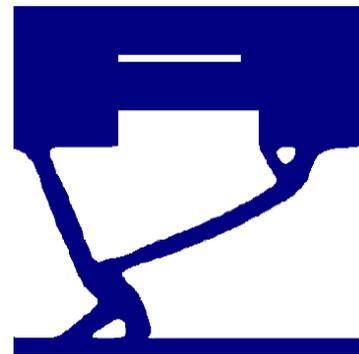


図5 最適構造

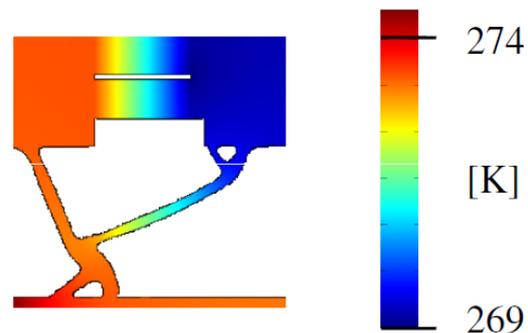


図6 温度分布と変形図

トポロジー最適化により得られた最適構造の例を図5に、この時の温度分布及び変形図を図6に示す。着目する境界の変位が最小化されている様子を確認できる。

本研究では、さらに感度解析の方法について検討を行い、解析領域全体を考慮した設計感度を用いることで、構造物の変形を大きく制御できる可能性があることを確認した。

また、本手法に基づく成果に基づいて、変位を最大化する定式化を行うことにより、熱コンプライアントアクチュエータの設計にも応用可能であり、幅広い横領が可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.osdel.me.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉井 一浩 (IZUI KAZUHIRO)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90314228

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし