

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21916

研究課題名（和文）革新的機械システムの創成を目指したリンク機構のトポロジー最適化法の開発

研究課題名（英文）topology optimization of link mechanisms for generating mechanical system

研究代表者

山田 崇恭（Yamada, Takayuki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：30598222

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数部材から構成される機械構造物に対するトポロジー最適化法を構築し、複数の部材を適材適所に配置可能な方法論を構築した。具体的には、レベルセット法に基づく形状表現を2つ以上の異なる複数部材を対象とした形状表現に拡張し、その形状表現法に基づいたトポロジー最適化法と具体的な数値解析アルゴリズムを構築した。次に、リンク機構の創成設計を目指して、所望の変形モードを実現する数理モデルの開発検討を行った。その結果、一般化弾性体におけるマイクロポーラ弾性体理論に着目し、具体的なパラメータ設定法の検討を行った。前述の複数部材トポロジー最適化との統合化に関する基礎検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、力学モデル及び数理モデルに基づく最適設計法に基づいてリンク機構の創成を可能とする数理モデル系の構築を目的としている。予め定められた設定のもとで最適な組合せを求める方法や、生物を模倣した方法と比較して、設計者の勘や経験、生物の観察に基づかずに、力学的・数学的に最適な機構の創成が可能になる。これにより、従来とは抜本的に異なる機械システムの創成により、高効率だけではなく、新しい機能を持つ機械システムの実現を可能にする。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed a topology optimization method for mechanical structures consisting of multiple members, and developed a methodology that allows multiple members to be placed in the optimal places. That is, the shape representation based on the level set method is extended to the shape representation for two or more different multiple members, and a topology optimization method and a concrete numerical algorithm based on the shape representation method are developed. Next, we have investigated the development of a mathematical model to realize the desired deformation mode for the emergent design of the linkage mechanism. As a result, we focused on the theory of micropolar elasticity in generalized elastic theory and investigated the specific parameter setting method. A basic study on the integration with the above-mentioned multi-component topology optimization was conducted.

研究分野：設計工学、計算力学

キーワード：トポロジー最適化 一般化連続体力学 数理モデル 感度解析 偏微分方程式 最適設計 構造最適化 有限要素法

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。

### 1. 研究開始当初の背景

構造最適化分野、特にトポロジー最適化分野は、構造力学を中心に発展してきた。近年では、新しい物理領域やそれらの複合領域、マルチスケール問題への展開が、世界的なトレンドとなっており、アクチュエータや共振器等の様々なデバイスの高機能化や多機能化が実現されつつある。しかしながら、トポロジー最適化は、連続体力学をはじめとする連続な状態量で記述される系に対して、最適な形状を創成する方法であるため、通常マルチボディダイナミクスで対象となるリンク機構等を設計解として得ることができない。すなわち、機械製品の多くは、歯車やスライダ・リンク機構等の部品間の相対運動に基づいた機構を多く含み、これらは離散系の数理モデルである。一方で、トポロジー最適化は、連続系の場に対する偏微分方程式系により記述される物理モデルに基づいて最適な形状を創成設計することを基本的な枠組としているため、リンク機構等の動作も含めた機械システム全体の創成設計を行うのは本質的に不可能である。このような背景の中、本研究は、部材形状の最適な形状を設計するトポロジー最適化の枠組を広げて、リンク機構を含めた機械システム全体の創成設計を可能とする設計論の構築に挑戦する研究課題である。

### 2. 研究の目的

本研究は、与えられた動作要件を満足するリンク機構の創成設計法の構築を目的とする。そのための具体的な研究目的として、第一に、オイラー座標系において、異なる役割を担う複数の部材の取り扱いを可能とする形状表現法を構築する。第二に、トポロジー最適化において、幾何学的非線形問題並びに境界非線形問題を考慮可能とするための基本的な方法論を構築する。第三に、所望の運動を実現するための数理モデル系を構築し、最適化問題の定式化法を確立する。そして、トポロジー最適化の考え方に基いて、機構創成設計法を構築することを研究の目的とする。

具体的には、回転自由度と並進自由度の独立解析によるリンク部とジョイント部の近似数理モデル系により、近似的に力学的特性を評価することを目指す。さらには、複数部材トポロジー最適化法を構築し、異なる特性をもつ部材の形状と、それらの配置を同時に最適化することで、所望の運動を行う機構を創成設計する方法論を構築する。例えば、図1に示すように、力学的な運動状態を入力条件として、所望の位置で、所望の力学的特性を持つように、トポロジー最適化を図る。

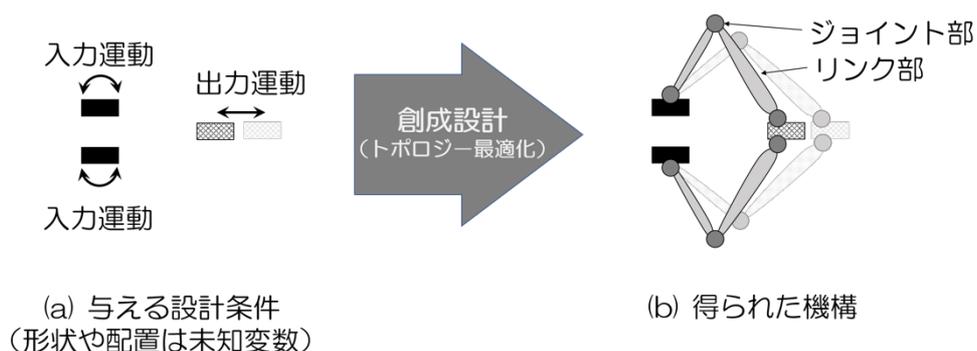


図1 本研究の目的の概念図

その結果、リンクやジョイントに相当する部材の配置と形状が創成されることを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、次の事項の研究を行った。

### (1) メカニズム創成を目的とした最適化問題の定式化の検討とトポロジー最適化への展開について

トポロジー最適化におけるメカニズム創成の基礎として、コンプライアントメカニズムの創成設計がある。デンマーク工科大学の Sigmund 教授により提案された定式化が最も広く利用されているが、適用できる設計問題が限定されているうえに、力学的根拠に立脚してパラメータを同定することが困難な場合があるため、メカニズム創成設計問題に汎用的に利用可能な定式化が必要となる。本研究では、研究代表者のこれまでの検討に基づいて、エネルギー効率最大化の考え方に基づいた定式化の検討を行った。また、基本的なメカニズム創成設計問題に適用し、具体的なトポロジー最適化アルゴリズムを開発した。そして、数値解析例により、手法の妥当性の検討を行った。研究代表者並びに研究分担者の宮島の両名で議論をし、定式化と最適化アルゴリズム等の再検討を行い、所望の目的を達成する定式化について明確化した。

### (2) オイラー座標系における複数部材表現とトポロジー最適化への展開

研究代表者のこれまでの実績に基づいて、本研究を実施することとし、レベルセット法に基づくトポロジー最適化を拡張することで、複数部材を対象としたトポロジー最適化法を構築することとした。最初に、これまでに提案されている手法である、カラーレベルセット法、マルチマテリアルレベルセット法、区分一定値レベルセット法等について、詳細に調査をし、それぞれの特徴の整理を行った。次に、それらの特徴に基づいて、本研究に展開する場合の問題点や利点について整理を行った。これらの調査の結果、これまでの手法の修正や拡張では不十分であることが確認された。この結果を踏まえて、独自に手法の開発に着手し、方法論の基盤を構築することができた。

### (3) 界面非線形問題・幾何学的非線形問題のトポロジー最適化法の構築

研究分担者の渡邊のこれまでの実績に基づいて、界面非線形問題と幾何学的非線形問題のトポロジー最適化法を構築した。トポロジー最適化は繰り返し計算により最適な構造を探索する手法であり、探索過程において、局所的に非線形性の影響が大きい部分構造が得られる場合がある。このような場合であっても、計算コストが大幅に増大することなく、適切な数値解を得る必要がある。さらには、トポロジー最適化における形状表現の元で表現された形状に対して、非線形解析を行う必要もある。通常トポロジー最適化では、構造が存在しない領域に対して、非常に弱い弾性係数を持つ仮想材料に置き換えて数値解析を行う。線形問題であれば、適切に近似数値解を得ることができるが、非線形解析においては、このような近似モデルが数値不安定性の原因になりうる。このような課題を回避する手法について、検討をし、具体的な数値解析アルゴリズムを提案した。

## 4. 研究成果

### (1) メカニズム創成を目的とした最適化問題の定式化の検討とトポロジー最適化への展開について

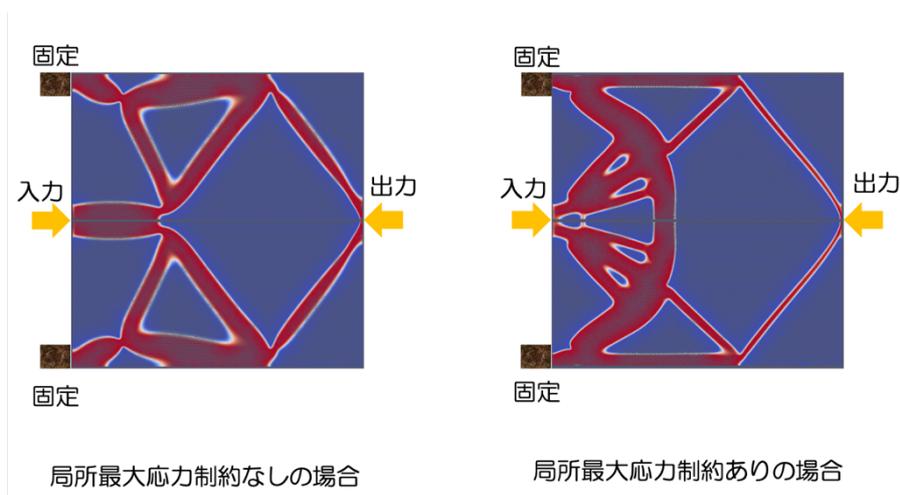


図2 バネなし数理モデルにおけるメカニズム創成設計例

本研究では、これまでに主流とされてきた仮想的なバネによる剛性を与える定式化の課題を克

服する、新たな定式化の構築に成功した。さらには、同時に、局所的な構造物の応力を制約する手法を開発した。図2に得られた結果を示す。図中左が局所最大応力の制約を設けなかった場合で、図中右が局所最大応力を考慮した結果である。

### (2) オイラー座標系における複数部材表現とトポロジー最適化への展開

従来の手法の調査を行い、従来の複数材料表現に基づくトポロジー最適化の課題を整理した。その調査結果を踏まえて、議論を実施し、それらの課題を解決する理論と、具体的なトポロジー最適化アルゴリズムを構築した。

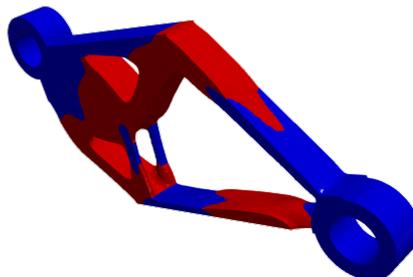


図3 複数部材を対象としたトポロジー最適化結果

図3に本研究で構築した複数部材トポロジー最適化の結果を示す。図に示すように、異なる材料を適材適所に配置した形状が得られている。

### (3) 界面非線形問題・幾何学的非線形問題のトポロジー最適化法の構築

研究分担者の渡邊を中心に、界面非線形問題や幾何学的非線形問題を対象としたトポロジー最適化法を構築した。図4に幾何学的非線形性を考慮したトポロジー最適化結果を示す。図に示すように、荷重値に対して異なる最適構造が得られ、いずれも力学的に妥当である。すなわち、荷重値が多い場合は、座屈を回避するように、圧縮ではなく引張により剛性を保持する形状が得られた。

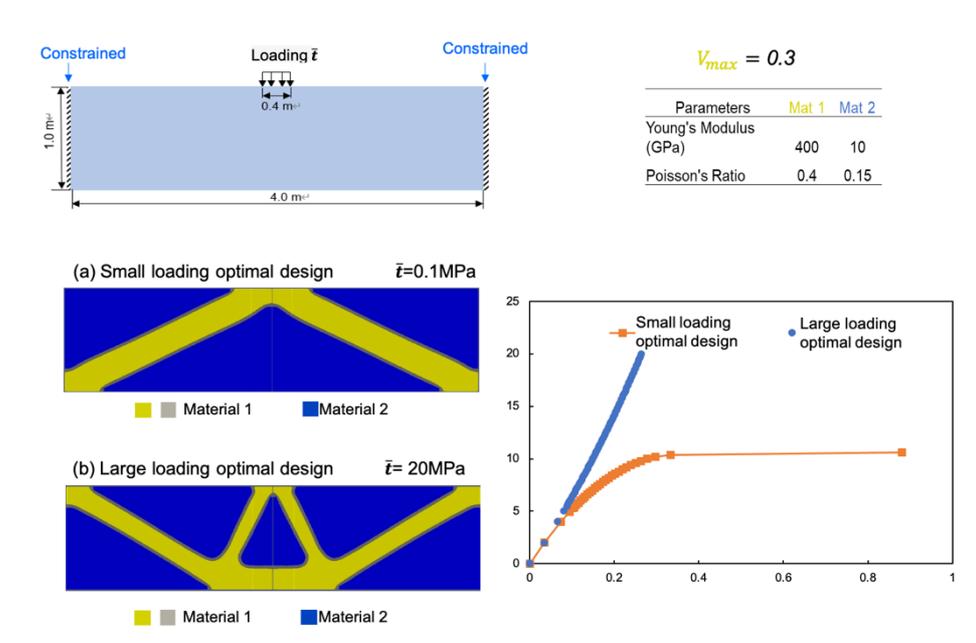


図4 幾何学的非線形を考慮したトポロジー最適化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 NODA Masaki, NOGUCHI Yuki, YAMADA Takayuki	4. 巻 87
2. 論文標題 Multi-material topology optimization based on symmetric level set function using the material definition with perfect symmetric property	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00412	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 Ogawa Shun, Yamada Takayuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Topology optimization of dynamic problems based on finite deformation theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nme.6710	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小池善徳, 山田崇恭, Benliang Zhu, 泉井一浩, 西脇真二
2. 発表標題 アダプティブメッシュを用いた微小剛性領域を利用しないレベルセット法によるトポロジー最適化
3. 学会等名 第30回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田雅貴, 野口悠暉, 山田崇恭
2. 発表標題 材料規定の完全等方性を実現する複数材料に対するレベルセット法に基づくトポロジー最適化
3. 学会等名 第30回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhou, J., Noguchi, Y., Watanabe, I., Yamada, T.
2. 発表標題 A level set-based topology optimization of multi-material structure Considering interface property
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究分担者	渡邊 育夢  (Watanabe Ikumu)  (20535992)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主任研究員   (82108)	
研究分担者	宮島 健  (Miyajima Ken)  (10847916)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・研究員   (84431)	

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
---------	---------