

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630209

研究課題名(和文) これからの材料開発に欠かせない材料ミクロ組織の仮想実験と最適化技術の新展開

研究課題名(英文) Material design applying numerical material testing and decoupling multiscale topology optimization

研究代表者

加藤 準治 (Kato, Junji)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00594087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：構造の力学的挙動は材料の微視構造(ミクロ構造)に強く依存することがよく知られているが、近年、微視構造の製作、制御技術が急速に進歩したことから「マクロ構造の力学的性能を最大にする最適なミクロ構造を発見する」ための研究が先端材料開発分野で盛んに行われている。しかし、それらは実験や経験則に基づくトライアルアンドエラー型のアプローチであり、真に最適なミクロ構造を得ることはできない。本研究では数理的アプローチを基本として、それを可能にする次世代型材料最適設計法の確立に成功した。

具体的には、超弾性ゴム材料や金属材料の微視組織を最適化し、所望の力学的性能を最大にする手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：It is well known that the structural behavior strongly depends on the material microstructure. Recently, production technology enables to control/manufacture the microstructure to a degree and this kind of topics has been paid attention in world wide, especially in the research for advanced materials. However, most of them take empirical approaches strongly relying on the experiments. For the best of our knowledges, these approaches cannot lead to the truly optimal design.

The present study proposed topology optimization method to provide an optimal microstructure numerically for maximizing structural performance and eventually the usability and versatility of the proposed method was verified by the series of numerical examples. Specifically, we developed a method to optimize microstructure topology of hyperelastic composite material and also to optimize a metallic crystalline structure to maximize the macroscopic structural performance.

研究分野：計算力学

キーワード：トポロジー最適化 ミクロ構造 マルチスケール解析 材料開発

1. 研究開始当初の背景

力学の自然な現象として「マクロ構造の力学的挙動は材料の微視構造（マイクロ構造）に強く依存する」ことがよく知られている。

近年、微視構造の製作、制御技術が急速に進歩したことから「マクロ構造の力学的パフォーマンスを最大にする最適なマイクロ構造を発見する」ための研究が様々な先端材料開発分野で盛んに行われている。

しかし、実験や経験則に基づくトライアルアンドエラー型のアプローチでは真に最適なマイクロ構造を得ることはできない。

そこで、力学の基本原則とコンピュータを駆使した数理的アプローチによる材料開発法が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究は数理的アプローチを基本として、それを可能にする次世代型材料最適設計の確立を目指すものである。

具体的な設計対象としては、土木構造物の地震時エネルギーを吸収する機構である、高減衰ダンパーの材料設計を念頭に置いている。この目的を達成するために、まずは構造・材料の力学的挙動を模擬する必要があるが、従来は有限要素法を用いた解析が行われてきた。申請者らも実際、有限要素法を用いた「マルチスケールトポロジー最適化」と呼ばれる最適マイクロ構造を決定するための数的手法を開発してきた。しかし、材料のマイクロ構造の幾何特性は複雑であり、材料によっては有限要素法だけで現実の微視的な幾何特性を表現することはできない場合も多い。そこで、本研究では、基礎的研究として複合材料によるダンパー機構のコンプライアンス最小化問題を取り上げ、それを可能にする手法の開発を行った。

3. 研究の方法

(1) 概要

実際の複雑なマイクロ組織の形態を表現しづらいこと、また、有限要素法を単独に用いた場合には、最適結果がパラメータの初期値に強く依存することが問題として挙げられる。そこで、本研究ではマイクロ材料組織の予測ツールとして広く用いられるフェーズフィールド法の形態表現法を導入し、それを有限要素法と連成させることでマイクロ構造のトポロジー最適化手法の開発した。

本研究では、その基礎的検討として分離型マルチスケール解析法と呼ばれる手法を用いて、マイクロ-マクロ境界値問題を定式化し、さらにその最適化問題の定式化および時間発展方程式を開発した。

表-1 使用材料量定数

	ヤング係数 [GPa]	ポアソン比
phase-1 (赤)	100.0	0.3
phase-2 (灰色)	10.0	0.3

(2) 最適化計算例：解析条件

提案したトポロジー最適化手法の妥当性を検証するため、本手法を用いた最適化計算例を紹介する。

計算に使用するマクロ構造は、図-1に示す1要素の単純なマクロ構造と左端固定構造で8節点四辺形要素を用いている。一方、使用するユニットセルは4節点四辺形要素を用いた正方形とし、phase-1 (赤) と phase-2 (灰色) で構成されるものとする。マイクロ材料モデルは、表-1に示す材料定数を用い、phase-1が phase-2 より硬い材料となるように設定した。ユニットセルは、図-1に示す初期構造を有するものとし、材料体積比は phase-1 が 54.5%、phase-2 が 45.5%である。

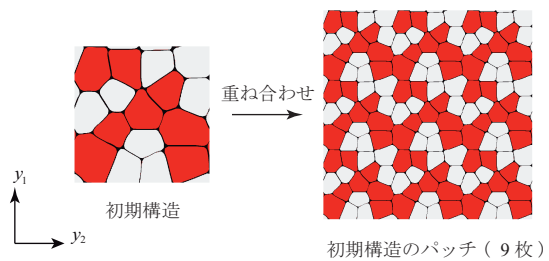


図-1 初期構造

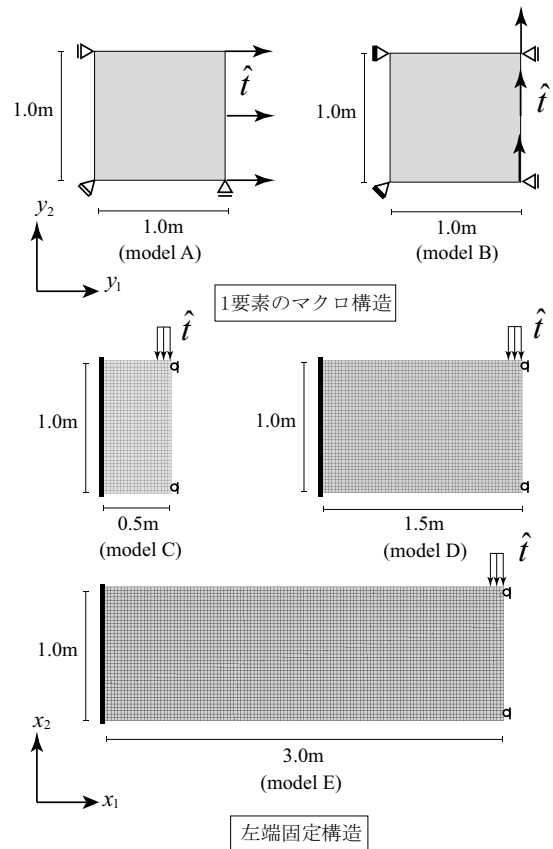


図-2 マクロ構造モデル

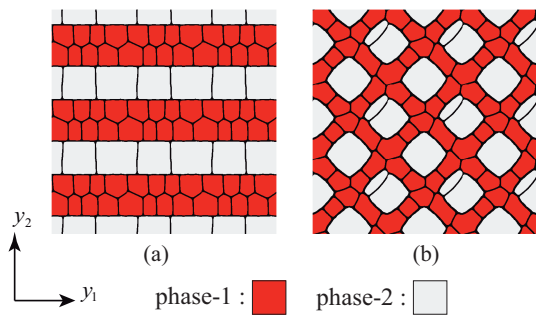


図-3 マクロ構造(1要素)に対する最適化マイクロ構造トポロジー (ケース1)

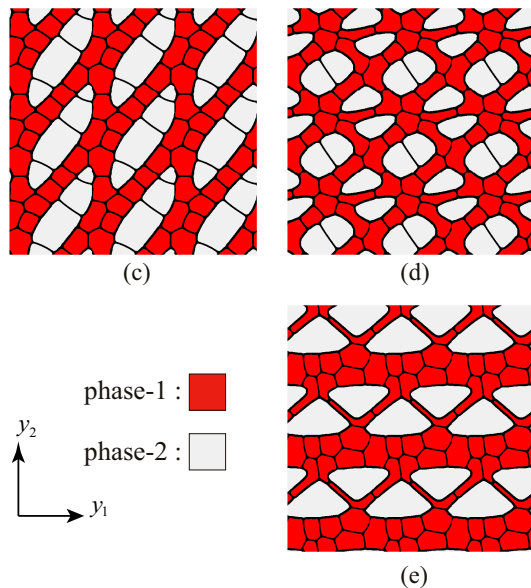


図-4 左端が固定された長さが異なる3つのマクロ構造に対する最適化マイクロ構造トポロジー (ケース2)

(3) 最適化計算例：ケース1

まず、図-2に示す1要素のマクロ構造 model A, model B に対する最適化結果を示す。model A は x_1 軸方向に引張変形, model B は x_1x_2 方向に単純せん断変形するように $t=10$ kN/m の等分布荷重を作用させている。得られた最適化結果を図-3に示す。model A の最適化結果(a)は、与えた荷重により生じる引張り変形の方に phase-1 が配置される結果となっている。また、model B の最適化結果(b)については、与えた荷重により生じるせん断変形の圧縮と引張の方に phase-1 が配置される結果となった。いずれの最適化結果についても変形に抵抗する合理的なトポロジーが得られたことから本手法の妥当性が確認された。

(4) 最適化計算例：ケース2

次に、長さの異なる左端固定構造の中央部に $t=100$ kN/m の等分布荷重を作用させたときの最適化結果を紹介する。図-4は model C~E に対する最適化結果を示している。まず、model C はマクロ構造の長さが比較的短いた

め、曲げによる影響は小さい。そのため、図-5に示す応力図を見ると、 x_1 軸方向応力に比べて、 x_2 軸方向応力、 x_1x_2 せん断応力が卓越していることが分かる。その結果、 x_2 軸方向と斜め方向に phase-1 が配置される最適化結果(c)が得られた。次に、model D を見てみると、先ほどよりもマクロ構造が長くなったことで、曲げによる影響が大きくなり、 x_1 軸方向応力が増加していることが図-6の応力図から分かる。その結果、 x_1 軸方向とせん断方向への変形に抵抗するように phase-1 が配置された最適化結果(d)が得られた。最後に、model E を見てみると、曲げによる影響がさらに増加したことで、 x_1 軸方向応力が卓越していることが図-7の応力図から分かる。その結果、最適化結果(d)と比較して、より x_1 軸方向に対する補強が大きい最適化結果(e)が得られた。これらの最適化結果から、本手法によりマクロ構造の力学的挙動を十分に考慮した合理的なトポロジーが得られることが確認され、本手法が有用であることが示された。

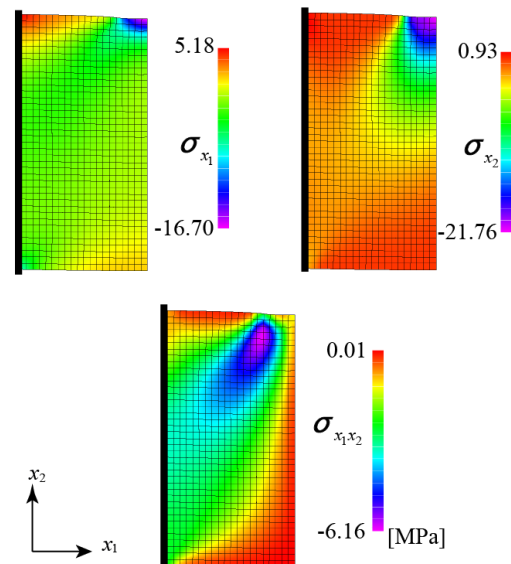


図-5 model C の変形 (変形倍率 100 倍) と応力図

4. 研究成果

本研究では、MPF 法と有限要素法、および分離型マルチスケール解析とトポロジー最適化を融合した新しい枠組みを構築し、材料の微視領域における複雑な幾何表現を可能にする新しい材料設計法を開発した。

また、最適化計算例を見ても、合理的な最適構造が得られており、本手法の妥当性と性能の高さを示す結果となっている。以下に本研究で得られた知見と今後の課題を記す。

(1) 本手法により、今まで困難とされていた材料結晶構造を表現した上で、マイクロ構造のトポロジー最適化が可能となった。この成果は、今後の先進材料の開発分野において、非常に有益なものであると考えられる。

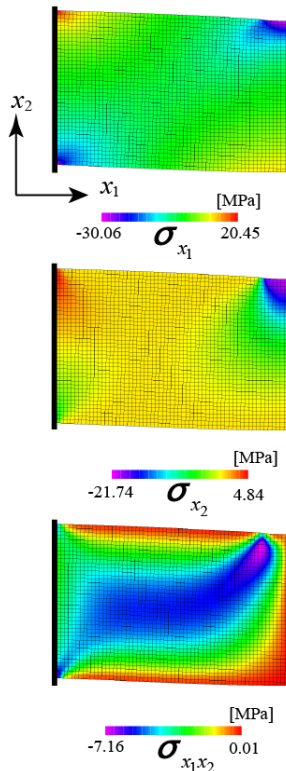


図-6 model D の変形 (変形倍率 100 倍) と応力図

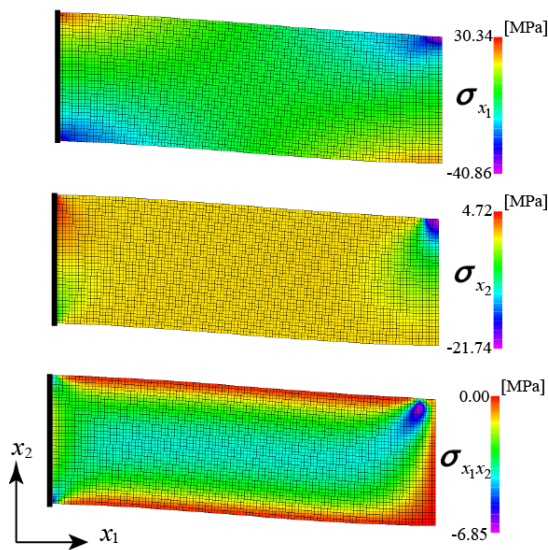


図-7 model E の変形 (変形倍率 100 倍) と応力図

(2) 分離型マルチスケール解析を用いたことで、マクロ構造の力学的挙動を考慮した結晶組織の設計が可能となった。分離型マルチスケール解析は非線形材料にも適用可能な汎用性の高い手法であるため、今後は非線形問題を対象とした最適化手法の構築が期待される。

(3) 本手法では、マイクロ構造を構成する材料の種類が 2 種類と限定的であった。しかし、

実際の材料は、複数の材料により構成される場合が多い。そのような、複数の材料により構成される結晶構造を表現するための最適化モデルの構築が望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① 加藤準治, 谷地大舜, 西澤峻祐, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 超弾性複合材料の分離型マルチスケールトポロジー最適化, 日本計算工学会論文 (Transactions of JSCES), Paper No.20160001, 2016 (査読有り) .
- ② 加藤準治, 谷地大舜, 西澤峻祐, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 分離型マルチスケール解析法による超弾性複合材料のマイクロ構造トポロジー最適化, 日本計算工学会論文 (Transactions of JSCES), Paper No.20150014, 2015 (査読有り) .
- ③ 加藤準治, 加茂純宜, 高瀬慎介, 森口周二, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, フェーズフィールド法によるマイクロ構造トポロジー最適化の基礎的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 70, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 17), I_173-I_183, 2014 (査読有り).

〔学会発表〕 (計 14 件)

- ① Hiroya Hoshiya, Junji Kato, Takashi Kyoya, Fundamental Study of Topology Optimization for Large Elastoplastic Deformation, Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016(ACSMO 2016), (eds. Prof. Azegami), June 22-26, Brick Hall (Nagasaki), 2016.
- ② Junji Kato, Yoshiki Kamo, Tomohiro Takaki, Takashi Kyoya, Multi-scale topology optimization for polycrystalline metals with a multi-phase-field approach, Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016(ACSMO 2016), (eds. Prof. Azegami), June 22-26, Brick Hall (Nagasaki), 2016.
- ③ Junji Kato, Shunsuke Nishizawa, Takashi Kyoya, Kenjiro Terada, Multi-scale topology optimization considering mechanical and thermal stress forces for additive manufacturing, VII European congress on computational methods in applied sciences and engineering (ECCOMAS 2016), June. 5-10, Crete (Greece), (1page), 2016.
- ④ Shinnosuke Nishi, Kenjiro Terada, Junji Kato, Two-scale topology optimization method for composite plate with in-plane unit cells, VII

European congress on computational methods in applied sciences and engineering (ECCOMAS 2016), June 5-10, Crete (Greece), 2016.

- ⑤ 西澤峻祐, 加藤準治, 京谷孝史, 寺田賢二郎, 熱・構造非連成解析を対象としたマルチスケルトポロジ最適化, 第19回応用力学シンポジウム, 5月21, 22日, 北海道大学 (北海道), 2016.
- ⑥ Junji Kato, Daishun Yachi, Shunsuke Nishizawa, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, Material design for hyperelastic composites using a decoupling multi-scale method, The 3rd International Workshop on Computational Mechanics, (eds. Prof. Isobe), Oct. 12-14, KC Hall (Tokyo), 2015.
- ⑦ 加茂純宜, 加藤準治, 高木知弘, 京谷孝史, マルチフェーズフィールド法を用いたマイクロ構造トポロジー最適化の検討, 日本機械学会 第28回計算力学講演会 (CMD2015), 10月10-12日, 横浜国立大学 (神奈川) (全2頁), 2015.
- ⑧ Junji Kato, Multiscale topology optimization applying a homogenization method, GSIS Homogenization and Numerical Analysis International Summer School, (organizer Prof. Jun Masamune), Aug. 8, Tohoku University (Miyagi), Japan, 2015.
- ⑨ Junji Kato, Daishun Yachi, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, 'Multiscale topology optimization for hyperelastic composites', Proc. of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM13), July 26-30, San Diego (USA), 2015.
- ⑩ Junji Kato, Daishun Yachi, Hiroya Hoshiba, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, 'Multiscale topology optimization for hyperelastic material', Proc. of 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO11, June 7-12, Sydney (Australia) 2015.
- ⑪ 加藤準治, 加茂純宜, 高木知弘, 寺田賢二郎, 京谷孝史, フェーズフィールド法によるマルチスケルトポロジ最適化手法の提案, 日本機械学会 第27回計算力学講演会 (CMD2014), 11月22-24日, 岩手大学 (岩手) (全2頁), 2014.
- ⑫ 加茂純宜, 加藤準治, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, フェーズフィールド法によるマイクロ構造トポロジー最適化の基礎的研究, 第69回土木学会年次学術講演会, 9月10-12日, 大阪 (全2頁), 2014.
- ⑬ 加藤準治, 加茂純宜, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 森口周二, Phase-field

法を用いたマイクロ構造のトポロジー最適化の検討, 第19回計算工学講演会, 日本計算工学会 (全4頁), 6月11-13日, 広島大学 (広島), 2014.

- ⑭ 加藤準治, 加茂純宜, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 車谷麻緒, フェーズフィールド法によるマイクロ構造トポロジー最適化の基礎的研究, 第17回応用力学シンポジウム, 5月10, 11日, 琉球大学 (沖縄), 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 準治 (KATO, Junji)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00594087

(2) 研究分担者

京谷 孝史 (KYOYA, Takashi)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00186347

寺田 賢二郎 (TERADA, Kenjiro)

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号: 40282678