

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560561

研究課題名(和文) 複合材料のエネルギー吸収性能最大化 マルチスケール構造最適化法の新導入

研究課題名(英文) Multiscale topology optimization for maximizing energy absorption capacity of composites

研究代表者

加藤 準治 (Kato, Junji)

東北大学・災害科学国際研究所・助教

研究者番号：00594087

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、複合材料のミクロレベルにおける材料の種類や配置を最適化する、マルチスケール構造最適化手法を確立することを目的としたものであった。本研究では、「マルチスケールトポロジー最適化手法」という新しい方法を確立し、国内外の学会や学術論文にて発表した。この手法は、今後の数値材料設計をやる上で、非常に有効な手法であり、有限要素法を基本としたものである。また、本研究では上記の目的に加え、新たな方法として、複合材料の弾塑性挙動を考慮したトポロジー最適化法およびフェーズフィールド法によるトポロジー最適化手法の開発に成功した。これらの成果は、学術論文ならびに国内外の学会で積極的に発表された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study was to develop a multi-scale optimization which optimize topology of microstructure and/or kind of material of composites. In this achievement we developed successfully the new method, namely "multi-scale topology optimization". This method is based on the finite element method and significant approach from a view point of material design. In addition to above achievement, we also developed the new approach considering elastoplastic material model for composites and so-called phase-field method. These results were presented in six academic journals. So far, the four papers were published and the other two papers are under review process. Furthermore the results of the present study will be presented in the national and international congress totally 13 places.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学，地震工学，維持管理工学

キーワード：応用力学 構造最適化 トポロジー 制震 シミュレーション工学

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(ミクロ構造)に強く依存する」ことがよく知られている。近年、微視構造の制御、製作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ミ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ミクロ構造を得ることはできない。そこで、本研究では数理的アプローチを基本とする先端材料開発の一環として次世代型材料最適設計の確立を目指したものである。特に材料の非線形特性を考慮した最適化問題の研究は学術的にも未解決問題であり、それを盛り込んだ最適化問題の定式化およびその解法を示すことは学術的意義が非常に高いものと思われる。

2. 研究の目的

繊維強化プラスチックをはじめとする複合材料は、軽量かつ高強度という優れた性質をもち、防災、維持補修の上でも今や必要不可欠な建設材料である。一方、複合材料の問題は、その強度の高さ故に脆性的な破壊挙動を示すこと、ミクロレベルにおける材料の挙動がマクロ構造の破壊挙動に大きく影響するという複雑なメカニズムを呈することである。そのため、申請者は既往の研究で、構造最適化手法を用い、脆性破壊を起こす複合材料の靱性を向上させる手法を確立した。しかし、この手法はミクロレベルにおける材料の挙動を本質的に評価できていない。本研究は、材料非線形性を考慮した複合材料の、ミクロレベルにおける材料の種類、位相(トポロジー)、寸法および配置(レイアウト)を最適化する、マルチスケール構造最適化手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

概要: 初年度は、まず有限要素法(以下、FEM)をベースとする構造最適化手法のプログラムの整備を行うと共に必要となる計算機の設定を行った。既に損傷力学モデルを使った複合材料の最適化プログラムは完成しているため、ここでは、それをミクロスケールに限定した最適化プログラムに拡張した。また、マルチスケール構造最適化の準備として、複合材料の材料非線形性を考慮した構造最適化をミクロレベルに限定して行った。ここでは、まず、複合材料のミクロ構造に、例えばせん変形を繰返し与え、どのような(a)位相(トポロジー)あるいは(b)繊維のレイアウトがその平均的なマクロレベルの応力-ひずみ曲線が囲む面積(吸収エネルギー)を最大にするかを求めた。ここでは、高強度低靱

性である材料が強度を高め、低強度高靱性である材料が靱性を改善することを意図したものである。具体的作業については、CCARATという申請者がこれまでFEMと構造最適化の研究で使用・作成してきたC言語のプログラムを用いた。また、デバッグ機能も併用しながら、C言語で作成するプログラムの正誤を厳しくチェックした。

H24,25年度は、初年度に作成したプログラムを用いて本格的なマルチスケール構造最適化のプログラムの完成および大規模数値実験を行い、本手法の有効性と妥当性を検証した。ここでは、加藤・寺田・京谷が協働して均質化法に基づくマルチスケール解析ができるように機能を拡張し、後の大規模数値解析実験に備えた。また、京谷が岩盤強度の極度解析で培った最適化理論に関するノウハウを活かして、そのアルゴリズムを拡張し、加藤が作成したプログラムに実装した。なお、構造最適化のためには感度解析が必要となるが、その精度が悪ければ信頼に足る最適解が得られないことが学術的にわかっている。そのため、本研究では感度解析の高精度化を可能にする新しい手法を提案し、国際会議や学術論文で発表した。さらに感度解析の高精度化に成功したことを踏まえ、大規模計算に取りかかった。

4. 研究成果

本研究では、「マルチスケールトポロジー最適化手法」という新しい方法の確立を目指したもので、および「非線形材料特性を最適化問題における感度解析の高精度化」が主な目的である。これらについては、それぞれ定式化に成功したため、国内外の学会や学術論文にて発表した。これらの手法は、今後の数値材料設計をやる上で、非常に有効な手法であり、汎用性も高いといえる。また、本研究では上記の目的に加え、新たな方法として、複合材料のフェーズフィールド法によるトポロジー最適化手法の開発に成功した。これらの成果は、学術論文ならびに国内外の学会で積極的に発表された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

1. J. Kato, H. Hoshiba, S. Takase, K. Terada, T. Kyoya, Multiphase topology optimization of composites under elastoplastic behavior, Structural and Multidisciplinary Optimization, March 2014, 投稿済(査読あり)。
2. 加藤準治, 干場大也, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 複合材料の塑性変形挙動を

- 考慮したトポロジー最適化と解析的感度手法の精度検証, 日本計算工学会論文集, 2014. 3, 投稿済 (査読あり).
3. Junji Kato, Daishun Yachi, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, Topology optimization of micro-structure for composites applying a decoupling multi-scale analysis, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 49, pp. 595-608, 2014 (査読あり).
 4. 谷地大舜, 加藤準治, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, マルチスケールトポロジー最適化手法と解析的感度導出法の提案, 日本計算工学会論文集 (Transactions of JSCE), Paper No.20130022, 2013 (査読あり).
 5. Kenjiro Terada, Junji Kato, Norio Hirayama, Masanori Inugai, Koji Yamamoto, A method of two-scale analysis with micro-macro decoupling scheme: application to hyperelastic composite materials, *Computational Mechanics*, 52, pp. 1199-1219, 2013 (査読あり).
 6. 加藤準治, 谷地大舜, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, マルチスケールトポロジー最適化手法の3次元構造問題への拡張, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 69, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 16), I_133-I_144, 2013 (査読あり).
 7. Junji Kato, Ekkehard Ramm, Multiphase layout optimization for fiber reinforced composites considering a damage model, *Engineering Structures*, 49, pp. 202-220, 2013 (査読あり).
 8. 加藤準治, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 複合材料のマクロ構造挙動を考慮したミクロ構造トポロジー最適化, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 68, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 15), I_279-I_287, 2012 (査読あり).
 9. 加藤準治, Ramm Ekkehard, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 繊維複合材料のひずみ軟化を考慮した多層材料最適化手法の提案, 土木学会論文集 A2, 67(1), pp. 39-53, 2011.
 10. 加藤準治, Ramm Ekkehard, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 損傷を受ける繊維複合材料の繊維形状最適化, 土木学会論文集 A2, 67(1), pp. 54-68, 2011 (査読あり).
- [学会発表](計 13 件)
1. Junji Kato, Hiroya Hoshiba, Shinsuke Takase, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, Topological Design Considering Elastoplastic Behavior for Structural Toughness, 'Proc. of 1st Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problem (COMPSAFE2014)', pp. 66-69, Sendai, Japan, Apr. 13-16, 2014.
 2. Daishun Yachi, Junji Kato, Shinsuke Takase, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, Numerical Design for Rubber Materials toward High Performance in Energy Absorption, 'Proc. of 1st Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problem (COMPSAFE2014)', pp. 114-117, Sendai, Japan, Apr. 13-16, 2014.
 3. 加茂純直, 加藤準治, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, Phase-field 法を用いたマルチスケールトポロジー最適化, 土木学会東北支部技術研究発表会, 3月8日, 八戸 (全2頁), 2014.
 4. 干場大也, 加藤準治, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 複合材料の塑性挙動を考慮したトポロジー最適化の実装, 土木学会東北支部技術研究発表会, 3月8日, 八戸 (全2頁), 2014.

5. 加藤準治, 谷地大舜, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 京谷孝史, マルチスケールトポロジー最適化を用いた材料設計, 日本機学会 第 26 回 計算力学講演会 (CMD2013), (全 2 頁), 10 月 2~4 日, 佐賀, 2013.
6. 谷地大舜, 加藤準治, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 京谷孝史, 3 次元マルチスケールトポロジー最適化, 土木学会第 68 回 年次学術講演会, (全 2 頁), 9 月 4~6 日, 千葉, 2013.
7. 谷地大舜, 加藤準治, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 複合材料のマルチスケールトポロジー最適化, 第 18 回日本計算工学会講演会, (全 4 頁), 6 月 19~21 日, 東京, 2013.
8. 谷地大舜, 加藤準治, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 複合材料の分離型マルチスケール解析手法を適用した 3 次元ミクロ構造トポロジー最適化, 土木学会東北支部技術研究発表会, 3 月 9 日, 仙台, (全 2 頁), 2013.
9. 谷地大舜, 加藤準治, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 複合材料の分離型マルチスケール解析手法を適用した 3 次元ミクロ構造トポロジー最適化, 第 62 回理論応用力学講演会, 3 月 6~8 日, 東京, (全 2 頁), 2013.
10. Junji Kato, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, Topology optimization of microstructures for inelastic composite materials applying decoupling multi-scale analysis, the 6th European congress on computational methods in applied sciences and engineering (ECCOMAS 2012), Sep. 10-14, Wien, Austria, (1page), 2012: *keynote lecture*
11. 加藤準治, 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ミクロ

構造トポロジー最適化の提案, 第 17 回日本計算工学会講演会, 第 17 回日本計算工学会講演会, (全 4 頁), 5 月 29~31 日, 京都, 2012.

12. 加藤準治, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 損傷モデルを考慮した繊維複合材料のエネルギー吸収性能最大化, 第 16 回日本計算工学会講演会, (全 4 頁), 5 月 25~27 日, 東京, 2011.

13. Junji Kato, Ekkehard Ramm, Material Layout Optimization for Fiber Reinforced Composites considering Material Nonlinearity, 'Proc. of 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO09', Shizuoka, Japan, May 13-17, (10 pages), 2011.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔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・災害科学国際研究所・助教
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

(3)連携研究者
(なし)
研究者番号： -