

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2021
課題番号：20K14603
研究課題名（和文）次世代の材料設計を見据えた熱・機械強連成勾配型次数低減マルチスケール解析の実現
研究課題名（英文）Thermo-mechanical coupled gradient-enhanced reduced order multi-scale analysis for the next-generation material design
研究代表者
松原 成志朗（MATSUBARA, SEISHIRO）
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号：40823638
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高分子複合材料の微視構造内における非定常な温度場と変形場の連成挙動、およびそれを反映した巨視的構造の熱・機械連成特性を評価するための計算均質化理論、および関係するマルチスケール解析手法を構築した。結果として、熱超弾性複合材料の熱・機械連成問題を通して、両スケールにおける時刻歴の温度場と変形場を高精度に予測可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案手法では、「非定常」な複合材料の熱・機械連成挙動を微視・巨視構造レベル双方で高精度に予測することが可能である。そのため、微視構造レベルで局所的に温度が蓄積し、それによる残留応力が問題となる充填ゴムや繊維強化樹脂の強度評価を高精度に実施することが可能である。また、トポロジー最適化手法との組み合わせによってこれらの弱点を克服するような微視構造のデザインも可能になる。したがって、本手法は実用面においても極めて有用であるといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we formulated a method of two-scale analysis to predict unsteady thermo-mechanically coupled behaviors in the microstructure of polymer based composite and to evaluate coupled thermo-mechanical macroscopic properties. As a result, the verification for the thermo-mechanically coupled problem of thermo-hyperelastic composite demonstrated that our proposed method can evaluate unsteady two-scale thermo-mechanically coupled behaviors of composites accurately.

研究分野：計算固体力学

キーワード：マルチスケール 均質化法 熱・機械連成問題 ミクロ非定常 高分子複合材料

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

充填ゴムや繊維強化樹脂 (FRP, FRTP) といった高分子材料を母材とする複合材料は、構成材料の材料学的特性だけでなく、微視的な幾何形状も変数とした設計が可能なることから、様々な産業分野での活用が期待されている。その反面、複合材料の巨視的 (マクロ) 力学挙動は介在物の配向角に依存した異方性を有するだけでなく、母材物性の温度依存性が微視 (ミクロ) 構造内の応力場を複雑化させ、構造物の強度に深刻な問題を与えうる。そのため、これらの複合材料の強度評価を正しく実施するためには、変形場と温度場の連成問題を取り扱う必要がある。

複合材料の数値的強度評価として最も一般的な均質化法に基づくマルチスケール解析手法は、主に RVE 寸法の無限小操作による帰結を用いた一次均質化法と実寸 RVE を仮定して寸法効果を考慮する二次均質化法のどちらかを理論基盤としている。複合材料の熱・機械連成問題に焦点を当てるとき、前者のアプローチを基礎とする手法はこれまでに数多く提案されているものの、RVE の無限小操作という数学的基盤が足かせとなって、ミクロな伝熱現象の「非定常性」を再現することができない。一方、後者のアプローチではミクロな「非定常」熱伝導を考慮することが可能であるものの、現在においても構造物の強度評価に直接結びつく固体力学との連成問題、および数値計算手法の確立には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、高分子材料を母材とする複合材料のミクロな「非定常性」を考慮した 2 変数熱・機械連成問題を定式化し、有限要素法を用いてこれを解くための熱・機械連成マルチスケール解析手法を実装する。

3. 研究の方法

本研究で提案する熱・機械連成マルチスケール解析手法は、以下の手順で構築される。

- (a) 増分型変分法に基づき複合材料の熱・機械連成状態を記述する速度ポテンシャルを定義し、その停留条件に対して 2 スケール分離を行うことで一般論としての 2 変数境界値問題を導出
- (b) 一般論としての 2 変数境界値問題について、対数温度場の線形化近似を行うことによって古典的な固体力学、伝熱工学に整合した 2 変数境界値問題を導出
- (c) 接線均質化アプローチに基づく、完全陰的な熱・機械連成マルチスケール解析手法の構築およびプログラム実装

(a) では、まず増分型変分法に基づき複合材料のエネルギー貯蔵を記述する内部エネルギー、非弾性変形によるエネルギー散逸を記述する双対散逸ポテンシャル、熱伝導によるエネルギー散逸を記述する Fourier ポテンシャルから成り立つ速度ポテンシャルを定義する。このエネルギーポテンシャルは、運動、エントロピー、温度、内部変数を独立変数として持ち、運動と温度については 2 次均質化法の要領でミクロ構造単位の代表寸法 Y を持った関数として定義する。このエネルギーポテンシャルに対して 4 つの独立変数に関する停留原理を考慮して力のつり合い、非定常熱伝導、内部変数の発展、熱力学的平衡状態を記述する支配方程式を導出する。そして、数学的均質化法における一般化収束論の帰結をこれらの支配方程式に適用することで支配方程式をミクロおよびマクロスケールの物体の平衡状態を記述する式へとそれぞれ変換する。本研究で行ったこの定式化は、固体熱力学理論に完全に整合しているため、2 変数境界値問題に要請される Hill-Mandel 条件を自動的に満足し、計算均質化理論においても理論的に全く矛盾の無い数理モデルとなっている。

(a) において定式化した 2 変数境界値問題は、固体熱力学および計算均質化理論に厳密であるものの、対数温度を独立変数とする非定常熱伝導方程式が導出されるため、実際の数値計算においては極めて煩雑なアルゴリズム構築を必要とする。そこで (b) では、ミクロ対数温度とマクロ対数温度の関係において対数温度の線形化近似を考慮することでアルゴリズム上の問題点を解消した。結果として近似された熱伝導方程式は、古典的な伝熱工学において得られるものと厳密に一致した。したがって、これまで実験的に計測されてきた熱伝導係数などの材料特性をそのまま使用した数値解析が本手法でも可能であり、複合材料に対する熱・機械連成マルチスケール解析をシームレスに実施できることがわかった。

定式化した2変数境界値問題はマイクロ数値解析とマクロ数値解析を連成するFE2によって解く。その際、完全陰的な数値計算を実現するため、(c)では、マイクロな物理変数の非一様性を特徴づける摂動変数に対して、対応するマクロ量と特性関数による近似を用いた接線均質化アプローチを熱・機械連成マルチスケール解析手法に拡張することで完全陰的な数値計算手法を構築した。具体的には、マイクロ変形勾配、温度、温度勾配に含まれる摂動変数をマクロ変形勾配、温度、温度勾配と9個の特性関数の導入によって近似し、特性関数のセットを熱・機械連成問題に対応する線形摂動解析から求めることで理論的には1次収束性が見込まれるアルゴリズムを構築した。

4. 研究成果

本提案手法の妥当性を検証するために、図1に示す2種類の熱超弾性体からなる複合材料の熱伝達を考慮した熱機械連成問題の数値解析を実施した。図2に全体構造のシングルスケール解析と提案するマルチスケール解析によってそれぞれ予測されたマクロ温度と反力を示す。温度場に対する一様境界条件の結果として提案手法で予測されたマクロ温度場は、シングルスケール解析の結果に対して常に下限に位置した。また、反力については完全に一致した値が得られており、本提案手法が正しくマクロな熱・機械連成挙動を予測できることが示された。また、図3、4に示すマクロ・マイクロな温度・応力場の比較結果を参照すると、全体構造のシングルスケール解析によって予測された結果と完全に一致することが分かった。以上の点より、本研究で提案するマルチスケール解析手法は複合材料の熱・機械連成挙動を正確に予測できることが分かった。なお、非弾性問題に対する検証は今後の課題とする。

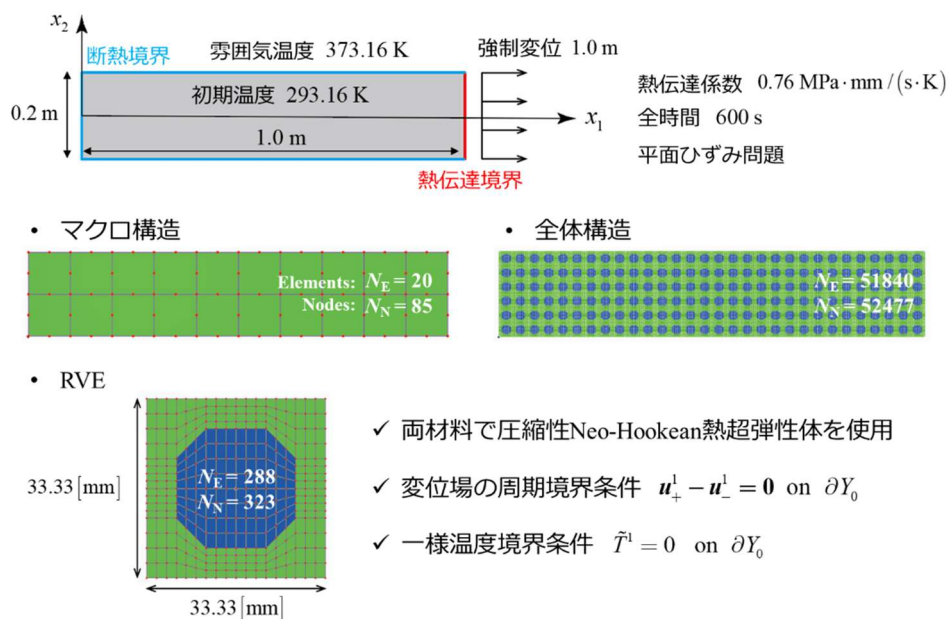


図1 熱超弾性複合材料に対する検証例題

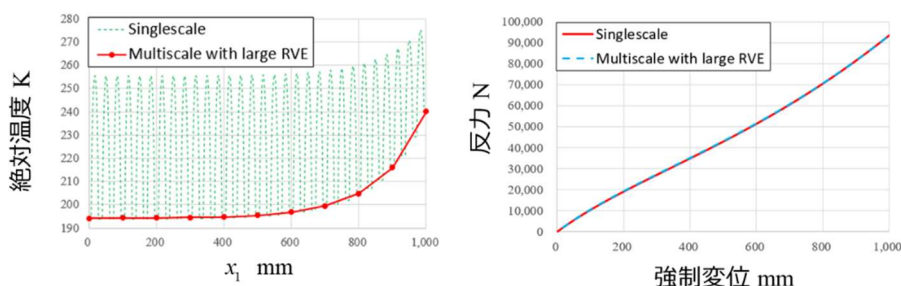


図2 マクロ温度 (左) と反力 (右) の検証結果

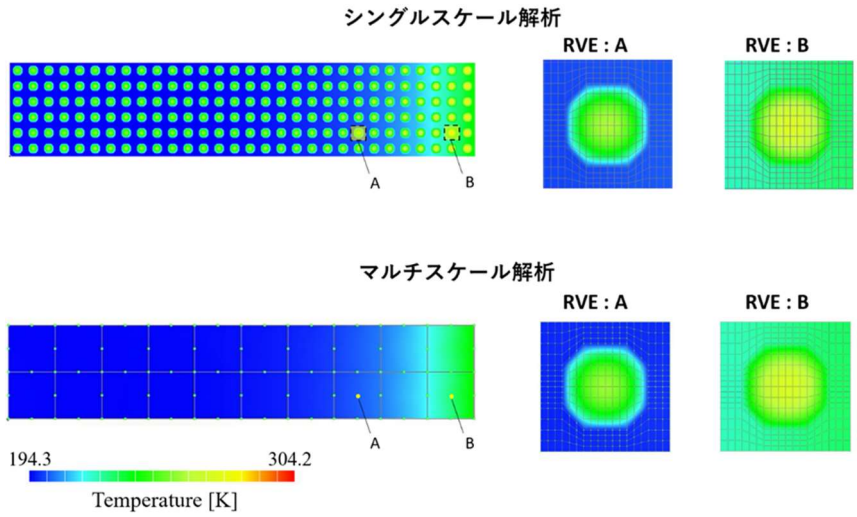


図3 温度場の検証結果

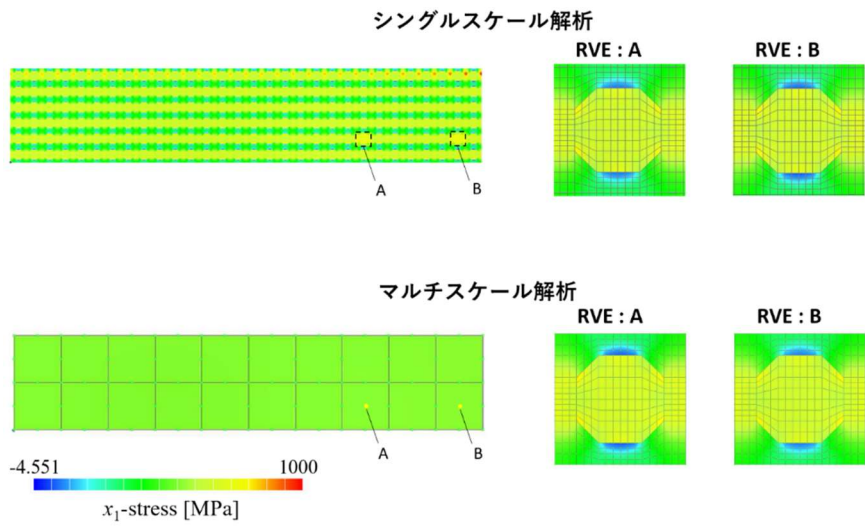


図4 応力場の検証結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 菊池 正太郎, 三好 宏明, 松原 成志朗, 奥村 大	4. 巻 86
2. 論文標題 膨潤エラストマーに対するGent-Gent超弾性モデルの有限要素実装	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 20-00233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00233	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 -
1. 著者名 松原 成志朗, 奥村 大, 寺田 賢二郎	4. 巻 20
2. 論文標題 微圧縮超弾性体の熱・機械完全連成問題に対する 増分型Mean dilatation法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 101-109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 Yosuke Yamanaka, Seishiro Matsubara, Risa Saito, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada	4. 巻 216
2. 論文標題 Thermo-mechanical coupled incremental variational formulation for thermosetting resins subjected to curing process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 30-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsoistr.2021.01.014	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 -
1. 著者名 Seishiro Matsubara, Kenjiro Terada	4. 巻 212
2. 論文標題 A variationally consistent formulation of the thermo-mechanically coupled problem with non-associative viscoplasticity for glassy amorphous polymers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 152-168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsoistr.2020.12.004	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松原成志朗, 寺田賢二郎
2. 発表標題 微視的非正常性を考慮した複合材料のマルチスケール熱伝導解析
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Matsubara D. Okumura K. Terada
2. 発表標題 A thermo-mechanically coupled variational update for glassy amorphous polymers in consideration of the effect of mechanical entropy change
3. 学会等名 IMECE2020 virtual conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Matsubara D. Okumura K. Terada
2. 発表標題 Thermo-mechanical coupled two-scale analysis involving microscopic thermal inertia
3. 学会等名 The 3rd international conference on computational engineering and science for safety and environmental problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松原成志朗, 奥村大
2. 発表標題 非均質体に対する微視的温度場の過渡現象を考慮した熱・機械連成マルチスケール解析
3. 学会等名 機械学会東海支部第70期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松原成志朗, 奥村大
2. 発表標題 非晶性熱可塑性樹脂の熱・機械強連成有限要素解析
3. 学会等名 日本材料学会東海支部 第15 回学術講演会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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