

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760079

研究課題名(和文) 多孔質材料の確率均質化特性評価法に関する研究

研究課題名(英文) Study on Probabilistic Property Evaluation for a Homogenized Elastic Property of a Porous Material

研究代表者

坂田 誠一郎(SAKATA SEI-ICHIRO)

島根大学・総合理工学部・准教授

研究者番号：80325042

研究成果の概要(和文)：本研究では、光造形装置を用いて作成した多孔質材料の確率均質化問題の解析および確率均質化特性の評価を目的とし、解析手法の確立および実験による確認を行った。特に、コンピュータシミュレーションを用いた多孔質材料の確率均質化解析のために、複合材料など他の一般的な不均質材料をも解析可能な摂動法ベースの解析システムを開発した。種々のシミュレーションを通じ、提案手法の妥当性、有効性および問題点を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, a rapid prototyping is employed for manufacturing a porous material having well-controlled voids in the material. A random variation in a porous material manufactured with a rapid prototyping system is observed in a set of experimental data. For the purpose of investigate an influence of the microscopic random variation on a homogenized elastic property, a perturbation-based computational methodology for the stochastic homogenization analysis of a porous material and a general heterogeneous material like a composite material is developed. With the numerical results, validity, effectiveness and problems in the proposed approach are illustrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：確立均質化 多孔質材料 マルチスケール

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 研究開始当初、不均質材料のマルチスケール問題における不確定性の影響の解析、すなわちある物理量のばらつきのスケール間伝播に関する問題が注目されつつあった。特に、複雑な微視構造を有する多孔質材料や複合材料の均質化された弾性特性に関するばらつき特性伝播解析問題(確率均質化問題)は、先端不均質材料の特性評価や信頼性評価

の観点から重要性が認識されつつあった。しかしながら、関連する研究はまだ広く行われているとは言いがたく、欧州、米国等で数名の研究者が報告した成果が見られる程度であった。

(2) これらの報告は、複合材料などに対象が限られており、今後超軽量構造物やバイオインプラント材料などに応用が期待されてい

る多孔質材料に関する報告は見られなかった。特に、多孔質材料においては空孔の形状や位置など微視的な幾何学特性のばらつきが問題となると予想されるが、これらの問題に対する解析手法もほとんど検討されていなかった。

(3) また、これまでの報告では、介在物が一様なランダム性のもと分布している場合や、材料の弾性定数がばらつきを有する場合について、二次元的な解析が報告された程度であった。しかしながら、当該問題の三次元的な解析は十分に検討されておらず、さらに非一様なばらつきを有するより一般的な問題については未検討であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、空孔の位置を制御して作製された多孔質材料を対象とし、空孔の位置や形状がばらついた場合に均質化された弾性特性に及ぼす影響を解析する手法を確立することを目的とした。また、手法の将来的な応用可能性を鑑み、複合材料も含めたより一般的な解析手法を構築することとした。

さらに、光造形装置を用いて空孔位置を制御した多孔質材料を試作し、実際のばらつきを調査することも目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、三次元有限要素法と均質化理論の併用による均質化解析の利用を念頭に、コンピュータシミュレーションで当該問題を解析可能な手法を開発した。

具体的には、モンテカルロシミュレーションおよび摂動法に基づく確率均質化解析手法を開発し、数値計算を通じてその有効性や妥当性、適用限界などについて調査した。

実験的側面としては、光造形装置を用いた二次元的もしくは三次元的な空孔配置を有する多孔質材料の製造方法を検討するとともに実際に試作し、作製した材料内に生じるばらつきを測定した。

研究の具体的方法を以下に示す。

### ①解析手法について

解析手法については下記の方法により研究を実施した。

(1) 開発手法による多孔質材料の確率均質化解析の試行

(2) 確率均質化解析法の多孔質材料への適用のための改良（階層型確率均質化法の確立）

(3) 階層型確率均質化法による解析システムの構築

多孔質材料では主に空孔の形状・大きさ・含有率および空孔の位置など幾何学的パラメータが確率変数となると考えられるが、これらを簡便に考慮できる手法は確立されて

いない。申請者らはある種類の幾何学的確率変動を有する問題に対して適用可能な独自の手法を開発した。

②空孔位置を制御した多孔質材料作製のためのモデリング手法の検討

(1) ミクロ構造のばらつきを想定した多孔質材料の三次元数値モデリング

(2) モンテカルロシミュレーションに利用可能な多孔質モデルの生成とシミュレーションの実行

多孔質材料の有限要素モデルについては既にいくつか報告されているが、確定的な解析を目的としており、本研究で想定するようなばらつきを考慮した確率的解析のためのモデリング手法については未だ確立されていない。特に、モンテカルロシミュレーションや光造形の実データとしての使用に耐え得るモデリング手法を確立し、それを用いてシミュレーションや実モデル作成を行った。

③光造形システムを用いた多孔質材料試験片の作製

(1) 現在所有する光造形システムによる多孔質モデルの作成限界・造形精度の検証

(2) 出来る限り小さな空孔を精度良く含む多孔質材料試験片の造形のための三次元光造形機の改良

現在、所有する三次元光造形機を用いて多孔質材料の製造を試みた。また、精度等が不十分であったため、微細構造の造形が不能であるという問題点の解決のため、造形機の改良により高精度化を実現した。

## 4. 研究成果

本研究期間内では、多孔質材料を含む一般的な不均質材料に関する三次元確率均質化問題の解析手法を確立できた。特に、摂動法に基づく確率均質化解析プログラムを開発し、種々の問題において数値実験等を通じて妥当性、有効性および問題点を明らかにした。

また、比較的廉価な光造形装置を用いて二次元および三次元的な空孔配置を有する多孔質材料を試作し、造形時に生じるばらつきを測定した。作製した二次元的空孔配置を有する多孔質材料（二次元多孔質材料）の例を図1に、三次元的な空孔配置を有する多孔質材料の試作例を図2に示す。また三次元多孔質材料の有限要素解析及び光造形のための数値モデルを図3に示す。図2および図3では三次元的な構造が造形できているように見えるが、材料内部で適切な空孔状態となっていない問題があり、今後の解決課題である。本研究期間では、図1に示す二次元多孔質材料を解析対象とした。

さらに、測定したデータに基づき、本研究により開発したシステムを用いて多孔質材

料の確率均質化解析（二次元的な空孔配置を有する場合）を実施し、空孔配置や形状のばらつきが確率均質化特性に及ぼす影響について調査を行った。

二次元多孔質材料の確率均質化問題として、図4に示すように空孔の配置および形状がばらつく場合を想定した。図1のように規則的に配置された空孔の配置や形状がばらつく場合に、ばらつきをどの程度以下に抑えればランダム空孔を有する多孔質材料と比較してよい特性が実現できるかを調査することは重要である。

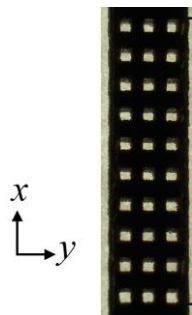


図1 二次元的な空孔配置を有する多孔質材料試験片

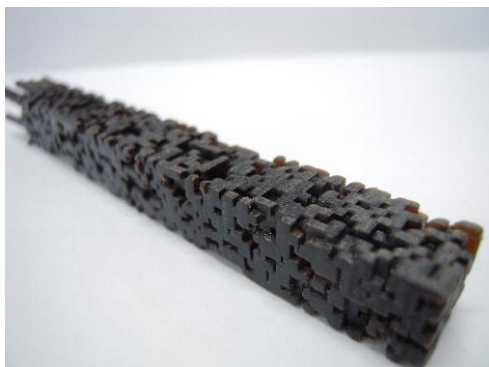


図2 三次元的な空孔配置を有する多孔質材料試験片

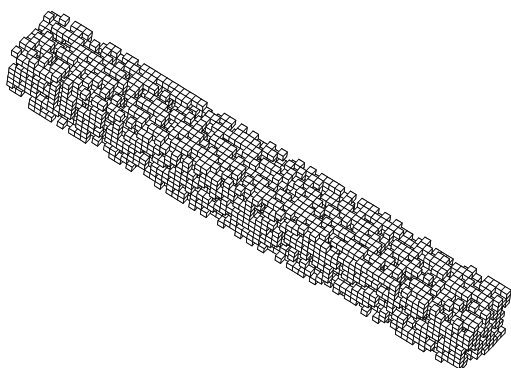
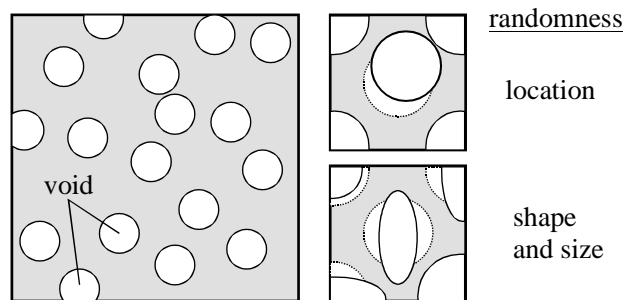


図3 三次元多孔質材料の有限要素解析および光造形のための数値モデル

まず、ランダムに配置された同じ大きさの空孔を有する二次元多孔質材料の確率均質化特性を調査した。有限要素モデルを図5に示す。また、微視構造のセルサイズと等価弾性定数の変動係数の関係を図6に示す。図6はモンテカルロシミュレーションの結果を表している。図6より、本モデルではセルサイズを増やしても変動係数 0.03 程度の等価弾性定数のばらつきが見られた。



(a) porous material (b) randomness in voids

図4 多孔質材料の空孔変動の例

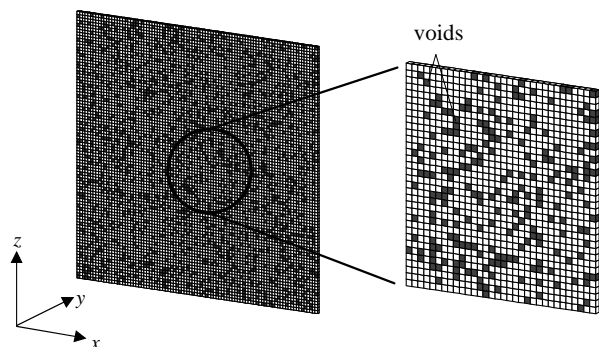


図5 ランダム空孔を有する多孔質材料の有限要素モデルの例

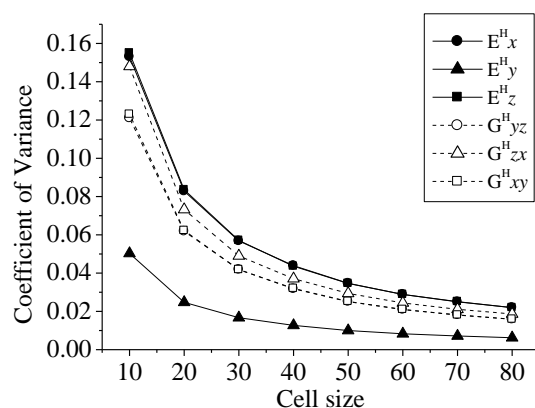


図6 多孔質材料のセルサイズと各等価弾性定数の変動係数

次に、図7に示すように規則的に配置され

た空孔を有する場合について、空孔形状変動に対する確率均質化解析結果を図8に示す。

図8は空孔寸法が変動係数0.05でばらつく場合の確率均質化特性を求めた結果である。これより、方向によっては等価弾性定数のばらつきが空孔ランダム配置の場合より大幅に大きいことがわかる。したがって、本解析結果をもとに、造形精度を適切に決定する必要があることが示された。

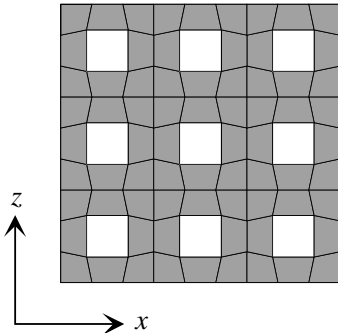


図6 規則的空孔配置を有する二次元多孔質材料の解析モデル

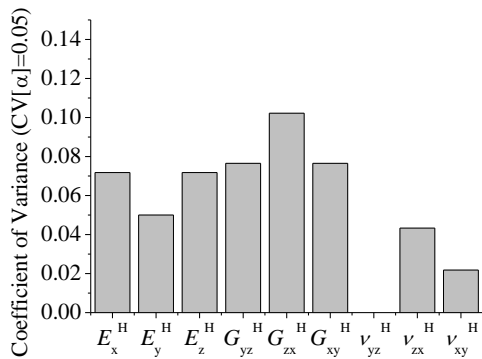


図7 規則的空孔配置を有する二次元多孔質材料の空孔変動に対する確率均質化特性

これまで当該問題について、国内外で上記のような報告はなく、多孔質材料の信頼性設計において新たに考慮すべき内容を明らかにしたと考える。

また、不均質材料の微視的な幾何学的変動が及ぼす影響の解析、主に微視的な一様ばらつきが仮定されていた。

これに対し、本研究では非一様なばらつきを考慮可能な手法の提案を行った(階層型確率均質化手法の提案)。階層型確率均質化モデルの概念図を図8に示す。本手法については、これまでしばしば報告が見られた粒子強化複合材料を想定し、解析を試みた。図9に仮定した粒子含有率の確率特性の微視的非一様分布、図10に微視的な非一様性を考慮した場合と考慮しない場合の解析結果を示す。この結果より、不均質材料を構成する材料定数や微視構造の幾何学的特性に関する

確率特性の微視的な非一様性を考慮する必要が明らかとなった。

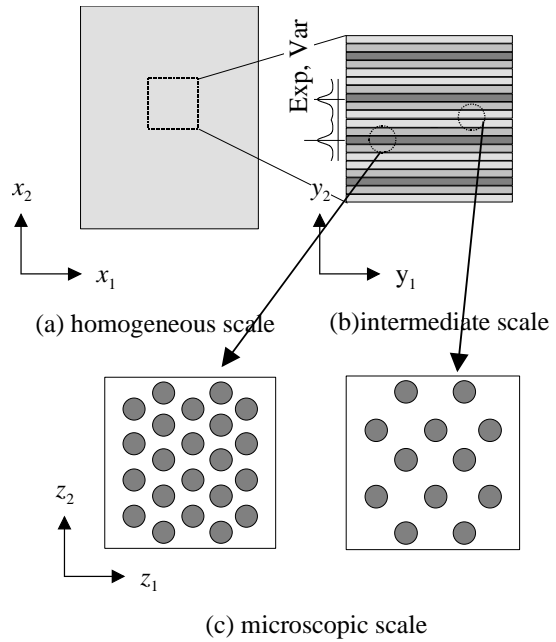


図8 階層型確率均質化モデルの概念図

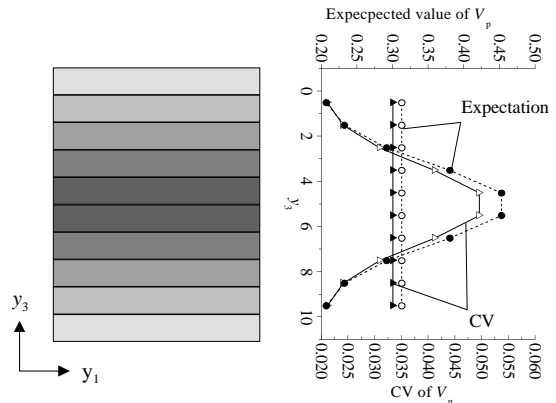


図9 単位微視構造内における粒子含有率の期待値及び変動係数の非一様分布

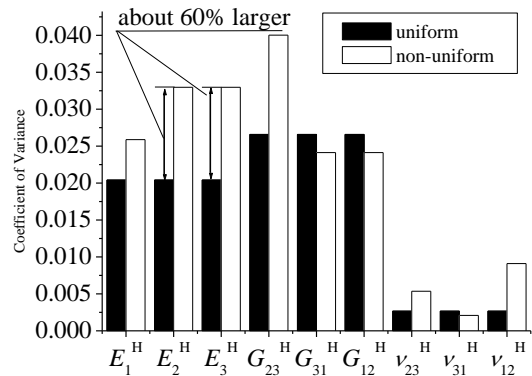


図10 微視的確率特性の非一様性を考慮した確率均質化解析結果

関連研究成果については別項目に示す国際会議、学術論文等で報告を行っただけでなく、活動が国際的に評価され、2010年7月にシドニーで開催された計算力学に関する世界会議ではPolandのKaminski教授と関連セッションのオーガナイザーを務めた。また2011年6月の米国機械学会の材料力学分野講演会では、Frank Xu教授らが主催する関連シンポジウムのセッションオーガナイザーにOstoja-Starzewski教授らとともに抜擢されている。

さらに、解析手法開発が順調に進んだため、当初予定していた確率均質化解析のみならず、マルチスケール確率応力解析について基礎的な内容の検討も行った。本問題は、確率均質化問題に続く次の課題として検討すべき内容であり、現在重要性が指摘されつつある。本問題は本研究課題である確率均質化解析を基礎とするものであり、本課題の遂行により得られた知見が寄与するところは大きい。

また、本課題で取り扱った問題は、前述の先端不均質材料の性能評価の観点だけでなく、計算力学的手法の品質および信頼性評価の観点からも極めて重要視されつつある。今後、コンピュータシミュレーションを援用し設計した製品の信頼性評価のために、マルチスケール確率応力解析やそれに基づくマルチスケール信頼性評価手法の確立が必要となると考えられるが、そのための基礎として本研究の遂行は高い意義を有する。

また、今後本研究課題を含む確率均質化問題全般について、確率均質化解析手法の高精度化、汎用化及び解析可能対象の拡大が求められると考える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

① S. Sakata, F. Ashida and R. Tanaka, First Order Perturbation-based Stochastic Homogenization Analysis for Short Fiber Reinforced Composite Materials, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.4, No.4, 446-459, 2010, 査読あり

② S. Sakata, F. Ashida and Y. Shimizu, Identification of a Microscopic Randomness of a Particle Reinforced Composite Material with Monte-Carlo Simulation and Inverse Homogenization Analysis, International Journal for Multiscale Computational Enginerring, Vol.10, 1-9, 2010, 査読あり

[学会発表] (計 13 件)

① S. Sakata and F. Ashida, Stochastic Homogenization Analysis of a Particle Reinforced Composite Material considering a Microscopic Non-uniform Random Variation of a Microscopic Quantity, 12th International Congress on Mesomechanics, 2010年6月22, Taipei

② S. Sakata and F. Ashida, Stochastic Multiscale Stress Analysis via Identification of Microscopic Randomness, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, 2010年7月21日, Sydney

③ S. Sakata and F. Ashida, Stochastic Homogenization Analysis of a Porous Material Manufactured by a Rapid Prototyping, The Second Asian Conference on Functional Materials and Structures, 2010年10月25, Nanjing

④ 大住元謙一, 坂田誠一郎, 芦田文博, 空孔形状のランダム変動を有する多孔質材料の確率均質化解析, 日本計算工学会第16回計算工学講演会, 2011年5月25, 千葉 (東京大学柏キャンパス)

[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

坂田 誠一郎 (SAKATA SEI-ICHIRO)

島根大学・総合理工学部・准教授

研究者番号：80325042