

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760097

研究課題名(和文)多孔質材料のマルチスケール確率応力解析および信頼性設計法に関する研究

研究課題名(英文) Study on Multiscale Stochastic Stress Analysis and Reliability-based Design of a Porous Material

研究代表者

坂田 誠一郎 (SAKATA, Sei-ichiro)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：80325042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、先端不均質材料のうち、特に多孔質材料内部の空孔形状や含有率のばらつきの影響を調査し、それを考慮した設計法について研究した。

まず、マルチスケール有限要素法とモンテカルロ法により、想定されるばらつきがみかけの材料特性に及ぼす影響を調査し、当該解析の必要性を示した。また、摂動法を用いた効率的解析法を提案した。加えて、複合材料も含めた一般材料について、非一様なばらつきの場合も解析し、本解析の重要性を示した。さらに実験結果と比較し、解析結果の妥当性を示した。この成果に基づき多孔質材料構造物の信頼性設計法について基礎的検討を行い、本研究で示した微視的ばらつきの影響を考慮する必要性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, influence of a microscopic random variation in heterogeneous materials, in particular a porous material, on homogenized material properties and stress fields is investigated. As microscopic random variables, volume fraction, shape and location of holes in the material are taken into account.

At first, influence of the microscopic random variations on the homogenized properties and the stresses is analysed with the multiscale finite element method and the Monte-Carlo simulation, and the results show necessity of the multiscale stochastic stress analysis for a reliability-based design of the material. In particular, importance of considering the non-uniformity of the microscopic random variation is indicated.

The numerical results on the stochastic homogenization analysis with the perturbation-based method are compared with the results of the Monte-Carlo simulation and experiments, and validity and effectiveness of the approach are shown.

研究分野：材料力学，計算力学

キーワード：確率均質化解析 マルチスケール確率応力解析 多孔質材料 信頼性設計

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の開始当初は、計算力学手法の発達により不均質材料や機能材料のマルチスケール解析が利用されるようになり、ミクロレベルとマクロレベルの両者を考慮した構造解析を用いた構造評価および設計が行われつつあった。一方、国際的にも、これまで、より複雑、もしくは高度な問題の解析や高精度化が計算力学分野の大きな研究目標の一つであったが、例えば機械部品における材料のばらつきや寸法誤差、経年劣化など、種々の確定しづらい要因を考慮し、コンピュータシミュレーションと現実問題との対応付けを念頭に置いた、シミュレーションの妥当性検証に関する研究の必要性が指摘されていた。

(2) これに対し、不均質材料の微視的なばらつきを確率変数と見なし、その影響を考慮した材料特性評価計算手法に関する研究が注目されつつあった。この問題は確率均質化問題と呼ばれ、主に複合材料を想定して母材や介在物の材料定数や分布状態がばらついたときの解析について検討が行われていた。

一方、本研究でも想定している人工多孔質材料など、単一素材からなる不均質材料についても、同様の解析の必要性が指摘されつつあった。また、これらの研究は主に計算力学アプローチのみにとどまることが多く、実験面からの検証も十分とは言えなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景に鑑み、特に現在では新たな成形法として注目を集めている三次元造形法に着目し、それを用いて作成した多孔質材料について、孔の幾何学的なばらつきがみかけの弾性特性や強度に及ぼす影響を解析するとともに、より効率的な手法を開発し、併せて実験的検証を行い当該解析の必要性及び提案手法の妥当性を検討することを目的とした。

また、本問題は今後当該材料を構造部品として利用する際、設計時に考慮すべき内容であることから、信頼性設計の観点から当該問題を考慮した設計手法に関する基礎的検討を行うことも目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、研究代表者により開発された確率均質化・マルチスケール確率応力解析手法及び解析システムを用いて、多孔質材料及び複合材料などの不均質材料のマルチスケール確率解析を行った。解析手法としては均質化法に基づく有限要素法解析、モンテカルロシミュレーション、摂動法、関数近似法などを用いた。また、実験面では、光造形法に基づく三次元造形機及び一軸引張り試験機等を用いた材料特性測定を実施した。

(2) 研究目的を達成するために、まず 一様な

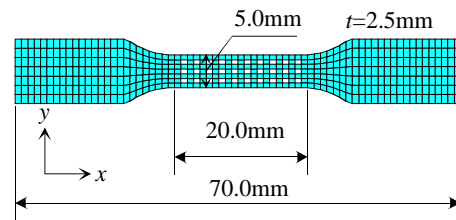
ばらつきを仮定した二次元的な周期的空孔分布を有する多孔質材料のマルチスケール確率応力解析手法を開発し、既存のモンテカルロシミュレーション及び光造形を用いた多孔質材料試験による提案手法の妥当性検証を行った。次に、提案手法の非一様なばらつきを有する問題への拡張を行ない、一般的材料への適用可能性の検討及びそれを用いた構造設計法について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 摂動法に基づく確率均質化解析と実験との比較による妥当性検証

まず、図1に示すように面内に規則的な孔を有する有孔引張り試験片を三次元造形装置で作成し、孔の位置及び寸法のばらつきを測定すると共に、単軸引張り試験により見かけの弾性定数のばらつきを測定した。

例として、孔のy方向寸法のばらつきを図2に示す。このように、造形寸法にはばらつきが生じていることが判る。また、引張り試験により得られた見かけの弾性定数のヒストグラムを図3に示す。



(a)各部の寸法



(b)実際に造形した試験片

図1 試験片の概形

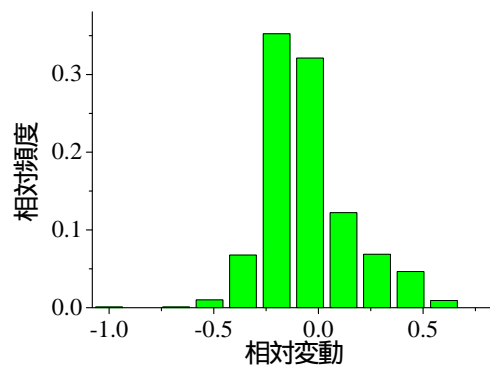


図2 孔寸法のばらつき

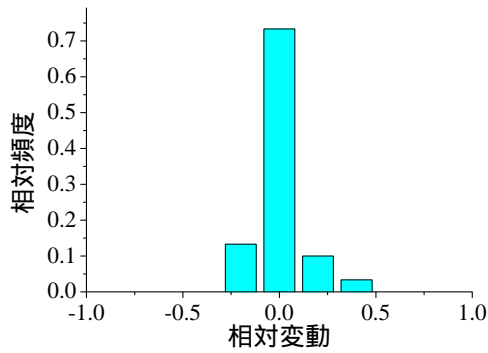


図3 有孔試験片の等価弾性定数のばらつき

図3より得られた有効試験片の見かけの弾性定数の変動係数は0.11であり、孔なし試験片により得られた素材そのものの弾性定数のばらつき0.048より大きかった。

本研究では、このように有孔試験片における孔の寸法や配置のばらつきが見かけの弾性係数及ばす影響を解析した。数値解析としてはモンテカルロシミュレーション及び摂動法に基づく確率均質化解析を実施した。特に、一次および二次摂動法による解析結果と実験により得られた見かけの弾性係数の変動係数の比較を表1に示す。表1から、摂動法に基づく解析で良好な結果が得られていることが判る。また、二次摂動法を用いることにより解析精度が若干改善したことも判る。これらの結果から、三次元造形法により作製した有孔材料において、孔寸法及び位置にばらつきがある場合、見かけの弾性係数に影響を及ぼすこと、またその影響が確率均質化解析により評価できることが確認できた。

表1 実験と解析結果の比較

	実験	一次摂動	誤差[%]
		二次摂動	
CV	0.1105	0.1059	4.2
		0.1069	3.3

(2) 一様な微視的ばらつきを有する多孔質材料のマルチスケール確率応力解析

次に、多孔質材料を用いた構造物の信頼性設計上重要となる見かけの材料強度について、マルチスケール応力解析を用いてミクロスケールで生じる応力のばらつきを解析するマルチスケール確率応力解析を実施した。まず、微視構造が一様に変動する場合について解析を実施した。例として、図4に示すように孔形状や孔配置がランダム変動する場合について解析を行った。

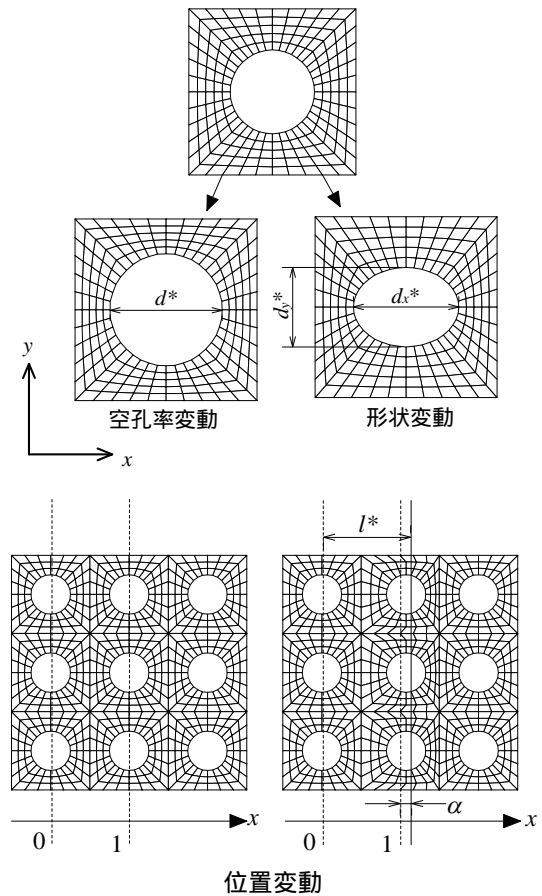


図4 多孔質材料の微視的幾何学変動の例

解析を行うにあたり、荷重一定の条件と強制変位量一定の条件の二通りを想定した。また、孔方向(Z方向)と孔に直角な方向(X方向)の二通りの荷重を想定した。

図5はミクロスケールで生じる各方向の応力の期待値である。図より、荷重方向により生じる応力に差があることが確認できる。これに対し、空孔率、孔の形状および孔の配置がランダム変動した場合の各応力の変動係数を図6に示す。

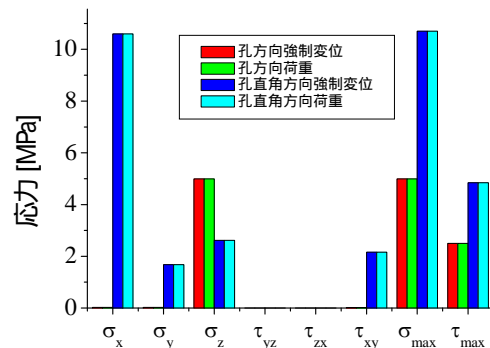
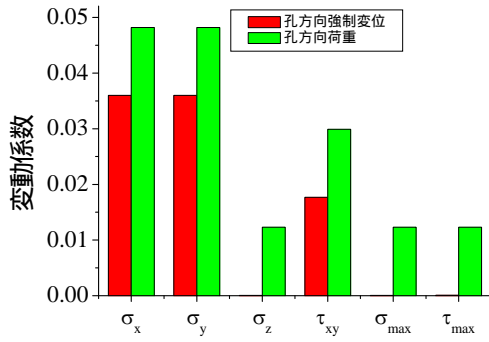
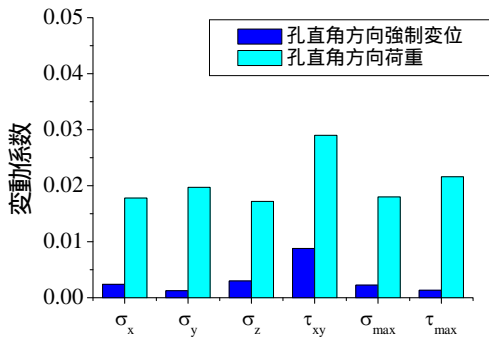


図5 ミクロ応力の期待値

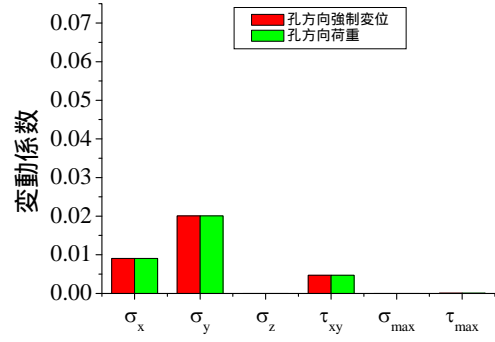


(a) 孔方向負荷

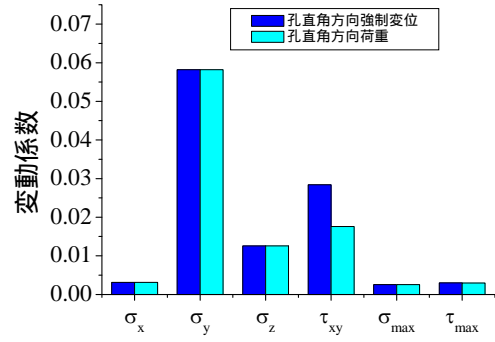


(b) 孔直角方向負荷

図6 空孔率変動に対するミクロ応力の変動係数

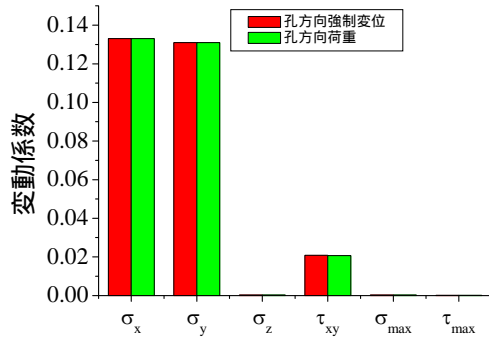


(a) 孔方向負荷

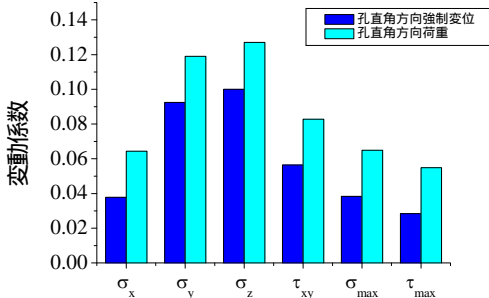


(b) 孔直角方向負荷

図8 空孔位置変動に対するミクロ応力の変動係数



(a) 孔方向負荷



(b) 孔直角方向負荷

図7 空孔形状変動に対するミクロ応力の変動係数

このように、多孔質材料のミクロな幾何学変動はミクロ応力に大きな影響を及ぼし、またその影響は変動の種類や負荷方向、負荷条件により異なるため、信頼性設計においては当該問題の考慮が必要な事が示された。

次に、本問題を効率的に解析するため、摂動法に基づくマルチスケール確率応力解析の有効性について調査した。その結果、今回想定した多くの場合において一次摂動でも十分良好な解析精度を有していたが、例えば図9に示す孔直角方向に強制変位量一定で負荷した場合のように解析誤差が大きい場合もあった。これらについて、その原因が低次摂動による近似誤差にあることを確認し、これを改善する手法構築の必要性を指摘した。

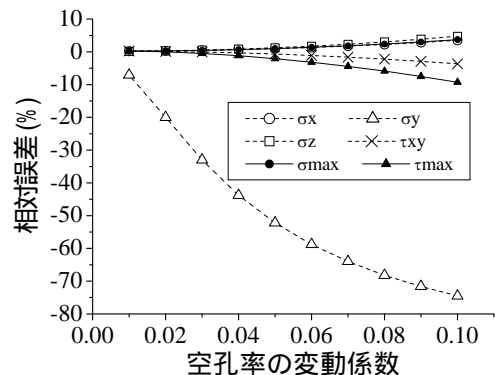


図9 摂動法によるマルチスケール確率応力解析の誤差



(3) 非一様な微視的ばらつきを有する多孔質材料・複合材料の確率均質化解析およびマルチスケール確率応力解析

続いて、より現実的な問題として、空孔の微視的変動が非一様な場合について、マルチスケール確率応力解析を行った。例として、図 10 に示す矩形構造物について、マイクロ変動の大きさが両端と中央で異なる問題を考え、解析を行った。なお、図 10 中の  $\alpha_1, \alpha_2$  はマイクロな確率変数を示す。

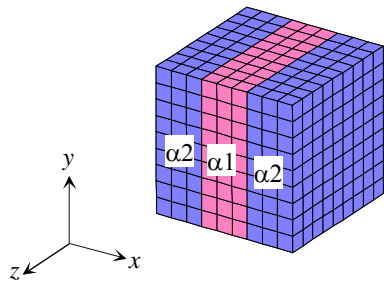


図 10 非一様な微視的ばらつきを想定した解析対象

図 11 に  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  の変動係数の比に対するマイクロ応力の変動係数の比を示す。このように、多孔質材料における空孔率や孔形状などの変動の大きさが異なるにつれ、マイクロ応力の変動が大きくなることが判る。このことから、マイクロ応力のばらつきを考慮した多孔質材料の信頼性設計においては、微視構造の非一様なランダム変動を考慮して見かけの材料特性やマイクロ応力のばらつきを求めた上で設計を実施する必要性が示された。

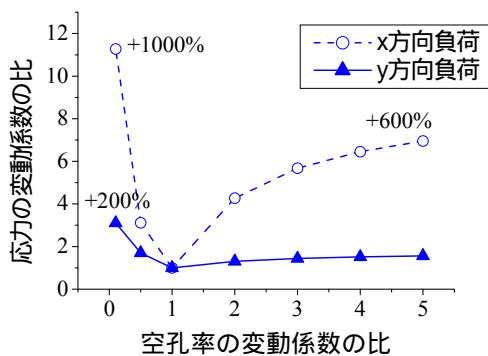


図 11 ミクロ変動の差が主応力の変動係数に及ぼす影響

本研究では、以上のように、単に周期的な微視構造のランダム変動を考慮した場合のみならず、変動が非一様になる場合についての確率均質化・マルチスケール確率応力解析を実施し、その重要性を明らかにした点が新規である。また、特に三次元造形法を用いて作成した有孔試験片を用い、多孔質材料の微視的ばらつきが見かけの弾性定数に及ぼす影響について、数値シミュレーションと実験

の両面から調査し、影響を明らかにするとともに、本研究で提案した数値シミュレーション法の妥当性と有効性を示した。

当該研究分野においては、国内外共に、主に微視的ばらつきが見かけの材料特性に及ぼす影響について、関数近似などより高次の近似手法を用いて高精度化を目指す成果や、モンテカルロシミュレーションによりランダムな微視構造の数値モデルを生成し解析する研究などが報告されているが、摂動法など効率的な手法により非一様なばらつきの解析を試みた例は見られない。また、マイクロな三次元応力状態まで詳細に検討した例もほとんど見られない。加えて、実験と数値計算の比較を試みた例もほとんど見られず、これらのいずれの点からも、本研究により独自の成果が得られたと考えられる。

また、これらの成果により、近年注目され急速に普及しつつある三次元造形法や、既に用いられている不均質材料を用いた場合において、設計時に考慮すべき問題が示された。これらの材料に対する今後の信頼性設計手法の確立のために、本研究で提案し妥当性と有効性を検証した確率均質化及びマルチスケール確率応力解析に関する成果が有用であるとされる。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

S. Sakata, F. Ashida and K. Ohsumimoto, Stochastic homogenization analysis of a porous material with the perturbation method considering a microscopic geometrical random variation, International Journal of Mechanical Sciences, 査読有, Vol.77, 2013, pp.145-154. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2013.10.001

S. Sakata, F. Ashida and K. Ohsumimoto, A multiscale stochastic stress analysis of a heterogeneous material considering nonuniform microscopic random variation, Journal of Computational Science and Technology, 査読有, Vol.7, No.2, 2013, pp.134-147. DOI: 10.1299/jcst.7.134

S. Sakata, F. Ashida and K. Ohsumimoto, Multiscale stochastic stress analysis of a porous material with the perturbation-based stochastic homogenization method for a microscopic geometrical random variation, Journal of Computational Science and Technology, 査読有, Vol.7, No.1, 2013, pp.99-112. DOI: 10.1299/jcst.7.99

S. Sakata and F. Ashida, A stochastic homogenization of thermal expansion coefficient with the homogenization theory, Journal of Thermal Stresses, 査読

有,Vol.36,No.5, 2013, pp.405-425.  
DOI:10.1080/01495739.2013.770359

坂田誠一郎, 塩谷公紀, 摂動法に基づくマルチスケール確率応力解析を用いた粒子強化複合材料の微視的材料定数変動に対する破壊確率解析, 日本機械学会論文集 A 編, 査読有,79 巻 800 号, 2013, pp. 395-406.

[学会発表](計 19 件)

鳥越到, 坂田誠一郎, 逐次摂動法による GFRP の繊維配置のばらつきに対するマルチスケール確率解析, 2014 年 11 月 22 日, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 岩手大学 (岩手県盛岡市).

S. Sakata, Stochastic analysis of laminates for microscopic random variation (Invited), ACMFMS2014, 2014 年 10 月 11 日, 奈良県新公会堂 (奈良県奈良市).

I. Torigoe and S. Sakata, Multiscale stochastic analysis of unidirectional fiber reinforced composite material considering random fiber arrangement with the perturbation approach, ACMFMS2014, 2014 年 10 月 12 日, 奈良県新公会堂 (奈良県奈良市).

S. Sakata and I. Torigoe, Multiscale Stochastic Stress Analysis for randomness of Fiber Arrangement in Fiber Reinforced Composite Material(Keynote Lecture), 11thWCCM, 2014 年 7 月 22 日, パルセロナ (スペイン).

鳥越到, 坂田誠一郎, 繊維配置のばらつきを考慮した一方向繊維強化複合材料のマルチスケール確率応力解析, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 2013 年 11 月 2 日, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市).

S. Sakata, An adaptive strategy for the stochastic homogenization and the multiscale stochastic stress analysis (Invited), IUTAM Symposium on Multiscale Modeling and Uncertainty Quantification of Materials and Structures, 2013 年 9 月 9 日, サントリーニ島 (ギリシャ).

坂田誠一郎, 逐次摂動法を用いた不均質材料の確率均質化・マルチスケール確率応力解析, 第 18 回計算工学講演会, 2013 年 6 月 20 日, 東京大学 (東京都目黒区).

S. Sakata, A multiscale stochastic stress analysis of a heterogeneous material considering non-uniform microscopic random variation, ICMS2012, 2012 年 10 月 10 日, 神戸大学統合研究拠点 (兵庫県神戸市).

坂田誠一郎, 光造形法により作製した二次

元多孔質材料の確率均質化特性評価, 2012 年日本機械学会年次大会, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学 (石川県金沢市).

大住元謙一, 坂田誠一郎, 芦田文博, 非一様な空孔変動を有する多孔質材料のマルチスケール確率応力解析, 第 17 回日本計算工学講演会, 2012 年 5 月 31 日, 京都教育文化センター (京都府京都市).

[図書](計 1 件)

S. Sakata, Multiscale modeling and uncertainty quantification of materials and structures: proceedings of the IUTAM symposium held at Santorini (Ed: M. Papadrakakis and G. Stefanou), Springer, 2014, 全 170 ページ, 担当 pp.51-66.

6. 研究組織

(1)研究代表者

坂田 誠一郎 (SAKATA, Sei-ichiro)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 80325042