

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16K05995

研究課題名（和文）マルチスケール確率応力解析を用いた不均質材料の新たな強度推定法の確立

研究課題名（英文）Establishment of a novel method for strength estimation of heterogeneous materials by multiscale stochastic stress analysis

研究代表者

坂田 誠一郎（Sakata, Sei-ichiro）

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：80325042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、近年注目されている三次元造形材料や複合材料などに代表される不均質材料の見かけの材料強度推定に対し、微視的な構造のランダムなばらつきを考慮したマルチスケール確率解析の応用を試みた。また、実験との比較を行い、提案手法の有効性を検証した。当該問題への提案手法有効性検証のために、実際に三次元造形法で作成した材料内部の微視構造の代表寸法の確率特性を測定し、それを考慮した確率均質化解析およびマルチスケールを実施した。検証結果より、提案手法が一定の精度で利用可能なことが確認できたとともに、さらなる精度改善のために、微視的な確率変数間の相互関係などを考慮した確率場のモデリングの必要性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、三次元造形材料や複合材料などの先進不均質材料で構成された構造物の強度評価にコンピュータシミュレーションを用いる際に、実際には決定できない微視的なパラメータを確率変数と考えることで、より定量的かつ高精度な材料強度推定を可能とする点にある。本研究成果により、数値解析による不均質材料の材料特性推定精度が向上し、産業競争力の一助として期待できる点が社会的意義である。また、本研究成果により、不均質材料の確率均質化特性評価および強度推定に対する提案手法の利用可能性が実験的に検証された点と、より精度の高い強度推定には詳細なランダム場の同定などが必要であることが示唆された点が学術的意義である。

研究成果の概要（英文）：In this research, apparent strength estimation of advanced heterogeneous materials such as a resin structure fabricated by the fused deposition modeling method or composites considering microscopic randomness observed in the material by the stochastic homogenization method and the multiscale stochastic stress analysis method is attempted. In particular, for the purpose of validation of the proposed method, probabilistic properties of microscopic representative sizes are identified by experimental observations from a set of actually fabricated specimens, and those are reflected to the analysis. From the comparison between the numerical and experimental results, the proposed method gives a good estimation of the probabilistic characteristics of the homogenized elastic properties, while the estimation error in the apparent strength estimation is larger. In order to improve the computational accuracy, it is pointed out that the random field modeling of microstructure should be carried out.

研究分野：材料力学、計算力学、複合材料力学、最適設計

キーワード：マルチスケール確率応力解析 三次元造形材料 複合材料 不均質材料 強度推定 信頼性評価

## 1. 研究開始当初の背景

(1)本研究の開始当初は、複合材料や三次元造形材料などの先端不均質材料の力学的評価にかかり、特にコンピューターシミュレーションを援用する計算力学的アプローチを用いる際に、それまでの微視的な不均質性を考慮したマルチスケール解析の考え方から、さらにそのランダム性や不確実性を考慮した解析手法および材料特性評価手法を開発し、現実問題に対し、より定量的な評価予測を可能とする方法の確立が求められていた。これに対し、申請者に加え、世界的には **Kaminski, Xu, Graham-Brady, Wriggers** らなどにより、それぞれの方法で当該問題の解析が試みられている状況であった。

(2)一方、これらの解析は、理想的な状態、例えば微視的な規則性や周期性が仮定される、またはある物理量の単純なばらつきが考慮されるなど、現実問題に見られるような、より一般的な問題の解析には十分至っていなかった。多数の介在物を考慮する解析も一部報告されていたが、モンテカルロシミュレーションにより仮想的な実験を試みるなどの内容が主であった。また、これらの研究においても、例えば実験的検証など、当該解析の現実問題への有効性の検証も十分に行われていなかった。これらの点から、実試験片の微視的特徴量の確率特性の評価も含めた、解析手法の実験的検証と、より現実的な問題を効率的に解析可能な手法の開発の必要性が研究開始当初の背景であった。

## 2. 研究の目的

上記の研究背景を受け、本研究では、近年急速に普及し、今後さらに高性能化が期待される三次元造形装置に代表される先端成形技術により作製された材料について、微視的なばらつきを考慮した新たな強度評価法の確立を目標とした。特に、申請者がこれまで開発してきた解析手法を拡張し、三次元造形上不可避な微視的ばらつき、特に微視構造や微視組織の幾何学的なばらつきが等価弾性特性、微視的な応力状態および見かけの強度に及ぼす影響を解析し、実験との比較により精度や問題点を検証する。この際に、既報で仮定されているような、比較的少数の介在物で代表できる周期的、規則的なばらつきにとどまらず、実際の材料で生じる不規則な幾何学的なばらつきを考慮したマルチスケール確率応力解析法を開発し、数値面と実験面の両面から検証することが狙いである。加えて、解析対象を一方向繊維強化複合材料などの複数の素材からなる材料に拡張し、それらに対する効果的な解析手法を開発し有効性を検証することも目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、まず研究期間の前半で(1)三次元造形法により作製された材料に内在する微視的な材料特性及び構造の実際的なばらつきを実験及び顕微鏡観察により調査し、(2)これまで開発されている確率均質化手法およびマルチスケール確率応力解析手法の適用可能性を数値シミュレーションにより調査した。さらに、(3)現在開発中の非一様な微視的ばらつきを考慮可能なマルチスケール解析法を適用するとともに、別の不均質材料である複合材料への適用を想定し効率的な解析手法を開発し、利用可能性を調査した。研究期間の後半では、(4)(3)により開発した解析手法により当該問題を解析し、モンテカルロシミュレーションおよび実験結果により得られた等価弾性特性および見かけの強度の確率特性と比較し、妥当性および問題点を検証した。

## 4. 研究成果

### (1)三次元造形法により作製された試験片における微視的ばらつきの実験的調査

まず、今回研究対象として想定した熔融積層造形法 (**Fused Deposition Modeling method, FDM** 法)により作成した試験片内部の微視構造について、樹脂交差部の幅が本材料の機械特性に大きな影響を及ぼすと考え、これを代表寸法 (パス幅)として測定した。その結果、実際の材料に内在する微視構造の幾何学的なばらつきが確認でき、その確率特性を明らかとした。このような詳細な内部構造の実験的観察に基づき確率均質化解析とマルチスケール確率応力解析を実施した。

### (2)三次元造形材料の詳細な微視構造計測に基づく確率均質化解析の実施と実験による検証

次に、マルチスケール確率応力解析の前に、確率均質化解析の実験との比較による妥当性検証を行った。例として、実験および解析により推定された見かけの弾性率の変動係数を図1に示す。なお、図中の **HD,MD,LD** はそれぞれ高密度、中密度、低密度で造形した場合であることを示す。また、凡例は **core only** が微視構造1種類のみを考慮した場合、**skin+core** が表面材と2種類の内部構造を考慮した場合、**detailed** が各層を詳細に考慮した場合の結果である。なお、本例では各層のパス幅の実現値は互いに独立と仮定している。これらの結果より、全体的に微視構造の均質性を仮定した場合は精度が悪いことが確認できる。結果中で高密度の期待値が他の結果や実験結果と近くなっているが、これは高密度造形の場合、試験片内部全体がほぼ同様の造形密度、パス幅の期待値となっていることが理由と考えられる。

このことから、一般的に、微視構造のばらつきに関する期待値や変動係数などの確率特性を考慮する場合には、その非一様性を考慮する必要があること、また本例では微視構造のモデル化の際に少なくとも2つ以上の異なる確率特性を考慮する必要性が確認できた。

ここで、各層のパス幅について、造形法の特徴から、実際には積層造形時に直下の構造の影響を受けることが推測される。この観点から、隣接する層の相関を考慮した場合の解析結果を図3に示す。図2は各層のパス幅の相関係数を-1から1まで変化させた際の見かけの弾性率の変動係数を表す。

これらの結果より、微視的な確率変数の相関は、見かけの弾性率の確率特性、特に変動係数に影響を及ぼすため、実験による妥当性検証の際には、試験片に内在する確率変数個々の確率特性だけでなく、それらの相互影響などを同定し、解析において考慮する必要性が示唆された。

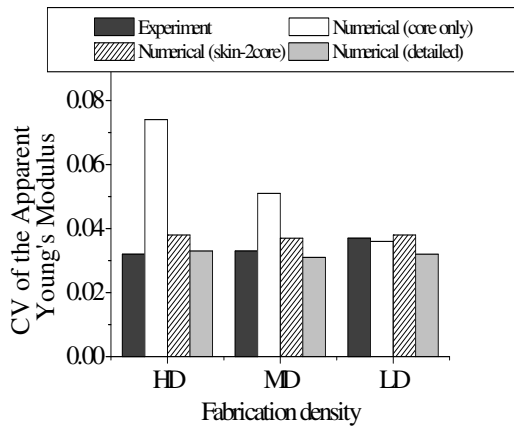


図1 確率均質化解析の検証結果

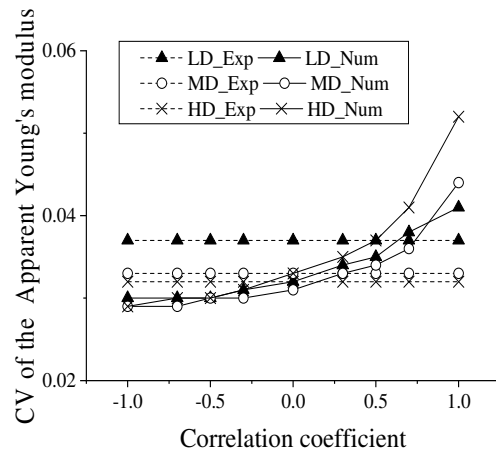


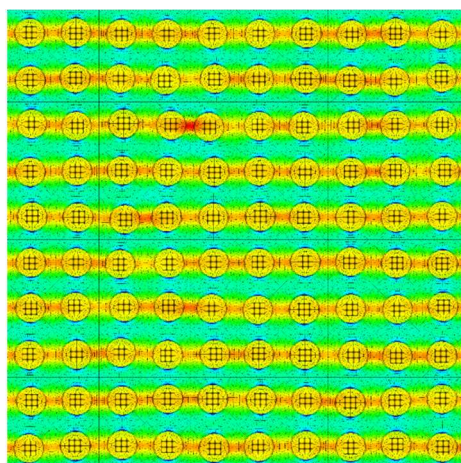
図2 確率変数の相関の影響

(3) 微視的なばらつきの非一様性を考慮した不均質材料のマルチスケール確率応力解析

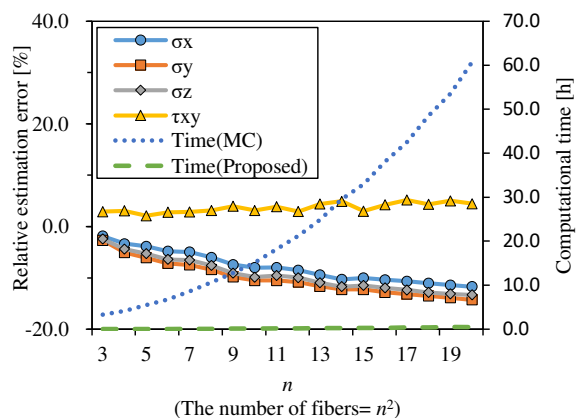
続いて、実際に作製した試験片の微視構造計測結果に基づき、パス幅のばらつきが応力状態に及ぼす影響をマルチスケール確率応力解析により評価した。ここで、上記の確率均質化解析の実験による検証を踏まえ、さらに均質化特性と比べて応力状態は微視構造の形状や配置の影響をより大きく受けると考えられることから、材料内の微視的な幾何学的ばらつきの非一様性を考慮するために、材料内部の各層で微視的構造が変化するとし、パス幅の期待値や変動係数が異なる場合を想定したモンテカルロシミュレーションによるマルチスケール確率応力解析を実施した。結果より、各層に生じる最大主応力の確率特性はそれぞれ異なり、さらに造形密度によっても異なることから、微視構造およびその幾何学的ばらつきの非一様性を考慮したマルチスケール確率応力解析の必要性が確認された。

また、より複雑な微視的応力状態となることが想定される複合材料の強度評価問題において、多数の介在物が非一様にばらついた場合のマルチスケール応力解析についても検討を行った。本問題については、(a)多数の介在物変動を考慮した場合の効率的解析手法の開発と(b)現実的な介在物配置においても安定した解析が実施可能な手法の開発を行った。

例として、図3(a)のような多数の繊維を考慮した解析を試みた。このような問題に対して効率的な解析法を開発した。図3(b)に提案手法の解析精度と計算コストを示す。



(a)多数の繊維を考慮した解析例



(b)提案手法の解析精度と計算コスト

図3 多数繊維を考慮した場合の最大応力上昇例および提案手法による結果

図より、提案手法により400本の繊維を含む場合でも解析誤差は約15%程度以下、また解析時間は1%以下となり、良好な結果が得られたことが確認できる。加えて、これらの繊維配置がより一般的にばらついた場合のマルチスケール応力解析や近似モデルに基づく確率応力解析実施のために、重合メッシュ法による不均質材料の応力解析・応力感度解析の精度改善も行った。

#### (4)マルチスケール確率応力解析によるFDM材の見かけの強度推定

これらの成果を受け、FDM法を用いて実際に作製した材料に内在する素材の材料定数および代表寸法の確率特性を考慮したマルチスケール確率応力解析結果から、当材料の見かけの強度推定を試みた。本研究では、引張り試験による応力-ひずみ線図および微視構造観察から、微視構造の樹脂部に白化が生じ始める巨視的ひずみに対する応力を材料強度指標とし、線形範囲を仮定した解析と実験と比較した。また、ばらつきを考慮した材料強度評価の指標の一つとして、見かけの強度の期待値および標準偏差を考慮した3シグマ限界を評価した。結果を図4に示す。なお、本解析において確率変数は互いに独立とした。数値計算結果は高密度で約23%、中密度で約13%、低密度で約20%実験より高い値となった。また、期待値は実験と比べ数値計算の方が約20~30%程度強度を高く見積もった結果となった。これは、今回計算コストの観点から簡略化した計算モデルを用いたため、微視構造に生じる応力を低めに見積もっていることが理由と考えられる。一方、最大応力の変動量を表す標準偏差については実験と比べ数値計算の方が約15%~35%低く見積もっており、今回パス幅の確率特性は実験的計測に基づいた値を用いたものの、各交差部におけるパス幅の実現値の相互関係までは考慮していないことが原因の一つと考えられる。

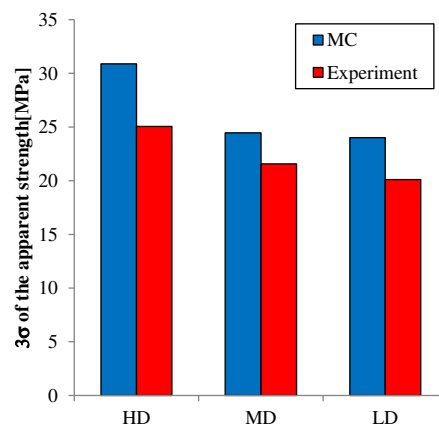


図4 FDM材の見かけの強度推定結果

以上より、本研究課題における主な目的であった、確率均質化およびマルチスケール確率応力解析の実験的検証については成果が得られた。これまで類似の報告は見られず、その成果は米国機械学会の論文誌や種々の国際会議等で報告された。また、別の対象物である複合材料についても新たな解析手法や微視的ひずみ場観察法を開発し、それぞれについて妥当性検証を行った。これらについても同様に国外の論文誌などを通じて成果報告している。

一方、本研究課題の最終的な目標であったマルチスケール確率応力解析によるFDM材見かけの強度の確率特性推定については、誤差が20~30%程度の推定にとどまり、さらなる研究が必要なことが示唆された。

本研究で実施した確率均質化特性の実験的検証から、試験片内に内在する確率変数の相互関係を調査した上で、それを考慮した解析により精度向上の可能性を検討する必要があると考えられる。さらに、強度評価においては、局所的な応力の大小がより強く影響することが考えられ、樹脂形状をより詳細に反映した数値モデルの使用に加え、確率場の特性をより詳細に調査し、解析に反映させる必要性が示唆されたと考えられる。

このような不均質材料の微視的確率場の特性評価法として、本研究期間中に、一方向繊維強化複合材料のランダムな繊維配置を考慮した場合の確率均質化問題などについて、その確率場を同定するランダムフィールドモデリングに関する研究が報告されるようになってきた。これを受け、より精度の高い解析評価のためには、上記に示した確率場の特徴をより適切に考慮するランダムフィールドモデリングなどの適用検討が必要なことが推察されたため、本研究課題に引き続き、不均質材内部の幾何学的特徴量およびその確率特性の測定とランダム場のモデル化、さらにそれらを考慮したマルチスケール確率応力解析による材料強度評価法の確立への展開が期待される。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 S. Sakata, Y. Chan and Y. Arai	4. 巻 121
2. 論文標題 On accuracy improvement of microscopic stress/stress sensitivity analysis with the mesh superposition method for heterogeneous materials considering geometrical variation of inclusions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Engineering	6. 最初と最後の頁 534-559
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nme.6233	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 S. Sakata and T. Sakamoto	4. 巻 5
2. 論文標題 A local sensitivity based multiscale stochastic stress analysis of a unidirectional fiber reinforced composite material considering random location variation of multi fibers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems part B: Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 030902_1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4043400	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 S. Sakata and Y. Yamauchi	4. 巻 5
2. 論文標題 Stochastic Elastic Property Evaluation with Stochastic Homogenization Analysis of a Resin Structure Made Using the Fused Deposition Modeling Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems part B: Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 030901_1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4043398.	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30件（うち招待講演 0件/うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Yuga Iwata and Sei-ichiro Sakata
2. 発表標題 Stochastic Analysis of a Specimen Fabricated by the FDM Method Considering Non-Uniform Random Variation in Microstructure
3. 学会等名 APCOM2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Arai and Sei-ichiro Sakata
2. 発表標題 Stochastic Stress Analysis of FRP considering Random Location Variation of Fibers with an Improved Mesh Superposition Method
3. 学会等名 APCOM2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Natsunosuke Kishimoto and Sei-ichiro Sakata
2. 発表標題 On Estimation of Microscopic Maximum Stress in Unidirectional Fiber Reinforced Plastic by Machine Learning
3. 学会等名 APCOM2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taichi Watanabe and Sei-ichiro Sakata
2. 発表標題 A Sizing Optimization of Heterogeneous Material-based Structures Considering Microscopic Random Variation
3. 学会等名 APCOM2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Yamaguchi and Sei-ichiro Sakata
2. 発表標題 Topology Optimization of a Resin Structure fabricated by FDM method
3. 学会等名 APCOM2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sei-ichiro Sakata and Takuro Sakamoto
2. 発表標題 ON PARAMETER ESTIMATION FOR PROBABILISTIC DISTRIBUTION OF THE MAXIMUM MICROSCOPIC STRESSES IN UNIDIRECTIONAL FIBER REINFORCED COMPOSITES AGAINST A RANDOM FIBER LOCATION VARIATION WITH THE SUCCESSIVE LOCAL SENSITIVITY ANALYSIS-BASED APPROACH
3. 学会等名 UNCECOMP2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Arai, Sei-ichiro Sakata
2. 発表標題 MULTISCALE STOCHASTIC STRESS ANALYSIS OF PARTICLE REINFORCE COMPOSITES WITH A SUCCESSIVE LOCAL SENSITIVITY ANALYSIS CONSIDERING RANDOMNESS IN MULTI-PARTICLES LOCATION
3. 学会等名 UNCECOMP2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新井 悠希, 坂田 誠一郎
2. 発表標題 重合メッシュ法による不均質材料のランダムな介在物位置変動を考慮した確率応力解析
3. 学会等名 CMD2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤 僚太, 坂田 誠一郎
2. 発表標題 一方向ガラス繊維 / ガラス粒子 / 樹脂 三相複合材料の力学的特性に関する研究
3. 学会等名 M&M2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Sakata and T. Sakamoto
2. 発表標題 Multiscale Stochastic Stress Analysis of FRP with a Successive Sensitivity Analysis considering Randomness in Multi Fibers Location
3. 学会等名 WCCM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Arai and S. Sakata
2. 発表標題 Microscopic Strain Measurement of FRP with DIC and Kriging Method
3. 学会等名 WCCM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川貴大, 坂田誠一郎
2. 発表標題 材料定数が準周期的な微視構造を有する不均質材の効率的なマルチスケール確率応力解析手法
3. 学会等名 日本機械学会第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 陳日飛, 坂田誠一郎
2. 発表標題 複合材料の介在物位置変動を考慮した確率応力解析のための重合メッシュ法による感度解析
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 酒本拓朗, 坂田誠一郎
2. 発表標題 FRP の多数の繊維の配置変動を考慮した局所近似モデルによる確率応力解析手法
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井悠希, 坂田誠一郎
2. 発表標題 Kriging-DIC と領域分割法を用いた FRP の微視ひずみ計測
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷口洸, 坂田誠一郎
2. 発表標題 機械学習を用いた画像認識による不均質材の微視的最大応力推定に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第94期定時総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Sakata
2. 発表標題 MULTISCALE STOCHASTIC ANALYSIS OF A RESIN STRUCTURE MANUFACTURED BY THE FDM METHOD
3. 学会等名 UNCECOMP2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 谷口 洸, 坂田 誠一郎
2. 発表標題 ガラス繊維/微小ガラス粒子三相複合材料の弾性特性評価に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小川 貴大, 坂田 誠一郎
2. 発表標題 準周期的マイクロ場を考慮した複合材料の確率均質化問題における近似解法の精度向上について
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡森 祐也, 坂田 誠一郎
2. 発表標題 一方向GFRPの界面層の弾性定数と強度のばらつきを考慮したマイクロ応力解析
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 酒本 拓朗, 坂田 誠一郎
2. 発表標題 一方向GFRPにおける複数の繊維配置変動の相互影響を考慮したマルチスケール確率応力解析
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 陳日飛, 坂田誠一郎
2. 発表標題 ミクロなばらつきを考慮した複合材料の重合メッシュ法による応力解析
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新井悠希, 坂田誠一郎
2. 発表標題 画像相関法を用いたGFRPの微小歪み場計測精度向上に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中埜幸紘, 坂田誠一郎
2. 発表標題 FDM法により作成された樹脂部材の微視的ばらつきを考慮した構造最適設計
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石駿佑, 坂田誠一郎
2. 発表標題 複合材料の複数の微視的変動を考慮した近似確率均質化解析の主成分分析を用いた精度改善について
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Sakata
2. 発表標題 Sensitivity Analysis for Multiscale Stochastic Stress Analysis of Fiber Reinforced Composite Material Considering Fiber Location Variation
3. 学会等名 The 12th World Congress on Computational Mehcanics ( 国際学会 )
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大石駿佑, 坂田誠一郎
2. 発表標題 相関を有する複数変動を考慮した粒子強化複合材料の重み付き最小二乗法による近似確率均質化解析
3. 学会等名 日本機械学会第29回計算力学講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中埜幸紘, 坂田誠一郎
2. 発表標題 微視的ばらつきを考慮した一方向繊維強化複合積層材材料の最適設計に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会第29回計算力学講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山田晃, 坂田誠一郎
2. 発表標題 FDM法により作製された樹脂部材のマルチスケール確率応力解析
3. 学会等名 日本機械学会第29回計算力学講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石田善紀, 坂田誠一郎
2. 発表標題 GFRPの複数本の繊維配置変動に対する相互影響を考慮したマルチスケール確率応力解析
3. 学会等名 日本機械学会第29回計算力学講演会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 塩谷正俊、入澤寿平、柏村成史、石船学、藤井透、大窪和也、小武内清貴、村上理一、林柏均、水口周、武田展雄、坂田誠一郎、西義武、北川将大、内田貴大、松村義人、木村英樹、利根川昭、遠藤民生、坂田憲泰、中西康雅、他	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 623
3. 書名 炭素繊維およびその繊維複合材料における分析試験, 評価解析に関する最新事例集	

1. 著者名 濱田泰以、水口周、新保實、信川省吾、野田尚昭、松嶋道也、松田哲也、宝田亘、小関健一、平井義彦、山田保治、町田邦郎、坂田誠一郎、中野光一、坂井建宣、中嶋健、佐藤春実、荘司郁夫、高坂達郎、扇澤敏明、荒井政大、川田宏之、他	4. 発行年 2017年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 480
3. 書名 高分子の残留応力対策	

〔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
---------	---------