

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：13901
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19H00781
研究課題名（和文）連続繊維複合材用3Dプリンターで作る革新的多孔質構造のロバスト・トポロジー最適化

研究課題名（英文）Robust topology optimization of innovative porous structures by 3D-printer of continuous fiber reinforced plastics

研究代表者
加藤 準治（Kato, Junji）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00594087
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 37,600,000円

研究成果の概要（和文）：現在、多くの産業において「積層造形（3D-printing）」を活かしたものづくりの導入が検討されており、最近では連続繊維の積層造形も開発されている。そのような中、積層造形によって造形した多孔質性構造体を埋め込んだ複雑形状を有する構造は、従来構造の約5倍もの耐荷力を発現するという驚くべき実験結果が示された。しかし、製作上のはらつきや荷重変動などの不確かな件下では、その性能を安定的に引き出すことができない。そこで、本研究ではその優れた性能を安定的かつ最大限に引き出すために、新たなトポロジー最適設計法を構築し、ロバストな最適多孔質構造体の形状を見出す方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
将来の生産労働者人口の減少を鑑み、宇宙航空、自動車、機械、建設、医工学の分野において、ロボットや積層造形を活用した革新的なものづくりが検討されているが、その構造はこれまでのものとは大きく異なり、従来型の設計法では力学的に価値ある構造を設計できない。そのため、本研究ではトポロジー最適化理論に基づいて、合理的な構造形状を数理的に求める手法を開発した。開発した手法は、力学性能に優れた構造を生み出すとともに、様々な分野に応用できる汎用性の高さを有するものであるため、今後の革新的なものづくりに寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In many industries, the introduction of additive manufacturing is being considered. Recently, continuous fiber 3D printer has also been developed and paid attention to its performance. Under such circumstances, surprising experimental results were shown that a structure with a complex shape in which a porous structure formed by additive manufacturing is embedded exhibits a load bearing capacity that is about five times that of a conventional structure. However, under uncertainties such as manufacturing variations and load fluctuations, its performance cannot be stably brought out. Therefore, in this research, in order to bring out the excellent performance stably and to the maximum, we developed a new topology optimum method which can find a robust optimum porous structure.

研究分野：計算力学・トポロジー最適化

キーワード：トポロジー最適化 積層造形 3Dプリンター

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、宇宙航空、自動車、機械、建設、医工学の分野において「積層造形 (3D-printing)」を活かしたものづくりが本格的に導入されている。そして、その先端テクノロジーが生み出した『インフィル構造』と呼ばれる多孔質構造体を導入すると「従来構造の約 5 倍もの耐荷力を発現する」という驚くべき実験結果が示された (参考文献[1])。しかし、製作上のばらつきや荷重変動などの不確かな条件下では、その性能を安定的に引き出すことができなくなることが独自の調査でわかってきた。そのため、その優れた性能を安定的かつ最大限に引き出すための設計手法の開発が必要となるが、従来設計法の延長ではそれを達成することはできない。また、最新の積層造形技術として、連続繊維補強材を造形できるものが登場し、様々な分野で注目を浴びるようになった。これについても従来の設計法の延長では力学的に価値のある合理的な構造を見出すことができない。以上より、積層造形を念頭におき、数理的手法をベースとした力学問題の最適設計法、特にトポロジー最適設計法の開発が喫緊の課題として取り上げられていた。

参考文献[1]: A. Clausen, N. Aage, O. Sigmund, Exploiting Additive Manufacturing in Topology Optimization for Improved Buckling Load, Engineering, 2. pp. 250-257, 2016.

2. 研究の目的

本研究では、主に 2 つの目的を達成することに注力をした。まず 1 つ目は、インフィル構造などの多孔質構造体を対象としたトポロジー最適設計法の構築である。積層造形の特徴として、複雑形状の造形が可能になったことで合理的な軽量構造の造形が期待されるようになっており、その結果、材料使用量は小さく制限されることで、構造部品は有限変形を生じやすく、また座屈もしやすい構造となる。そのため、そのような設計条件下でも、安定的に性能を発揮できるようなトポロジー最適設計法を構築する。具体的には、構造の初期剛性を制約した座屈強度最大化のためのトポロジー設計法を開発した。

2 つ目は、繊維補強材の配置を考慮したトポロジー最適設計法の構築である。ここでは、炭素繊維 (CFRP) を念頭におき、繊維補強材の配置と配向を合理化するための 3DP-printing トポロジー最適設計法を開発した。

3. 研究の方法

(1) 剛性制約を座屈強度最大化のためのトポロジー最適設計法

剛性最大化を目的としたトポロジー最適化は軽量化を図りつつ、構造の剛性を向上させることが可能である。しかし得られる最適化結果は構造の効率性故にいわゆるスレンダー構造となり、部材毎の細長比が大きくなる傾向にあるため、低い座屈強度および脆弱な破壊挙動を示すことがある。これに対し、実設計では構造の剛性よりもむしろ最大荷重や冗長性を確保することに主眼を置かれることが多い。そこで本研究では、構造全体の剛性を一定以上に保つ制約のもとで座屈荷重係数を最大化する最適化問題を設定した。

(2) 3DP-printing FRP 構造の繊維配置を考慮したトポロジー最適設計法

3DP-FRP の性能に関する重要なパラメータとして、繊維の配置と配向について着目し、これらのパラメータを同時に制御して FRP 構造の剛性を最大化する方法を提案した。本研究では、はじめに FRP 材料の力学的性質を確認した後、繊維の配置と配向を表すパラメータを設計変数とした剛性最大化問題について紹介し、最後に本研究で提案する最適化手法の妥当性を数値解析例を用いて検討した。

4. 研究成果

(1) 剛性制約を座屈強度最大化のためのトポロジー最適設計法

以下に、本研究で開発した手法を用いて実施した数値計算結果のうち、代表的なものについて説明する。

(a) 解析条件

最適化計算例に用いる解析モデルには 4 節点四角形要素を用い、平面ひずみ状態を仮定した。境界条件は、図-1.1 の単純はりとし、 200×50 要素とした。材料物性はヤング率 75.3GPa 、ポアソン比を 0.3 とし、設計変数には初期条件として $s = 0.3$ を与えた。また、剛性制約値 c については、各ケースの剛性最大化によって得られた最適化結果の剛性を基準として、剛性緩和率

を用いて計算した．具体的には， $\alpha = 95\%$ ， 90% ， 85% ， 80% （順に $c = 0.233$ ， 0.244 ， 0.255 ， 0.266 ）の4例を考えた．また，制御方法は荷重制御法とした．

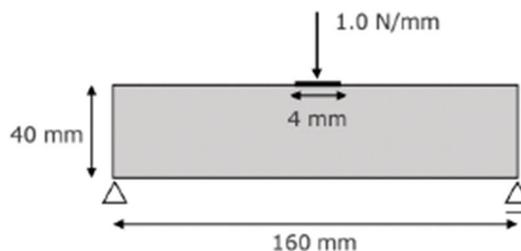


図-1.1 境界条件

(b) 数値計算例

図-1.1 に示す境界条件で最適化を行った時の最適化結果を図-1.2 に示す．(a)の剛性最大化においては，シンプルなトラス構造のような結果を得ることが出来た．しかしその構成要素には細長比の大きい部材が多く，実際にはこれらの部材で座屈が生じてしまうことが予想される．そこで座屈荷重最大化を行った(b)-(e)の結果を確認すると，剛性最大化によって得られた最適構造を基本として次第に枝分かれが生じてゆき，複雑な構造が得られていく様子が見て取れる．全体的に一つの部材の長さが短くなっていることが確認できるが，特に図中の破線で囲んだ部材やその下の部分にて枝分かれが集中的に発生している．これは，剛性最大化における1次の座屈モードから分かる通り，この領域が不安定になりやすく，座屈が生じる原因となっていたためだと考えられる．この例から，単に幾何学的に細い部材に対して枝分かれを生じさせるのではなく，座屈に関与する部分に限って枝分かれなど構造変化を促せていることが確認できた．図-1.3 を見ると，与える剛性制約によって構造のコンプライアンスを狙った値に制御できている様子と，座屈荷重を向上させることが出来ている様子が見て取れる．20%の剛性低下を許容した(e)の例では剛性最大化の例の約2.38倍の座屈荷重を得ることが出来た．

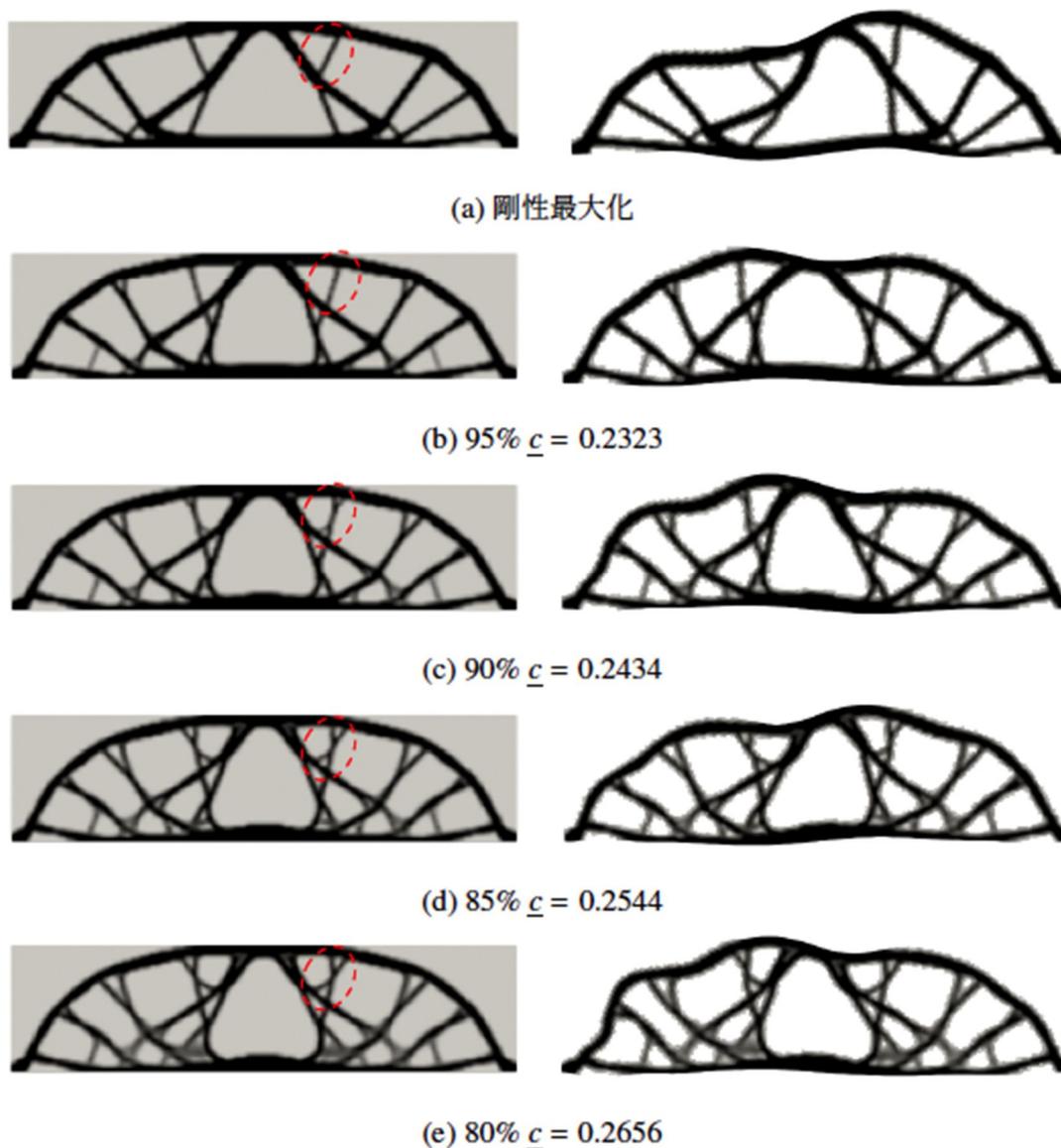


図-1.2 最適化結果（左）と1次座屈モード（右）

しかし，(e)の例は図-1.2 から分かる通りグレースケールが生じ始めている．剛性緩和率

が大きくグレースケールをある程度許容してしまうことに加え、複雑な座屈モードに対する最適構造が解析領域のメッシュの細かさに合わなくなっていることも考えられる。ただ、細かすぎる形状や枝分かれも実設計を考慮するとデメリットとなるため、いずれにせよ剛性緩和率の値はグレースケールが生じない範囲で与えるべきであると言える。続いて、得られた最適化結果に対して構造強度の検証を行うために有限変形解析を行った。

(a)-(d)の中から代表として(a)剛性最大化、(b)95%、(c)90%、(d)85%の4例で有限変形解析を行い得られた荷重変位曲線と線形座屈荷重を図-1.4に示す。これより、剛性緩和率に合わせて剛性を制御できていることわかる。線形座屈荷重についても剛性緩和率に合わせてより大きな値を得ることができ、最大荷重と変形性能も向上させることができた。一方、線形座屈荷重と最大荷重には乖離があり、これは座屈荷重最大化によって得られた結果には座屈前挙動の非線形性が多少現れたためだと考えられる。ただし乖離の程度は大きくなく、また座屈荷重の向上、最大荷重の向上という最適化の目的は果たしているといえる。

以上の例から、座屈解析を用いた提案手法により、剛性緩和率によって剛性を制御しつつ座屈荷重やエネルギー吸収性能を向上させられることを確認した。ここで、剛性は恣意的に下がるものではなく、剛性最大化のコンプライアンスを基準に自ら定める剛性緩和率で制御するものであり、実設計の場面において扱いつらいものではないことを改めて強調しておく。

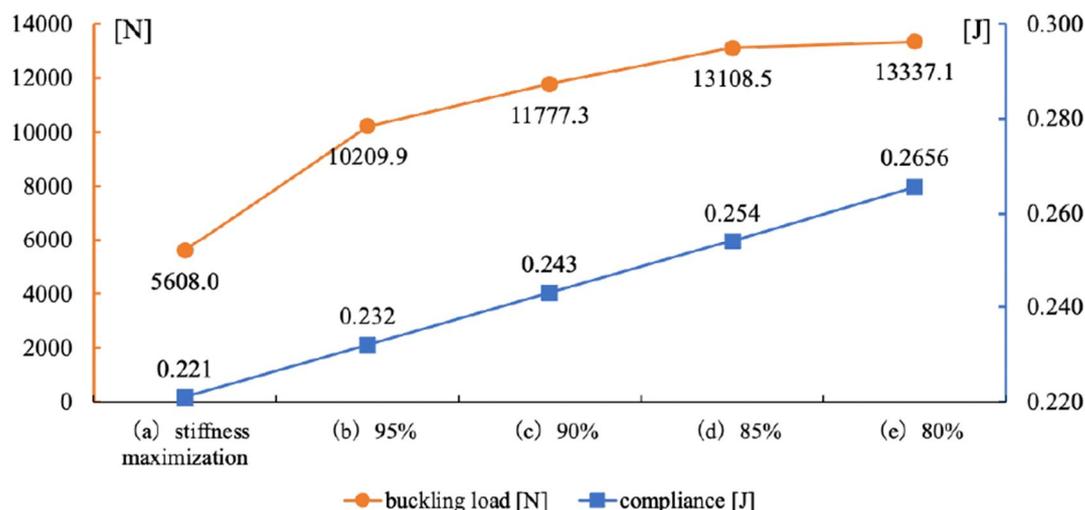


図-1.3 座屈荷重と平均コンプライアンスの比較

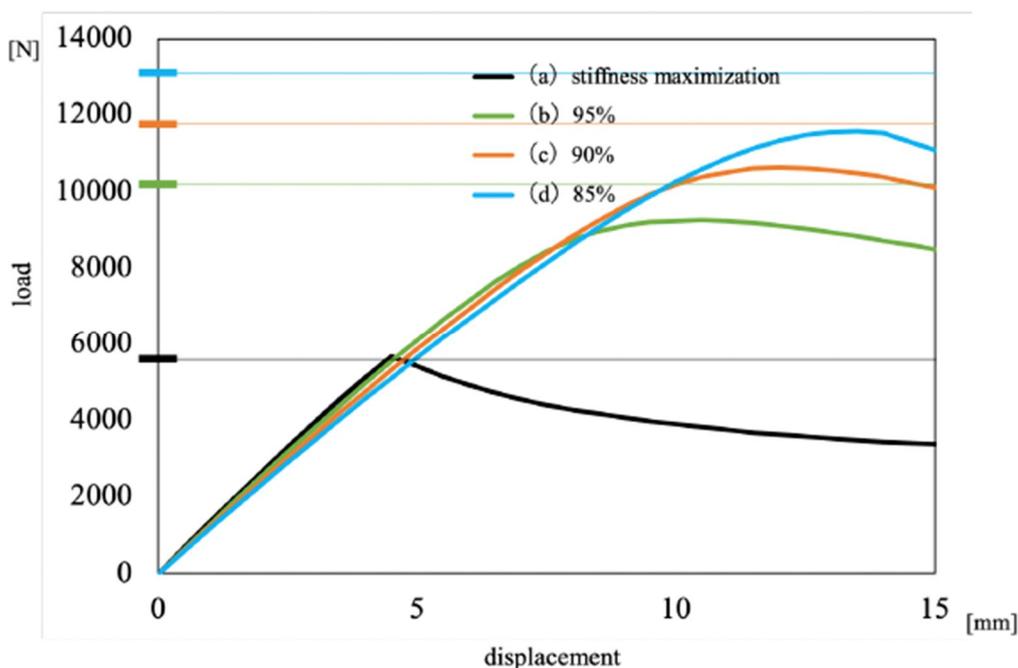


図-1.4 有限変形解析による荷重-変位曲線と線形座屈荷重

ここでは、提案手法の妥当性を検証するために直交異方性材料のトポロジー最適化計算例のうち、代表的な例について説明する。

(a) 解析条件

本節では、解析に使用するモデルおよび解析条件について示す。ここでは、図-2.1 に示す解析モデルを用いた。要素数は 3200 としており、2次元 8 節点四辺形要素を用い平面応力状態を仮定した。また、繊維の配向方向の初期値 0 を全ての要素に与えた。表-2.1 に解析で用いた異方性材料の特性を示す。また、繊維の配向方向の初期値として 0° を与えた。体積制約の上限値は 40%とした。

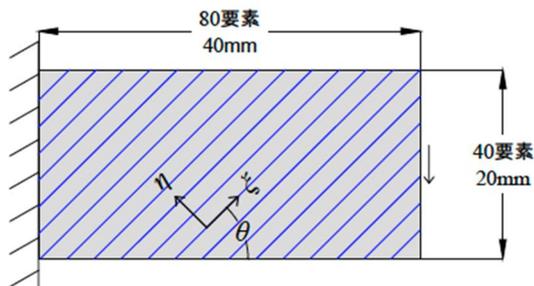


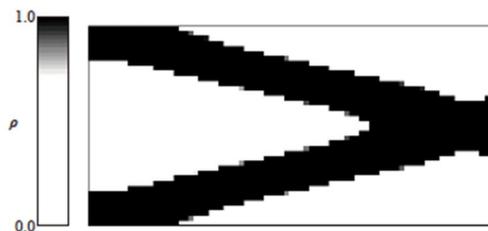
図-2.1 境界条件

(b) 計算結果

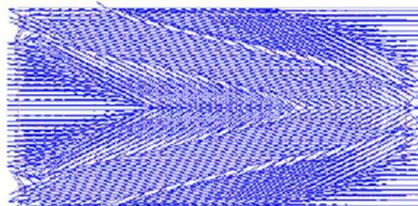
ここでは、構造の剛性を最大にするようなトポロジーと繊維材の方向を同時に最適化した例を示す。図-2.2 は、得られた最適化結果を示している。同図(a)はトポロジーの最適化結果、(b)は繊維配向の最適化結果、(c)は(a)と(b)を重ね合わせた図である。FRP は繊維方向に特に優れた性能を発揮するため、これは理想的な結果であることが分かる。また、繊維材配向の初期値が 45° の場合と 135° の場合で、ほぼ完全に対称なトポロジーと繊維配向が得られた。今回は線形解析を行ったためこのような結果になった。今後は、非線形構造解析を基本とした最適化問題への拡張が期待される。

表-2.1 使用材料の特性

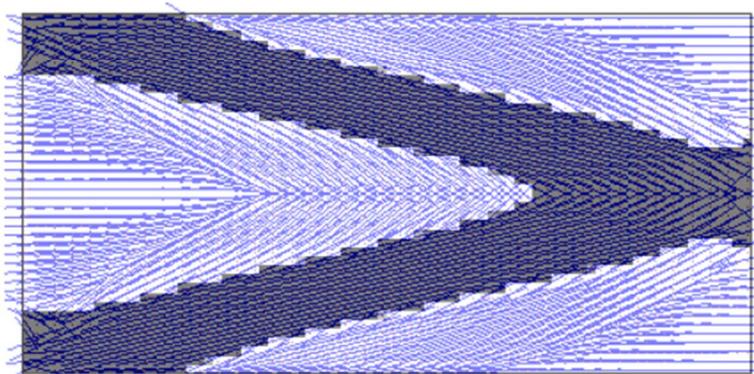
繊維方向のヤング率 E_ξ [GPa]	繊維直交方向のヤング率 E_η [GPa]	ポアソン比 ν	繊維の配向方向の初期値 θ_0 [$^\circ$]	体積制約の上限値 V_0 [%]
60	2.4	0.3	0,45,135	40



(a) 最適化結果 (トポロジー)



(b) 最適化結果 (繊維配向)



(c) 最適化結果 (トポロジー + 繊維配向)

図-2.2 最適化結果 (初期値 0° の場合)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takayuki Nishino, Junji Kato	4. 巻 122
2. 論文標題 Robust topology optimization based on finite strain considering uncertain loading conditions	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 1427, 1455
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nme.6584	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 該当する

1. 著者名 鎌田浩基, 加藤準治, 京谷孝史	4. 巻 No.20200006
2. 論文標題 トポロジー最適化による構造強度向上を目的とした主応力方向分散制約の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 鎌田浩基, 干場大也, 加藤準治, 京谷孝史	4. 巻 75 (1)
2. 論文標題 インフィル構造の応力制約付きトポロジー最適化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 68, 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.68	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 西野 崇行, 加藤 準治, 京谷 孝史	4. 巻 No.20190004
2. 論文標題 幾何学的非線形性と荷重条件の不確かさを考慮したトポロジー最適化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2019.20190004	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 小池 雄介 , 牛島 邦晴 , 加藤 準治	4. 巻 No.20190006
2. 論文標題 グラウンドストラクチャ法に基づく サンドイッチラティス梁の最適化設計に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jscs.2019.20190006	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24件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Kuniharu Ushijima and junji Kato
2. 発表標題 Optimization and additive manufacturing technology for smart materials and structures
3. 学会等名 ACMFMS2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daiki Watanabe, Hiroya Hoshiaba and Junji Kato
2. 発表標題 Multi-material Topology Optimization Considering Static Fracture of The Interface
3. 学会等名 ACMFMS2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroya, Hoshiaba, Junji Kato
2. 発表標題 CONDITIONAL EXPLICIT FORMULATION OF SENSITIVITY ANALYSIS FOR NONLINEER TOPOLOGY OPTIMIZATION
3. 学会等名 WCCM2020(World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congres) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daiki Watanabe, Hiroya Hoshiba and Junji Kato
2. 発表標題 MULTI-MATERIAL TOPOLOGY OPTIMIZATION WITH STRESS CONSTRAINTS UNDER A HIGH TEMPERATURE ENVIRONMENT
3. 学会等名 WCCM2020(World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayoshi Matsui, Hiroki Kamada, Hiroya Hoshiba and Junji Kato
2. 発表標題 TOPOLOGY OPTIMIZATION BASED ON A HOMOGENIZATION APPROACH FOR DISTRIBUTION OF SEAMLESS MICROSTRUCTURES
3. 学会等名 WCCM2020(World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroya Hoshiba, Junji Kato
2. 発表標題 Topology optimization considering nonlinear behavior of brittle damage material model
3. 学会等名 COMPSAFE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahito Moribe, Hiroya Hoshiba, Junji Kato
2. 発表標題 Optimization of fiber orientation and location for 3D-printing FRP
3. 学会等名 COMPSAFE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daiki Watanabe, Hiroya Hoshiba, Junji Kato
2. 発表標題 Multi-material topology optimization considering strength of materials and interfaces
3. 学会等名 COMPSAFE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junji Kato
2. 発表標題 Topology optimization to improve structural strength for additive manufacturing
3. 学会等名 ACSMO2020(Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤 準治
2. 発表標題 積層造形を念頭においたトポロジー最適設計
3. 学会等名 2020年度 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田邊 雄太, 牛島 邦晴, 加藤 準治
2. 発表標題 三相材料モデルによるラティス構造のトポロジー最適化設計
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 干場 大也, 高橋 寛成, 加藤 準治
2. 発表標題 建設3Dプリンターを念頭においたトポロジー最適設計法の開発
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森部 天仁, 干場 大也, 加藤 準治
2. 発表標題 3D-printing FRPの機械的性能評価および数値シミュレーション
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水鳥智幸, 干場大也, 加藤準治
2. 発表標題 コンクリート構造の損傷解析に基づく感度解析アルゴリズムの提案
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森部天仁, 干場大也, 加藤準治
2. 発表標題 3D-printing FRPの機械的性能評価および数値解析モデルの検討
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井聖圭, 干場大也, 加藤準治
2. 発表標題 コンクリート補強材を想定した周期的なCFRP構造の最適設計
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayuki Nishino, Junji Kato
2. 発表標題 Robust topology optimization based on finite deformation to uncertain loading conditions
3. 学会等名 13th Word Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西野 崇行, 津嶋 雄大, 加藤 準治
2. 発表標題 幾何学的非線形性および荷重条件の不確かさを考慮したロバスト・トポロジー最適化
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田 浩基, 加藤 準治, 京谷 孝史, 魚住 久雄, 木皮 和男
2. 発表標題 構造の冗長性を考慮したトポロジー最適化に関する研究
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小池 雄介, 牛島 邦晴, 加藤 準治
2. 発表標題 積層造形時の形状不整を考慮したラティス構造の最適化設計
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田 浩基, 加藤 準治, 京谷 孝史
2. 発表標題 座屈荷重制御を目的としたマルチスケルトポロジー最適化手法の提案
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会・第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H.Kamada, J.Kato
2. 発表標題 Simplified Approach of Topology Optimization Considering Structural Redundancy
3. 学会等名 15th U.S. National Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H.Kamada, J.Kato
2. 発表標題 Simplified approach of topology optimization for improving structural strength
3. 学会等名 International Conference on Simulation for Additive Manufacturing (Sim-AM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.Koike,K.Ushijima and J.Kato
2. 発表標題 Optimal Design of Lattice Structure Considering Constraints through Additive Manufacturing Process
3. 学会等名 International Conference on Simulation for Additive Manufacturing (Sim-AM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究分担者	干場 大也 (Hoshiba Hiroya) (80847038)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	
研究分担者	小橋 真 (Kobashi Makoto) (90225483)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	北根 安雄 (Kitane Yasuo) (10444415)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

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