

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2021

課題番号：16KK0141

研究課題名（和文）金属積層造形プロセスを再現した最適マイクロ材料 - 最適制御設計法の新開発（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Optimization of additive manufacturing process to control metallic microstructure(Fostering Joint International Research)

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） 10,700,000円

渡航期間： 1ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、申請者の基課題、科研費基盤B「高強度・高延性の両立を可能にする次世代金属材料のための多結晶構造最適化」の成果を発展させ、宇宙航空、自動車、機械、建設、船舶、医療工学分野など、あらゆる分野の「ものづくり」の基盤となる最適設計法の共同研究および国際的ネットワーク・人脈作りを行うことであった。ドイツ・アーヘン工科大学ほか、ドレスデン工科大学、シュトゥットガルト大学、中国・大連工科大学、イタリア・パヴィア大学などの研究機関との共同研究および研究交流を通じて研究を実施し、積層造形を念頭においた熱流体-構造問題に関するマルチフィジックス解析およびトポロジー最適設計法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、近年注目されている次世代型ものづくりの積層造形に着目し、それによって造形される構造体の最適トポロジーを得るための設計手法の開発を目的としたものである。特に、熱流体-構造連成解析の非定常問題を定式化し、材料微視構造の寸法効果を考慮したマルチスケール最適設計法の確立に成功した。非定常のマルチスケールトポロジー設計法の確立は、学術的に意義が高く、積層造形で製作する熱移動を最大化させるような構造部品の設計に役立つものであることから、社会的意義も高いものと思われる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research was to conduct joint research on optimal design methods, which are the foundation of "manufacturing" in all fields, and to develop an international and human network. Through joint research and research exchanges with research institutions such as Technical University of Aachen, Technical University of Dresden, University of Stuttgart, Germany, Dalian University of Technology, China, and University of Pavia, Italy, we have established multiphysics analysis and topology optimal design methods for thermal fluid-structural problems in view of additive manufacturing. Topology optimal design method for thermo-fluid-structural problems in view of additive manufacturing has been established.

研究分野：計算力学

キーワード：トポロジー最適化 マルチフィジックス 熱伝導 マルチスケール 寸法効果

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本国際共同研究の目的は、申請者の基課題・科研費基盤 B「高強度・高延性の両立を可能にする次世代金属材料のための多結晶構造最適化」の成果を発展させ、国際共同研究を通じて宇宙航空、自動車、機械、建設、船舶、医療工学分野など、あらゆる分野の「ものづくり」の基盤となる最適設計法を確立するものである。熱問題を対象とし、中でも次世代型ものづくりの代表格である積層造形を念頭におき、その形状自由度の高さを活かした最適設計法の構築を研究目的としている。一方で、この国際研究活動では、研究を遂行するだけでなく、国際的ネットワークを広げ、異分野・若手研究者を取り入れた持続可能な国際研究拠点を主導的立場で立ち上げることも重要視しており、活発な国際共同研究の展開を予定していた。しかし、世界的にコロナ感染症が猛威をふるい、それが原因で 2020 年からは主たる滞在地であったドイツを始め、諸外国への渡航ができない状況に陥った。

2. 研究の目的

本研究では、研究動向調査やヒアリングを行い、また国際共同研究の会議を重ねて、次の 2 つ研究テーマを柱とすることにした。ひとつ目は、熱に伴う有限変形を考慮したマルチスケール構造解析法の構築、2 つ目は、積層造形の強みである形状自由度の高さを最大限に活かし、その性能を最大にする最適設計法の確立である。特に後者は、多孔質構造体の寸法効果を考慮した非定常熱移動マルチスケールトポロジー最適設計法を構築することにある。具体的には、熱をいち早く逃がすことが可能な最適構造形状を数理的アプローチ(数値シミュレーション)により求めるものであり、構造形状のみならず、材料マイクロ(あるいはメゾ)構造の形状も同時に最適化することで、これまでにない優れた性能の達成を目指すものである。しかし、均質化法に基づく方法ではマイクロ構造の寸法の影響を考慮することはできない。実際のものづくりにおいては、マイクロ構造の大きさは有限であり、それを考慮することは重要であることを国際共同研究の会議で確認し合った。そのため、本研究ではマイクロ構造の寸法効果を考慮した最適設計法の確立を目指した。

3. 研究の方法

前述のとおり、世界的なコロナ感染症の蔓延により、2020 年から海外渡航ができない状況に陥った。そのため、当初予定の研究方法を見直し、オンライン会議などを通じて新たな方法を取ることとした。ただし、1 つ目の研究テーマ(熱に伴う有限変形を考慮したマルチスケール構造解析法の構築)については、2018 年中頃からドレスデン工科大学と共同で研究を進めていたため、それほど大きな影響は出なかった。一方、2 つ目の研究テーマ(多孔質構造体の寸法効果を考慮した非定常熱移動マルチスケールトポロジー最適設計法の確立)については、渡航不可となったことから、滞在予定地のドイツの研究機関が保有する超大規模計算機を使用できなくなった。そのため、可能な限り日本国内でデータを収集しながら数値計算を実施することとした。

(1) テーマ 1: 熱に伴う有限変形を考慮したマルチスケール構造解析法の構築

この研究では、主にドレスデン工科大学が先導する形で熱膨張を再現するマルチスケール解析法を構築した。日本側からは、主に均質化法による分離型マルチスケール解析法を紹介し、それをドレスデン工科大学側で有限変形を考慮した熱力学モデルに組み込む形で定式化を行い、プログラムの実装を行った。

(2) テーマ 2: 多孔質構造体の寸法効果を考慮した非定常熱移動マルチスケールトポロジー最適化の確立

この研究では、日本側が主導する形で研究を進めた。まずは、熱流体構造連成解析を近似的に解く、車谷・寺田ら(2010)の方法を取り入れることからはじめ、そこにトポロジー最適設計の枠組みを実装することとした。これら一連の計算は、C 言語によるプログラムで作成し、設計条件なども自由に変えられるようにプログラミングを実装した。

4. 研究成果

以下に各研究テーマの成果の概要を記す。

(1) テーマ 1: 熱に伴う有限変形を考慮したマルチスケール構造解析法の構築

テーマ 1 については、ドレスデン工科大学の Kaliske 教授と Freischhauer 博士と共同して理論の構築とプログラム実装した。図 1 は、熱が時間に依存して変化していくという境界条件のもとで、材料微視構造の熱による応力および変形状態、また、温度分布をシミュレートした結果である。およびとその温度変形によって大きく変形するマイクロを行った例である。このように大きく変形した材料微視構造の状態を再現し、それをマクロの構造応答に反映させる方法を提案した。これらの成果は、国際共著論文として、計算力学分野におけるトップジャーナルである、

International journal for numerical methods in Engineering (IJNME)に投稿し、掲載された。また、国際会議においても共著で研究成果発表をしている。

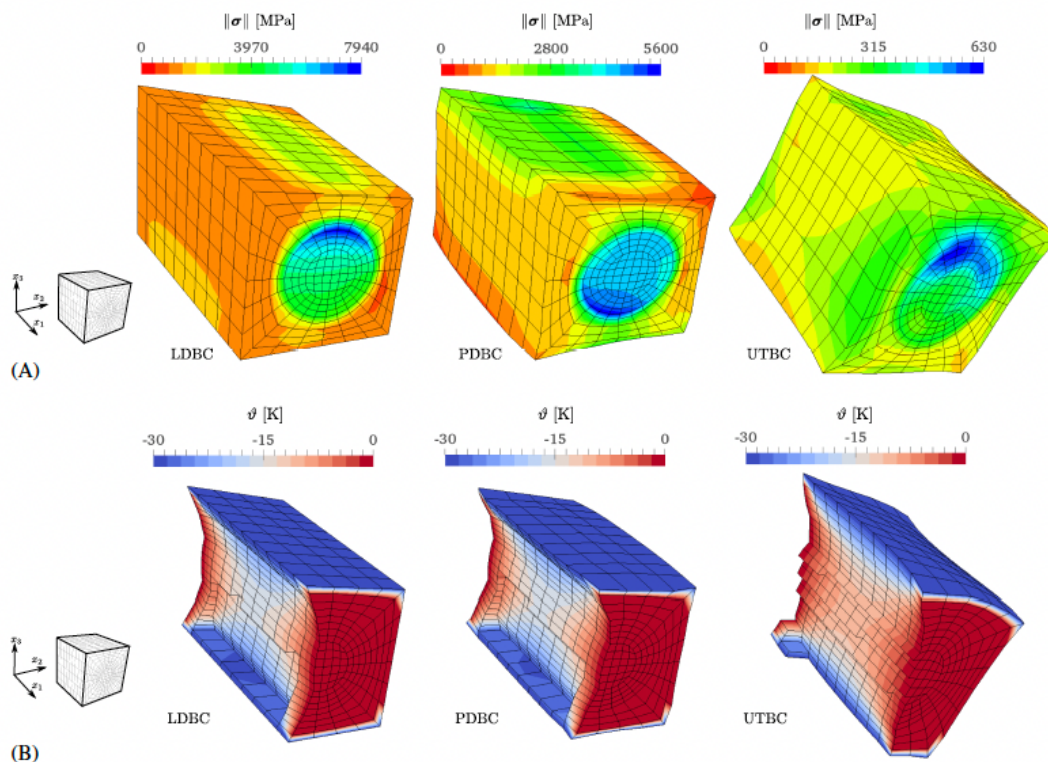


図 1 熱を受ける複合材微視構造のコーシー応力および熱変形状態（上段）と温度変化の分布（下段）

(2) テーマ 2: 多孔質構造体の寸法効果を考慮した非定常熱移動マルチスケールトポロジー最適化の確立

(a) 計算例 1: ミクロ構造の最適化計算例

ここでは、図 2 に示すようなマクロ構造体の中央表面に熱を与えたときに、熱を早く逃がすことが可能な多孔質ミクロ構造の最適形状（トポロジー）をコンピュータシミュレーションによって見出した例である。図 3 は、その結果を示しており、マクロ構造である板の温度変化の分布図と最適化された多孔質ミクロ構造の形状を示している。

また、図 4 (左) は、熱伝達係数を大きくしていった場合に、それと等価な特性を示すミクロ構造のトポロジーの変化およびそれに伴い、目的関数値が小さくなることを確認した結果である。また、図 4 (右) はミクロ構造の寸法を小さくしていくと、目的関数値が小さくなり、構造性能が向上することを示している。また、一方でミクロ構造の形状が対称性を失い、非対称になっているが、これはミクロ構造内の界面を大きく作用が働いたためであり、これは寸法効果による影響を示したものである。これは、本研究で得られた知見である。

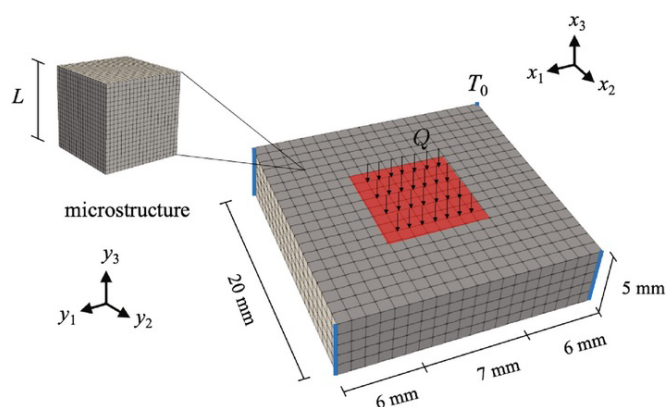


図 2 中央に熱を熱を受ける板の解析条件

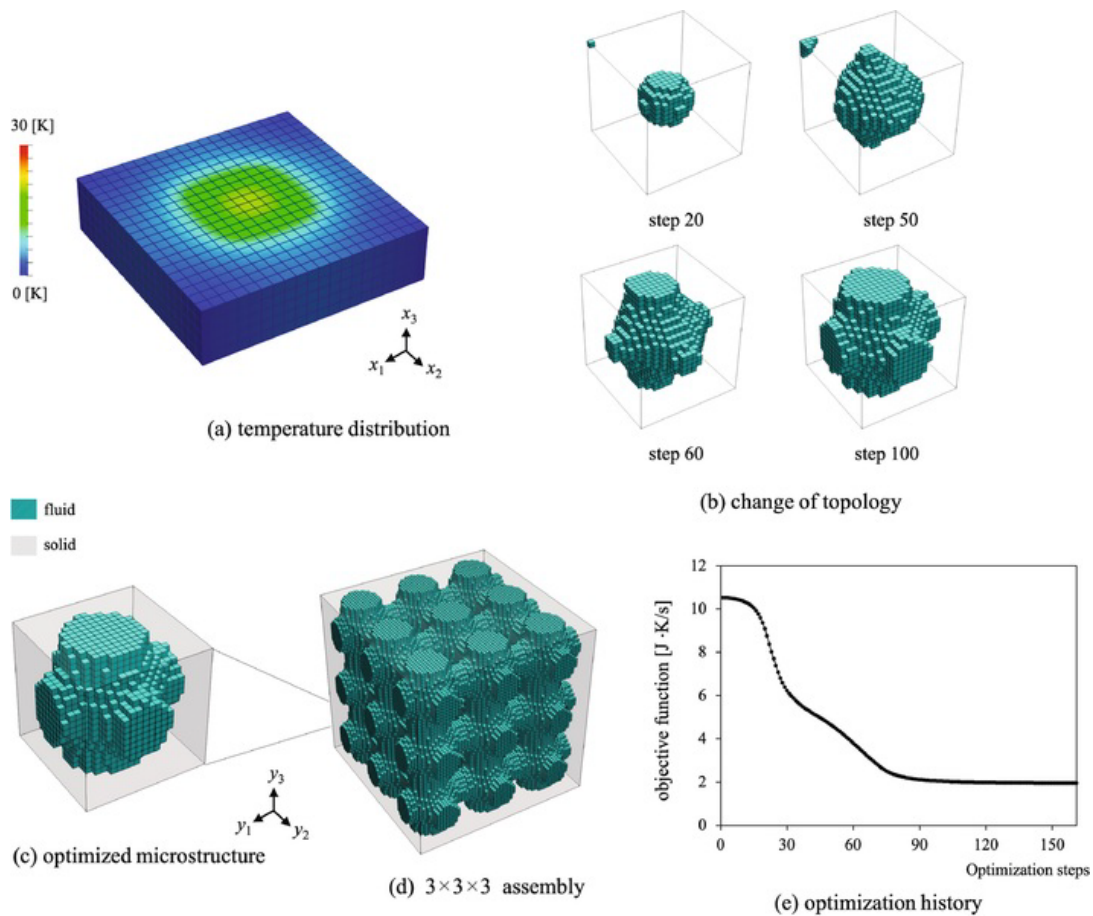


図3 熱を瞬間的に受けたときの最適化結果：(a) 0.05 秒後のマクロ構造の温度部分布と (b) ミクロ構造が最適化されていく様子，(c, d) 最適された多孔質ミクロ構造，(e) 目的関数値の推移

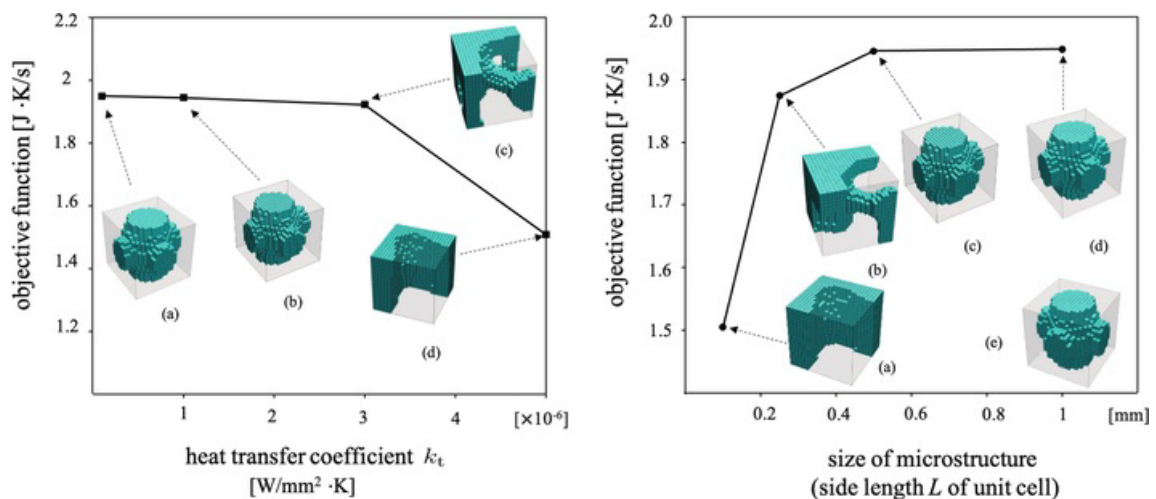


図4 (左) ミクロ構造の均質化熱伝達係数を大きくした場合に、目的関数が小さくなることを確認した例と(右) ミクロ構造の大きさを小さくすることで目的関数を小さくできることを確認した例。このとき、多孔質構造体の界面（表面積）を大きくする作用が働き、ミクロ構造が非対称となることが確認された。

(b) 計算例2：ミクロ構造とマクロ構造の両方同時トポロジー最適化の例

図5は、板の表面上に4点の熱を与え、そのときに板の温度を最小にするためのミクロ構造とマクロ構造の両方を同時に最適化する設計法の性能検証を実施した例である。また、この問題は非定常熱移動問題であることから、着目する時刻も変化させて実証してみた例である。ここで

は、熱の载荷時間を1秒、2秒、5秒と変化させた場合のそれぞれの最適化結果を示している。熱負荷の時間が短い場合は、マクロ構造は熱負荷近傍で処理することとなり、材料は熱負荷部分に集まるようになりつつも、ミクロ構造は対角線方向に熱を逃がすようなトポロジーが得られている。逆に、熱負荷の時間が長くなると定常問題で見られる最適形状に近づくことがわかり、物理的にも正しい結果が得られた。また、図6では固体材料の体積量の違いによる目的関数値の変化と最適構造の変化を示したものである。

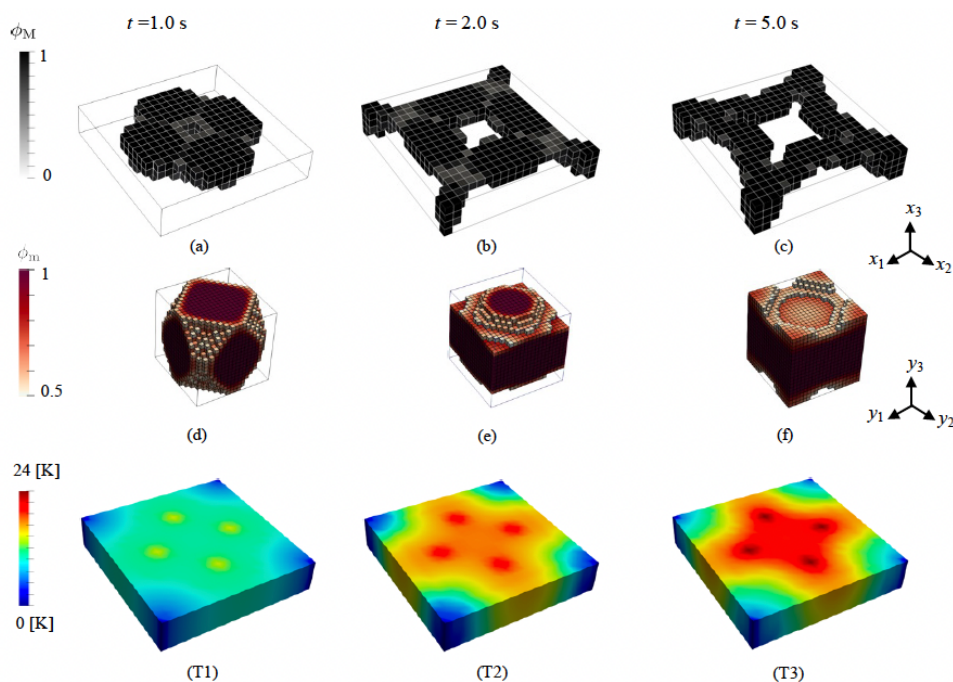


図5 ミクロ-マクロ構造の両方向同時トポロジー最適化の計算結果

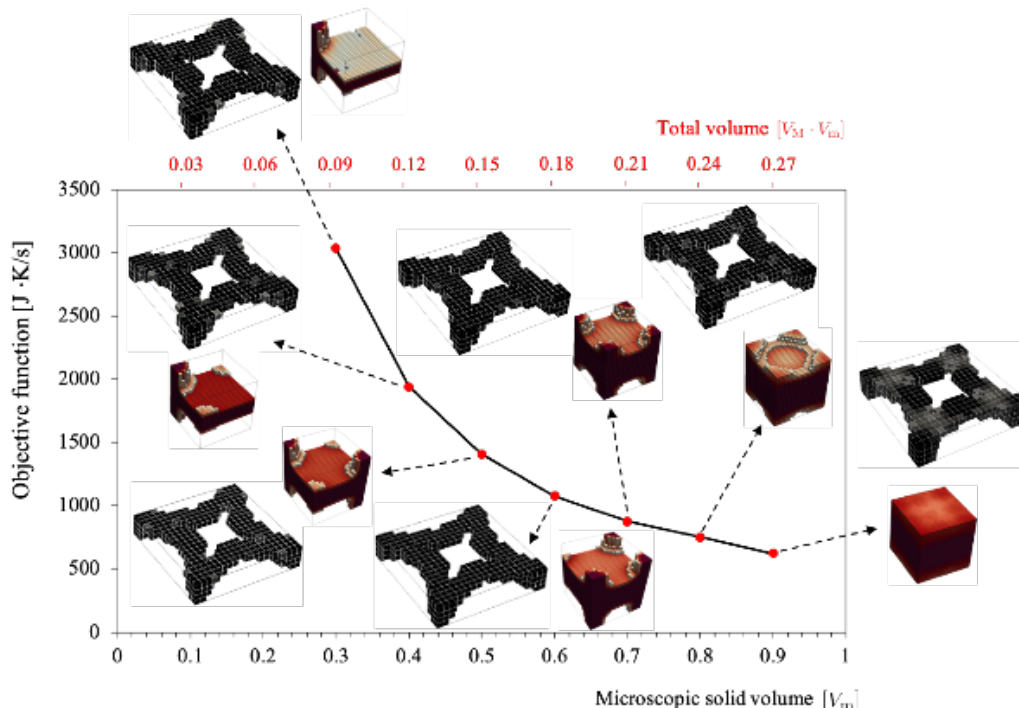


図6 熱負荷時間5秒とした場合のミクロ構造の固体材料体積量を変化させてときの結果比較

これらの成果は、国際共著論文として、最適設計学分野におけるトップジャーナルである、Structural and Multidisciplinary Optimization (SMO)に投稿し、採択された。また、国内誌では日本計算工学論文集にも採択され、国際会議においても共著で研究成果発表をした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Takarazawa, K. Ushijima, R. Fleischhauer, J. Kato, K. Terada, W.J. Cantwell, M. Kaliske, S. Kagaya, S. Hasumoto	4. 巻 58(1)
2. 論文標題 Heat-transfer and pressure drop characteristics of micro-lattice materials fabricated by selective laser metal melting technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 125, 141
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 該当する
1. 著者名 B.A. Cakal, I. Temizer, J. Kato, K. Terada	4. 巻 120
2. 論文標題 Microscopic design and optimization of hydrodynamically lubricated dissipative interfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Numerical Methods for Engineering	6. 最初と最後の頁 153, 178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nme.6129	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 小池雄介, 牛島邦晴, 加藤準治	4. 巻 Paper No.20190006
2. 論文標題 グラ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） 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 R. Fleischhauer, T. Thomas, J. Kato, K. Terada, M. Kaliske	4. 巻 121
2. 論文標題 Finite thermo elastic decoupled two scale analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Numerical Methods for Engineering	6. 最初と最後の頁 335,392
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/nme.6212	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 N. Sukulthanasorn, H.Hoshiba, K. Nishiguchi, M. Kurumatani, R. Fleischhauer, K. Ushijima, M. Kaliske, K. Terada, J. Kato	4. 巻 -
2. 論文標題 Two-scale topology optimization for transient heat analysis in porous material considering the size effect of microstructure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structural and Multidisciplinary Optimization	6. 最初と最後の頁 accepted
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 該当する

1. 著者名 N. Sukulthanasorn, K. Nishiguchi, M. Kurumatani, J. Kato, , K. Terada	4. 巻 Paper No. 20220004
2. 論文標題 Transient thermal porous structure designed by two-scale concurrent topology optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of JSCEs	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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Sululthanasorn Naruethap, Hiroya Hoshiba, Mao Kurumatani, Junji Kato and Kenjiro Terada
2. 発表標題 Topology Optimization for Porous Structure Considering Unsteady-state Heat Conduction and Transfer
3. 学会等名 ACMFMS2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sululthanasorn Naruethap, Hiroya Hoshiba, Mao Kurumatani, Junji Kato and Kenjiro Terada
2. 発表標題 MULTI-SCALE TOPOLOGY OPTIMIZATION FOR TRANSIENT HEAT TRANSPORTATION IN POROUS MATERIAL
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 Naruethep Sukulthanasorn, Hiroya Hoshiba, Mao Kurumatani, Junji Kato, Kenjiro Terada
2. 発表標題 A study on topology optimization of microstructure for transient thermal energy transport in porous media
3. 学会等名 COMPSAFE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 スクルタナソン ナルテープ, 干場 大也, 車谷 麻緒, 加藤 準治, 寺田 賢二郎
2. 発表標題 多孔質材料の熱伝導及び熱伝達に関するミクロ構造のトポロジー最適化
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 Sululthanasorn Naruethep, Hiroya Hoshiba, Mao Kurumatani, Junji Kato and Kenjiro Terada
2. 発表標題 Multiscale topology optimization for heat conduction and transfer in porous media
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 R. Fleischhauer, J. Kato, K. Terada, M. Kaliske,
2. 発表標題 Finite thermo-elastic decoupled two-scale analysis
3. 学会等名 The Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2019) (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 The Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kudo, J. Kato
2. 発表標題 Multi-Phase Field Topology Optimization Considering Crystal Orientation
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 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 工藤 寛史, 加藤 準治, 京谷 孝史
2. 発表標題 結晶方位差に起因する界面上のエネルギーを考慮したMPF マルチスケールトポロジー最適化による剛性最大化問題
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 Karo, J., Nishino, T.
2. 発表標題 Topology optimization with geometrical nonlinearity responding to uncertain loading
3. 学会等名 90th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高荒圭佑, 干場大也, 西口浩司, 加藤準治
2. 発表標題 温度履歴制御を目的としたトポロジー最適化の基礎的検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Sululthanasorn, N., Hoshiba, H., Kurumatani, M., Kato, J. and Terada, K.
2. 発表標題 Topology optimization for transient heat transfer considering size effect of microstructure in porous material
3. 学会等名 14th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高荒圭佑, 干場大也, 西口浩司, 加藤準治
2. 発表標題 非定常熱境界条件を考慮したトポロジー最適化の基礎的検討
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
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			
ドイツ	ドレスデン工科大学			
ドイツ	アーヘン工科大学			
ドイツ	シュトゥットガルト大学			
中国	大連理工大学			
イタリア	パヴィア大学			
米国	ジョンズ・ホプキンス大学			