

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：32689

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2018～2021

課題番号：18KK0412

研究課題名（和文）構造最適化と指向性エネルギー堆積法に基づく負熱膨張金属複合材料の開発

研究課題名（英文）Development of Negative Thermal Expansion Metal Composites Based on Structural Optimization and Directed Energy Deposition Additive Manufacturing

研究代表者

竹澤 晃弘（Takezawa, Akihiro）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10452608

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,900,000円

渡航期間： 9ヶ月

研究成果の概要（和文）：近年の産業技術の発達に伴い、熱膨張は極めて重要な現象となっている。熱膨張抑制手法として、温めると弾性的に縮む負熱膨張材料が注目を集めている。負熱膨張材料開発の一つのアプローチとして、熱膨張率の異なる複数の材料と空孔を適切にレイアウトすることで負熱膨張を生み出す手法があり、研究代表者らの研究グループは、3Dプリンタを活用しこのような複合材料を開発している。本研究では熱的に性質が安定した金属で広い温度帯での負熱膨張を実現することを目標に、米国ピッツバーグ大学との国際共同研究に取り組んだ。また、米国滞在中に新たに着想した研究テーマとして、構造設計による金属積層造形の熱膨張抑制法の開発にも取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の機械の精密化や、パワー半導体のような高発熱機器の普及により、熱膨張の抑制は極めて重要な工学的課題となっている。その抑制手法の一つとして、負熱膨張材料を用いて熱膨張を相殺する手法がある。ただし、負熱膨張化合物においては、負熱膨張の度合いを制御することは難しい。本研究で提案する負熱膨張複合材料は、設計により任意の負熱膨張を実現可能であるため、より柔軟な負熱膨張抑制手法として意義がある。

研究成果の概要（英文）：With the recent industrial technology development, thermal expansion has become a significant phenomenon. Negative thermal expansion materials, which elastically shrink when heated, are attracting attention as a method to suppress thermal expansion. One approach to developing materials with the negative thermal expansion is to create negative thermal expansion by appropriately laying out multiple materials with different thermal expansion coefficients and vacancies. Our research group has developed such composite materials using 3D printers. In this study, our group conducted international joint research with the University of Pittsburgh in the United States to realize negative thermal expansion in a wide temperature range using a thermally stable metal. In addition, as a research theme newly conceived during my stay in the U.S., the group worked on developing a method to suppress the thermal expansion of metal additive manufacturing by structural design.

研究分野：構造最適化，積層造形

キーワード：負熱膨張材料 積層造形 構造最適化

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

近年の産業技術の発達に伴い、「熱膨張」は極めて重要な現象となっている。光学機器や半導体製造装置、精密加工機器においては、ナノメートルレベルの熱変形が致命的になる場合があり、その適切な制御は大きな工学的課題である。熱膨張制御の一つの手法として、温めると弾性的に縮む「負熱膨張材料」が注目を集めている。一部の特殊な化合物は相転移等の現象に伴い、負の熱膨張を示し、その探索が盛んに行われてきた。しかし、負熱膨張の大きさや発生する温度帯は化合物自体の本質的な特性に依存する部分が多く、それを意図的に設計することは未だ困難である。

これに対し、負熱膨張材料開発の全く異なるアプローチとして、熱膨張率の異なる複数の材料と空孔を適切にレイアウトすることで、負熱膨張を生み出す手法がある。代表的なメカニズムは、異なる熱膨張率を有する材料を積層することでバイメタルに似た曲げを生じさせ、さらにその曲げを空隙を含む弾性変形メカニズムを通じ、材料の巨視的な(マクロの、見かけ上の)負熱膨張へと変換することにある。この手法であれば、負熱膨張特性や剛性が弾性力学で議論できるため、その設計が可能である。ただし、優れたメカニズムの設計法やそれを忠実に再現する高度な製造法が必要になる。申請者らの研究グループは、設計を性能の良い部材形状を数値計算により自動で生み出す構造最適化法で行い、製造は汎用のマルチマテリアル樹脂積層造形装置(3Dプリンタ)を利用するという方法で、平面的な負熱膨張を生み出す複合材料を開発した[1,2]。この複合材料は汎用機器で製造可能という大きな利点があるが、材料である光硬化性樹脂の熱膨張特性は温度依存性が高くかつ不安定なため、設計した負熱膨張を実現できる温度帯が極めて狭いという問題点がある。

### 2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本国際共同研究では光硬化性樹脂ではなく熱的に性質が安定した金属で負熱膨張複合材料を作成することを目指す。本国際共同研究では、米国ピッツバーグ大学への長期滞在中に、滞り負熱膨張金属複合材料の実現手法の一つとして構造最適化法と指向性エネルギー堆積法を検討した。さらに、米国滞在中に金属積層造形の残留変形が大きな問題であることを学び、派生研究テーマとして構造最適化による金属積層造形の残留変形抑制に取り組んだ。

### 3. 研究の方法

当初の計画では指向性エネルギー堆積法でステンレス鋼とインバー合金による複合材料を製作することを検討し、ピッツバーグ大学において装置使用のための研修を受けた。図1はそれに使用した装置(OPTOMECH社のLENS450)と造形サンプルである。しかし、研修終了後に機器に深刻な故障が発生し、滞り滞り中に修理が完了せず、その後もコロナ禍で大学が閉鎖される等で委託による実験も難しかったため、代替手法を検討した。



図1 指向性エネルギー堆積法の装置と、研修で作成した試験片

積層造形では、直接対象を造形する他に、造形したい対象と同型の空隙を含む型を造形し、 castingに用いるという手法も良く用いられている。そこで本研究では積層造形で二種類の型を造形し、二段階の castingにより錫と亜鉛で構成される負熱膨張複合材料を形成する。組み合わせる二種類の金属は、線膨張係数(CTE)に大きな差があることが望ましい。その結果、錫(Sn, CTE:  $23.9 \times 10^{-6}$  [1/K])と亜鉛(Zn, CTE:  $39.7 \times 10^{-6}$  [1/K])を選定した。また、この組み合わせは互いの濡れ性が低いということもなく、複合材料を形成するのに問題はない。

また、派生研究テーマである金属積層造形の残留変形低減法について、金属積層造形特有の高機能構造であるとして内部に中空構造を周期的に設けたラティス構造を考える。残留変形の大きさや形状は成形対象物の形状や拘束状態に依存し、特に剛性の影響が大きいので、ラティス構造を傾斜機能材料のように構造内部に適切に分布させることで、その不均一な剛性分布を活用し、残留変形を抑制できる期待がある。このような熱変形低減に向けた設計を行うには、金属積層造形における熱変形を予測する必要がある。その近似的評価法として、溶接分野の伝統的な手法である固有ひずみ法を積層造形向けに改良した手法が近年開発されている[3,4]。それに対し、研究代表者は漸化式を用いた固有ひずみ法の新たな表現方法を提案するとともに、傾斜機能ラティス構造のレイアウト最適設計法と組み合わせることで、金属積層造形における残留変形抑

制を試みる。

#### 4. 研究成果

まず、複合材料の構造設計を行った。申請者らが先行研究で開発した負熱膨張複合材料のメカニズムを図 2 (a)に示す[2]。この構造はバイメタルのような曲げを生み出す部材をヒンジで結合することで実現できる。この機構をなるべく簡易な構造で実現できる構造として、図 2 (b)に示す構造を設計した。なお、Sn と Zn の物性値は表 1 に示す値を用い、寸法等は有限要素法を用いた構造最適化により最適な値を決定した。有限要素法で計算した実行的 CTE は $-12.3 \times 10^{-6}$ [1/K]であり、確かに負熱膨張が実現できていることがわかった。

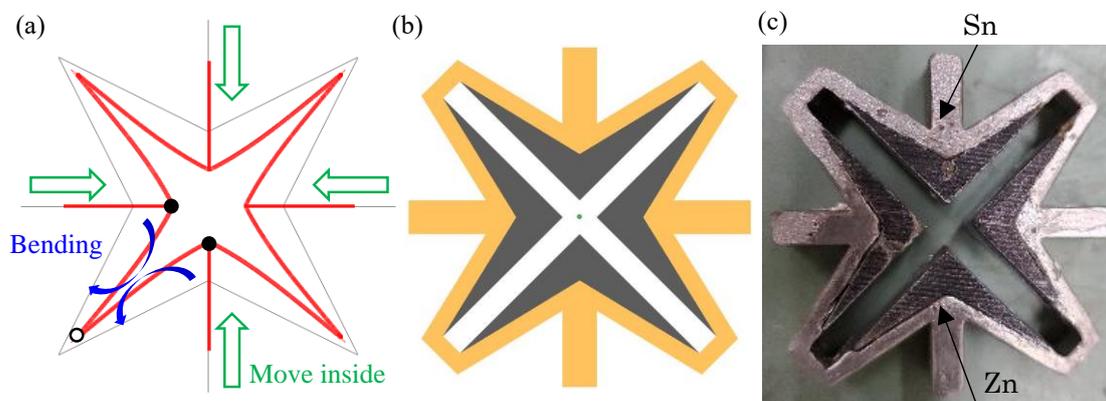


図 2 負熱膨張複合材料の構造. (a) 先行研究で開発したメカニズム. (b) 考案した構造. 線膨張係数が低い方の材料が橙色で、高い方の材料が黒色である. (c) 作成した試験片.

表 1 設計に用いた物性値

	Sn	Zn
ヤング率[GPa]	50	108
ポアソン比	0.36	0.25
CTE[1/K]	$23.9 \times 10^{-6}$	$39.7 \times 10^{-6}$

次に、造形方法について検討を行った。本研究では以下のような手順で二段階での鋳造を行った。1：金属積層造形装置で型を作り、Zn 部を鋳造する。2：光硬化性樹脂による積層造形装置で、耐熱性の材料を用いて Sn 部のための型を造形する。3：手順 2 で作成した型に Zn 部を埋め込み、空孔部に Sn の湯を注ぐ。4：型をばらす。なお、鋳造を容易にするため、ユニットセルの大きさは 40mm とした。図 2 (c)に完成したユニットセルの試験片を示す。二種類の金属で意図した形状が確かに実現できている。最後に、作成した試験片を加熱し、レーザー変位計で熱変形を計測した。求められた実行的 CTE は約 $-2.1 \times 10^{-6}$ [1/K]となり、有限要素法による解析値よりは小さいものの、確かに負熱膨張が観察できた。樹脂での負熱膨張複合材料は室温～約 45℃と負熱膨張域が極めて狭かったのに対し[1,2]、本研究で開発した金属製負熱膨張複合材料は室温～約 220℃と広い範囲で負熱膨張を示し、より実用性が向上した。

また、派生研究テーマである金属積層造形の残留変形低減法について、まず固有ひずみ法を構築した。固有ひずみとは溶接の結果生じた塑性ひずみを言い換えたものであり、金属積層造形における最も基本的な固有ひずみ法では、一層毎に一定値の収縮固有ひずみを考える。それを線形弾性問題の初期ひずみとして与えて有限要素法による解析を行い、さらに次のステップで次層の形成を要素活性化（対象要素のヤング率と初期ひずみを変えることにより金属の凝固を表現する手法）により考慮すると、結果的に上層ほどひずみが大きくなり、土台から切り離した際は反るような変形を表現できるというものである。従来の固有ひずみ法ではこのプロセスに仮想的な時間を与え、過渡応答問題として問いていたが、研究代表者は時間の概念がない漸化式問題として簡易に最定式化し、さらにラティス密度分布最適化問題を実現した。

例題として金属積層造形において、縦に造形した板状部品をプレートから切り離した際の反りを低減するような傾斜機能ラティス構造を考えた。図 3 に解析モデルを示す。幅 80mm、高さ 20mm、厚さ 4mm の厚板を想定し、内部を球状孔を有する 4mm 角のラティスで分割した。反り計測箇所は右下端とし、反り計測時に基準とする拘束位置は左下端に設定した。なお、材料はインコネル 718 とした。図 3 に得られた最適ラティス構造の断面図を示す。金属積層造形において熱ひずみは上層の方が強くなるため、熱応力低下のため疎なラティスが配置され、ま

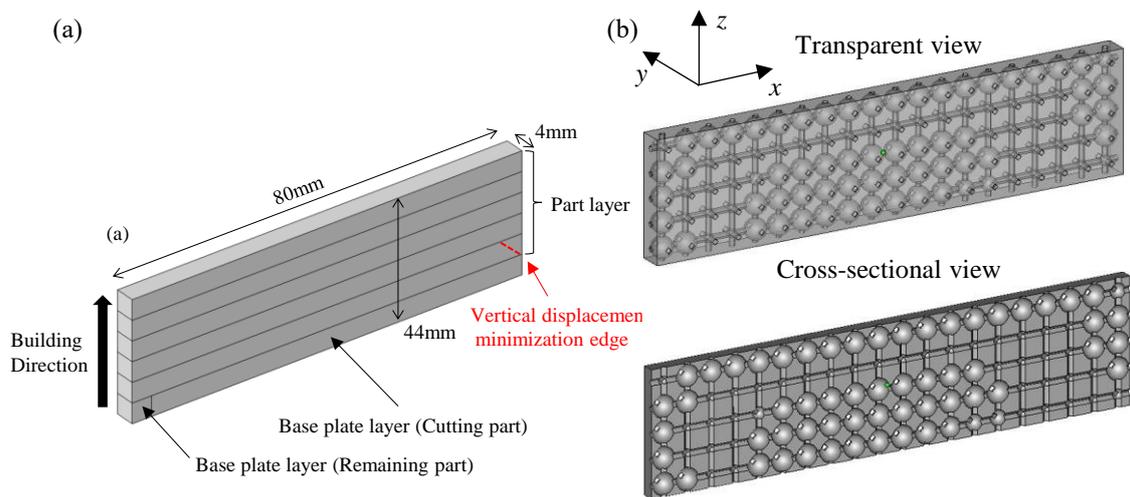


図3 (a) 残留変形計算用モデル. (b) 最適ラティス構造.

た、熱応力による曲げに対して剛性を持たせるために、アーチ型の構造になっていることがわかる。

最後に図3に示すラティス構造及び、いくつかの体積の均一なラティス構造を金属積層造形装置により造形し、ワイヤカット加工により左端を残して底部を造形プレートから切り離れた後に、右端の隙間の計測を行った。なお、隙間はクリアランスゲージにより測定した。N=2での計測の結果を図4にまとめる。均一ラティスでは体積含有率とともに変位が大きくなった一方で、最適ラティス構造では均一ラティスよりも明らかに小さな変位が計測された。

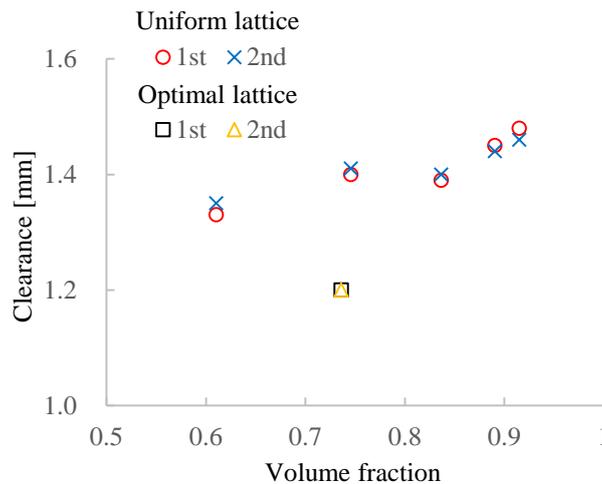


図4 隙間（残留変形）の計測結果

<引用文献>

- [1] A. Takezawa, M. Kobashi, M. Kitamura, Porous composite with negative thermal expansion obtained by photopolymer additive manufacturing, *APL Mater.*, 3 (7), (2015), 076103.
- [2] A. Takezawa, M. Kobashi, Design methodology for porous composites with tunable thermal expansion produced by multi-material topology optimization and additive manufacturing, *Composites Part B: Engineering*, 131, pp. 21-29, 2017.
- [3] N. Keller, V. Ploshikhin, New method for fast predictions of residual stress and distortion of AM parts, in: *Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014, pp. 1229–1237.
- [4] N. Keller, *Verzugsminimierung bei selektiven Laserschmelz-verfahren durch Multi-Skalen-Simulation* (Ph.D. thesis), Universität Bremen, 2016.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takezawa Akihiro, To Albert C., Chen Qian, Liang Xuan, Dugast Florian, Zhang Xiaopeng, Kitamura Mitsuru	4. 巻 370
2. 論文標題 Sensitivity analysis and lattice density optimization for sequential inherent strain method used in additive manufacturing process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	6. 最初と最後の頁 113231 ~ 113231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cma.2020.113231	査読の有無 無
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 Takezawa Akihiro, Zhang Xiaopeng, Kato Masaki, Kitamura Mitsuru	4. 巻 28
2. 論文標題 Method to optimize an additively-manufactured functionally-graded lattice structure for effective liquid cooling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 285 ~ 298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2019.04.004	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 Takezawa Akihiro, Zhang Xiaopeng, Kitamura Mitsuru	4. 巻 143
2. 論文標題 Optimization of an additively manufactured functionally graded lattice structure with liquid cooling considering structural performances	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 118564 ~ 118564
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118564	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 Takezawa Akihiro, Zhang Xiaopeng, Tanaka Takuo, Kitamura Mitsuru	4. 巻 34
2. 論文標題 Topology optimisation of a porous unit cell in a fluid flow considering Forchheimer drag	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Fluid Dynamics	6. 最初と最後の頁 50 ~ 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10618562.2019.1705968	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 Guo Honghu, Takezawa Aikihiro, Honda Masanori, Kawamura Chikara, Kitamura Mitsuru	4. 巻 175
2. 論文標題 Finite element simulation of the compressive response of additively manufactured lattice structures with large diameters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Materials Science	6. 最初と最後の頁 109610 ~ 109610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.commatsci.2020.109610	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 Chen Qian, Taylor Hunter, Takezawa Akihiro, Liang Xuan, Jimenez Xavier, Wicker Ryan, To Albert C.	4. 巻 46
2. 論文標題 Island scanning pattern optimization for residual deformation mitigation in laser powder bed fusion via sequential inherent strain method and sensitivity analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 102116 ~ 102116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2021.102116	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 Zhang Heng, Takezawa Akihiro, Ding Xiaohong, Xu Shipeng, Duan Pengyun, Li Hao, Guo Honghu	4. 巻 209
2. 論文標題 Bi-material microstructural design of biodegradable composites using topology optimization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials & Design	6. 最初と最後の頁 109973 ~ 109973
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2021.109973	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 Takezawa Akihiro, Chen Qian, To Albert C.	4. 巻 48
2. 論文標題 Optimally variable density lattice to reduce warping thermal distortion of laser powder bed fusion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 102422 ~ 102422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2021.102422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Guo Honghu, Ichikawa Kazuo, Sakai Hiroyuki, Zhang Heng, Zhang Xiaopeng, Tsuruta Kenji, Makihara Kanjuro, Takezawa Akihiro	4. 巻 396
2. 論文標題 Numerical and experimental analysis of additively manufactured particle dampers at low frequencies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 696 ~ 709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.powtec.2021.11.029	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

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 A. Takezawa
2. 発表標題 Lattice distribution optimizations for additive manufactured functional structures
3. 学会等名 ACSMO 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Takezawa
2. 発表標題 Prediction of the nano-scale elastic mechanism of the large negative thermal expansion of $\text{Ca}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_4$ -y ceramics by topology optimization
3. 学会等名 OptoX-NANO 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Takezawa
2. 発表標題 Variable lattice density optimization based on sequential inherent strain method to reduce thermal distortion of selective laser melting
3. 学会等名 ASTM ICAM 2021 (招待講演) (国際学会)
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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	アルパート トウ  (To Albert)	ピッツバーグ大学・工学部・教授	

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			
米国	ピッツバーグ大学			
中国	大連理工大学	上海理工大学		