

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18889

研究課題名（和文）原子を手本にメタ材料を創る - 形状記憶セル格子多孔体の4Dプリントへの挑戦 -

研究課題名（英文）Creation of Meta-materials Mimicking Atoms - Challenge to 4D Printing of Shape Memory Cellular Lattice Porous Materials:

研究代表者

小泉 雄一郎 (Koizumi, Yuichiro)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10322174

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、形状記憶セル格子多孔体の4Dプリントに挑戦すべく、原子構造を模倣したメタ材料を創成した。3Dプリンタ技術と材料科学の知見を融合させ、新規特性を持つ先進材料を開発した。具体的には、面心立方および体心立方格子構造の弾性異方性を評価した。さらには、応力誘起相転移する格子構造体にバイメタルを組み込むことで、熱誘起相転移と形状記憶特性を持つ4Dメタ材料を提案した。さらに、ダイヤモンド構造や単純立方構造の弾性異方性を再現し、バイメタル梁を組み込んだ格子の設計と評価に成功した。この研究は、4Dメタ材料設計の新しい基盤を確立し、持続可能な社会の発展に貢献することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、原子構造を模倣したメタ材料の創成を通じて、材料の密度分布を制御し弾性特性を自在に調整する新しい手法を提案した。3Dプリンタ技術と物質科学の知見を融合し、形状記憶セル格子多孔体の4Dプリントに成功したことは、特定の元素組成に依存しない新たな材料特性の発現を可能とした。特に、応力誘起相転移と熱誘起相転移を組み合わせた4Dメタ材料の設計は、持続可能な社会の構築に向けた新技術の基盤の構築の一助となる。また本研究は、電子構造に基づくメタ材料設計というパラダイムシフトを生み出すことに挑戦し、先進的材料科学の発展に寄与する重要な成果を挙げた点で意義が極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to create metamaterials by mimicking atomic structures and challenged the 4D printing of shape memory cellular lattice porous structures. By integrating 3D printing technology with materials science knowledge, we developed advanced materials with novel properties. Specifically, we evaluated the elastic anisotropy of face-centered cubic (FCC) and body-centered cubic (BCC) lattice structures. Additionally, we proposed 4D metamaterials with shape memory properties by incorporating bimetallic beams into stress-induced phase-transforming lattice structures, enabling thermally induced phase transitions. Furthermore, we successfully replicated the elastic anisotropy of diamond and simple cubic structures and designed and evaluated lattices incorporating bimetallic beams. This research established a new foundation for 4D metamaterial design and is expected to contribute to the development of a sustainable society.

研究分野：材料科学・工学

キーワード：相転移 第一原理計算 付加製造 4Dプリント メタ材料 バイメタル 形状記憶 弾性異方性

1. 研究開始当初の背景

材料の構造と特性の関係の理解とそれに基づく構造の制御は、現代の新材料創成の常套手段である。一方、3Dプリンタ技術の発達により、サブミリレベルからメートルレベルでの構造の制御が可能となった。3Dプリンタ技術と、これまで物質科学が得た原子レベルの構造と特性の関係に関する知見を融合した格子の設計により、その物質が本来有さない特性を発現させることが、新しいメタマテリアル創成手法として期待される。研究代表者らは、以下2つのアプローチでの力学特性制御による新規力学的メタマテリアルの創成を着想した。

(1) 電子構造を模倣したメタマテリアル設計: 結晶性材料の力学特性、なかでも基本となる弾性特性とその異方性は、原子を粒子と捉えてみると、原子間結合力と結晶構造に概ね支配されている。しかしながら、結晶構造だけでは力学特性とその異方性は決まらない。特に、弾性特性に非線形性が現れる程に大きいひずみでは、同じ結晶構造を有する物質でも変形挙動は大きく異なる。例えば、アルミニウム(Al)と銅(Cu)はともに面心立方(FCC)構造を有すが、両者の降伏挙動は大きく異なる。これは、結晶構造のさらに下の階層にある電子が原子間結合を支配するからである。電子構造と力学特性の関係を参考にした格子構造の設計は、特定の元素が発現する機能を他の元素で発現させる可能性がある。

(2) 相転移を模倣した4Dメタマテリアル設計: 代表的な形状記憶合金は、温度変化に伴う無拡散結晶構造変化であるマルテンサイト転移により形状記憶など特有の特性を発現する。これは、原子同士の安定配置が温度や応力によって変化することによる。この原子の相対的な安定位置の変化を模擬する機構を組み込んだ格子構造は温度変化や応力による相転移による機能を模擬的に発現するメタマテリアルを実現する可能性がある。例えば異種合金の熱膨張率の差で、温度変化により形状変化するバイメタルを組み込んだメタマテリアルを製造し、原子レベルでは相転移を示さない材料に対し、mmレベルの格子構造に相転移を発現させ形状記憶特性を示すメタマテリアルが創成できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では上記のような背景の下、原子模倣メタマテリアル創製のその基礎として、原子の電子構造に由来する弾性特性を、材料の密度分布の制御で再現することを試みる。さらに、応力誘起相転移する格子構造に、温度変化で変形するバイメタル製梁を組み込むことで熱誘起相転移を発現させる4Dメタマテリアルを提案する。これにより、特定元素を必要としてきた特性を他の元素で発現させることで、持続可能な社会の実現に貢献する学術的基盤構築に向けて挑戦することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 面心立方および体心立方構造を有する金属結晶と格子構造体の弾性異方性と力学メタマテリアルの設計
FCC 構造、BCC 構造を模して、原子位置に球、最近接結合位置に円柱梁を配した格子構造体モデル群 L_{FCC} 、 L_{BCC} を作成した。各格子構造体に対し、有限要素法(FEM)による一軸圧縮および純粋せん断シミュレーション(図1)を行いマクロな弾性係数を求めた。

また、第一原理データベース Materials Project から、FCC 構造、BCC 構造と同様にそれぞれ $Fm\bar{3}m$ 、 $Im\bar{3}m$ 対称性を持つ結晶構造が 0 K で安定な結晶性物質群 M_{FCC} 、 M_{BCC} 、 M_{DIA} の弾性特性係数 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{44} を取得した。各格子構造体と各結晶性物質の弾性異方性を評価するため、Zener 比 $A_z = 2c_{44} / (c_{11} - c_{12})$ とポアソン比 $\nu = -c_{12} / (c_{11} - c_{12})$ を計算し、格子構造体と結晶性物質の A_z と ν の関係を比較した。加えて、FEM で解析した格子構造体を 3D プリンタで造形し、一軸圧縮変形力学試験ならびにせん断変形試験の結果から A_z と ν を計算し、結晶性物質の A_z と ν の関係との対応を検証した。

3D-CAD により FCC 格子、BCC 格子の Ball&Stick 型構造体を Ball の半径、梁の太さを変数として設計し、粉末床溶融結合(PBF)型樹脂用付加製造(AM)装置にて、熱可塑性ポリウレタン(TPU)粉末を原料として造形した(図2)。材料試験機により造形体、縦弾性率 E 、横弾性率 G を評価した。ポアソン比 ν は、試料表面につけたマーカーの相対位置変化から画像解析により評価した。

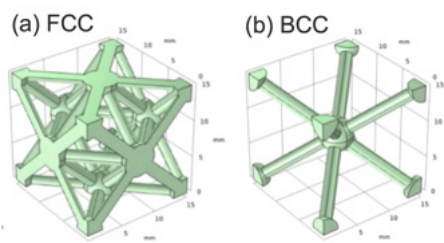


図1. 有限要素解析で用いたモデルの例
(a) FCC 構造、(b) BCC 構造。

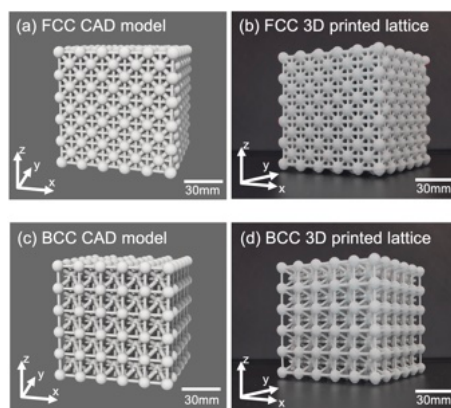


図2. (a,b) FCC 構造と(c,d) BCC 構造の Ball & Stick モデル. (a,d) CAD, (b,d) 造形体。

(2) 熱誘起相転移を示す格子構造体の設計と特性評価

有限要素法 (FEM) シミュレーションにより、熱誘起相転移を示す格子構造体 (TI-PXCM: Thermally Induced Phase Transforming Cellular Material) の要素構造 (図 3) の温度変化にともなう形状変化から加熱・冷却時の相転移挙動を解析した。応力-変位曲線から応力の上限を評価し、各温度での相変態に必要な力を推定した。実験では、バイメタルを単純支持する溝を有する H 型梁を放電加工により、316L ステンレス鋼のバルク材から切り出した。TI-PXCM を加熱・冷却し、画像解析によってそのときの変形挙動を評価した。

TI-PXCM のユニットセルを、独自に設計したコネクタによって接続し、三次元構造を有する TI-PXCM を組立てた。これらに対して、圧縮実験を行い、応力誘起相転移挙動を評価した。なお、圧縮試験は、ロードセル容量 500 N の材料試験機を用いて行った。

一方、温度と荷重と安定構造との関係を表す温度-荷重状態図を TI-PXCM の特性の指標として作成した。

4. 研究成果

(1) 面心立方および体心立方構造を有する金属結晶と格子構造体の弾性異方性と力学メタマテリアルの設計

図 5 に、FCC 構造または BCC 構造を有する結晶性物質 (図 5a) と格子構造体 (図 5b) のポアソン比と Zener 比の関係を示す。

FCC 型格子構造体の A_z は 1 近傍で比較的低く、等方的なのに対し、BCC 型格子構造体は大きな A_z を示し異方性は高かった。一方、金属の A_z は、元素に依存するが、BCC 基金属では比較的低い配位に限定され FCC 基金属ではポアソン比、 A_z 共に広い範囲に分布し、両方高い値を示すものが多く存在する。このように金属結晶と格子構造体では逆の傾向が示された。この理由は不明であるものの、それでも明らかに、FCC 金属の弾性異方性を模した格子を設計する上で、FCC 構造の Ball&Stick モデルの格子構造体は不適で、逆に BCC 構造の Ball&Stick モデルの方が適切である可能性が高いことが示された。

このような結果が得られた原因を考える上で図 6 に示すように、FCC 金属のフェルミ面が $\langle 111 \rangle$ 方向に突き出しあるいはネックを形成しているものが多く、BCC 金属のフェルミ面が $\langle 110 \rangle$ 方向に連結しているものが多い。これが格子構造体と金属結晶で、弾性異方性の傾向が逆転していることと関係している可能性があることを見出した。

金属結晶の電子構造については、第一原理計算データを集約した Materials Project データベースを活用することにより効率的に進めることができた。当初、FCC 金属の特性は FCC 構造の造形体、BCC 金属の特性は BCC 構造の格子の構造に類似すると予想したが、実際に逆に FCC 構造の造形体は BCC 金属の弾性異方性に近いことなど、弾性異方性の傾向が逆転する傾向のあることを見出した。この理由として、現時点では不明だが、フェルミ面の形状が弾性異方性と関係している可能性を見出した。

このことは例えば、希少元素で構成される物質の有用な特性を発現する格子構造体を別のユビキタな元素からなる物質で模倣しようとする場合、その物質の結晶構造を模倣するよりも、フェルミ面の構造を模倣することから出発することが近道になる化も知れないことを示唆している。

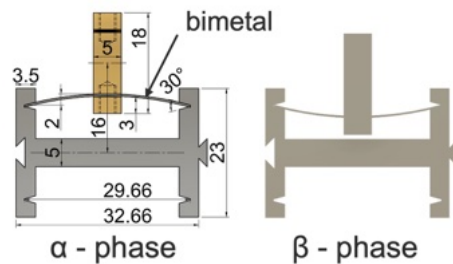


図 3. 熱誘起相転移する格子構造体 (TI-PXCM) の要素構造 [2].

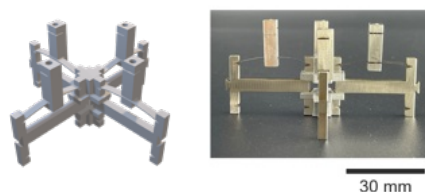


図 4. TI-PXCM の三次元化 (CAD モデル) (a) 要素構造モデル, (b) 作製した要素構造

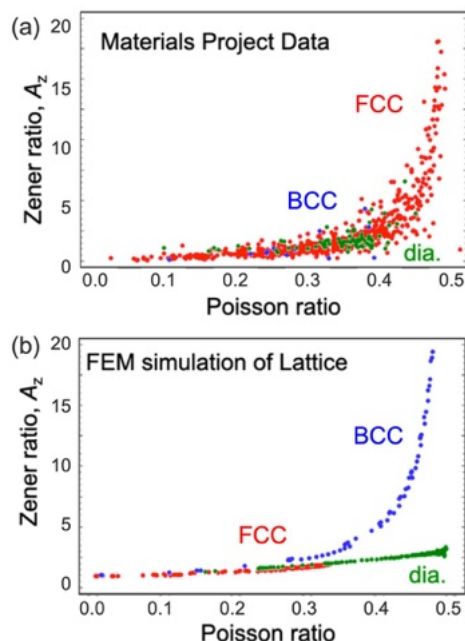


図 5. FCC 構造または BCC 構造を有する (a) 結晶性物質と (b) 格子構造体のポアソン比と Zener 比の関係。

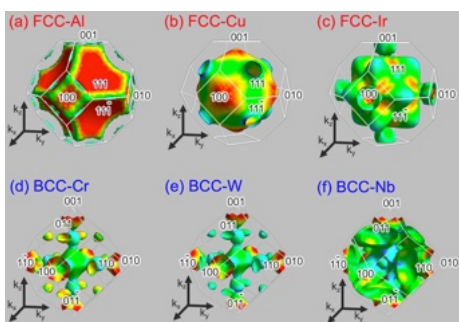


図 6 (a-c) FCC 金属および (d-f) BCC 金属のフェルミ面の形状の比較。

(2) 熱誘起相転移を示す格子構造体の設計と特性評価

図 7 に、TI-PXCM ユニットセルを加熱冷却したときの相転移挙動を示す。273 K では上に凸であったバイメタル製曲がり梁が、143 K でスナップスルーを発現し、下向きに凸となった。このあと加熱して室温 (323 K) では下向きに凸のままであるが、TI-PXCM ユニットセルを加熱すると 428 K で相転移が発生し、上向きに凸の状態となった。この上向きの凸の状態を α 相、下向きに凸の状態を β 相と呼ぶ。要素構造の各状態を相と呼ぶことは、この要素構造を様々に組み合わせて配列させることで格子構造を α 相や β 相と呼ぶことを想定していることに由来する。要素構造の相転移挙動を予測あるいは制御することは TI-PXCM の相転移を制御する上で重要である。

図 8 に、曲がり梁のみの両端を単純支持拘束した状態で中心の上下位置を強制変位させた場合の梁の様子をしめす。なお、この曲がり梁は、Mn-Cu 合金と Fe-Ni インバー合金のバイメタルである。見易さのために、横 (X) 方向と縦の Y 方向とで (途中で左右非対象の正弦曲線状の状態を経て最終的に下に凸となった。この変化にともなう弾性ひずみエネルギーと梁の中心の Y 座標位置との関係を図 9 に示す。室温 (293K) では $Y=-2$ mm と $Y=+2$ mm の状態でどちらもエネルギーが極小となっており、 α 相と β 相の両方が共に安定である。同様の FEM 解析を温度 93 K で行った場合、 $Y=-2$ mm 近傍で再安定となり、温度 603 K の場合は、 $Y=+9$ mm 近傍で安定となることが示されている。さらに、このひずみエネルギーを Y 方向の位置で微分すると、荷重が求まる。それを見掛けの断面積で除することで見掛けの応力が求まる。変位を要素構造の高さで除すことにより応力-ひずみ曲線が図 10 のように得られる。FEM 解析は変位制御で実施したが、応力制御で変形させた場合には、例えば、圧縮側から応力を大きくした場合、応力がピーク値に達すると、同じ応力値でひずみ引張側に大きい状態にまで瞬間的に変化すると予想される。この変化は、応力誘起相転移に相当する。このような FEM 解析を、設定温度を細かく変化させて、圧縮側から引張側、引張側から圧縮側への多数実行し、実施して、スナップスルーが生じる応力を各温度に対してプロットすることで図 11 に示すような応力-温度状態図が得られる。この図は TI-PXCM を設定する上で、の重要な指標となる。

TI-PXCM ユニットセルは約 2 N の荷重で変形した。相転移に必要な荷重は TI-PXCM の面積に比例して大きくなると予想される。ユニットセルを 1 段につき 4 つ並べた場合は、予想通り面積に比例して荷重が増加し、ピークでの荷重は約 8 N となった。三次元化した PXCM の圧縮試験中の構造体を図 12 に、その荷重変位曲線を図 13 に示す。バイメタル曲がり梁は一段当り 8 個ずつあり、2 段で計 16 個が使用されている。4 回繰り返した圧縮試験において毎回ピークは 2 か所確認された。1 番目のピークの荷重値は毎回ほぼ同程度で 11 N~14 N と予想された 16 N よりも小さくなった。この理由として TI-PXCM の自重の影響が考えられる。2 番目のピークの荷重値は試験毎に大きく異なった。この理由について今後も検討が必要である。

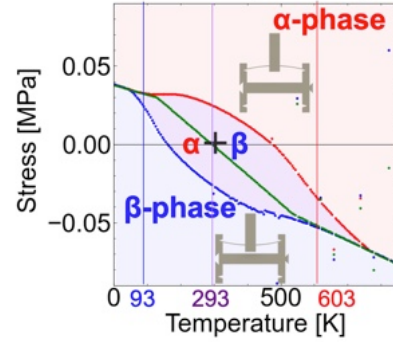


図 11. FEM 解析で得た応力-温度状態図

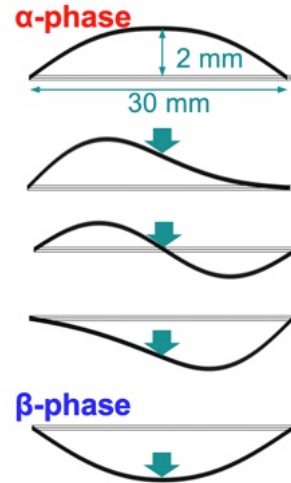


図 8. バイメタル製曲がり梁の中心に強制変位させた場合の有限要素解析。

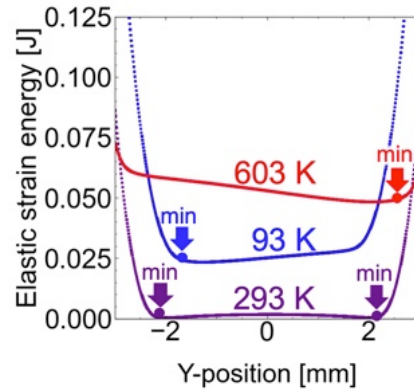


図 9. 曲がり梁の中心位置の Y 方向の変化による弾性ひずみエネルギーの変化。

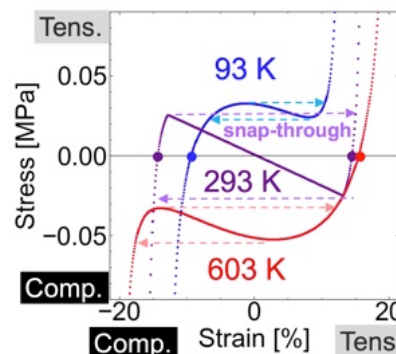


図 10. FEM 解析で得られた応力-ひずみ曲線。

5. まとめ

(1) 面心立方および体心立方構造を有する金属結晶と格子構造体の弾性異方性と力学メタマテリアルの設計

原子模倣メタマテリアルの設計指針確立を目指して、立方晶系の結晶構造を模擬し、原子を球、原子間結合を円柱梁で表現した格子構造体と、立方晶系物質の弾性異方性を評価し対応関係を調べ、以下の知見を得た。

- ① 格子構造体の梁の方向が弾性異方性を密接に関わる。圧縮方向に対して垂直な方向に存在する梁が球を拘束しポアソン比を減少させる傾向にある。
- ② 格子構造体の材料のポアソン比は格子構造体の Zener 比には寄与しないが、格子構造体の Poisson 比に寄与すると考えられる。格子構造体の相対密度が上がるにつれて、構造由来のポアソン比に漸近し、格子構造体の相対密度が下がるにつれて、材料そのものの Poisson 比に漸近することが確認できる。
- ③ 対称性が $Fm\bar{3}m$ となる結晶構造は FCC 構造だけでなく、化合物の M_{FCC} の最近接結合方向が $\langle 110 \rangle$ 方向以外の方向となる。最近接結合方向の変化が、Zener 比が $A_z < 1$ となる原因であると考えられる。
- ④ FCC 構造を模した格子構造体の弾性異方性は、BCC 構造の实在材料の挙動と類似する。
- ⑤ 結晶性物質のフェルミ面のネック方向に梁を配置した格子構造体が、その結晶性物質と類似した弾性異方性を示すことが示唆される。

(2) 熱誘起相転移を示す格子構造体の設計と特性評価

梁の一部にバイメタル板を使用して湾曲したバイメタルが snap-through を発現することで熱誘起相変態を生じるメタマテリアルが作製できる。バイメタルの温度変化による変形の FEM 解析と実験とによって、その特性は以下のように制御可能なことを示した。

- ① バイメタル板の両端を単純支持した温度を変化させ、温度変化量が一定の値を超えると湾曲させる力が両側から受ける圧縮方向の力を超え snap-through を起こし、初期状態とは逆方向に湾曲する。また、snap-through する温度は加熱時と冷却時で異なり温度-変位曲線はヒステリシスを示すことを見出した。
- ② 変位制御の FEM 解析によって温度と荷重の状態図を作製した。状態図を用いることで特定の温度、荷重における安定形状やバイスタビリティの有無を予測可能であることが示唆された。
- ③ 変位制御の FEM 解析によって TI-PXCM の相転移に由来した特性の予測が可能に成ることを示した。今後必要な温度や荷重は TI-PXCM の設計パラメータを変更することで制御可能であることが示唆された。

本研究の成果を基に、特定の希少元素が無ければ発現しない弾性異方性や相転移に由来した機能性を、ありふれた元素で構成される物質で発現させることで、持続可能な社会の構築に貢献することが期待される。さらには、物質では発現出来ない特性を発現する新しい 4D メタマテリアルが生まれる。せん断型の相転移を発現する格子構造体の創成[3]と組み合わせることにより、さらに多くの機能を発現する 4D メタマテリアルの設計・製造が、3D プリント技術の発達とともに可能になると期待される。

<引用文献>

- [1] 鐘ヶ江壮介, 奥川将行, 小泉雄一郎, 3D プリントを活用した形状記憶・衝撃吸収メタマテリアル開発. *Journal of 4D and Functional Fabrication*, 1 (2020) 1-8.
- [2] H. Nagayama, S. Kanegae, M. Hosoda, M. Okugawa, Y. Koizumi, Thermally induced phase transforming cellular lattice driven by bimetal beams, *MRS Adv.*, 7, (2022), 701–705.
- [3] S. Kanegae, M. Okugawa, Y. Koizumi, Martensitic Phase-Transforming Metamaterial: Concept and Model, *Materials*, 16, (2023), 6854.

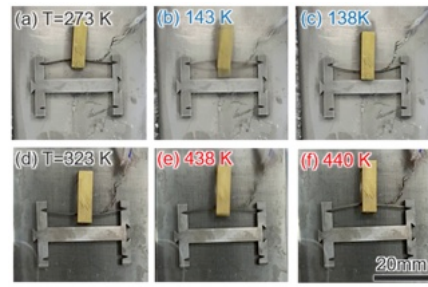


図 7. TI-PXCM の要素構造の相転移挙動。

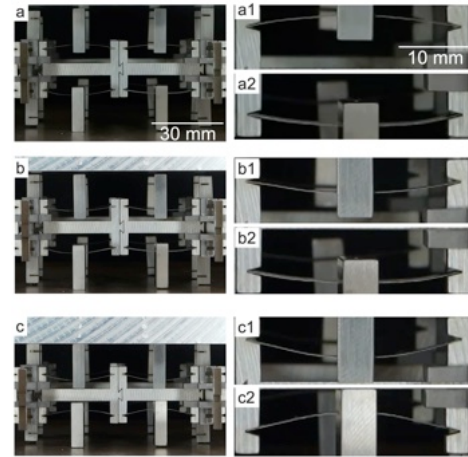


図 12. 圧縮変形中の三次元 TI-PXCM. (a) 変形前. (b) 上段の曲がり梁のみスナップスルーした状態, (c) 下段の曲がり梁もスナップスルーした状態. (a1,b1,c1) 上段のバイメタル梁の拡大像, (a2, b2, c2) 下段のバイメタル梁の拡大像。

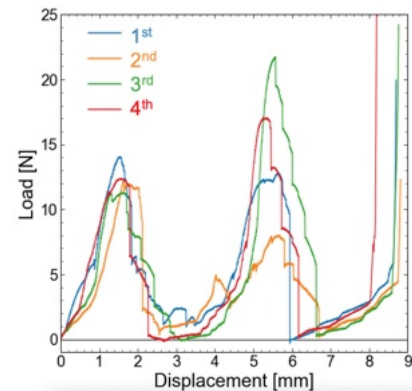


図 13. 三次元 TI-PXCM の荷重変位曲線。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 鐘ヶ江壮介, 奥川将行, 細田昌樹, 永山隼, 小泉雄一郎, 尾方成信 | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 原子のふるまいに学ぶ4Dメタマテリアルの創成 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of Conference on 4D and Functional Fabrication | 6. 最初と最後の頁 45 ~ 48 |
| 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Nagayama Hayato, Kanegae Sosuke, Hosoda Masaki, Okugawa Masayuki, Koizumi Yuichiro | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Thermally induced phase transforming cellular lattice driven by bimetal beams | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 MRS Advances | 6. 最初と最後の頁 701 ~ 705 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/s43580-022-00334-y | 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 - |
| 1. 著者名 鐘ヶ江壮介, 奥川将行, 小泉雄一郎 | 4. 巻 27 |
| 2. 論文標題 代表体積要素モデルを用いた有限要素法による多軸双安定構造の大変形挙動解析 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 計算工学講演会論文集 | 6. 最初と最後の頁 B-08-03 (1-4) |
| 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 Kanegae Sosuke, Okugawa Masayuki, Koizumi Yuichiro | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Martensitic Phase-Transforming Metamaterial: Concept and Model | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Materials | 6. 最初と最後の頁 6854 ~ 6854 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma16216854 | 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 - |

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Sosuke Kanegae (D2), Masayuki Okugawa, Yuichiro Koizumi |
| 2. 発表標題 Evaluating Bistability of Phase Transforming Cellular Materials with Finite Element Analysis |
| 3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII) 31 July - 5 August 2022, Yokohama, Japan (Online) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hayato Nagayama (M2), Sosuke Kanegae (D2), Masayuki Okugawa, and Yuichiro Koizumi |
| 2. 発表標題 Thermally induced Phase Transforming Cellular Material using bimeta |
| 3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII) 31 July - 5 August 2022, Yokohama, Japan (Online) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Sosuke Kanegae (D2), Masayuki Okugawa, Yuichiro Koizumi |
| 2. 発表標題 Geometric Design and Inverse Design of Multi-Axial Bistable Lattice Mechanical Metamaterial Inspired by Atomic Arrangement of Crystals |
| 3. 学会等名 MRS 2022 Spring Meeting, Honolulu, Hawaii, May 2, 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Koizumi, Masaki Hosoda (M1), Sosuke Kanegae (D2), Masayuki Okugawa, Hayato Nagayama |
| 2. 発表標題 Design of Cellular Lattices by Atom-Mimetics-;How to reproduce Elastic Anisotropy of Metals |
| 3. 学会等名 MRS 2022 Spring Meeting, Honolulu, Hawaii, May 10, 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuichiro Koizumi, Hayato Nagayama, Sosuke Kanegae, Masayuki Okugawa, Masaki Hosoda |
| 2. 発表標題 Creation of a Lattice Structure Showing a Thermally-Induced Phase Transition Using Bimetal |
| 3. 学会等名 MRS 2022 Spring Meeting, Honolulu, Hawaii, May 9, 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 細田昌希, 鐘ヶ江壮介, 奥川将行, 尾方成信, 小泉雄一郎 |
| 2. 発表標題 面心立方構造、体心立方構造、およびダイヤモンド構造を有する格子構造体と結晶性材料の弾性異方性, |
| 3. 学会等名 日本金属学会2023年秋期(第173回)講演大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鐘ヶ江 壮介, 永山 隼, 奥川 将行, 小泉 雄一郎 |
| 2. 発表標題 熱誘起相変態するメタマテリアルの状態図 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2023年春季(第172回)講演大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 細田 昌希, 鐘ヶ江 壮介, 奥川 将行, 小泉 雄一郎 |
| 2. 発表標題 面心立方構造および体心立方構造を有する格子構造体の弾性特性 |
| 3. 学会等名 日本金属学会2022年秋期(第171回)講演大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 細田 昌希, 鐘ヶ江 壮介, 奥川 将行, 尾方 成信, 小泉 雄一郎 |
| 2. 発表標題 面心立方構造, 体心立方構造, およびダイヤモンド構造を有する原子模倣メタマテリアルの弾性異方性 |
| 3. 学会等名 Conference on 4D and Functional Fabrication 2023 (4DFF2023) |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 材料エネルギー理工学講座材料設計・プロセス工学領域
<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp3/>

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 | 尾方 成信 (Ogata Shigenobu) (20273584) | 大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授 (14401) | |
| 研究分担者 | 奥川 将行 (Okugawa Masayuki) (70847160) | 大阪大学・大学院工学研究科・助教 (14401) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|