# 論 文

# 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

鐘ヶ江壮介\*,奥川 将行\*,小泉雄一郎\*

(2020.3.25 受理)

### Development of Shape Memory and Shock Absorbing Metamaterials Using 3D Printing

#### Sosuke KANEGAE\*, Masayuki OKUGAWA\*, and Yuichiro KOIZUMI\*

The purpose of this research is to apply additive manufacturing (AM) technology to functionalize mechanical metamaterials which have properties that cannot be realized with existing materials. In particular, mechanical metamaterials exhibiting martensitic transformation, which is the mechanism behind superelasticity and shape memory properties, are being developed by controlling the lattice structures. Lattice structures that are expected to exhibit these properties were designed by simulating interatomic bonds with elastomer, manufactured by AM and evaluated to reveal their mechanical properties. As a result, we observed the deformation behavior that are similar to the characteristics of superelasticity and shape memory properties. We also discovered that phenomenon similar to the phenomenon seen in crystal structures of metallic materials have occurred in mechanical metamaterials. Furthermore, taking inspiration from the similarity between crystal structure of metallic materials and mechanical metamaterials, we designed a structure expected to be capable of further control of properties.

**Keywords**: Material design, Metamaterial, Martensitic transformation, Bistability, Superelasticity, Shape memory, Atom mimetics

付加製造(additive manufacturing: AM) 技術を用いて格子構造制御により既存物質では実現が不可能な特 性を発現させる力学的メタマテリアルの機能化を目的としている.具体的には,超弾性や形状記憶特性が発現 する要因であるマルテンサイト変態を発現する力学的メタマテリアルを,格子構造の制御により創製する.こ れらの特性を発現すると予想される格子構造を弾性的変形能の高いエラストマー材料で原子間結合を模擬して AM 装置で製造し,その特性を評価した.その結果,超弾性や形状記憶特性の特徴と一致する変形挙動を観測 し,金属材料などの結晶構造で見られる現象と類似した現象が生じていることを発見した.さらに,この金属 材料と力学的メタマテリアルとの類似性に着目して,金属の結晶構造から着想を得て,様々な構造への適用が 可能となる構造を設計した.

**キーワード**:マテリアルデザイン,メタマテリアル,マルテンサイト変態,バイスタビリティ,超弾性,形状 記憶,原子模倣材料

## 1. はじめに

物質が発現する性質は、原子配列や電子分布等、原子レベル やそれ以下のスケールでの「構造」に由来する<sup>1.2)</sup>.例えば、 結晶構造や原子を取りまく電子の分布による結合状態が物性を 決定づけている<sup>3)</sup>.もしそれらの構造を自在に制御できれば、 物性の制御が可能となると考えられる.しかしながら物質の原 子配列は,原子の電子構造に由来した原子間結合に支配される ため,直接的に原子配列を任意に制御することは極めて困難で ある.そのため元素の組み合わせと得られる構造との関係を蓄 積して,それらの中から所望の特性を示す原子配列を探索する のが一般的な材料設計であるといえる.

一方,直接制御可能なスケールで微細な周期構造を作り込み,既存物質では実現が不可能な特性を発現させる材料はメタマテリアルと呼ばれる<sup>4-9)</sup>.メタマテリアルとして例えば、半 導体の微細加工技術を応用して光波長程度の周期を持つ構造を 制御し,負の屈折率等の特異な光学特性を示す 3D fishnet metamaterial<sup>4.5)</sup>が創製されている.さらには任意の形状の部 材を製造できる 3D プリンターを用いて,負のポアソン比を有

<sup>\*</sup> 大阪大学 大学院工学研究科

<sup>〒565-0871</sup> 大阪府吹田市山田丘 2-1

<sup>\*</sup> Graduate School of Engineering, Osaka University 2–1, Yamadaoka Suita Osaka 565–0871, Japan

する auxetic 材料<sup>6-8)</sup>や photonic crystal<sup>9)</sup>などの力学的に特異な 挙動を発現するメタマテリアルが開発されている.これらのこ とは結晶中の原子間結合を起源に発現する機能を, 3D プリン ターを用いた格子構造の制御によって発現させられる可能性を 示唆している.超弾性や形状記憶特性等を,原子間結合や原子 配列等に基づく物性のみではそれらの特性を発現しない元素を 用いて,マクロな格子構造の制御によって発現させられる可能 性がある.

具体的には例えば、代表的な形状記憶材料として知られる TiNi 合金における形状記憶効果や超弾性の発現は、後述する ように B2 構造, B19 構造, B19' 構造間の熱弾性マルテンサイ ト変態 (martensitic transformation) に由来する<sup>10,11)</sup>. したが って、TiNi と同じメカニズムにより形状記憶特性を示す材料 を開発する場合、その材料そのものが熱弾性マルテンサイト変 態を示すことが前提となる. これに対して 3D プリンターによ り操作可能なサイズの格子構造を制御することで TiNi 合金中 の結晶構造転移のような構造変化を発現するメタマテリアルを 創製すれば、原子レベルの構造に由来した特性としてマルテン サイト変態を示さない材料に形状記憶特性を発現させられる可 能性がある.このことは、Ni 等の希少金属を用いずに TiNi 合 金が示すような形状記憶を発現させ、形状記憶特性の発現温度 を合金組成ではなくマクロ格子構造の設計により制御させた り、格子構造の最適化で軽量化が可能なメタマテリアルを創製 したりできることを期待させる.

本研究ではこのような、原子の振る舞いを模倣した格子構造 制御による機能化の試みとして、超弾性や形状記憶特性を示す と期待される格子構造の設計、作製および特性評価を行うこと を目的とする.原子間結合を模擬した梁から構成される格子構 造として設計し、それを弾性変形能の高いエラストマーを素材 として 3D プリントしてその特性を評価することで、メタマテ リアルの新しい設計・創製の指針を示すことを目的とした.

### 2. 設計コンセプト

## 2.1 形状記憶効果の起源としてのマルテンサイト変態と bistable 構造

先述のとおり TiNi 合金は、マルテンサイト変態により形状 記憶特性や超弾性を発現する. マルテンサイト変態とは、ある 結晶構造すなわち周期的な原子配列をもつ母相に、加熱や冷却 などで温度変化を与えたり、荷重を加えたりすることによっ て,1原子サイズ以下の距離だけ原子配列が一様に変位して, 母相とは異なる結晶構造を持つマルテンサイト相に相転移(金 属分野では相変態とも呼ばれる) することである. TiNi 合金 の場合、冷却中に形成されたマルテンサイト相には、外形状を 保って内部の結晶構造のみを変化させるために、鏡面対称の結 晶(双晶と呼ばれる)を交互に積み重ねた双晶組織が形成され る<sup>12)</sup>. その双晶組織が導入された状態に荷重を加えて変形させ る際、交互に重なっていた鏡面対象の結晶のうちの一方がもう 一方の結晶に方位を揃えるように原子配列を変化させる,つま り双晶変形が生じる場合がある. その一方向に揃ったマルテン サイト相を加熱して,母相が安定な温度にまで昇温すると,結 晶構造がもとに戻ると同時に外形状も元に戻る. これが形状記



Fig. 1 Deformation of cantilever at the center of cantilever with sinusoidal curve fixed at both ends. (a) before deformation in the primarily stable configuration, (b) in an unstable configuration during deformation, (c) after deformation in the secondarily stable configuration.

憶特性の起源である.一方,母相が安定な温度で応力を加える とマルテンサイト変態が生じる場合がある.これを応力誘起マ ルテンサイト変態という<sup>11)</sup>. このマルテンサイト相を除荷する と母相に戻り形状が回復することがある. この特性は超弾性と 呼ばれ、TiNi 合金等がマルテンサイト変態することで発現す る. このような原子配列による形状記憶特性や超弾性と同様の 力学的挙動はメタマテリアルでも見出されており、その格子構 造の一つとして bistable 構造<sup>13-17)</sup>がある. Bistable とは, 安定 状態が二つ存在して、これら二つの状態は可逆的に遷移可能な ことを意味する. Bistable 構造が配列した格子では、荷重を加 えて格子点間距離以下の距離だけ格子点が変位した状態で安定 あるいは準安定となる.準安定状態に熱的変化を加えることで 元の格子構造へと回復すれば、形状記憶特性を発現したと見な せる.一方,除荷のみで形状が回復すれば,超弾性を発現した と見なせる.我々は、格子構造の変化により、こうした結晶構 造の変化に類似した機能を発現するメタマテリアルを新たな材 料の概念「力学的メタマテリアル」として提案している. この ような原子の振る舞いを模擬した構造変化を示す格子等を atom mimetics<sup>27)</sup>,特にそれを 3D プリント additive manufacturing により実現する取り組みを atom mimetics by additive manufacturing (AM-by-AM) と呼んでいる. AM-by-AM は、3Dプリントにより時間的に形状変化(4D)により機能 (function) を発現することから 4D and functional fabrication (4DFF)<sup>18-21)</sup>の思想に合致すると考えている.

### 2.2 Bistable 構造の要素構造設計

これまでの研究で,正弦波形状を持つ構造が bistability を示 すことが見出されている<sup>13-17)</sup>. **Fig.1**(a)に示す初期形状を1 周期の正弦波状とした両持ち曲り梁を考える.この両持ち曲り 梁の中央部分に荷重を印加すると,まず1周期のまま梁の長さ が減少するように圧縮変形する.しかし,臨界荷重を超えると 座屈し, Fig.1(b)に示す多周期の正弦波が重ね合わさった不

安定形状となる.この座屈が生じると、梁の荷重に対する反力 は減少していく. さらに変形が進むと反力は負の値を示すよう になり、両持ち曲り梁はFig.1(c)に示す第2安定形状で安定 化する. このような正弦波形状の bistable 構造を, ハニカム構 造に組み込んだ構造として phase transforming cellular materials (PXCM)<sup>22)</sup>  $\stackrel{\text{\tiny (22)}}{\leftarrow}$  negative stiffness honeycomb<sup>23, 24)</sup>, monolithic metamaterials with opposite U-shaped snapping segments (OUMs)<sup>25)</sup>などの格子構造がある.これらの格子構造 のうち、本研究では PXCM を研究対象とする. PXCM の単位 格子を Fig. 2(a)に、また、この単位格子を 2 次元的に配列し た構造を Fig. 2(b) に示す. PXCM は正弦波形状の曲り梁と2 種類の真直梁から構成される. 真直梁はさらに, 曲り梁同士を 連結する縦梁と縦梁に垂直で曲り梁に沿うような横梁から成 る. Fig.3(a)に示す初期形状を有する格子を上下方向に圧縮 荷重を与えて変形させると Fig.3(b)に示す形状となる.この 圧縮後の形状 (Fig.3(b)) が安定であればこの構造は bistableとなる.これまでに1周期の正弦波状とした両持ち曲り梁



**Fig. 2** Schematic picture of PXCM. (a) Unit cell, (b) PXCM with 5×8 arrangement of the unit cell.



Fig. 3 Deformation of PXCM with 2×3 arrangement of unit cell. (a) Before deformation in the primary configuration. (b) After deformation in the secondary configuration.

bistability 発現の条件は解明されている.しかし,実際の PXCM においては曲り梁同士の連結を担う真直梁がたわむた め境界条件が異なり,bistable となる条件は明確ではない.真 直梁のたわみには,梁の太さが大きく影響すると予想される. そのため,構造を支える真直梁もbistability 発現に必須な因子 として検討する必要がある.本研究では,真直梁の太さと bistability との関係を明らかとすることを目的に,真直梁太さ の異なる 27種の PXCM 構造の設計および造形を行い,その 力学特性を調べた.

### 3. 実験方法

Bistability を発現しうる構造体として,正弦波状の曲り梁と 曲り梁同士の連結を担う縦梁と縦梁同士の距離を維持できるセ ル格子多孔体を設計した.Fig.2(a)に示した単位格子の模式 図のように,曲り梁の谷と山の高低差をA,単位格子の幅を  $\lambda$ ,曲り梁の厚さをt,縦梁の厚さを $t_v$ ,横梁の厚さを $t_h$ とす る.単位格子の幅 $\lambda$ と曲り梁の厚さ $t_k$ ,それぞれ 10 mm と 1 mm に固定した.一方,縦梁厚さ $t_v$ ,横梁厚さ $t_h$ および曲り 梁の谷と山の高低差を曲り梁の厚さで除したQ=A/tは変数 とし, $t_v$ と $t_h$ は2, 4,6 mm,Qは2,4,6 として,計27種 の構造を設計した.



**Fig. 4** Deformation behavior of a lattice structure which was fully bistable: (a) before the test, (b) deforming, and (c) completely compressed. (d) Corresponding stress-strain curve.

The Journal of 4D and Functional Fabrication No.1 (2020)

設計した PXCM 格子構造を材料押出(material extrusion: MEX)方式の付加製造(additive manufacturing:AM)装置 (Raise3D 社, Raise3D Pro2)および熱可塑性ポリウレタン (thermo-plastic urethan:TPU, Raise3D PolyFlex ゴムライク フィラメント)を用いて作製した.積層ピッチは0.01 mm で ある.作製した造形物の圧縮変位と荷重の関係を,インストロ ン型材料試験機(島津製作所,AG-IS 500N)を用いて調べた. 圧縮速度は一定の0.5 mm/sとした.すべての曲り梁を変形さ せた後に,圧縮時と同じ速度で逆方向に変位させた.圧縮・除 荷過程および除荷後の試料をビデオカメラにて撮影し,変形お よび形状回復挙動を観察した.PXCM 格子構造の圧縮変形に おけるロードセルで測定した荷重*f*,格子構造体の外形状の水 平断面積*S*,変形開始時からのクロスヘッドの変位量*d*,初期 状態での試料の高さ $h_0$ を用いて、構造全体の見かけの応力  $\sigma_{app} = f/S$ およびひずみ $\varepsilon_{app} = d/h_0$ を定義して、応力-ひずみ 応答を評価した.

### 4. 結果と考察

作製した 27 種類の造形体のほとんどは、その応力-ひずみ曲 線の特徴から、(i)試料の全体が bistability を示す構造、(ii) 一部だけ bistability を示す構造、(iii) bistability を全く示さな い構造および(iv)不規則的な変形を示す構造の4種類に分類が 可能であった. Fig.4に示す構造は、格子構造を圧縮した後の 形状が安定化し、除荷しても圧縮されたままの形状が維持され



Fig. 5 Deformation behavior of a lattice structure which was partly bistable: (a) before the test, (b) deforming, (c) completely compressed, and (d) after the test. (e) Corresponding stress-strain curve.





Fig. 7 Deformation behavior of a lattice structure which exhibited amorphous-like behavior: (a) before the test, (b) deforming, (c) completely compressed, and (d) after the test. (e) Corresponding stress-strain curve.

た. これは、2.1 で述べた bistable 構造の特徴と一致する. こ れは曲り梁にて形状を回復しようとする応力と縦梁および横梁 にてたわみを抑制しようとする応力とがつり合うことで成立す る. この応力の釣り合いを乱すようなトリガーを設けること で、形状記憶効果を示すメタマテリアルの創製が可能となると 期待される.一方、Fig.5 に示す構造では、圧縮した後でも一 部の曲り梁は安定化するが、他の梁は形状を維持できずに元の 形状へと戻った. 試料の一部だけが bistable になった. Bistability を示さない構造でも、特徴的な圧縮・回復挙動が見ら れた. Fig.6 に示す構造は、圧縮後に除荷すると全ての曲り梁 の形状が回復した. これは、応力誘起変態で生成したマルテン サイト相がを除荷により母相に逆変態して形状が回復する超弾 **Table 1** Classification of deformation behaviors of cellular lattices designed with various combinations Q-values and the thickness of vertical beam  $(t_h)$ , and that of horisontal beam  $(t_h)$ . The symbols " $\bigcirc$ ", " $\triangle$ ", " $\times$ " and "Am" represents "Fully bistable", "Partly bistable", "Not bistable" and "Amorphous-like behavior", respectively.

		Q = 2			Q = 4			Q = 6		
		$t_v (\mathrm{mm})$			$t_v (\mathrm{mm})$			$t_v (\mathrm{mm})$		
		2	4	6	2	4	6	2	4	6
$t_h$ (mm)	2	×	×	×	×	×	×	Am	Am	Am
	4	$\times$	$\times$	×	×	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$	Am	$\bigcirc$	$\bigcirc$
	6	×	Х	$\times$	×	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$	$\bigcirc$

性材料の特徴と一致する. 超弾性を示す格子構造の応力-ひず み曲線を比較すると、梁の太さによって形状が回復するまでの 時間が異なり、梁が太いほど形状が回復するまでの時間が長く なった. 縦梁および横梁の細さを調整することで任意の超弾性 を示すメタマテリアルの創製が可能となる. さて, bistability および超弾性を示す格子構造では、変形が構造の端から生じ始 め、曲り梁に沿って連鎖するように変形が進む.これは、材料 学の視点から考えると、結晶中での変形の際に生じる原子のず れである「転位」が結晶の境界面に生じ, 原子がずれやすい 「すべり方向」に転位が伝播するという性質に類似する.一方, これら3種類とは異なり、曲り梁や縦梁が倒れ込むように大き くたわんで変形し、元の構造が崩れる試料があった(Fig.7). この格子構造は、元の規則性を失い不規則的に変形する、この ような挙動は、材料学における結晶構造を持たないアモルファ スに相当する.アモルファスはQが6の試料にのみ見られた. これは、Qを大きくすると縦梁の長さも大きくなり、曲り梁が 縦梁に与えるモーメントが大きくなるため縦梁および曲り梁が 大きくたわむことで生じると考えられる.アモルファスの変形 は、ハニカム構造の圧縮変形<sup>26)</sup>で見られる挙動に類似してい る.

 $Q, t_h$ および $t_v$ に対して,これらの分類を Table 1 にまとめ た. Qが4のとき、実験結果はthとtvの積によって変形挙動 が異なった.t<sub>h</sub>とt<sub>v</sub>の積が12以下の試料はbistableにならな かった.一方, taと taの積が16以上の試料は一部だけ bistable になったものと完全に bistable になったものがある.  $t_h$  と tvの積が16以上となった試料の中でも、tvが4mmの試料は 一部だけ bistable となり、t<sub>v</sub>が6mmの試料は完全に bistable となった. Qが6のときもQが4の時と同様に、実験結果は t<sub>h</sub>とt<sub>v</sub>の積で分類可能であった.t<sub>h</sub>とt<sub>v</sub>の積が12以下の試料 は不規則変形あるいは一部だけ bistable になったものに分類さ れる. thと tv の積が 12 以下の試料の中でも, th が 4 mm 以下 の試料はアモルファスとなり、 thが6mmの試料は一部だけ bistable となった. t<sub>h</sub>と t<sub>v</sub>の積が 16 以上の試料は完全に bistable になった. これらの分類は現時点では、実験事実に基づい た経験的なものである. 今後その理論的裏付を検討する必要が ある.

### 5. 今後の展望:多方向に bistable な新しい構造

これまでに紹介してきた bistable なハニカム構造は、一方向 にのみ形状変化する一軸 bistable であり、超弾性や形状記憶特 性の発現が制限され、様々な構造への適用が困難である. その 制限をなくした多方向に bistable となる多軸 bistable 構造を提 案する.

先に紹介した構造はハニカム構造に一軸 bistable 構造を組み 込んだ 2 次元的な構造であるが、ここで提案する構造は面心立 方格子(face-centered cubic:fcc)の四面体位置に着目してそ こに多軸 bistable 構造を組み込んだ 3 次元的な構造である.四 面体の各辺を、正弦波を用いて表すことで bistable 構造を組み 込み、1 方向だけではなく 4 方向に bistable である多軸 bistable 構造となる.正四面体の頂点に球をおき、それらを結ぶ辺 にあたる部分を 2 つの正弦波状の梁を組み合わせたものとす る.Fig.8 に1つの梁の模式図を示す.正四面体の頂点と重心 を結ぶ直線を一点鎖線で、正四面体の辺の中央と重心を結ぶ直 線を破線で示す.Fig.8 に示すように正弦波状の曲り梁がある 球から出て破線上で他の曲り梁と結合する.曲り梁の端部は、



Fig. 8 Schematic illustration of beam of multi-axis bistable structure.

曲り梁が出ている球の一点鎖線と平行である.この梁を四面体の辺に設ける.この際, Fig.9(a)に示すような梁の突起が四面体の重心に対して内向きである四面体とFig.9(b)に示すような梁の突起が外向きである四面体の2種類をfccの四面体位置とみなして配列する.

Fig. 10(a)の赤で示した四面体位置に内側突起の四面体構造を、青で示した四面体位置に外側突起の四面体構造を配置する.この場合、Fig. 10(b)に示すような単位格子が得られる.この構造は <111> 方向(Fig. 10(b)矢印)への圧縮変形において PXCM の変形で見られた転位のような変形が確認された.この構造やこれを改良した構造<sup>27)</sup>にて、bistable となる条件を解明し、これを制御することでより汎用性の高い超弾性および形状記憶特性のメタマテリアルの創製が可能であると考えられる.この新しい構造は、金属の結晶構造から着想を得て設計した AM by AM のコンセプトの具現化した好例である.

### 6. おわりに

PXCM は、その変形挙動と構造変化から以下にその特徴を 示す(i) fully bistable 構造、(ii) partically bistabile 構造、 (iii) non-bistable 構造、(iv) amorphous 構造の4種類に分類 できた.

(i)Fully bistable 構造: 圧縮した後の形状が安定化し,除荷 しても梁同士の応力の釣り合いにより圧縮されたままの形状が 維持される.この応力の釣り合いを乱すようなトリガーを設け ることで,形状記憶効果を示すメタマテリアルの創製が可能と なると期待される.

 (ii) Partically bistabile 構造: 圧縮した後でも一部の曲り梁は 安定化するが,他の梁は形状を維持できずに元の形状へと戻る.

(iii) Non-bistable 構造: 圧縮後に除荷すると全ての曲り梁の 形状が回復する.これは、応力誘起変態で生成したマルテンサ イト相が除荷により母相に逆変態して形状が回復する超弾性材 料の特徴と一致する.さらに、この構造は縦梁および横梁の細 さを調整することで任意の超弾性を示すメタマテリアルの創製 が可能となる.



Fig. 9 3D model of single tetrahedra element of multi-axis bistable structure. (a) Tetrahedra element whose protrusion on beams face toward the center of tetrahedron. (b) Tetrahedra element whose protrusion on beams face outwards of tetrahedron.

The Journal of 4D and Functional Fabrication No.1 (2020)



Fig. 10 Comparison of multi-axis bistable structure and face-centered cubic (fcc). ( a ) Schematic picture of (fcc) with red tetrahedron representing tetrahedra element whose protrusion on beams face inwards and blue tetrahedron representing tetrahedra element whose protrusion on beams face outwards. ( b ) 3D model of multi-axis bistable structure representing a unit cell of fcc.

(iv)Amorphous 構造:材料学における結晶構造を持たないア モルファスに相当し,ハニカム構造の圧縮変形で見られる挙動 に類似している.

一方向にのみ形状変化する一軸 bistable 構造の実用性を向上 させるべく,正弦波形状の辺を持った正四面体を,面心立方構 造(fcc)の四面体空隙位置に組み込んだ新規多軸 bistable 構 造を提案した.提案した構造は,四面体各面に垂直な4方向に bistability を示すことが期待される.

文中に記載のシステム名や製品名は各社の商標あるいは登録 商標である.

#### 参考文献

- E. Bayraktar, F.A. Khalid, and C. Levaillant, "Deformation and fracture behaviour of high manganese austenitic steel," Journal of Materials Processing Technology, **147**, pp. 145–154 (2004).
- M. Itoh, M. Kotani, H. Naito, T. Sunada, Y. Kawazoe, and T. Adschiri, "New Metallic Carbon Crystal," Physical Review Letters, **102**, 055703, pp. 1–4 (2009).
- S. Ogata, J. Li, N. Hirosaki, Y. Shibutani, and S. Yip, "Ideal shear strain of metals and ceramics," Physical Review B, 70, 104104, pp. 1–7 (2004).
- J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D.A. Genov, G. Bartal, and X. Zhang, "Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index," Nature, 455, pp. 376– 379 (2008).
- R.A. Shelby, D.R. Smith, and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction," Science, 292, pp. 77–79 (2001).
- 6) J.U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N.X. Fang, and Y. Lu, "Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications," Advanced Engineering Materials, 21, 1800864, pp. 1–37

(2019).

- X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, and Y.M. Xie, "Auxetic metamaterials and structures: a review," Smart Materials and Structures, 27, 023001 (2018).
- K.E. Evans and A. Alderson, "Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking," Advanced Materials, 12, pp. 617–628 (2000).
- S. Babaee, P. Wang, and K. Bertoldi, "Three-dimensional adaptive soft phononic crystals," Journal of Applied Physics, 117, 224903, pp. 1–9 (2015).
- K. Otsuka and X. Ren, "Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys," Progress in Materials Science, 50, pp. 523–527 (2015).
- 11) X. Yang, L. Mal, and J. Shang, "Martensitic transformation of Ti<sub>50</sub> (Ni<sub>50-x</sub>Cu<sub>x</sub>) and Ni<sub>50</sub> (Ti<sub>50-x</sub>Zr<sub>x</sub>) shape-memory alloys," Scientific Reports, 9, 3221, pp. 1-8 (2019).
- 12) K. Bhattacharya and R.D. James, "The Material Is the Machine," Science, 307, pp. 53–54 (2005).
- J. Qiu, J.H. Lang, and A.H. Slocum, "A curved-beam bistable mechanism," Journal of Microelectromechanical Systems, 13, pp. 137–146 (2004).
- M. Vangbo, "An analytical analysis of a compressed bistable buckled beam," Sensors and Actuators A: Phisical, 69, pp. 212-216 (1998).
- 15) B.A. Fulcher, D.W. Shahan, M.R. Haberman, C.C. Seepersad, and P.S. Wilson, "Analytical and Experimental Investigation of Buckled Beams as Negative Stiffness Elements for Passive Vibration and Shock Isolation Systems," Journal of Vibration and Acoustics, **136**, 031009, pp. 1–12 (2014).
- 16) H. Hussein, P. Moal, G. Bourbon, Y. Haddab, and P. Lutz. "Modeling and Stress Analysis of a Pre-Shaped Curved Beam: Influence of High Modes of Buckling," International Journal of Applied Mechanics, 7, 1550055, pp. 1–20 (2015).
- 17) H. Hussein, P.L. Moal, R. Younes, G. Bourbon, Y. Haddab, and P. Lutz, "On the design of preshaped curved beam bistable mechanism," Mechanism and Machine Theory, 131, pp. 204– 217 (2019).

- 18) M. Fujii, "4D and Functional Printing—The Creation of New Values beyond Dimensions—," Journal of the Imaging Society of Japan, 58, pp. 385–388 (2019) [in Japanese].
- T. Touma, "Complex of Parallel Crosses Structure," Journal of the Imaging Society of Japan, 58, pp. 406–414
- 20) M. Ueda, R. Matsuzaki, A. Todoroki, and Y. Hirano, "3D Printing of Mechanically Anisotropic Carbon Fiber Reinforced Plastic," Journal of the Imaging Society of Japan, 58, pp. 415–419,
- 21) R. Yuasa, "Design and Utilization of FDM Material," Journal of the Imaging Society of Japan, 58, pp. 420–423 (2019).
- D. Restrepo, N.D. Mankame, and P.D. Zavattieri, "Phase transforming cellular materials," Extreme Mechanics Letters, 4, pp. 52–60 (2015).
- 23) D.M. Correa, C.C. Seepersad, and M.R. Haberman, "Mechanical design of negative stiffness honeycomb materials," Integrating Materials and Manufacturing Innovation, 4, pp. 165–175 (2015).
- 24) D.A. Debeau, C.C. Seepersad, and M.R. Haberman, "Impact behavior of negative stiffness honeycomb materials," Journal of Materials Research, 33, pp. 290–299 (2018).
- 25) H. Yang and L. Ma, "Multi-stable mechanical metamaterials by elastic buckling instability," Journal of Material Science, 54, pp. 3509–3526 (2019).
- 26) L.J. Gibson, M.F. Ashby, and B.A. Harley, "Cellular Materials in Nature and Medicine," Cambridge university press (2010), pp. 34–43.
- 27) Y. Koizumi, S. Kanegae, and T. Fujita, "Microstructure Control in Metal Additive Manufacturing and Fabrication of Lattice Structures," Ceramics Japan, 55, pp. 10–14 (2020) [in Japanese].



### 鐘ヶ江壮介

2019年大阪大学工学部応用理工学科を卒業. 2019年大阪大学大学院工学研究科博士前期 課程に入学.材料学や金属冶金学で学んだ結 晶構造の変形挙動と力学的メタマテリアルに 見られる変形挙動の類似性に注目し,原子の 振る舞いを模擬した構造変化を示す格子等を Additive Manufacturing により実現する研 究に従事している.



### 奥川 将行

2019年大阪府立大学大学院工学研究科博士 課程を修了.2019年4月産業技術総合研究 所産総研・東北大数理先端材料モデリングオ ープンイノベーションラボラトリ(MathAM-OIL)産総研特別研究員着任.2019 年11月より大阪大学大学院工学研究科助教. 気相堆積法や金属3D積層造形などの非平衡 プロセスに注目して,形成される準安定な構 造・組織を制御するプロセス設計の研究に従 事している.



## 小泉雄一郎

1999年大阪大学大学院工学研究科博士課程 を修了.1999年10月大阪大学大学院工学研 究科助手着任(2007年4月より助教).2007 年3月マサチューセッツ工科大学客員研究員 (2008年3月迄).2010年4月東北大学金属 材料研究所准教授,2018年1月より大阪大 学大学院工学研究科教授.耐熱材料や生体材 料等の開発を主眼として,材料強度と材料組 織の関係に注目し,Additive Manufacturing に関する実験と計算機シミュレーションを融 合した手法による合金設計,プロセス設計の 研究に従事している.