

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号
特開2021-185268
(P2021-185268A)

(43) 公開日 令和3年12月9日(2021.12.9)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
B 2 2 F 10/18 (2021.01)	B 2 2 F 10/18	4 K O 1 8
B 2 2 F 10/36 (2021.01)	B 2 2 F 10/36	
B 2 2 F 3/16 (2006.01)	B 2 2 F 3/16	
B 3 3 Y 10/00 (2015.01)	B 3 3 Y 10/00	

審査請求 有 請求項の数 19 O L 外国語出願 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2021-131689 (P2021-131689)	(71) 出願人	507243142
(22) 出願日	令和3年8月12日 (2021.8.12)		アリゾナ・ボード・オブ・リージェンツ・
(62) 分割の表示	特願2018-510868 (P2018-510868)		オン・ビハーフ・オブ・アリゾナ・ステイ
	の分割		ト・ユニバーシティー
原出願日	平成28年8月26日 (2016.8.26)		Arizona Board of Re
(31) 優先権主張番号	62/210,041		gents on behalf of
(32) 優先日	平成27年8月26日 (2015.8.26)		Arizona State Unive
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)		rsity
			アメリカ合衆国、アリゾナ州 85257
			-3538、スコッツデイル、ノース・ス
			コッツデイル・ロード 1475、スカイ
			・ソングススイート 200
		(74) 代理人	100118902
			弁理士 山本 修

最終頁に続く

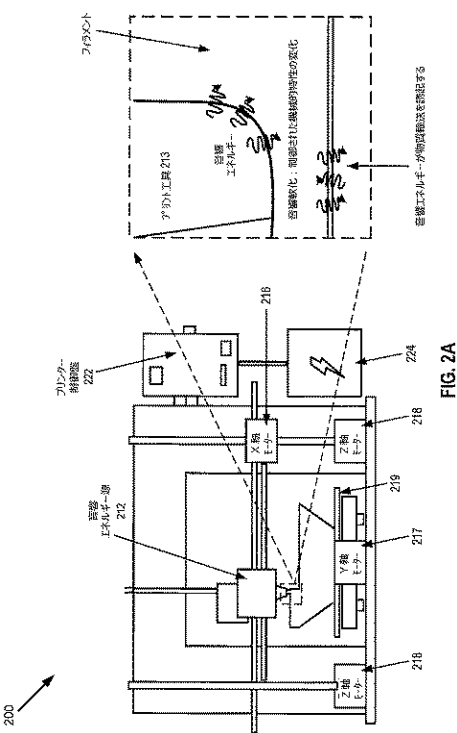
(54) 【発明の名称】 局所的な超音波増大した材料の流れと融合を利用する付加製造のための装置および方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 固体の (>95%) 金属材料の室温での3Dプリンティング (三次元造形) を達成するための方法を提供する。

【解決手段】 超音波フィラメントモデリング装置と方法を利用し、金属のフィラメントに振動工具が適用されてボクセルが形成され、機械的な変形ならびに層間および層内の物質輸送が誘起される。所望の構造をボクセル・バイ・ボクセルベースで構築することができる。加えて、加えられる超音波エネルギーを変化させることによって、得られる構造の微細構造を制御することができる。

【選択図】 図2A



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

金属の物体を 3 D プリントするための方法であって、前記方法は、

前記金属の物体を構成する一連の複数の層を形成すること、各々の層は金属のフィラメントから形成され、

各々の層を形成することは、前記金属のフィラメントと接触しているプリント工具に超音波エネルギーを加えることによって前記金属のフィラメントから一連の複数のボクセルを形成することを含み、前記プリント工具は 2 mm と 3 mm の間の厚さおよび 1 2 mm と 2 5 mm の間の長さを有する炭化タングステンの棒を含み、

前記金属のフィラメントと接触している前記プリント工具の一部は、前記超音波エネルギーに応答して 0 . 9 ミクロンと 1 . 1 ミクロンの間の振幅で振動し、

前記一連の複数のボクセルにおける各々のボクセルは、物質輸送によって前記ボクセルの層における隣接する複数のボクセルおよび前に形成された層における隣接する複数のボクセルに結合され、

ボクセルを形成している間に、前記金属のフィラメントの温度は摂氏 6 度未満だけ上昇し、

各々のボクセルは、2 0 0 マイクロ秒と 4 0 0 マイクロ秒の間の時間にわたって超音波エネルギーを加えることによって形成され、そして

前記一連の複数のボクセルを形成することは、室温において周囲大気の中で行われる、前記方法。

【請求項 2】

前記金属のフィラメントはアルミニウム、チタン、金、銀、銅、または鋼合金のうちの少なくとも一つを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記金属の微細構造を変えるために、複数のボクセルを形成する間に加える前記超音波エネルギーの強度を変化させることをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記プリント工具は炭化タングステンの棒を含み、そして前記プリント工具は 4 0 k H z と 2 0 0 k H z の間で作用する圧電性結晶に結合されている、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

付加製造のための方法であって、

金属ワイヤの第一の長さを金属の支持体と接触させること、

超音波エネルギーを加えることによって、第一の標的領域における前記金属ワイヤの第一の長さ内に材料の流れと固体状態での拡散を誘起させて、前記第一の標的領域の一部を前記金属の支持体に結合させること、ここで 2 mm ～ 3 mm の厚さ及び 1 2 mm ～ 2 5 mm の長さを有する炭化タングステンの棒を含む前記プリント工具によって前記金属ワイヤの第一の長さに前記超音波エネルギーが加えられる、および

前記プリント工具により超音波エネルギーを加えることによって、前記第一の標的領域と少なくとも部分的に重なり合っている第二の標的領域における前記金属ワイヤの第一の長さ内に材料の流れと固体状態での拡散を誘起させて、前記第二の標的領域の一部を前記金属の支持体に結合させること、ここで前記金属ワイヤの第一の長さ内の材料の流れと固体状態での拡散が、前記ワイヤにおける摂氏 6 °C 未満の温度上昇で起こる、を含む前記方法。

【請求項 6】

金属ワイヤの第二の長さを前記第一の標的領域および前記第二の標的領域と接触させること、および

プリント工具からの超音波エネルギーを加えることによって、第三の標的領域における前記金属ワイヤの第二の長さ内に材料の流れと固体状態での拡散を誘起させて、前記第三の標的領域の一部を前記第一の標的領域または前記第二の標的領域のうちの少なくとも一つに結合させること、

10

20

30

40

50

をさらに含む、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記金属ワイヤの第一の長さ内に材料の流れと固体状態での拡散を誘起させる間、前記金属ワイヤの第一の長さに 10 ニュートンの力が加えられる、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 8】

前記超音波エネルギーの供給源は約 60 kHz の周波数で作用する圧電性結晶であり、そして前記圧電性結晶と前記プリント工具は鋼のホーンを介して結合されている、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 9】

金属ワイヤの第一の長さ、金属ワイヤの第二の長さ、および金属支持体は同じ金属を含み、前記第一の標的領域、前記第二の標的領域、および前記第三の標的領域の合わせた密度は、前記純粋な金属の密度の 95 % を超える、請求項 6 に記載の方法。

10

【請求項 10】

前記支持体に結合した前記第一の標的領域の前記一部がボクセルを形成する、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 11】

所望の構造を形成するために、一連の複数のボクセルを繰り返して形成することをさらに含む、請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

前記一連の複数のボクセルのうちのひと組の複数のボクセルに加える前記超音波エネルギーの量を変化させて、前記所望の構造における前記金属の結晶粒の微細構造を制御することをさらに含む、請求項 11 に記載の方法。

20

【請求項 13】

前記方法は室温において周囲大気の中で実施される、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 14】

前記超音波エネルギーに応答して、前記プリント工具の自由端が 0.9 ミクロンと 1.1 ミクロンの間の振幅で振動する、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 15】

前記超音波エネルギーは 200 マイクロ秒と 400 マイクロ秒の間の時間にわたって加えられる、請求項 5 に記載の方法。

30

【請求項 16】

所望の構造を形成するために、前記第一の標的領域、前記第二の標的領域、または前記第三の領域の少なくとも一部を除去することをさらに含む、請求項 6 に記載の方法。

【請求項 17】

前記一連の複数のボクセルを形成することが、前記金属フィラメントに加えられた 10 ニュートンの力で実施される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 18】

前記金属フィラメントが結晶粒を含み、超音波を加えることに応答して、前記結晶粒が変形して亜結晶粒の形成を引き起こす、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 19】

40

前記一連の複数のボクセル中の一つのボクセル内での前記金属フィラメントの温度上昇が：

(i) 前記金属フィラメントの塑性変形からの体積的な熱の発生、

(ii) 前記金属フィラメントと前のボクセルの間の相対的移動からの摩擦熱の発生、および

(iii) 前記金属フィラメントの軸方向でのボクセルの周期的な剪断変形から起こる、請求項 1 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

50

本開示は付加製造に関し、そして特に、局所的な超音波増大した材料の流れと融合を利用する付加製造の方式に関する。

【背景技術】

【0002】

今のところ、付加製造への取り組み方は様々な障害に遭遇している。従って、改善された付加製造の装置と方法が依然として要望されている。

【発明の概要】

【0003】

本発明によれば、純粋な金属の少なくとも95%の密度を有する金属の物体を3Dプリントするための方法が提供され、前記方法は、前記金属の物体を構成する一連の複数の層を形成することを含み、各々の層は金属のフィラメントから形成され、各々の層を形成することは、前記金属のフィラメントと接触しているプリント工具に超音波エネルギーを加えることによって前記金属のフィラメントから一連の複数のボクセルを形成することを含み、前記金属のフィラメントと接触している前記プリント工具の一部は、前記超音波エネルギーに応答して0.9ミクロンと1.1ミクロンの間の振幅で振動し、前記一連の複数のボクセルにおける各々のボクセルは、物質輸送によって前記層における隣接する複数のボクセルおよび前の層における隣接する複数のボクセルに結合され、ボクセルを形成している間に、前記金属のフィラメントの温度は摂氏6度未満だけ上昇し、各々のボクセルは、超音波エネルギーを200マイクロ秒と400マイクロ秒の間の時間にわたって加えることによって形成され、そして前記一連の複数のボクセルを形成することは、室温において周囲大気の中で行われる。

10

20

【図面の簡単な説明】

【0004】

【図1】図1は典型的な態様に係る典型的な付加製造装置を示す。

【図2A】図2Aは典型的な態様に係る典型的な付加製造装置の操作を示す。

【図2B】図2Bは典型的な態様に係る平行層方式および直交層方式における典型的な付加製造装置の操作を示す。

【図2C】図2Cは典型的な態様に係る連続ステッチ方式における典型的な付加製造装置の操作を示す。

【図3A】図3Aは典型的な態様に従って単一のボクセルを堆積させるための典型的な付加製造装置の操作を示す。

30

【図3B】図3Bは典型的な態様に従って一对の隣接するボクセルを堆積させるための典型的な付加製造装置の操作を示す。

【図3C】図3Cは典型的な態様に従って隣接するボクセルの2層を堆積させるための典型的な付加製造装置の操作を示す。

【図4】図4は典型的な態様に係る連続ステッチモードにおける典型的な付加製造装置の操作の結果を示す。

【図5】図5は典型的な態様に係る直交層方式における典型的な付加製造装置の操作の結果を示す。

【図6A】図6Aは典型的な態様に係るスタンドアローンの金属付加製造プロセスとしての典型的な付加製造装置の操作の結果を示す。

40

【図6B】図6Bは典型的な態様に係る混成の付加・除去製造プロセスの一部としての典型的な付加製造装置の操作の結果を示す。

【図7A】図7Aは典型的な態様に係る典型的な付加製造装置の操作の熱的な特性づけを示す。

【図7B】図7Bは典型的な態様に係る典型的な付加製造装置の操作の熱的な特性づけを示す。

【図8A】図8Aは典型的な態様に係る典型的な付加製造装置の操作によって形成された材料の微細構造の特徴を示す。

【図8B】図8Bは典型的な態様に係る典型的な付加製造装置の操作によって形成された

50

材料の微細構造の特徴を示す。

【発明を実施するための形態】

【0005】

以下の説明は様々な典型的な態様にすぎず、本開示の範囲、適応性または構成をいかなるやり方によっても限定することを意図していない。むしろ、以下の説明は、最良の態様を含めて様々な態様を実施するための好都合な例示を提供することを意図している。明らかになるであろうが、これらの態様において説明された構成要素の機能と配置における様々な変更を、本開示の範囲から逸脱することなく行うことができる。

【0006】

簡潔にするために、付加製造、ワイヤボンディング、3Dプリンティング、および／または類似のものについての従来技術については、ここでは詳しくは説明しないだろう。さらに、ここに含まれる様々な図面に示された連結線は、様々な構成要素の間の典型的な機能上の関係および／または物理的あるいは通信上の結合を表すことを意図している。実際の付加製造装置および関連する使用方法においては、多くの代替的または付加的な機能上の関係が提示されうることを認識すべきである。

【0007】

ここ数十年間にわたって、三次元物体の「付加的な」積層を構築する考え方は、コンセプトの視覚化のためのラピッドプロトタイピングツールから末端使用者の工業部品を製造することが可能な現行の生産手段に移行し、そして製造業で大変革を起こすのみならず、物品をいかにして製造するかを根本的に定義しなおす方向に向けられている。この移行の影響は計り知れず、航空宇宙産業、自動車、生物医学、軍事、電子工学、消費財、食品、および個人用品など、人間としての経験の各層におそらく行き渡っている。現在、製造品質を伴ったポリマーの付加製造が入手可能かつ利用可能である。しかし、十分に高密度な金属の付加製造のための先行する取り組み方は、入手可能かつ利用可能であることからほど遠い。

【0008】

先行する金属付加製造プロセスには、バインダージェット法、超音波圧密化法（UC）、およびシート積層法（LOM）などの間接的方法と、選択的レーザー溶融法（SLM）、電子ビーム溶融法（EBM）、およびレーザー直接積層法（LENS）のような直接的方法が含まれる。間接的方法は、十分に高密度な部品を製造するためには後加工を必要とする。特定の加工法においては、金属粒子を結合させるために、金属粒子が部分的に溶融されるか、あるいは低融点結合剤が用いられる。従って、高い嵩密度の部品が求められる場合は、結合剤の除去、焼結または液体金属の浸透などの後加工の操作が必要となる。超音波圧密化法は混成の付加・除去プロセスであり、この場合、金属箔のシート（またはストリップ）が最初に超音波で溶接されてスタックにされる。次いで、金属のスタックを所望の層形状に付形するために、切削操作（しばしば、エンドミル削り）が用いられる。これら溶接と切削の操作を交互に行うことによって、三次元の物体が構築される。LOMはUCと同じく交互の付加と切削の操作に従うが、しかし、溶接工程はシートどうしの間に適用される接着剤によって置き換えられ、また製作後の焼結プロセスが必要な場合がある。

【0009】

さらに、先行する直接的な金属プロセスには、レーザーまたは電子ビームのいずれかによって金属粉末に加えられ熱によって生成する溶融プールの操作によって材料を溶融および結合させるための熱エネルギーの使用が伴う。造形物について得られる構造、形態、および微細構造は、微細溶接を行う際の熱物理的プロセスおよび熱移動プロセスに高度に依存する。これらの直接的な金属付加製造プロセスの別の明確な特徴は、出発材料としての微細な粉末（平均の直径で典型的に20ミクロン程度）の使用であり、またこのプロセスは、酸化、電子ビーム溶融の場合のビームの散乱、およびプロセスの危険性を防止するために、不活性ガスまたは真空の制御された環境の下で行われる。高品質の金属部品を製造することができるけれども、これらの特徴は技術的なコスト低減と利用し易さに対する

主要な障害となる。

【0010】

先行する方式の短所に対比して、ここで開示される典型的な態様は、周囲条件下で室温において実質的に十分に高密度の（例えば、固体金属の密度の95%以上の）金属物品を付加的に製作することを可能にする。様々な典型的な態様では、超音波フィラメントモデリング（UFM）プロセスを利用する。UFM法の作用原理は、ワイヤボンディングと熱溶解積層法の融合になぞらえることができる。ロードと層との間の冶金学的結合によって三次元物体を形成するために、固体金属のフィラメントが出発材料として用いられる。

【0011】

図1を参照すると、典型的な態様において、付加製造装置100はフィラメントモデリング部分110と制御部分120を含む。フィラメントモデリング部分110は、支持体の上にフィラメント（例えば、アルミニウム、チタン、銀、金、銅、鋼合金、金属・ポリマー混成物、および／または類似のもののうちの一つ以上で構成されるフィラメント）を供給し、そして堆積するように構成されている。制御部分120はフィラメントモデリング部分110の操作を管理し、それにより複雑な三次元構造物の形成を可能にする。

10

【0012】

図2Aおよび図2Bに示すように、幾つかの態様において、UFMの典型的な仕組みと細工の構成はFDMのプロセスに類似していて、FDMでは、加熱された熱可塑性樹脂の押出し機が三次元要素を構成するロードと層を直接「書く」。しかし、それとは違って、UFMにおいては、位置決め装置上の案内工具を用いて固体金属のフィラメントが誘導され、付形され、そして支持体（または前の層）ならびにボクセルごとに隣接するフィラメントに冶金的に結合される。

20

【0013】

当業者であれば、UFMプロセスの重要な側面または特徴は以下のことであると認識するであろう：（1）フィラメントを所望のロードの幾何学的配列に「付形する」のに要する機械的応力（従って、機械的エネルギー入力）は、加えられる超音波振動の存在下で、材料の降伏強度と比べて大幅に（50%未満）低減される、（2）冶金学的結合を形成するために相互のフィラメントの界面および相互の層の界面を横切って観察される物質輸送の量は、その観察される条件下でフィックの拡散によって予測されるよりも10000倍を超えるほど多い、そして（3）UFMプロセスの温度上昇はほとんど無視してよく、これは、音響エネルギー入力から必要な可塑性と物質輸送への高い結合効率を反映するものである。これらの独特な特徴が、ここで開示される超音波フィラメントモデルのプロセスを、デスクトップの3Dプリンティング環境の中で実行し、ならびに高精度で高忠実度の工業上の付加製造環境の中で実行することを可能にする。加えて、室温における十分に高密度な金属の3DプリンティングのUFMの独特な性質は、ポリマーと金属の同時の造形を可能にする（これは、溶融・融合に基づく金属付加製造のプロセスにおいては実行可能ではない材料の組み合わせである）。

30

【0014】

ここで図2Aおよび図2Bを参照すると、典型的な態様において、付加製造装置100（例えば、付加製造装置200）は、音響エネルギー源212、x軸モーター216、y軸モーター217、少なくとも一つのz軸モーター218、プリンター制御盤222、および出力源224を含む。付加製造装置200はまた、上に3Dプリントされる物体を堆積させるのに用いるためのビルドプレート219を有していてもよい。ビルドプレート219は決まった位置に固定されていてもよく、あるいはx、y、およびzの次元に移動可能および／または回転可能であってもよい。

40

【0015】

典型的な態様において、付加製造装置200は音響エネルギー源212における超音波振動源を利用する。さらに、音響エネルギー源212には、フィラメントを誘導し、そしてそこへ音響エネルギーを運ぶのに用いるためのプリント工具213がさらに含まれていてもよい。音響エネルギー源212にはさらに、60kHzの周波数で振動する圧電性結

50

晶に結合されたステンレス鋼のホーンが含まれていてもよい。音響エネルギー源 212 は、所望の量の超音波エネルギー、例えば、5 ワット、10 ワット、15 ワット、および／または類似のエネルギーを供給することができる。アルミニウムのボクセルへ供給される超音波エネルギーは、例えば、変動可能な振幅および時間によって変調される。ステンレス鋼のホーンの末端にプリント工具 213（例えば、炭化タングステンまたはその他の適当な耐久性のある材料で形成されたもの）があって、これがフィラメント（例えば、300 μm の直径の 99.99% Al）からのボクセルを誘導し、そしてそれを形成する。超音波エネルギーの入力の変調に加えて、金属のフィラメントが支持体または存在する層の上を押圧する力も制御することができる。

【0016】

プリント工具 213 は刃、針、円柱、長方形、厚板、またはその他の適当な形状を有していてもよい。プリント工具 213 は任意の適当な寸法および／または材料で構成されていてもよく、例えば、プリント工具 213 に加えられる約 60 kHz の超音波振動に応答してプリント工具 213 の自由端において約 1 ミクロンの振動の振幅が達成されるように設計されたアスペクト比を有する。一つの典型的な態様において、プリント工具 213 は約 3 mm の幅および約 12 mm と 25 mm の間の長さを有するように構成されている。別の典型的な態様において、プリント工具 213 は約 2 mm の幅および約 12 mm の長さを有するように構成されている。さらに、プリント工具 213 の寸法は、例えば、付加製造装置 200 において用いられる金属フィラメントの寸法、金属フィラメントを構成する特定の金属または合金、および／または類似のことに基づいて、要望されたとおりに選択および／または調整されることが認識されよう。様々な材料に適応させるために、そして／または堆積される材料について様々な特性を達成するために、特定のプリント工具 213 は付加製造装置 200 から取り外し、そして別のプリント工具 213 に取り換えることができる。

【0017】

典型的な態様において、付加製造装置 200 の操作は、（例えば、一つ以上のモーター 216、217、または 218 の運転によって）フィラメントを誘導するプリント工具 213 を望ましいボクセル位置に持ってきて、フィラメントを決まった位置に僅かな圧力で保持することによって開始される。配置したならば、プリント工具 213 によってフィラメントに超音波エネルギーが供給される。プリント工具 213 によって加えられる力と超音波エネルギーの照射の組み合わせによって、プリント工具とフィラメントの接触によって画定されるフィラメントの部分が形成され、そして支持体または存在する層の上で融合して、ボクセルが形成する。このプロセスは、所望の「ロード」が完成するまでプリント工具 213 が金属フィラメントの軸を下降するときを繰り返される。各々のボクセルは、前および後続のボクセルおよび隣接するロードにおけるボクセルと重なり合ってもよい。次いで、このプロセスは、所望の構造物が形成されるまで、各々のロードおよび各々の層について繰り返される。様々な典型的な態様において、付加製造装置 200 は、入力、フィラメントの材料、その他に応じて、目標の構築速度（例えば、0.2 $\text{mm}^3/\text{秒}$ 、0.3 $\text{mm}^3/\text{秒}$ 、および／または類似の速度）を達成することができる。

【0018】

典型的な態様において、付加製造装置 200 は、十分に高密度の金属フィラメントに音響エネルギーを加え、フィラメントを誘導し、そして 3D プリンティングのために望ましいボクセルの付形と材料の融合を誘発させるように機能する。音響エネルギー源 212 は、約 60 kHz（さらに広く言えば、約 40 kHz と約 200 kHz の間）の周波数で発振する圧電性結晶をベースとする変換器を利用する。UFM プロセスを行う間に、プリント工具 213 は、図 2A～2C に示されるような固体フィラメント（例えば、固体アルミニウム、300 ミクロンの直径、純度 99.99%）と存在する表面との間の界面に超音波エネルギーを伝える。フィラメントを付形し、そして金属と金属の界面で冶金的結合を形成させるために超音波エネルギーが用いられると、プリント工具 213 はフィラメントの長さだけ後退し、それにより、（例えば、幅が約 600 ミクロンで高さが約 125 ミク

10

20

30

40

50

ロンの寸法の) 固体金属の「ロード」が形成する。次いで、一つの層を構成する隣接するロードを付形するためにこれらの行程が繰り返され、それに続いて、ロード方向と層方向の各行程を繰り返すことによって、三次元の物体が形成される。図4に示すものは、典型的なUFM方式に従って構築された2層の構造物の走査型電子顕微鏡画像である。これらの画像は、隣接するロードについてのフィラメントのロードの成形ならびに冶金結合を示している。ロードと層の中間に識別可能な空隙は認められない。

【0019】

プリンター制御盤222は、付加製造装置200の運転を制御するために、何らかの適当な電子的構成要素、例えば、マイクロプロセッサ、抵抗器、コンデンサ、誘導子、トランジスタ、ダイオード、発光ダイオード、スイッチ、トレース、ジャンパー、フューズ、増幅器、アンテナなどで構成されていてもよい。幾つかの典型的な態様において、付加製造装置200はパーソナルコンピュータ上で操作できるソフトウェアプログラムへの連結を介して制御可能である。

10

【0020】

幾つかの典型的な態様において、付加製造装置200はx軸モーター216、y軸モーター217、およびz軸モーター218を利用する。これらのモーターは、所望により付加製造装置200の構成要素(例えば、プリント工具213および/またはビルドプレート219)を配置および/または移動させるために機能することができる。しかし、付加製造装置200の関連する部分の移動、回転、および/またはその他の動きのためのいかなる適当な構成要素または装置であっても、本開示の範囲内のものであると考えられる。

20

【0021】

ここで図4を参照すると、付加製造装置200を「連続ステッチ」のモードで運転することができ、これにより、個別のボクセルが連続して形成される。このモードにおいては、ビルドプレート219および/またはプリント工具213はボクセルどうしの間でX、Y、またはZの各次元に移動することができるが、しかし、最も一般的には、隣接する複数のボクセルからなる単一の線状の「ロード」が形成され、次いで、隣接するロード、そしてその次のものが形成されるだろう。図4は、得られた高品質の層間およびフィラメント間の結合を例示している。

【0022】

次に図5を参照すると、第1の層のボクセルの「ロード」が第2の隣接する層であるボクセルの「ロード」と直交するようなモードで付加製造装置200を運転することができる(これは例えば、層どうしでのビルドプレート219の回転によって、プリント工具213の再配置によって、および/または類似のことによって行われる)。図5は、A1100(99.9%)アルミニウムからこのやり方で形成された0.11mmの層厚と2mm×2mmのフットプリントを有する典型的な18層の構造を例示している。この場合もまた、得られた材料の高い品質が明らかである。

30

【0023】

ここで図3A、3B、および3Cを参照すると、典型的なボクセルまたは付加製造装置200の操作によって形成されたボクセルの顕微鏡写真が示されている。図3Aは、1.5mmの長さの構成物であって0.15mmの厚さを有する連続して結合したボクセルを例示している。図3Bは、2つの隣接する1.5mmの長さの構成物であって0.15mmの厚さを有する連続して結合したボクセルを例示している。図3Cは、隣接する1.5mmの長さの第1の層の構成物であって0.15mmの厚さを有する連続して結合したボクセルと、その上にある隣接する1.5mmの長さの第2の層であって0.15mmの厚さを有する連続して結合したボクセルを例示している。

40

【0024】

スタンドアローンの3Dプリンティングのプロセスとしての典型的なUFM方式の実行可能性をさらに証明するために、付加製造装置200の操作によってL形状の三次元物体が首尾よく造形された。図6Aに示すように、この物体は5mmの長さ、4mmの幅、およびおよそ1.5mmの高さと、約125ミクロンの層の高さを有している。

50

【0025】

さらに、UFMは混成の付加・除去製造プロセスとして利用することができる。ここで図6Bを参照すると、16層のアルミニウム構造物を3Dプリントし、そして引張り試験片の形状の物体に切削加工したが、これを写真撮影して図6Bに示す。サンプルの中央部分についてのX線マイクロトモグラフィの結果が得られ、一つの代表的な切片を図6Bに示す。UFM造形したサンプルのマイクロCT走査画像において、層間の界面は識別可能であるが、一方、フィラメント間の界面は認められない。95%を超える密度が認められる。

【0026】

著しい加熱を必要とする先行する金属付加製造プロセスと比較して、本開示の典型的なUFMプロセスは著しい熱を発生させない。ここで図7Aおよび7Bを参照すると、UFMの典型的な態様と関連する温度上昇を定量化するために、表面温度の高解像度IRイメージングと熱電対探針を用いることができる。図7Aでわかるように、高速度IRビデオカメラ撮影によって、一つのボクセルの形成についての最大の温度上昇は5度未満であることが示されている。図7Aにおいて、ボクセルが形成する間に捕捉された熱ビデオの一つのフレームは、最大温度に達した時点でのボクセルの近傍における空間温度分布を示している。

【0027】

同様に図7Bに示すものは、フィラメントと支持体の界面における温度についての典型的な時間の進展である。重要なフィラメントと支持体の界面における温度についての時間の進展は、超音波エネルギーを加えることの30マイクロ秒以内にボクセルの融合が始まり、一方、ボクセルの付形は、ボクセルの加工時間が続くときに進展し続ける、ということを示している（図7Bにおいて、超音波振動の照射は50番目のマイクロ秒において開始する）。二つの表面の間の相対的な移動は摩擦熱を与え、その結果、急激な温度上昇が起こる。プロセスでの次の30マイクロ秒において、冶金的結合が形成し始め、そしてフィラメントと支持体の間の相対的な移動は停止する。これによって摩擦熱の源は除かれ、そして界面の温度が降下する。約5度の最大の温度上昇が観察される。例示する時間的な温度プロフィールにおける別の特徴は、約350マイクロ秒における急激な低下であり、このとき超音波振動が停止する。このことは、プロセスにおける第二の熱源の除去を示している。すなわち、ボクセルが形成するときのボクセルにおける高頻度の周期的な剪断変形による周期的な塑性ひずみによる加熱である。操作において、付加製造装置200は適当な長さの時間（例えば、100マイクロ秒、200マイクロ秒、320マイクロ秒、400マイクロ秒、550マイクロ秒、および／または類似の時間）にわたってボクセルに超音波エネルギーを与えることができる。

【0028】

典型的なUFMの装置と方法は、金属の微細構造に影響を及ぼすように用いることができる。付加製造装置200の操作に関して、金属組織学的なサンプルの調製と原子間力鏡検法を用いて、次の三つの状態におけるボクセルの断面（フィラメントの軸に対して垂直な断面）の特徴づけを行うことができる：（i）未加工で未使用のアルミニウムのフィラメント、および（ii）および（iii）プリント工具213の0.96ミクロンおよび0.98ミクロンの振動振幅に相当する二つの異なるレベルの超音波エネルギーの入力を用いて形成されたアルミニウムのボクセル。付加製造装置200はプリント工具213について任意の適当な振動振幅（例えば、約0.9ミクロンと約1.1ミクロンの間の振動振幅）を用いるように構成することができるということが、認識されよう。図8Aおよび8Bに要約する結果は、UFMプロセスを行うときの微細構造の明白な展開を示している。図8Aは低い超音波出力（これは0.96ミクロンの振幅に相当する）の設定において形成されたアルミニウムのボクセルの微細構造、そして図8Bは高い超音波出力（これは0.98ミクロンの振幅に相当する）の設定において形成されたアルミニウムのボクセルの微細構造をそれぞれ示していて、両者とも300マイクロ秒の超音波照射時間におけるものである。

10

20

30

40

50

【0029】

未使用のフィラメントはおよそ10ミクロンの平均の結晶粒度を示すが、しかるに、図8Aおよび8Bに例示する形成したボクセルは両者とも初析結晶粒の中での亜結晶粒の形成を示している。結晶粒度の分析によって、初析結晶粒はほぼ同じサイズのままであることが示される。それらは、ボクセルにおける塑性ひずみの結果として変形した。さらに、低い超音波エネルギー入力において、亜結晶粒は1.4ミクロンの平均サイズを有するが、一方、大きくした超音波入力における平均の亜結晶粒サイズは0.9ミクロンに低下する。従って、付加製造装置200は、プリント工具213に供給される出力に基づいて亜結晶粒の組織を設計および／または制御することを容易にし、得られる組織の特性に関しての大きな制御を可能にする。

10

【0030】

付加製造装置200の操作は、本明細書において初めて確認された物理的現象を利用する。第一に、UFMプロセスは結晶質金属について十分に認められた超音波軟化を利用する。音響軟化の効果は1950年代に最初に確認されたが、これは、転位や結晶粒界のような格子欠陥に集中した音響エネルギーの結果としての転位の迂りのために低下した活性化エネルギーによるものであると考えられている。観察される軟化および残留硬化の効果を音響エネルギーの入力に関する定性的条件と関連づけるための経験的關係が誘導されている。加えて、音響軟化の観察結果を説明するために、修正された塑性モデルが開発され、そして用いられている。UFMプロセスにおいて観察される材料の軟化は、文献に記録されているものと矛盾しない。

20

【0031】

さらに重要なこととして、付加製造装置200は、本明細書において初めて開示される第二の新規な機構を利用するものであり、それは、(1秒未満の)短い時間内での(数百ナノメートルの)大きな空間領域にわたる結晶格子レベルでの(4~6桁の大きさの)大幅に増大した物質輸送を包含する。UFMプロセスおよび／または付加製造装置200によって利用されるこの第二の現象は、kHzの周波数範囲での超音波振動の存在下での材料の界面を横切る大量の物質輸送を含むが、しかし、温度上昇は限定されている。前の現象はワイヤボンディングにおいても観察され、また最近では超音波圧密化法(UC)において観察されているが、しかし、大量の温度の増大を伴う。それに対して、付加製造装置200は、顕著な温度上昇を伴わずに著しい物質輸送をもたらす。

30

【0032】

様々な典型的な態様において、UFMにおいて用いられるアルミニウムのボクセルに照射される超音波の出力密度は、測定および／または計算された振動の振幅、ボクセルの幾何学的形状、およびプロセスのパラメータに基づけば、 160 W/cm^2 以上に達する。本開示の原理については、空孔の量子拡散の理論が、付加製造装置200によって達成される向上した物質輸送についての可能性のある解釈であると考えられる。

【0033】

プロセスの温度は上昇する。UFMプロセスにおける温度上昇の理由は、図7Bに示される時間的な温度の進展において捕捉される三つの熱源に帰することができる。すなわち、(1)ボクセルが形成する間のフィラメントの高さの変化と関連する大量の塑性変形からの体積的な熱の発生、(2)フィラメントと支持体(あるいは、すでに存在するフィラメントの表面)との間の周期的な相対的移動によって発生する摩擦熱、および(3)フィラメントの軸方向でのボクセルの周期的な剪断変形である。ボクセルの高さの変化と関連する塑性変形による体積的な熱の発生は、線形変形の間に行われる機械仕事を最初に計算することによって見積もることができる。

40

【0034】

【数 1】

$$W_p = \int_{h_0}^h area \times \sigma_y \times \delta h$$

(式 1)

【0035】

10

ここで、 $\sigma_y = \xi K \varepsilon_p^n$ は変形応力であり、 ξ は超音波エネルギーによる軟化係数であり、 ε_p は塑性ひずみであり、そして K および n は材料定数である（例えば、アルミニウムについては、これらは、 $K = 155.65 \text{ MPa}$ 、および $n = 0.2123$ として得られる）。 ξ を 1 と仮定すると、ボクセルの形成についての全機械仕事は $W_p = 0.01 \text{ J}$ である。アルミニウムについては、塑性ひずみのエネルギーのおよそ 30% は熱として散逸し、残りは格子における欠陥の中に蓄えられる、ということが示されている。想定される典型的な態様において、ボクセルの形成のプロセスは約 300 ミリ秒にわたって行われることを考慮すると、このことは、ボクセルの形成における圧縮ひずみはアルミニウムのボクセルが形成する間に発生する体積的な熱の 0.01 W 未満となることを意味する。

【0036】

20

熱の発生の第二の源は、ボクセルと支持体との間またはボクセルとプリント工具 213 との間の相対的な移動からの摩擦熱である。プリント工具 213 とボクセルとの間で迂りが無いと仮定した場合、これは次のようにモデル化することができる：

$$Q_f = \mu F U \quad (\text{式 2})$$

ここで、 μ はボクセルと支持体の接触についての摩擦係数であり、また U はそれらの相対的な移動の速度で、これは $U = 4 A f$ (式 3) で近似され、ここで A は振動の振幅であり、 f は振動の周波数であり、そして F は接触力である。

【0037】

アルミニウムを用いての付加製造装置 200 の典型的な操作において、接触力が約 10 N で、振動の振幅が約 0.98 ミクロンで、そして周波数が約 60 kHz のとき、冶金的結合が 30 マイクロ秒で形成して、ボクセルが形成することになる。超音波振動を付与する下でのアルミニウムのフィラメントとアルミニウムの支持体との界面について、ボクセルが形成する際には 0.3 の摩擦係数が想定される。これらの値に基づいて、フィラメントと支持体との接触についての合計の摩擦熱の発生量は約 0.7 W であると計算される。

30

【0038】

熱の発生の第三の要素は、ボクセルが体積的な熱として散逸する際の周期的な変形による塑性ひずみとして生じる。典型的な態様において、プリント工具 213 とボクセルとの接触における振動の振幅は 0.98 ミクロンである。これはまた、振動の所定のサイクルにおけるボクセルの表面上での最大の変位でもある。ボクセルが形成する間に生じる総計の剪断ひずみは 0.33% から 0.83% まで変化する。この典型的な態様において用いられるアルミニウムについて、ボクセルが塑性変形し始めるひずみは 0.13% である。従って、各々の振動サイクルにおいて塑性ひずみによる加熱に寄与するひずみの量は 0.2% から 0.7% まで変化する。30% の熱の散逸の分割およびこの典型的な UFM プロセスの運転の頻度を考慮すると、ボクセルが形成する間の周期的な塑性変形による平均の総計の熱発生量は約 0.75 W である。

40

【0039】

微細構造の進展。付加製造装置 200 によって形成されるアルミニウムのボクセルの微細構造は、アルミニウムの動的回復において一般的に観察されるものに類似する微細構造を示す。動的回復は、熱間加工条件 ($T > 50\% T_m$) において $\varepsilon = 40$ 未満のひずみにおいて起こりうる。この挙動は典型的に、アルミニウムやチタンのような高い積層欠陥を

50

有する材料において見いだされる。一つの明確な特徴は、転位が初析結晶粒の中で蓄積するときに小傾角粒界が形成する結果として、初析結晶粒の中で亜結晶が形成することである。

【0040】

例えば、付加製造装置200において実施されるようなUFMにおいて、同様の微細構造の進展が観察される。しかし、付加製造装置200の操作は室温 ($T < 5\% T_m$) において行われ、そしてボクセルにおいて生じるひずみの量はおよそ $\varepsilon = 1$ である。加えて、本開示の原理は、ボクセルへの超音波エネルギーの入力が増大するにつれて、この微細構造の進展のプロセスが起こる度合いが増大する、ということを想定している。従って、UFMにおいて観察される微細構造の進展の背後にある駆動機構は動的回復における機構とは異なるけれども、超音波エネルギーの入力への微細構造の依存性を示す傾向は、加工温度が増大するにつれて亜結晶粒のサイズが低下するような動的回復が観察される傾向と類似する。従って、エネルギー論の観点からの付加製造装置200の操作に関しては、この傾向は、超音波エネルギーの照射によって材料の格子が高いエネルギー状態に到達することを可能にすることを示唆していて、そのような高いエネルギー状態においては、転位の跳び移りと合体による動的回復が容易に起こりうる（このとき、材料の温度が著しく上昇するように見えるが、しかし実際には材料の温度は著しくは上昇しない）。

10

【0041】

付加製造装置200は、形成される物体の微細構造を操作するために、超音波エネルギーの入力へのこの挙動の依存性を利用するように構成される。付加製造装置200は、この能力を利用および／または開示する最初のシステムであると考えられる。金属の3DプリンティングのプロセスとしてのUFMの趣旨において、プロセスの入力への材料の微細構造のこの依存性は、プロセスの物理を理解し制御することによって構築のプロセスを行う際に、3Dプリントされる部品の機械的性質を付加製造装置200によってリアルタイムで制御および調整することができる、ということを意味する。

20

【0042】

ここで再び図7Aを参照すると、付加製造装置200の操作の特徴づけを行うために、UFMにおけるボクセルの形成のIRイメージングのためにFLIRA6751カメラを用いることができる。イメージングの頻度は適当な速度（例えば、125.6Hz）とすることができる。表面の反射能を低減するために、炭化タングステンのプリント工具213の一部の上に黒いポリマーフィルムを用いてもよい。支持体の表面の温度を測定するために、例えば、ボクセルの中央から0.9mmおよび4.3mm離れた位置において、熱電対を用いてもよい。

30

【0043】

図8Aおよび8Bに戻ると、付加製造装置200の操作によって、二つの異なる超音波出力のアルミニウムのボクセルがアルミニウム1100の支持体の上に形成され、この形成されたボクセルの微細構造が検査された。支持体上にボクセルが形成された後、標準的な金属組織学的手順に従って、それらの断面が調製された。サンプルを320粒度の炭化ケイ素の研磨ディスクで研磨し、次いで、600粒度の炭化ケイ素の研磨ディスクで研磨した。6μmの多結晶ダイヤモンド粒子を用い、次いで0.05μmのアルミナスラリーを用いて、さらなる研磨を行った。それぞれの研磨工程の間で、超音波脱イオン水浴の中でサンプルを洗浄した。研磨処理の後、25mlのメタノール、25mlのHCl、25mlの硝酸、および1滴のHFを含むエッチング液の中でサンプルをエッチングした。エッチングしたサンプルをブルカーのマルチモード原子間力顕微鏡（AFM）で検査し、それにより図8Aおよび8Bに示すようにアルミニウムのボクセルの微細構造を明らかにした。

40

【0044】

さらに、本開示の原理は金属とポリマーの櫛歯状材料の製作への変形的な取り組み方についての知識の基礎を発展させるものであり、その製作において、金属成分とポリマー成分からなる材料と空間構造を設計し、実行し、そしてボクセル対ボクセルベースで特徴づ

50

けることができる。この方式の核心には、超音波による金属の結合と熱によるポリマーの融合の並行付加製作プロセスが存在する。音響軟化と音響振動によって増大される固体状態での拡散の遂行により、金属・ポリマー不均質材料の金属成分を、上で開示したようにしてボクセルごとに空間的に形成することができ、一方、熱融合プロセスによりポリマー成分の位置が充填される。二つを交互に行うことにより、空間および組成の不均質性を様々な規模で達成することができる。これらの典型的なやり方において、付加製造装置は、金属の堆積において用いるための第一の手段（例えば、プリント工具 2 1 3）とポリマーの堆積において用いるための第二の手段（例えば、ノズル）を備えるように構成することができる。

【0045】

ここに開示されるポリマー・金属不均質材料のための変形的な熱音響付加製造への取り組み方は、櫛歯状材料と製造の領域において直面しているプロセスの非効率さと材料の不安定さという難題に対処するものである。例えば、微調整された機械的、物理的および電気化学的な特性を有する新規な金属・ポリマー複合材料の配列は、システムの全体的な重量とコストを低減することができて、また位置上、用途上および要件上の特異性を複合材料に与えることによってそれらの性能を改善することができて、第二に、この開示される取り組み方についてのリアルタイムの材料特性のモニタリングと制御要素は、製造プロセスならびに製品品質をモニターし、そしてその構築プロセスが行われる間にそれらをリアルタイムで調整することを可能にすることによってシステムの信頼性を高めることができ、第三に、この開示される取り組み方は、金属に対して音響エネルギーを用い、そしてポリマーに対しては熱エネルギーを用い、それにより材料の変形と結合を達成する。エネルギー源のこの独特な組み合わせはエネルギーの効率的な使用を可能にする。付加式の取り組み方の「必要に応じた材料」の特質との組み合わせは、構成部品と装置の製造コストを低減し、そして（例えば、宇宙特務飛行のための）予備部品または交換部品の機内での設計と製作の能力を与える。

【0046】

ポリマーをベースとする不均質材料は、強度対重量比、空間上の制約、および全体的なシステムのエネルギー効率のような性能上の要件が重要である宇宙航空工学における広範囲の重要な用途において、従来の単一相材料よりも望ましいものになりつつある。これらの望ましい用途の中でも、宇宙用途におけるロボット工学と人間支援の分野において有効な材料系であるイオン交換ポリマー・メタル複合体（IPMC）の開発は、現在の開発の重要な領域を代表するのみならず、将来に宇宙探査が具体化したときに重要な役割を演じる。しかし、ポリマーの化学における新たな打開策の必要性に加えて、理論的に予想される性能と要求される信頼性を備えている実際のデバイスを構築することに対する障害が、最終製品の材料と空間的な構成を正確に計画し、実行し、そして制御すること（閉回路の混成金属・ポリマー実用製品の直接生産）ができるような製造のやり方を欠いた状態で、これまでに存在していた。

【0047】

現行のポリマーと金属の直接デジタル製造（DDM）のシステムは、用いられる出発材料の形態、すなわち、液体、固体のフィラメントまたはフィルム、および粉末、によって三つのタイプに大まかに分類することができる。液体の光硬化性ポリマーはポリマーDDMにおいて用いられるだけであるが、金属AMシステムでは、層ごとの三次元部品のための材料を選択的に溶融して融合させるために熱エネルギーを用いる。選択的レーザー溶融法（SLM）あるいはレーザー直接積層法（LENS）のようなプロセスは、一般的ではあるが、高い装置および運転のコスト、低いエネルギー効率と粉末の再利用率、ならびに金属粉末を用いて作業することに関連する健康上のリスクを伴う。NASAによって最初に開発された電子ビーム自由形状造形法（EBF3）では、電子ビーム溶接と同じ原理で作業を行う。溶融金属池の3Dパスを操作することによって、高い真空環境下で固体の造形化が達成される。このプロセスが直面する重大な難題は、プロセスの精度とプロセスの規模拡大の困難さである。これらの取り組み方は、混成金属・ポリマー付加製造プロセス

がこれまでに何故達成されなかったか、という基本的な問題を提示する。それは、溶融に基づく金属AMプロセスとポリマープロセスとの、それらの大きな加工温度の相違による不適合によるものである。

【0048】

超音波付加製造法は、金属箔の層の超音波溶接とCNCフライス削りを交互に行い、それによってニアネットシェイプ部品とネットシェイプ部品を製造するプロセスである。このプロセスは金属の音響軟化と固体状態での拡散の増進を利用し、それにより金属箔の層どうしの間での応力の無い冶金結合を形成し、次いで、各々の層において機械削りを行い、それにより層ごとに部品を形成する。従来の製造法と進歩した製造法を組み合わせた優れた例ではあるが、このやり方によれば大量の廃棄物が生じ、また箔の原材料の使用は金属とポリマーの同時使用を不可能にする。微細押出しに基づく付加造形法および電気力学的噴射のようなインク小滴造形法は、ナノ（あるいはミクロ）製造のコミュニティによって現在開発中のプロセスである。これらのプロセスによれば、混成金属・ポリマー不均質材料を製造することができ、また造形のための金属粒子とポリマー系との混合物を利用し、それにより最終製品について必要な電気的性質が得られる。しかし、最終製品の機械的性質は、構成金属の部品の性質よりもずっと劣っている。加えて、最終製品における造形した金属のパーティクルトレースは典型的に、所望の電気的性質を得るために熱加工を受ける必要がある。

10

【0049】

現行のDDM法の最も重大な問題の一つは、それらが稼働する「開ループ」の性質である。典型的に、DDMプロセスは、それがSLA、FDMのいずれであっても、あるいは他の物であっても、構成要素の材料特性のような構築物の特性についての情報を何ら受け取らず、また装置への損傷が防がれるように、構築のプロセスを終了させるための力や衝突のようなパッシブシステムのレベルの信号の検知のみを抛りどころとしている（例えば、SLA装置およびSLS装置における「ワイパー」）。この機構は、装置がプロセスを停止させる前にそれらの規定された機能を達成することに対する閾値抵抗を装置における可動要素が受ける程度まで製品の中の欠陥が蓄積する必要がある場合には、効果的ではない。この点において、構築のプロセスを再開させるためには人間の介入が必要であり、損傷した構築物における材料は回復させることができない。もっと重要なこととして、この機構は製品の寸法、欠陥、または材料の特性についての情報を何ら与えない。品質の制御は製作後にしか行うことができない。

20

30

【0050】

多重スケールのポリマー・金属不均質材料の設計と製作への現行の付加製造プロセスの適用を妨げている多くの問題に対処するために、本開示の原理は、金属とポリマーの各成分物質からなる材料と空間構造を設計し、実行し、そしてボクセル対ボクセルベースで特徴づけることができるような変形的な金属・ポリマー混成付加製作の方式を想定するものである。

【0051】

この新たな方式は、新規な金属・ポリマー不均質材料の設計、試験、製造、および特徴づけのサイクルにおけるパラダイムシフトを生み出すことができる。それは、ソフトマシーンおよびロボットのための極めて高い強度対重量比の複合材料およびイオン交換ポリマー・メタル複合体をベースとする適応性のある材料のような宇宙技術の開発プロセスを能率化する。この装置と方法の宇宙適合性とエネルギー効率性は、宇宙旅行と探検の間の新たな部品または交換部品の機内での設計と製作が可能になり、そのような特務飛行のアフォーダビリティと持続可能性を高めることを意味する。加えて、本開示は、ポリマー・金属複合デジタル製造の方式とコンピューターによる設計と分析の手段との統合を想定して、それにより革新的な統合された設計から製品までの取り組みを可能にするのに必要な基本型と概念の開発が促進される。ここで開発された多重スケールの金属・ポリマー不均質デジタル製造方式は、100ナノメートルとおそらくはメートル単位の間の長さの尺度での先例のない全組成範囲の金属・ポリマー複合材料を可能にする。提案されるプロセ

40

50

スの付加製作の特徴によってもたらされる組成上の本質的な適応性と組立て設計が結びついて、製品の組成におけるこの可変性は、メートル以下のスケールの装置の構造設計と組立てへの新たな取り組みを迅速にプロトタイプ化および実証化することを可能にする。

【0052】

この開示されるDDM方式によって提供される真正な3D製造の特質と材料組成および特性の調整における適応性は、新規なIMPCをベースとするソフトアクチュエータとセンサーの設計、プロトタイプ化、および特徴づけのプロセスが加速されることを意味するだけでなく、それはまた、複雑な3D金属電極の配置のためにこれまでは実行可能ではなかった動きにおける3、4あるいは5の自由度を有するソフトアクチュエータの設計を実現することも可能にする。この分野横断的な影響は、本開示とソフトマシーン技術のテーマの領域との間に相乗効果をもたらす。

10

【0053】

本開示の原理は、連続的な時空間領域における加工音響軟化の物理学と力学を取り込むものである。小さな材料の領域、すなわちここに開示するプロセスに類似する高周波数超音波結合の環境下では、材料の全領域において、超音波の細管と支持体との間で、大量の塑性変形が起こる。このプロセスは、ほぼ全体が材料の音響軟化によって推進される。この場合において、材料の応力とひずみの関係は、音響軟化の効果のために異なる。

【0054】

典型的な装置は、次の多くの要素を伴う環境下で実施される、すなわち、金属とポリマーの線材の取り扱い、音響と熱のエネルギー源と送出、機械的な動作、およびプロセスの制御とフィードバックシステムである。

20

【0055】

金属とポリマーの線材の取り扱い。プロセスの材料の供給源として、環境のこの部分は、金属ならびにポリマーの線材の貯蔵、供給および引き取りを担っている。プロセスで必要とされるワイヤの制御された動きを与えるために、それは音響的および機械的な構成要素と高度に調和される。金属とポリマーの構成材料はそれら自体の細管とノズルにおいて個々に取り扱われ、そして必要とされるボクセルへの材料の送出がそれらの間で交互に行われ、それにより環境の複雑さが低減され、また組成の不均質さが達成される。

【0056】

音響と熱のエネルギー源と送出。この要素は、エネルギーを電気の形から音響および熱の形へと変換し、そしてそれらを金属の細管とポリマーのノズルの中へ送出する。典型的な装置においては、40kHzから200kHzまでの調整可能な周波数範囲を用いて縦振動モードで単一モードの超音波振動装置を利用する。熱エネルギー装置を用いて、ポリマーのノズルを対象のポリマー材料のガラス転移温度を超える温度まで加熱し、また押出しと堆積を行う間の熱衝撃と関連する欠陥を防ぐために構築領域を中間温度（約50℃）まで加熱する。

30

【0057】

機械的な動作およびプロセスの制御とフィードバックシステム。環境のこの要素は、（1）三つの軸における直接的な動作を支援し、そして（2）他の全ての要素からの機械的、熱的、音響的な信号を受けて、そして構築プロセス、部品の欠陥状態、および材料の特性についてのリアルタイムでの状態のようなシステムの特性を監視する。典型的な装置においては、結合部の欠陥の探知と材料の特性の評価のためのリアルタイムでの音響信号の励起、探知、および視覚化を示す。

40

【0058】

本開示の原理は、イオン交換ポリマー・メタル複合体をベースとする人工筋肉の設計、プロトタイプおよび特徴づけへのこの方式の適用を想定している。例えば、この原理は、単純な1軸動作のアクチュエータから3軸での並進とこれらの軸のうちの一つの周りでの回転が可能なIMPCをベースとする4軸活動品までの範囲の構成要素を想定している。

【0059】

本開示の原理は米国仮特許出願62/210041号（2015年8月26日提出）に

50

開示された付加製造の原理と関連づけて利用することができ、この仮特許出願の内容の全てが、あらゆる目的のために参考文献として本明細書に取り込まれる。

【0060】

本開示の原理が様々な態様において示されたが、実際面において用いられる構造、配置、比率、要素、材料および部品の多くの修正が特定の環境と運転要件に対して特に改造されるものであり、それら修正したものは本開示の原理と範囲から逸脱することなく用いることができる。これらおよびその他の変更または修正は本開示の範囲内に含まれることが意図されていて、それらは特許請求の範囲において表されるだろう。

【0061】

本開示を様々な態様を参照して記述した。しかし、当業者であれば、本開示の範囲から逸脱することなく様々な修正と変更がなされうること認識する。従って、本明細書は限定的な意味よりも例示的な意味において考慮されるべきであり、そのような修正の全てが本開示の範囲内に含まれるべきであることが意図されている。同様に、利益、その他の利点、および問題に対する解決策を、様々な態様を参照して上で記述した。しかし、利益、利点、および問題に対する解決策、および何らかの利益、利点、または解決策を生み出すか、あるいはさらに顕著にするかもしれないいかなる要素も、いずれかの請求項または全ての請求項の重要な、必要な、または必須の態様または要素であるとは解釈されるべきではない。

【0062】

本明細書の中で用いられるときの「含む」、「含んでいる」あるいはこの用語の他のいかなる変形も非排他的な包含物を含むことが意図されていて、従って、構成要素のリストを含むプロセス、方法、物品、または装置は、それらの構成要素を含むのみならず、明確には挙げられていない他の構成要素、あるいはそのようなプロセス、方法、物品、または装置に固有の構成要素も含むことができる。「A、B、またはCのうちの少なくとも一つ」あるいは「A、B、およびCのうちの少なくとも一つ」と同様の言い回しが特許請求の範囲または明細書の中で用いられているとき、その語句は以下のいずれかを意味することが意図されている：（１）Aのうちの少なくとも一つ、（２）Bのうちの少なくとも一つ、（３）Cのうちの少なくとも一つ、（４）Aのうちの少なくとも一つおよびBのうちの少なくとも一つ、（５）Bのうちの少なくとも一つおよびCのうちの少なくとも一つ、（６）Aのうちの少なくとも一つおよびCのうちの少なくとも一つ、あるいは（７）Aのうちの少なくとも一つ、Bのうちの少なくとも一つ、およびCのうちの少なくとも一つ。

〔発明の態様〕

〔１〕

純粋な金属の少なくとも95%の密度を有する金属の物体を3Dプリントするための方法であって、

前記方法は、前記金属の物体を構成する一連の複数の層を形成することを含み、各々の層は金属のフィラメントから形成され、

各々の層を形成することは、前記金属のフィラメントと接触しているプリント工具に超音波エネルギーを加えることによって前記金属のフィラメントから一連の複数のボクセルを形成することを含み、

前記金属のフィラメントと接触している前記プリント工具の一部は、前記超音波エネルギーに応答して0.9ミクロンと1.1ミクロンの間の振幅で振動し、

前記一連の複数のボクセルにおける各々のボクセルは、物質輸送によって前記層における隣接する複数のボクセルおよび前の層における隣接する複数のボクセルに結合され、

ボクセルを形成している間に、前記金属のフィラメントの温度は摂氏6度未満だけ上昇し、

各々のボクセルは、200マイクロ秒と400マイクロ秒の間の時間にわたって超音波エネルギーを加えることによって形成され、そして

前記一連の複数のボクセルを形成することは、室温において周囲大気の中で行われる、前記方法。

10

20

30

40

50

[2]

前記金属のフィラメントはアルミニウム、チタン、金、銀、銅、または鋼合金のうちの少なくとも一つを含む、1に記載の方法。

[3]

前記金属の微細構造を変えるために、複数のボクセルを形成する間に加える前記超音波エネルギーの強度を変化させることをさらに含む、1に記載の方法。

[4]

前記プリント工具は炭化タングステンの棒を含み、そして前記プリント工具は40kHzと200kHzの間で作用する圧電性結晶に結合されている、1に記載の方法。

[5]

前記プリント工具は炭化タングステンの棒を含む、1に記載の方法。

10

[6]

付加製造のための方法であって、

金属ワイヤの第一の長さを金属の支持体と接触させること、

超音波エネルギーを加えることによって、第一の標的領域における前記金属ワイヤの第一の長さ内に材料の流れと固体状態での拡散を誘起させて、前記第一の標的領域の一部を前記金属の支持体に結合させること、および

超音波エネルギーを加えることによって、前記第一の標的領域と少なくとも部分的に重なり合っている第二の標的領域における前記金属ワイヤの第一の長さ内に材料の流れと固体状態での拡散を誘起させて、前記第二の標的領域の一部を前記金属の支持体に結合させること、
を含む前記方法。

20

[7]

金属ワイヤの第二の長さを前記第一の標的領域および前記第二の標的領域と接触させること、および

超音波エネルギーを加えることによって、第三の標的領域における前記金属ワイヤの第二の長さ内に材料の流れと固体状態での拡散を誘起させて、前記第三の標的領域の一部を前記第一の標的領域または前記第二の標的領域のうちの少なくとも一つに結合させること、
をさらに含む、6に記載の方法。

30

[8]

炭化タングステンを含むプリント工具によって前記金属ワイヤの第一の長さに前記超音波エネルギーが加えられる、6に記載の方法。

[9]

前記超音波エネルギーの供給源は約60kHzの周波数で作用する圧電性結晶であり、そして前記圧電性結晶と前記プリント工具は鋼のホーンを介して結合されている、6に記載の方法。

[10]

前記第一の標的領域における前記金属ワイヤの第一の長さ内の前記材料の流れと固体状態での拡散は、前記ワイヤ内の摂氏6度未満の温度上昇とともに生じる、6に記載の方法。

40

[11]

前記第一の標的領域、前記第二の標的領域、および前記第三の標的領域の合わせた密度は、前記純粋な金属の密度の95%を超える、7に記載の方法。

[12]

前記支持体に結合した前記第一の標的領域の前記一部がボクセルを形成する、6に記載の方法。

[13]

所望の構造を形成するために、一連の複数のボクセルを繰り返して形成することをさらに含む、12に記載の方法。

50

[1 4]

前記一連の複数のボクセルのうちのひと組の複数のボクセルに加える前記超音波エネルギーの量を変化させて、前記所望の構造における前記金属の結晶粒の微細構造を制御することをさらに含む、1 3に記載の方法。

[1 5]

前記金属はアルミニウム、チタン、金、銀、銅、または鋼合金のうちの少なくとも一つを含む、6に記載の方法。

[1 6]

前記方法は室温において周囲大気の中で実施される、6に記載の方法。

[1 7]

前記超音波エネルギーに応答して、前記プリント工具の自由端が0.9ミクロンと1.1ミクロンの間の振幅で振動する、8に記載の方法。

[1 8]

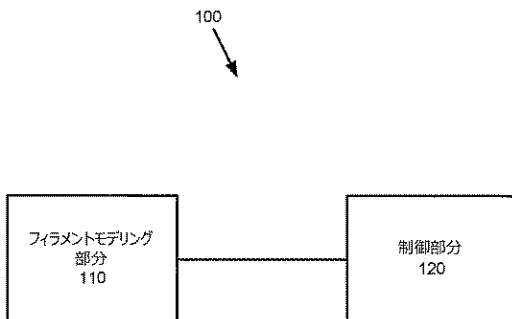
前記超音波エネルギーは200マイクロ秒と400マイクロ秒の間の時間にわたって加えられる、6に記載の方法。

[1 9]

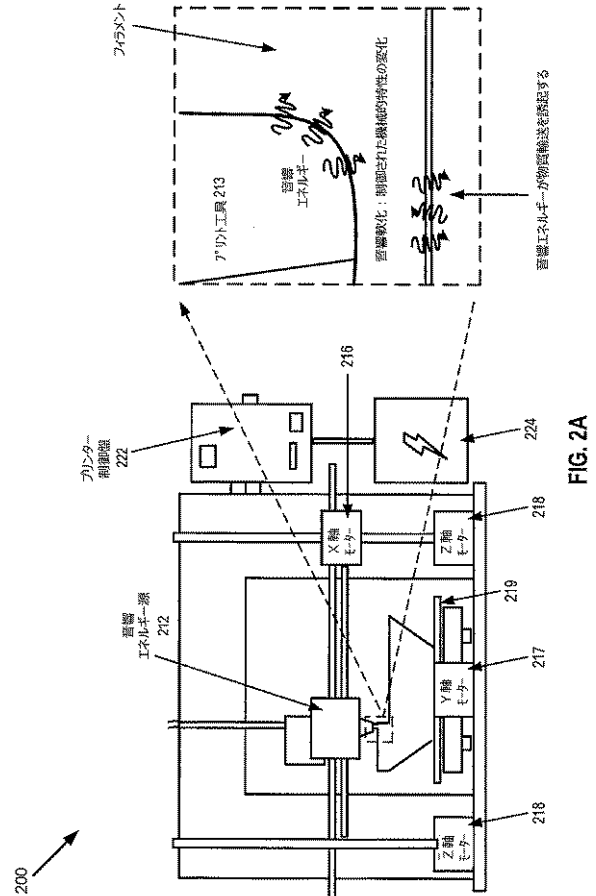
所望の構造を形成するために、前記第一の標的領域、前記第二の標的領域、または前記第三の領域の少なくとも一部を除去することをさらに含む、6に記載の方法。

10

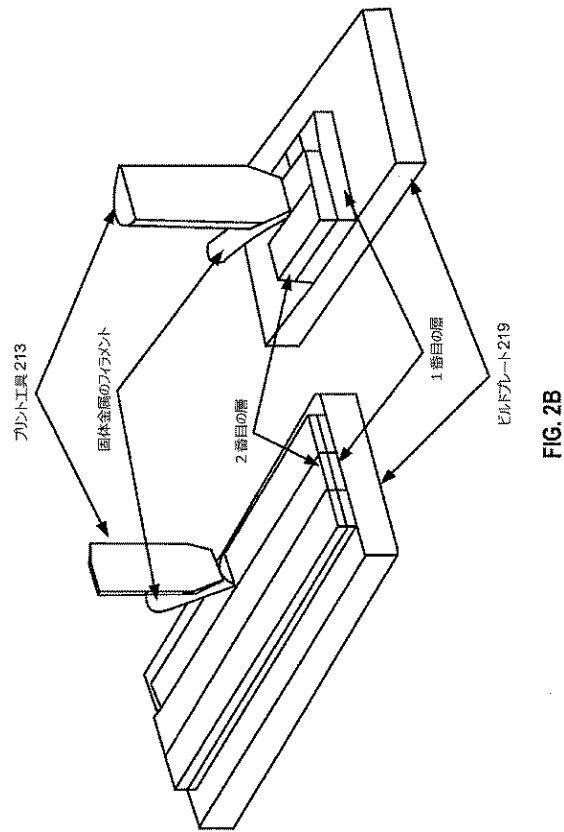
【図 1】



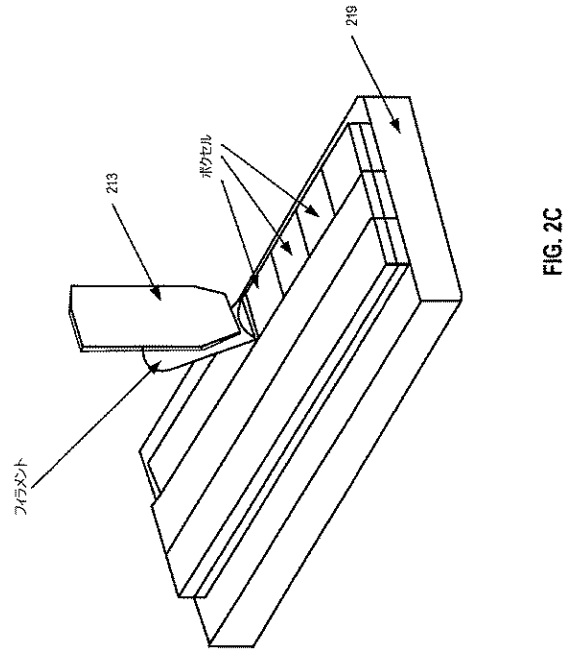
【図 2 A】



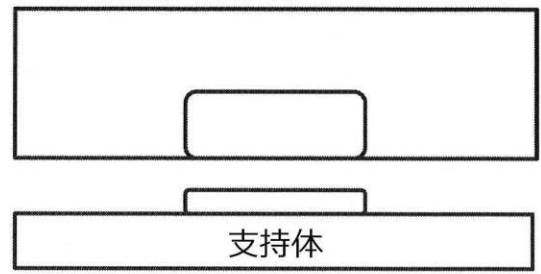
【図 2 B】



【図 2 C】



【図 3 A】



【図 3 B】

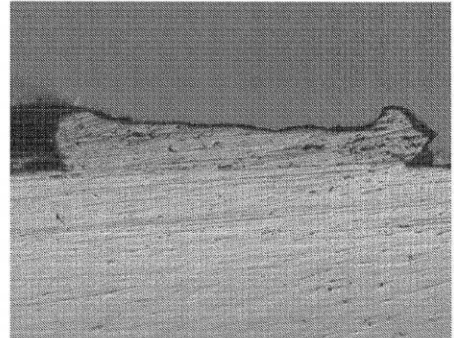
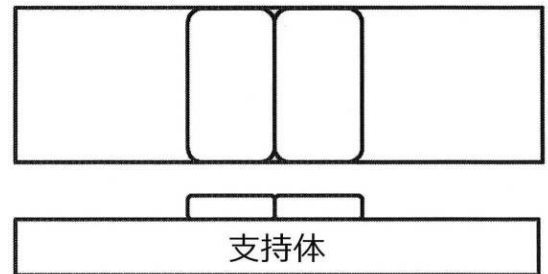


FIG. 3A

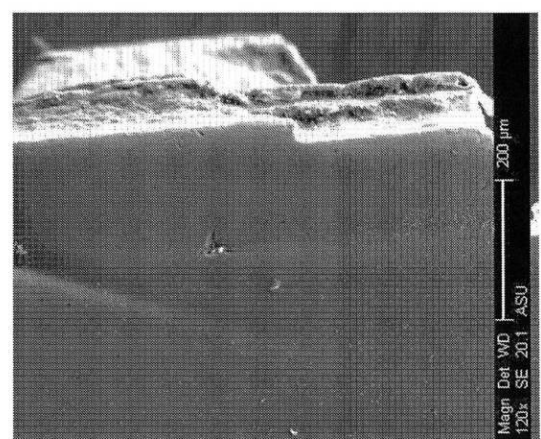


FIG. 3B

【図 3 C】

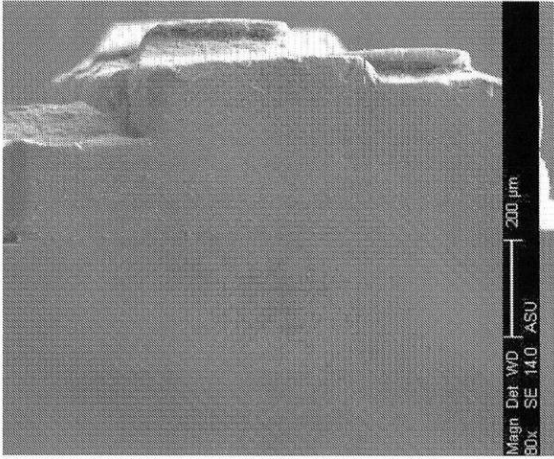
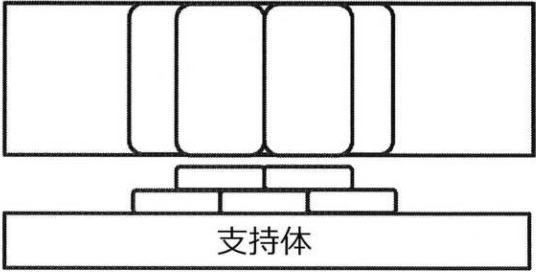


FIG. 3C

【図 5】

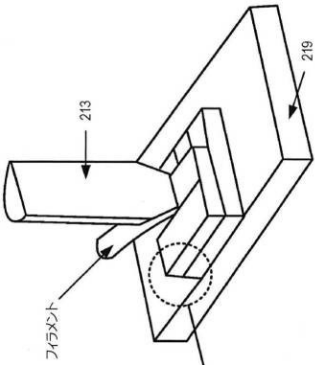


FIG. 5

【図 4】

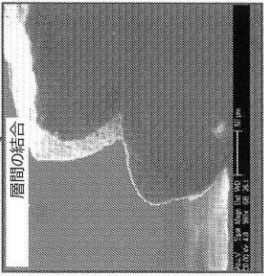
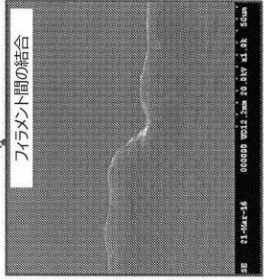
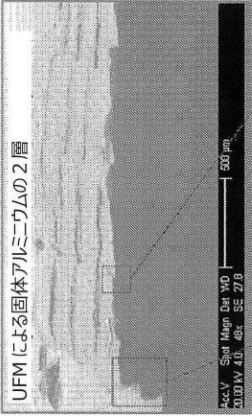
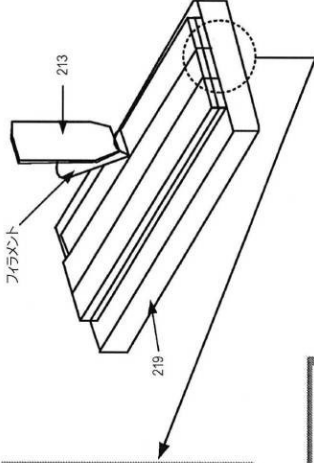


FIG. 4

【図 6 A】

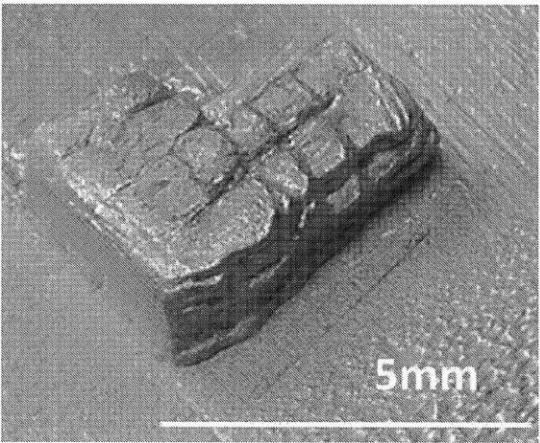


FIG. 6A

【図 6 B】

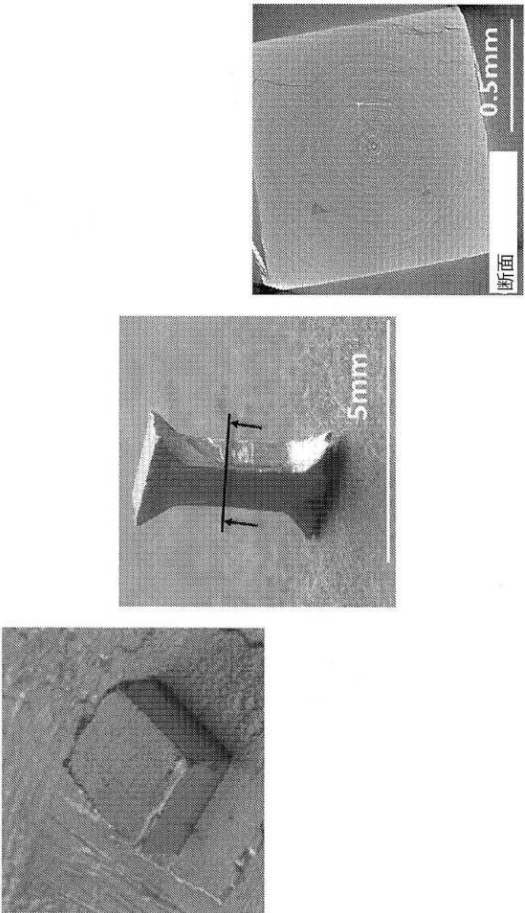


FIG. 6B

【図 7 A】

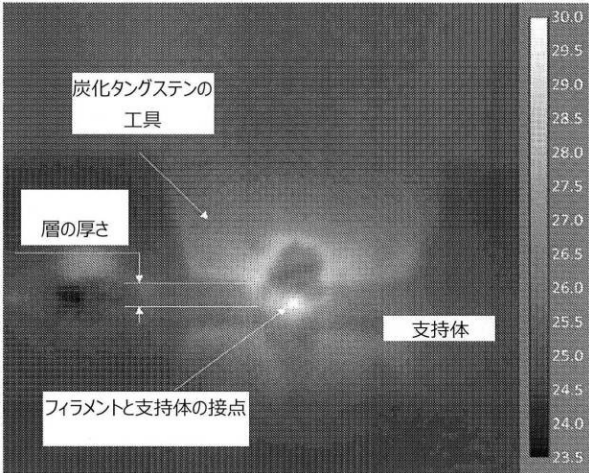


FIG. 7A

【図 7 B】

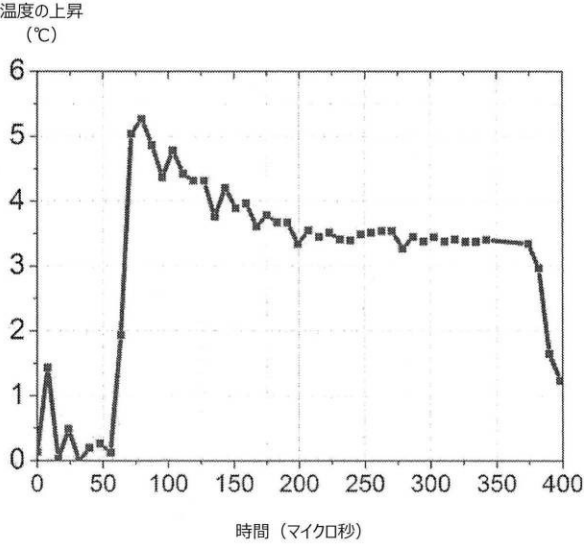


FIG. 7B

【図 8 A】

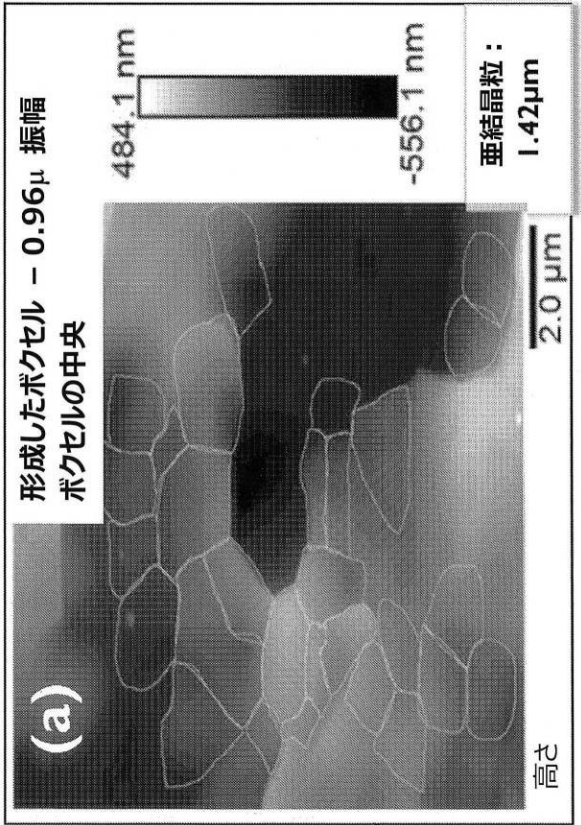


FIG. 8A

【図 8 B】

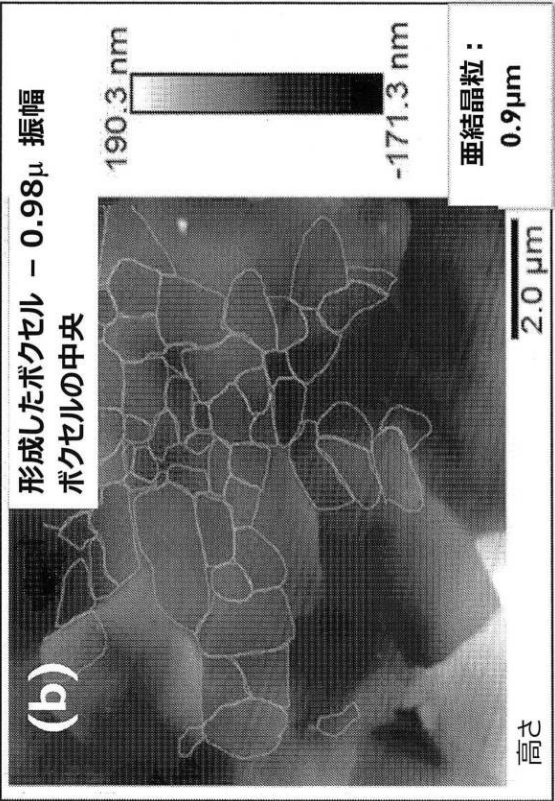


FIG. 8B

フロントページの続き

(74)代理人 100106208

弁理士 宮前 徹

(74)代理人 100196508

弁理士 松尾 淳一

(74)代理人 100104374

弁理士 野矢 宏彰

(72)発明者 スー, ケン

アメリカ合衆国アリゾナ州 8 5 2 8 3, テンピ, サウス・ジュニパー・ストリート 7 4 0 1

(72)発明者 デシュバンデ, アナー

アメリカ合衆国アリゾナ州 8 5 2 8 1, テンピ, サウス・テラス・ロード 9 5 0, アパートメン
ト 1 0 4

Fターム(参考) 4K018 AA02 AA03 AA06 AA14 AA24 BA01 BA02 BA03 BA08 BA13

BB02

【外国語明細書】
2021185268000001.pdf