

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2017-511865

(P2017-511865A)

(43) 公表日 平成29年4月27日(2017.4.27)

(51) Int.Cl.  
F16S 5/00 (2006.01)

F I  
F16S 5/00

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 43 頁)

(21) 出願番号 特願2016-543033 (P2016-543033)  
 (86) (22) 出願日 平成27年1月7日 (2015.1.7)  
 (85) 翻訳文提出日 平成28年8月19日 (2016.8.19)  
 (86) 国際出願番号 PCT/US2015/010458  
 (87) 国際公開番号 W02015/105859  
 (87) 国際公開日 平成27年7月16日 (2015.7.16)  
 (31) 優先権主張番号 61/924,681  
 (32) 優先日 平成26年1月7日 (2014.1.7)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 516186500  
 ナマ ディベロップメント エルエルシー  
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 93  
 103 サンタ バーバラ アラメダ パ  
 ドレ セラ 2109  
 (74) 代理人 100120891  
 弁理士 林 一好  
 (74) 代理人 100165157  
 弁理士 芝 哲央  
 (74) 代理人 100205659  
 弁理士 齋藤 拓也  
 (74) 代理人 100126000  
 弁理士 岩池 満  
 (74) 代理人 100185269  
 弁理士 小菅 一弘

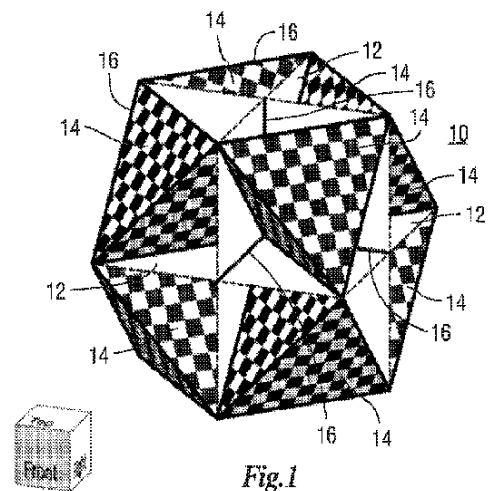
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 3Dハニカムフォーム構造

(57) 【要約】

提示されるのは、立方体セル形状と四面体セル形状との組み合わせに配置された複数のセル壁と複数のセル端縁とを備えた気泡形状を有する単位セル、および複数の単位セルを備えた組み立て構造である。複数の形状の組み合わせによって作成される単位セルのポイドは、正四面体と非正四面体と八面体とを備える。一部の実施形態においては選択されたセル壁の厚さは可変であり、一部の実施形態においては厚さをゼロにできる。一部の実施形態においては、選択されたセル壁および選択されたセル端縁は、さまざまな厚さを有する。他の複数の実施形態において、選択されたセル壁は非平面状である。一部の実施形態において、選択されたセル壁は1つ以上の穴を有し得る。単位セルの一部の実施形態の選択されたセル端縁は、セル端縁の長さに沿って変化する可変の断面形状を有し得る。単位セル一部の実施形態は、応力集中を鈍らせるために、隅肉を備え得る。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

立方体セル形状と四面体セル形状との組み合わせに配置された複数のセル壁と複数のセル端縁とを備えた気泡形状を有する単位セル。

## 【請求項 2】

前記組み合わせによって作成されたポイドは、正四面体、非正四面体、および八面体を備える、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 3】

選択されたセル壁の厚さがゼロである、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 4】

選択されたセル壁は変化する厚さを有する、請求項 1 に記載の単位セル。

10

## 【請求項 5】

選択された前記セル壁および選択された前記セル端縁は変化する厚さを有する、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 6】

選択された前記セル壁は非平面状である、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 7】

選択された前記セル壁は 1 つ以上の穴を有する、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 8】

選択された前記セル端縁は変化する断面形状を有する、請求項 1 に記載の単位セル。

20

## 【請求項 9】

選択された前記セル端縁は、前記セル端縁の長さに沿って変化する可変の断面形状を有する、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 10】

前記単位セルに接続された装置を更に備える、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 11】

前記単位セル内に埋め込まれた装置を更に備える、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 12】

材料を除去するシステムによって、溶接、接着剤、ろう付け、または他の接着法によって、インベストメント鑄造の使用によって、または 3D 印刷直接製造法によって、製造される、請求項 1 に記載の単位セル。

30

## 【請求項 13】

応力集中を鈍らせるために複数の隅肉を更に備える、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 14】

金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、複合材料、繊維、粒子強化複合材料、サーメット、格子と連続および独立気泡フォームとを含む気泡材料、またはこれらの何れかの組み合わせから作られる、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 15】

前記四面体セル形状の前記セル壁の厚さに対する前記立方体壁形状の前記セル壁の厚さの比が

40

## 【数 1】

$$\sqrt{3}$$

である、請求項 1 に記載の単位セル。

## 【請求項 16】

前記四面体セル形状の前記セル壁の厚さに対する前記立方体壁形状の前記セル壁の厚さの比が

## 【数 2】

$$\sqrt{3}$$

であり、前記単位セルの前記形状は、前記立方体壁形状の前記セル壁の厚さ、前記四面体セル形状の前記セル壁の厚さ、または前記単位セルの相対密度のうちの1つを選択することによって決定される、請求項1に記載の単位セル。

## 【請求項17】

複数の単位セルを備えた組み立て構造であって、前記単位セルは、立方体セル形状と四面体セル形状との組み合わせを備えた気泡形状に配置された複数のセル壁と複数のセル端縁とを備えた気泡形状を有する、組み立て構造。

10

## 【請求項18】

前記組み合わせによって作成されたポイドは、正四面体、非正四面体、および八面体を備える、請求項17に記載の組み立て構造。

## 【請求項19】

選択された前記単位セルは、選択された前記セル壁の厚さがゼロである、請求項17に記載の組み立て構造。

## 【請求項20】

選択された前記単位セルは、変化する厚さを有する選択されたセル壁を有する、請求項17に記載の組み立て構造。

## 【請求項21】

選択された前記単位セルは、変化する厚さを有する選択されたセル端縁と選択されたセル壁とを有する、請求項17に記載の組み立て構造。

20

## 【請求項22】

選択された前記単位セルは、1つ以上の穴を有する選択されたセル壁を有する、請求項17に記載の組み立て構造。

## 【請求項23】

選択された前記単位セルは、可変断面形状を有する選択されたセル端縁を有する、請求項17に記載の組み立て構造。

## 【請求項24】

選択された前記単位セルは、前記セル端縁の長さに沿って変化する可変断面形状を有する選択されたセル端縁を有する、請求項17に記載の組み立て構造。

30

## 【請求項25】

材料を除去するシステムによって、溶接、接着剤、ろう付け、または他の接着法によって、インベストメント鑄造の使用によって、または3D印刷直接製造法によって、製造される、請求項17に記載の組み立て構造。

## 【請求項26】

金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、複合材料、繊維、粒子強化複合材料、サーメット、格子と連続および独立気泡フォームとを含む気泡材料、またはこれらの何れかの組み合わせから作られる、請求項17に記載の組み立て構造。

40

## 【請求項27】

サンドイッチパネル、梁、溝、またはチューブである、請求項17に記載の組み立て構造。

## 【請求項28】

応力集中を鈍らせるために複数の隅肉を有する選択された前記単位セルを更に備える、請求項17に記載の組み立て構造。

## 【請求項29】

立方体セル形状と四面体セル形状との組み合わせに配置された複数のセル壁と複数のセル端縁とを備えた気泡形状を有する単位セルの作成方法であって、

前記四面体セル形状の4つの四面体と前記立方体セル形状のセル壁のうちの3つとを形

50

成するために、切断および折り曲げ可能な平面状パターンを得るステップと、  
 切断および折り曲げ可能な選択された材料に前記平面状パターンを適用するステップと  
 、  
 前記平面状パターンに合わせて前記選択された材料の第 1 の断片を切断するステップと  
 、  
 前記四面体セル形状の 4 つの四面体と前記立方体セル形状の前記セル壁のうちの 3 つと  
 を形成するために、前記第 1 の断片を切断して折り曲げるステップと、  
 前記選択された材料に前記平面状パターンを再度適用するステップと、  
 前記平面状パターンに合わせて、前記選択された材料の第 2 の断片を切断するステップ  
 と、  
 前記四面体セル形状の 4 つの四面体と前記立方体セル形状の前記セル壁の内の 3 つとを  
 形成するために、前記第 2 の断片を切断して折り曲げるステップと、  
 完全な単位セルを形成するために、前記第 1 の断片と前記第 2 の断片とを組み合わせる  
 ステップと、  
 を含む方法。

10

【請求項 30】

前記選択される材料は、金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、複合材料、繊維、粒子強化複合材料、サーメット、格子または連続気泡フォームまたは独立気泡フォームを含む気泡材料、またはこれらの何れかの組み合わせである、請求項 29 に記載の方法。

20

【請求項 31】

立方体セル形状と四面体セル形状との組み合わせに配置された複数のセル壁と複数のセル端縁とを備えた気泡形状を有する単位セルを複数備えた組み立て構造の作成方法であって、

前記四面体セル形状の 4 つの四面体と前記立方体セル形状のセル壁のうちの 3 つとを形成するために、切断および折り曲げ可能な平面状パターンを得るステップと、

必要な複数の単位セルを作成するために、

(1) 切断および折り曲げ可能な選択された材料に前記平面状パターンを適用するステップと、

(2) 前記平面状パターンに合わせて、前記選択された材料の第 1 の断片を切断するステップと、

30

(3) 前記四面体セル形状の 4 つの四面体と前記立方体セル形状の前記セル壁のうちの 3 つとを形成するために、前記第 1 の断片を切断して折り曲げるステップと、

(4) 前記選択された材料に前記平面状パターンを再度適用するステップと、

(5) 前記平面状パターンに合わせて、前記選択された材料の第 2 の断片を切断するステップと、

(6) 前記四面体セル形状の 4 つの四面体と前記立方体セル形状のセル壁のうちの 3 つとを形成するために、前記第 2 の断片を切断して折り曲げるステップと、

(7) 完全な個々の単位セルを形成するために、前記第 1 の断片と前記第 2 の断片とを組み合わせるステップと、

40

を繰り返すことによって個々の単位セルを作成するステップと、

前記組み立て構造を作成するために、複数の単位セルを接合するステップと、  
 を含む、方法。

【請求項 32】

前記選択される材料は、金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、複合材料、繊維、粒子強化複合材料、サーメット、格子または連続気泡フォームまたは独立気泡フォームを含む気泡材料、またはこれらの何れかの組み合わせである、請求項 31 に記載の方法。

【請求項 33】

前記組み立て構造は、サンドイッチパネル、梁、溝、またはチューブである、請求項 3

50

1 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本出願は、その内容が参照により本明細書に組み込まれる2014年1月7日出願の米国仮特許出願第61/924,681号の優先権を主張する。

【背景技術】

【0002】

10

格子およびフォームの形態の軽量構造材料は、構成材料が効率的に使用されるため、技術者にとって魅力的である。フォームおよび格子は、システム内の中実材料の量に比べ、高い剛性、強度、およびエネルギー吸収能力を有することができる。これら材料は、一般に気泡材料として公知である。これら材料は、ハイブリッド構造のコア材料として、緩衝材、断熱材として、および出荷時に使用される梱包およびヘルメットなどのエネルギー吸収構造に、特に有用である。これら材料の特性は、主として、構成材料の幾何学的配置から得られる。最も一般的に、この配置は、長さの点で、取り付け先の装置または部品に比べると小さく、構成材料の微細構造に比べると大きい。

【0003】

20

気泡材料は、広範囲の特性を有するため、工学システムにおいて広く普及している。気泡材料は、剛性および可撓性ポリマー、延性金属、およびセラミックを含む多種多様な材料から形成可能である。熱伝導率および導電率など、構成材料の固有の特性は引き継がれるが、セルの形状によって変わる。気泡形状は、連続気泡から独立気泡まで、およびランダム配列から規則配列まで、広範囲に及ぶ。格子は、例えば、連続気泡の規則配列構造である。気泡材料の剛性および強度は、梁部材および板部材のさまざまな配置に伴い、この範囲内のそれぞれの位置に応じて変わる。確率的（ランダム）独立気泡フォームは、ランダム連続気泡フォームに比べ、より高い比剛性（構成材料の単位質量当たりの剛性）を有することが知られている。これは、セル面がセル端縁の変形を制約するため、得られる変形様式を大きく制限することにもよる。セル端縁は、さもなければ曲がり易い構造である。格子は、材料が同じく曲がり難いため、ランダム独立気泡フォームに比べ、性能が優れていることが知られている。位置合わせされた複数の部材内に応力および歪みエネルギーが比較的良好に分散されるので、より高い性能がもたらされる。規則配列された独立気泡フォームは、材料の制約および位置合わせにより、潜在的性能が最も高い。格子と同様にセル端縁が位置合わせされ、同じく位置合わせされたセル面に更なる支持をもたらす。これら独立気泡が規則配列された材料は、複数の要因からの寄与により、剛性の理論上の上界を実現する唯一無二の能力を有する。

30

【0004】

ハニカム形態の規則配列フォームは、工学システムに広く使用されているが、その二次元（2D）形状に起因する固有の異方性を有する。今や、3D印刷手法および、直接製造、積層造形、またはラピッドプロトタイピングとも一般に称される、他の最新の自動組み立て手法の出現によって複雑な三次元（3D）に位置合わせされた材料の開発が実際に可能になっている。これら手法は、独立気泡が高度に位置合わせされた、等方性デザインを含む、実質的に任意の形状の材料を製作するために使用可能である。等方性の、すなわち無方向性の、材料特性は、荷重が多軸（多方向）である多くの用途において、または異方性材料の場合の設計の複雑さを単に回避するために、好都合である。直接製造は、複雑な気泡材料の製作を可能にする。

40

【0005】

直接製造は、複雑なデザインの製作に伴うコストの多くを排除する。伝統的な機械加工手法および接着法、例えば、ろう付けおよび溶接など、においては、部品の製造に伴い、複雑度が増大する。部品は、単純なピレットブロックとして、または接着される複数対の

50

部材で、始まる。次に、材料を除去するための工具の通過、または材料を接合するための溶接、接着剤、ろう付けなどの方法による接着によって、特徴が追加される。各工具の通過および溶接に伴うコストは、部品が複雑になるほど増大する。直接製造では、複雑さはそのままであるが、追加コストが伴わない。ピレットブロックの形状のような大きな単体部品の製作は、これら種類の手法においては時間およびコストの大半を要し、低密度の効率的な材料では最小である。歴史的に、ハニカムおよび格子は、高コストであるため、航空機および宇宙などのハイエンド用途に限られていた。直接製造によるコスト削減により、このような規則配列材料の用途がより広がり、製品の製造者および使用者の両方が利益を享受する。ここで、問題となるのは、印刷された構成材料を最も効率的に利用する材料形状を特定することである。

10

## 【0006】

提示されるのは、剛性の理論上の上界の極めて大きな部分を達成し、直接製造法によってもたらされる利点を更に利用できるセル構造を作成するために使用可能な材料の気泡形状である。

## 【発明の概要】

## 【課題を解決するための手段】

## 【0007】

提示されるのは、立方体セル形状および四面体セル形状の組み合わせに配置された複数のセル壁と複数のセル端縁とを備えた気泡形状を有する単位セルである。複数の形状の組み合わせによって作成された単位セルのポイドは、正四面体、非正四面体、および八面体を備える。一部の実施形態において、選択されたセル壁の厚さは可変であり、一部の実施形態においては厚さゼロである。一部の実施形態において、選択されたセル壁および選択されたセル端縁は、可変厚さを有する。他の実施形態において、選択されたセル壁は非平面状である。一部の実施形態において、選択されたセル壁は1つ以上の穴を有し得る。一部の実施形態の単位セルの選択されたセル端縁は、一部の実施形態において、セル端縁の長さに沿って変化する可変の断面形状を有し得る。単位セルの一部の実施形態は、応力集中を鈍らせるために隅肉を備え得る。

20

## 【0008】

単位セルは、一部の実施形態において、単位セルに接続された装置を、または単位セル内に埋め込まれた装置でさえ、有し得る。単位セルの複数の実施形態は、材料を除去するシステムによって、溶接、接着剤、ろう付け、または他の接合法によって、インベストメント鑄造を用いて、または3D印刷直接製造法を用いて、製造され得る。また、金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、複合材料、繊維、粒子強化複合材料、サーメット、格子と連続および独立気泡フォームとを含む気泡材料、またはこれらの何れかの組み合わせから作られ得る。

30

## 【0009】

単位セルの一部の実施形態のセル壁の寸法は、前記四面体セル形状のセル壁の厚さに対する立方体壁形状のセル壁の厚さの比として

## 【数1】

$$\sqrt{3}$$

40

を有し得る。このような一部の実施形態において、単位セルの形状は、立方体壁形状のセル壁の厚さ、四面体セル形状のセル壁の厚さ、または単位セルの相対密度のうちの1つを選択することによって決定される。

## 【0010】

組み立て構造の複数の実施形態は、複数の単位セルを備えて構築され得る。各単位セルは、立方体セル形状と四面体セル形状との組み合わせを備えた気泡形状に配置された複数のセル壁と複数のセル端縁とを備えた気泡形状を有する。単位セルは、組み立て構造の一部の実施形態において、正四面体と非正四面体と八面体とを備えた幾何学的組み合わせによって作成されたポイドを有する。一部の実施形態において、選択されたセル壁の厚さは

50

可変であり、一部の実施形態においては厚さをゼロにし得る。一部の実施形態において、選択されたセル壁および選択されたセル端縁は、可変厚を有する。他の実施形態において、選択されたセル壁は非平面状である。一部の実施形態において、選択されたセル壁は1つ以上の穴を有し得る。単位セルの一部の実施形態の選択されたセル端縁は、一部の実施形態においてはセル端縁の長さに沿って変化する、可変の断面形状を有し得る。単位セルの一部の実施形態は、応力集中を鈍らせるために隅肉を備え得る。組み立て構造の複数の実施形態は、サンドイッチパネル、梁、溝、またはチューブなど、さまざまな構成に形成可能である。

#### 【0011】

組み立て構造のさまざまな実施形態は、材料を除去するシステムによって、溶接、接着剤、ろう付け、または他の接合法によって、またはインベストメント鑄造の使用によって、または3D印刷直接製造法によって、製造され得る。組み立て構造のさまざまな実施形態は、金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、複合材料、繊維、粒子強化複合材料、サーメット、格子と連続および独立気泡フォームを含む気泡材料、またはこれらの何れかの組み合わせから作られ得る。

10

#### 【0012】

単位セルの作成方法も開示される。本方法において、単位セルは、立方体セル形状および四面体セル形状の組み合わせに配置された複数のセル壁と複数のセル端縁とを備えた気泡形状を有する。単位セルの複数の実施形態は、四面体セル形状の4つの四面体と立方体セル形状のセル壁のうちの3つとを形成するために、切断および折り曲げ可能な平面状パターンから作成される。この平面状パターンは、切断および折り曲げ可能な選択された材料に当てられる。選択された材料の第1の断片が平面状パターンに合わせて切断され、次に、四面体セル形状の4つの四面体と立方体セル形状のセル壁のうちの3つとを形成するために、更に切断されて折り曲げられる。選択された材料に平面状パターンが再度(2回目)当てられ、選択された材料の第2の断片が平面状パターンに合わせて切断される。この第2の断片は、四面体セル形状の4つの四面体と立方体セル形状のセル壁のうちの3つとを形成するために、切断されて折り曲げられる。第1の断片および第2の断片は、完全な単位セルを形成するために、組み合わせられる。この方法を用いて作成される単位セルは、金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、複合材料、繊維、粒子強化複合材料、サーメット、格子または連続気泡フォームまたは独立気泡フォームを含む気泡材料、またはこれらの何れかの組み合わせから選択された材料で作成され得る。

20

30

#### 【0013】

複数の単位セルを備えた組み立て構造を作成する一方法において、これら単位セルの各々は、立方体セル形状と四面体セル形状との組み合わせに配置された複数のセル壁および複数のセル端縁を備えた気泡形状を有する。単位セルの複数の実施形態は、四面体セル形状の4つの四面体と立方体セル形状のセル壁のうちの3つとを形成するために、切断および折り曲げ可能な平面状パターンから作成される。必要な複数の単位セルを作成するために、(1)切断および折り曲げ可能な選択された材料に平面状パターンを適用するステップと、(2)選択された材料の第1の断片を平面状パターンに合わせて切断するステップと、(3)四面体セル形状の4つの四面体と立方体セル形状のセル壁のうちの3つとを形成するために、第1の断片を切断して折り曲げるステップと、(4)選択された材料に平面状パターンを再度(2回目)適用するステップと、(5)選択された材料の第2の断片を平面状パターンに合わせて切断するステップと、(6)四面体セル形状の4つの四面体と立方体セル形状のセル壁のうちの3つとを形成するために、第2の断片を切断して折り曲げるステップと、(7)個々の完全な単位セルを形成するために、第1の断片と第2の断片とを組み合わせるステップと、を繰り返して個々の単位セルを作成し、複数の単位セルを接合することによって組み立て構造を作成する。選択される材料は、金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、複合材料、繊維、粒子強化複合材料、サーメット、格子または連続気泡フォームまたは独立気泡フォームを含

40

50

む気泡材料、あるいはこれらの何れかの組み合わせでもよい。組み立て構造は、サンドイッチパネル、梁、溝、またはチューブなど、何れの構成でもよい。

【0014】

本明細書および図面を見直されると、本発明の上記および他の態様がより深く理解されるであろう。

【0015】

本発明およびその多くの利点のより完全な理解および認識のために、添付の図面と併せて以下の詳細な説明を参照されたい。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】単位セルの一実施形態を示す。

【図1A】図1の単位セルの基本形状の立方体セル構成要素を示す。

【図1B】図1の単位セルの基本形状の四面体セル構成要素を示す。

【図2】セル端縁の厚さとセル壁の厚さとの間が変化する単位セルの実施形態を示す。

【図3】図2の単位セルを色分けなしに示す。

【図4】図3に示されているような単位セルを複数備えた組み立て構造を示す。

【図4A】図4の組み立て構造の正面図を示す。

【図4B】図4の組み立て構造のアイソメトリック図を示す。

【図4C】図4の組み立て構造の底面図を示す。

【図4D】図4の組み立て構造の右側面図を示す。

【図5】セル壁の厚がゼロであり、セル端縁材料のみを有する単位セルの一実施形態を示す。

【図6】図3および図5に示されている単位セルの実施形態を含む複数の単位セルを備えた組み立て構造を示す。

【図6A】図6の組み立て構造の上面図を示す。

【図6B】図6の組み立て構造のアイソメトリック図を示す。

【図6C】図6の組み立て構造の正面図を示す。

【図6D】図6の組み立て構造の右側面図を示す。

【図7】等方性、またはほぼ等方性の、剛性を有する単位セルの一実施形態を示す。

【図8】隅肉が追加された、等方性、またはほぼ等方性の、剛性を有する単位セルの一実施形態を示す。

【図9】図8に示されている単位セルの配列を備えた組み立て構造を示す。

【図10】含まれる単位セルの構造特性が変化する組み立て構造の一実施形態を示す。

【図10A】図10の組み立て構造の上面図である。

【図10B】図10の組み立て構造の左側面図である。

【図10C】図10の組み立て構造の正面図である。

【図10D】図10の組み立て構造の右側面図である。

【図10E】図10の組み立て構造の底面図である。

【図11】梁システムである組み立て構造の一実施形態である。

【図11A】図11の梁システムの端面断面図である。

【図12】サンドイッチパネルである組み立て構造の一実施形態である。

【図12A】図12のサンドイッチパネルの正面図である。

【図13】単位セルの一実施形態の一部にするために切断および折り曲げ可能な平面状パターンの一例である。

【図13A】折り曲げられて単位セルの一部になった図13の平面状パターンのさまざまな図を示す。

【図13B】単位セルを形成するために組み合わされた図13Aの平面状パターンのうちの2つを示す。

【図13C】図13の複数の平面状パターンから作成された単位セルを複数噛み合わせて形成された、完成した組み立て構造を示す。

10

20

30

40

50



- 【図 1 3 D】図 1 3 C の完成した組み立て構造の組み立て方法を示す。
- 【図 1 4】各種 A l - S i C 材料のヤング率のプロットである。
- 【図 1 5】等方性、およびほぼ等方性、の材料のヤング率のプロットである。
- 【図 1 6】複数の断面を見せるためにスライスされた組み立て構造の一実施形態である。
- 【図 1 6 A】図 1 6 の組み立て構造の部分構成要素を示す。
- 【図 1 7】単位セルの別の実施形態である。
- 【図 1 7 A】図 1 7 の単位セルの断面図である。
- 【図 1 7 B】図 1 7 の単位セルの断面図である。
- 【図 1 7 C】図 1 7 の単位セルの断面図である。
- 【図 1 7 D】図 1 7 の単位セルの断面図である。 10
- 【図 1 8 A】さまざまなセル種別のヤング率のための有限要素解析のプロットである。
- 【図 1 8 B】さまざまなセル種別のせん断弾性率のための有限要素解析のプロットである。
- 【図 1 8 C】さまざまなセル種別の体積弾性率のための有限要素解析のプロットである。
- 【図 1 9 A】巨視的な軸方向歪み下の立方体セルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 1 9 B】巨視的なせん断歪み下の立方体セルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 1 9 C】巨視的な静水圧歪み下の立方体セルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 0 A】巨視的な軸方向歪み下の四面体セルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 0 B】巨視的なせん断歪み下の四面体セルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 0 C】巨視的な静水圧歪み下の四面体セルにおける歪みエネルギー分散を示す。 20
- 【図 2 1 A】巨視的な軸方向歪み下の単位セルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 1 B】巨視的なせん断歪み下の単位セルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 1 C】巨視的な静水圧歪み下の単位セルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 2 A】巨視的な軸方向歪み下のオクテットストラットセルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 2 B】巨視的なせん断歪み下のオクテットストラットセルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 2 C】巨視的な静水圧歪み下のオクテットストラットセルにおける歪みエネルギー分散を示す。
- 【図 2 3】さまざまなセル種別の等方性のプロットである。 30
- 【図 2 4】さまざまなセル種別の等方性剛性のプロットである。
- 【図 2 5】さまざまなセル種別の全体剛性のプロットである。
- 【図 2 6】さまざまなセル種別のポアソン比のプロットである。
- 【図 2 7】種々の実験条件下における単位セルの複数の実施形態の設計応力のための有限要素解析のプロットである。
- 【図 2 8】種々の実験条件下における単位セルの複数の実施形態の接線弾性率のための有限要素解析のプロットである。
- 【図 2 9】圧縮された各種 3 D 印刷単位セルの変形を示す。
- 【図 3 0】変形された有限要素モデル上にプロットされた図 2 9 の圧縮された 3 D 印刷単位セルのうちの 1 つの正規化された応力を示す。 40
- 【図 3 1】変形された有限要素モデル上にプロットされた図 2 9 の圧縮された 3 D 印刷単位セルのうちの 1 つの正規化された塑性歪みを示す。
- 【図 3 2】変形された有限要素モデル上にプロットされた図 2 9 の圧縮された 3 D 印刷単位セルのうちの 1 つの正規化された塑性歪みを示す。
- 【図 3 3】変形された有限要素モデル上にプロットされた図 2 9 の圧縮された 3 D 印刷単位セルのうちの 1 つの正規化された応力を示す。
- 【図 3 4】変形された有限要素モデル上にプロットされた図 2 9 の圧縮された 3 D 印刷単位セルのうちの 1 つの正規化された塑性歪みを示す。
- 【図 3 5】変形された有限要素モデル上にプロットされた図 2 9 の圧縮された 3 D 印刷単位セルのうちの 1 つの正規化された塑性歪みを示す。 50

【図 3 6】単位セルの 3 つの実施形態を示す。

【図 3 7】単位セルのゆがんだ実施形態および放射状構成の組み立て構造を示す。

【図 3 8】図 3 7 の単位セルおよび組み立て構造の正面図である。

【図 3 9】単位セルの一実施形態ならびにそのレシプロカルセルの上面図である。

【図 3 9 A】図 3 9 の単位セルならびにそのレシプロカルセルのディアメトリック図である。

【図 3 9 B】図 3 9 の単位セルならびにそのレシプロカルセルの正面図である。

【図 3 9 C】図 3 9 の単位セルならびにそのレシプロカルセルの右側面図である。

【図 4 0】単位セルの一実施形態ならびにそのレシプロカルセルの上面図である。

【図 4 0 A】図 4 0 の単位セルならびにそのレシプロカルセルのディアメトリック図である。

【図 4 0 B】図 4 0 の単位セルならびにそのレシプロカルセルの正面図である。

【図 4 0 C】図 4 0 の単位セルならびにそのレシプロカルセルの右側面図である。

【図 4 1】単位セルの一実施形態ならびにそのレシプロカルセルの上面図である。

【図 4 1 A】図 4 1 の単位セルならびにそのレシプロカルセルのディアメトリック図である。

【図 4 1 B】図 4 1 の単位セルならびにそのレシプロカルセルの正面図である。

【図 4 1 C】図 4 1 の単位セルならびにそのレシプロカルセルの右側面図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

図面を参照すると、一部の参照符号は、図示および説明されている実施形態および図のうちいくつかにわたって同じ、または対応する、部品を示すために用いられている。対応する部品は、複数の異なる実施形態において、小文字を付けて示されている。これらの図に示されている対応する部品の形態または機能における変形例が説明されている。これら実施形態の変形例は、通常、本発明から逸脱することなく、置換可能であることを理解されるであろう。

【0018】

直接製造によって印刷された構成材料を最も効率的に利用する材料形状の特定にあたり、剛性の理論上の上界の極めて大きな部分を実現する気泡形状が開発されている。これら一連の理論上の上界は、多相材料、この場合は二相系、の剛性を定める。これら理論上の上界は、材料の剛性に現れる歪みエネルギーの蓄積を制限する。したがって、最大の剛性は、固有歪みエネルギーの最大蓄積を意味する。これは、高強度を更に示す。

【0019】

これら理論上の上界は、等方性、またはほぼ等方性、の材料についてである。等方性の材料は、方向に依存しない特性を有する。これは、多くの均質材料の巨視的特性であるが、幾何学的形状によって特性が定められる多くの気泡材料の巨視的特性ではない。これら気泡形状は、最も一般的にはメソスケールで用いられ、多数のセルの挙動に起因する有効な巨視的特性をもたらす。用語「マクロスケール」は、フレーム内の梁部材などの部品の規模を指すために用いられる。用語「ミクロスケール」は、微細構造の特徴の長さの規模を指す。例えば、共晶材料系におけるデンドライトである。この場合、メソスケールは相対的に定義される。すなわち、ミクロスケールに比べると大きく、マクロスケールに比べると小さい。全てではないが多くの用途において、気泡網内の各セルのサイズは、それが構成する本体、および/または本体にかかる荷重、に比べると小さい。この材料は、その理論的に最大のほぼ等方性の剛性により、多くの用途のために理想的な工業材料になる。

【0020】

これら材料の各特性は、有限要素 (FE: finite element) モデルを用いて算出される。気泡材料形状の均質化された (有効な) 特性は、均質化手法として公知の手法において、周期的な境界条件を用いて算出される。この手順は、十分に確立されている。モデル結果は、応力および歪みエネルギーの分散の視覚化を可能にする。これらモデル結果により、高性能設計の元となる形態的特徴に関する洞察が得られる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 1 】

材料はそれぞれの形態が極めて異なることが多いので、直接比較が可能なように複数の材料の性能を定量化することも必要である。より高性能の材料を開発するには、既存の設計の材料の適正な特性評価が必要である。このために、この特性評価を助けるいくつかの数量が本明細書に含まれている。これらモデル化ツールを用いると、本明細書に開示されている気泡形状の開発のために必要な洞察が得られる。

## 【 0 0 2 2 】

本明細書に示されている組み立て構造は、より正確には規則配列フォームとして説明されている。その理由は、確率的な連続および独立気泡フォームとは異なり、これら規則配列フォームは、規則的な繰り返し形状を有する連続または独立単位セルを有する気泡材料

10

## 【 0 0 2 3 】

## 【 数 2 】

$$\leq cm$$

## 【 0 0 2 4 】

において、これら材料は、直接製造法を用いて製作可能である一方、例えば大型船舶の船体など、より大きな長さスケールでは、個々のセル面と同じ位小さい複数の区間の接合に接着法を使用できる。ただし、組み立て構造は、技術が許す複数の材料から、技術が許す

20

## 【 0 0 2 5 】

本明細書に開示されている気泡形状の最大の等方性剛性は、モデル化手順を通して特定される、極めて異方性の2つの部分構造の組み合わせによってもたらされる。この組み合わせとは、本明細書に開示されている気泡形状の各特性を生じさせる、これら2つの部分構造の積み上げ、重ね合わせ、または相互貫入である。その結果、各部分構造の相対密度を別々に変化させることによって、本明細書に開示されている気泡形状の異方性を調整できる。本明細書に開示されている気泡形状は、最大の等方性剛性を有する可能性ばかりでなく、剛性効率を維持しながらさまざまな異方性度を有する可能性をも有することを証明

30

## 【 0 0 2 6 】

このFEモデル化均質化手法において、巨視的荷重に一致する一様な歪みが立方体材料の体積に加えられ、歪みおよび応力が材料形状に応じて局在化される。この解析においては、一軸性圧縮応力を体積要素の一面に垂直に加えて、材料の有効ヤング率

## 【 0 0 2 7 】

## 【 数 3 】

$$\bar{E}$$

## 【 0 0 2 8 】

が測定される。有効せん断弾性率

40

## 【 0 0 2 9 】

## 【 数 4 】

$$\bar{G}$$

## 【 0 0 3 0 】

は、せん断歪み境界条件 (BC : boundary conditions) が6つの体積要素のうち4つに適用される純粋せん断応力の適用から算出される。有効体積弾性率

## 【 0 0 3 1 】

【数 5】

$$\bar{K}$$

【0032】

は、静水圧圧縮歪みの適用から算出される。ただし、体積弾性率は、これら立体対称材料においては、一軸応力ケースから算出されたポアソン比およびヤング率

【0033】

【数 6】

$$\bar{\nu}$$

10

【0034】

から独立ではない。全体にわたって、気泡材料の各特性を示すために、パール表記が用いられている。応力および歪みエネルギー分散を視覚化するために、および結果の検証を助けるために、直接静水圧計算が行われる。

【0035】

線形解析において、一単位セルの応答は無限配列の応答と全く同じであり、材料は、有効連続体に埋め込まれたかのように挙動する。この場合、この代表的な応答の算出は、代表体積要素 (RVE: representative volume element) のモデル化と称される。座屈などの非線形解析の場合、システム応答を表すには、複数の単位セルが必要になり得る。一単位セルは、気泡形状を示す基本的な幾何学的特徴を有する基本的な形状単位である。

20

【0036】

商用の有限要素コード A b a q u s を用いて、モデル化結果が生成される。このコードは、モデルの生成、解析、および結果の視覚化を可能にする。これらモデルから剛性パラメータが抽出され、次に、比較に適した方法で編集される。本明細書に記載されている気泡形状は立体対称であり、ひいては独立弾性定数を3つ有する。したがって、これら気泡形状は、弾性定数 E、G、および K、ヤング率、せん断弾性率、および体積弾性率による特性評価がそれぞれ可能である。気泡材料の場合、これらの量は、それぞれ有効量

【0037】

【数 7】

$$\bar{E}, \bar{G}$$

30

【0038】

および

【0039】

【数 8】

$$\bar{K}$$

【0040】

である。複数の気泡材料の性能を体積と比較するために、有効量が構成材料の特性  $E_s$ 、 $G_s$ 、および  $K_s$  によってそれぞれ正規化される。それぞれ異なる形状の剛性を比較するために、相対密度

40

【0041】

【数 9】

$$(\bar{\rho}/\rho_s)$$

【0042】

によって弾性定数を正規化する。式中、

【0043】

【数 1 0】

 $\bar{\rho}$ 

【0 0 4 4】

は、気泡材料の密度であり、 $\rho_s$  は、それぞれの体積固有の特性に対する構成材料の密度である。次に、注目される量は、以下の量である。

【0 0 4 5】

【数 1 1】

$$\frac{\bar{E}/E_s}{\bar{\rho}/\rho_s} \quad (1) \quad 10$$

$$\frac{\bar{G}/G_s}{\bar{\rho}/\rho_s} \quad (2)$$

$$\frac{\bar{K}/K_s}{\bar{\rho}/\rho_s} \quad (3)$$

【0 0 4 6】

これら量の各々は、十分に高密度の等方性構成材料についての単位元

【0 0 4 7】

【数 1 2】

20

$$(\bar{E}/E_s)/(\bar{\rho}/\rho_s) = (\bar{G}/G_s)/(\bar{\rho}/\rho_s) = (\bar{K}/K_s)/(\bar{\rho}/\rho_s) = 1$$

【0 0 4 8】

である。何れの材料形状についても、これら特性は相対密度

【0 0 4 9】

【数 1 3】

$$\bar{E} = \bar{E}(\bar{\rho}/\rho_s) = E_s f_1(\bar{\rho}/\rho_s), \bar{G} = \bar{G}(\bar{\rho}/\rho_s) = G_s f_2(\bar{\rho}/\rho_s)$$

【0 0 5 0】

および

30

【0 0 5 1】

【数 1 4】

$$\bar{K} = \bar{K}(\bar{\rho}/\rho_s) = K_s f_3(\bar{\rho}/\rho_s)$$

【0 0 5 2】

の関数である。式中、 $f_i$  は、相対密度の単調増加関数である。ヤング率およびせん断弾性率  $h_s$  が相対密度

【0 0 5 3】

【数 1 5】

40

$$f_1(\bar{\rho}/\rho_s) \neq f_2(\bar{\rho}/\rho_s)$$

【0 0 5 4】

とは独立に変化する場合、材料の等方性も相対密度の関数である。この場合、異方性の尺度は、以下の比である。

【0 0 5 5】

【数 1 6】

$$\frac{\bar{E}/E_s}{\bar{G}/G_s} \quad (4)$$

【0 0 5 6】

50

これは、ヤング率およびせん断弾性率が相対密度に伴い同様に变化する材料の単位元である。派生項は、以下の項である。

【0057】

【数17】

$$a^* = 1 - |1 - (\bar{E}/E_s)/(\bar{G}/G_s)| \quad (5)$$

【0058】

式中、全ての材料について  $a^* = 1$  である。これは、材料の等方性剛性を算出するために、後でペナルティ項として使用される。立体対称材料の異方性の周知の尺度は、次の Zener 異方比である。

【0059】

【数18】

$$a = \frac{\bar{C}_{11} - \bar{C}_{12}}{2\bar{C}_{44}} \approx \frac{\bar{E}/E_s}{\bar{G}/G_s} \quad (6)$$

【0060】

$a^*$  の類似項が、次のように形成される。

$$a' = 1 - |1 - a| \quad (7)$$

【0061】

式中、すべての材料について  $a' = 1$  である。相対密度の領域内で  $a^*$ 、 $a' = 1$  を有する材料形状においても形状の非線形性により、項  $a^*$  および  $a' = 1$  は相対密度と共に变化する。

【0062】

本明細書に記載されている気泡材料など、剛性の高密度相とポイドまたは気相とで構成された二相材料の性能は、一連の理論上の上界によって制限される。体積弾性率およびせん断弾性率の理論上の上界は、Hashin および Shtrikman によって最良に説明されている。Hashin-Shtrikman (H-S) の上下界は、最良かつ最も厳密であり、本明細書に記載されているシステムに最も該当することが分かった。体積弾性率およびせん断弾性率の理論上の上界は、以下のとおりである。

【0063】

【数19】

$$\frac{K_{HSU}}{K_s} = \frac{4G_s(\bar{\rho}/\rho_s)}{4G_s + 3K_s(1 - \bar{\rho}/\rho_s)} \quad (8)$$

$$\frac{G_{HSU}}{G_s} = \frac{(9K_s + 8G_s)(\bar{\rho}/\rho_s)}{20G_s + 15K_s - 6(K_s + 2G_s)(\bar{\rho}/\rho_s)} \quad (9)$$

【0064】

式中、 $K_{HSU}$  および  $G_{HSU}$  は、それぞれ体積弾性率およびせん断弾性率に対する上界である。ヤング率に対する上界は、次の等方性の線形弾性を想定することによって形成される。

【0065】

【数20】

$$E_{HSU} = \frac{9G_{HSU}K_{HSU}}{3K_{HSU} + G_{HSU}} \quad (10)$$

【0066】

これは、体積弾性率およびせん断弾性率に対する上界の関数である。これら上界は、エネルギー原則に基づき算出され、所与の相対密度を有する材料の固有の巨視的歪みエネルギー

10

20

30

40

50

ギーを制限する。

【 0 0 6 7 】

【 数 2 1 】

$$\Omega = \frac{\bar{E}/E_s + \bar{G}/G_s + \bar{K}/K_s}{E_{HSU}/E_s + G_{HSU}/G_s + K_{HSU}/K_s} \quad (11)$$

【 0 0 6 8 】

この項は、特性

【 0 0 6 9 】

【 数 2 2 】

10

$\bar{E}, \bar{G}$

【 0 0 7 0 】

および

【 0 0 7 1 】

【 数 2 3 】

$\bar{K}$

【 0 0 7 2 】

を有する材料の性能と、理論上の上界を実現する材料の性能とを比較する。これは、これら H - S 上界を同時に実現する材料の場合、単位元値 = 1 を有する。ここで、

20

【 0 0 7 3 】

【 数 2 4 】

$\bar{E} = E_{HSU}, \bar{G} = G_{HSU}$

【 0 0 7 4 】

および

【 0 0 7 5 】

【 数 2 5 】

$\bar{K} = K_{HSU}$

30

【 0 0 7 6 】

である。これら項の定式化によって、 = 1 である等方性材料は、上界が歪みエネルギー汎関数を用いて算出されるため、最大の固有歪みエネルギー密度を有する。これは、材料の全体剛性の尺度である。等方性の全体剛性の尺度は、次のように算出される。

【 0 0 7 7 】

【 数 2 6 】

$$\Psi = a^* \Omega = \frac{a^*(\bar{E}/E_s + \bar{G}/G_s + \bar{K}/K_s)}{E_{HSU}/E_s + G_{HSU}/G_s + K_{HSU}/K_s} \quad (12)$$

40

【 0 0 7 8 】

これら H - S 上界を同時に実現する材料は、 = 1 を有することになる。これら H - S 上界は、等方性、およびほぼ等方性、の材料についてであり、

【 0 0 7 9 】

【 数 2 7 】

$\bar{E} = E_{HSU}$

【 0 0 8 0 】

および

【 0 0 8 1 】

50

## 【数 2 8】

$$\bar{G} = G_{HSU}$$

## 【0082】

を有する材料は、 $a^* = 1$ を有する。この項は、全ての材料について $a^* = 1$ であるため、値範囲  $a^* = 1$ を有し、これら材料については  $a^* = 1$ である。

## 【0083】

これら数値指標を用いて、種々の材料が解析され、以下の幾何学的形状が特定された。図1は、特許請求される気泡形状の単位セル10の一実施形態を示す。この気泡形状は、極めて異方性の2つの材料形状の組み合わせから形成される。一方の材料形状は、高いヤング率と相対的に低いせん断弾性率とを有し、他方は、高いせん断弾性率と相対的に低いヤング率とを有する。この2つの材料形状は、それぞれ、立方体セルまたはボックスセル(CC)12(図1A)、および最近発見されたオクテットフォーム気泡体である。オクテットフォームは、オクテットトラスの独立気泡版であり、八面体および正四面体である複数のセルで構成される。これは、四面体セル(TC)14(図1Bに図示)と称される。これら材料の幾何学的形状は以前に特定されていたが、十分には特性評価が行われておらず、適切な利用が可能ないようには特性の定量化も行われていない。この開発を本発明において具現化するために必要な洞察を実現するには、これを解明するしかない。この2つの形状を組み合わせると、図示のように、特徴的な形状を有するポイドを複数有する単位セル10が作成される。これらポイド形状については、後で図39~図41Cの説明において説明する。単位セル10は、多種多様な材料から形成可能である。これら材料として、これだけには限定されないが、金属、金属合金、ポリマー、プラスチック、エラストマー、セラミック、天然材料、繊維および粒子強化複合材料およびサーメットを含む、ただしこれだけには限定されない、複合材料、および格子と連続および独立気泡フォームを含む気泡材料が挙げられる。

10

20

## 【0084】

図1に示されているように、単位セル10のTC14構成要素は市松パターンで着色されており、CC12構成要素は無着色のままである。これら構成要素形状のセル壁が交わる箇所により上記材料によって画成されるセル端縁16は、黒色の太線で示されている。CC12構成要素と体積要素の境界とが交わる箇所は、破線で表されている。図1において、CC12およびTC14構成要素のセル壁およびセル端縁16は、厚さなしに示されているが、製作時に有限の厚さを有することになる。

30

## 【0085】

図2は、単位セル10aの独立気泡型実施形態を示す。TC14a構成要素は市松パターンで着色されており、CC12a構成要素は無着色のままであり、セル端縁16aは灰色に着色されている。CC12aおよびTC14a構成要素のセル壁およびセル端縁16aの厚さおよび形状は、それぞれ独立に変化させることができる。セル端縁16a構成要素の断面形状は円形断面20aで示されているが、如何なる形状でも可能であり、この形状はセル端縁の長さに沿って可変である。TC14aおよびCC12a構成要素の厚さは、それぞれ異なる値にできる。CC12a構成要素のセル壁の厚さをTC14aおよびCC12a構成要素の個々のセル壁内で、および隣接セル壁間で、変化させると多くの用途において有利であろう。TC14aおよびCC12a構成要素のセル壁の形状を変えて非平面状にする、または隣接セル間での流体輸送を容易にするために1つまたは多くの穴をセル面またはセル端縁に設ける、ことも有利であろう。端縁材料または面材料をアクティブバルブまたは歪み測定装置などの装置に交換する、またはこのような装置を単位セル10aに接続する、ことも一部の用途においては有利であろう。一部の実施形態において(図示せず)、装置は単位セル内に埋め込まれ得る。図3は、図2と同じ実施形態を着色せずに示す。

40

## 【0086】

上で示した単位セルの各々は、種々の構築法を用いて、密着して繰り返される複数のセ

50



ルから成る構造に組み立てまたは構築可能である。例えば、これら単位セルの構築は、材料を除去するシステムを用いて、または選択された材料を溶接、接着剤、ろう付け、または他の接合法によって接着することによって、または上記の3D印刷直接製造法またはインベストメント鑄造の使用によって、行うことができる。例えば、図4は、図2および図3に示されている単位セル10aのコピーを複数備えた組み立て構造22aを示す。図示の実施形態においては18個の単位セル10aが組み立て構造22aを形成しているが、必要に応じて任意の構成の構造を形成するために、任意の数の単位セルおよび種類の異なる単位セルを組み立て得ることを理解されるであろう。図4A~図4Dは、図4の組み立て構造22aの正面図、アイソメトリック図、底面図、および右側面図をそれぞれ示す。

【0087】

10

図5は、単位セル10bの連続気泡型実施形態を示す。この実施形態において、セル壁の厚さはゼロであり、各セル端縁16bの厚さは、図2および図3に示されている実施形態と同じである（しかし、この厚さは必要に応じて変えられ得ることを理解されるであろう）。セル壁が除去されると、隣接セル間の流体輸送が最大になる。流体輸送は、気泡材料の多くの用途において有用である。この連続気泡型実施形態は、前に示した独立気泡型実施形態に密着接合可能である。単位セル10bが部分的に開口されるように、一部の選択されたセルのみの壁厚がゼロになるように単位セル10bを構築することもできることを理解されるであろう。このような実施形態は、特定の用途のために必要に応じて方向付けられた流路を有する、微調整された組み立て構造の作成を可能にするであろう。

【0088】

20

図6は、図2および図3に示されている単位セルの独立気泡型実施形態10aと図5に示されている単位セルの連続気泡型実施形態10bとを組み込んだ組み立て構造22cの一実施形態を示す。連続および独立気泡型実施形態を密着接合させると、流体輸送が一部のセル間でのみ可能になり、その他のセル間では可能にならない。図6A~図6Dは、図6の組み立て構造22cの上面図、アイソメトリック図、正面図、右側面図をそれぞれ示す。

【0089】

単位セルの最も単純な実施形態は、等方性、またはほぼ等方性、の剛性を有する。単位セルのこのような実施形態10dの一例が図7に示されている。この場合、壁厚の比は

【0090】

30

【数29】

$$t_c/t_t = \sqrt{3}$$

【0091】

である。式中、 $t_c$  はCC12d壁の壁厚であり、 $t_t$  はTC14d壁の厚さである。 $t_t$ 、 $t_c$ 、または相対密度

【0092】

【数30】

$$(\bar{\rho}/\rho_s)$$

40

【0093】

のうちの1つを選択することによって、形状が完全に決定される。この構成において、材料はほぼ等方性であり、ほぼ最大の剛性を有する。

【0094】

この実施形態のヤング率、せん断弾性率、および体積弾性率の有限要素結果がそれぞれ相対密度の関数として、図18A~図18Cにプロットされている。構成材料のポアソン比 $\nu_s = 0.3$ は、多くの金属および合金に特有である。構成材料のポアソン比が気泡材料の性能に大きく影響することは知られていない。この実施形態は、プロットされている相対密度範囲にわたって理論上の一連の上界の大部分を実現する。比較のために、立方フォーム(CF)、オクテットフォーム(TC)、およびオクテットトラスの結果が含まれ

50

ている。本明細書に開示されている単位セルを備えた組み立て構造のためのシェル有限要素（塗りつぶされていない大きな正方形）およびソリッド有限要素（塗りつぶされた大きな正方形）の結果は、

【 0 0 9 5 】

【 数 3 1 】

$$\bar{\rho}/\rho_s \approx 10\%$$

【 0 0 9 6 】

において収斂する。Hashin - Shtrikman (H - S) の上界が細い破線でプロットされている。本明細書に開示されている単位セルを複数備えた組み立て構造は、プロットされている相対密度範囲にわたって理論上の上界の大部分を実現し、セル壁がより薄くなり、相対密度がゼロに近づく

10

【 0 0 9 7 】

【 数 3 2 】

$$\bar{\rho}/\rho_s \rightarrow 0$$

【 0 0 9 8 】

に伴い、上界に向けて収斂する。本明細書に開示されている単位セルの2つの部分形状CFおよびTCの結果が小さなダイヤモンドおよび小さな正方形でそれぞれ示されている。これらは、どちらも極めて異方性であり、理論上の上界は適用されない。オクテットトラスの結果が小さな円でプロットされている。各材料の相対密度は、CFおよびTCの壁厚 $t_c$ および $t_t$ （下付き文字 $t$ は、TCの四面体セルを指す）に伴い、またはOT内のストラットの厚さに伴い、それぞれ変化する。CF（小さなダイヤモンド）は、高いヤング率（図18A）と相対的に低いせん断弾性率（図18B）とを有する。逆に、TC（小さな正方形）は、高いせん断弾性率（図18B）と低いヤング率（図18A）とを有する。ヤング率およびせん断弾性率の匹敵するトレードオフがCFおよびTCの形状に見られる。これらがほぼ同じ体積弾性率（図18C）を有することに注目すると、これらの極めて異方性の材料は、ほぼ等方性の材料のためのH - S上界によって制限された限定的な性能を有することが示唆されている。これを定量化するために、全体剛性（方程式11）が図25にプロットされている。ここで、CFおよびTCは、ほぼ同じ全体剛性を有し、それぞれの異方性にも拘らず、ある意味、H - S上界によって制限されているように見える。CFおよびTCは、高い全体剛性を有するが、それぞれの等方性剛性（方程式12）は低い（図24）。

20

30

【 0 0 9 9 】

図18Aおよび図18Bのプロットにおいて、CFおよびTCの剛性は、理論上の上界からほぼ等距離にあるヤング率およびせん断弾性率を有し、ヤング率およびせん断剛性のトレードオフがなされている。この特性の決定により、2つの形状の組み合わせによって組み合わせられた特性を有する単位セルを複数備える組み立て構造の特定が可能になる。本明細書に記載されている単位セル、TC、およびCFの体積弾性率はほぼ同じであり、（図18Cに示されているように）理論上の上界の大部分を実現する。

40

【 0 1 0 0 】

本明細書に開示されている発明は、相対密度がゼロに近づくに伴い、単位元に近づく等方性剛性（図24）および全体剛性（図25）を有することが分かる。本発明の全体剛性は、プロットされている相対密度範囲にわたって、理論上の上界の90%超、 $> 0.9$ 、を実現する。気泡材料の主な適用分野の1つは、軽量の低密度領域

【 0 1 0 1 】

【 数 3 3 】

$$\bar{\rho}/\rho_s \lesssim 0.2$$

【 0 1 0 2 】

50

にある。この場合、本発明は、理論上の全上界の97%超、 $> 0.97$ 、を実現する。

【0103】

図18A~Cにおける結果は、材料応答の延伸成分の観点から最も容易に解釈される。  
低密度限界

【0104】

【数34】

$$\bar{\rho}/\rho_s \rightarrow 0$$

【0105】

において、部材の曲げ剛性は無視できるほど小さい。この点を念頭に置くと、図18A~  
図18Cのプロットにおけるy切片は、延伸により巨視的剛性に寄与する材料部分を示す  
と見ることができる。例えば、CFは、単位セル面に垂直に加わる荷重に位置合わせされ  
る3つの壁のうちの2つを有する。この場合、図18Aにおけるy切片は、約3分の2で  
ある。この場合、剛性へのその他の小さな寄与は、適用荷重に対して直角の壁の延伸およ  
びポアソン効果からもたらされる。図19Aにおける歪みエネルギーの分散は、この分割  
を示す。CFせん断の場合、3つの壁のうちの1つが主応力に位置合わせされ(図19B  
)、y切片は $\sim 1/3$ である(図18A)。立方対称性を有する材料の場合、材料全体が  
主応力および3本の軸線の各々に等しく位置合わせされるため、CFのヤング率が最も高  
い。TFは、逆の特性を有する。各セル壁は、せん断荷重下で主応力に位置合わせされ、  
延伸支配の変形をもたらされる。このシナリオにおけるセル壁内の歪みエネルギーの分散  
は、相応に一樣である(図20B)。最大の等方性剛性を有し得る材料を形成するために  
、これら2つの極めて異方性ではあるが、効率的な材料が、本明細書に開示されている単  
位セル内で組み合わされる(図21A~図21C)。

【0106】

比較のために、オクテットトラス(OT)(図22A~図22C)が結果に含まれてい  
る。OTは、長さの等しい梁またはトラス要素で構成された完全に三角形のトラス構造で  
あり、したがって一義的に定義される。これが重要であるのは、トラス構造は曲がり易い  
からである。長さが等しい複数の部材は、等しい曲げ剛性および強度を有するので、巨視  
的な材料特性が比較的一様になる。オクテットトラスは、 $1/3$ の部材が主応力に軸線方  
向に位置合わせされるので、せん断荷重下での剛性および強度が最大である(図22B)  
。軸方向荷重下で(図22A)、あらゆる部材が同等の曲げを受ける。静水圧荷重下での  
変形(図22C)は、ほぼアフィンである(曲がらない)。ただし、体積剛性は低い(図  
18C)。これは、巨視的な体積剛性を生じさせるために、静水圧の局所的閉じ込めを有  
する必要があることによる。トラス部材内の材料はその軸線を横切る平面において膨張可  
能である一方で、セル面内の材料は面に直角な方向にのみ膨張可能である。オクテット  
トラスの全体的性能は、他の連続気泡材料に比べると良好であるが、本明細書に開示され  
ている単位セルの性能には太刀打ちできない。

【0107】

図23は、本明細書に開示されている発明、2つの構成要素の形状、およびオクテット  
トラスの等方性パラメータ $a^*$ (式5)を示す。本発明の材料は、プロットされている相  
対密度範囲にわたってほぼ等方性である。ただし、壁厚比 $t_c/t_t$ は、異方性を変える  
ために変化させることができる。これは、一部の用途において有利となる。

【0108】

図26は、上記の5つの材料形状のポアソン比を示す。本発明のポアソン比

【0109】

【数35】

$$\bar{\nu} \approx 0.25$$

【0110】

は、プロットされている範囲にわたって相対密度に伴い大幅には変化しない。

## 【0111】

3つの荷重シナリオの代表的な歪みエネルギーの分散が図19A～図22Cにプロットされている。3つの荷重シナリオとは、一軸圧縮（図19A、図20A、図21A、および図22A）、純粋せん断（図19B、図20B、図21B、および図22B）、および静水圧圧縮（図19C、図20C、図21C、および図22C）である。形状は、CF（図19A～図19C）、OF（図20A～図20C）、本明細書に開示されている単位セル（図21A～図21C）、およびオクテットラス（図22A～図22C）である。歪みエネルギーの密度は、巨視的な（平均）歪みエネルギー密度によって正規化される。歪みエネルギーの分散は、図18A～図18Cに示されている剛性の証拠である。加わる歪みは小さく、線形弾性領域内に十分含まれるが、変形を示すために分かり易いように拡大されている。静水圧荷重下（図19C、図20C、図21C、および図22C）での変形は、圧縮下での壁のポアソン膨張による、主に部材の肥厚化から成る。（負の歪みエネルギーは仮想である。）。部材内の様な歪みエネルギーの分散および平均値（1.0）に近い歪みエネルギーの密度は、高性能を示す。逆に、非様な歪みエネルギーは、曲げおよび低性能を示し、平均より大幅に高い歪みエネルギー密度は、局在化および低性能を示す。本発明においては、歪みエネルギーが3つの荷重シナリオの全てにおいて、良好に分散される（3行目）。

10

## 【0112】

図8は、単位セルの別の実施形態10eを示す。この実施形態は、図7に示されている実施形態と同様であるが、セル端縁に沿って幅狭の帯体、すなわち隅肉24e、が追加されている。隅肉24eは、応力集中を鈍らせるために用いられる。この実施形態は、形状の複雑さが追加されていながら、基本的な実施形態の基本的な特徴を維持している一般的な実施形態を表している。図9は、図8に示されている単位セル10eの配列を備えた組み立て構造22eを示す。複数の単位セル10eから成るこのような組立体の周期性は、任意な大きさにでき、製作手法および所望の特性にのみ依存する。

20

## 【0113】

特定の目的のために調整可能なデザインを作成するために、部分構造の異方性を利用できる。例えば、図10は、材料の特性が左から右に、および上から下に、それぞれ異なる方法で変化する一実施形態の組み立て構造22fを示す。図10A～図10Eは、図10の組み立て構造22fの上面図、左側面図、前面図、右側面図、および底面図をそれぞれ示す。組み立て構造22fは、TC壁およびCC壁の壁厚が可変である単位セルを9つ備える。左から右方向にTC壁が厚くなり、各単位セル10fのせん断剛性および強度が増してゆく。一番下から最上部の方向にCC壁が厚くなり、単位セル10fの軸方向の強度およびヤング率（軸方向の剛性）が増してゆく。これら特性の規則的な漸次変化は、立方体および四面体部分構造の異方性特性によってのみ可能である。このように効率的な結果をもたらすように特性を簡単かつ規則的方法で調整できると、極めて効率的な、調整された構造の設計が可能になる。

30

## 【0114】

図11は、梁システムのコア材料である組み立て構造22gの単位セル10gの複数の実施形態を示す。工学システムにおいては、荷重を支えるために一般に梁が用いられる。梁の例として、自転車のフレーム部材、サスペンションリンケージにおけるストラット、または高層ビル内の構造梁が挙げられる。人間の骨および椰子の木の幹のような生物学的梁システムは、密度が徐々に変化する材料で構成される。これは、例えば図10～図10Eに示されている実施形態に示されているように、組み立て構造22fにおいて繰り返し可能である。図11において、組み立て構造22gの密度は、周囲に向かって増大する。周囲は、梁が曲げられるときに応力が最大になる場所である。材料の密度が高いほど強度が高く、梁システムの強度を高める。組み立て構造22gの周囲に近い材料がより高密度であると、梁の横方向の破砕強度も高くなり得る。図11Aは、図11に示されている組み立て構造22gシステムの端面断面図を示す。材料の密度は徐々に変化し、単位セル10gの相対密度は内部で最も低く、組み立て構造22gの周囲に向かって高くなる。単位

40

50

セルの10gの漸次変化は、重要でない箇所の構造質量を下げることによって、高性能設計を助けることができる。組み立て構造22gの周囲の単位セル10gを他より厚くすると、壊れ易い領域の堅牢性および強度を助ける。

【0115】

図12は、複数の単位セル10hをコア材料として有するサンドイッチパネルの形態の組み立て構造22hの別の実施形態を示す。サンドイッチパネルデザインの有用性は周知である。図12Aは、組み立て構造22hの正面部分を示す。

【0116】

図13は、本明細書に記載されている単位セルの立方体壁のうちの3つと4つの四面体とを形成するために、切断および折り曲げ可能な平面状パターン25iの一例を示す。これら4つのパターンは、4つの四面体セルの共有面を示す。8つの四面体と6つの立方体セル壁とで構成された単一の単位セルを形成するために、これらパターン25iのうちの2つを切断して折り曲げ、接着する必要がある。繰り返される噛合式セル構造を形成するために、これら単位セルを噛み合わせることができる。極めて軽量の組み立て構造を形成するには、紙、繊維強化複合材料、等々などの肉薄の平面状材料を使用できる。紙、繊維強化複合材料、等々から成る出荷用材料および使い捨てのエネルギー吸収組み立て構造は、このような単位セルについて考えられる用途である。図13A～図13Dは、折り曲げられて単位セルの半分を構成する平面状パターン25iのさまざまな図を示す。この平面状パターン25iは、図13Eに示されているように同一部材の折り曲げられた平面状パターン25iと組み合わせられると、図13Fに示されているように繰り返し可能な組み立て構造22iを形成するために他の単位セルと噛み合わせることができる単位セル10iを構成する。このような単位セルを4つ用いて構成される構造の組み立て方法が図13Gに示されている。

【0117】

図14は、壁厚

【0118】

【数36】

$$t_c/t_t = \sqrt{3}$$

【0119】

と、オクテットラスと、ハニカムの測定特性とを有する実施形態のFE結果を示す。Al-SiC複合材料で構成された単位セルを備えた、ほぼ等方性の組み立て構造(図14では「単位セルフォーム」と呼称)の性能は、低密度においてハニカムの性能より数桁優れている。確率的フォームの剛性は、約 $E^{1/2}$ で変倍されている。本明細書に開示されている各単位セルは、理論的に最大の等方性剛性を効果的に有し、ほぼ $E$ で変倍されている。

【0120】

あらゆる製造方法が独立気泡形状の製作を可能にするわけではない。選択的レーザー焼結(SLS: selective laser sintering)法、および前駆体材料の槽から凝固させる他の方法、またはインベストメント鑄造において、この前駆体材料は、独立気泡の作成における成形工程においても囲まれる。したがって、図16に示されているような完全に独立した単位セルを複数備えた組み立て構造22jをこのようなシステムから作成するには、望ましくない材料の封入を回避する部品の形状に組み立て構造22jを作成すること、またはこの材料を除去することが必要である。これは、図16Aに示されている。図16の組み立て構造22jは、3つの部分部品28jの組み合わせとして構築され得る。これら部分部品28jは、3つの非独立気泡層26jから構築される。これら3つの非独立気泡層26jは、図16に示されている完全な独立気泡組み立て構造22jを形成するために接着される。図示されているのは、独立気泡セットを形成するために接着される3つの非独立部分である。これは、単なる例示的な実施例であり、必ずしも適正な手法を示しているとは限らない。適切な解析に引き続き、高応力または壊れ易い

10

20

30

40

50

領域における溶接を回避するために、非独立部分の解析を行うことができる。あるいは、部品が大きな大気圧変化を受ける航空宇宙などの用途においては、流体の輸送を可能にするためにポイドをセル面に選択的に配置できる。ポイドは、第2相または前駆体材料を除去する手段としても役立つ。これら部分の間の界面は、図16に示されているように、平面状である必要はない。実際に、非平面状の界面は、接着される表面積がより大きいので、好適であり得る。

【0121】

組み立て構造の製作は、接着剤、溶接、またはろう付けなど、より伝統的な接着法によって行うこともできる。個々の単位セルは、薄板からの切断、成形、機械加工、または積層造形によって製作可能であり、その後接着して単位セルを形成できる。例えば、立方体の部分構造は、段ボール製ワインボックスに見られるように、複数のスロットによって四角形の板同士を接合することによって形成可能である。四面体セルの部分構造は、三角形の4枚の板を端縁で接合することによって形成可能である。次に、8つの四面体セルを立方体の単位セルの8つのオクタントに接着することによって、完全な単位セルを形成できる。本明細書に示されている各単位セルは、同じ特徴的寸法を有する立方体である。立方体および四面体の部分形状の特徴的寸法は異ならせることもでき、平行移動によって、剛性を損ねることなく、相対的な向きを変えることもできる。

10

【0122】

本明細書に記載されている方法で構成材料に多孔性を追加することによって、新奇な剛性を有する材料システムを製作でき、組み立て構造の可能性を大きく広げることができる。サンドイッチパネルは、コアの剛性が主要な設計変数であるため、これらハイブリッド材料の用途のために注目される最も重要なシステムである。本明細書に開示されている単位セルを備えた組み立て構造の高剛性は、相応する軽量化をもたらす。所与の剛性設計要件において、競合する解決策より10倍剛性の構造は、10倍軽量である。航空宇宙、レール、および船舶用途に見られるような高性能構造の領域において、部品および車両の質量の低減は、性能および稼働コストの両方において大幅な効率向上をもたらすであろう。船体、航空宇宙用サンドイッチパネル、およびエネルギー吸収構造は、何れも、相対密度が低い領域において部分質量を10分の1超下げることによって、この種の剛性材料の恩恵を受けることができる。高い剛性および強度効率が必要とされる何れの用途においても、確率的フォームおよび格子構造の代わりに、複数の単位セルを備えた組み立て構造を使用できるので、このような組み立て構造を無数の解決策に適用できる。

20

30

【0123】

図17は、単位セル10kの一実施形態を示す。図17A~図17Dに示されている断面スライスは、高度に位置合わせされたシステムを明らかにする。このような単位セル10kを複数備えた組み立て構造も高度に位置合わせされた部分構造を有することになる。

【0124】

図36は、他の3つの単位セル10l、10m、10nの実施形態を示す。最も単純な単位セル10lは、関連する3つの数量、すなわち、立方体壁厚 $t_c$ 、四面体壁厚 $t_t$ 、または相対密度

40

【0125】

【数37】

$$\bar{\rho}/\rho_s$$

【0126】

のうちの1つを選択することによって完全に記述される。相対密度を選択すると、形状および壁厚が規定される。この単位セル10lにおける壁厚比は

【0127】

【数38】

$$t_c = \sqrt{3}t_t$$

50

## 【 0 1 2 8 】

である。これは、幾何学的に定義され、図 3 6 に示されている。C C 1 2 1 壁 ( A 1 . 1、濃灰色 ) は、セル端縁に沿って T C 1 4 1 壁 ( A 1 . 2、薄灰色 ) に重なる。これら末端区間における重なり領域は縞状に示されている。図 3 6 の左側の単位セル 1 0 1 に示されているように、

## 【 0 1 2 9 】

## 【 数 3 9 】

$$t_c = \sqrt{3}t_t$$

## 【 0 1 3 0 】

であるとき、重なり領域 ( A 1 . 3 ) に三角形が形成される。この構成において、材料はほぼ等方性である ( この構成のための等方性が図 2 3 にプロットされている )。図 3 6 の中央の単位セル 1 0 m に示されているように、

## 【 0 1 3 1 】

## 【 数 4 0 】

$$t_c < \sqrt{3}t_t$$

## 【 0 1 3 2 】

であるとき、材料は相対的に剛性であり、せん断に強く、単位セル 1 0 m をより異方性に行っている。図 3 6 の右側の単位セル 1 0 n に示されているように、

## 【 0 1 3 3 】

## 【 数 4 1 】

$$t_c > \sqrt{3}t_t$$

## 【 0 1 3 4 】

であるとき、材料は相対的に剛性であり ( 高いヤング率を有し )、軸線方向に強い。

## 【 0 1 3 5 】

## 【 数 4 2 】

$$t_c \neq \sqrt{3}t_t$$

## 【 0 1 3 6 】

である場合、別の変数の導入が必要であり、重なり領域が三角形にならない。幾何学的特徴の中でも、とりわけパラメータ  $t_c$  および  $t_t$  を変化させると、多くの用途において有利になる。図 3 6 に示されている 3 つの実施形態の全てにおいて、四面体壁厚は等しいので、全ての薄灰色領域 A 1 . 2 が、重なり領域 A 1 . 3 も含め、等しくなる。

## 【 0 1 3 7 】

図 3 7 は、別の実施形態を示す。この実施形態においては、単位セル 1 0 o を複数備えた組み立て構造 2 2 o が放射状構成に組み立てられるように、単位セル 1 0 o はゆがんでいる。図 3 8 は、単位セル 1 0 の正面図および図 3 7 の放射状組み立て構造 2 2 を示す。これは、基本的な単位セルの可撓性を示している。図 3 7 および図 3 8 には完全に円形のチューブが示されているが、非円形チューブ、円弧、樋、溝、等々など、組み立て構造の他の構成も可能であることを理解されるであろう。湾曲構造および管状構造は、工学および航空宇宙用途において、例えばロケットの本体などとして、一般的である。

## 【 0 1 3 8 】

先に紹介したように、本明細書に開示されている単位セルを形成する気泡形状は、立方体セル ( C C ) 形状と四面体セル ( T C ) 形状との組み合わせで形成される。この 2 つの形状の組み合わせは、特徴的な形状を同じく有するポイドを有する単位セルを作成する。図 3 9 ~ 図 3 9 C は、単位セル 1 0 p の実施形態を、レシプロカルセル 3 0 p として表されたポイド形状と共に、示す。この実施形態は、形状パラメータ  $t_t / L = 0 . 0 6$  および

10

20

30

40

50

【 0 1 3 9 】

【 数 4 3 】

$$t_c/t_t = \sqrt{3}$$

【 0 1 4 0 】

によって記述される。式中、 $t_t$  は四面体壁厚であり、 $t_c$  は立方体壁厚であり、 $L$  は立方体 R V E の特徴的寸法である。レシプロカルセル 3 0 p は、八面体（濃灰色）、非正四面体（薄灰色）、および正四面体（市松パターン）から成る。八面体は、R V E のコーナーの中心に位置する。八面体セルの 8 つの面は、8 つの正四面体セルに当接する。この場合、非正四面体セルは、正四面体セルの間に位置する。

10

【 0 1 4 1 】

図 4 0 ~ 図 4 0 C は、単位セル 1 0 q の別の実施形態を、レシプロカルセル 3 0 q として表されているポイド形状と共に、示す。この実施形態は、形状パラメータ

【 0 1 4 2 】

【 数 4 4 】

$$t_t/L = 0.06, t_c/t_t = \sqrt{3}$$

【 0 1 4 3 】

および  $r/L = 0.02$  によって記述される。式中、 $t_t$  は四面体壁厚であり、 $t_c$  は立方体壁厚であり、 $L$  は立方体 R V E の特徴的寸法であり、 $r$  は隅肉の半径である。この実施形態では、図 3 9 ~ 図 3 9 C の実施形態に隅肉が追加されている。レシプロカルセル 3 0 q は、この実施形態において、八面体（濃灰色）、非正四面体（薄灰色）、および正四面体（市松パターン）と、隅肉付き端縁とから成る。八面体型セルは、R V E のコーナーの中心に位置する。八面体型セルの 8 つの面は、8 つの正四面体型セルに当接する。この場合、非正四面体型セルは、正四面体型セルの間に位置する。

20

【 0 1 4 4 】

図 4 1 ~ 図 4 1 C は、単位セル 1 0 r の別の実施形態を、レシプロカルセル 3 0 r として表されているポイド形状と共に、示す。この実施形態は、形状パラメータ  $t_t/L = 0.06$  および  $t_c/L = 0.20$  によって記述される。式中、 $t_t$  は四面体壁厚であり、 $t_c$  は立方体壁厚であり、 $L$  は立方体 R V E の特徴的寸法である。立方体壁が十分な相対厚さを有するとき、八面体ポイド（濃灰色）の頂点と正四面体（市松パターン）の端縁とは、面取りされる。八面体型セルは、R V E のコーナーの中心に位置する。八面体セルの 8 つの面は、8 つの正四面体型セルに当接する。この場合、非正四面体セルは、正四面体型セルの間に位置する。

30

【 0 1 4 5 】

3 D 印刷を用いた本発明の二次加工適性を実証するために、図 8 に示されているように隅肉を有する実施形態の単一の単位セルを試験用に製作した。この形状は、形状パラメータ

【 0 1 4 6 】

【 数 4 5 】

$$t_t/L = 0.02, t_c/t_t = \sqrt{3}$$

40

【 0 1 4 7 】

および  $r/L = 0.02$  によって定義される。式中、 $t_t$  は四面体壁厚であり、 $t_c$  は立方体壁厚であり、 $L$  は立方体 R V E の特徴的寸法であり、 $r$  は隅肉の半径である。得られた材料形状は、相対密度

【 0 1 4 8 】

【 数 4 6 】

$$(\bar{\rho}/\rho_s) = 23.8\%$$

50



【 0 1 4 9 】

を有する。この種の4つの同じ単位セルをABSプラスチックを利用するStratasys uPrint SE Plusを用いて製作した。単位セルの特徴的寸法は、 $L = 0.05$ メートルである。

【 0 1 5 0 】

複数の実施形態のヤング率、せん断弾性率、および体積弾性率についての有限要素結果、すなわち、

【 0 1 5 1 】

【 数 4 7 】

$$t_c/t_t = \sqrt{3}$$

10

【 0 1 5 2 】

および隅肉半径  $r/L = 0.02$  を有する結果、が相対密度に対して図42A、図42B、および図42Cに、それぞれプロットされている（塗りつぶされた丸）。隅肉の追加は、隅肉なしの実施形態に比べ、剛性を僅かに高めるために役に立つ（塗りつぶされた正方形および塗りつぶされていない正方形）。隅肉なしの結果は、図18A～図18Cおよび図23～図26にプロットされている結果である。この隅肉付きの実施形態は、僅かにより等方的である（図43）。

【 0 1 5 3 】

図44および図45は、この隅肉付き実施形態の等方性剛性および全体剛性をそれぞれ示している（塗りつぶされた丸）。隅肉付き実施形態は、隅肉なしの実施形態に比べ、全体剛性および等方性剛性がより高い（塗りつぶされた正方形および塗りつぶされていない正方形）。

20

【 0 1 5 4 】

図46は、隅肉付き実施形態のポアソン比を示す（塗りつぶされた丸）。ポアソン比は、隅肉の追加によって無視できるほど小さな影響を受ける。隅肉なしの実施形態が塗りつぶされた正方形と塗りつぶされていない正方形とを用いてプロットされている。

【 0 1 5 5 】

図27および図28は、4つの実験ならびに有限要素（FE）解析計算についての実験応力対歪み曲線および接線弾性率対歪み曲線をそれぞれ示す。応力は、材料の降伏強度  $\sigma_y$  および相対密度

30

【 0 1 5 6 】

【 数 4 8 】

$$\bar{\rho}/\rho_s$$

【 0 1 5 7 】

によって正規化される。歪みは、構成材料における降伏歪み  $\epsilon_y$  によって正規化される。最も低い測定ピーク強度（実験番号4）は、不完全な単一の単位セルの算出強度にほぼ等しい、

【 0 1 5 8 】

【 数 4 9 】

$$(\bar{\sigma}/\sigma_y)/(\bar{\rho}/\rho_s) \approx 0.63$$

40

【 0 1 5 9 】

。最も高い測定ピーク強度（実験番号1）は、無欠陥の周期材料の予測強度を超える、

【 0 1 6 0 】

【 数 5 0 】

$$(\bar{\sigma}/\sigma_y)/(\bar{\rho}/\rho_s) \approx 0.75$$

【 0 1 6 1 】

50

。導入される欠陥は、固有モードの欠陥であり、如何なる材料点においても最大変位は  $d/L = 0.25\%$  である。式中、 $d$  は最大変位の大きさであり、 $L$  は立方体 RVE の特徴的寸法である。応力対歪み応答は、ピーク強度の達成前はほぼ双線である（図 27）。各線形領域は、接線弾性率の平坦域に対応する（図 28）。FE データは、複数の破壊歪みを位置合わせするために、実験データからオフセットされている。破壊歪みは、実験において  $\gamma_y = 2.5$  である。測定される実験応答は、FE モデルによって十分に予測される。ただし、試験試料の初期ベディングインおよび対応する初期剛性の増大は捕捉されない。データマーカーは、図 29 および図 30 ~ 図 35 にそれぞれ示されている有限要素解析結果のプロットおよび各実験の画像に対応する。

#### 【0162】

図 29 は、3D 印刷されたオフホワイト ABS プラスチック製単位セルの圧縮変形の実験結果を示す。2 つの実験が示されている。すなわち、実験番号 3（図 29 の左側の 2 つの列）および実験番号 4（図 29 の右側の 2 つの列）である。対応する応力対歪み応答が図 27 にプロットされている。接線弾性率対歪み応答が図 28 にプロットされている。変形を強調するために、複数の線がオフホワイト ABS プラスチック製単位セルに描かれている。各記号は、図 27 および図 28 の記号に対応しており、画像内の巨視的応力および歪みを示す。圧縮は、鉛直軸線に沿っている。印刷方向は、荷重方向に対して垂直（左）および平行（右）である。応力の初期線形領域対歪み応答の直線は、ほぼ直線のままであり、線形弾性応答を示している。四面体セルの僅かな座屈（反り）が見られる（円、最上列）。初心者用の商用 3D プリントを用いて試験試料を製作した。このプリンタは、印刷経路におけるエラーに起因する欠陥を印刷材料に発生させる。これら欠陥は表面粗さをもたらし、有意な巨視的荷重の発現の前に、表面を変形させる。このベディングインは、材料の初期剛性を低下させ、セル壁の僅かな座屈および位置ずれを発生させる。これらの現象は、これら試料の製作に用いた特定の 3D 印刷工程の結果であり、材料形状の固有の特性ではない。双線応答における第 2 の線形領域は、四面体セル壁の座屈によって特徴付けられる（三角形、中央列）。連続荷重は、最終的には立方体壁に座屈を発生させ（正方形、一番下の列）、強度の低下を引き起こす。ピーク荷重における四面体壁の塑性（永久）変形は、印刷された層に層間剥離（実験番号 3）およびシワ（実験番号 4）として現れる特徴に対応付けられる。印刷された層の層間剥離は、FE モデルには捕捉されず、更に高い測定強度の実現可能性を示唆している。

#### 【0163】

図 30 ~ 図 35 は、複数の欠陥を含む変形された有限要素解析モデルの上にプロットされた、正規化された応力（図 30 および図 33）および正規化された塑性歪み（図 31、図 32、図 34、および図 35）をそれぞれ示す。図 30 ~ 図 32 には周期材料が示されており、図 33 ~ 図 35 には単一の単位セルの構造が示されている。応力は、巨視的応力によって正規化されている。塑性歪みは、ABS プラスチックとしてモデル化された構成材料の降伏歪みによって正規化されている。材料特性は線形弾性  $E = 1.84 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.40$ 、 $\gamma_y = 0.1\%$  としてモデル化され、モデルを安定化するために 1% の歪み硬化が用いられている。これら欠陥は、固有モード型であり、如何なる材料点においても最大変位の大きさは  $d/L = 0.25\%$  である。式中、 $d$  は最大変位の大きさであり、 $L$  は立方体 RVE の特徴的寸法である。巨視的歪みのさまざまなレベルにおける結果の間の比較を容易にするために、巨視的歪みは 25% に変倍されている。この場合、示されている局所的歪みは加えられた歪みに対してであり、形状内の歪みの局在化を示している。これら変形を発生させる巨視的歪みおよび応力は、対応する記号と共に、図 27 にプロットされている。応力対歪み応答の初期線形領域において（図 30 および図 33）、歪みは比較的一様である。この形状における欠陥は、セル壁内の材料の横方向変位における、これら大きく変倍された、変形において明らかである。これら横方向変位は極めて小さく、完全な、および不完全な、形状のヤング率の差は無視できるほど小さい。周期材料および単一の単位セル構造の剛性は、この実施形態における初期線形弾性領域において、ほぼ同じ  $E_{T, \text{single cell}} / E_{T, \text{periodic}} > 95\%$  である。双線応力対

歪み応答の第2の線形領域において(図31および図34)、立方体セル壁において可塑性が始まり、四面体壁の弾性座屈が生じる。四面体壁では、ピーク荷重の近くで可塑性が始まっている(図32および図35)。単一の単位セル構造において適用荷重の軸線周りのねじりモードが明らかである。単一のセル構造は、周期材料より可撓性が高い。その理由は、隣接材料からの支持がないため、単一セル構造における制約が相対的に小さいことによる。FE結果は、質的にも量的にも、実験結果と極めて一致している。ピーク測定強度は、材料の~75%が巨視的荷重のピーク時に降伏したことを示す。これは、形状全体にわたる塑性歪みの広範囲な分散によって質的に支持される(図32および図35)。

【0164】

図15は、各種構成材料を含めるために拡張された、この隅肉付き実施形態のFE結果を示す。利用可能なほぼ等方性の材料の宇宙に比べると、これら組み立て構造は、高い剛性を低密度と共にもたらす特性空間の大きな、そうでなければ空いている、領域を占める。これは、図15に示されている。この図は、単位セルを複数備えた等方性の組み立て構造(図15においては「単位セルフォーム」と呼称)を、繊維、ラミネート、および木材などの(such)異方性材料を除く、他のほぼ等方性の材料に関連付けている。例えばベリリウムで構成される場合、複数の単位セルを備えた組み立て構造は、特性空間の大きな空き領域を満たす可能性を有する。金属フォームのためのより一般的な構成材料、例えばAl-SiC微粒子複合材料、で構成される場合であっても、複数の単位セルを備えた組み立て構造の性能は、以前は達成不可能であった特性空間の領域に収まる。ダイヤモンドで構成される場合、本明細書に記載されている一部の実施形態の特性は基本的に、材料特性空間の上界を規定する。

10

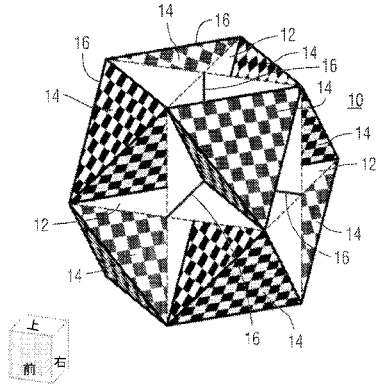
20

【0165】

いくつかの好適な実施形態を参照して、本発明を説明した。上記明細書を読まれて理解されると、多くの変更および変形が他人でも思い付けられるであろう。本発明は、添付の特許請求の範囲またはこれら請求項の均等物の範囲内にある限り、このような変形および変更を全て含むと解釈されるものとする。特許請求されている各方法のいくつかのステップは、特許請求されている順番以外でも実施可能であり、これら特定のステップのためには一切の順序が不要であることを当業者は分かるであろう。

30

【 図 1 】



【 図 1 A 】

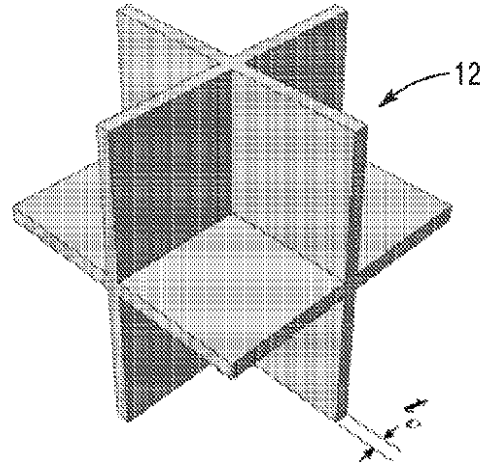


Fig.1A

【 図 1 B 】

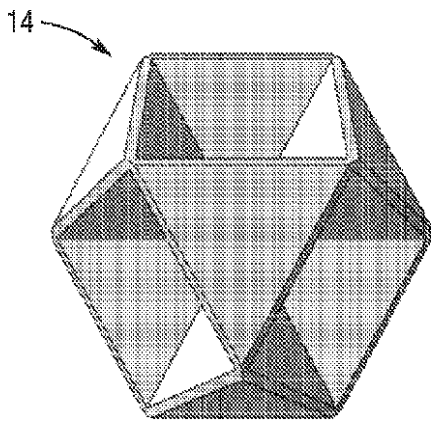
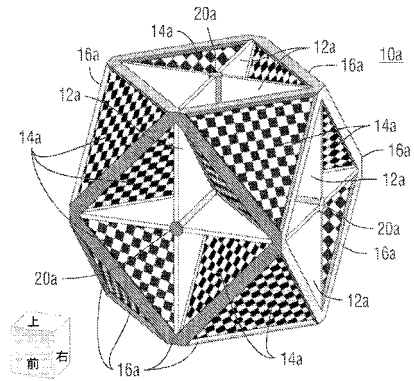
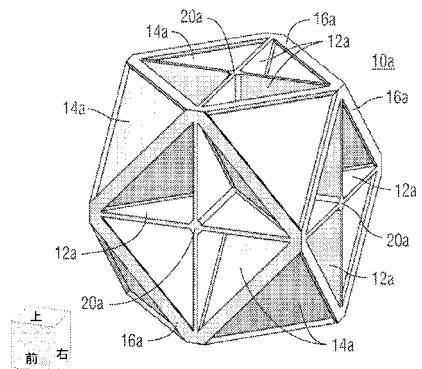


Fig.1B

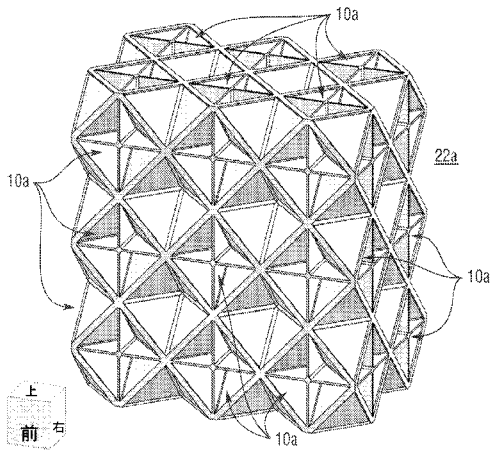
【 図 2 】



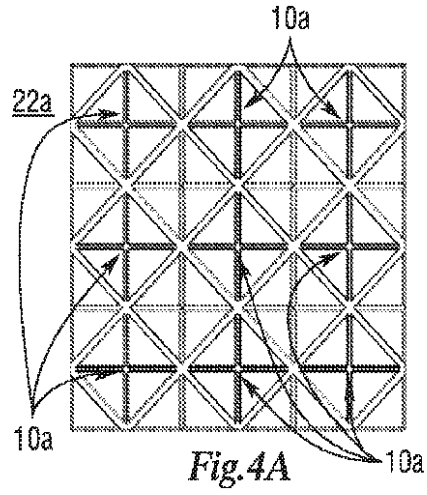
【 図 3 】



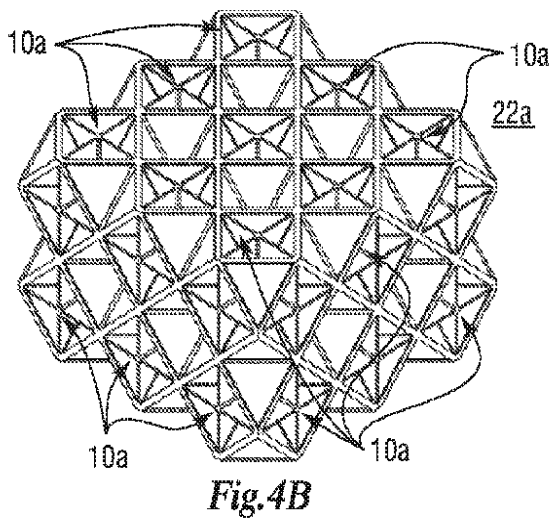
【 図 4 】



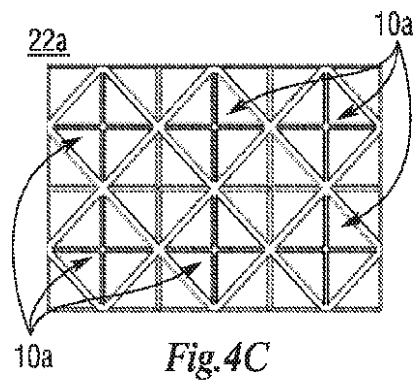
【 図 4 A 】



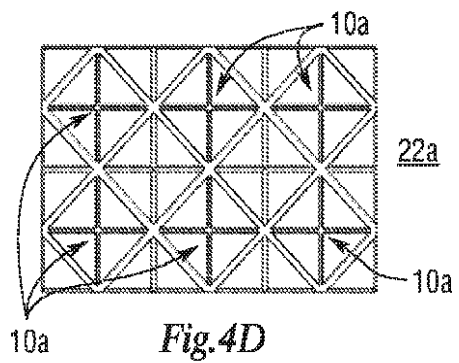
【 図 4 B 】



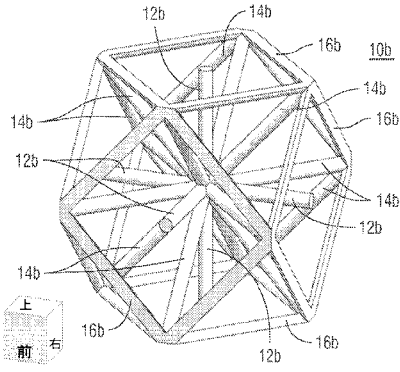
【 図 4 C 】



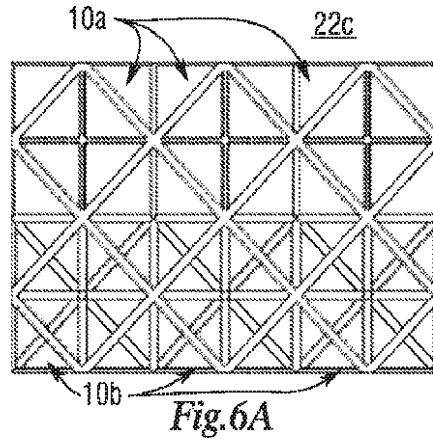
【 図 4 D 】



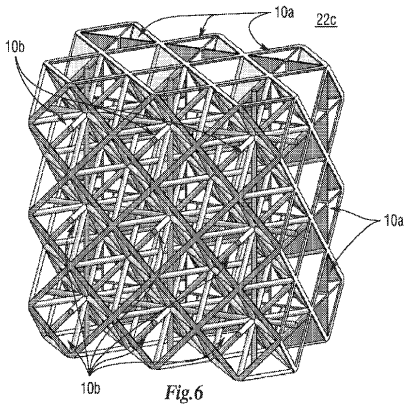
【 図 5 】



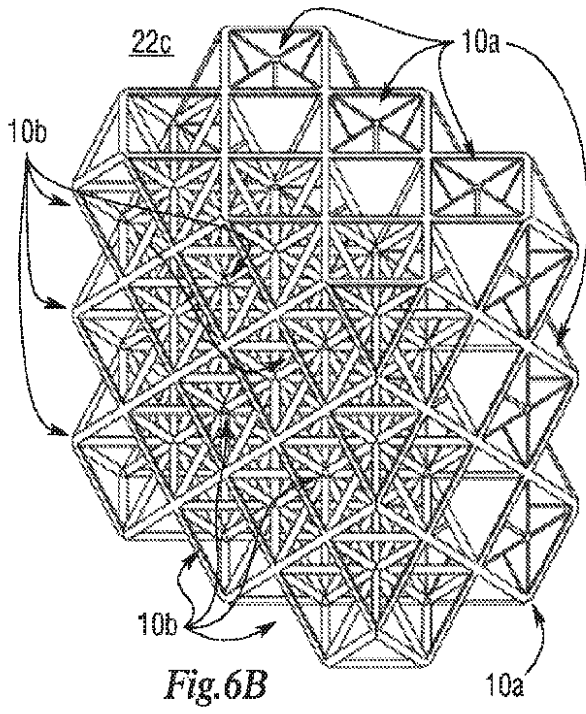
【 図 6 A 】



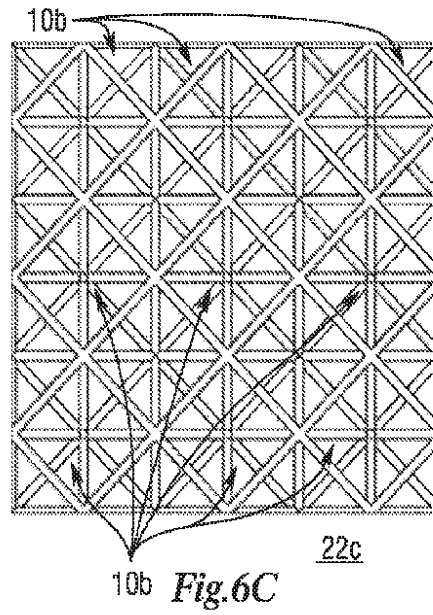
【 図 6 】



【 図 6 B 】



【 図 6 C 】



【 図 6 D 】

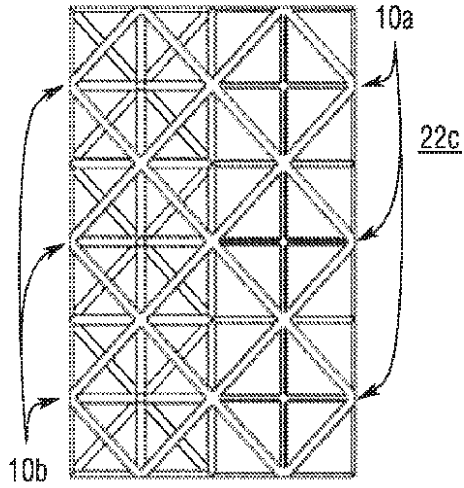
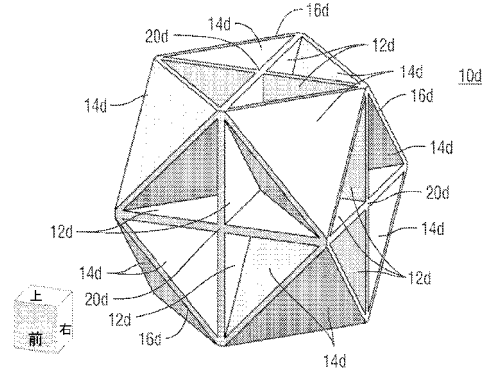
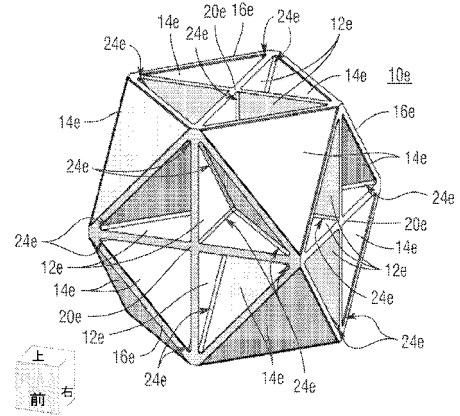


Fig.6D

【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】

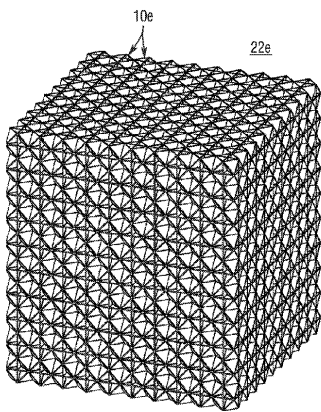
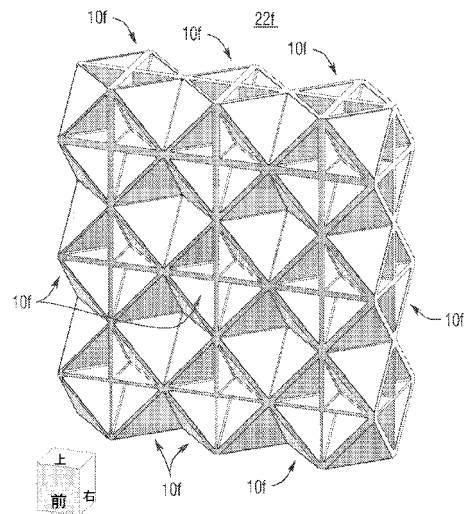
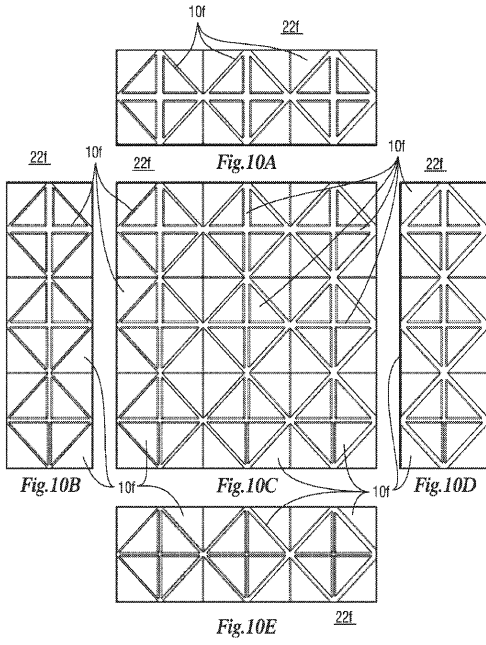


Fig.9

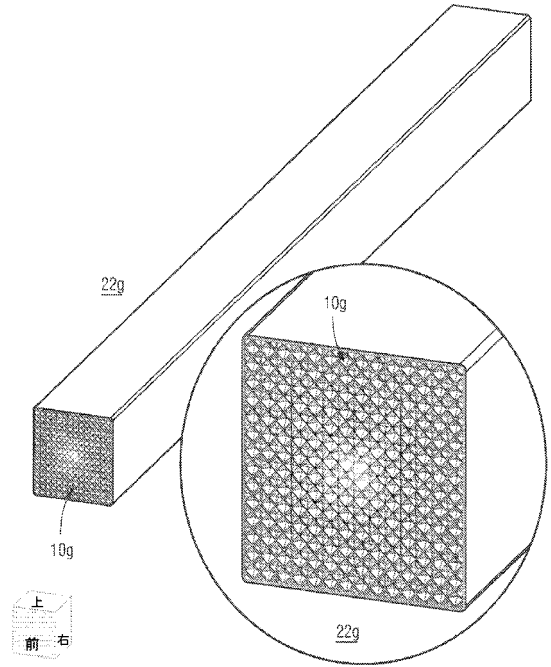
【 図 10 】



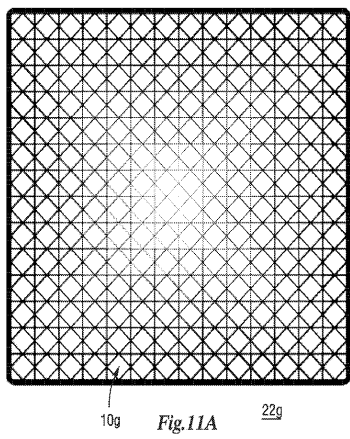
【 図 1 0 A - 1 0 E 】



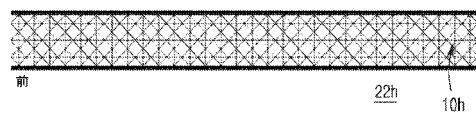
【 図 1 1 】



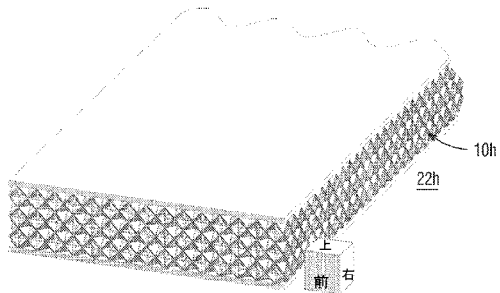
【 図 1 1 A 】



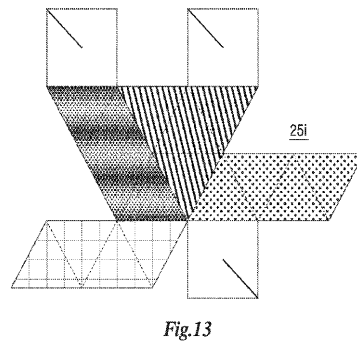
【 図 1 2 A 】



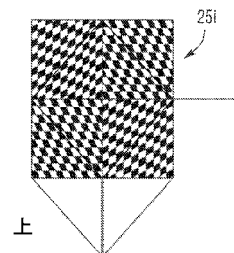
【 図 1 2 】



【 図 1 3 】

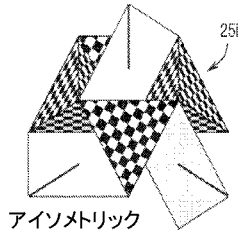


【 図 1 3 A 】

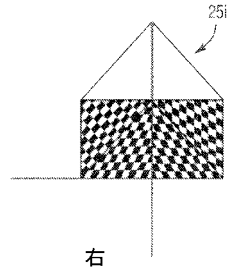




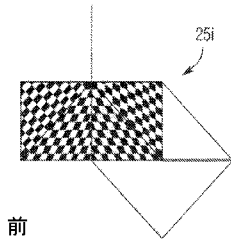
【図 13 B】



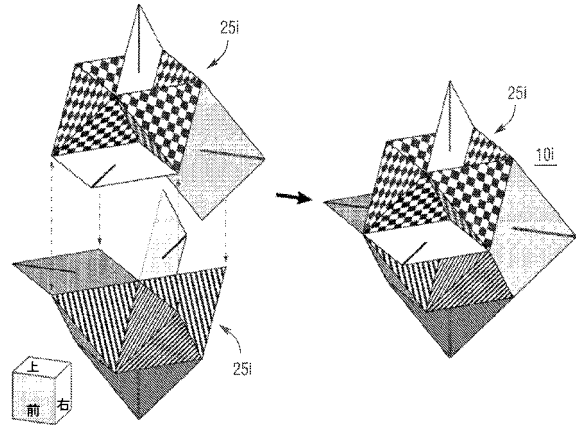
【図 13 D】



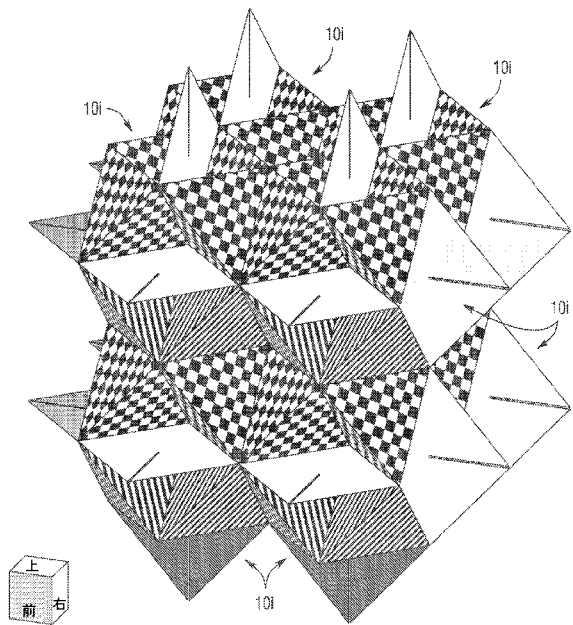
【図 13 C】



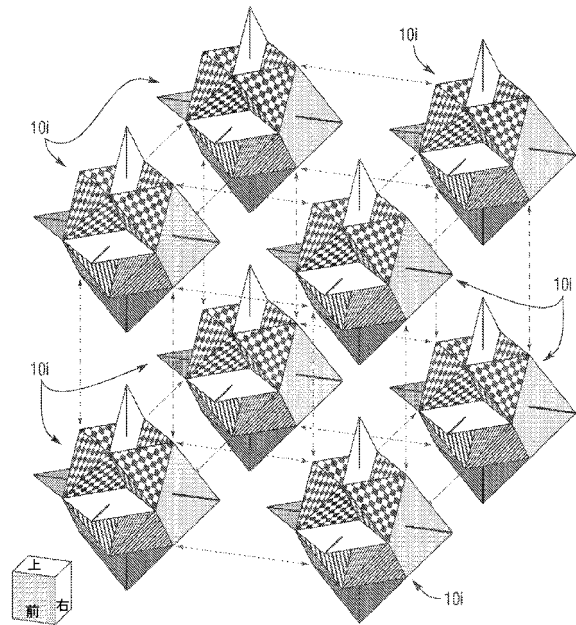
【図 13 E】



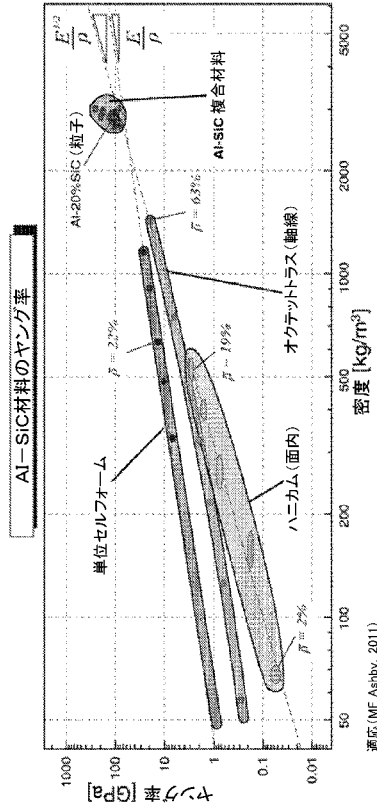
【図 13 F】



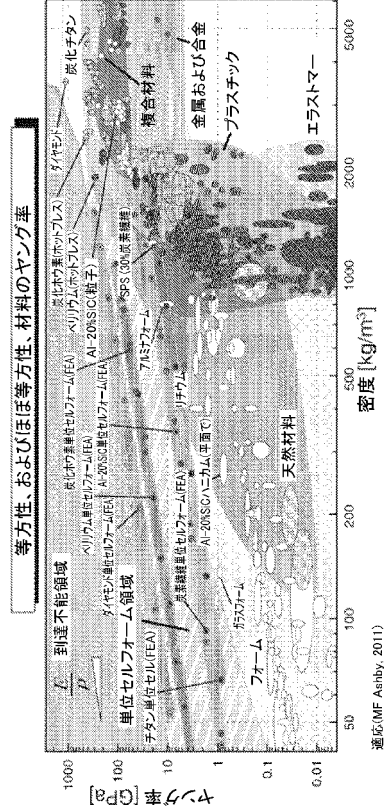
【図 13 G】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



【 図 1 6 】

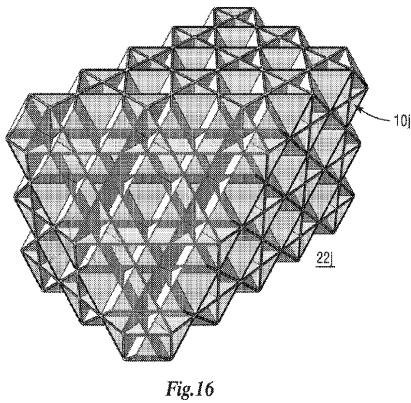


Fig.16

【 図 1 7 】

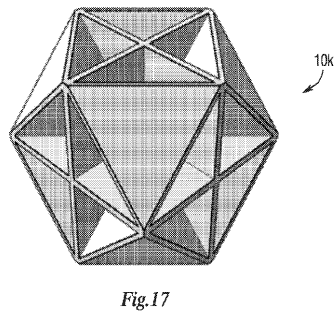


Fig.17

【 図 1 6 A 】

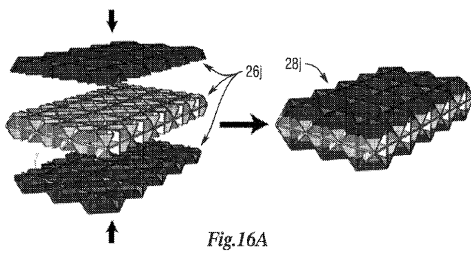


Fig.16A

【 図 1 7 A 】

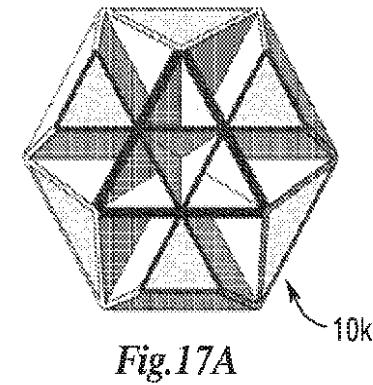
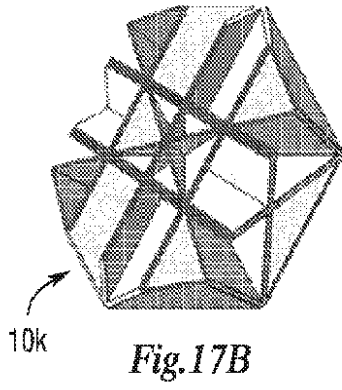
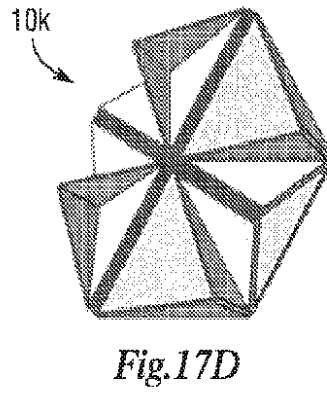


Fig.17A

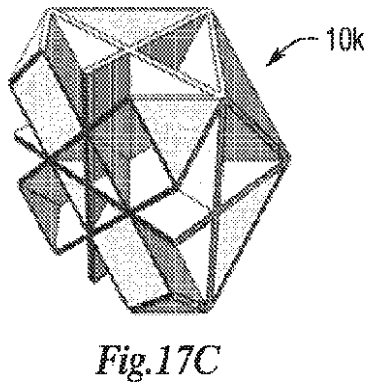
【図17B】



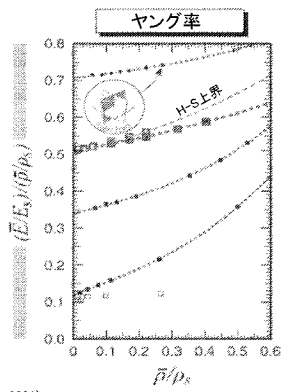
【図17D】



【図17C】

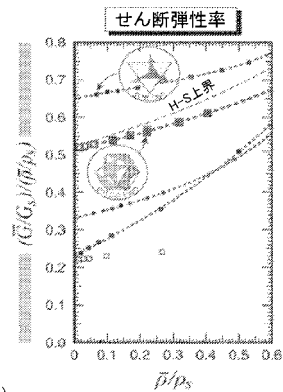


【図18A】



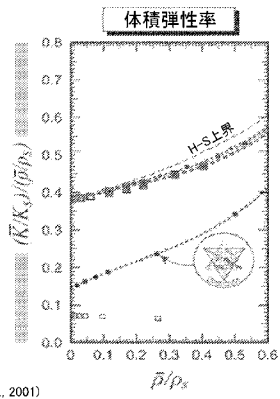
(Deshpande et al., 2001)

【図18B】



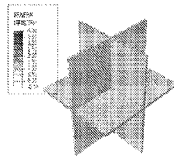
(Deshpande et al., 2001)

【図 18 C】

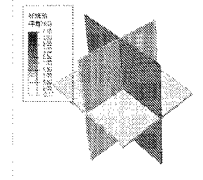


(Deshpande et al., 2001)

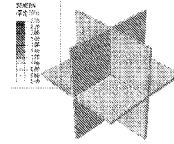
【図 19 A】



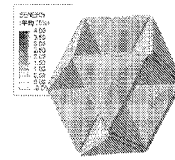
【図 19 B】



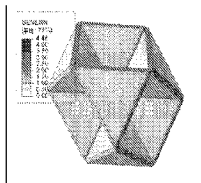
【図 19 C】



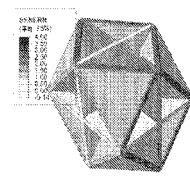
【図 20 A】



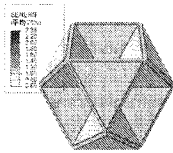
【図 20 B】



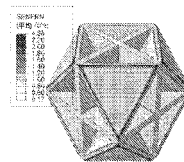
【図 21 B】



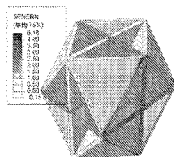
【図 20 C】



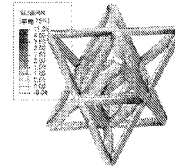
【図 21 C】



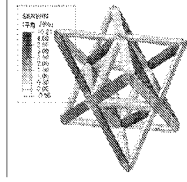
【図 21 A】



【図 22 A】



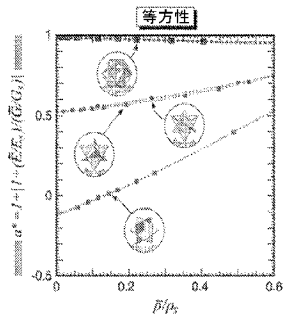
【図22B】



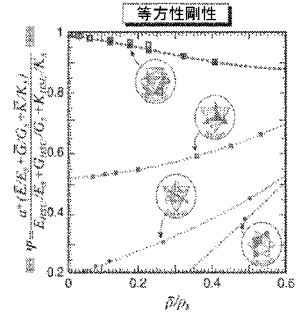
【図22C】



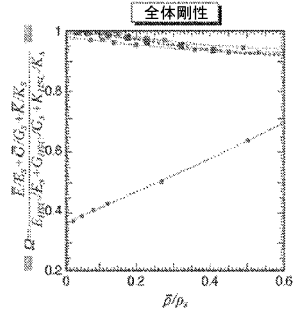
【図23】



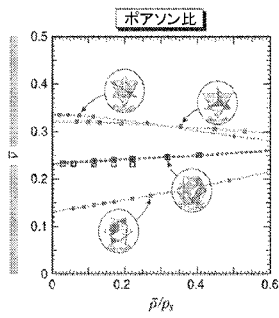
【図24】



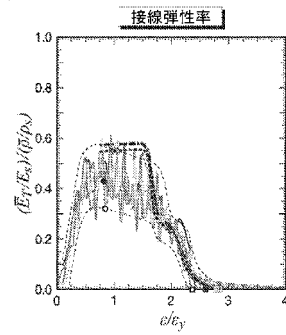
【図25】



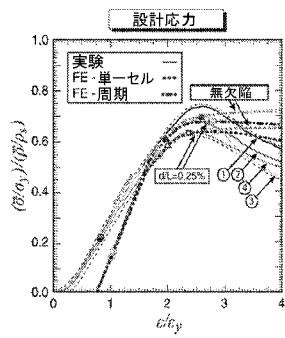
【図26】



【図28】



【図27】



【図29】

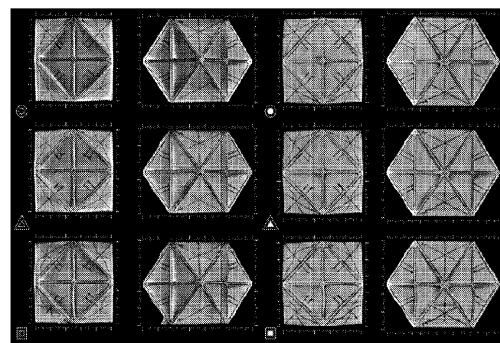
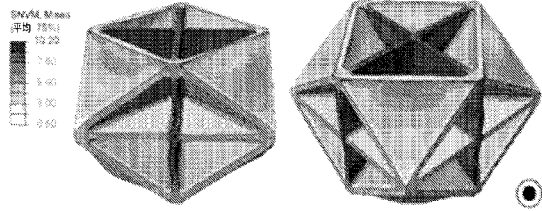
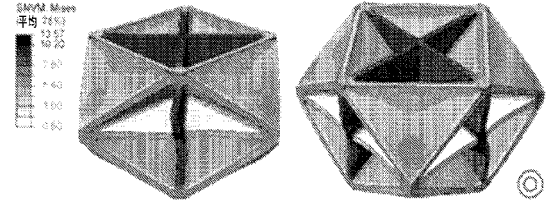


Fig.29

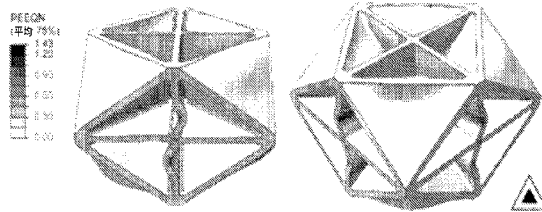
【 図 3 0 】



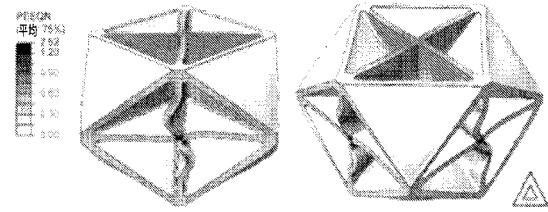
【 図 3 3 】



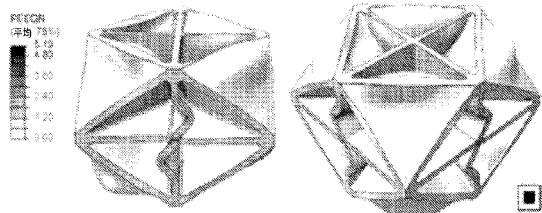
【 図 3 1 】



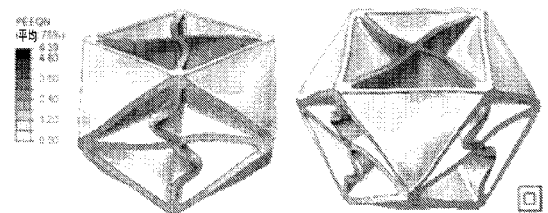
【 図 3 4 】



【 図 3 2 】



【 図 3 5 】



【 図 3 6 】

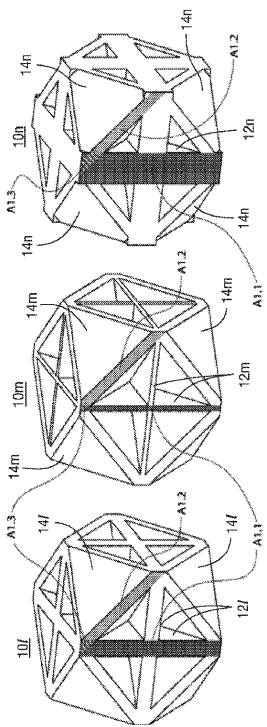


Fig.36

【 図 3 7 】

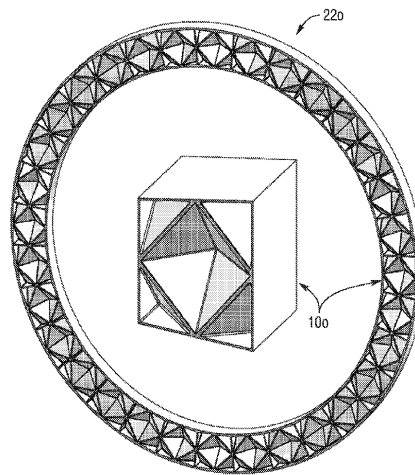


Fig.37

【図38】

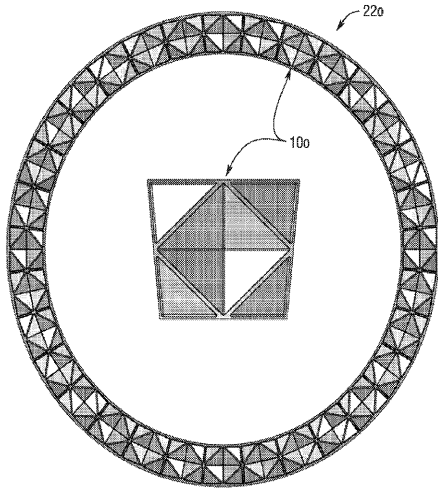
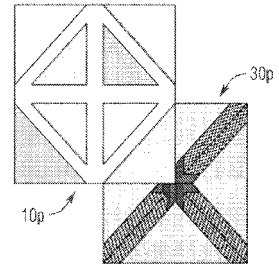


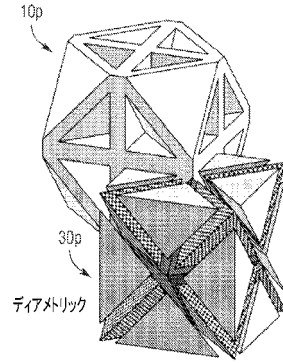
Fig.38

【図39】

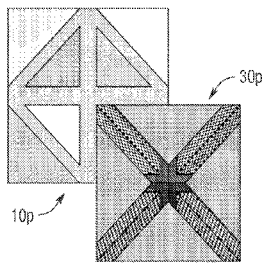


上

【図39A】

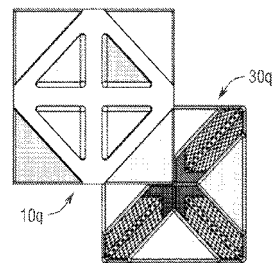


【図39B】



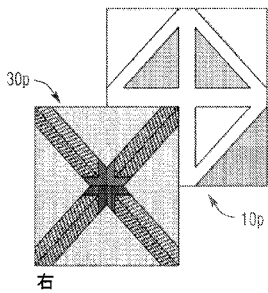
前

【図40】



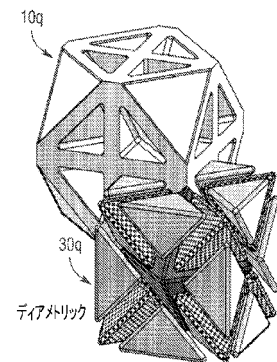
上

【図39C】

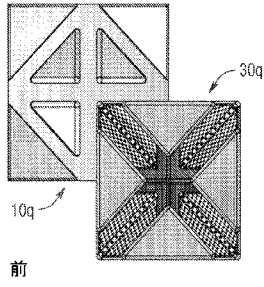


右

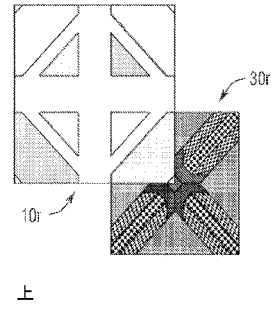
【図40A】



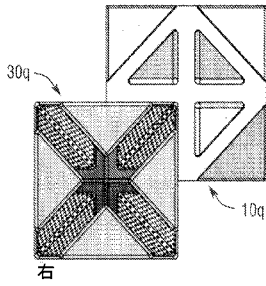
【図40B】



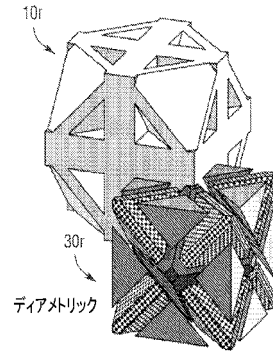
【図41】



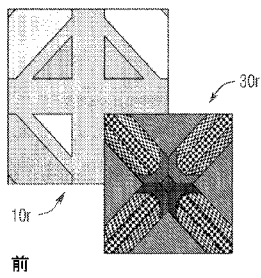
【図40C】



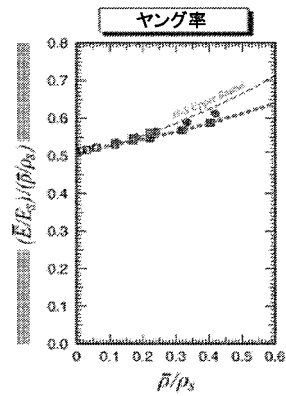
【図41A】



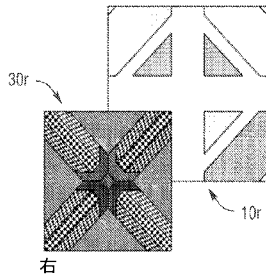
【図41B】



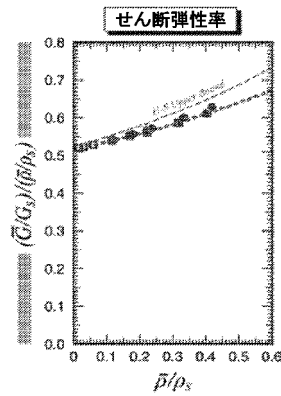
【図42A】



【図41C】

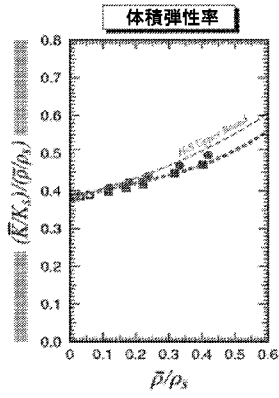


【図42B】

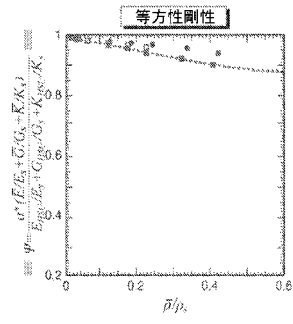




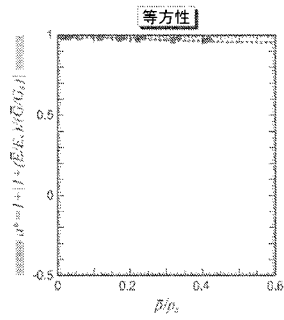
【 図 4 2 C 】



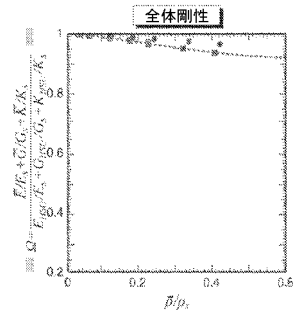
【 図 4 4 】



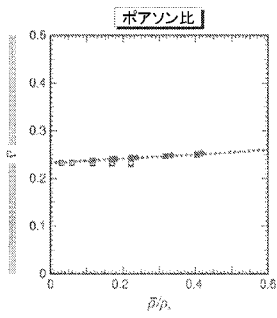
【 図 4 3 】



【 図 4 5 】



【 図 4 6 】



## 【 国際調査報告 】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

PCT/US 15/10458

International application No.  
PCT/US 15/10458

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> <b>IPC(8)</b> - E04B 1/348, E04B 1/19 (2015.01) <b>CPC</b> - E04B 2001/3247, E04B 2001/3294, B01J 2219/32296 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC																												
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) CPC: E04B 2001/3247, E04B 2001/3294, B01J 2219/32296; IPC(8): E04B 1/348, E04B 1/19 (2015.01) Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched USPC: 52/648.1, 52/DIG.10; CPC: E04B 1/34815, B01J 2219/32293, B01J 35/04 (see terms below) Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) PatBase, PubWEST(PGPB,USPT,USOC,EPAB,JPAB), Google Scholar terms: tetrahedral, cellular, geometry, wall, edge, unit, metal, alloy, polymer, plastic, elastomer, ceramic, fiber, cermet, lattice, foam, pattern, planar, cut, fold, assemble, structure, sandwich, beam, channel, tube, octahedron, zero thickness, hole, aperture, perforation.																												
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Category*</th> <th>Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th>Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>US 5,448,868 A (Lalvani) 12 September 1995 (12.09.1995), entire document, especially fig. 1, 5-6, 12, 15, 17, col 5, in 9-57, col 6, in 53-63, col 11, in 54-66, col 14, in 24 - col 16, in 15.</td> <td>1-12, 14, 17-27</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td></td> <td>13, 28-33</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td></td> <td>15-16</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>US 2005/0274097 A1 (Beall et al.) 15 December 2005 (15.12.2005), entire document, especially fig. 2, para [0021].</td> <td>13, 28</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>US 4,380,133 A (Amstein) 19 April 1983 (19.04.1983), entire document, especially title, fig. 1, col 1, in 42-46.</td> <td>29-33</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 3,586,845 B1 (Granger et al.) 22 June 1971 (22.06.1971), entire document, especially fig. 2, col 5, in 1-11, col 14, in 60 ? col 15, in 5.</td> <td>15-16</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2011/0250385 A1 (Sypeck et al.) 13 October 2011 (13.10.2011), entire document.</td> <td>1-14, 17-33</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 6,299,958 B1 (St. Julien et al.) 09 October 2001 (09.10.2001), entire document</td> <td>1-14, 17-33</td> </tr> </tbody> </table>	Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	X	US 5,448,868 A (Lalvani) 12 September 1995 (12.09.1995), entire document, especially fig. 1, 5-6, 12, 15, 17, col 5, in 9-57, col 6, in 53-63, col 11, in 54-66, col 14, in 24 - col 16, in 15.	1-12, 14, 17-27	Y		13, 28-33	A		15-16	Y	US 2005/0274097 A1 (Beall et al.) 15 December 2005 (15.12.2005), entire document, especially fig. 2, para [0021].	13, 28	Y	US 4,380,133 A (Amstein) 19 April 1983 (19.04.1983), entire document, especially title, fig. 1, col 1, in 42-46.	29-33	A	US 3,586,845 B1 (Granger et al.) 22 June 1971 (22.06.1971), entire document, especially fig. 2, col 5, in 1-11, col 14, in 60 ? col 15, in 5.	15-16	A	US 2011/0250385 A1 (Sypeck et al.) 13 October 2011 (13.10.2011), entire document.	1-14, 17-33	A	US 6,299,958 B1 (St. Julien et al.) 09 October 2001 (09.10.2001), entire document	1-14, 17-33	<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.																										
X	US 5,448,868 A (Lalvani) 12 September 1995 (12.09.1995), entire document, especially fig. 1, 5-6, 12, 15, 17, col 5, in 9-57, col 6, in 53-63, col 11, in 54-66, col 14, in 24 - col 16, in 15.	1-12, 14, 17-27																										
Y		13, 28-33																										
A		15-16																										
Y	US 2005/0274097 A1 (Beall et al.) 15 December 2005 (15.12.2005), entire document, especially fig. 2, para [0021].	13, 28																										
Y	US 4,380,133 A (Amstein) 19 April 1983 (19.04.1983), entire document, especially title, fig. 1, col 1, in 42-46.	29-33																										
A	US 3,586,845 B1 (Granger et al.) 22 June 1971 (22.06.1971), entire document, especially fig. 2, col 5, in 1-11, col 14, in 60 ? col 15, in 5.	15-16																										
A	US 2011/0250385 A1 (Sypeck et al.) 13 October 2011 (13.10.2011), entire document.	1-14, 17-33																										
A	US 6,299,958 B1 (St. Julien et al.) 09 October 2001 (09.10.2001), entire document	1-14, 17-33																										
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "Z" document member of the same patent family																											
Date of the actual completion of the international search 23 March 2015 (23.03.2015)	Date of mailing of the international search report <b>10 APR 2015</b>																											
Name and mailing address of the ISA/US Mail Stop PCT, Attn: ISA/US, Commissioner for Patents P.O. Box 1450, Alexandria, Virginia 22313-1450 Facsimile No. 571-273-3201	Authorized officer: Lee W. Young PCT Helpdesk: 571-272-4300 PCT OSP: 571-272-7774																											

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

(74)代理人 100202577

弁理士 林 浩

(72)発明者 ベルガー ジョナサン

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 93103 サンタ バーバラ アラメダ パドレ セラ  
2109