

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6373696号  
(P6373696)

(45) 発行日 平成30年8月15日(2018.8.15)

(24) 登録日 平成30年7月27日(2018.7.27)

(51) Int.Cl.	F 1
F 25 B 9/00	(2006.01)
F 01 N 5/02	(2006.01)
F 02 G 5/02	(2006.01)
F 03 G 7/00	(2006.01)
	F 25 B 9/00
	F 01 N 5/02
	F 02 G 5/02
	F 03 G 7/00
	F 03 G 7/00

請求項の数 11 (全 46 頁)

(21) 出願番号 特願2014-192021 (P2014-192021)  
 (22) 出願日 平成26年9月19日 (2014.9.19)  
 (65) 公開番号 特開2016-61531 (P2016-61531A)  
 (43) 公開日 平成28年4月25日 (2016.4.25)  
 審査請求日 平成29年4月14日 (2017.4.14)

(73) 特許権者 000004064  
 日本碍子株式会社  
 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号  
 (74) 代理人 100088616  
 弁理士 渡邊 一平  
 (74) 代理人 100154829  
 弁理士 小池 成  
 (72) 発明者 宮入 由紀夫  
 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号  
 日本碍子株式会社内  
 (72) 発明者 三輪 真一  
 愛知県名古屋市瑞穂区須田町2番56号  
 日本碍子株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】熱・音波変換部品および熱・音波変換ユニット

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

第1の端面から第2の端面まで延在する複数のセルであって、振動することで音波を伝搬する作動流体によって内部が満たされる複数のセルを区画形成する隔壁を有し、該隔壁と前記作動流体との間で授受される熱と、前記作動流体の振動による音波のエネルギーとを相互に変換する、セラミック材料で構成された音波変換部品であって、

前記セルの延在方向に垂直な前記セルの断面の面積をS、該断面の周長をCとしたときに  $H D = 4 \times S / C$  で定義される水力直径HDが0.4mm以下であり、

3点曲げ強度が5MPa以上である熱・音波変換部品。

## 【請求項 2】

前記熱・音波変換部品の前記第1の端面から前記第2の端面までの長さをLとしたときに該熱・音波変換部品の長さLに対する前記水力直径HDの比  $H D / L$  が0.005以上0.02未満である請求項1記載の熱・音波変換部品。

## 【請求項 3】

前記熱・音波変換部品の各端面における開口率が93%以下である請求項1又は2記載の熱・音波変換部品。

## 【請求項 4】

前記延在方向に垂直な前記セルの断面形状は、角部が弯曲した多角形の形状であり、該形状の角部における曲率半径が0.02mm以上0.1mm以下である請求項1~3のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

10

20

## 【請求項 5】

前記熱・音波変換部品は、気孔率が5%以下のセラミック材料で構成されたものである請求項1～4のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

## 【請求項 6】

前記熱・音波変換部品は、材料強度が20MPa以上のセラミック材料で構成されたものである請求項1～4のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

## 【請求項 7】

前記延在方向に垂直な平面内において、前記熱・音波変換部品の断面の重心点を含み該断面の形状と相似形の中央領域における前記隔壁の平均的な厚さに対し、前記中央領域の外側に位置し前記熱・音波変換部品の断面積の20%の面積を占める外周領域における前記隔壁の平均的な厚さは1.1～2.0倍である請求項1～6のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

10

## 【請求項 8】

前記熱・音波変換部品が、

それぞれが、前記複数のセルのうちのいくつかのセルを区画形成する前記隔壁を有し、該隔壁と前記作動流体との間で授受される熱と、前記作動流体の振動による音波のエネルギーとを相互に変換する、一体的に形成された複数のハニカムセグメントと、

前記複数のハニカムセグメントの側面同士を互いに接合する接合部と、

前記複数のハニカムセグメントと前記接合部とで構成されるハニカム構造部の外周面を覆う外周壁と、を備えた請求項1～7のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

20

## 【請求項 9】

前記セラミック材料の原料を含有する成形原料を押出成形して、第1の端面から第2の端面まで延在する複数のセルを区画形成する隔壁を有するハニカム成形体を作製する成形工程と、前記成形工程で作製されたハニカム成形体を乾燥・焼成する第1乾燥焼成工程と、前記第1乾燥焼成工程で焼成されたハニカム成形体の前記セル内における前記隔壁の表面を、Mg, Si, Alのうちの少なくとも1種の金属の酸化物粒子を含む液状体に接触させることで、その少なくとも1種の金属の酸化物粒子を含み前記表面上の気孔に浸入して該表面上の気孔を低減する表面層を形成する表面層形成工程と、前記表面層形成工程で前記表面上の気孔が低減したハニカム成形体を乾燥・焼成する第2乾燥焼成工程と、を有する請求項1～8のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品の製造方法。

30

## 【請求項 10】

請求項1～8のいずれか1項に記載の熱・音波変換部品であって、前記作動流体が前記複数のセルの内部を満たしている状態において前記第1の端面側の第1端部と前記第2の端面側の第2端部との間に温度差が生じたときに、該温度差に応じて前記作動流体を前記延在方向に沿って振動させて音波を発生する熱・音波変換部品と、

前記熱・音波変換部品の前記第1端部および前記第2端部にそれぞれ近接して設けられ、該両端部との間で熱の授受を行うことで該両端部の間に温度差を与える一对の熱交換部と、を備えた熱・音波変換ユニット。

## 【請求項 11】

請求項1～8のいずれか1項に記載の熱・音波変換部品であって、前記作動流体が前記複数のセルの内部を満たしている状態において音波の伝播を受けて前記延在方向に沿って該作動流体が振動したときに、前記第1の端面側の第1端部と前記第2の端面側の第2端部との間に前記作動流体の振動に応じた温度差を生じさせる熱・音波変換部品と、

40

前記熱・音波変換部品の前記第1端部および前記第2端部のうちの一方の端部に近接して設けられ、該一方の端部への熱の供給、あるいは、該一方の端部からの熱の吸収を行つて該一方の端部の温度を一定温度に維持する熱交換部と、

前記熱・音波変換部品の前記第1端部および前記第2端部のうちの、前記一方の端部とは反対側の他方の端部に近接して設けられ、前記熱交換部により前記一方の端部の温度が一定温度に維持されている状態において、前記熱・音波変換部品が音波の伝播を受けたときに、前記一定温度に維持された前記一方の端部に対し前記他方の端部が、前記音波の伝

50

播による前記作動流体の振動に応じた温度差を有するように、前記他方の端部との間で熱の授受を行って得られた温熱あるいは冷熱を出力する温熱・冷熱出力部と、を備えた熱・音波変換ユニット。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、熱・音波変換部品および熱・音波変換ユニットに関する。さらに詳しくは、熱と音波のエネルギーとを相互に変換する熱・音波変換部品、および、熱・音波変換部品と熱交換器で構成された熱・音波変換ユニットに関する。

【背景技術】

10

【0002】

近年、社会全体でエネルギー資源の有効活用の要請が高まってきており、エネルギーを再利用する様々な技術の開発が試みられている。その中でも、熱音響効果を利用して自動車の排気ガス等の高温流体の熱を音波のエネルギーに変換し、そのエネルギーを最終的に電力等の形で出力するエネルギー回サイクルシステムは、得られるエネルギーの取得率(エネルギー効率)が高いことから注目を集めており、実用化に向けて様々な工夫が行われている。

【0003】

20

熱音響効果は、簡単に言えば、熱により音波が発生する現象であり、より詳しく言えば、細管の一端部に熱を与えて細管に温度勾配を形成することで細管中の音波伝播媒体が振動を起こして音波が発生する現象である。このとき一度に数多くの細管を用いて音波が発生させると効率がよいことから、熱音響効果を起こす細管の集合体として、孔径の小さい貫通孔が数多く形成されたハニカム構造体が採用されることが多い(たとえば、特許文献1~3参照)。

【0004】

30

ところで、ハニカム構造体自体は、その表面積の大きい立体形状を利用する目的で、熱音響効果とは無関係に、様々な用途について用いられてきた。たとえば、自動車の排気ガスから微粒子を取り除く排気浄化触媒担持用のハニカム構造体は、その典型的な例であり、従来から様々なタイプのものが開発されている。また、他の例としては、イオン触媒体として利用するため、孔径が数十~数百 $\mu\text{m}$ の小さい貫通孔を持つハニカム構造体も開発されており(たとえば、非特許文献1, 2参照)、これらは、フィルタ目的のハニカム構造体で通常用いられる押出成形法とは全く異なり、専ら化学的な手法を用いて作製される。

【0005】

40

このように、従来からよく知られたハニカム構造体ではあるが、熱音響効果を起こす熱・音波変換部品として用いるには、熱音響効果発生に適した特有の特性を持つことが要求される。たとえば、高い熱音響効果を発揮するためには、貫通孔の孔径を小さくすることが好ましく、特許文献3では、排気浄化触媒担持用のハニカム構造体よりも貫通孔の孔径の小さい0.5mm以上1.0mm未満程度の孔径の熱音響効果用のハニカム構造体が提案されている。非特許文献1, 2のハニカム構造体では孔径がきわめて小さいものの、専ら化学的な手法を用いて作製されるため、その長さや耐久性に限界があり熱音響効果用のハニカム構造体にはあまり適さないのでに対し、この特許文献3の熱音響効果用のハニカム構造体は、熱音響効果を発揮する熱・音波変換部品としての利用に耐えられるという必要条件を満たしつつ、高い熱・音波変換機能を有するという長所を有している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2005-180294号公報

【特許文献2】特開2012-112621号公報

【特許文献3】特開2012-237295号公報

50

## 【非特許文献】

## 【0007】

【非特許文献1】インターネット上のURL：<http://www.mesl.t.u-tokyo.ac.jp/ja/research/tpv.html>

【非特許文献2】インターネット上のURL：[http://www.ricoh.com/ja/technology/tech/009\\_honeycomb.html](http://www.ricoh.com/ja/technology/tech/009_honeycomb.html)

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0008】

しかしながら特許文献3では、熱・音波変換部品としての長期間使用するために要求される強度については全く考慮されていない。たとえば、熱・音波変換部品として長期間使用された場合、発生した音波の衝撃に絶えずさらされることとなるため、この音波の衝撃に対する十分な強度を確保することが不可欠となる。このように、熱・音波変換部品としてハニカム構造体を用いるにあたっては、さらなる改良が望まれる。

10

## 【0009】

上記の事情を鑑み、本発明は、ハニカム構造を有し強度の向上が図られた熱・音波変換部品、および、このような熱・音波変換部品と熱交換器で構成された熱・音波変換ユニットを提供することを目的とする。

20

## 【課題を解決するための手段】

## 【0010】

上述の課題を解決するため、本発明は、以下の熱・音波変換部品、および、熱・音波変換ユニットを提供する。

20

## 【0011】

[1] 第1の端面から第2の端面まで延在する複数のセルであって、振動することで音波を伝搬する作動流体によって内部が満たされる複数のセルを区画形成する隔壁を有し、該隔壁と前記作動流体との間で授受される熱と、前記作動流体の振動による音波のエネルギーとを相互に変換する、セラミック材料で構成された音波変換部品であって、前記セルの延在方向に垂直な前記セルの断面の面積をS、該断面の周長をCとしたときに $H D = 4 \times S / C$ で定義される水力直径HDが0.4mm以下であり、3点曲げ強度が5MPa以上である熱・音波変換部品。

30

## 【0012】

[2] 前記熱・音波変換部品の前記第1の端面から前記第2の端面までの長さをLとしたときに該熱・音波変換部品の長さLに対する前記水力直径HDの比 $H D / L$ が0.005以上0.02未満である[1]記載の熱・音波変換部品。

## 【0013】

[3] 前記熱・音波変換部品の各端面における開口率が93%以下である[1]又は[2]記載の熱・音波変換部品。

## 【0014】

[4] 前記延在方向に垂直な前記セルの断面形状は、角部が弯曲した多角形の形状であり、該形状の角部における曲率半径が0.02mm以上0.1mm以下である[1]～[3]のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

40

## 【0015】

[5] 前記熱・音波変換部品は、気孔率が5%以下のセラミック材料で構成されたものである[1]～[4]のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

## 【0016】

[6] 前記熱・音波変換部品は、材料強度が20MPa以上のセラミック材料で構成されたものである[1]～[4]のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

## 【0017】

[7] 前記延在方向に垂直な平面内において、前記熱・音波変換部品の断面の重心点を含み該断面の形状と相似形の中央領域における前記隔壁の平均的な厚さに対し、前記中央

50

領域の外側に位置し前記熱・音波変換部品の断面積の20%の面積を占める外周領域における前記隔壁の平均的な厚さは1.1~2.0倍である[1]~[6]のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。

【0018】

[8] 前記熱・音波変換部品が、それぞれが、前記複数のセルのうちのいくつかのセルを区画形成する前記隔壁を有し、該隔壁と前記作動流体との間で授受される熱と、前記作動流体の振動による音波のエネルギーとを相互に変換する、一体的に形成された複数のハニカムセグメントと、前記複数のハニカムセグメントの側面同士を互いに接合する接合部と、前記複数のハニカムセグメントと前記接合部とで構成されるハニカム構造部の外周面を覆う外周壁と、を備えた[1]~[7]のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品。 10

【0019】

[9] 前記セラミック材料の原料を含有する成形原料を押出成形して、第1の端面から第2の端面まで延在する複数のセルを区画形成する隔壁を有するハニカム成形体を作製する成形工程と、前記成形工程で作製されたハニカム成形体を乾燥・焼成する第1乾燥焼成工程と、前記第1乾燥焼成工程で焼成されたハニカム成形体の前記セル内における前記隔壁の表面を、Mg, Si, Alのうちの少なくとも1種の金属の酸化物粒子を含む液状体に接触させることで、その少なくとも1種の金属の酸化物粒子を含み前記表面上の気孔に浸入して該表面上の気孔を低減する表面層を形成する表面層形成工程と、前記表面層形成工程で前記表面上の気孔が低減したハニカム成形体を乾燥・焼成する第2乾燥焼成工程と、を有する[1]~[8]のうちのいずれかに記載の熱・音波変換部品の製造方法。 20

【0020】

[10] [1]~[8]のいずれかに記載の熱・音波変換部品であって、前記作動流体が前記複数のセルの内部を満たしている状態において前記第1の端面側の第1端部と前記第2の端面側の第2端部との間に温度差が生じたときに、該温度差に応じて前記作動流体を前記延在方向に沿って振動させて音波を発生する熱・音波変換部品と、前記熱・音波変換部品の前記第1端部および前記第2端部にそれぞれ近接して設けられ、該両端部との間で熱の授受を行うことで該両端部の間に温度差を与える一対の熱交換部と、を備えた熱・音波変換ユニット。

【0021】

[11] [1]~[8]のいずれかに記載の熱・音波変換部品であって、前記作動流体が前記複数のセルの内部を満たしている状態において音波の伝播を受けて前記延在方向に沿って該作動流体が振動したときに、前記第1の端面側の第1端部と前記第2の端面側の第2端部との間に前記作動流体の振動に応じた温度差を生じさせる熱・音波変換部品と、前記熱・音波変換部品の前記第1端部および前記第2端部のうちの一方の端部に近接して設けられ、該一方の端部への熱の供給、あるいは、該一方の端部からの熱の吸収を行って該一方の端部の温度を一定温度に維持する熱交換部と、前記熱・音波変換部品の前記第1端部および前記第2端部のうちの、前記一方の端部とは反対側の他方の端部に近接して設けられ、前記熱交換部により前記一方の端部の温度が一定温度に維持されている状態において、前記熱・音波変換部品が音波の伝播を受けたときに、前記一定温度に維持された前記一方の端部に対し前記他方の端部が、前記音波の伝播による前記作動流体の振動に応じた温度差を有するように、前記他方の端部との間で熱の授受を行って得られた温熱あるいは冷熱を出力する温熱・冷熱出力部と、を備えた熱・音波変換ユニット。ここで、「温熱あるいは冷熱を出力する」とは、たとえば、「温度が上がった流体、あるいは、温度が下がった流体を出力する」ことを意味する。 30 40

【発明の効果】

【0022】

本発明の熱・音波変換部品では、水力直径HDが0.4mm以下であり、3点曲げ強度が5MPa以上となっていることで、熱音響効果を用いて熱を音波エネルギーに変換する際の十分なエネルギー変換効率を維持しつつ、強度が向上した熱・音波変換部品が実現する。 50

## 【図面の簡単な説明】

## 【0023】

【図1】本発明の熱・音波変換ユニットおよび熱・音波変換部品の一実施形態が適用された電力発生システムの模式的な構成図である。

【図2】図1の熱・音波変換ユニットおよび熱・音波変換部品が適用された冷熱発生システムの模式図である。

【図3】図1の熱・音波変換ユニットの構成を表した模式図である。

【図4】図3の熱・音波変換ユニットにおける高温側熱交換器の外観斜視図である。

【図5】高温側環状管の流入口および流出口を含む平面で見たときの高温側熱交換器の断面図である。

10

【図6】高温側環状管の管内にさらに別のハニカム構造体が嵌合している熱・音波変換ユニットの一形態を表す模式図である。

【図7】図6のA-A線の断面における高温側熱交換器の模式的な断面構成図である。

【図8】図6および図7に示す熱・音波変換ユニットとは別の本発明の熱・音波変換ユニットの一形態を表す模式図である。

【図9】図8に示す熱・音波変換ユニットとはさらに別の熱・音波変換ユニットの一形態を表す模式図である。

【図10】メッシュ構造を採用した高温側熱交換器の断面図である。

【図11】図3に示す熱・音波変換部品のセルの貫通方向に垂直な面内における熱・音波変換部品の断面図である。

20

【図12】各セルの貫通方向に垂直な面内における、セグメント構造を有する熱・音波変換部品の断面図である。

【図13】セル形状が三角形の場合において、ハニカムセグメントの形状が六角形の例を表した図である。

【図14】本実施形態におけるハニカム成形体の作製に用いられる口金の外観斜視図である。

【図15】図14に示す口金の、図14とは反対側から見たときの外観斜視図である。

【図16】図14に示す口金の表面の一部を示す拡大平面図である。

【図17】図16に示す口金のA-A'断面を示す模式図である。

【図18】押さえ板構造の一例を表した図である。

30

【図19】図18とは別の押さえ板構造の一例を表した図である。

【図20】さらに別の押さえ板構造の一例を表した図である。

【図21】図20とはさらに別の押さえ板構造の一例を表した図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0024】

以下、本発明の実施形態を、図面を参照しながら説明する。なお、本発明は以下の実施形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で、当業者の通常の知識に基づいて、適宜設計の変更、改良等が加えられることが理解されるべきである。

## 【0025】

図1は、本発明の熱・音波変換ユニットおよび熱・音波変換部品の一実施形態が適用された電力発生システムの模式的な構成図である。

40

## 【0026】

図1に示す電力発生システム1000は、熱・音波変換ユニット100、ループ管4、共鳴管5、およびエネルギー変換器6により構成されている。

## 【0027】

ループ管4は、熱・音波変換ユニット100の図の上側の端部（上端部）と下側の端部（下端部）とに接続されたループ状の管である。共鳴管5は直線状の管であり、共鳴管5の一端はループ管4に接続されており、共鳴管5の他端はエネルギー変換器6に接続されている。ここで、共鳴管5とエネルギー変換器6とを合わせた全体は、実質的に図の右方向の端が閉じた管となっている。

50

## 【0028】

熱・音波変換ユニット100は、熱・音波変換部品1、高温側熱交換器2、および、低温側熱交換器3を有している。

## 【0029】

高温側熱交換器2は、高温の加熱流体（たとえば高温の排気ガス等）の流入を受けて、その熱を図1の熱・音波変換部品1の下端部に伝達し、流入時よりも温度の下がった加熱流体を流出させるものである。一方、低温側熱交換器3は、高温側熱交換器2に流入する加熱流体に比して相対的に温度の低い冷却流体（たとえば水等）の流入を受けて、その冷熱を図1の熱・音波変換部品1の上端部に伝達し、流入時よりも温度の上がった冷却流体を流出させるものである。このような高温側熱交換器2および低温側熱交換器3の働きにより、熱・音波変換部品1は、図の上下方向に延びる複数の細い管状の貫通孔（以下、セルと呼ぶ）を有するハニカム構造を有している。各セルは、隣接するセルから隔壁により隔てられており、高温側熱交換器2および低温側熱交換器3を介してループ管4と連通している。

10

## 【0030】

ここで、ループ管4、共鳴管5、および熱・音波変換部品1の各セル、のそれぞれの内部は、縦波の振動を生じて音波を伝播する作動流体で満たされている。作動流体としては、たとえば、低粘性で反応性の低い希ガス等の気体を用いることができる。

## 【0031】

20

熱・音波変換部品1では、その両端部に上述の温度差が存在することにより、各セル内の作動流体は、各セルの貫通方向に振動を開始し、その振動は音波として熱・音波変換部品1から外部に伝播していく。このように温度差を与えると作動流体が振動する現象は、自励振動と呼ばれており、細い管に温度勾配を与えたときに起きる従来からよく知られた現象である。熱音響効果とは、熱に起因するこうした作動流体の自励振動により音波が発生することを指している。ここで、この自励振動について簡単に説明する（なお、詳細については、数多くの文献で説明されているが、たとえば、特許文献3でも詳しく説明されている）。

## 【0032】

30

細い管に温度勾配が与えられると、高温側では、細い管の内部の作動流体は、管の壁面から熱を吸収して高温側から低温側へ向けて膨張する。そして、その低温側で壁面に対し熱を放出して圧縮して元の高温側の方に戻る。このような壁面との熱の授受と膨張圧縮が繰り返されることで、結果的に、作動流体が管の延長方向に振動することとなる。簡単にいえば、この作動流体の動きは、壁の壁面の温度勾配を緩和する（弱める）ように、熱を運ぶ作動流体の動きだということができる。この説明からも明らかであるが、この現象は、管が細いために内部の作動流体に対する壁面の熱的影響が大きい場合にのみ生じるものである。このため、管を太くしていくと壁面の熱的影響が小さくなていき（すなわち断熱状態に近づき）、こうした自励振動は生じにくくなる。そこで、自励振動により音波を発生させる上では、管の太さが重要な要素となり、この管の太さは、より定量的には、管の断面の面積をS、この断面の周長をCとしたときに $H D = 4 \times S / C$ で定義される水力直径HDによって評価できる。

40

## 【0033】

以下、図1に戻って電力発生システム1000の説明を続ける。

## 【0034】

熱・音波変換部品1では細い管状のセルが複数存在し各セル内で自励振動が起きることで、それら複数のセルの作動流体の振動の集合からなる音波が、熱・音波変換部品1からループ管4に向けて発せられる。そして、その音波は、この図の点線矢印の向きにループ管4内を伝播していく。ループ管4内を伝播する音波の多くは共鳴管5内に進行し共鳴管5内を図の右方向に進行する。上述したように、共鳴管5とエネルギー変換器6とを合わせた全体は、実質的に図の右方向の端が閉じた管となっているため、反射して逆の図の左

50

方向に進行するものも発生し、共鳴管5内では、両進行波が重ね合わされることとなる。このとき、進行波の周波数が、共鳴管5の長さ等で決まる共鳴周波数と整合すると、共鳴管5内ではいわゆる共鳴が起こり、両進行波の重ね合わせからなりその共鳴周波数を有する定在波が発生する。図では、定在波の存在が一点鎖線の両矢印で示されている。

【0035】

ここで、エネルギー変換器6では、共鳴管5の実効的な長さを変化させることができる不図示の機構が設けられており、これにより共鳴が起きるよう共鳴周波数を調整することができる。共鳴管5の実効的な長さを変化させる機構としては、たとえば、特許文献1記載のものを採用することができる。なお、ここでは、共鳴管5の実効的な長さを変化させることができるものとして説明を行うが、図1の電力発生システム1000では、熱・音波変換部品1で発生しループ管4内を進行する音波の周波数成分のうち最も支配的な周波数成分をあらかじめ把握しておき、共鳴管5の長さが、その支配的な周波数成分の周波数が共鳴周波数となるような特定の長さにあらかじめ設計されている形態が採用されてもよい。

10

【0036】

また、エネルギー変換器6には、音波を電気信号に変換する機構も設けられている。こうした変換機構としては、たとえば、特許文献1に記載されているようなマイクロフォンを備えた機構を挙げることができる。このようにマイクロフォンを利用する変換機構が最も簡便ではあるが、マイクロフォンを利用する変換機構に限らず、音波のエネルギーを力学的なエネルギーに変換しその力学的なエネルギーを電磁誘導により電力に変換する、従来からよく知られた様々な機構（たとえば特許文献2の機構）が採用できる。

20

【0037】

図1の電力発生システム1000では、以上説明した構成により、高温側熱交換器2に流入する高温の加熱流体（たとえば高温の排気ガス等）の熱を電力に変換することができ、エネルギーの有効利用（リサイクル）が可能となっている。

【0038】

次に、上記の熱・音波変換ユニット100および熱・音波変換部品1が適用された冷熱発生システムについて説明する。

【0039】

図2は、図1の熱・音波変換ユニット100および熱・音波変換部品1が適用された冷熱発生システムの模式図である。

30

【0040】

図2に示す冷熱発生システム2000は、ループ管4'、伝播管5'、音波発生部7、および、図1で説明した熱・音波変換ユニット100により構成されている。

【0041】

ループ管4'は、熱・音波変換ユニット100の図2の上側の端部（上端部）と下側の端部（下端部）とに接続されたループ状の管であり、高温側熱交換器2および低温側熱交換器3を介して熱・音波変換部品1の複数のセルと連通している。伝播管5'は直線状の管であり、伝播管5'の一端はループ管4'に接続されており、伝播管5'の他端は音波発生部7に接続されている。音波発生部7は、音波を発生する機能を有しており、音波発生部7としては、たとえば、電力の供給を受けて音波を出力するスピーカを採用することができる。また、図1の電力発生システム1000からエネルギー変換器6を取り除いた、熱の供給を受けて音波を発生させるシステム（この場合、共鳴管5の右側は開放端となつて反射が起きないため、図1の状況とは異なり共鳴管5内では右向きの進行波が伝播する）を採用することもできる。

40

【0042】

熱・音波変換ユニット100は、その構成自体は図1で説明したものと同じであるが、図1のときとは異なり、図2の高温側熱交換器2および低温側熱交換器3の双方には、図1の低温側熱交換器3に流入したのと同様の冷却流体（たとえば水）が流入するようになっている。

50

## 【0043】

ここで、ループ管4'、伝播管5'、および熱・音波変換部品1の各セルの内部は、縦波の振動を生じて音波を伝播する作動流体で満たされている。作動流体としては、たとえば、図1の電力発生システム1000と同様のものを採用できる。

## 【0044】

音波発生部7で発生した音波は、伝播管5'を図2の一点鎖線矢印の方向に伝播し、さらにループ管4'内を図2の点線矢印の方向に伝播していく。そして、熱・音波変換ユニット100に到達し、熱・音波変換部品1の図2の上側から各セル内に進行していく。このとき、音波による熱輸送により、高温側熱交換器2側の端部が低温側熱交換器3側の端部よりも相対的に温度が高い状態が実現する。高温側熱交換器2では常温近傍の冷却流体が流入し、常温より高い温度で流出する。一方、音波による熱輸送により熱が高温側熱交換器2側の端部へ輸送されてしまうので、熱・音波変換部品1の低温側熱交換器3側の端部は、常温より低い温度となる。低温側熱交換器3では常温近傍の冷却流体が流入し、熱・音波変換部品1の低温側熱交換器3側の端部に熱を奪われるため、常温より低い温度で流出する。言い換えれば、冷水の形で、冷熱が出力されることになる。

10

## 【0045】

図2の冷熱発生システム2000では、以上説明した構成により、音波発生部7で発生した音波のエネルギーを用いて冷熱を出力することができる。特に、音波発生部7として、図1の電力発生システム1000からエネルギー変換器6を取り除いたシステムを採用した場合には、図1の高温側熱交換器2に流入する高温の加熱流体（たとえば高温の排気ガス等）の熱を冷熱に変換することができ、エネルギーの有効利用（リサイクル）が可能となっている。

20

## 【0046】

以上説明したように、図1の電力発生システム1000および図2の冷熱発生システム2000においては、本発明の一実施形態である熱・音波変換ユニット100がきわめて重要な役割を果たしている。以下では、図1の電力発生システム1000で使用されている状況を例にとって、熱・音波変換ユニット100について、さらに詳しく説明する。以下の説明では、一例として、図1の電力発生システム1000として、図1の高温側熱交換器2には、自動車の排気ガスの典型的な温度である400～600程度の高温の加熱流体（たとえば排気ガスそのもの）が流入し、低温側熱交換器3には、20～70程度の低温の冷却流体（たとえば水）が流入するものとして話を進める。この場合、熱・音波変換部品1の両端部における温度差は、330～580程度となる。

30

## 【0047】

なお、当然のことではあるが、以下に説明する熱・音波変換ユニット100の特性そのものは、図2の冷熱発生システム2000において使用する場合も変わるものではない。

## 【0048】

図3は、図1の熱・音波変換ユニット100の構成を表した模式図である。

## 【0049】

熱・音波変換ユニット100は、熱・音波変換部品1、高温側熱交換器2、および、低温側熱交換器3、金属部材32、および、干渉材1aを備えており、これら全体は、ハウジング100a内に収容されてループ管4（図1も合わせて参照）に接続されている。

40

## 【0050】

熱・音波変換部品1では、それぞれが細い管状の貫通孔である複数のセル14が、隔壁11によって区画形成されてなるハニカム構造を有している。ここで、本明細書では、「セル」という語を、隔壁を含まない貫通孔のみを指すものとして用いる。なお、実際には、熱・音波変換部品1は、こうしたハニカム構造を有するハニカムセグメントをいくつか互いに接合した構造を備えてもよいが、このセグメント構造については後述することとして、図3では、説明の簡単化のためにセル14の配列だけが図示されている。各セル14は、図3の上下方向を貫通方向（各セル14が延在する延在方向）とし、低温側熱交換器3側の端面および高温側熱交換器2側の端面の両端面において開口する。熱・音波変換部

50

品1の、低温側熱交換器3側の端面は、金属部材32と接しているとともに、金属部材32を間ににおいて低温側熱交換器3に対向している。なお、ここでは、金属部材32が配置されているが、本発明では、金属部材32が省略された形態も採用可能である。金属部材32が省略された場合には、後述のメッシュ積層体30と接触する作動流体が冷却された後に、その冷却された作動流体が、音波の振動に対応した作動流体の変位により熱・音波変換部品1の端面近傍に接触しこの端面近傍を冷却する。ここで、金属部材32が省略された形態では、熱・音波変換部品1と低温側熱交換器3との間の隙間は極力小さいことが好ましい。

#### 【0051】

金属部材32は、中央部に互いに平行な複数本のスリット(不図示)が形成された板状の金属製部材であり、図3では、その板状の側面部(厚みの部分)のみが図示されている。

#### 【0052】

低温側熱交換器3は、複数枚の金属製(たとえば銅製)メッシュ板を重ね合わせてなるメッシュ積層体30を有している。また、低温側熱交換器3は、メッシュ積層体30の側面を取り巻く環状の管である低温側環状管31を有している。このようにメッシュ積層体30の側面を取り巻く低温側環状管31は、図3では、流入口31aおよび流出口31bを含む断面においてメッシュ積層体30の両側を挟み込むものとして模式的に示されている。この低温側環状管31は、流入口31aから、後述する高温側熱交換器2に流入する加熱流体よりは相対的に低温の冷却流体(たとえば水)の流入を受け、その冷却流体の冷熱をメッシュ積層体30に伝達し(逆の言い方をすればメッシュ積層体30の熱を冷却流体に伝達し)、流出口31bから、温度が上昇した冷却流体を流出させる役割を果たしている。

#### 【0053】

メッシュ積層体30に伝達された冷熱は、接触している作動流体に伝わり、さらに音波の変位で熱・音波変換部品1の、低温側熱交換器3側の端面に伝達され、熱・音波変換部品1の低温側熱交換器3側の端部を冷却する。このため、金属部材32の材質としては熱伝導率の高いものが好ましく、たとえば、銅製のものを用いることができる。

#### 【0054】

なお、以上では、低温側熱交換器3の構成について詳しく説明したが、本発明の熱・音波変換ユニットは、低温側の熱交換器の詳細に特に限定されず、従来から知られている熱交換器を採用してもよい。また、後述する高温側熱交換器2と同じ構成のものを採用してもよい。

#### 【0055】

熱・音波変換部品1の側面は、干渉材1aによって取り巻かれており、図3の模式的な断面図では、その取り巻く干渉材1aが、熱・音波変換部品1を図の左右両側から挟み込む2つに分かれた干渉材1aとして示されている。この干渉材1aは、熱・音波変換部品1の、低温側熱交換器3側の端部と高温側熱交換器2側の端部との間で熱・音波変換部品1外部の周囲環境を介して熱の伝達が行われるのを防ぐ断熱材としての役割を果たしている。

#### 【0056】

高温側熱交換器2は、熱交換ハニカム構造体20および高温側環状管21を備えている。熱交換ハニカム構造体20は、熱・音波変換部品1と同様にハニカム構造を有しており、それぞれが図3の上下方向を貫通する細い管状の貫通孔である2以上のセル20dが、隔壁20aによって区画形成されている。高温側環状管21は、熱交換ハニカム構造体20の側面を取り巻く環状の管であり、流入口21aから高温の加熱流体(たとえば、高温の排気ガス)の流入を受けてその加熱流体の熱を熱交換ハニカム構造体20に伝達し流出口21bから温度が低下した加熱流体を流出させる役割を果たす。ここで、図3に示すように、高温側環状管21の管内には、加熱流体との接触面積を増加させるために、金属製あるいはSiC(炭化珪素)を主成分とするセラミックス製のフィン21eが設けられて

10

20

30

40

50

いる。

【0057】

図4は、図3の熱・音波変換ユニット100における高温側熱交換器2の外観斜視図であり、図5は、高温側環状管21の流入口21aおよび流出口21bを含む平面で見たときの高温側熱交換器2の断面図である。

【0058】

図4に示すように、高温側熱交換器2では、高温側環状管21の環状形状における中央の空洞部分に熱交換ハニカム構造体20が嵌め込まれた構成となっている。この高温側環状管21には、図4の太い矢印で示すように、図の下側の流入口21aから高温の加熱流体（たとえば、高温の排気ガス）が流入し、図の上側の流出口21bから流出する。このとき、流入口21aから流入した高温の加熱流体は、図5の矢印で示すように、熱交換ハニカム構造体20の円形の外周を構成する外周壁20bに直接に突き当たり、外周壁20bの左右二手に分かれて外周壁20bに沿って進み、流出口21bで合流して流出する。このように熱交換ハニカム構造体20の外周壁20bに対して直接に高温の加熱流体が接触することで、高温の加熱流体から外周壁20bに対して多量の熱が直接に伝達され、その熱は、熱交換ハニカム構造体20内部の隔壁20aやセル20d内部の作動流体にも伝達される。このように、熱交換ハニカム構造体20が高温の加熱流体に直接に接触できるのは、後述するように、熱交換ハニカム構造体20が、耐熱性および熱伝導性が高い材料で構成されているためであり、直接に加熱流体と接触できることで、間に他の部材を介した場合と比べ、熱の損失を抑え熱交換効率の向上が図られる。

【0059】

なお、このように熱交換ハニカム構造体20が直接に加熱流体と接触する形態が好ましいが、本発明では、熱交換ハニカム構造体20の外周壁20bが高温の加熱流体に直接に接触する代わりに、外周壁20bの周囲を金属で覆う形態も採用することができる。特に、音波を伝播する作動流体として高圧の気体（たとえばアルゴン等の不活性の希ガス）を用いる場合には、こうした高圧の気体を密閉して漏れを防ぐ観点からこのように外周壁20bの周囲を金属で覆う形態が好ましい。この場合、外周壁20bの周囲を覆った金属の外周面に、図5の熱交換ハニカム構造体20の中心からみて外向き方向（動径方向）に突出した金属製のフィン（たとえば図3のフィン21e参照）を備えていることが好ましい。これは、高温の加熱流体との接触面積を増加させて熱交換効率を高めるためである。高温の加熱流体との接触面積が小さいと、高温の加熱流体と高温側熱交換器2との熱の授受が不十分で高温側熱交換器2の熱交換効率が低下してしまうので、高温加熱流体との接触面積をできるだけ大きくすることが高温側熱交換器2にとって重要となる。

【0060】

特に、SiC（炭化珪素）を主成分とするセラミックス材料で構成された、さらに別のハニカム構造体が高温側環状管の管内に嵌合している形態が最も好ましい。これは、SiC（炭化珪素）を主成分とするセラミックス材料は、金属製のフィンより高温での熱伝導率が高く、高温ガスとの接触面積も飛躍的に増加させることができ、さらに、金属製のフィンでは問題となり得る高温の加熱流体による腐食劣化の問題も回避できるからである。以下、この好ましい形態について説明する。

【0061】

図6は、高温側環状管の管内にさらに別のハニカム構造体が嵌合している熱・音波変換ユニットの一形態を表す模式図であり、図7は、図6のA-A線の断面における高温側熱交換器の模式的な断面構成図である。

【0062】

図6および図7では、図3～図5と同一の構成要素については同一の符号を付し、その重複説明は省略する。

【0063】

図6の熱・音波変換ユニット200における高温側熱交換器2'は、熱交換ハニカム構造体20'および2つの互いに異なる高温側環状管211, 212を有している。熱交換

10

20

30

40

50

ハニカム構造体 20' は、図中の水平方向を貫通方向とする 2 以上のセルが隔壁により区画形成されたハニカム構造を有しており、2 つの異なる高温側環状管 211, 212 により加熱流体から伝達された熱を熱・音波変換部品 1 に伝達する。ここで、熱交換ハニカム構造体 20' は、熱・音波変換部品 1 から間隔  $t$  を置いて配置されている

#### 【0064】

図 7 に示すように、2 つの高温側環状管 211, 212 の内部には、SiC (炭化珪素) を主成分とするセラミックス材料で構成された管内ハニカム構造体 2110, 2120 がそれぞれ備えられている。管内ハニカム構造体 2110, 2120 は、いずれも図中の水平方向を貫通方向とする 2 以上のセルが隔壁により区画形成されたハニカム構造を有している。2 つの高温側環状管 211, 212 では、図の矢印で示すように、流入した加熱流体が管内ハニカム構造体 2110, 2120 の各セルを通過して流出していく。このとき、各セルを通過する加熱流体の熱が管内ハニカム構造体 2110, 2120 に伝わり、その熱は、高温側環状管 211, 212 の壁面、および、熱交換ハニカム構造体 20' の側面 (外周壁の面) を取り巻く金属管 (不図示) を介して、熱交換ハニカム構造体 20' に伝達される。なお、図 7 では、簡単のため、熱交換ハニカム構造体 20' の断面が矩形形状で図示されているが、図 4 および図 5 のように断面が円形状の場合であっても、高温側環状管 211, 212 の形状を円形に沿うようにする等により実質的に同様の構成を取り得る。

#### 【0065】

このように熱交換ハニカム構造体 20' の外周壁を金属管で覆い、その外側に、SiC (炭化珪素) を主成分とするセラミックス材料で構成された 2 つの管内ハニカム構造体 2110, 2120 を配置する構造では、熱交換ハニカム構造体 20' は直接加熱流体と接触せず、このため、高温の加熱流体による腐食劣化を抑えることができる。また、作動流体として不活性な希ガス (たとえばアルゴン等) を用いる場合には、作動流体により熱交換ハニカム構造体 20' が腐食する問題も生じない。この場合、熱交換ハニカム構造体 20' の材料としては、SiC (炭化珪素) を主成分とするセラミックス材料の他、熱伝導性の高い金属材料、たとえば銅も採用できる。

#### 【0066】

ここで、図 6 における熱交換ハニカム構造体 20' の長さ  $L'$  は、作動流体の振動より発生する音波の波長程度であることが好ましい。音波の波長よりも長すぎると作動流体 (たとえば不活性な希ガス) への熱の供与が不十分となる。一方、長さ  $L'$  が音波の波長よりも短すぎると、外側から熱交換ハニカム構造体 20' を通り抜けて熱・音波変換部品 1 へ達してしまい、比較的低温の作動流体が熱・音波変換部品 1 の高温熱交換器側の端部を冷やしてしまうといった悪影響が生じ得る。

#### 【0067】

図 8 は、図 6 および図 7 に示す熱・音波変換ユニットとは別の本発明の熱・音波変換ユニットの一形態を表す模式図、図 9 は、図 8 に示す熱・音波変換ユニットとはさらに別の熱・音波変換ユニットの一形態を表す模式図である。

#### 【0068】

図 8 に示す熱・音波変換ユニットでは、高温側熱交換器 2A において、図中の上側から加熱流体が流入し高温側熱交換器 2A の内部を通って図中の下方向に向けて流出する。一方、図 9 に示す熱・音波変換ユニットでは、高温側熱交換器 2A' において、図中の上側から加熱流体が流入し高温側熱交換器 2A' の内部を通って図中の上方向に向けて流出する。ここで、図 8 および図 9 に示す熱・音波変換ユニットのいずれも、低温側熱交換器 3A においては、図中の上側から冷却流体が流入し低温側熱交換器 3A の内部を通って図中の上方向に向けて流出する。ここで、図 8 および図 9 では、内部構造 (以下の 2 つのハニカム構造体 22, 23 を含む構造) を明らかにするために、一部については透視図となっている。

#### 【0069】

図 8 の高温側熱交換器 2A および図 9 の高温側熱交換器 2A' は、金属材料で構成され

10

20

30

40

50

た柱状のハニカム構造体 23 と、その周りを取り囲む、SiC（炭化珪素）を主成分とするセラミックス材料で構成された中空の円柱状（言い換えば厚みのある円筒状）のハニカム構造体 22 とを有している。ハニカム構造体 23 の外周では同一の金属材料の後述の金属メッシュ外筒 23a が金属製のハニカム構造体 23 と一体に形成されている。なお、正確には、2つのハニカム構造体 22, 23 の間にはメタライズ層が存在するが、これについては後述する。これら2つのハニカム構造体 22, 23 は、いずれも、円柱状の形状の延在方向を貫通方向とする2以上のセルが隔壁により区画形成されたハニカム構造を有している。このような図8および図9の構造によっても、熱の損失を抑え熱交換効率の向上が図られる。

【0070】

10

なお、ここでは、金属材料で構成されたハニカム構造体 23 によるハニカム構造が採用されているが、これに代えて金属製のメッシュで構成されたメッシュ構造が採用されてもよい。

【0071】

図10は、メッシュ構造を採用した高温側熱交換器の断面図である。

【0072】

20

図10に示す高温側熱交換器では、金属外筒 22a で外周が囲まれた、SiC（炭化珪素）を主成分とするセラミックス材料で構成されたハニカム構造体 22 のさらなる内側に、円筒状のメタライズ層 23b および金属メッシュ外筒 23a を介して金属メッシュ体 23' が備えられている。ここで、メタライズ層 23b は、モリブデンやマンガン等の金属の焼き付けによって形成された層であり、金属製の金属メッシュ外筒 23a とセラミックス製のハニカム構造体 22 を接合させるための層である。図10に示す構造によっても、熱の損失を抑え熱交換効率の向上が図られる。

【0073】

以下、再び、図3～図5に戻って説明を続ける。

【0074】

30

図3に示すように、熱交換ハニカム構造体 20 の、熱・音波変換部品 1 側の端面（熱交換ハニカム構造体 20 の上側の端面）は、熱・音波変換部品 1 の、高温側熱交換器 2 側の端面（熱・音波変換部品 1 の下側の端面）と直接に接触している。以下、この熱交換ハニカム構造体 20 の上側の端面を接触面 20s と呼ぶ。なお、本発明では、このように熱・音波変換部品 1 と熱交換ハニカム構造体 20 とが直接に接触する代わりに、熱・音波変換部品 1 と熱交換ハニカム構造体 20 との間に図6の間隔 t のような隙間が存在していてよい。この場合、熱交換ハニカム構造体 20 に対して伝達された熱は、熱交換ハニカム構造体 20 と接した作動流体に伝達され、その加熱された作動流体が、音波の振動に対応した作動流体の変位により熱・音波変換部品 1 の端面近傍に接触し、この端面近傍が加熱される。これにより、熱・音波変換部品 1 の、高温側熱交換器 2 側の端部は、低温側熱交換器 3 側の端部に比して相対的に温度の高い状態に維持されることとなる。

【0075】

40

ここで、この熱交換ハニカム構造体 20 は、SiC（炭化珪素）を主成分とするセラミックス材料で構成されている。セラミックス材料は、耐熱性が高いため、上述のように直接に高温の加熱流体に接触する熱交換ハニカム構造体 20 の材料に適している。さらに、セラミックス材料の中でも SiC を主成分とするセラミックス材料は、熱伝導率が相対的に高いため、上述したように熱交換ハニカム構造体 20 が熱・音波変換部品 1 に熱を伝達する役割を果たすのに適した材料となっている。ここで、「SiCを主成分とする」とは、SiC が、熱交換ハニカム構造体 20 の材料の 50 質量 % 以上を占めることを意味する。このときの気孔率としては、0 ~ 10 % であることが好ましい。また、隔壁 20a の厚さが 0.25 ~ 0.51 mm であってセル密度が 15 ~ 62 セル / cm<sup>2</sup> であることが好ましい。

【0076】

SiCを主成分とするセラミックス材料としては、具体的には、単純な SiC に加え、

50

Si含浸SiC、(Si+Al)含浸SiC、金属複合SiC、再結晶SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、及びSiC等を採用することができる。これらの中でも、Si含浸SiC、(Si+Al)含浸SiCが好ましい。その理由は、Siを含浸するSiCは、高い熱伝導率および耐熱性を有することに加え、多孔質体であっても気孔率が低く緻密に形成されているため、Siを含浸しないSiCに比して相対的に高い強度を実現できるからである。

#### 【0077】

ここで、熱交換ハニカム構造体20では、図5に示すように三角形のセル20dが、セル20dの貫通方向に垂直な面内で、決まった長さの周期で周期的に配列した構成が採用されている。後述するように、熱の伝達先である熱・音波変換部品1においても同様の構成が採用されており、熱交換ハニカム構造体20におけるセル20dのこの周期は、熱・音波変換部品1におけるセル14の周期の10以上の整数倍となっている。このように、熱交換ハニカム構造体20のセル20dの形状として、熱の伝達先である熱・音波変換部品1のセル14の形状と同一の形状を採用し、熱交換ハニカム構造体20のセル20dの周期として、熱・音波変換部品1のセル14の周期の整数倍のものを採用することで、熱交換ハニカム構造体20のセル20dの内部、および、熱・音波変換部品1のセル14の内部を満たしている作動流体の動きがスムーズになるよう工夫されている。なお、熱交換ハニカム構造体20のセルの周期が、熱・音波変換部品1のセルの周期よりも大きい理由は、熱・音波変換部品1のセル14は、上述した自励振動を起こすためにきわめて細い貫通孔であることが要求されるためである。熱交換ハニカム構造体20のセル20dには、こうした要請はなく、熱交換ハニカム構造体20は熱交換の役割を果たせば十分であるため、熱・音波変換部品1のセル14の周期に比べ、1桁(10倍)以上の大きさのものとなっている。

#### 【0078】

なお、熱・音波変換部品1が、後述するハニカムセグメントの接合構造を備えている場合には、ハニカムセグメントが、決まった長さの周期で周期的に配列した構成も備えられており、熱交換ハニカム構造体20のセルの周期が、このハニカムセグメントの周期の整数分の1(逆の言い方をすれば、このハニカムセグメントの周期が熱交換ハニカム構造体20のセルの周期の整数倍)となっていることが好ましい。こうすることで、隣接するハニカムセグメントの境界部分で熱交換ハニカム構造体20のセルが塞がれるのを低減でき、音波の減衰を抑えることができる。上記の整数倍としては、5~20倍が好ましい。

#### 【0079】

また、図3に示すように、熱交換ハニカム構造体20では、熱・音波変換部品1との接触面20sは、熱交換ハニカム構造体20が高温の加熱流体と直接に接触して熱を受ける受熱領域21cよりも、熱・音波変換部品1側(図の上方向)にずれた位置にあり、受熱領域21cと重ならないようになっている。仮に、接触面20sが受熱領域21cと重なってしまうと、接触面20sのうち、受熱領域21cに近い縁の周辺と、受熱領域21cから遠い中央付近では、温度差が大きく異なる状態が生じることがある。この場合、熱・音波変換部品1の、熱交換ハニカム構造体20側の端部(図3の下端部)が均一に加熱されないために、熱・音波変換部品1の各セルの自励振動が各セルに応じてムラが出るという問題が生じ得る。図3の熱交換ハニカム構造体20では、接触面20sが受熱領域21cと重ならないようになっていることで、こうした問題を回避している。

#### 【0080】

また、図5に示すように、熱交換ハニカム構造体20では、外周壁20bの一部が欠けてセル20dの貫通方向に沿って延びるスリット20cが形成されている。図5では、例として、熱交換ハニカム構造体20の外周面の4か所にスリット20cが形成された例が示されている。こうしたスリット20cが存在することで、高温の加熱流体が直接に外周壁20bに接触したときに、外周壁20bに生じる熱応力を緩和することができ、この結果、外周壁20bや隔壁20aの割れや剥離を抑えることができる。

#### 【0081】

また、図5に示すように、高温側環状管21には、スリット20cが延在する方向に沿

10

20

30

40

50

つて、各スリット 20c による空隙を塞ぎつつ延在する 4 つの耐熱性金属板 21d が設けられている。これら 4 つの耐熱性金属板 21d により、4 つのスリット 20c から作動流体が高温側環状管 21 内に漏れ出しが防がれる。ここで、熱交換ハニカム構造体 20 は、高温側環状管 21 の環状の中央部で、これら 4 つの耐熱性金属板 21d に嵌め込まれることで支持される。また、4 つの耐熱性金属板 21d において、図 5 の熱交換ハニカム構造体 20 の中心からみて外向き方向（動径方向）に突出した金属製あるいは SiC（炭化珪素）を主成分とするセラミックス製のフィン 21e（図 3 も合わせて参照）が備えられている。

#### 【0082】

次に、図 3 に示す熱・音波変換部品 1 について詳しく説明する。

10

#### 【0083】

図 11 は、図 3 に示す熱・音波変換部品 1 のセル 14 の貫通方向に垂直な面内における熱・音波変換部品 1 の断面図である。

#### 【0084】

図 11 に示すように、熱・音波変換部品 1 は、それぞれが細い管状の貫通孔である複数のセル 14 が、隔壁 11 によって区画形成され、さらにそれら隔壁 11 の全体の外周を外周壁 13 で取り囲むことで形成されている。ここで、外周壁 13 の構成材料としては、隔壁 11 の構成材料と同じものを採用できる。

#### 【0085】

上述したように、自励振動により音波を発生させる上でセル 14 の水力直径 HD が 1 つの重要な要素であり、熱・音波変換部品 1 のセル 14 の水力直径 HD は 0.4 mm 以下のきわめて小さい値となっている。このような水力直径 HD がきわめて小さいセルが形成されていることで、熱・音波変換部品 1 では、十分な熱音響効果を得ることができる。逆に、水力直径 HD が 0.4 mm より大きい場合、きわめて小さい熱音響効果しか得られず、たとえば、図 1 の電力発生システム 1000 や図 2 の冷熱発生システム 2000 で十分な量の電力や冷熱を得ることは難しくなる。

20

#### 【0086】

また、熱・音波変換部品 1 では、3 点曲げ強度が 5 MPa 以上となっている。3 点曲げ強度が 5 MPa 以上であると、熱音響効果によって発生する音波に絶えずさらされていても音波の衝撃に対する十分な強度を確保することができる。なお、強度が大きすぎると、弹性に欠けて耐久性が落ちることもあり得るため、5 MPa 以上 15 MPa 以下であることが好ましく、10 MPa 以上 15 MPa 以下が特に好ましい。

30

#### 【0087】

なお、3 点曲げ強度は、JIS R 1601 に準じた 3 点曲げ強度の測定方法を用いて測定することができる。もう少し具体的にいえば、熱・音波変換部品 1 から、セル 14 の貫通方向に垂直な方向を長尺方向とする、JIS R 1601 によって定められている大きさの棒状の部材を切り出し、その長尺方向について、JIS R 1601 によって定められている支点間距離で 3 点曲げ試験治具を設置して 3 点曲げ（抗折）試験を実施する。そして、破断するまでの最大応力を測定してその測定された最大応力を 3 点曲げ強度とする。

40

#### 【0088】

ここで、熱・音波変換部品 1 の 3 点曲げ強度は、たとえば、熱・音波変換部品 1 の構成材料の材料強度に依存する。たとえば、構成材料が多孔質材料である場合には、その材料強度としては、20 MPa 以上であることが、上記の熱・音波変換部品 1 の 3 点曲げ強度の数値範囲を満たす上で好ましい。ここで、熱・音波変換部品 1 の構成材料の材料強度は、原理的には、上述の熱・音波変換部品 1 の 3 点曲げ強度の測定において測定対象となつた棒状の部材において、そのセル構造による空洞部分が熱・音波変換部品 1 の構成材料で埋められた密な棒状の部材を上述と同様の測定方法で測定することで得られる。なお、熱・音波変換部品 1 の 3 点曲げ強度の測定結果から、セル構造の詳細を考慮して換算することで得ることもできる。あるいは、熱・音波変換部品 1 の構成材料の原材料となる坏土で

50

上記の棒状の部材と同じ形状のものを成形しさらに乾燥処理および焼成処理を施すことでき、材料強度の測定対象となるサンプルを作製し、そのサンプルについて、上述の3点曲げ強度の測定を実行することで得ることもできる。

【0089】

また、熱・音波変換部品1の3点曲げ強度は、たとえば、熱・音波変換部品1の構成材料が多孔質材料である場合には、気孔率に依存する。このときの気孔率としては、5%以下であることが、上記の熱・音波変換部品1の3点曲げ強度の数値範囲を満たす上で好ましい。なお、気孔率については、水銀ポロシメータ（たとえば、Micromeritics社製商品名：オートポアIV9505）等の測定装置により測定できる。

【0090】

また、熱・音波変換部品1が、多孔質の材料で構成されている場合には、各セル内における隔壁11の表面上（すなわち各セルの内壁面上）において、Mg, Si, Alのうちの少なくとも1種の金属の酸化物粒子を含み、隔壁11の表面上（各セルの内壁面上）の気孔を低減する表面層が形成されていることが好ましい。このような表面層により気孔が低減して空洞部分が減り、強度が向上する。

【0091】

また、熱・音波変換部品1では、その端面における開口率は93%以下に抑えられている。端面におけるセルの開口率が高すぎると、熱・音波変換部品1の空洞部分が多すぎることとなり、熱・音波変換部品1の強度が低下する。特に、開口率が93%を超えると、発生した音波による衝撃により生じる熱・音波変換部品1の損傷が無視できなくなる。

【0092】

ただし、より大きな熱音響効果を発揮するには、上述の水力直径が小さいセルを、できるだけ数多く形成するのが有利であるため、熱・音波変換部品1の端面における開口率が大きい方が有利である。そこで、熱・音波変換部品1では、開口率は、93%以下であるが、60%以上の高い開口率となっており、これにより大きな熱音響効果を発揮することもできる。実際、60%未満の開口率では、熱音響効果に寄与するセルが少なすぎてあまり大きな熱音響効果は得られない。まとめると、熱・音波変換部品1では、熱・音波変換部品1の端面における開口率が60%以上93%以下となることで、十分な熱音響効果の発揮と十分な強度との適度なバランスが実現している。なお、60%以上93%以下の開口率の中でも、80%以上93%以下の開口率が好ましい。

【0093】

なお、開口率は、貫通方向に垂直な断面を顕微鏡で撮影し、このときの断面の撮影画像から、材料部分面積S1と空隙部分面積S2を求め、S1とS2を用いてS2/(S1+S2)として求められる。

【0094】

また、熱・音波変換部品1では、その両端面の間の長さをLとしたときにこの長さLに対する上述の水力直径HDの比HD/Lが0.005以上0.02未満となっている。仮に、HD/Lが0.005未満であると、水力直径HDに比して熱・音波変換部品1が長すぎて、熱・音波変換部品1の各セル内の作動流体が熱・音波変換部品両端の温度差の影響を受けにくくなる。この場合、各セル内の作動流体と隔壁11との間における熱の授受が不十分で十分な熱音響効果が得られない。一方、仮に、HD/Lが0.02以上であると、今度は、水力直径HDに比して熱・音波変換部品1が短すぎて、各セル内の作動流体と隔壁11との間で熱の授受が不十分なまま熱・音波変換部品1において高温側熱交換器2側から低温側熱交換器3側に隔壁11を熱が伝導していくことになる。この結果、やはり十分な熱音響効果が得られない。そこで、熱・音波変換部品1では、比HD/Lが0.005以上0.02未満となるよう工夫されており、このため、各セル内の作動流体と隔壁11との間における熱の授受が十分に行われる。この結果、熱・音波変換部品1では、十分な熱音響効果が得ることができる。

【0095】

また、熱・音波変換部品1では、セル14の貫通方向に垂直な前記セルの断面形状は、

10

20

30

40

50

角部が弯曲した多角形の形状であることが好ましく、その形状の角部における曲率半径が0.02mm以上0.1mm以下であることが好ましい。図11では、セル14の形状の例としては、角部が弯曲した三角形の形状が図の右上の拡大図に示されており、この角部の曲率半径は0.02mm以上0.1mm以下となっている。曲率半径が0.02mm以上であることでその緩やかに弯曲した形状により、セル14を押しつぶすように働く衝撃に対し十分に対抗できる。これは、トンネル等の穴の形状としては、丸みを帯びた形状の方が角ばった形状よりも、周囲からの外力に対抗しやすいのと同様の理由に基づくものである。ただし、弯曲部分が大きすぎると、今度は、各セルの角部付近で隔壁11が分厚くなり、その分、熱音響効果に寄与するセル14の貫通孔が減ることになる。そこで、曲率半径が0.1mm以下となっていることで、同時に高い熱音響効果も維持されている。

10

#### 【0096】

なお、セル14の角部における曲率半径については、セル14の貫通方向に垂直な断面の拡大写真をとり、そのセル14の断面形状に基づき測定することができる。

#### 【0097】

また、熱・音波変換部品1では、セルの貫通方向に垂直な面内において、熱・音波変換部品1の断面の重心点を含み該断面の形状と相似形の中央領域における隔壁11の平均的な厚さに対し、中央領域の外側に位置し熱・音波変換部品1の断面積の20%の面積を占める外周領域における隔壁11の平均的な厚さが1.1~2.0倍となっていることが好ましい。外周部における隔壁11は、中央領域における隔壁11に比べると、外力として特定の方向の力を受けやすく、中央領域のように外力同士が相殺し合うことは相対的に少ない。このため、外周部の隔壁の平均的な厚さが中心部の隔壁の平均的な厚さの1.1倍以上厚くなっていることで、強度の向上が図られる。ただし、外周部の隔壁の平均的な厚さが中心部の隔壁の平均的な厚さよりも厚すぎると、今度は、外周部におけるセル密度が中央領域におけるセル密度よりも小さすぎて、中央領域と外周部との間で熱音響効果にムラが出るという問題が生じ得る。そこで、外周部の隔壁の平均的な厚さが中心部の隔壁の平均的な厚さの2.0倍以下となることでこうした問題の発生を抑えられる。

20

#### 【0098】

なお、外周部における隔壁11の厚さや、中央領域における隔壁11の厚さについては、セル14の貫通方向に垂直な断面の拡大写真をとり、隔壁11の厚さを測定することにより得られる。

30

#### 【0099】

また、熱・音波変換部品1の構成材料の熱伝導率が、5W/mK以下の低い熱伝導率となっていることが好ましい。仮に熱伝導率が5W/mKより大きい場合には、各セル内の作動流体と隔壁11との間で熱の授受が不十分なまま高温側熱交換器2側から低温側熱交換器3側に隔壁11を熱が伝導していくことになり、十分な熱音響効果が得られないことがある。これに対し、熱伝導率が5W/mK以下の低い熱伝導率となることで、各セル内の作動流体と隔壁11との間で熱の授受が十分に行われ、十分な熱音響効果が得られる。なお、5W/mK以下の熱伝導率の中でも、1.5W/mK以下の熱伝導率であることが特に好ましい。ただし、熱伝導率が小さすぎると、今度は、熱・音波変換部品1の高温側熱交換器2側の端面のみが局所的に高温となってセル内壁面に熱が伝わらず熱音響効果が起きにくくなるので、少なくとも0.01W/mK以上の熱伝導率であることが好ましい。

40

#### 【0100】

ここで、熱伝導率は、温度傾斜法(定常法)で求められる。具体的には、以下のようにして求められる。まず、熱伝導率の測定対象から板状のテストサンプルを切り出し、その板状のテストサンプルを熱伝導率が既知のスペーサ(たとえば銅やステンレス等の金属)で挟む。次に、その片面を30~200に加熱し、反対面を20~25に冷却することにより、テストサンプルの厚さ方向に一定の温度差を設ける。そして、伝播する熱流量をスペーサ内の温度勾配により求め、この熱流量を温度差で割り算して熱伝導率を算出する。

50

## 【0101】

熱・音波変換部品1では、セル14の貫通方向に垂直な面内における熱・音波変換部品1の断面の円相当直径Dが30mm以上100mm以下であって、円相当直径Dに対する熱・音波変換部品1の長さLの比L/Dが0.3以上1.0以下であることが好ましい。

## 【0102】

ここで、上記の「円相当直径」は、上記の熱・音波変換部品1の断面の面積を  $D^2/4$  と表現したときのDとして定義される。30mm以上100mm以下の数値範囲内に属する円相当直径Dに対する、熱・音波変換部品1の長さLの比L/Dが0.3以上1.0以下となることで、十分な熱音響効果を発揮する適度な大きさの熱・音波変換部品が実現する。

10

## 【0103】

また、熱・音波変換部品1では、熱・音波変換部品1の構成材料の、20~800における熱膨張率が6ppm/K以下であることが好ましい。

## 【0104】

熱・音波変換部品1の構成材料の、20~800における熱膨張率が6ppm/K以下となることで、両端部に温度差が生じたときの熱・音波変換部品1の損傷が抑えられる。なお、6ppm/K以下の熱膨張率の中でも、4ppm/K以下の熱膨張率であることがさらに好ましい。

## 【0105】

また、熱・音波変換部品1の長さLは、5mm以上60mm以下であることが好ましい。

20

## 【0106】

熱・音波変換部品1の長さLが上記の数値範囲に属することで、十分な熱音響効果が発揮される。

## 【0107】

また、熱・音波変換部品1は、図11に示すような一体型のハニカム構造を有するものに代えて、図11に示すような一体型のハニカム構造と同様の構造をそれぞれ有する複数のハニカムセグメントと、これら複数のハニカムセグメントの側面同士を互いに接合する接合部と、これら複数のハニカムセグメントとその接合部とで構成されるハニカム構造部の外周面を覆う外周壁とで構成されるものであってもよい。

30

## 【0108】

図12は、各セルの貫通方向に垂直な面内における、セグメント構造を有する熱・音波変換部品1の断面図である。

## 【0109】

図12の熱・音波変換部品1は、それぞれが一体的に形成された複数のハニカムセグメント15、ハニカムセグメント15を互いに接合する接合部12、および、このような接合部からなるハニカム構造部の外周を取り囲む外周壁13で構成されている。

## 【0110】

図11のような一体型のハニカム構造では、大型のハニカム構造の場合、製造上、一体的に作製するのが多少難しいことに起因して、製造されたハニカム構造中において、場所に応じて強度にばらつきが出ることがある。このように、大型のハニカム構造の場合には、図12のように複数のハニカムセグメント15に分けた接合型のハニカム構造とすることでこうした強度のばらつきを抑えられることがあり、この点は、接合型のハニカム構造の長所である。

40

## 【0111】

なお、接合型のハニカム構造では、接合面での強度が最も低く（言い換えれば、はがれやすく）、接合型のハニカム構造を有する図12の熱・音波変換部品1では、上述の3点曲げ強度の測定において、破断面が接合面となるように3点曲げ強度の測定を行ったときの3点曲げ強度、すなわち、接合面における強度（接合の強さ）が、5MPa以上となっている。

50

## 【0112】

図12に示す接合型の熱・音波変換部品1では、ハニカムセグメント15は、図11に示す一体型のハニカム構造の熱・音波変換部品1が有する上述の様々な特性と同じ特性を有している。

## 【0113】

ここで、接合型のハニカム構造を有する本発明の熱・音波変換部品では、各ハニカムセグメントにおける、セル14の貫通方向に垂直な面内でのセルの形状としては、三角形、四角形、五角形、六角形等の様々な多角形、および、橢円形（真円の形状含む）を採用できるが、三角形、四角形、六角形、およびこれらの組み合わせが好ましく、図12の熱・音波変換部品1の右上のセル14の配列の拡大図のように、三角形のセル14がこの垂直な面内で周期的に配列した構成が特に好ましい。なお、ここでは、図示の都合上、三角形のセル14の角部は、鋭角を有するものとして図示されているが、実際には、図11の右上のセル14と同様に角部は弯曲した形状となっている。10

## 【0114】

三角形のセル14が特に好ましいのは、様々な多角形および橢円形のセル形状のうち、三角形のセル形状が、隔壁の厚さをできるだけ薄くして数多くのセルを配列させるのに最も適しているからである。なお、この点は、熱・音波変換部品1のハニカム構造が接合型か一体型かに無関係な事情であり、同じ理由で、図11の一体型のハニカム構造においても三角形のセル14が採用されている。ここで、自動車の排ガスから微粒子を取り除く排気浄化触媒担持用のハニカム構造体では、セルの角部が鋭角であると、微粒子が角部に堆積しやすいといった問題があるため、三角形のセル形状は、（原理的には採用可能であっても）実際上、採用されないことが多い。しかし、熱音響効果を発揮するハニカム構造体（ハニカムセグメント）としては、自励振動を起こす作動流体（希ガス等の気体）に関して、このような問題は存在しないため、数多くのセルを配列させるのに最も適した三角形のセル形状を積極的に活用できる。20

## 【0115】

ここで、本発明において、接合型のハニカム構造を採用する場合、ハニカムセグメントの形状としては、ハニカムセグメントが複数のセルの集合体であることから、セルの形状をそのまま反映したセルの形状と同一の形状のものを採用することが、熱・音波変換部品の断面全体にできるだけ数多くのセルを配列させる上で都合がよい。たとえば、図11のように、セル14の形状が三角形の場合には、ハニカムセグメント15の形状としても、セル14の形状をそのまま反映した三角形とすることが好ましい。図12では、熱・音波変換部品1の外周壁13付近を除き、三角形の形状のハニカムセグメント15が、図12の平面内で周期的に配列している様子が示されている。30

## 【0116】

ただし、セル14の形状が三角形の場合には、ハニカムセグメントの形状としては、三角形の他に六角形も採用できる。これは、六角形は、6つの三角形により構成することができるためである。

## 【0117】

図13は、セル形状が三角形の場合において、ハニカムセグメントの形状が六角形の例を表した図である。40

## 【0118】

図13では、図12と同じ構成要素については同じ符号が付されており、その説明についての重複説明は省略する。

## 【0119】

図13に示す熱・音波変換部品1'では、図13の右上において拡大して示されているセル14の配列からわかるように、ハニカムセグメント15'において、三角形のセル14が、セル14の貫通方向に垂直な面内で周期的に配列した構成が採用されている。このハニカムセグメント15'の形状は六角形であり、熱・音波変換部品1'の外周壁13付近を除き、六角形の形状の複数のハニカムセグメント15'が図12の平面内で周期的に50

並んでいる。このような形態によっても、熱・音波変換部品1'の断面全体においてできるだけ数多くのセルを配列させることができる。

#### 【0120】

以下、図12に戻って、図12の熱・音波変換部品1の説明を続ける。なお、以下に説明する熱・音波変換部品1の特性は、図13に示す熱・音波変換部品1'にも共通する特性である。

#### 【0121】

図12の熱・音波変換部品1では、上述の接合部12および外周壁13のそれぞれの構成材料のヤング率は、いずれも、ハニカムセグメント15の構成材料のヤング率の30%未満であり、接合部12の構成材料の熱膨張係数は、ハニカムセグメント15の構成材料の熱膨張係数の70%以上130%未満であり、接合部12の構成材料の熱容量は、ハニカムセグメント15の構成材料の熱容量の50%以上となっていることが好ましい。

10

#### 【0122】

接合部12および外周壁13のそれぞれの構成材料のヤング率が、ハニカムセグメント15の構成材料のヤング率の30%未満となることで、上述した熱応力に対する緩衝作用を十分に得ることができる。このとき、構成材料の材質の相違に起因して接合部12および外周壁13の熱膨張係数や熱容量が、ハニカムセグメント15の構成材料の熱膨張係数や熱容量と比べて大きく異なると、今度は、接合部12および外周壁13と、ハニカムセグメント15との間で剥離等の問題が生じ、やはり熱応力に対する耐久性が低下する。接合部12および外周壁13の熱膨張係数や熱容量が、上述の数値範囲内にあることで、熱応力に対する十分な耐久性が発揮される。

20

#### 【0123】

ここで、ヤング率は、次のように算出する。まず、各構成材料について、ある決まった寸法の板状の試料を切り出す。この寸法とは、 $10 \times 10 \text{ mm} \sim 30 \times 30 \text{ mm}$ の範囲内に属する正方形の面と、 $0.5 \sim 3 \text{ mm}$ の範囲内に属する厚さとを有する板の寸法であり、各構成材料について共通の寸法である。この板状の試料の面積を $S (\text{mm}^2)$ 、厚さを $t (\text{mm})$ とし、この板状の試料の面に対し、 $0 \sim 3 \text{ MPa}$ の範囲内に属する荷重 $W (\text{N})$ を加えたときの試料の厚さの変化 $t (\text{mm})$ を測定する。この荷重 $W$ も、各構成材料について共通である。そして、ヤング率を $E$ とし、 $E = (W/S) \times (t/t_0)$ の式に従ってヤング率 $E$ を算出する。特に、ハニカムセグメント15の構成材料のヤング率については、まず、ハニカム構造を有する試料について上記のようにヤング率を測定し、次に、その測定したヤング率を、そのハニカム構造を考慮して、ハニカムセグメント15の構成材料のヤング率（すなわち、ハニカム構造には無関係なハニカムセグメント15の材料特性としてのヤング率）に換算することで得られる。

30

#### 【0124】

また、熱膨張係数については、JIS R 1618-2002に記載される「ファインセラミックスの熱機械分析による熱膨張の測定方法」に準拠して求めることができる。この測定では、まず、JIS R 1618-2002に規定されている測定対象の棒状部材の長尺方向がハニカムセグメント15のセルの貫通方向と一致するように、ハニカムセグメント15から、JIS R 1618-2002に規定されている大きさの棒状部材を切り出し、JIS R 1618-2002に規定されている方式で熱膨張係数を求める。得られた熱膨張係数は構成材料のセルの貫通方向と一致する方向の熱膨張係数とみなせる。

40

#### 【0125】

また、熱容量、たとえば、単位体積（たとえば $1 \text{ cc}$ ）当たりの熱容量については、以下のようにして求められる。まず、測定対象の一部を粉碎して粉末状にする。その粉末状のものをサンプルとして、そのサンプルについて断熱型熱量計を用いて投入熱と温度上昇の関係を調べる。これにより、そのサンプルの単位質量当たりの熱容量を求めることができる。そして、サンプルとして用いた粉碎前の測定対象の密度（体積当たりの質量）を、その求めた単位質量当たりの熱容量に乘じることで、単位体積（たとえば $1 \text{ cc}$ ）当たりの熱容量を得ることができる。

50

## 【0126】

ここで、ハニカムセグメント15は、コーデュライト、ムライト、アルミニウムチタネート、アルミナ、窒化珪素、炭化珪素、および耐熱性樹脂のうちの1つ、あるいは、2つ以上の組み合わせを主成分とするものであることが好ましい。ここで、「主成分とする」とは、ハニカムセグメント15の50質量%以上を占めることを意味する。一方、接合部12や外周壁13は、無機粒子とコロイド状酸化物とを含む塗布材を、接合材や、外周壁形成のための外周コート材として用いることで形成されることが好ましい。ここで、無機粒子としては、たとえば、コーデュライト、アルミナ、アルミニウムチタネート、炭化珪素、窒化珪素、ムライト、ジルコニア、磷酸ジルコニウム、および、チタニア、のうちの1つ、あるいは、2つ以上の組み合わせからなるセラミックス材料の粒子や、Fe-Cr-Al系金属、ニッケル系金属、珪素(金属珪素)-炭化珪素系複合材料の粒子を挙げることができる。一方、コロイド状酸化物としては、シリカゾル、アルミナゾル等が挙げられる。なお、以上の隔壁11や外周壁13の構成材料については、図11に示す一体型のハニカム構造における隔壁11や外周壁13の構成材料も同様である。

## 【0127】

また、図12の熱・音波変換部品1では、互いに接合される2つのハニカムセグメント15の間の接合幅が0.2mm以上4mm以下であり、セル14の貫通方向に垂直な面内における、熱・音波変換部品1の断面積に対する接合部12の全断面積の割合が10%以下となっていることが好ましい。

## 【0128】

互いに接合される2つのハニカムセグメント15の間の接合幅や、熱・音波変換部品1の断面積に対する接合部12の全断面積の割合が上記の数値範囲内に属することで、接合部12の存在による開口率の減少に起因する熱音響効果の低下を抑えつつ、熱応力に対する十分な耐久性が発揮される。

## 【0129】

また、熱・音波変換部品1では、複数のハニカムセグメント15それぞれの、セル14の貫通方向に垂直な面内における断面積は、3cm<sup>2</sup>以上12cm<sup>2</sup>以下となっていることが好ましい。

## 【0130】

各ハニカムセグメントの断面積が上記の数値範囲に属することで、十分な熱音響効果の発揮と十分な耐久性との適度なバランスが実現する。

## 【0131】

以下、図11に示す一体型の熱・音波変換部品1の製造方法について説明する。以下では、熱・音波変換部品1がセラミックス材料で構成されている場合を例にとって説明する。

## 【0132】

まず、セラミック原料にバインダ、界面活性剤、造孔材、水等を添加して成形原料とする。セラミック原料としては、コーデュライト化原料、炭化珪素-コーデュライト系複合材料、アルミニウムチタネート、炭化珪素、珪素-炭化珪素系複合材料、アルミナ、ムライト、スピネル、リチウムアルミニウムシリケート、および、鉄-クロム-アルミニウム系合金のうちの1つ、あるいは、2つ以上の組み合わせであることが好ましい。これらの中でも、コーデュライト化原料が好ましい。なお、コーデュライト化原料とは、シリカが42~56質量%、アルミナが30~45質量%、マグネシアが12~16質量%の範囲に入る化学組成となるように配合されたセラミック原料であって、焼成されてコーデュライトになるものである。なお、セラミック原料の含有量は、成形原料全体に対して40~90質量%であることが好ましい。

## 【0133】

バインダとしては、メチルセルロース、ヒドロキシプロポキシルセルロース、ヒドロキシエチルセルロース、カルボキシメチルセルロース、ポリビニルアルコール等を挙げることができる。これらの中でも、メチルセルロースとヒドロキシプロポキシルセルロースと

10

20

30

40

50

を併用することが好ましい。バインダの含有量は、成形原料全体に対して2～20質量%であることが好ましい。

【0134】

水の含有量は、成形原料全体に対して7～45質量%であることが好ましい。

【0135】

界面活性剤としては、エチレングリコール、デキストリン、脂肪酸石鹼、ポリアルコール等を用いることができる。これらは、単独で使用してもよいし、2つ以上を組み合わせて使用してもよい。界面活性剤の含有量は、成形原料全体に対して5質量%以下であることが好ましい。

【0136】

造孔材としては、焼成後に気孔となるものであれば特に限定されるものではなく、例えば、澱粉、発泡樹脂、吸水性樹脂およびシリカゲル等を挙げることができる。造孔材の含有量は、成形原料全体に対して15質量%以下であることが好ましい。

【0137】

次に、成形原料を混練して坯土を形成する。成形原料を混練して坯土を形成する方法としては特に制限はなく、例えば、ニーダー、真空土練機等を用いる方法を挙げることができる。

【0138】

次に、坯土を押出成形することで、複数のセルを区画形成する隔壁を備えたハニカム成形体を形成する。押出成形に際しては、上述した、各セルの水力直径、開口率、熱・音波変換部品1の形状、セル形状、各セルの周期、に対応した形状の口金を用いることが好ましい。口金の材質としては、摩耗し難い超硬合金が好ましい。なお、ハニカム成形体における各セルの水力直径、開口率、等の値については、後述の乾燥処理および焼成の処理で生じる収縮をも考慮して決定することが好ましい。

【0139】

ここで、大きな熱音響効果を発揮するための、上述したような、各セルの水力直径がきわめて小さく開口率が高い（セル密度が高い）図11の熱・音波変換部品1を作製する際には、以下の2つの問題により、こうした制約がない従来の排気浄化触媒担持用のハニカム構造体で用いられている押出成形法をそのまま単純に流用する（口金を、高密度の細孔形成用の口金に取り換えただけで同様の製造方法をそのまま実行する）ことはできない。

【0140】

第1の問題は、押出成形の際に、高温で押し出された坯土が成形用口金の孔内に密着して目詰まりが起こりやすいことである。なお、この問題については、たとえば、特許文献3の段落[0021]でも言及されている。

【0141】

第2の問題は、図11の熱・音波変換部品1のような各セルの水力直径がきわめて小さく開口率が高い（セル密度が高い）ハニカム構造体に対応する口金には、必然的にきわめて細い微細部分（典型的には0.3mm程度の太さの部分）が存在することとなり、この微細部分が、坯土押し出しの際の粘性摩擦により損傷（たとえば引きちぎれる等）を受けやすいことである。この損傷は、ハニカム成形体の形状の予測不可能な変形の原因となり、完成したハニカム構造体の3点曲げ強度を低下させる一つの要因となる。

【0142】

そこで、熱・音波変換部品1の製造方法においては、これら2つの問題を解消するために、以下の工夫が凝らされている。

【0143】

第1の問題に関しては、各セルの水力直径が0.4mm以下であって開口率が60%以上93%以下の、水力直径がきわめて小さく開口率が高い（セル密度が高い）熱・音波変換部品1に対応した口金（以下、正規口金と呼ぶ）による押出成形の実行前に、リブの厚さが0.04mm以上0.09mm以下というリブの厚さがきわめて小さい口金（以下、ダミー口金と呼ぶ）での坯土の押出処理が行われる。なお、ここでいう「リブの厚さ」と

10

20

30

40

50

は、成形体ハニカムの隔壁厚さのことで、口金におけるスリット幅を指しており、各スリットは、坏土の排出孔であって作製対象のハニカム構造体の各隔壁部分の形状を決定するものである。以下、「リブの厚さ」を、スリット幅を意味するものとして用いる。このダミー口金を用いた押出処理により、目詰まりの原因となりやすい坏土成分をあらかじめ取り除くことができる。この押出処理後の坏土を用いて正規口金による押出成形を実行することにより、上記の目詰まりの発生を抑えることが可能となる。

#### 【0144】

第2の問題に関しては、押出成形による熱・音波変換部品1の成形体の保形性を維持できる（つまり、成形体の形が崩れない）範囲内で、押出成形に用いる坏土の粘性を、従来の排気浄化触媒担持用のハニカム構造体の製造で用いられる坏土の粘性に比べ大幅に低減して粘性摩擦を小さくすることで対処している。ここで、このように保形性維持の条件を満たしつつ坏土の粘性を低減するにあたっては、坏土中の水の比率を、従来の排気浄化触媒担持用のハニカム構造体の製造時に比べ、より厳格に制御する（すなわち、水の比率の制御目標値と実際の水の比率の値との間の誤差をきわめて狭い範囲内に抑える）ことも必要となる。より具体的には、従来の排気浄化触媒担持用のハニカム構造体の製造で用いられる坏土中の水の比率が、坏土固形成分100質量部に対し25～35質量部であるのに対し、熱・音波変換部品1の製造で用いられる坏土中の水の比率は、坏土固形成分100質量部に対し40～42質量部となっている。なお、坏土中の水の比率を増加した場合には、坏土の粘性が低減して熱・音波変換部品1の成形体の形状に適度なばらつきが生じるようになり、音波の自励振動が起こりやすくなるという効果も生じる。さらにこの坏土の粘性低減には完成品のハニカム構造体（つまり熱・音波変換部品1）の強度に影響する上述の予測不可能な大きな変形を抑える効果があり、この効果により、完成品のハニカム構造体の3点曲げ強度が向上する。

#### 【0145】

ここで、本実施形態におけるハニカム成形体の作製（すなわち押出成形）に用いられる口金について説明する。なお、以下では、説明の簡単化のために、主に、セル形状が四角形の場合について説明する。

#### 【0146】

図14は、本実施形態におけるハニカム成形体の作製に用いられる口金の外観斜視図であり、図15は、図14に示す口金の、図14とは反対側から見たときの外観斜視図であり、図16は、図14に示す口金の表面の一部を示す拡大平面図であり、図17は、図16に示す口金のA-A'断面を示す模式図である。

#### 【0147】

図14～図17に示されるように、口金301は、第2の板状部303と、炭化タングステン基超硬合金製の第1の板状部307とを備えている。ここで、第2の板状部303は、鉄、鋼材、アルミ合金、銅合金、チタン合金およびニッケル合金からなる群から選択される少なくとも一種により構成されたものであり、この第2の板状部303には、ハニカム成形体の成形原料を導入するための裏孔305が形成されている。第1の板状部307には、裏孔305に連通する穴部311が形成されるとともに、穴部311に連通しセルブロック313を区画するスリット309が形成されている。この第1の板状部307は、第2の板状部303側に配設された第1の層307aと、第1の層307aに配設された第2の層307bとから構成されている。ここで、穴部311は、第1の層307aの両面に開口しており、スリット309は、第2の層307bの両面に開口している。図17には、第1の接合面310における穴部311の開口部311aが、第2の接合面における裏孔305の開口部305aと一致するように配置されている状態が示されている。以上の口金301の構成は、後述するように、口金の長寿命化を図るためのものである。

#### 【0148】

ここで、口金301の厚さは4～10mmであることが好ましい。4mmより薄いと、成形時に口金が破壊されることがある。10mmより厚いと、ハニカム構造体を成形する

10

20

30

40

50

際に、圧力損失が高く、成形し難いことがある。

【0149】

第2の板状部303は、鉄、鋼材、アルミ合金、銅合金、チタン合金およびニッケル合金からなる群から選択される少なくとも一種により構成された板状部材から構成される。ここで、鋼材とは、ステンレス鋼、ダイス鋼およびハイス鋼からなる群から選択される少なくとも一種のことである。第2の板状部303の材質としては、これらの中でも、鋼材が好ましく、ステンレス鋼が更に好ましい。

【0150】

なお、本願においては、「鉄、鋼材、アルミ合金、銅合金、チタン合金およびニッケル合金からなる群から選択される少なくとも一種」のことを「快削材」と称することがある。快削材は、炭化タングステン基超硬合金と比較して、容易に研削加工することができる材質（材料）である。第2の板状部303は、スリット309が形成されていないため、第1の板状部307に比べて、摩耗の問題が少ない。第2の板状部303は、快削材により形成されたものであるため、炭化タングステン基超硬合金に比べて加工性に優れている。また、炭化タングステン基超硬合金より、快削材のほうが安価であるため、製造コストを低下させることが可能である。

【0151】

第2の板状部303の材質の一種であるステンレス鋼としては、公知のステンレス鋼を用いることができる。たとえば、SUS304、SUS303等を挙げることができる。また、第2の板状部303の大きさは、特に限定されず、用途に合わせて、所望の大きさにすることができる。ただし、第2の板状部303が円板状である場合、円板の直径（一方の面および他方の面の直径）は20～40mmであることが好ましい。また、第2の板状部303の厚さについては2～8mmが好ましい。2mmより薄いと成形抵抗による応力による変形、破損を生じ、8mmより厚いと成形抵抗が過大になり成形体の押し出しが困難となる。

【0152】

上述したように、第2の板状部303には、成形原料を導入するための裏孔305が形成されており、裏孔305は、成形原料を導入するための貫通孔（第2の板状部303の両面に開口する孔）である。この口金301を用いてハニカム構造体を成形するときには、裏孔305からハニカム構造体の成形原料が導入される。裏孔305の形状については、導入された成形原料を、穴部311およびスリット309に導くことができるような形状であれば特に制限はないが、裏孔305を成形原料が流れる方向（第2の板状部の厚さ方向）に直交する断面における形状が、円形であることが好ましい。また、裏孔305の開口部の直径は0.15～0.45mmであることが好ましく、0.25～0.40mmであることが更に好ましい。このような裏孔305は、例えば、電解加工（ECM加工）、放電加工（EDM加工）、レーザ加工、ドリル等の機械加工等の方法によって形成することができる。これらの方法の中でも、効率的に、精度良く裏孔305を形成することができるうことより、電解加工（ECM加工）が好ましい。裏孔の空間は円柱形状であることが好ましい。この場合、裏孔を成形原料が流れる方向（第2の板状部の厚さ方向）に直交する断面における直径（裏孔の直径）が一定の値となる。そして、この場合、裏孔の直径は、第2の接合面における裏孔の開口部の直径と同じ値になる。また、裏孔の個数は、特に限定されず、作製しようとするハニカム構造体の形状等に合わせて適宜決定することができるが、セル形状が三角形の場合には、ハニカム構造体において隔壁が互いに交差する交差部（隔壁交差部）に対応する全ての位置に裏孔を配置することが好ましい。また、セル形状が四角セルの場合には、ハニカム構造体の隔壁交差部一つおきに千鳥状に裏孔を配置すると隔壁交差部での壊土の圧着性が良好になりハニカム構造体の3点曲げ強度が向上するので、隔壁交差部一つおきに千鳥状に裏孔を配置するのが好ましい。

【0153】

第1の板状部307は、炭化タングステン基超硬合金製の板状部材から構成されている。そして、裏孔305の直径に比べて、スリット309の幅は、非常に狭く形成されてい

10

20

30

40

50

る。このため、成形原料を押出成形する際に、裏孔 305 内の圧力が高くなつて、スリット 309 に応力が集中し、摩耗したり変形したりする等の不具合が生じやすい。そのため、第 1 の板状部 307 は、耐摩耗性の高い材料である炭化タングステン基超硬合金によつて形成されている。ここで、「炭化タングステン基超硬合金（超硬合金）」とは、炭化タングステンと結合材とが焼結した合金のことである。結合材は、コバルト (Co)、鉄 (Fe)、ニッケル (Ni)、チタン (Ti)、およびクロム (Cr) からなる群から選ばれる少なくとも 1 種の金属であることが好ましい。このような炭化タングステン基超硬合金は、耐摩耗性や機械的強度に特に優れている。

#### 【0154】

第 1 の板状部 307 の大きさは特に限定されず、用途に合わせて、所望の大きさにすることができる。ただし、第 1 の板状部 307 が円板状である場合、円板の直径は、20 ~ 40 mm が好ましい。第 1 の板状部 307 および第 2 の板状部 303 が円板状である場合、第 1 の板状部 307 の直径は、第 2 の板状部 303 の直径の 90 ~ 100 % が好ましい。なお、第 1 の板状部 307 の厚さは、0.3 ~ 1.2 mm であることが好ましく、0.5 ~ 0.9 mm であることが更に好ましい。また、第 1 の板状部 307 の厚さは、第 2 の板状部 303 の厚さの 0.05 ~ 2 倍であることが好ましい。このような数値範囲の寸法を採用することにより、押出圧力による口金自体の変形を許容範囲内に抑えることができ、ハニカム構造体の 3 点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形を抑えることができる。

#### 【0155】

上述したように、第 1 の板状部 307 は、第 2 の板状部 303 側に配設された第 1 の層 307a と、第 1 の層 307a に配設された第 2 の層 307b とから構成されている。口金 301 は、このように第 1 の板状部が、第 1 の層 307a および第 2 の層 307b の 2 層から構成されているため、押出成形時の応力を緩和することができ、破損を防止することができる。第 1 の層 307a と第 2 の層 307b の材質は、同じ種類であつてもよいが、異なる種類であつてもよい。

#### 【0156】

このように第 1 の層 307a は、第 1 の板状部 307 を構成する一つの層であつて第 2 の板状部 303 側に配置される層である。ここで、第 1 の層 307a には穴部 311 が形成されている。第 1 の層 307a は、ビックカース硬度が 2000 ~ 3000 HV であり、ヤング率が 600 ~ 800 GPa である超硬合金製の層であることが好ましい。第 1 の層 307a は、上記のようなビックカース硬度とヤング率を有する場合、穴部 311 にかかる応力に耐え得る硬度と、韌性とを備えた層となる。そのため、裏孔 305 から穴部 311 に流入した成形原料の応力によって、第 1 の板状部 307 が割れるなどの不具合を防止でき、口金の寿命を長くすることができる。また、穴部 311 は、第 1 の層 307a の両面に開口するように形成されており、ハニカム構造体の 3 点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形を抑えることができる。

#### 【0157】

第 1 の層 307a のビックカース硬度は、2000 ~ 3000 HV であることが好ましく、2000 ~ 2200 HV であることが更に好ましい。上記所定のビックカース硬度を有することにより、第 1 の層 307a は、裏孔 305 から穴部 311 に流入したセラミック原料の応力に耐え得る硬度を備えることができる。そのため、穴部 311 が磨耗することを防ぐことができる。第 1 の層 307a のビックカース硬度が 2000 HV 未満である場合には、強度不足で磨耗が生じることがある。また、第 1 の層 307a のビックカース硬度が 3000 HV 超である場合には、硬すぎることにより、第 1 の層 307a が割れ易くなることがある。また、第 1 の層 307a のヤング率は、600 ~ 800 GPa であることが好ましく、600 ~ 700 GPa であることが更に好ましい。これにより、第 1 の層 307a の破損を防止することができる。第 1 の層 307a のヤング率が、600 GPa 未満である場合には、韌性が小さすぎることにより、割れてしまうなどの不具合が生じことがある。また、ヤング率が 800 GPa を超える場合には、韌性が大きすぎて穴部 311 が

10

20

30

40

50

変形してしまうおそれがある。穴部311が変形した口金を使用してハニカム構造体を成形すると、ハニカム構造体に歪みが生じ成形性が低下する。

#### 【0158】

上述したように、第2の層307bは、第1の板状部307を構成する1つの層であり、第1の層307aに配設されている。第2の層307bには、スリット309が形成され、スリット309は、第2の層307bの両面に開口するように形成されている。ここで、「第2の層307bの両面」とは、第2の層307bの、第1の層307aに接する（接合している）面と、この第1の層307aに接する面に対して反対側（裏側）の面との両方の面を意味する。図17では、スリット309の成形原料の吐出口は、スリット309の開口部309aとして示されている。第2の層307bは、ビッカース硬度が500～3000HVであり、ヤング率が400～700GPaであることが好ましい。第2の層307bがこのようなビッカース硬度とヤング率とを有する場合、スリット309にかかる応力に耐え得る十分な韌性および硬度を備えた層となる。このため、スリット309の変形や磨耗を防ぐことができる。

#### 【0159】

第2の層307bは、ビッカース硬度が500～3000HVであることが好ましく、ビッカース硬度が2000～3000HVであることが更に好ましい。このようなビッカース硬度を有することにより、第2の層307bの磨耗を抑制することができ、ハニカム構造体の3点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形を抑えることができる。第2の層307bのビッカース硬度が500HV未満である場合には、硬度不足で簡単に磨耗が生じることがある。また、ビッカース硬度が3000HV超である場合には、第2の層307bが割れやすくなることがある。

#### 【0160】

第2の層307bは、ヤング率が400～700GPaであることが好ましく、ヤング率が500～700GPaであることが更に好ましい。第2の層307bがこのようなヤング率を有することで、割れにくくなる。第2の層307bのヤング率が400GPa未満である場合には、韌性が小さすぎることにより割れなどの不具合が生じやすい。また、ヤング率が700GPa超であると、今度は韌性が大きすぎることにより、第2の層307bが変形しやすい。

#### 【0161】

さらに、口金301は、第2の層307bのビッカース硬度とヤング率が、第1の層307aのビッカース硬度とヤング率よりも大きいものであることが好ましい。すなわち、第2の層307bのビッカース硬度が、第1の層307aのビッカース硬度よりも大きく、第2の層307bのヤング率が、第1の層307aのヤング率よりも大きいことが好ましい。このような関係により、スリット309が形成された第2の層307bは、摩耗しにくく、穴部311が形成された第1の層307aは割れにくくなる。そして、磨耗を抑制する第2の層307bと、割れを抑制する第1の層307aとにより、口金の更なる長寿命化が図られるとともに、ハニカム構造体の3点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形を抑えることができる。

#### 【0162】

口金301においては、第2の層307bのビッカース硬度が第1の層307aのビッカース硬度よりも、1000～2500HV大きく、第2の層307bのヤング率が、第1の層307aのヤング率よりも50～300GPa大きいことが好ましい。これにより、耐摩耗性を備えた第2の層307bと、高い韌性を備えた第1の層307aを確実に第1の板状部307に形成することができ、口金の寿命を長くするとともに、ハニカム構造体の3点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形を抑えることができる。

#### 【0163】

また、第1の層307aの厚さが0.1～5mmであることが好ましく、第1の層307aの厚さが0.2～5mmであることが更に好ましい。第1の層307aが上記範囲内

10

20

30

40

50

の厚さに形成されることにより、第2の板状部の摩耗を効果的に抑制することができる。第1の層307aの厚さが0.1mm未満であると、第2の板状部が摩耗し易くなることがある。また、第1の層307aの厚さが5mmを超えると、口金の厚さが大きいために押出成形時の圧力が高くなることがある。このように押出成形時の圧力が高くなると、二局所間の圧力差（局所間圧力差）が大きくなることがあり、ハニカム構造体の3点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形の原因となり得る。

#### 【0164】

また、第2の層307bの厚さが0.3~4mmであることが好ましく、1~4mmであることが更に好ましい。第2の層307bが上記範囲内の厚さに形成されることにより、押出成形されたハニカム構造体の変形を抑制することが可能となり、ハニカムの3点曲げ強度が向上する。逆に、第2の層307bの厚さが0.3mm未満であると、押出成形されたハニカム構造体の形状が変形することがあり、ハニカム構造体の3点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形の原因となることがある。また、第2の層307bの磨耗や変形が生じる可能性もある。また、第2の層307bの厚さが4mmを超えると第2の層307bが厚くなつてスリットの深さ（成形原料を押し出す方向におけるスリットの長さ）が大きすぎることで、押出成形時の圧力が高くなりすぎることがある。この場合、局所間圧力差が大きくなつて、ハニカム構造体の3点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形の原因となることがある。また、スリットに囲まれる部位が極端に細長くなり、坏土との摩擦により断裂してしまうこともある。これらの事態を防ぐ観点からスリットの深さは大きくはできない。一方、スリットの深さを適度に浅くすると、複数のスリットの間でスリットの深さについての相対的なばらつきが大きくなる。この結果、押出成形されたハニカム構造体の形状に適度のばらつきが生じるようになり、音波の自励振動が起りやすくなる。

#### 【0165】

上述したように、第1の板状部307には、穴部311に連通し、成形原料を成形するためのスリット309が形成されている。スリット309は、第1の板状部307に形成された隙間（切れ込み）である。裏孔305から導入された成形原料が、口金内でスリット309に入り、さらに、スリット309の開口部309aから成形原料が押し出されて、ハニカム形状の成形体が形成される。

#### 【0166】

上述したように、スリット309は、第2の層307bの両面に開口している。スリット309は、第2の層307bのみに形成されていてもよいが、第1の層307aにも形成されていることが好ましい。第1の層307aに形成されるときには、第2の層307bに形成されたスリット309が第1の層側に延長されるようにして第1の層307aに形成されていることが好ましい。この場合、第1の層307aに形成されるスリット309は、第1の層307aの、第2の層307bに接する面に形成されることになる。また、この場合、スリット309の深さが、第2の層307bの厚さよりも深く形成されていることになる。スリット309の深さは0.3~1.0mmであることが好ましく、0.4~0.8mmであることが更に好ましい。スリット309の、第1の層側に延長された部分の深さは0.1~0.5mmであることが好ましく、0.2~0.5mmであることが更に好ましい。これにより、ハニカム構造体の3点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形が少ない良好なハニカム形状の成形体を形成することができる。また、スリット309の幅が0.03~0.05mmであることが好ましく、0.04~0.05mmであることが更に好ましい。

#### 【0167】

上述したように、第1の板状部307の第1の層307aには穴部311が形成されており、この穴部311は、第2の板状部303に形成される裏孔305、および、第1の板状部307に形成されるスリット309に連通するように形成される。また、この穴部311は、第1の板状部307の第1の層307aに形成された貫通孔でもある。すなわち、穴部311は、第2の層307bの第2の板状部303に接する側の面（第1の板状

10

20

30

40

50

部 3 0 7 の第 1 の接合面 3 1 0 ) に開口するとともに、第 2 の層 3 0 7 b の第 1 の層 3 0 7 a に接する側の面 ( 第 2 の層の一方の面 3 0 7 b a ) 」に開口する貫通孔でもある。第 1 の接合面 3 1 0 は、図 1 7 に示されるように、第 1 の板状部 3 0 7 の、第 2 の板状部 3 0 3 に接合されている ( 接している ) 面である。このような穴部 3 1 1 が形成されることにより、第 2 の板状部 3 0 3 に形成された裏孔 3 0 5 から導入された成形原料が、この穴部 3 1 1 を通過してスリット 3 0 9 に入る。そして、スリット 3 0 9 の開口部 3 0 9 a から成形原料が押し出され、ハニカム形状の成形体 ( ハニカム構造体 ) が形成される。穴部 3 1 1 は、深さ  $h$  ( 図 1 7 参照 ) が 0.1 ~ 4 mm であることが好ましく、0.2 ~ 3 m m であることが更に好ましい。このように、穴部 3 1 1 の深さ  $h$  が上記範囲であることにより、第 2 の板状部 3 0 3 の摩耗を効果的に抑制することができ、ハニカム構造体の 3 点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形を抑制することが可能となる。穴部の深さ  $h$  が、0.1 mm 未満であると、成形原料を押出成形する際に第 1 の板状部 3 0 7 の強度が低下し易くなる。穴部の深さ  $h$  が 4 mm を超えると、口金作製の際に、第 1 の板状部材を加工して穴部を形成することが困難となりやすい。ここで、穴部 3 1 1 の深さ  $h$  は、図 1 7 に示されるように、第 1 の板状部 3 0 7 の第 1 の接合面 3 1 0 から、第 2 の層 3 0 7 b の一方の面 3 0 7 b a までの距離である。なお、この穴部 3 1 1 の深さは、第 1 の層 3 0 7 a の厚さと一致する。穴部 3 1 1 の開口部 3 1 1 a の直径は 0.15 ~ 0.4 mm であることが好ましく、0.2 ~ 0.4 mm であることが更に好ましい。穴部 3 1 1 は、例えば、電解加工 ( E C M 加工 ) 、放電加工 ( E D M 加工 ) 、レーザ加工、ドリル等の機械加工等の方法によって形成することができる。これらの中でも、効率的に、精度良く穴部 3 1 1 を形成することが可能であることより、電解加工 ( E C M 加工 ) が好ましい。穴部 3 1 1 の空間は、円柱形状であることが好ましい。この場合、穴部 3 1 1 の成形原料が流れる方向 ( 第 1 の板状部の厚さ方向 ) に直交する断面における直径 ( 穴部 3 1 1 の直径 ) が一定の値となる。このとき、穴部 3 1 1 の直径は、第 1 の接合面 3 1 0 における穴部の開口部 3 1 1 a の直径と同じ値になる。また、穴部 3 1 1 の個数は、裏孔の個数と同じであることが好ましい。

#### 【 0 1 6 8 】

図 1 7 に示されるように、口金 3 0 1 は、第 1 の接合面 3 1 0 における穴部 3 1 1 の開口部 3 1 1 a ( 円形 ) の直径  $d_1$  が、第 2 の接合面 3 0 6 における裏孔の開口部 3 0 5 a ( 円形 ) の直径  $D_1$  と同じ大きさに形成されている。ここで、第 2 の接合面 3 0 6 は、図 1 7 に示されるように、第 2 の板状部 3 0 3 の、第 1 の板状部 3 0 7 に接合されている ( 接している ) 面である。第 1 の接合面 3 1 0 における穴部 3 1 1 の開口部 3 1 1 a は、第 1 の接合面 3 1 0 に開口する、貫通孔の入口部分 ( 成形原料の流入部分 ) である。また、第 2 の接合面 3 0 6 における裏孔 3 0 5 の開口部 3 0 5 a は、裏孔 3 0 5 の第 2 の接合面 3 0 6 に開口する、第 2 の接合面 3 0 6 側の出口部分 ( 成形原料の出口部分 ) である。成形原料は、この出口部分を通過すると同時に、穴部 3 1 1 に供給される。

#### 【 0 1 6 9 】

ここで、押出成形を行うにあたっては、口金を固定する押さえ板構造が備えられていることが好ましい。

#### 【 0 1 7 0 】

図 1 8 は、押さえ板構造の一例を表した図である。

#### 【 0 1 7 1 】

図 1 8 に示す押さえ板構造では、図 1 8 の下向き矢印の向きに成形原料は押し出される。このとき、裏押さえ部 4 0 3 により、流入する壊土の量を調整することができる。口金 4 0 1 は、押さえ部 4 0 2 によって固定されており、口金 4 0 1 と押さえ部 4 0 2 との間隙 4 0 5 より押し出される成形原料は傾斜面 4 0 6 および対向面 4 0 7 とでハニカム成形体 4 0 4 の外周部分を調整形成する。

#### 【 0 1 7 2 】

図 1 9 は、図 1 8 とは別の押さえ板構造の一例を表した図である。

#### 【 0 1 7 3 】

10

20

30

40

50

図19に示す押さえ板構造550では、図19の下向き矢印の向きに成形原料は押し出される。この押さえ板構造550には、成形原料を供給する裏孔553と、成形原料を押し出すスリット552を有する口金554と、その口金554の下流側に設けた押さえ板555とが備えられている。口金554は内側部571と外周部572とからなる。内側部571は下流側(図19中の下方)に突出して外周部572との間に段差部575を形成しており、この内側部571には、ハニカム構造を成形するスリット573が備えられている。一方、外周部572には、スリット573より短いスリット574が備えられている。口金554と押さえ板555との間には、ハニカム構造の外壁を成形する隙間部557が形成されている。なお、押さえ治具558および裏押さえ板55aは、口金554と押さえ板555とをセットするためのホルダーである。

10

## 【0174】

図19に示す押さえ板構造550を用いた押出成形においては、成形原料は、口金554の上流側(図19中の上方)から押出機(図示しない)によって口金554を通じて下流側に向かって押し出される。下流側が開放された口金554の内側部571に備えられているスリット573から押し出された成形原料561は、多数のセルからなるハニカム構造に成形される。一方、口金554の外周部572に備わるスリット574から押し出された成形原料561は、隙間部557の作用によって、ハニカム形状が潰されるとともに、押出方向から段差部575方向へと進行方向を変え、押さえ板555が開口したところで、再び押出方向へと進行方向を変え、セルを取り囲む外壁を形成する。

20

## 【0175】

図20は、さらに別の押さえ板構造の一例を表した図である。図21は、図20とはさらに別の押さえ板構造の一例を表した図である。

## 【0176】

図20(a)に示す押さえ板構造は、図20(b)に示すように正三角形の周期的な配列を形成するスリット602を有する口金604を有している。この口金604は、正三角形のセル形状を有するハニカム構造体を成形するためのものであり、押さえ板605により固定されている。ここで、スリット602は、裏孔603に連通している。この押さえ板構造では、スリット602の長さL1、スリット602の長さL1から段差部615の段差の長さを引いた長さL2、スリット602の幅W、および、押さえ板605と段差部615との間の距離dにより、成形されるハニカム成形体の形状(寸法)が決定される。

30

## 【0177】

図21は、図20とはさらに別の押さえ板構造の一例を表した図である。

## 【0178】

図21(a)に示す押さえ板構造は、図21(b)に示すように正方形の周期的な配列を形成するスリット702を有する口金704を有している。この口金704は、正方形のセル形状を有するハニカム構造体を成形するためのものであり、押さえ板705により固定されている。ここで、スリット702は、裏孔703に連通している。この押さえ板構造も、スリット702の長さL1、スリット702の長さL1から段差部715の段差の長さを引いた差の長さL2、スリット702の幅W、および、押さえ板705と段差部715との間の距離dにより、成形されるハニカム成形体の形状(寸法)が決定される。

40

## 【0179】

図20および図21の押さえ板構造のいずれにおいても、スリット702の長さL1は、0.3~1.0mmであることが好ましく、0.4~0.8mmであることがさらに好ましい。また、差の長さL2は0.1~0.5mmであることが、ハニカム構造体の3点曲げ強度に影響するハニカム構造体の隔壁の大きな変形が少ない良好なハニカム成形体を形成する上で好ましい。

## 【0180】

以下、押出成形によって得られたハニカム成形体のその後の処理について説明を続ける。

50

## 【0181】

得られたハニカム成形体について、焼成前に乾燥を行う（第一次乾燥工程）。乾燥の方法は特に限定されず、例えば、マイクロ波加熱乾燥および高周波誘電加熱乾燥等の電磁波加熱方式と、熱風乾燥および過熱水蒸気乾燥等の外部加熱方式とを挙げることができる。また、電磁波加熱方式で一定量の水分を乾燥させた後、残りの水分を外部加熱方式により乾燥させることも可能である。この場合、電磁波加熱方式にて、乾燥前の水分量に対して、30～90質量%の水分を除いた後、外部加熱方式にて、3質量%以下の水分にすることが好ましい。電磁波加熱方式としては誘電加熱乾燥が好ましく、外部加熱方式としては熱風乾燥が好ましい。

## 【0182】

10

各セルの貫通方向に沿ったハニカム成形体の長さが所望の長さではない場合は、両端面（両端部）を切断して所望の長さとすることが好ましい。切断方法は特に限定されないが、丸鋸切断機等を用いる方法を挙げることができる。

## 【0183】

次に、このハニカム成形体を焼成する（第一次焼成工程）。ここで、焼成の前には、バインダ等を除去するため、仮焼成を行うことが好ましい。また、仮焼成は大気雰囲気において、400～500で0.5～20時間行なうことが好ましい。仮焼成及び焼成の方法は特に限定されず、電気炉およびガス炉等を用いて焼成することができる。焼成条件は、たとえば、珪素-炭化珪素系複合材料を用いた場合には、窒素およびアルゴン等の不活性雰囲気において、1300～1500で、1～20時間加熱することが好ましい。一方、酸化物系材料を用いた場合には、酸素雰囲気で、1300～1500で1～20時間加熱することが好ましい。

20

## 【0184】

次に、Mg, Si, Alのうちの少なくとも1種の金属の酸化物粒子を含む液状体を作成する。この液状体としては、スラリー（懸濁液）や溶液が採用可能であるが、作製が簡単なことからスラリーが好ましい。たとえば、Mg, Si, Alのうちの少なくとも1種の金属の酸化物粒子を含むとともに、バインダ、分散剤、界面活性剤、水等が添加されたスラリーを作製する。ここで、バインダや界面活性剤としては、たとえば、上述のものを用いることができる。第一焼成工程後のハニカム成形体の各セル内における隔壁の表面（各セルの内壁面）に、このスラリーを接触させることで、Mg, Si, Alのうちの少なくとも1種の金属の酸化物粒子を含み隔壁の表面（各セルの内壁面）上の気孔に浸入して該表面上の気孔を低減する表面層を形成する（表面層形成工程）。表面層を形成する方式としては、第一焼成工程後のハニカム成形体をスラリーの浸漬させる浸漬法や、第一焼成工程後のハニカム成形体の各セル中に上方からスラリーの液滴を滴下して各セルの内壁面上を流下させる流下法等が考えられる。ここで、流下法を採用する場合には、スラリーの液滴の流下を複数回繰り返すことや、スラリーの液滴の流下後にさらに第一焼成工程後のハニカム成形体を上下させかさまにした状態で、再度、スラリーの液滴の流下を行うことが好ましい。

30

## 【0185】

40

次に、表面層形成工程後のハニカム成形体に対し、第1乾燥工程と同様の乾燥処理を施す（第2乾燥工程）。さらに、第2乾燥工程後のハニカム成形体に対し、第1焼成工程と同様の焼成処理を施す（第2焼成工程）。

## 【0186】

50

最後に、所望の熱・音波変換部品1の断面形状（たとえば、図11のような円形）を実現するのに必要であれば、第2焼成工程後のハニカム成形体の外周部分を、適宜、切削加工して形状を整える。さらに、切削加工後のハニカム成形体の外周面に外周コート材を塗布して乾燥させ外周壁13を形成する。ここで、外周コート材としては、後述の接合材と同じ材料を用いることができる。また、外周コート材を塗布する方法は特に限定されず、切削加工後のハニカム成形体をろくろ上で回転させながらゴムベラ等でコーティングする方法等を挙げることができる。

## 【0187】

以上の工程を経て、最終的に図11の一体型の熱・音波変換部品1が完成する。

## 【0188】

なお、図12の接合型の熱・音波変換部品1を作製する場合は、最後の外周コート材塗布の工程を除き、以上の図11の一体型の熱・音波変換部品1の製造方法とほぼ同様の工程を経て、まず図12のハニカムセグメント15を複数個作製する。ただし、図12のハニカムセグメント15は三角形の断面形状を有するものであるため、以上の図11の熱・音波変換部品1の製造方法において、この三角形の断面形状に適合した口金を用いるか、あるいは、切削加工して三角形状に整えるといった変更は必要である。

## 【0189】

作製した複数個のハニカムセグメント15を、互いの側面同士が対向するように配置し、接合部12の固化前の材料である接合材で互いに接合して乾燥させる。接合材をハニカムセグメントの側面に塗布する方法は、特に限定されず刷毛塗り等の従来の方法を用いることができるが、対向する側面全体に塗布されることが好ましい。これは、接合部12が、各ハニカムセグメントを互いに接合するだけでなく、上述したように、熱応力を緩衝する（吸収する）役割も果たすためである。ここで、接合材としては、無機粒子とコロイド状酸化物を含む原料に、有機バインダ、発泡樹脂、分散剤等の添加材を加えたものに水を加えて混練したスラリー等を挙げることができる。ここで、無機粒子としては、たとえば、コージェライト、アルミナ、アルミニウムチタネート、炭化珪素、窒化珪素、ムライト、ジルコニア、磷酸ジルコニアム、および、チタニア、のうちの1つ、あるいは、2つ以上の組み合わせからなるセラミックス材料の粒子や、Fe-Cr-Al系金属、ニッケル系金属、珪素（金属珪素）-炭化珪素系複合材料の粒子を挙げることができる。一方、コロイド状酸化物としては、シリカゾル、アルミナゾル等が挙げられる。

10

## 【0190】

次に、接合材で互いに接合された複数個のハニカムセグメント15全体の外周部分を、所望の熱・音波変換部品1の断面形状（たとえば、図12のような円形）が実現するように切削加工する。さらに、切削加工後の複数個のハニカムセグメント15全体の外周面に外周コート材を塗布して乾燥させ外周壁13を形成する。ここで、外周コート材としては上記の接合材と同じ材料を用いることができる。また、外周コート材を塗布する方法は特に限定されず、ハニカムセグメント接合体をろくろ上で回転させながらゴムベラ等でコーティングする方法等を挙げることができる。

20

## 【0191】

このようにして、図12の接合型の熱・音波変換部品1が完成する。

## 【0192】

次に、図3の高温側熱交換器2の製造方法について説明する。

## 【0193】

図3の高温側熱交換器2における熱交換ハニカム構造体20については、上記の図11の一体型の熱・音波変換部品1の製造方法において、セラミック原料としてSiC粉末に炭素粉末（黒鉛粉末等）を加えたものを用い、押出成形の際の口金として相対的にセルの水力直径の大きいハニカム成形体の作製に適した口金を用いることを別にすれば、上記の図11の熱・音波変換部品1の製造方法と同様の製造方法で作製することができる。

30

## 【0194】

この熱交換ハニカム構造体20の作製においては、たとえば、SiCとSiC複合材料を主成分とする熱交換ハニカム構造体20を製造する場合には、SiC粉末および炭素粉末を混合・混練して調整された坏土を成形してハニカム成形体を作製した後、乾燥処理および焼結処理を行った後に、溶融した珪素（Si）をこのハニカム成形体に含浸させる処理を行うことが好ましい。この処理を行うことで、焼結処理後に、SiC粒子の表面を金属Si（金属珪素）の凝固物が取り囲むとともに、金属Siを介してSiC粒子同士が接合した構造が形成される。この構造により、気孔率が小さく緻密な構造であって高い熱耐久性および熱伝導性が実現する。

40

50

## 【0195】

なお、溶融した珪素(Si)だけでなく、Al、Ni、Cu、Ag、Be、Mg、Ti等といったその他の金属に含浸させてもよい。この場合、焼結処理後に、SiC粒子の表面を金属Si(金属珪素)、および含浸に用いたその他の金属の凝固物が取り囲むとともに、金属Si、および含浸に用いたその他の金属を介してSiC粒子同士が結合した構造が形成される。この構造によつても、気孔率が小さく緻密な構造であつて高い熱耐久性および熱伝導性が実現する。

## 【0196】

なお、熱交換ハニカム構造体20の外周コート材においても、上記と同様の理由で、外周コート材の材料(熱・音波変換部品1の接合材の材料)となる無機粒子の候補として上述した材料の粒子のうち、珪素(金属珪素)-炭化珪素系複合材料の粒子を用いることが好みしい。

10

## 【0197】

また、外周コート材の塗布により形成された外周壁に対して、セルの貫通方向に沿つてスリットを形成するスリット形成処理を行うことが好みしい。なお、スリット形成処理を行う場合には、以下に説明する高温側環状管21の作製において、耐熱性金属板21dやフィン21eを形成する。

## 【0198】

図3の高温側熱交換器2における高温側環状管21については、耐熱性の高い材料を環状に成形する(ただし、熱交換ハニカム構造体20との結合時に熱交換ハニカム構造体20の外周壁の一部が高温側環状管内で露出するような、中央側の壁面の一部が欠落した環状に成形する)ことで作製できる。耐熱性の高い材料については特に限定されないが、具体的には、たとえば、高耐熱性ステンレスや銅等の金属、さらには、セラミックス材料(たとえば、図11の熱・音波変換部品1や熱交換ハニカム構造体20の材料として挙げたもの)を採用できる。

20

## 【0199】

図3の高温側熱交換器2は、基本的には、高温側環状管21の環状における、穴となつてゐる中央部に熱交換ハニカム構造体20を組み込むことによって完成する。

## 【0200】

次に、図3の低温側熱交換器3の製造方法について説明する。従来から知られている熱交換器を低温側熱交換器3として用いる場合には、従来から知られている熱交換器の製造方法を流用することができる。また、上述の高温側熱交換器2と同じ構成のものを低温側熱交換器3として用いる場合には、上述の高温側熱交換器2の製造方法と同じ製造方法を用いることができる。

30

## 【0201】

図3の熱・音波変換ユニット100を構成するその他の部材、たとえば、金属部材32やハウジング100aや干渉材1aについては、従来から知られているものを採用でき、その製造方法についても従来から知られているものを流用することができる。

## 【実施例】

## 【0202】

以下、本発明を実施例によって更に具体的に説明するが、本発明はこれらの実施例によつて何ら限定されるものではない。

40

## 【0203】

## (実施例1)

実施例1においては、まず、セラミック原料としてコーデュライト化原料を用い、コーデュライト化原料100質量部に対して、分散媒を35質量部、有機バインダを6質量部、分散剤を0.5質量部、それぞれ添加し、混合、混練して坯土を調製した。コーデュライト化原料としては、平均粒子径が3μmのタルクを38.9質量部、平均粒子径が1μmのカオリンを40.7質量部、平均粒子径が0.3μmのアルミナを5.9質量部、及び平均粒子径が0.5μmのベーマイトを11.5質量部、用いた。ここで、平均粒子径

50

とは、各原料の粒子の分布におけるメジアン径 (d 50) のことである。

【0204】

分散媒としては、水を用いた。有機バインダとしては、ヒドロキシプロピルメチルセルロースを用いた。分散剤としては、エチレングリコールを用いた。

【0205】

次に、得られた坏土を、口金を用いて押出成形し、セル形状が三角形で、全体形状が六角形のハニカム成形体を複数個作製した。なお、このときの押出成形においては、上述したように、実施例1の熱・音波変換部品に対応した正規口金による押出成形の実行前に、リブの厚さが0.07mm程度のダミー口金での坏土の押出処理が行われた。そして、このダミー口金を用いた押出処理後の坏土を用いて正規口金による押出成形が実行された。さらに、このとき、正規口金による押出成形に用いる坏土における水の比率が、坏土固形成分100質量部に対し41質量部（誤差は±1質量部の範囲内）となるように坏土成分を厳格に制御した。

【0206】

なお、このときの口金の押さえ板構造としては、図20に示す押さえ板構造を用いた。この押さえ板構造では、スリットの長さL1（図20参照）が0.5mmであり、スリットの長さL1から段差部の段差の長さを引いた差の長さL2（図20参照）は0.2mmである。また、スリットの幅W（図20参照）が0.05mmであり、押さえ板と段差部との間の距離d（図20参照）は0.5mmである。

【0207】

そして、このハニカム成形体をマイクロ波乾燥機で乾燥し、更に熱風乾燥機で完全に乾燥させた（第1乾燥工程）後、ハニカム成形体の両端面を切断し、セルの貫通方向に沿ったハニカム成形体の長さを調整した。そのハニカム成形体を熱風乾燥機で乾燥し、更に、1445で、5時間、焼成した（第1焼成工程）。

【0208】

次に、Mg, Si, Alの酸化物粒子を含み、バインダ、界面活性剤、水等が添加されたスラリーを作製した。ここで、バインダや界面活性剤としては、たとえば、上述したのと同じものを用いた。第一焼成工程後のハニカム成形体の各セル内における隔壁の表面（各セルの内壁面）に、このスラリーを接触させることで、Mg, Si, Alの酸化物粒子を含み隔壁の表面（各セルの内壁面）上の気孔に浸入して該表面上の気孔を低減する表面層を形成した（表面層形成工程）。この表面層を形成する方式としては、第一焼成工程後のハニカム成形体の各セル中に上方からスラリーの液滴を滴下して各セルの内壁面上を流下させる流下法を採用し、スラリーの液滴の流下を複数回繰り返すとともに、さらに第一焼成工程後のハニカム成形体を上下さかさまにした状態で、再度、スラリーの液滴の流下を複数回行った。

【0209】

次に、表面層形成工程後のハニカム成形体に対し、第1乾燥工程と同様の乾燥処理を施した（第2乾燥工程）。さらに、第2乾燥工程後のハニカム成形体に対し、第1焼成工程と同様の焼成処理を施した（第2焼成工程）。

【0210】

最後に、第2焼成工程後のハニカム成形体の外周部分を、適宜切削加工して円形状に整えた。さらに、切削加工後のハニカム成形体の外周面に外周コート材を塗布して乾燥させ外周壁13を形成した。ここで、外周コート材としては、コーチェライトの粒子とシリカゾルを含む原料に、有機バインダ、発泡樹脂、分散剤を加えたものに水を加えて混練したスラリーを用いた。また、外周コート材を塗布する方法としては、切削加工後のハニカム成形体をろくろ上で回転させながらゴムベラ等でコーティングする方法を用いた。

【0211】

以上の工程を経て、最終的に実施例1の一体型の熱・音波変換部品が完成した。

【0212】

完成した実施例1の熱・音波変換部品について、セルの貫通方向に垂直な面（垂直面）

10

20

30

40

50

内におけるセルの水力直径HD、熱・音波変換部品の3点曲げ強度、熱・音波変換部品の構成材料の材料強度、上記垂直面内における気孔率、両端面間の長さL、端面における開口率、上記垂直面内におけるセルの角部の曲率半径、上記垂直面内における熱・音波変換部品の円形の断面に対し、その内側の同心円であって80%の面積を占める円で囲まれた中央領域における隔壁11の平均的な厚さ、上記熱・音波変換部品の円形の断面から上記中央領域を除いた、20%の面積を占める残りの領域である外周領域における隔壁11の平均的な厚さ、をそれぞれ測定した。

#### 【0213】

なお、セルの水力直径HDについては、上記垂直面内における熱・音波変換部品の断面の拡大写真を撮り、この断面の拡大写真中の、上述の中央領域に属する10個のセルを無作為に選択してそれについて水力直径を定義式（セルの断面の面積をS、該断面の周長をCとしたときに $HD = 4 \times S / C$ ）に従って計算したときの、その平均値として算出した。

#### 【0214】

熱・音波変換部品の3点曲げ強度は、以下のようにして求めた。まず、熱・音波変換部品から、試料として、セルの貫通方向に垂直な方向を長尺方向とする、JIS R1601によって定められている大きさの棒状の部材を切り出し、その長尺方向について、JIS R1601によって定められている支点間距離で、かつ、この棒状の部材の、上述の中央領域に属すると考えられる中央付近が破断位置にくるように3点曲げ試験治具を設置して3点曲げ（抗折）試験を実施し、破断するまでの最大応力を測定した。同様の最大応力の測定を、この熱・音波変換部品から切り出した別の9個の試料についても行った。このようにして得られた全部で10個の試料の最大応力の測定値についてその平均値を求め、この平均値を熱・音波変換部品の3点曲げ強度とした。一方、熱・音波変換部品の構成材料の材料強度については、まず、隔壁の原材料となる坏土で上記の棒状の部材と同じ形状のものを成形しさらに乾燥処理および焼成処理を施すことでサンプルを作製し、次に、そのサンプルについて上述の3点曲げ（抗折）試験を実施することで取得した。また、気孔率については、水銀ポロシメータ（より具体的には、Micromeritics社製商品名：オートポアIV9505）により測定した。

#### 【0215】

また、開口率は、上記垂直面における断面を顕微鏡で撮影し、このときの断面の撮影画像から、材料部分面積S1と空隙部分面積S2を求め、S1とS2を用いて $S2 / (S1 + S2)$ として求めた。また、セルの角部における曲率半径については、上記垂直面における断面の拡大写真をとり、そのセルの断面形状に基づき角部の曲率を測定することによって得た。

#### 【0216】

また、中央領域における隔壁11の平均的な厚さ、および、外周領域における隔壁11の平均的な厚さについては、各領域中で、互いに隣接する2つのセルからなる組を無作為に10組選択して各組のセル間の隔壁の厚さを測定し、それら10組について平均をとることによって求めた。

#### 【0217】

以上の測定によって得られた測定値から、以下の9種類のパラメータの値を得た。なお、以下の9種類のパラメータの中には、互いに独立ではなく連動して変化するものも含まれているが、都合上、それらも含めて記載している。

#### 【0218】

(1)セルの貫通方向に垂直な面（垂直面）内でのセルの水力直径HD (2)熱・音波変換部品の3点曲げ強度 (3)熱・音波変換部品の構成材料の材料強度 (4)気孔率 (5)熱・音波変換部品の長さL (6)熱・音波変換部品の長さLに対するセルの水力直径HDの比 $HD / L$  (7)開口率 (8)セル角部の曲率半径 (9)中央領域の隔壁厚さに対する外周領域の隔壁厚さの比

#### 【0219】

10

20

30

40

50

実施例1の熱・音波変換部品について、これら9種類のパラメータの値を以下の表1に記載する。なお、表1には、(1)～(9)のパラメータの値と合わせて、セグメント構造(接合型・一体型)についても記載されている。

【0220】

【表1】

	セル水力直徑HD (mm)	熱・音波交換部品の3点曲げ強度 (MPa)	材料強度 (MPa)	気孔率(%)	熱・音波交換部品の長さL (mm)	水力直徑HD/長さL	開口率 (%)	セル角部の曲率半径(mm)	外周領域の隔壁厚さ ／中央領域の隔壁厚さ	接合型・一体型
実施例1	0.25	15	46	4	30	0.0083	74	0.05	1.3	一体型

10

20

30

40

50

この実施例 1 の熱・音波変換部品を用いて以下の実験 1 および実験 2 を行った。

【0221】

実験 1 の内容は以下のとおりである。まず、図 1 の電力発生システム 1000 において、熱・音波変換部品 1 の代わりに実施例 1 の熱・音波変換部品を組み込んだ。そして、高温側熱交換器 2 に対し 500 度の自動車の排気ガスを流入させ、温度がいくらか下がって流出する排気ガスの温度を測定した。このときの温度変化からこの電力発生システムに流入した熱量を算出した。この排気ガスの流入により、熱・音波変換部品の高温側熱交換器 2 側の端部の温度はほぼ 500 に保たれていた。一方、低温側熱交換器 3 に対しては 60 の水を流入させ、熱・音波変換部品の低温側熱交換器 3 側の端部の温度を 60 に保った。そして、図 1 の電力発生システム 1000 のエネルギー変換器としてマイクロフォン等を用い、上記の熱・音波変換部品両端部の温度差に伴う熱音響効果で発生した音波からどのくらいの電力量が生じたかを計測した。そして、あらかじめ把握されているマイクロフォンのエネルギー変換効率（音波エネルギーを電力に変換する効率）により、上記の電力量の計測値を除算することで音波のエネルギーの推定値を求めた。そして、この音波のエネルギーの推定値と、上述した、電力発生システムに流入した熱量とから、熱から音波エネルギーへのエネルギー変換効率を求めた。そして、エネルギー変換効率が 60 % 以上の場合を評価「+」とし、エネルギー変換効率が 30 % 以上 60 % 未満の場合を評価「0」、エネルギー変換効率が 30 % 未満の場合を評価「×」として 3 段階で評価した。なお、この実験では、自励振動を起こす、ループ管 4 や共鳴管 5 やセル内の作動流体としては、10 atm のヘリウムガスを用いた。

【0222】

実験 2 の内容は以下のとおりである。熱・音波変換部品が、熱・音響効果により発生する音波の周波数・振幅と同程度の周波数・振幅の音波をスピーカにより発生させ、その音波を、スピーカに近接した位置に置いた熱・音波変換部品に向けて 24 時間連続して出射した。この出射実験を全部で 10 個の同一の熱・音波変換部品について行い、その破壊確率をワイブルプロットした後、設計応力における破壊確率を読み取った。

【0223】

（実施例 2 および比較例 1, 2）

上述の実施例 1 の製造方法とは、押出成形の際に用いる口金が異なる点を除き同じ製造方法を用いて、上述の 9 種類のパラメータのうちセルの水力直径 HD に関するパラメータ（水力直径 HD および HD/L）の値のみが実施例 1 とは異なる実施例 2 および比較例 1, 2 の熱・音波変換部品を作製した。

【0224】

そして、これらの実施例 2 および比較例 1, 2 について、実施例 1 と同様の 2 つの実験 1, 2 を行った。

【0225】

（実施例 3～5 および比較例 3）

上述の実施例 1 の製造方法とは、坯土中の造孔材の量が異なる点を除き同じ製造方法を用いて、上述の 9 種類のパラメータのうち 3 点曲げ強度に関するパラメータ（3 点曲げ強度、材料強度、および気孔率）の値のみが実施例 1 とは異なる実施例 3～5 の熱・音波変換部品を作製した。さらに、上述の実施例 1 の製造方法とは、坯土中の造孔材の量が異なる点、および、表面層形成工程が行われない点、を除き同じ製造方法を用いて、上述の 9 種類のパラメータのうち 3 点曲げ強度に関するパラメータ（3 点曲げ強度、材料強度、および気孔率）の値のみが実施例 1 とは異なる比較例 3 の熱・音波変換部品を作製した。

【0226】

これらの実施例 3～5 および比較例 3 について、実施例 1 と同様の 2 つの実験 1, 2 を行った。

【0227】

以上説明した実施例 1～5 および比較例 1～3 の実験結果を、実施例 1 とは異なる各パ

10

20

30

40

50

ラメータの値とともに下記の表 2 に示す。

【0228】

【表 2】

	セル水力 直径HD (mm)	水力直径 HD/長さL	熱・音波交換部 品の3点曲げ強 度(MPa)	材料強度 (MPa)	気孔率(%)	エネルギー 変換効率 (%)	音波による損 傷の確率(%)
実施例1	0.25	0.008	15	46	4	○	0
実施例2	0.4	0.013	15	46	4	○	0
比較例1	0.5	0.017	15	46	4	×	0
比較例2	0.8	0.027	15	46	4	×	0
実施例3	0.25	0.008	12	30	6	○	0.1
実施例4	0.25	0.008	10	24	10	○	2
実施例5	0.25	0.008	5	20	25	○	3
比較例3	0.25	0.008	4.5	15	37	○	100

10

20

30

40

【0229】

表 2 において、セルの水力直径 H D ( および比 H D / L ) が互いに異なる実施例 1 , 2 および比較例 1 , 2 を比較すればわかるように、実施例 1 , 2 は、比較例 1 , 2 に比べ高いエネルギー変換効率を発揮している。このことより、セルの水力直径 H D が 0 . 4 m m 以下であることが、大きな熱音響効果を発揮する上で必要であることがわかる。

【0230】

また、表 2 において、3 点曲げ強度 ( あるいは材料強度や気孔率 ) が互いに異なる実施例 1 , 3 ~ 5 および比較例 3 を比較すればわかるように、実施例 1 , 3 ~ 5 は、比較例 3 に比べ、はるかに損傷が少ない。このことより、3 点曲げ強度が 5 M P a 以上であることが損傷回避のために必要であることがわかる。また、熱・音波変換部品の多孔質の構成材

50

料の材料強度が20 MPa以上であることが損傷回避のために必要であることもわかる。逆に、比較例3が損傷の点できわめて劣っていたという事実から考えて、表面層形成工程が行われることが好ましいこともわかる。さらに、実施例1, 3~5の中で実施例1のみ、損傷が発見されなかったことから、気孔率が5%以下であることが好ましいこともわかる。

【0231】

(実施例6~10)

上述の実施例1の製造方法とは、押出成形の際の押出し長さが異なる点を除き同じ製造方法を用いて、上述の9種類のパラメータのうち熱・音波変換部品の長さLに関するパラメータ(熱・音波変換部品の長さL、および、HD/L)の値のみが実施例1とは異なる実施例6~10の熱・音波変換部品を作製した。

【0232】

そして、これらの実施例6~10について、実施例1と同様の2つの実験1, 2を行った。

【0233】

(実施例11~13)

上述の実施例1の製造方法とは、押出成形の際に用いる口金が異なる点を除き同じ製造方法を用いて、上述の9種類のパラメータのうち熱・音波変換部品の開口率の値のみが実施例1とは異なる実施例11~13の熱・音波変換部品を作製した。

【0234】

そして、これらの実施例11~13について、実施例1と同様の2つの実験1, 2を行った。

【0235】

以上説明した実施例6~13の実験結果を、実施例1とは異なる各パラメータの値とともに下記の表3に示す。

【0236】

【表3】

熱・音波交換部品の長さL(mm)	水力直徑HD/長さL	開口率(%)	エネルギー変換効率	音波による損傷の確率(%)
実施例6	3	0.083	74	△ 0
実施例7	12	0.021	74	△ 0
実施例8	15	0.017	74	○ 0
実施例9	50	0.005	74	○ 0
実施例10	60	0.004	74	△ 0
実施例11	30	0.083	80	○ 2
実施例12	30	0.083	93	○ 3
実施例13	30	0.083	95	○ 100

【0237】

表3において、比HD/L(およびL)が互いに異なる実施例6~10を比較すればわかるように、実施例8, 9は、実施例6, 7, 10に比べ、高いエネルギー変換効率を発揮している。このことより、比HD/Lが0.005以上0.02未満であることが、大きな熱音響効果の発揮と損傷回避の上で好ましいことがわかる。

【0238】

また、表3において、セルの開口率が互いに異なる実施例11~13を比較すればわかるように、実施例11, 12は、実施例13に比べ、損傷が少ない。このことより、熱・音波変換部品の端面における開口率が93%以下であることが、損傷回避の上で好ましいことがわかる。

10

20

30

40

50

## 【0239】

(実施例14～19)

上述の実施例1の製造方法とは、押出成形の際に用いる口金が異なる点を除き同じ製造方法を用いて、上述の9種類のパラメータのうちセル角部の曲率半径の値のみが実施例1とは異なる実施例14～19の熱・音波変換部品を作製した。

## 【0240】

そして、これらの実施例14～19について、実施例1と同様の2つの実験1, 2を行った。

## 【0241】

(実施例20～23)

10

上述の実施例1の製造方法とは、押出成形の際に用いる口金が異なる点を除き同じ製造方法を用いて、上述の9種類のパラメータのうち中央領域の隔壁厚さに対する外周領域の隔壁厚さの比のみが実施例1とは異なる実施例20～23の熱・音波変換部品を作製した。

## 【0242】

そして、これらの実施例20～23について、実施例1と同様の2つの実験1, 2を行った。

## 【0243】

(実施例24)

20

上述の実施例1の製造方法とは、複数のハニカムセグメントの接合の過程が存在する点、すなわち、実施例1のハニカム成形体の成形と実質的に同様の方法で複数のハニカムセグメントを作成してそれらを接合材(外周コート材と同じものを用いた)で接合した点を除き、同じ製造方法を用いて、セグメント構造(接合型・一体型)が接合型である点でのみ実施例1とは異なる実施例24の熱・音波変換部品を作製した。

## 【0244】

そして、実施例24について、実施例1と同様の2つの実験1, 2を行った。

## 【0245】

以上説明した実施例14～24の実験結果を、実施例1とは異なる各パラメータの値とともに下記の表4に示す。

## 【0246】

30

## 【表4】

	セル角部の曲率半径(mm)	外周領域の隔壁厚さ／中央領域の隔壁厚さ	接合型・一体型	エネルギー変換効率	音波による損傷の確率(%)
実施例14	0.005	1.3	一体型	○	2
実施例15	0.01	1.3	一体型	○	2
実施例16	0.02	1.3	一体型	○	0
実施例17	0.03	1.3	一体型	○	0
実施例18	0.08	1.3	一体型	○	0
実施例19	0.12	1.3	一体型	△	0
実施例20	0.05	1.05	一体型	○	0.1
実施例21	0.05	1.1	一体型	○	0
実施例22	0.05	2	一体型	○	0
実施例23	0.05	2.05	一体型	△	0
実施例24	0.05	1.3	接合型	○	0

## 【0247】

表4において、セル角部の曲率半径の値のみが実施例1とは異なる実施例14～19を比較すればわかるように、実施例16～18は、実施例14, 15に比べ損傷が少なく、実施例19に比べ高いエネルギー変換効率を発揮している。このことより、セル角部における曲率半径が0.02mm以上0.1mm以下であることが、大きな熱音響効果の発

40

50

揮と損傷回避の上で好ましいことがわかる。

【0248】

また、表4において、中央領域の隔壁厚さに対する外周領域の隔壁厚さの比のみが実施例1とは異なる実施例20～23を比較すればわかるように、実施例21，22は、実施例20に比べ損傷が少なく、実施例23に比べ高いエネルギー変換効率を発揮している。このことより、中央領域の隔壁厚さに対する外周領域の隔壁厚さの比が1.1～2.0であることが、大きな熱音響効果の発揮と損傷回避の上で好ましいことがわかる。

【0249】

また、表4において、接合型の実施例24を一体型の実施例1と比較すればわかるように、実施例24は、エネルギー変換効率の点でも音波による損傷の点でも実施例1と同程度となっている。このことより接合型であっても大きな熱音響効果の発揮と損傷回避が可能であることがわかる。

10

【0250】

さらに、上述した押出成形時の2つの工夫の効果を確認するための参考実験として、以下の押出成形の実験を行った。

【0251】

(1) リブの厚さが0.09mmのダミー口金を用いた以外は、実施例1と同じ方法で熱・音波変換部品の押出成形を試みた。

【0252】

(2) リブの厚さが0.10mmのダミー口金を用いた以外は、実施例1と同じ方法で熱・音波変換部品の押出成形を試みた。

20

【0253】

(3) リブの厚さが0.04mmのダミー口金を用いた以外は、実施例1と同じ方法で熱・音波変換部品の押出成形を試みた。

【0254】

(4) リブの厚さが0.03mmのダミー口金を用いた以外は、実施例1と同じ方法で熱・音波変換部品の押出成形を試みた。

【0255】

(5) 坏土中の水の比率が、坏土固形成分100質量部に対し43質量部程度（誤差1質量部以内）となる坏土用いた以外は、実施例1と同じ方法で熱・音波変換部品の押出成形を試みた。

30

【0256】

(6) 坏土中の水の比率が、坏土固形成分100質量部に対し39質量部程度（誤差1質量部以内）となる坏土用いた以外は、実施例1と同じ方法で熱・音波変換部品の押出成形を試みた。

【0257】

結果としては、(1)および(3)では、問題なく成形できたが、(2)および(6)では、坏土が成形用口金の孔内に目詰まりを起こしてできなかつた。(4)では、ダミー口金による押出成形時に多大な圧力が必要となり、口金の損傷の可能性が生じたので実験を中止した。(5)では、押出成形で得られた成形体が自重で容易に変形してしまい、所望の形状のものが得られなかつた。

40

【0258】

これらの結果と実施例1での押出成形が成功していることを加味すると、リブの厚さが0.04mm以上0.09mm以下のダミー口金を用いて事前の押出処理を行い、坏土中の水の比率が、坏土固形成分100質量部に対し40～42質量部のものを用いるのが、好ましいことがわかる。

【産業上の利用可能性】

【0259】

本発明は、自動車の排ガス等の熱を有効利用して、電力や冷熱を発生させるシステムにおいて好適に利用することができる。

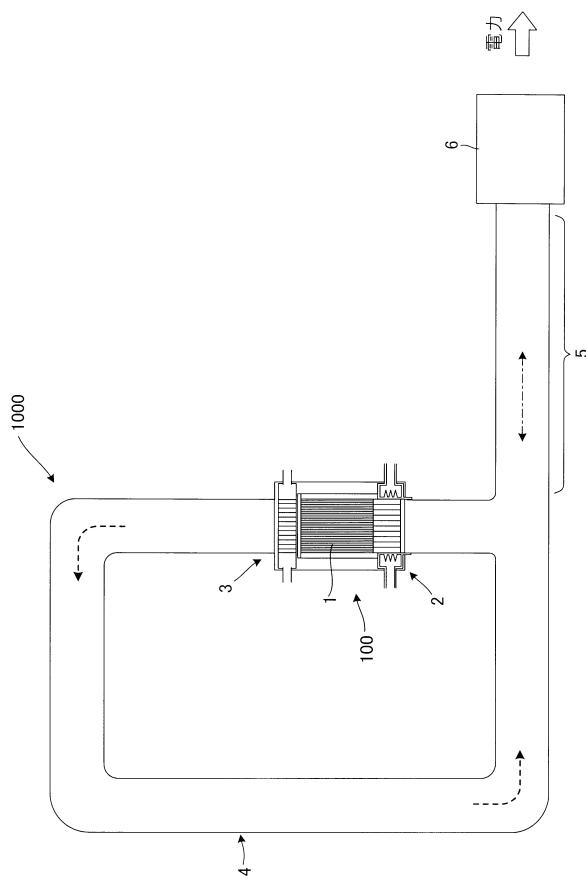
50

## 【符号の説明】

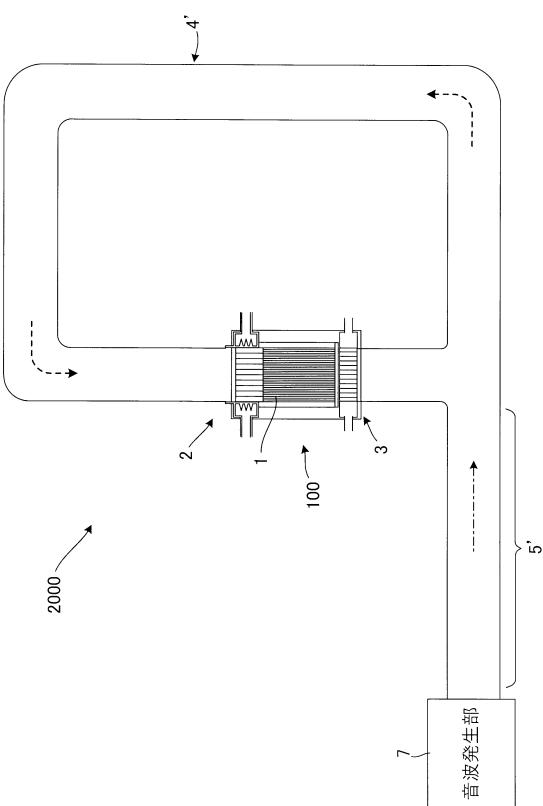
## 【0260】

1：熱・音波変換部品、1a：干渉材、2, 2', 2A, 2A'：高温側熱交換器、3：低温側熱交換器、4：ループ管、4'：ループ管、5：共鳴管、5'：伝播管、6：エネルギー変換器、7：音波発生部、11：隔壁、12：接合部、12'：接合部、13：外周壁、14：セル、15：ハニカムセグメント、15'：ハニカムセグメント、20：熱交換ハニカム構造体、20'：熱交換ハニカム構造体、20a：隔壁、20b：外周壁、20c：スリット、20d：セル、20s：接触面、21：高温側環状管、211：高温側環状管、212：高温側環状管、2110：管内ハニカム構造体、2120：管内ハニカム構造体、21a：流入口、21b：流出口、21c：受熱領域、21d：耐熱性金属板、21e：フィン、22, 23：ハニカム構造体、23'：金属メッシュ体、22a：金属外筒、23a：金属メッシュ外筒、23b：メタライズ層、30：メッシュ積層体、31：低温側環状管、31a：流入口、31b：流出口、32：金属部材、301：口金、303：第2の板状部、305：裏孔、305a, 309a, 311a：開口部、306：第2の接合面、307：第1の板状部、307a：第1の層、307b：第2の層、307ba：第2の層の一方の面、309：スリット、310：第1の接合面、311：穴部、313：セルブロック、401：口金、402：押さえ部、403：裏押さえ部、404：ハニカム成形体、405：間隙、406：傾斜面、407：対向面、550：押さえ板構造、552：スリット、553：裏孔、554：口金、555：押さえ板、557：隙間部、558：押さえ治具、55a：裏押さえ板、561：押し出された成形原料、571：内側部、572：外周部、573, 574：スリット、575：段差部、602, 702：スリット、603, 703：裏孔、604, 704：口金、605, 705：押さえ板、615, 715：段差部、100：熱・音波変換ユニット、200：熱・音波変換ユニット、100a：ハウジング、1000：電力発生システム、2000：冷熱発生システム。

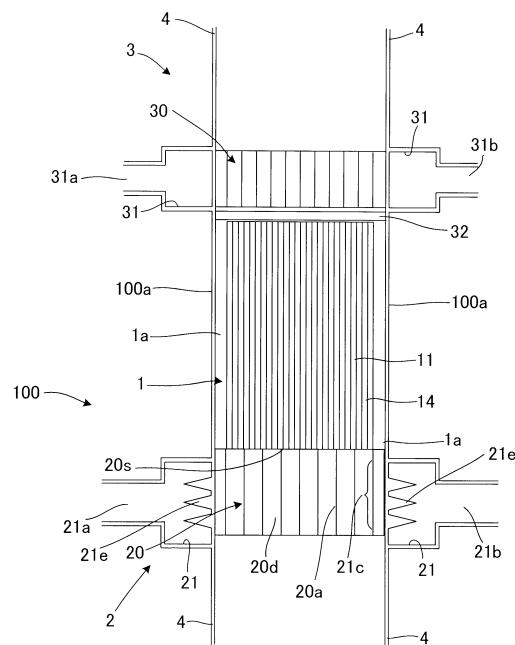
【図1】



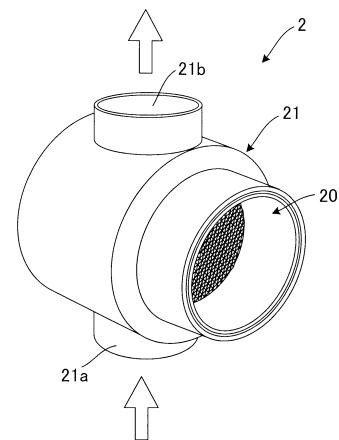
【図2】



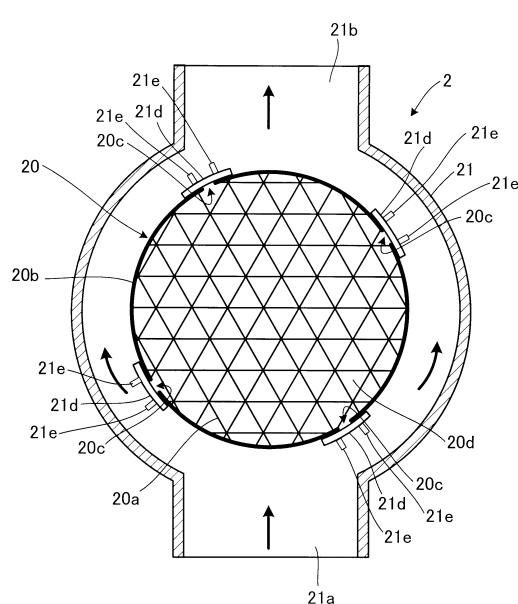
【図3】



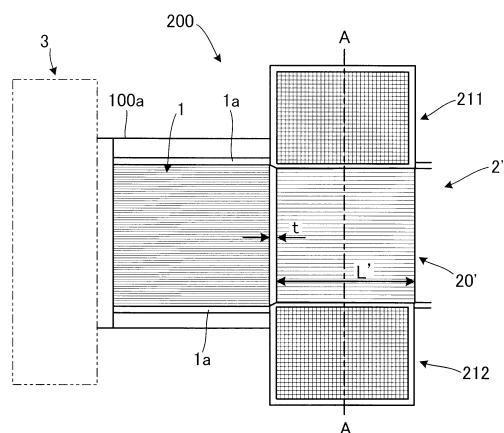
【図4】



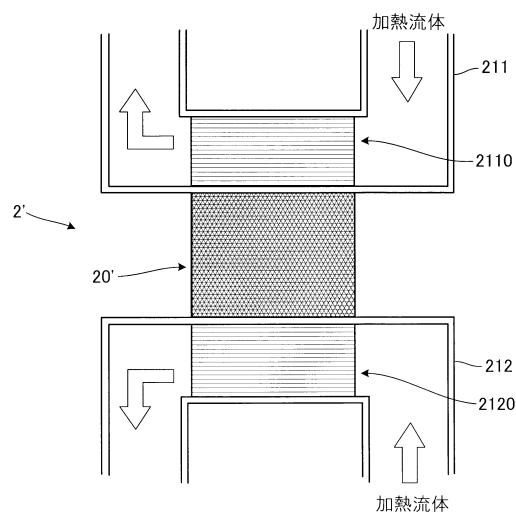
【図5】



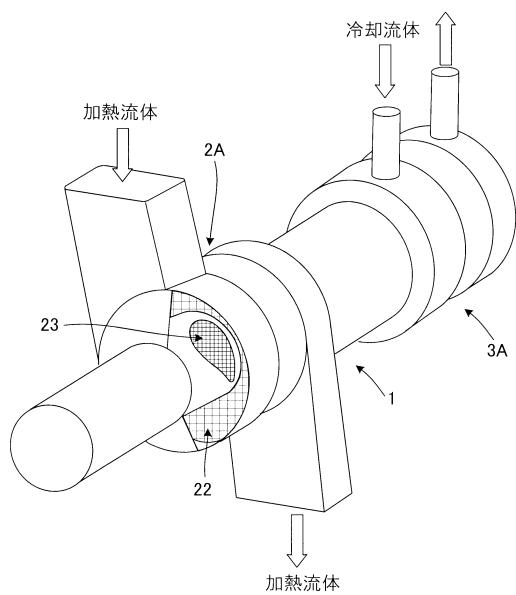
【図6】



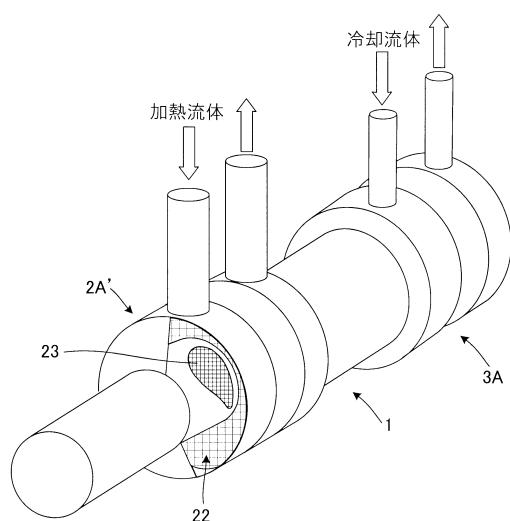
【図7】



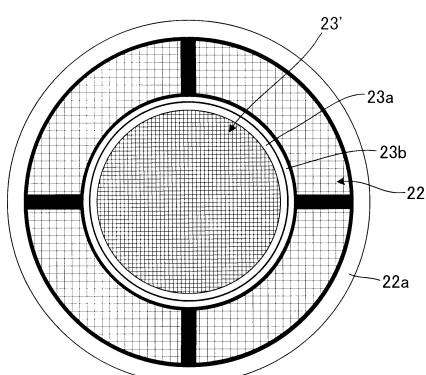
【図8】



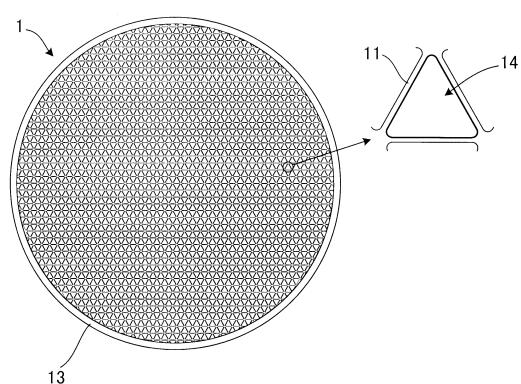
【図9】



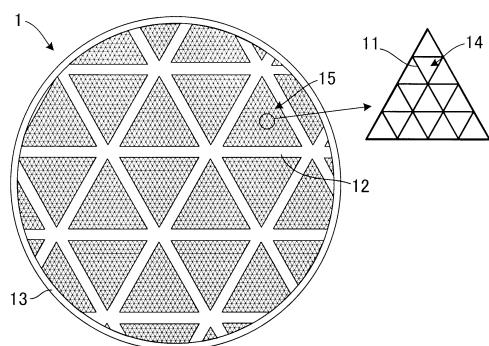
【図10】



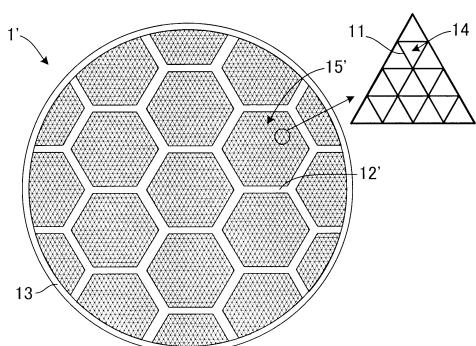
【図11】



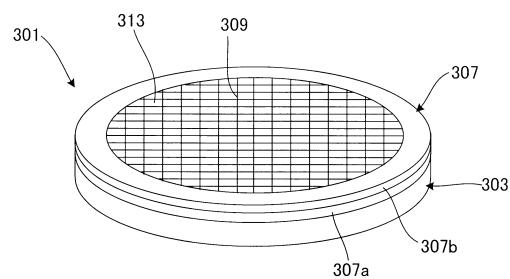
【図12】



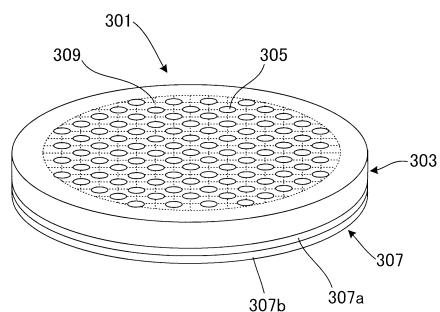
【図13】



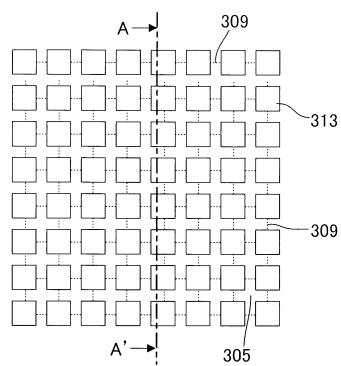
【図14】



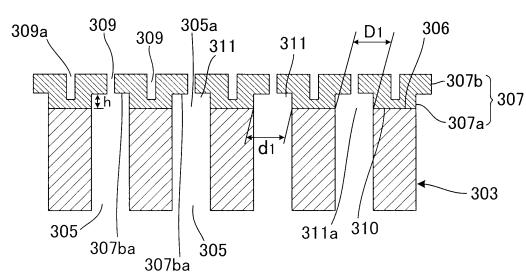
【図15】



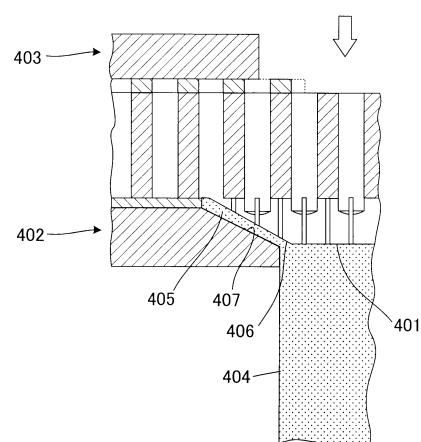
【図16】



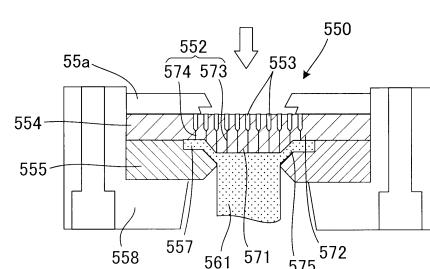
【図17】



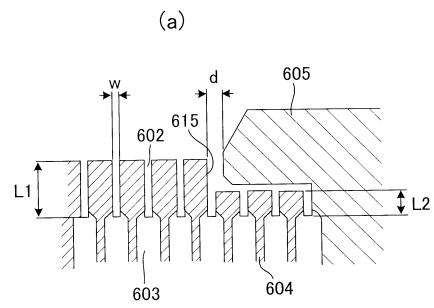
【図18】



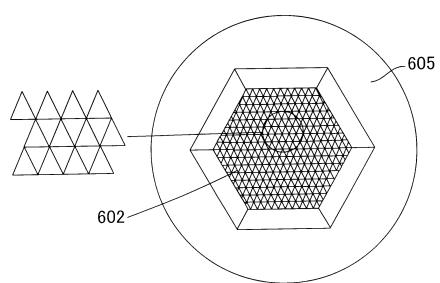
【図19】



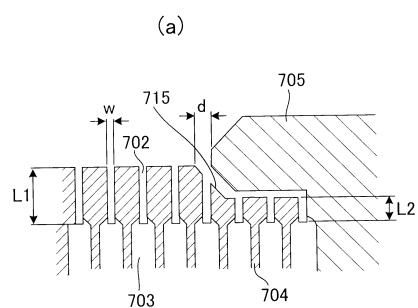
【図20】



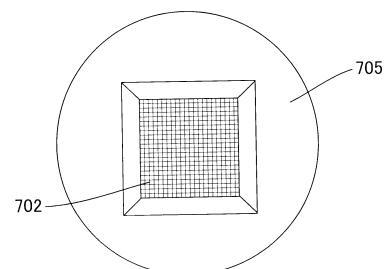
(b)



【図21】



(b)



---

フロントページの続き

(72)発明者 野田 直美  
愛知県名古屋市瑞穂区須田町 2 番 5 6 号 日本碍子株式会社内  
(72)発明者 出口 勇次  
愛知県名古屋市瑞穂区須田町 2 番 5 6 号 日本碍子株式会社内  
(72)発明者 森 照芳  
愛知県名古屋市瑞穂区須田町 2 番 5 6 号 日本碍子株式会社内  
(72)発明者 濱塚 和彦  
愛知県名古屋市瑞穂区須田町 2 番 5 6 号 日本碍子株式会社内  
(72)発明者 末信 宏之  
愛知県名古屋市瑞穂区須田町 2 番 5 6 号 日本碍子株式会社内  
(72)発明者 弘永 昌幸  
愛知県名古屋市瑞穂区須田町 2 番 5 6 号 日本碍子株式会社内  
(72)発明者 熊澤 和彦  
愛知県名古屋市瑞穂区須田町 2 番 5 6 号 日本碍子株式会社内

審査官 小原 一郎

(56)参考文献 特開2012-237295 (JP, A)  
特表2005-522664 (JP, A)  
国際公開第2006/025498 (WO, A1)  
特開2012-187510 (JP, A)  
特開平10-264125 (JP, A)  
特開2011-194323 (JP, A)  
特開2001-104742 (JP, A)  
特開平11-277653 (JP, A)  
特開2013-056825 (JP, A)  
特開2010-131589 (JP, A)  
特開2005-180294 (JP, A)  
特開2012-112621 (JP, A)  
米国特許出願公開第2013/0111894 (US, A1)  
国際公開第2006/137162 (WO, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F 25 B 9/00 - 11/04  
F 03 G 7/00  
F 01 N 5/02