

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6348404号  
(P6348404)

(45) 発行日 平成30年6月27日(2018.6.27)

(24) 登録日 平成30年6月8日(2018.6.8)

(51) Int.Cl.

F I

F 2 5 B 9/00 (2006.01)

F 2 5 B 9/00 Z

F O 1 N 5/02 (2006.01)

F O 1 N 5/02 J

F O 3 G 7/00 (2006.01)

F O 3 G 7/00 C

F O 3 G 7/00 B

請求項の数 6 (全 36 頁)

(21) 出願番号 特願2014-229094 (P2014-229094)  
 (22) 出願日 平成26年11月11日(2014.11.11)  
 (65) 公開番号 特開2016-90209 (P2016-90209A)  
 (43) 公開日 平成28年5月23日(2016.5.23)  
 審査請求日 平成29年7月21日(2017.7.21)

(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  
 審査官 西山 真二

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熱・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 $HD = 4 \times S / C$ で定義される水力直径 $HD$ が $0.4\text{ mm}$ 以下であり、

前記熱・音波変換部品の各端面における開口率が $60\%$ 以上 $93\%$ 以下であり、

前記熱・音波変換部品の、前記延在方向に沿った単位長さ当たりの熱容量は、前記延在方向に沿って前記第1の端面から離れるほど減少する傾向を示すものであり、

前記延在方向に沿った前記熱・音波変換部品の全長の $10\%$ の領域を占める、前記第1の端面側の第1端部の熱容量は、前記延在方向に沿った前記熱・音波変換部品の全長の $10\%$ の領域を占める、前記第2の端面側の第2端部の熱容量の $1.1$ 倍以上である熱・音波変換部品。

【請求項 2】

2つの端面の間を延在する複数のセルであって、前記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、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を備え、

10

20

前記熱・音波変換部品は、前記複数のハニカムセグメントが、各ハニカムセグメントの一端面が前記複数のハニカムセグメントのうちの別のハニカムセグメントの一端面に当接した状態で前記第 1 の端面から前記第 2 の端面まで直列的に配置されることで構成されたものであり、

前記複数のハニカムセグメントそれぞれの前記セルの水力直径は 0.4 mm 以下であり、

前記複数のハニカムセグメントそれぞれの各端面における開口率は 60 % 以上 93 % 以下であり、

前記複数のハニカムセグメントは、前記延在方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が互いに異なるものであって、前記第 1 端部の側から前記第 2 端部の側に向かって、前記延在方向に沿った単位長さ当たりの熱容量の大きい順に直列的に配置されているものであり、

直列的に配置された前記複数のハニカムセグメントのうちの、前記第 1 の端面を端面として持つ第 1 のハニカムセグメントは、前記熱・音波変換部品の前記第 1 端部を含むものであり、

直列的に配置された前記複数のハニカムセグメントのうちの、前記第 2 の端面を端面として持つ第 2 のハニカムセグメントは、前記熱・音波変換部品の前記第 2 端部を含むものである請求項 1 記載の熱・音波変換部品。

【請求項 3】

前記第 1 のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量は、前記第 2 のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量と同じであり、

前記第 1 のハニカムセグメントの円相当直径は、前記第 2 のハニカムセグメントの円相当直径の 1.05 倍以上である請求項 2 記載の熱・音波変換部品。

【請求項 4】

前記第 1 のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量は、前記第 2 のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量の 1.1 倍以上であり、

前記第 1 のハニカムセグメントの円相当直径は、前記第 2 のハニカムセグメントの円相当直径と同じである請求項 2 記載の熱・音波変換部品。

【請求項 5】

請求項 1 ~ 4 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 端部と前記第 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。

【請求項 6】

請求項 1 ~ 4 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 端部と前記第 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。

【発明の詳細な説明】

10

20

30

40

50

## 【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】

## 【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リ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。

10

## 【0003】

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）。

20

## 【0004】

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に、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】

30

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。

40

## 【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

## 【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.utokyo.ac.jp/ja/research/tpv.html>

50

【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、熱・音波変換機能の向上に寄与する要素としては、貫通孔の孔径を小さくする以外にも構造上の様々な要素が考えられる。たとえば、高い熱・音波変換機能が継続的に発揮されるためには、ハニカム構造体の両端部間に形成された温度勾配を十分に維持することが要求されるが、温度勾配を十分に維持するに当たっては、ハニカム構造体端部を加熱する外部の加熱機構の能力向上とは別に、ハニカム構造体それ自体の構造を工夫

10

【0009】

上記の事情を鑑み、本発明は、温度勾配の維持に適した構造を有する熱・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。

【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熱・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 $HD = 4 \times S / C$ で定義される水力直径 $HD$ が $0.4\text{ mm}$ 以下であり、前記熱・音波変換部品の各端面における開口率が $60\%$ 以上 $93\%$ 以下であり、前記熱・音波変換部品の、前記延在方向に沿った単位長さ当たりの熱容量は、前記延在方向に沿って前記第1の端面から離れるほど減少する傾向を示すものであり、前記延在方向に沿った前記熱・音波変換部品の全長の $10\%$ の領域を占める、前記第1の端面側の第1端部の熱容量は、前記延在方向に沿った前記熱・音波変換部品の全長の $10\%$ の領域を占める、前記第2の端面側の第2端部の熱容量の $1.1$ 倍以上である熱・音波変換部品。

30

【0012】

[2] 2つの端面の間を延在する複数のセルであって、前記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、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を備え、前記熱・音波変換部品は、前記複数のハニカムセグメントが、各ハニカムセグメントの一端面が前記複数のハニカムセグメントのうちの別のハニカムセグメントの一端面に当接した状態で前記第1の端面から前記第2の端面まで直列的に配置されることで構成されたものであり、前記複数のハニカムセグメントそれぞれの前記セルの水力直径は $0.4\text{ mm}$ 以下であり、前記複数のハニカムセグメントそれぞれの各端面における開口率は $60\%$ 以上 $93\%$ 以下であり、前記複数のハニカムセグメントは、前記延在方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が互いに異なるものであって、前記第1端部の側から前記第2端部の側に向かって、前記延在方向に沿った単位長さ当たりの熱容量の大きい順に直列的に配置されているものであり、直列的に配置された前記複数のハニカムセグメントのうちの、前記第1の端面を端面として持つ第1のハニカムセグメントは、前記熱・音波変換部品の前記第1端部を含むものであり、直列的に配置された前記複数のハニカムセグメントのうちの、前記第2の端面を端面として持つ第2のハニカムセグメントは、前記熱・音波変換部品の前記第2端部を含むものである[1]

40

50

記載の熱・音波変換部品。ここで、「各ハニカムセグメントの一端面が前記複数のハニカムセグメントのうちの別のハニカムセグメントの一端面に当接した状態」には、隣接する2つのハニカムセグメントの端面が互いに直接に接触している状態に加え、接合材を介して互いに対向している状態や、音波の伝達に支障が生じない程度の微小な間隔を置いて互いに対向している状態が含まれている。

【0013】

[3] 前記第1のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量は、前記第2のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量と同じであり、前記第1のハニカムセグメントの円相当直径は、前記第2のハニカムセグメントの円相当直径の1.05倍以上である[2]記載の熱・音波変換部品。

10

【0014】

[4] 前記第1のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量は、前記第2のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量の1.1倍以上であり、前記第1のハニカムセグメントの円相当直径は、前記第2のハニカムセグメントの円相当直径と同じである[2]記載の熱・音波変換部品。

【0015】

[5] [1]～[4]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端部と前記第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。

20

【0016】

[6] [1]～[4]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端部と前記第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

【発明の効果】

【0017】

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、熱・音波変換部品の各端面における開口率が60%以上93%以下となっていることに加え、さらに、セルの貫通方向に沿った熱・音波変換部品の全長の10%の領域を占める第1端部の熱容量が、セルの貫通方向に沿った前記熱・音波変換部品の全長の10%の領域を占める第2端部の熱容量の1.1倍以上となっていることで、熱・音波変換部品の両端の間の温度勾配が維持されやすくなっている。この結果、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実現する。

40

【図面の簡単な説明】

【0018】

【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。

50

【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。

【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。

【図 12】熱・音波変換部品における第 1 端部および第 2 端部を説明するための概念図である。

【図 13】円相当直径が同一で単位体積当たりの熱容量が互いに異なる 3 つのハニカムセグメントからなる熱・音波変換部品の構成を表す模式図である。

【図 14】単位体積当たりの熱容量が同一で円相当直径が互いに異なる 3 つのハニカムセグメントからなる熱・音波変換部品の構成を表す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0019】

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。

【0020】

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。

【0021】

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。

【0022】

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（不図示であるが、図のエネルギー変換器 6 の内部に存在する）が閉じた管となっている。

【0023】

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。

【0024】

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

10

20

30

40

50

より、熱・音波変換部品 1 の下端部が上端部よりも相対的に温度が高い状態が実現する。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。

#### 【0025】

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。

#### 【0026】

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）。

#### 【0027】

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、作動流体が管の延在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っていき（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  $HD = 4 \times S / C$  で定義される水力直径  $HD$  によって評価できる。

#### 【0028】

以下、図 1 に戻って電力発生システム 1000 の説明を続ける。

#### 【0029】

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。

#### 【0030】

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

10

20

30

40

50

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。

#### 【 0 0 3 1 】

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。

10

#### 【 0 0 3 2 】

図 1 の電力発生システム 1 0 0 0 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。

#### 【 0 0 3 3 】

次に、上記の熱・音波変換ユニット 1 0 0 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。

#### 【 0 0 3 4 】

図 2 は、図 1 の熱・音波変換ユニット 1 0 0 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。

20

#### 【 0 0 3 5 】

図 2 に示す冷熱発生システム 2 0 0 0 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 1 0 0 により構成されている。

#### 【 0 0 3 6 】

ループ管 4' は、熱・音波変換ユニット 1 0 0 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 1 0 0 0 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っ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。

30

#### 【 0 0 3 7 】

熱・音波変換ユニット 1 0 0 は、その構成自体は図 1 で説明したものと同一であるが、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。

40

#### 【 0 0 3 8 】

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 1 0 0 0 と同様のものを採用できる。

#### 【 0 0 3 9 】

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 1 0 0 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

50



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。

#### 【0040】

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。

10

#### 【0041】

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。

20

#### 【0042】

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。

#### 【0043】

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。

#### 【0044】

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。

30

#### 【0045】

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。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。

40

#### 【0046】

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。

#### 【0047】

50

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 3 0 を有している。また、低温側熱交換器 3 は、メッシュ積層体 3 0 の側面を取り巻く環状の管である低温側環状管 3 1 を有している。このようにメッシュ積層体 3 0 の側面を取り巻く低温側環状管 3 1 は、図 3 では、流入口 3 1 a および流出口 3 1 b を含む断面においてメッシュ積層体 3 0 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 3 1 は、流入口 3 1 a 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 3 0 に伝達し（逆の言い方をすればメッシュ積層体 3 0 の熱を冷却流体に伝達し）、流出口 3 1 b 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。

10

#### 【0048】

メッシュ積層体 3 0 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 3 2 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、銅製のものをを用いることができる。

#### 【0049】

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。

20

#### 【0050】

熱・音波変換部品 1 の側面は、干渉材 1 a 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 1 a 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 1 a として示されている。この干渉材 1 a 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。

#### 【0051】

高温側熱交換器 2 は、熱交換ハニカム構造体 2 0 および高温側環状管 2 1 を備えている。熱交換ハニカム構造体 2 0 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 2 0 d が、隔壁 2 0 a によって区画形成されている。高温側環状管 2 1 は、熱交換ハニカム構造体 2 0 の側面を取り巻く環状の管であり、流入口 2 1 a 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 2 0 に伝達し流出口 2 1 b 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 2 1 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 2 1 e が設けられている。

30

#### 【0052】

図 4 は、図 3 の熱・音波変換ユニット 1 0 0 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 2 1 の流入口 2 1 a および流出口 2 1 b 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。

40

#### 【0053】

図 4 に示すように、高温側熱交換器 2 では、高温側環状管 2 1 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 2 0 が嵌め込まれた構成となっている。この高温側環状管 2 1 には、図 4 の太い矢印で示すように、図の下側の流入口 2 1 a 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 2 1 b から流出する。このとき、流入口 2 1 a 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 2 0 の円形の外周を構成する外周壁 2 0 b に直接に突き当たり、外周壁 2 0 b の左右二手に分かれて外周壁 2 0 b に沿って進み、流出口 2 1 b で合流して流出する。

50

このように熱交換ハニカム構造体 20 の外周壁 20 b 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 20 b 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 20 a やセル 20 d 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。

#### 【0054】

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 20 b が高温の加熱流体に直接に接触する代わりに、外周壁 20 b 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 20 b の周囲を金属で覆う形態が好ましい。この場合、外周壁 20 b 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 21 e 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。

#### 【0055】

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。

#### 【0056】

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。

#### 【0057】

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。

#### 【0058】

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。

#### 【0059】

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、説明の簡単化のため、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。

#### 【0060】

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。

#### 【0061】

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、作動流体の振動によって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。

#### 【0062】

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。

#### 【0063】

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 の内部を通し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' の内部を通し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 の内部を通し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。

#### 【0064】

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（言い換えれ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。

#### 【0065】

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。

## 【0066】

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。

## 【0067】

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。

10

## 【0068】

以下、再び、図3～図5に戻って説明を続ける。

## 【0069】

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もよい。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。

20

## 【0070】

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0.25～0.51mm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。

30

## 【0071】

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、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。

40

## 【0072】

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（後述の図11参照）、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（後述の図11参照）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

50

、熱交換ハニカム構造体 20 のセル 20 d 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 20 d 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 20 d には、そうした要請はなく、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。

【0073】

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 20 s 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 21 c 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 21 c と重ならないようになっている。仮に、接触面 20 s が受熱領域 21 c と重なってしまうと、接触面 20 s のうち、受熱領域 21 c に近い縁の周辺と、受熱領域 21 c から遠い中央付近とでは、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 20 s が受熱領域 21 c 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。

【0074】

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 20 b の一部が欠けてセル 20 d の貫通方向に沿って延びるスリット 20 c 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 20 c が形成された例が示されている。こうしたスリット 20 c が存在することで、高温の加熱流体が直接に外周壁 20 b に接触したときに、外周壁 20 b に生じる熱応力を緩和することができ、この結果、外周壁 20 b や隔壁 20 a の割れや剥離を抑えることができる。

【0075】

また、図 5 に示すように、高温側環状管 21 には、スリット 20 c が延在する方向に沿って、各スリット 20 c による空隙を塞ぎつつ延在する 4 つの耐熱性金属板 21 d が設けられている。これら 4 つの耐熱性金属板 21 d により、4 つのスリット 20 c から作動流体が高温側環状管 21 内に漏れ出すことが防がれる。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 21 d 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 21 d 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 21 e（図 3 も合わせて参照）が備えられている。

【0076】

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。

【0077】

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。

【0078】

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。

【0079】

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

10

20

30

40

50

きわめて小さい値となっている。このような水力直径  $H D$  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  $H D$  が  $0.4 \text{ mm}$  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。

#### 【0080】

ここで、より大きな熱音響効果を発揮するには、上述の水力直径  $H D$  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。言い換えれば、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。熱・音波変換部品 1 は、各端面において 60% 以上の高い開口率を有しており、これにより大きな熱音響効果を発揮することができる。逆に 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。

10

#### 【0081】

ただし、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 全体の耐久性や強度が低下する。そこで、熱・音波変換部品 1 では開口率は 93% 以下に抑えられている。実際、開口率が 93% を超えると、発生した音波による衝撃や熱・音波変換部品 1 の両端の温度差に起因する熱的な歪みやねじれ（熱応力）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。

#### 【0082】

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耐久性・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。

20

#### 【0083】

なお、上記開口率は、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  $S_1$  と空隙部分面積  $S_2$  を求め、 $S_1$  と  $S_2$  を用いて  $S_2 / (S_1 + S_2)$  として求められる。

#### 【0084】

また、熱・音波変換部品 1 では、セル 14 の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量は、この貫通方向に沿って図 3 の低温側熱交換器 3 側の端面（図 3 の熱・音波変換部品 1 の上側の端面）から離れるほど減少する傾向を示す。

30

#### 【0085】

ここで、上記の「単位長さ」は、熱・音波変換部品 1 の長さを評価する上で長さの基準単位となる長さを指しており、熱・音波変換部品 1 よりも短い長さである限り適宜選択することが可能である。たとえば、数  $\text{cm}$  ～ 数百  $\text{cm}$  程度の長さの熱・音波変換部品 1 に対しては、上記の「単位長さ」として  $10 \text{ mm}$  ( $1 \text{ cm}$ ) を採用することができる。

#### 【0086】

また、上記の「減少する傾向」には、単調に減少する場合の他に、部分的には増減せずに一定となることもあるが全体的には減少する場合も含まれている。数学的に表現すれば、上記の「減少する傾向を示す」は、低温側熱交換器 3 側の端面（図 3 の熱・音波変換部品 1 の上側の端面）からの距離を変数とし、上記貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量をこの変数によって値が決定される関数とすると、この関数の傾きの値（変数による微分値）が、常に、ゼロまたは負の値となり、正の値には常にならないことを意味する。

40

#### 【0087】

さらに、図 3 の熱・音波変換部品 1 では、低温側熱交換器 3 側の端面（図 3 の熱・音波変換部品 1 の上側の端面）を含む端部であってセル 14 の貫通方向に沿った熱・音波変換部品 1 の全長の 10% の領域を占める端部の熱容量は、高温側熱交換器 2 側の端面（図 3 の熱・音波変換部品 1 の下側の端面）を含む端部であってセル 14 の貫通方向に沿った熱・音波変換部品 1 の全長の 10% の領域を占める端部の熱容量の 1.1 倍以上となっている。以下では、前者の端部（低温側熱交換器 3 側の端面を含む端部）を第 1 端部と呼び、

50

後者の端部（高温側熱交換器２側の端面を含む端部）を第２端部と呼ぶ。

【００８８】

ここで、単位長さ当たりの熱容量は、以下のようにして求められる。まず、測定したい単位長さの部位を切り出し、それ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部位の質量を、その求めた単位質量当たりの熱容量に乘じることで、単位長さ当たりの熱容量を得ることができる。なお、その単位長さの方向に垂直な面におけるその部位の断面の面積で上記の単位長さ当たりの熱容量を除算すれば、この部位の単位体積当たりの熱容量を得ることもできる。

10

【００８９】

図１２は、熱・音波変換部品１における第１端部および第２端部を説明するための概念図である。

【００９０】

図１２に示すように、熱・音波変換部品１の上側の端部である第１端部１６は、熱・音波変換部品１の全長Ｌの１０％の領域、すなわち、熱・音波変換部品１の上側の端面（第１の端面１６ａ）から（１／１０）Ｌの長さの領域を占める端部である。一方、熱・音波変換部品１の下側の端部である第２端部１７は、熱・音波変換部品１の全長Ｌの１０％の領域、すなわち、熱・音波変換部品１の下側の端面（第２の端面１６ｂ）から（１／１０）Ｌの長さの領域を占める端部である。第１端部１６の熱容量は、第２端部１７の熱容量より大きく、上述したように第２端部１７の熱容量の１．１倍以上となっている。また、第１端部１６と第２端部１７の間においては、セル１４の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量は、上述したように、この貫通方向に沿って図１２の上側の端面（図３の低温側熱交換器３側の端面）から離れるほど減少する傾向を示す。以下、このようにセル１４の貫通方向に沿って単位長さ当たりの熱容量に勾配を持たせる理由について説明する。

20

【００９１】

図１の説明において上述したように、熱音響効果の原因となる自励振動は、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である。図１２の熱・音波変換部品１でいえば、セル１４内の作動流体は、第１端部１６側と第２端部１７側との間の温度勾配を緩和するように自励振動を起こす。たとえば、瞬間的に、第１端部１６に対しある量の温熱が与えられ第２端部１７に対しある量の冷熱が与えられた（つまり、ある量の熱が第２端部１７から吸収された）場合、作動流体が自励振動を起こすことにより、上述の温熱と冷熱の供給によって生じた第１端部１６側と第２端部１７側との間の温度勾配は、時間の経過とともに徐々に緩和されていくことになる。

30

【００９２】

ここで、仮に、熱・音波変換部品１において、セル１４の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量がこの貫通方向に沿って一様であるとする、温度勾配が緩和されて、その単位長さ当たりの熱容量に応じた一定の温度に達する。一方、実際の熱・音波変換部品１のように、セル１４の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が、この貫通方向に沿って図１２の上側の端面（図３の低温側熱交換器３側の端面）から離れるほど減少する構成では、もちろん最終的には全体で一定の温度に到達するものの、途中の段階では、単位長さ当たりの熱容量にばらつきがあることに起因して局所的に温度勾配の緩和の仕方が異なることとなり、全体的に温度勾配が残りやすい。言い換えれば、単位長さ当たりの熱容量にばらつきがある場合の方が、単位長さ当たりの熱容量が一様な場合に比べて、温度勾配の緩和に時間がかかることになる。すなわち、単位長さ当たりの熱容量にばらつきを持たせることで、温度勾配が維持されやすいことになる。特に、第１端部１６の熱容量が第２端部１７の熱容量の１．１倍以上となっていると、この温度勾配が維持される効果が十分に大きく、高い熱・音波変換機能の発揮が可能となる。この点については、後述の実施例によって検証する。

40

【００９３】

50



ここで、セル 14 の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量に変化を持たせるには、以下に説明する、セル 14 の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が互いに異なる複数のハニカムセグメントを用いるのが簡便である。

【0094】

これら複数のハニカムセグメントはいずれも、ハニカム構造（2つの端面の間を貫通する複数のセルが隔壁によって区画形成されている構造）を備えており一体的に形成されたものである。ここで、このハニカム構造では、各セルの水力直径HDが0.4mm以下であって、かつ、各端面の開口率が60%以上93%以下となっており、熱・音波変換機能を発揮することができる。また、複数のハニカムセグメントのうち、セル14の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が最も大きいハニカムセグメント（以下、第1のハニカムセグメントと呼ぶ）のその単位長さ当たりの熱容量は、セル14の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が最も小さいハニカムセグメント（以下、第2のハニカムセグメントと呼ぶ）のその単位長さ当たりの熱容量の1.1倍以上である。ここで、第1のハニカムセグメントおよび第2のハニカムセグメントはいずれも、全長（各ハニカムセグメントの各セルの貫通方向に沿った長さ）が、上記の複数のハニカムセグメントの全長の総和の1/10倍以上となっている。第1のハニカムセグメントおよび第2のハニカムセグメントの長さについてこのような条件が課される点を除き、複数のハニカムセグメントそれぞれの長さは特に限定されず、互いに同じであってもよいし、互いに異なってもよい。あるいは、複数のハニカムセグメントのうちの一群のハニカムセグメントの長さは同一であって、残りのハニカムセグメントの長さが互いに異なるものであってもよい。

【0095】

これら複数のハニカムセグメントが、各ハニカムセグメントの一端面が前記複数のハニカムセグメントのうちの別のハニカムセグメントの一端面に対向した状態で、セル14の貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量の大きい順に直列的に配置されることで、上述の熱・音波変換部品1の一例が実現する。この例では、第1のハニカムセグメントは、熱・音波変換部品1の上述の第1端部16（図12参照）を含むものであり、第2のハニカムセグメントは、熱・音波変換部品1の上述の第2端部17（図12参照）を含むものである。

【0096】

ここで、複数のハニカムセグメントが直列的に配置される際には、互いに隣接する2つのハニカムセグメントの間で、互いに対向する端面における各セルの開口同士が重なり合って1つの貫通孔（言い換えれば、2つのセルがつながることで形成された1つのセル）が形成されるように、複数のハニカムセグメントが配置されることが好ましい。このとき、上述のように各セルの開口同士が重なり合った状態を維持しつつ、互いに隣接する2つのハニカムセグメントの互いに対向する端面同士を接合材で接着する形態が採用されてもよい。なお、この場合、接合材によって形成された、隣接ハニカムセグメント間の接合層は、厳密に言えば、熱・音波変換部品1の上述の「単位長さ当たりの熱容量」に寄与するが、通常、接合層は薄いため、その寄与は十分に小さい。このため、間に接合層を介して、単位長さ当たりの熱容量の大きい順に並んだ複数のハニカムセグメントの直列的な配置により、上述した、単位長さ当たりの熱容量が一方の端面（図3の低温側熱交換器3側の端面）から離れるほど減少する傾向を示すという熱・音波変換部品1の特徴は十分に実現可能である。ただし、この場合の「単位長さ」は、接合層の厚さよりも十分に大きい長さである。たとえば、10mm（1cm）の単位長さであれば、こうした条件を十分に満たすことができる。

【0097】

また、接合材で端面同士を接着するのに代えて、各セルの開口同士が重なり合った密着状態で配置された複数のハニカムセグメント全体を、この密着状態のまま、筒状の収容部材の内部に嵌め込むことで、収容部材の内部において各ハニカムセグメントを位置決めして固定する形態が採用されてもよい。

【0098】

さらには、このように密着状態で位置決めして固定する代わりに、音波の伝達に支障が生じない程度の微小な間隙を置いて複数のハニカムセグメントが、単位長さ当たりの熱容量の大きい順に筒状の収容部材の内部に詰め込まれて位置決めおよび固定されるものであってもよい。

【0099】

以下では、3つのハニカムセグメントで構成された熱・音波変換部品1を例にとってさらに具体的に説明する。

【0100】

図13は、円相当直径が同一で単位体積当たりの熱容量が互いに異なる3つのハニカムセグメントからなる熱・音波変換部品1の構成を表す模式図である。

10

【0101】

なお、図13では、熱・音波変換部品1が3つのハニカムセグメントで構成されていることを明確にするために、ハニカムセグメント間に、ある程度の距離を設けて熱・音波変換部品1の構成が模式的に図示されているが、実際には、隣接するハニカムセグメントは、上述したように、接合材で接合されているか、または、筒状の収容部材の内部に、密着状態あるいは微小な間隙を置いて詰め込まれて位置決めされた構成が実現している。このような構成では、互いに対向する端面における各セルの開口同士が、互いに重なり合うか、少なくとも互いに対向することで、実質的に1つの貫通孔（言い換えれば、2つのセルがつながることで形成された1つのセル）が形成された状態になっている。このため、発生した音波は、この1つの貫通孔（1つのセル）をスムーズに伝達されることとなる。

20

【0102】

ハニカムセグメントの「円相当直径」とは、ハニカムセグメントの各セルの貫通方向に垂直な面におけるハニカムセグメントの断面積を  $D^2/4$  と表現したときの  $D$  として定義されるものである。端的に言えば、ハニカムセグメントの「円相当直径」は、ハニカムセグメントの太さを表している。図13の熱・音波変換部品1は、3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3で構成されており、これら3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3は、円相当直径は同一であり、単位体積当たりの熱容量が互いに異なっている。

【0103】

このように、単位体積当たりの熱容量が互いに異なるようにする1つの手法としては、たとえば、組成成分の種類が互いに異なる構成材料で隔壁や外周壁（あるいはこれらのいずれか一方のみ）を構成することが考えられる。たとえば、3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3のうち、1つのハニカムセグメントについてはコーゼライト材料で隔壁や外周壁を構成し、別のハニカムセグメントについてはアルミナを含む非コーゼライト材料で隔壁や外周壁を構成し、残りのハニカムセグメントについてはアルミナを含まない非コーゼライト材料で隔壁や外周壁を構成するといった場合である。このように組成成分の種類が互いに異なる構成材料を用いる場合には、円相当直径を含め形状や大きさは同一であり各端面における開口率や各セルの水力直径も同一であるが、単位体積当たりの熱容量が互いに異なる状態を実現することができる。

30

【0104】

単位体積当たりの熱容量が互いに異なるようにする別の手法としては、組成成分の種類自体は同一であるが、組成成分あるいは構成材料自体の形態が互いに異なる構成材料で3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3の隔壁や外周壁（あるいはこれらのいずれか一方のみ）を構成することが考えられる。たとえば、組成成分粒子の平均粒径が互いに異なる構成材料を用いる場合や、気孔率が互いに異なる構成材料を用いる場合である。このように組成成分あるいは構成材料自体の形態が互いに異なる構成材料を用いる場合にも、円相当直径を含め形状や大きさは同一であり各端面における開口率や各セルの水力直径も同一であるが、単位体積当たりの熱容量が互いに異なる状態を実現することができる。

40

【0105】

単位体積当たりの熱容量が互いに異なるようにするためのさらに別の手法としては、円

50

相当直径を変えることなく、隔壁や外周壁が互いに異なるように、3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3を作製することが考えられる。ただし、この場合には、各ハニカムセグメントにおいて、セルの水力直径HDが0.4mm以下であり、各端面における開口率が60%以上93%以下であるという上述の要件を満たすとともに、互いに対向する端面におけるセルの少なくとも一部については開口同士が、互いに重なり合うか、少なくとも互いに対向することで、実質的に1つの貫通孔（言い換えれば、2つのセルがつながることで形成された1つのセル）が形成されているという要件も満たすように構成することが必要となる。

#### 【0106】

以上では、単位体積当たりの熱容量が互いに異なるようにするいくつかの手法を説明したが、当然ながら、これらを組み合わせることによっても、円相当直径は同一であるが単位体積当たりの熱容量が互いに異なる状態を実現することができる。

#### 【0107】

ここで、図13の3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3のうち、一番上のハニカムセグメント1\_\_1の単位体積当たりの熱容量が最も大きく、一番下のハニカムセグメント1\_\_3の単位体積当たりの熱容量が最も小さい。図13の3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3では円相当直径が同一であることから、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量についても、一番上のハニカムセグメント1\_\_1が最も大きく、一番下のハニカムセグメント1\_\_3が最も小さい。ここで、図13の一番上のハニカムセグメント1\_\_1が、第1端部16を含む第1のハニカムセグメントであり、図13の一番下のハニカムセグメント1\_\_3が、第2端部17を含む第2のハニカムセグメントである。また、図13の一番上のハニカムセグメント1\_\_1の、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量は、図13の一番下のハニカムセグメント1\_\_3の、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量の1.1倍以上となっている。この構成では、当然ながら、第1端部16の熱容量も、第2端部17の熱容量の1.1倍以上となっている。

#### 【0108】

図14は、単位体積当たりの熱容量が同一で円相当直径が互いに異なる3つのハニカムセグメントからなる熱・音波変換部品1の構成を表す模式図である。

#### 【0109】

図14でも、熱・音波変換部品1が3つのハニカムセグメントで構成されていることを明確にするために、ハニカムセグメント間に、ある程度の距離を設けて熱・音波変換部品1の構成が模式的に図示されているが、実際には、隣接するハニカムセグメントは、上述したように、接合材で接合されているか、または、筒状の収容部材の内部に、密着状態あるいは微小な間隙を置いて嵌め込まれて位置決めされた構成が実現している。このような構成では、互いに対向する端面における少なくとも一部のセルについては各セルの開口同士が、互いに重なり合うか、少なくとも互いに対向することで、実質的に1つの貫通孔（言い換えれば、2つのセルがつながることで形成された1つのセル）が形成された状態になっている。このため、発生した音波は、この1つの貫通孔（1つのセル）をスムーズに伝達されることとなる。

#### 【0110】

図14の熱・音波変換部品1は、図14に示すように、円相当直径が互いに異なる3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3で構成されている。これら3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3は、同一の構成材料で構成されており、単位体積当たりの熱容量も同一である。なお、各ハニカムセグメントの全長や各端面における開口率やセルの水力直径についてもこれら3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3の間では同一である。ここで、図14の3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3のうち、一番上のハニカムセグメント1\_\_1の体積が最も大きく、一番下のハニカムセグメント1\_\_3の体積が最も小さい。図14の3つのハニカムセグメント1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3では、単位体積当たりの熱容量が同一であることから、各セルの貫通方向に沿った単

10

20

30

40

50

位長さ当たりの熱容量についても、一番上のハニカムセグメント 1\_\_1 が最も大きく、一番下のハニカムセグメント 1\_\_3 が最も小さいことになる。ここで、図 1 4 の一番上のハニカムセグメント 1\_\_1 が、第 1 端部 1 6 を含む第 1 のハニカムセグメントであり、図 1 4 の一番下のハニカムセグメント 1\_\_3 が、第 2 端部 1 7 を含む第 2 のハニカムセグメントである。また、図 1 4 の一番上のハニカムセグメント 1\_\_1 の、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量は、図 1 4 の一番下のハニカムセグメント 1\_\_3 の、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量の 1 . 1 倍以上となっている。上述したように、単位体積当たりの熱容量は同一であるため、図 1 4 の一番上のハニカムセグメント 1\_\_1 の、各セルの貫通方向に垂直な断面の面積は、図 1 4 の一番下のハニカムセグメント 1\_\_3 の、各セルの貫通方向に垂直な断面の面積の 1 . 1 倍以上である。この構成では、当然ながら、第 1 端部 1 6 の熱容量も、第 2 端部 1 7 の熱容量の 1 . 1 倍以上となっている。なお、各ハニカムセグメントの断面の面積を円相当直径に換算して考えれば、図 1 4 の一番上のハニカムセグメント 1\_\_1 の円相当直径は、図 1 4 の一番下のハニカムセグメント 1\_\_3 の円相当直径の  $(1 . 1)^{1 / 2} \quad 1 . 0 5$  倍以上となっている。

10

#### 【 0 1 1 1 】

以上の図 1 3 や図 1 4 のような、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が互いに異なる複数のハニカムセグメントを用いることで、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量がこの方向に沿って変化する熱・音波変換部品 1 を容易に実現することができる。

#### 【 0 1 1 2 】

20

以下、熱・音波変換部品 1 の他の特徴について説明する。

#### 【 0 1 1 3 】

熱・音波変換部品 1 では、セル 1 4 の貫通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、その形状の角部における曲率半径が 0 . 0 2 mm 以上 0 . 1 mm 以下であることが好ましい。図 1 1 では、セル 1 4 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 . 0 2 mm 以上 0 . 1 mm 以下となっている。曲率半径が 0 . 0 2 mm 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 1 4 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 1 1 が分厚くなり、その分、熱音響効果に寄与するセル 1 4 の貫通孔が減ることになる。そこで、曲率半径が 0 . 1 mm 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。

30

#### 【 0 1 1 4 】

なお、セル 1 4 の角部における曲率半径については、セル 1 4 の貫通方向に垂直な断面の拡大写真をとり、そのセル 1 4 の断面形状に基づき測定することができる。

#### 【 0 1 1 5 】

セル 1 4 の貫通方向に垂直な面内でのセル 1 4 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、楕円形（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 1 1 の熱・音波変換部品 1 の右上のセル 1 4 の拡大図のように、三角形のセル 1 4 が特に好ましい。三角形のセル 1 4 が特に好ましいのは、様々な多角形および楕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。ここで、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）實際上、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（ただし角部が弯曲した三角形）のセル形状を積極的に活用できる。

40

50

## 【0116】

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、十分な熱音響効果を得ることができる。

10

## 【0117】

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、特に、隔壁11の構成材料の $20 \sim 800$ における熱膨張率が $6 \text{ ppm/K}$ 以下であることが好ましい。ここで、熱膨張率の測定方法としては、たとえば、各セルの貫通方向に沿った $10 \text{ mm}$ 以上の長さを有する試験片であって、この貫通方向、および、この貫通方向に直交する方向を含む断面の面積が $4 \text{ mm}^2$ 以上 $100 \text{ mm}^2$ 以下である試験片を熱・音波変換部品1から切り出し、この貫通方向の熱膨張率を、石英を標準比較サンプルとする示差式の熱膨張計により測定する方法を採用することができる。

20

## 【0118】

隔壁11の構成材料の、 $20 \sim 800$ における熱膨張率が $6 \text{ ppm/K}$ 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、 $6 \text{ ppm/K}$ 以下の熱膨張率の中でも、 $4 \text{ ppm/K}$ 以下の熱膨張率であることがさらに好ましい。

## 【0119】

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

30

## 【0120】

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。

## 【0121】

以下、図13や図14で説明したような、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が互いに異なる複数のハニカムセグメントで構成された熱・音波変換部品1の製造方法について説明する。以下では、各ハニカムセグメント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。まず、1つのハニカムセグメントの製造について説明する。

## 【0122】

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、コーージェライト化原料、炭化珪素 - コージェライト系複合材料、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、コーージェライト化原料が好ましい。なお、コーージェライト化原料とは、シリカが $42 \sim 56$ 質量%、アルミナが $30 \sim 45$ 質量%、マグネシアが $12 \sim 16$ 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、焼成されてコーージェ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 $40 \sim 90$ 質量%であることが好ましい。

40

50

## 【0123】

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。

## 【0124】

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。

## 【0125】

界面活性剤としては、エチレングリコール、デキストリン、脂肪酸石鹸、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。

10

## 【0126】

造孔材としては、澱粉、発泡樹脂、吸水性樹脂およびシリカゲル等を採用することができる。

## 【0127】

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。

20

## 【0128】

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、ハニカムセグメントの形状、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。

## 【0129】

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）ハニカムセグメントを作製する際には、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。

30

## 【0130】

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。

## 【0131】

第2の問題は、上述のハニカムセグメント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かい微細部分（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。

40

## 【0132】

そこで、上述のハニカムセグメント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。

## 【0133】

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）上述のハニカムセグメントに対応した口金（以下、正規口金と呼ぶ）による押出成形の実行前に、リ

50

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）での坏土の押出処理が行われる。なお、ここでいう「リブの厚さ」とは、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。

#### 【0134】

第2の問題に関しては、押出成形によるハニカムセグメント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、上述のハニカムセグメント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上述のハニカムセグメント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。

#### 【0135】

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。

#### 【0136】

得られたハニカム成形体について、焼成前に乾燥を行う。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。

#### 【0137】

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のが好ましい。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。

#### 【0138】

次に、このハニカム成形体を焼成する。ここで、焼成の前には、バインダ等を除去するため、仮焼成を行うのが好ましい。また、仮焼成は大気雰囲気において、400～500で0.5～2.0時間行うのが好ましい。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1～2.0時間加熱するのが好ましい。一方、酸化物系材料を用いた場合には、酸素雰囲気において、1300～1500で1～2.0時間加熱するのが好ましい。

#### 【0139】

最後に、所望のハニカムセグメントの断面形状（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、焼成後のハニカム成形体の外周部分を、適宜、切削加工して形

10

20

30

40

50

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、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、コーゼライト、アルミナ、アルミニウムヒタネート、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。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。

10

#### 【0140】

以上の工程を経て、1つのハニカムセグメントが作製される。

#### 【0141】

上記の1つのハニカムセグメントの製造方法で用いられていた成形原料とはセラミック原料の組成成分の種類が異なる点を除き同じ成形原料を用いて、上述の製造方法と同様の製造方法により、別のハニカムセグメントを作製する。または、上記の1つのハニカムセグメントの製造方法で用いられていた成形原料とは、セラミック原料中の組成成分の粒子径、あるいは、造孔材の量が異なる点を除き同じ成形原料を用いて、上述の製造方法と同様の製造方法により、別のハニカムセグメントを作製する。または、上記の1つのハニカムセグメントの製造方法で用いられていたハニカムセグメント用の口金とは円相当直径が異なるハニカムセグメント用の口金を用いて、上述の製造方法と同様の製造方法により、別のハニカムセグメントを作製する。

20

#### 【0142】

このように、セラミック原料や口金を変更しながら同様の製造方法でハニカムセグメントの作製を繰り返し、最終的に、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が互いに異なる複数のハニカムセグメントが作製される。このとき、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が最も大きいハニカムセグメント(第1のハニカムセグメント)、および、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が最も小さいハニカムセグメント(第2のハニカムセグメント)が、複数のハニカムセグメントの全長の総和の1/10倍以上となるとともに、第1のハニカムセグメントの各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が、第2のハニカムセグメントの各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量の1.1倍以上となるように、セラミック原料の内容やハニカムセグメントの円相当直径を適宜調整する。

30

#### 【0143】

これら複数のハニカムセグメントを、各ハニカムセグメントの一端面が別のハニカムセグメントの一端面に対向した状態で、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量の大きい順に直列的に配置する。このとき、互いに隣接する2つのハニカムセグメントの間で、互いに対向する端面における各セルの開口同士が重なり合って1つの貫通孔(言い換えれば、2つのセルがつながることによって形成された1つのセル)が形成されるように、複数のハニカムセグメントを直列的に配置する。なお、このように直列的に配置された状態を維持するため、必要に応じて、互いに対向するハニカムセグメントの端面間を接合材で接着する。接合材としては、たとえば、上述の外周コート材の材料として挙げたものを採用することができる。あるいは、接合材で接着する代わりに、各セルの開口同士が重なり合った密着状態で配置された複数のハニカムセグメントを、この密着状態のまま、筒状の収容部材の内部に嵌め込むことで、収容部材の内部において各ハニカムセグメントを位置決めして固定する方式を採用してもよい。さらには、このように密着状態で位置決めして固定する代わりに、音波の伝達に支障が生じない程度の微小な間隙を置いて複数のハニカムセグメントが、単位長さ当たりの熱容量の大きい順に筒状の収容部材の内部に嵌め込まれて位置決めおよび固定される方式を採用してもよい。

40

50



## 【 0 1 4 4 】

以上の工程を経て最終的に、熱・音波変換部品 1 が完成する。

## 【 0 1 4 5 】

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。

## 【 0 1 4 6 】

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 2 0 については、上記の図 1 1 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 S i C 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 H D 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 1 1 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。

10

## 【 0 1 4 7 】

この熱交換ハニカム構造体 2 0 の作製においては、たとえば、S i 含浸 S i C 複合材料を主成分とする熱交換ハニカム構造体 2 0 を製造する場合には、S i C 粉末および炭素粉末を混合・混練して調整された坯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、熔融した珪素（S i）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、S i C 粒子の表面を金属 S i（金属珪素）の凝固物が取り囲むとともに、金属 S i を介して S i C 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。

## 【 0 1 4 8 】

20

なお、熔融した珪素（S i）だけでなく、A l、N i、C u、A g、B e、M g、T i 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、S i C 粒子の表面を金属 S i（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 S i、および含浸に用いたその他の金属を介して S i C 粒子同士が結合した構造が形成される。この構造によっても、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。

## 【 0 1 4 9 】

なお、熱交換ハニカム構造体 2 0 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ましい。

30

## 【 0 1 5 0 】

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っ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ましい。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 2 1 の作製において、耐熱性金属板 2 1 d やフィン 2 1 e を形成する。

## 【 0 1 5 1 】

図 3 の高温側熱交換器 2 における高温側環状管 2 1 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 2 0 との結合時に熱交換ハニカム構造体 2 0 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 1 1 の熱・音波変換部品 1 や熱交換ハニカム構造体 2 0 の材料として挙げたもの）を採用できる。

40

## 【 0 1 5 2 】

図 3 の高温側熱交換器 2 は、基本的には、高温側環状管 2 1 の環状における、穴となっている中央部に熱交換ハニカム構造体 2 0 を組み込むことによって完成する。

## 【 0 1 5 3 】

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

50

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。

【0154】

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】

【0155】

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って何ら限定されるものではない。

【0156】

(実施例 1)

実施例 1 の熱・音波変換部品は、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が異なる 2 つのハニカムセグメントで構成された熱・音波変換部品である。以下では、まず、1 つのハニカムセグメントの作製について説明する。セラミック原料としてコーゼライト化原料を用い、コーゼライト化原料 100 質量部に対して、造孔材を 1 質量部、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。コーゼライト化原料としては、平均粒子径が  $3\mu\text{m}$  のタルクを 38.9 質量部、平均粒子径が  $1\mu\text{m}$  のカオリンを 40.7 質量部、平均粒子径が  $0.3\mu\text{m}$  のアルミナを 5.9 質量部、及び平均粒子径が  $0.5\mu\text{m}$  のペーマイトを 11.5 質量部、用いた。ここで、平均粒子径とは、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。

【0157】

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。

【0158】

次に、得られた坯土を、口金を用いて押出成形し、セル形状が三角形で、全体形状が円形のハニカム成形体を作製した。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  $0.07\text{mm}$  程度のダミー口金での坯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坯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坯土における水の比率が、坯土固形成分 100 質量部に対し 41 質量部 (誤差は  $\pm 1$  質量部の範囲内) となるように坯土成分を厳格に制御した。

【0159】

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。

【0160】

最後に、焼成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、コーゼ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。

【0161】

以上の工程を経て、1 つのハニカムセグメントが完成した。

【0162】

上記の1つのハニカムセグメントのコーゼライト化原料とは一部原料の粒子径が異なるコーゼライト化原料を用いた以外は同様の方法で、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が相対的に小さい別のハニカムセグメントを作製した。先の熱容量が相対的に大きい方のハニカムセグメントが第1のハニカムセグメントであり、熱容量が相対的に小さい上述の別のハニカムセグメントが第2のハニカムセグメントである。2つのハニカムセグメントは、構成材料が異なるため単位体積当たりの熱容量が異なる以外は、円相当直径を含め形状や大きさは同一であり、各端面における開口率やセルの水力直径も同一である。このため、第1のハニカムセグメントおよび第2のハニカムセグメントそれぞれの全長は、同一の長さであるため、当然ながら、2つのハニカムセグメントの全長の総和の1/10倍以上となっている。

10

#### 【0163】

これら2つのハニカムセグメントを、一方のハニカムセグメントの一端面が他方のハニカムセグメントの一端面に対向した状態で、直列的に配置した。このとき、互いに対向する端面における各セルの開口同士が重なり合って1つの貫通孔（言い換えれば、2つのセルがつながることで形成された1つのセル）が形成されるように、2つのハニカムセグメントを直列的に配置した。このように直列的に配置された状態を維持するため、互いに対向するハニカムセグメントの端面間を接合材で接着した。接合材としては、たとえば、上述の外周コート材の材料と同じものを採用した。

#### 【0164】

このようにして、最終的に実施例1の熱・音波変換部品が完成した。

20

#### 【0165】

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）内におけるセルの水力直径HD、熱・音波変換部品の各端面における開口率、第1端部および第2端部の熱容量、第1のハニカムセグメントおよび第2のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量、第1のハニカムセグメントおよび第2のハニカムセグメントの円相当直径をそれぞれ測定した。ここで、第1端部は、第1のハニカムセグメントに含まれる熱・音波変換部品の端部であって、その長さは熱・音波変換部品の全長の(1/10)倍である。一方、第2端部は、第2のハニカムセグメントに含まれる熱・音波変換部品の端部であって、その長さは熱・音波変換部品の全長の(1/10)倍である。

#### 【0166】

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10個のセルを無作為に選択してそれぞ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。

30

#### 【0167】

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。なお、断面全体における開口率は、端面における開口率と等価であるとして、断面全体における開口率を端面における開口率とみなしている。

#### 【0168】

また、第1端部や第2端部の熱容量については、以下のようにして求めた。まず、それぞれの部位を切り出し、それを粉砕して粉末状し、その粉末状のものをサンプルとし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、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た。次に、その単位質量当たりの熱容量に、それぞれの部位の質量を乗じることで、それぞれの部位の熱容量を得た。

40

#### 【0169】

また、第1のハニカムセグメントおよび第2のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量については、第1端部や第2端部の単位体積当たりの熱容量と同じである。そこで、上述の第1端部や第2端部の熱容量を第1端部や第2端部の体積で除算することで、第1のハニカムセグメントおよび第2のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量を得

50

た。

【0170】

以上の測定によって得られた測定値から、以下の5種類のパラメータの値を得た。なお、以下の5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。

【0171】

- (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・音波変換部品の断面全体における開口率(各端面における開口率と同じ)
- (3) 第2端部の熱容量に対する第1端部の熱容量の割合
- (4) 第2のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量に対する第1のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量の割合 10
- (5) 第2のハニカムセグメントの円相当直径に対する第1のハニカムセグメントの円相当直径の割合

【0172】

この実施例1の熱・音波変換部品を用いて以下の実験を行った。

【0173】

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程度の自動車の排気ガスを10分間流入させ、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。20  
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10分間流入させ、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。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、10atmのヘリウムガスを用いた。 30

【0174】

(実施例2および比較例1)

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5種類のパラメータのうちセルの水力直径HD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の熱・音波変換部品を作製した。

【0175】

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

【0176】

(実施例3, 4および比較例2, 3) 40

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5種類のパラメータのうち熱・音波変換部品の各端面の開口率(上記垂直面の開口率と同じ)の値が実施例1とは主に異なる実施例3, 4および比較例2, 3の熱・音波変換部品を作製した。

【0177】

そして、これらの実施例3, 4および比較例2, 3について、実施例1と同様の実験を行った。

【0178】

(比較例4, 5および実施例5~8)

上述の実施例1の製造方法とは、各セルの貫通方向に沿った単位長さ当たりの熱容量が 50

相対的に大きい方のハニカムセグメント（第１のハニカムセグメント）の作製に用いたコーゼライト化原料とは組成が異なるコーゼライト化原料を用いた点を除き同じ製造方法を用いて、上述の５種類のパラメータのうち、第２端部の熱容量に対する第１端部の熱容量の割合、および、第２のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量に対する第１のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量の割合のみが実施例１とは異なる比較例４，５および実施例５～８の熱・音波変換部品を作製した。

【０１７９】

そして、これらの比較例４，５および実施例５～８について、実施例１と同様の実験を行った。

【０１８０】

（比較例６、実施例９、および実施例１０）

上述の実施例１の製造方法とは、第２のハニカムセグメントの作製において、第１のハニカムセグメントの作製に用いられたのと同じ組成のコーゼライト化原料を用いるが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５種類のパラメータのうち、第２端部の熱容量に対する第１端部の熱容量の割合、および、第２のハニカムセグメントの円相当直径に対する第１のハニカムセグメントの円相当直径の割合のみが実施例１とは異なる比較例６、実施例９、および実施例１０の熱・音波変換部品を作製した。ここで、比較例６、実施例９、および実施例１０における第１のハニカムセグメントおよび第２のハニカムセグメントは、円相当直径（太さ）が互いに異なる以外は、単位体積当たりの熱容量や各端面における開口率やセルの水力直径については同一のハニカムセグメントである。

【０１８１】

そして、これら比較例６、実施例９、および実施例１０について、実施例１と同様の実験を行った。

【０１８２】

（比較例７、実施例１１、および実施例１２）

上述の実施例１の第１のハニカムセグメントの製造方法を用いて同一の第１のハニカムセグメントを作製するとともに、実施例１の第１のハニカムセグメントの製造方法とは、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、円相当直径が第１のハニカムセグメントよりも相対的に小さいハニカムセグメントを作製した。さらに、この円相当直径が相対的に小さいハニカムセグメントの製造方法とは押出成形の際に用いる口金にさらに異なる点を除き同じ製造方法を用いて、この円相当直径が相対的に小さいハニカムセグメントよりもさらに円相当直径が小さい３番目のハニカムセグメントを作製した。これら３つのハニカムセグメントを、円相当直径が大きい順（つまり単位長さ当たりの熱容量が大きい順）に配置し、実施例１と同様のやり方で端面同士を接合して熱・音波変換部品を作製した。この熱・音波変換部品は、図１４の構成の熱・音波変換部品と同じタイプの熱・音波変換部品である。このような３個のハニカムセグメントからなる熱・音波変換部品を、円相当直径が一番小さいハニカムセグメント（第２のハニカムセグメント）の円相当直径に対する、円相当直径が一番大きいハニカムセグメント（第１のハニカムセグメント）の円相当直径の割合が互いに異なり、この結果、第２端部の熱容量に対する第１端部の熱容量の割合も互いに異なる３個用意し、それらを、比較例７、実施例１１、および実施例１２の熱・音波変換部品とした。

【０１８３】

そして、これら比較例７、実施例１１、および実施例１２について、実施例１と同様の実験を行った。

【０１８４】

以上説明した実施例１～１２および比較例１～７の実験結果を、各パラメータの値とともに下記の表１に示す。

【０１８５】

10

20

30

40

【表 1】

	セル水力直径 HD (mm)	端面の開 口率(%)	(第1端部の熱容量) ／(第2端部の熱容 量)	(第1のハニカムセグメント単 位体積当たりの熱容量)／(第 2のハニカムセグメント単位体 積当たりの熱容量)	(第1のハニカムセグメント円 相当直径)／(第2のハニカム セグメント円相当直径)	ハニカムセ グメント個 数	エネルギー変換 効率(%)
実施例1	0.25	74	1.20	1.20	1.000	2	18.3
実施例2	0.40	74	1.20	1.20	1.000	2	13.8
比較例1	0.45	74	1.20	1.20	1.000	2	10.0
比較例2	0.25	55	1.20	1.20	1.000	2	8.8
実施例3	0.25	60	1.20	1.20	1.000	2	17.6
実施例4	0.25	93	1.20	1.20	1.000	2	20.0
比較例3	0.25	95	1.20	1.20	1.000	2	-
比較例4	0.25	74	1.07	1.07	1.000	2	11.0
比較例5	0.25	74	1.08	1.08	1.000	2	12.0
実施例5	0.25	74	1.10	1.10	1.000	2	15.0
実施例6	0.25	74	1.11	1.11	1.000	2	16.0
実施例7	0.25	74	1.15	1.15	1.000	2	23.0
実施例8	0.25	74	1.20	1.20	1.000	2	20.0
比較例6	0.25	74	1.07	1.00	1.034	2	12.0
実施例9	0.25	74	1.11	1.00	1.054	2	18.0
実施例10	0.25	74	1.30	1.00	1.140	2	26.0
比較例7	0.25	74	1.05	1.00	1.025	3	13.0
実施例11	0.25	74	1.11	1.00	1.054	3	23.0
実施例12	0.25	74	1.30	1.00	1.140	3	28.0

表 1 において、セルの水力直径  $H D$  が互いに異なる実施例 1, 2 および比較例 1 を比較すればわかるように、実施例 1, 2 は、比較例 1 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  $0.4 \text{ mm}$  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。

#### 【0187】

また、表 1 において、各端面における開口率（上記垂直面における開口率）が互いに異なる実施例 3, 4 および比較例 2 を比較すればわかるように、実施例 3, 4 は、比較例 2 に比べ高いエネルギー変換効率を発揮している。ここで、比較例 3 の熱・音波変換部品は、実験の途中で破損してしまったために実験を中止したのでエネルギー変換効率の最終的な値が得られなかった。その理由は、開口率が高すぎて強度や耐久性に欠けているためだ

10

#### 【0188】

また、表 1 において、第 2 端部の熱容量に対する第 1 端部の熱容量の割合（および、第 2 のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量に対する第 1 のハニカムセグメントの単位体積当たりの熱容量の割合）の値が互いに異なる比較例 4, 5 および実施例 5 ~ 8 を比較すればわかるように、実施例 5 ~ 8 は、比較例 4, 5 に比べ十分に高いエネルギー変換効率を発揮している。このことより、第 1 端部の熱容量が、第 2 端部の熱容量の  $1.1$  倍以上であることが、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。

20

#### 【0189】

また、表 1 において、第 2 端部の熱容量に対する第 1 端部の熱容量の割合（および、第 2 のハニカムセグメントの円相当直径に対する第 1 のハニカムセグメントの円相当直径の割合）の値が互いに異なる比較例 6、実施例 9、および実施例 10 を比較すればわかるように、実施例 9 および実施例 10 は、比較例 6 に比べ十分に高いエネルギー変換効率を発揮している。このことから、第 1 端部の熱容量が、第 2 端部の熱容量の  $1.1$  倍以上であることが、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。

#### 【0190】

また、表 1 において、いずれも 3 個のハニカムセグメントから構成され、第 2 端部の熱容量に対する第 1 端部の熱容量の割合（および、第 2 のハニカムセグメントの円相当直径に対する第 1 のハニカムセグメントの円相当直径の割合）の値が互いに異なる比較例 7 および実施例 11、実施例 12 を比較すればわかるように、実施例 11 および実施例 12 は、比較例 7 に比べ十分に高いエネルギー変換効率を発揮している。このことから、第 1 端部の熱容量が、第 2 端部の熱容量の  $1.1$  倍以上であることが、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。

30

#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0191】

本発明は、自動車の排気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。

#### 【符号の説明】

40

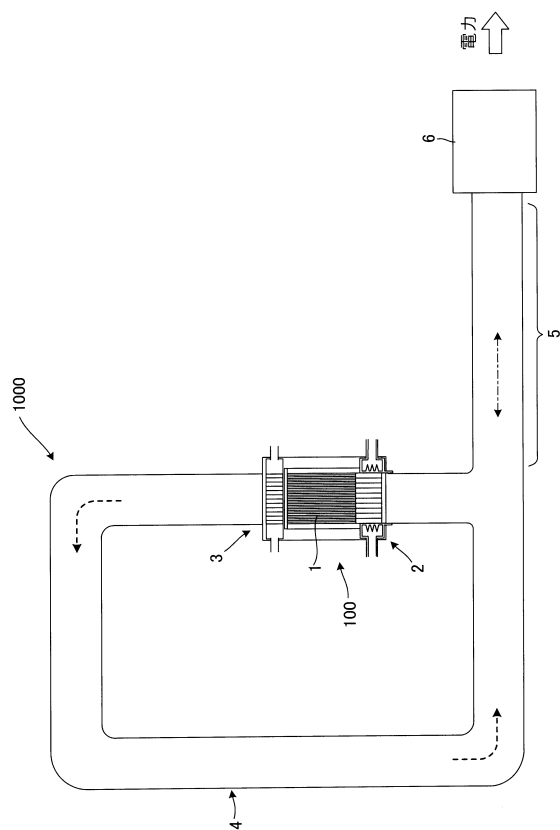
#### 【0192】

1：熱・音波変換部品、1a：干渉材、1\_\_1, 1\_\_2, 1\_\_3：ハニカムセグメント、2, 2', 2A, 2A'：高温側熱交換器、3, 3A：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、13：外周壁、14：セル、16：第 1 端部、16a：第 1 の端面、17：第 2 端部、17a：第 2 の端面、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

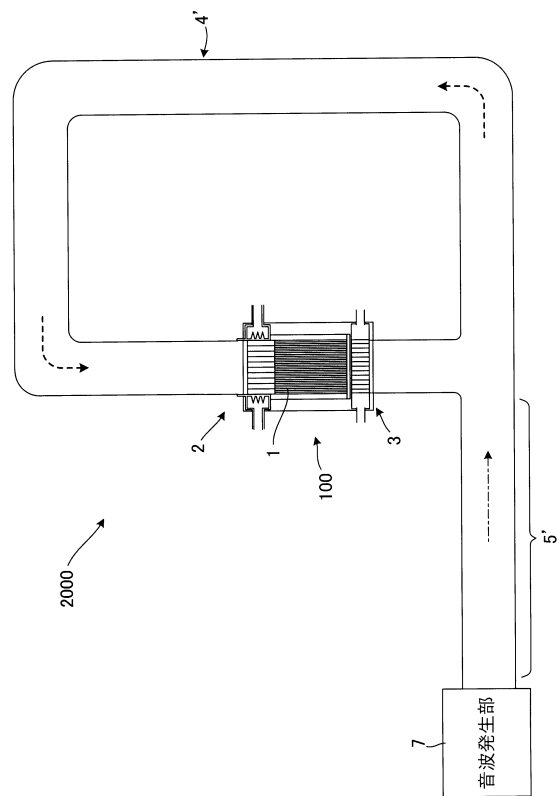
50

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、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】

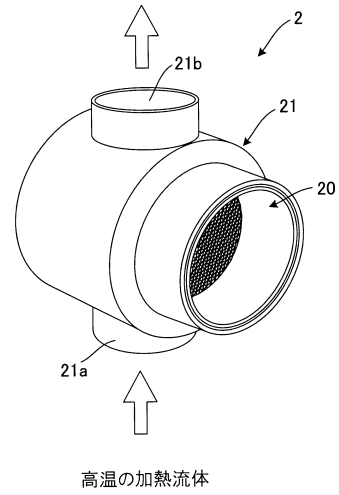


【図2】

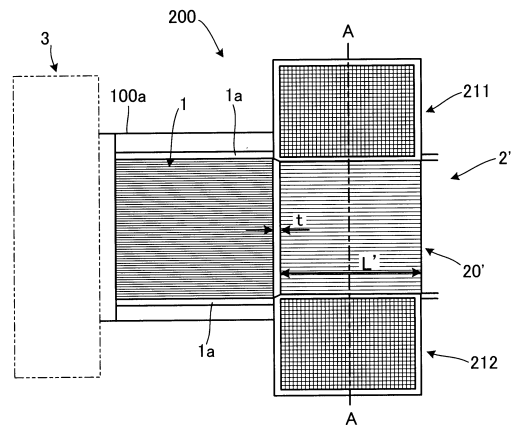




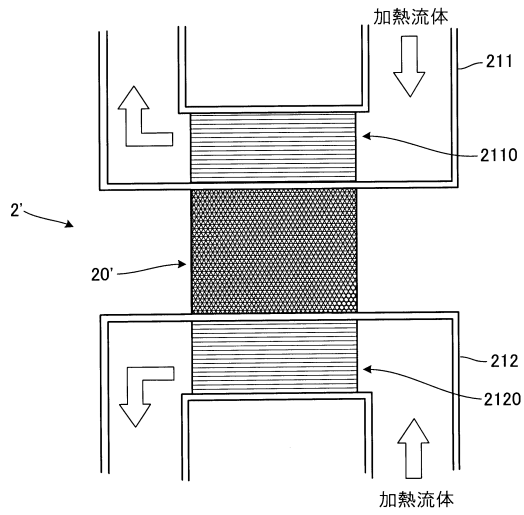
【 図 4 】



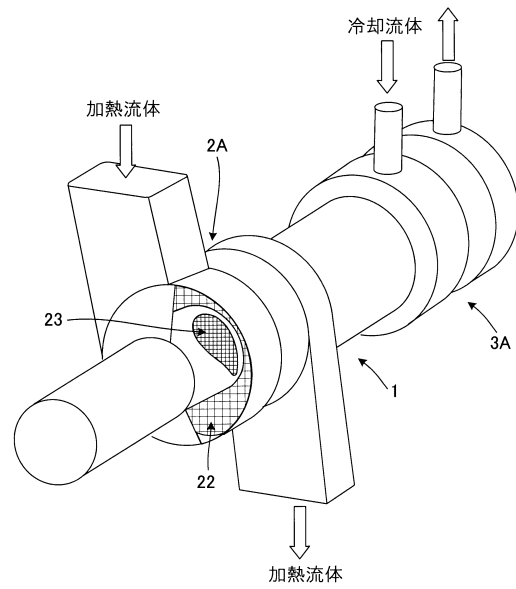
【 図 6 】



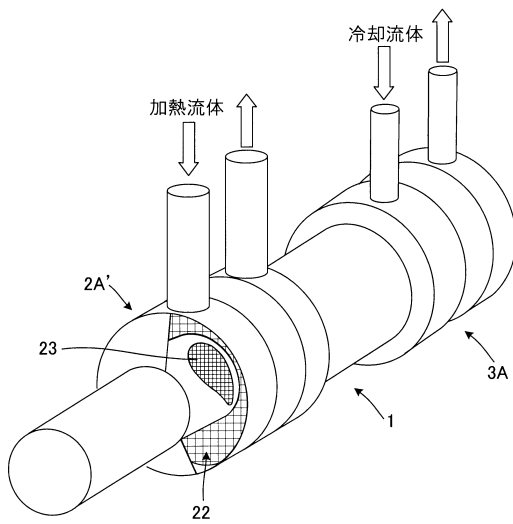
【図 7】



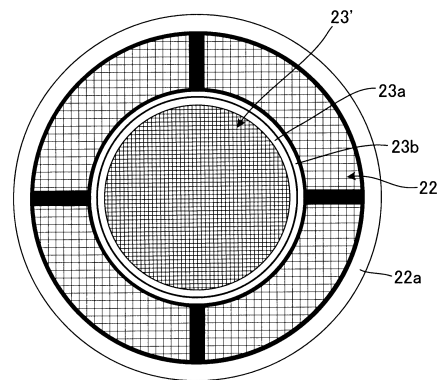
【図 8】



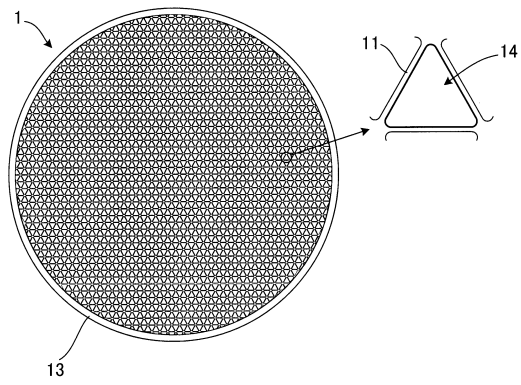
【図 9】



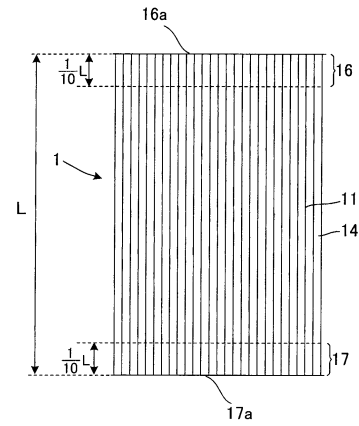
【図 10】



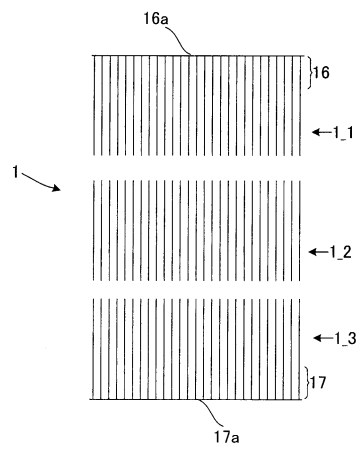
【図 1 1】



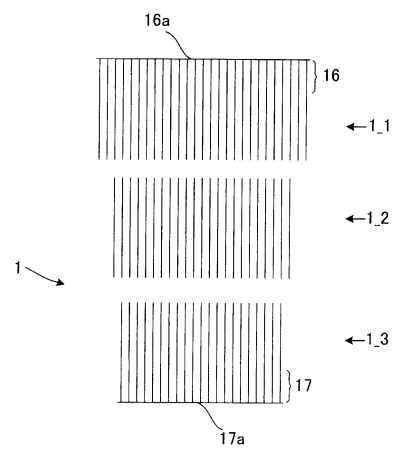
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開 2 0 1 2 - 2 3 7 2 9 5 ( J P , A )  
特開 2 0 1 2 - 4 7 4 4 0 ( J P , A )  
特表 2 0 0 5 - 5 2 2 6 6 4 ( J P , A )  
特開 2 0 1 2 - 1 1 2 6 2 1 ( J P , A )  
特開 2 0 0 5 - 1 8 0 2 9 4 ( J P , A )

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

F 2 5 B	9 / 0 0
F 0 1 N	5 / 0 2
F 0 3 G	7 / 0 0