

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560281

研究課題名(和文) 熱音響システムの効率化のためのハニカムセラミックスの検討

研究課題名(英文) Research of the honeycomb ceramics in the thermoacoustics system

## 研究代表者

小塚 晃透 (Kozuka, Teruyuki)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：60357001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：熱音響システムにおいて、キーデバイスである熱音響変換素子に関する研究を行った。本研究では、従来多くの研究で用いられてきたハニカムセラミックスに代わる新たな熱音響変換素子について検討した。金網の積層体や微細ガラス管を束ねた素子、そして3Dプリンタを用いた樹脂素材による素子を製作し、スピーカからの音波で音響管中に定在波音場を形成し、素子の両端に形成される温度差を評価した。その結果、3Dプリンタを用いて製作した内部でスパイラル状にひねる素子において、ひねることにより表面積が増加して熱交換が効率的に行われ、より高い温度差を得られることを示した。

研究成果の概要(英文)：A thermoacoustic system is a system of heat and acoustic energy conversion. When there is a stack with a lot of narrow tubes in a standing wave field, difference of temperature occurs at the both ends of the tubes. A honeycomb ceramics, stainless mesh and glass tubes were used as the devices of the energy converter from sound to heat. Although thermoacoustic effect was confirmed for all the devices the temperature difference depended on each devices. Therefore stacks are molded using a 3D printer in this study. When the inner shape of the stack has a spiral shape, it is possible to build a longer narrow tubes in the same capacity. In addition, it can increase surface area to contribute to heat exchange. It produced several stack were with various angle of the spiral. Difference of temperature was experimentally measured between the both ends of the stack in the standing-wave type thermoacoustic cooler.

研究分野：超音波・振動・音響

キーワード：熱音響 音響エネルギー 超音波 ハニカムセラミックス

## 1. 研究開始当初の背景

エネルギー資源の枯渇、地球温暖化が問題となり、地球環境保全につながる技術の確立が求められている。また、2011年の大震災における原子炉の事故においては、冷却、すなわち熱エネルギーの扱いが重要課題であった。熱音響システムは、工場廃熱などの高温エネルギーを用いて、相反する冷却システムを構築することができる特異なシステムであり、各所で鋭意研究が行われている。微細管の中で空気が振動すると、管壁との間で熱交換が起こる。これは熱音響現象と呼ばれ、スターリングエンジンにおけるピストンの移動を空気の振動に置き換えたものに相当する。既存のエアコンなどの冷却システムでは、コンプレッサーを用いて冷媒を加圧・減圧することでヒートポンプを行っているが、熱音響システムでは、音波による空気の振動を用いて媒体を加圧・減圧し、微細管の中でマイクロにヒートポンプ現象を実現している。

熱音響現象は古くから知られ、主な成果として1816年:スターリングエンジン、1859年:レイケ管、1954年:スターリング冷凍機、1975年:共鳴管冷凍機などがある。また、1980年代に米国ロスアラモス研究所で発電に利用する研究が行われてきた。日本では、1998年に矢崎らがループ形状の熱音響システムを考案して以来、多くの研究者により盛んに研究が行われている。現在、この冷却システムの実用化に向けた研究が盛んに行われている。実用化には多くの課題があるが、その一つは効率の向上である。

## 2. 研究の目的

本研究では、熱と音(振動)のエネルギーを変換する熱音響システムにおいて、変換効率の高効率化を目的とする。熱音響システムでは、多数の微細孔を持つ熱音響変換素子中でこの熱と音のエネルギー変換が行われている。本研究では、キーデバイスである熱音響変換素子に着目する。現在、熱音響変換素子としては、ハニカムセラミックスが多く用いられているが、素子の形状、材質、音場中における素子の設置位置等によるエネルギー変換効率への影響を調べる。

ハニカムセラミックスは、薄い壁と均一な貫通穴である微細孔を有する点が優れているが、既製品から選択することしかできない。本研究では、ハニカムセラミックスに代わる新たな熱音響変換素子について検討する。本分野で従来より用いられていた金網の積層体や微細ガラス管を束ねた素子、そして3Dプリンタを用いた樹脂素材による素子を作成して、熱音響変換素子として評価する。また、素子の性能を評価する方法を確立することも、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

(1)熱音響変換素子の評価システムの構築  
熱音響システムは、熱を与えて音を発生

させる熱音響エンジンと、音を与えて温度差を発生させる熱音響ヒートポンプの2種類がある。熱音響変換素子の評価には、素子以外の条件を同じにして、熱音響変換素子のみを変えたときの出力を評価する必要がある。

熱音響変換素子の評価のためには、熱音響ヒートポンプにおいて、スピーカから音を用いて定在波音場を形成し、任意の箇所に熱音響変換素子を配置して、素子の両端に発生する温度差を評価値とすることが望ましいと考えられる。スピーカに与える電力を一定にすることで、同一の音場を形成できるからである。

### (2)各種材料による影響

熱音響変換素子の素材、形状等の影響を調べる。ハニカムセラミックスについては、既製品の中から、複数の壁厚、孔径が異なるものについて、直径41mm×50mmの円筒形の素子を製作して、評価を行う。

他の材料については、ステンレス金網を積層させたもの、ガラス管を束ねたものを用意した。ステンレス金網は、針金の線径、針金の間隔等が異なるものが無数にある。いくつかの種類を選定して、直径41mmの円形に切り抜き、数十枚を積層して長さ50mmの円筒形の素子を製作した。ガラスチューブに関しては、長さ50mmのキャピラリーチューブを数百本束ねて、他の素子と同様の円筒形を形作り、熱音響変換素子とした。

### (3)微細孔形状の影響

微細孔形状の影響を調べるために、3Dプリンタを用いて熱音響変換素子の造形を試みた。直径41mm×長さ50mmの円筒形の中に、ハニカム形状、スリット形状、スリット形状+スパイラル形状などの素子を製作し、上記の評価システム中に配置して、評価を行った。なお、3Dプリンタの造形には、主としてFDM方式によるPLA樹脂で造形を試みたが、外部の公設試験研究機関の協力を得て、ナイロン粒子を素材として、レーザーで焼結する方式の3Dプリンタでも製作して、評価した。

## 4. 研究成果

### (1)定在波音場を用いた素子の評価方法

熱音響変換素子を評価するためのシステムを構築した。基本的な実験装置は、内径42mmのステンレスの直線管で、一端にスピーカを設置して、他端を反射板で塞いだ閉管である。長さ1500mmの管中に、スピーカに226Hz、10Wの電気入力を与えて音波を放射し、管内の50mm間隔の位置について圧力センサを移動させて圧力を測定した。管の中央と両端が極大となる圧力分布となり、定在波音場が形成されていることが確認された。

次に、この音場中に熱音響変換素子を挿入して、その両端の温度差を熱電対で測定することを試みた。音場中の位置により、得られ

る温度差は変化するので、最大の温度差が得られるスピーカから 800mm 付近の位置に熱音響変換素子を配置して両端の温度を測定して評価する。

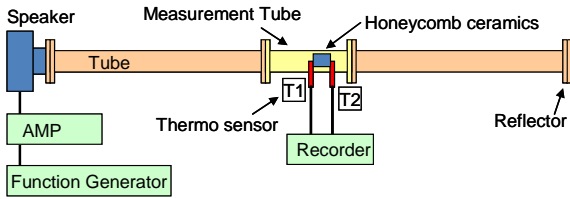


図 1. 熱音響変換素子評価装置

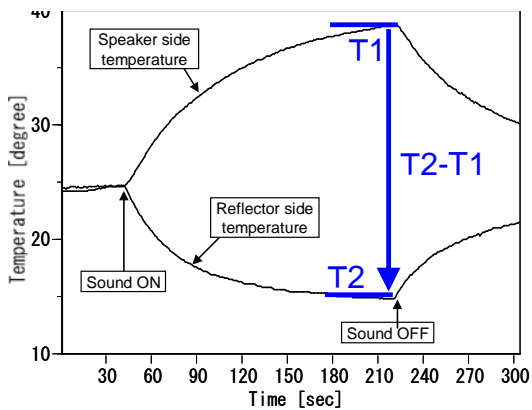


図 2. 熱音響変換素子の両端温度の時間変化の一例

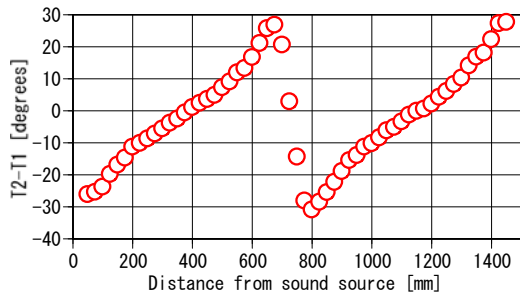


図 3. 素子の位置による温度差の変化

## (2) 材料による影響

ハニカムセラミックス、金属メッシュの積層体、ガラスチューブの束による熱音響変換素子を、音響管の中に形成した定在波音場中に配置して、素子の両端の温度差を測定する実験を行った。

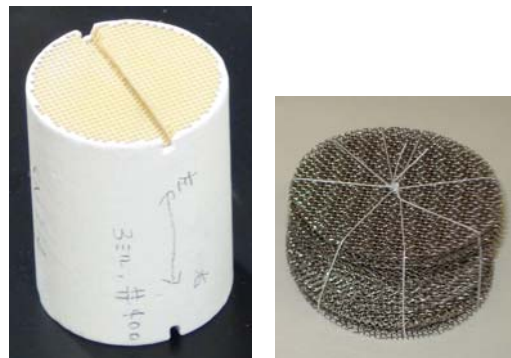
ハニカムセラミックスは、材質はすべてコージライトで、壁厚、孔径が異なる 6 種類を用意した。孔径の小さいものにおいて、最大 30°C 程度の温度差を数分で得られることを確認した。穴径が小さい者は壁の表面積が大きいので、熱交換が効率的に行われたと考えられる。

ステンレス金網を積層させたものは、8 種類(針金の径、目の間隔が異なる)を用意した。

直径  $\phi 41\text{mm}$  の金網を、厚さが 25mm になるまで数十枚を積み重ねて糸で括り、この状態のものを 2 個重ねて 50mm の熱音響変換素子として用いた。当初は金網の目を合わせて貫通する直線孔を確保することを試みたが、金網は剛性がなく、数十枚の金網の目を合わせることは困難であった。

ガラス管を束ねたものは、1 種類用意した。ガラス管は、外径  $\phi 1.3\text{mm}$ 、内径  $\phi 0.8\text{mm}$  のパイレックスガラス管 860 本を束ねて用いた。なお、音響管への設置時には、両端を金網で固定した。

いずれの材料においても温度差の発生が確認されたが、材料により違いが現れた。最も高い温度差を得たものは、ハニカムセラミックスの微細孔のものであった。ハニカムセラミックスは開口率が大きく、均一な微細孔が確保されていることが優位に作用したと考えられる。また金属メッシュも 20°C 程度の温度差を得た。金属は熱伝導率が高いため、内部での熱のショートが懸念されていたが、金網を積層している構造のため、接触部分は点接触であり、見かけの熱の伝導率が低くなると考えられる。ガラス管もそれなりに温度差が確認された。多々、ガラス管はチューブ単体で構造物としての強度を持つために厚く、開口率が小さいことが高い温度差が得られない原因と考えられる。



(a) ハニカムセラミックス (b) 金属メッシュの積層体



(c) ガラスチューブ

図 4. 各種材料による熱音響変換素子

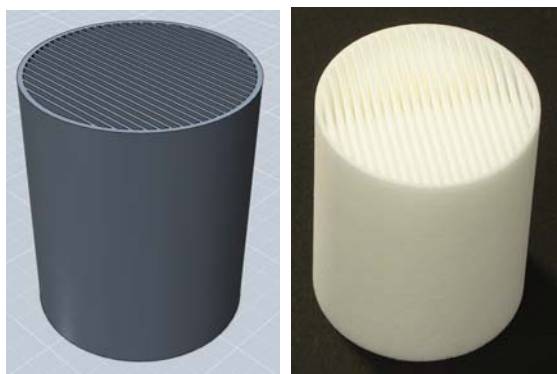
## (3) 孔の形状による影響

金属メッシュの積層体は、材料となる金属メッシュに様々な針金の線径、針金の間隔のものがあるため、様々な形状の素子を造形

できる可能性がある。しかし、それを制御することが難しく、たとえば貫通孔を作ることは困難であった。また、ハニカムセラミックスは薄い壁と均一な貫通孔ができることが長所であるが、金型を用いて作るため、壁の間隔を変えるなどの新たな形状を作り出すためには新たな金型を用意する必要があり容易ではない。また、一様な物しか作れないため、内部に細工を施すことはできない。そこで、3Dプリンタを用いて熱音響変換素子を造形することを試みた。

3Dプリンタを用いれば、自由な形状の熱音響変換素子をコンピュータのCADで設計して製作することができる。当初はハニカムセラミックスに相当する格子形状の製作を試みたが、構造体として造形するためには壁厚が0.5mm程度は必要であるため、スリット形状で製作した。外径は、他の素子と同じく直径41mm×長さ50mmの円筒形であり、内部にスリット構造を有するものである。壁厚0.5mm、壁の間隔1.0mm、開口率66%のそしで18℃の温度差を得た。さらに、内部でスパイラル状にひねる素子を製作した。ひねり角度の異なる3種類の素子を製作して、両端に発生する温度差を評価したところ、ひねり角度が大きい方が、より高い温度差を得られることが実験により確認された。ひねることにより表面積が増加し、熱交換が効率的に行われたためと考えられる。

3Dプリンタによる造形では、微細な造形が困難であり、材料の耐熱性が低いなどの問題がある。しかし、熱音響システムは高効率化のために大型化することが予想され、その際には細かい造形は必要ではないと考えられる。また、3Dプリンタは多様な材料を用いるものが開発されている。石膏を材料とするものも実用化されており、このような耐熱性を持つ材料を用いれば、熱音響エンジンにも使用することも可能と考えられる。



(a) 3Dデータ (b) 造形物

図5. 3Dプリンタによる造形

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① 小塚晃透、安井久一、安岡正喜、加藤一実、坂本眞一、3Dプリンタを用いた内部にスパイラル形状を有する熱音響変換素子の検討、電子情報通信学会技術研究報告、査読なし、115-、2015年、pp.39-42、DOI:なし
- ② 小塚晃透、安井久一、安岡正喜、加藤一実、坂本眞一、Study of a stack made by a 3D printer in the thermoacoustic system、Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics、査読有り、Vol.35、2014年、pp.123-124、DOI:なし
- ③ 小塚晃透、安井久一、安岡正喜、坂本眞一、熱音響変換システムにおける変換素子の微細孔の形状の影響、電子情報通信学会技術研究報告、査読なし、114-16、2014年、pp.37-40、DOI:なし
- ④ 安井久一、小塚晃透、安岡正喜、加藤一実、Numerical simulation of a thermoacoustic prime mover at 20 kHz、Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics、査読なし、Vol.34、2013年、pp.459-460、DOI:なし
- ⑤ 安井久一、小塚晃透、安岡正喜、加藤一実、熱音響におけるエネルギー効率の式について、電子情報通信学会技術研究報告、査読なし、113-238、2013年、pp.11-16、DOI:なし
- ⑥ 小塚晃透、坂本眞一、安井久一、熱音響変換システムにおける変換素子の材質および形状の影響、電子情報通信学会技術研究報告、査読なし、113-13、2012年、pp.17-20、DOI:なし
- ⑦ 小塚晃透、坂本眞一、安井久一、Effect of the interference of sounds by two sound sources in the thermoacoustic system、Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics、査読なし、Vol.33、2012年、pp.283-284、DOI:なし

[学会発表] (計16件)

- ① 小塚晃透、安井久一、安岡正喜、加藤一実、坂本眞一、3Dプリンタを用いた内部にスパイラル形状を有する熱音響変換素子の検討、超音波研究会、2015年04月20日、電気通信大学(東京都・調布市)
- ② 小塚晃透、安井久一、安岡正喜、加藤一実、坂本眞一、熱音響システムにおける3Dプリンタで造形した微細孔形状の影響、日本音響学会2015年春季研究発表会、2015年03月18日、中央大学(東京都・文京区)

- ③小塚晃透、安井久一、安岡正喜、加藤一実、坂本眞一、Study of a stack made by a 3D printer in the thermoacoustic system、第 35 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (USE2014)、2014 年 12 月 03 日、日本大学 (東京都・千代田区)
- ④小塚晃透、安井久一、安岡正喜、加藤一実、坂本眞一、3Dプリンタで造形した熱音響変換素子の微細孔形状と冷却性能、日本音響学会 2014 年秋季研究発表会、2014 年 09 月 04 日、北海学園大学 (北海道・札幌市)
- ⑤小塚晃透、3Dプリンタを用いた熱音響変換素子製作の試み、2014 年度非線形音響研究会、2014 年 07 月 27 日、加藤山崎教育基金軽井沢研修所 (長野県・軽井沢町)
- ⑥小塚晃透、安井久一、安岡正喜、坂本眞一、Effect of the narrow tubes in a stack molded using 3D printer in a thermoacoustic system、Second International Workshop on Thermoacoustics、2014 年 05 月 24 日、東北大学 (宮城県・仙台市)
- ⑦小塚晃透、安井久一、安岡正喜、坂本眞一、熱音響変換システムにおける変換素子の微細孔の形状の影響、超音波研究会、2014 年 04 月 22 日、電気通信大学 (東京都・調布市)
- ⑧安井久一、小塚晃透、安岡正喜、加藤一実、Numerical simulation of a thermoacoustic prime mover at 20 kHz、第 34 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (USE2013)、2013 年 11 月 22 日、同志社大学 (京都府・京都市)
- ⑨安井久一、小塚晃透、安岡正喜、加藤一実、熱音響におけるエネルギー効率の式について、超音波研究会、2013 年 10 月 09 日、産業技術総合研究所 (愛知県・名古屋)
- ⑩小塚晃透、坂本眞一、安井久一、熱音響システムにおける変換素子に金属メッシュを用いる場合の影響、日本音響学会 2013 年秋季研究発表会、2013 年 09 月 26 日、豊橋技術科学大学 (愛知県・豊橋市)
- ⑪小塚晃透、熱音響システムにおける金属メッシュを用いた音から熱への変換、2013 年度非線形音響研究会、2013 年 07 月 14 日、加藤科学振興会軽井沢研修所 (長野県・軽井沢町)
- ⑫小塚晃透、坂本眞一、安井久一、熱音響変換システムにおける変換素子の材質および形状の影響、超音波研究会、2013 年 04 月 23 日、電気通信大学 (東京都調布市)

- ⑬安井久一、小塚晃透、安岡正喜、加藤一実、kHz 帯における熱音響の数値計算、平成 24 年度第 3 回応用熱音響研究会、2013 年 03 月 16 日、東北大学 東京分室 (東京都千代田区)
- ⑭小塚晃透、坂本眞一、安井久一、Effect of the interference of sounds by two sound sources in the thermoacoustic system、USE2012 (The 33rd Symposium on UltraSonic Electronics)、2012 年 11 月 13 日、千葉大学 (千葉県・稲毛区)
- ⑮小塚晃透、坂本眞一、安井久一、直線管の両端に音源を配置した音響から熱への変換、日本音響学会 2012 年秋季研究発表会、2012 年 09 月 20 日、信州大学 (長野県・長野市)
- ⑯小塚晃透、坂本眞一、安井久一、2 音源を用いた直線管における音響から熱への変換、2012 年度非線形音響研究会、2012 年 07 月 15 日、加藤科学振興会軽井沢研修所 (長野県・軽井沢町)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小塚 晃透 (KOZUKA TERUYUKI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員  
研究者番号：60357001

### (2) 研究分担者

- ①安井 久一 (YASUI KYUICHI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員  
研究者番号：30277842
- ②坂本 眞一 (SAKAMOTO SHIN-ICHI)  
滋賀県立大学・工学部・准教授  
研究者番号：40449509