

# 新規機構を有する熱音響デバイスに関する研究

平野 繁樹, 戸羽 篤也, 鈴木 逸人, 保科 秀夫

## Research on Thermoacoustic Device with Advanced Structure

Shigeki HIRANO, Atsuya TOBA, Hayato SUZUKI, Hideo HOSHINA

### 抄 録

音響の共鳴を利用したエネルギーと熱とのエネルギー変換を行う熱音響現象に関する基礎的な研究を行った。直径50mmの片側開放端のステンレス直管に周波数制御を行うことが可能な音波発生器と増幅器及びスピーカを設置し70dB程度の音波を発生させ、管長の約1/4の位置にスタックを設置した。スタックは多孔体構造を有し、音響のエネルギーを温度差に変換する熱デバイスである。温度差を発生させるスタックは3D-CADにより設計し、レーザ光を用いた金属粉末積層造形3Dプリンタを用いて、多孔質構造体を試作開発した。音波源及び共鳴管により構成される熱音響デバイスにより温度差の発生を確認し、周波数依存性及び音波発生強度による発生温度差の影響について実験的に検討を行い、熱音響デバイスの基礎的な熱特性を明らかにした。

キーワード：熱音響, エネルギー変換, スタック, 3D-CAD, 3Dプリンタ

### 1. はじめに

音響の共鳴を利用したエネルギーと熱とのエネルギー変換を行う物理現象である熱音響現象 (Thermoacoustics) を利用した熱音響デバイスについて報告する。熱音響現象は、スタックと呼ばれる多孔質構造を有する部材に温度差が生じると共鳴により音響を発生するソンドハウス (Sondhaus) 管やレイケ (Rijke) 管としても知られており、日本でも古来より米を炊く釜の共鳴音により吉凶を占う鳴釜神事として、岡山県の吉備津の釜などが知られている。

この現象は微細構造部に温度差を発生させて音響を発生させるだけでなく、逆に共鳴管に音響を与えることにより、スタックに温度差を発生させることも可能な、音響と熱のエネルギー変換現象である。これらの現象を総じて熱音響現象と呼んでいる (図1)。この物理現象を利用した熱音響デバイスは装置構造が単純で可動部が無くメンテナンスがしやすいことなどから、1950年代から極低温や航空宇宙関連部品として特殊な環境下で使用されてきた<sup>1-3)</sup>。近年は常温域における研究が進み、騒音や排熱を利用し、音響から熱を利用する機器についての研究が進められている<sup>4-7)</sup>。本研究では、直管を用いた基本的な熱音響現象を検証するとともに、3D-CADにより設計し、レーザ焼結による金属粉末積層造形装置 (金属3Dプリンタ) を用いて、これまでにない新しい構

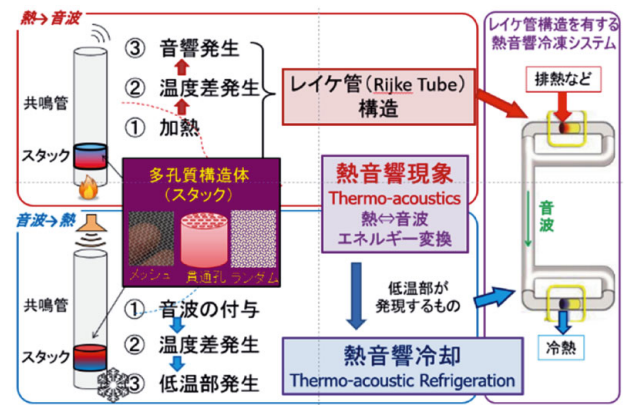


図1 熱音響現象の模式図

造を有する熱と音響のエネルギー変換を行う部品 (スタック) の作製を行った。

### 2. 試験方法

#### 2.1 熱音響デバイス

本研究では熱音響現象のうち、管に音波を作用させて多孔体構造であるスタックに温度差を発生させる実験を行った。直径50mmのステンレス直管を共鳴管とし、片方を開放端とし、もう片方にスピーカを設置し音の強さと周波数を制御した。共鳴管は全長約1.4mのもの (以下Short Tube) と全長約2.1mのもの (以下Long Tube) の2種類を用意し、それぞれの全長の約1/4の位置に多孔質体であるスタックを設

事業名：経常研究

課題名：熱音響デバイスによるエネルギー回収技術に関する研究

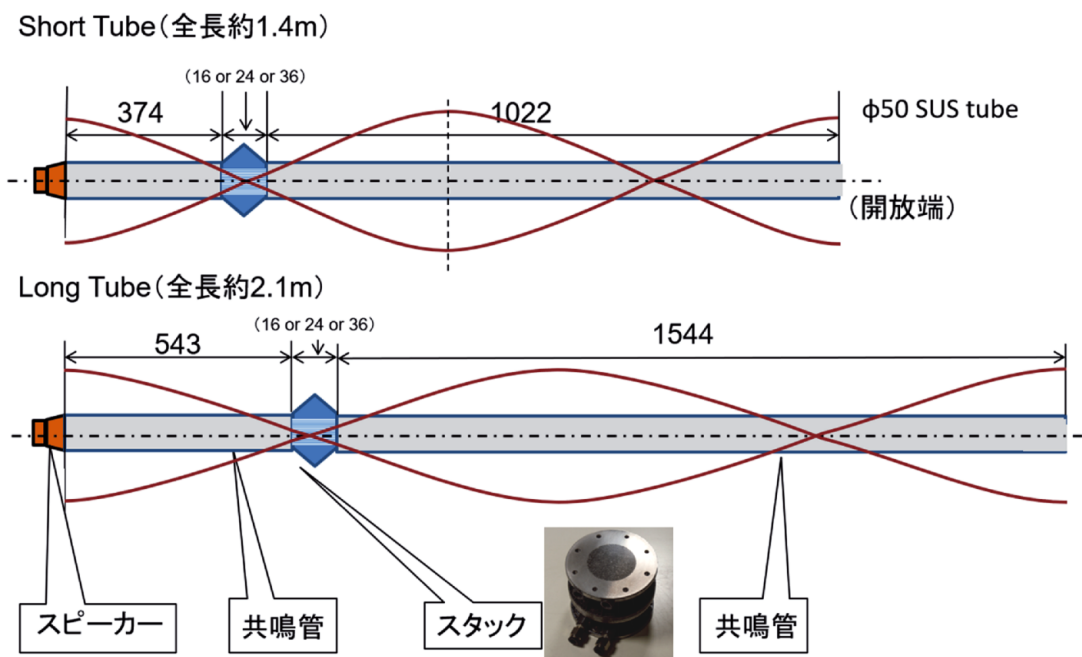


図2 熱音響デバイスのレイアウト

置した(図2)。熱音響デバイスは共鳴させることにより大きな熱音響効果が得られることが知られており、開放端を有する直管構造の場合、端部より1/4において大きな効果が得られる<sup>8)</sup>ことから各管のその位置にスタックを設置した。また、共鳴周波数は式(1)により計算されるが、共鳴周波数が可聴域となるよう各管の長さを選択した。

$$V=f \cdot \lambda \tag{1}$$

ここで、

V：音速 m/s, f：周波数 Hz, λ：波長 m

であり、半波長整数倍が管長となるよう、かつ共鳴部の谷の部分にスタックが設置されるよう各管の長さ、スタックの位置を設定した。

## 2.2 スタック

従来熱音響デバイスに使用されてきた多孔質構造であるスタックは、図1に示すようにメッシュ状の金網やセラミックス、スチールウールや針金を束ねた様なランダム形状のものが多く見られた。このような場合、微細構造形状が一定では無いことや、材質が非金属であること、金属の場合でも密な構造ではないことなどからスタック構造の熱伝導率が小さく、熱交換に不利であった。また、発生した冷熱や温熱を外部へ取り出すために、別体の熱交換器が必要となり、装置が複雑化大型化する上、別体構造であることによる接触抵抗等により、さらに熱移動に不利な状況となっていた。

そこで、本研究では3D-CADにより設計し、レーザー焼結による金属粉末積層造形装置(金属3Dプリンタ)を用いて、多孔質構造と熱交換構造が一体化したスタックを作製した。

スタック高さは16, 24, 36mmの3種類とした。作製したスタックは図3に示すように中央部に直径0.92mmの貫通孔が多数開けられており、その開口率は0.411であった。なお本構造を有するスタックは、特許出願を行った。

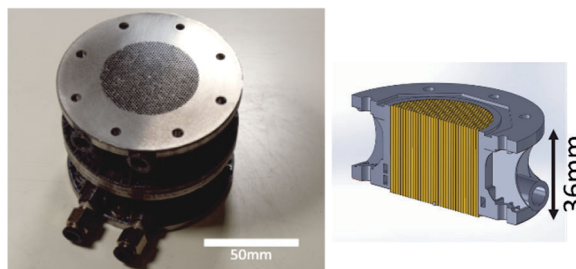


図3 スタックの外観(左)とCADによる断面図(右)

## 2.3 熱音響実験

図2で示す長さの異なる直管タイプの熱音響デバイス2種にそれぞれ音波を付与し、スタック両端に発生する温度差を測定した。周波数は約100~600Hzの範囲で調整し、騒音レベルは騒音計により開放端にて測定し、管長や共鳴の違いにより79.8-103.9dBの範囲となった。図4にスタック両端に生じる温度差の時間推移を示す。この図より、熱音響デバイスのスタック両端には、音波付与とともに徐々に温度差が発生し、約100秒後にほぼ一定の温度差となり安定することがわかった。各付与音波の周波数において、この安定した温度差を測定し、付与音波の周波数による発生温度差を測定した。

### 3. 実験結果

印加電圧による発生温度差の違いを図5に示す。また管長の違いによる発生温度差に及ぼす音波周波数の影響を図6, 7に示す。図5よりスピーカへの印加電圧が大きいほどスタック両端に生ずる最大温度差が大きくなることも確認され、周波数により発生温度差が大きく変化することがわかった。

また、図6及び7より、管長と最大温度差を生じる周波数が異なり、Short Tube (1.4m) では約200Hzで温度差が2.9K, Long Tube (2.1m) では約150Hzで温度差が3.1K発生したことが確認された。また、周波数によってはスタックに発生する温度差が変化し、高温部と低温部の逆転現象も見られるなど、周波数によりその温度発生特性が大きく影響されることが確認された。また、スタック厚さは36mmのもので最大の温度差が見られた。

### 4. おわりに

音と熱とのエネルギー変換を行う熱音響デバイスを作製しその基礎的な特性について実験的に検討を行った。本研究では音から温度差へのエネルギー変換を行いその温度特性を明らかにした。また3Dプリンタを用いて新たな構造を有する多孔質体であるスタックを作製し特許を出願した。

### 参考文献

- 1) J. Wheatley, et al. : Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines, American J. Phys. 53, 147-162 (1985)
- 2) W. H. Keesom, : Helium (Elsevier), 174 (1942)
- 3) W. E. Gifford, : Pulse-tube refrigeration, Syracuse Univ. Research Institute Technical Report No. 1, 2 (1963)
- 4) E. I. Mikulin, et al. : Low temperature expansion pulse tubes, Advances in Cryogenic Engineering 29, 629 (1984)
- 5) G. W. Swift, : Analysis and performance of a large thermoacoustic engine, J. Acoustical Society of America 92, 1551-1563 (1992).
- 6) T. Yazaki, et al., : Traveling Wave Thermoacoustic Engine in a Looped Tube, Phys. Rev. Lett. 81, 3128 (1998).
- 7) S. Backhaus and G. W. Swift, : A thermoacoustic Stirling heat engine, Nature (London) 399, 335-338 (1999).
- 8) 富永 昭, : 熱音響工学の基礎, 内田老鶴圃, (1998)

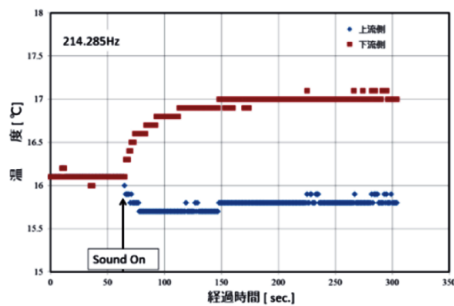


図4 スタック両端に生じる温度差の時間推移

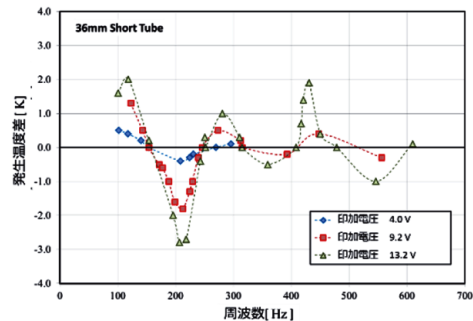


図5 印加電圧による発生温度差の違い

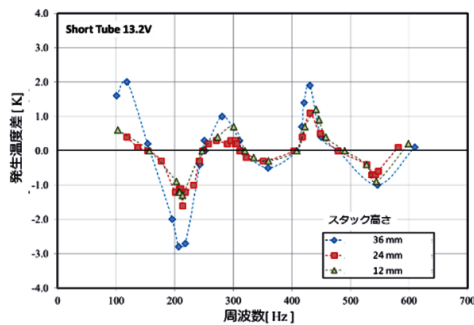


図6 発生温度差におよぼす音波の周波数の影響 (Short Tube (管長 1.4m) の場合)

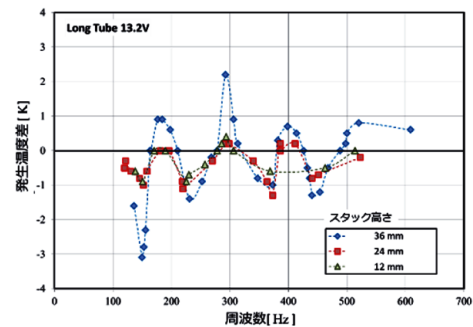


図7 発生温度差におよぼす音波の周波数の影響 (Long Tube (管長 2.1m) の場合)