

平成21年5月21日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19710072  
 研究課題名 (和文)  
 : 低温度差で熱音響現象を発生させる方法の基礎検討－低温廃熱の有効利用に向けて－  
 研究課題名 (英文)  
 : Basic investigation of thermoacoustic self-sustained sound generation by low temperature gradient  
 - For efficient use of low temperature waste heat energy -  
 研究代表者：滋賀県立大学 工学部 電子システム工学科 准教授 坂本眞一  
 研究者番号：40449509

## 研究成果の概要：

低温度廃熱の有効利用を目指して、低温度で熱音響現象を発生、維持するための基礎研究を行った。粒子速度分布を調整するためにフェイズアジャスターを提案した。システム内に発生する音波の音圧と粒子速度の位相を調整し、低温度での発振に成功した。②音圧分布を調整するためにトリガーチューブ、③変位を調整するためにメンブレンを提案。3つの提案ともに効果を確認した。フェイズアジャスターを設置した条件においては300℃程度での発振に成功した。今後は更なる低温度差による発振条件を詳細に検討する必要があると考える。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	0	2,500,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	240,000	3,540,000

研究分野： 複合新領域

科研費の分科・細目： 環境学・ 環境技術・ 環境材料

キーワード： 熱音響現象, 低温廃熱, フェイズアジャスター, インテンシティ, 位相

### 1. 研究開始当初の背景

低い温度の排熱 (300℃以下) は再利用の方法が限られ, 大半が廃熱となる. この廃熱を再利用しエネルギー源として有効活用できるようにすれば, 地球全体の喫緊の課題である「環境保全・温暖化防止および資源の有効利用」に大きく貢献する. 申請者等のグループは, 熱音響現象を応用し実用化を前提とした熱音響冷却システムの研究を進めている. これまでに, 図1に示す熱音響冷却システムを製作することによって, 室温から氷点下 20℃ (一般的な冷凍庫温度) まで約 40℃の冷却に成功している. ただ, このシステムでは, 駆動するにあたってプライムムーバのスタック上下に 600℃以上の大きな温度差を形成する必要がある.

### 2. 研究の目的

熱エネルギーと音エネルギーの相互変換現象である熱音響現象を応用すると, 廃熱をエネルギー源とした冷却システムやエンジンを構築することが可能となる.

将来的に, ほとんど活用されていない低温廃熱を有効利用することを目的とし, 本研究では, 熱音響現象を低温度差で発生させる方法の基礎検討を行う. 温度差が熱音響現象の発生に与える影響を検証し, 低温度差での熱音響現象発生の可能性を検討する.

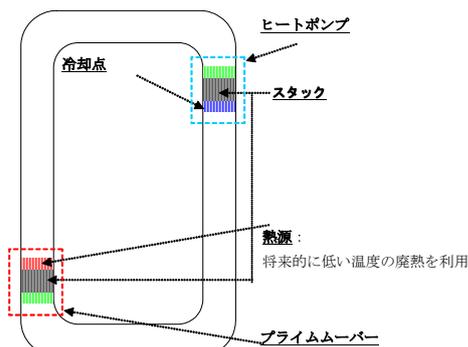


図1: 熱音響冷却システム

### 3. 研究の方法

本研究では「フェイズアジャスター」, 「トリガーチューブ」, 「メンブレン」の導入を提案する.

①フェイズアジャスター, ②トリガーチューブ, ③メンブレンの有効性を確認し, 低温度

差での熱音響現象の発生を目指す. 基礎特性については図1に示した熱音響システムを用いて, エネルギー変換効率, 音場, 音圧分布, 粒子速度分布, 位相差, インテンシティ分布, スタック上下の温度などを測定した.

①フェイズアジャスターは粒子速度分布を調整するために提案されたもので, その効果, 形状や設置位置の影響について基礎特性を測定した. ②トリガーチューブは音圧分布を調整するために提案されたもので, その効果の形状や設置位置の影響について基礎特性を測定した.

③メンブレンは変位を調整するために提案されたもので, その効果の形状や設置位置の影響について基礎特性を測定した.

### 4. 研究成果

フェイズアジャスター (PA: Phase Adjuster) の導入を提案し, 低温度において熱音響現象の発生を試み, 成功した. PA とは, システム内の一部分に粒子速度を速くするという強い境界条件を創り出すためのデバイスである. これにより, 音圧と粒子速度の位相を調整することが可能となる. 熱音響システム内の時間的, 空間的温度変化を測定し, その影響について検討した.

ループ管方式熱音響冷却システムの冷却部であるヒートポンプを取り除き, 熱から音へのエネルギー変換部であるプライムムーバーに注目して実験を行った. 熱音響プライムムーバーとして用いたループ管の概略図, 測定系を Fig. 2 に示す.

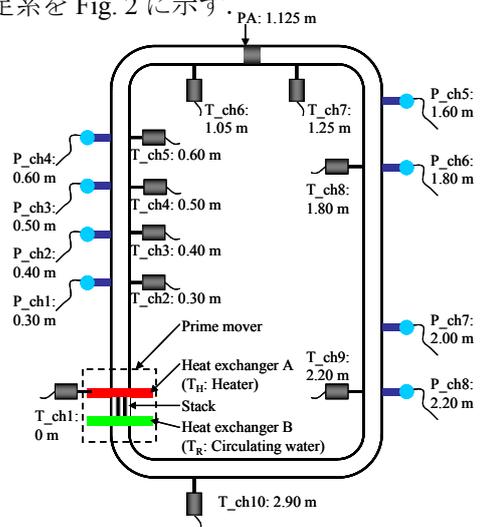


Fig. 2 Block diagram of measurement system.

ループ管全長は 3300 mm とし、作業流体には 1 気圧のアルゴンを用いた。スタックには流路半径 0.45 mm、長さ 50 mm のハニカムセラミックスを用いた。スタック上方に設置したエレクトリックヒーターより 100 W の熱エネルギーの供給を行った。システム内の時間的、空間的な温度変化の測定には K 型熱電対を T\_ch1 から T\_ch10 まで 10 個用いた。熱電対はプライムムーバー上端から、0.30 m、0.40 m、0.50 m、0.60 m、1.05 m、1.25 m、1.80 m、2.20 m と 2.90 m の位置に設置した。システム内に発生する音波の測定には PCB 社圧力センサを P\_ch1 から P\_ch8 まで 8 個用いた。圧力センサはプライムムーバー上端から、0 m、0.30 m、0.40 m、0.50 m、0.60 m、1.60 m、1.80 m、2.00 m と 2.20 m の位置に設置した。2 センサパワー法によって、上記センサの測定値より、インテンシティ、音圧、粒子速度、ならびに音圧と粒子速度の位相差を算出した。熱エネルギー供給開始と同時に音圧と温度の測定を開始し、測定時間は 600 秒とした。PA をシステム内に設置した場合と設置しない場合において測定を行った。

PA の形状を Fig. 3 に示す。PA は円管形で、その外径とループ管の内径を一致させ、ループ管内にはめ込む。PA の形状については内径を 26.5 mm とし、長さは 45 mm とした。PA の設置位置は、粒子速度が最も速くなる位置近傍とし、プライムムーバー上端から、時計回りに 1.125 m の位置に PA の左端を設置した。

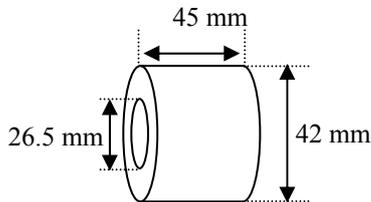


Fig. 3 Schematic illustration of phase adjuster.

システム内の温度時間変化を Fig. 4 に示す。Fig. 4 の ch1 より、PA を設置することによって、プライムムーバー上端の温度が低下していることがわかる。これは PA の設置によって、熱から音へのエネルギー変換効率が向上したことが原因と考えられる。また、プライムムーバー上方の温度時間変化が PA の設置によって変化していることがわかる。PA の設置による、音響流の抑制やプライムムーバー上端の温度低下による上昇気流の減少が原因と考えられる。一方、ヒーターから遠方の部分においては PA の設置有無によらず、温度時間変化は確認されない。熱音響システム内の時間的、空間的溫度変化を測定し、その影響について検討した。PA を設置することによってプライムムーバー上端の温度を低下させることに成功した。また、PA を設置するこ

とにより、システム内に発生する音響流の抑制を示唆する結果が得られた。フェイズアジャスターを熱音響システム内に設置することによって定常状態のプライムムーバー上端の温度を、これまでの 600°C 以上から、300°C 程度まで低下させることに成功した。

ループ管にトリガーチューブを設置することにより管内音場の制御が可能になる。トリガーチューブを設置した場合は、設置部分において流路が拡大するため、流路内での粒子速度は遅くなるという境界条件が付加される。この条件により、トリガーチューブ内において粒子速度の節、音圧の腹が励起されるように制御可能となる。トリガーチューブを用いてプライムムーバー側スタック内の位相差を調節することで、定常状態に達した時のスタック上部温度は低温度に抑制できると考えられる。Fig. 5 に示すような実験系において、測定を行った。トリガーチューブを設置しなかった場合とトリガーチューブを設置した場合のスタック上部の温度変化を Fig. 6 に示す。図よりトリガーチューブを設置した場合は、定常状態に到達する温度が抑制された。これは、トリガーチューブを設置したことでエネルギー変換効率が向上したためと考えられる。エネルギー変換効率が向上した理由は、トリガーチューブを設置することで管内音場が調整され、スタック内の位相差が適切な位相差に近づいたことが要因であると考えられる。フェイズアジャスターと同様に、トリガーチューブを熱音響システム内に設置することによって定常状態のプライムムーバー上端の温度を、これまでの 600°C 以上から、350°C 程度まで低下させることに成功した。メンブレンにおいてもある条件においては設置をしない場合と比較して、低温度の発振に成功した。しかしながら、上記の 2 つと比較して、大きな効果は今回の条件では発見することができなかった。

フェイズアジャスターやトリガーチューブ、メンブレンをシステム内に設置することによって、稼働部品の導入や新たなエネルギーを必要とせず熱音響現象を発生、維持させる温度の低下に成功した。これらの研究結果は低温の廃熱の有効利用に応用可能と考えられる。

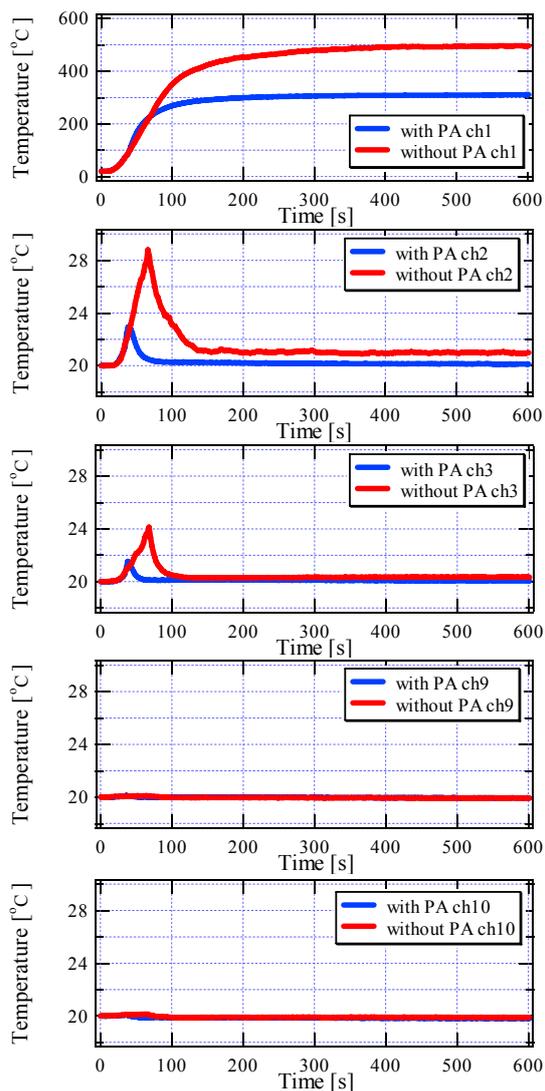


Fig. 4 Temperature variation in the loop-tube with and without PA.

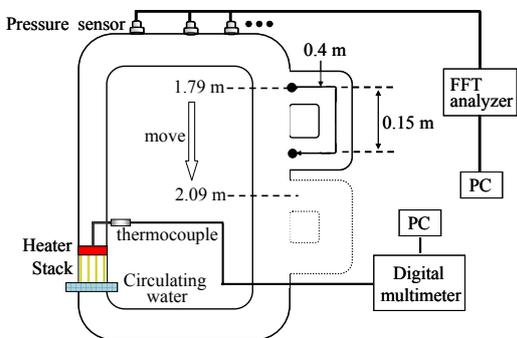


Fig. 5 Diagram of measurement system.

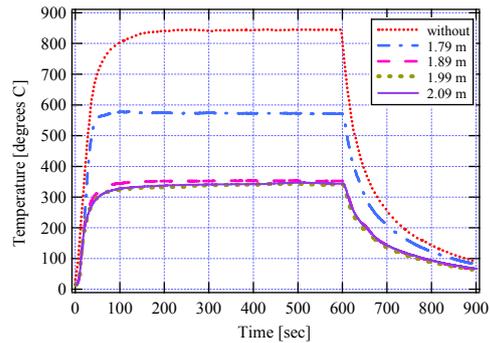


Fig. 6 Relationship between time and temperature of top of stack : with and without trigger tube.

### 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 8 件)

- ① S. Sakamoto, Y. Imamura and Y. Watanabe, "Improvement of Cooling Effect of Loop-Tube-Type Thermoacoustic Cooling System Applying Phase Adjuster," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 7B, pp. 4951-4955, 2007. (査読あり)
- ② Y. Imamura, S. Sakamoto and Y. Watanabe, "Modulation of Sound Field in Looped Tube Thermoacoustic Cooling System with Membrane," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 7A, pp. 4417-4420, 2007. (査読あり)
- ③ H. Yoshida, S. Sakamoto and Y. Watanabe, "Study on Thermoacoustic Cooling System Using a Resonance Tube to Induce One-wavelength Mode Resonance," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 7A, pp. 4413-4416, 2007. (査読あり)
- ④ S. Sakamoto, and Y. Watanabe, "Reduction in Temperature Difference of Prime Mover Stack in Loop-Tube-Type Thermoacoustic Cooling System by Applying Phase Adjuster," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 5, pp. 3776-3780, 2008. (査読あり)
- ⑤ S. Sakamoto, M. Nishikawa, T. Ishino, Y. Watanabe, and J. Senda, "Effect of Inner Diameter Change of Phase Adjuster on Heat-to-Sound Energy Conversion Efficiency in Loop-Tube-Type Thermoacoustic Prime Mover," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 5, pp. 4223-4225, 2008. (査読あり)
- ⑥ Y. Tsuji, S. Sakamoto, T. Ishino, Y. Watanabe, and J. Senda, "How to Design a Thermoacoustic

System Considering the Relaxation Time  $\tau$ : Introduction of Parameter  $\omega\tau$  to Determine the Position of Stack,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 5, pp. 4231-4234, 2008. (査読あり)

⑦ N. Miya, S. Sakamoto, and Y. Watanabe, “Effect of Copper Mesh at Interface between Stack and Heat Source in Thermoacoustic Cooling System,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 5, pp. 4235-4238, 2008. (査読あり)

⑧ S. Sakamoto, S. Komiya, J. Senda and Y. Watanabe, “Nonlinearity Suppressed by Applying Phase Adjuster in Thermoacoustic System,” Fundamentals and Applications (ISNA 18), 18th International Symposium pp. 367-370, 2008. (査読あり)

[学会発表] (計 15 件)

① 坂本眞一, 渡辺好章, 千田二郎 “熱音響システムのエネルギー変換効率向上に向けて—フェイズアジャスターについての検討—,” 第 31 回非線形音響研究会, 軽井沢, 2007.

② 石野貴廣, 坂本眞一, 渡辺好章, “ループ管方式による熱音響冷却システムの実用化に向けた検討—分岐路による管内音場の制御—,” 日本音響学会講演論文集, pp.1201-1202, 日本音響学会 2007 年秋季研究発表会, 山梨, 2007.

③ 坂本眞一, 石野貴廣, 西川昌宏, 渡辺好章, “ループ管方式による熱音響冷却システムの実用化に向けた検討—フェーズ・アジャスタによる熱から音へのエネルギー変換特性向上について—,” 日本音響学会講演論文集, pp.1203-1204, 日本音響学会 2007 年秋季研究発表会, 山梨, 2007.

④ 坂本眞一, 西川昌宏, 石野貴廣, 渡辺好章, 千田二郎, “フェイズアジャスター内径変化による熱音響システムのエネルギー変換効率の向上,” 第 28 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講演論文集, pp. 341-342, 第 28 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, 筑波, 2007.

⑤ 辻良行, 坂本眞一, 石野貴廣, 渡辺好章, 千田二郎, “緩和時間  $\tau$  を考慮した熱音響システム設計手法の検討— $\omega\tau$  によるスタック位置の決定—,” 第 28 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講演論文集, pp. 451-452, 第 28 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, 筑波, 2007.

⑥ 若田哲也, 坂本眞一, 西川昌宏, 渡辺好章, “熱音響冷却システムの小型化に向けたエネルギー変換効率に関する基礎研究,” 第 28 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講演論文集, pp. 453-454, 第 28 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, 筑波, 2007.

⑦ 宮直基, 坂本眞一, 渡辺好章, “熱音響冷却システムにおいてスタックの熱源接触部に銅メッシュを設置した際の効果,” 第 28 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講演論文集, pp. 454-455, 第 28 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, 筑波, 2007.

⑧ 坂本眞一, 辻良行, 西村由貴子, 渡辺好章, “積層メッシュにおける音と熱のエネルギー変換についての考察—熱音響冷却システム実用化に向けて—,” 日本音響学会講演論文集, pp.1359-1360, 日本音響学会 2008 年春季研究発表会, 千葉, 2008.

⑨ 小宮慎太郎, 坂本眞一, 坂口敦, 渡辺好章, “管内伝搬音波に対して断面積変化が及ぼす影響についての実験的検討—ループ管冷却システムに Phase Adjuster が及ぼす影響について—,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1413-1414, 日本音響学会 2008 年春季研究発表会, 博多, 2008.

⑩ 坂本眞一, 小宮慎太郎, 坂口敦, 渡辺好章, “フェイズアジャスターが熱音響システム内の時間的, 空間的温度変化に与える影響について\*,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1427-1428, 日本音響学会 2008 年春季研究発表会, 博多, 2008.

⑪ 石野貴廣, 坂本眞一, 渡辺好章, “ループ管型熱音響冷却システムの実用化に向けた検討—分岐管の断面積変化が管内音場に与える効果について—,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1365-1366, 日本音響学会 2008 年春季研究発表会, 博多, 2008.

⑫ 坂口敦, 坂本眞一, 小宮慎太郎, 渡辺好章, “断面積変化が管内伝播音波に及ぼす影響に関する数値解析—ループ管方式熱音響冷却システムの実用化に向けて—,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1367-1368, 日本音響学会 2008 年春季研究発表会, 博多, 2008.

⑬ 坂口敦, 坂本眞一, 小宮慎太郎, 渡辺好章, “FDTD法を用いた定在波音場の推定—熱音響システムの設計に向けて—,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1197-1198, 日本音響学会 2009 年春季研究発表会, 東京, 2009.

⑭ 石野貴廣, 坂本眞一, 渡辺好章, “分岐管設置による音と熱のエネルギー変換効率向上についての検討—ループ管型熱音響冷却システムの実用化に向けた研究—,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1199-1200, 日本音響学会 2009 年春季研究発表会, 東京, 2009.

⑮ 坂本眞一, 小宮慎太郎, 塚本大地, 渡辺好章, “円錐型フェイズアジャスターが熱音響システムのエネルギー変換効率に与える影響,” 第 57 回応用物理学関係連合講演会講演論文集, 30p-N-12, 応用物理学会 2009 年春季研究発表会, 筑波, 2009.

6. 研究組織

(1)研究代表者

滋賀県立大学

工学部

電子システム工学科

准教授

坂本眞一

研究者番号：40449509

(2)研究分担者

本研究課題では分担者なし

(3)連携研究者

本研究課題では分担者なし

以上