

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：32644

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010 年度～2011 年度

課題番号：22860059

研究課題名（和文） 低温駆動・高効率熱音響機関の研究

研究課題名（英文） Study of a low temperature differential, high efficiency thermoacoustic engine

研究代表者 長谷川 真也

長谷川 真也 (HASEGAWA SHINYA)

東海大学・工学部・助教

研究者番号：30580500

研究成果の概要（和文）：近年、蓄熱器を複数接続することで発振温度を低下可能な多段熱音響機関が提案された。しかしながら同構成は複素音響インピーダンスの実部が最大となる位置以外にも蓄熱器を設置する必要があるため、一般的に効率が低い。そこで本研究では多段熱音響機関を対象に数値計算にて高効率・低温発振を実現可能な構成を決定し、原動機の温度比を変化させた際の熱効率を求めた。その結果、多段型を用いることによって、低温動作・高効率を両立可能であるということを示した。

研究成果の概要（英文）：A multistage thermoacoustic engine that can lower the critical onset temperature was suggested recently. However, a multistage thermoacoustic engine that uses multiple regenerators needs installation of regenerators not only at the peak of acoustic impedance distribution in real part, and therefore is generally inefficient. In this report, we determined the configuration of the multistage thermoacoustic engine by numerical calculation, and then examined its efficiency when the temperature of the prime mover was changed. The result shows that low temperature drive and high efficiency can both be achieved with a multistage thermoacoustic engine.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2012 年度	1,160,000	348,000	1,508,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：熱音響現象，熱工学，排熱回生，複素音響インピーダンス，リニア発電機

1. 研究開始当初の背景

近年、熱音響機関を用いて太陽光エネルギーや工場廃熱を高効率で再動力化することを目的とした研究が活発に行われている。熱音響機関は 1979 年に Ceperley が提案した理論に端を発している。管内に狭い流路の束（以

降、蓄熱器と称する）を設置し、蓄熱器両端の温度比をある臨界値以上にすると、管内の流体が自励振動を起こす。この作用は熱力学的には原動機と見ることができ、この作用を用いたものが熱音響機関である。熱音響機関は音波を用いてエネルギー変換を行うため、本

質的に可動部品を必要とせず、ローコスト、メンテナンスフリーという大きな利点を有する。しかしながら実用化に向けた課題も存在する。一般的に熱音響機関が高い効率を発揮する温度帯域は $300^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ 程度であり、現実の自動車や工場廃熱 $100^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 程度と比較して格段に高温である。排熱を高効率かつメンテナンスフリーで回生可能なデバイスとして、低温領域で高効率を実現する熱音響機関が切望されている。

熱音響機関の動作温度を低下させる試みとしては、近年蓄熱器を多段直列化することで仕事流の累乗増幅を実現する「多段熱音響機関」が提案されている。琵琶らはループ管と共鳴管を組み合わせた熱音響機関を対象とし第二蓄熱器を設置することで臨界発振温度比の低下を実現している。一方 Gardnerらは直管型多段熱音響機関を提案し約 1kW の出力を得ることに成功している。直管型熱音響機関にはループ構造が存在しない為に循環質量流の発生が少なく、高い熱効率が期待できる。しかしながら、これを実現するためには複素音響インピーダンスの実部が最大となる位置に蓄熱器を配置する必要がある。複素音響インピーダンスの実部のピークは進行波位相かつ流速振幅が最小という条件を満たすために、蓄熱器を設置すると高い熱効率を実現するが、直管型では複素音響インピーダンス分布の頂点が急峻であること多く、蓄熱器を複数設置することは難しい。これまでに複数の蓄熱器を用いることによって発振温度差を低下させることに成功した報告はあるが、複素音響インピーダンス分布に対してどのように蓄熱器位置と蓄熱器流路を定めれば低温発振と高効率を両立可能であるか現段階では十分に検討されていない。

2. 研究の目的

本研究では直管型多段熱音響機関を対象に、熱音響理論を用いた数値計算にて蓄熱器の設置位置を決定し、定在波と進行波を組み合わせた多段増幅を行うことによる高効率・低温発振の実現を試みる。また加熱器温度を変更した際の仕事流分布と発振温度を実験にて求め数値計算と比較する。

3. 研究の方法

本研究では図1のように内径 40 mm の円筒パイプを用いて、直管型多段熱音響機関を構築する。装置内には冷却器と加熱器、蓄熱器からなるユニットを図に示すように二ヶ所設置する。なおユニット1の蓄熱器流路は 0.95 mm、長さは 40 mm とし、ユニット2の蓄熱器流路は 0.67 mm、長さは 30 mm とし

た。またユニット2は後述する数値計算を用いて、進行波位相が局所的に実現する位置を探索し、同箇所を設置する。また熱音響機関の出力である仕事流を吸収する目的から音響レシーバとしてラウドスピーカを設置した。なおラウドスピーカはパワーアンプを介したファンクションジェネレータにて実験装置の一次モード共振周波数である 85 Hz で駆動させる。加熱器と冷却器温度は熱電対を用いて測定し、仕事流分布は図のように設置した(株)JTEKT製半導体圧力センサ PD104K を用いて Two-sensor 法により導出した。また同時に本報告では数値計算を用いて、管内音場並びに、エンジンの熱効率を計算する。数値計算では運動量の式、連続の式を線形長波長近似することによって得た Rott の式を用いる。

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} p \\ U \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} p \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ U \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_{12} = \frac{-j\omega\rho_m}{A_c(1-\chi_v)}$$

$$A_{21} = -\frac{j\omega A_c}{p_m} \left\{ 1 - \frac{\gamma-1}{\gamma} (1-\chi_v) \right\}$$

$$A_{22} = \frac{\chi_\alpha - \chi_v}{(1-\chi_v)(1-\sigma)} \frac{1}{T_m} \frac{dT_m}{dx}$$

$$\chi_v = \frac{2J_1\{(j-1)\sqrt{\omega\tau_v}\}}{(j-1)\sqrt{\omega\tau_v}J_0\{(j-1)\sqrt{\omega\tau_v}\}}$$

$$\chi_\alpha = \frac{2J_1\{(j-1)\sqrt{\omega\tau_\alpha}\}}{(j-1)\sqrt{\omega\tau_\alpha}J_0\{(j-1)\sqrt{\omega\tau_\alpha}\}}$$

$$\tau_v = \frac{r^2}{2\nu}, \quad \tau_\alpha = \frac{r^2}{2\alpha}$$

ここで p : 圧力振動, U : 断面平均体積流速振動, j : 虚数, ω : 角周波数, ρ_m : 平均密度, A_c : 断面積, p_m : 平均圧力, γ : 比熱比, σ : プラントル数, T_m : 平均温度, J_n : n 次のベッセル関数, r : 流路半径, ν : 動粘性係数, α : 温度拡散係数である。なお蓄熱器における温度勾配 dT_m/dx は一定ではない。本論文では

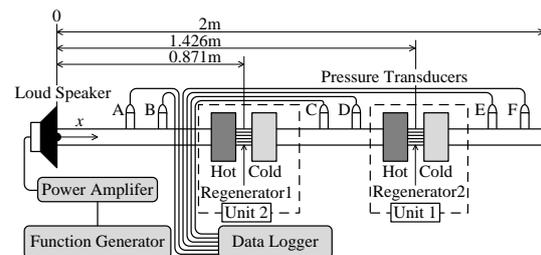


図1 実験装置

「蓄熱器においてエンタルピー流 H は一定である」という条件を用いてイタレーションを行うことによって蓄熱器内の dT_m/dx を定めている。式(1)の行列 A の固有値と固有ベクトルを求め対角化を行うと、 $x=0$ における $p(0)$ と $U(0)$ を使って連続な x 点の情報を得ることが可能な以下の式を得る。

$$\begin{bmatrix} p(x) \\ U(x) \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} p(0) \\ U(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B_{11} = \frac{-\lambda_2 e^{\lambda_1 x} + \lambda_1 e^{\lambda_2 x}}{D},$$

$$B_{12} = \frac{A_{12}(e^{\lambda_1 x} - e^{\lambda_2 x})}{D},$$

$$B_{21} = \frac{A_{21}(e^{\lambda_1 x} - e^{\lambda_2 x})}{D},$$

$$B_{22} = \frac{\lambda_1 e^{\lambda_1 x} - \lambda_2 e^{\lambda_2 x}}{D},$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{A_{22} \pm D}{2}, \quad D = \sqrt{A_{22}^2 + 4A_{12}A_{21}}.$$

式(2)を連続空間毎に以下のように連結することによって計算モデルの全体の音場を求める。

$$\begin{bmatrix} p(x_n) \\ U(x_n) \end{bmatrix} = \mathbf{B}_n \cdots \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_1 \begin{bmatrix} p(0) \\ U(0) \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} p(0) \\ U(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

またエンジンに入力される熱量 Q は以下の式で求めた。

$$Q = H - W$$

$$= -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{\chi_\alpha - \tilde{\chi}_v}{(1 + \sigma)(1 - \tilde{\chi}_v)} p \cdot \tilde{U} \right] + \frac{C_p \rho_m}{A_c 2\omega} \operatorname{Im} \left[\left(\frac{\chi_\alpha - \sigma \chi_v}{|1 - \chi_v|^2 (1 - \sigma^2)} \right) |U|^2 \frac{dT_m}{dx} \right] \quad (4)$$

ここで C_p は定圧比熱容量、 $\tilde{\cdot}$ は複素共役である。本報告では基礎的な検討を目的としているために式(4)において単純熱伝導による熱流は無視している。

4. 研究成果

本研究では加熱器温度変更時における管内仕事流を実験並びに数値計算にて求め、比較する。また定在波と進行波を組み合わせた多段増幅を行う事による発振温度について検討を行う。まずはよりシンプルな状態で数値計算と実験結果の整合を行うために、ユニット1のみを用いた場合を対象に検討を行う。ラウドスピーカにより管内に音波を入力し、加熱器温度を変更した。なお冷却器温度は

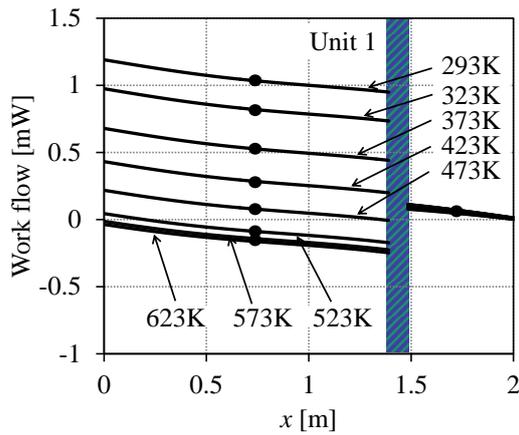
303 K に固定した。Two-sensor 法を用いて測定した管内の仕事流分布と、同様の条件下において数値計算を行った仕事流分布を図2に示す。Two-sensor 法を用いた計測では、温度勾配を有する蓄熱器位置の仕事流を得ることは出来ない。一方、本研究で用いた計算手法は温度勾配が存在する空間の仕事流増幅を可視化することが可能であり、詳細に熱音響機関の性能を知ることが出来る。図2の実験結果と計算結果の比較を行うと、両者は一致しており、計算手法の妥当性が確認できる。よって以後は計算結果を基に考察を行う。

図2(b)では、加熱器温度が 573 K 以上の時に $x=0$ での仕事流が負に転じる事がわかる。よって 573 K までは管全体としてエネルギー散逸が生じエネルギー供給により振動が維持されているが、573 K を超えると管内散逸を上回るエネルギーが蓄熱器から湧き出し自励振動が可能となる事が分かる。また同図より蓄熱器温度が上昇するに従いエネルギーの湧き出しが飽和していくことも確認出来る。これは蓄熱器温度変化に伴いインピーダンス分布の頂点が図中左側に移動する為である。直管型熱音響機関では複素音響インピーダンス分布の頂点が急峻であるために蓄熱器温度勾配の変化に伴う複素音響インピーダンス分布の変化を特定し、構成を定める必要があると考えられる。ユニット1のみを用いた場合の実験結果と数値計算の整合が確認出来た為、ユニット1とユニット2を用いた多段増幅時における仕事流分布について検討を行う。加熱器温度をユニット1, ユニット2 併に変更した際の、実験結果並びに数値計算結果を図3に示す。なおユニット2の位置は上述の結果を基に、蓄熱器温度 548 K の際にインピーダンス分布の頂点に位置するよう決定した。図3においても実験結果と数値計算結果はよい一致が確認できる。よって以降は数値計算結果について考察する。図3(b)では 548 K において $x=0$ での仕事流が負であることから、548 K で自励発振が可能になると考えられる。ユニット1のみを用いた場合における発振温度が 573 K であったことから、多段増幅を行うことによって、発振温度を 25 K 低下可能となる。更に結果を詳しく考察するために、数値計算によって求めた臨界発振時(加熱器温度 548 K)における複素音響インピーダンス分布を図4に示す。図4よりユニット2の蓄熱器はインピーダンス分布(実数)の頂点付近に設置されていることが確認出来る。複素音響インピーダンス分布(実数)の頂点は局所的進行波位相であると同時に流速の節であるために高効率の仕

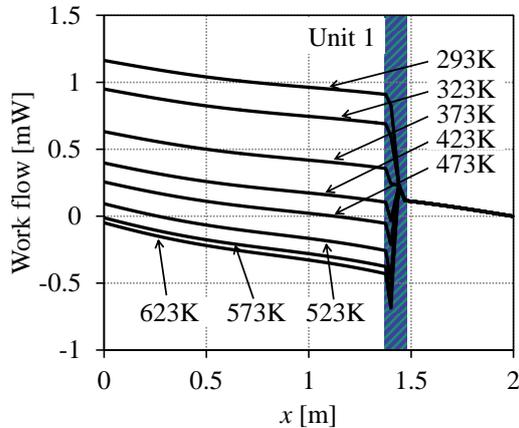
事変換が可能となる。

最後に本研究において最も仕事流の増幅率の大きい、加熱器温度 623K における蓄熱器の熱効率を検証する。数値計算によって求めた蓄熱器 1 並びに蓄熱器 2 におけるエネルギー流分布を図 5 に示す。同図(a)は蓄熱器 1, (b)は蓄熱器 2 の結果を表している。なお本研究では単純熱伝導は省略し、その他の熱流成分に対する効率を検討する。図中において W は仕事流, Q_{prog} は進行波による熱流, Q_{stand} は定在波による熱流, Q_D はドリームパイプによる熱流である。また熱効率は蓄熱器加熱端における仕事流を熱流の総和で除し表す。結果を確認すると図 5(a)では Q_D が支配的であり熱効率は 0.97% である。 Q_D は流速の 2 乗に比例するため、流速振幅の節から遠い位置に設置した蓄熱器 1 では効率が著しく低くなった。一方、図 5(b)の蓄熱器 2 では蓄熱器 1 に比べ Q_{prog} の割合が大きい。 Q_{prog} は可逆的な熱交換に伴う熱流であるために、これが支配的な場合、高効率を実現出来る。実際に蓄熱器 2 の熱効率は 20.22% であった。

以上の検討より、本研究の構成はユニット



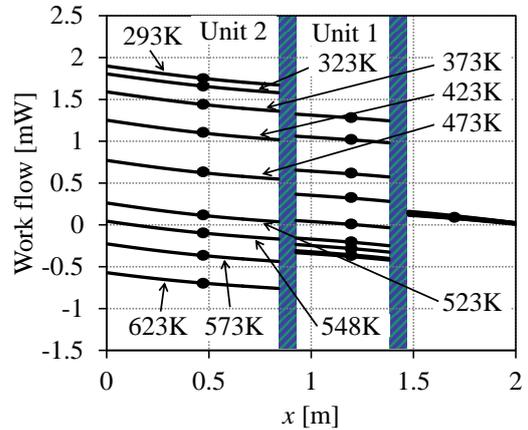
(a) 実験結果



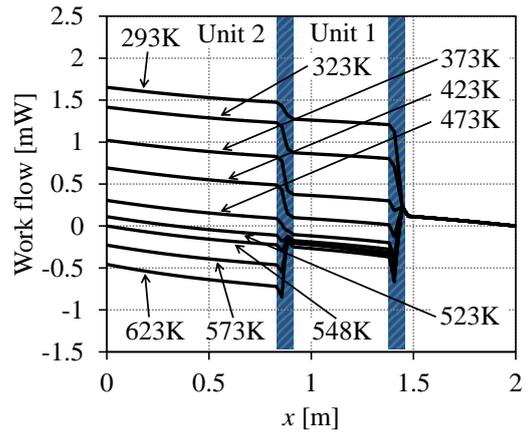
(b) 数値計算結果

図 2 仕事流分布 (単段)

1 の定在波型熱音響機関により低温発振を実現すると同時に、ユニット 2 を局所的進行波位相位置付近 (蓄熱器中心の圧力、流速間位相は 45°) に設置することで装置全体として低温発振、高効率を実現可能とすることが出来た。また加熱器温度を変更した際の仕事流分布と発振温度を数値計算と実験にて求め整合性を確認することが出来た。



(a) 実験結果



(b) 数値計算結果

図 3 仕事流分布 (二段)

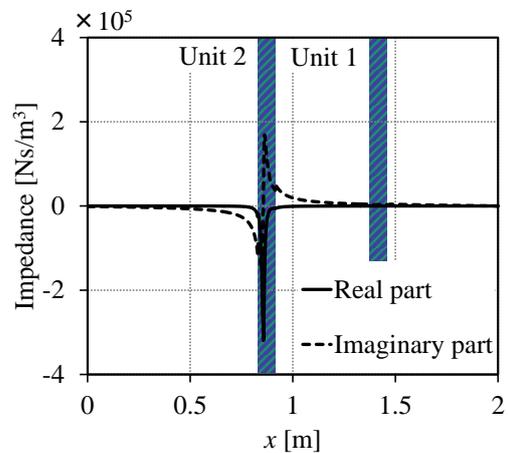
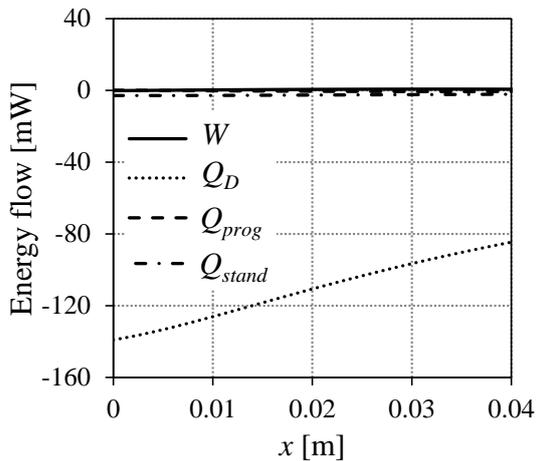
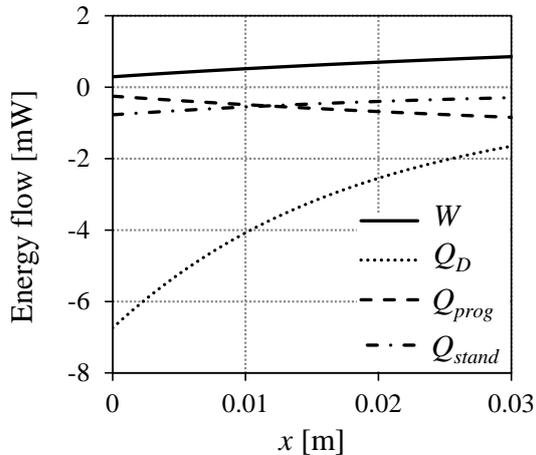


図 4 複素音響インピーダンス分布



(a) 蓄熱器 1



(b) 蓄熱器 2

図 5 蓄熱器内のエネルギー流分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- ① 長谷川真也, 山口剛史, 押野谷康雄, 多段熱音響機関の冷凍機温度 (作動気体を大気圧空気とした基礎的検討), 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, Vol. 78, No. 787, (2012) pp.440-444.
- ② 長谷川真也, 山口剛史, 押野谷康雄, 管内全域を進行波とした高効率多段熱音響エンジンの研究, 低温工学, 査読有, Vol.47, No.1(2012), pp.11-15.
- ③ 長谷川真也, 山口剛史, 押野谷康雄, 熱音響現象に対する支配方程式と臨界発振条件, 東海大学紀要 工学部, 査読有, Vol.51(2011), pp.151-156.
- ④ Hideaki KATO, Yasuo OSHINOYA, Shinya HASEGAWA, Hirakazu KASUYA, Ride Comfort Evaluation of Active Seat Suspension for Small Vehicles Using Psychology and Physiology—Fundamental Consideration by Analysis of Heart Rate Fluctuation and Salivary Amylase Activity

—, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E , peer reviewed papers, Vol. XXXVI(2011), pp. 29-34.

- ⑤ Hideaki KATO, Yasuo OSHINOYA, Shinya HASEGAWA, Hirakazu KASUYA, Experimental Examination of Riding Comfort Improvement with Active Seat Suspension of Small Vehicle during Driving on a Bad Road—Comparison of the Control Performances by a Trade-Off Curve—, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E , peer reviewed papers, Vol. XXXVI(2011), pp.35-41.
- ⑥ Hideaki KATO, Yasuo OSHINOYA, Shinya HASEGAWA, Tatsuya MORISHITA, Hirakazu KASUYA, Basic Study on Noise Reduction Technology for Small Vehicle with Giant Magnetostrictive Actuator, Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E , peer reviewed papers, Vol. XXXVI(2011), pp.43-47.
- ⑦ Takayoshi NARITA, Yasuo OSHINOYA, and Shinya HASEGAWA, Study on Horizontal Noncontact Positioning Control for a Magnetically Levitated Thin Steel Plate(Experimental Considerations on Elastic Vibration Control under Transport), Journal of Council on Electrical Engineering, peer reviewed papers, Vol.1, No.3 (2011), pp.291-297.

〔国際会議〕(計 2 件)

- ① Takayoshi NARITA, Yasuo OSHINOYA and Shinya HASEGAWA, Study on Horizontal Noncontact Positioning Control for a Magnetically Levitated Thin Steel Plate(Experimental Considerations on Elastic Vibration Control under Transport), 16th International Conference on Electrical Engineering(2010), peer reviewed papers, CD-ROM.
- ② Takayoshi NARITA, Yasuo OSHINOYA and Shinya HASEGAWA, Control of Electromagnetic Levitation Transport of Flexible Steel Plate(Fundamental Considerations on Elastic Vibration Control under Transport), International Power Electronics Conference-Sapporo2010(2010), peer reviewed papers, CD-ROM.

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① 宮杉溪, 長谷川真也, 押野谷康雄, 多段熱音響機関の冷凍器温度 (実用化に向けた基礎的検討), 関東支部第 51 回学生員卒業研究発表講演会(2012 年 3 月 9 日), pp.563-564, 日本大学生産工学部津田沼校舎 37 号館.

- ② 金子知弘, 長谷川真也, 押野谷康雄, 数値計算を用いた低温度差多段熱音響機関のインピーダンス調整に関する基礎的検討, 関東支部第 51 回学生員卒業研究発表講演会(2012 年 3 月 9 日), pp.559-560, 日本大学生産工学部津田沼校舎 37 号館.
- ③ 佐藤雅祥, 長谷川真也, 押野谷康雄, ボイスコイルモータで駆動される直管型多段熱音響機関における音場制御に関する基礎的検討, 関東支部第 51 回学生員卒業研究発表講演会(2012年3月9日), pp.553-554, 日本大学生産工学部津田沼校舎 37 号館.
- ④ 秋元惟裕, 長谷川真也, 押野谷康雄, リニアモータを用いた熱音響発電機に関する研究(大気圧空気を作動気体とした基礎的検討), 関東支部第 51 回学生員卒業研究発表講演会(2012 年 3 月 9 日), pp.549-550, 日本大学生産工学部津田沼校舎 37 号館.
- ⑤ 山口剛史, 佐藤雅祥, 長谷川真也, 押野谷康雄, 複数の熱音響エンジンを用いて動作するダブルループ型熱音響冷凍機の性能評価, 日本音響学会 2012 年春季研究発表会(2012 年 3 月 13 日), CD-ROM, 神奈川大学横浜キャンパス.
- ⑥ 山口剛史, 長谷川真也, 押野谷康雄, 数値計算を用いた低温度差多段熱音響機関の効率改善(蓄熱器拡大によるインピーダンス調整), 日本機械学会第 14 回スターリングサイクルシンポジウム(2011 年 12 月 8 日), pp.121-124, 日本科学未来館.
- ⑦ 山口剛史, 長谷川真也, 押野谷康雄, 直管型多段熱音響機関の音場調整に関する基礎的検討, 日本機械学会 2011 年度年次大会(2011 年 9 月 13 日), CD-ROM, 東京工業大学.
- ⑧ 山口剛史, 長谷川真也, 押野谷康雄, 数値計算によるダブルループ型多段熱音響機関の冷凍機温度と効率, 低温工学協会調査研究会・応用熱音響研究会(2011 年 6 月 25 日), 名古屋プライムセントラルタワー.
- ⑨ 山口剛史, 長谷川真也, 押野谷康雄, 多段熱音響機関の冷凍機温度(作動気体を大気圧空気とした基礎的検討), 日本機械学会第 16 回動力・エネルギー技術シンポジウム(2011 年 6 月 24 日), pp.269-272, 関西大学千里山キャンパス.

他 6 篇

[産業財産権]

○出願状況(計 3 件)

- ① 名称: 熱音響機関
発明者: 長谷川真也, 押野谷康雄, 山口

剛史, 金子知弘
権利者: 学校法人東海大学
種類: 特許
番号: 特願 2011-266181
出願年月日: 2011 年 12 月 5 日
国内外の別: 国内

- ② 名称: 熱音響機関
発明者: 長谷川真也, 押野谷康雄, 山口剛史
権利者: 学校法人東海大学
種類: 特許
番号: 特願 2011-191595
出願年月日: 2011 年 9 月 2 日
国内外の別: 国内
- ③ 名称: 熱音響機関
発明者: 長谷川真也, 押野谷康雄, 山口剛史
権利者: 学校法人東海大学
種類: 特許
番号: 特願 2010-264133
出願年月日: 2010 年 11 月 26 日
国内外の別: 国内

○公開状況(計 30 件)

- ① 名称: 熱音響機関
発明者: 山本 康, 阿部 誠, 長谷川真也
権利者: いすゞ自動車株式会社
種類: 特許
番号: 特開 2011-185456
公開年月日: 2011 年 9 月 22 日
国内外の別: 国内
- ② 名称: 熱音響機関
発明者: 山本 康, 阿部 誠, 長谷川真也
権利者: いすゞ自動車株式会社
種類: 特許
番号: 特開 2011-182520
公開年月日: 2011 年 9 月 15 日
国内外の別: 国内
- ③ 名称: 熱音響機関
発明者: 阿部 誠, 長谷川真也, 山本 康
権利者: いすゞ自動車株式会社
種類: 特許
番号: 特開 2011-179774
公開年月日: 2011 年 9 月 15 日
国内外の別: 国内

他 27 件

[その他]

ホームページ等

<http://www.ed.u-tokai.ac.jp/thermoacoustic/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

長谷川 真也 (HASEGAWA SHINYA)

東海大学・工学部・助教

研究者番号: 30580500