

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760174

研究課題名(和文) 300 の熱源温度で30%の熱効率を有する熱音響機関

研究課題名(英文) Thermoacoustic engine with a thermal efficiency of 30% at heat source temperature of 300 degree celsius

研究代表者

長谷川 真也 (HASEGAWA, SHINYA)

東海大学・工学部・講師

研究者番号：30580500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では圧力振幅と流速振幅間の位相関係が進行波であるだけでなく、配置された全ての蓄熱器で自由進行波音波よりも高い比音響インピーダンスを実現するような多段進行波音波エンジンの設計および作成を行った。このような音場を実現するために、温度差のある蓄熱器と隣接した短い共鳴管で構成されるユニットの伝達特性を分析し、固有ベクトルと固有値を計算にて決定した。その結果、提案モデルの蓄熱器での第二法則効率の最大値は63.9%に達した。

研究成果の概要(英文)：We design and build a cascade traveling wave thermoacoustic amplifier, in which there is not only the traveling wave phasing between pressure and velocity oscillations, but also there is specific acoustic impedance which is greater than that freely traveling acoustic waves and that can be achieved for all the regenerators aligned in series. In order to realize such acoustic fields, the transfer matrix for the unit component consisting of a differentially heated regenerator and adjacent short resonator is analyzed, and the eigenvector and the eigenvalue are numerically determined. As a result, the maximum second law efficiency of the regenerator reaches 63.9% in the present model.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱音響現象 非平衡熱力学 自励振動 熱効率

1. 研究開始当初の背景

1979年、Ceperleyは進行波音波の圧力振動と流速振動の位相関係とスターリングエンジンにおける振動流体の位相関係が同等になることに基づき、進行波を利用する進行波音波エンジンを提案した。進行波音波エンジンでは軸方向に温度差のある狭い流路の束(蓄熱器)を進行波音波が通過することで、その音響パワーが絶対温度比倍で増幅する。また、音波波長に比べて十分短い蓄熱器を仮定すると、その両端では圧力振動は変化せず、理想的には流速振動のみ増加する。さらに彼は1985年に蓄熱器での比音響インピーダンス z を用いて熱効率の計算を行った^[2]。 z は圧力振動 p と断面平均流速振動 v の比であり、次式となる。

$$z = \frac{p}{v} \quad (1)$$

Ceperleyは蓄熱器での z が自由空間中を伝播する進行波音波の固有音響インピーダンス $\rho_m c$ と等しい場合、粘性散逸が原因となり熱力学第二法則効率は10%が上限であるとした。しかし、蓄熱器での z が $10\rho_m c$ と高くできれば、79%の熱力学第二法則効率が実現できると計算にて示した。彼は高い z を実現する1つの案として、蓄熱器ならびに蓄熱器下流の管の断面積を上流側の管の断面積の10倍程度にすることを挙げている。1979年にCeperleyが提案した進行波音波エンジンは2011年に琵琶らによってはじめて実験的な検証が行われた。さらに蓄熱器を3つ直列に接続することで小さな温度比でも大きな音響パワー増幅が可能な多段進行波音波エンジンを提案した。このエンジンでは音響パワー増幅率10を実現しているが、蓄熱器における z は $\rho_m c$ 程度と低く、高効率ではない。1985年にCeperleyが示したように蓄熱器位置で高い z としながら、複数の蓄熱器を接続することができれば、高効率および小さな温度比での音響

パワー増幅の両方が得られる多段進行波エンジンが可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、蓄熱器位置での高い z を実現しながら、ユニットの連結区間毎に音響パワー密度を増加させ、それらを複数接続した多段進行波増幅器の構築手法を示し、「300°Cの熱源温度で30%の熱効率を有する熱音響機関」構成を決定する。

3. 研究の方法

本研究では高い熱効率で音響パワー増幅をするために、Fig. 1のようなモデルを考える。上流側共鳴管、常温熱交換器、蓄熱器、高温熱交換器、下流側共鳴管を1つのユニットとし、上流側共鳴管から蓄熱器に比音響インピーダンスが $\rho_m c$ の進行波音波が流入すると仮定する。蓄熱器低温側の比音響インピーダンスは蓄熱器断面積を A_{reg} とすると $z = (A_{reg} / A_a) \rho_m c$ で与えられるからこれを大きくするには、上流側共鳴管断面積 A_a に対して蓄熱器断面積 A_{reg} を大きくすればよい。さらに、下流側共鳴管断面積を再び縮小することでこのユニットを複数接続することが可能となる。本研究ではこのユニットの複数接続を可能にするための数値計算による設計手法の提案を行う。

数値計算を用いた設計は熱音響理論に基づく線形計算を用いる。Fig. 1の始点 a における圧力振動を p_a 、断面平均流速振動を v_a とし、終点 b における圧力振動を p_b 、断面平均流速振動を v_b とすると、それらの関係式は、伝達マトリクスを用いて次のように表せる。

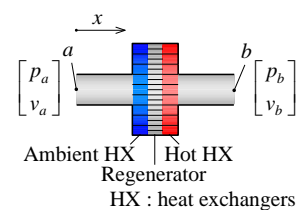


Fig. 1 Model of computation.

$$\begin{bmatrix} p_b \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12}A_a \\ C_{11} & A_a \\ A_b & C_{22}A_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ v_a \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{all} \begin{bmatrix} p_a \\ v_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

マトリクス要素は各部の幾何学的サイズと音波周波数, 作動流体によって決定される. 本研究では, 次式を満たすような伝達マトリクス \mathbf{M}_{all} の固有ベクトルに着目した.

$$\mathbf{M}_{all} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix} \quad (3)$$

固有値と固有ベクトルはマトリクス要素に依存する. この固有ベクトルの要素の比で決まる比音響インピーダンスが $\rho_m c$ に近いと, 進行波音波に近いことを意味する. \mathbf{M}_{all} の固有ベクトルは2つ存在するが, 本報告では音波が正方向に進行すると考えて, 実数部が正となる z とそれに対応する固有値 λ を用いる. また固有値 λ は, a 点の音響パワーに対する b 点の音響パワーの比, すなわち増幅率と次の関係にある.

$$G = \lambda \lambda^* \frac{A_b}{A_a} \quad (4)$$

ここで, λ^* は複素共役である. また $G > 1$ の場合, 増幅していることを意味する. 増幅率 G が最大となる点を求める為に蓄熱器前後の共鳴管長さを調整パラメータとする.

4. 研究成果

本研究で用いる数値計算モデルの概要を Fig. 2 に示す. 1つのユニットを上流側共鳴管, 常温熱交換器, 蓄熱器, 高温熱交換器, 下流側共鳴管の組み合わせとし, 同じユニットを2つ接続する. 蓄熱器の断面積は共鳴管の断面積の8.16倍に拡大した.

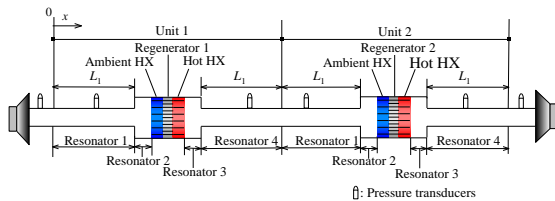


Fig. 2 Analysis model.

望みの固有ベクトル, 固有値および増幅率を得るため, 前述の計算手法を用いて共鳴管長さ L_1 を最適化する. なお, スピーカの動作周波数は 40 Hz とし, 作動流体は 300 K の大気圧空気とした. 各常温熱交換器温度 T_C を 300 K に固定し, 温度比が 2.33, 2.00, 1.67 となるように高温熱交換器温度 T_H を変化させた. Unit の共鳴管長さ L_1 を 0.10 m から 6.00 m まで変化させた場合の固有ベクトルおよび固有値を数値計算にて求め, Eq. (4) から増幅率 G を求めた. 結果を Fig. 3 に示す. 同図からユニット全体で最大の増幅率は温度比が 2.33 のとき 1.71, 2.00 のとき 1.51, 1.67 のとき 1.29 である. また, 最適な共鳴管長さ L_1 はそれぞれ 0.55 m, 0.49 m, 0.43 m であった. 本研究では, 特に温度比 2.00 (高温熱交換器温度 327°C) の場合について考える. このとき, ユニットの固有ベクトルによって定まる比音響インピーダンスは $z_r = 222.097 - 104.320i$ であった. 提案構成ではユニットを2つ直列に接続する構成であるが, この装置構成の場合ユニットの固有ベクトルが同じであるため, 複数ユニットの接続が可能である.

数値計算によって求めた装置構成と, 比較のために, 「共鳴管ならびに, 各ユニットの直径を全て 40 mm とした」構成の音響パワー分布, 比音響インピーダンス分布を Fig. 3, Fig. 4, に示す. それぞれの図における実線は提案構成, 破線は比較構成の結果であり, 図中のハッチング部は各蓄熱器位置である.

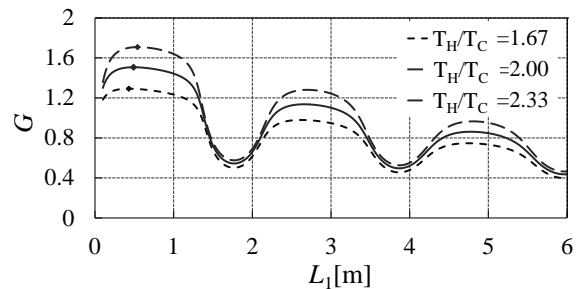


Fig. 3 G vs. L_1 .

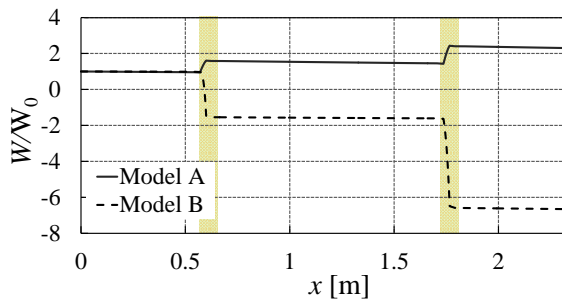


Fig. 4 Distribution of standardized acoustic power W/W_0 .

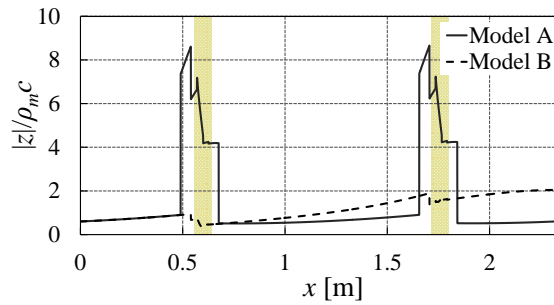


Fig.5 Absolute standardized acoustic impedance $|z|/\rho_m*c$.

Fig. 4 の W は $x = 0$ の位置の音響パワー W_0 で規格化した。また, Fig. 5 の縦軸は ρ_m*c で除し規格化している。Fig. 4 より目的としたユニットを接続すると音響パワーの増加が為されていることがわかる。本報告では高温熱交換器温度 T_H を 600 K, 常温熱交換器温度 T_C を 300 K としているため, 理想的には各蓄熱器での温度比: $T_H / T_C = 2$ 倍の音響パワー増幅ができる。Fig. 4 より蓄熱器の音響パワー増幅率は約 1.70 であり, 蓄熱器温度比の 85 % と理想的な値に近い増幅率である。続いて蓄熱器の効率について述べる。蓄熱器の効率を蓄熱器上流側の音響パワー W_{in} と下流側の音響パワー W_{out} の差を入力熱量 Q で除した値と定義する。

$$\eta = \frac{W_{out} - W_{in}}{Q} \quad (5)$$

効率の上限はカルノー効率なので, 熱効率とカルノー効率の比を考える。

$$\eta_2 = \frac{\eta}{\eta_{Carnot}} \quad (6)$$

本報告では Eq. (6) の熱力学第二法則効率 η_2 を用いて効率を評価する。Eq. (6) より求め

た η_2 は蓄熱器で 63.90 % (熱効率 31.95%) に達した。この高い効率は, Fig. 5 に示される通り蓄熱器位置で $8.5\rho_m*c$ の高い z を有していることに起因する。

最後に本提案に対する比較対象として「共鳴管並びに各ユニットの直径を全て 40 mm とした」モデル(以降, モデル B)について述べる。二つの蓄熱器温度比は提案モデル(以降, モデル A)と同一であり, 直径以外の諸元はモデル A と同じである。この場合 Fig. 5 より, 蓄熱器位置における z は低いことがわかる。これは, 蓄熱器や共鳴管の断面積および共鳴管長さの最適化を行っていないことに起因する。また, Fig. 4 からわかるように音響パワーは大きく減衰し, 増幅していない。以上より, モデル B が増幅しない理由は比音響インピーダンスが原因であり, モデル A が高効率・高増幅である理由は高い比音響インピーダンスを蓄熱器位置において実現しているからであることがわかる。

以上より, 本報告では多段熱音響エンジンを対象に「蓄熱器位置で高い z を実現」する多段熱音響増幅器の設計手法を提案した。さらに蓄熱器位置での $8.5\rho_m*c$ の高い比音響インピーダンスと温度比 2.00 (高温熱交換器温度 327°C) で熱力学第二法則効率 63.90 % (熱効率 31.95%) に達する熱音響機関が実現可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

[1] S. Hasegawa, T. Yamaguchi, Y. Oshinoya, A thermoacoustic refrigerator driven by a low temperature differential, high efficiency multistage thermoacoustic engine, Applied Thermal Engineering, 査読有, Vol.58, pp.394-399, (2013).

[2] 長谷川真也, 熱音響発電の基礎, 日本エネルギー学会誌, 査読有, Vol.92, No.11, pp.1111-1116, (2013)

[3] M. Sato, S. Hasegawa, T. Yamaguchi, Y.

Oshinoya, Experimental evaluation of performance of double-loop thermoacoustic refrigerator driven by multistage thermoacoustic engines Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 査読有, pp.391-394, (2013).

[4] T. Kaneko, S. Hasegawa, T. Yamaguchi, Y. Oshinoya, A multistage thermoacoustic engine that enables energy conversion with high acoustic impedance and traveling wave within all resonators, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, 査読有, pp.383-386, (2013).

[5] 長谷川真也, 伊藤剛, 押野谷康雄, 高効率熱回生用熱音響エンジンに関する研究, 東海大学紀要, 査読有, Vol.52, No.1, pp.77-82, (2012).

[6] 阿部誠, 窄智久, 山本康, 長谷川真也, 琵琶哲志, 商用車向廃熱回生用熱音響スターリングエンジンの研究, 自動車技術会論文集, 査読有, Vol.43, No.6, pp.1245-1250 (2012).

〔学会発表〕(計 12 件)

[1] 橋本彪史, 長谷川真也, 押野谷康雄, 熱音響機関を用いた熱電変換(リニアモーターを用いた管内音波制御に関する基礎的検討, 第25回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp.384-385(2013.5.15), 箱根小涌園.

[2] 近藤啓介, 長谷川真也, 音波によるQDの測定, 応用熱音響研究会(2013.9.20), 東京農工大学.

[3] 千賀麻利子, 長谷川真也, 多段熱音響増幅器, 応用熱音響研究会(2013.9.20) 東京農工大学.

[4] 千賀麻利子, 長谷川真也, 堀暖, 福田紘大, 押野谷康雄, 多段熱音響増幅器に関する数値計算, 日本音響学会2013年秋季研究発表会, CD-ROM.2-10-6(2013.9.16), 豊橋技術科学大学.

[5] 加瀬竜樹, 福田紘大, 長谷川真也, 押野谷康雄, 断面積変化のある進行波エンジンの熱効率, 日本機械学会[No.13-47] 第16回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, pp.75-76(2013.11.30), 日本科学未来館.

[6] 轟彰宏, 長谷川真也, 高橋俊, 福田紘大, 押野谷康雄, 低温度差進行波音波エンジンで動作する音波クーラー, 日本音響学会

2014年春季研究発表, CD-ROM.(2014.3.11), 日本大学理工学部.

[7] 千賀麻利子, 長谷川真也, 押野谷康雄, 管断面積変化による多段熱音響機関の音場調整, 関東学生会第53回学生員卒業研究発表講演会, CD-ROM, (2014.3.14), 東京農工大学.

[8] 芦垣祐太郎, 長谷川真也, 押野谷康雄, ハニカムセラミクスを用いた蓄熱器の熱流束特性, 関東学生会第53回学生員卒業研究発表講演会, CD-ROM, (2014.3.14), 東京農工大学.

[9] 佐藤一成, 長谷川真也, 押野谷康雄, 熱音響機関とリニア発電機のインピーダンスマッチングによる熱音響発電機の構築, 関東学生会第53回学生員卒業研究発表講演会, CD-ROM, (2014.3.14), 東京農工大学.

[10] 谷川原秀和, 長谷川真也, 押野谷康雄, 多段熱音響エンジンの音場と装置構成に関する数値計算を用いた基礎的研究, 関東学生会第53回学生員卒業研究発表講演会, CD-ROM (2014.3.14), 東京農工大学.

[11] 加瀬竜樹, 長谷川真也, 押野谷康雄, 断面積変化のある進行波音波エンジンの熱効率, 関東学生会第53回学生員卒業研究発表講演会, CD-ROM, (2014.3.14), 東京農工大学.

[12] 轟彰宏, 長谷川真也, 押野谷康雄, 排熱利用を想定した低温で動作する熱音響冷凍機, CD-ROM, 関東学生会第53回学生員卒業研究発表講演会(2014.3.14), 東京農工大学.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: 熱音響機関及びその製造方法
発明者: 長谷川真也, 千賀麻利子, 押野谷康雄

権利者: 学校法人東海大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-190076

出願年月日: 2013.9.13

国内外の別: 国内

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔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 (SHINYA HASEGAWA)

東海大学・工学部動力機械工学科・講師

研究者番号：30580500

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：