

平成 22 年 5 月 7 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760044
 研究課題名 (和文) 音波エンジンにおけるエネルギー変換およびエントロピー生成の局所的観測
 研究課題名 (英文) Observation of local energy conversion and entropy production in a thermoacoustic heat engine
 研究代表者
 琵琶 哲志 (BIWA TETSUSHI)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：50314034

研究成果の概要 (和文)：圧力・流速・温度の同時計測を温度勾配のある気柱管内で行い、熱音響エネルギー変換の様子を実験的に調べた。圧力と流速の位相差は熱力学的サイクルを構成する熱力学的過程のタイミングを支配する因子であることを観測した。また、流体が行うエネルギー変換により得られる出力仕事に応じて、軸方向の仕事流 (音響パワー) が増加することが分かった。これは熱音響現象をエネルギー変換現象と見る立場を支持する結果である。

研究成果の概要 (英文)：Thermoacoustic energy conversion was experimentally studied through simultaneous measurements of pressure, velocity, and temperature oscillations in a gas-filled tube with axial temperature gradient. The phase difference between pressure and velocity was found out to be a key parameter governing the phasing of thermodynamic processes constituting a thermodynamic cycle. Also, the axial work flow (acoustic power) was found to increase in proportional to the local energy conversion rate that the gas executed. This results supports the thermodynamic approach to thermoacoustic phenomena.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用物理学一般

キーワード：流体, 熱工学, エネルギー変換, 熱音響工学, エントロピー生成

1. 研究開始当初の背景

平板を積層した狭い流路 (蓄熱器) を気体が充填された共鳴管内部に配置し、蓄熱器両端の熱交換器を使って臨界値以上の温度勾配を与えると、共鳴振動数で気体が自励振動

を開始する。平均圧力の 10% にもおよぶ音圧の大振幅音波が発生することもある。この熱音響自励振動は熱対流に現れるロールパターン同様、非平衡系で生じる典型的な散逸構造の一つであり、流体力学の安定問題として

長く議論されてきた。その理論的成果は低温物理の分野でよく知られているタコニス振動の系統的研究で検証され、熱音響現象に対する基本的な理解の枠組みとなっている。

ところがより最近になって、流体力学というよりもむしろ熱力学の立場から熱音響現象を理解する方法が理論的に提示された。米国ロスアラモス研究所のグループはこの立場から研究を進め、エネルギー変換機として動作する新しい音響デバイスを試作することに成功した。この音響デバイスは熱音響自励振動を利用しており、固体ピストンの往復運動として動力を発生するのではなく、気体の振動運動（音波）の形で動力を発生する音波エンジンである。1990年代後半からは、それまでの定在波音波をつかったデバイスの代わりに進行波音波を使ったデバイスの開発研究をスタートし、天然ガス液化用冷凍機や宇宙衛搭載用発電機の開発を手がけている。21世紀に入ってからフランス、オランダおよび中国でも研究がスタートした。国内でも同様に、音響学や機械工学の研究グループや民間企業が実用化を目指して研究に加わりつつある。国内外を問わず応用研究が圧倒的に多い中で、研究代表者は独自に開発した計測技術に基づき、基礎研究に軸足を置いて研究活動を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究も音波エンジンの理解と応用の基盤となる基礎研究である。熱音響現象に対する熱力学的な観点からは、熱流 Q と仕事流 I という2つのエネルギー流束が中心的物理量となる。この2つのエネルギー流の相互変換と見なすことで、音波エンジンや音波クーラーの性能は著しく向上した。しかし熱音響エンジンの心臓部である蓄熱器内において、どのようにしてエネルギー変換が起きているかは実験的には未だに明らかにされておらず、エネルギー変換を担う熱力学的サイクルも明らかではない。熱音響エンジンが「熱機関」と呼ぶにふさわしいかどうかは、その熱力学的サイクルが明らかにされていない以上、疑問が残る。そこで、本研究は温度勾配のある円管内でどのようにしてエネルギー変換が起きるかを圧力、流速と温度の同時計測を通じて観測し、新しい見方の合理性を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

熱力学的サイクルを観測するために、蓄熱器内部で圧力・温度・流速の同時計測を行うことを計画した。そのために解決すべき課題と本研究でとった対策は以下の通りである。

蓄熱器は通常の熱音響デバイスでは 1 mm 以下の狭い流路からなるため、内部の流体の物理量をそのまま計測することは困難である。そこで、流体と管壁の熱交換の善し悪しを表す無次元パラメータ $\omega\tau_a$ に着目し、 $\omega\tau_a$ の

値を保ったまま流路半径をおよそ 7 mm まで大きくした円管を蓄熱器として機能させることにした。このため音波周波数を 1.0 Hz と低くした。

研究代表者は円管内での流速計測をレーザードップラー流速計 (LDV) により行ってきた経験を有するが、LDV は点計測する流速計であるため、蓄熱器内部のエネルギー変換の様子空間的な変化を明らかにするには不向きであった。そこで、面計測が可能な画像粒子計測法 (PIV) を流速計測に利用することにした。これに先立って、PIV 計測と圧力計測の間の同時性を確保するために、同じ振動流場を LDV と PIV で計測し比較を行い、使用する PIV 装置では 1° 程度の位相ずれがあることを確認した上で実験に使用した。

実際に使用した装置を以下に示す。全長 210 mm、管内径 13.9 mm のパイレックスガラス管および全長 45 mm、管内径 14 mm のステンレス管を使用した。ガラス管の一端はアクリルの板で蓋をし、ステンレス管の一端はダイナミックペローズを介し、ラウドスピーカー (FOSTEX FW108N) を取り付けした。ガラス管の周囲を真空状態にするため、その周囲をステンレススチール製の枠で囲った。枠の一面は内部のガラス管が見えるように透明のアクリルの板で蓋をした。ガラス管閉端からガラス管内にレーザー光を入射できるように、ガラス管部の位置に穴のあいた真鍮製の板で蓋をし、さらにアクリルの板で蓋をした。

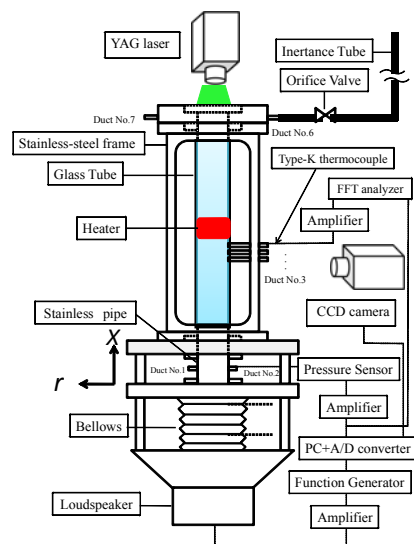


図1 実験装置

ステンレス管とダイナミックペローズの上部フランジの接続部分を $X = 0$ とし、ガラス管閉端を $X = 280$ mm とする鉛直方向に X 軸を設定した。ガラス管壁に温度勾配を与えるため、ガラス管中央、 146 mm $< X < 171$ mm に幅 25 mm のヒーターを巻き付けた。ガラス

管壁の温度を測定するために、ガラス管の外壁に接着剤を用いて4本のK型熱電対を取り付けた。ガラス管上方にYAGレーザー(カノマックス CW532-600M)を設置した。また、高速度カメラ(Photron FASTCAM-1024PCI 1K-BW)を、温度計測ダクト(No.3- No.5)部分がよく見えるように、およそ24.5 cm離れた位置に三脚で固定した。このカメラと同期したA/Dコンバーター(4 ch, 14 bit, 電圧レンジ±5 V)で、圧力シグナルと発振器シグナルを計測する。

線径 $d = 50 \mu\text{m}$ のKタイプ熱電対を外径1 mm, 長さ85 mmの薄肉ステンレスパイプに挿入して、先端の測温部が露出した状態で接着剤で固定した。この熱電対をガラス管の側壁に取り付けた合計3つの真鍮製ダクト(内径1.0 mm)のうち任意の1つに挿入し、1軸粗微動ステージを用いて動径方向へ移動できるように固定した。FFTアナライザーのチャンネルの一つで熱電対出力をモニターするとともに、別のチャンネルで圧力センシングシグナルもモニターした。得られたデータのフーリエスペクトルから圧力振動と熱電対電圧信号の振幅と位相を決定した。

圧力と流速の位相差を変えて実験を行うため、オリフィスバルブ(Swagelok, B-2GM-MH)とイナータンスチューブをガラス管閉端近傍に接続した。位相差の調整機構を確認するために、圧力振動と流速振動の比で与えられる複素インピーダンスを、バルブ開度を変えながら測定した結果を図2に示す。

バルブを閉じたとき、つまりガラス管の一端を剛体壁で閉じたときには、位相差は -60.9 (deg.)であるが、バルブを開けることでその位相が大きく増加する。バルブを取り除いて直接イナータンスチューブを接続すると、 79.8 (deg.)となった。この2つの位相条件について実験することにした。

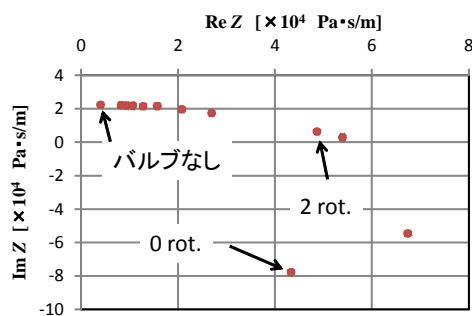


図2 音響インピーダンス

4. 研究成果

加熱時には最も高い温度(=375K)および最も大きな温度勾配(=3500 K/m)が実現する位置($X = 146$ mm)における流速及び温度の計測結果を示す。なお、管内の圧力振幅は2.0

kPaである。図3(a), (b)に温度勾配がある場合の流速振動の動径分布を示す。流速振幅は管中心で最大値0.025 m/sをとり、管壁に向けて単調に0にまで減少する。位相は流速の圧力に対し流速の位相が 90° 近く進んでおり、中心に近いほど位相は進んでいる。

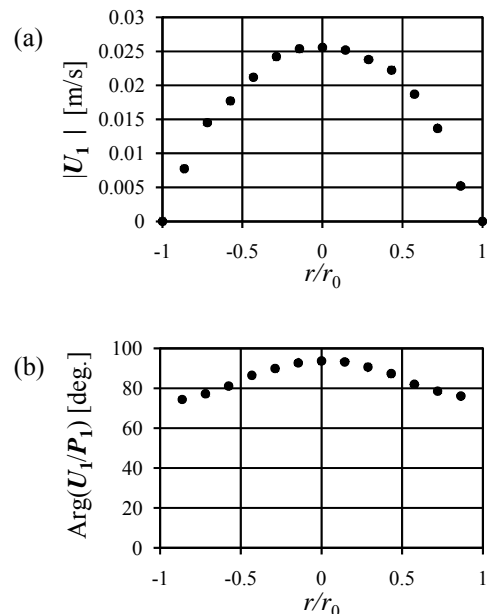


図3 流速振幅 U_1 (a)と圧力と流速の位相差(b)

次に、温度振動の動径分布を図4(a), (b)に示す。温度振幅 T_1 は中心に近いほど大きな値を示し、管壁に近づくにつれて小さくなる。位相は、およそ -160° となった。

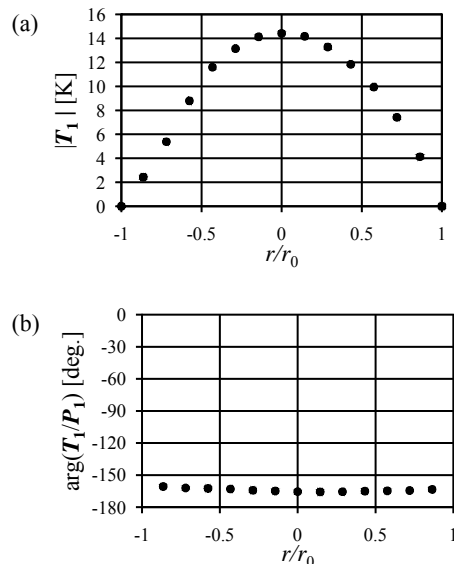


図4 温度振幅 T_1 (a)と圧力と流速の位相差(b)

このようにして得られた温度振動は、次々とプローブを通り過ぎる異なる流体の温度であって、特定の流体要素に関する状態量ではない。したがって得られた計測データから直接的に熱力学的な議論を行うことはできない。そこで、次式を用いてオイラー系から

ラグランジュ系へと記述を変更した.

$$T_{1,Lag} = T_1 + (\nabla T_m) \xi_1$$

ここで, $T_{1,Lag}$ はラグランジュ的温度振動,

∇T_m は時間平均温度の軸方向勾配, ξ_1 は実験的に得られる流速振動を時間積分して得られる変位である. 圧力振動に関しては軸方向の時間平均圧力が一様なので, 計測した圧力振動をラグランジュ的圧力振動と見なしても差し支えない. これで圧力と温度という 2 つの熱力学的状態量が明らかになったので, 注目する流体要素について熱力学的議論を展開する準備が整った.

単位時間, 単位体積あたりのエネルギー変換の大きさ w は

$$w = \rho_m f \oint T_{1,Lag} dS_{1,Lag}$$

で与えられる. ρ_m は密度, f は周波数である.

$$S_{1,Lag} = \frac{C_p}{T_m} T_{1,Lag} - \frac{\beta}{\rho_m} P_1$$

はラグランジュ的温度振動と圧力振動から局所平衡の仮定の下で決定可能なラグランジュ的エントロピー振動である. C_p と β は流体の定圧比熱と体積膨張率である. 図 5 に実際に $X = 146 \text{ mm}$ の位置での計測値から求めた w の動径分布を示す.

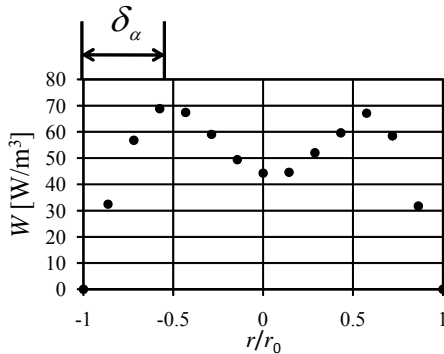


図 5 局所的エネルギー変換 w

図 5 より, すべての位置で $w > 0$ であることがわかる. つまり, どの位置でも, 流体要素は熱力学的サイクルを実行し, 「原動機」としてのエネルギー変換を行っている. しかしながら, その変換量は動径位置で大きく異なる. 管壁近傍では小さいが, 温度境界層 δ だけ離れた位置でピークをもち, 中心に向かって減少している. 熱音響エネルギー変換は決して単一の熱力学的サイクルに帰着されるものではなく, 空間的に異なる場所では異なるサイクルを通じてエネルギー変換に寄与することが分かった.

このサイクルの結果, 得られる出力仕事 w がどのように使われるかを明らかにするため, 仕事流 I

$$I = \frac{1}{2} P_1 U_1 \cos \Phi$$

も決定した. ここで Φ は圧力振動と流速振動の位相差である. この仕事流は流速の動径分布を反映して動径依存性をもつ. これを断面平均した量 $\langle I \rangle$ を図示したところ, 温度勾配のある領域で単調に増加することが分かった. この様子を図 6 に示す.

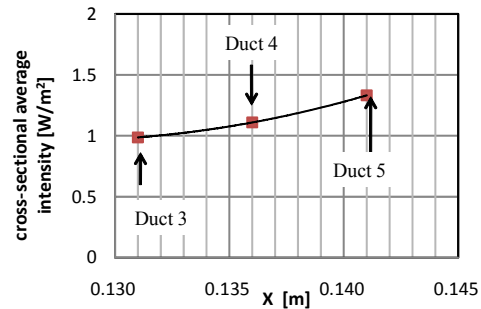


図 6 断面平均仕事流 $\langle I \rangle$

音響強度の勾配 $\text{div} \langle I \rangle = dI/dx$ と局所的エネルギー変換 w を比較したところ, 両者はよく一致することが分かった. つまり, 蓄熱器内の流体要素 1 つ 1 つが各々の熱力学的サイクルを経験し, 仕事をする結果得られる出力仕事は断面平均した仕事流 (音響パワー) の増加に使われる. 流体要素が微小な「エンジン」として機能することが熱音響エンジンの本質をなすと結論できる.

次に圧力と流速の位相が w にどのような影響を及ぼすかを明らかにするために, イナータンスチューブをつけたときの実験も行った. イナータンスチューブを接続すると, 圧力と流速の位相差が変化するだけでなく, 温度振動の位相もイナータンスチューブ接続前の -170° から 60° へと大きく変化した. 流速とオイラー的温度の位相の違いを反映して, ラグランジュ温度の位相も大きく異なる結果になった.

先と同様にして局所的エネルギー変換 w を求めてみたところ, イナータンスチューブを接続したときには w は著しく小さくなることが分かった. 位相差を変化させた場合もラグランジュ的エントロピー振動の振幅は有限なので, この結果は流体要素がエントロピー振動できなくなるからではなく, その位相がずれることに問題がある. 圧力と流速の位相差は, 熱力学的サイクルのタイミングを支配する重要なパラメーターである.

本実験で使用したガラス管では, 圧力と中心流速の間の位相差はバルブを閉じたときに得られる 100° の方がエネルギー変換に適していた. ただし, この位相差は, 管と振動

流体の熱接触の善し悪しと関係しているはずである。管の流路半径、音波の角周波数と流体の熱拡散係数で決まる無次元パラメータ ωr に応じて最適な圧力流速位相差を実現することが、熱音響エネルギー変換を効率よく行うためには重要である。

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0件)

〔学会発表〕(計1件)

1. 谷口寛樹, 琵琶哲志, 「熱音響エネルギー変換の観測」, 2009年度第4回熱音響デバイス研究会, 2010年3月28日, 東京.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

琵琶 哲志 (BIWA TETSUSHI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50314034

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号: