

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007-2008

課題番号：19560045

研究課題名（和文） 音の熱機関の理解と応用をめざして-エネルギー変換の直接観測

研究課題名（英文） For understanding of the working mechanism of acoustical heat engine and its applications – direct observation of energy conversion

研究代表者

矢崎 太一（Yazaki Taichi）

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号：20144181

研究成果の概要：熱音響現象を「音の熱機関」と捉えることによって、熱機関（エンジン）を理解する新しい概念（仕事流束および熱流）が生まれた。「パルス管エンジン」内部で仕事流束を計測することによってエネルギー変換を直接観測することができた。熱機関を定在波型と進行波型に分類し仕事源を特定することは、熱機関を応用・発展するためには極めて重要であることが明らかになった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：音響物理学

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：音

1. 研究開始当初の背景

「音」と「熱」との関連性を示す最初の一步は、17-18 世紀の Newton や Laplace による音速論争からはじまる。大気中を伝播する音波の特徴は、流体の圧縮膨張運動が断熱的になされることである。エントロピー変動がないのだから「仕事流（音響強度と同等）」と呼ばれる力学的エネルギー流束は存在するが、「熱流」は存在しない。だから断熱音波を扱う限り熱力学との関係は薄い。

一方、固体壁で囲まれた細管内を伝播する音波は常に断熱的とは限らない。振動する流体要素と固体壁との間で熱交換（エントロピーの授受）が可能になるからだ。結果として

音波による熱輸送が可能になる。断熱音波から脱却すると「仕事流」と「熱流」に関係した多様な現象が観測される。振動流体と固体壁との間の熱交換によって発生する現象を総称して熱音響現象（音の熱機関）と呼ぶ。

熱音響現象は以下の 4 つの柱からなる。

- (a) 細管内で発生する気柱自励振動
- (b) Stirling Engine に代表される原動機
- (c) 共鳴管冷凍機に代表される波動冷凍機
- (d) ドリームパイプ

最初の 3 つの柱は「仕事流」と「熱流」の間の相互変換（エネルギー変換）によって実現される。これらを「音の熱機関」と呼ぶ。ともに有限の圧力変動を必要とする。固体壁で

囲まれた狭い空間を伝播する等温音波を扱うことで、断熱音波にはない「音」本来の機能を引き出すことができる。

1996年、熱音響現象に関する初めての国際会議(日米合同音響学会)が開かれた。発表された25件の殆どは低温物理学の出身者からであった。低温の研究者は急激な温度勾配を持つ細管内の気柱音波を経験しているためであろう。熱音響の概念が新しいエンジンや冷凍機を誕生させたばかりか、一般の熱機関を理解するために広く浸透してきた結果であろう。実際にGM(Gifford-McMahon)冷凍機、パルス管冷凍機やスターリングエンジンのような蓄熱(冷)器を備えた伝統的熱機関が、熱音響現象を記述するために提案された「仕事流」や「熱流」などの概念で語られるようになってきた。

熱音響現象(音の熱機関)とStirlingエンジンにはおよそ2世紀にわたる長い歴史がある。前者はRottの研究に代表されるように流体力学的な観点から取り組まれ、また後者はUrieliのテキストでも良く知られているように、等温モデルにより熱力学的観点からの研究がなされてきた。筆者の知る限り、これら両者の類似性を学術論文としてはじめて指摘したのは、米国George Mason大学のCeperleyだと認識している。1979年、“A pistonless Stirling engine-The traveling wave heat engine”と銘打った彼の論文は、「thermoacoustic」なる用語こそ使われていないが、熱音響現象と熱機関を関連付けた最初の論文である。仕掛けは単純である。本来音波が持つ流体の「圧縮」や「膨張」からなる周期的運動に外部から「加熱」と「冷却」効果を組み込み、往復運動する流体要素がこれらの4過程をタイミングよく経験するように細工すれば、それはある種の熱力学的サイクルと同じである。という発想である。タイミングは音波が本来持つ圧力と変位の間の位相に関連する。基本的に進行波でも定在波音波でも熱機関が可能である。熱音響現象は時間と空間を含まない熱力学と、時空を含む音響学(流体力学)が融合された分野に属する。

「音の熱機関」は定在波型と進行波型に分類される。定在波型気柱自励振動の歴史は古い。熱機関の観点からの研究は1983年以後で、米国ロスアラモス国立研究所のWheatleyやSwiftのグループが中心的役割を担ってきた。定在波型が不可逆過程を利用した熱機関である一方、進行波型は本質的に可逆的熱機関である。そして実現されたのは最近のことである。現在、進行波型を中心とした熱音響現象の基礎・応用研究が国内外で精力的に進められている。

このような学問的背景のもとで、従来の熱機関を理解するために最近使われだした「熱

流束」および「仕事流束」もCeperleyの功績だと考える。熱音響現象を可動部の無い熱機関として理解するために提案され概念であり、これらは従来の熱力学で熱機関を理解するために用いられていた「熱」および「仕事」とは全く異なる物理量である。これらの「移動量」によって「局所的なエネルギー変換」や「局所的なエントロピー生成」が議論されるに至った。しかし、これらの新しい概念の有用性を実験を通じて検証しなければならない。本研究は上記のような学問的背景のもとで、新しい概念を熱機関に適用できるかどうかを検証する必要性から計画・実行されるに至った。

2. 研究の目的

上記で述べたように可動部を持つStirlingエンジンが発明されてからおよそ2世紀を経て、ループ管エンジンと呼ばれた可動部を持たないStirlingエンジンが実現した。これらのStirlingエンジンは共に熱音響現象の典型例であり、本質的に等温可逆過程を利用した進行波型熱音響エンジンに分類されている。

Stirlingエンジンと同様におよそ2世紀前、温度勾配のある管内で気柱自励振動が観測された。Sondhauss管あるいはRijke管としてよく知られている現象である。これらの現象は本質的には不可逆過程を利用した定在波型熱音響エンジンに分類されている。進行波エンジンの場合とは逆に、可動部をもつ定在波型エンジンが発見されたのはごく最近である。

2005年、濱口のグループによって「パルス管エンジン」と命名されたStirlingエンジンと類似したエンジンが開発された。金属網を積層したシリンダーの一端にピストンを取り付けた極めて単純なデバイスであった。彼らは「パルス管エンジン」が定在波型エンジンに分類されていることを主張している。もし事実なら、このデバイスは可動部を持った初めてのエンジンとなる。熱音響の立場に立った新しい手法により検証が必要であることは言うまでもない。

本研究の目的は、パルス管内での仕事流束測定を通じて「パルス管エンジン」がStirlingエンジンとは本質的に異なった定在波型熱音響エンジンに分類されることを実験的に検証し、さらにエンジンの仕事源(仕事が発生する場所)を特定することである。これらの実験を通じて、エンジン内部で実行されているエネルギー変換を直接観測することが可能である。

3. 研究の方法

実験に用いた「パルス管エンジン」の模式図をFig.1に示す。内直径 $R=16.0\text{mm}$ 、長さ

100mmのガラス管の上端から46mmの部分には50meshのステンレス網170枚が積層され、他端には orifice を通して変位振幅 10mm のピストンが取り付けられた。pulse tube と金属網の境界付近には加熱用のヒータが設置され、その温度は K 型熱電対温度計で計測された。作業気体には大気圧空気が用いられ、さらにガラス管の上端は循環水で室温に保った。装置全体は流速測定のため重力方向に立てられ実験が行われた。

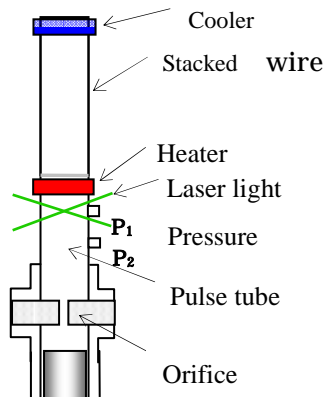


Fig.1 Experimental pulse tube engine

仕事源を特定するため、pulse tube 内で仕事流束

$$I = 0.5pucos$$

が測定された。ここで p および u はそれぞれ圧力振幅および流速振幅を示し、また ϕ は圧力と流速の間の位相差を示す。圧力は pulse tube の管壁に高温用接着剤で接合した内半径 1mm の短い銅管に小型圧力センサを取り付け、pulse tube 内の 2 箇所 (P_1 P_2) で測定された。作業気体の流速測定には LDV が用いられた。レーザ光の散乱粒子としては、パルス管内の Orifice 付近に取り付けた 5mm 角のセラミックヒータに油滴をつけ蒸発させた油蒸気を用いた。こうして圧力と流速を同時計測し、FFT アナライザを用いて p と u および ϕ を決定した。パルス管内の断面にわたる仕事流束分布を調べるため、装置全体を動径方向に移動して局所的工作流束が測定された。

4. 研究成果

Pulse tube の上部を電気ヒータで加熱していくと、およそ 200 で気柱は不安定になりピストンが周期的に振動し始めた。加熱量を増大していくと振動数が増大した。振動数が 4Hz のとき、 P_1 地点の管の中心部 ($r/R=0$, r は動径方向を示す) で観測された流速波形とそのパワースペクトルを Fig.2 に示す。波形は非周期的でスペクトルを調べると振動数の増加とともにノイズレベルの上昇が観

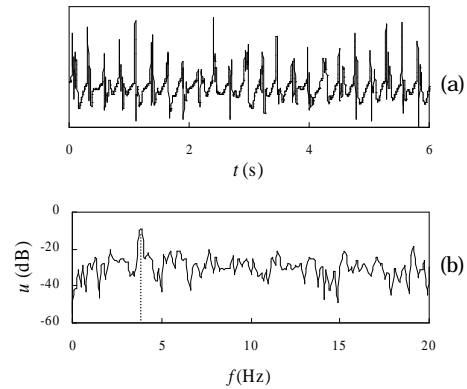


Fig.2 Wave-form(a) and its spectrum(b)

測された。これは pulse tube 内部の流体運動が乱流状態であることを示している。流速を小さくし乱流を避け層流状態で仕事流束を計測するため、加熱量を調整しながら乱流が発生する振動数を調べてみた。結果を Fig.3 に示す。およそ 3Hz 以上では流速波形は非周期的で乱流状態を示すが、振動数が減少すると流速が小さくなり流速波形は周期的(層流)になることが分かった。加熱量をおよそ 12W に調整してヒータの温度を下げ、振動数が 1Hz のもとで仕事流束分布の測定を試みた。

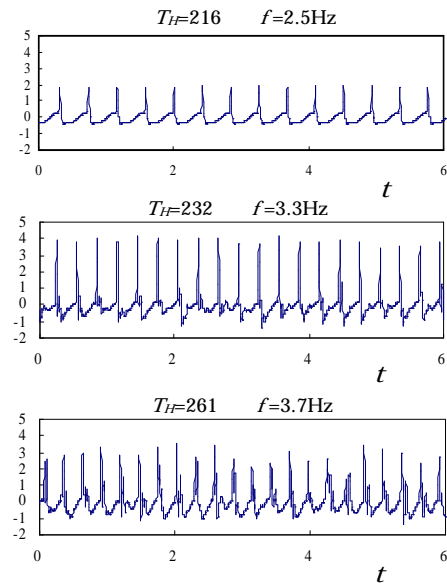


Fig.3 Sequence of velocity waveform observed in the pulse tube.

Fig.4 はヒータの温度が 211 で観測された P_1 における動径方向の仕事流束分布を示す。正の仕事流束は重力と反対方向の流れを、また負の値はピストンに向かう流れを示す。Pulse tube の core の部分と境界層付近では仕事流束の方向が異なることが分かる。Fig.4 の分布を動径方向で積分すると、ピストン方向におよそ 2.2mW の仕事が生産される

ことが分かった。

しかし、Fig.4の実験結果はパルス管エンジンの「仕事源」が位置 P_1 より上部にあることを示すだけで仕事源の場所を特定することは出来ない。金属網の中に仕事源が存在する可能性もある。我々はこの問題を解決するため、Fig.1のヒータの位置を圧力センサ P_1 と P_2 の間に設置し、振動数が 1.0Hz のもとで仕事流束の測定を行った。結果的にパルス管エンジンの仕事源が pulse tube 内にあり、そこから仕事流束が湧き出すことを観測することができた。これらの結果を論文にまとめ近日中に投稿する予定である。

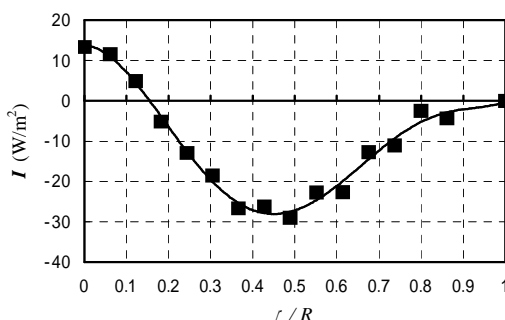


Fig.4 Work flux distribution over the cross-section of the pulse tube

< 今後の展望 > 通常の熱機関では、効率的なサイクルを遂行するための「タイミング調節」はクランクシャフトやピストンおよびバルブのような可動部によって実現される。一方「音の熱機関」では、タイミングは全て自然任せである。スピーカーのような可動部がなくても、単純な熱源だけで容易に平均気圧の 10% 以上の圧力変動が得られる。進行波音波であれば太陽強度の 100 倍を優に超える仕事流が得られる。発生した仕事流をエネルギー源に利用すれば、可動部を持たない新しいデバイスが誕生する。その一方で、「パルス管エンジン」のような可動部を持たない熱音響振動に可動部を付加したデバイスの開発は、熱音響現象の実用化を計る上で必要不可欠な研究と位置づけられる。

最近、進行波型熱機関が実現したことにより、ループ管と共鳴管を組み合わせた新しいエンジン、冷凍機および発電機に関する応用研究が急増している。米国で試作されたエンジンの熱効率の内燃機関に迫り、中国で開発された可動部を持たない進行波型冷凍機は -20 で 270W の冷凍能力をもつ。また米国では天然ガスの一部を燃やして「音の冷凍機」を駆動し、天然ガスを液化する計画も始まった。「音の熱機関」は太陽光や廃熱が利用できる外燃機関である。近い将来地球温暖化やフロンガスなどによる環境問題に貢献でき

る可能性がある。応用研究が進む一方で、エンジンを非平衡現象の立場から「仕事流」や「熱流」測定を通じた我々のような基礎研究は極めて少ない。今後、熱機関を応用発展するうえでも重要な役割を果たすものと確信している。

熱音響現象を用いたデバイスの実用化の可能性が高まる一方、解決すべき問題も山積する。特に、大振幅音波に伴う非線形現象として発現する音響流(定常流)は、進行波型熱機関に深刻な性能低下の問題をもたらす。定在波型が不可逆性の短所を持つ一方、ループ管では音響流の抑制が不可避となる。Swift は電流を制御するダイオードと同様に、音響流の方向を制御する単純なデバイスを提案した。東北大学の琵琶はこれを進行波型熱機関に適用し、流体の可視化や速度計測によって、その有効性を確認している。さらに大阪大学の杉本は衝撃波音波を抑制するための共鳴管を実現している。「音の熱機関」の出現によって、まさに「音の新展開」が始まるうとしている。

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 8 件)

熱音響エンジンと Stirling エンジン - エンジンを理解するための新しい概念 - (解説)
矢崎太一, 低温工学学会誌 vol.24, no.12 509-516(2008).(査読有)

Experimental verification of a two-sensor acoustic intensity measurement in lossy ducts.
T. Biwa, Y. Tashiro, H. Nomura, Y. Ueda and T. Yazaki; J. Acoust. Soc. Am., vol.124, 1584-1590 (2008).(査読有)

Observation of thermoacoustic energy conversion.
Y. Tashiro, T. Biwa and T. Yazaki;
J. Power and Energy Systems, vol.2, 1261-1266(2008).(査読有)

How does Stirling engine work?
T. Biwa, Y. Tashiro and T. Yazaki;
J. Power and Energy Systems, vol.2, 1254-1260 (2008).(査読有)

Measurement of work generation and improvement in performance of a pulse tube engine.
K. Hamaguchi, H. Futagi, T. Yazaki, and Y. Hiratsuka;

J. Power and Energy Systems, vol.2, 1267-1275 (2008).(査読有)

Measurements of sound propagation in narrow tubes

T. Yazaki, Y. Tashiro and T. Biwa; Proc. Royal Society Lond., A, vol.463, 2855-2862

(2007). (査読有)

Acoustic intensity measurement in a narrow duct by a two-sensor method.

T. Biwa, Y. Tashiro, H. Nomura, Y. Ueda and T. Yazaki; Rev. Sci. Inst. vol.78, 0861101-3

(2007). (査読有)

Intensity measurement of a periodic shock wave in a resonator.

T. Biwa and T. Yazaki; 19th International Congress on Acoustics Madrid, 2-7 Sept., 1-4

(2007). (査読有)

〔学会発表〕(計3件)

熱音響系で観測されてた同期現象(招待)

矢崎 太一,

振動流エネルギー変換・輸送現象研究会
(同志社大学 2008年3月).

パルス管エンジンにおける仕事流測定

吉田隆昌, 矢崎 太一, 二木 洋光,
濱口和洋

第11回スターリングサイクルシンポジウム,
国土館大学(2008年11月5日).

Intensity measurement of a periodic shock wave in a resonator.

T. Biwa and T. Yazaki;

19th International Congress on Acoustics
Madrid, 2-7 Sept., 1-4 (2007).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢崎 太一 (Yazaki Taichi)

愛知教育大学・教育学部・教授
研究者番号 20144181

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者