

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04383

研究課題名(和文) 低温・低エネルギー密度の熱源で動作する音波エンジンの開発

研究課題名(英文) Development of acoustical heat engines working with low-temperature low-energy-density heat sources

研究代表者

琵琶 哲志 (Biwa, Tetsushi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50314034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、固体の可動部品を持たない熱機関の開発を目指して、液体ピストンエンジンおよび、フライホイールを持つ音波エンジンの開発を行った。液体ピストンエンジンは、固体ピストンの往復動で作動気体を制御する代わりに複数の液柱の連成振動を利用して作動気体を制御し、エネルギー変換サイクルを実行する。その動作メカニズムの解析と設計指針の確立を理論モデルの構築と実験により行った。また、フライホイールをもつ音波エンジンのプロトタイプの開発に成功し、その基本的な動作ダイナミクスの解析と数値解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気柱振動を利用した音波エンジンは、著しく簡単な構造を持つことや特殊な材料・物質が不要で、しかもエネルギー変換に固体ピストンが本質的には不要という特徴を備えた比較的新しい外燃機関である。本研究は音波エンジンを液体ピストンを持つ系に拡張し、またその音響パワー出力を軸出力に変換するための基礎であり、音波エンジンを核とする分散型エネルギー源の構築に資する。

研究成果の概要(英文)：In this study, a liquid piston engine and an acoustic engine with a flywheel were developed for a heat engine without solid moving parts. The liquid piston engine uses the coupled vibration of multiple liquid columns to control the working gas instead of the reciprocating motion of a solid piston to execute an energy conversion cycle. We analyzed the operating mechanism and established design guidelines by constructing a theoretical model and conducting experiments. A prototype acoustic engine with a flywheel was successfully developed, and its basic operating dynamics was investigated experimentally and numerically.

研究分野：熱音響工学

キーワード：熱音響現象 音波エンジン スターリングエンジン エネルギー変換 外燃機関

## 1. 研究開始当初の背景

温度差のある気柱共鳴管で生じる熱音響自励振動をもとに、外部から与えられた熱を気柱振動の音響パワーに変換する「音波エンジン」が作成されるようになってきた。とくに気柱共鳴管やその一部にループ管を用いた音波エンジンは部品を持たないにも関わらず既存の熱機関と同等の熱効率が達成可能なことが明らかになったことから、研究が活発化した。最近では、著しく簡単な構造を持つことや特殊な材料・物質が不要という特徴から、音波エンジンの出力である音響パワーをどのように活用するかに関心が集まっている。

## 2. 研究の目的

上述の背景のもと、本研究では、液体ピストンを組み込んだ音波エンジンの開発と、フライホイールにより軸出力を発生可能な音波エンジンの開発を目的とした。

### (1) 液体ピストンを持つ音波エンジンの開発

固体ピストンの往復動で作動気体を制御する代わりに複数の液柱の連成振動を利用して作動気体を制御し、エネルギー変換サイクルを実行する液体ピストンエンジンについて、その動作メカニズムの解析と設計指針の確立および応用展開の方法を検討することを目的とした。

### (2) フライホイールをもつ音波エンジンの開発

音波エンジンを発電機へと発展するとき、これまではリニア発電機を組み合わせることが行われてきたが、いくつかの問題点(エネルギー密度が比較的小さいこと、汎用品が少ないこと)も明らかになってきた。しかし、音波エンジンで軸出力(回転動力)を作り出すことができればこの問題の多くは解決可能である。そこで最小限の機械要素を組み込んで軸出力を生み出す音波エンジンを開発することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 液体ピストンを持つ音波エンジンの開発

液体ピストンをもつエンジンには大別して二つある。一つは複数の U 字管内液柱を、蓄熱器を備えた気柱管を介してリング上に接続したループ管型と、もう一つは液柱で部分的に占められた蓄熱器を備えるループ管に一端を解放した枝管を接続した Fluidyne 型である。ループ管型について、申請者はすでにバネマスモデルによる基本的なモデル化と線形化した流体力学の基礎方程式に基づく数値計算による動作温度の解析を行っていた。これに熱交換器特性に関するモデル化を行い、所定の熱源温度条件のもとで希望の出力を発揮できる設計指針の構築を行うこととした。またその発展としてループ型装置の蓄熱器の一部を低温生成用に利用した熱駆動型クーラーの開発を行い、冷凍機への応用展開を検討することとした。また、Fluidyne 型については 1980 年代に開発を手がけた C. West が解析モデルを提示して以来、現在まで何の進展もない状況であった。そこで熱音響自励振動の観点からあらためて本質的パラメータを抽出するための基本モデル解析を行い、また線形化した流体力学の基礎方程式に基づく数値計算の方法を提案することとした。

### (2) フライホイールをもつ音波エンジンの開発

フライホイールをもつ音波エンジンとして本研究以前に存在していたのは、ループ管の代わりに直線上の管をもつ「パルス管エンジン」であった。このエンジンでは、装置を所定の温度以上に加熱するとフライホイールの定常回転が維持されることは示されていたが、そのエネルギー変換の基本メカニズムはスターリングエンジンとは異なることが指摘されていた。本質的に高いエネルギー変換効率をもつスターリングサイクルで動作するためには直線上の管をループ管に置き換える必要があった。そこで蓄熱器を備えたループ管とピストンおよびフライホイールを用いて新規の装置を作成し、その動作確認を行うとともにエネルギー変換メカニズムがスターリングサイクルに由来することを実験的に明らかにすることとした。熱音響自励振動の解析では調和振動する流体を念頭に置いて、線形化した流体力学の基礎方程式で検討することが多かった。しかしフライホイールを持つ音波エンジンでは加熱量の増大とともに回転数が増加するため流体振動の周波数は変化する。そのような場合にもこれまでの熱音響の知見が活かせるような数値計算の枠組みを整理することとした。

## 4. 研究成果

### (1) ループ型液体ピストンスターリングエンジンの設計指針の構築

図 1 に示すような、4 つの U 字管内の液柱と 4 つの気柱管をリング上に接続して得られるループ型液体ピストンスターリングエンジンについて、その固有周波数と固有モデルを明らかにするために、液柱部分を質量、気柱部分をガスバネ、また液柱に作用する重力をバネの作用として扱う力学モデルを作成した。蓄熱器と熱交換器はこの時点では考慮に入れていないが、より精密な解析の段階で検討することとし、この段階では、より基本的な液柱体積が全体に占める割合や気柱部分の体積が系に与える影響を調査し、固有周波数と基本モードにおける気柱部分にお

る比音響インピーダンス（圧力振動と流速振動の複素振幅の比）を定式化した。

次に、熱音響理論の結果を用いて、蓄熱器における熱音響エネルギー変換効率を局所的なカルノー効率に対する比として、比音響インピーダンスの大きさと位相角に対して図示し、望ましい比音響インピーダンスはどうあるべきかを整理した。その上でそれを実現するための装置の形状パラメータを決定した。さらに、所定の熱源温度条件のもとで望みの出力仕事（単位時間あたりのエネルギー変換の大きさ）を得るために最低限必要な熱交換器の伝熱面積を物理モデルに対して予測し、決定した。得られた装置形状を熱音響分野でよく用いられる数値解析モデル DeltaEC に入力し、その性能を数値的に評価した。その比較から概略設計として十分に利用できることがわかった。

これまでの音波エンジンの設計では、様々な装置寸法を数値計算で試して相互比較して最終計上を決定することが多かったが、多くのパラメータを含む現実に近い装置設計では数値的な最適化は難しく、またできたとしてもその物理的理解は難しい。本研究で示した設計方法は明確な物理的根拠を持つため、これで決定した装置計上を出発点としてその周辺を数値的に探索することには意義があると考えられる。

P. Murti, A. Takizawa, E. Shoji, T. Biwa, “Design guideline for multi-cylinder-type liquid-piston Stirling engine,” Applied Thermal Engineering, 200 117635 (2022).

### (2) ループ型液体ピストンスターリングエンジンを応用した熱駆動型クーラーの開発

ループ型液体ピストンスターリングエンジンの応用として、熱駆動型クーラーの開発を試みた。4つある蓄熱器の一部を振動発生用、残りをその振動によって実現される逆スターリングサイクルによって冷却作用を発揮する低温生成用として使用する。そのため低温生成用蓄熱器の個数を1つ、2つ、3つのいずれにするか、また2つの場合は隣り合わせて配置するか、振動発生用蓄熱器と交互に配置するか、という選択肢が生まれる。そこで実験的にどの配置が最も有効化を明らかにした。

結果的に最も冷却温度が低く、また COP が高かったのは、2つの蓄熱器を低温生成用とし、その二つを隣り合わせて配置する方法であった。この原因について、4つの液柱の振動状態の対称性に注目して調べたところ、4つある蓄熱器の一部を低温生成用としたことで全体的な対称性が低下し液柱振動の振幅や位相関係がもとの装置から大きく変化することがわかった。そこで、液柱の質量を変化させることで対称性の回復を図った。その結果、低温生成用蓄熱器が1つの場合、液柱質量を変化する前は冷却温度は $5^{\circ}\text{C}$ であったが、質量変化後は $-4^{\circ}\text{C}$ に向上することがわかった。また蓄熱器2つを交互に配置した場合には振動そのものが発生しなかったが液柱質量の変更により振動が発生し、冷却温度が比較的高い場合には、隣り合わせて配置した場合よりも冷凍出力が向上することがわかった。この成果をもとに冷却部に簡易のクーラーボックス（内容量  $3.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ）を取り付けた装置を作成し、庫内温度 $2^{\circ}\text{C}$ を実現した。

P. Murti, E. Shoji, T. Biwa, “Analysis of multi-cylinder type liquid piston Stirling cooler,” Applied Thermal Engineering, 219, 119403 (2023).

### (3) Fluidyne 型液体ピストンスターリングエンジンの線形振動解析

図2に示すような Fluidyne 型液体ピストンスターリングエンジンにおいて、その固有周波数と固有モードを明らかにするために、液柱を質量、気柱をガスバネ、また重力の作用を質量に取り付けられたバネとした力学モデルを作成した。得られた固有周波数は West が導出した結果を本質的に再現した。また併せて行った固有モードの解析から、エネルギー変換に適した装置形状の決定方法を示した。そのようにして決定した装置寸法を持つ Fluidyne を作成し、実験によりスターリングサイクルが実行されること、および $53^{\circ}\text{C}$ の温度差があるだけで振動が開始することを明らかにした。1980年代以降に蓄積されてきた熱音響自励振動に対する理解の仕方や方法が Fluidyne 型液体ピストンスターリングエンジン

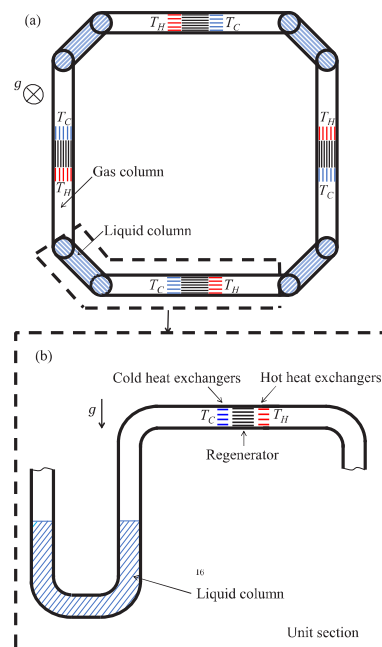


図1 ループ型液体ピストンスターリングエンジンの模式図。(a)上面図、(b)側面図。

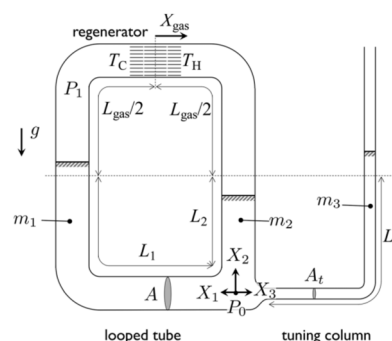


図2 Fluidyne 型液体ピストンスターリングエンジンの模式図。

にも有効であることを示す結果となった。

M. Ito, P. Murti, S. Tsuboi, E. Shoji and T. Biwa, “Analysis of the linear oscillation dynamics of Fluidyne engines,” The Journal of the Acoustical Society of America 151, 1133-1141 (2022).

(4) 液体ポンプを接続した Fluidyne 型液体ピストンスターリングエンジンの熱音響解析

Fluidyne 型液体ピストンスターリングエンジンを熱音響現象の一つとみなして、これまで熱音響系で用いられてきた伝達行列の方法を用いて数値解析を行った。この方法では装置をいくつかの要素に分割し、その要素ごとに線形化した流体力学の基礎方程式の解をもとに伝達行列を作成して、それらの積から全系の伝達行列を作成した。さらに境界条件を考慮することで特性方程式を求め、それを数値的に解くことで線形安定となる温度条件を探索した。その結果、既報において検討したバネモデルから示唆される装置寸法で発振温度が低下することが数値的に明らかになった。またこの数値モデルに対して、さらに逆止弁を二つ持つ液体ポンプをモデル化して組み込み、液体ポンプを接続した Fluidyne の特性評価を数値的に行った。得られた結果を実験と比較したところ系内の圧力振幅の大きさについては定量的にもよい一致を示すものの、液体ポンプの特性はあきらかに実験が数値計算結果を下回る結果となった。これは数値モデルで考慮していない損失があることを示しており、改善の余地があることがわかった。

T. Biwa, P. Murti, E. Shoji, “Thermoacoustic modeling of Fluidyne engine with a gas-coupled water pumping line,” The Journal of the Acoustical Society of America, 152, 2212 (2022).

(5) フライホイールを持つ熱音響スターリングエンジンの作成

図 3 に示すような、蓄熱器および一対の熱交換器を含むループ管に、ピストン、コネクティングロッド、クランク、フライホイールを接続した熱音響エンジンを作成した。この装置はスターリングエンジン、および定在波型エンジンと類似点、および相違点を持ち、図 4 に示す分類表の 4 番目のカテゴリーに位置する初めてのエンジンである。この分類表は、エネルギー変換に関与する熱力学的サイクル（スターリングサイクルもしくは本質的不可逆サイクル）、一定周波数動作 / 一定振幅動作、固体可動部品の点数で分類されている。実験では図 3 の装置がある温度差以上の条件で定常回転動作することが明らかになった。またその状態において、作動流体の圧力変動と流速変動の同時計測を行った結果、スターリングサイクルを通じてエネルギー変換が行われていることを示す実験的証拠が得られた。またある程度以上の加熱温度では、フライホイールが安定点の周りに回転振動を繰り返す秤動モードと、一定方向に回転運動をする回転モードの両方が存在しうることを実験的に観測した。このような 2 種類の動作モードが存在することはフライホイールを持つ系に特有の興味深い現象であり、複雑な非線形ダイナミクスの問題を含むと予想される。

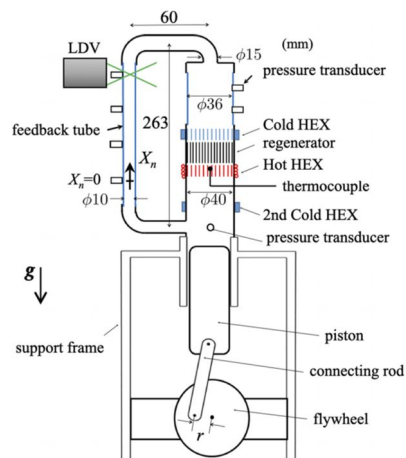


図 3 フライホイールを持つ熱音響エンジンの模式図。

T. Biwa, T. Watanabe, G. Penelet, “Flywheel-based traveling-wave thermoacoustic engine,” Applied Physics Letters, 117 243902 (2020).

		Reversible thermodynamic cycle (Stirling cycle)		Irreversible thermodynamic cycle
		Solid piston/displacer	Less/no moving parts	Less/no moving parts
Operation mode	Constant frequency, variable amplitude	1. free-piston Stirling engines	3. traveling-wave engine + linear load	5. Standing-wave engine + linear load
	Constant amplitude, variable frequency	2. kinematic Stirling engines	4. traveling-wave engine flywheel	6. Standing wave engine + flywheel

図 4 スターリングエンジン(1,2)および熱音響エンジン(3-6)の分類表。

(6) フライホイールを持つ熱音響スターリングエンジンの数値解析

図 3 の装置では、ある温度差以上では回転動作が実現し、温度差が上昇するとともに回転数が増加する。これは通常の熱音響エンジンとは対照的な動作である。従来型の熱音響エンジンで発生するのは系の固有周波数の音響振動であり、温度差が上昇するとその周波数のまま振動振幅が増大する。そのため、調和振動を前提にして理論解析および数値解析が行われてきた。本研究では、フライホイールの回転軸周りの回転の運動方程式を考察の対象とし、時間領域において数値解析を行った。従来型の解析ではループ管の音響インピーダンスが用いられてきていたが、これは周波数領域における概念のためそのままの形では利用できない。そこでシステム同定において用いられる方法を適用し、時間領域における表現に変換して数値解析を実施した。その結果、温度差が十分でない場合は初期回転のあと、秤動状態を経て停止すること、また温度

差が十分高い場合には定常回転状態に移行することが数値的にも再現された。回転周波数に関する系の分岐図を作成したところ実験とも定量的に一致することが示され、本計算手法の妥当性が示された。本研究により、フライホイールを持つ熱音響エンジンの基本的な解析の仕方が確立したと考えている。

G. Penelet, T. Watanabe, T. Biwa, “Study of a thermoacoustic-Stirling engine connected to a piston-crank-flywheel assembly,” *Journal of Acoustical Society of America*, 149 1674 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Murti Prastowo, Takizawa Akira, Shoji Eita, Biwa Tetsushi	4. 巻 200
2. 論文標題 Design guideline for multi-cylinder-type liquid-piston Stirling engine	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 117635 ~ 117635
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2021.117635	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ito M., Murti P., Tsuboi S., Shoji E., Biwa T.	4. 巻 151
2. 論文標題 Analysis of the linear oscillation dynamics of Fluidyne engines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 1133 ~ 1141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0009571	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Biwa T., Watanabe T., Penelet G.	4. 巻 117
2. 論文標題 Flywheel-based traveling-wave thermoacoustic engine	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 243902 ~ 243902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0022315	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Penelet Guillaume, Watanabe Takumaru, Biwa Tetsushi	4. 巻 149
2. 論文標題 Study of a thermoacoustic-Stirling engine connected to a piston-crank-flywheel assembly	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 1674 ~ 1684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/10.0003685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する



〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 滝沢彬
2. 発表標題 液体ピストンスターリングエンジンを用いた発電機の実証
3. 学会等名 日本伝熱学会学生発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 みひろ
2. 発表標題 フルイダインの発振温度比の計測と解析
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Prastowo Murti
2. 発表標題 Design and construction of multi-cylinder type liquid piston Stirling engine
3. 学会等名 International Stirling Engine Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumaru Watanabe
2. 発表標題 Demonstration of flywheel-based traveling-wave thermoacoustic engine
3. 学会等名 International Stirling Engine Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 琵琶哲志
2. 発表標題 Q値の数値解析からみたフルイダインの調整管の役割
3. 学会等名 第23回スターリングサイクルシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺拓丸
2. 発表標題 フライホイール型熱音響エンジンの出力と効率の測定
3. 学会等名 第23回スターリングサイクルシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺拓丸
2. 発表標題 フライホイール型熱音響エンジンの実証
3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤みひろ
2. 発表標題 フルイダインの動作解析
3. 学会等名 日本音響学会2020年秋季研究発表会
4. 発表年 2020年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------