

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19861

研究課題名（和文）スターリングエンジンイノベーション：キネマティック型進行波音波エンジンの開発

研究課題名（英文）Stirling engine innovation: development of kinematic acoustical heat engine

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） 4,500,000円

研究成果の概要（和文）：ループ管型進行波音波エンジンにピストンクランクフライホイールで構成される回転機構を組みつけたキネマティック型進行波音波エンジンを開発した。このエンジンはスターリングエンジンから固体ディスプレーサーを取り除いたエンジンと見ることができ、高効率で知られるスターリングエンジンの機械構造の単純化に貢献する。本研究では、この装置の回転周波数を支配する重要な要因がループ管部分の音響インピーダンスの実部であることを見出した。またその音響インピーダンスの実部を増大する設計方法を等価回路に基づいて解析的に導出した。実験的検証によりその設計方針の妥当性も示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギー問題、環境問題に関連して、多様な熱源のもとで動作可能な、外燃機関に関心が寄せられるようになってきた。必ずしも高温の熱源が利用できない状況では、外燃機関はなるべく単純な構造であることが望ましい。ループ管型進行波音波エンジンは、従来型の機械式スターリングエンジンから固体ディスプレーサーを取り除いた単純構造の熱機関であり、本質的な高効率と単純構造を兼ね備えている。本研究では、その動作メカニズムを明らかにするとともに、性能向上に向けてループ管の音響インピーダンスの実部を増加させるための設計方法の指針を解析的に示した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a kinematic traveling wave acoustic engine that integrates a loop-tube traveling wave acoustic engine with a rotating mechanism comprising a piston, crank, and flywheel. This engine can be regarded as a kinematic Stirling engine without a solid displacer, potentially simplifying the mechanical structure of the high-efficiency Stirling engine. Our study identified the real part of the acoustic impedance of the looped tube as a crucial factor in elevating the engine's rotation frequency. We analytically derived a design method based on the equivalent circuit model to increase this impedance. Experimental verification confirmed the validity of our design methodology.

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

(1) スターリングエンジンは、可逆サイクルであるスターリングサイクルを実行して機械動力を発生する外燃機関であり、これに電気機械変換器を接続することで多様な熱源で動作する熱発電機となる。国内のスターリングエンジン技術は1990年代の国家プロジェクトを通じて高いレベルを達成するに至っているが、その方向性は高温度差でしかも高効率で動作するエンジン開発にあった。このスターリングエンジンの動作温度を200°Cまで低下させ、しかも機械構造の簡略化により、長寿命化、低価格化が達成できれば、100Wから10kWクラスの発電機として、産業排熱、自然エネルギー（太陽光熱、木質バイオマスの燃焼熱）の回収・利用システムの中核技術になり得る。

(2) スターリングサイクルを基本原理とする外燃機関に熱音響エンジンがある。熱音響エンジンは温度勾配を局所的に有する気柱管に発生する熱音響自励振動に対する基礎研究の成果に基づいて、提案・開発された。その特徴は固体ピストンを使わずに気柱振動に伴う作動気体の圧力変動と流速変動を通じてスターリングサイクルを実行することであり、結果的に著しく単純な構造の熱機関「熱音響エンジン」となる。この熱音響自励振動を発電に応用する試みがすでに行われているが、そこで必須なのが気体の往復振動から電力に変換する機構である。これまではリニアオルタネータ（直動発電機）を専用開発して熱音響エンジンに組み合わせることで、熱音響発電機が試作されてきたが、市販の安価なリニアオルタネータが市場になく、専用設計のリニアオルタネータを用いることから比出力に対して高価な装置となっていた。

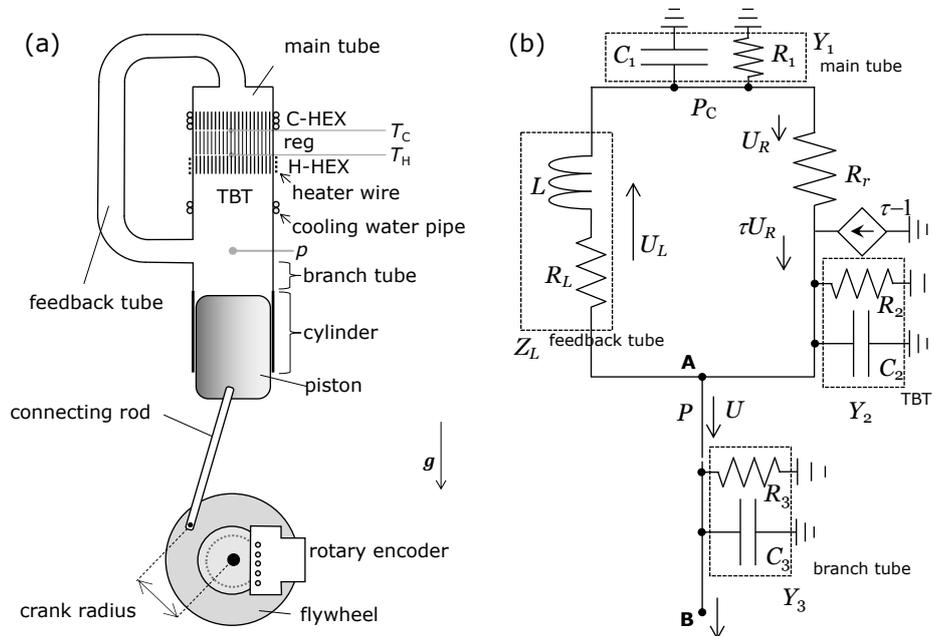


図1 (a)回転式熱音響エンジンの模式図と(b)その等価電気回路。ループ管型の熱音響エンジンとピストン、コネクティングロッド、クランク、フライホイールからなる回転機構で構成される。ループ管はフィードバック管、メイン管、低温および高温熱交換器、蓄熱器、熱緩衝管で構成される。フライホイールの回転軸に回転発電機を接続すれば全体として熱発電機となる。等価回路ではループ管部分のみを模擬した。

2. 研究の目的

(1) これまでリニアオルタネータを利用してきた熱音響エンジンにピストン、フライホイール、および回転発電機を組み合わせ、気体の振動運動を回転運動に変換し、その軸出力で発電を行う回転式熱音響発電機(図1(a))の開発を目標とした。フライホイールを介して得られる軸出力で発電する従来型のスターリングエンジンはキネマティック型スターリングエンジンと呼ばれ、世界中で開発が行われている。本研究で目指す回転式熱音響発電機は、キネマティック型スターリングエンジンの機械的構造を革新的に簡略化することに対応する。従来型の熱音響エンジンは気柱の固有モードで動作するため、振動は装置形状で決まる定数であり、加熱温度差の増加とともに振動振幅が増加する。それに対してフライホイールを持つ装置では振動振幅がクランク半径で機械的に拘束されており、加熱温度差の増加とともに回転数が増加することになる。この違いが回転式熱音響発電機の理解と応用にとって課題となる。

(2) 上記目標を達成するために、以下のような研究目的を設定した。

- ① ピストン, コネクティングロッド, クランクを介してフライホイールと接続された回転式熱音響エンジンを試作し, 動作させる.
- ② 回転式熱音響エンジンの動作周波数と加熱温度差の関係を計測し, その動作特性を支配する本質的物理量を明らかにする.
- ③ 回転式熱音響エンジンの性能向上に必要な設計指針を見出し, 実験的に検証する.

3. 研究の方法

本研究計画採択時点において, すでに回転式熱音響エンジンを試作することができた. そこでその動作解析から本研究をスタートすることにした.

- (1) 動作解析のために, 加熱温度差とフライホイール回転数の関係を測定する. そのために, 光学式ロータリーエンコーダーによる回転角速度計測と作動気体の圧力変動計測を, 定常加熱時に実施できる計測システムおよび取得したデータから, 時間平均回転周波数とそのまわりの回転周波数揺らぎを決定する解析方法, およびフライホイール回転角からピストン速度をもとめ, 圧力, ピストン断面積と速度で決まる音響インピーダンスを決定する解析方法を作成する.
- (2) 回転式熱音響発電機の心臓部となるループ上の熱音響エンジンの設計方針を明らかにするために, ループを構成する各配管部品を等価な電気回路素子に置き換えた等価回路を考案し, その解析からループの第1次設計を行う方法を示し, 実験で検証する.

4. 研究成果

- (1) 試作した回転式熱音響エンジンに対して, 時間平均回転周波数と加熱温度差の関係を実験的に決定した. 図2に示すように, クランク半径ごとに時間平均回転周波数は異なるものの, いずれの場合も加熱温度差が増加するとともに回転数は増加し, 最大で250 Kのとき12 Hzに達した. 回転式熱音響エンジンの動作確認ができた.
- (2) 実験的に得られた回転周波数の加熱温度差依存性を確認するために, フライホイールの回転軸に関する回転の運動方程式をもとに考察した.

$$(I + Mr^2 \sin^2 \theta) \ddot{\theta} + Mr^2 \dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta + Mgr \sin \theta = -rSp \sin \theta - rF_d \sin \theta \operatorname{sgn}(\dot{\theta} \sin \theta)$$

ここで, I はフライホイールの慣性モーメント, M はピストン質量, r はクランク半径, θ は回転角, g は重力加速度, S はピストン断面積, p はループ内の作動気体の変動圧力, F_d はピストンとシリンダの摩擦力, $\operatorname{sgn}(x)$ は x の正負に応じて+1および-1となる関数である. 回転動作が定常的で, しかも時間平均回転周波数に対してゆらぎ成分が小さいと仮定すると, 回転の運動方程式から, 以下の2式を導出することができる.

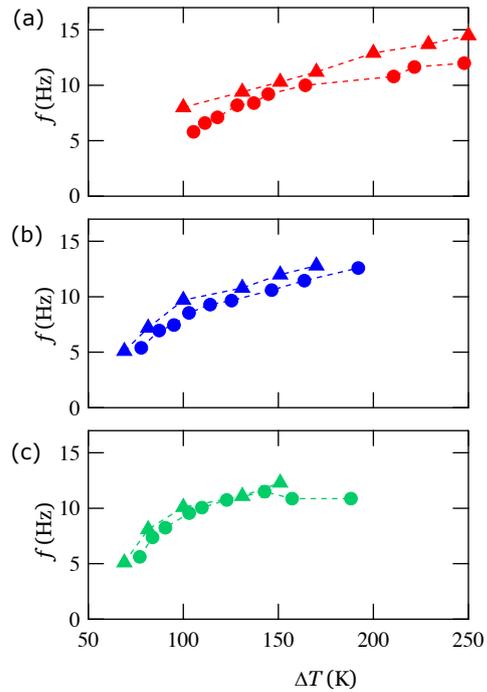


図2 時間平均回転周波数 f と蓄熱器両端の温度差 ΔT の関係. (a), (b), (c)はそれぞれクランク半径が5 mm, 10 mm, 20 mmの場合の結果. 円は実験結果を表し, 三角は運動方程式による予測結果を表す.

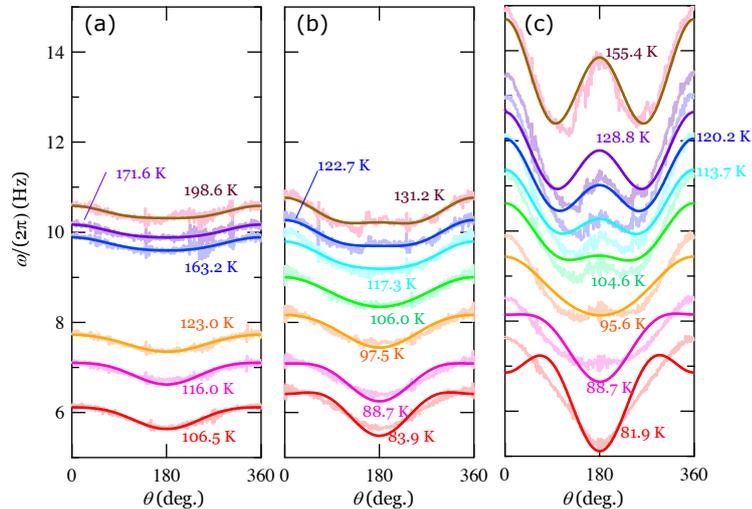


図3 回転周波数の回転角依存性. (a), (b), (c)はそれぞれクランク半径が5 mm, 10 mm, 20 mmの場合の結果. 薄い色の曲線が実験結果, 濃い色の実線が運動方程式による予測結果を表す.

$$-\frac{1}{2}(rS\bar{\omega})^2 \text{Re}[Z] = 4rF_d \frac{\bar{\omega}}{2\pi}$$

$$\omega'(\theta) = \frac{Mgr}{\bar{\omega}I} \cos \theta + \left(\frac{Mr^2\bar{\omega}}{4I} + \frac{(rS)^2 \text{Im}[Z]}{4I} \right) \cos 2\theta + \left(\frac{(rS)^2 \text{Re}[Z]}{4I} + 0.21 \frac{F_d r}{\bar{\omega}I} \right) \sin 2\theta$$

なお Z はループ管熱音響エンジンの接続点音響インピーダンスであり、 $\bar{\omega}$ は時間平均した回転角速度、 ω' はその周りの時間的揺らぎを表す。第 1 式は熱音響エンジンとピストンフライホイールのエネルギーバランスにより時間平均回転数が決まることを意味する。

この式に基づいて、 Z およびフライホイールの散逸エネルギーを独立に実験で求め、その関係から決定した時間平均回転周波数と温度差の関係を図 2 に合わせて示した。実験値とエネルギーバランスに基づいて決定した値は、定量的な一致を示した。また同様に求めた回転角速度のゆらぎについても実験と運動方程式に基づいて得られた曲線を求め、図 3 に合わせて示した。両者は定性的に一致しており、回転の運動方程式の解析が系の本質的なダイナミクスを捉えていることがわかった¹⁾。

(3) ここまでの解析により、ループ管型の熱音響エンジンにとって本質的な物理量は接続点における音響インピーダンスの実部 $\text{Re}[Z]$ であることが明らかとなった。そこで、望みの音響インピーダンスを実現するためのループ管の設計方針を等価回路に基づいて検討した。等価回路を図 1(b) に示す。フィードバック管に使用する比較的細い配管部品はインダクタンス、比較的太い管はキャパシター、また温度勾配のある蓄熱器は抵抗および電流供給源でモデル化した。それぞれの回路定数は配管の幾何学的形状と作動気体の熱物性値を元に音響理論に基づいて決定した。回路方程式を元に決定した接続点音響インピーダンスは次式のようにになった。

$$\text{Re}[Z] = \frac{A}{\bar{\omega}C_1} \frac{1}{A^2 + [B + (C_2 + C_3)/C_1]^2}$$

$$A = (\tau - 1) \frac{a}{1 + a^2}, B = A + 1, a = \frac{\bar{\omega}L}{R_r}$$

これをもとに太い管に相当するキャパシター C_1, C_2, C_3 を調整することが接続点音響インピーダンスの実部を簡便に向上させる方法であることがわかった²⁾。

(4) 音響インピーダンスの解析結果に基づいて、ループ管部分に改良を施し、フライホイールと接続して、時間平均角振動数と温度差の関係を実験的に求めた。その結果を図 4 に示す。改良前と比べて改良後には、ある温度差における回転周波数が向上しており、改良が高価的であることを示す結果となった³⁾。

(5) 本研究で得られた成果は回転式熱音響エンジン発電機を開発するのに有用な知見となった。すなわち、等価回路に基づく第 1 次設計でループ管の概略を決定して良いこと、またその際、接続点の音響インピーダンスの実部がなるべく大きくなるように装置形状を決めればよいこと、が明らかとなった。今後はこの方針に従いながら、また流体力学の基礎方程式に基づく数値計算や加圧気体を作動気体とすることによる軸出力の強化によって、現実的な性能の回転式熱音響発電機を試作したい。

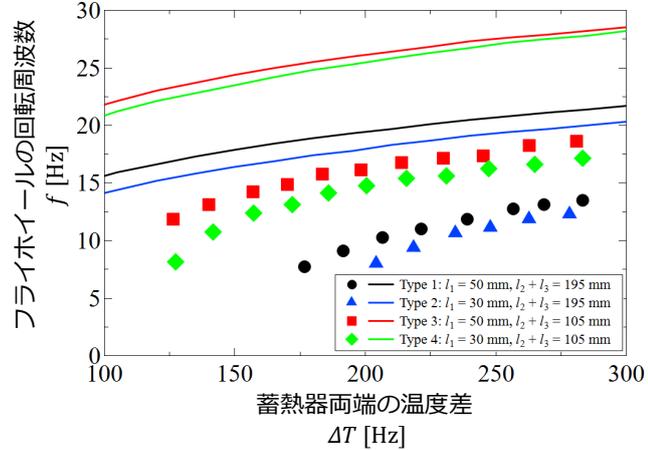


図 4 等価回路の解析結果に基づいて、4 種類のループ管エンジンを作成し、それぞれを同じフライホイールに接続したときの回転周波数と蓄熱器両端の温度差の関係。マーカーで図示されているのが実験値で、曲線が運動方程式に基づく予測結果。定量的には実験結果と予測結果は異なっているが、各部の寸法変更に伴う時間平均回転数の変化の傾向は再現されることがわかった。

<引用文献>

- 1) T. Watanabe, E. Shoji, T. Biwa, G. Penelet, "Rotational Dynamics of a Looped-Tube Thermoacoustic Engine with a Flywheel," *Physical Review Applied*, 18 044079 (2022).
- 2) 琵琶哲志, 庄司衛太, 等価回路に基づくフライホイール駆動用音波エンジンの設計, 第 24 回スターリングサイクルシンポジウム (神奈川大学), 2022 年.
- 3) K. Tetsuska, E. Shoji, T. Biwa, "Design methodology for a looped-tube thermoacoustic engine incorporating a flywheel," *The 20th International Stirling Engine Conference*, Naples, Italy, June 25-27, 2024 (発表予定).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Watanabe T., Shoji E., Biwa T., Penelet G.	4. 巻 18
2. 論文標題 Rotational Dynamics of a Looped-Tube Thermoacoustic Engine with a Flywheel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 044079 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.18.044079	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 琵琶 哲志, 庄司 衛太
2. 発表標題 等価回路に基づくフライホイール駆動用音波エンジンの設計
3. 学会等名 第24回スターリングサイクルシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 手塚啓太, 琵琶哲志
2. 発表標題 等価回路に基づくフライホイール型熱音響エンジンの設計と実験的評価
3. 学会等名 熱音響研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keita Tetsuka, Eita Shoji, Tetsushi Biwa
2. 発表標題 Design Methodology for a Looped-Tube Thermoacoustic Engine Incorporating a Flywheel
3. 学会等名 The 20th International Stirling Engine Conference (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------