スターリングサイクルを応用した熱スピーカーの原理*

佐藤 智 明^{*1}

Principle of Heat Speaker to which the Stirling Cycle is Applied

Tomoaki SATO^{*2}^{*2} Department of Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology,
1030 Shimo-ogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292 Japan

In this paper, as a new application of Stirling cycle, it is proposed to apply the Stirling cycle to heat speaker which amplifies sound vibration by means of the thermal energy. The heat speaker is composed of a pressure vessel whose capacity is variable, a displacer to which a voice coil is attached, a vibration board attached to the pressure vessel and a permanent magnet placed around the vessel. The displacer with voice coil is vibrated by the magnetic force which is generated by electric current of sound signal flowing in the voice coil. The vibrating displacer makes the air come and go between the hot side and the cold side in the pressure vessel. The air temperature goes up and down, and then the pressure follows it. The capacity of the vessel repeats expansion and shrinkage by the pressure change of the air. The moving vessel vibrates the vibration board and it yields the sound.

Key Words: Stirling Engine, Sound and Acoustic, Energy Conversion, Speaker

1. はじめに

スターリングサイクルは、これまで熱エネルギーを動力に変換する熱機関として、あるいは動力を使って熱エネルギーを移動させる冷凍装置あるいはヒートポンプとして応用されてきた。本研究では、このようなこれまでのスターリングサイクルの利用方法とは全く異なり、音声信号振動の増幅、即ちスピーカーに応用することを提案する。本報では、本スピーカーの原理について解説するとともに、簡単な装置を用いて予備実験を行い、本スピーカーの実現可能性について検討したので報告する。

2. 熱スピーカーの原理

2・1 装置の構成および動作 図1に本装置の概要を示す。従来のスピーカーはボイスコイル（電磁誘導コイル）と振動板（コーン）が一体となっており、音声信号電流による電磁誘導で励起されたボイスコイルの振動が振動板を直接振動させて音波が発生する。本研究の装置は、従来型のスピーカーの振動板部とボイスコイル部を切り離し、ボイスコイルに円柱状に体積を持たせ、スターリングエンジンにおけるディスプレーサーとして動作させる（以下ボイスコイルディスプレーサー

と呼ぶ）。ボイスコイルディスプレーサーの作動する空間は密閉容器となっており、2つのシリンダーがハメ合わさった状態で、それぞれのシリンダーの内壁と外壁が摺動して容積が可変となっている（密閉容器の膨張収縮機構はベローズ等を使ってもよい）。図1において、密閉容器は左側が加熱側、右側が冷却側となっており、ボイスコイルディスプレーサーが音声振動すると、空気が容器内を加熱側と冷却側を行き来して加熱および冷却を繰り返す。これによって、音声信号に同期した内部温度の上昇および低下が起こり、内部圧力も上昇および下降を繰り返す。この内部圧力変化に伴って密閉容器のシリンダーの摺動部が伸縮する。密閉容器の冷却側の底部（図中右側）にはスピーカーの振動板が取り付けられており、音声信号によって伸縮するシリンダーの振動によって振動板が振動し、音波を発生することで本装置のスピーカーとしての機能が達成される。また、振動板が発生する振幅は加熱側と冷却側の温度差、即ちシステムに加えられる熱量の増加とともに増幅される。したがって、本装置はボイスコイルに流す音声信号電流によって発生した微弱な音声振動を、熱エネルギーによって、より大きなエネルギーレベルの音波に増幅する音声スピーカーとして機能させることができる。

* 原稿受付 2009年12月2日。

^{*1} 正員, 神奈川工科大学工学部(〒243-0292 厚木市下荻野1030)。

E-mail: satotomo@me.kanagawa-it.ac.jp

Fig. 1 Principle of Heat Speaker.

Fig. 2 Cycle of the Heat Speaker.

2・2 熱スピーカーによる音波発生および増幅の原理 ここでは、本システムは理論的にはスターリングサイクルであるものと仮定して検討を行う。図2にサイクル図を示す。

図2中の状態①から状態②にかけては、図1中の左側（加熱側）にあったボイスコイルディスプレーサーが磁力によって右方向（冷却側）に移動する。逆に、内部空気は右側（冷却側）から左側（加熱側）に移動し、加熱される。これによって、密閉容器内部空気の平均温度は上昇し、内部圧力も上昇する。ここで、音声信号電流の強弱によってボイスコイルディスプレーサーの移動量が変化するため、加熱量が音声振動の振幅に従って変化する。

状態②から状態③ではシリンダー摺動部が摺動し容積が膨張する。この時シリンダーに取り付けられたスピーカー振動板は右方向に移動する。振動板は膨張するシリンダー容器内空気が大気圧になるまで移動する。これが周囲空気を移動させ音

波となる。前述の状態①から状態②の過程において加熱された熱量、即ち作動流体の上昇温度（上昇圧力）によってこの移動量（ストローク）も変化する。また、シリンダー内空気の膨張時に、一部の空気が加熱領域から冷却領域に移動するため内部平均温度は若干低下する（図2(b)中の破線部）。

状態③から状態④では、図1中の右側（冷却側）にあったボイスコイルディスプレーサーが磁力によって左方向（加熱側）に移動する。逆に、内部空気は左側（加熱側）から右側（冷却側）に移動し、冷却される。これによって、密閉容器内部空気の平均温度は低下し、内部圧力も低下する（大気圧よりも低くなる）。ここで、状態①から状態②と同様に、音声信号電流の強弱によってボイスコイルディスプレーサーの移動量が変化するため、冷却熱量が音声振動の振幅に従って変化する。

状態④から状態①では、大気圧に押され、シリンダー摺動部が収縮し、内部空気が圧縮される。この時シリンダーに取り付けられたスピーカー振動板は左方向に移動する。振動板は圧縮される内部空気圧が上昇し大気圧になるまで移動する。これが周囲空気を移動させ音波となる。前述の状態③から状態④の過程において冷却された熱量、即ち作動流体の下降温度（下降圧力）によってこの移動量（ストローク）も変化する。また、シリンダー内空気の圧縮時に、一部の空気が冷却領域から加熱領域に移動するため内部平均温度は若干上昇する（図2(b)中の破線部）。

以上のように、基本的にはスターリングサイクルに準じたサイクルを繰り返すことで本スピーカーのサイクルが成立する。ここで、動力機関としてのスターリングエンジンはパワーピストンのストロークは固定されているが、本スピーカーシステムにおける振動部のストロークは、内部空気の圧力が大気圧になるまでを基準として、入力信号振動に呼応して変化するため、音声信号の複雑な波形を忠実に再現することができる。

3. 音声信号増幅確認実験

3・1 実験装置概要および実験方法 本原理によるスピーカー装置の実現性を確かめるための実験を行った。図3にその概要図を示す。本装置は、ディスプレーサーをボイスコイルによって振動させる代わりに、電気モーターによってディスプレーサーを駆動する。外部電気モーターによる回転動力を滑車機構およびクランク機構によって往復運動に変換し、コネクティングロッドを介し

Fig. 3 Experimental Apparatus.

Fig. 4 Experimental Result.

て圧力容器 1 内のディスプレイサーを往復運動させる。圧力容器 1 の片側 (図中右側) に熱湯をかけ流すことで高熱源側とする。ディスプレイサーの往復運動によって内部作動媒体である空気が加熱させられたり冷却させられたりすることで内部の圧力が上下する。この圧力変動を、圧力伝達管を通して、蛇腹 (ベローズ) から成る内容積可変な圧力容器 2 に伝える。そして、この圧力変化によって膨張収縮する蛇腹部に取り付けられたスピーカーコーンを振動させる。スピーカーコーンから発せられる音波をマイクロホンによって集音し、コンピューターに取り込んでスペクトル分析する。

3・2 実験結果 モーターに電流を流し回転させる。モーターの回転数はロータリーエンコーダーによって計測する。モーターの回転を制御してディスプレイサーの振動が、人間が音として感じられる周波数の下限範囲である約 30Hz になるようにする。加熱面を加熱していない時点では、スペクトル分析結果は、30Hz 付近に顕著な音声振動 (音波) は見られなかった。次に、加熱側面にお湯をかけ流して加熱すると約 30Hz の付近に顕著な音波が現れた。その後加熱した面にエアゾールスプレーを吹き付けて冷却を行うと温度の低下に伴って 30Hz 付近の音声振動も消滅した。

本実験結果を図 4 に示した。図中にはそれぞれ加熱面温度、冷却面温度および 30Hz のスペクトル

成分の出力変化を時系列で示した。出力値は音波を電圧値に変換したマイクロホンの出力電圧について、基準振幅を 1V としたデシベル値で示した。この結果、加熱面温度の上下動によって 30Hz の出力も上下に呼応していることがわかる。これより、本システムによって熱エネルギーを使い音声信号振動を増幅させることが可能であることが証明された。

4. スピーカー装置としての可能性

実験の結果、30Hz 付近の音声振動に対して熱エネルギーを使った音声信号振動の増幅が実現できたが、人間が音として感じる周波数は 20Hz～20000Hz であり、実用的には更に高い周波数についても検証していく必要がある。しかし、熱交換のスピードには限界があることが予想され、20000Hz までの高周波に対して本装置が有効かどうかは不確かである。但し、低周波の音声に特化したウーハーのようなスピーカーであれば、100Hz 程度の周波数が増幅できれば十分である。音波を使った熱機関として熱音響スターリングエンジンがあるが、既にこれが約 100Hz の音波によってサイクルを作動させている実績がある⁽¹⁾。従って、少なくとも低周波数に特化したウーハースピーカーであれば、本方式によるスピーカーが実現可能であると考ええる。

また、従来のスピーカーは、コイルに過大な電流を流すと、ジュール熱によってボイスコイルの破断が起こるため、その出力に限界があった。しかし、本方式のスピーカーは音声振動の増幅に熱エネルギーを用いるため、過大な電流を必要としない。したがって、これまでの限界を超えた大音響のスピーカーの開発が可能であると考ええる。

5. おわりに

本報では、これまでは熱機関として、あるいは冷凍装置として応用されてきたスターリングサイクルの新たな利用方法の一つとして、音声信号振動の増幅、即ちスピーカーに応用することを提案した。更に、簡単な装置を用いて予備実験を行い、本スピーカーの実現性を確認した。

文 献

- (1) Sakamoto S., Tsujimoto T., Hirano H., Fujita T., Watanabe Y., A study on resonant frequency of thermoacoustic cooling system, *IEICE technical report. Ultrasonics*, Vol.104, No.299 (2004-9), pp. 25-30.