



…平成14年度助成研究より…

熱音響現象を利用した音波の 増幅と減衰に関する研究

名古屋大学大学院 工学研究科
助手 博士 (工学)

琵琶哲志

熱を動力に、また動力を熱に変換するのが熱機関である。例えば、代表的な外燃機関であるスターリングエンジンでは対向するピストンを利用して内部の流体に圧縮-加熱-膨張-冷却という一連の熱力学的サイクル「スターリングサイクル」を行なわせ、エネルギー変換を実行する。スターリングエンジンは二つのピストンをうまく同期させることで効率良く動作するが、その機構が複雑である。従来の熱機関はいずれもその機構を複雑にしながらか性能向上を果たしてきた。これら可動部の役割を音波が担うことが出来ないだろうか。もし可能ならば音波が主役となる新しい種類の熱機関が完成することになる。

広い空間を伝搬する音波では、媒質である流体は断熱的にしか振動運動しない。これに対して、狭い空間、例えば流路半径が流体の熱境界層程度であれば、流路を形成する固体壁と流体は当然、熱交換を行う。特に音波の進行方向に温度勾配が存在する場合には、振動運動する流

体は周期的な圧縮、膨張に加えて、温度勾配の中を変位することで、加熱、冷却を経験するはずである。こうした熱力学的過程を順序よく実行することが全く可動部のないエネルギー変換デバイス実現の鍵である。

このようなアイデアに基づいて、熱と音のエネルギー変換を利用した音波の増幅と減衰を試みた。使用した装置は単純で、図1に示すように一端を閉じた気柱共鳴管を通常のスピーカーで駆動している。ちょうど一波長共鳴が生じるような振動数を用いたので、閉端部、中央部、そしてスピーカ周辺が流速の節となる。管の中央部には高温、低温の熱交換器で挟み込んだ蓄熱器を設置した。蓄熱器にはステンレスメッシュを2センチだけ積層してある。メッシュの穴の一辺の長さは流体の熱境界層より短いので、蓄熱器の内部では熱交換を行なうことが出来る。低温熱交換器は冷却水で室温に保ち、高温熱交換器は周囲に巻き付けたヒーターにより280°Cまで加熱した。低温熱交換器-蓄熱器-高温熱交

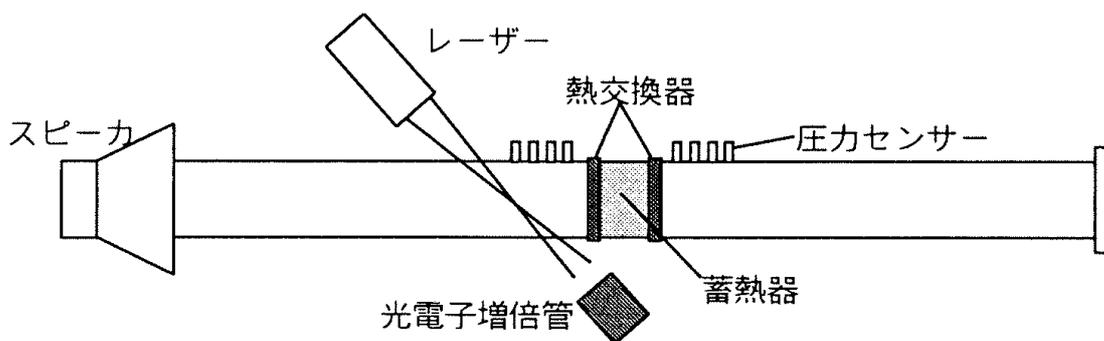


図1 実験に使用した装置の概略

換器のユニットは取り付け方を反転することで、音波の進行方向に対して正または負の温度勾配を与えることが出来る。

まず蓄熱器に温度勾配がない状態で、圧力センサーとレーザードップラー流速計を用いて、管内流体の圧力 $P = p \exp(i\omega t)$ と管内の断面平均流速 $U = u \exp\{i(\omega t + \Phi)\}$ の同時計測を行なっ

た。共鳴振動数で管内の流体は振動しているので、管内には「定在波」が励起されると思うかも知れない。いわゆる定在波では、流体要素の流速は圧力がちょうど最大、あるいは最少となる時刻にゼロとなるような、ちょうど90°だけ位相がずれた関係にある。ところが実際には図に示すように位相 Φ は $-90^\circ < \Phi < 90^\circ$ の関係をみた

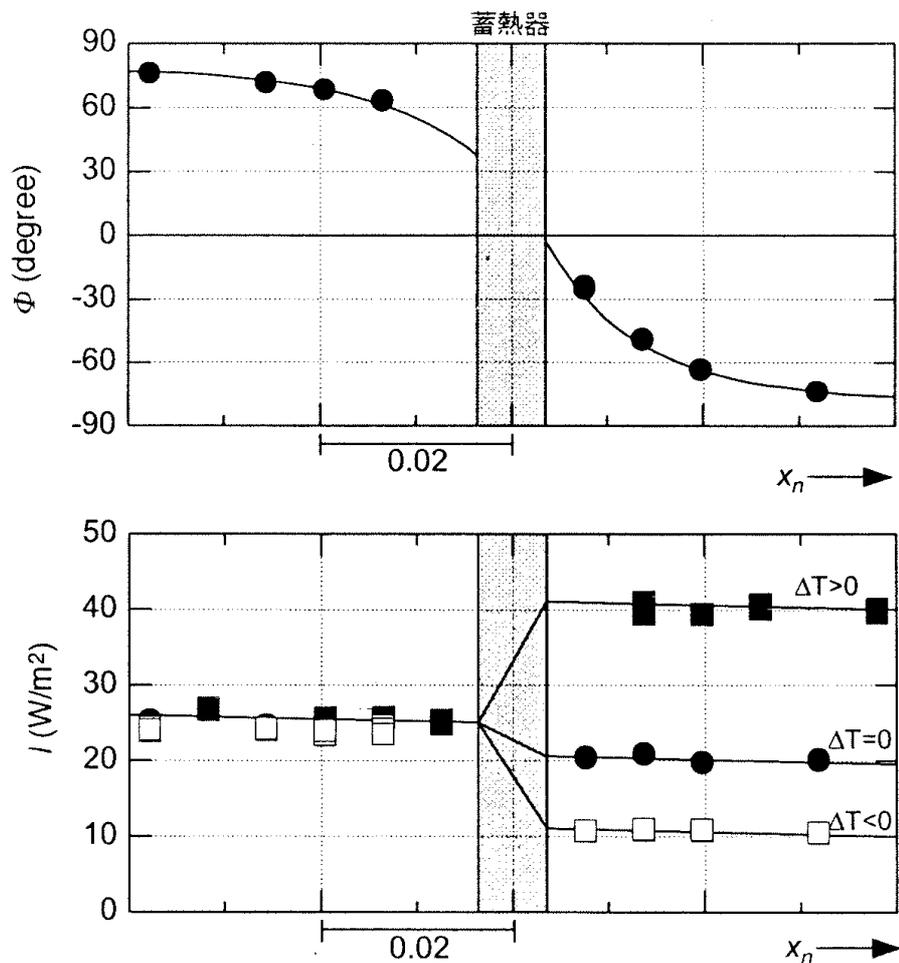


図2 気柱管内の位相と音響強度の分布

しながら連続的に変化する。一方、「進行波」では圧力と流速は同位相であることが知られているが、現実の気柱管ではそのような進行波位相が局所的に出現することも図から分かる。ここはちょうど流速の節に相当する。

圧力・流速振幅 p, u と両者の位相差 Φ が分かると音の輸送する力学的エネルギーの大きさ、すなわち、音の強度 I をその定義式 $I = \langle P \cdot U \rangle = 0.5pu \cos \Phi$ によって直接評価することができる。ここで $\langle \rangle$ は時間平均を意味する。図2に示すように I は常に正の値を呈するが、これは音源であるスピーカーから閉端へエネルギーが供給されることを意味する。また I の勾配が常に負であることは流体の振動運動に伴うエネルギー散逸を示している。つまり、粘性や熱伝導によりエネルギーが散逸しているため、管内音波が定常的な振動を維持するためには、有限な大きさの I の存在が不可欠である。蓄熱器では特に勾配が大きいこれは粘性に由来する散逸が大きいからである。先に見た位相分布の「定在波位相」からのずれはここで重要な意味を持つ。つまり、 $\Phi = 90^\circ$ であれば音響強度 I はゼロになってしまうからで、散逸のある現実の共鳴管では決して「定在波」は存在し得ない。

高温の熱交換器を加熱して、蓄熱器に正負それぞれの温度勾配を与えた場合の音響強度の分布も図に合わせて示した。温度勾配が正の時、音響強度は蓄熱器を低温部から高温部へ向けて通過するが、この時、蓄熱器内で音響強度の勾配が正となった。この音響強度の増幅が「熱と

音のエネルギー変換」の結果である。蓄熱器両端での音の強度の差がこの音波エンジンの出力仕事である。ここでエネルギー変換に寄与する流体要素の位相差 Φ がほぼ進行波位相 ($= 0^\circ$) であることに注意して欲しい。圧力と流速が同位相なので、圧力と流体要素の変位はちょうど 90° だけ位相が異なる。その結果、圧力変化を受けながら温度勾配の中を変位する流体要素は、周期的に圧縮-加熱-膨張-冷却というスターリングサイクルを経験する。つまり、蓄熱器内部で流体はスターリングサイクルを通じてエネルギー変換を実行し、ピストン等の可動部をいっさい必要とせずに自ら音響強度を増幅するのである。温度勾配が負の時は蓄熱器での音響強度の減少量が著しく増加しているが、これは先とは逆のサイクル「逆スターリングサイクル」の結果である。熱と音の相互作用を利用する新しいタイプの消音効果である。

音波がエネルギー変換を実行する熱音響エンジンを利用して全く可動部のない冷凍機の研究も行なっている。装置はループ管と枝管で構成され、内部にはヘリウムとアルゴンの不活性混合ガスが充填されている。ループ内には二つの蓄熱器があり、それぞれ原動機および冷凍機として動作する。原動機用蓄熱器の一端にある熱交換器を冷却水で室温に保ちながら、もう一方の熱交換器を加熱する。高温部の温度がおよそ 300°C 程度になると、管内の気柱は共鳴振動数でひとりで発振する。これが原動機蓄熱器でのエネルギー変換の結果であることは言うまでも

ない。もう一方の冷却用蓄熱器は発生した音波により実行される逆スターリングサイクルによってヒートポンプとして動作する。そのため、一方の熱交換器を冷却水を使って室温に保っておくと、もう一端は室温以下に冷却される。現在、この装置では到達温度としてマイナス25°Cを得ている。

熱も音もなじみのある概念であるが、相互にエネルギー変換を実行することはあまり知られていない。音波の輸送するエネルギーもまた決

して小さな量に限られるわけではない。ここで紹介した試作機では原動機の出仕事は概算で40W以上に達するし、熱から音波、音波から熱へのエネルギー変換効率もそれぞれカルノー効率の10%程度と決して低くない。外燃機関であることから廃熱が利用可能なこと、フロンを必要としない冷凍サイクルであること、可動部がないので安価で長寿命であるといったメリットもある。今後も基礎と応用の両面で熱音響エンジンの研究を進めていきたい。

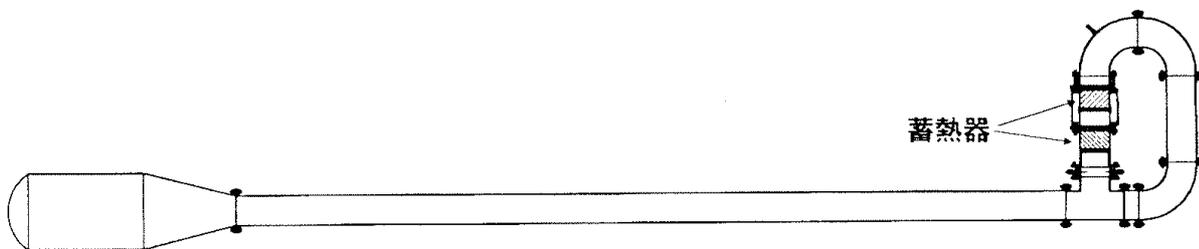


図3 熱音響冷凍機の試作機