

第105回CIS研究所パートナー会議事録(一般様用)

開催日: 2021年2月21日(日)
場 所: CIS会議室 13時~16時
講 師: 西村 靖紀 様

今回、初めてテレビ会議を試みました。
東京からLINEで参加の竹内様、ご自宅からZOOMで参加の久米様とCIS会議室の3元中継には操作法に不慣れで準備に手間取りました。



会議風景

テーマ: 熱音響エンジン その2

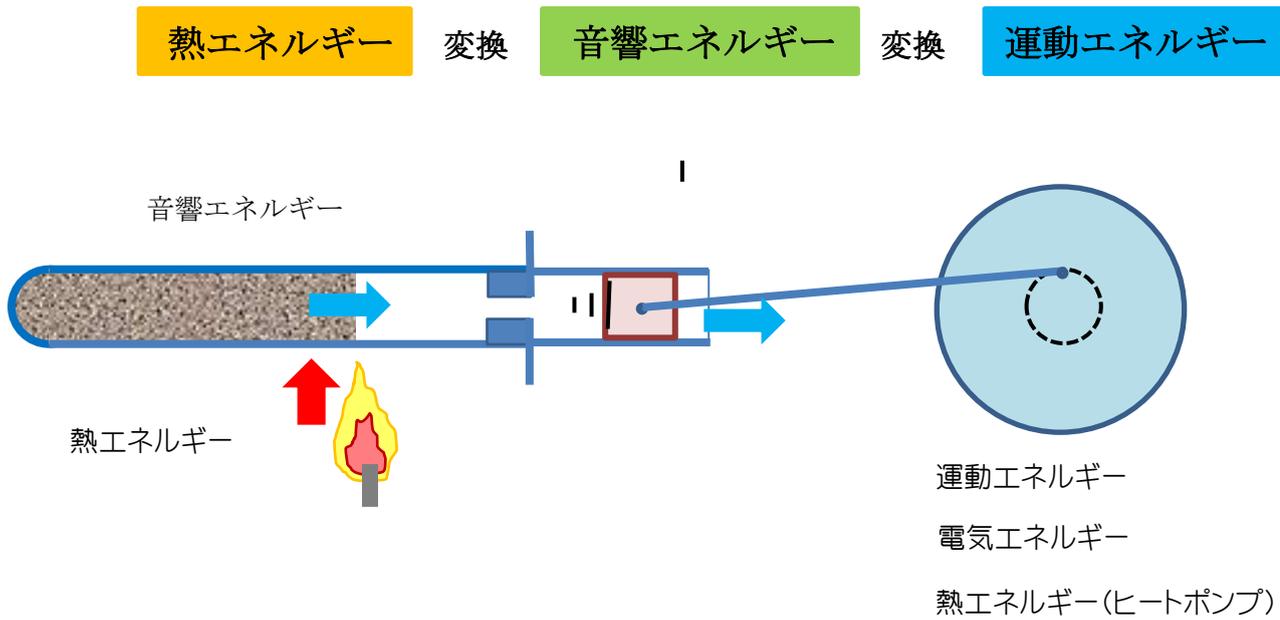
今回は、「熱音響エンジン」の動作原理の解釈をより進めるため、「熱音響エンジン その2」として西村様より実験機のデモを含めてご紹介いただくこととなった。



熱音響エンジン・デバイス

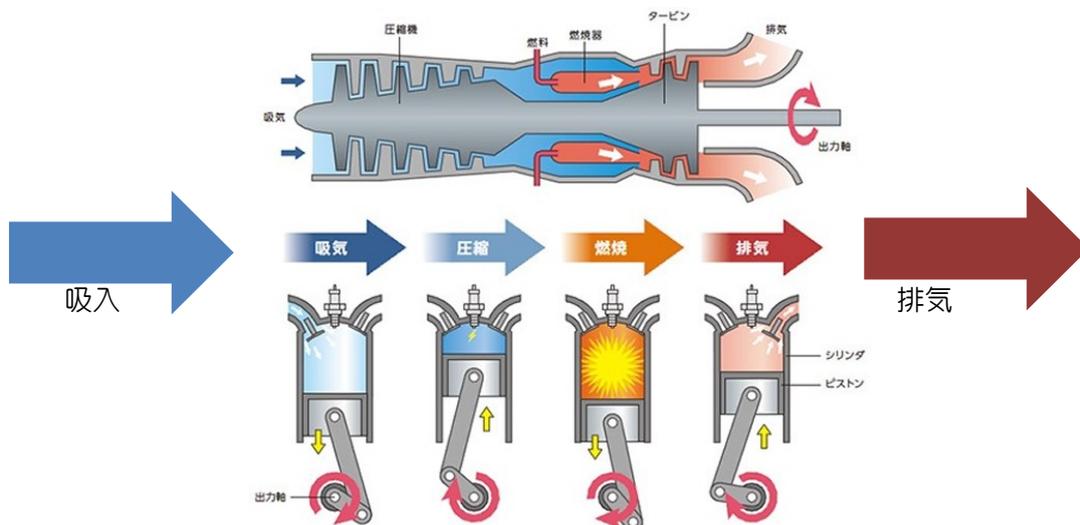
一年前に、熱音響エンジンの話をして、実物で動作実験を行ったが、「動作原理がどうもようわからん…」ということで宿題事項が残った。そこで、今回は前よりも進展した考えを準備した。熱音響デバイスとは、くるくる回るエンジンだけでなく、冷凍機、ヒートポンプも含めてあるのでエンジンとデバイスとしておく。

熱エネルギーを一旦音響エネルギーに変えてそこから運動エネルギーに変える。あるいは、運動エネルギーを電気エネルギーに変換する。いわゆるエネルギー変換が普通の熱機関に比べて、ひと手間多く音響エネルギー変換行程が有るので難解であり、理解が進みにくい。下図は、定在波型の模型でガラス管壁を通して熱エネルギーが入り、試作ではステンレスウールで形成されているスタックと呼ばれる部分の空隙間の空気が加熱されて往復運動することにより音波になり、この圧力をピストンが受けて回転運動に変換される。
 ・往復運動するピストンに磁石またはコイルを置き電気エネルギーに変換することもできるし、回転部分に発電機能を持たせることもできる。



このように、熱音響デバイス・熱音響エンジンは音響エネルギーを介して熱を運動エネルギーに変換している。スターリングエンジンは、熱エネルギーから直接運動エネルギーに変換しているの理解しやすい。
 蒸気機関 --- ピストンを押し上げた蒸気は外側に開放排出される。
 内燃機関 --- ガソリンやガスなど燃焼により発生する高圧力をピストンを押し上げたのちに外部に排出。
 蒸気機関や内燃機関はともに熱機関であるが、開放的である。

一方、スターリングエンジンと、熱音響エンジンは密閉型で、作動空気が密閉状態にある。という大きな違いが有る。



レイケ管:

熱エネルギーから音響エネルギーへの変換:

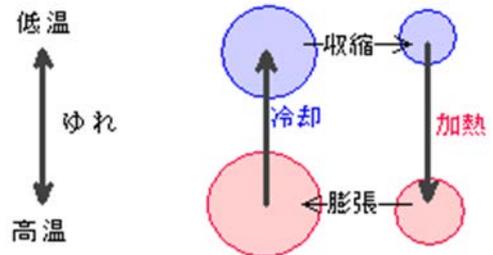
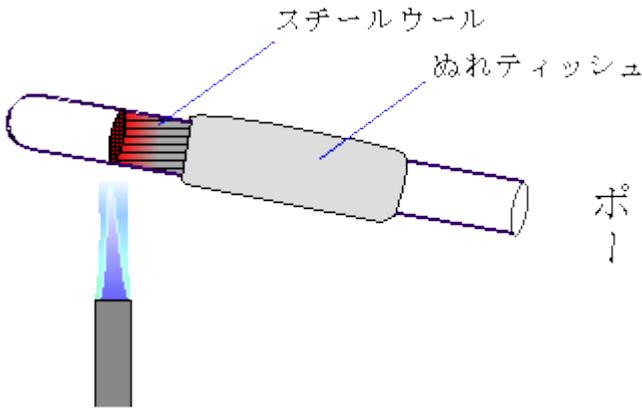
熱から音響を出すメカニズムは、やや難解であるが理解できたと考えている。この、熱から音響へのエネルギー変換に関しては多くの文献が有る。

Rayleigh, Theory of Sound

Rijke tube

熱的要因で振動が発生し持続するには、「気体が圧縮を受け温度が上がったときに熱を与え、一方膨張し温度が下がったときに熱を奪うことが必要である」

振動の位相と加熱・冷却の位相との相対関係が重要 ← レイリーの理論



温度勾配と 気団の振動サイクル

https://en.wikipedia.org/wiki/Rijke_tube

Rayleigh, THE EXPLANATION OF CERTAIN ACOUSTICAL PHENOMENA, July 18, 1878, p321 NATURE

熱音響現象のメカニズム レイリーの条件 t=24:31

気体粒子が右に変位し圧縮を受ける。気体粒子の速度が大きいうちは断熱的に変化する。変位が最大になる付近では速度が遅く、熱のやりとりが起る。

粒子が右に最大変位した位置での粒子の温度 $T_e + \delta T$ と、その位置での壁面温度 $T_e(x+a) [= T_e(x) + (dT_e/dx)a]$ との間には差が現れる。

図のように壁面温度の方が高ければ、熱 δQ が壁から気体粒子に流れ込むことになり、逆に低ければ壁に向かって熱は流れ出ることになる。

一方、粒子が左に最大変位するときには膨張をうけ気体温度は低下する。壁面温度の方が低ければ、熱は気体粒子から壁に流れ出ることになる。

もし $\delta T/a < dT_e/dx$ であればレイリーの条件が満たされる。

この条件下で振動が繰り返されると振幅 a が次第に大きくなる。

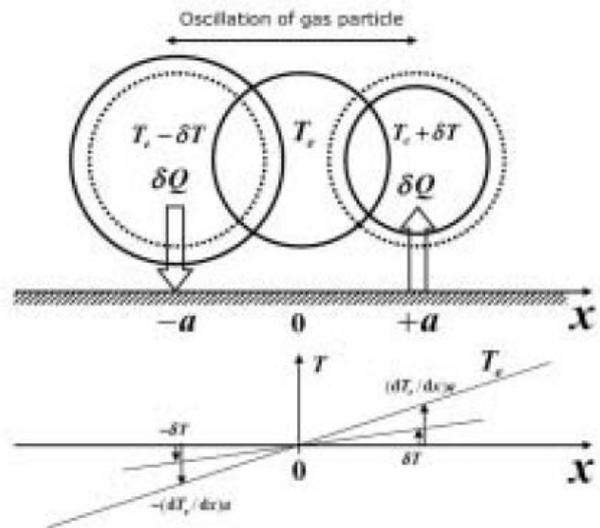


図1: 気体粒子の振動と壁の温度勾配が大きい場合の熱の流れ

出典: 杉本信正, “熱音響現象とこれを利用した新しい熱機関”, 生産と技術 第63巻 第2号 (2011)

自励振動の開始

外部から加える熱量を増やすと、熱音響エンジンはひとりでに固有モードで振動を開始する。

たしかに不思議な現象である。

どのようにして発振に至るかを見るために、温度差が十分に高くないときになにが起こるかを検討した例をしめす。

熱音響エンジンに外部から刺激を加えたとする。

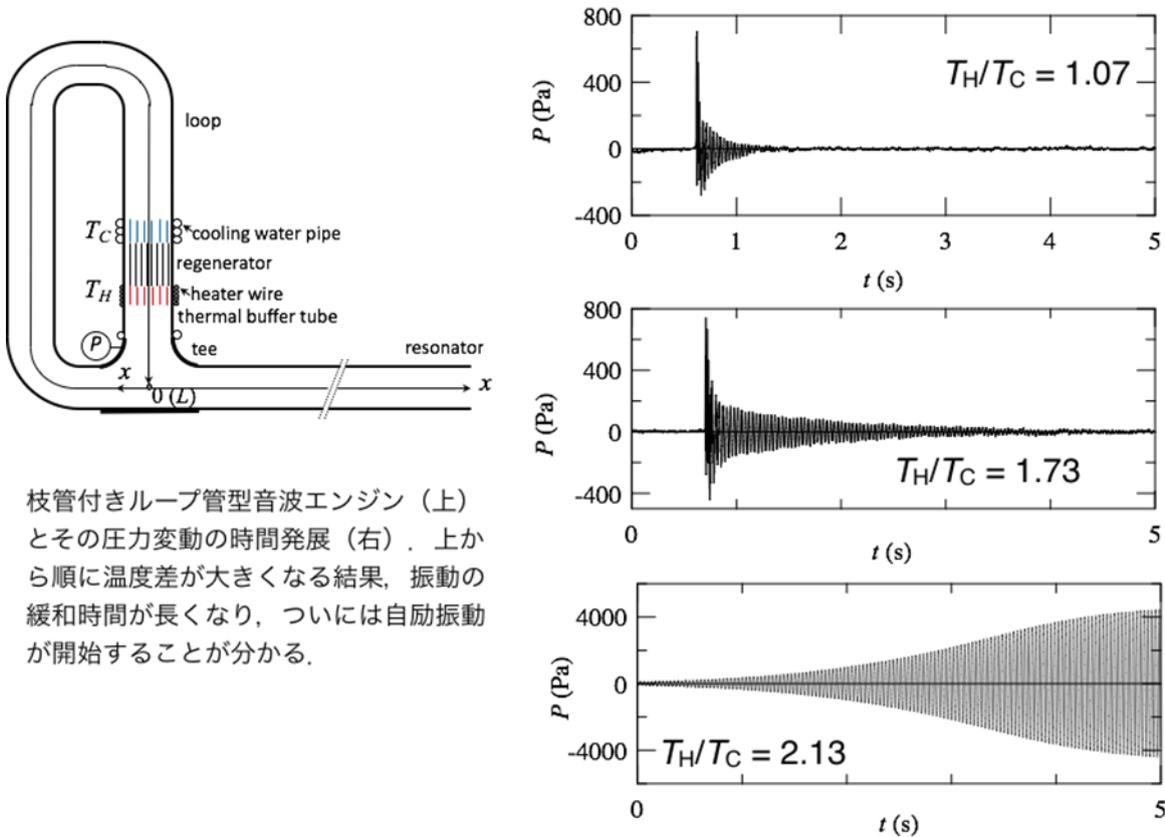
開放端を持つ熱音響エンジンならスピーカーで音を発生させてもよいし、手のひらで開放端を(鼓を打つように)叩いてもよい。

そうすると固有モードの音響振動が一時的に発生するが時間が経つとやがて静止状態になる。

熱音響エンジンに加える熱量を増した状態で同じことをすると、先ほどと同じくやがて振動は止まるが、止まるまでの時間が長くなる。さらに加熱量をますと、ついには静止せずに振動し続けるようになる。

このときの温度が発振開始温度になる。

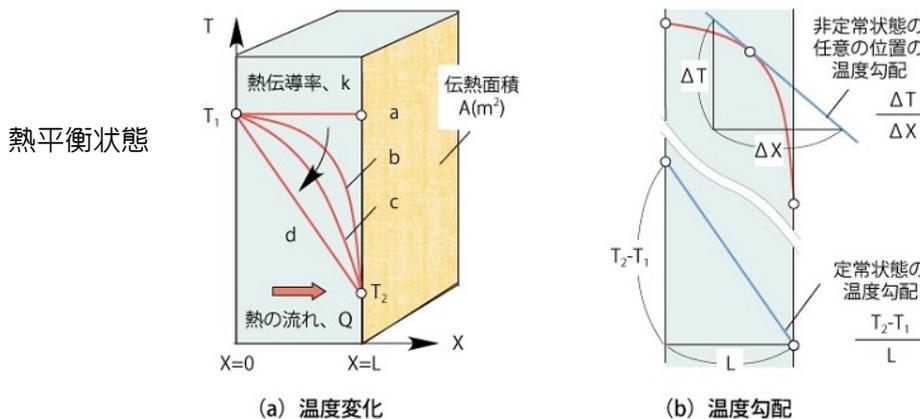
この温度では、外部から意図的に刺激を加えなくても自然のゆらぎが勝手に成長して定常振動に至るようになる。



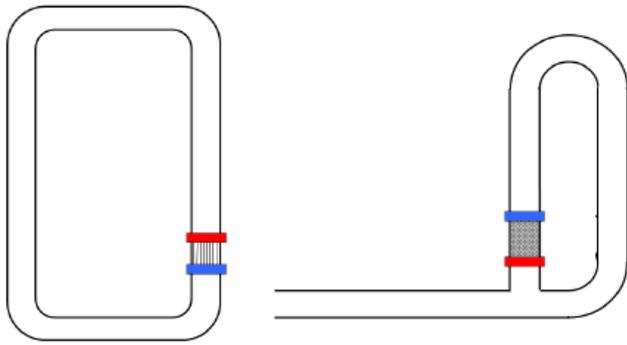
枝管付きループ管型音波エンジン (上) とその圧力変動の時間発展 (右)。上から順に温度差が大きくなる結果、振動の緩和時間が長くなり、ついには自励振動が開始することが分かる。

自励振動しないとエンジンとして働かない。

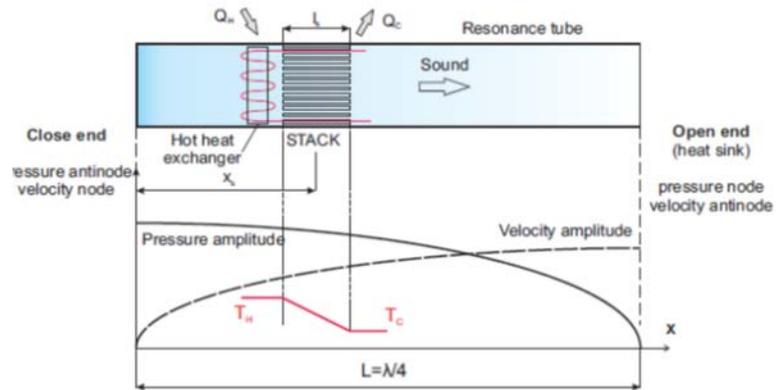
振動していない場合、熱平衡状態であり熱は高いほうから低い方に流れるのみで外部にエネルギーを出さない。



熱音響エンジンの基本形 2種類ある
ループ管(進行波型)



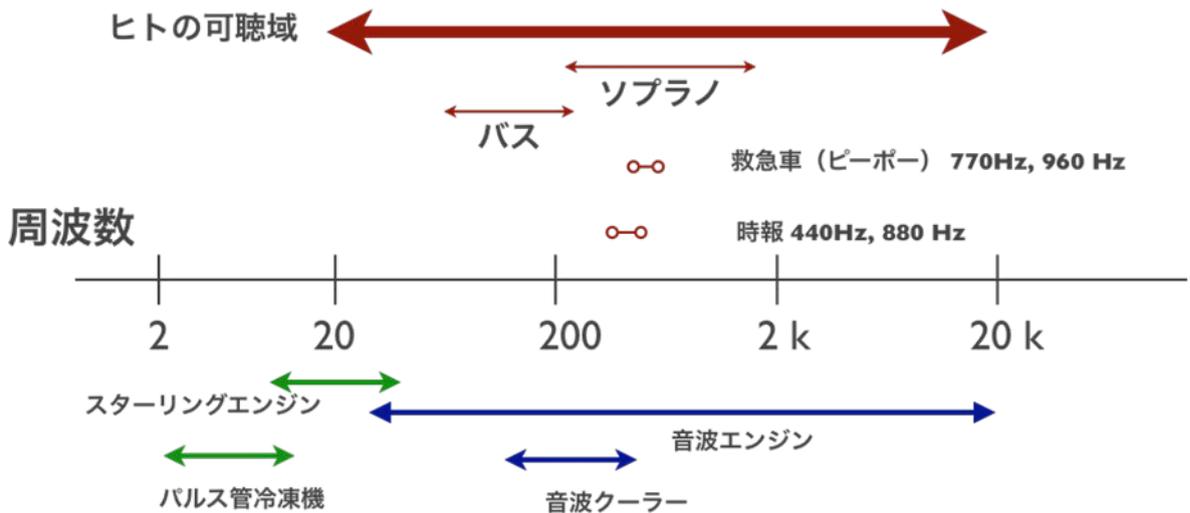
共鳴管(定在波型)



共鳴管は両端が開いているか閉じているかによって、固有モードが変わる。
一端が閉じて他端が開いている場合には、基本固有モードの振動では、
閉端で圧力の腹(流速の節), 開端で圧力の節(流速の腹)ができる。
両端が閉じている場合には、両端で圧力の腹(流速の節), 中央で圧力の節(流速の腹)が形成される。
ループ管の基本モードはループ一周が波長に等しくなるようなモード。

熱音響エンジンの周波数範囲

熱音響エンジンにとって重要なのは、振動流体が蓄熱器やスタックを構成する流路壁と十分に熱交換できること。
周波数が高ければ狭い流路を用い、周波数が低ければ比較的広い流路でも十分。
音として聞こえるかどうかと、エネルギー輸送、エネルギー変換が可能かは別問題。
スターリングエンジンやパルス管冷凍機では、2 Hz~20 Hz程度の周波数で動作する。圧力振動を伴う流体の振動運動が鍵となる点では、熱音響エンジンはスターリングエンジン等と本質的に同等なエネルギー変換デバイス。
いずれの装置も圧力振幅の値を見れば大音響であるが、密閉された管内での大振幅音波なので、静粛なエンジンである。



疑問の一つ:(t=30.23)

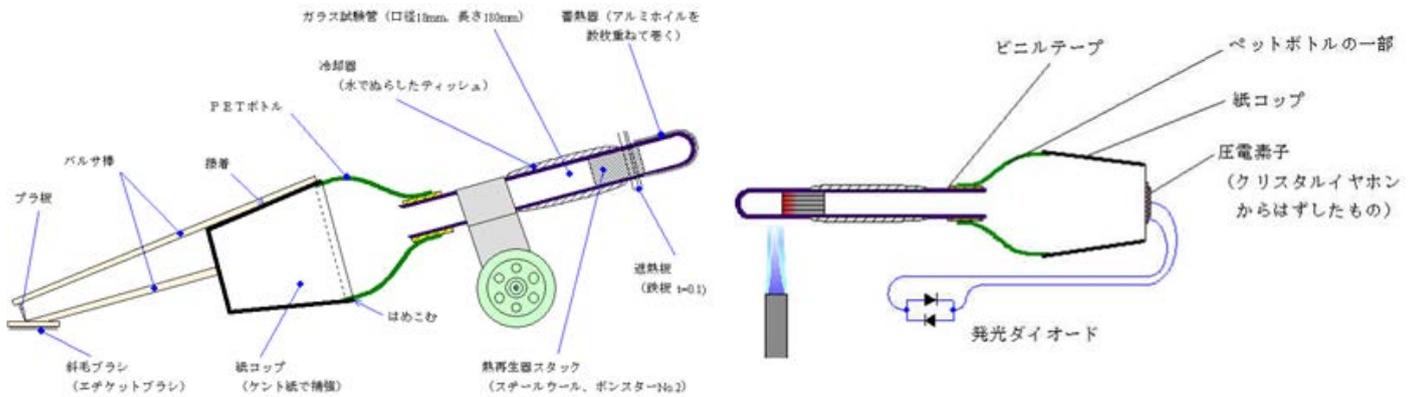
管の中で振動している音の周波数はほぼ400Hz、実際にピストンが動いているのはせいぜい10Hz程度。
スターリングエンジンは10Hz~20Hz
エネルギーの取り出し方で周波数で違うのではないかと、電気でいうインピーダンスマッチングのように

音響→運動エネルギー変換

定在波型熱音響エンジン

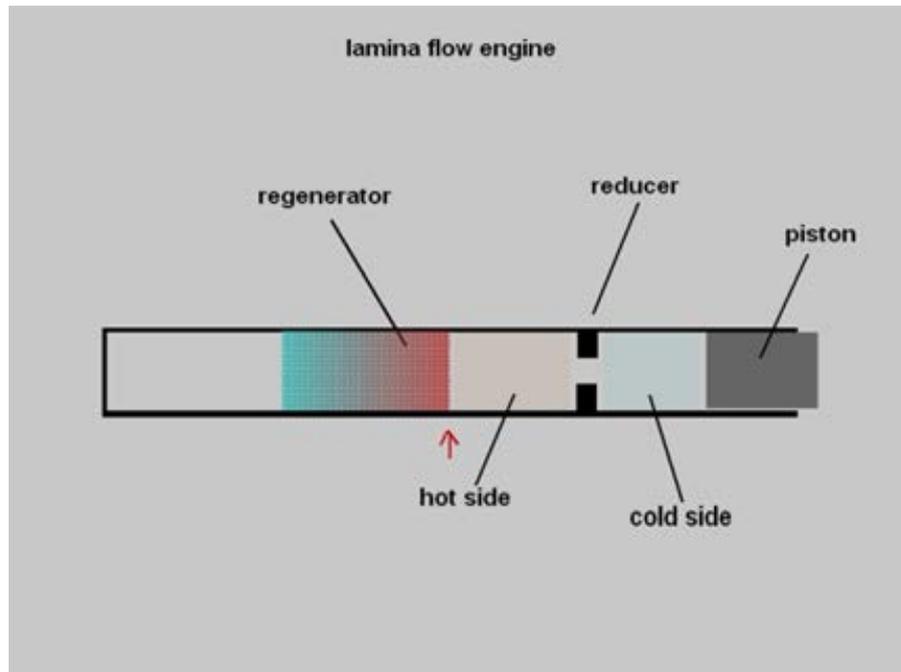
科学教材レベル

(1) 直接出力 振動板に細工、 piezo素子 エネルギーの取り出し



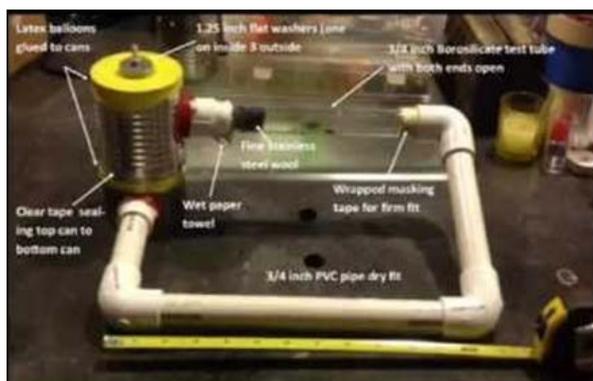
科学教材、研究室レベル

(2) リストリクター + ピストン機構

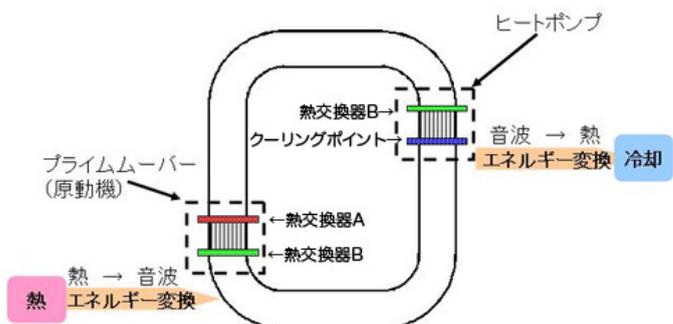


進行波型音響エンジン

科学教材レベル



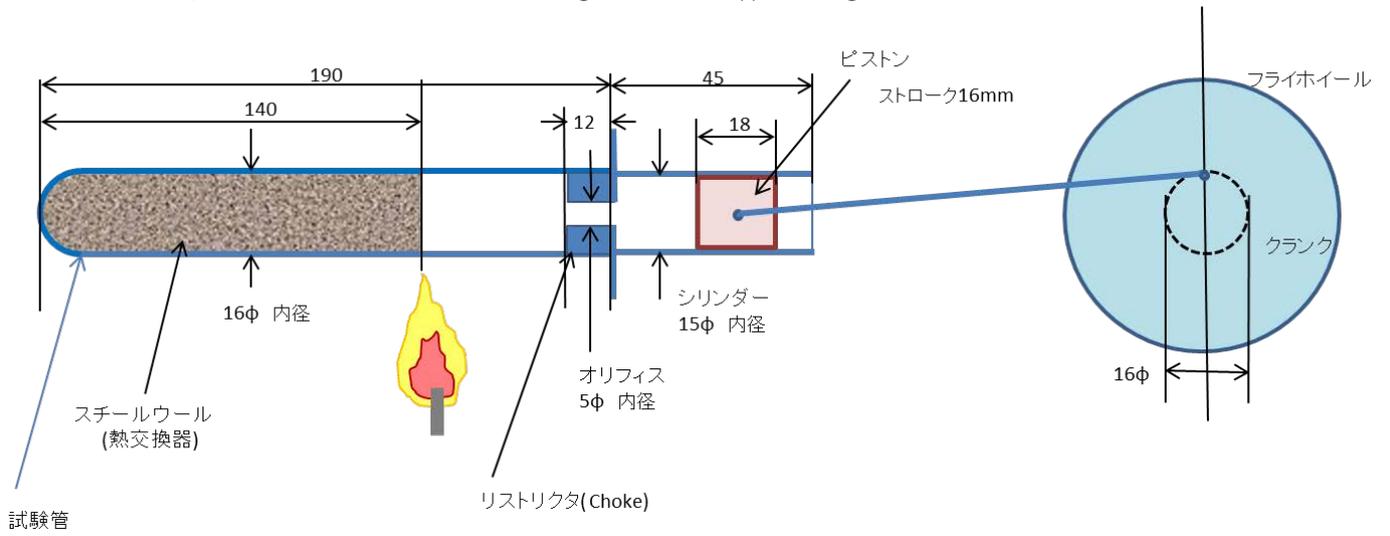
研究室レベル



定在波型熱音響エンジン

今回の試作実験機

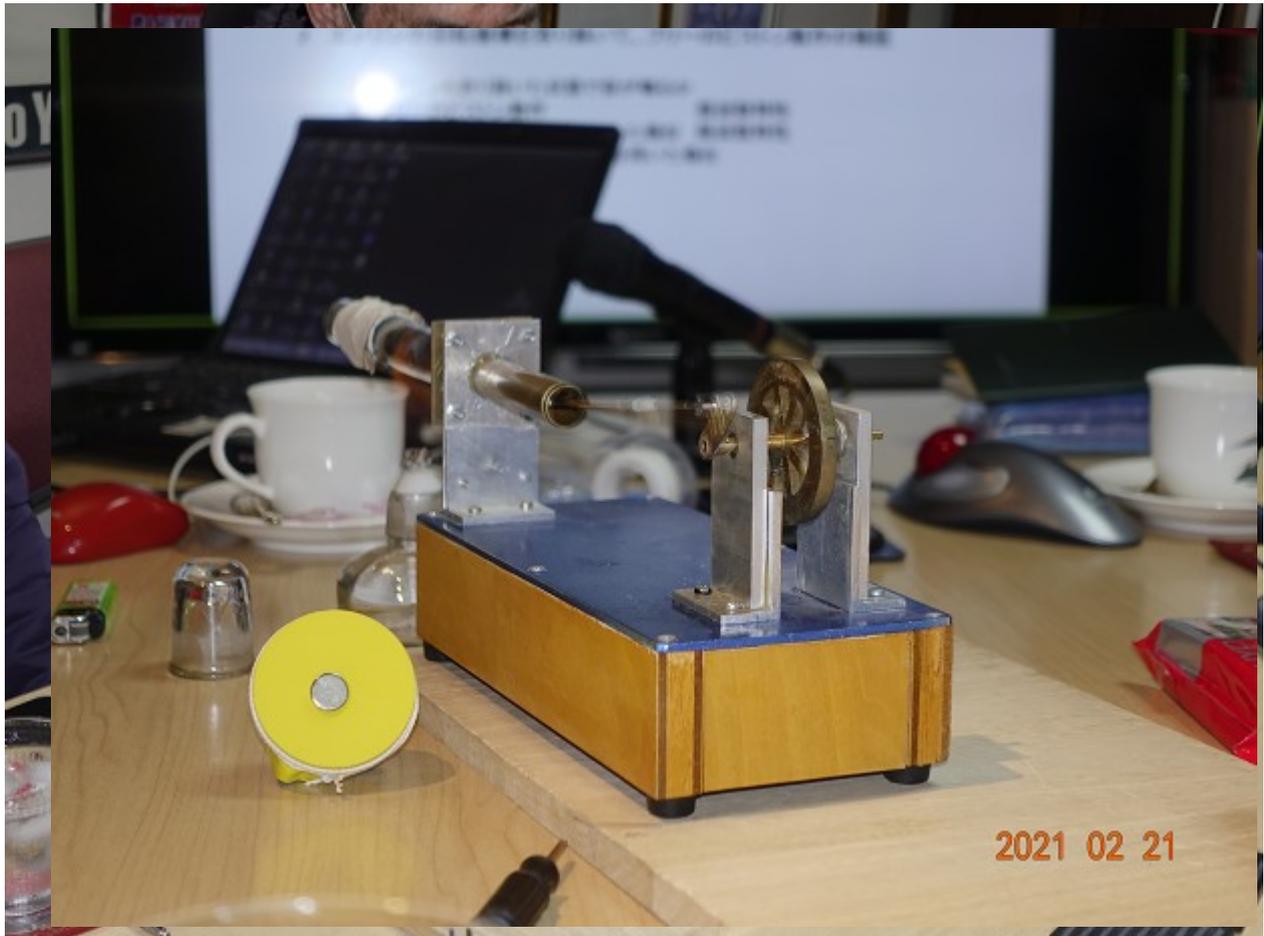
Thermo acoustic engine Proto type Design



定在波型熱音響エンジン 動作アニメーション

[How thermoacoustic engine works.mp4](#)

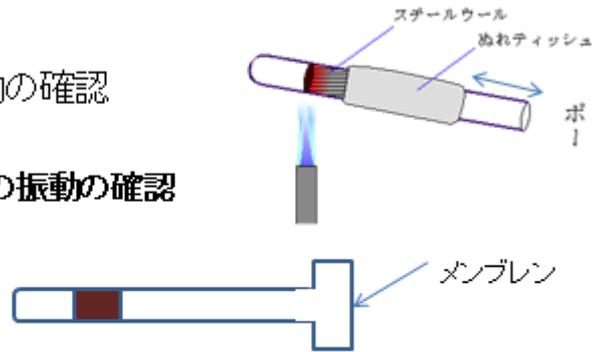
熱音響エンジンの動作原理を理解するための実験



熱音響エンジンの動作原理を理解するための実験

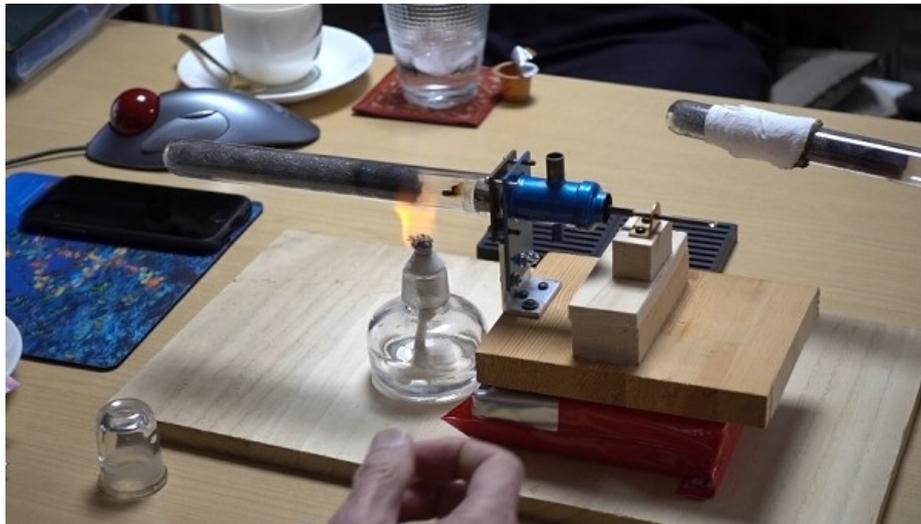
1 レイケ管の自励振動の確認

- A 管長を長くする
- B 開口部での空気の振動の確認



2 エンジンの回転機構を取り除いて、フリーのピストン動作の確認

- A ピストンも取り除いた状態で音が鳴るか
- B フリーのピストン動作 周波数特性
- C フリーのピストンの質量を重くした場合 周波数特性
- D ピストンの代わりにメンブレンを用いた場合



フリーのピストンで加熱

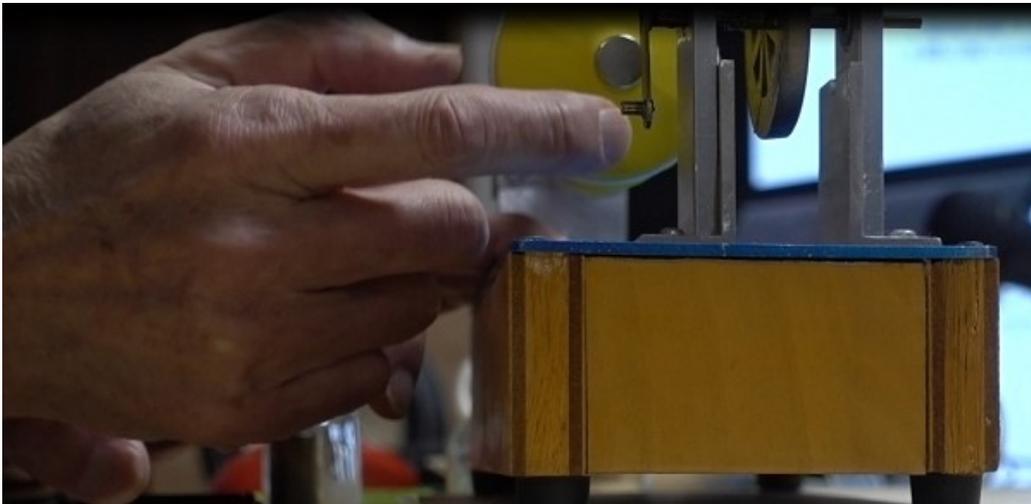


加熱が進んだ頃にピストンを軽く押し込むと自励振動が始まる

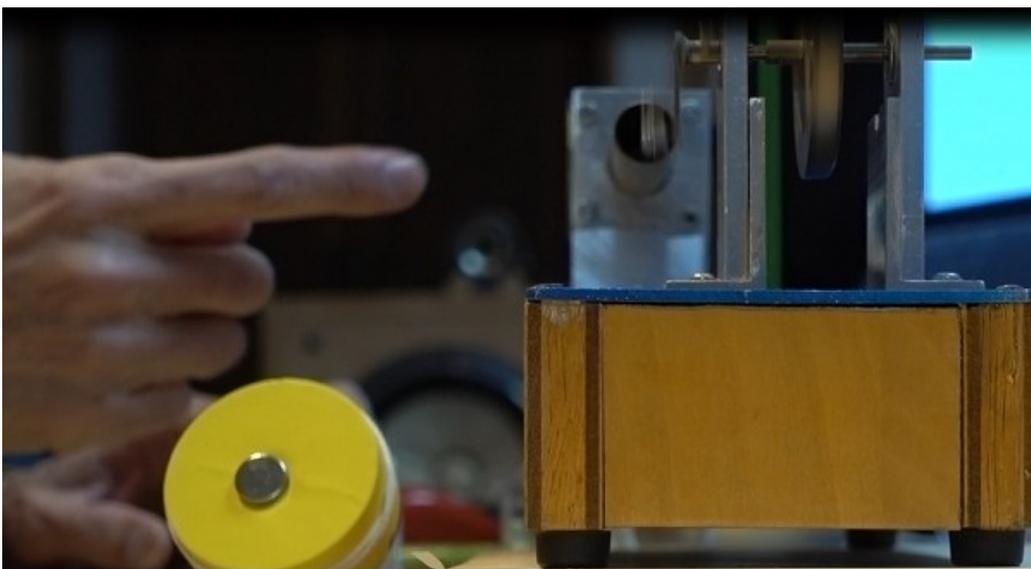
この状態で、負荷をかけるためにピストン重量を増やした場合の動作を確認。



振動の周波数は明らかに低下した



さらに大きな負荷のメンブランを付けると振動することがなかった



メンブランを外し、フライホイールに付け替えると気持ちよく回転する

今回の進行状況:

- 熱音響現象のメカニズム レーリーの条件の定性的な理解が進んだ。
 - 運動負荷を増やすと動作周波数は下がる。これはR負荷による電気振動回路と同じ振る舞いである。
 - 理解が進まないところは、熱音響現象の検知できる周波数は実験機で確認するとほぼ400Hzと比較的高いが、機械エネルギーに変換する機構部の運動する周波数は10~20Hzと低い。
- 観測周波数の大きな異なりは十分な理解が得られていないものの、レーリー条件の理解が進んだことから本件は一旦着地することが提案された。

今後の日程

第106回 3月28日(日)13時~ 竹内 学 様 → 山本代行します

HP <http://www.cis-laboratories.co.jp/index.html>

以上