

T=19:32

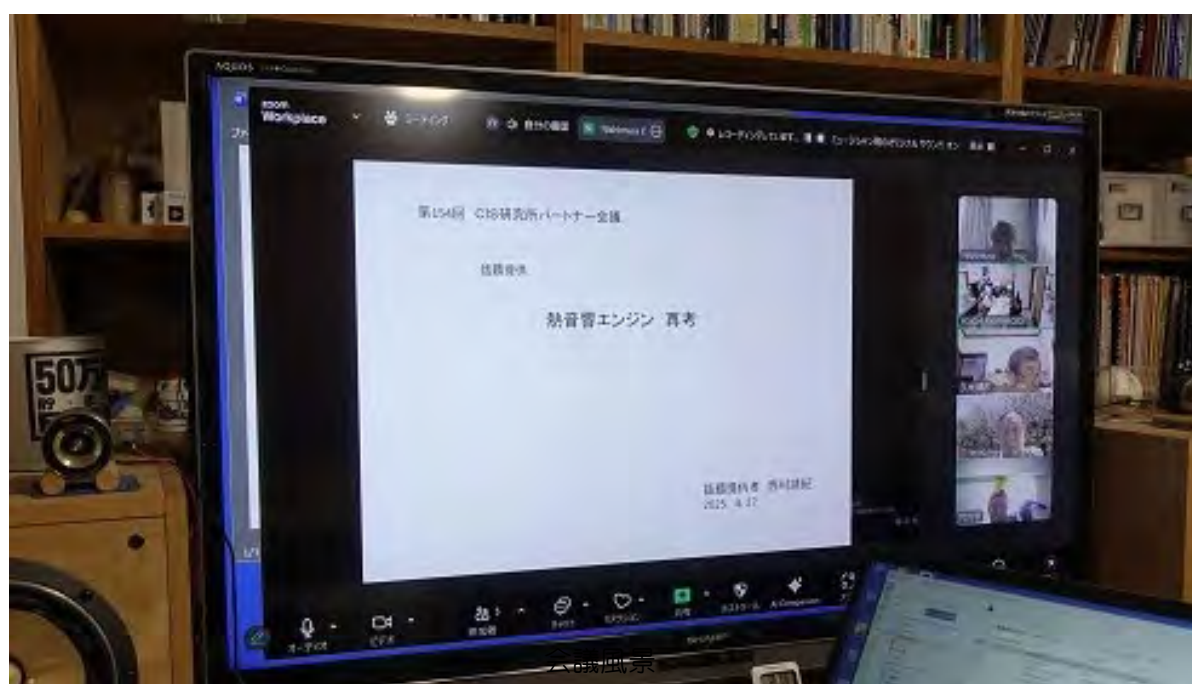
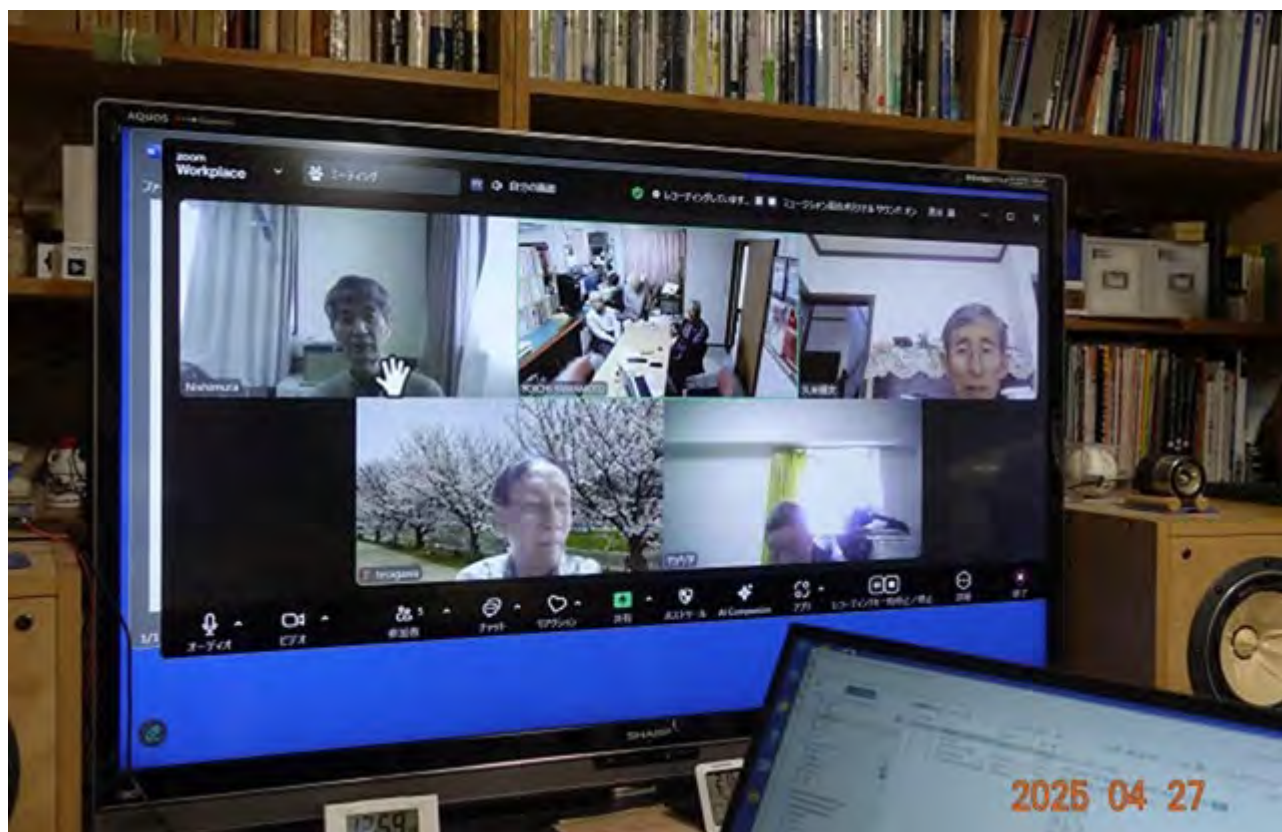
第 154 回CIS研究所パートナー会議事録(一般様用)

第 154 回 CIS パートナー会議事録(一般様用)

開催日時 4月27日(日) 13時～

講師 西村 靖紀 様

テーマ 「熱音響エンジン 再考」



第154回 CIS研究所パートナー会議

話題提供

熱音響エンジン 再考

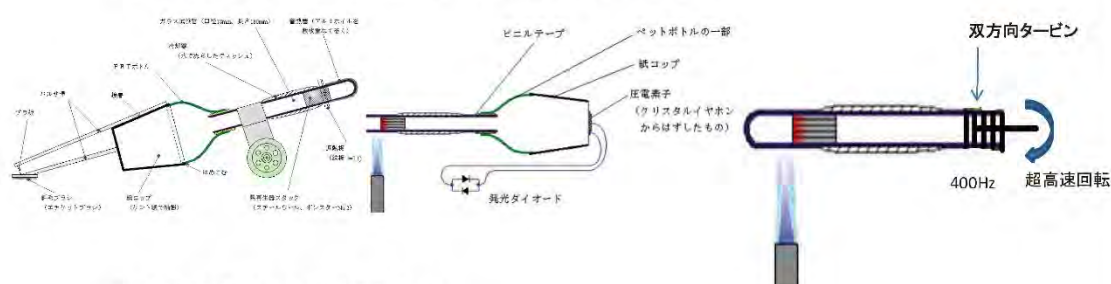
話題提供者 西村靖紀
2025. 4. 27

熱エネルギー → 音響エネルギー → 運動・電気エネルギー変換

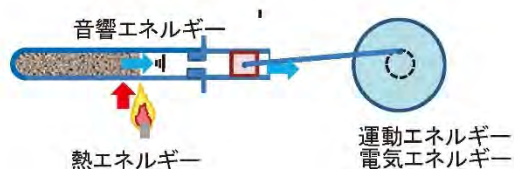
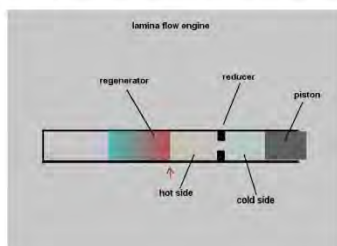
音からどのようにして出力を取り出すか。直接取り出し型
20cm → 400Hz の音

1. 定在波型熱音響エンジン

(1) 直接出力 振動板に細工、圧電素子 双方向マイクロタービン



(2) 低周波気柱共鳴 ピストン機構

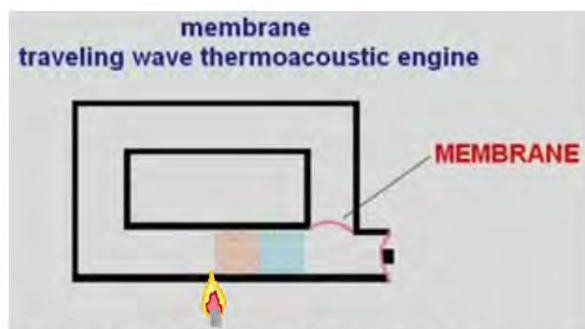
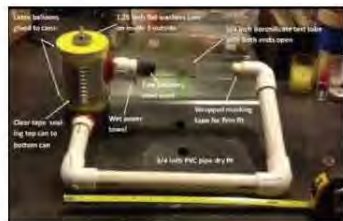


音響エネルギーから運動エネルギーに効率よく変換するには
音波の振幅を大きくする必要がある

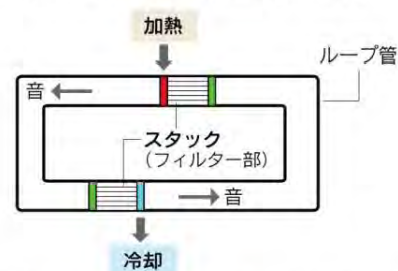
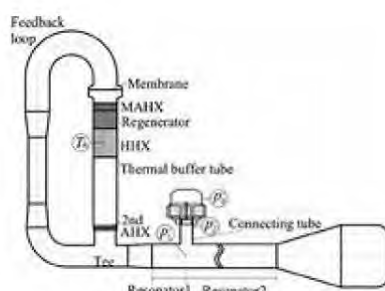
ポイントはこの400Hz の音を低周波に変換し共鳴させて出口の気柱速度を大きくしてピストンでそれを受けて運動エネルギーに変える

音響→運動エネルギー変換

2. 進行波型音響エンジン

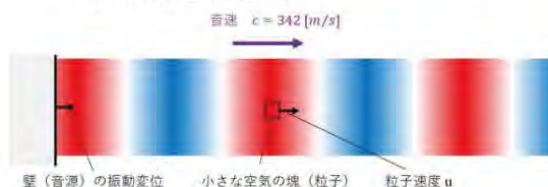


熱音響効果を利用した冷凍装置の概念図



熱が一方のスタックによって音に変換され、管の中を伝わっていき、もう一方のスタックで熱に変換され、冷却に使われる

音の物理的性質

音圧 p 単位は Pa/m^2

媒質中の音波によって生じる媒質内圧力の静圧からの変化分。通常実効値で表す。

$$p = \rho c v$$

音の強さ I 単位は W/m^2

音の強さは単位面積を通して伝わる音響エネルギーである。振動数は等速円運動で出来る周波数で音の粒子速度は周波数×振幅 $(2\pi f \cdot A)$ となる

$$I = \rho c v^2 = \frac{p^2}{\rho c} = v p \quad [\text{W/m}]$$

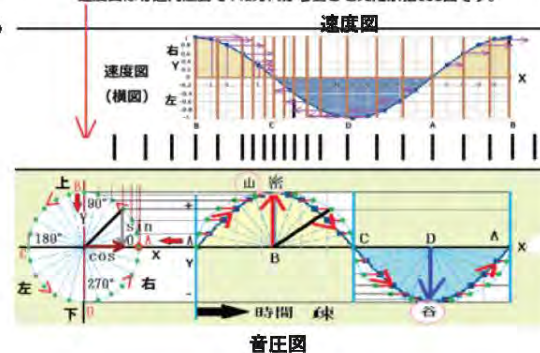
 $v = 2\pi f \cdot A$ を代入して

$$I = \frac{1}{2} \rho c v_{\text{rms}}^2 = \frac{1}{2} \rho c (2\pi f \cdot A)^2 \quad [\text{W/m}]$$

 $\rho =$ 空気密度 kg/m^3 : $1.293 - 0.0047T$
 $C =$ 音速 m/s : $331.5 + 0.61T$
 $\rho C = 428 \text{ Pa s/m}$ 空気の音響インピーダンス (0°C , 1014hPa)

 $F =$ 周波数 $1/\text{s}$ v
 $v =$ 粒子速度 m/s
 $A =$ 振幅 m

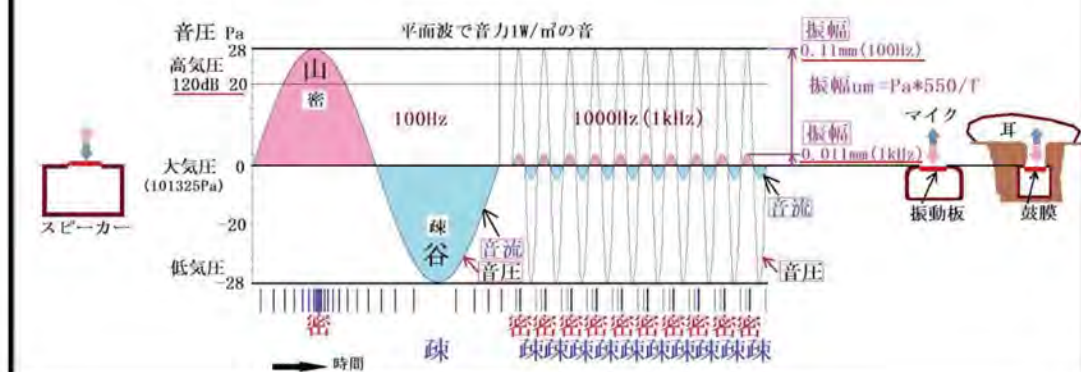
速度図は等速円運動でY軸方向から動きを見た余弦cos図です。



$$A (\text{振幅}) \times 2\pi f (\text{周波数}) = \text{CONST}$$

振幅と周波数は反比例の関係にあり、周波数が低くなると振幅は大きくなる。

同じ音圧でも、
振幅は低音ほど大きい！

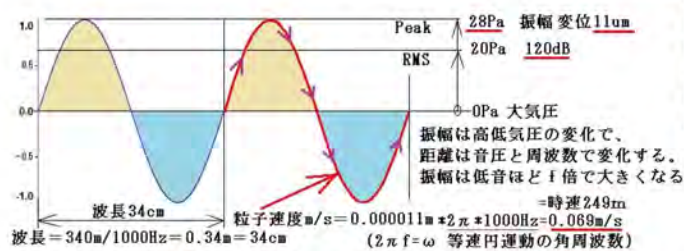


音圧と振幅

$$p = \rho c v = \rho c \cdot 2\pi f \cdot A \quad \text{より音圧と粒子速度、振幅を求める}$$

平面波で $1\text{W}/\text{m}^2$ の音響エネルギーには、音圧は $\sqrt{410}\text{Pa} \approx 20\text{Pa}$ 必要、peak 28Pa
 粒子速度は $28/410 = 0.0068\text{m/s}$ 、振幅は 周波数 1kHz で $28/6.28 \cdot 1000 \cdot 410 = 0.000011\text{m}$
 周波数 10Hz で $28/6.28 \cdot 10 \cdot 410 = 0.0011\text{m}$

1気圧で音速Cは20℃時に 344 m/s、
 空気密度 ρ は20℃時に $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 、
 ρC の値は22℃時に 410Pa s/m となる

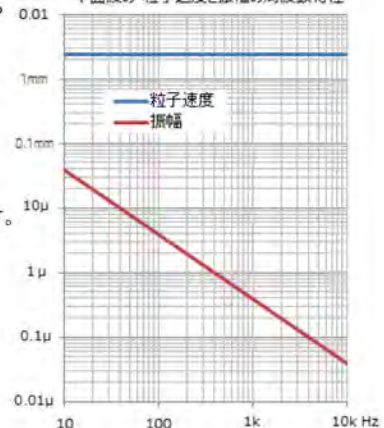


主な音の音圧レベル

	音圧 (Pa)	音圧レベル (dB)
最小可聴音	0.00002	0
ささやき声 (1m)	0.0002	20
会話 (1m)	0.02	60
混雑した街	0.2	80
地下鉄車内	0.5	90
ジェットエンジン (50m)	20	120

(出典) 中村健太郎著「図解雑学 音のしくみ」ナツメ社

平面波の粒子速度と振幅の周波数特性



平面波の音圧ピークが 1Pa (94dB) では、粒子速度は $1/410 = 0.0024\text{m/s}$
 振幅は 周波数 1kHz で $1/6.28 \cdot 1000 \cdot 410 = 0.00000039\text{m} = 0.39\mu\text{m}$
 周波数 10Hz で $1/6.28 \cdot 10 \cdot 410 = 0.000039\text{m} = 39\mu\text{m}$

右図に音圧 1Pa (94dB)時の粒子速度と最大振幅 (共に0-peak値)の周波数特性を示す。
 音圧 1Pa では速度は $1/410\text{ m/s}$ で一定、振幅は速度を $\omega = 2\pi f$ で割った値になり、
 低域で増大する。
 音圧は粒子速度と一致し、振幅ピーク位置では速度ゼロなので音圧も0、
 振幅中心 (変位量0) で速度最大になり音圧瞬時値もピークとなる。

上記、振幅は、単位面積 (1m^2) 当たり音圧から算出された数値であり、
 断面積 $S\text{ m}^2$ の場合は、振幅 $A_s = A_0/S$ となる。

スタックの機能(熱力学の重要な役割)

スタックは、温度勾配が音響振動(音波)と相互作用し、エネルギー変換につながることを可能にすることで、熱力学的に重要な役割を果たしている。

スタックで何が起きているのか:

音波は、ガス粒子の振動圧力と変位を発生させる。

ガスがスタックを往復する:

高温端に向かうと熱を吸収する。

高温端に向かうと熱を吸収し、低温端に向かうと熱を放出する。

ガスとスタック材料の間のこの周期的な熱交換は、エネルギーの正味の移動につながる:

エンジンの場合 :熱 → 音

冷蔵庫の場合 :音 → ヒートポンプ

まとめてみると ↓

音響エンジンのスタックとは、熱音響デバイスにおいて、熱エネルギーと音エネルギーの変換を担う重要な部分を指す。具体的には、狭い流路の集合体で、蓄熱器とも呼ばれる。このスタックの流路壁と振動流体との間で熱交換が行われることで、エネルギー変換が起こり、音波が発生したり、冷却効果を生じたりする。

音の物理的性質

音響インピーダンスとは

音響インピーダンス Z は、音圧 p と粒子速度 u の比で定義される物理量で、次の式で表されます:

$$Z = \frac{p}{u}$$

単位は $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}$ または $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

これは、音波が物質中を伝播する際の「抵抗の大きさ」を表します。

1. 一次元波動方程式

音波の伝播は、以下の一次元波動方程式に従います(媒質は空気、線形近似):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

ここで:

- $p(x, t)$: 音圧 (Pa)
- c : 音速 (m/s)

2. 一般解(平面進行波)

右向きに進行する平面波の解として:

$$p(x, t) = P_0 e^{j(\omega t - kx)}$$

対応する粒子速度 $u(x, t)$ は、運動方程式から導出:

3. 運動方程式と連続の式

運動方程式(ニュートンの第 2 法則)より:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x}$$

この式に

$$p(x, t) = P_0 e^{j(\omega t - kx)}$$

を代入:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= -jkP_0 e^{j(\omega t - kx)} \\ \Rightarrow \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} &= jkP_0 e^{j(\omega t - kx)} \end{aligned}$$

時間微分して:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{jkP_0}{\rho_0} e^{j(\omega t - kx)} \\ \Rightarrow u(x, t) &= \frac{P_0}{\rho_0 c} e^{j(\omega t - kx)} \end{aligned}$$

ここで $c = \omega/k$ を使用。

4. 音響インピーダンスの導出

$$Z = \frac{p(x, t)}{u(x, t)} = \frac{P_0 e^{j(\omega t - kx)}}{(P_0 / \rho_0 c) e^{j(\omega t - kx)}} = \rho_0 c$$

結論:音響インピーダンス

一次元の平面波における音響インピーダンスは、次の定数になる:

$$Z = \rho_0 c$$

- ρ_0 : 媒質の密度 (例: 空気 で 約 1.2 kg/m^3)
- c : 媒質中の音速 (例: 空気中 で 約 343 m/s)

例(空気中)

$$Z_{air} = 1.2 \times 343 \approx 412 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$$

音波の往復運動とエネルギー流

スタック内では、音圧 p と粒子速度 u が発生し、エネルギー流(音響パワー)として:

音響パワー

$$\text{音響パワー} = \frac{1}{2} \text{Re}[pu^*] = \frac{|p|^2}{2Z}$$

ここで:

u^* : 粒子速度の複素共役

$Z = \rho c$: 媒質の音響インピーダンス

→ 小さな粒子速度で大きな圧力を得るには、インピーダンスが高い必要がある。

2. 熱交換と粒子速度

スタックでは、音波による粒子運動(速度 u)と、温度勾配が交差し、ガスが膨張・圧縮されながら熱のやりとりを行う。

ここで:

- $Z = \rho c$ が小さい(密度が小さい・音速が遅い)と、粒子速度 $u = p/Z$ は大きくなり、熱交換の機会が増える。
- よって、低インピーダンスな媒質 (例:ヘリウム)は熱音響エンジンにとって効率が良い。

3. スタックの位置と共鳴条件

共鳴管の中で定在波が形成されると、位置に応じて:

- 節(ノード):粒子速度 $u=0$ 、音圧最大 → Z 無限大
- 腹(アンチノード):粒子速度最大、音圧最小 → Z 最小

スタックは、音圧と粒子速度の両方が存在する中間位置に配置すると、効率的に熱から音へ変換されます。

この位置で:

$$Z = \frac{p}{u} = \rho c$$

→ インピーダンス整合により、音響エネルギーが最大限に伝達される。

4. 熱音響エンジンの設計への示唆

- 媒質の選択: ρc が小さいと u が大きくなり、スタックでの熱交換効率が上がる。
- (例:ヘリウム(ρ が小さい + c が大きい) = Z は中程度) --とちがうかな？
- スタック断面の調整: 小さいチャンネルで大きな表面積 → 粒子が壁に熱を伝えやすくなる。

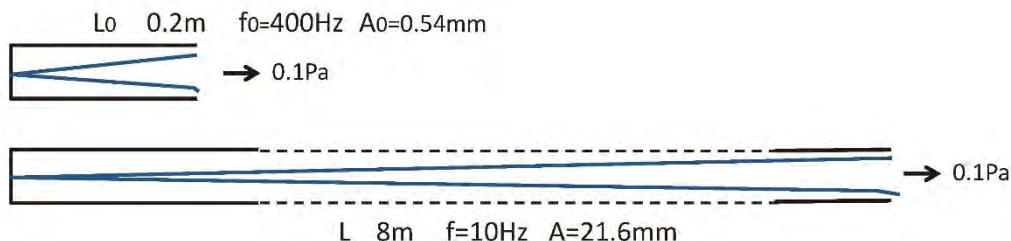
結論

音響インピーダンス $Z = \rho c$ は、熱音響エンジンの:

- 熱-音響変換効率
 - 共鳴条件の設定
 - スタックの最適配置
- に関わる設計の核となる物理量である——といえる。

長さ 20cm、直径 15mmΦ (断面積 $S=1.8 \text{ cm}^2$) のガラス管で熱音響を発生させる。
 周波数 $f_0=400\text{Hz}$ 、音圧 0.1 Pa の音波が出ているとする。開口部(波の腹)の振幅は、
 $A_0 = (0.1^2 / 410 \cdot 6.28 \cdot 400) / 1.8 \times 10^{-4} = 0.097 \mu\text{m} / 1.8 \times 10^{-4} = 0.54 \text{ mm}$

同じ断面積の長さ 8m の共鳴管にすると開口部(波の腹)の振幅 A は
 $A = (0.1^2 / 410 \cdot 6.28 \cdot 10) / 1.8 \times 10^{-4} = 3.88 \mu\text{m} / 1.8 \times 10^{-4} = 21.6 \text{ mm}$



共鳴管を整数倍長くすれば、低い周波数(回転数)の大きい振幅(トルク)のエンジンが得られる。
 しかし、このような長い共鳴管はおよそ現実的ではない。
 長さ 20cm 程度の共鳴管で、8m の共鳴管と等価な共鳴管が必要。

ヘルムホルツ共鳴を利用して近似的に共鳴装置の実現を考える。

ヘルムホルツ共鳴と共鳴周波数

空き瓶の飲み口に息を吹きかけると、「ポーーツ」という音が鳴るかと思えます。この現象をヘルムホルツ共鳴と呼ぶ。
 ヘルムホルツ共鳴がおこる仕組みは比較的単純で、以下のようになっています。

- ① ビンの飲み口に息を吹きかけると、ネック部分の空気がボトルにおしこまれる。
- ② ボトル内の圧力が上昇し、空気を押し返す。

① ⇄ ② の繰り返しによって空気が振動し、音が鳴る。

ヘルムホルツ共鳴によって鳴る「ポーーツ」という音の周波数(共鳴周波数)は次のようにあらわすことができる。

ヘルムホルツ共振周波数 Helmholtz Resonant

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V L}}$$

c : 音速 340 m/sec

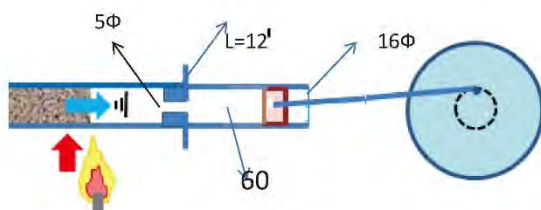
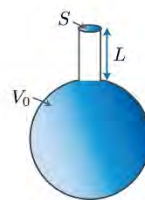
S : 開口面積 (m^2)

V : 内容積 (m^3)

L : 等価ネック長 (m)

ここで、開口の半径 r の時、

$$L = 1.7 * r$$



$$F = \frac{340}{2\pi} \sqrt{\frac{2.0 \times 10^{-5}}{1.2 \times 10^{-5} \times 1.2 \times 10^{-2}}} = 6.2 \text{ Hz}$$

<https://www.mdpi.com/2073-8994/13/3/442>
<https://journals.aps.org/prapplied/ab...>

共通点と違いの比較

項目	ヘルムホルツ共鳴器	熱音響エンジン
構成	ボトルのような空洞+ネック	閉管または共鳴管+スタック+熱源
原理	圧縮空気の質量ばね系共鳴	音波が熱勾配により自励発生(or 駆動)
共鳴	単一共鳴モード(低次)	任意の定在波モード(複数も可能)
エネルギーの蓄積	空洞内の音圧エネルギー	管内全体に粒子速度+音圧が分布

音響エネルギー密度の一般式(平面波)

$$E = \frac{p^2}{2\rho c^2} + \frac{1}{2}\rho u^2$$

- p : 音圧 [Pa]
- u : 粒子速度 [m/s]
- ρ : 媒質密度(空気:約 1.2 kg/m³)
- c : 音速(343 m/s)

※ 平面波なら: $p=Zu$ より両項は等しくなる → 総エネルギー密度:

$$E = \frac{p^2}{\rho c^2} \quad \text{または} \quad E = \rho u^2$$

熱音響エンジンでの推定例

仮に以下の条件を設定:

- 音圧振幅 $p_0=1000$ Pa
- 動作容積 $V=0.001$ m³ (例:管長 0.5m, 断面 0.002m²)
- エネルギー密度:

$$E = \frac{p_0^2}{\rho c^2} = \frac{(1000)^2}{1.2 \times (343)^2} \approx 7.1 \text{ J/m}^3$$

- 蓄積エネルギー:

$$U = E \times V \approx 7.1 \times 0.001 = 7.1 \times 10^{-3} \text{ J}$$

振動数 $f=500$ Hz、1秒間に 500 回取り出せるとすると:

$$P = U \times f \approx 0.0071 \times 500 = 3.55 \text{ W}$$

試作 1 号機のディメンジョンは 長さ 0.2 m, 断面積 2×10^{-4} m²

$$E = 7.1 \text{ J/m}^3$$

$$\text{蓄積エネルギー } U = 7.1 \times 4 \times 10^{-5} = 2.8 \times 10^{-4} \text{ J}$$

$$\text{振動数 } f = 400 \text{ Hz} \quad P = U \times f \approx 2.8 \times 10^{-4} \times 400 = 0.11 \text{ W}$$

試作 1 号機の出力(実測値) 27mW at 400 RPM

音圧振幅 $p_0=1000$ Pa 設定値がこの試作機に対応しているかは未定。

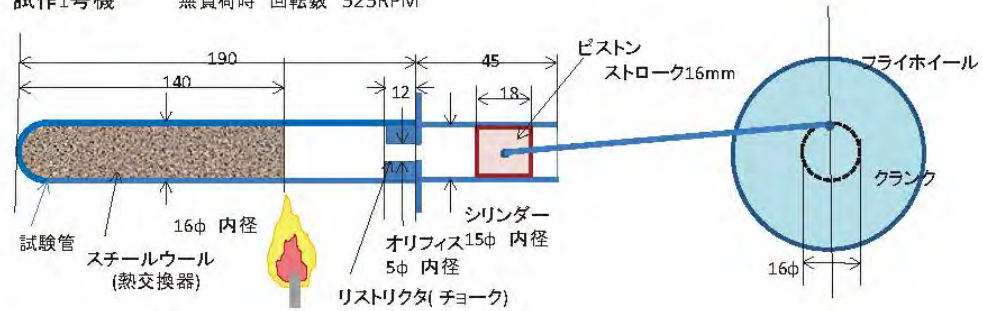
以上です。

ヘルムホルツからの洞察:

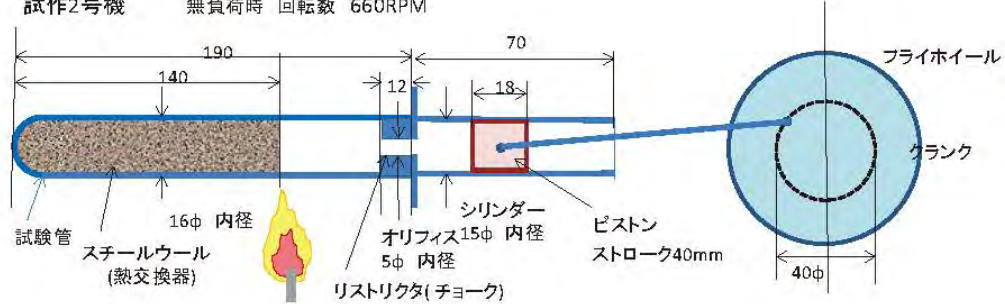
音響共鳴構造の Q 因子が高いと、同じ入力で大きな音圧が得られる

音圧と粒子速度の位相が整う位置でスタックを設計すれば、取り出せるエネルギーが最大化

試作1号機 無負荷時 回転数 525RPM



試作2号機 無負荷時 回転数 660RPM

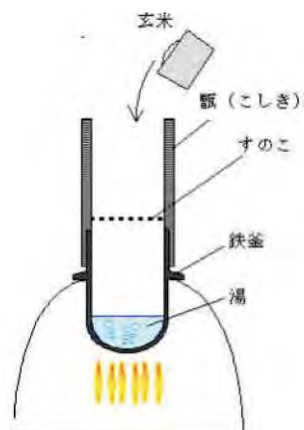


吉備津の釜

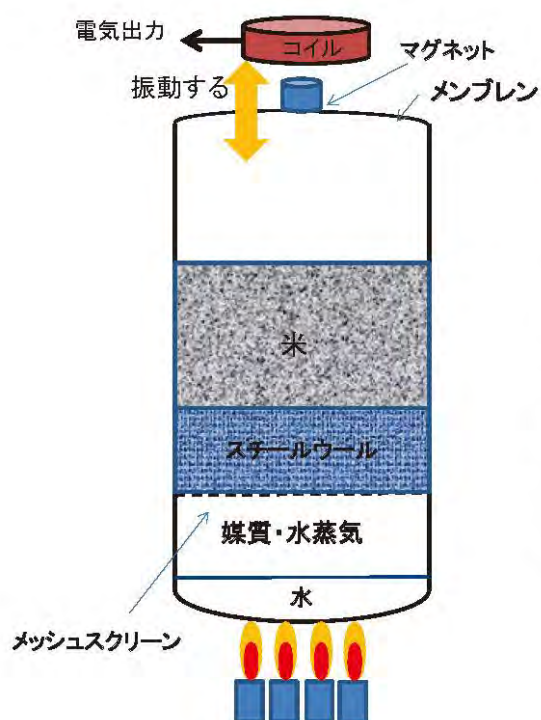
(湯を沸かした釜がうなるような音を発する現象)

熱音響自励振動 加熱によって釜内部の気柱の共鳴振動が励起される熱音響現象





最近You Tubeでよく見かける Thermoacoustic Rice engine



吉備津の釜を原理的に模したエンジン

作動媒質は水蒸気
スチールウールはスタック
米はどんな機能をするかは不明
(熱交換器?)

熱音響自励振動が起こり、シリンダー内部の気柱の共鳴振動が励起される持続した音波が発生する。

水蒸気は空気より複雑な振舞いをすると考えられる。



今後の日程

- 第 155 回 5 月 25 日 (日) 13 時 ~ 竹内 学 様
- 第 156 回 6 月 29 日 (日) 13 時 ~ 久米 健次 様
- 第 157 回 7 月 27 日 (日) 13 時 ~ 寺川 雅嗣 様

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

以上

2025-5-4 文責 山本洋一