

# 熱で奏でる音楽

## Sound Generation by Combustion Heat Releasing

岸本 健\*\*

(Ken KISHIMOTO)

**Key Words** : Thermoacoustics, Combustion Oscillation, Pulse combustion

### 1 はじめに

熱と音楽の関係という、不思議に思うかもしれない。もちろん、熱が直接音となることはない。音は振動現象であり、周波数が可聴範囲内の 30Hz~5kHz 程度でなければ、音楽の音にはならない。固体内の熱の移動速度は非常に遅く熱伝導率も充分ということではないため、熱伝達と伝熱では、音を作り出すことはできない。熱が音を作り出すには伝熱とは異なるメカニズムが必要になる。

また、逆に、音が熱を作り出す現象もある。しかし、可聴周波数の範囲の非常に大きな音でさえ、音の振動エネルギーは力学的エネルギーであるので、日常的な熱エネルギーの大きさからすると小さく、蓄積しなければ数 100℃ という温度差を作り出すことはできない。

ここでは熱がどのようなメカニズムで、空気振動を作り出すかを平易に紹介すると同時に音が熱に変わるための仕掛けも紹介する。つまり、音響という圧力変動と熱のエネルギー変換の紹介となる。

### 2 熱を音に変換する

はじめに述べたように、伝熱と蓄熱の比を表すフーリエ数  $F_O = \alpha t / L^2$  で表される伝熱の特性時間は  $F_O = 10 \sim 40$  程度が通常であるので、 $\alpha = 1.0, L = 0.1$  として、 $F_O = 100t = 10 \sim 40$  から  $1/t = 2.5 \sim 10$  となり、周波数は数 Hz となる。つまり、蓄熱と伝熱で音を作ると、可聴周波数以下の極めて低音になるため、熱で奏でることは難しくなる。

熱が高い音も含めた「音楽」の音に変わるためには伝熱ではないメカニズムが必要になる。それが流れや化学反応である。熱を伴う化学反応がすべて燃烧であるとは言えないが、燃烧や流れを用いると高速な熱生成や消滅が容易となる。

音を出す楽器のうちで、金管楽器では、太さの変化する金属の薄い管(共鳴管)の側面のところどころに穴を開け、その穴を塞ぐことで、音階を作り出すことができる。尺八や和笛、木管楽器でも、同様ではある。

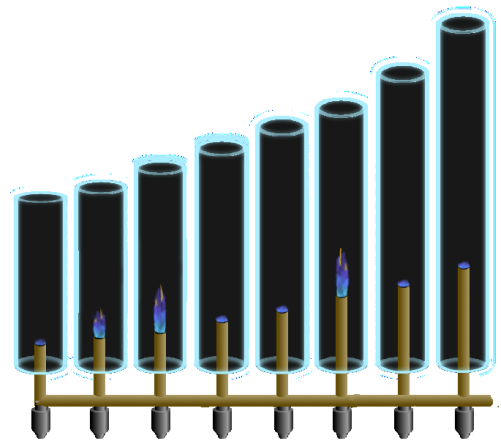


図1 ガスオルガン

この穴の位置は、定在波の圧力分布の節の位置を決めるため、波長が決まり音階が決まる。しかし、この孔の開閉は可動部が必要になる。燃烧で音を出し音楽を作るためには、可動部のないパイプオルガンのように多数の長さの異なる管を用意し図1に示すように、音階に相当する  $1/2$  波長管の長さ、 $L = 0.5 \frac{c_0}{330 \cdot 2^{n/12}}$ ,  $n = 0, 2, 4, 5, 7, 9, 11, 12$  の管を並べて用意し、演奏に応じてそれぞれのパイプに

\* 原稿受付 2014 年 10 月 23 日

\*\* 国土館大学

(〒154-8515 世田谷区世田谷 4-28-1)

付けられたバーナを点火、消火する。

この 1/2 波長管 (1/4 波長管) の原理は、ディーゼル機関の排気管設計などにも使われている。

## 2.1 騒音から楽音

騒音 (噪音) とは、発音器から出てくる圧力変動である音の成分として、多くの不規則な周波数を含み、それらの位相もまちまちである圧力変動をいう。それに対して、楽音とは特定の基本周波数 (複数でもいい) とその倍音からなる音である。熱が楽音に代わる原理は、管楽器と似ている。楽器のリードやマウスピースで発せられるには多くの周波数が様々な位相で出てくる騒音である。これらの発音器は、多くの周波数の音を出す、リードでは共鳴管の固有振動数に相当する圧力変動がリードの振動を強めて、特定周波数だけ強調するため、もともと騒音の中に含まれていた特定周波数で振動しているかのような状態になり楽音となるのである<sup>(10)</sup>。

一方、燃焼に関わる音の発生では、乱流燃焼による。この乱流燃焼と音の関係も上述の管楽器と似ているメカニズムで騒音ではない音を作り出す。乱流燃焼では、予混合燃焼であっても、微細な火炎面は既燃の領域と未燃の領域の接点であり、平面ではなく、複雑に入り組んだ形状となる。この入り組んだ領域で燃焼速度に対応した燃焼が起こると燃焼は圧力変動となる。つまり、乱流は騒音を出す、燃焼器の形状によって決まる共鳴振動数が選択的に系内に蓄積されるため選択的に増幅したようになる。図 2 に圧力変動が音として維持されるメカニズムを示す。

空気と燃料を用いる燃焼装置には、空気供給系と燃料供給系がある。一般に空気は比較的低い圧力で供給される、燃焼室と供給系との差圧が空気流入量  $Q_a$  に関係し、燃焼室圧力の上昇は供給量の減少になる。燃料供給  $Q_f$  は高圧で細孔を通して行われるため、ほぼ一定とは言え、空気に対して量は小さいため時間的に燃料の濃淡の形で供給される。

燃焼には、当量比という空気に対する燃料量の比を定めた必要な量がある。燃焼速度は、当量比  $\phi = 1.0$  という量論混合比に近い時に最大になり、この時が燃焼速度も燃焼温度も最高となる。燃焼温度はガスの膨張速度を決めるので、圧力変動の

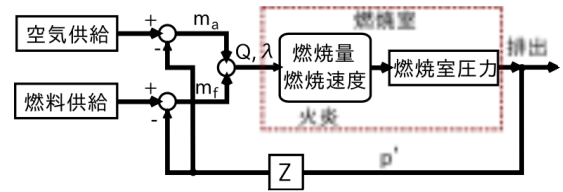


図 2 燃焼による圧力変動のフィードバック

大きさを決めることになる。燃焼室で生成された圧力変動は音波となって供給系に影響する。この時、 $\oint p' dq' > 0$  となるような遅れを持つ騒音の変動成分 (つまり共鳴周波数である) があると正のフィードバックとなり、圧力振動は成長してゆく。このように燃焼室入口の火炎で作られる圧力変動は、比較的単純な燃焼室の形から決まる共鳴周波数によって、燃焼室内に閉じ込められる。これは、楽器の特定音が大きくなるメカニズムと同じである。しかし、楽器と異なるのは、閉じ込められた共鳴周波数の圧力変動  $p'$  は、ある遅れ時間  $Z$  を以って、空気や燃料の供給系に戻る。適当な遅れ時間となれば、燃焼室の圧力変動は、自己の圧力変動を増大させることになる。これは燃料の供給を止めないと止まらない自励振動となる。

## 2.2 熱音響

前述のように振動燃焼もガスオルガンのような現象も熱音響現象といい、図 3 のように長い管内の下部出口から 1/4 長さの位置にガーゼを置き、ガーゼを炎で加熱した時に垂直においた管が強い音を発するようになることをオランダ人 R.Rijke(ライカと発音するのが近い) が 1859 年に発見している。そのため、この現象を起こす管を Rijke 管といい、発声音をガーゼトーンという事もある<sup>(8)</sup>。

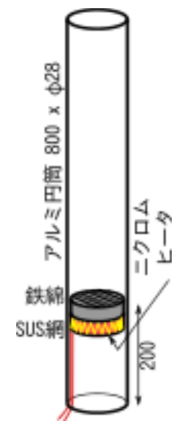


図 3 Rijke 管

この管は両端が「開」であるので、1/2 波長管と呼ばれ、基本周波数での波長の 1/2 が音の波長となる共振状態を持つ。圧力の腹が管の長手中央にあり、低音になると 1/4 周期遅れて管の両端から空気が流

入ってくる。この時、加熱された金網を通過するため、空気は膨張する。そのため、 $p'q'$  は正となる。一方、管中央が高圧になると、管内の空気は両端に向かって流れ始める。垂直な管では暖められた空気は浮力が働くため、ほとんどが上方に抜け、下方への流速は小さくなり、金網を通過する空気は少なく、加熱量は現象するため、 $p' < 0$  で  $q' < 0$  となり、ここでも正となるため、後述のレーリーの仕事積分は常に正で振動には常にエネルギーが供給されることになる。

この原理は燃焼という化学反応ではなく、壁と空気の伝熱現象によってエンタルピ流れが生じ、高温部と低温部が出現することになる。前項で述べたように、伝熱する壁  $L$  を薄くし、温度伝導率  $\alpha$  を高くすることで伝熱の特性数であるフーリエ数  $Fo = 10^4 t$  とすると蓄熱に対する伝熱は 100 倍となり、特性周波数は 1kHz~ 400Hz となり、十分に伝熱で可聴範囲の音を発することになる。つまり、ガーゼやスチールウールのような細線や、薄いアルミ箔やセラミックスを用いたハニカムを使用することで、流体抵抗の増加を極力減らし、特性長を小さくすることが音を出すために必要な手法となる。

この Rijke 管は、このように発見されて久しい現象であるが、最近、省エネのデバイスとして注目されている。Rijke 管を両端閉の管として密閉し圧縮空気で内部を高圧化し、音響振幅  $p'$  が 0.5MPa ほどになるようにすると、音の強さは  $p'^2/\rho c = 1.43 \times 10^8 \text{W/m}^2$  となり、210dB にも達し、ジェット機騒音の 1000 倍にも達する。この時、最大圧力と最小圧力の比、圧力比を 20 程度にできるので、-100℃ から 750℃ の温度変動を生じることになる。

原理的には Rijke 管を 2 つつなぎ、図 4 のようにループにして音響波を閉じ込める。この音波は反射条件を持たないため、進行波であるが、重ねあわせされるので、定在波のように振る舞う。

対称面に圧力の節が来るため、 $1/4L$  の位置に加熱部と冷却部を設ければ、ループ内に定在波ができる。閉管に閉じ込めているのでこの大きな圧力波を利用して 1kW 出力の熱音響エンジン<sup>(3,6,9)</sup>などが開発されている<sup>(2)</sup>。

また、同じ音波をループ管に導入すると高温部と

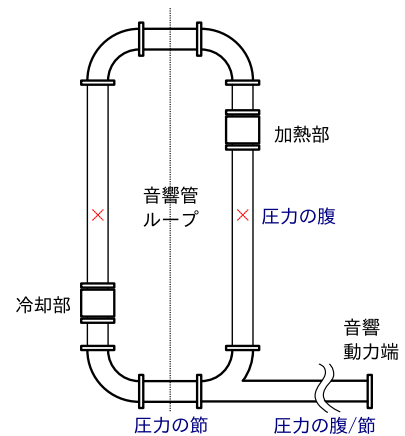


図 4 音響管動力源

低温部ができるため、2つのループを音響的な接合をすると、一方で低温度差により音響を発生させ、もう片方で、冷凍もしくは加熱を行うことができる。現在では、カルノーサイクル効率 30% 程度という高い熱効率が実現されている。

### 3 自励振動と共鳴

共鳴は特定周波数が強調される現象であるが、これは、境界面、ここでは管の端部での反射条件が問題となる。完全反射はこの端面で、管内部の音波はエネルギーロスなく反射する。波長の異なる音は境界である端面で大きなエネルギーロスが起こるため、管(系)内部には蓄積できない。しかし、境界面で効率良く反射した特定の波長を持つ音は間の中に溜まり続ける、つまり、巨大なエネルギーを持つ定在波の振動となる。

もちろん、エネルギーロスが全くない境界面はない。しかし、ロスよりも生成されるエネルギーが大きければ振動は増大する。一サイクルで振動に与えられるエネルギーは、力学エネルギーであるので、圧力を  $p$ 、燃焼室ガスの体積を  $V$  とする。この体積は対象としている気体の体積であるので、急激な圧力上昇に続いて膨張する部分の体積であり、幾何学的に定められるものではない。一般に熱力学的には、単位時間に燃焼によって与えられるエネルギーを  $\dot{q}$  として、

$$\frac{d\dot{q}}{dt} = c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

である。振動の一サイクルに与えられる仕事は、式

(1) を積分する。定常振動であると一変数の周積分はゼロであることを利用し、圧力変動の小さいとして整理すると、

$$\oint p' dq = \oint p' \frac{dq}{dt} dt = \frac{c_p P_0}{R} \oint p' \frac{dV}{dt} dt \quad (2)$$

となり、発熱速度の変動  $q'$  と圧力変動  $p'$  が振動のエネルギーを作り出している。 $q'$  は発熱速度ではなく、発熱速度の変動であり、与えられる熱エネルギーの大部分はエンタルピーとなるが、式(1)のように燃焼強度の強弱の一部が振動エネルギーになることを示している。式(2)はエネルギー生成量を表している。

$$\oint p' dq > 0 \quad (3)$$

この式はレーリーの発振条件と言われ自励振動を発生する条件を示す。実際は損失を上回るエネルギー生成があると振動は成長するので、右辺は

$$\frac{R}{c_p P_0} \oint p' dq > W_{loss} \quad (4)$$

のようにする。ただし、 $W_{loss}$  については、流体管摩擦、乱流損失、開口端の反射係数など複雑であるので理論的に扱うことは難しい。この式(4)の等号は  $<$  であると、ロスのほうが大きいので減衰し、 $=$  となった時に振動は安定する。

図2に示すように正のフィードバックであり、式(4)の左辺は、 $|q| \propto |p|^2$  であるので、振幅の二乗に比例する。一方、 $W_{loss}$  が主として、摩擦や開口端からの放射であると、速度変動の二乗に比例するために、振動が発生すると振幅は無限大となる。しかし、図5に振幅成長時の各サイクル1周期のエネルギーを示すように、加振エネルギーは振幅 15kPa くらいで二乗の曲線から外れて損失エネルギーのカーブと交点を作る。このときの  $p'$  が定常振幅の振動となる。大振幅では燃焼の  $|q'|$  は  $|p'^2|$  に比例しなくなり、実際には無限にはならず振幅が決まる。

このように加振エネルギーは、Rijke 管においては流速変動による空気への熱伝達の変動による圧力変動  $p'$  と加熱量変動  $q'$  の積図1のオルガンパイプでは、圧力変動による供給量変動が、式(3)のレーリーの条件を作り出している。このために、加熱・

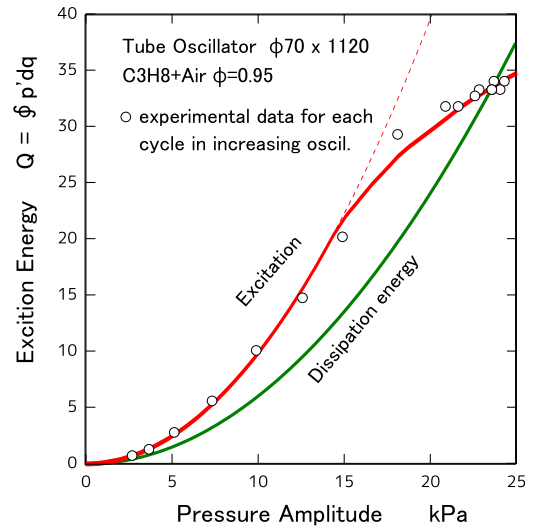


図5 サイクルごとのエネルギー

冷却で音響振動が、音響振動で高温部と低温部ができる。170dB にもなる音響振動を動力や発電に使う試みが最近始まっている。

#### 4 パルス燃焼

燃焼の熱エネルギーを振動のエネルギーに替えるデバイスにパルス燃焼がある。図6には、給気と排気のデカップラーが書いてあるが、基本的には燃焼室とテールパイプで構成されている。

燃焼室には連続的に燃料が供給されている。燃焼室で空気と混合して、急激に膨張する。この爆発は燃焼室内の燃焼ガスをテールパイプに排出する。流入管は比較的短いため、逆流があるが、太くて長いテールパイプ内のガスの質量は大きいため、燃焼室内の爆発で押し出される運動量は大きく、爆発後の燃焼室内圧力を供給圧力よりも低くする。この低圧化した燃焼室には多量の新鮮な空気が流入し、混合気を生成する。流入速度が十分速いため、流入と同時に燃焼することはなく、流入によって圧力が回復し、流入速度が低下した時点で再び爆発が起こる。

燃焼室体積が 300cc で長さ 300mm のパルス燃焼器では、大気開放にも関わらず、400Hz で振幅 50kPa 程度の間欠燃焼が起り、大音響の 190dB にもなる

このパルス燃焼器は、次のような用途に使われる。Putnum<sup>(1)</sup> のパルス燃焼のサベィの中では多くの応用例が報告されてるが、主なものは次のようなものである。

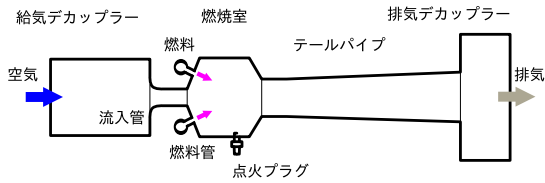


図6 バルブレスパルス燃焼器

1. 推進器
2. オイルヒータ・給湯器
3. 乾燥機
4. ツインパルス燃焼器

これらについて以下に紹介する。



図7 第1次大戦で独軍が使ったV1ロケット<sup>(5)</sup>

**推進器** パルス燃焼器から噴射されるガスの速度は、400m/s程度となり、音速の60%となるため、推進エンジンとして利用された。図7に示すように第1次大戦で独軍が使ったV1ロケットのエンジンとして有名である。U型のLockwoodパルス燃焼エンジンなども1970年代多く作られたが、いずれも現在が過去の技術となっている。ただ、非常に単純で、径の異なる管をつなぎあわせてエンジンとすることができるため、ホビー飛行機のエンジンとしては現在も使われている。

**オイルヒータ・給湯器** パルス燃焼は、燃焼室の爆発による高速な排気ガス流速と、往復流により、テールパイプ表面での熱伝達は定常な状態よりも20倍も大きいという報告もある<sup>(7)</sup> 図8はLucas-Rotax社が開発したもので、燃焼器とテールパイプを水没させ、伝熱面積を増すために複数のテールパイプを持つなど、その後の多くの給湯器の特徴を持つ形状を持っている。高効率で小型であるという高性能ヒーターであった。

ペイント塗料やアスファルトなど常温ではピッチ状態にある高粘度流体の加熱器として使われたこともある。しかし、発生する著しい騒音と安価なガス

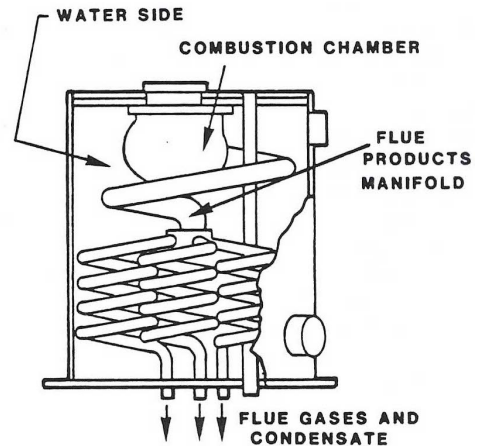


図8 パルス燃焼を使った給湯器<sup>(1)</sup>

燃焼給湯器などには市場的に対抗できず現在はほとんど使われていない。

**乾燥機** パルス燃焼は、現在は乾燥機として用いられることが多い。図9にはPulse Combustion System社の製造している粉体乾燥装置を例として示す。上方から下方に向けて燃焼器が設置され、テールパイプ出口に置かれた霧化器から液体が噴出する。パルス燃焼排ガスの間欠噴射に粉碎能力があるため、霧化器は単純な構造でよくアスピレーター構造を持った出口から冷却空気とともに乾燥機に送られる。テールパイプ出口のガス温度は噴出時は1500℃を超えるが時間平均温度は200℃以下である。加えて粉体乾燥機として、無機物(FeO<sub>2</sub>やCrCoなど微細鉱物酸化物、有機化合物の一部)の水濁液では、98%以上の含水率があるが、0.2MWクラスの小型パルス燃焼器で乾燥させると、含水率として50%以下の粉体を高効率で得ることができる。パルス燃焼器中での乾燥時間は1/200~1/50secであり、従来の乾燥速度からすると超高速乾燥であると言える乾燥システムとなり、薬品や粉末食品を高熱で変質させないという特徴を持っている。

**ツインパルス燃焼器** パルス燃焼であるので、著しい騒音を発生する。強いパルス燃焼をさせながら、この騒音の発生を抑制するための対策をしたものを図10に示す。

この構造は、2つの燃焼器の流入管を、給気デカップラーを介して一つにする。一方の燃焼器に吸気が行われる瞬間には片方の燃焼器の爆発による逆流に

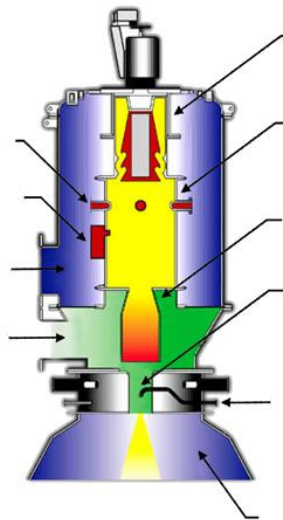


図9 パルス燃焼を使った乾燥機<sup>(4)</sup>

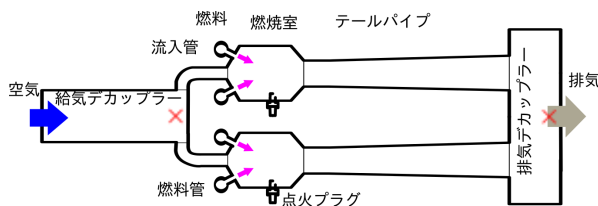


図10 ツインパルス燃焼機

よって、この吸気をアシストする。また、燃焼器の排気を排気デカップラーで結合し、2つの燃焼器が同じ周波数で逆位相で発振しているとき、圧力変動の中間点つまり節の部分に排気口を設け、出口での圧力変動を最小にするとともに、一方が片方の圧力変動を助ける構造となっている。

## 5 終わりに

本稿では、熱と音の関係についての紹介をさせていただいた。音響設計は本来コンサートホールなどの設計であり、建築音響の分野であった。しかし、冒頭に「遊び」の段階ではあるが、燃焼を利用したガスオルガンを紹介した。これは、ものづくりの教材として、教育用に提供されている装置であるが、という音楽的基礎も必要となる。

さらに、気体の膨張・収縮という車のエンジンでの仕事発生とおなじ事を、可動部なしに行い、音響管という閉じた空間内に共鳴という閉じ込める原理

を使って小さな振動を閉じ込めて強大な音場を作り出すことが、熱音響学である。ちょうど、励起された光エネルギーを固体もしくは気体の中で、共振という条件下で閉じ込めて強力なレーザー光を作り出すことと同じである。

光と異なり、音は熱現象を伴うエネルギー散逸プロセスであるが、まだまだ多くの応用すべきアイデアの宝庫として研究することも重要であると考えられる。また、小稿を書く機会を頂いた国土館大学の本田康裕教授に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] F.E.Belles A.A.Putnum and J.A.C.Kentfield. Pulse combustion. Vol. 12, pp. 43-79, 1986.
- [2] JST Science Channel. 熱音響エンジン:熱を音に音を電気に. <http://sc-smn.jst.go.jp/M120001/detail/M120001015.html>, 2012.
- [3] D. L. Gardner and G. W. Swift. A cascade thermoacoustic engine. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 114, No. 4, 2003.
- [4] Pulse Combustion System. Spray driers - pulse combustion systems. <http://www.pulsedry.com/tech.php>.
- [5] Steven Zaloga, Jim Laurier, 手島尚 (翻訳). V 1 飛行爆弾 1942-1952. 大日本絵画, 2005.
- [6] 下川哲, 上田祐樹, 秋澤淳. 加圧室素を作動流体とした進行波型熱音響冷凍機の性能測定. *低温工学*, Vol. 47(1), pp. 37-41, 2012.
- [7] 岸本健. パルス燃焼の現状と進展. *燃料協会誌*, Vol. 70, No. 5, p. 389, May 1991.
- [8] 岸本健. 家庭用小型燃焼器の騒音と振動. *燃焼研究*, Vol. 100-103, , 1995,1996.
- [9] 長谷川真也, 伊藤剛, 押野谷康雄. 高効率熱回生用熱音響エンジンに関する研究. *東海大学紀要*, Vol. 52, No. 1, pp. 77-82, 2012.
- [10] 日本機械学会編. 燃焼工学ハンドブック, 第8章. 日本機械学会, 1995.