

熱音響現象の基礎実験

岡 住 悠 二^{*1}

宇 藤 茂 憲

福岡教育大学教育学部

福岡教育大学教育学部

(平成21年10月1日受理)

Basic experiments of thermoacoustic phenomena

Yuji OKAZUMI

Department of Physics, Fukuoka University of Education

Shigenori UTOH

Department of Physics, Fukuoka University of Education

キーワード: 熱音響現象, スチールウール, スタック内温度分布, 定在波, スキャン測定

概 要

特殊な工作や特別な器具を用いることなく温度を測定(例, 熱電対)する装置さえあれば, 「音」と「熱」が密接に関係する「熱音響現象」を簡単に実験できる例を紹介し, 本実験の基礎データから現象の理解に努めてみた。閉管条件下(スピーカーをパイプに密着させ, パイプ他方を閉端とした)の $\lambda/2$ 定在波(λ =波長)を領域Ⅰ～Ⅲに3区分し, それぞれの領域でスチールウール製スタック内の温度分布を測定し, 各特徴を検証した。

1. はじめに

日常生活で経験する「音」に係わる現象は, その多くが断熱現象であるため, 一般的に熱や仕事の発生とは無縁のものと認識されている。しかし, 例えば, 温度勾配のある特定の環境下で音が発生(自励振動)したり, また, 細管内を音波が伝播すると熱が発生(或いは, 冷却)するなど, 音を断熱的变化としてとらえられない現象が種々存在することが報告されている¹⁾。これは「熱音響現象」として理論的解釈の試みがなされ, また実用的応用面においても研究が展開されている^{2-4, 6)}。熱音響現象の歴史的な経緯やその詳細は他の文献に委ねるとして, この熱音響現象は, (1) 自励振動, (2) エネルギー変換機, (3) 熱輸送, と大まかに分類できるようなのである。(1)は, 吉備津の釜, Rijke管, Taconis振動等の現象として, (2)は, スターリングエンジン(原動機)やパルスチューブ冷凍機等として, (3)は, ドリームパイプ(強制熱輸送現象)等として知られている¹⁾。特に, (2)と(3)は実用面でも注目されているものである。本報告は, 熱音響現象の中でも簡単な実験器具を用いて研究室で実験しやすい現象を取り上げて検証し, 現象を理解するための基礎データを提示するものである。閉管条件の共鳴管 $\lambda/2$ 定在波の中にスタックを設置し, 熱音響現象でスチールウール製スタック内に生じる温度分布の特徴について, 実験データを元に現象を概説する。

※1 現在, 福岡教育大学 特別支援教育特別専攻科 に在籍

2. 実験方法

2種類 [(i) 60φmm (厚さ2mm) & 長さ1030mmと, (ii) 90φmm (厚さ3mm) & 長さ1030mm] の透明アクリル製パイプを定在波発生管として実験に用いた。閉管条件で実験をおこなうため、パイプの右端にスピーカーを密着させ、左端はアルミ板でパイプを閉じた後、油粘土で厚く覆ってアルミ板の振動を抑えた。閉管定在波の「節」と「腹」の位置の検証は、①静電気処理した発泡スチロール球 (1~3φmm) の視覚的確認 (写真1参照)、②閉管壁のアルミ板中央に穴をあけて、スピーカーをプローブとして挿入した音の強度測定 (以下、スピーカー・プローブ法) でおこなった。尚、両パイプ共に「音」を発するスピーカーは同じものを用いた。90φmmパイプにスピーカーを直接密着させて取り付けることはできたが、60φmmパイプには補助具取り付けの必要があったので、パイプ長が1140mmとなった。 $\lambda/2$ の定在波を発生させる周波数は前者が173Hz、後者は150Hzである^{*2}。



写真1

静電気処理した発泡スチロール球による閉管定在波とパソコン発振器「発音」のノートパソコン画面



写真2

閉管 (90φmm) に設置したスチール (0.8mm格子間隔) 製メッシュ円筒カゴと7本のK熱電対

本実験で用いたパソコン・発振器やパソコン・デジタルオシロスコープは、インターネットで公開されているフリーソフト^{*3} (パソコン発振器: 「発音」と1chパソコン・デジタルオシロスコープ: 「振駆郎」) をダウンロードしてノートパソコンにインストールして使用した。「音」の電気信号のパソコンへの出し入れは、特別なインターフェースを用いることなく、パソコンの「マイク端子 (アナログ→デジタル変換)」と「ヘッドホン端子 (デジタル→アナログ変換)」を利用した。

閉管条件のパイプ内に定在波を発生させるため、パソコン発振器の電気信号を「ヘッドホン端子」経由で約12Wのパワーアンプ (市販品) で増幅してスピーカー (6Ω, 15W) から「音」を出して①を実験した。②の実験では、1W程度に増幅した閉管内の音の強度測定に、34φmmのスピーカー (8Ω, 0.5W) をプローブとして用いた。約1W (組立品) のパワーアンプでこの信号を増幅させた後、「マイク端子」経由でパソコンに取り込んで1chパソコン・デジタルオシロスコープ「振駆郎」で音の強度を測定した。

温度検出プローブにはK (Chromel-Alumel) 熱電対 (Omega ER社製テフロン被膜TT-K-30) を用いた。図1に示すように、ゼロ補正 (氷使用) 点はK熱電対のクロメル (或いは、アルメル) と銅製補償導線を低温銀溶接 (Nice社製ナイスフラックス) で接合し、さびないようにアラルダイトエポキシ樹脂で

※2 音速度計算 [$V(T) = 331.5 + 0.6T$ (m/s)] とパイプの長さから $\lambda/2$ 定在波の生じる計算上の周波数は、室温が25℃の条件で、60φmmパイプでは148Hz、90φmmパイプでは168Hzである。しかし、今回用いた実験器具の条件で最も大きな定在波強度を得るため、静電気処理した発泡スチロールで強度を確かめながら周波数を決定した。この結果、前者が150Hz、後者は173Hzの周波数となった。

※3 <http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0260b/contents/04oto.html>

密封した。スタック内温度分布の概要を得るため、(A) 3本のK熱電対でスタック両端と中央部を測定した後、(B) 実験条件に応じた一定間隔で7本のK熱電対をスタック内に固定して、より詳しい温度分布を測定した。

K熱電対の計測データをパソコンに取り込むため、(A)の実験では、デジタルマルチメータ(DMM, Advantest社製, TR 6851型とSC7401&7402型)3台で測定をおこなった。(B)の実験では、DMMとスキャナー(多点計測切替器: Advantest社製, R7210型)を組合わせて測定した。スキャナーで7つの計測点を一定時間間隔で順次走査し、各データ(直流電圧値)を1台のデジタルマルチメータ(TR6851型)で測定した。スキャナーとDMMはGP-IB(National Instrument社製, PCI型, 及びGP-IB USB HS)でパソコンと接続して、制御とデータ収集をおこなった。計測概念図を図2に示す。

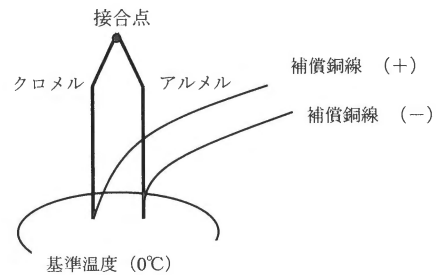


図1 K熱電対と補償導線接合と基準温度 (0℃)

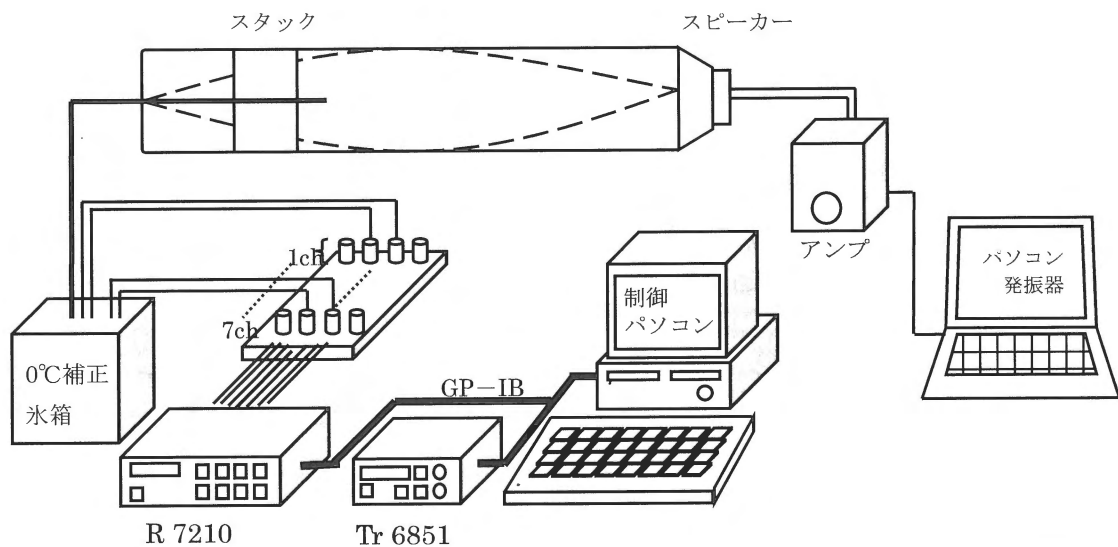


図2 スキャナー(R 7210)とDMM(Tr 6851)を組合わせたスキャン計測概念図

計測プログラムはMicrosoft Visual Basic ver.6で作製した。GP-IB制御用にNational Instrument社供給のVbib-32.bas, Niglobal.basを標準モジュールとしてリンクした。計測プログラム画面を図3に示す。「GP-IBボードの初期化」、「DMMとスキャナーの初期化」、「DMMとスキャナーの測定基本定数の設定(例えば、DMMスムージング回数の指定やサンプリングレートなどをプログラムに書込済)」をおこなった後、①データ取得回数(例、80回。但し、7ポイント走査測定を1回とする)、②スキャン時間間隔(例、200 msec)、③データ取得時間間隔(例、10 sec)をそれぞれ指定して計測した。データはファイルに保存した。データ解析にはMicrosoft Excelを使用した。

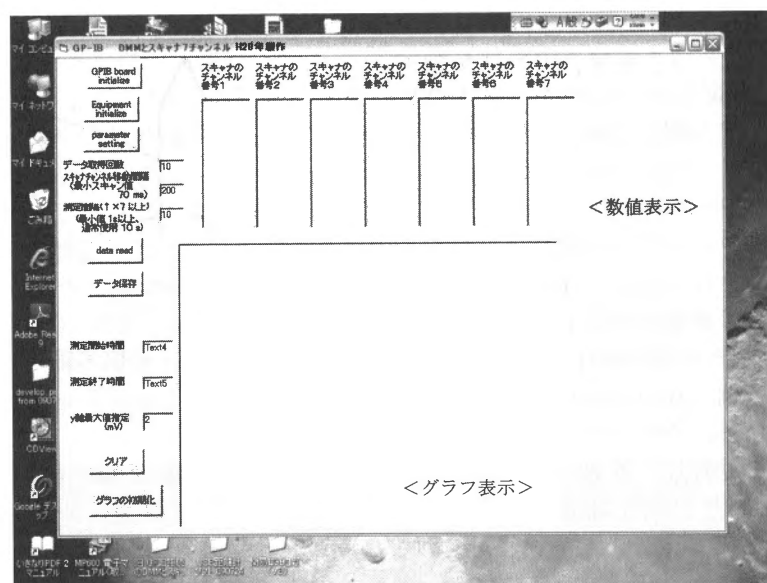


図3 Microsoft VisualBasic ver.6 で製作したデータ収集画面

3. 実験データと解析

3-1. 閉管定在波の実験条件とスタック選定について

脚注※2に記載したように、60φmmパイプでは150 Hz、90φmmパイプでは173 Hzの周波数でそれぞれの閉管に $\lambda/2$ 定在波（室温は25℃）を発生させた。実験データを解析するため、定在波の「腹」と「節」の位置を正確に決定する必要がある。写真1に示すように、静電気処理した発泡スチロール球による定在波の視覚的確認では、「腹」中央部のおよその位置を決めることは可能であるが、「節」の位置を確定できない。そこで、スピーカー・プローブ法による「音」の強度測定で確認した。この方法は閉管の端に穴をあけるため、完全な閉管条件でないこと、また、スピーカーをパイプに挿入することで定在波が乱されること、などの理由で「節」と「腹」の正確な位置決定は難しいが、簡単な定量的測定法として用いた。本実験条件では、90φmmパイプの定在波「腹」中央の位置は閉管の端から51 cm、60φmmパイプは57 cmと決定した。この「腹」中心の位置を基準として、定在波内のスタックの位置を $x = 100L/0.25\lambda$ で定義した。但し、 L は、 $\lambda/2$ 定在波の「腹」中央からスタック左端までの距離である（図6参照）。

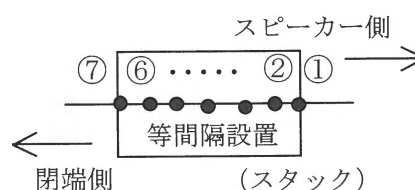


図4 スタック（スチールウール）内に設置した7本のK熱電対

本実験で用いるスタックの種類と形状を決めるため、次の実験をおこなった。スチールメッシュ板（0.8 mm 間隔格子：市販品）、スチールウール [A-12：山崎産業㈱]、ガラス製キャピラリーチューブ（外径1.5 mm、内径1.0 mm：フジストーン）の3種類をスタックとして、直径35 mmで長さ60 mmのスチール製メッシュ円筒カゴに詰めて実験した（写真2）。円筒カゴは90φmmパイプの閉端から約150 mm（ $x = -73\%$ で、後述する「領域Ⅱ」の特徴を示す）の位置に設置して、音発生（173 Hzを約12 Wで出力）から800 sec経過するまでのスタック内7ポイント〔閉管に平行な方向に沿って、スタック内の10 mm 間隔（図4参照）〕の温度分布を測定した。結果を図5と表1に示す。この3種類のスタックの中では、スチールウールがスタック両端で最も大きな温度差（この実験条件では約11.7℃）を生じたので、これをスタック

クとして実験をおこなうこととした。ここで、スタックを 90 mm, 60 mm と 40 mm と長さを変えて実験をおこなったところ、1 番大きな温度差を得た 60 mm をスタックの長さとした。また、熱音響効果のより高い状態（スタック両端の温度差が大きくなること）を得るため、パイプ内に充填させるスタック形状（56φ mm×60 mm）で図 6～8 の実験をおこなった。この充填形態にすることで、円筒カゴにスタックを詰める方法よりも温度差を更に約 2℃ 増すことができた。

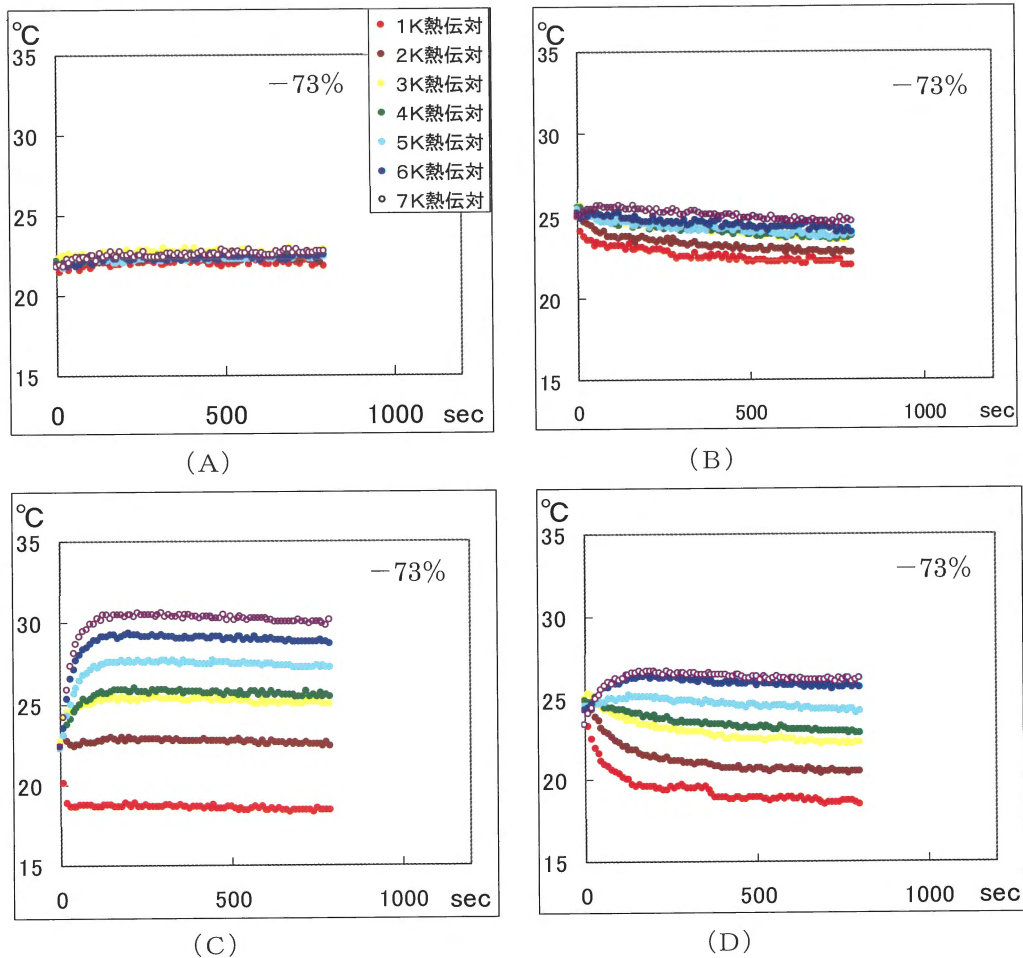


図 5 「音」を発生させた直後から 800 sec 後までのスタック内①～⑦の各点における温度変化

(A) 何も詰めない状態 (B) スチールメッシュ板 (0.8 mm 格子間隔)
(C) スチールウール (D) ガラス製キャピラリーチューブ

スタックの種類	高温度 (°C)	低温度 (°C)	温度差 (°C)
ナシ (空洞)	×	×	×
スチールメッシュ板 (堆積)	24.6	22.0	2.6
スチールウール	30.1	18.4	11.7
ガラスキャピラリーチューブ	26.0	18.4	7.6

表 1 スタックの種類と温度差
(本文参照)

3-2. スタック内温度分布について

3-2-1. 閉管方向に平行な温度分布

熱音響効果におけるスタック内温度分布の特徴を得るため、スタック両端の温度測定をおこなった。60φ mm パイプを閉管にして実験した結果を図6に示す。 $\lambda/2$ 定在波の「腹」の中心を原点として、原点からスタック左端までの距離が $\lambda/4$ の何パーセントの値(x)であるかを示したものが横軸で、縦軸はスタック両端の温度(°C)、及び両端の温度差を示している。スピーカーをパイプ右側に設置した場合、横軸のマイナス値は $\lambda/2$ 定在波の「腹」中心より左側にスタックがあることを、また、プラスの値は $\lambda/2$ 定在波の「腹」中心より右側にスタックがあることを示している。スタックの形状(56φ mm で長さ約 60 mm の円柱)やK熱電対の設置の仕方によって、スタック両端の温度差に多少の違いは生じるが、この実験では最高約 13°C の温度差を得た(スチールウールの密度については3-2-3の項参照)。図6から分かることは、定在波の「節」に近い方のスタック端温度が、「腹」に近い方のスタック端温度よりも一般的に高い傾向にある(詳細は後述)という「定在波中のスタック内温度分布」のおおまかな特徴を知ることができた。但し、原点近傍では温度差はゼロとはならないので、図に示す点線は目安である。

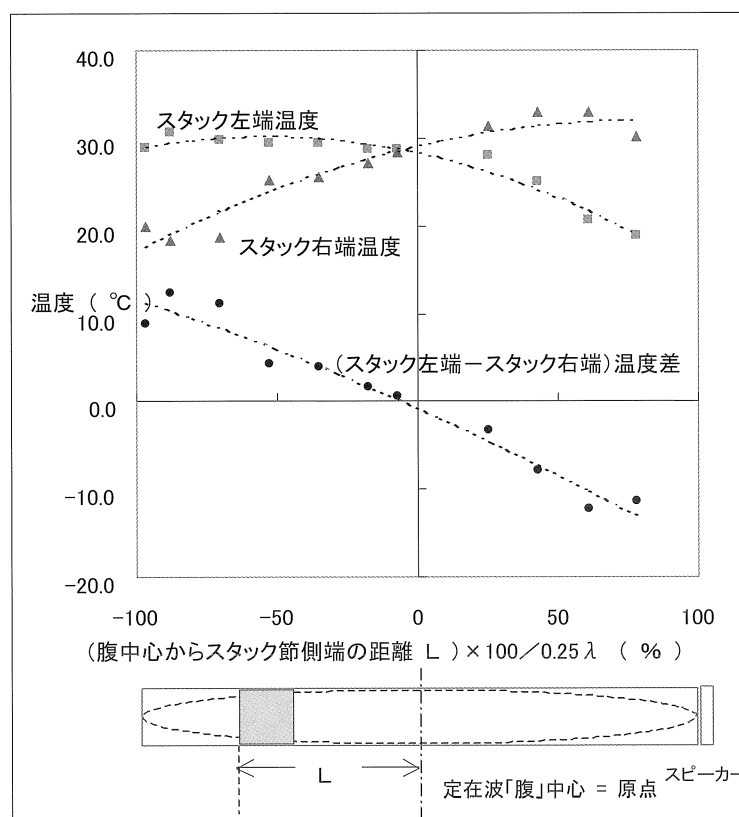


図6 スタック両端の温度

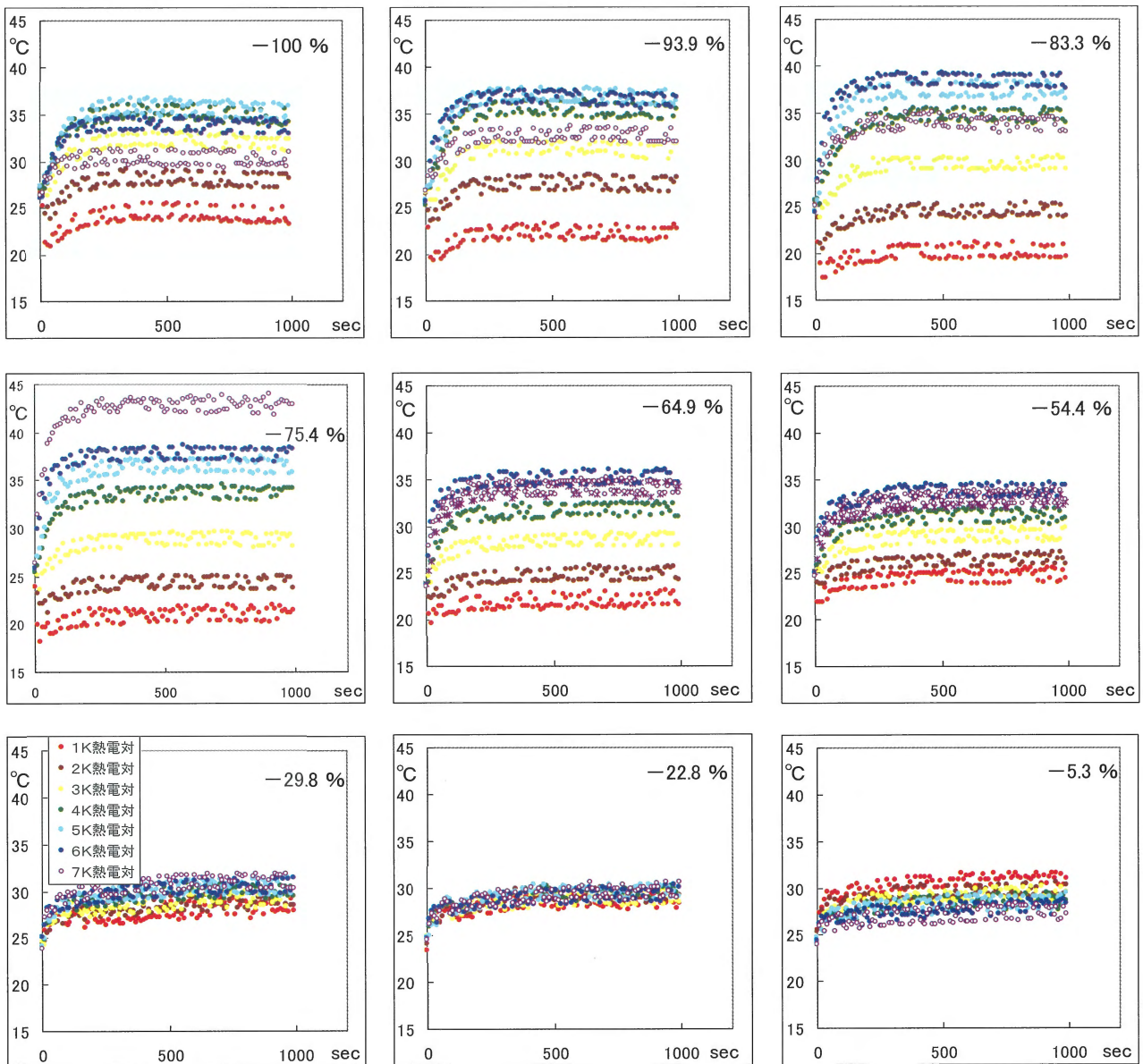


図7 スタック内7ポイント温度測定データ

スタック内温度分布の特徴をより詳しく検討するため、K熱電対7本をスタック内に一定（約10 mm）間隔で設置した7ポイントスキャン測定をおこなった。但し、スタック両端近傍のK熱電対（図4の①と⑦）がスタック境界からわずかに外に出るように設置した。横軸を経過時間（sec）に、縦軸を各ポイントの温度（℃）とした。幾つかのデータを図7に示す。閉管のスピーカー側から閉端側に向かってK熱電対を並べた順番に「（スピーカー側）①赤色→②茶色→③黄色→④緑色→⑤水色→⑥青色→⑦紫色（中抜き丸）（閉端側）」とした。何れのデータも測定開始温度は24℃近傍である。図7の右上の％数値は、図6で示した「 $\lambda/2$ 定在波が生じている閉管内でのスタックの位置の定義」の数値を示している。この生データを元に、スタック内温度分布状態や温度差等を整理したものを図8に示す。温度差はほぼ平衡状態とみなせる800～1000 sec間の最高温度と最低温度を平均して求めた。スタック内温度の高低順にK熱電対番号を並べている。点線丸で囲まれた番号は測定精度等を考慮してほぼ同じ温度であることを示している。

(%)	-100.0	-93.9	-86.8	-83.3	-75.4	-64.9	-54.4	-43.0	-29.8	-22.8	-10.8	-5.3
温度変化傾向	上下①	上下①	上下①	上下①	上下①	上下①	上下①少	上下①少	上上②	上上②	上上②	上上②
スタック内分布状態	↖↖	↖↖	↖↖	↖↖	↖	↖	↖	↖	↖---	乱雑	↗	↗
温度差 °C	12	15	15	19	22	14	9	6	4	1	1.5	5
温度高 ↑	⑤	⑤	⑥	⑥	⑦	⑥	⑥	⑦	⑦	⑤	①	①
	④	⑥	⑤	⑤	⑥	⑦	⑦	⑥	⑥	⑤	②	②
	⑥	④	④	④	⑤	⑤	⑤	⑤	⑤	⑥	③	③
K熱電対番号	③	⑦	⑦	⑦	④	④	④	④	④	④	④	⑤
	⑦	③	③	③	③	③	③	③	③	③	⑤	④
温度低 ↓	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	⑥	⑥
	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	⑦	⑦
	領域Ⅰ				領域Ⅱ				領域Ⅲ			

- ・ (%) の説明は本文、或いは図6 参照
- ・ 温度変化傾向の説明は本文参照
- ・ スタック内分布状態の矢印は温度分布の規則性と温度の高い方向を示す
- ・ ①～⑦はK熱電対番号を示す。点線丸印はほぼ同じ温度を示す

図8 スタック内7ポイント温度測定データ整理 (本文参照)

データ解析から、(1) $\lambda/2$ 定在波「節」領域 ($x = -100 \sim -80$ % 近傍)、(2) 「腹」領域 ($x = -40$ 近傍 ~ 0 %)、(3) 中間領域 ($x = -80$ % 近傍 ~ -40 % 近傍) に設置されたスタックにそれぞれ特異な(閉管方向に平行な)温度分布が生じていることが理解できる。

(1) 領域Ⅰ：「節」領域での特徴 ($x = -100 \sim -80$ % 近傍)

測定したK熱電対7ポイントの内(図4参照)、「腹」に近い方から2～3ポイント(①, ②, ③)は測定開始温度から一旦温度が降下(0～70 sec)した後、温度が上昇して平衡温度に達している。しかし、他の測定ポイントは測定開始直後から温度が上昇し、平衡温度に達した(図8の「温度変化傾向」欄の「上下①」で表示)。また、スタック内部に最高温度が存在するのもこの領域の特徴である(図7の-100%～-83.3%参照)。温度差の変化(図9-2参照)より、この領域では%の絶対値(以下、|%|値)が減少するにつれて温度差が増加傾向にあることも確認できる。

(2) 領域Ⅲ：「腹」領域での特徴 ($x = -40$ 近傍 ~ 0 %)

測定した7ポイント何れも、測定開始直後から温度上昇を示して平衡温度に達している(図8の「温度変化傾向」欄の「上上②」で表示)。この「腹」領域での特異さは次の一連の変化で示すことができる。例えば、 $x = -22.8$ %のデータ(図7, 図8参照)を見ると、温度幅約1.5°Cで平衡温度になっているが、7ポイントの温度分布は乱雑な状態である。この $x = -22.8$ %の前後の状態($x = -29.8$ %と $x = -5.3$ %)を比較すると、 $x = -29.8$ %ではスタック内位置①→⑦の順で温度が上昇傾向になっているが、 $x = -5.3$ %ではスタック内位置⑦→①の順で温度が上昇傾向になっていることが分かる。つまり、 $x = -22.8$ %の状態を境に、スタック内温度分布の増減が逆転している(図8の矢印参照)。また、この領域での温度差は、図9-2に示すように $x = -22.8$ %の状態を最低値に、その前後で増加傾向を示している。

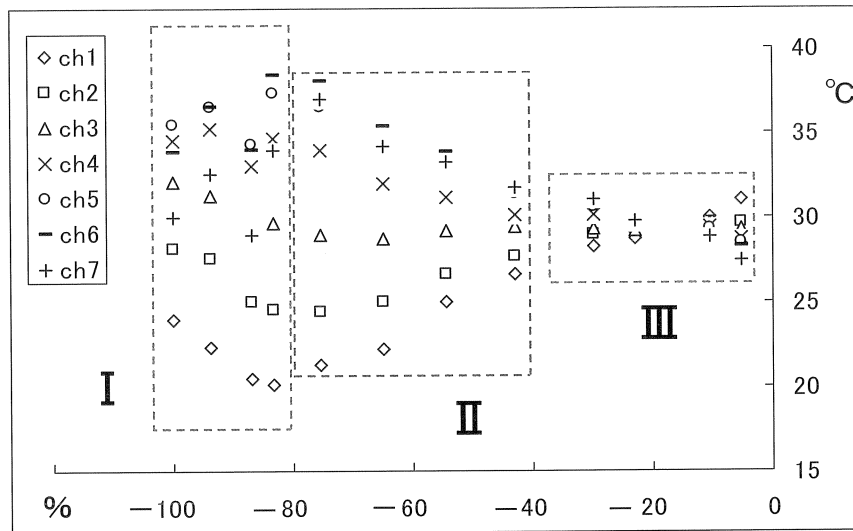


図 9 - 1

各領域でのスタック内 7 ポイントの温度変化
(横軸は x %, 縦軸は $^{\circ}\text{C}$)

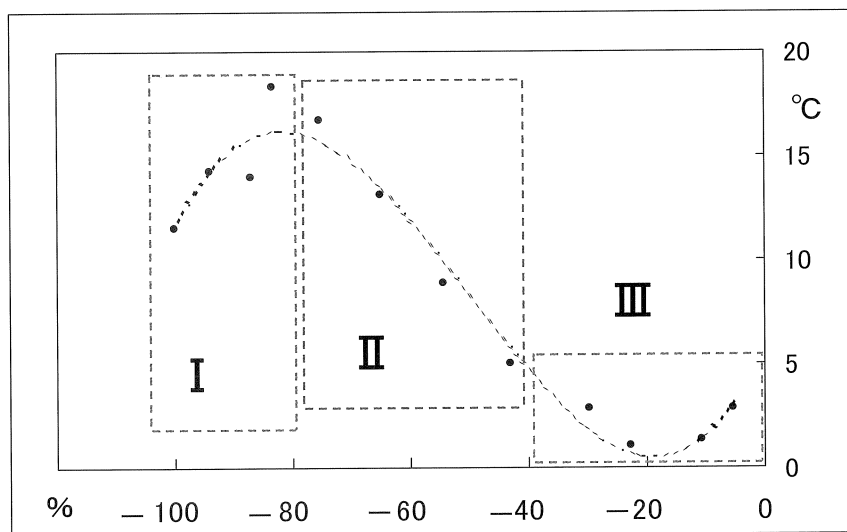


図 9 - 2

各領域での温度差 (横軸は x %, 縦軸は $^{\circ}\text{C}$)

(3) 領域Ⅱ：「節」と「腹」近傍以外の領域 ($x \simeq -40$ 近傍 ~ -80 近傍 %)

測定した 7 ポイントの内、「腹」に近い方から 2 ポイント (①と②) は測定開始温度から一旦温度が降下 ($0 \sim 50$ sec) してから温度が上昇して平衡温度に達している。この領域では「節」側スタック端の温度が高く、「腹」側に向かって温度が単調に減少傾向 (⑦ \rightarrow ⑥ \rightarrow \rightarrow ② \rightarrow ①) を示す (図 8 の矢印参照)。また、 x の $|\%$ 値が低下するにつれて、⑤、⑥と⑦の温度差はほとんどなくなっている。図 9 - 2 に示すように、 $|\%$ 値が減少するにつれてスタック温度分布の温度差が減少しているのも領域Ⅱの特徴である。

$\lambda/2$ 定在波中でのスチールウール製スタックの温度分布の特徴は、おおまかには以上のⅠ \sim Ⅲの 3 タイプに分類できそうである。領域Ⅰにおいて、スタック内温度が最も高くなる場所で平衡温度に到達するまでの時間は、「音」発生からおよそ 180 sec 後である。領域ⅡからⅢに移るにつれて、僅かずつではあるがこの時間が短くなっている (領域Ⅲでは 150 sec 程度)。これら各領域Ⅰ \sim Ⅲの消音後の温度分布グラフを

図10 [$x = -93.9\%$ (領域Ⅰ), $x = -64.9\%$ (領域Ⅱ) と $x = -22.8\%$ (領域Ⅲ)] に示す。領域ⅠとⅡでは、消音から約120 secの時間経過で(K熱電対番号の)①～③は増加するが、その後温度は減少して平衡温度に達している。この0～約120 sec間はスタック内の温度分布に規則性が存在し、「節」側のスタック内部(⑤や⑥に比べて、⑦が低い状態)の温度が高い状態となっている。しかし、以後の時間経過では温度分布は乱雑な状態となる。領域Ⅲの消音経過では、①～⑦の何れもが消音開始時から温度降下し、スタック内の温度分布は乱雑なまま平衡温度に達している。

3-2-2. 領域Ⅱにおける閉管に垂直な方向の温度分布

スチール製メッシュ(0.8 mm 格子間隔)円筒カゴ(84φ mm, 長さ60 mm)にスチールウールを詰めてスタックとした。閉管条件下の領域Ⅱ($x \approx -70\%$)の位置にスタックを置き、7つの熱電対を等間隔に配置して、スタック内7ヶ所の垂直温度分布[90φ mm (厚さ3 mm) & 長さ1030 mmのパイプ使用]を測定した。測定結果を図11に示す。横軸は「垂直温度用熱電対のスタック左端からの位置(cm)」を示し、縦軸はスタック中央部温度 T_0 、周辺部温度 T_h とこれらの温度差 $|T_0 - T_h|$ (°C)を示している。スタック左端では中央部の温度が周辺部より高くなっているが、この垂直温度差 $|T_0 - T_h|$ はスタック内を右に移動するにつれて徐々に小さくなり、 $|T_0 - T_h| \approx 0$ (温度分布に傾向のない混在状態)となる領域(スタック左端から約5 cmの位置)が存在する。また、スタック右端(11図横軸6 cm部分)ではスタック中央部 T_0 と周辺部 T_h で温度高低が逆転する傾向が観察された。ここで、熱平衡状態における③、④と⑤の平均温度を T_0 とし、同条件下の①と⑦の平均温度を T_h とした。

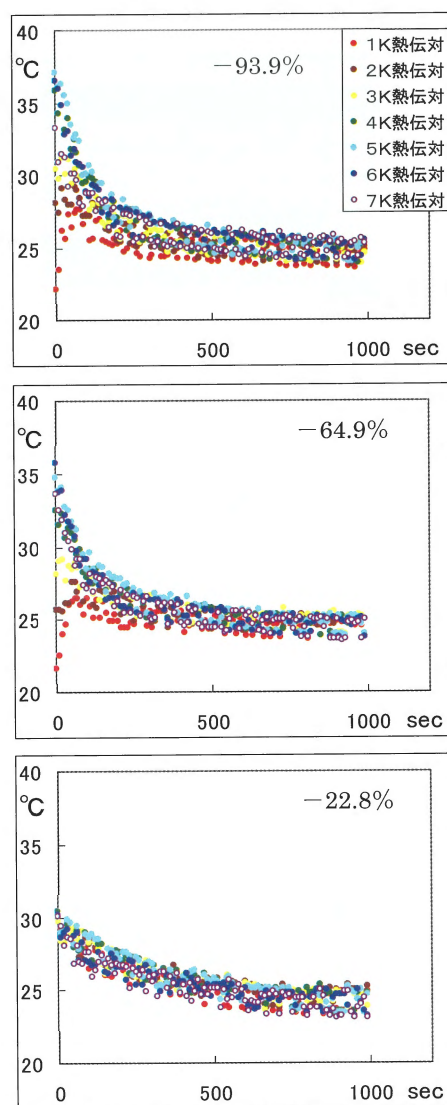


図10
消音後のスタック内
7ポイントの温度変化

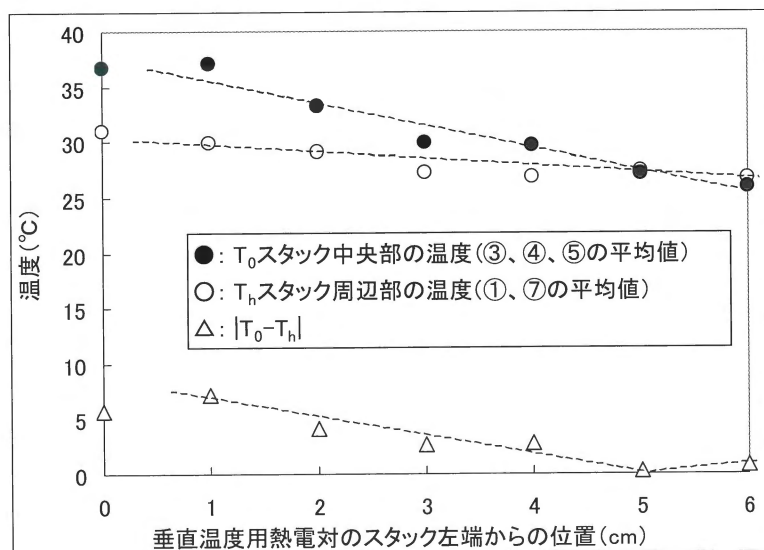
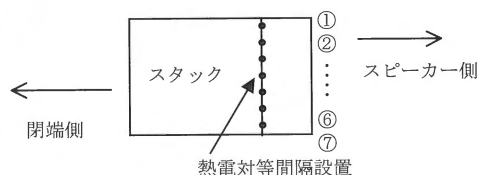


図11 領域Ⅱにおけるスタック内垂直温度分布の傾向



3-2-3. スタックの密度変化について

熱音響現象はスタック密度にも依存すると考えられるため、スチールウールの密度とスタック内温度差の関係を確認する実験をおこなった。35φmm & 長さ 60 mm のスチール製メッシュ（格子間隔が約 0.8 mm）円筒カゴにスチールウールをほぼ一様に詰めて、パイプ内の $x = -70\%$ の位置に設置した。「音」を発生させて 1000 sec 経過したとき（ほぼ平衡状態）の温度差と、スチールウール密度の関係を図 12-1 に示す。また、図 12-2 は、横軸と縦軸を密度比と温度差比に換算したものである。スチールウールの場合、 0.1588 g/m^3 の密度が 6 倍近くになると温度差が 2.5 倍程になることを示しており、熱音響現象のスタックの密度依存性を確認できた。

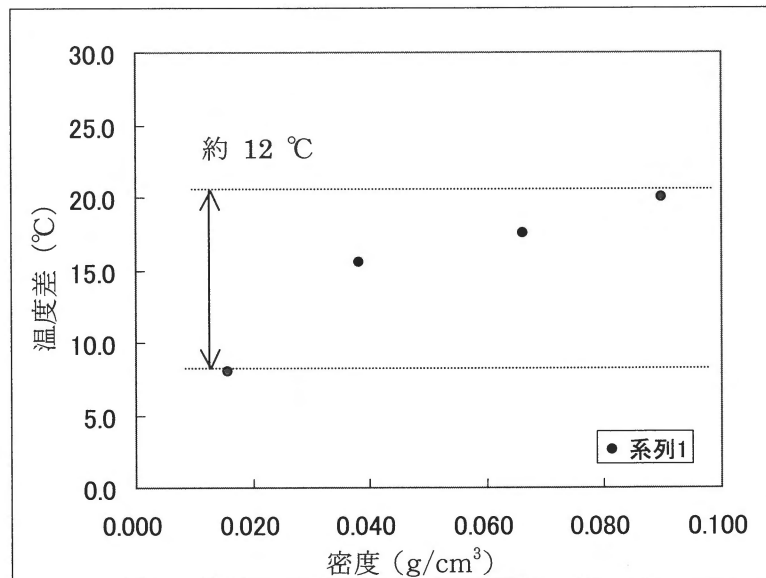


図12-1

領域Ⅱにおけるスチールウール密度と温度差

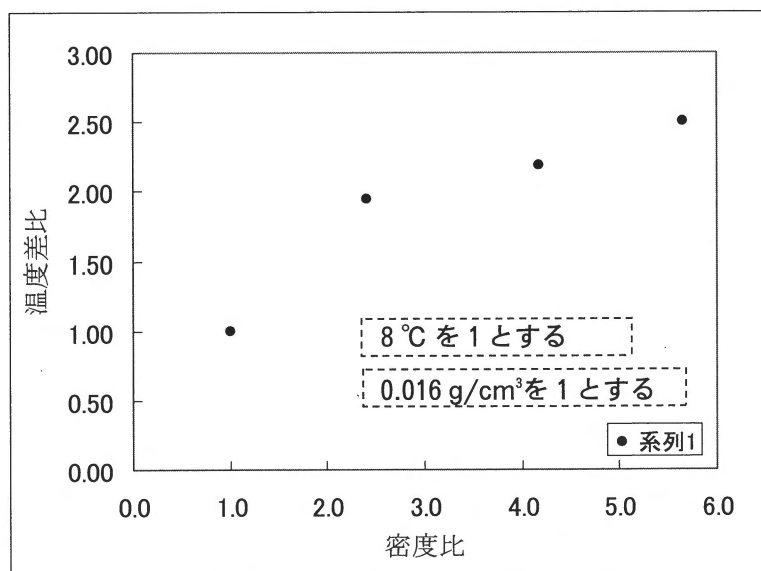


図12-2

領域Ⅱにおけるスチールウール密度比と温度差比

4. まとめ

熱音響現象においてスタックに温度差が生じる概念については、次のように解釈されている¹⁻⁴⁾。ここで、閉管定在波の「(媒質分子の) 粒子速度分布」と「音圧分布」は、図 13-1 の関係にあり、両者の位相は $\pm 90^\circ$ ずれる (図 13-2 参照) ことが解っている⁵⁾。

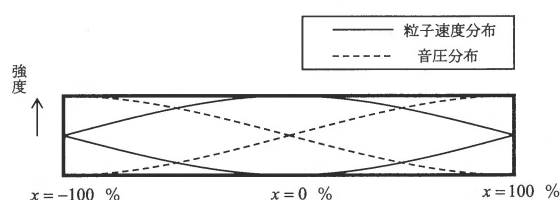


図13-1 閉管定在波における粒子速度分布と音圧分布

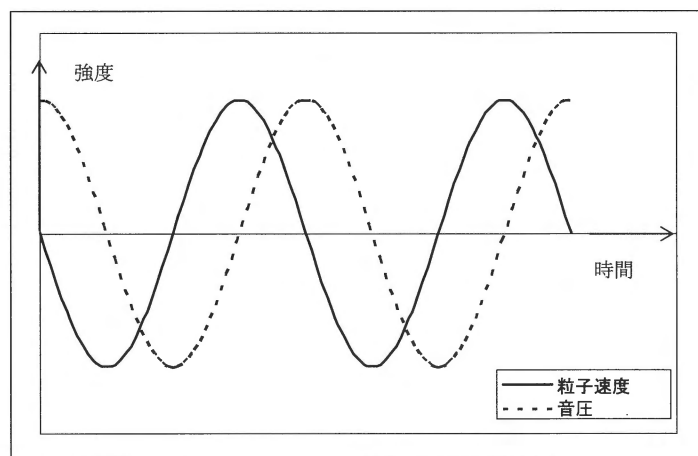


図13-2 閉管定在波における粒子速度と音圧の位相関係

定在波中にあるスタック内部の隙間にある(「音」の媒質である)空気(以下、「粒子」=「空気を構成する気体分子」)は「圧縮 \leftrightarrow 膨張」を繰り返す運動をおこなう。つまり、粒子はスタック隙間で振動する。定在波中のこの周期運動において、粒子速度分布と音圧分布に 90° の位相のズレが生じるため、粒子振動の両端(「粒子速度=0」の位置)で音圧は最大(P_{\max})、或いは、最小(P_{\min})状態となる(図 13-2 参照)。図 14 に示すように、粒子振動の「 $P_{\min} \rightarrow P_{\max}$ の過程」ではスタック隙間内の空気が圧縮され、スタック壁との熱のやりとりによりスタック壁が熱を受け取る。また、粒子振動の「 $P_{\max} \rightarrow P_{\min}$ の過程」ではスタック隙間内の空気が膨張し、スタック壁が熱を奪われる。全体的には、粒子振動の往復により平均化されることで温度勾配は生じない。しかし、スタック壁とスタック隙間の空気との熱のやりとりに時間的遅れがあるなど、その過程が不可逆になると熱の輸送が生じることとなる。概念的にはこのような図 14 のサイクル(以下、「熱サイクル」と呼ぶ)で、スタック隙間の粒子とスタック壁との間で熱のやり取りがおこなわれるものと考えられる。

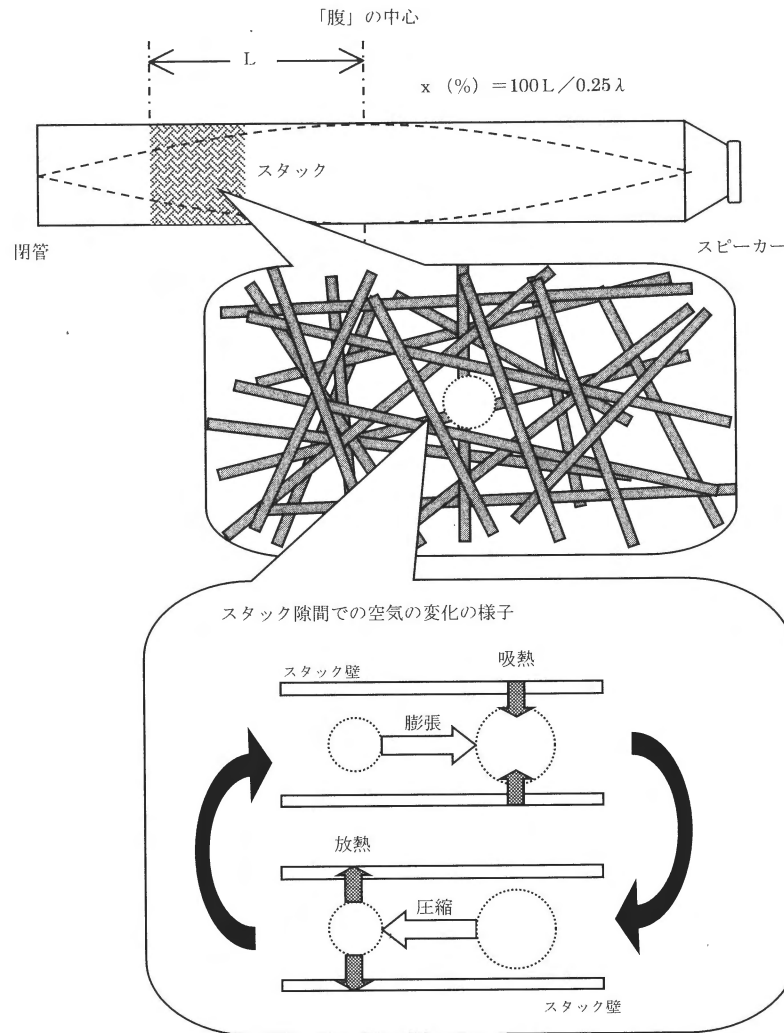


図14 熱音響現象の概念図

定在波の「節」側から「腹」側に向かってスタック内温度が単調減少する領域Ⅱ（図8参照）の温度分布の特徴は、この概念的な説明で解釈できる。熱サイクルが次々とスタック壁に沿って繰返されて熱を運び、最終的な平衡状態に至るとスタック「節」側が最も温度が高く、スタック「腹」側が温度が低くなると考えられる。スタック内で「腹」に近い領域（図4の①や②）の温度が一旦降下した（0～50 sec）後、温度上昇する現象は、熱サイクルが（「音」発生から）最初は効率よく作動するが、やがてスタック「節」側の温度が上がるにつれてこの上昇した熱がスタック全体に拡散していくプロセスが重なり、この熱拡散がスタック全体に広がることで温度を押し上げた結果生じた現象と推測する。熱サイクルが効率よく作動する仕組み（例えば、スタック高温側に蓄積していく「熱」を排除するなど）が本実験系に組み込まれていたならば、スタック「腹」側の低温領域は効率よく温度低下（つまり、冷却効果）するものと考えられる。

領域Ⅲの現象の特徴は、図7、および図8の $x = -22.8\%$ における温度分布の乱雑さにある。この領域の位置では熱サイクル効率を高めることができず、温度分布の規則性を誘起するまでには至っていないようである。領域Ⅲでは「音」発生時から、スタック内の①～⑦の何れも温度が降下することなく（図7参照）温度上昇で平衡温度に到達している。熱サイクル効率の低さと熱がスタック全体に拡散していく影響より、この特性が生じたと推測する。また、 $x = -22.8\%$ を境にして、 $x = -29.8\%$ ではスタック温度分布が「①→⑦」の順で温度が高くなる傾向に、 $x = -5.3\%$ ではスタック温度分布が「⑦→①」の順で温度が高くなる傾向になっている。つまり、温度分布の高低の順序が逆転する現象が生じている。これは、 $x = -29.8\%$

から $x = -5.3\%$ へのスタックの移動において、定在波の「腹」中心を通過するため、スタック左端と右端にかかる音圧強度の逆転で生じた現象といえる。

領域Ⅰの温度分布の大きな特徴は、スタック内部に最も温度の高い領域が存在することである。この特徴は領域ⅡやⅢにはないものである。定在波の中で音圧がもっとも強いのが領域Ⅰ（節部分）であり、このことが現象に関係しているのであろうが、現時点では明確なことはいえない。今回の実験では、 $\lambda/2$ 定在波の中にスタックを設置し、閉管端近傍に定在波「節」が存在する条件で実験をおこなった。今回のこの領域Ⅰでの現象が、例えば、 λ 定在波の中にスタックを設置した実験でも、つまり、定在波の「節」の中心を通過させてスタックを移動させた場合でも、同じ現象を測定できるか、否か、検証する必要があると考えている。

謝 辞

本実験の多大なデータ収集、及びデータ解析を手伝ってくれた研究室の河原 健二君と富安 涼太君に感謝します。

参考文献

- 1 例えば、富永 昭 著：「熱音響工学の基礎」 内田老鶴圃
同 上 : 物理学会誌, 第 55 巻 2000 年 p 326-331
「熱音響現象の理解とその応用」
矢崎 太一 : 数理解析研究所講究録, 第 1483 巻 2006 年 p 100-111
「熱音響現象の理解と応用を目指して」
- 2 井上 龍夫: 低温工学, 第 26 巻 1991 年 p 98-107
「パルス管冷凍機の研究開発の現状」
- 3 琵琶 哲志: 冷凍 第 79 巻第 925 号 2004 年 p 874-881
「熱音響冷凍」
- 4 矢崎 太一: ながれ, 第 24 巻 2005 年 p 395-404
「細管内の音波伝播と熱音響現象」
- 5 小橋 豊 : 基礎物理学選書 「音と音波」 裳華房
- 6 杉本 信正: 機械の研究, 第 60 巻 2008 年 p 423-434
「熱音響現象 - 熱と音と流れの相互作用 -」