

第3回 HAKKO 熱の実験コンテスト

最終報告書

山梨大学工学部応用化学科

クリスタル科学研究センターゼミ

代表

市野祥多

2年次

市野祥多 柴崎有紀

矢ヶ崎恵斗 吉村元希

1年次

今井敦都 谷林知郁

中島恵 樋口達也

第 1 章

研究内容の紹介

太陽光で氷を作ろう!!

～熱音響冷却システムの開発～

山梨大学工学部応用化学科クリスタルゼミ

背景と動機

現在の冷蔵庫において主流となっている冷却方法はコンプレッサーを用いた冷却方法である。この冷却方法は200年近く変わっていない。しかし、電気を使うこの冷却方法では震災などで停電してしまった場合使うことができなくなってしまう。そこで、我々は電気を使わずに冷却する方法を検討した。それは熱音響システムによる冷却である。この冷却方法はループ管、または直管の中にスタックと呼ばれる装置を設置して管の一部を高温にし、それにより生じた熱を音に変化させる。この現象を繰り返し行うことによりスタックの両端で温度差が発生し、相対的に徐々に温度が下がっていく。(図1参照)

我々の提案する冷却システムでは、電気が不要で太陽光を利用し冷却できるという優れた点を持つ画期的なシステムである。このシステムは災害時だけでなくインフラが整っていない地域での利用を可能にする。

我々がこの研究を行いコンテストに応募することにより多くの人間に熱音響システムについて知ってもらい、さらに大きな企業に注目してもらうことでさらなる実験の飛躍が望めると考えた。

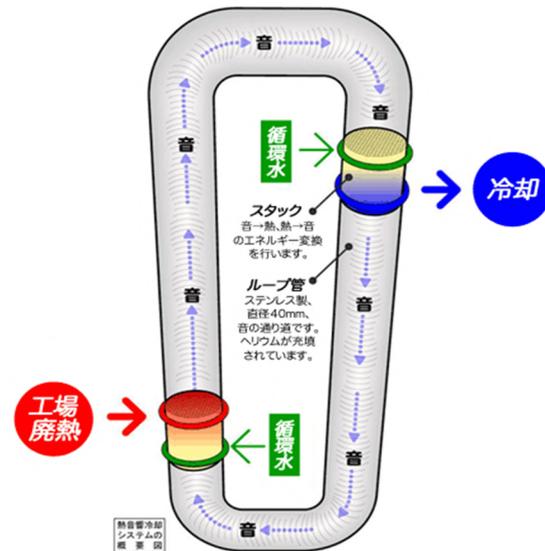


図1. 熱音響システムの説明

目的

- ・ 太陽光を熱源とする熱音響システムの製作をする
- ・ 冷却によって氷を作る
- ・ 熱音響システムは一般に認知されていないのでHAKKO熱の実験コンテストを通して知ってもらう

研究内容

冷却システムの作製にあたり、2つの予備実験を行う。1つ目は、太陽光を熱源とする熱音響システムを検討する。2つ目に、スピーカーを用いて音による冷却効果の確認及び、その変換効率が低い材料の検討を行う。その後、図2のようなシステムを製作し冷却効果についての研究を行う。

この研究計画における注意点は音や熱エネルギーが逃げてしまうのをいかにして少なくするかということである。この点については断熱材や防音材を用いてなるべくエネルギーを逃がさない構造を考えていきたい。

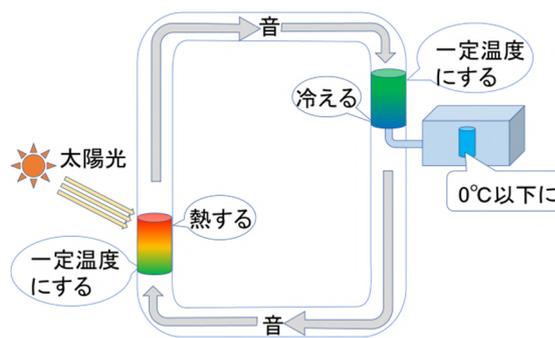


図2. 実験装置のイメージ

研究体制

本研究は大学の工学部応用化学科の授業科目ものづくりゼミの一環として行う。それに伴い7名の教員の指導のもとで行う。また、大掛かりな研究になると考えられるので2班に分担して研究を行う。

・冷却システム設計班 ・実験班

実際に行った工程

本来であれば、当初の計画通りに実験を進めていければよかったが行っていかうえで障害が生じてしまったため計画を変更し以下の工程で行った。

1. 熱音響現象の確認及びモデルの作成、実験
2. 冷却効果の確認及びモデルの作成、実験
3. ループ管での熱音響冷却システムの作成、実験

第2章

1部

熱音響現象の確認及びモデルの作成、実験

今回実験をおこなうにあたって熱音響現象が本当に起こるのか。また、長時間効率良く音を鳴らすのにはどのような装置が適当かを検討する。

熱音響現象の確認実験について

最初に石英管を使用してしっかりと音が出るのかを確認した。手順としては、15cmの石英管を使用し、その中に少量のスチールウールを入れ、スチールウールの一方を加熱する。その時にスチールウールの両端で温度差が顕著に生まれるように加熱していない方に水で濡らしたキムワイプを巻いて行う(図3)。この時に音を発生させて確認する。

→結果として熱音響現象による音の発生を確認した。

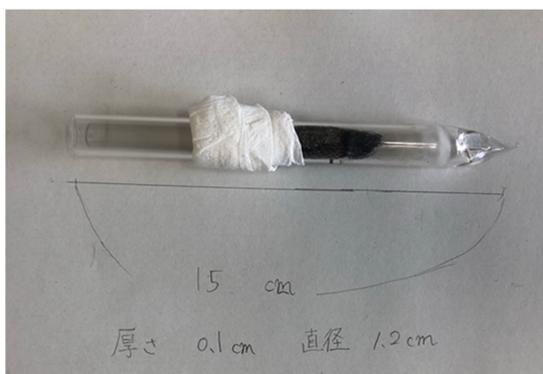


図3 作製した15cm石英管

熱音響現象の確認ができたので、熱音響発生装置の作成に移る。作成する際に確認しなければならない要素は以下のとおりである。石英管を15cm・30cm・60cmを使用した。

1. スチールウールの量
2. ガスバーナーの位置
3. スチールウールの位置

1. スチールウールの量

熱音響現象は金網のような細かい穴を空気が行き来することで音が発生するため、スチールウールの量を多くして石英管に詰めることでスチールウール中の空気の通り穴が細くなり音が鳴りやすいのではと考え実験を行った。第1回目の実験では15cmの石英管に対して0.40gのスチールを使用した。その結果、音は発生しなかった。その考察として、詰めるスチールウールの量が多すぎてしまい空気の通り穴が必要以上に細くなってしまい音が鳴らなかったのではないかとした。第2回目の実験では15cmの石英管に対して0.25gのスチールウールを使用した。第2回目の実験ではスチールウールの量を0.15g少なくすることで空気の通り穴を必要以上に細くしないようにした。その結果、音が鳴り熱音響現象を確認した。

→スチールウールの量を必要以上に多くしてしまうとスチールウールが密の状態になってしまい熱音響現象を発生させることができないということがわかった。

2. ガスバーナーの位置

スチールウールをガスバーナーで加熱していくと加熱している側のスチールウールが図 4 のように酸化してしまう。熱音響現象を確認しているとだんだんと音が小さくなっていき最後には音が完全に消えてしまった。これはスチールウールの一方が完全に酸化してしまうことで空気の行き来がうまくできなくなってしまい鳴らなくなってしまうと考察した。



図 4 実験後のスチールウール

今回の実験で使用したガスバーナーは非常に高温のものであったためスチールウールを写真のように直接加熱してしまうとすぐに酸化してしまった。そのため、ガスバーナーで直接加熱するのではなく（図 5）、図 6 のように空気を加熱してスチールウールに温度差をつけることで酸化を緩和しつつ熱音響現象を確認した。

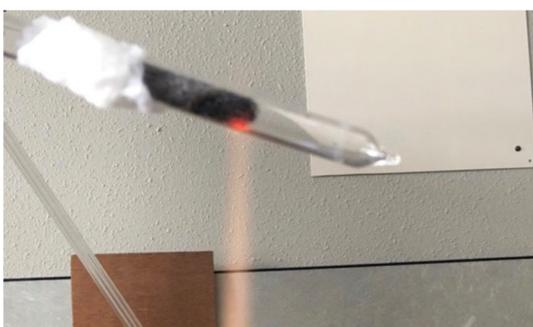


図 5 ガスバーナーの位置

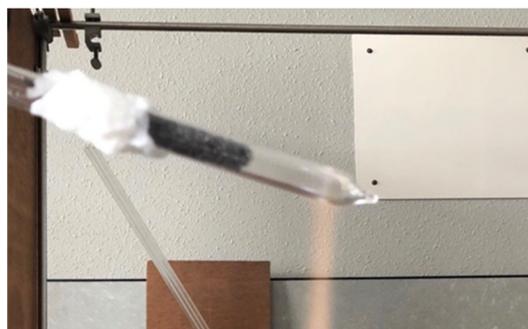


図 6 ガスバーナーの位置

→その結果、ガスバーナーを加熱する位置はスチールウールではなくてスチールウールの下の空気にするすることで酸化を緩和しつつ熱音響現象を確認した。

3. スチールウールの位置

・石英管の最下部からのスチールウールの距離も重要な条件であると考えた。ガスバーナーで加熱する部分からなるべく遠くにスチールウールを置くことで酸化を緩和できることは 2 の条件から得られているがそうしてしまうとスチールウールの両端における温度差ができるまでに時間がかかってしまい短時間での実験ができない。このことを踏まえてスチールウールの位置は 3cm が最適であるとした。

1～3 までの条件によって熱音響確認実験の最適モデルは図 7 であるとした。

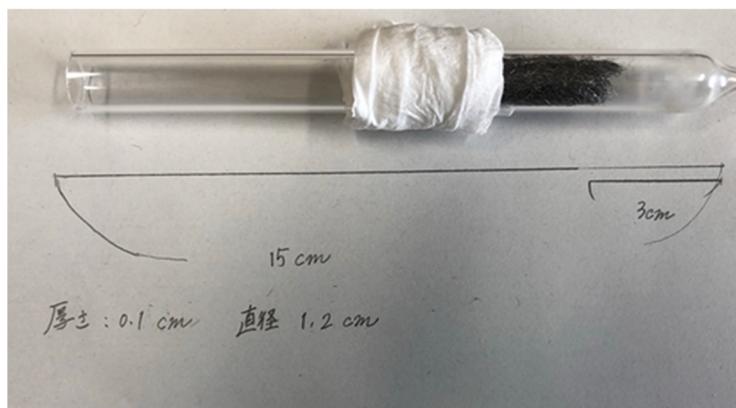


図 7 最適モデル

また、以降の冷却効果の確認実験を行うためには 15 cm より長い石英管を使用する必要があるため、「熱音響現象の確認実験」を長い石英管に応用した実験とそれから得られた最適モデルを用いての冷却効果の確認実験という、2 段階の実験で行った。基本は、15 cm の確認実験で得られた 3 つの条件をもとに行った。さらに Sophie Collard 氏の論文「Design and Assembly of a Thermoacoustic Prototype」を参考にして長い石英管における熱音響現象で発生する音について数式を用いて最適な長さで開口か閉口のどちらが良いかを判断材料として最適モデルを作製した。

1. スチールウールの量と加熱部分の位置

この2点に置いては15cmの石英管の最適モデルと変えずにスチールウールは0.25gで行い加熱部分も直接ではなく空気を加熱するのが最適とした。

2. 石英管の両端開口か片方閉口かの決定と長さ及びスチールウールの位置

石英管の長さは600Hzの音を出すと仮定して決定した。その600Hzというのは、人間が聞き取ることのできる範囲内の振動数にしたいということをもとに決定した。この石英管の長さを決定するに当たって $v = f\lambda$ の数式と上で示した論文から「一方が開口で一方が閉口の管を使用するときは波長の1/2倍の長さの管が理想的で、両方が開口もしくは閉口の管を使用するときは波長の1/4倍の長さの管が理想的である」部分を参考にして両端が開口の30cmの石英管を用いて実験した。だが、両端開口の30cmの石英管を使用した熱音響現象の確認はできなかった。そこで、もう一度文献を読み直したり数式の妥当性などを確認したりすることを行った。その結果、両端開口で30cmの石英管では600Hzではなく半分の300Hzの音しか出ないことが分かった。そこで今度は、両端開口ではなく片方閉口の30cmの石英管を使用して確認実験を行い熱音響現象の確認をすることができた。

→600Hzの振動数の音によって熱音響現象の確認を行うには、片方閉口の30cmの石英管を用いて実験を行うことで確認することができるとことが得られた。

3. スチールウールの位置

スチールウールの位置についても上記した論文の「音が最大強度になるためには、ディスクの下端からの距離が全長の1/4である必要がある。」という部分を参考にして、ディスク＝スチールウールとして閉口のほうから15cmの位置にスチールウールを詰めて確認実験をしてから時間が短くなるように閉口からの距離を縮めて7.5cmの距離とした。

→閉口のほうから7.5cmが片方閉口の30cmの石英管を用いたときのスチールウールの最適位置であることが得られた。

第 2 章

2 部

冷却効果の確認及びモデルの作成、実験

冷却効果が本当に起きるのか確認するためにまず確認実験を行った。実験方法として、石英管に 2 つの少量のスチールウールを入れて一方のスチールウールを加熱し熱音響現象を起こし、音を発生させる。その発生した音によって一方のスチールウールの両端で温度差を生み出し確認する。加熱する方のスチールウールには「熱音響現象の確認」の時に行った時と同様に濡れたキムワイプを使用する。さらに、温度差を確認する方のスチールウールにも濡れたキムワイプを片方に巻き温度差が顕著に出るようにする。確認方法は、サーモグラフィを使用して行った。

→結果としてサーモグラフィでの冷却効果の確認はできなかった。考えられる理由としてサーモグラフィは大きな温度変化しかわからない為、ごくわずかに変化している温度を計測できなかったと考えられる (図 8)。

上記の実験によりサーモグラフィでの温度変化の確認は難しいと分かったので K 型熱電対を用いて実験を行った。

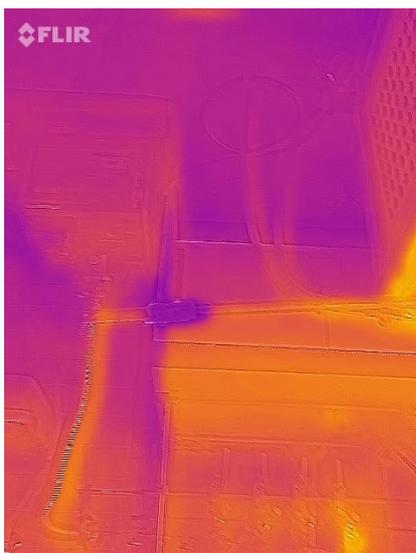


図 8 サーモグラフィ画像

冷却確認実験

図 9 のように機器をセットした。前回との構成の違いは、石英管の開口部にも石英管内にあるスチールウールと同量のスチールウールを詰めた点である。そこに熱電対をつけ（図 10）温度変化を確認した。

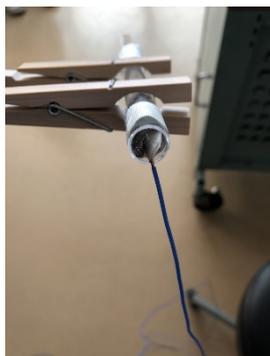


図 9 実験装置



図 10 熱電対の装着場所

温度変化の推移を下の表に記す（表 1）。表からも分かるように石英管開口部にスチールウールを入れたものより温度の上がり方が緩やかになった。この現象から 2 つの要因が考えられる。1 つ目は、熱音響現象での冷却が成功した。2 つ目は、石英管内での対流が関係し温度変化に影響を及ぼした。

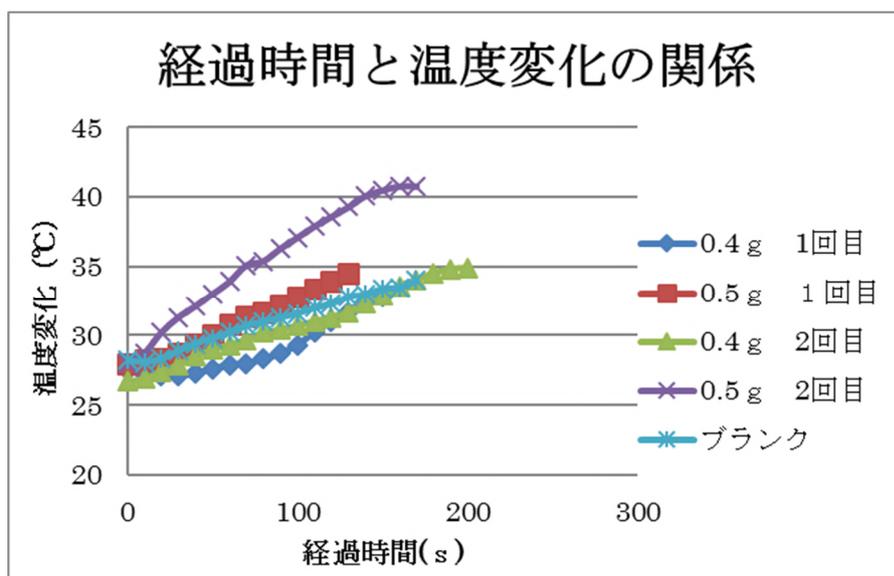


表 1 経過時間と温度変化の関係

第 2 章

3 部

ループ管での熱音響冷却システムの作成、実験

第 2 章 1 部と第 2 章 2 部で熱音響現象を発生と冷却効果の確認ができた。これらの実験結果をもとに石英管を使いループ管の作成と冷却効果を検証した。

ループ管作成

両端開口の 30 cm 石英管に U 字管をつけループ管にした。石英管と U 字管の接続部は熱収縮チューブを用いて接続した。加熱部は第 2 章 1 部のようにし、反対側にはスチールウールに K 型熱電対をつけた。また、長時間の実験を想定し、加熱部にあるキムワイブにはビュレットを使い一定間隔で水を落とし、スチールウールの温度差を維持できるようにした。図に見える黄色い布は、水をよく吸う材質でできておりこの材料も長時間の実験に耐えられると考え採用した。



図 11 装置全体写真

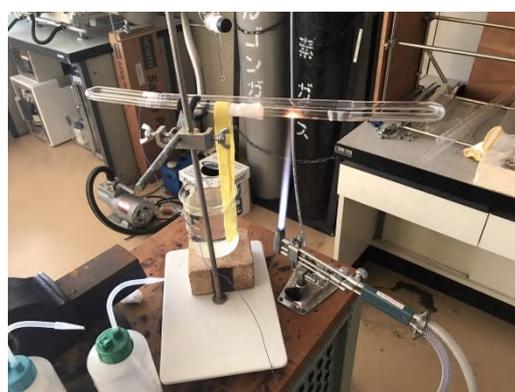


図 12 ループ管

実験結果

ループ管での冷却効果は確認できた。30 分間の計測による温度変化のグラフ表 2 を掲載する。

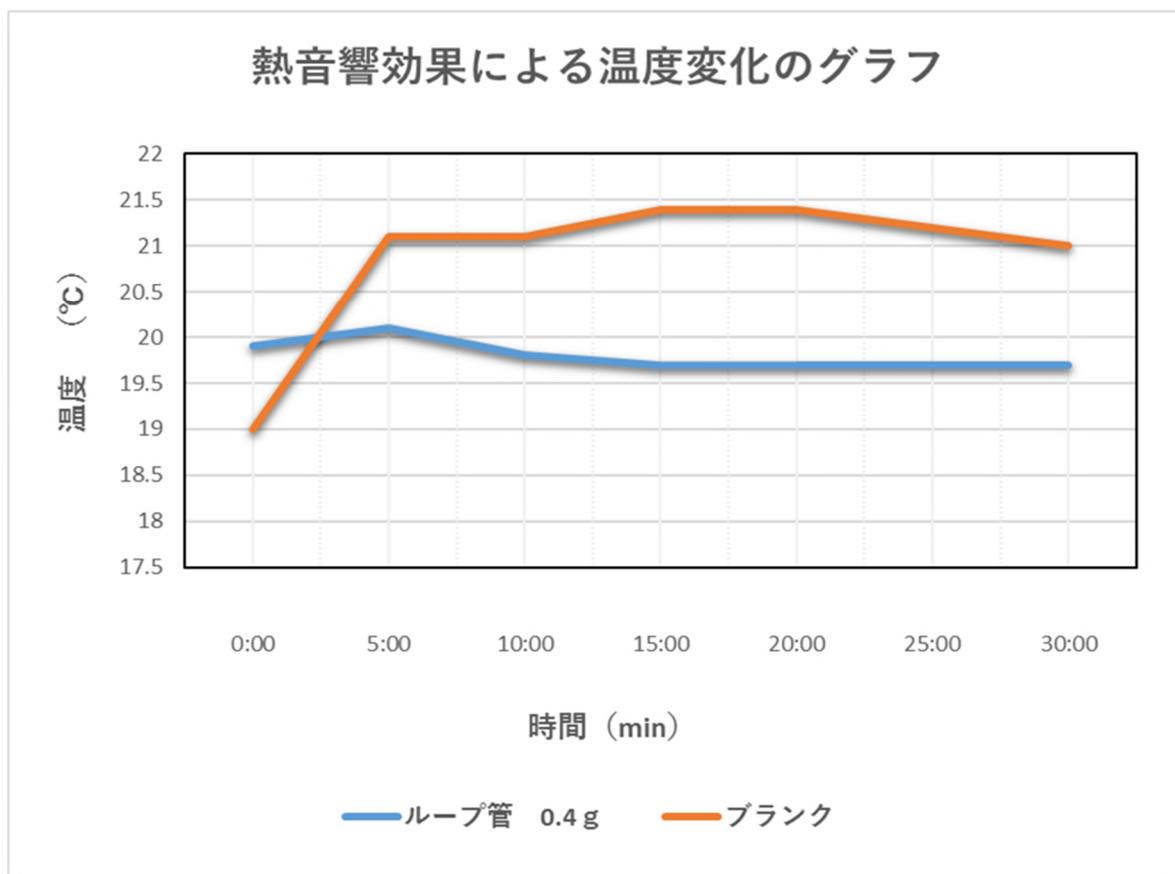


表 2 熱音響効果による温度変化のグラフ

実験の考察

ループ管内に 0.4 g のスチールウールを入れた装置では、最初の 5 分でグラフは右上がりを示した。これは音が発生するまでに時間がかかったため、バーナーの熱が直接伝わり、温度が上昇したからだと考えられる。後、5 分から 15 分の間でグラフは右下がりを示し、数値にすると約 0.5°C 下がったことが確認できる。これは熱音響による冷却効果がしっかりと現れていることが読み取れる。15 分を過ぎ、そこから 30 分の間でグラフは一定を保ち続けた。これは熱音響による冷却のエネルギーと外気の温度が冷えた部分を元に戻そうとするエネルギー、双方が平衡となり温度が一定になったと考える。

ループ管内にスチールウールを入れなかった (ブランク) 装置では 15 分間上昇し続け、そこから 30 分までは緩やかに約 0.3°C 下降する結果となった。この下降の原因は、この実験を行った日時が 12/16 の午後 4 時以降で、日没により実験室の室温が下がったことで測定個所の温度も下がったのではないのかと考えられる。そのため、本実験の意図とは無関係であるといえる。

双方の結果をふまえるとやはりスチールウールを入れた装置と入れない装置とでは明確な差があり、私たちの作成した熱音響システムのモデル装置は冷却効果を示したといえる。

第 3 章

総括

私達の行った実験について簡単に概要を述べる。第1部では熱音響現象を起こせるのかの確認及び音を鳴らすために最適な装置を模索した。第2部では熱音響現象の冷却効果を起こすための簡易的な冷却装置を作製した。第3部では第1部、第2部の実験結果をもとにループ管での冷却効果を調査した。その結果、温度下降は見られたがとて小くある一定の温度になると温度が下がらないということが分かった。

私達は第3回 HAKKO 熱の実験コンテストの募集が開始される直前にテーマを選定した。誰もやったことがないこと、インパクトが大きいテーマにしようと考えたため選定が遅れてしまった。第1部の実験はゆうれい試験管という実験で実験方法は確立されている。しかし、第2部からの冷却方法については実験手法が確立されておらず、手探り状態で始まった。その結果プロジェクトの予期せぬ問題や遅れによるプロジェクトの縮小によって太陽光で氷をつくるという当初の目的を達成できなかった。しかしながら、本実験では熱音響現象の冷却効果を簡易的な実験装置から確認できた。来年2月には本学の応用化学科においてのものづくりゼミの発表があるので、その発表にむけてさらなる実験系の改良、温度を下げる方法を模索していきたい。

謝辞

研究資金の提供を行ってくださった株式会社八光電機をはじめとする研究に協力いただいた多くの方々にこの場を借りて御礼申し上げます。

株式会社八光電機

田中功 長尾雅則 柳田さやか 丸山裕樹 綿打敏司 米崎功記

武井貴弘 熊田伸弘 山中淳二 阪根 英人

参考文献

Sophie Collard 「Design and Assembly of a Thermoacoustic Prototype」

熱音響技術研究 SHIN-ICHI.ORG 坂本眞一

<http://shin-ichi.org/ctt.html>

廃熱を音に変えてモノを冷やす、不思議な熱音響冷却

<http://archive.wiredvision.co.jp/blog/yamaji/200802/200802151144.html>

東海大学の熱音響エンジンとは？ - 発電の原理、効率について

<https://kininarun.com/post-1465>

東北大学 琵琶・兵頭研究室

<http://www.amsd.mech.tohoku.ac.jp/subpage1.html>