調査・報告

熱音響機関に関する調査研究

大野　宏*　大川原　真*　須貝　裕之**　平石　誠**　本多　章作***

Report of Market and Technology Trend of ThermoAcoustics Technology

OHNO Hiroshi*，OKAWARA Makoto**，SUGAI Hiroyuki**，HIRAISHI Makoto**
and HONDA Syosaku***

1.　緒　　言

熱音響機関は，工場の未利用熱や太陽熱から音波を発生させ，これを電気や冷熱に変換して有効活用する技術である。細いパイプの束（蓄熱器）の両端に温度差を与えると，中の気体が膨張・収縮してパイプ内を移動し，温度差がある一定以上になるとこの動作が繰り返され，気体の移動が振動源となって音波が発生する。これを電気に変換したり冷熱として取り出したりして，有効利用できることがわかってきた[1]。

本研究会は，熱音響機関の実用化を目的として，啓蒙普及のための講演会を開催し，技術動向や県内企業の動向を調査した。また，高熱から音波を発生させ，これを冷熱に変換する熱音響冷凍機を実用化するため，適した用途を考え公募事業に提案した。

2.　活動概要

2.1　研究会の開催

熱音響機関の概要，技術動向および実用化の課題を知るため，セミナー形式の研究会を開催した。

・第1回（平成27年8月17日）

「排熱を有効活用する熱音響エンジン」

東海大学工学部　講師　長谷川真也氏

細いパイプの束（蓄熱器）の両端に温度差を与えると音波が発生する。細いパイプの中の気体は，加熱されて膨張し，圧力の低い反対側に移動し，冷却されて収縮し，最初の位置に戻る。この気体の移動が振動源となって音波が発生する。逆に蓄熱器に音波をあてると粗密波として振動するため，細いパイプで強制的に圧縮され放熱するため温度は上がり，反対側に移動しながら収縮して吸熱するため温度は下がり，最初の位置に戻る。この現象を利用して発生する音波を電気に変換したり，冷熱として利用したりするデバイスが熱音響機関である。

他の熱電変換技術である，バイナリ発電，熱電変換素子，スターリングエンジンと比較すると，発電量当たりの価格が安い，高温度域の変換効率が高い，保守性が良いことなどが特長として挙げられるが，現状では体積当たりの出力が低く，低温域における高効率化が課題となっている。

熱音響エンジンの動作条件は，無数のパラメータがあるため，最適化が難しい。動作条件の予想や最適化には数値計算が有効であり，長谷川研究室では熱音響工学の理論方程式を解析的に解くことで，熱音響エンジンの動作条件と性能の予測，最適化を可能とした。2012年に，多段化進行波型エンジンと進行波型クーラにより熱源温度140℃で-40℃の冷凍を実現した。

熱音響機関の課題は，蓄熱器を低コストで実現できる製造技術と，熱交換器へ効率的に入熱する方法である。また，音波の発生や成長を阻害する要因の解明など，まだ分からないことも

*　下越技術支援センター
**　中越技術支援センター
***　素材応用技術支援センター

多い[2)]。

・第2回（平成27年1月28日）

≪講演1≫

「実用スターリングエンジンの開発動向と用途事例」

明星大学理工学部　教授　濱口和洋氏

スターリングエンジンは他のエンジンにくらべ軸出力当たりの熱効率が高い。気体を高熱と冷熱で収縮・膨張させてピストンを動かし仕事をさせる。出力を電力として取り出す方法は2通りあり，キネマティック方式は回転運動に変換して取り出し，フリーピストン方式は直線運動をリニア発電機で取り出す。スターリングエンジンの出力は，スターリングサイクルを圧力Pと体積Vを測定することで予測できる。

実用化は海外のほうが進んでおり，世界で一番数が出ている機種はMicro-Gen社製の1kWフリーピストン型エンジン発電機で，年6,000台程度出荷されているが動作温度が高い。また，日本の潜水艦で使われているのはKockums社製の75kWエンジンである。

国内では木質ペレットとの組み合わせのものが多い。日本製エンジンは海外製にくらべると耐久性が低い。最も多く生産されている百瀬機械設計のエンジンは出力200Wと小型である。また，模型エンジンに関する書籍が多く，教育用としては良い教材であるが，耐久性がないため，製品化を安易に考えるのは危険である。

≪講演2≫

「スターリングエンジンの作り方」

工業技術総合研究所　専門研究員　大野宏

大気圧で動作する模型スターリングエンジンの作り方について解説した。特に製作が容易なものは，水柱をピストン代わりに使ったフルイダイン（水スターリングエンジン）で，動作周波数は1Hzとゆっくり動作する。また，ガラス製の注射器を使った模型エンジンが数万円で入手でき，書籍でも製作方法が紹介されているが，長時間加熱するとシリンダーが変形してしまい耐久性はない。

2.2　技術動向

東海大学が数値計算で熱音響機関の性能を予測する手法を確立し，高効率の装置が開発できるようになった。熱源温度300℃で-108℃の冷凍を実現し，変換効率も18%と実用化レベルに達している。本手法は，国内の研究者の標準になっている。

熱音響冷凍機で利用する場合，音波を発生させるループと冷凍されるループのインピーダンスが合わないと出力が低下するため，4mという長い管が必要になり，装置全体が大きくなってしまう。一方，リニア発電機を使い発電装置として利用する場合は，発電機のインピーダンスを調整することで長い接続管が不要になる。冷凍機にも機械的な振動装置でインピーダンスを合わせられれば，装置全体を小さくできる。

高出力の熱音響機関を実現するためには，分子量の小さいHeを高気圧で封入する必要があり，銅製の熱交換器と耐熱性のあるステンレスパイプを溶接する必要がある。しかし，銅とステンレスの溶接は難しく，ただ接合するだけでなく気密性も保たなければならない。製品化には，低コストで銅とステンレスを溶接する技術が必要である。

2.3　県内企業の動き

県内にはファンヒータメーカがあるが，温風を送るファンは商用電源で駆動しており，熱から電気を取り出せないか，以前から検討していた。今年度，カセットコンロメーカと共同で熱電変換素子を用いたカセットガスファンヒータを製品化した。熱電変換素子は変換効率が低く高価のため，取り出せる電力は非常に小さいが，カセットガスの熱量が大きいため，ヒータとしては十分使えるものになっている。

研究会に参加した企業の内，化学プラント，鋳物，鍛造，食品など，工場の未利用熱からのエネルギー回収について興味を持っている企業は多い。また，機械設備工事を主な業務とする企業にも，自社製品の開発に積極的で熱音響機

関の開発に興味を持つ企業が見受けられた。

2.4　公募事業への提案

熱音響機関の利用方法は，熱音響機関で高熱から冷熱を発生させ冷凍機として使用する方法と，熱音響機関で発生する音波をリニア発電機で電気に変換して利用する方法がある。熱音響冷凍機はループ状のパイプの中に 2 個蓄熱器を配置するという簡単な構造のため，まずは冷凍機として公募事業へ提案することを検討した。

新潟県では，冬季に降った大量の雪を保存し，夏季の冷房に使ったり食料の冷蔵庫として利用したりしている。課題は導入コストが高いことで，大量の雪を保存しておく雪室，冷たい空気を各部屋まで送る配管と送風ファンの設置に約500万円がかかる[3]。その半分が雪室の設置費用であるが，太陽熱を熱源とした熱音響冷凍機で雪室を冷却すれば，雪融けを遅らせ雪室容積を小さくして雪冷房の導入コストを削減できる。また，雪冷房に必要な雪の量を削減できるため，それほど雪が降らない地域でも導入可能となり，利用地域の拡大が期待できる。開発する装置の概要を図 1 に示す。太陽熱が強い時ほど雪も解けるが，熱音響冷凍機の冷凍能力も大きくなるため，非常に適した利用方法と言える。

一般家庭で雪冷房を使う場合，雪室に約 30 トンの雪を貯蔵する必要があるが，出力 1kW の熱音響冷凍機を 6 か月間運転した場合，その冷凍能力は雪 12.5 トンに相当し，雪室の容積を41.7%削減できる。また，汎用のプレハブ冷蔵庫に使われている断熱壁を雪室用に改良することで，従来の雪室用の断熱材より安価になり，これも加えて導入コスト 17%の削減が見込める。この内容で，（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）再生可能エネルギー熱利用技術開発事業に，「太陽熱を利用した熱音響冷凍機による雪室冷却装置の開発」で提案し採択された。この事業は，再生可能エネルギー熱を使ったシステムの導入コストが高いため，従来の 10%削減を目指すもので，熱音響冷凍機の理論と設計を担当する東海大学，装置の製造を担当する県内企業とともに 3 年間の予定で研究開発を実施する。

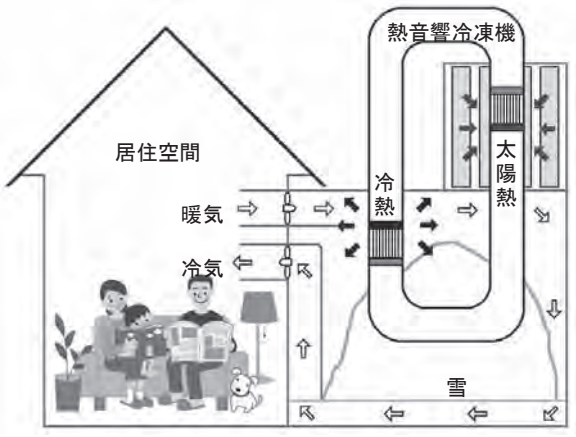

図 1　熱音響冷凍機による雪室冷却装置

3.　結　　言

(1) 熱音響機関は構造が簡単で可動部がないため，メインテナンスの必要がなく低コストという特徴がある。工場の未利用熱や太陽熱を冷熱や電気に変換する装置の研究開発が大学や企業で進められている。

(2) 熱音響機関は他の外燃機関にくらべて効率は高いが，装置全体が大きいなどの課題がある。そのため，小型化の研究開発も進められている。

(3) 大学や企業と連携し，太陽熱を利用した熱音響冷凍機の開発で NEOD の事業に提案し採択された。この研究開発をすすめ熱音響冷凍機の実用化に取り組む。

参考文献

1）富永昭，“熱音響工学の基礎”， 内田老鶴圃，1998，pp.9-11.

2） 杉本信正，“熱流の不安定性と熱音響現象”，ながれ 33，2014，pp.181-194.

3） 新潟県産業観光労働部産業振興課新エネルギー資源開発室，“雪冷熱エネルギー住宅建築のためのガイドライン”，2009，pp.13.