ノート

未利用低温排熱利用の発電システムの技術開発

（第 2 報）

三村　和弘*　須貝　裕之**　阿部　淑人***　山崎　栄一*

Development of Power Generation System using Untapped Low Temperature Heat Source Ⅱ

MIMURA Kazuhiro *, SUGAI Hiroyuki **, ABE Yoshito*** and YAMAZAKI Eiichi*

1. 緒　　言

近年，未利用エネルギーを利用した多くの技術開発が行われているが，低温排熱利用については開発が限定的であり，特に 200℃以下の熱エネルギーを電気エネルギーに変換することは実用化が困難である。また，県内でも排熱の有効利用を考えている企業は米菓業や鋳物業をはじめとして多く存在する。そこで，本研究は県内企業，新潟大学，県農業総合研究所食品研究センター，そして工業技術総合研究所が共同研究体を形成し開発を行った。ここでは，工業技術総合研究所が担当したスターリングエンジンの発電実験とコンピューターシミュレーションを利用した技術開発について報告する。

2. 発電システム

開発する発電システムは「集熱装置」，「熱輸送装置」，［スターリングエンジン」そして「制御装置」の 4 つの要素から構成される[1)]。このシステムは，工場から排出される熱を集熱装置で回収し，作動流体の相変化を利用したサーモサイフォンで熱輸送を行い，スターリングエンジンに熱供給し電力を発生させる。その後，発生した電力を制御装置で安定した電力に変換する。

*　研究開発センター
**　中越技術支援センター
***　下越技術支援センター

3. スターリングエンジンの開発

開発するスターリングエンジンは，高温部と低温部の温度差を利用するもので，エンジン内部のヘリウムガスを作動気体として膨張収縮を繰り返させ，ピストンを高速で動作させて電力を発生させる。ここでは，熱交換器の効率を向上させることが発電性能に大きく関与するため，発電実験と熱交換部のコンピューターシミュレーションによる解析を行った。

3.1 発電実験方法

スターリングエンジンの加熱に関しては，加熱部に安定した熱エネルギーを供給し再現性のある実験を行うため，高温に加熱したシリコーンオイルを循環させる装置を図 1 のように開発した。この装置は，シリコーンオイルを油タンク内で高温に熱し，高温用ポンプによりスターリングエンジンに熱供給を行うものである。

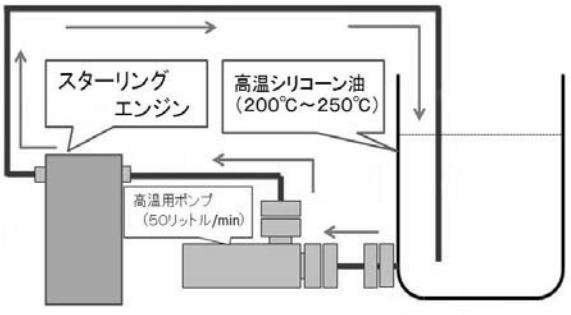


図 1　スターリングエンジン加熱装置

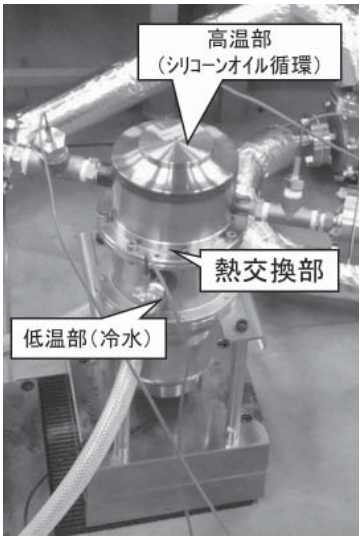


図 2　スターリングエンジン

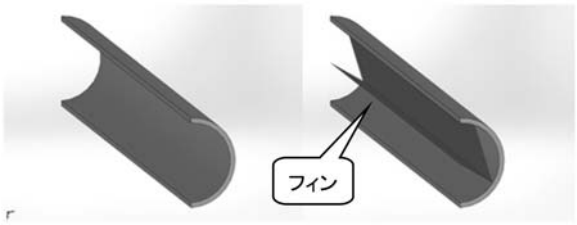
また，エンジン出入り口に温度センサ（K 熱電対）を取り付けて，シリコーンオイルの出入りの温度差と流量により投入熱量を算出した。冷却に関しては，冷却部に約 10℃の冷水を常時流した。

3.2　発電量と発電効率

発電実験では，起動中のスターリングエンジンのヘリウムガス圧力を調整し，パワーピストンとディスプレーサーピストンの位相差を適正化することによって得られる最大の発生電力を調べた。その結果，ヘリウムガス圧が 1.4MPa のときに，発生電力は最大の 45W を出力し，このときのシリコーンオイルの出入りの温度差が 1.8K であり，流量が 400g/s だったので，シリコーンオイルの比熱を 1.5J/(K･g)とすると，投入熱量は，400×1.5×1.8 =1080W となった。したがって，投入熱量に対する発電効率を求めると約 4%になる。実験に使用したスターリングエンジンを図 2 に示す。

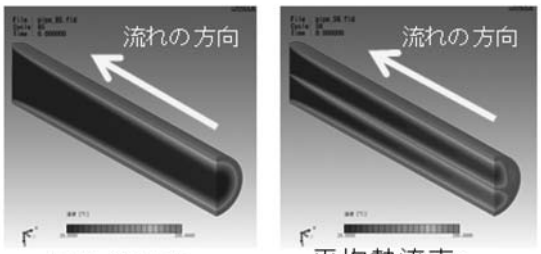
3.3　コンピューターシミュレーションによる集熱・熱輸送装置の開発支援

ここでは，熱流体コンピューターシミュレーションによるスターリングエンジンの開発支援の概要を説明する。



(a) 単純円筒管　　(b) フィン挿入型

図 3　熱交換器断面形状



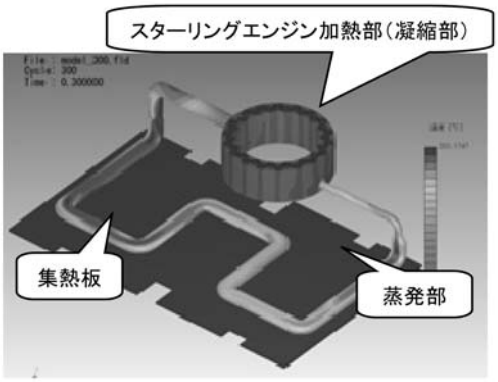
(a) 単純円筒管　　(b) フィン挿入型

図 4　解析結果

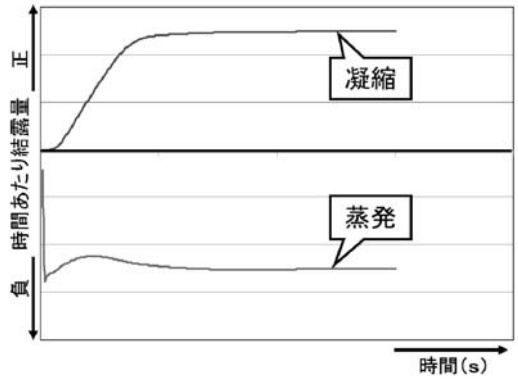
3.3.1　熱交換器の特性解析

スターリングエンジンを動作させるためには，エンジン内部の作動気体を外部から間接的に加熱・冷却させる必要がある。そこで，パイプ内部を流れる作動気体を外部からの熱源により加熱する熱交換器の性能評価をコンピューターシミュレーションにより行った事例を示す。

図 3 に計算した熱交換器の例を示す。(a)は単純な円筒管，(b)は管内に銅フィンを挿入し，伝熱面積を大きくした場合である。伝熱面積を大きくすると，移動する熱エネルギー量が多くなり熱交換の効率がよくなる。したがって，単位時間に単位面積に流れるエネルギー量である熱流束が大きくなる。計算結果を図 4 に示す。単純円筒管の平均熱流束 0.024 W/mm^2 に対して，フィンを挿入することにより，倍以上の熱流束が得られることが予想される。ただし，フィン挿入により作動気体の流れに対して抵抗も増加することが予想される。このようにして，銅のフィン形状や板厚・材質を変えて計算を行い，スターリングエンジンに適した熱交換器を



(a) サーモサイフォン全体の温度分布



(b) 加熱・冷却部の蒸発・凝縮量の時間変化

図 5　サーモサイフォンの解析結果

検討し，実際の装置製作に反映させた。

3.3.2　サーモサイフォンの解析

排熱源から回収された熱は，サーモサイフォンによりスターリングエンジン加熱部に移送される。サーモサイフォンは，ヒートパイプと同様に真空容器内に水を封入し，加熱部における蒸発と冷却部における凝縮により，同形状の銅の棒に比べて数 100 倍の熱伝導率を実現する装置である。

本研究では，サーモサイフォン加熱・冷却部の形状が性能に与える影響をコンピューターシミュレーションにより計算し，装置製作に役立てた。図 5 に解析結果の一例を示す。(a)にはサーモサイフォン全体の温度分布を示す。排熱は集熱板を加熱し，これにより蒸発部の水が気化する。気化した水はスターリングエンジン加熱部で熱交換により凝縮して液体となり，蒸発部に戻る。(b)には蒸発部とエンジン加熱部の単位時間あたりの結露量の時間変化を示す。正の結露量はスターリングエンジン加熱部における凝縮を意味し，負の結露量は蒸発部における蒸発を意味する。この値に質量あたりの気化熱をかけた値が熱輸送量となる。

4.　結　　言

(1) 安定した熱供給を行う加熱装置を開発し，最大発生電力を 45W 出力した。

(2) 熱流体解析ソフトウエアにより，スターリングエンジンに適した熱交換器を検討し，実際の装置製作に反映させた。

(3) 熱流体解析ソフトウエアによりコンピューター上でサーモサイフォンを再現し，内部状況の分析や熱輸送能力の評価をおこない，開発に役立てた。

参考文献

1)　須貝裕之，本田崇，阿部淑人，坂井朋之，“未利用低温排熱利用の発電システムの技術開発”　工業技術総合研究所報告書，no.41，2011，pp.49-51.