

セラミックス製熱交換器評価用スターリングエンジンの開発

Development of Experimental Stirling Engine with Ceramics Heat Exchanger

正 平田 宏一(海技研) 正 今井 康之 正 石村 恵以子 正 川田 正國
赤澤 輝行(eスター) 村尾 景司

Koichi HIRATA, Yasuyuki IMAI, Eiko ISHIMURA and Masakuni KAWADA,
National Maritime Research Institute, Tokyo
Teruyuki AKAZAWA and Keiji MURAO, e stir Co.,Ltd., Osaka

In order to develop a household co-generation system, we need a compact and high efficient power source. A Stirling engine, which has excellent characteristics such as high ideal efficiency and low pollution, is one of the suitable power sources for the co-generation system. In this study, we aim to develop a high efficient Stirling engine. And a ceramics heat exchanger is developed. It has high heatproof performance and high heat conduction, then the Stirling engine can have higher operating temperature. We also develop a prototype Stirling engine for investigation of the ceramics heat exchanger. In this paper, we discuss a fundamental performance of the engine.

Key words: Stirling Engine, Ceramics, Silicon Carbide and Heat Exchanger

1. まえがき

昨今の地球温暖化防止や省エネルギー化の観点から小型で高効率な動力源が必要とされている。高熱効率性、熱源の多様性、低公害性といった優れた特徴を持つスターリングエンジンは、将来のエネルギー事情に適合しうる動力源の一つであるのは間違いない。そのような観点から、著者らは、家庭用コジェネレーションの動力源に用いるための高効率スターリングエンジンの開発を進めている⁽¹⁾。

従来のスターリングエンジンにおいて、エンジンの高効率化を図るためには、高温条件下での材料強度の制限から、ヒータ材料としてインコネルやハステロイ X 等の特殊なニッケル合金を用いてきた。本研究では、スターリングエンジンのさらなる高効率化を目指して、セラミックス製ヒータの実現可能性を検討している。本報では、セラミックス製ヒータを搭載した評価用スターリングエンジンの基本性能について述べる。

2. 高効率スターリングエンジンの開発指針

家庭用コジェネレーションの稼働率を考えた場合、著者らは、400~500 W の発電出力が最適であると試算している。従来から開発されてきた高性能スターリングエンジンの多くは、3~30 kW 程度の出力であることを考えると、その出力レベルはかなり低い。一方、ガスエンジンや燃料電池等を用いた家庭用コジェネレーションに性能面で勝るためには、25%以上の発電端効率が必要であると考えている。すなわち、家庭用コジェネレーション用動力源には、小型で高効率なエンジンが必要となる。

小型な高効率スターリングエンジンを開発するためには、エンジン自身の熱効率向上並びに各種損失の低減が必要不可欠である。エンジン自身の熱効率向上については、エンジンの作動温度を従来以上に高めることが有効である。そのため、ヒータ材料に、耐熱強度が高く、しかも熱伝導率が高いセラミックス材料(炭化珪素, SiC)を用いることで、高効率化が図られる可能性がある。

セラミックス材料は、従来の金属材料と比べて、材料の信頼性やじん性に劣り、破損時の危険性が高い。また、製

法が大きく異なるため、ヒータの基本形式から見直す必要がある。すなわち、エンジンや熱交換器の基本構造はもちろん、ヒータ単体の強度やエンジンとの接続方法等についても詳細な検討が必要である。

3. 熱交換器評価用スターリングエンジンの開発

本研究では、セラミックス製ヒータの基本性能を取得し、エンジン搭載時の様々な技術課題を見極めるため、熱交換器評価用スターリングエンジンを開発している。以下、その基本構造と特徴について述べる。

3.1 評価用エンジンの基本構造 図1及び図2に評価用エンジンの構造と外観、表1に主な仕様及び目標性能を示す。本エンジンは、ディスプレイサとパワーピストンを一つのシリンダ内に配置した形である。シリンダ上部にはセラミックス製ヒータ、さらにその上方には燃焼器が配置されている。

セラミックス製ヒータは、従来の金属製熱交換器のような溶接構造やねじ止めによる締結方法を採用できない。本評価用エンジンにおいては、燃焼器構造部材である S45C 製天板(厚さ 25 mm)とクーラに取り付けたフランジの間

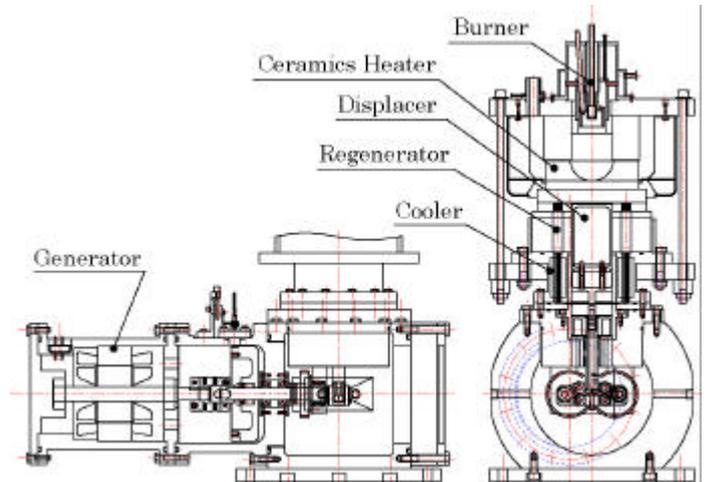


Figure 1, Structure of Prototype Stirling Engine

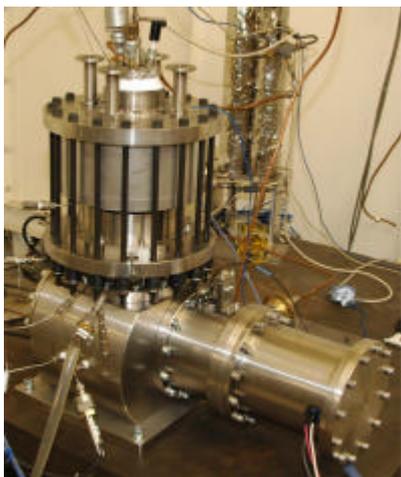


Figure 2, Photograph of Prototype Stirling Engine

Table 1, Specifications and Target Performance

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| Engine Type | Beta-type |
| Displacer (Bore x Stroke) | 60 x 18 mm |
| Power Piston (Bore x Stroke) | 60 x 18 mm |
| Working Gas | Helium |
| Piston Drive Mechanism | Rhombic Mechanism |
| Target Power | 400 We |
| Target Efficiency | 25 % |
| Engine Speed | 2100 rpm (max.) |
| Mean Gas Pressure | 3.0 MPa (max.) |
| Heat Source | Combustion Gas (Methane) |
| Heater Material | Ceramics (SiC) |
| Regenerator | Piled Mesh, #150 |
| Cooler Type | Shell and Tube Type |
| Generator Type | Induction Type (Hermetic) |

を 18 本の M10 ボルトによって、高強度断熱材、セラミックス製ヒータおよび再生器ハウジングを締め付ける構造としている。

ピストン駆動機構には、ピストンの直線運動が可能なロンビック機構を採用している。ロンビック機構の運動は、各部品の加工精度や組立精度の影響を大きく受け、各ピストンを直動させるためのガイドを設置する必要がある。本評価用エンジンにおいては、ディスプレイサロッド下部やパワーピストンの支持部に数種の PTFE 製ブッシュを製作し、各ピストンの直線運動を調整している。

さらに、圧力容器構造とした誘導発電機がクランクケースに直接配置されている。なお、本エンジンはセラミックス製熱交換器の性能評価を目的として開発しているため、駆動機構の機械損失や発電機特性についての詳細な評価試験は行っていない。実用エンジンの開発には、別途開発を進めているリニア発電機と組み合わせ、フリーピストン形式とすることで小型化・高効率化を図る。

3.2 セラミックス製ヒータ 高性能ヒータの材料は、高い熱伝導率を有することが要求される。また、スターリングエンジンの作動空間は数 MPa まで加圧されるため、高温条件下での強度特性が重要である。それらの検討事項を踏まえて、ヒータ材料には炭化珪素 (SiC) を用いることとした。炭化珪素は、ステンレス鋼の 5 倍程度の熱伝導率があり、高温条件下での強度が高い材料である。

図 3 は以下の実験に使用したセラミックス製ヒータの構造を示している。従来のスターリングエンジンに用いられ

てきた金属製ヒータの多くは、数十本の伝熱管で構成される多管式熱交換器である。一方、本セラミックス製ヒータは、燃焼ガスからの熱を受け取るフィンを取付けた燃焼ガス伝熱部、耐圧強度を受け持つ平板並びに作動ガスに熱を与えるための多数の小孔を取付けた作動ガス伝熱部から構成されている。この特殊な形状は、熱応力・耐圧解析の結果や簡易モデルによる油圧試験の結果、さらにエンジンへの接続方法を考慮した上で決定されている。

3.3 熱交換器周辺部の構造 図 4 に本評価用エンジンの熱交換器周辺部の構造を示す。前述の通り、セラミックス製ヒータ等の部品は 2 枚のフランジによって締め付ける構造としている。セラミックス製ヒータと天板との間の高強度断熱材にはレンガ系低熱伝導材料を用いている。これにより、燃焼ガスの熱エネルギーが外部に漏れる熱損失 (燃焼器損失) の低減を試みている。

高圧・高温な作動ガスの静止面シールには、初期厚さ約 1 mm のカーボンシートを使用している。カーボンシートは、複数の薄膜カーボン繊維をシート状に圧縮したものである。高温条件下で長期のシール性能を維持させることは難しいが、連続運転時間が数十時間程度の実験においては、

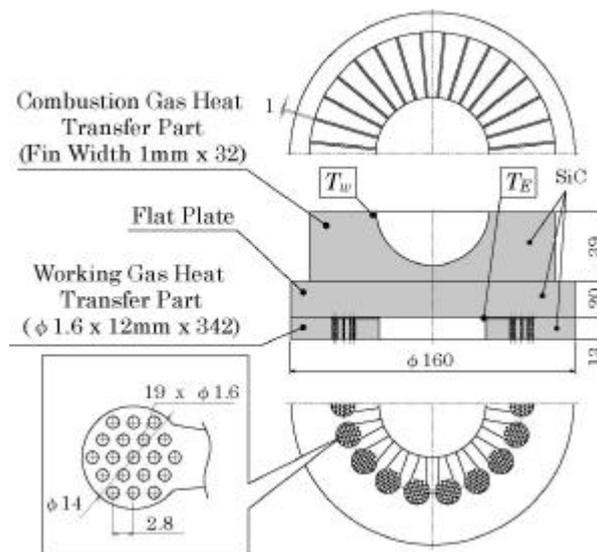


Figure 3, Structure of Ceramics Heater

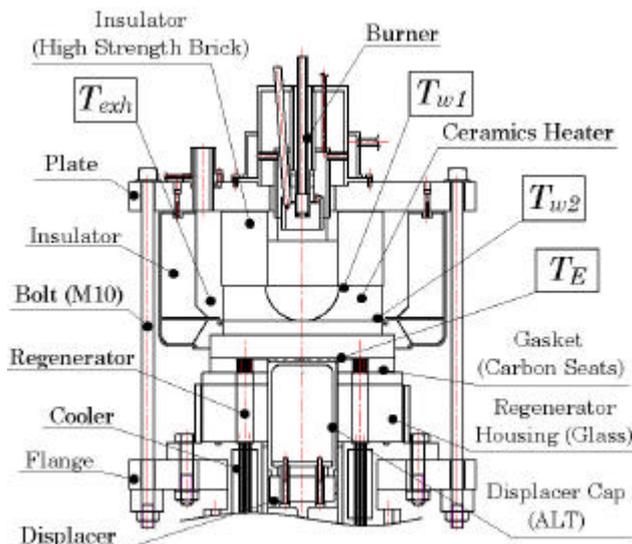


Figure 4, Structure of Heat Exchangers

数 MPa のヘリウムを概ね密封することができることを確認している。

ヒータとクーラを連結する再生器ハウジングには、熱伝導率が極めて低い石英ガラスを使用している。直径 160 mm、高さ 50 mm の石英ガラスには、ディスプレイサが貫通するための約 60 mm の穴と再生器マトリクスを挿入するための複数の穴があげられている。この再生器ハウジングの形状についても、セラミックス製ヒータと同様、構造解析及び詳細な油圧試験の結果から決定されている。

高温な膨脹空間に配置されるディスプレイサキャップは、その耐熱性を考慮して、チタン酸アルミニウム (ALT) を用いている。チタン酸アルミニウムは比較的低い熱伝導率を有する高強度なセラミックス材料である。

ディスプレイサ及びパワーピストンには、従来のスターリングエンジンに使用されてきた PTFE 製ピストンリングを用いている。また、ディスプレイサのロッドシールには、摺動部が PTFE 製のリップシールを用いている。これらのシール機構は、熱交換器性能を評価するための作動空間を構成するために選定されており、本エンジンをフリーピストン形式とする場合には、より低摩擦なシール機構を選定する必要がある。

以上のように本評価用エンジンは、従来のスターリングエンジンにはないユニークな構造を有しており、多くの特殊材料を用いている。

4. 評価用スターリングエンジンの性能特性

4.1 実験方法及び実験条件 評価用エンジンを試作した後、性能評価のための実験を行った。燃料にはメタンを用い、設定した空気比になるように燃料と空気を圧送する。温度は、K 熱電対によって、図 4 に示した 2ヶ所のヒータ壁温 T_{w1} 、 T_{w2} 、膨脹空間ガス温度 T_E 、圧縮空間ガス温度 T_C 、排ガス温度 T_{exh} 及び冷却水温度等を測定する。ガス圧力は、膨脹空間 P_E 、圧縮空間 P_C 及びバッファ空間 P_{buf} の 3ヶ所を測定している。さらに、フライホイールの外部にはレーザ式の位置センサが取り付けられており、ピストン位置を検知している。これらの信号はパーソナルコンピュータに取り込まれ、処理される。

表 2 に実験条件を示す。本実験において、全入熱力 Q_{total} (メタンの高発熱量ベース) を 3~6 kW とし、空気比が 1.3 となるように空気量を調整している。また、平均ガス圧力 P_m を 2.5 MPa とし、エンジン回転数 N は 600~1800 rpm の範囲で発電負荷を調節している。

Table 2, Experimental Condition

| | |
|-------------------|------------------|
| Heat Source | Methane |
| Total Heat Input | 3 ~ 6 kW |
| Air Ratio | 1.3 |
| Engine Speed | 600 ~ 1800 rpm |
| Mean Gas Pressure | 2.5 MPa (Helium) |

4.2 ヒータ壁温及び膨脹空間ガス温度 図 5 にヒータ壁温 T_{w1} 及び膨脹空間ガス温度 T_E の実験結果を示す。これより、それぞれの温度は、全入熱力 Q_{total} の減少並びにエンジン回転数 N の上昇に伴い低下していることがわかる。これは、エンジンへの入熱量の増加に伴い、各温度が低下するためである。一方、本実験条件における最高ヒータ壁温度は $Q_{total}=6$ kW、 $N=1200$ rpm において約 870 であり、これ

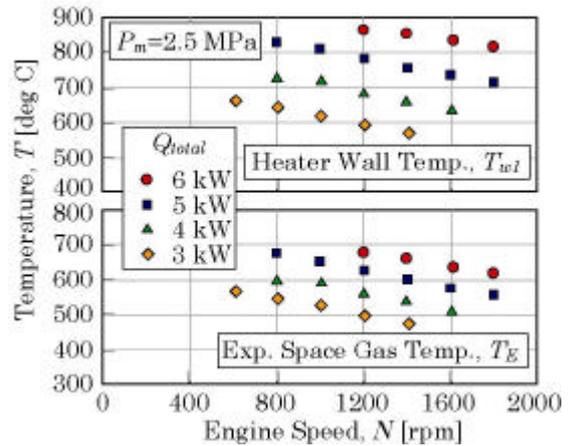


Figure 5, Experimental Results of Heater Wall Temperature and Expansion Gas Temperature

は従来の金属製ヒータでは達することが困難な温度レベルである。本研究で開発したセラミックス製ヒータはこのような過酷な温度条件においても使用可能であることが確認された。

4.3 圧力線図及び P-V 線図 以上の実験において得られた圧力波形と、シミュレーションによる計算結果とを比較・検討し、エンジン性能評価を試みる。シミュレーションは、等温モデルで求められるガス圧力に、圧力損失及びピストンシール部からのガス漏れを考慮した 2nd オータの計算である⁽²⁾。なお、本シミュレーションプログラムは、燃料の全入熱量から理論燃焼断熱温度を求め、各種熱損失とのバランスから出力性能を試算するために作成したものであるが、以下の比較においては、膨脹空間ガス温度 T_E の測定結果に基づく計算結果を用いる。

図 6 は、 $Q_{total}=6$ kW、 $N=1800$ rpm における作動ガスの圧力波形の実験結果及び計算結果を示している。同図における計算は、実験で得られた膨脹空間ガス温度 $T_E=620$ を計算条件とし、ピストンシール部からのガス漏れがないものとしている。これより、計算結果と実験結果とは、クランク角に対するガス圧力の位相がやや異なっていることがわかる。そこで、計算結果が実験結果を模擬できるように、ガス漏れ特性を等エントロピ流れで表した場合のノズルの等価直径 d_{leak} と膨脹空間温度 T_E の補正を試みる。

様々な計算条件でシミュレーション計算を行った結果、 $d_{leak}=0.75$ mm、 $T_E=470$ (実測値から 150 K を差し引いた値) としたときに計算結果と実験結果はよい一致が見ら

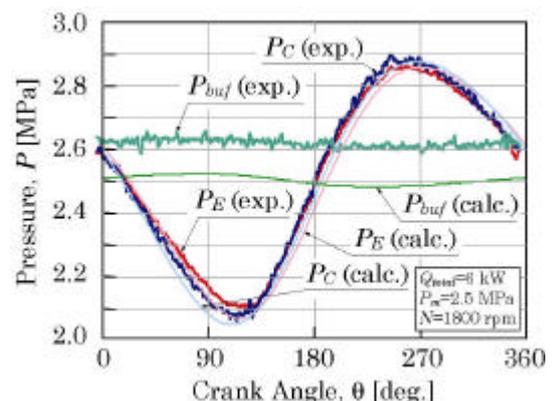


Figure 6, Pressure Diagram

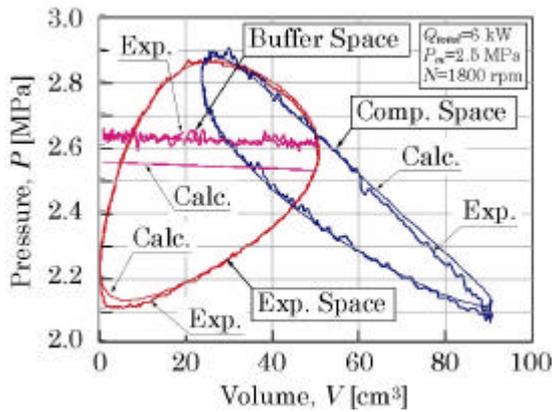


Figure 7, P-V Diagram (Revised Gas Leakage and Expansion Gas Temperature)

れた (図 7)。等価直径 d_{leak} については、エンジン組立時に測定したガス漏れ特性の 3~4 倍の等価直径となっているが、組立後約 100 時間の運転を行っていることを考えると、概ね妥当な結果であると考えている。一方、膨脹空間ガス温度 T_E の補正值は、妥当な値であるとは言えない。これは、セラミックス製ヒータの製作法の制限から、作動ガス温度や圧力が複雑な経路で測定を行ったことやピストン位置を検知するレーザ式センサの調整に問題があったと考えている。今後、エンジンの熱効率を詳細に調べていく場合には、温度・圧力の高精度な測定が必要不可欠である。

4.4 各種熱損失及びエネルギーバランス 図 8 は、 $Q_{total}=5$ kW とした場合のエンジン回転数 N に対する各種熱損失及び熱量の実験結果を示している。同図において、排ガス損失 Q_{exh} 及び燃焼器損失 Q_b が他の損失と比べてかなり大きいことがわかる。排ガス損失 Q_{exh} は、排ガス温度 T_{exh} の測定値と排ガス流量、排ガスの比熱から求めている。本評価用エンジンでは、エンジンの高効率化に不可欠な空気予熱器を取り付けていないが、今後開発する空気予熱器によって排ガス損失の一部を回収できるものと考えている。一方、燃焼器損失 Q_b は、燃焼器周辺の断熱が不十分なために増大していると考えられる。セラミックス製ヒータを固定するための構造部材の温度上昇が主要因であると考えられ、現状の構造では低減が困難である。また、雑熱損失には、シリンダ部の熱伝導損失 Q_{cond} と再生器損失 Q_{reg} が含まれ

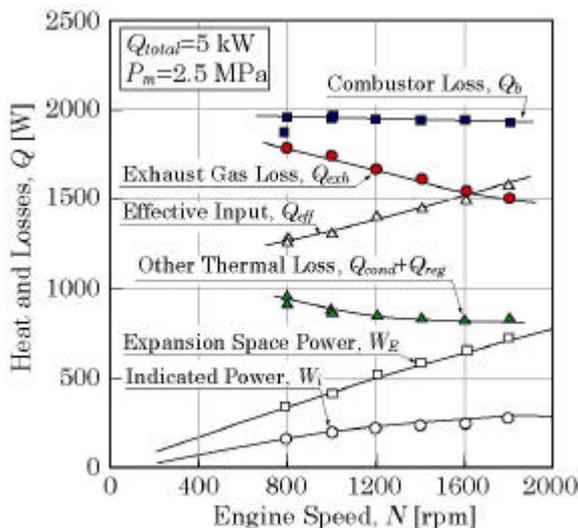


Figure 8, Heat and Thermal Losses

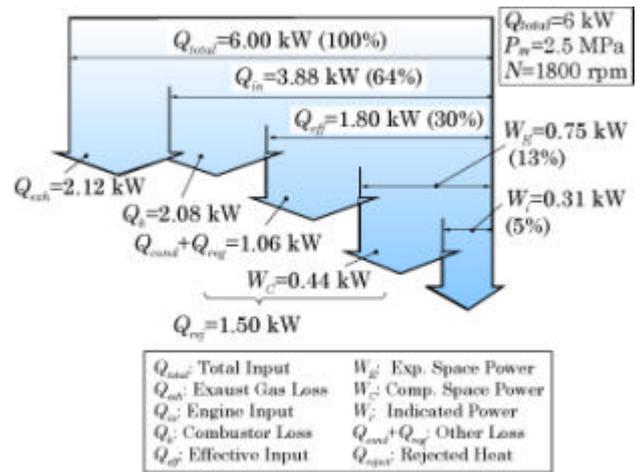


Figure 9, Energy Balance

る。目標性能の達成にはこれらの損失を半減する必要がある。

図 9 は、 $Q_{total}=6$ kW, $N=1800$ rpm におけるエネルギーバランスを示している。前述の通り、排ガス損失 Q_{exh} 及び燃焼器損失 Q_b が大きいことがわかる。また、全入熱量 Q_{total} に対する図示出力 W_i の割合 (図示熱効率) は 5 %, エンジン入熱量 $Q_{in} (= Q_{total} - Q_{exh})$ に対する図示出力 W_i の割合は 8 %, 有効熱入力 $Q_{eff} (= Q_{in} - Q_b)$ に対する図示出力 W_i の割合は 17 % である。これらの熱効率は、従来のスターリングエンジンと比べて決して高い値ではなく、セラミックス製ヒータを用いて作動温度の高温化を試みているメリットはまだ十分に発揮されていない。

5. あとがき

本報では、スターリングエンジンの高効率化を目指して開発を進めているセラミックス製ヒータ並びに評価用スターリングエンジンについて述べた。そして、燃焼ガスを用いた評価用エンジンの運転実験を行った結果、開発したセラミックス製ヒータは 800 以上の高温条件下で適切に機能することを確認できた。また、最終的な目標性能の達成には至っていないものの、シミュレーションとの比較・検討や各種熱損失の分析を行うことで、エンジン性能向上についての様々な知見が得られた。今後、新たな形式のセラミックス製ヒータの開発を含めて、各種熱損失の低減を図り、目標出力の達成並びに熱効率の向上を図っていきたいと考えている。

本報で紹介したセラミックス製ヒータ並びに評価用スターリングエンジンは、NEDO 委託研究「セラミックス製熱交換器と新形式リニア発電機を用いた次世代エンジンの開発」により実施されているものであり、関係各位並びに共同研究メンバーに対し、深い感謝の意を表したい。

文献

- (1) 赤澤輝行, 村尾景司, 平田宏一, 星野健, 高効率スターリングエンジンの開発, 日本機械学会第 9 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, p.105-106 (2005)。
- (2) 平田宏一, 浜口和洋, 岩本昭一, 小型発電機用スターリングエンジンの開発に関する基礎研究 (第 2 報 シミュレーション計算によるエンジンの性能予測法) 日本機械学会論文集, B 編, 第 64 巻, 621 号, 1998 年 5 月, 1608-1615。