

1W級スターリングエンジンの開発

戸 田 富士夫
山 下 善 之

宇都宮大学教育学部紀要
第63号 第2部 別刷
平成25年(2013)3月

Development of the 1W type stirling engine

TODA Fujio, YAMASHITA Yoshiyuki

1W級スターリングエンジンの開発

Development of the 1W type stirling engine

戸田 富士夫, 山下 善之
TODA Fujio, YAMASHITA Yoshiyuki

Output power is more than 10 W for the stirling engine which comes to practical use at present. It's the big stroke volume, a water cooling type and high pressure type to get this output power. Therefore an engine will be expansion and a decline of installation and the cost rise. These problems are obstruction of the spread of a stirling engine. So the practical 1W type engine is developed as the way to settle these problems.

I think you can improve installation and the cost by micro engine of 1W type. The 1W type engine, more than one, a used thing can plan for high output. So the micro stirling engine is developed. A model stirling engine for education was used by this development.

A thing scarce in the durability was revealed for this engine as a result of the experiment. So a high durability new-type engine using a carbon piston and a heat-resistant glass cylinder has been developed. This engine makes output power occur 0.6 W as a result of the experiment. A simulation result showed that output power becomes more than 1 W by setting the phase angle to 90 deg.

Key words : the micro stirling engine, biomass energy, Airpot, performance analysis

1. はじめに

栃木県栃木市都賀町大柿地区の里山の散歩コースに間伐材を用いたバイオマスエネルギーを燃料とするバイオマス焼却炉が設置されている。また、このバイオマス焼却炉によって作られた温水を用いる足湯が設けられており、地域の交流にも役立っている。この里山では、里山保全のために木を間引く間伐を行っている。そこで足湯へ温水を供給するためのバイオマスエネルギーとしてこの間伐した木材を利用することで、里山保全にも貢献することにもなる。

現在、足湯場から足湯用照明の電力を発電するためにバイオマス焼却炉の熱源を用いる実用超小型スターリングエンジンが要望されている。そこで足湯場の要望からバイオマス焼却炉の熱源を用いる、足湯用照明の電力を発電するための実用超小型スターリングエンジンの開発を行う。想定する足湯場のシステム図を図1に示す。本来、温水を供給することのみに使用されていたバイオマス焼却炉の熱源を利用するために、バイオマス焼却炉の煙突から超小型スターリングエンジンを用いて足湯用照明の電力を発電することでバイオマス焼却炉の効率化を図ることができる。

ここで本研究における超小型の定義はエンジンの大きさだけでなく、エンジンの軸出力が大気圧運転で1[W]程度のエンジンとしている。現在、実用化を目指して開発されているスターリングエンジンは数十ワット以上のエンジンが大半を占めている。しかし、1[W]程度の電力でも高輝度LEDを複数個点灯させることができるため、足湯場の要望に応えられると考える。また、このエンジンをツイ

ンおよびマルチタイプとして用いることによって高出力化を達成できると考える。

よって、本研究では現在実用化されているバイオマススターリングエンジンよりも小型で、小規模な発電に適した実用超小型スターリングエンジンの開発を目的とし、開発を行うためのスターリングエンジンの選定並びに性能解析、実験並びにシミュレーション計算を行う。

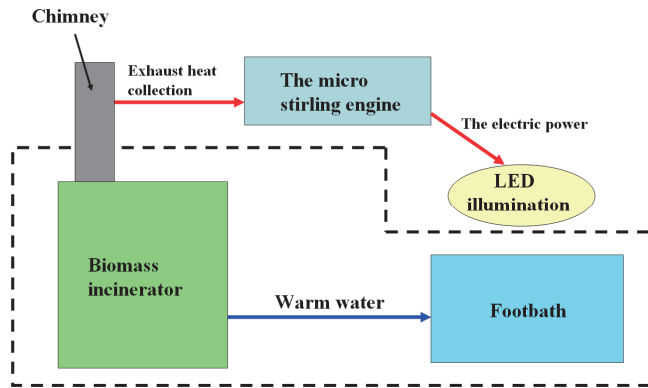


図1 足湯場のシステム図

2. 実用超小型スターリングエンジンの開発

2.1 開発条件

ここで実用超小型スターリングエンジンの開発条件について述べる。実用超小型スターリングエンジンの開発条件として (i) 超小型であること, (ii) シンプルな構造, (iii) 整備性がよいこと, (iv) 安価なコストが挙げられる。ここで (i) では, 従来の実用スターリングエンジンより設置性がよいことと足湯場の要望を満たすことができ, また現在, 実用化に向けて開発されているエンジンとの差別化を図るため軸出力が1[W]程度としている。(ii) ~ (iv) では, 生産性やエンジンの維持管理性を考慮したものである。

2.2 エンジンの選定

前述の条件を満たすスターリングエンジンの形式として, α 形エンジンの選定とした。これは α 形の特徴より構造が簡単なだけでなく, 高い圧縮比が得られ, 高出力, 高回転型のエンジンとなるからである。

クランク機構については, ピストンにかかる側圧を小さくでき, 両ピストンの位相差を保ちながらも, 小型化が可能な機構であるロス・ヨーク機構を選定した。

また, (ii), (iii) の条件から冷却方式として空冷式を選定した。現在の実用スターリングエンジンでは高出力を図るために水冷式が主流となっている。しかし, 超小型スターリングエンジンにおいては軸出力を1[W]程度としており, そのため空冷式でも十分と考える。これは開発条件の (iv) についても満たすと考える。

さらにここで開発条件の (iv) を満たすために, 既存の模型スターリングエンジンを流用する実用超小型スターリングエンジン開発を検討した。既存の模型スターリングエンジンを用いることで開発コスト低減しながらも量産性の確保ができるものと考えた。

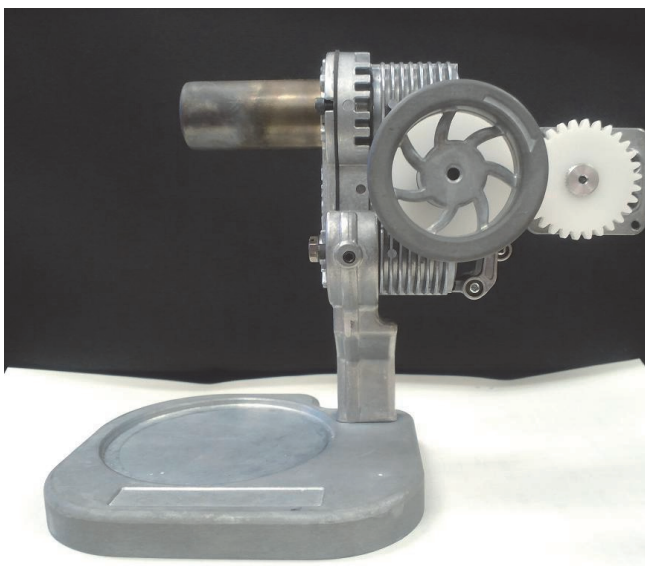


図2 選定候補のスターリングエンジン

ここで選定候補のスターリングエンジンを図2に示す。選定候補として、協和合金社から販売されている教育用模型スターリングエンジンが挙げられた。

2.3 エンジンの性能解析

選定候補として挙げられた教育用模型スターリングエンジンを本研究での採用を検討するために、このエンジンのシミュレーションによる性能解析を行い、エンジンの採用について検討する。そこでスターリングエンジンの一般的な解析方法であるシュミットモデルと断熱モデルを用いて行い、両モデルにおける図示出力の比較も行う。

2.4 解析結果

表1に教育用模型スターリングエンジンの仕様を示す。また、解析条件を表2に示す。シュミットモデルでは、解析条件より図示仕事量が約0.10 [J]となり、図示出力は1.66 [W]となった。また、断熱モデルにおける図示出力は0.097[J]となり、図示出力は1.617[W]となり、断熱モデルの方が若干低い結果が得られた。シュミットモデルと断熱モデルの解析結果から、ともに図示出力が1[W]以上を得られることから、本研究において教育用模型スターリングエンジンを採用することとした。

また、シュミットモデルと断熱モデルで

表1 教育用模型スターリングエンジンの仕様

	Expansion side	Compression side
Piston diameter [cm]	1.80	1.80
Piston stroke [cm]	1.20	1.20
Stroke volume [cm ³]	3.05	3.05
Dead space [cm ³]	0.15	0.40
Heat exchanger volume [cm ³]	Heater	Cooler
	2.00	0.15
	Regenerator	
	0.44	
Phase angle [deg]	120	

表2 解析条件

	Heater side	cooler side
Gas temperature [°C]	500	50
Mean pressure [kPa]	101.3	
Engine speed [rpm]	1000	

の解析結果から図示仕事と図示出力においてほとんど差がないため、解析が簡易的におこなえるシュミットモデルを今後、解析法として用いる。

3. 供試エンジン

3.1 供試エンジンの構造

教育用模型スターリングエンジン（以下、供試エンジンとする）の構造を図3に示す。供試エンジンは教材用として開発されたエンジンである。超小型ながら軸出力を得るために高い圧縮比を持ち、高回転型である α 形エンジンを採用している。機構部については、構造が比較的簡易的で加工がしやすいとされているロス・ヨーク機構が用いられている。次にエンジンの各部の構造について説明する。

本供試エンジンは膨張側ピストンおよび圧縮側ピストンにエンジンの高回転化のために軽量のアルミニウム合金を用いている。また、作動ガスの漏れ並びに摩擦損失が極めて小さいという条件を満たすためにピストン部にピストンリングなどを用いらず、テフロンメッキが施してある。さらに膨張側ピストンの上面には断熱材が取り付けられている。これは加熱器のために膨張側空間が大きくなり死容積が大きくなってしまう。そのため、死容積を減らすために断熱材を取り付けてある。断熱材はエンジンの高回転化への影響を減らすため、また、高温になったガス温度の熱がピストン部に伝わらないように軽量のセラミックス製となっている。

シリンダ部は膨張側および圧縮側ともにエンジン本体と一体型になっている。材質は軽量、放熱性に優れているアルミニウム合金を用いて、また生産性を高めるためにダイキャスト製法となっている。ピストン部との摩擦低減のためにピストン部同様にテフロンメッキが施してある試作型エンジンも供試されていたが改良時の加工等のために、テフロンメッキの施されていないシリンダを実験に用いた。

加熱器はステンレス製の円筒形キャップを用いているため、本エンジンの加熱器キャップをアルコールランプやガスバーナーで加熱する、また高熱流路管などに挿入することで動力を得ることができる。加熱器キャップの厚みを薄くすることによって、加熱器キャップから膨張空間内の作動ガスへより早く熱を伝え、エンジン始動までの加熱時間を短縮することを可能としている。

供試エンジンでは圧縮側のキャップを冷却キャップと呼称しているが、他の模型エンジンと同様に明確な冷却器を持っていない。そのため、エンジン本体の膨張側シリンダ外部および圧縮側シリンダ

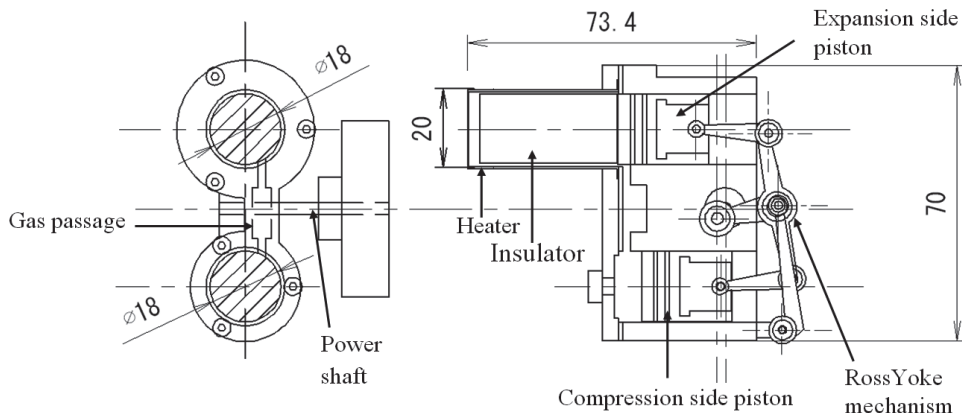


図3 供試エンジンの構造

外部にフィン状の部品を取り付けることでエンジン全体を空気によって冷却するようになっている。材質には熱伝導性が比較的良好で生産性が高い鋳造のアルミニウム合金製を採用している。

コネクティングロッドやロス・ヨークのT字リンク、支持リンクには他の構成部品と同じく生産性の良いダイキャストのアルミニウム合金材を使用している。また、エンジンの可動部の軽量化を図ることでエンジンの高回転化を目指している。さらに、コネクティングロッドやT字リンクの接続部にベアリングを用いることで運転時の摩擦低減を図っている。もう1つの特徴として本超小型スターリングエンジンでは、膨張側と圧縮側の位相差を 120° とすることで加熱・冷却時間を長くすることで低温度差でのエンジンの始動性向上を目的として行なっている。

4. 供試エンジンの性能特性実験

4.1 実験方法

本供試エンジンの性能特性を調べるために天秤型トルク計を用いて軸出力を測定する。

簡易的に微小な出力を得る軸出力測定法として、天秤型トルク計を用いた、測定装置系統を図4に示す。天秤型トルク計は、トルク伝達ロープを介しエンジンに負荷をかけることにより測定している。エンジン内圧力はエンジン側面に取り付けた圧力センサにより感知し、動ひずみ計、A-D変換ボードを介してパーソナルコンピュータに入力している。この際、1サイクルの圧力変化を取り出すため、膨張型ピストン側コネクティングロッドに設置したフォトセンサを使用し、パーソナルコンピュータに入力しTDCパルスを検出している。エンジン内ガス温度は、高温側、低温側それぞれにK熱電対を設置し、熱電対対応デジタル温度計により測定している。高温側、低温側の温度を一定に保つため、高温側はプレートヒータを採用し、可変交流電圧器を調整することにより熱量を変化させ、低温側は、PC用ファンで強制冷却することにより、温度を一定に保っている。

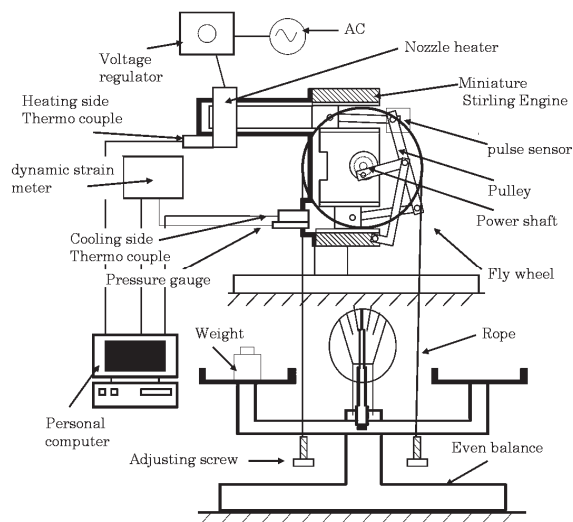


図4 測定装置系

4.2 実験結果および考察

供試エンジンを前項までで提案した実験方法により測定し、エンジン性能特性の検討を行う。

実験の温度比はほぼ一定とした状態とし、負荷を変化させたときの軸仕事の測定を行う。供試エンジンでの実験条件を表3に、実験結果を図5に示す。図5は、天秤型トルク計によって測定された軸トルクから軸出力を計算したエンジン性能特性である。このエンジンでの最高回転数は2600[rpm]付近であることがわかる。天秤型トルク計によって負荷を増大させるに従い軸出力は増大していき、最大軸出力は約 $0.61[\text{W}]/2100[\text{rpm}]$ である。さらに負荷を増大させると軸出力は減少していきることがわかる。本実験では、2時間程度を使用したときにエンジンが再始動できなくなってしまう。この原因として全負荷での測定であったため、ピストン・シリンダの各部摩擦および熱的負荷による損傷に

表3 実験条件

	Heater side temperature	Cool side temperature
Gas temperature [°C]	500	30
Mean pressure [kPa]	101.3	

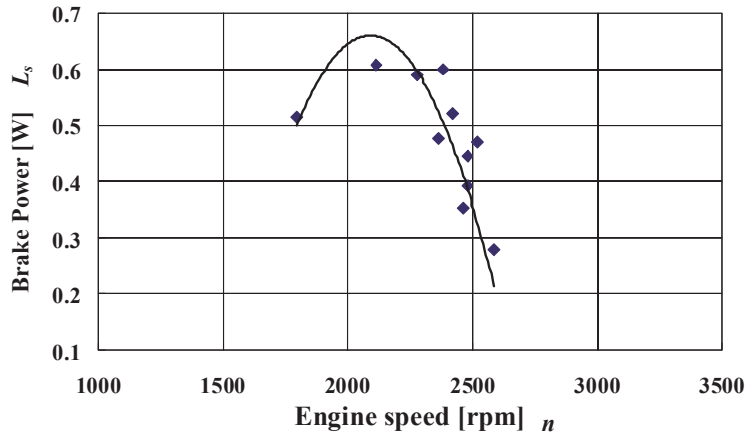


図5 エンジン性能特性の実験結果

よってガス漏れが発生したものと考えられる。そのため、供試エンジンの耐久性に乏しいものと考え、そこで耐久性向上のための開発が必要である。

5. 高耐久性エンジンの開発並びに性能シミュレーション

5.1 カーボン製ピストンとガラス製シリンダの組み合わせ

供試エンジンは最大負荷において、耐久性が低いという実験結果が得られた。そのため、耐久性向上を目的として、従来のシール装置に代わる新たなシール装置について検討を行なう必要が生じた。そこで、Airpot社製のカーボン製ピストンとガラス製シリンダの組み合わせ（以下Airpotと呼ぶ）による耐久性向上の可能性を発見した。

前述の実験結果、熱的負荷によるピストンやシリンダの損傷および摩擦損失の増大が生じた。そのためガス漏れの増大が起こり、エンジン性能の低下がみられた。そこで、解決策の1つとしてAirpotを用いることにした。Airpotとは、カーボングラファイト製のピストンと耐熱ガラス製のシリンダから成り立っている超精密空圧機器である。Airpotを図6に示す。特徴としてピストンは(i)軽量かつ超低摩擦であり、高速、低速問わず使用できる。また、(ii)超精密適合によりピストン

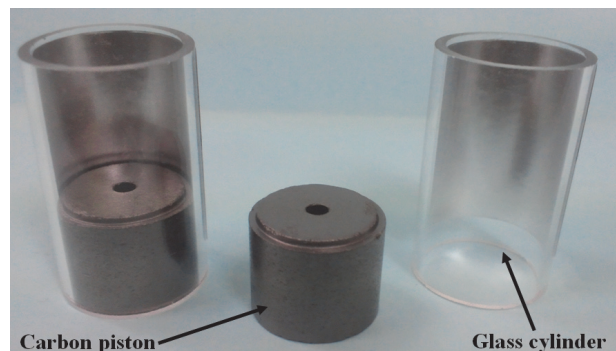


図6 Airpot

リングを持ちいらずに高気密性でガス漏れが極小である。さらに (iii) 10 億サイクル以上の使用に耐えられて高寿命である。最後に (iv) 空気による自動潤滑作用により潤滑材が一切不要という特徴も持った製品である。この (i) ~ (iv) の特徴は供試エンジンの耐久性向上を目的とした開発において全て条件を満足している。次に Airpot を採用検討する際に考慮しなければならないのは、使用温度範囲である。Airpot の仕様によると、使用温度範囲が $-55[^\circ\text{C}] \sim +260[^\circ\text{C}]$ となっているが、高温側ガス温度は $400[^\circ\text{C}]$ 以上である。しかし、この問題は膨張側ピストンに取り付けられたセラミックス製断熱材によって、直接、ピストンやシリンダに高温のガスは触れることはないため、エンジンのピストン・シリンダに採用できるものとした。そこで本供試エンジンを用いて Airpot をピストン・シリンダに流用したエンジンの開発を行った(以下、Airpot 型エンジンと呼ぶ)。Airpot 型エンジンの構造を図 7 に示す。

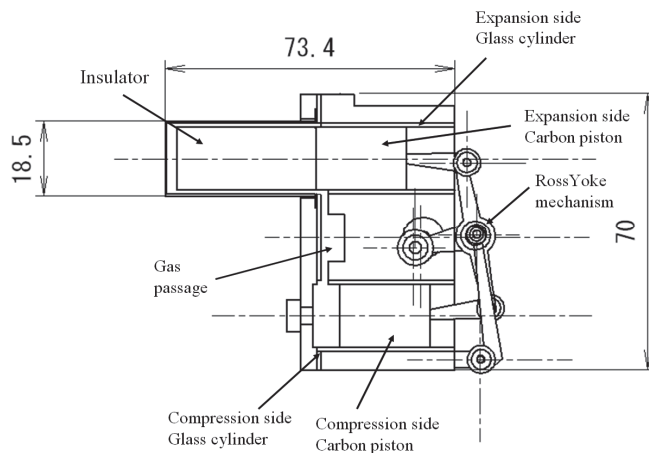


図 7 Airpot 型エンジン

表 4 Airpot 型エンジンの仕様

	Expansion side	Compression side
Piston diameter [cm]	1.60	1.60
Piston stroke [cm]	1.20	1.20
Stroke volume [cm³]	2.41	2.41
Dead space [cm³]	0.11	0.40
Heat exchanger volume [cm³]	Heater	Cooler
	1.62	0.15
	Regenerator	
	0.44	
Phase angle [deg]	120	
Flow Area [cm²]	Heater	Cooler
	0.39	1.50
	Regenerator	
	0.06	
Pipe Length [cm]	Heater	Cooler
	4.08	0.10
Pipe Diameter [cm]	0.71	1.38

また、表 4 に Airpot 型エンジンの仕様を示す。最初にこの製品を使用するために供試エンジンシリンダの内径を旋盤で拡大加工し、接着剤で固定する。Airpot を用いる場合、供試エンジンと同じ径のピストンが供給されていないため、本実験では供試エンジンと比べ 2mm 小さいピストンである外径 16[mm] の 2K160 (Airpot 社の製品規格) を使用した。そのため、供試エンジンと比べ、行程容積が減少する。さらに膨張側空間側のピストンと加熱器キャップのすきま量を等しくするために断熱材の径を小さくする。また、加熱器キャップの内径や厚みもそれぞれ加工する。そのため、加熱器容積等が供試エンジンに比べ小さくなる。

5.2 Airpot型エンジンの実験結果

実験条件を表5に、実験結果を図8に示す。図より、前章での結果と同じように天秤型トルク計によって負荷を増大させるに従い軸出力は増大していき、最大軸出力は2800[rpm]のときに約0.60[W]でピークを向え、さらに負荷を増大させると軸出力は減少していくことがわかる。また、このAirpot型エンジンでの最高回転数は3200[rpm]を得られた。また、前章での実験と同じく全負荷で行っていたが、供試エンジンとは異なり、約10時間程度の運転でも停止することなく運転し続けることができた。耐久試験については、別途行う必要があるが、供試エンジンでの結果と比較してAirpotを用いることによって供試エンジンの耐久性が向上したものと考えた。また、性能特性の結果と比較してエンジンの最高回転数の向上が見られた。これはAirpotを用いることによって、従来型に比べピストンとシリンダ部の摩擦低減と摩耗によるガス漏れが少なくなったことによるものと考えられる。このことから、供試エンジンにAirpotを用いることによって、エンジン性能を総合的に向上させることができるということがわかった。

表5 Airpot型エンジンの実験条件

	Expansion side (Wall)	Compression side (Gas)
temperature [°C]	534	50
Mean pressure [kPa]	101.3	

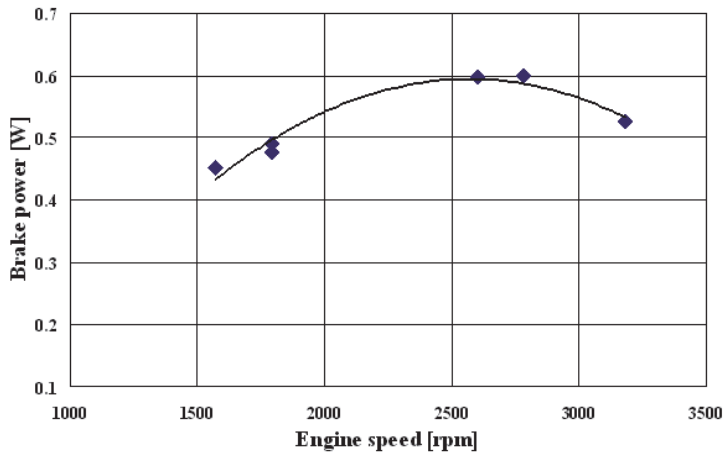


図8 Airpot型エンジン性能特性の実験結果

5.3 Airpot型エンジンの性能解析

Airpot型エンジンにおける性能解析を行い、実験結果との比較をする。この解析では最大軸出力までを求めていく。最大軸出力の解析では、まず理想等温モデルであるシュミットモデルを用いて図示仕事を解析する。次に流動損失の解析¹⁾を行い、流動損失を考慮した図示仕事を求める。最大軸仕事の解析としてはメカニズム効率なる概念を用いる。

ここで、最大軸仕事におけるメカニズム効率 e_{max} ²⁾は、戸田らの過去の実験解析結果より、つぎのように表される。

$$e_{max} = 0.87 \cdot \zeta^{0.08} \quad (1)$$

5.4 Airpot型エンジンの性能解析結果

Airpotは作動ガス漏れが極めて少ないことから性能解析においては作動ガス漏れについては考慮していない。まず、シュミットモデルを用いた性能解析を行う際、ガス温度を与える必要がある。そこで、簡易ガス推定法を用いて加熱キャップ壁温度から高温側ガス温度を予測した。このときの条件は表5に示した実験条件である。また、本エンジンは教材用模型エンジンのため明確な冷却器を備えておらず、エンジン全体から放熱していると考えられる。そのため、冷却器の温度効率を求めることができない。そこで、本性能解析では冷却器と加熱器の温度効率を同等とした。その結果、高温側ガス温度は457[°C]を得られた。ここで表6に性能解析の条件を示す。この条件から求めた特性解析の結果を図9に示し、表7に最大図示出力と最大軸出力の結果を示す。この結果は実験結果の約1.6倍の値となった。これは予想よりやや高い値となった。これは、各損失等の考慮していないことに問題があるものと考えられる。

また、スターリングエンジンは通常、両ピストンの位相角が90[deg]のときに一番高い出力が得られる。そこで本研究の目標であるバッファ圧が大気圧運転で1[W]の軸出力を得るために位相角を90[deg]にした場合のエンジン性能のシミュレーションを行う。この結果を図10に示す。この結果、予測通り図示・軸出力ともに向上して軸出力は目標である1[W]より高い出力が得られることを確認した。

表6 Airpot型エンジンの解析条件

	Heater side	Cooler side
Gas temperature [°C]	457	54
Mean pressure [kPa]	101.3	

表7 最大図示出力と最大軸出力の解析結果

	power [W]	Engine speed [rpm]
Max indicated power	1.76	2300
Max brake power	0.97	2800
mechanism efficiency [%]		
87		
mechanical efficiency [%]		
59		

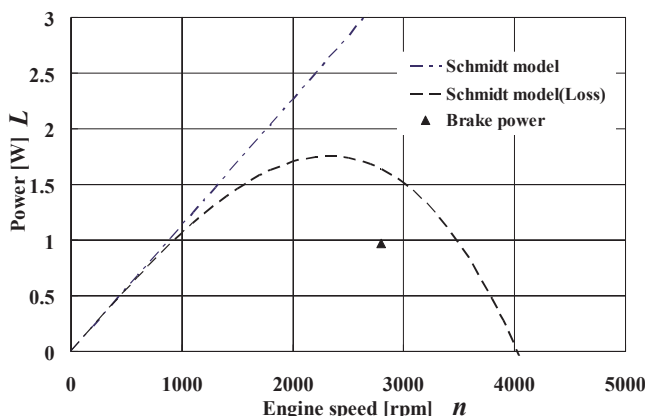


図9 Airpot型エンジン性能特性の解析結果

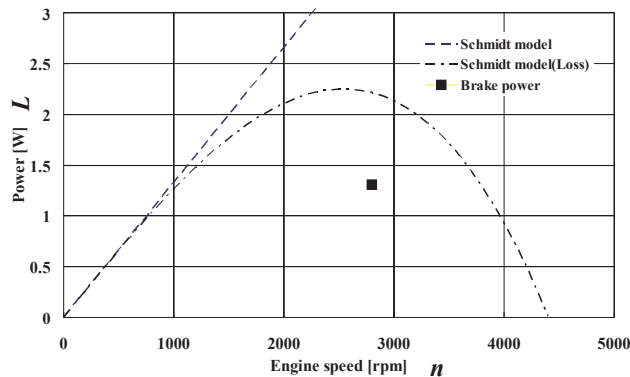


図 10 位相角 90° のAirpot型エンジン性能特性の解析結果

6. まとめ

本研究では、バイオマス焼却炉の熱源を用いる実用超小型スターリングエンジンの開発を目的とし、エンジンの選定及び、理論解析、実験・解析等を行った。実験結果より、供試エンジンの改良型であるAirpot型エンジンを開発した。本研究を通して次のことが明らかになった。

- (i) 実用超小型スターリングエンジンの開発を行う上で供試エンジンを流用することができる。
- (ii) 供試エンジンでは実験より、2100[rpm]で0.61[W]を得られるが耐久性に乏しい。
- (iii) 耐久性向上のためにAirpot型エンジンを開発した。Airpot型エンジンでは実験より、2800[rpm]で0.60[W]を得られ、教育用模型スターリングエンジンの実験と比較した結果、Airpotを用いることで耐久性が大きく向上すると考えられた。また、Airpotを用いることによってエンジン回転数が向上することから、エンジンの性能を総合的に向上させることがわかった。
- (iv) メカニズム効率を用いた軸出力の性能解析を行った結果、Airpot型エンジンでは2800[rpm]で約0.97[W]という結果が得られた。また、バッファ圧の上昇に伴い軸出力が向上する結果が得られた。さらに、ピストン位相角を $90[\text{deg}]$ とした場合、軸出力のシミュレーションでは1[W]以上得られた。

参考文献

- 1) 戸田 富士夫, 岩本 昭一: 低温度差スターリングエンジンの性能解析 (作動ガスの流動損失が図示出力に及ぼす影響), 日本機械学会論文集 第64巻 第619号 B編 別冊, (1998), pp.304-311.
- 2) 大八木 義教, 他4名: 低温度差スターリングエンジンの性能解析, 宇都宮大学教育学部教育実践総合センター紀要 第27号 別冊, (2004), pp.185-194.