

ソーラースターリングエンジンTNT-3に関する実験研究 (第1報; エンジンとベンチテスト)

Experimental Studies on Solar Stirling Engine TNT-3
(1st Report; Construction and Bench Test Results)

渡部 弘一*¹
Hiroichi WATANABE

一色 尚次*¹
Naotsugu ISSHIKI

大友 充弘*²
Michihiro OHTOMO

Abstract

A terrestrial solar Stirling engine "TNT-3" has been developed and studied by the authors. TNT-3 is a pressurized, single-cylinder γ -type Stirling engine, having a transparent glass head which receives the concentrated solar radiation and within which heat is generated at a copper wire mesh beam receiver.

TNT-3 has been designed following working experience of two earlier prototype. It has a larger regenerator and more heat transfer surface in the bayonet-type coolers than its predecessors. A double James Watt linear crank mechanism reduces side forces, and friction, whilst W-shaped piston rings reduce leakage.

The engine is rated at 1 kW and drives a newly designed Tokuno electric generator which has been developed for windpower applications. Two TNT-3 engines have been manufactured, of which one is a laboratory test model fitted with an electrically heated. This engine has produced 1 kW indicated power and 600 W shaft power by the room test.

The present paper reports the design philosophy, constructional features and bench test results of this engine. It was found that, for constant electrical heat input, the gas temperature at the hot cylinder end decreases with an increase in rotational speed, and further that there are discussed in this report.

It is concluded that TNT-3 is one of a well-developed, high-technology Stirling engine suited to solar and other heating sources.

Key words; Solar energy, Stirling engine, Watt linear crank mechanism, W type piston ring

1. はじめに

太陽エネルギーの有効利用法を探索することは、昨今の化石燃料依存から脱却しなければならない将来のエネルギー源として、欠かせない課題である。

筆者らは21世紀に目標をおき、数年以前より、高日照地帯の離島や村落において将来、簡易にソーラー発電ができ、1kWの出力を目標とする地上用ソーラースターリングエンジンによる発電の研究を行ってきた。このエンジンの開発の大きな特色は、石英ガラスをエンジンの頭部に有し、ソーラーディッシュで集光した太陽光線を透過させて内部の金網を加熱し、金網を通る作動ガスのヘリウムガスに熱を与えるという、独自の新加熱方式をとったことである。

この研究の前半の設備や計画の概要についてはすでに断片的に発表⁽¹⁾⁽²⁾しているが、このたびはとくにTNT-3型スターリングエンジン(以降TNT-3とする)についてその設計思想、ピストンの新直線運動機構、ガス漏洩防止策、ヒーター及びクーラーの新構造、高効率発電機等、数々の特色ある点について述べ、かつ

エンジンの性能向上のために太陽熱加熱に代えて電気加熱によりベンチテストを行った結果、この種のスターリングエンジンシステムの開発に有用と思われる多くの知見を得たのでここに報告したい。

なおソーラーディッシュおよびソーラー実験結果については第2報に示す。

2. TNT-3型スターリングエンジンの設計仕様と特徴

2.1 TNT型スターリングエンジン

TNTとは東北電力、日本大学、東北学院大学の三者の頭文字をとったものであって、出力1kWを目標として、1987年以来ソーラーディッシュ(以降ディッシュとする)の開発と同時に、研究を続けている一連のソーラースターリングエンジンを指すものである。

初期のエンジンはTNT-1型スターリングエンジン(以降TNT-1とする)で、問題点を改良しながらTNT-3の試作に至っている。図1には3種類のエンジンの変遷として、各エンジンの組立断面図を並べたものである。TNT型エンジンの設計方針を5項目挙げると以下の通りである。

- (1) 受熱器の効率を高くするために、太陽光線を直接透過して加熱できる石英ガラスヘッドを用いた。
- (2) エンジンの姿勢が広範囲に傾斜、または倒立させ

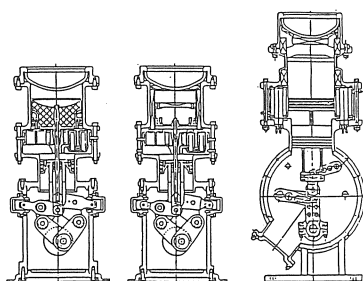
* 原稿受付 平成8年10月15日

*¹ 会員、日本大学工学部機械工学科(〒963 郡山郵便局私書箱第12号、郡山市田村町徳定中河原1番地)。

*² 会員、東北電力(株)研究開発センター(〒981 仙台市青葉区中山7丁目-2-1)

るので、オイルによる潤滑を不要のものとした。

- (3) 回転部分および摺動部は無潤滑油の機構とし、とくに摺動部は低摩擦力の直線運動機構とした。
- (4) 作動ガスにヘリウムガスを用い、クランク室加圧式とした。
- (5) 各部からの作動ガス漏洩防止のために、新素材を用いたガスシールやW形ピストンリングなどを取り入れた。



TNT-1 TNT-2 TNT-3

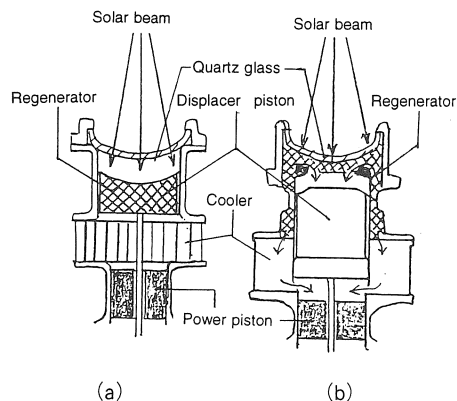
図1 TNT型エンジンの変遷

表1 TNT型エンジンの主要設計仕様

1. Shaft power	1kW (Engine power)
2. Thermal efficiency	Over 20%
3. Engine type	β type
4. Engine revolution	1000rpm
5. Engine head material	Quartz glass (130mmdia.)
6. Working gas	Helium gas

表1にTNT型エンジンの主要設計仕様を示す。エンジン型式はデッドスペースの少なく設計できる β 型の同軸ディスプレイサ型である。

TNT-1は図2(a)のように上下に移動するディスプレイサピストンそれぞれ自体の上部に受光金網と再生熱交換器用金網を入れて石英ガラスヘッドを通過した光束



(a) (b)

図2 太陽熱加熱方式

表2 TNTエンジン仕様

	TNT-1型	TNT-2型	TNT-3型
Power piston			
Bore $\times$ Stroke (mm)	ϕ 80 $\times$ 36	ϕ 80 $\times$ 36	ϕ 100 $\times$ 36
Displacer piston			
Bore $\times$ Stroke (mm)	ϕ 120 $\times$ 32	ϕ 96 $\times$ 36	ϕ 116 $\times$ 36
Working gas	He	He	He
Mean pressure(MPa)	1.572	1.572	1.572
Regenerator			
Volume (cc)	342	336	519
Surface (cc)	3,900	14,800	54,800
Dead volume (cc)	299	279	382
Void ratio	0.86	0.83	0.74
Heater			
Heating type	Solar	Solar	Solar/Electric
Temperature (K)	773	773	773
Surface (cc)	830	1,100	10,499
Dead volume (cc)	161	213	505
Cooler			
Cooling type	Bayonet Water	Bayonet Water	Bayonet Water
Temperature (K)	323	323	323
Surface (cc)	1,220	1,220	1,800
Dead volume (cc)	94	94	72

がその受光金網を加熱するように設計したものである。

この移動金網による受熱方式は構造上、全体として簡単に軽量のエンジンを造れるが、実験の結果、

- (1) ディスプレーサピストン自体が相対的に重くなりすぎるので機械損失が大きい。
- (2) ディッシュの焦点距離に比べてディッシュの直径が大きいほど太陽光線のエンジンヘッドへの入射角度が大きくなるので、受光金網がディスプレイサピストンとともに下死点付近に来ると太陽光線は受光金網から遠ざかり、シリンダー壁に散乱し金網が加熱されない。

等がわかった。

したがって TNT-1 を改良し、図 2(b) のように受光金網をガラスヘッドの内側に固定し、また再生熱交換器用金網もディスプレイサピストンから分離しシリンダーの外周に固定した TNT-2 型スターリングエンジン（以降 TNT-2 とする）とした。

TNT-2 は TNT-1 より出力が増加したが、もともと移動受熱型の TNT-1 を変更しただけのもので、再生熱交換器を通るガスの通路面積やクーラーの通路面積に制限があり、流動抵抗が大きいため出力に限度があることがわかったので、新規に始めから固定受光金網方式の TNT-3 エンジンを設計することとなった。

その際リニアクランクメカニズム、ピストンリング等も TNT-1 および TNT-2 よりさらに改良されたものが使用された。

表 2 に TNT-3 および比較のため TNT-1 および TNT-2 の仕様を示す。同表より TNT-3 は TNT-1 および TNT-2 に比べて再生熱交換器の容積を約 1.6 倍、金

網の伝熱面積を約 3.8 倍に増大したことが大きな改良点である。さらにヒーター部の受光金網の表面積を増大し、かつクーラーの伝熱面積を約 1.5 倍に増大しているように主に作動ガスの熱伝達の改良に重点をおいたことがわかる。

2.2 伝熱部の構成

2.2.1 石英ガラス製ヘッド

図 3 にソーラー用 TNT-3 の断面図を示す。本エンジンは最上部に図 4 に示すような皿状の石英ガラスを用いた。石英ガラスの高い圧縮強度を利用するため上面を凹にして納めている。ガラスの厚さは 5mm、入射光部直径 135mm、耐熱温度 1673K、ガラスの失透する温度は 1373K 以上（旭ガラス社製耐圧 4.8MPa）のものである。また筆者らによる油圧による耐圧試験では油圧が 3.53MPa まで充分耐えた。それ以上は取付フランジの部分から油が漏れだしたのでそれ以上の試験は中止した。

ガラスの取り付け方法は、SUS 製シリンダーヘッドと石英ガラスが接する面に耐熱耐圧用ガスシール（ニチアス[®]製グラシール）を挟み、充填したヘリウムガス圧力のみで密着させる機構であり、数日間以上の密封性があつた。

2.2.2 受光金網

石英ガラスの下方には固定した受光金網を収納した。この金網は TNT-1 型および TNT-2 型にはステンレス金網（100 メッシュ）を使用した。TNT-3 型に対してはステンレス以外に銅金網を使用し好結果を得た。

使用した受光金網については第 2 報の「ソーラーデイスシュによる発電実験」の図 4 に示す。またその実験結果と考察についても第 2 報に示した。

2.2.3 再生熱交換器

再生熱交換器に用いた金網は線径 0.1mm のステンレス線を袋状金網に編んだ後、さらにこの熱交換器の寸法に合った厚さ 10mm、幅 15 ～ 20mm の環状に圧縮成型して（NHK 社製商品名スプリングメッシュ）これを数段に重ねて使用した。外観を図 5 に示す。

このエレメントの流動抵抗は通常の場合に比べ 30 パーセント程度大きくなるが、極めて成形し易くかつ分解組立時のメンテナンスが容易である。また製作時の素線の太さと圧縮密度を調整できるので、エンジンの仕様に応じた成形ができるなどの特徴がある。

2.2.4 クーラー

作動ガスの冷却用クーラーは図 6 に断面図を示すように TNT 型エンジンの独特の設計でバヨネット形式をとっている。

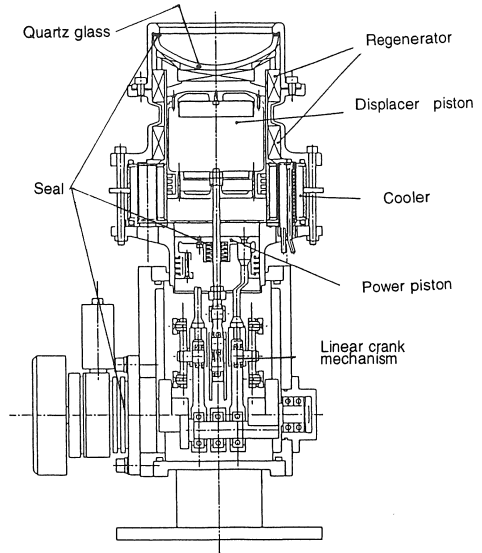


図3 TNT-3型スターリングエンジン断面図

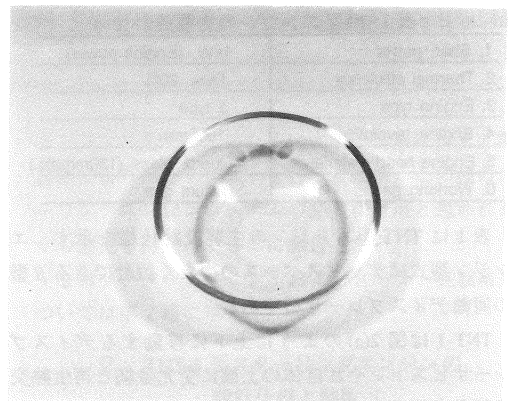


図4 石英ガラスヘッド

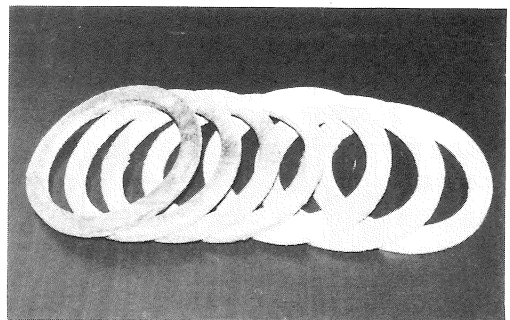


図5 再生熱交換器用金網

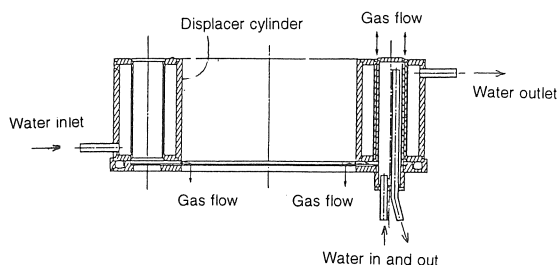


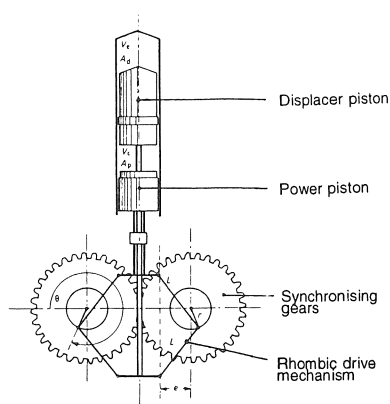
図6 バヨネット型クーラー

スターリングエンジンのクーラーとしては通常数百本の細管を使用するシェラントチューブ形式⁽³⁾が多いが、本形式は使用管の本数が十数本程度に少ないので加工上、溶接点が少なくかつ大小二本の管に切つてあるねじ山の径をわずかに変更することによって、環状空間のガス通路面積を自由に調整することができる。さらにガス通路部分の管表面に各種のねじを切ることにより、通路の相当水力直径や伝熱面積を増減することが可能であること等の特色を持っている。クーラーの材料には熱伝導性と溶接性の高い銅を使用した。

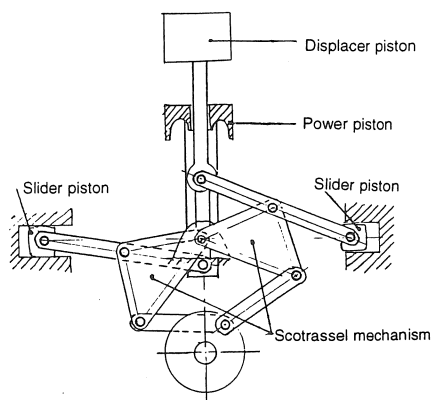
またこのクーラーをエンジン内につけての実験の結果、その流動抵抗は再生熱交換器に比べて十分小さく、かつ低温側温度は常時 50℃以下で冷却効果も十分であったので、TNT型エンジンシリーズではすべてにこのバヨネット型クーラーを使用した。

2.3 運動機構部の構成

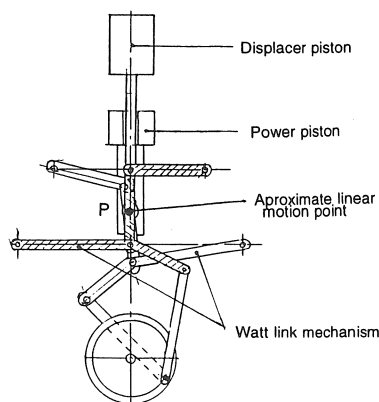
2.3.1 クランクメカニズム スターリングエンジンの p - V 線図は楕円形を示すので、行程の中心付近で最大の圧力差が生じ作用期間も長い。そのため従来のクランク型式ではピストンとシリンダー間の側圧力は極めて大きい。とくに無潤滑油で運転する場合、ピストンの摩擦をできるだけ軽減する必要があり、そのために摩擦の小さい回転リンクだけを組み合わせてピストンを直線的に動かすリニアクランクメカニズムが多く研究されている。たとえば図 7(a) のロンピックメカニズム⁽⁵⁾や図 7(b) のスコットラッセルメカニズムがある。(a) のロンピックメカニズムは二つのピストン間のデッドスペースを小さくでき、厳正直線運動をするが、機構は大変複雑で重くなる。TNT-1 および TNT-2 では同じく厳正直線運動をする (b) のスコットラッセル機構を試作して使用した。しかし (b) は実験の結果、全体が極めてコンパクトになる利点があるものの、わずかに揺動するスライダ端部の接触面に局部摩擦が生じた。これはスライダの移動量が極めて小さく（約 2mm）かつ高負荷であるのでその潤滑に



(a) ロンピック型



(b) スコットラッセル型



(c) ワット型

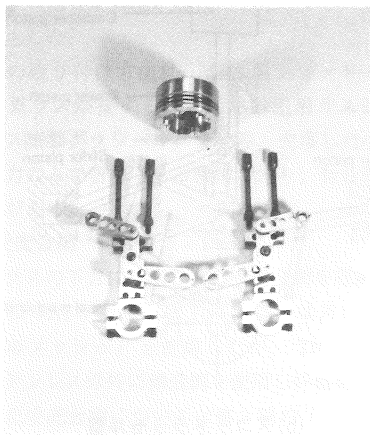
図7 クランクメカニズム

難点を生じたためである。

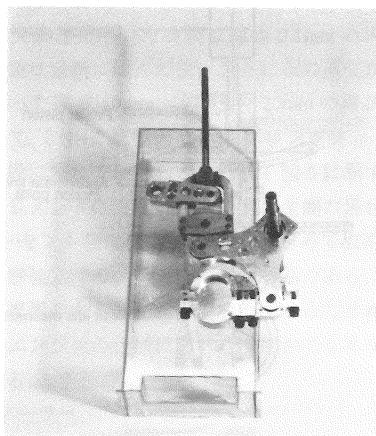
よって TNT-3 では図 7(c) に示すように、局部応力が大きくならないワット式近似直線運動機構を、パワーピストンだけでなくディスプレイサピストンにも使

表3 各種直線運動機構の特長

Type	Merit	Defect
Rohmbic mechanism	Strict linear motion	Complicate Large size Many parts
Scot Rassel mechanism	Strict linear motion Compact size	Exces of stress for links Large friction
James Watt mechanism	Simple size Aproximating linear motion	Many parts Heavy



(a)P.P.用



(b)D.P.用

図8 TNT-3エンジンのクランクメカニズム

用することとし、これを同軸上に運動する機構を開発した。近似直線機構であるワットメカニズムは計算によると⁽⁶⁾ TNT-3 型に用いた寸法では、図 7(c) 中央のリンクの P 点の左右のふれは約 0.003mm 以内で、運動は実用上全く直線的であることがわかり、かつ実用した結果異常は生じなかった。

表 3 に TNT-3 にこれらの直線運動機構の特長の比較を示す。図 8(a),(b) に TNT-3 に使用した両ピストンのクランク機構外観を示す。

2.3.2 ピストンリング、ロッドシール TNT-3 のピストンリングには図 9 に例を示すような W 型ピストンリングを使用した。これはリングの一部分に W 字状に交互に切り込み部を作っているエンドレスリングであって、このようなリングを二枚一組にして切り込み部を互いに 180 度ずらしてピストンに組み付ける。合い口がないのでヘリウムガスの漏れ量を少なく抑えることができる。

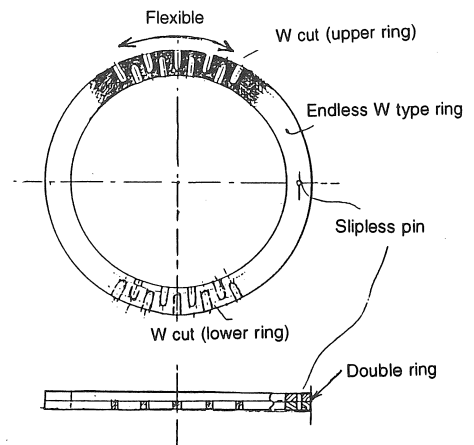


図9 W型ピストンリング

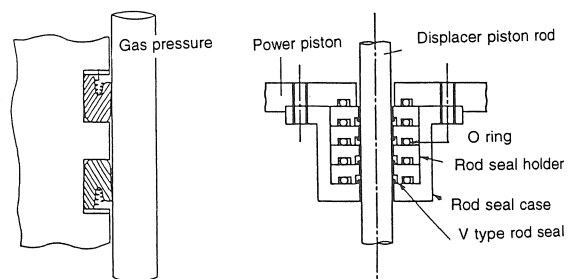


図10 ロッドシール

表4 諸ガスシールの種類

Quartz glass head seal	Glasseal plate
Cylinder head gasket	Glasseal plate
Piston ring	Wtype(Teflon + Carbon)
Rod seal	Teflon rip seal
Shaft seal	Carbon +tungsten carbide
Crank case seal	O ring

材質は潤滑油を使用しないため、乾性摩擦の小さいテフロンに機密性と自己潤滑を持たせるために約10%のカーボンを入れて試作し使用した。ピストンに組み込む際はリングを拡大してはめられないのでリング部構造は組立式とした。

ロッドシールはパワーピストン中央部を突き抜けてディスプレイサピストンを駆動するロッドの間からの作動ガスの漏洩を防止するもので、図10のようなV形リップシールを用いた。二本ずつシール広がり部分を反対向きに並べることで使用した。表4にエンジンに用いた諸シールの種類を示す。

2.3.3 メカニカルシール TNT-3のクランクケースは内部に高圧ヘリウムを密封するため、動力軸の貫通部にはガスシールを必用とする。シールとしては図11に断面を示すようなメカニカルシールを使用した（タンケンシールセーコウ社製）。

これは回転するカーボンリングと静止したタングステンカーバイドリングの突き合わせ面でガスを密閉しようとするものであり、一般にも使用されているが本機に対しては、クランク室内加圧による摩擦を減少させるために、特別に接触シール面のバランス比（シール部全接触面積とバランスラインより高圧側の部分の面積の割合）を0.5に十分近く（0.51）することによって接触面に作動する平均接触圧力を下げている⁽⁶⁾。

またメカニカルシールの発熱を除去するためにその周辺はシール油を入れておく必要があるため、オイルを入れないドライな主クランク室とメカニカルシールのある部屋とはリップシールで分離し、シール油は図11のように上方の小型オイルタンクより下方に入るようにして、そのオイルタンクの上方は細いガス管によって主クランク室と連通した。

また本機は姿勢が上下反転するソーラー用であるので、その小型オイルタンクの位置は自由に軸を中心として回転させ、最適位置に取り付けた。

3. TNT-3のベンチテストとその結果

3.1 実験装置および実験結果

3.1.1 電気加熱ヘッド TNT-3のベンチテストは、シリンダ内に細い多数の電気加熱用シース線を挿入し

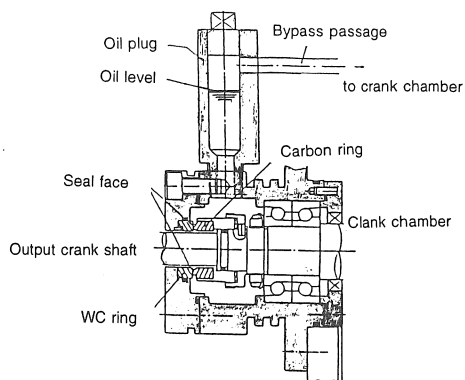


図11 メカニカルシール

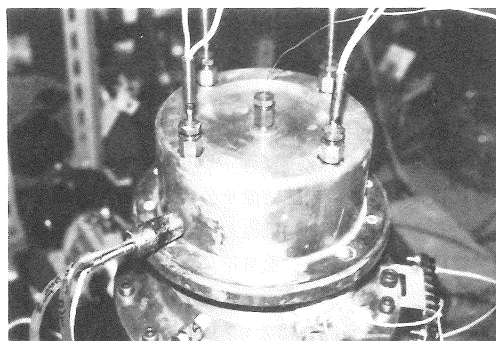


図12 電気加熱ヘッド

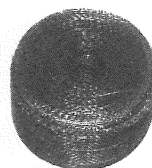


図13 加熱ヘッドセンターメッシュ

て加熱する方法で行った。電気加熱による試験は、太陽熱による駆動試験の予備実験として位置付け、太陽による供給熱量も安定した天候の下では一定であることから、太陽熱とはほぼ同じ熱量を入力できるようにした。入熱量は変圧器で0～6kWまで変えられる。その試験のためTNT-3に対してステンレス製の電気加熱用ヘッドを試作した。

電気加熱ヘッドの外観を図 12 に示す。電気加熱線はヘッド上部の外側の 4 カ所より内部に挿入し、コイル状に巻き束ねてヘッド内に入れ、中心部に生じた空間には図 13 のように円柱状に巻いたステンレス金網（外径 70 mm、高さ 50 mm）を装てんし、デッドスペースの低減を図った。

なおこのような電気加熱線とステンレス金網は総合して、ガラスヘッドと受光金網によるソーラー加熱のときの形状と伝熱面積およびデッドスペースが同等であるようにしたのもであり、それまで TNT-1 および TNT-2 に対して行ってきたプロパンガス燃焼による加熱方法よりも実際に近く、かつ入熱量の正確な計測ができる。

また、作動ガスが加熱ヘッドとシリンダー内部との間を移動するとき、必ず加熱空間に導かれるように、ステンレス製ガスガイド片を取り付けた。

3.1.2 発電機 本実験のように 1kW の出力で、回転数が 1000rpm 以下において高い効率を生ずる発電機は市販のものでは少ない。たとえば自動車用発電機は 4000rpm 付近では効率がよいが本エンジンで使用するには 4 倍以上の増速装置を必要とするので機械損失が大きくなる。我々は低出力、低増速比で効率の良い発電機を求めた結果、風車用発電機として高効率発電機を開発している鷹羽絨製の徳納式発電機⁽⁷⁾に注目し、同社と共同開発により図 14 に示すような発電機を試作しそれを接続した。性能試験で本機は 2000rpm 以上で発電効率は $\eta = 85\%$ であった。

TNT-3 の最大出力は 750rpm 付近に生じるので増速比は 2.7 倍とした。

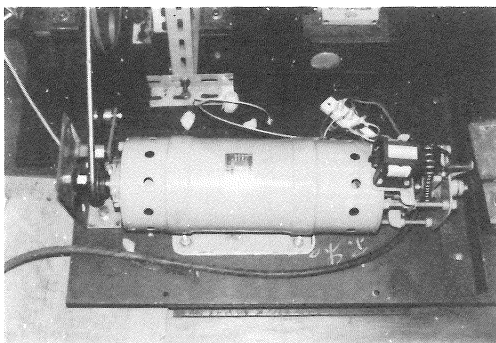


図 14 徳納式発電機

3.1.3 測定系 図 15 には電気加熱による運転試験装置の測定系の配置図を、図 16 にはその外観写真の一例を示す。

エンジン内部にヘリウムガスを 11.7MPa から

1.57MPa の範囲で充填し、電気加熱により 3.0kW から 3.5kW を入力した。高温部ガス温度が約 473K（200℃）以上を示した後、スタート用モーターで始動して、

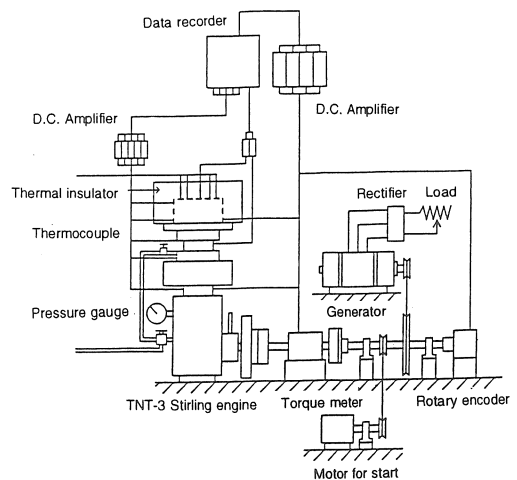


図 15 エンジン性能試験ブロック図

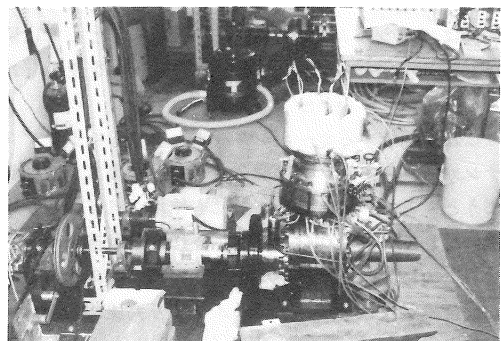


図 16 TNT-3の電気加熱実験装置

自立運転後モーターを切り離し、発電機に電氣的負荷を加えて出力性能を測定した。測定項目は高温および低温部のガス温度およびガス圧力、再生熱交換器内部温度、エンジンのトルク、発電機出力等を測定した。

3.1.4 実験結果 図 17 に TNT-3 の p - V 線図の一例と、図 18 は電気加熱による性能試験結果の一例を示す。試験条件は、入熱量 3.5kW、作動ガスヘリウムの充填圧力は 1.57MPa である。

これを見ると、高温ガスの温度は回転数が上がるほど低下する傾向を示している。図示出力および軸出力はある回転数において最大値を示し、図示出力については回転数が約 1,000rpm で約 800 W を、軸出力については約 750rpm で 584 W を得た。

3.1.5 ベンチテスト結果の考察 以上のように幾多

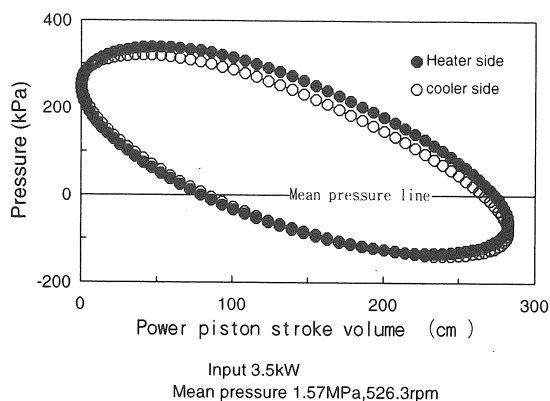


図17 p-V線図の一例

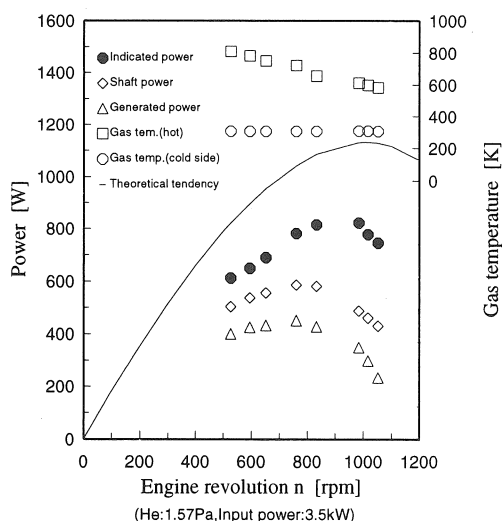


図18 電気加熱による性能試験結果

表5 TNTエンジンの性能比較

	TNT-1	TNT-2	TNT-3
Indicated power	----	190W	867W
Flow loss	----	----	86W
Shaft power	10W	80W	585W
Generated power	----	----	470W
Mechanical eff.	----	0.45	0.749
Quantity of cooler	800W	1,007W	1,941W
Engine revolution	350rpm	450rpm	759rpm

の改良と思われるものを施して TNT-3 のベンチテストを行った結果、表5に示すように性能向上を得ることができた。TNT-1、TNT-2はいずれも加熱方法はヘッドをガスフレームによる加熱で作動ガス温度は623Kであったのに対して、電気加熱ではガス温度720K、図示出力約800Watt、軸出力約600Wattで飛躍的に増大し目標とする1kWにかなり近づくことが

できた。

以上の結果として、TNT-3に関し以下の考察が得られた。

- (1) 太陽熱加熱と同様に、入熱量が一定の際は加熱部ガス温度が回転数とともに減少し、そのためある回転数において出力に最大値を生ずる。
- (2) 上記の理由はスターリングサイクルにおいては、行程容積と平均圧力が等しく、同一圧力比、同一容積比の理論等温膨張過程における二点間に必要な1サイクル分の熱量は、熱力学第一法則により回転数および温度に無関係に一定である。しかし、実際上回転数 n を上げると必要熱量は n に比例して増大するが、加熱器としての受光金網の熱伝達率は n に比例して増大しないので、その伝熱に必要な温度差は n の増大とともに増大し、よって受光部表面温度が一定であっても中の作動ガスの温度が低下するからである。
- (3) 図示出力の極大点について、スターリングエンジンのp-V線図を楕円形と考えた楕円近似式⁽⁶⁾⁽⁷⁾の、理論出力 P_{th} は温度比の関数となり、

$$P_{th} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right) \frac{1}{1+2a} P_m V_m \frac{n}{60} \quad (1)$$

$$= C_B P_m V_m \frac{n}{60} \quad (2)$$

で表される。

ただし、

T_H ：高温側ガス温度、 T_C ：低温側ガス温度、 p_m ：作動ガス平均圧力、 γ ：温度比（ $=T_H/T_C$ ）、 a ：デッドスペース比（全デッドスペース/全ピストンの行程容積）、 V_m ：有効膨張容積、 C_B ：ビール常数⁽⁸⁾

上式に実測値の高温側ガス温度 T_H を入れると図16の実線のようになり、極大値が生じることが容易に解る。それは実測の図示出力曲線の傾向に近い。

- (4) また、軸出力については回転数の増大により、流動損失と機械損失が増大するために出力の最大値はより低い回転数域に現れる。
- (5) また TNT-3 のスターリングエンジンとしての性能は、図示熱効率率は約25%、正味熱効率率は約17%と低いので未だ多くの損失について探求してそれを修正する必要がある。
- (6) TNT-3 のベンチテストによるエネルギー収支は表6の通りで、機械損失と流動損失が大きいことがわかる。これは無潤滑で摺動するピストンリング、ロッドシール等の摩擦力の影響が大である
- (7) TNT-3 の無負荷起動時は高温側ガス温度がわずか

200℃程度で十分に自力スタートした。運転中の騒音は極めて静粛であること等によりワット機構その他の多くの改良が成功したことを示した。

表6 TNT-3のエネルギー収支(%)

Input energy	100.0
Indicated power	33.3
Shaft power	16.7
Mech. & Flow loss	8.1
Cooling loss	59.0
Other loss	7.7

4. おわりに

筆者らは小型ソーラースターリングエンジンを研究してきたが、その内のエンジン本体について TNT-1, TNT-2 と進めた後、それらの持つ欠点を改良して TNT-3 を製作した。

これは単気筒、ヘリウム加圧密閉型のエンジンで上方に本来ガラスヘッドより受光する加熱部を持ち環状の再生熱交換器およびバヨネットクーラーを有する β 型スターリングエンジンである。

またピストンのサイドスラストを減少させるため新しくワット型近似直線クランク機構を用い、ピストンリングとしては漏れの少ない新形式 W 形リングを使用した。

このエンジンの性能を知るため、実験室内において電気加熱ヘッドによるベンチテストを行った。その結果エンジンは極めて静粛に運転され、入熱量 3.5kW のばあい、ヘリウム充填圧力 1.57MPa、高温側ガス温度 720K、エンジン回転数 670rpm のとき最大軸出力 584W、発電機出力 470W を得た。

これらは目標値の 1kW には達しないが TNT-1, TNT-2 に比して格段の改善を示した。

またソーラーの場合と同様に、一定の熱入力で運転した場合は回転数の増大とともに高温ガス温度が減少し、他の影響も含めて出力はある回転数で最大を示すことが顕著に示された。

以上のようにこの TNT-3 型スターリングエンジンはまだ不十分な点が多いが太陽熱加熱ばかりでなく、任意の熱源にも対応できる本格的な高圧スターリングエンジンの一つとして開発できたものと思われる。よって以上の TNT-3 の開発との実験による多くの知見をここに示してソーラースターリングエンジンの今後の開発へ資するものとした。

参考文献

- (1) 渡部(弘), 一色, 安戸, 渡部(國); 「地上用ソーラースターリングエンジンの研究開発例」, 太陽エネルギー, Vol17,

No4, pp21-28(1991).

- (2) 一色, 渡部; 「地上用ソーラースターリングエンジン論」, 太陽エネルギー, Vol17, No.4, pp3-8 (1991)
 (3) 一色; 「ソーラーエネルギーは不滅である」, 太陽エネルギー, Vol.21, No.4, pp29-34 (1995).
 (4) 一色; 「自然エネルギーの詩」, 太陽エネルギー, Vol.18, No.4, pp2-9 (1992).
 (5) I. Urieli, D. M. Berchowitz; 「Stirling Cycle Engine Analysis」, 1984, p39-43, Adam Hilger, Bristol.
 (6) 渡部, 一色, 大友, 他 2; 「ソーラースターリングエンジン TNT-3 の設計・開発」, 日設計論, 1992.
 (7) 一色; 「スターリングエンジンの開発」, 工業調査会, (1983).
 (8) Beale WT, Wood JG and Chagnot BJ; 「Stirling Engine for Developing Countries」, 15th IECEC Seattle, 1980.