

模型スターリングエンジンの試作

遠山 壽

1. はじめに

1816年にロバート・スターリング牧師によって発明された熱空気エンジンは、内燃機関に使用するガソリン、軽油、プロパン、水素などの爆発的に燃焼するものはもちろんのこと、他の可燃性のもはすべて燃料として使用できる。ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンは内燃機関の燃焼のため、一酸化炭素(CO)、炭化水素(HC)、窒素酸化物(Nox)の排出される量が問題となることが多い。しかし、スターリングエンジンの燃焼は外燃機関で大気圧の燃焼室となるので前者2つの汚染物質に関しては非常に少ない。また、爆発燃焼ではないので静かである。作動ガスの漏洩防止や耐熱材料、出力当たりの重量などの問題点はあるが、環境問題がクローズアップされる中で見直されている。しかし、一般的にはあまり知られていない。そこで、比較的簡単に製作できる模型のスターリングエンジンができれば、熱が仕事をするのが実感でき、基礎工学の学習教材として意義あるものと考えられる。

本稿では、スターリングエンジンの作動原理の簡単な紹介を述べ、資料^{1),2)}を参考に試作した単シリンダ形の1号機(図1)、2シリンダ形の2号機(図2)の加工と組立の問題点を報告する。

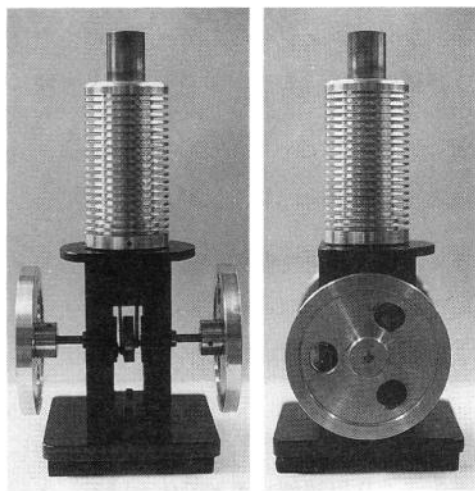


図1 単シリンダ形

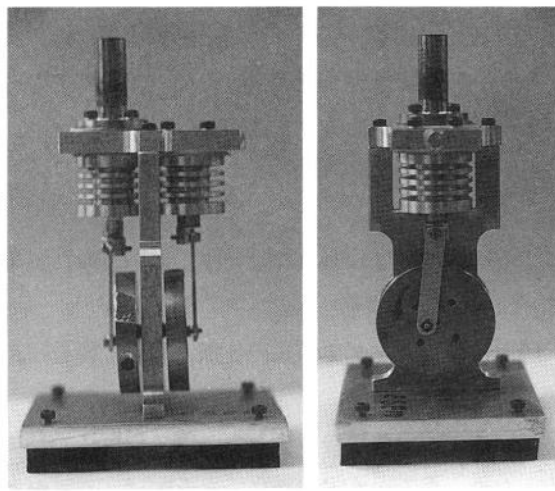


図2 2シリンダ形

2. スターリングエンジンの作動原理

作動原理^{1)~3)}は、図3に示すように作動ガスが加熱すると膨張し、冷却すると収縮する性質を利用している。図3に示す②から③の工程では、高温側ピストンは下に、低温側ピストンは上に向

って動く。内部のガスは低温側から高温側へ移動する。さらに加熱するためガス温度の高い空間が大きくなり、内部の圧力は上昇する。③から④の工程では、加熱で圧力が高まったガスがピストンを押し下げる。その時に出力軸を回転させる。

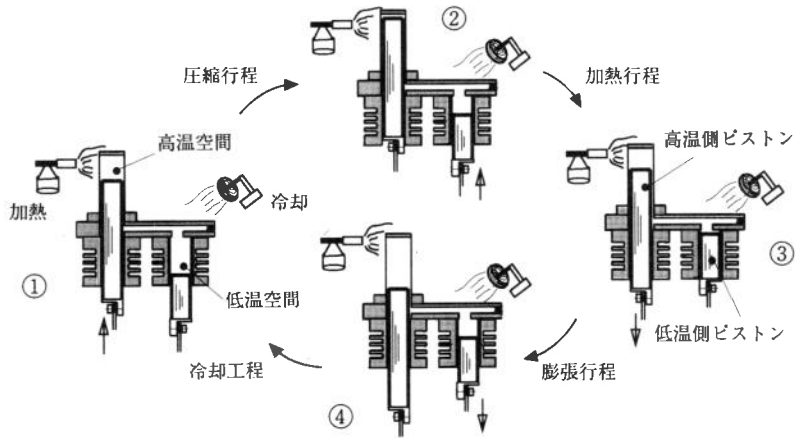


図3 スターリングエンジンの作動原理

そしてエネルギーの一部をフライホイールに貯える。④から①の工程では、貯えたエネルギーを使い、高温側ピストンは上に、低温側ピストンは下に向って動く。その結果、内部のガスは高温側から低温側へ移動し低温の空間が大きくなり、圧力は低下する。①から②の工程では、圧力低下したガスがピストンを引き寄せると、フライホイールに貯えたエネルギーによって両方のピストンを上昇させる。

このようにスターリングエンジンは、2つのピストンにおける90度の位相差が容積変化を誘起し、連続的に加熱、膨張、冷却、圧縮を繰り返している。なお、エンジンのスタート時は、フライホイールの慣性力を利用するので、作動ガスの占める容積が加熱により増加するような方向に回転させる必要がある。

3. 模型スターリングエンジンの試作

主要部品の加工においては、卓上ボール盤、汎用フライス盤、汎用旋盤と手仕上げで加工した。

3.1 単シリンダ形

表1に単シリンダ1号機の仕様、図4に構造図、および図5に部品構成図を示し、試作上での問題点を述べる。

加熱器は、耐熱性のステンレス鋼で難削のため切れ味の良いバイトを使う。肉厚を約0.5mmにするため、なるべくドリルにて穴を広げ、わずかの肉厚を穴くり用超硬バイトで仕上げる。ネジ部はメネジ側がアルミの上にピッチが細かいので、現合(現物合わせ)をする際、食いつき易い

表1 試作1号機(単シリンダ形)の仕様

形式	ピストン・ディスプレイサ方式
作動ガス	空気
冷却方法	自然空冷
封入圧	1気圧
全長	100mm
全高	235mm
全幅	126mm
ディスプレイサ径×ストローク	φ19.4mm×18mm
パワーピストン径×ストローク	φ20mm×11mm
位相角	90°
フライホイール径	φ84mm
パワーピストン	黄銅
クランクケース	FC20
ディスプレイサ, フライホイール シリンダ, コンロッド	アルミ合金
その他	鋼材

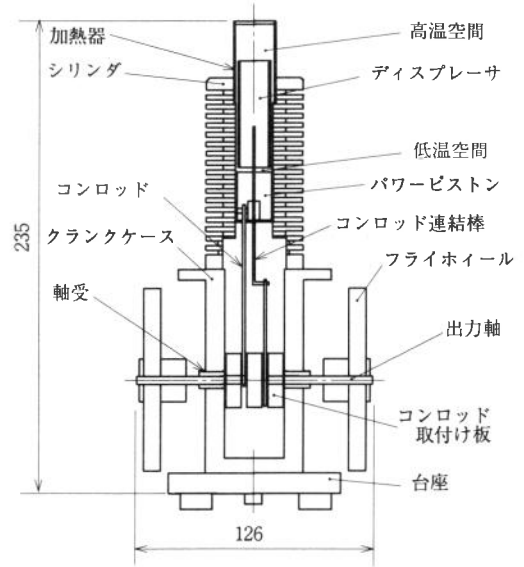


図4 単シリンダ形の構造

(カシる)ので注意する。

シリンダはアルミなので加工しやすい。問題となるのは、メネジの旋盤加工である。フットブレーキを有効に使い、ネジ切りの速度を十分に落とす必要がある。冷却フィンの溝加工はシリンダの内径が同じでないでフィンの溝深さを取りすぎないようにする。なお、頭部溝加工は熱源に近いので、冷却効果が少ないと考え加工しなかった。

パワーピストンは、アルミと熱膨張率の差が少ない黄銅を使用した。黄銅なので切削しやすいがシリンダとの摺動部は加工精度が高く要求される。穴加工は寸法的に切削しにくいのでシリンダ側を先に加工すべきである。切れ味の良いバイトで少しずつ切削し現合する。

ディスプレイサは、シリンダ側と0.3mm程の隙間があり、精度は要求されない。

クランクケースは、旋盤、フライス盤、

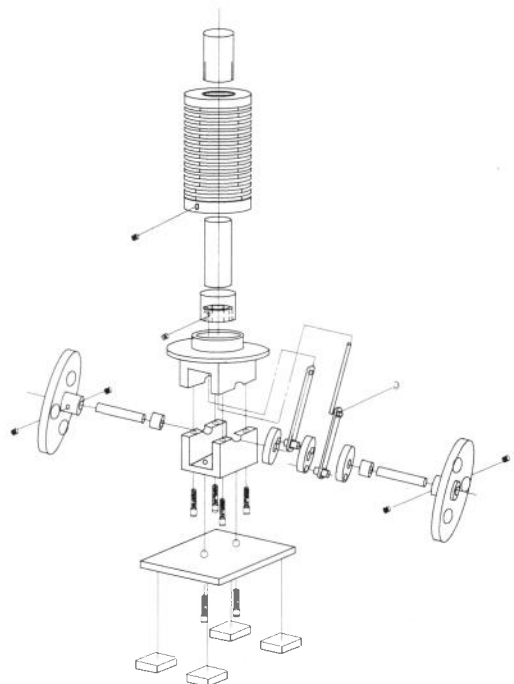


図5 単シリンダ形の部品構成図

卓上ボール盤で加工する。材料はねずみ鑄鉄を使用した。切削性は良いが製品の角が壊れやすいので落下などに注意する必要がある。加工の順序としては、上下を切り離す前に締付けボルト用の穴をあけ、切り離した後で4本のボルトで締め、軸受用の穴を加工する。そして、最後にどちらか一方の締めつけ部の面をわずかだけ切削すれば、軸受け部を固定できる。

コンロッドは、肉厚が薄いので切断機で切断し、ケガキをして穴あけする。コンロッドの先がパワーピストンの溝底に当たらないように手仕上げ加工する。

コンロッド取付け板は3枚必要であるが、3枚にする前に割出し用チャック(図6)を付けたフライス盤で偏心部の穴をあける。この際、ディスプレイサ側とパワーピストン側では機構上穴あけの位置が少し違うので注意する。最後に旋盤で軸受け用の穴をあけた後3枚に切断する。

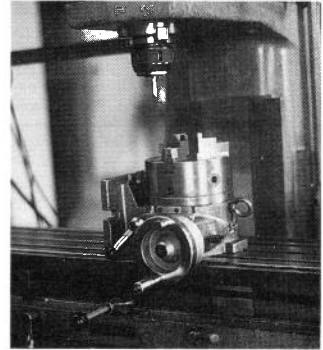


図6 割り出し用チャック

フライホイールは加工し易いアルミとした。フライホイールはある程度重いほうが慣性力が働くので、肉厚を厚くした。出力軸の固定は2本の止めネジを使用した。

以上、加工上の問題について述べた。次に、組立について述べる。

加熱器とシリンダの接合は、液状のシリコン系ガスケットを使用して作動ガスの漏れを防ぐ。完全にシール効果が得られるのには3日間を要する。

ディスプレイサと連結棒の接合は、まず、連結棒がパワーピストンの穴をスムーズに摺動するようにする。そして、作動部全体を組み立てた後にストロークを調整して最後に瞬間接着剤で接合する。

パワーピストンとコンロッドの組立で特に注意するのは、接合するピンが絶対に外周に出ないように少し短くすることである。

コンロッド取付け板の3枚は、位相差をつけた偏心の穴があいているためコンロッドとの組立が難しい。試作では、Vブロックを使った(図7)。クランクピンの一方をまず接合しコンロッドを差し込んだ後、中間の板を接合する。そして、もう一方も同様にピン、コンロッド、コンロッド取付け板の順に組付ける。その時、瞬間接着剤がコンロッド側に付かないように注意する。

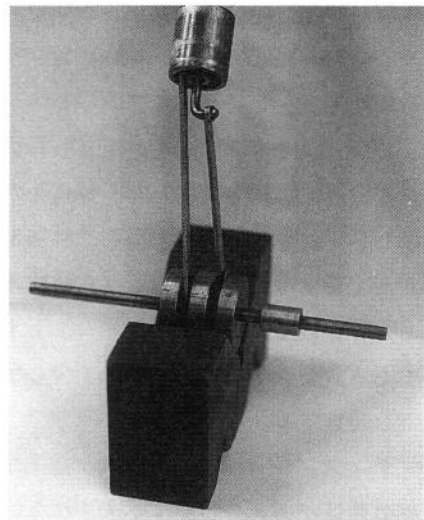


図7 Vブロックを使用しての組付け

3. 2 2シリンダ形

表2に2シリンダ形2号機の仕様、図8に構造図、および図9に部品構成図を示し、試作上での問題点を述べ

表2 試作2号機(2シリンダ形)の仕様

形式	α 形スターリングエンジン
作動ガス	空気
冷却方法	自然空冷
封入圧	1気圧
全長	80mm
全高	165mm
全幅	100mm
ピストン径×ストローク	$\phi 10\text{mm} \times 8\text{mm}$
位相角	90°
フライホイール径	$\phi 48\text{mm}$
ピストン, シリンダ材質	ガラス(注射器)
加熱器	ステンレス
フライホイール	黄銅
その他	アルミ合金

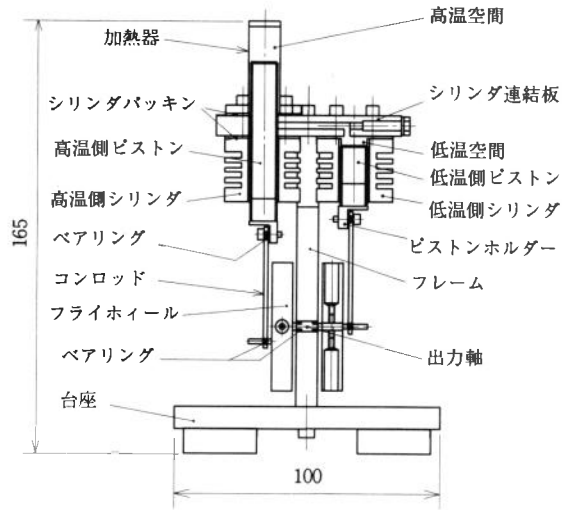


図8 2シリンダ形の構造

る。2シリンダ形は、高速回転になるので加工精度を高くする必要がある。

加熱器のつばの部分の穴あけは、割出し用のチャック(図6)を使用し正確に割出しをする。

シリンダ連結盤はケガキを正確に行い、フライス盤、ボール盤で加工する。加熱器と連結盤、そして、シリンダ部のネジ穴が正確に合う必要がある。直径3mm程度の穴になると、ケガキとポンチ打ちを正確に打たないと位置が狂うので注意をする。

シリンダカバーの内径は、ガラス製の注射器の形状が一様でないので現合になる。

ピストンに使う注射器はもろいのでチャッキングできない。そこで、青陶砥粒のグラインダーのコーナーを使い所要の寸法より少し多めに切り、研削して長さを出す。研削を急ぐとガラスは薄いので割れて

しまう。注射器はピストンとシリンダがセットであるので、一方が割れると使えなくなる。なお、研削によって生じるバリは内側、外側ともペーパーを使って滑らかにする。

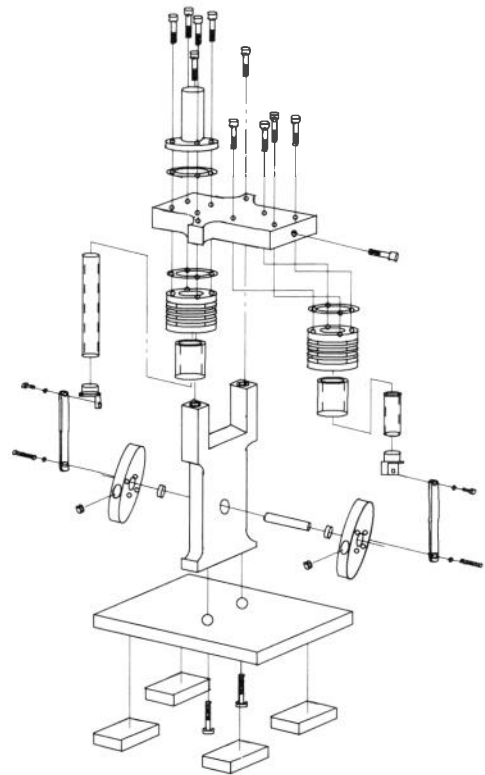


図9 2シリンダ形の部品構成図

ピストンホルダーと注射器の内筒(ピストン)との現合は、きつすぎるとエンジン回転中の加熱時に、ピストンホルダーの膨張でガラスが割れる恐れがあるので注意する。コンロッド取付け部は、割出し用チャック(図6)を横向きに固定して使用し、取付け部の切削と、ネジ下穴をあける。

フライホイールは、肉厚が薄くチャッキングが難しいのでジグが必要である。まず、仕上げ寸法を残して旋盤加工した後、フライス盤でジグ取付け用の穴と、コンロッド取付け用ネジの偏心穴をあける。そして、ジグにネジで固定後、ジグ側を旋盤にチャッキングして端面、外面を仕上げる。最後に、出力軸の穴を中心にあける。

以上、加工上の問題について述べた。次に、組立について述べる。

シリンダカバーとシリンダの接合は、液状のシリコン系ガスケットを使い漏れないようにシリンダの外周全体につける。シリンダの内面には、ガスケットが付かないようにする。乾いてしまうと取れなくなるので、付いた時は拭き取っておく。

ピストンとピストンホルダーの接合は瞬間接着剤を使う。ホルダーの端面があたるまで差込む。その際、接着剤がピストンの外周に付かないように注意する。

ピストンとシリンダの組付けは、ピストンの動きをスムーズにするため研磨剤(ピカール)で擦り合せをする。この際、無理をして割らないように注意をする。擦り合わせの後、研磨剤はティッシュペーパーできれいに拭き取っておく。なお、水、油等が付くと摩擦が大きくなるので、潤滑のつもりで付けないようにする。

4 ま と め

模型スターリングエンジンを試作した結果、基本的な工作機械であるボール盤、旋盤、フライス盤があれば製作できることを確認した。また、フライス盤に取付けた割出し用のチャックが、ボルト穴加工の位置決めや、偏心穴の加工に大変役立った。教育上学生が機械加工する場合に問題となるところは、単シリンダ形では加熱器とシリンダの旋盤によるネジ加工、パワーピストンとシリンダの現合、パワーピストン部のコンロッド取付け溝の加工である。2シリンダ形においては、シリンダ連結板の正確なケガキ作業、シリンダカバーとシリンダの現合、ピストン(ガラス製注射器)の加工、そして、ピストンホルダーのフライス加工である。組立では、単シリンダ形は、コンロッドとコンロッド取付け板の組付けである。2シリンダ形では、シリンダカバーとシリンダ、シリンダとピストンの擦り合わせ等の組付けである。

教材として開発されているのは2シリンダ形が多い。しかし、単シリンダ形は、ベアリングや注射器を使わなくても製作できる。また、シリンダを簡単にはずせることでディスプレイサとパワーピストンの位相差による動きを見ることが出来る。さらに、壊れにくい点を考えると取り扱い易いので、初歩の教材として適していると考えられる。なお、今回試作したエンジンの回転数は、無負荷の場合、単シリンダ形が最高1470rpm、2シリンダ形が最高2890rpmであった。また、単シリンダ形で測定した出力は0.36Wであった。今後は、製作し易い単シリンダ形エンジンの開発

と、利用法を検討していきたい。

おわりに、本稿をまとめるに当たり、ご協力頂いた本学の諸先生に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 兵働 努・米田 裕彦：スターリングエンジンの生い立ちと原理，パワー社，P61-69，(1990.3)
- 2) 松尾政弘他3名：教材用ミニスターリングエンジンの設計・開発，設計・製図 26-1，P38-45，(1991)
- 3) 佐賀直治・植木政則・浜口和洋：模型スターリングエンジンを用いた設計・製作教育<その3 加工実習教育>，技能と技術，29-5，P51-55，(1994)