

# 模型スターリングエンジンをを用いた設計・製作教育

北海道職業能力開発短期大学校

植木 正則・浜口 和洋・佐賀 直次

Education of Design & Production Using Model Stirling Engines

Masanori UEKI・Kazuhiro HAMAGUCHI・Naotsugu SAGA

## 要約

機械システム系には、設計・加工関連科目として、基礎製図、機械製図、CAD演習、機械加工実習が標準的に設けられている。これに加えて、生産技術科には、機械設計製図、機械加工実習Ⅱ、数値制御加工実習Ⅰ・Ⅱ、CAD/CAM演習といった教科も設けられている。当科では、これら設計・加工関連科目を有機的に結び付ける教材として、模型スターリングエンジンを取り上げ、その設計製作課題「模型スターリングエンジンの設計・製作」を、2年生の前期に実施したので、その実践例ならびに成果を報告する。

## I はじめに

職業能力開発短期大学校においては、多くの基礎科目や専門科目の教育訓練を行うが、各科目間のつながりが学生にとって明確でなく、学習意欲をそぐ結果になる場合もある。その解決には、ある時期に各科目間の関連性を明確にさせて指導する必要がある。

入学した学生の卒業までの教育訓練は、次の三段階に分類される。

- ①基礎教育訓練：専門系基礎科目の教育訓練
- ②総合教育訓練：①段階のまとめ
- ③応用教育訓練：基礎学力の再確認、最先端技術、卒業研究など

特に、②段階においては、①段階の教科目の重要性、興味、そして③段階の専門分野へ進む目的の明確化を教育訓練する必要がある。しかし、本校における②段階に相当する設計と加工関連教科の教育訓練は、従来、両教科を有機的に結び付ける教材を使用せず実施していた。この原因として、手ごろな教材を見いだすことが出来なかったことが主因であるが、授業時間数、予算、機器の数量などの諸問題による制約も挙げられる。この結果、各教科の教育訓練は、講師主導にならざるを得ず、学生にとって各教科の結び付きや興味を誘起する教育訓練になっていなかった。

この解決のため、本校生産技術科では、2年生のⅢ期に設置されている設計・加工関連教科の共通教材に、

「模型スターリングエンジン」を選び、その設計と製作を実施した。模型スターリングエンジンを選んだ理由は、次のとおりである。

- ①「動く」作品を自ら設計製作することにより、関連教科に対する興味を誘起させることができる。
- ②設計に際して、熱力学、材料力学、機械力学、工業材料、設計工学など多くの基礎科目の知識が必要になる。
- ③同じ設計条件でも、設計の自由度が高く、学生の創造性を引き出すことも可能である。
- ④製作にあたり、汎用旋盤、フライス盤、ボール盤、NC旋盤、MC、CNCタレットパンチプレスなど多種多様な工作機械が使用できる。

## II スターリングエンジンの概要

このエンジンは、1816年にスコットランドの牧師であったロバート・スターリングにより発明された密封空気を外部より加熱・冷却することにより軸出力が得られる熱空気エンジンにその源を発する。その当時隆盛であったレシプロタイプの蒸気エンジンにボイラ事故が多発したため、大気圧空気を作動ガスとしたスターリングエンジンの原型になる熱空気エンジンが実用化され、約3000台が製作されている。しかし、内燃機関の登場により熱効率および重量当りの出力の低さからその姿を消していった。ところが現在、このエンジンが再び注目されている。その理由を列挙すると次のよ

うになる。

- ①理論的にカルノーサイクルと等しい高い熱効率。
- ②外燃機関であるため熱源を選ばない。
- ③連続燃焼であるため排気ガスがクリーン。
- ④振動・騒音が低い。

すなわち、地球環境に優しいエンジンである。しかし次のような問題点もある。

- ⑤重量・容積当りの出力が低い。
- ⑥サイクルを構成する上で不可欠な熱交換器の材料費・加工費が高価。

本エンジンは現状では内燃機関に代わることは難しいが、その研究開発は盛んである。実用化されている技術には、太陽熱駆動揚水ポンプ、海中作業船用の動力源があるが市民権を得るには到っていない。しかし、本サイクルを利用した極低温冷凍機は、液体窒素生成装置、超高真空を得るためのクライオポンプ、赤外線カメラの画素子冷却などにすでに利用されている。

### III 設計・製作教育の流れ

#### 1. 授業教科と教育訓練内容

生産技術科の学生は、1年生において、基礎製図、機械製図そして機械加工実習Ⅰといった設計・加工関連の教育訓練を終えている。1年生における設計教育は、JIS通則の理解が主であった。したがって、2年生にとって、模型エンジンの設計が設計計画から出図までの流れを初めて経験する課題である。この課題は、Ⅲ期に設置されている機械設計製図ならびにCAD演習教科により実施した。1年生における機械加工実習Ⅰは、汎用工作機械のみの実習であった。2年生においては、汎用機に加えてNC旋盤、CNCタレットパンチプレス、MCなどの数値制御加工も行う必要性から、模型エンジンの製作実習を通じて機械加工実習Ⅱと数値制御加工実習Ⅰを実施している。このように、本課題の設計から製作までの実習に関連した教科は4教科である。ただし、各教科とも半期2コマ/週、100分/コマであるが、4教科でトータル8コマ(2日)/週として、機械設計製図→CAD演習→機械加工実習Ⅱ→数値制御加工実習Ⅰの順に集中的な教育訓練を展開した。

#### 2. 教育訓練手順と提出課題

模型スターリングエンジンの設計から製作までの教育訓練手順ならびに提出課題は次のとおりである。

- (1) 概要：スターリングエンジンの理解
- (2) 基本構想：内部容積、ピストン長さなど各部寸

法の計算を行い、概略図を作成する。

(課題1.計算書、課題2.概略図)

- (3) 設計図面：概略図に基づき、設計条件の充足度ならびに製作上の問題点をチェックし、計画図を作成する。

(課題3.仕様書、課題4.計画図)

- (4) 製作図面：部品図および組立図をCADシステムにより作成するとともに各部品の再チェックを行う。

(課題5.製作図面)

- (5) 製作準備：製作図面に基づき、機工具表、材料表、購入部品表、加工行程図を作成する。(課題6.機工具表、課題7.材料表、課題8.加工行程表)

- (6) 加工組立：部品の製作(材料→加工→検査)ならびに組立を行う。(課題10.製品)

- (7) 試運転：性能(回転数、出力)のチェックを行う。

- (8) 評価：製作時に問題が判明した図面の修正、性能チェック時の考察、実習に対する感想、自己評価について述べる。

(課題11.自己評価レポート)

各教科に当てた上述の教育訓練内容は、次のとおりである。機械設計製図では(1)~(3)、CAD演習では(4)、機械加工実習Ⅱと数値制御加工実習Ⅰでは(5)~(8)の内容である。

### IV 設計方法

設計教育においては、時間数ならびに履修科目の関係上、熱設計は行っていない。したがって、概略図の作成に必要な作動空間寸法は、図1に示す埼玉大学で製作された教材用スターリングエンジン<sup>1)</sup>の相似設計により決定した。このエンジンは、シリンダとピストンにガラス製注射器を用いているのが特徴である。注射器の使用は、封入されている作動空気の漏れ低減ならびに摺動部における摩擦低減、さらには加工の容易性に最適な選択と思われる。したがって、シリンダとピストンには、市販のガラス製注射器を使用するとともに、作動ガスには、漏れの影響の少ない大気圧空気を使用することとした。なお、設計に際して、学生には図1に示すエンジンの概要図を与えているが、組立図や部品図は与えず、できるだけ自らの考えで設計するように指導した。

図1に示す各部品の使用材料は次のとおりである。加熱ヘッドは、耐熱、耐腐食性、切削性よりSUS420J

2である。フライホイールと偏心円板は、材料の密度、耐腐食性、切削性よりC3604である。クランク軸、ピストンピン、クランクピンに相当する軸材料は、材料強度ならびに利便性よりSUS304の棒材ならびに六角穴付きボルトである。そしてシリンダ連結板、フレームなど他の材料は、放熱や切削性よりA5052Pである。

1. 設計条件

学生に提示した設計条件を以下に示す。なお、下線の数値は、学生各々に変えて提示されている。

- 作動ガス 大気圧の空気
- 作動ガスの平均圧力  $P_{mean} = 130\text{kPa}$
- 加熱部無効容積比  $X_h = 1.50$

(高温空間無効容積と高温側行程容積の比)

- 冷却部無効容積比  $X_k = 0.50$

(低温空間無効容積と高温側行程容積の比)

- 圧縮(低温)空間の空気温度  $T_c = 323\text{K}$
- 膨張(高温)空間の空気温度  $T_e = 673\text{K}$
- 両ピストンの直径×ストローク

$$D_p = \phi 10\text{mm} \times S_p = 8\text{mm}$$

- 行程容積比  $\kappa = 1$

(低温側行程容積 $V_c$ と高温側行程容積 $V_e$ の比)

- 位相角  $\alpha = 90^\circ$
- 軸出力  $W_{net} = 0.4\text{W}$

2. 部品寸法の計算方法

学生に提示した各部品の寸法計算法を示す。ここでの計算例は前述の設計条件を使用している。

- (1) 回転数 : N

軸出力 $W_{net}$ に及ぼす平均作動ガス圧力 $P_{mean}$ 、回転数Nそして高温側ピストンの行程容積 $V_e$ の影響を学生に理解させるとともにフライホイール寸法計算に必要な回転数Nを次式により算出する。

$$W_{net} = B \cdot P_{mean} \cdot N \cdot V_e \quad \text{より } N = 1970\text{rpm}$$

ここで、B : ビール数(=  $2.45 \times 10^{-4}$ )<sup>(2)</sup>

$$V_e : \text{高温側の行程容積} \\ (\pi / 4 \cdot D_p^2 \cdot S_p = 0.628\text{cm}^3)$$

- (2) 加熱ヘッド長さ :  $L_h$

加熱ヘッド長さ $L_h$ は、図1及び図2に示すピストン直径 $D_p$ と加熱ヘッド内径 $D_c$ とのクリアランス $\epsilon$ を1mm程度に選び、無効容積比 $X_h$ より求めた高温空間の無効容積 $V_{sh}$ (ピストンの行程容積を除く空間)より算出する。

$$X_h = V_{sh} / V_e = 1.50 \quad \text{より}$$

$$V_{sh} = 0.942\text{cm}^3 = 942\text{mm}^3$$

$$V_{sh} = \pi / 4 \cdot (D_c^2 - D_p^2) \cdot (L_h - \delta_h) \\ + \pi / 4 \cdot D_c^2 \times \delta_h + 1 / 3 \cdot \pi / 4 \cdot D_c^2 \cdot D_c / 2 \cdot \tan 30^\circ \\ = 25.3L_h + 272.0 = 942.0 \quad \text{より } L_h = 26.5\text{mm}$$

ここで、 $D_p$  : ピストン直径(=10mm)

$D_c$  : 加熱ヘッド内径(=  $D_p + \epsilon \times 2 = 11.5\text{mm}$ )

$\delta_h$  : 上死点におけるピストンヘッドと加熱ヘッド間の最小隙間(=2mm)

$\epsilon$  : クリアランス(=  $(D_c - D_p) / 2 = 0.75\text{mm}$ )

ただし、加熱ヘッド長さ $L_h$ は、穴加工上の問題ならびに市販注射器の寸法を考えに入れて設定することにする。なお、市販注射器の寸法上、高温ピストン長さすなわち加熱ヘッド長さを長く取れない場合、 $\epsilon$ を0.75~3.0mmの範囲で選ぶ。

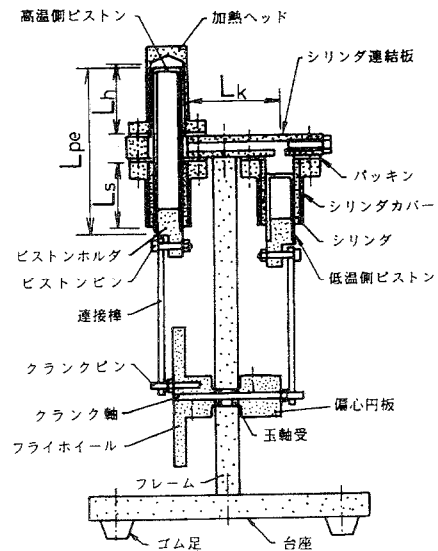


図1 模型スターリングエンジンの概要

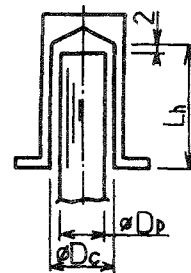


図2 加熱ヘッドの内部形状

- (3) 冷却部長さ :  $L_k$

図1及び図3に示す冷却部長さ $L_k$ は、高温空間と低温空間とを結ぶ作動ガスの流路長さである。この長さは、流路内径 $d_k$ を3.5mm程度に選び、無効容積比 $X_k$ より求めた冷却部無効容積 $V_{sk}$ より算出する。

$$X_k = V_{sk} / V_e = 0.50 \quad \text{より}$$

$$V_{sk} = 0.314\text{cm}^3 = 314\text{mm}^3$$

$$V_{sk} = \pi / 4 \cdot d_k^2 \cdot L_k = 314 \text{ より } L_k = 32.6 \text{ mm}$$

ここで、 $d_k$  : 冷却流路内径(=  $\phi 3.5 \text{ mm}$ )

ただし、冷却部長さ $L_k$ は深穴加工の問題を考へに入れて決定する必要がある。 $L_k$ が過大になる場合、 $d_k$ は5.0mm程度までの範囲で選ぶとよい。また、流路の本数を2~4本に増やすことにより $L_k$ を減少させ、加工穴深さを調節する。

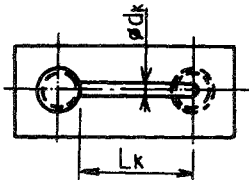


図3 冷却部形状

(4) シリンダ長さ :  $L_s$

図1に示すシリンダ長さ $L_s$ は、ピストンストローク $S_p$ の3倍の長さを取る次式により算出する。

$$L_s = 3 \cdot S_p = 24 \text{ mm}$$

(5) ピストン長さ :  $L_{pe}$ 、 $L_{pc}$

図1に示す高温側ピストン長さ $L_{pe}$ 及び低温側ピストン長さ $L_{pc}$ は、上死点における高温側ピストンヘッドと加熱シリンダヘッドとの最小隙間 $\delta_h$ 、上死点における低温側ピストンヘッドとシリンダ連結板との最小隙間 $\delta_c$ 、シリンダ連結板厚 $t_c$ 、パッキン厚さ $t_p$ そして上死点位置にあるピストンのシリンダ下部から出ている長さ $\zeta$ を考慮に入れて次式により算出する。

$$L_{pe} = L_s + t_c + L_h - \delta_h + t_p \times 2 + \zeta = 59.5 \text{ mm}$$

$$L_{pc} = L_s + t_p - \delta_c + \zeta = 25.5 \text{ mm}$$

ここで、 $\delta_h = 2 \text{ mm}$ 、 $\delta_c = 1 \text{ mm}$ 、 $\zeta = 2 \text{ mm}$ 、 $t_c = 8 \text{ mm}$ 、 $t_p = 0.5 \text{ mm}$

(6) 作動ガスの最高圧力 :  $P_{max}$

作動ガス最高圧力は、スターリングエンジンの大略的な性能把握に使用するSchmidt理論<sup>(3)</sup>を用いて、次式により算出する。

$$P_{max} = P_{mean} \left\{ \frac{(1 + \delta)}{(1 - \delta)} \right\}^{1/2} = 130 \left\{ \frac{(1 + 0.241)}{(1 - 0.241)} \right\}^{1/2} = 166 \text{ kPa}$$

$$\delta = \left( \frac{\tau^2 + \kappa^2 + 2 \cdot \tau \cdot \kappa \cdot \cos \alpha}{(\tau + \kappa + 2S)} \right)^{1/2}$$

$$= 0.241$$

$$S = 2 \cdot X \cdot \tau / (\tau + 1) = 1.56、$$

$$\tau = T_c / T_e = 0.48、\kappa = 1、\alpha = 90^\circ、$$

$$X = X_h + X_k + X_r = 2.39、X_r = 0.39$$

(7) 図示仕事 :  $W$

フライホイール寸法の算出に必要な図示仕事 $W$ は、

次式により求められる<sup>(9)</sup>。

$$W = P_{max} (V_E + V_C) \pi (1 - \tau) / (\kappa + 1) \times \left\{ \frac{(1 - \delta)}{(1 + \delta)} \right\}^{1/2} \times \delta \sin \theta / \left\{ 1 + (1 - \delta^2)^{1/2} \right\} = 1.47 \times 10^{-2} \text{ Nm}$$

(8) フライホイール寸法

模型エンジンのエネルギー変動分 $\Delta E$ は、次式により求められる。ただし、エネルギー変動率 $\xi$ は、トルク変動の理論値より0.25とする。

$$\Delta E = \xi \cdot W = 3.67 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

したがって、フライホイールに要求される慣性モーメント $I$ は、次のように求められる。

$$I = \Delta E / (\delta \cdot \omega_m^2) = 1.74 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

ただし、 $\delta$  : 速度変動率(=  $(\omega_{max} - \omega_{min}) / \omega_m = 1/200$ )

$$\omega_m : \text{平均角速度} (= (\omega_{max} + \omega_{min}) / 2$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot N / 60 = 206 \text{ rad/s})$$

フライホイールの慣性モーメントは、図4に従い次式により算出できる。

$$I = \pi / 2 \cdot \rho \cdot b \cdot (r_o^4 - r_i^4)$$

$$= 4.58 \times 10^{-7} r_o^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$= 1.74 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \text{ より}$$

フライホイール寸法 $r_o = 24.8 \text{ mm}$ 、 $r_i = 18.6 \text{ mm}$ が得られる。すなわち、幅 $b = 5 \text{ mm}$ 、外径 $2 \times r_o = 49.6$ より50mm、内径 $2 \times r_i = 37.2$ より37mmが得られる。なお、外径が過大な場合は幅 $b$ を大きく、あるいはフライホイールを2個にするとよい。

ただし、 $r_o$  : フライホイール外半径

$r_i$  : フライホイール内半径(=  $0.75 r_o$ )

$b$  : フライホイール幅(=  $5 \text{ mm}$ )

$\rho$  : フライホイール材料の密度(黄銅)

$d_f$  : クランク軸直径

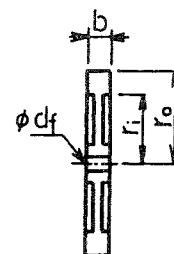


図4 フライホイール形状

(9) 他の主要部品寸法計算

フライホイールを除く、他の部品寸法は作動ガスの最高圧力が小さいため、強度計算結果に左右される程ではない。しかし、演習を目的に、主要な部品

寸法の計算が実施されている。計算を実施した主要部品と計算方法は次のとおりである。

- ・ シリンダ肉厚 : 内圧を受ける薄肉円筒
- ・ 締結ボルトの呼び径 : 引っ張り強度
- ・ 接続棒寸法 : 圧縮強度、座屈強度
- ・ ピストンピン、クランクピン、クランク軸 : せん断強度
- ・ 玉軸受けの選定 : 寿命

部品寸法は、計算結果にそれほど依存しない。すなわち、学生自らが寸法決定しなければならないエンジニアリングセンスを養わせる結果にもなっている。

#### 10) 設計例

設計作品例として学生の設計した作品の組立図を図5に示す。同作品の設計条件は、ピストン直径φ15mm、ストローク12mmそして軸出力1Wである。組立図中の主要な部品番号と部品名は次のとおりである。

- ①加熱ヘッド、②シリンダカバー、③高温側ピストン、④シリンダ、⑤ピストンホルダ、⑥接続棒、⑦フライホイール、⑧シリンダ連結板、⑨低温側ピストン、⑫フレーム、⑭台座

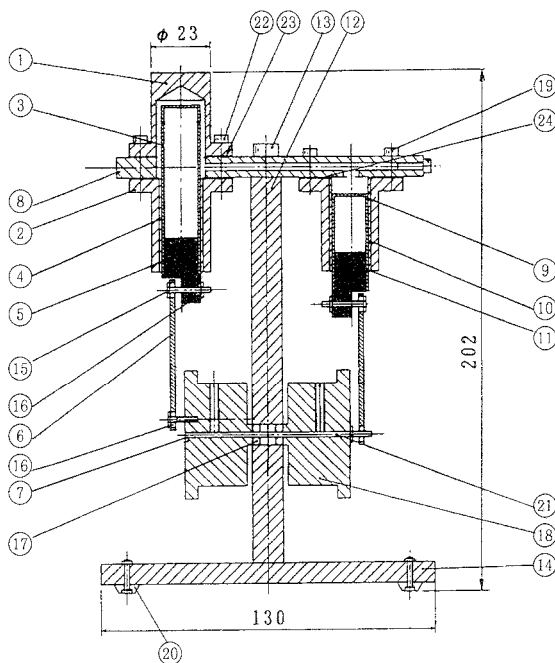


図5 設計作品（組立図）例

## V 製作方法

### 1. 加工準備

加工実習においては、23名の学生が設計した23台の全作品より12台の作品を選定し、1台の設計図を設計者と異なる2人の学生により製作させることにした。これは、多数の図面により構成される1台の製品図面を複数の人が製作する実際の加工現場を想定したものである。

ところで、講師側による設計図面の検図は重要部分しか実施していない。したがって、各部品を製作する学生は、設計図における不備を見つけた場合、設計者に問い合わせながら、製作、組立そして試運転までの間、まずは自らの考えで実施する。すなわち、講師側は、前もって細かいことは意識的に指導せず、実際に各部品を加工しながら問題を解決させることにした。

学生は、製作に入る前に表1に示す標準的製作工程を参考にし、図面より材料をチェックして材料表を作成する。つづいて、材料と加工法をチェックし、各種加工工程表、機工具表を作成する。

### 2. 加工・組立

模型スターリングエンジンは汎用工作機ですべて製作できる。しかし、位置決め、はめあいなどの加工精度の必要とする部品の加工は、初心者である学生には無理がある。したがって、加工精度の必要な部品（シリンダ連結板など）は、MCやNC工作機を用いて加工することにした。ここでの加工実習は加工技術を習得させることではなく、興味をもたせることを重視している。この加工実習を通じて学生は、加工する際、製作図面と製作工程表より各種部品の加工工程表を十分検討して製作する必要性を体験している。また、作品によっては、組立時になって製作した部品では組立たず、再度、部品の製作を行っており、設計時の重要性を再認識した例もある。

図6には、完成した全作品を示す。

### 3. 試運転

製作した模型エンジンは、加熱ヘッドをガストーチなどで加熱しながら決められた回転方向に初速を与えることで運転を開始する。定常運転に達した（一定回転数）後、エンジン回転数を測定し、設定した回転数と比較することにより、設計段階で要求された性能の満足度を評価した。その結果、設計条件を満足するエンジンもあれば動かないエンジンもあった。図6の作

表1 模型スターリングエンジンの製作工程表

NO	部品名	数
A	加熱ヘッド	1
B	シリンダカバー	2
C	フライホイール	2
D	ピストンホルダ	2
E	シリンダ連結板	1
F	フレーム	1
G	台座	1
H	接続棒	2
I	ピストンシリンダ (精密切断機)	2

1	材料切断 (帯鋸盤)	2	プログラム作成 (NC旋盤)	3	4	寸法検査	TO E-8					
1	材料切断 (帯鋸盤)	2	旋削加工 (旋盤)	3	4	穴あけ (ボール盤)	5	ねじ切り	6	寸法検査	TO E-8	
1	材料切断 (帯鋸盤)	2	旋削加工 (旋盤)	3	4	軸・ボルト穴けがき	5	穴あけ (旋盤・ボール盤)	6	ねじ切り (手仕上げ)	寸法検査	TO E-8
1	材料切断 (帯鋸盤)	2	旋削加工 (旋盤)	3	4	ノコ・やすり	5	穴あけ (ボール盤)	6	ねじ切り	寸法検査	TO E-8
1	材料切断 (帯鋸盤等)	2	フライス加工 (フライス盤)	3	4	プログラム作成 (MC)	5	穴あけ (ボール盤)	6	ねじ切り	寸法検査	TO E-8
1	材料切断 (帯鋸盤等)	2	フライス加工 (フライス盤)	3	4	ボルト穴位置決め (MC)	5	穴あけ (ボール盤)	6	ねじ切り	寸法検査	TO E-8
1	材料切断 (帯鋸盤等)	2	フライス加工 (フライス盤)	3	4	ボルト穴位置決め (MC)	5	穴あけ (ボール盤)	6	ねじ切り	寸法検査	TO E-8
1	材料切断 (帯鋸盤等)	2	プログラム作成 (MC)	3	4	ボルト穴位置決め (MC)	5	穴あけ (ボール盤)	6	ねじ切り	寸法検査	TO E-8
1	材料切断 (帯鋸盤等)	2	プログラム作成 (MC)	3	4	ボルト穴位置決め (MC)	5	穴あけ (ボール盤)	6	ねじ切り	寸法検査	TO E-8
1	材料切断 (帯鋸盤等)	2	プレス加工 (タブレットプレス)	3	4	ボルト穴位置決め (MC)	5	穴あけ (ボール盤)	6	ねじ切り	寸法検査	TO E-8
1	切断 (精密切断機)	2	寸法検査	TO E-8	7	寸法検査	8	組立・調整	9	試運転		

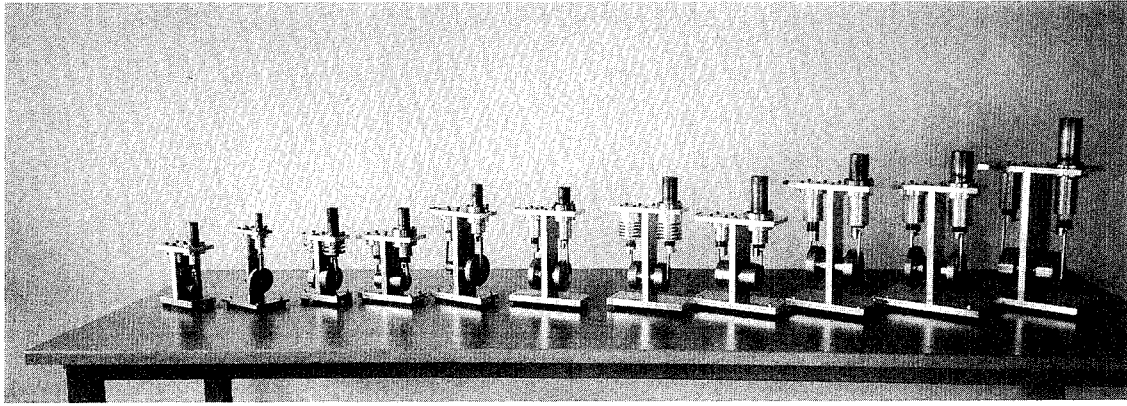


図6 模型スターリングエンジンの全作品

品の中で、与えられた期間内にほぼ設計通りの性能を得たエンジンは2台、性能不足だが動いたのは9台、期間内に最後の調整不足で間に合わなかったものが1台であった。原因はほとんどが加工に問題があり、加工に対する考え方と加工時間さえあれば解決できるものであった。

回転数不足あるいは動かない原因として次のようなことが考えられる。

- (1) ピストン及びシリンダが汚れ、摩擦を大きくしている。または、割れている。
- (2) ピストンホルダの膨張でピストンの動きが固くなっている。
- (3) 出力軸の2つのベアリングの中心が合っていない。
- (4) 振動により連接棒がフライホイールやピストンホルダに干渉している。
- (5) ベアリングにゴミが入っている。または、無理なはめあいになっている。
- (6) ピストンが加熱ヘッドに頭打ちしている。あるいは、加熱ヘッドやパッキンに当たっている。
- (7) シリンダを取り付けるボルトや連結板内部穴止めボルトが緩く、作動ガスが洩れている。
- (8) パッキンがボルトの締め過ぎなどで切れたり、傷ついている。
- (9) シリンダカバーとシリンダの接合が不十分で作動ガスが洩れている。

## VI おわりに

設計教育と加工実習教育は、切り離して実施されることが多く、設計と製作との関係および設計から製作への流れを教育することが困難であった。

本学では、学生の興味の対象となりうる教材として模型スターリングエンジンを選び、その設計から製作

までの一貫した教育を行った。

得られた成果を列挙すると次のようになる。

- (1) 模型スターリングエンジンを教材に選んだことにより、設計・加工関連教科に興味を持たせることができた。
- (2) 機械工学全般にわたる基礎学力と知識の必要性を強調できた。
- (3) 設計・加工関連教科を有機的に結びつける教育ができた。
- (4) 設計から製作への橋渡しとなる図面の役割を教育できた。
- (5) もの作りの面白さと難しさ、やり遂げた満足感を体験でき、次に「もの」を作るときに大きな自信を持たせることができた。
- (6) 機械部品の設計から製作までの流れを教育できた。

おわりに、模型スターリングエンジンを教材に利用する際、ご協力頂いた埼玉大学教授、岩本昭一、松尾政弘の両先生ならびに運輸省船舶技術研究所、平田宏一氏に感謝申し上げます。また、CAD教育に際して協力頂いた日立造船情報システム(株) 林 耕平氏ならびに本課題の実施に当り協力頂いた本校生産技術科の諸先生に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) 平田・ほか3名、教材用スターリングエンジンの設計・製作、日本設計工学会講演論文集No.92 - 秋季(1992)、p51.
- (2) Walker G., Stirling Engines, Oxford Univ. Press., (1980), P 73.
- (3) 文献(2)の50ページ.