

教材用スターリングサイクル機器の開発と利用法

北海道職業能力開発短期大学校

浜口 和洋・佐賀 直次・植木 正則*・吉野 正樹

Development and Applied Methods of Stirling Cycle Machines for Education

Kazuhiro HAMAGUCHI, Naotsugu SAGA, Masanori UEKI, Masaki YOSHINO

要約

職業能力開発短期大学校では、生産現場で活躍できる技能だけではなく、十分な基礎学力と最先端の技術を有した、自らが『物』を作り出す実践技術者の養成を目標にしている。ところで、機械分野における技術革新は、既存の多くの分野における知識や技術の複合化あるいは融合化により創り出されることが多い。特に、エレクトロニクス分野との複合・融合技術が大きく関わっている。このような複合・融合技術を僅か2年間で、より効率的に教育訓練するには、基礎学力を実感しながら修得するための教材、修得した基礎学力と最先端の技術を有効に結び付ける教材、さらには創造力の発揮できる教材の使用が不可欠である。

本報では、機械システム系における実践技術者の養成に当たり、効果的な教材の提供を目的に開発した、教材用スターリングサイクル機器ならびにその性能計測法を紹介するとともに、その利用法を提示する。

I 緒言

『物』は多種多様な分野の理論が使用されて設計・製作されている。したがって、学生は、数学、物理、材料力学を始めとする4力学や多くの工学関連教科を十分身につけるとともに、これらを統合して物づくりに利用できる知識にしなければならない。この解決には、工学関連教科と物作りとの結びつきを効果的な教材を用いて教育訓練することが必要である。また、機械分野においては他分野との複合技術や融合技術が技術革新の核になっており、その一例として、メカトロニクス教育が重要になっている。すなわち、機械分野におけるエレクトロニクスやコンピュータの係わり方の教育訓練も不可欠である。この目的の達成には、それぞれの分野の個別教育訓練ではなく、各分野につながるある教材を用いた教育訓練がより効果的である。

ところで、教育訓練に際して人間に本来備わっている筈の製作する喜びを導き出す方法が問われている。幸い、本短大の設置目的が実践技術者の養成にあるこ

とから、物作りに当たって必要な設備は十分にある。そこで、工学基礎教科と設計教科そして加工教科とを結び付けた教育訓練が、より効果的な成果を挙げる。この教育訓練にも、各教科を有機的に結び付ける教材が必要である。

著者らは、以上の条件を満足する教材として、教材用スターリングエンジンと冷却機を開発した。一方、各スターリングサイクル機器の性能を計測するための計測技術を開発するとともに、各機器の性能特性を調べた。以上の結果に基づき、本教材の各種教育訓練への利用法を検討したので、その成果を報告する。

II スターリングサイクル機器

スターリングサイクル機器とは、図1に示す熱力学上のスターリングサイクルを形成するエネルギー変換機器である。同図中の T_e は高温空間温度、 T_c は低温空間温度、 T_k は冷凍を生成する空間温度、 Q_{in} は加熱量、 Q_{out} は冷却熱量そして Q_k は冷凍熱量を表す。図1(a)に示すエンジンとしての正サイクルは、スターリングエンジンとして太陽熱湯水ポンプ駆動源⁽¹⁾あるいは潜水

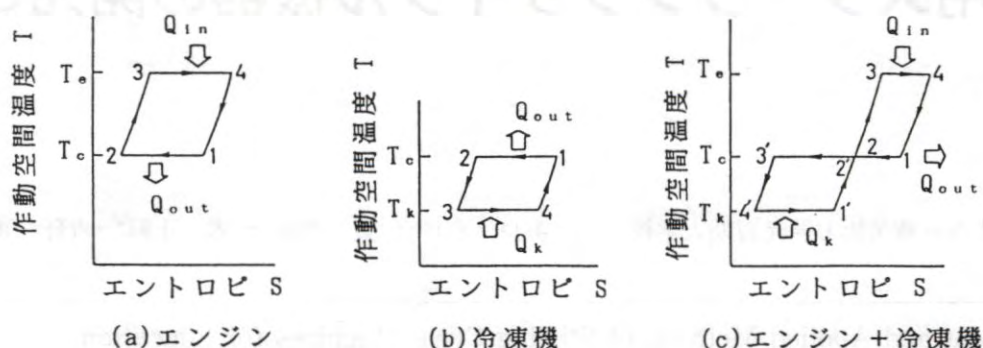


図1 スターリングサイクルのT-S線図

船動力源⁽²⁾に一部利用されている。一方、図1(b)に示す冷凍機としての逆サイクルは、スターリング冷凍機⁽²⁾として極低温生成用に利用されている。また、図1(c)に示す正サイクルと逆サイクルを組み合わせたヴィルミエサイクルは空調用のヒートポンプ⁽²⁾として脱フロン問題より注目され、その開発が盛んである。

エンジンの場合、密閉された作動ガス（高圧のヘリウム）を外部から加熱・冷却し、膨張・収縮させて得られる圧力変動により、ピストンを動作させ動力を得る。冷凍機の場合、密閉された作動ガス（高圧のヘリウム）を外部動力により圧縮・膨張させ、低温の生成を行う。ヴィルミエヒートポンプの場合、駆動源であるエンジンと冷凍機がサイクル上でも構成上でも結合しており、密閉された作動ガス（高圧のヘリウム）を外部から加熱・冷却することにより、冷房と暖房・給湯が同時に可能である。したがって、エンジンでは熱源を選ばず、太陽熱、廃熱あるいは冷熱等も利用できる。また、冷凍機や空調機器では、冷媒にフロンを使用しない特色がある。

III スターリングサイクル機器の教材への選定理由

スターリングサイクル機器は、その性能を問わなければ作動ガスに大気圧空気を使用することにより、図2に示す簡略化した構造が可能であり、その設計・製作が比較的容易である。なお、正サイクルのエンジンは動くこと、逆サイクルの冷却機（教材機器では大きな温度低下は期待できないので冷却機とした。）は温度低下が確認できることを前提条件とする。この前提条件に基づき選定理由を列挙すると次のようになる。

(1)『加熱すると動く』エンジンならびに『動かすと冷える』冷却機が、自ら設計・製作できる実感教育が可

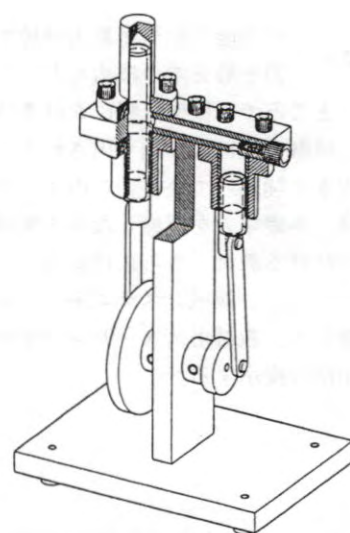


図2 教材用スターリングエンジン

能である。

(2)エンジンの場合、外燃機関であることから加熱及び冷却熱源を選ばない。すなわち、加熱源には身近にあるローソク、アルコールランプ、ガストーチ等の燃焼熱、太陽熱、電熱線のジュール熱等、冷却熱源には雰囲気との自然空冷、水冷等が使用できる。したがって、熱源の種類に合った設計課題の設定も可能である。

(3)作動ガスを移動させ、温度変化すなわち圧力変化を与えるとともに出力を取り出す、あるいは吸熱させるために必要なピストンの往復運動と出力軸あるいは入力軸との間にあるメカニズムが多種多様に考えられる。

(4)動作原理を熟知すると、多種多様なエンジン形状を自ら創造することが可能である。

(5)設計に際して、熱力学、材料力学、機械力学、流体力学、工業材料、設計工学など機械全般に及ぶ基礎知識を要求できる。一方では、設計課題の選択により必

要とされる機械分野の知識を限定することが可能である。

(6)構成部品点数が比較的少ない。また、工夫により一層少なくできるので、設計・製作時間に柔軟性がある。

(7)動くエンジンの出力は微小(mW)であるが、著者らの考案した小形直流電気動力計により、性能計測が比較的容易である。

(8)冷却機は大きな温度低下が期待できないが、温度計測により、無負荷状態での性能計測が可能である。

(9)各機器の回転数はカウンタ回路を作成して計測することもでき、機械分野のみならずエレクトロニクス分野の教育訓練も付与できる。

(10)作動ガスに大気圧空気を用いるため、動作中の圧力変動は大気圧 ± 10 kPa程度と微小である。したがって、動作中の振動は極めて小さく、安全性が高い。

IV 開発した教材機器

教材用として開発したスターリングサイクル機器は、エンジンでは、手仕上げを主として製作した簡易加工エンジンならびに汎用工作機等を用いて製作した機械加工エンジンの2種類である。また、冷却機は汎用工作機等で製作した。

1. 教材用エンジン

(1)簡易加工エンジン

簡易加工エンジンの概要を図3、その仕様を表1に示す。本エンジンは、ディスプレーサの上下空間とパワーピストン下部空間に作動ガスの大気圧空気が満たされている γ 形エンジン⁽³⁾である。本エンジンは、その加熱部を80℃のお湯に入れ、冷却部を自然空冷下におくだけでも、その動作が確認できる。その仕組みは、ディスプレーサの上下により高温空間及び低温空間の占める割合を変化させ、その結果得られる圧力変動を利用してパワーピストンから出力を取り出し、クランク機構により回転運動に変換する。

図3におけるディスプレーサの動作空間を構成するシリンダには、お菓子の空き缶($\phi 207$ mm $\times$ 60 mm)を用いる。また、動力を取り出すパワーピストンとそのシリンダならびにディスプレーサロッドとそのガイドには、注射器(3 ccと1 cc)の内筒と外筒を用いる。注射器の利用は、作動ガスの漏れ防止に最適である。ディスプレーサには発泡スチロールそしてフライホイールには塩ビ板を使用し、手仕上げによる加工を行った。ディスプレーサとパワーピストンには、位相差90°を設けると共に出力取り出しにはクランク機構を使用

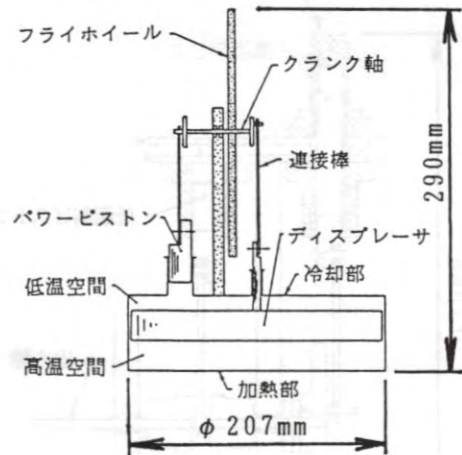


図3 簡易加工エンジンの概要

表1 簡易加工エンジンの仕様

エンジン形式	γ 形
作動ガス	大気圧空気
加熱方法	シート状電気ヒータ加熱
冷却方法	自然空冷
ボア $\times$ ストローク	
ディスプレーサ	$\phi 200 \times 10$ mm(314.1cm ³)
パワーピストン	$\phi 18.5 \times 20$ mm(5.38cm ³)
位相差	90°

した。なお、機械的摩擦を極力低減させるため、軸受け部にはミニチュアベアリングを使用している。

本エンジンの性能特性を調べる際、その加熱にはシート状面熱源である電気ヒータを用いた。ヒータは加熱部に直接接触させ、その下部には断熱材を敷き、周縁への熱漏洩を低減している。冷却には周縁空気との間での自然空冷方式を採用した。製作にあたっては、ボール盤、ノコギリ、やすり、カッターナイフ等を利用している。

(2)機械加工エンジン

機械加工エンジンの概要を図4、その仕様を表2に示す。本エンジンは、高温側ピストンと低温側ピストン間の空間に作動ガスの大気圧空気が満たされている α 形エンジン⁽³⁾である。本エンジンは、加熱ヘッドをアルコールランプあるいはガストーチ等で加熱することにより、その動作が確認できる。その動作は、高温空間作動ガスの膨張仕事(正の仕事)と低温空間作動ガスの圧縮仕事(負の仕事)の差により得られる。ところで、本学では本エンジンの原形モデルが教材として設計教育あるいは設計・加工教育⁽⁴⁾⁽⁵⁾に使用されている。

図4の高温側ピストンと低温側ピストン及びそのシ

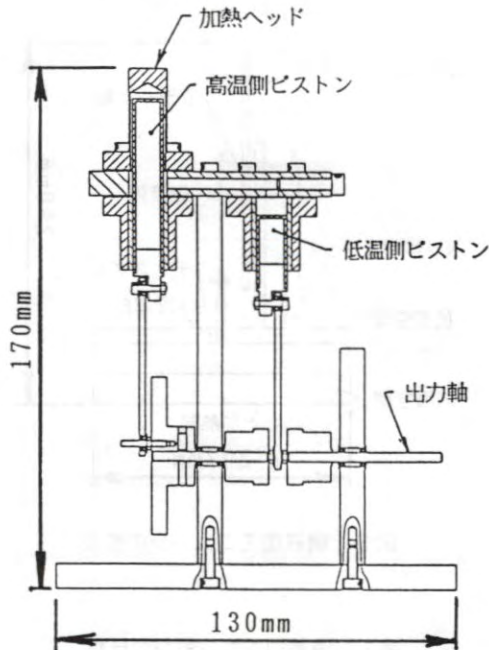


図4 機械加工エンジンの概要

表2 機械加工エンジンの仕様

エンジン形式	α形
作動ガス	大気圧空気
加熱方法	マイクロシース電気ヒータ加熱
冷却方法	自然空冷
ボア×ストローク	
高温側ピストン	φ10×8mm(0.628cm ³)
低温側ピストン	φ10×8mm(0.628cm ³)
位相差	90°

リンダには、注射器（3 cc）の内筒と外筒を使用して
いる。高温側ピストンと低温側ピストンには位相差90°
を設けると共に、出力取り出しにはクランク機構を使用
した。なお、軸受け部にはミニチュアベアリングを
使用している。

本エンジンの性能特性を調べる際、その加熱にはマイ
クロシースヒータ（φ 1 mm×500 mm）を用いた。
ヒータは加熱ヘッドに直巻きされ、その上から断熱材
を覆い、周縁への熱漏洩を低減している。冷却は周縁
空気との間での自然空冷方式とした。

製作にあたっては、ステンレス製の加熱ヘッド、真
鍮製のフライホイール等、アルミ合金製のフレームや
シリンダ等の加工のため、少なくとも旋盤、フライス
盤等の汎用工作機が必要である。なお、一部にはMC、
NC 旋盤、CNC タレットパンチプレス等も利用してい
る。

2. 教材用冷却機

冷却機の概要を図5、その仕様を表3に示す。本機

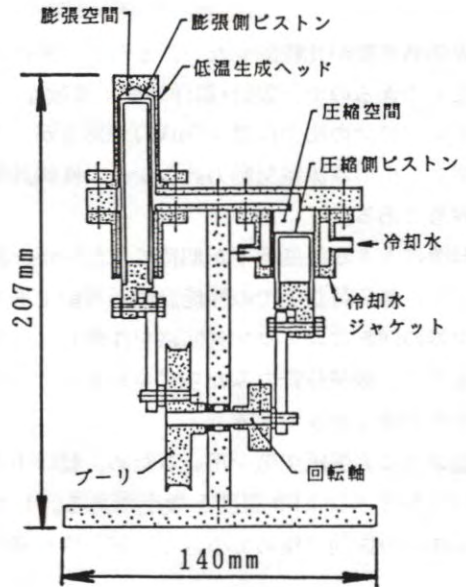


図5 冷却機の概要

表3 冷却機の仕様

冷却機形式	α形
作動ガス	大気圧空気
冷却方法	水冷あるいは空冷
ボア×ストローク	
膨張側ピストン	φ15×12mm(2.12cm ³)
圧縮側ピストン	φ18×12mm(3.05cm ³)
位相差	90°
回転数	550rpm

器は、図4の機械加工エンジンと同じ構成であるが、
膨張側ピストンと圧縮側ピストンは、プーリを介して
直流モータにより駆動される。作動ガスには大気圧空
気を使用し、両ピストン間にある作動ガスの圧縮過程
での発生熱量を、圧縮側シリンダ周辺より周縁空気あ
るいは冷却水に放熱する。圧縮後放熱した作動ガスは、
膨張過程で周辺空気より冷却ヘッドを介して吸熱す
る。その結果、膨張空間では作動ガスの温度低下、圧
縮空間では温度上昇が生じる。

本冷却機の性能特性を調べる際、圧縮側シリンダか
らの放熱は、本機器のヒートポンプ効果を確認するた
め水冷方式ではなく周縁空気との間での自然空冷方式
とした。これは、水温が5℃と低く、得られる冷却性
能がヒートポンプ効果よりも水温による冷却効果に依
存していることが確認できたことによる。

製作方法は機械加工エンジンと同じであるが、圧縮
空間での放熱仕事を大きくする必要性から圧縮側の行
程容積は膨張側のそれより大きく設計するとともに、
冷却ヘッドへの圧縮側からの熱流入を極力低減させる

工夫が必要になる。また、両ピストンが直流モータ(15 W)により駆動されることから、入力軸、ピストンピンならびにクランクピンはエンジンより太めに設計している。

V 教材機器の性能計測法

エンジン性能は軸出力や図示出力そして冷却機性能は到達温度によって評価する。

1. 軸出力の測定

エンジン性能の把握には、軸出力すなわちトルクの測定が不可欠である。ところが教材用エンジンの出力は微小であるため、その測定には困難が伴う。そこで、図6に示す直流モータを励磁電流および負荷抵抗によりトルク制御する、いわゆる直流電気動力計を製作した。直流モータは、その回転軸がミニチュアベアリングを介してフレームに保持されているため、回転自由である。すなわち、モータの負荷が、装着されている腕により上皿天秤に懸かる構成である。なお、直流モータを支持するフレームは、エンジンの振動が極めて少ないので、上皿天秤・秤量皿の横に両面テープにより固定されている。

直流モータには、CD プレーヤに内蔵されていた低回転でも回転むらの少ない界磁磁石にフェライト粉末を合成ゴムで結合した複合磁石を用いた小形直流モータを利用した。その負荷調整には可変抵抗器により電流を制御する簡便な方式を採用した。直流モータ(電圧1.5 V 時の静止トルク0.77 mN・m、外形寸法φ25 mm×18 mm)には、図6に示すように塩ビ板を加工した腕(モータ出力軸中心からの長さL=80 mm)が装着され、電子上皿天秤(最小表示0.01 gf)に載せてあるナイフエッジにモータの受ける負荷を懸けている。

得られた電子上皿天秤の読みW(gf)は、式(1)によりトルク Toq (mN・m) に換算する。

$$\text{Toq} = W \cdot L = W \times 9.80665 \times 80 / 1000 \quad (1)$$

また、トルク Toq は測定したエンジン回転数N(rpm)を用いて、式(2)より軸出力 W_b (mW) に換算する。

$$W_b = \text{Toq} \cdot 2 \pi N / 60 \quad (2)$$

本エンジンの軸出力は微小であり、その振動も極めて少ない。したがって、性能計測を行う際には、エンジン及び動力計は強固に固定する必要はないので、安全性が極めて高い。

2. 回転数の測定

回転数Nの測定には、ストップウォッチを用いて一定時間内のフライホイールの回転数をカウントする方法、非接触形電子デジタル回転計による方法、フォトインタラプタによりフライホイールに装着した突起物を検出する方法等がある。ここでは、エレクトロニクスやコンピュータ処理分野との融合教育を考慮に入れ、パソコンあるいはカウンタ回路による回転数処理を行うこととし、フォトインタラプタを用いる方法を採用した。その回転数測定方法は次の通りである。

(1) カウンタ回路による測定

フォトインタラプタからの信号は、デジタル式回転数計測回路を用いて一定時間カウントし、回転数に換算する。同回路は、比較的容易に製作できるので電子回路作成教育も取り入れることが可能である。

(2) パソコンによる測定

教材機器作動空間内の圧力データを取り込む場合、1サイクルの外部信号を検出する必要がある。したがって、同信号をパソコンを用いて積算処理することにより、圧力と同時に回転数の測定が可能になる。

3. 作動空間の温度測定

エンジンおよび冷却機とも作動空間の温度(サイクル平均温度)測定が重要である。本サイクル機器は密閉サイクルであるので、各空間温度の測定にはセンサであるK形熱電対の接点部をシリンダ壁等を通して作

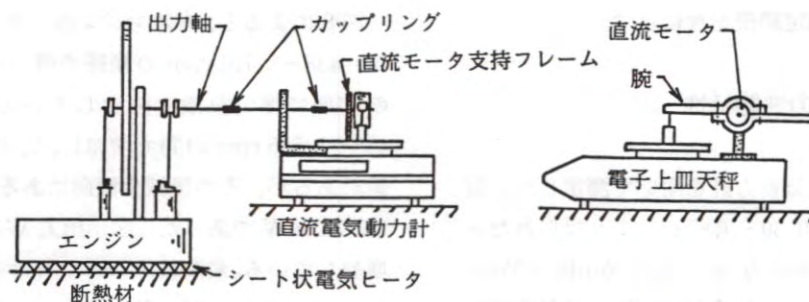


図6 トルク測定の概要

動ガスに接触させる必要がある。したがって、センサ部から作動ガスが漏れることのないよう十分注意を払う必要がある。機械加工エンジンや冷却機では、熱電対装着場所の壁肉厚が比較的厚いのでコンプレッションフィッティングを用いてシースタイプの熱電対を挿入した。また、簡易加工エンジンでは、シリンダに空き缶を利用しているため壁肉厚が薄いので1 mm程度のドリル穴に熱電対素線を通して接着剤で漏れ止めた。センサからの温度データは、A/Dボードを介してのパソコン処理あるいはデジタル温度指示計による表示を行った。

4. 作動空間の圧力測定と図示出力への換算

教材機器の性能評価を詳細に検討する場合、作動空間内における1サイクルの圧力変化をフォトインタラプタからのクランク角信号とともに取り入れる必要がある。一定回転数 N (rpm) 下で得られた圧力 P (Pa) とクランク角すなわち行程容積 V (m^3) との関係は、パソコンによりエンジン形式により異なる式(3)と(4)の図示出力 W_i に換算する。

(a)簡易加工エンジン γ 形である本エンジンの図示出力 W_i は、パワーピストンの行程容積変化 V_p を用いた次式により算出する。

$$W_i = N/60 \times \oint P \cdot dV_p \quad (3)$$

(b)機械加工エンジン α 形である本エンジンの図示出力 W_i は、高温側ピストンおよび低温側ピストンの行程容積変化 V_o と V_c を用いた次式により算出する。

$$W_i = N/60 \times (\oint P \cdot dV_o - \oint P \cdot dV_c) \quad (4)$$

各機器の作動空間圧力は正弦波状の比較的安定した変動を示すので、圧力測定には半導体圧力変換器を用い、1サイクルの外部信号中の720個の圧力データを直流増幅器、A/Dボードを介してパソコン処理する。圧力センサは、エンジンでは温度の影響を除去するため低温空間側そして冷却機では圧縮空間側に装着する。

VI 教材機器の性能特性

各教材機器の性能測定結果を次に示す。

1. 教材用エンジンの性能特性

(1)簡易加工エンジン

図7には製作した電気動力計を用いて測定した、電子上皿天秤の読み W (0.30~0.85 gf) より得られたトルク Toq ($mN \cdot m$) と軸出力 W_o そして図示出力 W_i の回転数依存性、さらには高温空間温度 T_o と低温空間温度 T_c の回転数依存性を示す。エンジン性能の測定に際

して、加熱部下部に設置した電気ヒータへの入力電力 Q_{in} は一定(15.5 W)とし、冷却部は雰囲気(室温25℃)との自然空冷状態とした。

図7によると、トルク Toq は回転数 $N=11 \sim 40$ rpmの範囲で得られているが回転数の増加に伴い直線的に減少している。軸出力 W_o は、10~20 rpmの間で増加し、30 rpm時にピーク値があるが、その後減少傾向にある。軸出力の最高値は1.1 mWであった。図示出力 W_i は回転数の増加とともに増大している。最高軸出力時における正味熱効率 $\eta_{th}(=W_o/Q_{in})$ は 7.2×10^{-5} そして図示熱効率 $\eta_{ind}(=W_i/Q_{in})$ は 1.4×10^{-4} と微小である。これは、電気ヒータから周辺への熱の逃げが大きく、かつ空き缶の壁を通しての作動ガスとの熱交換性能が非常に悪いことを示している。ところで、機械効率 $\eta_{mech}(=W_o/W_i)$ は、11 rpm時に0.80であるが回転数の増加に伴い減少し、40 rpm時には0.39と半減している。一方、作動ガスのサイクル平均温度は、低温空間では30℃程度であるが回転数増加に伴い幾分減少傾向にある。高温空間では回転数依存性が強く、回転数増加に伴い110℃から90℃まで減少している。その際の加熱壁温度は124℃から113℃までの僅かな減少であった。

この結果は、回転数の増加に伴い、空き缶の壁を介しての熱交換性能が劣化するが、回転数の増加が出力増加を誘起することを示す。一方、その後の回転数増加に伴い、作動ガスの流動抵抗や機械損失の増加が誘起され、出力にピーク値が出現した後、次第に出力を低下させることを示している。

(2)機械加工エンジン

図8には、電子上皿天秤の読み W (0.10~0.61 gf) から得られたトルク Toq ($mN \cdot m$) と軸出力 W_o そして図示出力 W_i の回転数依存性、さらには高温空間温度 T_o と低温空間温度 T_c の回転数依存性を示す。エンジン性能の測定に際して、加熱ヘッドに直巻きした電気ヒータへの入力電力 Q_{in} は一定(22 W)とし、冷却部は雰囲気(室温25℃)との自然空冷状態とした。

図8によると、本エンジンのトルク Toq は、回転数 $N=438 \sim 2,101$ rpmの範囲で得られているが回転数の増加に伴い急激に減少している。軸出力 W_o は、438~1,505 rpmの間で増加し、1,505 rpm時にピーク値があるが、その後減少傾向にある。軸出力の最高値は48.2 mWであった。図示出力 W_i は回転数とともに増加している。最高軸出力時における正味熱効率 η_{th} は 2.2×10^{-3} そして図示熱効率 η_{ind} は 4.1×10^{-3} と微小であるが、簡易加工エンジンより30倍程度高い効率を示

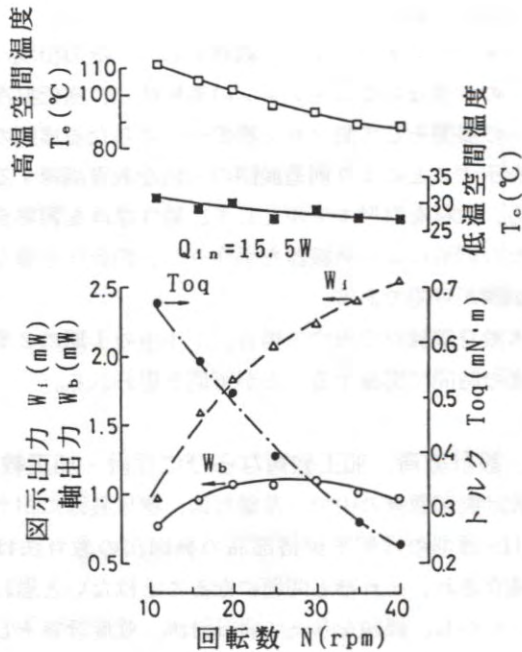


図7 簡易加工エンジンの性能特性

す。これは、簡易加工エンジンより作動ガス量が少ないため、4倍程度高くなった高温空間温度ならびに少ない流動抵抗による回転数増加が主因と思われる。ところで、機械効率 η_{mech} は、438 rpm 時に0.50であるが、回転数増加に伴い上昇し、1,079 rpm 時には0.57の最高値が得られている。しかし、さらなる回転数の増加は機械効率を急激に減少させ、2,101 rpm 時には0.15しか得られていない。一方、作動ガスのサイクル平均温度は、低温空間では45℃そして高温空間では380℃程度である。

この結果は、回転数増加に伴い、ピストンとシリンダ間でのシール性能がある程度良くなるとともに、回転数増加により出力の増大を誘起することを示す。一方、その後のさらなる回転数増加に伴い作動ガスの流動抵抗や機械損失の急激な増加が誘起され、出力にピーク値が出現した後、急激に出力を低下させることを示している。

2. 教材用冷却機の性能特性

図9には、直流モータによりプーリを介して冷却機を回転数550 rpm で駆動開始後の各作動空間における到達温度を示す。同図によると、膨張空間温度は運転開始後31℃から22.5℃まで低下し、圧縮空間温度は31℃から37℃まで上昇しているのがわかる。これは、8.5℃の温度低下ならびに6℃の温度上昇が得られたことを示しており、僅かな温度低下・上昇であるが、

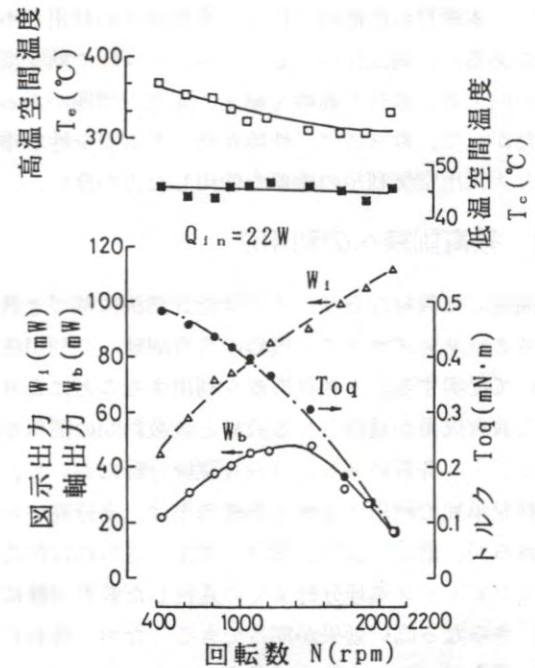


図8 機械加工エンジンの性能特性

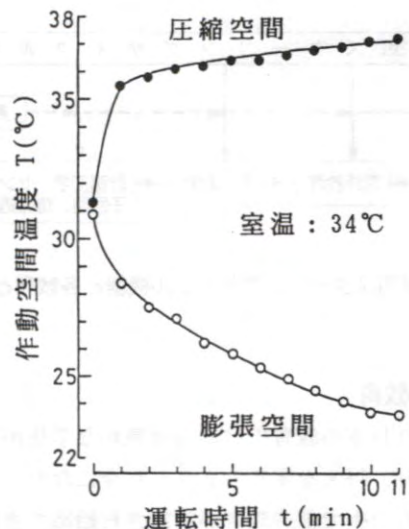


図9 冷却機の到達温度

このような教材でも冷却機あるいはヒートポンプの効果を確認することが可能と思われる。

このような教材機器の性能測定結果は、自ら設計・製作した機器の性能確認ならびに性能改善の可能性を示しており、さらなる教育効果が期待できる。

ところで、本教材は、作動ガスに大気圧空気を利用しているため、極めて低い性能である。しかし、その圧力変動は大気圧 ± 10 kPaと小さく、安全性は極めて

高い。本教材の性能向上には、高圧ガスの利用が不可欠であるが、高圧化は作動ガスのシール性や熱交換性能の向上等、教材の範疇を越え、安全上問題がある。したがって、教材には、性能が低くとも安全性を重視した大気圧空気利用の機器を使用した方が良い。

VII 教育訓練への利用法

開発した教材ならびにその性能計測法に基づき教材用スターリングサイクル機器の教育訓練への利用法について提案する。本教材機器を利用することにより大きな教育成果が期待される教科と各教科間の関係を図10に示す。各教科あるいは教育訓練分野において、本教材を単独で利用する教育訓練効果は、充分高いと思われるが、創造と設計、設計と加工、さらには創造からコンピュータ処理分野までの連続した教育訓練により、さらなる高い効果が期待できる。なお、各教育分野の導入部において熱力学教育が必要になるが、各分野の内容ならびに時間数に応じて簡略化することも可能である。各教育訓練内容は次の通りである。

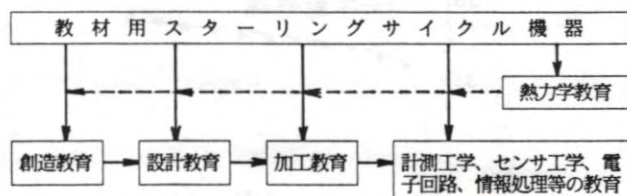


図10 教材用スターリングサイクル機器と各教科との関係

1. 創造教育

従来より日本の教育では創造性豊かな学生が育ちにくいとされ、将来を案じるあまり昨今になり、ようやく大学教育の中で創造教育が実施され始めてきた。職業教育を実施している職業能力開発短大においても、創造教育は不可欠である。すなわち、商品開発のみならず生産現場における効率的生産を目指す上でも創造教育が必要になる。画一的な高校教育を受けてきた学生が本短大に入学後経験するのが、自ら考える創造性の欠如である。すなわち、物理、数学、工学基礎教科、専門教科等を学んだところで、何を目的に学んでいるかの自覚が不足しているため、単に単位を取得し、卒業できれば良い程度にしか考えていないように見受けられる。この解決には、創造教育が不可欠である。すなわち、『物』を創造する過程を教材を通じて教育訓練し、種々の教科目とのつながりを理解させることが何

より大切である。

スターリングエンジンを教材として、その出現（発明）の背景ならびにエンジンの高性能化、極低温冷凍機への展開そして脱フロン機器へのさらなる展開の状況を示すことにより創造展開の一例を教育訓練する。一方、教材を原形モデルとして、動作原理を習熟後、新たな創造による新機器を手作りし、創造性を養う教育訓練が可能である。

本教育訓練を実施する場合、1年生のI期に2単位程度の時間で実施することが可能と思われる。

2. 設計教育、加工教育ならびに設計・加工教育

設計製図教育の中で、基礎製図、機械製図に相当するJIS通則の理解や規格部品の製図法の方法はほぼ確立され、それほど問題になることはないと思われる。しかし、課題を与えて設計計画、強度計算そして図面作成を行う設計演習教科については常に多くの問題を抱えているようである。すなわち、課題によく利用される歯車減速機、渦巻ポンプ、ガソリンエンジン、油圧シリンダなどの一般に実績のある機械あるいは機械部品は、その設計過程で工学基礎科目を包含した機械全般に及ぶ基礎知識を要求でき、教育効果もある。しかし、すでに商品化そして規格化され十分に実績のある機械を設計課題に選ぶことは、学生にとって単なる製品の改良あるいは製品形状寸法の確認、最悪の場合は製品の改悪設計を行いかねない。もちろん、このような教育訓練法も設計教育の一段階にはなるものと思われるが、創造性を養う、もしくは発揮させることは困難である。

また、従来の課題は、学生にとって、その設計作品の良否は指導者側の判断に委ねられており、その最終目的は必ずしも十分に明確化されていない。したがって、設計に対して学生の興味を引きつけることができず、新規性溢れる意欲的な取り組みが見られないことになる。

すなわち、この解決には学生の興味を引きつけることが可能であり、比較的自由的な発想が可能な、創造力の発揮できる教材用スターリングエンジンの利用が効果的であると考えられる。また、この課題は比較的製作が容易であることから自ら設計、製作し、その性能を確認できる。

設計、加工関連教育に必要な単位数と開講学期の一例を次に示す。

(1) 設計教育

CAD演習(4単位/III期)教科を利用してCAD操作

法の修得を図りながら教材エンジンの設計を行う。

(2)加工実習教育

機械加工実習（4単位/Ⅱ期）あるいは集中実習（2単位）での加工実習教科を利用して汎用工作機械等の操作法の修得を図りながら教材エンジンの製作図面を与えてエンジンの製作を行う。

(3)設計・加工教育

CAD 演習（4単位/Ⅲ期）と機械加工実習（4単位/Ⅲ期）の2教科を融合して合計8単位の中で、教材用エンジンを課題として、その前半期間において集中的に設計を終了させるとともに後半期間で集中的に製作する。

3. 他の教育

機械システム系は、機械分野に加えてエレクトロニクスやコンピュータ科学を含む広い教育訓練体系になっている。本教材により前述以外の教育が可能と思われる分野を次に示す。

(1)熱力学教育

熱力学におけるガスサイクルの理解とともに、正サイクルの原動機（エンジン）と逆サイクル（冷凍機、ヒートポンプ）の違いの教育に最適な教材である。

一方、エンジン動力の測定を行うことにより、投入したエネルギーの動力への変換割合、損失分の見積等、エネルギー利用技術の修得が可能になる。

教材用スターリングサイクル機器を用いた性能計測は、機械工学実験における熱力学分野の一つのテーマ（2～4コマ、100分/コマ）になり得る。

(2)計測工学、センサ工学、エレクトロニクス教育

本エンジンの詳細な性能特性を調べるには、シリンダ内圧力と温度の計測が不可欠である。また、圧力データ取り込みの際には外部トリガ信号が必要になる。すなわち、フォトインタラプタにより信号を取り出し圧力データを取り込む必要性が生じる。また、回転数は、フォトインタラプタからの信号を製作したカウンタ回路を用いて計測することができる。

すなわち、機械工学実験における一つのテーマ（2～4コマ、100分/コマ）としてエンジンの性能特性を調べながら、計測工学、センサ工学、電子回路等の教育訓練も可能である。

(3)情報処理教育

本教材は、その設計において予め性能予測を行う必要がある。その際には比較的簡単な理論付けによりサイクルシミュレーションを行うことが可能である。また、エンジンの性能特性を調べる際の圧力データの処

理にも簡単な計算処理及びグラフィック処理を行う必要がある。すなわち、理論及び実験上得られる圧力変化は、パソコンにより P （圧力）- θ （クランク角）線図、 P （圧力）- V （行程容積）線図等をグラフ化するとともに、図示出力を算出する必要がある。このような情報処理は、学生にとって目標が明白であることから、その教育効果は高い。

本教育訓練では、情報処理演習の一つのテーマ（4コマ、100分/コマ）としてエンジンあるいは冷却機のシミュレーションあるいはデータ処理に用いることが可能である。

図10に示すように、本教材により創造教育、熱力学教育、設計教育、加工教育、電子回路そして情報処理等と機械システム系の多くの教科を取り込んだ教育訓練が可能であり、全てを包含することにより卒業研究課題としても十分成り立つ。すなわち、スターリングサイクル機器は学生の入学から卒業までの多くの教育訓練に関わる効果的な教材の一つになりうると思われる。

VIII 結言

機械システム系における教育訓練に当たり、効果的な教材を提供することを目的に、教材用スターリングサイクル機器の開発を行うとともに、その利用法を検討した。得られた成果を列挙すると次のようになる。

- (1)お湯と外気との温度差で動作する空き缶と注射器を主材料としたエンジンを汎用工作機を使用することなく製作できた。
- (2)ローソク、アルコールランプ、ガストーチ等の身近にある熱源により動作するエンジンを汎用工作機、NC工作機等により製作できた。
- (3)熱力学上の正サイクルで動作するエンジンに対して逆サイクルにより温度低下を誘起する冷却機を製作できた。
- (4)教材用エンジンの微小動力計測を目的とした小形直流電気動力計を考案し、数 mW の軸出力測定が可能になった。
- (5)エンジンの軸出力を測定した結果、簡易加工エンジンでは 1 mW (30 rpm)、機械加工エンジンでは 48 mW (1,505 rpm) の最高軸出力が得られた。一方、冷却機では 8.5℃ の温度低下が得られた。
- (6)本開発教材は、安全性が高く、創造教育、設計・製作教育等多くの教育訓練の成果向上に有用である。

おわりに、本教材開発には当時本学学生、鳥海和史

君、菊地道雄君、鈴木慎一君そして榊美晴君の協力を得たことを付記する。また、本教材の開発に当たり平成6年度職業能力開発短期大学校指定研究の援助を受けた。ここに、関係各位に深く感謝申し上げる。

参考文献

- (1) 浜口、スターリングエンジンの作動原理、日本設計工学会・教材用スターリングエンジン技術講習会テキスト、1994年、p 3-13.
- (2) 浜口、環境に優しいスターリングサイクル機器の現状と将来、内燃機関、31-4、1992年、p 56-70.
- (3) 浜口、模型スターリングエンジンを用いた設計・製作教育（その1 スターリングエンジンの概説）、技能と技術、29-3、1994年、p 56-59.
- (4) 浜口・植木・佐賀、模型スターリングエンジンを用いた設計・製作教育（その2 設計教育）、技能と技術、29-4、1994年、p 50-54.
- (5) 佐賀・植木・浜口、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、1994年、p 51-55.