

教育用スターリングエンジンの試作と展示

A Trial Production and Exhibition of a Stirling Engine for Education

中野 勝巳, 鈴木 夏夫

Katsumi Nakano, Natsuo Suzuki

玉川大学工学部機械情報システム学科, 194-8610 東京都町田市玉川学園6-1-1

Department of Intelligent Mechanical Systems, Faculty of Engineering, Tamagawa University,

6-1-1 Tamagawa-Gakuen, Machida, Tokyo 194-8610

Abstract

The authors wished students to attend the class for machine tooling with interest and to enter practicing the work after understanding the role of machine tools. These emotions promoted the authors to produce a prototype Stirling engine, for environmental and creative design education, also to provide how to learn the mechanical motion and the structure, the process of which was developed to open at the technology exhibition held by JSME.

Keywords: Stirling engine, Environmental and creative design education, Technology exhibition

1. はじめに

工学部機械情報システム学科の2年次において、ものづくりの基礎として工作実習や工学基礎実験授業で、旋盤・フライス盤・ボール盤・NCマシン（数値制御）等の工作機械や関連するネジきり用ハンドタップやダイス・ヤスリ・弓ノコ・罫書き等、簡単な手工具の基本実習が行われているが、ここ数年、学校や家庭で危険な道具は排除され、手にする物はゲーム機・携帯電話・パソコン等になり、ものづくりの機会が少なくなって来た学生は機械工作系授業に関して興味を持って授業に取り組む姿勢が年々薄れてきたように感じられる。また、スパナ・ヤスリ・ボルト等の名称や使用した事がない、鉄とアルミニウムの区別がつかない学生が多々見られる。一般常識である事でも親切丁寧に指導しなければ安全に関わる事なので説明に多くの時間が費やされて実習内容が少なくなって来ている。今回このテーマに取り組

んだきっかけは、上記理由により授業の始めに、多くの工学系工作授業で取り入れられていて教材としては色々な要素を含んで最適であると言われていたスターリングエンジンを取り入れ、動く工作物に注目させて興味を持って取り組んでもらうために、試作の経緯から教材としての教育効果と、現在までの学内外展示状況を報告する。

2. 試作コンセプト

スターリングエンジンを試作するにあたり、以下の方針を設けた。

- (1) 学生が工作実習で使用する実習場の機械・手工具類で製作する。
- (2) エンジンの動力を利用して動きのある機構が学べる教育的付加価値を実現する。
- (3) 今後の卒業研究課題で設計・工作・組み立て手順などで応用できる機構にする。
- (4) 色々な熱源に対応できるようにする。

- (5) 実習での加工部位がどのような所に使用されているのか見やすい構造にする。
- (6) 実習で使用している手工具でも分解・組み立てができるようにする。
- (7) 学内外で行われる科学技術イベントで当工学部の広報活動として移動展示が容易に出来るサイズと重量にする。
- (8) 安全で、見て楽しいデザインにする。

スターリングエンジンの作動原理は、空気を加熱すると膨張し、冷却すると収縮する性質を利用した簡単なエンジンで爆発を伴わないため、比較的クリーンで環境に優しく静かである。

今回のテーマは、スターリングエンジンの研究が目的ではないため、詳しい説明は避ける。

3. 1号機の試作

平成18年9月 着手

平成19年3月 完成

型式としては素人でも比較的わかりやすい外観で、メカニクなγ（ガンマ）型スターリングエンジンを採用し、図1のように全体を軽量で熱伝導率に優れて加工しやすいアルミニウムで製作することにした。熱源はキャンプ等で使用されているカセットガスコンロを採用した。

約6ヶ月で試作が完了し、試験運転したところ約3分で動き始めて順調に連続運転していたが、1時間程で全体に熱が伝わり温度差が小さくなって回転が下がって来た。強火にしても限界がありエネルギーロスも著しいため試験運転を1時間30分程で中止した。冷却して数回試したところパワーピストンとシリンダーの壁にキズが出来て動かなくなり対策が必要になった。



図1 1号機と実習場

● 1号機の問題点

1. 高温側のディスプレイサーと低温側のパワーピストン・シリンダーの間が接近した設計になったために熱の伝達が早い。
2. ピストンの材質がシリンダーと同じ材質のアルミニウムなので潤滑剤を添加しても温度上昇に対応出来ない。

● 対策

1. ディスプレッサーヘッド部と左右をつなぐブリッジの上部に冷却フィンを取り付ける。
2. ピストンに0.04mmのクロームメッキをコーティングする。
3. 小型モーターでディスプレイサーヘッドとピストンシリンダーブロック下部を強制空冷化する。

● 対策結果

対策1と3の冷却フィンと強制空冷化は、多少の効果は認められたが根本的な解決にはならない。対策2のメッキでは、効果がはっきり現れ3時間の連続運転も可能になり以後一度もキズが付かないが、イベントなどの1日中連続運転では3回程度冷却が必要になる。

• 教材としての1号機

スターリングエンジン最初の教材として使用したのは、平成19年4月からの春学期、2年生の工作実習で加工部位や機械加工に興味を持ってもらうためにテスト導入した。全員注目して興味を示したが、ただ回転しているだけなのでメカに興味のない学生には動力としての創造性を刺激するまでには至らない様子であった。1号機は市販の教育用スターリングエンジンに比較して大きく授業では見やすいが、動力を利用してメカニカルな見栄えのある仕事をさせるほどパワーがないため試作コンセプトで掲げた動きのある機構が学べる教育的付加価値をつけるまでには至らなかったため2号機の構想に着手した。

くし、その仕事量を大きくする。また、大型化を防ぐために高温側と低温側を出来るだけ近接設計にしてコンパクトにする。しかし、近接設計にすると1号機と同様に熱の影響を受けやすいので熱を遮断するためにパワーピストン側を水に浸して水冷構造とし、水を循環させて温度差を大きくする。これにより1号機の弱点である熱影響を低減させると共にパワーアップさせることにした。スターリングエンジンはガソリンエンジンの様な内燃機関ではなく、外燃機関なので熱源は工場廃熱・太陽光・バイオマス燃料等を利用することが出来るが、教室などで気軽に利用出来る300ワット程度の電気コンロとカセットガスコンロを熱源に採用する。

4. 2号機の試作

平成20年9月 着手
平成23年10月 完成

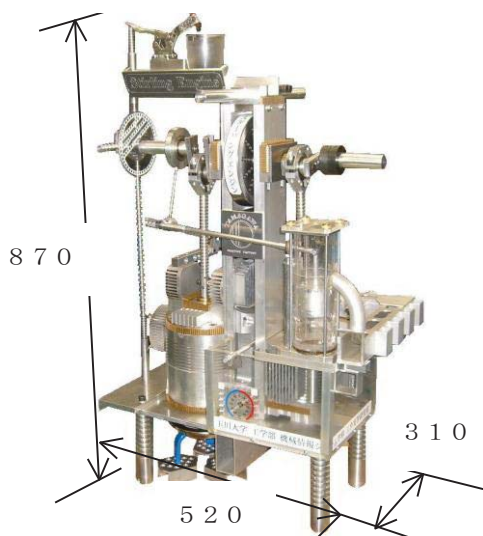


図2 2号機の外観

(1) 基本構造設計と熱源

1号機で達成出来なかった動きのある機構が学べる教育的付加価値を実現するため基本コンセプトは変えないで1号機と同じγ（ガンマ）型スターリングエンジンを採用して作動行程容積を大き

ディスプレイサー側



図3 基本ユニット

- 基本ユニットは、防水性を意識して出来るだけシンプルで頑丈に製作する。



図4 フライホイールとクランク軸の軸受

- フライホイールは、子供の指が穴に入らないように安全を考慮してデザインする。

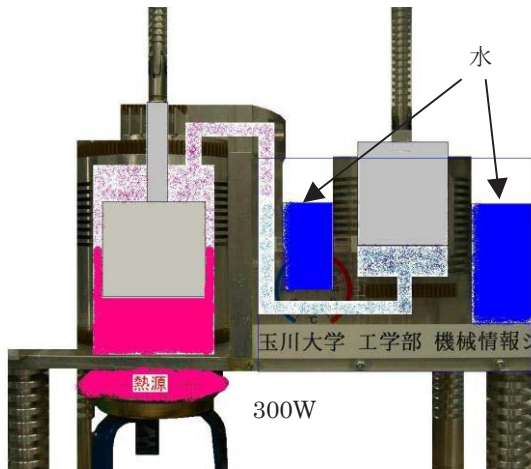


図5 基本構造内部

- 構造内部の穴仕上げは、作動流体がスムーズに流れるように出来る限り滑らかに仕上げる。



図6 熱源・カセットガスと電気コンロ

- 環境問題を考慮して、出来るだけガスは使わずに電気コンロで動くように工夫する。

(2) 主な部品の加工

- 1号機・2号機とも実習工場内で製加工することにしてメンテナンスや質問に対応できるようにした。また、材料は廃材を利用する。
- この試作を通して今後、機械工作授業で利用するために製作過程を記録する。

1. 旋盤によるディスプレイサーブロック加工

- 大径穴グリ加工で深く肉厚があるため時間がかかる。この後、冷却用フィンの溝加工もある。

アルミニウムは軟らかく傷が付きやすい。見栄えのことを気にしながらチャックを締め付けるので加減が必要になる。



ドリルで下穴加工

バイトで穴を拡大

図7 旋盤による穴加工

2. 旋盤によるパワーピストン加工

- ピストンは軽量化するために厚み1mmまで薄く削るので神経を集中させて慎重に加工する。ネジ切りも密閉する蓋に合わせながらの作業で気が抜けない。（先に密閉蓋を加工）



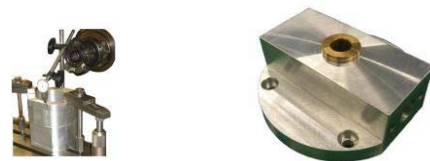
ネジ切り

切断

図8 旋盤によるネジ切りと切断

3. フライス盤によるディスプレイサーブロック（左）とヘッド（右）の加工

- 支柱取り付け用の面加工を行うが両面加工なのでダイヤルインジケータで平行出しをしてからクランプする。横型フライス盤なので回転テーブルに段取りして加工する方法もある。ディスプレイサーヘッドも同様にして加工する。ヘッド中心部にロッドガイドが打ち込まれる。



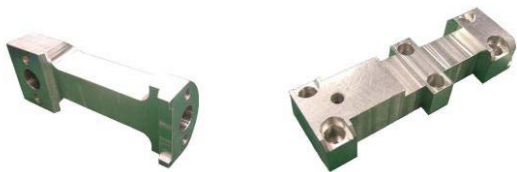
平行出しと平面加工

段差と取り付け穴加工

図9 フライス盤による面・段差・穴加工

4. フライス盤・ボール盤によるマニホールド加工

- フライス盤の加工は多少複雑だが精度的にはそれほどでもない。中心部のボール盤加工は深いので切り屑の排除と熱の影響による面精度に気をを使う。また、直角に穴がつながり作動流体がスムーズに流れる様にするため、慎重に加工する。従って直角度が重要になる。



R形状と深穴加工 段差と取り付け穴加工

図 10 フライス盤・ボール盤による形状加工

5. ワイヤ放電加工機による大径とベアリング保持用ピストンコンロッドの形状加工



大径穴加工 ピストンコンロッド形状加工

図 11 ワイヤ放電加工機による形状加工

6. 細穴放電加工機によるステンレス製ヒートキャップの取り付け下穴加工

- ヒートキャップは熱源を直接受けるので錆びにくく硬い材料であるステンレスを使用するので細穴放電加工機を使う。



M4 ネジ下穴 鍋蓋と同時下穴加工

図 12 穴放電加工機による細穴加工

7. NC機（数値制御）マシニングセンターでのプログラミングによる文字加工



図 13 マシニングセンターによる文字加工

5. 基本組み立てと試運転

図14の状態を試運転するのに必要な基本組み立てを行い試運転したところ30秒ほどで回転を開始した。連続運転をするためにガスコックを絞り最低回転の毎分 120 回転まで下げて連続運転したところ、1 時間ほどで回転が下がり停止しそうになった。

熱源の火力を必要に応じて強くすれば回転は維持できるが、エンジン全体に熱が伝わってディスプレイ側とパワーピストン側の温度差が小さくなってしまい、更に火力を強くしなければ回転を維持できなくなり3 時間ほどで停止してしまい、一旦冷却する事になった。

スターリングエンジンは温度差を大きくして、それを維持するかが大きな課題である。

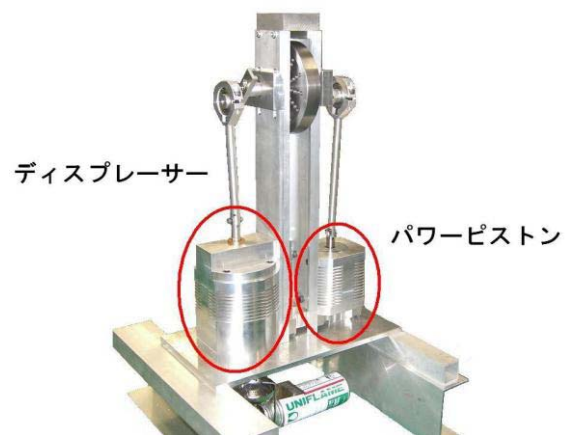


図 14 基本組み立て

(1) 問題点

1. 時間経過と共にエンジン全体に熱が伝わり温度差を維持できなくなり回転が下がって、一旦冷却しなければならない。
2. イベント出展では見学者が途切れないために1日中連続運転（最低7時間）する必要がある。
3. 教育的付加価値のある機構にするにはクランク軸から動力を取り出す必要があるため更に温度差を作り出す工夫が必要である。
4. 電気コンロの熱源では、300Wの低いワット数を目指しているので動く部品を出来るだけ軽量化する必要がある。

(2) 対策案

1. パワーピストン側を水で冷やす。
2. 水温を一定に維持するために水を循環させる。
3. 水を分散させて滝の様に冷却する。
4. 目の細かい金網を通して冷却する。
5. 電動空冷ファンで柱（左の高温側）と水を冷却する。（イベントなどの長時間連続運転時）
6. 冷却フィンを増やす。
7. 循環水路を長くする。
8. 動く部品を軽量化する。
9. ベースの中間に熱遮断壁を設ける。
10. 温度計を設置して温度管理をする。

(3) 対策

- クランクシャフトの偏心回転をベアリングとロッド棒で直線運動に変換し動力を取り出す。
 - テコの原理を利用して井戸式ポンプを稼動。
1. クランク軸から動力を取り出して井戸式ポンプで水を汲み上げる。

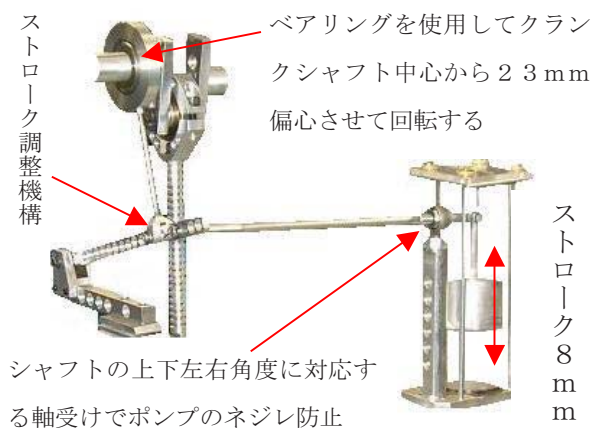


図 15 クランク軸から動力を取り出す

2. 中が見えるようにパワーピストン側（右）を透明なアクリル板で水槽を製作する。



図 16 水槽でポンプのテスト

- 現時点では水温が53℃まで上昇していた。
 - 水漏れが少し発生したので止めネジを追加
3. 動力の取り出し方やテコの原理を解りやすく説明するために井戸式手押しポンプの機構で水を吸い上げて循環冷却させる。



図 17 井戸式ポンプ

5. 図20のように水を4本のパイプで分散させ滴のように流し中間の金網で再度分散させて水温を下げる。

4本のパイプでお湯を分散



図 20 冷却用パイプと金網

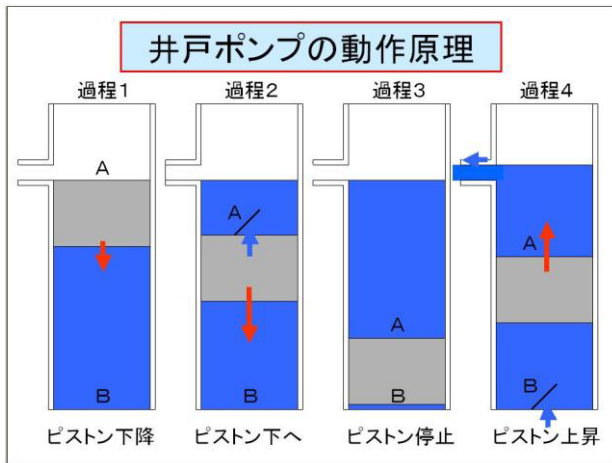


図 18 ポンプの動作原理

- 水をポンプで吸い上げるのにパワーがかなり必要なのでストロークやテコの支点の調整が困難である。

4. 図19のように水中に小型の円形温度計を設置し、熱源を調整して水温を管理する。

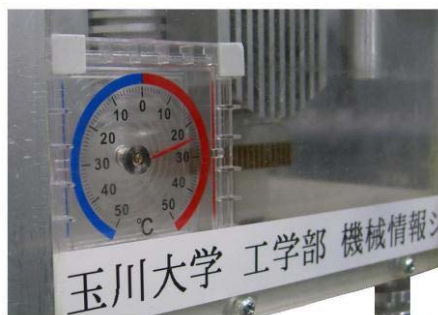


図 19 水中温度計

6. 図21のように井戸式ポンプと循環水路を合体させた水循環式冷却システムで水温を下げる。

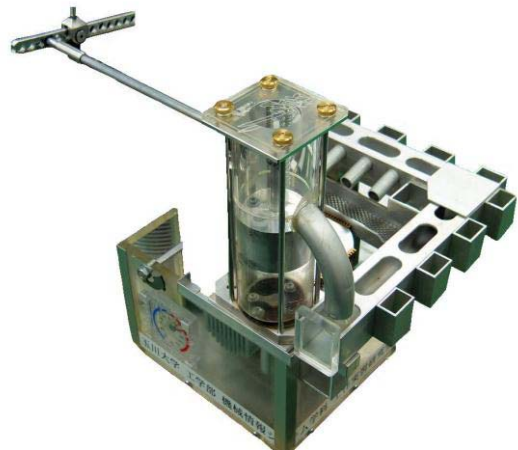


図 21 水循環式冷却システム

7. 長時間連続運転時に高温側の柱が熱膨張してクランクシャフトと柱の直角度に影響を与えて回転数が下がってしまうため電動ファンで高温側の左柱に風を送り柱に当て上下に分散させると左右の柱がほぼ同じ温度になり、柱の熱膨張の防止と同時に水槽の水を冷却し、水温を低下させることになった。



図22 柱と水面の冷却用電動ファン

(4) 結果

水冷循環システムで実験した所、対策前は2時間程で水温が以前は5.3℃まで上昇していたが対策後は3.6℃までで、水は濁ってきたがその後は一定の温度になり安定して連続運転が可能になった。濁りも以前より改善されて水の入れ替えなしで中が見える状態になった。

6. 動力の取り出し

(1) クランクシャフトの偏心回転運動を直線運動に変換する

- リンク機構を利用する。
- クランクシャフトの先端軸を偏心させて先端にベアリングを取り付け、水平方向の長穴にセットし回転すると、パイプで上下可動のみに矯正されたロッド棒が上下の直線運動に変換されるので動力として取り出しが容易になった。

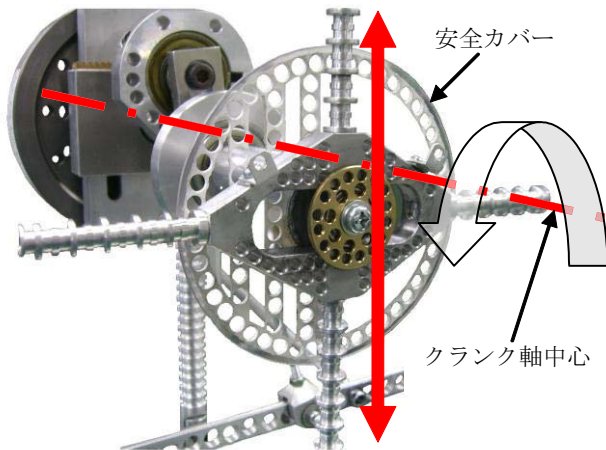


図 23 回転運動を直線運動に変換

(2) 直線運動を円弧運動に変換する

- 突き上げるロッド棒で動物に見立てたハンドクラップのリンク機構を利用して円弧運動の動きで玄米を搗く遊び心を取り入れた。

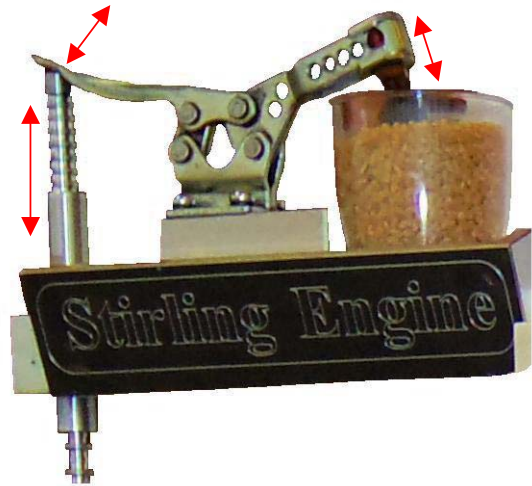


図24 直線運動から円弧運動に変換

7. 大学内外の展示

(1) 学園祭 工学部テクノフェスタ 2011

- 今回のテクノフェスタでは2号機が完成して快調に連続運転出来て大変な反響を得た。中でも40代の方は、弁当持ちで一日中見ているも飽きないとのこと。
- ある中学2年生の男子は小学6年生から3回連続で訪れて興味深く毎回長い時間見ていた。

実習工場公開

B2 610・611教室

スターリングエンジン実演

実習用・水冷式

工作実習研究室

図25 テクノフェスタ 実演案内

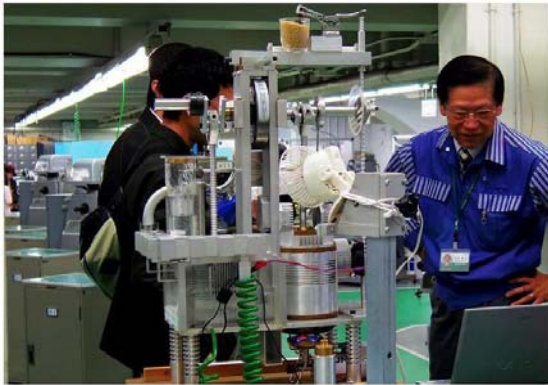


図26 テクノフェスタ 見学風景



図28 日本科学未来館 見学風景

(2) 第14回スターリングサイクルシンポジウム
(エンジンシステム部門・教育教材機器展示)

主催：一般社団法人 日本機械学会

開催日：2011年12月7・8日

開催地：日本科学未来館 7F (東京)

- シンポジウムでは学会員の方は勿論、一般の方にも開放されて大勢の人で大変賑わった。
- 社会見学の小・中・高校生や大学の卒業研究・中国からの留学生など興味ある人達が質問・カメラ・ビデオ撮影に熱中していた。
- 男子大学生が授業の始めにこれを見せられたらガッツリのめり込めるのに、と言っていた。
- 学会員の方でスターリングエンジンは静かな音が利点の一つに数えられるが、展示では心地よいメカ音が逆にリズムカルで見ていて飽きない演出になるとの評価を得た。



図27 日本科学未来館 小学生の見学風景

(3) 工学基礎実験授業風景

- 授業ではこのエンジンを使って各工作機械で加工される部分の説明、組み立てのポイントや安全面などを説明している。また、卒業研究課題で物を設計する場合の機構などを簡単に紹介している。

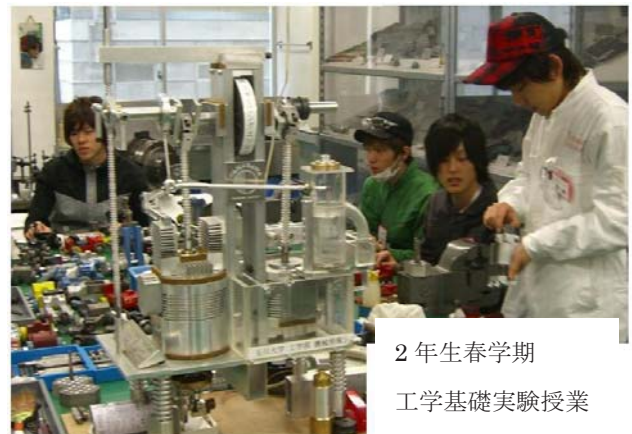


図29 授業風景

7. おわりに

試作目的としては、機械工作系授業でなかなか興味を示さない学生や工作技能レベルの低い学生に対して授業の開始時に興味を持ってもらうために試作した。私自身がこれだけ大きな(産業用以外で)スターリングエンジンを試作するのは初めてであり動くかどうか不安であったが自分のスキルアップのために

も挑戦してみた。試運転で回転を開始した時は感激したが、その後の連続運転では熱の影響等でトラブルが連続して対策に苦悩する日が続いた。トラブルを解消してほぼベストな状態に完成して授業でも使った結果、好評を得たので教育目的は達成できた。当工学部の卒業研究課題で3年連続スターリングエンジンを研究しているのでアドバイスに役立っている。学内外でのイベントに展示して大勢の方に見て頂き色々な意見を頂いたのでこれから少しでも多く実現して行きたい。たとえば太陽光やバイオマス燃料でスターリングエンジンの熱源に活用し発電させて環境問題を考える教材を製作したい。

2012年2月10日原稿受付

Received, February 10, 2012