

エネルギー変換の学習を目的とした スターリングエンジンの教材としての応用

芝原 寛 泰・小栗栖 隆・手島 光 司

(京都教育大学理学科) (京都教育大学理学科) (京都教育大学産業技術学科)

関根 文太郎・住田 光 弘

(京都教育大学産業技術学科) (元京都教育大学産業技術学科)

An Application of Stirring Engines to Teaching Materials for the Study of Energy Transformation

Hiroyasu SHIBAHARA, Takashi OGURUSU, Koji TESHIMA,
Fumitaro SEKINE, Mitsuhiro SUMITA

2002年11月30日受理

抄録：理科授業におけるエネルギー学習で重要なことは、エネルギーについての知識にとどまらず、生徒一人一人がエネルギーとは何か、さらにエネルギーの生産・消費、エネルギーの利用、エネルギー変換について身近なことから結びつけて体験することである。特に重要な位置を占めるエネルギー変換の学習教材としての模型スターリングエンジンの製作と利用方法について報告する。気体の持つ様々な性質を学びながら、気体のする仕事に関連してエネルギーの取り出し方、変換効率についても同時に学べる点で、模型スターリングエンジンは学習教材として有効である。

キーワード：スターリングエンジン、エネルギー変換、学習教材、理科教育

1. はじめに

エネルギーの変換については、エネルギーの種類及び利用の学習と並行して、中学校、高等学校の理科の学習において重要な内容となっている。しかし、生徒にとってエネルギーについての学習は抽象的な内容が多く、また実際にエネルギー変換を体験する学習教材が少ないため困難な場合が多い。本研究では、熱による気体の膨張・圧縮により気体が仕事をする事、また熱もエネルギーの一種であること等を、体験をとおして学習できる教材の開発を目的として行った。以上のようなエネルギー変換を体験させる教材として、本研究では模型スターリングエンジンを用いた。模型スターリングエンジンの製作及び操作による体験をとおして、エネルギー変換の原理や変換効率を学び、エネルギーの効率的利用を日常生活に生かせることをねらいとした。体験をとおしての理解は忘れにくいものであり、身近な材料による「ものづくり」の体験を踏まえた学習教材の開発に主眼をおいた。

II. スターリングエンジンとは^{1,2)}

熱機関の一種であるエンジンは、熱エネルギーを動力（仕事）に変換する一種のエネルギー変換装置である。エンジンの種類には内燃機関と外燃機関とがある。スターリングエンジンは外燃機関に分類される。外燃機関とは、シリンダー内に密封された気体を外部からの加熱と冷却による、シリンダー内の圧力変動から動力を取り出す機構をもっている。スターリングエンジンは1816年にロバート・スターリングにより発明された。このエンジンの長所は内燃機関に比べ振動が少なく、また騒音も小さく、理論的にはカルノーサイクルと同じ高い熱効率を示す点である。また、逆サイクルにすると冷凍機の役割を果たす。外燃機関であるため、熱源を選ばず熱源として石炭などの固形燃料だけでなく、太陽熱や地熱などを用いることもできる。また、排気ガス中のNO_xやCOのような環境に悪影響を及ぼす気体が内燃機関に比べ圧倒的に少ない。小さい温度差でも動かす事ができるため、今後、実用化の可能性のあるエンジンである。しかし、密封された気体の漏れを防ぐ機構等の問題点があり、内

燃機関にとって代わることは現時点では難しい。しかし、世界各国で実用化を目指した開発が行われている。

本研究では、2ピストン型とビー玉型の2種類の模型スターリングエンジンを試作した。2種類のエンジンを教材として取り上げた理由は、ビー玉型の場合、製作が簡単で熱による気体の膨張、圧縮がゆっくり行われるので、気体の性質を理解しやすいためである。また2ピストン型の場合は熱から仕事を取り出す際に、エネルギー変換を実際に体験できるためである³⁾。

III. 2ピストン型スターリングエンジン

1. 特徴について

中学校の現行教科書ではエネルギー変換の例として、主に運動エネルギーと位置エネルギーの変換を扱っている。熱→仕事の変換の例は、火力発電・原子力発電の原理に関連して、水を加熱により沸騰させ、その蒸気でタービンを回し仕事をする例を扱っている。しかし、身近にある車のエンジンの動作原理は扱われていない。内燃機関と外燃機関の違いを除けば、熱による気体の膨張・圧縮によって仕事を取り出すという原理は車のエンジンの場合も同じである。2ピストン型スターリングエンジンを教材として用いる事によって、エンジンの基本原理とエネルギー変換および変換効率について学習できる点に注目した。

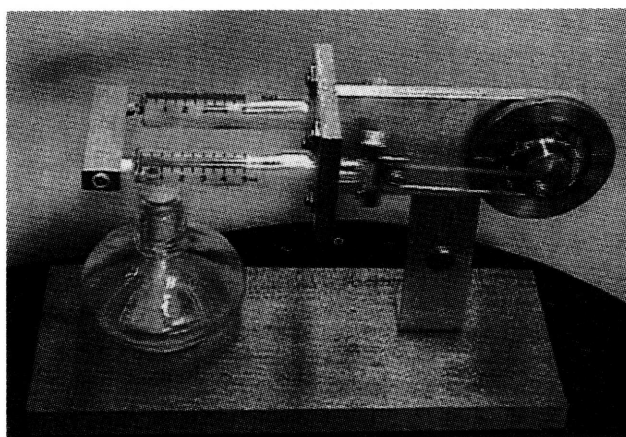


図1 2ピストン型スターリングエンジンが動作している様子を示す。横幅は約22cm。

本学産業技術学科で開講されている授業「機械基礎実習」において、製作課題として2ピストン型スターリングエンジンを取り上げている。機械基礎実習における装置の製作および教育的意義については、すでに報告されている⁴⁾。動作時の2ピストン型スターリングエンジンの完成品を図1に示す。

2. 動作原理について

スターリングエンジンの動作原理を模式的に示した図2に基づいて説明する⁵⁾。初めに加熱側（熱源に近い側のシリンダー）におけるシリンダー内の気体の温度は加熱により T_1 に上昇し、さらにシリンダー内の圧力は高くなる。

① A → B（等温膨張）

シリンダー内の気体の圧力が高いため、シリンダー内の気体は Q_{ab} の熱量を受け取りながら、温度一定のまま膨張する。それにより、加熱側と冷却側の両方のピストンは下降しクランクとフライホイールを回転させ、運動エネルギーの一部がフライホイールに貯えられる。気体が膨張する時、熱の出入りがないとすると、外に対して仕事をするため、熱力学第一法則 $U = Q + W$ (U = シリンダー内の内部エネルギー、 Q = 熱量、 W = シリンダー内の気体が外にする仕事) より気体の温度が下がる。ここでは、 Q_{ab} の熱量を受け取りながら膨張するため、温度一定のままとなる。

② B → C（等容冷却）

①の行程でフライホイールに貯えられたエネルギーの一部を利用して、加熱側のピストンは上昇し、冷却側のピストンは下降する。その結果、シリンダー内の気体は体積一定のまま加熱側から冷却側に移動する。冷却側に移動した気体は外から冷やされて Q_{bc} の熱量を排出し、温度 T_2 に下がる。温度が下がるため、シリンダー内の気体の圧力は低くなる。加熱側においてシリンダー外からされる仕事と、冷却側においてシリンダー内の気体が外にする仕事と同じになるため、全体の仕事はゼロとなる。

③ C → D（等温圧縮）

シリンダー内の圧力が低くなったため、フライホイールに貯えられたエネルギーの一部を利用して、加熱側と

冷却側のピストンは上昇する。この時、シリンダー内の気体は Q_{cd} の熱量を排出しながら、温度一定のまま圧縮される。気体が圧縮される時は、熱の出入りがないとすると、外から仕事をされるため、温度が上昇する。ここでは、 Q_{cd} の熱量を排出しながら圧縮されるため、温度一定となる。

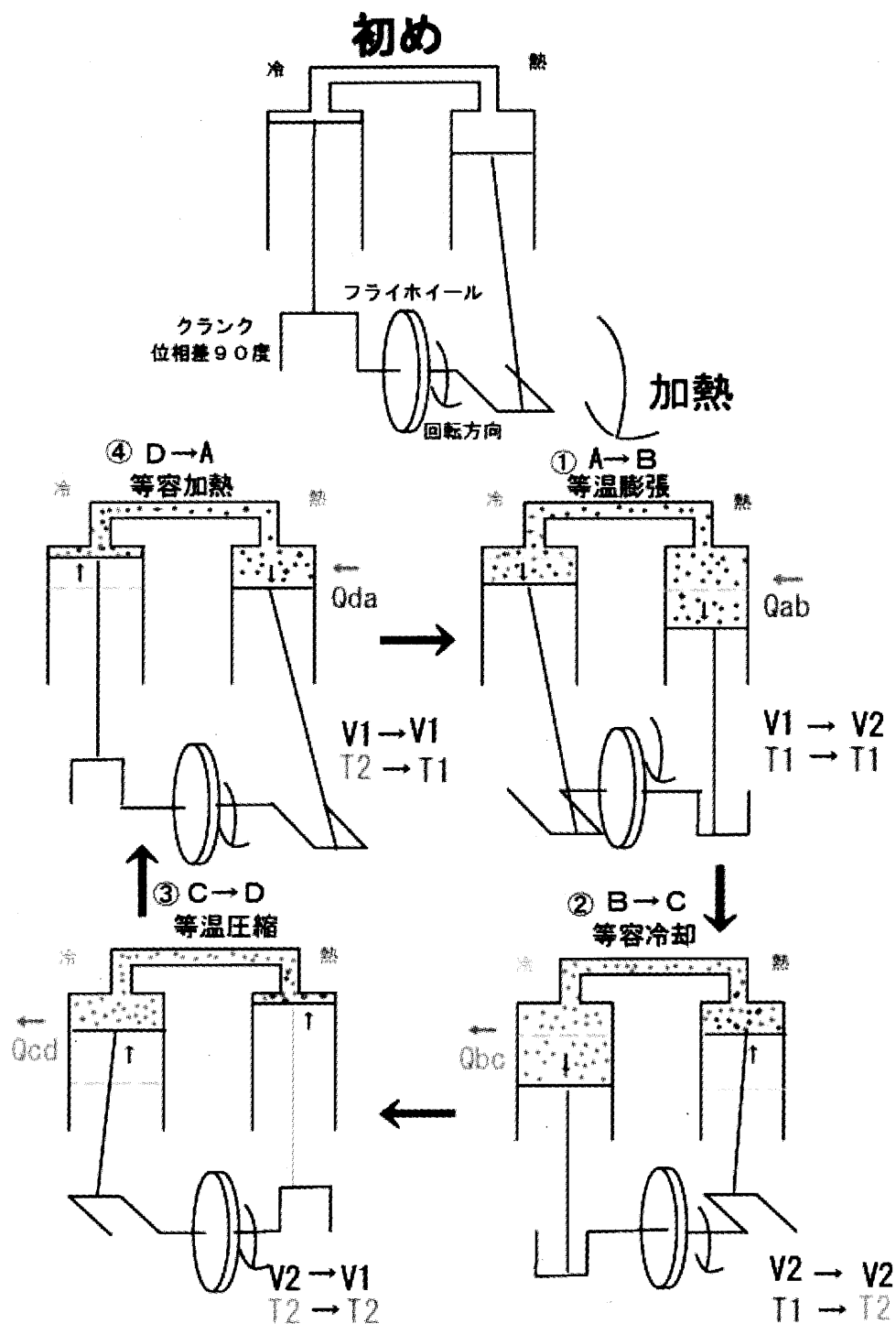


図2 2ピストン型スターリングエンジンにおける動作原理を模式的に示す。

④ D→A（等容加熱）

①でフライホイールに貯えられたエネルギーの一部を利用して、加熱側のピストンは下降し、冷却側のピストンは上昇する。その結果、シリンダー内の気体は体積一定のまま、冷却側から加熱側に移動する。加熱側に移動した気体は Q_{da} の熱量を受け取り、温度 $T1$ に上昇する。温度が上がったため、シリンダー内の気体の圧力は高

くなる。加熱側においてシリンダー外にする仕事と、冷却側においてシリンダー内の気体が外からされる仕事と同じになるため、全体での仕事はゼロとなる。その後、①に戻り繰り返えされる。

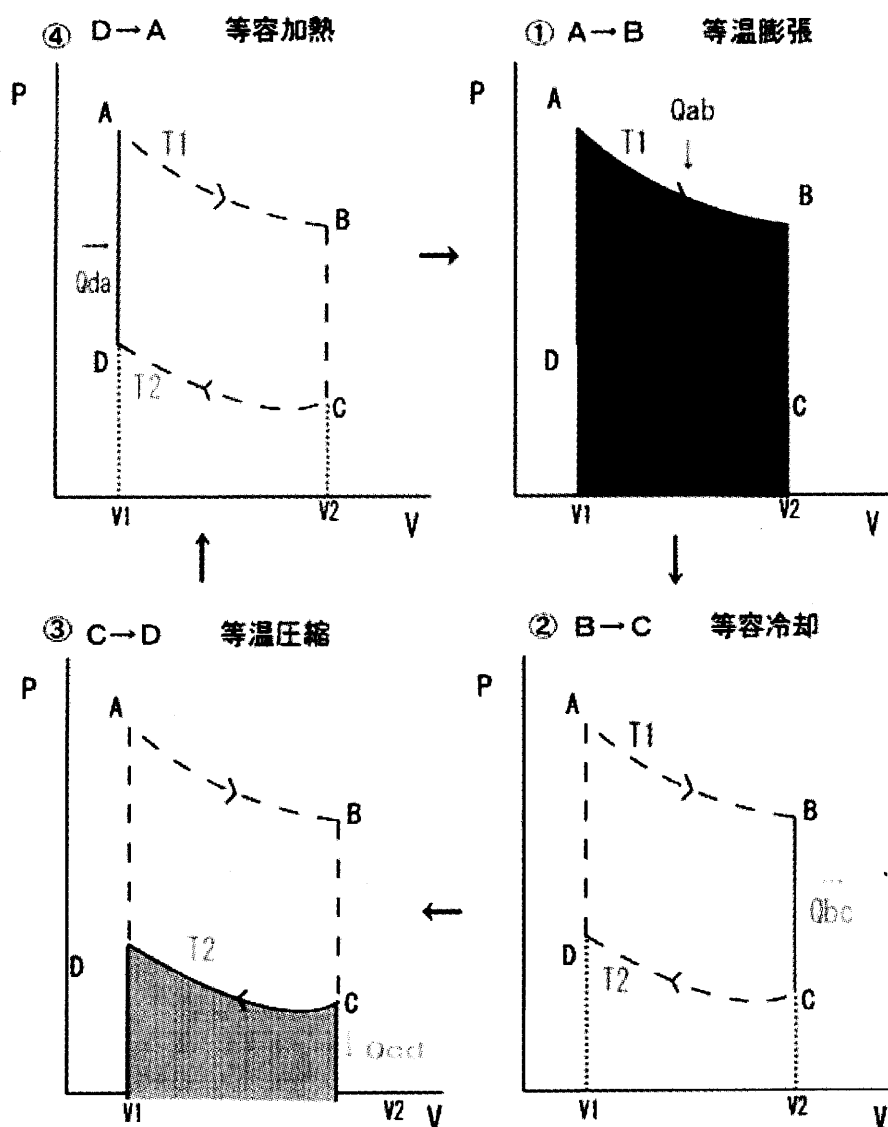


図3 2ピストン型スターリングエンジンにおける圧力－体積の関係を示すダイアグラム。

3. PV ダイアグラムによる説明

PV（圧力－体積）ダイアグラムを用いて動作原理を説明する（図3）。シリンダー内の理想気体のモル数を n 、気体定数を R 、定容比熱を C_v 、等温膨張と等温圧縮におけるシリンダー内の気体の温度を各々 T_1 , T_2 、等容加熱と等容冷却におけるシリンダー内の気体の体積を各々 V_1 , V_2 とする。熱再生器での熱の授受はすべて熱であるとする。内部エネルギー U は $3/2 nRT$ で与えられ、絶対温度と関係している。

① A → B（等温膨張）

温度 T_1 を一定のまま、シリンダー内の体積が V_1 から V_2 に変化する時、シリンダー内の気体が行う仕事 W_{ab} 、熱量 Q_{ab} は温度一定のため、 $U_{ab} = 0$ 、 $W_{ab} = Q_{ab}$ となる。また、 $W_{ab} = \int P dV$ 、 $P = nRT/V$ より

$$W_{ab} = nRT_1 \ln V_2/V_1 \quad (V_2 > V_1 \text{ より, } W_{ab} > 0)$$

$$Q_{ab} = nRT_1 \ln V_2/V_1$$

この時 $W_{ab} > 0$ より, $Q_{ab} > 0$ となり, 熱量 Q_{ab} が供給されている事がわかる。

② B → C (等容冷却)

体積一定のまま, シリンダー内の温度が T_1 から T_2 に変化するとき, W_{bc} , Q_{bc} は体積一定のため, $W = 0$, $U_{bc} = Q_{bc}$, $Q_{bc} = nC_v (T_2 - T_1)$ となる。 $T_1 > T_2$ より, $Q_{bc} < 0$ となり, ここでは Q_{bc} が排出されている。

③ C → D (等温圧縮)

温度 T_2 を一定のまま, シリンダー内の体積が V_2 から V_1 に変化する時, シリンダー内の気体が行う仕事 W_{cd} , 熱量 Q_{cd} は温度一定のため, $U_{cd} = 0$, $W_{cd} = Q_{cd}$, $W_{cd} = PdV$, また $P = nRT/V$ より

$$W_{cd} = nRT_2 \ln V_1/V_2 \quad (V_2 > V_1 \text{ より, } W_{cd} < 0)$$

$$Q_{cd} = nRT_2 \ln V_1/V_2$$

$W_{cd} < 0$ より, $Q_{cd} < 0$ となり, ここでは, 熱量 Q_{cd} が排出される。

④ D → A (等容加熱)

体積一定のまま, シリンダー内の温度が T_2 から T_1 に変化するとき, W_{da} , Q_{da} は体積一定のため, $W = 0$, $U_{da} = Q_{da}$, $Q_{da} = nC_v (T_1 - T_2)$ となる。

$T_1 > T_2$ より $Q_{da} > 0$ となり, ここでは Q_{da} が供給されていることになる。

取り出せる仕事は①でシリンダー内の気体が外にした仕事 W_{ab} と③でシリンダー内の気体が外からされた仕事 W_{cd} を足した値となる。

$$W_{ab} + W_{cd} = nRT_1 \ln V_2/V_1 + nRT_2 \ln V_1/V_2$$

となる。熱再生器での熱の授受が 100% としているため, $Q_{bc} = Q_{da}$ である。供給された全体の熱量 Q_{in} は

$$Q_{in} = Q_{ab} = nRT_1 \ln V_2/V_1$$

で与えられ, 熱効率 = 取り出せる仕事 / 供給された熱量 = $1 - T_2/T_1$

となり, 理想気体で熱交換率が 100% とするとカルノーサイクルと同じ熱効率となる。

図 1 に示す装置では, 加熱源としてアルコールランプを用いているが, 回転数は毎分 1200 回に達する。しかし回転数は高いがトルクが小さいため 2 ピストン型エンジンから直接に動力を取り出すのは難しい。また, 注射器を加熱しすぎると, 注射器の内部が焼きついてしまうという問題点もある。

次に, 2 ピストン型エンジンから動力を取り出す工夫を行った。スターリングエンジンのフライホイールから直接的に動力を取り出すのではなく, ウォームギアを用いて回転数を落としてトルクを上げた。通常のギアの噛み合わせでは, ギア同士の抵抗が大きくなるが, ウォームギアではギアの軸が垂直でかつ交っていない, またウォームとウォーム歯車は 2 ~ 3 歯ぐらいしか重なっていないためギア同士の抵抗が少なく, ウォームギアからの入力小さくても, ウォーム歯車に動力を伝達できる。その結果, ウォーム歯車により大きく減速することができる。この際, エンジンの始動時からウォームギアに力が伝わっていると始動の際, 抵抗になり動かないので, エンジンを始動させるときはエンジンとウォームギアは離しておく。エンジンの回転数が上がった時にエンジンをウォームギアの入力軸に近づけた。クラッチに似た原理でエンジンからの出力軸とウォームギアへの入力軸とを連結させ, エンジンからウォームギアに動力が伝わるようにした。以上の工夫の結果, 回転数を落としてトルクを大きくすることができた。試作した装置を図 4 に示す。図中の A がギアボックス, B が必要に応じて使用できる水冷器を示す。

4. 熱効率の算出

フライホイールの回転数から直接に熱効率を求める方法を検討した。すなわちフライホイールの回転数からもとめた慣性エネルギー (運動エネルギー) と, 加熱に用いた電気エネルギーをもとに熱効率を算出した。慣性エネルギーは次のようにして求めた⁶⁾。回転している円盤の質量を m , 単位体積あたりの密度を p , 半径を a , 角速度を ω とすると, $m = \pi a^2 p$ となり, 運動エネルギー E は

$$E = \pi p \omega^2 \int_0^a r^3 dr = \pi p a^4 \omega^2 / 4 = 1/2 (m/2) (a\omega)^2$$

となる。また熱効率は (慣性エネルギー) / (与えられた電熱量) よりもとめた。熱電対により注射器の中の温度を測定した。1 秒間に与えられた熱量 Q は, 電流を I , 電気抵抗値を R として $Q = I^2 R$ より求めた。また回転計を用いて一分間の回転数をもとめ, $m = 0.16 \text{ kg}$, $r = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m}$, $R = 0.45 \Omega$ とした。その結果, 熱効率は

$7.93 \times 10^{-3} \sim 3.15 \times 10^{-2}$ となった。熱効率が極めて小さい原因は、電気エネルギーのほとんどが加熱部分で放熱されるためである。また、放熱以外にもいろいろな部分で摩擦熱が発生して放出される。その結果、電気エネルギーがフライホイールの慣性エネルギー（運動エネルギー）に変換されるのはわずかとなる。

本実験では、電流値を大きくすると注射器の中の温度が上昇し、同時に熱効率もよくなっている。カルノーが導いた熱機関における熱効率は

熱効率 = $1 - \text{低温相の温度} / \text{高温相の温度}$

である。これは低温相と高温相との温度差が大きいほど熱効率は良くなる事を意味する。今回の実験からも、低温相が一定の場合、高温相の温度が高いほど、熱効率がよくなることがわかった。しかし、本実験では温度が高すぎると熱効率は低くなっている。これは注射器の内部が焼きつき（注射器の筒とピストンの間に異物が入ったり、熱でピストンが膨張し筒とピストンに傷が入る）、機械的抵抗が大きくなったためと考えられる。

模型スターリングエンジンにおける α 型エンジンの熱効率は 2.2×10^{-3} であると報告されている¹⁾。本実験で求めた熱効率の方が、およそ 3 ～ 12 倍高い。報告では回転数から慣性エネルギーを求めるのではなく、出力軸から動力を取り出して熱効率を測定しているため、本実験よりも低い結果となっている。一般に、模型スターリングエンジンの場合、熱効率が非常に低いのは実用エンジンと異なり、熱再生器に相当する場所が特定できないこと、密封する気体が実用エンジンの高圧ヘリウムガスと違い大気圧の空気を用いていることが考えられる。また、模型エンジンの場合、加熱温度が低いことも原因となっている。理論的にはカルノーサイクルと同じ熱効率を示すので、高温相と低温相の温度差が大きいほど熱効率はよくなる。

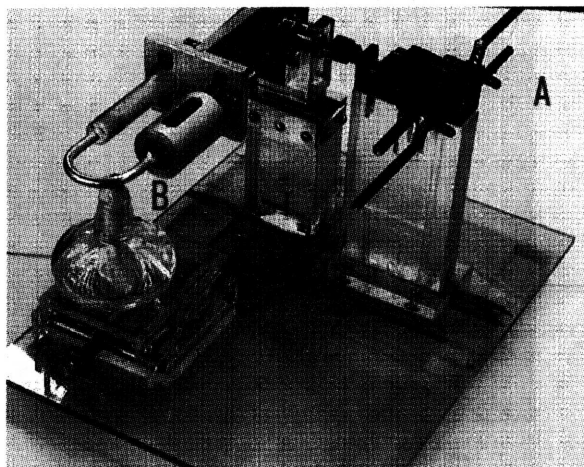


図4 ウォームギアを用いて2ピストン型スターリングエンジンより動力を取りだすための装置。

Aはウォームギアボックス、Bは水冷装置を示す。

5. 熱効率の改善

Ⅲ. 4. の実験より、熱効率は最高で 3.15×10^{-2} であった。次に熱効率の改善を検討した。

1) 熱再生器としての効果をあげるため、連結管の中に銅製のコイルを入れた。連結管に銅コイルを入れた時の測定結果を表1に示す。連結管に何も入れなかった場合と較べて、連結管に銅コイルを入れた場合、熱効率はおおよそ 1.1 ～ 2 倍高くなった。注射器内の気体が加熱側から冷却側に移動する時に、表面積の大きい銅コイルと接する事によって銅コイルが気体から熱を奪い、また冷却側から加熱側に移動する時に、銅コイルに奪われた熱を再び気体が受け取り温められたためである。すなわち銅コイルは熱の授受を行い熱再生器と同じ役割をしていると考えられる。以上より、連結管に銅コイルを入れた方が熱効率が良くなることがわかった。

2) 電熱線の周りから熱が放散されるのを防ぐため、電熱線の周りにガラスウールを巻いた。ガラスウールを巻いた場合の測定結果を表2に示す。ガラスウールを巻くことによって熱効率はおよそ 1.6 ～ 4.5 倍高くなっている。これは、ガラスウールを巻くことによって電熱線から放散される熱量を減らし、保温効果が高まったからである。しかし、電流値を大きくしても熱効果は比例的に良くならなかった。原因として、ガラスウールに熱が残留していたことが考えられる。熱の放散を防ぐ効果は認められた。例えば 11A の時、ガラスウールを取り除くと、注射器の温度は 610℃ から 415℃ に下がった。

6. 取り出した仕事量からの熱効率の算出

フライホールの回転数からでなく、出力軸から取り出した仕事量を求めるため、次のような装置を製作した(図5)。ウォームギアボックスの出力軸から、ベルトで動力を伝える工夫を行った。ベルトで伝えた動力で 500g の錘を 5cm 持ち上げるのに要する時間を求め、また供給されたジュール熱を算出し熱効率をもとめた。電流を 11A に固定して測定した結果、ガラスウールを巻いていないときの熱効率は 3.72×10^{-5} 、ガラスウールを巻いたときの熱効率は 5.04×10^{-5} となった。ガラスウールを巻き電熱線からの熱の放散を防いだ効果があらわれている。

表1 2ピストン型スターリングエンジンにおいて、連結管に銅コイルをいれた場合のフライホイールの回転と慣性エネルギー、さらに熱効率をもとめた結果を示す。

電流 (A)	フライホイールの回転数/分	慣性エネルギー (J)	注射器の温度 (°C)	熱効率
8.5	704	0.56	270	0.0174
9.0	850	0.81	350	0.0223
9.5	1030	1.17	390	0.0290
10.0	1133	1.41	420	0.0315
10.5	1223	1.74	440	0.0353
11.0	1301	2.00	470	0.0344
11.5	1392	2.13	480	0.0360
12.0	1410	2.19	510	0.0341

表2 2ピストン型スターリングエンジンにおいて、加熱部分（シリンダー）にガラスウールを巻いた場合のフライホイールの回転数と慣性エネルギー、さらに熱効率をもとめた結果を示す。

電流 (A)	フライホイールの回転数/分	慣性エネルギー (J)	注射器の温度 (°C)	熱効率
8.0	985	1.06	310	0.0371
8.5	1027	1.15	380	0.0357
9.0	1201	1.58	430	0.0434
9.5	1235	1.67	470	0.0414
10.0	1422	2.22	520	0.0497
10.5	1401	2.16	550	0.0438
11.0	1517	2.52	610	0.0466

IV. ビー玉型スターリングエンジン

ビー玉型スターリングエンジンは春日部工業高校 土田三郎氏の考案による⁷⁾。一般的な作り方はインターネットのホームページ等でも紹介されている。ビー玉型スターリングエンジンは製作が容易で、材料も手に入れやすい。また、気体の性質について、気体の膨張・圧縮がゆっくり行われるため動作を確認しながら理解できる。小学校4年生の現行教科書⁸⁾では気体の性質として、気体の膨張・圧縮を扱っている。しかし、気体を加熱あるいは冷却することにより、仕事が行われることは扱っていない。ビー玉型スターリングエンジンでは、気体を温める事による膨張と、冷却することによる収縮がゆっくりと連続的に行われるので、熱による気体の変化だけでなく、エンジンが動く基本原理も理解できる。

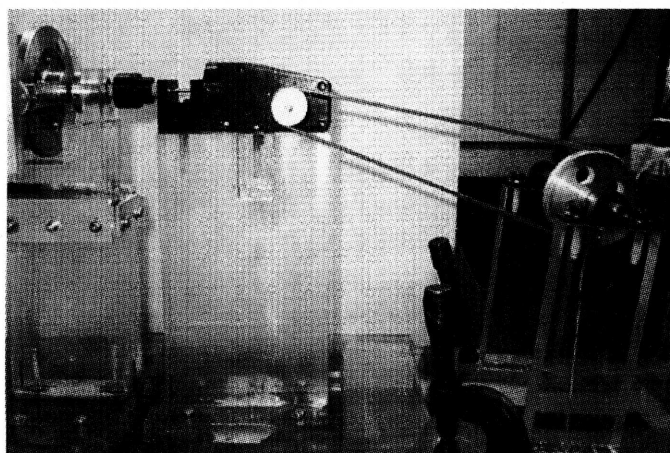


図5 ベルトを使い2ピストン型スターリングエンジンより動力を取り出し、錘を垂直に持ち上げる仕事をさせるための装置。

ビー玉型スターリングエンジンをエネルギー学習の教材として利用するためのいくつかの改良を行った。ビー玉の数、大きさ、冷却方法、支点の工夫、加熱源などについて検討した。完成したビー玉型スターリングエンジンを図6に示す。教材として用いる場合、加熱源としてアルコールランプを用いるのが便利であるが、本研究では熱効率を定量的に考察するため、電熱線による電氣的加熱の方法を用いた。ここでは加熱条件を一定にするた

め、長さ一定の電熱線（ステンレス線，抵抗値 0.74Ω ）を用いた。また，熱電対を用いて試験管の中の温度を測定した。測定は試験管の底から約 1 cm の中心位置で行った。電熱線に流す電流の大きさを変えてビー玉エンジンの動く速さ，及び試験管内の温度を測定した結果を表3に示す。電流 6 A の時に動きだし，試験管内の温度は 245°C を示した。ちなみに，アルコールランプによる試験管の中の加熱温度は 410°C であった。試験管の中の温度は，電熱線を用いた方がアルコールランプの場合と比して低いことがわかる。また電流を大きくすると試験管の中の温度が上がり，膨張による注射器の体積の増加は大きくなる。その際，支点の位置を底側に移動させるので，注射器内での体積が変わる。従って1分間のビー玉の往復回数は，加熱温度に比例しないことになる。

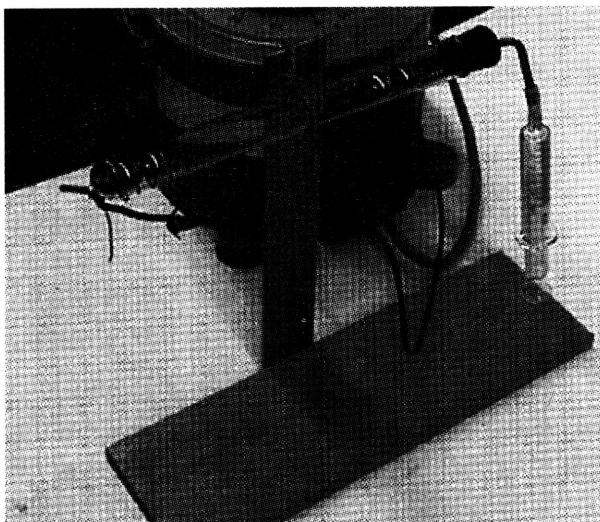


図6 ビー玉型スターリングエンジンを示す。図では加熱源として電熱線を用いている。

V. スターリングエンジンの教材としての活用例⁹⁾

ビー玉スターリングエンジンの製作は小学生でも可能で，気体の熱による膨張・圧縮を理解しやすい。小学校理科⁸⁾では単元名「ものの体積と温度」において教材としての利用が考えられる。この単元では水，空気，金属を温めたり，冷やしたりすると体積がどのように変化するかを学習する。そこで，空気の温度による変化を学び，実際に体験するために，ビー玉スターリングエンジンを用いるとよい。気体を温めると膨張し，冷えると縮む動作の繰り返しによってビー玉エンジンは動いているので，気体が膨んだり縮んだりすることによって物を動かすことができることもわかり，エンジンの動作の基本も体験できる。

表3 ビー玉型スターリングエンジンにおいて電流値をかえて動く速さ（1分間のビー玉の往復回数），注射器の温度等を測定した結果を示す。

電流 (A)	注射器の最大体積 (ml)	注射器の最小体積 (ml)	注射器の温度 ($^\circ\text{C}$)	ビー玉往復回数 (1分間)
6.0	2.9	1.9	245	41
6.5	3.3	2.1	270	35
7.0	3.5	1.8	320	34
7.5	3.5	2.0	360	33
8.0	1.4	1.4	390	34

中学校理科¹⁰⁾では単元名「運動とエネルギー」でビー玉スターリングエンジンと2ピストン型スターリングエンジンを用いることができるだろう。この単元ではエネルギーやエネルギー変換についても学習する。エネルギー変換では運動エネルギーと位置エネルギーの変換を中心にして実験も行う。エネルギー保存の法則も学ぶが，この法則は運動エネルギーと位置エネルギーの相互変換の時だけ成立すると生徒は考える可能性がある。熱エネルギーから動力を取り出したり，電気エネルギーから他のエネルギーに変換する際にも，エネルギーの保存の法則が成り立つことを授業で説明することは重要である。エネルギー保存の法則を理解させるために，熱から仕事を取り出すことを例にあげ，実際に体験させるとよい。ここでは，熱エネルギーの全てが仕事に代わるのではないこと，仕事

として取り出せたエネルギーはほんの一部で、残りは熱として逃げていき、同時に摩擦で熱エネルギーに変わってしまうことも体験をとおして理解できる。変換して利用しているエネルギーは元のエネルギーの一部だが全体としてはエネルギーの保存の法則は成り立っていることを体験により理解できる。また、2ピストン型スターリングエンジンにおいては、演示実験の際、電気エネルギーの供給をどのようにすれば、多くの仕事に変換できるかを生徒に考えさせ実験することによりエネルギーの変換についての理解が深まるだろう。

高等学校¹¹⁾では単元名「熱と気体分子の運動」において、演示実験として2ピストン型スターリングエンジンを用いることができる。この単元では気体の状態変化（体積・運動）によって気体は仕事をしていることを学び、気体がした仕事の計算を学習することもできる。エンジンの基本動作やエネルギーについての理解を深め、エネルギー変換の効率についても考えることができる。

VI. まとめ

理科授業におけるエネルギー学習で重要なことは、エネルギーについての知識にとどまらず、生徒一人一人がエネルギーとは何か、さらにエネルギーの生産・消費、エネルギーの利用、エネルギー変換について身近な事と結びつけて体験することである。エネルギーとは「仕事をする能力」である。従って、エネルギーは仕事という概念なくしては考えられない。しかし、学習指導要領では中学校の指導から仕事の範囲が扱われていない。現行の教科書でも¹⁰⁾、「ある物体が他の物体に対して仕事ができる状態にあるとき、その物体はエネルギーを持っている」と記されている。学習指導要領の下では生徒にエネルギーをどのようにとらえさせたいのだろうか。運動エネルギーだけでなく、電気エネルギー・熱エネルギーの理解も困難であろう。

一方、私達の生活はエネルギーを大量に消費している社会であり、エネルギーを大切にしよう、エネルギーの無駄使いをやめよう、とよく言われる。しかし、熱力学第一法則ではエネルギーは保存されることになっている。私達の生活の中で、エネルギーを消費するとは“使えるエネルギー”から“使えないエネルギー”に変えてしまうことを意味する¹¹⁾。使えるエネルギーとは他のエネルギーに変換しやすい、あるいは私達の生活の中で利用しやすいエネルギーのことを指す。一方、使えないエネルギーとは、他のエネルギーに変換できない、もしくは変換しても、変換する効率が低いエネルギーを指す。使えるエネルギーは私達の生活の中で言えば、例えば電気エネルギーや、石油などが持つ化学エネルギーである。電気エネルギーを変換することによって仕事を取り出せる。この際、元の電気エネルギーなどから光エネルギーや力学的エネルギーに変換されているのはわずかであり、変換する時に必ず熱（熱エネルギー）などの他のエネルギーにも変換される。しかし、熱エネルギーは低温（熱量が少ない）だと使えないエネルギーになる。また石油などが持つ化学エネルギーは大量の熱エネルギーに変換できる。この熱エネルギーを私達は生活で利用している。しかし、熱エネルギーは少しだと使えないエネルギーになってしまう。熱から仕事を取り出すためには高温相と低温相の2つが必要であり、この2つの温度差（エネルギー差）が大きいほど仕事が多く取り出せる。二相の温度差が小さいと、仕事を取り出しにくい。熱エネルギーは使えないエネルギーになる。このようにエネルギーを変換するときは必ず、使えるエネルギーと使えないエネルギーが発生する。つまり、熱力学第一法則の考えに基づけば、元のエネルギー＝（使えるエネルギー）＋（使えないエネルギー）という関係が成り立つ。エネルギー変換の際に発生する使えないエネルギーをどれだけ少なくするかが問題である。使えるエネルギーには多くても数10%にしか変換できない。エネルギー学習において日常生活での電気エネルギーの節約量がたとえ少なくとも、実際はその何十倍もの使えないエネルギーにも変換されている事実を理解することは重要である。本研究で取り上げた模型スターリングエンジンの教材による学習は、エネルギーの変換は元のエネルギーのごく一部しか利用していないという体験が可能となる。

本研究（II. 4 節）では私達の生活の中で物を持ち上げるといった実生活の中で行う仕事を用いて熱効率を求めた。フライホイールの慣性エネルギーから求めた熱効率に比べると、仕事から求めた熱効率は非常に小さくなった。これは、フライホイールから、仕事を取り出すための機構による損失のためである。しかし、慣性エネルギーから熱効率を求めるよりも、本研究のように仕事としてとりだして変換効率を考えると、生徒にとっては生活と深く関わっていて身近なことに感じる。エネルギー学習の中で、重要な位置を占めるエネルギー変換の学習教材として、模型スターリングエンジンは有効である。

文献

- 1) 小栗栖 隆, 2001. 京都教育大学教員養成課程理系教育専攻卒業論文
- 2) 岩本昭一監修, 1997. 模型スターリングエンジン. 山海堂. 東京
- 3) 一色尚次著, 1982. スターリングエンジンの開発. 工業調査会
- 4) 関根文太郎, 手島光司, 1999. 「技術科」教員養成カリキュラムにおける「機械実験実習」製作課題としてのスターリングエンジンの採用とその評価. 京都教育大学実践教育研究年報 第15号 pp173 - 183
- 5) W.J.MOORE 著, 細矢治夫・湯田坂雅子訳, 1985. 基礎物理化学(上). 東京化学同人. 東京
- 6) 波多野彰著, 1999. 身近な現象から学ぶ物理ー自然の基礎概念をつかむためにー 東京玄文社. 東京
- 7) 土田三郎, 1993. これだったら作れる中学生用スターリングエンジン模型. 日本設計工学会 スターリングエンジンの実用に関する調査研究分科会
- 8) 水野文夫監修, 1982. 新版たのしい理科4年下 大日本図書. 東京
- 9) 小栗栖 隆, 芝原寛泰 2000. 熱と仕事の関係を扱う教材研究ースターリングエンジンの改良を例にしてー. 日本理科教育学会近畿支部大会(奈良大会). 要項 p54
- 10) 戸田盛和ら著, 1996. 新版中学校理科1分野下 大日本図書. 東京
- 11) 藤本文範ら著, 1994. 高等学校物理Ⅱ 第一学習社. 東京
- 12) 池内 了, 2000. 私のエネルギー論. 文春新書. 東京