

# 製作題材としてのスターリングエンジンの開発と授業実践

星野 孝仁\*・山本 利一\*\*・戸田富士夫\*\*\*・針谷 安男\*\*\*

キーワード：エネルギー変換、スターリングエンジン、製作題材、教材・教具、技術科

## 1 緒言

平成20年3月に小中学校の学習指導要領<sup>1)</sup>の改訂が示され、中学校では平成24年度に完全実施されることが発表された。中学校技術・家庭科における改訂内容では、授業時間数は変わらないものの、学習内容全てが必修化され、選択授業が教育課程外になるなど、大幅な改訂がなされた。これらのことを受け、中学校技術・家庭科技術分野（以下、技術科と記す）のエネルギー変換に関する学習内容は、選択して履修する内容から必修化され、そのため規定時間内に指導する題材開発などが必要となっている。

エネルギー変換を学習するこれまでの題材は、ロボット製作を通じたロボットコンテストなどの実践が多く見られた<sup>2,3)</sup>。モータを使用し、電気エネルギーを動力エネルギーに変換する仕組みや、クランク機構などを使用して、動力の伝達方法について学習するものである。しかし、これらの題材は、主として選択教科で扱われているため、多くの学習時間が必要であることや、指導者の力量が求められることなどの課題も指摘されている<sup>4)</sup>。

そこで、本研究では、新学習指導要領の「エネルギー変換に関する技術」を限られた時間内で効果的に学習する題材を製作し、それらを活

用した授業展開の提案である。製作題材として、スターリングエンジンを取り上げ、それらの製作を通して、エネルギー変換の技術や動力伝達などを学習すると共に、環境やエネルギー問題について考えさせるものである。

## 2 製作題材の開発

### 2.1 スターリングエンジンの特徴

スターリングエンジンは、1816年に Robert Stirling が熱（空気）機関の特許を取り、1843年に複動形のスターリングエンジンが開発されてから現在まで、環境に優しいエネルギー変換効率の優れたエンジンとして注目され、研究が進められてきた。スターリングエンジンは、構造が比較的簡単であり、様々なタイプのエンジンが考えられることから、工業高等学校、高等学校物理、技術科などにおける製作題材としても研究が進められてきている<sup>5)</sup>。また、スターリングエンジンは、①部品点数が少なく整備の時に専用工具を必要としないため、分解・組立が容易である。②外燃機関であるため、大きな爆発音が発生しない静かなエンジンで、作動原理が熱と気体の関係だけであるため、内燃機関と比べるとエネルギー変換の過程が単純である。③熱源を選ばないことや、有害な物質を出さないことから、環境に対しても優しいエンジンという長所を持っている<sup>6)</sup>。

\* 埼玉大学大学院教育学研究科修士課程

\*\* 埼玉大学教育学部

\*\*\* 宇都宮大学教育学部

## 2.2 製作題材としてのスターリングエンジンの現状と課題

スターリングエンジンの先行研究を見てみると、ビー玉スターリングエンジンなどの実践が多く見られる<sup>7)</sup>。これらは、加工は容易であることが主な要因であるが、常に動作させるためには調整が難しく、また、動作原理を理解させるには工夫が必要である。そのため、近年では、フリーピストン型のスターリングエンジンを使った実践も見られるようになってきた<sup>8)</sup>。先行研究のフリーピストン型スターリングエンジンは、動作させるための調整は容易であるが、シリンダーの加工（試験管の切断）においては、リウータやダイヤモンドカッタなど特殊な工具が必要で、中学生にとっては難しいと言う指摘もなされている。そこで、本製作題材は、①特殊な工具を使用することなく、②比較的短時間で、③安価で製作できることを目標として、製作題材を開発することとした。

## 2.3 製作題材とその特徴

本製作題材は、フリーピストン型スターリングエンジンで、振動カーとも呼ばれるものである<sup>8)</sup>。その外観を図1に示す。本製作題材は、部品が13種類と少なく、比較的短時間で製作・調整ができることが特徴である。スターリングエンジンを動力として動作する振動カーを製作することで、熱エネルギーを運動エネルギーに変換する仕組みについて体験的に学習できる。本製作題材の特徴として、フリーピストンが往復運動するシリンダーを試験管（耐熱性ガラス）を活用するのではなく、ステンレス缶（胡

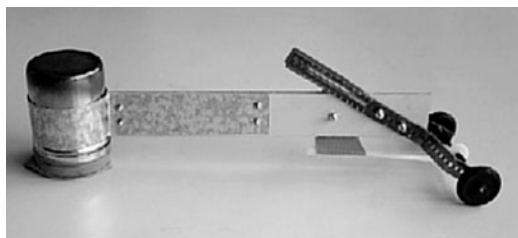


図1 製作題材の概要

椒缶)を活用することで、加工時間を短縮でき、低コスト化を図っている。ステンレス缶には、ネジが切っており、内部を密閉できると同時に、分解・組み立てが容易にできる。ステンレス缶内部にフリーピストン（スチールウール）を入れディスプレイサの役割を果たしている。パワーピストンには、風船を使用して（先行研究ではベローズを活用）、その膨張・収縮を直接動力として取り出している。ステンレス缶の固定には、亜鉛鋼板を使用し、これらが熱の放熱を促す役割をしている。本実践では、熱源にガストーチバーナーを用いた。

振動したエネルギーを前進する運動に変換させるために、歯車とプラスチック爪（タイラップ）でラチェット機構を作り、一定方向に動作する（前進・後進が可能である）仕組みを作り出している。

生徒は、これらの部品加工・組み立て・調整を行うことにより、各部品の役割や内部構造を確認することが出来る。

その他の部品についても、一般の学校でも簡単に入手できる部品で構成されている。構成部品を表1に示す。

表1 構成部品

No.	品名(材料)	サイズ	個数
1.	シリンダー(胡椒缶)	φ50×74	1
2.	ディスプレイサ(スチールウール)	φ48×30	1
3.	パワーピストン(風船)		1
4.	シャシ(木材)	300×35×4	1
5.	ラチェット固定部(木材)	65×30×4	1
6.	プラスチック(タイヤ固定)	170×12×2	2
7.	ラチェット(タイラップ)	80×4×2	1
8.	歯車(プラスチック)	M0.5×1.1×20	1
9.	放熱板(亜鉛鋼板)	400×30×0.3	1
10.	タイヤ	φ40	2
11.	タイヤシャフト	φ3×100	1
12.	ボルト	M3×20	7
13.	ナット	M3	7

## 2.4 学習を支援する教具

本製作題材（フリーピストン方式）の動作原理を理解するためには、熱の移動や空気の膨張・収縮を学習する必要がある。そこで、これらを学習するため、原理が単純な2シリンダー型のスターリングエンジンの教具を活用することとした。

### (1) スターリングエンジンの動作を確認する教具

温度差を利用してスターリングエンジンの動作を確認する教具<sup>9)</sup>（以後、動作教具と記す）は、低温部と高温部に生じる温度差エネルギーを利用して動作するもので、吸熱・廃熱する部分に分かりやすいように製作した。動作教具の外観を図2に示す。

実験授業では、温度差発電装置<sup>10)</sup>（ペルチェ素子）での実験（温度差→電力）後、温度差から動力を取り出す動作教具へ授業を展開した。動作教具は、ディスプレイサ型スターリングエンジンを使用し、熱交換する部分の効率化を図ると共に、温度差発電装置の上部に設置できるようになっている。動作教具の外寸は、幅100mm×奥行100mm×高さ185mmで、120mm

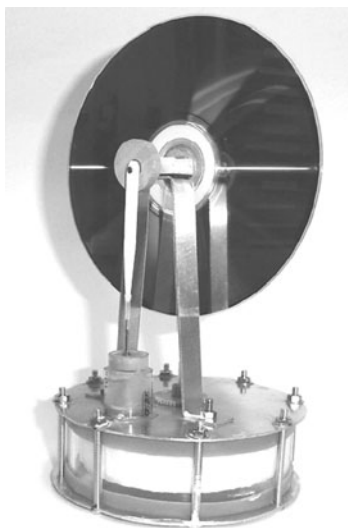


図2 動作教具の外観

のフライホイールを持つ小型のものである。動作教具を観察することで、各サイクルの動作や熱交換に興味・関心を持たせるための導入的役割として活用することとした。また、温度差による動作速度の変化から、エネルギー変換の効率についても学習させることとした。

### (2) スターリングエンジンの動作原理を説明する教具

動作教具は、小型であるため内部構造まで確認することができない。そこで、スターリングサイクルの動作原理を分かりやすく説明する教具（以後、説明教具と記す）を、透明のプラスチックを用いて本体（外枠）を作成した。説明教具の外寸は、幅650mm×奥行280mm×高さ460mmで主要な部品は、直接観察できるよう工夫してある。説明教具の構造を図3に示す。また、クランク部分、コンロッド、ディスプレイサ、パワーピストンは、取り外しが可能で、ディスプレイサ部とパワーピストン部が独自に動作する様子を観察することができる。これらにより、ディスプレイサやパワーピストンの果たす役割について学習することができると考えられる。また、説明教具では、発展的な学

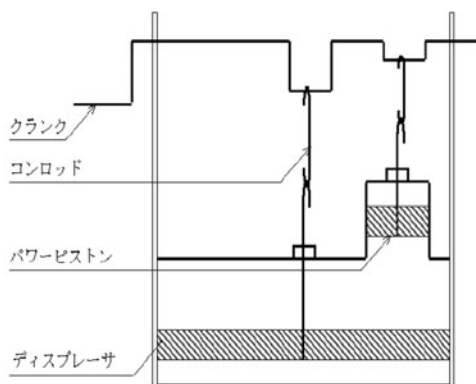


図3 説明教具の構造

習として、熱交換の時期とパワーピストンやディスプレイサの位置にどのような関係があるかについても、学習することが可能である。

### (3) 動作工程をシミュレーションするソフトウェア

説明教具では、各部品の関係の説明が可能であるが、各サイクルの連続的な動作を確認することは困難である。そこで、各サイクルの連続的な動作をシミュレーション表現するソフトウェア（以後、ソフトウェアと記す）を開発した<sup>10)</sup>。ソフトウェアでは、スターリングサイクルを説明するために等温圧縮、定容加熱、等温膨張、定容冷却の各状態を、熱の移動やパワーピストン・ディスプレイサ（フライホイール）の動きと関連付け説明できるようになっている。

ソフトウェア製作には、アニメーションソフトウェアを活用し、8枚の静止画を再生することで、つながりのある動画としている。特に、空気の膨張・収縮、温度変化、空気の流れは、実際に直接見ることが出来ないため、これらをシミュレーションで表現した。また、シミュレーションの再生速度は、調整可能なものとし、それぞれのサイクルを繰り返し表現できるようになっている。画面の一例を図4に示す。

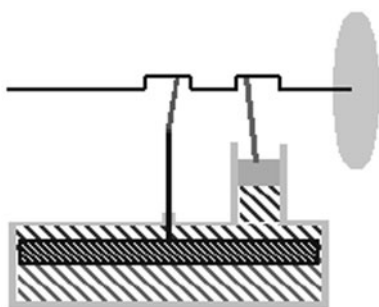


図4 画面の一例

## 3 実験授業

### 3.1 実験日時及び対象

2008年6月にA中学校の第2学年の15名に対

して、5校時間を配当して実験授業を実施した。

### 3.2 授業展開

学習目標を、「熱エネルギーを効果的に活用する仕組みを考えよう」と設定した。

授業展開は、第1校時では、事前調査としてスターリングエンジンおよび、エネルギーに関するアンケート調査を行った。その後、日本における発電の種類、仕組み、現状について確認し、技術が果たす役割について学習した。その中でも、環境に優しいクリーンエネルギーに着目し、さらに学習を深めた。

第2校時では、温度差エネルギーを電気エネルギーに変換する仕組みを学習した。そこで温度差発電装置<sup>11)</sup>を用い、実験を行った。実験内容は、20秒間隔で低温・高温部側の温度変化・電流・電圧の変化を測定し、発電の状態を確認した。

第3校時では、前節で述べた教具を用いて授業を展開した。指導の手順は、①実験を通して温度の高低による空気の膨張・収縮を確認した。②動作教具を温度差発電装置の上部に設置し、スターリングエンジンが温度差によって動作していることを学習した。③説明教具を用いて、パワーピストンやディスプレイサなどの役割を知り、動作原理を学習した。④ソフトウェアを用い、スターリングサイクルの順序性とパワーピストン、ディスプレイサの動きを確認した。

第4,5校時では、製作題材の製作を行った。製作の流れは、①ステンレス缶を用いてスターリングエンジンの製作、②振動カーの加工、③組み立て、④試走をしながら、スターリングエンジンの調整を行った。

授業後半にスターリングサイクルの特徴を学習プリントにまとめ、環境とエネルギー問題について話し合いを持ち、これらのエネルギー問題について自分たちの意見をまとめた。その後、事後調査としてスターリングエンジンおよび、エネルギーに関するアンケート調査を行った。

表2 事前調査項目

問1 このアンケートは、皆さんがどのような気持ちで作業をしているのかを尋ねるもので、技術・家庭科の成績とは関係ありませんので、自分の思ったとおりに答えて下さい。次の各項目について、あなたはどの程度、興味や関心がありますか。興味や関心の程度を4段階で回答して下さい。(各項目ごとにA～Dより1つ選んで○をつけて下さい)。

A…とても興味がある B…まあまあ興味がある  
C…あまり興味はない D…まったく興味はない

1. 太陽電池や燃料電池、風力発電などの新しいクリーンエネルギーについて。
2. 原子力発電の利用と問題点について。
3. 日常生活における電気の有効利用や省エネルギー(例えば、節電など)について。
4. 化石エネルギーの利用による大気中の二酸化炭素濃度の上昇と地球の温暖化について。
5. 排気ガスから排出される窒素酸化物による酸性雨について。
6. 様々な技術の保守や整備と事故の発生について。
7. 様々なエネルギーを有効に活用し、生活を便利にする電気や機械の技術について。

問2 次に示す項目や内容について、あなたはどの程度の知識がありますか。知識の程度を4段階で回答して下さい。(各項目ごとにA～Dより1つ選んで○をつけて下さい)。

A…知っている B…だいたい知っている  
C…聞いたことがあるが良く分からない  
D…聞いたことがない(分からない)

1. 世界の石油や石炭、天然ガスなどの石油燃料が減少していることについて。
2. 日本の発電の割合について(原子力が○%, 火力が○%・・・など)。
3. スターリングエンジンの仕組みについて。
4. 日本のエネルギー問題について。

### 3.3 調査の内容及び手続き

上記の授業展開における事前・事後調査には、以下の質問項目を設定した。

事前調査では、問1「エネルギーに関する興味・関心」、問2「スターリングエンジンに関する知識」、「エネルギー問題に関する知識」を4件法で尋ねた。これらの質問項目によって、実験授業に参加した生徒のレディネスを把握した。調査項目を表2に示す。

事後調査では、問1「実験・実習のプロセスの理解」、問2「授業の評価」を4件法で尋ねた。また、問3「授業の感想」を自由記述で記入させた。これらの質問項目を用いて、実験授業における生徒の学習過程および学習成果を把

表3 事後調査項目

今日の授業を受けて、下に示す質問に答えて下さい。技術・家庭科の成績とは関係ありませんので、自分の思ったとおりに答えて下さい。

問1 今日の授業で実験をした時、次の項目に当てはまるかどうかを4段階で答えて下さい。

A…しっかりやった、B…だいたいやった、  
C…どちらかと言えばやらなかった、  
D…やらなかった

1. 実験・製作の目的について自分なりに考えた。
2. 実験・製作の結果がどうなるか、自分なりに予想しながら取り組んだ。
3. 実験・製作の中では、注意深く、実験・製作した。
4. 実験・製作の結果から、何が分かるかを、自分なりに考えた。
5. 実験・製作の中では、分かったことや気づいたことを、プリントに整理した。

問2 今日の授業で実験をした時、次の項目に当てはまるかどうかを4段階で答えて下さい。

A…はい、B…どちらかと言えばはい、  
C…どちらかと言えばいいえ、D…いいえ

1. 今日の授業は楽しかったですか。
2. 今日の授業の内容は、理解できましたか。
3. 今日の授業の中で、正しく実験を行うことができましたか。
4. 授業の中で、実験の方法などを自分なりに工夫することができましたか。
5. 今日の実験で、温度差で動力が発生する仕組みが分かりましたか。
6. 今日の実験で使った教具の構造は分かりやすかったですか。

問3 今日の授業の感想を書いて下さい。

握した。4件法で求めた回答は、A→4点、B→3点、C→2点、D→1点と得点化し、平均値と標準偏差を求めた。事後調査項目を表3に示す。

### 3.4 生徒の反応及びアンケート結果

問1のエネルギーに関する興味・関心は、高い値(7項目の平均が3.5)を示しており、生徒たちはレディネスとして、エネルギーやそれらの応用技術に対して興味・関心を持っていることが示された。

しかし、問2の知識に関しては、「石油の枯渇(3.7)」に関しては認知しているが、「発電の割合(2.4)」、「スターリングエンジン(1.8)」

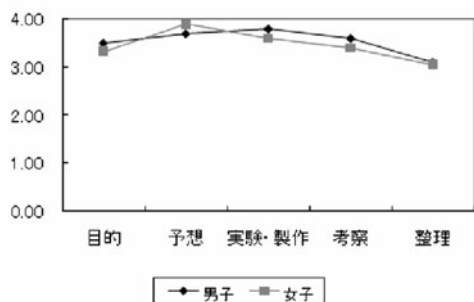


図5 実験のプロセスの理解の結果

「エネルギー問題 (2.6)」については、十分な知識が身につけていないことから、エネルギーやそれらの技術に関して興味・関心はあるが科学的な認識が形成されていない実態が示された。

実験授業終了後に実施した事後調査より、図5に問1の質問項目“実験・実習プロセスの理解”に対する回答を集計した。その結果、「目的」、「予想」、「実験・製作」、「考察」、「整理」の各項目において、いずれも平均値が3.1以上の高い値を示した。その中でも特に、「予想」と「実験・製作」は、平均値3.6前後と顕著に高い値を示した。このことから、生徒は、自分なりの予想を立てた上で、スターリングエンジンの実験・製作をしていたことが示された。

授業の評価に関しては、3.5以上の高い値を示した。特に、「授業の楽しさ (3.8)」、「教具の分かりやすさ (3.8)」などの項目では、顕著に高い値が示された。自由記述では、「スターリングエンジンの内部が見えているので分かりやすい」、「各動きをゆっくり確認できる」など教具を評価する指摘を多数得ることができた。また、「動作のためには大きな熱量が必要である」、「実用的に使用するにはまだまだ技術的に問題がある」など、新しい技術の実用化を望みつつ、スターリングエンジンが持つ特有の課題点も指摘していた。これらの実践を通して自分たちで出来る、具体的な省エネルギーの提案や事例を授業の最後に提示することが出来るようになっていた。以上の結果から、製作題材としてのスターリングエンジンを活用した実験授業を実施

することにより、生徒の興味・関心を高めながら、エネルギーと生活との関わりについて意識を高めることができたものと考えられる。

## 4 結言

以上、新学習指導要領のエネルギー変換技術を学習する題材としてスターリングエンジンを取り上げ実験授業を行った。以下にその結果をまとめる。

- ①製作題材として短時間で製作可能なスターリングエンジンを開発した。
- ②同様にスターリングエンジンの動作原理を学習することを支援する教具を複数製作した。
- ③これらを活用することにより、スターリングエンジンに関する興味・関心を持たせ、それらを通して新しい技術の必要性や環境問題に関する意識を高めることができたと推察される。

今後は、製作題材や学習支援の教具の改善を図ると共に、エネルギー変換に関する学習内容全体を通したカリキュラムを検討して行く必要がある。

また、今回実験授業では説明を割愛したフライホイールなどの役割も的確に指導できる方法を考えたいと思う。これらは今後の課題とする。

## 参考文献

- 1) 文部科学省：中学校学習指導要領解説—技術・家庭科編一、教育図書 (2008)
- 2) 西村 稔・山本利一：創造力を育成するロボットチャンピオンシップの取り組み、教育実践総合センター紀要、第4号、153-164頁 (2005)
- 3) 山本利一・家永知明・田口浩継：中学校技術科におけるロボットコンテストの指導法改善に関する考察、埼玉大学紀要教育学部 (数学・自然科学)、第55巻、第2号、23-33頁 (2006)
- 4) 山本利一・家永知明・田口浩継・牧野亮哉：中学校におけるロボットコンテストの実施調査、日本機械学会論文集 (C編)、第73巻、第725号、1-9頁 (2007)

- 5) 兵働 務・米田裕彦：スターリングエンジン、パワー社（1990）
- 6) 小林義行：はじめてのスターリングエンジン、誠文堂新光社（2007）
- 7) 安藤義仁・松尾政弘・山本利一：スターリングエンジンの製作を通して行うエネルギー変換の学習、埼玉大学紀要教育学部（数学・自然科学I）、第54巻、第1号、89-96頁（2005）
- 8) 山本利一・浅田茂裕・小林義行・松尾政弘：スターリングエンジンを用いた教員研修の提案、埼玉大学紀要教育学部（数学・自然科学I）、第54巻、第1号、81-88頁（2005）
- 9) 森阪康昌・山本利一：低温度差スターリングエンジンを活用した教員研修、埼玉大学紀要教育学部（数学・自然科学I）、第57巻、第1号、105-111頁（2009）
- 10) 山本利一・森山潤・角和博・池上康之：ペルチェ素子を用いた温度差発電学習教具の開発と授業実践、日本産業技術教育学会誌、第49巻、第4号、315-322頁（2008）
- 11) 星野孝仁・山本利一・戸田富士夫：製作題材としての「スターリングエンジン」開発、日本機械学会第11回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集、105-106頁（2008）
- (2009年2月23日提出)  
(2009年4月17日受理)

## Development of Teaching Materials for Stirling Engine and Teaching Practice

Takahito HOSHINO, Toshikazu YAMAMOTO, Fujio TODA, Yasuo HARIGAYA

Keywords : Change of the Energy, Stirling Engine, Teaching Materials, Teaching Tools, Technology Education

The research is a teaching practice using Stirling engine in junior high school technology education. To understand the principle in Stirling cycle is difficult, so we developed the teaching tools which supports the learning. As a result of experiment class which utilized these, the degree of the understanding was improved, and interest on the energy problem was also improved it.