

## 教材用蒸気タービンカーの開発と評価†

### Development and Evaluation of a Steam Turbine Car as a Teaching Material

紅林秀治\*                      中野智久\*\*                      室伏春樹\*\*\*                      畑 俊明\*\*\*\*  
Shuji KUREBAYASHI   Tomohisa NAKANO   Haruki MUROFUSHI   Toshiaki HATA

中学校「技術・家庭」(技術分野)教材として蒸気タービンカーを開発した。開発した蒸気タービンカーは、トタン板や銅パイプを加工する材料(金属)加工と熱から動力を生み出すエネルギー変換の学習の両方が学べるように設計した。評価試験として、開発した教材の蒸気圧やエネルギー変換効率を調べた。さらに中学生に対して、教材を使った授業を行い、教材としての授業評価も行った。その結果、開発した蒸気タービンカーが、金属加工とエネルギー変換の学習として有効な教材であることがわかった。

キーワード: 金属加工, エネルギー変換, 中学校, 技術・家庭

#### 1. はじめに

蒸気機関は、産業と大きく関わっている。その歴史は、西暦 50 年に発案されて以来<sup>1)</sup>、様々な科学者や発明家が実用化に取り組んだ。蒸気機関は人の移動や物資の輸送、工作機械の発展に貢献した。しかし、蒸気機関よりも効率が良いガソリン機関や、電気モーターが発明されると、蒸気機関を利用した乗り物や機械などは、姿を消していった。そのため、蒸気機関は過去の遺物のように思われることが多い。ところが、私たちの生活を支えている電気エネルギーの大部分は蒸気機関によって生み出されている。なぜなら、火力発電所や原子力発電所では、蒸気タービンにより発電機を回転させ、電力を生み出しているからである。したがって、蒸気機関は過去の遺物ではなく、現在の生活と社会を支えている生きた技術である。2011 年実施の新学習指導要領<sup>2)</sup>では、中学校「技術・家庭」技術分野(以後技術科という)の学習に「エネルギー変換の技術」の学習内容が設けられた。さらに、その内容は必修化されている。エネルギー変換を扱う教材として、現在も活躍しているエネルギー技術をわかりやすく伝えられる教材として、蒸気タービンによるエネルギー変換教材が最適ではないか

と考えた。そこで、筆者らは、技術科の学習教材として、蒸気タービン動力で走行する蒸気タービンカーを開発した。この教材では、エネルギー変換の学習ができるだけでなく、トタン板や銅パイプ等金属材料を加工する学習ができるようにも設計した。本論文では、開発した蒸気タービンカーと教材としての評価試験について述べる。

#### 2. エネルギー変換教材について

蒸気タービンを教材として扱う理由は、1. 章でも述べたが下記の 3 点である。

- 電気エネルギーを生み出すために活用されている現在の技術が伝えられる
- エネルギー変換の仕組みが視覚的でわかりやすい
- エネルギー変換効率をあげる工夫ができる

代表的な、エネルギー変換教材として、蒸気エンジンカー<sup>3)</sup>、ボイラー船<sup>4)</sup>やスターリングエンジンカー<sup>5)6)</sup>、RC エンジンシップ<sup>7)</sup>の製作、形状記憶合金ワイヤーを用いた教材用エンジンカー<sup>8)</sup>が挙げられる。これらは、エネルギー変換教材として、学習者の関心・意欲をひく優れた教材であるが、蒸気タービンを扱ったものではない。蒸気タービンを扱った教材では竹野ら<sup>9)</sup>が効率学習の一環としての実験器具として示しているが、生徒が製作体験する教材ではない。筆者らは、学習者一人一人が製作体験することで、技術の本質や問題点を実感できると考えている。その上、製作したものの仕組みやその出力が評価しやすい

(2008 年 11 月 5 日受付, 2009 年 3 月 5 日受理)

\* 静岡大学  
\*\* 大阪府立八尾養護学校  
\*\*\* 静岡大学(院生)  
\*\*\*\* 静岡大学名誉教授  
† 2007 年 8 月本学会第 49 回全国大会にて発表

ものであるならば、エネルギー変換の技術だけでなく変換効率の観点から技術を評価する学習にも発展できる。持続可能な社会と技術に関する問題やエネルギー利用と環境の問題を考える題材<sup>2)</sup>として、エネルギー変換の技術を扱うことは、今後益々重要になると考えている。そこで筆者らは、生徒が製作でき、変換の仕組みが視覚的でわかりやすく、さらに変換効率を追求できる学習モデルの提示を考え開発した。

### 3. 開発した蒸気タービナー

#### 3.1 設計の考え方

蒸気タービナーの開発にあたり以下の2点を考慮した。

- 安価で容易に購入できる材料を使うこと
- 作業内容が中学校技術科として妥当であること

図1に開発した蒸気タービナーの概念図を示す。

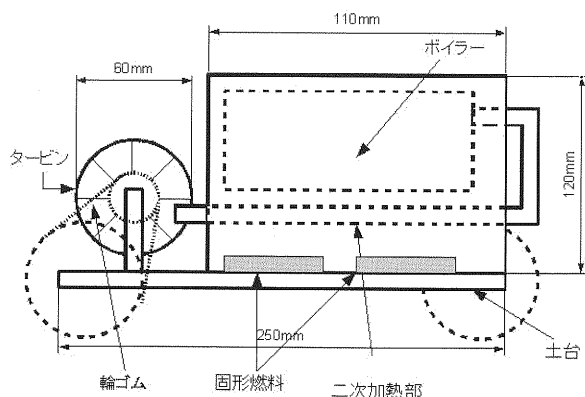


図1 概念図

開発した蒸気タービナーは以下の動作をする。

1. ボイラー内の水タンクに水約100gを入れ、ボイラー内で固形燃料(2個)を燃焼させる。
2. タンク内の水が沸騰し水蒸気を発生する。
3. 水蒸気は銅パイプを通り、タービンへ向かう。
4. 水蒸気は二次加熱を加えることにより蒸気圧を上昇させる。
5. 水蒸気はタービンに当たることでタービンを回転させる。
6. タービンの回転は回転軸の輪ゴムを介してタイヤへと伝える。

図2にボイラー内の二次加熱部を示す。図3に完成した蒸気タービナーを示す。

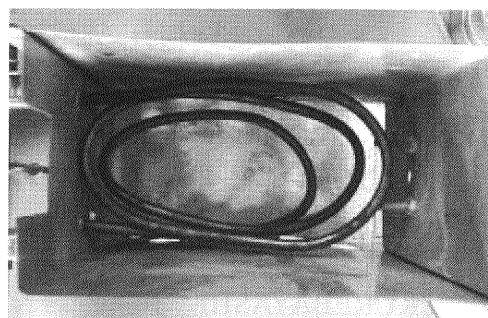


図2 二次加熱部

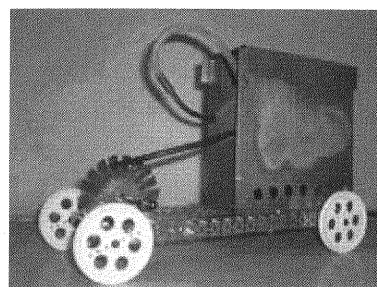


図3 製作したタービナー

#### 3.2 使用した材料

ボイラー内の水タンクとして市販されているスチール缶(190ml)を使用した。燃料として市販されている固形燃料(成分:メタノール)を使用した。車体には、トタン板(0.27mm)を使用した。使用した材料を表1に示す。車体の図面を図6に示す。

### 4. 評価試験

#### 4.1 ボイラー缶内の圧力

蒸気圧によるボイラー缶の破裂防止のための安全弁設置を検討する目的で、缶内圧力を計測した。計測にはアナログ圧力計を使用した。2個の固形燃料を燃焼させ、缶内の水(100g)を沸騰させ、蒸気タービンが回転している状態で計測した。計測の様子を図4に示す。

その結果、最大圧力 $145000\text{N/mm}^2$ であることがわかった。この結果から、稼働時の缶内の圧力がおおよそ、1.4気圧程度であることがわかった。また、開発した蒸気タービナーでは、ボイラーが密閉されることなく、常にタービンに向けて蒸気が出ているため、最大圧力以上の圧力は生じないこともわかった。よってボイラー缶の破裂が稼働中に生じないと判断し、安全弁は必要ないと判断した。

表 1 使用した材料

No.	使用材料	サイズ	数量
1	穴あきのアルミ L 字アングル	10mm × 250mm	2
2	未開封スチール缶	190ml	1
3	シリコン栓	20mm	1
4	シリコンチューブ	外径 4mm × 200mm	1
5	銅パイプ	4mm × 70mm	1
6	銅パイプ (なまし)	4mm × 800mm	1
7	トタン板 (ボイラー用)	0.27mm × 190mm × 130mm	2
		0.27mm × 130mm × 55mm	1
		0.27mm × 120mm × 100mm	1
		0.27mm × 120mm × 85mm	1
8	トタン板 (タービン用)	0.27mm × 100mm × 100mm	1
9	真鍮棒	2.0mm × 150mm	1
10	プーリー (L) セット	50mm × 4mm	2
11	真鍮棒	2.0mm × 180mm	2
12	留めゴム	耐熱ゴムパイプ 3mm × 40mm	1
13	自在金具	市販品	2

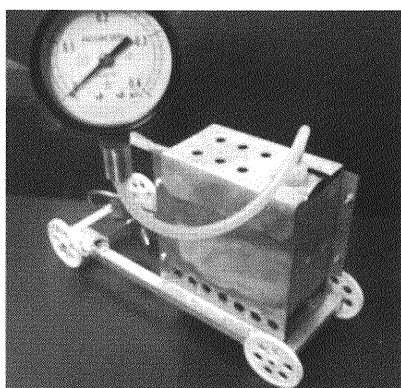


図 4 圧力測定

水の質量  $m$ (g), 水の比熱容量を  $c$ (4.2J/g·K), 1 秒あたりの温度変化を  $\Delta T$ (K/s) とすると水が受け取った平均仕事率  $P_w$ (W) は下記の式から求められる。

$$P_w = mc\Delta T \quad (1)$$

そこで,  $m$  の値に水 150cc の質量を 150 g, 0.4 を  $\Delta T$  に代入すると

$$P_w \approx 252[\text{W}] \quad (2)$$

を得る。また, 固形燃料の平均出力  $P_n$  (W) は, 1g あたりの熱量  $q$ (cal/g), 固形燃料の質量を  $m$ (g), 燃焼時間を  $t$ (秒), 熱の仕事当量を 4.2(J/cal) とすると, 下記の式で求めることができる。

$$P_n = \frac{4.2qm}{t} \quad (3)$$

使用した固形燃料の主成分はメタノールである。固形燃料 1 個の質量は 30 g である。また, メタノールの熱量は 5.6kcal/g である。開発した蒸気タービンのボイラーでは 2 個の固形燃料を約 20 分で燃焼し尽くすことから式 (3) に代入すると以下の値を得る。

$$P_n = \frac{4.2 \times 5.6 \times 30 \times 2}{20 \times 60} \approx 1.176[\text{kW}] \quad (4)$$

したがってボイラーの水蒸気の発生に使用される熱エネルギーと使用した固形燃料のもつ潜在的な熱量との比

## 4.2 開発した蒸気タービンの効率

固形燃料から得られる熱エネルギーを動力エネルギーに変換する効率を求めるために, 以下の項目の試験を行った。

- ボイラーが固形燃料から受け取る熱量
- 蒸気タービンの動力

### 4.2.1 ボイラーが受け取る熱量

ボイラー内に 150cc の水を入れ, 固形燃料 (メタノール) 2 個を燃焼させた。時系列に温度変化を測定した。測定した結果をグラフにしたものを図 5 に示す。

図 5 から, 平均 0.4 °C/s で温度上昇がみられた。

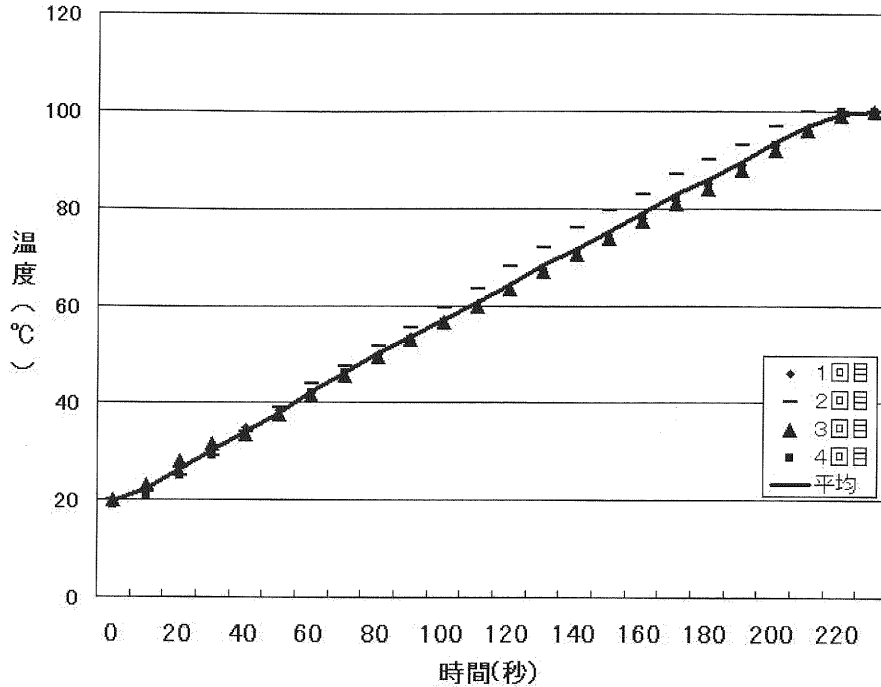


図5 温度変化

(以後、燃焼効率とよぶ)  $\eta_{bn}$  は次式により求めることができる。

$$\eta_{bn} = \frac{P_w}{P_n} \times 100 = \frac{252}{1.176 \times 10^3} \times 100 \approx 21.4[\%] \quad (5)$$

式(5)より、燃焼効率は、約 21.4(%) であることがわかった。

### 4.3 動力への変換効率

開発した蒸気タービンの走行試験を行う走路での動摩擦係数<sup>1</sup> $\mu$ を測定した。その結果以下の値を得た。

$$\mu = 0.06 \quad (6)$$

また、走行する蒸気タービンの平均速度  $v$ (m/s) は、測定結果から以下の値を得た。

$$v = 0.38[m/s] \quad (7)$$

走行時に必要な力は速度  $v$  の関数であるため  $F(v)$  とすると、 $F(v)$  の値は摩擦抵抗  $F_s$  と空気抵抗  $F_a(v)$  の和である。したがって次式を得る。

$$F(v) = F_s + F_a(v) \quad [N] \quad (8)$$

蒸気タービンの平均的な動力  $Pr$  は、 $F(v)$  と速度  $v$  との積で求めることができる。また、摩擦抵抗  $F_s$  は、動摩擦係数  $\mu$  と車体の質量  $m$ (kg) から求めることができる。平均速度  $v$  が式(7)より大変小さいため、空気抵抗  $F_a(v)$  の値は0とすると、動力  $Pr$  は次式により求めることができる。但し  $G$  を重力加速度 ( $m/s^2$ ) とする。

$$Pr = F(v) \cdot v \approx \mu \cdot m \cdot G \cdot V \quad [W] \quad (9)$$

蒸気タービンの質量は 444 g (水 150g を含む)、式(6)と(7)の値と重力加速度  $G(9.8m/s^2)$  を式(9)に代入した結果以下の値を得る。

$$Pr \approx 0.1 \quad [W] \quad (10)$$

したがって、ボイラーからの変換効率を  $\eta_{br}$  とすると、 $\eta_{br}$  は、式(2)より求めることができる。さらに、式(5)より、固形燃料から動力までの変換効率  $\eta_{nr}$  は次式より求めることができる。

$$\eta_{br} = \frac{0.1}{252} \times 100 \approx 0.04[\%] \quad (11)$$

$$\eta_{nr} = \frac{\eta_{br} \cdot \eta_{bn}}{100} \approx 0.0086[\%] \quad (12)$$

式(12)より、固形燃料から得られる動力エネルギーは 0.0086% と大変小さいことがわかった。

<sup>1</sup> 車体の走行時に生ずる、車輪のころがり抵抗やすべり摩擦等を全て含め、ここでは動摩擦と表現した。

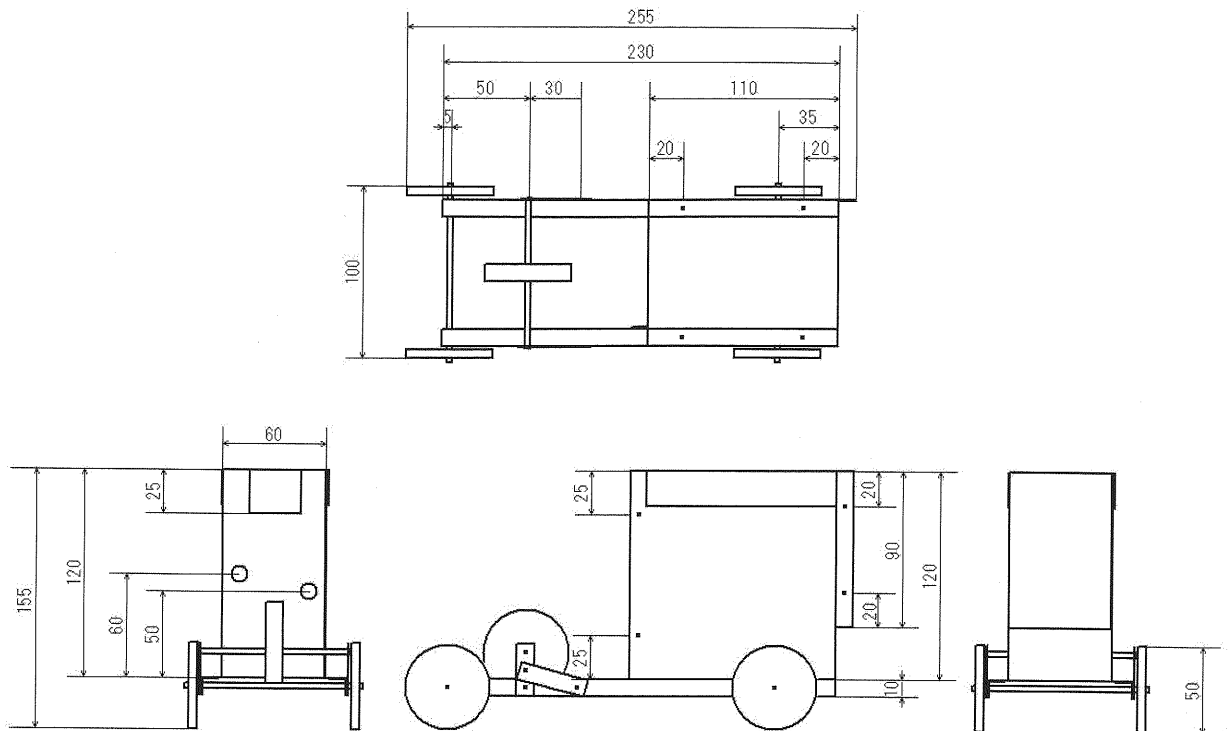


図 6 タービーカーの車体

表 2 授業内容と時間

No.	授業内容	時間
1	蒸気タービーカーについて	1
2	土台製作	5
3	タービン製作	2
4	燃焼室製作	6
5	ボイラー製作	2
6	調整・走行	1

1 時間は 50 分



図 7 授業の様子

## 5. 授業による評価

### 5.1 授業内容

本教材を使用して、中学生に対して授業を行った。2007 年 4 月 26 日から 10 月 18 日までの期間、静岡大学教育学部附属静岡中学校にて 2 年生 14 名に対して行った。授業内容を表 2 に示す。図 7 に授業の様子を示す。

### 5.2 授業の結果

授業の評価をするため、事前・事後にアンケート調査を行った。事前アンケートは、表 2No.1 の授業開始前に実施し、事後アンケートは、No.6 終了後に実施した。質問内容を下記に示す。回答はすべて記述による回答を求めた。

1. 金属の特徴とは何ですか？

2. エネルギーと聞いて何をイメージしますか？

3. エネルギー変換と聞いて何をイメージしますか？

質問 1 「金属の特徴とは何ですか？」に関しては、金属加工の学習を通じて獲得された知識を事前と事後で比較するために行った。質問 2 「エネルギーと聞いて何をイメージしますか？」と質問 3 「エネルギー変換と聞いて何をイメージしますか？」に関しては、エネルギーとエネルギー変換に関するイメージの変容を事前と事後で比較するためにおこなった。アンケートを記述内容により分類した結果を表 3 に示す。

## 6. 考察

表3 事前・事後アンケート結果

質問1	金属の特徴とは何ですか？
事前	熱伝導率が良い(3), 光沢がある(4) 叩くと伸びる(1), 固い(6)
事後	加工硬化(5), 曲がったら戻らない(2), 熱伝導率が良い(2), 曲がる(塑性変形)(5)
質問2	エネルギーと聞いて 何をイメージしますか？
事前	乗り物(6), 石油(6), 動力源(2)
事後	力(2), 熱(3), 光(3), 原子力(2), 蒸気(2), その他(2)
質問3	エネルギー変換と聞いて 何をイメージしますか？
事前	分からない(14)
事後	発電所(4), ソーラーパネル(3), 車(4), ある力を別の力に変えること(3)

( )内の数字は人数を示す。

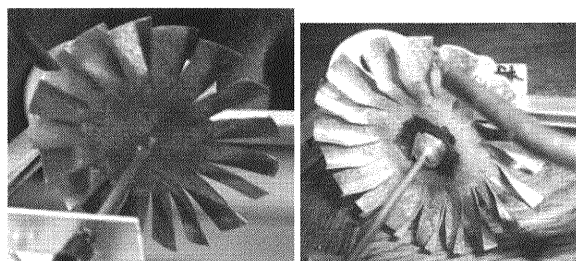


図8 改良前(左)と改良後(右)の翼

表3から、質問1「金属の特徴とは何ですか？」に関しては、事前の回答に比べて事後の回答では、加工硬化や塑性変形など金属を折り曲げ加工することで得られる知識の記述が増えたことがわかる。質問2「エネルギーと聞いて何をイメージしますか？」に関しては、エネルギーのイメージが事前に比べて事後のほうが「力」「熱」「光」等具体的なものを例示する回答に変化していることがわかる。これは、質問3「エネルギー変換と聞いて何をイメージしますか？」に関しても同様な結果といえる。

図8は、生徒が自作した蒸気タービンの走行性能を上げるためにタービン翼の形状を変えた写真である。本教材は、タービンをトタン板で作っているため生徒が簡単に加工し直したり作り変えたりすることができる。授業の中で走行試験が始まると、生徒はできるだけ速く走らせたいと考え始める様子が見られた。本教材は生徒が走行性能を上げる(エネルギー変換効率を上げる)ために工夫し加工することが可能な教材であることがわかった。

### 6.1 動力への変換効率に関して

固形燃料が持つエネルギーから出力として得られる動力への変換効率を測定した結果、およそ0.0086%と非常に低い値であることがわかった。変換効率が低い原因として、ボイラーが受け取る熱量が約21.4%と計測されていることからわかるように、ボイラーから逃げる熱量が非常に多いことがわかる。ボイラーから逃げる熱量を抑えるためには、ボイラー部に断熱材を使用することや受熱部の表面積を広げる等の工夫が必要である。しかし、それは同時にボイラー部の缶内圧力を高めることも意味している。開発した蒸気タービンは、中学生が金属加工とエネルギー変換を学習するための教材と考えているため、製作の簡易さや安全を考慮に入れると、現状の設計が妥当である。動力への変換効率を高めるためには、機械損を減らす方法も考えられる。可動部の摩擦軽減やタービン翼の形状により変換効率を上げることも可能であるが、現状の設計では蒸気圧を開放型のタービンに当てており、その大半が空中に離散している。したがってこの方法では、変換効率を飛躍的に高めることは不可能である。変換効率を高めるためには、火力発電所や原子力発電所等で使用されている密閉式の多段式蒸気タービン<sup>10)</sup>にする必要がある。しかし、先にも述べたように、開発した蒸気タービンは、教材用であるため高い変換効率を求める以上に、エネルギー変換教材として価値を考える必要がある。蒸気タービン翼の工夫に関しては、5.2より、タービン翼の形を工夫する生徒が確認できた。生徒が自ら工夫できた理由は、厚さ0.27mmのトタン板を使用しているため、加工が容易であると同時に、使用する道具も金切りばさみや半田ごて等の簡単な道具で加工できるためである。また、可動部の摩擦の軽減に関しても、潤滑油の塗布や動力伝達部のベルト(輪ゴムを使用)張りの調整等、簡単な作業で行うことができる。そして、それら工夫を加えた後の評価も、走行試験で生徒自らが確かめることができる。このように、開発した蒸気タービンは、作りが簡単であるが故にエネルギー変換効率が低い、それ故に学習する生徒の工夫やアイデアを導く可能性がある。

### 6.2 本教材を使用した授業に関して

事前・事後アンケートから、質問1「金属の特徴とは何ですか？」に関して事前アンケートでは「わからない」と答える生徒が多かったが、事後アンケートでは加工硬化や塑性変形など具体的な金属の特徴を述べる生徒が増えた。その理由として、本教材の製作にはトタン板の折り曲げ加工が多いため、用語の意味が実感を伴って理解できたと考えられる。質問2「エネルギーと聞いて何をイメージしま

すか?」と質問3「エネルギー変換と聞いて何をイメージしますか?」のエネルギーとエネルギー変換のイメージに関してもより具体的な例を記述する生徒が増えた。その理由として、「ある力を別の力に変えること」という記述をする生徒がでてきたことからわかるように、本教材は、燃料から熱、熱から動力というように変換の様子が視覚的でわかりやすいため、かつて社会科や理科で習ったことがある熱や原子力、あるいはソーラーパネルや発電所等の用語がエネルギーやエネルギー変換に関係する用語であるというイメージできるようになったと考えられる。

## 7. まとめ

筆者らは、教材用蒸気タービンを開発し、その評価を行った。その結果本教材が、中学校「技術・家庭」(技術分野)のものづくり教材(材料(金属)加工教材)と、エネルギー変換教材の両方に有効であることがわかった。さらに、本教材そのものは、エネルギー変換効率が低く蒸気タービンとしての性能を見れば決して良いものではないが、変換効率を上げるための機械損を軽減する工夫やタービン翼の形状の工夫等を学習者に課題として与えることが可能である。また、エネルギー変換教材として、社会を支える技術に関心を抱かせる学習へ発展させることも可能である。それは同時に、本教材を使用した授業は、持続可能な社会を実現するための技術の学習となる。

今後は、変換効率だけでなく地球環境問題を含めた実践も検討したい。

## 謝辞

本教材を開発するにあたり、茨城県立中央高校の小林義行先生にご助言を賜りました。また、性能評価試験では、静岡大学 八柳祐一准教授にも適切にご助言をいただきました。さらに、授業による評価では、静岡大学教育学部附属静岡中学校の若林努教諭、および選択技術科の授業を選んだ14名の生徒のみなさんにご協力いただきました。紙面を借りて感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) リチャード・プラット, 赤城昭夫: スミソニアン博物館に見る発明の歴史, 学習研究社, p16(1995)
- 2) 文部科学省: 中学校学習指導要領解説 技術・家庭編, 教育図書, pp.23-27(2008)
- 3) 宮崎洋明: 走れ!! ぼくのSL 蒸気エンジンの仕組みと蒸気機関の作り方, 民衆社(1986)

- 4) 安東茂樹: 教材としてのボイラー船の実験, 日本産業技術教育学会誌, 第26巻3号, pp.1-8(1985)
- 5) 大倉宏之・須見尚文: ものづくり教材としてのスターリングエンジンの開発, 日本産業技術教育学会誌, 第43巻3号, pp.129-135(2001)
- 6) 松尾政弘・平尾尚武・神長祥: 創作教材としてのスターリングエンジン, 日本産業技術教育学会誌, 第44巻4号, pp.215-220(2002)
- 7) 石川誠・岡田寛行・大倉宏之・松永泰弘: 中学校技術教育における技術者の営みに迫るものづくり教材の検討ーRCエンジン船の共同製作をとおしてー, 日本産業技術教育学会第43回全国大会講演要旨集, p.125(200)
- 8) 松永泰弘・水野靖弘: TiNi形状記憶合金ワイヤーを用いたエンジンカー/エンジンシップの製作, 日本産業技術教育学会誌, 第46巻2号, pp.79-84(2004)
- 9) 諸橋正和, 谷池真彦, 滝本稔治, 竹野英敏: 中学校技術科のエネルギー変換に関する技術の進展を効率の違いによって考えさせる教材の開発, 日本産業技術教育学会第51回全国大会講演要旨集, p17(2008)
- 10) 山崎俊雄・木本忠昭: 新版 電気の技術史, pp28-240, オーム社(1992)

## Abstract

A steam turbine car is developed as a teaching material for industrial arts and home economics classes for lower secondary students. The steam turbine car is designed so that students can learn both metal working, in which they use galvanized sheets and copper pipes, and energy conversion, which makes motive energy from heat energy. As an evaluation test, we checked the steam pressure and conversion efficiency of the Steam Turbine Car that we developed as a teaching material. Additionally, we conducted experimental lessons for lower secondary students to check educational effects of our teaching material. As a result, the teaching material we developed is predictably effective for students to learn both metal working and energy conversion.

Key words: Metal working, Conversion of energy, Technology education, Lower secondary students, Industrial arts and Home economics