



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

Title	技術科「B エネルギー変換に関する技術」としての水力発電システム(fulltext)
Author(s)	望月,高昭
Citation	東京学芸大学紀要. 自然科学系, 69: 279-289
Issue Date	2017-09-29
URL	http://hdl.handle.net/2309/148250
Publisher	東京学芸大学学術情報委員会
Rights	

技術科「B エネルギー変換に関する技術」としての水力発電システム

望 月 高 昭*

技術科学分野

(2017年5月29日受理)

MOCHIZUKI, T.: Hydroelectric Power Generation System for Curriculum Unit “Energy Conversion Technologies” Taught in Technology Classes in Junior High Schools. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **69**: 279–289. (2017) ISSN 1880–4330

Abstract

This report reviews the literature published from 1997 to 2016 on hydroelectric power generation systems used in technology classes, to examine these systems as a subject in “Energy Conversion Technologies” offered in technology classes in junior high schools, as instructed by the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). It was found that the Pelton wheel and the overshot water wheel which is supplied water from an elevated water-supply tank, from which water is always overflowing and to which water is constantly supplied to maintain the tank’s water level, are suitable for teaching materials used in junior high schools because the systems allow easy measurement of the efficiency of hydraulic/electric energy conversion and the wheels are easy to fabricate in classrooms. These water wheel systems were also found to be suitable as subjects for projects in technical high schools, since the teaching materials (hydroelectric power generation system equipped with Pelton or overshot water wheels) satisfy the guidelines for “Project Studies” as set forth in the MEXT curriculum guidelines for technical classes in technical high schools.

Keywords: Hydroelectric power generation system, Pelton wheel, Overshot water wheel, Energy conversion technology, Project study, Technology class, Technical class

Department of Technology Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 中学校技術科「B エネルギー変換に関する技術」の教材として求められる水力発電システムを検討するため、1997年から2016年までに発表された先行研究を調査した。調査・検討の結果、エネルギー変換効率の明確化および水車部の設計製作の容易さという点より、オーバーフロー機構を持つヘッドタンクを備えたペルトン水車もしくは上掛開放周流形水車が適しているとの結論に至った。水車の設計・製作および河川・用水路等を用いたフィールド試験の実施という点を満足することができれば、水力発電システムは工業高等学校における「第2章 工業科の各科目 第2節 課題研究」に合致する教材にもなり得ると考える。

* 東京学芸大学 技術・情報科学講座 技術科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

1. はじめに

中学校学習指導要領解説技術・家庭編, 技術分野¹⁾の「Bエネルギー変換に関する技術」においては,

(1) エネルギー変換機器の仕組みと保守点検について, 次の事項を指導する。

ア エネルギーの変換方法や力の伝達の仕組みを知ること。

に関して

社会で利用されている機器等において, エネルギーがどのような方法で変換, 制御され, 利用されているか知ることができるようにする。

が求められており, その例として,

石油などの化石燃料, 原子力, 水力, 風力, 太陽光など, 自然界のエネルギー資源を利用している発電システムや, エネルギー変換技術を利用した電気機器, 自転車などの身近な機械の調査, 観察, 操作を通して, それぞれの特徴を知ることができるようにすることが考えられる。

と記載されている。発電システムについては

自然界のエネルギー資源を利用した発電システムを取り上げる場合には, エネルギーの変換効率や設備の稼働率を含めた発電コスト, 輸送時のエネルギー損失及び環境への負荷についても学習させるよう配慮する。

と付記されており,

小学校及び中学校の理科等におけるエネルギーに関する学習を踏まえ, 関連する原理や法則が具体的にどのような機器やシステムに生かされているかを取り上げ, 科学的な根拠に基づいた指導となるよう配慮する。

という配慮事項を重ね合わせると, 「どのようなエネルギーを, どのような工学的手法で, 発電機の動力に変換しているか?」および「その変換効率はどの程度か?」という内容は欠かせない。以下に, 化石燃料, 原子力, 水力, 風力, 太陽光を利用した発電システム

に関し, エネルギー変換原理の理解し易さ, 設計・製作(学習者の工夫を含む)のし易さ, 変換効率の示し易さという点から考える。

化石燃料発電(ガスタービン利用を除く), 原子力発電, 地熱発電, 太陽熱発電, 海洋温度差発電の何れもランキンサイクル(海洋温度差発電を除く)に代表される蒸気サイクルを用いており, 熱源により呼び方が異なっているのみである(例えば, 熱源が重油の燃焼の場合は石油火力発電, 石炭の燃焼の場合は石炭火力発電, 原子核の崩壊熱の場合は原子力発電, 地熱の場合は地熱発電, 太陽熱の場合は太陽熱発電)。つまり, 化石燃料発電(ガスタービン利用を除く), 原子力発電, 地熱発電, 太陽熱発電, 海洋温度差発電の理解のためには蒸気サイクルの理解が必要不可欠である。蒸気サイクルに用いられる蒸気タービンの動作原理は「水が蒸気になる際の膨張力に起因する仕事を蒸気タービンに付与し, 力学(回転)エネルギーに変換」することである。よって, 例えば, フラスコ内の水を沸騰させることにより生じた蒸気を(ノズル等を介して)風車に当てる等の実演(例えば, 引用文献2の表2中の写真参照)により, その変換原理を学習者にイメージさせることが可能と考える。一方, その効率を示すには困難が伴うように感じられる。蒸気サイクルの熱効率向上のための手法は, 全て, 熱源と廃熱の温度をそれぞれ高温熱源と低温熱源の温度と考えた場合のカルノーサイクルの熱効率に近づけるための努力である。よって, カルノーサイクルとの比較下でなければ, 当該性能向上方法の原理を理解することはできない。

太陽光発電を授業に用いる場合, 発電素子への入射光量の変化に伴う発電量の変化を示すことは可能であると考えられる。ただし発電素子がブラックボックスとなることが最も大きな問題と思われる。発電素子を分解したとしても発電原理が理解できるわけではない。また発電原理を説明する場合, 学習者の年齢が低くなるほど, イメージしづらいのでは?と危惧する。発電原理に関する体験学習の代わりに, 学習者に発電素子を利用した回路の製作を体験させることは可能である。しかしながら, 乾電池等の電源を発電素子に置き換えただけにならないようにする工夫が難しいのでは(言い換えると, 発電素子を敢えて利用する特別な理由付けが可能なのか)?と考える。

風力発電に関しては非常に多くの教育に関する試みが報告されている。例えば文献データベースCiNiiにて「(風力 OR 風車) AND (教材 OR 教育 OR 授業)」という検索式の下, 1997年から2016年までの先行研

究を調査したところ、該当するものが347件存在した（前出の太陽光発電を「太陽光 AND（教材 OR 教育 OR 授業）」という検索式により調査したところ、該当するものは201件であった。なお、風力発電および太陽光発電に関する何れの調査に関しても「著者が“教育”というキーワードを選択しただけの工学的な研究」等の意図しない先行研究が含まれている）。この結果より、風車もしくは風力を用いた教育は盛んに検討されていると推察される。しかしながら風車の動作原理は理解容易とは言い難い。周知のように風車は大きく揚力型と抗力型に分類される。プロペラ風車（発電用風車として先ず思い浮かぶ風車）、ダリウス風車、ジャイロミル風車等の揚力型風車の翼の断面は、飛行機の翼の断面と同様の形をしており、風車の翼に作用する流体力学的揚力と抗力の合成力の回転面成分が回転の駆動力となっている。また、翼に入射する空気の流れ方向も、単なる風の方角では無く、風車の回転方向や翼弦の方角を考慮したものとなる。一方、抗力型風車は、風を受けて回るといったイメージのものである。しかしながら、必ずしも駆動原理が分かり易いとは言えないようである。例えば、橋渡ら³⁾は中学校2年生（73名）を対象とした技術科の授業において、風力発電システム（オランダ型風車等に分類されるとされる抗力型風車）を教具とした授業実践を行っている。当該試みにおいて橋渡らは、学習者の約半数が翼の技術的な根拠等を記述・考察できなかったと述べている。また抗力型風車に分類されるサボニウス風車を用いた教育の提案（例えば文献4）もあるものの、同風車は空気流れが翼に衝突した際の抗力のみが駆動に関与しているわけではなく、翼の下流側に生じる圧力差も関与しており、駆動原理がオランダ型風車に比べて理解容易というわけでは無い。設計・製作のし易さという点から考えた場合、翼形断面を持つ翼を作らなければならないという点から、揚力型風車の設計・製作は難しいと言える。加えて、揚力型風車に関する学習者の工夫は翼形の工夫等を意味しているため、学習者の工夫を求めるような問題解決型授業の教材としては不適と言わざるを得ない。一方、抗力型風車の設計・製作も容易ではない。綾と小川^{5,6)}は、中学校3年生（3クラス、計107人）を対象とし、「総合的な学習」の時間において風力発電システム（オランダ型風車等に分類される抗力型風車と思われる）の翼を製作させている（実際には、水・風力発電システムを含む自然エネルギー利用に関する授業を実施）。風力発電システムの学習に関する事後アンケートの自由記述に、翼の設計・製作の困難さに関する記述が

あったとのことであり、このことから、抗力型とはいえ、オランダ型の様な風車の設計・製作は難しいと言える（作り易さを重視するのであれば、サボニウス風車が適している）。また、風車を用いた授業における難関は、変換効率の学習にも存在する。変換効率の測定に際しては、既知の風速の様な定常空気流れが望まれる（風洞の利用が理想的である）。「空気流れの定常性」や「任意の風速を得る」という点から、自然の風は変換効率の測定に向かない。扇風機と整流板を用いて誘起した空気流れを利用した授業例があるものの（例えば文献7）、扇風機を用いた場合は風車に入射する空気の流れが同様であるとは考えにくい。また、変換効率を定量的に議論するためには風車前面の平均風速が必要となるが、使用する風車が小さい場合、ピトー管や熱線流速計等を用いて風速を測定する必要がある。

流速の測定という点から見た場合、水力発電の方が風力発電よりも測定が容易である。ストップウォッチ、秤もしくはメスシリンダー、温度計（水の密度を明確化するため）があれば流速、流量および水車に入力される流体力学的なエネルギーを評価可能である。またヘッドタンクを用いて水を流す場合、ヘッドタンクの高さ（水の位置エネルギー）より水車に入力される流体力学的なエネルギーを評価することも可能である（管路抵抗もしくは有効高さ等に関する考慮は必要）。周知のように水車は衝動水車と反動水車に大別される。何れの水車の駆動力もNewtonの運動の法則（第一法則～第三法則）により理解可能である。ただし、反動水車は翼上を流れる水の方角を変えることにより、翼上の水の運動量（ベクトル）を変化させ、水車の駆動力を得ている。運動量変化に要する力の理解が必要という点では後述の衝動水車と基本的には変わりはないが、後述の衝動水車に比べ、理解する際のイメージがしづらいのでは？と危惧する。また製作という点から考えた場合、水車の翼の構造が衝動水車ほど簡単ではない。一方、ペルトン水車に代表される衝動水車は、水が水車の水受けに衝突、その反動で回転する。つまり、動いているものを静止させる際の力のイメージにより理解可能である（例えば、バスケットボールを学習者に受け止めさせる等により体験可能である）。ペルトン水車は、ランナと呼ばれる回転車上に設けられたバケット（水受け）に水の噴流を当てるという基本構造になっている。この単純な基本構造が故に、授業における設計・製作が容易になる様にモデル化・簡素化が可能とも考える。また2.1節において述べるように、衝動水車の一種である開放周流形水

車は、構造の簡単さから製作を伴う教材として広く用いられている。

以上のように、水車は「入力される流体力学的なエネルギーの量を流速もしくはヘッドタンクの高さという点から評価可能」である。この結果、流体力学的なエネルギーの変換効率の測定が容易と考える。また衝動型水車は構造も簡単であり、設計・製作・学習者の工夫がし易いという特徴を持ち得る。よって技術科「B エネルギー変換に関する技術」に適した教材になり得ると考える。本稿では、水車もしくは水力発電の教育利用に関する先行研究をレビューすることにより、中学校技術科「B エネルギー変換に関する技術」における教材として相応しい水車もしくは水力発電システムを考える。

2. 教育用水車とその実践

文献データベースCiNiiおよびJDreamIIIを用いて「(水力 OR 水車) AND (教材 OR 教育 OR 授業)」という検索式の下、1997年から2016年までの先行研究を調査した。本稿においては検索結果の中から、小学校～大学（小学生～大学生）を対象とした教育に関する先行研究を記す。

小学校～大学（小学生～大学生）を対象とした水車もしくは水力発電についての教育に関する報告は、水車・発電機等の要素の製作に関するもの、水車・発電機を含む教育用水力発電システム（実験装置）に関するもの、水力発電システムを教具としたエネルギー変換についての授業実践に関するものに大別される。以下、教育用水車の製作に関する報告、水車・発電機を含む教育用水力発電システム（実験装置）に関する報告、水力発電システムを教具とした授業実践に関する報告を順次述べていく。

2. 1 教材用水車の製作

本節においては、先行研究において使用されている水車に焦点を当てる。大山⁸⁾はレンゲ（スプーンの種類）を水受けとし、料理で使用する落とし蓋にレンゲを貼り付けることにより水車を構成、同水車を用いた発電実験をおこなっている。一見するとペルトン水車のようなものであるが、当該水車が開放周流形水車を意図しているのかペルトン水車を意図しているのかについては明記されていない。手島⁹⁾は訪問授業において使用する水力発電システムの模型の紹介をしている。手島は、子どもの身近にあるものを使用して模型を作るという方針を持っており、当該水力発電システムの

模型はアイスクリームのスプーンを水受け部とする水車となっている。散水用ノズルを用いた噴出ノズルを使用しているため、ペルトン水車を模擬していると推察されるが、ペルトン水車と開放周流形水車の何れを意図したのかは明記されていない。山口¹⁰⁾は六角形断面を持つペットボトルの中心軸に沿うように回転軸を通すと共に、ペットボトルの側面（六角形の平面部分）を切り起こすことにより水受け部を構成した水車（開放周流形水車に分類されると考える）を製作している。山口は、ペットボトルを用いた当該水車は工作が容易なため、工作のテーマとして有効であると述べている。また小池ら¹¹⁾および栗林ら¹²⁾は発泡スチロール製の円柱にアルミ板¹¹⁾もしくは樹脂板¹²⁾を差し込むことにより開放周流形水車を製作している。以上の何れの試みも、身近な材料により水車を構成しており、衝動型水車の製作の容易さ、および、水車の製作に際しての学習者の発想・工夫を受け入れる余地の存在を示している。

以上、水車の製作方法を明記してある例を述べたが、川や水路等における実証試験を前提とした水車を始め、教育利用では「構造が簡単で自作しやすい¹³⁾」との理由から、開放周流形水車が採用されている例が多い¹³⁻¹⁶⁾。開放周流形水車以外に教育利用されている水車は、ペルトン水車^{5, 6, 17, 18)}、芋洗い水車¹⁹⁻²¹⁾、クロスフロー水車²²⁾の例があるのみである。開放周流形水車以外の水車について簡単に紹介する。綾と小川^{5, 6)}はアクリル製のペルトン水車を用いた水力発電演示用模型を開発している。彼らはバケットの色を変える等、見栄えの良いアイキャッチな模型を目指しているようである。アクリル材は機械加工し易く、板厚が薄い場合は加熱による曲げ加工も可能であり、また専用接着剤により強固な接着が可能という特徴を持つ。よって水車を作る材料としては適していると言える。難点は価格と質量である。長尾と小川¹⁷⁾は、噴流やランナの回転状態が観察し易く、また製作が容易という理由から、自然エネルギー利用技術に関する授業（工業高校生対象）においてペルトン水車を用いている。シリコンゴム製の割型を使用してバケットを樹脂成形する等、いかにも工業高校生を対象とした試みとなっている。Agar and Rasi¹⁸⁾は再生エネルギーについての教育に使用するペルトン水車を開発している。Agar and Rasiが製作した水車は、機械加工により削り出した樹脂製バケットを使用する等、かなり精巧かつ堅牢な作りとなっている。西日本工業大学の研究グループは^{19, 20)}は同大学環境建設学科1年生の教育の一環として芋洗い水車（木製）を学生に製作させると

共に、川に設置、実際に芋の皮を向くという試みを行っている。また西日本工業大学の研究グループではないが、増本ら²¹⁾は芋洗い水車(木製)の翼枚数の最適化を検討している。芋洗い水車は「我が国の伝統や文化」に関連する「A 材料と加工に関する技術」の教材としても適しているように考えられる。芋洗い水車ではないが、岐阜大学教育学部技術教育講座のグループは「こどものためのものづくり教室」と称したイベントにおいて、コンクリートの型取りに使用する木製合板(コンパネ)を用いて開放周流形水車を製作することを試みている²³⁾。水車が「A 材料と加工に関する技術」の教材としても適している証左と言える。小屋畑と南²²⁾は八戸工業高等専門学校におけるエネルギー環境教育用教材として垂直軸クロスフロー水車(衝動型水車の一種)の開発を行っている。「実験用開水路を使用している」、「学習者が水車の翼の角度を変更可能」、「水車前方に導水壁を自由に設置可能」等、完成度の高い実験装置となっている。

2. 2 教育用水力発電システム

教育用の水力発電システムは、川や用水路等のフィールドにおいて使用されるもの(例えば文献16)、および室内において使用されるものの2つに分類される。本節においては、室内において使用することを前提とした教育用の水力発電システムもしくは水車を用いた実験装置について紹介する。

教育用の水力発電システムもしくは実験装置として提案もしくは使用されているものの中で、唯一の工学実験装置は上述の小屋畑と南²²⁾の開発した装置である。ただし、同装置は、実験用開水路を保有しない環境下では適用が難しい。開水路を自作した例として小池ら¹¹⁾の製作した教育用水力発電システムが存在する。小池ら¹¹⁾は発砲スチロール板を用いて開水路(幅60 mm、長さ850 mm、深さ80 mm)を自作している。同開水路の下部出口にはドレインタンク(衣装ケースを利用)が設置されており、予め水が貯められている。同タンク内の水はポンプにより開水路上部へと供給され、開水路通過後、再びドレインタンクへと戻る。開水路内の流速は、開水路の傾きにより変更可能となっている。水車(下掛け式開放周流形)は、開水路内に設けられた絞り部(水路板と表記されている)の下流に設置されている。水車には発電機が接続されており、水車のエネルギー変換特性を電圧として得ることが可能となっている。同装置の最大の問題点は、水流の全てが水車に入力されることが保証されず水車へ到達する直前の水が保持している流体力

学的なエネルギーが不明なことにある。つまり、流体の持つエネルギーの電力への変換効率を知ることができない。

ペルトン水車や上掛式開放周流形水車のように水受け部に水流の全てを衝突させる水車を用いた場合、上述の開水路を用いること無くエネルギー変換に関する実験が可能となると考える。栗林ら¹²⁾は、高さの異なる二つの上部タンク(ヘッドタンク)、水車(回転軸に発電機を接続)、貯蔵タンク(下部タンク)からなるコンパクトな教育用水力発電システムを製作している。何れかの上部タンクから放出された水は、水車を通過後、水車下部に設置された貯蔵タンクに貯められる。同装置では、上部タンク内の水位が保たれないため、時々刻々発電量が変化することになるが、高さの異なる上部タンクの利用により、水の位置エネルギーの発電量への影響を定性的に学習することが可能となっている。

吉田ら¹³⁾は、出前授業等に利用可能なコンパクトな教育用水力発電システムを製作している。同システムは、上部タンク、開放周流形水車および下部タンクから構成されており、それらが高さ1980 mm、幅460 mm、奥行き610 mmのラック(アングル製)内に設置されている。下部タンクに予め貯められた水は、揚水ポンプを介して上部タンクへと送られ、上部タンクより開放周流形水車へと流入、その後、下部タンクへと放出される。発電機は開放周流形水車に直に(動力伝達機構等を介すること無く)接続されている。上部タンクは高さを変えることが可能となっており、タンク中の水の位置エネルギーと発電機の出力の関係を求めることが可能となっている。また、開放周流形水車(直に接続されている発電機を含め)は取り外し可能となっており、同水車部のみを河川等におけるフィールド試験に用いることが可能となっている。同システムは水の位置エネルギーの電力への変換効率を求めることが可能であるが、変換効率に関連する因子は水の位置エネルギーのみでは無い。例えば、同装置では、水車に直に発電機が接続されており、水車-発電機間のエネルギー伝達損失(例えば、加・減速機等の動力伝達機構を使用した場合のエネルギー損失)を示すことができない。またシステムがコンパクトであることから上部タンク-水車間の管路抵抗が小さいと想像される。有効落差(上部タンク(ダムに相当)-水車間のエネルギー損失に関係)の概念を示すことができないのでは?と考える。

永田ら¹⁵⁾は幅334 mm、奥行き200 mm、高さ100 mmのプラスチックケース(ホームセンター等で販売

されている収納ケースの様なもの)の内部に水車(開放周流形)、増速機、発電機を組み込んだ教育用水力発電システムを提案している。小学生(低学年)が持ち運び可能にするとの配慮から、同システムは0.6 kgと軽くできている。同システムは水流部を内蔵していないため、実験の際は、ペットボトル内の水をかけるようになっている。同システムはキット化されており、永田らは、公開講座(小学生、中学生対象)において参加者に水力発電システムの組み立てをさせると共に、ペットボトルの設置高さを変えた実験を行わせ、発電原理および発電量と位置エネルギー(ペットボトルの設置高さ)の関係を学習させている。同システムはペットボトル内の水をかけるため流量が安定しないと考えられるが、効率の測定をしないと言う条件下であれば(発電原理の説明のみをすれば良いという条件下であれば)、その軽さ故、出先機関において公開講座を実施するには適していると考える。

山本ら²⁴⁾は貯水槽(装置最下部に設置)、ポンプ、水栓金具(台所の蛇口の様な外観)、水車からなる教育用水力発電システムを提案・製作している。貯水槽に予め貯められた水はポンプにより水栓金具に送られ、同金具通過後、同金具出口部に取り付けられた水車に送られる。水車部通過後、水は貯水槽へと戻る。水栓金具中に水圧調整機構が取り付けられており、水車へ送られる水の圧力を常に一定に維持することが可能となっている。また、水車出口における排水負荷を変更できるようになっており、排水負荷の発電量への影響を学ぶことが可能となっている。同システムの問題点は、非常に綺麗かつコンパクトにシステムがパッケージングされていることにあると考える。綺麗なシステムであるが故に、学習者には「水車がどの様に回っているか」、「水車と発電機がどの様に接続されているか」等について実感できないのでは?と危惧する。またポンプにより誘起される圧力エネルギーを電力へと変換しているため、水の位置エネルギーが意識できず、この結果、「ダムの役割は何か?」についても実感できないのでは?とも考える。

以上、水流部を含めたシステムの例について述べたが、水車部と発電機部のみを開発し、水の供給には水道水を利用するもの(屋上の貯水槽から実験場所までの落差を利用)も多い^{5, 6, 9, 10, 17)}。例えば長尾と小川¹⁷⁾は実験を実施する階を変更することにより屋上の貯水槽からの落差を変えるという手法を採用している(5階建ての校舎)。貯水槽から実験場所までの落差を利用する方法の欠点は、他所における水道の利用の影響があることにあると考える。また、水道の水圧が低

く発電に至らなかったとの報告⁹⁾もあり注意が必要である。

2. 3 水車を利用したエネルギー変換に関する授業実践

2. 3. 1 エネルギー変換の授業に関する現状把握

佐藤^{25, 26)}は、エネルギー変換システムに関し大学生がどの程度の知識を持っているか、および中学校技術科においてどのような教育が行われているかについて調べている。佐藤²⁵⁾は山梨大学教育人間科学部の2~3年生(計38名)に対し、水力、火力、原子力発電のエネルギー変換原理を問うアンケートを実施している。同アンケートの結果、各発電の原理を理解していない者の割合は、水力発電45%、火力発電71%、原子力発電71%であったことを明らかにしている。佐藤²⁵⁾は、「水力発電の仕組みは中学校理科の教科書には明記していないこと」および「火力発電の仕組みは中学校理科の教科書に明記されていること」より、水の位置エネルギーを電気エネルギーに変換することはわかり易いが、熱エネルギーを電気エネルギーに変換することはわかりにくいと述べている。一方、同研究から明らかかなように、水力発電においては、水の位置エネルギーを電気エネルギーに変換していることを45%の学生が理解していない。水力発電に関する教育においては、水の位置エネルギーを意識させることが必要と考える。後日、佐藤²⁶⁾は山梨県内の中学校技術科の教師を対象とし、エネルギー変換に関する教育の実態についてのアンケートを実施している(有効回答数56校)。同報告によると、熱エネルギー、風力エネルギー、水力エネルギーから電気エネルギーへの変換を、それぞれ、45%、64%、66%の学校において座学により教えている。一方、それぞれ48%(熱エネルギー)、30%(風力エネルギー)、30%(水力エネルギー)の学校においては教えていない。熱エネルギー、風力エネルギー、水力エネルギーから電気エネルギーへの変換の実験を生徒が行う学校数は非常に限られており、全て2%とのことである(教員による演示は、それぞれ2%、0%、0%)。光エネルギーから電気エネルギーへの変換の実験を生徒が行う学校数は11%となっており(教員による演示は14%)、学校現場では光エネルギーから電気エネルギーへの変換の方が実施し易いことが見受けられる。佐藤²⁶⁾は結論においてエネルギー変換に関する教育の問題点を述べており、その一つとして、熱エネルギー、風力エネルギー、水力エネルギーから電気エネルギーへの変換を教えるために適した教具・教材が無いことを指摘している。

2. 3. 2 水力発電の演示・実験

綾と小川^{5,6)}は、中学校3年生(3クラス、計107人)を対象とし、「総合的な学習の時間」において水力発電システムの模型を用いた演示を行っている。水力発電システムの学習に関する事後アンケートの自由記述に、水道の水で発電していることに驚いた旨の記述があったとのことである。前節で述べた様に、水力発電システムに関する学習では、水の位置エネルギーを意識させる必要がある。水道の利用は水の位置エネルギーをイメージし辛いのでは?と危惧する。小池ら¹¹⁾は、中学校3年生(2クラス、計72人)を対象とし、理科の時間(単元:科学技術と人間。小単元:いろいろなエネルギー)において、水力発電に関する実験をおこなっている。授業前後におけるアンケートの結果、「図等を用いた説明よりも演示・実験の方が、タービン(水車)の役割を理解するために役だったこと」および「水車(タービン)の理解が火力・原子力発電において利用されるタービンの役割の理解に役立ったこと(引用文献11,表12より)」を報告している。吉田ら¹³⁾は高等学校2年生を対象とした出前授業において、永田ら¹⁵⁾は小学生および中学生を対象とした公開講座において、彼らの考案・製作したコンパクトな水力発電システムを利用している。いずれも事後アンケートでは授業に対し概ね肯定的な意見を得たとのことである。なお吉田ら¹³⁾の授業ではエネルギー変換効率の検討(算出)もおこなっているが、当該事項に関する学生の反応等の報告は無い。綾と小川^{5,6)}、小池ら¹¹⁾、吉田ら¹³⁾、永田ら¹⁵⁾の例から明らかな様に、演示・実験の如何を問わず、発電している様子を見せることにより学習者の興味を集めることが可能と言える。

先述のように、長尾と小川¹⁷⁾は、屋上の貯水槽から校舎(5階建て)の各階までの落差を利用することにより、水力発電システムのエネルギー変換効率に関する授業を実施している(対象:工業高校生)。長尾と小川は、学習者の変換効率の概念の理解度を授業の前後で比較し、「理解が深まった」と結論づけている。山本ら²⁴⁾は、「水力発電の学習(実験)を通して日本のエネルギー事情について理解を深める」との学習目標の下、中学校技術科の授業において水力発電に関する実験をおこなっている(対象:中学校2年生(計83人)。装置に関しては2.2節に記載)。「排水負荷の発電量への影響」や「同一水路内に水車二台を並列設置することの発電量への影響」を調べる等、高度な実験を実施している。山本ら²⁴⁾は、授業にて、①学習者に予想させ、②実験的に結果を示し、③結果を解

説するという手順を実施している。実験装置の理解に関する事後アンケートより、実験を通して発電の仕組みを理解することができた旨の意見が見られたとのことである。栗林ら¹²⁾は、彼らの開発した教育用電力発電システムを用いて、水の位置エネルギー、翼の枚数、水車の幅の発電量への影響を調べる実験を行っている(対象:中学校1年生。4クラス。計137名)。授業前・授業後にアンケートを実施しており、その結果、水力発電の仕組みを理解させるだけでなく、水車の形と発電量の関係を学習者に理解させ得たことを明らかにしている。長尾と小川¹⁷⁾、山本ら²⁴⁾および栗林ら¹²⁾の例から明らかな様に、中学生以上を対象とする場合は、学習者にエネルギー変換効率について学習させることが十分に可能と言える。

2. 3. 3 水車の製作

木村と吉田¹⁴⁾は、中学校「選択授業技術」に対応した「水車に関する教育」を提案・実践している。同教育カリキュラムは、水車に関し、社会・産業(地域学習・国際理解)、文化・芸術(詩歌・俳句・絵画)、機構(部品・材料・メカニズム)、科学(エネルギー変換・力学)、生活(食生活・住環境)、環境(他の動力による環境破壊)の6点から学習可能なものとなっている。また学習者が製作する水車は、切断・部品加工よりも組み立て・接合に重きを置くように工夫されている。木村と吉田¹⁴⁾は、学習者に対する授業前・後のアンケートの結果、水車は機構、産業、文化の理解に関して優れた教材であることを明らかにしている。また、提示用教材により学習者の興味を誘起した後、工作実習を実施することが有効であると述べている。

2.1節で述べた様に、西日本工業大学の研究グループは^{19,20)}は同大学環境建設学科1年生の教育の一環として受講学生に芋洗い水車を製作させている。2009年の報告¹⁹⁾では電動ジグソーを使用していたが、安全に対する配慮から、2014年の報告²⁰⁾では使用しなくなっている。製作を伴う教材では、安全に対する配慮が必要不可欠であり、同配慮により製作物の一部をキット化せざるを得ない場合がある。

林ら²⁷⁾は、「自転車の車輪に翼を取り付けた形の水車」と「ハブダイナモ(発電機)」を用いた水力発電に関する教具を開発すると共に、小学生を対象とした環境学習イベントにおいて、参加者に同教具の製作を行わせている。林ら²⁷⁾は、アンケート結果の分析より、小学校4年生以下に対しては学習効果が無かったと判断し、対象を小学校5年生以上とすることが好ましいと述べている。同水力発電システムが作りやす

かったか否かのアンケートには、低学年になるほど製作方法が分かりづらかった、もしくは製作が難しかったという意見があったようである。同水力発電システムに興味があったという理由からイベントに参加した子どもが多いことから考えると、製作が難しい物は学習意欲を減退させてしまうように感じられる。同じ物を作らせるにしても、年齢に応じて予め部分的に製作しておく等の配慮が必要であろう。

四元と小山²⁸⁾は工業高校の研究課題の時間を利用して水力発電システムの製作を実施している。四元と小山は、同水力発電システムがものづくり教育という点からは一定の効果があった一方、エネルギー変換の仕組みや変換量の習得には至らなかったと述べている。製作に時間がかかりすぎ、当該システムを使用するのエネルギー変換の仕組みの説明や実験を十分に実施できなかったため、エネルギー変換の仕組みや変換量の習得には至らなかったとのことである。著者も述べている事柄ではあるが、製作時間と実験時間のバランスが求められる。

以上、学習者に水車を製作させる際には、

- ・提示用教材により学習者の興味を予め誘起
- ・学習者の能力、安全確保、製作時間短縮を勘案し、ある程度できあがった部品を使用する

等を考慮しなければならない。

また、水力発電システムに関する問題解決型の授業を行うに際しては、設計・製作に時間を掛けすぎない工夫が必要と考える。例えば、システム全体を設計・製作させるのではなく、水車の形状、水車の設置方法、水車への噴流の当て方等の何れかのみを工夫させることが相応しいであろう。

3. 教育用水力発電システム

2節に記載した先行研究のレビューより、中学校技術科「B エネルギー変換に関する技術」の授業に必要とされる水力発電システムは以下の要件を満たすものが望ましいと考える。

- (i) 水面高さを明確化可能なヘッドタンク（上部タンク）を持つ。
- (ii) ヘッドタンクからの水が全て水車部に入力される。
- (iii) ヘッドタンク－水車間の流体力学的抵抗を変更可能。
- (iv) 水車－発電機間のエネルギー伝達に関する損失を変更可能。

- (v) 水車部の設計・製作が容易

要件 (i) ～ (iv) は、中学校学習指導要領解説技術・家庭編、技術分野 (1) の

(1) エネルギー変換機器の仕組みと保守点検について、次の事項を指導する。

ア エネルギーの変換方法や力の伝達の仕組みを知ること。

中の

自然界のエネルギー資源を利用した発電システムを取り上げる場合には、エネルギーの変換効率や設備の稼働率を含めた発電コスト、輸送時のエネルギー損失及び環境への負荷についても学習させるよう配慮する。

に関連している。要件 (i) および (ii) は水車部に入力されるエネルギーを明確化するために必要となる。一方、要件 (iii)、(iv) は水車部以前（要件 (iii)）および以降（要件 (iv)）のエネルギー損失を意図的に変え、エネルギーの変換効率を学習するために必要となる。また要件 (v) により、中学校学習指導要領解説技術・家庭編、技術分野¹⁾の

(2) エネルギー変換に関する技術を利用した製作品の設計・製作について、次の事項を指導する。

ア 製作品に必要な機能と構造を選択し、設計ができること。

製作品の構想を検討する際には、機能、構造、材料、加工、費用、時間などの設計要素を踏まえるとともに、エネルギーの損失や効率についても考慮するよう指導する。

また、製作品に求められる構造や電気回路を選択する際には、自分の考えを整理するとともに、よりよいアイデアが生み出せるよう、構想図や回路図などを適切に用いることについて指導する。なお、その際、内容の「A材料と加工に関する技術」との関連に配慮する。

を満たすことが可能である。

要件 (i) の具体化方法として、

- (a) 高さを変えて設置可能なオーバーフロー機能付きのヘッドタンクを利用する

が挙げられる。同ヘッドタンクは調整池式水力発電もしくは貯水池式水力発電ではダムに、自流式水力発電では水源地に相当する。ヘッドタンクの高さを変えながらエネルギー変換効率を測定することにより、(水の)位置エネルギーと発電量の関係を学習者に体験させることが可能となる。オーバーフロー機能を持たないヘッドタンクは、引用文献12, 13, 15において採用されている。何れもヘッドタンクの高さを変更可能となっているが、水の位置エネルギーを一定に保つことが可能なシステムは引用文献13のみである。ただし、引用文献13の場合も、ヘッドタンク内の水位(水の位置エネルギー)は、単位時間あたりにおけるヘッドタンクからの水の流出量(トリチェリの定理から明らかな様に、水位の関数となっている)と、ヘッドタンクへの水の供給量の差により決定される。このため、ヘッドタンク高さの変更量が小さな場合、流出量と供給量の関係によっては、実際の水位は変化しないと言うことがあり得る。また実験の度に水位を測定し、水の位置エネルギーを確認する必要がある。一方、オーバーフロー機能付きのヘッドタンクの場合、オーバーフロー機能部の流動抵抗が十分に小さければ、水位はオーバーフロー機能部の高さにより決定される。つまり、ヘッドタンクの高さを変えることは、水の位置エネルギーを変えることに他ならないことを担保する。なお同タンクへの水の供給は、

- ・水道から直に供給
- ・水車からの排水をドレインタンク(下部タンク)に貯め、ポンプを介してドレインタンクの水をヘッドタンクへ供給

等が考えられる。いずれの方法にせよ、常にオーバーフローさせることにより、安定したヘッドタンク内水面高さを維持することが可能——水車に入力する流体力学的エネルギーを一定に保つことが可能となると考える。

要件(ii), (v)の具体化方法として、

- (b) ベルトン水車もしくは上掛開放周流形水車の採用

が挙げられる。2.1節に例示したように、現在までに検討された教育用水車の多くは、ベルトン水車もしくは開放周流形水車となっている。ベルトン水車もしくは上掛開放周流形水車の場合、ノズル等を利用することにより、ヘッドタンクからの水の全量を水車部へ

と入力することが可能となる。つまり水車に与えられる流体力学的エネルギー量を明確化することが可能となる。また2.1節に例示したように、ベルトン水車もしくは開放周流形水車は身近な材料を用いた製作が可能のため、学習者による試行錯誤が可能であり、問題解決型の学習が可能と言える。ただし、ベルトン水車もしくは開放周流形水車のいずれを採用するにせよ、2.3.3節に記載のように、設計・製作に過度に長い時間を掛けすぎない工夫が必要と考える。

弘中ら²⁹⁾は、3D CADと3Dプリンタを利用した水車(ベルトン水車、カプラン水車、バルブ水車)製作に関する授業カリキュラム(工業高等学校対象)を提案している。3D CADと3Dプリンタを利用した水車製作により、中学校学習指導要領解説技術・家庭編、技術分野¹⁾「D 情報に関する技術」の

(3) プログラムによる計測・制御について、次の事項を指導する。

ア コンピュータを利用した計測・制御の基本的な仕組みを知ること。

を満たすことも可能である。

要件(iii)の具体化方法として、

- (c) ヘッドタンク-水車間の流路長さや流路断面積を変化させる

が考えられる。ヘッドタンクはダムに相当する。(c)によりダム-水車間を接続する導水管部にエネルギー損失が存在することを学習者に体感させると共に、水力発電における有効落差の概念を提示することが可能となる。引用文献12, 13では、ヘッドタンクの高さを変更することにより導水管部の長さも変わる構造を採用しているため、結果的に導水管部のエネルギー損失を評価していることになるが、装置(システム)がコンパクトであるため、エネルギー損失の変化も小さいと想像される。また、導水管部の長さを変更する際、ヘッドタンクの高さも変化してしまうため、導水管部にエネルギー損失が存在することが理解しにくいのでは?と危惧する。ヘッドタンクの高さを変えずに、流路長さや流路断面積を変化させた場合、導水管部のエネルギー損失のみを変化させることが可能となる。

要件(iv)の具体化方法として、

- (d) 水車-発電機間に歯車増・減速機を設置する

が考えられる。歯車増・減速機を設置しない場合の発電効率と比較することにより、歯車増・減速機によるエネルギー損失を学習者に体験させることが可能となる。歯車増・減速機の一方を接続するのみでは無く、歯車増速機と減速機を同時に接続し、増・減速前の回転数と減・増速後の回転数を同じにすることにより、歯車機構を用いた際のエネルギー損失のみを取り出すことも考えられる。また中学校学習指導要領解説技術・家庭編、技術分野¹⁾の

動力伝達の機構としては、ベルトとプーリなどの摩擦を利用して動力を伝える機構や、歯車などのかみ合いを利用して動力を伝える機構、カム機構などの目的とする動きに変換して動力を伝える機構について知ることができるようにすることが考えられる。

も満たすことができる。なお本稿の調査では、動力伝達機構のエネルギー損失を考慮した先行研究は見当たらなかった。

小川ら³⁰⁾は簡易ブローニーブレーキを用いることによりトルクコンバーターに起因するエネルギー損失を求めている。同様の方法により、

(e) 発電機入力直前のエネルギーを求め、発電機の出力和比較する

ことが考えられる。(e)により、発電機においてもエネルギー損失が存在することを学習者に体験させることが可能となる。

以上の(c)、(d)、(e)の実施により水力発電に関する総合的なエネルギー損失を示すことができる。これにより「揚水型水力発電システムが位置エネルギーを利用した蓄エネルギー装置であること」および「揚水型水力発電システムは電力需要の昼夜不均衡等が存在するが故に成立するシステムであること」等を学習者に理解させることも可能となると考える。

4. おわりに

オーバーフロー機構を持つヘッドタンクを備えたペルトン水車もしくは上掛開放周流形水車を用いた教育用水力発電システムは、中学校学習指導要領解説技術・家庭編、技術分野¹⁾「B エネルギー変換に関する技術」に合致する「エネルギーの変換効率を明確化可能な教材」になり得ると考える。また3D CADと3D

プリンタを活用することにより、「D 情報に関する技術」に適合させることも可能となる。

本稿では中学校技術科を対象とした検討を行ったが、高等専門学校生を対象として「小水力発電アイデアコンテスト」が開催されている³¹⁾。工業高校における課題研究としても成立し得るように考える。水車の設計・製作および河川・用水路を用いたフィールド試験により、高等学校学習指導要領解説工業編³²⁾の「(1) 作品製作, (2) 調査, 研究, 実験」を満たすことから「第2章 工業科の各科目 第2節 課題研究」として成立し得る。また流体を利用した教材であることから「第2章 工業科の各科目 第5節 工業数理基礎 第2 内容とその取扱い 2 内容 (2) 基礎的な数理処理 ア力とエネルギー イ力と釣合い ウ流れの基礎」, 「第2章 工業科の各科目 第14節 原動機 第2 内容とその取扱い 2 内容 (2) 流体機械 ア流体の性質と力学」, 「第2章 工業科の各科目 第40節 土木基礎力学 第2 内容とその取扱い 2 内容 (3) 水理学の基礎 ア静水の性質 イ水の流れの性質と測定」, 「第2章 工業科の各科目 第45節 化学工学 第2 内容とその取扱い 2 内容 (3) 単位操作 ア流体の輸送」の何れをも満足する。

引用文献

- 1) 文部科学省：中学校学習指導要領解説技術・家庭編，文部科学省，2008.
- 2) 島崎洋一：地域の再生可能エネルギーを題材にした環境学習プログラムの開発，環境科学会誌，26(1)，pp. 11-21, 2013.
- 3) 橋渡憲明，村松浩幸，田中いずみ，芦田肇，堀内直人：中学校技術科における風力発電タービンコンテスト用ワークシートを活用した授業実践と評価，技術科教育の研究，21，pp. 55-60, 2016.
- 4) 川村康文，本田賢一郎，井筒理，松本悠：手作り発電機を用いたサボニウス型風車風力発電機の教育教材の開発，日本エネルギー学会誌，92(9)，pp. 913-918, 2013.
- 5) 綾美幸，小川武範：中学校におけるエネルギー変換学習用教材の開発と授業実践——自然エネルギーを中心として——，理科教育学研究，47(1)，pp. 25-34, 2006.
- 6) 綾美幸，小川武範：中学校におけるエネルギー変換学習のための教材開発——自然エネルギーを中心として——，日本科学教育学会研究会研究報告 科教研報，20(1)，pp. 21-26, 2005.
- 7) 吉田誠，松山宗弘：風車のはたらきを指導する教材・教具の開発，奈良教育大学教職大学院研究紀要「学校教育

- 実践研究」, 8, pp. 117-123, 2016.
- 8) 大山光晴：身近な発電を通して学ぶ電気, 物理教育, 48 (3), pp.267-268, 2000.
 - 9) 手島清美：風・水力発電機模型によるエネルギー教育の実践, エネルギー環境教育研究, 5 (1), pp. 9-16, 2010.
 - 10) 山口静夫：ペットボトルを用いた水車と風車の教材への応用, 第73回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No. 12p-PB2-24, 2012.
 - 11) 小池守, 植田多恵子, 齊藤恵太郎, 高津戸秀：中学校理科「科学技術と人間」で使用するマイクロ水力発電教材の開発と評価 —— 発電原理に共通するタービンの役割を理解することを目指して ——, エネルギー環境教育研究, 8 (1), pp. 11-19, 2013.
 - 12) 栗林敬宜, 白石正人, 遠藤秀治：水力発電模型による教材開発と授業実践, 日本産業技術教育学会九州支部論文集, 22, pp. 101-107, 2014.
 - 13) 吉田義昭, 横田聖輝, 青木健太, 山添絃弥：マイクロ水力発電を用いたエネルギー変換教材の開発, 応用物理教育, 40 (2), pp. 115-121, 2016.
 - 14) 木村慶太, 吉田誠：「水車から広がる学び」に関する学習プログラムの開発, 日本産業技術教育学会誌, 55 (1), pp. 53-60, 2013.
 - 15) 永田亮一, 楠原良人, 椎保幸, 瀬濤喜信, 島名賢児, 清水勇喜, 原田正和, 山田孝行：マイクロ水力発電教材の開発と実践, 電気学会研究会資料 教育フロンティア研究会, 電気学会, 東京, pp.7-10, 2014.
 - 16) 森下英樹, 遠藤優斗, 山本敏和, 橋本慎也：小水力発電装置の製作と発電特性に関する研究, いわき地域環境科学会誌 EQUAL, 29, pp. 39-42, 2016.
 - 17) 長尾伸洋, 小川武範：工業高校における効率の概念学習案とその実践, 日本産業技術教育学会誌, 49 (3), pp. 223-229, 2007.
 - 18) D. Agar, M. Rasi: On the use of a laboratory-scale Pelton wheel water turbine in renewable energy education, Renewable Energy, 33 (7), pp. 1517-1522, 2008.
 - 19) 是永展征, 古賀亮輔, 坂本浩之, 池森寛：環境ものづくり演習に利用する「芋洗い水車」の製作, 日本機械学会講演論文集 (九州支部第62期総会講演会), No. 098-1, p. 335, 2009.
 - 20) 野瀬秀拓, 池森寛：水車大工のESDものづくり授業を振り返って, 昔の技術と生活に学ぶ『芋洗い水車づくり』, 技術と社会の関連を巡って：過去から未来を訪ねる, No. 14-63, pp. 37-38, 2014.
 - 21) 増本憲泰, 坂本直也, 中島滉貴, 矢野孝宏, 小瀬保, 広岡邦昌, 下村康治：芋洗い機を用いた小型水力発電装置の開発 (芋洗い機の実験的最適化), 日本工業大学研究報告, 41 (3), pp. 595-597, 2011.
 - 22) 小屋畑勝太, 南将人：垂直軸クロスフロー水車をモデルとしたエネルギー環境教育教材の開発, 八戸工業高等専門学校紀要, 48, pp. 131-136, 2013.
 - 23) 小原光博, 片山達人, 大瀧祥子, 堀高哉：ものづくり体験のための題材開発 コンパネと2×4材で作る水車, 岐阜大学教育学部研究報告 (自然科学), 29, pp. 45-49, 2005.
 - 24) 山本利一, 弘中一誠, 大橋雅人：小水力発電の仕組みを学習する装置の開発と授業実践, 日本産業技術教育学会誌, 57 (4), pp. 231-239, 2015.
 - 25) 佐藤博：発電に関するエネルギー教育の現状, 山梨大学教育人間科学部紀要, 2 (2), pp. 48-55, 2001.
 - 26) 佐藤博：中学校技術科におけるエネルギー教育についての調査, 教育実践研究, 11, pp. 26-38, 2006.
 - 27) 林真弘, 大窪健之, 金度源：手づくり発電水車を教材として利用した環境学習イベントがもたらす学習効果の調査研究, 平成25年度日本建築学会近畿支部研究発表会, pp. 637-640, 2013.
 - 28) 四元照道, 小山英樹：自作インバータを用いた教材用発電システムの開発と実践, 兵庫教育大学学校教育学研究, 29, pp. 19-24, 2016.
 - 29) 弘中一誠, 山本利一, 佐藤智明, 小山翔太：3Dプリンタを活用した水車の設計と製作, 日本教育情報学会第31回年会, pp. 266-267, 2015.
 - 30) 小川武範, 久光脩文, 鍋島浩：中学校技術科における効率の概念の学習について, 日本産業技術教育学会誌, 35 (3), pp. 195-204, 1993.
 - 31) 宮川敬, 竹本泰敏, 藤田克志, 吉田雅穂, 丸山晃生, 田安正茂：福井工業高等専門学校におけるもの創り教育活動 —— 小水力発電アイデアコンテストへの参加報告 ——, 平成25年度工学教育研究講演会講演論文集, pp. 416-417, 2013.
 - 32) 文部科学省：高等学校学習指導要領解説工業編, 文部科学省, 2010.