

マイクロ水力発電を用いたエネルギー変換教材の開発

Development of a Teaching Material for Energy Conversion using Micro Hydropower

吉田義昭, 横田聖輝, 青木健太, 山添紘弥

Yoshiaki Yoshida, Masaki Yokota, Kenta Aoki and Hiroya Yamazoe

広島工業大学工学部, 〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1

Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology

2-1-1 Miyake, Saeki-ku, Hiroshima-shi 731-5193 Japan

Abstract

To acquire the scientific thinking, students should conduct experiments and measurements. And it would also be important to try to quantify using physical formulas. So, we have developed a teaching material of micro hydropower generator that can quantify the energy conversion efficiency. We use a classical water wheel that is suitable for low head drop. This apparatus can be used in laboratory or field experiments. To clarify the power generation performance, it was carried out the resistance load test and the head drop change test. We also clarified the education effects of this apparatus.

Keywords: micro hydropower generator, experimental teaching material, energy conversion efficiency

(受理 2016年 7月 25日)

1. はじめに

近年, 深刻化するエネルギー・環境問題を背景に再生可能エネルギーの利用に期待が高まっている. その中でも, マイクロ水力発電は, 中～大規模水力発電と異なり, 河川部や農業用水路または上下水道などの低落差・低流量の場所に設置できる. 開発規模が小さく, 環境にやさしい発電として注目される. また太陽光発電と比べて設置場所は限られるものの, 設備稼働率は約60%と高く, 安定した発電出力が得られる¹⁾.

マイクロ水力発電を身近に体験できる実験教材があれば, 生徒や学生に物理現象やものづくりに対する関心・理解を深める機会になるだろう. これまで水力発電をテーマにした教材に, 水道の蛇口や水を貯めたペットボトルと水車をつないで発電するものがある²⁾. 水の力学的エネルギーが電気エネルギーに変換される過程を観察でき, 負荷としてLEDや電子オルゴールなどが動作する. エネルギー変換の原理を定性的に理解するのに適した教材と言える.

一方, 物理法則などを理解し, 科学的見方や考え方を

身に付けるには, 実験・測定を行い, 物理公式を使って定量化してみることも重要であろう. そこで著者らは, エネルギー変換効率(以下, 効率と略す)を定量化できるマイクロ水力発電の教材開発に取り組んできた³⁾. 低落差に適した開放周流型水車を採用し, 回転軸に耐久性のあるハブダイナモ(定格6V・2.4W)を用いた⁴⁾. 本装置は, 室内とフィールドの両方で発電実験ができる. 室内実験時は, 2台の揚水ポンプで下部の透明な水槽から上部の貯水タンクへ汲み上げ, 水を循環させる. 貯水タンクから導水管に水を通して落下させ, 水車を回転して発電する. 発電性能を明らかにするため, 抵抗負荷試験と落差変更試験を行った. 効率は最大で20.3%が得られた. フィールド実験では, 河川の側溝に水車を仮設し効率30.8%で発電することを検証した.

さらに, 高校生を対象とした出前授業において, 開発した教材を用いて体験型授業を実施した. 生徒は本装置を操作して測定し, ワークシートを使って効率の計算に取り組んだ. アンケートの結果, 教育上の効果を確認できた. その授業内容の概要についても報告する.

2. 実験装置および効率計算

2.1 マイクロ水力発電装置

図1は開発した室内用マイクロ水力発電装置の外観である。出前授業などに活用することを想定し、キャスターを取り付け運搬移動が容易な構造とした。高さが1980 mmあるが、長さ1000 mmのL型アングルを2本

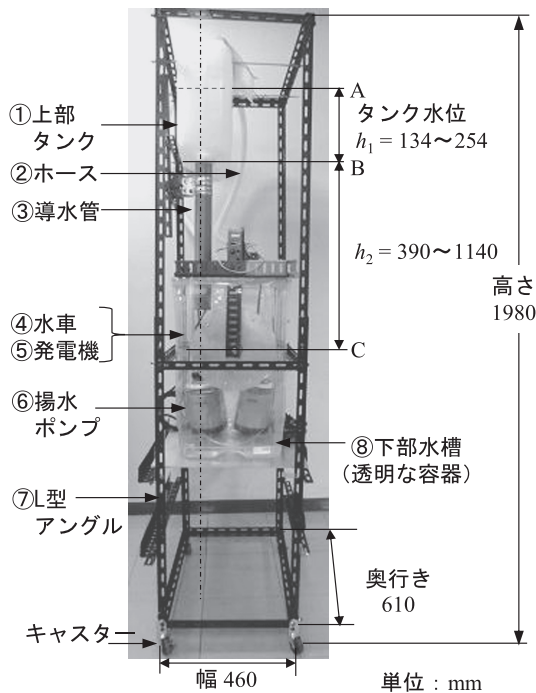


図1 室内用マイクロ水力発電装置

表1 主要部品一覧

No.	部品名 (型式等)	仕様
①	上部タンク (北陸土井工業, 広口缶20L)	サイズ: 175×340×380 mm 断面積: 59500 mm ² 小孔直径: 44 mm 小孔面積: 1521 mm ²
②	サクシオンホース (SUN UP, 2本)	内径: 25 mm 長さ: 2200 mm
③	導水管 (塩化ビニル管, VU50)	内径: 56 mm 長さ: 250, 500, 750, 1000 mm
④	水車 (開放周流型水車)	直径: 300 mm, 幅: 60 mm 羽根形状: 湾曲 羽根枚数: 9
⑤	発電機 (シマノ, DH-2N30J)	ハブダイナモ 永久磁石式同期発電機 定格: 6 V-2.4 W, 極数: 28
⑥	揚水ポンプ 2台 (テラダ, SL-102)	吐出量: 70 L/min 全揚程: 2600 mm
⑦	L型アングル (架台用)	板厚 3.2×50×50 (L-50W) 板厚 3.2×30×30 (L-30W)
⑧	下部水槽 (セキスイ, TPD9R)	容積: 90 L サイズ: 455×434×602 mm

つないで構成しているのので、分解すれば半分の大きさになり、軽自動車にも積み込める。表1に主な部品リストを示す。図の丸数字は表の部品番号に対応する。

実験準備として、下部水槽に25 Lの水を貯めておく。上部タンクから流出する水の流量は、落差や負荷条件によって変動し、89~122 L/minである。そのため、2台の揚水ポンプ (1台あたり、全揚程2600 mmの時、吐出量70 L/min) を用いて、水を上部タンクに汲み上げる。導水管を通して流出した水は、水車の羽根に衝突し、水車を回転させる。開放周流型水車は、発電効率が低いという課題があるが、1000 mm以下の落差でも発電ができる。また構造が簡単で自作しやすく、製作実績が豊富である。図2に製作した開放周流型水車の構造を示す⁵⁾。側面の円板は厚さ1 mmのアルミ製である。湾曲した9枚羽根は直径150 mmの塩化ビニル管から切り出した。水車の回転軸には耐水性に優れたハブダイナモが取り付けられており、水車の回転と同期して発電する。水車の動きが容易に観察できるように下部水槽は透明な容器とした。導水管の長さを変えて、落差の変化が出力や効率に与える影響を調べることができる。

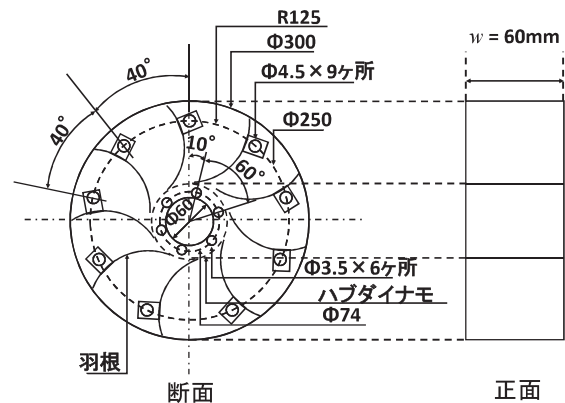


図2 開放周流型水車の構造⁵⁾

2.2 室内実験時の効率計算

図3は、図1の模式図である。定常的な発電状態において、ポンプによる揚水量とタンク小孔から噴出する流量 Q は等しいので、タンクの水位 h_1 は一定になる。このとき小孔から噴出する水の流速 v_1 は摩擦損失を無視すると、トリチェリの定理⁶⁾から次式で表される。

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}, \quad (1)$$

ここで、 g : 重力加速度である。小孔から噴出する水の

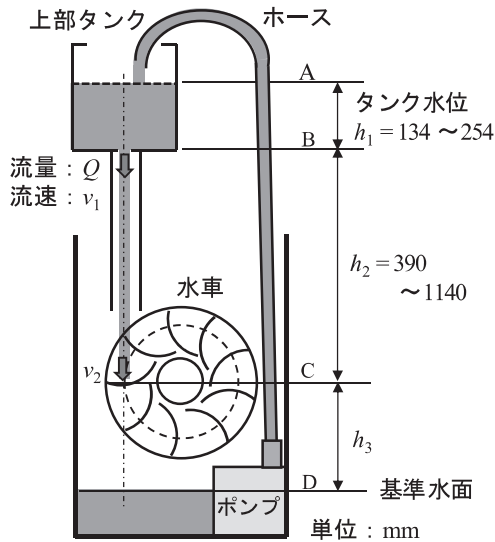


図3 室内実験の模式図

流量 Q は, (1)式を用いて

$$Q = C_1 a v_1 = C_1 a \sqrt{2gh_1}, \quad (2)$$

で表される。ここで, C_1 : 流量係数⁹⁾ ($\cong 0.6$), a : タンクの小孔面積 ($= 1521 \text{ mm}^2$) である。高さ A と C におけるそれぞれの全水頭は以下の式で表される。

$$H_A = h_1 + h_2 + h_3, \quad (3)$$

$$H_C = h_3 + \frac{v_2^2}{2g}, \quad (4)$$

ここで, v_2 : 高さ C における流速である。計算を簡単にするため, 損失水頭を無視すると, エネルギーの保存則から, 次式が成り立つ。

$$H_A = H_C, \quad (5)$$

導水管から流出した水は羽根に衝突した後, 飛散したり, 羽根からこぼれ落ちたりするため定式化が難しい。ここでは, 水流と羽根の位置関係から, 高さ C の速度水頭 ($= v_2^2/2g$) が有効落差 (水車入力に変換される落差) H にほぼ等しいと仮定する。このとき, 水車入力 (以下, 入力と略す) P_m は (2)式~(5)式を用いて,

$$P_m \cong \rho Q g \cdot \frac{v_2^2}{2g} = \rho Q g (h_1 + h_2) \equiv \rho Q g H, \quad (6)$$

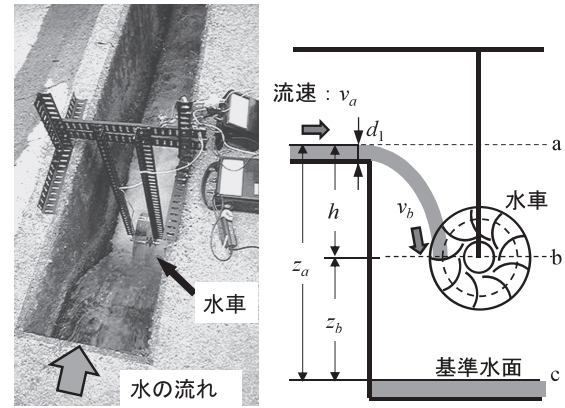
と表される。ここで, ρ : 水の密度である。発電出力 (以下, 出力と略す) を P_o とすれば, 効率 η は,

$$\eta = \frac{P_o}{P_m} \times 100, \quad (7)$$

で与えられる。

2.3 フィールド実験時の効率計算

本学周辺の河川 (千同川) の側溝に製作したマイクロ水力発電機を仮設した。図 4(a)にフィールド実験の様子, 図 4(b)に模式断面図を示す。高さ a と b におけるそれぞれの全水頭は以下の式で表される。



(a) 実験風景

(b) 模式断面図

図4 フィールド実験

$$H_a = z_a + \frac{v_a^2}{2g}, \quad (8)$$

$$H_b = z_b + \frac{v_b^2}{2g}, \quad (9)$$

ここで, v_a : 高さ a における流速, v_b : 高さ b における流速である。計算を簡単にするため, 損失水頭を無視すると, エネルギーの保存則から, 次式が成り立つ。

$$H_a = H_b, \quad (10)$$

前節と同様に, 高さ b の速度水頭 ($= v_b^2/2g$) が有効落差 H にほぼ等しいと仮定する。このとき入力 P_m は(8)式~(10)式を用いて,

$$P_m \cong \rho Q g \cdot \frac{v_b^2}{2g} = \rho Q g (h + \frac{v_a^2}{2g}) \equiv \rho Q g H, \quad (11)$$

と表される。ここで, Q : 水車に流入する流量 ($= S v_a$), h : 高さ a と b の落差 ($= z_a - z_b$), S : 水車の羽根に水が当たる面積 ($= d_1 \times w = 2700 \text{ mm}^2$), d_1 : 高さ a での水深 ($= 45 \text{ mm}$), w : 水車の幅 ($= 60 \text{ mm}$) である。効率は, (11)式を(7)式に代入して求められる。

3 実験方法

開発したマイクロ水力発電装置の特性を明らかにするために, 以下の2つの実験を行う。

3.1 室内実験

室内実験として, 落差変更試験と抵抗負荷試験を行う。導水管の長さを 250, 500, 750, 1000 mm の 4 通り

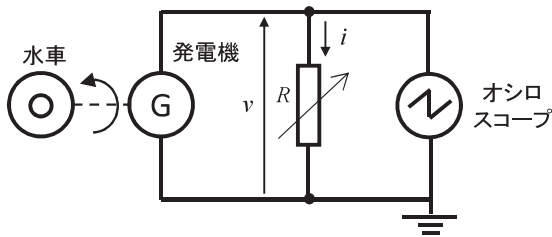


図5 抵抗負荷試験回路

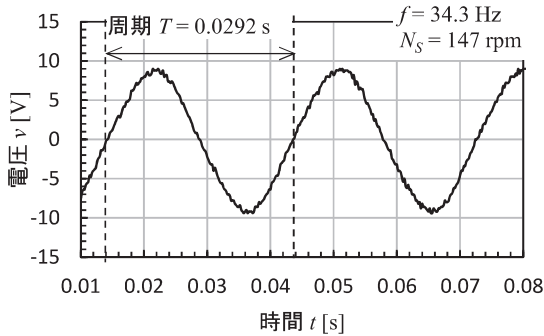


図6 電圧波形例 (抵抗: 15 Ω, 導水管長: 250 mm)

にして落差を変更する。図5に抵抗負荷試験の回路を示す。それぞれの落差において、抵抗負荷 R を $1\ \Omega \sim 100\ \Omega$ の範囲で変化させる。オシロスコープで測定した電圧波形 v から出力 P_o を求める。また電圧の周波数 f から、発電機の回転数 N_s を以下の式で求める。

$$N_s = \frac{120f}{p}, \quad (12)$$

ここで、 p ($=28$): 発電機の極数である。抵抗および落差に対する入力、出力、効率および回転数の特性を明らかにする。図6に電圧波形の測定例を示す。抵抗が $15\ \Omega$ 、導水管長が $250\ \text{mm}$ の例である。周期が $0.0292\ \text{s}$ であることから周波数 f は $34.3\ \text{Hz}$ 、回転数 N_s は $147\ \text{rpm}$ となる。また電圧、電流の実効値はそれぞれ $V=6.18\ \text{V}$ 、 $I=0.412\ \text{A}$ となり、出力 P_o は $2.55\ \text{W}$ である。

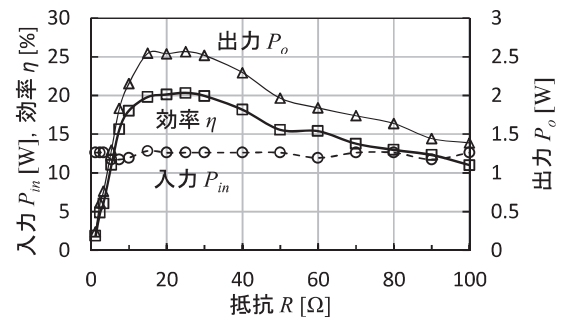
3.2 フィールド試験

図4に示したフィールド実験において、浮子法^{8)~10)}により高さ a における流速 v_a を測定する。3.1節と同様に抵抗負荷試験を行い、入力、出力、効率および回転数の特性を明らかにする。

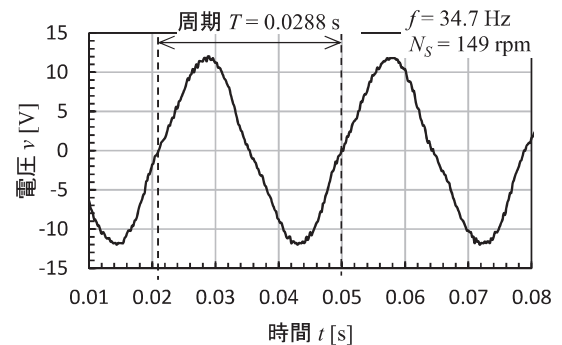
4. 実験結果および考察

4.1 室内実験の結果

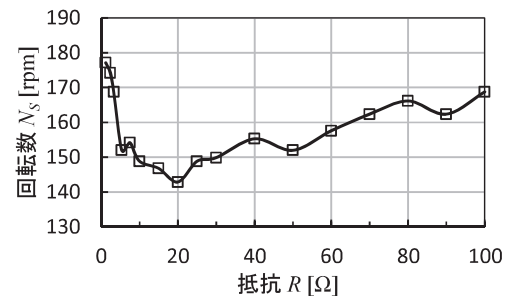
図7に抵抗負荷試験結果の例として、導水管の長さが $250\ \text{mm}$ の場合を示す。このときタンク水位 h_1 は負



(a) 入力、出力および効率と抵抗の関係



(b) 電圧波形例 (抵抗: 25 Ω)



(c) 回転数と抵抗の関係

図7 抵抗負荷試験結果の例 (導水管長: 250 mm)

荷の値によって変わるが、 $229\ \text{mm} \sim 254\ \text{mm}$ と大きな変動はない。(2)式を使って流量 Q を求めると、 $116 \sim 122\ \text{L/min}$ となる。落差 h_2 は、 $390\ \text{mm}$ 一定であり、有効落差 H ($=h_1+h_2$) は $619\ \text{mm} \sim 644\ \text{mm}$ とほぼ一定となる。この結果、図7(a)に示されるとおり、入力 P_m は抵抗 R を変えてもほぼ一定で $11.7\ \text{W} \sim 12.9\ \text{W}$ である。これに対して、出力 P_o は負荷抵抗の影響を受け、 $0.237\ \text{W} \sim 2.57\ \text{W}$ まで大きく変化する。抵抗が $25\ \Omega$ のときに最大出力 $2.57\ \text{W}$ が得られた。効率 η は入力 P_m がほぼ一定であるため、出力とほぼ同様な特性を示している。効率 η は抵抗が $25\ \Omega$ のとき、最大の 20.3% が得られており、電圧、電流の実効値はそれぞれ $V=8.01\ \text{V}$ 、 $I=0.32\ \text{A}$ で、出力 P_o は $2.57\ \text{W}$ である。しかし、図7(b)か

ら抵抗が 25 Ω の電圧波形は、抵抗が 15 Ω (図 6 参照) の場合と比べて、電圧波高値と歪みが大きくなっている。この原因は、出力 P_o がほぼ一定のとき、抵抗 R が大きくなると、発電端の電圧 ($V = \sqrt{P_o R}$) も大きくなり、発電機内部のコイル鉄心に磁気飽和が生じるためと考えられる。ハブダイナモの定格出力 (6 V・2.4 W) 時の抵抗は 15 Ω であることから、これよりも大きな抵抗を接続した場合は、発電機に磁気飽和が生じやすいと考えられる。次に図 7(c)より、水車の回転数は、143 rpm~177 rpm の間で変化している。出力 P_o が大きくなる 20 Ω 前後で発電機の軸負荷も大きくなるため、回転数が減少する傾向にあることがわかる。

表 2 と図 8 に落差変更試験結果の例として、抵抗が 15 Ω の場合を示す。表 2 より、タンク水位 h_1 と流量 Q は、落差 h_2 (または有効落差 H) の増加に伴い、単調に減少する。導水管長が 250 mm のときに、タンク水位 h_1 は、最大 (254 mm) となり、1000 mm のときに最小 (194 mm) となった。この理由は以下のように考えられる。落差を大きくするとポンプの全揚程が増加するので、ポンプの性能曲線¹⁴⁾から、吐出量も減少する。したがって上部タンクへの揚水量も低下し、タンク水位 h_1 と流量 Q は減少すると考えられる。

表 2 落差変更試験結果の例 (抵抗 : 15 Ω)

導水管長 [mm]	250	500	750	1000
水位 h_1 [mm]	254	214	204	194
落差 h_2 [mm]	390	640	890	1140
流速 v_1 [m/s]	2.23	2.05	2.00	1.95
流量 Q [L/min]	122	112	109	107
有効落差 H [mm]	644	854	1094	1334
水車入力 P_m [W]	12.9	15.6	19.6	23.3
発電出力 P_o [W]	2.55	2.69	2.99	3.13
効率 η [%]	19.8	17.2	15.3	13.4
回転数 N_s [rpm]	147	162	186	204

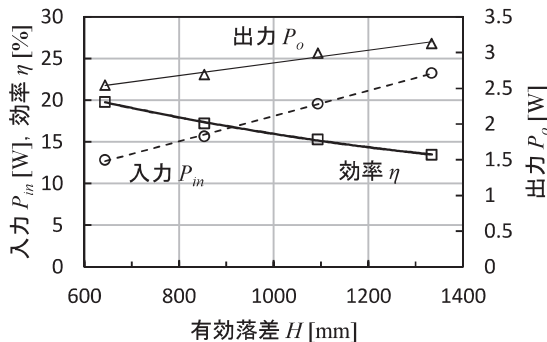


図 8 落差変更試験結果の例 (抵抗 15 Ω)

導水管長を 250 mm から 1000 mm に変えると、入力 P_m は 1.81 倍 (=23.3÷12.9) に増加した。この理由は以下のように説明できる。まず、導水管を長くした結果、有効落差 H が 644 mm から 1334 mm へ 2.1 倍増加し、流量 Q は 122 L/min から 107 L/min へ 87.6 %に減少した。次に、(6)式より入力 P_m は流量 Q と有効落差 H の積に比例することを考慮すれば、 $2.1 \times 0.876 = 1.81$ 倍が成り立っていることがわかる。一方、出力 P_o は有効落差 H に対して緩やかに増加する。入力 P_m ほど出力 P_o は大きく増えない。この理由は、以下のように考えられる。ハブダイナモは 125 rpm 付近で定格出力 (6 V・2.4 W) が得られるように設計されている⁹⁾。ところが、表 2 より実験値は 147 rpm~204 rpm に達している。125 rpm より速く回転しており、発電端に過電圧が発生して、通常の負荷である自転車用電球を使用する場合は、球切れするおそれがある。これを防ぐため、回転数が上昇すると発電機内部のコイル鉄心は磁気飽和を起し、誘導起電力と出力 P_o の増加を抑制する特性⁹⁾になっていると考えられる。このように、出力 P_o より入力 P_m の増加が大きいため、効率 η は有効落差 H が大きくなるにつれて低下している。

4.2 フィールド実験の結果

表 3 にフィールド実験結果の例として、抵抗を 15 Ω ~40 Ω まで変えた場合を示す。流速は 0.917 m/s であり、室内実験が 1.95~2.23 m/s であったのと比べると半分程度である。これは現場が勾配の緩やかな河川であるからである。しかし、水車の羽根に水が当たる面積は、室内実験よりフィールド実験の方が 1.8 倍 (=S/a=2700 mm²/1521 mm²) 大きい。このため、水車に流入する流量は室内実験よりも 1.22 倍~1.39 倍多く、149 L/min に達する。有効落差は、423 mm であり室内実験値よりも低い。また入力 は 10.3 W であり、室内実験の

表 3 フィールド実験結果の例 (抵抗 : 15 Ω~40 Ω)

落差 h [mm]	380				
流速 v_a [m/s]	0.917				
流量 Q [L/min]	149				
有効落差 H [mm]	423				
水車入力 P_m [W]	10.3				
抵抗 R [Ω]	15	20	25	30	40
発電出力 P_o [W]	2.69	2.92	3.08	3.15	3.16
効率 η [%]	26.3	28.5	30.1	30.7	30.8
回転数 N_s [rpm]	177	168	170	172	173

導水管長 250 mm のとき (12.9 W) よりもやや小さい。しかしながら抵抗が 15Ω のときでも、出力は定格を上回る 2.69 W が得られている。室内実験時は、2.55 W であったから、出力が 1.05 倍になった。この原因として、回転数の違いが挙げられる。室内実験では 147 rpm であるのに対して、フィールド実験では流量が多いために 177 rpm と 1.2 倍速い。このため、より大きな誘導起電力が発生し、出力も大きくなる。以上の結果、室内実験の 19.8 % よりも 6.5 % 高い 26.3 % の効率が得られたと考えられる。なお、抵抗が 40Ω のときに出力 P_o と効率 η は最大となり、それぞれ 3.16 W, 30.8 % であった。開放周流型水車は最適化すると 60%~75% の効率に達することが知られている^{12), 13)}。しかし、本研究では、発電機容量が 2.4 W と入力 P_m に対して小さいため、最大で効率 η は 30.8 % までしか得られなかった。高い効率を得るには、より低い有効落差で動作させるか、発電機容量を大きくするなどの対策が必要である。

5. 授業実践

開発したマイクロ水力発電装置を用いて出前授業を行った。詳細は別報¹⁴⁾で報告する予定であるため、その概要を述べる。キャリア教育の取り組みとして、H 高校では年度末に 2 年生を対象に、出前授業 (60 分間) を実施している。著者らは、13 人の生徒を対象に「自然エネルギー発電と電気電子工学」をテーマに体験型授業を企画し実施した。「人力発電」、「水力発電」、「風力発電」の 3 つのコーナーを設け、各コーナーに進行役を一人つける。生徒を 3 班 (4 人, 4 人, 5 人) に分けて、1 コーナーの授業を 1 班につき 15 分間で行い、各班が 3 コーナーすべてを巡回して体験できるように構成した。つまり、各コーナーの授業を 3 回繰り返すと一巡する。各コーナーの授業に入る前に、共通の導入説明を行った (5 分間)。「電気をつくる・つかう・測る」を各コーナーで体験してもらうことを伝え、入力 (人力・水力・風力) が発電機を介して電気に変換されることを図で説明した。このときに効率や損失 (電気に変換されずに逃げてしまうエネルギー) の概念も説明する。

以下に、「水力発電」のコーナーで実施した授業 (15 分間) について説明する。授業の進行が生徒にわかるように、4 つの設問に分かれたワークシートを配布する。問 1 は、実物を見ながら実験で使う水車の名称を記入させる。問 2 は、生徒が操作して発電実験を行い、電



図9 授業風景 (水位 h_1 の測定中)

マイクロ水力発電の理解や関心は深まりましたか?
(n = 13)

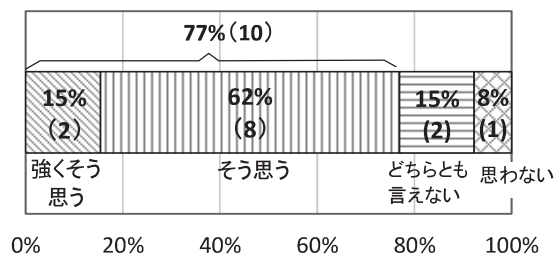


図10 アンケート結果の例

子負荷の消費電力 (= 出力) を測定する。測定を簡単にするため、電圧計と電流計の指示値を読んで、出力を計算する。また電子負荷として、「ラジオ」、「LED 照明 (2 種類)」および「携帯電話の充電」を用いて、すべてが同時に動作することを確認する。問 3 は、抵抗負荷 (15Ω) につなぎ替えて、効率を求める。落差 h_2 は既知として与える。タンクの水位 h_1 を測定して、(2)式と(6)式を用いて入力を計算する。図 9 は生徒の一人が水位 h_1 を測定しているときの授業風景である。4 人の生徒はそれぞれ、「水位の測定」、「揚水ポンプ電源の入切」、「電圧計と電流計の指示値の読み取り」、および「測定結果の記録」の役割を分担して実験・測定を行った。出力は問 2 と同じ方法で求め、効率を計算する。問 4 は、オシロスコープで抵抗両端の電圧波形を観測し、周波数を読み取り、(12)式を使って水車の回転数を計算する。

3 コーナーの巡回授業の後で、まとめとアンケート (7 問) を実施した。実施したアンケートのうち、図 10 に「水力発電コーナーでマイクロ水力発電の理解や関心は深まりましたか?」の問いに対する結果を示す。13 人中、「強くそう思う」に 2 人 (15%)、「そう思う」に 8 人 (62%)、「どちらとも言えない」に 2 人 (15%)、

「思わない」に1人(8%)が答えた。つまり体験授業を通じて10人(77%)の生徒がマイクロ水力発電の理解と関心を深めることができたとの肯定的な回答をしている。進路の希望が定まっていない2年生を対象にしたことを考慮すると、本装置を用いた教育効果は大きいと考えられる。

6. まとめ

効率の計算が容易にできるマイクロ水力発電装置の実験教材を開発した。室内実験(抵抗負荷試験, 落差変更試験)とフィールド実験を通して発電装置の特性を明らかにした。室内実験では, 有効落差を644 mm~1334 mmの間で4通りに変更することができる。発電機は定格出力付近で動作し, 効率は最大で20.3%が得られた。フィールド実験では, 有効落差は423 mmと低い, 流量が比較的多い場所であったため, 室内実験と同じ入力の場合と比べても, 高い効率(26.3%, 抵抗15 Ω)で発電していることがわかった。さらに高い効率を得るには, より低い有効落差で動作させるか, 発電機容量を大きくするなどの対策が必要である。最後に, 本装置を活用して高校生13人を対象に, 出前授業(体験型授業)を行った。アンケートの結果から, マイクロ水力発電に対する理解や関心を深めることができた生徒が77%(10人)にのぼり, 高い教育効果を有することが検証できた。今後は, 大学生を対象とした授業にも本教材を活用し, 教育効果をさらに検証する予定である。

参考文献

- 1) 全国小水力利用推進協議会: 小水力発電がわかる本ーしくみから導入までー, p.3 (オーム社, 2012).
- 2) 株式会社ナリカ: エネルギー・環境教育カタログ, p.15 (2014).
- 3) 株式会社内田洋行: 理化学機器カタログ Vol.63 (中学校・高等学校版), p.263 (2015).
- 4) 青木健太, 横田聖輝, 吉田義昭: 第1回電子デバイス・回路・照明・システム関連教育・研究ワークショップ予稿集, p.15 (2015).
- 5) 中村昌広: 自分で作る ハブダイナモ水力発電, pp.23-25, pp.39-44 (総合科学出版, 2012).
- 6) 吉野章男, 菊山功嗣, 宮田勝文, 山下新太郎: 詳解 流体力学演習, p.48, pp.69-70 (共立出版, 1989).
- 7) 平田哲夫, 田中誠, 熊野寛之, 羽田嘉昭: 図解 エネルギー工学, pp.126-131 (森北出版, 2011).
- 8) 物部長穂: 水理学, p.342 (岩波書店, 1933)
- 9) 春日屋伸昌: 流量測定, pp.156-159 (コロナ社, 1990)
- 10) 川上博: サイエンス・シリーズ 水の恵みを電気に! 小型水力発電実践記, pp.64-65 (パワー社, 2006)
- 11) 寺田ポンプ製作所: 家庭用水中ポンプ SL-102, 製品カタログ, <http://www.teradapump.co.jp/item/data/SL.html>
- 12) 清水幸丸: マイクロ水力発電ハンドブック, p.63 (パワー社, 2001)
- 13) 藤原良樹, 細川欽延: 小型水車製作ガイドブック, p.32 (パワー社, 1993)
- 14) 吉田義昭, 川西達也, 青木健太, 山添紘弥: 応用物理教育 **40**(2), 掲載予定.