

水飲み鳥を用いた環境発電の教育効果

Teaching Effect of Energy Harvesting with the Drinking Bird

吉田義昭

Yoshiaki Yoshida

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

We have developed an energy harvesting apparatus using the drinking bird for an experimental teaching material. Some of the pendulum motion energy of the drinking bird is converted into the electrical energy by electromagnetic induction. It is possible to confirm the small LED flashing and the operation of galvanometer. We conducted a lesson of energy harvesting to college students and carried out the demonstrative experiments using this apparatus. We clarified the teaching effects through the mini tests and surveys to confirm the comprehension of the students.

Keywords: energy harvesting, drinking bird, pendulum motion, electromagnetic induction

(受理 2015年11月18日)

1. はじめに

環境発電(エネルギーハーベスティング)は、環境中に存在する未利用エネルギー(電磁波、振動、温度差など)を収穫し、電気エネルギーに変換する技術であり、21世紀型の新しいエネルギー利用の考え方である。発生電力はマイクロワットからワット程度で、主に小型電子機器の電源として用いられる。環境発電をテーマにした実験教材があれば、身近にある未利用エネルギーを活用でき、物理現象に対する学生の興味や関心を高められるであろう。このような経緯から、著者は、市販の「水飲み鳥」を用いた環境発電(以下、水飲み鳥発電)の教材研究に取り組んできた²⁾。開発した「水飲み鳥発電装置」の概観を図1に示す。水飲み鳥は、水の蒸発熱から温度差を作り、力学的エネルギーに変換して周期的に振り子運動(水を飲む動作)を続ける熱機関の一種である³⁾。この水飲み鳥の尻部に磁石を取り付け、その直近にコイルを設置する。水飲み鳥の振り子運動によって磁石はコイルの近くを往復し、電磁誘導により起電力が発生する。

これまで水飲み鳥については、熱機関としての教材研究が多く行われている^{4,5)}。その中で、振り子運動の一部を電気エネルギーに変換した研究は極めて少ない。文献6は、図1と同様な構造を用いて、電圧で最大80 mV_{pp}、電力で最大3 μW(平均電力で0.27 μW)を取り

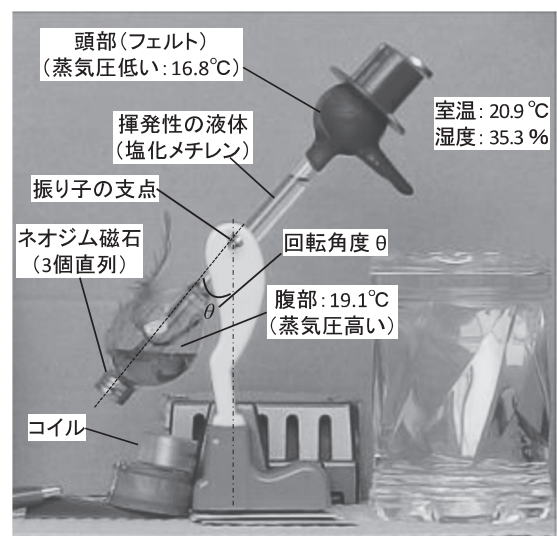


図1 水飲み鳥発電装置(温度、湿度は測定例)

出している。しかしながら、発生した電圧と電力は微小であり、小型電子機器を駆動できるレベルではなかった。起電力を向上させるためには、コイルの巻き数を大幅に増やす必要があると考えられる。

そこで、著者は巻き数がそれぞれ 3500 回、7000 回、12000 回、20000 回の 4 種類のコイルを製作し、起電力と発生電力の増大を試みた。文献 6 と比べて、20000 回のコイルを用いると、インピーダンスが整合した抵抗負荷を接続したとき、最大で電圧が 50 倍の $4.32 V_{pp}$ 、電力が約 30 倍の $94.1 \mu W$ (平均電力で $9.47 \mu W$) を取り出すことができた²⁾。この結果、「LED の点滅」や「検流計の針が左右 (正負) に振り切れる動作」を観察できるようになった。さらにコンデンサに充電すれば、小型電子機器 (電卓) を使用することも可能になった。

以上を背景として、本学の学生を対象に、著者が担当する授業科目「先端エネルギー工学」で水飲み鳥を用いた環境発電の授業を実践した。本装置の演示実験を行うとともに、理解度を確認する小テスト (授業前と授業後の 2 回) とアンケートを実施し、教育効果を確認することができた。本論文では、授業の実施内容と教育効果の検証結果について述べる。

2. 授業の方法

2.1 「先端エネルギー工学」の通常の授業

「先端エネルギー工学」は、平成 22 年度から本学工学部電気システム工学科の学生 (3 年次) を対象に開講している授業である。著者は、本科目を平成 26 年度から担当している。表 1 に、平成 27 年度前期に実施した授業内容を示す。従来型エネルギー (水力、火力、原子力) と新エネルギー (太陽光、風力、海洋エネルギー、地熱など) の違いを比較し、それぞれの原理、特徴、課題を学ぶことによって、クリーンエネルギー技術の基礎を修得することを目的にしている。教科書として文献 7 を用いているが、演習問題がないため記述問題と計算問題からなる「演習プリント」を各章ごとに作成している。これを毎回配布し、授業時の演習と授業後の復習に活用する。このように「先端エネルギー工学」における「通常の授業方法」は、教科書と演習プリントを教材として用いながら、板書による講義を基本とする。この講義法は、準備した知識を学生に伝えやすいという長所がある一方で、学生は受身になって知識を習得するだけになりやすい。教科書の図や写真だけでは動いているイメージができないこともある。また、毎回の授

表 1 「先端エネルギー工学」の授業内容

第1回	エネルギー・資源とトリレンマ問題 および原子力発電
第2回	分散型エネルギー概論
第3回	水力発電システム
第4回	風力発電システム
第5回	エンジン発電システムと コージェネレーションシステム
第6回	地熱発電システム
第7回	太陽熱発電システム
第8回	海洋エネルギー発電システム
第9回	太陽光発電システム
第10回	環境発電1 (熱電発電と圧電発電)
第11回	環境発電2 (水飲み鳥発電)
第12回	燃料電池システム
第13回	エネルギー貯蔵システム
第14回	スマートグリッドと分散型エネルギー およびその将来
第15回	期末まとめ

1回の授業時間：90分

業で学んだことに対して、学生の理解度や関心度がどのように変化したのかを評価しにくいという問題もある。

2.2 「水飲み鳥発電」の授業

15 回の講義の内、2 回分 (180 分) を環境発電にあてている。第 10 回「環境発電 1 (熱電発電と圧電発電)」は 2.1 で述べた通常の方法による授業を行った。これに対して、第 11 回「環境発電 2 (水飲み鳥発電)」は、教育効果を検証するために、表 2 に示す構成で授業を行った。以下に授業の方法を説明する。

(1) 実験準備

使用した教室は、事前の準備ができない場所であったため、授業の初めに演示実験の準備に 10 分当てた。

表 2 「水飲み鳥発電」の授業構成

項目	内容	時間
実験準備	水飲み鳥発電装置のセッティング	10分
導入	小テスト (授業前)	15分
展開	講義：水飲み鳥発電の原理・構造・特徴について講義	25分
	演示実験：2グループに分け、グループごとに説明	15分
	動画と電圧波形のスクリーン表示	10分
まとめと振り返り	小テスト (授業後) とアンケート (6問)	15分

【1】下図は、「水飲み鳥の動作原理」を示す。説明文①～⑥は図の状態を示す番号と対応している。空欄(ア)～(ス)に当てはまる語句を語句欄から選び埋めよ。同じ語句を二回以上使ってもよい。

- ①濡れたクチバシ付近の水が(ア、蒸発)する。
- ②(イ、蒸発熱)により頭部の温度が(ウ、低下)する。
- ③温度(エ、低下)により、頭部の塩化メチレン蒸気が(オ、凝縮)し、頭部の圧力が(カ、低下)する。
- ④頭部と腹部の(キ、圧力差)により、首内の液面が(ク、上昇)する。
- ⑤液面がさらに(ケ、上昇)すると(コ、重心)が高くなってクチバシの方に傾き、水を飲む。
- ⑥頭部と腹部の気体が接触して(サ、圧力差)がなくなり、(シ、重力)により、液体が腹部に(ス、落下)し、元の状態①へと戻る。

<語句欄>

重量、重力、重心、融解、濃縮、凝縮、上昇、低下、落下、高低差、圧力差、温度差、電位差、温度、平衡、凝固、蒸発、沸騰、凝固、凝固熱、蒸発熱、融解熱

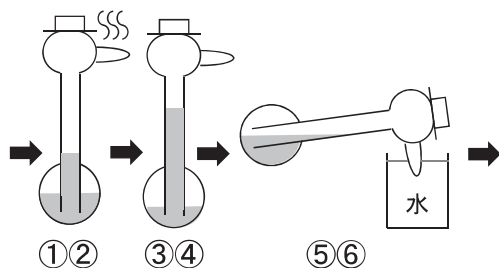


図 水飲み鳥の動作原理

図2 水飲み鳥の動作原理に関する問題⁵⁾

教壇の上で、デジタル温度・湿度計を側に置き、「普通の水飲み鳥」と「水飲み鳥発電装置(図1)」をそれぞれ1台並べて、実際に動作させながら、構造や動作の違いを観察できるようにしておく。

(2) 小テスト(授業前)

「設問1. 水飲み鳥の動作原理に関する問題⁵⁾」と「設問2. 振り子発電の原理に関する問題⁸⁾」の2問を出題した。それぞれの問題内容を図2と図3に示す。図中に解答例を下線ありの太字で記入している。

(3) 講義

環境発電の新しい方法である水飲み鳥発電の原理・構造・特徴について板書をしながら講義した。

(4) 演示実験

受講者数(65名)が多いため、2つのグループ(1グループ:約30名)に分けてグループごとに実演を行った。なるべく近づいて実験装置を見学できるように、学生を教壇の周りに集める。20000回巻きのコイルに負荷を接続し、発電時に負荷が動作する様子を観察させる。時間が限られているため、視覚的に動作がわかる簡

【2】下図は振り子発電の原理を示す。

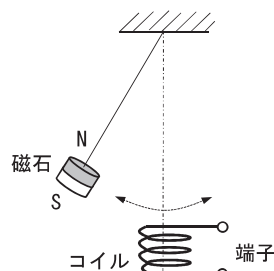


図 振り子発電の原理

(a) 電磁誘導の法則の式を書きなさい。但し、誘導起電力 V 、コイルの巻数 n 、磁束 ϕ とする。

$$V = -n \frac{d\phi}{dt}$$

(b) 振り子運動時にコイル端子に観測される電圧波形は下図の①～④のどれか? (③)

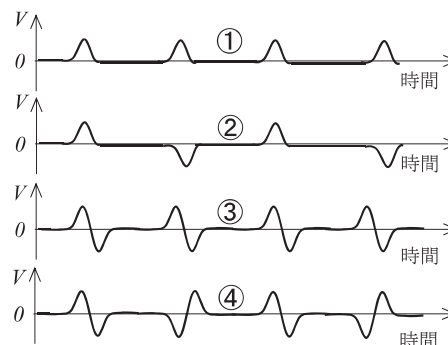


図 振り子発電の電圧波形

(c) 振り子発電を説明する以下の文の空欄(ア)～(ク)を語句欄から選び、埋めよ。同じ語句を二回以上使ってもよい。

磁石がコイルに近づくと、コイルには(ア、上)向きの磁束が増してくる。よって(イ、レンツ)の法則より、コイルは磁束の変化を打ち消す(ウ、下)向きに(エ、誘導起電力)が生じる。また、その後、磁石はコイルを通り過ぎ、コイルから遠ざかる。その際、磁石が作る(オ、上)向きの磁束が減っていくため(カ、レンツ)の法則より、(キ、上)向きの磁束が生じる向きに(ク、誘導起電力)が生じる。磁石が振り子になっているため、この振る舞いを繰り返すこととなる。

<語句欄>

クーロン、オーム、レンツ、フレミングの右手、誘導電流、誘導起電力、上、下、右、左

図3 振り子発電の原理に関する問題⁸⁾

易な負荷試験を2通り行った。一つ目の負荷は、「LED(1.7V以上で点灯)」である。LEDは2個を逆並列にコイルに接続することで、1度の水飲み鳥動作で10回程度交互に点滅する。二つ目の負荷は、「検流計」である。コイルをつなぐと、瞬間的に50 μA 以上電流が流れるので、検流計の針が正負(左右)に振り切れる様子が観

察できる。

(5) 動画と電圧波形のスクリーン表示

水飲み鳥発電装置の動画をスクリーンに映して、水飲み鳥の「振り子運動」を詳しく説明した。動画を用いた理由に二つある。一つ目の理由は、湿度の異なる条件での水飲み鳥発電装置の動きを見せるためである。用意した動画は、低湿度条件（32%）であり、水飲み鳥発電装置が水を飲む周期は約 25 秒と短い。一方、授業時の教室は、やや高い湿度（74%）であり、水飲み鳥発電装置が水を飲む周期は長くなった（約 50 秒）。この両者を比較することで、湿度の影響を理解することができる。二つ目の理由は、動画をスローモーションで見ることによって、肉眼では分かりにくいガラス管の中の液体の動きを詳しく観察することができるからである。続いて電圧波形をスクリーンに映しながら、水飲み鳥の振り子運動が電磁誘導によって電気に変換されるメカニズムを説明した。用いたグラフはコイルの両端の電圧（無負荷）をオシロスコープで実測したものである。図 4 と図 5 にその波形を示す。図 4 から、水を飲む周期が約 25 秒であることがわかる。図 5 は、図 4 の点線部

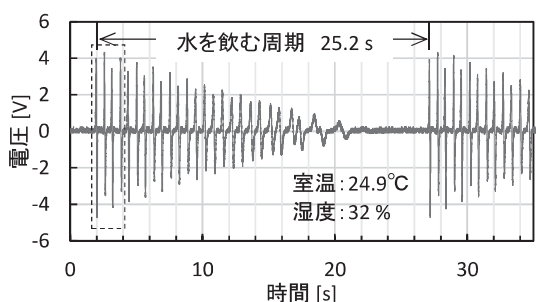


図 4 無負荷時の電圧波形

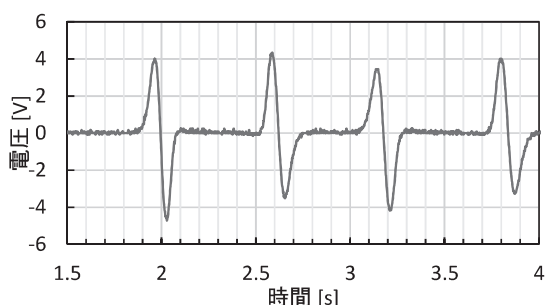


図 5 無負荷時の電圧波形（図 4 の点線部を拡大）

（水飲み鳥の振り子運動の二往復分）を拡大した電圧波形である。図 3 で出題した振り子発電の電圧波形（解答③）と概ね一致していることがわかる。

(6) 小テスト（授業後）とアンケート

理解度の確認をするため、小テスト（授業後）を行った。授業前の小テストと比較を行うため、同一の問題を出題している。また振り返りとして選択式 5 問と自由記述式 1 問の合計 6 問からなるアンケートも実施した。

3. 授業の結果および考察

「小テスト（授業の前後）」と「アンケート」の結果をもとに、水飲み鳥発電の授業の教育効果について検証する。

3.1 小テストの結果

授業前後に実施した小テストによって授業の理解度がどれだけ向上したかを検討する。表 3 に平均点の推移を示す。図 6 に小テストの得点分布を示す。受講者は 65 人であったが、図に示すとおり、対象人数は 64 人としている。これは、遅刻をして授業前の小テストを受けなかった学生が 1 名おり、この学生の小テスト（授業後）の結果を除いたからである。配点は、設問 1（図 2）と設問 2（図 3）ともに 50 点とし、合計が 100 点になるようにした。設問 1 は問題数が 13 問あり、1 問の正解につき 3.84 点（ $= 50 \div 13$ ）を付与した。設問 2 は問題数が 10 問あるので、1 問の正解につき 5 点（ $= 50 \div 10$ ）を付与した。ただし、設問 2 (a)の問題は記述式であるため、巻き数の記入漏れなどで完全に正解していない場合は、部分点として 2.5 点を付与した。

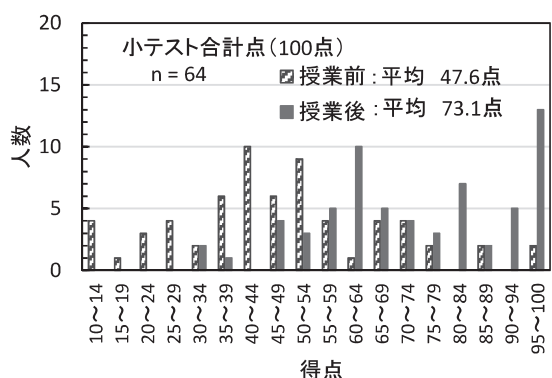
表 3 より平均点（合計）は、授業前の 47.6 点から授業後の 73.1 点へ 25.5 点上昇した。設問ごとに見ると、設問 1 が授業前の 25.6 点（正解率 51.2%）から授業後に 37.3 点（正解率 74.6%）と 11.7 点上昇した。設問 2 が授業前の 22.0 点（正解率 44.0%）から授業後に 35.8 点（正解率 71.6%）と 13.8 点上昇した。いずれの設問も授業前は、平均の正解率が 60%未満であり、理解しているレベル（60%以上）には達していなかった。授業後は平均の正解率が 70%を超えており、全体として、ある程度の理解に達していると評価できる。

図 6 の得点分布から言えることは、授業後は満点を取って完全な理解を示した学生がいずれの設問でも 10 人以上増えていることが特徴的である。合計点が 60 点未満の学生は、授業前は 49 人（76.6%）いたが、授業後は 15 人（23.4%）まで減少した。設問ごとに見ると、設問 1 については、正解率が 60%未満の学生が、授業前は 37 人（57.8%）いたが、授業後は 15 人（23.4%）

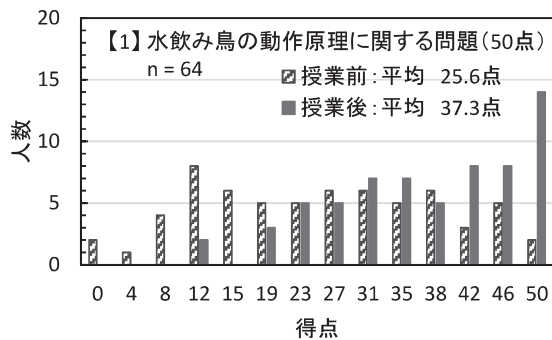
まで減少した。設問2については、正解率が60%未満の学生が、授業前は47人(73.4%)いたが、授業後は18人(28.1%)まで減少した。以上から理解度の向上

表3 小テストの平均点(カッコは正解率)

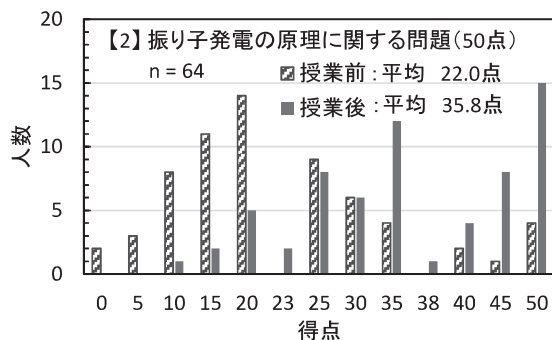
	授業前(B)	授業後(A)	(A) - (B)
設問1の平均点	25.6 (51.2%)	37.3 (74.6%)	11.7 (23.4%)
設問2の平均点	22 (44%)	35.8 (71.6%)	13.8 (27.6%)
平均点(合計)	47.6	73.1	25.5



(a) 小テスト(合計点)の得点分布



(b) 設問1の得点分布



(c) 設問2の得点分布

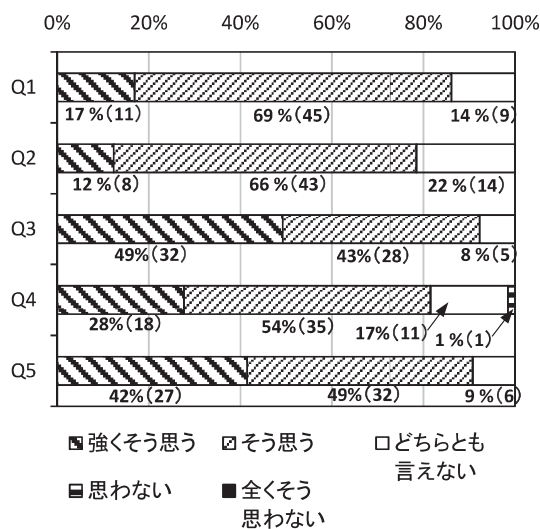
図6 小テストの得点分布

に本授業の手法が有効であると考えられる。しかしながら、授業後において依然25%前後の学生が理解できるレベルに至っていない。特に、設問2の方が理解しにくいと感じる学生がやや多い。今後は、授業を通して60%以上の理解に到達しなかった学生へのフォローが必要である。例えば、次回の授業で今回の授業範囲から小テストを行うようにするなど、学生が授業の復習を確実にやる仕組みを作ることが重要になると考えられる。

今回の小テストによる効果検証の課題として、授業の前後で同じ問題を使用したため、講義内容を理解していなくても覚えただけの学生もいることが考えられる。効果検証の精度を高めるためには、「テストを行う日を別にする」、あるいは「テスト内容に変化をつける(例として、理由を記述式にする)」などの対策が必要である。今後は、これらの対策を講じた上で、小テストを実施していきたい。

3.2 アンケートの結果

図7にアンケートの結果を示す。最初に、Q1の「水飲み鳥の動作原理が理解できたか?」とQ2の「水飲み鳥発電の発電原理が理解できたか?」の結果を比べる。



- Q1. 「水飲み鳥の動作原理」を理解できたか?
- Q2. 「水飲み鳥発電の発電原理」を理解できたか?
- Q3. 水飲み鳥発電は「環境にやさしい発電」と思うか?
- Q4. 「動画」によって「水飲み鳥発電」の理解が深まったか?
- Q5. 「実演」によって「水飲み鳥発電」の理解が深まったか?

図7 アンケート結果 (n=65)

Q1の肯定的回答（「強くそう思う」と「そう思う」）が86%であるのに対して、Q2の肯定的回答は78%であり、Q2の方がやや低い結果となった。これは小テストの結果（表3）において、設問1の平均点より設問2の平均点の方が低かったことと相関があると考えられる。本学では、2年次に「基礎電磁気学Ⅱ」の講義で電磁誘導の法則を教えている。電磁誘導の法則を基本に考えれば、振り子発電の原理を理解することは容易であると考えられる。しかし、22%の学生がQ2に対して「どちらとも言えない」と感じていることが明らかになった。今後は講義の中で、電磁誘導の法則の復習も丁寧に行う必要がある。

Q3の「水飲み鳥発電は環境にやさしい発電と思うか？」については、肯定的回答が92%に達している。その内訳を見ると「強くそう思う」が49%であり、「そう思う」の43%を上回っている。これは今回の講義と実演によって、水飲み鳥発電が「水の蒸発熱から得られるエネルギーで発電していること」や「発電時に二酸化炭素を出さず、また静音であること」などの認識を学生が持ったからと考えられる。

最後に、Q4の「動画によって水飲み鳥発電の理解が深まったか？」とQ5の「実演によって水飲み鳥発電の理解が深まったか？」の結果を比べる。Q4の肯定的回答は82%であったのに対して、Q5の肯定的回答は91%に達しており、本授業で導入した演示実験による教育効果は非常に高いことを示している。動画については発電機本体の動きを見せたのに留まり、負荷が動作する様子は紹介しなかった。このことが動画に対する肯定的回答がやや低かった原因と考えられる。今後は動画においても水飲み鳥による発電と負荷の動作を両方見せるなどの工夫が必要である。

3.3 自由記述の結果

表4に自由記述の一部を載せた。実物を見せることによって、環境にやさしい発電に興味や関心が高まった意見が多く寄せられた。水飲み鳥の大きさが発電電力にどう影響するかにも関心を広げた学生もいる。一方で、エネルギー変換効率が低く、湿度に影響を受けやすいことから発電の安定性に疑問を呈す意見もあった。これは、本教材が観察に基づく批判的思考力を育成する上でも有効であることを示している。また小テストを授業前後に行うことで理解が深まったとする意見も複数あり、本授業法の有効性を学生も実感しているこ

表4 自由記述（抜粋）

- 水飲み鳥の動作の仕組みを自分の目で確認することができてわかりやすかった。こういう方法で動力を得て、電力を得られるのが面白く感じ、興味が湧いた。
- 今回の授業では授業前の小テスト、授業後の小テストを行うことで理解が普段の授業より深まったと感じた。その理由は、授業前の小テストを行うことで、何を理解しなければならないかが明確になったためである。
- 水飲み鳥発電は確かに環境にやさしい発電であるが、現段階では電力効率は良いとは考えられない。瞬間的には確かに発電されているが一定な電力を取り出せないのが問題であるとする。
- 水飲み鳥発電はエコで利点も多いが、短所を挙げると湿度、湿度に左右されるということだと思った。
- 音もなく、水の蒸発熱を使用してエネルギーを取り出している水飲み鳥はエコだと言える。他にもこのようなエネルギーの取り出し方があるのかが気になる。
- 発電原理は電磁気学が苦手だから少し難しかった。水飲み鳥の大きさによって発電から得られる電力がどう変化するか気になった。
- 小さい頃に遊んで遊んでいた水飲み鳥で発電できるのは想像できなかったが、実際に見てとても感動した。自然エネルギーへの興味が出てきた。
- 振り子発電の原理が少し理解しきれなかったため、時間があればもう一度解説をお願いしたいです。
- 動画にて湿度が低い場合についても見ることでかためたために違いが理解できた。

とが明らかになった。

4. まとめ

開発した水飲み鳥発電装置を演示実験に用いた環境発電の授業を行った。授業の効果を検証するため、授業の前後に小テストを取り入れ、授業後にアンケートも行った。小テストの結果、学生の理解度に関しては平均点が48点（授業前）から73点（授業後）に上昇しており、一定の効果を確認できた。しかし、授業後も23%の学生が60%以上の理解度に到達していないことがわかったため、授業の復習を確実に促す仕組みが必要であると考えられる。アンケート結果から、水飲み鳥発電が環境にやさしい発電であると思う回答が92%に達し、また演示実験を通して理解が深まったとする回答も91%に達した。以上から、本装置の教育への有効性が明らかになった。今後は、水飲み鳥発電装置を小船に搭載し、湖面やプールなどに浮かべて、人為的な水の補給がなくても発電可能なシステムに改良し、より環境発電

を学べる教材にしていく予定である。

参考文献

- 1) 堀越智, 竹内敬治, 篠原真毅: エネルギーハーベスティング～身の周りの微小エネルギーから電気を創る“環境発電” (日刊工業新聞社, 2014).
- 2) 三好悠也, 佐藤雄馬, 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. 14 (2015).
- 3) 高木聖志郎 他: 物理基礎, p. 135 (啓林館, 2013).
- 4) J. Güémez, R. Valiente: Am. J. Phys. **71**, pp. 1257-1263 (2003).
- 5) 岳川有紀子, 大久保和則, 麴谷慶太, 中田聡: 化学と教育, 56 巻 4 号, pp. 162-163 (2008).
- 6) Ralph Lorenz: Am. J. Phys. **74**, pp. 677-682 (2006).
- 7) 伊藤義康: 分散型エネルギー入門 (講談社, 2012).
- 8) 2008 年版 センター試験過去問研究 物理 I, 2007 年度 (問題編), p. 10 (教学社, 2007).