

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

Development and Class Practice of an Educational Power-generation System Equipped with a Self-made Inverter

四元照道* 小山英樹**

YOTSUMOTO Terumichi KOYAMA Hideki

発電から電力消費までのエネルギー変換の仕組みを生徒に理解させるための教材として利用可能な、自転車用発電機と倍電圧整流回路、および自作のDC/ACインバータからなる発電システムを開発した。比較的簡易な回路構成で、LED電球など20W程度以下の家庭電化製品を動作させることが可能である。これを用いて、工業高校の課題研究の授業で水力発電システムの製作実践を行った。木製の水車の部分は、用意された板材から各部の大きさを考え、生徒が工夫して設計・加工・組み立てを行ったものである。水槽からの水漏れや基板のはんだ付け不良などにより予想外に時間がかかったものの、無事完成させることができ、水力によりLED電球やラジオなどの家電品が動作することを確認できた。生徒の感想からはものづくり教育の観点からの一定の効果は確認できたものの、エネルギー変換の理解を示す記述は少なく、製作時間を十分考慮して題材を選ぶ必要がある。

キーワード：エネルギー変換、水力発電、水車、家庭電化製品、工業高校

1. はじめに

石油をはじめとした化石燃料の枯渇とそれにとまなう代替エネルギー源の開発、また環境に配慮した自然エネルギーの利用促進や原子力発電の安全性に関わる議論など、エネルギー問題は今やわれわれにとって生活に直結する身近なものとなっている。学校教育の現場においてもその重要性が認識され、授業内容の工夫や新たな教材・教具の開発など、多くの取り組みが報告されている¹⁻⁴⁾。

このようなエネルギー問題について理解を深めるためには、生活の中でエネルギーがどのように利用されているのかをまず知ることが重要である。われわれはエネルギーの多くを電力の形で使用し、その電力は電圧実効値が100Vの交流で各家庭に送られている。そのため、エネルギーについて学ぶための教材・教具としては、何らかの方法で発電した電力を商用電源と同じ100V、60Hz（または50Hz）の交流に変換し、家庭電化製品を駆動できるようにしたものが実生活での利用形態に近いという点で非常に効果的であると考えられる。実際に太陽光パネルや自転車発電機にDC/ACインバータを取り付けて家庭電化製品を駆動する実践が行われ、成果が報告されている⁵⁻⁷⁾。身の回りの製品を使うためにはどのくらいのエネルギーが必要かを知ることができ、日常的に使うエネルギーの量に対する感覚を養うこともできる。

しかし、このような取り組みでこれまでに報告されたものはいずれも中学生を対象としたものである。2時間程度の授業で、生徒は授業者が用意した教具を使用して発電と電力消費を体験するのみであった。発電システムそのものの製作も生徒が体験するようにすればより理解が深まるものと考えられる。そこでわれわれは、工業高校の課題研究の時間を使って実践を行うことを試みた。

比較的多くの授業時間数を使うことができるため、発電装置そのものの製作も十分行うことができる。さらに電気系学科の生徒が対象となるため、インバータなどの回路を自ら製作することで、発電システムに必要な電気回路・電子回路の学習にも役立つものと期待できる。そのためにできるだけ簡易な構成で、動作原理がわかりやすいインバータ回路を利用した教材用発電システムを開発した。ここではその発電システムの構成と性能評価、およびそれを利用した水力発電システムの製作を題材とした授業実践の結果について報告する。

2. 発電装置

2.1 インバータ

教育用のものも含め、これまでに多くのインバータ回路が開発され、報告されている⁸⁻¹⁰⁾。本実践では発電システムに必要な回路の基本を理解させることを目的としているため、できるだけ簡易な回路で、基本的な動作が容易に理解できるものにする必要がある。そこで、図1に示す回路を製作することとした¹¹⁾。

汎用のデジタルICを使用して構成した発振回路からは60Hzの矩形波が出力され、100Ωの抵抗を通してダーリントン接続された2組のトランジスタ(Tr₁/Tr₂およびTr₃/Tr₄)のベースに互いに逆位相で加えられる。したがって2組のダーリントントランジスタが60Hzの周波数で交互にON状態になり、センタータップを通してトランスの1次側に電流が流れる。トランジスタをダーリントン接続して使用しているのは、コレクタ電流が数百mA以上と大きいためにトランジスタのスウィッチングに必要なベース電流も大きく、ICの出力電流では直接ドライブできないためである。なおTr₁とTr₃には2SD

*兵庫教育大学大学院博士課程教科教育実践学専攻生活・健康系教育連合講座

**兵庫教育大学大学院教科教育実践開発専攻生活・健康・情報系教育コース 教授

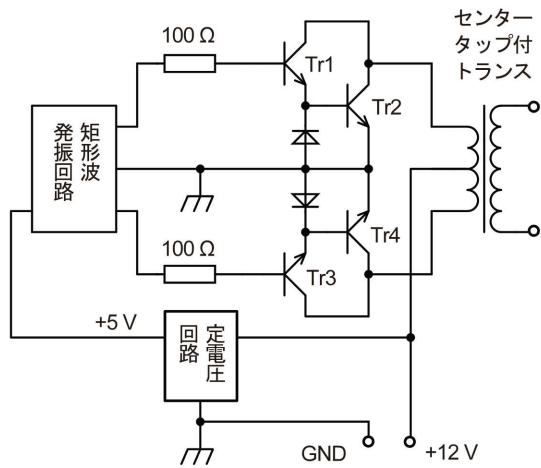
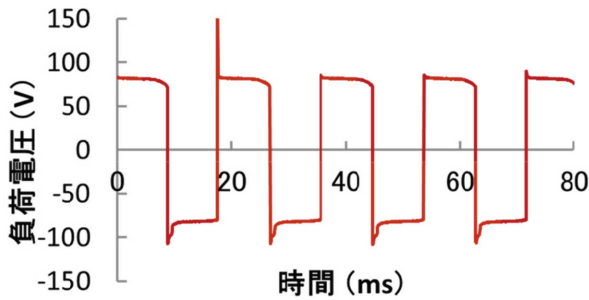


図1 インバータ回路

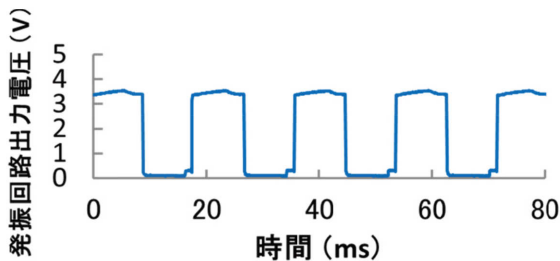
1266, Tr₂とTr₄には2N3055を使用した。

トランスは、センタータップ付きで入力電圧が100V、出力電圧が12V（センタータップを使用しない場合は24V）の電源トランスを入出力逆に接続して使用している。矩形波発振回路の電源電圧（5V）を供給する定電圧回路は、3端子レギュレータ（78L05）を用いて構成した。

このインバータ回路の特性評価のため、定電圧電源装置を用いて直流12Vの一定電圧を加え、出力電圧波形の測定を行った。負荷として4.7kΩの抵抗を接続したときの矩形波発振回路の出力と負荷電圧波形を図2に示す。発振回路の出力電圧の変化に同期して正負が反転する矩形波に近い負荷電圧波形が得られていることがわかる。



(a) 負荷電圧



(b) 矩形波発振回路の出力電圧

図2 インバータ回路の出力波形

図3は、220Ωから4.7kΩまでの5種類の抵抗を用いて負荷抵抗値による負荷電圧の変化を測定したものである。図中の数値は各抵抗に実効値100Vの正弦波交流電圧を

加えたときの消費電力で、抵抗値 R (Ω) に対して (100)²/R で計算したものである。これを見ると、負荷電圧は最大でも80V程度で、負荷が20W相当以上（負荷抵抗が500Ω以下）になると急激に出力電圧が低下することがわかる。

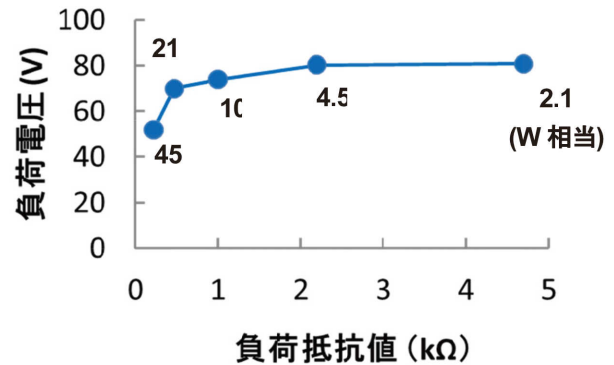


図3 負荷抵抗値による負荷電圧の変化

このように負荷電圧が低下する原因を調べるため、使用したトランスの1次コイル（センタータップと12V端子間）および2次コイル（100V側）のインダクタンスと抵抗をLCRメータ（CUSTOM ELC-100）を使って測定した。その結果を表1に示す。

表1 トランスのインダクタンスと抵抗

コイル	インダクタンス (mH)	抵抗 (Ω)
1次コイル	12.3	1.5
2次コイル	677	32.5

これから巻数比 a を求めると

$$a = \sqrt{677/12.3} = 7.42$$

となる。したがって1次コイルに12Vの電圧を加えたときに2次コイルに発生する電圧 E₂ は

$$E_2 = 12 \times a = 89.0 \text{ (V)}$$

となり、100Vには達しない。これは、使用したトランスが本来100Vの電圧を12Vに降圧するためのものであり、損失を考慮して巻数比を小さめにしているためと思われる。トランスの入出力を逆に使う場合はこのことに注意する必要がある。

一方で、巻線抵抗の影響も大きい。1次コイルの巻線抵抗を2次側に換算すると、

$$R_2 = 1.5 \times a^2 = 82.6 \text{ (Ω)}$$

となり、2次コイルの巻線抵抗32.5Ωと合わせて約115Ωとなる。この抵抗による電圧降下は、負荷抵抗が4.7kΩの場合約2.4%、220Ωの場合は約34%に上り、この分負荷にかかる電圧が低下する。したがって図3に示す負荷抵抗値が低いときの大幅な電圧の低下は、このコイルの

巻線抵抗の影響と考えられる。

このように特に負荷抵抗値が低い（消費電力が大きい）場合は負荷電圧が大きく低下するため、このインバータ回路では高々20W程度までの家庭電化製品しか駆動することができない。したがってLED電球や低消費電力の白熱電球、ラジオなどが駆動の対象となる。

2.2 発電機との接続

発電機には、廃棄された自転車から取り出したハブダイナモ発電機（6V, 2.4W）を使用した（図4）。廃品を利用したのは、システムの低コスト化と生徒の環境に対する意識高揚を図る目的もあるが、実際に自転車から生徒が自ら取り外すことで、身近な発電システムに対する関心が高まることも期待したためである。



図4 ハブダイナモ発電機

この発電機は定格出力が6Vの交流であるため、インバータの電源として用いるためには昇圧と整流が必要である。そのため、図5に示す全波倍電圧整流回路を接続することにした。この回路はダイオードの整流作用によ

り、直列接続された2つの電解コンデンサのうち一方が発電機の交流出力の正の半サイクルで充電され、もう一方が負の半サイクルで充電されるようになっている。インバータの電源として接続するのはこの直列接続されたコンデンサの両端であるため、理論的には発電機出力の2倍の直流電圧を発生させることができる。

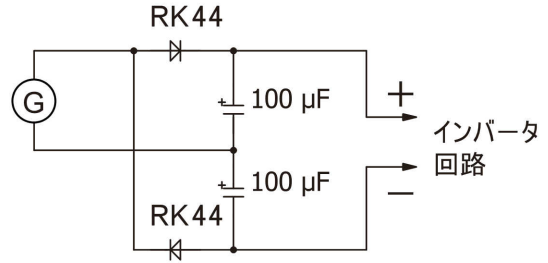
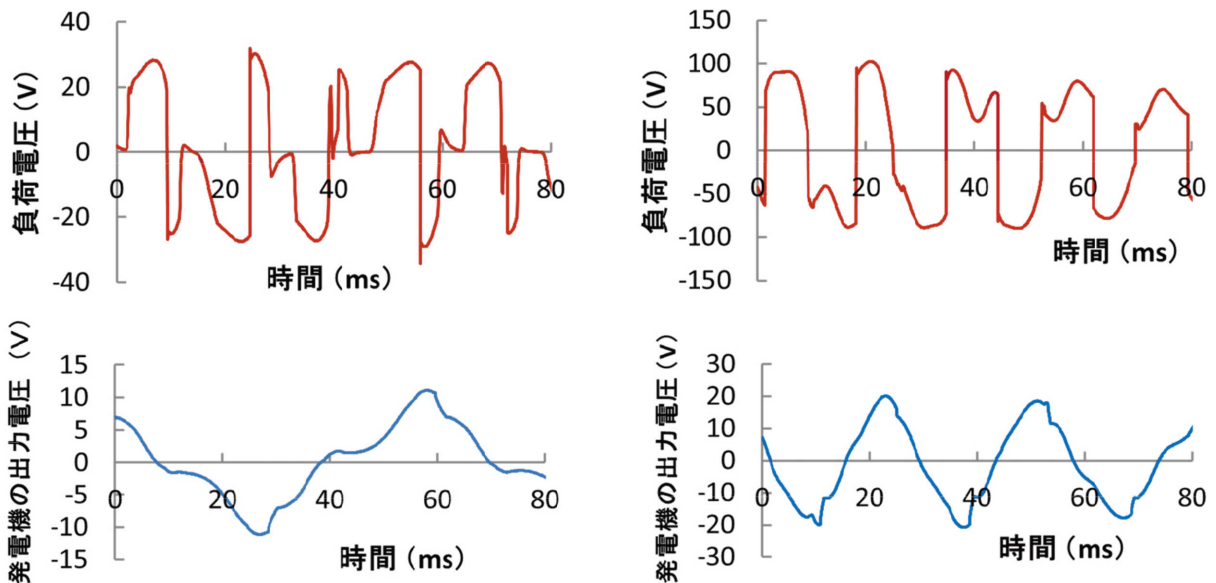


図5 全波倍電圧整流回路

ハブダイナモ発電機、全波倍電圧整流回路、およびインバータをすべて接続し、自作のハンドルを用いて手回して発電した場合の発電機の出力電圧とインバータの出力電圧の波形を図6に示す。なお、インバータの出力端には負荷として4.7kΩの抵抗を接続した。回転速度が比較的低い64rpmの場合〔図6(a)〕は負荷電圧は最大で30V程度で、波形も非常に不規則な変化をしている。回転速度が153rpm〔図6(b)〕になると波形の規則性は向上し、負荷電圧も最大で100V程度に達している。

今回用いたハブダイナモ発電機では1回転あたり14サイクルの交流電圧が発生する。これが倍電圧整流回路で平滑化され直流に変換されるわけであるが、整流回路の出力に比較的大きな負荷が接続された場合は非常に大きなリプルが残り、平均電圧は低下する。本システムでは整流回路の出力にインバータが接続されており、数百mA以上の比較的大きな電流が流れるため、発電機の回



(a) 64rpm

(b) 153rpm

図6 ハブダイナモ発電機の出力電圧とインバータの出力電圧（負荷電圧）

転速度が低い場合は整流回路の出力電圧は不安定で、平均値も低くなる。この乱れた電圧がそのままインバータの電源となるため、発振回路の動作も不安定になり、インバータの出力電圧は低く大きく乱れた波形になる。発電機の回転速度が増加すれば整流回路の出力すなわちインバータの電源電圧が安定化され、インバータの出力電圧は増加し、波形も図2に示すものに近くなる。

このシステムに負荷として4.2WのLED電球を接続し、手回しにより発電実験を行ったところ、約80rpmの回転速度で点灯することが確認できた。後述するように、発電機を水車に取り付け、水力で発電した場合でも、LED電球の点灯は確認できる。

3. 授業実践

兵庫県内公立工業高校（1校）の課題研究の時間を利用して製作を行った。生徒数は7名である。授業の大まかな内容と時間配分を図7に示す。ただし、実際には製作に予想以上の時間がかかったため、授業時間外の放課後や休日にも製作を行っている。

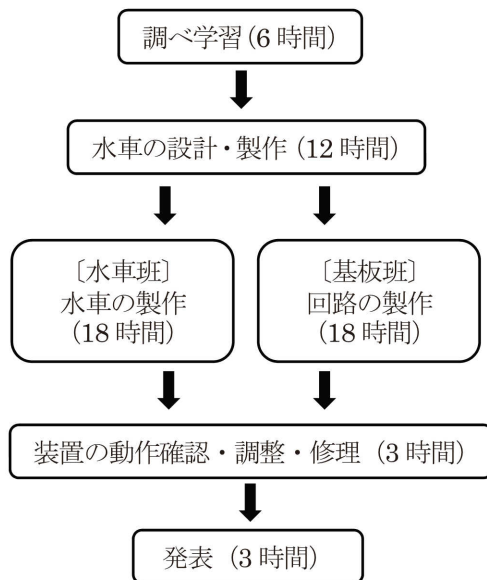


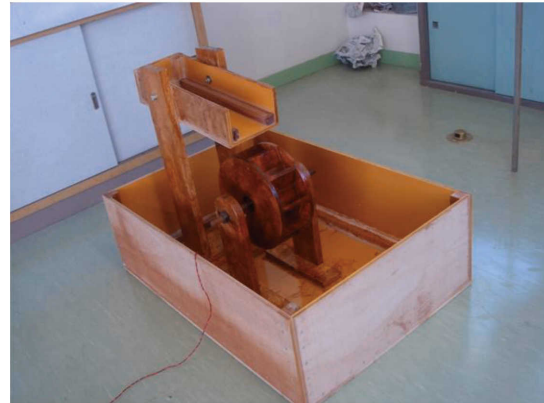
図7 授業の内容と時間配分

授業はまずインターネットを使って水車の種類や原理について調べるところから始めた。製作方法についてもインターネットのいくつかのサイト（手作り水車について詳しく書かれているサイト）を参考にしたが、できるだけ安価でできるように考え工夫させるようにした。生徒は互いに協力し合ってデザインや大きさを決め、用意した板材（廃材）に各部の寸法を罫書いて加工し組み立てていった。

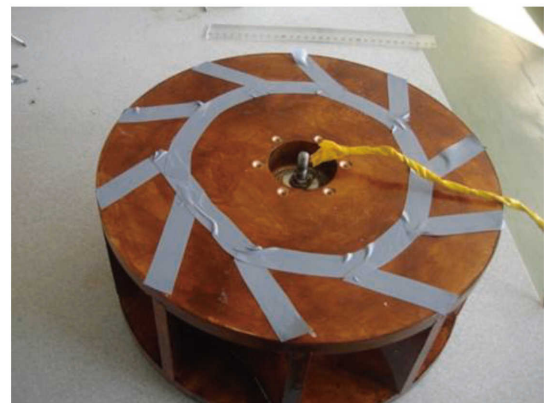
当初7名全員で作業を進めていたが、予想外に製作に時間がかかること、また同一の作業を行う人数として7名はやや多いことなどから、途中から水車班（4名）と基板班（3名）に分かれて製作を行った。ただしお互いの学習内容・作業内容について十分把握できるようにするため、同じ部屋で作業を行い、両班の生徒が適宜交流

し情報交換できるように配慮した。

水車班では水車本体の製作を引き続き行った。ハブダイナモ発電機をその中心に固定した直径300mmの羽根車や1000mm×700mmの水槽などを製作し、図8に示す水車を完成させた。図9は実際に水を流して動作を確認している様子である。意外に大変だったのは水槽からの水漏れの対策で、コーキング材を使って丁寧に補修を行った。



(a) 全体の外観



(b) 羽根車

図8 製作した水車



図9 動作確認の様子

基板班ではインバータ回路や倍電圧整流回路の製作を担当したが、回路の構成や特性を理解するため、まず最初にブレッドボード上に回路を作製し、波形の測定など

を行った。その後はんだ付けにより回路の製作を行ったが、回路の間違いやはんだ付け不良が多く、意外にこの製作にも時間がかかることがわかった。はんだ付けした箇所を一つ一つ点検し、ミスがないか確認する方法について指導を行った。

最後に水車の発電機と製作した回路を接続し、水を流して発電システム全体の動作確認を行った。図10は負荷として4.2WのLED電球を接続したときの様子であるが、はっきりと点灯していることがわかる。ただし、これは水をかなり勢よく流したときの結果で、普通に流しただけでは点灯は確認できなかった。羽根車を回りやすくするために潤滑油の注入などを試みたが、ほとんど効果は見られなかった。LED電球以外の家庭電化製品としてCDラジカセを接続してみたところ、CDは動作しなかったが、ラジオが使用できるのを確認することができた。

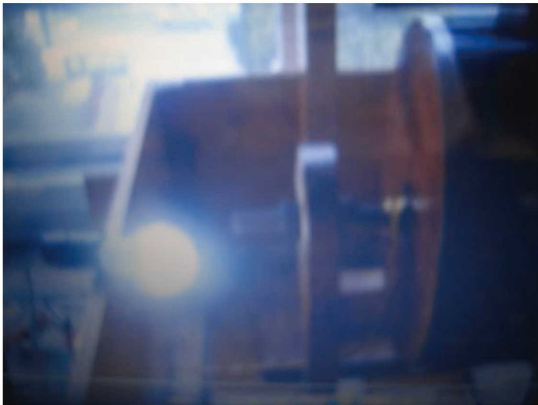


図10 LED電球の点灯実験

授業全体を振り返ると、生徒にとってやはり大変だったのは水槽からの水漏れに対する補修や電子回路の点検・修理などであったらしく、授業後の感想にはこれらの作業に苦労した旨の記述が特に多く見られた。感想ではその他、「工具を扱うことができ勉強になった」「電球を光らせたりラジカセを鳴らしたりできたので感動した」「チームワークの大切さがわかった」などの記述も見られ、この水車発電システムの製作がものづくり教育という観点からは一定の効果があったものと判断できる。しかし、残念ながらエネルギー変換の仕組みの理解やエネルギーの量に対する感覚の体得について、効果があったことを示すような記述はほとんど見られなかった。これは、製作作業に時間がかかりすぎたため、完成したシステムを使ってエネルギー変換の学習に関わる説明や実験を十分行うことができなかったことがその理由の一つと考えられる。また、製作途中でトラブルが多く、そのために生徒はうまく動作するシステムをとにかく完成させることだけを考えるようになってしまったことも影響しているものと思われる。ものづくり（特に木材加工）の作業を取り入れることで製作に対する生徒の意欲や関心を喚起した点では効果が確認できたものの、エネルギー変換学習の教材として使うためには製作時間の短縮など

が課題となる。

4. まとめ

工業高校の課題研究という比較的まとまった授業時間を利用して発電から電力消費までの仕組みを理解させる目的で、簡易な発電システムを開発し、それを利用した水力発電システムの製作実践を行った。この発電システムは、自転車用ハブダイナモ発電機と全波倍電圧整流回路、および自作のインバータを組み合わせたものである。インバータは発振回路から出力される矩形波信号によって2組のダーリントン・トランジスタを交互にスイッチングする非常に簡易な構成のもので、出力の昇圧トランスを通じて矩形波に近い交流電圧を発生することができる。しかし出力トランスとして市販の電源用降圧トランスを入出力逆にして使用したため、12Vの定電圧電源を使用しても80V程度の電圧しか発生させることができず、さらに負荷の増大とともに著しく電圧が低下するため、20W程度までの家庭電化製品しか駆動することができない。発電機と整流回路を接続したところ、約80rpm以上の回転速度で発電機を回すことで4.2WのLED電球が点灯することを確認した。

授業実践では、初めの調べ学習と最後の発表を除いた33時間で製作を終える予定であったが、トラブルも多く製作に予想外に時間がかかった。途中から水車班と基板班の2班に分け、さらに放課後や休日などの授業時間外にも製作を行うことで何とか完成させたという状況であった。完成したシステムは、水力でLED電球を点灯できるほか、CDラジカセのラジオ機能の動作も確認できた。授業後の生徒の感想では、製作（特に水槽からの水漏れや基板のはんだ付け不良などの修理）に苦労した旨の記述が多かったが、完成した時の喜びを味わったり協調性の大切さに気付くなど、ものづくり教育という観点からは一定の効果は見られた。しかし、本来の目的であるエネルギー変換の仕組みの理解に関わる記述はほとんど見られなかった。エネルギー変換と直接関係のない部分の作業（水漏れの修理など）で時間がかかり過ぎないように、製作題材を検討する必要がある。

文献

- 1) 長尾伸洋, 小川武範: 工業高校における省エネルギー学習指導案とその実践, 日本産業技術教育学会誌, 第48巻, 第1号, pp. 19-26 (2006).
- 2) 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, 第47巻, 第1号, pp. 25-33 (2006).
- 3) 渡辺理文, 鎌田正裕: 光と電気の間でのエネルギー変換を実感させるための教材, 物理教育, 第59巻, 第1号, pp. 9-13 (2011).
- 4) 若山裕章, 小山英樹: 振動発電教材の高効率化のための回路の検討と授業実践, 兵庫教育大学学校教育学研究, 第28巻, pp. 39-43 (2015).

- 5) 山本利一, 牧野亮哉: 太陽光発電システムの教材化と授業実践, 日本産業技術教育学会誌, 第42巻, 第4号, pp. 183-188 (2000).
- 6) 宮下晃一, 松岡慎也, 長松正康: 電動カートを利用したエネルギー教育実践とその分析, 日本産業技術教育学会誌, 第47巻, 第1号, pp. 17-23 (2005).
- 7) 吉田昌春, 古田拓, 大羽淳也, 島田英治: 自励式自転車人力発電教材, 日本産業技術教育学会誌, 第50巻, 第4号, pp. 207-214 (2008).
- 8) 後藤智行, 熊澤誠二, 安部秀志: ワンボードマイコン (TK-85) を用いた教育用 PWM トランジスタインバータの製作, 大分工業高等専門学校研究報告, 第27号, pp. 39-48 (1991).
- 9) 秋葉治克, 泉希仁: 自動車用トランジスタ・インバータの設計・製作, 北海道教育大学紀要 (第2部A), 第46巻, 第1号, pp. 99-105 (1995).
- 10) 日熊芳斉, 菊池清明: 教育用インバータ回路の製作, 実践教育, 第29巻, 第1号, pp. 68-73 (2014).
- 11) 電子回路工作素材集, http://www.piclist.com/images/www/hobby_elec/ckt.htm (最終アクセス日: 2016年5月4日).