

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

Efficient circuit for educational vibration power generators and its class practice

若山裕章* 小山英樹**
WAKAYAMA Hiroaki KOYAMA Hideki

圧電素子を用いて音や振動のエネルギーを電気エネルギーに変換する振動発電教材の効率向上のため、倍電圧整流回路と共振回路の導入について検討を行った。倍電圧整流回路を導入した場合、立ち上がり電圧の低いショットキーダイオードやゲルマニウムダイオードを用いることで、大幅に低い信号電圧で負荷（LED など）を駆動できることがわかった。加えて、従来のダイオードブリッジ回路よりも少ない部品数で発電を確認することができる。共振回路については、ややコストのかかるコイルが必要になるものの、負荷電流の増加に一定の効果があることが実験的に示された。倍電圧整流回路を利用して中学校および工業高校で授業実践を行ったところ、出力電流の改善と回路構成の簡素化により、短時間で効果的に振動発電を体験する授業を行うことができた。

キーワード：圧電素子、発光ダイオード（LED）、中学校技術・家庭科技術分野、工業高校

1. はじめに

東日本大震災以降、わが国ではますますエネルギー問題への関心が高まり、水力や太陽光、風力などの再生可能エネルギーの利用に注目が集まっている。学校教育の場においては、それ以前から技術・家庭科技術分野（以下、技術科）や理科、総合的な学習の時間などで再生可能エネルギーに関する多くの取り組みがなされている¹⁻³⁾。そのような状況の中、今回われわれは音や振動のエネルギーを利用する振動発電に着目した。われわれの身の回りには自動車や歩行者などから発生する振動のエネルギーが豊富にある。振動発電はこれらを生活に必要な電気エネルギーとして利用するもので、その技術は発電床として高速道路や駅での利用が試みられている。すでに一部のオフィスなどで実用化されているものの、現在のところ太陽光発電ほど普及しておらず、今後の展開が期待されている技術である⁴⁾。

振動発電の実験は、圧電素子（1個100円程度で入手可能）を用いて簡単に行うことができる。得られた電力で発光ダイオード（LED）を点灯したり、メロディ IC を駆動して音楽を鳴らすなどの例が報告されている⁵⁻⁷⁾。プラスチックのコップの底に穴をあけ、そこに圧電素子を取り付ければ、声のエネルギーによる発電を体験することができる⁵⁾。木製のすのこに圧電素子を取り付け、その上を人が歩くと LED が点灯するようにした教材も開発されている⁸⁾。しかし、以上のようにこれまでに報告されているのは圧電素子への振動の伝達方法を工夫した教材の開発や授業実践の事例研究に関するものが中心で、振動により圧電素子に発生した電力を効率よく利用するための回路の検討に関するものはほとんどない。本研究は、そのような回路の改良を行うことで、より効果的な振動発電教材を開発することを目的としている。

2. 回路の検討

2.1 倍電圧整流回路の効果

振動により圧電素子で発生する電圧は交流であるため、それを利用して電子回路を駆動する場合、整流回路が必要になる。整流回路として一般的によく用いられるのはダイオード4個を用いたブリッジ回路で、実際に先行研究^{6, 7)}でも用いられているが、ここではダイオード2個とコンデンサ1個で整流が可能な倍電圧回路について検討した。圧電素子自体が電氣的にはコンデンサとして働き、また発電した電力でLEDを点灯する場合について考えると、負荷であるLEDが倍電圧整流回路のダイオードの役割も担うため、実際にはダイオードを1個加えるだけでよい。しかも、理論的には入力電圧の2倍の電圧（ただしダイオードの立ち上がり電圧分を引いた値）を得ることができるため、比較的低い電圧でLEDを点灯することができるものと考えられる。そこで、この倍電圧整流回路の効果を実験により調べた。

実験の回路図を図1に示す。信号源として発振器（出力インピーダンス 50Ω ）を使用した。信号周波数は1 kHzである。LEDには高輝度の赤色のもの（SLI-570U2T3F）を使用し、整流用のダイオードDとしてショットキーダイオード（1N4007）、シリコンダイオード（1N2076A）、ゲルマニウムダイオード（1N60）、およびLED（SLI-570U2T3F）の4種類を使用した。LEDの電流は一定ではなく半波整流波形となるため、直列に接続された抵抗（ 10Ω ）の電圧波形をオシロスコープで測定することにより電流値を求めた。

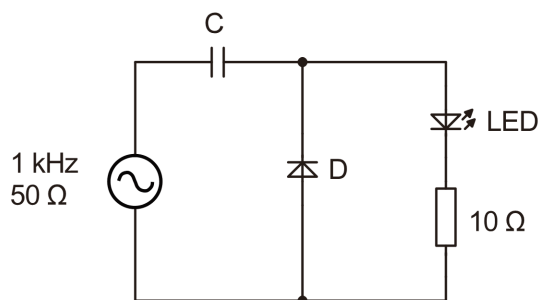


図1 倍電圧整流回路

コンデンサ C として $100\mu\text{F}$ の電解コンデンサを使用したときの測定結果を図2に示す。横軸は入力信号電圧をピーク・トゥ・ピーク（最大値と最小値の差、つまり振幅の2倍）の値で示したもので、縦軸はLEDの電流（半波整流波形の最大値）である。図より、ダイオード D として立ち上がり電圧の低いショットキーダイオードやゲルマニウムダイオードを用いた場合、 $2V_{P-P}$ 程度の入力信号電圧で負荷 LED を点灯できることがわかる。負荷として使用した LED の立ち上がり電圧が約 1.7V であることを考えると、倍電圧整流回路を使用しないでこの LED を点灯しようとする場合、信号電圧は約 $3.4 V_{P-P}$ 必要になる。したがって倍電圧整流回路を用いることにより LED の点灯開始電圧を大幅に低減できることがわかった。なお、コンデンサ C として圧電素子自体（容量 38.8 nF ）を用いた場合には、LED の電流は減るものの、点灯開始電圧については同様な結果が得られている。

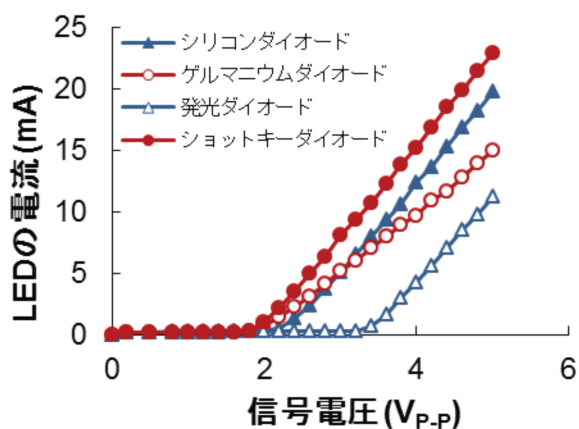


図2 LEDの電流と信号電圧の関係

ダイオード D として負荷と同じ LED を用いた場合、点灯開始電圧は 3.2 V 程度であり、倍電圧整流回路の効果があまりないように見える。しかし、実際に図1の回路からダイオード D だけを外して実験を行うと、コンデンサ C の充電により LED は点灯しなくなる。ダイオード D にはコンデンサの充電による負荷電圧低下の影響を防ぐ働きもある。

2.2 共振回路の効果

先に述べたように圧電素子は電気的にはコンデンサとしての性質を持つ。したがってその容量を C_p 、周波数

を f とすると $1/(2\pi f C_p)$ のインピーダンスを持つことになり、 $f=1\text{ kHz}$ 、 $C_p=38.8\text{ nF}$ の場合、そのインピーダンスは $4\text{ k}\Omega$ を超える。これは LED の動作抵抗（数十 Ω ）よりはるかに大きいので、LED を点灯する場合、効率を下げる大きな原因となる。そこで、コイルを用いてこの容量と直列共振を起こすようにして回路のインピーダンスを低減し、LED の電流を増加させることを試みた。

回路図を図3に示す。負荷である赤色高輝度 LED (SLI-570U2T3F) と倍電圧整流回路構成のためのショットキーダイオード D (1N4007) の並列回路に直列にコンデンサとコイルを接続した。信号周波数は比較的高音の 806.9 Hz と低音の 519.2 Hz の2つについて測定を行った。発振器の出力インピーダンスは 50Ω で、信号電圧は $8V_{P-P}$ である。LED に直列に接続した 10Ω の抵抗の電圧波形をオシロスコープを用いて観測し、LED に流れる電流の平均値を測定した。

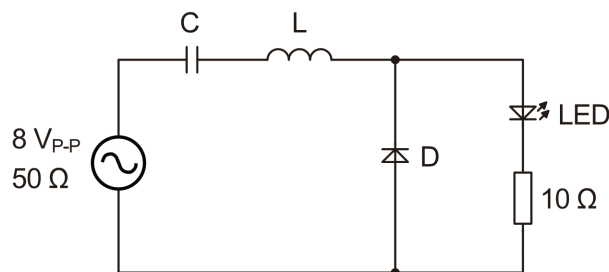


図3 共振の効果を利用した回路

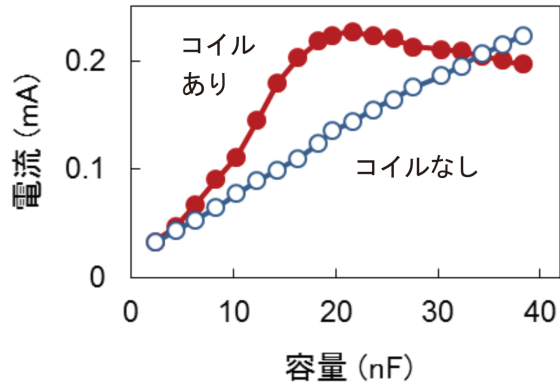
ここで、共振条件

$$(2\pi f)^2 CL = 1 \quad (1)$$

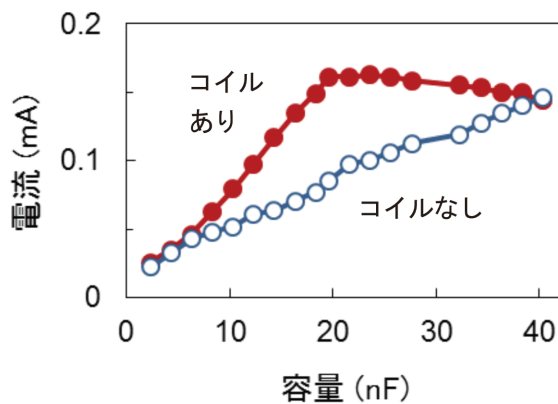
より容量 $C=38.8\text{ nF}$ の圧電素子と共振が起こるコイルのインダクタンス L を求めると、高音 ($f=806.9\text{ Hz}$) では $L=1.03\text{ H}$ 、低音 ($f=519.2\text{ Hz}$) では $L=2.42\text{ H}$ となる。しかし、実際には価格や入手のし易さなどの点から、 L の値を調節するよりも C の値を調節するようにした方が好都合である。その場合、圧電素子に直列にコンデンサを接続することになるので、圧電素子の容量 (38.8 nF) より小さい容量で共振させることになる。したがってコイルは上で計算した値より大きなインダクタンスを持つものを使用する必要がある。そこで高音では $L=1.5\text{ H}$ 、低音では $L=3\text{ H}$ とし、容量 C の値を変えて実験を行った。

実験結果を図4に示す。容量の値が高音では $6\sim 32\text{ nF}$ 、低音では $8\sim 38\text{ nF}$ の範囲で、共振による明確な電流の増加が確認できる。しかし、どちらの場合も電流の増加は最大でも2倍に満たない。コイルにおける直流損失（銅損）や交流損失（鉄損）により電流が制限されているものと思われるが、コイルの使用に伴うコスト増や回路の複雑化ということを考えると、授業での積極的な利用のためにはさらなる改善が必要である。損失について定量的な評価を行い、コイルの選定を慎重に行う必要

がある。



(a) 高音 ($f = 806.9 \text{ Hz}$, $L = 1.5 \text{ H}$)



(b) 低音 ($f = 519.2 \text{ Hz}$, $L = 3 \text{ H}$)

図4 共振の効果

3. 授業実践

3.1 中学校における授業実践

開発した回路を用いて、H大学附属中学校の選択授業（技術）で実践を行った。ただし上述のように共振回路の効果は限定的であり部品数も多くなるため、実践では倍電圧整流回路のみを使用した。具体的には図5に示すようにプラスチックのコップの底に穴をあけ、圧電素子を接着してリードとミノ虫クリップを取り付けたものを用意し、これに回路を接続するようにした。生徒は2年生と3年生、合せて11名で、50分授業のうちの約30分を使って実施した。授業では初めにスライドを利用して5分程度エネルギー問題について説明した後、実験1として振動エネルギーによるLEDの点灯、実験2としてメロディICの駆動を行い、最後に5分程度でまとめ（感想の記入等）を行った。したがって実験に充てた時間は実験1と実験2を合せて20分程度である。

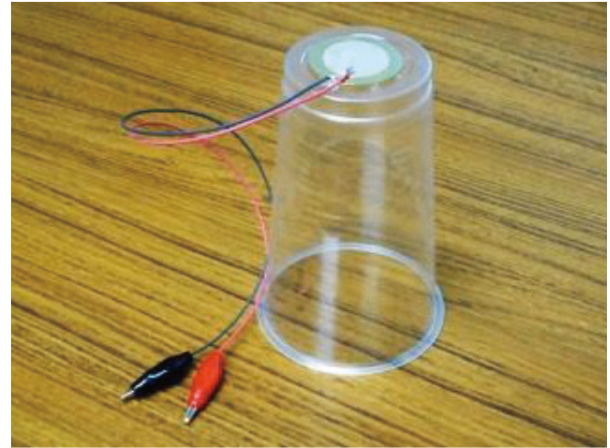
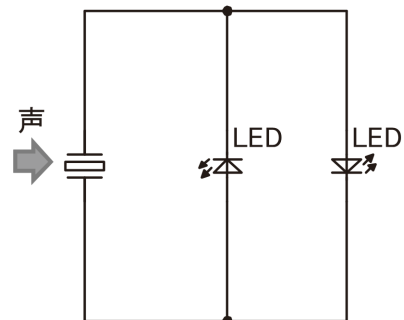
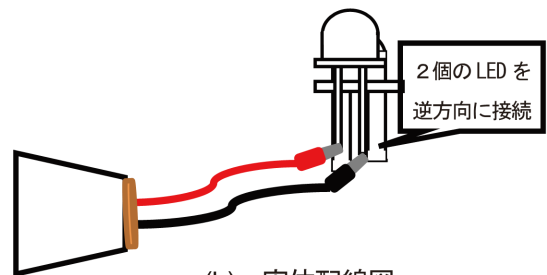


図5 圧電素子を用いた振動発電実験教材

実験1（LEDの点灯）では、電子部品にあまり馴染みのない生徒にも容易に製作できるようにするため、倍電圧整流回路を同じLED（赤色高輝度SLI-570U2T3F）2個で構成するようにした。ショットキーダイオードなどの立ち上がり電圧の低いダイオードを用いた場合に比べてLEDに流れる電流は小さくなるが、2個のLEDの両方とも点灯するために効果を確認しやすいという利点もある。生徒には回路図〔図6(a)]とともに実体配線図〔図6(b)]をスライドとプリントの両方で提示した。2個のLEDを逆向きに取り付けるだけの非常に簡単な回路であるため、全員がすぐに回路を組むことができた。



(a) 回路図



(b) 実体配線図

図6 実験1（LEDの点灯）

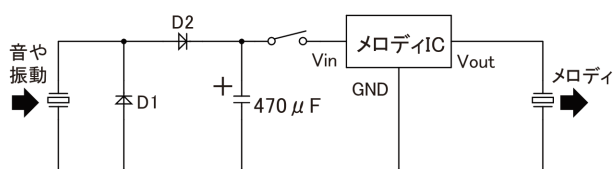
実験を行っている生徒の様子を図7に示す。声を出す実験であるため、当初戸惑っていた生徒も多かったが、

授業者が一度例示した後は全員が熱心に声を出したりコップを机の上で叩いたりして振動エネルギーによるLEDの点灯を体験していた。

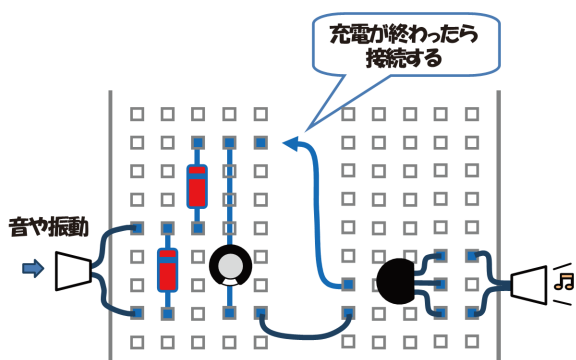


図7 授業の様子（実験1）

次に実験2として、発電した電力でメロディ IC を駆動し、音楽を鳴らす実験を行った。ただし声や振動による発電は瞬間的な現象であるので、音楽をある時間流し続けるためには図8（a）の回路図に示すように、エネルギーをコンデンサにためる必要がある。ここでも効率よくコンデンサを充電するため、倍電圧整流回路を使用した。なお事前に行った実験で、倍電圧整流回路のダイオードとしてはショットキーダイオードやゲルマニウムダイオードよりもシリコンダイオードの方がより多くのエネルギーをためることができることがわかった。図2からも明らかなようにショットキーダイオードやゲルマニウムダイオードの方が立ち上がり電圧は低い、これ



(a) 回路図



(b) 実体配線図

図8 実験2（メロディ IC の駆動）

らのダイオードは逆方向電流が大きいため、放電が起こり効率的な充電ができないためと考えられる。そのためダイオード D_1 , D_2 にはシリコンダイオード (1N2076A) を用いた。またプラスチックコップに圧電素子を取り付けた振動発電実験教材（図5）は、この実験ではメロディ IC からの音声信号を音に変換するスピーカとしても使用している。

回路の作製にはブレッドボードを使用した。授業時間の関係でその使用法について練習する時間がとれなかったため、生徒には図8（b）に示す実体配線図を回路図とともにスライドとプリントで示した。実験は3～4人の班で行い、慣れないブレッドボードの使用に戸惑う姿も見られたが、すべての班で時間内に回路を製作し、振動のエネルギーで音楽を鳴らす実験を体験することができた。実験の様子を図9に示す。



図9 授業の様子（実験2）

以上、実験1と2の二つの実験を行ったが、20分程度の短い時間にもかかわらずすべての班で回路を作製し、振動発電を体験することができた。授業後の感想では、振動で発電できることを初めて知った、振動で発電できるを見て驚いた、などの記述が多く見られ、振動発電という最新技術の存在を実験を通して理解した様子がうかがえる。

3.2 工業高校における授業実践

兵庫県立O工業高校の1年生29人を対象に工業技術基礎の時間を利用して実践を行った。授業の内容は基本的に中学校の場合と同じであるが、時間が45分とやや長いこと、また対象が工業を専門とする生徒であることから、コンデンサによる電気エネルギーの貯蔵を理解させるための演示実験（大容量コンデンサを発電機を用いて充電し、携帯用扇風機を駆動する実験）も行った。また、実験2（メロディ IC の駆動）においても、容量の異なるコンデンサを数種類用意し、これらを交換して実験を行うことで、容量と蓄えられるエネルギーの関係を理解できるようにした。実験の様子を図10に示す。



(a) 実験 1 (LED の点灯)



(b) 実験 2 (メロディ IC の駆動)

図10 工業高校での実践の様子

授業後の感想では、中学校の場合と同様、振動のエネルギーで LED が点灯したり音楽が鳴ったりしたことに関心を感じた旨の記述が多く見られた。加えて、人間の力で蓄えることができるエネルギーはごくわずかで、それに比べると乾電池には非常に多くのエネルギーが蓄えられていることに気が付いたとの記述もあり、われわれが普段使うエネルギーの量に対する感覚を育成する上でも効果が期待できることがわかった。従来この目的には自転車に発電機を取り付けた装置⁹⁾など、やや大がかりな教材が用いられてきたが、プラスチックのコップに圧電素子を取り付けただけの非常に簡単な教材でも効果があるということであれば授業で実践しやすくなる。再生可能エネルギーの一つである振動エネルギーというものを知ることでできると同時に、エネルギーの大切さを学ぶことも可能になる。

4. まとめ

圧電素子を用いた振動発電教材について、発電により得られた電気エネルギーを効率よく利用するための電子回路部分の検討を行った。負荷として LED を用いた場合、倍電圧整流回路を利用することにより、 $2V_{p-p}$ （振幅で考えれば1V）程度の低い信号電圧でその LED を点灯することができることがわかった。ダイオードを4個

使用したブリッジ整流回路を使用する場合に比べ、部品数も大幅に削減することができる。コイルを追加して共振の効果を利用すれば、さらに LED の電流を増やすことが可能であることも実験的に明らかになった。効果の検証のため、倍電圧整流回路を利用した振動発電教材を用いて中学校および工業高校で授業実践を行ったところ、LED の点灯とメロディ IC の駆動の2つの実験を比較的短時間で効果的に実施することができた。振動発電について学ぶだけでなく、エネルギーの量に対する感覚を育むための教材として利用できる可能性があることも生徒の感想から明らかになった。

文献

- 1) 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)
- 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) 池田昌子, 堀川理介, 伊藤美代子, 宮本憲武, 山本勝博: 色素増感太陽電池の製作を通じた教材化と教育実践, 茨城大学教育学部紀要 (教育科学), 57号, pp.29-43 (2008)
- 4) 速水浩平: 振動力発電のすべて, 日本実業出版社 (2008)
- 5) 鶴田孝一, 小池守, 高津戸秀: 音エネルギーに対する生徒の理解を深める中学校理科学習における授業実践研究, 理科教育学研究, 第50巻, 第3号, pp.135-142 (2010)
- 6) 菊池竜徳, 小野寺清光: 圧電素子を用いた振動発電教材の開発, 日本産業技術教育学会九州支部論文集, 第19巻, pp.63-68 (2011)
- 7) 菊池竜徳, 小野寺清光: 圧電素子を用いた教材開発 (2), 日本産業技術教育学会九州支部論文集, 第20巻, pp.135-140 (2012)
- 8) 松原佑, 室伏春樹, 鄭基浩: 床振動発電を利用した教材の開発, 日本産業技術教育学会誌, 第56巻, 第1号, pp.75-79 (2014)
- 9) 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)