

# 簡素な発振回路によるワイヤレス電力伝送に関する 理科教材の開発と分析

森重 比奈\*<sup>1)</sup>・加藤 徹也<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>千葉大学大学院・教育学研究科修士課程

<sup>2)</sup>千葉大学・教育学部

## Development of science teaching materials on wireless power transmission by simple oscillation circuit

Hina Morishige\*<sup>1)</sup>, Tetsuya Kato<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Education, Chiba University, Japan

<sup>2)</sup> Faculty of Education, Chiba University, Japan

コイルを貫く磁束が変化することで起電力が生じる電磁誘導現象には、交通系ICカードやIH調理器など身近な応用がある。これらは生徒にとってたいへん魅力的な技術であり、教室内で演示できればこの学習内容に興味を持たせることにつながる。筆者らは、ワイヤレス電力伝送技術を実現する発振回路を教材化する上で、中学校での理科教材として最も簡素な形であることを重視した。そこで、1個の乾電池、1対のコイル、1個の抵抗と1個のトランジスタという構成の「ブロッキング発振回路」を採用した。本報告では、実験装置の作成手順と完成例、動作原理を説明する。最後に、実際に作成した回路を実験により調べながら、抵抗値やコイルの巻き数を変更した場合の変化について報告する。

The electromagnetic induction phenomenon, in which an electromotive force is generated by changing the magnetic flux penetrating the coil, has familiar applications such as transportation IC cards and IH cookers. These are very attractive technologies for students, and if they can be demonstrated in the classroom, students will be interested in this content. In this research, we made a teaching resource with an oscillating circuit that displays the basic mechanism of wireless electricity transmission technology. In doing so, we stress the importance of using the simplest forms when using teaching materials for junior high school students. Hence, we adopted a "blocking oscillator circuit" consisting of one dry cell battery, a pair of coils, one resistor and one transistor. In this report, we will explain the procedure for creating the experimental equipment, a completed example, and the operating principle. Finally, we will report on the changes in the frequency and the collector voltage of the circuit when the resistance value and the number of coil turns are changed.

キーワード：物理教育 (Physics Education), 電磁誘導 (Electromagnetic Induction),  
非接触給電 (Non-contact Power Supply), ブロッキング発振回路 (Blocking Oscillator)

### 1. 序論

電流の流れていないコイルに磁石を近づけたり遠ざけたりして、コイルを貫く磁束に変化を与えると、特にその変化が早ければ、コイルは検出可能な誘導起電力が生じる。磁束の変化を妨げる方向に銅線に電流が誘導されて流れるのである。誘導起電力は単位時間当たりの変化量が大きければそれだけ大きな誘導起電力を生じる。この量的関係を学ぶのは高校物理であるが、コイルと磁石の相対運動による発電効果は中学校2年生の理科の単元「電流と磁界」の後半で学習する。中学校2年理科で扱う教科書<sup>1,2)</sup>では、電磁誘導の応用例として、交通系ICカードやIH調理器を挙げている。交通系ICカードは、カード内に電池などの電源を搭載しているわけではなく、カードの読み取り機内に流れる電流がつくる変化する磁

界が、内蔵のコイルを貫くことで誘導起電力が生じ、カード内のコイルに電流が流れるという仕組みで情報のやり取りをしている。子どもたちにとって身近で魅力的な応用技術であり、教室での演示は学習興味を向上させるだろう。飯塚・山口(2019)は中高生向け大学で行う実験講座を想定し、受信回路でLEDを点灯したり、整流して直流モータを回転したりする装置の提案を行った<sup>3)</sup>。本報告ではこのような演示に必要な発信側と受信側の回路、およびその動作の鍵となる「振動回路」が、中学校理科教員が扱うことが可能なように、簡素な構成の実験装置の作成を目指した。

ここで、発振回路とは何か、ということ考察しておきたい。

コンデンサとコイルはエネルギーを蓄えることができる。電界の源としての電荷を蓄えるコンデンサは電気エネルギーを、また、磁界の源としての電流を蓄えるコイルは磁気エネルギーを蓄える。これらの素子はエネルギー

の仮置き場となることができる。そして、蓄えられたエネルギーに応じてON/OFFできるスイッチがあれば、電源からエネルギー供給を受けながら間欠的・周期的にエネルギー放出を繰り返すことができる。電気回路がこのような変動を周期的にくり返せば、回路には交流電圧や交流電流が生成できる。つまり、電源からエネルギーを受け取り、また蓄えたエネルギーを放出するコイルあるいはコンデンサに加えて、この切り替えのきっかけ（トリガー）を与えるスイッチ動作が可能な回路素子が必要となる。

スイッチ動作を行う代表的な素子がトランジスタである。動作の安定性を高めるなど高機能化した素子はIC（集積回路）と呼ばれるが、これは内部にトランジスタを多数備えている。比較的簡易な回路の下で正確な発振動作をする専用ICも存在する。本研究で紹介する発振回路は

- 素人が失敗せずに準備し作成できるもの
- 入力電源は普通の乾電池1本（直流1.5V）
- 出力は交流（例：ピーク電圧5V，周波数300Hz）
- 簡素な回路構成

という特徴を有するものとし、発振周波数や出力波形（電圧の時間変化）の正確な再現性や安定性は問わないこととする。さらに、

- 出力を非接触型（ワイヤレス）電力送信に利用し、
- 交流磁場を生成するコイルでエネルギー貯蓄・放出し
- 電力を受ける回路はコイルとLEDだけ

とした。この場合、受動素子であるコイルと抵抗のほかにはトランジスタひとつで実現可能な「ブロッキング発振回路（Blocking Oscillator Circuit）」を採用することにした。本報告の内容として、はじめにとトランジスタのスイッチ動作に関する基本事項を説明したあと、この回路の作成手順や完成例や動作の様子を紹介する。次に、回路の動作原理を示す。ここでの視点は中学校理科・高校物理の教員がこの回路の動作を理解するための内容という想定で記述するが、前提となる知識として、コイルの過渡現象について簡単に付録にまとめるので、必要に応じて参照していただきたい。続いて、実際に作成した回路の動作の詳細を測定によって示す。ここでは抵抗値やコイルの巻き数を変更した場合に起こりうる特性の変化を例示するものとする。最後にまとめと展望を示す。

## 2. 簡素な発振回路の作成と利用

### 2.1 トランジスタのスイッチ動作

本報告ではトランジスタに東芝製 2SC1815 を利用する。多種あるトランジスタの中ではNPN型バイポーラトランジスタと呼ばれる種類のうち最も代表的なものである。3つの端子（エミッタe，コレクタc，ベースb）が足のように出ている（図1）。

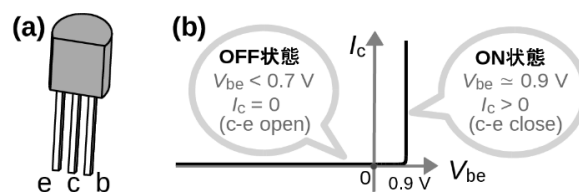


図1 (a) トランジスタ (2SC1815 等) 概形、  
(b) ベース電圧  $V_{be}$  とコレクタ電流  $I_c$  の関係の概形

このようなトランジスタでは、（エミッタを基準として）ベースにかかる電圧  $V_{be}$  が閾値（0.7 V 程度）を下回るか超えるかの関係により、コレクタ・エミッタ間を電氣的に切り離したり（OFF状態）、接続したり（ON状態）、というスイッチ動作を行う。ON状態ではコレクタ端子に流れ込む電流  $I_c$  ( $> 0$ ) が正の向きあり、その大きさに関わらずベース電圧  $V_{be}$  は0.9 V程度で一定になる。一方、OFF状態ではコレクタ電流は  $I_c = 0$  で一定になるが、 $V_{be}$  は0.7 V程度以下の任意の値（閾値以下であれば負値も可）をとる。これらふたつの状態はベース電圧  $V_{be}$  によって切り替わる。

一般に、トランジスタの最も代表的な特性は電流増幅で、電流  $I_c$  はベース端子に流れ込む電流  $I_b$  の  $h_{FE}$  倍になることが知られている。この比  $h_{FE}$  は電流増幅率と呼ばれ、100倍程度だが環境温度、使用電流あるいは個々の製品ごとによりかなり異なり、2倍程度のばらつきが許容されている。2SC1815では色ラベルにより分類され、黄色=Yで  $h_{FE}=120\sim 240$ 、緑色=GRで  $h_{FE}=200\sim 400$  等である。この、 $I_c = h_{FE} I_b$  の電流増幅特性はトランジスタが活性領域と呼ばれる状態にある場合の特性である。その外側にON状態（飽和領域）とOFF状態（遮断領域）がある<sup>4</sup>。ブロッキング発振回路ではトランジスタは素早くON状態とOFF状態の切り替えを行う。

### 2.2 ブロッキング発振回路について

ブロッキング発振回路は残量が少なくなり起電力が低下したような電池から電気エネルギーを組みだすことにも利用され、別名ジュールシーフとも呼ばれる。一体化したふたつのコイル、トランジスタ、抵抗を基本要素とする回路で、最も簡素な場合の回路例を図2に示す。この回路の出力負荷は、図2(a)のように有線でコレクタ-エミッタ間に接続する（図2(a)では抵抗  $R_c$ ）か、あるいは図2(b)のように、この回路のコイルと非接触結合する第三のコイルに接続するをさせる（図2(a)ではLED3）。

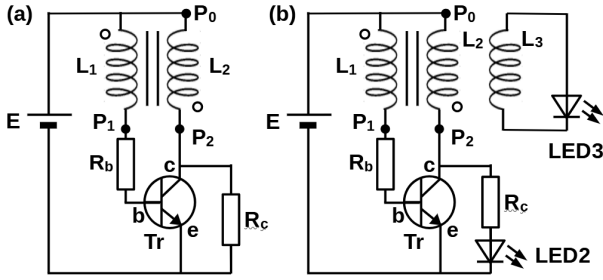


図2 ブロッキング発振回路, (a) 有線でRcに電力出力する場合, および (b) 無線でLED3に電力出力する場合 (Rc, LED2は動作安定化・確認用)

## 2.2 ブロッキング発振回路の作成手順

- コイルのためのワイヤの用意：コイル用エナメル（あるいはポリウレタン）被覆銅線φ0.32 mm×70 cm×2本, さらにワイヤレス電力送信受信部用に150 cm×1本。
- コイルの作り方：この回路に用いるコイル1とコイル2は, 一方のコイルが作る磁束がすべて他方のコイルを通り, 効率最大の相互誘導を生じることが望ましい。そのために2本の銅線を合わせた状態で同時に軸（単3電池等, 作成後に外す）に12巻き, 巻き付ける。銅線はそれぞれ0.17Ω程度であった。巻き終わり時には合わせて4本の端があるので, デジタルマルチメータの機能などを利用して導通チェックを行いながら, それらの端に回路図上のP<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>各1個, P<sub>0</sub>×2個を割り振る。このときP<sub>1</sub>→P<sub>0</sub>, P<sub>0</sub>→P<sub>2</sub>が同じ向きに巻かれていることに注意する。ふたつのP<sub>0</sub>ははんだ付けする。完成したコイルはクリスマスリースのように余った銅線を巻き付けて, 解けないようにする。
- 電子部品等の用意：トランジスタ2SC1815-Y, 130 Ωカーボン抵抗 (R<sub>b</sub>), 1 kΩカーボン抵抗 (R<sub>c</sub>) およびLED 2個（有線出力・動作確認用LED 2と, ワイヤレス電力送信受信部用LED 3), 1.5 V単三電池および電池ボックス。
- 回路を組む：コイルのP<sub>0</sub>は電池ボックスのプラス端子, P<sub>1</sub>は抵抗 R<sub>b</sub>=130Ωの一端（他端はトランジスタのb端子), P<sub>2</sub>はトランジスタTrのc端子など, 図2の回路図に従って回路を組む。図3に回路の完成例を示す。

## 3. 発振回路の動作原理

一般に, 発振回路の出力する電圧・電流は正弦波形ではない。正弦波形は連続的・調和的な「自然な」振動現象の下で発生する。それに対して, ブロッキング発振回路のような簡素な構成による発振回路ではトランジスタのON/OFFの切り替えによるスイッチ動作を周期的に行うことにより, 電圧・電流の急激な変化をくり返し起こす。力学的なたとえとしては, 天秤棒は支点が棒の直線より上にあり, つりあいの姿勢の近くで調和的な振動を起こすが, シーソーは支点が棒の直線より下にあってつりあい（シーソーに乗る左右の人たちがいずれも地面に足がつかずにいる状態）は不安定で, 左にあるいは右に, 行きつくところ（地面に足が着く）まで行って, 動きのスイッチを切り替えて振動している。

この切り替えのきっかけを, 図2の回路ではふたつのコイルの自己誘導と相互誘導で実現している。コイル1, 2ともに, 図2の上から下に向かう向きを正としてそれらに流れる電流I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>を定義すると, それぞれのコイルの端子間には自己誘導と相互誘導による起電力がかかり, 両者の電流が正の向きに同じ割合で増大して流れると, 起電力が打ち消しあうような向きになっている。自己誘導係数はふたつのコイルの大きさや巻き数を同じにすることにより同一となり, L<sub>1</sub> = L<sub>2</sub> = Lとなる。また, 相互誘導係数はふたつのコイルの結合を完全に（それぞれのコイルに貫く磁束を完全に一致（結合定数1に）させるように, ふたつのコイルを一体化させる）ことによりM = Lとなる。これらにより, 図2の中の点P<sub>0</sub>（二つのコイルの midpoint）, 点P<sub>1</sub>（コイル1の他端）, 点P<sub>2</sub>（コイル2の他端）の電位はそれぞれ

$$V_{P0} = E,$$

$$V_{P1}(= V_{be} + R_b I_1) = E + -L_1 dI_1/dt + M dI_2/dt,$$

$$V_{P2}(= V_{ce}) = E - L_2 dI_2/dt + M dI_1/dt$$

となり, トランジスタのON/OFFに関わらず, 点P<sub>0</sub>を中心として点P<sub>1</sub>と点P<sub>2</sub>が常に対称的に, シーソーのような電位となる。なお, I<sub>1</sub>はトランジスタのベース電流I<sub>b</sub>に常に一致する。

この回路の一連の動作について, 電源を投入した直後と似た状態を起点とするくり返しのプロセスを追いながら, 図4のような4つの転換点に分かれる状態推移として説明する。

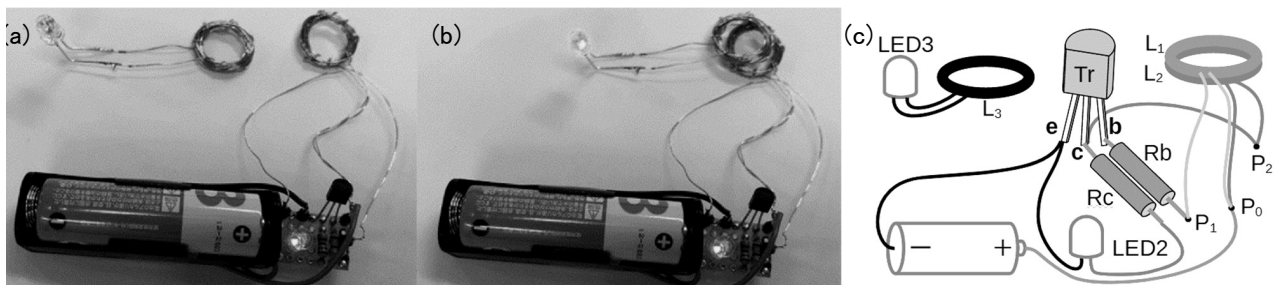


図3 回路の完成例。(a) 有線出力のみ、(b) 無線出力あり、(c) 実体図。



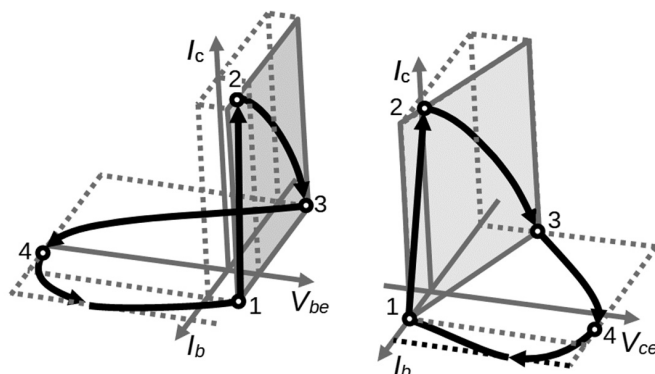
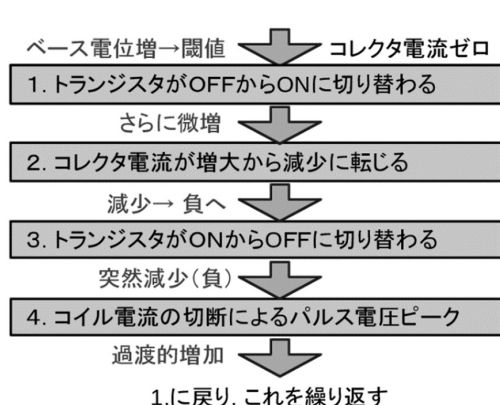


図4 ブロッキング発振プロセスを転換点1～4で分けしたもの(左)、および、 $I_b$ - $I_c$ - $V_{be}$ 、あるいは $I_b$ - $I_c$ - $V_{ce}$ を直交する3軸として状態の推移を模式的に示したもの(右)。

電源を入れる前、エミッタを接地したベース電圧  $V_{be}$  も、コレクタ電圧  $V_{ce}$  もいずれもゼロで、トランジスタはOFF状態にある。電源電圧  $E$  はコイル  $L_1$  とベース抵抗  $R_b$  の直列接続、および、コイル  $L_2$  と出力抵抗  $R_c$  の直列接続に印加され、これらのコイルに電流が流れはじめる。この電流増大率は次第に減少してコイルにかかる電圧が減少し、抵抗にかかる電圧が大きくなる。これによりベース電圧  $V_{be}$  が上昇し、閾値 (0.7 V) 程度を超えたところでONになる。

[1] トランジスタがOFFからONに切り替わる

トランジスタがONになるとコレクタ電位  $V_{ce}$  はゼロになり、コイル  $L_2$  に流れる電流は全て、トランジスタに流れ込むコレクタ電流  $I_c$  となる。このとき回路の抵抗 ( $r$  とする) はとても小さいため、大きな電流値  $(E - V_{ce})/r$  に向かって電流は増大する。このときの電流増大率は  $(E - V_{ce})/L_2$  でほぼ一定となり、また時定数 (変化の完了までの目安となる時間) は  $L_2/r$  で与えられ、この変化はゆっくり進行する。このときコイルには磁気エネルギーが蓄えられてゆく。このとき

$$V_{p1}(=V_{be}+R_b I_b)=E+Ld(I_c-I_b)/dt$$

の関係が成り立つ。ベース電圧  $V_{be}$  はON時の値 (0.9 V程度) に固定される。コレクタ電流  $I_c$  に比べてベース電流  $I_b$  は小さい。  $I_b$  は正の一定値を取る。

[2] コレクタ電流が増大から減少に転じる

トランジスタのON状態 (飽和領域) でコレクタ電流が増大するとき、それにしたがってコレクタ電位  $V_{ce}$  が正の値で徐々に増大する。この回路ではコレクタ電位は  $V_{ce} \sim E - LdI_c/dt$  を満たすため、電流増大率  $dI_c/dt$  が減少して、これがゼロになるときコレクタ電流  $I_c$  は最大を迎え、さらに  $dI_c/dt < 0$  となるために  $I_c$  は加速度的に減少するが、  $V_{ce}$  は増大し続ける。このときベース電圧  $V_{be}$  はON時の値 (0.9 V程度) に固定され、ベース電流は、  $V_{be}+R_b I_b \sim E+LdI_c/dt$  を満たすように減少して負値になる。  $I_c$  が最大値からゼロに至る時間 (2→3) は、  $I_c$  が増大して最大値を迎える時間 (1→2) よりもだいたい短い。

[3] トランジスタがONからOFFに切り替わる

$I_c = 0$  に近くなると  $dI_c/dt < 0$  の大きさが大きくなっているが、トランジスタのベース電圧はON時の値 (0.9 V程度) を保ち、コレクタ電圧は10 V程度の大きさになる。トランジスタは遮断領域に入りOFF状態になる。電流の流れていた  $L_2$  コイルの回路が切断されて、開放となるコレクタ電位には瞬間的に大きな正電圧が発生する (付録A参照)。その最大値に至る過程では、コレクタ電流がゼロを保ちながらベース電流が  $dI_c/dt < 0$  となって  $Ld(I_c-I_b)/dt < 0$  を維持する。ベースにはコレクタ電位と対称的に大きな負電圧が発生し、また、ベース電流は負値から正値に向かって変化する (3→4)。トランジスタがOFFになってから各電位の大きさが最大を迎えるまでの時間は他のプロセスに比べて極めて短い。

[4] コイル電流の切断によるパルス電圧ピーク

コレクタ電位の正値ピーク及びベース電位の負値ピークの後はいずれも電圧ゼロに向かって変化する (4→1)。ここでの時定数は、機械的なスイッチで回路を切り離れたときに空気の絶縁破壊が起こることを考慮した高抵抗に基づく比較的短い時間になる (付録A参照)。

4. 作成した回路の動作分析

電池のマイナス端子 (あるいはそれと接続されているトランジスタのエミッタ) を基準とする各点での電位の時間変化を、オシロスコープにより観察し、実験的に回路のふるまいを確かめた。

実験 (1) オシロスコープによる観察

まず、第2章で説明したパラメータ ( $R_b = 130 \Omega$ ,  $R_c = 1 \text{ k}\Omega$ , コイル  $L_1$  と  $L_2$  はどちらも巻き数  $N = 12$ ) でのコレクタ電位とベース電位の時間変化を測定し、これらのオシロスコープ像を観察した。パルス状の発振がみられ、周波数は 541.7 kHzであった。次に、コイルを交換して、 $\phi 0.32 \text{ mm}$  の銅線による巻き数  $N = 50$  ( $\phi 15 \text{ mm}$  の空芯に巻き付けたもの) にし、さらにふたつの抵抗を  $R_b = 150 \Omega$ ,  $R_c = 130 \Omega$  にした場合で測定した。このときのオシロスコープ像を図5 (a) に示す。こちらは

193.4kHzの周波数で発振していることがわかる。コレクタ電位の正およびベース電位の負の各ピーク付近を時間的に拡大すると（図5(b)）、コレクタ電位は電源電圧1.5Vを超える10Vに達し、ベース電位は-5Vまで下がること、また、他の時間帯ではベース電位は1V程度でほぼ一定になっていることがわかる。

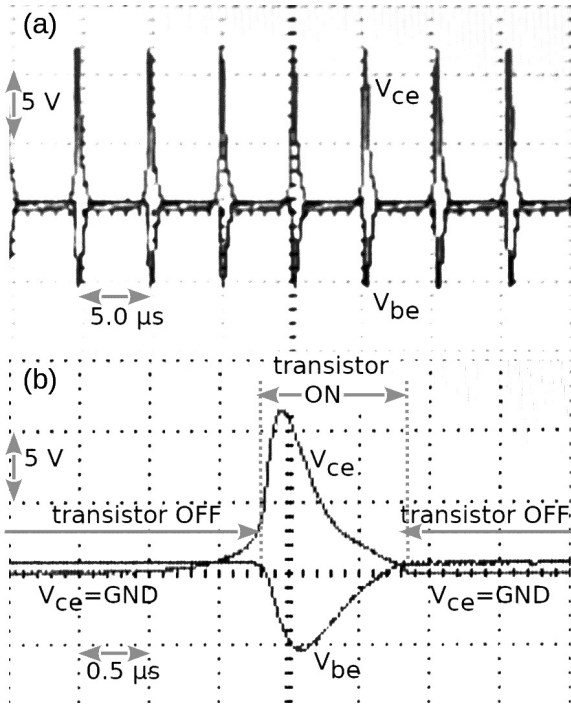


図5 オシロスコープでの時間変化の観察

実験（2） 回路パラメータによる動作の変化

図2の回路において、コイル  $L_1, L_2$  の巻き数  $N$ （同一で、結合定数1）とベース抵抗  $R_b$  の値を変えたときの発振周波数への影響を調べた。 $N = 12, 25, 50, 75, 100, 150, 200$ ,  $R_b = 20, 130, 200, 1\text{ k}, 3.3\text{ k}\Omega$  を組み合わせて発振周波数およびコレクタ電位のピーク電圧をオシロスコープで測定した。

発振周波数を  $N$  に対してプロットしたグラフを図6(a)

に示す。 $N$  が小さくなると  $R_b$  によらず周波数は大きくなる傾向がみられる。また、最も  $N$  の小さな12巻では発振周波数は大きくなるが、 $R_b$  が  $1\text{ k}\Omega$  と  $3.3\text{ k}\Omega$  のときには発振しなかった。これらは  $L$  が小さく  $R$  が大きいので、時定数  $RL$  が大きい。周波数が大きくなりすぎることによって、スイッチ後の回路の変化が収まる前に次の変化をしようとするのに対応するものだと考えられる。一方、発振周波数を小さくしたいのであれば、 $N$  を大きくするのが良いことがわかった。

また、この図からは  $R_b$  が大きい方が発振周波数は大きくなることわかる。これは、 $R_b$  の値はコレクタ電流を決めるものであり、コイル1を流れるコレクタ電流が小さいほどコイル1を流れる電流が飽和しやすく、すると電流がつくる磁束の変化量が小さくなるため、コイル2の相互誘導も小さくなりトランジスタのベース電位は急激に下がるからであると考えられる。

図6(b)にはコレクタ電位のピーク値を示す。これは  $R_b$  の値が小さいほど大きくなっている。また、 $N$  による変化は  $N$  が比較的小さいところのみであり、このときコレクタのピーク値には変化があるものの、 $N$  が大きくなるとピーク値は  $N$  によらず一定になることが分かった。 $R_b$  の値との関係としては、 $R_b$  が大きい（これはコレクタ電流が小さいことに対応）ほどピーク値は小さくなることが分かった。また、 $R_b$  が  $20\ \Omega$  のときの  $N$  とピーク値の関係は、他の  $R_b$  のものと異なる振る舞いをしており、これはコイルの時定数が大きく、大きな電流が流れる時間も長いため、トランジスタがOFFになったときの変化も大きくなるため、より大きな誘導起電力が発生するからであると考えられる。またピーク値が  $N$  の大きいところで頭打ちになるのは、この回路でコイルに流れる電流を決めるものはベース電流であり、コイルの磁気エネルギーの容量に満たないうちに電流が一定になってトランジスタがOFFになるからであると考えられる。

本報告で作成方法を紹介するにあたって、発振周波数が十分高いながら容易に作成可能な、簡素な構成を目指したため、コイルの巻き数は極力抑えて  $N = 12$  とした。このとき有線出力の図2(a)では  $R_b = 200\ \Omega$  が最も高い発振周波数を与えているが、無線出力の図2(b)にすると発振しなかった。これは、無線で受信用コイルへのエ

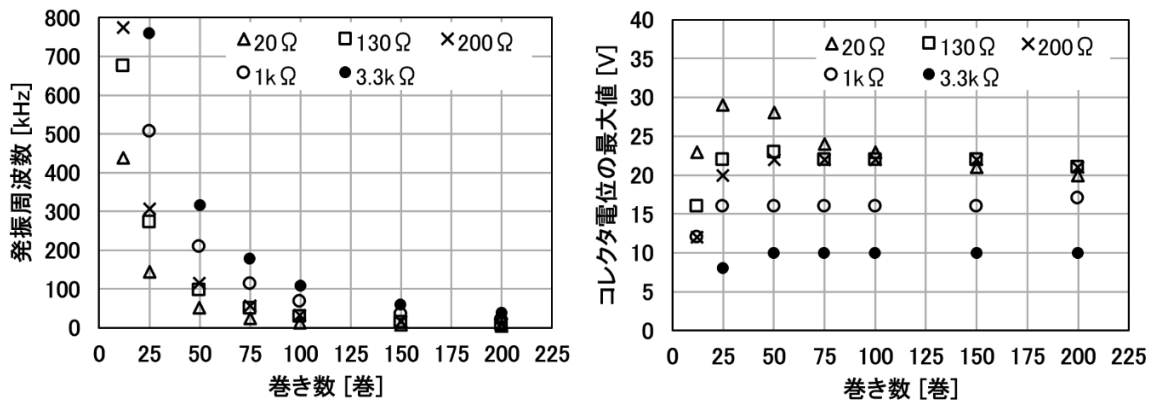


図6 コイルの巻き数とベース抵抗を変えたときの (a) 発信周波数、および (b) コレクタ電位のピーク値の変化

エネルギーの受け渡したためエネルギーの損失が影響しているものと考えられる。そこで、ベース抵抗に130Ωを用いたものを提示することにした。

## 5. まとめと展望

ブロッキング発振回路の特性を生かし、電磁誘導の応用教材として最も簡素なものを作ることができた。12巻程度という少ない巻き数のコイルでよいということは、中学校教員が自作することのできる教材として重要なポイントである。また、発振している様子はオシロスコープを通さなければ見えないが、むき出しの送信コイルに受信側のコイルを近づけるだけで、電源のない受信側のLEDが光るという現象は生徒の興味を喚起するだろう。特に、受信側にブラックボックス化された部分がないことは、仕組みを理解しやすくする上で重要である。また、使う素子数を減らしたためコストは抑えられている。1年に1回程度しか使用しない理科の教材としては有意なものである。

教員としては、エネルギーの受け渡しの説明も工夫し、容易にできるようにしたいと考える。また、本研究ではエネルギー効率を求めることはできなかった。エネルギーは保存するものであるが、損失もある。特にブロッキング発振回路を昇圧回路として使用した時のエネルギー変

換効率を調べ、仕組みへの理解につなげていくつもりである。さらに、このような簡素な回路は発展途上の国々も含め、各地の教員が自作することが可能である。この回路を使った授業展開を一例として、日本式科学教育を世界的に展開する予定である。

## 謝辞

この研究はJSPS科研費 20H0173, 18K02976の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- 1 岡村定矩, 藤嶋昭ほか「新編 新しい科学2」(中学校教科書 理科2年) 東京書籍 p.261, 2016年.
- 2 有馬朗人ほか「新版 理科の世界2」(中学校教科書 理科2年) 大日本図書 p.211, 2016年.
- 3 飯塚正明, 山口淑恵「ワイヤレス電力伝送の理解を目的とした電磁誘導教材の開発」千葉大学教育学部研究紀要 第67巻 (2019) pp.365~368.
- 4 日本電気技術者協会「電気技術解説講座 トランジスタの構造と基本特性(1)=バイポーラトランジスタ=」<https://jeea.or.jp/course/contents/02106/> 2020年10月30日閲覧

付録 A コイルの過渡現象

コイルに流れる電流が増加するとき、コイルには電圧降下が起こる。逆に、電流が減少するときには電圧の上昇が起こる。電圧降下は電流の減少をもたらす、電圧上昇は電流の増加をもたらすという点から、コイルには電流の時間変化への抑制効果がある。図 A-1(a) の回路であれば電流は  $I^{ON}(t) = (E/R)(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$  の関数形で時間変化することが微分方程式の解として導かれる。電流の初期値は  $I^{ON}(0) = 0$ 、その増大率の初期値は  $dI^{ON}/dt(0) = E/L$  となり、 $R$  によらない。時定数(初期の時間変化のままであれば最終値すなわち  $V_L(t \rightarrow \infty) = 0$  に至るのに要する時間)は  $L/R$  である。

さらに、電流の流れているコイルの回路を切断(スイッチを切る)ときには、図 A-1(b)の回路のように、抵抗値が巨大でほとんど電流の流れない抵抗  $r(\rightarrow \infty)$  がスイッチと並列に入っているものと考えて、スイッチ OFF の後も電流が流れるモデルにする。これは、間隙が狭ければ空気の絶縁破壊が発生するからである。空気の絶縁耐力(絶縁破壊を起こす電界強度)は  $3.0 \text{ V}/\mu\text{m}$  程度であることが知られており、それによると間隙が  $10 \mu\text{m}$  (髪の毛の 10 分の 1) では  $30 \text{ V}$  あれば放電し電流が流れる。このモデルでは、回路を開けた瞬間( $t = 0$ )には、開ける前の電流  $I = E/R$  が流れ続ける。また、合成抵抗  $r + R$  は  $r$  に近似できるため、電流は  $I^{OFF}(t) = (E/R)e^{-\frac{r}{L}t}$  の関数形で時間変化する。電流の増大率の初期値は  $dI^{OFF}/dt(0) = -(r/R)(E/L)$ 、時定数は  $L/r$  である。 $r/R = 10$  としたときの  $I^{ON}(t)$  と  $I^{OFF}(t)$  のグラフの概形を図 A-2(a) に示す。

コイルの過渡現象で注目すべき点は端子間電圧  $V_L(t)$  の時間変化である。これは、数式としては  $V_L(t) = -L dI/dt$  で与えられる。スイッチが入った後は  $V_L^{ON}(t) = -L dI^{ON}/dt = -Ee^{-\frac{R}{L}t}$ 、スイッチが切れた後は  $V_L^{OFF}(t) = (r/R)Ee^{-\frac{r}{L}t}$  となる。いずれも、スイッチの状態が変わる瞬間を  $t = 0$  としている。これらの初期値は  $V_L^{ON}(0) = -E$ 、 $V_L^{OFF}(0) = (r/R)E$  であり、時定数はそれぞれ  $I^{ON}(t)$ 、 $I^{OFF}(t)$  の時定数と同じである。ON 時の電圧に比べて、OFF 時の電圧は初期値の大きさが  $r/R$  倍、時定数は  $R/r$  倍になる。電圧のグラフの概形を図 A-2(b) に示す。コイルの端子間にはスイッチの ON・OFF

時に短い時間幅のパルス電圧が発生し、OFF 時には大電圧短時間パルス電圧が生じる。この特徴を利用して、電源電圧より高い電圧を出力することができる。

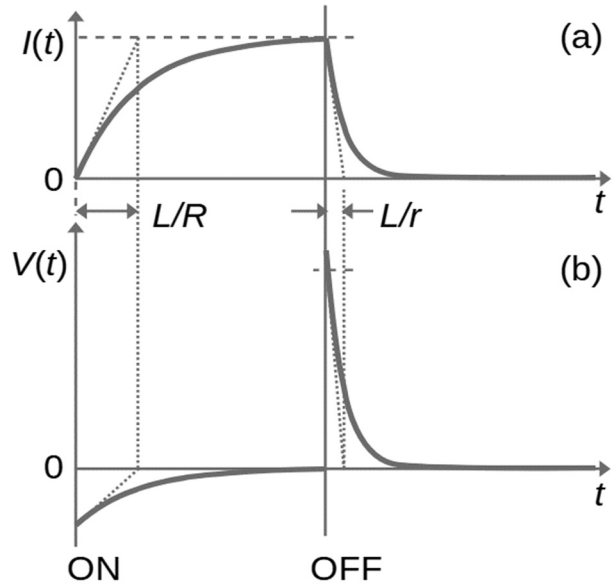


図 A-2 コイルの(a)電流と(b)電圧の時間変化(概形)

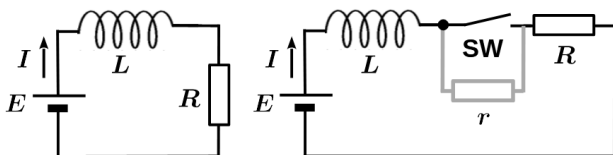


図 A-1 (a) LR 回路, スイッチ ON の後と, (b) OFF の後