

パルス繰り返し周波数方式に基づき演奏する 半導体式テスラコイルの開発

学生員 寺口 直希* 正員 南 政孝*

Development of Musical Solid State Tesla Coil based on Pulse Repetition Frequency Method

Naoki Teraguchi*, Student Member, Masataka Minami*, Member

(2018年9月25日受付, 2018年11月12日再受付)

A Tesla coil is a resonant transformer circuit that generates very high voltages which are made to arc through the air. Recently, a solid state Tesla coil was produced according to developing the semiconductor. In addition, the solid state Tesla coil makes sound by the air discharge. Hence, the sound is used as musical devices. In the past, the musical solid state Tesla coils are generated by PWM (Pulse Width Modulation) method. However, it is difficult to use the high pitch sound and the tone color. This paper investigates the musical solid state Tesla coil by using not PWM method but PRF (Pulse Repetition Frequency) method. As the result, the proposed musical solid state Tesla coil provides good sound.

キーワード: 半導体式テスラコイル, 演奏するテスラコイル, パルス繰り返し周波数方式

Keywords: solid state tesla coil, musical tesla coil, PRF (pulse repetition frequency) method

1. はじめに

テスラコイルとは、ニコラ・テスラ (1856-1943) によって考案された高周波高電圧を出力し、空間の浮遊容量と共振させて放電を発生させる変圧器である⁽¹⁾⁽²⁾。ニコラ・テスラは、このテスラコイルを利用して、無線通信やワイヤレス給電⁽³⁾⁽⁴⁾の基礎を築いた⁽¹⁾。その後、テスラコイルは様々な形で応用され、フリーラジカル (遊離基) の発生⁽⁵⁾や電子銃⁽⁶⁾、レーザーによる放電のサポート⁽⁷⁾として用いられている。テスラコイルの設計として、従来はスパークギャップと共振トランスを用いていたが⁽⁸⁾、近年の半導体素子の発展により、スイッチング素子を用いた半導体式テスラコイルの設計が進んでいる⁽⁹⁾。

設計における各パラメータのモデリング⁽¹⁰⁾や2次コイルの周りの電磁場を計算してギャップや浮遊容量でどの周波数でどの次数の共振が生じて放電するかを理論的に計算した研究⁽¹¹⁾も進んでいる。さらに半導体式テスラコイルの台頭により、動作周波数の高周波化に伴い、コイル自体の小型化が可能になり、ミニテスラコイルまたは携帯テスラコイルが開発されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。一方で、火花放電 (コロナ放電) 実験の教材として用いられることもあり、国内でもテス

ラコイルの試作や解析が進んでいる⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁷⁾。

本研究では、テスラコイルの放電音に注目し、演奏するテスラコイルを開発する。従来の演奏する[†]テスラコイル⁽¹⁸⁾⁻⁽²¹⁾は、主に PWM (Pulse Width Modulation; パルス幅変調) 方式で駆動されていることが多い。しかしながら、PWM 方式の場合には音楽データの音の高さや音色によりテスラコイルによる演奏に向き不向きがある。

そこで本論文では、PWM 方式ではなく PRF (Pulse Repetition Frequency; パルス繰り返し周波数) 方式によるテスラコイルの駆動を提案し、演奏するテスラコイルを開発する。開発した演奏するテスラコイルによる演奏結果は本文には示すことが困難であるため、動画データとしてサイトに表示している⁽²²⁾⁽²³⁾。

2. 半導体式テスラコイルの主回路構成

本章では、半導体式テスラコイルの主回路構成について述べる。まず、半導体式テスラコイルの主回路トポロジーと動作について簡単に示す。そして、半導体式テスラコイルの回路部分であるハーフブリッジインバータの動作と放電原理について述べる。

〈2・1〉 半導体式テスラコイルの動作 本節では、半導体式テスラコイルの簡単な動作について説明する。Fig. 1

* 神戸市立工業高等専門学校 電気工学科
〒 651-2194 神戸市西区学園東町 8-3
Kobe City College of Technology
8-3, Gakuenhigashi, Nishi-ku, Kobe 651-2194, Japan

[†] 英文では、Musical Tesla Coil や Singing Tesla Coil, Audio Tesla Coil と呼ばれている。

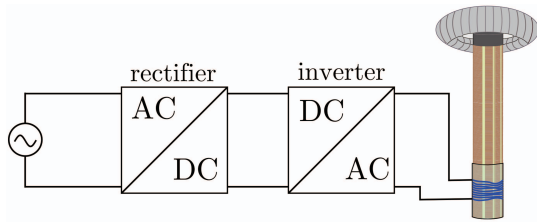


Fig. 1. Schematic diagram of solid state Tesla coil.

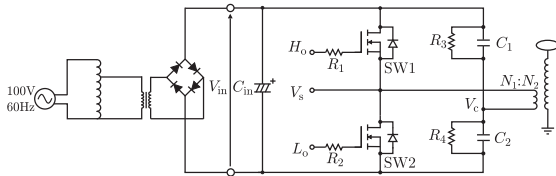


Fig. 2. Solid state Tesla coil and its driving circuit.

に半導体式テスラコイルの概略図を示す。駆動回路部分は、商用交流電源 (AC 100 V, 60 Hz) から整流器を介して直流に変換し、ハーフブリッジインバータにより高周波交流を出力する。ハーフブリッジインバータ出力端の先に円柱が接続されている。円柱に一次側 (青色) と二次側 (黄土色) に巻数の異なるコイルをそれぞれ巻いており、空芯トランスの構造になっている。そして、二次側巻線の上部に接続しているトロイド部から放電が発生する構造になっている。

Fig. 2 に Fig. 1 の駆動回路部分を示す。まず、商用交流電源から可変変圧器 (LS-100-10, 山菱電機 (株) 社製) により入力交流電圧を調整する。次に電氣的絶縁のため、絶縁トランス (LZ22-015KF, 豊澄電源機器 (株) 社製, 100 V:100 V) を用いる。変圧した交流電圧をダイオードブリッジ整流器 (KBPC5010, HY Electronics 社製) と平滑キャパシタ C_{in} により、直流電圧 80 V に変換する[†]。その後、インバータにより直流の入力を交流に変換する。最後に、空芯トランスの巻数比により一次側の電圧を昇圧して二次側に高電圧を印加する。また、Fig. 4 における等価回路における二次側巻線コイルの L と対地静電容量の C を共振させることで、二次側巻線に流れる電流を大きくし、空中放電を発生させる。空中放電の詳細は、〈2・3〉節で述べる。

〈2・2〉 ハーフブリッジインバータの動作 本節では、前節で述べた半導体式テスラコイルの駆動部分である、ハーフブリッジインバータの動作原理について説明する。ハーフブリッジインバータは、複数の半導体スイッチング素子の ON と OFF の切り替えにより直流を交流に変換する変換器である⁽²⁴⁾。Fig. 2 では、半導体スイッチング素子が 2 つのハーフブリッジインバータを使用する。Table 1 にハーフブリッジインバータのパラメータを示す。

次に、ハーフブリッジインバータの動作について述べる。SW1 が ON, SW2 が OFF の場合には、 V_s は入力電圧 V_{in}

[†] 本文では割愛するが、直流電圧値を変化させて放電音を評価した際、80 V が放電音が安定して発生したため、ここではこの値に設定している。

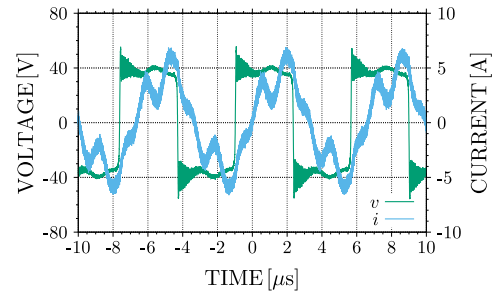


Fig. 3. Output voltage and output current waveforms of half bridge inverter.

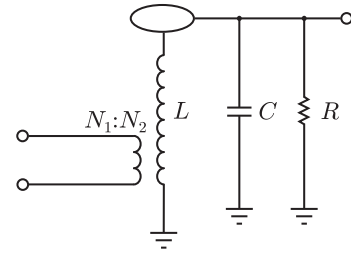


Fig. 4. Equivalent circuit of secondary winding.

Table 1. Experimental conditions.

Input voltage	V_{in}	80 V
Smoothing capacitor	C_{in}	740 μ F
Diving capacitors	C_1, C_2	12 μ F
Diving resistors	R_3, R_4	100 k Ω
Gate resistors	R_1, R_2	10 Ω

の電位となる。 V_c はコンデンサおよび抵抗の分圧により、常に $V_{in}/2$ の電位である。これにより、ハーフブリッジインバータには $V_{in} - V_{in}/2 = V_{in}/2$ の電圧が出力される。一方、SW1 が OFF, SW2 が ON の場合には、ハーフブリッジインバータには $V_{in}/2 - V_{in} = -V_{in}/2$ の電圧が出力される。このように 2 つの半導体スイッチング素子の ON と OFF を切り替えることで直流電圧を交流電圧に変換することが可能となり、スイッチングパターンにより $\pm V_{in}/2$ の矩形波が出力される。Fig. 3 に電源電圧 80 V 印加時のハーフブリッジインバータの出力電圧電流波形を示す。電圧波形は $\pm V_{in}/2 = 40$ V の矩形波であり、電流波形は矩形波の \pm に合わせて、線形的に上下している。これは、インバータ出力端に前述した空振トランスの一次コイルが接続されているためである。また、電圧および電流の脈動は V_{in} の脈動によるものであると考えられる。

〈2・3〉 空中放電の原理 本節では、半導体式テスラコイルの二次側の放電部について説明する。Fig. 1 の円柱には一次側巻線 (青色) と二次側巻線 (黄土色) が巻いている。巻数比は $N_1:N_2 = 8:2000$ であり、一次側に印加された電圧が 250 倍に昇圧される。本実験ではこのトランスに印加する電圧を ± 80 V とするため、二次側には約 10 kV の電圧が印加される。ここで Fig. 4 に、このトランスと対地との等価回路を表現する。二次側巻線の L と対地静電容量 C による固有周波数とハーフブリッジインバータからの高

周波交流の周波数が一致すると、共振が発生し、空中放電が発生する。さらに、二次側巻線の先端部にトロイドを取り付けることで、対地静電容量 C を大きくし、二次側巻線 L との固有周波数を下げることが可能である⁽²⁾。そのため、安定した空中放電が実現可能になる。実際、本論文の半導体式テスラコイルは約 150kHz [†] で駆動している。

3. 駆動方式と演奏結果

本章では提案する PRF 方式による駆動原理とその演奏結果について述べる。まず PRF 方式について簡単に示す。その後、ハーフブリッジインバータの制御回路の構成について述べる。最後に半導体式テスラコイルによる演奏原理を説明する。演奏原理として、楽譜をプログラムしたものと鍵盤回路による外部入力によるものとの2種類を説明する。

〈3・1〉 提案する PRF 方式 本節では、半導体式テスラコイルを駆動する PRF 方式について説明する。Fig. 5 に本論文で提案する PRF 方式の波形の模式図を示す。一般的に PRF とは、通信やレーダーの分野において1パルスが繰り返される周波数のことを意味している⁽²⁵⁾。本論文では、この1パルスの内部にさらに周波数の高いパルスを含む波形を提案する。Fig. 5 に示すように、PRF が細かいパルスを塊として1パルスとした場合の周波数に、半導体式テスラコイルの固有周波数 (Eigen frequency) が細かいパルスの周波数に対応している。提案方式による波形生成により、PRF が演奏される音の役割を、固有周波数が半導体式テスラコイルの空中放電を実現する役割を担う。さらに、PRF の値と持続時間を変化させることで様々な音程と長さを調節できる。以上の原理により、演奏するテスラコイルを設計する。

ここで、提案する PRF 方式と従来の PWM 方式の差異を述べる。波形の生成方式だけを PRF 方式または PWM 方式にした場合の結果を比較する。Fig. 6 に同じ音楽データ (レ (D3), 約 146Hz) を入力した際の電圧波形をフーリエ変換した結果を示す。まず、Fig. 6 (a) の PRF 方式の結果に注目する。生成波形が矩形波であることから、基本波 (約 146Hz) に対して奇数次の高調波成分を含んでおり、その高調波成分が鋭く現れている。それ以外の周波数成分は概ね含まれていないことがわかる。一方、Fig. 6 (b) の PWM 方式の結果では、奇数次の高調波成分以外に、偶数次の高調波成分や低周波帯域の分散が大きく見られる。以上の結果より、演奏に使用するにあたり、PRF 方式が優位であると考えられる。

〈3・2〉 制御回路の構成 本節では、ハーフブリッジインバータの制御回路の構成および動作について説明する。Fig. 7 に制御回路の概略図を示す。本回路は、Arduino UNO (A000066, Arduino 社製) から出力する音楽データ信号 (PRF のパルスに相当) とオシレータ (LTC1799, リニアテクノロジー・コーポレーション社製) から出力する固有周

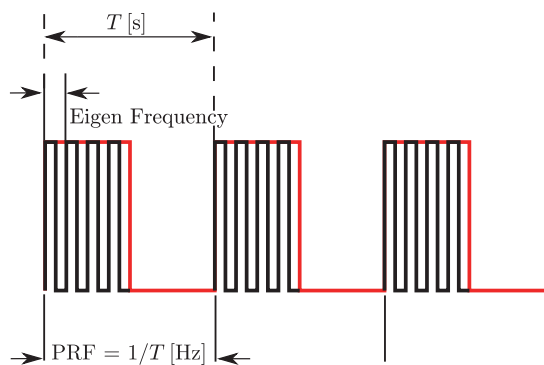


Fig. 5. Explanatory diagram of PRF.

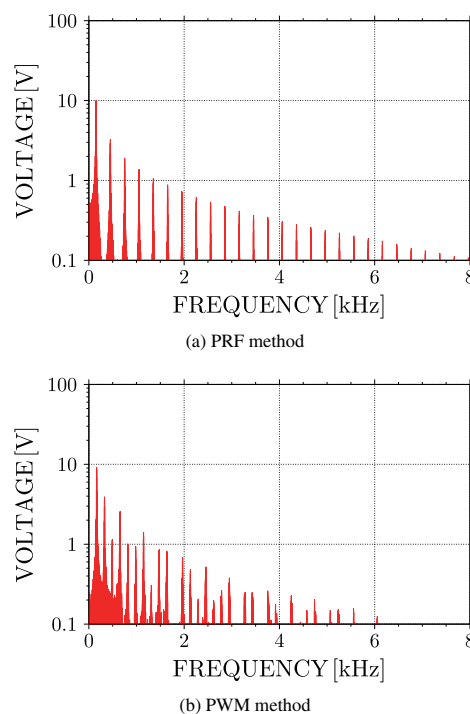


Fig. 6. Fourier expansion of output voltage waveforms: PRF and PWM methods.

波数のパルスの2つを掛け合わせた信号により、ハーフブリッジインバータをゲートドライバ回路 (Si8237BB, Silicon Labs 社製および IR2302, Infineon Technologies 社製) により駆動させる。ゲートドライバ回路は MOSFET や IGBT など半導体スイッチング素子を使用した電力変換回路において、主回路側と制御回路側を絶縁駆動するために使用される。そして、Fig. 2 の上下にある半導体スイッチング素子 (MOSFET) を上下反転させて駆動する。さらに、Fig. 8 に実際の制御回路の出力信号を示す。Fig. 8 (b) は (a) を拡大させたものであり、音楽データに合わせてインバータ駆動信号が出力されている。

次に、Fig. 9 に制御回路の構成を示す。Arduino UNO とオシレータからのそれぞれの信号を Si8237BB に入力し、電氣的に絶縁して信号を IR2302 に送る。IR2302 の \overline{SD} はシャットダウン機能であり、この端子に Arduino UNO からの音楽データ信号を入力することで、結果的に2つの信

[†] 実験日の環境により対地静電容量が変化するので、およその値を表記している。本論文に掲載している実験日の共振周波数は 138kHz であった。また、Fig. 3 のハーフブリッジインバータの出力波形は、別日に再測定したものであり、この日の共振周波数は 154kHz であった。

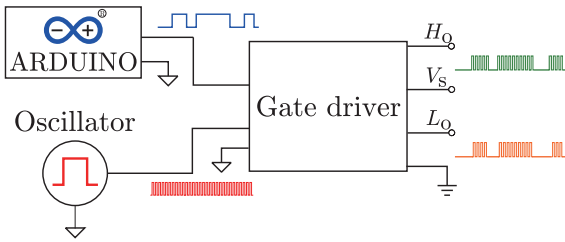
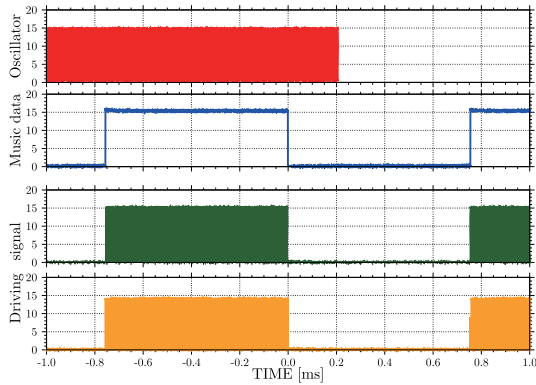
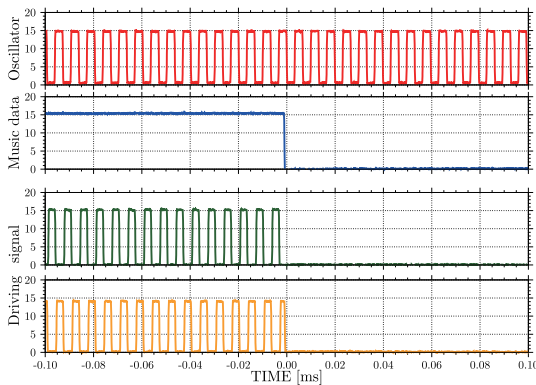


Fig. 7. Schematic diagram of control.



(a) Oscillator signal, music data, and driving signals



(b) Enlarged view of Fig. 8 (a)

Fig. 8. Signal waveforms in Fig. 7: oscillator signal, music data, and driving signals.

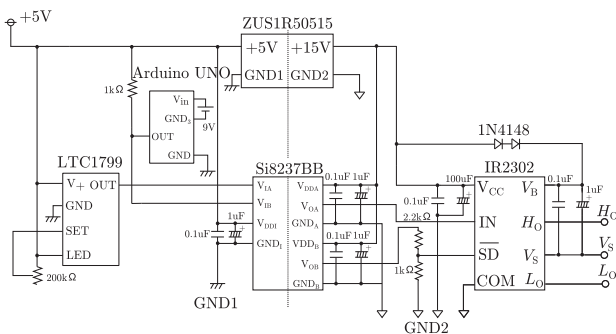


Fig. 9. Configuration of control circuit.

号が乗算される信号が出力される。そして、IR2302 から Fig. 2 の上下にある半導体スイッチング素子 (MOSFET) を駆動する。

〈3・3〉 楽譜入力による演奏 本節では、楽譜入力による半導体式テスラコイルの演奏原理について説明する。

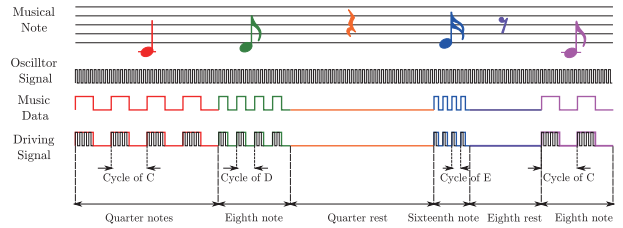


Fig. 10. Schematic of performance by musical note.

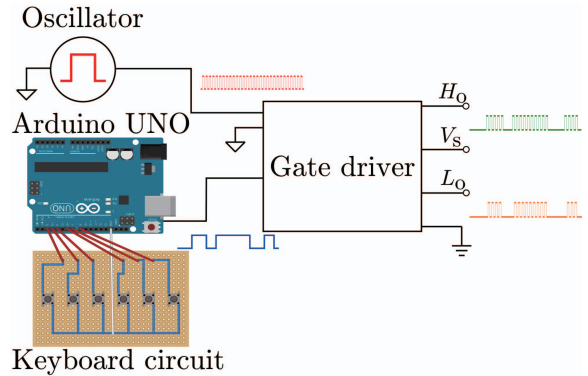


Fig. 11. Schematic of performance by keyboard circuit.

〈3・1〉節で演奏原理を説明した通り、音を出すためには PRF のパルスを音楽データ信号とする必要がある。一般的な曲に楽譜がある場合は、それぞれの音程と長さが決められている。そのため、楽譜の情報から音楽データを出力すれば演奏が可能であると考えられる。

Fig. 10 に演奏原理の概略図を示す。図の上段から、楽譜、オシレータ信号、音楽データ信号、インバータ駆動信号である。オシレータからは常に固有周波数の信号を発生している。そして、Arduino UNO から楽譜に合わせて特定の音の高さと周期 (例えば、ド (C) の 4 分音符) をもつ音楽データ信号を出力している。Arduino UNO のプログラムとして楽譜に合わせた音楽データを打ち込む必要がある。上述の方法により、半導体テスラコイルを駆動して演奏した結果を動画⁽²²⁾として示す。

〈3・4〉 鍵盤入力による演奏 本節では、鍵盤入力による半導体式テスラコイルの演奏原理について説明する。放電音を変化させる原理については前節と同じであり、楽譜入力による音楽データ信号の生成方法が異なる。

Fig. 11 に鍵盤回路による制御回路を示す。前節と異なる点として、Arduino UNO に鍵盤回路を接続し、タクトスイッチによる ON/OFF を入力している。Arduino UNO 内部で、音程 (例えば、ド (C) やレ (D)) に対する PRF を設定しておき、タクトスイッチの ON 時に対応した音程に対する PRF のパルスを出力する。音を持続する時間 (PRF のパルス継続時間) はタクトスイッチを ON し続けた時間としている。そのため、ピアノなどの演奏装置と同様に半導体式テスラコイルを駆動し、演奏することが可能である。

上述の方法により、半導体テスラコイルを駆動して演奏した結果を動画⁽²³⁾として示す。

4. おわりに

本論文では、PRF 方式による演奏するテスラコイルを開発し、その駆動原理を説明するとともに演奏結果を示した。今後は従来の PWM 方式のように音声波形を用いて、提案した PRF 方式が使用可能になるように開発を進める予定である。

謝 辞

本研究の実験補助として活動して頂きました、河村知輝氏、阪部智城氏、塩井太介氏、友枝功佑氏(2018年3月神戸高専卒業)、阿部佑貴氏、大内光氏、近藤小春氏(2019年3月神戸高専卒業予定)には、この場を借りて謝意を表します。さらに、本研究の実験環境の一部は、神戸高専道平雅一教授と茂木進一教授から提供して頂きました。深く感謝致します。

文 献

- (1) 山村 昌:「ニコラテスラとその業績」, 電學誌, Vol.111, No.5, pp.421-425 (1991)
- (2) G.L. Johnson: "Solid state Tesla coil", Режим доступа: <http://www.g3ynh.info/zdocs/refs/Tesla> (2001)
- (3) B.M. Makaa: "Wireless power transmission using solid state Tesla coils", Proc. of Sustainable Research and Innovation Conference, pp.23-29 (2015)
- (4) P.D.A. Aziz, A.L.A. Razak, M.I.A. Bakar, and N.A. Aziz: "A study on wireless power transfer using Tesla coil technique", Proc. of 2016 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA), pp.34-40 (2016)
- (5) C. Bamford, A. Jenkins, and J. Ward: "The Tesla-coil method for producing free radicals from solids", *Nature*, Vol.186, No.4726, pp.712-713 (1960)
- (6) M. Paraliiev, C. Gough, and S. Ivkovic: "Tesla coil design for electron gun application", Proc. of 2005 IEEE Pulsed Power Conference, pp.1085-1088 (2005)
- (7) M. Henriksson, J.-F. Daigle, F. Théberge, M. Châteauneuf, and J. Dubois: "Laser guiding of Tesla coil high voltage discharges", *Opt. Express*, Vol.20, No.12, pp.12721-12728 (2012)
- (8) K. D. Skeldon, A. I. Grant, and S. A. Scott: "A high potential Tesla coil impulse generator for lecture demonstrations and science exhibitions", *Am. J. Phys.*, Vol.65, No.8, pp.744-754 (1997)
- (9) G.L. Johnson: "Building the world's largest Tesla coil-history and theory", Proc. of the Twenty-Second Annual North American Power Symposium, pp.128-135 (1990)
- (10) V. Kolchanova: "Computational modeling of the Tesla coil parameters", Proc. of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists Modern Technique and Technologies, 2002. MTT 2002., pp. 32-33 (2002)
- (11) J. Voitkans and A. Voitkans: "Tesla coil theoretical model and its experimental verification", *Electr. Control & Commun. Eng.*, Vol.7, No.1, pp.11-19 (2014)
- (12) K.D. Skeldon, A.I. Grant, G. MacLellan, and C. McArthur: "Development of a portable Tesla coil apparatus", *Eur. J. Phys.*, Vol.21, No.2, pp.125-143 (2000)
- (13) M. Farriz, A. Din, A. Rahman, M. Yahaya, and J. Herman: "A simple design of a mini Tesla coil with dc voltage input", Proc. of 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), pp.4556-4559 (2010)

- (14) 松本 聡・側高正信・三浦俊平・水上義規:「テスラコイルの製作と電気的特性」, 平成 21 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, pp.261-266 (2009)
- (15) 加藤正平:「共振形変圧器(テスラコイル)の電磁界解析」, 平成 23 年電気学会電力・エネルギー部門大会, p.24 (2011)
- (16) 橋本浩輔・齋藤拓也・加藤正平・里 周二:「空芯型共振変圧器(テスラコイル)の動作解析」, 平成 29 年電気学会全国大会, p.7-076 (2017)
- (17) 加藤正平・橋本浩輔・里 周二:「テスラコイルのサージ解析-1 次回路のパラメータ解析-」, 平成 29 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, p.103 (2017)
- (18) B.M. Jos, N. Naveen, N. Jose, T. Cherian, and K. Vishnu: "Audio modulated solid state Tesla coil", *Trans. Eng. & Sci.*, Vol.2, No.5, pp.65-68 (2014)
- (19) C.-D. Ghilintă, S.C. Stegaru, T. Popeea, and N. Tăpuș: "Portable audio-modulated Tesla coil for demonstrative actions", Proc. of 2015 14th RoEduNet International Conference-Networking in Education and Research (RoEduNet NER), pp.238-241 (2015)
- (20) J. Long, J. Bailey, J. McVay, D.A. Carnegie, and A. Kapur: "Improving the musical expressiveness of Tesla coils with software", *ICMC*, pp.202-205 (2015)
- (21) Ø. Smith: "Analysis of design parameters in a musical dual resonant solid state Tesla coil", Master's thesis (NTNU, 2017)
- (22) <https://youtu.be/SJemToN3HL4>
<https://youtu.be/eTRaNtewhxE>
<https://youtu.be/h9CDeroh5gE>
<https://youtu.be/yWbzhgdGJ1Ss>
<https://youtu.be/4nNKMipBjY>
- (23) <https://youtu.be/Ae4mHwQoKfA>
- (24) N. Mohan, T.M. Undeland, and W.P. Robbins: *Power electronics: converters, applications, and design*, 3rd Ed., John Wiley & Sons (2002)
- (25) 深尾昌一郎・浜津享助:「気象と大気のレーダーリモートセンシング」, pp.69-70, 京都大学学術出版会 (2005)

寺口直希 (学生員) 1999年1月4日生。2014年4月神戸市立工業高等専門学校電気工学科入学, 2019年3月卒業予定。同年4月同校専攻科電気電子工学専攻に進学予定。



南政孝 (正員) 1985年11月9日生。2010年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。2013年3月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。2013年4月神戸市立工業高等専門学校助教, 2014年4月同講師, 2017年4月同准教授, 現在に至る。博士(工学)。パワーエレクトロニクスに関する研究・教育に従事。2018年4月~2019年3月スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)パワーエレクトロニクス研究室にて客員教授。平成20年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞, 2017年電気学会産業応用部門優秀論文発表賞受賞。電子情報通信学会, システム制御情報学会会員。

