

光線力学療法用体内デバイスへの角度ずれを考慮した立体配置型 複数送電コイルシステムの構築と特性解析

学生員 高橋 美優 正 員 居村 岳広 フェロー 堀 洋一（東京理科大学）

Construction and Characterization of Multiple Power Transmission Coil System for In-Vivo Implanted Medical Device Considering Angular Misalignment for Photodynamic Therapy

Miyu Takahashi, Student Member, Takehiro Imura, Member,
Yoichi Hori, Fellow (Tokyo University of Science)

Photodynamic Therapy (PDT) offers a minimally invasive cancer treatment by activating photosensitizers with light. However, current PDT methods are limited to shallow tumors due to direct light delivery requirements. To enable deep-tissue treatment, implantable light sources powered by Wireless Power Transfer (WPT) are proposed. A major challenge is reduced efficiency from misalignment between coils. This study proposes a WPT system with multiple transmitter coils and phase control based on the receiver's orientation, enabling stable power delivery despite angular shifts. The approach allows for simplified, miniaturized implant design and was validated through theoretical and electromagnetic analysis.

キーワード：光線力学療法, ワイヤレス電力伝送, がん治療

Keywords : Photodynamic Therapy, Wireless Power Transfer, Cancer Treatment

1. 序論

がんは主要な死因のひとつであり、2020年には約1000万人が、がんによって命を落としたと報告されている⁽¹⁾。現在一般的に確立されているがん治療法には、外科療法、放射線療法、化学療法の3つがあるが、いずれも身体への侵襲や副作用といった課題がある。そのため、より低侵襲で副作用の少ない治療法の開発が進められている⁽²⁾⁽³⁾。

本稿では、低侵襲治療法のひとつとして注目されている光線力学療法（Photodynamic Therapy : PDT）に焦点を当てる。PDTは、がん細胞に選択的に集積する光感受性物質（光増感剤）を投与後、特定の波長の光を照射することで、一重項酸素と呼ばれる活性酸素（ROS）を生成させ、がん細胞を選択的に死滅させる治療法である⁽⁴⁾。（Fig.1）PDTの特徴としては、正常組織への治療が比較的軽微であることに加え、がん細胞周辺の血管にも障害を与えることで再発抑制効果が期待できる点が挙げられる。

しかしながら、現在のPDTでは光ファイバを用いた直接照射が前提となるため、治療可能ながんの部位は限られており、肝臓や膵臓などの深部臓器への適用は困難であった。これに対し、近年では体内に光源を埋め込む技術が提案されており、深部臓器への治療の可能性が広がると期待

されている。⁽⁵⁻⁹⁾。

このような体内埋め込み型の受電デバイスを用いるには、デバイスの小型化・薄型化に加え、体内での角度ずれに対する耐性が重要な課題となる。送電側と受電側の結合が弱まるため、患者が治療中に体勢を変えることが困難となり、身体的負担が増す。そこで本稿では、複数の送電コイルを用いたWPTシステムを提案し、受電側デバイスの角度変化に対しても安定した電力供給を可能とすることでこの課題に対応する。本提案では、比較的自由的な設計が可能な送電側で角度ずれによる電力低下を補償することで、受電側に複雑な電圧制御回路などを搭載する必要がなく、受電側の構造の簡素化と小型化を実現する。提案する手法は理論解析と電磁界シミュレーションにより検証する。

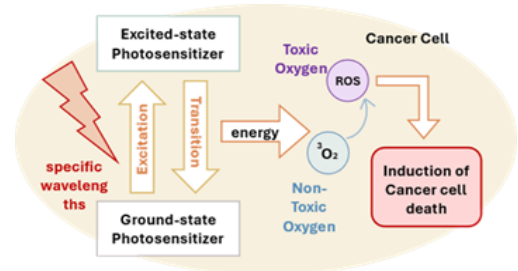


Fig. 1 PDT の作用原理

2. 研究概要

〈2・1〉 WPT システムの提案

体内埋め込み型 PDT 用 WPT デバイスでは、受電コイルが送電コイルに比べて小型であるため、送受電間の結合係数が小さくなる。本研究では低結合環境でも伝送距離に対して電流が線形に変化し、安定して大きな電流を供給できる S-P トポロジの磁界共振回路を採用している。また、受電側デバイスの小型化と回路の簡素化を重要視し、送電側の設計自由度を活用することで、体勢の変化などにより発生する結合係数の変動に対応可能な WPT システムを提案する。具体的には、複数の送電コイルを用いて受電コイルの角度に応じた送電電圧の振幅を調整し、LED への過電流や光量不足を防ぐことで、PDT において安定した光照射を実現する。

〈2・2〉 WPT システムの設計

Fig.2 には本システムにおける回路構成、Fig.3 には送受電コイルの構成を示す。Fig.2 より、電圧及び電流の関係式は式(1)のように表すことができる。ただし、式(1)における R_{CR}, X_{CR} はそれぞれ Rx の共振コンデンサと LED 等価抵抗の並列接続部分を等価回路に変換したときの実数成分、虚数成分である。本システムにおける動作周波数は 6.78MHz とする。

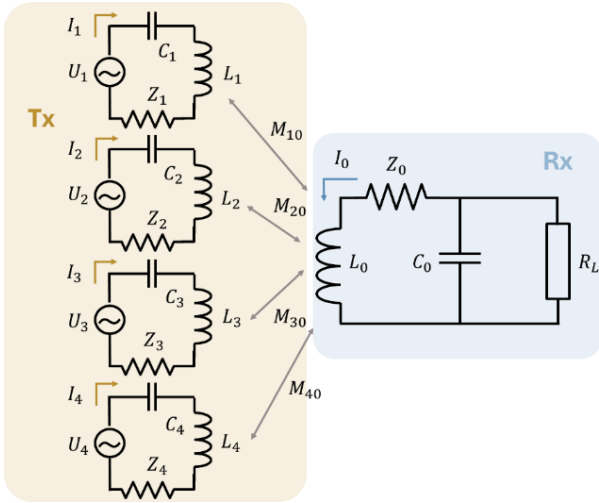


Fig. 2 提案する WPT システムの回路構成

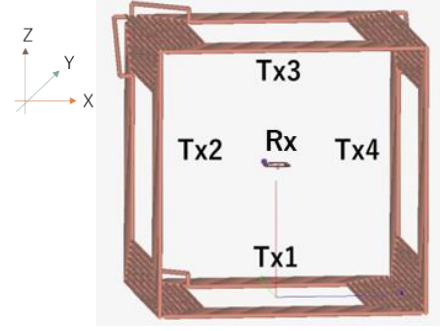


Fig. 3 送受電コイルの構成

Table.1 に本システムで用いたコイルの仕様、Table.2 に送電側の回路パラメータ、表 3 に受電側の回路パラメータを示す。

Table. 1 本システムで用いたコイルの仕様

	Transmitting side	Receiving side
Number of Turns	8	7
Size[mm]	200×200	20×20
pitch[mm]	5	0.5
Wire radius[mm]	1.8	0.26

Table. 2 送電側の回路パラメータ

Tx	
Parameters	Value
$L_1[\mu\text{H}]$	21.8
$C_1[\text{pF}]$	25.2
$Z_1[\Omega]$	0.45
$L_2[\mu\text{H}]$	21.6
$C_2[\text{pF}]$	25.5
$Z_2[\Omega]$	0.45
$L_3[\mu\text{H}]$	21.7
$C_3[\text{pF}]$	25.4
$Z_3[\Omega]$	0.45
$L_4[\mu\text{H}]$	21.7
$C_4[\text{pF}]$	25.4
$Z_4[\Omega]$	0.45

$$\begin{bmatrix} R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} & j\omega M_{14} & j\omega M_{10} \\ j\omega M_{12} & R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) & j\omega M_{23} & j\omega M_{24} & j\omega M_{20} \\ j\omega M_{13} & j\omega M_{23} & R_3 + j\left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right) & j\omega M_{34} & j\omega M_{30} \\ j\omega M_{14} & j\omega M_{24} & j\omega M_{34} & R_4 + j\left(\omega L_4 - \frac{1}{\omega C_4}\right) & j\omega M_{40} \\ j\omega M_{10} & j\omega M_{20} & j\omega M_{30} & j\omega M_{40} & R_0 + R_{CR} + j(X_{CR} + \omega L_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Table. 3 受電側の回路パラメータ

Rx	
Parameters	Value
$L_0[\mu\text{H}]$	1.45
$C_0[\text{pF}]$	381
$Z_0[\Omega]$	0.21

本稿での理論値算出、電磁界解析においては実際のデバイスのLEDは等価抵抗として $R_L = 10\Omega$ を用いた。また、式(1)の右辺にあたる送電コイルの電源電圧の振幅は θ を用いて以下の式(2)のように設定し、 θ を変化させることで合成磁界をRxの方向に向けることを目的とした。実際の理論解析、電磁界解析において $U = 20[\text{V}]$ とした。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \cos \theta \\ U \sin \theta \\ U \cos \theta \\ U \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. 提案したWPTシステムの評価

〈3・1〉 理論解析

理論解析では式(1)における複素数を含む係数行列と定数ベクトルを用いて連立方程式をたて、pythonの数値計算ライブラリを活用し最小二乗法に基づく数値計算を行った。この計算よりLEDの等価抵抗 R_L に流れる電流を算出した。RxがXZ平面上で角度ずれを起こした場合を想定し、送電側の電源電圧の振幅を変化させて特性解析を行った。角度ずれにより変化する値は送受電間の結合係数であるため、この値はFEKOによる電磁界解析により導出した。

結合係数の解析結果をFig.4に示す。

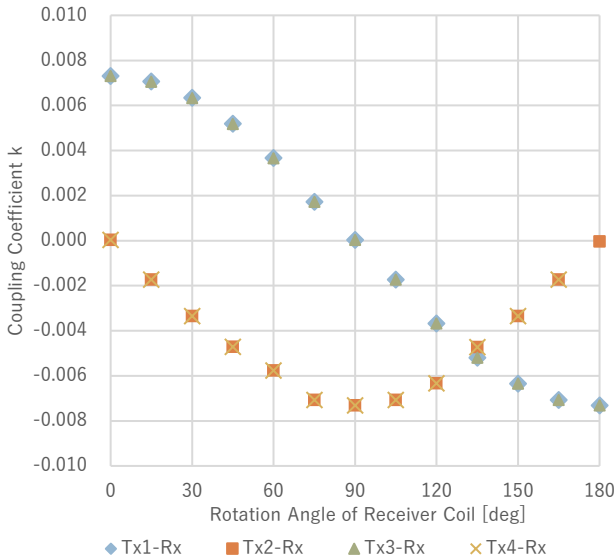


Fig. 4 Rxを回転させたときの結合係数の変化

Fig.4及び式(2)を用いて理論解析を行った。送電側の電源電圧の振幅に含まれる変数 θ を変化させたときの負荷(LEDの等価抵抗)に流れる電流値の変化を求め、その結果をFig.5に示す。

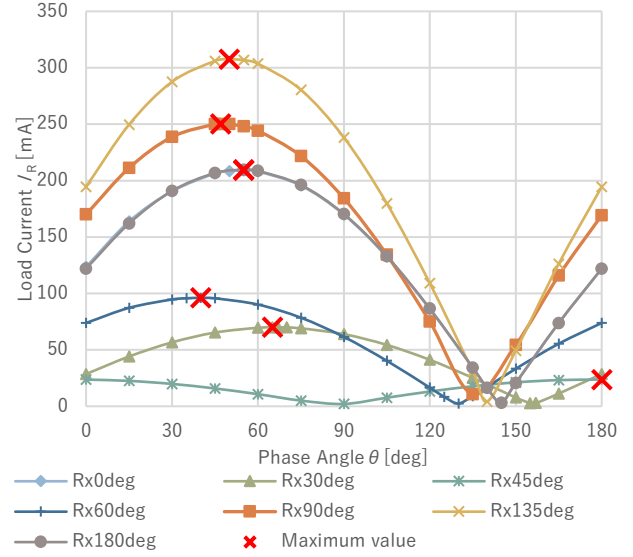


Fig. 5 理論解析結果

Fig.5において負荷電流値の極大値は×印で示した。ここで負荷に流れる電流値が極大となるときの振幅の位相角 θ を $\theta_{\max}$ とする。Fig.5よりRxの回転角が変化すると $\theta_{\max}$ が変化していることがわかる。このことから、Rxの角度ずれが起こり電力伝送効率が低下しても、電源電圧の θ を回転角に応じて変化させることで、LED部分に流れる電流を制御可能であることが理論的に証明された。

〈3・2〉 電磁界解析

Fig.3のようにTxを立体に4つ、内部にRxを1つ配置し、Rxの回転角に応じて、Txに繋がれた4つの電源の電圧振幅の θ を変化させたときの受電側の負荷部分(LED部分)に流れる電流の電磁界解析を行った。ここではモーメント法に基づくCEMソフトウェアであるFEKOを用いた。電源電圧は理論解析と同様に以下の式(2)のように設定した。

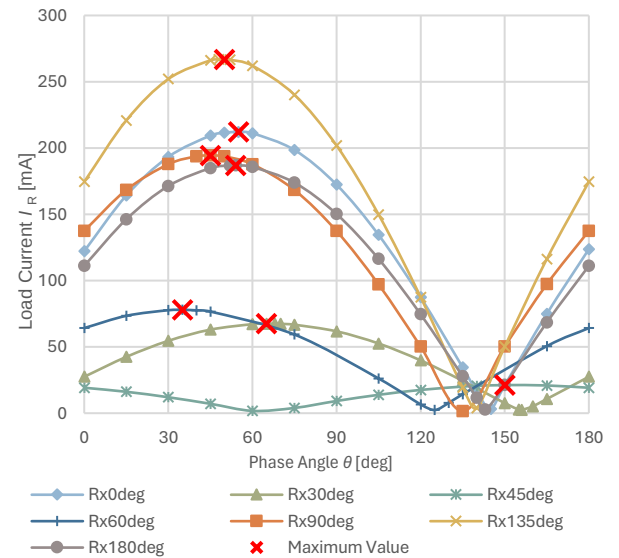


Fig. 6 電磁界解析結果

Fig.6 において負荷電流値の極大値は×印で示している。Fig.6 より Rx の回転角に応じて $\theta_{\max}$ が変化していることがわかる。これはRxの角度ずれに対しても、電源電圧の振幅の位相角 θ を回転角に応じて調整することで、LED 部分に流れる電流を制御可能であることを電磁界解析により示したものである。さらに電磁界解析の結果は理論解析とよく一致しており、提案手法の有効性が確認された。したがって、受電デバイスの角度変化に応じて送電側の電源電圧の振幅を調整することで、受電コイルに流れる電流を適切な値に制御し、安定した動作が可能であることが明らかとなった。

続いて、Fig.5 および Fig.6 の結果をもとに、 $\theta_{\max}$ が Rx の回転角にどのように依存するかを詳細に検討する。受電デバイスの各回転角における $\theta_{\max}$ の変化をまとめた結果を Fig.7 に示す。Fig.7 より、 $\theta_{\max}$ は回転角 x に対して、 $\tan$ 関数に類似した変化を示すことが確認された。また、ほとんどの回転角において $\theta_{\max}$ および負荷電流値について理論解析と電磁界解析の結果は一致した。一方で回転角が $40\sim 60^\circ$ 付近では、他の範囲と比較して両者の間に誤差が生じている。これは特に 45° 付近において、送電コイル間の相互結合により磁界の干渉が発生し、電力伝送効率が低下することで負荷電流値が小さくなること、加えて $\theta_{\max}$ の回転角依存性が $\tan$ 関数に類似して急峻に変化する領域であるため、わずかな計算誤差が負荷電流値の大きな誤差に繋がるのが原因と考えられる。

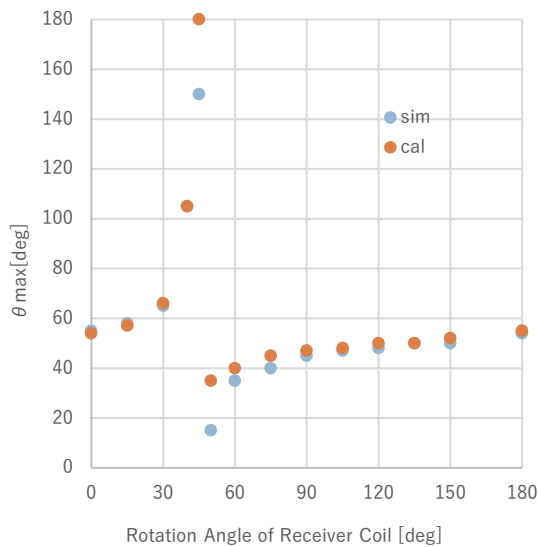


Fig. 7 Rx の各回転角における $\theta_{\max}$ の変化

4. まとめ

本研究では光線力学療法とワイヤレス電力伝送技術を組み合わせることで、従来の PDT では適用が困難とされていた深部臓器の治療を可能にする WPT システムを提案した。具体的には、人体に光照射デバイスを埋め込んで治療を行う際に想定される人体の動きによる結合係数の変化を起因とする、デバイスの破損や光量不足といった問題を解決するため、複数送電コイルを用いた設計自由度の高いシステムを構築した。

本システムでは受電デバイスの回転角に応じて送電側の各コイルに接続された電源電圧の振幅を設定し、複数コイルの振幅変化に伴う特性について理論解析と電磁界解析を行った。その結果、受電側の角度ずれに応じた送電側電圧の振幅調整により、受電コイルに流れる電流を適切な値に調整可能であることが示され、本システムの有用性が確認された。

ただし、本研究では実際の制御を行っておらず、あくまで設計段階での特性解析に基づいた検討である。そのため今後の展望として、実験によるシステムの動作検証や送電コイルの電源電圧をリアルタイムで調整するための制御アルゴリズムの実装を実現していく必要があると考えられる。

文 献

- (1) J. Ferlay, M. Ervik, F. Lam, M. Colombet, L. Mery, M. Piñeros, et al., "Global Cancer Observatory: Cancer Today," Lyon: International Agency for Research on Cancer (2020)
- (2) E. Schena et al., "Solutions to improve the outcomes of thermal treatments in oncology: Multipoint temperature monitoring," *IEEE J. Electromagn., RF Microw. Med. Biol.*, vol. 2, no. 3, pp. 172–178 (2018)
- (3) T. Abbasiasl et al., "A flexible cystoscope based on hydrodynamic cavitation for tumor tissue ablation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 69, no. 1, pp. 513–524 (2022)
- (4) D. Dolmans, D. Fukumura, and R. Jain, "Photodynamic therapy for cancer," *Nat. Rev. Cancer*, vol. 3, pp. 380–387 (2003)
- (5) M. Mitsunaga, T. Nakajima, K. Sano, P. L. Choyke, and H. Kobayashi, "Near-infrared theranostic photoimmunotherapy (PIT): Repeated exposure of light enhances the effect of immunoconjugate," *Bioconjug. Chem.*, vol. 23, no. 3, pp. 604–609 (2012)
- (6) R. Mansour, "Flexible wireless microsystem for implantable photodynamic therapy in bladder cancer treatment," *Preprint, Version 1, Research Square*(2025)
- (7) S. Rho, H. S. Sanders, B. D. Smith, and T. D. O'Sullivan, "Miniature wireless LED-device for photodynamic-induced cell pyroptosis," *Photodyn. Ther.*, vol. 47, 104209 (2024)
- (8) Yoshitaka Yasuda, Takehiro Imura, Yoichi Hori, Kenta Yokoi, Azusa Kanbe, MasakiKakihana, Shin Aoki, "Studies on Inducing Cancer Cell Death and Required Light Energy by Photodynamic Therapy Using Wireless Power Transfer", *Southern Power ElectronicsConference 2022(SPEC2022), Fiji*, (2022).
- (9) H. Abe, T. Imura, Y. Hori, N. Hayakawa, T. Tojo and S. Aoki, "Photodynamic Therapy with Wireless Power Transfer for Deep Organ Cancer Application," *2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE)*, Kyoto, Japan, pp. 509-512(2024).