

心臓ペースメーカー用容量結合型経皮電力伝送システムの伝送条件最適化

–最適伝送周波数の解析–

Optimizing Transmission Conditions of Transcutaneous Energy Transmission

Using Capacitive Coupling for Cardiac Pacemaker; Analysis of Optimum Transmission Frequency

○米谷早織（東京理科大学） 柴 建次（東京理科大学）

Saori KOMETANI, Dept. of Applied Electronics, Tokyo University of Science

Kenji SHIBA, Dept. of Applied Electronics, Tokyo University of Science

**Abstract:** Cardiac pacemaker is driven by battery and has to be replanted about every seven years for the life of battery. This paper proposes a transcutaneous wireless energy transmission system using capacitive coupling for a rechargeable cardiac pacemaker. In this study, the maximum energy transmission efficiency was calculated via electromagnetic analysis using transmission-line matrix method when the transmitting frequency was changed from 0.01 to 2000 MHz. The dimensions of two transmitting electrodes attached on surface of the human body and two receiving electrodes placed on the pacemaker are  $10 \times 50$  mm and  $5 \times 25$  mm, respectively. When a distance of transmitting electrodes is 30 mm, a maximum energy transmission efficiency of 1.67% at 500 MHz can be obtained.

**Key Words:** Energy transmission, Cardiac pacemaker, Capacitive coupling

1. はじめに

心臓ペースメーカーは心臓の電気興奮の発生及び伝達に障害がある患者に対し，人工的に電気刺激を発生させる医療治療機器であり，利用患者は年々増加傾向にある．装置寿命は平均 7 年であり，交換手術を必要とする<sup>(1)</sup>．これによる患者への負担が問題視されており，装置への経皮的電力伝送が研究されている．本稿では，電磁界解析シミュレーション（Transmission-Line Matrix Method; TLM 法）を用いて，容量結合方式を用いた電力伝送を行った場合の AC-AC 電力伝送効率，電磁生体影響の評価を行い，最適伝送周波数を検討した．

2. 容量結合型経皮電力伝送を用いた充電方法

本稿で提案する電力伝送システムは，体内の装置上に配置した 2 枚の受電電極に対して，2 枚の送電電極を体表面に水平に配置する（Fig. 1）．送受電電極間には生体組織があり，外部電源から送電電極へ送られた電流が，導電体である生体組織を介して受電側の抵抗  $R_L$  に流れることで電力伝送が可能となる．受電側で得られた電力は整流回路を通して，ペースメーカー本体の二次電池へ供給する．本研究の伝送システムでは，整流回路を省略し，抵抗  $R_L$  で得られた電力をもとに最適化を行う．

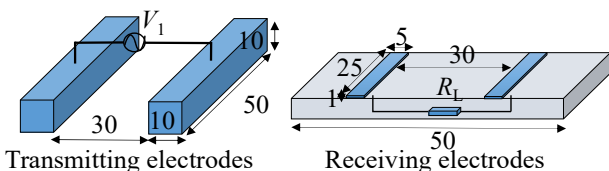


Fig. 1 Transmitting and Receiving electrodes

3. 電磁界解析モデル

心臓ペースメーカーは一般的に左鎖骨下 10-20 mm の皮下脂肪内に埋め込まれるため，今回は皮下 10 mm の位置に装置を埋め込んだ場合を想定した<sup>(2)</sup>．また，使用する心臓ペースメーカーの寸法は， $44 \times 52 \times 6$  mm（St. Jude

Medical 社製 Verity ADx XLVDR）をモデルとし，受電電極貼り付け可能部位をプラスチック部分を除いた  $25 \times 50$  mm と想定した．使用した解析モデルを Fig. 2 に示す．送電電極，受電電極の寸法は，それぞれ  $25 \times 10 \times 10$  mm， $25 \times 5 \times 1$  mm とし，送電電極間，受電電極間の距離をそれぞれ 30 mm とした．電極は，純チタン（導電率  $1.67 \times 10^6$  S/m）とした．皮膚，脂肪，筋の厚さはそれぞれ 4, 10, 10 mm とした．二次電池には Polymer Li-Ion Battery（3.7 V, 400 mAh）電池を使用することを想定し，等価抵抗  $200 \Omega$  の電池に対して，充電電圧 4 V 一定で，20 時間充電を行うと仮定した．受電電極間の送電電圧  $V_L$  は 10 V に固定した．

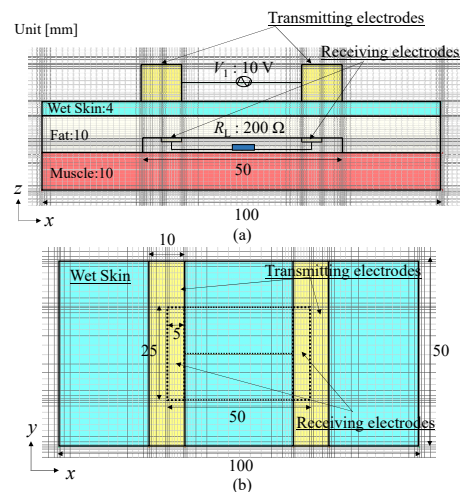


Fig. 2 Analysis model size of (a) x-z plane and (b) x-y plane

電磁界解析用の TLM メッシュサイズは最大 2.5 mm，最小 0.2 mm とした．Fig. 2 のグレーのラインは，TLM メッシュであり，電極付近は小さく区切っている．本稿では，検討周波数範囲を 0.01-2000 MHz とし，最大電力伝送効率と電磁生体影響を評価した．また，解析ソフトは，CST 社製 Microstripes 2011 を使い，生体組織の導電率と比誘電率

は周波数ごとに設定した<sup>(3)</sup>。

4. AC-AC 電力伝送効率と入力インピーダンスの解析結果

各周波数の最大電力伝送効率を Fig. 3 に，入力インピーダンスを Fig. 4 に示す．本解析モデルでは，伝送周波数 500 MHz において最大電力伝送効率 1.67% が得られた．また，周波数が高くなるのに伴い，入力インピーダンスは低下し，1MHz 以上において虚部成分が増加することが分かった．

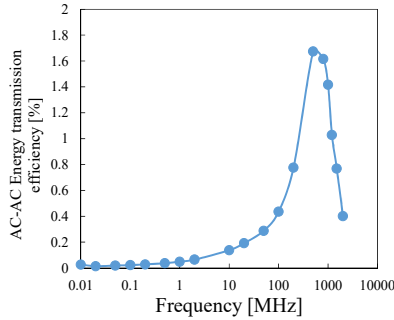


Fig. 3 Analysis result of maximum AC-AC energy transmission efficiency

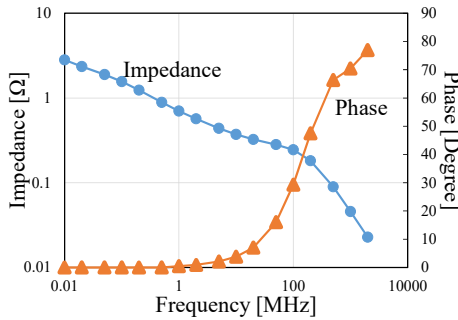


Fig. 4 Analysis results of input impedance and phase

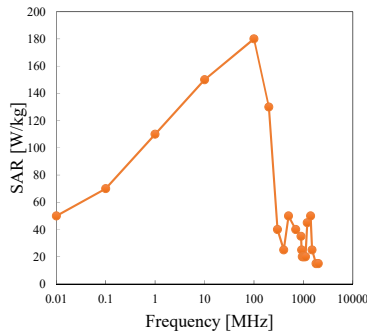


Fig. 5 Analysis result of maximum SAR

5. 電磁生体影響の解析

生体が電磁場に曝されたときの生体への影響は，大別して熱作用と刺激作用があり，前者は Specific Absorption Rate (SAR)，後者は体内電界強度  $E$  で評価される．今回は，局所 SAR を用いて本システムが生体へ与える影響を検討した．ここで， $\sigma$  [S/m] は人体組織の導電率， $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] は人体組織の密度， $E$  [A/m<sup>2</sup>] は体内電界強度である．

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho}$$

各周波数における最大 SAR を Fig. 5 に，500 MHz の SAR 分布図を Fig. 6 に示す．Fig. 6 の SAR は，電圧源，出力抵抗，および導線と同平面上の  $y=25$  mm における  $x-z$  断面図

の解析結果を示している．また，1 メッシュ毎の値を示している．その結果，送電電極のエッジ部分において 100 MHz で最大値 180 W/kg が得られ，2000 MHz で最小値 15 W/kg が得られた．

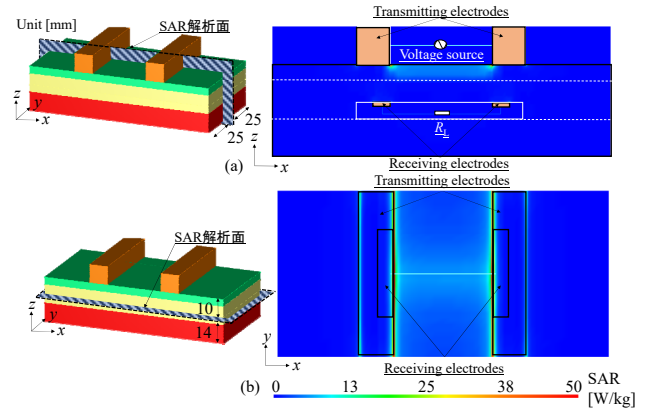


Fig. 6 SAR distribution of (a)  $x-z$  and (b)  $x-y$  plane at 500 MHz

一般的に SAR は，質量 10 g で平均された値が評価対象とされており，規制値には International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIPR) の基本制限値が良く用いられる<sup>(4)</sup>．しかし，本解析モデルは，質量 10 g に値する体積が，モデルの全体体積に対し大きい．そこで，SAR の解析結果から，最も SAR が大きかった付近の一边 20 mm の立方体領域  $V$  を切り取り，それを 1/60 の立方体に分割し，各立方体の平均 SAR を求めた．そして，それら全体を平均した値を領域  $V$  の平均 SAR とした．その結果，質量 10 g 平均 SAR は 500 MHz のとき 1.9 W/kg (1 メッシュ毎の最大値は 50 W/kg) となり，これは ICNIPR における制限値 2 W/kg を下回った．

6. まとめ

本研究の電力伝送システムでは，伝送周波数 500 MHz で最大電力伝送効率 1.67% が得られた．また，このときの質量 10 g 平均 SAR 値は 1.9 W/kg となり，電磁生体影響の制限値を下回った．

5. 参考文献

- (1) Toshihiro Nakamura, Tetsuji Eguchi, A Non Invasive Rechargeable Cardiac Pacemaker Battery System with a Transcutaneous Energy Transformer, Proc.IEEE, vol.20, no.1, pp.432-435, 1998.
- (2) 佐藤拓, 佐藤文博, 心臓ペースメーカ用経皮的電力伝送コイルの設計に関する考察, 日本応用磁気学会誌, Vol.27, No.4, pp.603-606, 2003.
- (3) Institute for Applied Physics (Italian National research council), An Internet resource for the calculation of the dielectric Properties of the Body tissues in the frequency range, 0.01-400MHz. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/#inizio>
- (4) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting Electromagnetic fields, Health Phys, vol.5, no.4, pp.494-522, 1998.