

人工心臓用体外結合型経皮トランスを用いた電力伝送

-液体付着時における伝送効率の測定-

Energy transmission of Externally Coupled Transcutaneous Transformer for artificial heart

-Measurement of the transmission efficiency at the time of liquid adhesion-

○ 吉川秀一(東京理科大学大学院) 澁谷健大(東京理科大学大学院) 柴 建次(東京理科大学)

Shuichi YOSHIKAWA, Tokyo University of Science

Takehiro SHIBUYA, Tokyo University of Science

Kenji SHIBA, Tokyo University of Science

Abstract: Externally coupled transcutaneous transformer (ECTT) is one of the main devices used for wirelessly transmitting electric power to an artificial heart. Although the ECTT's surface is covered with an insulating material, there may be a decline in its efficiency because of the adhesion of liquid caused by sweating, bathing, rain etc. In this study, the transmission efficiency of the ECTT in a NaCl solution of 6 % concentration was measured and analyzed. From the results, it was clear that the difference between the efficiency of the ECTT in the NaCl solution and in air was less than 3%.

Key Words: Externally Coupled, Transcutaneous Transformer, Energy Transmission, NaCl

1. 緒言

人工心臓へ駆動用エネルギーを非接触で供給する方法として電磁誘導によって体外から体内にワイヤレスでエネルギー供給するものがある。その方法の一つとして体外結合型経皮トランス (ECTT: Externally Coupled Transcutaneous Transformer) を用いる方法がある⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。電線が皮膚を貫通することなく電力を供給できるので感染症の危険性もなく、患者の Quality of life の向上が見込める他、高効率な電力伝送が可能などの利点を有している。

ECTT の表面は日常生活防水および機械的な保護の目的でシリコーン等の絶縁材料で覆われているが、ECTT を装着して生活することを想定した場合、入浴や雨などの液体が絶縁材料上に付着することが考えられる。絶縁材料で完全に防水されていても、絶縁材料上に液体で作られた短絡コイルが追加形成され、伝送効率が低下する可能性がある。

本稿では液体付着時における電力伝送効率の測定を行い、さらに TLM 法 (Transmission Line Modeling Method) による電磁界解析⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾を行い、実測との比較を行ったので報告する。

2. 方法

2-1 体外結合型経皮トランスとその防水加工

ECTT の体外側 (1 次) コイルは、トロイダル型の磁性体 (Mn-Zn フェライト N30, SIEMENS 社製, 外径 25 mm, 内径 15 mm, 厚さ 10 mm, 断面積 50 mm²) にポリウレタン被膜銅リッツ線束を 10 回均等密着巻きしたものを用い、体内側 (2 次) コイルは同様のリッツ線を D 字型状に (D 字の直線部分を 50 mm, D 字の楕円弧の短半径を 30 mm) 10 回巻いたものを用いる。2 次コイルの一部は皮下に埋め込み、残りの部分を皮膚に覆われたままアーチ状に体外に突き出す。これを 1 次コイルを巻いた磁性体でクランプすることで、1 次コイルと 2 次コイルの相対的な位置関係に関わらず、高い伝送安定性が得られる。

本稿では液体の付着量が最も多い場合を想定して、ECTT を 2 種類の液体に浸けた状態で電力伝送効率の測定を行った。Fig. 1 に実験に用いた ECTT を示す。また Fig. 2 に液体

中に浸けた状態の ECTT と接続図を示す。

リッツ線部分に液体が触れると漏電することは明らかである。そのため、実験で用いる ECTT には漏電を防ぐためにあらかじめ防水加工を施した。この ECTT の防水加工として、1 次コイルの巻線を熱収縮チューブ (RS, 1.6 mm to 0.8 mm) で覆った。また、2 次コイルをエポキシ樹脂のパテ (セメダイン, エポキシパテ) を厚さが 0.1 mm になるように覆い、液体と直接触れるリッツ線部分を熱収縮チューブで覆ったものを使用した。

2-2 NaCl 水溶液の電気特性の測定

ECTT を浸す液体には、精製水、海水の 2 倍の濃度の NaCl 水溶液を用いた。各液体の比誘電率 ϵ_r と導電率 σ [S/m] を測定するために、3 cm × 3 cm × 3 cm のアクリルケースの両端にチタンの薄膜を電極として取り付けたものを作成し、LCR メータ (HIOKI, 3532-50) を用いて各液体の並列容量成分 C_p と並列抵抗成分 R_p を測定した。測定した値を用いて、(1)式より比誘電率 ϵ_r と導電率 σ を算出した。(1)式において $d=3$ cm, $S=9$ cm² とした。

$$\epsilon_r = \frac{C_p d}{\epsilon_0 S}, \quad \sigma = \frac{d}{R_p S} \quad [\text{S/m}] \quad (1)$$

2-3 エネルギー伝送効率の測定

精製水および NaCl 水溶液 (6 w/v%) を、それぞれ 10 cm × 10 cm × 10 cm のアクリルケースに 600 ml ずつ用意し、その中に防水加工を施した ECTT を浸けた状態で電力伝送効率を測定した。比較のために空气中に置いた状態でも電力伝送効率測定を行った。伝送実験では、信号発信機 (岩崎通信機, SG-4105) から出力された交流電圧をアンプ (エヌエフ回路設計ブロック, 4205) で増幅し、ECTT を介して 2 次側へ伝送し、デジタルオシロスコープ (横河電機株式会社, DL1620) を用いて測定した。実験では、人工心臓が駆動するのに必要な電力を 15 W と仮定し、負荷抵抗を 38.4 Ω とし、出力電圧を 24 V に固定した時の AC-to-AC エネルギー伝送効率を測定した。10 回の測定を行い、平均値および 2SD (標準偏差×2) を求めた。

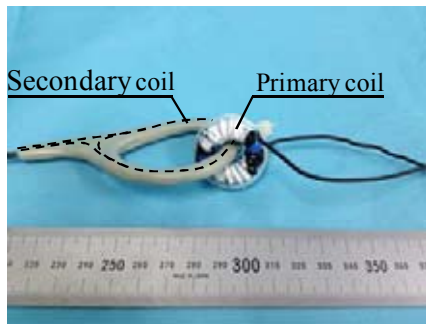


Fig. 1 Appearance of the waterproofing externally coupled transcutaneous transformer

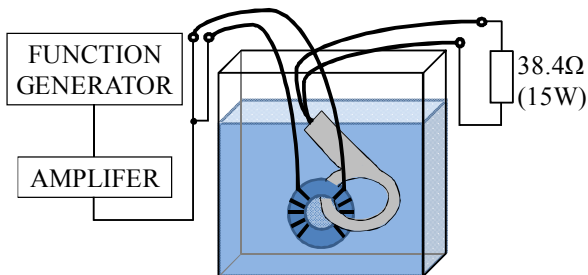
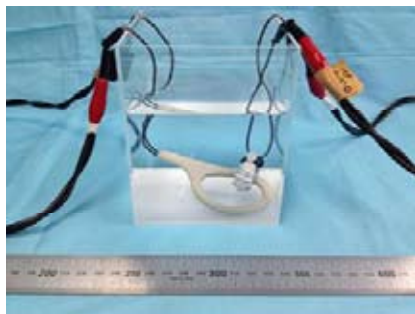


Fig. 2 Externally coupled transcutaneous transformer in liquid and experimental setup

2-2 TLM 法による電磁界解析

2-2-1 電磁界解析について

ECTT における液体中での伝送効率や電界分布を調べるために、伝送線路行列法 (TLM 法: Transmission Line Modeling Method) による電磁界解析を行った⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。TLM 法は、電界と磁界のグリッドに基づいており、複合的な境界条件をモデリングする上で優れている。解析空間をメッシュ切りして離散化し、離散点間を一次線路と仮定して、各格子点で散乱行列を定義し、波動を逐次的に計算する。TLM 法を用いた電磁界解析ソフト (CST STUDIO SUITE™ ver. 2011) は低周波においても、少ないメモリで短い時間で計算できるため、本研究において採用した。

2-2-2 電磁界解析モデル

Fig. 3 に解析に用いた ECTT のモデルを示す。ECTT における 1 次及び 2 次コイルは実測で用いたサイズと同じになるようにモデルを作成した。また、電気絶縁のために、1 次及び 2 次コイルを厚さ 0.1 mm の空気と同等の絶縁層で覆った。2 次コイルに接続した負荷抵抗 R_L は、補助人工心臓の負荷を想定しているため、D 字型状の直線部分から離れた位置に接続した。解析モデルの比透磁率、比誘電率、導電率を Table 1 に示す⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。また、実測で用いた精製水

と 6 w/v% NaCl 水溶液の比誘電率と導電率の測定値を Table 2 に示す (空気の値は理論値を示す⁽¹¹⁾)。Table 2 のパラメータを用いて実測におけるアクリル内の液体を模した立方体を作成し、その中に ECTT の解析モデルを配置し、出力電力を 15W として解析を行った。

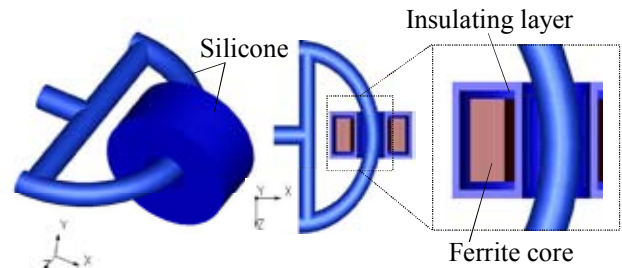


Fig. 3 Electromagnetic field analysis model

Table 1 Analysis model of electrical parameters

	Relative permeability	Relative permittivity	Conductivity [S/m]
Ferrite core	2300	100000	0.154
Silicone	1	3	1.0×10^{-14}
Insulating layer	1	1	0

Table 2 Measurement results of the conductivity and the relative permittivity

	Air	Purified water	NaClaq (6 w/v %)
Conductivity [S/m]	0	1.75×10^4	8.27
Relative permittivity	1	85.85	44641

3. 結果及び考察

3-1 実測によるエネルギー伝送効率測定結果

AC-to-AC エネルギー伝送効率の測定結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 において、空気中と精製水中での伝送効率は概ね同じ値を示した。効率変動についても 100 kHz を除けばほぼ 1% 未満であった。空気中での伝送効率と NaCl 水溶液中での伝送効率の差は 3~4% であることが確認された。これは NaCl 水溶液の導電率が大きく、空気中での伝送効率と NaCl 水溶液中での伝送効率の差分の電力がすべて液体中に吸収されているものと考えている。

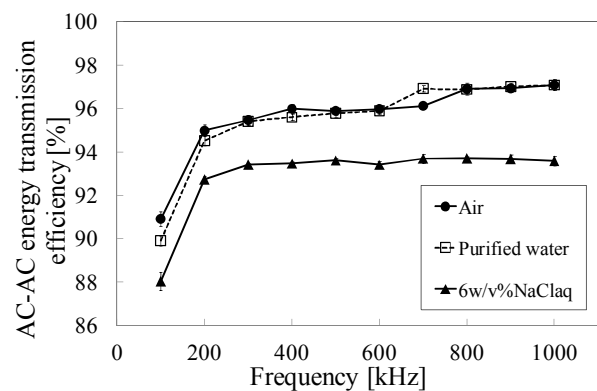


Fig. 4 Measurement results of AC-to-AC energy transmission efficiency

3-2 電磁界解析による伝送効率測定結果

Fig. 5 に実測と解析の伝送効率の比較を示す. 空気中および精製水中での伝送効率が同等になる傾向や, NaCl 水溶液中では空気中に比べ伝送効率が約 3~4 %低下するという Fig. 4 と同じ傾向が見られた. また, 実測結果の方が解析結果より全体的に約 2 %ほど伝送効率が低くなっていた. このことから, 実測にのみ当てはまる損失が存在することになる. この理由については今後検討していく. Fig. 6 に空気中における電界分布の図を, Fig. 7 に 6 w/v% NaCl 水溶液中における電界分布の図をそれぞれ示す. 空気中における ECTT 近傍の電界分布が 1 次コイル, 2 次コイル共にその表面に集中しているのに対し, NaCl 水溶液中における ECTT 近傍の電界分布は 1 次コイルを中心とした円を描くように分布していることが確認できた. このことから, NaCl 水溶液中に渦電流が流れ, この渦電流により, 電界強度が大きな値を示していると考えられる. この電力の損失分が伝送効率を 3~4%低下させたと考えている.

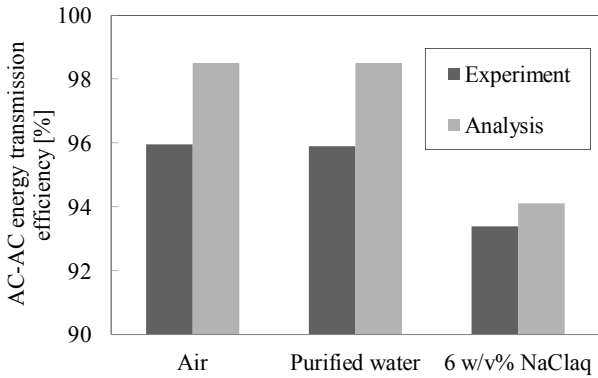


Fig.5 Comparison of efficiency between experiment and analysis

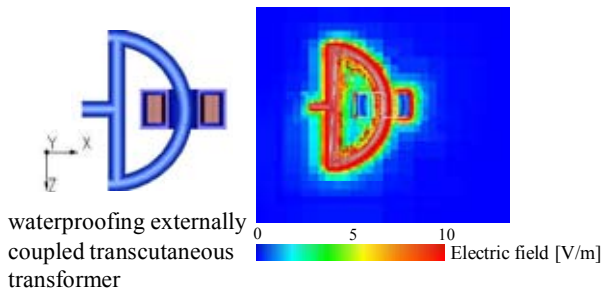


Fig. 6 Electric field distribution in air

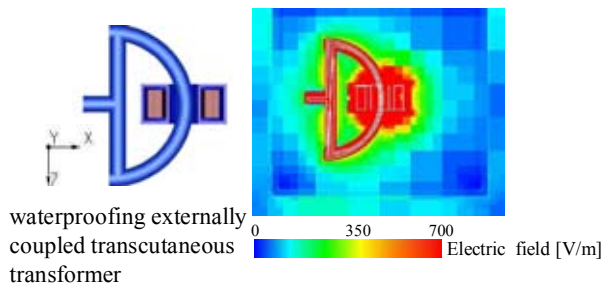


Fig. 7 Electric field distribution in 6 w/v% NaClaq

4. 結語

実測において, 空気中での伝送効率と NaCl 水溶液中での伝送効率の差は 3~4%であることを確認した. 防水処理を施しても, 導電性の高いものがそばにあることで, 効率低下が生じることが確認できた. このことから電力伝送効率の面から考慮し, 日常的に体外結合型経皮トランスを装着しての入浴やシャワーは差支えないものかどうかを慎重に考えなくてはならないといえる. 今後は, 液体中に吸収されている伝送電力の損失分が生体に与える影響について検討していく予定である.

参考文献

- (1) Andren, Lewin G, *et al.*, An improved biological power source for cardiac pacemakers, *Trans Am Soc Artif Intern Organs*, Vol.218, No.14, 1968.
- (2) 柴建次, 周英明 他, 完全埋込式人工心臓駆動用体外結合型経皮トランスの解析, *電学論 D*, Vol.120, No.2, pp.169-175, 2000.
- (3) 柴建次, 周英明 他, 高エネルギー伝送を考慮した完全埋込式人工心臓用経皮トランスの検討, *人工臓器*, Vol.28, No.1, pp.49-54, 1999.
- (4) 宮坂京布子, 柴建次 他, 完全埋込型人工心臓用体外結合型経皮エネルギー伝送システム-経皮トランスの小型化の検討-, *電気学会医用・生体工学研究会*, Vol.97, No.3, pp.11-15, 1997.
- (5) 中村知道, 増澤徹 他, 体内完全埋込型人工心臓に用いる経皮エネルギー伝送ユニットの生体適合性及び実用性の評価-体内埋込時の温度特性とエネルギー伝送効率の検討-, *人工臓器*, Vol.27, No.2, pp.347-351, 1998.
- (6) K.Shiba, K.Koshiji, *et al.*, Analysis of specific absorption rate in biological tissue surrounding transcutaneous transformer for an artificial heart, *J Artif Organs*, Vol.5, No.2, pp.91-96, 2002.
- (7) C.Christos, *The Transmission-Line Modeling Method*. Piscataway, NJ:IEEE Press, 1995.
- (8) M.Krumpholz and P.russer, A field theoretical derivation of TLM, *IEEE Tras. Microw. Theory Technol.*, Vol.42, No.9, pp.1660-1668, Sep.1994.
- (9) C.クリストボロス: TLM 伝送線路行列法入門, 加川幸雄(訳), 株式会社培風館, 東京, 1999.
- (10) 中島功, プラスチック材料講座⑨けい素樹脂, 有我欣司編著, 日刊工業新聞社, 東京, 1970.
- (11) Institute for AppliedPhysics, "An Internet resource for the calculation of The dielectric Properties of the Body tissues in the frequency range 10Hz-100GHz," <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>
- (12) Siemens Matsushita Components SIFERRIT®Materials Ferrite data sheets <http://www.thierry-lequeu.fr/data/SIFERRIT.pdf>