裁縫技術を用いた縫込みループアンテナの反射損失

電気・化学専攻　医用工学領域　2281241　今田　創大
(主査：桐生 昭吾 教授　副査：京相 雅樹 教授,　副査：森 晃 教授)

1.　はじめに

重度の心臓疾患の治療法のひとつとして補助人工心臓を移植する方法がある[1]。補助人工心臓はその動作に多くの電力を必要とする点から体外に電源を設置する場合が多く、体外から体内へ電力を供給するためには皮膚に貫通部を設ける必要がある。そのため、補助人工心臓装着者は体外に設置する電源によって動きが制限されることで生活の質が低下することや、皮膚の貫通部からの感染症発症のリスクを伴う[2]。この問題を解決するため、体外から体内に無線で電力を伝送する研究が行われている[3]。先行研究は低周波に分類される 1MHz 以下の周波数を用いて、数十センチメートルの距離での伝送効率を検討する実験が行われていた[4][5]。また、先行研究では伝送対象をペースメーカーとしていたため、補助人工心臓に比べ消費電力が少なく、寝ている間のみの伝送を検討していた[4][5]。しかし、補助人工心臓は消費電力が多いため寝ている間のみでの無線給電では必要電力を賄えない可能性が高い。そのため本研究では「補助人工心臓を対象とした、無線給電システムと空間の実現」を最終目的とした。

また、本研究では先行研究[4][5]に引き続き、布にリッツ線を縫い込む技術を利用して、研究を行っていく。リッツ線を布に縫込んでループアンテナを作製する理由として、持ち運びや設置が容易な点が挙げられる。布にリッツ線を縫い込むことで壁や天井などの平面だけでなくテーブルの裏や曲線を含んだ壁、衣服などにも取り付け可能になり、折りたたむことで設置位置の変更が容易になる。そのため、既存の施設や一般家庭での利用を見込むことができ、補助人工心臓装着者の生活の質の向上が見込める。リッツ線を用いて作製した縫込みループアンテナを図 1 に示す。しかしながら、図 1 に示したリッツ線を用いた縫込みアンテナで電力を伝送することができるか、実証されていない。そのため、本研究では無線給電システムと空間を実現するために用いる縫込みループアンテナの特性について検討していく。

図 1　縫込みループアンテナ

2.　原理

2.1 無線電力伝送

無線電力伝送は伝送の方式、伝送の距離によって種々の分類ができるが、図 2 に示すように、送受信の仕組みは共通である。送信側では、商用電源などを電力源として、それを空間に送るための高い周波数に変換し、アンテナやコイルなどに接続している。受電側は、送信された高周波をアンテナやコイルで汲み取り、利用可能な電源に変換する。

電力伝送方式は伝送距離によって大きく 3 つに分けられる。

1)　1cm 以下の短距離伝送
2)　数十 cm～数 m の中距離伝送
3)　距離に制限のない遠距離伝送

短距離送電では、電磁誘導を利用したコイルによる磁界結合、平板電極を対向させる電界結合が利用される。中距離送電では、LC 共振で結合する共鳴送電が用いられる。この短距離伝送と中距離伝送は、非放射の近傍電磁界が電力を運んでいる。遠距離送電は、通信と同じ仕組みの電磁波方式であり、フリスの伝達公式に従う伝送になる。表 1 にそれぞれの方式の特徴をまとめる[6]。

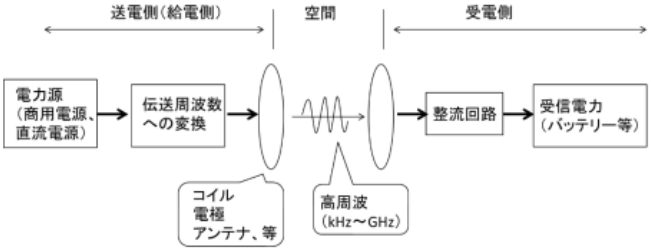

図 2　無線電力伝送方式の基本構成図

表 1　各種伝送方式の特徴比較

方式	電磁結合方式	電界結合方式	共鳴結合方式	電磁波方式 （電波伝送方式）
原理	電磁誘導	変位電流	LC共振	自由空間伝搬
送・受電部	コイル	コンデンサ電極	コイル （浮遊容量も利用）	アンテナ （受信はレクテナ）
最大伝送距離	1cm	1cm	数m	制限なし
伝送周波数(*)	100kHz	1MHz	10MHz	GHz帯（マイクロ波）
最大伝送電力(**)	100W	100W	1kW	GW級の伝送も可
応用分野（給電）	家電製品 情報端末 体内機器	家電製品 情報端末 体内機器	電気自動車 交通システム	SPS 移動体・飛行体

*)　代表値であり、幅広い対応が可（この値に拘束されるものではない）
**)　目安値であり、構成の工夫により、さらに大電力化が可能

2.2 インピーダンス整合

高周波のアンテナは近接効果や浮遊容量、表皮効果の影響を考慮するためアンテナ全体のインピーダンスを用いて評価する。アンテナに接続する電源とアンテナと電源を接続する同軸ケーブルのインピーダンスとアンテナ自体のインピーダンスが同様にならなければならない。これをインピーダンス整合という。アンテナに接続する電源とアンテナと電源を接続する同軸ケーブルのインピーダンスは一般的に 50Ω と決められている。そのため、アンテナのインピーダンスも同様に 50Ω にする必要がある。[7]

3.　研究方法

本研究では送受信用ループアンテナを縫込みループアンテナで作製する。受信用補助アンテナは衣服の胸部に縫い込むことで受信アンテナの補助を行うため、大きさの制限が強い。送信用ループアンテナは大きさの制限は少ないが、一般家庭の部屋や病室に設置することを想定し、持ち運びや設置を容易にする点からできる限りコンパクトにすることが望ましいため、大きさが小さくなるアンテナ形状を検討した。

実際に縫込みループアンテナを作製する前に、電磁界シミュレーションソフト(Femtet)を用いて縫込みループアンテナの形状の違いによる周波数特性の変化を求めた。また、シミュレーションの結果と実際にリッツ線を用いて作製した縫込みループアンテナの周波数特性を比較した。以下にシミュレーション条件を示す。

・空間条件：空気中(自由空間)
・境界条件：開放境界
・参照周波数：144MHz
・材料：銅線（シミュレーションにリッツ線が無いため性質の近い銅線を使用）
・特性インピーダンス：50Ω
・計測範囲：0~500MHz,50MHz~250MHz

ループアンテナを作製し、その特性を測定するのにあたり、長方形ループアンテナの 1 辺の長さのずれや 2 重にした場合のピッチ間のずれは少なくする必要があった。これは長さやピッチ間のずれが近接効果や浮遊容量、表皮効果に影響を与え、ループアンテナの特性が変化してしまう可能性があるためである。そのため、図 3 のような突起が無数に突き出している基板を PLA 樹脂を用いて作製した。基板は突起中心から突起の中心までの距離が 1cm となるように設計した。そのため、突起にリッツ線を這わせ引掛けることで長さやピッチ間の距離を 1cm ずつ正確に確定することができるようになった。最終的には布にループアンテナを縫込み、アンテナを作製することが目標であるが、複数のアンテナ形状を正確に作製するし計測することが重要となるため初期のアンテナ設計ではループアンテナを縫込まず、図 3 の PLA 基板を使用してループアンテナを作製した。

実際に作製したアンテナの測定はベクトルネットワークアナライザ(NanoVNA)を用いて行った。ベクトルネットワークアナライザを用いることでアンテナの周波数特性である反射損失(S11)や伝送効率(S21)を求めることができる。本研究ではアンテナ単体での性能を評価する点から周波数特性である反射損失(S11)を測定し、比較検討を行った。

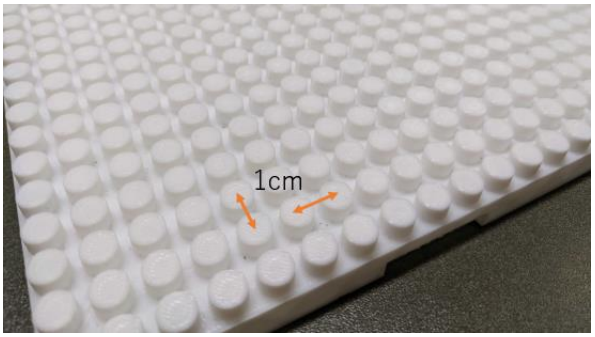

図 3　アンテナ作製に使用した PLA 基板

4.　実験結果と考察

4.1 フラクタル形状を用いたループアンテナ

ループアンテナをフラクタル形状にすることで全長を伸ばし、体積を少なく抑えつつ実行面積を維持することで、マルチバンド化することができ、ループアンテナの周波数特性が変化させることができると考えた[8] [9]。そこで、1 次の正方形を 2 次、3 次のフラクタルとした図 4、図 5 のような形状のループアンテナの周波数特性を検討する。図 6 に電磁界シミュレーションソフト(Femtet)を用いた反射損失(S11)のシミュレーション結果を示す。

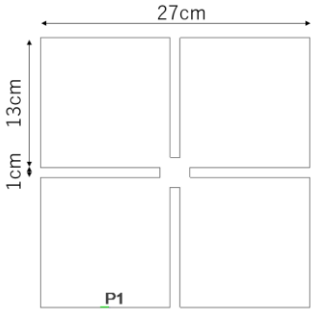

図 4　2 次フラクタル形状

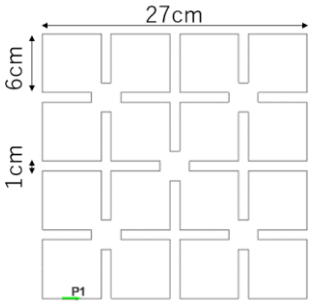

図 5　3 次フラクタル形状

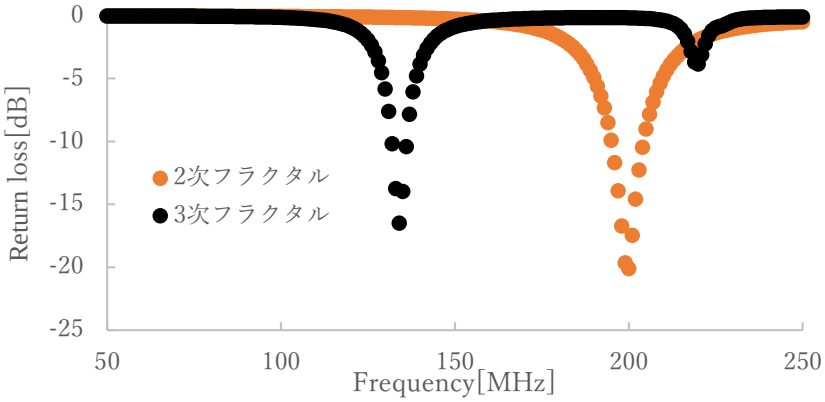

図 6　2 次フラクタル形状と 3 次フラクタル形状のシミュレーション結果

図 6 からわかるように、2 次フラクタル形状では約 200MHz 付近に反射損失が最小となる点が存在し、反射損失の最小値が約－20dB になるとわかった。3 次フラクタル形状では約 140MHz 付近に反射損失が最小となる点が存在し、反射損失の最小値が約－17dB であるとわかった。

図 7 に 2 次フラクタルループアンテナにおける反射損失のシミュレーションと実測値を比較したものを示す。図 8 に 3 次フラクタルループアンテナにおける反射損失のシミュレーションと実測値を比較したものを示す。2 次フラクタルループアンテナは約 170MHz 付近で反射損失が最小となる点が存在し、反射損失の最小値が約－18dB になるとわかった。3 次フラクタルループアンテナは約 130MHz 付近で反射損失が最小となる点が存在し、反射損失の最小値が約－11dB になるとわかった。2 次フラクタルループアンテナと 3 次フラクタルループアンテナともに実測値の反射損失の値(dB 値)がシミュレーション値の値に比べ全体的に小さくなっていることが読み取れる。これはアンテナと計測機(NanoVNA)を接続

するために使用したコネクタが反射波を減衰していることが要因であると考えられる。また、図 20 ではシミュレーション値の最も共振している周波数(200MHz)に対して、実測値の最も共振している周波数(180MHz)が左側に移動したことがわかる。実測値の周波数特性がシミュレーション値の周波数特性に対して、左側に移動した要因として、ループアンテナを作製するために使用した PLA 基板が考えられる。シミュレーションではアンテナの周波数特性を自由空間上で測定していた。一方、実際に作成したアンテナは PLA 基板上にリッツ線を固定することで作製しているため、PLA 基板の持つ誘電率がアンテナのインピーダンスに影響を与え、シミュレーション値の最も共振している周波数(200MHz)に対して、実測値の最も共振している周波数(180MHz)が左側に移動したと考えた。

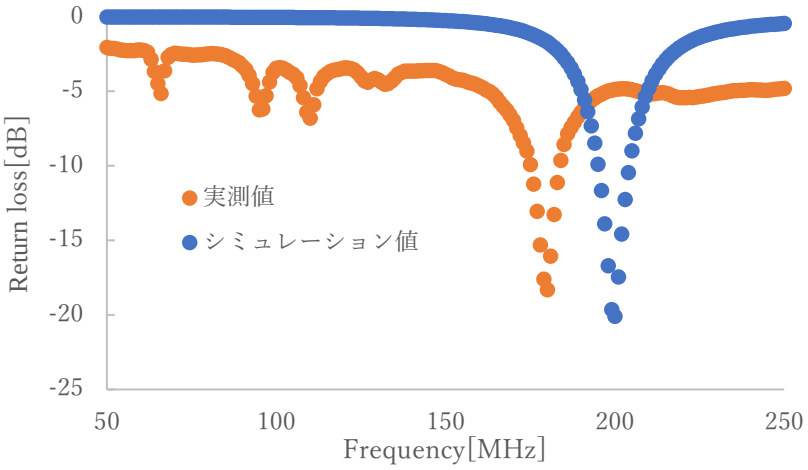

図 7　2 次フラクタル形状における反射損失のシミュレーションと実測値

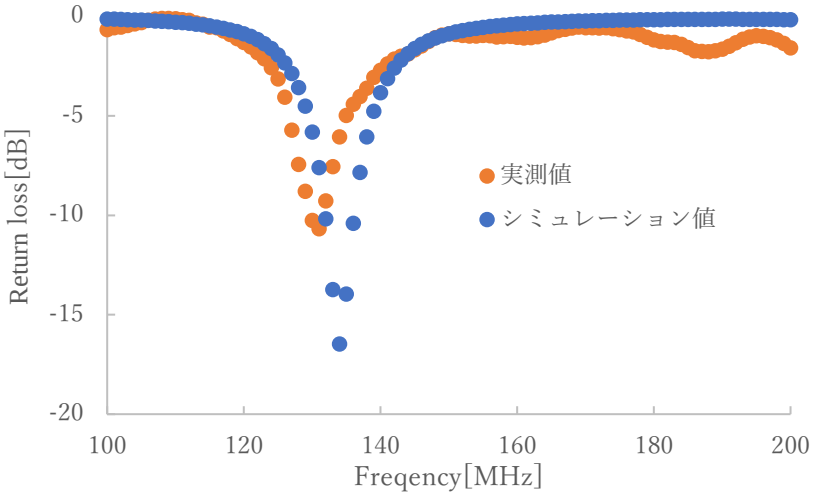

図 8　3 次フラクタル形状における反射損失のシミュレーションと実測値

4.2 周囲環境の誘電率を考慮した検討

3 次フラクタル形状を用いて、ループアンテナを実際に布に縫い込み、縫込みループアンテナを作製することでシミュレーションの自由空間上と同じ条件で計測を行った。図 9 にシミュレーション結果と 3 次フラクタル・縫込みループアンテナの実測値を示す。図 8 と図 9 の実測値を比較すると、図 8 の最も共振している周波数(130MHz)が図 9 の最も共振し

ている周波数(140MHz)に移動していることがわかる。そのため、実測値の共振周波数がシミュレーション値の共振周波数に対して、低い周波数に存在していた要因が PLA 基板の誘電率などのアンテナ以外の外部環境によるものだとわかった。

そこで、コンクリートの壁と人体にアンテナを設置した場合に、反射損失がどのように変化するのかを計測した。図 10 に計測した反射損失を示す。図 10 から分かるように、コンクリートの壁と人体にアンテナを設置した場合、図 9 の実測値に比べ、周波数特性が大きく変化している。これらのことから、リッツ線を用いた縫込みループアンテナは外部環境(アンテナを設置する物体の誘電率)の影響を大きく受けることが読み取れる。本研究では送受信に使用する縫込みループアンテナの形状を検討していた。送信アンテナを様々な場所に設置するためには、設置場所の電気的特性を考慮しアンテナを設計することやマッチング回路を用いてインピーダンスを調整する機能をアンテナに実装する必要がある。そのため、様々な場所に設置することのできるアンテナを同一の形状のアンテナ単体で実現することは難しいといえる。

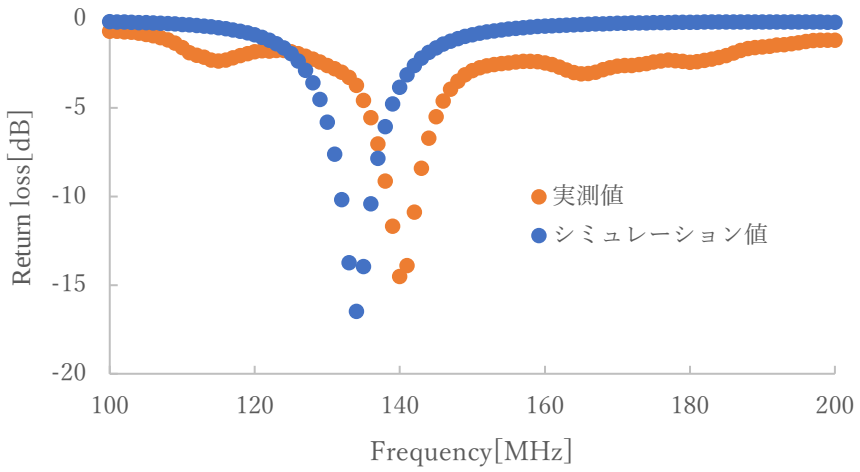

図 9　シミュレーション結果と 3 次フラクタル・縫込みループアンテナの実測値

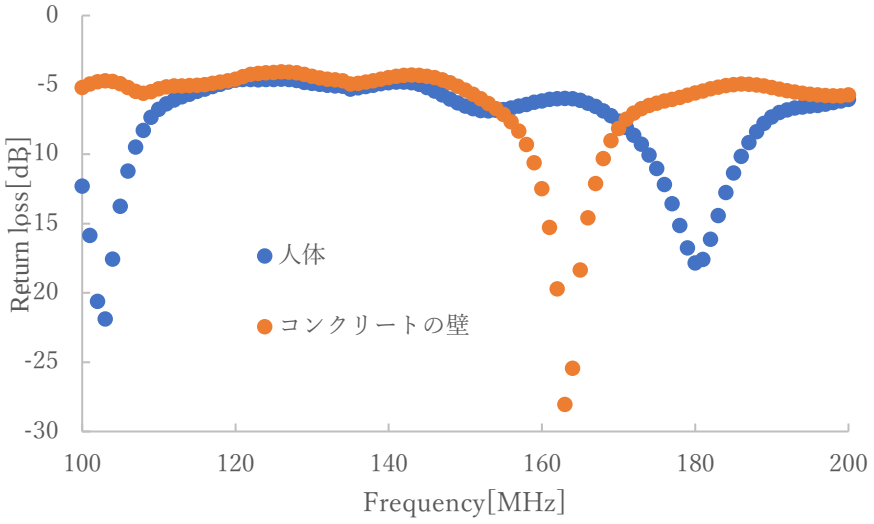

図 10　コンクリートの壁と人体にアンテナの反射損失

4.3 人体による反射損失の変化

送信アンテナとして様々な場所に設置することのできるアンテナを同一の形状のアンテナ単体で実現することは難しいことがわかった。 一方、受信アンテナ(補助アンテナ)として使用する場合、人体のみに設置(衣服に縫い込む)するため外部環境による周波数特性の変化が少ないと考えられる。そのため、本項目では縫込みループアンテナを人体に設置することで反射損失を計測し、個人の人体がアンテナの周波数特性に与える影響を検討した。被験者の体型を「痩せている、普通、太っている、筋肉質」の 4 つのグループに分けて実験を行う。図 11 にすべての被験者を各分類で比較したデータを示す。痩せていると分類した人に設置したアンテナは 120～130MHz で反射損失の最小値をとり、普通と分類した人に設置したアンテナは 120～125MHz で反射損失の最小値をとった。太っていると分類した人に設置したアンテナは約 115MHz で反射損失の最小値をとり、筋肉質と分類した人に設置したアンテナは 115～120MHz で反射損失の最小値をとった。このことから痩せている人ほど設置したアンテナの周波数特性が高い周波数で共振し、太っている人ほど設置したアンテナの周波数特性が低い周波数で共振することがいえる。これは、人体を構成する筋肉や脂肪の誘電率が異なるためであると考えられる。

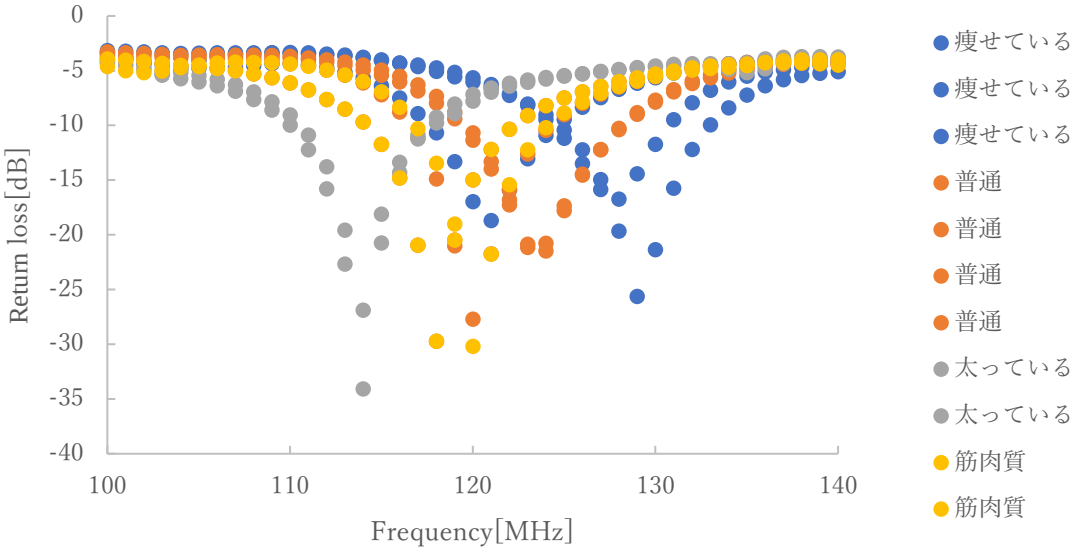

図 11　分類による反射損失の違い

5.　まとめ

実測値の周波数特性がシミュレーション値の周波数特性に対して、左側にシフトしていることがわかった。この要因として、PLA 基板の誘電率がループアンテナの周波数特性に影響を与え、自由空間上で行ったシミュレーション値と差が生じたと考えた。このことから周囲環境の誘電率を考慮した検討を行い、周囲環境がループアンテナのインピーダンスに影響を与え、周波数特性が変化することがわかった。そのため同一形状の縫込みループアンテナを送信アンテナとして様々な場所に設置するという最終目的に使用することは難しいといえる。

人体による反射損失の変化を考慮した検討では受信アンテナ(補助アンテナ)として縫込

みループアンテナを使用することが可能であるかを検討した。これは受信アンテナ(補助アンテナ)として使用する場合、人体のみに設置(衣服に縫い込む)するため外部環境による周波数特性の変化が少ないと考えたためである。受信アンテナも送信アンテナと同様にアンテナ装着者の体型などといった外部環境の影響を受け、周波数特性が変化することがわかった。しかしながら、その変化域は約 115~130MHz と送信アンテナの変化域に比べ少ない。そのため、周波数特性(反射損失)の帯域が広いアンテナ形状を検討することや周波数特性の微調整を行うことのできる機能を実装することで、受信アンテナ(補助アンテナ)として縫込みループアンテナを使用することは可能であると考えられる。

6. 参考文献

[1]志賀,齋藤, “補助人工心臓の現状と今後の展開”,日集中医誌,2020;27:177-83.

[2]柴,“人工心臓の完全埋込み化技術”人工臓器 43 巻 1 号,2014 年,pp.86-88

[3] J. S. Ho, A. J. Yeh, E. Neofytou, S. Kim, Y. Tanabe, B. Patlolla, R. E. Beygui, and A. S. Y. Poon, “Wireless power transfer to deep-tissue microimplants,” Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., vol. 111, no. 22, p. 201403002, 2014.

[4]佐々木,“縫込み補助コイルを用いた非接触電力伝送に関する研究”(2019)修士論文

[5] 諏訪原良平,“裁縫技術を用いたコイルの試作と電気的特性および非接触電力伝送への応用,”日本 AEM 学会誌,Vol.25,No.2,pp.168-173,2017.05.

[6]唐沢, “ワイヤレス電力伝送：その理解の壷” Technical Report YK-008,Jan.09,2018.

[7]平山,“電気回路論”,電気学会,1995.9.20,338-349.355-363.

[8]本田, “フラクタルとは何か”高分子,1994 年 43 巻 3 号 p. 222-225

[9]多田,羽石,木村, “フラクタル構造を有するマイクロストリップアンテナの放射特性”電子情報通信学会論文誌 C Vol.J87-C No.12 pp.1102-1112 2004 年 12 月