裁縫技術を用いた無線電力伝送用コイルの損失の評価

電気・化学専攻　医用工学領域　　2281257　　髙橋　凱

（主査：桐生昭吾教授　　副査：和多田雅哉教授　　副査:京相雅樹教授）

1　はじめに

近年、心臓ペースメーカや ICD といった植込み型医療機器への給電方法として無線電力伝送が注目されている[1]。植込型医療機器はバッテリー交換による定期的な手術を要する。これは装用者にとって肉体的にも精神的にも大きな負担である。無線電力伝送は金属接点を介せずに電力を伝送するため手術をすることなく充電が可能になると期待されている。

また、先行研究からリッツ線を布に縫込み作製した縫込みコイルが植え込型医療機器への給電に対して有用であることは示されている[2]。リッツ線とは、エナメル線を多本数より合わせた電線のことであり、単線に比べ高周波領域での抵抗上昇が抑えられるといった特徴がある。無線電力伝送の中でも磁場共鳴型は、コイルの磁気的結合と共鳴現象を利用し伝送距離を長く設定できる。また、中継コイルを利用することで伝送効率の上昇も可能である。

そこで、植込み型医療機器装用者の衣服やベッドにコイルを縫い込むことで、睡眠中による機器への給電ができるのではないかと考えられている。

磁場共鳴型では、送受コイルの結合係数 k と回路の Q 値の積によって効率が決まり、kQ を大きくすることが重要である。k は、送受コイルの大きさや配置などの幾何学的条件で決まり、シミュレーションである程度は計算可能である。Q は、最終的には回路の損失などを考慮する必要があるが、回路を工夫してもコイルの Q を超えることができないため、設計の第一段階では使用するコイルの Q をできるだけ大きくすることが重要となる。コイルの Q は、以下の式(1)で表すことができる。

$$Q = \frac{\omega L}{R} \tag{1}$$

ここで ω は、電力伝送で使用する角周波数であり、磁場共鳴型電力伝送では共振周波数に等しい。使用できる周波数は電波法で決められており、近年では、電波法で許される 13.56 MHz やその半分の 6.78 MHz で設計されることが多い。L はコイルの自己インダクタンス、R はコイルの損失抵抗である。インピーダンスは、コイルに使う線の材質、近接効果、表皮効果、浮遊容量など様々な要因が影響を与える[3]。

式(1)からわかる通り、Q を大きくするには R を小さくする必要がある。しかし、複数の電磁気的特性が影響する R は、シミュレーションと合わない、計算できないといった問題があった。

そこで本研究では、コイルを設計する上で、損失抵抗に関し、線の性質、近接効果、表皮効果、浮遊容量などが及ぼす影響ついて、より高周波である 15 MHz まで実験的に検討することを目的とする。

2　導体で起こる現象

2.1 近接効果

2 本の平行した導線がある場合、片方の導線が発する磁場がもう片方の導線に影響して電流密度に偏りが出来ることである。理論的には周波数の 2 乗に比例して増加する。平行した 2 本の導線の電流密度の偏りを図 1 に示す。

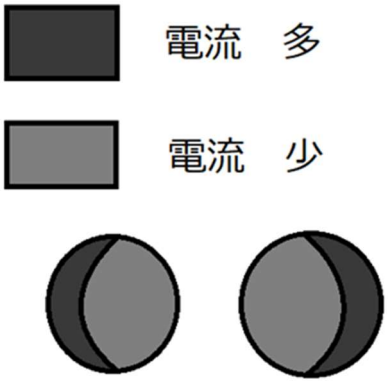


図 1　近接効果

2.2 表皮効果

周波数が高くなるほど導線の内部に電流が流れにくくなることである。理論的には周波数の平方根に比例して増加する。電流が表皮の 1 / *e* に低下するまでの、表皮からの距離のことを表皮厚さと言う。導線内の電流密度の偏りを図 2 に示す。

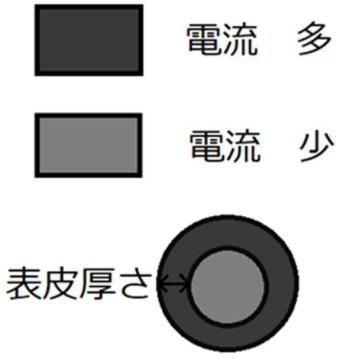


図 2　表皮効果

2.3 浮遊容量

2 本の隣り合った導線に電位差が生じた場合、コンデンサのようになり静電容量を持つこと。

3　損失の評価方法

3.1 コイルの損失の要因

コイルの損失は DC 抵抗、近接効果による損失、表皮効果による損失、浮遊容量による損失がある。

コイルの DC 損失は、コイルの長さ、断面積、線材の抵抗率のみに依存すると仮定できる。近接効果による損失成分は周波数の 2 乗に比例するとされている[3]。表皮効果による損失成分はリッツ線では小さく周波数の平方根に比例する。浮遊容量による等価的な損失成分は、巻き数の線間隔が小さいと大きな影響を与える[3]。

銅線の表皮厚さは 1 MHz で 60 μm 程度、10 MHz では 20 μm 程度になり、今回用いた素線径 0.04 mm のリッツ線では 10 MHz まで大体断面に均一に電流が流れていると仮定できるので、表皮効果による損失は今回の測定では無視する。以上より、今回用いている素線径 0.04 mm のリッツ線を用いたコイルでは、DC 損失、近接効果による損失、浮遊容量による損失を考える。DC 損失はコイルの DC 抵抗を測定すれば評価できるため、今回は近接効果による損失の評価と浮遊容量による損失の評価を以下に述べる方法で行った。

3.2 リッツ線内の近接効果による損失の推定

全長を 80 cm とした 1 ターンの 20 cm × 20 cm コイルを、素線径 0.04 mm × 30 本、100 本、300 本、660 本のリッツ線で作製した。コイルはジャバクロス生地にリッツ線を縫い込んでコイルを作製した。作製したコイルの 1 例を図 3 に示す。リッツ線間の近接効果、および浮遊容量による損失を軽減するために 1 ターンのコイルとした。

このコイルの高周波損失から DC 損失を引くことで、リッツ線内の近接効果の影響を評価した。

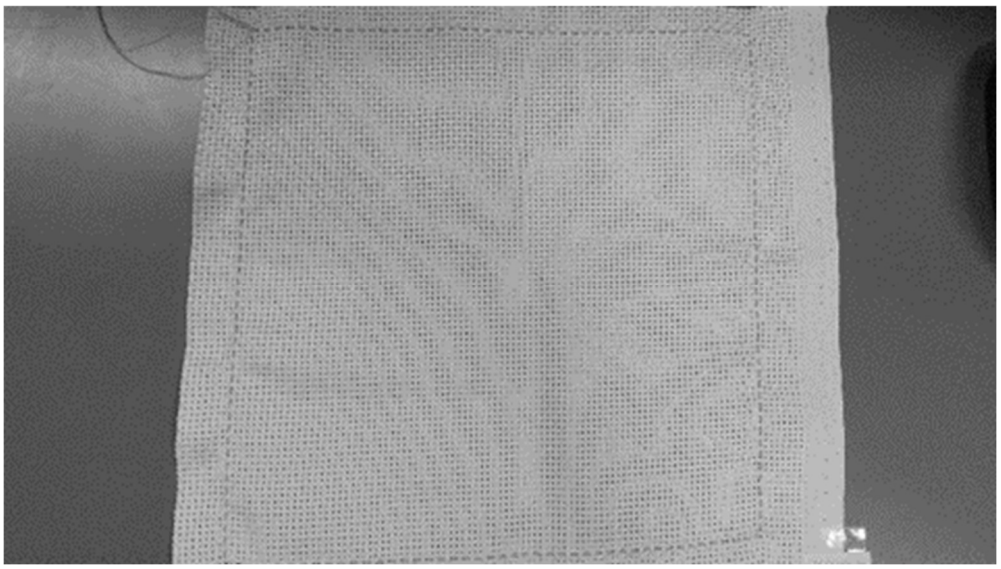


図 3　コイル例 1

3.3 線間の近接効果による損失の推定

素線径 0.04 mm×100 本のリッツ線で、近接効果の影響が出ない程度に全長を長くした、約 20 cm×20 cm サイズのコイル(図 4)を 4 つ作り、それぞれコイル 1、2、3、4 とした。リッツ線間の近接効果、および浮遊容量による損失を軽減し、また DC 抵抗の測定が容易なように線間が 20 mm 空いたミアンダパターンとした。また作製を簡単にするためにメッシュ生地にリッツ線を縫い込んだ。

4 つのコイルのうち 2 つを選び、各コイルの損失と、2 つのコイルを並列につなぎ重ねた状態の損失を、1 MHz から 15 MHz まで 1 MHz 毎に測定した。2 つのコイルの重なった部分はほぼ同電位であると仮定出来るため浮遊容量の影響は小さくでき、DC 損失を引くことで、重なった線間の近接効果の損失を評価できる。密着させた状態から 2 mm ずつ離していき、10 mm 離した状態まで測定した。

各コイルの損失から DC 損失を引いたもの（仮に R_1、R_2 とする）を式(2)のように計算した R_a と、2 つのコイルを並列に繋いで測定した損失の値 R_b の差を比較することで、線間の近接効果を評価した。この値が小さいほど線間の近接効果による損失は小さいと考えられる。

使用する 2 つのコイルの組み合わせは、4 つのコイルで出来る全てのパターンで評価した。

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{2}$$

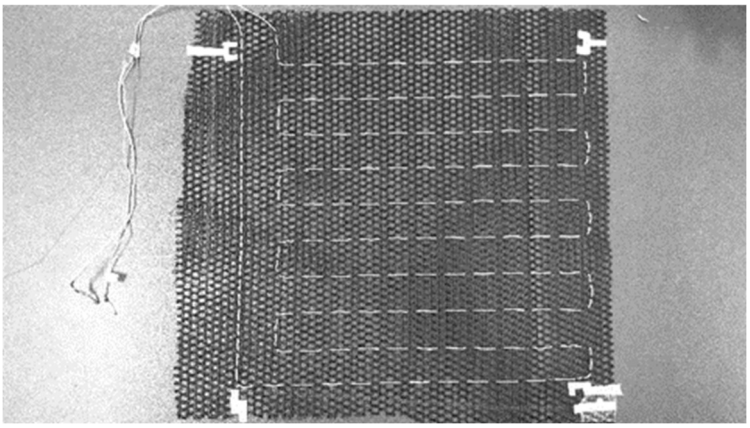


図 4　コイル例 2

3.4 浮遊容量による損失の推定

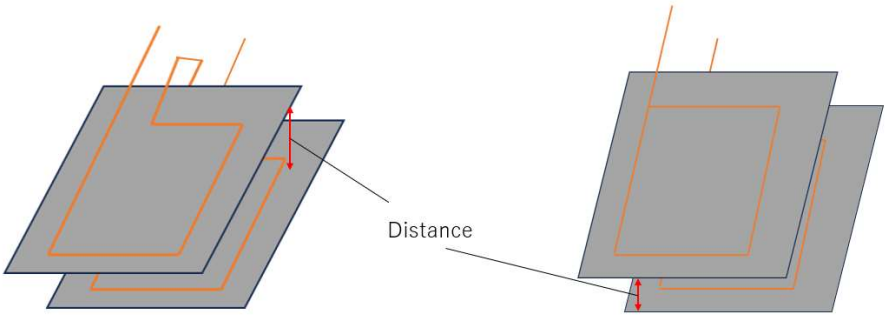
3.3 で作製した 4 つのコイルのうち 2 つのコイルを直列に繋ぎ、3.3 と同じ測定を行った。直列に繋ぐことで重なった部分に電位差が生じ、浮遊容量による損失の影響が出ると考えられる。密着させた状態から 10 mm ずつ離していき、50 mm 離した状態まで測定した。

各コイルの損失から DC 損失を引いたもの（仮に R_1、R_2 とする）を式(3)のように計算した R_A と、2 つのコイルを直列に繋いで測定した損失の値 R_B の差を比較することで、浮遊容量による影響を評価した。3.3 同様、この値が小さいほど浮遊容量による損失の影響は小さいと考える。こちらも全てのパターンの組み合わせで評価した。

$$R_A = R_1 + R_2 \tag{3}$$

また、20 cm×20 cm の 1 ターンコイルを 2 つ作製し、上記と同じように損失の測定を行った。さらに、同じサイズの短絡させた 1 ターンコイルを 2 つ作製した。片方をグランドに接続、もう片方に電圧を加えることで電位差を生じさせ、静電容量の測定を行った。2 つのコイルを重ねた状態から徐々に距離を離していき、線間の距離に対する静電容量の変化を調べた。

距離に対する損失の変化と距離に対する静電容量の変化を比較することで、損失と静電容量の関係性を評価した。



(a)損失測定時　　(b)静電容量測定時

図 5　コイルの配置

4　評価結果

4.1 リッツ線内の近接効果による損失の推定

各リッツ線で作製したコイルの損失抵抗を、1 MHz から 15MHz まで 0.5MHz 毎に測定し、両対数グラフにしたものを図 6 に示す。最小二乗法を用いてグラフの傾き A を求めた結果、30 本のリッツ線は 1.48、100 本のリッツ線は 1.87、300 本のリッツ線は 2.18、660 本のリッツ線は 1.90 であった。

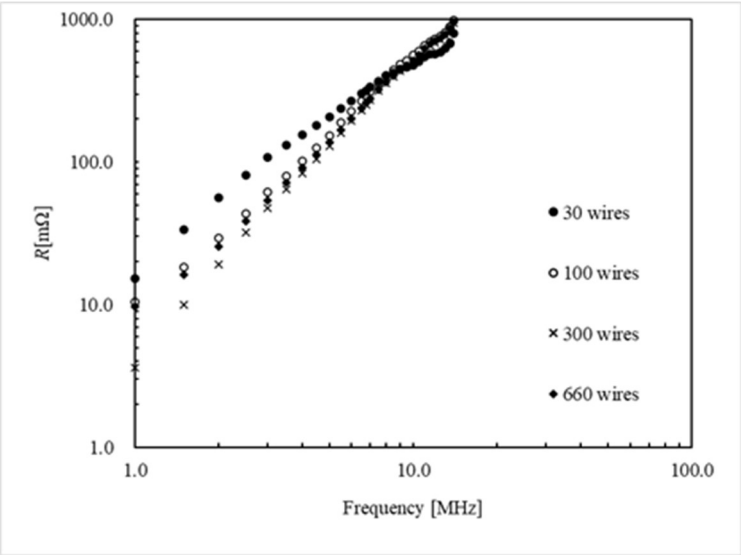


図 6　リッツ線内の近接効果による損失

4.2 線間の近接効果による損失の推定

各コイルの損失から計算した値と 2 つのコイルを並列に繋いだ時の測定値の差をグラフにした。結果の 1 例として、コイル 3 とコイル 4 の組み合わせの結果を図 7 に示す。尚、結果が分かりやすい 6 MHz、13 MHz、15 MHz のみを表示している。

周波数が高く距離が小さいほど損失の差は大きいが、およそ 6 mm 以上離すと小さい値となった。また、6 MHz 以下の周波数では、距離に関係なく小さい値となった。

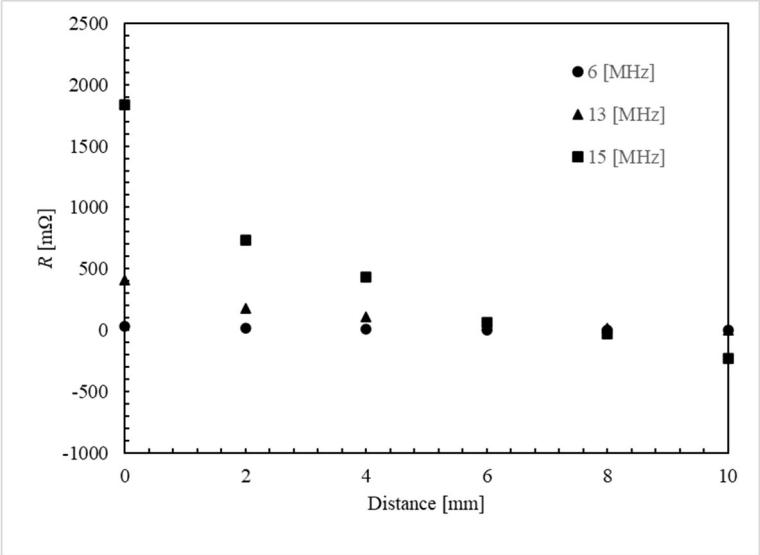


図 7　並列に繋いだ時の測定値と個別のコイルから計算した値の差　コイル 3 コイル 4

4.3 浮遊容量による損失の影響

各コイルの損失から計算した値と 2 つのコイルを直列に繋いだ時の測定値の差をグラフにした。結果の 1 例として、コイル 1 とコイル 2 の組み合わせの結果を図 8 に示す。尚、結果が分かりやすい 2 MHz、6 MHz、15 MHz のみを表示している。また、線間の近接効果による影響が出ない 10 mm 以上離した値を表示している。

周波数が高くなるほど損失は大きく、ある程度距離を開けても個々の損失との差が 0 に近づくことはなかった。

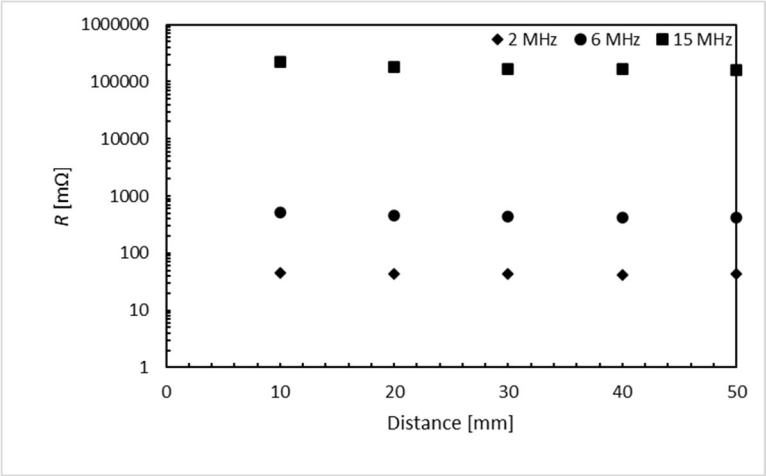
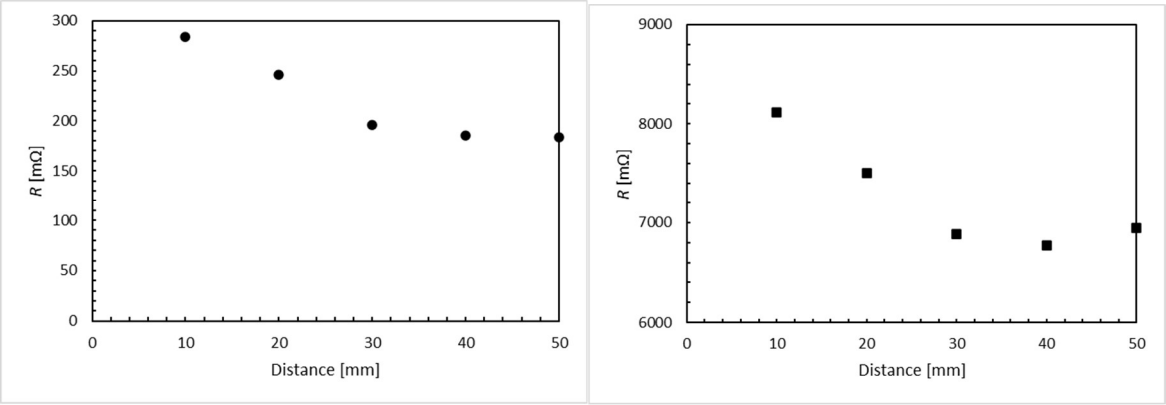


図 8　直列に繋いだ時の測定値と個別のコイルから計算した値の差　コイル 1 コイル 2

1 ターンコイルを直列に繋いだ時の測定値と個別のコイルから計算した値の 6 MHz、15 MHz を図 9 に、2 つの短絡したコイルから測定した静電容量の値を図 10 に示す。損失の差と静電容量のどちらの値も、コイル間を 30mm 離すまでは徐々に小さくなっていき、30mm 以降は変化が小さくなっていた。



(a) 6 MHz　　(b) 15MHz

図 9　1 ターンコイルを直列につないだ場合の損失の差

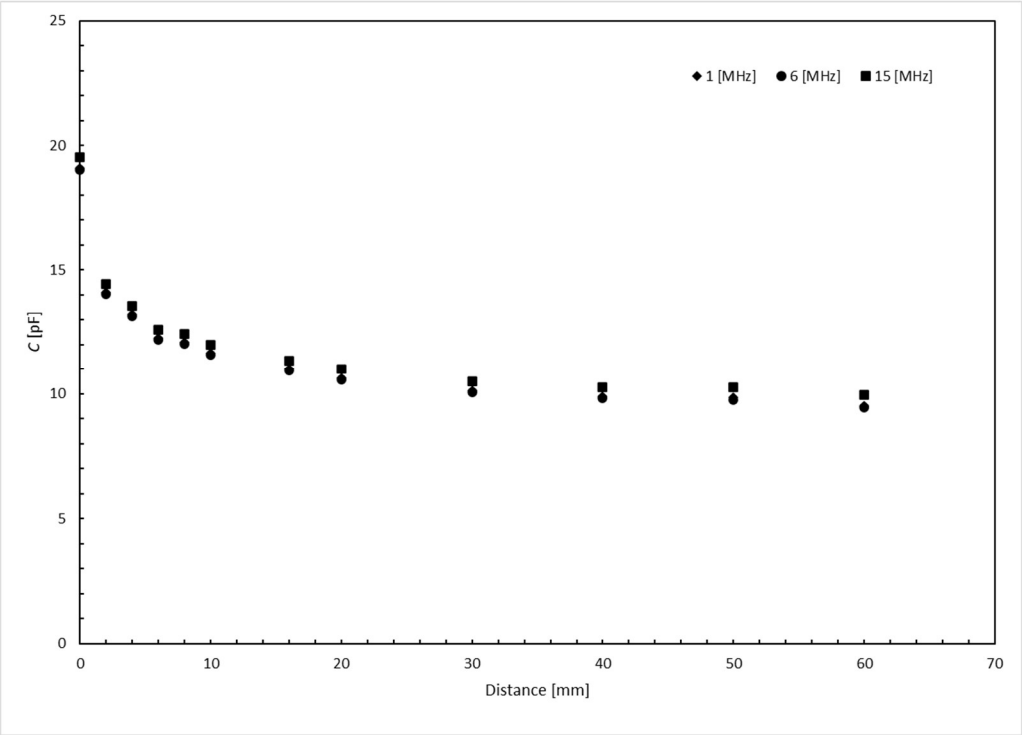


図 10　短絡させたコイルを重ねた時の静電容量

5　考察

4.1 の結果より、素線径 0.04 mm×100 本、300 本、660 本のリッツ線の線内の近接効果による損失は、周波数の約 2 乗に比例している。このことはリッツ線内の損失は近接効果が支配的であることを示している。しかし、素線径 0.04 mm×30 本のリッツ線の線内の損失は、周波数の約 1.5 乗に比例していた。これは、本数が少ないため縫込み時に線がつぶれエナメル線同士の間隔が広がり、近接効果の影響が小さくなったからだと思われる。

4.2 の結果より、線間の近接効果の影響は、6mm 程度距離を開ければ無視できることが分かった。また、低周波領域では近接効果の影響は少ないことが分かった。

4.3 の結果より、浮遊容量による損失の影響は、50 mm 距離を離していても大きいことが分かった。図 9、10 より、コイル間の距離による浮遊容量の影響は 30mm までであり、他の要因による浮遊容量の影響が出ているのではないかと考えられる。

6　結論と残された課題

裁縫技術を用いて作製した縫込みコイルについて 1～15 MHz の周波数範囲で損失の評価を行った。何種類かの素線数の違うリッツ線で 1 ターンのコイルを作製し損失を評価した結果、素線数 30 本を除いて、線内の損失は近接効果によるものが支配的であることを確認した。また、ミアンダ形状のコイルを作製し、2 つのコイルを並列に接続して損失を評価した結果、6 mm 程度離すことにより、線間の近接効果を無視できることを示した。2 つのコイルを直列に接続した場合は、浮遊容量による損失が大きいことを示した。損失と静電容量の関係を評価した結果、線間の距離による浮遊容量の影響は 30 mm までであることを示した。

これらのことから、植込み型医療機器に内蔵する受電コイルのようなサイズに制限のあるコイルはピッチ間距離を 6 mm 以上に、ベッドや衣服に縫い込む送電コイルや中継コイルといった比較的大きさの制限がないコイルはピッチ間距離を 30 mm 以上にすることが好ましい。そして、近接効果による影響に比べ浮遊容量による影響が非常に大きいことから、コイルを設計するうえでは、浮遊容量による影響を考慮することが重要である。しかし、コイル間の距離をある程度離しても減少することのなかった浮遊容量による影響の原因はわからないままであるため、この原因を検証する必要がある。

7　参考文献

[1]松木英敏, “医療機器へのワイヤレス給電,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol.13, No.6, pp.427-430, 2010.

[2]諏訪原良平, 小俣黎, 加藤諒汰, 瀬田慶, 桐生昭吾, “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.100-105, 2017.

[3] Z. Yang, W. Liu, and E. Basham, “ Inducto Modeling in Wireless Links for Implantable Electronics, “ IEEE Trans. Magn., Vol. 43, No. 10, 2007.