

衣服間無線給電におけるコイル形状変化が与える影響

宮村 久也[†] 宮路 祐一^{††} 大村 廉^{††}

概要: ウェアラブルデバイス向けの無線給電システムには衣服などの布地に実装したコイルを用いたシステムが多い。衣服に実装したコイルは柔軟性があるため曲げることができ、シワも発生することが考えられる。既存研究では平面コイルをある曲げ半径 R で曲げたときに電力伝送効率が低下することがわかっているが、シワについての影響は調査されていない。本研究では衣服に実装したコイルに発生するシワに着目し、シワが発生することで無線給電システムにどのような影響があるか、単純に曲げた場合とどのように異なるかを調査した。コイルに発生する形状変化としてコイル平面のある箇所に直径 w の円柱形のシワが発生した場合のモデルと、そのシワの大きさに対応した曲げ半径 R を発生させたモデルを作成した。それらのモデルを用いて電力伝送のシミュレーションを行い、単純な曲げとシワが無線給電に与える影響を評価した。結果としてシワの直径 w がコイル径の半分以下の場合、位置ずれに対する平均効率が単純な曲げに比べ 10[%]、形状変化無しの場合に比べ 30[%]低下することがわかった。しかしコイル同士が近接しすぎることにより効率が低下する場合は、片方のコイルに曲げやシワを発生させることで効率を改善させることができるということがわかった。また、シワが複数に分散した場合、合計で同程度となる一つのシワが発生するよりも効率が低下することがわかった。

Effects of Coil Deformation in Wireless Power Transfer between Clothes

KIKUYA MIYAMURA[†] YUICHI MIYAJI^{††}
REN OHMURA^{††}

Abstract: Many wireless power supply systems for wearable devices use coils mounted on clothes. Since the coil mounted on the garment is flexible, bent and wrinkles can be occurred. In existing researches, it is known that efficiency of power transmission decreases when the planar coil is bent at a certain bending radius, R , but the effect of wrinkle has not been investigated. In this research, we focused on wrinkles generated in coils mounted on clothes, and investigated how it affects the wireless power supply system by occurrence of wrinkles, considering how it differs from simple bending. As a shape change of a coil, a model with cylindrical wrinkles of diameter, w , and with bend of radius, R , which corresponds to the size of the wrinkle, were prepared. The effect of simple bending and wrinkle on wireless power transmission was evaluated by simulation. As a result, it was found that when the diameter w of the wrinkle is less than half of the coil diameter, the average efficiency is reduced by 10% compared with simple bending and reduced by 30% compared with no shape change during occurring misalignment. In addition, efficiency decreases with multiple wrinkles more than one bigger wrinkle.

1. はじめに

近年ウェアラブルデバイスの開発が進み、腕時計やメガネ、さらには衣服や靴などをデバイス化したものもある [1]。ウェアラブルデバイスが多様化し、身体のあるあらゆる部位に取り付けられるようになると複数のデバイスを同時に使用するという利用方法も考えられる。しかし複数のデバイスを同時に使用すると、各デバイスの充電や電池残量の把握などの電源管理がユーザの負担となる。

この電源管理の問題を解決するための技術として無線電力伝送技術を用い、デバイス間で電力を分配する手法が提案されている [2] [3] [4]。無線電力伝送技術には多くの方式があるが、ウェアラブルデバイス向けの無線給電システムでは数 mm から数 cm の近距離での無線給電を行うためコイルを用いた電磁誘導方式や、位置ずれに強い磁界

共振結合方式が多く採用されている。それらを採用した既存研究では、コイルを導電性繊維で作成して衣服に直接実装する方法や、銅箔テープを用いてコイルを作成し、それを後付で取り付ける方法をとっている [5] [6]。導電性繊維や銅箔テープを用い、コイルをフレキシブルにすることでユーザに与える負担が少ないという利点がある。一方で、それらの手法ではユーザの動作や衣服の状態によってコイルに曲げやシワなどの形状変化が発生し、電力伝送効率に影響を及ぼすことが考えられる。実際にコイルに単純な曲げが発生した場合には電力伝送効率が低下し、その曲げが大きければ給電が不可能なレベルの効率にまで低下することがわかっている [7]。しかし、実際に衣服にコイルを直接実装した場合には単純な曲げだけでなく、シワがコイルに発生すると考えられる。しかしコイルに発生するシワが電力伝送効率にどのような影響を与えるか、またその影響は

[†] 豊橋技術科学大学大学院
Graduate School of Toyohashi University of Technology.

^{††} 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology.

単純に曲げたときと異なるかはわかっていない。

そのため、本研究ではコイルの形状変化が電力伝送システムにどのような影響を与えるのかに着目して調査を行う。既存研究ではコイルに単純な曲げを発生させたときの影響は調査されていたが、シワについての影響を調査し、傾向を評価したものは無い。形状変化の種類による違いや、形状変化の大きさによる特性変化の傾向を明らかにできればウェアラブルデバイスにおける無線給電システムのデザインの指針となると考えられる。

本研究では形状変化として曲げとシワを発生させたコイルのモデルを作成し、電磁界シミュレータによってそのコイルの特性変化や電力伝送効率をシミュレーションする。単純にコイル形状変化による特性変化を調査するため、2つのコイル間の電力伝送特性を評価する。コイルの基本形状にはウェアラブルデバイス向けの無線給電システムで多く用いられる平面スパイラルコイルを用いる。コイルに発生させる形状変化は大きく分けて図1のような「曲げ」と「シワ」と定義する。「曲げ」は平面コイルのある位置を中心として曲げ半径 R で曲げることであり、「シワ」とはコイルのある位置に一定の直径 w を持った円柱型の窪みを生じさせることとする。そして形状変化させたコイルを用いて電力伝送シミュレーションを行うことで、その形状変化が電力伝送にどのような影響を与えるかを調査する。

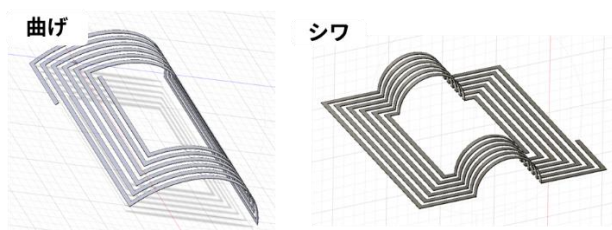


図1 コイルに発生させる形状変化

2. 関連研究

ウェアラブルデバイス向けの無線給電のためのコイルを作成する方法として、導電性繊維が用いられることが多い。導電性繊維とは銀や銅などの導電性を持った材料でメッキを施した糸などの導電性を持った繊維のことである[8]。回路の配線だけでなく、電磁波シールドや静電気抑制を目的として衣服などに組み込むことを目的として開発されている。一般的な導電性繊維は通常の銅線に比べ単位長さ当たりの抵抗値は高いが、柔軟性を持ち衣服に組み込みやすいことからスマートテキスタイル技術に広く応用されている。ここでは衣類上で無線給電システムを実現することを目的として導電性繊維などを用いたコイルを使用した例について述べる。

Jeong らは導電性繊維を用いて布地上にコイルを実装し、ズボンと靴の間で磁界結合方式を用いた無線給電を行うシ

ステムを提案した [3]。これはランニングのトラッキングなどに使用する靴型のデバイスと、ズボン型のデバイス間で無線給電を行うことを前提としたシステムである。受電コイルと送電コイルは筒状の布地に導電性繊維をヘリカル状に縫い付けることで実装している。導電性繊維は直径 $0.04[\text{mm}]$ の銅フィラメントとポリエステル繊維を撚り合わせて作成しており、抵抗値は $0.0925[\Omega/\text{cm}]$ となっている。評価実験では実装した送電コイル、受電コイルをそれぞれ被験者の靴とズボンの裾に取り付け、ルームランナーを使用しながら一定時間電力伝送効率を測定した。結果として平均効率が $45[\%]$ 、最小効率と最大効率の差が $6.15[\%]$ となった。考察では効率変化の要因を被験者の動作によるコイル間の位置ずれ、及びコイルの形状変化としていたが具体的にどのように位置ずれや形状変化が発生したかは調査されていない。また、コイルは靴とズボンに直接取り付けられていないため、実際に起こりうる位置ずれやコイルの形状変化と異なると考えられる。本研究ではコイルに生じる形状変化に着目し、シワや曲げが生じた際にどのような影響があるかを調査する。そして、形状変化によるコイルの特性変化、電力伝送効率変化にどのような違いがあるかを評価する。

また、Heo らは導電性繊維を用いて作成した平面スパイラルコイルを用いた電力伝送システムを提案した [7]。評価実験では送電コイルにリッツ線を用いた $300[\text{mm}] \times 300[\text{mm}]$ の平面スパイラルコイルを使用し、受電コイルには送電コイルと同じコイルと、 $80[\text{mm}] \times 120[\text{mm}]$ の導電性繊維を用いたコイルを切り替えて使用して比較した。また、導電性繊維を用いたコイルに形状変化が発生した場合の影響を調査するためにコイルの曲げ半径 R の大きさを変えながら透過電力を測定した。結果としては、受電コイルにリッツ線のコイルを用いた場合には透過電力が $33[\text{mW}]$ であり、導電性繊維を用いたコイルを使用した場合では $24[\text{mW}]$ まで低下した。また、導電性繊維を用いたコイルの曲げ半径 R を $50[\text{mm}]$ まで発生させた場合は曲げが無い場合と比較して透過電力が $1[\text{mW}]$ 低下し、曲げ半径 R を $20[\text{mm}]$ とした場合は $3[\text{mW}]$ 低下した。この結果から、コイルに曲げを発生させた場合には電力伝送効率が低下することがわかったが、曲げ半径 $50[\text{mm}]$ 程度の大きさの曲げであれば実用上は問題無いということもわかった。しかし、実際にコイルに発生する形状変化は単純曲げだけでなく、シワのような局所的な形状変化が考えられる。そういったコイルの形状変化の違いが実際に使用する際にどれだけ電力伝送効率に影響を与えるかは調査されていない。そのため本研究では単純な曲げだけでなく、シワが発生することを想定して電力伝送シミュレーションを行い、電力伝送にどのような影響を与えるかを調査する。

3. 本研究における調査

本研究では電磁界シミュレータを用いて形状変化を発生させたコイルの電力伝送効率や特性変化を調査する。シミュレータを使用せずに実際のコイルを用いて形状変化に対する特性変化を測定することもできるが、定量的な形状変化に対する傾向の調査を行うことが難しい。よって本研究ではコイルの形状変化を 3D モデルで表現し、定量的に形状変化に対する傾向を評価するため電磁界シミュレータを用いる。電磁界シミュレータには汎用マルチフィジックス有限要素解析ソフトウェアである COMSOL Multiphysics ver5.2a (以下 COMSOL) を使用する。以降、シミュレーションで使用するコイルのデザイン、シミュレーションの環境や条件について述べる。

3.1 コイルデザイン

本研究のシミュレーションで用いるコイルの基本的なデザインについて述べる。まず、基本的な形状として図 2 のような正方形スパイラルコイルを用いる。この正方形スパイラルコイルは様々な無線給電システムでも用いられており、布などの平面への実装が容易であり小型化が可能であるためウェアラブルデバイス向けの無線給電システムでも用いられる。コイルの外径は $d=100[\text{mm}]$ 、線径と線間ピッチは $p=2[\text{mm}]$ 、巻き数は 6 とする。また線の厚みは一般的な銅箔テープの厚みを参考とし $0.035[\text{mm}]$ とする。また、コイルの両端には共振周波数調整のためのキャパシタや測定用のポートをシミュレータ上で取り付ける。測定用のポートからは、S パラメータやインピーダンスなどを測定することができる。また、共振周波数はコイルに形状変化が無い状態で $13.56[\text{MHz}]$ となるようにキャパシタの値を調整する。この共振周波数 $13.56[\text{MHz}]$ は ISM (Industry Science Medical) バンドであり、磁界結合方式の無線給電システムで一般的に用いられている周波数である。共振周波数を調整するためのキャパシタの値は $28.9[\text{pF}]$ となった。また、コイルの線材として COMSOL の材料ライブラリで銅である Copper を設定する。以上を基本的なコイルのデザインとし、送受電コイルとして用いる。以降各シミュレーション条件によってこのコイルに「シワ」と「曲げ」の形状変化を発生させてシミュレーションを行う。

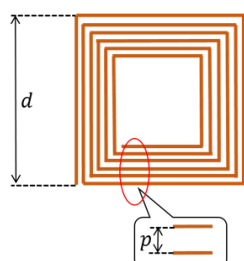


図 2 正方形スパイラルコイル

3.2 コイルに発生させる形状変化

ここではシミュレーションにおいてコイルに発生させる形状変化について述べる。形状変化は大きく分けて「シワ」と「曲げ」の二種類を発生させる。本研究では、「シワ」は図 3 のようにコイルの中心に直径 w の半円柱型の窪みを発生させることで表現する。「曲げ」は図 4 のようにコイル平面全体をある曲げ半径 R で曲げることにする。この二つの形状変化をシミュレーションすることで、それぞれの形状変化の影響を調査するとともに、局所的な形状変化である「シワ」と全体的な形状変化である「曲げ」の違いを評価する。「曲げ」と「シワ」を発生させたコイルのパラメータは図 5 のようになっている。図 5 の各パラメータのうち、 L はコイルの外径 d となるため $100[\text{mm}]$ で固定である。 R はコイルの曲げ半径、 w はシワの直径となっている。また、 D_{bend} と D_{wrinkle} はそれぞれ式(1)、式(2)で定義される「曲げ」と「シワ」が発生したときのコイルの幅であり、シワや曲げが大きいほど小さくなる。シミュレーションはシワの大きさ w と曲げの大きさ R を変更しながら行うが、この D_{bend} と D_{wrinkle} を一致させたモデル同士で比較する。そうすることによってシワと曲げが発生した際のコイルの外径を一致させ、形状変化の違いによる影響のみを評価する。表 1 にシワ w を $1[\text{cm}]$ から $6[\text{cm}]$ 発生させた場合に、それぞれの大きさのシワと対応する曲げ半径 R を示す。以降、便宜上シワの直径 $X[\text{cm}]$ を発生させたモデルをシワ $X[\text{cm}]$ 、対応する曲げ半径 R を発生させたモデルのことを曲げ $X[\text{cm}]$ と述べる。

表 1 シワの大きさと対応する曲げ半径

シワの直径 $w[\text{cm}]$	曲げ半径 $R[\text{cm}]$
1	8.30
2	5.84
3	4.74
4	4.03
5	3.62
6	3.23



図 3 コイルに発生させる「シワ」の形状

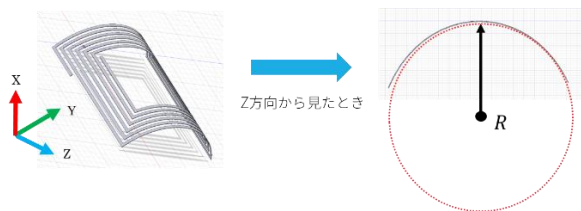


図 4 コイルに発生させる「曲げ」の形状

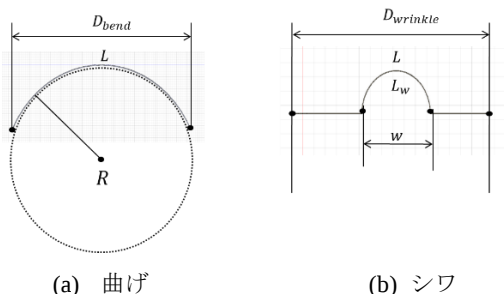


図 5 「曲げ」と「シワ」のパラメータ

$$D_{bend} = 2R \sin\left(\frac{L}{2R}\right) \quad (1)$$

$$D_{wrinkle} = L - \left(\frac{\pi w}{2} - w\right) \quad (2)$$

3.3 シミュレーション条件

ここでは、シミュレーションでのコイル配置やコイルの形状変化等の条件を述べる。図 6 に受電コイル (Rx Coil) と送電コイル (Tx Coil) の配置を示す。コイルの形状変化は図 6 で示す受電コイルに対して発生させる。受電コイルと送電コイルはコイルの中心が X 軸方向に正対するように配置する。シミュレーションでは受電コイルに位置ずれを発生させるが、その位置ずれとは受電コイルを X, Y, Z 方向にある距離だけ移動させることである。位置ずれは X 方向に 1[cm], 5[cm], Y 方向に -18[cm] から 18[cm] まで発生させる。本研究では送電コイルから受電コイルへの電力伝送効率を主に評価するが、その電力伝送効率は受電コイルに取り付けられたポートから測定した S_{21} パラメータから式(3)を用いて算出する。

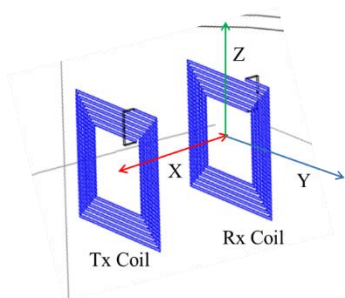


図 6 送電コイルと受電コイルの配置

$$\eta_{21} = |S_{21}|^2 \times 100 [\%] \quad (3)$$

4. シミュレーション結果

4.1 シワを発生させたコイル

まず、直径 $w = 1 \sim 6[\text{cm}]$ のシワを受電コイルに発生させた場合の電力伝送シミュレーションの結果について述べる。図 7 に $X=1[\text{cm}]$ のときに Y 方向に位置ずれを発生させた場合のシワ有りコイルの電力伝送効率を示す。また、図 8 に $X=5[\text{cm}]$ のときに Y 方向に位置ずれを発生させた場合のシワ有りコイルの電力伝送効率を示す。

図 7 をみると、 $X=1[\text{cm}]$ のときには形状変化が無いコイルの場合位置ずれが 0[cm] のときの効率が 45.5[%] で、そこから位置ずれを発生させていく毎に効率が高くなり位置ずれ $\pm 5[\text{cm}]$ のときに 97.1[%] の最高効率となっている。この位置ずれが無い、つまり送受電コイル同士が非常に近い場合に効率が低くなるのは、コイル同士が近すぎると共振周波数が二つに分かれてずれてしまうという磁界共振結合方式の特徴である。そのため磁界共振結合方式では電源の共振周波数が一定の場合、最適なコイル間の距離が存在する [9]。今回用いたコイルでは最適な距離 5[cm] であることが図 7 と図 8 からわかる。また、シワを発生させた場合の効率変化をみるとその最適な距離 5[cm] は変化しておらず、どの大きさのシワでも 5[cm] の位置ずれの場合に効率が最も高くなっている。しかし、その最大効率はシワの大きさを大きくすると低くなっており、図 7 をみると $w=1[\text{cm}]$ から 4[cm] と大きくすると最大効率は 95.1[%], 92.6[%], 89.1[%], 85.0[%] と低下している。しかし、シワの大きさが 5[cm], 6[cm] のときの最大効率は 88.9[%], 89.9[%] と逆に大きくなっている。図 8 の場合でも、形状変化無しの場合の最大効率は 99.1[%] となり $w=1[\text{cm}]$ から 4[cm] と大きくすると 97.3[%], 91.3[%], 82.7[%], 72.5[%] と低下している。そして 5[cm] で 75.6[%] と大きくなり、6[cm] のとき 71.6[%] となった。つまり、シワの大きさが 4[cm] から 5[cm] のときで効率変化が逆転している。

次に、位置ずれに対する特性変化について述べる。まず図 7 の $X=1[\text{cm}]$ のときは、形状変化無しの場合でもシワが発生した場合でも位置ずれ $\pm 5[\text{cm}]$, $\pm 9[\text{cm}]$ の付近に効率の極大値があることがわかる。位置ずれ $\pm 5[\text{cm}]$ のときは先述のように形状変化無しからシワの大きさ $w=4[\text{cm}]$ まで発生させると伝送効率が 12[%] 低下している。しかし、位置ずれ $\pm 9[\text{cm}]$ のときは形状変化無しからシワの大きさ $w=4[\text{cm}]$ まで発生させると伝送効率が 71.6[%] から 11.7[%] まで低下している。つまり、シワを大きくすることで低下する伝送効率の大きさがコイル同士の位置によって大きく異なっている。図 8 の $X=5[\text{cm}]$ のときは、位置ずれが $\pm 4[\text{cm}]$ の場合の形状変化無しとシワの大きさ $w=4[\text{cm}]$ の効率の差が 36[%] と最も大きくなっており、位置ずれを 4[cm] から大きくするとその差が小さくなっていき、 $\pm 10[\text{cm}]$ の位

置では形状変化無しとシワを発生させた場合での効率の差は10[%]以下となっている。

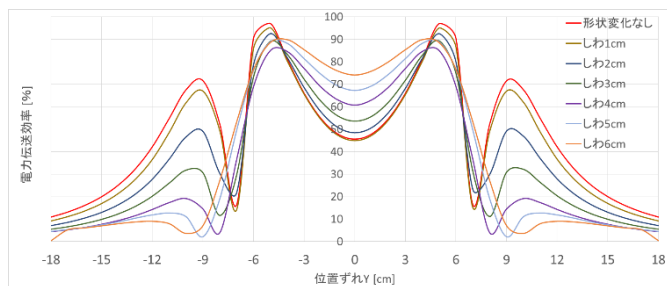


図7 シワを発生させたモデルの電力伝送効率 (X=1[cm])

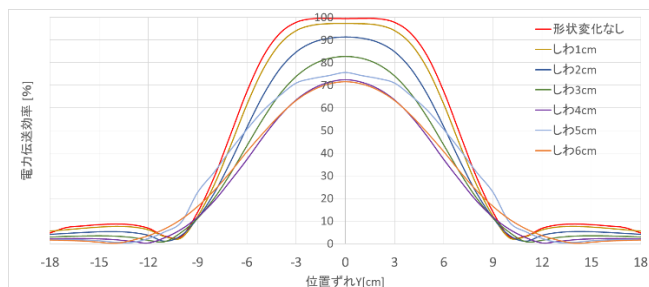


図8 シワを発生させたモデルの電力伝送効率 (X=5[cm])

4.2 曲げを発生させたコイル

ここでは、表1のシワの大きさに対応した「曲げ」を発生させた受電コイルを用いた電力伝送シミュレーションにおける電力伝送効率について述べる。まず、図9に送受電コイル間の距離 $X=1[\text{cm}]$ のときに Y 方向の位置ずれを発生させた場合の電力伝送効率を示す。また、図10に $X=5[\text{cm}]$ のときに Y 方向の位置ずれを発生させた場合の電力伝送効率を示す。

図7、図9をみると、シワを発生させたコイルと比べて曲げを発生させた場合では効率変化が大きく異なっている。シワを発生させたコイルは最大効率が形状変化無しに比べて、シワの大きさ $w=4[\text{cm}]$ まで発生させると10[%]低下していたが、曲げの場合では曲げ4[cm]の場合でも最大効率は2[%]の低下となっている。またシワを発生させたコイルに比べ位置ずれの無い位置付近での効率が高くなっており、位置ずれ0[cm]のときの曲げ3[cm]の効率は72.9[%]となっている。しかし、シワを発生させたコイルに比べ位置ずれ $\pm 10[\text{cm}]$ 付近の効率が10[%]から29[%]と低くなっている。

次に、図10をみると、 $X=5[\text{cm}]$ の場合でもシワを発生させたコイルに比べて曲げを発生させたコイルのほうが最大効率が高くなっていることがわかる。シワの大きさ $w=4[\text{cm}]$ の場合は最大効率が72.5[%]であったが、曲げ4[cm]の場合は81.5[%]となっている。また、位置ずれに対する効率低下もシワ有りコイルに比べて少なくなっている。シワの大きさ $w=3[\text{cm}]$ の場合では位置ずれ $\pm 10[\text{cm}]$ 付近の効率は3.6[%]となっているが、曲げ3[cm]の場合は15[%]となっている。

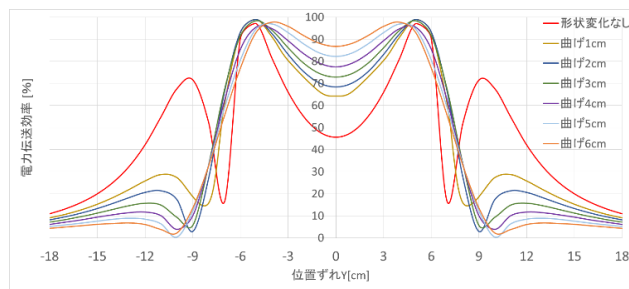


図9 曲げを発生させたモデルの電力伝送効率 (X=1[cm])

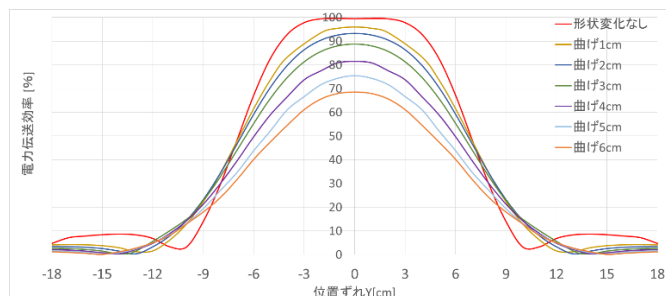


図10 曲げを発生させたモデルの電力伝送効率 (X=5[cm])

4.3 単体の特性

「シワ」と「曲げ」を発生させた各コイルについて、単体での特性変化を評価するためにインピーダンスを測定するシミュレーションを行った。ここではコイルとしての性能を評価するために、各コイルのインダクタンスの値を図11に示す。図11を見ると、シワを発生させたコイルと曲げを発生させたコイルではインダクタンスの変化が大きく異なっていることがわかる。シワ、曲げ共に大きくするごとにインダクタンスが低下しているが、曲げに比べてシワの大きさを大きくするほうがインダクタンスの低下が大きくなっている。形状変化無しの場合のインダクタンスは $5.082[\mu\text{H}]$ であるが、シワの大きさを4[cm]まで変化させた場合は $4.256[\mu\text{H}]$ まで低下し、曲げ4[cm]の場合は $4.792[\mu\text{H}]$ までの低下となっている。また、曲げの場合は曲げを大きくするごとにインダクタンスが単調に低下しているが、シワの場合は1[cm]から4[cm]までで大きく低下し、5[cm]以上では逆に上っておりシワ6[cm]では曲げ6[cm]とほぼ同じ値になっている。

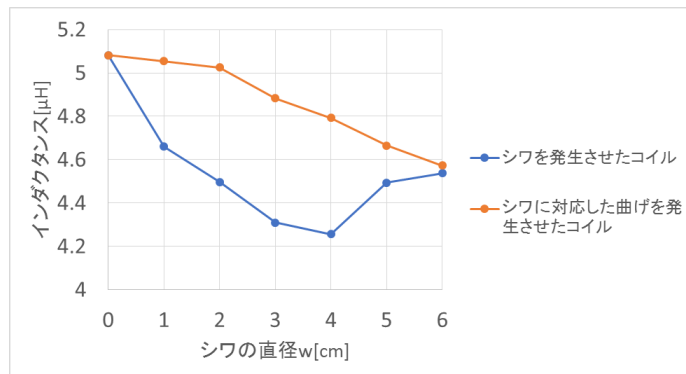


図11 シワ、曲げのモデルのインダクタンス変化の比較

5. 考察

今まで示した結果をもとに、ウェアラブルデバイス向けの無線給電システムの観点から考察を行う。まず、シミュレーションの結果からシワと曲げというコイルの形状変化に大きな違いがあるということがわかる。単体の特性変化を見ると、シワも曲げも大きくするごとにインダクタンスが低下している。しかし曲げの大きさを 1 [cm] から 4 [cm] まで大きくすることに比べ、シワの大きさを 1 [cm] から 4 [cm] まで大きくするほうがインダクタンスの低下が大きくなっている。また、シワの大きさが 5 [cm] 以上となると逆にインダクタンスが上がり、曲げ 5 [cm] 以上の値に近づいていった。つまり、シワがコイル径の半分以下である 4 [cm] 以下の場合に曲げに比べて特性が大きく異なっている。このインダクタンスの低下が原因となり、シワ 4 [cm] 以下の電力伝送効率は曲げと比較して低くなっていると考えられる。このことから、曲げのように全体的に緩やかな形状変化がコイルに発生することより、シワのような局所的に大きな形状変化が発生することのほうが電力伝送効率が低下するといえる。

例として、図 12 に最もシワと曲げの差が大きかった $X=5$ [cm] のときの曲げ 4 [cm] とシワ 4 [cm] の位置ずれに対する伝送効率変化の比較を示す。これを見ると最大効率は曲げ 4 [cm] のときのほうが 10 [%] 高くなっている。位置ずれに対する平均効率で比較しても、シワ 4 [cm] は 28.7 [%] であるのに比べ曲げ 4 [cm] の場合は 37.2 [%] と 8.5 [%] 高くなっている。この効率の差はウェアラブルデバイス向けの無線給電システムにおいては大きな影響を与えると考えられる。例えば位置ずれ ± 5 cm 以内の範囲で 50 [%] 以上の効率が求められるというシステムの場合では、曲げ 4 [cm] まで発生しても条件を満たしているが、シワ 4 [cm] の場合位置ずれが 5 [cm] 発生すると効率が 50 [%] を切ってしまう。

次に図 13 に $X=1$ [cm] の場合の曲げ 4 [cm] とシワ 4 [cm] の位置ずれに対する電力伝送効率を示す。これをみると図 12 と同様に位置ずれ ± 5 [cm] 以内での電力伝送効率の高さは曲げとシワで大きく異なっている。 ± 5 [cm] 以内の範囲において平均 10 [%] シワのほうが効率が低くなっている。この効率の差はコイル同士が近すぎることに由来のもので、コイル間の位置に合わせて適した電源周波数に調整することで改善することは可能である。しかし、現在のところそういった周波数の追従には大規模な回路を要するためウェアラブルデバイスでは実現が難しいと考えられる。そのため、ウェアラブルデバイスにおける無線給電システムではコイル間の距離や位置ずれを予め想定し、適切にコイルを設計する必要があると考えられる。例えば今回用いたコイルでは $X=5$ [cm] での位置ずれに対する効率変化が最も理想的であると考えられるのであれば、それだけコイル間の距離を離れた状態を初期状態として実装することが望ましい。し

かしコイル間の距離をとることが難しい場合は、コイルに形状変化を意図的に発生させて改善するというものも考えられる。例えば図 13 では ± 5 [cm] 以内の平均効率が、コイルに形状変化が無い場合よりコイルに曲げとシワが発生した場合のほうが高くなっている。この結果から、最大効率よりも位置ずれに対するロバスト性を求めるのであれば意図的にシワを発生させたほうが良いということになる。そのため、2 [cm] 程度のシワであれば電力伝送に問題がないと考え、コイルのデザインとして取り込むということができると考えられる。例えば衣服にはスーツのパンツのセンタープレスのように折り目やシワなどをデザインとして作っているものがある。そういった衣服のデザインとして折り目やシワがある箇所にコイルを実装したとしても、2 [cm] 程度のシワであれば効率の低下は 10 [%] と見込むことができる。

一方で、これまでの実験から曲げに比べシワのほうが伝送効率は低下するという結論を得たが、この結論からシワが複数に分散した場合にさらに電力伝送効率は低下すると予想される。例えば 3 [cm] のシワが 1 [cm] のシワ 3 つに分散した場合はより効率が低下すると考えられる。このことを検証するために、図 14 のように 1 [cm] のシワが 3 つに分散した場合のモデルを作成し、その電力伝送効率を測定した。図 15 にその結果をシワ 3 [cm] と比較して示す。結果から、シワ 3 [cm] に比べシワ 1 [cm] が 3 箇所分散した場合のほうが最大効率が 6.2 [%] 低下している。よって、上記の予測通り、衣服にコイルを実装する際には複数に分散した小さいシワの方が一つの大きなシワより効率を低下させるといえる。この結果から、実際のコイルの作成では、細かなシワが複数発生するような状況になるべく避けた方がよい、と考えられる。例えば T シャツにコイルを実装する場合、コイルに発生するシワはその T シャツの素材やサイズ、ユーザの体型によって大きさや数が変化する。その際、コイルを実装する位置や、T シャツの形状、素材などを工夫することによって、シワが複数できないよう工夫することが必要であると考えられる。

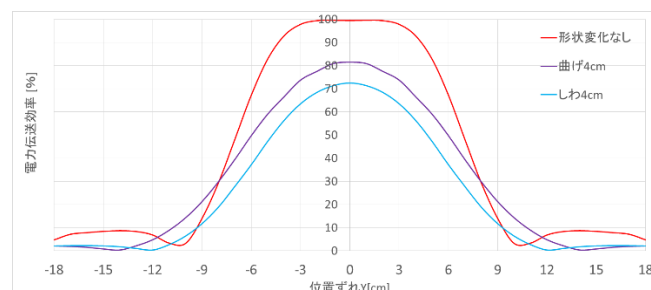


図 12 シワ 4 [cm] と曲げ 4 [cm] の比較 ($X=5$ [cm])

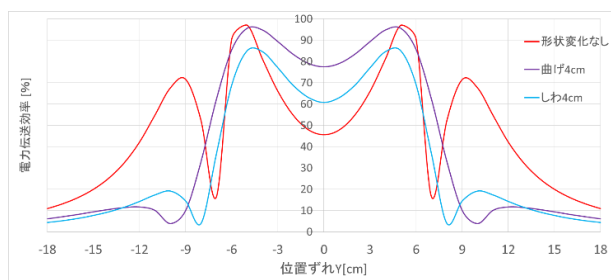


図 13 シワ 4[cm]と曲げ 4[cm]の比較 (X=1[cm])

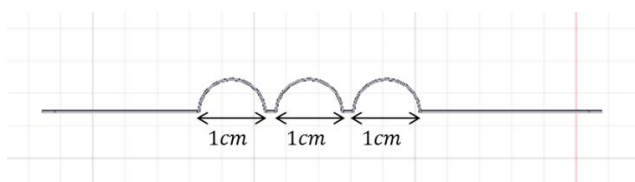


図 14 1[cm]のシワが 3 箇所が発生したコイル

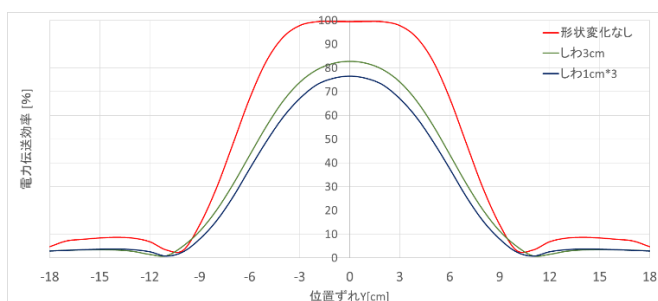


図 15 シワ 3[cm]とシワ 1[cm]が 3 箇所が発生した場合の比較 (X=5[cm])

6. まとめと今後の課題

本研究ではコイルの形状変化が電力伝送システムにどのような影響を与えるのかに着目して調査を行った。既存研究ではコイルに単純な曲げを発生させたときの影響は調査されていたが、シワに対する調査、傾向を評価したものは無かった。そのため本研究では局所的な形状変化として、シワを発生させたコイルのモデルを作成し、電磁界シミュレータによってそのコイルの特性変化や電力伝送効率等をシミュレーションした。コイルの基本形状にはウェアラブルデバイス向けの無線給電システムで多く用いられる平面スパイラルコイルを用いた。コイルに発生させる形状変化は大きく分けて「曲げ」と「シワ」と定義し、曲げとシワの大きさを変化させてシミュレーションを行った。結果から、曲げとシワでは特性変化に違いがあり、曲げのような全体的に緩やかな形状変化が発生することより、シワのような局所的に大きな形状変化が発生することのほうが電力伝送効率が平均 10[%]低下しシステムに悪影響を与えるという結果となった。特にシワの大きさがコイル径の半分以下の場合に電力伝送効率が 30[%]と大きく低下する場合があることがわかった。しかし、シワの大きさが 2 [cm]

程度であれば効率低下は 10[%]以下であるためコイルの設計を適切に行うことでシワが発生しても問題は無くデバイスへ給電ができると考えられる。また、コイル同士が近接しすぎることによる効率の低下は、シワや曲げができることで改善ができるということがわかった。そのため、衣類上のコイル同士が近接しすぎることにより効率が低下する場合は、シワや曲げを意図的に発生させて効率の向上を図ることが可能であると考えられる。今後はコイルのモデルに Cloth Simulation などの技術を適用し、実際の衣服において発生する形状変化に基づいて影響を調査することが考えられる。

参考文献

- [1] Seneviratne, S., Hu, Y., Nguyen, T., Lan, G., Khalifa, S., Thilakarathna, K., Hassan, M., Seneviratne, A., "A Survey of Wearable Devices and Challenges," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2573-2620, 2017.
- [2] Clare, L. R., Burrow, S. G., Stark, B. H., Grabham, N. J. and Beeby, S. P., "Design of an Inductive Power Transfer System with Flexible Coils for Body-worn Applications," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 660, no. 1, 2015.
- [3] Jeong, M. J., Yun, T. I., Baek, J. J. and Kim, Y. T., "Wireless power transmission using a resonant coil consisting of conductive yarn for wearable devices," *Textile Research Journal*, vol. 86, no. 14, p. 1543-1548, 2016.
- [4] Li, Y., Grabham, N., Torah, R., Tudor, J. and Beeby, S., "Textile-based flexible coils for wireless inductive power transmission," *Applied Sciences(Switzerland)*, vol. 8, no. 6, 2018.
- [5] Worgan, P. and Fraser, M., "Garment level power distribution for wearables using inductive power transfer," *2016 9th International Conference on Human System Interactions (HSI)*, pp. 277-283, 2016.
- [6] Worgan, P. and Fraser, M., "CoilMove: An actuated to-body energy transfer system," *DIS 2017 - Proceedings of the 2017 ACM Conference on Designing Interactive Systems*, pp. 791-795, 2017.
- [7] Heo, E., Choi, K.-Y., Kim, J., Park, J.-H. and Lee, H., "A wearable textile antenna for wireless power transfer by magnetic resonance," *Textile Research Journal*, vol. 88, no. 8, pp. 913-921, 2017.
- [8] Hughes-Riley, T., Dias, T. and Cork, C., "A Historical Review of the Development of Electronic Textiles," *Fibers*, vol. 6, no. 2, p. 34, 2018.

- [9] Imura, T., Okabe, H., Uchida, T. and Hori, Y., "Study of Magnetic and Electric Coupling for Contactless Power Transfer Using Equivalent Circuits," *IEEJ Transactions on Industry Applications*, vol. 130, no. 1, pp. 84-92, 2010.