

研究レポート

ワイヤレス給電を電気自動車に～電力伝送の効率化～

愛媛県立松山南高等学校

代表 3年 久保田 嘉伸 3年 奥田 眞央 3年 越智 怜楽

実験期間 2022年 4月14日～9月30日

## 1. 研究背景と目的<sup>1)</sup>

### 1.1 研究背景

現在、電気自動車の普及が進んでおり、政府も 2035 年までに電気自動車の普及率を 100 %にすると発表した。しかし、電気自動車は給電時間が長く、給電場所が不足しているなどの給電面にいまだ問題を抱えている。そこで、私達は走行中でも給電が可能であるワイヤレス給電に着目した。

従来のワイヤレス給電は、図 1 のように自動車が走行する道路にワイヤレス給電用コイルを埋め込み、車の進行方向に対して垂直に磁束を発生させ、車載の受信側コイルにて給電する仕組みになっている。この方式ではコイル間の磁束がコイル上に比べて弱くなるため、安定的に電力を供給できない。そこで、私達は図 2 のように進行方向に磁束を生じさせるシステムを考案する。このようにすれば受信側コイルに常に磁束が貫くことになるため、安定した電力を得ることができると考えられる。

また、自動車の走行するトンネルは鉄筋が用いられている。鉄筋は強磁性体であるため、この性質が磁束密度の増大に有効であると考えられる。

この 2 点について着目し、研究を行うことにした。

### 1.2 研究目的

鉄筋による磁束密度の増大と、自動車の進行方向に磁束を発生させることによって、従来よりも高い電力伝送効率の電気自動車における給電システムを開発することを目的に研究を行った。

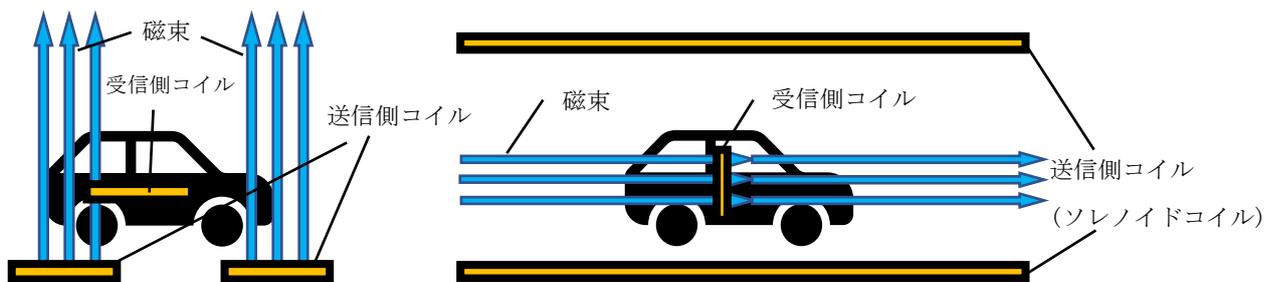


図 1 従来型のワイヤレス給電法

図 2 本研究のワイヤレス給電法

## 2. 実験における呼び方の定義

図 3 のように、鉄パイプの端を鉄パイプ端面、鉄パイプの側面を鉄パイプ側面、コイルの端をコイル端面、コイルの側面をコイル側面とし、以降はこの名称で記述する。

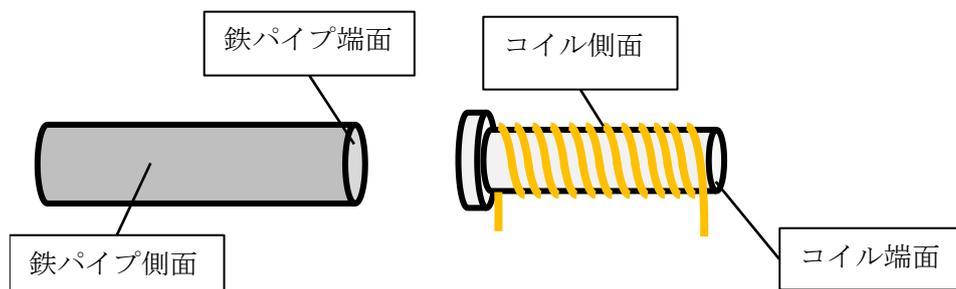


図 3 呼び方の定義

自動車の進行方向に磁束を発生させるコイルの検討を行うため、私達はソレノイドコイルに着目し、次の確認実験を行った。

### 3. 確認実験 ソレノイドコイルの磁束密度の計測

#### 3.1 実験の目的

ソレノイドコイルを貫く磁束を増大させる条件を検証し、電力伝送効率の良いコイルの形状を模索する。

#### 3.2 実験方法

- (1) 内径 2.0 cm の塩ビパイプに直径 1.0 mm のエナメル線を使用し、20 回巻、40 回巻、60 回巻、80 回巻、100 回巻のソレノイドコイルをそれぞれ作製した。作製したソレノイドコイルに 4.0 A の直流電流を流し、ソレノイドコイル内部の磁束密度をテスラメーターで測定した。
- (2) (1) と同じ塩ビパイプに 1 層を 50 回巻として、4 層 200 回巻のソレノイドコイルを作製した。作製したソレノイドコイルに 4.0 A の直流電流を流し、ソレノイドコイル内部の中心からコイルの断面方向外側に向かって 0.50 cm ずつ 2.0 cm までの磁束密度を測定した。
- (3) (2) と同じ巻き方をした 2 層 100 回巻のソレノイドコイルを作製した。作製したソレノイドコイルに 0.5 A ずつ 4.0 A まで直流電流を流し、内部及び端面の磁束密度と電流値の関係を測定した。
- (4) 同じ巻き数あたりの層数の違いによる磁束密度の変化を調べるために、(1) と同じ塩ビパイプに 1 層を 25 回巻として、4 層 100 回巻のソレノイドコイルを作製した。作製したソレノイドコイルと(3)の 2 層 100 回巻のソレノイドコイルに 0.5 A ずつ 4.0 A まで直流電流を流し、ソレノイドコイル端面の磁束密度を測定し、比較した。

#### 3.3 仮説

ソレノイドの作る内部の磁場は中心が最も強いため、ソレノイドコイルの磁束密度はコイルの中心に近いほど大きいと考える。また、ソレノイドの内部の磁場は単位長さあたりの巻き数が多くなればなるほど大きくなるため、ソレノイドコイルの磁束密度は巻数と巻数当たりの層数が多くなればなるほど大きくなると思われる。

#### 3.4 実験結果

- (1) ソレノイドコイルの巻数が多くなると磁束密度は大きくなったが、巻き数を多くするほど磁束密度の増加率は緩やかになった。
- (2) ソレノイドコイル内部では大きな変化が見られなかったが、コイル外部では、距離をとるにつれて、磁束密度は小さくなった。
- (3) ソレノイドコイル内部の方が、コイル端面より磁束密度が増大した。
- (4) ソレノイドコイル端面の磁束密度は層数を多くすると増大した。

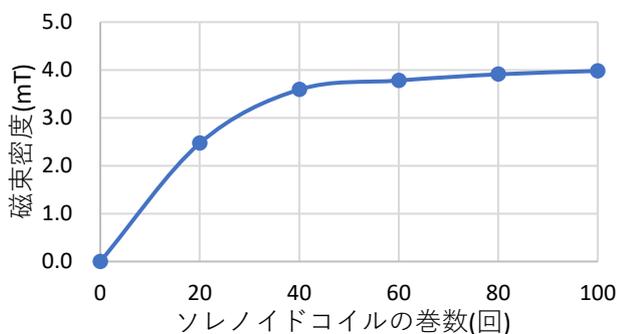


図4 確認実験(1)結果  
ソレノイドコイルの巻数とコイル内部  
中心における磁束密度の関係

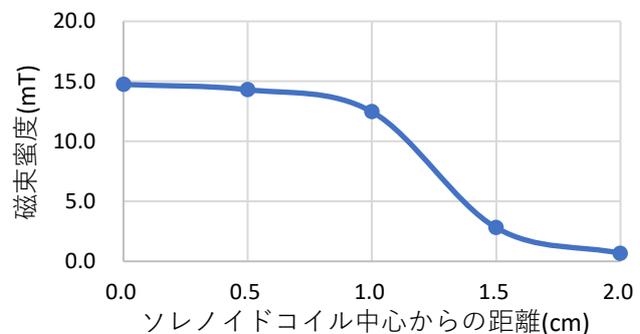


図5 確認実験(2)結果  
ソレノイドコイル中心からの距離  
と磁束密度の関係

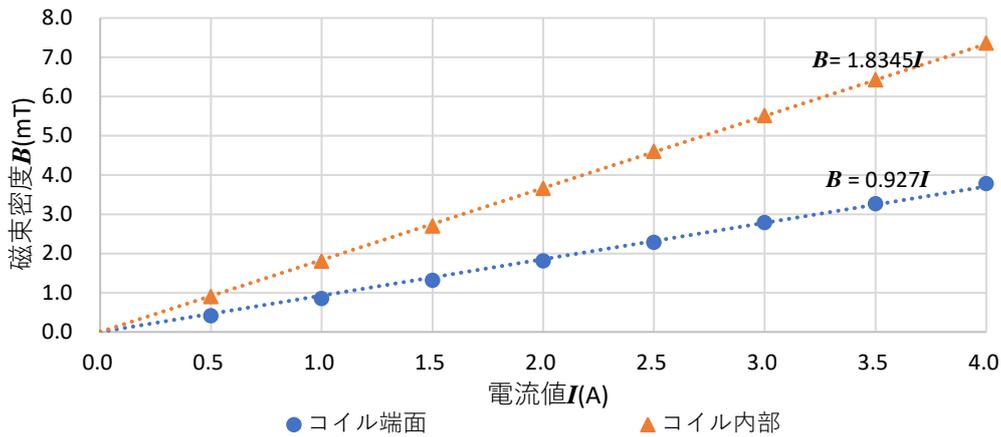


図6 確認実験(3)結果  
ソレノイドコイル内部と端面の磁束密度比較

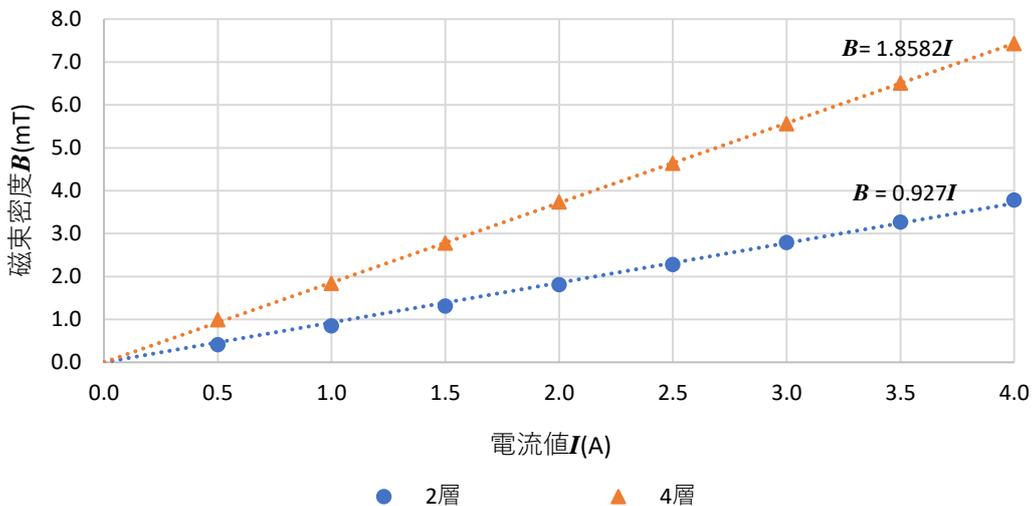


図7 確認実験(4)結果  
ソレノイドコイルの層数と磁束密度の関係

### 3.5 考察

図4より、ソレノイドコイルの巻数が少ない場合、巻数を多くするほど磁束密度は大きくなるが、巻数が多い場合は磁束密度の変化率は緩やかになることが分かる。加えて、巻数が多くなるとインピーダンスが増大することから、電力伝送効率を高めるには、巻数のみを多くすることは有効ではない。一方、図7より、コイル端面の磁束密度はコイルの層数が多くなると大きくなったため、磁束密度増大のために、層数を増やすことは有効であると考えられる。また、図5、図6より、コイルの中心が最も磁束密度が大きいことから、電力伝送において、送信側コイル内部に受信側コイルを入れる二重コイルとするのが良いと考えた。

図2のような、進行方向に磁束をかけるシステムの場合、電力を送信するコイルは、長くなければならない。したがって、これらの実験結果を踏まえれば、長くすることに対する自己インダクタンス値の変化によってインピーダンスが過剰に大きくなってしまう。よって、送信側のコイルは一層にし、可能な範囲で長さの長いコイルを作製すると良いと考えた。

一方、受信側コイルについては小型で良いので、層数の大きいソレノイドコイルにすると良いと考えられる。

## 4. 実験1 鉄パイプなしと鉄パイプ内での磁束密度の比較

### 4.1 実験の目的

ソレノイドコイルの磁束密度が鉄パイプによってどれほど増大するのかを調べる。

### 4.2 実験方法

内径 16.4 cm、厚さ 6.0 mm、長さ 80.0 cm の鉄パイプと内径 2.0 cm、長さ 9.0 cm、2 層 100 回巻のソレノイドコイルを用意した。この鉄パイプと、ソレノイドコイルを図 8 のように鉄パイプなし、鉄パイプ端面中央、鉄パイプ端面の端に置き、それぞれの位置で 0.50 A ずつ 4.0 A までソレノイドコイルに直流電流を流し、磁束密度を測定した。また、それぞれ磁束密度は、10 回測定した平均値とする。



図 8 ソレノイドコイルの配置位置

### 4.3 仮説

鉄は強磁性体であり、磁束の向きに強く磁化するため、ソレノイドコイルを鉄パイプ内に配置した方が、鉄パイプなしよりも磁束密度は大きくなると思う。

### 4.4 実験結果

どの電流値においても、鉄パイプなしよりも鉄パイプ内にソレノイドコイルを配置した方が磁束密度は大きくなった。また、ソレノイドコイルが鉄パイプ内にあるときは、コイルが鉄パイプに近い位置の方が磁束密度は大きくなった。

### 4.5 考察

どの電流値でも、鉄パイプ内の方が鉄パイプなしよりも磁束密度が大きく、鉄パイプは磁束密度増大において有効であることが分かった。また、ソレノイドコイルを鉄パイプ端面の端に置いた場合が最も磁束密度が大きくなった。これは、ソレノイドコイルが鉄に近いほど、鉄がより強く磁化されたためであると考えられる。

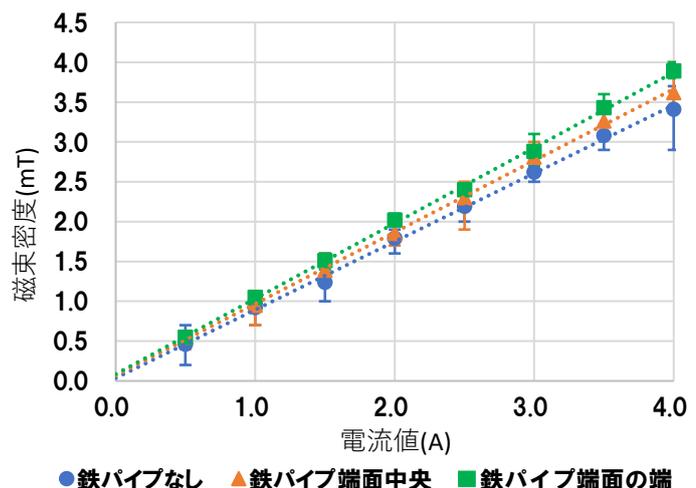


図 9 鉄パイプによる磁束密度変化

## 5. 実験2 鉄パイプ磁化時の磁束密度分布

### 5.1 実験の目的

実験1で磁束密度増大に鉄パイプが有効であることが分かったことから、鉄パイプがどの向きに磁化したのか、またソレノイドコイル周辺の磁束密度分布がどのように変化するか調べる。

### 5.2 実験方法

200回巻のソレノイドコイルに4.0 Aの直流電流を流し、ソレノイドコイルを鉄パイプ内中央に入れた場合と入れない場合の磁束密度の分布を調べ、鉄パイプの磁束の向きを調べた。また、このとき、図11のように、鉄パイプに切り込みを入れ、テスラメーターの素子が入るようにした。

### 5.3 仮説

強磁性体は磁束の向きに強く磁化される性質を持つ。そのため、鉄パイプはソレノイドコイル内部の磁束と同じ向きに磁化され、ソレノイドコイルの内部の磁束密度は増大すると考える。

### 5.4 実験結果

磁束密度分布は図12のようになった。また、図13のようにソレノイドコイル端面から鉄パイプ方向に向けての磁束密度はどの位置においてもソレノイドコイルを鉄パイプ中央に入れたときの方が小さくなった。

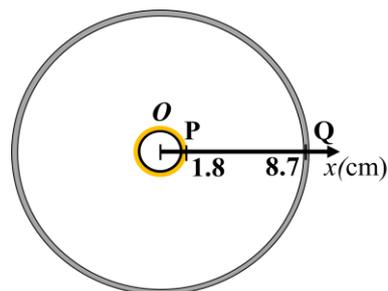


図10 ソレノイドコイルを鉄パイプ中央に置いたときの断面図



図11 鉄パイプ側面方向の磁束密度測定の工夫

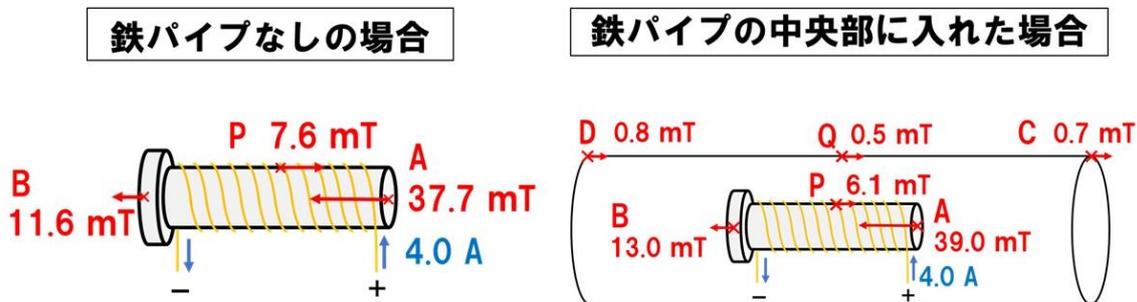


図12 ソレノイドコイル周辺の磁束密度分布

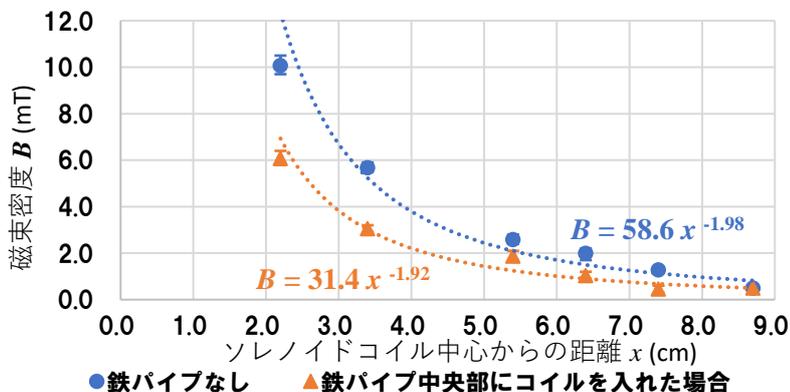


図13 ソレノイドコイル端面の磁束密度

## 5.5 考察

図12を基に、図14のような磁束線のイメージ図を作成した。図14より、鉄パイプ内に平行にソレノイドコイルを配置すると、磁束が鉄パイプに沿って発生する。また、鉄パイプ内部の磁束とソレノイドコイル外側の磁束は逆向きであるため、弱め合う。一方、ソレノイドコイル内部の磁束と鉄パイプがコイル内部に作る磁束の向きは同じであるため、強め合う。これらのことから、ソレノイドコイル外側の磁束密度は小さくなり、ソレノイドコイル内部の磁束密度は大きくなったと考えられる。したがって、確認実験と同様に実験3の結果からも、電力伝送において送信側コイル内部に受信側コイルを入れる二重コイルとするのが良いと考えられる。

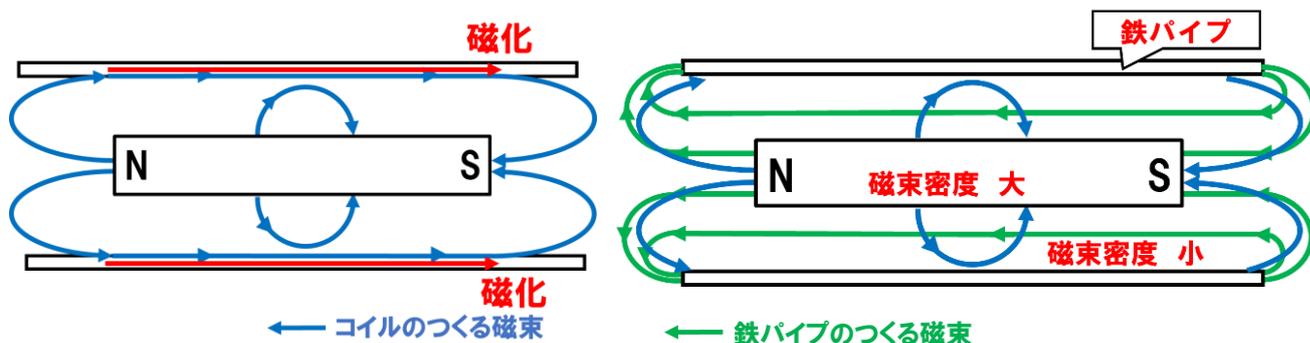


図14 実験結果から考えられる鉄パイプの磁化のイメージ

## 6. 実験3 コイルの形状による電力伝送効率の比較<sup>2)3)</sup>

### 6.1 実験の目的

電力伝送効率の良いコイルの形状の組み合わせを調べる。

### 6.2 実験方法

- (1) 図15のように、自己インダクタンスを  $107.5 \mu\text{H}$  に調整した形状の異なる3種類のコイルを作製した。図15のコイルを左からA、B、C、とし、コイルAは内径2.0 cm、外径10.0 cmのスパイダーコイル、コイルBは内径2.0 cmの塩ビパイプを使ったソレノイドコイル、コイルCは内径9.0 cmの塩ビパイプを使ったソレノイドコイルである。AとBはそれぞれ2個作製した。
- (2) 作製したコイルで図16のように回路を組み、送信側コイルの回路では負荷抵抗  $R$  の、受信側コイルの回路では負荷抵抗  $R$  からコイルまでの電圧をオシロスコープで測定し、測定値を抵抗値で割ることで、回路に流れる電流の実効値を求めた。
- (3) (2)で求めた電圧から以下に示す式(4)を用いて、電力伝送効率 PTE を計算した。コンデンサの電気容量、コイルの自己インダクタンス値を揃えることにより、コイル形状の違いによる電力伝送効率の比較を行った。

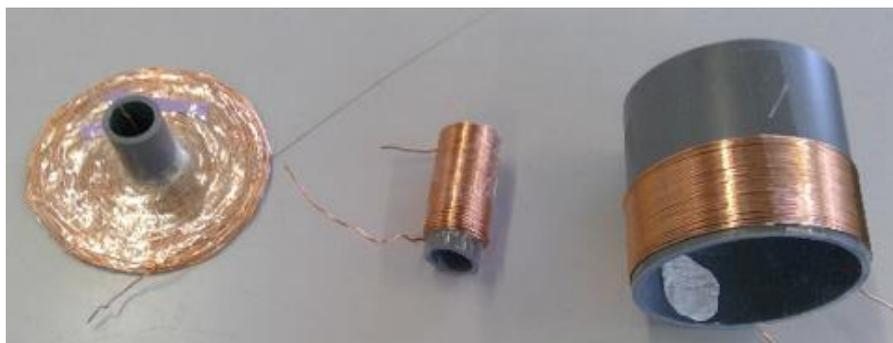
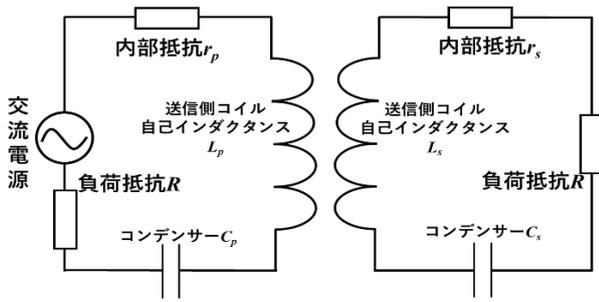


図15 作製した自己インダクタンス  $107.5 \mu\text{H}$  のコイル



送信側 インピーダンス  $Z_p$  内部抵抗  $r_p$   
 自己インダクタンス  $L_p$   
 コンデンサー電気容量  $C_p$   
 受信側 インピーダンス  $Z_s$  内部抵抗  $r_s$   
 自己インダクタンス  $L_s$   
 コンデンサー電気容量  $C_s$

図 16 送信側コイルの回路と受信側コイルの回路

### 6.3 送信側コイルと受信側コイルの組み合わせ

図 17 のように、コイル A を重ねた装置ア、コイル B を向かい合わせた装置イ、コイル C 内にコイル B を置き、コイル C を送信側コイルとした装置ウの 3 種類について実験を行った。



図 17 送信側コイルと受信側コイルの組み合わせ

### 6.4 伝送効率の計算式

送信側回路の交流電源の電力で、受信側コイルの負荷抵抗における消費電力を割ると、電力伝送効率 PTE を求めることができる。入力側の電流値を  $I_p$ 、交流電源電圧を  $V_{in}$ 、出力側の電流値を  $I_s$ 、負荷抵抗の電圧を  $V_s$ 、角周波数を  $\omega$  とすると、

$$PTE = \frac{I_s V_s}{I_p V_{in}} \quad \text{式(1)}$$

また、この回路では次の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} Z_p & -j\omega M \\ -j\omega M & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{式(2)}$$

さらに、共振周波数は次の式で与えられる。

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad \text{式(3)}$$

式(2)を整理し、共振時の伝送効率を求めると、次のようになる。

$$PTE = \frac{I_s^2 R}{I_p^2 r_p + I_s^2 (r_s + R)} \quad \text{式(4)}$$

本研究では式(4)を電力伝送効率の計算式とする。

### 6.5 仮説

コイル A を重ねた装置アは従来法であり、静止時には電力伝送効率が最も良くなると考える。また、交流の周波数が共振周波数に一致するとき、回路に強力な電流が流れるため、共振周波数時の電力伝送効率が最も高いと考える。

## 6.6 実験結果

図 18 より装置アの伝送効率が 75.0 % と最も高い結果となった。次いで、装置ウが 66.9 %、装置イが 0.1 % となった。また、図 19 のように、どの組み合わせにおいても、共振周波数時の伝送効率が最も高かった。

表 1 共進周波数時の伝送効率

装置名	伝送効率
装置ア	75.0 %
装置イ	0.1 %
装置ウ	66.9 %

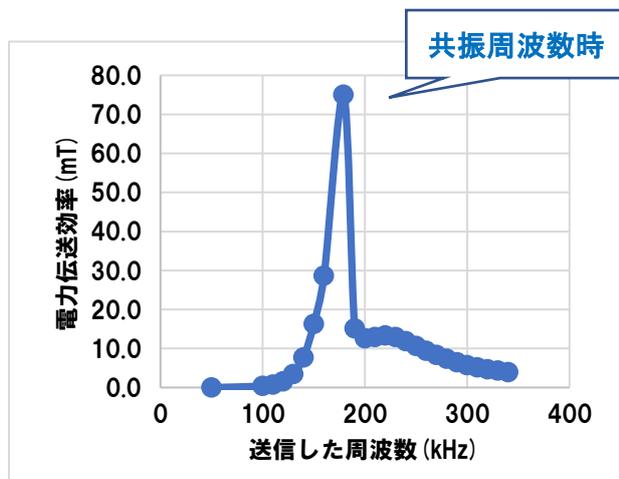


図 18 装置アの周波数と伝送効率の関係

## 6.7 考察

従来法であるスパイダーコイルを重ねた組み合わせ（装置ア）の電力伝送効率が最も高かったが、図 19 のように、送信側コイルと受信側コイルが向き合ったときの電力伝送効率は高いものの、送信側コイルと受信側コイルが向かい合わないときには電力伝送効率が悪い傾向があったため、走行時の電力伝送効率は低いと考えられる。一方で、装置ウは受信側コイルの内部に向かって送信側コイルの磁束が貫くために、走行時の電力伝送効率は高いと考えられる。

これらのことから、今後実験するに当たって、最も電力伝送効率が良かったスパイダーコイルの組み合わせである装置アを使うよりも、次いで電力伝送効率が良かった装置ウを使った方が良いと考えた。

さらに、回路にコンデンサーを使用しなかったとき、送信側コイルの回路もしくは受信側コイルの回路のどちらか一方にコンデンサーを使用したときの電力伝送効率は低い傾向が観察できた。このことから、交流電源を用いたワイヤレス給電では、両回路にコンデンサーを使用し、共振周波数の交流電流を流すことで電力伝送効率を高めることができると分かった。

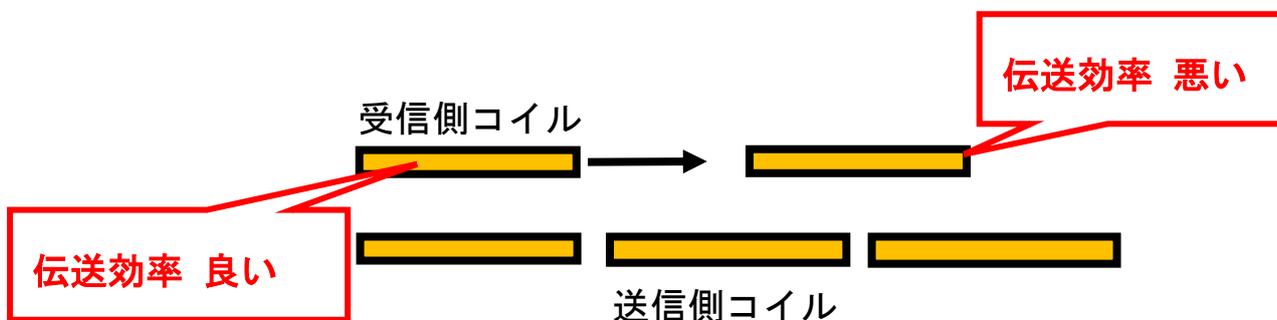


図 19 装置アの課題点

## 7. 実験4 電力伝送時における鉄パイプの有効性の検証

### 7.1 実験の目的

鉄パイプの磁化が電力伝送効率にどのように影響を与えるのかを調べる。

### 7.2 実験方法

装置ウを応用し、図20のように、鉄パイプを利用せず電力送信用コイルの中心に電力受信用コイルを配置した装置エ、鉄パイプの内側に装置ウを接するように配置した装置オ、鉄パイプの中心と鉄パイプ内にあるコイルCの中心を合わせて配置した装置カ、鉄パイプの中心と鉄パイプ内にあるコイルBの中心を合わせて配置した装置キという条件に分けた。この条件下で、実験3の図16と同じ共振回路を組み、実験3と同様の操作を行い、電力伝送効率を検証した。

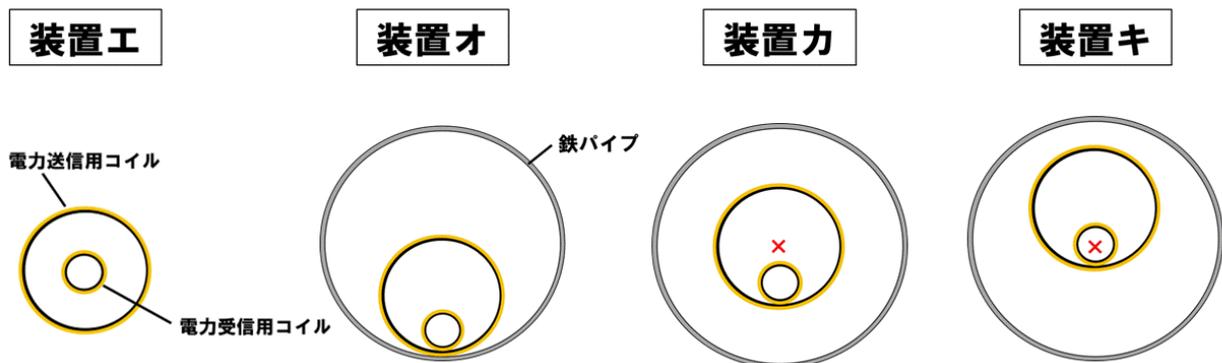


図20 装置ウを応用した配置方法

### 7.3 仮説

確認実験より、ソレノイドコイル内部の中心の磁束密度が最も大きかったことから、電力伝送効率は、受信側コイルを送信側コイルの中心に配置した装置エの方が、受信側コイルを送信側コイルの中心に配置していない装置ウより高いと考える。また、実験1より、ソレノイドコイルを鉄パイプにより近く配置すると、鉄パイプがより磁化することから、送信側コイルが鉄パイプに最も近い装置オが最も電力伝送効率が高いと考える。

### 7.4 実験結果

鉄パイプを用いない装置エの電力伝送効率が装置ウの66.9%を大きく下回った。また、装置オ、カの電力伝送効率も装置ウを下回った。一方で、装置キの結果が装置ウの電力伝送効率を上回り、最も電力伝送効率が高くなった。

表2 共振周波数時の伝送効率

装置名	伝送効率
装置エ	43.7 %
装置オ	53.0 %
装置カ	64.7 %
装置キ	69.6 %

## 7.5 考察

受信側コイルは送信側コイルの導線付近に設置した方が、送信側コイルの磁束の影響を強く受けるため、装置ウの方が装置エよりも電力伝送効率が高くなったと考えられる。また、装置キの方が装置オよりも電力伝送効率が高くなったのは、受信側コイルを鉄パイプの磁束密度が最も大きくなる鉄パイプの中心に配置したためと考えられる。このことから、装置キのように、受信側コイルの中心と鉄パイプの中心を合わせた配置が電力伝送効率を高める最も良い配置であると考えられる。また、装置キの電力伝送効率は装置ウの電力伝送効率を上回ったことから、鉄パイプの有効性が確認できた。

## 8. 結論

### 8.1 成果

電力伝送効率増大において鉄パイプは有効であることが分かった。また、従来法であるスパイダーコイルを利用してワイヤレス給電させる方法が最も電力伝送効率が高かった。しかし、自動車を走行させたときには、安定して自動車の進行方向に磁束をかけることができるソレノイドコイルの組み合わせの方が最も安定で電力伝送効率が良いと考えられる。

### 8.2 今後の課題

今回の実験では、受信側コイルを走行させながらワイヤレス給電をさせ、電力伝送効率を測定するまでの実験は行えなかった。そこで、これからの実験では、高速に走行できるようにした台車の上に受信用コイルを乗せ、鉄パイプ内に配置した送信用コイルによって起きた磁場の中を走行させた場合の電力伝送効率を検証したい。

加えて、今後の自動車に応用するにあたって、磁場の人体への影響を考慮した実験モデルを作製したい。

## 9. 謝辞

本研究にご助言、ご指導いただきました愛媛大学教育学部教授 中本 剛 先生、愛媛県総合教育センター 参河 厚史 先生、愛媛県新居浜工業高等学校教頭 露口 猛 先生に御礼申し上げます。

## 10. 参考文献

- 1) 川原圭博(2019) “スマホなど部屋中どこでもワイヤレス充電 東大が実験部屋を公開”  
<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/1906/19/news046.html>
- 2) 松本秀樹、三浦聖、森正祐、野内健太郎、大根田進、香月史郎(2016) “ワイヤレス給電用コイルの最適化検討” 昭和電線ホールディングス株式会社
- 3) 宮野忠文、山本晃、長谷川浩治(2011) “非接触電力伝送に関する基礎的検討” 広島県立総合技術研究所西部工業技術センター研究報告