

EV 用走行中非接触給電における送電コイルサイズと 給電効率に関する検討

三澤 崇弘^{*1} 田倉 哲也^{*2} 佐藤 文博^{*3} 佐藤 忠邦^{*4} 松木 英敏^{*5}

^{*1*}^{*2*}^{*3} 東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{*4*}^{*5} 東北大学大学院医工学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: ^{*1} nonaq18@ec.ecei.tohoku.ac.jp ^{*2} takura@ecei.tohoku.ac.jp ^{*3} fsato@ecei.tohoku.ac.jp

^{*4} takuni.sato@bme.tohoku.ac.jp ^{*5} matsuki@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし EV における航続距離の短さを解決する方法として、我々は非接触給電技術を利用した走行中給電を提案している。走行中給電を実現することで、車載のバッテリー容量を小さくできるだけでなく、ドライバーが電池残量を気にせず遠距離移動に EV を安心して利用できるようになる。我々は電磁誘導方式を用いた EV への大電力給電を想定している。本研究では、高速道路上での走行中給電システムにおける送受電コイル間の給電効率の目標を設定し、それを達成するための送電コイル幅と長さの検討を行った。

キーワード 非接触給電, 電磁誘導方式, 走行中給電, EV, 送電コイル

Relationship between Feeding Coil Size and Transmission Efficiency of Contactless Power Transmission for Moving Electric Vehicle

Takahiro MISAWA^{*1} Tetsuya TAKURA^{*2} Fumihiko SATO^{*3} Tadakuni SATO^{*4}

and Hidetoshi MATSUKI^{*5}

^{*1*}^{*2*}^{*3} Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6-05 Aramaki-aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

^{*4*}^{*5} Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku Univ., 6-6-05 Aramaki-aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8579
Japan

E-mail: ^{*1} nonaq18@ec.ecei.tohoku.ac.jp ^{*2} takura@ecei.tohoku.ac.jp ^{*3} fsato@ecei.tohoku.ac.jp

^{*4} takuni.sato@bme.tohoku.ac.jp ^{*5} matsuki@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract We have proposed contactless power transmission techniques for moving electric vehicles (EV) as method of resolving short cruising distance of EV. When we realize power feeding for moving EV, it will be possible to reduce in-vehicle battery and many drivers will utilize EV in relief for long-distance migration. In this research, we set up target efficiency of power transmission between feeding and receiving coil in system of contactless power transmission for moving EV on highway, and study length and width of feeding coils for achieving target efficiency.

Keyword Contactless power transmission, Electromagnetic induction type, Power feeding for moving electric vehicle, Electric vehicle, Feeding coil

1. まえがき

近年、非接触給電技術の研究・開発が盛んに行われており、その需要も様々な産業分野で拡大している。その中でも、活発に研究されているのが電動車両 (EV) への非接触給電技術の応用である。まず、プラグインの充電装置に取って代わると予想されるのが、現在多く開発が進められている停車中の非接触充電装置である。非接触で電力を供給することでプラグの抜き差し作業がなくなり、充電の利便性が向上するだけでなく、雨天時などに作業者が誤って感電する心配も減少する。

非接触充電スタンドが街中に多く設置されれば、ドライバーが充電したいときにすぐに充電スタンドに立ち寄り、簡単に充電が可能となる。

EV における実用上の問題点は、航続距離が比較的短いということである。自宅や街中における EV の利用には、近くの充電スタンドに立ち寄り充電すれば、普段の生活に必要な航続距離を確保することができる。しかし、高速道路などを利用した遠距離移動に関しては、航続距離が短いことで走行中の電欠が生じるリスクが増加してしまう。そこで、我々は

高速道路に非接触給電技術を利用した充電レーンを設置し、地面から非接触で EV に電力供給することで、バッテリー容量が少なくても目的地まで走り切ることができる方法を提案する。走行中に非接触で給電するため、パンタグラフのような接触式に比べて摩擦による消耗がないためメンテナンス頻度も少なく、騒音も発生しないというメリットがある。これにより充電レーンで走行している間は電欠の心配もなく、ドライバーが安心して運転することができる。非接触給電技術により、EV による人の近中遠距離移動を安心かつ便利にすることができる。

非接触給電技術にはいくつかの方式があり、その中で我々は電磁誘導方式について多く研究を行ってきた。電磁誘導方式とは送受電コイル間の磁気的な結合を利用したものである。この方式の特徴として、広範囲の距離に対して大電力を高効率に給電することができることがある。よって、EV 用非接触給電装置に必要とされる大電力に対してはこの方式を利用することが最も適していると考え、採用した。また他の特徴として、負荷との整合回路を設計することで給電効率を向上できる。この整合回路はコイルとコンデンサの共振現象を利用している。その際に給電効率を決めるのは、送受電コイル間の結合係数とそれぞれのコイルの Q 値の積である^[1]。

高速道路における走行中給電においては送電インフラの普及が必須である。一送電コイルサイズの検討を行うために、本研究における送受電コイル間の給電効率を設定する。高速道路における走行中給電の電力供給には自然エネルギーの一つである太陽光発電を利用することが望ましいと考えられる。二つのサービスエリア間 50 km を一区間として道路脇にソーラーパネルを設置することを想定する。ソーラーパネルの高さを高速道路の防音壁と同等の 2 m とすると、これらで発電可能な電力は 11.8 MW となる。ここで、走行中の EV における車間距離を 100 m とすると、50 km の間に 500 台存在していることになる。一台当たり走行に必要な電力は現行 EV の仕様より 15 kW 程度である。よって、500 台分の必要電力は 7.5 MW となり、電源用インバータ効率と整流効率を含めて総合効率として 63 % が必要になる。今、インバータ効率を 90 %、整流効率を 90 % とすると、必要となる送受電コイル間の給電効率は 80 % 程度となる。したがって、本研究では給電効率 80 % を目標に送電コイルサイズ（幅及び長さ）について検討を行った。

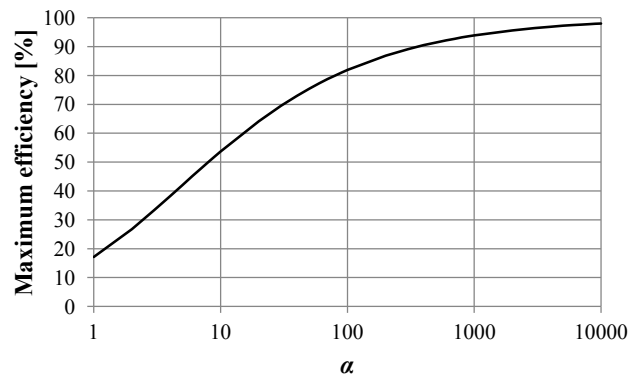


図 1：性能指標 α と最大伝送効率の関係

2. 走行中非接触給電

2.1. 電磁誘導方式

電磁誘導方式において送受電コイル間の給電効率を決めるのは、コイル間の結合係数とコイルの Q 値の積である。我々は結合係数と Q 値の積を電磁誘導方式における性能指標として下式のように定義している。

$$\alpha = k^2 Q_1 Q_2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

電磁誘導方式におけるコイル間の最大効率は α を用いることによって次のように表せる。

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\alpha}(1 + \sqrt{1 + \alpha})} \quad \dots\dots\dots(2)$$

α と送受電コイル間の給電効率の関係を図 1 に示す。 α が増加することで給電効率が向上することが分かる。電磁誘導方式においてこの α をいかに増加させるのが高効率な給電の鍵を握っている。

2.2. 給電回路の構成

非接触給電システムの全体像を図 2 に示す。太陽光発電から供給される電力をインバータにより高周波数に変換する。この高周波電力を送電コイルに供給し、磁気的な結合を利用し受電コイルに電力を非接触で供給する。その後、交流を直流に変換し、負荷に電力を供給するという構成である。その中で、非接触給電回路部は図 3 に示すように、送受電コイル、整合用コンデンサから構成される。受電コイルに接続されるコンデンサの役割は負荷との整合である。接続方法によって広範囲の負荷に対して高効率な給電を実現できる。また、送電コイルに接続されるコンデンサは力率改善及び入力インピーダンス調整の役割をする。受電側の構成は負荷とのマッチングが広範囲で可能な直並列共振回路を用いる。この回路は受電コイルに接続する直列及び並列コンデンサを調整するこ

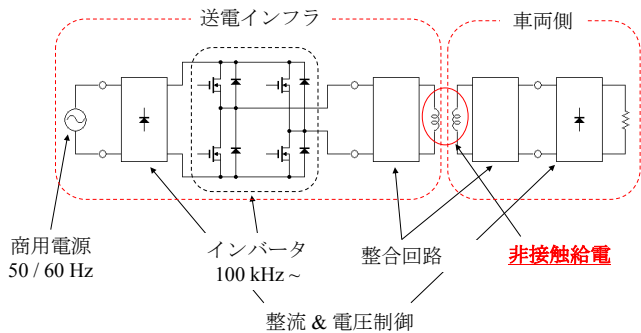


図 2: 非接触給電システム

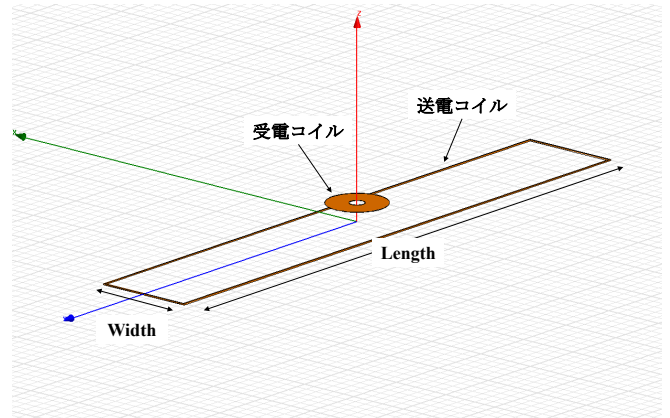


図 4: 送受電コイル構成

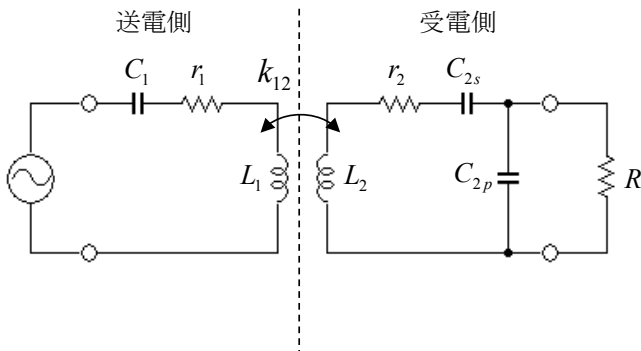


図 3: 給電回路

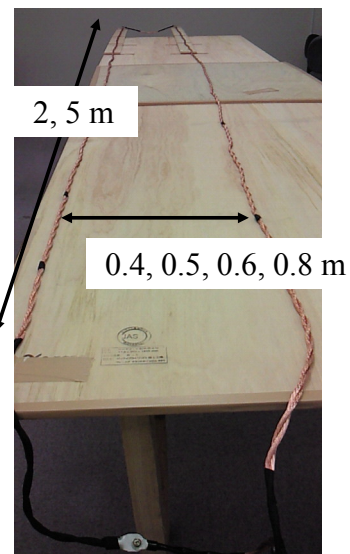


図 5: 送電コイル

とで多くの負荷に対して対応できる。伝送効率を最大にするコンデンサの値はそれぞれ次の通りとなる^[2]。

$$C_{2s} = \frac{1}{\omega r_2} \frac{1}{Q_2 - \sqrt{\frac{R}{r_2} \sqrt{1+\alpha} - (1+\alpha)}} \quad \dots\dots(3)$$

$$C_{2p} = \frac{1}{\omega R} \sqrt{\frac{R}{r_2} \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}}} - 1 \quad \dots\dots(4)$$

一方、送電側の構成は送電コイルとそれに直列にコンデンサを接続している。送電コイルに接続しているコンデンサ C_1 の値は次の通りである。

$$C_1 = \frac{1}{\omega r_1 Q_1} \quad \dots\dots(5)$$

2.3. 送受電コイル

送受電コイルの構成を図 4 に示す。送電コイルには走行方向に安定的に給電可能なレーン状の長方形コイルを想定している。また、送電コイルから発生する上方向の磁束を受け取るために、受電コイルには円形スパイラルコイルを使用する。

3. シミュレーション及び実験

3.1. 送受電コイル製作

送電コイルは図 5 のような 1 ターンの長方形コイルを製作した。リッツ線には素線径 0.1 mm、撚り数 1120 本のを 2 本撚って使用した。受電コイルには図 6 に示すような円形スパイラルコイルを使用する。その仕様は表 1 に示す通りである。受電コイルの内外径比は周波数 100 kHz において Q 値が最も高くなる 1 : 4 とした。

3.2. 送電コイル特性

製作した各送電コイルの特性を測定した。なお、測定には Agilent 製 E4980A を用いた。各送電コイル長 (2, 5 m) 及び幅 (0.4, 0.5, 0.6, 0.8 m) におけるインダクタンス、巻線抵抗及び Q 値を図 7, 8, 9 に示す。周波数は 100 kHz である。長さを変化すると Q 値の変化があるが、同じ長さで幅を変化させたときは Q 値にほぼ変化はなかった。2 m のコイルにおいて Q 値は 180 程度、

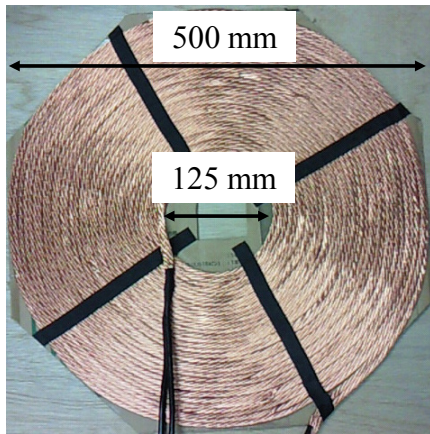


図 6：受電コイル

表 1：受電コイル仕様

外径 [mm]	500
内径 [mm]	125
巻き数	17
周波数 [kHz]	100
L [μH]	81.8
r [$\text{m}\Omega$]	97
Q	530

5 m のコイルでは 220 程度であった。

3.3. 送受電コイル間の結合係数分布

送受電コイル間の結合係数分布をシミュレーション及び測定により検討した。シミュレーションにはノイマンの公式を用いた^[3]。送受電コイル間距離は 150 mm とし、走行中の位置ずれを考慮し、位置ずれ 400 mm までシミュレーション及び測定により検討を行った。

図 10, 11 に送電コイル長 2, 5 m 及び幅 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 m について結合係数分布を示す。結果より、送電コイル長及び幅が増加すると結合係数が低下することが分かる。しかし、幅が増加すると走行位置ずれが生じたときの結合低下が抑えられることが分かる。送電コイル幅を拡大すると、図 12 に示す磁束密度分布になる。幅が拡大することで、コイル中心部の磁束密度が低下するため、送電コイル中央部での結合係数が低下し、位置ずれが生じてても結合低下を抑制できる。つまり、送電コイル幅が広い場合、安定給電が可能になるということである。

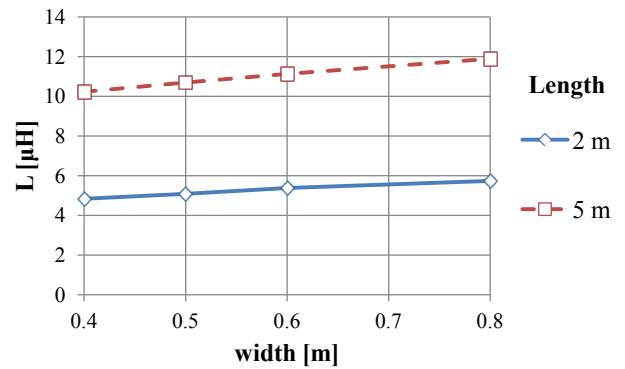


図 7：各コイル長及び幅におけるインダクタンス

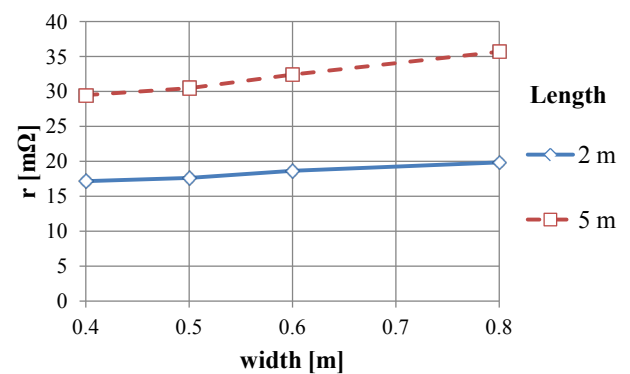


図 8：各コイル長及び幅における巻線抵抗

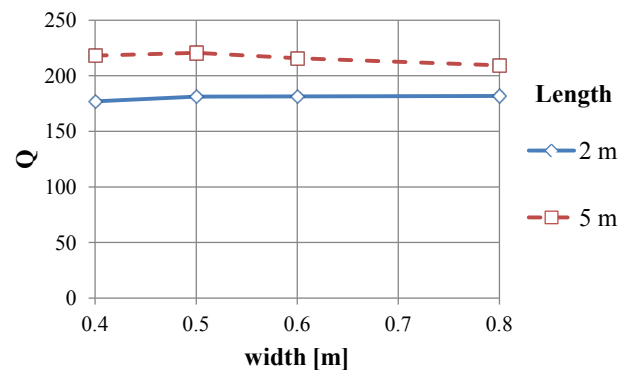


図 9：各コイル長及び幅における Q 値

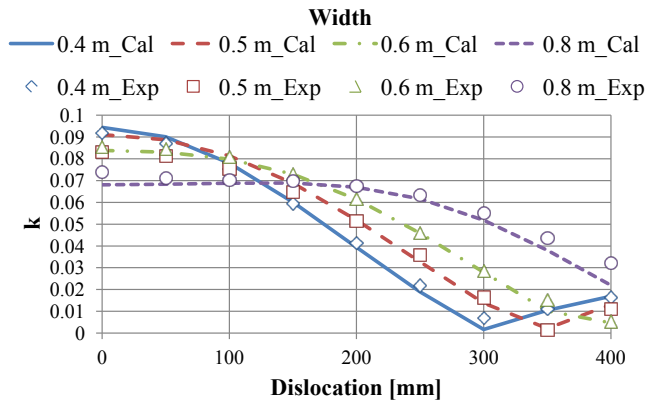


図 10：送電コイル長 2 m における結合係数分布

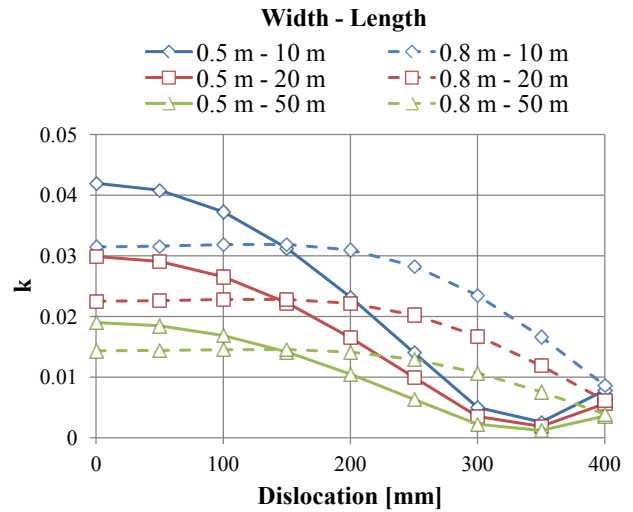


図 14：送電コイル長を拡大した場合の結合係数分布

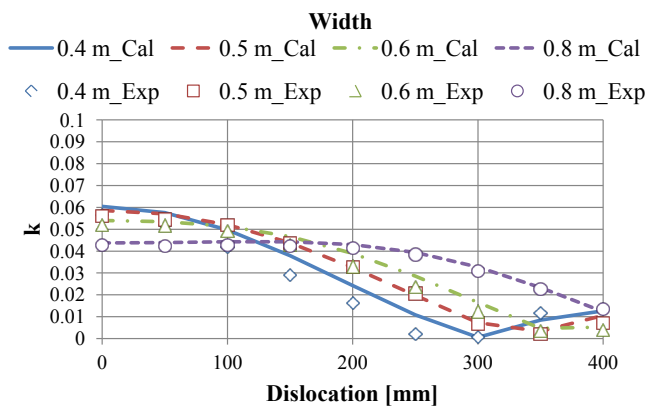


図 11：送電コイル長 5 m における結合係数分布

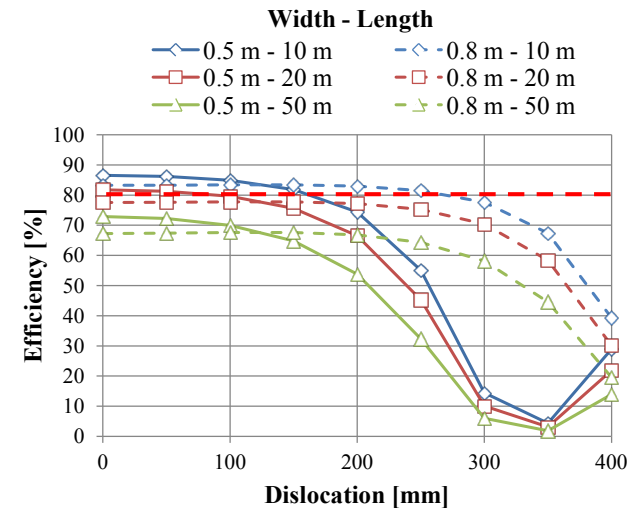


図 15：送電コイル長を拡大した場合の給電効率分布

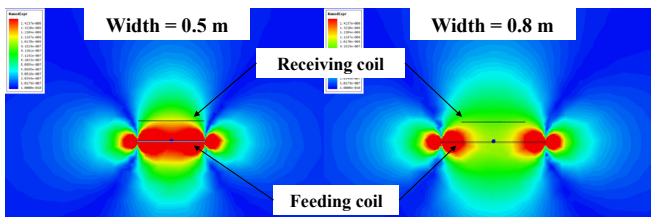


図 12：送電コイル幅と磁束密度（コイル上方向成分）

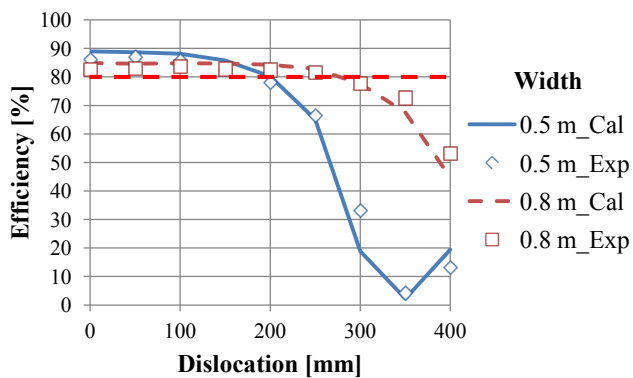


図 13：給電効率

3.4. 送受電コイル間の給電効率測定

送電コイル長さ 5 m において給電実験を行いコイル間給電効率の測定を行った。シミュレーション及び測定結果を図 13 に示す。まず、シミュレーション値と測定値の比較をみると、最大で 10 % 程度差異が発生している点もあるが、他の点は 3 % 程度の差異となっており、シミュレーション値の妥当性は確認できたと言える。送電コイル幅が 0.5 m の場合、走行位置ずれ 150 mm 程度まで目標効率 80 % を上回った。また、送電コイル幅が 0.8 m の場合、誤差 250 mm 程度まで目標効率を上回る結果となった。これより、送電コイル幅を増加させるとレーン中央での給電効率は低下するが、位置ずれが増加した時の効率低下を抑えることができ、安定給電が可能になることが分かる。

3.5. 送電コイルサイズ拡大

送電コイル長をさらに拡大した場合の結合係数分布と給電効率分布の検討を行い、各送電コイルサイズにおいて効率目標達成可能範囲を明らかにする。

まず、結合係数分布のシミュレーション結果を図 14 に示す。これより、位置ずれ特性は送電コイル長を拡大してもほぼ同じ位置において結合係数が低下するという傾向を示すことが分かる。

結合分布の結果をもとに給電効率分布について検討する。図 15 に送受電コイル間の給電効率分布のシミュレーション結果を示す。送電コイル長 10 m の場合、幅 0.5 m 及び 0.8 m において、それぞれ走行位置ずれ 150, 250 mm 程度までで目標効率を上回った。送電コイル長 20 m の場合、幅 0.5 m においては位置ずれ 50 mm までで目標効率を達成しているが、幅 0.8 m においては中央位置においても目標達成不可という結果となった。送電コイル長 50 m の場合、幅 0.5 m 及び 0.8 m 両方で目標効率を達成することができないことが分かった。以上より、送受電コイル間距離 150 mm の場合、送電コイル長 10 m において、高効率かつ位置ずれに対して安定的な給電が可能であることを示せた。

次に、送電コイルサイズを拡大し、送受電コイル間距離が変化した場合について検討する。ただし、受電コイルは送電コイルの中央に位置している場合を想定している。それぞれの送電コイル長の場合における送受電コイル間距離変化に対する結合係数特性を図 16 に示す。それに基づいて距離に対する給電効率特性は図 17 のようになる。目標効率を達成可能な範囲は表 2 に示す通りである。これより、距離 50 mm の場合、送電コイル長 50 m においても効率 80 % を上回る高効率な給電が可能となることが分かる。したがって、長距離の高効率な走行中給電も可能であることが示された。

4. まとめ

本研究では、EV 用走行中給電システムにおける非接触給電部の目標効率を設定し、送電コイルサイズを変化させた場合の目標達成範囲を明らかにした。送電コイル長及び幅を増加させると、給電レーン中央部において結合係数が低下することにより給電効率が低下する。一方で、送電コイル幅を増加させることで走行位置変化が生じたときの結合低下を抑えることができ、安定給電を実現可能となる。また、給電実験及びシミュレーションにより長距離の高効率走行中給電が可能であることを示すことができた。

今後、更なる給電範囲拡大には、送受電コイル間の結合係数を向上するコイル形状の検討または送受電コイル双方の Q 値を向上するコイル設計の検討が必要となってくる。

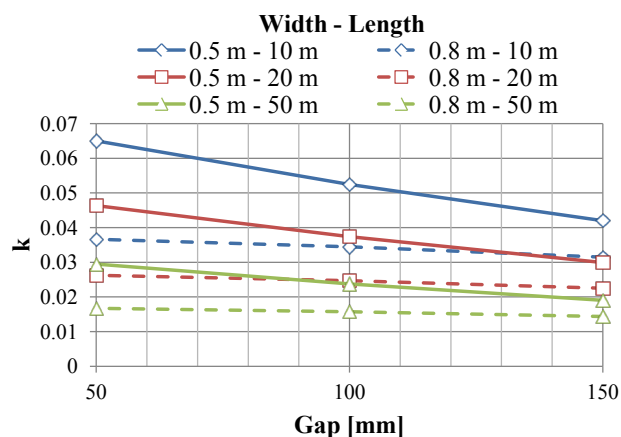


図 16：送受電コイル間距離変化に対する結合係数

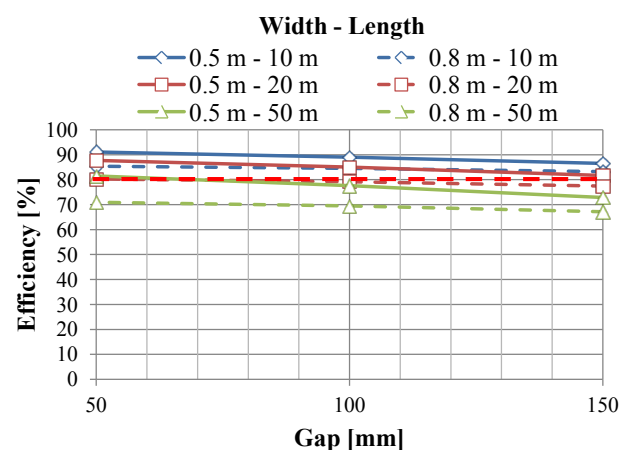


図 17：送受電コイル間距離変化に対する給電効率

表 2：目標効率達成範囲

Gap [mm]	50	100	150
Length [m]	目標効率達成		
10	○	○	○
20	○	○	○
50	○	×	×

文 献

- [1] 田倉哲也, 太田佑貴, 加藤健太郎, 佐藤文博, 松木英敏, 佐藤忠邦, 野中崇: 「電磁誘導型非接触給電における効率と性能指標の関係」, J. Magn. Soc. Jpn., Vol. 35, No. 1, pp. 132-135, 2011
- [2] T. Misawa, T. Sato, T. Takura, F. Sato, and H. Matsuki, "Stabilization of input impedance for wireless power supply circuit", J. Appl. Phys. 111, 07E720, 2012
- [3] 福永利徳, 柴田随道, 富沢雅彰, 伴弘司: 「解析手法を用いたコイルインダクタンス計算手法」, 信学技報, 1999