

走行中ワイヤレス給電用インホイールコイルの基礎技術開発

清水 修¹⁾ 永井栄寿¹⁾ 藤田稔之¹⁾ 藤本博志¹⁾ 郡司大輔²⁾ 桑山勲³⁾

Development of Basic Technology for Dynamic Wireless Power Transfer System with In-Wheel Coil

Osamu Shimizu Sakahisa Nagai Toshiyuki Fujita Hiroshi Fujimoto Daisuke Gunji Isao Kuwayama

Eddy current loss of foreign matter metal object is one of the biggest problems for wireless power transfer. Eddy current loss decreases efficient of wireless power transfer and increase temperature. To solve this problem, wireless power transfer system through the tire and wheel is proposed. For this system, methodology of arc-shaped coil design and materials for tire and wheels that do not occur eddy current loss is proposed with actual measurement data.

KEY WORDS: EV and HV systems, motor drive system, tire, in-wheel motor (A3)

1. 研究の背景

電気自動車の性能的課題として、航続距離が挙げられる。航続距離の伸長にはバッテリーの搭載量を増やすことが効果的ではあるが、バッテリーの搭載量を増やすと車体重量が増えることにより、走行抵抗が増加し、走行にかかるエネルギーが増大する。走行にかかるエネルギーが増大すると電気自動車の充電に係る発電量が増える。ほとんどの国で発電には化石燃料を用いるため、電気自動車普及の大きな目的である二酸化炭素の削減と化石燃料の使用量削減を実現できなくなり、持続可能でなくなる。

航続距離の持つ課題の抜本的解決方法として走行中給電¹⁾が提案されている。走行中に車両に給電を行うことで、車両に搭載するバッテリーは大きく削減することができ、走行にかかるエネルギーを削減することができる²⁾。走行中給電の方式としては接触式給³⁾と非接触式給電(WPT: Wireless Power Transfer)があり、非接触給電方式には主に電界結合方式⁴⁾と磁界結合方式⁵⁾が提案されている。しかし現状、対候性の観点から屋外では磁界結合方式を採用することが求められている。磁界結合方式は送電コイルが発生する磁界を受電コイルが受けることによって電力電送をするため、発生磁界が導電体を鎖交すると導電体内に渦電流が発生し、損失となる。また発熱により、周辺部品の劣化や発火に繋がる恐れもある。導電体の検知のために導体が侵入した際の等価回路が提案されており、異物検知システムも提案されている。

金属異物検知をした場合に送電システム自身が金属異物を取り除くことは容易でないため、送電停止し、金属異物の存在を外部に知らせ、金属異物の除去をするという方式が想定

される。すると、設備観点だと金属異物により設備の利用率が低下することとなり、車両観点だと給電の機会を逸することとなる。そのため、金属異物が送電コイルと受電コイルの間に入らないようにすることは効率的に電力、設備、車両を利用できる手段となる。

2. インホイールコイル

金属異物を送電コイルと受電コイルの間から排除するために、インホイールコイルによるタイヤ内給電を提案する。インホイールコイルとは受電コイルをホイール内部に配置する形式である。受電コイルをホイール内に配置することで、金属異物が送電コイルと受電コイルの間に入る可能性を大きく減らすことができる。

ここで提案する無線電力システムは送受電双方の送電コイルと共振コンデンサを直列に接続する Series-Series(SS)方式であり、送電に使用する周波数は 85kHz としている。SS 方式の理論最大効率率は Fig.1 に示す等価回路から、式(1)に示す結合係数、式(2)に示すコイルの Quality Factor(Q 値)より、式(3)で表される。

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{\omega_0 L_i}{R_i} \quad (i = 1 \text{ or } 2) \quad (2)$$

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (3)$$

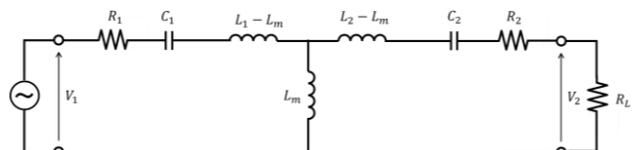


Fig.1 Equivalent Circuit of SS System

1) 東京大学(277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

2) 日本精工(株)(251-8501 神奈川県藤沢市鶴沼神明 1-5-50)

3) 株式会社ブリヂストン(187-8531 東京都小平市小川東町 3-1-1)

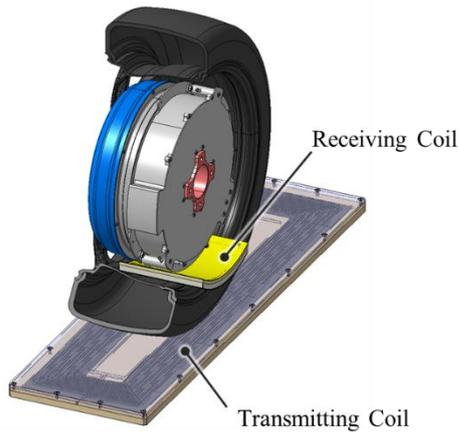


Fig.2 In-Wheel Coil

ここで k は結合係数、 Q_i はコイルの Q 値、 η_{max} は理論最大効率であり、 L_m は相互インダクタンス、 L_i はコイルのインダクタンス、 R はコイルの抵抗である。また1が送電側、2が受電側を示す。

電力電送効率向上のためには R の低減と L_m の向上が効果的である。コイルの形状でなく、位置関係により大きく変化するパラメータは L_m であり、 L_m の向上には送電コイルと受電コイルの距離の短縮が重要である。ホイール内にコイルを配置する場合、送電コイルと受電コイルの距離を最小化するにはホイールの形状に沿った形に湾曲したコイルが有効である。ホイールの形状に沿った形状のタイヤ内給電のコイルの構造をFig.2に示す。

ホイール内下部に受電コイルを設け、受電コイルはブレーキキャリパーなどを固定するアップライトに取り付けられるため、受電コイルはホイールと同期して回転せず、静止した状態で受電を行う。受電した電力はホイール内、もしくは車体側に取り付けられた整流器で整流された後にバッテリーの充電に使用される。受電コイルとホイールの間には回転部との接触を防ぐために空隙が設けているが、タイヤとホイールが受電コイルに挟まれ、全周にわたり存在するため、金属異物を防ぐことができる。

3. タイヤ内の損失低減

3.1. タイヤの構造

タイヤは主に合成ゴムで構成されているが、骨格補強部材として金属や有機繊維が用いられている。ホイール内給電用コイルが発生する主磁束はタイヤの接地面を通るため、タイヤのトレッド部分に導電体が配置されていると渦電流損が発生し、損失となる。また損失は熱となりタイヤの温度を局所的に上昇させるため、回転位置によるタイヤの性能バラつきや劣化を発生させ、最悪の場合には発火に至る可能性がある。

タイヤのトレッド部分はトレッド部、ベルト部、インナーライナー(I/L : inner liner)部に分けられる。それぞれの構

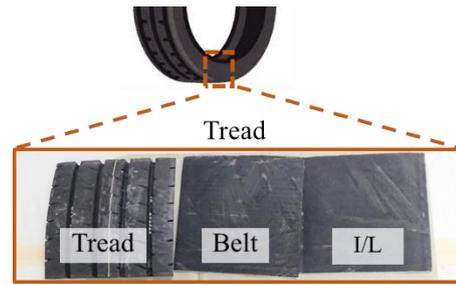


Fig.3 Parts of Tire Tread

造をfig.3に示す。

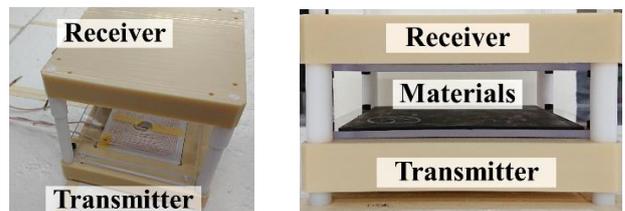
トレッド、I/L部は合成ゴムで構成される。ベルト部にはタイヤの接地性や剛性を保つために合成ゴムの他にスチールベルトが用いられている。

3.2 合成ゴム材料によるWPT性能への影響評価

合成ゴムには導電性を持つカーボンブラックが含まれるため、ゴム材料がWPT性能に与える評価を行った。材料によるWPT性能変化の評価設備をFig.4に示す。

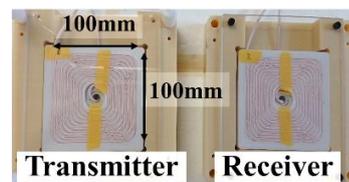
100mm四方の送受電コイルを設け、その間に材料を挟んでWPT性能の変化を評価できる設備となっている。ここでは送電実験は行わずにコイルパラメータとして送電側と受電側の抵抗とインダクタンス、また相互インダクタンスを計測して結合係数と送電コイル、受電コイルの Q 値理論効率で評価する。

本研究で材料をTable.1に示す。乗用車用の合成ゴム2種類と商用車用の合成ゴムのそれぞれに対して、低燃費タイヤと高性能タイヤを2種類ずつ、計4種類の合成ゴム材料を評価した。合成ゴム材料は150mm四方の2mm厚の形状に切り出して使用し、コイル中央に配置することでコイルの上部すべてを覆うように配置して評価を行った。評価時の周波数は85kHzである。



(a) Overview

(b) Material Setting



(c) Coil Dimensions

Fig.4 Material Evaluation Equipment

Table.1 Test Pieces

No.	Types of Tire	
	Vehicle Type	Use Type
Rubber1	Passenger Vehicle	Eco
Rubber2		Sports
Rubber3	Track	Eco
Rubber4		Sports

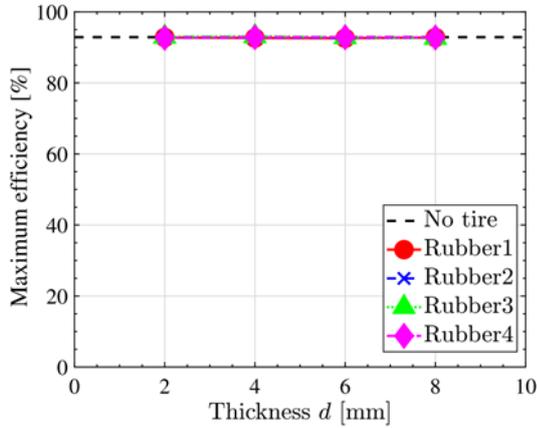


Fig.5 WPT Efficiency with Rubber

評価結果を Fig. 5 に示す。ゴム材料の枚数を変えることによって厚さを変化させながら測定を行った。測定の結果、すべてのパラメータに変化は見られなく、結果として効率に変化はなかった。カーボンブラックは合成ゴムの中に含まれるが、粒径が $50 \mu\text{m}^{\text{⑥}}$ 程度と非常に小さいため発生する渦電流がコイルパラメータや WPT 性能として現れないレベルであったと考えられる。これによりタイヤのトレッド部、インナーライナー部による 85kHz の WPT 性能への影響はないということを示した。

3.3 ベルトによる WPT 性能への影響評価

3.3.1 材料試験装置による評価

鉄は導電性と高い透磁率を持つため、スチールベルトには渦電流損が発生することが考えられる。渦電流損は形状にも依存するため、タイヤ形状での評価が必要になる。そのため Fig. 3 の様にスチールベルト部のみをタイヤから切り出し、評価を行った。前述の通り、85kHz であればゴム材料による WPT 性能への影響はないことが明らかになっているため、ここでの評価はベルトによる影響の評価ということになる。また、スチールベルトの代替として有機繊維のベルトを用いた場合の評価を行った。有機繊維ベルトは製品としては航空機用のタイヤなどに使用されている。今回の供試体は車用のタイヤとして試作した有機繊維ベルトタイヤを切り出して作成している。評価装置はゴム材料と同様に Fig. 4 に示した評価装置を用いて、85kHz での測定を行った。

コイルパラメータの測定結果を Fig. 6 に示す。そして、コイルパラメータを基にした結合係数、コイルの Q 値、理論最

大効率を Fig. 7 に示す。

測定の結果、スチールベルトは抵抗が大きくなり、有機繊維ベルトは変化がなかった。

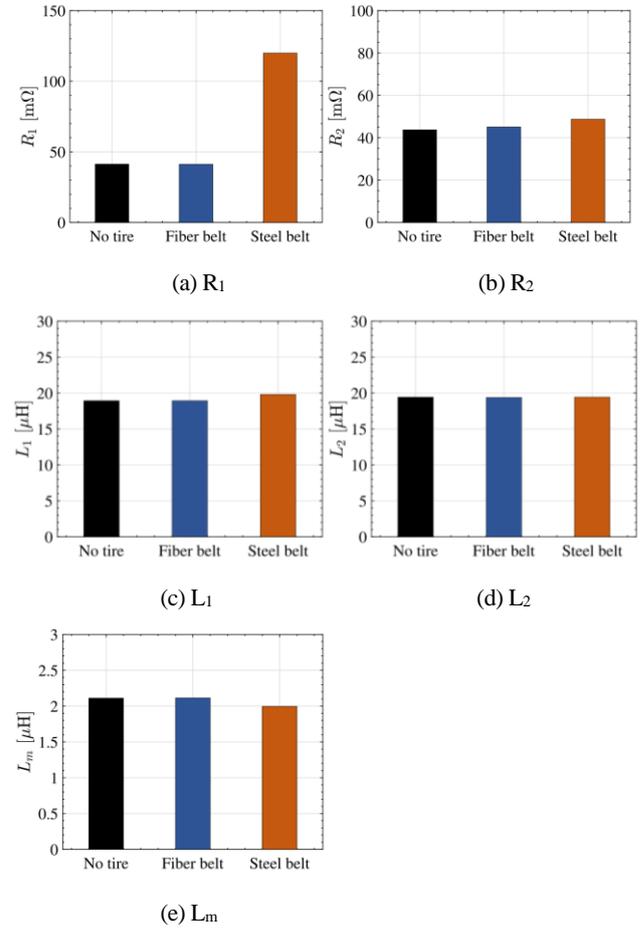


Fig.6 Coil Parameters with Belt

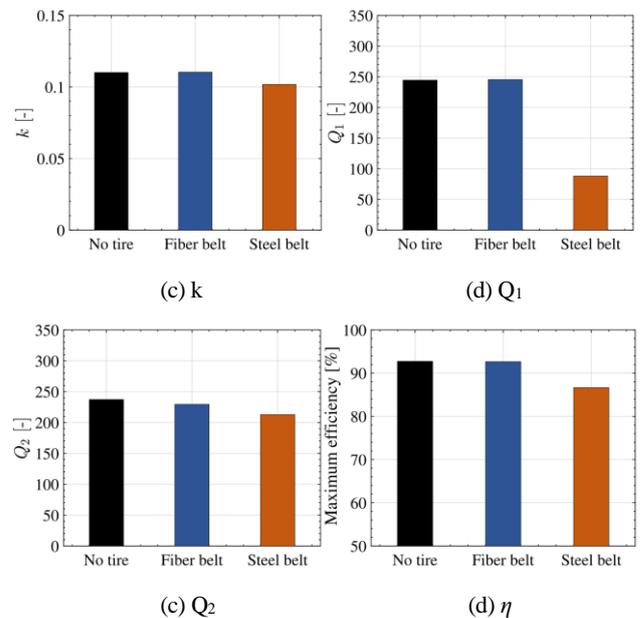


Fig.7 Coil Performance with Belt

2次側と比較すると1次側の方が抵抗の増加量が大きい。また自己インダクタンスはスチールベルトでは1次側の微小な増加がみられ、2次側では変化がなかった。有機ベルトを挟んだ場合の自己インダクタンス何も間に挟まない場合と同様であった。相互インダクタンスはスチールベルトを挟んだ場合に何も挟まないときに対して減少がみられ、有機ベルトでは変化がなかった。

スチールベルトによる抵抗の変化はスチールベルト内に発生する渦電流損によるものと考えられる。1次側と2次側でスチールベルトを挟んだことによる影響の大きさが違う理由は1次側に近い位置にスチールベルトが配置されるためである。

スチールベルトによる自己インダクタンスの変化はスチールベルトの透磁率が空気やゴムに対して高いためであると考えられる。1次側と2次側でスチールベルトを挟んだことによる影響の大きさが違う理由は、抵抗同様にスチールベルトの位置によるものである。

スチールベルトによる相互インダクタンスの変化はスチールベルトの透磁率が空気やゴムに対して高いためであると考えられる。磁界結合方式の自己インダクタンスは漏れインダクタンスと捉えることができる。自己インダクタンスが増えるということは2次側に到達しない磁束が増え、漏れインダクタンスが増えるということである。そのため、相互インダクタンスが減少したと考えられる。

結合係数はスチールベルトを用いた場合、減少し、有機ベルトでは変化がなかった。コイルのQ値は1次側、2次側共にスチールベルトで減少し、有機ベルトでは変化がなかった。理論最大効率は何も挟まないときに92%であったことに対して、スチールベルトを用いた場合には86%まで低下した。一方で有機ベルトを挟んだ場合に効率低下はなく、有機ベルトを用いることにより、損失や発熱を削減することが可能であることが分かった。

3.3.2 電送試験による評価

フルスケールのコイルとスチールベルト、有機ベルト2種類の同サイズのタイヤを作成し、電送試験による温度上昇試験を実施した。タイヤサイズは305/30ZR20である。送電試験の構成をFig. 8に示す。

送電コイルの上にタイヤを置き、タイヤの内側に受電コイルを樹脂製のワイヤーで釣って配置している。送電コイルから受電コイルまでの距離は100mmとしている。入力電圧は90V、周波数は85kHzである。そして試験結果をFig. 9に示す。Fig. 9は送電開始から18秒後の温度分布である。

スチールベルトのタイヤは送電開始時に25°Cであり、送電終了時には最高温度43°Cであったため、 $\Delta 18^\circ\text{C}$ であったことに対し、有機ベルトのタイヤでは温度上昇が全く確認されなかった。これにより、有機ベルトを使用することで、タイヤ内でのWPTによる損失、発熱の問題を解決することができる

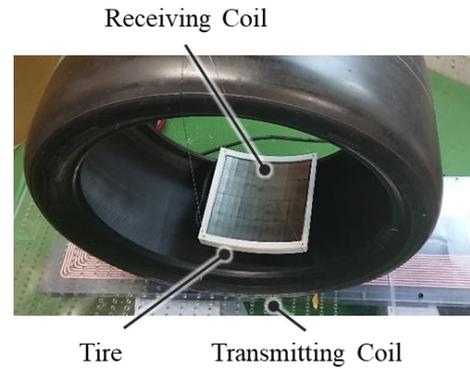


Fig.8 WPT Test Setting

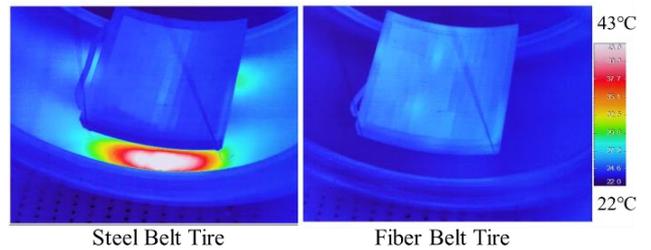


Fig.9 WPT Test Result (18sec later)

ことを確認した

4. 湾曲コイルの相互インダクタンスモデル

4.1 相互インダクタンスモデル

湾曲コイルの設計をするにあたり、相互インダクタンスのモデル化を行った。ここで提案する相互インダクタンスモデルはスパイラル型の湾曲コイルをスパイラル型の平面型コイルに近似するものである。スパイラル型の平面型コイルの相互インダクタンスモデル⁸⁾をFig.10に示す。

CDに流れる電流がCoil Rを鎖交する磁束 Φ_{CD} は式(4)で表される。ここで $R_{CA'}$ は点Cから点A'までの距離である。

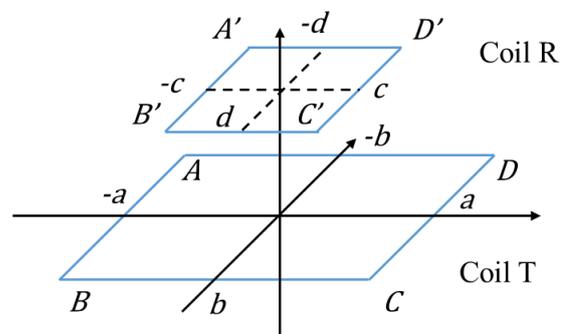


Fig.7 Mutual Inductance Model of Flat Coil

$$\Phi_{CD} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[R_{CA'} - (a+c) \tanh^{-1} \frac{a+c}{R_{CA'}} - R_{CD'} \right. \\ \left. + (a-c) \tanh^{-1} \frac{a-c}{R_{CD'}} - R_{CB'} \right. \\ \left. - (a+c) \tanh^{-1} \frac{a+c}{R_{CB'}} - R_{CC'} \right. \\ \left. - (a-c) \tanh^{-1} \frac{a-c}{R_{CC'}} \right] \quad (4)$$

そして、送電側の外側から i ターン目のコイルと受電側 j ターン目コイルの相互インダクタンス M_{ij} は式(5)によって算出される。

$$M_{ij} = \Phi_{AB} + \Phi_{BC} + \Phi_{CD} + \Phi_{DA} \quad (5)$$

全体の相互インダクタンス M は式(5)によって求められたコイルのすべての相互インダクタンスの総和がコイル全体としての相互インダクタンスとなるため、式(6)によって表される。ここで N^T は送電側のターン数、 N^R は受電側のターン数である。

$$M = \sum_{i=1}^{N^T} \sum_{j=1}^{N^R} M_{ij} \quad (6)$$

湾曲型のコイルの場合、上記式を当てはめることはできないため、等価ギャップ G_e を用いて湾曲型コイルを平面型コイルに近似する。湾曲型コイルのモデルを Fig.10 示し、等価ギャップを Fig.11 に示す。

等価ギャップは式(7)で表される。 $G_{(x)}$ は座標 x における送電コイルと受電コイルの垂直距離である。

$$G_e = \frac{1}{R_{B''C''}} \int_{-c}^c G_{(x)} dx \quad (7)$$

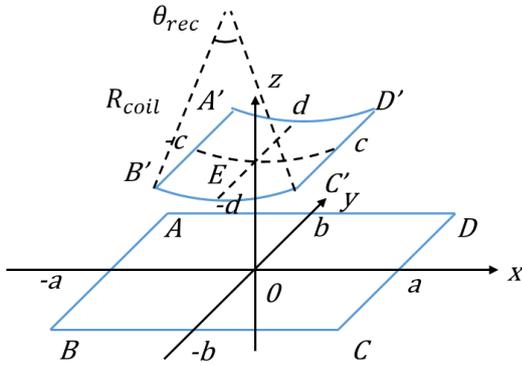


Fig.10 Mutual Inductance Model of Arc-shaped Coil

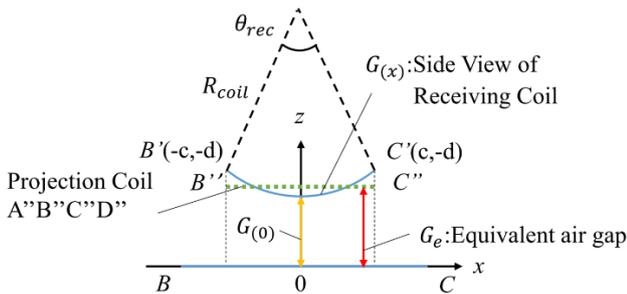


Fig.11 Equivalent Air Gap

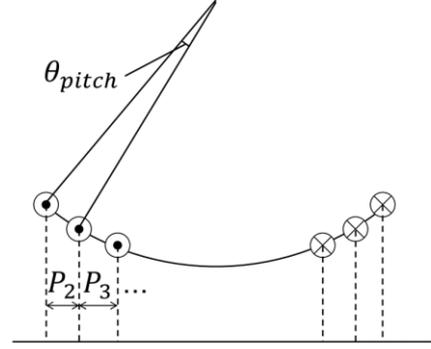


Fig.12 Projection Coil Pitch

また、受電コイルの巻線間の幅であるコイルピッチについても近似を行う。コイルピッチがターン毎に一定である場合、受電コイルを上面から平面に投影したコイルピッチを相互インダクタンスの計算に使用するコイルピッチとして扱う。投影したコイルピッチを Fig.12 に示す。そして、投影したコイルピッチは式(8)で表される。

$$P_n = R_{coil} \left(\cos\left(\frac{\theta_{rec}}{2}\right) - \cos\left(\frac{\theta_{rec}}{2} - \theta_{pitch}(n-1)\right) \right) \quad (8)$$

ここで P_n は外側から n 番目のコイルと $n-1$ 番目の間のコイルピッチである。 R_{coil} は受電コイルの半径、 θ_{rec} は受電コイルの中心角度、 θ_{pitch} はコイル間の角度を示す。

式(7)、式(8)によって得られた座標を用いることで、湾曲型コイルを平面型コイルとして扱い、式(4) (5) (6)を使用することが可能になり、相互インダクタンスを算出可能になる。

4.4 1/1 スケールモデルによる検証

1/1 スケールモデルにて相互インダクタンスの精度の検証を行った。1/1 スケールモデルの寸法を Table.2 にまとめる。Table.2 に示した受電コイルは平面型のものである。湾曲型コイルは R_{rec} を 235 としたときのものである。

湾曲型コイルと平面型コイルの相互インダクタンスの計算値と実測値を Fig.13 に示す。モデルによって算出された計算値と実測の誤差は5%以下であった。

そして、このコイルを用いて電力電送実験を行った。電力電送実験時にはコイル背面にフェライトを用いている。電力電送のベンチを Fig.14 に示し、試験の結果を Fig.15 に示す。送電側、受電側は同一の AC/DC コンバータに接続しているため、DC 電圧は送電側、受電側は同一であるため最適電圧比での送電は出来ていない。

Table.1 Parameters of 1/1 Scale Model

Items	Transmission	Reception
Outer Most Shape[mm]	250x1000	179.5x179.5
Coil Pitch[mm]	6	6
Number of Turns	12	13
Number of Layers	1	2
Wire Type	Litz Wire AWG 44x6250	

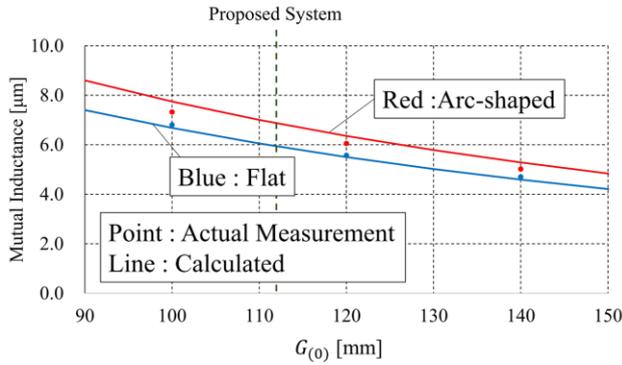


Fig.13 Mutual Inductance Test Result

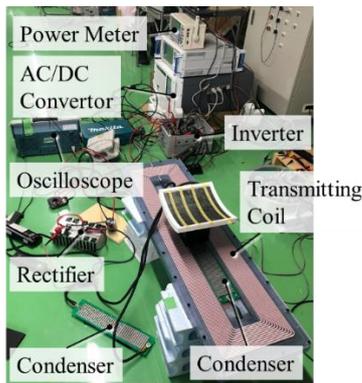


Fig.14 Test Bench

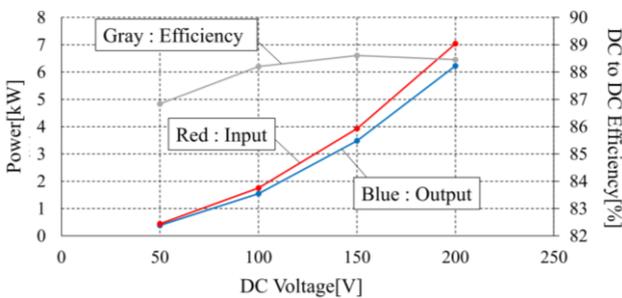


Fig.15 WPT Test Result

コイル 1 台当たり 7kW の給電を 200V で達成した。高出力化する場合は、電圧を高めることで実現可能である。このコイルを左右輪に用いることで車両 1 台当たり 14kW、四輪に搭載することで 28kW の給電が可能である。

6. 結論

本研究ではホイール内受電コイルを配置しての給電するシステムを提案し、システムに適したタイヤ材料およびコイルの設計方法を提案、検証した。研究で得られた結論は下記の通りである。

- 1) スチールベルトによる損失、発熱は有機ベルトに置き換えることで削減可能
- 2) 湾曲コイルの相互インダクタンスモデルは平面コイルに近

似することで計算可能になり、計算誤差は 5% 以内
3) 湾曲コイル 1 台当たりの送電 7kW 以上が可能であり、車両の充電器として十分な出力が実現可能

7. 今後の課題

送受電コイル間の距離を小さくし、送電を高効率化するためにはより扁平なタイヤの開発が必要になる。また高効率化や低電流化には受電コイルのサイズを大きくするためにもタイヤの幅が大きいことが重要である。さらに等価ギャップを小さくするためには大径のタイヤであることが重要である。そのため、従来のタイヤと同等の性能を担保しつつ、大径、幅広、扁平なタイヤの開発が必要となると考える。

またホイールが金属製の場合、磁束を阻害するため、ホイール用の比導電性の材料開発、新材料での設計技術が必要になる。またコイル設計技術としてはフェライトを用いた場合にも高速に演算可能で最適化に使用可能なコイルパラメータのモデル化が今後の課題として挙げられる。

6. 謝辞

本研究の一部は JST 未来社会創造事業 (グラント番号: JPMJMI17EM), JSPS 科研費 (基盤研究 A 課題番号: JP18H03768) によって実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- (1) H. Fujimoto, T. Takeuchi, K. Hanajiri, K. Hata, T. Imura, M. Sato, D. Gunji, G. Guidi : Development of Second Generation Wireless In-Wheel Motor with Dynamic Wireless Power Transfer, The 31st International Electric Vehicle Symposium & Exhibition and International Electric Vehicle Technology Conference 2018, (2018)
- (2) O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, H. Fujimoto: "Potential for CO2 Reduction by Dynamic Wireless Power Transfer for Passenger Vehicles in Japan", Energies 2020, 13, 3342, (2020)
- (3) T. Tajima, W. Noguchi, T. Aruga : Study of a Dynamic Charging System for Achievement of Unlimited Cruising Range in EV: SAE Technical Paper 2015-011686, (2015)
- (4) T. Ohira: Via-wheel power transfer to vehicles in motion: 2013 IEEE Wireless Power Transfer, (2013)
- (5) T. Fujita, T. Yasuda, H. Akagi : A Dynamic Wireless Power Transfer System Applicable to a Stationary System: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, Issue 4, pp3748-3757, (2017)
- (6) York R. Smith, Dhiman Bhattacharyya, Travis Willhard, Mano Misra : Adsorption of aqueous rare earth elements using carbon black derived from recycled tires, Chemical Engineering Journal, Volume 296, pp.102-111 (2016)