

タイヤ変形量を考慮した走行中給電用タイヤ内中継コイルの エアギャップの検討

山田 翔太¹⁾ 角谷 勇人^{1),2)} 柳 達也^{1),3)} 清水 修¹⁾ 藤本 博志¹⁾ 桑山 勲⁴⁾ 若尾 泰通⁴⁾ 大山 貴広⁵⁾

Air Gap Design of in-Tire Repeater Coil for Dynamic Wireless Power Transfer System Considering Tire Deformation

Shota Yamada Hayato Sumiya Tatsuya Yanagi Osamu Shimizu Hiroshi Fujimoto
Isao Kuwayama Wakao Yasumichi Takahiro Ohyama

Wireless power transfer (WPT) to in-motion electric vehicles can extend the cruising range without additional batteries. Our group has already proposed a novel dynamic WPT system using in-tire and in-wheel repeater coil, which can shorten the air gap between the coils on the road and tire sides. In WPT system, the air gap should be as small as possible from the viewpoint of efficiency and leakage electromagnetic field. However, it is necessary to have a sufficient air gap to avoid coil damage by tire deformation. The maximum tire deformation when overcoming bumps of various heights at different vehicle speeds is experimentally measured with two different tires, normal tire and self supporting runflat (SSR) tire. The measured results show advantages of using SSR tire for the proposed WPT system.

KEY WORDS: EV and HV systems, Dynamic wireless power transfer, Tire deformation, Air gap (A3)

1. 序 論

CO₂ 排出量削減のため、世界的に電気自動車 (Battery Electric Vehicles: BEVs) の普及が急速に進んでいる。従来の内燃機関自動車 (Internal Combustion Engine Vehicles: ICEVs) に対して、航続距離が短いこと、充電時間が長いこと等が主な課題として挙げられている。航続距離の短さを解決する手段として、大量のバッテリーを搭載した BEVs が市場に増えてきている。大量のバッテリーは車室空間を制限するだけでなく、重量増による電費低下により、CO₂ 排出量の削減量が制限されてしまう¹⁾。また、電池容量の増加によって充電時間はより長くなってしまふ。

ICEVs にはない BEVs の利点の一つとして、非接触でエネルギーの充填が可能であることが挙げられる。磁界結合方式を用いた BEVs への非接触給電 (Wireless Power Transfer: WPT) の研究が盛んに進められており、停車中の BEVs への給電として定置式 WPT に関しては、標準化も進んでいる²⁾。定置式 WPT により、充電ケーブルを差し込む手間が無くなるといったユーザーの利便性の向上はするものの、航続距離の短さや充電時間が長いといった課題は解決されない。

これらの課題を抜本的に解決する技術として、走行中非接触給電 (Dynamic Wireless Power Transfer: DWPT) の研究開発が行われている^{3),4)}。道路に埋設された送電コイルから車両に設置された受電コイルへ走行中に電力伝送を行うことで、バッテリー搭載量を増やすことなく航続距離の延伸が

可能となる^{5),6)}。

DWPT は受電コイルをばね上かばね下に搭載するかにより大きく二つの方式に分けることができる。ばね上にコイルを搭載するオンボードコイル (On-board coil: OBC) 方式は、ばね下にコイルを搭載するホイールサイドコイル (Wheel-side coil: WSC) 方式に対して、従来の車両構造からの変更が少なく DWPT システムを搭載し易いが、路面側コイルとのエアギャップが大きくなってしまふ。また、OBC 方式は車両運動に伴うサスペンションストロークや路面凹凸の影響も受けるため、エアギャップの変動も大きくなる。WSC 方式はエアギャップ変動を抑制できることから結合係数の変動も小さく、電力や効率の変動も抑えることができる⁷⁾。また、WSC 方式は、発熱を起こす可能性がある送受電コイル間の金属異物を走行中にタイヤにより取り除くことができるという利点を持つ。

WSC 方式として、アップライトからステアを介してコイルをホイール外に搭載する (Outside wheel coil: OWC) 方式⁴⁾ やホイール内にコイルを搭載する (In-wheel coil: IWC) 方式⁸⁾ が提案されている。IWC 方式はその構造上、タイヤサイドウォール相当のエアギャップが必要となるため、OWC 方式と比べてエアギャップが大きくなってしまふ。また、アルミホイールによるシールド効果を避けるために CFRP 等の材質の特殊ホイールが必要となる。これらの課題を解決するため、タイヤ内に中継コイルを用いた新たな IWC 方式の DWPT システムを提案している⁹⁾。

本稿では、タイヤ内に中継コイルを用いた IWC 方式の DWPT システム実現のため、適切なタイヤ内中継コイルのエアギャップの検討を行う。漏洩電磁界や効率といった観点

1) 東京大学 (277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

2)(株) デンソー (448-8661 愛知県刈谷市昭和町 1-1)

3) ローム (株) (615-8585 京都府京都市右京区西院溝崎町 21)

4)(株) ブリヂストン (187-8531 東京都小平市小川東町 3-1-1)

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

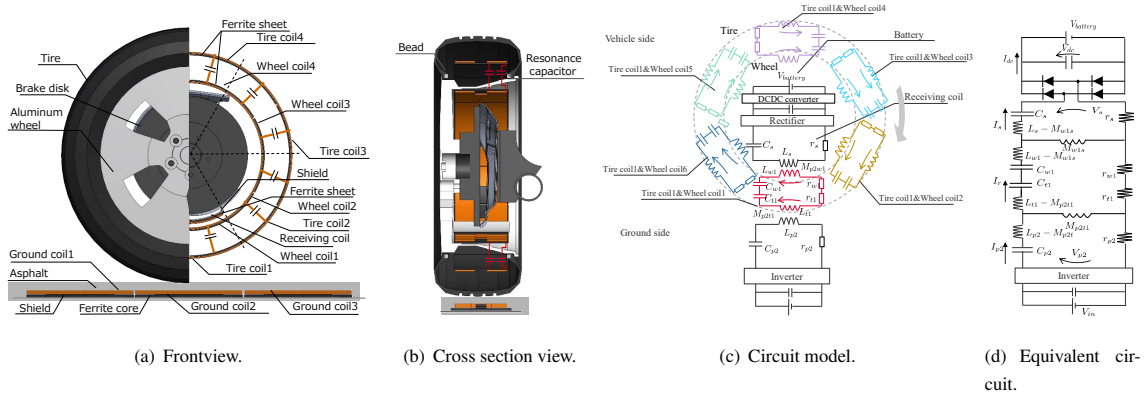


Fig. 1 In-tire and in-wheel repeater DWPT system.

からエアギャップは小さい方が良いが、タイヤ変形によるコイルの破損を防ぐため、様々な状況下でのタイヤ変形量を考慮する必要がある。タイヤが最大変形をするのは突起乗り越え時と想定されるが、タイヤの非線形性により、変形量の単純なモデル化は難しい。突起乗り越え時のダイナミクスに関して FEM 解析等をした研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ やタイヤ内面カメラによる変形量測定に関する研究⁽¹³⁾ は見受けられるが、タイヤ内中継コイルのエアギャップ検討のためには突起高さや速度の条件が十分ではない。

そこで本稿では、タイヤ変形量が十分大きくなるような様々な条件下において、ハイスピードカメラを用いて突起乗り越え時のタイヤ最大変形量の測定を行う。また、ノーマルタイヤだけでなくタイヤ最大変形量を抑制できると想定されるサイドウォール補強型ランフラット (Self supporting runflat: SSR) タイヤでも測定し、比較を行う。それぞれのタイヤでの測定結果を基にタイヤ内に中継コイルを用いた DWPT システムを実現するためのエアギャップの検討を行う。最後に、それぞれのタイヤを用いた際のエアギャップの値の差異による結合係数への影響を解析及び測定によって評価を行う。

2. タイヤ内中継コイルを用いた DWPT システム

2.1. システムの概要

図 1(a), 1(b) に文献(9) で提案したタイヤ内中継コイルを用いた DWPT システムの正面図及び正面図の中央での断面の側面図を示す。本システムは、地上コイル、タイヤ内中継コイル、ホイール内中継コイル、受電コイルで構成される。

地上コイルから発生する磁束をタイヤ内中継コイルに鎖交させる。タイヤ内中継コイルとホイール内中継コイルは電線で接続されており、タイヤ内中継コイルとホイール内中継コイルの起電力は同一となる。ホイール内中継コイルの起電力によって発生する磁束が受電コイルに鎖交することで、地上コイルから受電コイルへ電力が伝送される。

受電コイルは、ホイール内形状に沿うように円弧状に形成されており、アップライト部に固定される。また、ブレーキディスク等での磁気損失を軽減するため、アルミシールドを有する。受電コイルはアップライト部に装着されているため回転しないが、タイヤ内中継コイル及びホイール内中継コイルはホイールと共に回転する。タイヤ内中継コイル

及びホイール内中継コイルは周方向に 6 分割されてホイールに固定されており、ホイールの回転によりそれぞれ地上コイルと受電コイルに対向するコイルが順次切り替わる。

中継コイルを用いない IWC 方式は、地上コイルから発生する磁束を直接受電コイルに鎖交させる構成のため、磁束の鎖交を妨げないように有機ベルトタイヤ及びアルミホイールの使用を前提としている。一方、中継コイルを用いる本方式の場合、タイヤ内中継コイルとホイール内中継コイルは電線で接続されており磁界で結合していないため、アルミホイールの使用が可能である。また、中継コイルを用いない IWC 方式では地上コイルから直接受電コイルへ給電するため、タイヤサイドウォール相当のエアギャップが必要となる。タイヤ内、ホイール内中継コイルを用いることで大幅なエアギャップの低減が可能であり、漏洩電磁界や効率が大幅に改善される。

2.2. 回路構成

図 1(c) に回路構成を示す。なお、 L, C, r, M, I, V はそれぞれコイルのインダクタンス、キャパシタンス、抵抗、相互インダクタンス、電流、電圧を示し、添え字 p, t, w, s は地上コイル、タイヤ内中継コイル、ホイール内中継コイル、受電コイルを示す。図 1(c) に示されているように、正対している地上コイルを添え字の p_2 、タイヤ内中継コイル及びホイール内中継コイルをそれぞれ t_1, s_1 で示し、例えば正対している地上コイルとタイヤ内中継コイル間の相互インダクタンスは $M_{p_2t_1}$ と表す。

本回路は送電側にインバータを有し、受電側は整流器を介してバッテリーに相当する電圧源へ接続されている。また、各コイルに直列に共振コンデンサを持つ Series-Series(SS) 方式を採用している。電力伝送を行う地上コイルと受電コイルの間に存在する、共振コンデンサで短絡したコイルは中継コイルとして働き、等価的にエアギャップを低減する効果を持つ⁽¹⁰⁾。

図 1(d) に等価回路を示す。各コイルが共振条件を満たすとき、正対している地上コイルに流れる電流 I_{p_2} 、中継コイルに流れる電流 I_{t_1} 、ホイール内コイルに流れる電流 I_s はそれぞれ式 (1), (2), (3) のように表される。なお、磁界を遮るアルミホイールが存在するため、正対している地上コイル-タイヤ内中継コイル間及びホイール内中継コイル-受電コイ

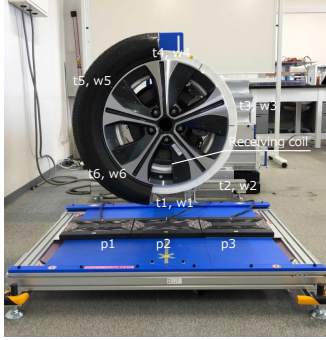


Fig. 2 Experimental setup for in-tire and in-wheel repeater DWPT system.

Table 1 DWPT setup specifications.

Height (tire - tire repeater coil)	28 mm
Tread thickness, T_t	13 mm
Air gap between receiver coil and wheel repeater coil	10 mm
Burial depth of ground coil, D_g	20 mm

ル間以外のコイル同士の相互インダクタンスは十分小さく無視できる。

$$I_{p2} = \frac{(r_{t1} + r_{w1})(r_s + r_L) + \omega^2 M_{w1s}^2}{r_{p2} \{(r_{t1} + r_{w1})(r_s + r_L) + \omega^2 M_{w1s}^2\} + (r_s + r_L)\omega^2 M_{p2t1}^2} V_{p2}, \quad (1)$$

$$I_{r1} = \frac{j\omega M_{p2t1}(r_s + r_L)}{r_{p2} \{(r_{t1} + r_{w1})(r_s + r_L) + \omega^2 M_{w1s}^2\} + (r_s + r_L)\omega^2 M_{p2t1}^2} V_{p2}, \quad (2)$$

$$I_s = \frac{-\omega^2 M_{p2t1} M_{w1s}}{r_{p2} \{(r_{t1} + r_{w1})(r_s + r_L) + \omega^2 M_{w1s}^2\} + (r_s + r_L)\omega^2 M_{p2t1}^2} V_{p2}. \quad (3)$$

ここで、 r_L は負荷抵抗、 ω は交流の角速度を示す。効率は、 $\eta = \frac{V_s I_s}{V_{p2} I_{p2}}$ で表され、最大効率を実現する最適負荷 R_{LOpt} は $\frac{\partial \eta}{\partial r_L} = 0$ より、式 (4) となる。

$$R_{LOpt} = \sqrt{r_s^2 + \frac{\omega^2 M_{w1s}^2 \{2r_{p2}(r_{t1} + r_{w1})r_s + r_{p2}\omega^2 M_{w1s}^2 + r_s\omega^2 M_{p2t1}^2\}}{(r_{t1} + r_{w1})(r_{p2}r_s + \omega^2 M_{p2t1}^2)}}. \quad (4)$$

最適抵抗となるように負荷側電圧や電流を制御することで、最大効率が実現される。

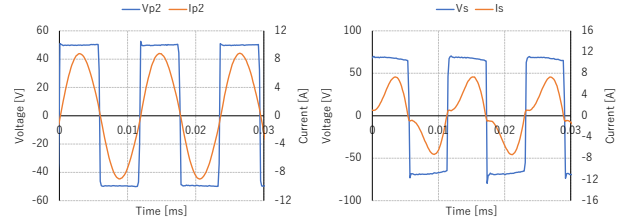
2.3. 電力伝送

タイヤ内に中継コイルを用いた IWC 方式の DWPT システムの実験装置を図 2 に示す⁹⁾。各パラメータを表 1 に示す。本稿で検討を行うタイヤ内裏面とタイヤ内中継コイル間のエアギャップは、ここでは 28 mm とした。

電力伝送の周波数は 85 kHz とし、式 (4) を満たすように負荷側電圧を制御し、最大効率運転を行った。各コイルの電圧、電流波形を図 3 に示す。送電側コイル及び受電側コイルの電圧と電流の位相が揃っており、高効率で大電力を送ることができる磁界共振結合方式の特徴を示している。効率は受電側の直流電力が 250 W 時において、AC-to-AC 効率で 94% となった。

3. 突起乗り越え時のタイヤ最大変形量

磁界共振方式を用いた DWPT システムにおいては、漏洩電



(a) Ground coil voltage and current. (b) Receiving coil voltage and current.

Fig. 3 Experimental results of in-tire and in-wheel repeater DWPT system.

磁界や効率といった観点からエアギャップを出来るだけ低減することが好ましい。しかし、タイヤ変形等によってタイヤ内中継コイルが破損しないように十分なエアギャップを設ける必要がある。適切なエアギャップの値の検討のため、実際に車両が突起を乗り越える時のタイヤ変形量を測定する。

通常のタイヤと SSR タイヤの 2 種類で測定を行う。SSR タイヤは、パンク時においても一定の距離を走行するために開発されたタイヤ¹⁴⁾ であるが、サイドウォールが補強されているため突起乗り越え時のタイヤ変形量がノーマルタイヤに対して抑制されると想定される。SSR タイヤ採用によりエアギャップを低減した設計が可能になると想定されるため、異なる 2 種のタイヤ間での変形量の比較を行う。

3.1. クォーターカーモデルによるタイヤ鉛直方向剛性の影響の簡易検討

まず測定の前に、ノーマルタイヤと SSR タイヤの差異に関してクォーターカーモデルによる簡単な解析でタイヤ変形の傾向の確認を行う。乗り越えのダイナミクスは、鉛直方向だけではなくタイヤの回転や前後方向、ピッチ、ロールといった多自由度の運動が連成した複雑なものであるが、ここでは鉛直方向のみの運動を考慮し、タイヤの鉛直方向剛性の差異によるタイヤ変形量への影響を検討する。

図 4 に検討に用いるクォーターカーモデルを示す。変数の定義は図に示す通りである。鉛直方向の運動方程式は以下の通りである。なお、 s はラプラス演算子である。

$$m_2 z_2 s^2 = (c_s s + k_s)(z_1 - z_2), \quad (5)$$

$$m_1 z_1 s^2 = (c_s s + k_s)(z_2 - z_1) + k_t(z_0 - z_1). \quad (6)$$

突起乗り越え時のタイヤ変形量の影響を検討するため、路面変位 z_0 からタイヤ変形量 $(z_0 - z_1)$ までの伝達特性を考える。式 (5)、(6) より、伝達関数は式 (7) の通りである。文献 (15) では、ノーマルタイヤと SSR タイヤでは鉛直方向の剛性がおおよそ 1.2 倍程度異なるとされている。タイヤ剛性の差異による伝達関数 (7) の周波数特性の差異を検討するため、他のパラメータの値として文献 (16) を参考に、図 4 中に示す一般的な値を用いる。

ノーマルタイヤと SSR タイヤにおける路面変位 z_0 からタイヤ変形量 $(z_0 - z_1)$ までの伝達関数の周波数特性の比較を図 5 に示す。今回のパラメータ値では、ばね上共振周波数が 1.3 Hz 程度、ばね下共振周波数がそれぞれ 13, 15 Hz 程度となる。赤点線で示されている鉛直方向のタイヤ剛性が高い SSR タイヤ

$$\frac{z_0 - z_1}{z_0} = \frac{m_1 m_2 s^4 + (m_1 + m_2) c_s s^3 + (m_1 k_s + m_2 k_s) s^2}{m_1 m_2 s^4 + (m_1 + m_2) c_s s^3 + (m_1 k_s + m_2 k_s + m_2 k_t) s^2 + c_s k_t s + k_t k_s} \quad (7)$$

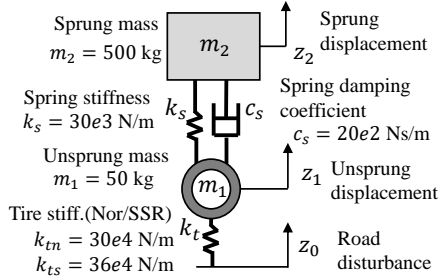


Fig. 4 Quarter-car model and parameter definitions.

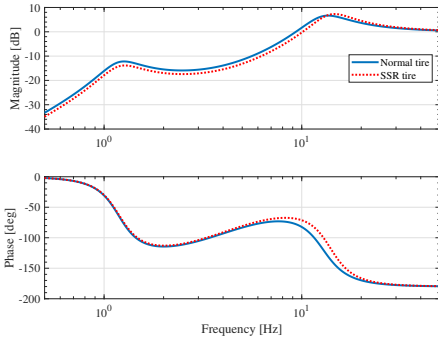


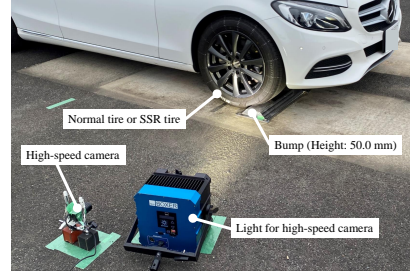
Fig. 5 Comparison of frequency characteristics from road disturbance z_0 to tire deformation ($z_0 - z_1$) between normal tire and SSR tire.

を採用することで、多くの周波数域でゲインが下がっており、同じ路面変位 (= 乗り越え時の突起高さ) に対してタイヤ変形量が小さくなることが予想される。前述したように、実際の突起乗り越え時には鉛直方向だけではなく様々な運動が連成していることや、タイヤやサスペンションの非線形特性により、解析のみでは検討が不十分であるため、次節にて実測を行う。

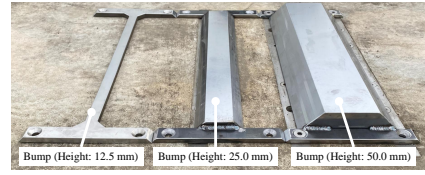
3.2. 実験条件

タイヤ変形量測定のための実験装置の全体図を図 6(a) に示す。路面に道路鉤を模擬した治具を固定し、実験車両が一定速走行で治具を乗り越える際のタイヤ変形の様子をハイスピードカメラで撮影し、変形量の測定を行う。

車重は燃費の試算サイクルである WLTC (Worldwide-harmonized light vehicles test cycles) で規定されている試験条件を想定した。今回の実験車両の仕様では輪荷重では 412 kg となる。道路鉤を模擬した治具として高さの異なる 3 種類の治具を用いる。図 6(b) に示すように、高さ 12.5, 25.0, 50.0 mm の治具を用いる。突起乗り越え時の車速は、5 km/h から 30 km/h まで 5 km/h 刻みとする。なお、高さ 50.0 mm の治具に関しては、20 km/h までの測定とする。測定に使用したタイヤは、通常のタイヤと SSR タイヤの 2 種類である。変形量の測定のため、2 種のタイヤの側面には径方向に 10 mm 毎に同心円上に目印となる点を描いている。なお、測定に用いたタイヤは、それぞれコールド時に推奨空気圧である 250 kPa を入れている。ハイスピードカメラの設定はシャッタースピードが 4000 1/s、フ



(a) Setup overview.



(b) Three bumps with different heights.

Fig. 6 Experimental setup for the riding over experiments.

レームレート 2000 fps とし、タイヤ最大変形時の変形量の評価を行う。

3.3. 突起乗り越え時タイヤ最大変形量測定

図 7(a), 7(b) に高さ 50.0 mm の治具を 15 km/h で乗り越えた時のタイヤ最大変形時をハイスピードカメラで撮影した様子を示す。タイヤ側面に描かれた同心円上の点を参考にタイヤ中心を出し、最大変形時のタイヤ変形量を測定した。

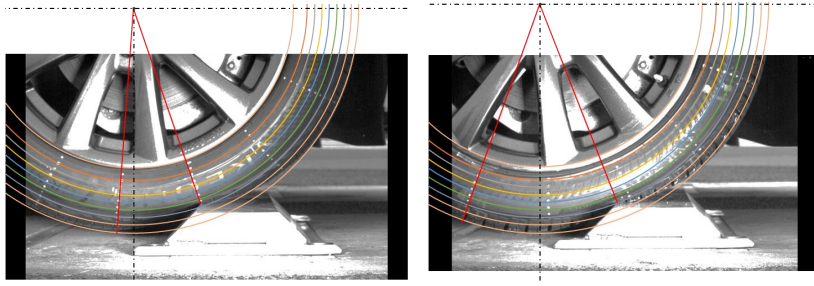
図 7(c) にタイヤ最大変形量の測定結果を示す。実線が SSR タイヤ、点線がノーマルタイヤ、灰色が高さ 50.0 mm、橙色が高さ 25.0 mm、青色が高さ 12.5 mm の治具を用いた場合の測定結果をそれぞれ示す。どの条件においても、車速に応じてタイヤの最大変形量は大きくなっている。車速を上げていくと、自重による変形分と突起の高さの和を最大値として、タイヤ最大変形量が漸進していくと考えられるが、突起高さがある程度高い場合には設計基準として上限の車速を想定する必要があることがわかる。ノーマルタイヤと SSR タイヤを比較した場合、どの条件下においても SSR タイヤの方がノーマルタイヤよりも最大変形量が小さくなっている。

3.4. エアギャップ検討

エアギャップの検討において、自重による静的なタイヤ変形と突起乗り越え時の動的なタイヤ変形は独立であると仮定する。破損回避の観点から最も厳しい条件となる静的な変形量と動的な変形量をそれぞれ D_{stmax} , D_{dymax} とし、下式のように既定の余裕 H_{tol} を持たせ、タイヤ裏面からタイヤ内中継コイル下面までの高さ H_{des} を設計する。

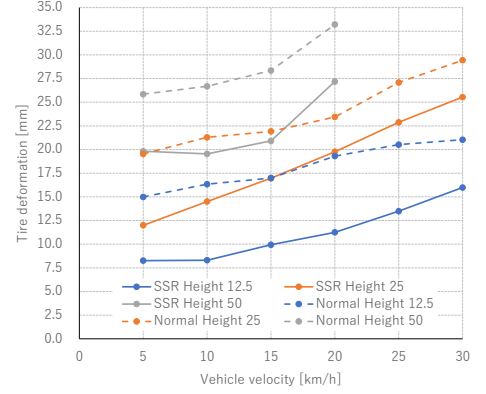
$$H_{des} = D_{stmax} + D_{dymax} + H_{tol} \quad (8)$$

本稿では、余裕 H_{tol} は 1.5 mm とする。



(a) Normal tire (50.0 mm height, 15 km/h).

(b) SSR tire (50.0 mm height, 15 km/h).



(c) Comparison of tire maximum deformation.

Fig. 7 Experimental results of tire maximum deformation when riding over bumps.

Table 2 Parameters for air gap design of normal tire and SSR tire.

	Normal [mm]	SSR [mm]
Static def. (WLTC): D_{stWLTC}	10.0	8.3
Static def. (max): D_{stmax}	16.3	13.5
Dynamic def. (max): D_{dymax}	23.2	18.9
Designed height: H_{des}	41.0	33.9
Height (WLTC): H_{WLTC}	31.0	25.6
Air gap (WLTC): G_{WLTC}	64.0	58.6

自重による静的な変形量は荷重に対して線形であると仮定し、タイヤ最大負荷時の静的な変形量 D_{stmax} を以下の式より求める。なお、 W_{max} 、 W_{WLTC} はそれぞれ、タイヤの荷重指数 (Load index: LI) に基づくタイヤ最大負荷時の輪荷重、WLTC 走行条件時の輪荷重を示す。

$$D_{stmax} = \frac{W_{max}}{W_{WLTC}} D_{stWLTC} \quad (9)$$

測定時は WLTC 走行条件を想定した荷重となっており、 W_{WLTC} は 412 kg となる。また、空気圧 250 kPa 時のタイヤ最大負荷時の輪荷重 W_{max} は 670 kg となる。ハイスピードカメラで突起乗り越え前のタイヤの変形量 D_{stWLTC} を測定したところ、ノーマルタイヤで 10.0 mm、SSR タイヤで 8.3 mm であったため、タイヤ最大負荷時の変形量 D_{stmax} は式 (9) より、それぞれ 16.3 mm、13.5 mm となる。

図 7(c) に示されている測定結果は、WLTC 走行条件を想定した自重による変形と突起乗り越え時の変形が合わさったものであると考えられる。今回計測を行った中で最大変形量が最も大きくなった条件は、50.0 mm の突起高さかつ 20 km/h であった。本条件を設計上考慮する最悪条件とし、この時のタイヤの動的な変形量を D_{dymax} とする。変形量の測定結果 D_{mea} との間には以下の式が成立する。

$$D_{dymax} = D_{mea} - D_{stWLTC} \quad (10)$$

図 7(c) より、50.0 mm の突起高さかつ 20 km/h の条件での測定値 D_{mea} は、ノーマルタイヤ時に 33.2 mm、SSR タイヤの場合では 27.2 mm であった。したがって、最悪条件での動的な変形量 D_{dymax} は、式 (10) より、ノーマルタイヤ時に 23.2 mm、

SSR タイヤでは 18.9 mm である。

以上の結果と式 (8) より、タイヤ裏面からタイヤ内中継コイル下面までの高さ H_{des} を、ノーマルタイヤ時には 41.0 mm、SSR タイヤ時には 33.9 mm と設計すればよい。

また、WLTC 走行条件下におけるタイヤ裏面からタイヤ内中継コイル下面までの高さ H_{WLTC} は、輪荷重が無負荷時の高さである H_{des} から、WLTC 走行条件下での静的な変形量 D_{stWLTC} を引けば良いため、以下の式で表される。

$$H_{WLTC} = H_{des} - D_{stWLTC} \quad (11)$$

したがって、ノーマルタイヤで 31.0 mm、SSR タイヤで 25.6 mm となる。

WLTC 走行条件下における地上コイルとタイヤ内中継コイルのエアギャップ G_{WLTC} は、トレッド厚さを T_t 、地上コイルの埋設深さを D_g とすると、

$$G_{WLTC} = H_{WLTC} + T_t + D_g \quad (12)$$

と表される。トレッド厚さ T_t 、地上コイルの埋設深さ D_g は表 1 と同様に、それぞれ 13 mm と 20 mm とすると、ノーマルタイヤ時に 64.0 mm、SSR タイヤの場合では 58.6 mm となる。エアギャップの設計に用いた各パラメータ値の比較を表 2 に示す。

3.5. エアギャップの差による給電性能への影響

前節での検討から、WLTC 走行条件においてはノーマルタイヤと SSR タイヤで 5.4 mm のエアギャップの差が出る。エアギャップの差による DWPT システムの性能への影響を検討する。電磁界解析ソフトである JMAG を用いて、図 1 に示すモデルから、ノーマルタイヤを想定したエアギャップ 64.0 mm、SSR タイヤを想定した 58.6 mm の場合において、地上コイルとタイヤ内中継コイルの自己インダクタンスや相互インダクタンスを導出し、結合係数を下記の式から算出した。

$$k_{p2t1} = \frac{M_{p2t1}}{\sqrt{L_{p2}L_{t1}}} \quad (13)$$

また、図 2 に示す実験装置と LCR メータを用いて、各パラメータの計測を行った。

解析及び測定の結果を表 3 に示す。解析結果と比べて測定結

Table 3 Comparison of DWPT parameters between normal tire air gap and SSR tire air gap.

	Simulation		Experiment	
	Normal	SSR	Normal	SSR
Air gap [mm]	64.0	58.6	64.0	58.6
L_{p2} [μ H]	114.9	115.7	109.4	110.0
L_{t1} [μ H]	24.69	24.85	23.29	23.46
M_{p2t1} [μ H]	12.45	13.82	9.196	10.35
k_{p2t1}	0.2337	0.2577	0.1818	0.2037
Improved ratio of k_{p2t1} [%]	-	10.27	-	12.05

果の各インダクタンス値が小さく出ているが、地上コイルと中継コイル間の横ずれやタイヤ回転角のずれ等が測定の場合には存在することが原因として考えられる。ノーマルタイヤの場合と比べて、SSR タイヤ時のエアギャップは 5.4 mm 小さくなるため、解析及び測定の双方で相互インダクタンス M_{p2t1} が大きくなり、結果として結合係数 k_{p2t1} が 10%程度改善されている。結合係数の改善により漏洩電磁界や効率が改善されるため、タイヤ内中継コイルを用いた DWPT システムにおいて SSR タイヤを活用することで性能の改善が期待される。

4. 結論と今後の課題

本稿では、タイヤ内中継コイルを用いた DWPT システムにおける地上コイルとタイヤ内中継コイル間のエアギャップの検討を行った。WPT システムにおいては、効率や漏洩電磁界といった観点から、エアギャップはなるべく小さい方がよい。しかし、タイヤの変形を考慮するとコイル破損を回避するために十分なエアギャップを確保する必要がある。通常走行時にタイヤの変形が最大となるのは突起乗り越え時と想定し、様々な高さの突起を異なる車速で乗り越えた時のタイヤ最大変形量をハイスピードカメラで測定した。

ノーマルタイヤと SSR タイヤで比較を行ったところ、SSR タイヤはタイヤ変形量が抑制されるため、エアギャップを低減した DWPT システム設計が可能となる。それぞれの測定結果に基づいて設計したエアギャップの条件下において、解析及び測定によって地上コイルとタイヤ内中継コイル間の結合係数の比較を行い、SSR タイヤの場合、ノーマルタイヤと比して 10%程度の改善が見られた。結合係数の改善により、DWPT システムにおける漏洩電磁界や効率が改善されるため、タイヤ内中継コイルを用いた DWPT システムにおいて SSR タイヤを活用することで性能の改善が期待される。

今後の課題として、車速や突起高さに関してどこまでの条件を想定するのか、最大変形時のコイルまでの距離の安全率等、DWPT システムにおける給電性能とのトレードオフを考慮しながら、様々な条件での実測に基づき適切なエアギャップの設計検討を進める必要がある。

謝 辞

本研究の一部は JST 未来社会創造事業（ Grant 番号：JP-MJMI21E2 ）の助成を受けたものであることを付記する。

参考文献

- (1) O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita and H. Fujimoto: "Potential for CO2 Reduction by Dynamic Wireless Power Transfer for Passenger Vehicles in Japan", *Energies*, Vol. 13, No. 3324, (2020)
- (2) Society of Automotive Engineers: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology J2954, *SAE Recommended Practice*, (2016)
- (3) A. Mahesh, B. Chokkalingam and L. Mihet-Popa: "Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles—A Review", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 137667–137713, (2021)
- (4) H. Fujimoto, O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, D. Gunji and Y. Ohmori: "Development of Wireless In-wheel Motors for Dynamic Charging: From 2nd to 3rd generation", *2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, pp. 56–61, (2020)
- (5) 永井 栄寿, 清水 修, 藤田 稔之, 藤本 博志, 郡司 大輔: 走行中ワイヤレス給電における給電能力向上による送電コイル敷設率の低減, 自動車技術会論文集, Vol. 52, No. 2, p. 450–455, (2021)
- (6) B. J. Limb, Z. D. Asher, T. H. Bradley, E. Sproul, D. A. Trinko, B. Crabb, R. Zane and J. C. Quinn: "Economic Viability and Environmental Impact of In-Motion Wireless Power Transfer", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 5, No. 1, pp. 135–146, (2019)
- (7) 角谷 勇人, 清水 修, 永井 栄寿, 藤本 博志, 瀧田 晋平, 高橋 英介, 山口 宜久, 谷 恵亮, 郡司 大輔, 桑山 勲: 走行中非接触給電システムのコイル搭載位置による走行時のギャップ変動影響の検証, 電気学会論文誌 D, Vol. 141, No. 12, p. 985–994, (2021)
- (8) O. Shimizu, T. Utsu, H. Fujimoto, D. Gunji and I. Kuwayama: "Dynamic WPT Transmitting Through Fiber-Belt Tire and CFRP Wheel to In-Wheel Arc-Shaped Coil", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, Vol. 2, No. 2, pp. 113–121, (2021)
- (9) 角谷 勇人, 高橋 英介, 山口 宜久, 谷 恵亮, 清水 修, 永井 栄寿, 藤本 博志, 郡司 大輔, 桑山 勲: "タイヤ内ホイール内コイルによる中継を使用した走行中非接触給電システムの提案", 電気学会産業応用部門大会, pp.105–110, (2021)
- (10) 居村 岳広: 磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送, 森北出版社, (2017)
- (11) C. Wei and O. A. Olatunbosun: "Transient dynamic behaviour of finite element tire traversing obstacles with different heights", *Journal of Terramechanics*, Vol. 56, pp. 1–16, (2014)
- (12) 大野 進一, 板倉 博, 滝田 敏之, 鈴木 常夫: "自動車が発起を乗り越えるときの路面作用力について", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 54, No. 498, pp.432–438, (1988)
- (13) 河崎屋 秀司, 岩井 智昭, 今泉 涼太, 正角 豊: "障害物乗り越え時のタイヤ内面変形の非接触測定に関する研究", 日本機械学会北陸信越支部第 56 期総会・講演会 講演論文集, No. L023, (2019)
- (14) 鶴田 誠: "ランフラットタイヤについて", 日本ゴム協会誌, Vol. 85, No. 6, pp. 193–197, (2012)
- (15) L. Yang, F. Ballo, G. Previali and M. Gobbi: "Robust Optimization of Road Vehicle Suspension Considering the Variation of Tire Vertical Stiffness", *Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 11, No. 1, pp. 8–15, (2019)
- (16) 勝山 悦生: トリプルスカイフック制御による乗り心地の研究, 自動車技術会論文集, Vol. 50, No. 1, p. 128–133, (2019)