

タイヤ内スチールベルト道路埋設導体間の静電容量を用いた走行中給電

花澤 理宏[†] 大平 孝^{††}

[†] 株式会社豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町長湫横道 41-1

^{††} 国立大学法人豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

E-mail: [†]hanazawa@mosk.tytlabs.co.jp, ^{††}ohira@tut.jp

あらまし タイヤ内のスチールベルトと路面上に設置された金属板から構成されるコンデンサーを介して走行する自動車に電力を伝送する技術を検討している。これまで基礎検討として、タイヤと金属板から構成される簡易モデルの複素インピーダンス測定や整合回路設計等を実施してきた。簡易測定および簡易シミュレーションの検討の結果、1MHzにおける簡易実験モデルの複素インピーダンスの実部および虚部は、それぞれ約700Ωおよび約-2000Ωと大きいことおよび整合回路を介して50Ω線路と接続した際の S_{21} は、約-0.1dBであることを理論的に示した。さらに、理論検討に基づき製作した整合回路を入出ポートに接続し測定した S_{21} は、約-3dB程度と大きいものの整合回路の低損失化を図ることで高効率伝送が可能であると考えている。

キーワード 電力伝送, 自動車, タイヤ, スチールベルト

SUPRA:Supply Underground Power to Running Automobiles

Masahiro HANAZAWA[†] and Takashi OHIRA^{††}

[†] Toyota Central R&D Labs., Inc. 41-1, Yokomichi, Nagakute, Aichi, 480-1192 Japan

^{††} Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan

E-mail: [†]hanazawa@mosk.tytlabs.co.jp, ^{††}ohira@tut.jp

Abstract A technology of power transfer through a capacitor composed of a steel belt in a tire and a metal plate attached to a road is examined. The complex impedance of a simple model composed of the tire and metallic boards was measured, and matching circuits was desinged as a basic examination. As a result of the examination, the measurements revealed that the real and imaginary parts of the complex impedance at 1 MHz were approximately 700 ohm and -2,000 ohm, respectively. It was theoretically confirmed that a S_{21} involving the matching circuit is about -0.1 dB. In addition, S_{21} that connected the matching circuit with input port and output port was about -3 dB as a result of the measurement. It will be guessed that the transmission loss decreases by improving the matching circuit in the near future.

Key words Power Transfer, Automobile, Tire, Steel Belt

1. ま え が き

近年、地球温暖化防止、省エネルギーの観点から電気自動車やプラグインハイブリッド自動車が検討されている。外部から供給される電気エネルギーを用いて走行する電気自動車は自動車単体として排気ガスを放出しないことから大きな期待が寄せられているが、現在のバッテリーは容量が小さく充電時間が長いことが課題である。この問題を解決するひとつの方法として、走行する電気自動車に無線で電力を供給する技術がある。これまで電磁波エネルギーを用いた無線給電技術の伝送効率は低かったが、2007年、MITの研究グループが提案した磁気共鳴方式が90%以上の高い伝送効率を実現したことから [1]、

多くの研究機関や企業において無線給電技術が検討されている [2]- [4]。磁気共鳴コイルは、これまで検討されてきた電磁誘導方式や電波放射方式に比べ高効率伝送可能であるものの送受信コイルが位置ずれすると伝送特性が急激に悪化することが知られており走行する自動車に高効率で電力を伝送することは難しい。また、自動車が走行するのに必要なエネルギーを伝送する際には、周辺の人や通信機器に影響を与えることも明らかになってきた [5]。

上記の課題の中で位置ずれの問題を解決する方法として、マイクロストリップ線路カプラーの原理に基づいた伝送方式やパッチアンテナを用いた伝送方式も提案・検討されている [6] [7]。

そのような中、我々の研究グループは、タイヤ内のスチール

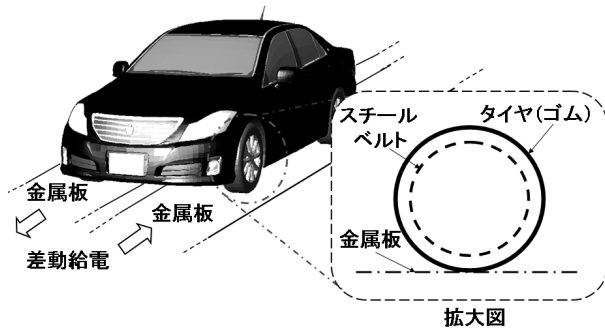


図 1 提案する給電方式の概略図
Fig.1 Diagrammatic illustration of proposed power transfer technology

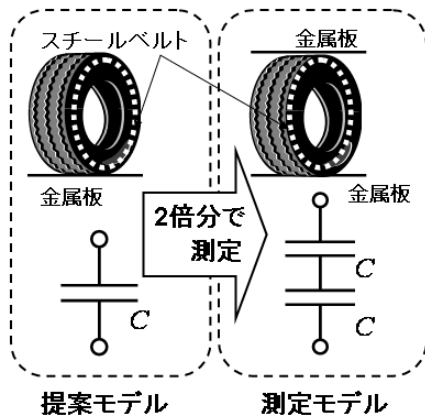


図 2 提案モデルと測定モデル
Fig.2 Proposed model and measurement model

ベルトと路面に設置された金属板で構成されるコンデンサーを介して電力を伝送する技術を検討している [8]- [13]。

本講演では、本提案伝送方式を実現する際に必要不可欠なタイヤ内のスチールベルトと金属板から構成されるコンデンサーの特性、伝送特性の簡易シミュレーションおよび測定結果について報告する。

2. 伝送方式および検討モデル

2.1 伝送手法

図 1 に提案する伝送方式の概略図を示す。本伝送方式は走行レーンと平行に設置された 2 本の金属板とその上を走行する自動車のタイヤ内のスチールベルトとで形成される 2 つのコンデンサーを介して電力を伝送する。また、電力は差動モードで給電することから同相給電に比べ線路から放射する不要な電磁波エネルギーを抑制できると考えている。

2.2 検討モデル

図 1 の概略図では、タイヤ内のスチールベルトと路面上に配置された金属板から構成されるコンデンサーを介して電力を伝送するモデルを示しているが、ここでは基礎検討として図 2 に示す測定モデルを用いて検討を行った。提案モデルは、スチールベルトと路面上の金属板から構成されるコンデンサーを介して電力を伝送するが、測定モデルはタイヤの上下に金属板を配

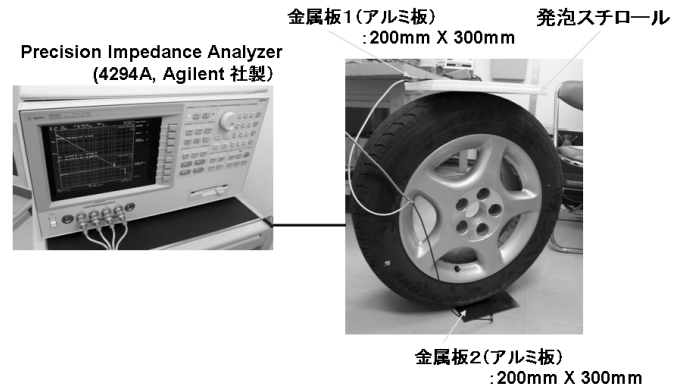


図 3 インピーダンスの測定系
Fig.3 Measurement setup of impedance measurement

置していることから、2 つのコンデンサーが直列に接続されたモデルとなる。

3. インピーダンス測定

3.1 測定系

インピーダンスの測定系を図 3 に示す。この図に示すように、インピーダンスアナライザ (4294A Agilent 社製) に接続された 2 枚の金属板 (200mm × 300mm) をタイヤの上下に設置し測定を行った。なお、本測定ではタイヤ上面に設置した金属板とタイヤの間に厚みの異なる発泡スチロールを挟み金属板とタイヤ上面との間隔を 0cm から 4cm まで 1cm きざみで変更するとともに測定周波数帯域は 10kHz から 10MHz とした。

3.2 測定結果

図 4 および図 5 にタイヤとタイヤの上下に設置された金属板から構成される回路の複素インピーダンスの測定結果を示す。測定の結果、インピーダンスの虚部は周波数の増加とともに増加し、発泡スチロールの厚みの増加とともに減少している。以上の結果から、本測定モデルはインダクタンス成分に比べキャパシタンス成分が支配的であると推測される。また、本測定条件下において実部および虚部は、それぞれ 100Ω から 10000Ω 程度および -100Ω から -100000Ω 程度変動することもわかった。

4. 整合回路

4.1 設計方法

先に示したようにタイヤ内のスチールベルトと金属板が構成する回路の複素インピーダンスは、実部および虚部ともに非常に大きな値である。実際のシステムでは、測定したタイヤの複素インピーダンスと整合する給電回路および受電回路を設計する方法も考えられるが現時点では回路構成が決定していない。そこで、図 6 に示すようにキャパシタンス C_1 、 C_2 およびインダクタンス L_1 、 L_2 から構成される整合回路を介して給電回路および受電回路と接続されたモデルを考える。一般的な車両は左右対称であることから、同図に示すように 2 本の金属板に差動モード電圧を加えると中心線上では仮想的に 0 ボルト (接地) となる。したがって図 6 に示す回路は、図 7 に示す回路と等価となる。

図4および図5に示したように、測定した複素インピーダンスは実部および虚部を有しているが、ここでは図8に示すように単純抵抗 R のみから構成される簡易回路モデルを用いる [14]。また、図8以降、数式をみやすくするため LCR 類の変数記号を改定する。

高周波電源の出力インピーダンスおよび車載負荷入力インピーダンスをともに Z_0 と表記する。先に示した測定結果から、式 (1) が常に成り立つ。

$$Z_0 \ll R \quad (1)$$

L および C の値を以下のように定義する。この式中の ω は、高周波電源から供給される電力の角周波数である。

$$\omega^2 LC = 1 \quad (2)$$

コイルのリアクタンス値 ωL は以下の式のようにタイヤ部分の抵抗成分 R に比べ十分に大きいとする。

$$R \ll \omega L \quad (3)$$

タイヤ部分の抵抗のみから構成される回路のアドミタンス行

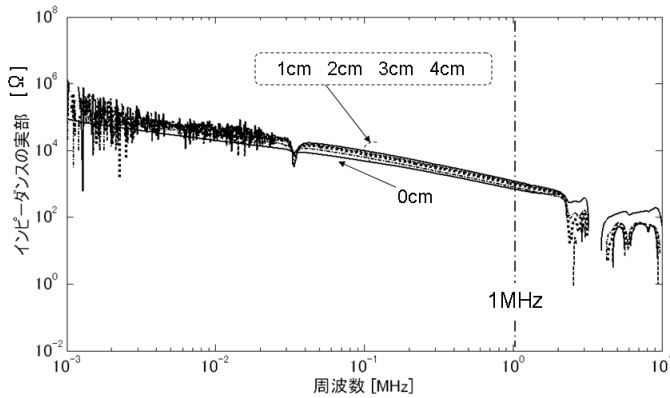


図4 インピーダンスの測定結果 (実部)

Fig. 4 Measurement results of impedance (real part)

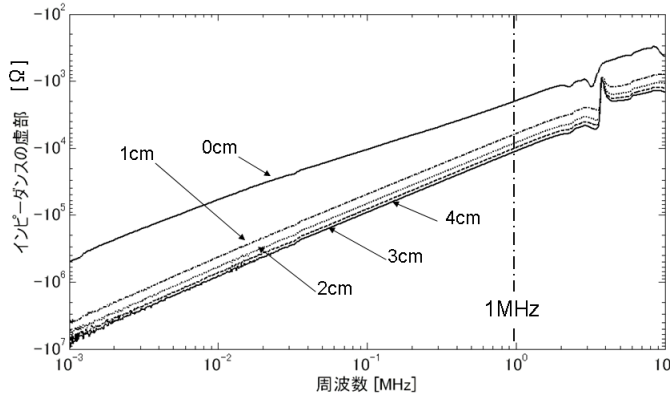


図5 インピーダンスの測定結果 (虚部)

Fig. 5 Measurement results of impedance (imaginary part)

列は、以下の式で与えられる [14]。

$$\frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

図8に従い、抵抗のみから構成される回路の両側に並列に C を接続すると、アドミタンス行列は次式となる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + j\omega C \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ & = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 + j\omega CR & -1 \\ -1 & 1 + j\omega CR \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

抵抗成分 R のみから構成される回路の両側に並列 C を接続した回路のインピーダンス行列は上記行列の逆行列であるから、以下の式となる。

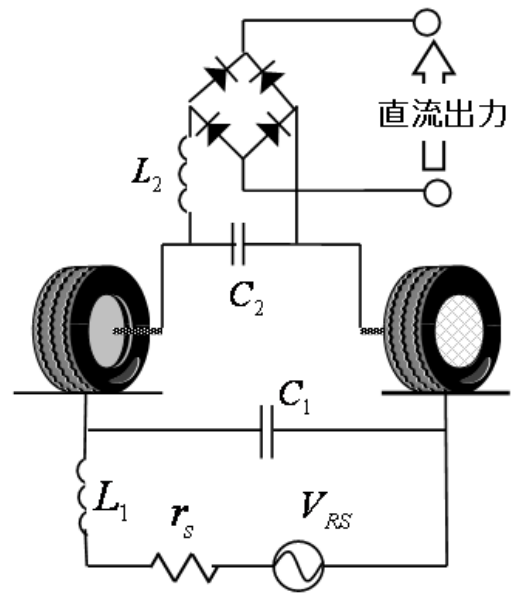


図6 システム構成

Fig. 6 System configuration

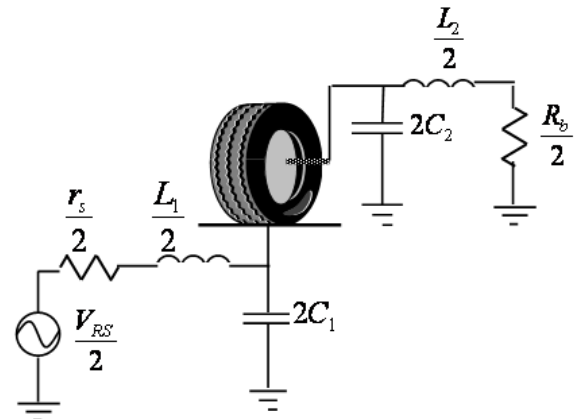


図7 対称性を考慮したシステム構成

Fig. 7 System configuration that considered symmetry

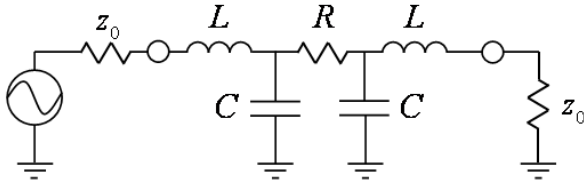


図 8 簡易等価回路モデル

Fig.8 Equivalent circuit model

$$\begin{aligned}
 & R \begin{bmatrix} 1 + j\omega CR & -1 \\ -1 & 1 + j\omega CR \end{bmatrix}^{-1} \\
 &= \frac{R}{(1 + j\omega CR)^2 - 1} \begin{bmatrix} 1 + j\omega CR & 1 \\ 1 & 1 + j\omega CR \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{j\omega C(2 + j\omega CR)} \begin{bmatrix} 1 + j\omega CR & 1 \\ 1 & 1 + j\omega CR \end{bmatrix} \quad (6)
 \end{aligned}$$

上記行列の回路の両側に L を直列に挿入すると、そのインピーダンス行列 \mathbf{Z} は、以下の式となる。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Z} &= \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \\
 &= \frac{1}{j\omega C(2 + j\omega CR)} \begin{bmatrix} 1 + j\omega CR & 1 \\ 1 & 1 + j\omega CR \end{bmatrix} \\
 &\quad + j\omega L \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

上記行列の各成分を分割表示すると、対角成分は以下の式となる。

$$\begin{aligned}
 Z_{11} = Z_{22} &= \frac{1 + j\omega CR}{j\omega C(2 + j\omega CR)} + j\omega L \\
 &= -\frac{1}{2j\omega C} + \frac{R}{2(2 + j\omega CR)} \quad (8)
 \end{aligned}$$

一方、非対角成分は以下の式となる。

$$\begin{aligned}
 Z_{12} = Z_{21} &= \frac{1}{j\omega C(2 + j\omega CR)} \\
 &= \frac{1}{2j\omega C} - \frac{R}{2(2 + j\omega CR)} \quad (9)
 \end{aligned}$$

以上の結果から、以下の式が成立する。

$$Z_{11} + Z_{12} = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 Z_{11} - Z_{12} &= 2Z_{11} \\
 &= -\frac{1}{j\omega C} + \frac{R}{2 + j\omega CR} \quad (11)
 \end{aligned}$$

上記インピーダンス行列を散乱行列に変換する式に代入する [14]。インピーダンス行列を散乱行列に変更する際、規格化イ

ンピーダンスを定義する必要がある。ここでは規格化インピーダンスとして電源の出力インピーダンスおよび車載負荷インピーダンスである Z_0 を用いる。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \\
 &= (\mathbf{Z} - Z_0 \mathbf{I})(\mathbf{Z} + Z_0 \mathbf{I})^{-1} \\
 &= \frac{1}{(Z_{11} + Z_{12} + Z_0)(Z_{11} - Z_{12} + Z_0)} \\
 &\quad \begin{bmatrix} Z_{11}^2 - Z_{12}^2 - Z_0^2 & 2Z_0 Z_{12} \\ 2Z_0 Z_{12} & Z_{11}^2 - Z_{12}^2 - Z_0^2 \end{bmatrix} \quad (12)
 \end{aligned}$$

この散乱行列から非対角成分のみを抽出すると以下の式となる。

$$\begin{aligned}
 S_{12} = S_{21} &= \frac{2Z_0 Z_{12}}{(Z_{11} + Z_{12} + Z_0)(Z_{11} - Z_{12} + Z_0)} \\
 &= \frac{2Z_{12}}{2Z_{11} + Z_0} \\
 &= \frac{2}{2j\omega C Z_0 - 2 - \omega^2 C^2 R Z_0} \quad (13)
 \end{aligned}$$

これより、電力透過係数 $|S_{21}|^2$ は以下のようにになる。

$$|S_{21}|^2 = \frac{4}{(2\omega C Z_0)^2 + (2 + \omega^2 C^2 R Z_0)^2} \quad (14)$$

上記式は、式 (2) を用いると C のかわりに L で表現することもできる。

$$\begin{aligned}
 |S_{21}|^2 &= \frac{4}{\left(\frac{2Z_0}{\omega L}\right)^2 + \left(2 + \frac{RZ_0}{\omega^2 L^2}\right)^2} \\
 &= \frac{4}{\left(\frac{2Z_0}{\omega L}\right)^2 + 4 + \frac{4RZ_0}{\omega^2 L^2} + \left(\frac{RZ_0}{\omega^2 L^2}\right)^2} \quad (15)
 \end{aligned}$$

式 (1) および式 (3) から $Z_0 \ll R < \omega L$ を考慮すると、上式の分母の初項と末項に比べ中間項は微量量なので、近似的に以下の式となる。

$$|S_{21}|^2 \approx \frac{1}{1 + \frac{RZ_0}{\omega^2 L^2}} \approx 1 - \frac{RZ_0}{\omega^2 L^2} \quad (16)$$

一例として、タイヤを透過する電力透過率を 96% とするには以下の式を満足すればよい。

$$\frac{RZ_0}{\omega^2 L^2} < 0.04 \quad (17)$$

上記式を書き下すと以下の式となる。

$$\omega L > 5\sqrt{RZ_0} \quad (18)$$

上記したように、電源インピーダンスや負荷インピーダンスに比べ高い抵抗値を有する素子であっても、高効率伝送が可能となる。

4.2 設計例

先に示した条件を満足する整合回路を用いれば、タイヤを介して高効率で電力を伝送できる可能性がある。一方、現時点では電力を給電回路および受電回路、伝送周波数が決定していない。そこで、ここでは一例として入出力インピーダンスをネットワークアナライザ等の測定機器で用いられている 50Ω とするとともに安定したインピーダンスが測定できたと推測される 1MHz 付近に着目し検討をおこなう。

図4および図5より、 1MHz における複素インピーダンスの実部および虚部は、それぞれ約 700Ω および約 -2000Ω である。これらの測定結果に対し式(2)および式(18)の条件を満す C および L の一例として 120pF および $220\mu\text{H}$ を選択した。

Opne Source として提供されている回路シミュレータ Qucs [15] を用いて、整合回路を接続した際の伝送特性および反射特性をシミュレーションした。 S_{11} および S_{21} のスミスチャート、伝送特性および反射特性のシミュレーション結果を図9および図10に示す。

以上の結果、 120pF と $220\mu\text{H}$ の共振周波数(約 0.98MHz)における S_{21} は約 -0.2dB である。また、整合周波数から、 $\pm 20\text{kHz}$ 程度周波数が変化すると S_{21} は、約 3dB 減少することもわかった。

使用するタイヤが異なる場合、図4および図5に示した複素インピーダンスが異なることも考えられる。そこで、タイヤの複素インピーダンスが変更した場合の伝送特性(S_{21})をシミュレーションした。シミュレーション結果を図11に示す。本図では、複素インピーダンスの実部および虚部がそれぞれ、 $\pm 30\%$

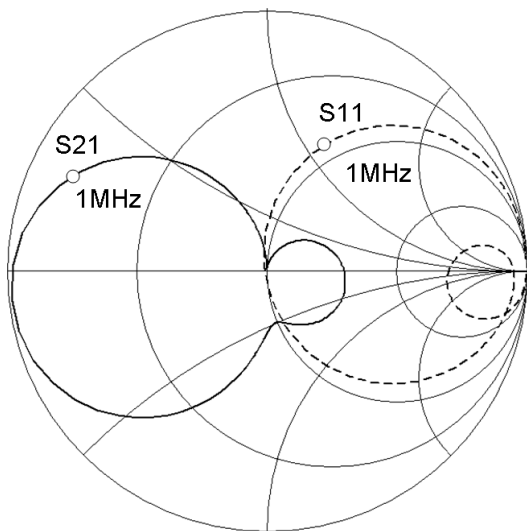


図9 スミスチャート (S_{11}, S_{21})
Fig.9 Smith chart (S_{11}, S_{21})

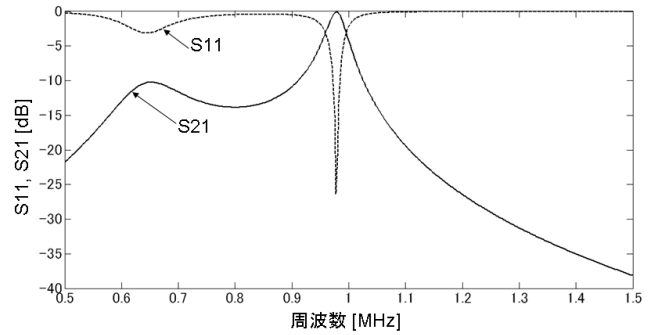


図10 整合回路を接続した際の S_{11} および S_{21} のシミュレーション結果
Fig.10 Simulation results of S_{11} and S_{21} that connected matched circuit

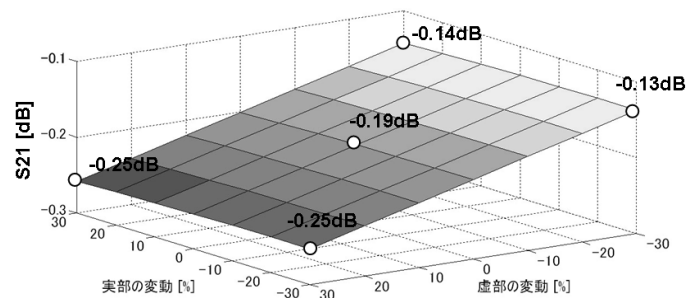


図11 タイヤのインピーダンス変化に伴う S_{21} の変動
Fig.11 Change of S_{21} according of complex impedance of the tire

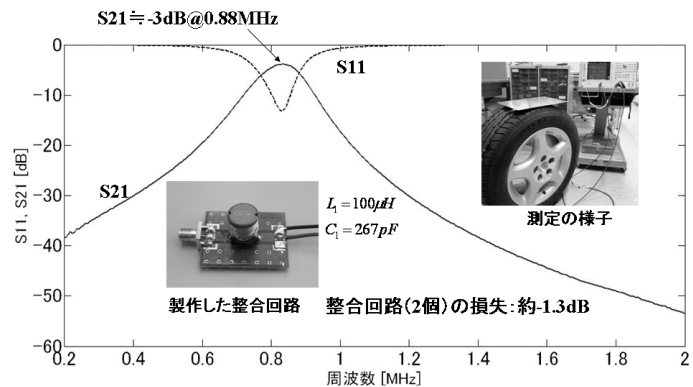


図12 伝送特性および反射特性の測定結果
Fig.12 Measurement results of transmission and reflection characteristics

変化した際の伝送特性(S_{21})の結果を示している。検討の結果、 $\pm 30\%$ 程度実部および虚部が変動しても伝送特性の変動は 0.05dB 程度と小さいことがわかった。また、この図においては、表示していないが伝送周波数は変動しないことも確認している。

5. 伝送特性

先に示した条件を満足するインダクターおよびキャパスターとして $100\mu\text{H}$ および 276pF を選択し整合回路を製作した。製作した整合回路が接続された $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ の金属板をタイヤの上下に配置しベクトルネットワークアナライザ(8753ES

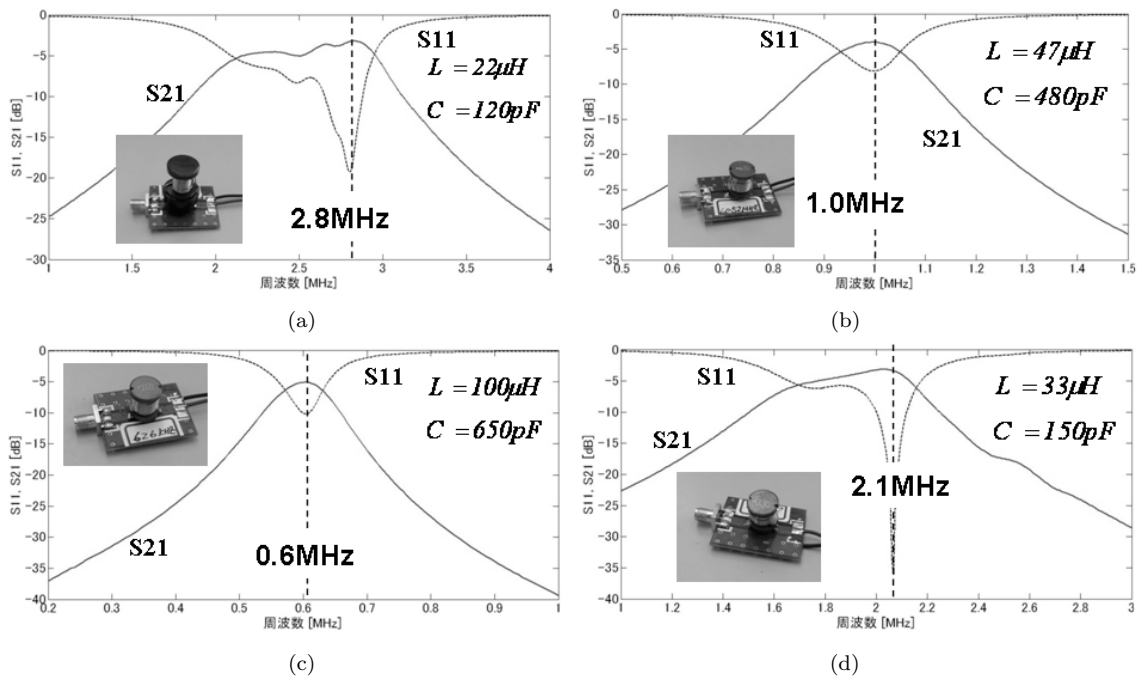


図 13 整合回路を変更した際の反射および透過特性

Fig. 13 Transmission and reflection characteristics in which matched circuits is changed

Agilent 社製) で伝送特性および反射特性を測定した。製作した整合回路の写真、測定風景および伝送・反射特性の測定結果を図 12 に示す。測定の結果、周波数 0.88MHz において S_{21} は最大値を示し、その値は約-3dB であった。また、2 つの整合回路を直接接続した際の伝送損失 (S_{21}) は、約-1.3dB であることから、タイヤとタイヤの上下に配置した金属から構成されるコンデンサの伝送損失は、約-1.7dB 程度であると推測される。以上の測定結果から、整合回路の伝送損失を抑制することにより更に伝送効率を向上可能であると考えている。

式 (18) の条件を満足すれば、伝送周波数を変更できる可能性がある。そこで、先に示した異なる値の素子 (L および C) を用いて 4 種の整合回路を作成し伝送特性を測定した。なお整合回路の定数および測定周波数以外の条件は先に示した条件と同様とした。測定の結果、先の測定結果同様、各回路の伝送損失のため S_{21} は、-3 ~ -5dB 程度であるものの伝送周波数を 0.6 ~ 3MHz 程度変更可能であることもわかった。

6. ま と め

タイヤ内のスチールベルトと路面上に配置された金属板が構成するコンデンサを介して走行する自動車に電力伝送する技術の実現に向け検討を行っている。これまで実施してきた理論的検討および実験的検討から、十分に実用化可能な技術であると考えている。今後は、模型や実車を用いた実験を通し本提案手法の実現性を検討する予定である。

文 献

[1] A.Kurs, A.Karalis, R.Moffatt, J.D.Jonnopolos, P.Fisher and M.Soljagic "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science, Vol.317, pp.83-86 (2007).
 [2] 北村浩康、安倍秀明 "家庭用非接触給電," 機能材料, 2010 年 1

月号, Vol.30, No.1, pp.15-23 (2010).

[3] 丸地智博、稲垣直樹、藤井勝之 "誘導電界を用いた新しい無線接続方式," 信学技報 AP2009-84, pp.29-34(2009).
 [4] 平岩洋介、菊間信良、平山 祐、榊原久二男 "近接コイルを用いた無線電力伝送の効率特性についての一検討," 信学技報 AP2009-86, pp.41-46(2009).
 [5] 高橋俊輔 "非接触給電と周囲の電磁環境," 月間 EMC 2010 年 5 月号, pp.54-68.(2010).
 [6] 浪越和紀、堀邦仁、役野茂生、粟井郁雄 "方向性フィルタを用いた移動式ワイヤレス電力伝送," 信学技報 MW2009-179, pp.1-6(2010).
 [7] 巖 謹宣、新井宏之 "線上フリーアクセスマットによる無線電力伝送," 信学技報 AP2009-89, pp.57-60 (2010).
 [8] 花澤理宏、大平 孝 "走行する自動車への電力伝送技術に関する基礎検討," 信学技報 MW2010-168, pp.93-98 (2011).
 [9] 花澤理宏、大平 孝 "走行する自動車への電力伝送に関する一検討," 信学総大 2011 BS2-9, (2011).
 [10] M.Hanazawa and T.Ohira "Power Trasfer for a Running Automobile," Proceedings of 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, System, and Applications, pp.77-80 (2011).
 [11] "クルマと磁界共鳴が主役ワイヤレス給電の国際会議開催-ソニーはコスト低減手法を、豊田中研は走行中の給電を提案-" 日経エレクトロニクス, 2011 年 5 月 30 日号, pp18-19(2011)
 [12] W.Zukerman "Electified roads could power cars from the ground up," NewScientist Magazine 10 Sep, pp.22-23 (2011).
 [13] 花澤理宏、大平 孝 "走行する自動車への電力伝送技術実現に向けた取り組み," 信学技報 MW2011-36, pp.23-28 (2011).
 [14] 大平 孝 "行列ができる回路演習: アナログ回路を紙と鉛筆で考えよう [I] アナログ回路のポートパラメータ," 電子情報通信学会会誌, Vol.93, No.1, pp.67-72 (2010).
 [15] <http://qucs.sourceforge.net/index.html>