

共鳴型無線給電システムへの水や誘電体の影響

堀田 昌志^{a,*} 延 彰憲^a 春山 隆行^b 結城 亨^c 羽野 光夫^a

Effect of Water and/or Dielectric Materials for Resonant Type Wireless Power Transfer System

Masashi Hotta^{a,*}, Akinori Nobu^a, Takayuki Haruyama^b, Tohru Yuki^c, Mitsuo Hano^a

(Received April 24, 2014; revised June 4, 2014; accepted June 23, 2014)

Abstract

Wireless power transfer (WPT) system is one of the promising way to connect the power supply and the electrical appliances with freedom of the product layout for the next generation. At this time, the several kinds of WPT system have been proposed. Among of them, we have focused on the resonant type WPT system composed of the loop coils as the transmitting and receiving units and the resonators enhance the specified electromagnetic energy to transmit the electric power. This system has been much attractive because of its efficient power transmission especially for the middle-range distance such as the outdoor power supply to the electric vehicles. To put the stable and effective WPT system of this type into practical use, it is necessary to inspect the influence of the disturbing objects come into the transmission pass of the system. In this paper, the effect of the water and the dielectrics used as the package of the unit come into the system has been discussed. In addition, one of the ways to recover the deterioration of the transmission efficiency due to the disturbing objects has been demonstrated.

キーワード：無線給電システム，共振器，電力伝送効率，誘電体，水

Keywords : Wireless power transfer system, Resonator, Power transfer rate, Dielectric material, Water.

1. はじめに

低炭素社会実現に向けて，自動車業界では排気ガスの少ないハイブリッド車やプラグインハイブリッド車あるいは電気自動車の開発・普及が進んでいる。この様な車両への走行中給電あるいは駐停車中における充電の一方式として非接触型の無線給電システム⁽¹⁻³⁾を用いる手法が検討されている。中でも，一対のソレノイダルコイルを共振器として用いた“Magnetic Resonance 型”のシステ

ムが MIT グループから発表⁽⁴⁾されて以来，システム内に配置した一対の共振器間の共鳴現象を利用し，中距離用の電力伝送に適した共鳴型無線給電システムが注目を浴び，その実用化に関する研究開発⁽⁵⁻⁷⁾が現在活発に行われている。筆者らも，ソレノイダルコイルと同じコイル型共振器の一種であるスパイラル共振器を用い，共振器間の磁界結合型の共鳴により電力を伝送する共鳴型無線給電システムについて，その最適設計法や性能改善法に関する検討を行ってきた⁽⁷⁾。

ここで，無線給電システムを実用化するためには，システムを各種機器へ実装する方法や屋外で使用する場合などを念頭において，天候や環境の影響を考慮したシステム性能の検討が必要である。たとえば，降雨時における雨水がシステムに及ぼす影響やシステムのパッケージングとして用いられる可能性の高い誘電体材料の影響を考慮したシステム構築が重要であると考えられる。

また，最近では，医療分野における人体内に送り込まれた内視鏡カプセルなどへの給電⁽²⁾や水中で動作する機器等への給電⁽⁸⁾などにおいても，無線給電システムの利用が検討されている。これまで，無線給電システムにお

* Corresponding author. E-mail: hotta@yamaguchi-u.ac.jp

a 山口大学大学院理工学研究科
〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1
Graduate School of Science & Engineering
Yamaguchi University
2-16-1 Tokiwa-dai, Ube, Yamaguchi, 755-8611 Japan

b ロームアポロ株式会社
〒834-0111 福岡県八女郡広川町大字日吉 1164-2
Rohm Apollo Co., Ltd.
1164-2 Ooaza-Hiyoshi, Hirokawa-cho, Yame-gun, Fukuoka
834-0111 Japan

c 本田技術研究所汎用 R&D センター
〒351-0024 埼玉県朝霞市泉水 3-15-1
Honda R&D Co., Ltd.
3-15-1 Senzui, Asaka-shi, Saitama, 351-0024 Japan

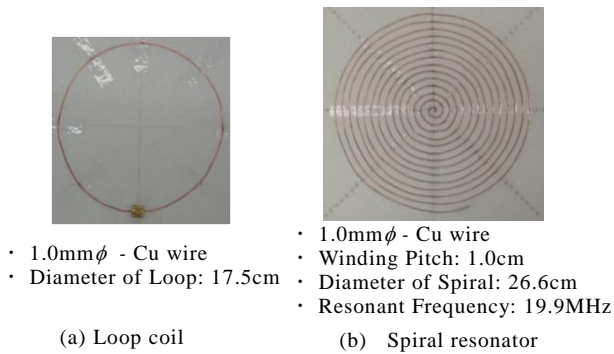


Fig.1 Fundamental elements for conventional resonant type wireless power transfer system.

いては大気中の湿気の影響や人体内部への給電時の諸問題⁽⁹⁾に関する検討は見受けられるが、システム伝送路内に誘電体や水が存在する場合の影響やその改善策についての詳細な検討は数少ない。筆者らも、水や塩水の入ったペットボトルを無線給電システムの伝送路内に配置した場合に起こる諸現象に関する検討⁽¹⁰⁾や伝送路内に水入りアクリル水槽を設置した場合の電力伝送効率低下を報告⁽¹¹⁾するに留まっている。

本論文では共鳴型無線給電システム内に誘電体や水が存在する場合の影響について実験的に詳細な検証を行う。まず、本無線給電システムの特性を明らかにする上で必要となる各種パラメータの測定法について説明する。そして、伝送路内に中空あるいは水を充填したアクリル水槽を挿入することで、どのパラメータが特に大きな影響を受けるのかを検討し、その結果として電力伝送効率がどの程度低下するのかを詳細に明らかにする。そして、伝送路内における水を充填したアクリル水槽の位置によって電力伝送効率がどの様に変化するかを調べることで、水を充填したアクリル水槽が本給電システムに与える性能劣化を軽減する手法の一提案を行う。

2. 無線給電システムの設計

本論文で取り扱う共鳴型無線給電システムの構成要素として、1.0mm 径の軟銅線を用いて Fig1(a)に示す様な直径 17.5cm の送受信用ループコイルと同図(b)に示す様な線間距離 1.0cm で直径 26.6cm, 共振周波数 19.9MHz のスパイラル共振器をそれぞれ 1 組ずつ作製した。そして、これらの構成要素を空気とほぼ同じ誘電率を持つ厚さ 1.0cm で広さ 50.0×50.0cm² の発泡スチロール板に貼りつけ、Fig.2 に示す様に送信用のループコイルとスパイラル共振器および受信用のスパイラル共振器とループコイルの全ての中心軸が一致する様に配列することで共鳴型無線給電システムを構成した。ここで、同図に示す様にループコイルとスパイラル共振器間の距離を a 、無線電力伝送路となる送受信端の各スパイラル共振器間の距離を d とする。

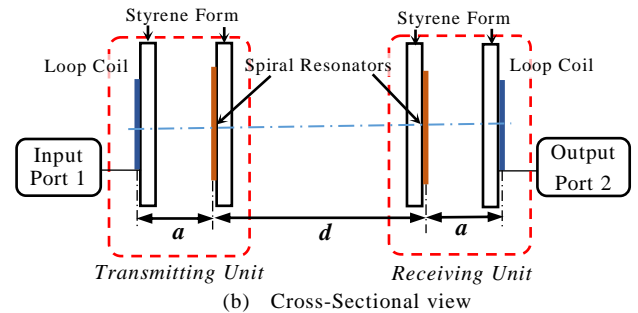
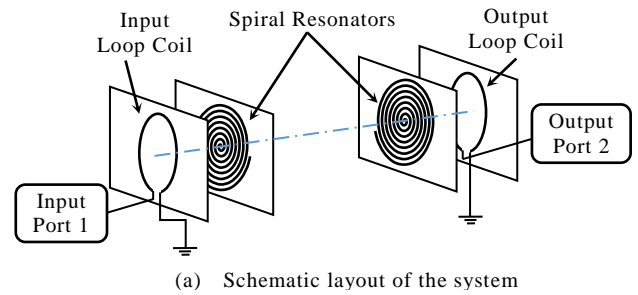


Fig.2 Conventional resonant type wireless power transfer system.

本共鳴型無線給電システムでは、送信端においてループコイルがスパイラル共振器を励振し、励振されたスパイラル共振器と受信端のスパイラル共振器間での磁気結合型の共鳴によって電磁エネルギーの伝送を行う。そして、受信端スパイラル共振器へ移送された電磁エネルギーを受信端ループコイルで取り出すことで電力伝送を実現するものである。なお、システム内のスパイラル共振器は、電力伝送が効率的に行える様に入力側 (Port 1) から出力側 (Port 2) を見た際に、互いの巻き方向が逆方向となる様にする⁽¹²⁾。

ここで、本無線給電システムを等価回路表現すると 2 段帯域通過フィルタ (Band Pass Filter: BPF) 回路と同じ形状となることが報告⁽⁶⁾されており、フィルタ設計理論に基づいて整合の取れたシステム設計を行うことで効率的な電力伝送が可能なシステムを構築できることが示されている⁽⁴⁻⁶⁾。すなわち、本無線給電システムにおいて、使用共振器の無負荷 $Q: Q_u$ (unloaded quality factor) と外部 $Q: Q_e$ (external quality factor), そして、共振器間の結合係数: k (coupling efficiency) を測定し、これらの値から計算で求めたループコイルと外部回路間の結合の度合いを表す外部 $k: k_e$ (external k) と共振器間の結合の度合いを表す結合係数: k が一致する様な a と d を選択することで、システム等価回路である BPF 回路の整合条件を満足したシステムを構築できる。なお、 Q_u および Q_e は、作製した無線給電システムの入出力端 (Port 1 および 2) をベクトルネットワークアナライザ (VNA) に接続して測定した S パラメータ (複素振幅反射特性 S_{11} および複素振幅透過特性 S_{21}) から、次節で示す手順で求めることができる。

2.1 Q値の測定

Q_u および Q_e の測定では、共鳴型無線給電システムを中央で分割した Fig.3(a)に示す様な測定系を用い、BPF回路のQ値測定法^(4,13)に基づく次の様な手順で行った。

Fig.3(a)の測定系で dB 表記の $|S_{11}|$ を観測すると同図(b)の様な周波数特性が得られる。この時の $|S_{11}|$ の最小値を L_0 [dB], その時の周波数を f_0 として読み取り, L_0 の値を次式へ代入することで L_1 を求める。

$$L_1 = 10 \log \left(\frac{10^{\frac{L_0}{10}} + 1}{2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

次に、同図(b)中の周波数特性において $|S_{11}|$ が L_1 となる2点の周波数 f_1 および f_2 (但し, $f_1 < f_2$) を読み取り, 次式からこの系の負荷Q: Q_L (loaded quality factor)を求める。

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (2)$$

さらに、VNA の表示モードをスミスチャート型に切り替えて $|S_{11}|$ の軌跡を観測する。この時、 $|S_{11}|$ の軌跡がチャートの原点を取り囲んでいれば(3a)式を、取り囲んでいなければ(3b)式を用いて β_e を求める。

$$\beta_e = \begin{cases} \frac{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}} & \text{loose-coupling} \\ \frac{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}} & \text{over-coupling} \end{cases} \quad (3a)$$

$$\beta_e = \begin{cases} \frac{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}} & \text{loose-coupling} \\ \frac{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}} & \text{over-coupling} \end{cases} \quad (3b)$$

以上の計算で求めた Q_L および β_e を用いることで、 Q_u および Q_e は、次式より求めることができる。

$$Q_u = Q_L (1 + \beta_e) \quad (4)$$

$$Q_e = Q_L \left(1 + \frac{1}{\beta_e} \right) \quad (5)$$

ここで、 Q_u は共振器固有の損失の逆数を表し、共振器の品質を示す値である。Fig.4(a)に本システムの Q_u を測定した結果を示す。同図より、ループコイルとスパイラル共振器間距離 a が短い場合、ループコイルとスパイラル共振器間の相互作用により Q_u の値が大きく変化しているが、 $a=15.0\text{cm}$ 程度まで十分に離すと、ループコイルの影響を抑えることができ、 Q_u は約 746 程度の値に漸近する。この値がスパイラル共振器固有の Q_u であると推察される。

さらに、(5)式の Q_e の逆数で外部 k : k_e (external k) を定義すると、 k_e は、ループコイルとスパイラル共振器間の結合度合いに比例する量となる。Fig.4(b)に本システムの k_e の特性を求めた結果を示す。同図より、 k_e はループ・スパイラル共振器間距離 a が長くなるに従って指数関数的に減少している。

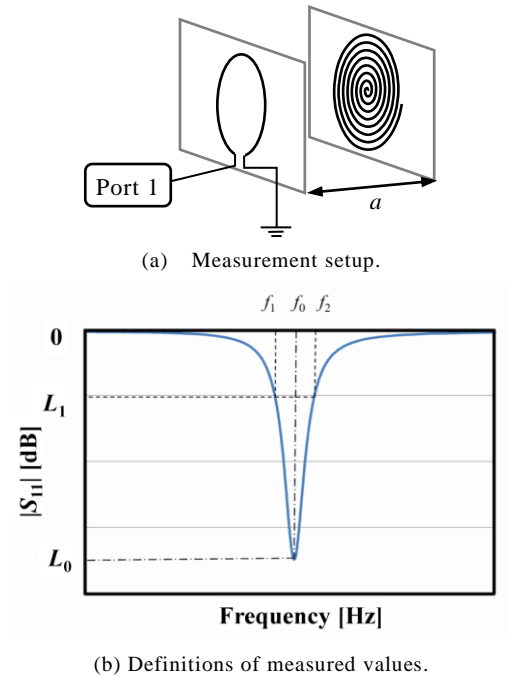


Fig.3 Setup for measurement of Quality Factors.

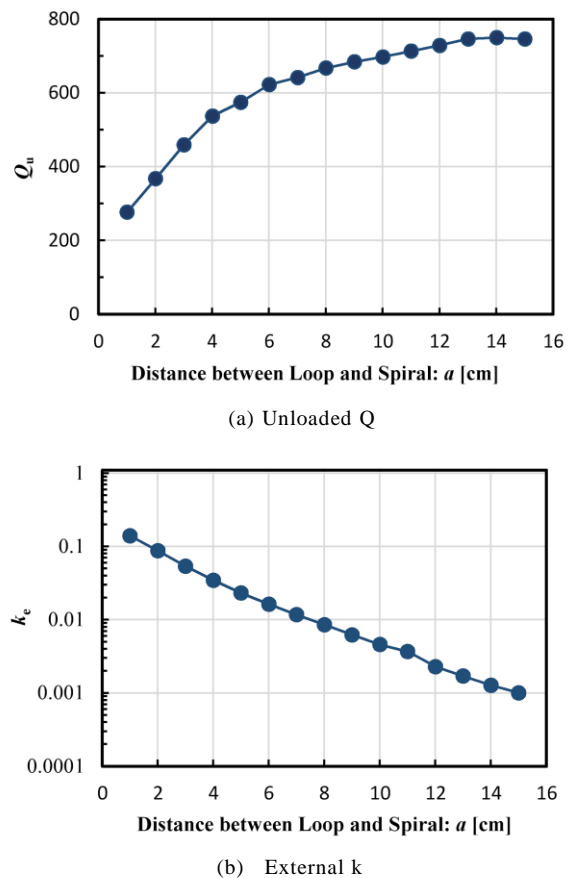


Fig.4 Unloaded Q and External k of fabricated conventional wireless power transfer system as a function of distance between loop coil and spiral resonator.

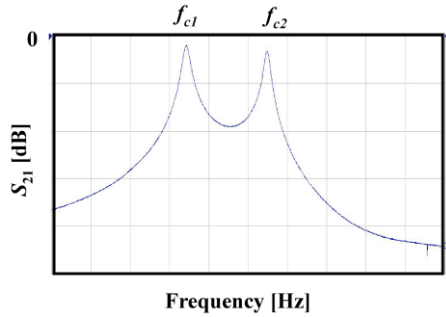


Fig.5 Schematic figure of measured S-parameter to estimate the coupling efficiency.

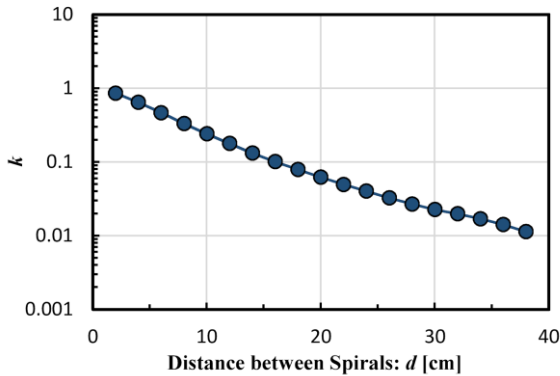


Fig.6 Coupling efficiency of fabricated conventional wireless power transfer system as a function of the distance between spiral resonators.

2.2 結合係数

次に、2つのスパイラル共振器間の結合係数を求めるために、前節の Fig.2 のシステムにおいてループコイルとスパイラル共振器間の相互作用の影響が含まなくなるループ・スパイラル間距離 a で固定した測定系でスパイラル共振器間距離 d を変化させた時の振幅透過係数 $|S_{21}|$ を VNA により測定した。すると、Fig.5 に示す様に 2 つに分離した共振周波数 f_{c1} および f_{c2} (但し、 $f_{c1} < f_{c2}$) が観測される。この分離した共振周波数の値を読み取り、次式へ代入することで共振器間の結合の度合いを示す結合係数 k を求めることができる^(4,13)。

$$k = \frac{f_{c2}^2 - f_{c1}^2}{f_{c2}^2 + f_{c1}^2} \quad (6)$$

ここで、結合係数 k は、スパイラル共振器間の結合の度合いを表す量である。Fig.6 に本システムにおける k の測定結果を示す。同図より、 k も k_e と同様にスパイラル共振器間距離 d が大きくなるに従って指数関数的に減少していることがわかる。

2.3 システム整合と電力伝送効率の理論値

先にも述べた様に、本論文で取り扱う無線給電システムは、BPF 回路の設計理論を適用可能であるので、BPF 回路と同様にしてシステム整合を取ることもできる⁽⁴⁻⁶⁾。

すなわち、所望の共振器間距離 d に対して Fig.4(b) で示した k_e と Fig.6 で示した結合係数 k が一致する様にル

Table 1 Matching conditions for fabricated conventional wireless power transfer system based on BPF Theory.

a [cm]	d [cm]	Theoretical Value of Power Transfer Rate: η [%]
1.0	14.0	94.94
2.0	17.5	93.95
3.0	21.5	92.18
4.0	25.5	89.81
5.0	30.0	86.02
6.0	34.0	82.10
7.0	40.0	76.62

ープコイルとスパイラル間の距離 a を選択すると、ループコイルとスパイラル共振器およびシステム内のスパイラル共振器同士の結合度合いが一致し、BPF 回路での整合が取れた状態と等価になり最も効率的な電力伝送が可能となる。この整合のとれたシステムでの伝送損失 P_L は、この時の比帯域 w を用いて次式で表される。

$$P_L = 4.343 \frac{1}{w} \sum_{i=1}^2 \frac{g_i}{Q_{ui}} \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

ただし、 g_i は原型 BPF の g 値であり、本システムの等価回路は 2 段ワグナー・バターワース型フィルタとなるため $g_1 = g_2 = \sqrt{2}$ とする^(6,7)。また、比帯域 w と結合係数 k の間には、

$$w = \sqrt{2}k \quad (8)$$

の様な関係があるので、本システム内で使用している 2 つのスパイラル共振器の Q_u の値が等しければ(7)式は次の様に簡略化することができる。

$$P_L = \frac{8.686}{kQ_u} \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

上式で求まる伝送損失 P_L から、伝送路内に損失性媒質などの障害物が存在しない無線給電システムにおける、システム整合時の電力伝送効率： η (power transfer rate) の理論値は次式で得られる。

$$\eta = 10^{-\frac{P_L}{10}} \times 100 \quad [\%] \quad (10)$$

上式は損失の少ない無線給電システムでは非常に有効であるが、損失の大きな伝送系では、おおよその電力伝送効率しか求めることが出来ない⁽¹⁰⁾。ただ、上述のシステム整合条件を満たす a および d の組み合わせを決定する手段としては非常に有効と考えられる。そこで、まず伝送路内にアクリル水槽や水などの障害物が存在しない共鳴型無線給電システム (従来システムと呼ぶ) において整合の取れる a および d の組み合わせと(10)式から求まる電力伝送効率の理論値を Table 1 にまとめておく。

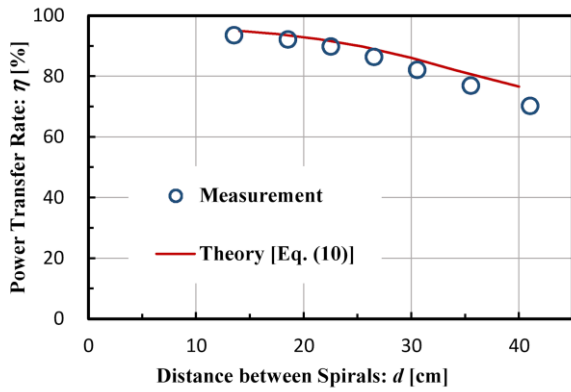


Fig.7 Power transfer rate of fabricated conventional wireless power transfer system as a function of the distance between spiral resonators.

3. 電力伝送特性と水や誘電体の影響

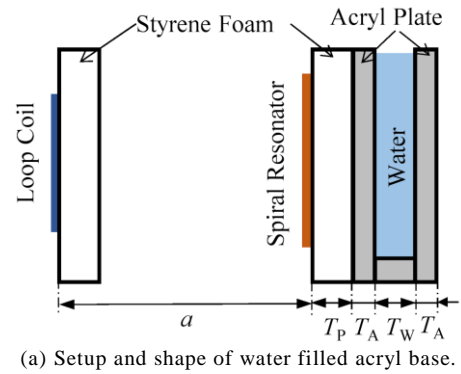
従来のシステムにおいて、前章の Table 1 に示した $k_e=k$ となり整合の取れるループ・スパイラル間距離 a とスパイラル共振器間距離 d に設定し、電力伝送効率の測定を行った。測定は、入出力用ループコイルに接続した VNA を用いて読み取った dB 表記での $|S_{11}|$ および $|S_{21}|$ から次式でスパイラル共振器間の電力伝送効率を測定した。

$$\eta = \frac{10 \frac{|S_{21}|}{10}}{1 - 10 \frac{|S_{11}|}{10}} \times 100 \quad [\%] \quad (11)$$

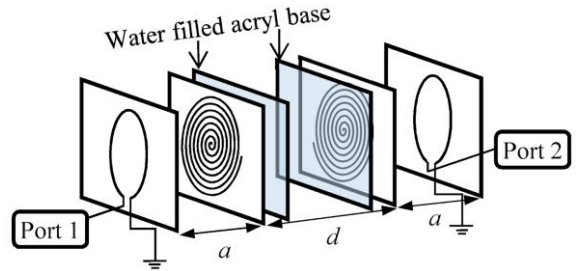
上式は、反射波の影響を除去することで、本システムの電力伝送領域であるスパイラル共振器間での電力伝送効率を表している。Fig.7 に、システム整合後に $|S_{11}|$ が十分小さくなり $|S_{21}|$ が最大となる様に d の値を微調整した後の結果を○で示している。また、同図中には、Table 1 に併記した電力伝送効率の理論値も実線で示している。

ここで、本論文は実用的な共鳴型無線給電システム構築のための実験的な検討を主目的としているため、以下の測定実験ではすべて、送信用ループコイルへの給電は VNA からの入力を利用し、スパイラル共振器の共振周波数近傍で周波数掃引した電力供給下で測定実験を行っている。また、Fig.7 の測定でスパイラル共振器間の結合周波数を VNA で観測すると、ループコイルとスパイラル共振器の結合の影響などにより 19.9 から 20.8MHz の範囲で変化した。

同結果より、本共鳴型無線給電システムでは、電力伝送距離 d が短ければ 93.5% 以上、 $d=30\text{cm}$ 程度まで離れた場合でも 82% 以上の電力伝送効率を得られることがわかる。また、測定結果と理論値を比較すると、本測定で得られた電力伝送率は BPF 設計理論に基づく理論値と良く一致しており、今回の特性測定の妥当性を確認することができた。



(a) Setup and shape of water filled acryl base.



(b) Schematic figure of overall system setup

Fig.8 Resonant type wireless power transfer system with water filled acryl bases.

次に、本システムのスパイラル共振器付近に Fig.8 に示す様に、水を充填したアクリル水槽(water filled acryl base)あるいは中空のアクリル水槽(hollowed acryl base)を設置した場合の電力伝送効率の検討を行う⁽¹¹⁾。

ここで、本システムを産業機器へ適用する場合、給電システムは送電側と受電側ユニットで、それぞれ個別にケーシングされ使用機器へと装着されると考えられる。そこで、アクリル水槽は、送電および受電ユニットのケーシングなどに用いられる誘電体を想定している。アクリルは誘電体であり、特に電気的エネルギーに作用する誘電損失を有する。さらに、水は導電性を有する高誘電率体であり、誘電損失に加えてやはり電気的エネルギーに対して作用する導電損失も持ち合わせている場合が多い。ここで、一概に水と言っても、その中に含まれる電解質やイオン濃度等の違いで超純水から雑水まで様々な状態が考えられる。今回行う検討は、本システムを屋外で使用するための基礎的な検討であるため、降雨等の影響を考察する目的で一般の水道水を用いている。

本測定に用いたアクリル水槽の形状は、Fig.8(a)に示す様に、広さ $50.0 \times 50.0\text{cm}^2$ で厚さ $T_A=0.5\text{cm}$ のアクリル板 2 枚を 0.5cm 角のアクリル角材を棧として挟み、間隔 $T_W=0.5\text{cm}$ で対峙させている。また、同図に示す様に、初期配置は作製した水槽をスパイラル共振器から距離 $T_P=1.0\text{cm}$ 離して配置している。この様なアクリル水槽を Fig.8(b)に示す様に、それぞれ送電端と受電端に配置することで、水を充填したアクリル水槽が伝送路内に存在する無線給電システムモデルを構築した。

まず、システム内に水を充填していない中空の亚克力水槽を配置した場合、および、水を充填した亚克力水槽を配置した場合の Q_u 、 k_e および k を Fig.8 の測定系を用いて測定した結果を Fig.9 に示す。ただし、 Q_u および k_e の測定には Fig.8(a) の測定系を、 k の測定には同図(b) の測定系でループ・スパイラル間距離を $a=15.0\text{cm}$ として行った。詳細な測定の手順は第2章において従来システムについて説明した手法と同じである。

同図中の ▲ は、中空亚克力水槽のみの場合、■ は水を充填した亚克力水槽を配置した場合の結果である。なお、同図中には、水や亚克力水槽を配置していない従来システム(conventional)の結果も比較のために ● で併記してある。

図(a)の結果より、 Q_u の特性変化は、中空の亚克力水槽を挿入した場合には、 a が大きくなるにつれて漸近する値が低下しているが、従来システムにおける Q_u とほぼ同様な特性を示している。ここで、前述した様に Q_u は、共振器固有損失の逆数で定義される量である。したがって、亚克力水槽の誘電損失がスパイラル共振器周辺に形成されている電界による電氣的エネルギーを減衰させ、共振器全体の損失が増加したものと考えられる。

次に、水を充填した亚克力水槽を挿入した場合には、 Q_u は 80 程度の非常に低い値でほぼ一定の値を示している。これは、亚克力水槽の誘電損失に加え水の誘電損失および導電損失の影響で電氣的エネルギーが著しく減衰し、共振器全体の損失が急激に増加したためであると推察される。

次に、同図(b)の k_e の結果では、亚克力水槽あるいは水を充填した亚克力水槽を挿入した場合の結果は全てほぼ同じ値を示している。ここで、 k_e はスパイラル共振器と励振用ループコイルの結合度合いを示す量である。したがって、本システムでは、亚克力水槽や水がスパイラル共振器間に存在したとしても、ループコイルとスパイラル共振器間の結合にはほとんど影響を与えないことを示していると考えられる。

さらに、同図(c)の結合係数 k の結果では、亚克力水槽を挿入した場合には、従来システムの結合係数とほぼ同じ結果を示しているが、水を充填した亚克力水槽では、 k は全体的に低下している。ここで、結合係数 k は、システム内のスパイラル共振器間の結合の強さを示す値であるため、本システムの伝送路内に水が存在することでスパイラル共振器が形成する電磁界分布に影響を与え、共振器間結合度の低下を引き起こしたものと考えられる。

次に、スパイラル共振器と亚克力水槽間の距離 T_p を 1.0cm で固定したままでスパイラル共振器間距離 d を変化させた場合の電力伝送特性の測定を行った。その結果を Fig.10 に示す。なお、比較のために従来システムの測定結果および理論値の結果も同図中に ● および実線で

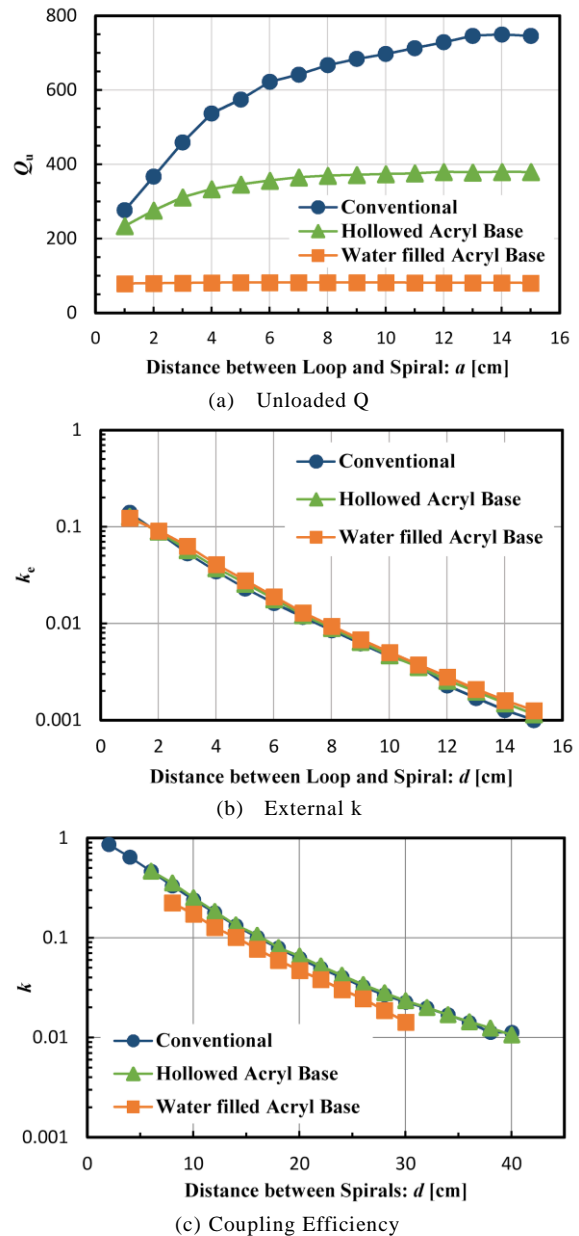


Fig.9 Unloaded Q, External k, and Coupling Efficiency of fabricated resonant type wireless power transfer system with hollowed or water filled acryl base.

示している。

まず、同図中の ▲ は、中空亚克力水槽のみを伝送路内に挿入した場合の結果である。この時、スパイラル共振器間の結合周波数を VNA で測定すると、空気よりも高誘電率の亚克力水槽が共振器付近に挿入されたことおよびループコイルとスパイラル共振器間の結合の影響により 19.2 から 19.7MHz の範囲で変化した。同結果より、中空亚克力水槽のみを挿入した場合、電力伝送効率は最大でも 92.6%程度、 $d=30\text{cm}$ で 73%程度まで低下しており、従来システムと比較してスパイラル共振器間距離が大きくなるにつれて電力伝送効率の低下量は大きくなっている。同図中には、Fig.9 の Q_u および k を用いて (10)式から計算した電力伝送効率の値も点線で示してい

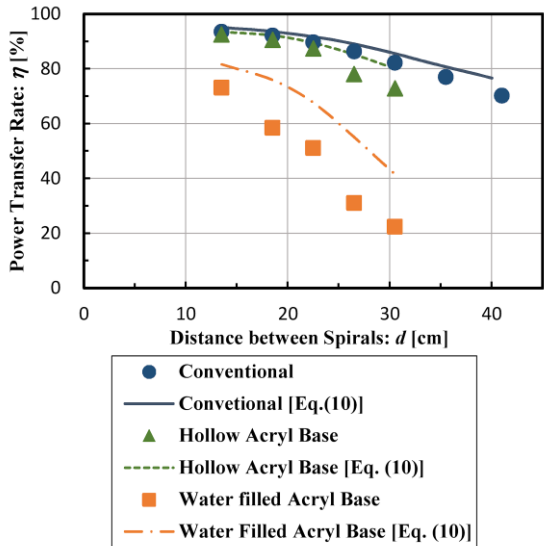


Fig.10 Power transfer rate of fabricated resonant type wireless power transfer system with hollowed or water filled acryl bases as a function of the distance between spiral resonators.

る。ここで、(10)式の説明部分でも述べた様に、この式の値はシステム内の損失が大きくなると精度が低下する。この事実を考慮した上で測定結果と(10)式の結果を比較すると、従来システムの場合に比べて両者の差が僅かに広がっているが、(10)式の結果は測定値とほぼ同様の特性を示している。

次に、同図中の■は水を充填したアクリル水槽を伝送路内に挿入した場合の結果である。同結果から明らかな様に、水を充填したアクリル水槽が伝送線路内に挿入された場合、電力伝送効率も最大でも73%程度、 $d=30\text{cm}$ で22.5%まで大幅に低下し、スパイラル共振器間距離 d が長くなるにつれてその低下の割合は急激になっている。この時、スパイラル共振器間の結合周波数をVNAにより観測すると、空気よりも高誘電率を持つ水を充填したアクリル水槽が共振器付近に挿入されたことおよびループコイルとスパイラル共振器間の結合などの影響により16.2から16.7MHzの範囲で変化した。

ここで、アクリル水槽は誘電損失を、水は誘電損失に加えて導電損失も有している。しかし、先にも述べた様に、本給電システムはシステム内の共振器の磁気結合的共振によって動作しており、磁界には上記の損失は影響を与えないと考えられる。ただし、励振された共振器の近傍には固有の電磁界が分布しているため、共振器周辺に分布する電界に誘電損失や導電損失が作用し、電力伝送効率を著しく低下させたものと考えられる。また、中空のアクリル水槽を伝送路に挿入した場合の電力伝送効率の低下と比較して、水を充填したアクリル水槽を伝送路に挿入した場合の電力伝送効率の低下は極めて大きくなった。したがって、今回の測定実験では、アクリル水

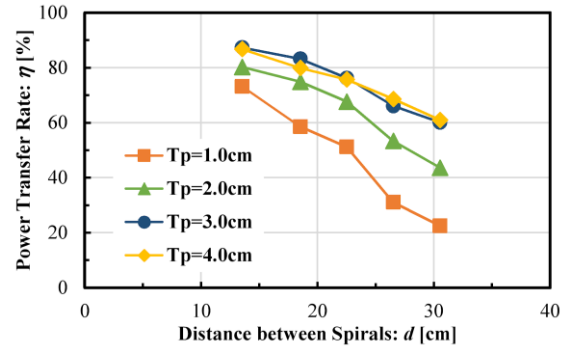


Fig.11 Power transfer rate of fabricated resonant type wireless power transfer system with water filled acryl bases, where the distance between spiral resonator and acryl base, T_p , as a parameter.

槽が持つ損失の影響よりも水が持つ損失の影響の方がシステム性能低下に与える影響は極めて大きかったと考えられる。さらに、同図中にはFig.9の Q_u および k を用いて(10)式から計算した電力伝送効率の値も一点鎖線で示している。両者の比較より、システム全体の損失が大きくなったために(10)式の精度が低下し、測定値と大きなずれが生じたものと考えられる。

ここで、同図には示していないが、 $T_p=0.0\text{cm}$ 、すなわちスパイラル共振器をアクリル水槽の伝送路側面に貼りつけた場合の電力伝送特性は、同図中の■の結果よりも大幅に低い結果となった。

そこで、スパイラル共振器とアクリル水槽の間の発泡スチロール厚さを変化させ、距離 T_p を変化させた場合の電力伝送特性を測定した。その結果をFig.11に示す。同図より、スパイラル共振器から水を充填したアクリル水槽を $T_p=3.0\text{cm}$ 程度まで遠ざけると電力伝送効率が最大で87%以上、 $d=30\text{cm}$ で60%以上まで大幅に改善した。この結果は、本共鳴型無線給電システムが磁界結合型の共鳴を利用しているため、誘電損失や導電損失の影響を受けない磁界が電力伝送に主に寄与し、電界はシステム内のスパイラル共振器近傍にその大部分が集中していることを示していると考えられる。

以上の結果より、本システムを誘電体や水の存在する環境下で使用する際には、スパイラル共振器と誘電体や水の間にある程度の距離を取ることで、電力伝送効率を改善できる可能性がある。すなわち、本システムの送受電ユニットのケーシングを行う際に、スパイラル共振器とケーシング材料との間に適切な空隙部を設けることが有効であると考えられる。

4. おわりに

本論文では、実際に共鳴型無線給電システムを構築し、システムの電力伝送路内にアクリル水槽（誘電体）や水が充填されたアクリル水槽が存在する場合の Q 値、共振

器間結合係数の測定を行うと共に伝送効率の測定を行った。その結果、システム伝送路内に誘電体や水が存在することで伝送効率は大幅に低下し、システムの整合を取ったとしても、その改善はほとんど見られないことを確認した。

今回取り扱った無線給電システムは、磁界結合による共鳴で電力伝送を行うが、共振器近傍には共振器固有の電磁界が分布し、その近くに誘電体や水が存在する場合には電氣的エネルギーの損失は避けられないものと考えられる。そこで、誘電体や水を共振器から遠ざけた場合について電力伝送特性の測定実験を行った。その結果、誘電体や水を共振器からある程度離せば、電力伝送効率の低下を抑制できることを示した。すなわち、屋外使用を想定すべき機器に本無線給電システムを装着する場合には、共振器の伝送路側に空間を設けてケーシングを行えば、ケーシング材料や降雨による水の影響を改善できると考えられる。

なお、本無線給電システムの使用用途は、電気自動車等への充・給電にとどまらず、水分を多く含んだ人体内部で移動するカプセル内視鏡から淡水・海水中で動作する移動体への給電など様々であり、特に、人体模型としての生理食塩水や海中移動体への給電を考慮し、塩水を介した給電の際の検討^(8,11)を行うために、純水へ計量した NaCl を溶かして塩分濃度を調整した塩水が伝送路内に存在する場合の電力伝送効率についても、現在、検討を進めている。

今後は、電氣的エネルギーをより共振器内部へ集中させ、より強い磁界結合を実現することで、さらに電力伝送効率が長い伝送距離でも実現できる共振器形状やシステム構成を検討する予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、様々なご指導やご意見を頂いた(株)リューテックの栗井郁雄氏に心から感謝の意を表する。

文 献

- (1) A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, vol.317, pp.83~86, 2007-06.
- (2) 栗井郁雄 他:「ワイヤレス・エネルギー伝送技術の最前線」, 吉田隆(編), 株式会社エヌ・ティー・エス, 東京, 2011.
- (3) 松木英敏, 高橋俊輔:「ワイヤレス給電技術がわかる本」, オーム社, 東京, 2011.
- (4) 栗井郁雄, 小森琢也:「共振器結合型ワイヤレス給電システムの簡便な設計」, 電気学会論文誌 C, vol.130, no.12, pp.2198~2203, 2010-12.
- (5) 栗井郁雄, 小森琢也, 石田哲也, 石崎俊雄:「共鳴型ワイヤレス電力伝送に用いる共振器の比較検討」, 電子情報通信学会技術報告, 無線電力伝送研究会, no.WPT2010-01, pp.1~7, 2010-04.

- (6) 栗井郁雄:「磁気結合共振器型ワイヤレス給電システムの BPF 理論による設計」, 電気学会論文誌 C, vol. 130, no.12, pp.2192~2197, 2010-12.
- (7) 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 栗井郁雄:「共鳴型無線給電システムの伝送効率改善に関する検討」, 第 13 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS) 論文集, no.B-3,pp.220~223, 2011-11.
- (8) Y. Iwasaki, T. Shioiri, K. Harauchi, K. Fukui, K. Hayashino, Jin-Ping Ao and Y. Ohno: "Effects of Wetting to Wireless Power Transmission by Open-Ring Resonators Coupling," *Proc. IMWS-IWPT 2012*, no.FRI-E-2, pp.97~100, 2012-05.
- (9) 小川健一郎, 庄木裕樹, 大館紀章, 司城徹, 山田亜希子, 工藤浩喜:「磁界共鳴型近距離無線電力伝送試験装置の開発(3) MHz 帯システムにおける人体近接時の特性への影響検討」, 電子情報通信学会ソサエティ大会予稿集, no.B-1-37, p.37, 2012-09.
- (10) 栗井郁雄, 澤原裕一, 山口和也, 堀田昌志, 石崎俊雄:「水中のワイヤレス給電に関わるいくつかの新しい現象」, 電子情報通信学会論文誌 B 分冊, vol.J96-B, no.11, pp.1284~1293, 2013-11.
- (11) 春山隆行, 結城亨, 堀田昌志, 羽野光夫, 栗井郁雄:「共鳴型無線給電システムへの水の影響に関する検討」, 第 14 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム(HISS)論文集, no.B-17, pp.326~329, 2012-11.
- (12) I. Awai, Y. Zhang, T. Komori, and T. Ishizaki, "Coupling coefficient of spiral resonators used for wireless power transfer", *Proc. 2010 Asia Pacific Microwave Conf.*, pp.1328~1331, Yokohama, Japan, 2010-12.
- (13) 小林禎夫:「マイクロ波共振器の測定技術」, *Microwave Workshop & Exhibition(MWE)2000 ダイジェスト*, 横浜, pp.431~442, 2000-11.



堀田 昌志

昭和 63 年 3 月愛媛大学工学部電子工学科卒業。平成 2 年 3 月同大学院工学研究科修士課程電子工学専攻修了。同年 4 月同大学工学部電子工学科助手。平成 11 年 4 月山口大学工学部電気電子工学科講師, 平成 14 同大学院理工学研究科助教授を経て, 現在, 准教授。平成 9~10 年 University of California, Los Angeles (UCLA) 客員研究員。平成 23~24 年 IEEE 広島支部支部長。博士(工学)。導波型光デバイス設計, マイクロ波伝送線路, メタマテリアル, 無線給電システムに関する研究に従事。電子情報通信学会シニア会員。IEEE Senior 会員。OSA, SPIE, AAAS, The Planetary Society 各会員。



延 彰憲

平成 25 年 3 月山口大学工学部電気電子工学科卒業。平成 25 年 4 月同大学院博士前期課程電子情報システム工学専攻入学。現在に至る。無線給電システムの電力伝送特性に対する障害物の影響に関する研究に従事。



春山 隆行

平成 24 年 3 月山口大学工学部電気電子工学科卒業。平成 26 年 3 月同大学院博士前期課程電子情報システム工学専攻修了。同年 4 月ロームアポロ株式会社入社, 現在に至る。在学中は, 効率的な無線給電システムの構築に関する研究に従事。



結城 亨

平成 23 年 3 月山口大学工学部電気電子工学科卒業。平成 25 年 3 月同大学院博士前期課程電子情報システム工学専攻修了。同年 4 月本田技研工業株式会社入社。平成 26 年株式会社ホンダ技術研究所・汎用 R&D センター配属、現在に至る。
在学中は、効率的な無線給電システムの構築に関する研究に従事。



羽野 光夫

昭和 49 年 3 月山口大学工学部電気工学科卒業。昭和 51 年 3 月同大学院修士課程修了。同年同大工学部物理学科助手。昭和 54 年同大工学部電気工学科助手。昭和 60 年同講師，平成元年同助教授を経て，平成 14 年同大学院教授，現在に至る。工博。
電磁界の数値解析とその応用に関する研究に従事。
電気学会，電子情報通信学会，日本 AEM 学会，IEEE 各会員。