

# 共鳴型無線給電システムへの水の影響に関する検討

## Effect of Water for Resonant Type Wireless Power Transfer System

春山 隆行  
Takayuki Haruyama

結城 亨  
Tohru Yuki

堀田 昌志  
Masashi Hotta

羽野 光夫  
Mitsuo Hano

栗井 郁雄†  
Ikuro Awai

山口大学理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering,  
Yamaguchi University

† (株) リューテック  
† Ryutech

### 1. まえがき

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充電方式の一つとして非接触型の無線給電システム[1], [2]を用いる手法が検討されている。中でも、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た共鳴型無線給電システムの実用化に関する検討[2]-[4]が現在活発に行われている。この様な給電システムを車両充電あるいは走行中給電に用いるためには、その屋外使用や屋外設置を念頭に置いて、天候や環境を考慮したシステム構築が不可欠である。なぜならば、降雨時には雨水が地表面や車両底面に水膜を形成する恐れがある。水は導電性を有する物質であるため、水膜がシステム性能低下に及ぼす影響を明らかにしておく事は重要である。

これまでの無線給電システムにおいては大気中の湿気の影響[5]や水分を含む人体ファントムの与える影響[6]に関する検討は行われているようであるが、システム内に水膜が形成された場合の影響やその改善策についての検討はなされていない様である。そこで本研究では共鳴型無線給電システム内の共振器付近に水膜が形成された場合の影響について実験的に検討を行う。

### 2. 無線給電システムの設計

まず、1.0mm 径の銅線を用い、直径 17.5cm の送信用ループコイルと、線間距離 1.0cm で直径 27.0cm、共振周波数 20MHz のスパイラル共振器をそれぞれ 1 組ずつ作製し、50.0cm 四方で厚さ  $T_S=1.0\text{cm}$  の発泡スチロールに貼りつけ、図 1 に示す様に配置して共鳴型無線給電システムを構築した。ここで、本給電システム全体を帯域通過フィルタに見立て、フィルタ設計理論に基づいて設計することで効率的なシステムを構築できることが示されている[2]-[4]。この設計手法に基づきシステム設計を行うには、使用する共振器の無負荷  $Q(Q_u)$ 、外部  $Q(Q_e)$  及び共振器間の結合係数  $k$  を測定する必要がある。これらは、システムの入出力端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 ( $S_{11}$  および  $S_{21}$ ) から次の様に求めることができる。

### 2.1 $Q$ 値の測定

$Q_u$  および  $Q_e$  の測定は、図 1 のシステムを中央で分割した図 2 のシステムを用いて  $S_{11}$  を測定することにより行う。

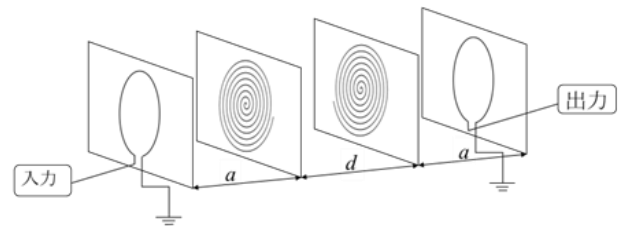


図 1 測定系

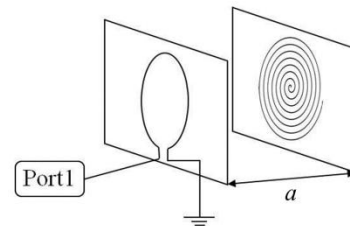


図 2  $Q$  値の測定系

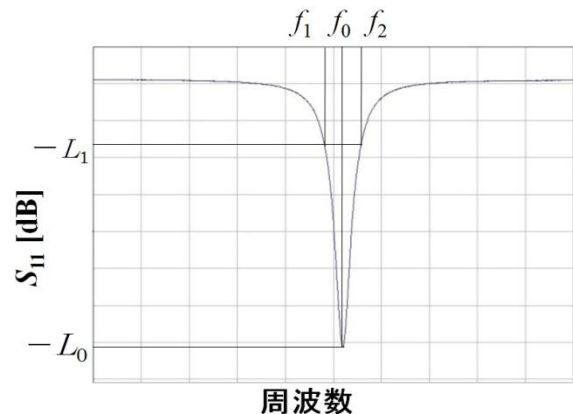


図 3  $S_{11}$  の周波数特性

測定系における反幅反射係数  $S_{11}$  が図 3 の様に測定されたとすると、 $S_{11}$  の最小値を  $-L_0$ 、その時の周波数を共振周波数  $f_0$  とし、次式から  $L_1$

を求める。

$$L_1 = -10 \log \left( \frac{10^{\frac{L_0}{10}} + 1}{2} \right) \quad (2.1)$$

続いて、同図中に示された周波数特性において  $S_{11}$  が  $-L_1$  となる 2 点の周波数  $f_1$  及び  $f_2$  (但し  $f_1 < f_2$ ) を読み取ることで次式からこの系の負荷  $Q (Q_L)$  を求めることができる。

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (2.2)$$

次に、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。その軌跡がチャートの原点を取り囲んでいけば(2.3)式を、囲んでいなければ(2.4)式を用いて  $\beta_e$  を求める。

$$\beta_e = \frac{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}} \quad (\beta_e \geq 1) \quad (2.3)$$

$$\beta_e = \frac{1 - 10^{-\frac{L_0}{20}}}{1 + 10^{-\frac{L_0}{20}}} \quad (0 < \beta_e < 1) \quad (2.4)$$

以上より求めた  $Q_L$  および  $\beta_e$  と次式から、 $Q_u$  および  $Q_e$  を次式より求めることができる。

$$Q_u = Q_L (1 + \beta_e) \quad (2.5)$$

$$Q_e = \left( 1 + \frac{1}{\beta_e} \right) \quad (2.6)$$

## 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図 1 の測定系においてループ・スパイラル間距離  $a=15.0\text{cm}$  で一定とし、共振器間距離  $d$  を変化させ振幅透過係数  $S_{21}$  を観測した。その結果、図 4 に示す様に 2 つに分離した共振周波数  $f_{c1}$  及び  $f_{c2}$  (但し  $f_{c1} < f_{c2}$ ) が観測された。この共振周波数より結合係数  $k$  を次式より求めた。

$$k = \frac{f_{c2}^2 - f_{c1}^2}{f_{c2}^2 + f_{c1}^2} \quad (2.7)$$

## 2.3 伝送効率

本システムはその等価回路を考慮すれば、2 段帯域通過フィルタ(BPF)に相当すると考えることができる。外部  $Q$  の逆数は外部  $k(k_e)$  となる[3], [4]。この  $k_e$  と共振器間の結合係数  $k$  との値が一致するときのループ・スパイラル間距離  $a$  と共振器間距離  $d$  を選択することでシステムの整合を取ることができる。

$$k_e = \frac{1}{Q_e} \quad (2.8)$$

図 5 中の◆の特性が、通常システムにおけるループ・スパイラル間距離  $a$  の変化に対する  $Q_u$  の測定結果である。

次に、図 1 のシステム全体における  $S_{21}$  の測定結果から共振器間結合係数  $k$  を求め、外部結合係数  $k_e$  と一致する様に共振器間距離  $d$  を調整することによってシステムは整合の取れた状態となる。共振器間結合係数  $k$  は線間距離 1.0cm の共振器においてループ・スパイラル間距離  $a=1.0\text{cm}$  として設計すると共振器間距離  $d=15.0\text{cm}$  で整合となる[3], [4]。整合のとれたシステムでの伝送損失  $L$  は、整合時の比帯域  $w$  を用いて次式で表される。

$$L = 4.343 \frac{1}{w} \sum_{i=1}^2 \frac{g_i}{Q_{u_i}} \quad (2.9)$$

ただし、 $g_i$  は原型帯域フィルタの  $g$  値であり、本システムはワグナー・バターワース型であるため  $g_1=g_2=\sqrt{2}$  である[3],[4]。また、比帯域  $w$  と結合係数  $k$  には次のような関係がある。

$$w = \sqrt{2}k_e \quad (2.10)$$

ここで、2 つの共振器の  $Q_u$  の値が等しければ(2.9)式は次のように書くことができる。

$$L = \frac{8.686}{k_e Q_u} \quad (2.11)$$

また、伝送損失  $L$  からシステム全体での電力伝送効率  $\eta$  は次式で求めることができる。

$$\eta = 10^{-\frac{L}{10}} \times 100[\%] \quad (2.12)$$

図 6 の◆は、各共振器間距離  $d$  に対して整合が取れるループ・スパイラル間距離  $a$  に設定した場合の伝送効率  $\eta$  を式(2.12)から求めた結果である。ここで、本システムにおける  $S_{21}$  の実測値は、同図の結果とよく一致することを確認している。

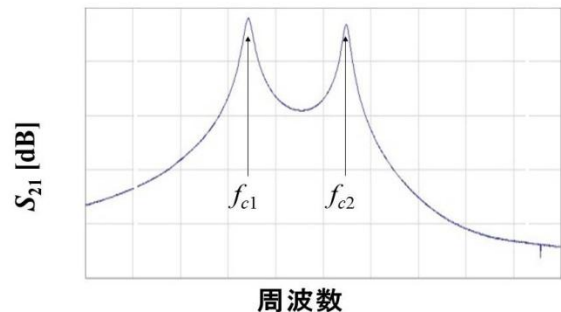


図 4 共振周波数の分離

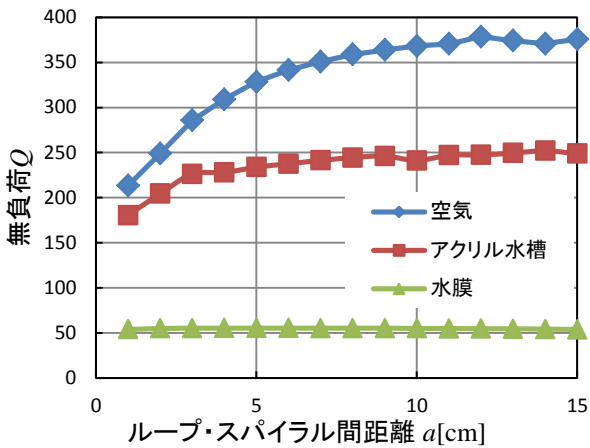


図5 各条件下における無負荷  $Q$  の比較

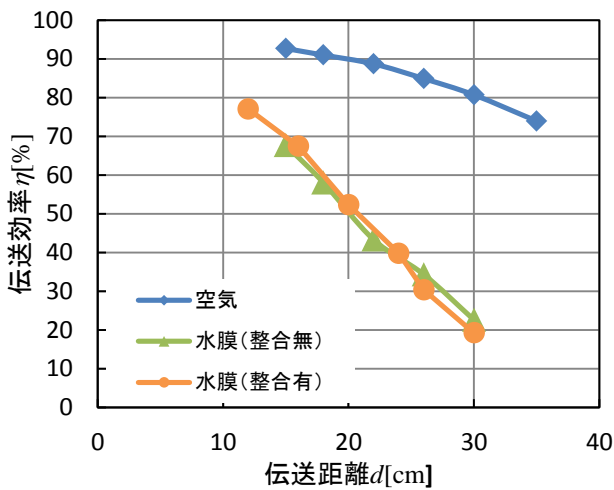


図6 伝送効率

#### 2.4 共振器近傍に水膜が存在する場合の伝送

次に、本システムの共振器付近に水膜が存在する場合を想定した場合の測定を行う。無線給電システムを地面と車両等に搭載する場合にはシステムが剥き出しにならない様にパッケージングを行う必要がある。そこで、パッケージング材料等の存在も考慮して、図7に示す様に50.0cm四方で厚さ  $T_A=0.5\text{cm}$  のアクリル板2枚を間隔  $T_W=0.5\text{cm}$  で対峙させた水槽をスパイラルコイルと厚さ  $T_S=1.0\text{cm}$  の発砲スチロール板を介して配置した構造での  $Q_u$  をまず測定した。

図5中の■は、水を充填していないアクリル水槽のみを配置した場合、同図中の▲は水槽に水を充填した場合について、それぞれ  $Q_u$  を測定した結果である。同図より、システム内にアクリル板や水が存在することで、 $Q_u$  は大幅に低下している。しかし、同時に測定した  $Q_e$  の値には水膜の影響はほとんど認められなかった。

次に、整合をとった図1のシステム内に水を充

填した上記の水槽を図8のように挿入した測定系での結果を図6の▲で示す。同図から明らかなように送電自体は可能であるが、伝送効率は大幅に低下している。また、伝送距離に対する伝送効率の低下もより急峻になっている。さらに、同図中の●はシステム内に水膜を挿入した状態で、通常システム時と同様の方法により整合を取った場合の結果であるが、整合を取る事による効率の改善はほとんど見られなかった。

これらの現象は、アクリル板や水の誘電率は空気に比べて高い為に共振器付近における電束密度が影響を受け、その結果として共振器付近における電磁界に影響が及んだこと、および、水は導電性を有する媒質である為にエネルギー損失が顕著に表れたことによるものと考えられる。

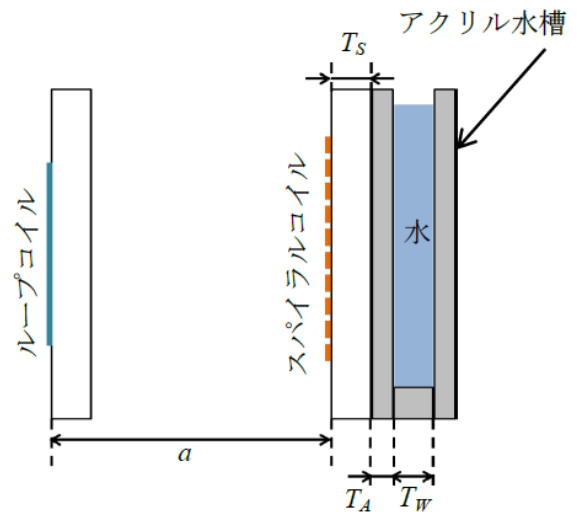


図7 アクリル水槽を挿入した  $Q$  値測定系

#### 3. あとがき

本稿では、実際に共鳴型無線給電システムを構築し、システム内にアクリル水槽や水が存在する場合の  $Q$  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。システム内に水膜が存在することで伝送効率は大きく低下し、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。伝送効率の低下は主にアクリル板や水の電気的特性および導電性による損失であると考えられる為、今後は、媒質の電气的影響を受け無い磁气的エネルギーを電力伝送に積極的に利用する手法について検討する予定である。

#### 謝辞

JST スーパーサイエンスハイスクール (SSH) 事業の一環として本研究の補助を行って下さった山口県立宇部高等学校の学生および担当教員諸氏に感謝の意を表す。

参考文献

[1] A.Kurs, A.Karalis, R.Moffatt, J.D.Joanopoulos, P.Fisher, and M.Soljagic: "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science, vol.317, pp.83-86, 2007-06.  
[2] 小森琢也, 栗井郁雄, "共鳴型ワイヤレス給電システムの簡易設計," 信学総全大, no.BS-9-8, pp.S-30-S-31, 2010-03.  
[3] 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," 信学技報, no.WPT2010-01, pp.1-7, 2010-04.  
[4] 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 HISS 論文集, no.B-3, pp.220-223, 2011-11.  
[5] 小川健一郎, 庄木裕樹, 大舘紀章, 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," 信学ソ大, no.B-1-37, P.37, 2012-09.  
[6] 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.

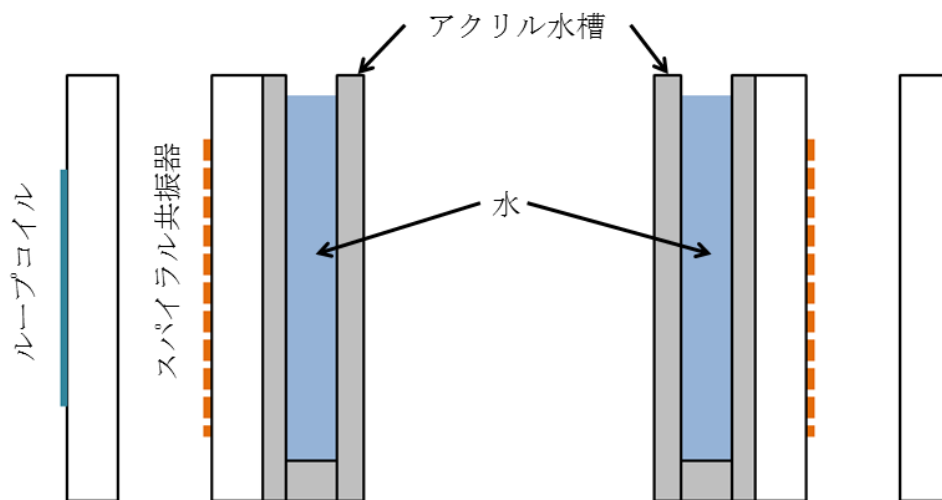


図8 水槽挿入時の測定系