

# オシロスコープによるワイヤレス電力伝送のシステム設計

石田 哲也<sup>†</sup> 杉山 一聖<sup>†</sup> 石崎 俊雄<sup>†</sup> 栗井 郁雄<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 龍谷大学理工学部 〒520-2134 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

<sup>‡</sup> (株)リユーテック 〒520-2134 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

E-mail: <sup>†</sup> ty1954@hotmail.com, <sup>‡</sup> awai@ryutech.com

**あらまし** オシロスコープを使った WPT システムの新設計方法を提案している。従来の VNA を使用した 2 段の BPF 理論による WPT の設計では測定環境が  $50\Omega$  に囚われてしまう為、任意のインピーダンスの電源や負荷を持つ WPT に対して直接設計を行うことができない。一方この新しい手法は、様々なインピーダンスの負荷が接続された状態の共振器の内部電圧をオシロスコープで測定し、その電圧から共振周波数、外部 Q、結合係数を求め、2 段の BPF 理論に則って設計を行う手法である。負荷の違いによる影響を含んだ状態で設計に必要なパラメータを直接測定するので、WPT の設計に適した設計方法である。

**キーワード** 非接触電力伝送, オシロスコープ, バンドパスフィルター, 共振周波数, 外部 Q, 結合係数

## WPT Design Using Oscilloscope

Tetsuya Ishida<sup>†</sup> Issei Sugiyama<sup>†</sup> Toshio Ishizaki<sup>†</sup> and Ikuo Awai<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Ryukoku university 1-5 Yokotani, Seta-oecho, Otsu, 520-2194 Japan

<sup>‡</sup> Ryutech Corp. 1-5 Yokotani, Seta-oecho, Otsu, 520-2194 Japan

E-mail: <sup>†</sup> ty1954@hotmail.com, <sup>‡</sup> awai@ryutech.com

**Abstract** We propose a new WPT design method. A conventional method using VNA has to define an input/output port as  $50\text{ ohm}$ . But the input/output resistances of WPT are not always  $50\text{ohm}$ . On the other hand, a new method using oscilloscope can measure the resonator parameters, which are resonant frequency, Q value and coupling coefficient. They are calculated from voltage variation on the resonator connected to various load resistances. Then WPT system is designed with these parameters by 2-stage band pass filter theory. Therefore, the proposed method is suitable for WPT design.

**Keyword** Wireless power transfer, oscilloscope, band pass filter, resonant frequency, external Q, coupling coefficient

### 1. はじめに

ワイヤレス電力伝送(WPT)は昨今、非常に興味を集めている技術の一つであり、携帯端末や電気自動車等への非接触での電力供給や宇宙太陽光発電 (SPS) への応用が期待されている。代表的な WPT 方式は電磁誘導方式や電磁界結合方式、アンテナ方式であるが、その中でも電磁界結合方式は 2007 年に MIT によって 2m 離れた電球を点灯した報告がなされて以来、非常に注目を受けている。この伝送方法は 2 つループコイルと 2 つのスパイラル共振器から構成されており、ループコイルとスパイラル間、2 つのスパイラル間の結合を介して、電源から負荷へと電力が伝送させる仕組みである。ループコイルとスパイラル間の結合は外部 Q、スパイラル間の結合は結合係数として定義することができる為、この方式の設計は 2 段の BPF の設計理論を用いて行うことが可能である [1] [2]。電磁界結合方式は他の伝送方式と比べ、

数 m オーダーの電力伝送を高効率で行えることから、様々な報告がなされている。しかし、これらの報告は慣習的に VNA を使ったものが多く、測定環境が  $50\Omega$  と固定されている。WPT の実使用環境を考えた場合、電源・負荷ともに  $50\Omega$  と成り得る機会にはほぼない。よって、 $50\Omega$  環境に囚われない設計方法が必要である。我々は、VNA ではなくオシロスコープを使った時間領域での共振器パラメータの測定方法 [3][4] を応用することで、この問題の解決を図った。

### 2. 共振周波数測定

WPT システムの設計を行う上で、システムの動作周波数を電源の出力周波数に一致させる必要がある。システムの動作周波数は、それに用いられる共振器の共振周波数によって決まる。従って共振周波数を調べ、周波数を調整する必要がある。図 1 に共振周波数の測定概要図を示す。信号発生

器・パルス発生器・RF スイッチを使って入力波形を作成し、ループコイル 1 を介してスパイラル共振器を励起する。オシロスコープでスパイラル共振器内部の電圧を観測し、その時間変化から共振周波数を求める。RF スイッチはオフ状態のとき高インピーダンスを示すため、スパイラルからループコイル 1 を見た反射係数は  $\Gamma \approx 1$  となる。よって、ループコイル 1 によるスパイラルへの影響は無視することができる。ループコイル 2 には様々なインピーダンスの負荷を接続する。スパイラルはループコイルを介して外部回路と接続されるが、スパイラルから見た外部回路は多くの場合  $\Gamma \approx 1$  とは成り得ず、外部回路の影響により共振周波数が変動する。この共振周波数の変動を観測するために、ループコイル 2 を用いる。純粋なスパイラルの共振周波数を測定したいときは、ループコイル 2 がない状態で観測すればよい。

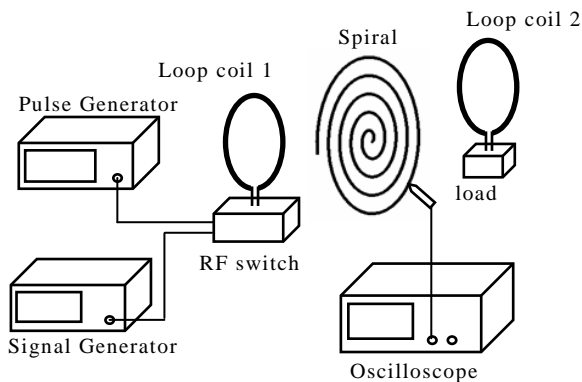


Fig.1 Measurement structure of resonant frequency

励振に用いた入力波形が幅広い周波数スペクトルを持つと、複数の共振モードが同時に励起されてしまい共振周波数の測定に悪影響を与える。したがって、入力波形の周波数スペクトル内には単一の共振周波数しか含まれないように CW 波やパルス変調幅を調整する必要がある。これは、次節以降に記す Q 値、結合係数の測定でも同様である。図 2 に図 3 に示すスパイラルを励起するのに使用した入力波形とその周波数スペクトルを示す。このスパイラルの 1 次共振周波数は 4MHz であるため、その周辺の周波数成分しか含まないように調整した励振波形となっている。入力波形はガウス変調波の形となるのが望ましいが、変調に用いたスイッチの立ち上がり立ち下がり特性が非対称である為、作成された入力波形は図 2(a) に示す形となった。

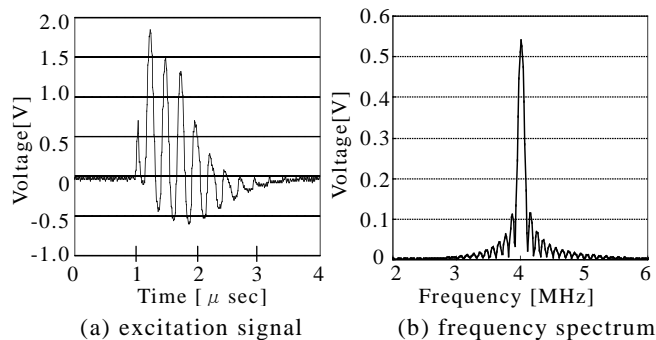


Fig.2 Time dependence of excitation

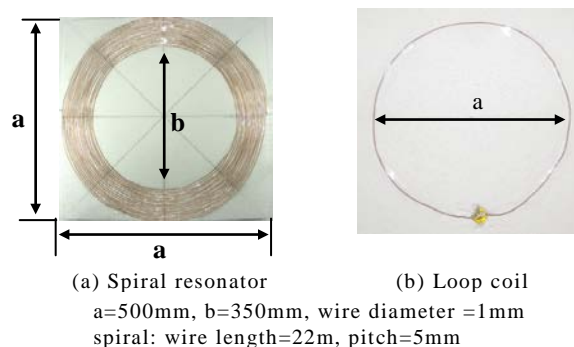


Fig.3 Spiral resonator and loop coil using WPT design

図 1 の構造において、スパイラル内部の電圧をオシロスコープで観測すると図 4 に示すような波形を得ることができる。

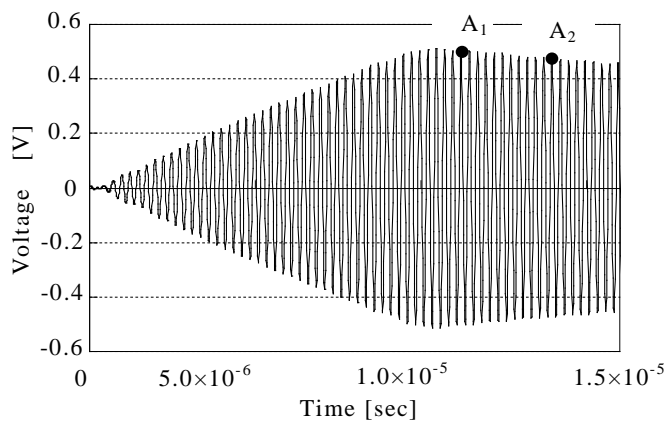


Fig.4 Observation voltage inside resonator

観測初期の時間帯では励振波の影響を強く受け、徐々に電圧が上昇し、その後、安定した周期で変動しながら徐々に減衰していく。この周期的な電圧の変動はスパイラルの共振周期を示しており、この周期の逆数から共振周波数を得ることができる。図 3 のループコイルとスパイラルを図 1 の構造に配置したときの共振周波数の測定結果を表 1 に示す。

Table1. Measured resonant frequency

Oscilloscope	Vector network analyzer
4.017MHz	4.011MHz

ループコイル 1 とスパイラル間は 50cm とし、スパイラルとループコイル 2 の間隔は 40cm とする。また、ループコイル 2 に接続した負荷は 50Ω である。測定の妥当性を検証するため、VNA で測定した結果を同時に記す。VNA の結果はループコイル 1 を VNA に測定し、スパイラルを励起したときの S パラメータから得た値である。ループコイル 1 とスパイラル間は 40cm としている。オシロスコープと VNA の測定結果はほぼ一致しており、正確な共振周波数が測定できている。

スパイラルが共振状態にあるとき、ループコイルの周囲にもそれ自身により生じる電磁界が存在する。スパイラルの電磁界はこのループコイルの電磁界の影響を受けて変化し、共振周波数もそれに伴い変化する。WPT のシステム設計を行うにあたっては、この周波数変動を加味した上でスパイラルの共振周波数を調整する必要がある。ループコイル 2 とスパイラルの間隔を変化させたときの共振周波数の変化を図 5 に示す。

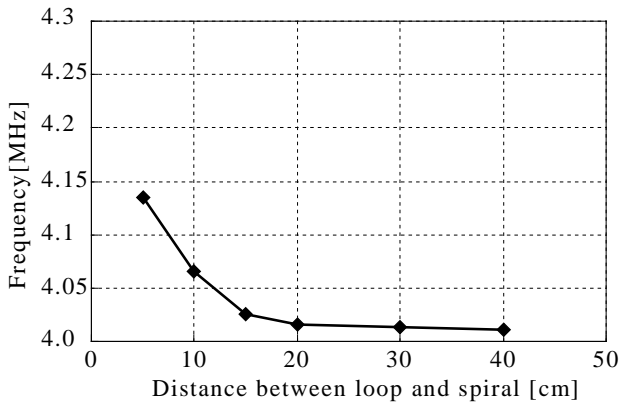


Fig.5 Resonant frequency variation with distance between loop and spiral

ループコイルとスパイラル間が狭いときほど影響が強くなり、共振周波数の変化が大きいことがわかる。また、ループコイル 2 に接続する負荷を変化させたときの共振周波数の変化を図 6 に示す。

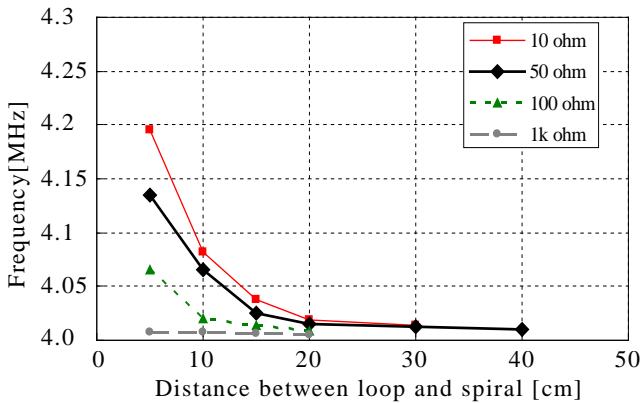


Fig.6 Resonant frequency variation with load

負荷のインピーダンスが小さいとき、ループコイル 2 に流れる電流は増加する。それに伴い、ループコイル 2 の周囲に発生する磁界は、アンペールの法則により強まる。よって、負荷のインピーダンスが小さいときほど共振周波数の変動は大きくなる。

### 3. Q 値測定

2 段の BPF の設計理論では外部回路との整合を取るため、外部回路と共振器間の結合度と 2 つの共振器間の結合度を一致させる。外部回路と共振器間の結合は外部 Q の逆数として表現される為、正確な外部 Q を測定する必要がある。

外部 Q を測定するにあたり、先ず無負荷 Q の測定を行う。無負荷 Q の測定構造を図 7 に示す。ループコイルによって励起されたスパイラル共振器は、一旦は内部にエネルギーを蓄えるが、そのエネルギーは共振器自身が持つ損失とループコイルへのエネルギー漏出により徐々に減衰していく。

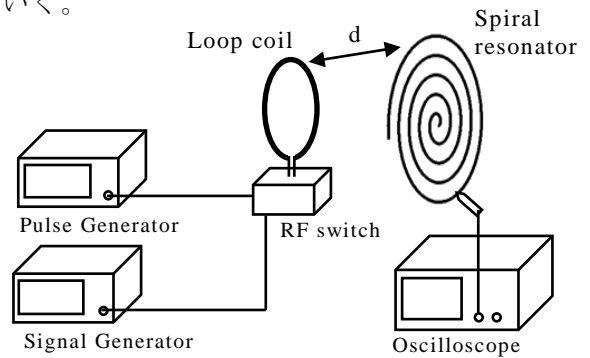


Fig.7 Measurement structure of unloaded Q value

エネルギーの減衰の様子は W を共振器に蓄積されたエネルギーとした Q の定義から知ることができる。共振器内部の電圧を A とすれば  $W \propto A^2$  であるから、図 4 中の時刻  $t_1, t_2$  における振幅を  $A_1, A_2$  として、Q の定義により

$$Q = \frac{\omega(t_2 - t_1)}{2 \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right)} \quad (1)$$

として求めることができる [5]。スパイラルからループコイルを見た反射係数が  $\Gamma \approx 1$  であるなら、ループコイルへのエネルギー漏出はほとんどない。したがって、図 7 の構造において式 (1) から算出される Q 値は無負荷 Q となる。

Table 2. Measured unloaded Q value

Distance between loop and spiral [cm]	Oscilloscope	VNA
40	581	607
50	579	588
60	601	603

図3のスパイラルとループコイルを用いて測定した無負荷  $Q$  を表2に示す。この結果から、安定して無負荷  $Q$  が測定されていることがわかる。

図1の構造で式(1)から  $Q$  値を求めた場合、ループコイル2へのエネルギー漏出が発生する為、その値は負荷  $Q$  を示す。負荷  $Q$  と無負荷  $Q$ 、外部  $Q$  は式(2)の関係を持つため、

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_e} \quad (2)$$

図1の構造から測定した  $Q$  値から図7の構造で測定した  $Q$  値をひくことで外部  $Q$  を求めることができる。図1の構造でループコイル2とスパイラル間を変化させ負荷  $Q$  を測定し、表2の無負荷  $Q$  を引いて求めた外部  $Q$  を図8に示す。測定に用いたループコイルとスパイラルは図3に示すものである。

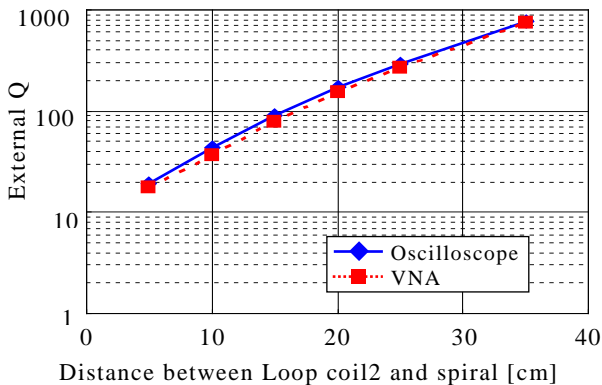


Fig.8 Measured external  $Q$  value by oscilloscope and VNA

VNAの結果はループコイルとスパイラルをそれぞれ1つ使い、反射法によって求めた値である。オシロスコープによる測定とVNAによる測定はほぼ一致していることから、オシロスコープによる測定でも正確な外部  $Q$  を得ることができている。

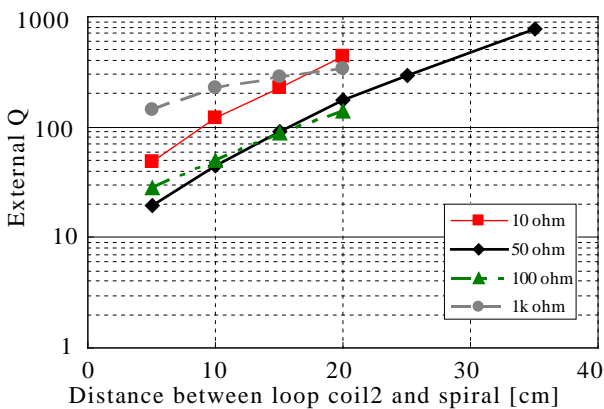


Fig.9 External  $Q$  variation with load

ループコイル2に接続する負荷を変化させたときの外部  $Q$  の変化を図9に示す。負荷を変化させると、外部  $Q$  が大きく変化している。また、インピーダンスが高いときほど、ループコイルとスパイラル間に対する外部  $Q$  の変化の傾きが緩やかになっている。共振周波数の変化と同様に、ループコイルの周囲に発生する電磁界の影響によりこれらの変化がもたらされていると推測されるが、原因究明は今後の課題である。

#### 4. 結合係数測定

WPT設計のためのもう1つの重要なパラメータは、2つのスパイラル間の結合係数である。オシロスコープでの結合係数の測定構造を図10に示す。

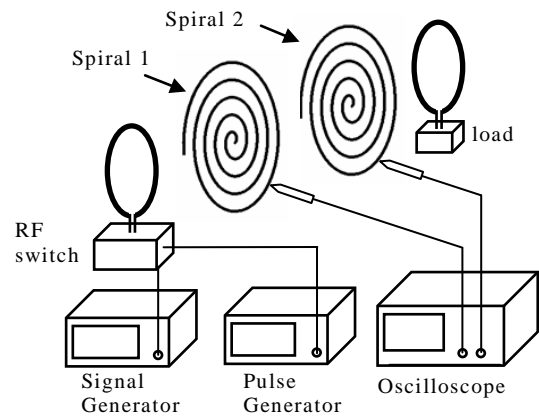


Fig.10 Measurement structure of coupling coefficient

共振周波数や  $Q$  値の測定と同様に、スパイラルをループコイルで励振し、スパイラル内部の電圧の時間変化を観測する。それぞれのスパイラル内部の電圧の時間変化を図11に示す。

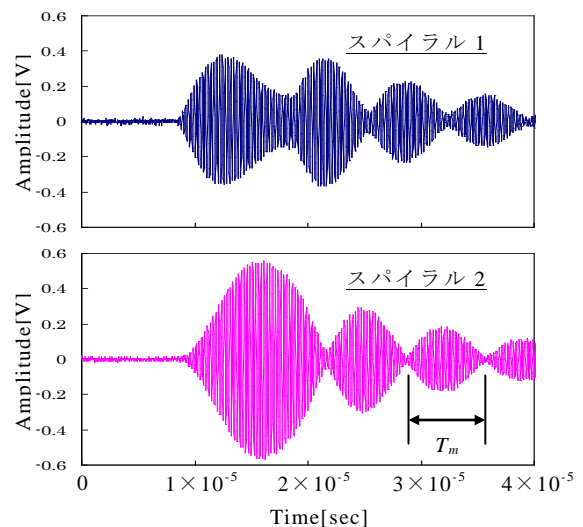


Fig.11 Energy exchange between two coupled spirals

ループコイルから発信された励振波は、近接しているスパイラルを励振する。励振されたスパイラルはもう1つのスパイラルと結合状態にあるため、エネルギーの相互やり取りが発生する。励振波の影響下では、各共振器は励振途中なので安定した結合状態を取ることができないが、励振パルスの影響が減衰するにつれ、2つの共振器は安定した周期でエネルギーのやり取りを始める。このエネルギーのやり取りの周期を  $T_m$ 、個々のスパイラルが持つ共振周期を  $T_0$  とすると、結合係数は式(3)で定義される[6]。

$$k = T_0 / T_m \quad (3)$$

図3のループコイルとスパイラルを図10の構造に配置し、2つのスパイラル間を変化させたときの結合係数の変化を図12に示す。

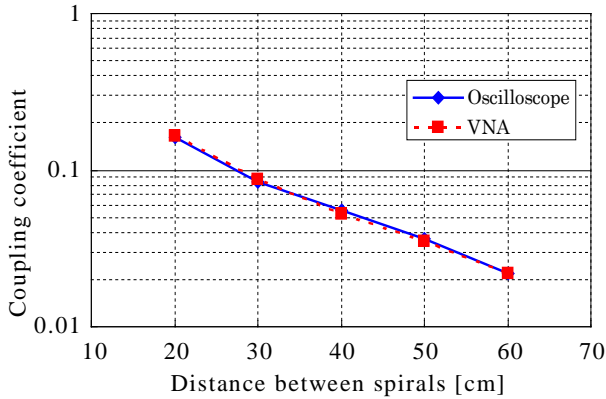


Fig.12 Measured coupling coefficient

オシロスコープでの測定結果と VNA での測定結果は完全に一致している。したがって、オシロスコープによる結合係数の測定は十分な測定精度を有している。

### 5. WPT システム設計

共振周波数、外部 Q、結合係数の測定をオシロスコープにより行った。これらの測定結果を用いて2段の BPF の設計理論に則り WPT システムの設計を行う。電力伝送に用いる電源、負荷のインピーダンスは  $50\Omega$  と仮定し、WPT システムは図3のループコイルとスパイラルを用いて構成する。伝送距離を 60cm とすると、その時の結合係数は図12より 0.022 である。この結合係数と整合が取れるループコイルとスパイラル間は図8より 10cm となる。電源と負荷をそれぞれ  $50\Omega$  と仮定したため、このシステム設計の結果は VNA で測定可能である。図13に測定結果を示す。この測

定結果から、整合の取れた2段の BPF が設計できていることがわかる。

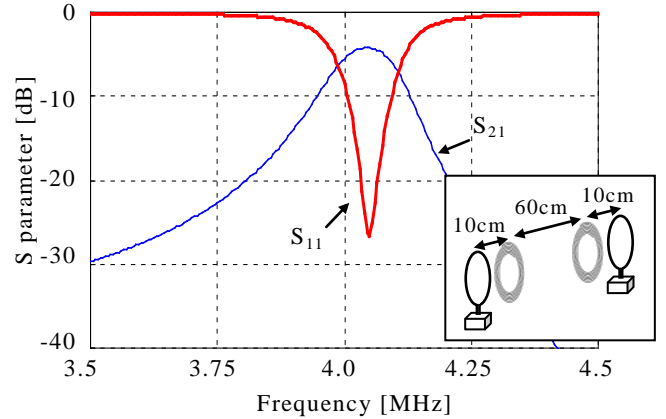


Fig.13 Frequency characteristics of designed system

WPT システムの伝送効率 は 電源の出力電力 に対し、どれだけの電力が負荷で消費されるかである。電源の出力を  $W_{in}$ 、負荷の消費電力を  $W_l$  とすると、効率  $\eta$  は

$$\eta = \frac{W_l}{W_{in}} = \frac{V_l^2 R_{in}}{V_{in}^2 R_l} \quad (4)$$

となる。ここで、 $V_{in}$ 、 $V_l$  は電源電圧と負荷の両端の電圧、 $R_{in}$ 、 $R_l$  は電源と負荷のインピーダンスである。また、電源と負荷が  $50\Omega$  であれば、 $\eta = S_{21}^2$  となる。オシロスコープで測定した  $\eta$  と VNA で測定した  $S_{21}$  の比較を図14に示す。

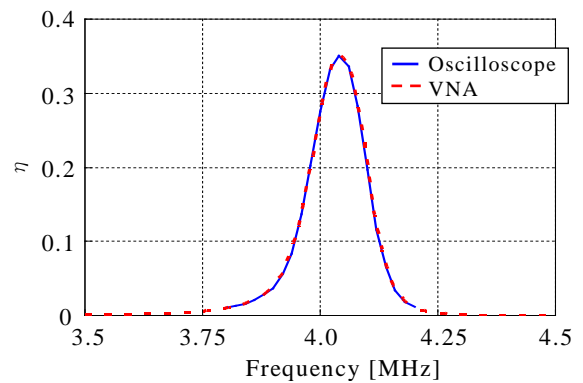


Fig.14 Power transmitting efficiency of WPT system

オシロスコープで測定した伝送効率と VNA の結果は完全に一致している。したがって、WPT システムの設計から効率測定・評価まで、VNA を一切使用せずに行うことが可能であると説明できた。設計した WPT システムの伝送効率は約 35% であるが、効率改善には結合係数または共振器の無負荷 Q を高くすることが有効であることが既に報告されている[7]。

## 6. まとめ

オシロスコープを使った WPT システムの設計方法を示した。この方法は VNA を一切使用しないため、 $50\ \Omega$  の測定環境に囚われることがなく、様々なインピーダンスの電源や負荷が接続された状態の共振周波数、Q 値、結合係数を直接測定することができる。したがって、多種多様な状況に適した WPT システムを容易に設計することができる。

## 文 献

- [1] I. Awai, "Design Theory of Wireless Power Transfer System Based on Magnetically Coupled Resonators", Proc.2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, Aug. 2010.
- [2] I. Awai and Takuya Komori, "A Simple and Versatile Design Method of Resonator-coupled Wireless Power Transfer System", Proc. 2010 International Conference on Communications, Circuits and Systems, pp. 610-616, July 2010.
- [3] I. Awai, T.Ishida Y.Zhang, "Principles of Time Domain Calculation of Microwave Resonator Parameters", Proc. of ANTEM/URSI, Montreal, pp. 589-592, July 2006.
- [4] I. Awai, Yangjun Zhang, Tetsuya Ishida and Tsuyoshi Suzuki, "Principles of time domain calculus of microwave resonator parameters", Trans. IEICE, vol.E90-C, No.12, pp.2198-2204, Dec. 2007
- [5] I.Awai, Y.Oda and Y.Okayama, "Calculation of External Q of a Resonator by FDTD", 28th European Microwave Conference Amsterdam 1998.
- [6] I. Awai, "New Expressions for Coupling Coefficient between Resonators", IEICE Trans. Electron., E88-C, No.12, pp.2295-2301, Dec.2005.
- [7] 小坂修平, 小森琢也, 栗井郁雄, "共振器結合型 WPT システムの伝送効率最大化", 信学総大講演文集, BS-2-8, .2011