

Repeating WPT における優位距離の定式化と検証

吉川 隆*, 禿 優希**

Formulation and Examination of advantage Distance of Repeating WPT

Takashi YOSHIKAWA, Yuuki KAMURO

We have studied HEMS (Home Energy Management System). In that study, we have regarded the wireless power transmission as the most useful energy source for sensor network node. Sensor network nodes need more than 100uW average power on working. Our scope of transmitting distance from power supplier to receiver is more than 1m. In our previous study we have shown the experimental result of more than 0.55m transmitting distance with one turn small loop coils and shown the possibility of further transmission by using other kinds of coil shape under the magnetic coupled method. But in that case the transmitting distance was less than 1m. In order to achieve more than 1m power transmission using only small size coils we have introduced intermediate coils between transmitting and receiving coils. As the results we can show the possibility of 1m range transmission referring to the HEMS specification. In such experiment, we have one wondering that there is a exchanging point for transmitting efficiency between with intermediate coils and without intermediate coils. In this paper we have clarified the reason under theoretical consideration and experiment.

Keyword Wireless Power Transmission, Dense Array, Repeating, Magnetic Resonance

1. 背景

我々はこれまでセンサネットワークを用いた HEMS に関する研究を行ってきた。偏在するセンサネットワークの電源確保のためにこれまで、エネルギーハーベスティングの研究を進めてきた [1]。エネルギーハーベスティングとして室内光発電 [1]、温度差発電 [2]、振動発電 [3]、等の研究を実施してきた。また、光や温度差、振動などが得られない環境でも発電ができるようにするために無線電力伝送による発電の研究を行ってきた。無線電力伝送ではある程度の距離にある程度強い電力を送信する目的から磁気結合型の無線電力伝送について研究を行ってきた [4]。

無線電力伝送(これ以降 WPT と略す)では、HEMS に用いるという目的のため、小型でシンプルな送受信コイルを用いる事を念頭において検討を進めてきた。目標仕様として受信機の 10cm 以内の大きさの条件で伝送効率-30dB@1m とした [4]。これは電波防護指針の基準にて受信点で 100 μ W の電力を得る事に相当する。これまで、ループコイルやスパイラルコイルを用いた伝送特性や、送信側に大きなコイルを用いた LS コイルによる伝送特性等を評価してきた [5]。その結果 LS コイルに於いては十分上記仕様を満足する事を確認できたものの送信側のコイルを大きくする必要があるので、実運用として適用するには実装可能な場所が限られていた。そこで小さい送受信コイルを用いても伝送距離を伸ばせる方式としてリピートコイルを用いる方式を検討する事とした [6]。リピートコイルを用いた電力伝送では上記仕様を満足する方式を示す事が出来た。他方、リピートコイルの挿入個数や挿入間隔によってリピートコイルの優位性が示される領域が限定されることが

-
- * 近畿大学工業高等専門学校
総合システム工学科 電気電子コース
 - ** 近畿大学工業高等専門学校 専攻科
生産システム工学専攻 電気電子工学系

実験的に明らかになった。これまで定性的な見解を示すに留まってきたが、本論文に於いて定量的な解釈を与える事とした。

2. 水平型 WPT の基礎特性

我々は従来評価されていた垂直型 WPT の代わりに HEMS の実運用性に優れた水平型 WPT 方式の評価手法を開発した [6]。図 1 にその概略図と写真を示す。送受信コイルを VNA (ベクトルネットワークアナライザ) に接続しそれぞれのコイルに共振コイルを重ねている。伝送距離 D を変えてその時の伝送効率 η を S パラメータ S_{21} を用いて式 (1) より計算した。

$$\eta = 20 \log (S_{21}) \quad (1)$$

その際の測定結果を図 2 に示す。ここでそれぞれのコイルは一辺の長さは 10cm のワンターンループコイルとしている。共振コイルには 500pF のマイコンデンサを装荷して 10.7MHz の共振周波数としている。

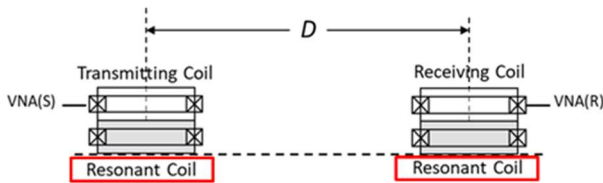


図 1 水平型 WPT の基本伝送特性の測定系

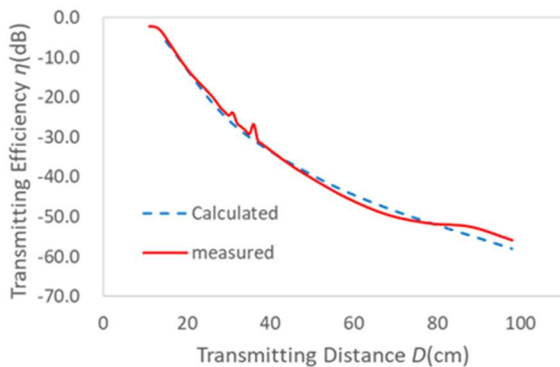


図 2 水平型 WPT の基本伝送特性実測値

図 2 に示した通り、1 m での伝送効率は -56dB となり目標である -30dB を大きく下回っている。目標である -30dB の伝送効率を満足するのは 33cm 程度となっている。(これまでの垂直型の伝送方式では 55cm 相当であった。)

この結果は等価回路より導出した理論計算 [7] に合致している事がわかる。

次に送受信コイルの中心にリピーティングコイルを挿入して実験を行った。送受信コイルの距離 D を変えてゆき常にリピーティングコイルが送受信コイルの中心に来るように設定した。リピーティングコイルは共振コイルと全く同じものを用いている。測定系を図 3 に測定結果を図 4 に示す。

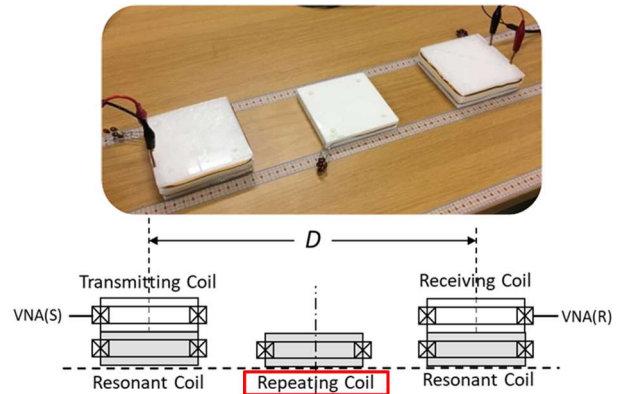


図 3 水平型 Hopping WPT の基本伝送特性測定系

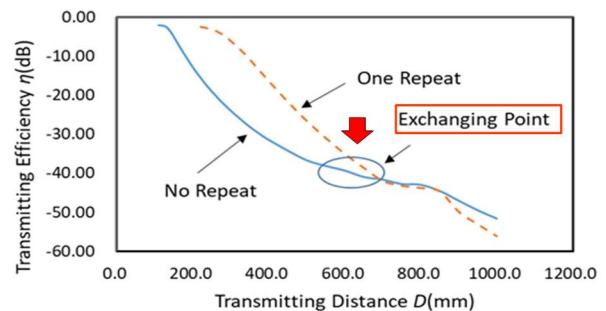


図 4 水平型 Hopping WPT の基本伝送特性実測値

当初我々はリピーティングコイルを挿入することであらゆる距離に対して伝送効率が改善されるものと考えていた。しかし図 4 に示した測定結果では 60cm 付近を境にリピーティングコイルを挿入することで伝送効率が下回る、交換点を迎える事が分かった。これは伝送距離が小さくなり、周りの磁性体の影響によるものではないかと考え、何度も磁性体を排した環境に於いて実験を繰り返した。しかしどの測定に於いてもこの交換点は常に存在した。

そこで、原理原則に立ち返って等価回路解析によって導出される伝送効率に遡って定量的な見地からこの特性を検証してみる事とした。

3. 等価回路を用いた伝送特性

以下に最もシンプルな伝送特性を示す等価回路を示す。変圧器を介して左側が送信コイルを右側が受信コイルを示している。各々の等価回路定数は図5の下に示した

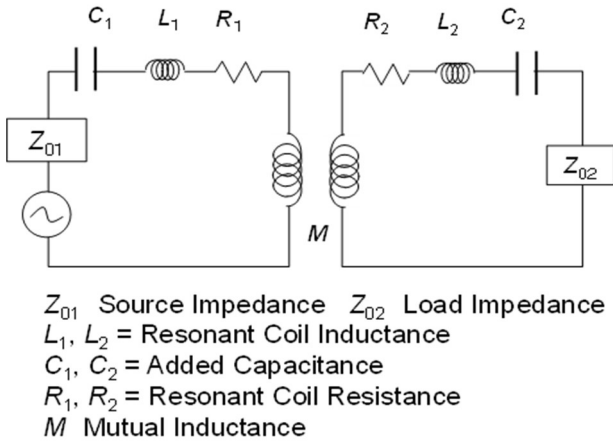


図5 WPTの等価回路

等価回路より効率 η を求めると (2) 式のような簡単な式で表される [7]。

$$\eta = \frac{(kQ)^2}{(1 + \sqrt{1 + (kQ)^2})^2} \quad (2)$$

ここで k は送受信共振コイル間の結合係数、 Q はそれぞれの共振コイルの Q 値を表している。

Q 値は伝送距離に無関係でコイルを変えない限り一定なので、効率は結合係数 k の関数となる。結合係数はコイルの形状、太さ等で異なって来るが、細線を用いたループコイルの場合、(3) 式の関係が成り立つ。

$$k \propto d^{-3} \text{ (for example)} \quad (3)$$

今図6の様なモデルを考える。

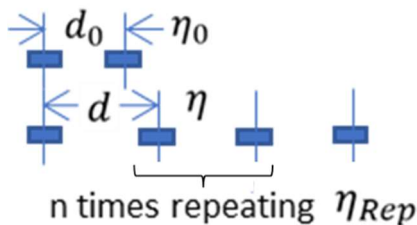


図6 リピーティングコイル送信の定数とモデル

図6では参照距離 d_0 において参照効率 η_0 とした時、一つのリピーティング距離を d その時の効率を η とし、 n 回

リピーティングする事を表している。

(2) 式に於いて注目する kQ (k と Q の積) を 1~10 程度とすると図7に示したように効率 η は kQ の 1 乗に比例する事となる。

$$\eta \propto d^{-3} \quad (1 < kQ < 10) \quad (4)$$

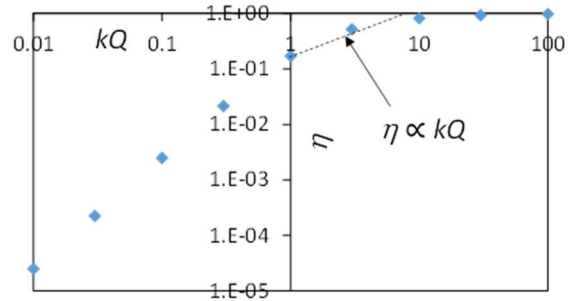


図7 kQ 積と伝送効率

図6のモデルに基づいて (4) 式を用いてリピーティング伝送効率 η_{Rep} を求めると (5) 式の様になる。ここで n はリピーティング回数であり、分割数である点に注意を要する。

$$\eta_{Rep} = \left\{ \eta_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-3} \right\}^{n+1} \quad (5)$$

(5) 式が示すように繰り返さない直接伝送 ($n=0$) では伝送距離の 3 乗に逆比例して効率は低下する事になるが、繰り返し回数を増やすと伝送効率は伝送距離の $3(n+1)$ 乗に逆比例して効率が低下する事が判る。他方、単位伝送効率が十分に大きければ繰り返し回数のべき乗で減衰する伝送効率を補償してリピーティング伝送効率の方が大きな値を示す事になる。これらの関係より交換点が存在する事が理解できる。

3.1 限界点存在の検証

前節 (5) 式に於いて交換点が存在する事がわかったのでその特性をいくつかの配列モデルについて計算してみた。ここでこれまで意味が不明瞭であったが「交換点」という言葉を、リピーティングコイルが優位性を示す距離限界という意味で「限界点」、そこまでの距離を「限界距離」と置き換えて定義する。

計算モデルを図8に示す。基準距離を $D_N = 1$ としてその区間をそれぞれ 2、3、4 等分した場合について考える。ここで基準距離 d_0 は $D/4$ 、その時の効率 η_0 を 0.9 と定義して計算を行った。計算結果を図9に示す。

Calculation Model

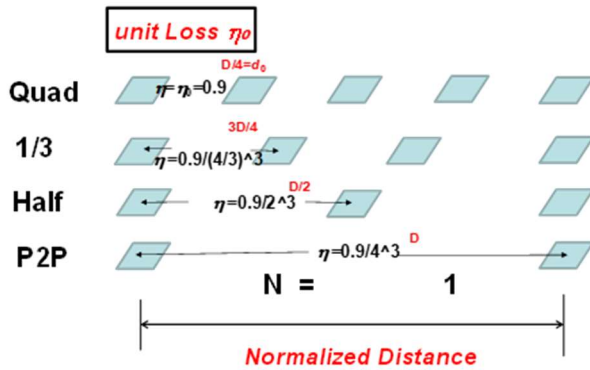


図8 リピーティング伝送の計算モデル

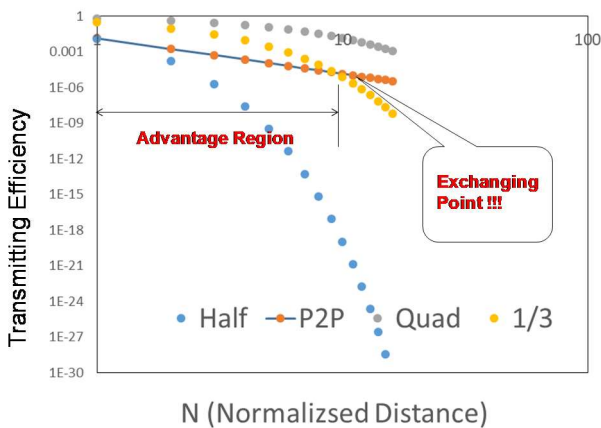


図9 リピーティング伝送モデルの伝送特性計算値

図9に示した様に、リピーティング伝送間隔が長くなると（Half、1/3配列の場合）、常にリピーティングコイルを用いた方が用いない場合（P2P）に比べて伝送効率とは低くなる、或いは比較的短い伝送距離で限界点を迎えるという結果となった。他方、リピーティング伝送間隔が長くなると（1/3配列の場合）、限界点はかなり大きくなる（図では未だ限界点に達していない）。この現象を分かりやすく示すために以下の諺を示したい。

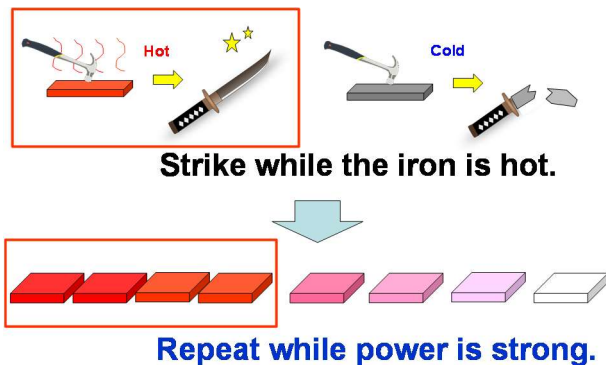


図10 「パワーは強いうちに繋げ」

3.2 限界点の定式化

前節に於いて、定量的に限界点が存在する事を示したので、本節に於いて限界点の定式化を考える。計算モデルを図11に示した。限界点までの距離を d とし限界点までのリピーティング回数を n とした。まずは、直達伝送の場合図11（上）伝送効率は η_{PP} となる（式（6））。これを n 回のリピーティングでつないだ場合、伝送効率は η_n となる（式（7））。ここでそれぞれの効率は参照伝送距離 d_0 における参照伝送効率 η_0 を用いて表している。また直達伝送をさせた時の伝送減衰係数を γ (< 0)、（前節では一例として $\gamma = -3$ としている。）として一般化した。

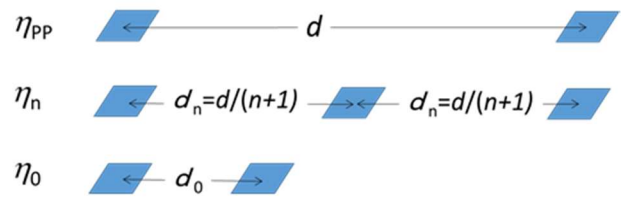


図11 限界点の定式化における計算モデル

$$\eta_{PP} = \eta_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^\gamma \quad (6)$$

$$\eta_n = \left\{ \eta_0 \left(\frac{d}{(n+1)d_0} \right)^\gamma \right\}^{n+1} \quad (7)$$

限界点では $\eta_{PP} = \eta_n$ が成り立つので、（6）式＝（7）式と整理すると限界距離 d は（8）式のように表される。

$$d = d_0 \eta_0^{-\frac{1}{\gamma}} (n+1)^{\frac{n+1}{n}} \quad (n \neq 0) \quad (8)$$

4. 実測値との整合性

第二章で示した実測結果に基づいて式（8）にて導出した限界距離が実際の実験値と合致しているかどうかについて検討を行う。以下に検証の手順を示す。

- ①直達伝送の伝送特性を測定する。対数グラフを用いる事で減衰係数 γ を求める。
- ②参照距離 d_0 (任意の点)に於ける参照効率 η_0 を求める。（今回は $d_0 = 300[\text{mm}]$ としている。）
- ③リピーティング回数を1回（リピーティングコイルを真ん中につただけ置く）として式（8）を用いて限界距離 d を計算する。

この結果の d の値と直達方式とリピーティング方式の交点を比較する。図12に①～③の手順の詳細を示す。

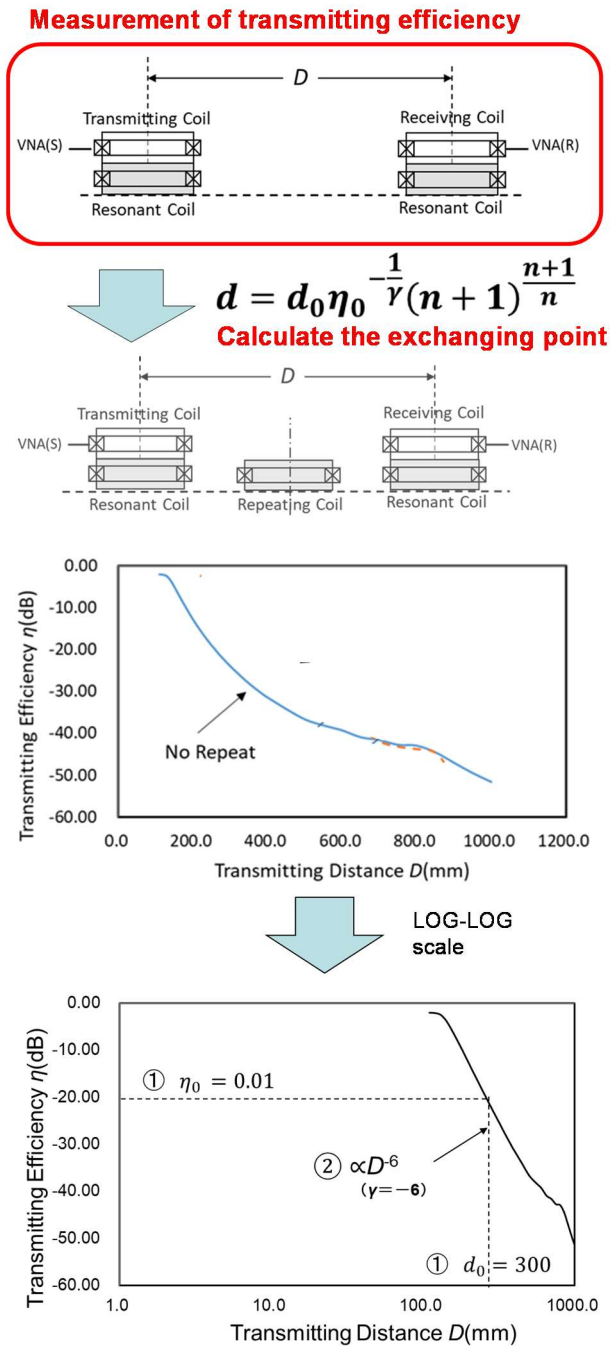


図 1 2 限界距離 d の導出手順

図 1 2 に示したように実測から求めた値、 $d_0 = 300$ [mm]、 $\eta_0 = 0.01$ 、 $\gamma = -6$ を式 (8) に代入すると限界距離 $d = 557$ [mm] と計算される。計算結果を測定結果と併せて図 1 3 に示す。限界点は実際の交点よりはやや小さい値となっているが、S/N があまり大きくない点での測定であることや、直達伝送のマルチパスの影響までを考慮していない点などの要因を勘案するとほぼ妥当な値が得られているものと考えられる。

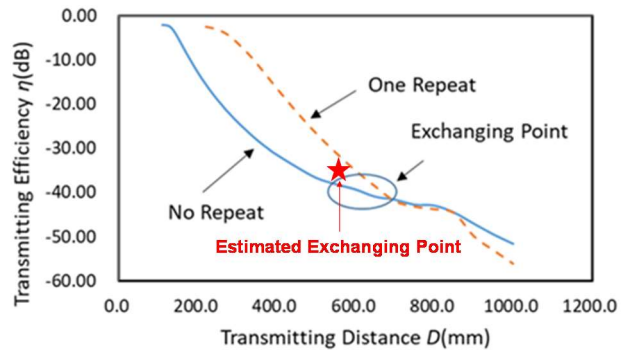


図 1 3 限界距離の推定値と実測結果

5. 結論

無線電力伝送におけるリピーティングコイルを用いた高効率伝送方式は各所で研究が進められている。これらの研究ではリピーティングコイルを潤沢に用いた密配列の条件で伝送するものが殆どであるが、実運用を考えた場合は、必ずしも密配列のシステムを組めるとは限らない。本研究ではリピーティング無線電力伝送に於ける粗配列時の特性を考慮する際に、リピーティング方式の優位性が保たれる距離に関して定量的な見積もりを得るための定式化を行った。

当初リピーティングコイルを用いる事で必然的に直達伝送より伝送効率が高くなるだろうと考えて実験を始めたが、実際にはどこかで必ず効率の上下関係が逆転する交換点が確認された。この原因を策定すべく基本的な等価回路に立ち返ってこの交換点がどういう条件で発生するのかという事を検討し、この点をリピーティングコイルが優位性を示す限界点として定式化を行った。この定式化の妥当性を検証するために、直達伝送方式の実測値を用いて導出した計算式で限界点を計算したところ、リピーティングコイルを介して実験した結果と直達伝送の実測値の交点にはほぼ近い値を得る事ができ妥当性が確認できた。

また、この検討の過程に於いて、より高い伝送効率でリピーティングを行った方がトータルの伝送効率が高くなり、大きくパワーが減衰するとトータルとして伝送効率は維持できなくなるということ、「パワーは強いうちに繋げ」という言葉と共に認識を深めた。

本検討は HEMS に用いる無線センサネットワークノードへの高効率長距離方式として検討を着手したが、現在盛んに研究が進められている、走行型給電方式にも本方式を適用できるとのご助言を栗井郁夫先生 (リユーテック株) から頂いた。つまり、現在検討されている走行型給電は常に給電するレーンを設けるか、非接触給電にてバッテリーにチャージを行う方式であるが、間欠的に高効率にエネル

ギーを走行車両に給電する事ができれば永続的な走行を保障しつつ、敷設コストを大幅に軽減する事が可能となる、そういった可能性を含んでいるという事になる。今後の課題として取り組んでゆきたい。

参考文献

- [1] 吉川 隆, ” エネルギーハーベスティングを用いたセンサネットワーク HEMS”, 近畿大学工業高等専門学校紀要 第 5 号, PP.33-39, 2012.
- [2] 吉川 隆, 森 優樹, ” HEMS 適用を指向した宅内温度差発電の可能性について”, 2015 年 3 月, 近畿大学工業高等専門学校紀要 第 8 号, PP.59-64, 2015.
- [3] 吉川 隆, ” 振動床発電の研究”, 2017 年 3 月, 近畿大学工業高等専門学校紀要 第 11 号, PP.39-48. 2018.3.15.
- [4] 吉川 隆, 更谷 翔太, ” HEMS 適用としての Wireless Power Transmission”, 近畿大学工業高等専門学校紀要 第 6 号, PP. 63-66, 2013
- [5] 吉川 隆, 更谷 翔太, "LS コイルを用いた Wireless Power Transmission", 近畿大学工業高等専門学校紀要 第 7 号, PP. 31-36, 2014
- [6] 吉川 隆, 禿 優樹, ” Last 1m WPT における Dense アレイ Hopping 効果の検証”, 2019 年 3 月, 近畿大学工業高等専門学校紀要 第 13 号, 2019.
- [7] 吉川 隆, 境 新, ” 銀ナノ粒子インクを用いた Wireless Power Transmission”, 2016 年 3 月, 近畿大学工業高等専門学校紀要 第 9 号, PP.47-54. 2015.3.15.