

# Last 1m WPT における Dense アレイ Hopping 効果の検証

吉川 隆\*, 禿 優希\*\*

## Examination of Dense Array Hopping Effect on Last 1m 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 coil and shown the possibility of further transmission by using other kinds of coil shape under the magnetic coupled method. In the latest paper we have shown the results of using silver nano-particle paste as the magnetic flux concentrator. In this study we have clarified the advantage of applying for repeating coils between transmitting coil and receiving coil. At first we have shown the results of introducing repeating coils by measurement. Next we have defined the scope concept as the novel concept. That is the concept for guaranteeing the transmitting efficiency in the scope range. We have measured and calculated the transmitting efficiency under the assumption that scope range is defined as 1m. As the results we can show the possibility of 1m range transmission referring to the HEMS specification.

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

### 1. 背景

近年燃料費の高騰などで電気料金が値上げされおり、それに伴い 1 世帯当たりの電力使用量が増加していることから家庭内での電力使用量の節約を行う必要がある。そのため、HEMS 技術が注目を集めている。HEMS とは「Home Energy Management System」の略であり、家庭で使うエネルギーを節約するための管理システムであるが、設置場所に制限があることが普及の障壁となっている。そのため、設置場所を選ばないセンサノードを用いたセンサネットワークの導入が検討されている[1]。

センサノードを無作為な場所に設置する場合、電池交換ができなくなってしまう可能性がある。よって、永続的にセンサノードへ電源を供給するシステムが必要となってくる。この必要なエネルギーをエネルギーハーベスティングにより確保する研究例は「省エネルギー革新技術開発ハーベスティング HEMS の事前研究」[2]によって報告されている。しかし、エネルギーハーベスティングによる電源確保のみでは宅内全領域でエネルギーを確保することは困難である。そこで我々は電源確保の課題に対し、無線電力伝送(WPT)を用いる可能性について検討を行うこととした。HEMS での運用を考え、センサノードに対し電力の伝送距離は 1m 以上であることを想定した。また、センサノードの大きさは 1 辺 10cm 程度であると仮定し、電波防護指針に基づき 1[mW/cm<sup>2</sup>]の上限伝送電力条件に倣って伝送効率を -30dB 以上に保つことを目標とした。

この様な目標を達成するためには、ある程度大きな電力を長い距離伝送することができる無線電力伝送方式が必

---

\* 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

要である。1970年にMITによって磁気共鳴型伝送方式が確立された[3]。その方式ではRF伝送方式より大きく、電磁誘導方式より長距離の電力伝送が可能であるため、本方式を用いることとした。その後、これまでに電気自動車の無線給電による充電[4]や無線給電ロボットなどが提案されてきた[5]。しかし、それらは大きなコイルを用いた伝送方式であり HEMS 用途には適していない。そこで我々は2011年より HEMS 向け無線電力伝送の研究を進めてきた。これまでの研究では、1辺が10cmのシングルターンコイルを用いて、送受信系のみの電力伝送を行った結果、-30dBの伝送効率を満たすのは55cmまでということがわかっている[6]。目標の半分程度しか伝送することができていないのは、コイル間の十分な結合係数が保障されていないことに起因しておりこれを改善すべく、伝送方式の検証を進めている。まずは大きな伝送コイルを用いたLSコイルの手法にて目的の1mを満足することがわかっている[7]が、これでは実運用に適さない。そこで実運用を想定した小型コイルにてそのコイル配置方法を工夫することで、1mまでの距離において-30dB以上の伝送効率を可能とする手法を見出すことが本研究の目的である。

## 2. 無線電力伝送の原理

本研究で用いた磁界共鳴型無線電力伝送の原理について述べる。

図1に磁界共鳴型無線電力伝送方式の等価回路を示す。

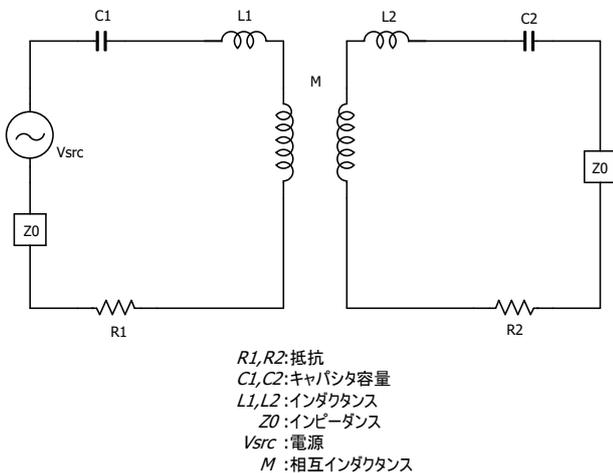


図1 磁界共鳴型無線電力伝送方式の等価回路

本方式では、送受信のコイル自身のインダクタンスと付加するキャパシタンスによる共振が等しいコイル同士を対向させ電力伝送を行う。両コイルとコンデンサが単一周波数で共振しているとき、図1の等価回路を用いて伝送効率 $\eta$ を求めると(1)式ようになる。以下に結合係数 $k$ と $Q$ 値について説明する。

$$\eta = k \times Q \quad (1)$$

結合係数 $k$ とは変圧器の1次側巻線と2次側巻線の結合度合いを表す指標であり、図1では送信側(左側)と受信側(右側)のコイル同士の結合の強さのことである。また、結合係数 $k$ は送受信コイルの自己インダクタンス $L_1$ 、 $L_2$ ならびに相互インダクタンス $M$ により導出することができる。以下に結合係数 $k$ を式(2)式に示す。

$$k = \frac{M}{L_1 \times L_2} \quad (2)$$

(2)式より、相互インダクタンスが大きいほど結合係数は大きくなる。また、相互インダクタンスは一方のコイルに電流を流した際に他方のコイルに発生する磁束を示す指標であり、双方の距離が近距離の場合またはコイル面積が大きい場合には結合係数が大きくなる。

$Q$ 値とはエネルギー放出の容易さを示す指標である。図1の場合、送受信コイルを互いに共振状態にしたとき、電力を伝送する。その際の電力放出のしやすさを $Q$ 値としている。式(3)に $Q$ 値の定義を示す。(ここで $f_0$ は共振周波数、 $\omega_0$ は共振角周波数を示す。)

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{(2\pi f_0)L}{R} \quad (3)$$

(3)式より、抵抗 $R$ が大きいほど $Q$ 値が小さくなりエネルギーを伝送することが困難となる。よって、共振をさせるコイルには内部損失の少ない金や銀、銅を用いる必要がある。また高周波の場合、表皮効果の作用によって等価的な抵抗値が大きくなってしまいうため、 $Q$ 値が低下する。

## 3. 解析及び測定手法の構築

### 3.1 数値解析手法の検討

無線電力伝送で使用するコイル形状は数多く存在する。しかし、それらを実際に製作し、伝送特性の検討を行うことは困難である。そこで、シミュレーションを用いて伝送効率を計算し、最適形状を導出することで効率よく作業を行うことが可能である。我々は電磁界シミュレーションとして、WIPL-D[8]、HFSS[9]の2種類の解析ソフトを用いて数値計算を行っている。以下にそれぞれの特徴と解析条件、解析結果について述べる。

### 3.1.1 WIPL-D

短時間で簡易的な数値計算を行うことが可能なソフトである。ワイヤーによりモデルを作成し、シミュレーションを行うことができる。ワイヤーに対して、抵抗成分やインダクタンス成分、キャパシタ容量を設定することでコイルとして解析する。しかし、ワイヤモデルであり渦電流などの影響を考慮することができないため、実験系と同じモデルを作成しても高周波において正確な  $Q$  値を得ることができない。そこで、実験データと比較しながら仮想の直列抵抗を挿入する必要がある。また、解析内に周波数以外のパラメータ Sweep 機能を持っていないため、伝送距離やコイルの大きさのようにモデルに用いる値を変化させる場合には、新たにモデルを作成し個別に解析する必要がある。

### 3.1.2 HFSS

数時間の解析時間を必要とするが詳細な解析を行うことが可能なソフトである。WIPL-D はワイヤーによりモデルを作成したが、HFSS では一般的な 3DCAD のように、オブジェクトを指定しすべての要素を作成することができる。また、作成したモデルの材料を選択することができるため、仮想抵抗の追加を必要としない。また、渦電流を考慮した解析結果を得ることができるため、正確にモデルを作成することで実測データに近い値を得ることが可能である。

HFSS では解析を行う際、解析領域の設定を行う必要がある。解析領域の範囲の設定を行い、領域内の材料を選択する必要がある。解析領域の範囲については、解析モデル毎に適した大きさに設定する必要があり、解析領域が不適切な値である場合、エラーが発生するため注意が必要である。

### 3.1.3 シミュレータの妥当性評価

WIPL-D と HFSS の解析結果を比較するため、図 2 に示す伝送系を用いて解析を行い実測値との比較を行った。WIPL-D で作成したモデルを図 3、HFSS で作成したモデルを図 4 に示す。また、図 3 の WIPL-D で作成したモデルの外側コイル中の点は送受電部、内側コイル中の点は  $RLC$  成分を持つ端子である。図 4 の HFSS では、上下両端のコイルに取り付けられている長方形シートが送受電部、中間コイルに接続されている長方形シートがコンデンサである。

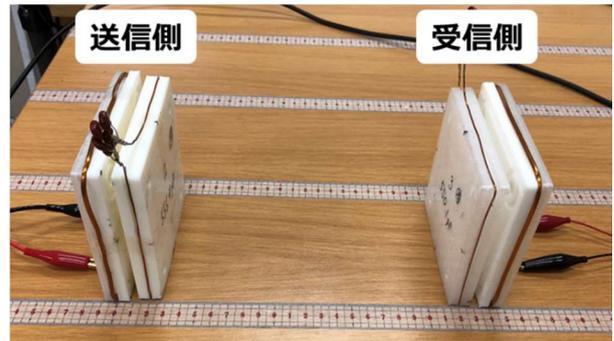


図 2 比較に用いた伝送系

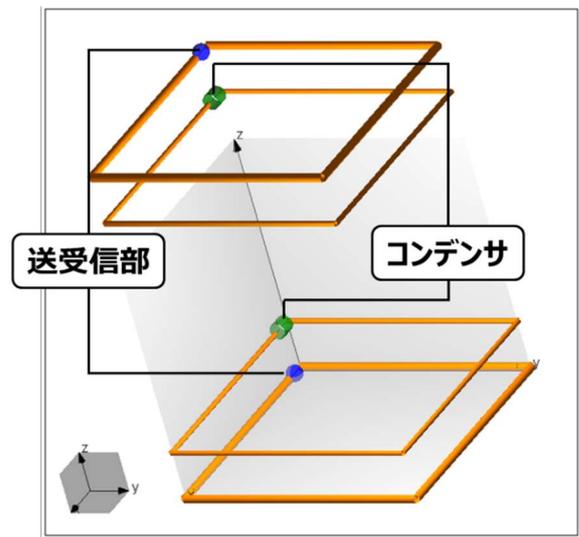


図 3 WIPL-D により作成した解析モデル

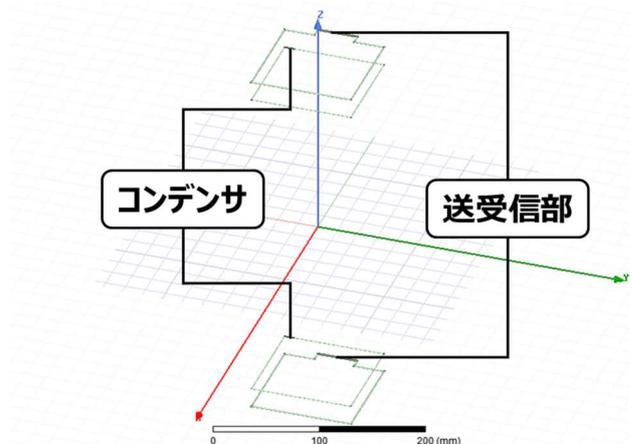


図 4 HFSS により作成した解析モデル

実測値、WIPL-D と HFSS から得られた解析データを比較した結果を図 5 に示す。

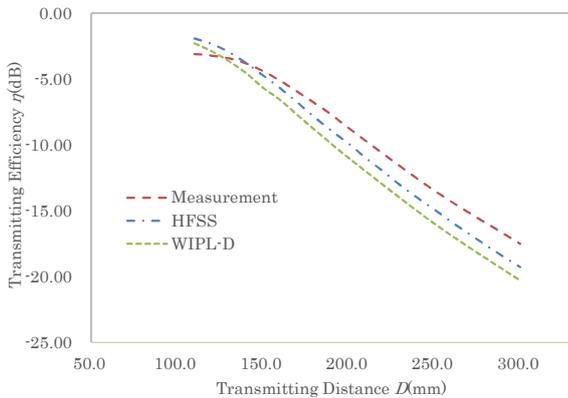


図 5 シミュレーション結果比較

図 5 より、伝送距離を 300mm で比較したとき HFSS では 2dB、WIPL-D では 3dB 実測値との差がある。この誤差は同等な特性から得られる Q 値が大きいことから生じる読み取り誤差や解析ポイントの粒度などで生じる誤差の範囲であることが考えられる。また、図 5 の元データである各計測での周波数特性は実測値と計算値でほぼ同一の波形となっていた。このことから本計算手法は、数値解析として妥当な値を得るものであることがわかった。HFSS と WIPL-D の比較結果より、より正確な値を計算することが可能であることが確認できたことから、今後本研究には HFSS を使用することとした。

### 3.2 横置き計測手法

従来の無線電力伝送効率計測実験では、図 6 のように縦置き状態の実験系を用いていた。しかし、HEMS で運用を考えるうえで縦置き状態の伝送は不適切である。そこで、HEMS において実際に使用することができる伝送形式として、共鳴コイルを床に敷き詰めることにより伝送する横置き形式を考案した。横置き形式の実験系を図 7 に示す。また、本論文で計測する伝送効率  $\eta$  はベクトルネットワークアナライザを用いて以下の式によって導出した( $S_{21}$  は S パラメータで入出力伝送パワー指標である)。

$$\eta = 20\log(S_{21}) \quad (4)$$

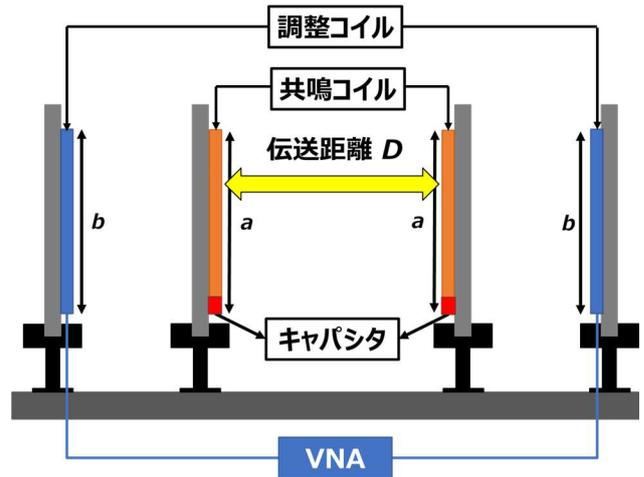


図 6 従来の実験系

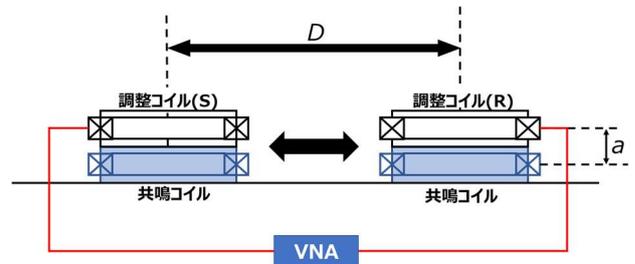


図 7 横置き伝送形式の実験系

#### 3.2.1 CMMU

従来の無線電力伝送測定実験では図 6 に示すように、コイルを張り付けたアクリル板を光学ステージに固定することで計測を行ってきた。しかし、光学ステージには架台や架台の固定に使用するネジなどの金属部品が近傍にあり、金属物の影響を考慮する必要があった。その他にも、ステージ長で測定範囲の制限を受けるなどの問題点があった。そこで我々は図 8、図 9 に示すコイルとコイルを保持するコイルマウンタを作成し、コイルを装着しコイル評価ユニット(CMMU: Coil Mounted Measurement Unit)とした。実際に製作した CMMU を図 10、図 11 に示す。また、コイルマウンタは 3D プリンタを用いて製作し、材料としては ABS を使用した。製作したコイルマウンタのサイズを表 1 に示す。溝は高さ方向の中心から対称に幅を設けた。

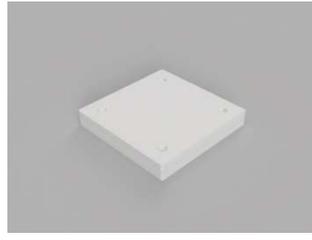


図 8 調整コイル用マウンタ 図 9 共鳴コイル用マウンタ

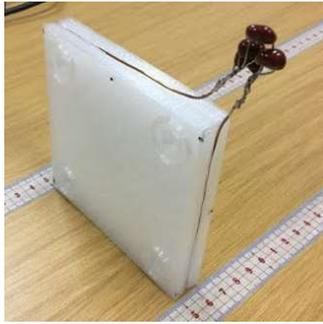
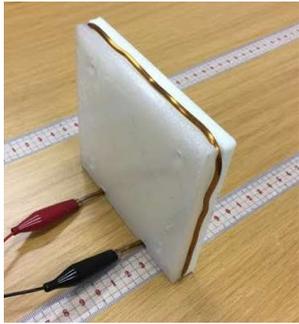


図 10 調整コイル用 CMMU 図 11 共鳴コイル用 CMMU

表 1 製作した CMMU の寸法値

	一辺			溝	
	縦 (mm)	横 (mm)	高さ (mm)	幅 (mm)	奥行き (mm)
調整コ イル	106	106	15	1.5	3
共鳴コ イル	104	104	15	1	2

### 3.2.2. 基礎電力伝送による CMMU 評価

図 10、11 の CMMU を用いて製作したコイルの共振周波数を調整し、図 6 に示した従来の方法である光学ステージを用いた場合の基礎特性との比較を行った。評価方法はそれぞれの端子をベクトルネットワークアナライザに接続し、反射指標である S11 を測定し、共振特性の比較を行った。CMMU 評価実験を図 12、比較結果を図 13 に示す。

図 13 より、基礎特性としてはほぼ同等であることから、CMMU を用いた計測系を新たな実験系として用いることが可能であることがわかった。

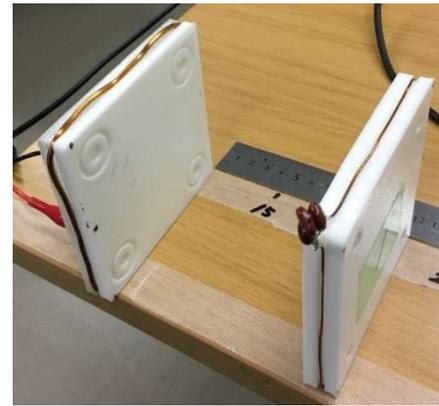


図 12 CMMU 評価実験

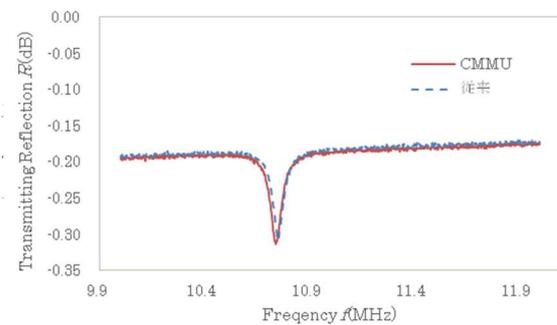


図 13 基礎特性比較結果

## 4. HEMS 仕様を満たす無線電力伝送方式

製作した CMMU を用いて床下伝送を想定した横置き伝送を行う。従来行われていた 1 対向電力伝送では、HEMS として十分な伝送効率を得られていなかったことから[6] 対向コイルの間に伝送部を設ける方法を試みた。その方式として、ホッピング無線電力伝送方式とスコープ無線電力伝送方式の 2 方式を用いて伝送効率測定をした。以下に、各方式と実験内容について説明する。

### 4.1 ホッピング無線電力伝送

ホッピング無線電力伝送とは図 14 に示すように、共鳴コイルと調整コイルを 1 組としてその間に中継コイルを挿入する方式である。伝送距離を変更した際の伝送効率を計測する。共鳴コイルを挿入しない場合を 0 HOP (HOP ではない)、1 つ共鳴コイルを挿入した場合を 1 HOP とし、この時共鳴コイルは伝送距離 D 内に等間隔になるように設置した。また、共鳴コイルを敷き詰めることにより伝送距離を大きくする方式を FULL HOP とし、伝送効率計測実験を行った。以下に各場合における計測結果と数値解析結果の比較を行った。

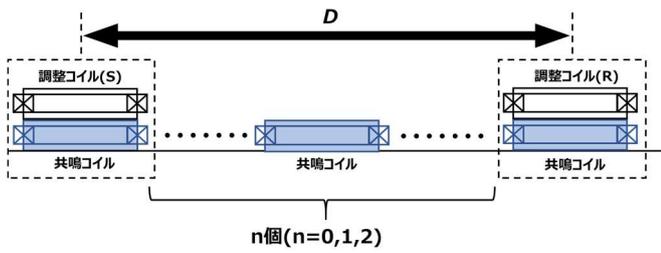


図 14 ホッピング無線電力伝送実験系

#### 4.1.1 0 HOP

製作した CMMU を用いて床下設置を想定した伝送効率計測実験を行った。実験系は図 15 に示すように、調整コイルと共鳴コイルを 2 組のみを使用する実験系(0 HOP)を用いる実験系であり、共鳴コイルの上に調整コイルを設置している。伝送距離  $D$  は 110~1000mm とし、コイル間の距離を変化させることで伝送効率を計測した。計測結果を図 16 に示す。また、計測で使用した共鳴コイルの共振周波数は 10.74MHz とした。

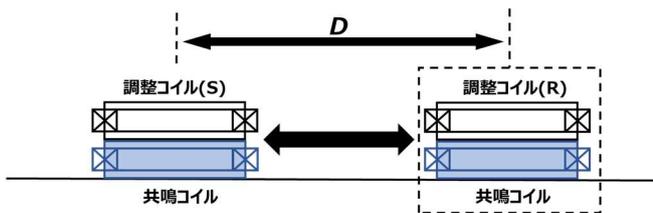


図 15 HOPPING (0 HOP)の実験系

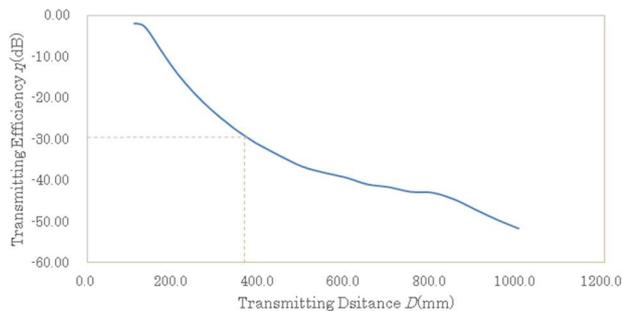


図 16 0 HOP の計測結果

図 16 より、 $-30\text{dB}$  の効率は  $D=350\text{mm}$  程度に止まっていることがわかった。目標である  $1\text{m}$  では効率が  $-50\text{dB}$  程度となり、HEMS 仕様を満足していない。

#### 4.1.2 1 HOP

そこで、図 17 に示すように共鳴コイルを 1 つ挿入すること(1 HOP)で、伝送距離の改善を試みた。伝送距離  $D$  は 220~1000mm とし、挿入した共鳴コイルは伝送距離の中間位置にコイルの中心がくるように設置し計測を行った。また、新たに挿入した共鳴コイルの共振周波数もほかの共鳴コイルと同様に 10.74MHz としている。図 18 に計測結果を示し、0 HOP と 1 HOP の比較を図 19 に示す。

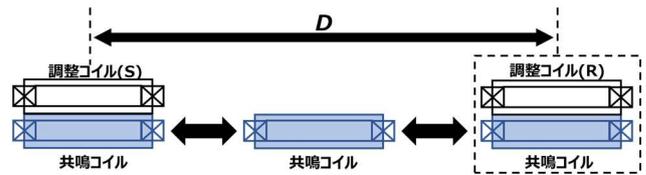
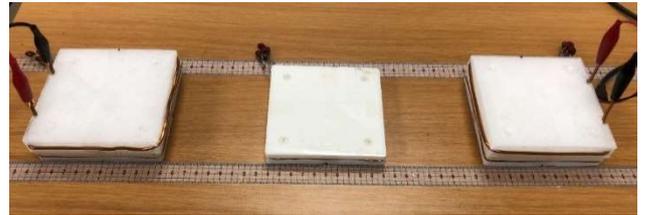


図 17 HOPPING(1HOP)の実験系

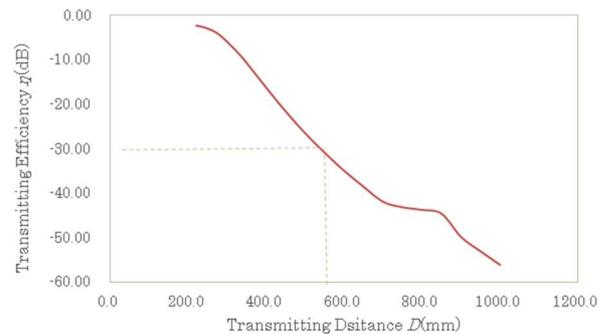


図 18 HOPPING(1HOP)の計測結果

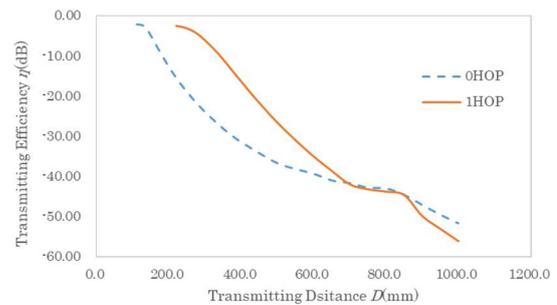


図 19 0HOP と 1HOP の結果比較

図 19 より共鳴コイルを挿入することで、伝送可能距離が 350mm から 550mm までおよそ 200mm 伸びていることを確認することができた。これにより、共鳴コイルを送受信コイル間に中継コイルとして設置することで伝送距離の改善が見込めることがわかった。

#### 4.1.3 FULL HOP

4.1.2 節の結果より、目標である 1m 伝送に対しては 1HOP でも半分程度しか到達していないことがわかった。そこで、図 20 に示す実験モデルのように、中継用の共鳴コイルを敷き詰めることで伝送距離を大きくする方法により、目標達成が可能であるかの確認を行った。現在、製作している共鳴コイル数は 4 個であるため中継コイルを 2 個用いて配列可能な距離として、330mm までの伝送効率を計測した。図 20 に示す(1)、(2)(中継コイル 1 個挿入)、(3)(中継コイル 2 個挿入)の位置での伝送効率をプロットし、コイルを敷き詰めた場合における伝送効率結果を得た。伝送効率計測結果を図 21 に示す。

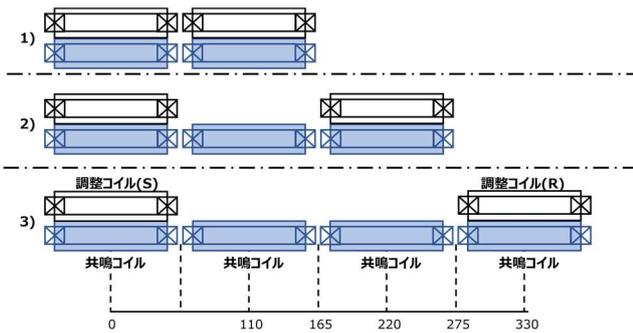


図 20 共鳴コイル敷き詰めによる伝送効率実験モデル



図 21 共鳴コイル敷き詰めによる伝送効率計測実験結果

図 21 より共鳴コイルを敷き詰め、調整コイルを両端に設置した場合の電力伝送効率は伝送距離が大きくなって、ほとんど減衰することなく高い伝送効率を維持することを確認できた。

## 4.2 スコープ無線電力伝送

従来のホッピング無線電力伝送では、共鳴・調整コイルを 1 組として扱い電力伝送を行った。しかし、実際に HEMS に対し床下伝送により電力伝送することを考慮した場合、どこまで電力を伝送することができるのか、伝送距離を延長したい場合どこに中継器を設置すればよいのかなどの運用面の煩雑性が問題としてある。そこで、図 22 のように最大送信距離を規定し、その範囲内ならどこに受信調整コイル(R)を設置しても所望の電力が得られることを想定した方式を最大伝送距離の規定という意味で、“スコープ無線電力伝送”と称する。この際、共鳴コイルは床下固定とし、調整コイルのみを可動としている点が重要である。これより、ユーザの受電機器(コイルを埋め込む側)は共振コイル設計の煩雑性から開放されることになり、普及効果を促す。受電点を任意の場所に設定した場合でも、-30dB 以上の伝送効率を保証する必要がある。計測距離(スコープ距離)を一定に固定し、その両端に共鳴コイルを設置しその間に  $n$  個の共鳴コイルを挿入し、調整コイル(S)を固定して受電部の調整コイル(R)のみを移動させ伝送効率測定を行った。以下に測定系並びにそれぞれの結果を示す。

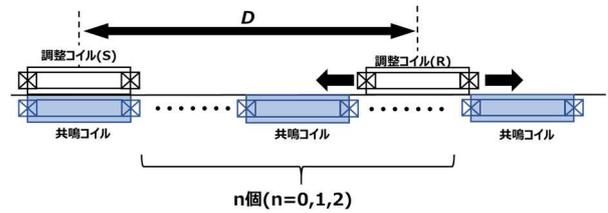


図 22 スコープ無線電力伝送の実験系

### 4.2.1 スコープ端に共鳴コイルを設置する伝送

今回、スコープ距離  $D$  を 330mm に固定し図 23 のようにコイルを配置し、計測を行った。計測結果を図 24 に示す。

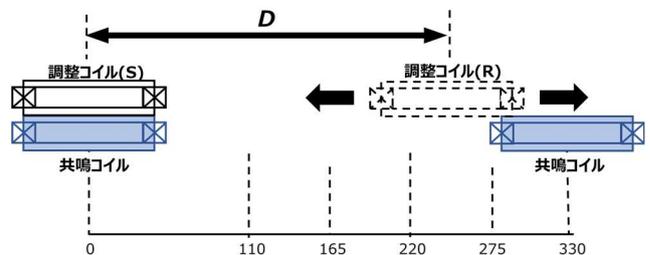


図 23 スコープ方式実験系モデル(n=0)

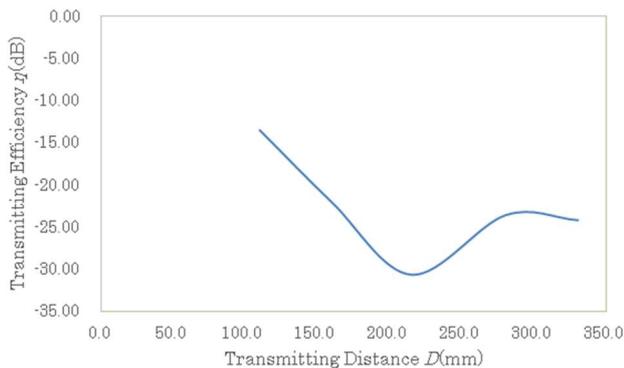


図 24 スコープ方式(n=0)計測結果

図 24 より  $D=220\text{mm}$  近傍では、 $-30\text{dB}$  以上の伝送効率を維持することができていない結果となった。

#### 4.2.2 中間に共鳴コイルを設置する伝送

4.1.2 節の結果より、ホッピング無線電力伝送の際、中間距離に共鳴コイルを設置することで伝送効率が改善されたので、同様の計測系を用いて伝送効率改善を試みた。図 25 に示すように  $165\text{mm}$  の位置に共鳴コイルを設置し伝送効率実験を行った。図 26 に計測結果を示す。

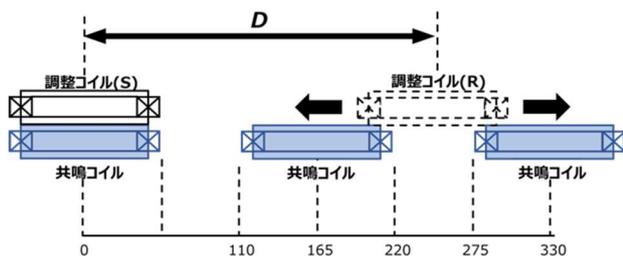


図 25 スコープ方式(n=1)式実験系

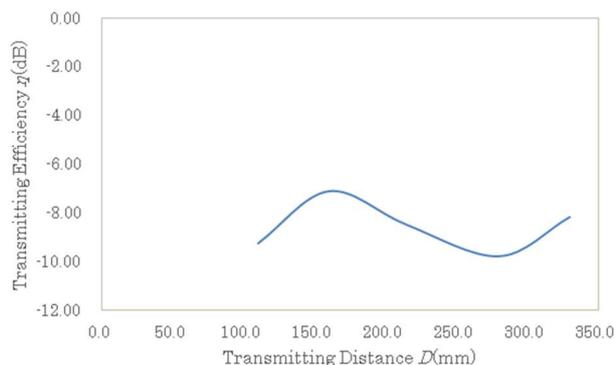


図 26 スコープ方式(n=1)計測結果

図 26 より、全領域において 4.2.1 節の結果より伝送効率が改善され、 $-30\text{dB}$  以上の伝送効率を維持できる結果となった。

#### 4.2.3 スコープ領域全体にわたって共鳴コイルを設置する伝送

4.1.3 節の結果より、送受信間に共鳴コイルを敷き詰めることで伝送効率が改善される結果を得ることができた。スコープ方式においても同様の結果を得ることができると考え、共鳴コイルを敷き詰めた場合におけるスコープ方式の伝送効率計測実験を行った。スコープ距離  $D$  を  $330\text{mm}$  とし、図 27 のように共鳴コイル敷き詰めた。 $n=0$ 、 $n=1$  の測定結果と共に本測定結果を図 28 に示す。

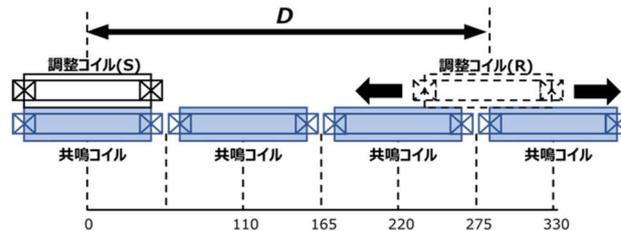


図 27 スコープ方式(n=2)実験系

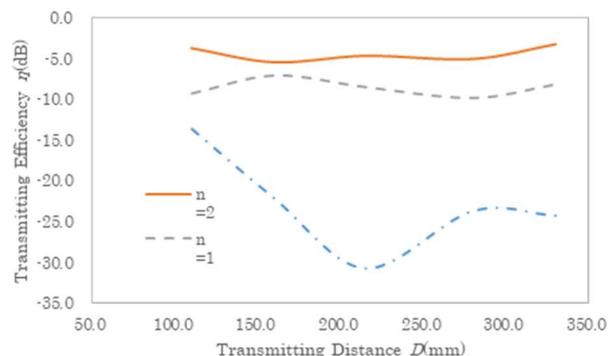


図 28 スコープ方式(n=2)計測結果

図 28 より全計測点において  $-30\text{dB}$  以上の伝送効率を維持することが可能であることが確認できた。この伝送効率は  $n=1$  でも達成されているが、図 28 に示すように  $n=0$ 、1、2 個それぞれの伝送効率を比較した場合、共鳴コイルの挿入数の増加により、 $n=0$  に対して  $n=1$  は  $24\text{dB}$ 、 $n=1$  に対して  $n=2$  は  $4\text{dB}$  程度伝送効率が改善されていることがわかった。

これらのことから、伝送系における共鳴コイルの敷き詰め方式は、伝送効率向上にとっても有効な方法であることがわかった。

### 4.3 HEMS 仕様を満たすスコープ無線電力伝送スケールモデル実験

#### 4.3.1 スケールモデルによる電力伝送効率実験

共鳴コイルを敷き詰めることによって全計測点で、 $-30\text{dB}$  以上の伝送効率を確保することは図 28 より確認する

ことができた。また、スコープ方式においても FULLHOP による伝送効率改善効果があることも確認できた。しかし、目標である伝送距離 1m において、実際にどの程度伝送効率を確保することができるのかという点についてはわかっていない。その一方、現地点で実際 1m までの伝送実験を行う測定系は完成していない。そこで、実際に 1m の伝送を行うのではなく受電コイルを 1/3 の大きさに変更することで、1/3 スケールモデルとして扱い伝送効率計測を行った。図 29 に実験系を示す。また、送受電コイルの一边を 35mm とし、コイルの太さは今までのものと同様の  $\phi$  1.6mm とした。また、調整コイルの一边は今までと同様に 100mm、コイル太さは  $\phi$  1.0mm とした。図 30 に計測結果を示す。

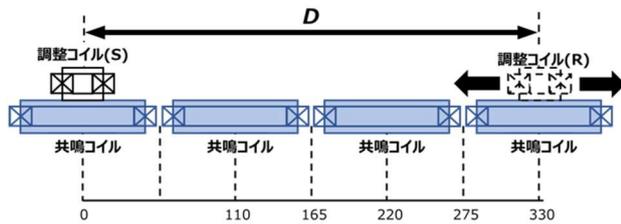


図 29 1/3 スケールモデル実験系

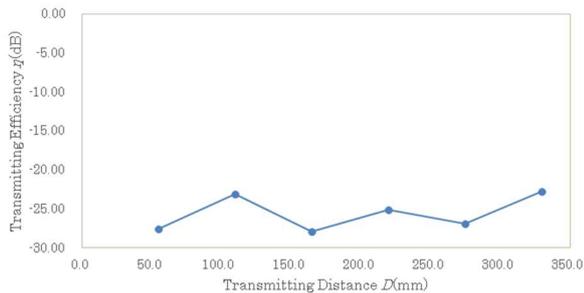


図 30 1/3 スケールモデル計測結果

図 30 の計測結果より、実際に使用するモデルスケールにおいても、全計測点で  $-30\text{dB}$  以上を維持することが可能であることが確認できた。このことから、1m の伝送効率においても  $-30\text{dB}$  以上を満足すると考えられる。

#### 4.3.2 HFSS によるスケールモデル計算

前節に述べた通り、現在 1m の伝送系を用いた実験を行うことが実施することができないため、シミュレーションにより計算を行った。しかし、1m の伝送距離に対する解析領域が大きすぎるためシミュレーションに使用している現有パソコンのメモリでは対応することができなくなったため、シミュレーションにおいても 1/3 モデルを作成し計算を行った。シミュレーションモデルを図 31、32 に示し、シミュレーション結果を図 33 に示す。

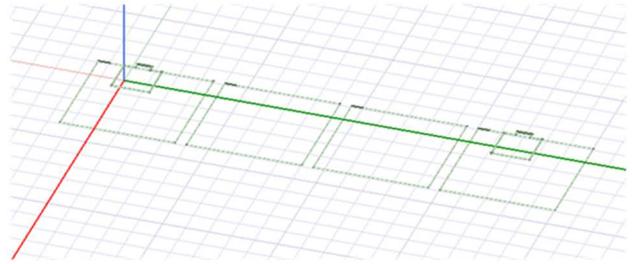


図 31 1/3 スケールモデル(斜方射影)

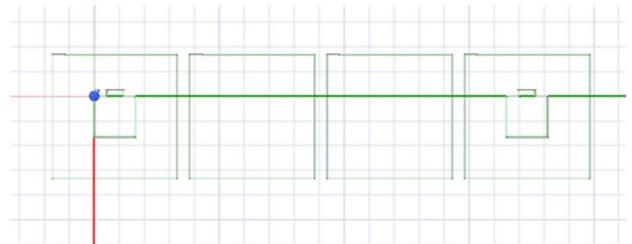


図 32 1/3 スケールモデル(上面投影)

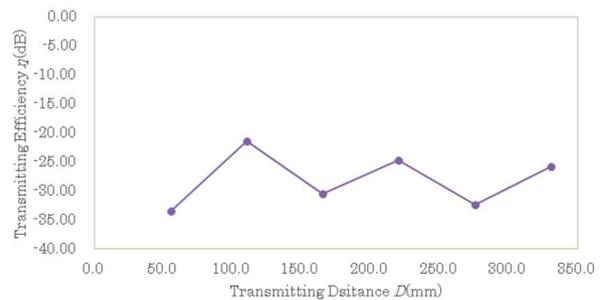


図 33 1/3 スケールモデル計算結果

図 34 に計測と計算の比較結果を示す。

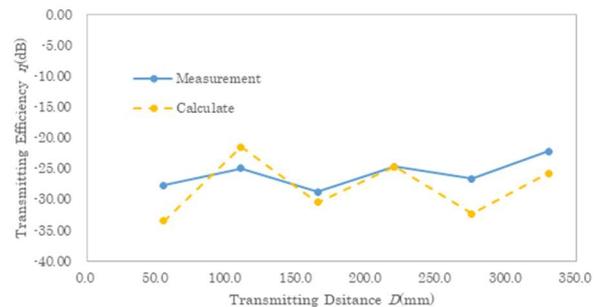


図 34 1/3 スケールモデル比較結果

図 34 より、波形が一致していることや伝送効率結果が近いことから計算と測定では大きな差はないとわかった。しかし、275mm の地点では約 7dB 程度の差があることも確認できる。これは、HFSS で解析の際に設けるメッシュの数が少ないため発生する誤差や、解析と測定との環境の

違いによるものであると考えている。今後、これらの課題を解決するため、解析の際のパラメータ設定を見直す必要がある。

#### 4.4 考察

図 19 に示す共鳴コイルによる伝送効率測定結果と図 27 のように敷き詰めた場合の周波数特性について 2 つの考察を行う。

(1) 効率クロスポイントの存在と密配列の有効性について

図 19 に示す測定結果について考える。伝送経路内に共鳴コイルを設置することで伝送効率の改善を確認することができたが、伝送距離が大きくなると伝送効率が低下している。この原因について考察を行うにあたり、伝送効率  $\eta$  を(5)式のように仮定する。 $k$  は結合係数、 $L$  は伝送距離、 $\alpha$  は減衰係数をそれぞれ示している。

$$\eta \propto k \propto L^{-\alpha} \quad (5)$$

1 区間当たり長さ  $L_0$  の伝送効率を  $\eta_0$  とした場合、図 35 中段のような伝送系の伝送距離を  $N$  倍(図 35 では  $N=2$ )としたときの伝送効率  $\eta_1$  は (6)式のように表すことができる。

$$\eta_1 = \left(\frac{NL}{L}\right)^{-\alpha} \eta_0 = N^{-\alpha} \eta_0 \quad (6)$$

また、1 区画の  $N$  倍の伝送距離を考えた場合、図 35 下段のように中間に共鳴コイルを設置した場合の伝送効率  $\eta_2$  は(7)式のように表すことができる。

$$\eta_2 = \eta_0^N \quad (7)$$

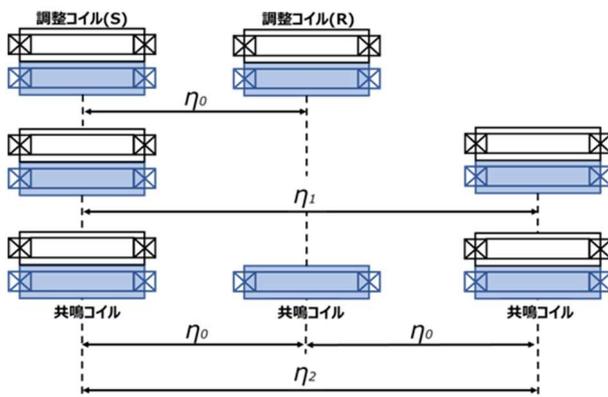


図 35 距離における伝送効率

(6)、(7)式をグラフにしたものを図 36 に示す。図 36 に示すように伝送距離が増加すると伝送効率が減衰していることがわかる。また、1 区間の伝送距離が増加することに

より  $\eta_1$  と  $\eta_2$  が逆転することも確認できる。

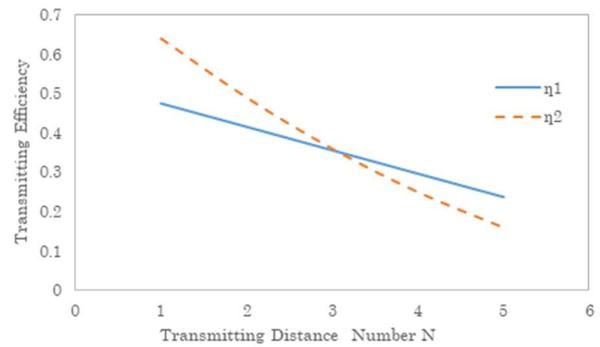


図 36 (6)、(7)式計算結果比較

$\eta_1$  と  $\eta_2$  が交差するとき、 $\eta_1 = \eta_2$  となる。(6)、(7)式を用いると(8)式のように示すことができる。

$$\begin{aligned} N^{-\alpha} \eta_0 &= \eta_0^N \\ N^{-\alpha} &= \eta_0^{(N-1)} \quad (8) \end{aligned}$$

(8)式より、 $N^{-\alpha} > \eta_0^{(N-1)}$  のとき  $\eta_1 > \eta_2$  となり  $N^{-\alpha} < \eta_0^{(N-1)}$  のとき  $\eta_1 < \eta_2$  となる。

(2) 共振周波数の遷移について

図 27 に示すような伝送系の周波数特性について考える。図 27 に示す伝送系はユーザが伝送経路内でどこでも電力を受電するための実験である。また、磁界共鳴方式では周波数によって伝送効率が増減するため周波数を一定値に固定した場合、伝送効率が減衰する可能性がある。そこで、図 27 に示す伝送系の各距離における周波数特性を確認することにより、実用性について考察を行う。図 37 に各距離の周波数特性を示す。

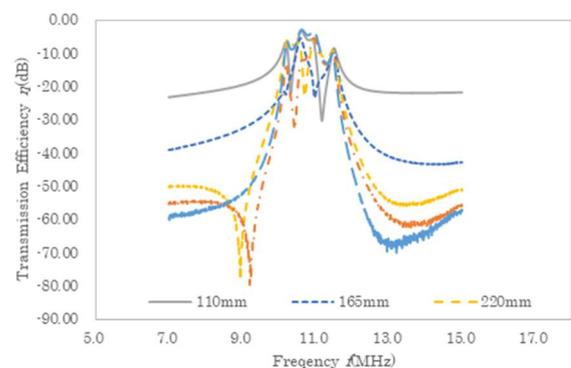


図 37 スコープ無線電力伝送方式の周波数特性

図 39 より、10~11.5MHz の帯域内で -30dB 以上の高効率伝送が可能であることがわかった。そのため、周波数を 11MHz 近傍で固定して電力伝送を行うことで領域内のい

かなる点においても、電力伝送効率を維持できることが確認できた。

## 5. 結論

本研究では、HEMS の無線電力伝送を成立させるための方式検討を行った。従来行われていた垂直型の電力伝送方式を水平型の電力伝送とすることが望ましいと考えられたため、評価用の治具(CMMU)を3Dプリンタより作成し、基礎特性を行うことで治具を用いた実験の妥当性を証明した。次に、送受信コイルの1対による伝送では、十分な高効率特性が得られないため、高効率な水平電力伝送方式を検討するに至った。

HEMS の電力伝送仕様は1mの距離で伝送効率-30dB以上であるので、次の2つの伝送方式の実現可能性について評価を行った。1つ目はホッピング無線電力伝送方式である。そしてもう一つは、スコープ無線電力伝送方式である。

ホッピング無線電力伝送方式では1mの伝送距離に対し、共鳴コイルを中間距離の地点に1個入れた場合と、入れなかった場合の2種類の測定を行った。その結果、共鳴コイルを挿入しない場合、-30dBを達成することができたのは350mm程度であった。共鳴コイルを1個中間位置に設置することで、550mm程度まで伝送することが可能になり、200mm程度の伝送可能距離改善が確認できた。しかし、目標である1mまで半分程度しか達成していないため、共鳴コイルを敷き詰めることによる伝送効率改善を試み、配列可能である330mmまでの伝送効率測定を行った。その結果、ほとんど減衰することなく330mm地点で-3dB程度の伝送効率を得た。これらの結果より、送受信コイル間に共鳴コイルを敷き詰めることで伝送特性の飛躍的な改善が得られることを見出した。

ホッピング無線電力伝送方式では、ホッピングの端点に送受信コイルを設置する必要があるため、伝送距離の変化に応じて設置側の共鳴コイルの位置を設定し直す必要があった。そこで、スコープ無線電力伝送方式を考案した。スコープ無線電力伝送方式は送受信最遠点を決め、その間(スコープ範囲内)では、どこに受電コイルを置いても所望の電力を受電できるというものである。

スコープ無線電力伝送方式においても、ホッピング方式と同様に共鳴コイルを0個と1個中間位置に敷き詰めた場合の伝送効率測定を行った。0個の場合、スコープ距離が220mm近傍で-30dB以下の伝送効率結果となった。共鳴コイルを1個中間位置に挿入した場合は、全領域において-10dB以上の伝送効率結果を得ることができた。また、ホッピング無線電力伝送方式の際、共鳴コイル敷き詰めによる伝送効率改善効果についてわかっていたため、スコー

プ無線電力伝送方式においても同様の実験系を用いて測定を行った。その結果、全領域にわたって-6dB以上の伝送効率を得ることができた。

最後に、HEMSに対応した1mでの電力伝送特性を検証するため、1/3スケールモデルを製作し、伝送効率測定を行った。その結果、全領域において-30dB以上の伝送効率となることを確認した。また、各領域において伝送の際の周波数特性を確認したところ、約10~11MHzの1MHzの間にピークが存在しており、この領域内の周波数を固定して送受信が可能であるとの見通しを得た。

以上の結果より、HEMSにおいて水平配置のスコープ電力伝送方式は十分適用可能であるとの結論に至った。

## 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, 第5号, pp.33-39, 2011.
- [2] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(委託先)沖電気工業株式会社, 省エネルギー革新技术開発ハーベスティング HEMS の事前研究, 平成22年2月.
- [3] Marin Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonance", Science Express, Vol.317, pp.83-85, 2007.
- [4] 居村岳広, 堀洋一, "ワイヤレス電力伝送と電気自動車により実現される未来の交通社会", 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, Vol.25, pp.19-24, 2013.
- [5] "移動体へのワイヤレス電力伝送を高効率で実現ロボットアームなどの回転体にも適応可能" (2019年11月7日参照), <https://product.tdk.com/info/ja/techlibrary/developing/wireless/index.html>.
- [6] Takashi Yoshikawa, Ikuo Awai, "A Novel Design for HEMS consisting of Sensor Network Nodes with Energy Harvesting and Wireless Power Transmission", AIEM, Vol.2, No.1, PP.11-15, 2012.
- [7] 吉川隆, 更谷翔太, "HEMS Assisted by a Sensor Network Having an Efficient Wireless Power Supply", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.49, pp.974-977, 2013.
- [8] 「WIPL-D Pro 高次基底関数モーメント法電磁界シミュレーター」, <http://www.wipl-d.jp/>, (2019年11月7日参照).
- [9] 「[高周波 3次元電磁界解析ソフトウェア]ANSYS@HFSS<sup>TM</sup>」, <https://www.cybernet.co.jp/ansys/product/lineup/hfss/> (2019年11月7日参照).