

# 部屋全域への無線電力伝送に向けた マルチモード準静空洞共振器

笹谷 拓也<sup>1,2,a)</sup> 川原 圭博<sup>1,b)</sup>

概要：広い空間全域における無線での電力のやり取りが可能になると、IoT 技術は電源の制約から解放され、半永久的に電池が切れないセンサネットワークや、部屋にいただけで勝手に充電されるウェアラブル/モバイル/インプラント機器などが実現すると考えられる。一方、従来の無線電力伝送は充電パッドなどの二次元状の給電領域を構成するものが主であり、ユーザが意識的に領域内に機器を置くことを前提とする。これに対し、準静空洞共振器 (QSCR: Quasistatic Cavity Resonator) という構造は空間内に三次元状に分布する磁界を生成できることからユビキタスな無線電力伝送への応用が期待されている。しかし従来の QSCR は部屋の中央に導体棒を要することや、部屋の中央から離れるにつれて給電効率が著しく低下するといった課題が存在する。これらの課題を解決するために、我々は複数のモードを持つマルチモード準静空洞共振器 (Multimode QSCR) 構造を提案し、導体棒無しでの運用や、部屋内のあらゆる位置における高効率な給電が可能であることをシミュレーションにより示した。本稿では部屋スケール (3 m × 3 m × 2 m) の Multimode QSCR を実装した後、部屋全域において小型の受電器に対し高効率で給電できることを実測により示し、IoT システムへの応用について議論した。

キーワード：無線電力伝送，センサネットワーク

## 1. はじめに

Internet of Things (IoT) の発展にともない、インターフェース、センサ、アクチュエータなど様々な機能が組み込まれた計算ノードが増えつつある [1], [18]。現在これらの機器の大多数へのエネルギー供給は電池や電源ケーブルにより行われているが、電池交換のコストや物理配線の煩雑さは機器の数とともに増加する。そのため、多数の機器への自律的なエネルギー供給技術は、身の回りの全てのモノが計算ノードとなる、究極の IoT の実現に向けたキー技術になると考えられる [2], [31]。

これに対し我々は無線電力伝送技術を用いることで、従来はコンセントなどの特定の箇所からのみアクセスが可能だった「電力」を、無線通信における「情報」のように、空間内のあらゆる箇所から簡単にアクセス出来るものに変えることを目指している。考えられるアプローチの一つとして、 $\mu\text{W}$  オーダーの超低消費電力計算ノードを、マイクロ波を用いた無線電力伝送やエネルギーハーベスティングにより駆動する手法がある [19], [22]。この方法は障害物が無

い環境において、UHF 帯の RFID のように最小限の機能を有する計算ノードを駆動するには有用だが、電力効率や安全性などの観点から伝送できる電力が小さく、ノードの機能は厳しく制限される。一方、電気自動車の充電などへの応用が期待されている磁界を用いた無線電力伝送技術 (電磁誘導方式、磁界共振結合方式、等) は、安全に大電力を送れることが知られているものの、伝送距離が短かさから、広い空間をカバーすることは難しい。このように、多くの障害物が存在する広い室内環境において、様々な機能を有する計算ノードに自律的かつ安全に電力が供給されるような、ユビキタスな無線電力伝送の実現は長らく難しいとされてきた [3], [7]。現在工場や病院、住宅といった様々な室内環境に IoT 機器が浸透しつつあることを考慮すると、これは IoT 技術の大きな枷になると考えられる。

近年発表された準静空洞共振器 (QSCR: Quasistatic Cavity Resonator) という部屋スケールの共振器構造は、共振器内に三次元状に分布する近傍磁界を生成できることから、ユビキタスな無線電力伝送への応用が期待されている [4], [23], [24]。しかし従来の QSCR は部屋の中央に導体棒を要することや、部屋の中央から離れるにつれて給電効率が著しく低下するといった課題が存在する。これらの課題を解決するために、我々は複数のモードを有するマル

<sup>1</sup> 東京大学/The University of Tokyo

<sup>2</sup> 日本学術振興会特別研究員 DC/JSPS Research Fellow

a) sasatani@akg.t.u-tokyo.ac.jp

b) kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

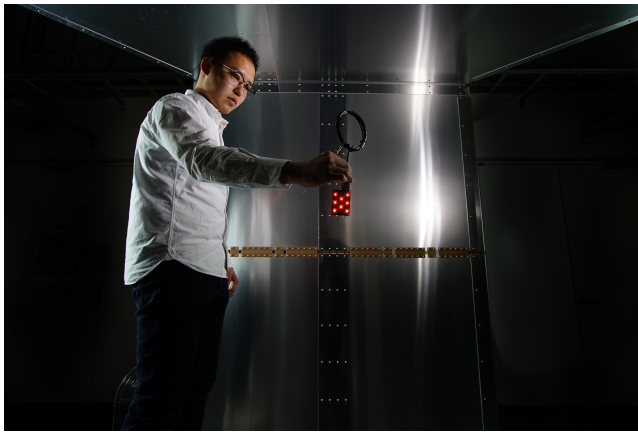


図 1 マルチモード準静空洞共振器による、LED アレイへの無線電力伝送。コイル状の受信器を通じて電力を受信している。

Fig. 1 Wireless power transfer to an LED array based on multimode QSCR. The power is received via the coil-shaped receiver.

チモード準静空洞共振器 (Multimode QSCR) を提案した。そして、(a) 導体棒無しでの運用 (Pole-less 駆動) や、(b) 複数モードを使い分けることで部屋内のあらゆる位置へ高効率な給電を行う運用 (Dual-mode 駆動) の二つの運用方法が可能となることをシミュレーションにより示した [23]。QSCR と Multimode QSCR の特徴を表 1 に示す。

本稿では実際に部屋スケール (3 m × 3 m × 2 m) Multimode QSCR を実装した (図 1)。そして実測による給電効率の評価や実際の給電システムの構築、アプリケーションのプロトタイプの実装を通じ、IoT システムへの応用可能性を示した。

## 2. 関連研究

### 2.1 無線電力伝送における安全性

本項で議論するマイクロ波や磁界を用いた無線電力伝送の安全性に関する最も重要な指標として、比吸収率 (SAR: Specific Absorption Rate) が挙げられる [5]。SAR とは生体が電磁界・電磁波にさらされることによって吸収されるエネルギー量の時間平均値であり、この吸収される割合に関しては周波数依存性が存在する。国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) が策定した代表的な国際ガイドラインも SAR の値に基づいて規定されている [8]。ICNIRP のガイドラインにおける安全性の評価は以下の二段階に分かれている。

(i) **Basic restrictions:** 上記 SAR 等の生体に直接作用する要因に基づいて規定されている。生体内の SAR の実測は困難なので、実用上の指標として後述の Reference level が設定されている。

(ii) **Reference level:** 電磁界強度といった計測が容易な値に基づいて各周波数ごとに規定されている。実用上 Basic restrictions を超過する可能性が非常に低い

表 1 従来手法 (QSCR) と提案手法 (Multimode QSCR) の比較。  
Table 1 Comparison between prior work (QSCR) and proposed work (Multimode QSCR).

	従来手法 (QSCR)		提案手法 (Multimode QSCR)	
	PDモード		Pole-less駆動	Dual-mode駆動
誘電体の影響	○ 小さい		○ 小さい	○ 小さい
障害物	× 導体棒が必要		○ 導体棒不要	× 導体棒が必要
給電範囲	△ 3D, 中央		△ 3D, 壁周辺	○ 3D, 全域

値として設定されており、この Reference level を超過した場合は Basic restrictions に基づいた詳細な解析が必要になる。

QSCR に基づいた無線電力伝送システムの安全性については [4] にて論じられているため、本研究では直接取り扱わない。

### 2.2 マイクロ波を用いた無線電力伝送

マイクロ波を通じて電力を送る手法であり、理論上長い伝送距離が得られることが知られている [2], [3], [26]。本手法の基本原理は多くの無線通信 (Wi-Fi, Bluetooth, 等) と同様であり、送信アンテナが電磁波を放射し、受信アンテナがこれを電力として受信する。派生技術としてテレビ放送や無線通信に用いられる環境中の電磁波からエネルギーを取り出す RF エナジーハーベスティングが存在し、新たな設備を要さずに、空気中から数  $\mu\text{W}$  程度の電力を取り出せる可能性から注目されている [10], [13], [14], [19], [20]。

これらに共通して用いられる数 GHz 帯のマイクロ波は、送電電力に対する SAR の値が大きいため、安全性を考慮すると送電電力が厳しく限定される [33]。そのため、これらの手法を用いて人体が介在する環境で数 W 級の電力伝送を行うことは困難である。また近隣の周波数帯域において通信障害が生じるという報告 [9] があることや、高効率・高出力を得るためには大きなアンテナアレイを要すること、障害物の影響を受けやすいことから、本手法は超低消費電力な機器の駆動には向いているものの、本稿で目指すユビキタスな無線電力伝送には適さないと考えられる。

### 2.3 磁界を用いた無線電力伝送

磁界を通じて電力伝送を行う代表的な方式として、電磁誘導方式と磁界共振結合方式が存在する。Wireless Power Consortium (WPC) が提唱する Qi 規格にも用いられる電磁誘導方式は、送電コイルと受電コイルの間の磁気的な結合を通じて電力を伝送する手法で、伝送距離が小さい (数 mm から数 cm 程度) もの、高効率であることや、周囲の生体への影響が小さいことが知られている [30]。

磁界共振結合方式は電磁誘導方式の送受電コイルにコンデンサを接続し、LC 共振回路とする方式であり、2007 年

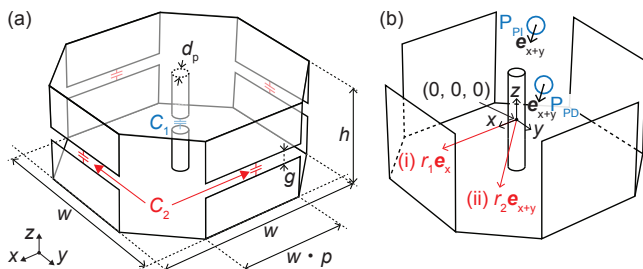


図 2 (a) Multimode QSCR の構造。PI モード単体で駆動するとき (Pole-less 駆動) は中央の導体棒は取り外して良い。(b) PD モード, PI モードを駆動するときの駆動コイルの設置位置 ( $P_{PI}, P_{PD}$ ) と, 図 6 の測定の際に受電器を動かした範囲 ( $r_1\vec{e}_x, r_2\vec{e}_{x+y}$ )。

Fig. 2 (a) Structure of multimode QSCR. When driving in the PI mode alone (Pole-less operation), the central pole may be removed. (b) The position of the drive coil when PD mode and PI mode are stimulated ( $r_1\vec{e}_x, r_2\vec{e}_{x+y}$ ), and the range ( $P_{PI}, P_{PD}$ ) in which the receiver was moved in the measurement shown in Figure 6.

表 2 図 2 の共振器構造のパラメータ。

Table 2 Parameters used in the structure shown in Fig. 2

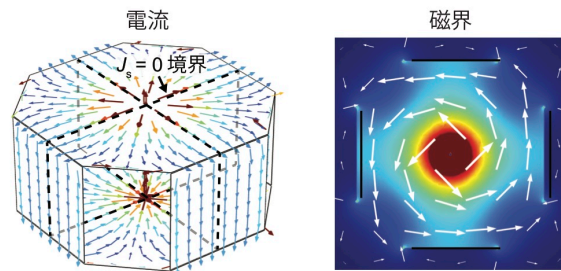
$w$	$h$	$g$	$d_p$	$p$	$C_1$	$C_2$
3 m	2 m	0.01 m	0.06 m	0.5	12.0 nF	23.5 nF

に MIT の研究グループが提唱した, [15], [21]. この手法は電磁誘導方式と同様に高効率・大出力が実現可能であることや安全性が高いことに加え, より大きな伝送距離が得られることや, 送受電器間の位置ずれに強いという特徴を有する [5], [16], [29]. しかし, 得られる伝送距離は高々送受電器の直径程度あることや, 送受電器のサイズ比が大きい場合 (大きな送電器と小さな受電器など) に給電効率が小さくなることから, ある一点上に配置されている機器の充電には適するものの, 広い三次元状の空間をカバーすることは難しい。

この点状の給電領域を二次元の面に拡張するためには, 送電器を平面状に敷き詰め, 二次元送電器アレイを構成する方法が考えられる [11], [17], [25]. この二次元送電器アレイの設置を容易にすることで, 身の回りの平面 (机, 床, など) に無線電力伝送の機能を付加するアプローチも模索されてきたが, 三次元空間への拡張は長らく課題であった [27], [28].

磁界共振結合方式を三次元空間へ拡張するアプローチとして 2017 年に発表された準静空洞共振器 (QSCR: Quasi-static Cavity Resonator) は空間内に三次元状に分布する近傍磁界を生成できることから, ユビキタスな無線電力伝送への応用が期待されている. QSCR は金属板により構成された部屋大の箱の中央に, コンデンサが挿入された金属棒を接続した共振器構造であり, 電界をコンデンサに集中させたまま箱内に三次元状に分布する磁界を生成できる [4]. しかし従来の QSCR には, (i) 中央に巨大な導体棒

(a) Pole Dependent (PD) Mode



(b) Pole Independent (PI) Mode

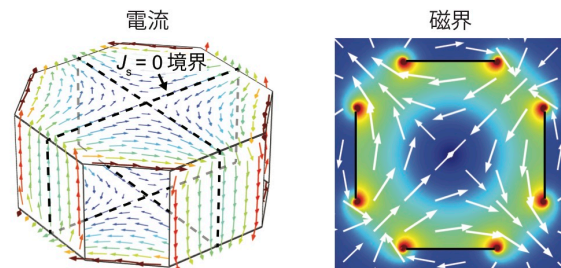


図 3 各モードの電流・磁界分布.  $J_s = 0$  境界は電流が交差しないため,  $J_s = 0$  で四分割した構造に基づいて解析を行う。

Fig. 3 Current and magnetic field distribution of each mode. Since the current does not cross the  $J_s = 0$  boundary, our analysis is based on the quartered structure divided by the  $J_s = 0$  boundary.

を要する, (ii) 中央の導体棒から離れると磁界強度が小さくなり, これにより給電効率が著しく低下する, という欠点がある。

### 3. Multimode/Pole-Less QSCR

#### 3.1 各モードの電流・磁界分布

QSCR の二つの欠点, (i) 中央に巨大な導体棒を要する, (ii) 中央の導体棒から離れると給電効率が著しく低下するに対し, 我々は Pole Dependent (PD) モードと Pole Independent (PI) モードという二つの共振モードを有するマルチモード準静空洞共振器 (Multimode QSCR) という共振器構造を提案した [23]. Multimode QSCR の構造を図 2 に, 各モードの電流・磁界強度分布を図 3 に示す. PD モードは従来の QSCR と似た磁界分布を持ち, PI モードは PD モードと相補的な磁界分布を示す上, 導体棒の有無に関わらず生じる. どちらのモードにおいても, 磁界の向き, 強度は  $z$  軸座標にほぼ依存しない. また, Multimode QSCR を用いた電力伝送の概念図を図 4 (a) に示す. 駆動コイルから Multimode QSCR の各モードの共振周波数に合わせて電力を入力すると共振が生じ, 励起されたモードによって図 3 に示した分布の磁界が空間内に発生する. そして発生した磁界を通じて受電コイルが電力を受け取り, 負荷に給電することで, 無線電力伝送が行われる。

PD モードと PI モードの二つの共振モードを活用することで, 以下の二つの運用方法が可能となる。

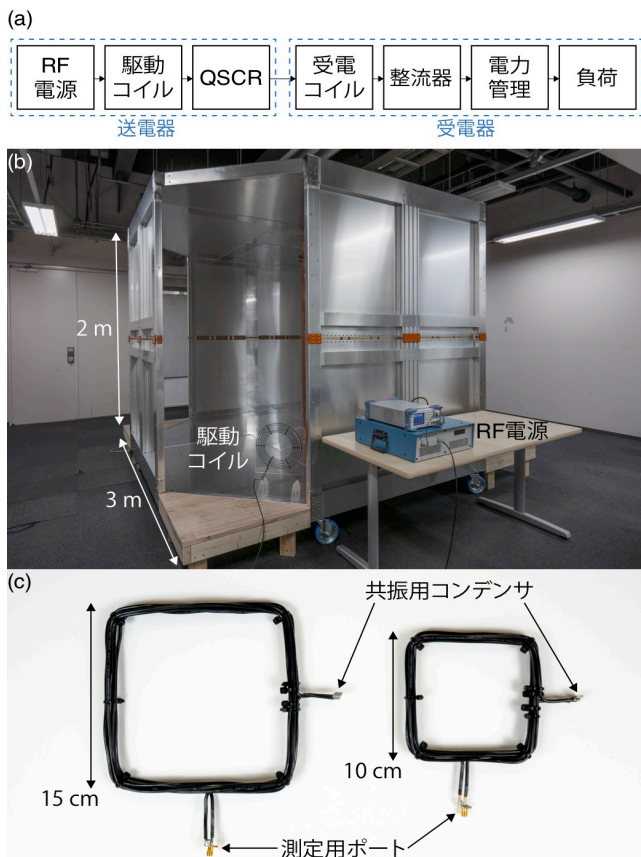


図 4 (a) システムの概要図. (b) 実装したマルチモード準静空洞共振器を用いた無線電力伝送システム. (c) 給電効率の測定に用いた受電コイル.

Fig. 4 (a) System overview. (b) Wireless power transfer system based on a multimode quasistatic cavity resonator. (c) Receiver coils used in efficiency measurements.

(A) Pole-less 駆動: PI モード単体による中央の導体棒を用いない運用.

(B) Dual-mode 駆動: 二つのモードを受電器の位置に応じて使い分けることで空間全域に対し高効率に電力を伝送する運用.

およびそしてこれら (A)(B) の運用により, 上記 (i)(ii) の問題をそれぞれ解決できる.

### 3.2 各モードの周波数の設定および制御・駆動方法

次に, 二つのモードが有する共振周波数  $\omega_{PD}, \omega_{PI}$  の設定方法を検討する. インダクタンス  $L$  とキャパシタンス  $C$  によって構成される典型的な  $LC$  共振器の角共振周波数  $\omega_0$  は以下の式によって与えられるが, この式に則った解析を行うために, 提案構造も等価的なインダクタンス  $L$  およびキャパシタンス  $C$  を有するとする.

$$2\pi f_0 = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

本研究においてキャパシタンス  $C$  は集中素子で実装されるため, 各コンデンサの値により容易に設定出来る. これに対し, インダクタンス  $L$  は構造上を流れる電流が保有

する磁気エネルギーによるため構造に固有の値となるが, Multimode QSCR では電流が面状に分布・分岐して流れるため, インピーダンス解析などの一般的な方法でインダクタンスを求めることが出来ない. そこで, 有限要素法に基づいた解析により, 構造が有する等価的なインダクタンスの解析方法を検討する. まず, 面上を流れる電流  $J_s$  が, 図 3 に示した  $J_s = 0$  境界を流れない点に着目する. PD モードでは壁-天井-柱-床-壁の経路に, PI モードでは壁-天井-壁-床-壁の経路に電流が流れるが, 両方の経路において  $J_s = 0$  境界を電流が交差ししない. そのため, Multimode QSCR に流れる電流は,  $J_s = 0$  境界によって区切られた, 4 個の独立したループ電流として扱うことが出来る. したがって, 単一のループ電流が有する磁気エネルギー  $w_m$  は, 構造の対称性から, 全構造が有する磁気エネルギーの  $1/4$  となる. そこでまずコンデンサの値を仮定し, 有限要素法により構造が持つ全磁気エネルギー  $\alpha$ , および単位ループの電流  $I$  を求めると, インダクタが蓄える磁気エネルギーを表す式 2 から, 単位ループの等価的なインダクタンスを求めることが出来ると考えられる.

$$\frac{\alpha}{4} = w_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2)$$

$$\alpha = 4w_m = \iiint_V \left( \mu_0 \frac{|\vec{H}|^2}{2} \right) dV \quad (3)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C \cdot \frac{2w_m}{I^2}}} = \frac{1}{\sqrt{C \cdot \frac{\alpha}{2I^2}}} \quad (4)$$

$w_m$  と  $I$  は両方とも有限要素法の解析により算出できるため, 構造に固有の値である等価インダクタンス  $L$  が求まる. そして得られた  $L$  と式 1 からコンデンサの値を算出することで, 共振周波数  $\omega_0$  が自由に設定できる.

図 2 に示したコンデンサの挿入位置と, 図 3 に示したループ電流の経路から PD モード, PI モードの各单位電流ループに挿入されたコンデンサの値は以下ようになる.

$$C_{PD} = \frac{C_1 C_2}{2C_1 + 4C_2} \quad (5)$$

$$C_{PI} = \frac{C_2}{8} \quad (6)$$

式 (4), (5) および (6) を使用することにより, 二つのモードの共振周波数を独立して設定することができる.

またこれらのモードを無線電力伝送に用いるためには, それぞれのモードを励起する必要がある. モードを励起する方法としては, 構造に直接電源を接続し, 電流を流す方法や, 外部の各モードに結合した駆動コイルから励起する方法などが考えられる. 本研究では簡単のために, 各モードに結合した駆動コイルを通じて各モードにエネルギーを入力する方法を用いた. 各モードを効率的に励起するためには, 各モードの強い磁界強度分布を示す部分に駆動コイルを設置する必要がある. そこで図 3 の磁界強度分布が

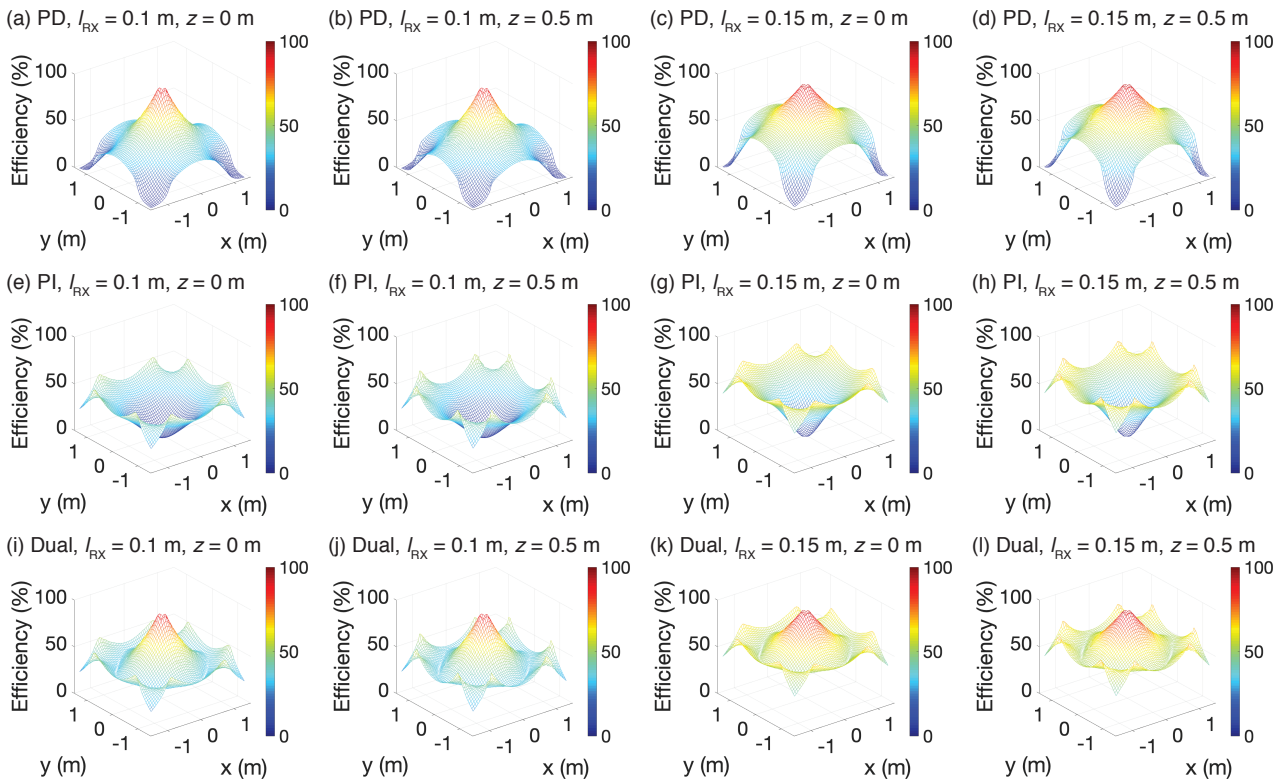


図 5  $x - y$  平面の各位置に受電器が置かれた際のシミュレーションによる給電効率の評価。

Fig. 5 The simulated transfer efficiency within the  $x - y$  plane.

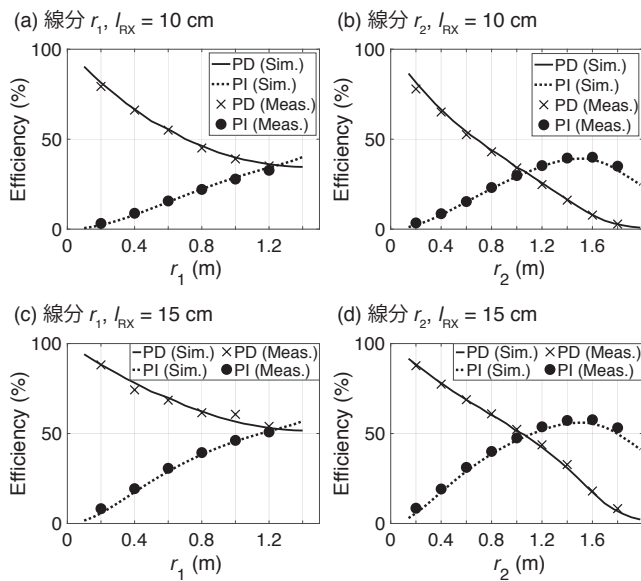


図 6 図 2(b) の線分 (i)(ii) 上の各点に受電器が置かれた際の給電効率の測定値。

Fig. 6 Measured transfer efficiency when the receiver was placed on each point within line (i)(ii) shown in Fig. 2(b).

ら、PD モード、PI モードについてそれぞれ、図 2 に示した位置  $P_{PD}$ 、 $P_{PI}$  に駆動コイルを設置した。

表 3 図 5 のシミュレーションで用いた回路パラメータ。

Table 3 Parameters used in the simulation shown in Fig. 5.

$Q_{PD}$	$Q_{PI}$	$Q_{10}$	$Q_{15}$	$L_{10}$	$L_{15}$
1230	615	230	236	7.1 $\mu$ H	13.1 $\mu$ H

### 3.3 部屋スケールの Multimode QSCR の実装

本研究で実装した Multimode QSCR を図 4 (b) に示す。床、壁、天井の金属板には厚さ 1 mm 以上のアルミ板を、導体棒には外径 60 mm の銅パイプを用い、金属板同士をねじで圧着することで各部品間の導電性を確保した。3.2 章に示した工程により、PD モードの共振周波数  $f_{PD}$  を 1.20 MHz に、PI モードの共振周波数  $f_{PI}$  を 1.34 MHz に設定した。PD モードと PI モードの Q 値は、VNA による測定で  $(Q_{PD,meas}, Q_{PI,meas}) = (1230, 615)$  となった [12]。

## 4. 給電効率の評価

本章で実装した multimode QSCR を用いた無線電力伝送における給電効率をシミュレーション及び実測により評価した。シミュレーションでは、結合モード理論 (CMT : Coupled Mode Theory) を用いた空間内の全域における給電効率の評価を行った [4], [6]。その後、代表点においてネットワークアナライザを用いた効率の実測を行い、シミュレーション妥当性を確認した。全ての評価において、負荷の値は効率が最大化される値とし、受電器は各地点の磁界に直交する向きに置いた [4], [32]。また、受電器につい

表 4 シミュレーションにより求めた、一辺 15 cm のコイルを用いた場合の空間内全体にわたる給電効率.

Table 4 The simulated transfer efficiency over the entire space using a 15 cm square coil.

	PD モード	PI モード	PD-PI 併用
最高効率	94.3 %	76.5%	94.3%
最低効率	1.0 %	1.7%	37.1%
平均効率	50.4%	46.7%	60.6%
効率 50%以上の位置	57.5%	52.4%	98.0%

表 5 シミュレーションにより求めた、一辺 10 cm のコイルを用いた場合の空間内全体にわたる給電効率.

Table 5 The simulated transfer efficiency over the entire space using a 10 cm square coil.

	PD モード	PI モード	PD-PI 併用
最高効率	90.7%	61.7%	90.7%
最低効率	0.3%	0.6%	21.2%
平均効率	35.7%	31.1%	44.8%
効率 30%以上の位置	66.0%	60.8%	99.2%

ては図 4(c) に示した、一辺 10 cm, 6 巻および一辺 15 cm, 6 巻のコイル型共振器を用いた. これらの受電器の Q 値およびインダクタンスを表 3 の  $Q_{10}$ ,  $Q_{15}$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{15}$  に示す.

#### 4.1 シミュレーションによる給電効率の評価

QSCR 内の 0.05 m 間隔の各空間格子点上 (図 2 上の座標で  $0.1 \text{ m} \leq |x, y| \leq 1.4 \text{ m}$ ,  $|z| \leq 0.9 \text{ m}$ ) に受電器が置かれた際の給電効率を評価した.

同じ共振周波数を持つ二つの共振器間の給電効率,  $G_{\max}$  は, 結合係数  $\kappa$ , 送受電共振器の Q 値 ( $Q_{\text{TX}}, Q_{\text{RX}}$ ) を用いることで式 7 から求まる [4].

$$G_{\max} = \frac{\chi}{(1 + \sqrt{1 + \chi})^2} \quad (7)$$

$$\chi = \frac{4|\kappa|^2 Q_{\text{TX}} Q_{\text{RX}}}{\omega_0^2} \quad (8)$$

結合係数  $\kappa$  は式 9 のように, 部屋大の送電器全体が有する磁気エネルギー  $\alpha$  (式 3) と受電器コイルに鎖交する磁束  $\beta$  から計算した [4], [6].

$$\kappa = \frac{\omega_0 \beta}{\sqrt{8L\alpha}} \quad (9)$$

$$\beta = \iint_A (\mu_0 \vec{H} \cdot \vec{n}) dA \quad (10)$$

送受電共振器の Q 値 ( $Q_{\text{TX}}, Q_{\text{RX}}$ ) は実測値である表 3 の値を使用した [12].

シミュレーションにより得られた空間内における最高効率, 最低効率, 平均効率, および 50%, 30%以上の効率が得られる格子点の割合を表 4, 5 に示す. 両モード併用の部分は, 各受電器の位置において, より効率の高いモードを選択して電力伝送を行った場合を示している. これらの表から, 導体棒を用いない構成 (PI モードのみ) において

も 50%程度の平均効率が得られることや, 両方のモードを用いることで空間内のほぼ全ての地点において 50%以上の給電効率を得ることがわかる.

#### 4.2 実測による給電効率の評価

シミュレーションによる評価の有効性の確認のため, 代表点においてネットワークアナライザを用いた給電効率の測定を行った. 測定の際には図 4(a)(b) に示すように, 外部の駆動コイル (直径 0.3 m, 6 巻) を用い, 電力を QSCR に入力した. 駆動コイルの位置は PD モード, PI モードについてそれぞれ, 図 2 に示す  $P_{\text{PD}}$  と  $P_{\text{PI}}$  とした. 受電器は, 図 2 上の (i) および (ii) に示した線上で, 磁束の向きの直行する向き (効率が最大化される角度) に配置した. 給電効率は, ネットワーク・アナライザを用いて得られた散乱行列 (S パラメータ) から算出した. 測定結果をシミュレーション結果とともに図 6 に示す. シミュレーションによる結果と実測値はほぼ一致しており, シミュレーションの有効性が確認された.

### 5. アプリケーション

本研究が応用可能な領域として, (i) センサネットワークへの電力供給や, (ii) モバイル・インプラント機器の充電, (iii) 照明機器の無線化などが考えられる. 本項では (i)(ii) について議論し, 電池を要さないセンサノードと無線で動作する USB 充電器のプロトタイプを実装した.

#### 5.1 センサネットワークへの電力供給

工場, 病院, 一般家庭などにおいて無線で動作するセンサデバイスが普及しつつあるが, これらが増えるにしたがって電池交換のコストが増大し, 維持が困難になる. また, 現状では電池容量の制約に応じてこれらのセンサノードが設計されるため, 機能が制約されることや, 逐一消費電力を最適化するようなシステム設計が必須であることなどの問題が存在する.

本研究を用いて部屋内の空間全体にエネルギーを伝送することで, 低コストでかつ半永久的に動作するセンサネットワークの実現が可能になると考えられる. 本項ではこれを示すために, 図 7 に示す原始的なセンサノードを作成し, 電池を用いずに駆動できることを確認した.

#### 5.2 モバイル・インプラント機器の充電

スマートフォンや PC, 活動量計など, モバイル機器が無線で充電可能になることで, 電池切れの心配がなくなるだけでなく, 電池残量を意識しない生活が実現すると考えられる. 本項ではこの第一歩として, 無線で空間からエネルギーを受信し, USB 負荷に供給する無線の USB 充電器のプロトタイプを作成した (図 7) そして作成した無線の USB 充電器を用いることで, スマートフォンの充電が可能



図 7 実装したアプリケーションのプロトタイプ。

Fig. 7 Prototype implementations of potential applications.

であることを確認した。

更に、本研究を用いることで食器などの日常的に水に触れるものや、土中の機器、さらには身体の中までもが電力にアクセス可能な領域となるため、日常的なモノの内部や生体内など、従来までは計算ノードの設置が困難であった領域へもネットワークが拡張できると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では部屋全域への無線電力伝送に向けた Multi-mode QSCR を提案・実装し、ユビキタスな無線電力伝送への応用について議論した。実測から、部屋（給電領域）の約 1/500 の面積の受電器に対して平均 50%以上の給電効率で給電できることや、効率が受電器位置の高さ方向に依存しないことが示され、ユビキタスな無線電力伝送への応用の可能性が示された。今後の課題は以下に挙げる。

### 6.1 複数の受電器への電力供給の最適化

無線電力伝送の効率は、本研究で検討を行った伝送路だけでなく電源回路や電力変換回路の制御手法に大きく依存することが知られている。本研究では電力変換部分の最適化は行っていないので、今後は電力効率を最大化するための制御機構や、複数の受電器への効率的な電力の配分手法を検討する。

### 6.2 安全性の詳細な検討

本研究で提案したシステムは [4] において安全性が検討されているシステムと類似しているため、本研究で提案した構造についての独自の検討は行わなかった。より多くの電力を送る場合や、実用化の際には、より詳細な安全性や電磁干渉性についての検討が必要となる。

謝辞 本研究を進めるに当たって多方面からの助言をくださった Alanson P. Sample さん、部屋スケールの共振器を建造するにあたり助言をくださった繁田亮さん、受電器の筐体を設計してくださった緒方壽人さん、建造に協力してくれた方々に感謝の意を表します。

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 (JP18J22537) および

JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G.: The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*, Vol. 54, No. 15, pp. 2787 – 2805 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010> (2010).
- [2] Bi, S., Ho, C. K. and Zhang, R.: Wireless powered communication: Opportunities and challenges, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53, No. 4, pp. 117–125 (online), DOI: 10.1109/MCOM.2015.7081084 (2015).
- [3] Brown, W. C.: The history of power transmission by radio waves, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 32, No. 9, pp. 1230–1242 (online), DOI: 10.1109/TMTT.1984.1132833 (1984).
- [4] Chabalko, M. J., Shahmohammadi, M. and Sample, A. P.: Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer, *PLoS ONE*, Vol. 12, No. 2, p. e0169045 (online), DOI: 10.1371/journal.pone.0169045 (2017).
- [5] Christ, A., Douglas, M. G., Roman, J. M., Cooper, E. B., Sample, A. P., Waters, B. H., Smith, J. R. and Kuster, N.: Evaluation of wireless resonant power transfer systems with human electromagnetic exposure limits, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 55, No. 2, pp. 265–274 (online), DOI: 10.1109/TEMC.2012.2219870 (2013).
- [6] Haus, H. A. and Huang, W.: Coupled-mode theory, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 79, No. 10, pp. 1505–1518 (online), DOI: 10.1109/5.104225 (1991).
- [7] Hui, S. Y. R., Zhong, W. and Lee, C. K.: A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 9, pp. 4500–4511 (online), DOI: 10.1109/TPEL.2013.2249670 (2014).
- [8] ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, Vol. 74, No. 4, pp. 494–522 (1998).
- [9] Iyer, V., Bayati, E., Nandakumar, R., Majumdar, A. and Gollakota, S.: Charging a Smartphone Across a Room Using Lasers, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT)*, Vol. 1, No. 4, pp. 143:1–143:21 (online), DOI: 10.1145/3161163 (2018).
- [10] Jabbar, H., Song, Y. S. and Jeong, T. T.: RF energy harvesting system and circuits for charging of mo-

- bile devices, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 56, No. 1, pp. 247–253 (online), DOI: 10.1109/TCE.2010.5439152 (2010).
- [11] Jadidian, J. and Katabi, D.: Magnetic MIMO: How to Charge Your Phone in Your Pocket, *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 495–506 (online), DOI: 10.1145/2639108.2639130 (2014).
- [12] Kajfez, D. and Hwan, E. J.: Q-Factor Measurement with Network Analyzer, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 32, No. 7, pp. 666–670 (online), DOI: 10.1109/TMTT.1984.1132751 (1984).
- [13] Kellogg, B., Parks, A., Gollakota, S., Smith, J. R. and Wetherall, D.: Wi-fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-powered Devices, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 44, No. 4, pp. 607–618 (online), DOI: 10.1145/2740070.2626319 (2014).
- [14] Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A. and Tentzeris, M. M.: Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, No. 11, pp. 1649–1666 (online), DOI: 10.1109/JPROC.2014.2357031 (2014).
- [15] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P. and Soljačić, M.: Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, *science*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83–86 (2007).
- [16] Laakso, I., Tsuchida, S., Hirata, A. and Kamimura, Y.: Evaluation of SAR in a human body model due to wireless power transmission in the 10 MHz band, *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 57, No. 15, p. 4991 (online), DOI: 10.1088/0031-9155/57/15/4991 (2012).
- [17] Lang, H.-D., Ludwig, A. and Sarris, C. D.: Convex optimization of wireless power transfer systems with multiple transmitters, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 62, No. 9, pp. 4623–4636 (online), DOI: 10.1109/TAP.2014.2330584 (2014).
- [18] Li, X., Lu, R., Liang, X., Shen, X., Chen, J. and Lin, X.: Smart community: an internet of things application, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 11, pp. 68–75 (online), DOI: 10.1109/MCOM.2011.6069711 (2011).
- [19] Liu, V., Parks, A., Talla, V., Gollakota, S., Wetherall, D. and Smith, J. R.: Ambient backscatter: wireless communication out of thin air, *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Review*, Vol. 43, No. 4, pp. 39–50 (online), DOI: 10.1145/2534169.2486015 (2013).
- [20] Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D. I. and Han, Z.: Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 17, No. 2, pp. 757–789 (online), DOI: 10.1109/COMST.2014.2368999 (2015).
- [21] Ricketts, D. S., Chabalko, M. J. and Hillenius, A.: Experimental demonstration of the equivalence of inductive and strongly coupled magnetic resonance wireless power transfer, *Applied Physics Letters*, Vol. 102, No. 5, p. 053904 (online), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4788748> (2013).
- [22] Sample, A. P., Yeager, D. J., Powledge, P. S., Mamishev, A. V. and Smith, J. R.: Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 11, pp. 2608–2615 (online), DOI: 10.1109/TIM.2008.925019 (2008).
- [23] Sasatani, T., Chabalko, M. J., Kawahara, Y. and Sample, A. P.: Multimode Quasistatic Cavity Resonators for Wireless Power Transfer, *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, Vol. 16, pp. 2746–2749 (online), DOI: 10.1109/LAWP.2017.2744658 (2017).
- [24] Sasatani, T., Yang, C. J., Chabalko, M. J., Kawahara, Y. and Sample, A. P.: Room-Wide Wireless Charging and Load-Modulation Communication via Quasistatic Cavity Resonance, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 4, pp. 188:1–188:23 (online), DOI: 10.1145/3287066 (2018).
- [25] Sekitani, T., Takamiya, M., Noguchi, Y., Nakano, S., Kato, Y., Sakurai, T. and Someya, T.: A large-area wireless power-transmission sheet using printed organic transistors and plastic MEMS switches, *Nature materials*, Vol. 6, No. 6, p. 413 (online), DOI: doi:10.1038/nmat1903 (2007).
- [26] Shinohara, N.: Power without wires, *IEEE Microwave Magazine*, Vol. 12, No. 7, pp. S64–S73 (online), DOI: 10.1109/MMM.2011.942732 (2011).
- [27] Sumiya, K., Sasatani, T., Nishizawa, Y., Tsushio, K., Narusue, Y. and Kawahara, Y.: Alvus: A Reconfigurable 2-D Wireless Charging System, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* (2019, Accepted).
- [28] Takahashi, R., Sasatani, T., Okuya, F., Narusue, Y. and Kawahara, Y.: A Cuttable Wireless Power Transfer Sheet, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 4, pp. 190:1–190:25 (online), DOI: 10.1145/3287068 (2018).
- [29] Tseng, R., von Novak, B., Shevde, S. and Grajski, K. A.: Introduction to the alliance for wireless power loosely-coupled wireless power transfer system specification version 1.0, *Proceedings of the 2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT)*, IEEE, pp. 79–83 (online), DOI: 10.1109/WPT.2013.6556887 (2013).
- [30] Van Wageningen, D. and Staring, T.: The Qi wireless power standard, *Proceedings of the 2010 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, IEEE, pp. S15–25 (online), DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606673 (2010).
- [31] Yang, C. J., Gummesson, J. and Sample, A. P.: Riding the airways: Ultra-wideband ambient backscatter via commercial broadcast systems, *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 1–9 (online), DOI: 10.1109/INFOCOM.2017.8057162 (2017).
- [32] Zargham, M. and Gulak, P. G.: Maximum achievable efficiency in near-field coupled power-transfer systems, *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 228–245 (online), DOI: 10.1109/TBCAS.2011.2174794 (2012).
- [33] Zhao, Y., Tang, L., Rennaker, R., Hutchens, C. and Ibrahim, T. S.: Studies in RF Power Communication, SAR, and Temperature Elevation in Wireless Implantable Neural Interfaces, *PLOS ONE*, Vol. 8, No. 11 (online), DOI: 10.1371/journal.pone.0077759 (2013).