

## 研究終了報告書

### 「マルチモード準静空洞共振器を用いた生体内における電力と情報の無線ネットワーク」

研究期間: 2019年10月～2022年3月

研究者: 笹谷 拓也

加速フェーズ期間: 2022年4月～2023年3月

#### 1. 研究のねらい

体中を自由に動き回って治療を行うマイクロロボットといった構想が打ち出され、生体内もコンピューティングの舞台になりつつある。電池内蔵式のカプセル内視鏡からの無線による映像受信が実用化されている他、そうした体内デバイスを含む小型機器への無線給電も検討されている。しかし、広い空間において小さい受電器へ大電力を送る無線給電には本質的な困難が伴う。従来の無線給電技術では数 mm の小型機器に対して面積比で 10000 倍程度広い範囲にわたって、マイコン、センサ、アクチュエータが搭載された機器を駆動することができる 100 mW 程度の電力を供給することはできない。本研究では筆者が以前から取り組んできた三次元無線給電技術を軸に、新たなシステムレベルの技術を展開することで小型機器を繋ぐ電力と情報の無線ネットワークの実現を目指す。具体的には階層性を取り入れた新たな給電システム構成の実証や、システムの非線形応答を機械学習的なアプローチを用いて分類することによる受電器の状態検知手法の検討などのアプローチに基づき研究を遂行する。

加速フェーズでは前年度までの成果の他分野への展開に加え、新たなシステム構成や実用を考慮した無線給電・通信技術の開発を目指す。具体的には高効率な無線給電と通信を両立するための電力変換回路を変調する通信方法や、無線給電の漏洩磁界を抑制するための送受電共振器構造などの研究を行う。

#### 2. 研究成果

##### (1) 概要

三次元空間における小型機器への無線給電・無線通信の実現に向けて、(A) 小型機器への広範囲な給電に向けた階層的な共振器の実証、(B) 周波数応答を用いた受電器の状態推定手法、(C) 形状変化するコンピュータの無線ネットワークングに向けた給電技術、(D) 準静空洞共振器の等価回路モデルの解析を含む五つの研究項目に取り組んだ。各項目の概要を以下に述べる。

(A) 大きい送電器と小さい受電器を仲介する中継構造を用いた階層的な共振器構造を提案し、磁界の向きや強度を操作できることを実験的に示した。そして送受電器の大きさが極端に異なる状況において、従来手法よりも 10 倍以上高効率な電力伝送が実現することを明らかに

した。本成果の一部は Nature Electronics に掲載された(主な研究成果リスト1)ほか、評価や設計の詳細を論文にまとめ、国際ジャーナルへの投稿に向けて準備している。

(B) 無線給電システムの受電器が有する非線形な応答を検知し、機械学習に基づいて分類することで、受電器の位置や状態を推定できるか検討を行った。実験を通じて、回転などの周期的な動きは検知できるものの、当初の目的である受電器の有無の検知や位置推定を広範囲において実現することは困難であることがわかった。

(C) 形状変化するコンピュータの実現に向けて、集積回路技術により実装した粒子状のコンピュータを無線でネットワーク化する構想について議論を行った。本研究項目は東京大学の門本先生を中心に進行している共同研究であり、筆者は粒子状のコンピュータへの無線給電技術を担当した。本議論は門本先生らと論文にまとめ、IEEE Pervasive Computing に掲載された(主な研究成果リスト2)。

(D) 準静空洞共振器などの面電流を用いた送電器構造は空間を効率的にカバーできることが知られている。しかし面電流は広く分布して流れるため扱いにくく、システム設計や得られる給電効率の見積もりが難しい。そこで本研究項目では、面状の電流を用いる準静空洞共振器の近似的な回路モデルを構築した。本成果は論文にまとめ、国際ジャーナルへの投稿を行った。

加速フェーズでは(E)高効率な無線給電と通信の両立のための電力変換回路の変調による通信手法、(F)無線給電における漏洩磁界を抑制するためのハルバツハ配列共振器、を含む四つの研究項目に取り組んだ。

各項目の概要を以下に述べる。

(E)無線給電システム上で低消費電力な通信を行うには負荷変調通信技術が用いられるが、負荷抵抗の変動や給電の停止など、電力伝送への悪影響が生じる。本研究項目では給電性能を損なわずに超低消費電力な Uplink 通信を実現するために、無線給電の制御に用いられる受電側 DC/DC コンバータのパルス幅変調(PWM)信号を変調し、電力伝送に通信信号を重畳する手法を提案した。そしてシミュレーションにより 9 W の給電と 25 kbps の通信が同時に達成可能であることを示した。本成果のシミュレーション結果は国際ワークショップ(AWPT 2022)にて発表し、国際会議への投稿に向けて試作・実験などを進めている。

(F)無線給電システムで大きな電力を送る場合は漏洩磁界が周囲と干渉しうるため、重い磁性材料を用いたシールドを要する。本研究項目では磁性材料を用いない漏洩磁界の抑制に向けて、片面に偏った磁界分布を示す Halbach 配列に着想を得た共振器構造を提案する。さらに数値最適化手法による設計を行い、従来手法と同等の電力効率を示しつつ漏洩磁界が 84%減少する共振器構造を実現した。本成果のシミュレーション結果は国際ワークショップ(AWPT 2022)にて発表し、国際ジャーナルへの投稿に向けて試作・実験などを進めている。

(2) 詳細

## 研究テーマ A: 小型機器への広範囲な給電に向けた階層的な共振器の実証

本研究課題では生体と干渉しにくい交流磁界を用いて、広い範囲に存在する小型機器へと電力を供給することを目指している。しかし、交流磁界を用いて高効率な無線給電を行うためには、送電器が生成した磁束の多くが受電器に鎖交する必要がある。そのため、送受電器のサイズが同程度であることが望ましく、逆に送受電器の大きさが乖離した状況では効率が著しく低下する。筆者が提案したマルチモード準静空洞共振技術は面電流を利用した低損失な共振器構造を構築することでこの制約を緩和し、部屋スケールの送電器からモバイル機器という 1:1000 程度の面積比の送受電器間における高効率な給電を実現した。しかし一方で受電器のサイズが更に小さい場合や、受電器の置かれる向きが磁界の向きと一致しない場合には、効率が著しく低下してしまう。

広範囲に生成された磁界に対し、集約や向きの変換といった操作が可能になれば、これらの課題は解決する。そこで中継機構を用いた階層的な共振構造を提案し、実装・評価を行った(図 1)。これらは共振周波数が一致する二つの共振器を結合させるとエネルギーのやり取りが生じるという特性を利用し、広範囲な無線給電システムが生成する磁束を中継器が集め、自分の周囲に再放出する。そのため、これらの中継器は電源を要さないパッシブな動作を行う。単一のコイルを用いた中継器構成では、磁界が中継器の周囲に集中し、小型機器に対して十分な磁界を鎖交させる(図 1e)。二つのコイルを繋げた場合は、一方で大きな無線給電システムから磁界を介して電力を受け取り、もう一方で必要な向きに磁界を放出することにより磁界の向きを変換する(図 1fg)。

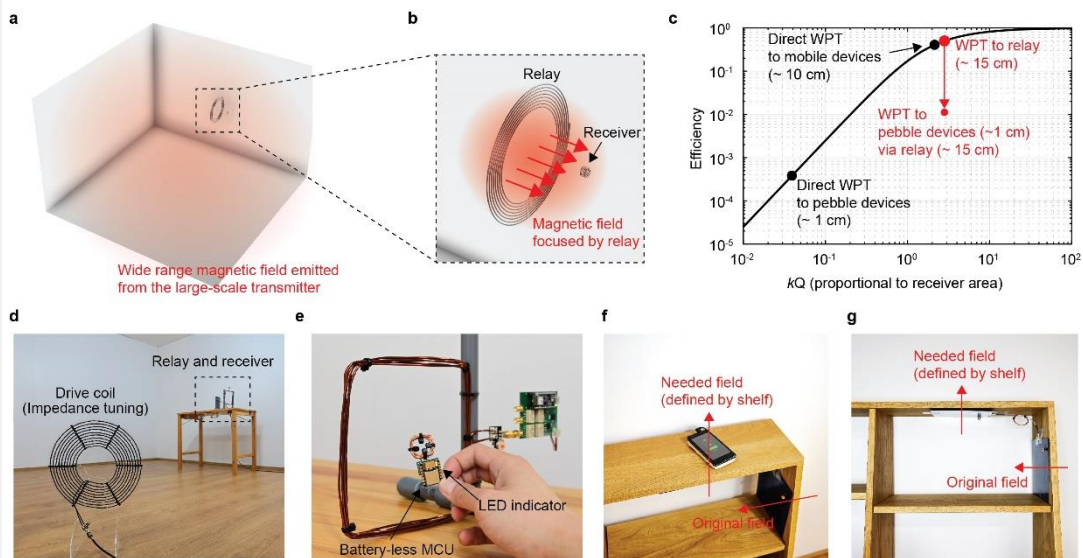


図 1 小型機器への広範囲な給電に向けた階層的な共振器。(c) 階層性により高効率となる要因の解析。(d) 実験時の部屋スケールマルチモード準静空洞共振器の中の様子。(e) 磁界の集中による小型マイコンへの給電。(f, g) 磁界を曲げることによる棚上のモバイル機器への給電。

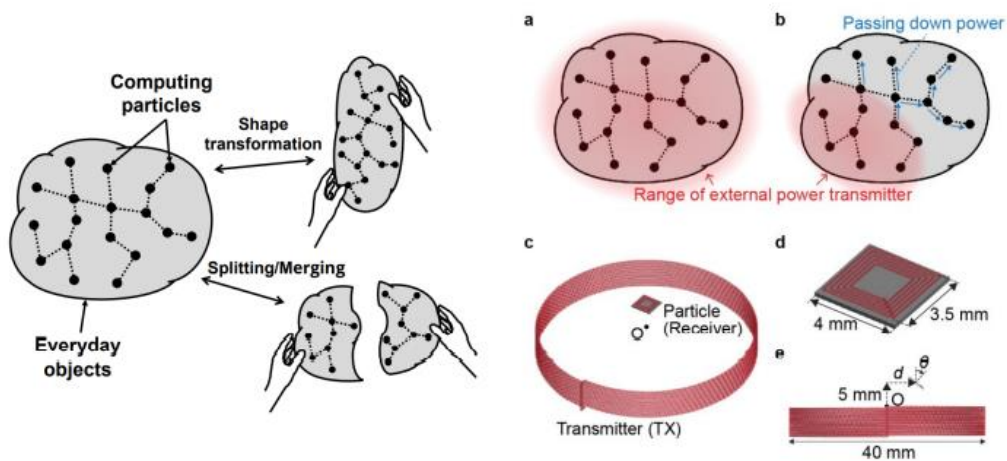


図 2 形状変化するコンピュータの無線ネットワーキングに向けた給電技術の検討。(a) 全体に対して送電器から電力を供給する方法と、(b) 一部の粒子にのみ電力を供給し、粒子間のネットワークにより電力を送り届ける方法。(c, d) 電磁界解析による粒子状のコンピュータへの無線電力伝送技術の検討。

本手法により得られる給電効率の理論値や、End-to-Endの給電システムで得られる給電効率を評価した。そしてこのような中継動作を実現するモジュールの設計および実装を行った。これらの実験を通じ、送電器と受電器の大きさが極端に異なる状況において、従来手法よりも10倍以上高効率な電力伝送が実現することや、受電器の向きに合わせて空間の磁界の向きを変換できることを明らかにした。本成果の一部はNature Electronicsに掲載された(主な研究成果リスト1)。また詳細な評価や設計を論文にまとめ、国際ジャーナルへの投稿に向けて準備している。

### 研究テーマ B: 周波数応答を用いた受電器の状態推定手法

無線給電システムにおける受電器の検知は、給電に用いる周波数帯における応答の変化を利用して行うことが多いが、小型の受電器を用いた場合には応答の変化が小さくなるため、検知が困難になると考えられる。一方で多くの受電器は、交流磁界を直流電流に変換するための整流機構などを有するため、非線形な応答を示す。本テーマではこの非線形な応答を検知し、機械学習に基づいて分類することで、受電器の位置や状態を推定できるか検討を行った。そして実験による検討から、受信器の振動や回転といった周期的な動きは検知可能であるものの、受信機の位置や状態といった周期性のない状態推定は困難であることが明らかになったため、研究を中止した。

### 研究テーマ C: 形状変化するコンピュータの無線ネットワーキングに向けた給電技術

形状変化するコンピュータの実現に向けて、集積回路技術により実装した粒子状のコンピュータを無線でネットワーキングする、「Wirelessly Cooperated Shape-Changing Computing Particles」という構想について、コンセプトの議論や電磁界解析による定量的な検討を行った。本研究は東京大学の門本先生を中心に進行している共同研究であり、私は粒子状のコンピュータへの無線給電技術を担当した。そして無線給電システムを用いてミリメートルサイズの小

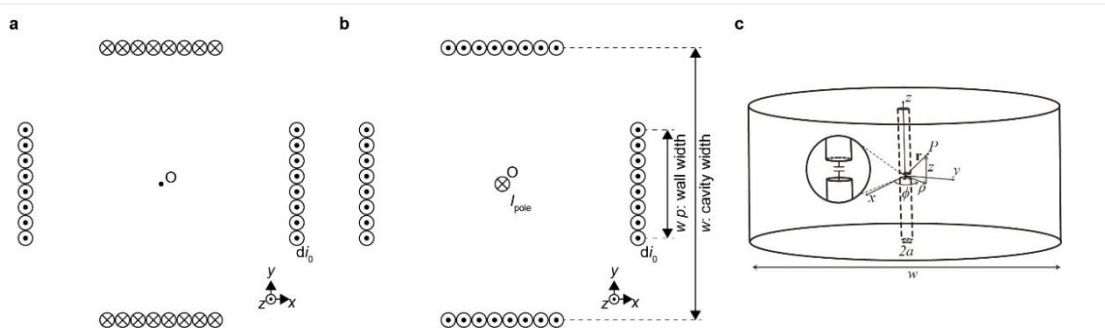


図 3 準静空洞共振器の磁界分布のモデリング方法の検討. (a, b) マルチモード準静空洞共振器の近似電流分布モデル. (c) 準静空洞共振器の解析に用いた近似構造.

型コンピュータへと給電を行う際の各手法の優劣や特徴について検討を行った(図 2)。さらに集約した粒子状のコンピュータへの無線給電システムの実現に向けて必要な給電アーキテクチャについて議論した。これらの議論の成果は門本先生らと論文にまとめ、IEEE Pervasive Computing に掲載された(主な研究成果リスト 2)。

#### 研究テーマ D: 準静空洞共振器の等価回路モデルの解析

準静空洞共振技術は面状の電流を用いることで広範囲への給電を実現した。しかし面電流は複数の向きに広く分布して流れるため、システムを構成する際に扱いにくい。さらに構造の解析に数十万要素以上の有限要素法を要するため、システムの設計や得られる給電効率の見積もりが難しい。そこで本項目では面状の電流を用いた準静空洞共振器やマルチモード準静空洞共振器を回路モデルで表現するための電磁気的なモデリングを行った。共振器の電流分布をそのまま解析すると導出過程が複雑となり、実用的な数式表現を得ることが困難となる。そのため、実際のシステムと近い磁界分布を生成する近似的な電流分布を仮定し、磁界分布や回路モデルのシンプルな近似表現を導出した。近似構造により得られた回路モデルは簡単な数値計算により扱うことが可能であるが、有限要素法により得られた磁界分布や実測値と概ね一致することを確認した。本成果は国際ジャーナルにて発表した(主な研究成果リスト 3)。

#### 研究テーマ E: 高効率な無線給電と通信の両立のための電力変換回路の変調による通信

無線給電システム上で低消費電力な通信を行うには負荷変調通信技術が用いられるが、負荷抵抗の変動や給電の停止など、電力伝送への悪影響が生じる。本研究項目では給電性能を損なわずに超低消費電力な Uplink 通信を実現するために、無線給電の制御に用いられる受電側 DC/DC コンバータを変調し、電力伝送に通信信号を重畳する手法を提案する。具体的には、電圧の制御に用いられるスイッチングレギュレータの入力パルス幅変調(PWM)信号を周波数偏移(FSK)変調して無線給電の周波数付近に電流ノイズを生成する。そのノイズを電源側から測定することで超省電力かつ給電と同時に実施可能な Uplink 通信を実現した。そして回路シミュレーションにより 9 W の給電と 25 kbps の通信が同時に達成できることを示した。本解析結果は国際ワークショップにて発表し、国際会議投稿に向けてさらなる検討を進めている。

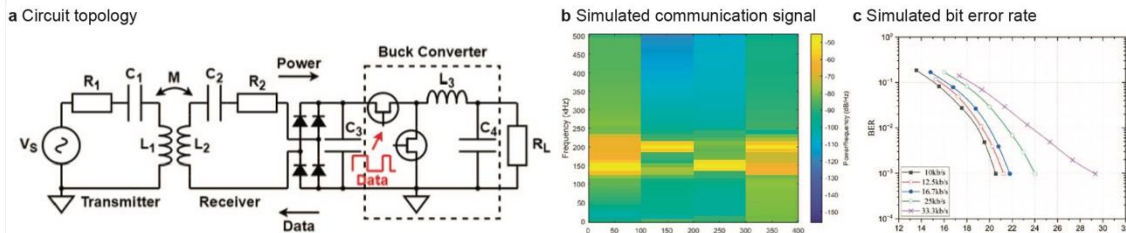


図 7 高効率な無線給電と通信の両立のための電力変換回路の変調による通信手法

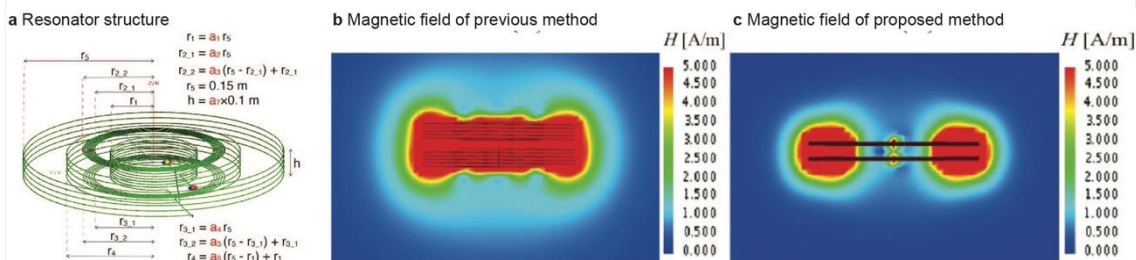


図 8 無線給電における漏洩磁界を抑制するためのハルバツハ配列共振器

### 研究テーマ F: 無線給電における漏洩磁界を抑制するためのハルバツハ配列共振器

無線給電システムで大きな電力を送る場合は漏洩磁界が周囲と干渉しうするため、重い磁性材料を用いたシールドを要する。本研究項目では磁性材料を用いない漏洩磁界の抑制に向けて、片面に偏った磁界分布を示す Halbach 配列に着想を得た共振器構造を提案する。Halbach 配列は永久磁石の配列だが、時計回り・反時計回りのコイルを立体的に配置することにより類似した磁界分布を再現する。そうすることで、電力伝送に必要な送電器と受電器の間の磁界を強め、外界との干渉の要因となるその外側の磁界を弱める。さらに数値最適化手法による設計を行い、従来手法と同等の電力効率を示しつつ漏洩磁界が 84%減少する共振器構造を実現した。本成果の解析結果は国際ワークショップにて発表し、国際ジャーナルへの投稿に向けて試作・実験などを進めている。

### 3. 今後の展開

本研究では空間型無線給電の送電機構におけるシステムレベルの技術の研究に取り組んだ。今後はカバー範囲のさらなる拡大を目指して継続的に研究を行うほか、受電側を含むシステム技術の開発にも取り組む。また本研究課題を通じて開発した磁界による空間型無線給電技術は生体や周囲の異物と干渉しにくく、システムの形状・大きさ・周波数を柔軟に設定できるという特徴がある。そのため、生活空間や工場、実験室内、車両内など、様々な領域への展開・応用が期待されており、実用化を目指して今後も研究を進める予定である。

#### (加速フェーズ実施後追記)

加速フェーズでは前年度までの成果の他分野への展開に加え、新たなシステム構成や実用を考慮した無線給電・通信技術の開発を行った。今後は加速フェーズの研究にて進展した応用事例やシステム構成の検討を足がかりに、他分野における本技術の社会実装や基礎技術のさらなる発展に向けて研究を進める。

#### 4. 自己評価

##### 研究目的の達成状況

本研究を通じて小型機器を繋ぐ電力と情報の無線ネットワークの構築に向けた重要な基盤技術の創出ができ、研究目標は概ね達成できたと考えている。受電器の検知といった一部の研究項目は想定通り進まなかった一方で、共同研究を通じて粒子状のコンピュータのネットワーキングといった分野横断型の研究成果が生まれた。また当初は生体内の機器に向けた無線給電技術という位置づけで研究を発表する予定であったが、生体に限定せずに小型機器に向けた技術として発表する方が適切だと判断したため、用途を限定しない形での成果発表を行った。論文発表が遅れている研究テーマがいくつかあるが、これらについては引き続き発表に向けた準備を進める。

##### (加速フェーズ実施後追記)

研究開始時は難しいと考えていた生命科学分野との領域横断的なプロジェクトを立ち上げられたことなど、予期していなかった成果も生まれており、研究目標は達成できたと考えている。

##### 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究費の執行に関しては概ね計画通り進捗した。新型コロナウイルスの感染拡大により出張費の執行額が当初の予定より少なくなったため、不足していた物品費に充てた。

##### (加速フェーズ実施後追記)

研究費の執行は概ね計画通り進捗した。主に実験のための装置や消耗品、共同研究立ち上げのための出張費として使用した。

##### 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

小さなコンピュータが様々な場所で持続的に、協調して動作するためには、電力と情報を自在にやり取りできるネットワークが必要である。無線通信技術のコモディティ化に伴い電子機器が無造作に情報ネットワークに接続できるようになったが、電力供給は今もユーザによる電池交換や配線により行われている。分散した機器の電力に着目すると、給電技術、電池技術、省電力回路技術が重要であるが、電池や省電力回路技術は近年大きく発展した一方で、給電技術に関しては未だにユーザの操作や配線を要し、本質的な進展は少ない。

コンセントや電池交換に代わるユビキタスな電源技術として無線給電は長らく期待されており、2007年にMITが共振コイルを用いた磁界共振結合という方式を発表してから無線給電技術は産学ともに盛り上がりを見せた。しかし皆が期待するような、広い範囲に配置された小さな機器に効率的に電力を送る無線給電が物理的に困難であることから、ユーザ体験を一変するような技術革新には至っていない。

本研究課題はこの状況の打破を目指すものであり、学術的にも社会的にも意義が大きい取り組みであると筆者は考えている。そして研究を実施する中で送電範囲と受電器のサイズ比が1:10000以上と非常に乖離した状況における効率的な電力伝送を実現するなど、重要かつ独自性の高い成果が生まれたと自負している。

(加速フェーズ実施後追記)

加速フェーズ前の研究では電子情報分野で評価される成果を創出したが、加速フェーズではその技術シーズを他分野で大きな意義を持つ研究に展開できた。そのため、研究期間を通して単一の学術領域にとどまらないインパクトの大きい研究成果が挙げられたと考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2件

研究期間累積件数: 3件(加速フェーズ実施後更新)

1. Takuya Sasatani, Alanson P. Sample, Yoshihiro Kawahara, "Room-scale magnetoquasistatic wireless power transfer using a cavity-based multimode resonator," *Nature Electronics*, vol. 4, 689-697, Aug. 2021.

部屋全域への無線給電に向けたマルチモード準静空洞共振という手法を提案し、部屋全域で37.1%以上の効率が得られることや、安全基準の範囲内で数十W以上の電力が送れることを実証した。本手法では空間の周りに金属板を配置することで複数の電流分布を生成し、それによって生まれる複数の三次元磁界分布を用いて部屋全域への給電を行う。そして3 m四方のデモルームを用いた生活空間におけるモバイル機器の充電の実証や、階層的な共振構造を用いた磁界分布の調整についての議論を行った。

2. Junichiro Kadomoto, Takuya Sasatani, Koya Narumi, Naoto Usami, Hidetsugu Irie, Shuichi Sakai, Yoshihiro Kawahara, "Toward Wirelessly Cooperated Shape-Changing Computing Particles," *IEEE Pervasive Computing*, June 2021 (筆者は"Powering Computing Particles"の章を担当)。

形状変化するコンピュータの実現に向けて、集積回路技術により実装した粒子状のコンピュータを無線でネットワークする、「Wirelessly Cooperated Shape-Changing Computing Particles」という構想について議論を行った。筆者は粒子状のコンピュータへの無線給電技術の検討を担当し、無線給電システムを用いてミリメートルサイズの小型コンピュータへと給電を行う際の各手法の優劣や特徴について検討を行った。

3. Takuya Sasatani, Matthew J. Chabalko, Yoshihiro Kawahara, and Alanson P. Sample, "Geometry-Based Circuit Modeling of Quasi-Static Cavity Resonators for Wireless Power Transfer," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2022, Vol. 3, pp. 382-390, June 2022.

三次元無線給電に向けた準静空洞共振技術(QSCR)の近似構造に基づく理論的な解析を行い、送受電器のサイズの回路モデル中のパラメータへの影響を明らかにした。QSCR技術はこれまで工学的に扱いにくい結合モード理論でしか解析出来なかったが、本モデルによりシステム設計が容易になるほか、電源の制御技術などの導入も可能になる。

### (2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0件(特許公開前のものも含む)





(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. University of Michigan, “[Will power cords go the way of land lines?](#)” August 30, 2021 (共同研究機関のミシガン大学からのプレスリリース).
2. 笹谷拓也, “準静空洞共振器によるワイヤレス電力伝送” TECHNO-FRONTIER 2021 第29回 磁気応用技術シンポジウム, June 14, 2021 (招待講演).
3. 第11回日本学術振興会育志賞. 笹谷拓也, “生活空間をカバーするユビキタスな無線電力伝送の研究,” March 2021.
4. 東京大学 大学院情報理工学系研究科 電子情報学専攻 専攻長賞. 笹谷拓也, “Ubiquitous wireless power transfer in three-dimensional spaces,” March 19, 2021.