

電子機器の駆動時間延長を可能にする ワイヤレス給電システムの基礎研究と開発事例

吉田 賢 史
Satoshi YOSHIDA

先端理工学部電子情報通信課程 講師

Lecturer, Electronics, Information and Communication Engineering Course



1. はじめに

私は2023年4月1日に先端理工学部の電子情報通信課程に着任した新任教員である。私の専門分野は工学部の中でも電気系、さらに細かく言うと電波工学と呼ばれる分野である。みなさんが日常的に使っているスマートフォンやタブレット端末は、電波を活用した無線通信技術により電線がつながってなくても通信できる。そのほかにも、ノートパソコンやポータブル型のゲーム機などにも無線通信機能が内蔵され、一昔前には考えられなかったエンターテインメントやサービスが出現し、我々の日常生活はより便利になるよう変化してきた。このように、我々の身の回りに電波工学の技術を応用した各種製品が多く見られることから、電波工学関連のさまざまな技術は、人間生活の役に立っている一つの技術と言える。

電波工学の技術は、通信への応用だけでなく、電子レンジをはじめとする食品の加熱にも活用され

ている。さらに近年では、第三の利用法として、ワイヤレス給電（無線電力伝送（WPT: wireless power transmission））への応用に関して研究開発が進められている。本稿では、ワイヤレス給電技術の中で、特にマイクロ波を活用する方式に着目し、ワイヤレス給電により無線通信系のハードウェアの電力供給を行う新たなシステムの研究開発事例を紹介する。

2. 研究背景

前章にて紹介したように、ワイヤレス給電技術に関する研究開発は、国内外問わず活性化してきている。WPTに焦点を絞った国際会議 WPTC¹⁾が2013年に創設され、2022年はフランスのボルドーで、2023年はアメリカのサンディエゴで現地開催された。数年前からは企業等による展示会も併設され、WPW（Wireless Power Week）と呼ばれる一大イベントとなった。国内では2022年春に、電波を用いるワイヤレス給電のための法制度が新設され、具体的な製品も発売されると同時に、製品を使うための免許取得も報告されている。このようにワイヤレス給電はこれからの社会を支えるIoTデバイスの電源問題を抜本的に解決できる手法として注目を集めており、日夜研究開発が進められている。

人類の宇宙進出は世界中の人々の注目を集め、

本記事は下記の文献の資料を一部転載したものです。
吉田賢史, マイクロ波を用いた無線電力伝送技術のワイヤレスセンサネットワークシステムへの適用事例, 静電気学会誌, vol.47, no.2, pp.64-69. (著作権許諾済)
RightsLink License Number: 5581781415545 and 5581790514298 for reuse from [2, 3]

表 1 The type of MPT by available transferred power.

Type	Source	Available transferred power	System structure
Scavenging	Unknown	nW- μ W	Simple
Harvesting	Intentional/ unknown	μ W-mW	Medium
Active transmission	Intentional	mW-W	Complex

様々な視点から研究開発が進められているが、以前著者が所属していた JAXA 宇宙科学研究所では再使用型の宇宙機の実現を目標とし、再使用ロケット実験機（RVT: Reusable Vehicle Test）の研究開発が行われている。ロケットと言えばエンジンや機体の構造設計など、機械系の仕事を想像することが多いが、我々電気系の技術者も RVT 実現に貢献すべく、軽量化とメンテナンス性の改善に資する新技術として、金属製のワイヤハーネスを除去し、ワイヤレス化してしまうアイデアを提唱してきた。従来ワイヤハーネスで実現されていたセンサデータや制御信号の有線データ通信と電力供給を、電波を用いてワイヤレスで行うことでワイヤハーネスを撤去できる。

本稿では、電波を用いるワイヤレス給電技術に着目し、具体的なシステム開発を行った例^{2,3)}について紹介する。電波暗室内での実験室レベルのシステム検証結果²⁾と、無線局免許を取得し、RVT 実機を用いて実証実験を行った結果³⁾の概要についてまとめた。そのため、本稿には掲載されていない、より詳細な技術情報はオリジナルの論文^{2,3)}を参照されたい。

3. ワイヤレス給電の分類

ワイヤレス給電技術は主に磁気共鳴型^{4,5)}、誘導性／容量性結合型⁶⁻⁸⁾、電磁波放射型^{9,10)}の3タイプに分類される¹¹⁾。電磁波の中でも特にマイクロ波帯の電波を用いた電磁波放射型は MPT (Microwave power transmission) と呼ばれることもある。マイクロ波帯の電波はスマートフォンやゲーム機の Wi-Fi

などの無線通信システムに用いられ、数 m から数百 m 程度の範囲で利用可能であることから、MPT は他の型の数 cm 程度の伝送距離と比べても数 m クラスの長距離伝送が可能であり、送受信の位置変動に対する効率低下が他の型に比べて低いという利点がある¹²⁾。マイクロ波のエネルギーを空中に拡散させているからこそ位置変動に強い利点が生じるため、送電側と受電側を一对一で考えると伝送効率は著しく低くなる。そのため、受電側の数が千から万以上の単位で存在するシナリオでシステムの有効性が見いだせる。近年 IoT (Internet of Things) 関連の研究開発が盛んになってきているが、例えば大規模農場内の温度や湿度分布などのモニタリング、橋梁やトンネルのヘルスモニタリングなどでは、端末が 100 個以上になるとバッテリー充電もしくは電池交換の手間の増加がボトルネックとなるため、本当はより多くのセンサを使って細かいデータを得たいものの、メンテナンス問題を理由に粗いデータしか得られていない現状がある。MPT はこの問題を解決できる可能性を秘めている。

MPT の特殊なシナリオとして、宇宙太陽光発電が挙げられる。宇宙空間に巨大な太陽光パネルとマイクロ波の送電アンテナを建設して、太陽電池で発電したエネルギーをマイクロ波のエネルギーに変換し、地上に送電するシステムである。通信分野では考えられない巨大なアンテナを用い、レーザービームのようにマイクロ波のビームを絞ることで一对一であっても 90% 以上の伝送効率を達成可能ある。このシステムは 30 年以上前に提唱され、国内外の研究者らにより研究開発が進められてきたが、様々な課題があり実現に至ってはいない。

宇宙太陽光発電を除いた MPT の地上応用の場合は、送電電力や送電距離にもよるが受電側ではマイクロワットオーダー、距離が 1m 以下であればミリワットオーダーの電力を得られる^{13,14)}。表 1 は、MPT システムにおいて扱う電力の大きさによって分類した表である。受電電力がマイクロワットもしくはそれ以下の場合は、エネルギーを「かき集め

る」意味でスケベンジングと呼ばれ、マイクロワットからミリワット級の場合は「ハーベスティング」と呼ばれる。これらのシステムでは、放送や無線通信システムの電波をエネルギー源とするため、送電基地局を意図的に配置しない場合が多い。さらに電力が大きくなってワット級になると、送電する基地局を意図的に配置する必要性が生じることから「アクティブトランスミッション」と呼ばれる。本稿で紹介する事例は、アクティブトランスミッションに分類される。

4. MPT と無線通信を両立可能なシステムの設計

4.1 時分割方式と周波数分割方式

宇宙太陽光発電のようにマイクロ波のビームが集中するような特殊事例を除き、マイクロ波のエネルギーは空中を拡散するように伝わるため、受電するセンサ局の設置場所に大きな制約はない。また、送電距離の観点から、コイルを用いる方式は数 cm 程度であるが、MPT の場合は数十 cm 以上にすることができると、無線センサネットワークシステムのセンサ局の駆動電力をワイヤレスで供給するワイヤレス給電方式は、MPT 方式が適していると考えられる。しかし、センサデータの伝送や制御には MPT と同じくマイクロ波を用いる無線通信が使われているため、ワイヤレス給電 (MPT) と無線通信を両立させる手段が必須となる。その手段として、MPT と無線通信の時分割および周波数分割による両立手法を提案した²⁾。

MPT と無線通信が同じ動作周波数を同時に使用するとデータ通信が不可能となる場合がある。これは、データ通信に比べて大電力な MPT 信号がデータ通信信号を強力に妨害してしまうためである。この問題を解決するには、MPT と無線通信を行う時間もしくは周波数を区別すればよい。時分割動作は、その名の通り時間を区切ってそれぞれのシステムが動作し、相互干渉を最小限に抑えることができるため、システムとしての信頼性が高い。しかし、

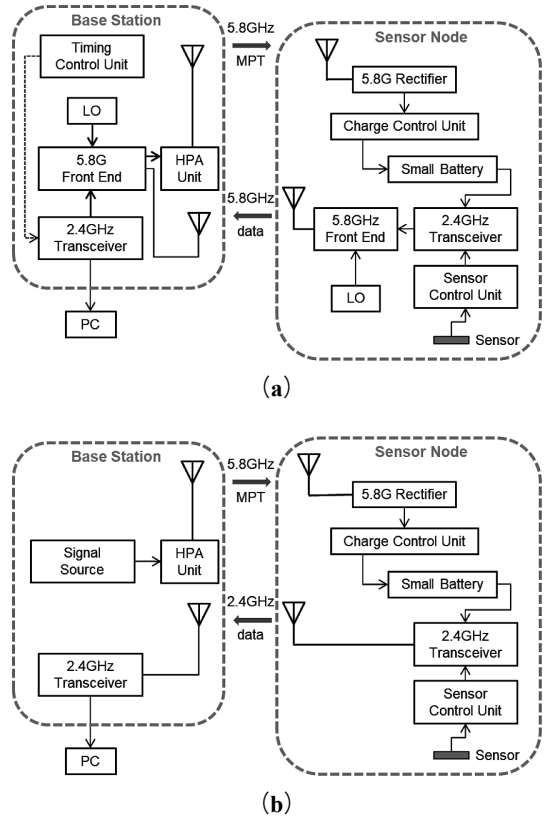


図 1 The system block diagrams of the proposed sensor network system compatible with MPT: (a) the time-division operation and (b) the frequency-division operation.

単位時間あたりのデータおよび電力伝送効率の観点から考えると、時分割動作は、MPT とデータ通信の時間を直列に共有することになるため、時間的に連続して動作可能な周波数分割方式に比べてデータ伝送及び電力伝送効率が低くなる。そのため、周波数分割動作方式に優位性があると思われるが、周波数分割方式では複数の周波数を用いることから周波数利用効率が低く、それぞれの周波数に対応した複数の RF ユニットが必要となるため、ハードウェア規模が増大してしまう欠点がある。それぞれメリットとデメリットがあるため、どちらの手法を採用するかアプリケーションに応じて適切に検討する必要がある。

提案システムのブロック図を図 1 に示す。上図が

時分割, 下図が周波数分割の場合である. 両者ともに 5.8GHz 帯高出力 MPT システムが備わる. 一方, 時分割の場合は 5.8GHz 帯, 周波数分割の場合は 2.4GHz 帯を用いて無線通信を行う. 時分割動作では, MPT 用と通信用のタイムスロットを完全に分割し, 交互に信号の送受信を行うように制御する. 一方, 周波数分割は, MPT 用と通信用の 2 つの周波数帯域を同時に使用する. 通信には, 市販されている Zigbee のチップセットを用い, 最大ビットレートは 250kbps である. センサ局のレクテナで整流された直流電力は, バッテリー充電を介してトランシーバとセンサーコントロールユニットの電源として使用される. 温度, 圧力, 水素ガス検知センサからのデータは, 無線通信システムによって送信され, 基地局に接続された PC の画面上に表示される. なお, レクテナとはレクティブファイア (整流器) とアンテナを組み合わせた造語であり, 同一基板上などに一体化したものである. そうではなく, 整流器とアンテナを個別に設計し, 同軸ケーブルで接続する形態もあり得る. ここで言う整流器とは, 5.8GHz のマイクロ波 (交流) エネルギーを整流して, 直流のエネルギーに変換するデバイスのことである.

4.2 時分割方式におけるタイムスケジューリング

時分割動作には, MPT とデータ通信の時間制御機能が必要である. 図 2 は, 時分割動作のタイムスケジューリングを示している. 分割されたタイムスロットは, 複数あるセンサ局のデータ通信に割り当てられる. 各タイムスロットの長さは 1 秒とした. 各タイムスロット内でデータ通信と MPT を順番に行うが, その時間割合は, データ量に応じて適応的に変化するようにした. なお, 水素ガス漏れ検知には秒以下の速報性が必要であるため, ガス漏れセンサのための特別時間枠が確保されている. 図 2 (b) に示すように, 基地局からのビーコン信号を受信した後, センサデータの送信を開始する. 全てのデータを送信し終わると, 基地局へデータ送信終了信号

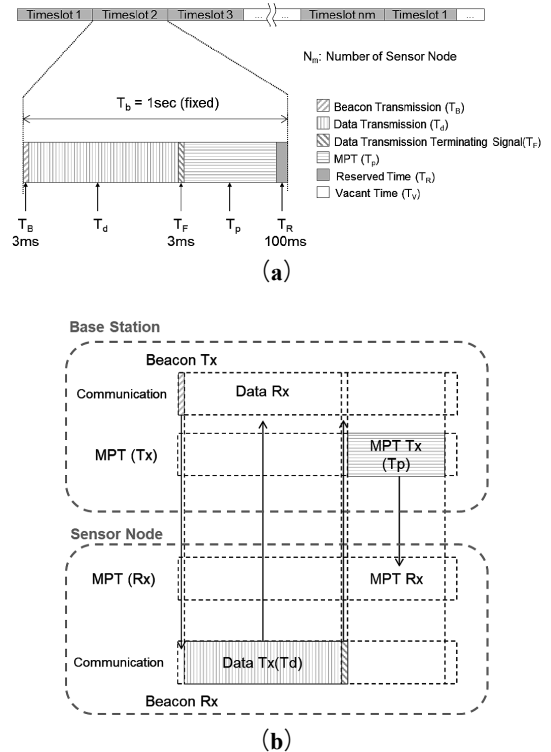


図 2 The scheduling for the time-division operation: (a) the total sequence and (b) the details in one timeslot.

が返信される. 基地局でその信号を受信すると, 直ちに MPT システムを ON にするようにパワーアンプの電源を制御する.

4.3 MPT システムのパワーダイアグラム設計

MPT システムの設計にあたり, 整流器への最適な入力電力レベルやハイパワーアンプ (HPA: High power amplifier) の出力電力を決定する必要がある. 予備実験の結果, RVT 内の 5.8GHz における伝搬損失は, センサ局の位置を変えることにより 36.6~58.0dB に変化した²⁾. そこでパワーダイアグラムの計算に用いる RVT 内部の伝搬損失は, 単純化して 50.0dB と定義した. RVT 内の主な障害物は, 水素, 窒素, 酸素のタンクである. また, アルミフレームも散乱体となっていると思われる. RVT は炭素繊維強化プラスチック製のエアロシェルでカ

バーされているが、エアロシエルは電波の反射体として働くことが想定される。一方で、アンテナ利得は電磁界解析の結果を用い、 2×2 アレイで 6.7dBi、 4×4 アレイで 18.9dBi とした。センサ局の消費電力はデータシートに記載されるシステム要件から 100mW と仮定した。損失や効率のマーヅンを 20% 考慮し、整流器の出力電力は 120mW 以上必要である。さらに整流器の RF-DC 変換効率を 50% と仮定した場合、これらの仮定から MPT 送信機の HPA に要求される出力電力は 47.0dBm (50W) 以上となった。

5. 提案システムを構成する主要なマイクロ波ハードウェア開発

5.1 5.8GHz 帯 HPA

先程の議論から、HPA に必要とされる出力電力は 47.0dBm 以上であった。HPA ユニツは、ドライバアンプ、ミドルパワーアンプ、ハイパワーアンプから構成される。終段のハイパワーアンプは、大電力を得るために 4 つの 25W 級 GaN HEMT アンプの出力を並列合成する方式を採用し、スペックちょうどではなく余裕を持った設計とした。図 3 に製

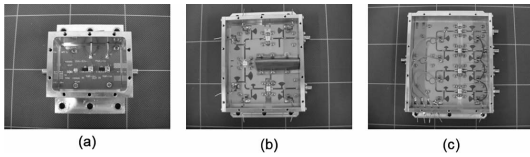


図 3 The fabricated HPA unit: (a) the driver amplifier, (b) the middle-power amplifier, and (c) the high-power amplifier.

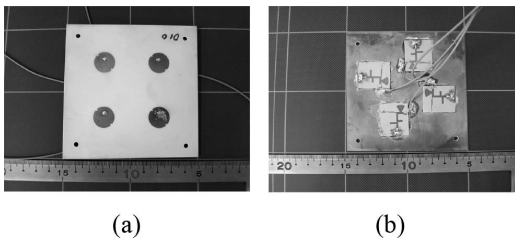


図 4 The photograph of the fabricated 2×2 rectenna array: (a) the front side and (b) the back side.

作した増幅器の写真を示す。総出力電力を測定により評価し、飽和電力は 5.8GHz において 48.0dBm であった。この測定データは要求条件であった 47.0dBm を満足するものであった。

5.2 5.8GHz レクテナアレイ

図 4 は試作した 5.8GHz レクテナアレイである。単素子レクテナを 4 つ用いる 2×2 アレイ構成とした。素子アンテナは円形のパッチ素子である。円形パッチに切り欠き加工を施し、円偏波対応とした。円偏波対応により、アンテナの向きに依存する偏波損失を考慮せずに済むようにした。パッチアレイアンテナ基板裏面に、整流器基板を直接ハンダづけした。素子アンテナの給電ピンと整流器の入力端子は基板内のスルーホールで接続されている。よって、各素子アンテナにつき 1 つずつ整流器が接続される形態とした。各整流器から出力される DC 電力はそれぞれ同軸ケーブルで取り出され、後述するセンサ局内の充電制御基板で並列合成される。

5.3 基地局とセンサ局のインテグレーション

図 5 は試作した基地局とセンサ局の写真である。2.4GHz の Zigbee 信号を 5.8GHz に変換するフロントエンド部、2.4GHz の Zigbee ユニツ、小型バッテリー、センサ制御基板、充電制御部などで構成される。なお、2.4GHz のデータ通信用アンテナには、Zigbee ユニツと一体化した平面板状逆 F アンテナを実装し、アルミケースの外に飛び出している。

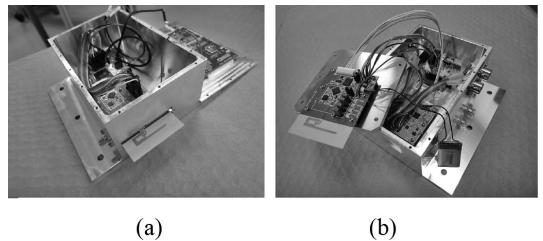


図 5 Photographs of the fabricated base station and the sensor node: (a) the base station and (b) the sensor node.

6. 提案システムの実験評価

試作した提案システムを実験的に評価するため、まずは電波伝搬が見通し直線条件下のみとし、壁面等での反射波の影響を無視できるようにするため、電波暗室内に測定系をセットアップした。図6にその様子を示す。写真左側が送信側、右側が受信側である。送電アンテナは三脚にねじ止めし、受電アンテナは回転台の上に安置した。以下の節にて、時分割及び周波数分割方式による実験内容について説明する。

6.1 時分割方式システム

図7は時分割動作の場合の測定系のブロック図である。基地局の2.4GHz帯トランシーバは、データ通信とワイヤレス給電用の正弦波生成の兼用とし、ハードウェア削減になるよう工夫した。そのため、ワイヤレス給電時のタイムスロットにおいては、Zigbeeチップセットを正弦波出力モードに設定する。5.8GHz帯の高周波回路を集めたフロントエンドユニットには、ミキサー、アンプ、SPDTスイッチが含まれている。ミキサーは、2.4GHz帯のZigbee信号を5.8GHzに周波数変換するために用いられる。アンプは、周波数変換されて生成された5.8GHz信号を必要な振幅に増幅するために用いられる。SPDTスイッチは、高周波信号の経路を切り替

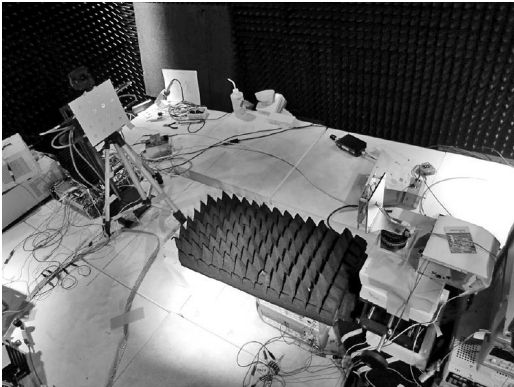
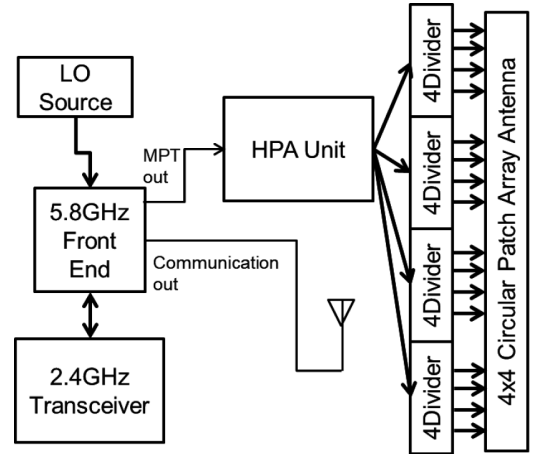
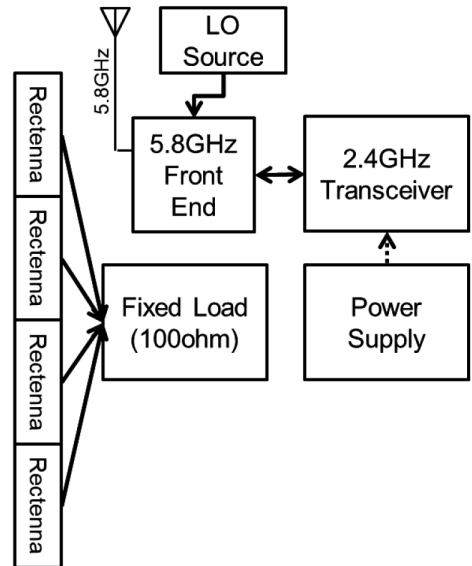


図6 Photographs of the measurement setup inside the anechoic chamber.

える部品であり、2.4GHz帯トランシーバ内のマイコンでアンプの電源と同期して制御される。センサ局に備え付けられるレクテナのDC出力電力は、実際のシステムではセンサ局の駆動電源として用いられるが、本実験においては100オームの固定負荷



(a)



(b)

図7 The block diagram of the time-division operation evaluation of the wireless communication in the 5.8 GHz band and the MPT at 5.8 GHz: (a) in the base station and (b) in the sensor node.

に直接接続され、出力電力を定量評価できるようにした。そのため、実験中のセンサ局の動作電源供給のため、別途安定化電源を用いた。この電源は、2.4GHz 帯 Zigbee ユニット、5.8GHz 帯フロントエンドユニット、および LO 信号生成基板に接続されている。

基地局とセンサ局のアンテナ間距離を 40cm から 100cm に変化させた場合の通信品質と受電電力を測定した。通信品質の評価項目はパケット誤り率 (PER: Packet error rate) と受信 RF 電力 (RSSI: Received power strength indicator) である。図 8 はその結果である。ワイヤレス給電とデータ通信を時分割動作させた場合と、ワイヤレス給電なしの場合で測

定した結果を並べている。結果を比べると通信品質はワイヤレス給電のありなしに関わらず変化なしのため、ワイヤレス給電とデータ通信が両立できていると考えられる。アンテナ間距離が短くなるにつれて、RSSI と整流器出力電力は増加した。また、PER はすべてのアンテナ距離で 1% 以下を示した。なお、測定中に MPT の出力電力は一定とした。そのため HPA のドレイン電流は一定となっている。

6.2 周波数分割方式システム

センサデータ通信には 2.4GHz 帯、ワイヤレス給

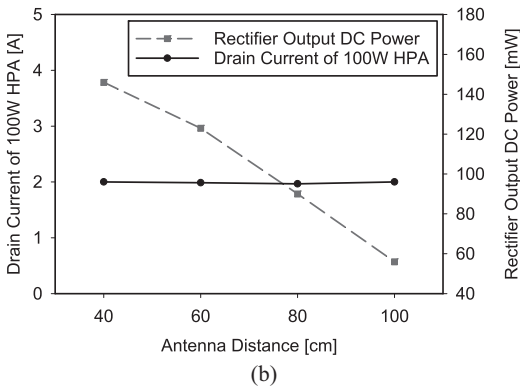
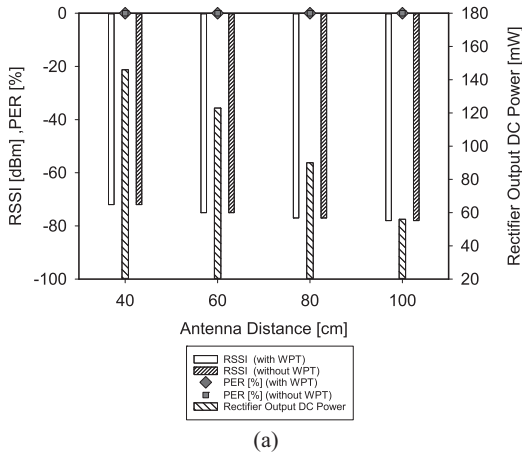


図 8 Dependence on antenna distance for the time-division operation: (a) the RSSI, the PER, and the rectifier output power and (b) the drain current of the HPA and rectifier output power.

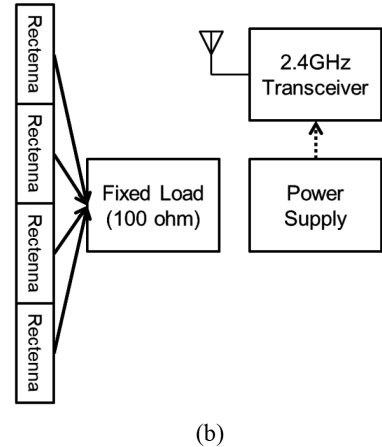
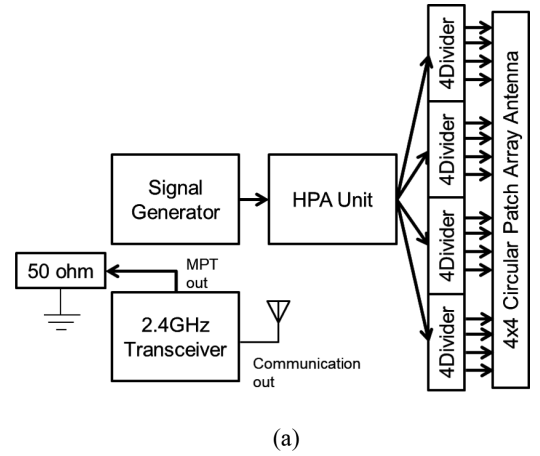


図 9 The block diagram of the frequency-division operation evaluation of the wireless communication in the 2.4 GHz band and the MPT at 5.8 GHz: (a) in the base station and (b) in the sensor node.

電には 5.8GHz 帯を使用する周波数分割動作方式での実験を行った。図 9 に示す測定系を用いた。データ通信には時分割システムで利用したトランシーバ一式をそのまま用いる。そのため、データ通信は間欠的に行われるが、ワイヤレス給電用の信号は、別途外部の信号発生器を利用し、時間的に途切れることなく連続的に送電する。時分割システムと同様にアンテナ間距離依存性の基本特性評価に加えて、長時間動作による電力量収支評価の 2 種類の実験を行った。長時間動作実験については、次節にまとめる。

アンテナ距離の依存性の実験結果を図 10 に示す。

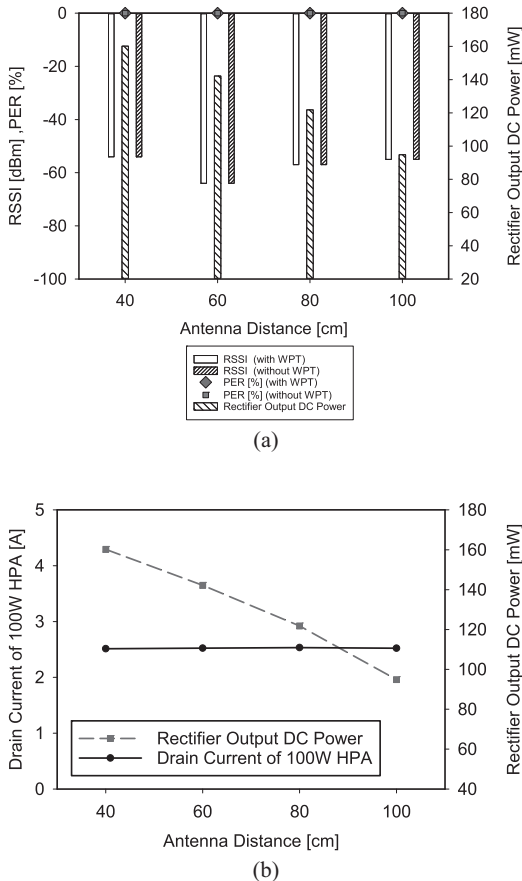


図 10 Dependence on antenna distance for the frequency-division operation: (a) the RSSI, the PER, and the rectifier output power and (b) the drain current of the HPA and the rectifier output power.

図 8 と同様にワイヤレス給電システムの出力 RF パワーは測定中に変化していない。RSSI はアンテナ距離の依存性を示さなかった。これは、平面状逆 F アンテナの主ビーム方向が互に向かい合っていないためである。通信相手の方向により、アンテナ利得が変化する。また、PER は実験中 1% 以下であり、センサデータ伝送に十分な通信品質が保たれている。一方、ワイヤレス給電システムの評価の観点からは、アンテナ間距離が短くなると整流器出力が増加することがわかった。アンテナ間距離 80cm 以下の場合、直流電力 120mW の最低要求を満たしていた。実際の宇宙機で MPT の性能を最適化するためには、センサノードの配置を決定する際に伝搬損失を十分に考慮する必要がある。

6.3 長時間動作による電力量収支

整流器からの DC 出力電力（電力収入）とセンサ局の消費電力（電力支出）との電力バランスを評価し、システムの安定性と信頼性を実験的に評価した。収入が支出を上回ればいわゆるバッテリーレス化が可能となるが、プラスの収支とならない場合でもバッテリーの消費を抑えることで駆動時間延長が可能にするため、ワイヤレス給電の意義は大きい。

今回は周波数分割システムを用いて実験を行った。120 分間の連続動作を行い、バッテリーの電圧や通信品質を測定した。図 11 は 120 分間のうち 60 分間の測定結果である。RSSI は -55dBm 、PER 1% 以下であったことから、通信品質は良好であると判断した。また途中の通信断等もなく安定した動作であった。比較実験として、ワイヤレス給電なしでデータ通信のみを動作させた場合についても同様に実験を行った。その結果も図 11 にプロットしている。ワイヤレス給電なしの場合は電池電圧が低下したが、ワイヤレス給電を行う提案システムの場合、電池電圧は 3.78V から 3.80V へとわずかに上昇した。したがって、電力量収支は僅かではあるがプラスとなったことがわかった。具体的な数値で電力量を示した図が図 12 である。ワイヤレス給電ありの提案

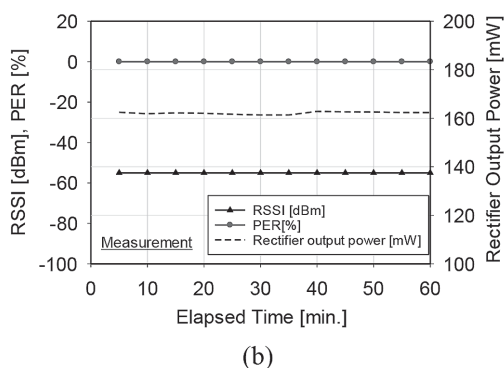
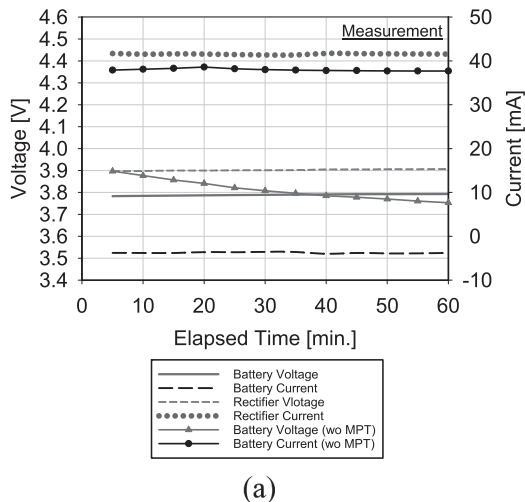


図 11 Long-time operation measurement results using the frequency-division operation (within 60 min): (a) the voltage and current of the battery and rectifier and (b) the RSSI, the PER, and the rectifier output power.

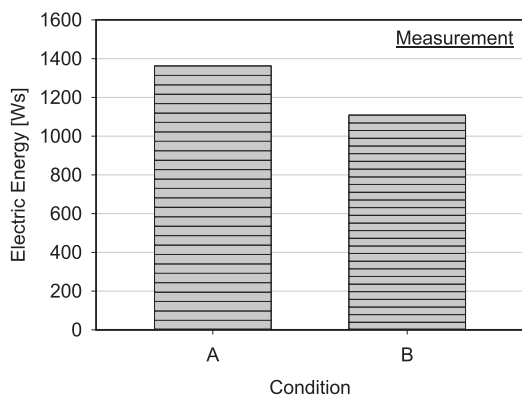


図 12 Power balance in the sensor node. Conditions A and B mean the rectifier output and the regulator output, respectively.

システムにおいて、120 分間動作させたときのセンサ局の電力量の測定結果を示した。条件 A は整流器出力電力（収入）、条件 B はレギュレータ出力電力（支出）を示す。図では、5 分間あたりの電力量を積み上げた。トータル収入および支出電力量は、それぞれ 1362.7Ws と 1109.0Ws であった。収入が支出を 253.7Ws 上回った。これらの結果から、持続可能で安定した運用性と、ワイヤレス給電とデータ通信の両立性が確認できた。

7. 再使用ロケット実験機を用いた提案システム評価

7.1 複数のセンサ局位置における両立性評価

前章までは提案システムの基礎評価として、複雑な電波伝搬環境ではなく壁面等からの反射がない電波暗室内での実験を行った結果を紹介した。本章では、提案システムのより実践的な活用例として、RVT 実験機を用いて提案システムを機内に搭載し、データ通信とワイヤレス給電の両立が可能であるか実験的に検証した結果について簡単にまとめる。図 13 は実験を行っている様子の写真である。写真ではセンサ局の位置が基地局直上の 1 箇所のみ紹介しているが、実験ではセンサ局を RVT 内の 6 か所に分散配置し通信品質と受電電力を測定した。実験の

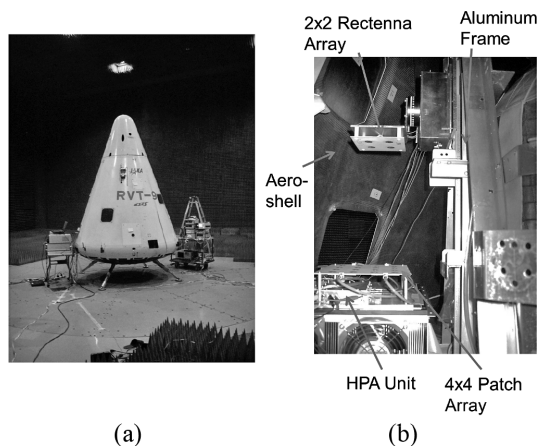


図 13 Measurement setup of the system evaluation using the RVT: (a) outside of the RVT and (b) MPT antenna inside the RVT.

結果、通信品質はどの位置でも問題なかったが、最大受電電力は10mW程度となり、電波暗室内での1/10程度の電力となった。これは、電波暗室内では見通し80cm以下の理想的な条件であったが、RVT実機では機体による電波の反射を利用するマルチパス伝送であり、かつ距離も1m以上離れていることに起因する。受電電力を改善するためには、送電電力を上げたり、受電アンテナの向きを最適化したりするなどの方策が考えられるが、今後の検討課題とする。

7.2 長時間動作による電力量収支

電波暗室内での基礎実験の際と同様に、長時間動

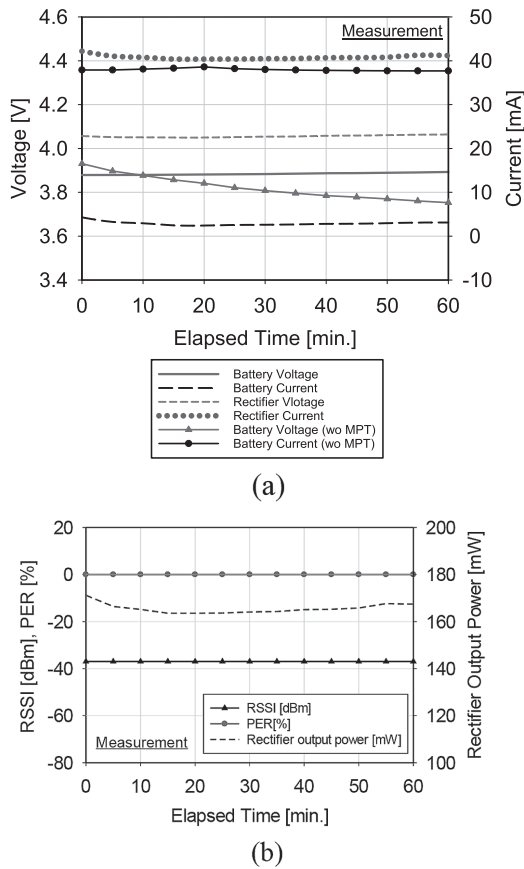


図 14 Measurement results of balance of electric energy: (a) the RSSI, the PER and the rectifier output power and (b) the battery voltage and current.

作試験を行った。本実験では、7.1節の実験とは異なり、センサ局と基地局間の距離は直線の見通し条件下の25cmとした。図14に示す通り、60分間の動作の結果、電波暗室での実験と同様に安定したデータ通信が持続でき、かつバッテリー電圧はほぼ一定であったことから、提案システムの有効性を確認できた。

8. まとめ

本稿では、マイクロ波帯の電波を用いたワイヤレス給電システムと、同じく電波を用いる無線通信システムを両立させることによりRVTの小型軽量化及びメンテナンス性の改善に資する新しいシステムの研究開発を行った成果についてその概要を紹介した。

参考文献

- 1) <https://wpt.ieee.org/>
- 2) S. Yoshida, N. Hasegawa, and S. Kawasaki: The aerospace wireless sensor network system compatible with microwave power transmission by time- and frequency-division operations. *Wireless Power Transfer*, 2[1] (2015) 3
- 3) S. Yoshida, N. Hasegawa, and S. Kawasaki. Experimental demonstration of microwave power transmission and wireless communication within a prototype reusable spacecraft. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 25[8] (2015) 556
- 4) M. Salas, O. Focke, A.S. Herrmann, W. Lang: Wireless power transmission for structural health monitoring of fiber-reinforced-composite materials. *IEEE Sens. J.*, 14[7] (2014) 2171
- 5) J. Back, C. Ahn, B.-C. Kim, S. Choi, S. Kwak: High frequency wireless power transfer system for robot vacuum cleaner. in *Int. Conf. on Consumer Electronics* (2014) 308
- 6) I. Mayordomo, T. Drager, J. A. Alayon, J. Bernhard: Wireless power transfer for sensors and systems embedded in fiber composites. *Wireless Power Transfer Conf.*, (2013) 107
- 7) M. Virili, F. Alimenti, L. Roselli, P. Mezzanotte, M. Dionigi: Organic frequency doubler RFID tag exploiting 7.5-MHz wireless power transfer. *IEEE Wireless Power Transfer Conf.*, (2013) 33

- 8) R.-F. Xue, K. W. Cheng, M. Je: High-efficiency wireless power transfer for biomedical implants by optimal resonant load transformation. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, **60**[4] (2013) 867
- 9) T. Li, Z. Han, H. Ogai, K. Sawada, J. Wang: A microchip controlling wireless power transfer system for sensor network. *Proc. SICE Annual Conf.*, (2012) 337
- 10) A. Georgiadis, A. Collado, K. Niotaki: Optimal signal selection and rectenna design challenges for electromagnetic energy harvesting and wireless power transfer. *Asia-Pacific Microwave Conf.*, (2014) 597
- 11) L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, A. Lou: Wireless power transfer and applications to sensor networks. *IEEE Wireless Commun.*, **20**[4] (2013) 140
- 12) N. Arbizzani, M. D. Prete, D. Masotti, A. Costanzo: Detection of closely-spaced objects by a low-cost reader at 2.45 GHz. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Technical Digest*, (2012) 1
- 13) Z. Popovic, E. A. Falkenstein, D. Costinett, R. Zane: Low-power far-field wireless powering for wireless sensors. *Proc. IEEE*, **101**(6) (2013) 1397
- 14) H. J. Visser, R. J. M. Vullers: RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: principles and requirements. *Proc. IEEE*, **101**[6] (2013) 1410

