

本間幸洋\*  
Yukihiro Homma  
西原 淳†  
Jun Nishihara  
片瀬徹也†  
Teisuya Katase

# 飛行中の無人航空機への無線送電技術

Wireless Power Transmission Technology for Unmanned Aerial Vehicles in Flight

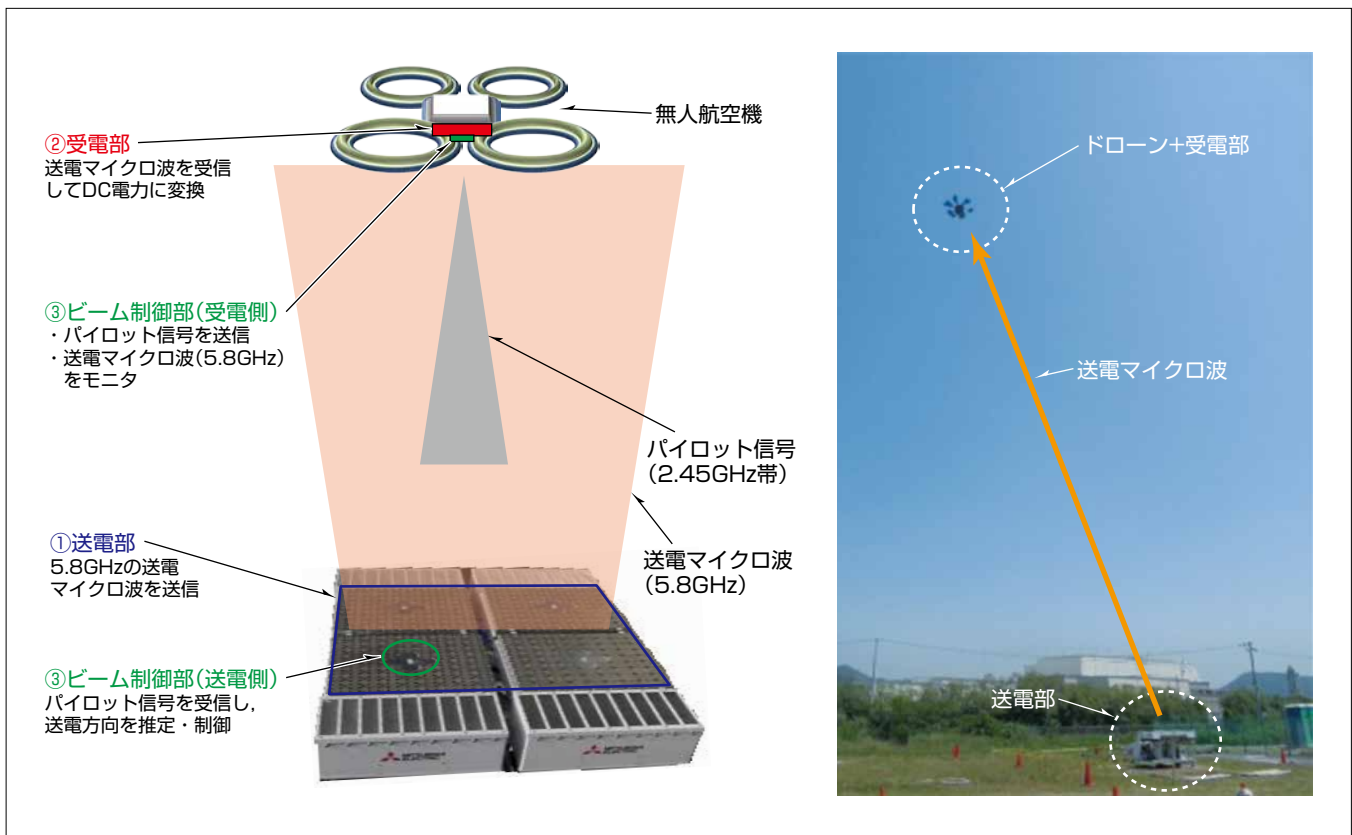
## 要 旨

近年、ドローンを含む無人航空機の活用は目覚ましい速さで拡大している。特に、高性能なGPS(Global Positioning System)による位置検出機能や、無線通信技術と組み合わせた自動航行技術の実用化が始まったことによって、産業界では、ドローンを輸送・物流や各種インフラ設備の巡視・点検など、種々の用途での活用が活発に議論されている。一方、ドローンは飛行可能な時間が短く(一般的には数十分程度)、活用を広げるためには、必要な電力をどう確保するかが大きな課題となっている。三菱電機は、このようなドローンを含む無人航空機に対して電力を供給する新しい手段として、マイクロ波を用いた無線送電技術を提案し、実用化に向けた研究開発を推進している。

2019年5月には、宇宙太陽光発電の研究開発の一環と

して、経済産業省と一般財団法人 宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)等と共同で、ドローンを用いた無線送電実験を行い、上空にホバリングするドローンに対して、完全な自動制御による無線送電技術の実証に成功している。

また、より実用的な飛行中のドローンへの長距離無線給電の実用化に向け、2019年11月から内閣府が推進する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期に参画し、送電装置と受電装置の大電力化やドローン搭載機器の軽量化などの要素技術の開発や、実証試験機の開発に取り組んでいる。



無人航空機へのマイクロ波無線送電の概念図(左図)と屋外でのドローンを用いたマイクロ波無線送電実験風景(右図)

2019年5月に、屋外でドローンを用いたマイクロ波無線送電実験を実施した(右図)。屋外実験では、地上に4台の送電装置で構成する送電部を設置し、ドローンに受電部や送電マイクロ波をモニタするアンテナ等を搭載し、自動制御で送電マイクロ波ビームを形成して所望の方向に電力を無線伝送することに成功した。高度19mで105W、高度30mで42Wの電力をドローン側で受電できた。

## 1. ま え が き

近年、ドローンを含む無人航空機の活用は目覚ましい速さで拡大している。特に、高性能なGPSによる位置検出機能や、無線通信技術と組み合わせた自動航行技術の実用化が始まったことによって、産業界では、ドローンを輸送・物流や各種インフラ設備の巡視・点検など、種々の用途での活用が活発に議論されている。一方、ドローンは飛行可能な時間が短く(一般的には数十分程度)、活用を広げるためには、必要な電力をどう確保するかが大きな課題となっている。当社は、このような無人航空機や各種移動体、IoT(Internet of Things)機器など、様々な機器に対して電力を供給する新しい手段として、マイクロ波を用いた無線送電技術を用いることを提案し、実用化に向けた研究開発を行っている。

本稿では、これらの研究開発での飛行中の無人航空機への無線送電技術の研究開発の状況と、課題、今後の開発計画について述べる。

## 2. マイクロ波を用いた無線電力伝送の原理

図1にマイクロ波を用いた無線送電の原理概念図を示す。図1(a)は原理概念図、図1(b)は回路イメージ図である。送

電装置は、RF(Radio Frequency)発振器で生成された微弱なマイクロ波を直流電力を用いて増幅し、送電アンテナを用いて空間に照射する。受電装置は、照射されたマイクロ波を受電アンテナで受信し、整流回路で整流して直流電力として取り出し、この電力を機器に供給する。このように、マイクロ波を電力の輸送媒体として使うことによって、遠方に無線で電力を送電できる。

## 3. 宇宙太陽光発電の研究開発での飛翔(ひしょう)体を用いた無線送電実験<sup>(1)</sup>

### 3.1 宇宙太陽光発電の研究開発での取組み

当社は、2000年ごろから、宇宙太陽光発電の研究開発に参画し、マイクロ波を用いた無線電力伝送技術の研究開発を推進している<sup>(2)</sup>。宇宙太陽光発電は宇宙空間で太陽電池を用いて発電した電力を、マイクロ波に変換して地上に送電するシステムである。大型発電所に相当する百万kW級の発電を想定しており、再生可能エネルギーを利用した天候や昼夜に左右されない、クリーンで安定した発電システムの実現を目指している<sup>(3)</sup>。

近年では、2009~2014年度に経済産業省とJ-spacesystemsや、JAXAが行った“マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発”に参画し、屋外に設置した半導体増幅回路を用いた送電装置から、水平方向に約55m離れた

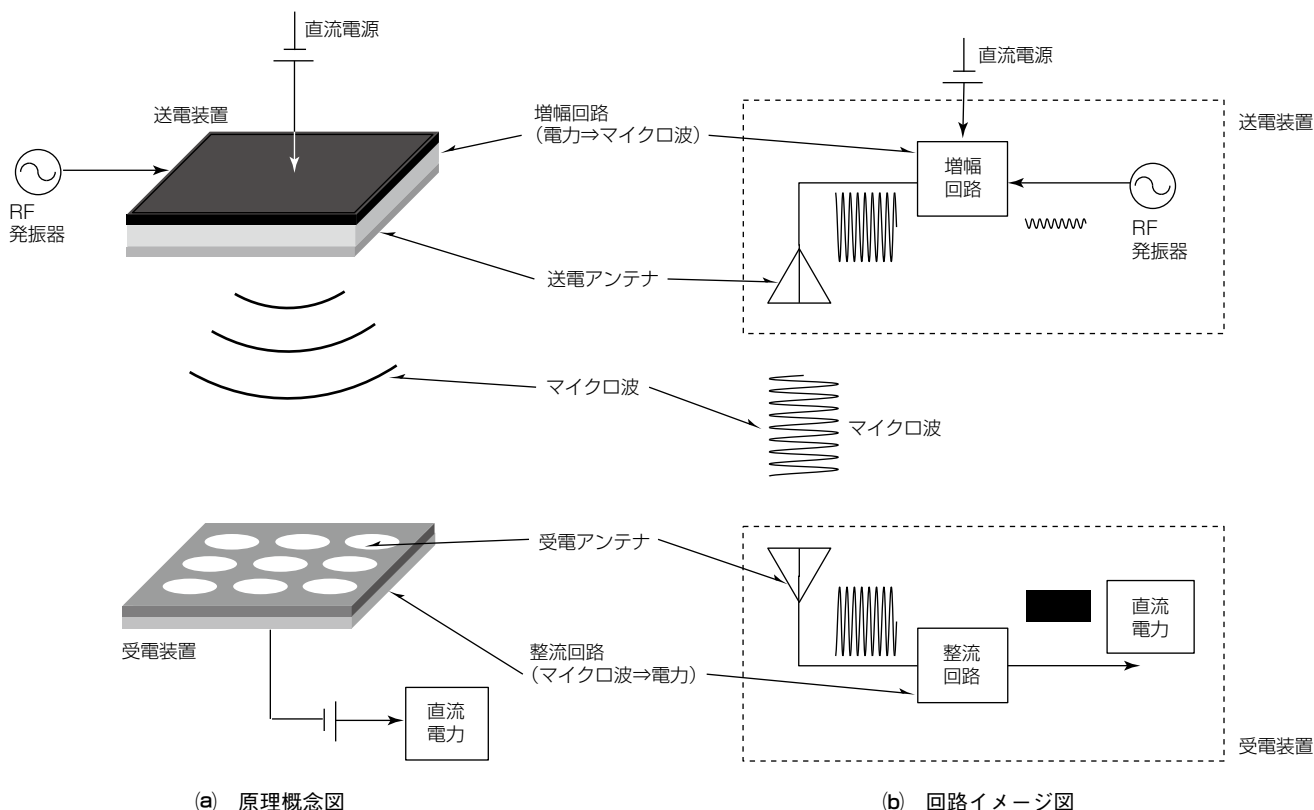


図1. マイクロ波による無線送電

受電装置に約340Wを送電する実証実験に成功している<sup>(3)</sup>。この実証実験では、将来の大規模な宇宙太陽光発電システムの送電装置を想定し、複数の送電装置を用いて精密に送電マイクロ波ビームを制御・合成して受電装置に効率よく送電する技術の実証実験を行い、この技術の有用性を実証している<sup>(4)</sup>。

一方、宇宙太陽光発電の実現に向けては、送電装置等の更なる高効率化や、完全な自動制御による送電マイクロ波ビームの制御などの課題が残っている。これらの課題を解決するため、経済産業省とJ-spacesystems, JAXAは、2016～2019年度には、更なる高効率化の研究開発や屋外でのドローンを用いた垂直方向への無線送電の実証実験<sup>(1)</sup>を行っており、当社も試験装置開発や実証実験担当者として参画している。3章ではこの研究成果について述べる。

### 3.2 マイクロ波送電装置の高効率化の開発

マイクロ波送電装置を高効率化するために、送電装置に用いる半導体デバイス(GaN High Power Amplifier : GaN HPA)の高効率化開発を行い、その素子製造技術を用いて、DC電力をRF(マイクロ波)に変換する最終段半導体増幅器の高効率化・量産化の開発を行った。また、開発した高効率最終段増幅器を、2014年度に開発した送電装置の一部(19サブアレー)に搭載・換装し、垂直方向の無線送電実験の実証機として使用した。

半導体デバイスは、当社で近年導入された微細加工技術を用い、HPAに用いるGaN(窒化ガリウム)トランジスタのゲート長を0.15mmまで短縮することで、ドレイン効率の向上と高利得化を実現した。それによって電力負荷効率(Power Added Efficiency : PAE)は77.7%、出力は8.4Wとなる高効率半導体デバイスの開発に成功した<sup>(5)</sup>。

次に、この送電用の高効率半導体デバイスの設計・製造

技術を活用して、性能・品質の安定した量産用半導体デバイスを製造し、このデバイスを用いて高効率最終段増幅器を開発した。図2に製造した量産用高効率半導体デバイスのPAEを示す。30台のデバイスを製造し、PAEは平均69.5%を達成している。最終段増幅器ではこのデバイスの性能を最大限に引き出すために、インピーダンスを5.8GHzに最適化したバイアス回路を設計・開発した。その結果、送電装置として、44.8%のDC-RF変換効率を達成した(2014年の実績は35.1%)。

### 3.3 無人航空機を用いた無線送電での送電マイクロ波ビームの制御技術の検討

宇宙太陽光発電のような大規模・大電力のマイクロ波を用いた無線送電を目指す場合、できるだけ効率よく電力を送電するためには、複数の送電装置から照射された電力を空間で合成し、送電マイクロ波ビームを形成する技術の確立が必要になる。この研究では、このようなマイクロ波ビームの形成及び送電方向の制御を、自動制御で実現する方法について検討・開発を行い、無人航空機を利用して実証試験を実施した。

図3に無人航空機への無線送電の概念図を示す。送電部は複数の送電装置で構成されており、受電部を搭載した無人航空機が移動した場合、移動した受電部の位置・方向に送電マイクロ波ビームを形成する必要がある。このためには、各送電装置から見た、

- (1) 送電方向： $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$
  - (2) 基準となる送電装置との位相差(経路長差)： $L_1 - L_n$
- の二つを自動で検出・補正することによって、複数の送電方向(受電部の方向)に送電マイクロ波ビームを形成し、送電することが可能になる。今回、これらの補正值の検出には振幅モノパルス法とREV(Rotating Element electric

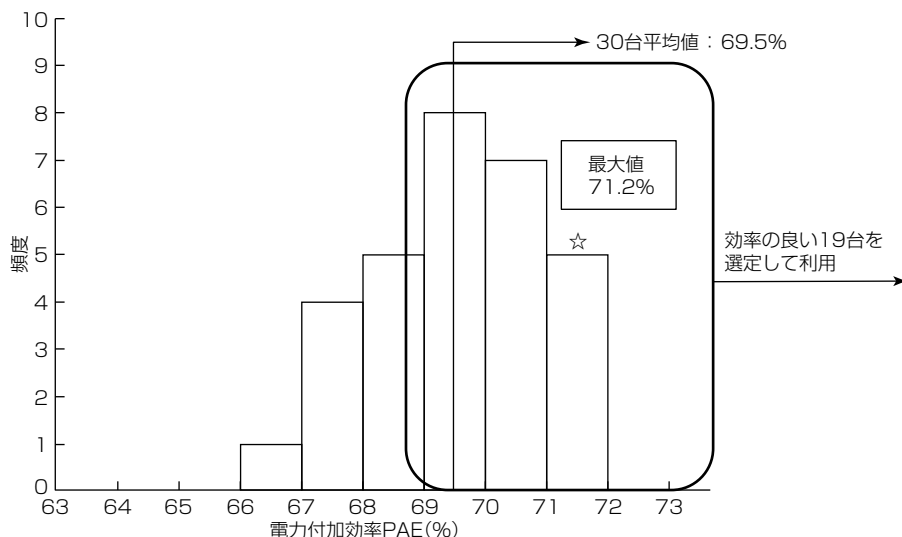


図2. 量産用高効率半導体デバイスのPAE

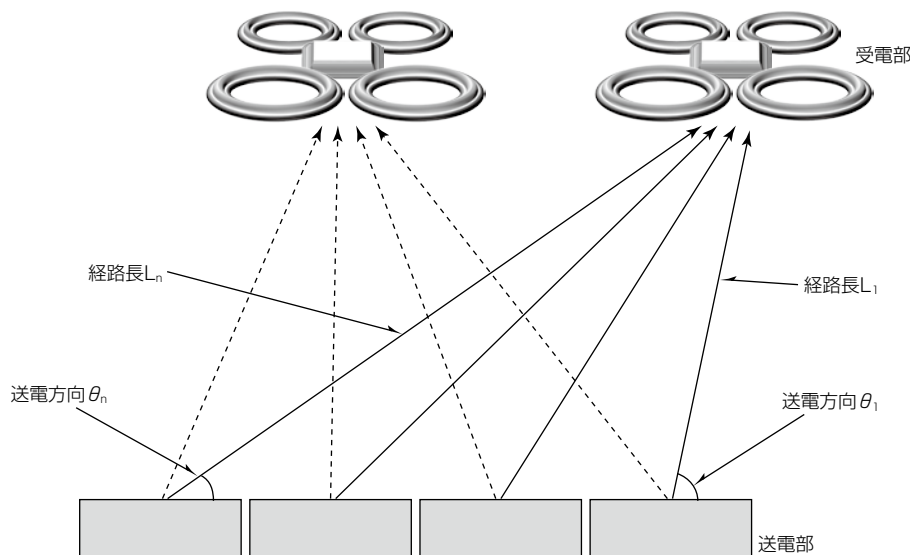


図3. 無人航空機への無線送電の概念図

field Vector)法の技術<sup>(4)</sup>を用いたドローンへの送電を想定したビーム方向制御部の開発を行った。

### 3.4 屋外での実証試験結果

送電マイクロ波の自動形成・制御、及び垂直方向の無線送電の実証試験は、要旨の図に示した試験コンフィギュレーションで、屋外で実施した。地上に4台の送電装置で構成される送電部を設置し、ドローンに受電部や送電マイクロ波をモニターするアンテナ等のビーム制御部(受電側)を搭載し、送電部にビーム方向を検知するアンテナ等のビーム制御部(送電側)を設置した。

送電部は、電子的に送電マイクロ波の送信方向を変えることが可能なアクティブフェーズドアレー方式の送電装置で構成されており、GaNデバイスを用いた高効率最終段増幅器で電力をマイクロ波(5.8GHz)に変換し、アンテナから放射する。ここで用いた送電装置の一部(19サブアレー)は3.2節で述べた高効率最終段増幅器を搭載し、高効率化の技術検証を行った。受電部はドローンに搭載され、上空でマイクロ波を受信して直流電力に変換する。

送電マイクロ波ビームの形成・制御は、3.3節で述べた技術を用いている。受電部側から送信したパイロット信号(2.45GHz)を送電部側で受信し、振幅モノパルス法を用いて送信方向 $\theta_n$ を推定する。また、受電部で送電マイクロ波をモニターし、REV法を用いて位相差(経路長差) $L_1-L_n$ を検知している。これらの補正値を、アクティブフェーズドアレーの各アンテナ素子の位相制御機能を用いて補正する。

これらの方法で、ある場所にホバリングするドローンに対して送電し、高度19mで105W、高度30mで42Wの電

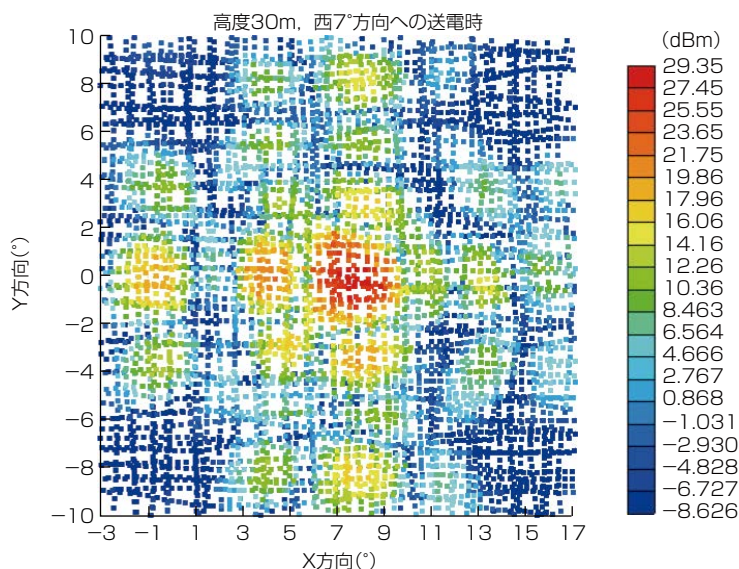


図4. 送電マイクロ波ビームの二次元パターンの測定結果例

力を受電することに成功している。また、送電マイクロ波ビームを形成した後に、マイクロ波ビームの電力強度を測定するモニターアンテナを搭載したドローンを飛行させてスキャンすることによって、送電マイクロ波の二次元のビームパターンの測定を行った。図4に測定した送電マイクロ波ビームの二次元パターンの一例を示す。ビーム形成制御時のドローンの飛行位置の揺動などによってビーム形成の誤差が生じ、非対称性等が見受けられるが、送電で重要なメインビーム(中心の赤色の電力の強い部分)のビーム幅は計算値と一致する $2^\circ$ 程度に形成されており、おおむね良好なビーム形成が行われていることが分かる。これらの試験・検証結果によって、完全な自動制御によるマイクロ波ビームの形成・制御技術、及び垂直方向の無線送電技術が実証された<sup>(1)</sup>。

## 4. 無人航空機への無線送電の実用化に向けた課題と今後の研究開発の取組み

3章で示した実証試験の結果から、マイクロ波を用いた無線送電技術を無人航空機に適用することの技術的な可能性は十分に示されているが、実際に実用化するに当たっては、まだ受電できる電力が小さいことや航空機に搭載する機器の軽量化、究極的な運用方法としての移動する無人航空機への追尾送電制御技術が確立されていない、などの課題がある。表1に、飛行中の無人航空機へのマイクロ波無線送電技術の適用での課題を示す。

大電力を受電するために、送電部は、単位面積当たりの出力を向上させ、大電力の送電を可能にする必要がある。また、より長距離・大電力の送電を行う場合は、送電装置を複数配置し、大開口径の送電アンテナから送電し、空間で大電力・狭ビームの送電マイクロ波ビームを形成する必要があるが、これを可能にするために拡張性のある送電装置の開発が必要となる。

受電部は、大電力が入力した際に高効率に直流電力に整流が可能で、高耐電力・高効率受電回路の開発が必要になる。また、無人航空機の飛行時間やペイロードを確保するために、できるだけ軽量の受電装置の開発が必要になる。さらに、飛行・移動中の無人航空機に対して給電するためには、高速に受電部の方向や位相差を感知して制御する追尾送電制御技術の開発が必要になる。

これらの技術開発に加え、産業利用を促進するためには、ビジネスモデルの構築と業界機運の醸成、及び利用可能な周波数の調整と規格・標準化活動を推進する必要がある。

これらの課題に対して、当社は、2019年度から内閣府

表1. 無人航空機へのマイクロ波送電技術の適用での課題

項目	課題と研究開発方針案等
送電部	大電力化：送電アンテナの単位面積当たりの出力向上、大開口径化・スケーラビリティ
受電部	大電力化：高耐電力・高効率受電回路(整流回路)の開発 軽量化：超軽量受電部の開発
ビーム制御部	追尾送電制御技術：移動する受電部の方向・位相差の感知と高速制御技術の開発
その他	ビジネスモデルの構築、業界機運の醸成 利用可能な周波数の調整、規格・標準化活動

が推進する戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期<sup>(6)</sup>に参画し、無人航空機活用のユーザーや大学研究機関、無人航空機メーカーと共同で研究開発を始めている。このプロジェクトでは2022年度まで要素技術開発と実証試験機の開発を進め、2023年度には実用化を想定したドローンへの無線給電の実証試験を行うことを予定している。

## 5. むすび

マイクロ波を用いた無線送電技術は、遠方に無線で電力を送電できる特長があり、移動する機器に対して追尾して送電できるポテンシャルもある。飛行中の無人航空機(ドローンなど)へ無線給電を実用化するためには大電力化などの課題があるが、この技術が実用化されれば、着陸して充電やバッテリー交換を行う必要がないため、ドローンの運用効率を飛躍的に拡大することが可能になる。また、この技術は、例えば移動するロボットや走行中の電気自動車など、他の用途への応用の可能性も秘めている。当社は引き続き、無線送電技術の実用化に向けた研究開発を推進し、宇宙から産業機器までの幅広い分野での送電技術の革新を目指していく。

3章の研究成果は、J-spacesystemsが経済産業省から受託した「太陽光発電無線送電高効率化の研究開発」、及びJAXAの「ドローンによるマイクロ波パターン測定精度確認試験」の研究の一環として行われた。

## 参考文献

- (1) Mihara, S., et al.: Current Status of the SSPS Development and the Result of Ground to Air Microwave Power Transmission Experiment, IAC Proc., IAC-2019-C3.2.1 (2019)
- (2) Homma, Y., et al.: New Phased Array and Rectenna Array Systems for Microwave Power Transmission Research, IEEE IMWS-IWPT Proc., 59~62 (2011)
- (3) Mihara, S., et al.: Microwave Transmission Experiment on the Ground for the Future SSPS, ISTS Proc., 2015-q-04 (2015)
- (4) 本間幸洋, ほか: 宇宙太陽光発電マイクロ波電力伝送技術, 三菱電機技報, 90, No.2, 127~130 (2016)
- (5) 山中宏治, ほか: マイクロ波送電実用化に向けた5.8GHz帯高効率GaN増幅器, 電子情報通信学会技術研究報告, 117, No.244, MW2017-99, 117~122 (2017)
- (6) 国立研究開発法人 科学技術振興機構ホームページ: 戦略的イノベーション創造プログラム  
<https://www.jst.go.jp/sip/p08/index.html>