

無人航空機型基地局(ドローン基地局)におけるエネルギー源の開発とその応用

代表研究者

安 昌俊

千葉大学大学院 工学研究院 教授

1 はじめに

無人飛行機市場は2025年までに市場規模が8兆円を超えると試算されており、今後、多くの企業がこの分野に進出することが予測されている[1]。特に、Amazon社の小荷物配達構想はこれまでの物流概念を変える革新的な技術として注目を浴びている。さらにGoogle社とFacebook社により、インターネットが整備されていない途上国や遠隔地にドローンを利用して通信を提供する計画が研究されている。また、5×5 Technologies Inc. は橋梁や発電所、送電鉄塔、大型プラントなどの点検に応用できる関連技術の研究を行っている(図1を参照)。国内においては、KDDIによる災害時に携帯電話サービスの利用が困難なエリアの一時的な復旧を目的として、小型の携帯電話基地局を搭載した「無人航空機型基地局(ドローン基地局)」の実証実験を2017年



図1 ドローンによる携帯電話基地局点検

12月14日に鹿児島県熊毛郡屋久島町で行った。しかし、ドローンはバッテリーを主な駆動電源として利用しているため、持続的な飛行が困難である。長距離輸送、空中インターネットサービス計画、自然災害・防犯監視などにドローンを活用するためには持続的な飛行が必要であるため、バッテリーのみならずエネルギーをどのように効率よく安定的に供給するかは解決しなければならない課題となる。

エネルギーの供給に関する技術として、無線電力伝送技術が盛んに研究されている。無線電力伝送技術は専用電源ケーブルなどを使わずに電力を無線で伝送・供給する技術である。発生方式により、①電磁誘導方式、②磁界共鳴方式、③電波受信方式と分けられる。長距離伝送を実現するためには、マイクロ波を用いた無線電力伝送が広く使われている。マイクロ波など電波による無線電力伝送は、米国のNASAを中心に宇宙から発電した電力を地球に送り出す技術として広く研究されている。日本においても、宇宙航空研究開発機構(JAXA)や京都大学などで高エネルギーを中心とした研究が行われている。

本研究は、マイクロ波無線電力伝送技術に着目し、ドローン等の新しいエネルギー源として実現させる事と社会インフラの点検、火山等の自然災害監視活動、さらに大規模災害時における緊急の通信手段としての通信サービス計画等の実現のための、エネルギー充電技術を目指した研究開発である。本研究により無線電力伝送がドローン等のエネルギー源として応用できれば、充電等の時間的制約を受けずに持続的かつ安定的にエネルギーを得ながら様々な活躍が期待できる。さらにバッテリーなどを搭載する必要もなくなり、安価で小型化することが可能となる。この様なドローン等への応用は、遠隔地や離島、または通常の通信インフラがすでにある地域に対しても、大規模災害時に緊急の通信手段、災害放送を提供する役割としても応用できるため、その実現に向けた研究結果を報告する。

2 無線電力伝送技術

2-1 基本原理

無線電力伝送技術は、大きく非放射型と放射型の2種類に分けることができる。さらに、非放射型は電磁誘導式、磁界共振式、電界結合式、エバネセント波式と分けられ、放射型はマイクロ波無線電力伝送とレーザ式に分けられる。それぞれの方式は伝送電力と伝送距離によって異なり、大電力の伝送は、非放射型が優れている。しかし、伝送距離を考慮すると放射型が優れた性能を実現できる。

無線電力伝送は電磁波を介してエネルギー伝送を行う。微小ループアンテナのように磁界を放射する放射源の近傍においては、磁界成分が支配的で、電磁界の電界と磁界の比率(E/H)、すなわち波動インピーダンス

スは図2のように低い。一方、微小ダイポールアンテナのように電界を放射する放射源の近傍においては電界成分が支配的で、その波動のインピーダンスは高い値になる。そして、放射源から遠ざかるにつれて、その波動のインピーダンスは 376.7Ω の自由空間インピーダンスに一定となる。このような、放射源の近傍で波動のインピーダンスが自由空間インピーダンスと大きく異なる領域を近傍界と呼び、距離が十分に離れて波動のインピーダンスが自由空間インピーダンスに近付いた領域を遠方界と呼ぶ。近傍界と遠方界の境界は図2からも分かるように距離/波長が $1/2\pi$ になる地点である。例えば、周波数が 60Hz であれば、放射源から距離が 796km 以内であれば近傍界、796km を超えれば遠方界となる。また、周波数が 1GHz であれば、48mm が境界となる。非放射型は、近傍界を利用して無線電力伝送を行う。一方、放射型は、遠方界を利用して無線電力伝送を行うのは一般的である。

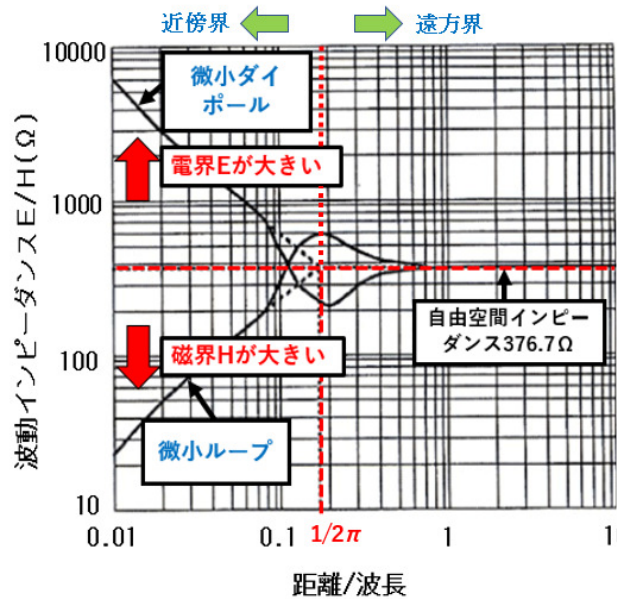


図2 近傍界と遠方界

(1) 電磁誘導方式

電磁誘導方式は、ファラデーの電磁誘導則に基づいている。ファラデーの電磁誘導則とは、磁束の変化を打ち消す方向に誘導起電力が発生するというので、式は以下ようになる。

$$V = -N(\Delta\Phi/\Delta t) \quad (1)$$

ただし、 N はコイルの巻き数、 Φ は磁束である。図3は電磁誘導方式の基本概念を示す。コイルの1次側に交流電圧を供給すると磁束が発生し、2次側ではこの磁束を打ち消すように誘導起電力が発生する。この2次側に発生する電力を機器の充電に利用することができる。

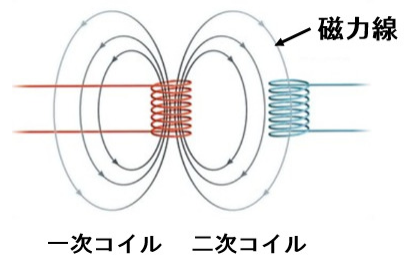


図3 電磁誘導方式

(2) マイクロ波無線電力伝送

図4は宇宙航空研究開発機構(JAXA)が構想した宇宙から発電し、地球に高エネルギーを送る出すマイクロ波無線電力伝送の概念を示す。1964年、ウィリアムCブラウン(William C. Brown)によって整流器付きアンテナであるレクテナ(Rectenna: Rectify Antenna)を用いて、長距離無線電力伝送の実証実験を行った[2]。マイクロ波無線電力伝送は、マイクロ波を生成し、指向性を持たせた送信機を用いてマイクロ波にエネルギーを乗せて電力伝送が実現可能であることを示した。受信機には、受診されたマイクロ波をレクテナで、直流電流に変換する。マイクロ波無線電力伝送の大きな問題としては、非常に大規模なアンテナが必要となる。また、大規模マイクロ波無線電力伝送技術は、宇宙から発電した高エネルギーをマイクロ波に乗せて地球に送りだすため、距離に比例してマイクロ波が広範囲に広がる。そのために起こりうる人体や環境への影響を十分考慮する必要がある。

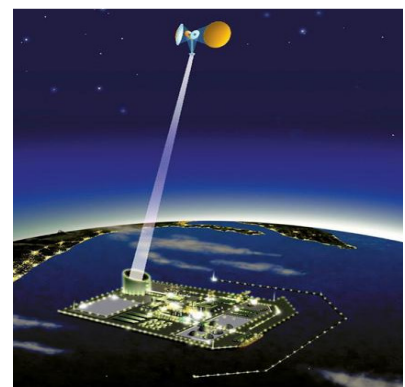


図4 マイクロ波電力伝送 (出典: JAXA)

2-2 受信レクテナ

マイクロ波を利用した無線電力伝送技術は1960年代から研究が進められてきた。レクテナと呼ばれる電磁

波を受信し、整流して電気として取り出す装置は無線電力伝送システムの主要な構成要素の1つである。図5にはレクテナの基本構造を示す[3]。レクテナは基本的にアンテナと整流回路で構成される。空中のマイクロ波はアンテナと同調回路により希望周波数信号が受信される。受信された信号は50Ω マッチング回路で調整され、整流回路に入力される。整流回路から出力された電気エネルギーはエネルギー蓄電回路で蓄えられる。図6には本研究で用いられた試作16素子レクテナを示す。本研究では、受信した無線信号からエネルギーを取り出す装置として、周波数使用が2.13GHzと5.8GHzで最大エネルギーを取り出すように設計した。一般的にレクテナ設計はマイクロストリップダイポールやパッチアンテナが広く使われる。マイクロストリップアンテナは軽量化と小型化が可能となる。しかし、狭帯域でアンテナに入射される電力に制限があり、さらに低利得も大きなデメリットであるため、本研究では、小型化と偏波特性がないマイクロストリップパッチアンテナを採用してレクテナ設計を行った。

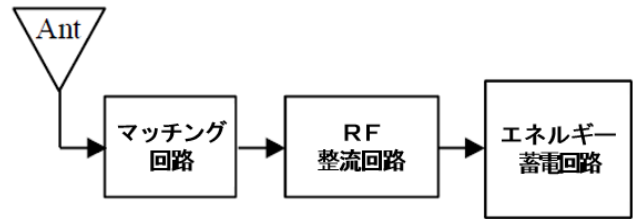


図5 レクテナの基本構造

2-3 指向性電力伝送

当初、電力伝送に使用される周波数は伝送距離を伸ばすことを重点に2GHz帯を考慮した。しかし、使用周波数を2GHz帯で検討すると送信アンテナとして使用されるホーンアンテナの開口面も大きくなり、距離が延びると無線信号が広がる。また、受信レクテナのサイズが決まっているため、多くのエネルギーを受信できない。そこで、今回の研究では使用される周波数を2.13GHzと5.8GHzの二つの周波数で検討を行った。図7は無線電力伝送実験装置を示す。使用周波数が2.13GHzのホーンアンテナの開口面は445mm×325mm、5.8GHzの開口面は112mm×85mmであり、一般的に低い周波数を使用すると伝搬損失は低い。しかし、送信ホーンアンテナの開口面が広がるため、より広い角度で放射される。その結果、単位面積当たりの受信電力も急速に減衰する。本研究では、送信アンテナから放射された信号の距離が延びるに伴い広がることを抑えるため、特に5.8GHzの送信システムでは送信信号に指向性を持たせた送信ビームフォーミングを用いて検討を行った。

3 実験結果

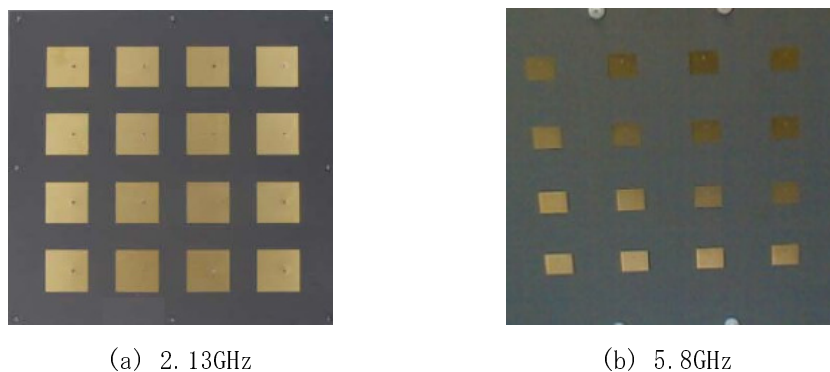
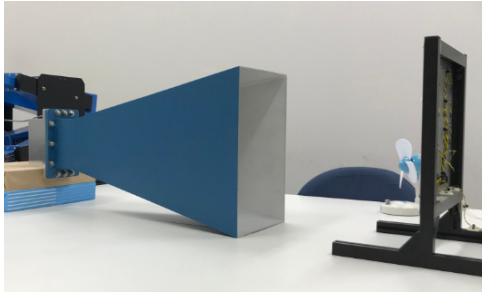
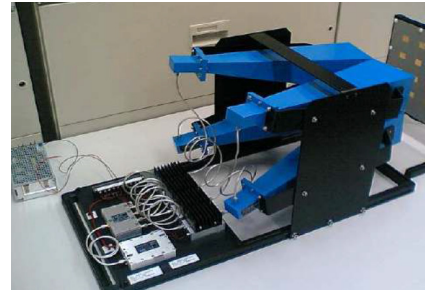


図6 試作した16素子レクテナ

図7は無線電力伝送実験装置を示す。2.13GHzでは一つのホーンアンテナ、5.8GHzでは4つのホーンアンテナを結合した構造で実験装置を組んだ。無線電力伝送実験装置の信号発生は電界効果トランジスタ(Field effect transistor, FET) 発信器により、2.13GHzと5.8GHzの信号を生成した。2.13GHzでは生成された信号を20dBmから38dBmまで増幅できるアンプを挿み、アンテナ利得16dBiのホーンアンテナを経由して送信される。2GHz帯は人体に影響が大きいため、増幅機の出力は1ワットで行った。5.8GHzでは、生成された信号を分配機に入力し、4つの出力信号として分配される。4つの出力信号はそれぞれ4つの移相機に入力



(a) 2.13GHz



(b) 5.8GHz

図7 無線電力伝送実験装置

され、位相制御パソコンにより入力された信号を 5.625 度の分解度で位相を変更した。位相変更された信号を 1 ワットアンプに入力するにはその電力が低いため、中間アンプを経由し、1 ワットアンプに入力される。総送信電力は 4 つのアンプから出力されるため 4 ワットとなる。5.8GHz の送信ホーンアンテナもアンテナ利得が 16dBi であるものを使用した。

表1 無線電力伝送実験装置の諸元

Device	Specification	
	2.13GHz	5.8GHz
Signal generator	10dBm	10dBm
Power divider	-	-6.4dB
Phase shifter	-	6-bit shifter
Sub-amplifier	-	30dB
Power amplification	20dBm ~ 38dBm	30dBm ± 2dB
Horn antenna	15dBi	15dBi
Patch antenna	5.8dBi	6.2dBi
Rectenna	16 patch antennas	16 patch antennas

受信レクテナは 4×4 のパッチアンテナで構成され、各パッチアンテナ設計は誘電率 10、膜厚 1.6 mm の PTFT (Teflon) ボードを用いて行い 2.13GHz のレクテナは 5.8 dBi、5.8GHz のレクテナは 6.2dBi の利得を得る。

表1には無線電力伝送実験装置の諸元を示す。図8は2.13GHzと5.8GHzの送信ビーム特性を示す。今回の実験では、4つのホーンアンテナを用いて実験を行った。単体のホーンアンテナでのビーム発散角 (Beam Divergence) が周波数 2.13GHz と 5.8GHz でそれぞれ、39度、38度となる大きな差はない。しかし、ビームフォーミングを行うとビーム発散角は 22度と単体のホーンアンテナの場合と比べ狭くなる。一般的に低い周波数を使用すると距離に対して伝搬損失は低い。しかし、送信ホーンアンテナの構造により広い角度で放射されるため、単位面積当たりの受信電力が急速に減衰する。そのため、ビーム特性 (M^2) は以下の式で評価を行った[4]。

$$M^2 = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\tan \theta_{div}}{\tan \theta_{div,0}} \quad (2)$$

ただし、 θ_{div} は測定したビーム広がり、 $\theta_{div,0} = \lambda / \pi \cdot d$ で定義される回折限界ガウスビームのビーム広がりである。図8の結果から単体のホーンアンテナ (2.13GHz) の θ_{div} は 19.47度、 $\theta_{div,0}$ は 5.77度であり、5.8GHz では、 θ_{div} は 18.96度、 $\theta_{div,0}$ は 8.6度で、ビーム特性 (M^2) は、2.4GHz が 3.34、5.8GHz は 2.20となる。一方、ビームフォーミング (5.8GHz) を行うと θ_{div} は 10.87度、 $\theta_{div,0}$ は 8.6度となるため、ビーム特性は 1.26とな

り、優れたビームの形成ができる。一般的に位相配列アンテナの各素子数を増やし、全体的な面積を広げても優れたビーム特性を実現できる。

図9は2GHz帯周波数の変換効率特性を示す。RF-DC 変換効率は次の式で定義される。

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_r} \times 100\% \quad (3)$$

ここで P_{dc} は出力直流電力、 P_r は受信電力を示す。レクテナの入力電力が8dBmと11dBmに固定し、周波数を2.1GHzから2.17GHzまで可変した際のRF-DC変換効率特性である。測定結果から分かるようにレクテナの入力電力が高いと変換効率も向上することが分かる。負荷インピーダンスが297.3Ωであるため、2.13GHzから2.15GHzの間で最適な変換効率を実現できる。

図10は5.8GHz実験装置のRF-DC変換効率を示す。測定結果からビームフォーミングを行わない場合、距離が200mmの際には49%、400mmの際には75%と距離が近くなるに伴い変換効率が悪くなっている。一方、距離が延びると変換効率も向上する。その理由としては、入射電力密度が一樣ではないため、場所により各レクテナ素子からの出力が異なり、変換効率が悪化されと考えられる。一方、ビームフォーミングを行った場合は、距離が200mmの際には63%、400mmの際には78%と距離の変化に対して、変換効率の変動が少ないことが分かる。

4 むすび

本研究は、マイクロ波無線電力伝送技術に着目し、ドローン等の新しいエネルギー源として実現させる事と社会インフラの点検、火山等の自然災害監視活動、さらに大規模災害時における緊急の通信手段としての通信サービス計画等の実現のための、エネルギー充電技術を目指した研究開発である。本研究により無線電力伝送がドローン等のエネルギー源として応用できれば、充電等の時間的制約を受けずに持続的かつ安定的にエネルギーを得ながら様々な活躍が期待できる。試作した装置を用いた実験結果からビームフォーミングを行う無線電力伝送が効率良くエネルギー伝送が可能であることからドローン等の電源として利用可能であることを示した。

【参考文献】

- [1] <https://www.tractica.com/wp-content/uploads/2016/04/DCA-15-chart2.jpg>
- [2] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol.32, no.9, pp.1230-1242, September 1984.

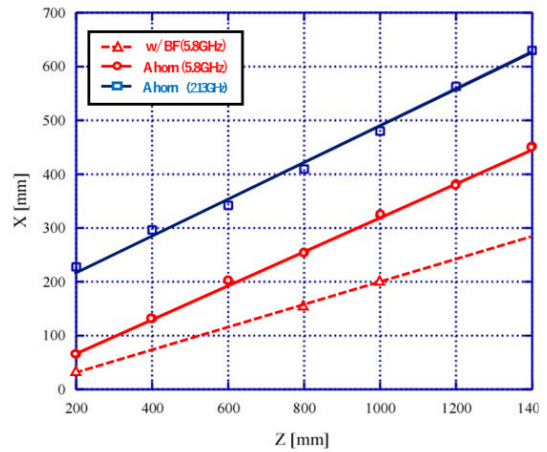


図8 ビーム特性

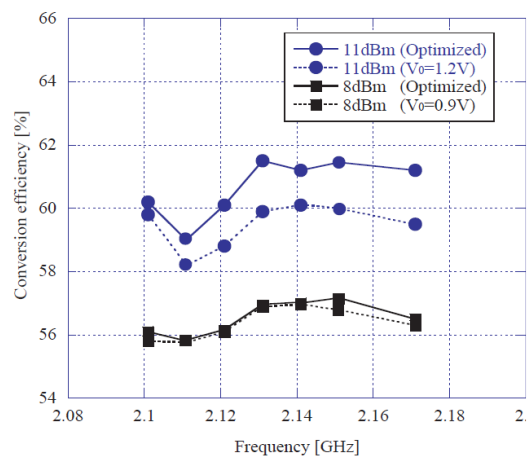


図9 2GHz 帯周波数の変換効率特性

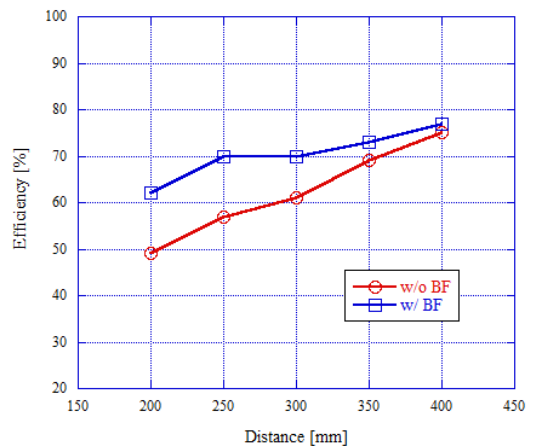


図10 レクテナの変換効率特性(5.8GHz)

- [3] C. Ahn, T. Kamio, H. Fujisaka and K. Haeiwa, "Prototype of 5.8GHz Wireless Power Transmission System for Electric Vehicle System," Proc. of IEEE International Conference on Environmental Science and Technology (ICEST 2011), Singapore, vol.1, pp.128-131, February 2011.
- [4] K. Komurasaki, T. Nakagawa, S. Ohmura, and Y. Arakawa, "Energy Transmission in Space Using an Optical Phased Array, " Transactions JSASS Space Tech. Japan, vol.3, pp.7-11, 2005.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Wireless Power Transmission for Drone Relay Station	Proc. of International Conference on Environment, Geology, Materials (ENGEMA2020)	2020 年 8 月 (発表予定)
Compressed Sensing based Low Complexity 2D-DOA Estimation by Separation and Pair-Matching Approach	IEICE Communications Express	2020 年 6 月
Reducing Channel Spatial Correlation by Rotating Planar Antenna Array	Elsevier ICT express	2019 年 12 月