

飛行船からのマイクロ波送電実験

橋本弘藏[†], 山川宏[†], 篠原真毅[†], 三谷友彦[†], 高橋文人[‡], 米倉秀明[‡], 平野敬寛[‡]
藤原暉雄^{††}, 長野賢司^{‡‡}, 川崎繁男^{†††}

† 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 宇治市五ヶ庄
‡ 京都大学大学院工学研究科 〒611-0011 宇治市五ヶ庄
†† 翔エンジニアリング 〒351-0111 埼玉県和光市下新倉5丁目2番70号
‡‡ スペーステクノロジー 〒340-0834 埼玉県八潮市大字大曾根50-4
††† 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1
E-mail: † {kozo, yamakawa, shino, Mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp
†† qfuji@js5.so-net.ne.jp ‡‡ nagano@space-tech.co.jp ††† kawasaki.shigeo@jaxa.jp

あらまし 世界初の高度約 30m の飛行船からのマイクロ波送電と遠隔制御の実験を行なった。2 台の同期の取れた位相制御マグネトロンをラジアルラインスロットアンテナに給電し、2 素子のアレイアンテナから送電した。地上では、レクテナに LED や携帯電話等をつけて受電したことを示した。

キーワード 無線電力伝送、飛行船、マグネトロン

Microwave Power Transmission Experiment from an Airship

Kozo HASHIOTO[†], Hiroshi YAMAKAWA[†], Naoki SHINOHARA[†], Tomohiko MITANI[†]
Funito TAKAHASHI[‡], Hideaki YONEKURA[‡], Takahiro HIRANO[‡]
Teruo FUJIWARA^{††}, Kenji NAGANO^{‡‡}, and Shigeo KAWASAKI^{†††}

† Research Institute for Sustainable Humansphere, Kyoto University, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

‡ Graduate School of Engineering, Kyoto University, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

†† Sho Engineering Corp., Wako, Saitama, 351-0111 Japan, ‡‡ Space Technology, Yashio, Saitama, 340-0834 Japan

††† Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara, Kanagawa, 229-8510 Japan

Abstract A wireless power transmission experiment by microwave and remote control of the transmission system is conducted from an airship with an altitude of 30m, for the first time in the world. The microwave was transmitted from two elements of radial line slot antennas (RLSA) fed by phase controlled magnetrons.

Keyword Microwave Power Transmission, Airship, Magnetron

1. はじめに

世界で初めての飛行船から地上に向けた送電実験の報告である。基本的な性能評価は、電波暗室や屋外での実験で行い、飛行船に用いては非公開の評価実験と公開実験を実施した。飛行船にはリチウムイオン電池を搭載し、位相の揃ったマグネトロンを共振源としたフェーズドアレイで送電を遠隔制御で行った。搭載のためには、回路の工夫や装置の小型化を行った。レトロディレクティブシステムも搭載し、これらの技術検証を行った。将来的には、移動体による災害時用ユビキタス電源のデモ実証や宇宙太陽発電衛星への第一歩と考えている。

2. 実験システム

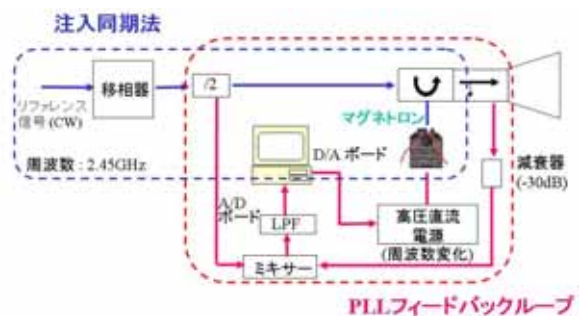


図 1 位相制御マグネトロンの原理図

本実験で用いる位相制御マグネトロン(PCM)の原理を図1に示す。サーキュレータを通してリファレンス信号でマグネトロンに注入同期をかけて周波数を合わせ、位相同期ループ(PLL)で位相も合わせる[1]。送電系のブロック図を図2に、重量を表1に示す[2]。電源は28V30AHのリチウムイオン電池を2個から供給される。飛行船はゴンドラの4点で係留され、高度約30mに設定された。低出力に設計された110WのPCMからラジアルラインスロットアンテナ(RLSA)[3]を用いて送電し、地上で受電する。PCMは小型軽量化のためにサーキュレータを取り除き、外部同期信号を用いないこととした。送電周波数は2.46GHzで免許が下りた。地上からは5.8GHzのパイロット信号を送信し、送電側での到来方向にビームをむけることができるレトロディレクティブシステムとなっている。情報伝送のためのテレメリー・コマンド系には、無線LANに2.142GHzのチャンネルを用いたほか、429MHz帯の特定小電力無線によるデータ伝送系をバックアップに用いた。地上からはkeep aliveを送信し、これが確認できなければ送電しないこととした。

3. 装置の特性

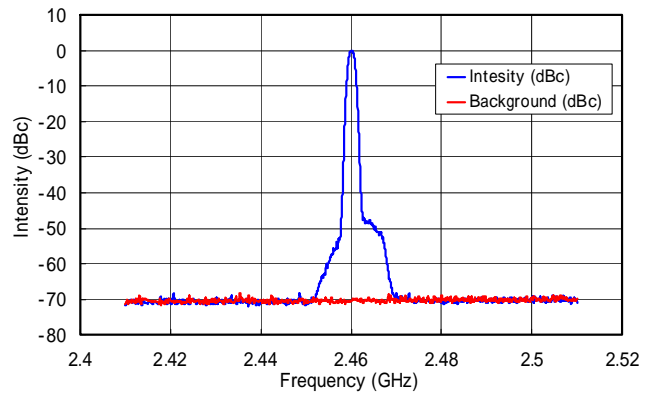


図3 位相制御マグネトロンのスペクトル

マグネトロンの通常の陽極電圧は通常の3.8kVに対して、2.2kVと低電圧に設計されている。電池容量の関係から、出力も110Wと小さい。PCMの中心周波数近傍のスペクトルを図3に示す。スペクトルが-50dB以下で広がっているのは、定電圧電源を簡素簡略化したことによる。落成検査時のデータによると発振周波数は電源投入時から2,459,987kHzで、変動はこれ以下の桁であった。スプリアス特性は、第2高調波:-87.3dBc、第3高調波:-88.3dBcであった。それぞれのPCMの位相制御には、250MHz帯の参照信号間の位相差を電圧制御移相器で制御することにより、ビーム方向を変

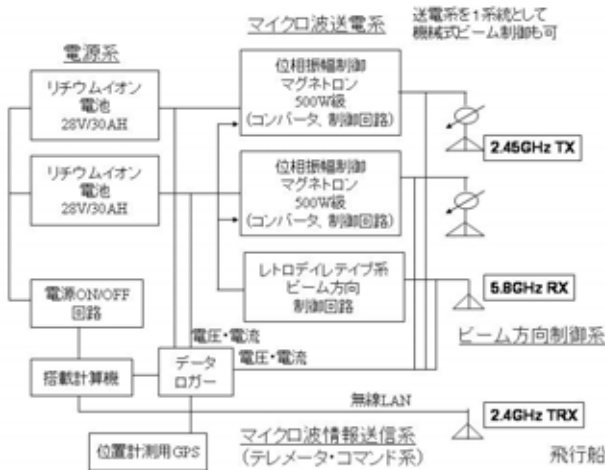


図2 飛行船に搭載する送電系の機器構成図 (計画時、現状は2.46GHz, 110W)

表1 送電系(飛行船搭載)

蓄電池(2個)	9 kg(2個)
マイクロ波送電系	15 kg
レトロディレクティブ系	4 kg
アンテナ系	8 kg(2個)
計測テレメータ操作系	2 kg
電気系・機械系計装	7 kg
合計	45kg



図4 送電系写真

化できる。

送電系の写真を図4に示す。送電アンテナにはラジアル導波路にハニカム構造を充填して軽量化[3]されたRLSAを2素子用いた。直径は72cmで利得の実験値は22.7dBi(開口効率54.6%)であった。PCMのサーキュレータを除いたことによる相互干渉を避けるために、素子間隔は116cmとした。60度毎の位相差に対するアンテナパタンの計算値を図5に示す。間隔が広いため、ビームの半値幅は3度で、6度方向にグレー

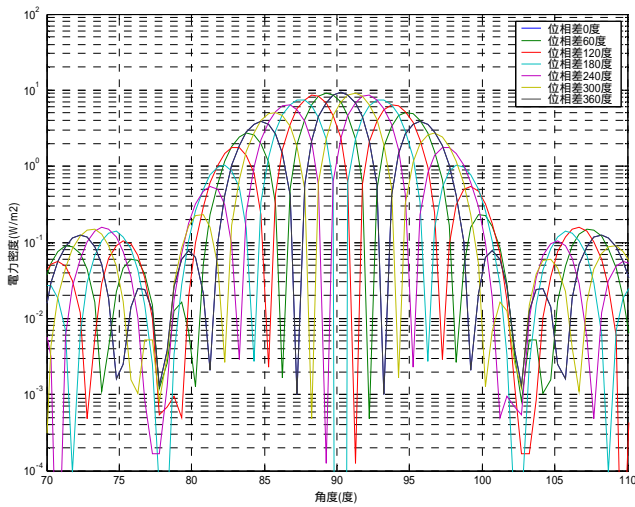


図5 送電アンテナのビームパターン

ティングローブが生じる。地上での電力密度を安全基

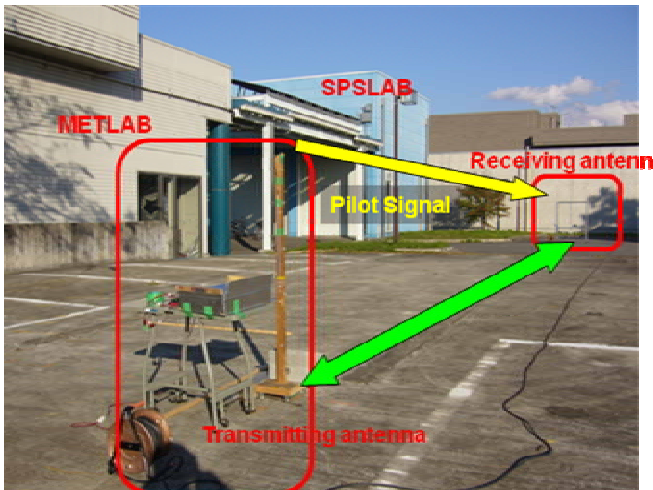


図6 レトロディレクティブシステムの実験

準の $10\text{W}/\text{cm}^2$ 以下とするために、26m以上の高度から送電するように指定された。

レトロディレクティブシステムの評価は、電波暗室 (METLAB)内および図6に示す屋外実験を行った[4]。伝搬距離は、暗室内 5.4m、屋外で 25mであった。パイロット信号の送信および到来方向測定は、飛行船実験用のシステムを用いた。受信素子間隔が 30cm の場合は平均推定誤差の最大値は、暗室内で 0.15 度、屋外で 0.7 度、また標準偏差の最大値は暗室内で 3.6×10^{-2} 度、屋外で 9.5×10^{-2} 度であった。到来方向の測定結果をもとに、可変移相器を制御し、レトロディレクティブシステムを構成している。送信には、別途免許を取得した 8 素子のパッチアンテナのそれぞれに半導体による 10mW 送信機を接続したアクティブフェーズドアレイを用いて、特性を評価した。屋内実験では、送電方向に 0.66 度位の誤差が生じ、到来方向誤差が加わ

って 0.56dB 位の受信電力差が生じた。ビーム方向制御のための位相器の誤差やアンテナ素子の個体差等によるものと考えられる。屋外では、暗室内のように設備が整っていないために、測定精度が落ちるが、送電方向に 1.2 - 1.7 度の誤差が生じた。送電ビームの較正に暗室内での値を用いざるを得なかったことも一因である。

4. 第1回飛行船実験

2009年3月5日に京都大学宇治総合グラウンド



図7 第1回飛行船実験

で高度 33m に飛行船を係留して送電実験を行った。図7に高度上昇中の様子を示す。搭載システムの様子が見える。送電系は正常に動作した。飛行船の下で図8に示す4素子レクテナに接続した電子ブザーが送電と同時に鳴り出し、送電状況を把握する上で効果的であった。

また 12 素子のレクテナに携帯を接続し、充電ランプの点灯を確認した。無線 LAN は、送電開始後は残念ながら通信が困難になったため、コマンドはバックアップ系の小電力無線を使用した。

レトロディレクティブ系に関しては、飛行船の真下

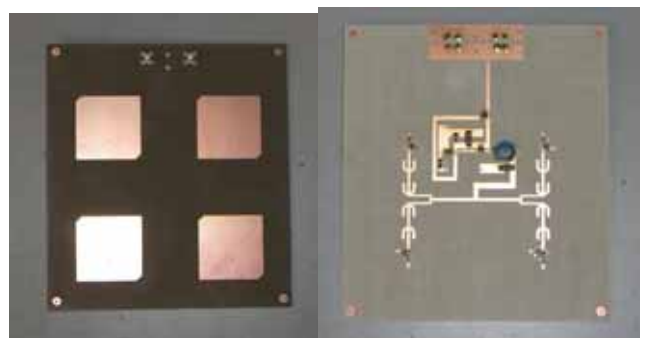


図8 4素子レクテナのアンテナ面と整流回路面

辺りからパイロット信号を送信していたが、風はほとんどなかったにも拘らず、飛行船は様々な方向に揺れていたため、到来方向の測定結果が大きく変化した。このため、地上での送電アンテナのパタンの測定は、ピークの位置の決定もできなかった。同様に、レトロディレクティブ動作の評価もできなかった。なお、実験中にパイロット信号送信機を人為的に移動したが、それに対応して到来方向が変化し、測定システムが動作していることが、定性的には確認できた。

5. 第2回飛行船実験

3月10日に公開デモ実験を行ない、送電実験は成功した。比較的多数の参加者があり、新聞やテレビでも報道され、関心を持ってもらうことが出来た。この日は、木の枝が揺れる程度とはいえ、前回よりも風が強かった。公開実験の後に再度実験を試みたが、「強風」のために中止した。

6. アプリケーション



図9 将来の災害時の ad hoc な携帯電話基地局兼無線送電通話システム

本技術は災害発生時における移動体搭載型の携帯電話基地局設置への展開が可能である。つまり、図9に示すように、災害復旧までの ad hoc な携帯電話基地局という概念を構築できる。大地震等の大災害が発生したときに、停電、既存の電話回線の切断、携帯電話基地局の倒壊等により、復旧まで数日間携帯電話の回線が成立せず、さらに、携帯電話の充電も行えない状況が考えられる。この状況を打開できるのが、災害発生直後から災害復旧までは数日間に使用可能な移動体

搭載型で、かつ、無線送電機能を付加した携帯電話基地局システムである。移動体としては、移動能力、継続飛行時間、運航の安全性の観点から飛行船が挙げられる。地上で必要になるのは、数10g程度で1m²程度のふるしき展開型の受電アンテナだけであり、これを災害グッズとして携帯し、災害時には、携帯電話と接続することにより、充電および通話が、飛行船基地局を介して可能となる。

7. むすび

世界で初めて、飛行船(高度30m)から地上に向けて、マイクロ波による無線電力伝送実験に成功した。3月10日には報道関係者等に向け、公開実験を行い、成功した。PCM系と無線LANとの干渉は、暗室内の試験では除くことができていたが、飛行船実験時の両立は今後の課題である。移動体による災害時用ユビキタス電源システムのデモ実証、また、宇宙太陽発電衛星の実現に向けた一歩としても位置づけられる。

謝辞

RLSAを製作していただいた東京工業大学の上田英樹氏、安藤真教授に謝意を表します。また、科学研究費基盤研究B(18360171、研究代表者:橋本)、財団法人国際コミュニケーション基金(以下、研究代表者:山川)、科学技術振興機構(JST)地域イノベーション創出総合支援事業 重点地域研究開発推進プログラム平成19年度シーズ発掘試験、京都大学総長裁量経費等の助成を受けて行われた。

文献

- [1] 篠原真毅、三谷友彦、松本紘、位相制御型マグネトロンの開発研究、電子情報通信学会論文誌C、Vol. J84-C、No.3、pp.199-206、2001
- [2] 山川宏、橋本弘藏、川崎繁男、篠原真毅、三谷友彦、高橋文人、米倉秀明、平野敬寛、藤原暉雄、長野賢司、"飛行船を用いたマイクロ波無線電力伝送実験",第52回宇宙科学技術連合講演会、淡路島、2008年11月5-7日
- [3] 上田英樹、安藤真、篠原真毅、山川宏、藤原暉雄、長野賢司、ユビキタス電源を目指した、飛行船によるマイクロ波送電実験用八二カムラジアルラインスロットアンテナの設計試作、電子情報通信学会技術研究報告、SPS2008-03、2008
- [4] 高橋文人、橋本弘藏、マイクロ波送電用レトロディレクティブシステムの開発及び屋外実験、電子情報通信学会技術研究報告、SPS2008-15、2009