

3. レクテナを用いたモータ駆動試験と MILAX 飛行実験

藤野 義之*¹ 藤田 正晴*² 伊藤 猛男*³ 松本 紘*⁴
賀谷 信幸*⁵ 藤原 暉雄*⁶ 佐藤 達男*⁷

(1998年6月15日受理)

3. DRIVING TEST OF A SMALL DC MOTOR WITH A RECTENNA ARRAY AND MILAX FLIGHT EXPERIMENT

By

Yoshiyuki FUJINO, Masaharu FUJITA, Takeo ITO, Hiroshi MATSUMOTO,
Nobuyuki KAYA, Teruo FUJIWARA, and Tatsuo SATO

Microwave power transmission is thought to be one way to supply energy to stratosphere radio relay aircraft. Although it has sometimes been assumed that DC power extracted with a rectenna is used for motor driving to propel the aircraft, there has not been, to the authors' knowledge, any report on the characteristics of the issue. This paper describes the results of a DC motor driving test with power sent by microwaves and extracted with a rectenna array. The results were then applied to the design of a microwave power transmission system for the Microwave Lifted Airplane eXperiment (MILAX). The outline of MILAX is also described to demonstrate the feasibility of microwave power transmission techniques.

[キーワード] マイクロ波電力伝送, モータ駆動, レクテナ, MILAX

Microwave power transmission. Motor drive, Rectenna, Microwave
lifted airplane experiment, MILAX

1. はじめに

成層圏無線中継システム⁽²⁾は、高度 20 km 付近に無人飛行体を滞空させて、通信の中継や環境観測他の様々な目的に利用する計画であり、この

飛行体への電力供給の手段として、マイクロ波電力伝送技術が想定されている。これは、地上で生成した電力をマイクロ波の形に変換して細いビーム状の電波で送電し、飛行体上に搭載したレクテナと呼ばれる電波を電気に変換するアンテナで受電して電力を得る方法である。飛行体ではこのようにして供給された電力によって電気モータに接続したプロペラを回転させ、推進力を得る。レクテナ⁽³⁾は受電用のアンテナと整流回路が一体となったデバイスであり、マイクロ波電力伝送における最も重要な要素技術の一つである。

レクテナの直流出力特性を評価するためには、通常の場合、抵抗負荷が用いられてきた⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。

*1 企画部企画課 (ATR 環境適応通信研究所出向中)
*2 地球環境計測部
*3 元電磁波技術部通信デバイス研究室
*4 京都大学超高層電波研究センター
*5 神戸大学工学部情報知能工学科
*6 日産自動車(株)宇宙航空事業部
*7 富士重工(株)航空宇宙事業本部
本論文の一部の内容は文献(1)で発表したものである。

しかしながら、飛行体の推進を目的とした電力供給を考えたときには、実際と同様に電気モータを負荷とした場合のレクテナの出力特性の評価が必要となる。しかし、著者等の知る限り、レクテナでモータを駆動させたときの出力特性に関する報告はない。そこで、このことを明らかにするため、実際にマイクロ波電力伝送の実験系を構築し、モータ駆動の実験を行って、基礎的なデータを取得した。

また、1992年にはここで得たモータ駆動に関する基礎データをもとに、成層圏無線中継プラットフォームの低空での飛行基礎実験と位置づけられるデモンストレーション実験を複数機関の共同で実施した。これは、マイクロ波電力伝送技術を利用して小型の模型飛行機を低空で飛行させる計画であり、MILAX実験(Microwave Lifted Airplane eXperiment, マイクロ波駆動小型模型飛行機実験)と呼ばれている。

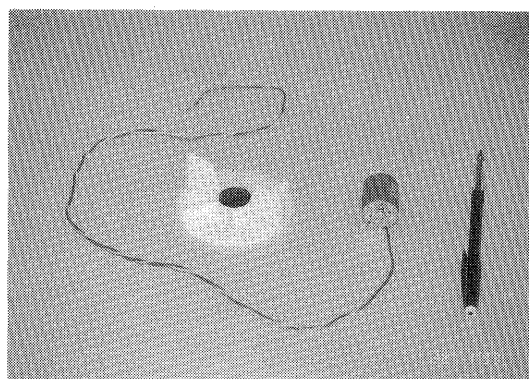
本論文では、レクテナアレーのモータ駆動試験と、得られたデータをもとに実施したMILAX実験の概要を併せて述べる。

2. モータ駆動実験

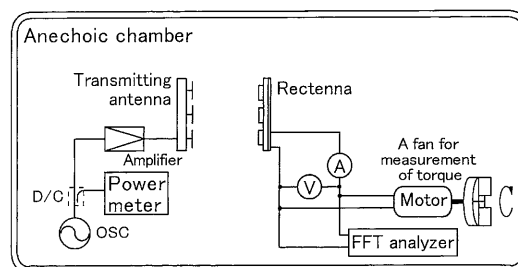
直流モータを負荷としたときのレクテナの出力特性は負荷を抵抗としたときとは異なると考えられるが、その状況は明らかではない。そこで、我々はトルク測定用の小さなファンが付いた小型直流モータを駆動してその出力特性を測定し、抵抗負荷としたときの出力特性と比較した。これにより、モータ負荷としたときのレクテナの動作に関する基礎データが得られた。

第1図に実験で使用したモータとファンの写真を示し、第2図に電波暗室内に設けた実験系のブロック図を示す。発信器で周波数2.412 GHzの電波を生成し、方向性結合器を経由した後、電力増幅を行い送電アンテナに入力する。方向性結合器の結合出力端には、送電電力をモニタするための電力計が接続されている。送電アンテナは、最大出力60 Wの6素子ダイポールアクティブフェーズドアレーであり、6配分された入力のそれぞれのチャンネルに4ビット移相器と最高出力10 Wの電力増進器が取り付けられた構造となっている。6素子それぞれの移相器のビット設定を手動で変

化させ、空間電力合成により受電点において最高電力が得られるように調整した。電波は0.6 m離れた所に設置した受電用のレクテナアレーで受電される。レクテナアレーは7素子であり、各々の素子は円形マイクロストリップアンテナと入出力フィルタ及びダイオードから成る整流回路から構成されている。本7素子レクテナアレーは、マイクロ波駆動小型模型飛行実験(MILAX)⁽⁸⁾用のために開発した120素子レクテナアレー⁽⁹⁾の一部の素子を使用しており、薄型で極めて軽量に作成されている。このレクテナアレーのRF-DC変換効率は52.7%であり、1素子あたりの定格出力電力は1 Wであった。また、1素子レクテナのRF-DC変換効率が最高となるときの負荷純抵抗は約100 Ω で、これを以下最適負荷抵抗と呼ぶことにする。レクテナアレーの各素子の出力は全て並列に接続した。モータ側で要求する電圧とレクテナ1素子の出力電圧が同程度であったため、レクテナの直列接続による電圧の増加は必要なく、電流の増加を主目的としたためである。各レクテナ素子に入力される電力が等しく、かつダイオードの動作点が一致していれば、レクテナ素子を並列に接続したときの最適負荷抵抗値は素子数に反



第1図 実験で使用したモータとファン



第2図 モータ駆動実験のブロック図

比例することが確認されており^{(7), (10)}, 本レクテナアレイの場合, その値は 14Ω となる.

7素子レクテナアレーから出力された直流電力は, 電圧計および電流計を経由して負荷である小型モータに入力される. その定格は 11 V の電圧を加えたときに, 消費電力が 7.7 W , 機械出力が 3.2 W であり, 回転数は 3000 r.p.m である. このとき, モータの定格から計算される抵抗値は約 15Ω となるが, この値はレクテナアレーの最適負荷抵抗値である 14Ω にほぼ等しくなるように設計されたものである. モータの回転数は, 第2図に示すFFTアナライザで測定したモータのブラシノイズの周波数スペクトルから求めた. ここで用いたモータのトルクは, 機械負荷として第1図に示す標準ファンを使用したとき, 次式で計算することができる⁽¹¹⁾.

$$T = \left(\frac{N}{380} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで, T は $[\text{g} \cdot \text{cm}]$ で表したトルクであり, N は $[\text{r.p.m.}]$ で表した回転数である. また, 機械出力はトルクと回転数から, 次式で与えられる⁽¹²⁾.

$$P = \frac{N \times T}{97500} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, P は $[\text{W}]$ で表した出力パワーである.

レクテナの入力電力を求めるため, マイクロ波電力伝送実験に先立って, 切り離し導波管アンテナを用いてレクテナアレーを設置する面上の電力束密度分布を測定した. 測定された電力束密度を面上で積分して入射電力とした. レクテナアレー

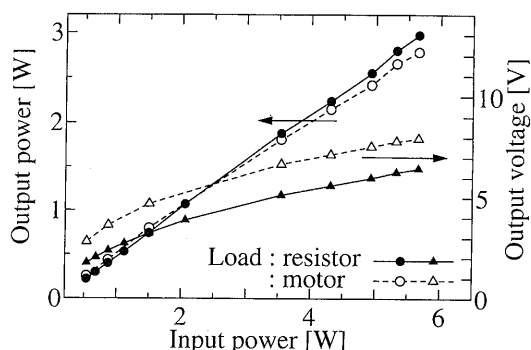
の入力電力を正確に推定するために, それぞれの素子の利得から切り離し導波管アンテナと円形パッチアンテナの実効開口面積を決定し, 補正を行った.

3. 実験結果

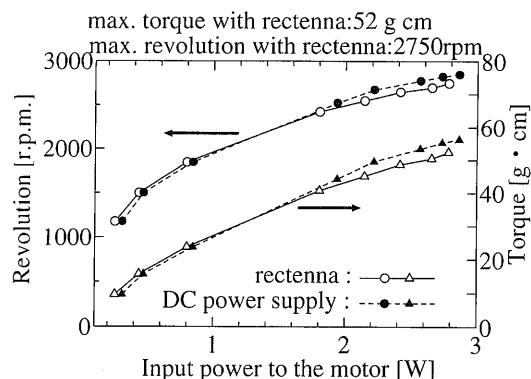
第3図に, レクテナの入射電力に対する出力電力と出力電圧を, 抵抗負荷とモータ負荷のそれぞれの場合について示す. 両者の出力電力は概ね一致している. これは, 抵抗負荷, モータ負荷のいずれの場合においても, レクテナのRF-DC変換効率がほとんど変化しないことを示している. しかしながら, モータ負荷の場合の出力電圧は抵抗負荷の場合よりも 1.5 V 以上大きくなっていることが分かる. このとき, モータの巻線抵抗値は負荷抵抗値に比べて十分低く, この抵抗のみではこのように高い端子電圧は期待できない. モータ負荷が接続されたときの高い端子電圧は, モータの回転に伴って発生した電圧(逆起電力)であると考えることができる.

次に, 電源としてみたときのレクテナの出力特性を明らかにするために, レクテナの出力電力に対するモータの機械出力およびトルクを直流電源の場合と比較して測定した. レクテナ出力の簡易的な等価回路は, 電圧源 v と仮想的な内部抵抗 R_i および負荷抵抗 R_L の3者の直列接続として表される. この等価回路において負荷抵抗 R_L への伝送電力が最高となる条件は $R_i = R_L$ のときであるから, レクテナの最適負荷抵抗の値を内部抵抗値として用いることでレクテナの出力特性を近似する等価回路が表現できる⁽¹⁰⁾.

第4図にレクテナ出力電力に対するモータの回転数とトルクを示す. 比較のため, 直流安定化電源を用いてモータを駆動した時の結果も併せて示す. このとき, レクテナの内部抵抗を模擬するため, 直流安定化電源に直列に 14Ω の抵抗を接続した. レクテナと直流電源を使ったデータは互いに良く一致しており, レクテナの直流的な等価回路の妥当性が示された. レクテナを使用したときの最大回転数は $2750 [\text{r.p.m.}]$ が得られており, また, このときのトルク数は $52 [\text{g} \cdot \text{cm}]$, 機械出力は 1.48 W であった. このときのマイクロ波の入力電力は 5.66 W と計算されているので, レ



第3図 モータ負荷および抵抗負荷の時のマイクロ波入力電力に対するレクテナアレーの出力特性



第4図 レクテナおよび直流安定化電源の出力電力対モータの回転数及びトルク

クテナへのマイクロ波入力電力からモータの機械出力までの全効率⁽⁹⁾は26%となった。レクテナの効率は52.7%⁽⁹⁾であり、モータ効率は回転数とトルクによって変化するが、50%前後であるから⁽¹¹⁾、全効率は26%と計算され、レクテナへの入力電力とモータの機械出力から求められた値と一致することが確認された。

4. MILAX 実験の概要

MILAX 実験とは、MICrowave Lifted Airplane Experiment の略であり、マイクロ波で伝送した電力を用いて小型模型飛行機を飛行させる実験である。この種の実験としてはカナダのCRC (Communications Research Centre) が1987年にSHARP (Stationary Hight Altitude Radio relay Platform) 計画の一環として行った実験^{(13), (14)}に次いで世界で2例目の実験となった。

MILAX 実験の目的は2つあり、一つは成層圏無線中継用のプラットフォームへのエネルギー供給手段として想定されているマイクロ波による電力伝送技術の基礎実験として位置づけられる。また、1993年2月には世界初の宇宙空間におけるマイクロ波電力伝送実験であるISY-METS実験 (International Space Year-Microwave Energy Transmission in Space) が計画されていたが、この実験にMILAX実験で使用された送電機が使用されることが決定していた。従って、MILAX実験は、これらのマイクロ波送受電機の動作試験という側面も持っていた。

MILAX実験においては送電機、レクテナ、模

型飛行機、追尾装置等の専門的な技術が要求されるサブシステムを必要としたので、複数の機関で協力して課題に取り組むこととした。これらの機関名と、それぞれの分担は以下の通りである。京都大学超高層電波研究センターおよび神戸大学工学部は送電用アクティブフェーズドアレーアンテナの開発及び全体の総轄、日産自動車(株)は追尾装置の製作と送電系のまとめを、富士重工(株)は、飛行体であるモーターグライダーの設計、製作を、マブチモータ(株)は、推進用モータの製作をそれぞれ行った。通信総合研究所は受電用レクテナの開発を行った。

計画の当初は送電機を地上に置く予定であったが、模型飛行機が旋回したときの伝送電力の低下量が大きいため、真下から送電を行う必要が生じた。そこで、自動車に送電機を搭載し、模型飛行機の下を併走しながら、エネルギーを供給する方式を採った。

5. MILAX システムの概要

ここでMILAX実験システムを構築する各サブシステムについて述べる。

送電システムはアクティブフェーズドアレーの構成であり、発振した2.411 GHzのマイクロ波は96分割の後、それぞれが移相器、高出力アンプ、アンテナを経由して送電され、空間で合成されてマイクロ波電力伝送のためのビームが形成される。移相器はPINダイオードを使用した4ビットデジタル移相器であり、その位相量は追尾回路から得られた模型飛行機の位置情報から計算され、制御される。高出力アンプはGaAsFETを使用した増幅器であり、1台で最高13wの電力を出力する能力を有している。また、アンテナは1点給電の円偏波マイクロストリップアンテナであり、3素子のアンテナをまとめてサブアレーを形成し、これに1素子アンプの出力を接続している。最高出力電力は1250wであり、アンテナ素子数は288となった。この送電アンテナは送電用自動車の上部に取り付けられた。

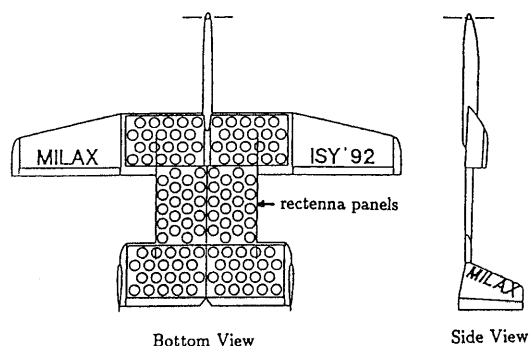
追尾システムは、送電車上面のアンテナ部の両端に設けられた2基のCCDカメラの映像を用いて、送電アンテナから模型飛行機までの角度、距離を算出し、このデータを元に、移相器を制御し

て、模型飛行機方向に送電ビームを集中する機能を持っている。

MILAX 実験に使用した模型飛行機は全長 1.9 m、全幅 2.5 m、全重量 4 kg (レクテナアレイを含む) の機体であり、レクテナを搭載するために、翼面積が大きく設計されている (第 5 図)。この模型飛行機には、駆動用のモータが 1 基搭載されており、駆動に要する電力として 100 w 程度が必要であると見積もられた。

MILAX のために開発されたレクテナは重量が約 1 kg、厚さが 5 mm と軽量化、薄型化を実現している。このため、アンテナ部にマイクロストリップアンテナを採用し、またその基板材料にペーパーハニカムを使用している。RF-DC 変換効率は 52.7% であった⁽⁹⁾。また、レクテナ 1 素子で受電できる電力は概ね 1 w であったので、機体側で要求する電力を考慮しつつ、予備を含めて 120 素子のレクテナアレイを作成することとした。このレクテナアレイは 20 素子のサブアレイパネル 6 枚に分割されて、第 6 図に示す模型飛行機に搭載された。モータ側で要求される電圧とレクテナ 1 素子の電圧は今回もほぼ等しかったため、全てのレクテナ素子の出力端子は並列に接続した。このため、MILAX 用レクテナアレイの最適負荷抵抗は 0.83Ω となった。また、駆動用モータはその内部抵抗値をレクテナの最適負荷抵抗値と合致させるように製作した。

模型飛行機にはバッテリーを搭載し、離昇時はこの電力により動力上昇し、十分高度を取ったあとで送電車が真下を並走する形になった後、レクテナ電力に切り替えることとした。レクテナへの切り替えは操縦者の判断でラジコンによって行うこ



第 5 図 MILAX 模型飛行機の外観図

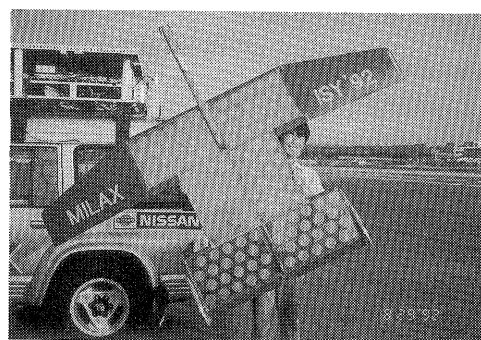
とができ、豆ランプを点灯させて外部から確認できるようにした。

6. MILAX 実験について

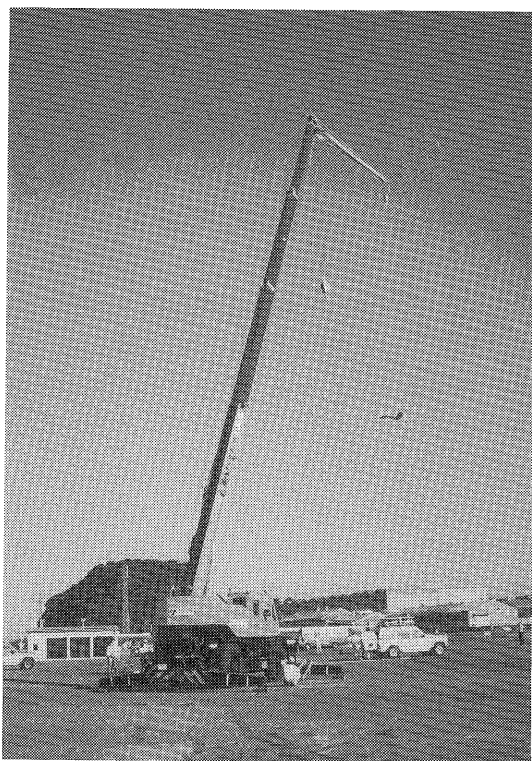
MILAX 実験は順序を追って実施された。はじめに、CRL 内の大型電波暗室に於いて MILAX 実験用に開発した送電機とレクテナを対向させ、マイクロ波電力伝送試験を実施した。これは、予めレクテナから十分な電力が得られることを確認する必要があったためと、送電機であるアクティブフェーズドアレイアンテナのビーム方向の調整のために、電波暗室内で角度特性を測定することが不可欠であったためである。この時点で 68 w 程度の直流電力がレクテナで得られることが確認された。機体側の試算の結果、この電力値では水平飛行を維持するためのぎりぎりの値であることが判明したが、実際の屋外に於ける実験時には送電機の電源として十分な容量のバッテリーを使用する予定であり、より大きな電力が得られることが期待された。

屋外での飛行実験は日産自動車㈱の追浜テストコースにおいて、8 月 22 日、23 日に行われた。まず、マイクロ波出力電力の確認を目的として、固定試験を行った。この写真を第 7 図に示す。推進用モータの代わりに疑似負荷を搭載した機体をクレーン車で送電車の上空 10 m に釣り、送電試験を行った。機体が風によって動揺したので、レクテナの出力電力も変化した。80 w 以上の最大出力が確認された。この出力電力は、模型飛行機の飛行のための電力としては十分であった。このときの出力電力の時間変化を第 8 図に示す。

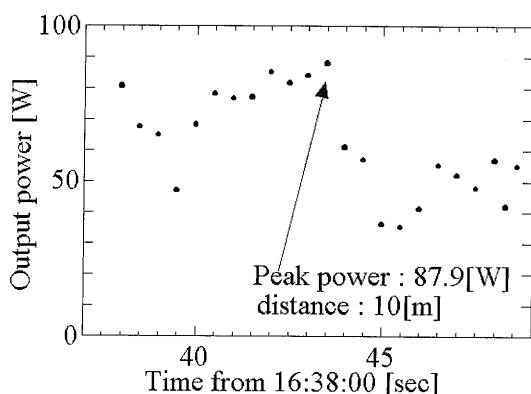
その後、モータを取り付けて釣り下げた状態で拘束飛行試験を行ない、送電アンテナから送電し



第 6 図 MILAX 模型飛行機の外観写真



第7図 固定試験の写真



第8図 固定試験時のレクテナの出力電力の時間変化

たマイクロ波によって、モータが回転することを確かめた。また、自由飛行にも挑戦したが、この日は風が強く、失敗に終わった。

その後、8月29日早朝に再度の自由飛行試験を行なった。当日は快晴無風状態の絶好の条件であった。関係者が見守る中、MILAXの機体はバッテリーによって動力上昇し、送電車の上空にさしかかったところで駆動用電源がバッテリーからレクテナに切り換えられた。その瞬間、MILAXの機体はレクテナからの電力を得て、プロペラを回

転させ、送電車の上空約10mを高度を維持し、さらに上昇しようとした。飛行時間は約40秒間であり、飛行距離は350mであった。このときの写真を第9図に示す。画面上方に模型飛行機があり、中央が送電車である。左側は送電車に模型飛行機の前後の位置を知らせるための補助車であり、後方の車はラジコンの操縦者が乗っている。これにより、日本初、世界でも2例目のマイクロ波による模型飛行機の飛行実験は成功裡に終了することができた。

7. む す び

本論文では、成層圏無線中継システム用のマイクロ波電力伝送技術の開発の一環として、レクテナによるモータ駆動試験と、その応用としてのマイクロ波送電による小型模型飛行機の駆動実験の2種の実験に関して述べた。送電されたマイクロ波からレクテナアレーで取り出した電力を用いてモータを駆動する試験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) モータ負荷の抵抗値をレクテナの最適負荷抵抗値と一致させれば、レクテナの直流出力特性は抵抗負荷の時とモータ負荷の時ではほぼ一致する。
- (2) (1)で記した条件の下では、レクテナ出力を抵抗負荷を用いて評価する従来の方法が有効である。

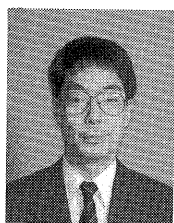
また、ここで得たモータ駆動に関する基礎データに基づいて、マイクロ波駆動小型模型飛行機実験(MILAX)を実施した。MILAX実験では模型飛行機上で88wの受電電力を確認し、世界で2例目のマイクロ波電力送電による模型飛行機の自由飛行試験に成功した。



第9図 マイクロ波駆動小型模型飛行機の自由飛行試験。(1992年8月29日早朝、350m、40秒間の自由飛行に成功した。)

参 考 文 献

- (1) Y. Fujino, T. Ito, M. Fujita, N. Kaya, H. Matsumoto, K. Kawabata, H. Sawada, and T. Onodera, "A driving test of a small DC motor with a rectenna array.", IEICE Trans. on Communications, Vol. E77-B, No. 4, PP. 526-528, Apr. 1994.
- (2) 高澤金吾, 森弘隆, "成層圏無線中継システムについて—高高度無人航空機の移動通信への適用の検討—", 信学誌, Vol. 73, No. 1, pp. 69-71, 1990.
- (3) W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-32, No. 9, pp. 1230-1242, Sep., 1984.
- (4) 島貫靖士, 安達三郎, "マイクロ波電力伝送用アレイの理論的・実験的検討", 信学論(B) Vol. J 67-B, No. 11, pp. 1301-1308, Nov., 1984.
- (5) 伊藤精彦, "太陽発電衛星受電用地球局素子「レクテナ」に関する基礎的研究", 昭和58年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書, Mar., 1984.
- (6) 大塚昌孝, 大室統彦, 柿崎健一, 齊藤誠司, 黒田道子, 堀内和夫, 副島光積, "有限レクテナアレイの素子間隔と受電効率", 信学論(B-II), Vol. J 73-B-II, No. 3, pp. 133-139, Mar., 1990.
- (7) T. Ito, Y. Fujino and M. Fujita, "Fundamental experiment of a rectenna array for microwave power reception", IEICE Trans. on Communications, Vol. E76-B, No. 12, pp. 1508-1513., 1993.
- (8) 松本紘, 賀谷信幸, 藤田正晴, 藤野義之, 藤原暉雄, 佐藤達男, "MILAXの成果と模型飛行機", 第12回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, 1993.
- (9) 藤野義之, 藤田正晴, 沢田寿, 川端一彰, "MILAX用レクテナ", 第12回宇宙エネルギーシンポジウム, 宇宙科学研究所, pp. 57-61, 1993.
- (10) R. J. Gutmann and J. M. Borrego, "Power combining in an array of microwave power rectifiers", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-27, No. 12, pp. 958-968, Dec., 1979.
- (11) "マブチモーターデータブック No. 9", マブチ(株), 1991.
- (12) マブチモーター(株)齊藤秀信氏の私信, 1992.
- (13) J. J. Schlesak and A. Alden, "SHARP rectenna and low altitude flight tests", Proc. of IEEE Global Telecomm. Conf., New Orleans, Dec., 1985.
- (14) J.J. Schlesak, A. Alden and T. Ohno, "A microwave powered high altitude platform", Proc., IEEE MTT-S International Symposium, May, 1988.



藤野 義之
Yoshiyuki FUJINO
企画部企画課 (ATR環境適応通信
研究所出向中)
E-mail: fujino@acr.atr.co.jp



藤田 正晴
Masaharu FUJITA
地球環境計測部
マイクロ波リモートセンシング
E-mail: mfujita@crl.go.jp



松本 紘
Hiroshi MATSUMOTO
京都大学超高層電波研究センター
教授
宇宙電波工学
E-mail:
matsumot@kurasc.kyoto-u.ac.jp



賀谷 信幸
Nobuyuki KAYA
神戸大学工学部情報知能工学科教授
マイクロ波無線送電, 宇宙太陽発電
衛星
E-mail: kaya@kobe-u.ac.jp

佐藤 達男
Tatsuo SATO
富士重工工業株式会社航空宇宙事業本
部宇都宮製作所第三技術部長
航空機システム開発
E-mail:
Satout5@pow2.ae.subaru-fhi.co.jp