

## マイクロ波電力伝送による小型無人航空機の飛行能力の検証

○平岡 京<sup>1</sup> 福田 敬大<sup>2</sup> 長濱 章仁<sup>3</sup> 鳴海 智博<sup>4</sup> 松本 剛明<sup>4</sup>  
三谷 友彦<sup>5</sup> 篠原 真毅<sup>5</sup> 米本 浩一<sup>6</sup>

1 九州工業大学工学部機械知能工学科 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

2 九州工業大学大学院工学府機械知能工学専攻

3 京都大学大学院工学府電気電子工学専攻 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

4,6 九州工業大学工学研究院機械知能工学研究系宇宙工学部門

5 京都大学生存圏研究所生存圏電波応用分野

E-mail: 1, 2 {h104098k, j344145k}@tobata.isc.kyutech.ac.jp

3, 5 {nagahama, mitani, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp

4, 6 {narumi, matumoto, yonemoto}@mech.kyutech.ac.jp

**あらまし** 九州工業大学では、マイクロ波電力伝送を利用した火星飛行探査システムの研究に取り組んでいる。本研究では、マイクロ波電力伝送用レクテナの製作を行い、京都大学生存圏研究所所有の METLAB 電波暗室内において性能評価試験および小型実験機 MAV (Micro Aerial Vehicle) による飛行実験を行った。まず、レクテナ間の干渉を調べるため受信電力評価試験を行った。次に、飛行実験のための MAV を制作するため、機体諸元を仮定して搭載するレクテナの配置・個数を検討し、飛行に必要な電力を得られる構成を検討した。飛行実験では、手動トラッキングによりマイクロ波電力伝送による直線飛行に成功し、MAV の飛行能力を実証した。

**キーワード** マイクロ波電力伝送, 火星飛行探査, レクテナ

## Flight Capability Verification of a Micro Aerial Vehicle that is Propelled by Microwave Power Transmission

Kei HIRAOKA<sup>1</sup>, Keita FUKUDA<sup>2</sup>, Akihito NAGAHAMA<sup>3</sup>, Tomohiro NARUMI<sup>4</sup>,  
Takaaki MATUMOTO<sup>4</sup>, Tomohiro MITANI<sup>5</sup>, Naoki SHINOHARA<sup>5</sup>, and Koichi YONEMOTO<sup>6</sup>

1,2 Department of Mechanical and Control Engineering, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui, Tobata,  
Kitakyushu, Fukuoka, 804-8550 Japan

3,5 Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokajo, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

4,6 Space Engineering Section, Department of Mechanical and Control Engineering, Faculty of Engineering,  
Kyushu Institute of Technology

E-mail: 1, 2 {h104098k, j344145k}@tobata.isc.kyutech.ac.jp

3, 5 {nagahama, mitani, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp

4,6 {narumi, matumoto, yonemoto}@mech.kyutech.ac.jp

**Abstract** Kyushu Institute of Technology makes research on the Mars flight exploration flight system utilizing microwave power transmission. This study aims at design, prototype production and performance tests of rectenna, and finally flight experiments using a small fixed wing type airplane MAV (Micro Aerial Vehicle). The flight experiment was conducted in the anechoic radio wave chamber of METLAB at the RISH (Research Institute for Sustainable Humanosphere) of Kyoto University. As the result of the performance test, new variety data concerning the interference characteristics between rectennas were obtained. Then the received power of the rectennas mounted to the MAV was measured, and it was confirmed that the MAV is capable to fly. In the actual flight experiment, the straight flight by power was confirmed. A lot of findings with regard to design for the MAV were achieved by the experiment.

**Keyword** MicroWave Power Transmission, Mars Exploration Flight System, Rectenna

## 1. 序論

現在、NASA や JAXA をはじめとして大気を有する惑星の探査が計画・実行されており、中でも火星が注目を集めている。火星の大気循環は地球と同様に考えられ、これを知ることが、地球の気象学では実現しえない現実の大気での広範囲なパラメータスタディを可能にし、両惑星の普遍的な理解につながるため探査の対象となっている。また、探査方法については地表面を自走するローバー・周回軌道を回る衛星によるものがあるが、近年は飛行機による探査が検討されている。利点としては地表の障害物や地形に影響されないためローバーよりも広範囲に、かつ衛星よりも高精度に探査が可能となることである。しかし、火星大気密度は地球上の 1/100 ほどしかないため、機体、搭載機器の大幅な軽量化が必要となる。そこでマイクロ波電力伝送を利用した探査システムが検討されている。この電力伝送システムを導入することで、バッテリーや燃料などの電力源による飛行時間の制約がなくなるほか、探査機自身に動力源を搭載する必要がなく小型化・軽量化が期待できる。

本研究では、このマイクロ波電力伝送システムを利用した火星飛行探査システムの適応可否の検証のため、レクテナ間における干渉の調査および飛行実験機の直線飛行の実証を目的としている。本稿では、飛行体搭載用レクテナおよびそのレクテナを搭載した飛行実験機を用いて京大生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験棟 (METLAB) 電波暗室において干渉実験・飛行実験を行った結果を報告する。

## 2. 実験設備概要

### 2.1. 飛行体搭載用レクテナ

レクテナ (Rectifying Antenna) とは、マイクロ波を直流電流に変換するための素子であり、受信アンテナと整流平滑回路 (整流ダイオード・平滑コンデンサ・DC カットコンデンサ) から構成される。本研究で使用するレクテナの構成を図 1 に示す。搭載するレクテナには以下に示す条件が要求される。

1. 機体規模を小さくするために軽量・薄型であること
2. 姿勢変化に対応できるよう無指向性であること
3. マイクロ波-直流変換効率が高いこと

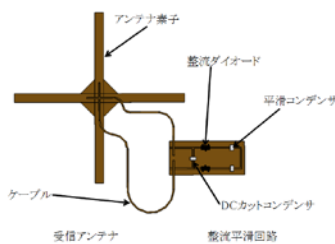


図 1 レクテナの構成

### 2.2. マイクロ波電力伝送システム

図 2 にマイクロ波電力伝送システムを示す。電波暗室内に固定した送信アンテナから、周波数帯 2.45GHz のマイクロ波を飛行実験機に送信する。ホーンアンテナから送信されたマイクロ波電力は、実験機に搭載されているレクテナが受信し直流電流に変換される。これにより DC モータおよびモータに接続されたプロペラが回転し、実験機は推力を得て固定翼により揚力を発生し飛行する。送信アンテナは実験機を捕捉・追尾し、常に実験機方向にマイクロ波を送信する。

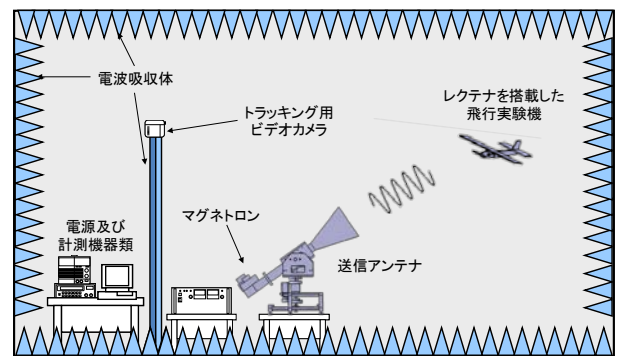


図 2 マイクロ波電力伝送システム

### 3. レクテナ間干渉試験

飛行実験機にレクテナを搭載する場合、モータ負荷とレクテナ単体の最適接続負荷は大きく異なる。また機体姿勢によらず受信電力を一定にする必要がある。そのため、機体は複数のレクテナを搭載する必要がある。このとき、レクテナ間距離が受信電力にどのような影響を与えるか知る必要がある。筆者らの昨年度の研究ではレクテナ間の干渉が予想されている<sup>[4]</sup>。

#### 3.1. レクテナ単体の評価試験

干渉試験に先立ち、まずレクテナ単体での受信電力評価試験を行った。機体上のレクテナの機体搭載位置は主翼前面・主翼上面・胴体が想定され、典型的な受信姿勢として、図 3 に示すに示す姿勢が考えられる。

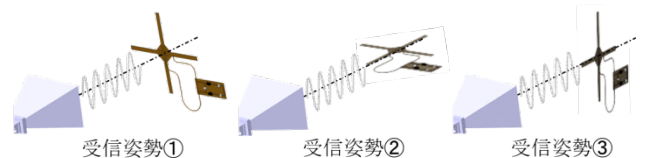


図 3 受信姿勢

製作した 18 個のレクテナにおいて受信姿勢①で測定したところ、受信電力は最少 0.335W、最大 0.429W、平均 0.375W であった。この原因としては、レクテナ製作時の各 부품の取付位置の微小なずれなどが考えられる。受信姿勢②は昨年度の研究より出力電力が微小なため測定を行わず<sup>[4]</sup>、受信姿勢③は受信姿勢①で受信電力が最小・最大のレクテナで測定したところ、平均 0.107W となった。

### 3.2. レクテナのみの干渉試験

次に、機体形状の影響を避けて純粋にレクテナの干渉をみるため、レクテナのみの個数・レクテナ間距離・受信姿勢を変更して試験を行い、出力電力を評価した。測定方法と結果の一例を図4、図5に示す。図4における送信アンテナとレクテナの距離は3mであり、送電電力は800Wである。このときの受信電力は、レクテナが重なる0~6cmにおいては電力が著しく低い。レクテナ同士が重ならなくなる距離7~15cmでは、受信電力は0.1W程度変動があるものの、ほぼ一定であった。しかし、その値は前節の単体測定結果の和よりも低い。これはアンテナと整流回路が近く、マイクロ波の反射・再放射が強く影響したためだと考えられる。

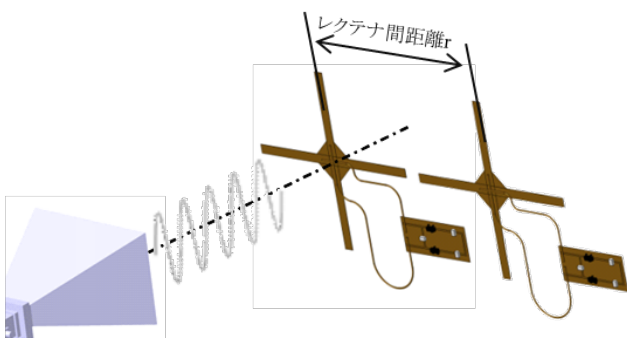


図4 測定方法

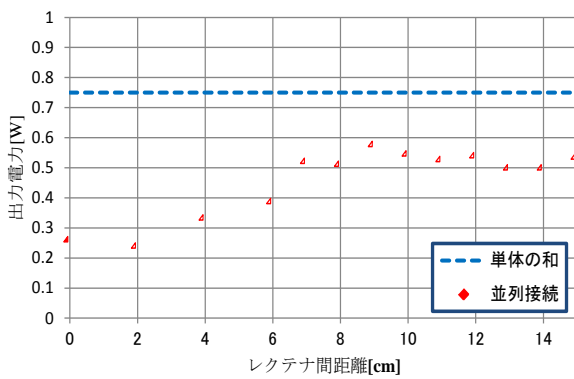


図5 測定結果

## 4. 飛行実験

### 4.1. 飛行実験機の設計とレクテナ配置

飛行実験機の設計には、レクテナから得られる電力を予測できる必要がある。干渉試験の結果より実験機に搭載する場所、個数によって変化する出力電力の予測を行ったが、レクテナの出力電力を予測する等価回路モデルの精度が十分でなく、満足な結果を得られなかった。そこで、レクテナから得られる電力から機体諸元を決定できないため、機体諸元を先に決定し、レクテナの個数を変えることで必要な電力を確保するようにした。

レクテナの配置については主翼前面・主翼上面・胴

体とし、実験機の姿勢が変化しても同じ受信電力が得られるように、これらの場所に同数配置するとした(図6)。このとき、図5よりレクテナ間距離がレクテナ同士が重なる6cm未満となると受信電力が低下することを考慮し、レクテナ間距離を7cmとしてレクテナを配置した。これは、図5の干渉試験結果はレクテナ間距離が7cm以上でも0.1W程度の受信電力の変動をもたらす可能性を示唆しているが、実験機への搭載を考えると1つの面に多くのレクテナを配置する必要があるため、比較的受信電力が安定する最小のレクテナ間距離である7cmが好ましいと考えられるためである。表1に図6の3つの面における受信電力測定結果を示す。表1より、この配置は正確に機能したと考えられる。

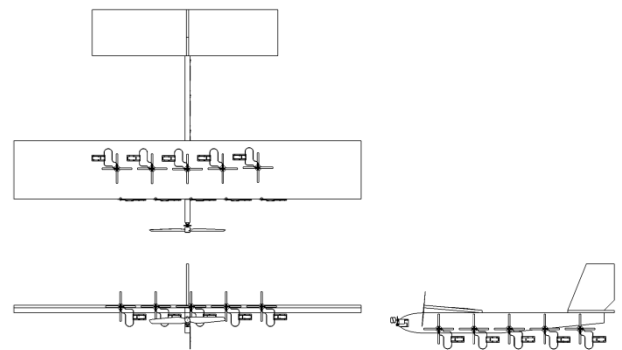


図6 受信電力測定姿勢

表1 受信電力測定結果

	各面4個	各面5個	
受信電力[W]	正面	1.31	1.86
	側面	1.23	1.97
	上面	1.16	1.85

実測により得られたレクテナからの電力値と実験機の推進動力特性(パワーカーブ)より、飛行実験を行うレクテナ数を決定した。飛行速度は3m/s程度を想定しており、余剰動力を考慮し必要動力の2倍程度の電力をレクテナから得られていれば飛行可能と判断する。

受信電力を測定した結果、主翼前面・上面・胴体に各5ないし6個搭載をした場合飛行条件を満たすことが分かった。しかし低速での飛行や余剰動力の増加による失速を考え、3面に各5個搭載することとした。この場合の実験機の主要諸元を表2、パワーカーブを図7に示す。また飛行実験を行う前に、想定される飛行経路における受信電力の測定を行ったが、飛行に十分な電力が得られていることを確認した。

表 2 実験機主要諸元

項目	単位	諸元
全長	mm	410
主翼面積	m <sup>2</sup>	0.08
主翼幅	mm	690
アスペクト比	-	6
重量 (レクテナ 15 個)	g	32.8

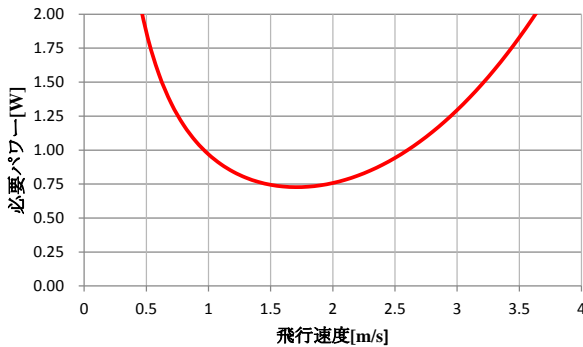


図 7 パワーカーブ

#### 4.2. 直線飛行実験

飛行実験は、移動体に機体を載せ斜面を滑らせることで初速を与え、手動トラッキング方式によってマイクロ波送電を行うことで直線飛行実験を行った。その結果、送電アンテナからのマイクロ波電力伝送により十分な推力を得ることができ、直線飛行を確認できた(図 7)。

しかし、アンテナの実験機への追尾を手動トラッキングによって行ったのでは精度および再現性に課題が残る。よって、今後は画像認識による自動トラッキングで行うなどの改善が必要である。

#### 5. 結論

本研究では、火星探査航空機の軽量化を目的として、マイクロ波電力伝送システムにおける小型無人航空機の飛行能力を実証するため、レクテナ間における干渉の調査および飛行実験機の直線飛行実験を行った。レ

クテナ間の干渉については、飛行可能な程度の数が飛行機に搭載された状態では、レクテナ間距離による影響は少ないという結論に至った。また、確実に実験機を追尾・捕捉し送電アンテナを実験機の方向に向けることができれば、十分な電力を伝送でき直線飛行が可能という結果が得られた。

今後はさらに軽量の機体材質・構造を考え、旋回などを含む飛行実験を繰り返し行うことで、火星飛行探査機へのマイクロ波伝送技術の適応可否について研究を行っていく予定である。また、マイクロ波に制御信号を重畳させた遠隔誘導なども検討する。

#### 謝辞

本研究におけるマイクロ波送電実験は、京都大学生存圏研究所全国共同利用施設「マイクロ波エネルギー伝送実験装置 (METLAB)」の電波暗室において行いました。京都大学生存圏研究所の先生方には、基本的なレクテナの設計方法および機器の使用法などについて数々の御指導、御助言を戴きました。深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 大山聖, 永井大樹, 得竹浩, 竹内伸介, 豊田裕之, 藤田昂志, 安養寺正之, 元田敏和, 米本浩一, 浅井圭介, 藤井考藏, “火星探査飛行機の高々度飛行試験計画”, 平成 23 年度大気球シンポジウム, isas11-sbs-007, 2010.
- [2] 福田敬大, 辻直樹, 三谷友彦, 米本浩一, “マイクロ波電力伝送用レクテナの受電性能向上と評価試験”, 信学技報 SPS2009-15, pp.13-18, 2010.
- [3] 辻直樹, 福田敬大, 可成理高, 長濱章仁, 三谷友彦, 米本浩一, “マイクロ波電力伝送レクテナ群の最適配置と飛行実験”, 信学技報 WPT2010-28, pp.35-40, 2011.

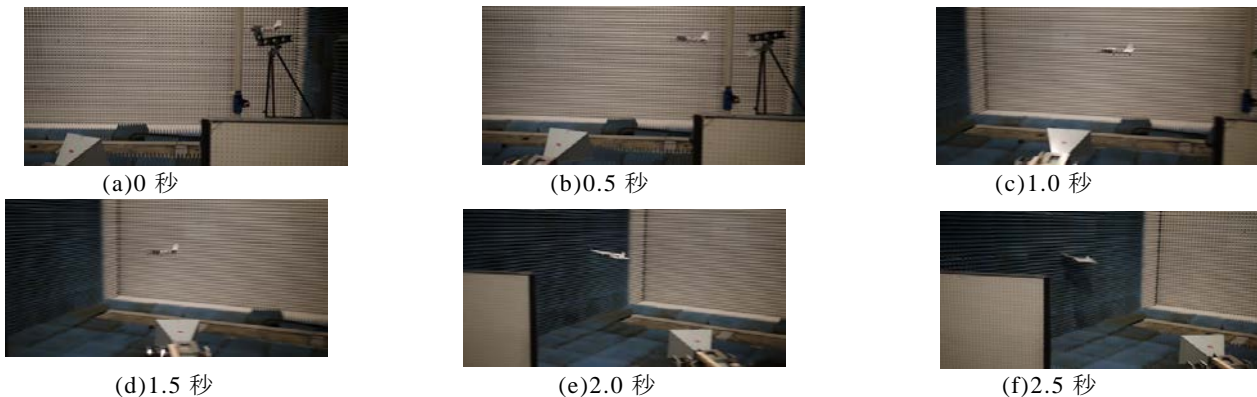


図 7 飛行実験