

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630391

研究課題名(和文)ワイヤレス給電による無燃料・長時間火星飛行探査システムの研究開発

研究課題名(英文) Study of a zero-fuel and long-time Mars observation airplane system by wireless power transfer

研究代表者

三谷 友彦 (Mitani, Tomohiko)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：60362422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、マイクロ波帯の電磁波を用いたワイヤレス給電により、無燃料かつ長時間の飛行が可能となる火星飛行探査システムを地上実験により確立することである。目的達成のために、電力制御付フェーズドアレイ送電システムの構築、探査機方向推定による送電ビーム制御システムの構築、ワイヤレス給電のみで飛行する模擬飛行探査機の開発の各課題について取り組んだ。システム要求を満たす送電システムの構築に成功し、レクテナ(受電アンテナ+整流回路)から再放射される2次高調波をパイロット信号として利用した到来方向推定方法の開発、レクテナを搭載した模型飛行機の開発を実現した。

研究成果の概要(英文)：The objective of the present study is to establish a zero-fuel and long-time Mars observation airplane system by microwave wireless power transfer, through ground experiments. We conducted three sub-studies to accomplish the objective: establishment of a power-variable phased array transmitting system, study of a beam control system using direction detection of the airplane, and development of a prototype airplane driven by wireless power transfer. We succeeded a transmitting system which fulfills system requirements, and developed a direction-of-arrival system by the second-harmonic pilot signal radiated from a rectenna (rectifying circuit and antenna), and the prototype airplane on which rectennas were mounted.

研究分野：マイクロ波応用工学

キーワード：ワイヤレス給電 火星飛行探査機

### 1. 研究開始当初の背景

火星は地球に至近な惑星であり、地球に近い環境を有することから、各国の宇宙機関による火星探査が継続的に進められている。現在の火星探査手法としては、人工衛星による観測、あるいはローバーを用いた地上走行による探査が実施されている。一方で、衛星観測および地上探査の相補的な観測手法として、小型火星航空機による探査の実現を目指した火星探査飛行機的设计検討も進められている。国内では、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所(JAXA/ISAS)での「火星探査航空機ワーキンググループ」による研究が2010年より実施されている。

飛行探査は衛星観測と比較して高解像度かつ地表に近い位置での鉱物分布・残留磁場分布等のデータが取得可能である。また地上探査と比較して広範囲な探査が可能であり、地上の障害物にも影響されない。しかし、火星大気密度は地球上の1/100程度のため、飛行探査の実現には空力性能・推進性能の大幅な向上や、機体および搭載機器の大幅な軽量化が必要である。

### 2. 研究の目的

上記の機体軽量化問題を抜本的に解決する方法として、本研究では「ワイヤレス給電による火星飛行探査システム」を提案する。ワイヤレス給電とは、有線(電線など)を使わずに無線で電気エネルギーを伝送する方法である。本研究では電波方式と呼ばれるワイヤレス給電方式により構想の実現を目指す。

ワイヤレス給電による火星飛行探査システムの概念図を図1に示す。火星地上にマイクロ波帯の電波を放射する送電システムを配備し、マイクロ波電力を上空へ放射する。飛行探査機はそのマイクロ波電力を受電することで飛行のための電力源を得る。これにより、飛行探査機に搭載する燃料あるいは蓄電池を大幅に低減させる、あるいは無燃料化することができる。また、ワイヤレス給電により電力が継続的に供給されるため、燃料補給や電池切れの心配がない長時間飛行探査が可能となる。

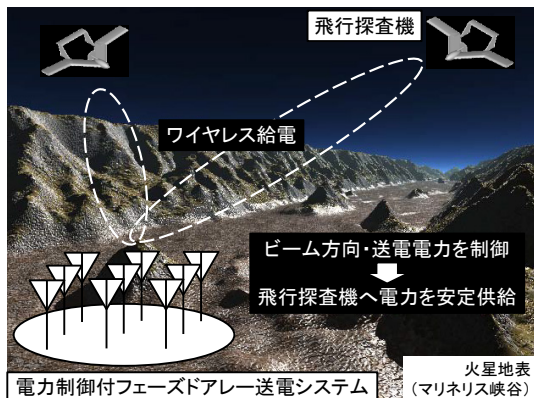


図1 ワイヤレス給電による火星飛行探査システムの概念図

### 3. 研究の方法

ワイヤレス給電による火星飛行探査システムを実現するためには、送受電間距離や姿勢が時々刻々と変化する飛行探査機に対し、安定的にワイヤレス給電を行う必要がある。よって、システム実現に向けた基礎研究として本研究課題では以下の3つのサブテーマに取り組んだ。

#### (1) 電力制御付フェーズドアレイ送電システムの構築

送電システムから放射されるマイクロ波電力を効率よく探査機に届けるには、移動する探査機に対して絶えず電力ビーム方向およびビーム強度を制御する必要がある。本サブテーマでは、電子レンジのマイクロ波加熱源として利用されているマグネトロンを送電システムのマイクロ波源として利用し、電力制御付フェーズドアレイ送電システムを構築する。

#### (2) 探査機方向推定による送電ビーム制御システムの構築

送電システムのマイクロ波電力ビームを制御するには探査機の方角を推定する必要がある。本サブテーマでは、パイロット信号を用いた到来方向推定手法により、方向推定誤差および方向推定時間が要求値に収まるような送電ビーム制御システムを構築する。

#### (3) ワイヤレス給電のみで飛行する模擬飛行探査機の開発

火星探査飛行機の1/4スケールに相当する模擬飛行探査機を設計・製作する。模擬飛行探査機にはレクテナと呼ばれる受電素子を配備し、様々な飛行姿勢においても十分な受電電力が得られるかどうかを実験する。

### 4. 研究成果

#### (1) 電力制御付フェーズドアレイ送電システムの構築

送電システムのマイクロ波源として用いるマグネトロンは、それ単体では周波数安定度や位相安定度に乏しいため、マグネトロンの周波数および位相を基準信号に対して同期させる必要がある。これを実現するために、研究者らは過去の研究において電力可変型位相制御マグネトロン(PVPCM)を開発した。PVPCMは、注入同期法および位相同期ループを併用することにより、マグネトロンの周波数と位相を基準信号に同期させつつ、マグネトロンの出力電力を可変にできるシステムである。

本サブテーマでは、PVPCMの高速化および位相安定度の改良に取り組んだ。火星飛行探査システムの送電システムに対して要求される制度は、PVPCMの位相精度 $19.9^\circ$ 以下、制御時間 $3.3\text{ms}$ 以内であった。これに対し、位相同期ループの回路定数を変更することにより位相精度 $1^\circ$ 以下、制御時間 $10\mu\text{s}$ を達成した。

改良したPVPCMを2台構築し、電波暗室内

にてフェーズドアレーアンテナ試験を実施した。図2および図3に実験写真およびフェーズドアレー試験により得られた送電ビーム方向誤差の結果を示す。試験結果より、誤差は最大 $4^\circ$ であった。

本サブテーマで用いたPVPCMは2台のみであったが、火星飛行探査システムにおいて必要となる送電システムのアンテナ数は62素子 $\times$ 62素子程度と計算される。開発したPVPCMを火星飛行探査システムに当てはめた場合、ビーム方向誤差は $0.2^\circ$ 以内に収まることが計算により推定されるため、送電システムの要求仕様を満たすPVPCMの開発に成功したと結論付けられる。

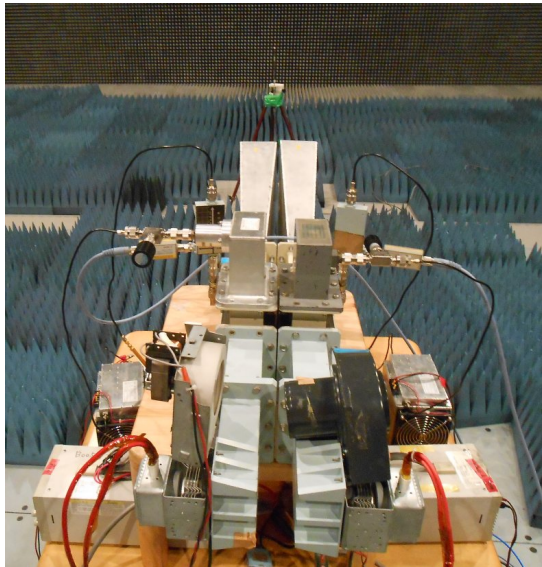


図2 電力可変型位相制御マグネトロン(PVPCM)2台によるフェーズドアレー試験の写真

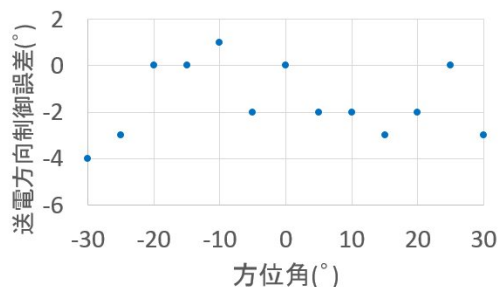


図3 フェーズドアレー試験での送電ビーム方向誤差の実験結果

### (2) 探査機方向推定による送電ビーム制御システムの構築

本サブテーマでは、探査機方向推定手法として、レクテナから再放射される2次高調波をパイロット信号として利用した方向推定を実施した。送電システムから放射されるマイクロ波(本研究課題では $2.445\text{GHz}$ )をレクテナで受電する際、レクテナの整流素子であるダイオードの非線形性によりレクテナからは高調波が再放射される。再放射される高次高調波のうち2次高調波( $4.9\text{GHz}$ )の再放射電力が最も大きかったため、パイロット信

号としては2次高調波を採用した。レクテナの高調波を利用することにより、探査機にはパイロット信号発生回路が不要となるため、機体の更なる軽量化を見込むことができる。

図4にレクテナからの2次高調波を用いた方向推定実験の写真および概略図を示す。写真の丸印で示した位置に合計15個のレクテナが搭載されており、これらのレクテナから再放射される2次高調波を用いて方向推定実験を行った。実験結果として、検出方位角誤差および2次高調波受信電力の方位角特性の結果を図5に示す。実験結果より、受信電力の低下とともに方向推定誤差が大きくなり、これらが相関関係にあることが明らかとなった。また受信電力低下時の方向推定誤差は $50^\circ$ を超える場合も存在し、このままでは方向検出手法として不十分であることが明らかとなった。

受信電力低下の原因は15個のレクテナから再放射される2次高調波が干渉し、フェーズドアレーのようにふるまったためである。今後の改善策としては、2次高調波再放射が相対的に大きいレクテナを1個だけ配備し、他のレクテナからの干渉を抑制することで方向推定誤差の低減を試みる予定である。

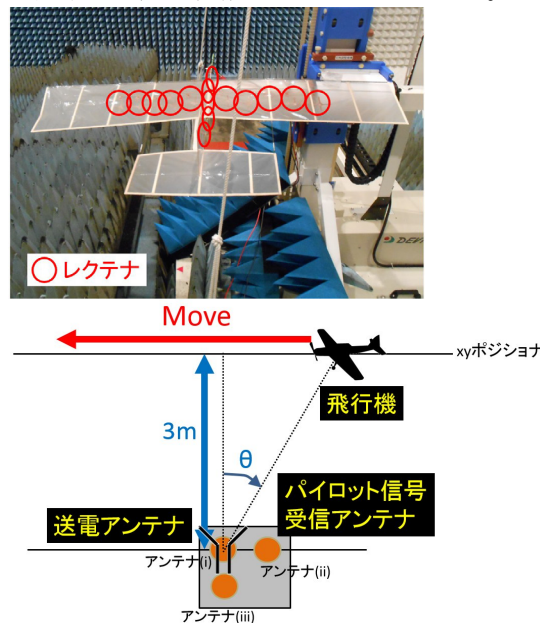


図4 レクテナからの2次高調波を用いた方向推定実験の写真および概略図

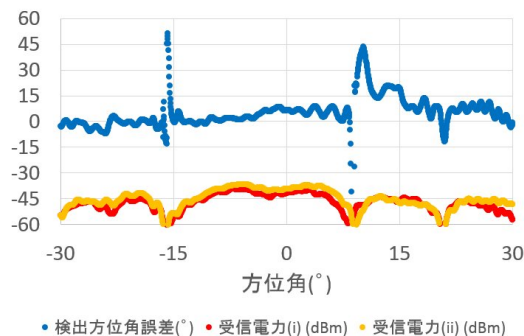


図5 検出方位角誤差および2次高調波受信電力の方位角特性の実験結果

### (3) ワイヤレス給電のみで飛行する模擬飛行探査機の開発

本サブテーマでは、火星探査飛行機の前段階として、地上でワイヤレス給電システムの実験を実施するための模擬飛行探査機を設計・試作した。

試作した模擬飛行探査機の写真を図6に示す。機体材料は、胴体をバルサ材、主翼と尾翼は発泡剤とした。機体諸元は、機体長0.687m、翼幅0.921m、アスペクト比6、重量55gであった。マイクロ波からの電力源を得るためのレクテナがこの機体の主翼および胴体に合計15個搭載されている。レクテナの総重量は21gであった。

図6の機体を用いてマイクロ波放射時の受電電力を測定した。送受電間距離を3mとし、送電システムからのマイクロ波電力を800Wとしたとき、レクテナから出力される受電電力は1.3Wであった。一方、リチウムポリマー電池を搭載した飛行実験より、本機体において水平飛行を実現するためには5.7W程度の受電電力が必要であることが明らかとなった。よって、今後の予定としては、送電システムの送電電力を増強するとともに、尾翼の材質の軽量化、胴体の機首方向への延長による軽量化、および主翼面積の増加等の機体の改良を行い、レクテナの受電力のみによる機体の水平飛行の実現を目指す。

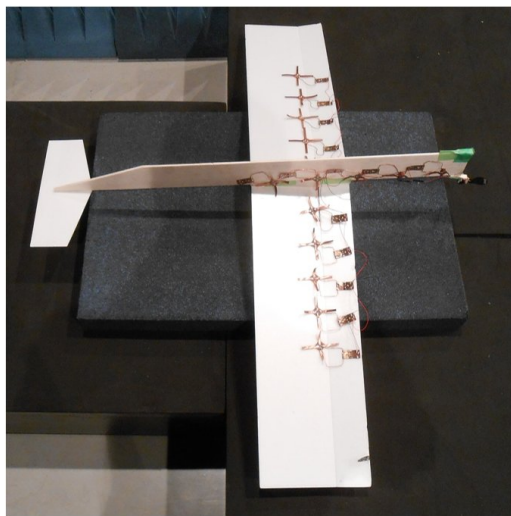


図6 模擬飛行探査機の写真（レクテナ撮影の都合上、機体を上下反転させている）

当初研究計画では、上記3つのサブテーマを統合した模擬飛行探査機の飛行実証試験を実施予定であったが、フェーズドアレーから出力されるマイクロ波送電電力が水平飛行の実現には不十分であったため未実施となった。しかしながら、火星探査飛行におけるワイヤレス給電システムの仕様に関しては、各研究課題を通じて明らかとなった。今後は、各研究課題を改善し、飛行実証実験に取り組む予定である。

なお、本研究課題は京大生存圏研究所

の共同利用である「マイクロ波エネルギー伝送実験装置」に申請し、電波暗室内での実験を実施した。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

①松本 剛明、米本 浩一、山下 幸三、渡邊 聡、三谷 友彦、篠原 真毅、岩清水 優、川添 昭人、玉井 至、佐々木 岳、松崎 江陽、マイクロ波電力伝送小型無人航空機の飛行試験、電子情報通信学会無線電力伝送研究会、信学技報 WPT2014-93、vol. 114、no. 524、pp. 1-4、京都、2015年3月24日

②岩清水 優、三谷 友彦、篠原 真毅、松崎 江陽、佐々木 岳、松本 剛明、米本 浩一、火星飛行探査機への自動追尾型マイクロ波無線電力供給用送電システムの研究、電子情報通信学会無線電力伝送研究会、信学技報 WPT2014-94、vol. 114、no. 524、pp. 5-10、京都、2015年3月24日

③T. Mitani, M. Iwashimizu, A. Nagahama, N. Shinohara, and K. Yonemoto, Feasibility Study on Microwave Power Transmission to an Airplane for Future Mars Observation, 3rd International Conference on Telecommunications and Remote Sensing, Proceedings pp. 47-50, Luxembourg, 2014年6月27日

④M. Iwashimizu, T. Mitani, N. Shinohara, G. Sasaki, K. Hiraoka, K. Matsuzaki, and K. Yonemoto, Study on Direction Detection in a Microwave Power Transmission System for a Mars Observation Airplane, IEEE Wireless Power Transfer Conference 2014, P-Th-2, Proceedings pp. 146-149, Korea, 2014年5月8日

⑤岩清水 優、三谷 友彦、篠原 真毅、佐々木 岳、平岡 京、松崎 江陽、米本 浩一、火星飛行探査機へのマイクロ波無線電力供給用送電システムにおける方向検知の研究、第22回無線電力伝送時限研究専門委員会研究会、信学技報 WPT2013-37、京都、2014年3月14日

⑥三谷 友彦、宇宙での無線電力伝送の実用化に向けて、第57回宇宙科学技術連合講演会、講演集 2M02、米子、2013年10月10日

⑦岩清水 優、長濱 章仁、三谷 友彦、篠原 真毅、米本 浩一、火星飛行探査機へのマイクロ波無線電力供給用送電システムにおける方向検知の研究、第17回無線電力伝送時限研究専門委員会研究会、信学技報

WPT2013-01、東京、2013年4月19日

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三谷 友彦 (MITANI, Tomohiko)  
京都大学・生存圏研究所・准教授  
研究者番号：60362422

### (2) 研究分担者

米本 浩一 (YONEMOTO, Kouichi)  
九州工業大学・工学(系)研究科(研究院)・  
教授  
研究者番号：80404101