

マイクロ波を用いた移動探査ローバへの 無線電力伝送に関する基礎研究

杉村 さゆり^{*1} 甲斐 誉史朗^{*2} 大槻 真嗣^{*3} 村上 遼^{*4} 大谷 知弘^{*1}
川崎 繁男^{*3} 吉田 賢史^{*3} 長谷川 直輝^{*5}

*1 東京大学

*2 東京理科大学

*3 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

*4 高知工科大学

*5 京都大学

あらまし 移動探査ローバによる月・惑星探査では、従来太陽光発電や原子力電池、一次電池などが電力供給手段として用いられてきたが、活動時間や範囲の制限、重量の増加といった問題があった。そこで新しい電力供給手段として電磁波による無線電力伝送が現在提唱されている。本稿では無線電力伝送に関して、従来と比較しての利点やローバへの搭載における応用について述べるとともに、実際にマイクロ波を用いて行った基礎実験の結果を示し、今後の課題について述べる。

キーワード 移動探査ローバ、無線電力伝送、マイクロ波

Basic Research on Microwave Power Transmission to Exploration Rover

Sayuri SUGIMURA^{*1} Yoshiro KAI^{*2} Masatsugu OTSUKI^{*3} Ryo MURAKAMI^{*4} Tomohiro OYA^{*1}
Shigeo KAWASAKI^{*1} Satoshi YOSHIDA^{*1} and Naoki HASEGAWA^{*5}

*1 The University of Tokyo

*2 Tokyo University of Science

*3 Japan Aerospace Exploration Agency

*4 Kochi University of Technology

*5 Kyoto University

Abstract Until now, several ways for electric power supply are used for planetary exploration rover, such as solar photovoltaic generation, nuclear battery, and primary battery. However, there are many problems as the limitation of activity time and area and the increase of weight. In this report, Wireless Power Transmission is introduced as a new way of electric power supply, and the merit and application of Wireless Power Transmission are mentioned. And the result of the experiment of Microwave Power Transmission toward the rover and future works are stated.

Keyword Rover, Wireless Power Transmission, Microwave

1. はじめに

現在、太陽系の起源と進化の解明や将来における宇宙の実利用のために、さまざまな手段で月・惑星探査が進められている。その中でも特に、探査対象天体の広範囲かつ詳細な探査が可能であるとして、移動探査ローバが注目されるようになっている。

これまで実際に宇宙で探査を行ったローバで使用された方法も含めて、ローバへの電力供給手段としては、以下の3つの方法が挙げられる[1][2][3]。

- ・太陽光発電
- ・原子力電池

・一次電池

太陽光発電では、ローバ本体に搭載した太陽光パネルで発電した電力でローバを駆動するが、太陽光のあたらぬ場所では発電ができないため、活動時間や範囲が制限されてしまう。

原子力電池は、核分裂により得られる電力でローバを駆動させ、一定の電力を数年間供給することが可能であるが、電源そのものの重量が大きく打ち上げコストがかかることや、安全面から打ち上げ時の衝撃に対し厳重な保護が必要である。

一次電池は化学反応により得られた電力で駆動す

る。しかしこの方法では電池そのものの寿命により、活動時間が制限されてしまう。

このように、先に述べた電力供給手段はそれぞれに欠点が存在する。そこで本稿では無線電力伝送について、ローバへの電力供給手段としての可能性や応用性について考えるとともに、実際にマイクロ波を用いてローバへの無線電力伝送の基礎実験を行い、今後の課題や改善点について述べる。

2. ローバへの無線電力伝送

2.1. 従来方式に対する利点

無線電力伝送が従来の電力供給手段と異なるのは、発電そのものはローバ上ではない別の場所で行うという点である。電力源が別の場所に存在し、電磁波を用いてローバに電力を伝送するため、ローバ側に搭載されるのは受電装置のみとなる。よってこの方法は、例えば原子力電池や一次電池を用いた電力供給手段よりもローバ自体の軽量化が期待される。

また、図1のように、送電装置が発電可能な領域にあれば、ローバそのものは発電不可能な領域にあっても電力を受け取ることが出来る。したがって、今までは探査できなかったような特殊環境への探査が可能となり、太陽光発電に比べ活動時間や範囲の拡大が可能となると考えられる。活動が可能となる領域として、具体的には2009年に月探査機「かぐや」によって発見された縦孔が挙げられる(図2)。この縦孔は、科学的な観点からも、また将来の月面有人活動拠点としても非常に重要であるとして探査要求が高まっているが、地下空洞は暗闇であるため太陽光発電を行うことができない[4]。そこで無線電力伝送を用いて縦孔内部で活動を行うローバへ電力を送ることで、暗闇の中でもローバを活動させ続けることができると考えられる。

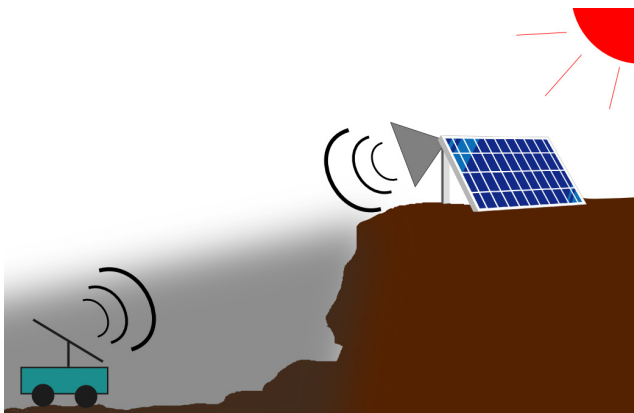


図1. 発電不可能な領域にあるローバへの電力伝送

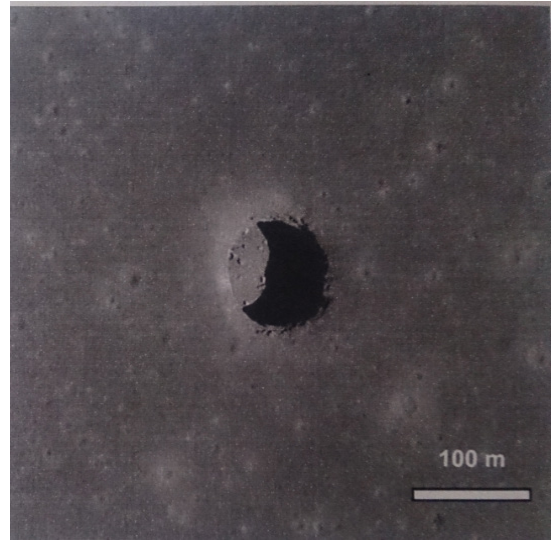


図2. 月面上に発見された縦孔[4]

2.2. 無線電力伝送の応用例

月・惑星上でローバへ無線電力伝送を行うには、ローバに搭載された受電システムとは別に、送電のためのシステムが必要となる。送電システムからローバが電力を受け取る方法として、下記のようなものが考えられる。

①ホットスポット型(図3)

送電システムが発電可能な領域に存在してホットスポットを形成している。受電システムを搭載したローバは惑星上を探査し、電池残量が一定以下になると、自らホットスポットに移動し、充電を行う。

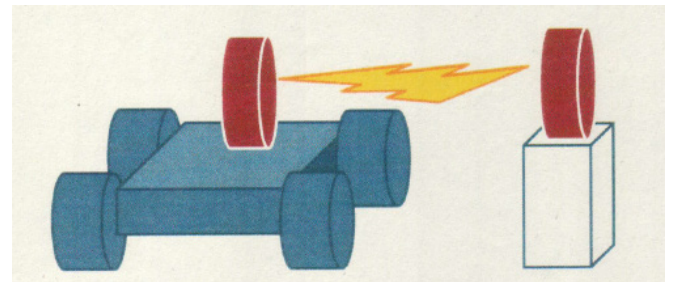


図3. ホットスポット型無線電力伝送

②ランダー給電型(図4)

ローバが月・惑星上に降り立つ際に、多くの場合は天体表面にローバを無事に着陸させ、静止することができる宇宙機(ランダー)を用いる。このランダーに送電システムを搭載し、ランダーで発電した電力をローバに伝送する。ランダーの背丈をローバより高くすることで、伝送距離の延長や伝送可能領域の拡大が可能であると考えられる。

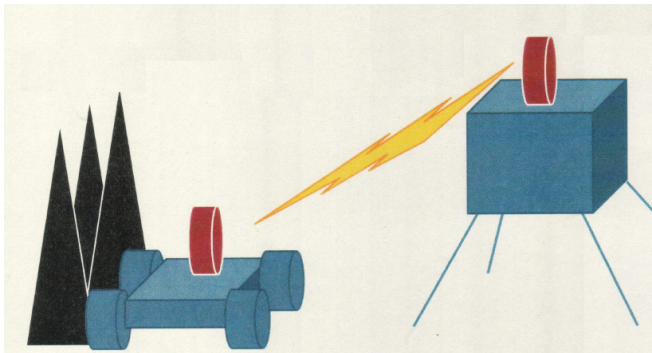


図 4. ランダー型無線電力伝送

③ 周回機型 (図 5)

送電システムを探索対象となる天体の周回軌道上を飛んでいる衛星に搭載し、衛星から天体表面に存在するローバへ無線電力伝送を行う。

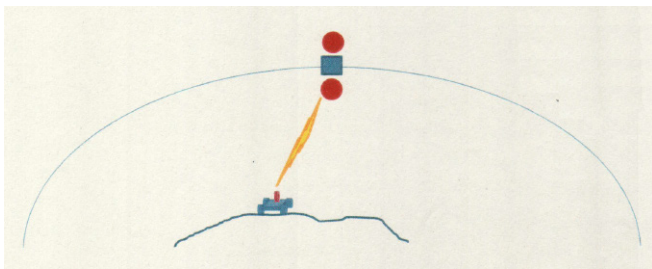


図 5. 周回機型無線電力伝送

また電磁波を用いた無線電力伝送では、電力を伝送するだけでなく、ローバ位置計測のレンジングへの利用も考えられる。

ローバが月・惑星上を探索する際に重要なことは、自分自身の位置を正しく認識することである。この手段として、従来は太陽位置からの推定[5]、電波の伝搬遅延時間[6]などが挙げられるが、推定精度や必要とされる時間の長さなどで課題があった。しかし、無線電力伝送によって、例えば送受信アンテナの距離と受信する電力の量に相関関係があれば、無線電力伝送で電力供給を行いながらローバの位置同定を行うことも可能であると考えられる。

3. マイクロ波による電力伝送実験

以上では無線電力伝送のローバへの適用による可能性を述べた。そこで今度は、実際にローバに無線で電力を伝送する基礎実験を行い、実用に際してどのような課題があるのかを検討する。本章では今回行われた実験について述べる。

3.1. 実験内容

実験は 2013 年 12 月 9~12 日に行われた。本実験で

計画されていた内容として、以下のものが挙げられる。

① 無線電力伝送による充電・駆動実験

送電装置とローバの距離を一定に保ち、一定時間無線電力伝送によりローバを充電する。その後ローバのモータを駆動させ、消費電力を無線電力伝送でまかなうことができるか検証する。

② ホットスポット型電力伝送実験

ローバ停止状態で充電を行った後ローバを駆動させ、バッテリー出力電圧が一定の値以下になったときにホットスポットに戻り、再び充電を行う。

③ 距離変動時の充電電力による距離推定

バッテリーに充電は行わず、受電装置先端に一定負荷をつけて実験を行う。送電装置からのローバの距離を前後方向に変化させ、そのときに受け取る電力と送受電アンテナ間の距離の関係を計測により明らかにする。

④ 障害物をはさんだ無線電力伝送実験

送受電アンテナ間にさまざまな大きさの障害物を置いて無線電力伝送を行い、マイクロ波の回折効果によってよりどれだけの電力を受け取ることができるのかを計測する。

実際の実験では、受電アンテナやローバに不具合が生じたため、①、③に関する実験のみを行った。

3.2. 実験概要

今回実験において使用した装置の全体概要を図 6 に示す。

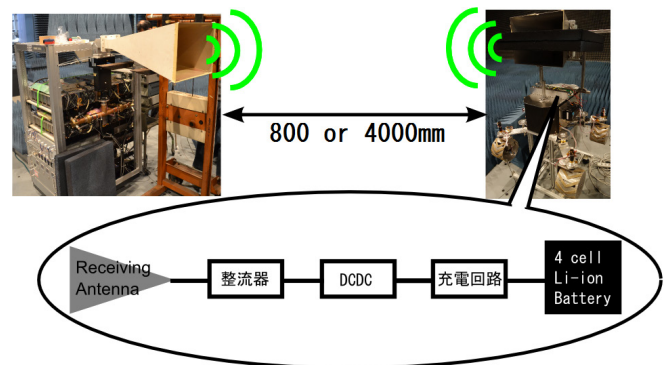


図 6. 実験概要

①の実験を行う際は送電装置—ローバ間の距離を 800mm, ③の実験を行う際には 800mm と 4000mm の②パターンでの実験を行った。

3.3. 使用装置

上記実験にて使用された装置について以下に示す。

- 1kW マイクロ波送電装置

周波数 2.1GHz のマイクロ波をホーンアンテナで送信する。本実験では出力は 1kW で行う。

・マイクロ波受信ホーンアンテナ

ホーンアンテナを 2 つローバの上に縦に並べ、マイクロ波を受信する。

・整流器

ホーンアンテナで受信されたマイクロ波を整流し、直流にすることで電力に変換を行う。整流器から見た負荷の変動により電力変換効率が変動する。

・DCDC(負荷調節 DCDC コンバータ)

整流器から見た負荷が極度に変動することによる整流器の故障・変換効率の低下を防ぐために、整流器全体から見た負荷が約 3~10Ω になるように制御し、定電圧 33V で充電回路に電力を渡す。

・充電回路(定電流定電圧充電制御回路)

整流器により変換されたマイクロ波の電力をバッテリーに充電するための制御回路。本実験ではバッテリーに充電を行う際には 2A の定電流源として動作し、バッテリー電圧が設定した値に近づいてきたら(満充電に近づいてきたら)定電圧源として動作し、過充電を防ぐ。

4. 実験結果

4.1. 充電・駆動実験

まずは送電装置とローバのアンテナ間距離を 800mm に設定した。マイクロ波送電出力を徐々に上昇させて 1kW のマイクロ波を 50 秒間出力して充電を行い、その後充電をやめてローバのモータを前進方向に 30 秒間駆動させる、という動作を繰り返し行った(充電 4 回、駆動 3 回)。ローバの車輪の駆動は、実際に走行させるのではなく、ローバの車輪を浮かせた状態で台車において行った。この一連の動作を行った際のバッテリー電圧と充電電流、モータ電流の時間変化について、図 7 に示す。

この実験では、50 秒間の充電を 4 回繰り返して行うことで、1 回当たり平均 0.45Wh、合計で 1.8Wh の充電を行うことに成功した。また 30 秒間のモータ駆動によって消費されている電力量を見ると、1 回当たり平均 0.10Wh、合計で 0.30Wh 消費していることがわかる。従って、今回の実験では 50 秒間の充電によってモータを 30 秒間駆動するには十分な電力量をまかなうことができ、充電・消費の繰り返しによって、無線電力伝送によって充電した電力を用いてのモータ駆動に成功したということができる。

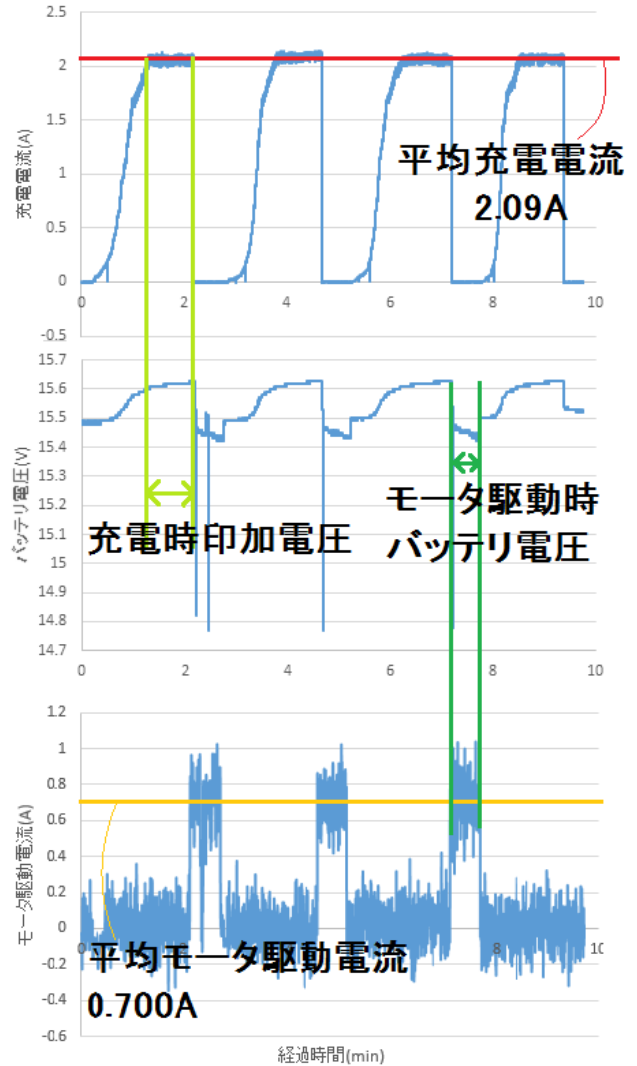


図 7. 各電流、電圧の時間経過

4.2. 距離変動時の充電電力による距離推定

この実験では整流器出力から DCDC や充電回路への接続は行わず、整流器出力電流・電圧を、デジタルマルチメータを用いて計測した。

送受信アンテナの距離が 800mm のとき、整流器から出力される電流・電圧は 11.8V, 1.76A であった。その後距離を 4000mm に変化させて計測を行うと、電流・電圧は 1.99V, 0.413A となった。

この結果より、送受信アンテナ間の距離を離れたとき、受信電力は大きく減少し、距離が 800mm のときに得られた電力は、4000mm のときの約 25.3 倍であることがわかる。また送受信アンテナ間の距離は 5 倍になっている。

この実験で得られた結果より、受信電力の大きさは送受信アンテナ間の距離の 2 乗に反比例する傾向が見て取れる。

5. 検討課題

今回行った実験では、実際に充電を行うに当たっては送受信アンテナ間の距離を 800mm の距離まで近づける必要があった。宇宙空間での運用を考えるに当たっては、送受信可能な距離をさらに向上させる必要がある。また、ローバ上に搭載した受信アンテナの重量・体積ともに大きく、実際ローバに設置したうえでの走行は不安定である。今後は使用するマイクロ波の周波数を高くし、受信アンテナの形状を平面アンテナにするなどして、受信効率を向上させるとともに受信アンテナの軽量化を図る必要がある。

また本実験では、整流器を通じてマイクロ波を直流変換した直後の電力と、充電回路からバッテリーに充電される電力との間に大きな差が生じた(図 8)。整流器直後の電力をデジタルマルチメータで計測した値はおよそ 20W であるが、充電回路直後の電力をローバ内のデータロガーで計測した値はおよそ 30W であり、1.5 倍もの差が生じている。この原因について、今後は検討を重ねていく必要があると考える。今回の実験では、ホール素子を用いて充電回路直後の電流値の計測をしているため、電流値にマイクロ波の影響が乗っている可能性が考えられる。今後はホール素子を用いた計測ではなく、シャント抵抗を用いるなどして、マイクロ波の影響をできる限り受けない計測手段に変更した上での計測が求められる。

送受信アンテナ間距離を変えて受信電力を測定する実験では、計測した距離は 2 パターンのみであるが、その 2 パターンにおいては距離と受信電力との間に関連性が見られた。今後は送受信アンテナ間距離のパターンをさらに増やした上で同じような関連性が見られるか検証し、その結果によって、無線電力伝送がローバの位置同定のレンジングに利用できるかどうか検討していく必要があると考えられる。

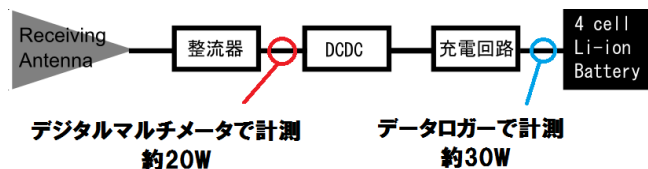


図 8. 計測箇所の違いによる受信電力の違い

6. まとめと今後の予定

本稿では、ローバへの電磁波による無線電力伝送を既存の電力供給手段と比較し、その利点と電力伝送以外の応用について述べた。さらに実際にローバへの無線電力伝送を行い、マイクロ波で伝送した電力を充電し、その電力を用いてモータを駆動することに成功した。さらにローバの位置同定のレンジングに使用でき

るかについて、2 パターンではあるがデータを取得し、その有用性を確認した。

今後は、実際にローバを駆動させながら電力を送らせる予定である。また、伝送されるマイクロ波に情報を載せ、電力伝送と通信を同時に行うための検討も進めていく。

文 献

- [1] Steven W. Squyres, et al., “Athena Mars rover science investigation”, Journal of Geophysical Research, Vol.18, Issue E12, December 2003.
- [2] John P. Grotzinger, et al., “Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation”, Space Science Reviews, Vol.170, Issue 1-4, pp 5-56, September 2012.
- [3] Apollo 17 LRV Technical Information, Boeing, 1972
- [4] 春山純一, 久保田孝, 河野功, 大槻真嗣, 今枝隆之介, “月惑星の縦孔・地下空洞探査:その意義”, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2F02, 2013.
- [5] 土屋明義, 黒田洋司, 久保田孝, 吉光徹雄, “月面探査ローバの自己位置同定手法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-09-008, 2000.
- [6] 金田 さやか, 中西 弘明, 榎木 哲夫, 吉光 徹雄, 中谷 一郎, “電波の伝搬遅延時間測定による小天体探査ローバの位置同定法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 9, P.1007-1015, 2009.