

Microwave Power Receiving System Experiment for the working Robot

Teruo Fujiwara[†], Yoshiro TAKAHASHI[†], Kenji NAGANO[†], Minoru Furukawa^{††}, Tadashi ISHII^{†††},
Shigeo KAWASAKI[‡], Naoki SHINOHARA[‡],
Susumu SASAKI^{‡‡}, Koji TANAKA^{‡‡}, Yasumasa HISADA^{‡‡‡}, Yoshiyuki FUJINO^{‡‡},
Shoichiro MIHARA^{‡‡‡}, Tokuo ANZAI^{†††} and Yutaro KOBAYASHI^{†††}

[†] Technologies Development Department, IHI Aerospace Co., Ltd. 900 Fujiki, Tomioka, Gunma, 370-2398 Japan

^{††} Nihon Dengyo Kosaku Co., Ltd. 2-2-7 Asahimachi Nerima-ku, Tokyo, 179-0071 Japan

^{†††} Jisedaitech L.P. 3-16-5 Wakabada, Shiroyama, Tuki, Kanagawa, 220-0112 Japan

[‡] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

^{‡‡} Institute of Space and Astronautical Science, JAXA 3-1-1 Yoshinodai, Sagami, Kanagawa, 229-8510 Japan

^{‡‡‡} Advanced Mission Research Center, JAXA 2-1-1 Sengen, Tukuba, Ibaraki, 305-8505 Japan

^{†‡} National Institute of Information and Communications Technology 893-1 Hirai, Kashima, Ibaraki, 314-8501 Japan

^{†‡‡} Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer 2-12 Kanda-ogawamachi, Chiyodaku, Tokyo, 101-0052 Japan

E-mail [†] qfuji@js5.so-net.ne.jp, ytaka@iac.ihl.co.jp, kenji-nagano@iac.ihl.co.jp

^{††} m-furukawa@ndk-k.co.jp, ^{†††} ishiichu@gol.com, [‡] Kawasaki@rish.kyoto-u.ac.jp, shino@rish.kyoto-u.ac.jp,

^{‡‡} sasaki@isas.jaxa.jp, ktanaka@isas.jaxa.jp, ^{‡‡‡} hisada.yasumasa@jaxa.jp ^{†‡} fujino@nict.go.jp

^{†‡‡} mihara@usef.or.jp, anzai@usef.or.jp y.kobayashi@usef.or.jp

The feasibility study for industrial applications of wireless microwave power transmission technology, which is considered as one of the key technologies in Space Solar Power System, is performed by Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF). At the same time, it is another target for the study to advance the development of wireless microwave power transmission technologies used for Space Solar Power System. As part of the study, the microwave power transmission system for the small-sized working robot electrically-powered at approximately 4W, which is remotely controlled by wireless communication system, was developed and demonstrated

The microwave power receiving system on the ground in Space Solar Power System is usually irradiated by microwave with approximately constant power and it is required to supply commercial electric power networks also with constant power. In these conditions, the receiving system would be easily operated in high conversion efficiency without any other equipment. On the other hand, in the microwave power receiving system for the working robot, the strength of input power is changing all the time with movement of the robot and the strength of required output power is also changing because of movement of the robot, as in acceleration, deceleration, cruising and so on. These conditions would force the receiving system not to operate in high conversion efficiency and to break down according to circumstances.

This paper describes the microwave power receiving system keeping the output voltage of rectenna array at a specified value to operate all the time in high conversion efficiency in spite of input power conditions and output power requirements, and the microwave power transmission experiment for this receiving system, using the small-sized working robot electrically-powered at approximately 4W mentioned above.

作業用ロボット用マイクロ波受電システムの試作

藤原 暉雄[†] 高橋 吉郎^{††} 長野 賢司^{†††} 古川 実^{††††} 石井 忠司^{†††††} 川崎 繁男^{†††††} 篠原真毅^{†††††}
佐々木 進^{†††††} 田中 孝治^{†††††} 久田 安正^{†††††} 藤野 義之^{†††††}
三原 荘一郎^{†††††} 安西 徳夫^{†††††} 小林 裕太郎^{†††††}

† (株) アイ・エイチ・アイ・エアロスペース 〒370-2398 群馬県富岡市藤木 900
†† 日本電業工作 (株) 〒102-0074 東京都千代田区九段南 4-7-15
††† (資) 次世代技術 〒202-0112 神奈川県津久井郡城山町若葉台 3-16-5
‡ 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
††† 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 〒202-0112 神奈川県相模原市由野台 3-1-1
†††† 宇宙航空研究開発機構高度ミッション研究センター 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
††††† 情報通信研究機構 〒314-8501 茨城県鹿島市平井 893-1
††††† (財) 無人宇宙実験システム研究開発機構 〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 2-12

1. はしがき

宇宙太陽発電システムにおける基本技術であるマイクロ波無線伝送技術の新たな展開として産業分野への応用が期待されており、移動しながら作業するロボットへの応用の可能性が検討されている。その一環として数 W クラスの小型電動ローバを対象としてマイクロ波無線送電・通信システムの原型モデルが試作され、技術実証実験が行なわれた。[1][2]

宇宙太陽発電システムでは、受電システムは概ね一定のマイクロ波電力を入力して、一定の電力で出力するが、作業ロボットの受電システムでは、マイクロ波入力電力及び負荷電力が共に大幅に短時間で変動することになり、作業ロボットの受電システムにとってはこれが大きな特徴となっている。本稿では、この受電システムに焦点を絞って、試作・試験の概要を報告する。

2. 無線動力システムの技術実証実験システム

無線動力システムとしての小型電動ローバ (4W 駆動) に対するマイクロ波無線送電の技術実証システムが図 1 に示される。この技術実証システムは、マイクロ波無線電力を送電する送電ステーションとレクテナ (受電パネル) を搭載する電動ローバから構成されている。送電ステーションは、半導体アンプを内蔵する送電アンテナパネルとこれを搭載する追尾装置付スピンドルから構成されている。送電アンテナは 4 素子 x 8 素子のフェーズドアレイアンテナであり、このアンテナより周波数 5.8GHz、直線偏波のマイクロ波が 100W 出力で送電される。

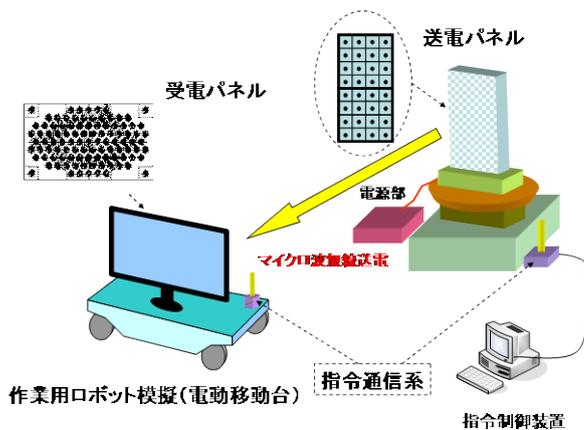


図1 技術実証実験システム

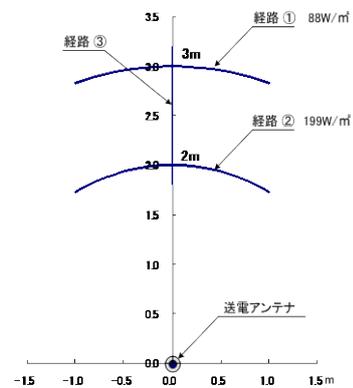


図2 電動ローバの移動範囲

電動ローバには、受電パネルに加えて、電力処理部、無線操縦部及び駆動部等が搭載されており、電動ローバは受電パネルで受電するマイクロ波電力を直流に変換してこの電力によって走行する。

送電ステーションを中心とする円弧状に電動ローバを走行させ、送電アンテナが追尾装置付スピンドールによって電動ローバを追尾することに常時送電アンテナとレクテナが正対されている。電動ローバは、図 2 のように $199\text{W}/\text{m}^2$ (2m 距離) と $88\text{W}/\text{m}^2$ (3m 距離) の電力密度の領域を決められた経路に沿って走行する。

3. 受電システムの概要

受電システムに対する要求条件

送電ステーションからの距離によってマイクロ波の電力密度が変動する。受電距離 2m および 3m での電力密度は、受電パネル中心部で、夫々、 $199\text{W}/\text{m}^2$ 、 $88\text{W}/\text{m}^2$ である。送電アンテナは 4 素子 x 8 素子の長方形形状であるために放射電力パターンは楕円形となる。送電アンテナは長手方向が垂直に設置されるため、水平方向が垂直方向に比べてビーム巾が広がる。受電距離によって電力密度が異なるばかりでなく、受電面においても電力密度が均一でないため、電動ローバの行動エリア内で場所によって受電パネルへの入力電力が大幅に変動する。尚、マイクロ波の周波数は 5.8GHz、偏波は直線偏波である。

一方、受電システムの負荷である電動ローバの駆動系は、電動モータで構成されており、起動、走行、停止の各動作モードに応じて要求する電力が大幅に変動する。

受電システムの構成

受電システムは、図 3 に示されるように、レクテナ素子をアレイ状に配置するレクテナアレイユニット (受電パネル) と給電制御部から構成されている。給電制御部は入力電力および負荷電力の大幅な変動に対してレクテナアレイユニットを常に高効率で動作させる制御機能を有している。

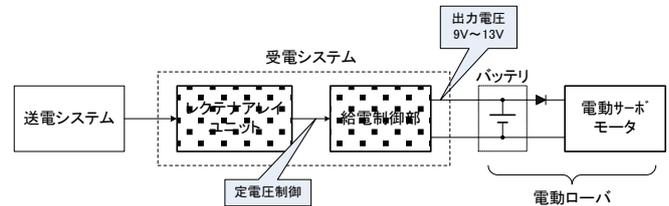


図 3 受電システムの構成

(1) レクテナアレイユニット (受電パネル)

レクテナアレイユニットを構成するレクテナ素子は、図 4 に示される高利得 9.1dBi (実効開口面積 17.3cm^2) の空洞後置型円形マイクロストリップアンテナと自己バイアス整流回路から構成されている。最大入力電力は 500mW である。

図 5 に試作したレクテナアレイユニットが示される。全体形状は $600 \times 340\text{mm}$ の長方形である。レクテナアレイユニットは、より小さい面積で多量の受電電力を得るために、楕円形の送電電力パターンに対応して、受電距離 3m 位置で送電アンテナの放射中心電力密度の 80% の等電力密度ラインで形成される楕円形状を受電面積とし、この楕円形状のエリア内に 97 個のレクテナ素子が、夫々、実効開口面をオーバーラップする状態で等間隔 0.774λ に三角配置されている。97 個のレクテナ素子の他にレクテナアレイユニットの 4 隅には各 1 個の独立したレクテナ素子 (M 素子) が配置されている。楕円形の受電エリア内の 97 個の素子は、A、B、C の 3 つのブロックに分轄され、図 6 に示されるように、平行接続される各グループが直列接続される構成となっている。夫々のブロックには未接続の 1 つのレクテナ素子 (R 素子) が存在し、単体のレクテナ特性が測定された後にグループに並列接続される。

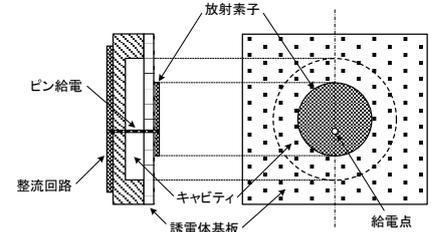


図 4 レクテナ素子アンテナ (空洞後置型円形マイクロストリップアンテナ)

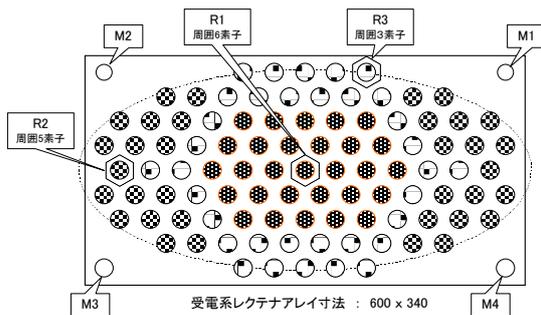


図 5 レクテナアレイユニット

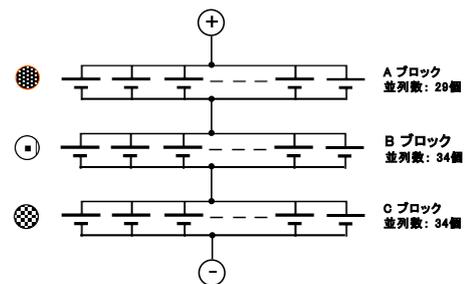


図 6 レクテナ素子の並直列接続

(2) 給電制御部

上述の通り、給電制御部は入力電力及び負荷電力の大幅な変動に対してレクテナアレイユニットを常に高効率で動作させる制御機能を有している。

図7にレクテナ素子の整流回路のV-I特性（実験値）が入力電力と負荷抵抗をパラメータとして示される。夫々の入力電力のV-I曲線上での●は最高の効率が得られる点である。入力電力の変動に対してレクテナ整流回路を常に最高の効率で動作させるためには入力電力の変動に対して夫々のV-I曲線上での●を結ぶライン上で動作させる必要がある。入力電力が10mW~200mWの領域では約540Ωの一定の負荷抵抗で最高効率が得られるが、200mW以上の領域では一定の出力電圧で最高効率が得られている。受電距離2m~3mでのレクテナ素子の入力電力は100mW~300mWの範囲であり、上記の両方の領域に掛かるが、レクテナを定電圧で動作させても効率低下が僅かであること、制御が簡素化されこと等の理由からここではレクテナを定電圧で動作させることにした。図8に、8Vの定電圧で動作する場合、100mW~300mWの範囲で最高効率からの効率低下が2%以内であることが示される。

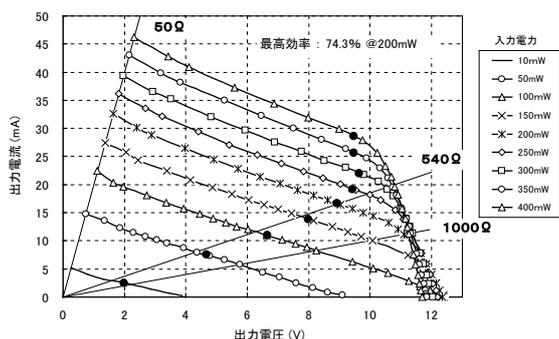


図7 レクテナ素子の電圧-電流特性

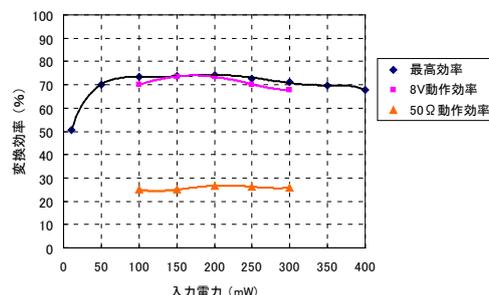


図8 定電圧制御時の変換効率

次に負荷変動であるが、最高効率が得られる負荷抵抗（540Ω）から負荷抵抗が変化するとき、大幅な効率低下が生じる。図7には50Ωと1000Ωの負荷に対する動作ラインが示される。又、図8には、50Ω負荷で達成できる効率は、最高効率の約40%であることが示される。従って、レクテナを高効率で動作させるためには一定の最適負荷抵抗又は一定の最適電圧で動作させることが必要であり、負荷との間に負荷整合機能が必要となる。

レクテナで受電された電力が負荷側で消費されない場合、この電力は負荷以外で何らかの方法で消費されることが必要になるが、受電電力を有効に活用するために、ここでは受電電力を一次的に蓄積するためのバッテリーを設けることとした。

入力電力の変動に対して、また、出力側のバッテリーの電圧変動に対して、レクテナを常に一定の出力電圧で動作させるために図9に示される給電制御回路が導入された。この回路は基本的には入力電圧を一定に維持するPWM制御によるダウンコンバータである。バッテリーには小型の鉛蓄電池が使用された。この電池の動作電圧9V~13Vを考慮すると、給電制御回路の入力電圧は18V~24V程度が必要であることからレクテナアレイは図7に示されるように3ブロックの直列接続構成とした。

給電制御部にも当然ながら高効率の動作が要求される。現在の電力制御技術を駆使すれば95%程度の効率の実現は容易であると思われるが、レクテナ制御の原理確認を目的としたため、85%の変換効率を目標として簡素化した制御回路を採用した。

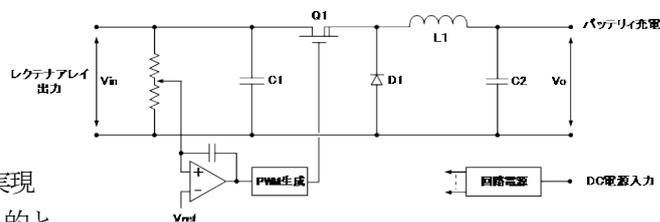
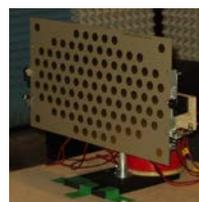


図9 給電制御部の基本回路

4. 受電システムの製作

製作したレクテナアレイユニットと給電制御部品が写1と写2に示される。レクテナアレイユニットについては、レクテナアンテナ、整流回路、レクテナ素子等の要素試作実験が行われ、この成果に基づいてユニットの設計・製作が行われている。レクテナアレイユニットは、図1に示されるように電動ローバに搭載され、又、給電制御部は電動ローバの内部に搭載されている。



写1 レクテナアレイ
ユニット



写2 給電制御部

5. 技術実証実験

5.1 受電システムの受電実験

図 10 に実験方法が示される。受電システムの出力に蓄電池が接続される。送電システムの送電アンテナとレクテナアレイが 2m~3m の距離を離して正対され、送電アンテナより 100W のマイクロ波電力が出力され、レクテナアレイの中心に向けて照射された。

レクテナアレイユニットへの入力電力 P_{in} は、送電アンテナの放射電力パターンによって決定される個々レクテナ素子の電力密度 p とレクテナ素子の有効開口面積 S_{eff} により次式によって求められた。

$$P_{in} = \sum_{i=1}^N p_{(i)} S_{eff(i)}$$

給電制御部でレクテナアレイの出力電圧を変えて測定したレクテナアレイ及び受電システムの出力電力が図 11 に示される。図 12 に、図 11 のレクテナアレイの出力電力と上述の入力電力で求めた変換効率とレクテナアレイ単体の変換効率の測定値が示されるが、両者の差異は 2% 程度であった。

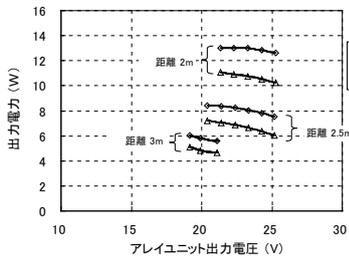


図 11 受電システムの出力電力

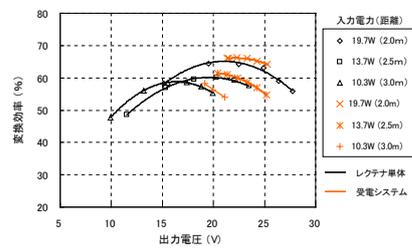


図 12 レクテナアレイの変換効率

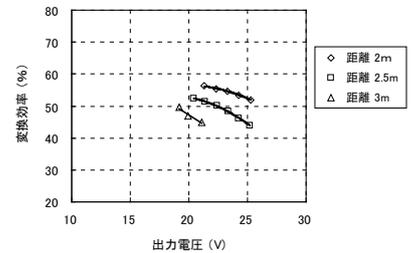


図 13 受電システムの総合効率

図 13 に給電制御部の電力伝達効率とレクテナアレイの変換効率の積として表される受電システム全体の総合効率が示される。総合効率に含まれる給電制御部の電力伝達効率の測定値は 80%~85% であった。

レクテナアレイの最高効率は、受電距離 2m 位置において出力電圧が 22V の条件で 65% が得られている。整流回路やレクテナ素子の試作実験では 70% 以上の変換効率が得られたが、レクテナアレイではこれ等に比べて数% 以上の低下がみられた。これらの低下の原因の究明は今後の課題である。

図 14 にレクテナアレイの受電距離 2m、2.5m、3m での入力電力に対する電圧-電流特性が示される。レクテナアレイの出力電圧は、入力電力が最小となる受電距離 3m 位置において大きな出力電力が得られるように設定することとし、給電制御部の電圧設定範囲を考慮して 18V に設定することとした。

レクテナアレイの出力電圧が 18V で一定に制御されるときの変換効率が図 15 に示される。電動ロボットの移動範囲でレクテナアレイは 60% 以上の変換効率での動作が期待される。このときの受電システムの受電特性の推定値が表 1 に纏められている。受電システムの総合効率が 50% 以上、また、最小給電電力が 5W 以上となり、当初の目標を達成できる結果が得られた。

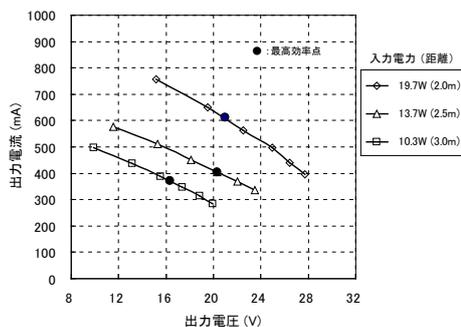


図 14 レクテナアレイの電圧-電流特性

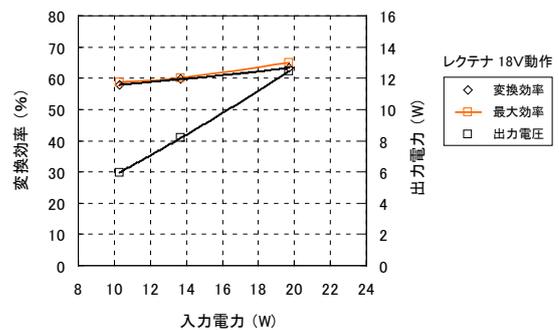


図 15 レクテナアレイの変換効率

表1 受電システムの18V動作時の特性

距離	入力電力	供給電力	受電系 効率	レクテナレイ・ユニット		給電制御 効率
				動作電圧	効率	
m	W	W	%	V	%	%
2.0	19.7	10.5	53	18	63	85
2.5	13.7	7.1	52	18	61	85
3.0	10.3	5.2	50	18	59	85

表2 総合試験時の受電システムの動作状況

距離	m	3	2.5	2
入力電力	W	6.87	9.28	12.90
ユニット 電圧	V	18.16	18.37	18.97
出力	W	1.54	3.92	6.42
計測損失	W	0.08	0.2	2.3
給電制御 入力	W	1.46	3.71	6.02
出力	W	1.12	3.3	5.30
ユニット効率	%	22.4	42.2	49.7
給電制御部	%	76.8	88.4	87.9
総合効率	%	16.5	36.2	45.7

(2) 総合実験 (技術実証実験)

受電システムが電動ロボットに組み込まれ、送電システムとの間でマイクロ波の送受電が行われる図1及び図2に示される総合実験では、上記(1)で設定したレクテナアレイ出力電圧、18Vで受電システムを動作させることで実験が計画されたが、総合実験の際、レクテナアレイユニットのAブロックに不具合が発生し、結局、レクテナアレイは、Aブロックが取外され、BブロックとCブロックの直列接続構成とし、レクテナアレイ出力電圧は計画値と同様の18Vで実験が行われた。実験結果が表2に示される。実験中、レクテナアレイの出力電圧は概ね18Vに維持され受電システムとして正常な動作が確認された。2ブロックでのレクテナアレイ構成となったこと、また、各ブロックの動作が最適条件から遠く外れた効率の悪い条件での動作となったために最小給電電力量は計画値の5W以上に対して1.5Wであった。

5. まとめ

- (1) 大幅な変動を伴うRF入力電力の下、また、大幅な変動を伴う負荷に対してレクテナ出力の電圧を一定に維持する制御方法を採用することによりレクテナ受電システムの高効率動作を可能とした。
- (2) 受電システムの総合効率50%以上、給電電力量5W以上の目標を十分に達成できる目処が得られた。又、レクテナアレイとして最大の変換効率は約65%であり、目標である55%以上を大幅に凌駕する結果が得られた。
- (3) レクテナの整流回路、レクテナ素子の試作実験結果では70%以上(最高値75%)が得られているが、レクテナアレイでは最大変換効率が65%と数%以下となっている。この差異の原因の究明については今後の課題である。
- (4) 総合試験でも発生したように今回の一連の開発実験の中でレクテナの主要な構成要素である整流ダイオードに伴う不具合が生じている。この不具合の原因の究明については今後の課題である。
- (5) 給電制御部は85%以上を目標としたが、出力電圧が低い領域で目標が達成されていない。簡素な回路構成で更なる伝達効率の高い回路技術の研究が今後必要である。

謝辞

本研究は、(財)機械システム振興協会が日本自転車振興会の競輪の補助金の交付を受け、その財源を基に(財)無人宇宙実験システム研究開発機構が受託した事業である。

文献

[1] (財)機械システム振興協会, (財)無人宇宙実験システム研究開発機構 “作業用ロボットへのマイクロ波送電および通信技術の開発に関するフィージビリティスタディ” 報告書, 平成19年3月

[2] 長野賢司, 石井忠司, 川崎繁男, 藤原暉雄, 中山師生, 高橋吉郎, 佐々木進, 篠原真毅, 田中孝治, 久田安正, 藤野義之, 三原荘一郎, 安西徳夫, 小林裕太郎 “作業用ロボットへのマイクロ波送電実験報告” 信学技報, SPS2006-22 (2007-02)