

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 4日現在

機関番号： 14501
 研究種目： 基盤研究（B）
 研究期間： 2009 ～ 2011
 課題番号： 21360416
 研究課題名（和文） 宇宙太陽発電衛星の実用発電送電パネルの開発と
 ハワイでの実証マイクロ波無線送電実験
 研究課題名（英文） Development Research on the practical power generation and
 transmission panels for the Solar Power Satellite and
 Hawaii experiment on the microwave power transmission
 研究代表者 賀谷 信幸（KAYA NOBUYUKI）
 神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授
 研究者番号： 30093503

研究成果の概要（和文）：

宇宙からクリーンで無尽蔵な電力を供給することができる宇宙太陽発電衛星を実現するための開発研究である。実用発電送電パネルは、片面に太陽電池で発電し、他面から電力をマイクロ波に変換して地上に送電するためのアクティブ・フェイズド・アンテナで構成される。本研究で、新しいアンテナ素子の開発と電力からマイクロ波に変換する高効率のGaNのFET増幅器の開発に成功した。また、ハワイでの長距離送電実験と静止衛星からの電波による実験で地上に送電されるマイクロ波への影響を実験し、実用面でのデータ取得に成功した。

研究成果の概要（英文）：

This research project is aimed to develop the Solar Power Satellite, which can supply clean and inexhaustible electricity to the ground from the space. The practical sandwich panels are composed of the solar cells to generate the electricity on the one side and of the active phased array antenna to transmit microwave power to the ground. We succeeded in development of the new antenna elements and GaN FET amplifiers to convert the electricity to the microwave. We also succeeded in obtaining the valuable data on the microwave propagation by the long distant power transmission experiment in Hawaii and the observations to receive the microwave from the geosynchronous satellite.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学・航空宇宙工学

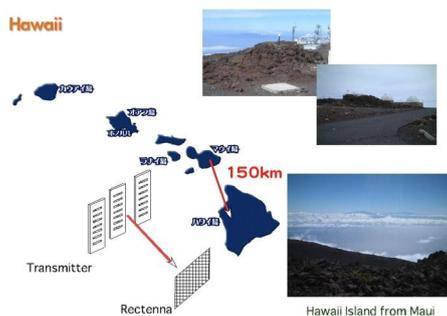
キーワード： 航空宇宙システム、宇宙太陽発電衛星

1. 研究開始当初の背景

将来のクリーンで無尽蔵な代替エネルギー源の有力候補として宇宙太陽発電衛星 (SPS : Solar Power Satellite) が注目されている。SPS は宇宙空間に超大型の太陽光発電衛星を建設し、発電した電力をマイクロ波に変換して地上に送電する構想である。この構想では、静止衛星軌道にある直径 1 km もの超大型アンテナから地上の受電点に向けて、90%以上の高効率でマイクロ波ビームを集中させる制御技術が必要となる。この制御方法として、レトロディレクティブ・アンテナ方式がある。この方式では、大型アンテナを構成する各アンテナ素子が地上から送信されたパイロット信号を受信し、その共役位相でマイクロ波を送信する。これにより、送電アンテナ面に歪みに依らず送信波面を一定に保つことが可能となる。この技術開発をはじめ SPS の実用化への技術開発が本研究の目的である。

2. 研究の目的

2008年5月に、ハワイのハレアカラ山 (マウイ島) からマウナロア山 (ハワイ島) への 150 km にわたる長距離マイクロ波無線送電の第1回目の実験をおこなった。実験概念を下図に示す。第1回目の送電実験はテレビ局 (Discovery Channel) の撮影のためのものであり、短時間の実験しか許されなかった。基本的なマイクロ波送電機能を確認するだけで今回の実験は終了せざるえなかったが、この撮影のために開発した機器が、マイクロ波送電システムとして十分な機能をもつことが実験で明らかとなった。



今回の研究では、開発したマイクロ波無線送電システムの改良とハワイで定量的な追加実験を行うこと。その実験結果から実用 SPS の発電、送電およびハウスキーピングのすべての機能をもつ実用発電・送電パネルを完成させることが、研究目的である。

本研究の最終的な目的は、宇宙で発電したクリーンなエネルギーを地上に送電する SPS の実現である。マイクロ波無線送電技術

はその成否を決める重要な要素技術である。マイクロ波無線送電技術で最も重要な課題は、送電効率であり、マイクロ波ビームを高精度に地上の受電アンテナに向ける制御技術、マイクロ波エネルギーを集中させる技術である。これを実験的に実証する事がたいへん重要である。特に、宇宙実験の前に地上で十分に実証実験を行う必要がある。

我々の研究グループの最初のマイクロ波ビーム制御実験は、1999年に4枚の送電パネルによるマイクロ波ビーム制御実験であった。約4m離れたパイロット信号のアンテナに、マイクロ波ビームが正確に追従できることを実証した。2006年にはS-310-36号機の観測ロケットを用いて120kmの宇宙空間から地上へのマイクロ波ビーム制御実験に成功した。この実験では、同時に将来のSPSの建設法としての「ふるしき展開」による網の展開と、その網上を走行するロボットの実験にも成功した。

観測ロケットの次のステップの実験として、小型衛星を用いた軌道実験を計画している。衛星用発電・送電パネルの開発と並行して、軌道実験の前の地上実験をハワイで行う事を提案していた。ハワイのハレアカラ山 (3055m) とマウナロア山 (4170m) は約150km離れ、直視する事ができる。150kmの距離は、S-310-36号機観測ロケットでのマイクロ波無線送電実験の約120kmに相当するものである。ロケット実験では、一度しか実験することができないが、地上実験では何度でも改良を加え、実験を重ねる事ができる。

2008年5月に行われた第1回目のハワイ実験では、開発したマイクロ波送電システムの基本動作を確認しただけで終わったが、パイロット信号受信機や位相制御に改良点が見出された。これらの改良を施して、再度、ハワイにおいて詳細な定量的実験を行い、将来の実用SPSに必要な技術を確認する。要素技術を実証したのち、太陽電池も含めた本格的な実用発電・送電パネルの設計・製作を行う。静止軌道上のSPSと同じ条件でのシステム検討が、ハワイ実験では可能となるため、最終的にハワイでの長距離無線送電で性能確認を行う。これらの開発・試験が本研究の目的である。この研究により、SPSはいよいよ試験衛星の段階へと進む事ができると考える。

本研究で開発されるマイクロ波ビーム制御技術は、ハードウェアにCPUを追加し、柔軟で多彩なビーム制御を可能とするものである。この技術によりパイロット信号送信アンテナ方向以外にもビームを能動的に向けることが可能となる。この新しい技術を用いる事により、多くの有益な用途に応用することができる。地上とポイント通信をおこな

う携帯用衛星通信用アンテナ、地上や惑星をリモートセンシングするための宇宙大型アンテナ、静止軌道から地上や航空機を監視・官制する超大型レーダー等々を容易に列挙することができる。以上の技術が実現されれば、その社会貢献は非常に大きいと言える。

3. 研究の方法

本研究の目的は、SPSの実用に向けた本格的な発電・送電パネルを完成させることである。そのためには、発電・送電パネルに必要な機能、仕様を明確化し、その要求を満たす性能にしなければならない。本研究終了後、完成させた発電・送電パネルを宇宙に打ち上げ、宇宙での本格的な試験・デモンストレーションの実施が目標である。

本研究では、まず第1回目のハワイ実験で用いたマイクロ波無線送電システムの改良と定量的な追加実験を行うこと。その実験結果から実用SPSの発電、送電およびハウスキーピングのすべての機能をもつ実用発電・送電パネルを設計・製作して、実用パネルを完成させることが、研究目的である。

本研究で開発する発電・送電パネルは、TV局(Discovery Channel)の撮影で用いた送電パネルを基本とし、その特性評価から開始する。送電パネルには、マイクロ波ビーム制御のためのレトロディレクティブ・アンテナ、CPUを組合わせた柔軟な送信位相制御システム、パイロット信号と送電波との同期方法、基準信号の新たな配信法、Internetシステムを利用した情報ネットワーク、新たに開発されたGaN-FETによる30Wのマイクロ波高効率アンプなど多くの新しい技術が試みられている。これらの新しい技術の検証と更なる改良を行う。

具体的な研究計画であるが、本研究は3年計画で進める。初年度の平成21年度は、第1回目のハワイ実験で開発した機器の再検討から開始し、2年次と3年次は、重点を実用発電・送電パネルの設計・製作に移し、発電・送電パネルの完成を目指す。

(1) 第1回目のハワイ・マイクロ波送電システムの再検討

第一段階として、レトロディレクティブ・アンテナ機能の性能評価試験を行う。パイロット受信機性能、位相検出性能、パイロット基準信号の安定度を中心に評価する。

① パイロット信号位相検出性能

マイクロ波ビームの制御精度は、受電点から送信されるパイロット信号の位相検出精度に大きく依存する。パイロット信号受信機の精度、位相安定度を評価する。特に、温度依存性、入力信号依存性を測定し、温度などによる不安定性を除く方法や補償方法を検討する。

② パイロット信号検出用基準信号

パイロット信号の位相を正確に検出するためには、位相検出のための基準信号の安定度が重要である。特に、すべての送電パネルに同相の安定した基準信号を供給しなければならない。今回は有線と無線方式を製作した。そのシステム精度の測定と同時に、安定した基準信号配信システムを再検討する。

③ 送電用マイクロ波の位相制御

パイロット信号の位相から、送電用マイクロ波の送信位相を決定する。決定する場合のソフトウェアの信頼性、安定性を検証する。特に、異常時の対応ソフトなどの充実を図る。また、移相器の精度やレスポンスを求め、マイクロ波ビーム制御の精度や時間応答を評価する。

④ 送信用高出力高効率マイクロ波アンプ

太陽電池により発電された電力をマイクロ波に変換する高出力高効率のマイクロ波アンプに、最近製品化されたGaN-FETを用いた。マイクロ波送電用アンプには出力位相や出力パワーの高い安定度が求められる。ハワイ実験のために新たに開発したGaN-FETアンプの性能を評価し、問題点を明確にする。

(2) ハワイでの実証実験

第1回目のハワイ実験と同様に、改良した送電パネルをハレアカラ山に、受信アンテナをマウナロア山に設置し、マイクロ波ビーム制御に関して各種の測定を行う。複数の送電パネルの性能試験は、2通りの配置で行う。ひとつはパネルを隙間なく配置した場合で、メインビームは広がるが、エネルギー集中度がもっとも高いアンテナとなる。この場合は、アンテナ全体のゲインや、パネル間の出力差などの影響を評価する。もう一つの配置は、パネルを等間隔もしくはランダムに配置し、100m規模の大きなアンテナを作る方法である。この場合、メインビームが細くなり、マウナロア山でメインビームの位置を測定する事ができる。メインビームの位置を測定する事により、ビーム制御の精度を検証することが可能となる。ビーム方向を変化させた場合のメインビーム幅も重要な測定である。

(3) 実用発電・送電パネルの検討

上記のハワイ実験による検証結果を、実用発電・送電パネルの設計に反映すべく各種の技術要素の検討を同時に進める。

実用的なアンテナ素子を実現するために、まずアンテナ素子全体の設計を今までの研究成果に基づき再検討を行う。各機器の配置、取付け方法、熱設計、構造的強度までも総合的に検討する。特に、排熱と軽量化は最重要項目である。また、アンテナ素子相互間のインターフェイスや干渉も重要な検討項目である。送電パネル間の電気的なインターフェイスは完全に独立で、相互の電氣的接続を用いない方針である。制御、データ通信には地上のインターネットを宇宙用に応用する。機

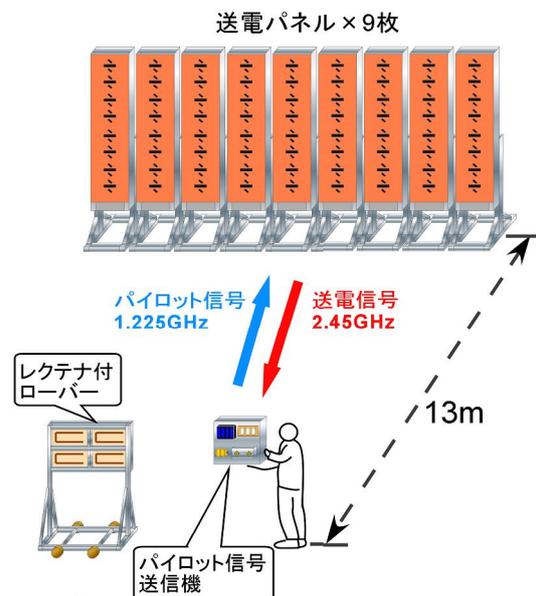
械的インターフェイスは網に固定する。網の振動解析が重要となり、振動モードの解析、さらには振動がアンテナに与える影響を検討する。このアンテナ素子の構成法の検討結果から、アンテナの種類等の選択を行う。平成22年度以降の研究計画は、重点を実用発電・送電パネルの設計・製作に移し、発電・送電パネルの完成を目指す。最終年度にはフライト・モデルを完成させ、全パネルのデータの取得、環境試験を行い、ハワイで最終的な実証実験を行う計画である。

4. 研究成果

本研究の研究成果は、SPS の実用発電送電パネルの開発とハワイでの実証マイクロ波無線送電実験に分かれる。

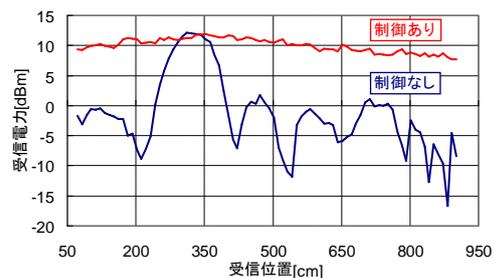
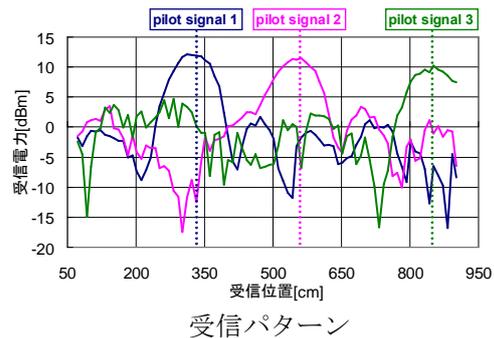
(1) 実用発電送電パネルの開発

まず第1回目のハワイ実験で用いたマイクロ波無線送電システムの改良をおこなった。レトロディレクティブ方式によるマイクロ波ビーム制御システムを有する送電パネルを完成させ、2009年9月にトロントで開催された International Symposium on Solar Energy from Space でデモンストレーションに成功した。送電パネル1枚あたり20Wの電力を2.45GHzのマイクロ波で放射する。送電パネルを9枚並べて設置し、送電パネルから13m離れた位置に受電アンテナ(以後、レクテナと称する)付ローバーに送電する。パイロット信号送信機から送電パネルに向けて1.225GHzのパイロット信号を送信し、パイロット信号を受信した各送電パネルはレトロディレクティブ制御を行った上で、パ



イロット信号送信機に向けてマイクロ波ビームを集中させる。レトロディレクティブ制御の時は、パイロット信号送信機の場所に関わらずマイクロ波ビームは常にパイロット

信号送信機に集中する。パイロット信号送信機をレクテナ付ローバーに近づけると、レクテナがマイクロ波ビームを受電する。レクテナは受電したマイクロ波を直流電力に変換し、ローバーのモーターを駆動する。また、ローバーの他LEDを接続したレクテナを使用し、パイロット信号送信機を近づける・離す・同時に移動することでLEDを点灯・消灯させた。デモンストレーションの後、アンテナパターンを取得し、ビーム制御がほぼ計算通りに制御されていることを確認した。この技術により、静止軌道のSPSから地上のレクテナに精度よく制御可能なことが実証された。



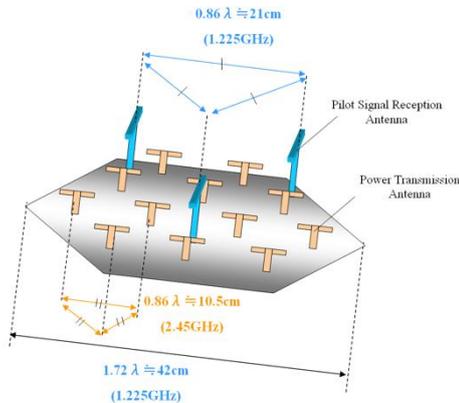
レトロディレクティブ制御結果

実用発電送電パネルの開発に関しては、まずSPS実用に適したパネルの大きさや形状及びパネルに搭載するアンテナの配列法や配列間隔について考察した。結果として、パネルは直径42cm、アンテナ間隔は0.86λとなった。また、パネルの開発を行う上で必要となるSPS実用にに向けた電力設計の計算を行った。結果として、必要送電電力が1.2GW、必要送電アンテナ数が6800万素子、1送電アンテナの必要最大送電電力が45W、必要発電電力が1.5GW、必要太陽光照射強度が6600W/m²と求めた。その時の集光反射鏡での必要集光倍率は4.7倍と求めた。

実用におけるアンテナ開発では、送電アンテナとしてULPDアンテナを採用した。新たにシミュレーションを導入し、製作前にアンテナパラメータを変化させた場合の特性評価を行い考察した。製作後は実測とシミュレーションの特性比較を行った。結果として、シミュレーションとほぼ等しい特性の送電アンテナの製作に成功した。アンテナのVSWR

は1.3、利得は5.6dBiを記録した。

実用におけるハイパワーアンプの開発では、パネルへの配置の問題から、小型化を試みた。結果としては、従来の42.0mm×81.3mmの大きさから35.7mm×71.8mmまで小型化し、小型化による性能低下がないことも確認できた。



マイクロ波送信機

トロントのデモンストレーションにより、SPS 用送電パネルの機能が確立されたと考える。この機能を最大限に生かせる構造の検討を進めた。その結果、今まで開発していたスロット・アンテナでは、反対方向への放射を抑えるためのキャビティーが大きく、増幅器や分配器を入れるためには多層構造となり、重量の増加となる。新たに逆Fアンテナの開発に取り込み、さらに発展させて排熱効率の高い幅広い逆Fアンテナを開発することができた。パイロット信号用のアンテナも送電アンテナ全面を反射鏡として利用するパラボラ・アンテナとした。このような改良により、送電パネルの構造や配線が非常に単純化され、信頼性が高く、非常に軽量なパネルが実現した。

(2) ハワイ・マイクロ波無線送電実験

トロントの国際会議でデモンストレーションに成功したレトロディレクティブアンテナ送電パネルを用いて、2010年7月にハワイ島マウナ・ロア山とマウイ島ハレアカラ山の間地上送電実験を行った。その結果、海面からの反射や大気等の減衰が予想以上に大きかった。観測された電力強度の変動の原因を考察するために、マイクロ波が大気などから受ける影響の分析を試みた。電力強度の変動が大気状態に応じて著しく変化し、また位相の変動も連動して大きくなることが確認できた。このことから何らかの干渉波が発生していると推測できる。今回の収集データで推測できる原因を表に示す。

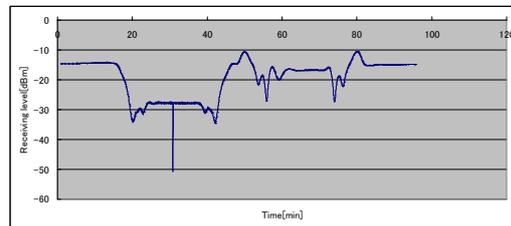
予測される原因	予測値
大気がス	-0.11dB
雨滴	-3.5dB~0dB

海面反射	-1.9dB~+1.6dB
総計	-5.5dB~+1.5dB

雨滴による交差偏波の発生は海面反射との関連性も強く、程度によっては大きな要因となり得る。しかしその発生や程度を確認するには各電波の偏波特性を評価する必要がある。地上間でのマイクロ波の伝搬を調べるにはより詳細なデータ収集と分析を進める必要がある。

そこで、静止軌道にある試験衛星 ETS-8 からの信号を用いて、大気層や電離層に垂直に入射された場合の影響を集中的に測定評価した。SPS での電波伝播では、大気層が約 10km 程度に留まっており、勿論海面の反射も起こり得ない。実際の SPS に近い状態での大気、更に電離層の影響を評価することが可能である。

ここでは、電離層の影響評価を報告する。沖縄局での代表データを図に示す。アンテナの向きが変化する前と後での平均受信レベルの変動にて評価を行う。このアンテナの向きが変化している際、同局では日没が発生している。図の横軸 20min から 40min の間である。電離層は太陽光での大気の大気電離によって構成されているため、日没前後に急激な電子密度の変動が生じる。日変化の内では最も大きな変動幅があり、電離層による影響を評価するには最適である。



沖縄局の受信レベル

図より、アンテナ方向変化前の受信レベルは約-10.4dB となっており、変化後は約-10.6dB となっている。従って、変動は約-0.2dB 程度となる。この時、メインビーム方向は九州方面となる。メインビームの範囲は広く、メインビームの周辺では衛星の位置変化による長時間のレベル変動は比較的小さいことが確認されている。

変動は約-0.2dB となっているが、日没後は電離層の電子密度は急激に減少する。従って電離層の影響が強くとするならば、吸収電波はむしろ減少し、受信電力は増大するはずである。しかし逆に減少しており、この原因はアンテナ自身の移動によるものであると考えられる。よって、このデータから電離層による影響も非常に小さいものであると判断できる。

以上の測定結果から、大気を水平に伝搬す

る地上間マイクロ波送電では減衰が大きな問題であるが、垂直入射なら大気層が薄いことから SPS から地上へのマイクロ波無線送電には影響がないことが判明した。この観測により、実用 SPS の開発に向けた重要なデータを取得した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① N.Kaya, Development of Microwave Power Transmission for the Solar Power Satellite, Integral, 査読有り, 62, 1-7, 2011.
- ② N.Kaya, etc., Orbiter Demonstration Plan for Solar Power Satellite of Sandwich Type, Proc. of International Astronautical Congress, 査読有り, 62, 1-6, 2011.
- ③ J. Mankins and N.Kaya, The First International Assessment of Space Solar Power: Results of the International Academy of Astronautics Study, Proc. of International Astronautical Congress, 査読有り, 62, 1-6, 2011.
- ④ N.Kaya, J. Mankins, Long Range Microwave Power Transmission Experiment in Hawaii and Space, IAA 50th Anniversary Celebration Symposium, 査読有り, 1, 1-7, 2010.
- ⑤ N.Kaya, M. Iwashita, J. Mankins, The Second Microwave Power Beaming Experiment in Hawaii, Proc. of International Astronautical Congress, 査読有り, 61, 1-6, 2010.
- ⑥ N.Kaya, J. Mankins, Proposal on Solar Power Satellite of Sandwich Type in IAA Study, Proc. of International Astronautical Congress, 査読有り, 61, 1-4, 2010.
- ⑦ N.Kaya, M. Iwashita, et al., Microwave Power Beaming Test in Hawaii, Proc. of International Astronautical Congress, 査読有り, 60, 1-5, 2009.

[学会発表] (計10件)

- ① 賀谷信幸、岩下真士、カナダ・トロントとハワイでの宇宙太陽発電衛星用マイクロ波ビーム制御実験、電子通信学会マイクロ波研究会、2012年1月11日、東京
- ② N.Kaya, Prospects for the Practical Solar Power Satellite, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011年6月9日、沖縄

- ③ R. Sasaki and N.Kaya, Microwave power transmission test in Hawaii for the real SPS at the geosynchronous orbit, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011年6月8日、沖縄
- ④ S. Etani, M. Iwashita, N.Kaya, Development on the Sandwich Panel for the Practical Solar Power Satellite, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011年6月8日、沖縄
- ⑤ M. Iwashita, N.Kaya, The Demonstration of Microwave-beam Control in International Symposium on Solar Energy from Space, The 28th International Symposium on Space Technology and Science, 2011年6月8日、沖縄
- ⑥ N.Kaya, etc., Solar Power Satellite using Small Satellites, International Space Development Conference, 2011年5月21日、ハンツビル、アメリカ
- ⑦ 賀谷信幸, Solar Power Satellite and Microwave Power Transmission, 通信学会, 2011年2月25日、明石
- ⑧ N.Kaya, Wireless Power Transmission Field Experiments Recent Demos and Future Plans, International Space Development Conference, 2010年5月28日、シカゴ、アメリカ
- ⑨ 岩下真士, 賀谷信幸, International Symposium on Solar Energy from Spaceでのマイクロ波ビーム制御デモンストラーション, エネルギー・シンポジウム, 2010年2月26日、JAXA 宇宙科学研究本部
- ⑩ 賀谷信幸, Demonstration on the microwave power transmission, International Symposium on Solar Energy from Space, 2009年9月8日、トロント、カナダ

[その他]

ホームページ等

Homepage: <http://phobos.cs.kobe-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

賀谷信幸 (KAYA NOBUYUKI)

神戸大学大学院システム情報学研究科・教授
研究者番号: 30093503

(2) 研究分担者

岩下真士 (IWASHITA MASASHI)

神戸大学大学院システム情報学研究科・助教
研究者番号: 60346236