

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246145

研究課題名(和文)高エネルギー密度のワイヤレス給電のためのミリ波放電現象の解明

研究課題名(英文) Research on millimeter-wave discharge phenomena for wireless power transfer at a high energy density

研究代表者

小紫 公也 (KOMURASAKI, KIMIYA)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90242825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,400,000円

研究成果の概要(和文)：ミリ波電磁ビームを用いたワイヤレス給電を実現するため小型軽量の受電、エネルギー変換システムの開発を目的とし研究を行った。ビーム径を拡大した後収束させて爆轟波管に導けるよう最短のテーパ型ビーム収束器を設計し、90%以上の電力捕集性能を示した。さらにこれと高出力ジャイロトロンを組み合わせ放電実験を行い爆轟波管内にミリ波放電を駆動することに成功した。一方理論解析においては、電離閾値電界強度を電子の積算加熱現象で説明できる可能性を示すと共に、我々の実験に特有のビーム軸に平行に伸展するフィラメント構造の内部に、電界方向に伸展する小さなフィラメント群が入れ子の構造になっていることを発見した。

研究成果の概要(英文)：A compact power reception and conversion system was studied for wireless power transfer using a high power-density millimeter-wave beam. An incident beam was expanded and then concentrated using a tapered-tube concentrator and beam acquisition efficiency of higher than 90% was achieved. Next, a discharge experiment was conducted by coupling above system with a high power gyrotron. As a result, detonation was successfully driven in the detonation tube. In addition, we proposed a new model in which the critical field for ionization is determined by accumulated electron heating. In simulation, we found nested fine filaments expanding in the electric field direction inside of a primary filament propagating parallel to the incident beam.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：エネルギー ミリ波 ワイヤレス給電 プラズマ 放電

### 1. 研究開始当初の背景

昨今の地球温暖化対策や脱化石燃料に向けて電気自動車の普及や電車の再評価などが進んでいるが、航空機や宇宙機は高いエネルギー密度を要するため電気駆動への移行が困難で、多量の燃料を携帯せざるを得ない。移動度とペイロード比(初期重量に対する貨物重量)はトレードオフの関係にあり、この制約は打ち上げロケットにおいて最も顕著で、静止衛星軌道への打ち上げには1%程度のペイロード比しか実現できない。そこで、航空宇宙機等に電磁ビームで遠隔にエネルギーを供給する試みはこの制約から解放されるひとつの有力な手段であり、レーザー推進機<sup>1)</sup>や電磁ビームワイヤレス給電<sup>2)</sup>といった形で研究が進んでいる。

電磁ビーム伝送において、受電にアンテナ整流器あるいは太陽電池セルを用いた場合、高効率である反面、大面積を要し、移動体への搭載が容易でない。一方、気体放電を介した衝撃波・高速流生成によって運動エネルギーに変換するプラズマ型変換器は非常にコンパクトで、電磁流体(MHD)式コンバーターやレーザー推進機などとして研究されている。レーザービーム伝送は、高出力レーザーが高価であるため本格的な開発に至っていないが、ミリ波は、電子管の技術の延長で発振が可能であるため発振器が桁違いに安く、ビームの直進性も劣らず通信との混線も少ないので有望な周波数帯と考えられている。我々は、日本原子力研究開発機構(以下、原研)と共同で、1MW級ジャイロトロンを利用してミリ波ビームを介した遠隔エネルギー伝送によるロケット推進の研究を行ってきた。2003年に行ったロケットモデル打ち上げ実験(図1)<sup>3)</sup>は、世界中にニュース配信され(AP通信など)、その後様々な学術講演会において独創的な研究として注目を集めている。

これまでの研究によると、ミリ波放電はフィラメント構造を伴った放電面の伝播を特徴とするが、その進展方向は必ずしも放電面の伝播の方向ではなく条件によって前方にも側方にも進展し(図2)<sup>4)</sup>、電力密度とその横モード分布が進展方向を決定し、ひいては駆動される爆轟波等の流体现象を支配することが分かってきた。

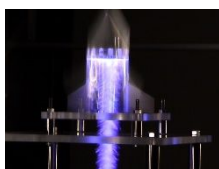


図1 我々が提案するマイクロ波ロケット

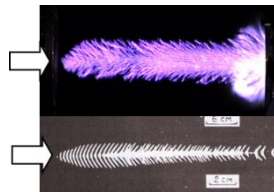


図2 大気中のミリ波放電フィラメント構造。条件によって斜め前方や後方に進展。

### 2. 研究の目的

波長1~10mmのミリ波電磁ビームを用いた高エネルギー密度なワイヤレス伝送と、その航空宇宙応用の可能性を探求する上で、小

型軽量な受電システムの成立性こそがその可能性、応用範囲を決定する主たる要件である。特にビームをコンパクトにモード変換してパワー密度を一機に高め、大気放電を発生させて流体の運動エネルギーに変換するプラズマ型エネルギー変換器の開発が重要で、ミリ波ビームの高度なモード制御技術の開発と、それに伴う大気中のミリ波放電現象を体系的に明らかにすることが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

(1)ミリ波ビームのモード制御技術の確立  
ビーム径を、放電を生じない大口径(低電力密度)のものからミリ波放電を維持可能な小口径(高電力密度)のものに変換する、可能な限りコンパクトなミリ波集光系(モード変換器)の設計・製作、および設計理論を構築する。またミリ波放電のフィラメント空間進展構造の横モード依存性を解析するため、ガウシアンビームのトップハット状あるいは円環状ビームへの変換を行う。

(2)ミリ波放電のビームモードと電力密度依存性の関係

長年のプラズマ計測の経験を生かし、高時空間分解能を有する高速度カメラ・ビデオを駆使して、様々な実験条件における放電を観察し、フィラメント先端の微細構造や電離波面・衝撃波波面の伝播履歴などの流体现象を体系的に取得する。それに加えてミリ波の吸収効率、エネルギー変換効率などマクロなパラメータ、モード変換後のビームの質や環境の影響なども調査する。

(3)高電力密度ミリ波放電現象のモデル化および数値シミュレーションによる検証  
高電力密度領域におけるプラズマ・放電物理モデルを構築・創出する。モデルの検証のため、数値シミュレーションによって現象の再現を試みる。

最終的には、これらの体系的な知見に基づいて小型軽量なミリ波エネルギー変換器、推進器を提案し、その性能検証まで行う。

### 4. 研究成果

(1)ミリ波空間伝送(送受電)システムの設計・製作と性能測定

本研究ではガウシアンビームのレイリー長の範囲内でミリ波ワイヤレス伝送を行うことを提案した。本ワイヤレス伝送システムでは大電力ミリ波発振器ジャイロトロンから射出されたビームを一旦拡大して伝送を実施し、推進機側で収束させて受電する。マイクロ波発振側でのビーム拡大には多面鏡システムを用い、推進機側でのビーム収束には小型軽量なテーパ管型マイクロ波受電器を用いた。

ミリ波の波長がテーパ管の出口径に比べ1/20以下と十分に短いため、光線追跡法を用いて、できるだけコンパクトな(短い)テーパ管型ビーム収束器を設計した。またシステ

ムの軽量化とテーパ管表面を通して換気を行うため、テーパ管の素材にアルミメッシュを用いた。アルミメッシュのピッチサイズは波長に比べて十分に小さく、金属表面と同様にミリ波を反射することが可能である。

設計したテーパ管型ビーム収束器の性能を調査するため、400 mW 出力の半導体ミリ波発振器を用いてビーム収束後のミリ波電力密度プロファイルの詳細な計測を行った。試験では、ミリ波を放物ミラーによりビーム径 150 mm のガウシアンビームに変換して自由空間を放散することなく伝送させ、テーパ型ミリ波収束器で再集光し、直径 65 mm デトネーション管に導くため、テーパ型ミリ波収束器の入口径を 150 mm、出口径を 65 mm とした。

ジャイロトロンからの放射ミリ波を模擬するため、送電アンテナとして角錐ホーンアンテナを用い、水平方向の偏光成分を 1% 程度に抑え、収束器は波源からレイリー長程度離して配置した。

ミリ波の検波には発振器励起源と同期を取ったヘテロダイン検波器を採用したため、高感度でかつ位相分布も測ることができる。また大きい傾き角を持つビームも捉えるため指向性の広いスロットアンテナを用い、x-y ステージにより 2 次元のプロファイルを計測した。(図 3)

その結果、計測されたテーパ管型ビーム収束器通過後の電力密度プロファイルは、ビーム径、ビームの傾き角、偏光方向が計算と良い一致を示し、90% 以上の高い電力捕獲・集光性能を示した。

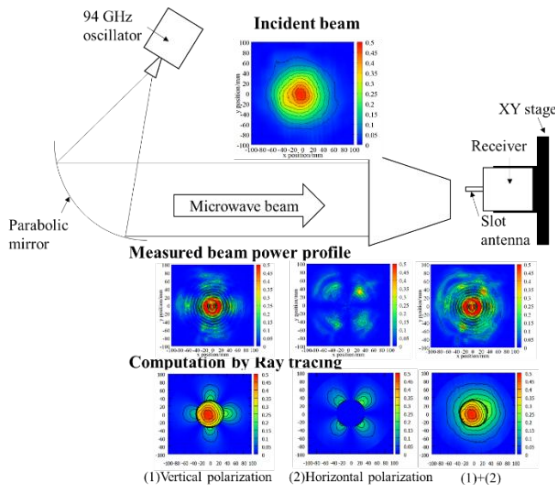


図 3 400 mW の半導体発振器とヘテロダイン検波器を用いたテーパ型収束器背後の電力密度分布計測

## (2) ミリ波放電のビームモードと爆轟波生成の関係

1MW 級の大電力ジャイロトロン（日本原子力研究開発機構那珂研究所）を用いて大電力ミリ波のワイヤレス電力伝送、および爆轟波生成試験を行った。テーパ型受電器を直結した直径 60 mm の観測窓付き爆轟波管内にミリ波を導き爆轟波を誘起した。ジャイロ

トロンの発振周波数は 170 GHz、発振ビームパワーは 638 kW であり、コルゲート導波管を用いてジャイロトロンからビームエキスパンダに伝送している。ビームエキスパンダは 1 組の凸面鏡と凹面鏡からなり、ビーム直径を 40 mm から 240 mm に拡大する。また凸面鏡は位相補正鏡であり、凹面鏡後のビームが平行光になるよう位相を補正している。

試験に用いたテーパ管は低電力試験と同様に設計され、ビーム直径 240 mm のビームを直径 60 mm に収束させている。

観測窓より内部のミリ波放電を高速カメラにより撮影した。また圧力を 2 点で計測し衝撃波の伝搬速度を調べ、発生した圧力は先端のロードセルで計測した。

図 4 に高速カメラで計測したミリ波放電の履歴を示す。電離波面の伝播速度は 550 m/s であり、圧力計で測った衝撃波の平均伝播速度と同じであった。結果としてテーパ型受電器を用いることにより電力密度を十分に高め、管内にミリ波爆轟波を駆動することに成功した。

しかしながら円錐形のテーパ管は軸に特異点を持ち、テーパ管で反射したミリ波は一度軸に集中するため、局所電力密度が非常に高くなり、その結果ビームの拡大・集光を行わない場合と比較して 2 倍の速さの爆轟波が誘起された。また、管内のミリ波モードの乱れが原因で、本来なら点火が起こらない低電力の密度の壁面付近で異常点火が見られた。その為、圧力変換サイクルの再現性が低下した。

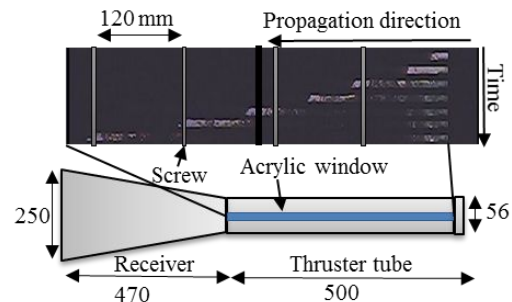


図 4 推進機内部の電離波面伝播の高速カメラ画像

## (3) ミリ波放電現象のモデル化と数値シミュレーション

およそ波長の 1/10 以下の計算格子を用いて FDTD 法で電磁界の空間分布を計算し、得られた電磁界に基づいて電子流体方程式を解くことを繰り返して、放電の時間発展をみることができる。ここで重要なのが高電界場での大気電離モデルと輸送係数（電子拡散あるいは輻射輸送）であり、これまで 10 GW/m<sup>2</sup> の高電力密度条件での放電実験を再現できるモデルは提案されている。

しかしながら、圧力変換サイクルに適した（C-J速度に近い）爆轟波を駆動する 1 GW/m<sup>2</sup> 領域で、測定された電離波面伝播速度（爆轟波伝播速度と等しい）を再現するには、電離閾値電界の値を人工的に小さくする必要が

あった。本研究でも解決していないが、ミリ波電界中の電子の累積加熱を考慮すると、電離閾値電界が下がる可能性が示唆された。

その仮定のもとに計算を行うと、我々の実験に特有の、ビーム軸に平行に伸展するフィラメント構造が再現された。電子の拡散係数を小さくすると、図5に見られるように4本のフィラメントの中に、より一般的なE方向に伸展する微細なフィラメント群が入れ子構造になることを発見した。

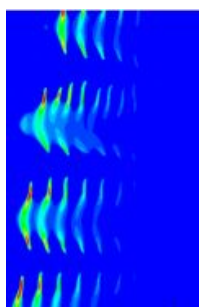


図5 微細フィラメントの入れ子構造

以上結果をまとめると、テーパ型収束器の導入により短い距離で大きくビーム径を収束することができた。その代わりに爆轟波管内のミリ波モードは乱れるので、局所的な爆轟波の加速や異常プラズマ点火などが起こる可能性があり、注意が必要である。ミリ波放電を計算で再現するには、新しい大気放電モデルの構築と輸送係数の見直しが必要であることがわかった。

#### <引用文献>

Kimiya Komurasaki, "Laser Propulsion," Encyclopedia of Aerospace Eng., Wiley, Vol. 2, Chap. 117, 2010.

小紫公也, 「レーザ・マイクロ波電力伝送技術」非接触電力伝送技術の最前線, シーエムシー出版, pp.40-48, 2009.

T. Nakagawa, Y. Mihara, K. Komurasaki, K. Takahashi, K. Sakamoto, T. Imai, "Propulsive Impulse Measurement of a Microwave-Boosted Vehicle in the Atmosphere," *J. of Spacecraft and Rockets*, Vol. 41, No. 1 (2004), pp.151-153.

Y. Hidaka, R. J. Temkin, Y. Oda, et al., "Plasma structures observed in gas breakdown using a 1.5-MW, 110-GHz pulsed gyrotron," *Physics of Plasma*, Vol.16 (2009) 55702.

#### 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 6件)

Yusuke Nakamura, Toshikazu Yamaguchi, Kimiya Komurasaki, Tony Schoenherr, Hiroyuki Koizumi, "Filamentary Structure of Millimeter-Wave Discharge Plasma at Low

Beam Power Density," *Frontier of Applied Plasma Technology*, 査読有, Vol.7, pp.7-12, 2014.

Yusuke Nakamura, Toshikazu Yamaguchi, Kimiya Komurasaki, Tony Schoenherr, Hiroyuki Koizumi, "Numerical Simulation of Filamentary Structure in Millimeter-Wave Discharge," *Plasma application & Hybrid Functionally Materials*, 査読無, Vol. 24, pp. 9-10, 2014.

Masafumi Fukunari, Anthony Arnault, Toshikazu Yamaguchi, and Kimiya Komurasaki, "Replacement of chemical rocket launchers by beamed energy propulsion," *Applied Optics*, 査読有, Vol. 53, No.31, pp. 116-122, 2014.

Masafumi Fukunari, Reiji Komatsu, Anthony Arnault, Toshikazu Yamaguchi, Kimiya Komurasaki and Yoshihiro Arakawa, "Air-breathing Performance of Microwave Rocket with Reed Valve System," *Vacuum*, 査読有, Vol. 88 (2013), pp. 155-159.

小松怜史, 山口敏和, 小田靖久, 齋藤翔平, 福成雅史, 小紫公也, 梶原健, 高橋幸司, 坂本慶司, "大電力・高デューティ比作動によるマイクロ波ロケットの推力向上日本航空宇宙学会誌," 査読有, Vol. 60, No. 6 (2012), pp.235-237.

Yasuhisa Oda, Toshikazu Yamaguchi, Yuya Shiraishi, Kimiya Komurasaki, Ken Kajiwara, Koji Takahashi, Atsushi Kasugai and Keishi Sakamoto, "A One-Dimensional Propagation of Shock Wave Supported by Atmospheric Millimeter-Wave Plasma," *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 査読有, Vol.32 (2011), No. 6, pp.877-882.

[学会発表](計 7件)

福成 雅史, 山口 敏和, 中村 友祐, 柿沼 薫, 小紫 公也, 小泉 宏之, 小田 靖久, 池田 亮介, 梶原 健, 高橋 幸司, 坂本 慶司, "テーパリード弁を用いたマイクロ波ロケットの空気吸い込み機構の開発," 航空宇宙原動機講演会, 2015年3月10日, 富山県富山市 富山国際会議場.

中村 友祐, 山口 敏和, 福成 雅史, 小紫 公也, 小田 靖久, 池田 亮介, 高橋 幸司, 坂本 慶司, "大気圧ミリ波放電のフィラメント構造解析," 宇宙輸送シンポジウム, 2015年1月16日, 神奈川県相模原市 JAXA 宇宙科学研究所.

M. Fukunari, N. Wongsuryrat, T. Yamaguchi, K. Komurasaki, Y. Oda, R. Ikeda, K. Kajiwara, K. Takahashi, K. Sakamoto, "Demonstration of Sub-Megawatt Power Transmission to Microwave Rocket," IRMMW-THz 2014, The University of Arizona, Sep. 16th 2014, Tucson, AZ, US.

M. Fukunari, N. Wongsuryrat, T. Yamaguchi, K. Komurasaki, "Design of an Oversize

Tapered-tube Beam Concentrator for Microwave Rocket,” IRMMW-THz 2014, Sep. 16th 2014, The University of Arizona, Tucson, AZ,US.

M. Fukunari, T. Yamaguchi, K. Asai, S. Kurita, N. Wongsuryrat, K. Komurasaki, Y. Oda, R. Ikeda, K. Kajiwara, K. Takahashi, K. Sakamoto, “Microwave Rocket with Quasi-Optical Microwave Power Transmission System and Flight Demonstration,” International High Power Laser Ablation and Beamed Energy Propulsion, Apr. 22nd 2014, Santa Fe, NM, US.

Kimiya Komurasaki, Masafumi Fukunari, Anthony Arnault, Toshikazu Yamaguchi,” Replacement of Chemical Rocket Launchers by BEP,” International High Power Laser Ablation and Beamed Energy Propulsion, Apr., 22nd, 2014, Santa Fe, NM, US.

福成雅史, 伊藤祐樹, 赤木将平, 鈴木 淳, Wongsuryrat Nat, 小紫公也, “マイクロ波ロケットとホールスラストを用いた低コスト宇宙輸送システム,” 第45期定時社員総会/年会講演会, 2014年4月10日, 東京都文京区・東京大学山上会館.

〔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〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

小紫 公也 (KOMURASAKI, Kimiya)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90242825

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

坂本 慶司 (SAKAMOTO, Keishi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号：90343904

小田 靖久 (ODA, Yasuhisa)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号：60512209