

平成22年 6月 4日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860093

研究課題名（和文） ミリ波放電の開始過程と放電制御手法への応用

研究課題名（英文） Study of millimeter wave breakdown and control method

研究代表者

小田 靖久（ODA YASUHISA）

独立行政法人 日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・博士研究員

研究者番号：60512209

研究成果の概要（和文）：ミリ波放電プラズマが持つフィラメント状構造の形成過程を明らかにし、その構造形成を制御する手法を検討した。そのため、ビーム断面分布に対するミリ波放電プラズマの構造変化を評価し、電力密度が高い領域にミリ波放電プラズマが形成されることを確認した。これは、ミリ波放電プラズマの電離波面の伝搬速度が局所的な電力密度に依存することが原因と考えられる。高速度カメラを用いた計測により、電力密度分布に従ってミリ波放電プラズマの電離波面の伝搬速度が決定されることを確認した。また、ミリ波放電プラズマの発生閾値を計測し、ガス種・圧力に対するミリ波放電の発生条件を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The structure formation of atmospheric millimeter wave breakdown plasma was observed. The atmospheric millimeter-wave breakdown was observed under various beam profiles. Several profiles were produced from a high-power 170 GHz gyrotron beam using the beam mode converter. The breakdown plasma had unique structure depending on each beam profile. The structure was determined by the trajectory of ionization spots depending on beam profile. The breakdown threshold under various gas species condition was also observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	920,000	276,000	1,196,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,720,000	516,000	2,236,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：核融合学

キーワード：ミリ波・空気プラズマ・ジャイロトロン

## 1. 研究開始当初の背景

電波から光の中間に位置するミリ波・テラヘルツ波領域は、電波と光の両者の性質を併せ持っている。近年の技術進展によって様々

な応用研究が進められている。とくに、ジャイロトロンを用いた大電力発振技術によって1MW(メガワット)をこえるコヒーレントなミリ波ビームが開発され、ミリ波放電の研究が可能になった。ミリ波放電は、例えば、従

来の高周波放電に比べてプラズマ密度を高くできることを利用した高性能なCVDダイヤモンド生成といった材料開発や、大電力での連続発振技術との組み合わせによるエネルギー伝送・変換技術など、幅広い領域での応用が期待されている。

また、ミリ波放電は、RFの周波数と分子間の衝突周波数、波長とRFビームのサイズのスケールが同程度であるため、他の周波数領域の放電と異なった構造・ダイナミクスを生じる。一例として、ミリ波ビーム上にミリ波放電プラズマが形成されると、周期的なフィラメント状構造が形成される。このフィラメント状構造をもった放電プラズマの電離波面はRFエネルギーを吸収しながらミリ波ビーム上を超音速で遡上することが知られている。

これまででは、ミリ波・テラヘルツ波を用いた大気放電現象は、大電力発振源が限られていることから、研究の事例が極めて少なく、現象の解明ならびにその応用は、まだ十分に明らかになっていなかった。しかし、近年、安定してミリ波を発振させる1MW級ジャイロトロンが開発が進展し、ミリ波放電の研究を進める環境が整いつつある。また、発振技術に伴う応用技術の開発により、放電現象を理解する必要性が出ており、ミリ波放電プラズマに関する研究の進展が待たれている。

## 2. 研究の目的

ミリ波放電プラズマは、波長とミリ波ビームのスケールが比較的近いため、相互のスケールの相互作用により特徴的なフィラメント状構造の形成の要因となっていると考えられる。そのため、ミリ波ビームの分布は、そのプラズマの構造に影響を与えていると考えられる。そこで、本研究ではミリ波ビームの分布の影響を明らかにし、その形成プロセスを明らかにする。これを通して、ミリ波放電プラズマのフィラメント状構造や放電の成長を制御する手法を検討した。

また、ミリ波による大気放電現象は、大電力発振源が限られていることから、研究の事例が極めて少ないため、まず放電開始の閾値といった放電現象の基礎的なパラメータについてデータの取得を行う必要がある。

上記の計測を通して、ミリ波プラズマの発生と成長のメカニズムを明らかにすることで、ミリ波プラズマを用いた様々な応用に必要となる知見を得ることを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 大電力ミリ波ビームの発生とミリ波放電プラズマの発生

放電を発生させるため、170 GHz 大電力ジ

ャイロトロンを用いた。ジャイロトロンから出力されたミリ波は、コルゲート導波管を通して実験系に導入されている。導波管内では基本伝搬モード $HE_{11}$ 成分を95%以上であるため、その出力はガウスビームとなる。ミリ波ビームの出力は、200~500 kWであり、パルス幅は<1 msとした。

導波管から出力されるガウスビームは、そのままのビーム状で50 cm程度伝搬させ、その先で焦点距離が1.5 cmの集光鏡を用いて波長程度の大きさまで集光させた。これにより、ミリ波ビームにより直接空气中に放電プラズマを着火させた。着火したプラズマは急激に成長するため、すぐに集光鏡から離れ、集光されていないミリ波ビーム上を導波管の出力部に向かって成長する。ミリ波プラズマの特徴的なフィラメント構造は、この集光されていないビーム上で観測されるため、プラズマ構造の評価はこの領域で行った。

### (2) プラズマ構造とビーム断面分布

プラズマのフィラメント構造形成へのRFビームのモードの影響を評価する。そこで、フラットな分布のミリ波ビームをビームモード変換器によって発生させ、空間的に均質な電力密度条件下での放電現象の再現を行う。ガウスビーム上の放電実験と合わせることができると考えられる。これに向け、必要となるビーム分布に変換するためのビームモード変換器の開発を行った。放電プラズマの計測においては、放電によって生じる衝撃波について圧力素子を用いて計測することで、プラズマによるミリ波ビームにエネルギーの変換についての検討を行った。

### (3) 放電開始条件

放電開始の条件を明らかにするため、ミリ波ビームの電力と雰囲気ガスの条件を変化させて放電開始の閾電力を測定する。これに向け、RF入射窓をもったチャンバーにガスを満たした中に、ミリ波ビームを入射し内部で集光させ放電を発生させた。このとき、放電が開始した位置と時刻を、観測窓を通して放電プラズマの画像を計測することにより、放電開始の条件を計測した。

### (4) プラズマの構造形成過程の計測

ミリ波放電プラズマの放電開始過程とそのフィラメント状構造の発生メカニズムを明らかにするために、高速度カメラにより放電の進展過程を計測し、その形成過程を可視化し、ミリ波放電プラズマにおいて特徴的なフィラメント状構造の形成メカニズムを明らかにした。

#### 4. 研究成果

##### (1) ビームモード変換器の設計と製作

放電プラズマのビームモードの影響を評価するにあたり、ビームモード変換器を設計・製作した。ビームモード変換器とは、導波管から空間放射されたミリ波ビームを、2枚の位相補正を行う複雑な表面形状をもった非線形ミラーで反射させ、ターゲットとなるビーム断面分布に変化させるものである。本研究では、単一の中心ピークをもったビームから、中心部にパワーを持たないリング状ビームを形成する変換器の設計を行った。次に、このリング状ビームに通常のガウスビームを重ね合わせることでビーム中心部にフラットな強度分布を持つフラット状ビームを形成する変換器を設計した。

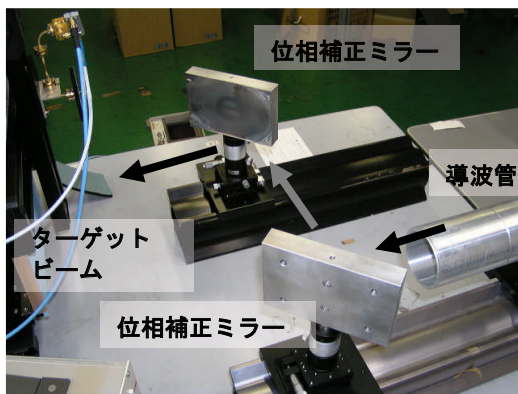
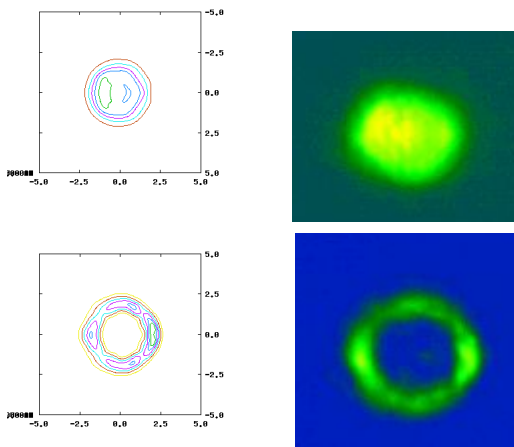


図1 2枚の位相補正鏡によって構成されるビームモード変換器。低電力計測の様子



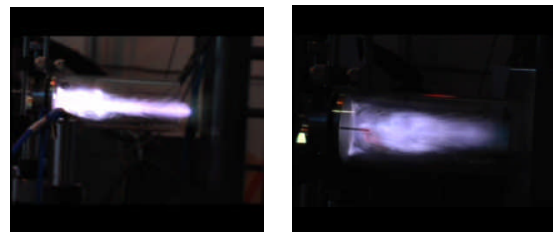
Designed profile Measurement result  
図2 大電力ビームによるビームモード変換器の動作試験で得られたビーム分布。ビームモード変換器の設計段階での計算結果と赤外線カメラによる計測結果を比較する。

実際に製作されたビームモード変換器は、図1に示す10 mW出力の発振源を用いた低電力試験においてビームモード変換性能の評価を行い、中心ピークをもった初期のガウスビームから、設計通りの断面分布をもったビームが得られることを確認した。

さらに、大電力ジャイロトロンからの出力ビームを用いて、ビームモード変換器の試験を行った。試験では、スクリーン上にミリ波ビームを照射し、ミリ波ビームによって生じるスクリーン上の温度分布を、赤外線カメラで計測した。その結果、図2に示すように、リング状ビーム・フラット状ビームの双方において設計した通りのビーム断面分布が、大電力条件でも得られることを確認した。

##### (2) ビームモードに対する放電形状の影響

ガウスビームとフラット状ビーム、リング状ビームにおいて、ミリ波放電プラズマを形成させ、ビームの断面分布によるミリ波放電プラズマの挙動の影響を観測した。その結果を図3に示す。ガウスビームでは、ビーム中心部の電力密度の高いところにのみプラズマが形成される一方で、強度分布が広いフラット状ビームでは、ガウスビームによるプラズマに比べて幅の広いプラズマが観測された。さらに、リング状ビームにおいては、周辺部のみにプラズマが形成された。以上より、電力密度が大きいところにプラズマが形成されるため、ビーム断面分布に応じて全体的な構造が変化することを確認した。



ガウスビーム フラット状ビーム  
図3 大電力ミリ波での放電プラズマの形状。ガウスビームとフラットビームの比較

ミリ波放電プラズマの発生によって生じる衝撃波を測定することにより、ミリ波放電プラズマによって吸収・変換されたミリ波ビームのエネルギーを評価した。表1に示す通り、ガウスビームの場合と比べ、フラット分布ビームではピーク部分の電力密度が低いため電離波面と衝撃波の伝搬速度が低くなるにもかかわらず、衝撃波背後の圧力上昇は逆に大きくなることが明らかになった。これはミリ波放電プラズマによって吸収・変換できたエネルギーが増大したことが要因と考えられる。以上より、ミリ波放電プラズマに

よるエネルギー吸収・変換は、ビーム断面分布による影響を受けることが明らかになった。

表1 ミリ波プラズマの電離波面の伝搬速度と衝撃波圧力のビーム分布に対する影響

	フラットビーム	ガウスビーム
ピーク電力密度	16 kW/cm <sup>2</sup>	33 kW/cm <sup>2</sup>
電離波面伝搬速度	68 m/s	140 m/s
衝撃波背後圧力	14.4 kPa	7.8 kPa

### (3) ガス中における放電開始条件の計測

ミリ波ビームによる放電発生閾値を測定するために、170 GHz 大電力ジャイロトロンで発生させたミリ波ビームを、RF 透過窓(サファイア製)を通してチェンバー内に導入し、ヘリウム・アルゴン中において、大電力ミリ波ビームによる放電を発生させた。入射したミリ波ビームはガウスビームであり、ピーク部分の電力密度は 50 kW/cm<sup>2</sup>~100 kW/cm<sup>2</sup>であった。その結果、ヘリウム・アルゴン雰囲気では放電発生閾値が低下し、図 4 に示す通り、集光させていないミリ波ビームを入射する RF 透過窓の表面においても放電が発生することが明らかになった。放電発生の条件はチェンバー内のガス圧に依存しており、アルゴン・ヘリウムでは 0.001 気圧以上で放電が発生することが確認された。

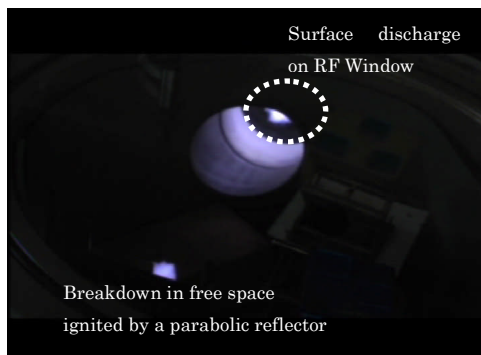


図 4 チェンバー内における放電の様子。集光ミラー部と窓表面で発生している。

### (4) ミリ波放電プラズマの構造形成過程

大電力ミリ波ビーム上のミリ波放電プラズマの成長過程を明らかにするため、100 万分の 1 秒のシャッター速度の高速度カメラで撮影した。170 GHz 大電力ジャイロトロンを用いて発生させたガウスビーム上で発生させたプラズマは、図 5 に示すように、小さなプラズマが電離波面を形成していることが明らかになった。図 6 に示す連続撮影の各フレームを比較すると、小さなプラズマは外向きに超音速で移動している。この軌跡は、積分写真で確認されるフィラメント形状に一致しており、プラズマのマクロ的な構造は電

離波面上に分布するプラズマの軌跡であることが明らかになった。プラズマの移動速度の解析の結果、ミリ波ビームの電力分布に依存した分布をしており、フィラメント構造の進展方向・角度はビーム断面分布によって大きく影響を受けることが明らかになった。

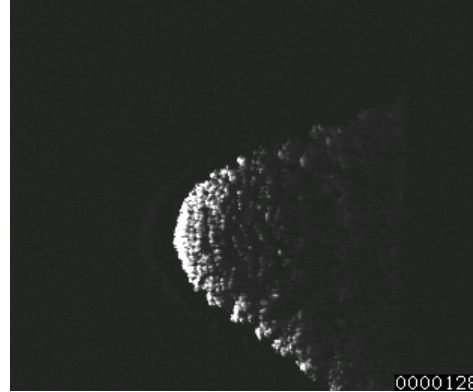


図 5 ミリ波プラズマの高速度カメラ画像

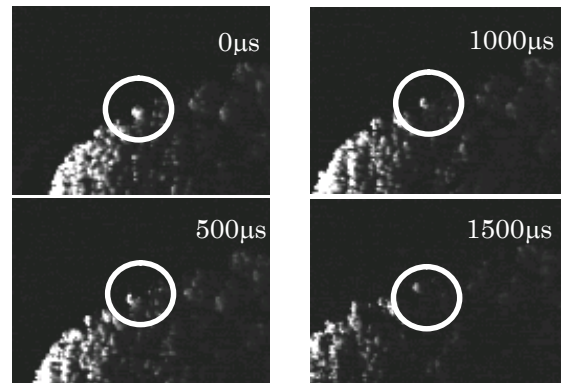


図 6 ミリ波プラズマのフィラメント構造の形成過程の高速度カメラ画像

## 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 3 件)

- ① Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, M. Shapiro, R. J. Temkin, K. Sakamoto, “Measurement of RF transmission mode in ITER relevant EC H&CD transmission line”, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 査読有, 2010 年掲載決定
- ② Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Komurasaki, “In Tube Shock Wave Driven by Atmospheric Millimeter-Wave Plasma”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 48, 2009, 116001
- ③ 小田靖久, 小紫公也, 坂本慶司, “マイ

クロ波による気中放電のダイナミックスと構造形成”, プラズマ核融合学会誌, 査読無, 84, 6, 2008, pp.343-347

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① T. Yamaguchi, Y. Oda, Y. Shimada, Y. Shiraishi, T. Shibata, K. Komurasaki, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, Y. Arakawa, “Visualization of Shock Wave Driven by Millimeter Wave Plasma in a Parabolic Thruster”, 6th International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Nov, 2009, Scottsdale, USA
- ② Y. Oda, T. Yamaguchi, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Komurasaki, K. Sakamoto, “Structure Formation of Atmospheric Millimeter Wave Breakdown on Non-Gaussian Beam”, The 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Sep, 2009, Busan, Korea
- ③ Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, T. Yamaguchi, K. Komurasaki, “Shock wave generation by atmospheric breakdown plasma on a high power millimeter wave beam”, 4th International Congress on Cold Atmospheric Pressure Plasmas: Sources and Applications, Jun, 2009, Ghent, Belgium
- ④ 小田靖久, 梶原健, 高橋幸司, 春日井敦, 坂本慶司, “大電力ミリ波ビームにおける RF 窓表面での放電”, プラズマ科学シンポジウム 2009, 2009 年 2 月, 名古屋
- ⑤ Y. Oda, K. Kajiwara, K. Takahashi, A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Komurasaki, “A structure of breakdown plasma by a high power millimeter wave beam”, International Congress on Plasma Physics 2008, Sep, 2008, Fukuoka, Japan

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小田 靖久 (ODA YASUIHSA)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・  
核融合研究開発部門・博士研究員  
研究者番号: 60512209