

大気圧ミリ波放電プラズマに見られる 楕状構造におけるピッチサイズの解析

学生証番号 47146058 氏名 中村 友祐
(指導教員 小紫 公也 教授)

Key Words: Millimeter-wave, Discharge, Air-plasma, Computation

1. 背景¹⁾

核融合分野におけるプラズマ加熱に対する需要から、ジャイロトロンと呼ばれる高出力のミリ波発生装置の開発が進んでいる。近年、高出力のミリ波が長い時間安定して出力できるようになり、ミリ波を利用した様々な現象が注目を集め、核融合以外の分野での利用が研究されている。そのひとつが大気圧ミリ波放電である。大気圧ミリ波放電とは、高いエネルギー密度のビーム状ミリ波が大気を電離させる現象であり、放電開始後に発生したプラズマが高速でビーム源方向へ伸展していく現象が知られている。この現象は遠隔エネルギー供給による宇宙推進機²⁾への応用が期待されている。

このようなプラズマの伸展現象はレーザーの波長帯における放電でも観測されているが、その伸展速度の傾向は大きく異なる。このような違いを生む要因として、ミリ波特有に観測される伸展時のプラズマ構造が考えられている。図1にミリ波放電の伸展時におけるプラズマを高速カメラにて撮影した短露光写真を示す。この写真からプラズマの粒が入射方向に対して垂直な方向に等間隔で並んでいる様子が見て取れる。この粒はミリ波入射方向へと進行し、その軌跡が楕の形状を描くことから、この構造のことを楕状構造と呼ぶこととする。粒のピッチサイズはおおよそ1.6 mmであった。本研究における目的はこの楕状構造を数値計算により再現し、ピッチサイズが何に依存しているのかを解析することである。

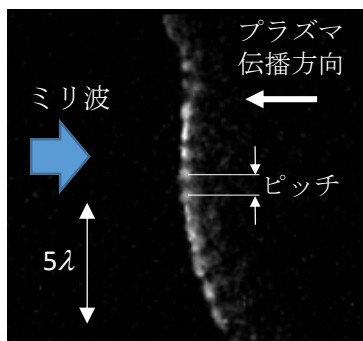


図1 楕状構造プラズマの高速カメラによる写真。ミリ波のプロファイルはフラットトップ。ミリ波波長1.76 mm。露光時間100 ns。

2. 数値計算手法¹⁾

入射ミリ波の磁界方向に対して垂直な面内において二次元計算を行った。数値計算法を表1に示す。拡散方程式中の電子生成項についてはフィッティングパラメータとして臨界電界強度 E_c を用い、計算によるプラズマ伸展速度が実験値と一致するように定めた。フィッティングの結果、本研究では $E_c=1.2$ MV/mを用いることとした。計算領域は入射波の波長を λ として $7.5\lambda \times 7\lambda$ で、境界条件は長辺のうち片側を対称面として反射境界、それ以外の三辺を吸収境界とし、さらに短辺の片側にミリ波の発生源を一様に付加した。ミリ波発生源と反対側に初期プラズマを任意に与えて、そこから入射方向へと伸展するプラズマを計算した。

表1 数値計算法。 λ , f は入射波の波長、周波数。

	電磁界	プラズマ
基礎方程式	Maxwell方程式	拡散方程式 ³⁾
離散化法	FDTD (S24) ⁴⁾	オイラー法
空間刻み幅	$\lambda/50$	$\lambda/100$
時間刻み幅	$1/200f$	$1/f$

3. 計算結果¹⁾

3-1 楕状プラズマの再現

数種類の初期電子数密度分布からプラズマ伸展を数値計算した。ミリ波の波長は図1の実験と同様の1.76 mmとした。いずれの初期プラズマ分布から始めた場合においても数 μ s後に図2に示すような楕状構造が形成されることを確認した。計算結果で得られた平均ピッチサイズは1.61 mmであり実験で計測された値とよく一致した。

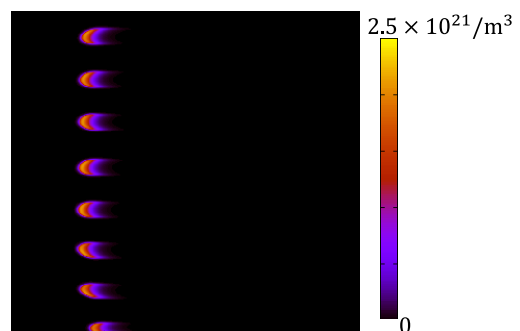


図2 数値計算から得られた電子数密度分布

3-2 ピッチサイズの波長依存性

入射ミリ波の波長を1.76 mmから、2.73、6.00、10.7 mmに変更して数値計算を行った。図3に波長とピッチサイズの関係を示す。この図から、ピッチサイズは入射ミリ波の波長に比例しており、およそ 0.9λ となっていることが分かる。

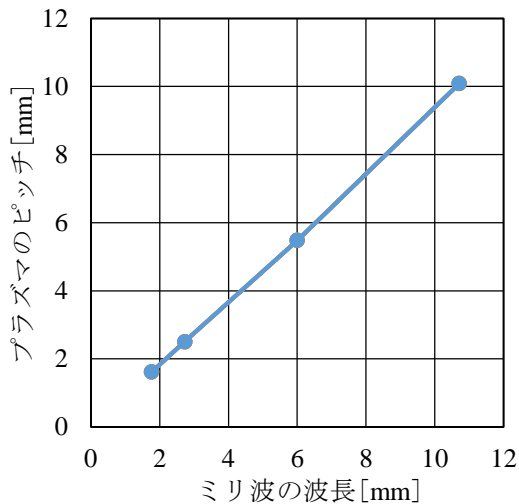


図3 入射ミリ波の波長とピッチサイズの関係

3-3 ピッチサイズのフィッティングパラメータ依存性

本研究における計算では、電子生成項にフィッティングパラメータ E_c を用いる。そのため、生成項には物理的な裏付けがあるわけではなく、この値によってピッチサイズが大きく変わるとすると、ここまでのピッチサイズに関する議論は信憑性に乏しいものになってしまう。そこで、フィッティングパラメータ E_c を1.1、1.2、1.3 MV/mと変化させて計算を行い、ピッチサイズを比較した。 E_c とピッチサイズの関係を図4に示す。この図から、 E_c を変化させてもピッチサイズには大きな変化が見られないことが分かる。

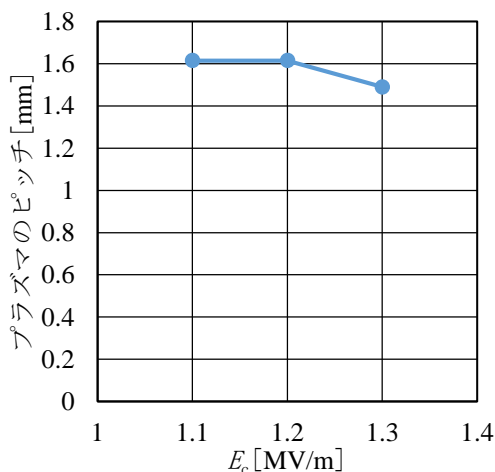


図4 E_c とピッチサイズの関係

また、表2に示すように E_c を変えると電子数密度、伸展速度は大きく変わっていることが分かる。

表2 E_c を変えた時の最大電子数密度と伸展速度

E_c	最大電子数密度	伸展速度
1.1 MV/m	$3.19 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$	9.2 kms^{-1}
1.2 MV/m	$2.21 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$	5.2 kms^{-1}
1.3 MV/m	$1.47 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$	2.7 kms^{-1}

4. 考察¹⁾

E_c を変えた場合、最大電子数密度と伸展速度は数倍程度の変化があるにもかかわらず、ピッチサイズはほぼ一定という結果を得た。このことからピッチサイズは電子数密度、伸展速度への依存性は低く、入射ミリ波の波長のみ依存すると思われる。プラズマの粒二粒から誘起される電界の二乗平均平方根分布を図5に示す。この図から、二つの粒からの反射波が干渉し、粒の間に電界強度の弱いスポットを作っていることが分かる。このスポットがプラズマの粒同士の間隔を一定に保ち、櫛状構造を形成していると考えられる。

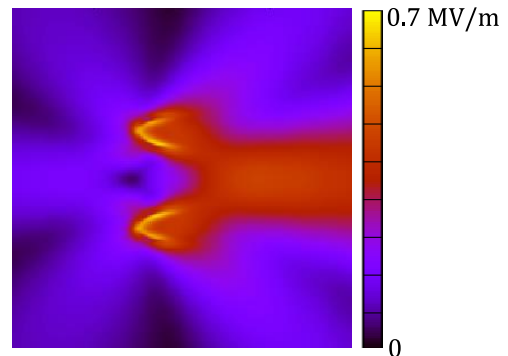


図5 プラズマ二粒から誘起される電界の二乗平均平方根分布

5. 結論¹⁾

数値計算により、実験で観測されたミリ波放電プラズマの櫛状構造を再現した。計算からピッチサイズについて以下のことが分かった。

- ・初期プラズマ分布によらず一定である
 - ・波長に依存する。
- また、計算結果の考察から以下のことが言える。
- ・ピッチサイズは電子数密度、伸展速度によらず、波長 λ をとして 0.9λ となる。
 - ・プラズマ二粒による反射波の干渉が櫛状構造形成の要因である。

参考文献

- 1) Y. Nakamura et al. 日本航空宇宙学会第47期年会講演会講演集, 2D3
- 2) Y. Oda et al. *J. Appl. Phys.*, **100** (2006), 113307
- 3) J. P. Boeuf et al. *Phys. Rev. Lett.*, **104** (2010), 015002
- 4) T. Deveze et al. *IEEE APS Int. Symp. Proc.* (1992), pp. 346-349