

ハーモニック電子サイクロトロン共鳴マイクロプラズマ源の開発

松下 正典*・松田 良信**・藤山 寛**

Development of Harmonic Electron Cyclotron Resonance Micro-Plasma Sources

by

Masanori MATSUSHITA*, Yoshinobu MATSUDA**, and Hiroshi FUJIYAMA**

Generation of low-pressure micro-plasmas was investigated theoretically and experimentally by using the electron cyclotron resonance plasma generated in the narrow gap of a coaxial tube. By using xenon and by applying the magnetic flux densities satisfying from the harmonic ECR to ECR conditions, we have succeeded in generating micro-plasmas in the $500\ \mu\text{m}$ gap of a coaxial tube at the pressure of 10^{-2} Torr.

1. 研究背景と研究目的

現在プラズマは、室内照明の蛍光灯、プラズマディスプレイパネル(PDP)、薄膜形成など、様々な分野で応用されており、我々の日常生活に欠くことのできない存在である。現在のプラズマ応用技術を、パッシェン(Paschen)の法則に基づき、横軸を気圧P[Torr]、縦軸をギャップ長d[cm]として表したものが図1である。図から分かるように、現在のプラズマ応用技術はPd=1~10Torr・cm付近で開発されている。現在注目されている非常に小さな放電体積(1辺が0.1mm程度)をもつPDPセルなどのいわゆるマイクロプラズマは、高気圧領域で開発されている。これは、高輝度を得るために高い発光粒子密度を必要とし、かつ、できる限り小さな放電体積に留めておく必要があるからである。一方、その他の領域、特に低気圧・短ギャップ長の領域でのプラズマ応用技術は皆無であることが図1から分かる。この低気圧・短ギャップ長の領域については、具体的な応用の可能性については未知な部分があるが、この領域でのプラズマ生成法の開発は新たな研究シーズを生み出す可能性がある。そこで本研究では、低気圧領域でのマイクロプラズマの生成を目的として、電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance; ECR)を利用したマイクロプラズマ生成について研究を行った。

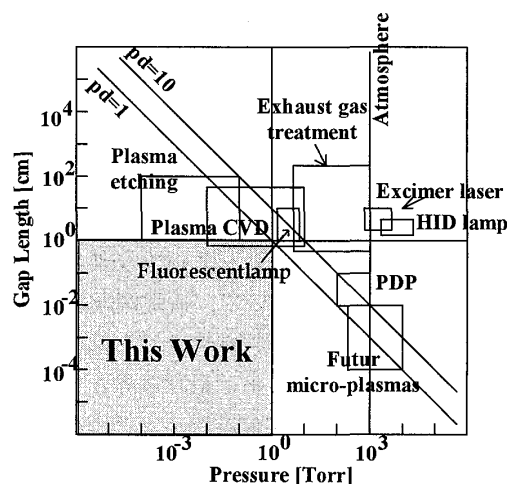


図1 パッシェンの法則に基づくプラズマ技術の分布

2. 放電領域の理論的導出

最初に、低気圧マイクロプラズマの生成が可能となるPd領域を理論的に検討した。図2のような同軸電極間のECR放電を念頭に、理論計算モデルとしては、その放電ギャップ間を平行平板と近似したものを考え、電界方向をx軸、それと直角方向をy軸、そして磁界方向をz軸と定義した。マイクロ波放電を維持するためには、初期電子を電極間内に閉じ込める必要がある。そこで我々は、放電を開始するのに必要な最低の電界を放電開始電界、電極間内に初期電子が捕捉されなくなる最高の電界を非捕捉電界、使用するガスの電離エ

平成15年4月18日

*大学院生産科学研究科(Graduate School of Science and technology)

**電気電子工学科(Department of Electrical and Electronics Engineering)

エネルギーよりも高い運動エネルギーまで初期電子を加速させるのに必要な最低の電界を最低電離電界とし、これらの電界の制限条件から放電が可能となるPd領域を導出した。なお、この計算では、電子1個あたりの消費する電力全てが電離に用いられていると仮定した。

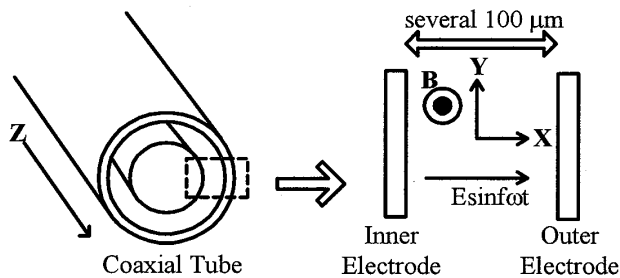


図.2 短ギャップを有する磁界中同軸マイクロ波放電の計算モデル

放電開始電界、非捕捉電界、最低電離電界のギャップ長依存性を図3に示す。この計算ではガスはAr、気圧は0.1Torr、磁界はハーモニック ECR 条件付近の $\omega c / \omega = 0.5$ とした。図3において、放電開始電界、最低電離電界よりも高く、非捕捉電界よりも低い領域で放電が可能となる。従って、最低電離電界と非捕捉電界の交点が、放電可能となる最短ギャップ長を示す。この条件の場合では、放電が可能となる最短ギャップ長は485 μm 、そのときの放電開始電圧は45.7Vとなる。この計算結果からも分かるように、理論的には50V以下の非常に低い電圧でマイクロプラズマを生成できることが示された。

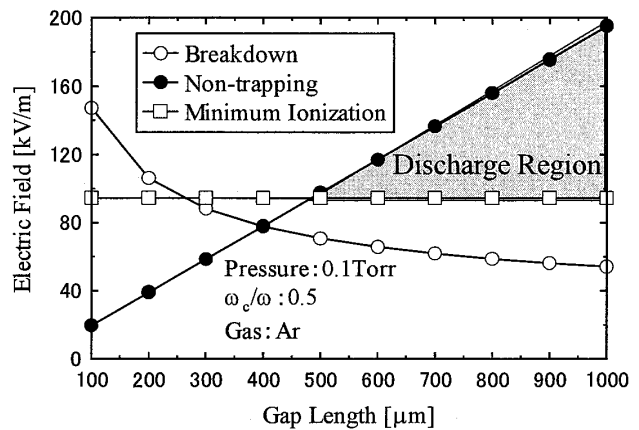


図.3 放電開始電界、非捕捉電界、最低電離電界のギャップ長依存性

Arよりプラズマを生成しやすいガスを使用することによって、より小さいギャップ長でのプラズマ生成が可能であると考えられる。そのためには、Arより衝突断面積が大きく、電離電圧が低いガスの利用が有効と考えられる。そこで、Xe、Neについても理論的計算を行った。表1にXe、Neの衝突断面積と電離電圧、図4、5にXe、Neにおける理論的計算結果を示す。その結果、Xeを使用した場合、放電可能となる最短ギャップ長は425 μm 、放電開始電圧は35.2V、Neを使用した場合、最短ギャップ長は568 μm 、放電開始電圧は62.8Vとなることが求められた。Arの場合と比較すると、Xeでは約50 μm 小さいギャップ長でプラズマを生成できることが分かった。以上より、低気圧マイクロプラズマを生成するにはAr、Neに比べXeが最も有効であることが分かる。

	Collision Cross Section [πa_0^2]	Ionization Voltage [V]
Ar	7	15.76
Xe	30	12.13
Ne	3	21.56

表. 1 希ガスの衝突断面積と電離電圧

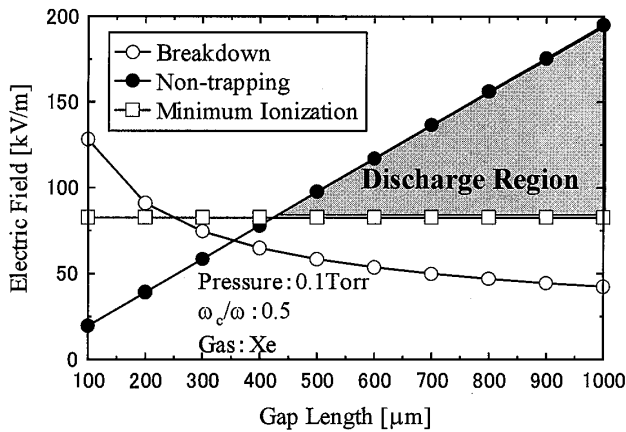


図. 4 Xe に対する放電可能領域

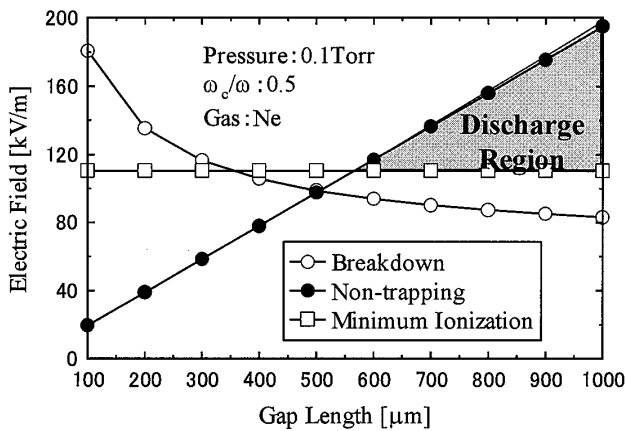


図. 5 Ne に対する放電可能領域 3. 実験装置および実験結果

図 6 に本研究で用いた実験装置図, 表 2 に実験条件を示す. 電源は 2.45GHz マイクロ波電源を用いた. マイクロ波伝送部はスタブチューナーとパワーモニタによって反射波をモニタ・制御できるようにした. 本実験で使用したガスは Ar と Xe である. 電極には Al 製同軸電極を使用し, それを磁界発生用コイルの中心に配置した. 実験を行ったギャップ長は 10mm, 3.5mm, 1mm, 700 μm, 500 μm で, それぞれ約 50 μm の精度誤差がある.

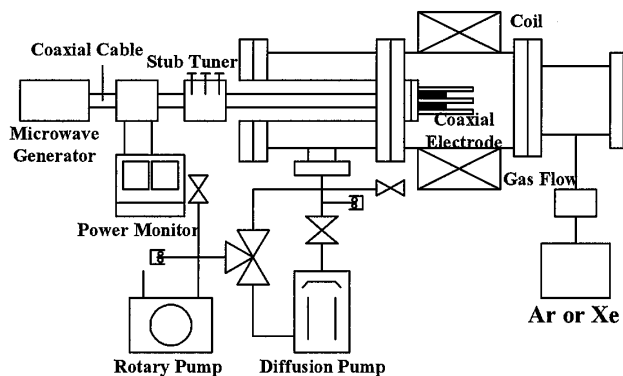


図. 6 ハーモニック ECR プラズマ装置

表 2 実験条件

マイクロ波電源	2.45GHz
マイクロ波パワー	10W
ガス	Ar, Xe
気圧	0.001 ~ 0.1Torr
ギャップ長	10mm, 3.5mm, 1mm, 700 μm, 500 μm

実際に低気圧マイクロプラズマ生成実験を行った結果, ガス Ar, 気圧 3×10^{-2} Torr においてギャップ長 700 μm までのプラズマ生成が可能であることが分った. Ar ガスを使用し, 投入マイクロ波パワー 10W で, ギャップ長 10mm, 3.5mm, 1mm, 700 μm で放電した時の, 放電開始磁界の気圧依存性を図 7 に示す. また, 図 8 にはギャップ長 700 μm における放電開始磁界と最大捕捉磁界の気圧依存性を示す. 気圧を減少させていったとき, プラズマ生成は, ギャップ長 10mm では気圧 1×10^{-3} Torr まで, ギャップ長 3.5mm では 4×10^{-3} Torr まで, ギャップ長 1mm では 1×10^{-2} Torr まで, ギャップ 700mm では 3×10^{-2} Torr まで可能であった. 気圧 10^{-3} Torr の領域ではギャップ長 10mm, 3.5mm とほぼ ECR 条件である 875Gauss 付近で生成されていることが分かる. 10^{-2} Torr の領域では 10^{-3} Torr の領域に比べ, より低い磁界で生成され, 放電領域が広がる傾向は理論計算結果と一致している. ギャップ長 1mm と 700 μm では, より弱磁界でプラズマが生成された. これは $\omega = 2\omega_c$ のハーモニック共鳴付近の磁束密度に相当し, 初期電子の軌道が非常に小さく, 閉じ込めが良くなったためと考えられる.

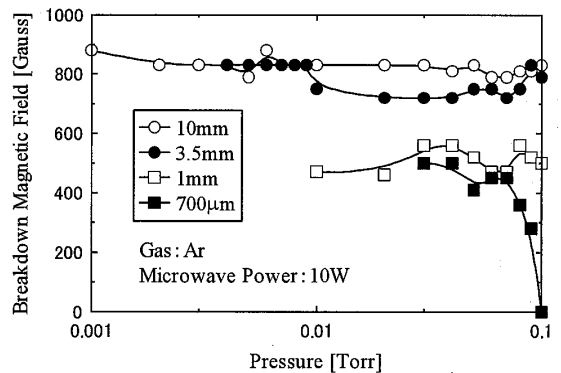


図. 7 ギャップ長 10mm, 3.5mm, 1mm, 700 μm での放電開始磁束密度の気圧依存性 (マイクロ波電力 10W)

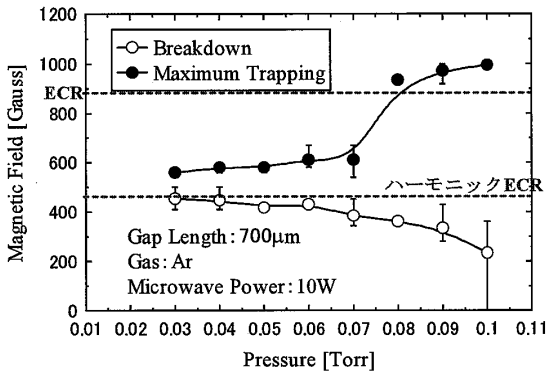


図. 8 ギャップ長 $700\ \mu\text{m}$ での放電開始磁束密度と最大捕捉磁束密度の気圧依存性 (マイクロ波電力 10W)

ガス Ar ではギャップ長 $700\ \mu\text{m}$ ではプラズマが生成したが、ギャップ長 $500\ \mu\text{m}$ では生成しなかった。理論計算によると、低気圧マイクロプラズマを生成するには Ar よりも Xe の方が有効という結果が得られているため、Xe でプラズマ生成実験を行った。その結果、ギャップ長 $500\ \mu\text{m}$ においては、高気圧側から $1 \times 10^{-2}\text{Torr}$ までの気圧範囲でプラズマ生成に成功した。ガス Xe, 気圧 0.01Torr , 磁束密度 385Gauss , 投入マイクロ波パワー 10W におけるギャップ長 $500\ \mu\text{m}$ でのプラズマ生成の様子を図9に示す。図10には、図9のマイクロプラズマの放電開始磁界と最大捕捉磁界の気圧依存性を示す。図10から、気圧が $3 \times 10^{-2}\text{Torr}$ までは磁界を必要とせず、マイクロ波だけでプラズマが生成されているのが分かる。また、ECR 条件付近である 875Gauss 以上の磁束密度ではプラズマが消滅した。これは電子が ECR の大きなエネルギーにより急激に加速されるために、このような小さなギャップ長では衝突電離を起こせず、すぐに電極で消滅してしまうためと考えられる。以上、ECR ではなくハーモニック ECR の方がむしろ有効であるという結果が得られている。理論計算では 50V 以下の非常に低い電圧でプラズマを生成できるという結果が得られていたが、実験ではマイクロ波パワーが全てプラズマ生成に使われているとは限らない。また、プラズマ生成が同軸電極のギャップ間のみならず開口端部でも生じている可能性もありうる。これらの不明な点の調査を早急に行う必要がある。また、電子密度、電子温度などのプラズマパラメータも定量的に評価する必要がある。

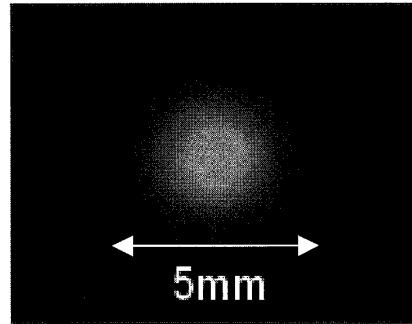


図. 9 マイクロプラズマの写真

(Xe ガス, 圧力 0.01Torr , マイクロ波電力 10W , 磁束密度 385Gauss , ギャップ長 $500\ \mu\text{m}$)

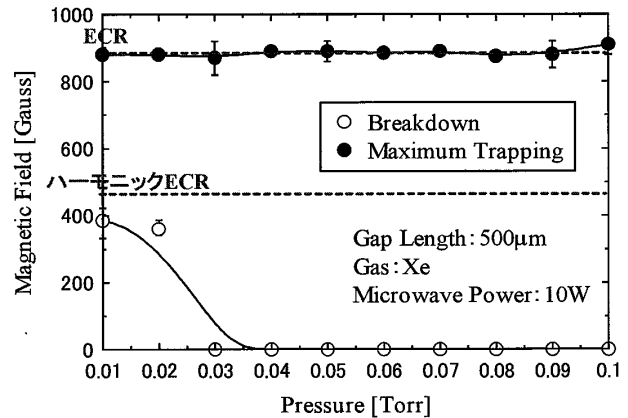


図. 10 ギャップ長 $500\ \mu\text{m}$, マイクロ波電力 10W での放電開始磁束密度と最大捕捉磁束密度の圧力依存性

4. まとめ

同軸 ECR 放電を用いた低気圧・短ギャップのマイクロプラズマの生成について理論的・実験的に調査した。電離電圧が低い Xe ガスを用いた場合、気圧 $1 \times 10^{-2}\text{Torr}$ において、ハーモニック ECR 条件から ECR 条件にわたる範囲の磁束密度を印加することで、ギャップ長 $500\ \mu\text{m}$ でのマイクロプラズマの生成に成功した。本マイクロプラズマの定量的な特性評価が今後の課題である。

参考文献

- [1] K. Terashima, L. Howarld, H. Haefke, and H. Guntherodt, *Thin Solid Films*, 281-281 (1996) 634
- [2] T. Ito, T. Izaki, and K. Terashima, *Thin Solid Films*, 386 (2001) 300
- [3] H. Fujiyama, M. Miyazaki, M. Matsushita and Y. Matsuda, *Proc. 14th SYMPOSIUM ON PLASMA SCIENCE FOR MATERIALS*, January 13-14 Tokyo, A2-6, 2001, 24
- [4] Y. Hayashi, T. Kato, and S. Susumu. *Denkigakkai Ronbunshi A*, 105-11 (1985) 41
- [5] H. Fujiyama, M. Miyazaki, M. Matsushita and Y. Matsuda, *Proc. of the 25th Int. Conf. On Phenomena in Ionized Gases*, July 17-22 Nagoya, 2001, Vol. 1, p.271.