

広域高周波を用いた小口径無電極高密度プラズマの生成

三塩晃¹⁾, 中川叔紀²⁾, 篠原俊二郎³⁾, 桑原大介³⁾, 藤埴弘昌¹⁾
1)東京農工大学工学府, 2)東京農工大学工学部, 3)東京農工大学工学研究院

1. 緒言

現在の深宇宙探査機には、電気推進ロケットエンジンが使われ始めている。この種類のエンジンの特徴として高比推力であることが挙げられ、従来の化学エンジンと比較して長時間の運転が可能である。そのため長期間に渡り宇宙空間を航行する探査機の主推進機として適している。しかし、小惑星探査機「はやぶさ」などに使用されているイオンエンジンは、プラズマの生成と加速時にプラズマと電極が接触し電極が損耗してしまう¹⁾。その結果、寿命が電極によって制限されてしまう問題が存在する。

この電極損耗による問題を解決するため、高密度ヘリコンプラズマ²⁾を利用した無電極型エンジンを提案する。本エンジンでは生成と加速を一体化し、加速機構として Fig. 1.1 に示すような外部から印加される発散磁場の磁場勾配によるカー $-\mu\nabla B$ (μ : 回転粒子の磁気モーメント), 及び軸方向圧力勾配によるカー $-\nabla P$ (P : プラズマ圧力)を使用する。本研究ではこの加速原理の実証及び、口径サイズの差によるスケール効果の検証のため、新たに小型ヘリコン装置を開発し、生成されたヘリコンプラズマの測定と特性評価を行った。

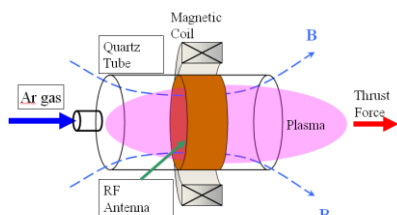


Fig. 1.1 Mechanism of plasma acceleration mechanism

2. 小型ヘリコン装置(Small Helicon Device)の開発

2.1 装置概要

小口径石英管での高密度ヘリコンプラズマ生成、磁場及び圧力勾配を利用した推進システムの原理実証及びスケール効果の検証のため、Figs. 2.1 - 2.3 に示す小型ヘリコン装置 (Small Helicon Device : SHD)を設計、開発した。

真空チャンバー本体 (全長 865 mm, 内径 165 mm) はステンレスで構成されている。一方の端部にプラズマ生成用の石英管及び石英管の固定装置を接続し、反対側端部下方に真空用のターボ分子ポンプ(TMP, 大阪真空: TG200 排気速度 200 l/s, 最高回転数 48,000 rpm)をゲートバルブを介して取り付け、補助引き兼粗引き用ロータリーポンプ(RP, ULVAC : CVD-050A 排気速度 50 l/min)を用いた。



Fig. 2.1 Small Helicon Device (SHD)

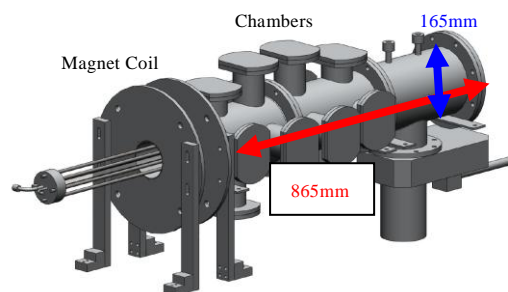


Fig. 2.2 Bird eye view of SHD

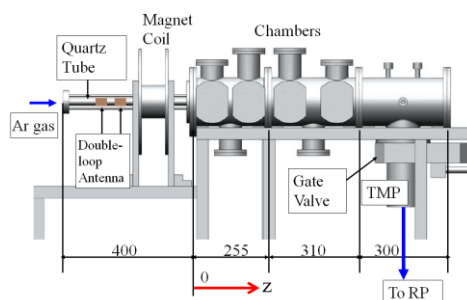


Fig. 2.3 SHD side view

2.2 プラズマ生成部

プラズマ生成部を Figs. 2.4 - 2.6 に示す。石英管の内径を選択できる構造で、口径の違いによる実験を可能としている。本実験では $\phi 20$ mm 石英管 (外径 23 mm 内径 20 mm) と、 $\phi 10$ mm 石英管 (外径 12 mm 内径 10 mm) の2種類でヘリコンプラズマ生成を試みた。RF (Radio Frequency)アンテナは石英管の外径に合わせてダブルループ・アンテナ (DL アンテナ) を製作し使用した。

無電極でのプラズマ生成を行うために、 $\phi 20$ mm 石英管用 RF アンテナは Fig. 2.4 の様に石英管の外部、大気中に石英管を囲む様に設置している。RF アンテナは 0.3 mm 厚さの銅板を使用し、幅 40 mm のループ状アンテナを2個直列に接続している。ループ間の中心間隔は 75 mm である。

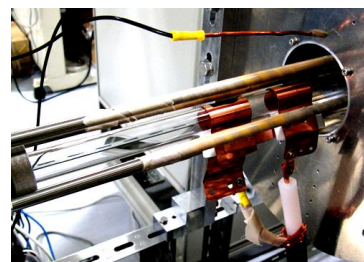


Fig. 2.4 Double loop antenna for $\phi 20$ mm quartz tube and 7MHz excitation (antenna width : 40 mm, central antenna distance : 75 mm)

また、 ϕ 20mm 石英管で RF 周波数を 50 MHz と 70 MHz とした実験を行い、この周波数帯用のアンテナも Fig. 2.5 に示すようにダブルループ形状のアンテナとして製作した。素材は銅板を使用し、幅を 40 mm、中心間隔は 60 mm とした。

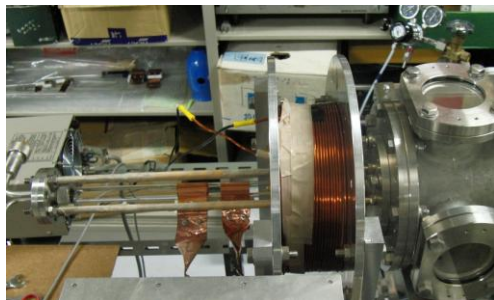


Fig. 2.5 Double loop antenna for ϕ 20mm quartz tube and 50, 70 MHz excitation (antenna width : 40 mm, central antenna distance : 60 mm)

ϕ 10 mm 石英管用の RF アンテナも同様に製作した。外觀は Fig. 2.6 の様になっており、アンテナ形状は 0.3 mm 厚銅板を使用し、幅 50 mm の銅板をループ状にしたものを二個直列に接続した。ループ間の中心間隔は 50 mm とした。

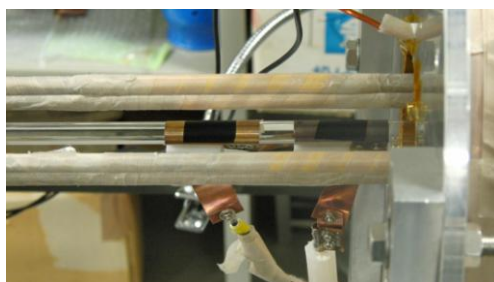


Fig. 2.6 Double loop antenna for ϕ 10mm quartz tube and 7MHz excitation (antenna width : 50 mm, central antenna distance : 50 mm)

高周波系統の装置構成は、高周波電源に THAMWAY 製:T145-6326CK、整合器に THAMWAY 製 T020-6326AK、ファンクション・ジェネレータに IWATSU 製 SG4105 と Tektronix 製 AFG3022B を使用した。また、ガス供給系統にマスフローコントローラ (MFC) として HORIBA 製 SEC-400MK3 (最大流量 30 sccm) を用いた。

チャンバー内の気圧計測用として、イオンゲージ素子 (Canon ANELVA 製:MG-2) をガス供給部近傍と TMP 近傍の 2 箇所、ピラニーゲージ素子 (ULVAC 製:WP-02) を 1 箇所チャンバーと RP の間に設置した。

2.3 外部磁場印加用コイル

外部からの軸方向定常磁場印加のために、Fig. 2.7 に示すようなコイルを 2 台製作した。コイル電源装置やコイル本体などの制約条件をもとに、最大磁場や磁力線分布のシミュレーションを行い、エナメル線の巻き数やコイル本体の設計を行った。Figure 2.8 に示すコイル中心での軸方向の磁場強度は次の条件で計算を行った；

コイル電流 30 A、コイル巻き数 20 巻 20 層で 400 Turns、要素分割は径方向に $r = 0.063, 0.079, 0.095, 0.111$ m、軸方向に $z = -0.03, -0.01, 0.01, 0.03$ m で計 16 分割。

コイルの線材として ϕ 3.2 mm の 250 °C 耐熱エナメル線を使用し、コイルの構造材として非磁性金属かつ加工が容易なアルミニウムを使用した。コイルは現在 2 台製作しておりコイルのターン数は 1 号機 404 turns, 2 号機 403 turns となっている。また 2 号機には運用中のコイル内部温度を監視するために熱電対を設置した。コイルの電力供給は直流安定化電源 (KIKUSUI 製 PAN 16-30A, 最大電流 30A, 最大電圧 16V) を利用した。

コイルの冷却には空冷方式を使用している。コイル近傍の外部にブロアーを設置し、そこから送風することにより強制冷却を行っている。以上、これら 2 台を同時に運用することにより更に磁場強度を上げると共に、磁場配位をより柔軟にした条件での実験を可能としている。

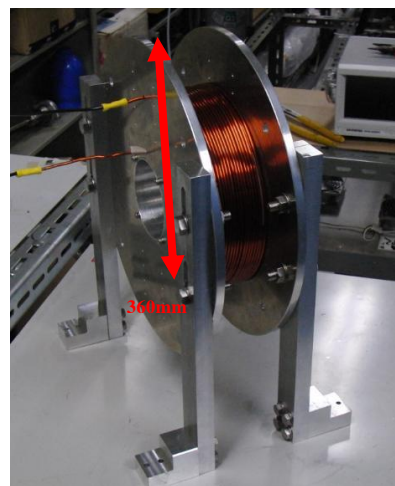


Fig. 2.7 External magnetic field coil

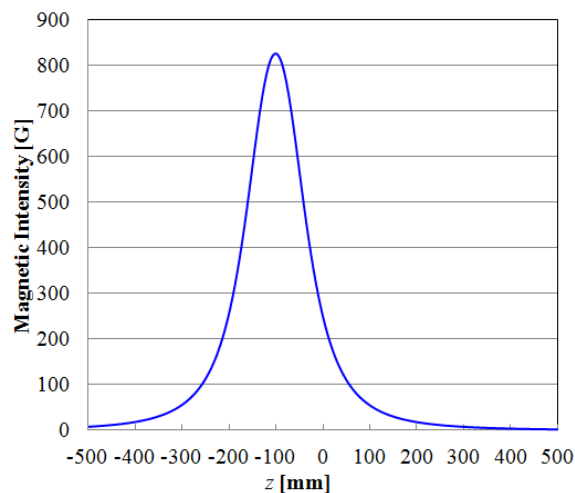


Fig. 2.8 Calculated axial magnetic field profile ($r = 0$ mm)

3. 実験結果

3.1 コイル磁場測定

製作したコイルの磁場強度が計算結果と一致しているかを確認するため、ガウスメーター (Lake Shore 製 Model 410) を利用してコイル中心部での電流を変化させた場合の磁場強度を計測した。測定結果では磁場強度の最大値が 30 A で 856 G であり、この値は Fig. 3.1.1 に示す計算結果最大値 826 G と誤差 3.5% でガウスメーターの機器誤差や測定誤差を考慮すればほぼ一致している。これより、コイル電流と磁

場強度はほぼ比例関係なため、コイル電流量から磁場強度を推定できる。

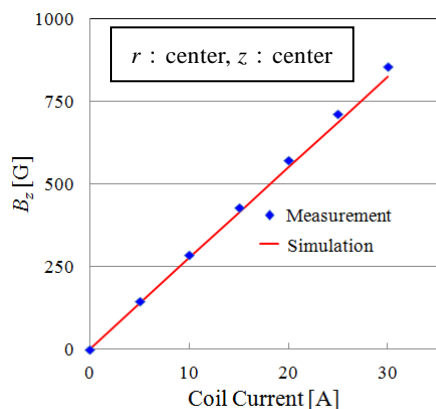


Fig. 3.1.1 Characteristics of external field coils

3.2 φ20 mm 石英管, 7 MHz 励起周波数 実験結果

φ20 mm 石英管で RF 周波数 7 MHz でヘリコンプラズマ生成実験を行い, Fig. 3.2.1 のような高密度アルゴンプラズマの特徴であるブルーモードを示すプラズマの生成に成功した. 次にこれらのプラズマの特性を調査, 評価するため各種測定を行った.



Fig. 3.2.1 Blue mode plasma (near antenna)

3.2.1 電子密度の RF パワー依存性

生成されたプラズマの評価を行うため, RF アンテナ直下での電子密度-投入電力計測をシングルプローブ³⁾を用いて以下の実験条件で行った. 電子密度は 3 eV と仮定した.

プローブ電極位置: $z = -265$ mm(石英管内アンテナ直下)
 ガス種: Ar, ガス流量: 20 sccm, コイル中心: -100 mm
 コイル位置: -50 ~ -150 mm, コイル電流: 20 A (570 G)
 RF 印加周波数: 7 MHz, RF パワー: 1,000 W 以下可変

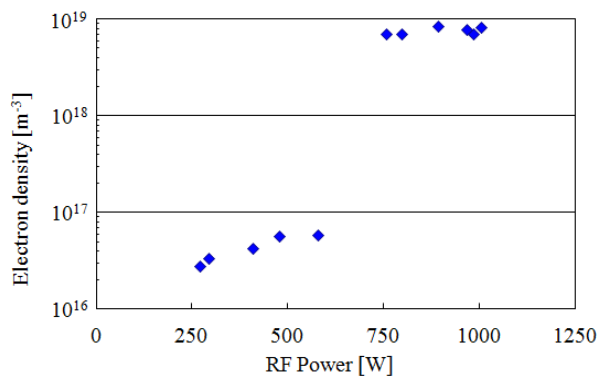


Fig. 3.2.2 Dependence of electron density on RF power
 (φ20 mm, coil current : 20A, probe position $z = -265$ mm)

その結果, Fig. 3.2.2 から最高電子密度 $8.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ を計測した. また, RF 投入パワーが 750 W の地点付近を境界として電子密度の大幅なジャンプを計測した. 電子密度はジャンプの前後とも RF 投入パワーに応じて上昇する傾向にある. これらの事から, φ20 mm 石英管においてヘリコンプラズマの生成に成功したと考えられる.

3.2.2 軸方向電子密度分布

次に, 軸方向の電子密度分布をシングルプローブを利用して計測した. 実験条件を次に示す.

プローブ電極位置: 軸方向に -300 mm ~ 200 mm の範囲
 ガス種: Ar, ガス流量: 20 sccm, コイル位置: -60 ~ -160 mm
 コイル中心: -110 mm, コイル電流: 20 A (570 G)
 RF 印加周波数: 7 MHz, RF パワー: 630 W

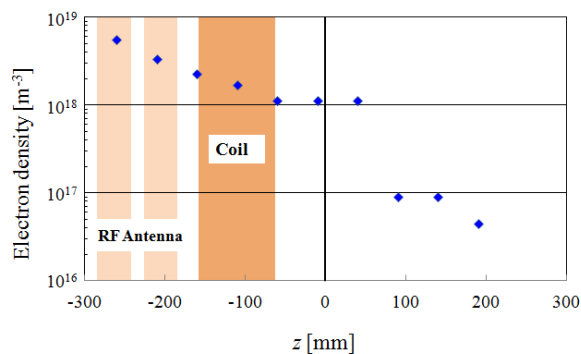


Fig. 3.2.3 Electron density distribution in the axial direction
 ($z < 0$: quartz tube, $0 < z$: vacuum chamber)

Figure 3.2.3 より軸方向の電子密度分布は, アンテナ直下で最高密度をとり, コイルから離れるにつれて電子密度は下降していった. また, 石英管とチャンバーの境界を境にして大幅な電子密度の下降が見られた. これは, プラズマが磁力線に沿って発散したためであると考えられる. このとき, $z = 50$ mm 付近でプラズマの電子密度が $1.1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ を保っているのは, ブルーモードプラズマのブルームがチャンパー内のある一定の領域まで噴出しているためであると考えられる.

3.3 φ20 mm 石英管, 50, 70 MHz 励起周波数 実験結果

3.3.1 電子密度の RF パワー依存性

Figure 3.3.1 に示すようなプラズマの評価を行うため, RF アンテナ直下での電子密度-投入電力計測をシングルプローブ³⁾を用いて以下の実験条件で行った.

プローブ電極位置: $z = -265$ mm(石英管内アンテナ直下)
 ガス種: Ar, ガス流量: 20 sccm, コイル中心: -110 mm
 コイル位置: -60 ~ -160 mm, コイル電流: 20 A (570 G)
 RF 印加周波数: 50, 70 MHz, RF パワー: 1,000 W 以下可変

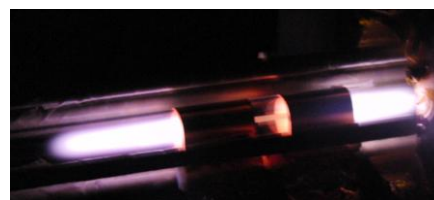


Fig. 3.3.1 Ar Plasma at 50 MHz (near antenna)

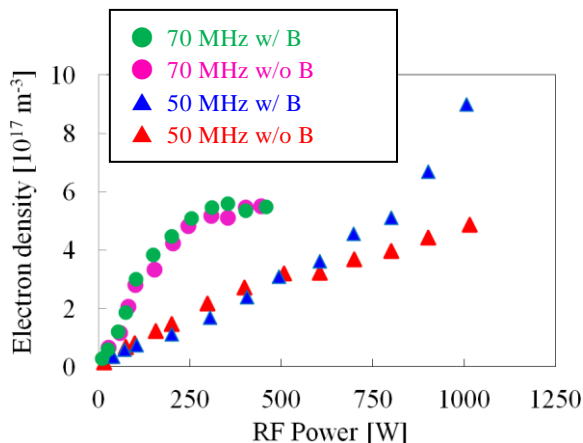


Fig. 3.3.2 Dependence of electron density on RF power (ϕ 20 mm, coil current : 20A, probe position $z = -265$ mm)

Figure 3.3.2 に示すように、RF パワーを上昇させるに連れて電子密度は上昇していった。しかし、7 MHz のときのような 100 倍程度の急激な電子密度のジャンプは見られなかった。ただし、7 MHz と比較して低パワーでのプラズマ生成が可能であり、最小で 1.5 W での生成に成功した。そのときの電子密度は $\sim 10^{14} \text{ m}^{-3}$ である。

3.3.2 軸方向電子密度分布

ϕ 20 mm 石英管での RF 周波数 50 MHz の場合の軸方向電子密度分布をシングルプローブを利用して計測した。実験条件を以下に示す。

プローブ電極位置 : -300 mm ~ 200 mm 間で可変,
 ガス種 : Ar ガス流量 : 20 sccm, コイル中心 : -110 mm
 コイル位置 : -60 ~ -160 mm, コイル電流 : 20 A (570 G)
 RF 印加周波数 : 50 MHz, RF パワー : 630 W

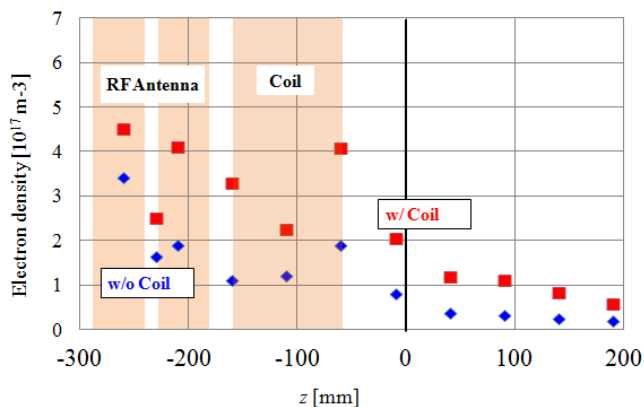


Fig. 3.3.3 Electron density distribution in the axial direction ($z < 0$: quartz tube, $0 < z$: vacuum chamber)

磁場の有無にかかわらず RF アンテナ直下で電子密度が最大となった。また、RF アンテナから離れるにつれて電子密度は徐々に下降していった。また、7 MHz のときに見られた石英管と真空チャンバーを境界とした電子密度の急激な下降は見ることができなかった。これは、プラズマが全体的に誘導性結合プラズマであった可能性が考えられる。

3.4 ϕ 10 mm 石英管, 12 MHz 励起周波数 実験結果

石英管の内径を 10 mm として、ヘリコンプラズマの生成実験を行った。なお、ヘリコンプラズマ源として内径 10 mm 世界最小口径である。この際も内径 20 mm の実験と同様に

電子密度など各種プラズマパラメータを計測した。Figure 3.4.1 に内径 10 mm の場合のブルーモードプラズマの写真を示す。

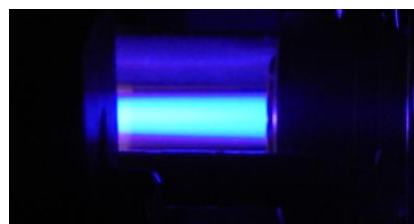


Fig. 3.4.1 Blue mode plasma (near antenna)

3.4.1 電子密度の RF パワー依存性

ϕ 10 mm 石英管でのプラズマ生成においてプラズマの電子密度と投入した RF パワーの関係を計測した。 ϕ 10 mm の場合は、アンテナ直下での計測はプローブがプラズマの生成に影響を与えるため、比較的高密度になると考えられるアンテナ直下での計測を行わず、影響がほぼないと考えられる地点で計測を開始した。以下に実験条件を示す。

プローブ電極位置 : $z = -40$ mm (石英管内アンテナ近傍),
 0 mm (石英管-チャンパー境界), 65 mm (チャンパー内部)
 ガス種 : Ar, ガス流量 : 5 sccm, コイル中心 : -100 mm
 コイル位置 : -50 ~ -150 mm, コイル電流 : 10 A (285 G)
 RF 印加周波数 : 12 MHz, RF パワー : 0 W ~ 1,600 W 間可変

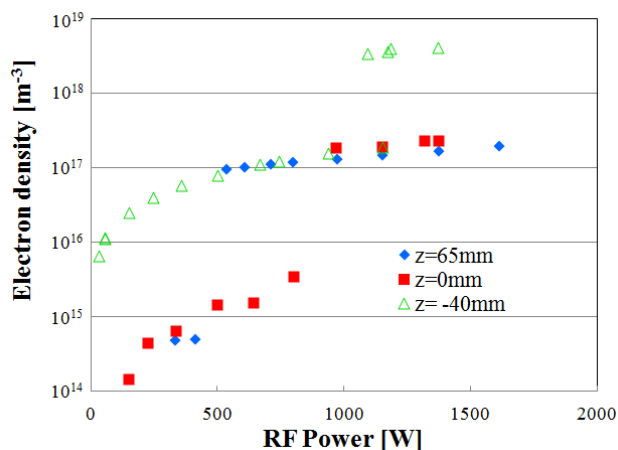


Fig. 3.4.2 Dependence of electron density on RF powers (ϕ 20 mm, coil current : 20A, probe position $z = 65, 0, -40$ mm)

Figure 3.4.2 より各計測地点で、RF パワー 1,000 W 近傍を境界として電子密度の 10 倍から 100 倍程度の大幅なジャンプを計測した。また、 $z = -40$ mm 地点で電子密度が $4.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ となり、高密度プラズマの生成に成功した。また、このプラズマがブルーモードであることと電子密度の値からヘリコンプラズマであると考えられる。

$z = -40, 0, 65$ mm の各計測地点で電子密度のジャンプが見られる RF 投入パワーの値に違いがある。境界となっている RF 投入パワーの領域は Fig. 3.4.2 より $z = -40$ mm で 1,200 W 付近, Fig. 3.4.3 より $z = 0$ mm で 1,000 W 付近, Fig. 3.3.4 より $z = 65$ mm で 500 W 付近となっている。この差は、計測に使用したシングルプローブの断面積が石英管中空部分断面積の約 1 割を占めた事によりプラズマの生成に影響があったためであると考えられる。故に、この実験条件において電子密度のジャンプが発生する RF 投入パワーの実際の

境界はプローブの影響が最も少ないプローブ位置が $z = 65$ mm の時の値である 500 W 付近であると考えられる。

3.4.2 軸方向電子密度分布

$\phi 10$ mm 石英管での軸方向の電子密度分布をシングルプローブを利用して計測した。実験条件を以下に示す。

プローブ電極位置：-100 mm~300 mm 間で可変，
 ガス種：Ar ガス流量：5 sccm，コイル中心：-100 mm
 コイル位置：-50 ~ -150 mm, コイル電流：10 A (285 G)
 RF 印加周波数：12 MHz, RF パワー：1,400 W

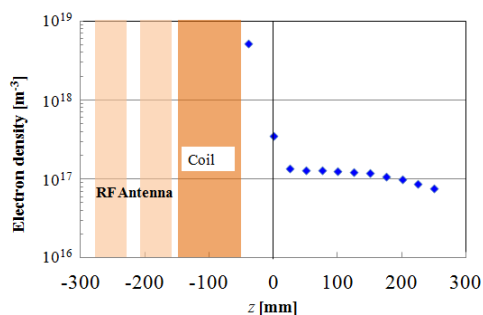


Fig. 3.4.3 Electron density distribution on the axial direction
 ($z < 0$: quartz tube, $0 < z$: vacuum chamber)

Figure 3.4.3 よりアンテナに最も近い $z = -40$ mm 地点で電子密度 $5.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ となり、最高電子密度となった。 $z < -40$ mm の領域はプローブの影響が大きく、プラズマの生成が阻害されたため計測は不可能であった。 $\phi 20$ mm 石英管と同様にコイルから離れるにつれて電子密度は下降していった。また、石英管とチャンバーの境界を境にして、大幅な電子密度の下降が見られた。これは、プラズマが磁力線に沿って発散したためであると考えられる。また、 $\phi 20$ mm 石英管の時と違い、チャンバー内にブルーモードプラズマの噴出は見られなかった。

4. 結論と今後の予定

4.1 結論

磁場勾配と圧力勾配を利用した推進システムの研究のため、小型ヘリコン装置 (SHD) を開発した。更にこの装置を使用し、内径 20 mm 及びヘリコン源として世界最小口径である内径 10 mm の石英管においてヘリコンプラズマの生成に成功した。

- ・実験条件 $\phi 20$ mm 石英管, 7 MHz 励起周波数
 - RF アンテナ直下の計測で電子密度が RF 投入パワー 750 W 以上で $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ となりヘリコンプラズマの生成に成功した。電子密度は RF パワーに応じて上昇し, RF 投入パワー 700 W 付近を境界として, 電子密度の 10 倍から 100 倍程度のジャンプを計測した。ブルーモードを示していたが, 放電モードがヘリコン波放電であるか確認するためプラズマ中の高周波波動伝搬を磁気プローブなどによって測定する必要がある。
 - 軸方向の電子密度分布はアンテナから離れるにつれて緩やかに下降し, 石英管と真空チャンバーの間で 1/10 程度の大幅な下降が起きた。このとき, ブルーモードプラズマのブルームが真空チャンバー内まで噴出していた。大幅な電子密度の下降後は, 石英管内と同様に緩やかに

下降した。

- ・実験条件 $\phi 20$ mm 石英管, 50 と 70 MHz 励起周波数
 - RF アンテナ直下の計測で電子密度が $9 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ となった。電子密度は RF パワーに応じて上昇したが, 電子密度のジャンプは見られなかった。
 - 軸方向の電子密度分布はアンテナから離れるにつれて緩やかに下降し, 電子密度の急激な下降は発生しなかった。
- ・実験条件 $\phi 10$ mm 石英管, 12 MHz 励起周波数
 - RF アンテナ近傍でのシングルプローブによる計測で電子密度が RF 投入パワー 1,370 W で $4.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ となりブルーモードであることと合わせて, 世界最小径でのヘリコンプラズマの生成に成功した。
 - 電子密度は RF 投入パワーに応じて上昇した。電子密度ジャンプは 500 W 付近を境界として 100 倍程度の大きさで発生した。
 - 軸方向の電子密度分布はアンテナから離れるにつれて緩やかに下降し, 石英管と真空チャンバーの間で電子密度の 1/100 程度の大幅な下降が 20 mm 石英管のときと同じように発生した。大幅な下降後は, 石英管内と同じように電子密度は緩やかに下降した。
 - 10 mm 石英管では 20 mm 石英管の場合と違い, ブルーモードプラズマのブルームのチャンバーへの噴出は見られなかった。

4.2 今後の研究計画

今後の研究としては、次の事を計画している。

- ・小口径化
 - 内径 5 mm および更に小口径な石英管でのヘリコンプラズマの生成実験を行う予定である。
 - プローブによるプラズマの生成の阻害とプローブ自体が挿入できないと予想されるのでレーザー誘起蛍光法によるイオン速度・温度計測や高速度カメラ, 分光器, マイクロ波干渉計による電子密度計測等を利用してプラズマ特性を評価していく。
 - プラズマ内の波動を測定し, ヘリコンプラズマであるか診断する。
- ・推進システムの構築
 - 磁場配位や強度などの外部のパラメータを変更した実験を行い, 加速に対して最適なパラメータを探索する。
 - 流速の計測法としてマッシュプローブ及び上でも述べたレーザー誘起蛍光法による計測などを並行して行っていく。
 - システムの軽量化及び径方向磁場の制御のため, 発散磁場を永久磁石単独, もしくは電磁石と併用して形成し, 加速効果を検証する。

参考文献

- 1) 栗木恭一・荒川義博編, 電気推進ロケット入門, (2003) 東京大学出版会。
- 2) 篠原俊二郎, 日本物理学会誌 **64** (2009) 7。
- 3) プラズマ・核融合学会編, プラズマ診断の基礎, (1990) 名古屋大学出版会。
- 4) 山本学, 村山精一, 「プラズマの分光計測」, (1995) 学会出版センター。
- 5) 藤埴弘昌, 「高密度ヘリコンプラズマの分光測定」, (2012) 東京農工大学卒業論文。
- 6) A. R. Striganov, N. S. Sventitskii, TABLES OF SPECTRAL LINES OF NEUTRAL AND IONIZED ATOMS, (1968) IFI/PLENUM.