

スペースチャンバーのための新しいプラズマ源

中村良治・中村正治・伊藤富造

A New Plasma Source for Space Chamber

By

Yoshiharu NAKAMURA, Masaharu NAKAMURA
and Tomizo ITOH

Abstract: A new plasma source was made and tested in the space chamber. The plasma density is $10^5 \sim 10^8 / \text{cm}^3$ and the electron temperature is $(1 \sim 4) \times 10^3 \text{°K}$. The axial density gradient dn/ndz is about 0.4.

概 要

スペースチャンバー内に低密度で静かなプラズマを生成するために新しいプラズマ源を製作しそのテストを行った。密度は $10^5 \sim 10^8 / \text{cm}^3$ 、電子温度は $(1 \sim 4) \times 10^3 \text{°K}$ でノイズ比 $\delta n/n \leq 0.1\%$ である。軸方向の密度勾配は $dn/ndz \approx 0.4 \text{ m}^{-1}$ であった。

1. ま え が き

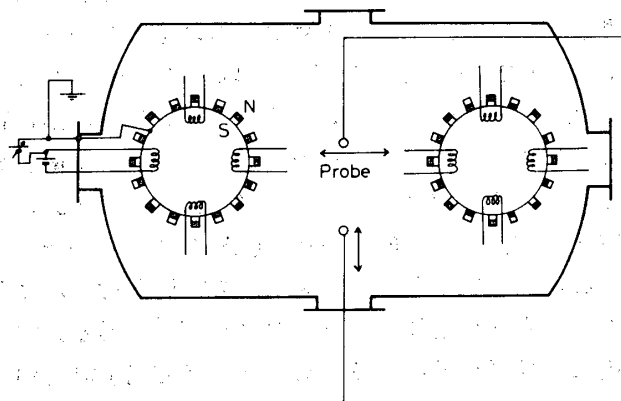
宇宙航空研究所に設置されているスペースチャンバーには電離層を模擬するプラズマを生成するために後方拡散型とグローモードプラズマ源が用いられている。後方拡散型プラズマ源は電子密度が $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ で電子温度が $0.1 \sim 0.4 \text{ eV}$ である。しかしプラズマ源が小さいため密度勾配が大きく ($dn/ndr \approx 1 \text{ m}^{-1}$)、さらにイオンビームが存在しているため条件によっては低周波雑音が発生する。一方グローモードプラズマ源は電子ビームで中性ガスを電離してプラズマをつくっているため雑音は大きい ($\delta n/n \leq 0.05$)。しかし密度が $10^6 \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ で電子温度が $2 \sim 4 \text{ eV}$ の空間的に一様性 ($dn/ndr \approx 0.3 \text{ m}^{-1}$) のよいプラズマを供給しているので[1]、これを用いて電子プラズマ波の実験が行われた[2]。後方拡散型プラズマ源を大きくすることで密度が空間的に均一なプラズマを得る方法もあるが[3]、ここでは大きいチャンバー内に電離層を模擬するための低密度で電子温度が低くビームのないプラズマを供給するプラズマ源[4]の製作とその試験を行ったのでそれについて報告する。

2. 実験装置

チェンバー内に設置されたプラズマ源の模式図を図1に示す。プラズマ源は直径45cmで長さ80cmの円筒の鳥かご状でかごの棧は0.5mm厚のアルミニウム角パイプでかごの周囲に30本渡してあり、円筒の上下も同じ棧が3cm間隔で渡してある。角パイプの内には永久磁石（表面で約2 kgauss, 大きさは20φ×14.5mm）を同じ極性に詰めて並べて隣りあった棧とは極性を逆にしてしているので磁力線は隣りの棧へのびている。棧の間隔は約3cmである。図1では模式的に黒がN極, 白をS極として示した。磁場は磁石が交互に極性がかわっているために磁力線がほとんど閉じてしまいプラズマに対しては実際上影響を与えない。後で実測値を示すように磁石面から10cm程離れると約2 gaussである。かごの内部にタングステンフィラメント(0.15mmφ×5cm)を15本測面から10cm程離してはり、フィラメントを陰極, 棧を陽極にして放電させる。陽極は接地する。かごの内部は測面の磁場のために一次電子が多数回反射を行いプラズマを効率よく生成するためにガス圧が低くても放電する[5]。このようにして生じたプラズマ($10^9 \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$)はかごの隙間の磁場を通過して外部へ拡散してくる。この量は少いのでチェンバーの内部でのプラズマの密度はプラズマ源内部の密度に較べて非常に小さい。放電電圧は30~60V, 放電電流は10A以下で実験した。

プラズマ源はチェンバーの扉から50cm離してアルミニウムアングル製の台に載せた。プラズマ源間の距離は2mでプラズマ実験やロケットの観測装置のテストにも十分の実験領域がある。

電子の密度と温度の測定には直径8cmの平板プローブを用いた。プローブはチェンバーの軸方向と径方向に可動とし空間的分布の測定も行った。イオン温度は三枚グリッド構造のリターディング型エネルギー分析器[6]で測定した。

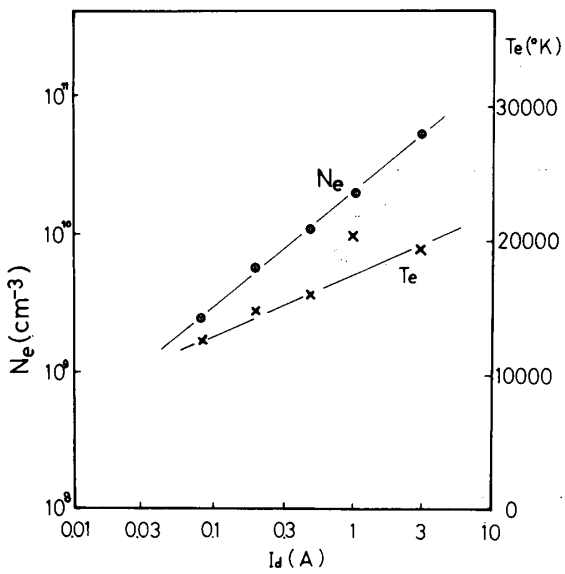


1図 実験装置の模式図

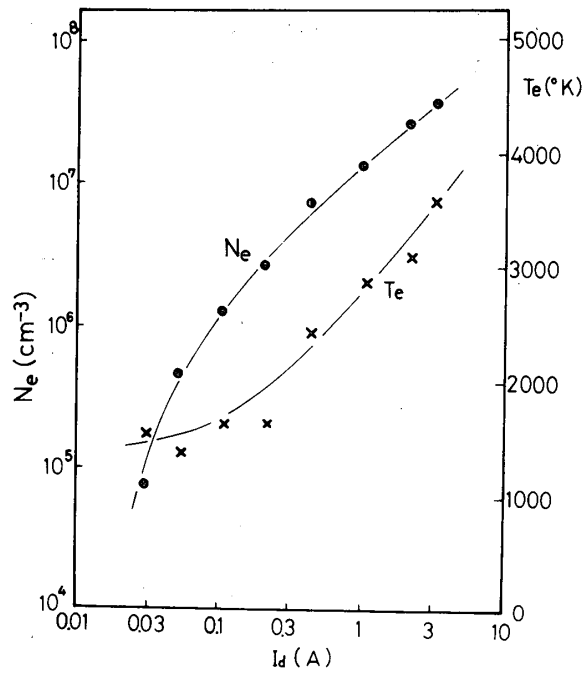
3. 測定結果

アルゴンガスを用いて生成したプラズマの特性を以下に示す。チャンバー内のガス圧力（電離真空計の読みのままで換算係数 0.6 は乗じていない）を $3 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$ Torr のある値に設定し、ヒーター電流、放電電圧と放電電流を調節してプラズマをつくりそのパラメータを測定した。

ガス圧を 2×10^{-4} Torr に一定した場合のプラズマ源内部のプラズマとチャンバー内部に拡散したプラズマの電子密度と電子温度を放電電流の関数として図 2 a と図 2 b に示す。放電電圧は 40 V に固定し放電電流はヒーター電流を調節して変化させた。プローブはチャンパー中央においた。前に述べたようにこのプラズマ源内では一次電子とプラズマの閉じ込め効果があるために磁石が測面にない通常の円筒容器の場合と較べて同じ放電電流でも約 10^2 倍の密度になっている。内部のプラズマ密度は放電電流とともに増大し $10^9 \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の範囲であるがさらに放電電流を増加することも減少させることも可能である。このプラズマ源からもれでてチャンパー内にひろがるプラズマの密度はプラズマ源内部の密度の $10^{-2} \sim 10^{-3}$ である。放電電流が 30 mA の時、密度は約 $8 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ になっていて電離層を模擬するためにもっと低い密度を要求する実験もあろうが更に放電電流をさげること、またはプラズマ源を小さくすることにより可能である。放電電流が数 10 mA の小さい時にはチャンパー内のプラズマ密度は放電電流とともにやや急激に増大するが放電電流が 100 mA をこえるとほぼ放電



2 a 図 プラズマ源内の密度と電子温度の放電電流依存性
P = 2×10^{-4} Torr



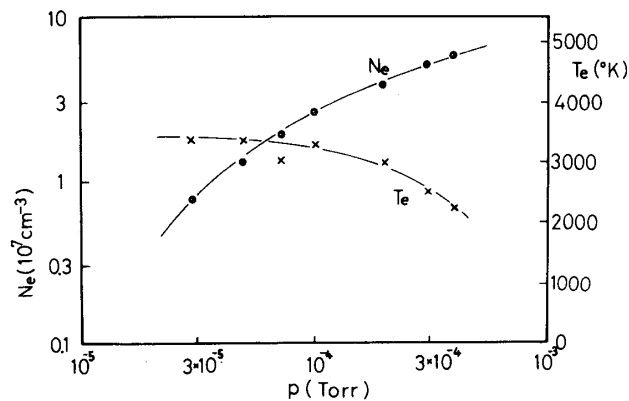
2 b 図 チャンパー中心での密度と電子温度の放電電流依存性
P = 2×10^{-4} Torr

電流に比例している。

一方プラズマ源内部の電子温度は放電電流とともにゆっくり増加し $(1 \sim 2) \times 10^4$ °K である。プラズマ源内部のプラズマが単純に拡散するだけならばここでの電子温度とチェンバーの電子の温度が等しい筈であるが図 2 b に示すようにチェンバー内の電子温度は $(1.5 \sim 3.6) \times 10^3$ °K と内部の温度の約 $1/6$ になっている。これがこのプラズマ源の特長である。この拡散は古典的と考えられるので [7], 電子は内から磁場を横切って外へでる間に多数回中性原子と弾性衝突してエネルギーを失う。磁場領域の平均の強さを 200 ガウス, その厚さを 2 cm とすれば 3 eV の電子のサイクロトロン半径は約 0.02 cm であるから 100 回程中性原子と衝突することになる。またフィラメントからの 40 eV 程の一次電子の電離断面積は弾性衝突断面積の数分の一であるので [8], やはりそのままでは外へでてこられない。実験的にもラングミュア探針特性の対数電流特性では二桁以上にわたって直線であり一次電子の存在は観測されなかった。拡散のメカニズムは実験的にはあきらかでない。

プラズマのノイズについてはプローブ電位をプラズマ電位においた時の電子飽和電流 I とその交流分 ΔI を測定し $\Delta I / I (= \delta n / n)$ で表わすとプラズマ源内部では 1% 以下, チェンバー内部では約 0.1% であった。それ故非常に静かであると言える。

次にガス圧に対する電子密度と電子温度の変化の例を図 3 に示す。放電電圧 (40 V) と放電電流 (1.45 A) は一定に保たれている。ガス圧を下げると放電電流は減少するがフィラメント温度, すなわちフィラメント電流を増加してもとにもどした。この時には 3×10^{-5} Torr が一番低いガス圧であるが放電電圧をさらに増加させればもっと低いガス圧でも放電する。これは一次電子がプラズマ源内に効率よく閉じ込められるためである。ガス圧が増加すると密度がガス圧にほぼ比例しているがそれは電子と中性原子との衝突確率がふえるためにチェンバー内に拡散する量が増加するためと考えられる。



3 図 チェンバー中心での密度と電子温度のガス圧依存性 $I_d = 1.45 \text{ A}$

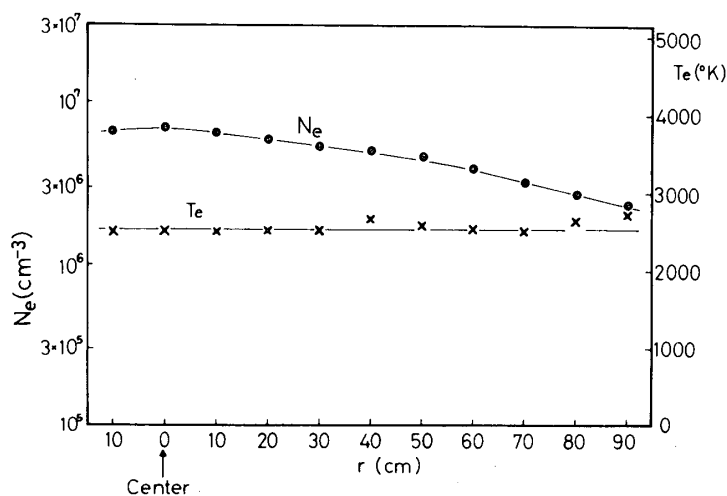
電子温度はガス圧が上昇するにしたがって低くなっていく。ガス圧が 1×10^{-4} Torr 以下では $3000 \sim 3500$ °Kで比較的变化が少いが 1×10^{-4} Torr 以上では変化の割合は大きくなっている。以上の実験結果をもとにガス圧が 4×10^{-4} Torr 位で放電電流を約50mAとすると電子温度が約700 °Kと1000 °K以下にすることが出来た。

プラズマの時間的な安定性については後方拡散型およびグローモード型では酸化膜陰極を用いているため放電電流が安定するまで時間がかかる、劣化がはげしい、また大気圧にさらすと使えなくなる等の欠点があった。しかし新しいプラズマ源、磁場拡散型と呼ぶが、ではタングステン線を用いるので寿命は長くまた安定性がありプラズマのパラメータの安定度はガス圧、電源等外部によって決まってしまう。

プラズマ密度と電子温度の径方向分布の測定例を図4に示す。チャンバー軸から50cmでの $(1/n) dn/dr$ は $0.73 m^{-1}$ である。電子温度は一樣であるが密度はチャンバー壁でプラズマが失われるために密度の勾配が生ずる。プラズマ源内部では壁面の磁場領域で(壁から数cm)急な密度勾配がありそれより内側では非常に一樣であることからチャンバー壁にも磁石を並べれば一樣性な改善されるであろう。

図5にチャンバーの軸方向の密度と電子温度の様子を示す。密度についてはプラズマ源からプラズマが供給されているためそこに近づくにつれ上昇しているが中心から±40cmの範囲では均一である。また同じ図に磁場の強さの測定値を示した。プラズマ源の表面から約20cm程離れると地球磁場程度に減少してしまうので実験領域への影響はない。地球磁場を0.4 gaussとして電子サイクロトロン周波数は1.1 MHzで電子温度を2000 °K とすれば電子サイクロトロン半径は2.5 cmとなる。電子密度を $10^5 cm^{-3}$ とすると電子プラズマ周波数は2.8 MHzとなるので地球磁場の影響はこのような低密度プラズマでは無視できない。

このプラズマ源を用いた実験例としてイオン音波の分散特性を測定した。チャンバー中心に直径18cmのグリッドを置いて波を励起し径方向に可動の平板プローブで受信してロックインアンプを用いて伝播波形を得た。ガス圧 3×10^{-4} Torr で放電電流1 Aの時のイオン音波



4 図 密度と電子温度の径方向分布 $P = 2 \times 10^{-4}$ Torr $I_d = 0.5$ A

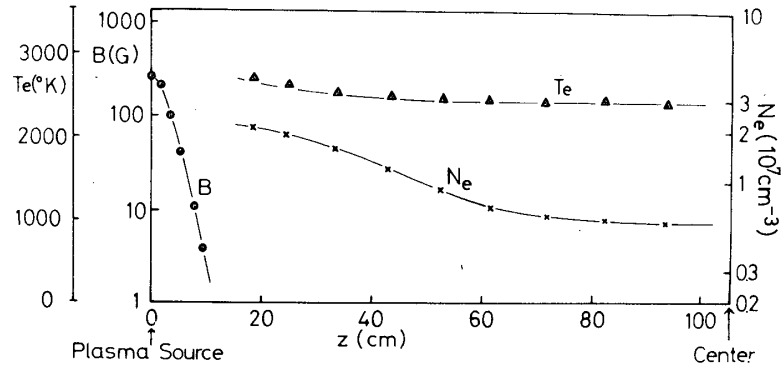


図5 密度と電子温度の軸方向分布 $P = 2 \times 10^{-4}$ Torr $I_d = 0.5$ A

速度は 8.4×10^4 cm/sec であった。これと減衰率（波数の虚数部と実数部の比）の周波数特性とから電子温度とイオン温度を計算すると前者が 2300 °K, 後者が約 500 °K となる。電子温度はプローブによる実測値と良く一致した。エネルギー分析器で実測したイオン温度の値は 550 °K であったのでこれもほぼあっている。分析器ではビームイオンの存在は観測されなかった。

4. あとがき

このプラズマ源で生成されたプラズマの特徴をまとめると 1) 密度は $10^4 \sim 10^8$ cm⁻³ の範囲に可変できる, 2) 電子温度は数 $100 \sim 3000$ °K, 3) 中性ガスのガス圧が低くてもプラズマの生成が可能, 4) イオンビーム, 電子ビームが存在しない, 5) 非常に静かである, 6) 長時間安定でパラメータの変動が小さい, 等である。この結果, 生成したプラズマは電離層プラズマに近くロケットや衛星の塔載機器, 例えば電子とイオン温度測定器やインピーダンスプローブ等のテストに適している。プローブの基礎や開発のための実験を行っている研究者から静かなプラズマの要求があったがそれに答えていると考えられる。波動実験のためには密度の均一性を良くする必要があると思われるがそのためにはプラズマ源を小型化して数をふやし, それらを壁のところに設置する等の改良を行うことが今後必要である。

謝 辞

有益な議論をしていただいた東京学芸大学の伊東正貴氏とプラズマ源の製作に協力して頂いたチェンバー室の土田静悟氏と細谷和美氏に感謝します。

1977年2月15日 新設部 (科学)

参 考 文 献

- [1] 河辺隆也, 河合良信, 坂翁介, 中村良治: 宇宙航空研究所報告 8 (1972) 186.
- [2] 中村良治, 中村正治, 伊藤富造: 同11 (1975) 703.
河合良信, 池沢俊治郎, 原民夫, 中村良治, 伊藤富造, 河辺隆也: 同11 (1975) 715.
- [3] 吉門信, 筒井稔, 山岸久雄, 松本紘, 木村磐根: 日本地球電気磁気学会講演予稿集 58 (1975) 105.
- [4] 中村良治, 伊藤富造: 同 59 (1976) 92.
- [5] R. Limpacher and K. R. Mackenzie: *Rev. Sci. Instrum* 44 (1973) 726.
Y. Nakamura, B. H. Ouon and A. Y. Wong: *Physics Letters* 53A (1975) 85.
- [6] 中村良治, 伊藤富造: 日本地球電気磁気学会講演予稿集 59 (1976) 98.
- [7] A. Y. Wong, Y. Nakamura, B. H. Ouon and J. M. Dawson: *Phys. Rev. Letters* 35 (1975) 1156.
- [8] S. C. Brown: *Basic Data of Plasma Physics*, M.I.T. Press 1967.