

## リング電極方式容量結合型高周波放電の基礎研究 (その4)

長 濱 治 男\*

### Foundamental studies of capacitively coupled R. F. discharge with ring-like electrodes (Part 4)

Haruo Nagahama

It has been observed experimentally that the pondermotive force occurs in the transitional stages during transitions from glow-like to arc-like R. F. discharge. For the purpose of studying the cause of occurrence of the pondermotive force, the electron density distributions in axial direction of the discharge tube have been measured.

As a result, it is confirmed experimentally that the occurrence of the pondermotive force is closely affected by a large electron density gradient laying in axial direction of the discharge tube.

On the other hand, the pondermotive force has been proved theoretically by solving the non-linear equation of electrons in the high frequency electric field.

#### 1. はじめに

高周波放電プラズマの不安定性を利用する一応用研究として、高周波放電プラズマをマイクロ波からレーザまでの幅広い周波数帯域の電磁波の増幅装置として応用する目的で、試みの研究を行っている。誘導結合型高周波放電プラズマ（略称 I C P プラズマ）で 2 4 G H z のマイクロ波で増幅実験を行ったところ、6 d B の電力利得が得られた<sup>(1)</sup>。しかし、波長が 6 3 2 . 8 n m の H e - N e ガスレーザで増幅実験を行ったところ、わずか 1 . 2 d B の電力利得しか得られなかった<sup>(2)</sup>。この原因として、誘導結合型高周波放電では放電管の  $\theta$  方向に発生する高周波電界を利用するため、レーザの伝搬方向（放電管の Z 方向）と電界の方向が異なるので、プラズマとレーザとの相互作用が少なくなることが考えられる。それゆえ、相互作用が多くなれば、増幅率を増大できる可能性が考えられるので、両者の電界方向が同じとなるリング電極方式容量結合型高周波放電を採用することにした。

前報<sup>(3)(4)</sup>では、高周波放電プラズマ生成に用いる陽極同調形高周波発振器にリング電極を接続しても発振が起こり、なおかつアーク状放電が発生するためのリング電極の設計および製

---

\*電気工学科

作について、およびグロー状放電からアーク状放電へ移行する過渡状態のプラズマ中に非線形現象である動重力が発生していること、またパッシェンの法則によるガス圧  $p$  とリング状電極間距離  $d$  との間に  $pd = \text{一定}$  の関係が成立していることについて報告した。

電子の拡散速度を算出し、動重力の発生原因を考察した。この結果、高電位側リング電極付近で大きな電子密度勾配が生じていて、これが原因となり、高電位側リング電極付近で大きな拡散速度が発生し、プラズマを不安定状態にさせ動重力が発生することが分かった。

## 2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置の概略図である。放電管は外径30 mm  $\phi$  長さ80 cmの石英ガラス管で、両端をOリングで真空止めできる金属アダプターに接合されている。リング状電極は内径40 mm  $\phi$  で、低電位側は固定、高電位側は1 cm間隔で移動できる可動式である。また、最大電極間隔は5 cmである。複探針はリング電極間の管軸方向電子密度分布を測定するもので、直径0.5 mm  $\phi$  のタングステン線を先端の長さが2 mmだけ露出させ、その他はガラス細管で被覆絶縁したものである。また、複探針はリング電極間の5 cmの範囲内で放電管軸方向に可動できる。電子密度分布の測定は、1 Torrまたは0.5 Torrの試料ガスを放電管内に封入し、リング電極間に印加する1 MHzの高周波電圧を0.5 kVから4.5 kVまで増加してゆき、各電圧に対する電子密度を複探針法を用いて測定する。また、13.5 MHzの場合には、プラズマの吸収電力(=入射電力-反射電力)  $P_A$  を10 Wから100 Wまで増加してゆき、各電力に対する電子密度の測定を行う。試料ガスは純度99.99%のHeガスやNeガスを使用する。

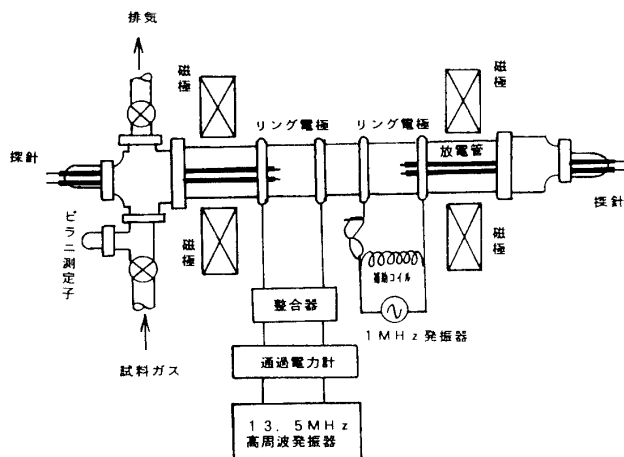


図1. 実験装置の概略図

## 3. 放電開始電圧と管軸方向電子密度分布の測定結果

図2は、周波数が1 MHz、リング電極間距離が4 cmの場合の、室温におけるNeガスのガス圧  $p$  を変化して、アーク状放電開始電圧  $V_c$  を測定した結果である。 $p = 0.6$  Torr (図中のM点)において、放電開始電圧  $V_c$  が最小になっていることがわかる。

また、図3は、Neガス、ガス圧  $p = 1$  Torrの場合の、放電管軸方向の電子密度分布を測定した結果の一例である。パラメータの  $E_p$  はリング電極に印加する1 MHzの高周波電圧である。 $Z =$

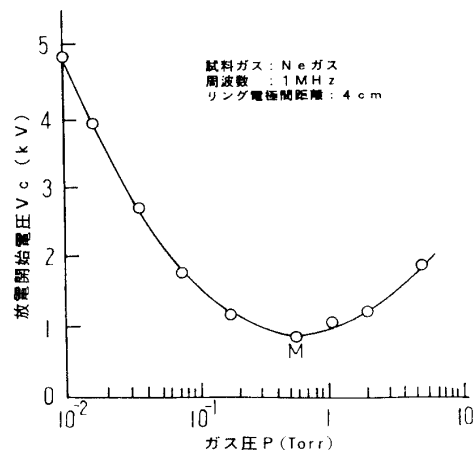


図2. アーク状放電開始特性 (Neガス)

4 が高電位リング電極位置、 $Z = 0$  が低電位リング電極位置である。印加電圧が小さい時には、高電位リング電極側で電子密度が大きく、低電位リング電極側で電子密度が小さく、管軸方向に大きな密度差が生じている。また、高電位リング電極付近では、大きな電子密度勾配の生じていることが分かる。また、印加電圧の増加とともに、高電位リング電極側と低電位リング電極側との電子密度差は小さくなり、密度勾配も小さくなっていくことが分かる。

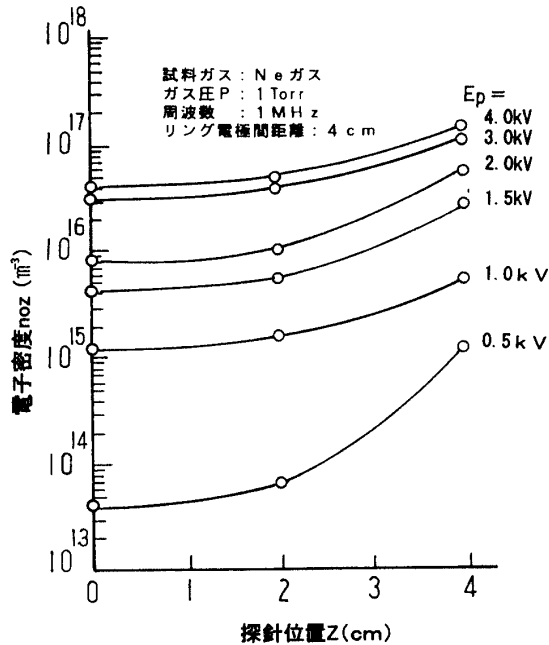


図3. 放電管軸方向電子密度分布  
(1 MHz の場合)

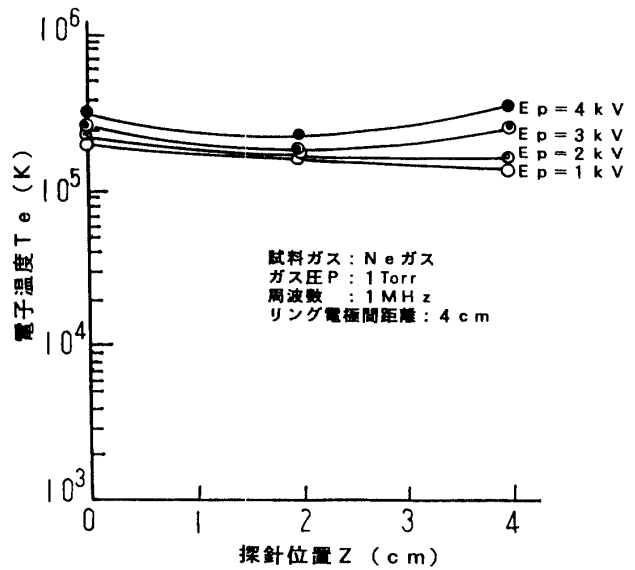


図4. 放電管軸方向電子温度分布  
(1 MHz の場合)

図4は、図3と同条件の場合における、管軸方向電子温度分布の測定結果の1例である。 $Z = 4$  cmの高電位リング電極側で、印加電圧の増加とともにわずかに電子温度が増大しているが、しかし、管軸方向にはほとんど温度変化のないことが分かる。

図5は、Ne ガス、ガス圧  $p = 1$  Torr の場合の、放電管軸方向の電子密度分布を測定した結果の一例である。パラメータの  $P_A$  はプラズマの吸収電力 (= 入射電力  $P_i$  - 反射電力  $P_r$ ) であり、13.5 MHz 高周波発振器の入射電力計の読み  $P_i$  と反射電力計の読み  $P_r$  から分かる。高電位リング電極側で大きな電子密度勾配が生じているのは1 MHz の場合と同じ傾向である。しかし、この密度勾配は、プラズマの吸収電力が増加しても、1 MHz の場合のように著しく減少していない。

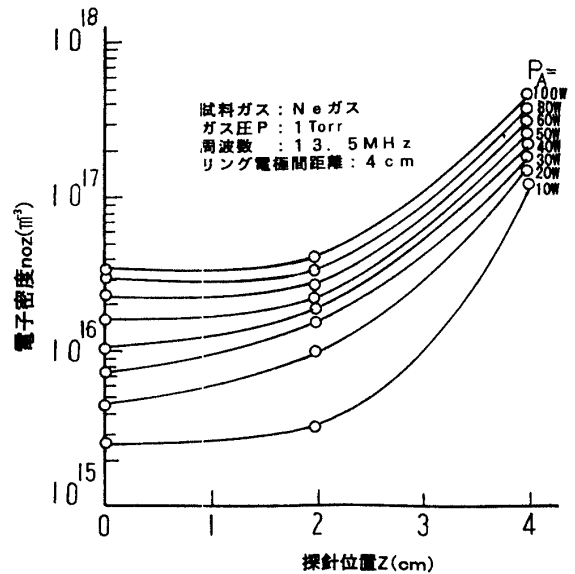


図5. 放電管軸方向電子密度分布  
(13.5 MHz の場合)

#### 4. 考察

##### < 4. 1 > 管軸方向拡散速度

リング電極間に印加する 1 MHz の高周波電圧が低電圧の時およびプラズマが吸収する 13.5 MHz の高周波電力が低い値の時、高電位リング電極側で大きな電子密度勾配の生じていること、また、印加電圧およびプラズマの吸収電力の増加とともに電子密度勾配が小さくなっていくことも分った。他方、印加電圧やプラズマの吸収電力が小さい時には、電離度の低い、発光強度の弱いグロー状放電であるが、印加電圧や吸収電力が大きくなると、発光強度の強いアーク状放電に移行することが放電特性の測定結果から分っている<sup>(4)</sup>。これらの実験結果から、グロー状放電からアーク状放電へ移行するのに、放電管の管軸方向電子密度分布の影響していることが考えられる。このため、拡散方程式を用いて、プラズマ電子の放電管軸方向の拡散速度を調べてみる。

拡散方程式は、

$$n \nu = -D \nabla n \quad (1)$$

で与えられる。(1) 式を管軸 (z) 方向の 1 次元量で書き直すと、電子の拡散速度は、

$$v_{oz} = - \frac{1}{n} \cdot D_e \cdot \frac{dn}{dz} \quad (2)$$

で表される。

電子の拡散係数  $D_e$  は

$$D_e = \mu_e \kappa T_e / e \quad (3)$$

である。

また、移動度  $\mu_e$  は、

$$\mu_e = \frac{e}{m} \cdot \frac{1}{\nu_m} \quad (4)$$

である。ここで、 $\nu_m$  は試料ガスと電子の衝突周波数である。

衝突周波数  $\nu_m$  は、ガス圧  $p$  の関数として、

$$\nu_m = \alpha(\omega) \cdot p \quad (5)$$

で表される。

放電 (開始電圧) 特性において、放電開始電圧が最小になるガス圧にて、 $\omega = \nu_m$  の関

係のあることが知られている<sup>(6)</sup>。1 MHz 高周波発振器の正確な発振周波数は1.8 MHz であるので、

$$\nu_m = \omega = 2\pi \times 1.8 \times 10^6 \quad (6)$$

が成り立つ。

図2の放電特性において、放電開始電圧が最小になるM点のガス圧  $p = 0.6$  Torrを(5)式に代入すると、

$$\alpha(\omega) = 2\pi \times 1.8 \times 10^6 / 0.6 = 1.88 \times 10^7 \quad (7)$$

を得る。それゆえ、(5)式、(7)式より任意のガス圧  $p$  における衝突周波数  $\nu_m$  は、

$$\nu_m = 1.88 \times 10^7 p \quad (8)$$

で表すことができる。(8)式を(4)式に代入すると、

$$\mu_e = \frac{e}{m} \cdot \frac{1}{1.88 \times 10^7 p} \quad (9)$$

を得る。(9)式を(3)式に代入すると、

$$D_e = \frac{\kappa T_e}{m} \cdot \frac{1}{1.88 \times 10^7 p} \quad (10)$$

を得る。(10)式中の電子温度  $T_e$  には図4の値を用いるが、管軸方向には余り変化がないので、計算には  $T_e = 2 \times 10^5$  (K) を使用する。

(10)式を(2)式に代入すると、放電管軸方向の電子の拡散速度  $v_{oz}$  は、

$$v_{oz} = 1.61 \times 10^5 \times \frac{1}{n_{oz}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dn_{oz}}{dz} \quad (11)$$

となる。 $n_{oz}$ には、管軸方向の任意位置における電子密度の値を、ガス圧  $p$  には管軸方向の電子密度分布を測定した時のガス圧の値を、 $dn_{oz}/dz$  には任意位置における電子密度勾配の値をそれぞれ代入するが、 $dz$  には探針の長さの2 mmを採り、また  $dn_{oz}$  には2 mmの間における電子密度の変化量を採り、拡散速度  $v_{oz}$  を計算する。実際の計算は、BASIC 言語でプログラムを作成し、パソコンで実行する。

図6は、図3の放電管軸方向電子密度分布の測定結果に基づき、1 MHz の場合の放電管軸方向の拡散速度  $v_{oz}$  を計算した結果である。

リング電極間距離が4 cmであるので、 $Z = 4$  cmが高電位リング電極位置で、 $Z = 0$ が低電位リング電極位置である。印加電圧の大きさにかかわらず、高電位リング電極位置で拡散速度の大きいことが分かる。また、リング電極の位置にかかわらず、印加電圧が大きくなるに従い、拡散速度が小さくなっていくことが分かる。また、低電位リング電極位置で最も拡散速度が小さくなることも分かる。

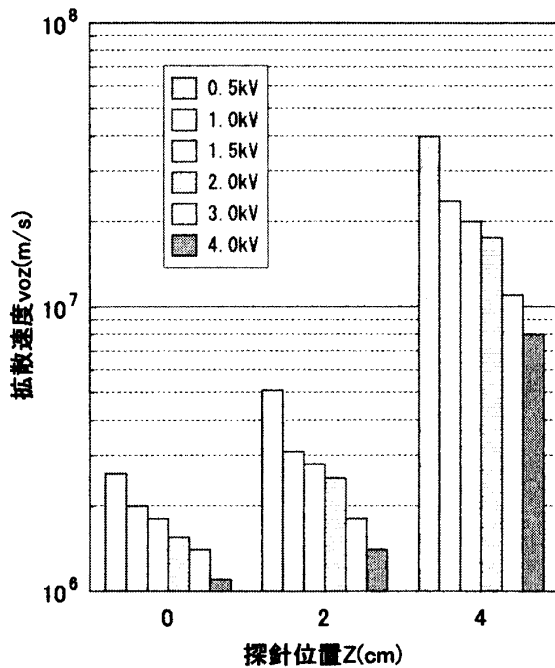


図6. 放電管軸方向拡散速度  
(1 MHz の場合)

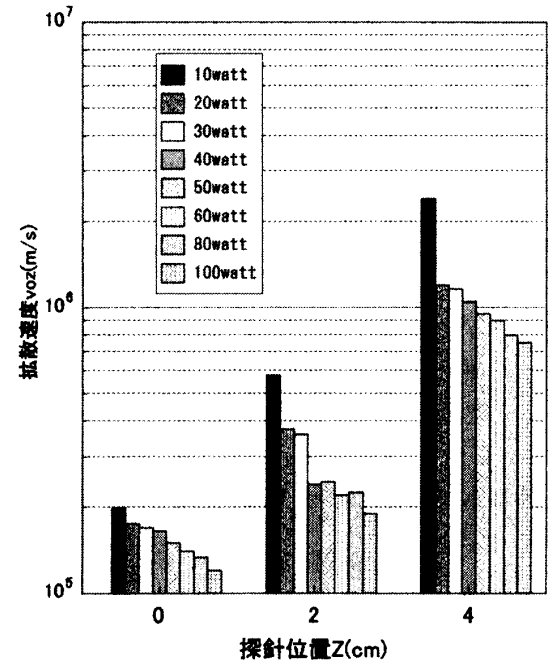


図7. 放電管軸方向拡散速度  
(13.5 MHz の場合)

図7は、図5の13.5 MHz の場合の放電管軸方向電子密度分布の測定結果に基づき、管軸方向の拡散速度 $v_z$ を計算した結果である。プラズマの吸収電力 $P_A$ の大きさにかかわらず、高電位リング電極位置で拡散速度の大きいことが分かる。また、10 watt時の拡散速度がぬきんで大きく、吸収電力の増加とともに拡散速度は減少していくが、余り大きな差はないことも分かる。また、1 MHz の高周波放電の場合と同様、高電位リング電極から離れるに従い、拡散速度が減少することも分かる。

13.5 MHz 高周波放電の場合の拡散速度が1 MHz のそれよりも1桁小さな値になっている。この原因として、次のことが言える。

衝突周波数 $\nu_m$ は13.5 MHzの方が1 MHzよりも約10倍大きいので、(4)式より移動度 $\mu_e$ は13.5 MHzの方が約10倍小さくなる。このため、(3)式より拡散係

数 $D_e$ は13.5 MHzの方が1 MHzよりも小さくなる。それゆえ、(2)式より拡散速度 $v_{0z}$ は13.5 MHzの方が1 MHzよりも約1桁小さくなる。

#### < 4. 2 > 動重力の発生とアーク状放電への移行機構

放電管軸方向の電子密度分布を基に、拡散方程式を用いて管軸方向の拡散速度 $v_{0z}$ を算出した。この結果、リング電極間に印加する電圧やプラズマの吸収電力が小さい時、高電位リング電極側で1 MHzの場合 $10^7$  m/sec、13.5 MHzの場合 $10^6$  m/secと、光速の $1/10$ から $1/100$ の極めて大きな電子の拡散速度が発生することが分かった。

プラズマが熱力学的に平衡状態にあれば、プラズマ電子はどこからも力を受けずに安定している。しかし、平衡状態にない時、高いエネルギー状態から低いエネルギー状態の方向に運動が生じる。この運動が準静的状態を保ちながらゆっくりと静かに行われるときには、普通の拡散現象が起こり、不安定性は起こらない。しかし、空間的に平衡状態がくずれていて、速いプラズマ電子の運動が生じるときには、プラズマは不安定状態となる。それゆえ、拡散速度 $v_{0z}$ の計算結果から、高電位リング電極側ではエネルギー状態は高く、低電位リング電極側ではエネルギー状態は低くなるため、高電位リング電極側から低電位リング電極側に向けてプラズマ電子の急激な運動が生じる結果、高電位リング電極寄りの空間でプラズマが不安定状態になる。このため、プラズマは非線形媒体として作用するようになり、研究紀要30号<sup>(5)</sup> (3)式で表示した非線形項 $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ が効いてくる結果、質量の大きなイオンまでも動かす大きな力の動重力が発生する。

また、研究紀要29号<sup>(4)</sup>で述べたように、動重力が発生している間には、印加高周波電界の振幅が増大する現象が実験的に確認されている。それゆえ、プラズマが不安定状態となる結果、一種の発振現象が生じて印加高周波電界の振幅が増大されてゆき、この大きくなった高周波電界で試料ガス分子が次つぎと電離されてゆくため、急激に電離が促進される。この結果、電離度が小さく、電子密度の小さなグロー状放電から、電離度が大きく電子密度の大きなアーク状放電に移行してゆく。

#### 5. おわりに

リング電極間に印加する高周波電圧およびプラズマの吸収電力を種々に変え、高電位リン

グ電極と低電位リング電極間の放電管軸方向の電子密度分布を複探針法により測定した。この結果、印加電圧やプラズマの吸収電力の大きさにかかわらず、高電位リング電極側で大きな電子密度勾配が生じており、さらに高電位リング電極側から低電位リング電極側に電子密度勾配の発生していることが分かった。この放電管軸方向の大きな電子密度勾配により、プラズマの平衡性が崩れる結果、プラズマが平衡状態を取り戻そうとする特徴的性質が作用し、プラズマは不安定状態となる。この結果、プラズマは非線形媒体として作用するようになるため、動重力の発生することが分かった。また、プラズマが不安定状態となっているとき、プラズマ中で印加高周波電界の振幅が増大される結果、電離度が急激に促進されるため、アーク状放電に移行することが分かった。

#### 参 考 文 献

- (1) 長濱、高元 : 核融合研究 第61号第4号、(1989) 258
- (2) 是安、長濱、高元 : 平成6年度電気関係学会北陸支部連合大会、A-70
- (3) 長濱 : 福井工業大学研究紀要、第28号、第1部(1997) 33
- (4) 長濱 : 福井工業大学研究紀要、第29号、第1部(1998) 39
- (5) 長濱 : 福井工業大学研究紀要、第30号、第1部(1999) 17
- (6) 長濱、福村、高元 : 電気学会論文誌A 108巻、第2号(1988) 51

(平成12年12月1日受理)