

## リング電極方式容量結合型高周波放電の基礎研究（その2）

長 濱 治 男\*

### Foundamental studies of capacitively coupled R.F. discharge with ring-like electrodes (Part 2)

Haruo Nagahama

The author reported a design and manufacture of ring-like electrodes in the previous report. In this paper, a few experimental results of the following which a detailed study of after that showed are reported ;

- (1) The pondermotive force occurs in the transitional stages during transitions from glow-like to arc-like R.F. discharges.
- (2) The electron density gradient hardly exists in the radial direction of a discharge tube, while the electron density gradient exists tube axially.

#### 1. はじめに

誘導結合型高周波放電がグロー状からアーク状へ移行する過渡状態（以後G→A移行と略記する）では、高周波電界に対するプラズマの等価コンダクタンスが負になる。この不安定性のために、プラズマ中には印加高周波以外の多くの空間電荷振動が励起されている。この状態のプラズマに外部から波長632.8nm、出力15mWのHe-Neガスレーザを入射し、プラズマを透過してきた透過レーザ光の電力をpin形Siフォトダイオードを介し光パワーメータで測定した結果、1.2dB増幅することが分った<sup>1)</sup>。高周波放電プラズマを周波数の高いマイクロ波からレーザ領域の全ての電磁波に対する増幅器として応用する目的のためには、この増幅率は余りにも小さすぎる。増幅率が小さな値となった原因として、レーザの伝搬方向と誘導結合型高周波放電の電界方向が異なるため、相互作用の時間が短くなることが考えられる。それゆえ、相互作用の時間を長くできれば、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>2)</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作について主に述べた。

今回は、製作した可動式リング電極を用いて実験を行った結果、グロー状放電からアーク状

---

\* 電気工学科

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、また放電管の半径方向には電子密度勾配はほとんどなく、放電管の管軸方向に大きな電子密度勾配が生じること、および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  $p d =$  一定の関係が成り立っていることなど、その後の研究で分かったことについて報告する。

## 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になっている。最大電極間隔は7 cmである。かぎ形複探針はプラズマ中に生じる各種の振動電圧の測定に用いるもので、低電位側探針はシンクロスコープのアース端子に接続し、高電位側探針は電圧端子に接続している。また、放電管の管軸方向および半径

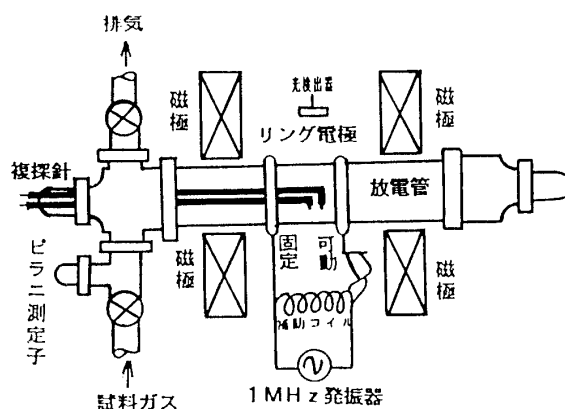


図1. 実験装置の概略図

方向の電子密度分布の測定を行うときには、それぞれ専用の密度測定用の複探針と入れ替えて使用する。グロー状放電およびアーク状放電直後のかぎ形探針に誘起された振動電圧の測定では、アーク状放電が発生しにくいガス圧領域から1 Torrを選び、またアーク状放電が発生し易いガス圧領域から0.5 Torrを選び、アーク状放電が十分に発生する電圧をリング状電極に印加する。また、放電開始特性の実験では、リング状電極間距離が5 cm, 3 cmの場合において、任意のガス圧  $p$  に対するグロー状放電およびアーク状放電開始電圧を測定する。放電開始時の確認は、探針に誘起する波形が放電の開始を示す特徴のある波形であるので、シンクロスコープの画面を観察することにより容易に行うことができる。光検出器は直径1 cmのCdSセルで、OPアンプで増幅回路を組んでいる。発光強度の磁界依存性の実験は、リング状電極方式容量結合型高周波放電における電界の方向を同定するために行うものである。また、磁界の形状はミラー磁界であり、0から3000 Gaussまで連続的に変化させることができる。1 MHzの高周波発振器の出力電圧は0から6 kVまで連続的に変えることができる。試料ガスは純度99.999%の $H_2$ ガスおよびNeガスを用いる。

## 3. 実験結果

図2は、試料ガスが $H_2$ ガスで、リング電極間距離を5 cm, 3 cmと変えた場合のアーク状放電開始電圧  $V_c$  とガス圧  $p$  の関係を測定した放電開始特性の実験結果である。図中の  $M_5$ ,  $M_3$  は、放電開始電圧  $V_c$  が最小になるミニマムポイントを示している。リン

グ状電極間距離が長くなるほど、放電開始特性曲線は全体的にガス圧の低い方に移動して

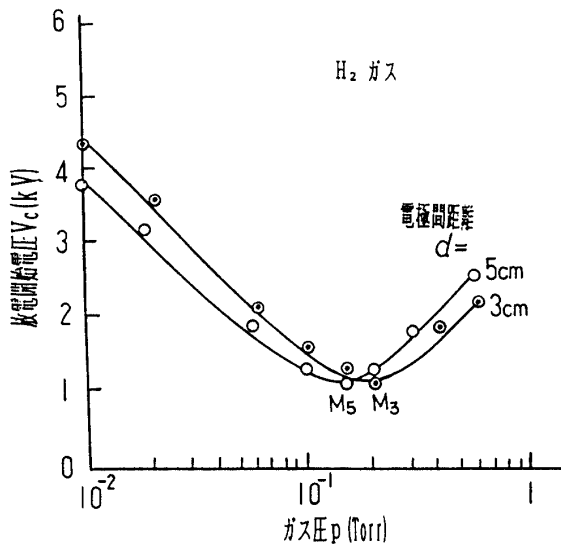


図2. 電極間距離を変えた場合の放電開始電圧特性



図3. グロー状→アーク状放電移行期にかぎ形複探針に誘起される振動電圧

いる。試料ガスをNeガスに変えて実験を行っても、同じ傾向の実験結果が得られた。図3は、放電状態がグロー状からアーク状放電に移行する過渡状態のプラズマ中にかぎ形複探針を挿入し、探針に誘起された振動電圧を測定した結果である。グロー状放電開始とともにプラズマ電子の拡散にともなう直流電位が急激に増加している。また、電位が最大になった後拡散を打ち消す新たな力である動重力が発生している。この動重力が発生しているグロー状からアーク状放電への移行期には、さらに高周波電圧の振幅の増大現象が観られる。その後、アーク状放電が発生している。

図4は、グロー状放電時とアーク状放電開始直後にかぎ形複探針に誘起された振動電圧を測定した結果である。いずれの場合にもプラズマ電子の拡散にともなう直流電圧が高周

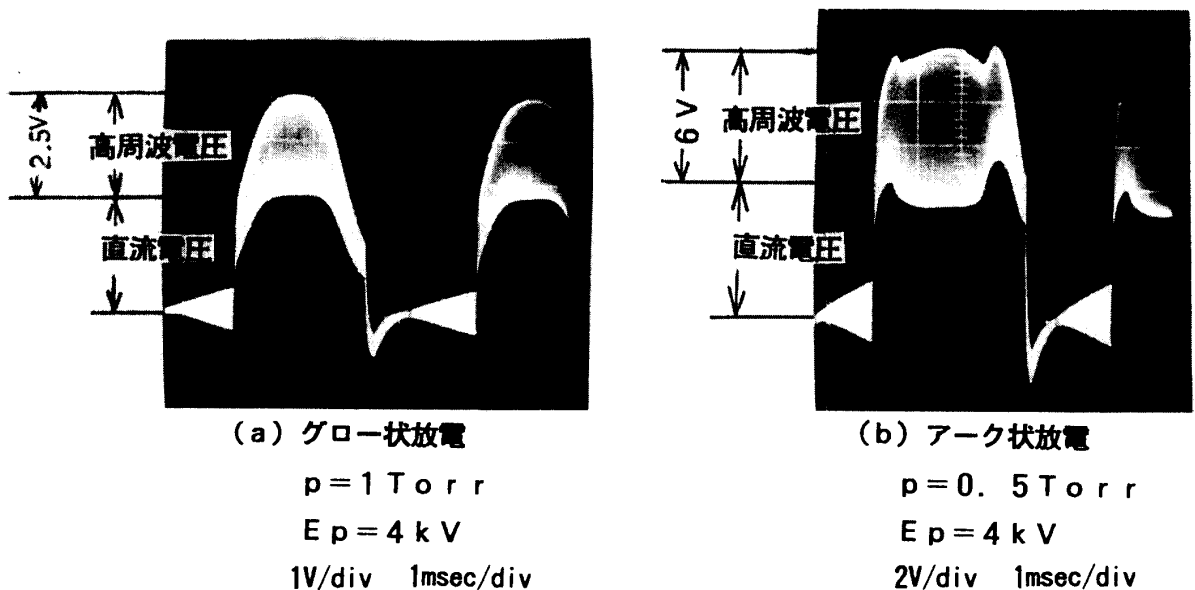


図4. グロー状放電、アーク状放電時にかぎ形複探針に誘起される振動電圧

波電圧に重畳している。グロー状放電時の高周波電圧の最大値は2.5 Vであるが、アーク状放電開始直後の高周波電圧は6 Vになっていて、アーク状放電の高周波電圧はグロー状放電時の2.4倍に増大している。

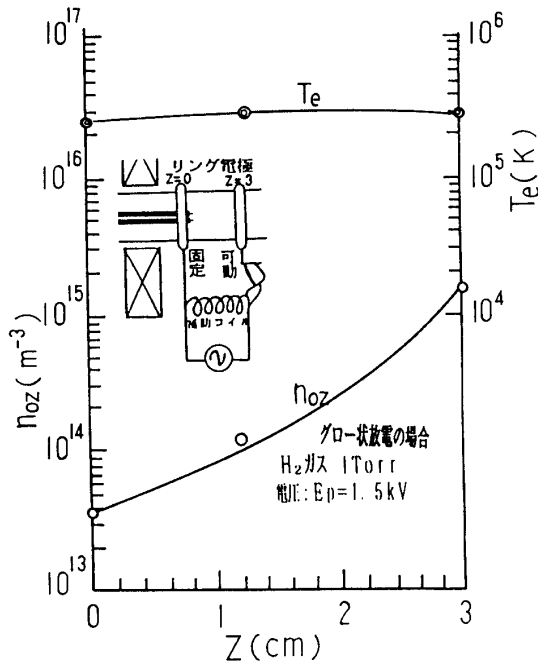


図5. 放電管軸方向電子密度分布

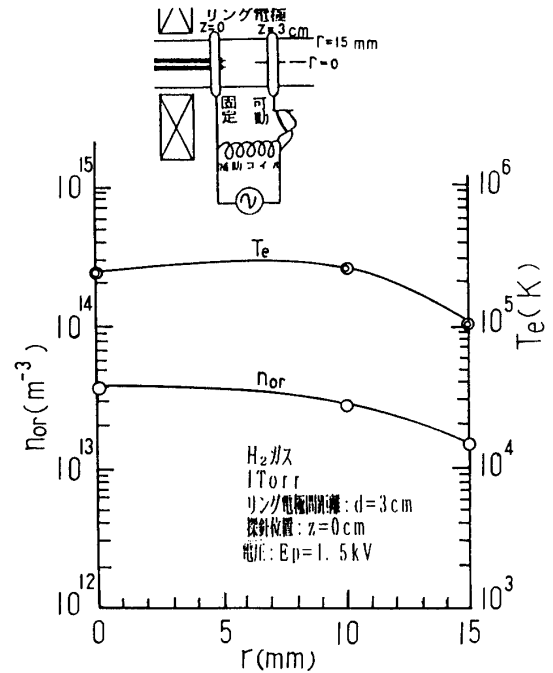


図6. 放電管半径方向電子密度分布

図5は、高電位側リング電極と低電位側リング電極間の放電管軸方向の電子密度分布を測定した結果である。ただし、リング状電極間距離が3 cmの場合である。また、試料ガスは $H_2$  ガス、グロー状放電の場合である。 $z = 3$ が高電位リング電極側で、 $z = 0$ が低電位リング電極側である。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、高電位側から低電位側に向けて密度勾配が生じていることが分る。しかし、電子温度 $T_e$ にはほとんど変化はない。

図6は、リング状電極の低電位側の位置における半径方向の電子密度分布を測定した結果である。 $r = 0$ が放電管の中心位置で、 $r = 15$ が放電管壁の位置である。電子密度は中心部に比べて放電管壁部でわずかに低下しているが、ほぼ一様な密度分布と考えられる。

図7は、プラズマからの放射光をCdSで受光し、発光強度が磁界の強さの変化によってどのように変化するかを調べることから、リング状電極方式容量結合型高周波放電の電界 $E$ の方向を同定するために行った実験結果の一例である。ただし、電磁石の磁極間隔は2.1 cmである。

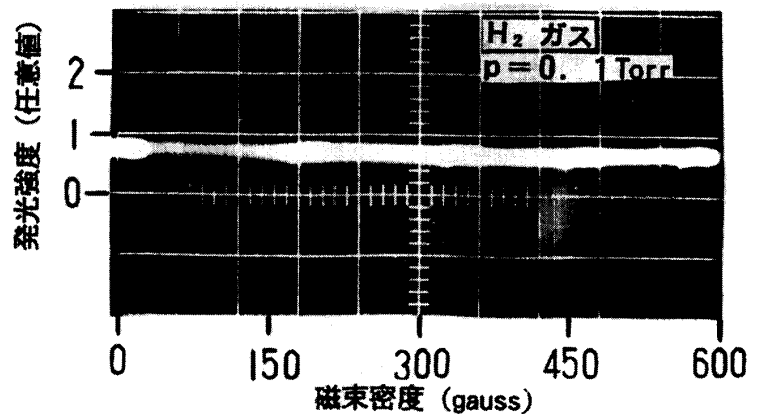


図7. 発光強度の磁界依存性

ただし、磁束密度はガウスメータで測定していて、その値は放電管軸上の値である。  
600ガウスは励磁電流を最大出力電流の80A流したときの値である。600ガウスまで磁束密度を変化させても、プラズマからの放射発光強度は変化しないことが分る。

#### 4. 実験結果の検討

##### 4. 1 リング状電極方式容量結合型高周波放電における パッシェンの法則の成立について

リング電極間距離  $d$  を 3 cm, 5 cm と変え放電開始特性の実験を行った結果、距離  $d$  が大きくなるほど、放電開始特性曲線が低いガス圧領域に移動することが分ったので、このことについて検討を行う。いま図2を、説明の都合上図8として再掲する。

$d = 5$  cm および  $d = 3$  cm の場合における放電開始電圧のミニマムポイント  $M_5$ ,  $M_3$  に対するガス圧を  $p_5$ ,  $p_3$  とする。

直流放電における放電開始電圧  $V_s$  は、放電管の陽極と陰極間の距離  $d$  とガス圧  $p$  の積である  $pd$  に依存し、

$$V_s = B \frac{pd}{\ln \left[ \frac{A pd}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]} = B \frac{pd}{\text{Const} + \ln(pd)}$$

..... (1)

で与えられ<sup>3)</sup>、この式はパッシェンの法則として知られている。ここで、 $A$ ,  $B$  は試料ガスによる定数である。

実験結果を (1) 式に適用すると、

$$p_3 d_3 = p_5 d_5 \quad \dots\dots (2)$$

の関係が得られる。しかし、 $p_3 > p_5$  であるので、

$$d_5 > d_3 \quad \dots\dots (3)$$

でなければならないことがわかる。 $d_5$  は  $d = 5$  cm の場合に、 $d_3$  は  $d = 3$  cm の場合に該当している。このように、リング電極方式容量結合型高周波放電は、直流放電のように陽極、陰極を持たない無電極放電であるが、直流放電におけるパッシェンの法則による  $pd = \text{一定}$  の関係の成り立つことが分かった。また、リング電極方式容量結合型高周波放電においては、高電位側リング電極が陽極の代わりとして、低電位側リング電極が陰極の代わりとして機能していることも分かった。

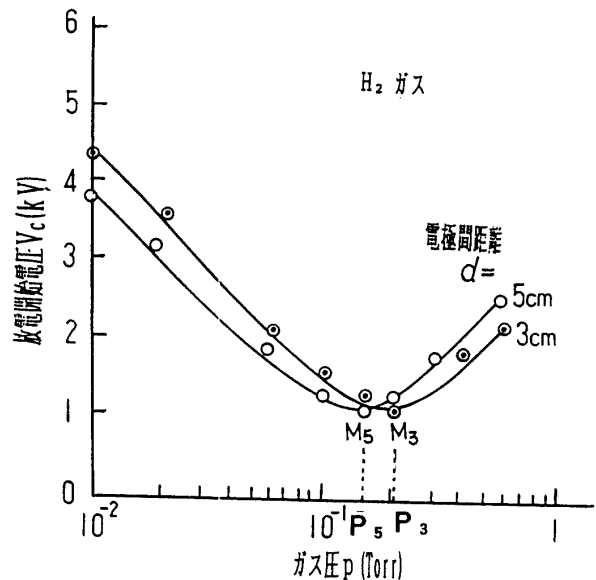


図8. 放電開始電圧特性

#### 4. 2 リング状電極方式容量結合型高周波放電 の電界方向について

電子は電界により加速運動を受けるので、実験結果を検討・考察する場合には電界の方向を知ることは重要である。

大気中においては電界の形状分布を測定することは不可能であるので、導電率の大きな水をはった水槽内で電界の形状分布を測定し、この結果から大気中の電界の形状分布をシミュレーションする方法が用いられている<sup>4)</sup>。本研究においても、実験に使用するリング状電極を用いてシミュレーション実験を行っている。しかしここでは、電子の運動変化に伴うエネルギー変化による放射光の変化を観測することから、電界の方向の同定を行う。

図7で示したプラズマからの放射光の磁界依存性実験の結果、発光強度は磁界によって変化しなかった。プラズマ電子は高周波電界  $E_1$  により

$$F = e E_1 \quad \dots \quad (4)$$

の力を受けて、

$$\nu_1 = \mu E_1 \quad \dots \quad (5)$$

の速度で運動している。いま、この時に一定方向（本研究では、放電管軸の  $z$  方向）の静磁束密度  $B_{0z}$  をかけると、電子には

$$F = e \nu_1 \times B_{0z} \quad \dots \quad (6)$$

の力が働く。電子の運動方向  $\nu_1$  と静磁束密度  $B_{0z}$  の方向が  $\theta$ （度）ずれていれば、電子には

$$F = |e \nu_1 \times B_{0z}| = e \nu_1 B_{0z} \sin \theta \text{ (N)} \quad \dots \quad (7)$$

の力が作用する結果、電子は運動方向を変える。ただし、添え文字の 0 は直流量を、1 は印加高周波成分である 1 次の交流量を表している。

この結果、初めから印加されている電界の方向からずれるように運動するため、電子の速度は力が作用する前よりも減少するようになる。電子の運動エネルギーが減少しているため、中性ガス分子と電離衝突を行っても中性ガス分子を電離させる確率も減少する。このため、プラズマからの放射光の発光強度が減少するようになる。

しかし本実験結果では、プラズマからの放射光の発光強度には変化が現れなかった。このことは、電子にエネルギー変化がなかったこと、すなわち電子の運動方向に変化がなかったことを意味している。それゆえ、印加静磁界  $B_{0z}$  が電子に力を及ぼさなかったことであるので、(7) 式による力  $F$  が 0 になるためには

$$\nu_1 \parallel B_{0z} \quad \dots \quad (8)$$

の関係を満足する必要がある。それゆえ、電子の運動方向は  $z$  方向でなければならず、 $z$  方向に加速運動するには、(5) 式より高周波電界は  $z$  方向成分を有する  $E_{1z}$  でなければならないことがわかる。

以上のことから、リング状電極方式容量結合型高周波放電の電界の方向は放電管軸と同方向の  $z$  方向であることが同定される。高周波電界の方向である  $z$  方向は、水槽内部の等電位分布の測定結果から得られた電界の方向と一致している。

## 5. おわりに

高電位側電極と低電位側電極の電極間距離を可変できるリング状電極を製作し、リング状電極方式容量結合型高周波放電を行い、クロー状およびアーク状放電プラズマの生成実験を行った結果、次のことが分かった。

- （1）グロー状放電からアーク状放電に移行する過渡状態のプラズマ中に動重力が発生する。このことから、放電の過渡状態では、質量の重いイオンを動かすような大きな力を発生させる非線形現象が生じている。
- （2）アーク状放電開始電圧  $V_c$  とガス圧  $p$  の関係を表す放電開始電圧特性をリング状電極間距離  $d$  を変えて行った結果、特性曲線は電極間距離が長くなるほど低いガス圧領域に移動する。また、直流放電におけるパッシェンの法則が成立し、 $p \cdot d$  = 一定の関係が成り立つ。
- （3）高周波電界の方向を同定するために、放電管軸（ $z$ ）方向に静磁界  $B_{0z}$  を加え、プラズマからの放射光の磁界依存性の実験を行った結果、リング状電極方式容量結合型高周波放電の電界方向は放電管の軸方向と同じ  $z$  方向である。
- （4）放電管の半径方向および管軸方向の電子密度分布を測定した結果、半径方向にはほとんど密度勾配は生じず、管軸方向に密度勾配が生じている。また、アーク状放電が生じる直前では、密度勾配は著しく大きくなる。

今回は 1 MHz の実験結果について報告した。ようやくアーク状放電を発生できる 13.5 MHz 発振器用のリング電極の製作が終り、13.5 MHz 高周波放電の研究が始まった。今後は、さらに詳細な 1 MHz 高周波放電の研究を進める一方、13.5 MHz 放電の実験を進め、研究成果が発表できるようにしていきたい。

## 参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 長濱：福井工業大学研究紀要、第28号、第1部（1997）33
- 3) 堤井信力：プラズマ基礎工学、内田老鶴圃（1986）39
- 4) 田中末雄：電気通信実験、コロナ社（1967）42

（平成10年12月5日受理）