

プラズマ放射光の照度計による容量結合型 高周波放電の電界方向の同定

長 濱 治 男*

Identification of Direction of R.F.Field of Capacitively Coupled R.F.Discharge by the Illuminance Meter of Plasma Radiation Light

Haruo Nagahama

Capacitively coupled radio frequency discharge is applied to the plasma chemistry and plasma CVD. However, the basic research of the r.f. discharge mechanism and the r.f. discharge plasma is not sufficiently studied.

Regarding reports on the design and manufacturing of ring-like electrodes so far, it is reported by author that the ponderomotive force occurred in the transitional stages during transitions from glow-like r.f. discharge to that of arc-like and the reasons are confirmed.

In this report, The author is reporting on that the direction of the electric field of the capacitively coupled r.f. discharge could be identified as a result of the measurement of the magnetic field dependence of the radiation light from the plasma using the illuminance meter.

1. はじめに

容量結合型および誘導結合型高周波放電は、電極材料から出る不純物の混入が避けられて、純粋なガスでのプラズマが生成できる有用な方法であるので、プラズマ化学やプラズマCVDなどに応用され重要視されている¹⁾にもかかわらず、十分に高周波放電機構や高周波放電プラズマの基礎研究が行われていない。

著者は、従来から誘導結合型高周波放電で生成されるグロー状放電とアーク状放電の放電特性^{2), 3)} およびグロー状放電からアーク状放電への移行機構^{4), 5)} の研究を行ってきた。また、リング電極方式容量結合型高周波放電の研究に着手するに際し、リング状電極の設計と製作に関する研究⁶⁾ およびグロー状放電、アーク状放電のプラズマパラメータや放電特性に関する基礎研究を行ってきた⁷⁾。

今回は、容量結合型高周波放電の放電機構に関する研究の一環として、リング電極方式容量結合型高周波放電に利用する電界の方向を同定する目的で、アーク状放電プラズマから放射される放射光が直流磁界を加えることによってどのように変化するかという、プラズマからの放射光の磁界依存性を調べる実験的研究を行った。この結果、誘導結合型高周波放電では、約270 gauss で発光強度が急激に低下するのに対して、容量結合型高周波放電では、発光強度には変化がないことが分かり、このことから、容量結合型高周波放電の電界の方向は放電管軸方

* 電気電子工学科

向（ z 方向）であることが同定できたので、これらの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30mmφ長さ80cm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40mmφで、低電位側は固定、高電位側は1cm間隔で移動できる可動式である。最大電極間距離は5cmであるが、実験は電極間距離4cmに調整して行った。電磁石は（株）日本高密度研究所製（KSC-120型）の空心

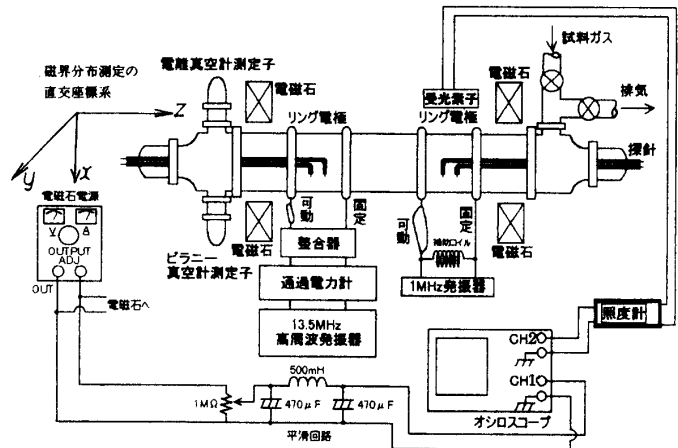


図1. 実験装置の概略図

コイルで、2個の空心コイルの磁間距離は20.5cmに調整してある。また、電磁石に流す励磁電流は0から最大80Aの範囲で連続的に可変できる。プラズマからの放射光の磁界依存性を調べるので、まず、空心コイルに囲まれた空間の磁界分布の測定を行うことから、磁界の形状を調べる必要がある。このため、2つの空心コイルに囲まれた空間を、図1中に図示した直交座標系のように、2つの空心コイル間の方向を z 方向（ $z=0$ の位置は左側の空心コイルの右端面とする）に、空心コイルの奥行き方向を y 方向（ $y=0$ の位置は、放電管の管軸上と一致させる）に、空心コイルの高さ方向を x 方向（ $x=0$ の位置は、放電管の管軸と一致させる）に採る。 x 方向の位置を決めるため、アルミ板から目盛りをめもった垂子を垂らしている。それゆえ、空間の任意の座標は、ガイド用ガラス棒上をアルミ板をスライドさせることによって z 座標を、垂子を取り付けているアルミ板の位置から y 座標が、さらに垂子の位置から x 座標が決まることになる。このようにして決めた任意の座標にガウスメータ（電子磁気工業（株）製、GM-432型）のホールプローブ（T-2型）のホール素子部を置き、その座標における磁束密度を測定する。放電管およびリング電極があると、これらが邪魔になりホール素子を任意の座標空間に置くことができないので、磁束密度を測定する前には、放電管およびリング電極は取り外しておく。プラズマからの放射光を受光する照度計はミノルタ（株）製（T-10WS型）で、受光素子はシリコンフォトセルである。オシロスコープはX-Y機能にし、電磁石の出力電圧を分圧した後、オシロスコープのX軸に接続し、励磁電流が0の時には画面の水平方向の0の位置にスポットが来るように、また60Aの励磁電流の時には10DIVの位置に来るように調整しておく。また、照度計のAC出力はオシロスコープのY軸に接続する。そして、所定のガス圧の試料ガスを放電管に封入し、発光強度の強いアーク状放電が発生するような電圧をリング電極に印加し、アーク状放電が発生させた後、電磁石の励磁電流を

0 から 60 A まで徐々に増してゆき、プラズマからの放射光の磁界の強さによる変化を測定する。試料ガスは純度 99.999% の H_2 ガス、 He ガスおよび Ne ガスを使用する。

3. 磁界分布とプラズマ放射光の磁界依存性の測定結果

3. 1 磁界分布の測定結果

円筒状放電管の管軸 ($x = 0$ 、 $y = 0$) を基準に、 x 方向に ± 1.5 cm (つまり、外径 30 mm ϕ の円筒状放電管に相当する) の範囲で、2つの空心コイルに挟まれた z 方向の 20.5 cm の範囲における磁界分布の測定を行った。測定の結果、励磁電流 I_B が 60 A の時、 z 方向の磁束密度は、2つの空心コイル近傍では大きく ($z = 0$ および $z = 20.5$ cm では最大 1300 gauss)、空心コイルから離れると小さく

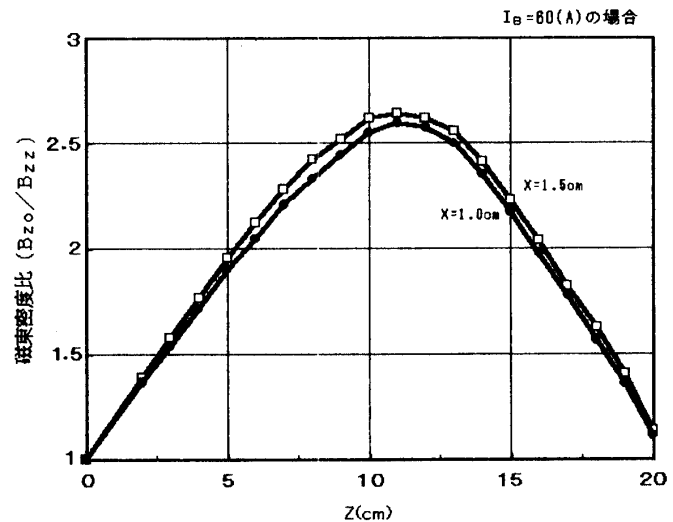


図2. 磁束密度の分布図

なる ($z = 10$ cm の空心コイル間の中間位置では 480 gauss) 傾向が得られた。また、 x 方向の磁束密度は、 $x = 0$ の放電管軸上で大きく (1300 gauss)、管軸から離れる (x が大きくなる) に従いわずかに減少し、 $x = \pm 1.5$ cm の放電管壁に相当する位置では 1280 gauss であった。この測定結果にもとづき、 $x = 1.0$ cm 位置および $x = 1.5$ cm の各位置での、 $z = 0$ 位置における磁束密度 B_{z0} と z 方向の任意の位置における磁束密度 B_{zz} の比 (B_{z0}/B_{zz}) を求め、作図したのが図2である。このグラフの形状は、 $z = 0$ と $z = 20.5$ cm の空心コイルの両端で磁束が絞られ、中央部で膨らむようなミラー磁界の形状であることが分かる。また、磁界分布の測定結果にリング電極の位置を重ねることから、 x 方向 (放電管の半径方向) に 2.3%、 z 方向 (放電管の管軸方向) に 15.5% の磁束密度変化があることが分かった。しかし、半径方向の 2.3% の磁束密度変化は、ほぼ放電管の外径 30 mm ϕ の範囲内では、放電管軸に平行な磁界であると考えることができる。

3. 2 プラズマ放射光の磁界依存性の測定結果

誘導結合型高周波放電と容量結合型高周波放電におけるプラズマからの放射光の磁界依存性の違いを調べるため、まず誘導結合型高周波放電の場合について測定を行った。図3は、リング電極の代わりに8巻の誘導コイルを放電管上に巻き、誘導コイルに 4 kV の電圧を印加して強い発光強度の誘導結合型アーク状放電を発生させ、電磁石の励磁電流 I_B を 0 から 60 A まで徐々に増加していった場合の、プラズマからの放射光の磁界依存性を測定した結果である。ただし、ガス圧が 0.15 Torr の H_2 ガスの場合である。磁束密度が約 270 gauss までは、強い発光強度のアーク状放電が続いているが、270 gauss 付

近で急激に発光強度が低下し、極めて弱い発光状態のグロー状放電に変化している。

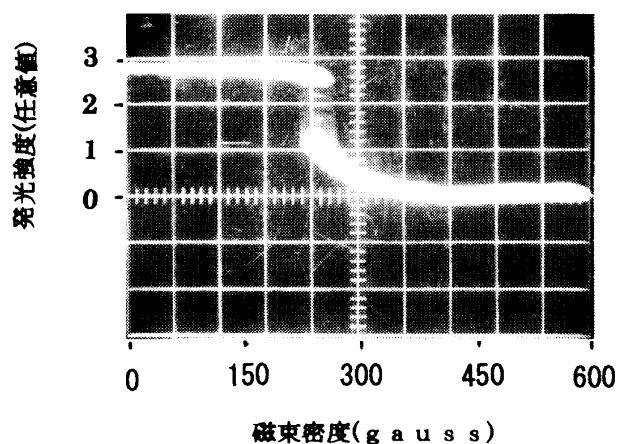


図3. プラズマからの放射光の磁界依存性
(誘導結合型高周波放電の場合)

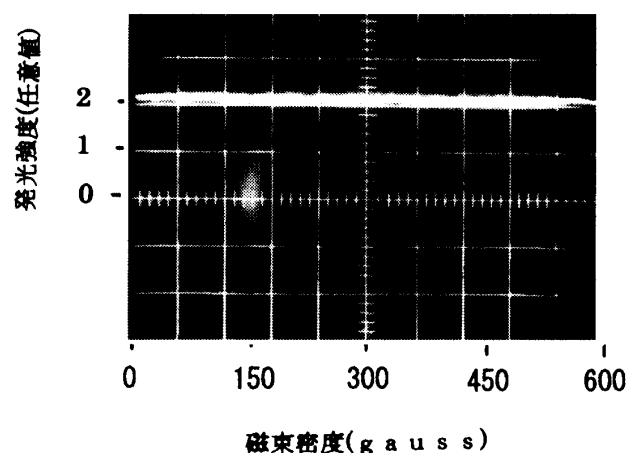


図4. プラズマからの放射光の磁界依存性
(容量結合型高周波放電の場合)

図4は、ガス圧 p が 0.1 Torr の H_2 ガスを放電管に封入し、リング電極に 4 kV の高周波電圧を印加して容量結合型アーク状放電を発生させた後、電磁石の励磁電流を 0 から 60 A まで徐々に増加させていった場合の、プラズマ放射光の磁界依存性の実験結果である。励磁電流 I_B が 60 A の時、放電管軸上のリング電極の中間位置での磁束密度が 600 gauss である。磁束密度を 600 gauss まで変化させても、プラズマからの放射光は一定の発光強度を保ったまま変化していない。このことは、リング電極方式容量結合型高周波放電の場合には、円筒状放電管の管軸方向とほぼ平行な直流磁界 B_{0z} は、発光強度の強いアーク状放電に影響を及ぼさないことを意味し、誘導結合型高周波放電の放電機構との違いを示していると考えられる。

4. 電界方向同定の考察

4. 1 誘導結合型高周波放電の場合

誘導結合型高周波放電は図5に図示するように、円筒状放電管に数巻のコイルを巻きつけ、高周波電流 $J_{1\theta}$ を流した時、 z 方向に生じる交流の磁束密度 B_{1z} が図中に示したマクスウェルの電磁方程式に基づく θ 方向の電界 $E_{1\theta}$ を誘起させるので、この電磁誘導電界 $E_{1\theta}$ を利用してプラズマを生成する放電方法である⁸⁾。

誘導結合型の場合は、既に電界方向が分かっているのので、プラズマ放射光の磁界依存性の実験結果から検証を試みることにする。直流磁界 B_{0z} は、3.1節で述べたように、放電管軸方向にほぼ平行な z 方向である。

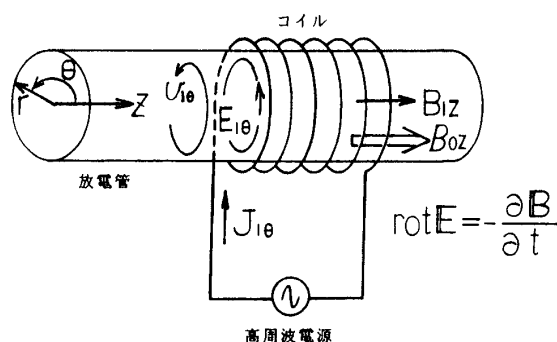


図5. 誘導結合型高周波放電の電界方向

プラズマ電子は、 θ 方向の高周波電界 $E_{\parallel 0}$ により

$$\mathcal{E}_{10} = \mu E_{10} \theta \dots\dots\dots (1)$$

の速度 $v_{\perp 0}$ で θ 方向に運動している。この時、 z 方向に印加している直流磁界 B_{0z} を増していくと、ローレンツ力

$$\mathbf{F} = e v_{1\theta} \boldsymbol{\theta} \times B_0 \mathbf{z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を受けるとともに、この力が大きくなってゆく。電子は、この力 F_r により r 方向（放電管半径方向）に運動方向を変化してゆく。 θ 方向に回転運動していた電子は、 r 方向に運動方向を変え、放電管壁に向けて移動してゆき、放電管壁に衝突し、消滅してゆく。この結果、高電子密度・高電離状態のアーク状放電状態を維持できなくなるため、急激に低電子密度・低電離状態のグロー状放電状態に変化し、発光強度が急激に低下する、と考えられる。それゆえ、電子が z 方向の直流磁界 B_{0z} によって r 方向の力を受けるためには、電子は θ 方向の電界により θ 方向に加速運動をしていなければならないことを意味するので、誘導結合型高周波放電に利用する高周波電界 E_1 の方向は θ 方向でないといけない、との結論が得られ、既に研究され、方向の分かっている高周波電界 $E_{1\theta}$ と一致する結果が得られた。

4. 2リング電極方式容量結合型高周波放電の場合

図4で示したように、容量結合型高周波放電の場合、プラズマ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。この結果に基づき、リング電極方式容量結合型高周波放電に利用する高周波電界 E_1 の方向の同定を試みる。

プラズマ電子は高周波電界 E_1 により

$$F = e E_1 \dots\dots (3)$$

の力を受けて

$$v = \mu E, \quad \dots\dots (4)$$

の速度で運動している。この時、 z （放電管軸）方向の直流磁界 B_{0z} をかけると、電子には

$$F = e v_1 \times B_{0z} \quad \dots\dots (5)$$

の力が働く。図6で示すように、もし電子の運動方向がz方向の直流磁界の方向と ϕ （度）

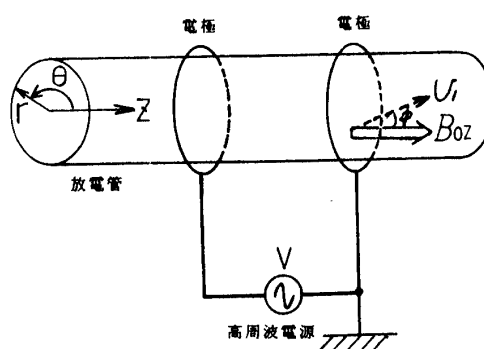


図6. 容量結合型高周波放電の
電界方向同定の考察モデル図

ずれていれば、電子には

$$F = \left| e \boldsymbol{v}_1 \times \boldsymbol{B}_{0z} \right| = e v_1 B_{0z} \sin \phi \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

の力が作用するようになるので、電子は運動方向を変えるようになる。この結果、初めから印加されている高周波電界の方向からずれて運動するようになるため、電子の速度 v_1 は力 F が作用する前よりも遅くなる。電子の運動エネルギーは $(1/2) m v^2$ であるから、速度が遅くなるに従い運動エネルギーも減少してくるので、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も減少するようになる。

しかし、プラズマ放射光の磁界依存性の実験結果では、プラズマからの放射光の発光強度には変化がなかった。このことは、 z （放電管軸）方向とほぼ平行方向の直流磁界の下で運動している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、 z （放電管軸）方向の直流磁界 B_{0z} が電子に力 F を及ぼさなかったことを意味するので、(6) 式による力 F が 0 になるためには、電子の運動方向と直流磁界 B_{0z} 方向にずれの角度 ϕ がなく、

$$v_1 \parallel B_{0z} \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

の関係を満足している必要がある。それゆえ、電子は z 方向成分の v_{1z} のみを有し、 r 方向および θ 方向の速度成分は

$$v_{1r} = v_{1\theta} = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

でないといけない。(4) 式をベクトル成分で表示すると、

$$v_{1r} \boldsymbol{r} + v_{1\theta} \boldsymbol{\theta} + v_{1z} \boldsymbol{Z} = \mu (E_{1r} \boldsymbol{r} + E_{1\theta} \boldsymbol{\theta} + E_{1z} \boldsymbol{Z}) \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

となるので、(8) 式を(9) 式に代入すると、

$$E_{1r} = E_{1\theta} = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

$$v_{1z} = \mu E_{1z} \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

を得る。それゆえ、電子が z 方向に運動するためには、高周波電界 E_1 の方向は、直流磁界と同じ方向の z （放電管軸）方向でなければならないので、高周波電界 E_1 の方向は放電管軸（ z ）方向である、と同定できる。

5. おわりに

容量結合型高周波放電の放電機構に関する研究の一環として、リング電極方式容量結合型高周波放電に関する電界の方向を同定するため、発光強度の強いアーク状放電プラズマから放射される放射光が放電管軸（ z ）方向の直流磁界 B_{0z} によってどう変化するかという、放射光の磁界依存性を調べる実験的研究を行った。

この結果、電磁石の励磁電流 I_B を 60 A（磁束密度では 600 gauss）まで変化させても、プラズマからの放射光は変化しないことが判明した。また、直流磁界 B_{0z} はプラズマ電子にローレンツ力 F を及ぼさないことが分かり、このことから、高周波電界 E_1 の方向は放電管軸方向と同方向の z 方向であることが同定できた。

さらに、この z 方向の高周波電界 E_{1z} は、リング電極を距離 d だけ離して放電管に配置し、電極間に高周波電圧を印加しているので、1つのリングで囲まれた閉曲面は等電位面となっているため、交流電圧によって分極電荷が発生し、その分極電荷によって放電管軸（ z ）方向に発生する交流の静電界 E_z であることが分かった。

本研究は、平成13年度福井工業大学特別研究費で行われたことを付記し、深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 堤井信力 : プラズマ基礎工学、内田老鶴圃（1986）68
- (2) 高元、向山、長濱: 電気学会誌、91巻（1971）753
- (3) 長濱、高元 : 真空、32巻（1989）20
- (4) 福村、長濱、高元: 電気学会論文誌、A97巻（1977）243
- (5) 長濱、福村、高元: 電気学会論文誌、A103巻（1983）265
- (6) 長濱、是安、高元: 平成7年度電気関係学会関西支部連合大会、G-20
- (7) 長濱 : 福井工業大学研究紀要、第31号、第1部（2000）31
- (8) 林 泉 : プラズマ工学、朝倉書店（1987）27

（平成13年11月28日受理）