

# 高周波アーク状放電の $V_c-p$ 特性と 衝突周波数の関係

長 濱 治 男

## Relation between the $V_c-p$ Characteristic of R.F. Arc-like Discharge and Collision Frequency

Haruo NAGAHAMA

Transition mechanism from glow-like to arc-like R.F. discharge has been studied on relations between collision frequency  $\nu$  and absorption power. The collision frequencies have been measured in glow-like discharge plasma of immediately before arc-like discharge. As a result, it has been found that the condition of  $\omega = \nu$  is established at the pressure of a minimum value  $V_{cmin}$  in the  $V_c-p$  characteristic.

### 1. まえがき

周波数が13.5MHzや27MHzの無線周波数(Radio Frequency)帯の高周波でプラズマを生成する高周波無電極放電は、電極から放出される不純物の影響が除去されるため、近年アモルファス太陽電池やDRAMなど超LSI製造のエレクトロニクス分野および新素材開発のためのプラズマプロセスなどに応用されている。プラズマが注目されている理由は、高い温度でしか起こすことのできない化学反応を、プラズマ中では低い温度で起こすことができる非平衡性を容易に実現できるためである。しかし、応用技術が先行し、成膜機構など基礎的性質の未解明部分が多く残されており、今後の組織的研究の重要性が認識されている<sup>1),2)</sup>。

筆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、アーク状放電の放電特性およびグロー状からアーク状放電への移行機構の研究を行ってきた<sup>3)~5)</sup>。アーク状放電移行電力(または電圧)はガス圧を定めると決まってしまう、この電力は電子とガス分子との衝突周波数 $\nu$ に大きく依存する。

今回は、アーク状放電移行機構研究の一環として、衝突周波数測定用の探針を考案し、アーク状放電直前のグロー状放電状態のプラズマ中の衝突周波数を測定した。この結果、アーク状放電移行電力が最小になるガス圧で、印加高周波電界の角周波数 $\omega$ と衝突周波数 $\nu$ との間に $\omega = \nu$ の関係が成り立つことが分かった。

## 2. 実験装置

図1は実験に用いた放電管および1MHz、13.5MHz発振器の略図である。放電管は内径が30mm $\phi$ 、長さ80cmの石英ガラス管で、または単探針その両端は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。1MHzコイルは10巻き、13.5MHzコイルは8巻きである。複探針は電子温度、電子密度などの測定に、単探針はイオン電流の測定に用いる。この時の基準電位は金属アダプターをアースして用いる。探針の材質はタングステン線で長さ2mm、直径0.5mm $\phi$ である。単探針、複探針とも放電管壁から管軸まで半径方向に可変できる。

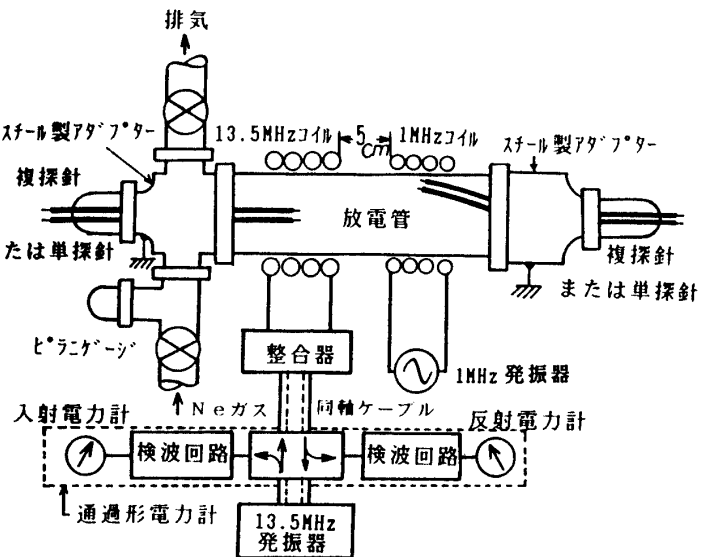


図-1. 実験装置

実験を行う前には、油拡散真空ポンプで放電管全体を $10^{-5}$ Torr以下の真空度に排気する。また、試料ガスとして純度99.999%の $H_2$ 、He、Neの各ガスを用いており、実験ごとに所定のガス圧に封入する。

## 3. 衝突周波数の測定方法

図1の実験装置で示した複探針では、図2(a)に示すように探針の間がプラズマで導通状態になっているため、探針の間に誘起される高周波電界 $E_\theta$ を正確に測定することはできない。また、(b)図の等価回路に示すように、外部回路に抵抗 $R$ を接続し、探針間に誘起される電圧により抵抗 $R$ に流れる

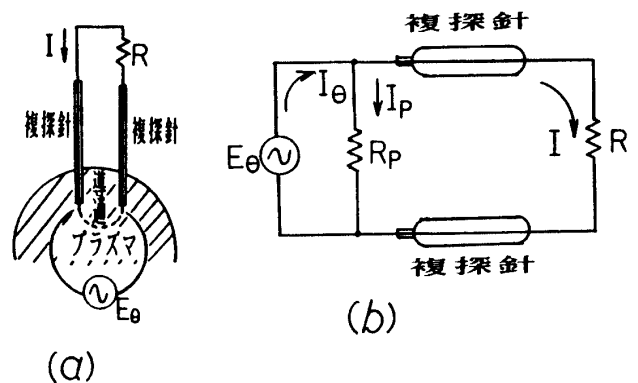


図-2. プラズマで導通状態になった複探針(a)とその等価回路(b)

電流を測定しようとしても、探針の間がプラズマで導通状態になっているので、電流  $I_\theta$  は導通状態のプラズマ中に流れる  $I_P$  と抵抗  $R$  に流れる  $I$  とに分かれて流れる。このため、探針間に誘起される高周波電界  $E_\theta$  により抵抗  $R$  に流れる電流は  $I_\theta$  とならない。それゆえ、プラズマ中の高周波電界と電流の位相差を正確に測定出来ないため、電子と中性ガス分子の衝突周波数  $\nu$  を正確に調べることができない。

このため、図-3 (a) に示すように、1組の複探針の2個の電極の間をガラスの絶縁物ではさみ、2個の電極が背中合わせに、またその表面が  $\theta$  方向に垂直になるような形状の衝突周波数  $\nu$  測定用複探針を2組作製した。この2組の複探針はそれぞれ電圧位相測定用と電流位相測定用である。そして、半径方向の電子の拡散速度  $v_{or}$  が大きな放電管付近に探針を置くと、正確な電圧、電流の位相差が測定できないため、半径方向の電子密度が一樣で、 $v_{or}$  が小さい位置を選んで半径の  $1/3$  の位置で、管軸方向に2組の複探針を並べて置いている。

ガラスで絶縁された2つの電極間には3図 (a) で示す等価プラズマ回路の複素抵抗率  $\rho$  および高周波電界  $E_\theta$  がつながつている。ただし、 $\rho$  は

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho' + j\rho'' , \quad \rho' = \sigma' / (\sigma'^2 + \sigma''^2) \\ \rho'' &= \sigma'' / (\sigma'^2 + \sigma''^2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

である。

今、探針の外側で抵抗率  $\rho_0$  の純抵抗を複探針に接続すると、複探針の電極間に誘起された高周波電界  $E_\theta$  のために  $\rho_0$  に流れる高周波電流密度  $J_\theta$  は

$$J_\theta = \left\{ \frac{\rho_0 + \rho'}{(\rho' + \rho_0)^2 + \rho''^2} - j \frac{\rho''}{(\rho' + \rho_0)^2 + \rho''^2} \right\} E_\theta \quad (2)$$

となる。

それゆえ、複探針に誘起される単位長さ当たりの電圧  $V$  は

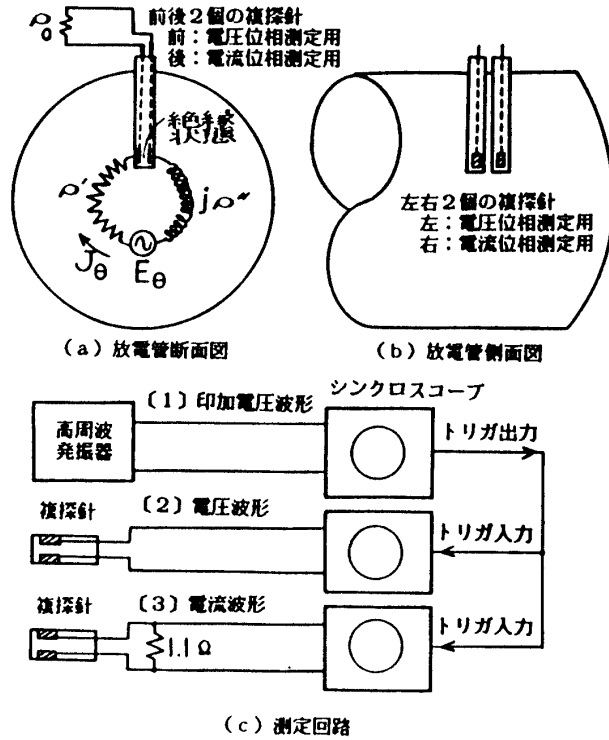


図-3 衝突周波数  $\nu$  の測定回路

$$V = J_{\theta} \rho_0 \quad \text{-----} \quad (3)$$

であるから、 $\rho_0 = \infty$  すなわち開放の場合と、 $\rho_0 > 0$  すなわち短絡に近い場合は(2)，(3)式より

$$\left. \begin{array}{l} V_{\infty} = E_{\theta} \\ V_0 = J_{\theta 0} \rho_0 \end{array} \right\} \text{-----} \quad (4)$$

となる。ただし、 $J_{\theta 0}$ は(2)式で $\rho_0 \div 0$ とおいた時の $J_{\theta}$ の値で、真のプラズマ電流である。それゆえ、 $V_{\infty}$ と $V_0$ の位相差を測定すると、高周波電界 $E_{\theta}$ と電流 $J_{\theta 0}$ の位相差を測定したことになり、

$$\tan \phi = \rho'' / \rho' = \omega / \nu \quad \text{-----} \quad (5)$$

より衝突周波数 $\nu$ が測定できることになる。ここで、 $\phi$ は電圧に対する電流の遅れ位相角である。

図3(b)，(c)は電圧と電流の位相差測定用の2組の複探針と測定回路である。印加高周波電圧の振幅は60Hzで振幅変調されているので、任意の電圧波高値の時にトリガをかけると、その波高値に対する衝突周波数 $\nu$ が測定できるようになる。本実験に必要な $\nu$ はグロー状からアーク状放電へ移行する直前の値であるから、そのような $\nu$ を測定する目的で印加高周波電圧側からトリガ回路を設けている。また、電流測定用の純抵抗 $\rho_0$ の値が余り小さすぎると雑音のために測定精度が悪くなるので、調整の結果1.1Ωの抵抗を用いている。

#### 4. 測定結果

図-4は、13.5MHzの高周波電圧を用い、アーク状放電直前の印加電圧のもとで電圧、電流の位相差から衝突周波数 $\nu$ とガス圧の関係を $H_2$ ， $He$ ， $Ne$ ガスについて測定した結果である。衝突周波数 $\nu$ はガス圧 $p$ に比例して大きくなるのがわかる。図-5は、アーク状放電移行電圧 $V_c$ を室温におけるガス圧 $p$ を変化して $V_c - p$ 特性を測定した結果である。 $V_c$ の最小点 $V_{cs}$ のガス圧は $p = 1.5 \times 10^{-2} \text{ Torr}$ であるから、この点で $\omega = \nu$ を仮定すると、 $\omega = 2\pi \times 13.5 \times 10^6$ より $\nu = 8.48 \times 10^7$ が得られる。この値を図4上にプロットしたのがA点であり、位相差から実測した $\nu$ の値と大体一致する。このことを他のガスでも確かめるために、 $He$ ，

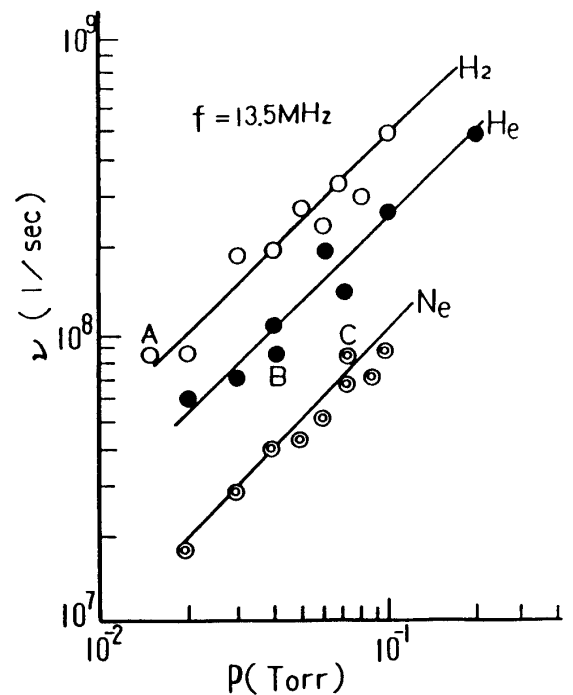


図-4  $V_c$  直前における  $\nu$  の値

Neガスについて測定した結果が図-6である。ただし、各ガスの $V_c$ は $H_2$ ガスの $V_c$ の最小値 $V_{cs}$ で規格化している。

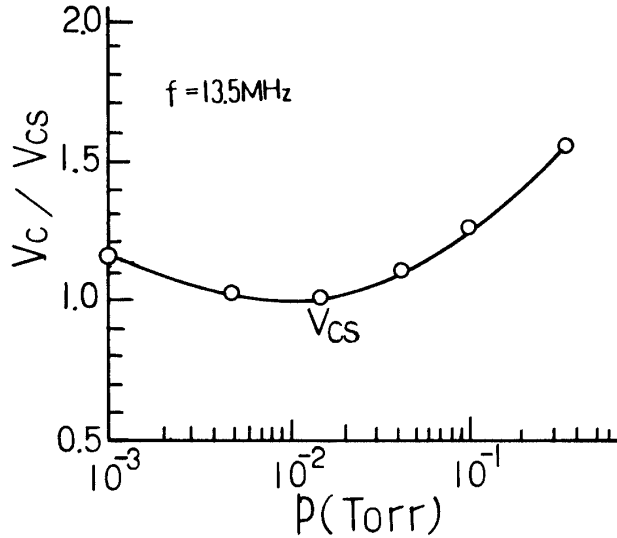


図-5.  $H_2$ ガスの $V_c$ - $p$ 特性

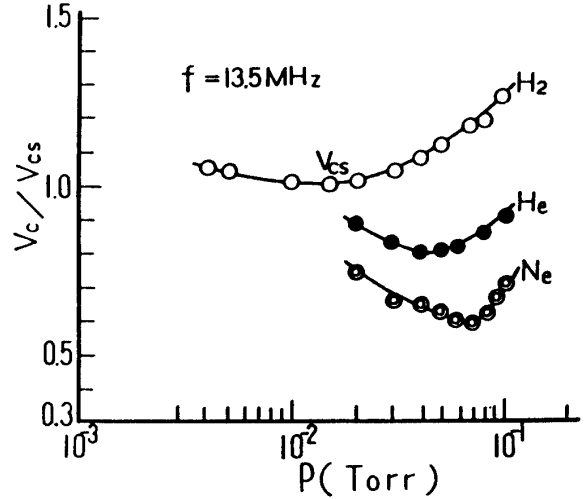


図-6.  $H_2$ ,  $He$ ,  $Ne$ の $V_c$ - $p$ 特性

各ガスについて、 $\nu = \omega = 8.48 \times 10^7$ を仮定して図4上に移すと、 $He$ についてはB点、 $Ne$ ガスについてはC点となる。いずれも実験誤差の範囲内で位相差から求めた $\nu$ と一致している。それゆえ、 $V_c$ の最小点では、 $\omega = \nu$ の関係が成立することが、本実験から明らかになった。

次に、 $H_2$ ガスを用い、印加周波数が13.5 MHzと9.8 MHzの高周波電界の場合の $\nu$ を実測し、比較した結果が図7である。図から明らかなように、周波数が低くなると、 $\nu$ 値が減少することがわかる。また、13.5 MHzと9.8 MHzの各 $V_c$ - $p$ 特性における $V_c$ の最小点からそれぞれ $\omega = \nu$ の関係を用いて $\nu$ をもとめると、13.5 MHzの場合には $\nu = 8.48 \times 10^7$ が、9.8 MHzの場合には $\nu = 6.16 \times 10^7$ の各値が得られる。これらの値を図7上にプロットしたのが、図中のA点(13.5 MHz)とB点(9.8 MHz)である。いずれの値も $\nu$ の実測値と良く一致している。それゆえ、周波数が異なっても、 $V_c$ - $p$ 特性の最小値 $V_{cs}$ の点で $\omega = \nu$ の条件が成り立つことが分かった。

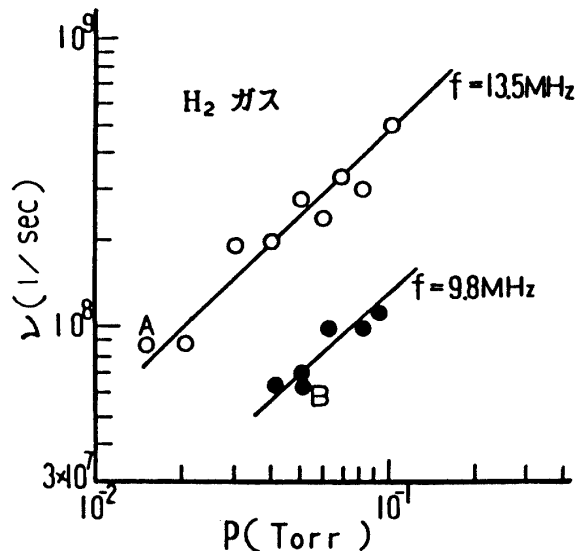


図-7. 13.5 MHzと9.8 MHzにおける衝突周波数の比較

## 5. 結 言

無放電状態からグロー状放電が発生する電圧 $V_B$ とガス圧 $p$ の関係において、 $V_B$ が最小になるガス圧で $\omega = \nu$ の関係が成立することを、S.C.Brown氏が報告している<sup>6)</sup>。今回、プラズマ中の高周波電圧と電流の位相差を実測して衝突周波数 $\nu$ を測定した。また、その結果を用いて、V字形のアーク状放電移行電圧 $V_c$ とガス圧 $p$ の関係の $V_c - p$ 特性（または、 $P_c - p$ 特性）の最小点で、 $\omega = \nu$ の関係が成立することが本実験から確認できた。

また、衝突周波数 $\nu$ とガス圧 $p$ の間には、

$$\nu = \alpha(\omega) \cdot p \quad (6)$$

の関係のあることが分かった。

終わりに、終始有益なご助言、ご指導を頂きました関西大学工学部電子工学科高元睦夫博士に感謝の意を表わします。

## 参 考 文 献

- 1) 板谷良平 : 電気学会雑誌 110(1990)、167
- 2) 橘、松井 : 真 空 31(1988)、179
- 3) 長濱、福村、高元 : 電気学会論文誌 A103(1982)、265
- 4) 長濱、福村、高元 : 電気学会論文誌 A105(1985)、381
- 5) 長濱、福村、高元 : 電気学会論文誌 A108(1988)、51
- 6) S.C.Brown : "ENCYCLOPEDIA OF PHYSICS XX II、GAS DISCHARGE II", Springer-Verlag,Belin(1956) 531

(平成2年12月13日 受理)