

リング電極方式容量結合型高周波放電に対する 2種類の高周波電界の重畳効果 (その3)

長 濱 治 男*

Effect of Applying Two Kinds of R.F.Fields on Capacitively Coupled R.F.Discharges with ring-like Electrodes (Part 3)

Haruo Nagahama

In a inductively or capacitively coupled r.f.discharge by a single frequency, the transition voltage V_c or P_c from glow to arc discharge depends on the gas pressure p . When superposing two applied fields with different frequencies at the same time, if V_c decreases comparing with the value of single-frequency discharge, r.f.discharge plasma with high ionization state can be easily generated. Effects of superposing two applied fields with different frequencies, that is, 2MHz and 13.5MHz have been studied. As a result, V_c of 2MHz side has decreases by the superposed effects in the low pressure region ($\omega > \nu$), but V_c has not decreases by the superposed effects in the high pressure region ($\omega < \nu$). Variations of P_c by the superposed effects in the discharge space of 13.5MHz side have not been able to in all pressure region.

In this paper, it is described that the difference of the superposed effect was theoretically studied from the absorption electric power of plasma electron in the low pressure region ($\omega > \nu$).

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。

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。

従来行ってきた単一周波数の高周波放電では、ガス圧を定めると、グロー状放電からアーク状放電へ移行する放電開始電圧の値が決まるので、高電離状態のプラズマを生成するには高出力の電源が必要となる。このため、電源の高出力化を図らずに、高電離状態のプラズマを生成する方法として、異なる2種類の高周波電界を同時に重畳して印加する方法を提案し、この方法で行った誘導結合型高周波放電についての実験結果をすでに報告した⁶⁾。また、2組のリング電極にそれぞれ異なる2種類の周波数の高周波電界を印加して重畳放電を行い、誘導結合型高周波放電と

* 電気電子工学科

放電機構や結合方法が異なる容量結合型高周波放電においても、重畳効果が生じるかどうかを調べる実験を行い、その結果を報告した。実験は、 $0.266\text{Pa} \sim 266\text{Pa}$ のガス圧範囲で、 2MHz と 13.5MHz の異なる 2 種類の高周波電界を同時に重畳して印加し、リング電極方式容量結合型高周波放電のグロー状放電からアーク状放電に放電状態が移行する 2MHz 側のアーク状放電開始電圧 V_c および 13.5MHz 側のアーク状放電開始電力 P_c の測定を行った。説明の都合上、報告した実験結果を再掲すると、図.1 に示すように 2MHz に 13.5MHz を重畳した場合、V 字形状をした放電特性の最小点 V_{cmin} よりも低いガス圧領域で 2MHz 側の V_c が低下し、重畳効果があったが、最小点 V_{cmin} よりも高いガス圧領域では V_c の低下は少なく、重畳効果の影響は小さかった。また、図.2 に示すように 13.5MHz に 2MHz を重畳した場合には、すべてのガス圧領域で重畳効果はなく、 P_c は低下しなかった。

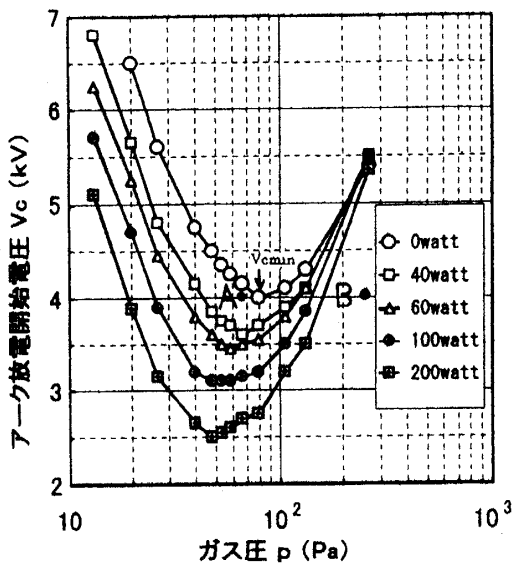


図 1. 2MHz 、 13.5MHz 重畳時の 2MHz 側のアーク放電開始電圧 V_c (Ne ガス)

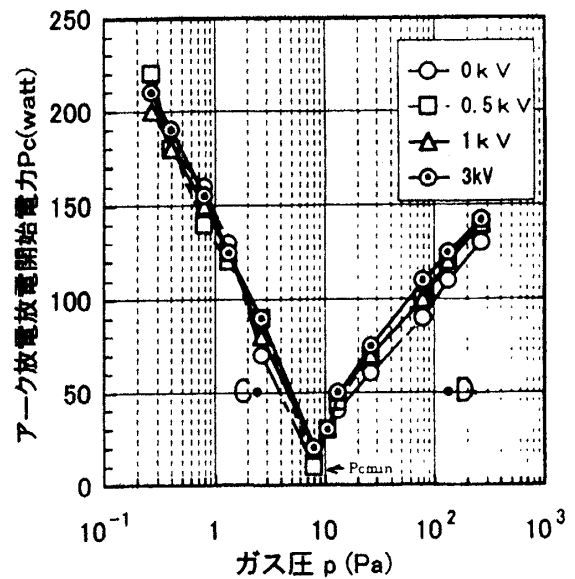


図 2. 13.5MHz 、 2MHz 重畳時の 13.5MHz 側のアーク放電開始電力 P_c (Ne ガス)

今回は、これら重畳効果の現れ方の違いを調べるため、 2MHz 高周波電界に 13.5MHz 高周波電界を重畳した時、重畳する 13.5MHz 電力の増加とともに 2MHz 側の V_c の最小値 V_{cmin} の点が低いガス圧側に移動している実験結果に注目し、プラズマ電子とガス分子との弾性衝突周波数 ν とプラズマ電子が高周波電界から吸収する電力の関係とから、重畳効果を説明することを試みた。その結果、重畳効果による V_c 低下の原因をプラズマ電子の高周波電界からの吸収電力の関係からよく説明することのできたので、今回は V_c の最小値 V_{cmin} 点よりも低いガス圧領域 ($\omega > \nu$) について限定し報告する。

2. プラズマ電子の高周波電界からの吸収電力の導出

高周波電界の下、プラズマ生成用の試料ガス中を運動する電子は試料ガス分子と衝突するの

で、衝突周波数を ν とすると、電子の運動方程式は

$$m \frac{dU}{dt} + m \nu U = -eE_p e^{j\omega t} \quad (1)$$

で表わされる。ただし、 E_p は高周波電界の最大値である。振動電界の下では、電子は高周波電界と同様に振動するので、電子の運動速度 U は、

$$U = U_p e^{j\omega t} \quad (2)$$

で表わされる。ただし、 U_p は最大値である。(2)式を(1)式に代入すると、

$$(j\omega + \nu)mU = -eE_p e^{j\omega t} \quad (3)$$

が得られる。(3)式を U についての式に書き直すと

$$U = -\frac{e}{m} \left(\frac{1}{\nu + j\omega} \right) E_p e^{j\omega t} \quad (4)$$

となるが、(4)式を有理化すると、

$$U = -\frac{e}{m} \left(\frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\omega}{\omega^2 + \nu^2} \right) \frac{E_p}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

が得られる。ただし、高周波電界は実効値で表示している。

電力は、

$$P_s = IV = JSV \quad (\text{watt}) \quad (6)$$

で表わされるから、単位体積当たりの電力 P は、

$$P = \frac{P_s}{QS} = JE \quad (\text{watt} / \text{m}^3) \quad (7)$$

となる。ただし、 Q は長さ、 S は面積、 E は電界の実効値である。今、対象にしているのはプラズマ電子であるので、

電流密度の式は、

$$J = neU \quad (\text{A/m}^2) \quad (8)$$

と書けるから、(5)式および(8)式を(7)式に代入すると、

$$P = \frac{ne^2}{m} \left(\frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\omega}{\omega^2 + \nu^2} \right) E^2 \quad (\text{watt} / \text{m}^3) \quad (9)$$

が得られる。電力の吸収は、純抵抗部で行われるから(9)式の実数部を採ると、プラズマ電子が高周波電界から単位体積当たり吸収する電力 P は、

$$P = \frac{ne^2}{m} \cdot \frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2} \cdot E^2 \quad (\text{watt} / \text{m}^3) \quad (10)$$

となる。ただし、 E は実効値である。

3. 重畳効果の考察

2MHz に 13.5MHz の高周波を重畳した場合、2MHz 側の V_c は V_{cmin} 点よりも低いガス圧領域で低下するとともに、 V_{cmin} 点が低いガス圧側に移動することがわかった。この V_{cmin} 点では、印加高周波電界の角周波数 ω と電子とガス分子との弾性衝突に関する衝突周波数 ν が等しくなり、

$$\omega = \nu \quad (11)$$

の関係が成り立つことを既に報告した⁸⁾。 ν はガス圧、電子エネルギー、印加高周波電界の周波数などの関数であるから、重畳効果によっても影響を受けるはずであるので、プラズマ電子が高周波電界から単位体積当たり吸収する電力にも影響を与える。このため、重畳による衝突周波数 ν の変化とプラズマ電子が高周波電界から吸収する電力の変化を調べることから、重畳効果の考察を試みた。

3.1 13.5MHz 重畳電力と衝突周波数の関係

衝突周波数 ν はガス圧 p に比例することが知られている⁹⁾から、

$$\nu = \alpha p \quad (12)$$

とおける。13.5MHz を重畳した場合の 2MHz 側の放電状態の変化を調べるのであるから、(11)式より $\omega (=2\pi \times 1.95 \times 10^6) = \nu = 1.23 \times 10^7 (\text{rad/s})$ となる。

図 1 の単独放電(0watt)時の V_{cmin} 点のガス圧 $p=80\text{Pa}$ を(12)式に代入すると、 $\alpha=1.54 \times 10^5 (\text{s} \cdot \text{Pa})^{-1}$ の値が得られる。この α の値を(12)式に代入すると、2MHz 単独放電時の任意のガス圧における衝突周波数として

$$\nu = 1.54 \times 10^5 p \quad (13)$$

が得られる。重畳効果のあった低いガス圧領域から $p = 26.6 \text{ Pa}$ を選びこの値を(13)式に代入すると、このガス圧に対する衝突周波数として、 $\nu = 4.1 \times 10^6 \text{ (sec)}^{-1}$ の値が求まる。重畳する 13.5MHz の各電力に対する V_{cmin} 点のガス圧、例えば 40W 重畳時は 63.8Pa, 60W 重畳時は 57.2 Pa の値を(12)式に代入してそれぞれの α の値を求め、これらの α を用いて 26.6Pa における衝突周波数を求める。このようにして重畳する 13.5MHz の電力 P_A に対する各衝突周波数を求めて図示したのが図 3 である。衝突周波数 ν は重畳する 13.5MHz 電力 P_A の増加とともに大きくなっている。

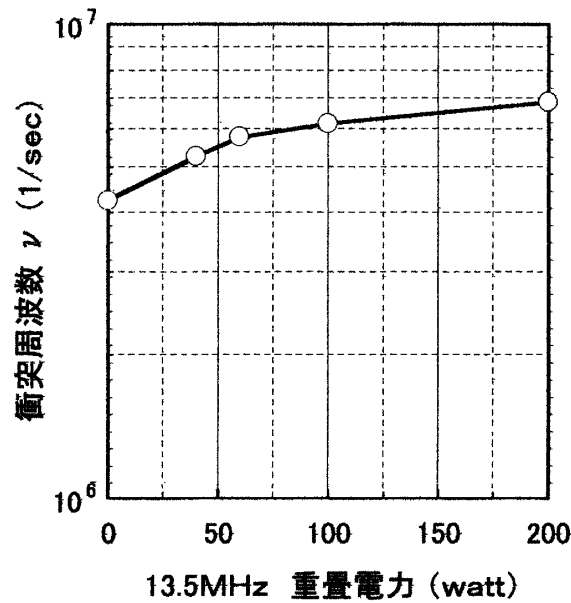


図 3. 13.5MHz 重畳電力と衝突周波数の関係

3.2 13.5MHz 重畳電力とプラズマ電子の吸収電力の関係

プラズマ電子が高周波電界から単位体積当たり吸収する電力 P は、(10)式で与えられた。それゆえ、2MHz および 13.5MHz の 2 種類の高周波電界を重畳した時、プラズマ電子が単位体積当たり高周波電界から吸収する電力は

$$P = \frac{ne^2}{m} \left(\frac{\nu}{\omega_2^2 + \nu^2} \cdot E_2^2 + \frac{\nu}{\omega_{13.5}^2 + \nu^2} \cdot E_{13.5}^2 \right) \quad (14)$$

で与えられる。ここで、添え字 2 と 13.5 は 2MHz と 13.5MHz の量を表わしている。2MHz 側での V_c の値を検討する時には、2MHz リング電極側での吸収電力を考えればよいから、(14)式の n , E_2 , $E_{13.5}$, ν の値は全て 2MHz リング電極側の値を用いればよい。13.5MHz リング電極は 2MHz リング電極の中間位置よりも離れているので、電子密度測定用の複探針を置いている

2MHz リング電極の中間位置では、(14)式右辺第1項目の E_2 は大きい、第2項目の $E_{13.5}$ は小さい。また、 ν は第1項目、第2項目とも同じ値で、その値は重畳効果によって定まる。それゆえ、2MHz リング電極の中間位置で、重畳効果の大きい $\nu < \omega_2$ のガス圧領域を考えると、 $\nu/(\omega_2^2 + \nu^2) \gg \nu/(\omega_{13.5}^2 + \nu^2)$ および $E_2 > E_{13.5}$ であるから、(14)式右辺第2項目は第1項目に比べて小さい。すなわち、2MHz 側の吸収電力を考える時には、 $E_{13.5}$ による直接の電力吸収や電離の影響は小さいから、結局(14)式の右辺第1項目だけが残るので、2MHz 側の吸収電力は添え字の2をとれば(10)式で表わすことができる。

重畳効果があった V_{cmin} 点よりも低いガス圧領域では、 $\omega > \nu$ の関係があるので、(10)式は

$$P = \frac{ne^2}{m} \cdot \frac{\nu}{\omega^2} \cdot E^2 \quad (\text{watt} / \text{m}^3) \quad (15)$$

となる。(15)式の ν に図3で図示した値を代入し、13.5MHz の重畳電力 P_A とプラズマ電子が高周波電界から吸収する電力 P の関係を計算し、図示したのが図4である。ただし、重畳する13.5MHz の各電力に対するプラズマ電子の高周波電界からの吸収電力 P_{su} を2MHz 単独放電時のプラズマ電子の吸収電力 P_0 で規格化してある。

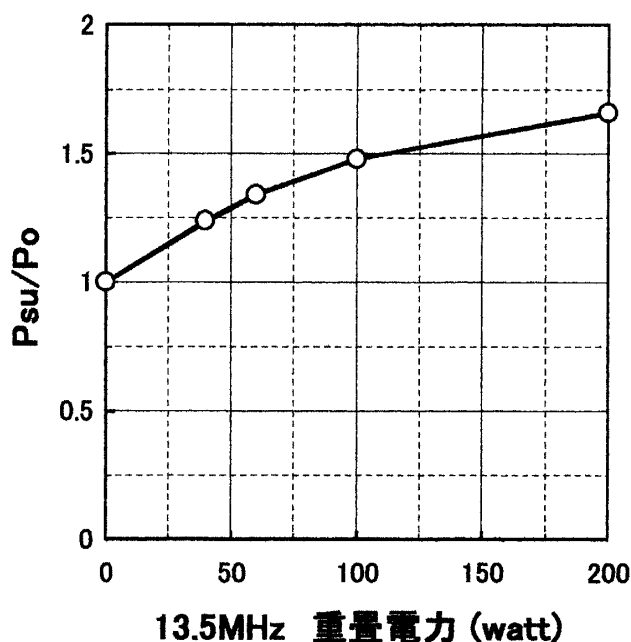


図 4.13.5MHz 重畳電力とプラズマ電子の吸収電力の関係

重畳する 13.5MHz の各電力 P_A を順次 40W から 200W まで増してゆくと、 P_{su}/P_0 は増加している。

プラズマ電子が高周波電界から吸収する電力が増加するので、電離の程度が増え、その結果電子密度も増加する。このことは、既に報告した研究紀要 35 号図 4 で図示した 13.5MHz 重畳時の 2MHz 側電子密度の実験結果とよく一致している。それゆえ、13.5MHz 電力の重畳により、

2MHz 側プラズマ電子の高周波電界からの吸収電力 P が増えるので、2MHz の単独放電開始電圧よりも小さな電圧でも、試料ガス固有の電離エネルギーを満足するようになるため、2MHz 側の V_c が低下すると考えられる。

4. 結 言

従来行ってきた単一周波数の高周波放電では、ガス圧を定めると、グロー状放電からアーク状放電へ移行する放電開始電圧の値が決まるので、高電離状態のプラズマを生成するには高出力の電源が必要となる。このため、電源の高出力化を図らずに、高電離状態のプラズマを生成する方法として、異なる2種類の高周波電界を同時に重畳して印加する方法を提案し、この方法で行った誘導結合型高周波放電についての実験結果をすでに報告した¹⁰⁾。

また、2組のリング電極にそれぞれ異なる2種類の周波数の高周波電界を印加して重畳放電を行い、誘導結合型高周波放電と放電機構や結合方法が異なる容量結合型高周波放電においても、重畳効果が生じるかどうかを調べる実験を行い、その結果を報告した¹¹⁾。実験は、隣接して配置した2組のリング電極に、2MHz と 13.5MHz の異なる2種類の周波数の高周波電界を同時に重畳して印加し、0.266Pa～266Pa のガス圧範囲で、グロー状放電からアーク状放電に放電状態が移行する2MHz 側のアーク状放電開始電圧 V_c および 13.5MHz 側のアーク状放電開始電力 P_c の測定を行った。この結果、2MHz に 13.5MHz を重畳した場合、V 字形状の放電特性の最小点 V_{cmin} よりも低い $\omega > \nu$ の条件を満たすガス圧領域で 2MHz 側の V_c が低下し、重畳効果が現れた。しかし、最小点よりも高い $\omega < \nu$ を満たすガス圧領域では重畳効果の現れ方が小さく、また 13.5MHz に 2MHz を重畳した場合のすべてのガス圧領域では重畳効果はなかった。

今回は、2MHz に 13.5MHz 高周波電力を重畳した場合、2MHz の V 字形状をした放電特性の最小点 V_{cmin} よりも低いガス圧領域で 2MHz のアーク状放電開始電圧 V_c が低下するとともに、2MHz 側の V_c の最小値 V_{cmin} の点が低いガス圧側に移動している実験結果に注目し、プラズマ電子とガス分子との弾性衝突周波数 ν とプラズマ電子が高周波電界から吸収する電力の関係から、重畳効果を説明することを試みた。

この結果、重畳する 13.5MHz 電力の増加とともに、プラズマ電子とガス分子との弾性衝突周波数 ν が増大するため、2MHz 側プラズマ電子の高周波電界からの吸収電力が増えるので、2MHz の単独放電開始電圧よりも小さな電圧でも試料ガス固有の電離エネルギーを満足するようになるため、2MHz 単独放電の V_c よりも 13.5MHz 重畳時の V_c の値が低下することが分った。

参 考 文 献

- 1)堤井信力:プラズマ基礎工学(内田老鶴圃、東京都、1986)1版、2章、p.68
- 2)高元暉夫、向山亨、長浜治男:電気学会誌、91(1971)、p.753
- 3)長濱治男、高元暉夫:真空、32(1989)、p.20
- 4)福村隆志、長濱治男、高元暉夫:電気学会論文誌、A97(1977)、p.243
- 5)長濱治男、福村隆志、高元暉夫:電気学会論文誌、A103(1983)、p.265
- 6)長濱治男、福村隆志、高元暉夫:電気学会論文誌、A108(1988)、p.51
- 7)長濱治男:福井工業大学研究紀要、第33号、第1部、(2003)33
- 8)長濱治男、福村隆志、高元暉夫:電気学会論文誌、A108(1988)、p.51
- 9)A.Von.Engel:電離気体(山本賢三、奥田孝美共訳)(コロナ社、東京、1968)4版、3章、p.51
- 10) 6)に同じ
- 11) 7)に同じ

(平成17年11月28日受理)