

## アーク状放電の移行電圧に対する 2 種類の高周波電界の重畳効果と放電形態

長 濱 治 男

Superposed effects and discharge states of kinds  
of R.F fields on the arc-like discharge transition voltage

Haruo NAGAHAMA

Effects of superposing two applied fields with different frequencies on transition voltage  $V_c$  from glow-like to arc-like R.F discharge have been studied by using  $H_2$  gas and already been reported.

This time above mentioned  $V_c$  have been studied by using the inert gas, that is, Ne, He and Ar. Furthermore, light intensities emitted from R.F discharges have been observed. As a result, it is found that brightness of lower frequency discharge space has increased extremely by adding a small amount of upper frequency discharge space.

### 1. ま え が き

円筒状の放電管に高周波発振器の高周波コイルを巻き、方位( $\theta$ )方向に  $E_1 \theta$ 、管軸( $z$ )方向に  $B_1 z$  の高周波電磁界を加える誘導結合型高周波放電は無電極放電が可能になる。この高周波無電極放電で生成されるプラズマは、近年薄膜の形成や表面改質などを行うプラズマプロセッシングの新しい分野に応用されている。しかし、応用技術が先行し、放電機構などのプラズマの基礎的性質の未解明の部分が多く残されている<sup>1)</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>2)~4)</sup>。また、高電離状態の高周波放電プラズマを生成する目的のため、周波数の異なる 2 種類の高周波電圧を同時に重畳した場合、アーク状放電移行電圧  $V_c$  が単独放電の場合と比べてどう変わるかを  $H_2$  ガスを用いて調べてきた<sup>5), 6)</sup>。

今回は、試料ガスとして He, Ne, Ar の不活性ガスを用いて 2 種類の高周波電圧を同時に重畳した時の  $V_c$  の値を測定するとともに、放電の発光状態を詳しく観察した。この結果、重畳する周波数の大きさにより  $V_c$  に対する重畳効果に違いが生じ、この違いは放電の発光状態から定性的によく説明できること、また  $V_c$  低下の現象はガスの種類に無関係であり、重畳する周波数の大小に係ることがわかったので、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は実験に用いた放電管および1 MHz, 13.5MHz発振器の略図である。放電管は内径が30mmφ, 長さ80cmの石英ガラス管で, その両端は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。1 MHzコイルは10巻き, 13.5 MHzコイルは8巻きである。両方の高周波放電が放電管の同じ位置で発生することが望ましいが, 両コイルを重ねて巻くことは実験上難しいので, 図のように隣り合わせて巻いてある。複探針は電子温度, 電子密度などの測定に

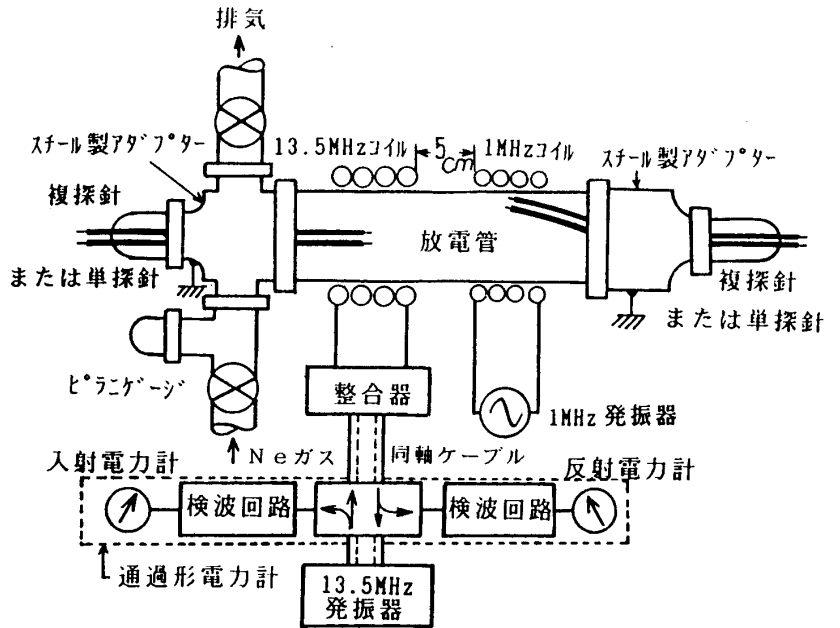


図-1 実験装置

用いる。単探針はイオン電流を測定する時に用いる。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2 mm, 直径 0.5mmφ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。

実験を行う前に油拡散真空ポンプで放電管全体を $10^{-5}$ Torr程度に排気した後, 試料ガスとして用いる不活性ガス(純度99.999%のHe, Ne, Ar)を実験ごとに所定のガス圧に封入する。そして, 1MHzに13.5MHzを重ねる場合は, どのガス圧でも重畳する13.5MHzの高周波発振器の出力電力(放電管への入射電力 $P_{13.5}$ )が一定になるように出力調整して保ち, この状態で1 MHz高周波電圧を上昇してゆき1 MHzのアーク状放電が発生する移行電圧 $V_c$ を各ガス圧ごとに測定する。 $V_c$ の測定は, 1 MHzコイル両端電圧を高周波用高圧分圧器(入出力比, 200:1)で分圧した後, シンクロスコープでアーク状放電が発生した時の振幅の大きさ, すなわち瞬時電圧を測定している。

放電の発光状態を観察する場合は, ガス圧を一定および1 MHz単独放電ではアーク状放電が発生しない程度の一定電圧に調整し, 重畳する13.5MHzの入射電力 $P_{13.5}$ を0から上昇してゆきながら, 放電の発光状態の変化を放電管軸の真上から写真撮影する。

13.5MHzに1 MHzを重ねる場合には, 先の順序を逆にして重畳する1 MHzのコイル端子電圧を一定にして先に印加し, 次に13.5MHzの入射電力を徐々に加えてゆき, 13.5MHzコイル側でアーク状放電が発生する移行電力 $P_c$ を測定する。 $P_c$ の測定は, 通過形電力計の入射電力の検波波形でアーク状放電の発生をシンクロスコープで観察し, アーク状放電発生時の入射電力の瞬時値を入射電力計から測定している。放電状態の写真撮影は先の説明と周波数の順序を逆にして行う。

## 3. 実験結果

### 3.1 1 MHzに13.5MHzを重ねた場合の $V_c$ の変化

ガス圧 $p$ を一定にし, まず通過形電力計で測定した13.5MHzの電力をある一定値だけ印加する。

次に、1 MHzコイル端子電圧を徐々に上昇してゆき、1 MHzコイル直下に挿入した探針で測定したイオン電流が急増する時のコイル端子電圧 $V_c$ 測定する。重畳する13.5 MHzの電力を順次変化させ、これをパラメータとして1 MHz側の $V_c$ を測定し、さらにガス圧および試料ガスを変えて行くと図2～図4が得られる。図2、3、4はそれぞれ試料ガスがNe、He、Arガスでの $V_c$ の測定結果である。いずれの図も、1 MHz単独放電の場合の $V_c$ の最小値 $V_{cs}$ で規格化し、縦軸として $V_c/V_{cs}$ をとっている。いずれの図からも明らかなように、1 MHz側の $V_c$ は最小点 $V_{cs}$ より低いガス圧領域で低下し、13.5 MHzの重畳効果が著しく現われている。しかし、最小点よりもガス圧の高い領域では

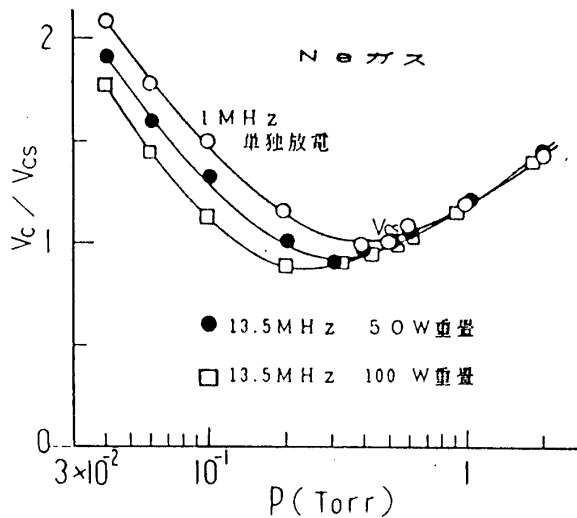


図-2 13.5 MHzの重畳による1 MHz側 $V_c$ の低下(Neガス)

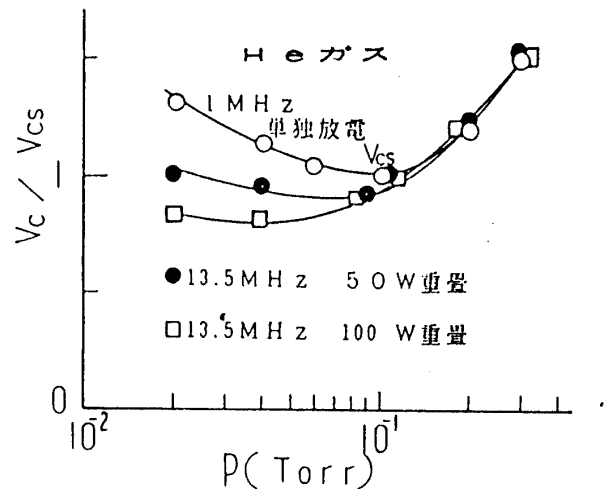


図-3 13.5 MHzの重畳による1 MHz側 $V_c$ の低下(Heガス)

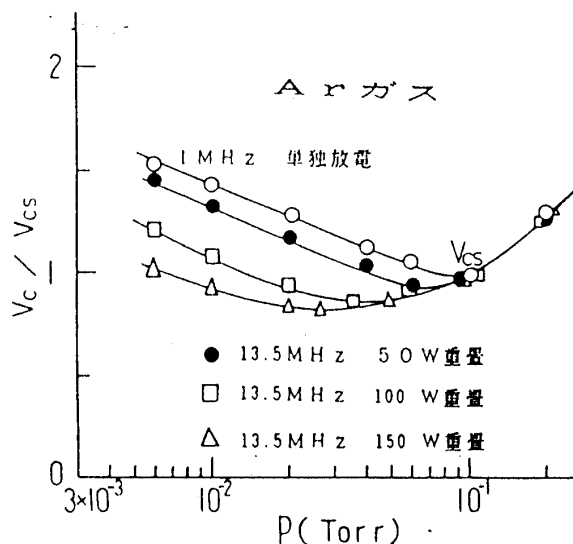


図-4 13.5 MHzの重畳による1 MHz側 $V_c$ の低下(Arガス)

ほとんど $V_c$ は低下せず、13.5 MHzの影響はない。また、 $V_c$ の最小点 $V_{cs}$ のガス圧はNeガスが高く、HeとArガスが低い。

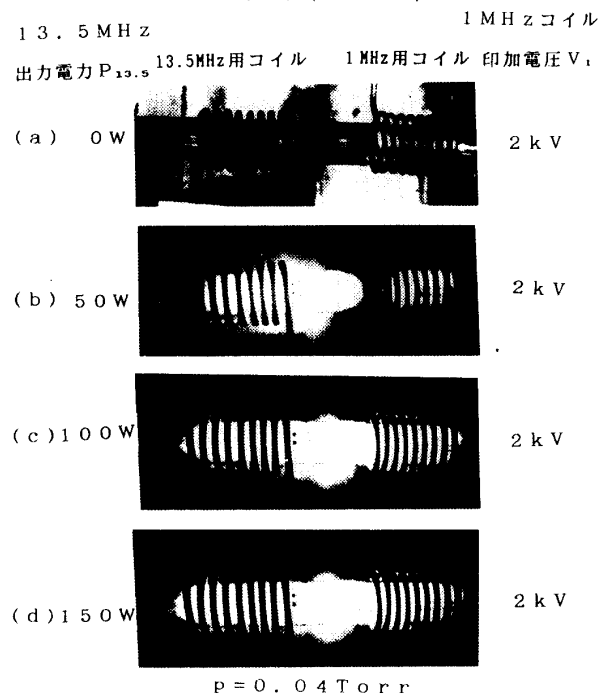


図-5 13.5 MHz重畳時の1 MHz側放電の発光状態の変化 (Neガス,  $p=0.04$  Torr)

### 3.2 1 MHzに13.5MHzを重ねた場合の放電状態の変化

図5はNeガス、ガス圧 $p = 0.04\text{Torr}$ とし、1 MHzコイルの印加電圧 $V_1$ を2 kV一定に保ち、重ねる13.5MHz高周波電力 $P_{13.5}$ を0から150Wまで変化させた場合の、重ねる側の放電領域の伸び具合と1 MHz側の発光状態の変化を見たものである。(a)図は1 MHz単独放電で、ほとんど発光がなく極めて弱いグロー状放電の場合である。 $P_{13.5}$ を50W重ねる((b)図)と、13.5MHzコイルの中央付近から1 MHzコイルの左端にかけて強い発光が見られる。 $P_{13.5}$ を100 W重ねる((c)図)と、強い発光領域は1 MHzコイル全体にまで伸びてゆき、1 MHzコイル側でも強い発光の放電を発生させている。このことは、1 MHz側で著しい重ね効果が現われていることを示しており、図2の低ガス圧領域で $V_c$ が低下することと一致している。 $P_{13.5}$ を150Wにする((d)図)と、1 MHz側の発光はかえって少し弱まっている。 $P_{13.5}$ をこれ以上増加しても傾向は同じである。

図6は、図2で $V_c$ が低下せず重ね効果のないガス圧から $p = 0.8\text{Torr}$ を選び出し、図5と同様にNeガスを用い $V_1$ を一定にし、 $P_{13.5}$ を変化させた場合の発光の状態を見たものである。この場合には、13.5MHz側の発光強度は重ねる $P_{13.5}$ の増加とともに少しずつ強くなり、かつ強い発光の放電領域は1 MHz側へ伸びているが、それにもかかわらず1 MHz側の発光は図5のように強くなり、ほとんど一定である。それゆえ、図2で $V_c$ が低下せず重ね効果のない結果と同じ傾向である。

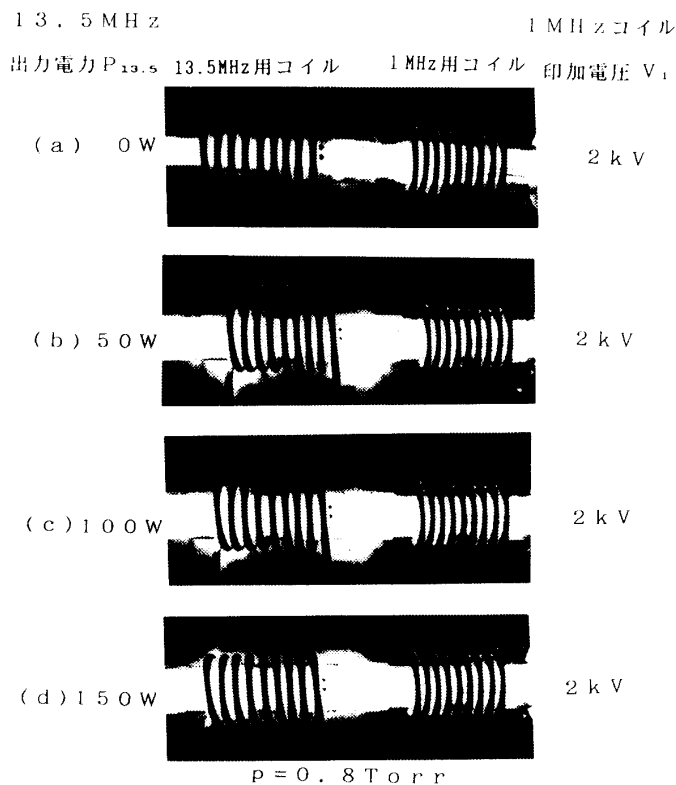


図-6 13.5MHz重ね時の1 MHz側放電の発光状態の変化  
(Neガス,  $p=0.8\text{Torr}$ )

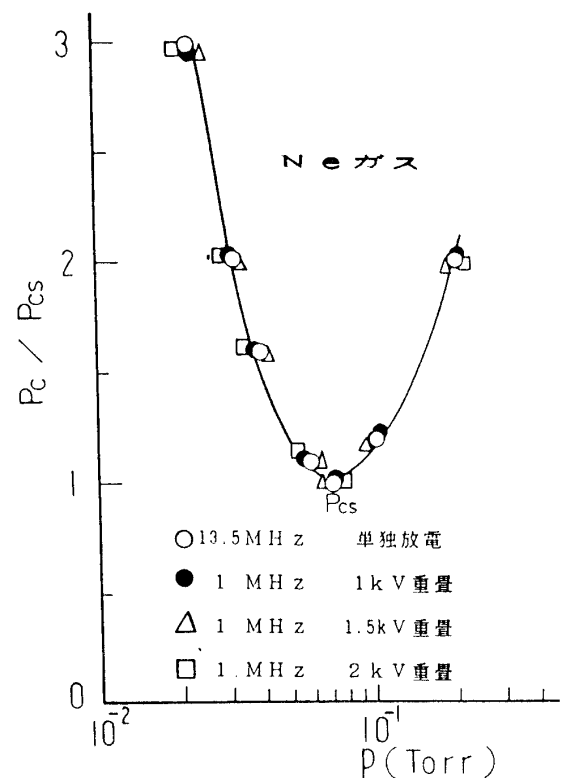


図-7 1 MHzの重畳による13.5MHz側  $P_c$ の低下 (Neガス)

### 3.3 13.5MHzに1MHzを重ねた場合の $P_c$ の変化

3.1節で述べた周波数の順序を入れ替えて、重畳する1MHzのコイル端子電圧を一定にして先に印加し、次に13.5MHzの電力 $P_{13.5}$ を徐々に上昇してゆき、13.5MHzコイル直下に挿入した探針で測定したイオン電流と13.5MHz側のアーク状放電移行電力 $P_c$ （アーク状放電が発生した時の $P_{13.5}$ の値）をNe, He, Arガスで測定した結果が図7, 8, 9である。いずれの図も縦軸は $P_c$ の最小値 $P_{cs}$ で規格化し、 $P_c/P_{cs}$ で目盛ってある。この場合には、いずれの図からも明らかなように、13.5MHz側の $P_c$ はすべてのガス圧領域で低下せず、重畳効果のないことがわかる。 $V_c$ の最小点 $V_{cs}$ のガス圧はNe, He, Arガスの順に低いガス圧側へ移動している。

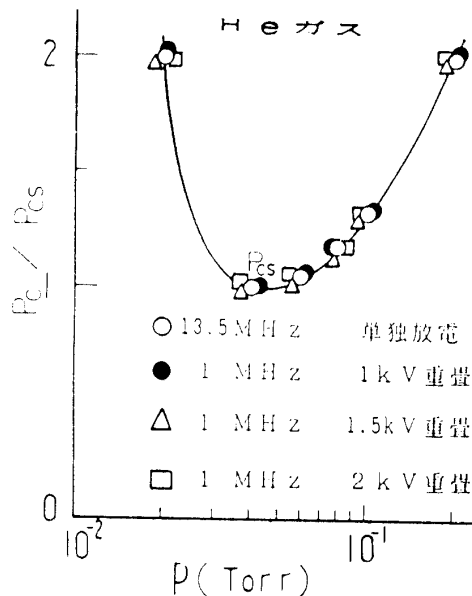


図-8 1 MHzの重畳による13.5MHz側 $P_c$ の低下 (Heガス)

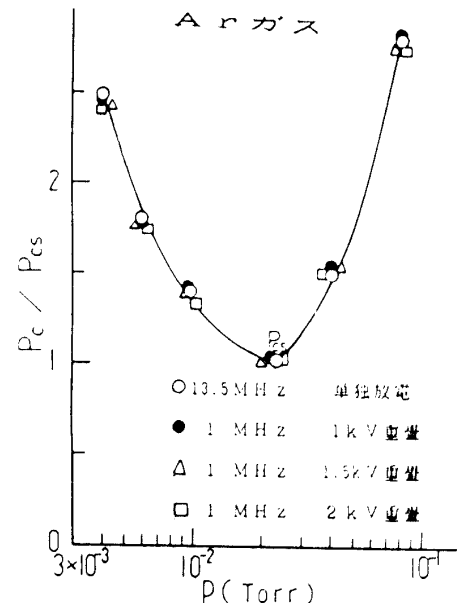


図-9 1 MHzの重畳による13.5MHz側 $P_c$ の低下 (Arガス)

### 3.4 13.5MHzに1MHzを重ねた場合の放電状態の変化

図10はNeガス、ガス圧 $p = 0.02$ Torrにおいて、 $P_{13.5}$ を80W一定に保ち、重畳する1MHzのコイル端子電圧を0から2.5kVまで変化させた場合の放電状態の変化を見たものである。(a)図は13.5MHz単独放電の場合で、13.5MHz側で強い発光の放電が生じている。1MHzのコイル端子電圧 $V_1$ を1kV印加する((b))図と、1MHz側で強い発光の放電が生じる。しかし、13.5MHz側の発光の強さは強いままで変化はない。

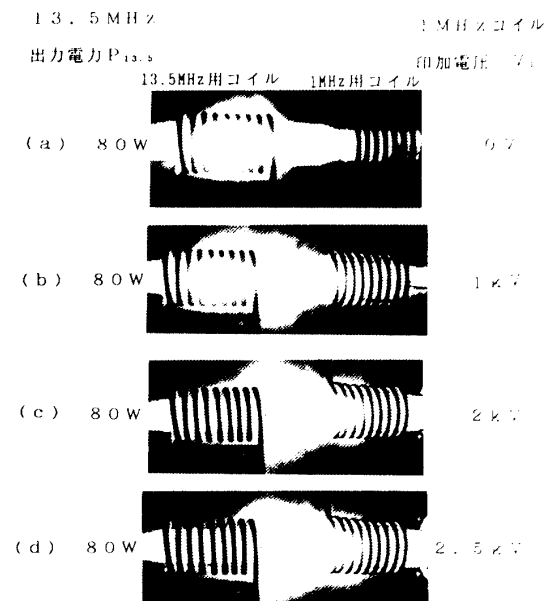


図-10 1 MHz重畳時の13.5MHz側放電の発光状態の変化 (Ne,  $p=0.02$ Torr)

さらに  $V_1$  を 2.5kV まで重畳してゆくと、1 MHz 側の発光は少しずつ強くなっている。しかし、13.5MHz 側の発光の強さはほとんど変わらない((a)~(c)図)。しかし、 $V_1$  が 2.5kV に増加すると、13.5MHz 側の発光はかえって少し強くなる((d)図)。このことは、図 7 で 13.5MHz 側の  $P_c$  がほとんど低下せず、重畳効果がないことと一致している。

#### 4. 重畳効果についてのまとめ

1 MHz および 13.5MHz の 2 種類の周波数の高周波電圧を重畳して印加した場合の  $V_c$ 、 $P_c$  の測定結果および放電形態の観察結果をまとめると、

- (1) 低い周波数に高い周波数を重畳した場合の低ガス領域では、重畳する電力の増加とともに低い周波数側の発光が極めて強くなり、著しい重畳効果が現われ、 $V_c$  が低下する (図 2, 3, 4, 5)。
- (2) しかし、上記(1)の高いガス圧領域では、重畳する電力の増加とともに強い発光の放電が低い周波数側に伸びていっているにもかかわらず、低い周波数側の放電はほとんど変わらず、重畳効果は現われないので、 $V_c$  はほとんど変化しない (図 2, 3, 4, 6)。
- (3) 高い周波数に低い周波数を重畳した場合、重畳する低い周波数のコイル端子電圧を増加しても高い周波数側の放電の発光の強さは余り変わらず、この場合ガス圧のすべての領域で重畳効果が現われず、従って  $P_c$  は変化しない (図 7, 8, 9, 10)。
- (4) 重畳する電力 (または電圧) が大きくなりすぎると、放電はかえって抑制される傾向にある (図 5 (d) の 1 MHz 側, 図 10 (d) の 13.5MHz 側)。

#### 5. 結 言

高電離状態の高周波放電プラズマを生成する研究目的のため、1 MHz と 13.5MHz の 2 種類の高周波電圧を同時に印加して重畳した場合の、高周波放電の放電形態および移行電圧  $V_c$  (または  $P_c$ ) に対する 2 種類の高周波電圧の重畳効果について、Ne, He, Ar の不活性ガスを用いて実験を行った。この結果、従来からの試料ガスの  $H_2$  ガスの実験結果と同様に、

- (1) 1 MHz に 13.5MHz を重畳した場合の低ガス圧領域で、 $V_c$  が低下し、著しい重畳効果があった。
- (2) 1 MHz に 13.5MHz を重畳した場合の高ガス圧領域および 13.5MHz に 1 MHz を重畳した場合のすべてのガス圧領域で、 $V_c$  および  $P_c$  は低下せず、重畳効果はなかった。
- (3) 重畳効果の現われ方は、活性、不活性というガスの化学的性質には無関係であり、周波数の大小に関係する。

以上の重畳効果の現象を放電形態の観察から定性的に説明できた。

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曄夫博士に感謝の意を表わします。

# 参 考 文 献

- 1) 堤井信力 : プラズマ基礎工学(内田老鶴圃,1986), p.239
- 2) 高元, 向山, 長濱: 電気学会誌 91(1971), p.753
- 3) 福村, 長濱, 高元: 電気学会論文誌 A97(1977), p.243
- 4) 長濱, 福村, 高元: 電気学会論文誌 A103(1982), p.265
- 5) 長濱, 福村, 高元: 電気学会論文誌 A105(1985), p.381
- 6) 長濱, 福村, 高元: 電気学会論文誌 A108(1988), p.51