

Tonks-Dattner 共振における共振維持放電

砂盛 諭*, 池沢俊治郎*, 中野 伸平*

Resonantly Sustained HF Discharge of Tonks-Dattner Resonances

Satoshi SUNAMORI*, Shunjiro IKEZAWA* and Shinpei NAKANO*

(Received September 10, 1975)

The resonance behavior of a plasma column subjected to a high power VHF wave was studied. The resonance behavior was characterized by the appearance of a hysteresis. The electron density in an upper region of the hysteresis is larger than that in a lower region of the hysteresis. We could obtain the value of the electron density and the electron temperature in these regions by means of the double probe. A rise of the electron temperature was reasonably explained by the theoretical analysis. We calculated the absorbed power and the absorbed loss, and could measure the amount of the increase of the electron density from these calculation. The experimental results were qualitatively in agreement with those reasoned through the theoretical calculation.

§.1 はじめに

従来、マイクロ波の低い入射電力レベル(2~3 mW)におけるプラズマ柱の Tonks-Dattner (T-D) 共振特性が研究されてきた。そこでは $\omega \approx \omega_p$ (ω_p : プラズマ電子角周波数) で効率よく高周波電力が吸収される。また比較的高い入射電力レベル(約100mW)に対するプラズマ柱のふるまいも研究されている。その共鳴は共振持続モード (Resonantly sustained mode) と呼ばれ, Leprince らにより研究されてきた。その理論的解析において電子温度の上昇が考慮されていない。¹⁾ そこで本研究では高い入射電力の VHF 波(数w: 122MHz, 数十w: 413MHz)を用いて、分割電極により高周波を導入し、高い入射電力に対して生じる発光強度のヒステリシスを観測した。²⁾ 同時にダブルプローブを用いて、電子温度と電子密度を測定した。測定した電子温度上昇の効果をパワーバランスの関係式に代入して得た理論値(吸収パワー対電子密度)は実験値と定性的に一致した。本研究のように、従来小電力レベルでよく解明してい

る T-D 共振を高周波電力の吸収という観点から研究した例は著者らの知る限りでは見当たらない。即ち、高密度プラズマ源の生成という観点から、吸収電力、周波数、電子密度との関係が明らかにされた。本研究の結果は強力レーザ光による高密度プラズマ生成の際の基礎資料として役立つであろう。

§.2 理論

直流電源の入力による吸収パワー密度 P_{DC} は

$$P_{DC} = \frac{\nu_c}{\epsilon_0 \omega^2 p_0} J^2 \quad (1)$$

となる。ただし、 ν_c は電子—中性粒子の衝突周波数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ω_{p0} は高周波を加えない時のプラズマ角周波数、 J は直流電流密度である。入力高周波の外部電界 E_0 により共鳴吸収が生じプラズマの内部には電界 E_i が生ずる。¹⁾

$$E_i^2 = \frac{\omega^4}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \nu_c^2 \omega^2} E_0^2 \quad (2)$$

ω は入力高周波の角周波数、 ω_r は Tonks-Dattner 共振周波数で $\omega_r = K\omega_p$ (K は定数) の関係にある。(1) 式よりプラズマの抵抗率 ρ は

*電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

$$\rho = \frac{\nu_c}{\epsilon_0 \omega_p^2} \quad (3)$$

で, 実効内部電界 $E_e^{(s)}$ は $\nu_c^2 \ll \omega^2$ を考えて

$$E_e^2 = E_i^2 (\nu_c^2 / \omega^2) \quad (4)$$

なので, 高周波パワー密度 P_{AC} は (2)(4) 式より

$$\begin{aligned} P_{AC} &= E_e^2 / \rho \\ &= \frac{\nu_c \epsilon_0 \omega_p^2 \omega^2}{(\omega_r^2 - \omega^2)^2 + \nu_c^2 \omega^2} E_o^2 \\ &= \frac{\nu_c \epsilon_0 \omega_p^2 \omega^2}{(K^2 \omega_p^2 - \omega^2)^2 + \nu_c^2 \omega^2} E_o^2 \end{aligned} \quad (5)$$

これらの直流と高周波の入力パワーの和 ($P_{DC} + P_{AC}$) は損失 P_L に等しくなければならない。 P_L は

$$P_L = (\omega_p^2 m \epsilon_0 / e) \nu_i (V_i + 8T_e + \sum \xi_x V_x) \quad (6)$$

で表わされる。¹⁾ m , e はそれぞれ電子の質量, 電荷で, V_i は電離電圧, $\sum \xi_x V_x$ は励起電圧の和である。 ν_i は単位時間あたり1個の電子により生ずる電離数で, Tonks-Langmuir の自由落下の理論⁴⁾ より

$$\nu_i = \frac{0.772}{R} \left(\frac{2kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

(7)式で, R は放電管の管内半径, k はボルツマン定数, T_e は電子温度, m_i はイオン質量である。前述の条件より

$$P_{DC} + P_{AC} = P_L \quad (8)$$

が成立しなければならない。高周波のパワーバランスと直流のパワーバランスの式はそれぞれ次式となる。

$$P_{AC} = P_L - P_{DC} \equiv P'_L, \quad P_{DC} \equiv P_{LDC} \quad (9)$$

P_{LDC} は直流電流だけが存在する時の損失であり, (6)式の ω_p を ω_{p0} に変えて

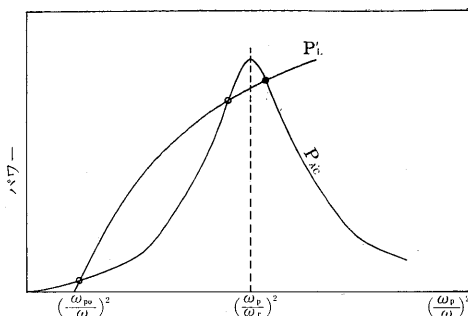
$$P_{LDC} = (\omega_{p0}^2 m \epsilon_0 / e) \nu_i (V_i + 8T_e + \sum \xi_x V_x) \quad (10)$$

となる。(6)(9)(10)式より高周波の損失は次式で表わされる。

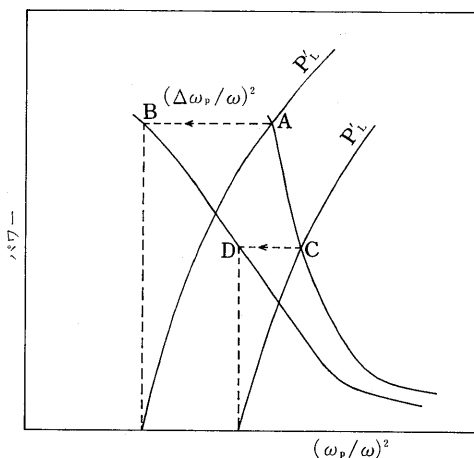
$$\begin{aligned} P'_L &= P_L - P_{LDC} \\ &= (\omega^2 m \epsilon_0 / e) \nu_i (V_i + 8T_e + \sum \xi_x V_x) \\ &\quad \times (\omega_p^2 - \omega_{p0}^2) / \omega^2 \end{aligned} \quad (11)$$

(5)(6)式の概略をグラフで示すと第1図のようになる。

(9)式の第1式の条件が成立するのは, 2つの曲線の交点であるが, 吸収が増すと損失としての密度が増加する交点のみが物理的に意味があり安定である。(9)式第2式の $P_{DC} \equiv P_{LDC}$ が成立するのは P'_L が零の時である。この様子を第2図に示す。すなわち, 図中のAがBに, CがDに移り, AB, CDの長さから高周波のパワー入力に対するプラズマ密度が求まる。すなわち, この長さを ℓ , 密度を n とすれば



第1図 吸収パワーと損失●点のみが安定



第2図 電子密度の増加

$$\ell = \left(\frac{\Delta \omega_p}{\omega} \right)^2 = \left(\frac{\Delta f_p}{f} \right)^2 \quad (12)$$

$$\Delta f_p = 8.9 \sqrt{\Delta n} \quad (13)$$

なので

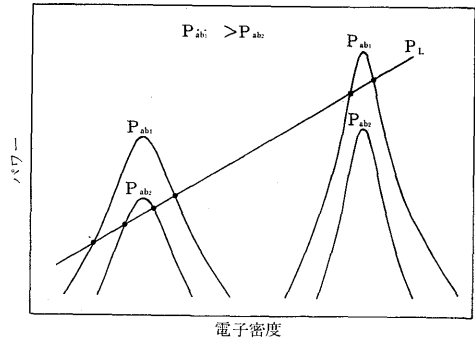
$$\Delta n = 0.0126 \ell f^2 \quad (14)$$

となる。 ℓ はパワーの増加関数であり, 電子温度の減少関数でもある (第2図)。(14)式は共振維持放電におけるプラズマ密度の上昇を示す。

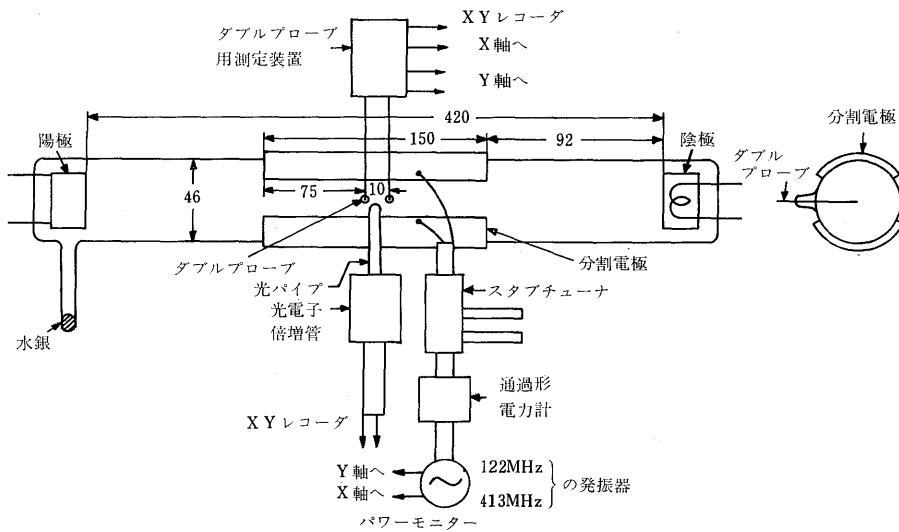
さて, 大電力の高周波入力に対するプラズマ円柱は強い非線形現象, ヒステリシス現象を示す。この意味から共振維持モード (Resonantly Sustained mode) と呼ばれる。この現象のできる原因は物理的に第3図で説明できる。入射パワーが増すと共振ピークは大きくなるが, 密度は余り増大せず, 共振ピークがある程度まできて電離が生ずると急に損失が増大し隣接する共振ピークに移る。パワーを減らすと共振ピークの減少が著しく, ついには交点がなくなり共振の項から隣の共振へジャンプする。これがヒステリシスのできる原因である。

§.3 実験結果と解析結果

第4図に実験装置を示す。放電管は陽極と陰極間間隔：42cm，管内半径：2.3cmの水銀封じ切り管で，その中央部には，高周波導入用の長さ：15cm，幅：3.8cmの銅板製の分割電極が2枚，ガラス管管壁に密着させてある。この電極により，122MHz，または413MHzの発振器から電力が，スタブチューナーによる整合回路を通して入射される。吸収パワーは通過形電力計によって測定される。すなわち，進行波と反射波の電力の差である。この電力は，発振器の終段管の+B電源用トランスの一次側電圧によってモニターされる。この電力モニターはX-



第3図 ヒステリシスのできる理由



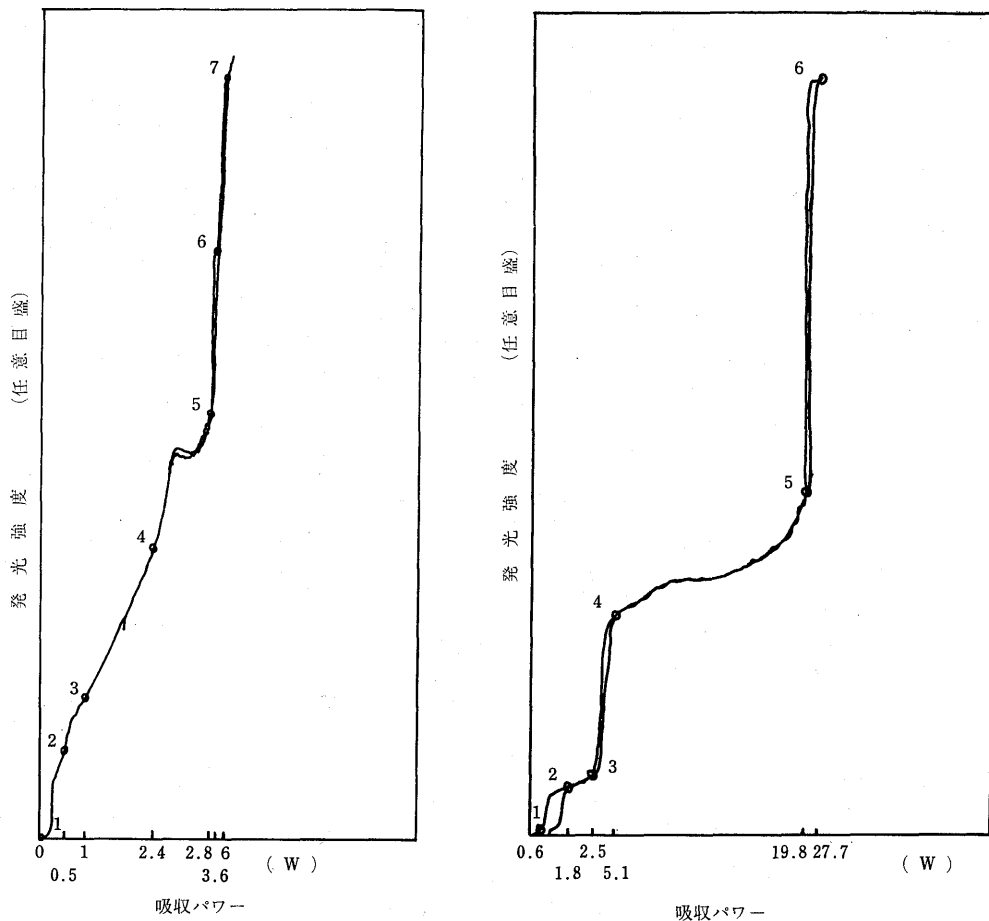
第4図 実験装置

YレコーダーのX軸へ入力される。ガラス管管壁に垂直に取り付けられたライトパイプは放電の発光強度を測定するためのもので光電子増倍管により電気信号に変換された出力はY軸へ入力される。電子温度，電子密度はダブルプローブ法により測定する。

直流電源により水銀陽光柱プラズマを生成し，その放電電流が122MHzの場合60mA，413MHzの場合50mA一定となるように調節し，高周波電力を増減してできたのが第5図である。図中の番号で示すように1と2の間，5と6の間で発光強度は吸収パワーに対してヒステリシス現象を示す。これらは高周波入力が零の場合のT-D共振と対応していることが第6図との対応によりわかる。第5図中の番号を付けてある点で，電子温度，密度をダブルプローブにて測定した。その結果を第7図に示す。これらの結果を(6)式，および(11)式より得られる電子温度の上昇を考慮した式

$$P'_L = \frac{\omega^2 m \epsilon_0 v_i}{e} \left[(V_i + 8T'_e + \sum \xi_x V_x) \left(\frac{\omega p}{\omega} \right)^2 - (V_i + 8T_e + \sum \xi_x V_x) \left(\frac{\omega p_0}{\omega} \right)^2 \right] \quad (15)$$

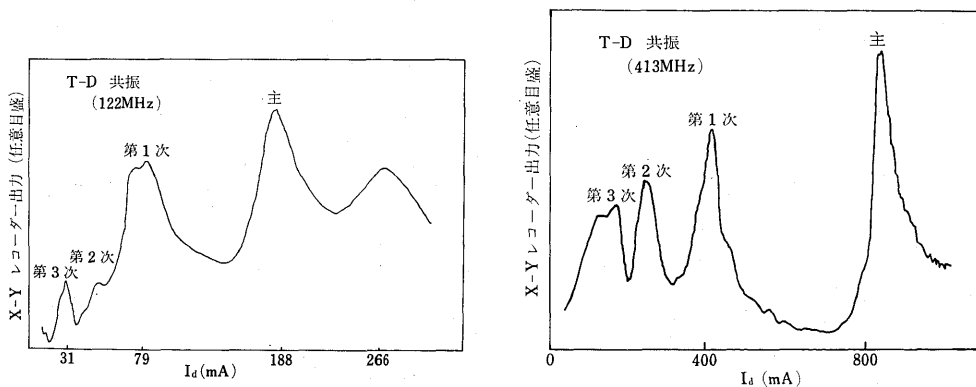
に代入して計算機で計算しグラフにしたのが第8，9図である。ただし， T'_e は第1図における $(\omega p/\omega)^2 > (\omega p/\omega_r)^2$ の領域での上昇した電子温度である。すなわち， T_e ， T'_e はそれぞれヒステリシス現象通過前（例えば第5図で番号5）と通過後（例えば第5図で番号6）の電子温度である。これらを計算するにあたり， $v_0 = n_0 \sigma_0 \bar{v} = 2.42 \times 10^7 \text{ Hz}$ ， $V_i = 10.4 \text{ V}$ ， $\sum \xi_x V_x = 31.9 \text{ V}$ とした。 n_0 は中性粒子の密度， σ_0 は衝突断面積 $\sigma_0 \approx \pi r^2$ （ r ：中性粒子の半径）で， $\bar{v}$ は電子の平均速度 $\bar{v} \approx (8kT_e)^{1/2}/(\pi m)^{1/2}$ である。これらの計算を各周波数のTonks-Dattner共振の主モードおよび第3次モードについて行なった。主モードは第5図(a)，(b)の番号5-6，第3次モードは第5図(a)，(b)の1-2に対応している（第6図）。第8，



第5図 吸収パワーと発光強度

(a) 122MHz Y軸入力感度 20mV/cm

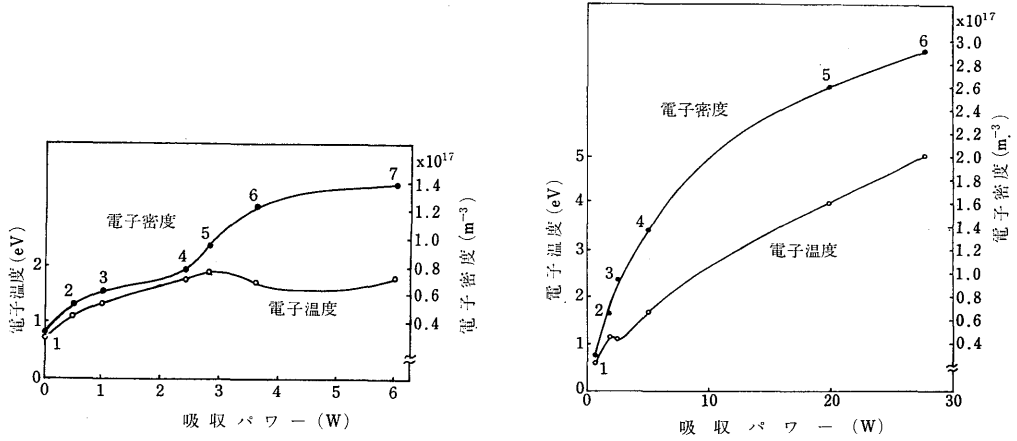
(b) 413MHz Y軸入力感度 0.1V/cm



第6図 Tonks-Dattner 共振

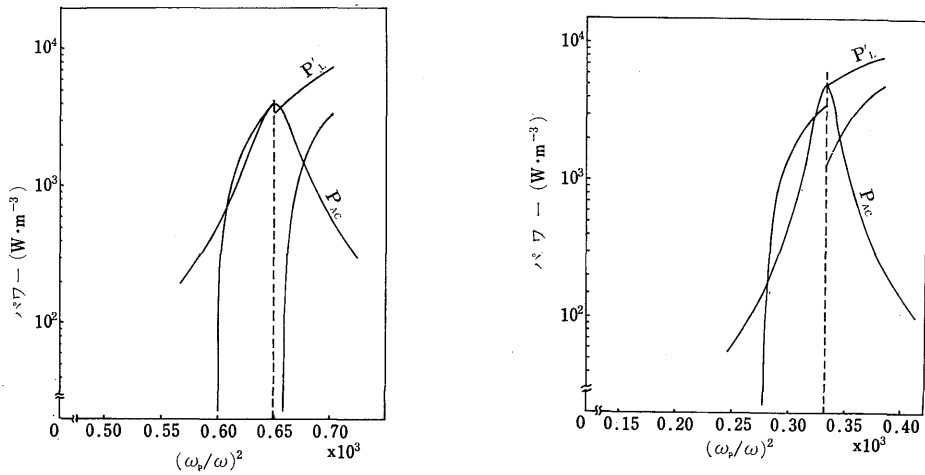
(a) 122MHz

(b) 413MHz



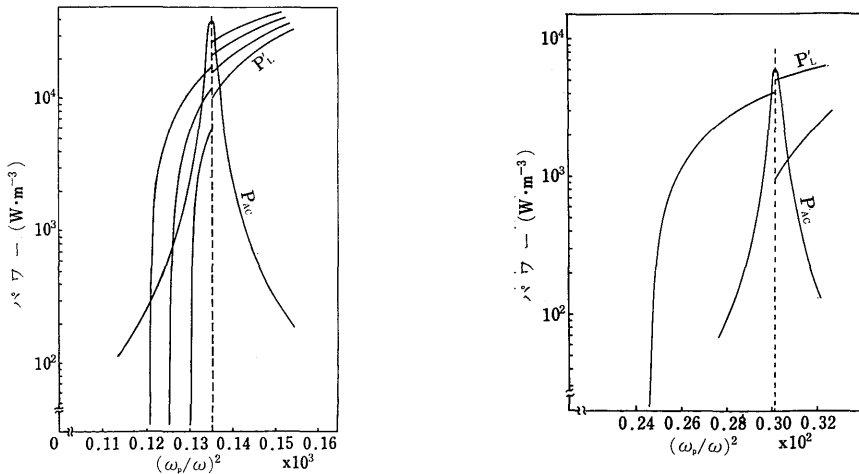
第7図 吸収パワーと電子温度, 密度

(a) 122MHz
(b) 413MHz



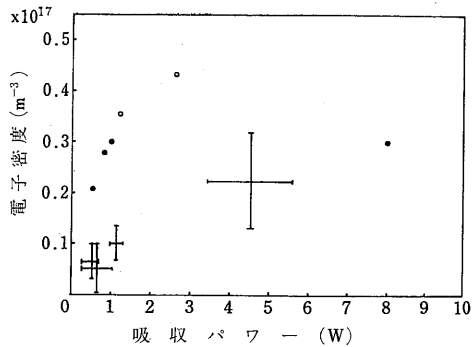
第8図 122MHzの計算機解

(a) 主モード (b) 第3次モード



第9図 413MHzの計算機解

(a) 主モード (b) 第3次モード



第10図 ヒステリシスによる密度増加の実験値と計算機解より求めた値
 ● : 122MHzの実験値
 ○ : 413MHzの実験値
 ⊕ : 計算機解

9 図より(14)式を用いて電子密度を求めて得られたのが第10図に計算機解として示してある。また同図には実験値を丸印で示し、第7図(a), (b)より求めた各ヒステリシス領域での電子密度の上昇分を、吸収パワーの上昇分に対してプロットした。

§.4 考 察

プラズマ周波数と電子密度の関係は(13)式に示したように $f_p = 8.9\sqrt{n_e}$ で、 $f \approx Kf_p$ なので、 $n_e \propto f^2$ の関係にある。122MHz, 413MHz の場合の密度の比は

$$\frac{n_{e413\text{MHz}}}{n_{e122\text{MHz}}} = \left(\frac{413}{122}\right)^2 \approx 11$$

となる。第5図(a), (b)の主モード(番号5—6)を比較す

るとヒステリシスの大きさは、122MHzの場合は $20\text{mV/cm} \times 4.2\text{cm} = 0.084\text{V}$ 、413MHzの場合は、 $0.1\text{V/cm} \times 8.6\text{cm} = 0.86\text{V}$ となり、したがっておよそ入力周波数の比の2乗になっている。しかし、密度は第7図(a), (b)それぞれの番号5—6を比較するとわかるようにほとんど上昇していない。この結果を用いて計算したので、第10図に示すように計算値と実験値が一致していない。ダブルプローブ法で用いた X-Y レコーダの高周波電界による誤動作が原因と思われる。

§.5 まとめ

この研究は、プラズマ柱に高周波電力を吸収させ、その密度の上昇が、加えた高周波の周波数および電力といかなる関係にあるかを調べようとしたものである。その結果には電子温度の上昇を考慮したという点で意義がある。

§.6 謝 辞

本論文を査読審査くださいました名古屋大学教授奥田孝美先生に謝意を表します。また放電管を製作してくださいました名古屋大学工学部森光雄氏に感謝致します。

文 献

- 1) P. Leprince, G. Matthieussent and W. P. Allis : J. Appl. Phys. 42, 412 (1971).
- 2) 池沢俊治郎, 奥田孝美, 田中裕二, 高村秀一 : 電気学会論文誌 93-A, 29 (1973).
- 3) 奥田孝美 : 「気体プラズマ現象」 p.129 コロナ社 (昭39).
- 4) 放電ハンドブック p.116 電気学会 (昭49).