

# ボルツマン方程式による3成分混合ガス ( $N_2/SF_6/c-C_4F_8$ ) の電子スウォームパラメータ解析 (II)

森田浩三\*・岡部昭三\*<sup>2</sup>

## Analysis of Electron Swarm Parameters in Ternary Gas Mixtures ( $N_2/SF_6/c-C_4F_8$ ) by Boltzmann Equations (II)

by

Kozo MORITA and Shozo OKABE

(Received on Sept. 20, 1991)

### Abstract

It is well known that the ternary gas mixtures, comprised of  $N_2$ ,  $SF_6$ , and  $c-C_4F_8$ , have excellent dielectric characteristics under both uniform and non-uniform fields. Electron swarm parameters such as ionization coefficients and electron attachment coefficients for the gas mixtures have been calculated by a Boltzmann equation to investigate basic physical processes in these gases. The authors have already reported that the electron attachment properties of the gas mixtures are basically dependent on the synergistic behavior between  $SF_6$  and  $c-C_4F_8$ . In this paper, the authors analyze and discuss the electron swarm parameters of the gases, to study the effect of  $N_2$  mixture ratios. The question is which ratio, 60, 70, or 80 percent, is better for use as practical electric insulating gas. It is found the more the  $N_2$  ratio increases, the less electron attachment decreases, and the less the  $N_2$  ratio decreases, the more electron attachment increases, because of synergisms of  $SF_6$  and  $c-C_4F_8$  increasing. As a result, this analysis predicts the desirable ratios of  $N_2$  may be near or less 70 %.

**Keywords:** *Electron swarm parameters, Boltzmann equations, Ternary gas mixtures,  $N_2$ ,  $SF_6$ ,  $c-C_4F_8$ , Electron attachment*

### 1. はじめに

高電圧電力機器のガス絶縁媒体として、現在  $SF_6$  ガスが広く使用されている。しかしながら、 $SF_6$  は不平等電界下や導電性粒子の混入による絶縁耐力の低下、あるいは寒冷地における液化の問題といった欠点が指摘されて

いる。著者らは、このような  $SF_6$  の欠点を補完する代替ガスとして、 $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  の3成分混合ガスに注目している。すなわち、 $N_2$  の混合割合を70%として僅かな  $c-C_4F_8$  を混合した3成分混合ガスが、広義の相乗作用を呈する  $N_2/SF_6$  (70/30%) の2成分混合ガスよりも、平等電界および不平等電界下において高い絶縁耐力を示

\* 工学研究科修士課程電気工学専攻    \*<sup>2</sup> 工学部電気工学科教授

し, SF<sub>6</sub> 単一ガスや2成分混合ガスよりも高い圧力範囲までコロナ安定化作用が及ぶことを実験により確認し, 報告している<sup>1)</sup>.

そこで, 著者らは N<sub>2</sub> の混合割合を70%一定とした場合の3成分混合ガスの電子スウォームパラメータをボルツマン方程式により算出し, 3成分混合ガスの放電基礎過程ならびにその絶縁特性を検討し, その結果を報告した<sup>2), 3)</sup>. ここでは, N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 混合ガスにおける絶縁耐力向上の機構は, N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> の2成分混合ガスに c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> が混合されることによって, これが SF<sub>6</sub> 成分の電子付着係数を効果的に増加させる形で作用しているということを明らかにした.

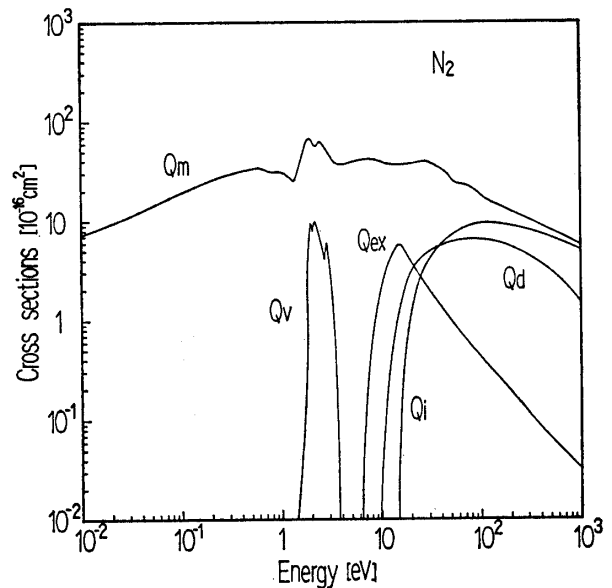
ところで, このような3成分混合ガスの絶縁特性はその成分ガスの混合割合によって大きな影響を受ける. また, 実用的な混合ガスとしてこれらの最適な混合割合を決定するには, 理論特性の観点からばかりでなく, その経済性や保守, 管理, 回収, あるいは放電に伴う生成物といった面も考慮して, いろいろな観点から検討する必要がある. そこで, 著者らは先ず, 理論特性上の面からそれらの最適な混合割合の目安を検討することにした. すなわち, 前報<sup>2)</sup> および文献<sup>3)</sup> では, N<sub>2</sub> の混合割合を70%一定として換算実効電離係数 ( $\bar{\alpha}/p_{20}$ ), 換算付着係数 ( $\eta/p_{20}$ ) 等の電子スウォームパラメータの解析を行ったが, 今回は N<sub>2</sub> の混合割合を60, 70, 80%と変化した場合の主として換算電離係数  $\alpha/p_{20}$  および換算付着係数 ( $\eta/p_{20}$ ) をボルツマン方程式により算出し, これを解析検討することにした. また, それぞれの混合割合における電子エネルギー分布関数  $F(\epsilon)$  および臨界換算電界 ( $E/p_{20}$ )<sub>lim</sub> の変化についても検討し, 3成分混合ガスの絶縁特性向上の放電機構について考察することにした.

## 2. ボルツマン方程式と電子衝突断面積

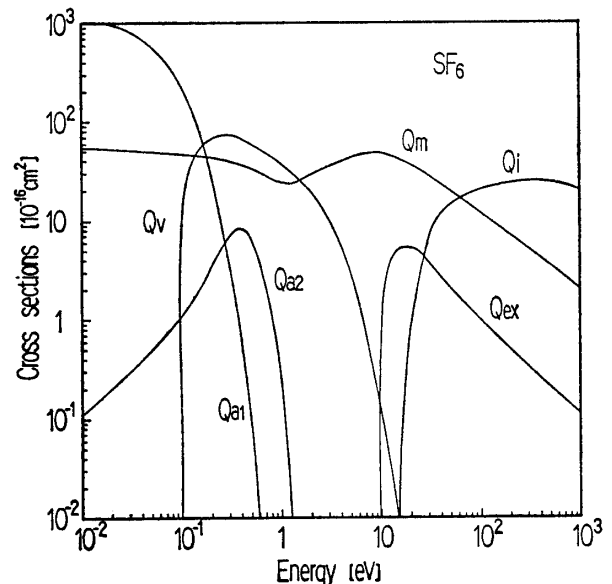
本解析では式 (2.1) に示すように, 電子の有するエネルギーが0から  $\epsilon$  までの電子数密度  $n$  の単位時間あたりの増分が衝突 ( $R_c$ ), 電界 ( $R_E$ ), 密度勾配 ( $R_x$ ) からなる電子増倍を考慮した定常タウンゼント (SST) 法による Thomas 表示のボルツマン方程式を用いた<sup>4)</sup>.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^\epsilon n(\epsilon', x, t) d\epsilon' = R_c(\epsilon) + R_E(\epsilon) + R_x(\epsilon) \quad (2.1)$$

パラメータ算出に用いた各成分ガスの電子衝突断面積は, 前報<sup>2)</sup> および<sup>5)</sup> と同じで, それぞれ次のように与えた. なお, 今回解析に使用した各ガスの電子衝突断面積を明確にしておくために, それぞれの断面積を Fig. 2.1 (a), (b), (c), (d) に示す. すなわち, N<sub>2</sub> の衝突断面積はこれまでに多くの研究者によって測定され,



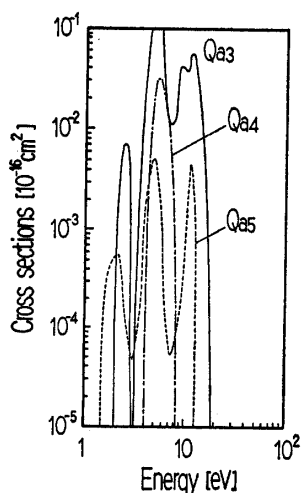
(a) Electron collision cross sections for N<sub>2</sub>.



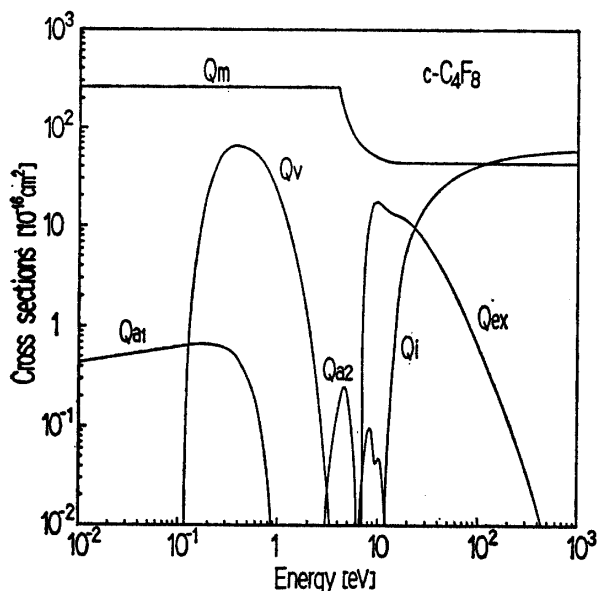
(b) Electron collision cross sections for SF<sub>6</sub>.

Q<sub>a1</sub> and Q<sub>a2</sub>: electron attachment cross section for formation of SF<sub>6</sub><sup>-</sup> and SF<sub>5</sub><sup>-</sup> respectively.

Ohmori ら (1988)<sup>6)</sup> が整理, 報告したものをを用いた (Fig. 2.1 (a)). ただし, N<sub>2</sub> の電子励起断面積 Q<sub>ex</sub> としては Ohmori ら (1988)<sup>6)</sup> と同様に図に示した値の80%に修正して計算を行っている. SF<sub>6</sub> の衝突断面積については, 同様に Itoh ら (1977)<sup>7)</sup> がまとめたものをそのまま用いた. しかし, 電子励起断面積と振動励起断面積については励起順位ごとの分別は行わず, 計算過程の簡単化を図るためにそれぞれ全電子励起断面積 Q<sub>ex</sub>, 全振動励起断面積 Q<sub>v</sub> として一括して与えた (Fig. 2.1 (b), (c)). また, c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> については Novak ら (1988)<sup>8)</sup> によって報告されたものを使用した (Fig. 2.1 (d)).



(c) Electron attachment cross sections for SF<sub>6</sub>.  
 Q<sub>a3</sub>, Q<sub>a4</sub> and Q<sub>a5</sub>: electron attachment cross section for formation of F<sup>-</sup>, SF<sub>4</sub><sup>-</sup> and F<sub>2</sub><sup>-</sup> respectively.



(d) Electron collision cross sections for c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>.  
 Q<sub>a1</sub> and Q<sub>a2</sub>: electron attachment cross section for formation of C<sub>4</sub>F<sub>8</sub><sup>-</sup> and F<sup>-</sup> respectively.

Fig. 2.1 Electron collision cross sections for each gas.  
 Q<sub>m</sub>: momentum transfer cross section.  
 Q<sub>i</sub>: ionization cross section.  
 Q<sub>d</sub>: dissociation cross section.  
 Q<sub>v</sub>: vibrational cross section.  
 Q<sub>ex</sub>: electronic excitation cross section.

3成分混合とする場合の電子衝突断面積Qの取扱については、成分ガス分子間に化学的な反応が生じないことを条件に、ガス1の混合割合をk<sub>1</sub>、ガス2をk<sub>2</sub>、ガス3をk<sub>3</sub>として、式(2.2)に示すように各ガスの断面積の分圧比で与えた。

$$Q = \sum_{i=1}^3 k_i Q_i = k_1 Q_1 + k_2 Q_2 + k_3 Q_3 \quad (2.2)$$

ここで、Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>: ガス1, 2, 3のそれぞれの電子衝突断面積, k<sub>1</sub>+k<sub>2</sub>+k<sub>3</sub>=1.

また、ガス分子数密度Nは3.29598×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup> (1 Torr, 20°C)とし、数値計算にはSX-1 (NEC)を用いた。

N<sub>2</sub>やSF<sub>6</sub>、あるいはc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の断面積の妥当性や取扱い方については、以前の報告2), 5)において詳述している。しかし、その後N<sub>2</sub>における電子励起断面積の取扱い方や、Novakらの示したc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の衝突断面積にはやや問題があるとの伊藤らの指摘を受けている<sup>9)</sup>。特にc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>については、特有の圧力依存性のために実効電離係数等の実測値にかなりのバラツキがあり、これらにフィッティングさせることにより求められる各種の断面積の妥当性については議論のあるところであり、今後とも引続き検討しなければならないものである。著者らは、ガスの絶縁特性を評価する観点から、著者らが高気圧において求めたc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の(E/p<sub>20</sub>)<sub>11m</sub>実測値により近い結果を導きだしているNovakらのまとめた衝突断面積のセットをそのまま用いることにしている。そこで今回も、N<sub>2</sub>の混合割合を変化することによる各パラメータの特性変化を比較検討するという観点から、前回と同じようにNovakらの衝突断面積をそのまま使用し、各パラメータの計算を行った。今後はこれら衝突断面積の妥当性や取扱い方等についての比較検討を行い、再度同様の解析考察を行い、これらの結果については別途報告したいと考えている。

### 3. 解析結果の検討

絶縁媒体としての電子付着性混合ガスの最適化を図るためには、電子を減速させることによって電子のエネルギー分布を低エネルギー側にできるだけ多く分布するように抑えて、電子による衝突電離作用を最小にし、電子付着を最大にすることである。従来、N<sub>2</sub>とSF<sub>6</sub>とからなる2成分混合ガスにc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>を加えることによる相乗作用の増加は、低エネルギー領域におけるSF<sub>6</sub>の電子付着をc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>がさらに補完するからだと考えられてきた。しかしながら、著者らは前報2)において、N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>混合ガスにc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>を加えることによる絶縁耐力の向上は、電子エネルギー分布関数F(ε)が低エネルギー領域へ推移し、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>がSF<sub>6</sub>の電子付着を効果的に増加させる形で作用していることを明らかにした。

今回はこの3成分混合ガスの絶縁特性向上の放電機構をさらに考察するために、前報でのN<sub>2</sub>の混合割合を70%一定とした電子スウォームパラメータの解析から、N<sub>2</sub>の混合割合を60, 70, 80%と一歩すすめた場合の換算電離係数α/p<sub>20</sub>や換算付着係数η/p<sub>20</sub>を解析検討する。

また、電子エネルギー分布関数  $F(\epsilon)$  や 臨界換算電界  $(E/p_{20})_{lim}$  を求め、最適な3成分混合ガスの目安を得るための混合割合について検討する。

### 3.1 換算実効電離係数 $\bar{\alpha}/p_{20}$

3成分混合ガスにおいて、換算電界  $E/p_{20}$  を 60, 100, 150 [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] とした場合の  $N_2$  の各混合割合 (60, 70, 80%) における  $c-C_4F_8$  の混合割合に対する換算実効電離係数  $\bar{\alpha}/p_{20} = (\alpha - \eta)/p_{20}$  の変化の様相を示したものが Fig. 3.1 である。ここで、100 [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] は  $N_2$  の混合割合が 70% や 80% の場合の臨界換算電界  $(E/p_{20})_{lim}$  よりもやや高めの場合の例として取り上げ、60 [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] はエネルギーが低い場合の例として取り上げた。また、150 [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] の場合は逆にエネルギーが高い場合の例として取り上げた。

これを見ると、どの  $N_2$  の混合割合においても、 $E/p_{20}$  が高くなるほど  $\bar{\alpha}/p_{20}$  は高い値を示している。また、 $E/p_{20}$  の低い 60 [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] では、 $c-C_4F_8$  のある混合割合において  $\bar{\alpha}/p_{20}$  は最小の値を示しており、 $N_2$  の混合割合が少ないほど顕著にこのことを示している。逆に  $E/p_{20}$  が高くなると次第にそれは判然としなくなっているのがわかる。 $N_2$  の混合割合が多くなると、どの  $E/p_{20}$  においても  $\bar{\alpha}/p_{20}$  は高い値を示している。また、 $E/p_{20}=60$  [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] におけるそれぞれの  $\bar{\alpha}/p_{20}$  の最小値は  $N_2=60\%$  で  $c-C_4F_8=20\%$ 、 $N_2=70\%$  で  $c-C_4F_8=12\%$ 、 $N_2=80\%$  で  $c-C_4F_8=6\%$  のところに存

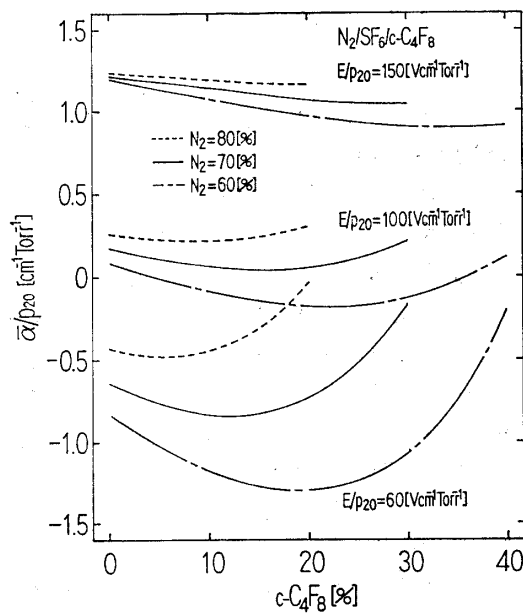


Fig. 3.1 Effective ionization coefficients  $\bar{\alpha}/p_{20}$  as a function of the mixture ratios of  $c-C_4F_8$  in  $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  at  $E/p_{20}=60, 100, 150$  [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ].

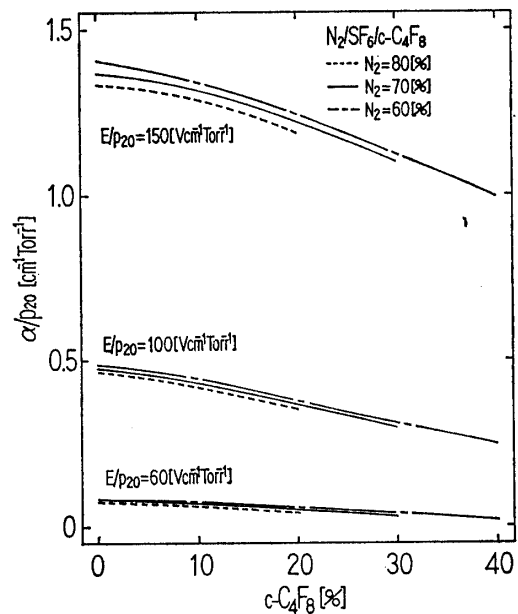


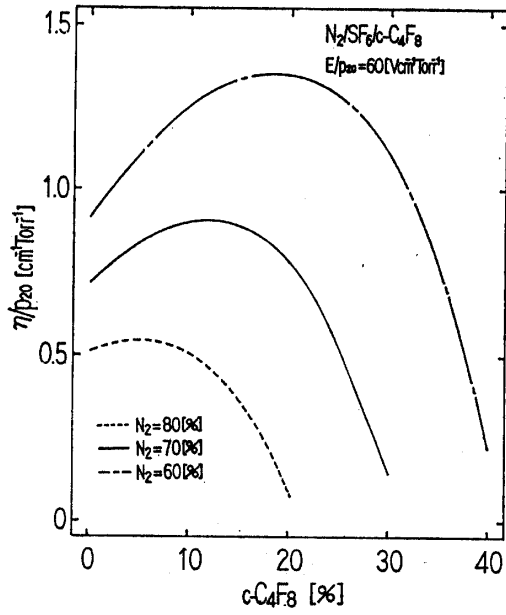
Fig. 3.2 Ionization coefficients  $\alpha/p_{20}$  as a function of the mixture ratios of  $c-C_4F_8$  in  $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  at  $E/p_{20}=60, 100, 150$  [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ].

在している。

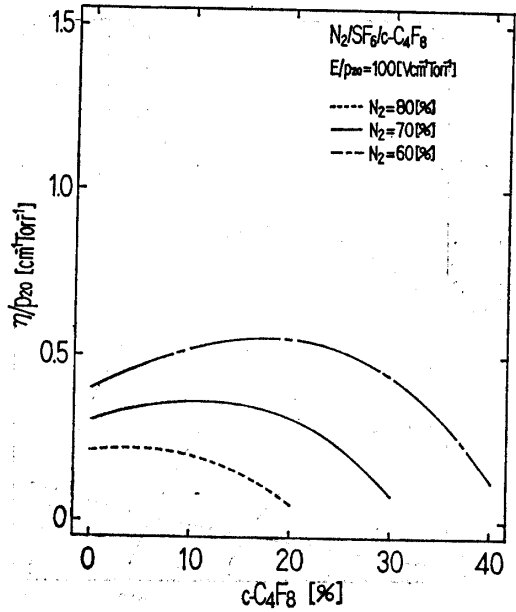
Fig. 3.2 は各  $E/p_{20}$  での  $c-C_4F_8$  の混合割合に対する換算電離係数  $\alpha/p_{20}$  の変化を示したものである。 $c-C_4F_8$  の混合割合の増加に対し、 $\alpha/p_{20}$  は単調減少の傾向を示しており、 $E/p_{20}$  が高い程減少の度合いが大きい。また、 $E/p_{20}$  が低いほど  $N_2$  の混合割合が異なっても  $\alpha/p_{20}$  はほぼ同じ値を示している。したがって、換算電離係数  $\alpha/p_{20}$  は  $N_2$  の混合割合による影響はあまり強く受けず、前述のような  $N_2$  の混合割合による  $\bar{\alpha}/p_{20}$  の差異は、換算電子付着係数  $\eta/p_{20}$  による影響が主であることが考えられる。

Fig. 3.3 (a)~(c) は、 $E/p_{20}$  をそれぞれ 60, 100, 150 [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] とした場合の、 $c-C_4F_8$  の混合割合の変化に対する  $\eta/p_{20}$  の変化を示したものである。 $\eta/p_{20}$  は  $E/p_{20}$  により大きな差異を見せている。また  $\eta/p_{20}$  は  $N_2$  の混合割合の影響を顕著に受けていることが分かる。すなわち、 $N_2$  の少ない 60% では、 $\eta/p_{20}$  は  $c-C_4F_8$  のある混合割合まで増加しているが、 $N_2$  の割合が多くなる 80% においては、増加の傾向はほとんど見られなくなっている。また、このような傾向は換算電界が低いほど顕著に現れている。

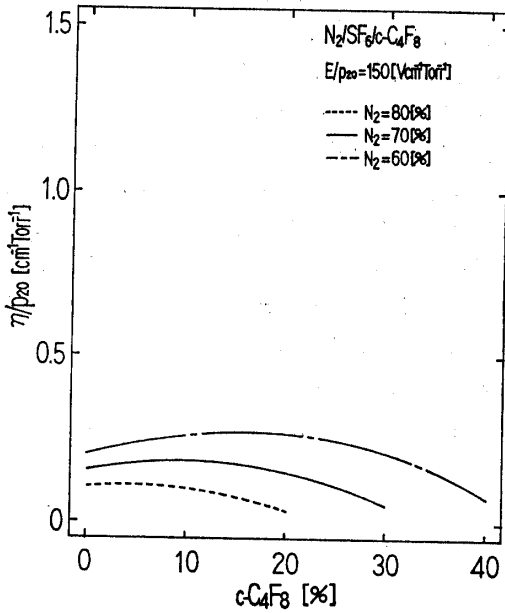
Fig. 3.4 は、 $E/p_{20}$  を 100 [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] とした場合の  $c-C_4F_8$  の混合割合に対する  $\alpha/p_{20}$  を 3成分混合ガスの各成分ガス毎に分けてそれぞれ示したものである。これを見ると、 $N_2$  および  $SF_6$  成分の  $\alpha/p_{20}$  は  $c-C_4F_8$  の混合割合の増加に対し単調減少の特性を示している。



(a)  $E/p_{20}=60$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>].



(b)  $E/p_{20}=100$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>].

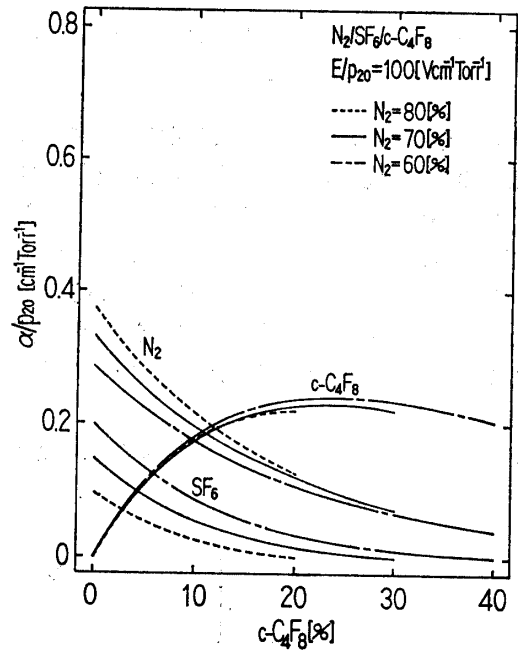


(c)  $E/p_{20}=150$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>].

**Fig. 3.3** Electron attachment coefficients  $\eta/p_{20}$  as a function of the mixture ratios of  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  in  $\text{N}_2/\text{SF}_6/c\text{-C}_4\text{F}_8$ .

また、 $\text{N}_2$  成分でも  $\text{SF}_6$  成分でもその混合割合が多いほど、 $\alpha/p_{20}$  は大きな値をとっている。このことから、これらの成分ガスの  $\alpha/p_{20}$  はそれぞれの成分ガスの分圧比、すなわち分子数密度に依存していることが分かる。

一方、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$  成分の  $\alpha/p_{20}$  は  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  の混合割合が 0~15% の範囲で急激な増加を示している。また、 $\text{N}_2$  の混合割合が変わってもその特性はほぼ同じで、その値も



**Fig. 3.4** Ionization coefficients  $\alpha/p_{20}$  for each component gas as a function of the mixture ratios of  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  in  $\text{N}_2/\text{SF}_6/c\text{-C}_4\text{F}_8$  at  $E/p_{20}=100$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>].

ほとんど同じである。このことから  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  成分の  $\alpha/p_{20}$  は、 $\text{N}_2$  および  $\text{SF}_6$  成分と同様に、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$  のある混合割合までその分子数密度に大きく依存するが、ある混合割合に達すると飽和し、むしろこれを過ぎると若干減少する傾向を示す。

Fig. 3.5 は、 $E/p_{20}$  を同じく  $100$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>] としたときの  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  の混合割合に対する  $\eta/p_{20}$  を電子付着性気体である  $\text{SF}_6$  成分ガスと  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  成分ガスに分

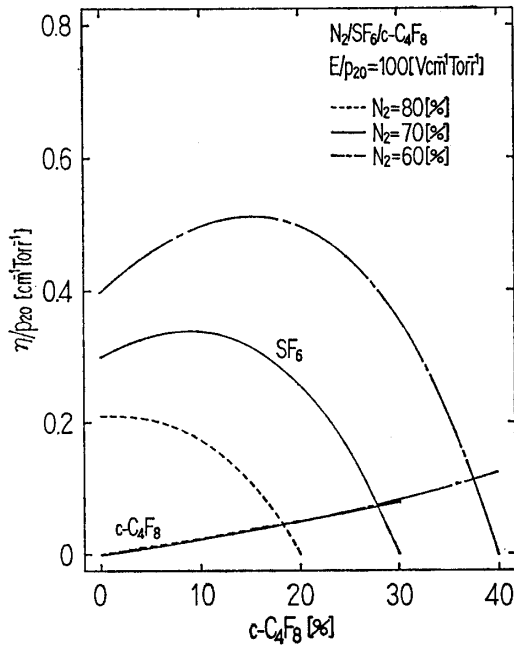


Fig. 3.5 Electron attachment coefficients  $\eta/p_{20}$  for each component gas as a function of the mixture ratios of  $c-C_4F_8$  in  $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  at  $E/p_{20}=100$  [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ].

けて示したものである。  $\eta/p_{20}$  に大きく寄与しているのは  $SF_6$  成分のものであり、この  $SF_6$  成分の  $\eta/p_{20}$  は、  $c-C_4F_8$  成分が増加して  $SF_6$  成分が減少していくにもかかわらず、  $c-C_4F_8$  のある混合割合まで増加して最大値を示し、その後減少するという特性を示すということである。これは  $N_2$  の混合割合が少ないほどその最大値は大きなものとなり、その最大値を示す  $c-C_4F_8$  の混合割合も明確になっている。

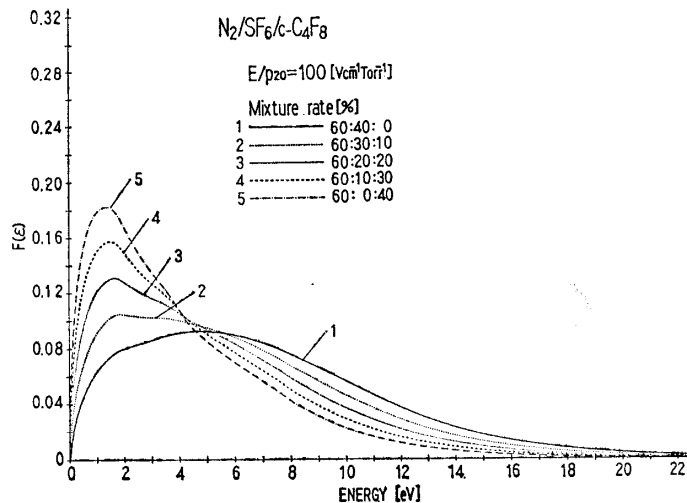
しかし、  $N_2$  の混合割合が 80% に達すると、最大値を

示す特性は見られず、  $c-C_4F_8$  の割合の増加と共に単調減少の傾向を示す。これは、  $N_2$  の増加に伴い  $SF_6$  と  $c-C_4F_8$  成分の割合が減少し、  $SF_6$  と  $c-C_4F_8$  による相乗作用が弱まってしまうことによるものであると考えられる。一方、  $c-C_4F_8$  成分の  $\eta/p_{20}$  は  $N_2$  の混合割合には影響されず、  $c-C_4F_8$  の増加と共に増加するほぼ単一の曲線上にある。このことから、  $c-C_4F_8$  成分の電子付着係数  $\eta/p_{20}$  は他の成分ガスによる影響をほとんど受けることなく、その分子数密度にほぼ比例した形だけのものとなると考えられる。

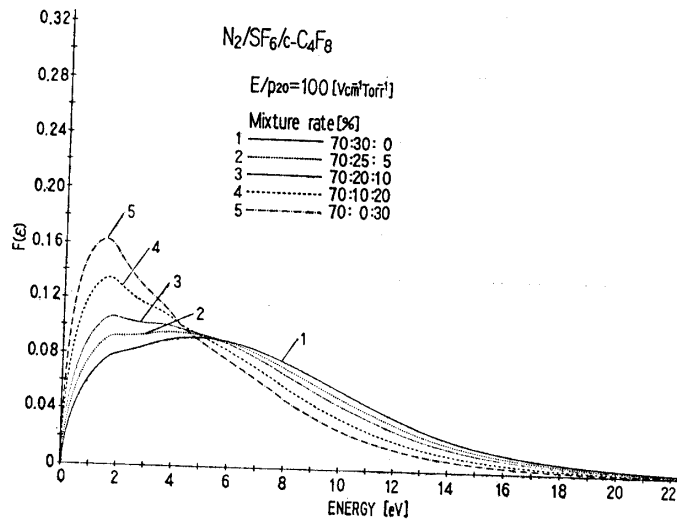
### 3.2 電子エネルギー分布関数 $F(\epsilon)$

Fig. 3.6(a)~(c)は、  $E/p_{20}$  が 100 [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ] のときの、  $N_2$  の混合割合をそれぞれ 60, 70, 80% としたときの電子エネルギー分布関数  $F(\epsilon)$  を示したものである。いずれの  $N_2$  の混合割合においても、  $c-C_4F_8$  の混合割合の増加と共に電子エネルギー分布は次第に低エネルギー領域に推移しているのが分かる。このため、低エネルギー領域で大きな電子付着断面積を有する  $SF_6$  ガスに電子が付着しやすくなると考えられる。しかしながら、  $N_2$  の混合割合が 80% にもなると、その低エネルギー領域への推移にも違いが見られるようになり、低エネルギー領域でのピーク値もかなり低下し、高いエネルギー領域に多くの電子が分布する形になる。これは、  $N_2$  の増加に伴い  $c-C_4F_8$  が減少し、これによって電子を低エネルギー領域へ推移させる働きが減少してしまうことによるものと考えられる。前述のような分布は  $E/p_{20}$  が異なってもほぼ同様である。

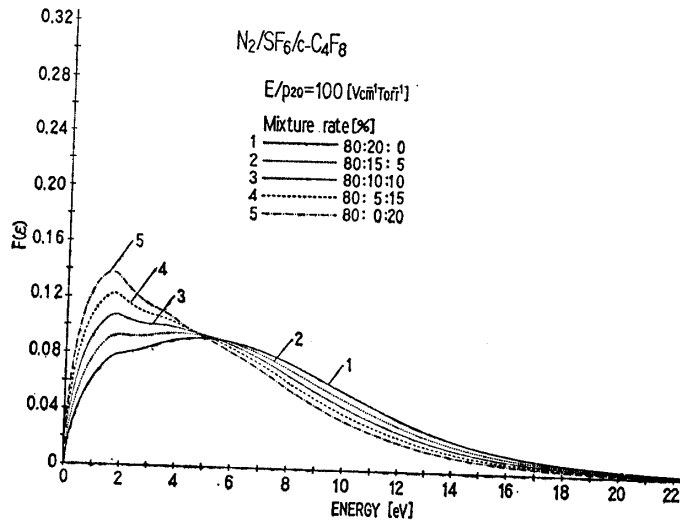
Fig. 3.7 は、  $N_2$  の混合割合をそれぞれ 60, 70, 80% としたときの最大臨界換算電界を与える 3 成分混合割合



(a) The mixture ratios of  $N_2$ : 60%.



(b) The mixture ratios of  $N_2$  : 70%.



(c) The mixture ratios of  $N_2$  : 80%.

Fig. 3.6 Electron energy distributions in  $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  at  $E/p_{20}=100 [Vcm^{-1} Torr^{-1}]$ .

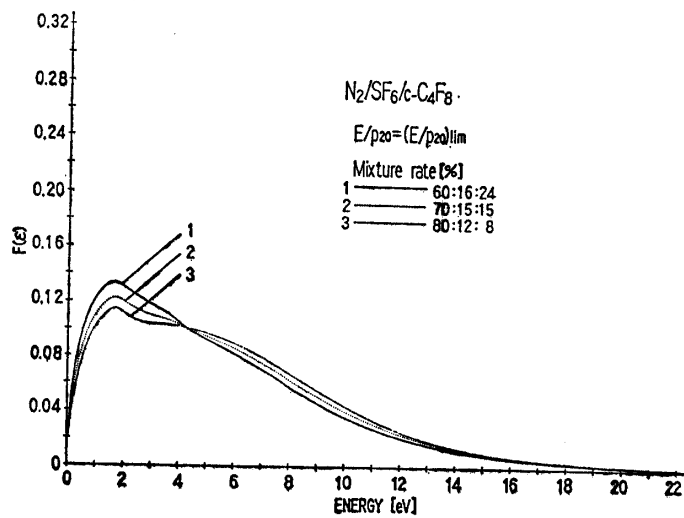


Fig. 3.7 Electron energy distributions at limit reduced field  $(E/p_{20})_{lim}$ .

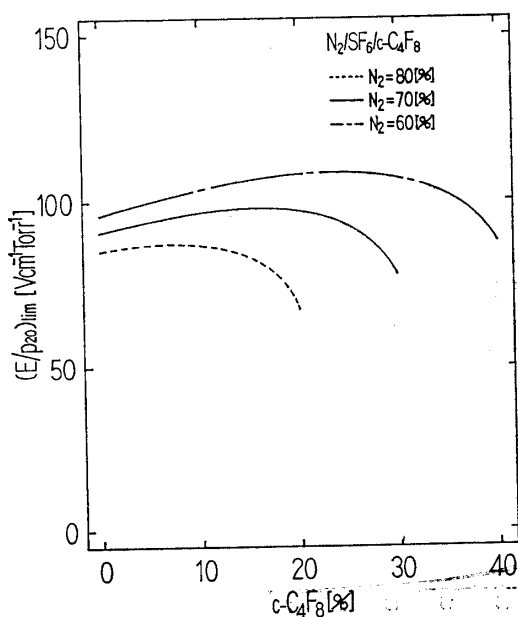
**Table 3.1** Limit reduced fields  $(E/p_{20})_{lim}$  and  $SF_6/c-C_4F_8$  ratios at each  $N_2$  mixture ratio.

$N_2$ [%]	$(E/p_{20})_{lim}$ [ $Vcm^{-1} Torr^{-1}$ ]	$SF_6/c-C_4F_8$ [%]
60	108.1	16/24
70	97.7	15/15
80	86.9	12/8

での  $F(\epsilon)$  を示したものである。最大臨界換算電界の大きさとそのときの混合割合を Table 3.1 に示す。これを見るとそれぞれの分布は、1.6 [eV] 付近の低エネルギー領域にピークを持ち、ほぼ同じ分布特性を示しているのがわかる。しかしながら、やはり  $N_2$  が多いほど低エネルギー側でのピーク値が抑えられ、より高い領域での電子分布の増加が認められる。

### 3.3 臨界換算電界 $(E/p_{20})_{lim}$

電子付着性気体の場合、その実効電離係数  $\alpha$  がゼロとなる換算電界より、その絶縁耐力が評価される。すなわち、換算実効電離係数  $\bar{\alpha}/p_{20}=0$  より臨界換算電界  $(E/p_{20})_{lim}$  が求められる。Fig. 3.8 は  $N_2$  の各混合割合 (60, 70, 80%) において、 $\bar{\alpha}/p_{20}=0$  となる  $(E/p_{20})_{lim}$  を  $c-C_4F_8$  の混合割合に対して示したものである。いずれの曲線においても、3成分混合の  $(E/p_{20})_{lim}$  は  $N_2$  と  $SF_6$  の2成分混合あるいは  $N_2$  と  $c-C_4F_8$  の2成分混合の場合の  $(E/p_{20})_{lim}$  よりも大きく、相乗効果があることを示している。しかしながら、 $N_2$  の混合割合によりその


**Fig. 3.8** Limit reduced fields  $(E/p_{20})_{lim}$  as a function of the mixture ratios of  $c-C_4F_8$  in  $N_2/SF_6/c-C_4F_8$ .

大きさは大きく異なり、絶縁耐力への影響が顕著に現れたり、そうでなかったりすることを示している。図から明らかなように、 $N_2$  が多くなるほどその絶縁耐力は減少してしまう。これは、前述のように  $N_2$  が多くなることにより、 $SF_6$  および  $c-C_4F_8$  ガスの相乗作用が減少してしまうことによるものである。

Fig. 3.8 において、各  $N_2$  の混合割合で最大臨界換算電界と、そのときの  $SF_6$  と  $c-C_4F_8$  の混合割合を見てみると、Table 3.1 に示すようなものとなる。 $N_2=60\%$  で最も高い絶縁耐力を示すが、そのときの  $c-C_4F_8$  の混合割合は 24% であり、 $SF_6$  の 16% よりも多い割合となっている。逆に、 $N_2=80\%$  では絶縁耐力は低下してしまいが、最大値を示す  $c-C_4F_8$  の割合は 8% で  $SF_6$  よりも少なくなっている。

## 4. まとめ

これまで3成分混合ガスの絶縁特性向上の放電機構を考察するために解析結果に検討を加えてきたが、これらを要約すると次のようになる。

①混合ガスの換算実効電離係数  $\bar{\alpha}/p_{20}$  は、 $E/p_{20}$  の低いときは  $c-C_4F_8$  (あるいは  $SF_6$ ) のある混合割合において  $\bar{\alpha}/p_{20}$  は最小の値を示し、 $N_2$  の混合割合が少ないほど顕著な特性を示す。これに対し換算電界  $E/p_{20}$  が高いときは、いずれの  $N_2$  の混合割合においても高い値をとり、単調な変化を示す。

②混合ガスの換算電離係数  $\alpha/p_{20}$  は、 $N_2$  の混合割合、 $E/p_{20}$  の高低にかかわらず、 $c-C_4F_8$  (あるいは  $SF_6$ ) の混合割合に対して、ほぼ同じ値で単調な変化を示す。成分ガス毎の  $N_2$  および  $SF_6$  の  $\alpha/p_{20}$  も、 $c-C_4F_8$  の混合割合増加に対して、単調な減少変化となる。これに対し、 $c-C_4F_8$  の  $\alpha/p_{20}$  は、 $c-C_4F_8$  の混合割合の増加に対して当初増加し、その後飽和するか、あるいは飽和の後減少の特性を示す。

③  $N_2$  の混合割合が少ない場合の  $SF_6$  の換算付着係数  $\eta/p_{20}$  は、 $SF_6$  の分子数密度が減少し、 $c-C_4F_8$  の分子数密度が増加するにもかかわらず、ある  $c-C_4F_8$  の混合割合まで増加する特性を示す。しかし、 $N_2$  の混合割合が多くなると  $SF_6$  の  $\eta/p_{20}$  の増加は見られなくなる。また  $c-C_4F_8$  成分の  $\eta/p_{20}$  は、 $N_2$  の混合割合にかかわらずほとんど同じ値をとり、 $c-C_4F_8$  の混合割合の増加に対しほぼ直線的増加の特性を示す。

④混合ガスの電子エネルギー分布関数  $F(\epsilon)$  は、 $N_2$  の混合割合が少ないほど、また  $c-C_4F_8$  が多いほど、その分布は低エネルギー領域へ推移し、そのピークも 1.5 [eV] 付近の低エネルギー領域に顕著に現れる。

逆に、 $N_2$  の混合割合が多くなると、低エネルギー領



域におけるピーク値が減少し、電子は高エネルギー側に多く分布するようになる。これは、 $N_2$ の増加に対し  $c-C_4F_8$  は減少し、このために  $c-C_4F_8$  により電子を低エネルギー領域へ推移させる働きが弱まることに起因する。

$N_2$  の各混合割合における最大臨界換算電界での  $F(\epsilon)$  は、ほぼ  $1.6 [eV]$  がピーク値となる分布を示し、 $N_2$  が多いほどそのピーク値は減少し、高エネルギー領域に分布する電子の増加がみられる。

⑤臨界換算電界  $(E/p_{20})_{lim}$  は、 $N_2$  の混合割合が少ないほど、成分ガスの分圧比和以上の特性を示す相乗効果が作用し、絶縁耐力の向上が見られる。

しかし、 $N_2$  の混合割合が少ない場合には、最大臨界換算電界での混合割合は  $SF_6$  ガスより  $c-C_4F_8$  ガスを多く必要とする。また  $N_2$  が多くなると  $(E/p_{20})_{lim}$  の値は減少する。

以上のことから、 $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  混合ガスにおける換算電離係数  $\alpha/p_{20}$  には  $N_2$  の混合割合の影響はあまり強く現れないが、実効換算電離係数  $\bar{\alpha}/p_{20}$  にはその効果が現れる。この効果の差異は換算電子付着係数  $\eta/p_{20}$  の変化によるものである。

$N_2$  の混合割合が少ないと電子付着が増加し、逆に  $N_2$  の混合割合が多いと電子付着が減少する。この場合電子付着の効果が最大となるような  $SF_6$  と  $c-C_4F_8$  の混合割合が存在する。

これは、いずれの  $N_2$  の混合割合においても、 $c-C_4F_8$  の混合割合の増加と共に電子エネルギー分布は次第に低エネルギー領域に推移し、これがために低エネルギー領域で大きな電子付着断面積を有する  $SF_6$  ガスに電子が効率よく付着するようになるからである。また、 $c-C_4F_8$  がある以上に増加するとその分  $SF_6$  の分子数密度が減少するので電子付着は減少する。

## 5. おわりに

著者らは前報に引続き、 $SF_6$  に代わるガス絶縁媒体として期待される3成分混合ガス ( $N_2/SF_6/c-C_4F_8$ ) の電子スウォームパラメータをボルツマン方程式により算出し、これら3成分混合ガスの放電基礎過程についての解析を行った。

この結果、本3成分混合ガスにおいては、 $N_2$  の混合割合を多くすると、 $c-C_4F_8$  の作用による  $SF_6$  成分の電

子付着係数は減少し、絶縁耐力も低下することがわかった。また逆に、 $N_2$  の混合割合を少なくすると、 $SF_6$  成分の電子付着係数は増加し、臨界換算電界は高い値となり絶縁耐力を向上させることが分かった。しかしながら、本混合ガスの混合割合を経済性を含めた面で検討する場合には、安価な  $N_2$  を多めにし、高価な  $c-C_4F_8$  ガスは少量にすることが必要である。すなわち、実用上の面から考慮すると、高価な  $c-C_4F_8$  の使用が少なくすみ、安価な  $N_2$  をできるだけ多く用いるという最適な混合割合を見出すことである。本解析の結果では、 $N_2$  の混合割合を80%以上とすると、その相乗作用が期待できず、臨界換算電界は低下する。したがって、 $N_2$  の混合割合はほぼ70%前後以下の割合になると予想される。

今後は、第2章で既に触れたように、衝突断面積の取扱い方やその妥当性について再度比較検討し、同時にこれと併せて最適な混合割合の混合ガスをコスト面も考慮した形で検討していきたいと考えている。

**謝辞** 本研究の遂行にあたり、日頃ご激励、ご指導を賜わっている本学工学研究科電気工学専攻主任松元 崇教授、ならびに本学工学部電気工学科主任金古喜代治教授に対し、心より厚くお礼申し上げます。また、数値計算を行うに当たり種々のご助言を頂いた佐々木俊雄氏(現電源開発)にも謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 岡部, 藤井, 他: 放電研究会資料, ED-89-28, (1989) pp. 73-82.
- 2) 佐々木, 岡部: 東海大学紀要工学部, Vol.30, No. 1, (1990) pp. 1-11.
- 3) 岡部, 佐々木: 電学論 A, 111巻3号, 平成3年, pp. 205-211.
- 4) Thomas W. R. L.: J. Phys. B.: Atom. Molec. Phys. 2 (1969) pp. 551-561.
- 5) 佐々木, 岡部: 東海大学紀要工学部, Vol. 29, No.2, (1989) pp. 11-20.
- 6) Ohmori Y. et al.: J. Phys. D.: Appl. Phys. 21, (1988) pp. 724-729.
- 7) Itoh H. et al.: J. Phys. D.: Appl. Phys. 21, (1988) pp. 922-930.
- 8) J. P. Novak and M. F. Frèchette: J. Appl. Phys. 63 (1988) pp. 2570-5.
- 9) 松村, 伊藤, 他: 平成3年電気学会全国大会, No. 209, 2-103.