

# 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

佐々木俊雄\*・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

by

Toshio SASAKI and Shozo OKABE

(Received on Mar. 30, 1990)

### Abstract

Electron swarm parameters in ternary gas mixtures comprised of  $N_2$ ,  $SF_6$ , and  $c-C_4F_8$  are analyzed by a Boltzmann equation to investigate the discharge mechanism of the mixture gases. It is shown that the improvement in the breakdown strength of the gas mixtures results from the fact that more electrons attach to  $SF_6$  than  $c-C_4F_8$  at low mixture ratios of  $c-C_4F_8$ . It is emphasized that the electron attachment properties of the ternary gas mixtures are greatly depending on the behavior of  $SF_6$  and  $c-C_4F_8$  in those gases from the analytical results of the electron swarm parameters for each binary gas mixture combination such as  $N_2/SF_6$ ,  $N_2/c-C_4F_8$ , and  $SF_6/c-C_4F_8$ . Furthermore, the authors confirm the synergism in the ternary gas mixtures, from the results of calculation using the Boltzmann equation which represent the changes of limiting field strength, as same as seen in the experimental limiting field strength.

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

### 1. まえがき

筆者らは、 $SF_6$ に代わるガス絶縁媒体として有望な $N_2$ と $SF_6$ を成分とする2成分混合ガスに、わずかな $c-C_4F_8$ を加えた3成分混合ガスに注目し、このガスの絶縁耐力が平等電界および不平等電界下において、2成分の場合よりも向上することを実験により確認し、これまで

に報告してきた<sup>1)</sup>。

本研究では、この混合ガスの絶縁特性を理論的な観点から明らかにするため、電子と中性ガス分子間の衝突過程をボルツマン方程式から解析し、電離係数 $\alpha$ 、電子付着係数 $\eta$ などの電子スウォームパラメータを算出することによって検討している。前報<sup>2)</sup>では、解析に使用したThomas表示のボルツマン方程式<sup>3)</sup>の有効性を確認する

\* 工学研究科修士課程電気工学専攻    \*2 工学部電気工学科教授

といった観点から、N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 混合ガスに限った計算を行い、これまでに報告されている電子スウォームパラメータの実測値との比較を行った。その結果、計算を行った換算電界の広い範囲にわたって、両者のよい一致が得られ、本解析結果が混合ガスの絶縁耐力を評価する上で極めて有効であることが示された。

そこで今回は、表題の3成分混合ガスの電子スウォームパラメータを算出するにあたって、まず必要となるc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の衝突断面積をNovakら(1988)<sup>4)</sup>が最近報告したセットからまとめ、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>単一ガスの換算電離係数 $\bar{\alpha}/p_{20}$ 、および換算電子付着係数 $\eta/p_{20}$ を算出し、これまでに報告されている実測値との比較を行った。3成分混合ガスでは、N<sub>2</sub>を70%一定としたときの $\bar{\alpha}/p_{20}$ 、および $\eta/p_{20}$ の値を成分ガスごとに分別して計算し、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合に対するこれらの変化を調べた。その結果、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、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合の少ないところで、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>がSF<sub>6</sub>成分の電子付着係数を増加させる形で効果的に作用しているためであることが明らかになった。また、成分ガスであるN<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>、N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>、およびSF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の2成分混合ガスについても同様な解析を行ったところ、3成分混合ガスの興味ある性質は、SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>混合ガスの性質に大きく依存していることがわかった。

さらに、3成分混合ガスの電子スウォームパラメータの解析結果から臨界換算電界を求めたところ、絶縁破壊実験で測定されたc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合に対する絶縁破壊電圧の相乗効果(シナジズム)を裏付ける結果が導かれたので、これらの解析結果について報告する。なお、解析にあたり、混合ガスの電子衝突断面積は、それぞれの成分ガスの断面積を分圧比の加重和で与えることによって取り扱った。

## 2. c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の電子衝突断面積

解析に使用したc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の衝突断面積をFig. 2.1に示す。これは、Novakら(1988)<sup>4)</sup>によってまとめられ、最近報告されたもので、運動量移行断面積 $Q_m$ 、振動励起断面積 $Q_v$ 、電子励起断面積 $Q_{ex}$ 、電離断面積 $Q_i$ 、電子付着断面積 $Q_a$ からなっている。この中で、 $Q_a$ については電子を付着してC<sub>4</sub>F<sub>8</sub><sup>-</sup>、F<sup>-</sup>イオンをつくる $Q_{a1}$ 、および $Q_{a2}$ が考慮されており、Kurepa(1967)<sup>5)</sup>による測定結果を基本として、LifshitzとGrajower(1972/1973)<sup>6)</sup>、およびSauersら(1979)<sup>7)</sup>の測定結果で修正することによって与えられている。また、 $Q_i$ についてはKurepaの報告した値をRappら(1965)<sup>8)</sup>、Schramら(1965)<sup>9)</sup>、およびStephanら(1980)<sup>10)</sup>によるArガ

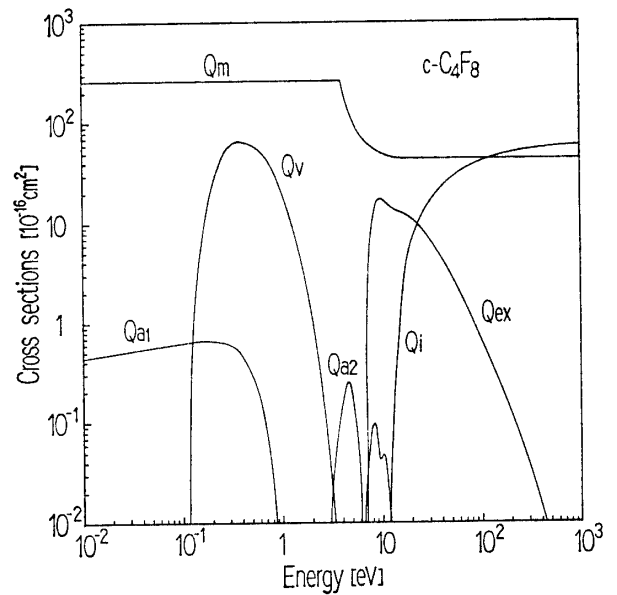


Fig. 2.1 Electron collision cross sections for c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>.  
 $Q_m$ : momentum transfer cross section,  
 $Q_v$ : vibrational cross section,  
 $Q_{ex}$ : electronic excitation cross section,  
 $Q_i$ : ionization cross section,  
 $Q_{a1}$  and  $Q_{a2}$ : electron attachment cross section for formation of C<sub>4</sub>F<sub>8</sub><sup>-</sup> and F<sup>-</sup> respectively.

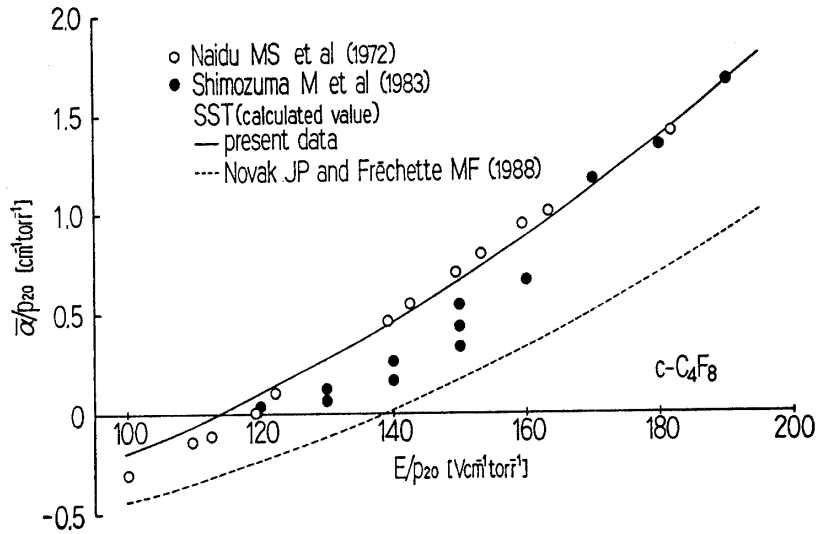
スの最近の測定結果を参考に、補正係数0.59とする修正が加えられている。

なお、N<sub>2</sub>、およびSF<sub>6</sub>の電子衝突断面積については、前報のものと同じものを使用したので省略する。また、ガス分子数密度 $N$ は、 $3.29598 \times 10^{16}$  [cm<sup>-3</sup>]一定とした。

## 3. 解析結果および考察

### 3.1 c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>単一ガスに対する解析

Fig. 3.1は、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>単一の場合における換算実効電離係数 $\bar{\alpha}/p_{20}$ の変化を $E/p_{20}$ に対して示したものである。この中で、2つのプロットは実測値、2本の曲線は解析結果を表している。これを見ると、 $\bar{\alpha}/p_{20}$ は $E/p_{20}$ に対して、単調に増加する特性を示しており、SF<sub>6</sub>で見られたような臨界換算電界 $(E/p_{20})_{lim}$ 付近での急峻な傾きを持っていないのがわかる。むしろ、N<sub>2</sub>の特性によく似た傾向を示している。Naiduら(1972)<sup>11)</sup>と下妻ら(1983)<sup>12)</sup>の実測値は、 $E/p_{20}=120$ と180 [Vcm<sup>-1</sup>Torr<sup>-1</sup>]でよい一致を示しているものの、それ以外の領域における下妻らの測定値は、一様に低い値を示している。このため、Naiduらの結果に対する差は、一番大きいもの(150 [Vcm<sup>-1</sup>Torr<sup>-1</sup>])で約52%にも達しており、下妻らの実測値は、Novakらのまとめた断面積をそのまま用いて計算した破線の結果に漸近する傾向を示



**Fig. 3.1** Effective ionization coefficient  $\bar{\alpha}/p_{20}$  as a function of the reduced electric field  $E/p_{20}$  in  $c\text{-C}_4\text{F}_8$ . The dashed line shows the values estimated by the present analysis with no modification of the cross sections for  $c\text{-C}_4\text{F}_8$ , and the solid line shows the values estimated with 190% addition in  $Q_i$  and 81% reduction in  $Q_{a2}$  for  $c\text{-C}_4\text{F}_8$ .

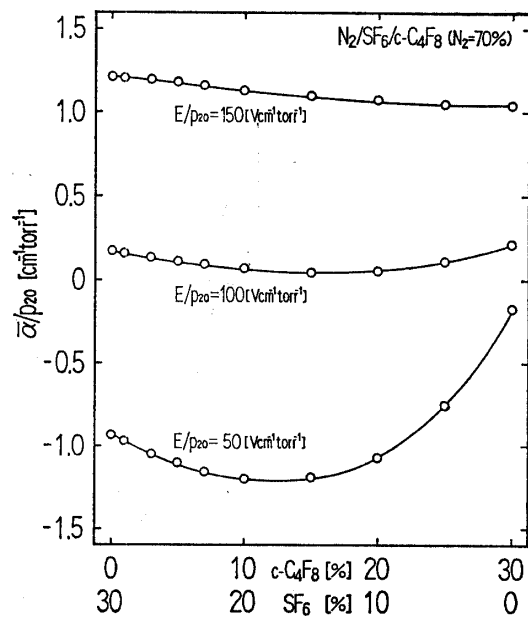
している。

一方、実測値への漸近を図るといった観点から、筆者らの決めた補正係数 ( $Q_i$  に対しては 2.9,  $Q_{a2}$  に対しては 0.19) を用いて計算した実線の結果は、 $E/p_{20} \geq 140$  [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ] の範囲で、Naidu の実測値を十分に裏付けているのがわかる。しかし、 $E/p_{20} \leq 120$  [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ] では、 $\bar{\alpha}/p_{20}$  の解析結果が実測値をわずかに上回り、 $(E/p_{20})_{lim}$  は約 113.7 [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ] という値が得られている。この値は、 $\text{SF}_6$  の 122.0 [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ] と比較して、約 6.8% 程度低い値となっており、Christophorou ら (1981)<sup>13)</sup> の報告にある  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  の絶縁耐力は、 $\text{SF}_6$  の約 1.2~1.3 倍であるという結果と矛盾している。一方、破線の結果は、約 138.7 [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ] の値を示していることから、 $\text{SF}_6$  の約 1.14 倍の絶縁耐力を持つことになり、むしろ Christophorou らの報告を裏付けている。

さらに、筆者らが実験によって測定した  $\text{SF}_6$  と  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  の直流絶縁破壊電圧値  $V_b$  から求めた  $(E/p_{20})_{lim}$  は、それぞれ 112.5 [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ]、145.6 [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ] であったことから、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$  は  $\text{SF}_6$  の約 1.29 倍の絶縁耐力を持っていることになる。したがって、このことも考慮すれば、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$  の実際的なガスの絶縁耐力を評価する上では、Novak らのまとめた衝突断面積のセットに修正を加えることなく解析を行った方が、効果的であると考られる。

### 3.2 3成分混合ガス ( $\text{N}_2/\text{SF}_6/c\text{-C}_4\text{F}_8$ ) に対する解析

3成分混合ガスの電子スウォームパラメータ解析にあたっては、 $\text{N}_2/\text{SF}_6$  の2成分混合ガスにおける絶縁耐力の相乗効果が、 $\text{SF}_6$  の混合割合を 0~30% とした範囲で顕著に現れたことから、 $\text{N}_2$  を 70% 一定とし、 $\text{SF}_6$  と  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  の混合割合を変えることによって行った。



**Fig. 3.2** Effective ionization coefficient  $\bar{\alpha}/p_{20}$  as a function of the mixture ratios of  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  in  $\text{N}_2/\text{SF}_6/c\text{-C}_4\text{F}_8$  at  $E/p_{20} = 50, 100$  and  $150$  [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ].

Fig. 3.2 は、混合割合に対する換算実効電離係数  $\bar{\alpha}/p_{20}$  の変化を  $E/p_{20}=50, 100, 150$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>] の場合について計算し、示したものである。これを見ると、50 [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>] における  $\bar{\alpha}/p_{20}$  の曲線には、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合が約 12~13% のところに最小値が得られており、成分ガスである N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>、N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> に比べて、かなり低い値を示しているのがわかる。この最小値は、 $E/p_{20}$  の増加と共に、緩和されながら c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合の高い領域に向かって推移している。この結果、Fig. 3.3 の実線に示すような臨界換算電界  $(E/p_{20})_{lim}$  の変化を見ると、それぞれの2成分混合ガスの絶縁耐力を上回る相乗効果が効果的に作用し、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合が 10% から 15% にかけて、最大値が得られている。この中で、○印は筆者らの絶縁破壊実験により導かれた結果を表している。これと比較すると、解析結果は c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合が 3% のところの絶縁耐力の最大値を裏付けてはいないが、12% のところでは、十分に裏付けているのがわかる。

c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合が高い領域 (20% 以上) で、実測値が解析結果よりも低くなっているのは、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の放電生成物(遊離炭素)が電極表面上に付着し、電界弱点が生じたことによる極端な電界変動が原因であると考えられる。このため、解析によって得られた c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合が 10% から 15% にかけての相乗効果は現れていない。また、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合を 3% としたところで、実測値による絶縁耐力が急増している点については、解析結果では示されなかったことから、今後、さらに詳細な検討を加えていく必要がある。いずれにしても、N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 混合ガスに c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> を混合した3成分混合ガスは、相乗

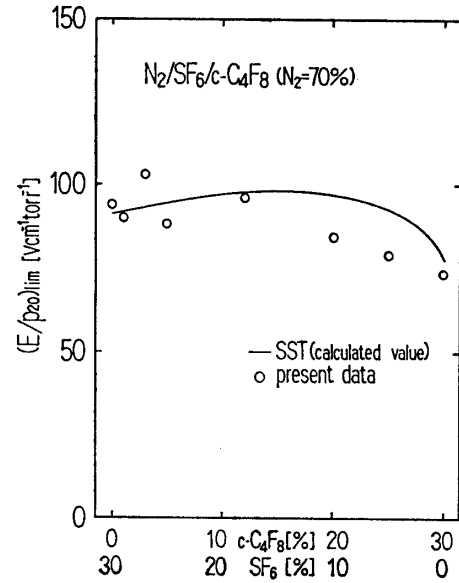
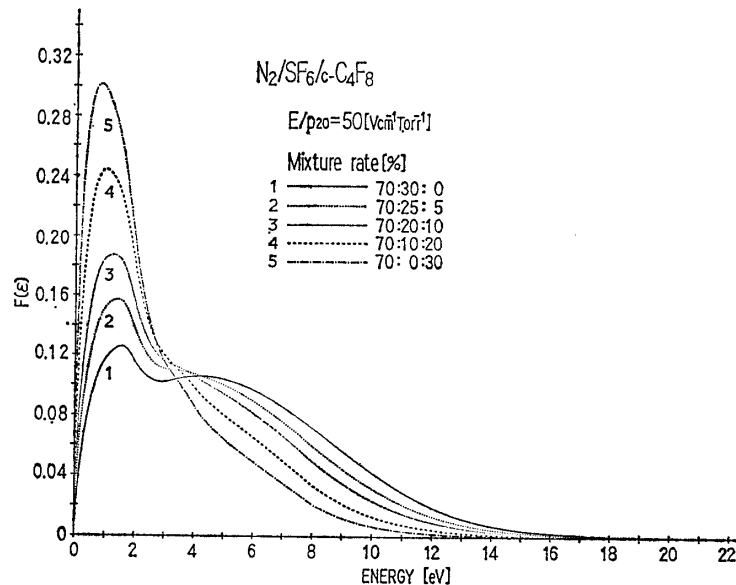


Fig. 3.3 Limit reduced field  $(E/p_{20})_{lim}$  as a function of gas mixture ratios of c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> in N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>.

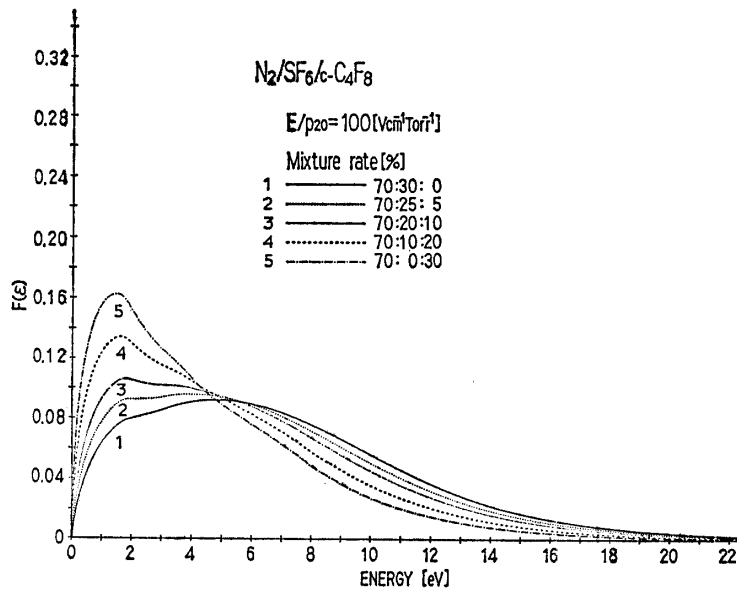
The solid line shows the values estimated by the present analysis, and circle marks show the experimental data.

効果を示し、高い絶縁耐力を持つことを解析的にも明らかにすることができた。

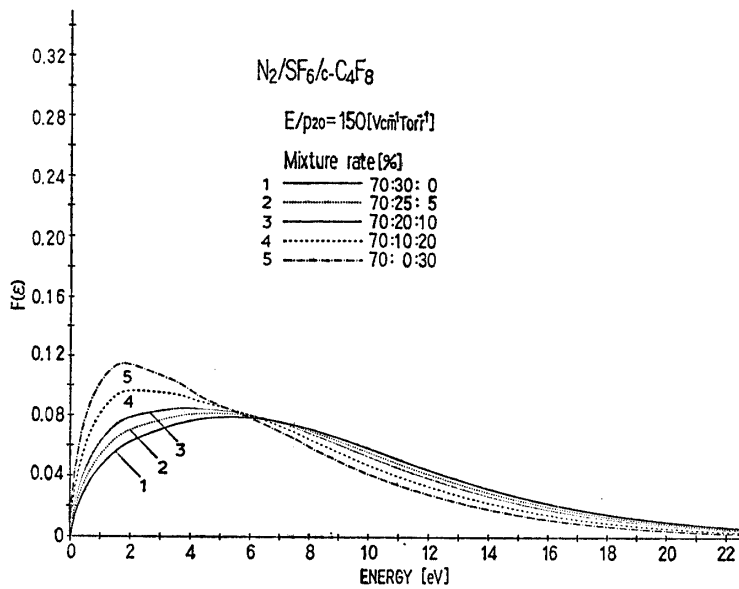
Fig. 3.4(a)~(c) は、3成分混合ガスの電子エネルギー分布関数  $F(\epsilon)$  を示したものである。これは、 $E/p_{20}$  を一定としたときの混合割合の変化による推移を表している。 $E/p_{20}=50$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>] のときを示した(a)を見ると、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合が高いほど低エネルギー領域での電子の分布が密となっており、0.5~1.5[eV] 付近



(a)  $E/p_{20}=50$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>].



(b)  $E/p_{20}=100$  [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ].



(c)  $E/p_{20}=150$  [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ].

Fig. 3.4 Electron energy distributions in  $\text{N}_2/\text{SF}_6/\text{c-C}_4\text{F}_8$ .

に鋭いピークが得られているのがわかる。ここで、実線 1 で示した  $\text{N}_2(70\%)/\text{SF}_6(30\%)$  混合ガスの場合、このピークを  $\text{N}_2$  の振動励起断面積  $Q_0$  のエネルギー吸収機構によって説明することができる。このため、 $\text{c-C}_4\text{F}_8$  を加えることによって、さらに大きなピークを持ったことから、 $\text{c-C}_4\text{F}_8$  にも  $\text{N}_2$  と同じようなエネルギー吸収機構が働いているものと推測される。このことは、Fig. 2.1 に示した  $\text{c-C}_4\text{F}_8$  の電子衝突断面積のセットにおいて、約  $\epsilon=0.5$  [eV] 付近に振動励起断面積のピークがあることからもうなずける。さらに  $\text{c-C}_4\text{F}_8$  は、 $\text{N}_2$  や  $\text{SF}_6$  に比べて大きな運動量移行断面積を持っていることもあって、低エネルギー領域における電子増大を招いて

いるものと考えられる。(b), (c)のように  $E/p_{20}$  が高くなると、このピークは低下する傾向にあり、電子は高エネルギー側へ分布するようになるが、 $\text{c-C}_4\text{F}_8$  の混合割合が高いほど、低エネルギー側の電子の存在確率は高くなっている。

$\text{N}_2/\text{SF}_6$  混合ガスでは、バッファガスとしての  $\text{N}_2$  の作用が  $F(\epsilon)$  を低エネルギー領域へシフトさせ、 $\text{SF}_6$  の持つ大きな電子付着断面積が効果的に電子を付着し、その結果、絶縁耐力の相乗効果が現れるものと説明されている。 $\text{SF}_6$  は  $\epsilon \approx 0$  [eV] 近傍で非常に大きな電子付着断面積を持っており、電子を付着することによって  $\text{SF}_6^-$  イオンを生成する。つまり、 $\text{N}_2/\text{SF}_6$  に  $\text{c-C}_4\text{F}_8$  を加え

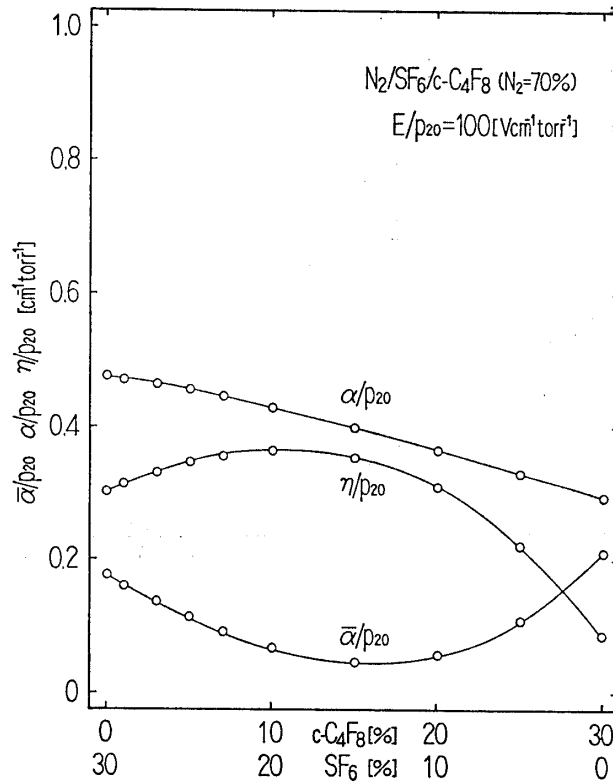


Fig. 3.5 Effective ionization coefficient  $\bar{\alpha}/p_{20}$ , ionization coefficient  $\alpha/p_{20}$  and electron attachment coefficient  $\eta/p_{20}$  as a function of the mixture ratios of c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> in N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> at  $E/p_{20}=100$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>].

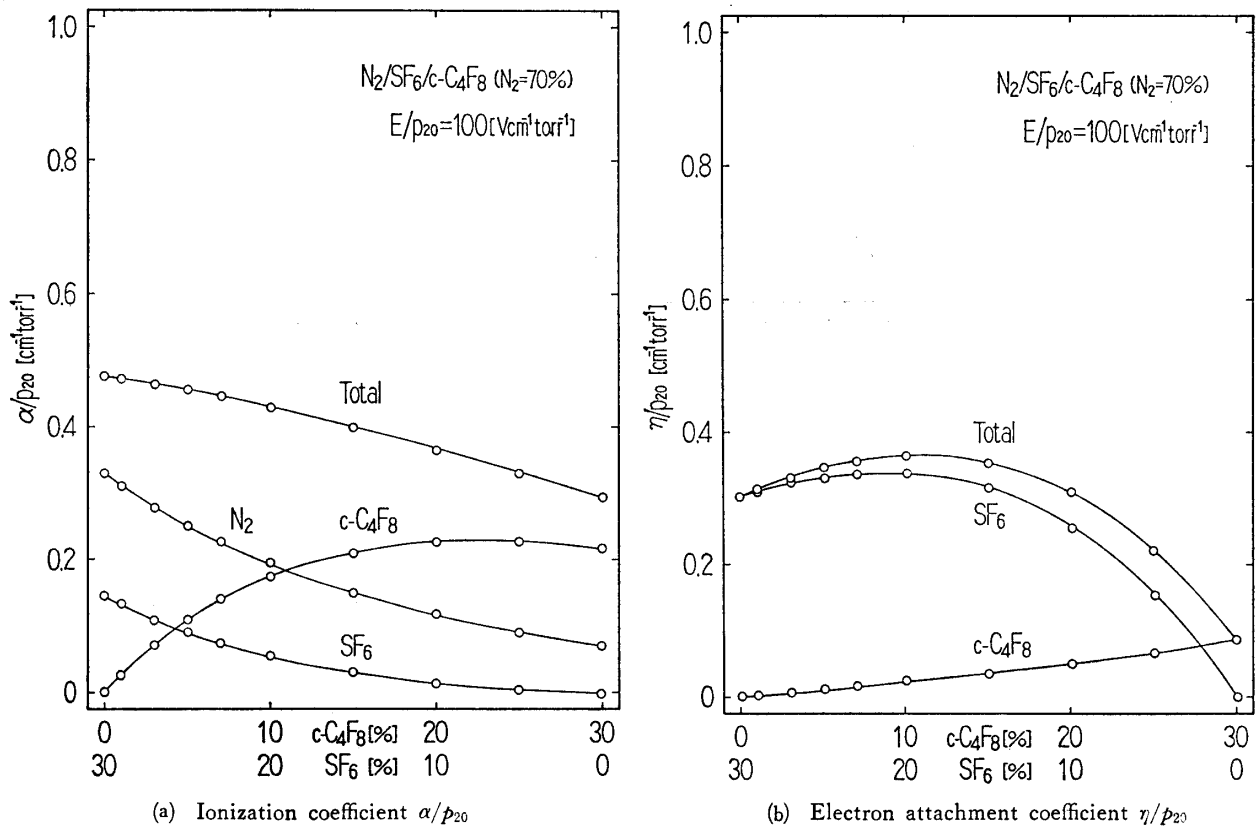


Fig. 3.6 Ionization coefficient  $\alpha/p_{20}$  and electron attachment coefficient  $\eta/p_{20}$  for each component gas and their mixture gases as a function of the mixture ratios of c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> in N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> at  $E/p_{20}=100$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>].

た3成分混合ガスも、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の増加にしたがって、 $F(\epsilon)$ は低エネルギー側へシフトされることから、 $\text{SF}_6$ の電子付着を活発にしているものと考えられる。

このことから、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ は $\text{SF}_6$ に対してバッファガスである $\text{N}_2$ と同じような作用が働いているのではないかと推測される。

Fig. 3.5は、3成分混合ガス中における $E/p_{20}=100$  [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ]の換算電離係数 $\alpha/p_{20}$ と換算電子付着係数 $\eta/p_{20}$ の関係を混合割合に対して表したものである。これを見ると、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合割合の増加と共に、明らかにガス全体としての電子付着は増加しており、電離は減少しているのがわかる。しかし、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合割合が10%を越えるところから、電子付着は減少し、必ずしも $c\text{-C}_4\text{F}_8$ を多く加えることが、絶縁耐力を向上させるものではないことを示している。

Fig. 3.6は、3成分混合ガス中の成分ガスが占める $\alpha/p_{20}$ 、 $\eta/p_{20}$ を分別して表したものである。ここでは、 $E/p_{20}=100$  [ $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$ ]の場合を示した。(a)の電離係数を見ると、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合割合の増加に対して、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ 成分は大きく増加しているものの、 $\text{N}_2$ と $\text{SF}_6$

成分による $\alpha/p_{20}$ はどちらも急激な減少を示しているのがわかる。このため、全体としての電離は減少する傾向を示す。ここで、注目すべき点は、 $\text{N}_2$ の混合割合は70%一定であるのに拘らず、 $\text{N}_2$ 成分の $\alpha/p_{20}$ が減少していることである。このことは、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ が $\text{N}_2$ に対してもバッファとして作用しているものと考えられる。

一方、(b)の電子付着に関しては、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合割合の増加に対して、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ 成分の増加はわずかなものであり、むしろ、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合割合の少ないところでの $\text{SF}_6$ 成分による電子付着の方が大きく現れているのがわかる。したがって、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合割合が比較的少ないところでの3成分混合ガスにおける絶縁耐力の向上は、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ 成分による電子付着が増加するばかりではなく、 $\text{SF}_6$ 成分による電子付着が、混合割合が少なくなるにも拘らず、増加するためであると判断できる。

しかし、 $c\text{-C}_4\text{F}_8$ の混合割合が10%を越える領域では、 $\text{SF}_6$ 成分による電子付着は大きく減少するようになる。これは、 $\text{SF}_6$ の混合割合が減少することもあって、低エネルギー領域における $c\text{-C}_4\text{F}_8$ による過剰な電子を $\text{SF}_6$ が付着できなくなったものと考えられる。

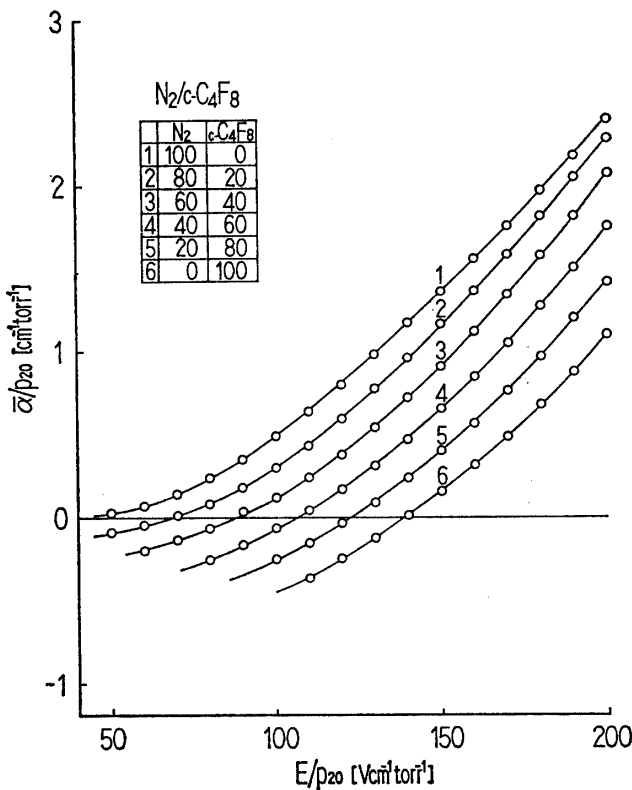


Fig. 3.7 Effective ionization coefficient  $\bar{\alpha}/p_{20}$  as a function of the reduced electric field  $E/p_{20}$  in  $\text{N}_2/c\text{-C}_4\text{F}_8$ . The solid line shows the result estimated by the present analysis.

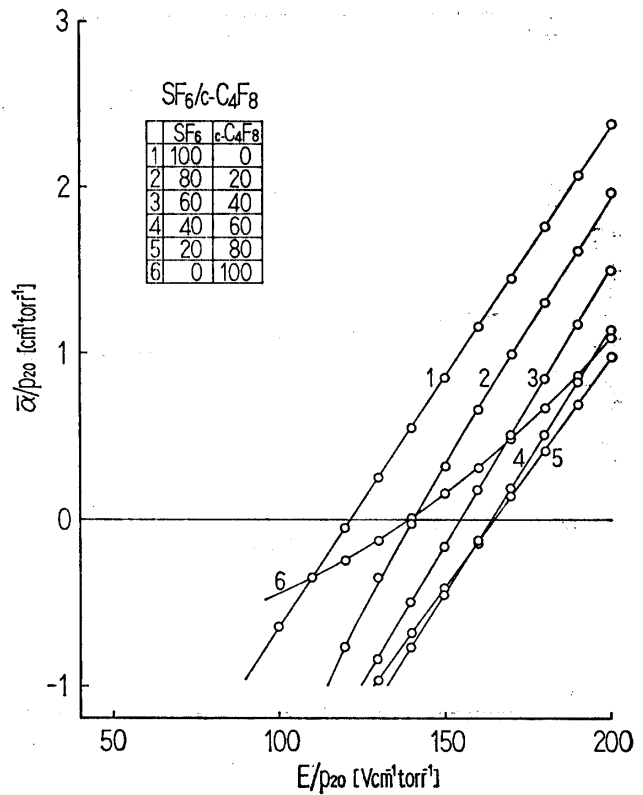
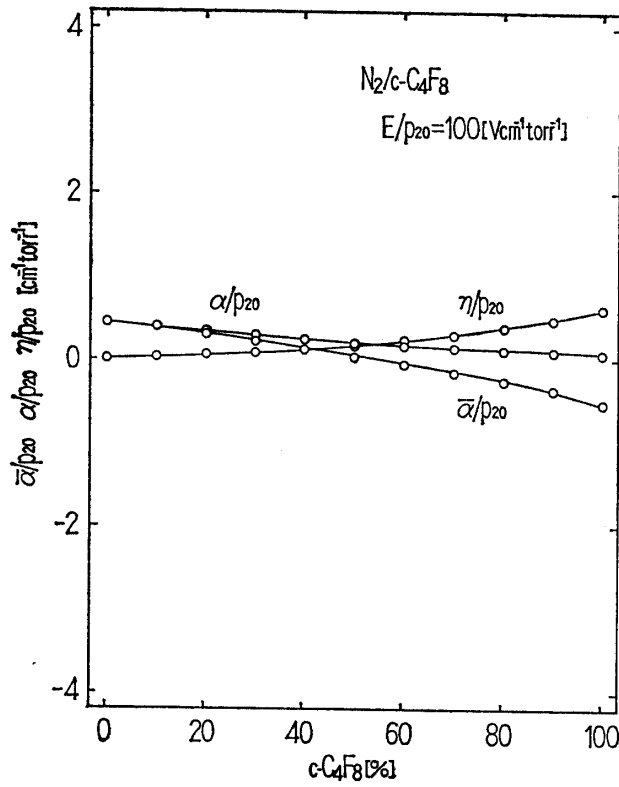
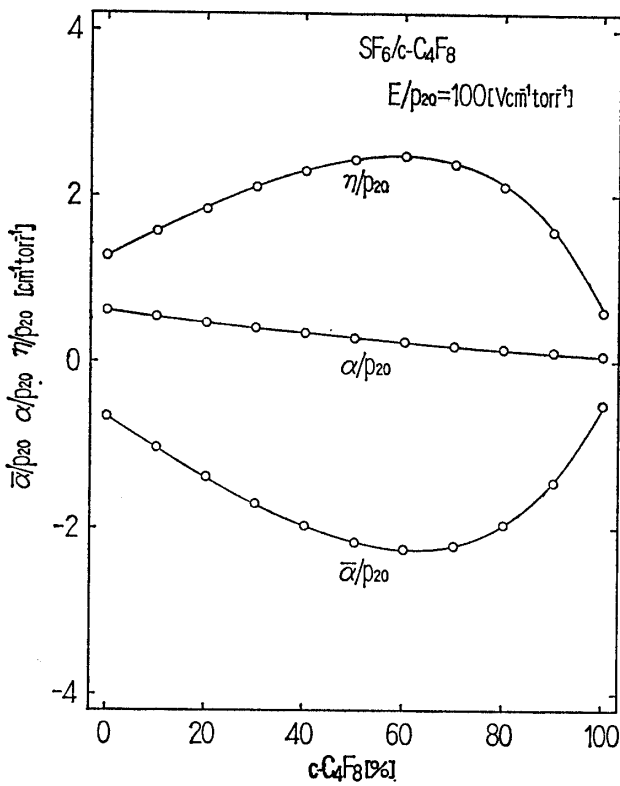


Fig. 3.8 Effective ionization coefficient  $\bar{\alpha}/p_{20}$  as a function of the reduced electric field  $E/p_{20}$  in  $\text{SF}_6/c\text{-C}_4\text{F}_8$ . The solid line shows the result estimated by the present analysis.



(a) N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>

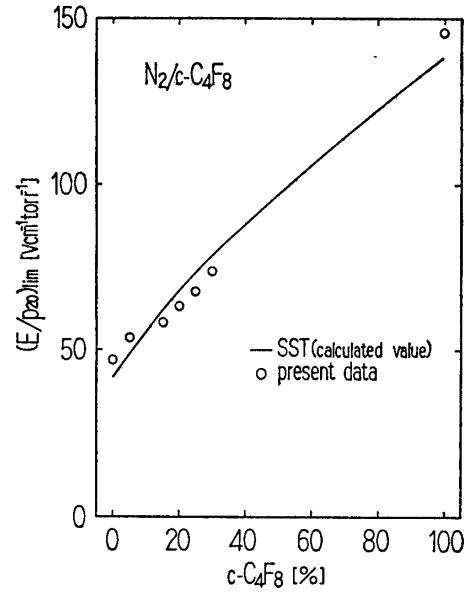


(b) SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>

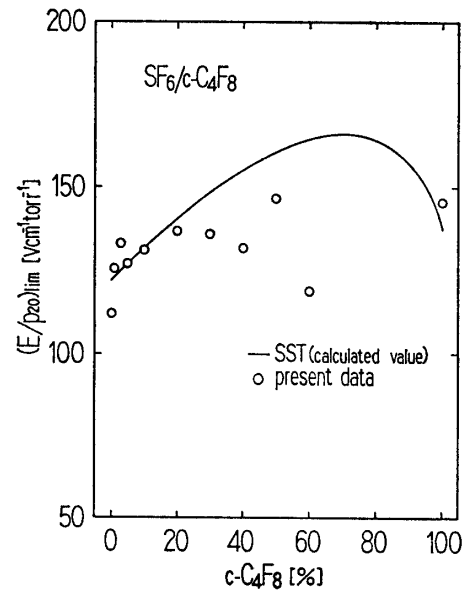
Fig. 3.9 Effective ionization coefficient  $\bar{\alpha}/p_{20}$  as a function of the mixture ratios of c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> in N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> and SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> at E/p<sub>20</sub>=100, 150 and 200 [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>].

### 3.3 2成分混合ガス (N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>) に対する解析

表題の3成分混合ガスは、単一ガスである N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>, c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> だけでなく、2成分混合ガスである N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> を成分ガスとしている。このため、3成分混合ガスの特性を評価する上で、成分ガスの性質を把握しておく必要がある。N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>, および N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 混合ガスについては、前報で報告し、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> に



(a) N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>



(b) SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>

Fig. 3.10 Limit reduced field  $(E/p_{20})_{lim}$  as a function of gas mixture ratios of c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> in N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>. The solid line shows the values estimated by the present analysis, and circle marks show the experimental data.



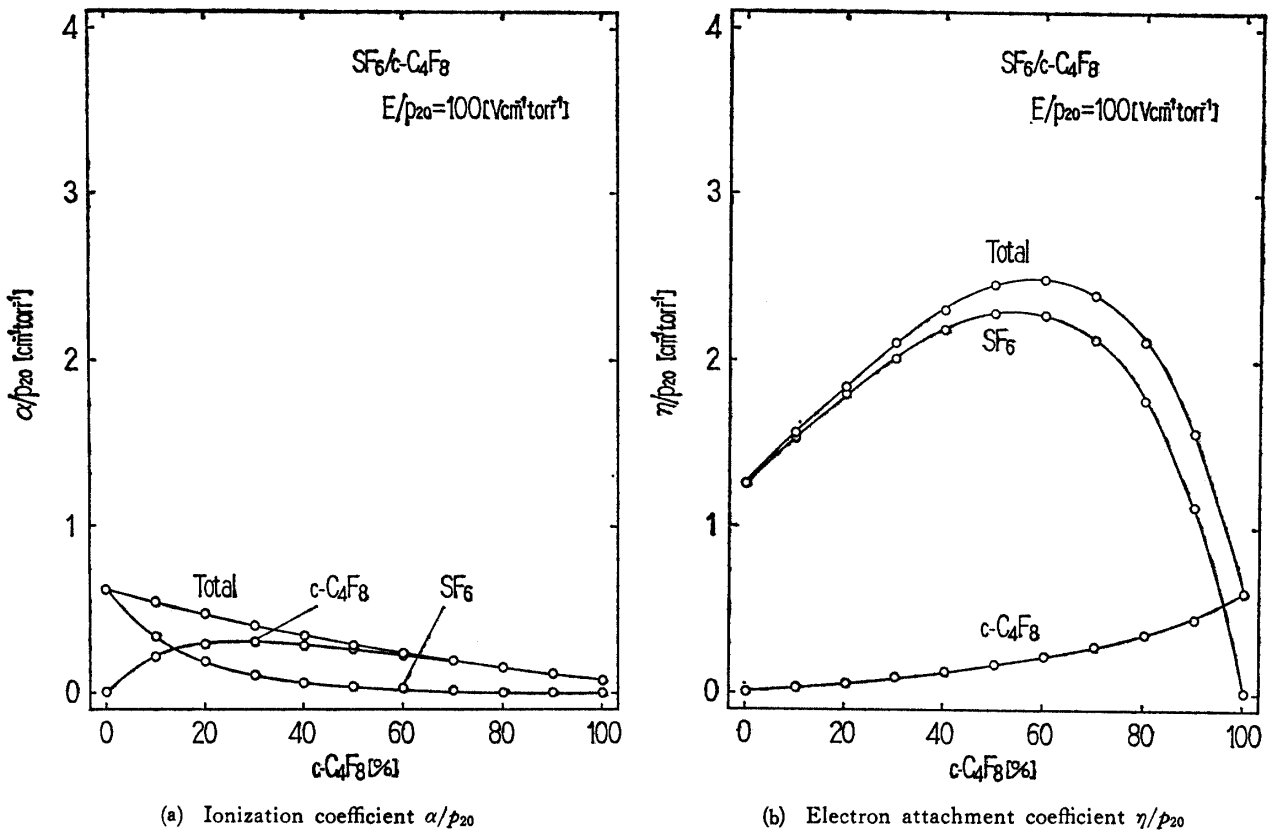


Fig. 3.11 Ionization coefficient  $\alpha/p_{20}$  and electron attachment coefficient  $\eta/p_{20}$  for each component gas and their mixture gases as a function of the mixture ratios of c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> in SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> at  $E/p_{20}=100$  [Vcm<sup>-1</sup>Torr<sup>-1</sup>].

については、すでに前述したので、ここでは N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>、SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の 2 成分混合ガスの解析結果について述べる。

Fig. 3.7 は、N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 混合ガスの  $E/p_{20}$  に対する  $\bar{\alpha}/p_{20}$  の変化を表したものである。ここでは、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合を 0~100% まで、20% 間隔で変化させたときの特性の推移を示した。これを見ると、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合の増加に伴って、ほぼ等間隔で減少し、特性が全体として高  $E/p_{20}$  領域へ推移している様子がわかる。このことは、N<sub>2</sub> に c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> を混合することによって、ガスの絶縁耐力が向上していることを示している。しかし、臨界換算電界  $(E/p_{20})_{lim}$  は、等間隔での増加を示しているため、N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> で見られたような顕著な絶縁耐力の向上を期待することはできない。また、全ての混合割合において、曲線の傾きが小さいために、SF<sub>6</sub> で問題となるような電極表面状態が絶縁耐力に与える影響は少ないものと考えられる。

一方、2つの電氣的負性気体からなる SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 混合ガスは、N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> とは全く異なる特性を示している。Fig. 3.8 を見ると、各混合割合に対する臨界換算電界が  $125 \leq (E/p_{20})_{lim} \leq 165$  [Vcm<sup>-1</sup>Torr<sup>-1</sup>] の範囲に集中

しており、N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の場合のように大きな広がりを持たないのが特徴である。混合の変化による特性の推移は不規則で、1→2、2→3、3→4、4→5 の順に臨界換算電界の増加幅が狭くなる傾向にある。また、4→5 への推移では大きな差異は見られず、ほとんど特性が一致しているように見える。このため、SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 混合ガスでは、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の割合が 60%、ないしは 80% の範囲で絶縁耐力にピークが現れ、それ以降は急激に 5→6 のように減少していくものと考えられる。この混合ガスにおける臨界換算電界付近での  $\bar{\alpha}/p_{20}$  傾きは、2、3、4 で SF<sub>6</sub> 単一の場合よりも大きいために、この混合割合の範囲では、電極表面上でのわずかな  $E/p_{20}$  の変化が、ガスの絶縁特性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

Fig. 3.9 は、N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>、および SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 混合ガスの混合割合に対する  $\bar{\alpha}/p_{20}$ 、 $\alpha/p_{20}$  および  $\eta/p_{20}$  の変化を  $E/p_{20}$  が 100 [Vcm<sup>-1</sup>Torr<sup>-1</sup>] の場合について計算して示したものである。N<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 混合ガスの(a)を見ると、3成分混合ガスで得られたような興味ある特性は示されず、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合に対して、 $\bar{\alpha}/p_{20}$  は単調に減少しているのがわかる。一方、SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 混合ガスの(b)では、3成分混合ガスの場合と非常によく似た特性を

示している。これを見ると、 $\bar{\alpha}/p_{20}$  の曲線には、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合が約70~80%のところに最小値が得られており、成分ガスであるSF<sub>6</sub>、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>に比べて、かなり低い値を示しているのがわかる。この最小値は、 $E/p_{20}$  の増加と共に、緩和されながらc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合の高い領域に向かって推移している。このように、 $\bar{\alpha}/p_{20}$  の曲線が最小値を持つのは、3成分混合ガスでも確認されたことである。

この結果、臨界換算電界  $(E/p_{20})_{lim}$  の変化を見ると、Fig. 3.10 に示すようになる。(a)のN<sub>2</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>混合ガスの場合は、実線で示したように、成分ガスの分圧比和に比例する形で絶縁耐力の向上を認めることができる。この中で、○印は筆者らの絶縁破壊実験により導かれた結果を表しているが、測定を行った範囲で、実測値は解析結果によって十分裏付けられているのがわかる。(b)のSF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>混合ガスの場合は、成分ガスの絶縁耐力を上回る相乗効果が効果的に作用し、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合が60%から80%にかけて、最大値が得られている。同様に○印は筆者らの実測値を表しているが、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合が高くなるのに伴い、実測値にばらつきが生じ、相乗効果は現れていない。

SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>混合ガスのc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合に対する $\bar{\alpha}/p_{20}$ 特性が、3成分混合ガスの場合とよく似た特性を示したことから、混合ガス中の成分ガスが占める $\alpha/p_{20}$ 、 $\eta/p_{20}$ を分別して表し、3成分混合ガスの場合と比較した。Fig. 3.11は、 $E/p_{20}=100$  [Vcm<sup>-1</sup> Torr<sup>-1</sup>]の $\alpha/p_{20}$ 、 $\eta/p_{20}$ を示したものである。(a)の電離係数を見ると、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合の増加に対して、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>成分は大きく増加しているものの、SF<sub>6</sub>成分による $\alpha/p_{20}$ が急激な減少を示しているため、全体としての電離は減少するのがわかる。

一方、(b)の電子付着に関しては、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合の増加に対して、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>成分の増加はわずかなもので、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合の少ないところでのSF<sub>6</sub>成分による電子付着の方が、かなり大きく現れているのがわかる。このことは、前述した3成分混合ガスの結果よりも、むしろ顕著に現れており、非常によく似た傾向を示している。したがって、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>を加えることによる3成分混合ガスの絶縁耐力の向上は、SF<sub>6</sub>とc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の間にある電子付着係数の関係から説明することができ、3成分混合ガスの絶縁特性は、SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の2成分混合ガスの性質に大きく依存していることが明らかになった。

#### 4. まとめ

SF<sub>6</sub>に代わるガス絶縁媒体の中で、筆者らは、高い絶縁耐力と物理的性質、有毒性、安全性、経済性などの様

々な特性の向上を目指した3成分混合ガス(N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>)に注目し、電子スウォームパラメータ(電離、電子付着係数)をボルツマン方程式から算出し、この混合ガスの放電機構を基礎的な観点から解析した。

今回の報告では、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>単一ガスの電子スウォームパラメータをNovakらのまとめた衝突面積を用いることによって計算し、これまでに報告されている実測値との比較から、断面積の有効性を評価すると共に、解析結果を実測値とフィッティングさせることにより、断面積の修正を試みた。また、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>を加えた3成分混合ガスの電子スウォームパラメータ解析にあたっては、換算電離係数 $\alpha/p_{20}$ と換算電子付着係数 $\eta/p_{20}$ を計算し、臨界換算電界 $(E/p_{20})_{lim}$ まで言及した検討を加えた。

これらの結果を要約すると以下ようになる。

①c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>単一ガスの $\alpha/p_{20}$ 、 $\eta/p_{20}$ 、 $\bar{\alpha}/p_{20}$ を計算し、Naiduらと下妻らによる実測値と比較検討したところ、定性的にはよく一致するものが得られた。しかし、実測値へのフィッティングを行うといった観点から断面積の修正を試みたところ、電離断面積 $Q_i$ については2.9、電子付着断面積 $Q_{e2}$ については0.19の補正係数が得られた。ところが、断面積の修正を行うと $(E/p_{20})_{lim}$ の値が実測値よりもかなり低く得られるため、実際的な絶縁耐力の評価を行う上では、断面積に修正を加えない方が有効であると考えられる。

②電子スウォームパラメータ解析から、3成分混合ガスの $(E/p_{20})_{lim}$ は、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合が10~15%の範囲で相乗効果が現れることがわかった。この結果を筆者らの実測値と比較してみたところ、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合が12%のところでもよい一致が得られた。このような相乗的な絶縁耐力の向上は、電子エネルギー分布関数 $F(\epsilon)$ の解析から、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>を混合することによる $F(\epsilon)$ が低エネルギー領域へ推移し、SF<sub>6</sub>による電子付着が効果的に作用しているためであると考えられる。

③さらに、3成分混合ガスの成分ガス単位の電子付着係数を計算してみたところ、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、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>成分による電子付着の増加よりも、むしろ、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の混合割合が少ないところでのSF<sub>6</sub>成分による増加の方が顕著であることが明らかになった。また、この傾向は、SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の2成分混合ガスの電子付着係数の特性によって説明できたことから、3成分混合ガスのこのような興味ある絶縁特性は、SF<sub>6</sub>とc-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>の間の振舞いに大きく依存しているものと考えられる。

謝辞 本研究の遂行にあたり、日頃御激励、御指導を

賜っている本学工学研究科電気工学専攻主任教授松元崇博士，ならびに本学工学部電気工学科主任教授金古喜代治博士に対し，心より厚く御礼申し上げます。また，本論文の作成にあたり御助言頂いた本学電気工学科中西祥八郎助教授にも感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 岡部，藤井，佐々木，松元：放電研究会資料，ED-89-28，pp.73-82 (1989).
- 2) 佐々木，岡部：東海大学紀要工学部，Vol.29，No.2，pp.11-20 (1989).
- 3) W.R.L. Thomas：J. Phys. B：Atom. Molec. Phys. **2** pp.551-61 (1969).
- 4) J.P. Novak and M.F. Fréchette：J. Appl. Phys. **63** pp.2570-5 (1988).
- 5) M.V. Kurepa：Transactions of the 3rd Czechoslovak Conference on Electronics and Vacuum Physics, 1965 (Academia, Prague, 1967), p.107.
- 6) C.Lifshitz and R.Grajower：Int. J. Mass. Spectrom. Ion. Phys. **10** p.25 (1972/1973).
- 7) I. Sauer, L. G. Christophorou and J.G. Carter：J. Phys. Chem. **71** pp.3016-24 (1979).
- 8) D.Rapp and P. Englander-Golden：J. Chem. Phys. **43** pp.1464-79 (1965).
- 9) B.L.Schram, F.J.de Heer, M.J. Van der Wiel and J. Kistemaker：Physica **31** p.94 (1965).
- 10) K. Stephan, H. Helm and T.D. Märk：J. Chem. Phys. **73** p.3763 (1980).
- 11) M.S.Naidu, A.N.Prasad and J.D.Draggs：J. Phys. D：Appl. Phys. **5** pp.741-6 (1972).
- 12) 下妻，金子，種田，長谷川，田頭：放電研究会資料 ED-83-86，pp.101-9 (1983).
- 13) L.G. Christophorou, R.A. Mathis, D.R. James and D.L. McCorkle：J. Phys. D：Appl. Phys. **14** pp.1889-901 (1981).