

# 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 (III)

家永栄治\*1・森田浩三\*1・岡部昭三\*2

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

by

Eiji IENAGA, Kozo MORITA and Shozo OKABE

(Received on Sept. 19, 1992)

### Abstract

The authors have already reported 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, and they also have discussed the basic physical mechanism and properties of the gases with Boltzmann equation analysis. In this paper, the authors analyze and discuss the electron swarm parameters such as ionization coefficients and electron attachment coefficients of the gases, in order to study the effect of the differences between the two sets of the electron collision cross sections for  $c-C_4F_8$  that have been shown by Novak et al. and Itoh et al., respectively, and between the estimation of electronic and vibrational excitation cross sections of  $N_2$ . The analytical results of the electron swarm parameters in unary  $c-C_4F_8$ , unary  $N_2$ , and ternary gas mixtures are different due to the difference in the cross sections of each gas and their mixture ratios. It is found that the limit reduced fields of the mixture gases are not remarkably dependent on the differences in the cross sections and the mixture ratios.

**Keywords :** *Electron swarm parameters, Electron collision cross sections, Ternary gas mixtures, Mixture ratios, Reduced field strength*

### 1. はじめに

$SF_6$ ガスは化学的に安定であり、絶縁耐力が高く、消弧能力にも優れているため、総合的な観点から高電圧用電力機器に広く用いられてきている。しかしながら、不平等電界下や導電性粒子の混入によって、その絶縁耐力

が極端に低下するという問題点も指摘されている。そこで、 $SF_6$ ガスに代わるガスとして、混合ガスに関する研究が数多く行われ、報告されている。

$SF_6$ は、電子エネルギーの低い領域において大きな電子付着断面積を有している。このために、 $SF_6$ は換算電界の低い領域において強い電子付着作用が働き、 $SF_6^-$ あ

\*1 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

るいは  $SF_6^-$  の負イオンを形成し、高い絶縁耐力を示す。しかしまた、 $SF_6$  は電子エネルギーの高い領域においては電離断面積も大きいため、高い換算電界領域において電離作用が活発になり、ある電界強度に達すると一気に破壊にいたるといった性質を持つ。したがって、 $SF_6$  成分の電子付着作用を助長し、 $SF_6$  成分の電離を抑制することが可能な適当なガスがあれば、これを混合することによって、 $SF_6$  の絶縁特性を改善することができる。

そこで、著者らは  $SF_6$  に混合するガスとして、 $N_2$  と  $c-C_4F_8$  に注目し、 $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  から成る3成分混合ガスについて検討している。ここでは各種の電子衝突断面積を用意し、これらの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って解析した。その上でその基礎過程から放電機構を考察して、最適な混合割合や絶縁耐力について検討を行った。これまで行ってきた一連の解析は、次のようである。

(1) まず、著者らはこれまでに報告されている  $N_2$ ,  $SF_6$  の単一ガス、および  $N_2/SF_6$  の2成分混合ガスの電子スウォームパラメータ (主として電離係数、付着係数) の実測値との比較を行うことにより、解析に使用する Thomas 表示のボルツマン方程式の有効性を検討した。その結果、計算を行った換算電界の広い範囲において、実効電離係数や臨界換算電界の実測値との一致が得られることを確認し、混合ガスの解析に Thomas 表示のボルツマン方程式が適用できることを示した<sup>1)</sup>。

(2) 次に、 $N_2/SF_6$  の2成分混合ガスに  $c-C_4F_8$  ガスを混合した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、実験で確認されている絶縁耐力の向上を解析的に裏付けた。この場合、 $N_2$  の混合割合は70%一定として解析した。解析の結果、3成分混合ガスの絶縁耐力向上の要因は、 $c-C_4F_8$  が加えられることにより、電子の有するエネルギーが  $c-C_4F_8$  に吸収されて、電子のエネルギー分布がより低いエネルギー領域へ推移し、このために、 $SF_6$  への電子付着が効率よく行われるためであることを明らかにした<sup>2,3)</sup>。

(3) そしてまた、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、大きく影響を受けるということから、 $N_2$  の混合割合を70%と、その前後の60%と80%に設定して、電子エネルギー分布や臨界換算電界について解析した。解析の結果では、 $N_2$  の混合割合が少ないほど混合ガスのシナジズム (相乗効果) は顕著に現れるが、逆に  $N_2$  の混合割合が多くなると、緩和されてしまうことを示した。著者らは、混合ガスの最適な混合割合を決定するには、絶縁耐力ばかりでなく、放電に伴う生成物やガス価格といった実用的な面も考慮して検討する必要があるとしているために、 $N_2$  の混合割合

としては、70%程度以下が適当であろうと推定している<sup>4)</sup>。

そこで今回の論文では、ボルツマン方程式解析に際して、最も重要な要素となる電子衝突断面積の違いや、その取扱い方による影響について検討を加えることにした。すなわち、 $c-C_4F_8$  の断面積に関しては、Novak ら(1987/1988)<sup>5,6)</sup> が提示したものと、Itoh ら(1991)<sup>7)</sup> が提示したものとを用い、また、 $N_2$  の断面積に関しては、振動励起断面積と電子励起断面積の取扱い方の違いにより、単一ガスあるいはこれらを混合した2成分や3成分混合ガスにおける電離係数、電子エネルギー分布、あるいは臨界換算電界やそのときの混合割合の違いについて検討する。

なお、今回は  $N_2$  の混合割合を60%と70%として解析している。第2章において、これらの電子衝突断面積の取扱い方について詳述し、第3章において、単一ガスの解析結果とガスを混合した場合の解析結果とを示す。

## 2. 電子衝突断面積

これまでの著者らが行った一連の解析において取り扱ってきた衝突断面積についてまとめると次のようになる。

①  $c-C_4F_8$ : これまでの解析において取り扱った  $c-C_4F_8$  の断面積は、Novak ら(1987/1988)<sup>5,6)</sup> によってまとめられ、報告されたものである。これには電子付着断面積  $Q_a$ 、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  $Q_i$  の5つの断面積が含まれている。このなかで  $Q_a$  については、電子を付着して  $C_4F_8^-$ ,  $F^-$ ,  $CF_3^-$ ,  $C_3F_5^-$ ,  $C_2F_3^-$  イオンをつくる5種類の断面積が考慮されている。これらは、Kurepa(1967)<sup>8)</sup> による測定結果を基本として、Lifshitz と Grajower (1972/1973)<sup>9)</sup>、および Sauers ら(1979)<sup>10)</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、計算の簡略化を図るために、Novak らは、 $C_4F_8^-$  を  $Q_{a1}$  で与え、残り4種類の付着断面積の総和を  $Q_{a2}$  で与えている。そして、 $Q_{a1}$  を1.53倍、 $Q_{a2}$  を0.59倍することによって付着断面積を修正している。 $Q_i$  においては、Kurepa らの実測値に合わせるために、補正係数0.59を乗ずることで修正している。

②  $N_2$ : これまでの解析において取り扱った  $N_2$  の断面積は解離断面積  $Q_d$  と  $Q_m$ ,  $Q_i$ ,  $Q_v$ ,  $Q_{ex}$  の5種類である。 $N_2$  のこれらの衝突断面積は、現在までに数多くの研究者によって測定され、報告されている。すなわち、 $Q_m$  については Engelhardt ら(1964)<sup>11)</sup> や Shyn ら(1980)<sup>12)</sup>、 $Q_i$  については Rapp ら(1965)<sup>13)</sup>、 $Q_d$  については Winters ら(1966)<sup>14)</sup> が報告している。また  $Q_v$  については、励起準位が  $V=0$  から  $V=1\sim 6$  へ

に関しては Shulz (1964)<sup>15)</sup>, そして  $V=0$  から  $V=7 \sim 10$  へに関しては Boness ら (1973)<sup>16)</sup> が報告している。  $Q_{ex}$  に関しては, 10 種類の励起状態を Cartwright ら (1977)<sup>17)</sup> が報告している。そしてこれらの衝突断面積を主として谷口ら (1977)<sup>18)</sup> や Ohmori ら (1988)<sup>19)</sup> が整理して報告している。

解析に使用した衝突断面積は, Ohmori らが整理したものである。特にこのなかで,  $Q_v$  に関しては 10 種類の断面積の総和をとって, 一括して与えている。また,  $Q_{ex}$  に関しては 10 種類ある励起断面積のなかでも,  $B^3\Pi_g$  を  $Q_{ex1}$  とし,  $C^3\Pi_u$  を  $Q_{ex2}$ , そして残り 8 種類の励起断面積を一括し, 総和の形で与えたものを  $Q_{ex3}$  として解析を行っている。それと同時に, 谷口らの  $N_2$  の励起準位に関する報告を参考にして, 著者らは  $Q_{ex1} \sim Q_{ex3}$  の大きさをそれぞれ 20% 減少させて使用している。

③  $SF_6$ :  $SF_6$  の断面積は,  $N_2$  と比較してデータがかなり不足しており, 未だ満足なものとはなっていない。そこで各測定者によって実測された電離係数  $\alpha$  や電子付着係数  $\eta$  に解析結果が一致するように, 衝突断面積を修正する形で報告されている。このような中において,  $Q_m, Q_a, Q_v, Q_{ex},$  および  $Q_i$  の断面積を吉沢ら (1978)<sup>20)</sup> や Itoh ら (1988)<sup>21)</sup> が整理し, 報告している。このなかで  $Q_a$  については, 電子を付着して  $SF_6^-, SF_5^-, F^-, SF_4^-, F_2^-$  の負イオンを形成する  $Q_{a1} \sim Q_{a5}$  が考慮されている。

本解析における  $SF_6$  の断面積としては, Itoh らが上述の断面積を近似式で置換した形で示したもの<sup>21)</sup>を用いた。

次に, 今回の解析で取り扱った断面積についてまとめると次のようになる。

①'  $c-C_4F_8$ : 今回の解析において  $c-C_4F_8$  の衝突断面積として用いたのは, Itoh ら (1991)<sup>7)</sup> が提示したものである。

Itoh らは, Novak ら (1987/1988)<sup>5,6)</sup> によって提示されたものは, SST 法の実験に対する計算に限定されているために, 移動速度  $W_m$  や横方向拡散係数  $D_T$  のような TOF 法の実験での測定結果と比較することは不可能であるとしている。さらに Itoh らは, Novak らの衝突断面積を使用して算出した電子スウォームパラメータは, Naidu ら (1972)<sup>22)</sup> の測定結果と大きく異なっているために, 彼らの断面積は修正しなければならないと述べている。

Itoh らは, 電子付着断面積の決定過程は非常に複雑であることから,  $C_4F_8^-, F^-, CF_3^-, C_3F_5^-, C_2F_3^-$  の形成に対する 5 つの断面積  $Q_{a1} \sim Q_{a5}$  については, Sauers ら (1979)<sup>10)</sup> のデータを用いている。しかし, これは相

対値でしか示していないので, Kurepa の  $Q_{a1}$  のピーク値で規格化している。そして振動励起断面積  $Q_v$  と電子励起断面積  $Q_{ex}$  は, できるだけ  $\alpha, \eta, W_m, D_T$  といった電子スウォームパラメータの計算値が前述の実験値と一致するように, Novak らのまとめた衝突断面積に, 0.675 と 0.85 の係数をそれぞれに乗じた形で示している。

②'  $N_2$ : 著者らが用いた  $N_2$  の衝突断面積は, 従来と同じく Ohmori らが整理して報告したものである。しかし, 今回の解析では  $Q_{ex}$  と  $Q_v$  はそれぞれ 10 個ずつの励起準位ごとに分割しており, 断面積の総和や一括は行っていない。また  $Q_{ex}$  については, 谷口らの報告を参考にして  $A^3\Sigma_u^+, a^1\Pi_g, C^3\Pi_u$  の 3 種類の断面積の大きさのみを 20% 減少させて解析を行った。

③'  $SF_6$ :  $SF_6$  に関しては, 前報までと同じ衝突断面積を用いた。

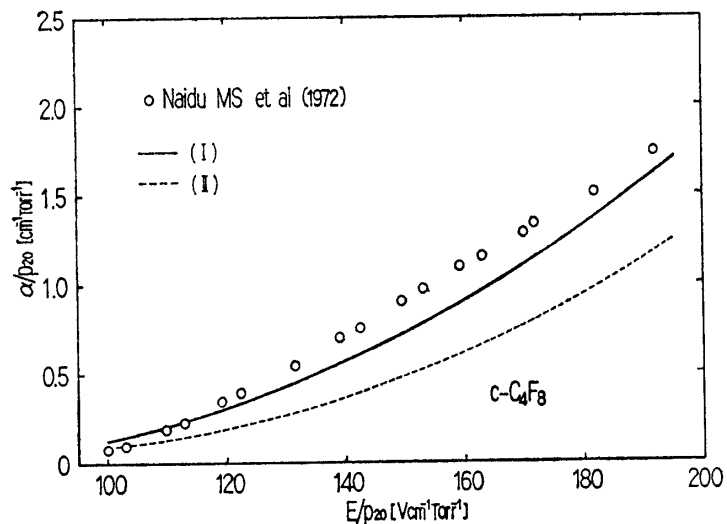
本解析では, これまでと同様に定常タウンゼント (SST) 法による Thomas 表示のボルツマン方程式を用い, 換算電界  $E/p_{20}$  が  $50 \sim 200$  [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] の範囲で計算を行った。混合ガスの解析にあたっては, 衝突断面積は各成分ガスの分圧比の和として与え, また, ガス分子数密度  $N$  は,  $N=3.29598 \times 10^{18}$  [ $cm^{-3}$ ] ( $1$  [Torr],  $20$  [ $^{\circ}C$ ]) とした。

### 3. 解析結果および検討

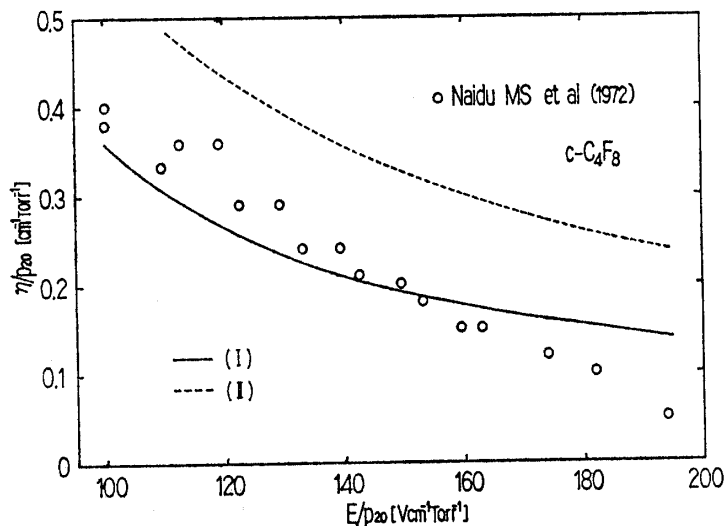
#### 3.1 $c-C_4F_8$ 単一ガス

Fig. 3.1 は,  $c-C_4F_8$  単一ガスの換算電離係数  $\alpha/p_{20}$ , 換算電子付着係数  $\eta/p_{20}$ , および換算実効電離係数  $\bar{\alpha}/p_{20}$  を, 換算電界  $E/p_{20}$  が  $100 \leq E/p_{20} \leq 200$  [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] の範囲で解析した結果を示したものである。図 (a) は  $\alpha/p_{20}$ , 図 (b) は  $\eta/p_{20}$ , 図 (c) は  $\bar{\alpha}/p_{20}$  を示している。図の破線は Novak らが提示した衝突断面積を用いて解析した結果であり, 実線は Itoh らが提示したものをを用いた解析結果である。また図中における○は Naidu ら (1972)<sup>22)</sup>, そして●は Shimozuma ら (1983)<sup>23)</sup> の実測値を示している。

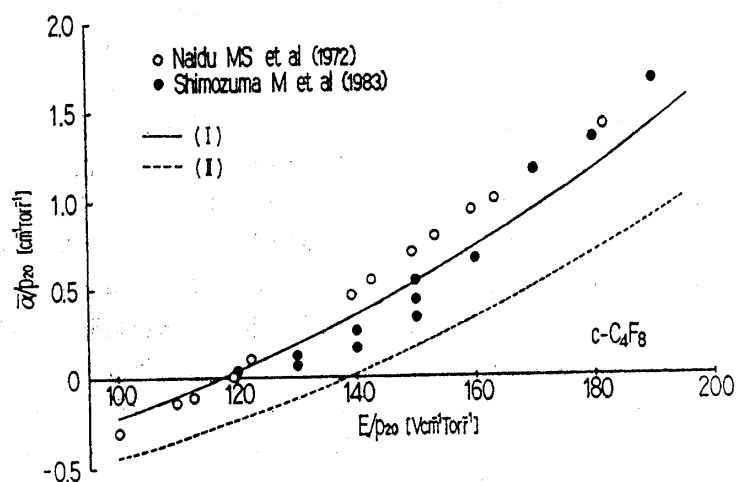
図 (a) における  $\alpha/p_{20}$  では, Itoh らの提示した衝突断面積による解析結果 (実線) は, Novak らの提示したのものによる解析結果 (破線) に比べて, Naidu らの実測値に対しよい一致がみられる。破線は Naidu らの実測値に比べて低く, 高電界になるほどその差は大きくなっている。図 (b) における  $\eta/p_{20}$  では, 実線は  $E/p_{20}$  が  $160$  [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] 以下で比較的 Naidu らの実測値により一致を見せている。一方, 破線はここで示した  $E/p_{20}$  の全領域で大きな値を与えており, 破線の値は  $E/p_{20}=140$  [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] において, Naidu らの実測値に対して 1.7 倍程度高い値を示して



(a) Ionization coefficients  $\alpha/p_{20}$ .



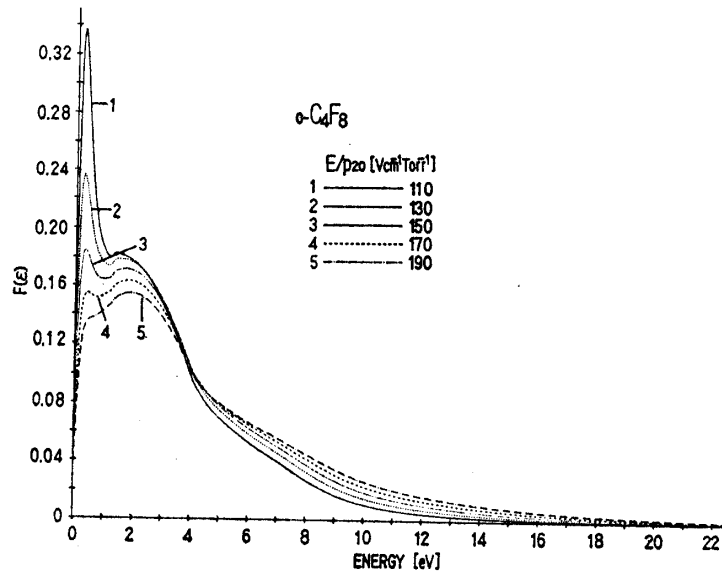
(b) Electron attachment coefficients  $\eta/p_{20}$ .



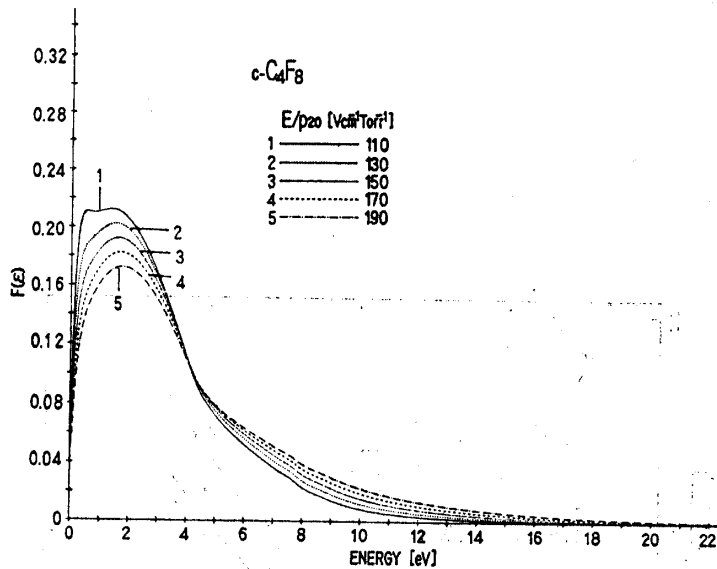
(c) Effective ionization coefficients  $\bar{\alpha}/p_{20}$ .

**Fig. 3.1** Electron swarm parameters as a function of the reduced electric field  $E/p_{20}$  in  $c-C_4F_8$ .

(I) The solid line shows the values estimated with the cross section set (\*) shown by Itoh et al. for  $c-C_4F_8$ , and (II) the dashed line shows the values estimated with the cross section set shown by Novak et al. for  $c-C_4F_8$ .



(a) For the cross section set shown by Itoh et al. (\*1)



(b) For the cross section set shown by Novak et al. (\*2)

Fig. 3.2 Electron energy distributions in c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>.

いる。図(c)における  $\bar{\alpha}/p_{20}$  では、実線は破線に比べて Naidu らおよび Shimozuma らの実測値により接近したものとなっており、破線はいずれの実測値よりも低い値を示している。Novak らの示した断面積による  $\bar{\alpha}/p_{20}$  は、Itoh らの断面積によるものを、全体的に  $E/p_{20}$  の高い側に移行した特性となっている。

Fig. 3.2 は、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 単一ガスにおいて、 $E/p_{20}$  を 110, 130, 150, 170, 190 [V・cm<sup>-1</sup>・Torr<sup>-1</sup>] とした場合の電子エネルギー分布  $F(\epsilon)$  を示したものである。図(a) は Itoh ら、図(b) は Novak らの衝突断面積から算出したものである。いずれも、2[eV] 以下の低エネルギー領域においてピークを示す分布をしている。特に、図(b) と比べて図(a) の  $F(\epsilon)$  は、 $E/p_{20}$

が 150[V・cm<sup>-1</sup>・Torr<sup>-1</sup>] 以下において、0.2~0.3[eV] の低エネルギー領域で鋭いピークを示す分布をしており、 $E/p_{20}$  が低くなるにつれてその傾向は非常に顕著となっている。図(b) と、図(a) の  $E/p_{20} > 170$  [V・cm<sup>-1</sup>・Torr<sup>-1</sup>] の場合には、2[eV] 付近にピークを示す分布となっている。しかし、4[eV] 以上になると、 $F(\epsilon)$  に衝突断面積の違いによる差は生じていない。このように低いエネルギー領域に鋭いピークを示す分布となるのは、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の有する大きな振動励起断面積  $Q_v$  によるものである。特に、Itoh らの示した衝突断面積は、Novak らの示した断面積に比べて、 $Q_v$  の効果が顕著となっている。

ここで、Fig. 3.1 (c) の  $\bar{\alpha}/p_{20} = 0$  より与えられる

臨界換算電界 ( $E/p_{20}$ )<sub>lim</sub> に注目してみると、実線では 117.5 [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ], 破線では 138.8 [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] となっている。Christophorou ら (1981)<sup>24)</sup> は「直流電圧印加において、 $c-C_4F_8$  は  $SF_6$  の約 1.2~1.3 倍の絶縁耐力を持つ」ということを報告しており、 $SF_6$  の一般に知られている ( $E/p_{20}$ )<sub>lim</sub> の 117 [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] と比べると、Itoh らの断面積から求めた値では  $SF_6$  の 1.004 倍でかなり低く、Novak らからの値では  $SF_6$  の 1.19 倍でかなり近い値を与えている。Itoh らの衝突断面積による  $\bar{\alpha}/p_{20}$  の解析結果は、Naidu, Shimozuma らの実測値と近い値を示しているが、Novak らの断面積による解析結果はかなり異なっている。しかし、破壊強度の点に関しては、Novak らの断面積による解析結果の方がむしろよい結果を示している。

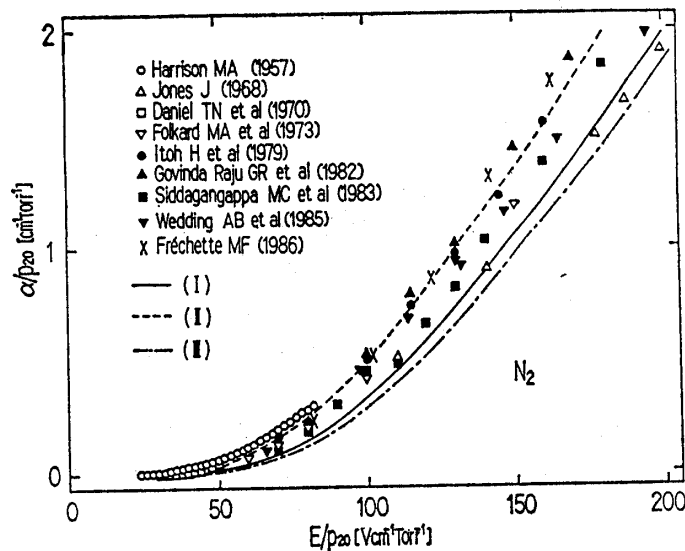
このように、 $F(\epsilon)$ ,  $\bar{\alpha}/p_{20}$ , あるいは ( $E/p_{20}$ )<sub>lim</sub> 等に差異を生じさせる  $c-C_4F_8$  の断面積の違いは、このガスの示す圧力依存性によるものであると推測される。つまり、電界が作用して電子との衝突・散乱が活発になると、 $c-C_4F_8$  ガスに分離が生じ、 $C_4F_8^-$ ,  $F^-$ ,  $CF_3^-$ ,  $C_3F_5^-$ ,  $C_2F_3^-$  のような数種の負イオンが発生する。したがって、これらの分離過程が  $c-C_4F_8$  の圧力依存性を示すものと推測されている。高い ( $E/p_{20}$ )<sub>lim</sub> を与える Novak ら

の衝突断面積は、気圧依存性も含めた高い圧力での等価な断面積を与えていると考えられる。

### 3.2 $N_2$ 単一ガス

Fig. 3.3 は、 $N_2$  単一ガスの換算電界  $E/p_{20}$  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。図中のプロットは、それぞれ他の研究者の実測値<sup>25-33)</sup> である。破線は、計算の簡便を図ると同時に、同じ  $E/p_{20}$  に対して、高い  $\alpha/p_{20}$  を示している Itoh ら (1979)<sup>29)</sup> の実測値にフィットさせるために、振動励起断面積  $Q_v$  は一括して与え、電子励起断面積  $Q_{ex}$  は3分割しその大きさをそれぞれ 20% 減少させて解析した従来の結果である。鎖線は  $Q_{ex}$  と  $Q_v$  をそれぞれ励起準位ごとに分割して解析した結果である。そして実線は、低い  $\alpha/p_{20}$  を示している Jones (1968)<sup>26)</sup> の実測値にフィットさせるように、鎖線と同様に  $Q_{ex}$  と  $Q_v$  をそれぞれ励起準位ごとに分割し、谷口らの報告<sup>18)</sup> を参考にして、 $A^3\Sigma_u^+$ ,  $a^1\Pi_g$ ,  $C^3\Pi_u$  の3種類の衝突断面積の大きさを 20 [%] 減少させて解析した結果である。

$N_2$  のような非負性気体においては、電離係数そのものが破壊に直接影響するので、解析結果を実測値の範囲内に合わせるためには、断面積に修正を加える必要がある。



**Fig. 3.3** Ionization coefficients  $\alpha/p_{20}$  as a function of the reduced electric field  $E/p_{20}$  in  $N_2$ .

(I) The solid line shows the value estimated with cross sections at every excitation level of  $Q_{ex}$  and  $Q_v$  respectively, excepting that the electronic excitation cross sections of  $A^3\Sigma_u^+$ ,  $a^1\Pi_g$ , and  $C^3\Pi_u$  for  $N_2$  are in 20% reduction of each cross section. (\*3)

(II) The dashed line shows the value estimated with 80% of the sum of all  $Q_{ex}$  and the sum of  $Q_v$ . (\*4)

(III) The chain line shows the value estimated with  $Q_{ex}$  and  $Q_v$  at every excitation level respectively. (i.e. in this case, the values estimated with no modification of the cross sections on  $Q_{ex}$  and  $Q_v$  for  $N_2$ .)

る。したがって、今回  $N_2$  に関しては、 $Q_{ex}$  と  $Q_v$  は励起準位ごとに分割したが、さらに実測値の中で最も低い  $\alpha/p_{20}$  を示す Jones の実測値にフィットさせるように、谷口らの報告を参考にして断面積を修正した。混合ガスにおいては、これらの  $N_2$  の電離係数を押さえた形で検討することにした。

### 3.3 2成分混合ガス ( $N_2/SF_6$ , $SF_6/c-C_4F_8$ ) の臨界換算電界

Fig. 3.4 は、 $N_2/SF_6$  混合ガスの  $SF_6$  の混合割合に対する  $(E/p_{20})_{lim}$  の変化を示したものである。破線は  $N_2$  において、一括した  $Q_v$  と、3分割し大きさを20%減少した  $Q_{ex}$  を用いた場合の解析結果であり、実線は  $Q_{ex}$  と  $Q_v$  をそれぞれ10個の励起準位ごとに分割し、3種類の  $Q_{ex}$  のみ大きさを20%減少させて解析した結果である。また、ごく最近 Itoh ら (1991)<sup>34)</sup> も  $N_2$ ,  $SF_6$ ,  $c-C_4F_8$  から成る混合ガスの解析を行い、その結果を報告しているのので、その解析結果を鎖線で示した。

全体的に実線の方が破線より高い絶縁耐力を示している。 $SF_6$  の混合割合が30%前後において、その差が最も大きく、約  $10 [V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}]$  程度となっている。これは、 $N_2$  において電離係数を低い  $\alpha/p_{20}$  の実測値 (Jones ら) にフィットさせたためである。

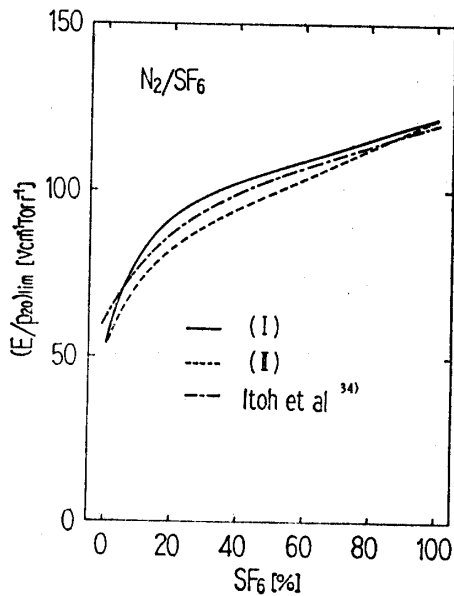


Fig. 3.4 Limit reduced fields  $(E/p_{20})_{lim}$  as a function of gas mixture ratios of  $SF_6$  in  $N_2/SF_6$ .

- (I) The solid line shows the values estimated with modification (\*3) for  $N_2$  in the same way as (I) of Fig. 3.3.
- (II) The dashed line shows the value estimated with modification (\*4) for  $N_2$  in the same way as (II) of Fig. 3.3.

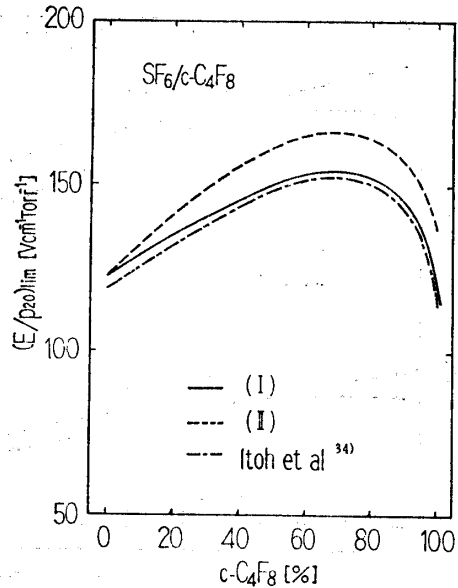


Fig. 3.5 Limit reduced fields  $(E/p_{20})_{lim}$  as a function of gas mixture ratios of  $c-C_4F_8$  in  $SF_6/c-C_4F_8$ .

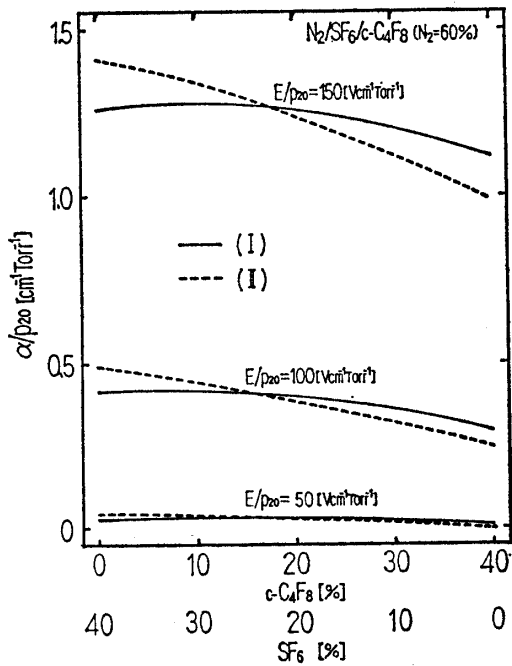
- (I) The solid line shows the values estimated with the cross section set (\*1).
- (II) The dashed line shows the values estimated with the cross section set (\*2).

Fig. 3.5 は、 $SF_6/c-C_4F_8$  混合ガスの  $c-C_4F_8$  の混合割合に対する  $(E/p_{20})_{lim}$  の変化を示したものである。破線は Novak らの提示した  $c-C_4F_8$  の衝突断面積を用いて解析した結果で、実線は Itoh らの提示したものをを用いて解析した結果である。また鎖線は、Fig. 3.4 と同様に Itoh ら<sup>34)</sup>によって報告された解析結果を示したものである。

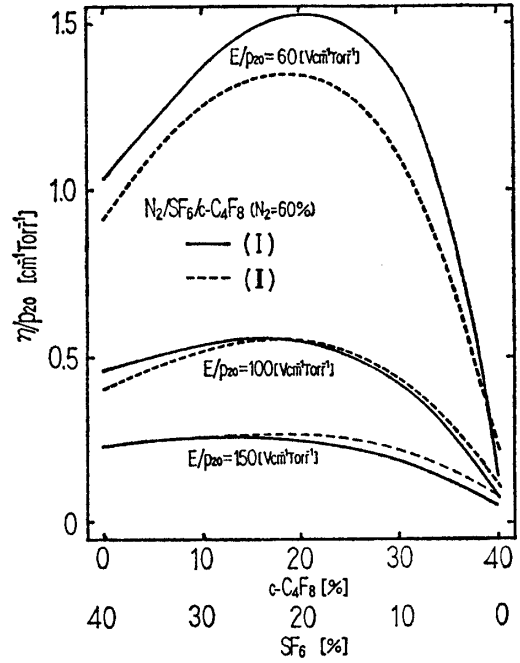
この場合は、いずれの解析値も  $c-C_4F_8$  の混合割合の増加とともに絶縁耐力は急激に上昇し、 $c-C_4F_8$  が70%、 $SF_6$  が30%の混合比において最大値を示している。 $c-C_4F_8$  の混合比がこれを超えると、逆に絶縁耐力は減少する。破線は  $c-C_4F_8$  が混合されることにより実線よりも高い  $(E/p_{20})_{lim}$  を示し、実線は鎖線とかなり接近した値を示している。このように実線の方が破線よりも低い  $(E/p_{20})_{lim}$  を示すのは、 $c-C_4F_8$  単一ガスの衝突断面積として、Itoh らの提示したものをを用いることによって、Novak らのものをを用いるよりも、電離係数  $\alpha/p_{20}$  が増加し、付着係数  $\eta/p_{20}$  が減少したためである。このため、 $c-C_4F_8$  の混合割合が増加するにしたがって、実線と破線の場合の  $(E/p_{20})_{lim}$  の差は大きくなっている。

### 3.4 3成分混合ガス ( $N_2/SF_6/c-C_4F_8$ )

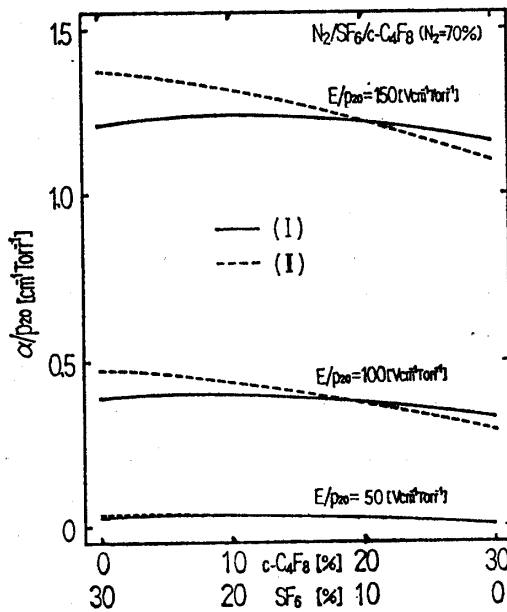
Fig. 3.6 は、 $c-C_4F_8$  の混合割合に対する  $\alpha/p_{20}$  を示したものである。同様に Fig. 3.7 は  $\eta/p_{20}$  を、また Fig. 3.8 は  $\bar{\alpha}/p_{20}$  の変化を示したものである。また、そ



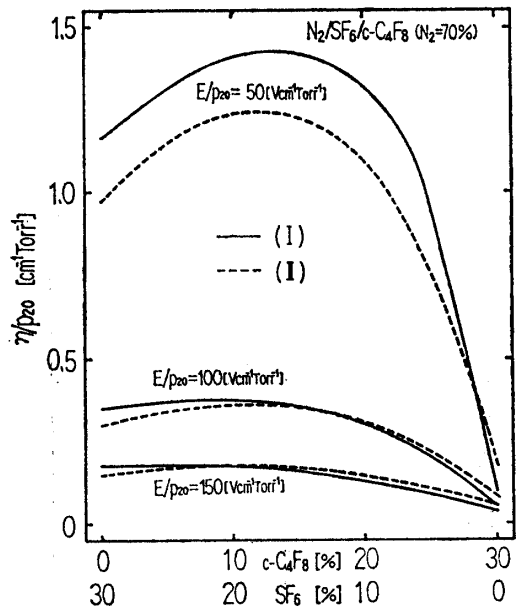
(a) The mixture ratio of  $N_2$  is 60%.



(a) The mixture ratio of  $N_2$  is 60%.



(b) The mixture ratio of  $N_2$  is 70%.



(b) The mixture ratio of  $N_2$  is 70%.

**Fig. 3.6** 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  $N_2=60\%$  and  $N_2=70\%$ . (I) The solid line shows the values estimated with the set (\*1) and the cross sections (\*3). (II) The dashed line shows the values estimated with the set (\*2) and the cross sections (\*4).

**Fig. 3.7** Electron attachment coefficients  $\eta/p_{20}$  as a function of the mixture ratios of  $c-C_4F_8$  in  $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  at  $N_2=60\%$  and  $N_2=70\%$ . (I) The solid line shows the values estimated with the set (\*1) and the cross sections (\*3). (II) The dashed line shows the value estimated with the set (\*2) and the cross sections (\*4).

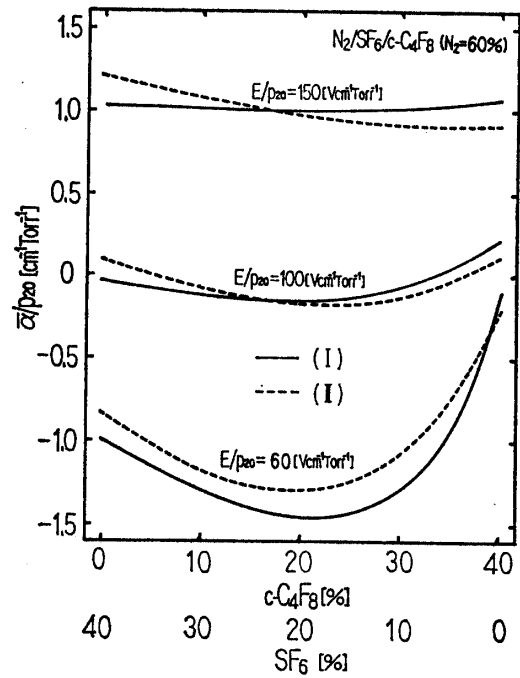


それぞれの図における (a) は  $N_2$  の混合割合を 60% としたとき、(b) は  $N_2$  の混合割合を 70% としたときの解析結果である。破線は  $c-C_4F_8$  の衝突断面積に Novak ら (1987/1988)<sup>5,6)</sup> の提示したものを、 $N_2$  の衝突断面積に、一括した  $Q_v$  と、3 分割し大きさを 20% 減少した  $Q_{ex}$  を用いた場合の解析結果である。また、実線は、 $c-C_4F_8$  の衝突断面積に Itoh ら (1991)<sup>7)</sup> の提示したものを、そして  $N_2$  の衝突断面積に、 $Q_{ex}$  と  $Q_v$  をそれぞれ励起単位ごとに分割し、 $Q_{ex}$  の 3 種類の断面積の大きさを 20% 減少させたものを用いた場合の解析結果である。ここでは  $E/p_{20}$  を、 $(E/p_{20})_{lim}$  付近の 100 [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] と、これよりも高い 150 [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ]、そして逆に低い 50, 60 [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] にとって示してある。

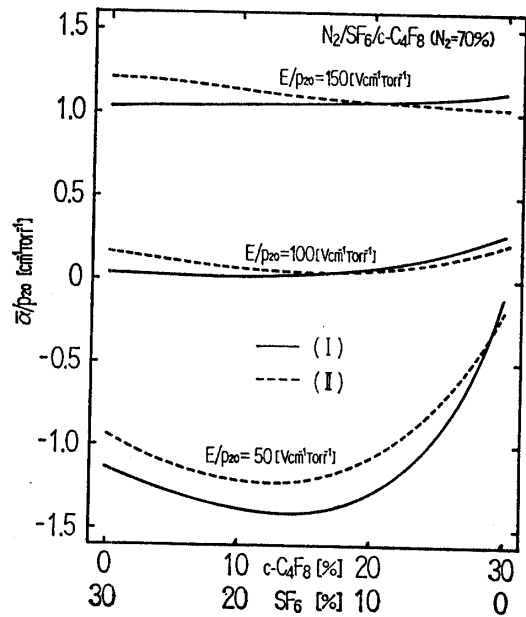
Fig. 3.6 の (a), (b) より、 $E/p_{20}$  が高いときほど、 $\alpha/p_{20}$  は当然大きく、混合割合に対しては、 $N_2/SF_6$  の 2 成分混合ガスのときに  $\alpha/p_{20}$  は最大値を示している。また  $c-C_4F_8$  の混合割合を増加させることによって、電離が押さえられ  $\alpha/p_{20}$  が減少していく特性が示されている。 $E/p_{20}$  が低い場合においては、実線と破線はほぼ同じ特性を示しているが、 $E/p_{20}$  が高くなるにつれて、2 つの解析結果の差は大きくなっている。また、 $c-C_4F_8$  の混合割合の増加に対して、破線の傾きは大きく、実線の傾きはなだらかである。 $N_2$  と  $c-C_4F_8$  の単一ガスにおける  $\alpha/p_{20}$  の差異が、ほぼそのまま実線と鎖線の解析結果の差異に現れている。

$N_2$  は非電氣的負性気体であるので、Fig. 3.7 の (a), (b) の  $\eta/p_{20}$  の特性は、 $SF_6$  と  $c-C_4F_8$  成分のみで決まってしまう。 $E/p_{20}$  が低い場合には、 $\eta/p_{20}$  は  $c-C_4F_8$  のある混合割合のときに明確な最大値を示す。図 (a) の  $N_2$  の混合割合が 60% の場合には、 $c-C_4F_8$  を 20% 程度混合したところでその最大値が現れ、図 (b) の 70% の場合には、 $c-C_4F_8$  を 15% ほど混合したところに現れている。 $c-C_4F_8$  のある混合割合で  $\eta/p_{20}$  が最大値を示すような効果は、 $N_2$  の混合割合が少ない 60% のときに顕著に現れており、 $N_2$  が増加するにつれてこの効果は抑制されてくる。 $E/p_{20}$  が高くなるにしたがって  $\eta/p_{20}$  は減少し、 $E/p_{20}$  が 150 [ $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ] では、ほとんどその最大値を示す  $c-C_4F_8$  の混合割合は判然としなくなる。

また、 $N_2/c-C_4F_8$  の領域では、破線の方が実線よりもわずかに大きな  $\eta/p_{20}$  を示している。これは、 $c-C_4F_8$  単一ガスにおいて、Novak らが提示した断面積を用いたときの  $\eta/p_{20}$  が、同一の  $E/p_{20}$  に対して、Itoh らの提示したものをを用いた解析結果に比べて高い値を示すからである。そして、 $N_2/c-C_4F_8$  にわずかな  $SF_6$  を混合



(a) The mixture ratio of  $N_2$  is 60%.



(b) The mixture ratio of  $N_2$  is 70%.

Fig. 3.8 Effective 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  $N_2=60\%$  and  $N_2=70\%$ . (I) The solid line shows the values estimated with the set (\*1) and the cross sections (\*3). (II) The dashed line shows the value estimated with the set (\*2) and the cross sections (\*4).

することによって、実線と破線の関係は逆転する。これは、Itoh らの提示した  $c-C_4F_8$  の衝突断面積の  $Q_v$  が、Novak らの提示したものよりも大きいため、高エネ

ルギー側の電子が効率よく低エネルギー側に移行され、 $SF_6$  の電子付着効果を増進させていることによっている。

Fig. 3.8 の (a), (b) においては,  $E/p_{20}$  が低いときには, 換算実効電離係数  $\bar{\alpha}/p_{20}$  は  $c-C_4F_8$  がある混合割合のところで最小値を示している。その最小値は実線, 破線とも図 (a) においては,  $c-C_4F_8$  を 20% 混合したところであり, そして図 (b) においては,  $c-C_4F_8$  を 15% 程度混合したところで現れている。しかしながら,  $E/p_{20}$  が高くなると,  $\bar{\alpha}/p_{20}$  は高い値を示すようになり, またその最小値を示す  $c-C_4F_8$  の混合割合は判然としなくなる。これは  $E/p_{20}$  が大きくなるにつれて,  $\alpha/p_{20}$  が高くなり, 電子付着効果は逆に弱ってしまうためと考えられる。

また, 図 (a), 図 (b) とも低い  $E/p_{20}$  においては, 実線と破線の差異が最も大きくなっているが  $(E/p_{20})_{11m}$  付近の  $100 [V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}]$  では両線の差異は小さく, ほぼ一致している。

Fig. 3.9 は, 3成分混合ガス ( $N_2/SF_6/c-C_4F_8$ ) において,  $N_2$  の混合割合を 60%, 70% としたときの,  $c-C_4F_8$  の混合割合に対する  $(E/p_{20})_{11m}$  の変化を示したものである。実線および破線は Fig. 3.6 と同様であり, 鎖線は, Fig. 3.4 と同様に, 最近 Itoh ら<sup>34)</sup> によって報告された解析結果を示したものである。また, ○および●

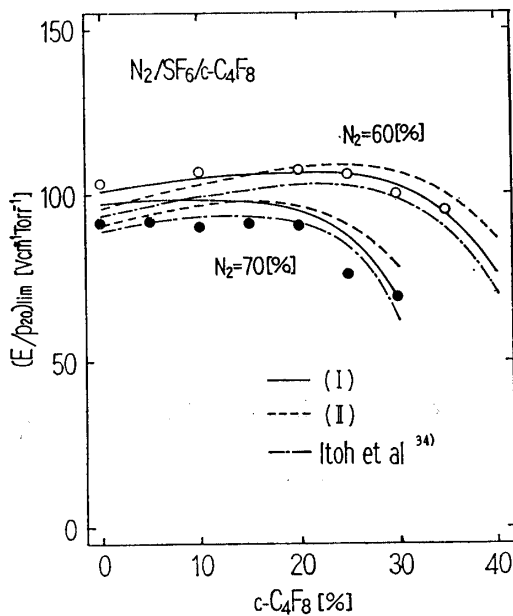


Fig. 3.9 Limit reduced fields  $(E/p_{20})_{11m}$  as a function of the mixture ratios of  $c-C_4F_8$  in  $N_2/SF_6/c-C_4F_8$  at  $N_2=60\%$  and  $N_2=70\%$ . (I) The solid line shows the values estimated with the set (\*1) and the cross sections (\*3). (II) The dashed line shows the value estimated with the set (\*2) and the cross sections (\*4).

●は,  $N_2$  の混合割合を 60%, 70% としたときに, 著者らの直流電圧による絶縁破壊試験から確認された  $(E/p_{20})_{11m}$  の値である。

この図より, 実線, 破線, 鎖線とも,  $N_2/SF_6$  および  $N_2/c-C_4F_8$  のそれぞれの 2 成分混合ガスとした場合よりも, 3 成分混合ガスとした方がやや高い絶縁耐力を示すことが分かるが, 鎖線は全体的に実線および破線よりもわずかに低い値を示している。また,  $N_2$  の混合割合が少ないほど  $(E/p_{20})_{11m}$  は高くなり, 絶縁耐力の向上が期待できる。

$N_2$  と  $c-C_4F_8$  の断面積を変更して解析した結果,  $N_2$  で電離を低く押さえたために,  $N_2/SF_6$  にわずかな  $c-C_4F_8$  を加えた側では, 実線の方が  $(E/p_{20})_{11m}$  は高くなっている。しかし,  $N_2/c-C_4F_8$  にわずかな  $SF_6$  を混合した側では,  $c-C_4F_8$  に Itoh らの衝突断面積を用いることによって, Novak らの衝突断面積を用いるよりも電離係数  $\alpha/p_{20}$  が増加し, 付着係数  $\eta/p_{20}$  が減少しているために, 実線の方が  $(E/p_{20})_{11m}$  は低い値を示している。つまり,  $N_2$  と  $c-C_4F_8$  の単一ガスときの効果が, この 3 成分混合ガスでも生じているということになる。○は 3 成分混合ガスとしたときの換算電界の幅広い範囲で実線に一致しているのに対し, ●は最も鎖線に近い値を示している。これは,  $N_2$  の混合割合が増加するにしたがって,  $N_2$  による影響が大きくなり, 衝突断面積の修正における議論が必要となることを含んでいる。

$c-C_4F_8$  単一ガスでは, Itoh らと Novak らの衝突断面積の違いによる  $(E/p_{20})_{11m}$  の差異は, 約  $20 [V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}]$  ほどであったが, 3 成分混合ガスになると, その差異は半分の  $10 [V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}]$  以下になっている。絶縁耐力の面から見ると, 3 成分混合ガスで

Table. 3.1 The maximum limit reduced fields  $(E/p_{20})_{11m}$  and  $SF_6/c-C_4F_8$  ratios at  $N_2=60\%$  and  $N_2=70\%$  in ternary gas mixtures.

	$N_2=60 [x]$		$N_2=70 [x]$	
	$(E/p_{20})_{11m}$	$SF_6/c-C_4F_8 [x]$	$(E/p_{20})_{11m}$	$SF_6/c-C_4F_8 [x]$
I	106.8	20/20	99.0	22/8
II	109.0	16/24	97.6	14/16
III	102.0	20/20	93.0	20/10

I:  $N_2$  is (\*3).  $c-C_4F_8$  is (\*1)

II:  $N_2$  is (\*4).  $c-C_4F_8$  is (\*2)

III: Reference 34)

は、両者の衝突断面積の違いによる影響はそれほど大きいものとはならない。

Table 3.1 は、実線、破線および鎖線の最大を示す  $(E/p_{20})_{11m}$  と、そのときの混合割合を示したものである。N<sub>2</sub> の混合割合が 60%、70% のときの  $(E/p_{20})_{11m}$  の最大値は、すべての線において 107~93 [V·cm<sup>-1</sup>·Torr<sup>-1</sup>] の範囲にある。c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の混合割合は破線に比べて実線、鎖線の方が少なくなっており、特に N<sub>2</sub> を 70% 混合した場合には、実線は破線の半分程度である。これは Itoh らの提示した c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の振動励起断面積  $Q_v$  が、Novak らの示したのものよりも大きいため、少量の c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> でも効果的に SF<sub>6</sub> に電子を付着させることができるためと考えられる。

#### 4. まとめ

今回著者らは、SF<sub>6</sub> に混合するガスとしての N<sub>2</sub> と c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の衝突断面積によって、これら 3 成分混合ガスの臨界換算電界や、そのときの混合割合がどのように変化するかについて検討してきた。以下に解析の結果を要約する。

##### (1) c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 単一ガス

Itoh らの提示した断面積による解析結果は、Naidu らおよび Shimozuma らの実効電離係数等の実測値により近い値を示すが、Novak らの提示した断面積ではかなり異なる。

両者の衝突断面積の違いによって、特に、高い  $E/p_{20}$  領域での  $\alpha/p_{20}$  と、低い  $E/p_{20}$  領域での  $\eta/p_{20}$  に大きな差が生じており、全体として  $\bar{\alpha}/p_{20}$  に差が生じている。

Itoh らの断面積による  $(E/p_{20})_{11m}$  は、SF<sub>6</sub> の  $(E/p_{20})_{11m}$  とほぼ同じで、低い値となった。むしろ  $(E/p_{20})_{11m}$  に関しては、Novak らの断面積による結果が、Christophorou らの報告している値により近いものを与えた。

##### (2) N<sub>2</sub> 単一ガス

電子励起断面積  $Q_{ex}$  と振動励起断面積  $Q_v$  をそれぞれ励起単位ごとに 10 分割した解析の結果は、実測値より低い値を示している。したがって、衝突断面積を用いて解析する場合には、解析結果を実測値の範囲内に合わせるように、衝突断面積を修正する必要がある。

一括した  $Q_v$  と、3 分割し大きき 20% 減少させた  $Q_{ex}$  を用いた解析では、高い  $\alpha/p_{20}$  を示している Itoh らの実測値にフィットしたものとなる。また、 $Q_{ex}$  と  $Q_v$  をそれぞれ励起単位ごとに分割し、 $Q_{ex}$  の  $A^3\Sigma_u^+$ ,  $a^1\Pi_g$ ,  $C^3\Pi_u$  の 3 種類の断面積を 20% 減少させた解析では、実測値の中でも最も低い  $\alpha/p_{20}$  を示している Jones の実測値にフィットしたものとなる。

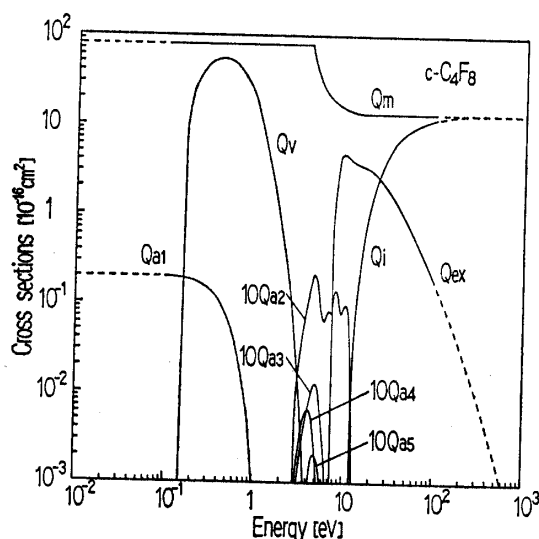
##### (3) 2 成分混合ガス

N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 混合ガスの  $(E/p_{20})_{11m}$  は、N<sub>2</sub> における励起単位ごとの分割で電離係数を低い  $\alpha/p_{20}$  の実測値にフィットさせたために、最大で約 10 [V·cm<sup>-1</sup>·Torr<sup>-1</sup>] ほど減少している。

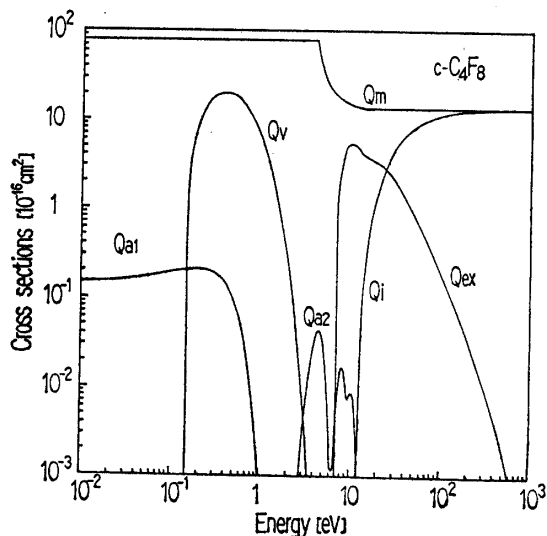
SF<sub>6</sub>/c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 混合ガスの  $(E/p_{20})_{11m}$  は、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> を 70%、SF<sub>6</sub> を 30% 混合したところで最大値を示す。また、Itoh らの提示した c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> の衝突断面積では、Novak らのものを用いるよりも全体的に  $(E/p_{20})_{11m}$  は低い値を示すが、これは Itoh らの断面積による解析結果が、電離係数  $\alpha/p_{20}$  の増加と付着係数  $\eta/p_{20}$  の減少を示したためである。

##### (4) 3 成分混合ガス

N<sub>2</sub> の混合割合を 60%、70% とした場合、 $(E/p_{20})_{11m}$



(a) The set shown by Itoh et al.<sup>7)</sup>



(b) The set shown by Novak et al.<sup>5,6)</sup>

Appended Figures Electron collision cross sections for c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>.

の最大値は、 $107\sim 93 [V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}]$  の範囲にあり、 $SF_6$  の混合割合は  $20\sim 15\%$  のところである。

$c-C_4F_8$  ガスを含んだ混合ガスの  $(E/p_{20})_{lim}$  のわずかな違いは、主として  $c-C_4F_8$  の振動励起断面積  $Q_v$  の大きさの違いによるものと考えられる。

なお、今後の課題として、 $c-C_4F_8$  に関しては、圧力依存性を考慮した衝突断面積を検討する必要がある。また、 $N_2$  に関しては、各種の電子励起および振動励起断面積について、より一層の検討が必要である。

**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、心から深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 佐々木, 岡部: 東海大学紀要工学部, Vol. 29, No. 2 (1989) pp. 11-20.
- 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) 森田, 岡部: 東海大学紀要工学部, Vol. 31, No. 2 (1991), pp. 7-15.
- 5) J. P. Novak, M. F. Frechette: J. Phys. D.: Appl. Phys. 20 (1987), pp. 438-43.
- 6) J. P. Novak, M. F. Frechette: J. Appl. Phys. 63 (1988), pp. 2570-5.
- 7) H. Itoh, T. Miyachi, M. Kawaguchi, Y. Nakao, H. Tagashira: J. Phys. D.: Appl. Phys. 24 (1991), pp. 277-82.
- 8) M. V. Kurepa: Transactions of the 3rd Czechoslovak Conference on Electronics and Vacuum Physics (Academia, Prague, 1967), (1967), pp. 107-15.
- 9) C. Lifshitz and R. Grajower: Int. J. Mass. Spectrom. Ion. Phys. 10 (1972/1973), p. 25.
- 10) I. Sauers, L. G. Christophorou and J. G. Carter: J. Phys. Chem. 71 (1979), pp. 3016-24.
- 11) A. G. Engelhardt, et al.: Phys. Rev. 135 A, (1964), pp. 1566-74.
- 12) T. W. Shyn and G. R. Carignan: Phys. Rev. A 22 (1980), pp. 923-29.
- 13) D. Rapp and Englander-Golden: J. Chem. Phys. 42 (1965), pp. 4081-85.
- 14) H. F. Winters: J. Chem. Phys. 44, (1966), pp. 1472-76.
- 15) G. J. Schulz: Phys. Rev. 135 A (1964), pp. 988-94.
- 16) M. J. W. Boness and G. J. Schulz: Phys. Rev. A 8 (1973), pp. 2883-86.
- 17) D. C. Cartwright, et al.: Phys. Rev. A 16 (1977), pp. 1041-51.
- 18) 谷口, 他: 放電研究会資料, ED-77-21 (1977), pp. 1-10.
- 19) Y. Ohmori, et al.: J. Phys. D.: Appl. Phys. 21 (1988), pp. 724-9.
- 20) 吉沢, 他: 放電研究会資料, ED-78-70 (1978), pp. 1-10.
- 21) H. Itoh, et al.: J. Phys. D.: Appl. Phys. 21 (1988), pp. 922-30.
- 22) M. S. Naidu, A. N. Prasad and J. D. Draggis: J. Phys. D.: Appl. Phys. 5 (1972), pp. 741-6.
- 23) 下妻, 金子, 種田, 長谷川, 田頭: 放電研究会資料, ED-83-86 (1983), pp. 101-9.
- 24) L. G. Christophorou, R. A. Mathis, D. R. James, D. L. McCorkle: J. Phys. D.: Appl. Phys. 14 (1981), pp. 1889-901.
- 25) M. A. Harrison: Phys. Rev. 105 (1957), pp. 366-8.
- 26) J. Jones: J. Phys. D.: Appl. Phys. 1 (1968), pp. 769-74.
- 27) T. N. Daniel, F. M. Harris: J. Phys. B.: Atom. Molec. Phys. 3 (1970), pp. 363-8.
- 28) M. A. Folkard, S. C. Haydon: J. Phys. B.: Atom. Molec. Phys. 6 (1973), pp. 214-26.
- 29) H. Itoh, M. Shimosuma, H. Tagashira, S. Sakamoto: J. Phys. D.: Appl. Phys. 12 (1979), pp. 2167-72.
- 30) G. R. Govinda Raju, M. S. Dincer: J. Appl. Phys. 53 (1982), pp. 8562-7.
- 31) M. C. Siddagangappa, C. S. Lakshminarasimha, M. S. Naidu: J. Phys. D.: Appl. Phys. 16 (1983), pp. 763-72.
- 32) A. B. Wedding, H. A. Blevin, J. Fletcher: J. Phys. D.: Appl. Phys. 18 (1985), pp. 2361-73.
- 33) M. F. Frechette: J. Appl. Phys. 59 (1986), pp. 3684-93.
- 34) 松村, 佐藤, 伊藤, 中尾, 田頭: 放電研究会資料, ED-91-84 (1991), pp. 67-76.