

CF<sub>4</sub>を含む混合ガスの電子輸送特性

正員	伊藤 秀範	(室蘭工大)
正員	猪股まどか	(NTT)
正員	松村 俊明	(三菱電機)
正員	佐藤 孝紀	(室蘭工大)
正員	鈴木 好夫	(室蘭工大)
正員	中尾 好隆	(室蘭工大)
正員	田頭 博昭	(北海道大)

Electron Swarm Characteristics in Gas Mixtures Containing CF<sub>4</sub>

Hidenori Itoh, Member (Muroran Institute of Technology), Madoka Inomata, Member (NTT), Toshiaki Matsumura, Member (Mitsubishi Electric Corporation), Kohki Satoh, Member, Yoshio Suzuki, Member, Yoshitaka Nakao, Member (Muroran Institute of Technology), Hiroaki Tagashira, Member (Hokkaido University)

The electron swarm characteristics in gas mixtures containing CF<sub>4</sub> has been analysed over the E/N range 0.01-566 Td by a multi-term Boltzmann equation method and by a Monte Carlo simulation. The differences between CF<sub>4</sub> and Ar, and CF<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> mixtures, in electron transport coefficients have been explained by the calculated electron energy distributions and the respective sets of electron collision cross-sections. The synergistic behaviour and the dielectric characteristics in these gas mixtures have been also shown and discussed in detail.

キーワード： CF<sub>4</sub>、混合ガス、相乗効果、ボルツマン方程式法、電子衝突断面積

## 1. まえがき

各種薄膜の創製やデバイスの作製におけるプロセッシングプラズマの利用はとどまることなく広がり続けている。プロセッシングプラズマが今後さらに成熟した技術へと発展していくためには、微視的視野にたったモデリングによる調査研究は欠かせないし、計算機をとりまく環境の改善と整備が急速に進んできている現状では、プロセッシングプラズマのモデリングに対する期待は高まる一方である<sup>(1)</sup>。そのためには、各種プロセスガスの電子衝突断面積の妥当なセットが必要であり、弱電離気体中における電子群(スオーム)の特性解析もまた重要である。

半導体デバイス製造プロセスにおけるプラズマエッチングでは、ハロゲンガスが用いられ、CF<sub>4</sub>ガスはその代表である。CF<sub>4</sub>は、おもに混合ガスとして利用されるが、CF<sub>4</sub>を含む混合ガスの弱電離プラズマの特性解析に関する研究例は極めて少ない<sup>(2)</sup>。CF<sub>4</sub>ガスは、電極などの固体表面に吸着しやすい性質から、実験的手法を用いた研究では、測定条件などの設定に難しさが伴う<sup>(3)</sup>ために、混合ガスではもちろんのこと単ガスでも測定例が限られるものと思われる。また、これまでいくつかの提案<sup>(4)</sup>はあったものの、妥当と思われるCF<sub>4</sub>の電子衝突断面積のセットが最近まで見出されなかったことから、ボルツマン方程式(BE)

法やモンテカルロ(MC)法による計算機を利用した理論解析もつい最近までほとんど行われなかった<sup>(5)</sup>。

最近著者らのグループは、可能な限り衝突断面積の測定データを尊重しながら、BE法やMC法で計算される各種電子輸送係数(スオームパラメータ)が対応するそれぞれの測定値と広範囲のE/Nでよく一致するような電子衝突断面積のセットを求めた<sup>(6)</sup>。ここでEとNは、それぞれ電界の強さとガス分子数密度を表す。このセットの導出によって、CF<sub>4</sub>単ガス、あるいはCF<sub>4</sub>を含む混合ガスの電子輸送現象の理論解析が可能になった。しかし、電子エネルギーが1eVより小さな領域で、CF<sub>4</sub>の振動励起衝突確率が弾性衝突確率を上回ることから、一般的に用いられる2項近似のBE法では正確な解析が困難なE/Nの範囲が存在する。したがって、CF<sub>4</sub>単ガスあるいは混合ガスの解析は、低エネルギー領域で難しく、これまで限られたE/Nの範囲、あるいは限られた条件のもとでしか行われてこなかった<sup>(7)</sup>。

本研究の目的は、低エネルギー領域に非弾性衝突断面積が存在しない希ガスのひとつであるArと、CF<sub>4</sub>と同じように低エネルギー領域に大きな振動励起断面積が存在するN<sub>2</sub>を混合対象ガスとして選択し、CF<sub>4</sub>を含む混合ガス中の電子輸送現象の解析を行い、混合ガスの電子スオームパラメータに関する相乗効果について考察することである。そのために、6項近似のBE法<sup>(8)</sup>を用いて解析を行い、その

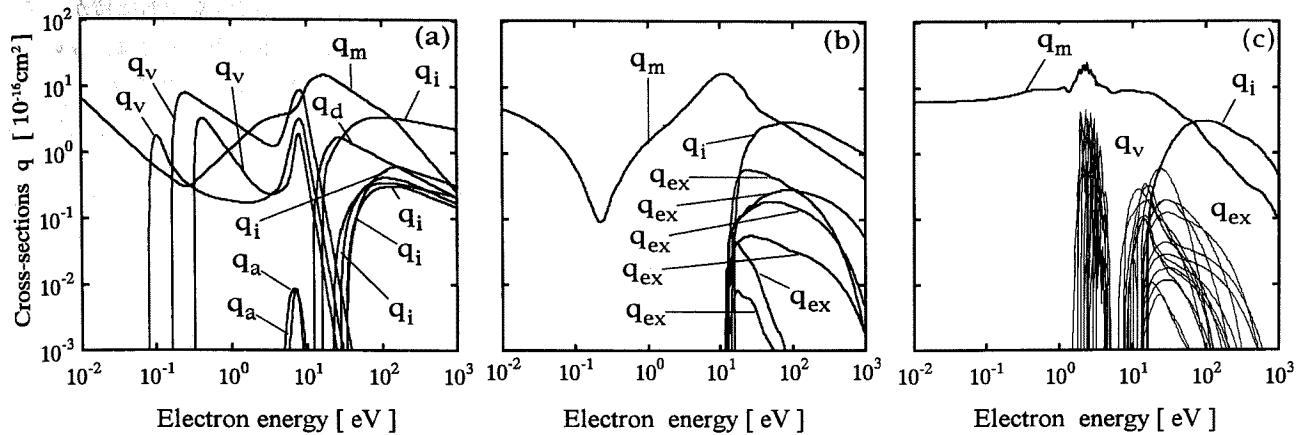


図1 電子衝突断面積 (a)CF<sub>4</sub>, (b)Ar, (c)N<sub>2</sub>

Fig.1 Electron collision cross sections for (a)CF<sub>4</sub>, (b)Ar and (c) N<sub>2</sub>.

妥当性をMC法と20項近似のBE法<sup>(9)</sup>で確認した。

## 2. 電子衝突断面積

混合ガス中の電子スオーム特性の解析では、構成ガスの電子衝突断面積のセットをデータとして与えると、ほかに必要なパラメータは混合割合のみである。したがって、それぞれの断面積のセットの慎重な吟味が非常に重要である。すなわち、それぞれ単ガス中の各種スオームパラメータがそれぞれ対応する測定値と矛盾なく一致するセットが必要である。本解析では、それぞれのガスのセットについて、MC法あるいは多項近似のBE法で評価されているか、あるいは評価したものを採用した。結果としてCF<sub>4</sub>, Ar, N<sub>2</sub>は、それぞれ著者ら<sup>(6)</sup>、倉知ら<sup>(10)</sup>、Ohmoriら<sup>(11)</sup>がまとめたものを採用し、使用したそれぞれの断面積のセットを電子エネルギー $\epsilon$ の関数として図1に示す。なお、図中の断面積 $q$ の添字は衝突の種類を示し、m:運動量移行、v:振動励起、i:電離、a:電子付着、d:解離、ex:電子励起、とした。また、(c)では、 $\epsilon < 5\text{eV}$ に10本の $q_v$ 、 $\epsilon > 6\text{eV}$ に20本の $q_{ex}$ を表している。

## 3. 解析方法

解析は、BE法では基本的に文献(8)と同じ方法を、MC法では文献(12)と同じ方法を用いた。そこで、定常タウンゼント(SST)法、パルス・タウンゼント(PT)法、タイム・オブ・フライト(TOF)法による電子スオームの観測原理<sup>(12)</sup>にしたがって、それぞれ解析を行った。導出したスオームパラメータのうち、電離係数 $\alpha$ 、電子付着係数 $\eta$ 、実効電離係数 $\bar{\alpha} (= \alpha - \eta)$ 、平均エネルギー $\bar{\epsilon}$ 、平均到着時間移動速度 $W_m$ 、縦方向拡散係数 $D_L$ を考察の対象とした。また、CF<sub>4</sub>は電気的負性気体であり、 $\bar{\alpha} = 0$ となる換算電界 $(E/N)_{lim}$ で、絶縁耐力を見積もることができる<sup>(13)</sup>。そこで、CF<sub>4</sub>とArおよびCF<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>のそれぞれの混合ガスでの混合割合に対する絶縁耐力の評価も行った。

なお、E/Nの解析範囲は、0.01-566 Tdであり、すべての計算で、Nは $3.54 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ (1 Torr, 0 °C)としている。

また、いずれの混合ガスにおいても、CF<sub>4</sub>の混合割合を $k$ とした。

## 4. CF<sub>4</sub>とArとの混合ガスに関する解析結果と考察

図1から分かるように、CF<sub>4</sub>には0.1eV付近にしきい値をもち8eV近傍で共鳴成分のピークを持つ大きな振動励起断面積が存在するのに対して、Arには $\epsilon < 10\text{eV}$ で非弾性衝突断面積がない。また、CF<sub>4</sub>にのみ電子付着断面積が存在し、 $\epsilon > 10\text{eV}$ でも非弾性衝突断面積はCF<sub>4</sub>の方がArより大きい。

<4.1> $W_m$ と $D_L$  回転あるいは振動励起衝突がない希ガスに微量の分子ガスを混合すると、低いE/Nで電子スオーム特性は分子の振動励起過程に強く依存することが知られている。中村らのグループは、スオームパラメータのこの特性を利用して、いくつかの分子ガスの振動励起断面積を推定している<sup>(14)</sup>。図2は、Arに微量のCF<sub>4</sub>混合させたときの $W_m$ の文献(14)の測定値と計算値である。比較のために、ArとCF<sub>4</sub>のそれぞれの単ガスの $W_m$ を同じ図に示した。この図から、微量のCF<sub>4</sub>の混合が、Arの電子スオーム特性に急激な変化を与えていることが分かる。混合ガスの $W_m$ は低エネルギーでピークを持ち、 $k$ の増加に伴ってそのピークが高エネルギーへとシフトしている。これはCF<sub>4</sub>の振動励起断面積によるものである。図には示さなかったが、この程度のCF<sub>4</sub>の混合割合でも、2項近似のBE法では低E/Nで正確な計算ができない。この図は、 $W_m$ の測定値と計算値が、広いE/Nでいずれの場合もよく一致していることを示しており、使用したCF<sub>4</sub>ならびにArの断面積の妥当性が確認できる。図3は、 $D_L$ に対する同様のプロットであるが、見やすくするためにそれぞれの単ガスのデータを省いている。この図は、 $W_m$ よりも測定精度が下がる $D_L$ においても混合ガスの文献(14)の測定値と計算値が、定性的に一致していることを示している。 $D_L$ の測定値は、ばらつきが大きいので、誤差評価は難しいが、 $W_m$ は、2項近似のBE法が完全にブレイクダウンするE/N < 5Tdにおいても、5%未満の範囲内で一致した。

$\langle 4 \cdot 2 \rangle \eta$ ,  $\alpha$ ,  $\bar{\alpha}$  とその他  $k$  をパラメータとして  $E/N$  の関数で  $\eta$  を表したものを、図4に示す。この図から、 $E/N > 80$  Td で  $\eta$  は  $k$  に対してほぼ単調増加しているが、それよりも小さな  $E/N$  では、 $k$  に対して相乗効果が見られる。すなわち、 $E/N$  が一定の時、パラメータ  $k$  に対して図中で  $\eta$  の逆転が見られ、これは  $\eta$  が  $k$  に対して最大値をもつことを意味する。 $\eta$  のこの相乗効果を、57 Td の電子エネルギー分布と電子付着断面積から考察する。図5は、 $k$  をパラメータとして電子エネルギー分布を速度空間でルジャンドル展開したときの1項目  $f_0$  を表したものと  $CF_4$  の2本の電子付着断面積  $q_a$  を示している。それぞれの  $k$  に対する  $\eta$  は、対応する  $f_0$  と  $q_a \times k$  との積を速度空間で積分し、ドリフト速度で割って求められる。図5における  $0 \sim 0.5$  eV の  $f_0$  のピークは、 $CF_4$  の振動励起衝突によるもので、 $E/N$  が小さいほど顕著になる。したがって  $E/N$  一定のとき、Ar を混合していくにしたがって ( $k$  の減少とともに)、このピークは次第に小さくなり、分布が高エネルギー側へシフトする。その結果  $4.5 \sim 10.5$  eV に存在する付着断面積によって付着衝突確率が大きくなり、 $\eta$  が増加する。 $k$  をさらに小さくしていくと、 $q_a \times k$  で表現される混合ガスの付着断面積が小さくなり、 $\eta$  が減少し、結果として  $k$  に対してピークを持つことになる。

$\alpha$  は、 $E/N$  を一定とすると、 $k$  に対して単調減少する

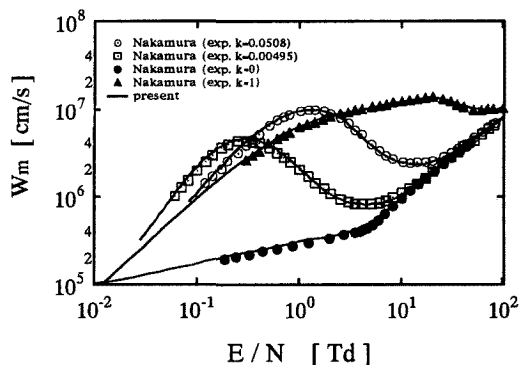


図2  $CF_4$ -Ar混合ガス中の平均到着時間移動速度

Fig.2 Mean-arrival-time drift velocity in  $CF_4$  and Ar mixtures.

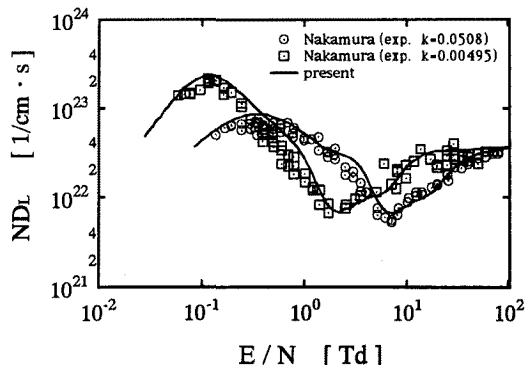


図3  $CF_4$ -Ar混合ガス中の縦方向拡散係数

Fig.3 Longitudinal diffusion coefficient in  $CF_4$  and Ar mixtures.

(図面省略)。これは、 $CF_4$  の非弾性衝突断面積が Ar のそれよりも大きいことによる。 $E/N < 80$  Td では、 $\alpha$  の値は小さく、 $\eta$  が上述のような相乗効果を示すため、 $\bar{\alpha}$  は  $k$  に対して最小値をもつことになる。 $E/N$  をパラメータにして、85 Td 以下における  $\bar{\alpha}$  を、 $k$  に対して表したものを図6に示す。この図は 28 Td では、すべての  $k$  で  $\alpha < \eta$  であり、 $k=0.1$  で最小値をとり、また 57 Td では、 $k > 0.1$  で  $\alpha < \eta$  であり、 $k=0.5$  で最小値を取るが、85 Td では  $\bar{\alpha}$  は  $k$  に対して最小値を持たないことを示している。

$\bar{\epsilon}$  は、 $E/N$  を一定とすれば、 $\alpha$  と同様に  $k$  に対して減少し (図面省略)、 $E/N$  が小さいほど著しい。これは  $CF_4$  の振動励起衝突によって、エネルギーを失う電子の割合が多くなるためである。

### 5. $CF_4$ と $N_2$ との混合ガスに関する解析結果と考察

前述のように、 $CF_4$  の振動励起断面積が 0.1 eV 付近に大きい値をもち 8 eV 近傍で共鳴成分のピークを持つものに対して、 $N_2$  の振動励起断面積は大きい値が 2 eV 近傍にあり ~5 eV におさまっている。もちろん  $N_2$  には電子付着衝突はないし、 $\epsilon > 10$  eV で非弾性衝突断面積は  $CF_4$  の方が  $N_2$  より大きい (図1参照)。したがって、Ar との混合に比べて、かなり複雑な電子スーム特性を示すことが、衝突断面積のセットをから予測できる。

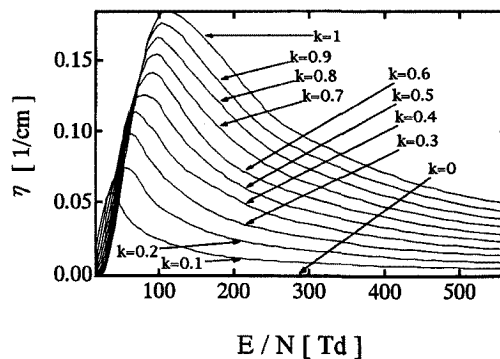


図4  $CF_4$ -Ar混合ガス中の電子付着係数

Fig.4 Electron attachment coefficient in  $CF_4$  and Ar mixtures.

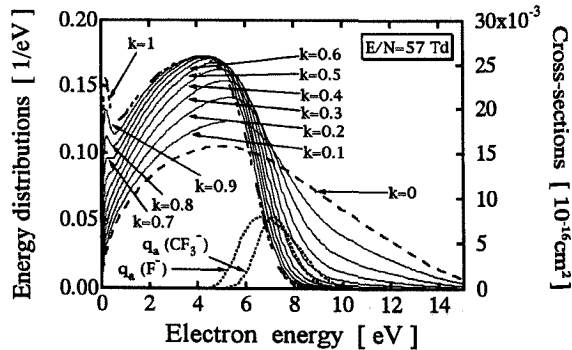


図5  $CF_4$ -Ar混合ガス中の電子エネルギー分布と電子付着断面積

Fig.5 Electron energy distributions in  $CF_4$  and Ar mixtures and electron attachment cross sections for  $CF_4$ .

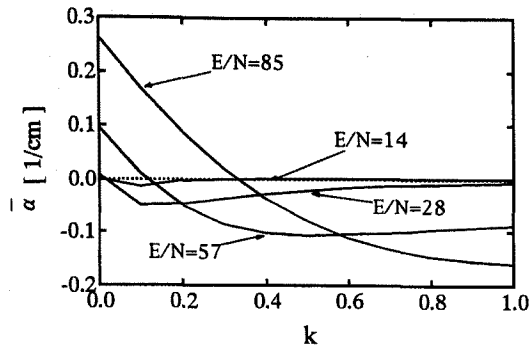


図6 CF<sub>4</sub>-Ar混合ガス中の実効電離係数

Fig.6 Effective ionization coefficient in CF<sub>4</sub> and Ar.

<5.1>電子エネルギー分布 図7(a)~(e)に、パラメータを $k$ として、電子エネルギー分布 $f_0$ の $E/N$ に対する変化を表した。(a), (b)で見られる0.1eV付近のピークは、CF<sub>4</sub>の振動励起衝突によるものであり、このピークは $E/N$ が小さいほど大きくなり、低 $E/N$ でスオーム特性を強く支配することがわかる。2eV手前のピークは、N<sub>2</sub>の振動励起衝突によるものであり、 $E/N$ の増加とともに0.1eVのピークに代わって次第に大きくなることわかる。この図でははっきり読みとれないが、(b)の0.1eVのピーク部分で $k=0.8$ まで $k$ とともにピーク値が大きくなり、その後減少するのはN<sub>2</sub>の振動励起衝突の影響による。85Tdより大きな $E/N$ では、8eV手前にピークも見られる。このピークは、CF<sub>4</sub>の振動励起断面積の共鳴成分に対応していて、その部分の効果が現れている。また、より大きな $E/N$ では、電子励起や電離などの非弾性衝突がさかんに起こるが、CF<sub>4</sub>の方が

N<sub>2</sub>よりその確率が高い。したがって、10eV近傍で $f_0$ の反転が起こり、これより大きな $\epsilon$ では $k$ が増加するほど $f_0$ が小さくなり、それが $E/N$ が大きくなるほど顕著になることが、(c)~(e)から分かる。

図7は、電子エネルギーに対応するそれぞれのガスの各種断面積の大きさに対して、混合ガスの電子スオーム特性が敏感に反応して、それが電子エネルギー分布にはっきりと現れることを示している。

<5.2> $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\bar{\alpha}$  図8は、 $E/N$ をパラメータとして、85, 141Tdの $\alpha$ と $\eta$ を $k$ に対して示している。この図から $E/N$ を一定とすれば、 $\alpha$ ,  $\eta$ ともに $k$ に対して単調に増加していることがわかる。CF<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>の電離電圧は、それぞれ15.9, 15.5eVと近く、CF<sub>4</sub>の電離断面積の方がN<sub>2</sub>より大きい。また、CF<sub>4</sub>の電子付着は高エネルギーに分布している。CF<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>ともに低エネルギー部に振動励起断面積があるために、図7に見られるように $f_0$ の高エネルギー部分では $k$ に対して大きな変化が見られない。したがって、 $E/N$ が大きくなるほど、高エネルギーを持つ電子の割合が大きくなるわけであり、 $E/N$ を一定とすれば、 $\alpha$ ,  $\eta$ ともに $k$ に対して単調に増加することになる。ただ、 $\alpha$ と $\eta$ の $k$ に対する変化が異なるために、図9に示すように140Td前後のごく限られた $E/N$ で $\bar{\alpha}$ が極小値を持つことになる。それよりも小さな $E/N$ では、 $k$ に対して減少傾向を示し、図では省いたが、それよりも大きな $E/N$ では、反対に $k$ に対して単調増加する。

<5.3> $\bar{\epsilon}$ , その他  $\bar{\epsilon}$ の計算値を、 $E/N$ をパラメータとして、 $k$ に対してプロットしたものを、図10に示す。 $\bar{\epsilon}$

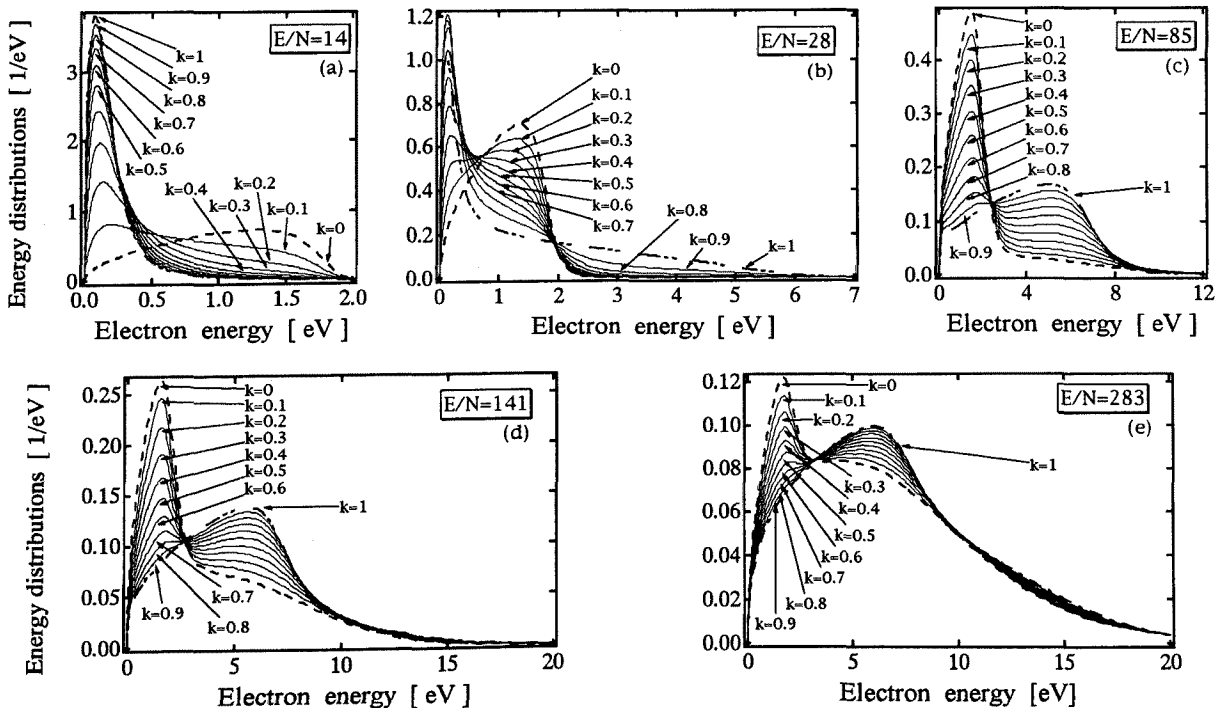


図7 CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>混合ガス中の電子エネルギー分布

Fig.7 Electron energy distributions in CF<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> mixtures.

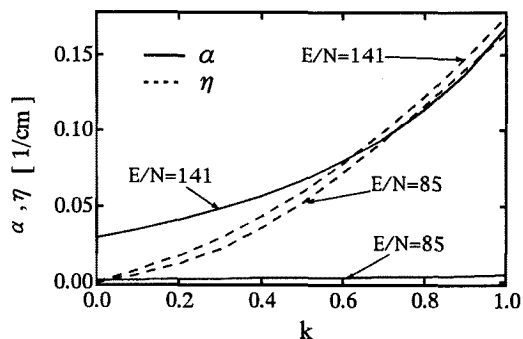


図8 CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>混合ガス中の電離係数と電子付着係数  
Fig.8 Ionization and electron attachment coefficients in CF<sub>4</sub>

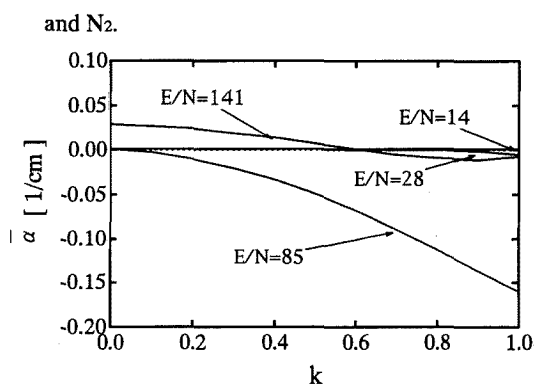


図9 CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>混合ガス中の実効電離係数  
Fig.9 Effective ionization coefficient in CF<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>.

は、85Td以上ではkに対して単調に変化している。 $\bar{\epsilon}$ は、電子速度をvとすれば、 $v^4 f_0$ をvで積分した値に比例するので、高エネルギーにおける $f_0$ の大きさに強く支配される。図7からわかるように、85Td以上では、 $f_0$ は0~2eVでkが小さいほど大きく、2~8eVで逆転し、それ以上ではまた反転をはじめますが、283Tdまでは反転の程度が小さい。しかし、さらにE/Nが大きくなると、0~2eVと2~8eVのピークは小さくなり、反転の程度は大きくなるのが容易に予想される。結果として、85~283Tdでは、 $\bar{\epsilon}$ はkに対して単調増加し、424~566Tdで単調減少する。一方28Td以下では、図7に示すように、 $f_0$ は0~0.1eVでkが大きいほど大きく、1~2eVで逆転する。2eV以上では、14Tdでほとんど電子が存在しないが、28Tdで $f_0$ の反転が見られる。結果として、14Tdで $\bar{\epsilon}$ はkに対して単調減少し、28Tdでは最小値を持つ。

他のスオームパラメータもまた同様に、低E/Nでkに対しての複雑な変化を示す。これは、CF<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>それぞれの振動励起衝突の影響による。これによって、電子エネルギー分布が、E/Nとkに対して複雑な変化を示し、それが低E/Nにおける電子スオームパラメータの特異な変化を引き起こすことになる。

## 6. 混合ガスの絶縁耐力

図11は、CF<sub>4</sub>とAr、CF<sub>4</sub>とN<sub>2</sub>混合ガスの $\alpha = \eta$ となる

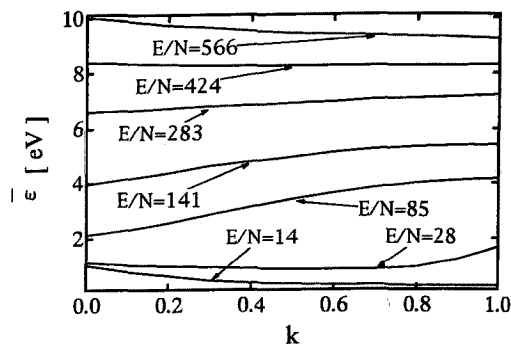


図10 CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>混合ガス中の平均エネルギー  
Fig.10 Electron mean energy in CF<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>.

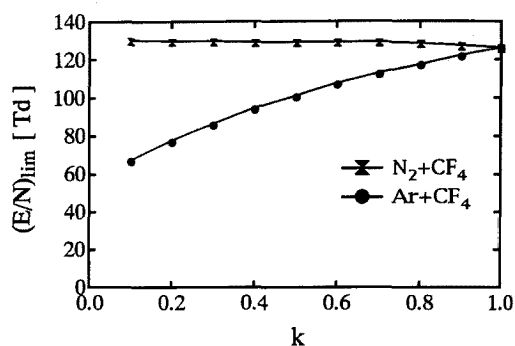


図11 CF<sub>4</sub>-Ar、CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>混合ガス中の(E/N)<sub>lim</sub>  
Fig.11 Limiting E/N values in CF<sub>4</sub> and Ar, and CF<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>.

(E/N)<sub>lim</sub>をkに対してプロットしたものである。前述のように、電気的負性気体の絶縁耐力を(E/N)<sub>lim</sub>で見積もることが可能であり、(E/N)<sub>lim</sub>が大きいほど絶縁耐力が大きいことを意味する。例えば、絶縁ガスの代表であるSF<sub>6</sub>の(E/N)<sub>lim</sub>は、362Tdである<sup>(15)</sup>。それに対して、CF<sub>4</sub>の(E/N)<sub>lim</sub>は127Tdであり、CF<sub>4</sub>の絶縁性能は、SF<sub>6</sub>の約35%であると見積もることができる。

図11から、N<sub>2</sub>との混合ガスの方が、Arとの混合ガスよりも絶縁耐力が大きいこと、N<sub>2</sub>との混合ガスの絶縁耐力はkに対してほぼ一定であるのに対して、Arとの混合ガスではkに対して増加していることが分かる。これは、Arに $\epsilon < 10$ eVで非弾性衝突がないために、Ramsauer-Townsend極小を越えるエネルギーを持った電子は、高い確率で電子励起衝突ならびに電離衝突を引き起こす。したがって、Arの $\alpha$ は、E/Nの対する増加の程度が大きい。それに対して、N<sub>2</sub>は2~5eVに大きな振動励起断面積が存在し、かつ電離断面積近傍にも多くの電子励起断面積が存在している。したがって、E/Nに対して $\alpha$ の立ち上がりは、Arに比べて緩やかである。その結果、図11で示された(E/N)<sub>lim</sub>のkに対する変化に差が生じると考えられる。

## 7. おわりに

6項近似のボルツマン方程式法により、ArとN<sub>2</sub>に、CF<sub>4</sub>を含んだときの混合ガスの電子スオーム特性の解析を行った。得られた結果を以下に要約する。

(i) Arとの混合ガスに関して,

(1) Arに微量のCF<sub>4</sub>を混合すると, 低E/Nで電子スオーム特性が分子の振動励起衝突に強く影響されることが知られている。そのことを示すW<sub>m</sub>とD<sub>L</sub>の測定データと6項近似による計算値が極めて良い一致を示した。一般的な2項近似では測定値と一致しないE/N領域が存在したので, 解析手法と断面積のセットの妥当性が確認できた。

(2) E/N < 80Tdで, 電子付着係数が, CF<sub>4</sub>の混合割合に対して最大値を持つことを示し, これを電子エネルギー分布と付着断面積から説明した。また, 結果として実効電離係数もまた, おなじE/Nの範囲で最大値を持つことを示した。

(ii) N<sub>2</sub>との混合ガスで,

(1) E/Nの変化に対して, CF<sub>4</sub>の混合割合をパラメータとして電子エネルギー分布を示し, それぞれの衝突断面積から電子エネルギー分布の変化を考察した。互いに低エネルギーにしきい値の異なる振動励起断面積を有するため, E/Nの変化に対して電子スオーム特性が強く影響を受け, それが電子エネルギー分布に敏感に現れることを明らかにした。

(2) 多くの電子スオームパラメータは, CF<sub>4</sub>の混合割合に対して単調に変化することを示した。電離係数, 電子付着係数についても同様の変化をするが, 変化の仕方の違いにより, 極限られたE/Nで, 実効電離係数が最小値を持つことを示した。

(iii)  $\alpha = \eta$ となる(E/N)<sub>lim</sub>から, 混合ガスの絶縁耐力を見積もり,

(1) CF<sub>4</sub>の絶縁耐力は, SF<sub>6</sub>の約35%であることを示した。

(2) N<sub>2</sub>との混合ガスの方が, Arとの混合ガスよりも絶縁耐力が大きいこと, N<sub>2</sub>との混合ガスの絶縁耐力はkに対してほぼ一定であるのに対して, Arとの混合ガスではkに対して増加していることを示し, これを断面積から説明した。

最後に, 本研究を遂行するにあたり, ご協力をいただいた本学小林憲一氏に感謝します。

(平成7年7月24日受付, 同7年10月16日再受付)

## 文 献

- (1) 眞壁利明:「低温プラズマモデリングの現状と課題」, 応用物理, **64**, 547-553 (1995)
- (2) e.g. H. Kobayashi, I. Ishikawa and S. Suganomata: "Electron temperature in RF discharge plasma of CF<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> mixture", *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** 5979-80 (1994)
- (3) 例えば三木維康, 佐藤孝紀, 伊藤秀範, 中尾好隆:「弱電離気体プラズマの解析(XIX)CF<sub>4</sub>ガスの電離係数の測定」, 平6電気関係学会道支連 No.48
- (4) e.g. K. Masek, L. Laska, R. D'Agostino and F. Cramarossa: "Boltzmann equation analysis of the electron gas in CF<sub>4</sub> discharge plasma", *Contrib. Plasma Phys.* **27** 15-21 (1987)
- (5) 例えば中村義春:「CF<sub>4</sub>分子の低エネルギー電子衝突断面積」, 電気学会放電研資, ED-92-145(平4)
- (6) H. Itoh, T. Matsumura, K. Satoh, Y. Nakao and H. Tagashira: "Development of electron swarms in CF<sub>4</sub>", *Proc. 21st Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, (ICPIG) (Bochum: Germany)* **1** 245-6 (1993)
- (7) e.g. B. Stefanov, N. Popkirova and L. Zarkava: "Elastic and inelastic e-CF<sub>4</sub> cross sections at low energies: fit to the experimental data", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **21** 3989-97 (1988)
- (8) e.g. H. Itoh, T. Matsumura, K. Satoh, H. Date, Y. Nakao and H. Tagashira: "Electron transport coefficients in SF<sub>6</sub>", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26** 922-30 (1993)
- (9) 猪股まどか, 松村俊明, 佐藤孝紀, 伊藤秀範, 中尾好隆:「電子スオーム特性の多項近似解析」, 電気学会放電研資, ED-93-93(平5)
- (10) 倉知正, 中村義春:「ArおよびKr中の電離係数と電子衝突断面積」, 電気学会放電研資, ED-89-72(平元)
- (11) Y. Ohmori, M. Shimozuma and H. Tagashira: "Boltzmann equation analysis of electron swarm behaviour in nitrogen", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21** 724-9 (1988)
- (12) K. Satoh, H. Itoh, Y. Nakao and H. Tagashira: "Electron swarm development in SF<sub>6</sub>: II. Monte Carlo simulation", *ibid.* **21** 931-6 (1988)
- (13) e.g. H. Itoh, T. Miyachi, M. Kawaguchi, Y. Nakao and H. Tagashira: "Electron transport coefficients in SF<sub>6</sub> and c-C<sub>6</sub>F<sub>6</sub> mixtures", *ibid.* **24** 277-82 (1991)
- (14) 小畑信一, 駒田正人, 中村義春:「CH<sub>4</sub>-ArおよびCF<sub>4</sub>-Ar混合気体中の電子輸送係数の測定」, 電気学会放電研資, ED-92-145(平4)
- (15) H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira: "Electron swarm development in SF<sub>6</sub>: I. Boltzmann equation analysis", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21** 922-30 (1988)

伊藤 秀範 (正員) (電学論A, Vol.116-A, No4参照)

猪股 まどか (正員) 平成5年室蘭工業大学電気工学科卒業。平成7年同大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻修了。同年日本電信電話(株)勤務, 現在に至る。



松村 俊明 (正員) 平成3年室蘭工業大学電気工学科卒業。平成5年同大学大学院工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻修了。同年三菱電機(株)勤務, 現在に至る。



佐藤 孝紀 (正員) (電学論A, Vol.116-A, No4参照)

鈴木 好夫 (正員) (電学論A, Vol.116-A, No4参照)

中尾 好隆 (正員) (電学論A, Vol.116-A, No4参照)

田頭 博昭 (正員) (電学論A, Vol.116-A, No4参照)