

## 論 文

大気圧 SF<sub>6</sub> ガス中の負イオン移動度測定林喬久<sup>\*1</sup>,

(2004年2月6日受付; 2004年11月26日受理)

Measurement of Negative Ion Mobility in SF<sub>6</sub> Gas at Atmospheric Pressure  
Takahisa HAYASHI<sup>\*1</sup>

(Received February 6, 2004; Accepted November 26, 2004)

We measured the negative ion mobility in SF<sub>6</sub> gas at atmospheric pressure, namely the time of the 1 cm flight made by the negative ions produced in the SF<sub>6</sub> gas in a low electric field was measured to obtain their mobility. This paper presents the details on the change of the negative ion mobility for the converted electric field. The range of the E/p<sub>0</sub> obtained at this stage is 0.035~1.31 V/cm·Torr. On that occasion, the almost settled mobility is 0.48 cm<sup>2</sup>/V·s. The said value is, according to the result with which Patterson released a report, is equivalent to the cluster ion SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>). Thus good coincidence with the mobility converted by the gas pressure and gas temperature was noticed. For the E/p<sub>0</sub> less than 0.655 V/cm·Torr, almost all of the mobility was distributed taking up the value of 0.48 cm<sup>2</sup>/V·s as a pivotal point. After that, the other ion group having speedier mobility appeared in an E/p<sub>0</sub> region that is higher than 0.721 V/cm·Torr. Furthermore the said factors approach a value of the mobility where the F<sup>-</sup> measured by Dutton and Nakamura is speedy enough. The individuals of the mobility observation frequency distribution varied based on the value of the E/p<sub>0</sub>. Furthermore it is recognized that the said distribution is equivalent to SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>)<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>), SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup> and F<sup>-</sup>.

## 1. はじめに

SF<sub>6</sub>は、無害で電子親和力が大きくこのため電気絶縁耐力が高くなり、電力用機器やガス絶縁ケーブルの絶縁媒体として盛んに用いられてきた<sup>1)</sup>。又、放電プラズマにより生成された SF<sub>6</sub>の解離種の反応性に富んだ性質に注目して、半導体製造工程におけるエッチングなどにも使用されて来た。この SF<sub>6</sub>は CO<sub>2</sub> やフロンとメタンと同様地球温暖化ガスで、CO<sub>2</sub> に比べて実に 23900 倍の温室効果を持つと言われ、大気中に放出した場合環境に悪影響を及ぼすことから、1997 年 CO<sub>2</sub>と共に規制対象ガスに指定された。このため SF<sub>6</sub>ガスに替わる絶縁気体の研究も盛んに行なわれている<sup>2)</sup>が、その実用化にも時間が必要のようである。一方、電気絶縁耐力のすぐれた性質を持つ SF<sub>6</sub>の分解あるいは分離技術が進みこれまでと同様環境に影響を与えない対策を講じながら

キーワード：SF<sub>6</sub>、大気圧、負イオン、移動度、クラスター

\*千葉工業大学電気電子情報工学科 (274-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

Department of Electrical Electronics and Computer Engineering Chiba Institute of Technology

<sup>1)</sup> p04hayas@pf.it.chiba.ac.jp

現在でも引き続き変電設備に使用されている。このような工学的応用という立場からも、高電界下での SF<sub>6</sub>の基礎的な放電特性については多くの報告がある。

最近における SF<sub>6</sub>に関する研究は、複合電極系における沿面放電特性<sup>3) 4)</sup>、部分放電劣化<sup>5)</sup>及び、負極性コロナ放電の粒子シミュレーション<sup>6)</sup>などが報告されている。一方、低電界下の SF<sub>6</sub>中の主として負イオン移動度についての研究では、次のような報告がある。佐々木<sup>7)</sup>は粒子シミュレーションにおいて、10≤E/n≤100 (Td)で移動度を求めた値は SF<sub>6</sub><sup>-</sup>のイオン種として換算移動度 0.6 cm<sup>2</sup>/V·s 付近の値を得ている。Nakamura<sup>7) 8)</sup>はスオーム法において、数 10Torr 以下で行なわれており 10≤E/n (Td) (E/p<sub>0</sub>=4V/cm·Torr 以上)での測定が主であり、得られた換算移動度は F<sup>-</sup>:1.26, SF<sub>6</sub><sup>-</sup>:0.595, SF<sub>6</sub><sup>-</sup>:0.564 cm<sup>2</sup>/V·s の値を得ており、特に移動度は E/n=100 (Td) 以上で上昇し始め E/n=300 (Td) 付近で最大値を示すことを報告している。Patterson<sup>9)</sup>は、スオーム法で得られた換算移動度の他に、SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>): 0.47, SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>)<sub>2</sub>: 0.42 cm<sup>2</sup>/V·s の値も得ており、又、移動度は E/n=100 (Td) 以上になると上昇することを報告している。Gosho<sup>10)</sup>は、大気圧中での測定範囲を 0.02≤E/p<sub>0</sub>≤1.2 V/cm·Torr で行なった結果、移動度はほ

は一定値を示し、この時の換算移動度は、 $0.57 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  の値を得ている。

著者らは Goshō ら<sup>10)</sup>が開発した大気圧中で動作するイオンドリフトチューブを用いて O<sub>2</sub> 中の O<sub>2</sub><sup>-</sup><sup>11)</sup> や O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> 混合ガス中の負イオンの移動度測定<sup>12)</sup>を行なって来た。これらの測定に共通した特徴としては高気圧下でありイオン拡散の影響を少なくした状態で測定が行なえることがある。又、低い換算電界下での測定となり、特に換算移動度測定に適していることも述べてきた。本論文ではこれらと同じ装置を用いて、ドリフト空間長 1cm、換算電界 E/p<sub>0</sub> = 2.0V/cm·Torr 以下で SF<sub>6</sub> 中の負イオン移動度測定を行ない、この振る舞いを観測した結果についてまとめたものである。この中では繰り返し測定により得られた移動度を平均値として表わすだけでなく、移動度観測頻度分布を作成し、これがイオンドリフト空間の換算電界強度に依存してどのように変化するか明らかにした。その結果、飛行しているイオン種が別のイオン種に変化していると判断できる結果を得た。一方、低い換算電界下で測定した負イオン移動度は平坦な特性を示すが、この値について検討したところ、SF<sub>6</sub><sup>-</sup> の値ではなく SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>) のクラスターとなつたイオン種の移動度であると予想される。

## 2. 実験装置及び方法

### 2.1 放電容器

実験装置の構成を図 1 に示す。これは Goshō らが開発したもの<sup>9)</sup>と基本的に同じである。放電容器は円筒型(直径 11 cm、長さ 10 cm)アクリル樹脂製であり、この中に一对の平行平板電極 C(陰極)、A(陽極)と針電極 P と平板電極 A からなるカスケード型のギャップ G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub> を設けた。

ギャップ G<sub>1</sub> は、陰極 C 及び陽極 A より構成された負イオンドリフト空間である。2枚の平板電極間の距離 d は 1cm であり、小さい直径の C 電極でも直径 7 cm であることから、電界の平等性は十分保たれていると判断できる。陰極には負の直流電圧を印加した。陽極の中央には直径 8 mm の穴を開けそこに金属メッシュ M (#32 : 26 lines/cm) を張ってある。これはパルス紫外光(以下 UV 光と記す)やイオン群が通過できるようにするためである。

ギャップ G<sub>2</sub> は、メッシュ電極 M と針電極 P よりなる正コロナギャップ(P-M 間は 15 mm)で電極間にガイガーカウンタ領域の電圧を直列抵抗 R=100 MΩを通して印加した。針電極の先端には白金線(直径 0.4 mm、長さ 3.0 mm)を使用し強電界を形成した。これは負イオン検出器として動作する。

SF<sub>6</sub> ガス中の放電による二次分解生成物を取り除くため、移動度測定を 100 回行う度に排気してガスを交換した。

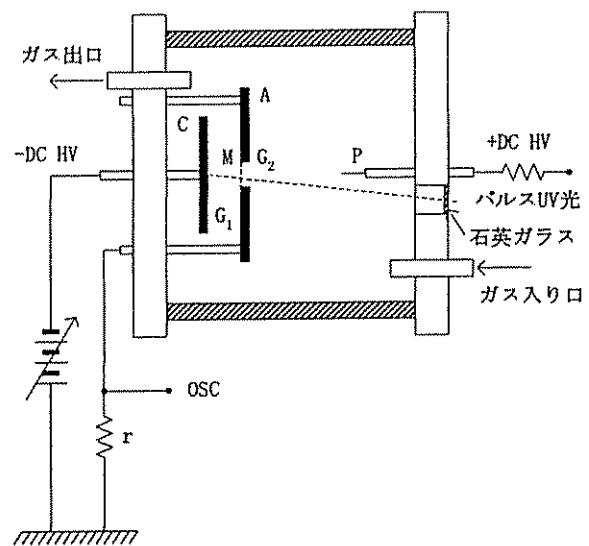


図 1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.

### 2.2 移動度測定

負イオン生成用の初期電子の供給は、大気中の火花ギャップ(球直径 12.5 mm、ギャップ長 1 mm)の放電光を利用した。この光を陰極 C と陽極 A の中央部に張ったメッシュ M の表面に凸レンズにより集光して照射した。この火花放電の繰り返し時間は約 1 秒であった。UV 光がメッシュと陰極表面に照射されると両電極から光電子が放出されるが、この時刻は火花放電が発生した時刻としてオシロスコープの波形と共に表示した。この時刻を図 2 において t<sub>0</sub> とする。M と C から放出された光電子は直ちに SF<sub>6</sub> に付着して負イオンとなりドリフトを開始する。メッシュから出発した負イオンは、G<sub>2</sub> を横切り針電極近傍の強電界部で電子離脱を起こす。その後電子は急速に電子なだれを作りバーストパルス BP<sub>1</sub> を形成する。この電流パルスは電流検出抵抗 r によりオシロスコープ上で観測され、このパルスの出現時刻を図 2 で t<sub>1</sub> とする。

一方陰極から放出された電子が SF<sub>6</sub> に付着して生成された負イオンは、均一な電界が印加されたイオンドリフト空間 G<sub>1</sub> を通り、メッシュ M をくぐり抜け G<sub>2</sub> に入る。その後は先にメッシュから時刻 t<sub>0</sub> で出発したイオン群と同じ経路をたどり、針電極近傍で時刻 t<sub>2</sub> に 2 つ目のバーストパルス BP<sub>2</sub> を作る。この BP<sub>2</sub> の出現時刻は、イオン群がドリフト空間長全体を飛行するみかけの移動時間であり、これらの連なった 2 つのパルス BP<sub>1</sub>、BP<sub>2</sub> の出現時刻 t<sub>1</sub> と t<sub>2</sub> の時間差は、2 つのイオン群の到着時間差 τ である。この値から G<sub>1</sub> を走行した負イオンのドリフト速度 v<sub>d</sub> 及び移動度 μ が次式により決定される。

$$v_d = d / \tau \quad (\text{cm/s}) \cdots \cdots (1)$$

$$\mu = v_d / E \quad (\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}) \cdots \cdots (2)$$

$d$  : ドリフト空間距離 (cm),  $E$  : 電界強度 (V/cm)

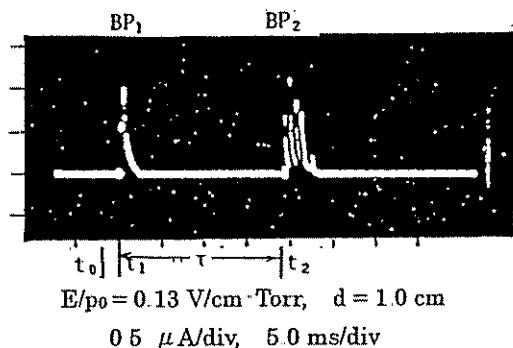


図2 バーストパルス波形

Fig.2 Typical waveform of two burst pulses.

観測されたバーストパルス BP<sub>1</sub> と BP<sub>2</sub> の時間差  $\tau$  は、同じ  $E/p_0$  ( $p_0$  : 0°C換算ガス圧力(Torr))であっても、その都度変動した。しかし、BP<sub>1</sub> の出現時刻  $t_1$  と  $t_0$  の間隔は常に一定であったので、この時間差  $\tau$  のばらつきは  $G_1$  を飛行したイオン群の作る BP<sub>2</sub> の出現時刻  $t_2$  の変動によるものと判断した。そこで、このような測定を 100 回繰り返し測定し、その都度移動度を算出して移動度観測頻度分布とした。又、この移動度測定においては、パルス BP<sub>1</sub> と BP<sub>2</sub> の時間差を観測したものであり、観測頻度分布に示す通り、ある移動度で最大測定回数を示す値がある。この値は換算電界に対して変化するので同じ  $E/p_0$  で 100 回測定した移動度の平均値を  $\mu$  とし、これを 0°C, 760Torr の標準状態に換算し  $\mu_0$  として表した。

$$\mu_0 = \mu (p / 760) (273 / T) \cdots \cdots (3)$$

$p$  : ガス圧力 (Torr)     $T$  : ガス温度 (K)

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 移動度の測定結果

前項で述べた方法に従って求めた移動度  $\mu_0$  を、図3に示す。図中の1個のプロットは、100回の測定の平均値を示す。今回の測定範囲は  $0.035 \leq E/p_0 \leq 1.31 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  であった。図中の移動度は  $E/p_0 \leq 0.5 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  では、ほとんど一定な値をとり、この値を換算移動度とすると  $0.48 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  が得られた。この平坦な移動度は、Patterson が報告している  $\text{SF}_6^-$ ( $\text{SF}_6$ ) のイオンと同じ値である。この移動度は、大気圧中での測定であるため  $\text{SF}_6$  との衝突

回数が多くなり、更に遅い移動度を持つ  $\text{SF}_6^-$  のクラスター化したイオン種になったものと考えている。その後、移動度は  $E/p_0$  の増加と共に僅かに増加する傾向を示した。これは電界が高くなつたため大きい移動度を持つイオン種に変化して飛行したものを見出されたと考えられる。 $E/p_0 \geq 1.0 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  の移動度は  $0.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  付近にあり、この値は  $E/p_0 = 10 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  付近で測定した Nakamura, Patterson らが測定した  $\text{SF}_6^-$ ,  $\text{SF}_5^-$  に近い値となっている。

一方、各  $E/p_0$  における 100 回の測定結果から移動度観測頻度分布、すなわち横軸に移動度を、縦軸にその移動度が観測された回数をとり整理したのが図4である。この図では  $E/p_0$  が  $0.655 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  までの観測頻度分布は同じ形状であると判断でき、ここまで各々の分布の平均値が図3のプロットとして表わされている。しかし、図4中の  $E/p_0 = 0.721 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  から高い方では、移動度分布の大きい方にもう1つの移動度成分が出現し、 $E/p_0$  の上昇と共に成長していく過程が観測された。このように単一のピークを持つ移動度分布が2つに分れ始める  $E/p_0 = 0.721 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  においては、図3の特性で僅かな凹部を持っているが、これが移動度分布の変化し始める点であった。図4に示す高い方の移動度の集団から平均移動度を求め、図3の移動度—換算電界特性をプロットし直すと図5が得られる。図5では  $E/p_0 = 0.721 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  で2つに枝分かれした移動度曲線となるが、○印で示した移動度の高い成分は  $E/p_0$  の上昇と共に急激に増加している。この傾向のまま  $E/p_0 = 10 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  付近まで外挿すると、Dutton<sup>13)</sup> や Nakamura らの測定した移動度は  $\text{SF}_6^-$  の移動度より大きい  $\text{F}^-$  の移動度に近づいている。これは C(カソード)電極から出発したイオンはドリフト空間中の換算電界が強くなつたため、それまでの移動度より大きい移動度を持つイオン種に変化し、先ず A(アノード)電極に達した後、P(針)電極に到達したものと考えられる。

一方、●印で示した成分は、それより低  $E/p_0$  下での移動度より減少する傾向で変化している。それらは  $E/p_0 = 10 \text{ V/cm}\cdot\text{Torr}$  付近で測定された  $\text{SF}_6^-$ ( $\text{SF}_6$ ),  $\text{SF}_6^-$ ( $\text{SF}_6$ )<sub>2</sub> の値に近いことがわかる。このように同じ  $E/p_0$  の下で繰り返し測定して得られた移動度の観測頻度分布で整理すると、複数のイオン種の存在が確認でき、しかも  $E/p_0$  依存して変化していることを明らかにすることことができた。

#### 3.2 測定結果とイオン種との考察

図4と図5の結果をもとに、これまで他の報告者らが求めた  $\text{SF}_6$  中で測定された負イオン移動度の特に低  $E/p_0$  における換算移動度の値を整理し表1にまとめた。ここでは5種類の負イオン種に分類されている。

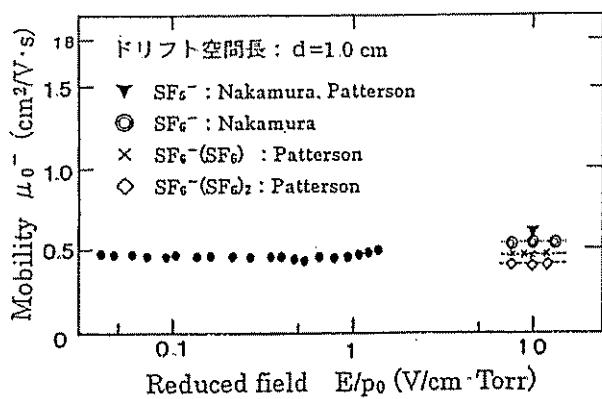


図3 負イオン移動度の測定値

Fig.3 Measured values of negative ion mobility.

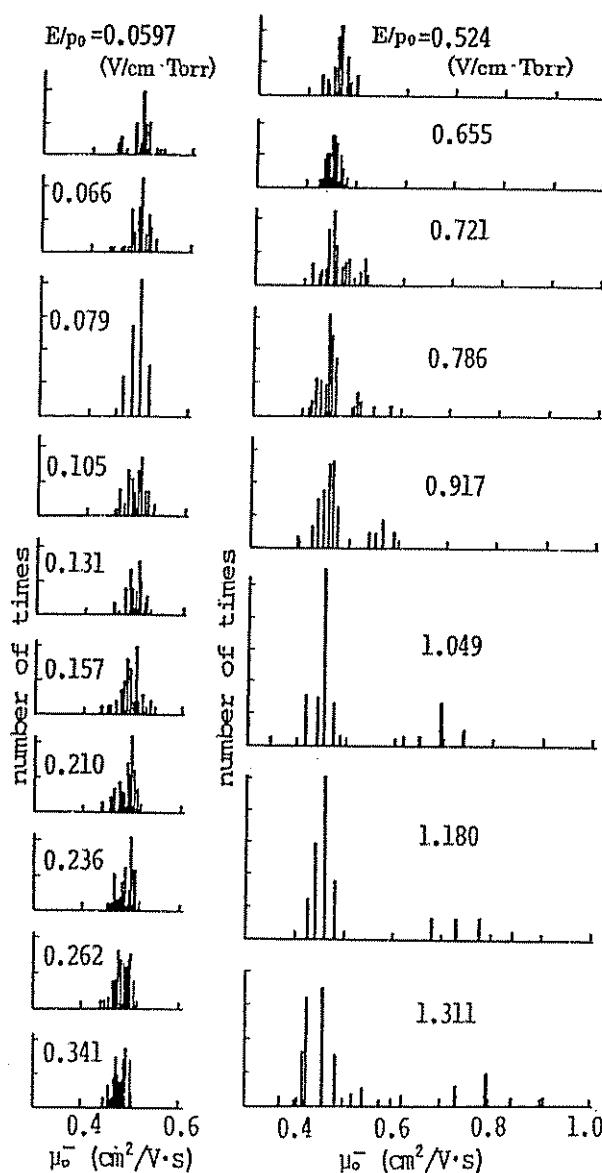


図4 移動度観測頻度分布の E/p₀ 依存性

Fig.4 Dependency of E/p₀ of the mobility observation frequency distribution.

表1 SF<sub>6</sub> 中負イオンの換算移動度Table 1 Reduced mobility of negative ion in SF<sub>6</sub> gas.

イオン種	換算移動度 (cm <sup>2</sup> / V·s)	文献
F <sup>-</sup>	1.58	J.Dutton
	1.26	Y.Nakamura
SF <sub>5</sub> <sup>-</sup>	0.595	Y.Nakamura
	0.595	P.L.Patterson
SF <sub>6</sub> <sup>-</sup>	0.564	Y.Nakamura
	0.57	Y.Gosho
	0.542	P.L.Patterson
SF <sub>6</sub> <sup>-</sup> (SF <sub>6</sub> )	0.47	P.L.Patterson
SF <sub>6</sub> <sup>-</sup> (SF <sub>6</sub> ) <sub>2</sub>	0.42	P.L.Patterson

この中で Patterson は、四重極質量分析計を組み合わせシャッターを持ったイオン移動管を用いた実験により、イオン種別に移動度を測定している。これによれば SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup> 他にクラスター状態のイオン種, SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>), SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>)<sub>2</sub> もあるとしてその値を報告している。表1のイオン種別の移動度を参考にすると、SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>), SF<sub>6</sub><sup>-</sup>(SF<sub>6</sub>)<sub>2</sub> の持つ換算移動度値(0.42~0.47 cm<sup>2</sup>/V·s)は、図4の E/p₀ ≥ 0.655 V/cm·Torr における低い移動度の観測頻度分布が取る値とよく一致している。又、SF<sub>6</sub><sup>-</sup>と SF<sub>5</sub><sup>-</sup>の両者の移動度は極めて近いが、これらの移動度に分布する観測頻度成分は、図4において E/p₀ = 0.721~0.917 V/cm·Torr で観測されている。

更に E/p₀ = 0.917 V/cm·Torr の観測頻度分布中に見られる  $\mu_0^- = 0.54 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  付近にピークを持つ成分は、その後の E/p₀ の増加と共に大きい方へ移動し、E/p₀ = 1.311 V/cm·Torr においては、 $\mu_0^- = 0.8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  まで増加している。この成分を同じイオン種とみなし、平均移動度を算出して図5中にプロットしたものが ○印であることは既に記した。この○印は、E/p₀ = 0.721 V/cm·Torr 付近より分離し E/p₀ の増加と共に移動度の値も増加している。これをそのまま延長して行くと、Nakamura や Dutton らの測定した F<sup>-</sup> の移動度の値、すなわち表1中の F<sup>-</sup> の移動度と一致する傾向にある。このような結果から、図5中 ○印で示した負イオン移動度を担うイオン種は、ほぼ F<sup>-</sup> であろうと推測できる。Nakamura の F<sup>-</sup> 移動度の測定結果は、E/p₀ = 100 V/cm·Torr 付近にピークを持ち、これより E/p₀ が減少すれば移動度も低下し、E/p₀ = 10~20 V/cm·Torr 付近でほぼ平坦な値となっている。しかし、著者らの結果から F<sup>-</sup> と判断される移動度が図5のように E/p₀

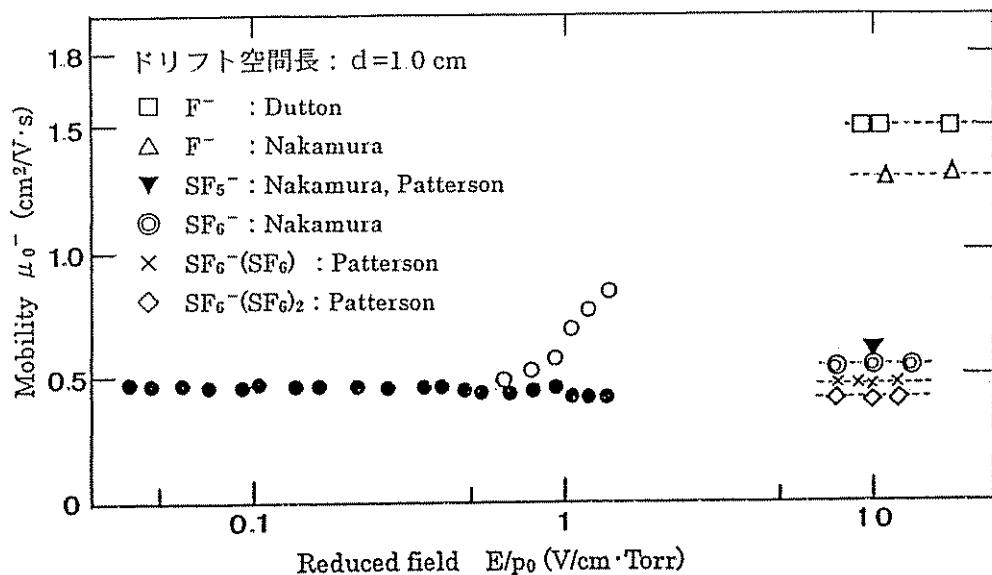


図5 負イオン移動度の測定値

Fig.5 Measured values of negative ion mobility.

に対して増加するのは、 $F^-$  がイオンドリフト空間の途中で生成され、以後それまでより大きい速度で移動して、 $G_2$ で検出されたものと推測できる。いいかえると、もし  $F^-$  が  $E/p_0 = 0.7 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$  付近から C 電極の直前で生成され、全ドリフト空間を  $F^-$  のまま移動したとすれば、Nakamura や Dutton の測定値をとるはずであると考えられるからである。従ってイオンドリフト空間の途中でイオン一分子反応、又はイオン交換反応を経て  $F^-$  が生成されたものと考えるのが妥当である。ドリフトしながらイオン種が別のものに変化するという議論は、スオーム法により実験した Nakamura も行っている。

以上述べたように  $SF_6$  中での負イオン移動度の測定結果は、イオン種を電子シャッターを用いて区別し、移動度を測定した Nakamura や、質量分析計を用いてイオン種ごとの移動度を測定した Patterson らの報告をよく理解できる。同時に、本研究の結果はイオン種を区別するための電子シャッターなどを用いなくても、簡単な装置で移動度観測頻度分布を観測することにより、条件は限定されるがイオン種別の移動度が測定できることを示している。勿論最終的にはイオン種の同定を行う必要があるのは言うまでもない。このような結果が得られたのは、 $SF_6$  中の負イオン形成のしきい値が極めて低い<sup>14)</sup>、例えば  $SF_6^-$  で 0 eV、 $SF_5^-$  で 0.1 eV であるという  $SF_6$  自身の特徴も反映している。それらを区別して検出できたのは、図 1 に示す  $G_1$  の正コロナキャップで  $G_1$  と  $G_2$  を最も速く飛行したイオンを測定したことによっている。

#### 4. おわりに

負イオン検出器に 1 気圧の下で動作する正コロナギャップを用いて負イオン移動度の測定を行った。本論文で述べた実験結果より得られた特徴と主な結論をまとめると、次のようになる。

- 1) 今回測定した方法で高  $E/p_0$  側の上限を更に 1 枝広げると、スオーム法で得られる測定値と関連付けられる。従って、より広い  $E/p_0$  にわたる移動度の挙動が把握できる。
- 2)  $SF_6$  中での測定値を平均化して処理した結果から得られた換算移動度は  $0.48 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  となり、既に報告された  $SF_6^-$  の換算移動度ではなく、例えば  $SF_6^-(SF_6)$  のクラスター化したイオン種の換算移動度とほぼ一致することが確認できた。
- 3) 測定したデータから移動度観測頻度分布を作成したところ、 $E/p_0$  に依存した形で変化していることも確認できた。
- 4) 移動度観測頻度分布中のピーク値は、 $SF_6^-(SF_6)_2$ 、 $SF_6^-(SF_6)$ 、 $SF_6^-$ 、 $SF_5^-$ 、 $F^-$  の移動度に相当するものがあり、複数のイオン種の移動度がイオン種を選択することなしに、測定できる可能性のあることを示した。
- 5) 従って、計測法の改良とデータ処理技術を導入することによって測定回数を増し、明確な形で移動度観測頻度分布を描くことが期待でき、今後の課題として挙げられる。

終りに、御所康七先生（元 徳島大学、日本工業大学）の御鞭撻と貴重なご意見に深く感謝致します。又 実験結果

について討論頂きました 本学教授 伊藤晴雄先生に厚く  
お礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 宅間 茜, 渡邊 晃: 電気学会誌, 90, (1970) 1381
- 2) L.G.Christphoru and R.J.Van Brunt : IEEE. Trans. on DEI, 2 (1995) 952
- 3) 上野秀樹, 増岡裕晃, 中山博史: 電気学会論文誌 A, 121, (2001) 990
- 4) 上野秀樹, 坂本直規, 国中嘉人, 中山博史: 静電気学会誌, 27 (2003) 32
- 5) 木谷博昭, 清水芳則, 宅間 茜: 電気学会論文誌 A, 122 (2002) 557
- 6) 佐々野秀一, 趙 孟佑: 電気学会論文誌 A, 121, (2001) 1012
- 7) Y. Nakamura : J. Phys. D: Appl. Phys. 21 (1988) 67
- 8) Y. Nakamura : Nonequilibrium Effects in Ion and Electron Transport, ed J.W.Gallagher et al. Plenum Press, New York, (1990) 197
- 9) P.L.Patterson : J. Chem. Phys., 53 (1970) 696
- 10) Y.Gosho and A.Harada : J. Phys. D: Appl. Phys., 16 (1983) 1159
- 11) 林 喬久, 伊藤晴雄: 電気学会論文誌 A, 120 (2000) 350
- 12) 林 喬久, 伊藤晴雄: 電気学会論文誌 A, 120 (2000) 712
- 13) J.Dutton, A.Goodings, A.K.Lucas and A.Williams : ICPIG XVIII (Swansea) Contributed Papers, 20, (1987)
- 14) A.Picard, G.Turban and B.Grollean : J.Phys.D:Appl. Phys., 19 (1986) 991