

論 文

逆電離の発光測定

増田 閃一*, 水野 彰*

(1977年7月2日受理)

Light Measurement of Back Discharge

S. MASUDA* and A. MIZUNO*

(Received July 2, 1977)

Light measurements of back discharge are made under negative DC high voltage and negative pulse high voltage application, with the aid of a photomultiplier tube and an image convertor camera connected to an image intensifier. The light signal of back discharge in the mixed streamer mode indicates that it consists of two parts, the primary light wave rising very rapidly, and the secondary light wave rising more slowly. The former proceeds into space while the latter along the layer surface. In the space streamer mode, the primary light wave is dominant and the secondary light wave is very weak. When a sufficiently high pulse voltage is applied under lower pressure, back discharge is triggered by free electrons supplied from the needle electrode. As the pressure is increased, an abrupt change in the triggering carriers occurs from electrons to negative ions.

1. はじめに

逆電離は電気集じん装置において集じん極表面に堆積したダスト層の絶縁破壊に起因する集じん極からの異常放電現象であり、その集じん効率を著しく低下させる。筆者らはこの現象の始発条件と放電様態ならびに火花電圧を測定し、この現象におよぼす種々のパラメータの影響を明らかにした^{1,2)}。その後さらに逆電離ストリーマの伝播状況およびパルス電圧を印加したときの逆電離のトリガー過程を光電子増倍管およびイメージコンバータカメラを用いて解明したので以下にその結果を報告する。なお逆電離発生点ではダスト粒子が放出されピンホールができるので³⁾、本論文では結果の再現性を向上するため堆積ダスト層の代わりに直径の0.5 mm ピンホールを有するガラス板およびマイカ板を使用した。

2. 実験装置

2.1 電極系

電極系としては図1に示すような針対平板電極系を用い、電極間隔は50 mm および20 mmとした。直流電圧印加時の逆電離現象の再現性を向上させるため、試料としてダストの代わりにピンホールを1個有するガラス板を用い、これを平板電極上において。このガラス板の抵抗率 $\rho_d = 6 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 、厚み 2.0 mm でピンホールの直径は0.5 mmである。なおパルス電圧印加の際には試料としてピンホールを1個有するマイカ板を用いた。この試料は $\rho_d > 15^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 、厚み 0.2 mm でピンホールの直径は同じく0.5 mm ϕ である。別報³⁾のようにいったん逆電離が開始したのちにはガス空間での放電様態は抵抗率の相違による影響は受けない。

2.2 光電子増倍管による測定

光電子増倍管 P.M. (浜松テレビ R 212) を用いて逆電離ストリーマの発光を測定し、同時に電流波形も測定した。発光は図1(a)に示すように凹面鏡を用いて P.M.

* 東京大学工学部電気工学科 (113 東京都文京区本郷7-3-1)
Department of Electrical Engineering, Faculty
of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1,
Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

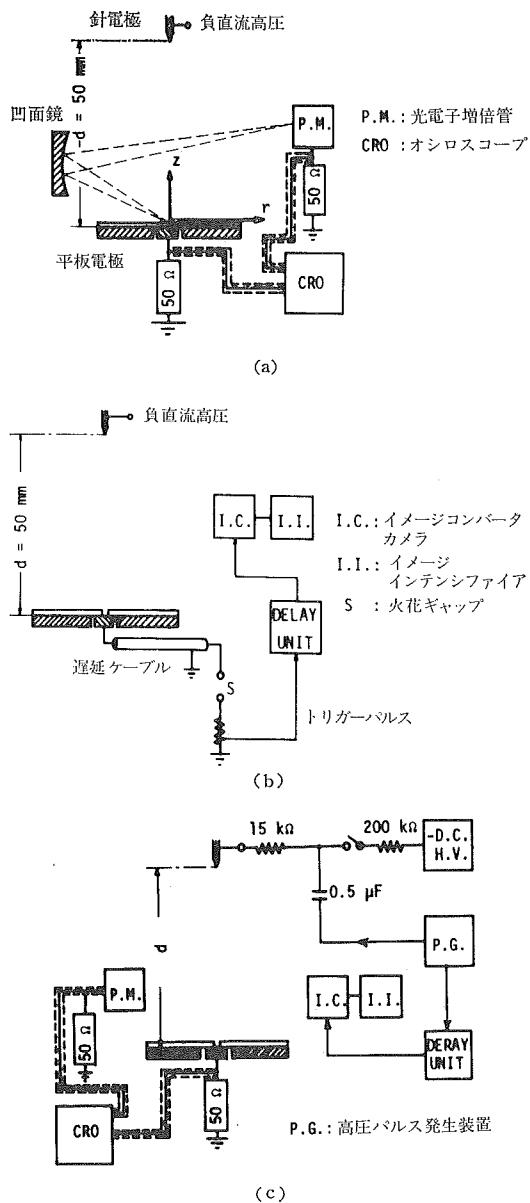


図 1 実験装置

- (a) 光電子増倍管による逆電離ストリーマ伝播測定装置
- (b) イメージコンバータカメラ用トリガーアルゴリズム(i) (直流電圧印加時)
- (c) イメージコンバータカメラ用トリガーアルゴリズム(ii) (直流+パルス電圧重畠時)

Fig. 1 Experimental apparatus.

前面のスリット上に結像させ、光電子増倍管を動かすことにより測定点の位置を変えた。測定点の大きさは 0.5 mm 四方の空間領域である。光電子増倍管の出力抵抗および電流検出用抵抗はともに 50Ω とし、同軸ケーブル、オシロスコープ（テクトロニクス7844）との整合条件を満たした。なお測定系の立上り時間は約 2 ns である。電極系全体は恒温恒湿槽に入れ、試料の表面抵抗を一定に保った。

2.3 イメージコンバータカメラによる測定

逆電離ストリーマの進展状況をさらにイメージコンバータカメラ I.C. (Jhon Hadland) を用いたストリーマ写真により測定した。なお I.C. の後段にイメージインテンシファイア I.I. (EMI, type 9912, 最高利得約 10^6 倍) を結合することにより写真撮影が可能となった。直流でのストリーマ・モードの逆電離はくり返し放電であるが、その周期のばらつきが現象の持続時間に比べて非常に大きい。そこで I.C. を現象と正確に同期させるために図 1(b)および(c)に示す回路を用いた。図 1(b)は直流電圧印加時の逆電離と同期をとるための回路である。主電極は遅延用同軸ケーブルを通して、小ギャップを経て接地されている。主電極の電圧が上昇し、小ギャップが閉絡すると定められた遅延時間のうちに主電極電圧がゼロとなり、逆電離がトリガーされる。一方この小ギャップの閉絡信号をイメージコンバータカメラに加えることにより同期をとることができる。図 1(c)は直流にパルスを重畠して逆電離をトリガーする回路である。最初に直流を印加してオンセットグロー・モードの逆電離を起こしておき、次にパルス電圧を重畠するとストリーマ・モードの逆電離がトリガーされる。また逆電離のトリガー過程は、低気圧のもとで高電圧パルスのみを印加することによって調べた。

3. 測定結果

3.1 負直流高電圧印加時の逆電離

針對平板電極系で上記ガラス板を試料として以下の測定を行なった。

3.1.1 混成ストリーマ・モード

試料の絶縁破壊時の表面電荷密度 σ_0 が約 $5 \times 10^{-9} \text{C/cm}^2$ 以上で、かつ表面抵抗 R_s が大きい場合には、空間および沿面ストリーマの混在した混成ストリーマ・モードの逆電離となる^{1,2)}。この試料の場合には $\sigma_0 = \epsilon E_{ds}$ の値は約 $5 \times 10^{-9} \text{C/cm}^2$ である。ただし ϵ は試料の誘電率、 E_{ds} は絶縁破壊強度である。以下の測定に際しては温度 40°C、相対湿度 20% とし、試料の表面抵抗 $R_s = 3.5 \times 10^{14} \Omega$ に設定した。このとき $V-I$ の特性を図 2 の曲線(i)に示す。 $V = -26 \text{kV}$ における逆電離発光波の空間方向 (z 方向) および沿面方向 (r 方向) への伝播状況を図 3 に示す。絶縁破壊点 ($z=0, r=0$) での発光波形は混成ストリーマ・モードの逆電離が 2 種類の発光波から成り立っていることを示している。それは立上りが早く、20 ns 程度持続する 1 次発光波と、それに引き続

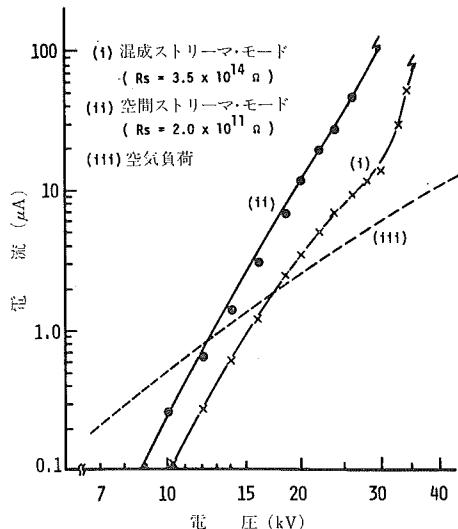


図 2 逆電離電圧-電流特性 (試料: ピンホール付きガラス板)

Fig. 2 Voltage-current curves of back discharge for different modes. (Sample: Glass plate with a pinhole)

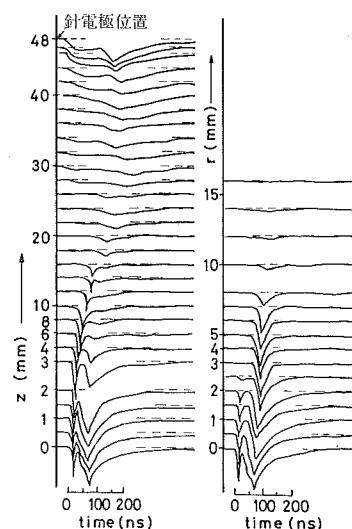


図 3 発光波形伝播状況 (混成ストリーマ・モード)

(a) z 軸方向 (空間方向)

(b) r 軸方向 (沿面方向)

Fig. 3 Change in light signal of back discharge in space (see Fig. 1-a).

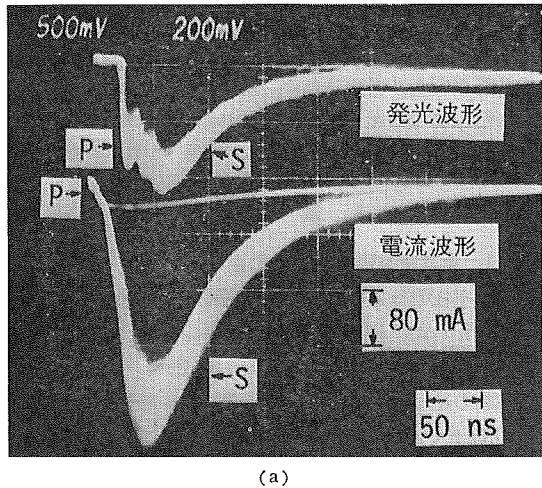


図 4 逆電離発光波形および電流波形 (混成ストリーマ・モード)

(a) 絶縁破壊点 ($z=0, r=0$) での発光波形および電流波形 ($V=-28$ kV, $I=13 \mu\text{A}$)
(b) 針電極先端の発光波形 ($z=48$ mm)

Fig. 4 Light and current wave form of back discharge in the mixed streamer mode.

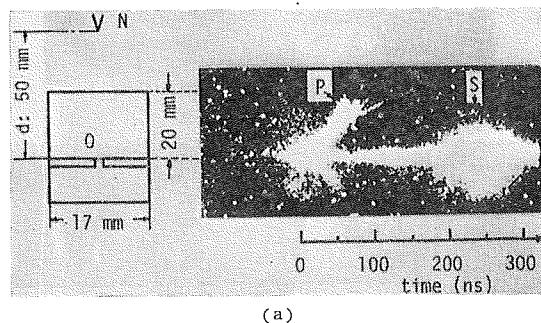
いて発生する立上りが比較的遅く、200 ns 程度持続する2次発光波である。前者は z 方向に約 4×10^7 cm/s で、後者は r 方向に約 2.5×10^7 cm/s の速度で進展する。図 4(a)はこのモードでの破壊点における発光波形と電流波形を示す。図中 P は1次発光波に、S は2次発光波に対応する発光および電流波形である。電流波形も2段の立上りを示している。このモードでは電流パルス 1

個当たりの電荷量は表 1 に示すように印加電圧によらずほぼ一定であり、そのくり返し周期が短くなることによって電流値が増加することが判明した。図 4(b)は針電極先端の発光波形で、A で示される発光は逆電離に伴っており、図 3 の $z=48$ mm での波形と等しい。あとに続くパルスは時間軸を拡大すれば A とはまったく異なっており、負コロナ特有のトリニティルパルスである。

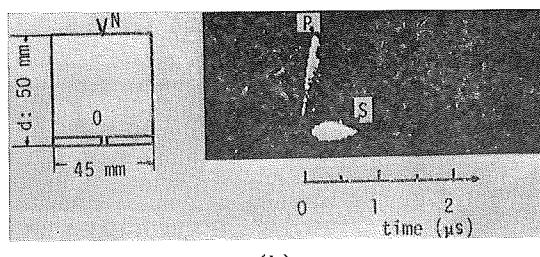
表 1 逆電離電流パルス 1 個当りの電荷量（混成ストリーマ・モード）

Table 1 Charge per single back discharge pulse (mixed streamer mode).

| Voltage [kV] | Q [C] | T_a [ms] | $Q \times I / T_a$ [A] | I meter [A] |
|--------------|-------------------------------|------------|------------------------|----------------------|
| 16 | 2.0×10^{-8} | 60 | 0.34×10^{-6} | 1.3×10^{-6} |
| 18 | 2.0×10^{-8} | 34~36 | 0.6×10^{-6} | 2.5×10^{-6} |
| 22 | 2.8×10^{-8} | 12 | 2.4×10^{-6} | 4.4×10^{-6} |
| 25 | 3.0×10^{-8} | 6.5 | 4.6×10^{-6} | 8.0×10^{-6} |
| 28 | $2.8 \sim 3.6 \times 10^{-8}$ | 3.2~3.5 | 1.08×10^{-5} | 1.3×10^{-5} |



(a)



(b)

図 5 混成ストリーマ・モード逆電離のストリーケ写真
(N : 针電極, O : 絶縁破壊点, P : 1 次発光波,
S : 2 次発光波)
(a) 1 次および 2 次発光波のストリーケ写真(ストリーカー方向: 水平)
(P : 760 Torr, V : -28 kV, I : 13 μ A) (図 1(b) 参照)
(b) 直流にパルス電圧を重畠して発生させた逆電離のストリーケ写真(ストリーカー方向: 水平)
(P : 410 Torr, V_P : -10 kV, t_P : 10 μ s, DC: -15 kV) (図 1(c) 参照)

Fig. 5 Streak photograph of back discharge in the mixed streamer mode. (N: Needle electrode, O: Breakdown point, P: Primary light wave, S: Secondary light wave)

図 5(a)は図 1(b)のトリガー回路を用いて横方向から撮影した逆電離発光のストリーケ写真であり、1次および2次発光波の伝播状況をよく示している。図 5(b)は図 1(c)の回路を用い、同じく横方向から撮影した逆電離発光のストリーケ写真である。この測定は大気圧下では逆電離をトリガーすることが困難であったので、圧力 $P=410$ Torr で行なった。なお試料の表面抵抗を高く保つ

ため乾燥空気を使用した。これらの観測によってオンセットグロー・モードからストリーマ・モードになると連続的な発光は消滅し、試料のピンホールが絶縁破壊するごとにストリーマに伴う発光がくり返し発生することが確認された。また2次発光波は1次発光波が針電極近傍に近づくと発生することも認められた。なお混成ストリーマ・モードにおけるストリーマのくり返し周期は後述の空間ストリーマ・モードの場合に比べ2桁程度大きいことがわかった(表 1)。

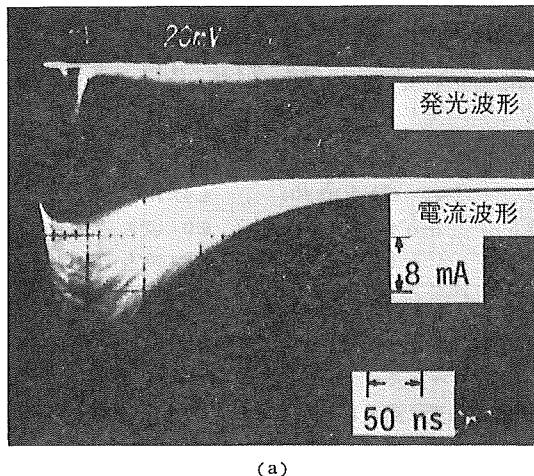
3.1.2 空間ストリーマ・モード

前項と同じ試料を用い、その表面抵抗 R_s の値を比較的小さくすると沿面ストリーマは消失し、空間ストリーマ・モードとなる。 $R_s=2 \times 10^{11} \Omega$ における空間ストリーマ・モードの逆電離 $V-I$ 特性を図 2 の曲線(ii)に示す。また $V=-22$ kV における破壊点での発光波形および電流波形を図 6(b)に示す。

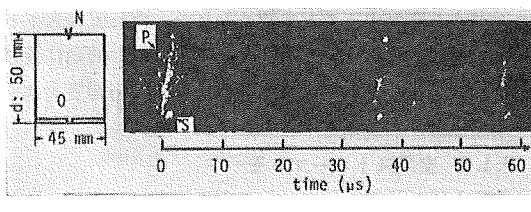
このモードでは1次発光波(空間ストリーマ)に続く2次発光の強度はきわめて小さく、しかも不規則であるため、光電子増倍管による観測は困難であった。また電流パルス1個当たりの電荷量は 10^{-9} C 程度であるが、くり返し周期が $50 \sim 300 \mu$ s と小さいため、混成ストリーマ・モードに比べ同一電圧印加時の電流値は大きくなることが判明した。図 6(b)は $P=410$ Torr における空間ストリーマ・モードの逆電離の横方向からのストリーケ写真である。大気圧下では発光が微弱で火花頻發¹⁾を生ずる程度の電圧を印加しないと観測が困難であり、しかもくり返し周期がイメージコンバータカメラで測定可能な時間幅よりも大きくなるため、低気圧で測定した。 R_s を低くするため真空槽内へは室内的湿った空気(温度 20°C、相対湿度 76%)を導入した。この写真では逆電離がくり返し発生しているのが見られ、休止期間中は針電極が発光していない。また破壊点においては空間ストリーマに引き続いて2次発光波と思われる微弱な発光が存在することが認められる。

3.1.3 火花閃絡

ストリーマ・モードの逆電離から火花閃絡に至る過程



(a)



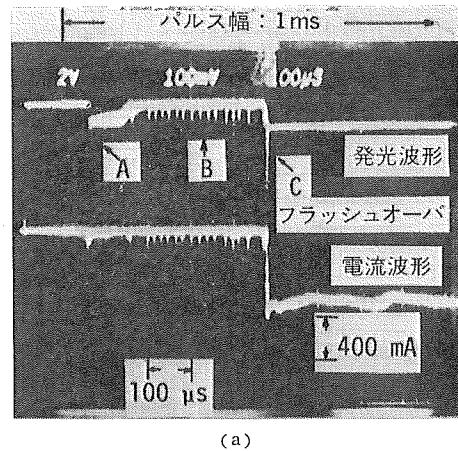
(b)

図 6 空間ストリーマ・モード逆電離

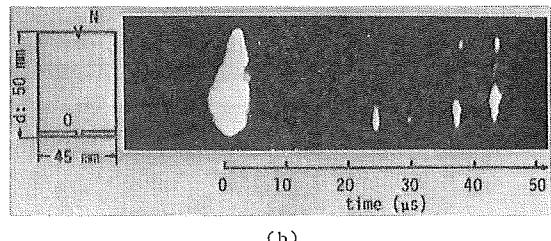
- (a) 絶縁破壊点での発光波形と電流波形
($P: 760 \text{ Torr}, V: -22 \text{ kV}, I: 12 \mu\text{A}$)
(b) ストリーカ写真 (ストリーカ方向: 水平)
($P: 410 \text{ Torr}, V: -10 \text{kV}$)

Fig. 6 Light and current pulse and streak photograph of back discharge in the space streamer mode.

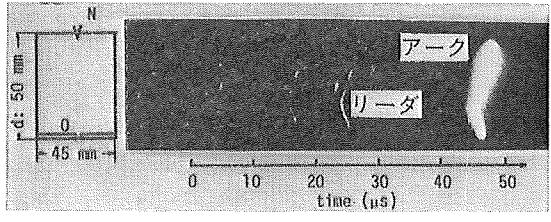
を図 1(c)の回路を用いストリーカ写真により調べた。その結果を図 7 に示す。ここで用いたパルス電圧は波高値 $V_p = -10 \text{ kV}$, パルス幅 $\tau_p = 1 \text{ ms}$ で、これを直流電圧 -15 kV に重量して印加した。前項と同様室内空気(温度 20°C , 相対湿度 76%)を真空槽に導入のうえ, $P = 410 \text{ Torr}$ において測定した。図 7(a)は破壊点における発光波形および電流波形である。この図の A で示した部分はパルス電圧印加により逆電離がトリガーされた瞬間であり、B は安定な放電路が形成され火花閃絡 C に至る前のくり返しストリーマの段階である。A での波高値の大きく持続時間の長い光パルスは光電子増倍管の飽和によるものである。これらの段階でのストリーカ写真を図 7(b)と(c)に示す。(c)ではカメラの光量を(b)の約 $1/2$ に絞って撮影している。パルス電圧が印加されると $50 \sim 100 \mu\text{s}$ の遅れ時間のあとに空間ストリーマ・モードの逆電離がトリガーされる。このとき最初のストリーマの発光強度は後続のものより大きい。これは最初のストリーマの発生時には両電極間の静電容量に全電圧が加わってい



(a)



(b)



(c)

図 7 火花閃絡

- (a) 火花閃絡時の発光波形と電流波形
($P: 410 \text{ Torr}, V_p: -10 \text{ kV}, \tau_p: 1 \text{ ms}, DC: -15 \text{ kV}$)
(b) 直流にパルス電圧を加えてトリガーされた逆電離のストリーカ写真 (水平方向)
(c) 火花閃絡時のストリーカ写真 (水平方向)

Fig. 7 Flashover caused by back discharge (see Fig. 1-c).

るのに対し、後続のストリーマは電圧が完全に回復する前の低い電圧でトリガーされるためと思われる。しかし B の段階でストリーマがくり返し発生することにより、ストリーマチャンネルが加熱収縮し、リーダ⁴⁾が形成される。このリーダは破壊点から放電極に向かって徐々に進展し、これに到達するとともに図 7(a)の C 点においてアーケに移行する。

3.2 負パルス高電圧印加時の逆電離

3.2.1 ストリーカ写真

図 1(c)を用いてパルス電圧のみを印加することによっ

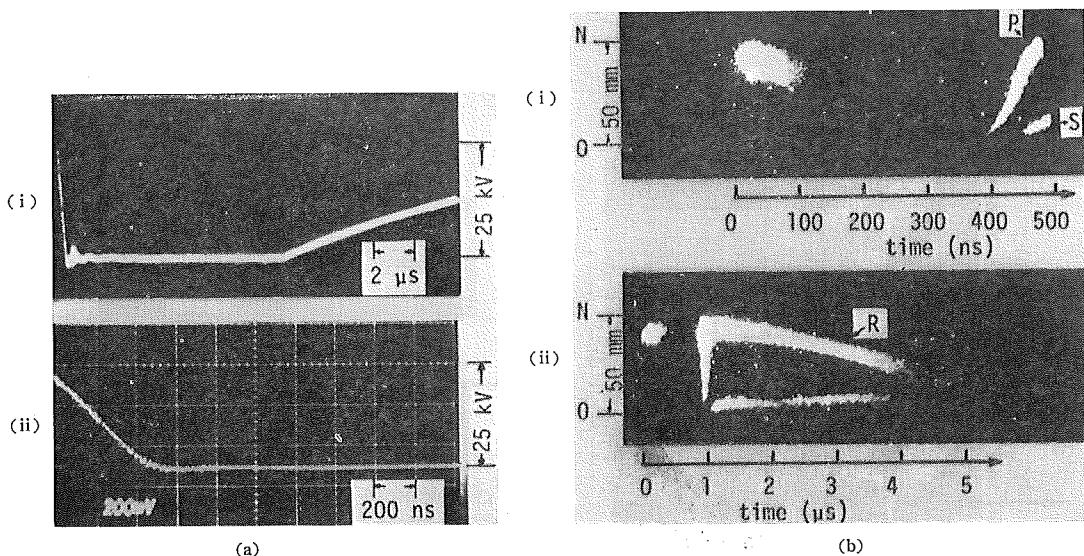
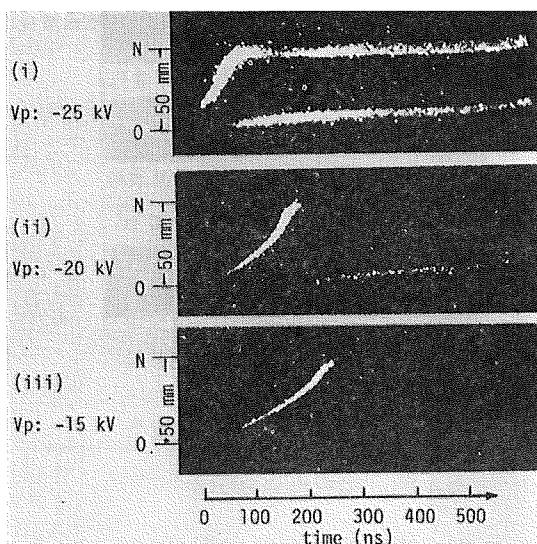


図 8 パルス電圧印加時の逆電離 (P : 1 次発光波, S : 2 次発光波, R : リターン発光波)

(a) 印加パルス電圧の波形
 (b) パルス電圧をえた場合の逆電離のストリーケ写真(水平方向)(図1(c)参照)
 $(d = 50 \text{ mm}, P = 170 \text{ Torr}, V_p = -25 \text{ kV}, \tau_p = 10 \mu\text{s}, f = 10 \text{ Hz}$, 試料: ピンホール付きマイカ板)

Fig. 8 Back discharge with pulse high voltage application. (P : Primary light wave, S : Secondary light wave, R : Return light wave)

図 9 逆電離の電圧依存性
 $(P : 160 \text{ Torr}, \tau_p : 10 \mu\text{s}, f : 10 \text{ Hz}$, 試料: ピンホール付きマイカ板)Fig. 9 Streak photographs of back discharge with pulse.
 $(P : 160 \text{ Torr}, \tau_p : 10 \mu\text{s}, f : 10 \text{ Hz}$, Sample : Mica plate with a pinhole)

て発生する逆電離を調べた。印加パルス電圧の波形は図 8(a)(i)および(a)(ii)に示すように、立上り時間=0.5

μs , 波高値 $V_p = -25 \text{ kV}$, パルス幅 $\tau_p = 10 \mu\text{s}$ で、
 り返し周波数 $f = 10 \text{ Hz}$ である。この τ_p の値はストリーマ放電の持続時間より十分大きい。電極間隔は50 mm であり、中央に直径 0.5 mm のピンホールを 1 個有する厚さ 0.2 mm のマイカ板を試料として用いた。なお乾燥空気を用い、気圧 $P = 170 \text{ Torr}$ で実験を行なった。図 8(b)(i)および(b)(ii)は得られたストリーケ写真であり掃引速度を変えている。パルス電圧の印加後、500 ns 程度の遅れ時間を経て最初に針電極が 100 ns 程度発光し、それに続いて 400~800 ns 発光が休止することが認められる。針電極の発光休止は放出された電子がガス分子に付着して負イオン空間電荷を作り、電極傍の電界を弱めるために電離が消滅することによるものと考えられる。この休止期間のあとにマイカ燃料ピンホールの絶縁破壊が発生し、1 次発光波すなわち空間ストリーマが針電極に向かって進展し始める。この休止期間を逆電離トリガー遅延時間と呼び、 τ_d で表わすことにする。この τ_d 期間内に針電極から放出されたキャリアが試料表面に飛来蓄積し絶縁破壊を引き起こすものと考えられる。この場合には τ_d が非常に短いことからキャリアは負イオンではなく電子であると考えられる。1 次発光波の進展速度は約 $5 \times 10^7 \text{ cm/s}$ であり、これが針電極に近づくと再び破壊点に 2 次発光波が発生する。図 8(b)(ii)は掃引速度を遅くしたものであり、1 次発光波が針電極

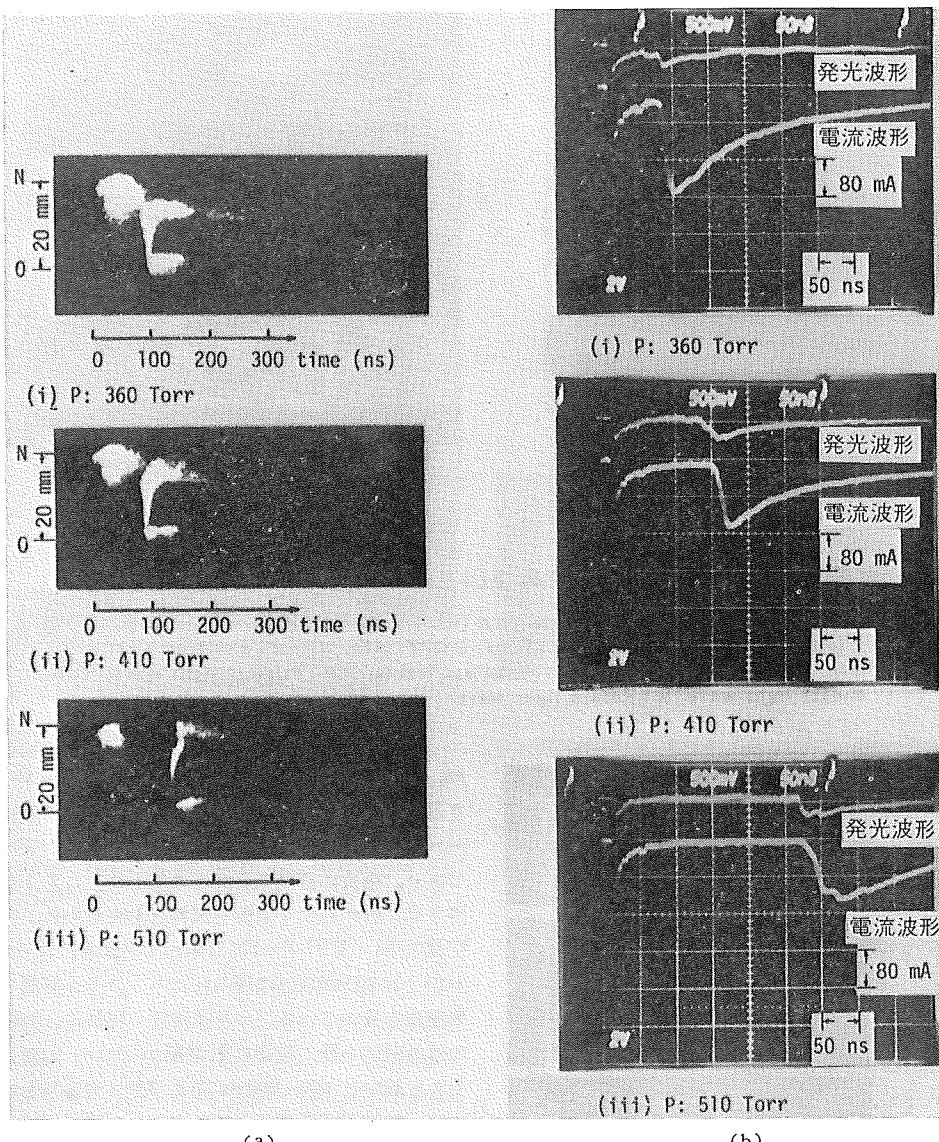


図 10 逆電離トリガー遅れ時間の測定

(V_P : -20 kV, τ_P : 10 μ s, f : 10 Hz, 試料: ピンホール付きマイカ板)

- (a) ストリーク写真(水平方向)
- (b) 発光および電流波形

Fig. 10 Change in triggering delay time.

(V_P : -20 kV, τ_P : 10 μ s, f : 10 Hz, Sample : Mica plate with a pinhole)

に到達したあと、そこから平板電極に向かう比較的速度の遅い (0.7×10^7 cm/s) リターン発光波⁵⁾が出現することを示している。図9は図8と同じ条件でパルス波高値 V_P を変えたストリーク写真である。1次発光波の進展速度は $V_P = -25$ kV で 5×10^7 cm/s, $V_P = -20$ kV で 3×10^7 cm/s, $V_P = -15$ kV で 2×10^7 cm/s である。1次発光波の進展速度のみならず2次発光波の強度も V_P

に依存していることが認められる。

3.2.2 逆電離トリガー遅延時間およびキャリア

逆電離トリガー遅延時間 τ_d の間に両電極間を移動するキャリアの速度は d/τ_d (d : 電極ギャップ長) のオーダと考えられる。図8の結果ではこの値は $0.6 \sim 1.2 \times 10^7$ cm/s であり、負イオンの移動速度⁶⁾に比べて3桁程度大きく、電子の移動速度⁷⁾と同じ程度である。電子の

移動速度は E/P の関数として参考文献 7) に示されて
いる（図13参照）。

上述の場合、 E の値を平均電界強度 $\bar{E}=V_P/d$ とする
と、 $\bar{E}/P=31.0 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ となり、文献 7) による電
子の移動速度は $1.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ となる。

キャリアが電子であることを確かめるために、ストリ
ーク写真および電流波形の両者から τ_d を求め、 d/τ_d の
値を直接的な方法で測定したキャリアの移動速度 d/τ_t
(後述) と比較した。図10(a)は気圧 P が異なる場合のスト
リーク写真である。なおこの場合、電極間隔 $d=20 \text{ mm}$,
 $V_P=-20 \text{ kV}$, $\tau_P=10 \mu\text{s}$ であり、試料として 3.1.1 と
同じマイカ板を用い、室内空気（温度 17°C , 相対湿度
61%）を真空槽に導入使用している。図10(b)は(a)と同じ
条件における電流波形と放電空間全体の発光波形であ
る。電流波形の最初の立ち上りは針電極からの電荷放出に
伴う誘導電流であり、2番目の立ち上りが逆電離開始に対
応している。この電流波形の測定から τ_d を精度よく求
めることができた。この τ_d の値はストリーク写真から
求めた値とよく一致した。得られた τ_d と P の関係を図
11に示す。この結果 $P=560 \text{ Torr}$ を境として τ_d が2
桁程度急激に変化することが判明した。このことはキャ
リアの移動速度が変化していることを示している。これ
は針電極から放出された自由電子が負性ガス分子と衝突

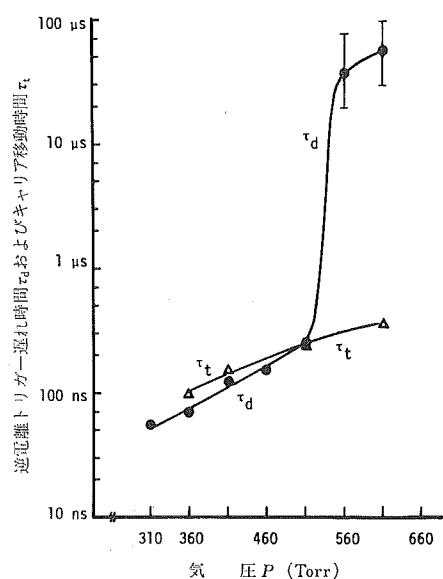


図 11 逆電離トリガーワレ時間 τ_d およびキャリア移動時
間 τ_t の気圧依存性

Fig. 11 Triggering delay time and carrier transit time as a function of pressure.

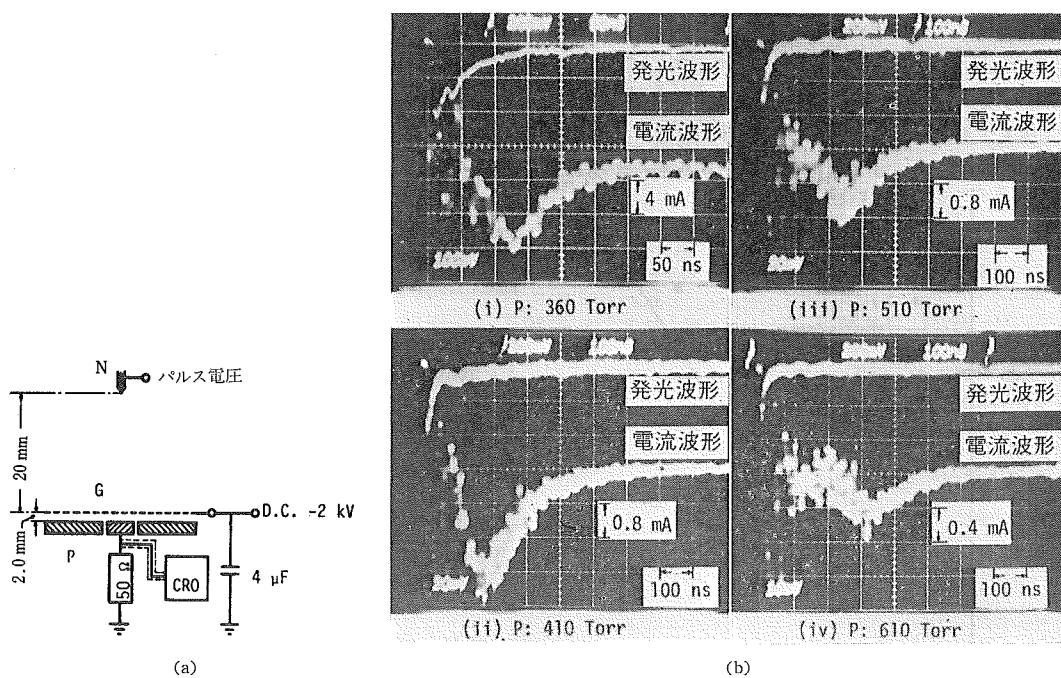


図 12 キャリア移動時間の測定（N：針電極、G：グリッド電極、P：平板電極、CRO：オシロスコープ）

(a) 測定装置 ($V_P: -22 \text{ kV}$, $\tau_P: 10 \mu\text{s}$, $f: 10 \text{ Hz}$)

(b) 電流波形

Fig. 12 Carrier transit time measurement.

するとある確率でこれに付着して失われる所以、その到達範囲はガスの平均自由行程の減少とともに小さくなり、ついに電子付着により生じた負イオンが逆電離をトリガーするようになるためと考えられる。なお $P=560$ Torr 以上ではパルス電圧の幅 τ_P を $100 \mu\text{s}$ として τ_d を測定した。

図12(a)は直接キャリアの移動時間 τ_t を測定するための電極系である。放電極でのキャリアの発生および移動に伴う誘導電流を取り除くためグリッド電極を挿入した。針電極とグリッド電極との間隔は 20 mm, グリッド電極と平板電極との間隔は 2.0 mm とし、グリッド電圧は -2.0 kV とした。なおキャリア飛来時のグリッド電圧の変動を抑制するため $4.0 \mu\text{F}$ のコンデンサをこれと大地の間に挿入した。印加したパルス電圧は $V_P=-22 \text{ kV}$, $\tau_P=10 \mu\text{s}$, $f=10 \text{ Hz}$ であり、針-グリッド電極間の平均電界強度は図10の場合と等しくした。なおマイカ板は取り除いてある。

図12(b)は気圧を変えて測定した電流波形である。図の電流パルスは平板電極まで到達したキャリアによるものである。時間の原点を定めるために針電極の発光も同時に測定した。針電極の発光開始から電流波形がピーク値に達するまでの時間を求め、これをキャリア移動時間 τ_t とする。気圧を変えて測定した τ_t の値を図11に併記する。この結果 $P \leq 510$ Torr では τ_d と τ_t はかなりよく一致することが確かめられた。 $P=610$ Torr では τ_d と τ_t は大きく異なっている。このときには図12(b) (iv) に示されるように電流波形のピーク値は小さく、平板電極まで到達する高速キャリアの量が非常に少ない。したがってこのキャリアでは逆電離をトリガーすること

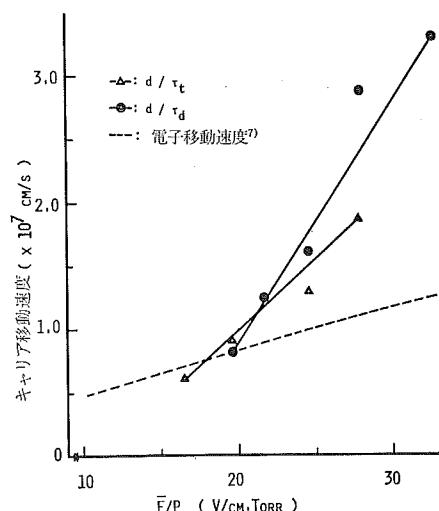
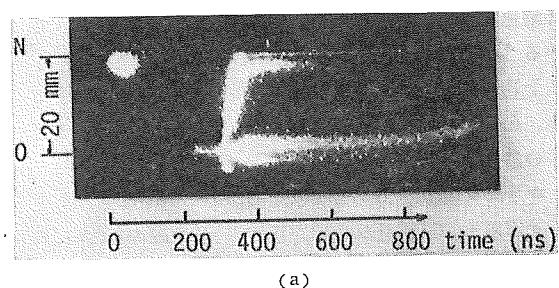
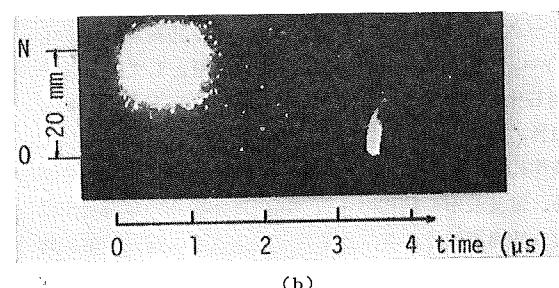


図 13 キャリア移動速度

Fig. 13 Carrier velocity as a function of \bar{E}/P .

(a)



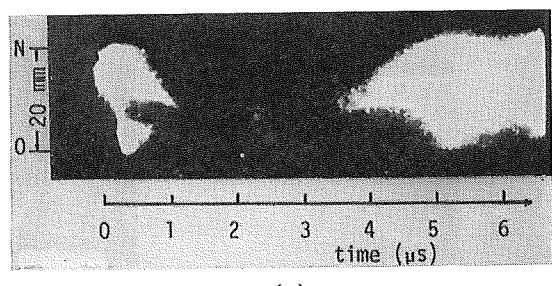
(b)

図 14 N_2 ガスおよび SF_6 ガス雰囲気中の逆電離
(試料: ピンホール付きマイカ板)

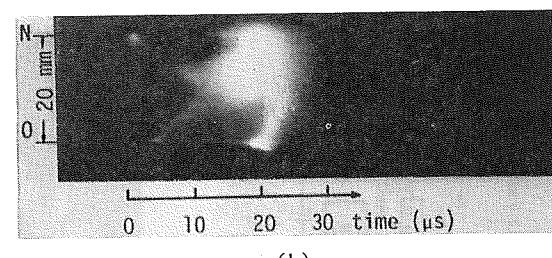
(a) N_2 ガス ($P: 360$ Torr, $V_P: -20 \text{ kV}$, $\tau_P: 10 \mu\text{s}$)
(b) SF_6 ガス ($P: 160$ Torr, $V_P: -24 \text{ kV}$, $\tau_P: 10 \mu\text{s}$)

Fig. 14 Back discharge with pulse under N_2 and SF_6 gas.

(Sample: Mica plate with a pinhole)



(a)



(b)

図 15 火花閃絡 (パルス電圧印加)

(a) 空気 ($P: 310$ Torr, $V_P: -20 \text{ kV}$, $\tau_P: 10 \mu\text{s}$)
(b) N_2 ガス ($P: 260$ Torr, $V_P: -25 \text{ kV}$, $\tau_P: 50 \mu\text{s}$)

Fig. 15 Flashover caused by back discharge with pulse.

(Sample: Mica plate with a pinhole)

ができず、低速の負イオンの到着によりはじめて逆電離がトリガーされるものと考えられる。

図13は、 $P \leq 510$ Torr での d/τ_d と $P \leq 610$ Torr での d/τ_t の値と \bar{E}/P の関係を示したものである。参考文献7)の電子の移動速度も同図に点線で示した。なお \bar{E} は平均電界強度 ($=V_P/d$) である。これらの結果より、低気圧において逆電離をトリガーする速いキャリアは自由電子であることが結論できる。

3.2.3 N_2 ガスおよび SF_6 ガスでの逆電離

これまでに得られた結果は、ガス分子の電子付着性の大小が逆電離をトリガーするキャリアの種類に重要な影響をおよぼすことを示している。さらにストリーマの進展も電子付着性により大きく影響を受けることはよく知られている。そこで N_2 ガスおよび SF_6 ガスを用いてこの影響をさらに詳しく調べた。前者では電子付着性が小さいため負イオンが形成されにくく、逆に後者ではその著しく高い電子付着性のため非常に多く負イオンが形成される。図14(a)に N_2 ガス中での逆電離のストリーグ写真を示す。最初に真空槽を 1 Torr とし、次に N_2 ガス（純度99.99%）を用いて $P=310$ Torr とした。このときの τ_d は約 200 ns であり、空気を用いた場合よりも大きいが、この値はキャリアが電子であることを示している。また針電極の発光は完全には消滅せず、連続的に発光することが観測された。さらにマイカ試料のピンホール絶縁破壊からストリーマ形成までに遅れ時間が存在すること、しかしながら空間ストリーマ発生後 2 次発光波がただちに発生することも認められた。図14(b)は SF_6 ガス中での逆電離のストリーグ写真である。この場合には、 $P=160$ Torr においても $\tau_d=4 \mu s$ であり、キャリアは電子ではなく負イオンである。またストリーマは進展しにくく、ただちに減衰し、2 次発光波はまったく認められなかった。

3.2.4 火花門絡

空気中および N_2 ガス中においてパルス電圧印加時に火花門絡に至る様子を図15(a)および(b)に示す。両者ともに 2 次発光波とリターン発光波が空間に進展し、中央部で一体となって強い発光を生じ、火花門絡に至ることが観測された。

4. 結 論

逆電離の発光測定により以下の結論が得られた。

(1) 混成ストリーマ・モードでは、逆電離の発光波は 1 次発光波と 2 次発光波から成っている。前者は空間ストリーマに対応し、後者は沿面ストリーマに対応している。また後者に対応する電流パルスの電荷量は $1 \sim 2 \times 10^{-9} C/pulse$ であるのに対し、後者に対応する電流パルスでは $2 \sim 4 \times 10^{-8} C/pulse$ であり、印加電圧の上昇に伴い逆電離のくり返し周波数が大きくなつて電流値が増加する。

(2) 空間ストリーマ・モードでは 1 次発光波が主であり、2 次発光波は非常に弱い。

(3) 低気圧において十分大きい波高値を持ったパルス電圧を印加する場合には、逆電離は電子によりトリガーされる。しかしある気圧を境として逆電離をトリガーするキャリアは電子から負イオンへ急激に変化する。この場合、気体の電子付着性と圧力が逆電離のトリガーに与えるキャリアが電子となるかイオンとなるかを左右する。

謝辞：この研究は文部省科学研究費（特定研究(1) No. 011914）の支援により行なわれたものである。筆者らはここに深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) S. Masuda, A. Mizuno and K. Akutsu: J. Electrostatics, 4, 1 (1977), 35.
- 2) S. Masuda and A. Mizuno: J. Electrostatics (to be published).
- 3) S. Masuda, A. Mizuno and K. Akutsu: 1977-Annual Meeting of IEEE/IAS, 35-A, p. 867, Los Angeles, Oct. (1977).
- 4) 常安暢: 電気学会論文誌, 96-A, 6 (1976), 63.
- 5) 生田信雄, 牛田富之, 石黒美種: 電気学会誌, 90(1970), 1816.
- 6) E.W. McDaniel and M.R.C. McDowell: Phys. Rev., 114 (1959), 1028.
- 7) H. Ryzko: Proc. Phys. Soc., 85 (1965), 1283.