

## 水素中の電離係数の測定\*

大内 均\*\*

吉田 公策\*\*

(昭和57年4月30日受理)

### Measurement of Ionization Coefficients in Hydrogen

by Hitoshi OUCHI and Kosaku YOSHIDA

A discharge apparatus for measurement of the Townsend first ionization coefficient  $\alpha$  in various gases by the steady-state Townsend method has been produced. The purpose of this paper is to confirm the accuracy and reliability of the apparatus by measuring the  $\alpha$  values in hydrogen. The reason for using hydrogen is that there is little difference between its  $\alpha$  values for each investigator compared with other gases and the gas is frequently employed as a suitable one for testing such an apparatus.

The results show that the  $\alpha$  values obtained over the  $E/p_0$  range  $40 < E/p_0 < 200$   $\text{Vcm}^{-1} \text{Torr}^{-1}$  are in excellent agreement with earlier ones. It is also found that the  $\alpha$  values are unchanged for ten hours after enclosing the gas, provided that hydrogen with purity of 99.9% is used, as in the present study.

#### 1. ま え が き

空気や  $\text{SF}_6$  を始めとする各種気体が、送電線や各種高電圧機器における電氣的絶縁材料として広く用いられている。このため Townsend の第一電離係数及び二次係数は最も基本的かつ重要なパラメータとなっており、これに関する研究が古くから行なわれている。

しかし報告されているそれらの値は必ずしも一致したものではなく、気体の種類によっては研究者間の電離係数値には数十%もの差が残されており、より信頼性のある値が望まれているのが現状である。

また、最近では各種の混合気体が、ガスレーザの媒体として、あるいは絶縁耐力の高いガスの開発を目的として使用されているが<sup>1)</sup>、これら混合気体における電離係数は、それを構成する単ガス中の電離係数をガスの混合比によって比例配分して得られる値と必ずしも一致しないことが指摘されており<sup>2)</sup>、未知の混合気体及び、混合比における電離係数の測定も重要な課題の一つになっている。

\* 昭和56年度電気四学会北海道支部連合大会 (1981. 10) にて一部講演

\*\* 北見工業大学電気工学科

そこで筆者らは各種気体における電離係数の測定を目的に今回放電装置を製作した。

本報告は、現在のところ最も測定者間の差が少なく信頼できるとされている  $H_2$  中の電離係数を SST 法 (定常 Townsend 法) により測定した結果を示し、装置の信頼性及び測定精度について検討したものである。

また、測定者間における電離係数の差を検討する一環としてガス封入後 10 時間にわたる実験を行ない、時間経過にともなう電離係数の変動についても調べている。

## 2. 実験装置及び測定方法

### 2.1 実験装置

図-1 に放電装置を、測定系統図を図-2 に示す。

放電チェンバは内径 400 (mm $\phi$ )、高さ 500 (mm) ガラス製で上下にそれぞれ真鍮、ステンレスのフランジを使用している。

放電チェンバ内は電氣的、光学的影響を避けるため内側を銅メッシュ、さらに外側をアルミ板によって完全に遮蔽されている。

排気系には 650 (l/sec) の油拡散ポンプと 110 (l/min) の油回転ポンプを使用し、室温 22 ( $^{\circ}C$ ) に於ける最高真空到達度は  $1.2 \times 10^{-6}$  (Torr)、リーク率は  $1.4 \times 10^{-5}$  (Torr/min) の値を得ている。

電極は Harrison 型電極<sup>3)</sup> で平等電界が得られるよう端極効果を少なく設計された形状のものをを用い材質は上下両電極とも真鍮、電極径は 150 (mm $\phi$ ) である。

陰極中央部には、背面より光を照射するため直径 20 (mm $\phi$ )、厚さ 1.2 (mm) の石英ガラスを埋め込み、陰極表面を金蒸着 (膜厚 1000  $\text{\AA}$ ) してある。なお、蒸着面における光の透過率は 2% である。陽極は表面に金メッキ処理を施し、上下に 35 (mm) 可動することができ、電極間距離は最小目盛 1/100 (mm) のダイヤルゲージにて読み取ることができる。

電流測定 ( $10^{-6} \sim 10^{-15}$  A) には振動容量型エレクトロメータを使用し、外乱の影響を

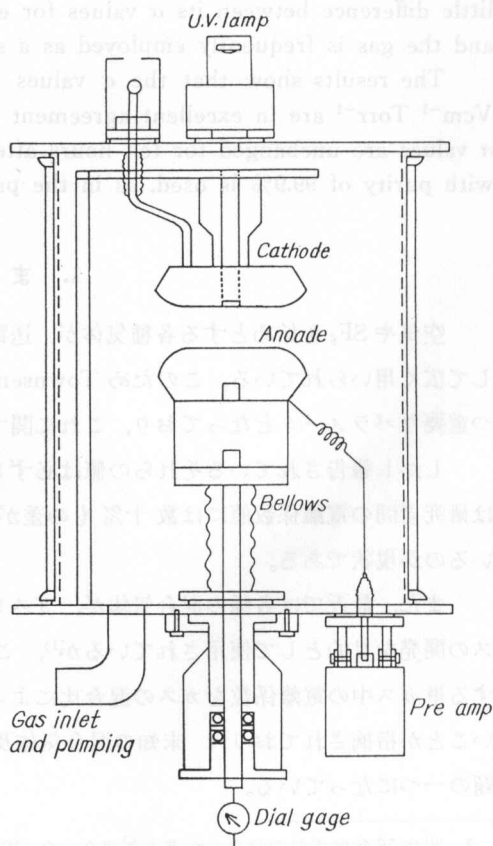


図-1 放電装置

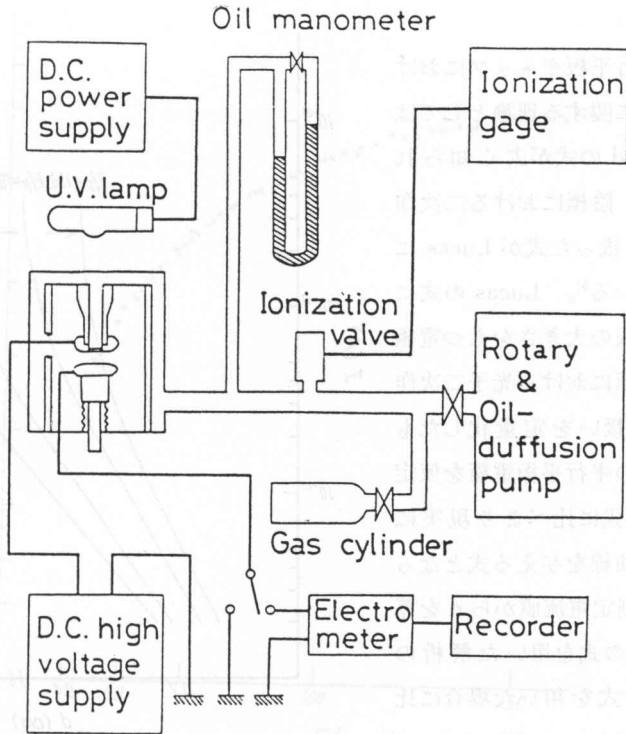


図-2 測定系統図

避けるため電流導入端子とプリアンプを直結し、それらを静電シールドしてある。

気圧の測定にはU字型オイルマンオメータを用い読み取り顕微鏡の使用によって  $7.8 \times 10^{-3}$  (Torr) の精度で測定することができる。本実験に使用したガス純度は99.9%である。

## 2.2 測定方法

放電チェンバ内を高真空 ( $4 \times 10^{-6}$  Torr 以上) に排気した後、メインバルブを閉じガスクリーニングを行なうため一度放電チェンバ内に数十 Torr のガスを封入する。再び高真空に排気しメインバルブを閉じ排気系と放電チェンバを分離した後、チェンバ内に規定圧力のガスを封入する。

実験方法は  $E/p_i$  ( $E$  は電界,  $p_i$  は室温  $t^\circ\text{C}$  における気圧) が一定となるように高電圧をギャップに印加し、ギャップ長を変えて放電電流をエレクトロメータで測定する。なお、陰極面よりの初期電子供給は、外部照射源 (重水素放電管使用) より陰極背面を照射して行なった。

## 3. 実験結果

### 3.1 電離係数 $\alpha$

図-3 に実験により得られた電流成長曲線の一例を示す。各  $E/p_i$  ともギャップ長  $d$  が小さい範囲においては指数関数的増倍がみられ、その後急激な増倍により電流値は急速に立ち上が

りをみせている。

このような平行平板ギャップにおける電離電流の成長に関する理論としては古くから Townsend の式が広く知られている<sup>4)</sup>。その後、陰極における二次作用をより定量的に扱った式が Lucas によって提案されている<sup>5)</sup>。Lucas の式においては実際の有限の大きさをもつ電極形状を想定して陰極における光子二次作用  $\gamma_p$  に対する取り扱いを定量化したものであって、無限の平行平板電極を仮定した Townsend の式に比べより現実に即応した電流成長曲線を与える式となっている。そのため測定電流値から  $\alpha$  を算出する場合 Lucas の式を用いた解析の方が Townsend の式を用いた場合に比べより厳密な値が得られることになる。

しかし、下妻らの報告<sup>6)</sup>によると電流増倍が 2~3 倍と小さい(二次電離の影響が少ない)場合は、Townsend の式による解析結果は Lucas の式を用いた解析結果に一致することが明らかにされており、今回の実験では図-3 に示したように電流増倍が小さいため次に示すような Townsend の式により解析を行なった。

$$I(d) = I_0 \frac{\exp(\alpha d)}{1 - \gamma_T \{\exp(\alpha d) - 1\}} \quad (1)$$

ここで  $I_0$  は外部照射による陰極上の初期電子電流である。

解析方法としては、測定電流値が Townsend の式にフィットするように線型化最小二乗法を適用し  $\alpha$ ,  $\gamma_T$  を求めた。

得られた  $\alpha/p_0$  ( $p_0$  は  $0^\circ\text{C}$  に換算した気圧) の値を  $E/p_0$  の関係として図-4 に示す。図において  $\alpha/p_0$  の値に多少のバラツキが認められるが、この原因としては測定上の誤差(照射電源の非安定性、測定時におけるメータの読み取り誤差など)が考えられる。そこで測定上の誤差によるバラツキを処理し、 $\alpha$  に対する最確値を求めるために測定した  $E/p_0$  の範囲をいくつかに分割し、それぞれの  $E/p_0$  の範囲において  $\alpha/p_0$  が次式にフィットするように最小二乗法で係数  $A$ ,  $B$  を決定した。

$$\frac{\alpha}{p_0} = A \exp \left\{ \frac{B}{(E/p_0)} \right\} \quad (2)$$

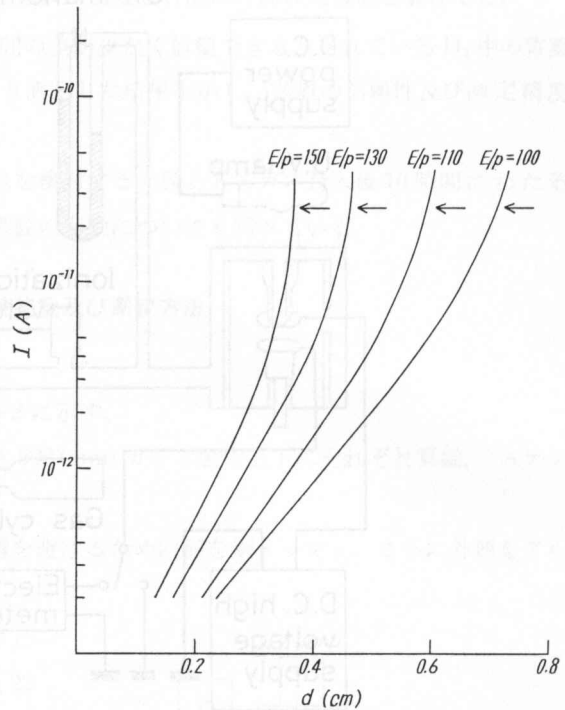


図-3 電流成長曲線

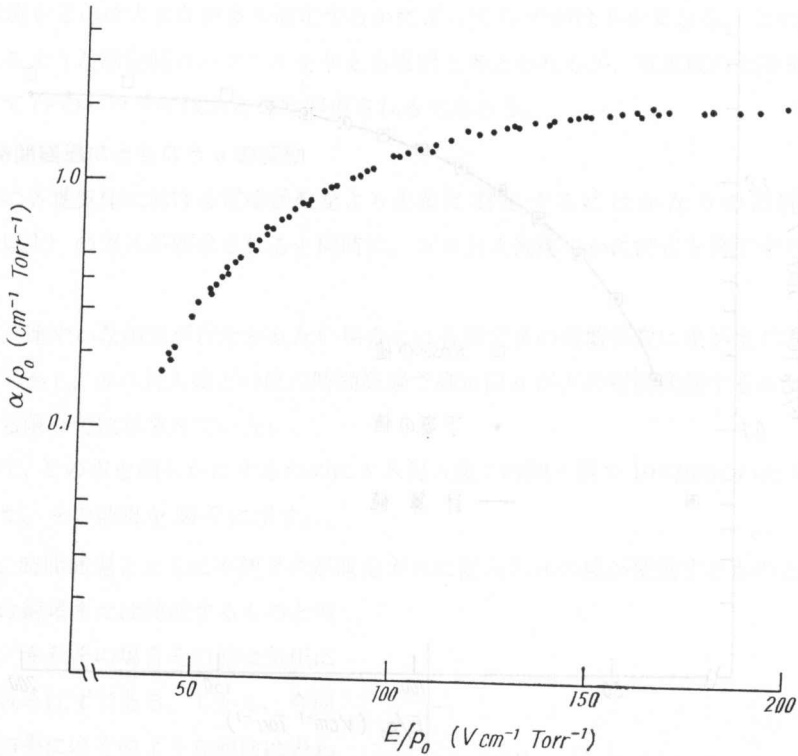
図-4 測定値  $\alpha$ 

表-1 に各  $E/p_0$  の範囲における係数  $A, B$  を示す。なお上式は  $\alpha/p_0$  に対する近似式として良く用いられる式である<sup>7)</sup>。

図-5 は表-1 の  $A, B$  から算出された  $\alpha/p_0$  の最確値で比較のため他の研究者の値も示してある。筆者らの値 (図中の実線) は下妻の値<sup>8)</sup> と測定した  $E/p_0$  の全範囲にわたって非常に良く一致していることが分る。な

お、 $E/p_0 > 150$  において Rose の値<sup>9)</sup> は筆者らの値に比べて 4~10% 高い値を示しているが、最近の報告<sup>10)</sup> によれば  $E/p_0 > 150$  における Rose の値は高過ぎることが指摘されており筆者らの値の方がより信頼できるものと考えられる。

以上のことにより本装置の信頼性は確認されたものと考えられる。

### 3.2 二次係数 $r_T$

次に二次係数  $r_T$  を図-6 に示す。 $E/p_0 = 100$  位まではフラットな値を保ち、 $E/p_0 > 100$  では増加している。図示していないがこの傾向及びその値は下妻らの結果<sup>8)</sup> と良く一致している。なお、 $r_T$  の値は図-3 における電流成長曲線の立ち上がり部分 (図中の矢印) に大きく依存して

表-1 各  $E/p_0$  における係数  $A, B$ 

$E/p_0$	$A$	$B$
40-60	1.674	142.619
60-80	1.807	152.878
80-100	2.140	183.138
100-120	1.581	132.370
120-160	1.399	107.697
160-200	1.248	84.226

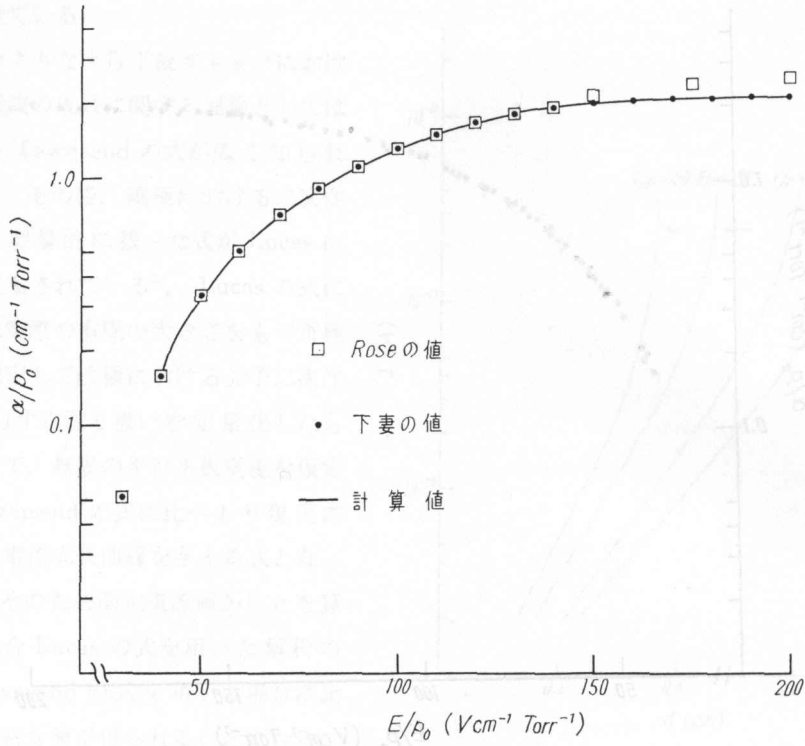


図-5 最確値  $\alpha$

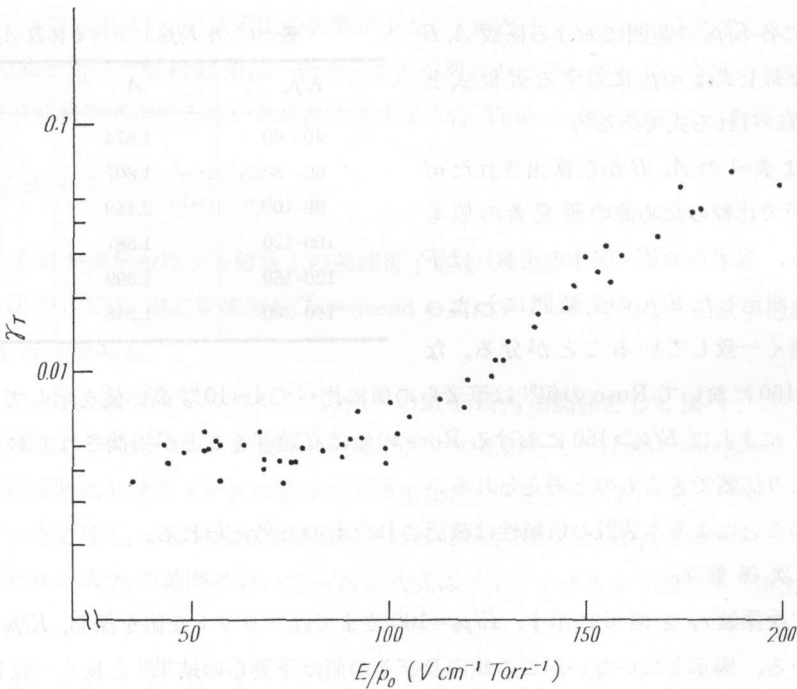


図-6 二次係数  $\gamma_T$

おり、電流をどの位大きな値まで測定するかによって $r_T$ の値は多少異なる。このことが図-6に見られるような測定値のバラツキを与える原因と考えられるが、電流値の上限を固定することによって $r_T$ のバラツキはある程度解消されるであろう。

### 3.3 時間経過にともなう $\alpha$ の変動

一般に各種気体における電離係数をより正確に測定するにはかなりの高純度（例えば99.999%以上）のガスが要求されると同時に、ガス封入後速やかに測定を終了することが望まれる。

もし、速やかな測定が行なわれない場合には各測定者の電離係数に差が生じることが予想される。しかし、ガス封入後どの位の時間経過で測定値 $\alpha$ がどの程度変動するかについては筆者らの知る限りでは示されていない。

そこで、この点を明らかにするためにガス封入後2時間々隔で10時間にわたり電離係数 $\alpha$ を測定した。その結果を図-7に示す。

もし、時間経過とともに不純ガスが測定ガスに混入し $\alpha$ の値が変動するものとするならばその値は純増または純減するものと考えられる。またその場合その値は気圧にも左右されるはずである。しかし、今回得られた結果にはそのような傾向は表われていない。なお、図-7において見られる極くわずかのバラツキが時間経過によるものか或は測定精度によるものか確認するために測定値のバラツキを次式で数量化し、検討を行なった。

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum (\log \alpha - \log \alpha_0)^2 \quad (3)$$

ここで $\alpha_0$ は(2)式より求めた値(最確値)で $\alpha$ は各測定値である。

図-8における実線は図-3の測定値を(3)式に代入して得られた分散であり、○印は時間経過にともなう測定値に対する分散である。

時間経過にともなう分散は実線よりも低い値を示しており、時間経過にともなう $\alpha$ 値のバラツキは測定精度の範囲

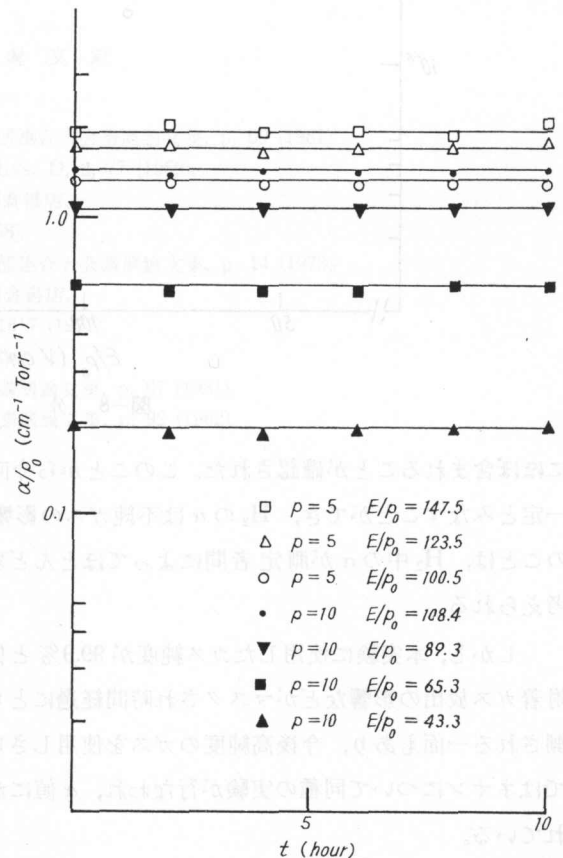


図-7 時間経過にともなう測定値 $\alpha$

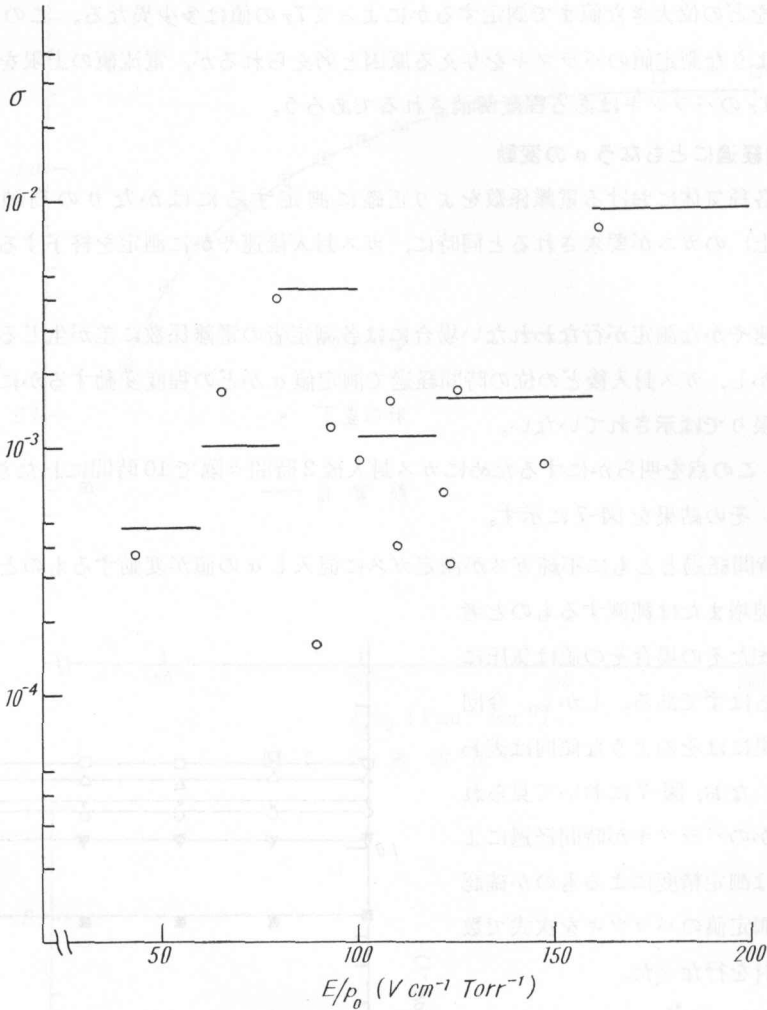


図-8 分散

には含まれることが確認された。このことから今回の実験では $\alpha$ の値は時間経過に関係なく一定とみなすことができ、 $H_2$ の $\alpha$ は不純ガスの影響を受けにくいという結果が得られた。このことは、 $H_2$ 中の $\alpha$ が測定者間によってほとんど変わらないという一つの根拠を与えるものと考えられる。

しかし、本実験に使用したガス純度が99.9%と低いため外部からの不純ガスの影響や内部附着ガス放出の影響などがマスクされ時間経過にともなう $\alpha$ の変動が現われなかったものと推測される一面もあり、今後高純度のガスを使用しさらに検討したい。なお、つい最近の報告<sup>11)</sup>ではネオンについて同種の実験が行なわれ、 $\alpha$ 値にかなりの変動を来たしていることが確認されている。



#### 4. む す び

今回気体中の電離係数の測定装置を製作し、 $H_2$ の電離係数を測定した。その測定値と他の研究者の測定値と比較したところ、多少のバラツキはみられるが良く一致した結果が得られたことにより本装置の信頼性が確認されたものと考えられる。バラツキの原因としては測定上の誤差が考えられ、今後この点を改善することにより本装置の精度はさらに向上するものと思われる。

ガス封入後の時間経過にともなう電離係数の変動は今回の実験条件下では確認されず、 $H_2$ 中の電離係数は不純ガスの影響を受けにくいことが分った。今後高純度のガスの使用、或は他ガスによる実験を行ない、測定者間の電離係数の差が時間経過にともなうものかどうかさらに検討してみたい。

最後に、本装置の製作にあたっては本学電気工学科教授神谷祐二先生ならびに同機械工学科技官阿部清氏より多大な御助言、御指導をいただき、また実験に際しては本学電気工学科卒業生渡部伸二、中島高博両君の協力を得た。ここに深く感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- 1) 八木, 関口: 電学誌, **101**, 303 (1981).
- 2) 下妻, 他: 昭和56年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, p. 69 (1981).
- 3) J. S. Pearson and J. A. Harrison: J. Phys. D, **2**, 77 (1969).
- 4) 坂本, 田頭: 新高電圧工学, p. 52 (1974), 朝倉書店.
- 5) J. Lucas: Int. J. Electronics, **25**, 27 (1968).
- 6) 下妻, 他: 昭和48年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, p. 14 (1973).
- 7) 坂本, 田頭: 新高電圧工学, p. 50 (1974), 朝倉書店.
- 8) M. Shimozuma, et al.: J. Phys. D, **10**, 1617 (1977).
- 9) D. J. Rose: J. Phys. Rev. **104**, 273 (1956).
- 10) 長谷川, 他: 昭和56年度電気学会全国大会講演論文集, p. 67 (1981).
- 11) 長谷川, 他: 昭和57年度電気学会全国大会講演論文集, p. 92 (1982).