熱陰極電離真空計の比感度係数(1)*

—衝立型電離真空計—

美馬 宏司**・清井 栄信**・八木 邦夫**・兼松 太**

(昭和59年7月11日 受理)

On the Relative Sensitivity of Hot Cathode Ionization Gauge (1)

—Schulz Gauge and Fogel Gauge—

Hiroshi MIMA, Shigenobu KIYOI

Kunio YAGI and Futoshi KANEMATSU

(Faculty of Engineering, Osaka City University, 3-138, Sugimoto 3-chome,
Sumiyoshi-ku, Osaka 558)

(Received July 11, 1984)

This paper proposes a new method for the derivation of relative sensitivity coefficient of a hot cathode ionization gauge. The coefficient is derived from the total ionization cross section of the sample gas with the aid of the $(I-V)$ distribution data relevant to the ionizing electrons.

The $(I-V)$ distribution has been newly adopted upon the concept that it signifies characteristics inherent to the hot cathode ionization gauge. It gives the path length l_i of an electron which contributes to ionization in terms of its energy eV_i . The path length l_i is computed from the $(V_{ar}-I^+)$ characteristics which are experimentally measured upon the rationale of the law of scaling which predicts the invariance of electron path configurations under proportional alteration of all electrode voltages.

The Fogel and Schulz gauges were measured of their $(V_{ar}-I^+)$ characteristics. The $(I-V)$ distribution of each gauge was determined by the fitting method. Relative sensitivity coefficients of fourteen gases were calculated for these gauges. They showed good agreement with the calibrated values.

1. はじめに

全圧計として広く利用されている熱陰極電離真空計の比感度係数は、気体の種類によって異なるだけではなく、同一気体に対しても真空計のタイプや動作条件によってその値がちがっていることはよく知られたところである。

今日、この係数については校正法により或る程度までデータが整えられており^{1,2)} 実用にも供されている。し

かし、本来全イオン化断面積データをもとにして解析的に導出し得るはずだと考えられるこの係数を導出することには未だ成功していない。熱陰極電離真空計の電離真空計係数や比感度係数を計算により求めようという初期の試みはかなり古くに見られ、1931年に Reynolds が、つづいて1934年に Morgulis が行っているようである³⁾。しかし、いずれの研究も単純な電子軌道の形を仮定した計算でその試みに成功したとは言い難いものであった。その後1970年に R. L. Wadsak⁴⁾が、電子運動が単純でその様子を推定し易いシュルツ真空計について、本報にのけるものとは異った方法で比感度係数を計算している。そこでは良好な結果が得られているがその方法も他のタ

* 昭和56年11月6日 第22回真空に関する連合講演会において一部講演

** 大阪市立大学工学部(大阪市住吉区杉本3)

Fig. 1 In an attempt to calculate the amount of ions generated in an ionization vacuum gauge, it has been customary to add up the ions produced along an electron path from the cathode to the anode, thereafter to sum up the ions for all the electrons of different paths. (Fig. 1-a)

A new method of calculating the ion current is proposed here, in which the number of generated ions per second by electrons with energies between $(V_i - \Delta V/2)$ and $(V_i + \Delta V/2)$ is calculated in the first place. Subsequently, the total ion current is calculated by summing up the ions for the entire energy region along the electron paths. (Fig. 1-b)

イプの電離真空計に適用できるものではない。

真空計のタイプによる係数のちがいについてはふれずに、気体の種類によるちがいにのみ注目する方法も利用されることがある。例えば、真空計の相対感度は全イオン化断面積の最大値付近の大きさにほぼ比例するであろうということで電子エネルギー 100 eV における全イオン化断面積の相対比⁶⁾を参照値にしたり、多数の異なるタイプの真空計についての平均値⁶⁾を参考にするなどの便法も考えられる。しかし、比感度係数の測定値が得られていない気体について全イオン化断面積データより、適当に選んだある電子エネルギー、例えば 75 eV での値から係数のおおよその値を推定しておきたい場合などには役立つ⁷⁾ものと思われるがこのような方法では正しい比感度係数値を求めることはできない。また、真空計のタイプや動作条件による値のちがいを説明しようとする方向とは異なる立場の研究である。

比感度係数の気体の種類による差は、当然のことながら各気体の全イオン化断面積の差異に依存するものである。しかし、同一気体に対する値に真空計のタイプによる差異がはっきりと認められていることはそこに動作条件も含めた個々の真空計固有の要因が含まれていることを示唆しているものと考え、比感度係数の構成因子を、

- 1) 気体に固有の因子
- 2) 真空計に固有の因子

とに分けて考えてみることにした。そして、管球の動作条件をも含めた真空計に固有の特性を、以下に述べる“ $I-V$ 分布”を用いて、気体の種類によるものとは区別して記述することを試み、それらの結果をもとにして各種電離真空計について比感度係数の算出を行った。

2. $I-V$ 分布と比感度係数

電離真空計において生成されるイオン量は、従来、次

のような考え方で求められてきた。すなわち、**Fig. 1(a)**に示すように、まずある電子に注目してこれがA点（例えばカソード）からB点（例えばアノード）まで走行する間に順次生成されていくイオンを加え合せて、この1個の電子による生成イオンをまず求める。引きつづき残りの総ての電子について同じ操作を実施して、最後に総ての電子による生成イオンを寄せ集めて全生成イオンとする方法がとられてきた。しかし、ここで考える方法では、**Fig. 1(b)**のように或るエネルギーでの全電子による生成イオン量を先に算出し、その後同様の操作を順次残りの全エネルギーに亘って行い、最後に各エネルギー領域での生成イオンをすべて寄せ集めるという手順で計算が進められる。

この後者の方法にもとづいて、ここに新しく提案する $I-V$ 分布は以下のように説明される。いま、微小電位差 ΔV ごとに分割されたイオン化空間において、例えば i 番目のエネルギー $e(V_i - \Delta V/2) \sim e(V_i + \Delta V/2)$ で走行する電子群の全走行距離 L_i を求めると次式

$$L_i = \sum_{q=a}^z \Delta L_i^q \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

のようになる。引きつづき同様の操作を残りの総てのエネルギー領域の電子について行えば、この電子群が総てとしていかなるエネルギーで幾らの距離を走行しているかを知ることができる。すなわち、エネルギー eV とそのエネルギーでの走行距離 L の関係を得る。このようにして導き出された L と V の関係は全電子を対象にしたものであるから、(1)式の L_i を電子の個数 N^- とは無関係な一般的な量にするために N^- で割ったものを l_i と置くならば、

$$l_i = \frac{L_i}{N^-} \quad (2)$$

を得る。これは“等価電子軌道”上を進む1個の電子が

上のエネルギーをもって走行する距離を与えてくれる。ここに等価電子軌道とは、仮に N^- 個の総ての電子がこの軌道上を走行したと考える場合に、現実の個々に異なる軌道上を走行する N^- 個の電子運動によるものと等しい量のイオン生成が実現されるはずであるという意味からこのように名付けたものであり、統計平均された仮想的な軌道である。このようにして得られた l と V の関係を l - V 分布と名付ける。電子エネルギーの表示については、これをその最大値 eV_{af} で規格化して V/V_{af} を用いることにする。これは、後の V_{af} - I^+ 特性の測定法とも関連するものであるが、 V_{af} の大きさは無関係に電子の飛跡を固定した形状として考えたいからである。

エネルギーのきざみを十分小さくした場合、 l - V 分布を s - V 分布と呼ぶことにする。したがって、 $s(V/V_{af})$ は上に説明したような等価電子軌道上を走行する 1 個の電子が V/V_{af} において持つ単位エネルギー幅当りの走行距離を表し、これは全電子について求めた単位エネルギー当りの走行距離 ($\int s(V/V_{af})$) を電子個数 N^- で割ったものである。

イオン生成量を求める従来の方法と、ここに新しく提案した方法によれば試料分圧 p のときの生成イオン量 I^+ は全イオン化断面積を σ として、各々次式のように与えられる。

$$\begin{aligned} I^+ &= \frac{p}{kT} I^- \frac{\sum_i \int \sigma(V) dV}{N^-} \\ &= \frac{p}{kT} I^- \int_{V=0}^{V_{af}} \sigma(V) s(V/V_{af}) d(V/V_{af}) \\ &\rightarrow \frac{p}{kT} I^- \sum_i \sigma(V_i) l_i \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 T は気体の温度である。また、 N^- は毎秒当りの電子数で I^- はその電流値、 V_{af} はアノード・フィラメント間の電位差を表す。実験に当たっての都合も考えて、数列和による表現式を用いることにすると、電離真空計係数 S および比感度係数 r は次式のように与えられる。

$$\text{電離真空計係数 } S = \frac{1}{kT} \sum_i \sigma(V_i) l_i \quad (4)$$

$$\text{比感度係数 } r = \frac{\sum_i \sigma(V_i) l_i}{\sum_i \sigma_{N_2}(V_i) l_i} \frac{\text{試料ガス}}{\text{窒素ガス}} \quad (5)$$

ここで、(4)式は l - V 分布の絶対値を必要とするが、(5)式は相対値でよいという特徴をもつ。

このようにある電離真空計について l - V 分布が分つておればその電離真空計についてこれらの係数の算出が可能となる。そして、この分布こそが、例えばシュルツ真

空計とフォーゲル真空計によって同一気体に対する電離真空計係数、したがって比感度係数が相違してくる根源であると考えられる。

なお、 l - V 分布は、次項に述べるように、

$$\int_{V=0}^{V_{af}} s(V/V_{af}) d(V/V_{af}) = \text{一定} \quad (6)$$

の条件の下で実験的に求められる。

3. l - V 分布の求め方

ある一つの動作条件に対して、生成イオン量の測定値として知り得るのは(3)式で与えられるただ一つのイオン電流値だけである。だから、ある電離真空計についての l - V 分布を N 個の l_i で表したい場合、 N 通りの異なる動作条件に対するイオン電流を測定して、 N 元の連立方程式の解としてこの分布を求めるなどの工夫が必要である。この目的のために、各電極電圧の比を一定に保ちつつ印加電圧を掃引して生成イオン量を測定することを考えてみる。このとき、相似則⁸⁾にしたがって電子は常に同一軌跡を描くはずなので、アノード・フィラメント間電圧 V_{af} がこれと異なる値の V_{af}' であるときでも最大エネルギー eV_{af} およびエネルギーのきざみ ΔV がそれぞれ V_{af}'/V_{af} 倍に変化するだけで N 個の l_i の大きさは変化しない。つまり、 V_{af} を N 等分した微小エネルギー区間 ΔV_i での電子の走行距離 l_i と、同じく V_{af}' を N 等分した $\Delta V_i'$ での走行距離 l_i' とは等しい。イオン化空間での電位分布の形状を変えないように V_{af} を掃引して N 個の異なる値の V_{af} について生成イオン量を測定すれば必要なデータが揃うことになる。前出の(6)式は V_{af} の掃引時の電位分布の形状に変化が無いということに対応する内容をもつものである。このように、アノード・コレクタ間電圧 V_{ac} とフィラメント・コレクタ間電位差 V_{fc} との比を一定に保ち、動作点の異なる N 点で測定されたイオン電流に対して(3)式をもとにして次の式を得る。

$$\begin{pmatrix} I^+(V_1) \\ I^+(V_2) \\ \vdots \\ I^+(V_N) \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \sigma(V_1/N) & \sigma(2V_1/N) & \cdots & \sigma(V_1) \\ \sigma(V_2/N) & \sigma(2V_2/N) & \cdots & \sigma(V_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sigma(V_N/N) & \sigma(2V_N/N) & \cdots & \sigma(V_N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_N \end{pmatrix} \quad (7)$$

イオン電流 I^+ はイオンコレクタ電極で実際に測定される値である。したがって係数 α には必然的にイオン収率も含まれており、その大きさが必要なときは、現状では校正により求める方法しかない。しかし、比感度係数の計算には、 α の値が一定である限りこの数値は必要でなく、例えば、 l_i の大きさが l_N に対する相対値として求めれば十分である。なお、ここで述べたような方法で求めた V_{af} と I^+ の一般的な関係を“ V_{af} - I^+ 特性”と呼

Fig. 2 This is the relation of V_{af} vs. I^+ measured for a single given gas such as N_2 . Values of I^+ for N different V_{af} 's are extracted from this figure to be substituted into Eq. (6), based upon which the $(I-V)$ distribution is derived.

ぶことにする。

$I-V$ 分布におけるエネルギーのきざみ N (以下分割数と呼ぶ) は良い精度で分布を求めるためにできるだけ大きく選ぶことが望ましい。しかし、 N 分割にしようとするとき N 元連立方程式を解くことになるのでイオン電流 I^+ の測定データ数も N 個用意することが必要になってくる。 N の大きさは方程式を解く際の問題点や実験上の制約も考慮に入れて決めねばならない。実験に先立ち、後にとり上げるシュルツ真空計についてモデル計算により必要な分割数 N を求めてみると、 N は少なくとも数十程度が必要⁹⁾だと考えられる。 $N=10^4$ での計算値 I^+ を基準にしたとき、 N が100以上では相対誤差は小さく 10^{-5} 程度またはそれ以下であるが、 $N=40\sim 50$ 付近から誤差が大きくなり始めてここでは 10^{-4} 位の大きさである。さらに、10以下では 10^{-3} 以上に増大する。

$I-V$ 分布は基本的にはイオン電流 I^+ を実測し(6)式より求めるわけだが、実験上の技術的な手法なども考慮して $I-V$ 分布を求める幾つかの方法を整理してみると以下のようなものが考えられる。

a) 単一気体 (例えば窒素) を用いて異なる N 個の V_{af} に対して求めた I^+ について(6)式をつくる。この場合の I^+ は **Fig. 2** の $V_{af}-I^+$ 特性上の N 個の点の値である。

b) 複数の気体について同一の V_{af} 値に対する I^+ を用いて連立方程式をつくと、例えば、次のようになる。

$$\begin{pmatrix} I^+_{He(V)} \\ I^+_{Ne(V)} \\ \vdots \\ I^+_{N_2(V)} \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \sigma_{He}(V/N) & \sigma_{He}(2V/N) & \cdots & \sigma_{He}(V) \\ \sigma_{Ne}(V/N) & \sigma_{Ne}(2V/N) & \cdots & \sigma_{Ne}(V) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{N_2}(V/N) & \sigma_{N_2}(2V/N) & \cdots & \sigma_{N_2}(V) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

Fig. 3 This is an illustration that describes the $(V_{af}-I^+)$ characteristics at the presence of a multiplicity of gases. The value of $I^+/I^+(N_2)$ of a specific gas corresponds to the relative sensitivity coefficient of the ionization gauge with an anode-to-filament voltage, V_{af} , at which the $I^+/I^+(N_2)$ was measured. The $(I-V)$ distribution of the ionizing electrons are derived from the values of I^+ .

$V_{af}-I^+$ 特性上の N 個の点が **Fig. 3** のように選ばれたことに対応している。この方法は N 種類の気体に対する比感度係数を用いて $I-V$ 分布を求めることと等価である。この結果を用いて、これら N 種類以外の気体に対する比感度係数が求まる。

c) 上の2つの方法を併用して複数の気体と複数の V_{af} についての I^+ より分布を求めることも可能である。

d) 気体のイオン化電圧を利用する方法も考えられる。イオン化に用いる電子の最大エネルギーがイオン化電圧より小さい場合には生成イオンは無いわけだから、この状態から電子エネルギー値を増していくと **Fig. 4** のように l_N から順に l_1 の大きさを決めていくことができる。

e) $I-V$ 分布のべき級数近似を利用することも可能である。電子の最大エネルギー値とは独立に $I-V$ 分布の要素 l_i の大きさが決まるような測定法を利用するので l の添字 i に注目し、 $I-V$ 分布を $l-i$ 分布と考えなおすことにより任意の要素 l_i を i のべき級数で表すことができる。すなわち m 次のべき級数を用いるなら、

$$l_i = \sum_{j=0}^m a_j \cdot i^j \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

と表せる。したがって(3)、(8)式より I^+ は次式となる。

$$I^+ = \alpha \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^m \sigma_i a_j i^j \quad (10)$$

この式より $m+1$ 点の I^+ を測定すれば $l-i$ 分布の形を m 次の近似式で知ることが可能となる。このように分割数 N が測定点数と無関係なのでこの点は有利である。

f) イオン電流 I^+ の値が広い範囲の V_{af} について測定してあれば I^+ を V のべき級数で表現することが可能

Fig. 4 Derivation of the $(I-V)$ distribution of the ionizing electrons by means of the appearance voltage of gases.

である。 l や σ もべき級数で表現されているので I^+ を次のような形で与えることができる。ただし、両辺の V の最高次数は同一とした。

$$I^+ = \sum_{k=0}^p B_k V^k = \alpha \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^p \left(V \cdot \frac{i}{N} \right)^k A_k \cdot a_j i^j$$

ただし、 $\sigma_i = \sum_{k=0}^p \left(V \cdot \frac{i}{N} \right)^k A_k$ (11)

この式から V の各べき乗について係数が等しいと考えて次式を得る。

$$\begin{pmatrix} B_0/A_0 \\ NB_1/A_1 \\ N^2B_2/A_2 \\ \vdots \\ N^mB_m/A_m \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N 1 & \sum_{i=1}^N i & \sum_{i=1}^N i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^N i^m \\ \sum_{i=1}^N i & \sum_{i=1}^N i^2 & \sum_{i=1}^N i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^N i^{m+1} \\ \sum_{i=1}^N i^2 & \sum_{i=1}^N i^3 & \sum_{i=1}^N i^4 & \cdots & \sum_{i=1}^N i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^N i^m & \sum_{i=1}^N i^{m+1} & \sum_{i=1}^N i^{m+2} & \cdots & \sum_{i=1}^N i^{2m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix}$$

なお、 k についての項数を未知数の数に合わせた。係数 A_k 、 B_k は既知の量であるからこれより a_j を求めれば $I-V$ 分布の形を知ることができる。

g) フィッティング法。管内電位分布を手がかりとして推定される $I-V$ 分布や上記諸法を単独または組合せ使用して求められた $I-V$ 分布を用いて(3)式から、 $V_{af}-I^+$ 特性を計算することができる。これを実験値と直接比較することにより用いた $I-V$ 分布が妥当なものであるか否かを確かめることができる。

4. 衝立型電離真空計の比感度係数

4.1 $V_{af}-I^+$ 特性と $I-V$ 分布

電子軌道の形状が変わらないように、アノード・フィラメント間電圧 V_{af} と、イオンコレクタ・フィラメント間電圧 V_{cf} との比 V_{af}/V_{cf} を一定に保ちつつ、 V_{af} を掃引したときに得られるイオン電流 I^+ ($V_{af}-I^+$ 特性)が測定された。

Fig. 5 はフォーゲル真空計とシュルツ真空計についての測定結果を示す。この特性は系を 1.3×10^{-5} Pa (1.0×10^{-7} Torr) 以下に排気後、窒素ガスをフォーゲル真空計では約 2.6×10^{-3} Pa (2.0×10^{-5} Torr)、シュルツ真空計では約 3.3×10^{-1} Pa (2.5×10^{-3} Torr) まで導入して測られた。エミッション電流はフォーゲル真空計は2 mA、シュルツ真空計は20 μ Aで V_{af} は μ -comを用いて掃引を行った。 V_{af} の掃引はフォーゲル真空計では2.5 Vきざみに約640 Vまで、シュルツ真空計では1.6 Vきざみに約240 Vまで掃引し各 V_{af} で10回イオン電流を測定した。上図はその平均値を示している。

この特性にもとづいて(7)式を直接解き $I-V$ 分布を求めることには、いわゆる ill condition のために、未だ成功

Fig. 5 Measured (V_{ar} - I^+) characteristics (broken line) of Fogel gauge, [cf. Fig. 6 (a)], and of Schulz gauge (LG-11S), [cf. Fig. 6 (b)]. The solid lines are the calculated values of I^+ with the aid of (I - V) distribution illustrated in Fig. 6. The total ionization cross section of N_2 is illustrated by the curve denoted as $\sigma_T(N_2)$. All the curves are normalized at $V_{ar}=150$ volt. The (V_{ar} - I^+) characteristics has been obtained for N_2 gas under the following conditions.

Gauge	V_{ar}/V_{cf}	I_e (mA)
Fogel	3.14 (=220/70)	2
Schulz	1 (=60/60)	0.02

していない。しかし、管内電位分布等を参考にしつつ、この特性によく整合する V_{ar} - I^+ 特性計算値を与える I - V 分布をフィッティング法により求めることは可能である。この方法により得られた結果を **Fig. 6 (a), (b)** に示す。測定値と計算値の完全な一致は望めなかったのでその管球の指定動作点付近で2つの曲線が最もよく一致するような I - V 分布を選んだ。この分布を用いて(7)式より V_{ar} - I^+ 特性を計算する際分割数 N を100としたが、この程度の細かい分割ならばむしろ連続量として考えた方がよいので、同図では I - V 分布を s - V 分布の如く描いてある。ただし、既述のように分布の絶対値は求めることができないのでここに与えられたものは走行距離そのものではなく相対的な量である。

4.2 比感度係数

比感度係数の算出には全イオン化断面積データが必要である。これについては1930年代にすでに測定が始められ今日までいくつかのグループによる研究が見受けられる。しかし、それらの測定値は相互に必ずしも良く一致しているとは言い難い。また、真空工学の分野で必要とされる総ての種類の気体についてデータが揃っているわけでもない。ここでは広い範囲の電子エネルギーにつ

Fig. 6 The (I - V) distribution of (a) Fogel gauge and (b) Schulz gauge, obtained by the fitting method.

いて全イオン化断面積が測定されており、測定値が単にグラフだけでなく数表として与えられている D. Rapp 等¹⁰⁾の値を用いて比感度係数を計算した。得られた結果を **Table 1** に示す。総ての計算値は I - V 分布の分割数 N を100として求めたものである。

5. 検 討

計算により求められた比感度係数の値は **Table 1** に与えられたように、その多くのものが測定値として報告^{6,11,12)}されているものとかかなりよい一致を示している。また、管球による比感度係数の相異も明確に示している。しかし、一部には計算値と測定値の一致が不十分なものもありその原因を明確にするためには比感度係数の測定値(校正値)、全イオン化断面積の値、 I - V 分布の測定値を含めて再検討の必要があるものと考えている。また、ここでとり上げたタイプ以外の全圧計についても本法の適用をすすめ、理論値と校正値の比較検討範囲を拡げていきたいと考えている^{9,14)}。

Table 1 に与えられた比感度係数は校正時と等しい動作条件について計算したものであるが、この値は当然印加電圧により変化するのは当然である。管球の動作点の選定理由の一つには、そこでの電極印加電圧変化による係数値の変動の大小も考慮に加えられるべきであら

Table 1 Calibrated measured results and Calculated results (according to this treatment) of the Relative Sensitivity Coefficients.

Gas	Fogel gauge ^{a)}		Schulz gauge	
	Meas- ured ^{b)}	Calculated (this work)	Meas- ured ^{c)}	Calculated (this work)
N ₂	1	1	1	1
He	0.15	0.138	0.110 0.15 ^{d)}	0.106
Ne	x	0.262	x	0.154
Ar	1.5	1.18	1.48	1.47
Kr	x	1.76	x	2.26
Xe	x	2.33	x	3.06
H ₂	0.42	0.357	0.53 ^{d)}	0.443
O ₂	0.81	1.05	0.935	0.959
CO	x	1.07	1.12 1.03 ^{d)}	1.14
CO ₂	1.2	1.40	1.41	1.39
CH ₄	x	1.53	1.98	1.97
D ₂	x	0.398	x	0.600
N ₂ O	x	1.51	x	1.53
NO	x	1.29	x	1.43
C ₂ H ₄	x	—	x	2.95
SF ₆	x	0.906	x	9.62

Notes on Table

x gas not reported

— column is not calculated

a) Ref. 13). b) Ref. 6). c) Ref. 12). d) Ref. 11).

Fig. 7 Dependence of the calculated relative sensitivity coefficient of Fogel gauge upon the anode-filament voltage V_{af} on the assumption of a rigid (I - V) distribution.

Fig. 8 Dependence of the calculated relative sensitivity coefficient of Schulz gauge upon the anode-filament voltage V_{af} on the assumption of a rigid (I - V) distribution.

う。また、電源の用意の都合などで校正時とは異なる電圧条件でその管球を使用したい場合なども時には生ずるのであろう。そこで V_{af}/V_{ef} が一定 (すなわち I - V 分布は

不変) という制限付きではあるが、比感度係数が V_{af} にどのように依存するはずであるかを求めてみたのが **Fig. 7 (a), (b), 及び Fig. 8(a), (b)** である。

Fig. 9 Anode current vs. filament-anode voltage characteristics of the Fogel and Schulz gauge. Either gauge is designed to be operated in the temperature limited characteristics for vacuum pressure measurement. The normal operating points of the gauges are indicated by the symbol O.

I - V 分布は、測定管球のもつ電位分布の下での等価電子軌道の形状と密接に関係している。ところで、 V_{af} - I^+ 特性は V_{af} の広い範囲にわたって測定されているので測定管の動作はいわゆる 2 極管の空間電荷制限領域から温度制限領域へと変化することになり空間電荷の影響の大小により管内電位分布にも変動を生ずるであろう。すなわち、等価電子軌道の形状が一定に保たれているか否かについての疑問が生ずる。また、 V_{af} の低いところでは、特に初期エネルギーの大きい生成イオンの収率が低下する恐れも十分考えられる。Fig. 9 は 2 つの真空計について一定のフィラメント温度の下で求めた 2 極管特性で、 V_{af}/V_{cf} の比を一定に保ちつつ V_{af} を変えたときのエミッション電流 I_e の変化を示す。圧力測定に用いる通常の動作点において、シュルツ真空計、フォーゲル真空計のいずれもが温度制限領域での動作になっていることがわかる。したがって、 V_{af} - I^+ 特性より I - V 分布を求める際、空間電荷制限領域にある小さい V_{af} のデータを使用することは避けるべきであろう。また、そこではイオン収率の低下の恐れもある。

フィッティング法による I - V 分布の決定に当たって、シュルツ真空計では Fig. 6(b) の分布を採用することにした。これは管内電位分布からほぼ予想される I - V 分布そのものである。もし細部にわたって電子運動の様子を検討してみるならば、例えば、電子のエネルギー分布にはフィラメント点火電圧に相当する程度の広がりが存在するはずである。しかし、このような影響を測定値の中に明確に見出すことは現段階ではむずかしそうである。このような効果は測定値の有効数字の 3 桁目に影響する程度のものであると考えられるが、用いた全イオン化断面面積データの有効数字が 3 桁までしか得られていないこと

Fig. 10 An example of an electron trajectory in the Fogel gauge. A portion of electrons emitted from the cathode traverse toward the ion collector located in the opposite direction of the anode. These electrons, on reaching the potential contour of equal height with the cathode potential, come to a halt, thereby resuming motion toward the anode. Configurations of such electron motions constitute the cause of a large l (or s) values in the low energy region of the (I - V) or (s - V) distribution.

を考慮すると、今後、より良い精度で I - V 分布を決めるには、まず全イオン化断面面積データの再検討から考え直さなくてはならない。もちろん、そのためには試料ガス圧の制御、圧力測定精度の大幅向上が前提となる。もし、 I - V 分布の細部についての様子が分かるになれば、同一タイプの管球間に存在する感度差、例えば VS-1 における意外に大きい感度差¹⁵⁾の原因の一端も知り得るのではないかと考えられる。

このように精度にやや不満はあっても、異なるタイプの管球を相互に比較してみるとその相違は非常にはっきりと現れている⁹⁾。例えば、ここでとり上げた 2 つの全圧計の I - V 分布を比較してみると、単純な等加速度運動を利用するシュルツ真空計に対して、フォーゲル真空計はやや複雑な電子運動を行っていることが現れている。すなわち、Fig. 6(a) に示されたようにフォーゲル真空計においてはエネルギーの小さい領域での電子の走行距離がより長くなっている。イオンコレクタ・アノード間での電位分布の様子をフィラメント電極を含む断面において定性的に考えてみると Fig. 10 のごときものとなるであろう。フィラメントを出る電子には、フィラメントから直接アノード電極に向かうもの以外に、同図に破線で示したように一たんアノード電極とは逆方向に進み、フィラメント電極と等しい電位の位置で折り返して再びアノードに向かう電子もあるはずである。このような電子運動は、 I - V 分布において、低エネルギー領域で長い走行距離を与えるであろう。このように Fig. 6(a) の I - V 分布は具体的な電子運動に結びつけて理解することがで

きるものである。なお、フォーゲル真空計においても印加電圧をシュルツ真空計と同じく電子が等加速度運動する条件、すなわち $V_{ar}=V_{rc}$ にするならば $V_{ar}-I^+$ 特性は Fig. 5 のシュルツ真空計によるものとはほぼ一致する。ここでとり上げた2つのタイプの測定子は一般にガラス管球に収められているものである。このようなフォーゲル真空計は $V_{ar}-I^+$ 特性の測定の際ガラス管壁内面へのチャージアップが原因だと考えられるイオン電流値の突然の変動が観測されたことがあった。ただし、その再現性は必ずしも良くないものであった。フォーゲル真空計のイオン電流の不連続性や二重性については電離真空計係数の圧力依存性を調べる際に観測された中山¹⁰⁾の報告もある。 $I-V$ 分布の決定に用いた $V_{ar}-I^+$ 特性は両測定子ともいわゆるヌードタイプとし、ガラス管壁位置にフィラメント電位に保たれた金属円筒を配置した測定子を用いた。

6. おわりに

熱陰極電離真空計内での電子運動の様子を表わす一つの方法として、新しく $I-V$ 分布という概念を導入した。これは電子のエネルギー別の走行距離を与えるものである。また、この分布を求めるための基礎特性となる $V_{ar}-I^+$ 特性の測定法が提案され、実験的に確認された。

2種類のタイプの衝立型電離真空計について $I-V$ 分布が求められ、これを用いてシュルツ真空計およびフォーゲル真空計の比感度係数が算出された。これらは校正値とよく一致することが示された。 $I-V$ 分布が分かれば、従来は不可能であったが、各種熱陰極電離真空計の比感度係数を全イオン化断面積データを用いて計算することが可能となる。

最後に本研究を行うに当ってお世話になった方々にお礼申し上げます。

本学の三戸左内名誉教授には多くの有益なる御討論をいただいた。また $V_{ar}-I^+$ 特性を測定することの重要性に考えが到達できたのは、かつて先生から受けた多くの示唆に富んだ御指導の中にその重要なヒントを見出せたものである。

大阪府大の堀口哲男教授には先生の研究室で測定されたシュルツ真空計の比感度係数を早くから御教示いただき、貴重な時間をさいて本研究による値との比較について種々御討論いただくと共に、絶えず励ましのお言葉をいただいた。

また、本学の卒研究生富田和之、内田利也の両君には予備実験に協力していただき、大学院生久保圭司君には $V_{ar}-I^+$ 特性の自動測定に必要な電子回路の準備をしていただいた。

これらの大変お世話になった方々に心から感謝申し上げます。

〔文 献〕

- 1) JIS Z8752 放電及び電離を使う真空計による真空度測定方法解説 (1976) p. 9
- 2) K. Nakayama and H. Hojo: 6th Int Vacuum Congress, 1974, Kyoto, Japan.
- 3) J. H. Leak (富永五郎, 織田善次郎共訳): 真空度測定法 (産業図書, 1967).
- 4) R. L. Wadsack: Rev. Sci. Instr., **41** (1970) 641.
- 5) P. A. Readhead, J. P. Hobson and E. V. Kornelsen: *The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum* (Chapman and Hall, London, 1968) p. 264.
- 6) 石井 博, 中山勝矢: 真空度測定 (日刊工業新聞社, 1964) p. 68
- 7) F. Nakao: Vacuum, **25** (1975) 431.
- 8) 例えば寺田正純, 裏 克己: 電子管工学 (電気書院, 1970) p. 228
- 9) 美馬宏司, 八木邦夫, 兼松 太: 日本真空協会関西支部昭和57年度第1回研究会資料 (1982) p. 1
- 10) D. Rapp and P. E. Golden: J. Chem. Phys., **43** (1965) 1464.
- 11) 福田伸夫, 堀田哲夫: 真空 **25** (1982) 631.
- 12) G. J. Schulz and A. V. Phelps: Rev. Sci. Instr., **28** (1957) 1051.
- 13) C. M. Fogel: Proc. I. R. E. **34** (1946) 302.
- 14) 真空誌に投稿予定.
- 15) 平田正紘, 小野雅敏, 戸田義継, 中山勝矢: 真空 **25** (1982) 372.
- 16) 中山勝矢: 電気試験所研究報告第701号 (1969) p. 87