ガス中電子透過過程

(I. N_2 中偏心円筒電極間の実験)

正員 伊藤 晴雄 (千葉工業大学)

正員 生田 信皓 (千葉工業大学)

Electron Transmission Process through Gases (I. Experiment in Nitrogen between Eccentric Electrodes)

Haruo Itoh, Member, Nobuaki Ikuta, Member (Chiba Institute of Technology)

Measurement of electron transmission ratio is carried out experimentally using eccentric electrodes in nitrogen. Electron current is measured with varying applied voltages between the electrodes under constant gas pressures. These curves are compiled in current- V/p_0 plots. Here, V/p_0 is the ratio of the applied voltage between the electrodes to the gas pressure reduced to 273K.

The current- V/p_0 plots are unified as a curve which depends only on V/p_0 . The ratio of these currents to the photoelectron current in the vacuum is defined as the electron transmission ratio in nitrogen. It is found that the electron transmission ratio in nonuniform field is proportional to the electron drift velocity in nitrogen. The electron transmission ratio in uniform field is also proportional to the electron drift velocity as reported by us previously. This fact means that the electrons are transported through nitrogen with an electron energy distribution almost same as that in the uniform field.

In this paper, we report the results of an experiment and the discussions on the transmission process of photoelectron avoiding the back scatterings near the cathode.

キーワード：電子透過率，光電子放出，後方散乱，窒素，偏心円筒電極，電子移動速度

1. はじめに

放電容器内に設けた1組の電極の陰極面から紫外光照射によって光電子が放出されているものとする。容器内を真空にして電極間の電圧を変化しながら定常電流を測定すると、20V程度の電圧で電流は飽和する⁽¹⁾⁽²⁾。この電流の飽和値は、陰極から放出された光電子の全てが陽極に収集されていることを意味し、それはまた紫外光強度と陰極表面の性質で決まる光電子の単位時間当たりの放出数でもある。これを真空中における光電子放出電流と呼ぶことにする。

次に容器内にガスを封入し、電極間電圧を変えながら同じく定常電流を測定すると、ガス圧力と印加電圧に依存した電流が観測される。一般にこのようなガス中の電流は、真空中の光電子放出電流より小さくなる。このガス中で観測した電流と光電子放出電流の比は、ガス中に注入された電子数と電極から放出された電子数に対する比を意味し、これを電子透過率(electron transmission ratio)と呼んでいる。電子透過率はJ.J.Thomsonにより提示された理論⁽³⁾以来、文献(1)の中に引用したいくつかの論文で議論されて

きた。

電子透過率が1より小さい値を示すのは、陰極近傍での電子分子衝突による後方散乱により、一部の電子が陰極に戻るためである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。著者らはかつて N_2 ガス中の平等電界中に光電子を放出し、それまでには測定されたことのなかった広い範囲のガス圧力と換算電界 E/p_0 において電子透過率を測定した。そして電子透過率は E/p_0 に関わらず、ガス圧力だけに支配される拡散支配域、 E/p_0 のみに依存する E/p_0 依存域、そして E/p_0 に対して飽和特性を描く飽和領域の3つの領域のあることを報告した⁽¹⁾⁽⁶⁾。

本論文は、このような実験を不平等電界ギャップに拡張した実験結果について述べ、ガス中電子透過率は、実は電極間の電界分布には関係なく、電極間印加電圧とガス圧力との比だけに依存するという極めて整然とした法則に従っていることを議論する。

このような結果は、電子が金属表面からガス中に放出された場合に避けることのできない後方散乱と、これに続くガス中の輸送、これを電子透過過程と言うが、これらに特有の現象である。従って、以下に述べるような電流の挙動

を調べることで、測定している電流が電極表面からの電子放出によるものか、或いは他の原因で生成された電子によるものであるかという判定に応用できる。

2. 実験装置及び方法

実験装置は図 1 に示すような構成である。200mmφ×300mm の円筒型ステンレス鋼製チェンバー内に図 2 に示したような偏心円筒電極を設け、この電極間に電圧を印加し、電流を測定した。偏心円筒電極はステンレス鋼製であり、外側円筒電極は内径 115mmφ、長さ 125mm、内側円筒電極は外径 2mmφ、長さ 100mm で両電極の中心軸は、42.5mm 離して平行にセラミックス製絶縁体により固定されている。

この電極間空間に重水素放電管 (浜松ホトニクス L879-01) からの紫外光を図 2 中に実線の矢印で示したように照射した。

図 1 実験装置構成図

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

図 2 偏心円筒電極

Fig. 2. Eccentric electrodes.

この放電管の直径 13mmφ、長さ 50mm の光出射部を O リングを介して放電容器と固定した。光源の光出射部の窓材には MgF₂ を用いているが今回は石英フィルターを用いて紫外域の光を照射した。

電極間電圧印加用電源には、川口電機製 V-710 を用いた。また電流測定には、アドバンテスト TR8411 振動容量型エレクトロメータを、ガス圧力測定には、日本エムケーエス、キャパシタンス型圧力計をそれぞれ用いた。使用したガスは、純度 99.9995% の N₂ である。ガス圧力は 0°C に換算した値で封入した。電流測定は室温で行った。

3. 実験結果及び考察

〈3・1〉 真空中における光電子電流特性 チェンバー内を 10⁻⁸Torr オーダまで排気した状態で、UV 光を照射しながら偏心円筒電極間の電圧を変化して電流を測定すると、図 3 のような結果が得られた。内側円筒電極は電流計を通して接地している。これに対して外側円筒電極に正負の電圧を加えて電流測定したが、正の電圧を印加したときの電流は、1V 付近より高い電圧で初めて正の電流が流れ、約 20V 付近から飽和した。飽和電流値 I₀ は、1.75×10⁻¹²A であった。

図 3 真空中における電流—電圧特性

Fig. 3. Photoelectron current-voltage characteristic in vacuum.

この正電圧側の電流は、陰極である内側円筒電極表面より放出された光電子が外側円筒電極に収集されたことにより観測される。10⁻¹²A オーダと小さな値であったのは、図 2 中の破線の矢印で示したように外側円筒電極内面での反射光により内側電極表面から放出された光電子電流であることによっている。そして、外側円筒電極は、光電子を放出

する内側円筒電極を取り囲む構造であり、この円筒間を横切るように電流が流れるため、低い電圧から飽和電流が得られた。この飽和電流は陰極表面からの光電子放出電流でもある。

これに対して負電圧側の電流は、電圧を0から高くしていくとほぼ直線的に増し、飽和特性は得られなかった。電流は正電圧印加時の 10^3 倍も大きかった。その理由は、UV光が陰極として作用する外側円筒電極の内面を直接広い範囲にわたって照射しているの、そこから多量に光電子が放出されることによって。このときの電子は、棒-平板電極に似た電界分布の電極間を横切ることになるため、飽和特性が得られにくいものとなった。この外側電極から放出された電流は逆電圧(外側電極に正電圧)を加えても存在し、図3中の拡大図でもわかるように約2V程度まで観測された。この電流が内側円筒電極から放出され外側円筒電極に入る電子流に重畳されて観測される為、前者のみを正しく測定することを不可能にしている。この傾向は真空中ばかりでなく、図4中で200Torr付近までの電流に影響を与えることになるが、これについては次節で述べる。

(3・2) N_2 ガス中における電流

(3・2・1) 電流-電圧特性 放電容器内に N_2 ガスを封入し、UV光を照射しながら偏心円筒電極間の電圧を変化して正方向電流、即ち内側円筒から放出される電子電流を測定した。測定時のガス圧力は0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000Torrである。測定結果を図4に示した。

これらの電流は、次のような3領域に分けることができる。

- (1) 約2Vまでの低電圧で電流が急増する領域
- (2) 電圧の上昇と共に電流が少しずつ増加し 1.75×10^{-12} Aで平坦な特性となる領域
- (3) 電流が飽和した後、電離増倍により急激に増加する領域

このうち(3)は電子衝突電離による電流増加であり、今回の電子透過過程とは関係ないので議論の対象にしないことにする。

図4 N_2 中における電流-電圧曲線
Fig. 4. Current-voltage curves in nitrogen.

(1)に関して、0~2V付近までの電流が負の値から急激に増加しているのは、内側電極から放出され外側電極に入る電子流に外側電極から放出され、内側電極に入る電子流、即ち逆方向電流が重なって測定されていることによる。そして、この逆方向電流は電圧の上昇と共に急激に減少し、約2Vで阻止される。言いかえると、例えば0.1Torrにおいては2V付近で逆方向電流は全く無くなり、陰極から放出され陽極に流れ込む電子流だけが観測されるようになる。そこで2V以下の電流は本論文で対象としている現象でないの、これ以降の議論では除外する。0.2Torrより高いガス圧力においても500, 1000Torrの場合を除いて、このような結果が認められるので2V以下の全ての電流は議論の対象から外した。

もし逆方向の電流が順方向電流に比べ無視できる程小さければ、0~2Vにおいて平等電界中で観測されたように⁽¹⁾⁽⁶⁾、本実験においても印加電圧に対して平坦な電流が検出された筈である。しかし、そのような電流は、今回用いた電極の構造上測定が不可能であった。

(2)はガス圧力が低い場合には電流が電圧の上昇と共に緩やかに増加して平坦な飽和特性を描く領域である。ガス圧力が高くなると飽和領域は高電圧側に寄り、その範囲も狭くなる。飽和電流は 1.75×10^{-12} Aであり真空中における光電子放出電流でもあることは既に記した。100Torr以上になると、電流は飽和特性を描くことなく電離増倍領域に入る。また、電圧2V付近で電流の大きさを見ると、ガス圧力が高くなるに従って次第に小さくなっているが、これは陰極を出た電子が、 N_2 分子との衝突で後方散乱しガス中に注入される電子数が減少していることを意味する。中間の電圧領域では、電圧上昇と共に電流はある勾配を持って飽和領域に向かって増加するが、この領域については次節で議論する。

(3・2・2) 電流- V/p_0 特性 図4の各ガス圧力における電流-電圧曲線の横軸を V/p_0 (V/Torr)として表したのが図5に示してある。ここで V/p_0 は電極間電圧とガス圧力の比であり、電子衝突電離のない低い電界中を横切る電子が電界から獲得するエネルギーを分子との衝突回数で割った量である。この値が決まると、 $V/p_0 = k(E/p_0)$ したがって電極間空間中の E/p_0 も決まることになる。この図において、各ガス圧力別に示した電流曲線は、ガス圧力が低い0.1Torrの場合では飽和電流値付近から、ガス圧力が高くなるのに伴って次第に低い V/p_0 側に電流曲線が伸びている様子が理解できる。

高いガス圧力の場合を除いて各曲線と交わっている破線は、真空中の飽和電流値、すなわち光電子放出電流を表している。図5に示した各電流曲線の V/p_0 に対する変化はよく似ている。そこで、これらの曲線を横軸は V/p_0 で、縦軸は破線で示した光電子電流で一致させ1つのグラフ上にまとめて示したものが図6である。

この図において、ガス圧力ごとに測定した複数の電流曲線は互いに重なり合って V/p_0 に対して一本の曲線を描いて

図5 電流- V/p_0 曲線
Fig. 5. Current- V/p_0 curves.

図6 $I-V/p_0$ 曲線と電子透過率 T'

Fig. 6. $I-V/p_0$ curves and electron transmission ratio in nitrogen.

表1 電子透過率の V/p_0 依存域の最低 V/p_0 値
Table 1. Minimum values of V/p_0 in the V/p_0 dependent region of the electron transmission ratio.

ガス圧力 p_0 (Torr)	V/p_0 (V/Torr)
0.1	2.0×10^1
0.2	9.2×10^0
0.5	4.0×10^0
1	2.0×10^0
2	1.0×10^0
5	4.0×10^{-1}
10	2.0×10^{-1}
20	1.0×10^{-1}
50	4.0×10^{-2}
100	2.0×10^{-2}
200	7.0×10^{-3}
500	1.0×10^{-3}
1000	2.0×10^{-4}

いることが明らかになった。このような電流を真空中の飽和電流値 $I_0=1.75 \times 10^{-12}$ Aに対する比で表すと、不平等電界中の電子透過率 T' となる。この値を図6の右側の縦軸に表した。

この1本の曲線、即ち電子透過率 T' に図5の各ガス圧力の電流曲線を重ねると、それぞれの曲線が電子透過率 T' のどの V/p_0 領域の特性を表現しているかをも見ることができる。この重なり合う部分の最も低い V/p_0 値を図5の曲線中に黒塗りのプロットで示してある。またこれらの値をまとめ、表1と図7に示した。

図7 電子透過率の V/p_0 依存域の最低 V/p_0 値との関係

Fig. 7. Relationship for the minimum values of V/p_0 in the V/p_0 dependent region of the electron transmission ratio.

図5中の各曲線につけた●印より低い V/p_0 においては、前節でも述べたように平坦な拡散領域の電流が観測される

筈である⁽¹⁾が、今回の実験では逆方向の電流のためにこの拡散領域の電流は観測できなかった。しかし●印は拡散領域の電流が V/p_0 のみに依存する領域に移行した後の電流値であることを考慮すると、拡散領域の電流は●印より少し小さいものの、そのガス圧力依存性は図7の変化とほぼ同じであると推測できる。即ち、約100Torrまでの N_2 中に注入される光電子はガス圧力に反比例していることがわかる。

再び図6に戻り、この図で得られた幹となる曲線、即ち不平等電界中の電子透過率 T' は、実は図8に示す平等電界中の電子透過率 T の測定結果とよく似た曲線になることも本研究の実験により見出された重要な結果である。

〈3・2・3〉電子透過率 N_2 ガス中平等電界における電子透過率 T は既に報告したが、その結果は図8のようになる。図中に N_2 ガス中の電子移動速度 W ⁽⁷⁾も比較して示した。

この図で電子透過率 T と電子移動速度 W は横軸の E/p_0 に対してよく似た曲線を描いており、電子透過率は電子移動速度に比例していることがわかる。これを著者らは電子透過率の電子移動速度依存性と呼んだ⁽¹⁾⁽⁶⁾。このような結果は、最近の著者らのモンテカルロシミュレーションの結果でも再現されている⁽⁸⁾。

図8 平等電界中の電子透過率

Fig. 8. Electron transmission ratio in the uniform field.

今回測定した図6の不平等電界中の電子透過率 T' は、この横軸、 $V/p_0=1V/Torr$ を図8の $E/p_0=1.6V/cm·Torr$ に合わせると、図9のように両者はよく一致する。この V/p_0 と E/p_0 条件は、マクロな見方ではあるが両電極間の電子輸送がほとんど同じ、従って電子エネルギー分布も互いに似た形状になっているのではないかと推測できる。しかし、 $V/p_0 = 1 \times 10^{-2} V/Torr$ 以下では2つの電子透過率の差が大きくなっている。これは、陰極表面の電界強度が電極中心軸回りの方向で異なっているためではないかと考えている。従って、同心円筒電極を用いれば陰極面、特に内側電極中心の電界はどこでも同じになるので、このような違いは観測されないものと予想される。更に電子透過率は、十分な数の電子分子間の衝突が起きる条件であれば、平等、不平

図9 N_2 中の電子透過率 T, T'

Fig. 9. Electron transmission ratios in nitrogen.

等、更に不平等の程度といった電界分布には関係なく、一般に電極間の電圧とガス圧力の比 V/p_0 により決まる、という極めて普遍的な電子輸送現象に支配されていることを推測させる。これらの点は別の電極系で検討し結論を出したい。

4. まとめ

本実験の結果によって、J.J.Thomsonが表わした電子透過率の理論は、より広い E/p_0 やガス圧力、それに不平等電界中へと拡張され、その全容が明らかになった。物理的には、電子はガス圧力に比例した数のガス分子と衝突を繰り返しながら、電極間電圧に相当するエネルギーを獲得し、一方では衝突によってそのエネルギーをガス分子に与え、エネルギー平衡がほぼ保たれた状態で電子輸送が行われていることを観測したことになる。要点は次のようになる。

- (1) 陰極から放出された光電子のうち後方散乱を逃れて N_2 中に注入される光電子は、100Torr付近まではガス圧力に反比例する。
- (2) N_2 中に注入された光電子の電離増倍のない低電界中における電子輸送は、電極間電圧とガス圧力の比 V/p_0 のみに依存する。
- (3) この V/p_0 は、電界分布には関わらず、エネルギー平衡に近い状態の電子輸送を表すことができる変数であると考えることができる。平等電界中の E/p_0 はこの特別の場合である。
- (4) このようなガス中の電流を真空中の光電子放出電流で除した値は電子透過率として表すことができる。
- (5) N_2 を満たした不平等電界中に注入された光電子の電子透過率は、既に測定した平等電界中の電子透過率によく似た変化をすることを実験結果より見出した。即ち、電子透過率は電界分布に関わりなく、 V/p_0 のみに依存し、その変化は N_2 中における電子移動速度に比例する。
- (6) このように電離増倍のない低電界下の電流が、電

界分布やガス圧力に関わらず、 V/p_0 のみに依存するならば、その電流は電極表面からの電子放出により維持されているものと判断できる。もし、 V/p_0 のみに依存しない電流成分があれば、電極表面以外から供給された電子による電流であると判断できることになる。

実験に協力していただいた卒論生、林 英一君、松浦孝浩君、山本正広君と院生、田中集友君の協力を感謝する。
(平成10年3月31日受付、平成10年6月19日再受付)

文 献

- (1) 伊藤, 生田: 電学論, 104-A, 17(1984)
- (2) 伊藤, 井上, 生田: 電学論, A-110, 363(1990)
- (3) J.J.Thomson and G.P.Thomson: Conduction of Electricity through Gases, 466(1928) Cambridge Univ.Press
- (4) エンゲル著, 山本訳: 電離気体 改訂版, 18, コロナ社(1968)
- (5) J.K.Theobald: J.Appl.Phys., 24, 123(1953)
- (6) H.Itoh and N.Ikuta: Contributed Papers of ICPIG XVI, 72(1983)
- (7) J.Dutton: J. Phys. Chem. Ref. Data, 4, No.3, 577(1975)
- (8) 田中, 西沢, 伊藤, 生田: 電気学会放電研究会資料 ED-97-87

伊 藤 晴 雄 (正員) 1945年9月11日生。1968年3月千葉工業大学電気工学科卒業。同年4月～1970年3月理化学研究所勤務。1972年3月徳島大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月千葉工業大学助手, 現在教授。放電基礎過程の研究に従事。工学博士。日本物理学会, 応用物理学会, 静電気学会会員。

生 田 信 皓 (正員) 1929年10月22日生。1951年徳島工業専門学校電気科卒業。県立工業高校教諭を経て, 1964年4月徳島大学工学部助手。その後, 同工業短期大学部を経て, 同工学部電気電子工学科教授。現在千葉工業大学研究所教授。コロナ放電現象の研究から, 近年は放電基礎過程の研究に従事。工学博士。1972年電気学会論文賞受賞。日本物理学会, 応用物理学会, 日本分光学会会員。