



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	グロー放電の安定性
Author(s)	三浦, 良一; Miura, Ryoichi
Citation	北海道大學工學部研究報告, 9, 117-124
Issue Date	1953-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40525
Type	departmental bulletin paper
File Information	9_117-124.pdf



グロー放電の安定性

三浦良一

(昭和28年9月30日受理)

The Stability of Glow Discharge

Ryoichi MIURA

Abstract

On the stability of glow discharge, experiments in atmospheric air were performed and the condition of stability was proposed by author.

Intermittent phenomena of gaseous discharge was investigated at the standpoint of discharge forms and its regularity was recognized. It has important relation to radionoise from discharge, and its forms are very affected by the electrode materials.

Fundamental difference between intermittence and pulsation of discharge was explained.

目次

I 緒言	1
II 実験方法	2
III 実験結果	3
1. 白金を電極とせる場合	3
2. 炭素を電極とせる場合	5
3. その他の電極の場合	6
IV 考察	6
1. 負抵抗領域に於ける放電の安定条件	6
2. グローの不安定に伴う放電形態	6
V 結論	8

I. 緒言

本研究は放電形態の安定条件に関連して、大気中グロー放電の安定性を中心とし、その不安定領域に於ける現象を系統的に研究したものである。グロー放電はその小電流側に於て前期グローに移行し、大電流側に於ては異常グローを経てアークに移行することは周知のこととされているが、後者に關する活潑な研究に對して前期グローに關する研究は極めて少い。その理由は現象が單純であると考えられているからであろうが、例えば放電雑音等に關して起つて來た問題を解決するには極めて不十分な段階にある。

Wehrli¹⁾ はグローからアークへの移行現象の研究に關聯して前期グローの特性を實驗的に得ており、このような傾向は、回路条件が靜的な安定条件を満足する限り一般性を有するもの

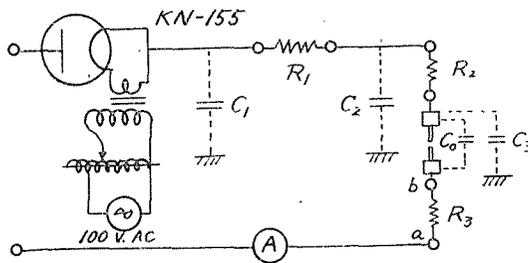
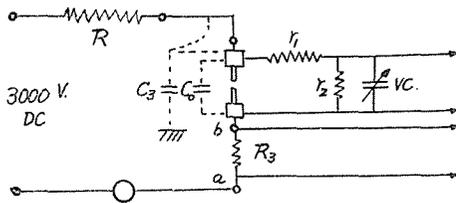
と信ぜられている。しかし著者の実験した大気中グローに於ては前期グローの安定な出現は認め難く静的な安定条件では説明困難である。一方、動的な安定条件については、餘り注意されていないけれども Engel u. Steenbeck²⁾ によつて提出されたものがある。しかしながら検討の結果満足が得られないので、著者は最も一般的と考えられる前期グローの安定条件を提出して実験結果の説明を可能ならしめることが出来た。

グローの不安定化につづく放電の間歇又は脈動の現象は、それ自身で放電形態論的重要性を有する外、最近特に問題視されている放電雑音發生の典型的な一例をなすものであり、又オゾナイザーの如くエネルギーを制限した放電形態とも密接な関係があると思われるので、各種の電極材料について詳細な研究を行つた。

II. 實 験 方 法

電極としては、白金の場合直径 1 mm, その他の場合直径 2 mm の圓筒を軸上に對向せしめたものを用い、放電間隙は微動装置によつて可變とした。放電外觀の觀察及び間隙長の測定には、一目盛が $1.25 \times 1/100$ mm に相當する尺度を入れた 60 倍の顯微鏡を使用した。放電電壓及び電流は直流計器とブラウン管オツシログラフとを併用して、定常状態及び振動状態を測定した。

グローの安定性を調べるためには、安定グローを點じておいて電流を除々に減少し、オツ



上 第 1 圖 高 抵 抗 電 源 回 路

下 第 2 圖 定 電 流 電 源 回 路

シログラフによつて安定限界を知る方法を探つたが、この場合の電源回路としては第 1 圖の如き高抵抗回路と第 2 圖の如き所謂定電流回路との 2 種を用いた。但し第 2 圖では第 1 圖から明らかな分壓回路の部分を省略してある。第 1 圖の場合高抵抗 R としては、液体抵抗又は炭素皮膜抵抗を使用し、電流の變化は電壓及び抵抗變化の併用によつた。電極間容量 C_0 は極めて小さいが對地容量 C_3 は約 3 pF であり、液体抵抗の場合液体抵抗自身が約 10 pF の分布容量を有する。

第 2 圖の場合は 2 極管 KN-155 のフィラメント電流の調節によつて電流を

變化せしめるものでその定電流特性は静的には満足し得る程度であるが約 100 pF にも及ぶ C_1 の存在によつて動的特性は第 1 圖の場合よりも不良であつた。 C_2 は導線の對地容量で約 10 pF, R_1, R_2 はこれ等の容量の影響を遮斷するためのものである。

分圧回路の特性は電圧波形に重要な影響を與えるものであるので、歪波形電圧を用いて注意して校正を行つた。 $r_1=10\text{ M}\Omega$, $r_2=1\text{ M}\Omega$ 共にリケノーム抵抗で VC は分圧特性補償のための小容量である。 R_3 は電流波形を観測するためのもので $30\text{ K}\Omega$ のリケノームを使用した。電流波形観測上注意すべきことは接地個所の選定であつて、 b を接地した場合は C_3 の放電電流は測定されず放電後の C_3 に對する振動的な充電電流が測定されることになる。これに對して a を接地した場合は C_0 が極めて小であるために満足すべき結果が得られた。 R_3 に並列に入るオツシログラフ偏向板の容量は約 10 pF 程度であり、その時定数は 3×10^{-7} 秒であつて波形観測には影響しない。同じく接地個所の問題であるが、 a を接地し R_3 を投入したままで電圧波形を観測すると電流パルスが逆極性で重疊して観測を困難にする。従つて電圧波形観測の場合は R_3 を短絡するのが無難な方法であらう。

尚オツシログラフ時間軸としては單掃引時間軸を用い、観測可能な限界は 2 MC 程度であつた。

III. 實驗結果

1. 白金を電極とせる場合

電極材料の電氣的、熱的性質特に化學變化は放電特性に重要な影響があるので、先ず白金を用いてこの困難を避けた。

安定グローに關する一般理論から、電極材料、ガスの種類、ガス圧が與えられると正規電流密度 j_n と正規陰極降下の厚さ d_n とが一定値を取る筈であり、大氣中白金の場合著者の實驗によれば $j_n=7.3\text{ A}$, $d_n=0.025\sim 0.03\text{ mm}$ 程度であつた。又フアラデー暗部をも含む陰極降下部の厚さを d_r とすれば、これも實驗の範圍で一定値 0.12 mm を示した。電流を次第に減少すればグロー電圧は殆んど一定値を保ち（陽光柱の影響を無視し得る場合の正規グロー特性）、ある臨界電流値で、突然不安定となり一般に間歇放電となる。この電流値は充分再現性があり間隙距離 l 、及び電源回路の條件で異なるもので、これをグロー下限電流 I_{gl} と稱することにする。

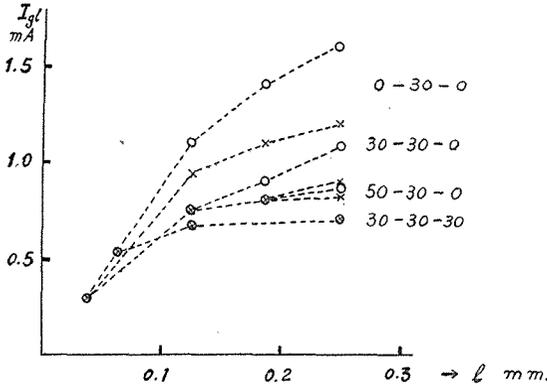
(1) 高抵抗回路の場合。第1圖の回路を用い、 l を出来るだけ小さくした場合の I_{gl} は約 0.2 mA で、この時 $R=1.5\times 10^7\ \Omega$ である。今グロー放電の負抵抗を $r=|dV/dI|$ とすれば靜的安定條件は

$$R < r \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされるので、(1) 式をこの實驗に適用すれば放電電流 $I_g=0.2\text{ mA}$ に於て r が突然 $10^7\ \Omega$ 程度に上昇することになり、後に論ずる如く (1) 式の適用は妥當でない。

I_{gl} 以下に於ては當然間歇放電となりその外觀は淺見氏⁹⁾の報告せられている如くで、兩極間は紫色の光溝で連り電極面に白い小輝點が見られる。電圧波形は完全な鋸齒状でその最低電圧は殆んど正規グロー電圧 V_{gn} と一致し、最高電圧は又靜的放電開始電圧 V_i と一致する。し

かしてこの状態は振動数が数メガサイクルになつても変化しない。かくて一度間歇的となれば R を減少しても容易に安定グローに戻らず、 $I_{gl}=5\sim 10\text{ mA}$ に相当する R でようやく安定となる。その過程に於て電圧波形に準安定グローに相当する水平部が次第に目立つて来る。これは外観上は負グローの出現に対応するものである。



第3圖 グロー下限電流

(2) 定電流回路の場合。第2圖の回路を用いた場合は豫想に反して一見複雑な様相を呈した。蓋し定電流回路は動的に $R=\infty$ に相当するもので(1)式の條件を満足す可きに拘らず、高抵抗回路に比して著しく不安定であつた。その理由は第2圖に於ける C_1, C_2 に起因するものと考えられる。故に R_1, R_2 によつてその影響の遮断を試みて第1表の如き結果を得た。第3圖は C, R をパラメーターとし I_{gl} を l に對して畫いたものである。

第 1 表

R (KΩ)			l (mm)							
			0.25		0.19		0.12		0.06	
R ₁	R ₂	R ₃	I _{gl} (mA)							
0	30	0	1.2	1.6	1.1	1.4	0.95	1.1	—	—
30	30	0	0.9	1.08	0.8	0.9	0.75	0.75	—	—
50	30	0	0.83	0.87	0.8	0.8	0.75	0.75	—	—
150	30	0	0.7	0.7	0.8	0.8	0.75	0.75	—	—
250	30	0	0.7	0.7	0.8	0.8	0.75	0.75	—	—
0	30	30	0.85	1.0	—	—	0.67	0.67	0.55	0.55
30	30	30	0.7	0.7	—	—	0.67	0.67	—	—
150	30	30	0.7	0.7	—	—	0.67	0.67	—	—

表中 I_{gl} の l に對應する値の内第2列のものは C_1 の外に特に $C_1'=10^3\text{ pF}$ を挿入した場合であつて第3圖に於ては○印がこれに對應する。一般的傾向を見るに、 I_{gl} は R 大、 l, C 小なる程小さく、 R が充分大になると C に無關係になる。

放電が間歇的となつた場合の状態も又、回路條件及び l によつて異なる。先ず $R_2=0$ で R_1 が充分大なる場合は準安定グローを生じない點で高抵抗回路の場合と同様であるが、 C_2 が大なる爲に最低電圧は V_{gn} 以下となり、外観も白色の強い光溝が見られる。 R_2 に數十キロオーム程度を挿入すれば白色のアーク状光溝をもつ放電は抑制され最低電圧は V_{gn} で止まるが、高抵抗回路と異なる點は電源からの定電流 I_0 のみならず C_1, C_2 からもエネルギーの供給があるために

準安定グローが存在する。この準安定グローの断続時間は C, R の大なる程、又 l の小なる程長くなる。第2表は $I_0=0.5 \text{ mA}$ の場合に R, l に対して準安定グローの断続時間を示したものである。

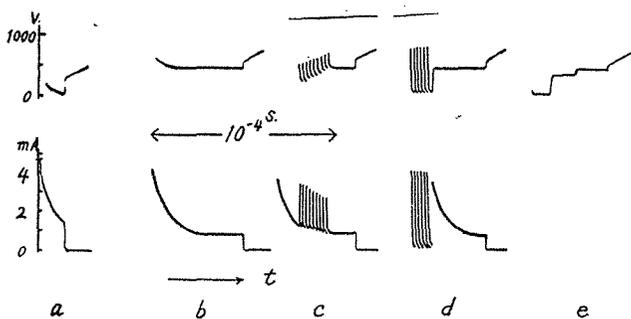
2. 炭素を電極とせる場合

放電電極としての炭素の著しい特色は極めてアークを点じ易いことであつて、実験によるアーク下限電流は 10 mA 程度である。即ち白金のそれが約 1 A であるのに比して著しい相違であるに拘らずグロー下限電流は白金の場合と殆んど變らない。白金に関する記述に於てはグロー下限の問題のみを述べたが、グローの上限も當然考えられる譯である。しかしこれは下限電流とは異つた條件即ち電極の熱的條件その他によつて著しく變化するもので、白金の場合數十ミリアンペアから數アンペアに及ぶ。大氣中に於ける炭素の場合には遂に下限電流程度まで低下するものと考えられる。即ち実験の結果安定グローは得ることが出来なかつた。

間歇放電は一見不規則な状態を呈するが、細かく観察すれば第4圖の如き規則的な部分が不規則に繰返されているものである。第4圖は定電流回路について ($I_0=0.5 \text{ mA}, R_1=150 \text{ K}\Omega, R_2=30 \text{ K}\Omega, l=0.25 \text{ mm}$) 得られたもので、(a) は間歇アーク、(b) は間歇グローと見られるものであるが何れも規則的には繰返さない。(c), (d) は高振動の部分を経て (b) と同様な準安定グローに移行せる場合で、全体の断続時間は $C_1 + C_2$ によつて定まるが、高振動数の部分は C_3 によつて規定されている。(e) はアークから中間形式のグローを経て準安定グローに移行した場合であるが最後の段階を缺く事も多い。これ等の形態は一般に不規則に交替出現するが、 R, l の値によつて大体の傾向が見られる。例えば $l=0.12 \text{ mm}, R_2=30 \text{ K}\Omega$ として R_1 を變化すると $R_1=0$ では (a) が多く現われ、 $R_1=30 \text{ K}\Omega$ では (a) と (e) において最終段階を缺いた形態 (e' とする) とが相半ばし、 $R_1=50 \text{ K}\Omega$ では (a) が少くなると共に (e') が振動的になつたもの即ち (c) に於けるグロー段階を缺いた (c') が現われてくる。 $R_1=150 \text{ K}\Omega$ とした場合は第4圖に示した。又 l の大なる場合はアーク、 l の小なる場合はグローが出現し易い。 I_0 が小なる場合は白金の場合に近くなり (c) (d) 等の如き複雑な形態は生じ難い。

第 2 表

R (KΩ)	l (mm)			
	0.25	0.12	0.6	
R_1	R_2	準安定グロー継続時間		
0	30	1.2×10^{-4} 秒	1.35 "	} 安定グロー
30	30	3.0 "	1.2 "	
50	30	3.0 "	2.0 "	
150	30	3.0 "	2.0 "	
250	30	3.0 "	2.0 "	



第 4 圖 間歇放電に於ける電圧及び電流波形

$R_2=30 \text{ K}\Omega, l=0.25 \text{ mm}$) 得られたもので、(a) は間歇アーク、(b) は間歇グローと見られるものであるが何れも規則的には繰返さない。(c), (d) は高振動の部分を経て (b) と同様な準安定グローに移行せる場合で、全体の断続時間は $C_1 + C_2$ によつて定まるが、高振動数の部分は C_3 によつて規定されている。(e) はアークから中間形式のグローを経て準安定グローに移行した場合であるが最後の段階を缺く事も多い。これ等の形態は一般に不規則に交替出現するが、 R, l の値によつて大体の傾向が見られる。例えば $l=0.12 \text{ mm}, R_2=30 \text{ K}\Omega$ として R_1 を變化すると $R_1=0$ では (a) が多く現われ、 $R_1=30 \text{ K}\Omega$ では (a) と (e) において最終段階を缺いた形態 (e' とする) とが相半ばし、 $R_1=50 \text{ K}\Omega$ では (a) が少くなると共に (e') が振動的になつたもの即ち (c) に於けるグロー段階を缺いた (c') が現われてくる。 $R_1=150 \text{ K}\Omega$ とした場合は第4圖に示した。又 l の大なる場合はアーク、 l の小なる場合はグローが出現し易い。 I_0 が小なる場合は白金の場合に近くなり (c) (d) 等の如き複雑な形態は生じ難い。

これ等の形態は一般に不規則に交替出現するが、 R, l の値によつて大体の傾向が見られる。例えば $l=0.12 \text{ mm}, R_2=30 \text{ K}\Omega$ として R_1 を變化すると $R_1=0$ では (a) が多く現われ、 $R_1=30 \text{ K}\Omega$ では (a) と (e) において最終段階を缺いた形態 (e' とする) とが相半ばし、 $R_1=50 \text{ K}\Omega$ では (a) が少くなると共に (e') が振動的になつたもの即ち (c) に於けるグロー段階を缺いた (c') が現われてくる。 $R_1=150 \text{ K}\Omega$ とした場合は第4圖に示した。又 l の大なる場合はアーク、 l の小なる場合はグローが出現し易い。 I_0 が小なる場合は白金の場合に近くなり (c) (d) 等の如き複雑な形態は生じ難い。

3. その他の電極の場合

銅, 鐵, ニッケル, 鉛, カドミウム等についても同様の實驗を行つたが, I_{gl} は殆んど電極材料に無關係であつた。又グロー上限電流 I_{gu} はアーク下限電流 I_{al} と平行的な關係にあつて, 白金と炭素との中間的傾向を示した。

異種電極を組合せた場合には殆んど陰極材料の特性に従う。

IV. 考 察

1. 負抵抗領域に於ける放電の安定條件

已述の如く (1) 式をもつて前期グローの安定性を論ずることは適當でないことは明らかで, これは並列容量の存在に歸因する。かかる場合例えば第 1 圖の如き回路に於ける安定條件として Engel 等は次式を提出し, (1) 式と同時に成立すべきものとした。

$$t > GR \quad \text{or} \quad t/C > R \quad \dots\dots\dots (2)$$

t は回路條件の急變に對應して放電電流が變化する速さを表わす時定數である。今放電電流が何かの原因で増加する場合, t は C が放電する時定數を意味し, GR は C が電源から充電される時定數である。従つて (2) 式が成立しないときは電源よりのエネルギー補給が不足する譯であつて, 放電に動的負抵抗 r_a が存在すれば不安定となる。定電流回路に於ては $R = \infty$ と考えられるので極めて微少なる C の存在によつても不安定となるといふ結論となり, 筆者の實驗の大部分を説明しうる。又 R_1, R_2 によつて C_1, C_2 の影響を遮斷しうることは, これらの直列抵抗が r_a を相殺すると考えればよい。しかしながら直列抵抗が一定の場合に C を變化すれば I_{gl} が變化する事實は説明出來ない。著者はこれに對して次の條件式を提出する。

$$t > Cr_a \quad \text{or} \quad t/C > r_a \quad \dots\dots\dots (3)$$

即ち, 放電電流が t によつて定まる速度をもつて r_a に沿うて變化せんとするとき (3) 式が成立しないならば端子電壓の變化は著しく大となるべきであつて, 放電電流の變化はその初動に於て抑制される。

(3) 式の條件は (1) とは獨立であり, (2) 式の制約を受けない。もし (2) 式も同時に成立すれば二重の安定性を有することとなり, (2) 式が成立しない場合でも (3) 式が成立すればよい。

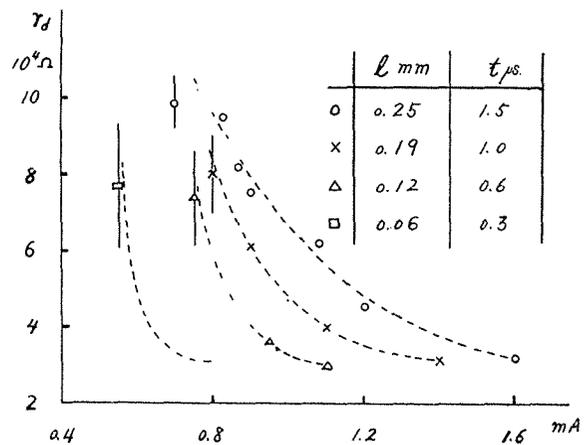
t は元來正確には定義し難いものであるから前期グローに於て夫々の l に對して適當な t を採用すれば, 第 4 圖の結果に (3) 式を適用することにより, l, I_a に對する r_a を算出しうる。第 5 圖はこれを圖示せるもので, t は $r_a - I_a$ がなるべく同一曲線にのるように選んだ。

尙, 直列抵抗 R の存在が負抵抗を相殺する傾向をもつと同様に直列インダクタンス L の存在は實効的に t を大ならしめるものであるが著者の場合 L は無視しうる程度である。

2. グローの不安定に伴う放電形態

高抵抗回路に於て間歇グローになるか, 間歇アークになるかは C の大きさと電極材料によ

り, $l=0.1$ mm $\rho l=7$ mmHg·cm 程度の場合白金では $C=3$ pF でグロー, $C=10$ pF でアークとなるが, 炭素では $C=3$ pF で両者が共に生ずる。何れにせよ過渡的な光溝状放電で $5\sim 15$ μ J 程度の C に蓄積されたエネルギーは一舉に放出され, 續流による準安定グローは殆んど出現しない。この場合に準安定グローを出現せしめるためには, l を充分小にして d_n 程度にする必要がある, しかもこのときの準安定グローの出現及び継続時間は不規則であつて



第5圖 大氣中グローの動的負抵抗の推定値

安定グローの段階になる前觸と考えられる。一方淺見³⁾, 三好⁴⁾, 山本⁵⁾ 諸氏の研究によれば, 氣壓 p の低下によつて容易に規則的な準安定常グローの出現が見られるのであつて, この兩者の相異は ρl の差では説明されず, p の大なる場合に於ける第一種グローの高い密度をもつたエネルギー放出に歸せらるべきである。三好氏によれば, $p=10$ mmHg $l=1$ cm 即ち $\rho l=10$ の時のグローからアークへの轉移エネルギーは 10^3 μ J 程度であつて著者の場合に比して二桁位大きい。 l のみならず p そのものが放電形態に對して重要視せらるべき所似である。

第2圖の回路の如く C_3 を充分小ならしめ且つ C_1, C_2 の放電を R_1, R_2 で抑制すれば, 白金に於て第3圖 (b) の如き間歇グローが規則的に發生する。その規則性は第2表によつて知られる通りである。この段階に於て C_1, C_2 を大にすることは準安定グローの継続時間を長くするだけであつて, グローからアークへの轉移は見られない。即ちかかる状態に於けるアークへの轉移は安定グローからアークへの轉移と同様に考えられるべきであつて, グロー上限電流の問題であり電極材料によつて大きく支配される。この問題は所謂階段放電と密接な關係を有するが, 此所ではこの程度に止める。

次に炭素電極の場合に發生する第3圖 (c), (d), (e) の形態について考察する。炭素は容易にアークに移る特性をもつているので一般に (a) が容易に發生するが, このとき C_1, C_2 が大で充分の續流が供給される場合には (e) (e') の形態をとる。(e) に於ける中間形態のグローは陽極降下部の消滅したグローと考えられ, 形態論的には通常グローよりもアークえ向つて進展したものである。しかしこの時 R_1, R_2 が比較的小さく且つアーク消滅後に於ける端子電壓の瞬時的回復が残留電荷による再放電電壓の低下を來す程度に速やかであれば (c) 又は (d) の如き振動を發生するのであつて, その周波数は $C_3 \cdot R_2$ 又は $C_3 (R_1 + R_2)$ で規定せられる譯である。

(d) は残留電荷の影響の比較的小さい場合であつて殆んど零に落ちるが, (c) は第1種グローとアークとの交替發生の形態をとり電流は零にならない。即ち前者は完全な間歇放電であり,

後者は脈動であるということが出来る。しかしながら上述の如く兩者の相異は放電路の導電性が残留する度合による見掛上のものであつて構構的には何れも間歇放電である。見掛上の脈動の極端な例は蛍光灯の如き低壓放電に於て見られるところであり、上述の意味に於てはこれも又局部的な間歇放電である。電流波形からいふと間歇放電は鋸齒狀的であつて、弛張振動として特色づけられる。この意味でプラズマ振動の如きトムソン振動的な脈動現象とは異なるものと考へなければならぬ。

V. 結 言

1. $pI=1\sim 30$ mmHg·cm に於ける大氣中グローの安定限界に關し、主として下限電流について研究して、電極材料には無關係であつて回路及び間隙條件によつて第1表の如き結果を得た。

2. グロー下限電流以下に於ける間歇放電を検討して、氣壓の形態論的重要性を強調した。

3. 一見不規則な間歇放電も第3圖に示す如き規則的な形態が不規則に交替發生するものであつて、その不規則性は炭素の如きアークに移り易い電極に於て特に著しい。蓋しグロー段階では不規則性の要因である残留電荷効果が小さいこと、及びアークへの移行そのものが臨界點附近では不規則な確率的現象であることに起因する。

4. 放電形態論的立場から放電の間歇及び脈動に對する解釋を與えた。

謝 辭

本研究に當り、淺見、片山兩教授の御指導を頂いた。ここに厚く感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) M. Wehrli: Z. f. Physik, Bd. 44, S. 301 (1927).
- 2) A. v. Engel u. M. Steenbeck: Elektrische Gasentladungen II. S. 173 (1934).
- 3) 淺 見: 電學誌 53卷, 27頁.
- 4) 三 好: 放電形式に關する研究(昭 21) 122頁.
- 5) 山 本: 電氣三學會東京支部連大講演要旨(昭 24-10) 61頁.