窒素ガス中におけるグロー放電とアーク放電との間のフリップフロップ形移行現象

正員 野垣正義 (成蹊大)

正員 杉沼義隆 (成蹊大)

1. まえがき

グロー放電とアーク放電との間のフリップフロップ形移行現象 (以後、FFTGA と略記) は、空气中、ヘリウム (He) 中や He+O₂ 中などでの諸特性が求められ、酸素 (O₂) が含まれるか否かという条件で、その幾らかの性質が明らかにされてきた⁽¹⁾⁽²⁾ (以後、グロー放電、アーク放電を省略し、それぞれ“グロー”および“アーク”とする)。FFTGA は He 中では生じなかったが、高い圧力の窒素ガス (N₂) 中では生じている。

ここでは、雰囲気気体を N₂ のみ (O₂ を含まないあるいは O₂ の含有量が非常に少ない) で、その圧力 (p) を 93~13 kPa とし、数種の電極材料を用い、従来、著者らが発表した⁽¹⁾⁽²⁾ よりも広い条件で FFTGA の性質を求めた。

グローの存在する確率を示すグロー放電率 P_g は N₂ 中のいずれの圧力、電極の場合にも ≈ 1.0 である。グロー放電の平均寿命 $\langle t_g \rangle$ は、N₂ 中では複雑であるが、それぞれの材料の電極に対し特徴ある性質を示した。そして、アークの平均寿命 $\langle t_a \rangle$ は電極が Cu, Ag, Fe, Au の場合 100 μ s 以下であり、Mo, W などの高融点電極の場合には 500 μ s 以下となっている。このように、N₂ 中の本現象の性質がつまびらかに得られた。

2. 研究の方法⁽¹⁾⁽²⁾

〈2・1〉 $P_g, \langle t_g \rangle$ および $\langle t_a \rangle$ $P_g, \langle t_g \rangle$ および $\langle t_a \rangle$ で表される三つの量は著者らの報告⁽¹⁾⁽²⁾ でも既に

示したが、十分長い測定時間 T 中に、グローとアークがそれぞれの寿命 $t_{g1}, t_{a1}, t_{g2}, t_{a2}, \dots, t_{gn}, t_{an}$ で n 回移行を繰返し

$$T_g = \sum_{i=1}^n t_{gi}$$

とすると、 $P_g (= T_g/T)$ はグローが存在する時間的割合であり、またある瞬間がグローである確率を示す。 $\langle t_g \rangle (= T_g/n)$ および $\langle t_a \rangle (= (T - T_g)/n)$ はグローおよびアークの各寿命 t_{gi}, t_{ai} の平均値をそれぞれ示す。

〈2・2〉 放電の条件 放電容器 (直径 30 cm, 高さ 30 cm) 内を真空ポンプにより、約 0.8 Pa とした後、雰囲気気体 N₂ を圧力 $p=13\sim 93$ kPa の定めた各圧力まで導入し閉じた。

電極は材料に Cu, Ag, Fe, Au, Mo, W を用い、できるだけ不純物の影響を除くため、純度 99.99% 以上のものを選んだ。陰極、陽極とも同一材料を使い、太さ 4 mm ϕ (Fe の場合 5 mm ϕ , Au の場合は陰極のみ 10 mm ϕ)、そして陰極を水冷とした。電極の実験前処理として、先端の角を丸め極細のエメリーペーパー (No. 3000) で磨き、石けん水、エタノール (超音波洗浄)、アセトンそしてエタノールの順に用い洗浄した。ギャップの長さを 6 mm, 平均放電電流を $I \approx$ 数十~300 mA, そして放電回路の直列抵抗 $R=15, 20, 50$ の各 k Ω とした。 I を変量として、小さい I から順次大きいほうへと測定を行った。そして、各 I に対し、 $T=58$ s で 10 回以上測定し、各 T について基礎量 (T_g, n) を測り、 $P_g, \langle t_g \rangle, \langle t_a \rangle$ を計算して求めた⁽¹⁾。

3. 結果, 検討

〈3・1〉 Cu 電極⁽⁶⁾⁽⁷⁾

(1) P_g - I 特性 P_g は図 1(a)~(g) に示すように、 $p=13\sim 93$ kPa, $I=270$ mA 以下で、1.0 に近い値であった。しかし、 P_g が大きい中で、後に示す

Flip-Flop Type Transition between Glow and Arc Discharges in Nitrogen Gases. By Masayoshi Nogaki, Member, Yosataka Suginuma, Member (Faculty of Engineering, Seikei University).
野垣正義: 正員, 成蹊大学工学部電気工学科
杉沼義隆: 正員, 成蹊大学工学部電気工学科

図1 N₂中におけるCu電極による P_g - I 特性
Fig.1. Glow discharge rate P_g for Cu electrodes in N₂ (13~93 kPa).

図2 N₂中におけるCu電極による
 $\langle t_g \rangle$ - I 特性

Fig.2. Average life time of glow discharges for Cu in N₂.

ように短寿命のアーキが存在していた。

P_g はここで扱った他の材料の電極の場合にも、特別の例外を除きすべて $I \approx 300$ mA 以下で、Cu と同様ほぼ 1.0, 低くとも 0.9 以上であった。

このことは、O₂ が含まれない (あるいは少ない) 放電の系においてはアーキにはなりにくいことを従来

図3 グロー放電の平均寿命の極小値
 $\min \langle t_g \rangle$ および $\min \langle t_g \rangle$ の点の電流 I に
対する雰囲気気体の圧力 p の関係

Fig.3. Minimum value on $\langle t_g \rangle$ ($\min \langle t_g \rangle$) and its current I versus gaseous pressure p .

よりも広い条件で確認したことになる⁽²⁾。

本論文では、 P_g は Cu 電極 (以後、電極を省略) の場合のみ、代表例としてここに示す。

(2) $\langle t_g \rangle$ - I 特性 図2に $\langle t_g \rangle$ - I 特性を示す。

$\langle t_g \rangle$ は $p=40$ kPa 以上において、 I の増加に対し、小さな I では十分大きな値 $\langle t_g \rangle \geq 58$ s (可測上限)* であり、ある狭い範囲の電流 ΔI (数十 mA) に対し急激に、大幅に減少し、ある I で極小値 (谷底, $\min \langle t_g \rangle$) を有し、更に I を増すと $\langle t_g \rangle$ は急激に増加し大きな値となった。すなわち、 $\langle t_g \rangle$ - I 特性は深いすり鉢形の谷を示す。 $p=27$ kPa 以下のとき $\langle t_g \rangle$ は I の増加に対して減少し、その減少傾向は $p=40$ kPa 以上の場合と似ているが、谷底を生ずる前に、陰極が熔融破壊する I に達する。

$\langle t_g \rangle$ - I 特性の $\min \langle t_g \rangle$ を、 p を変数として、図3に $\min \langle t_g \rangle$ - p 特性で示す。

$\min \langle t_g \rangle$ は 40 kPa では ≈ 10 ms, 93 kPa では $\approx 10^{-1}$ ms となり、 p の増加と共に大幅に減少する。また、図3および図2に示すように、各 p における $\min \langle t_g \rangle$ の点の I は p が増加すると共に減少して小さな値となる。

(3) $\langle t_a \rangle$ - I 特性 $\langle t_a \rangle$ - I 特性を図4に示す。

$\langle t_a \rangle$ は $p=13\sim 93$ kPa, $I=300$ mA 以下の範囲で 10μ s 以下である。 $\langle t_a \rangle$ は $p=67\sim 93$ kPa の範囲では数 μ s 以下であり、 $p=27\sim 53$ kPa では $I=100$ mA まで可

*: 本論文における、 $\langle t_g \rangle$ - I 特性中の可測上限、および $\langle t_g \rangle$ - I 特性中の可測下限外にプロットした点は、その電流 I において測定し、 $\langle t_g \rangle$ や $\langle t_a \rangle$ の値が測定限界外にあることのみを意味し、縦軸の値は意味をもたない。そして、ある I でパラメータの異なるものどうしの記号が重なり合うか近い値のとき、あまり詰まると窮屈で見にくいので縦に並べた。

図 4 N₂ 中における Cu 電極による
《 t_a 》- I 特性

Fig. 4. Average life time of arc discharges for Cu in N₂.

測下限 (0.25 μs) 以下*, $I=100$ mA を超えると数 μs までの値を示す。また, 《 t_a 》は $p=13$ kPa では, $I=270$ mA 以下の全測定領域で可測下限以下*である。 p が低いほうに向かうに従って, 《 t_a 》は I の大きいほうにまで, 可測下限以下*にある測定点が多くなっている。

〈3・2〉 Ag 電 極 ^{(3)~(5)}

(1) 《 t_g 》- I 特性 《 t_g 》- I 特性を図 5 に示す。全体的に見ると, 《 t_g 》は I の増加に対し減少の傾向を示すが, 《 t_g 》の大部分の測定点は $\approx 1 \sim 0.5$ ms を中心に $0.01 \sim 10$ ms の間に分布する。

そして, p が低くなるほど《 t_g 》は大きくなる傾向も見られる。

《 t_g 》は $I=100$ mA 以下の領域では, I が小さいとき p が低いほど大きく, I の増加に伴って大幅に減少する。そして, $I=100 \sim 120$ mA ですべての p に対し, $\approx 1 \sim 0.5$ ms の範囲に収まる。

$I=120 \sim 300$ mA の領域では, 《 t_g 》は I の増加に伴って減少するが, その減少割合は p が高いほど大きい。 $I=270$ mA のとき, $p=13$ kPa では《 t_g 》 ≈ 1 ms を維持するが, $p=93$ kPa では大幅に減少し, 数 μs となる。

(2) 《 t_a 》- I 特性 図 6 に《 t_a 》- I 特性を示す。

$I \approx 300$ mA 以下で, 総じて《 t_a 》は小さく $10 \mu s$ 以下であり, p が高いほど《 t_a 》はわずかに大きくなる

図 5 N₂ 中における Ag 電極による
《 t_g 》- I 特性

Fig. 5. Average life time of glows for Ag in N₂.

図 6 N₂ 中における Ag 電極による
《 t_a 》- I 特性

Fig. 6. Average life time of arcs for Ag in N₂.

傾向が見られる。

そして, 一部の $I=100$ mA 以下の場合や $p=93$ kPa のときの $I=250$ mA 以上の場合を除けば, わずかの差ではあるが, p が大きいほど《 t_g 》がわずかに大きく, I に対する変化はほとんど見られない。

〈3・3〉 Fe 電極 ⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

(1) 《 t_g 》- I 特性 図 7 に《 t_g 》- I 特性を示す。 $p=53 \sim 93$ kPa で, 《 t_g 》は $I=100$ mA 以下で可測上限以上*の位置に維持されているのに対し, $I=100 \sim 200$ mA の間で大幅に急激に減少し, $I=200 \sim 300$ mA の領域で《 t_g 》 $\approx 2 \sim 10^{-3}$ ms の範囲に分布する。

$p=13$ kPa になると, 《 t_g 》は $I=$ 数十 mA 以下のとき, 可測上限以上*の位置に分布しているが, $I=$

図 7 N_2 中における Fe 電極による
《 t_g 》- I 特性

Fig. 7. Average life time of glows for Fe in N_2 .

数十~150 mA では、わずかに $\approx 1 \sim$ 数 s まで減少して谷をもち、 $I=150 \sim 300$ mA の領域で、 $20 \sim 50$ s のような大きな値になる。 $p=13$ kPa では、《 t_g 》には I を増加させても、 $p=53$ kPa 以上で見られるような、大幅に急激に減少する傾向は見られない。

(2) 《 t_a 》- I 特性 《 t_a 》- I 特性を図 8 に示す。

$p=13 \sim 93$ kPa 中で、《 t_a 》の多くの測定点は可測下限以下*に存在する。その中で、《 t_a 》の幾つかの測定点は 60 kPa では $20 \mu s$ 以下、80 kPa では数 μs 以下のそれぞれ小さい値を示す。

〈3・4〉 Au 電極⁽⁹⁾⁽¹⁴⁾

(1) 《 t_g 》- I 特性 図 9(a) に《 t_g 》- I 特性を示す。

$p=80, 93$ kPa のとき、《 t_g 》は 100 mA 以下で可測上限以上*に位置するが、 I の増加に伴って $I=150 \sim 230$ mA で急激に下降し、 $I=240 \sim 300$ mA の範囲で、小さい《 t_g 》 $\approx 0.2 \sim 0.5$ s に分布している。

$p=13 \sim 53$ kPa では、 $I=320$ mA 以下の領域で、ほとんどの《 t_g 》の測定点は可測上限以上*に位置していた。

(2) 《 t_a 》- I 特性 図 9(b) に《 t_a 》- I 特性を示す。

電極：陰極陽極とも Fe, 5mm ϕ 陰極水冷
ギャップの長さ：6.0mm, 直列抵抗：15k Ω
雰囲気気体： N_2 , 13~93kPa

図 8 N_2 中における Fe 電極による
《 t_a 》- I 特性

Fig. 8. Average life time of arcs for Fe in N_2 .

図 9 N_2 中における Au 電極による、
(a) 《 t_g 》- I 特性および (b) 《 t_a 》- I 特性
Fig. 9. (a) Average life time of glows and
(b) average life time of arcs for Au in N_2 .

$p=53 \sim 93$ kPa において、《 t_a 》は $I=100$ mA 以下で、可測下限以下*に位置し、 $I=100 \sim 200$ mA の間で、 I の増加に伴って可測下限*の位置から増加し始め、 $I=300$ mA で $\approx 100 \mu s$ になった。

図 10 N₂ 中における Mo 電極による《 t_g 》- I 特性Fig. 10. Average life time of glows for Mo in N₂. 図 11 N₂ 中における Mo 電極による《 t_a 》- I 特性Fig. 11. Average life time of arcs for Mo in N₂.

$p=13, 27$ kPa では $I=300$ mA 以下で, 《 t_a 》は大部分, 可測下限以下*に位置している。

〈3・5〉 Mo 電極^{(12)~(14)}

(1) 《 t_g 》- I 特性 《 t_g 》- I 特性を図 10 に示す。

個々のパラメータ p の違いによる《 t_g 》の変化の差は大変複雑であるが, $p=13\sim 93$ kPa で, 全体として《 t_g 》の測定点は 120 mA 以下の小さな I に対し, 20 s ~ 可測上限以上*の領域 I に分布する。 I の増加に伴い, 《 t_g 》は $I=$ 数十 mA を超えるところで大幅に減

図 12 N₂ 中における W 電極による《 t_g 》- I 特性Fig. 12. Average life time of glows for W in N₂.

少し, $I=$ 数十~230 mA で 2 ms ~ 可測上限*の領域 II に分布し, 更に $I=200\sim 250$ mA で大幅に減少する。 $I=230$ mA 以上で《 t_g 》が $\approx 0.2\sim 20$ ms の第三の分布領域 III を示す。

このように, 各 p の場合とも変化の傾向が一貫して類似の形をとる。

(2) 《 t_a 》- I 特性 《 t_a 》- I 特性を図 11 に示す。

《 t_a 》- I 特性についても, 各 p とも類似の変化を示す。

$p=13\sim 93$ kPa で, 小さい $I=120$ mA 以下において, 《 t_a 》の点可測下限以下*に分布する領域 I がある。 I の増加に伴って $I=$ 数十~100 mA で, 《 t_a 》は急激に数~100 μs まで増加する。そして $I=$ 数十~210 mA では, 《 t_a 》は 1~数百 μs に分布する領域 II がある。しかし, 《 t_a 》は $I=220\sim 240$ mA でまた急激に減少し, $I=240\sim 300$ mA で《 t_a 》が可測下限の位置から数十 μs までの領域 III に分布する。

〈3・6〉 W 電極⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾

(1) 《 t_g 》- I 特性 図 12 に《 t_g 》- I 特性を示す。

電極陰極陽極ともW, 4mmφ, 陰極水冷
ギャップの長さ: 6.0mm
雰囲気気体: N₂, 直列抵抗: 15kΩ
雰囲気気体の気圧(kPa)

●	83	○	27
△	80	▽	13
□	53

図 13 N₂ 中における W 電極による
《 t_a 》- I 特性

Fig. 13. Average life time of arcs for W in N₂.

$p=93$ kPa では、《 t_a 》は $I=80\sim 100$ mA および $I \approx 180$ mA で減少した以外は、大部分の点でアークが検出されずグローのみであるから、可測上限の上*にプロットした。

$p=80$ kPa における、《 t_a 》の点は $I=70$ mA 以下で可測上限の上にあり、 I の増加に対し $I \approx 80$ mA から急激に減少を始め、 $I=150$ mA で ≈ 100 μs の極小値を生じ、更に I を増すとまた急激に増加し、 $I=270$ mA では ≈ 10 s となる。

$p=53$ kPa では、《 t_a 》は $I=50$ mA で $\approx$ 数十 ms であり、 I の増加に伴って減少し $I=150$ mA に ≈ 2 ms の極小値をもち、更に I の増加に伴って増加し、 $I \approx 300$ mA ではアークが検出されずグローのみとなって可測上限の上*に位置した。

$p \approx 27$ kPa において、《 t_a 》は $I=180$ mA 以下のほとんどの点で可測上限の上*に位置した。しかし、 $I \approx 200$ mA を超えると急激にアークが生じ、《 t_a 》は減少し $I=200\sim 300$ mA で ≈ 1 ms となった。

$p=13$ kPa では、《 t_a 》は $I=240$ mA まで、ほとんどアークが存在しないので可測上限*に位置し、 $I \approx 250$ mA を超えると急にアークが現れ、大幅に減少して、 $I=260\sim 300$ mA で《 t_a 》 ≈ 3 μs の小さい値となった。

(2) 《 t_a 》- I 特性 図 13 に《 t_a 》- I 特性を示す。

$p=93$ kPa のとき、 $I=100$ mA および $I=180$ mA のときにのみ《 t_a 》が数 μs 以下となった以外にはアークが発生しなかったため、大部分の I で《 t_a 》は可測

図 14 N₂ 中におけるモデル化した
《 t_g 》- I 特性

Fig. 14. Pattern of average life time of glows for each electrodes in N₂.

下限の下*に位置する。

$p=80$ kPa では、《 t_a 》は $I=120$ mA で ≈ 400 μs の極大値となり、 $I=80\sim 250$ mA の間で山を形成する。そして、 $I=80$ mA 以下および $I=250$ mA 以上の両領域では可測下限以下*の位置にある。

$p=53$ kPa では、《 t_a 》は $I=80$ mA 以下において、可測下限以下*、 $I \approx 80$ mA から I の増加と共に上昇して $I=220$ mA で極大値の《 t_a 》 ≈ 90 μs となり、再び減少を始め、 $I \approx 300$ mA では可測下限以下*に位置した。

$p=27$ kPa では、《 t_a 》は $I=180$ mA 以下の領域で可測下限以下*に位置し、 $I=180$ mA から I の増加に伴って増加し、 $I=300$ mA において、《 t_a 》 ≈ 20 μs となっている。

$p=13$ kPa においては、 $I=300$ mA 以下の大部分の領域ではアークが見られなかったので、《 t_a 》は I が 100 mA と 260 mA で ≈ 20 μs になったのを除き、可測下限以下*の領域に位置する。

3・7 検 討

(1) 《 t_g 》- I 特性 N₂ 中、 $p \approx 13\sim 93$ kPa で、 $I=300$ mA 以下の《 t_g 》- I 特性は各電極材料で、それぞれ異なった特徴ある形を示す。

図 14 に示すように、これらの《 t_g 》- I 特性のなかで、Cu, Mo, W に対する特性は極小値 (谷) を現し、Ag, Fe, Au では減少するか、またはほぼ一定

表 1. N₂ 中の各圧力, 各電極におけるアークの平均寿命の最大値 $\max \langle t_a \rangle$ 一覧
Table 1. Maximum values of average life time of arcs ($\max \langle t_a \rangle$) for several kinds of electrodes in several kinds of pressures of N₂.

単位: μs

電極 p (kPa)	Cu	Ag	Fe	Au	Mo	W
93	3	4	0.5	40	◎ 500	▲ 5
80	3		7	60		◎ 300
73		◎ 8				
67	3					
60			◎ 20			
53	3	3.5	▲ ≤ 0.25	◎ 90	150	100
40	◎ 7					
27	1	1.5		7	◎ 500	30
13	▲ ≤ 0.25	▲ 1.5	4 (10 ⁴)	▲ 1	▲ 90	20
融点 (°C)	1,085	962	1,535	1,064	2,610	3,387

注) ◎: 各電極における $\max \langle t_a \rangle$ の一番大きい値,

▲: 各電極における $\max \langle t_a \rangle$ の一番小さい値,

値を示す。Ag だけはこれらの電極のなかで別の形をもつ。Fe と Au は値が異なるが同様の傾向を示す。そして, W の $\langle t_a \rangle$ - I 特性は p が低いとき Fe の p が高いときと似た形であり, p が高いとき Cu と似た谷をもつ形を示す。

このように分類できることは, 電極材料に共通点あるいは相違点となる何らかの原因があるものと考えられる。

(2) $\langle t_a \rangle$ - I 特性 N₂ 中では, 各電極の場合とも $\langle t_a \rangle$ は小さく, 大部分が数百 μs 以下であり, その変化は複雑であるが, 一定の傾向も見られる。

ここで, $\langle t_a \rangle$ - I 特性から, 各電極の各 p における $\langle t_a \rangle$ の最大値 $\max \langle t_a \rangle$ (実験で得られた範囲での) に関する結果を表 1 に示す。

(i) $\langle t_a \rangle$ は数百 μs から可測下限以下*の範囲に, 電極によって, また p によって異なった分布をする。

しかし, 一般にその変化の細かい規則性は見いだしにくく, かなりランダムとってよい。

(ii) Cu, Ag において, 一番大きい $\max \langle t_a \rangle$ は $\approx 7 \sim 8 \mu\text{s}$ とかなり小さい。Fe と Au において, 一番大きい $\max \langle t_a \rangle$ はそれぞれ 20 μs および 90 μs である (ただし, Fe の特別な一点を除く)。Mo, W において, 一番大きい $\max \langle t_a \rangle$ は $\approx 300 \sim 500 \mu\text{s}$ と大きい。従って, 電極材料により一番大きい $\max \langle t_a \rangle$ の値が小中大である, それぞれ三つのグループに分類することができる。

(iii) 各電極における $\max \langle t_a \rangle$ は, 必ずしも p の

最大 (93 kPa) のときに一番大きくなっていない。 $\max \langle t_a \rangle$ は p の変化に対し, Cu では $p \approx 40$ kPa, Ag では $p \approx 73$ kPa, Fe では $p \approx 60$ kPa, Au では $p \approx 53$ kPa, Mo では $p \approx 93$ kPa および $p \approx 27$ kPa, W では $p \approx 80$ kPa で, それぞれ最も大きい値を示す。

(iv) 各電極での p に対する $\max \langle t_a \rangle$ の一番小さい値は, Fe と W 以外の電極において p が一番低いときに現れている。すなわち, $\max \langle t_a \rangle$ は p が低いほど小さくなる傾向にある。

(v) この移行現象は著者らが前著論文で, 陰極部で先行して始まることを示したが⁽¹⁾⁽²⁾, これに作用する一つの要素に陰極材料の融点が考えられる。表 1 の最下段に示す各材料の融点との関係で見ると, 一番大きい $\max \langle t_a \rangle$ が 90 μs 以下の Cu, Ag, Au, Fe の低融点 (1,535°C 以下) グループと, 一番大きい $\max \langle t_a \rangle$ が 300~500 μs に達する Mo, W の高融点 (2,610°C 以上) の二つのグループに分けられる。

4. ま と め

(1) P_g について N₂ 中の $p \approx 13 \sim 93$ kPa, 電極材料 Cu, Ag, Fe, Au, Mo, W で, $I \approx 300$ mA 以下の多くの領域で, $P_g \approx 1.0$, ほとんどの領域で $P_g \geq 0.9$ である。

従って, N₂ 中では, 雰囲気気体の圧力の変化にかかわらず電極材料によらずグローである確率が非常に高い。

(2) $\langle t_a \rangle$ について N₂ 中の $\langle t_a \rangle$ は I の増加に対し, 単に減少するもの, 減少して増加し谷底を示すもの, そしてアークがほとんど現れないので減少しないで可測上限以上の一定値を示すものなどに分けられる。

単に減少するのは, Ag のとき, Cu と W の p が低いとき, Fe と Au の p が高いときであり, 谷底を示すものには, Mo のとき, Cu と W の p の大きいとき, 大きな値で減少しないものには, Fe と Au の p が低いときなどに分類できる。

Cu における $\langle t_a \rangle$ は I に対し下に凸のすり鉢形変化を行い, その極小値 $\min \langle t_a \rangle$ は p に対し, また I に対し規則的な変化を行う。 p の増加と共に $\min \langle t_a \rangle$ は減少し, $\min \langle t_a \rangle$ の I は減少する。

Ag では, $\langle t_a \rangle$ - I 特性は垂下特性を示す。 $\langle t_a \rangle$ は $I \approx 100$ mA 以下では, p が低いほど値が大きく, 減少割合が大きい。これに対し $I = 100$ mA 以上では, p が高いほど $\langle t_a \rangle$ は小さく, その減少割合が大きい。

Fe では, $\langle t_a \rangle$ は $p \approx 53$ kPa 以上で, 小さい I の

ときグローが安定で十分大きく、ある ΔI の範囲で I の増加に対し大幅に減少し、小さな値となる。 $p=14$ kPa では、 $\langle t_g \rangle$ はほとんど減少しないで大きな値を維持する。

Au では、 $\langle t_g \rangle$ は $p=80$ kPa 以上の高い p のとき比較的大きな I で、 I の増加に伴って減少する。しかし、 $p=53$ kPa 以下では、 $\langle t_g \rangle$ は $I \approx 300$ mA まで十分大きく可測上限以上*であり、減少しない。

Mo では、 $\langle t_g \rangle$ は I の増加に伴って、 p によらず類似で複雑な変化をするが、小さい I で大きな値の領域 I、中間の I で中間の値の領域 II、大きい I で小さい値の領域 III に分布する。

W では $p=93$ kPa で、 $\langle t_g \rangle$ は大部分の点で可測上限以上*と大きい。中間の p では $\langle t_g \rangle$ は I に対し谷を有する。低い p では、 $\langle t_g \rangle$ は大きい I で極端に減少して小さい値となり、Fe の p が高い場合と同じ形をしている。

(3) $\langle t_a \rangle$ について N_2 中、 $p \approx 13 \sim 93$ kPa、調べた電極の範囲全体として、 $\langle t_a \rangle$ は数百 μs 以下と小さく、 I や p に対して規則的な変化を見いだしにくい。

Cu では、 $\langle t_a \rangle$ は数 μs 以下であり、 I に対して規則性を見いだしにくい、 p が低くなるほど、また大きな I まで小さい。

Ag では、 $\langle t_a \rangle$ はやはり数 μs 以下であり、 p が低いほど小さく、 I に対してあまり変化しない。

Fe では、 $\langle t_a \rangle$ は $p \approx 60 \sim 93$ kPa で p の低下に従って少しずつ増加し、 $p=14$ kPa と 53 kPa では大部分可測下限以下*と小さい。

Au では、 $\langle t_a \rangle$ は p が高いほど I と共に増加するが、たかだか $100 \mu s$ 程度である。 p が低いほど $\langle t_a \rangle$ が小さく、またはアークが生じない。

Mo では、 $\langle t_a \rangle$ は p による差があまり見られない。Mo の $\langle t_a \rangle$ は小さい I で小さく、中間の I で他の材料の電極のときよりも大きく、大きい I で小さくなり、 I による三つの領域に分けることができる。

W では、 p が 13 kPa と 93 kPa で、 $\langle t_a \rangle$ が小さく、あるいはアークが生じない、そして中間の p で Mo の場合と似ている。

電極材料に関する $\max \langle t_a \rangle$ の値で分類すると、各材料における一番大きい $\max \langle t_a \rangle$ が $90 \mu s$ 以下であ

る Cu, Ag, Fe, Au の低融点 ($1,535^\circ\text{C}$ 以下) のグループと、一番大きい $\max \langle t_a \rangle$ が $300 \sim 500 \mu s$ である Mo と W の高融点 ($2,610^\circ\text{C}$ 以上) グループに分けることができる。

各電極材料での一番小さい $\max \langle t_a \rangle$ は Fe と W を除き最低の p (13 kPa) になる傾向を示す。

本研究にあたり、御指導いただいた成蹊大学 浅見義弘 名誉教授、菅原吉彦 名誉教授、気体や真空の問題で御援助いただいた飯島徹徳氏 (現、職業訓練短大)、高橋 勉氏、その他お世話になった多くの方々に心から感謝の意を表します。

(平成元年2月16日受付, 同元年6月13日再受付)

文 献

- (1) 杉沼・野垣: 「グロー放電とアーク放電との間のフリップフロップ形移行現象」, 電学論 A, **93**, 83 (昭48-3)
- (2) 野垣: 「グロー放電とアーク放電との間のフリップフロップ形移行現象における酸素の効果」, 同上 A, **105**, 45 (昭60-2)
- (3) 杉沼・野垣: 「高気圧 N_2 中の Ag 電極グロー・アーク間フリップフロップ形移行現象」, 昭52電気学会全大, No.161
- (4) 杉沼・野垣: 「 N_2 中の Ag 電極によるグロー放電とアーク放電との間のフリップフロップ形移行現象」, 昭53同上, No.106
- (5) 野垣・杉沼: 「 N_2 中 Ag 電極によるグロー・アーク間フリップフロップ形移行現象の諸特性」, 電気学会放電研資, ED-78-83 (昭53)
- (6) 野垣・杉沼: 「高気圧 N_2 中の Cu 電極によるグロー・アーク間のフリップフロップ形移行現象」, 昭54電気学会全大, No.179
- (7) 野垣・杉沼: 「 N_2 中の Cu 電極によるグロー放電とアーク放電との間のフリップフロップ形移行現象」, 昭54電気学会東京支大, No.17
- (8) 野垣・杉沼: 「高気圧 N_2 中の Fe 電極によるグロー放電とアーク放電の間のフリップフロップ形移行現象」, 昭55電気学会全大, No.178
- (9) 野垣・杉沼: 「 N_2 中 Au 電極のグロー・アーク間フリップフロップ形移行現象」, 昭56同上, No.181
- (10) 野垣・杉沼: 「 N_2 中, Fe 電極のグロー・アーク間フリップフロップ形移行現象に関して」, 昭56同上, No.182
- (11) 野垣・杉沼: 「 N_2 中の Fe および W 電極におけるグロー・アーク間のフリップフロップ形移行現象」, 電気学会放電研資, ED-81-52 (昭56)
- (12) M. Nogaki & Y. Suginuma: "Flip-Flop Type Transition between Glow and Arc Discharges for Molybdenum Electrodes in N_2 ", Proceedings of the 6th Symposium on Ion Sources and Ion-Assisted Technology, Tokyo, p.1 (1982)
- (13) 野垣・杉沼: 「モリブデン電極 (Mo) を用いた N_2 中のグロー・アーク間フリップフロップ形移行現象」, 昭58電気学会全大, No.171
- (14) 野垣・杉沼: 「 N_2 中の FFTGA における二三の特徴」, 昭58同上, No.65
- (15) 電気学会編: 放電ハンドブック (改訂新版) (昭49)