



## 直流機の整流火花について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-07-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 松田, 敏彦, 丹治, 辰男 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3480">http://hdl.handle.net/10258/3480</a>

# 直流機の整流火花について

松田敏彦・丹治辰男

## On Commutator Sparking in Electrical d-c Machines

Toshihiko Matsuda and Tatsuo Tanji

### Abstract

The sparks on the d-c machine, particularly when they are arcs, produce remarkable damage on the brushes and commutator. It is, therefore, important to have a means to calculate the energy dissipated in the arc,  $W_a$ , as a function of the main parameters of commutation. This paper presents such a means and some experimental results.

A formula of the arc duration time is derived from the equation of the commutation at the instant that the current-carrying brush-segment contact is interrupted arcs are ignited. The current at which the arc ignites,  $I_a$ , is evaluated from the formula with oscillograms of arc voltage.

Results of the experimental work are:

- (1) The value of the average reactance voltage at which the arc ignites is about 0.28-0.30 volts.
- (2) The surface roughness of the commutator as well as  $W_a$  remarkably increase when the average reactance voltage,  $e_r$ , is above 0.30-0.35 volts.
- (3) The values of current  $I_a$  increase in proportion to  $e_r$  and are distributed over the range from about 1.0 to 3.2 amps under the anode brushes.

### I. 緒 言

整流火花はブラシおよび整流子の摩耗や荒損の主原因となるため、整流の良否を火花発生の程度を表わす火花号数<sup>1)</sup>をもって示すことが一般に行なわれている。この火花号数と火花の実害との関係は明確なものではなかったが、近年火花号数の科学的裏付を行ない、火花の実害を明らかにする研究成果が報告されている<sup>2),4)</sup>。R. Holm によるとブラシの摩耗は火花によって運ばれる電気量に比例する項と整流子の荒損による機械的摩耗の項との和として与えられ<sup>3)</sup>、整流火花の大部分がアーク放電となる高火花号数状態時にはアークの燃焼作用による摩耗が非常に大きくなることが知られている<sup>4)</sup>。従って整流アーク放電の発生条件、アーク放電エネルギーなどと整流の主要条件との関係を検討し、算定式を得ることが望まれる。

整流アーク放電によって消費されるエネルギーは、 $W_a = V_a I_a t_a / 2$  で与えられる。従ってアーク放電エネルギーの値はアーク電流初期値  $I_a$ 、およびアーク放電時間  $t_a$  の算定または測定によって得られる。アーク放電時間については、すでに K. Binder, R. Holm など<sup>4)~6)</sup> の報

告があり、またアーク放電エネルギーについても R. Holm など<sup>4),6)</sup>の式が報告されているが、それぞれの式はその論理、表現形式および特徴を異にしている。またアーク電流初期値  $I_a$  については J. E. Diehl および R. Holm<sup>7),8)</sup>の報告があり、アーク放電発生条件については K. Binder<sup>5)</sup>、稲垣・伊東<sup>8)</sup>の報告、林・内藤<sup>9)</sup>、著者らの一人<sup>10)</sup>の報告がある。林・内藤、著者らの一人の方法は、脈流電流による銅—黒鉛のすり接触  $V-I$  特性はほぼ直線となるとして、ブラシ幅と整流子片幅が等しい場合の整流方程式を解いて整流火花発生条件を検討したものである。ブラシすり接触  $V-I$  特性の非直線性の整流に及ぼす効果<sup>12),13)</sup>は重要であるが、線形化された整流方程式による解析は整流過程とその基本条件との関係を明確に示す点に特徴を有する。

本報告は線形化された整流方程式を基礎とし、アーク放電電流初期値を整流方程式の解から得られるブラシ接触電圧降下値から算出する方法について述べ、アーク放電時間をアーク放電発生瞬時の整流コイル中に蓄えられたエネルギーの関係式から求めている。整流試験機による実験から、整流火花数とアーク放電時間および整流子表面荒損度との関係を求め、高火花数数の整流となるに従い急速に実害度を増すことも確認した。また整流アーク電流初期値およびアーク発生限界リアクタンス電圧値についての検討をも合せ行なっている。

## II. 整流中のコイルの短絡電流と整流火花

直流機の電機子において、ブラシによって短絡されるコイル（以下整流コイルという）の電流を表わす微分方程式すなわち整流方程式は、図-1においてブラシと整流子間の抵抗をオーム抵抗となし、かつブラシ幅は整流子セグメント幅と等しく、片間マイカの厚みを零と仮定すると次式となる。

$$L \frac{di}{dt} + Ri + M_f \frac{di_f}{dt} + M_r \frac{di_r}{dt} + v_1 - v_2 + E_c = 0 \quad (1)$$

また整流コイルに電磁結合する主磁極回路および整流コイルと並列にある電機子回路の電圧平衡方程式は次式となる。

$$L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f + M_f \frac{di}{dt} + R_f I_f = E_f \quad (2)$$

$$L_r \frac{di_r}{dt} + R_r i_r + M_r \frac{di}{dt} - v_1 + v_2 = 0 \quad (3)$$

$$v_1 = i_1 R_1 = (I + i) R_b T / (T - t) \quad (4)$$

$$v_2 = i_2 R_2 = (I - i) R_b T / t \quad (5)$$

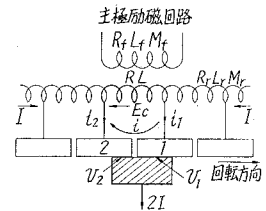


図-1 整流中のコイルの作る回路

ここでブラシは整流子から離れることなく全面接触をすると仮定している。整流コイル短絡電流は(1)、(2)および(3)式を連立させて解くと得られるが、簡単のため整流コイル抵抗および(2)、(3)式の効果を見捨てると(6)式を得る<sup>9)</sup>。

$x=t/T, y=i/I, c=E_c/2IR_b, r=1/b=(2LI/T)/2IR_b$  において

$$y = 1 - 2x + 2 \left( \frac{1-x}{x} \right)^b \int_0^x \left( \frac{x}{1-x} \right)^b (1-bc) dx \quad (6)$$

ブラシ整流子片 1 との間の電圧降下  $v_1$  の値が 3~4 [V] を越えるとブラシに火花が生ずることが知られているが<sup>8),14)</sup>, この値は (4) および (6) 式から

$$v_1 = (I+i) \frac{R_b T}{T-t} = IR_b \frac{1+y}{1-x}$$

である。また  $v_{1R} = v_1/2IR_b$  において基準化すると次式となる。

$$v_{1R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1+y}{1-x} \quad (8)$$

基準化されたリアクタンス電圧  $r=2$  の場合の基準化短絡電流値  $y$  および  $v_{1R}$  を 図-2 および 図-3 に示す。ブラシ全面の接触電圧降下  $2IR_b$  はブラシ材質, 電流波形およびブラシ極性により異なる。整流中のブラシ下に流れる電流は主電流平均値上に尖頭電流を重畳したものと考えられ, このパルス重畳電流によるブラシ接触  $V-I$  特性 (過渡特性と呼ぶ) は, 著者らの実験<sup>11)</sup> によると電気黒鉛質ブラシ, 50Hz 半波整流波重畳電流に対し, 図-4 の如くなりほぼ直線となる。過渡特性は電流, ブラシ材質, すり接触条件などにより変わり,  $R_b$  の一般的な値は定められない。図-4 の例では  $R_b \approx 0.1, 0.075, 0.065$  である。

$$v_1 = 2IR_b v_{1R} \quad (9)$$

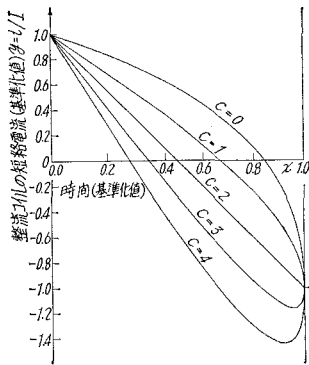


図-2 整流曲線  $r=2$

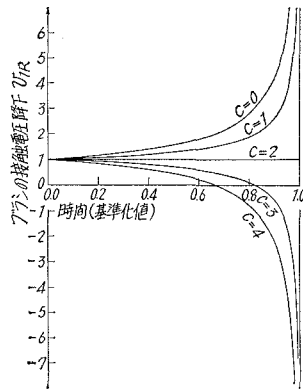


図-3 基準化ブラシ接触電圧値  $r=2$

この  $v_1$  がブラシと整流子片の接触が開離する瞬間において 3~4 [V] となると加熱火花を生じ, 続いてアーク放電に移行するものと考えられる。すなわち整流火花放電過程は 図-5 のような経過を取る。すなわち時刻  $t_0$  においてブラシ後端と整流子片 1 との接触が開き,  $t_1$  においてアーク放電が始まる。期間  $\Delta t_a = t_1 - t_0$  は  $t_0$  において接触点に高温陰極点が形成されてから, 陽イオン発生をうながして完全なアークを形成するまでの時間おくれである。 $t_1$  で点弧

し  $t_2$  までアークが継続する。 $t_a$  は後述のように一般に数  $10 \mu s$  に達するが、 $\Delta t_a$  はこれに比べてきわめて短かく  $1 \mu s$  以下である。実験 1 の 図-9 にアーク電圧波形の一例を示した。上記アーク電圧波形はブラシ極性に関係なく、アークの極性により一意的に決定されるものであるがアーク電圧はその放電期間中はほぼ一定値を示す。

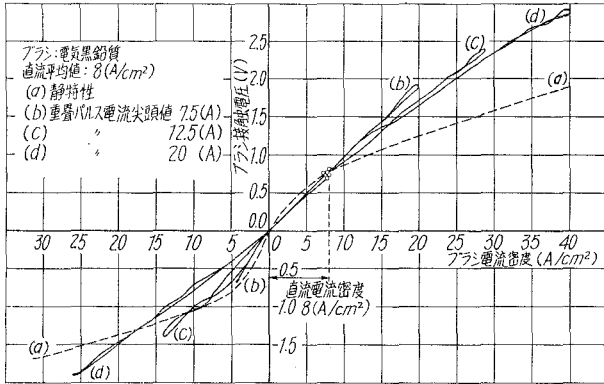


図-4 ブラシ接触過渡 V-I 特性

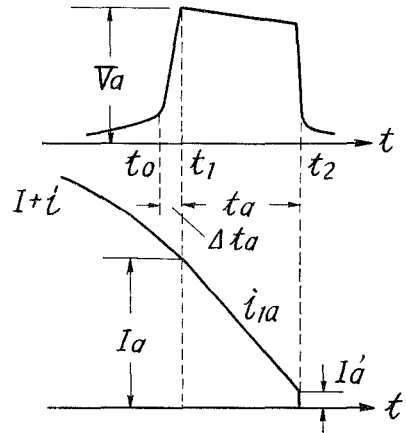


図-5 整流アーク放電過程

従って

$$V_a = L \left| \frac{di_{ia}}{dt} \right| = L \frac{I_a}{t_a}, \quad \left| \frac{di_{ia}}{dt} \right| = \frac{I_a}{t_a} = \text{const.} \quad (10)$$

となる。すなわち、アーク放電電流  $i_{ia}$  は 図-5 に示すように初期値  $I_a$  より直線的に減少し最小アーク電流値  $I_a'$  にて消滅する。

### III. アーク放電電流と放電継続時間

#### 1. アーク放電電流初期値

ブラシと整流子との接触は整流子の偏心、ブラシの弾性振動などにより多少なりともブラシの跳躍をきたし、接触面円弧も整流子のそれとは異なっているものである。従って、放電電流初期値を数式により算定することは非常に困難であると考えられるが、整流方程式により考察してみる。

II で述べたように、ブラシはそのすり接触電圧降下が  $3 \sim 4$  [V] に達すると加熱火花を生じ、続く開離においてアーク発生条件が満足されていると、電圧は飛躍的に  $12 \sim 24$  [V] となってアーク放電に移行する。電圧  $4 \sim 10$  [V] の範囲は不安定領域であって、この値を取る火花は殆んどない<sup>8)</sup>。従ってブラシ電圧降下  $v_1 > 4$  [V] をアーク放電発生条件とする。すなわち

$$v_1 = 2IR_b v_{1r} = IR_b(1+y)/(1-x) > 4 \quad (11)$$

でアーク放電を生ずる。(6) 式を代入して

$$1 + \frac{(1-x)^{b-1}}{x^b} \int_0^x \left(\frac{x}{1-x}\right)^b (1-bc) dx = \frac{2}{IR_b} \quad (12)$$

を満足する  $x$  を  $x_1$  とし、 $x_1$  における  $y$  の値を  $y_c = i_c/I$  とすると、アーク放電電流初期値は次式で与えられる。

$$I_a = I(1+y_c) \quad (13)$$

これらの関係を 図-6 に示す。また (10) 式から  $I_a = V_a t_a / L$  である。アーク放電時間  $t_a$  を実測し、多くの測定値から  $I_a$  を求めて検討する必要がある。実験 3 において、この  $I_a$  を求めているが、電機子回路電流の 10~30% の値を得ている。(13) 式の  $y_c$  との関係については実験を進行中である。

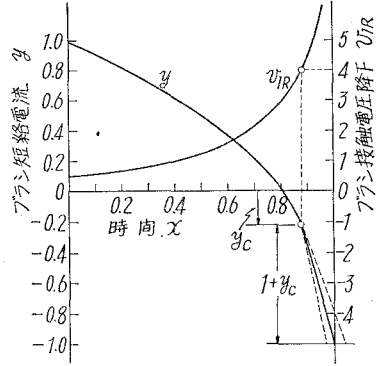


図-6 ブラシ接触電圧とアーク電流初期値

$$v_1 = 2IR_b, v_{1R}, R_b = 0.1 [\Omega], I = 10 [A]$$

## 2. アーク放電電流

図-1 で整流の終期  $x_1 = t_1/T$  でアーク放電が生じた時、ブラシとセグメント 1 および 2 との間の接触電圧が次式で与えられるとする。

$$v_1 = i_1 R_1 = i_{1a} R_1 = V_a \approx \text{const.} \quad (15)$$

$$v_2 = i_2 R_2 = V_0 \approx \text{const.} \quad (16)$$

(1), (3) 式にこれらを代入し、 $i = i_a$ ,  $i_{1a} = I + i_a$  とおいて

$$L \frac{di_a}{dt} + R i_a + M_f \frac{di_f}{dt} + M_r \frac{di_r}{dt} + V_a + E_c = 0 \quad (17)$$

$$L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f + M_f \frac{di_a}{dt} + R_f I_f = E_f \quad (18)$$

$$L_r \frac{di_r}{dt} + R_r i_r + M_r \frac{di_a}{dt} - V_a = 0 \quad (19)$$

(18) 式において、 $R_f I_f \approx E_f$  であり、 $R_f i_f$  は小さい値であるので省略すると

$$M_f \frac{di_f}{dt} = - \frac{M_f^2}{L_f} \frac{di_a}{dt} \quad (20)$$

また (19) 式においても同様に  $R_r i_r$  を省略すると次式となる。

$$M_r \frac{di_r}{dt} = - \frac{M_r^2}{L_r} \frac{di_a}{dt} + \frac{M_r}{L_r} V_a \quad (21)$$

(17) 式に (20), (21) 式を代入すると

$$\left( L - \frac{M_f^2}{L_f} - \frac{M_r^2}{L_r} \right) \frac{di_a}{dt} + R i_a + \left( 1 + \frac{M_r}{L_r} \right) V_a - V_0 + E_c = 0 \quad (22)$$

ここで  $L_c = L(1 - k_1 - k_2)$ ,  $k_1 = M_f^2 / LL_f$ ,  $k_2 = M_r^2 / LL_r$  とおいて

$$i_{ia} = \frac{V_0 - (1 + M_r/L_r) V_a - E_c}{R} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L_e}(t-t_1)} \right] + I_a e^{-\frac{R}{L_e}(t-t_1)} \quad (23)$$

(23) 式で  $(R/L_e)(t-t_1)$  は極めて小さい値であるので次の近似式を得る。

$$i_{ia} = I_a - \left[ \frac{(1 + M_r/L_r) V_a - V_0 + E_c}{R} + I_a \right] \frac{R}{L_e} (t-t_1) \quad (24)$$

アーク放電は  $i_{ia}$  がアーク放電最小電流値となるまで継続する。アーク放電最小電流値は R. Holm の測定値<sup>15)</sup> によると、銅陰極の場合 0.43 [A]、黒鉛陰極の場合 0.01 [A] である。これらの値はアーク電流初期値に比べ非常に小さく無視できる考え、 $i_{ia}=0$  となる時間  $t_a$  をアーク放電時間として求めると

$$t_a = \frac{L_e I_a}{(1 + M_r/L_r) V_a - V_0 + E_c + R I_a} \quad (25)$$

を得る。これを (24) 式に代入し、アーク発生時刻  $t_1$  を時間の原点とすると

$$i_{ia} = I_a \left( 1 - \frac{t}{t_a} \right) \quad (26)$$

を得る。(10) 式の  $L$  は実効インダクタンス  $L_e$  に当るものである。

#### IV. アーク・エネルギーとアーク放電時間

アーク発生時における整流回路のエネルギーについて考察する。

(17), (18) および (19) 式から

$$L_e \frac{di_a}{dt} + R i_a - \frac{M_f^2}{L_f} i_f - \frac{M_r^2}{L_r} i_r + \left( 1 + \frac{M_r}{L_r} \right) V_a - V_0 + E_c = 0 \quad (27)$$

この式に  $i_a$  を乗ずると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} L_e i_a^2 \right] &= \frac{M_f^2}{L_f} i_f i_a + \frac{M_r^2}{L_r} i_r i_a \\ &\quad - \left( 1 + \frac{M_r}{L_r} \right) V_a i_a - (R i_a + V_0) i_a - E_c i_a \end{aligned} \quad (28)$$

となる。上式右辺第一項は主極回路と、第二項は電機子回路と整流コイルとの間にエネルギーが授受されることを示すものである。第三項はアーク放電電力、第四項は ohmic loss である。第五項は補極磁束との間の mechanical power を示す。次にこの式を  $i_a$  が (26) 式で与えられらるとして、アーク放電時間について積分すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} L_e I_a^2 &= \frac{M_f^2}{L_f} \int_0^{t_a} i_f i_a dt + \frac{M_r^2}{L_r} \int_0^{t_a} i_r i_a dt \\ &\quad + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{M_r}{L_r} \right) V_a I_a t_a - \frac{1}{2} R I_a^2 + \frac{1}{2} (V_0 - E_c) I_a t_a \end{aligned} \quad (29)$$

この式で右辺第一、第二項の積分は  $i_f$  および  $i_r$  の値を知る必要があり非常に複雑であ

る。R. Holm によるとアークに消費されるエネルギーは整流回路に蓄えられた電磁エネルギー  $(1/2)L_e I_a^2$  の一部分であるとされ<sup>6)</sup>、多くの部分が主極回路および電機子回路へ移行するといわれている。右辺第一項、第二項はこれを示す。しかし Holm の論文に対する Coho の討論によると<sup>6)</sup>、隣接する電機子短絡コイルの効果の方がより大きいと述べられている。このことについては目下検討中である。アーク放電時間は (29) 式から得られる。(25) 式は右辺第一項、第二項を省略した場合に当る。かつ整流コイル抵抗  $R$  をも無視すると

$$t_a = \frac{e_r(1+y_c) W_b}{2[(1+M_r/L_r) V_a - V_0 + E_c] V_c} \tag{30}$$

を得る。ここで  $I_a = I + i_c$ 、 $e_r = L_e I/T$  である。アーク放電時間  $t_a$  はリアクタンス電圧  $e_r$  およびブラン幅  $W_b$  に比例し、整流子周速  $V_c$  が大きくなると短いことが知られる。 $t_a$  が知れるとアーク・エネルギーは次式で得られる。

$$W_a = \frac{1}{2} V_a I_a t_a = \frac{1}{2} \frac{V_a^2 t_a^2}{L_e} \tag{31}$$

### V. 整流火花に関する二、三の実験

直流機の整流回路を模擬する整流試験機には三通りの回路がある。今、二極で補極を有せず、ブラン幅は整流子片幅に等しく、幾何学的に対称な位置に取り付けられており、巻線もまた対称である直流機の等価回路は図-7 のようになる。この等価回路から図-8(a) の NEMA ブラン試験規格 (CBI-1951) の回路<sup>16)~18)</sup>、図-8(b) のいわゆる宗宮式回路<sup>19)</sup> および図-8(c) の K. Binder の報告に見られる回路の三通りの回路が実現される。(a) の回路は2個のブ

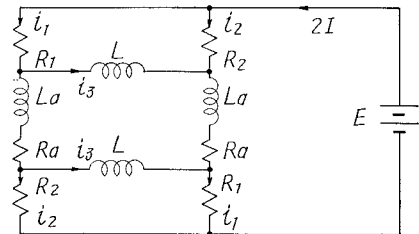
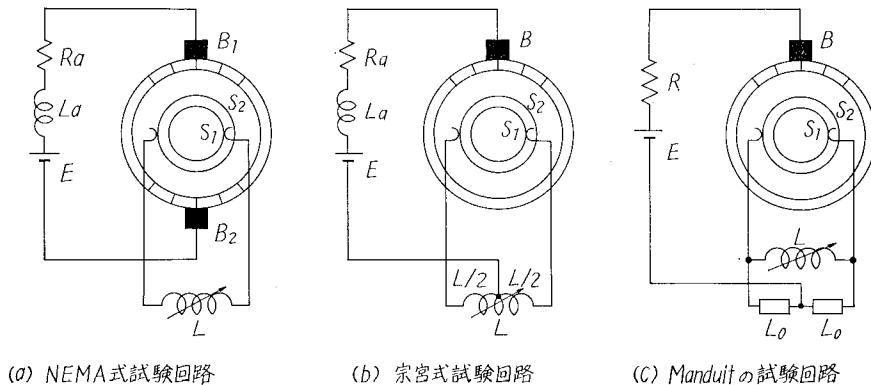


図-7 直流機の等価回路



(a) NEMA式試験回路

(b) 宗宮式試験回路

(c) Manduitの試験回路

図-8 等価整流回路



ラシ  $B_1, B_2$  が幾何学的な対称性をもたないことのために、2 個のブラシの整流が同時に完了しないことに難点があるといわれている。(b) の回路は等価回路の対称性に注目し、前記の不都合を改良したもので、宗宮氏その他によって提案されたものである。(c) の回路は原理的には Manduit によって発表されたもので、図-7 の二つの  $L_a, R_a$  電機子回路には常に同一電流が流れることから、ブラシおよび整流コイルの一組を省略したものである。すなわち  $L_a \gg L$  であればよいことになる。

実験には2種の試験機を用いている。実験1および2に用いた試験機1は整流子の直径120 [mm]、整流子片幅6.5 [mm]、片間マイカ厚さ0.8 [mm]、整流子片長さ45 [mm]、整流子片数52枚である。反動型ブラシ保持器をもち、ブラシすり接触面積  $6.8 \times 20$  [mm<sup>2</sup>]、3個のスリップリングを取りつけてある。模擬回路は図-8(b)を用いた。実験3に用いた試験機2は整流子が直径160 [mm]、整流子片幅4 [mm]、整流子片長さ60 [mm]、整流子片数115枚である。ブラシ保持器は垂直、複式バネ型でブラシ寸法は  $12.5 \times 2.0 \times 32$  [mm<sup>3</sup>] である。ブラシ幅を整流子片幅に等しくするためセグメント3枚ずつ一組に短絡し、一組おきに短絡スリップリングに接続してある。

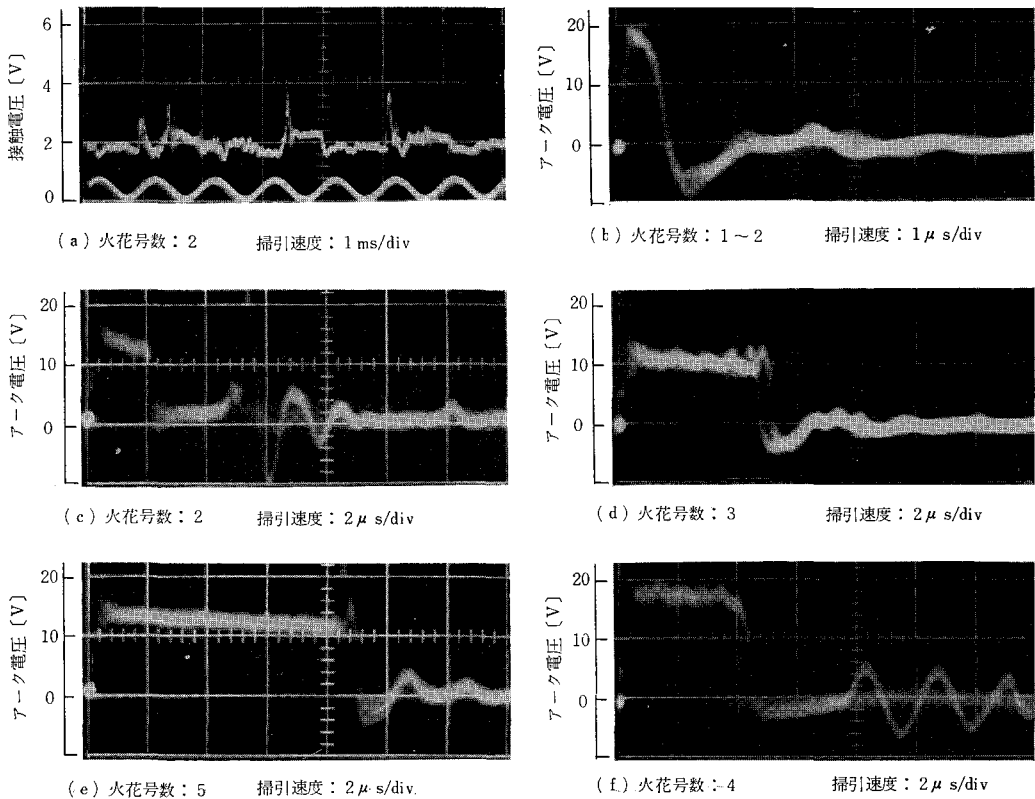


図-9 ブラシ接触電圧降下およびアーク放電波形

実験 1. アーク放電時間と火花号数

**火花放電波形** 目測火花号数に対する火花放電波形のオシログラム例を図-9に示す。全整流周期の電圧降下波形は(a)図のようで、ブラシ後端の電圧尖頭値が約3.2Vを越えると2~3号火花が目測される。このとき早い掃引とすると(b),(c)図のような短いアーク波形が得られる。(d)図および(e)図は3号および5号火花のアーク放電波形である。(f)図はブラシ負極性アーク放電波形で、正極性の放電電圧が約12Vであるのに対し、約18Vの放電電圧を示し、アーク消滅時の電圧ピークのないのが特徴である。

**火花号数とアーク放電時間** 図-8(b)の模擬回路についてのアーク放電時間算定式は(24)式から次式となる。

$$t_a = \frac{2Li_c}{V_a - V_0} = \frac{2LIy_c}{V_a - V_0} \tag{32}$$

測定は試験機1によって行ない、模擬回路図-8(b)のL,Iおよび回転数を変え、各測定につき十分に予備摺動を行なった後、オシロスコープにより得られた火花波形よりt<sub>a</sub>を求めた。その結果を図-10~図-13に示す。

(1) 火花号数sとアーク放電時間t<sub>a</sub>との関係は、一つの測定に対しては滑らかな曲線となる。s=2~4の範囲で、(s-1)∝t<sub>a</sub><sup>1/n</sup>, s=5~8の範囲で(s-1)∝t<sub>a</sub>とみることができる。一方(10)式,(31)式から、I<sub>a</sub>∝t<sub>a</sub>, I<sub>a</sub>∝W<sub>a</sub><sup>1/2</sup>であるから

$$\begin{aligned} (s-1)^{2n} &\propto W_a & s = 2\sim 4 \text{ の範囲} \\ (s-1)^2 &\propto W_a & s = 5\sim 8 \text{ の範囲} \end{aligned}$$

の関係が知られる。nの値については、より定量的測定により求めなければならないが、測定結果から1≤n≤2, 平均1.46を得た。すなわち極端に火花が大きい範囲ではアーク・エネルギーは火花号数の3乗に、とくに火花の大きいときは火花号数の2乗に比例することがわかる。火花の実害もこれに比例するものと考えられる。

表-1 火花号数とアーク放電時間およびy<sub>c</sub>の値

火花号数 s	整流コイル インダクタンス 2L [μH]	ブラシ電流 I [A]	アーク放電 時間実測値 t <sub>a,m</sub> [μs]	$\frac{2LI}{V_a - V_0}$ [ms]	アーク放電 開始短絡電流 y <sub>c</sub> = i <sub>c</sub> /I	アーク放電 ブラシ極性
8	602	10.5	60	0.35	0.17	正
8	470	12.0	37	0.31	0.12	"
8	602	5.8	41	0.29	0.14	負
8	602	4.4	13	0.15	0.09	正
8	565	12.0	60	0.57	0.11	負
8	602	9.4	42	0.47	0.09	"
7	340	12.0	45	0.23	0.19 <sub>5</sub>	正
7	240	12.0	25	0.24	0.19 <sub>6</sub>	負

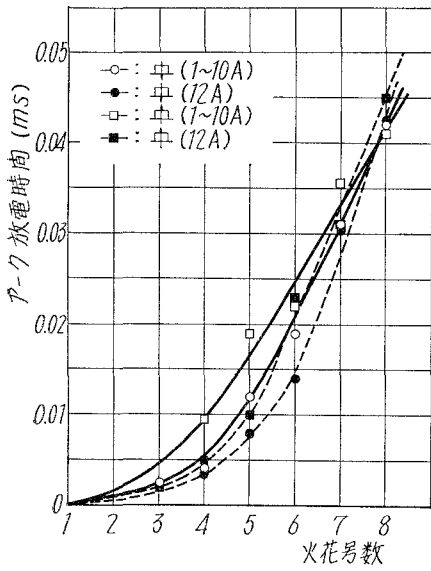


図-10 火花号数とアーク放電時間  
 整流子面: 銅色  
 回転数: 360 rpm

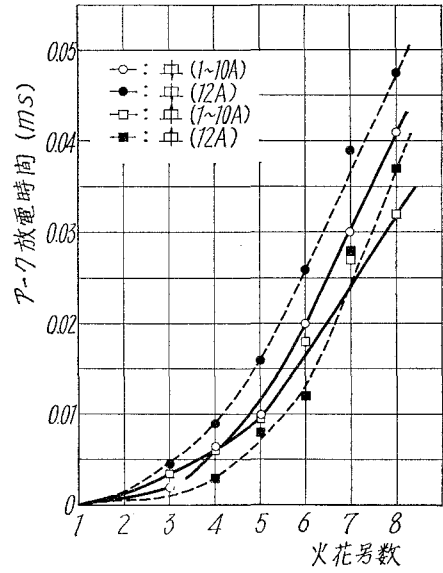


図-11 火花号数とアーク放電時間  
 整流子面: 銅色  
 回転数: 360 rpm

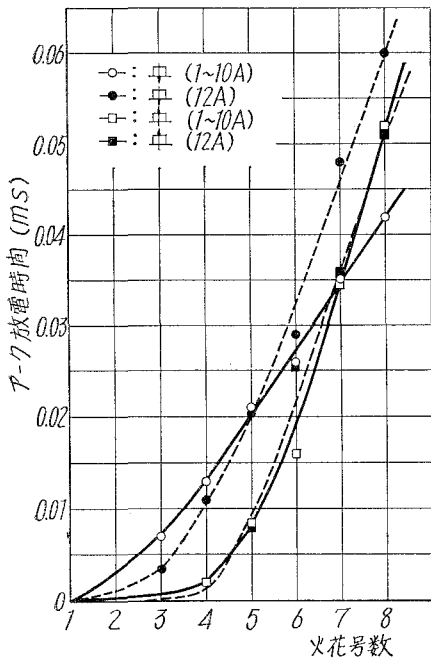


図-12 火花号数とアーク放電時間  
 整流子面: 黒化  
 回転数: 360 rpm

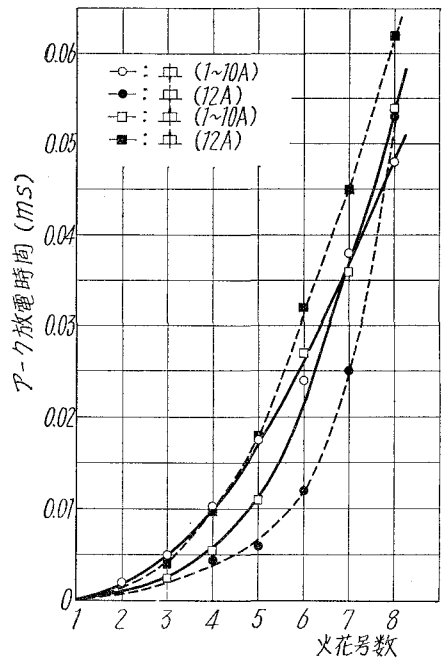


図-13 火花号数とアーク放電時間  
 整流子面: 黒化  
 回転数: 900 rpm

(2) 同じ火花号数について回転数の低い方が  $t_a$  が大きい。ブラシ摩耗が接触面中央へ進むと火花号数が小さく観測され、また黒化した整流子面の場合  $t_a$  が大きくなる傾向がみられた。

(3) アーク放電時間  $t_a$  の実測値と (31) 式を用いて計算すると、アーク開始電流値の概算を行なうことができる。すなわち  $t_a$  の実測値を  $t_{am}$  とすると

$$y_c = \frac{i_c}{I} = \frac{(V_a - V_0) t_{am}}{2LI}$$

である。アーク電圧を正ブラシで 13 [V]、負ブラシで 19 [V] として計算した結果を表-1 に示す。 $I_a$  は  $I$  (4~12 A) の 10~20% であることが知られる。

実験 2. 火花号数と整流子表面アラサとの関係

火花号数と火花の実害との関係を整流子表面のアラサにより求めた。すなわち整流子表面アラサ計により測定し、火花号数との関係を求めた。表面アラサは最大高さ  $H_{max}$  にて表わす。測定はまず整流子表面にサンドペーパーをかけ、引続き草砥をかけ、それから 50 時間摺合せをした後実験を始めた。また一つの実験についてほぼ 40 時間摺動を続け、次の実験は前の実験の面をそのまま用いた。実験中火花号数が大きくなるにつれてセグメントの出口側より次第に黒化が進み、8 号火花の時にはセグメントの幅の半分

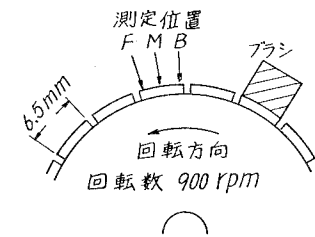


表-2 火花号数とブラシ-整流子摺動条件

火花号数	電 流 I [A]	インダク タンス L [ $\mu$ H]	摺動時間 [hr]	測定位置	図中の表示
1I	0	0	0	F, M, B	—————
1II	0	0	50	”	—————
1III	1	19	40	”	—————
1III	12	16	40	”	- - - - -
2	1	204	40	”	—————
2	12	21	40	”	- - - - -
3	1	248	40	”	—————
3	12	23	40	”	- - - - -
4	1	—	40	”	—————
4	12	33	40	”	- - - - -
5	2	225	43	”	—————
5	12	39	40	”	—————
6	28	231	40	”	—————
6	12	51	40	”	- - - - -
7	2.8	422	42	”	—————
7	12	69	42	”	- - - - -
8	2.8	602	40	”	—————
8	12	128	28	”	- - - - -

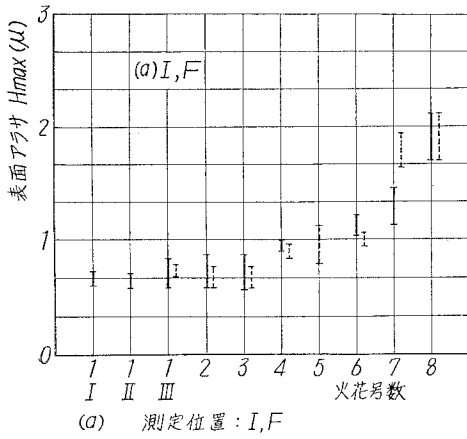


図-15 (a)

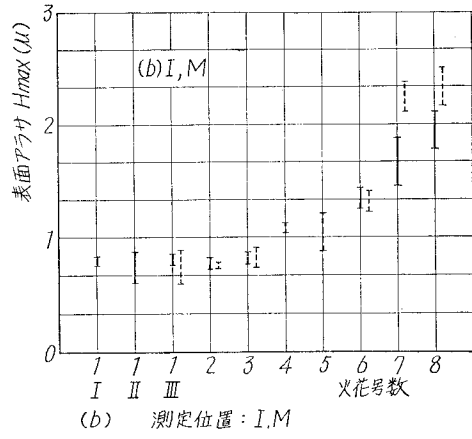


図-15 (b)

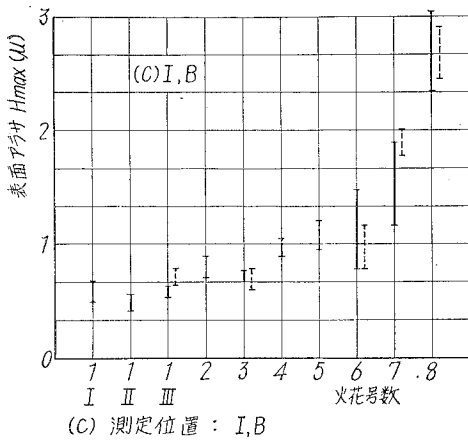


図-15 (c)

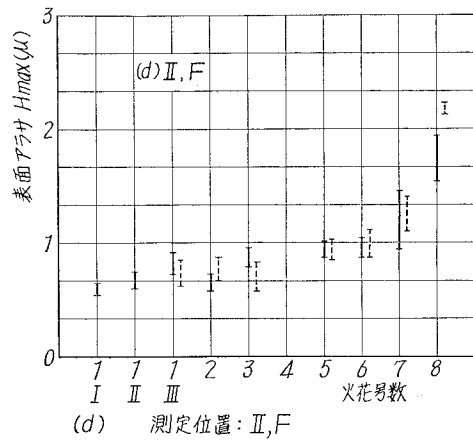


図-15 (d)

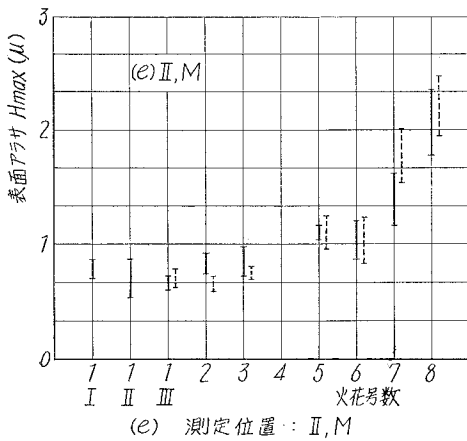


図-15 (e)

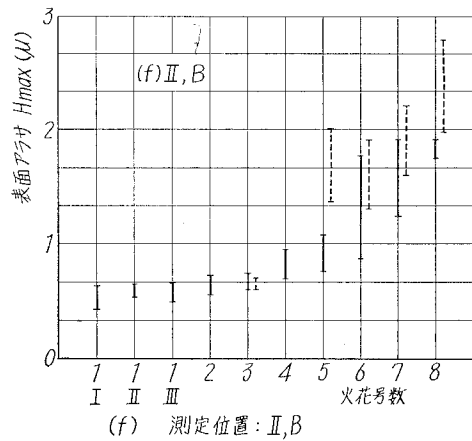
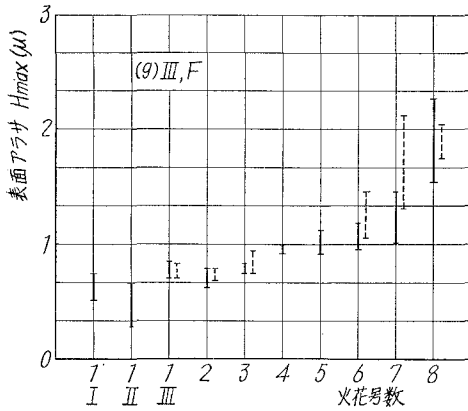
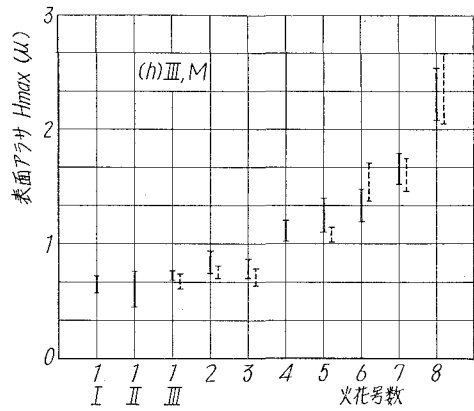


図-15 (f)



(g) 測定位置: III, F

図-15 (g)

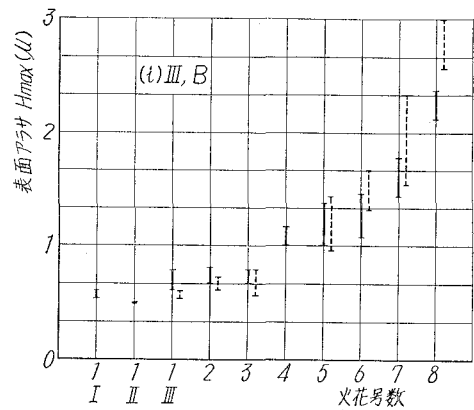


(h) 測定位置: III, M

図-15 (h)

は測定を行なった整流子片が異なることを示している。

測定結果を図-15(a)~(i)に示す。無火花状態すなわち火花号数1から火花号数3までは、表面アラサに差はなく  $H_{max} \approx 1.5 [\mu]$  である。3号火花まで火花の実害がないことが知られる。事実微小火花状態は整流子表面の適度な皮膜の成長をうながし、良好な摺動状態を得るといふ報告もある。火花号数が4号以上になると、火花号数の増加に対し表面アラサは放物線的に増加する。アラサはB, M, Fの順に大きく、8号火花状態では、B点で  $H_{max} \approx 2.7 [\mu]$ ,



(i) 測定位置: III, B

図-15 (i)

図-15 火花号数と整流子表面アラサの関係

M点で  $H_{max} \approx 2.3 [\mu]$ , F点で  $H_{max} \approx 2.0 [\mu]$  となっている。図中アラサ値のばらつき表示  $\text{——}$  は電流値小の場合、 $\text{-----}$  は電流値大の場合であるが、電流大の場合の方がアラサ、ばらつき共に大きい傾向が見られる。

### 実験3. アーク放電継続時間とアーク発生限界リアクタンス電圧

IVにおいて導いたアーク放電時間算定式(30)は、基礎方程式を線形化していること、ブラン振動など機械的な条件、主極回路など隣接短絡回路の効果などが明らかでない点に問題がある。これを検討するにはアーク電流初期値を算定する必要がある。

試験機2を用い、図-8(c)の等価整流回路を用いた。従って短絡コイル電流は  $I$  から  $-I$  までの変化をする。実験方法は、スート系無含侵ブラシ ( $12.5 \times 20 \times 32 [\text{mm}^3]$ ) を、0番エメリー紙で研磨した整流子に摺動させ、電流  $1 [\text{A}/\text{cm}^2]$  で40時間すり合せを行なった。室温は  $22 \sim$

24 [°C], 湿度 70~80% 位であった。ブラシと整流子片 1 との間の接触電圧降下をシンクロスコープにて観測, 写真撮影し, アーク放電時間  $t_a$  を求めた。各回路条件について 20~30 分の予備運転を行ない, 小火花の条件から大火花条件へと実験を進めた。簡単のため, ブラシ全面電圧降下  $V_0 = 2IR_b = 1$  [V] とし, アーク電圧  $V_a$  は正ブラシの場合 13 [V], 負ブラシの場合 19 [V] として計算に用いた。回路条件は平均リアクタンス電圧  $e_r = 0.35$  [V] を基準とし<sup>8)</sup>, 回転数は 600, 800, 1,000 [rpm], 電流  $I = 10, 15, 20$  [A] のそれぞれの組合せについて, 整流コイルのインダクタンスを  $L = 2 \sim 20$  [ $\mu$ H] に変化させた。各条件につき火花号数を記録し, 平均 5 枚のアーク電圧波形の写真撮影を行なった。また試験機にはオシロ観測用同期装置が附されており, 肉眼によるアーク放電時間平均値の測定も行なった。

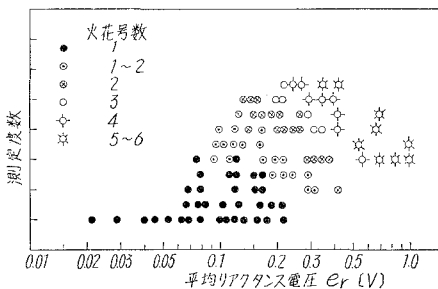
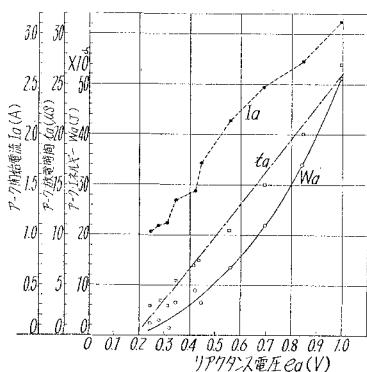


図-16 は平均リアクタンス電圧と火花号数との測定例である。無火花リアクタンス電圧は 1.8~2.0 [V] 以下である。2.0 [V] 以下に 2, 3 号火花の発生が以外に多いが実験期間中の条件が一樣でないことによるものであろう。2, 3 号火花は加熱火花および接触開離時の電圧振動の電圧ピ

図-16 リアクタンス電圧と火花号数



ークがわずかつぶれるような放電が多く, 一般に火花電圧波高値が 3.2~4 [V] である。アーク放電は 4 号火花から生じているとすると, そのリアクタンス電圧は 2.8 [V] 以上と見られる。図中 1 点は約 5 個の測定値の平均であり, 測定度数は任意に取った。

図-17 リアクタンス電圧と整流火花諸量

次にアーク放電時間, 放電電流初期値, アーク・エネルギーとリアクタンス電圧の関係を 図-17 に示す。アーク放電時間の実測平均値を基に求めたものである。アーク放電時間および放電電流初期値はリアクタンス電圧と直線的関係にあるのに対し, アーク放電エネルギーは放物線的に増す傾向が見られる。リアクタンス電圧が

0.2~0.3 [V] の値では  $t_a, I_a, W_a$  とともに小さく, ばらつきが多い。これからもリアクタンス電圧 0.3 [V] 以上はアーク放電を生じ, 火花の実害を増すことが知られる。

表-3 に測定条件および諸量の値を示す。試験機 2, 回路 (c) の場合  $y_c$  は

$$y_c = \frac{V_a - V_0}{LI} t_a - 1$$

である。これからアーク電流初期値は  $I_a = I(1 + y_c)$  で得られる。 $y_c$  の値からアーク電流初期

値は電機子回路電流 (5~10 A) の 10~30% の値で分布していることが解る。アーク・エネルギーは 2 号火花から 7 号火花へ  $2 \times 10^{-5} \sim 50 \times 10^{-5}$  [joule] と大きく変わり、アーク電力は  $I_a$  と同様に 10~30 [W] と変化する。アークの極性による放電の差異は、放電電圧が異なることから推測されるが、実験から明確な結果は得られなかった。

表—3 アーク放電時間とアーク電流初期値

ブラシ電流 $2I$ [A]	インダクタンス $L$ [ $\mu$ H]	回転数 $n$ [rpm]	リアクタンス電圧 $e_r$ [V]	火花号数	アーク放電時間 $t_{a,m}$ [ $\mu$ s]	アーク放電電流初期値		アーク・エネルギー $E_a$ [ $10^{-5}$ J]	アーク放電 ブラシ極性
						$y_c$	$I_a$ [A]		
20	11.1	800	0.213	1	—	—	—	—	正
10	21.7	800	0.217	1	—	—	—	—	負
10	26.0	800	0.248	2	3	-0.792	1.04	2.80	負
20	16.6	800	0.316	2~3	3	-0.891	1.09	1.96	正
10	29.4	800	0.280	3	3.5	-0.786	1.07	3.37	負
10	36.5	800	0.348	4	5.5	-0.728	1.36	6.73	負
20	22.8	800	0.434	3~4	6.5	-0.829	1.71	6.66	正
10	44.0	800	0.419	5	7.0	-0.712	1.44	9.06	負
20	29.4	800	0.560	5	10.5	-0.786	2.14	13.5	正
20	36.5	800	0.695	6	15.0	-0.753	2.47	22.2	正
20	44.0	800	0.838	7	20.0	-0.727	2.73	32.8	正
20	52.0	800	0.990	7	27.0	-0.688	3.12	50.6	正

## VI. 結 言

直流機の整流火花をその実害度の点から検討し、火花の正当なる評価を得るため、整流火花エネルギーの算定が必要である。そのためアーク放電時間の一算定式を提案し、放電電流初期値について実験を行なった。また整流火花の実害度の検討をも合せて行なった。

まず整流火花の強さを表わす火花号数に注目し、火花号数とアーク放電時間、および整流子表面アラサとの関係を求める実験、火花発生限界条件の実験などを行ない次の結果を得た。

1) 火花号数とアーク放電時間との間には滑らかな放物線の関係があり、それから

$$s = 2 \sim 4 \text{ の範囲で } W_a \propto (s-1)^3$$

$$s = 5 \sim 8 \text{ の範囲で } W_a \propto (s-1)^2$$

の関係がある。火花の実害はこの  $W_a$  に比例すると考えられる。

2) 火花号数と整流子表面アラサの関係は火花号数が増すと急激にアラサを増す。火花号数とアーク・エネルギーの関係が整流子の荒損度としてあらわれている。

3) 整流子表面アラサ測定の結果から、2~3 号火花による火花の実害はみとめられない。この程度の火花状態を完全無火花とする過度の努力をばらう必要はないと考えられる。しかし



4~5号火花以上では急激に実害度を増す。

4) アーク放電時間の実測値とアーク放電時間算定式とから、アーク放電電流初期値がえられる。アーク放電電流初期値は、火花号数2~3で約1[A]、火花号数4~5で約1.5~2[A]、火花号数6~7で2.5~3[A]の値であった。

5) アーク放電時間はリアクタンス電圧にほぼ比例して増加し、アーク電流初期値およびアーク電力はリアクタンス電圧0.2~0.3[V]で急激に増加する。アーク・エネルギーはリアクタンス電圧に対し放物線的に増加する。

6) 目測による無火花限界平均リアクタンス電圧 $e_r$ は0.25~0.3[V]であり、この時の火花電圧は3.2~4[V]である。また接触分離時に最初の電圧振動半波のピークで放電する場合もある。

7) 整流回路のエネルギーについて考察を行ない、アーク放電時間算定式を導びいたが、隣接短絡回路の効果等について実験による検討を進める必要がある。またブラシと整流子のすり接触特性は整流特性を左右するものであって、機械的特性の改良、ブラシおよび整流子の材質、すり接触面の通電機構の研究などを同時に進める必要がある。

終りに、本研究の一部は著者らの一人が北海道大学工学部在職中に行なったものであることを付記し、当時懇切なる御指導を賜った故林邦雄教授に謝意を表します。また日ごろ御指導頂いている、北海道大学工学部内藤正木教授、本学電気工学科織笠教授ならびに電気、電子両工学科教官各位に感謝の意を表します。

(昭和44年4月30日受理)

## 使用記号

- $c$ : 整流起電力基準化値
- $E_f$ : 主極回路電源起電力
- $E_c$ : 整流起電力
- $i$ : 整流コイル電流
- $i_f, i_r$ : 主極回路, 電機子回路電流変化分
- $i_a$ : アーク放電電流 ( $i_a = I + i_a$ )
- $I_a$ : アーク放電電流初期値 ( $I_a = I + i_a$ )
- $I$ : 電機子回路電流
- $L$ : 整流コイル自己インダクタンス
- $L_c$ : 整流コイル実効インダクタンス
- $L_f, L_r$ : 主極回路, 電機子回路の自己インダクタンス
- $M_f, M_r$ : 整流コイルと主極回路, 電機子回路間の相互インダクタンス

- $R, R_f, R_s$ : 整流コイル, 主極回路, 電機子回路 (負荷を含む) の抵抗  
 $R_b$ : ブラシ全接触抵抗  
 $r$ : 平均リアクタンス電圧基準化値  
 $s$ : 整流火花号数  
 $t_a$ : アーク放電時間  
 $t_{a,m}$ : アーク放電時間実測値  
 $T$ : 整流周期  
 $v_1, v_2$ : ブラシと整流子片 1, 整流子片 2 間の接触電圧降下  
 $v_{1R}$ : ブラシと整流子片 1 間の接触電圧降下基準化値  
 $V_a$ : アーク放電電圧  
 $V_c$ : 整流子周速  
 $W_a$ : アーク放電エネルギー  
 $W_c$ : ブラシ幅  
 $x$ : 整流周期で基準化した時間  
 $y$ : 整流コイル基準化電流  
 $x_1$ : アーク放電開始時の  $x$   
 $y_c$ : アーク放電開始時の  $y$

文 献

- 1) 電気学会電気規格調査会標準規格, JEC-54, 20 (昭 29).
- 2) 稲垣純平: 炭素 (31), 13 (1962).
- 3) Holm, R: AIEE Trans., Pt. III (Pwr. Apparatus and Syst.) **77**, 1124 (1958).
- 4) 稲垣純平: 電気学会雑誌, **84-1**, 13 (1964).
- 5) Binder, K: Elektrotech Z. (E.T.Z)-A, **81**, 558 (1960).
- 6) Holm, R: AIEE Trans., Pt. III (Pwr. Apparatus and Syst.) **81**, 588 (1962).
- 7) Diehl, J. E: AIEE Trans., Pt. III (Pwr. Apparatus and Syst.) **81**, 1348 (1962).
- 8) 稲垣・伊東: 東芝レビュー, **16**, 1131 (1961).
- 9) 林・内藤: 電気学会雑誌, **79**, 714 (1959).
- 10) 松田敏彦: 室工大研報, **4** (2), 143 (1963).
- 11) 林・内藤・松田: 電気四学会連大講演論文集, 618 (1961).
- 12) 乙武・玄地: 電気学会雑誌, **79**, 714 (1959).
- 13) 宮地邦夫: 電気学会雑誌, **82**, 807 (1962).
- 14) Turner, M. J. B., et. al: Proc. IEE, **113** (8), 1376 (1966).
- 15) Holm, R: Electric Contacts, 283 (Springer-Verlag, 1957).
- 16) Olney, F. D: AIEE Trans., **69**, 1207 (1950).
- 17) NEM ブラシ試験規格: CBI-1951, AIEE, No. 504 (1953).
- 18) 炭素材料研究会: 炭素, No. 15, 132 (1954).
- 19) 宗宮・上木・大久保: 炭素, No. 33, 28 (1962).