電気接点の大気中における開離アークについて*

佐藤 充典** 土方 政行** 森本 一郎**

Mitsunori Sato, Masayuki Hijikata and Ichiro Morimoto : Characteristics of the Arc on Breaking Contact in Air. The arc on breaking contact has been observed by means of an oscilloscope in the range of applied voltage from 20 to 110 volts and of circuit current from 0.3 to 50 amperes at both d.c. and a.c. circuits for silver, tungsten, carbon and silver-cadmium oxide contacts. From the observations, it is found that length L , voltage e and current i of the arc are given by the following equations,

$$L = vT = K \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} I^{1/2}$$

$$e = E_m + \frac{v}{K} \left[E \sin(\omega t + \phi) - E_m - \frac{E}{I} I_m \right]^{-1/2} [I \sin(\omega t + \phi)]^{-1/2} t$$

$$i = I \sin(\omega t + \phi) - \frac{I}{E} E_m$$

$$- \frac{v}{K} \left[E \sin(\omega t + \phi) - E_m - \frac{E}{I} I_m \right]^{-1/2} [I \sin(\omega t + \phi)]^{-1/2} \frac{I}{E} t$$

where E is applied voltage, I is short circuit current, E_m is minimum arc voltage, I_m is the minimum arc current, v is opening speed, ω is angular velocity, ϕ is phase angle, T is arc duration, t is time and K is constant. These equations hold for the materials of both thermionic emission and field emission (T - F mechanism).

(Received October 20, 1971)

I. 緒 言

アークの発生限界を越える使用条件の開閉器は回路の開閉時にアークが発生する。この開閉アークは電気接点の移

転、消耗および溶着特性に影響をおよぼし、密接な関係にある。また、開閉器設計の重要条件である接点間隙を決定するにもアーク特性を知る必要がある。

接点アークの機構については熱電子放射、電界放射

** 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, Tokyo)

* 1971 年 10 月本会金沢大会に発表

(T-F 理論)などによって説明され、アークの発生する限界電圧と電流も明らかにされている^{(1)~(9)}。なお、直流回路開離時のアーク長さおよびアーク時間は Holm による図式解析⁽¹⁾、相田による一般式⁽¹⁰⁾がいくつかの金属および C 接点について得られている。しかし、直流および交流におけるアークの長さ、波形、エネルギーを広い電圧、電流範囲にわたって求め、これを金属および合金接点に適用することは有効であると思われるが、一般には困難なため部分的に報告されているにすぎない。この過渡アークは接点の開離、閉成いずれにおいても発生する。開離時に発生するアークは移転、消耗と密接な関係にあり、長いアークが発生する。一方、閉成時に発生するアークはチャタリングがなければ極めて短く、移転、消耗におよぼす影響も開離アークに比較して一般には著しく小さい。

したがって、金属、合金および C 接点の広い範囲で容易に適用できる、無誘導負荷の直流および交流回路開離のアーク長さ、アーク波形、アークエネルギーを簡単な実験式あるいは作図によって表わすことを試みた。また、電子放射機構、アーク発生の限界電圧と電流、極性依存性および Holm、相田らの結果から実験式とアーク特性について検討した。

II. 試料および実験方法

実験に用いた接点材料の純度は Ag と Cd が 99.9%, W が 99.99%, C は分光分析用電極である。Ag-CdO 試料は溶解後焼鈍と加工をくり返して 6 mm ϕ の棒状として、機械加工により接点形状としてから、大気中 750°C で内部酸化を行なった。接触面形状は試験条件および接触状態を考慮して、Ag, W, Ag-CdO 接点を 6 mm ϕ , 20 mm R, C 接点を 8 mm ϕ , 30 mm R とした。表面は研磨を行ない、脱脂洗浄して試験に供した。

試験はすでに本誌⁽¹¹⁾に報告した開閉試験機を用いて行ない、開閉速度を 20~170 mm/sec 可変の等速運動、接触力を 200 g、開離力を 300 g とした。回路条件は直流および交流において、電圧を 20~110 V、電流を 0.3~50 A の範囲、負荷を無誘導抵抗とした。開離アークの波形観察はオシロスコープによって行なった。この波形から求めたアーク長さの測定値は試験電流が小さくなるとばらつきが大きくなる。したがって、それぞれ数 10 回の測定を行ない、度数分布の最大値をアーク長さとして定めた。

III. 実験結果

1. 直流の開離アーク

直流回路の電圧および電流がそれぞれ最小アーク電圧お

よび最小アーク電流より大きな回路を遮断するとき開離アークが発生する。Photo. 1 には一定速度で開離したときのアーク電圧およびアーク電流のオシロスコープによる観察波形の一例を示した。この試験条件は電圧 40 V、短絡電流 (以後単に電流とする) 10 A、開離速度 63 mm/sec である。アークの電圧と電流の波形は対称であって、アーク時間に対してほぼ直線的に変化している。これは近似的に Fig. 1 のように表わされ、 E : 電圧, I : 電流, E_m : 最小アーク電圧, I_m : 最小アーク電流, T : アーク継続時間, t : 時間である。

これから、アーク電圧 e は

Photo.1 Oscillogram of voltage e and current i of the arc in contact breaking at d.c. circuit for silver contact. Applied voltage is d.c. 40 volts and short circuit current is 10 amperes

Fig.1 Schematic illustration for voltage and current of the arc shown in Photo.1. e is arc voltage, i is arc current, E is applied voltage, I is short circuit current, E_m and I_m are voltage and current of minimum necessary for permanent arc respectively, T is arc duration and t is time

- (1) R. Holm: *Electric Contacts Handbook*, Berlin, (1958), 290.
- (2) 鳳: 電気接点と開閉接触子, 金原出版, (1956), 21.
- (3) T. H. Lee: *J. Appl. Phys.*, **30** (1959), 166.
- (4) 電気学会: 電離気体論, (1969), 199.

- (5) 電気学会: 放電ハンドブック, (1963), 166.
- (6) J. D. Cobine and E. E. Burger: *J. Appl. Phys.*, **26** (1955), 895.
- (7) 喜多村: 電気学会雑誌, **89** (1969), 1379.
- (8) J. D. Cobine: *Proceedings of the Engineering Seminar on Electrical Contacts*, (1965), 207.
- (9) G. A. Farrall: *Proceedings of the Holm Seminar on Electric Contact Phenomena*, (1969), 119.
- (10) 相田: 電気学会雑誌, **90** (1970), 2209.
- (11) 森本, 佐藤, 土方: 金属学会誌, **32** (1968), 597.

$$e = E_m + \frac{E - E_m - \frac{E}{I} I_m}{T} t \quad (1)$$

アーク電流 i は

$$i = I - \frac{I}{E} E_m - \frac{I - \frac{I}{E} E_m - I_m}{T} t \quad (2)$$

で表わされる.

$$ei = - \left(\frac{E - E_m - \frac{E}{I} I_m}{T} \right)^2 \frac{I}{E} t^2 + \frac{E - E_m - \frac{E}{I} I_m}{T} \left[I - 2 \left(\frac{I}{E} E_m \right) \right] t + I E_m - \frac{I}{E} E_m^2 \quad (3)$$

アークエネルギーは

$$\int_0^T e i dt = T \left[\frac{1}{6} (E I + I E_m + E I_m) + \frac{1}{3} \left(E_m I_m - \frac{I}{E} E_m^2 - \frac{E}{I} I_m^2 \right) \right] \quad (4)$$

で求められ、アークエネルギーの最大値は

$$(ei)_{\max} = \frac{I(E - 2E_m)T}{2(EI - I E_m - E I_m)} \quad (5)$$

である.

アーク継続時間が求まれば (1), (2), (4), (5) 式の計算によってそれぞれが近似的に求められる.

つぎに、アーク継続時間と開離速度 v との関係を Fig. 2 に示した. 回路条件を定めれば T と v は逆比例関係にあって、アーク長さ L は

$$L = v T \quad (6)$$

で表わされ、開離速度に依存しない. この関係はかなり広い開離速度にわたって成立つことが Holm⁽¹⁾, Fink らによって報告されている. したがって、以後の実験は $v=63$ mm/sec において行なった. アーク継続時間は開離速度に

Fig. 2 Arc duration in breaking for silver contact as a function of opening speed. Applied voltage is d.c. 40 volts

よって変化するので、測定値はアーク長さによって整理した方が適当と思われる.

2. 直流の開離アーク長さ

アーク長さが接点材料の物理的性質と試験条件にどのように依存するか調べ、アーク長さを簡単な実験式で表わし、合金接点を含めた広い範囲の接点材料に適用できるか検討する.

最初に接点材料として最も一般的な Ag 接点を用いて実験式を求める. アークは Photo. 1 および Fig. 1 から明らかなごとく、最小アーク電圧に近い電圧降下の後に発生し、アーク電流が最小アーク電流に近い値に達すると切れる. この最小アーク電流に対応する電圧降下は $E I_m / I$ である. よって、アーク長さは近似的にアーク柱長さであって、寄与する電圧は

$$E - E_m - \frac{E}{I} I_m \quad (7)$$

であることが考えられる. Fig. 3 には (7) 式と電圧および電流を変化させて測定したアーク長さの関係について示した. ここで、Ag の最小アーク電圧は $E_m=12$ V, 最小アーク電流は $I_m=0.5$ A を用いた⁽¹⁾⁽²⁾. 両対数で表わすと、いづれも直線であって勾配は $3/2$ に近い. これから

$$L \propto \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} \quad (8)$$

が得られる. つぎに電流依存性を考慮して

$$L = K \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} f(I) \quad (9)$$

と仮定して、Fig. 4 に電流依存性について示した. それぞれの電流に対する測定値は電圧を変化させて測定した値の

Fig. 3 Arc length L as a function of

$$E - E_m - \frac{E}{I} I_m$$

平均値である。両対数で表わすと直線で勾配は $1/2$ である。したがってアーク長さは

$$L = K \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} I^{1/2} \quad (\text{mm}) \quad (10)$$

で表わされ

$$K = 1.5 \times 10^{-3}$$

が得られる。

Fig. 5 には (10) 式からの計算による実線と測定値の対応について示した。破線より長いアークの範囲あるいは電圧が 70 V を越える範囲になると超音アークとなつて、電極の蒸発量が増加し、蒸気密度が高くなって、急激にアークが長くなる。したがって Ag 接点の場合、適用可能な範囲は $L < 1.7 \text{ mm}$, $E < 70 \text{ V}$ であると考えられる。

なお、これらの結果の妥当性を、アーク長さあるいはア

Fig. 4 $L / (E - E_m - \frac{E}{I} I_m)^{3/2}$ as a function of the short circuit current

Fig. 5 Arc length as a function of short circuit current for the silver contact. Solid curve calculated from

$$L = K \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} I^{1/2}, \text{ using } K = 1.5 \times 10^{-3}, E_m = 12 \text{ volts and } I_m = 0.5 \text{ amperes. } \Delta \text{ and } \blacktriangle \text{ are values from Holm}^{(1)}. \text{ Chain curves are calculated from the equations by Aida}^{(10)}$$

ーク継続時間についての Holm と相田の報告を引用して比較検討する。△▲印は Holm⁽¹⁾の図式解析によって求めたものであり、解析可能な値も少なく十分な精度があるものとはいえないが 20~50 V の範囲でよく一致し、60, 70 V において (10) 式および測定値よりもわずかに大きい程度である。

また、相田⁽¹⁰⁾による Ag 接点の一般式は

$$T = \frac{11}{v} \exp \left[0.05 E - \frac{\alpha(E)}{I} \right] \quad (11)$$

ここで、 T : m sec, v : cm/sec, $\alpha(E)$ の値は 20 V: 7.0, 40 V: 3.2, 50 V: 3.1, 60 V: 3.1, 70 V: 3.3, 役立つ範囲 $E = 20 \sim 70 \text{ V}$, $I = 0.8 \sim 10 \text{ A}$ (推定 30 A) である。それぞれの電圧について計算し、これを鎖線で示した。推定の範囲 (10~30 A) で電流値が大きくなるにしたがって測定値および (10) 式との差が大きくなる。これは Holm の図式解析の可能な 0.8~10 A の範囲で一致するように exp によって式を導いているために、この範囲を越えるにしたがって測定値との差が大きくなるものと考えられる。一方、(10) 式は電圧、電流によって係数が変化することなくより広い試験範囲に適用できるものと思われる。

つぎに、このように Ag 接点によって求められた (10) 式が他の接点材料にも適用できるか検討する。**Fig. 6** には、Holm⁽¹⁾の図式解析が広い範囲にわたって可能な Au 接点を選び、図式解析の値 △▲印と (10) 式の計算による実線の対応を示した。ここで、 $K = 1.5 \times 10^{-3}$, $E_m = 15 \text{ V}$, $I_m = 0.4 \text{ A}$ を用いた⁽¹⁾⁽²⁾。Au 接点においても (10) 式はかなりよい一致を示している。

接点材料の電子放射機構は熱電子放射と電界放射(T-F

Fig. 6 Arc length as a function of short circuit current for the gold contact. Solid curves calculated from

$$L = K \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} I^{1/2}, \text{ using } K = 1.5 \times 10^{-3}, E_m = 15 \text{ volts and } I_m = 0.4 \text{ amperes. } \Delta \text{ and } \blacktriangle \text{ are values from Holm}^{(1)}$$

理論⁽³⁾に大別できる。これがアーク特性と密接な関係にあることが考えられている。したがって、熱電子放射系、電界放射系、非金属で特殊なC接点において、それぞれ(10)式が適用できれば合金接点を含めたほとんどの接点材料に利用できるものと考えられる。すでに述べたAg, Au接点は電界放射系に属するものである。よって、つぎに代表的な熱電子放射系のW接点とC接点について調べる。

Fig.7にはW接点の測定値と(10)式の計算による実線の対応について示した。ここで、 $K=1.5 \times 10^{-3}$, $E_m=15$ V, $I_m=1$ Aを用いた⁽¹⁾⁽²⁾。破線より長いアークの範囲あるいは電圧が110 Vを越える範囲になると叱音アークとなつて、アークが急激に長くなる。したがって、W接点は $L < 1.4$ mm, $E < 110$ Vの範囲において(10)式とよい一致を示し、熱電子放射系の接点にも適用される。なお、W接点は開閉回数が増加すると酸化による影響でアークが長くなる。この酸化が影響しないように開閉回数の少ない範囲で測定を行なった。

Fig.7 Arc length as a function of short circuit current for the tungsten contact. Solid curves calculated from

$$L = K \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} I^{1/2}, \text{ using } K = 1.5 \times 10^{-3}, E_m = 15 \text{ volts and } I_m = 1 \text{ ampere. Chain curves are calculated from the equations by Aida}^{(10)}$$

Holm⁽¹⁾の図式解析は範囲が狭いため比較が困難である。相田⁽¹⁰⁾のW接点についての一般式は

$$T = \frac{3.25 E}{v} \exp \left(- \frac{1.37 \times 10^5}{I E^k} \right) \quad (12)$$

$$E \approx 20 \sim 40 \text{ V}$$

$$T = \frac{130}{v} \exp \left[- \frac{0.56 (1 + 0.025 E) \times 10^5}{I E^k} \right] \quad (13)$$

$$E = 40 \sim \text{約 } 70 \text{ V}$$

(12), (13)式ともに $I = 1.5 \sim 30$ A (推定 40 A) の範囲, k の

値はそれぞれ 30 V : 2.58, 40 V : 2.55, 50 V : 2.53, 60 V : 2.51 である。それぞれの電圧について計算し、これを鎖線で示した。40 V については(12), (13)式のいずれを使うかによって計算値がわずかに異なるが、ここでは(13)式を使った。電圧 30 V の 20~40 A, 40 V の 10~40 A, 50 V の 2~10 A の範囲で実験値および(10)式と一致するが、その他の範囲では一致しない。

Fig.8にはC接点について示した。最小アーク電圧、最小アーク電流は Holm⁽¹⁾⁽²⁾らによって $E_m \approx 20$ V, $I_m \approx 0.03$ A が得られている。これを(10)式に代入して計算したものと測定値を比較すると一致しない。(10)式によって表わされるものと仮定すると、 K , E_m , I_m の値に相違があることになる。最小アーク電圧、最小アーク電流は Photo.1 に示したようなアーク波形から求められるはずである。この測定によって最小アーク電圧 $E \approx 20$ V が得られる。これは Holm らの値と一致している。しかし、最小アーク電流は

Fig.8 Arc length as a function of short circuit current for the carbon contact. Solid curves calculated from

$$L = K \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} I^{1/2}, \text{ using } K =$$

$$7.5 \times 10^{-4}, E_m = 20 \text{ volts and } I_m = 0.1 \text{ amperes. Chain curves are calculated from the equations by Aida}^{(10)}$$

この方法から精度のよい値を得るのが困難である。したがって、 $E_m = 20$ V を代入した(10)式と叱音アークの発生しない範囲の測定値から

$$I_m \approx 0.1 \text{ A}$$

$$K \approx 7.5 \times 10^{-4}$$

を求めた。この K の値は Ag, Au, W で得られた金属接点の $1/2$ である。これを(10)式に代入して計算し実線は測定値とよい一致を示す。叱音アークとなつて、アーク長さが急激に増加して(10)式が適用できなくなるのは破線で示したごとく電圧、電流に依存し、特に電流依存性が高い。これは Fig.5, Fig.7 から明らかなごとく、金属接点の場合アーク長さに大きく依存していたのと異なる。

さらに、Holm⁽¹⁾の図式解析から求めたアーク長さの値

と(10)式および測定値はアーク長さが $L > 0.3 \text{ mm}$ ではほぼ一致するが、 $L < 0.3 \text{ mm}$ では著しく短い解析値になって一致しない。また、C接点の報告⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾されている最小アーク電流値は金属接点よりばらつきが大きい。これはC特有な性質が影響して、Cの種類によって最小アーク電流の値が異なるためと考えられる。Cはベンゼン核による網平面が分子間力(van der Waals 力)によって積層されている。この原子間距離は黒鉛結晶化の程度によって異なり、結合力も変化する。この黒鉛結晶化の程度と結晶方位によって電気および熱的性質が著しく異なる。したがって、試験に用いるCの黒鉛結晶化の程度によって、最小アーク電流の値が変化するのではないと思われる。

なお、相田⁽¹⁰⁾によるC接点の一般式は

$$T = \frac{160}{v} \exp \left[\frac{-26 \exp(-0.03 E)}{I} \right] \quad (14)$$

$E = 35 \sim 150 \text{ V}$, $I = 0.1 \sim 20 \text{ A}$ (推定 30 A) の範囲である。これを $60, 80, 110 \text{ V}$ について計算し、鎖線で示した。(10)式および測定値と比較して対応がよくない。これはWおよびC接点においてもAg接点と同様 $\exp$ によって広い範囲を表わすことが困難であることを示していると思われる。

(10)式において、 $L = 0$ になるアーク発生の限界は

$$E - E_m - \frac{E}{I} I_m = 0 \quad (15)$$

で表わされ、最短アーク特性は直線になる。これからアーク発生の限界曲線を求め、Fig. 9 に示した。作図はAg接点について行なったものである。なお、(15)式は鳳⁽²⁾の最短アーク特性が直線で示されるアーク発生限界の式と一致している。

Fig. 9 Curves of arc duration limit for silver, tungsten and carbon contacts

3. 極性依存性

アーク長さが陰極および陽極材料にどのように依存するか、異なった電極材料の組合わせによって測定し、アーク長さと密接な関係にある最小アーク電圧、最小アーク電流の極性依存性と(10)式を対応させて検討する。

Ag と W, Ag と C, W と C の組合わせを選び、材料によるアーク長さの相違が大きい電圧 $E = 30 \text{ V}$ において試験し、Fig. 10(a), (b), (c) に示した。実線は(10)式から計算

Fig. 10 Arc length as a function of short circuit current. Applied voltage is d.c. 30 volts
(a) Combination of silver and tungsten contacts
(b) Combination of silver and carbon contacts
(c) Combination of tungsten and carbon contacts

して Fig.5, Fig.7, Fig.8 に示した 30 V の曲線である。いずれの組合せにおいても最小アーク電圧は Photo.1 に示したようなアーク波形から求めると陰極材料の最小アーク電圧に近い値を示す。

アーク長さは電流が高くなるにしたがって陰極材料の曲線に近づいている。これはつぎのように考えられる。(10) 式の $E I_m / I$ の項は電流が高くなると小さくなり、アーク長さが最小アーク電圧に大きく依存するようになる。一方、電流が低くなるにしたがって $E I_m / I$ の項は大きくなり、アーク長さが最小アーク電流に大きく依存するようになる。この最小アーク電流は両極材料の影響を受けるが、特に陽極に大きく依存している。この場合、移転層が形成されると最小アーク電流は移転方向と顕著な関係をもつようになり、陽極に移転層が形成されるとこれに大きく支配される。なお、W 接点は酸化によってアークが長くなる。特に Ag と W の組合せにおいては開閉回数の増加とともに著しくアークが長くなる。ここで、W の酸化物と Ag が反応すると約 450°C で融解する。この原子の結合エネルギーの小さくなることに起因して、最小アーク電流を低くし、アークを長くするものと思われる。したがって、アーク長さの測定は移転ならびに酸化の影響の少ない初期の開閉において行なった。

4. Ag-CdO 接点

Ag-CdO 接点は溶着特性および消耗特性にすぐれ、接触抵抗も低く安定である。しかし、CdO 量の増加にしたがってアーク特性は低下するといわれている^{(11)~(13)}。

ここで、CdO 量が 8, 10, 12, 14 wt% の Ag-CdO 接点を用いてアーク長さの測定を行ない、Fig.11 に示した。なお、Photo.1 のようなアーク波形から求めた最小アーク電

Fig.11 Effect of CdO content in internally oxidized Ag-CdO contacts on the arc length.
Applied voltage is d.c. 40 volts

圧は $E_m \approx 12$ V で、Ag 接点の最小アーク電圧にはほぼ等しい。このために、電流の増加とともに最小アーク電圧依存性が大きくなって、Ag 接点のアーク長さに近づく。一方、電流が低くなるにしたがって CdO 量によるアーク長さの相違が大きくなる。これを (10) 式に対応させると $E I_m / I$ の項に依存するもので、アーク特性の低下は最小アーク電流が低くなるためと考えられる。したがって、(10) 式に $I_m = 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5$ A, $E_m = 12$ V, $E = 40$ V を代入して計算し、実線で示した。測定値と実線の変化はよく対応している。これから、それぞれの CdO 量に対する最小アーク電流は 8 CdO : $0.4 \text{ A} > I_m > 0.3 \text{ A}$, 10 CdO : $0.3 \text{ A} > I_m > 0.25 \text{ A}$, 12 CdO : $0.25 \text{ A} > I_m > 0.2 \text{ A}$, 14 CdO : $0.2 \text{ A} > I_m > 0.15 \text{ A}$ が得られる。

5. 交流の開離アーク

交流回路を開離すると Photo.2 に示したようなアーク波形を示す。この試験条件は電圧の最大値 $E = 70$ V, 電流の最大値 $I = 7$ A, 周波数 50 Hz, 開離速度 $v = 63$ mm/sec である。開離は交流波形の任意の場所で起こるために、アーク波形はこの開離時の位相によって開離のたびに異なる。しかし、交流アークも直流アークと本質的に同じものと思われる。商用周波数の交流と直流において、アークの慣性(周波数が高くなると熱慣性およびイオンの消長のために周波数との相対関係が問題になる)の影響が無視できるとすれば、交流の開離アークは直流の開離アークから作図あるいは計算によって求められることが考えられる。

Photo.2 Oscillogram of voltage and current of the arc in contact breaking at a.c. circuit for silver contact.
Applied voltage is a.c. 70 volts and short circuit current is 7 amperes

ここで、交流の開離アークを作図によって求めることを試みる。Fig.12 はアークの電圧波形を Photo.2 と同一の試験条件について作図したものである。

交流電圧は

$$E \sin(\omega t + \phi) \quad (16)$$

交流電流は

$$I \sin(\omega t + \phi) \quad (17)$$

(12) 相田：金属学会誌，28 (1964)，698.

(13) 佐藤，土方，森本：金属学会誌，33 (1969)，959.

Fig.12 Diagram of the arc voltage in contact breaking at a.c. circuit for silver contact by construction method

ここで、 ω : 角速度、 ϕ : 開離位相である。

無誘導負荷回路であるから電圧と電流は同相で

$$\frac{E \sin(\omega t + \phi)}{I \sin(\omega t + \phi)} = \frac{E}{I} \quad (18)$$

である。Fig.12 の場合 $E/I = 70/7 = 10$ になる。したがって直流回路短絡時の電圧と電流の比を交流の E/I に一致するように選り直流アークの電圧波形を(1)式に(6)式と(10)式から求めた T の値を代入して E まで画く。一方、交流は任意の開離位相 ϕ から開離するので、直流の $t=0$ に対して ϕ/ω の位相差で画く。ここで交流の各瞬時の電圧と、これに一致する電圧の直流アーク波形の交点がそれぞれの瞬時のアーク電圧である。この太線で示した軌跡が交流の開離アークの電圧波形になる。

つぎに、開離アークの電流波形を作図し、Fig.13 に示した電圧波形と全く同様な方法で、直流アークの電流波形を(2)式に(6)式と(10)式から求めた T の値を代入して I まで書き、交流の各瞬時の電流と、これに一致する電流の直流アーク波形の交点がそれぞれの瞬時のアーク電流

Fig.13 Diagram of the arc current in contact breaking at a.c. circuit for silver contact by construction method

である。この太線で示した軌跡が交流の開離アークの電流波形になる。

この作図の結果と Photo.2 に示したようなオシロスコープによるアーク電圧、アーク電流波形を比較するとよい一致を示す。これは商用周波数程度でアークの慣性が無視し得て、直流アークから交流アークが求められることを示していると思われ、各瞬時の ei は Fig.14 のようになる。

Fig.14 ei curve of the arc in contact breaking at a.c. circuit for silver contact. Applied voltage is a.c. 70 volts and short circuit current is 7 amperes

一方、開離アークを式によって表わすことを試みる。直流のアーク電圧は(1)式に(10)式を代入すると

$$e = E_m + \frac{v}{K} \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{-1/2} I^{-1/2} t \quad (19)$$

$$E_m \leq e \leq E - \frac{E}{I} I_m \text{ の範囲}$$

アーク電流は(2)式に(10)式を代入すると

$$i = I - \frac{I}{E} E_m - \frac{v}{K} \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{-1/2} I^{-1/2} \frac{I}{E} t \quad (20)$$

$$I - \frac{I}{E} E_m \geq i \geq I_m \text{ の範囲}$$

$$\begin{aligned} ei = & -\frac{v^2}{K^2} \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{-1} E^{-1} t^2 \\ & + \frac{v}{K} \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{-1/2} I^{-1/2} \left[I - 2 \left(\frac{I}{E} E_m \right) \right] t \\ & + I E_m - \frac{I}{E} E_m^2 \end{aligned} \quad (21)$$

が得られる。

交流のアーク電圧は(19)式に(16)式を代入すると

$$e = E_m + \frac{v}{K} \left[E \sin(\omega t + \phi) - E_m - \frac{E}{I} I_m \right]^{-1/2} [I \sin(\omega t + \phi)]^{-1/2} t \quad (22)$$

$$E_m \leq e \leq E \sin(\omega t + \phi) - \frac{E}{I} I_m \text{ の範囲}$$

アーク電流は (20) 式に (17) 式を代入すると

$$i = I \sin(\omega t + \phi) - \frac{I}{E} E_m$$

$$-\frac{v}{K} \left[E \sin(\omega t + \phi) - E_m - \frac{E}{I} I_m \right]^{-1/2}$$

$$\left[I \sin(\omega t + \phi) \right]^{-1/2} - \frac{I}{E} t \quad (23)$$

$$I \sin(\omega t + \phi) - \frac{I}{E} E_m \geq i \geq I_m \text{ の範囲}$$

(21) 式に (16), (17) 式を代入すると

$$ei = -\frac{v^2}{K^2} \left[E \sin(\omega t + \phi) - E_m - \frac{E}{I} I_m \right]^{-1}$$

$$[E \sin(\omega t + \phi)]^{-1} t^2 + \frac{v}{K} \left[E \sin(\omega t + \phi) - E_m \right.$$

$$\left. - \frac{E}{I} I_m \right]^{-1/2} [I \sin(\omega t + \phi)]^{-1/2}$$

$$\left[I \sin(\omega t + \phi) - 2 \left(-\frac{I}{E} E_m \right) \right] t + I E_m \sin(\omega t + \phi)$$

$$- \frac{I}{E} E_m^2 \quad (24)$$

が求まる。作図と (22), (23) 式は全く同じのものであって、いずれの方法によっても交流の開離アークを求めることができる。ここで、交流のアーク継続時間は (22) 式あるいは (23) 式のグラフから求めるのが容易である。

IV. 考 察

接点アークは主として陰極の現象から説明されているものが多く、陽極についてはほとんど明らかにされていない。しかし、陽極も接点アークに重要な役割を果たしているものと思われる。アーク長さと密接な関係にある最小アーク電圧および最小アーク電流が、電極材料の物理的性質および極性とどのような関係にあるか調べると、最小アーク電圧については報告も多くかなり明確にされている⁽¹⁾⁽²⁾。これは最小アーク電圧が陰極材料に大きく依存し、陰極での現象と密接な関係にあるためと思われる。一方、最小アーク電流についてはほとんど明らかにされていない。これは最小アーク電流が陽極の影響を大きく受けることに一因があると思われるので検討する。アーク電流は電子による電流 i_e とイオンによる電流 i_i によって $i = i_e + i_i$ で表わされ、陽極には電子、陰極にはイオンが入射し、電極を加熱蒸発させる。また、アーク柱内では熱電離の状態にあって、電子の数 n_e とイオンの数 n_i が $n_e \approx n_i$ である。この電界方向の速度は $v_e \gg v_i$ であるために、 $i_e \gg i_i$ であって $i \approx i_e$ になる。この伝導を保ちアークを持続させるためには電極間全域に電離の容易な蒸気の供給が必要である。したがって、電極材料がばらばらの原子になって電極面から放出されるに要する結合エネルギーと最小アーク電流に関連性があるのではないと思われる。ここで、Fig. 15 には最小アーク電流と原子の結合エネルギーの関係について示した。最小アーク

Fig. 15 The minimum arc current as a function of cohesive energy at 298°K for several metals

電流の値は Holm⁽¹⁾, Fink⁽¹⁾, 鳳ら⁽²⁾⁽⁵⁾によってかなり異なっているので範囲で示した。なお○印は Holm の値である。その結果、原子の結合エネルギーと最小アーク電流に相関関係があるように思われる。また、最小アーク電流の極性依存性について、最小アーク電流近傍では陰極へのイオンの衝突による入射エネルギーが小さい。このために、陰極の加熱による中性粒子の蒸発が少なく、アークを持続させるに十分な蒸発による中性粒子を陰極から陽極前面まで供給するのが困難である。したがって、アークの持続は陽極からの蒸気の供給に大きく支配され、最小アーク電流が陽極材料の影響を大きく受けることが考えられる。

つぎに、相田⁽¹⁰⁾によれば、W および C 接点は電流 $I > 5$ A で、電圧 50~120 V の増加に対してアーク長さがほとんど変わらず、(13), (14) 式はそれぞれ一定値に収斂する。このアーク長さ曲線の形状は電極材料の電子放射機構が熱電子放射、電界放射 (T-F 理論) のいずれかによって異なると報告されている。しかし、本実験において、熱電子放射系の W および C 接点は電界放射系の Ag および Au 接点と同様 (10) 式で表わされ、C 接点における K の値が金属接点の $1/2$ になるのみで、電子放射機構によると思われる曲線の相違は表われていない。これについて検討すると、いずれの電子放射機構においても陰極降下によって、陰極前面に十分な電子が供給されるとき、電子流は電圧の $3/2$ 乗に比例し、電圧によって飽和しない。これを (8) 式に対応させると、アーク長さはこのアーク柱に供給される電子流と相関関係にあるように思われる。これから接点アークにおいてはアーク柱電圧で飽和しない十分な電子の供給が行なわれるために、電子放射機構による相違が現われないものと考えられる。

これらの結果と検討から、各実験式は他の金属および実用の合金接点においてもそれぞれの最小アーク電圧および最小アーク電流を求めれば適用できるものと考えられる。

さらに、Fig. 12, Fig. 13 と同様の作図法によって、無誘

Fig.16 Diagrams of arc voltage, (a) and arc current, (b) of the a.c. arc by construction method.
 E_r is restriking voltage

導回路について任意の静止間隙の交流アーク波形も画くことができる。Fig. 16にはこの一例として、 $E=70$ V, $I=7$ A, $L=0.33$ mm, Ag 電極, 再点弧電圧 E_r 任意の条件で画き, 交流のアーク電圧波形(a), アーク電流波形(b)の作図法を示した。静止間隙の直流アークの電圧は(19)式と(6)式から

$$e = E_m + \frac{L}{K} \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{-1/2} I^{-1/2} \quad (25)$$

$$E_r \leq e \leq E - \frac{E}{I} I_m \text{ の範囲}$$

アーク電流は(20)式と(6)式から

$$i = I - \frac{I}{E} E_m - \frac{L}{K} \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{-1/2} I^{-1/2} \frac{I}{E} \quad (26)$$

が得られる。これは過渡アークから導いたものである。一方、定常アークについては Ayrton⁽²⁾の式および多くの実験がある。これらのいずれかを用いて交流の各瞬時に対応する直流の電圧, 電流のアーク電圧, アーク電流を画く, これと交流各瞬時の交点の軌跡が交流のアーク波形になる。

なお、交流アークの電圧, 電流を式で表わすと, (16), (17)式で位相差を考慮する必要がなく, (25)式から

$$e = E_m + \frac{L}{K} \left(E \sin \omega t - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{-1/2} (I \sin \omega t)^{-1/2} \quad (27)$$

$$E_r \leq e \leq E \sin \omega t - \frac{E}{I} I_m \text{ の範囲}$$

(26)式から

$$i = I \sin \omega t - \frac{I}{E} E_m - \frac{L}{K} \left(E \sin \omega t - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{-1/2} (I \sin \omega t)^{-1/2} \frac{I}{E} \quad (28)$$

が得られ, Fig.16 の作図と一致する。

V. 結 論

Ag, W, C, Ag-CdO 接点について, 開離アークをオシロスコープによって観察し, 直流および交流アークの長さ, 波形の実験式を導き, アーク発生の限界電圧と電流, 極性依存性から検討した。

アーク長さ L は

$$L = v T = K \left(E - E_m - \frac{E}{I} I_m \right)^{3/2} I^{1/2}$$

アーク電圧 e は

$$e = E_m + \frac{v}{K} \left[E \sin(\omega t + \phi) - E_m - \frac{E}{I} I_m \right]^{-1/2} [I \sin(\omega t + \phi)]^{-1/2} t$$

アーク電流 i は

$$i = I \sin(\omega t + \phi) - \frac{I}{E} E_m - \frac{v}{K} \left[E \sin(\omega t + \phi) - E_m - \frac{E}{I} I_m \right]^{-1/2} [I \sin(\omega t + \phi)]^{-1/2} \frac{I}{E} t$$

直流アークについては $\sin(\omega t + \phi) = 1$

で表わされ, これからアークエネルギーも求められる。ここで, K : 定数, E : 電圧, I : 電流, E_m : 最小アーク電圧, I_m : 最小アーク電流, v : 開離速度, T : アーク継続時間, t : 時間, ω : 角速度, ϕ : 開離位相である。この実験式は熱電子放射系, 電界放射(T-F 理論)系いずれの材料についても適用でき, 電子放射機構による相違のないことを確かめた。

本研究に対して, 御指導を賜った東京工業大学高橋恒夫教授に深く感謝の意を表します。