電 気 接 点 の 小 移 転 に つ い て*

森 本 一 郎** 佐 藤 充 典** 土 方 政 行**

Ichiro Morimoto, Mitsunori Sato and Masayuki Hijikata: Measurement of Material Transfer of Light Duty Electrical Contacts. The transfer of metal from anode to cathode of electrical contacts has been measured in a range of applied voltages from 2 to 8 volts and of circuit currents from 1 to 45 amperes in argon atmosphere. Results obtained are as follows. The material transfer is given approximately by an empirical formula as

$$W = KM(1 - E_r/E)^2 I^2 / T_m,$$

where W is the amount of metals transferred in milligram per operation, K is a constant and 2.5×10^{-7} , M is the mean atomic weight, T_m is the melting temperature in degrees Kelvin, E_r is the bridge voltage at rupture in volts and is equal to $6.9 \times 10^{-4} T_m$, E is the applied voltage in volts and I is the circuit current in amperes.

This relationship may hold under the following condition: $6V \geq E > E_r$ and $I > I_{\min}/(1 - E_r/E)$, where $I_{\min}$ is the minimum current necessary for a permanent arc.

The main cause of the material transfer in light duty contacts is considered to be the short arc energy depending on the lowest value of inductance when the bridge is ruptured, and the material transfer is little influenced by the thermoelectric effect.

(Received January 29, 1968)

I. 緒 言

直流回路を開閉する軽負荷接点の移転は、一方の極から他方の極に局部的に集中して起こり、アーク発生限界以下の直流回路開閉においてはこれが障害の原因となる場合が多い。この移転がどのような要因に依存するかについて、その機構を明らかにすることは興味ある重要な問題である。従来これらの移転が起こる原因については、主として short arc および熱電気効果によつて説明されているが、いずれに大きく依存するかは明確でない。short arc による移転は、接点分離時に陰極から放出された電子の衝突により加熱された陽極が蒸発、飛散して陰極上に付着するために起こるものであつて、この short arc エネルギーは回路のインダクタンスや電極材料によつて変化する。また熱電気効果による移転は、接点分離時に形成された bridge の温度分布が Thomson 効果および Peltier 効果などによつて非対称となり bridge が陽極側で破断するのが原因と考えられている。この移転量は回路のわずかなインダクタンスの変化に敏感であり、インダクタンスの増加とともに変化し、移転方向が陰極から陽極へと反転することについても報告されている^{(1)~(8)}。

電圧が最小アーク電圧よりも低い回路を開閉した場合の

小移転については Holm⁽¹⁾、鳳⁽²⁾⁽⁹⁾、朝井ら^{(10)~(18)}による多くの研究がある。無誘導負荷回路開閉の場合に移転は主として陽極から陰極の方向に起こり、接点金属の融解までの熱容量が大きいほど移転消耗量は少なくなることが報告されている⁽²⁾⁽⁹⁾。また Ag, Pt などの移転量は bridge 破断電流の 2 乗に比例することが確かめられている⁽¹⁾⁽³⁾⁽¹⁶⁾。

しかし合金接点を含めた接点材料の移転の難易関係、電圧および電流依存性などについてはほとんど報告されていない。よつて本研究では各種の金属および合金接点を最小アーク電圧より低い電圧の直流回路を開閉した場合移転量がいかなる要因に依存するかを明確にし、移転量と接点材料の平均原子量、融解温度または沸騰温度、回路条件との関係を実験式で示し、これらの結果から移転の機構についても検討を加える。

II. 試 料 お よ び 実 験 方 法

試料は融解温度、沸騰温度、原子量、接触抵抗などを考慮して広い範囲の金属および合金を溶解によつて試作し接

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

* 1967 年 4 月本会東京大会に発表

- (1) R. Holm: *Electric Contact Handbook*, Berlin, (1958), p. 358.
- (2) 鳳: 電気接点と開閉接触子, 金原出版, (1956), p. 95.
- (3) F. L. Jones: *The Physics of Electrical Contacts*, Oxford, (1957).
- (4) F. L. Jones et al: *Brit. J. Appl. Phys.*, **12** (1961), 485.
- (5) A. Keil and W. A. Merl: *Z. Metallk.*, **48** (1957), 16.
- (6) W. A. Merl: *Metall*, **15** (1961), 672.

- (7) W. A. Merl: *Proc. International Conf. Electromagnetic Relays*, (1963), p. 49.
- (8) M. R. Hopkins and C. H. Jones: *Brit. J. Appl. Phys.*, **14** (1963), 137.
- (9) 鳳: 電気学会誌, **61** (1941), 61.
- (10) 朝井: 本誌, **16** (1952), 464.
- (11) 朝井: 本誌, **16** (1952), 564.
- (12) 朝井: 本誌, **16** (1952), 633.
- (13) H. Asai: *Proc. International Conf. Electromagnetic Relays*, (1963), p. 43.
- (14) 朝井: 電子材料, (1964), (8), 54.
- (15) 朝井: 電子材料, (1964), (9), 51.
- (16) W. B. Ittner: *J. Appl. Phys.*, **27** (1956), 382.
- (17) A. Keil and C. L. Meyer: *Z. Metallk.*, **44** (1953), 22.
- (18) W. S. Boyle and L. H. Germer: *J. Appl. Phys.*, **26** (1955), 571.

点の形状は 5ϕ , $20R$ に統一した。合金試料の成分比は指定しない場合 50% 合金としすべて原子重量を用いた。

開閉試験はすべて抵抗負荷の直流回路とし、電圧 $2\sim 8V$, 電流 $1\sim 45A$ の範囲として接点面の酸化などに伴う接触抵抗の上昇を防ぐためアルゴン雰囲気中で試験を行なった。また試験機は著者が試作したカム式の開閉試験機を使用し、開閉速度 1.6 cm/sec , 開閉頻度 $30/\text{min}$ で 3×10^5 回開閉後の陽極消耗量をマイクロ天秤感度 $1/1000\text{ mg}$ によって測定した。なお陰極増量は移転層の離脱などに伴ない測定値がばらつくため陽極減少量をもって移転量とした。これらの試験においては接点分離時のチャッターが大きく影響する。よつて接点を振動吸収板を介して取りつけ、開閉速度についても考慮し、シンクロスコープで調べてチャッターが起こらないことを確かめた。

III. 実験結果および考察

各種の金属およびその合金接点の試験後の移転層の形状は、試料によつて比較的平坦なものあるいは突起のあるものなど多様である。この移転層の形状および移転量は接点材料に要求される重要な性質であるが、本報では移転量を主体に検討する。この移転量がどのような物理的性質に依存するかについては鳳⁽²⁾⁽⁹⁾の研究があり、単体金属接点の融解までの熱容量（融解温度と比熱の積または融解温度と比熱の積と融解潜熱の和）と移転量の間に同一試験条件のもとでは相関関係があることが報告されている。

これを合金接点まで延長して考える場合、合金の比熱および融解潜熱は明確でないものが多い。よつてこれらを他の既知の値におき換える必要がある。金属の高温における比熱は $6/\text{mol cal/deg}$ で表わされ、また融解潜熱は融解温度/mol に比例すると考えられる。よつて各試料の融解温度と比熱の積または融解温度と比熱の積と融解潜熱の和の大きさは融解温度/mol によつて比較できる。これによつて合金接点のごとく比熱および融解潜熱の明らかでないものでも、融解温度を $T_m^\circ\text{K}$, 平均原子量を M とすると T_m/M

Fig. 1 Amount of material transfer as a function of T_m/M . T_m is melting temperature in degrees Kelvin and M is the atomic weight of contact materials. Value of material transfer W for each metal from Holm⁽¹⁾ and Ho⁽²⁾

M によつて試料の融解までの熱容量の大きさが表わされ、単体金属と同様に扱うことができる。

Fig. 2 Amount of material transfer as a function of T_m/M . M is the mean atomic weight of contact materials. Applied voltage is 2 volts and circuit current is 20 amperes

Fig. 3 Amount of material transfer as a function of T_m/M . Applied voltage is 6 volts and circuit current is 10 amperes

Fig. 4 Amount of material transfer as a function of T_m/M for a number of Au-Ni alloys. Applied voltage is 6 volts and circuit current is 10 amperes

Fig.1 は鳳⁽²⁾ および Holm⁽¹⁾ の測定値を引用したものである。 T_m/M の大きな金属ほど移転量の少ない傾向を示している。

でなく種々の組織をもつ合金も含まれているが、単体金属の結果と同じ傾向を示し、合金組織の影響は少ないと考えられる。この関係をより明確にするために T_m/M を広い

(a) Ag

(b) Cu

(c) Ag-Cu

Fig.5 Amount of material transfer as a function of circuit current. Applied voltage is 2 volts

Fig.2 および 3 には金属および 50% 合金の接点を用いて試験した結果を示した。各試料は均一固溶体の合金のみ

範囲に変えられる Au-Ni 合金を選び成分比を変えた試料について試験を行ない、その結果を Fig.4 に示した。これらの結果から合金においても T_m/M の値が大きくなると移転量は少なくなることがわかる。

Fig.5 および 6 には移転量の回路電流依存性を電圧 2 V および 6 V として、電流を変化させて試験し、その結果を示した。移転量を W 、回路電流を I とするといずれの試料も

$$W \propto I^2 \quad (1)$$

の関係にある。

また Fig.7 に示したごとく接点開離時には bridge が形成され回路遮断まで bridge によつて電圧が降下する。よつて各接点の開離時過渡状態が移転量とどのような関係にあるかを調べる必要がある。この bridge 破断時の bridge による電圧降下分をシンクロスコープを用いて測定し、これを E_r (V) として T_m との関係を Fig.8 に示した。この結果から

$$E_r = 6.9 \times 10^{-4} T_m \quad (2)$$

が求まる。この E_r は回路電圧、電流の変化による依存性がわずかであり、回路条件に関係なく一定と考えてさしつかえない。また E_r は bridge が沸騰温度に到達する電圧であつて、接点の沸騰温度と比例関係にある⁽¹⁾⁽³⁾⁽¹⁶⁾。よつて bridge は熔融状態にあつて開離とともに温度が上昇し、

E_r まで電圧降下したときに沸騰温度に達し, bridge が破断するものと考えられるため T_m は本来沸騰温度を用いる

回路電圧を E (V) とすると bridge 破断によって回路が遮断するときの接点間電圧は $E - E_r$ (V) である. このときの

(a) Cd

(b) Au-Ni

Fig. 6 Amount of material transfer as a function of circuit current. Applied voltage is 6 volts

Fig. 7 Change in circuit current during rupture on the tungsten contact. E_r is the bridge voltage at rupture and I_r is the final current through a contact bridge. Applied voltage is 4 volts and circuit current is 10 amperes

べきであるが, 合金においては沸騰温度が明らかでないために融解温度によって表わした.

Fig. 8 Bridge voltage at rupture as a function of melting temperature of contact materials. Applied voltage is 4 volts

電流を I_r (A) とすると

$$I_r = (1 - E_r/E) I \quad (3)$$

で表わされ実際に回路が開かれるのは I_r である. これから(1)式を考慮して $W \propto I_r^2 = (1 - E_r/E)^2 I^2$ の関係が考えられる. よつて W と $(1 - E_r/E)^2$ の関係を $I=10$ A および 20 A で電圧を変えて試験し, その結果を Fig. 9 に示した. こ

Fig. 9 Amount of material transfer as a function of $(1 - E_r/E)^2$

れは $E \leq 6$ V で

$$W \propto (1 - E_r/E)^2 \quad (4)$$

の関係にあることを示している. よつて W と I_r^2 とは比例関係にあり, Ag, Pt などについて行なつた Holm⁽¹⁾, Ittner⁽¹⁶⁾ らの結果と一致している. しかし破線で示した $E > 6$ V では, 急激に移転量が増加して移転機構が異なることを示している. また Fig. 1, 2, 3 において移転量と接点の融解までの熱容量が逆比例し $WT_m/M = \text{constant}$ であると仮定すると W , Mo などの高融点試料ほど予想される移転量より少ない値を示す. これは高融点試料の方が $(1 -$

E_r/E の値が小さくなるため、同一試験条件でも試料によつて I_r がそれぞれ異なるためと考えられる。これから

Fig. 10 Amount of material transfer as a function of $M(1-E_r/E)^2 I^2 / T_m$

定数を K とすると

$$W = KM(1-E_r/E)^2 I^2 / T_m \quad (5)$$

が求まる Fig. 10 は (5) 式と実験値の対応を示したもので金属および合金接点の移転量は接点材料の平均原子量、融解温度、回路条件によつて表わされ、これから W を mg で表わすと $K=2.5 \times 10^{-7}$ が求まる。

つぎに下記のごとき諸結果を考慮して移転の起こる機構について考え、(5) 式が適用できる範囲について検討する。

(1) 移転はいずれの試料も陽極から陰極の方向に起こり、その移転量は I^2 に比例する。また Fig. 5 に示したごとく、試験電流値の増加とともに陽極減量に対する陰極増量の収率が一般に高くなる。

(2) 移転は接点動作のうち主に開離時に起こり、定常状態での接触抵抗、接触力およびこれらから概算で求めた bridge の径と移転量はほとんど依存性がない。

(3) bridge 破断時の bridge 長さや移転量の関係を調べると長い方 (bridge 破断時の電極間の広い方) が (5) 式で求めた値よりも一般に移転量が少ない傾向にある。

(4) 接点开離時に移転に作用するエネルギーは接点材料の熱電子電弧系、冷陰極電弧系など物理的性質の影響をほとんど受けず回路条件で定まることを (5) 式は示している。熱電子電弧系接点の方が冷陰極電弧系接点よりも移転量は少ないがこれは T_m が高いためであつて放電機構が影響しているのではないと考える。

(5) Ag と W の組合せ接点の移転方向は陽極から陰極の方向であつて、Ag を陽極、W を陰極として試験を行なう

と陽極移転量は Ag 対 Ag の場合に等しい。また W を陽極、Ag を陰極とすると W 対 W の場合にはほぼ等しく、移転量は陽極材料に大きく依存すると考えられる。

この移転の起こる機構は従来主に熱電気効果と short arc によつて説明され、またエレクトロトランスポートも考えられるがさきに列挙した各項はいずれも熱電気効果およびエレクトロトランスポートによつては説明し難い。しかし short arc について考えると、接点試験回路には必ずインダクタンスが含まれこれをのぞくことはできない。この回路を開離するとき bridge は I_r で遮断され、このときの回路の充電エネルギーのほとんどは bridge 破断時に short arc として電極間で放出されるであろう。この電極間隙が陰極から放出された電子の平均自由行程よりはるかに短いならば、電子は bridge 破断時に沸騰近くまで温度上昇している陽極点に直接衝突し、これによつて陽極が蒸発、飛散して陰極面上に付着するので short arc エネルギーのほとんどは蒸発潜熱として働く、このように考えるとき列挙した各項は容易に説明でき、移転は主に short arc によつて起こり、熱電気効果依存性はきわめて小さいと考え

Fig. 11 Amount of material transfer as a function of circuit current for the tungsten contact. Applied voltage is 2 volts

られるが今後電界蒸発などの影響も加えて検討しなければならないと考える。これらのことから移転量は沸騰までの熱容量と相関関係があるので本来 (2) および (5) 式の T_m は沸騰温度を用いるべきであるが、金属においては融解温度、沸騰温度、沸騰温度での蒸発潜熱と原子量の積のそれぞれの間にはほぼ比例関係があり、また蒸発潜熱は融解潜熱の約 30 倍と考えてさしつかえないので合金接点を扱うに便利な融解温度を便宜的に用いた。ただし Sn のような半金属には適用できない。

つぎに (5) 式が適用できる範囲について検討する。Fig. 11 には W 接点を用いて $E < E_r$ の範囲である $E=2V$ で試験した結果を示した。このような条件での移転量は極端に少なく、回路電流の 4~5 乗となる。また Germer, Ittner ら⁽¹⁶⁾ によれば Ag 接点について電圧 3~6 V で試験

したところ電流 2 A 以下では移転量が電流の 3 乗に比例すると報告している。これらの場合、回路遮断時に bridge は沸騰温度に達することなく、機械的に破断し、陽極点温度が沸騰温度近くまで達していないため short arc エネルギーの蒸発への寄与の割合が低くなるため、電流値が小さくなるにしたがつてますますこの割合が低くなると考えられる。また Fig.9 の $E > 6V$ の範囲で移転機構が異なることを考慮すると (5) 式の適用範囲は、電圧においては $6V \geq E > E_r$ 、電流においては I_r が最小アーク電流 $I_{\min}$ より小さくなると移転機構が異なると考えられるので、 $I > I_{\min}/(1-E_r/E)$ となる。

また (5) 式の K と回路のインダクタンスの関係について、その略図を Fig.12 に示した。A : 接点試験回路の配

Fig.12 Simplified representation for the constant K in the empirical formula (5) as a function of local circuit inductance L

線技術的に実現不可能なインダクタンスの範囲、B : 無誘導負荷を用いた試験回路のインダクタンスの範囲、C : 試験回路のインダクタンスが可変な範囲。C 範囲の移転は回路のインダクタンスに対して非常に複雑に変化し、移転量および移転方向の反転などそれぞれの接点材料によつて著しく異なる^{(4)~(7)}。これは (5) 式の定数 K が変化することであり、この範囲には適用できない。これは short arc 長さが電子の平均自由行程と比較し得る程度になったために、電子のふるまいのみによつて説明できず陽イオンについての考慮が必要となるためと考える。よつて (5) 式は A、

B の範囲のごとく、無誘導負荷回路のもつ程度の小さなインダクタンスの試験回路で short arc 長さが電子の平均自由行程に比べて十分短かく陽イオンの作用を無視できると考えられる範囲に適用される。この場合回路インダクタンスのもつ充電エネルギーが遮断時に short arc として接点間で放出されると考えられるから A、B の範囲では K と L が関数関係にあり実験者によつて K の値が多少異なることがあつても当然と考えられる。

以上の移転量はいずれも重量をもつて表わしたが体積によつて表わした方が適当な場合もある。接点材料に用いられる金属では、密度と原子量がほぼ比例関係に近いと考えられる。よつて体積で表わした移転量を W_v 、定数を K_v とすると (5) 式から近似的に

$$W_v = K_v (1 - E_r/E)^2 I^2 / T_m \quad (6)$$

が求まり、同一試験条件での金属および合金接点の移転体積は接点材料の融解温度が高いほど少なくなる。

IV. 結 論

最小アーク電圧より低い直流回路開閉によつて起こる小移転について各種の金属およびその合金接点を用いて試験し、つぎの結果を得た。

移転量は

$$W = KM (1 - E_r/E)^2 I^2 / T_m$$

W : 移転量 (mg/operation), K : 定数 2.5×10^{-7} , M : 平均原子量, T_m : 融解温度 (°K), E_r : $6.9 \times 10^{-4} T_m$, E : 供給電圧 (V), I : 回路電流 (A) で表わされ、この実験式は電圧については $6V \geq E > E_r$ 、電流については $I > I_{\min}/(1 - E_r/E)$ 、また short arc が電子の平均自由行程に比べて十分短くなるような小さいインダクタンスの範囲に適用できる。

この移転を起こす主たる原因は回路のインダクタンスによる充電エネルギーのほとんどが接点开離の bridge 破断時に short arc として放出され、この電子が陽極に衝突し、これを加熱蒸発させて陰極に付着させ移転を起こすのであつて熱電気効果依存性はきわめて小さいと考える。