

真空中におけるコンタクトの材質移転と消耗

河 合 吉 文*, 横 井 清*

Material Transfer and Erosion of Electric Contacts in Vacuum

Yoshifumi KAWAI* and Kiyoshi YOKOI*

(Received March, 31, 1983)

Material transfer and erosion of electric contacts show polarity in vacuum in direct current circuit. In the case of the long arc material transfer, the polarity tendency changes depending on the load conditions and materials. The properties of Ag, Ni, W, Ag-Ni contacts in vacuum are investigated with decreasing residual gas pressure, and the following characteristics are found: in the case of resistant load conditions, silver contacts show material transfer from anode to cathode below 10 Torr range, while in the case of inductive load conditions they show it from cathode to anode, but no talways on the other materials.

1. ま え が き

コンタクトは、半導体スイッチに較べ、電流を完全に遮断できる有意性がある。直流回路においては、電極の消耗と相まって、コンタクトの材質が、一方の電極面から他方の電極面へ移転する現象がある。正負どちらの電極へ移転するかは、回路条件、電極材料、雰囲気等により異なるが、大別すれば、大移転と小移転に分けられる。大移転は、回路電圧および電流が充分に大であって、電極間に放電が発生する場合を云い、小移転は、そうでない場合を云っている²⁾。空気中のコンタクトの現象については、実用性と相まち数多くの研究がされてきており¹⁻¹⁰⁾、本報告と関連の深い、コンタクト材質の電流・電圧による移転図⁵⁾、消耗機構⁶⁾、Ag系コンタクトの消耗移転現象⁹⁾¹⁰⁾等の報告がある。真空中におけるコンタクトの従来の研究をみる、と放電特性¹¹⁾、寿命特性¹²⁻¹⁴⁾、等の報告がなされているが、その真空領域は、狭い範囲(例えば、5~150 Torr¹¹⁾、 10^{-1} Torr と大気中の比較¹²⁾)である。コンタクト材質の消耗及び移転の現象は、負荷条件、材質、電流・電圧、雰囲気等により必ずしも一定

しておらず複雑な特性を示すが、真空中におけるコンタクトの特性は、真空度により放電形態が異なるため、さらに困難な問題点が多く存在する。真空コンタクトは、通常、真空度が 10^{-3} ~ 10^{-4} Torr 以上の高真空中に封入されたものをいっている¹⁵⁾¹⁶⁾。

筆者らは、空気中及び 10^{-3} ~ 10^2 Torr において、 10^{-1} 倍ごとに真空度を減圧し、コンタクトの材質移転と消耗についての研究¹⁸⁻²²⁾を行ってきたが、比較的軽負荷の中電流領域におけるもので、大移転の分類に属するものである。電流依存性²⁰⁾、誘導負荷依存性²¹⁾、材質依存性²²⁾等についての概要が得られたのでここにまとめて報告する。

2. 実験条件及び方法

実験条件及び方法は、既報¹⁹⁻²²⁾と同様であるが重ねて述べる。

実験に使用したコンタクトの材質は、純 Ag, Ni, W, Ag-Ni 合金である。コンタクトの形状を Fig.1 に示す。直径は約 6mm ϕ で、重さは約 2g 前後である。真鍮の台座の上にコンタクトの材質が取りつけてある。これをガスの放出を極力おさえるように改造した市販のパワー・リレーに取りつけ、平面側を固定して陰極側に、曲率側

*工業物理学科 (Department of Engineering Physics)

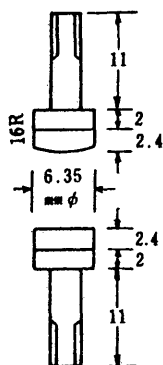


Fig. 1 The shape of contacts

を可動部として陽極側とした。そして、これを真空容器内にセット、真空度を変化させて実験を行った。電極の消耗及び移転量の測定は、直示天秤を用いて重量法で行った。最初、コンタクトの表面を、トリクロルエチレン、アルコール、蒸溜水の順序で洗滌し、次に直示天秤で、動作前と動作後の重量を測定し、前後の重量差よりコンタクト材質の消耗量と移転量を測定した。

電気的回路は、直流で、抵抗負荷並びに誘導負荷で行った。使用した抵抗は、セラミック質体抵抗器で誘導成分の少ないものである。誘導体としては、自作した空芯コイルを用いた。

実験条件は、既報¹⁹⁻²²⁾と同一であるが、一定条件のものを下記する。

- 1) 電圧は、DC 24V である。
- 2) 静的接触圧力は、約 30 g である。
- 3) 接点間隙は、約 4 mm である。
- 4) 動作回数は、毎分 300 回で、 5×10^4 回である。

3. 実験結果

(3-1) Ag コンタクトの材質の移転方向

Ag コンタクトの抵抗負荷（擺動抵抗器）と誘導負荷（25 mH：空芯コイル）の結果¹⁹⁾を Fig. 2 に示す。この結果では、誘導負荷の場合には、真空度に関係なく、陰極が消耗し、陰極から陽極への材質の移転方向を示している。抵抗負荷の場合においては、空気中並びに 100 Torr において、誘導負荷と同じく陰極から陽極への移転方向を示しているが、10 Torr 以下の圧力では、陽極から陰極へと移転方向が反転している。誘導負荷依存性の結果²¹⁾を Fig. 3 に示す。この結果から、誘導負荷を 0.1 mH, 1 mH, 10 mH と大きくするに従って、陰極が消耗し陰極から陽極への材質移転の極性が反転する真空領域が、各々、 $1 \sim 10^{-1}$ Torr, $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Torr, $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Torr の間に存在し、誘導負荷を大きくするに従っ

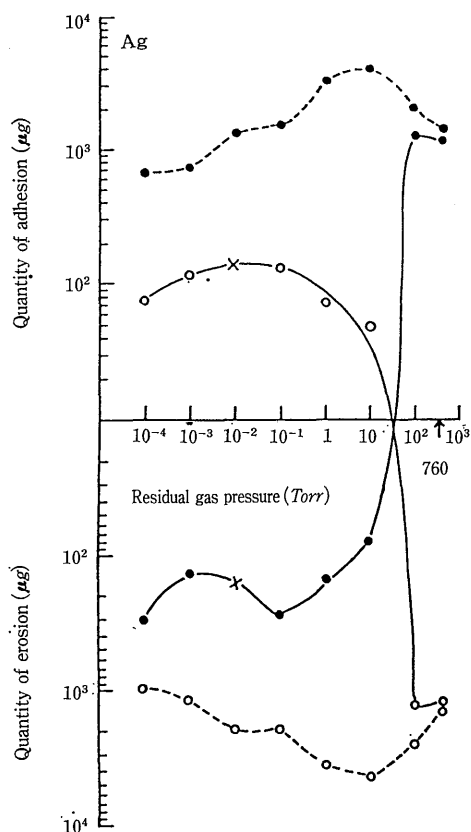


Fig. 2 Material transfer and erosion depending upon inductive load and resistant load in vacuum:

- Anode (Resistant load)
- Cathode (Resistant load)
- - -●- - - Anode (Inductive load)
- - -○- - - Cathode (Inductive load)

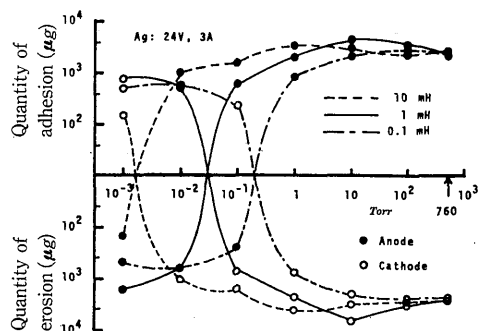


Fig. 3 Material transfer and erosion depending upon variable inductive load in vacuum

て、反転する真空領域が高真空側に移動している。Fig. 2 と Fig. 3 の結果を比較すると、Fig. 2 の誘導負荷 (25 mH) の場合には、移転方向が陰極から陽極へとどの真空領域においても起っている。Fig. 3 の場合には誘導負荷の値を大きくするに従って、反転の真空領域が高真空側に段々とづれていく。10 mH よりもさらに大きな 25 mH にした実験結果が、Fig. 2 の結果である。Fig. 2 において、抵抗負荷の場合に $10 \sim 10^2$ Torr の領域で反転が起っているが、この場合は、通常の擺動抵抗を用いており、この擺動抵抗には、 $80 \mu\text{H}$ 程度の誘導成分がある。Fig. 2 の場合において使用した電流制御のための抵抗は、誘導成分の極めて少ないセラミック質体抵抗器を使用した場合の結果である。誘導負荷の値が小さくなる程高圧力側に反転領域が移行するのが判る。

次に、消耗量に対する移転量の割合を、Table 1 と Table 2 に示す。Table 1 は、Fig. 2 におけるもので

Table 1 The ratio of the amount of transfer to erosion (see Fig. 2).

Torr \ load	resistance	inductance
760	0.95	0.94
100	0.97	0.88
10	0.59	0.93
1	0.37	0.90
10^{-1}	0.68	0.77
10^{-2}		0.67
10^{-3}	0.85	0.63
10^{-4}	0.35	0.73

Table 2 The ratio of the amount of transfer to erosion with variable inductance (see Fig. 3)

Torr \ mH	0.1	1	10
760	0.98	0.79	0.98
100	0.99	0.98	0.90
10	0.96	0.97	0.90
1	0.93	0.90	0.95
10^{-1}	0.93	0.89	0.97
10^{-2}	0.96	0.84	0.93
10^{-3}	0.99	0.71	0.96

あり、Table 2 は Fig. 3 におけるものである。この表

より、Ag コンタクトの場合には、消耗量に対する転移量の割合は、非常に高率を示している。真空度が高くなると少し低率になる傾向がある。

(3-2) Ag コンタクトの電流依存性

Ag コンタクトの移転方向の電流値依存性の結果を Fig. 4²⁰⁾ に示す。実線は、24V, 3A で、破線は 24V,

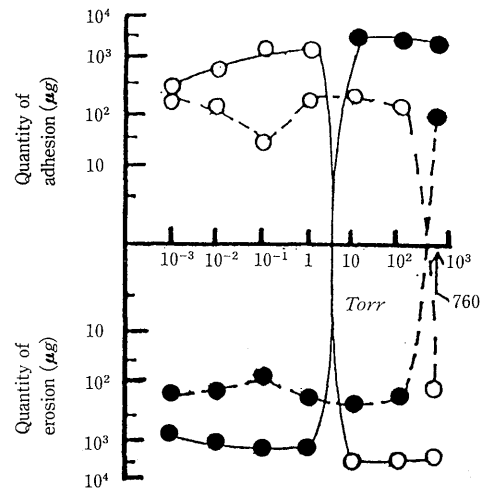


Fig. 4 Material transfer and erosion depending upon variable current with lamp resistant load:
 — 3A, 24V ● Anode
 ---- 0.87A, 24V ○ Cathode.

0.87 A である。この実験では、電流値制御の抵抗体として、ランプ負荷抵抗を用いている。ランプ抵抗は、コンタクトの閉成時に突入電流があるが、無誘導である。電流値を小さくすると、高圧力側に反転領域が移行している。

(3-3) 材質依存性

前節までは、Ag の場合の結果を述べたが、材質によりいかなる結果になるかを調べた結果を Fig. 5 (Ni)²²⁾, Fig. 6 (W)²²⁾, Fig. 7 (Ag-Ni) に示す。Ni と W の場合には、Ag の結果と異なり、真空度により材質の移転方向が反転する真空領域は存在せず、両電極が消耗する真空領域が存在すると云う特異性を示す結果となった。Ni の場合には、 $10^{-3} \sim 10$ Torr までは陰極が消耗し、陽極へコンタクト材質が移転するのみで反転はなく、100 Torr $\sim$ 760 Torr では両電極が消耗している。W の場合には、両極性消耗は Ni に比べ、さらに低圧力側に移行している。 10^{-3} Torr において、0.1 mH の場合には陽極が消耗し陰極へ材質が移転しているが、測定ミスカシ

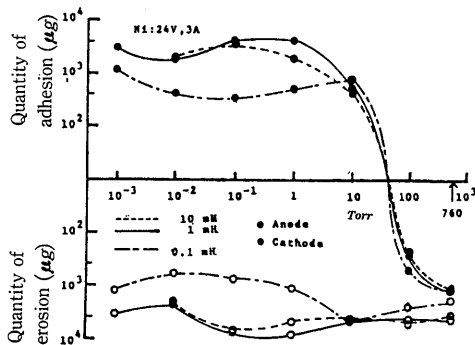


Fig. 5 Nickel (Ni) contacts

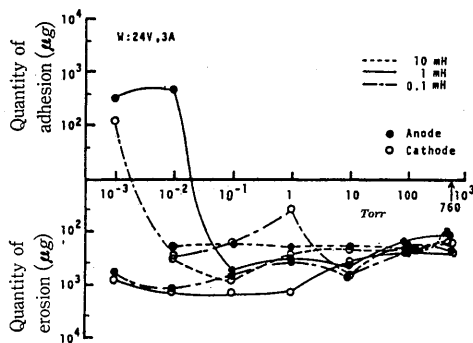


Fig. 6 Tungsten (W) contacts

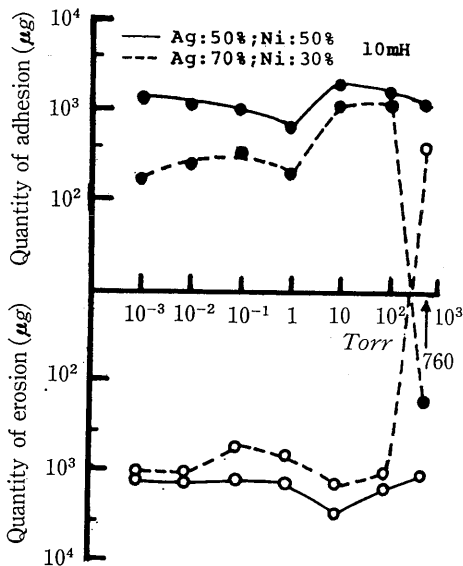


Fig. 7 Ag-Ni alloys contacts

ヨートアークに依るものかは判別でき難い。

Ag-Ni 系の材質においては, Ag の場合と同様な反転領域が存在する。Ag : 70%; Ni : 30% の場合に $10^2 \sim 760$ Torr の領域で反転が起っている。

これらの結果より, コンタクトの材質移転の方向は, 材質により大きく左右されると思われる。

4. 考 察

コンタクトの消耗と移転は, お互いに深く係わり合っており, 条件により複雑な様相を程するが, 本報告においては, 移転方向に主眼を置き考察する。空気中における材質移転の研究については, 直流無誘負荷回路において, 電流・電圧による移転特性図⁵⁾が作成されている。それによると, 橋絡移転領域 ($\oplus \rightarrow \ominus$), 電子衝撃による Anode Arc 領域 ($\oplus \rightarrow \ominus$), Normal Arc 領域 ($\oplus \leftarrow \ominus$), Normal Arc 領域 (大電流領域) ($\oplus \rightarrow \ominus$) の四つのタイプに大別されている。本報告における Ag コンタクトの場合には, 電圧・電流が 24V, 3A (及び 0.87 A) であるので, Normal Arc 領域の条件に合い, 移転方向 ($\ominus \rightarrow \oplus$) も満足しているが, 真空度により反転する真空領域があるので, 真空中においては Normal Arc 領域と決定することはできない。誘導負荷回路の場合には, Ag コンタクトで, 6.5V, 5A の場合の結果が報告されている。この電圧・電流値は, 橋絡移転領域に属する。この型の場合の移転方向は, $\oplus \rightarrow \ominus$ であるが, 誘導成分により $100 \mu\text{H}$ 以上で移転方向が反転をし, Normal Arc 領域の移転方向である $\oplus \leftarrow \ominus$ への現象を示すことが報告されている。本実験の場合には, Fig. 2 における抵抗負荷として撓動抵抗を用いており, この抵抗の誘導分が $80 \mu\text{H}$ ほどあり $\oplus \leftarrow \ominus$ の移転方向を示しているので, 浅井氏の報告の内容とほぼ一致している。又, 相田氏⁸⁾により, 負荷抵抗に水抵抗器 (誘導分を避けるため) を使用し, 電圧・電流を 35V, 50V, 70V, 1~5A で, 接触力約 20g の条件で Ag コンタクトについての報告があるが, 移転方向は $\oplus \leftarrow \ominus$ である。Germer 氏²³⁾は, 陽極アーク (Anode Arc) と陰極アーク (Cathode Arc) の二つの型に分類している。Anode Arc は, 陽極を主に消耗し小間隙で起り, Cathode Arc は陰極を主に消耗し大間隙で起るとしている。間隙の臨界値を Ag の場合, $0.5 \times 10^{-4} \text{ cm}$ としている。本実験の場合には, コンタクトの間隙が約 4 mm であるので Cathode Arc のタイプに属する。実験結果も Ag の場合, 陰極が消耗し陽極への移転方向を示している。Germer 氏のいう Cathode Arc のタイプである。又, Germer 氏は, Ag コンタクト表面のカーボンによる活性化, 非活性 (clean surfaces) により Cathode タイプ (active) と Anode

タイプ (iacntive) になることを述べている²³⁾²⁴⁾。移転方向の反転も、0.5A の電流で 3500 μ H 以下の誘導負荷で Cathode タイプから Anode タイプへの移行が非活性な Ag コンタクトで起ることが報告されている²³⁾。

真空中のコンタクトの研究については、永井氏等の報告¹²⁾がある。材質は、白金コンタクトで、電圧・電流が 12V, 0.1~2A の抵抗負荷回路である。真空度は約 10^{-3} Torr である。実験結果によれば、移転の方向は大気中とは逆に、陰極が消耗し陽極に突起を生じた結果が報告されている。本報告の場合には、 10^{-3} Torr においては、いずれの結果も抵抗負荷回路で陽極が消耗し陰極へ移転をしている¹⁹⁾²⁰⁾。コンタクト材質が Ag で、回路条件がほぼ永井氏らの実験条件と同じであるが、逆の移転方向特性となっているのは、コンタクト材質の違いによるものと思われる。

5. 結 言

従来よりも広い真空領域について、コンタクトの材質移転・消耗の特性を報告したが、本論文では材質によりその特性が大きく左右されることが明らかとなった。消耗・移転の現象は、アークが主体となる。静的電極による真空アークについては数多くの研究がなされてきているが、本論文のような動的電極におけるアークは、アークに起因する金属蒸気中で起り、物理的な諸定数も不明な点が多く今後の研究にまたねばならない。

終りに、本実験に使用したコンタクトは、中部工業大学特別研究費により購入したものであり、ここに謝意を表します。

文 献

- 1) R. Holm : Electric Contacts, 4th ed., (1967), Springer-Verlag.

- 2) 鳳 誠三郎 : 電気接点と開閉接触子, 第 4 版, (1967) 金原出版.
- 3) 藤本正男 : 電気接点材料, 第10版, (1965).
- 4) 土屋金彌 : 電気接点技術, (1980), 総合電子出版社.
- 5) H. Asai : Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Contact Phenomena, Tokyo, (1976), pp. 580-584.
- 6) 土屋, 小山 : 電気学会誌, Vol. 87-7, No. 946, pp. 1365-1372, (1967).
- 7) 佐藤, 土方, 森本 : 金属学会誌, Vol. 36, No. 3, p. 238 (1973).
- 8) 相田 : 電子通信学会機構部品研究会資料, EMC 72-41, (1973-02).
- 9) 山森等 : 三菱電機技報, Vol. 33, No. 10, p. 116, (1959).
- 10) 同 上 : 三菱電機技報, Vol. 34, No. 5, p. 71, (1960).
- 11) 大山, 三谷 : 電気三学会連合大会, 72, (1955).
- 12) 永井, 真野, 松本他 2 名 : 電気三学会連合大会, 217, (1955).
- 13) 光井, 鳥山 : 電気四学会連合大会, 104, (1963).
- 14) 永井, 真野, 松本 : 継電器研究会資料, (19525).
- 15) 伊藤, 大倉 : 三菱電機技報, Vol. 36, No. 11, p. 92 (1962).
- 16) 伊藤, 大倉 : OHM, No. 4, p. 48, (1963).
- 17) 河合, 横井 : 中部工業大学紀要, 第 7 巻, p. 121 (1971).
- 18) 河合, 横井 : 電気四学会東海支部連合大会講演論文集, 18 P-G-11, p. 342, (1972).
- 19) 河合, 横井 : 中部工業大学紀要, 第 9 巻, A, p. 99, (1973).
- 20) 河合, 横井 : 電子通信学会総合全国大会講演論文集, 分冊 1, 1-179, (1977).
- 21) 河合, 横井 : 電子通信学会総合全国大会講演論文集, 分冊 1, 1185, (1979).
- 22) 河合, 横井 : 電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 97, (1979).
- 23) L. H. Germer : J. Appl. Phys. **29**, 1067 (1958).
- 24) L. H. Germer and J. L. Smith : Bell system Tech. J. **36**, p. 769 (1957).