

銀合金接点の材質移転と消耗

河合吉文*, 横井 清*

Material Transfer and Wear of Silver Alloy Contacts

Yoshifumi KAWAI* and Kiyoshi YOKOI*

(Received September 1, 1971)

Material transfer of electric contacts shows polarity in direct current circuit. In case of the coarse transfer, the polarity tendency changes depending on the load conditions, and the contact generally has the transfer tendency of "from cathode to anode". The properties of contacts in air on *Ag-W* alloys and *Ag-Ni* alloys are investigated, and the following interesting characteristics are found: *Ag-W* contacts show material transfer from anode to cathode, while *Ag-Ni* contacts from cathode to anode.

The ratio of the amount of transfer to that of wear decreases with increasing inductance of *Ag-W* contacts, but it is roughly constant on *Ag-Ni* contacts. The amount of wear increases with increasing inductance on *Ag-W* and *Ag-Ni* contact.

The surface features of the contact members are roughed almost over the contact surface in the circuit conditions of high voltage and large current. However, in other circuit conditions small concentrated parts of roughed surfaces appear.

1. 序

電気接点における材質移転並びに消耗の現象は、一方の材質が熔融・蒸発をし、他方の接点表面に附着、又は周囲に飛散する現象を言っている。この問題は、種々の観点から多くの研究者により研究されてきた¹⁻⁵⁾。しかし、そのメカニズムは極めて複雑であり、機械的、熱的、化学的等の原因があげられるが、その中で、熱的因子が主要な役割を演じている。熱的因子として、放電、ジュール熱、トムソン効果等があるが、いずれが主要な役割を演ずるかは、接点の動作条件により左右される。

本研究は、この消耗・移転現象解析の一部として、銀系統の、一般に中電流以上の負荷に使用されている *Ag-W*、*Ag-Ni* 合金接点を、比較的微電流 (1~5A) における消耗・移転特性について、材質の相違が、回路条件即ちインダクタンス・電圧・電流によって如何なる影響をうけるかを比較研究を行ったものである。

2. 実験方法

実験に使用した回路は、空気中において、直流の誘導負荷回路で行った。これを Fig. 1 に示す。

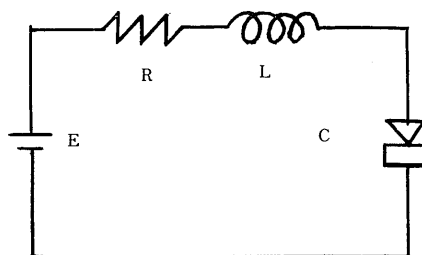


Fig. 1 Inductive circuit with arc.

E : D. C. source
R : Resistance
L : Inductance
C : Contacts

実験は、次の順序で行った。

- 1) 接点表面を、トリクロロエチレン、アルコール、蒸溜水の順序で洗滌した。
- 2) 直視天秤で、動作前の接点の重量を測定した。

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

3) 一万回の動作後、接点の重量を測定した。

接点材質は、電気化学的粉末冶金法によりつくられたもので、 $Ag-W$ 合金 (W の含有量: 30%, 50%, 70%), $Ag-Ni$ 合金 (Ni の含有量: 5%, 20%, 40%) の2種類の接点を使用した。接点の直径は約 6 mm で、陰極側に平面接点を、陽極側に曲率をもった接点を使用した。接点の開閉動作は、改良型 A. S. T. M. 装置を使用した。直示天秤の標準偏差は、 $\pm 0.01 mg$ である。

実験の条件として次に記す。

- (1) 静的接触圧力は、50 g である。
- (2) 動作回数は、毎分100回で、一万回である。
- (3) 平均開離速度は、7 cm/sec である。
- (4) 接点間隙は、1.44 cm である。

接触圧力の測定には、圧力センサと呼ばれるものを用いこれは、ストレイン・ゲージにより構成されており、歪を電気的信号に変換し、その信号を歪計により増幅し、電磁オシログラフで記録する。その測定系を Fig. 2 に

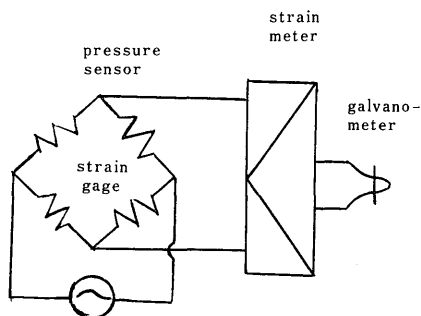


Fig. 2 measurement system of contact pressure

示す。我々の知る限りにおいては、接触圧力は、手動のテンション・ゲージにより測定されており、10~15%の測定誤差があるが、この方法によると5%以下で測定可能である。アークの持続時間は、Fig. 3 に示す測定系

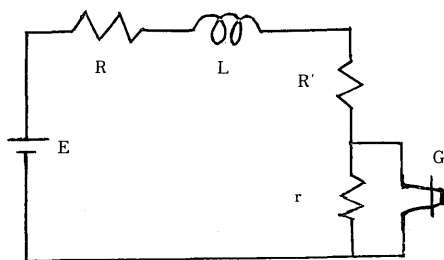


Fig. 3 The circuit of Arc duration
G: galvanometer

で測定した。抵抗 R' は、ガルバノメーターの安全電流以下におさえるためにあり、抵抗 r は、シャント抵抗である。

3. 実験結果

実験結果として、定性的に得た結果を記す。

(1) 移転方向: $Ag-W$ 接点は、陽極から陰極に移転方向を示し、 $Ag-Ni$ 接点は、陰極から陽極の方に移転方向を示し、両者は丁度反対の傾向を示す。後者は一般的傾向に従っているが、前者は、そうではない。

(2) 材質の移転量と消耗量: $Ag-W$ 接点の消耗量は、 $Ag-Ni$ 接点のものより相対的に多い。両者共に、 W 並びに Ni の含有量の増加に伴い消耗量並びに移転量は減少している。消耗量 (wear) に対する移転量 (transfer) の割合を Table 1 に示す。これをみると、 $Ag-W$ 接点

Table 1 The ratio of the amount of transfer to wear

Volt. & amp.	material inductance mH	Ag-W			Ag-Ni		
		W: 30%	W: 50%	W: 70%	Ni: 5%	Ni: 20%	Ni: 40%
V: 24 I: 5	No. 1) 25	0.85	0.65	0.82	0.87	0.98	0.40
	No. 2) 55	0.76	0.50	0.81	0.92	0.88	0.92
	No. 3) 117	0.41	0.26	0.33	0.97	0.99	0.89
	No. 4) 170	0.18	0.42	0.20	0.76	0.80	0.76
	No. 5) 200	0.20	0.42	0.37	0.83	0.91	0.94
V: 24 I: 3	No. 1) 25	0.54	0.44	0.19	0.98	0.13	0.81
	No. 5) 200	0.34	0.43	0.19	0.94	0.57	0.86
V: 24 I: 1	No. 1) 25	0.33	0.40	0.09	0.97	0.72	0.98
	No. 5) 200	0.71	0.31	0.97	0.97	0.92	0.95
V: 48 I: 5	No. 1) 25	0.73	0.93	0.88	0.98	0.87	0.89
	No. 5) 200	0.29	0.87	0.68	0.79	0.84	0.84
V: 12 I: 5	No. 1) 25	0.95	0.39	0.26	0.70	0.70	0.89
	No. 5) 200	0.27	0.35	0.65	0.87	0.85	0.55

については、インダクタンスの増加に伴い移転量は減少しているが、*Ag-Ni* 接点については、ほぼ一定の割合を示している。含有量の増加による影響をみると、移転量は、*Ag-W* 接点については、インダクタンスが低い

場合には、*W* の含有量が 50% の方が、30%、70% の方より少ないが、インダクタンスが高くなると、その逆の傾向にある。*Ag-Ni* 接点については、ほぼ一定とみなせる。消耗量については、Table 2 (a) と Table 2 (b)

Table 2 (a) Relative change of the wear with inductance

V: 24 V, I: 5 A

material inductance mH	Ag-W			Ag-Ni		
	W: 30%	W: 50%	W: 70%	Ni: 5%	Ni: 20%	Ni: 40%
No. 1: 25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
No. 2: 55	1.91	1.65	0.84	1.52	2.15	1.22
No. 3: 117	4.04	1.90	1.76	1.01	3.21	2.14
No. 4: 170	3.09	1.83	1.62	2.04	3.32	2.20
No. 5: 200	3.84	1.81	1.70	2.30	2.75	1.56

Table 2 (b) Relative change of the wear with composition of alloy

V: 24 V, I: 5 A

material inductance mH	Ag-W			Ag-Ni		
	W: 30%	W: 50%	W: 70%	Ni: 5%	Ni: 20%	Ni: 40%
No. 1: 25	1.00	0.14	0.13	1.00	0.55	0.48
No. 2: 55	1.00	0.26	0.12	1.00	0.78	0.39
No. 3: 117	1.00	0.14	0.12	1.00	0.93	0.55
No. 4: 170	1.00	0.18	0.15	1.00	0.89	0.52
No. 5: 200	1.00	0.14	0.13	1.00	0.66	0.46

に示す。Table 2 (a) の数値は、No. 1 (25mH) の消耗量を基底にとり、インダクタンスの増加に伴った消耗量を除した比率である。Table 2 (b) は、*Ag-W* については 30% を、*Ag-Ni* については 5% のものを基底にとり、各々の含有量における消耗量を除した比である。

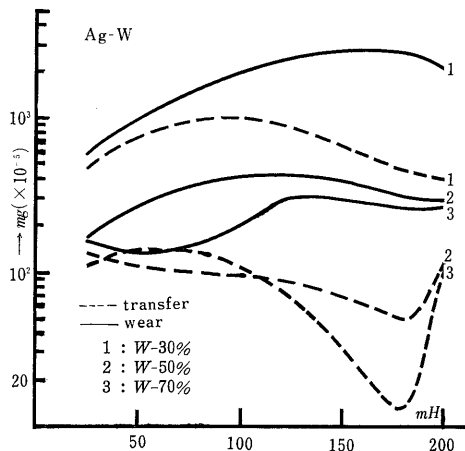


Fig. 4 Dependence of inductive load
I: 5 A, V: 24 V

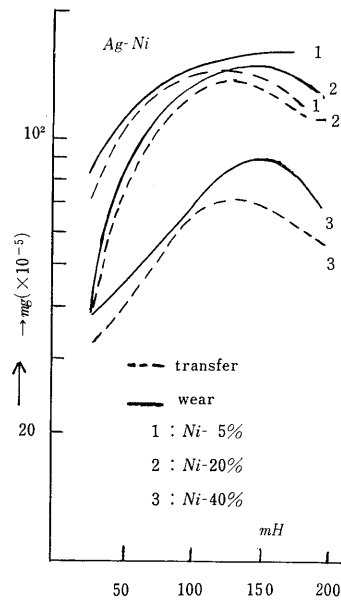


Fig. 5 Dependence of inductive load
I: 5 A, V: 24 V

Table 2(a) から判るように, 消耗量は, インダクタンスの増加に伴い増え, Table 2(b) から, 含有量の増加に伴い減少している。Ag-W と Ag-Ni のインダクタンス負荷による移転量と消耗量のグラフを Fig. 4 と Fig. 5 に示す。グラフからも判るごとく, Ag-Ni 接点については, 平行性を示しているが, Ag-W 接点の移転量は, 特に 150mH から 200mH の間に谷が存在し, 極端な減少を示している。両者共, インダクタンス負荷に対

して減少の領域をもっている。

移転量並びに消耗量の電圧による依存性については, 電圧の増加に伴い増加し, 含有量の増加に伴い減少しており, はば平行的な傾向を有している。Ag-W 接点についてのものを Fig. 6, Fig. 7 に示す。

同様に, 電流による依存性については, Ag-W についていうと, 電流値の増加に伴い, 増加する傾向にあり, W の含有量の増加に伴い減少している。これを Fig. 8, Fig. 9 に示す。

接点表面の状態を撮影したものを, Phot. 1 に示す。これより, 電圧・電流・インダクタンスの増加に伴い接点表面が荒らされている。

4. 考 察

実験結果に対する考察を下記する。

(1) 移転方向: 移転方向には, 陽極アーク転移と陰極アーク転移と呼ばれているパターンがある。前者は, 電

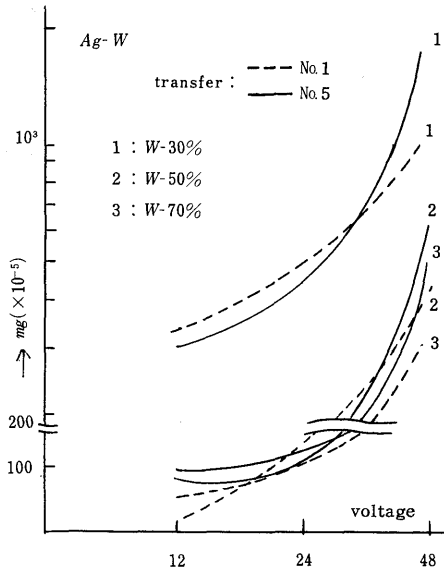


Fig. 6 Dependence of voltage
No. 1: 25mH, No. 5: 200mH
I: 5A

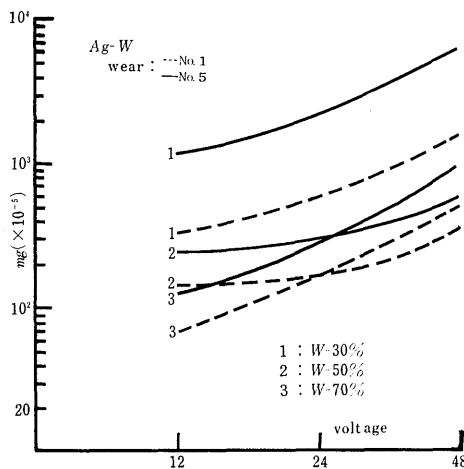


Fig. 7 Dependence of voltage
No. 1: 25mH, No. 5: 200mH
I: 5A

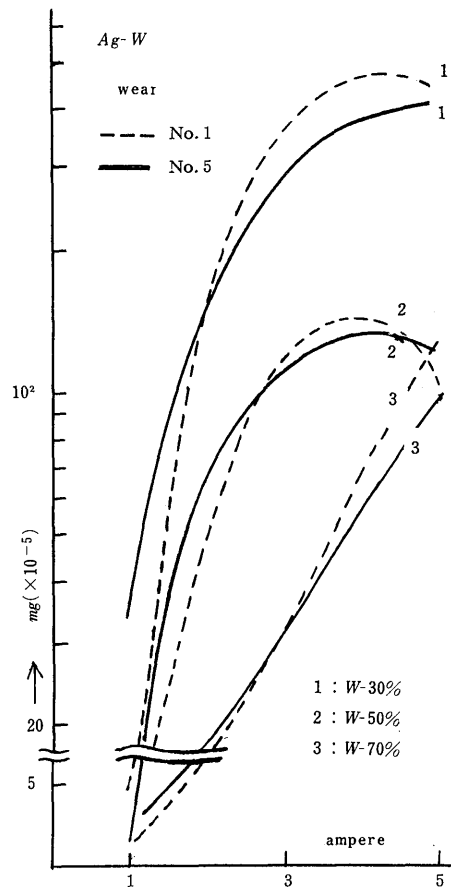


Fig. 8 Dependence of current
No. 1: 25mH, No. 5: 200mH
V: 24V

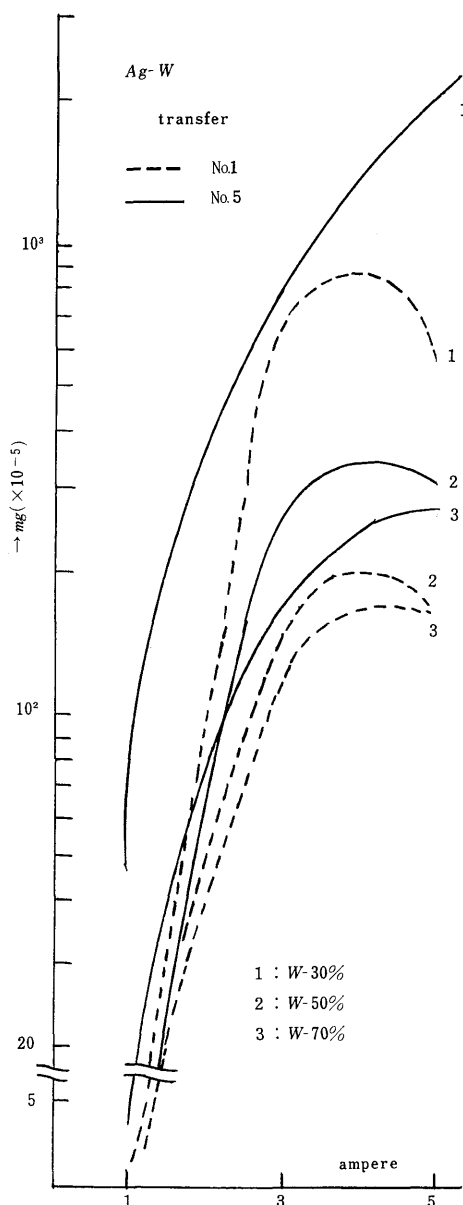


Fig. 9 Dependence of current
No. 1: 25mH, No. 5: 200mH
V: 24V

子の平均自由行程程度の間隙で発生するアークの場合で、陽極への電子の衝突により陽極が陰極よりも多量に蒸発し、陰極面に附着する現象であり、後者は、電子の平均自由行程の数倍以上になるとイオンの空間電荷の影響で、陽極への電子の衝突エネルギーが減少し、ジュール熱、イオンの衝突により陰極での熱の発生が増加し、陰極の蒸発が多くなり陽極への転移量が増す現象であ

る。このパターンによると、Ag-W 接点は陽極アーク転移であり、Ag-Ni 接点は、陰極アーク転移となる。本実験は、長間隙であるが、Ag-W 接点は陽極アーク転移となっており、この原因については不明である。この現象を、電子の放電機構からみると、冷陰極放射型電弧と熱電子型電弧に分類される¹⁾。Ag は冷陰極型で、W は熱電子型である。Ni については不明であるが、冷陰極型と思われる。これらの材質による移転方向については、分類がなく、今後の研究に待たねばならない。浅井教授は³⁾、無誘導負荷回路において、銀と銅の複合金接点について、電流と電圧による移転方向の臨界曲線を求めておられるが、我々の実験条件と違うので、直接比較検討はできない。

(2) 材質の移転量と消耗量：材質の消耗・移転はアークの熱エネルギーが主要な役割をするのであるが、Ni の融点 ($1,450^{\circ}\text{C}$) より W の融点 ($3,380^{\circ}\text{C}$) の方が高いにもかかわらず、消耗量が、Ag-Ni 接点より Ag-W 接点の方が相対的に多いのは、蒸発過程の相違と思われる。この蒸発過程は、高温で行われるため、物性的な蒸発過程が未知なる故に、消耗量、特に移転量を算出できないのが現状である。含有量の増加に伴い消耗量並びに移転量が減少するのは、Ag の融点 (960°C) と考え合せ、明らかである。

インダクタンスによる依存性は、Table 1 に示されるごとく、インダクタンスの増加に伴い移転量が減少しているのは、周囲へ飛散した為である。Table 2(a) に示されるごとく、消耗量が増加しているのは、アークの熱エネルギーの寄与が大となった為である。Ag-W 接点では、回路のインダクタンスが大きくなると、アーク持続時間も長くなるので、その間に、蒸発、飛散が多い結果と思われる。特に、Ag-W 接点の表面に形成される皮膜は、硬くて、もろい酸化タングステンなので、接点閉成時に飛散も可成り多いのではないと思われる。Ag-Ni 接点の方は、移転量/消耗量の比は、余り関係していない。これも放電時の皮膜の性質からくるもので、飛散よりも蒸発の方が多くなる為と思われる。Fig. 4 に於て、W が 50% と 70% の場合に、150mH ~ 200mH の間に谷が存在するが、この原因については不明である。誘導負荷 L とアーク持続時間 t は、 $t = k\sqrt{L}$ ⁴⁾ (k : 一定条件下における比例定数) の関係にあり、消耗量については、 L の増加に伴い持続時間は長くなり、消耗量も増えると予想されるが、Table 2(a) から判るように増加しているが、移転量については、逆の結果となっており、特に Ag-W 接点の場合、Fig. 4 に於ても見られるごとく、比例的な関係は全くない。この移転量については、未だ定説がなく、現在研究中である。真野教授は⁵⁾、Ag

接点について, $0.1 \sim 100 \mu H$ のインダクタンスについて研究を行っておられるが, 未解決の問題として, 今後の研究を示唆されている。

電圧・電流による依存性は, 過渡現象の理論で周知のごとく, Fig. 1 に示すような回路に於ては, 定常電流を I とするとすると, $E = RI + L \frac{dI}{dt} + V(I, s)$, なる関係がある。ここで $V(I, s)$ は, アーク電圧であり, s はアーク長である。この式を, アークの持続時間 t で積分すると,

$$\int_0^t V I dt = \int_0^t (E - RI) I dt - \int_0^t L I dI \\ = \int_0^t (E - RI) I dt + \frac{1}{2} L (I_0^2 - I_r^2)$$

となり, ここで, $I_0 = (E - U)/R$ で, U は接点間にかかる最終電圧である。上式において, 第一項は, 電源 E から, アークの持続時間中にアーク柱に供給されるエネルギーであり, 第二項は, インダクタンス中に蓄えられたエネルギーで, アーク柱の中で熱エネルギーに変換されるものである。電流による依存性は, 2乗の項が入っているで, Fig. 8, Fig. 9 に於てみられるごとく, 急激な変化をする。電圧による依存性は, 電圧と電流が比例関係なる故, 電流値が一定ならば, アーク抵抗にもよるが, 当然電圧の増加に伴い, 移転量並びに消耗量が平行的な傾向を示す。ここで, 移転量の電流依存性の場合に, $Ag-Ni$ について合有量の増加に伴い減少の傾向を示す原因については, 明らかではない。

材質の移転量については, 未解決の点が多く, 今後の研究に待たねばならない。

5. 結 言

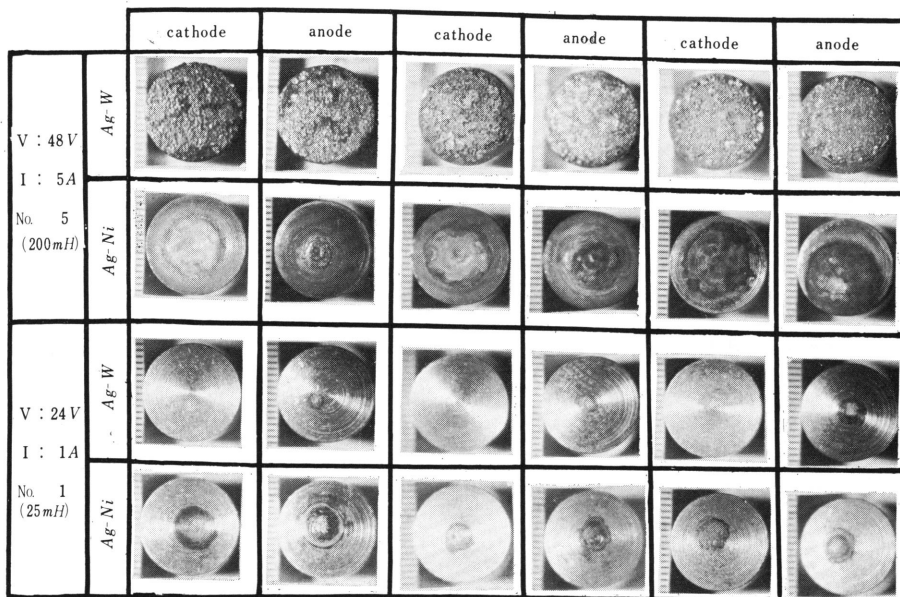
接点の移転・消耗は, 動作機構が動的な為に接点表面, 接触状態等が時間的に変化し, 又, アークの発生が確率的な為に, 多くの因子が複雑に関連し合い, 極めて複雑な様相を呈する。特に, 移転の問題は, 未解決の問題が多くあり, 蒸発過程, アークの熱エネルギーの両電極への配分比, 等今後の研究が必要である。又, 移転量のインダクタンス依存性については, さらに研究の余地がある。

謝 辞

本実験に使用した接点並びに顕微鏡は, 中部工業大学, 特別研究費による。他の機器については, 御配慮下さった工業物理学科の諸先生方に感謝を致します。特に, 本論文を書くのに当って, 有益なる助言をいただいた工業物理学科, 勝守寛教授に深く感謝を致します。なお, 実験に協力して下さいった, 工業物理学科学生, 荒川, 前川の両君に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 鳳誠三郎: “電気接点と開閉接触子” p 83, 金原出版, 第4版, (1967)
- 2) R. Holm: Electric contacts, 4th ed, p304—355, (1967), Springer-Verlag.
- 3) Hidekiyo Asai: The proceedings of international conference on electromagnet relays, A—10, (1963), Memorial Hall of Tohoku University.
- 4) 横井 清: 鉄道技術研究報告, 第271号, p.22—44, Dec., (1961)
- 5) 真野国夫, 窪野隆能: 電子通信学会, 機構部品研究会資料, 資料番号EMC68—2 (1968—04), EMC68—8 (1968—06), (1968)



Phot. 1 The features of contacts surfaces.