

Snめっき接点信頼性に及ぼす回転微摺動の影響

Influence of the Rotational Micro Sliding on the Reliability of the Tin-Plated Electrical Contact

奥野良和*¹
Yoshikazu Okuno

川田紳悟*¹
Shingo Kawata

水戸瀬賢悟*¹
Kengo Mitose

真下啓治*²
Keiji Mashimo

〈概要〉

Snめっき模擬接点の微摺動摩耗試験機による回転微摺動試験を行った結果、電気抵抗は初めは低位に安定していたがその後徐々に上昇し高抵抗となった。接触力が小さいほど、回転角度が大きいほど早期に抵抗が上昇することが判った。摺動痕の観察を行い抵抗上昇の要因を調べたところ、接触面全体が酸化摩耗物で覆われたため高抵抗になったものと推測した。

1. はじめに

自動車用コネクタはオス端子とメス端子の接続によって、電氣的に導通する役割を果たしている。これらの端子表面には防食を目的として一般にSnめっきが施されているが、数十 μm 程度の微小距離の繰り返し摺動により接触抵抗の上昇が認められ、この現象はフレッティングとして広く知られている¹⁾。

自動車用コネクタでは多極化が進んできたが、コネクタ嵌合作業者の負荷低減のため一端子あたりの接触力は小さくする傾向にある。ところが接触力は小さいほど微摺動により抵抗が上昇しやすく、抵抗の上昇を抑えるためには現象の解明が重要である。

微摺動が原因の抵抗上昇は接触力、摺動距離、接点形状、塗布油、めっき種、めっき厚に依存することが直線の往復運動摺動試験により報告されている^{1), 2), 3), 4)}。摺動のモードには直線型以外に回転型が存在し⁵⁾、過去に我々は回転微摺動がSnめっき接点の信頼性に及ぼす影響について報告した⁶⁾。その後回転中心と接触面中心とのずれを改善して、直線摺動との違い及び、摩耗量の予測について報告した^{7), 8)}。

今回、ずれを改善した状態で回転微摺動における接点抵抗の変化、劣化状況の観察・分析、並びに接触力及び回転角度の影響分析、直線摺動との比較を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

Snめっき銅合金条から縦20 mm、横20 mm、厚さ0.25 mmの試験片を切り出し、中央付近に半径2.0 mmの半球突起部を施しメス端子内部に存在する接点を模擬したエンボス片とし、また縦10 mm、横40 mm、厚さ0.30 mmの試験片を切り出し、

矩形に加工したものをオス端子のタブ部を模擬したフラット片とした。なお、エンボス片とフラット片の模式図を図1 (i), (ii)に示した。エンボス片とフラット片とを、アセトン液中で5分間超音波洗浄し、油分等の汚染物質を除去して、微摺動摩耗試験用の試験片とした。

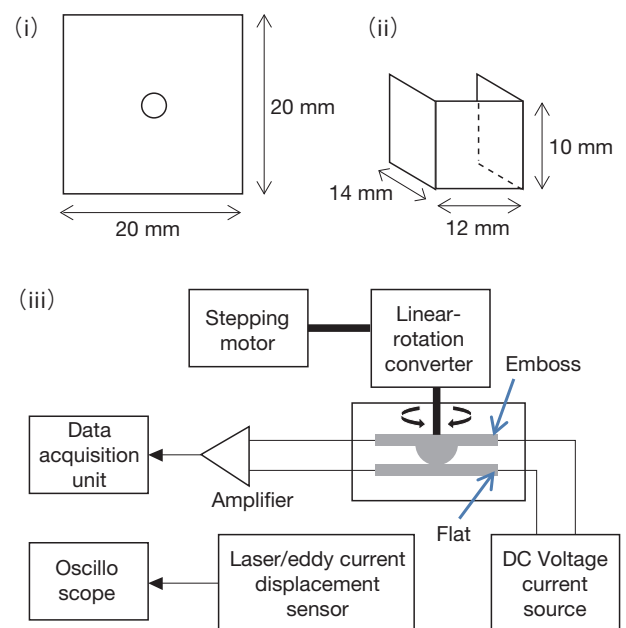


図1 (i) エンボス片, (ii) フラット片, (iii) 回転微摺動試験機の模式図
(i) Emboss test piece, (ii) Flat test piece, (iii) Schematic diagram of the rotational fretting corrosion tester.

なお、エンボス片の供試材は高強度及び応力緩和性に優れるCu-Ni-Si合金条(当社製FAS-680)とし、この合金条にNi, Cu, 無光沢Snの順に電気めっき及びリフロー処理を施した。また、フラット片の供試材には黄銅材としこの合金条にCu, 無光沢Snの順に電気めっき及びリフロー処理を施した。

*1 研究開発本部 自動車・エレクトロニクス研究所

*2 研究開発本部 先端技術研究所

表1にこれら供試材の合金組成を示す。また、表2にこれら供試材のリフロー後のめっき厚を示す。なお、ここで示すSn層及びCu-Sn金属間化合物層のめっき厚はコークール法により、Ni層は蛍光X線分析法により測定した。

表1 エンボス片とフラット片の合金組成 (mass%)
Composition of the alloy for the embossed test pieces and the flat test pieces (mass%).

	Ni	Si	Zn	Sn	Mg	Cu
Emboss test piece	2.0 - 2.8	0.45 - 0.6	0.4 - 0.55	0.1 - 0.25	0.05 - 0.2	Bal.
Flat test piece	—	—	28.5 - 31.5	—	—	Bal.

表2 エンボス片とフラット片のめっき構成と厚さ (μm)
Structure and thickness (μm) of plating for the embossed test pieces and the flat test pieces.

	Sn	Cu-Sn	Ni
Emboss test piece	0.3	0.5	0.5
Flat test piece	0.6	0.6	—

2.2 試験方法

図1 (iii) に微摺動摩耗試験機の模式図を示す。この試験機はエンボス片とフラット片を任意の接触力で接触させ、任意の回転角度で相対回転運動させる仕様である。本研究では大気室温の環境にて試験した。また、接点には5 mAの定電流を通電し四端子法にて接触抵抗を測定した。本研究で実施した回転角度、接触力の試験条件を表3に示す。

表3 回転微摺動試験条件 (回転角度, 接触力)
Test conditions of the rotational micro sliding (rotational angle and contact force).

Rotational Angle (degree)	2, 6, 10
Contact Force (N)	1, 6

2.3 評価方法

フラット片の摺動痕に関して、表面及びFIB (Focused Ion Beam) 断面をSEM (Scanning Electron Microscope), SIM (Scanning Ion Microscope), EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) 元素マッピングを用いて観察した。

3. 結果と考察

3.1 接触抵抗の摺動回数依存性

回転角度6度で繰り返し回転させ、接触抵抗の変化を調べた結果を図2に示す。抵抗は接触力1 Nでは10²回まで低位に安定し、その後徐々に上昇した。6 Nでは10⁴回まで低いレベルにあり、その後徐々に上昇した。

表3に示した6条件全てにおいて、抵抗上昇した後は低下することなく上昇し続ける挙動を示しており、直線摺動摩耗試験の摺動距離30 μm等の条件においてみられた上昇後に低下する挙動³⁾とは異なった。

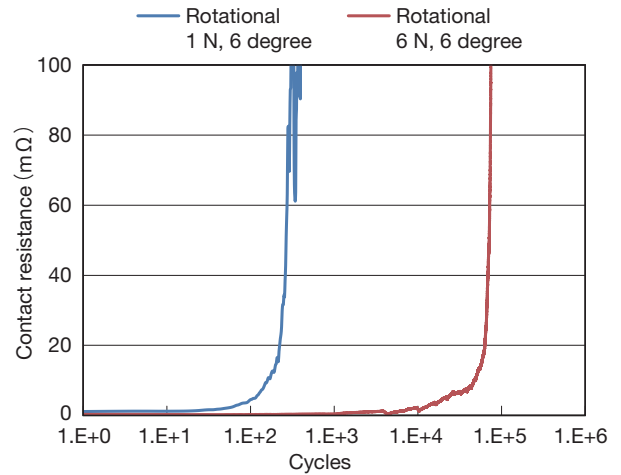


図2 接触抵抗の摺動回数依存性
Relation of the contact resistance profile against the number of rotational slidings.

3.2 接触力1 N, 回転角度6度における摩耗過程

接触力1 N, 回転角度6度の条件において回数100回 (抵抗値9 mΩ) で摺動を停止し、フラット片の摺動痕表面をSEM及びEDSにより観察した結果を図3に示す。

摺動痕は径180 μmの円形を呈し、摺動痕全体からOが検出され、Snの強度は減少し、一方Cuの強度は増加していた。Znは検出されなかった。このことは摩耗によりSnめっきの減少或いはSnの酸化は生じているが、基材までは摩耗が進行していないものと推測される。

表面をSIMにより観察した結果を図4に示す。この図より未摺動部 (a) が平坦であることに対し、摺動痕 (b1, b2) の方は荒れているが、比較的平坦な部分 (b1) と円形の凸部のある部分 (b2) との2種類が存在することが分かった。

更に図4の (a), (b1), (b2) の近傍についてFIB断面のSIM像を観察した結果を図5に示す。未摺動部 (a) はCuSn金属間化合物の上にSn層があり、このSn層にはリフローめっき特有の約1 μmの粒径の溶融凝固組織が見られた。摺動痕 (b1), (b2) にもCuSn金属間化合物は存在するが、未摺動部とは異っており、(b1) は摩耗物で充填された状態、(b2) は充填されていない状態にあると推測される。

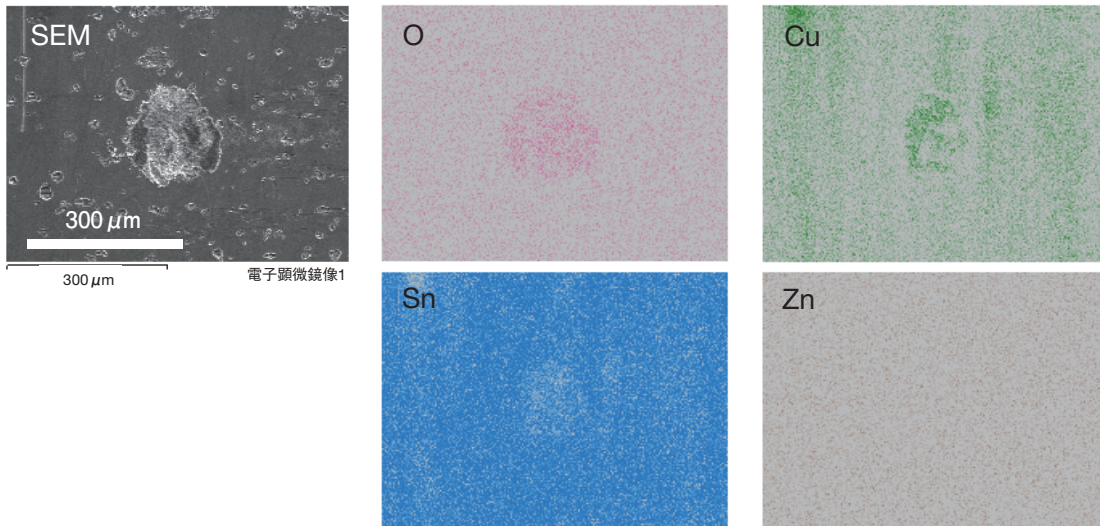


図3 フラット片の表面SEM像、及びEDS元素マッピング
A SEM image of the surface of the flat test pieces and their EDS mapping images.
(Rotated under condition of 1 N, 6 degree and 100 cycles.)

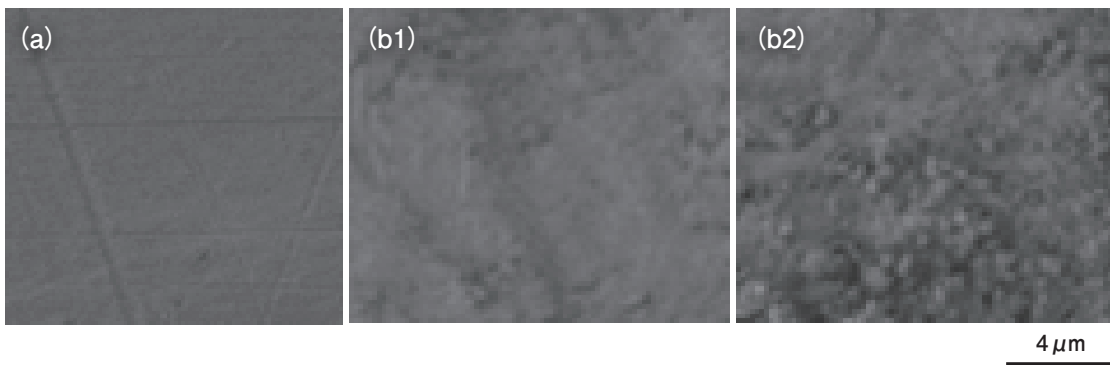


図4 フラット片の表面SIM像 (a)未摺動部, (b1), (b2)摺動痕
SIM images of the surface of the flat test pieces.
(a) Before rotational sliding. (b1) and (b2) Fretting trace after rotational sliding.
(Rotated under condition of 1 N, 6 degree and 100 cycles.)

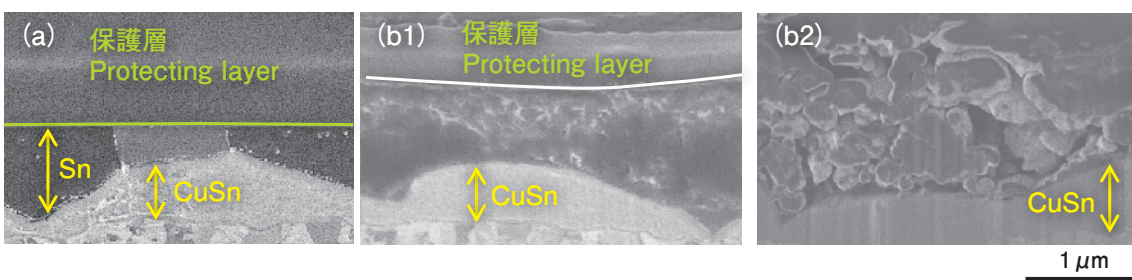


図5 フラット片のFIB断面SIM像 (a)未摺動部, (b1), (b2)摺動痕
SIM images of the FIB cross section of the flat test pieces.
(a) Before rotational sliding. (b1) and (b2) Fretting trace after rotational sliding.
(Rotated under condition of 1 N, 6 degree and 100 cycles.)

図6にはFIB断面をSEM並びにEDSにより観察した結果を示す。未摺動部(a)のSn層にはOがほとんど検出されなかったが、摺動痕(b1)ではCuSn金属間化合物より上にO及びSnが検出され、Cuは検出されなかった。このことから摺動痕の断面にはCuSn金属間化合物の上に酸化Snが存在し、部分的に金属Snが存在しているものと思われる。

以上の観察結果から、接触力1 N、角度6度、回数100回における摺動では、基材及びCuSn金属間化合物層は摩耗せず摺動前の状態を維持しているものとみられる。CuSn金属間化合物層の上には摩耗物で充填された部分とされていない部分とが存在しており、摩耗物は酸化Sn及び金属Snの混合物と推定される。

3.3 抵抗変化， 摩耗過程の接触力依存性

図2より接触抵抗が10 mΩに到達する回数は接触力が大きい6 Nのほうが1 Nより長いことが分かった。

前節の考察と図3より接触力1 Nでは100回で摺動痕全域に酸化摩耗物が存在するものと考えられる。

これに対し図7には接触力6 N， 角度6度での摺動回数100回 (A)， 2000回 (B)， 9700回 (c)における摺動痕の表面SEM像を示したが， この図から接触力6 Nでは2000回まで中央部に酸化

摩耗物が存在しないものと考えられる。このことは， 接触力6 Nでは抵抗の上昇が遅くなることを示しているものと思われる。なお接触抵抗は(A)0.5 mΩ， (B)0.9 mΩ， (C)5.1 mΩであった。

摺動痕全域に酸化摩耗物の生成が遅れるのは， 接触力が高いほどエンボス片とフラット片が追従し摩耗しない領域が広がり⁹⁾， 摩耗物そのものが形成されないためと考えられる。或いは接触力が高いほど酸素が進入しにくいものと推測され， その

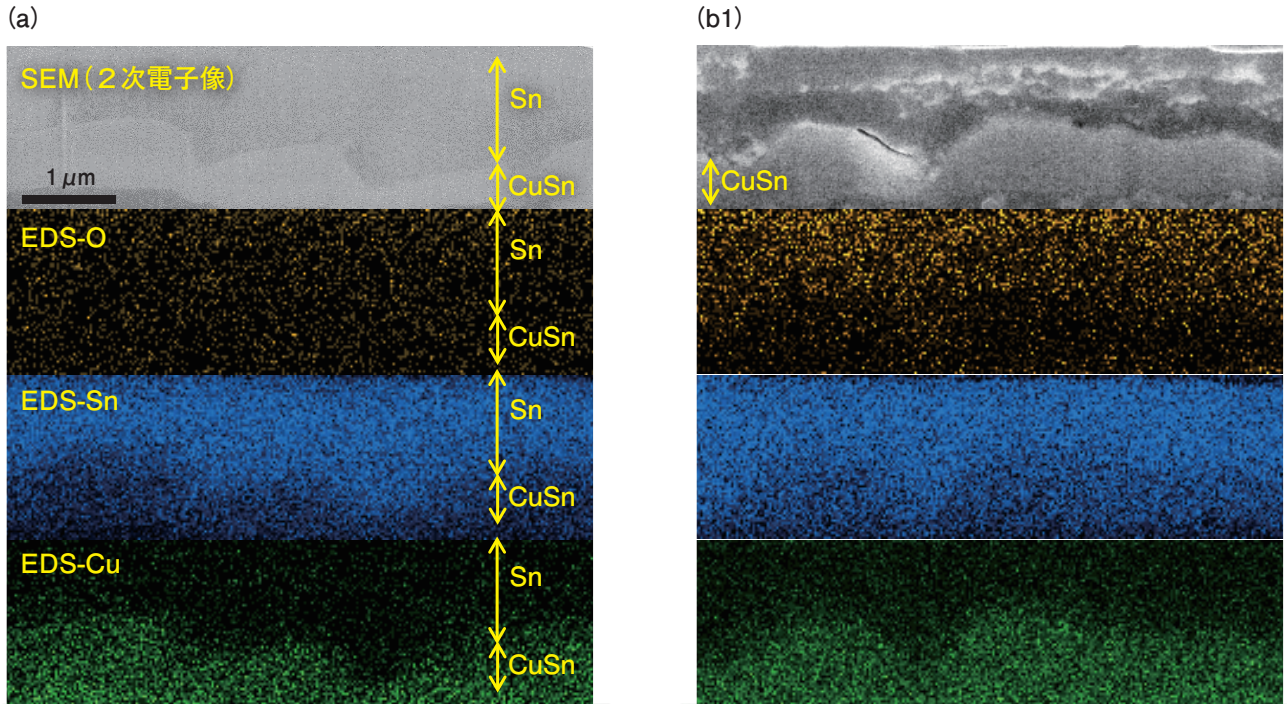


図6 フラット片のFIB断面SEM像，及びEDS元素マッピング (a) 未摺動部， (b1) 摺動痕
A SEM image of the FIB cross section of the flat test pieces and their EDS mapping images.
(a) Before rotational sliding. (b1) Fretting trace after rotational sliding.
(Rotated under condition of 1 N, 6 degree and 100 cycles.)

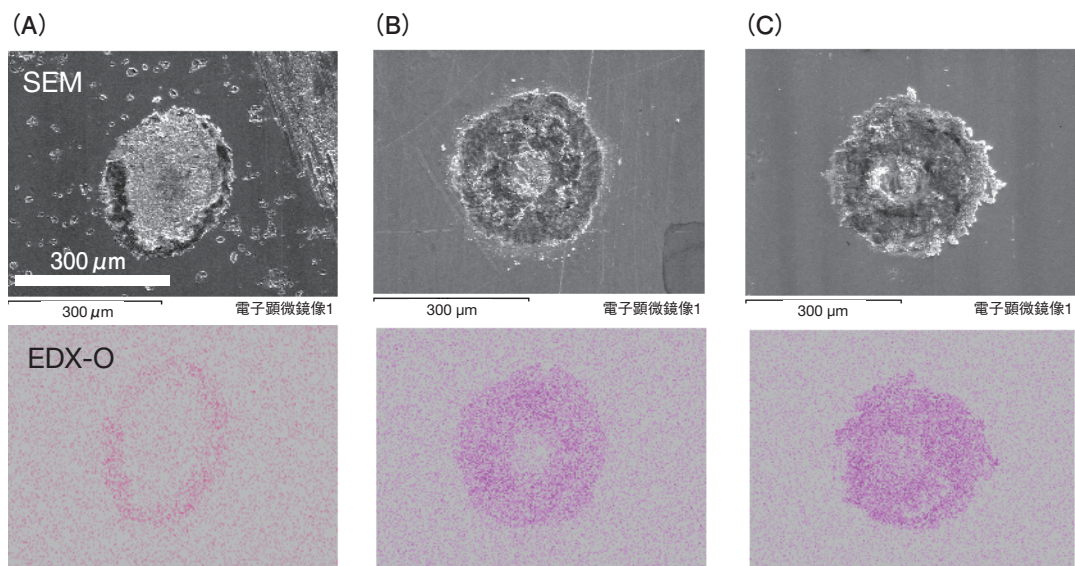


図7 フラット片側の摺動痕の表面SEM像，及びEDS元素マッピング (A) 100回， (B) 2000回， (C) 9700回
SEM images of the surface of fretting trace on the flat test pieces and their EDS mapping images.
(A) 100 turns (B) 2000 turns (C) 9700 turns
(Measured resistance showed (A) 0.5 mΩ， (B) 0.9 mΩ and (C) 5.1 mΩ.)

ため摺動によって生じた摩耗物が酸化しにくく、酸化摩耗物が形成されにくくなるためと考えられる。

3.4 抵抗変化の回転角度依存性

接触抵抗が10 mΩに到達する摺動回数の回転角度依存性を図8に示す。接触力6 N、角度2度のみ20万回まで10 mΩに到達せず試験を打ち切った。回転角度が大きいほど、接触力が小さいほど早期に10 mΩに到達することが判った。回転角度が大きいほど、フラット片とエンボス片が追従し摩耗しない領域が減少すると考えられ、酸化摩耗物の形成量が多くなるためと推測される。

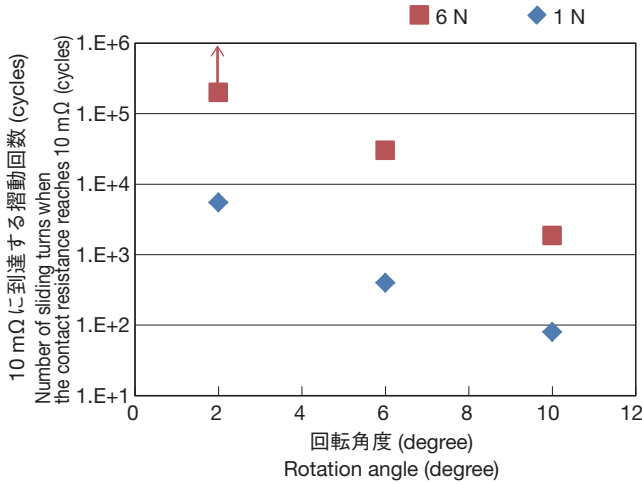


図8 接触抵抗が10mΩに到達する摺動回数の回転角度依存性
Influence of the rotation angle on the number of sliding turns when the contact resistance reaches 10 mΩ.

3.5 回転摺動と直線摺動の比較

図9(i)に示したような回転摺動における摺動距離を考えると、接触力6 N、角度6度の回転摺動では図7より、接触面半径が130 μm、外周部の摺動距離は14 μmと推定され、また同様に、接触力1 N、角度6度は、同様に図3より接触面半径90 μm、摺動距離は9 μmと推定される。これとそして図9(ii)に示したように同じ距離を直線摺動させた際の抵抗変化を、上記回転摺動の場合の抵抗変化と共に図10に示す。

接触力1 Nにおいては、回転摺動は1 × 10²回で抵抗が上昇したことにに対し、直線摺動では2 × 10³回で抵抗上昇した。接触力6 Nにおいては、回転摺動は1 × 10⁴回で抵抗が上昇したことにに対し、直線摺動では25万回まで抵抗上昇せず、1.0 mΩを維持したままであった。接触力1 N、6 N共に回転摺動のほうが早期に抵抗が上昇することが分かった。

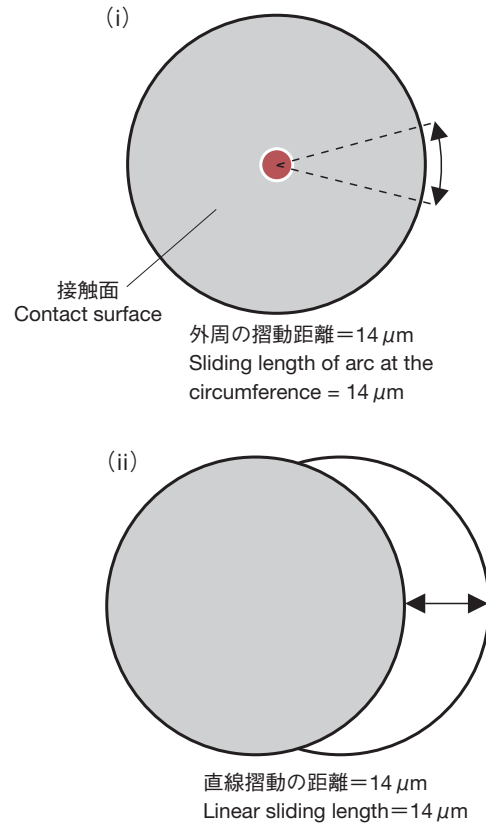


図9 (i) 接触面外周の摺動距離, (ii) 外周の摺動距離に対応する直線摺動
Schematic sketch of the sliding length on the contact surface. (i) Rotational sliding length on the arc peripheral of the contact surface. (ii) Linear sliding length equivalent to the rotational sliding length on the arc peripheral.

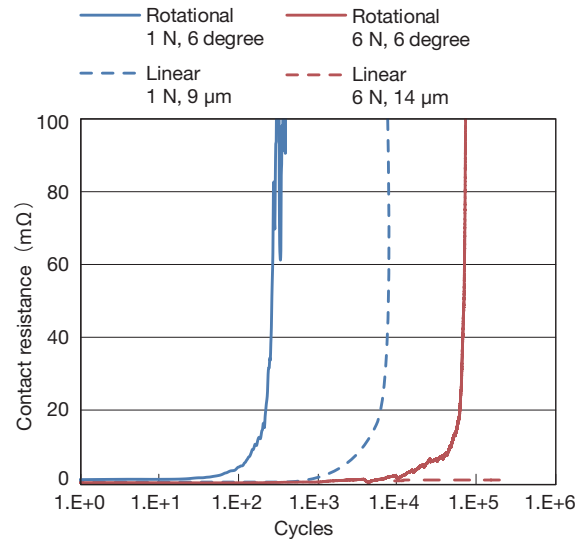


図10 電気抵抗の摺動回数依存性
Relation of the contact resistance profile against the number of rotational slidings and linear slidings. (Under condition of 1 N and 6 N.)

この理由は、回転摺動では摺動面の全領域が常に相手面と接触していることにに対し、直線摺動ではエンボス片の摺動面の全領域及びフラット片の摺動面の中央は常に相手面と接触してい

るが、フラット片の摺動面の端部は相手面とは接触せず、大気に暴露されている時間がある。つまり、回転摺動の方が摺動面に酸素が進入しにくく酸化しづらいものとも考えられるが、しかし回転摺動のほうが早期に抵抗が上昇しており、酸素の進入のしやすさからは説明できない。

また回転摺動は中央ほど摺動距離が短いのにに対し、直線摺動は全ての領域において摺動距離が一定であると考えられる。そのため、回転摺動の方がエンボス片とフラット片が追従し摩耗しない領域が広く酸化摩耗物の形成量が少ないものと予想され、摺動距離の長短からも回転摺動が早期に抵抗上昇することを説明できない。

酸化摩耗物の排出は回転摺動では径方向に酸化摩耗物を移動させる力がほとんど働かないものと思われるが、直線摺動では摺動距離が30 μm と大きい場合には抵抗上昇後に再び低下するという挙動³⁾からして、形成された酸化摩耗物が端部に排出されるものと考えられる。このことが摺動距離が小さい9 μm 、14 μm においても同様に排出が起きていると推測される。

以上のことから、回転摺動では酸化摩耗物の排出量が少ないため、摺動痕全体が酸化摩耗物で覆われるまでの摺動回数が短く、早期に抵抗が上昇するものと推測される。

4. おわりに

回転摺動における接点抵抗の変化、劣化状況の観察と分析、接触力及び回転角度の影響の分析並びに直線摺動との比較を行った結果、以下のことが判明した。

- (1) 摺動開始後抵抗は低く安定していたが、その後徐々に上昇した。接触面全体が酸化摩耗物で覆われたため、高抵抗になったものと推測する。
- (2) 接触力が高いほど、抵抗が低位に安定する摺動回数が多くなった。摺動痕全体が酸化摩耗物で覆われるのが遅くなったためと考えられ、エンボス片とフラット片が追従し摩耗しない領域が増加するため、或いは酸素が進入しにくいためと推測する。
- (3) 回転角度が大きいほど、抵抗が早期に上昇した。エンボス片とフラット片が追従せず摩耗しない領域が減少するためと推測する。
- (4) 角度6度の場合の接触面外周の摺動距離を14 μm と仮定し、14 μm の直線摺動と6度の回転摺動とを比較した結果、回転摺動において抵抗が早期に上昇した。回転摺動は摩耗物が排出されにくいためと推測する。

参考文献

- 1) P. G. Slade: "Electrical Contacts, Principles and applications" Marcel Dekker, Inc., New York (1999), 299-332.
- 2) K. Susai and K. Yoshida: Proc. Connector and Interconnection Technology Symposium and Trade Show (2007)
- 3) 水戸瀬賢悟, 吉田和生, 須齋京太: 古河電工時報, 第121号 (2008), 28-33.
- 4) 吉田和生, 北河秀一, 水戸瀬賢悟, 須齋京太: 銅と銅合金, vol.50 (2011), 170-174.
- 5) Tag Hammam: Proceedings of the Fifty First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (2005), p.97-106.
- 6) 吉田和生, 北河秀一, 水戸瀬賢悟, 須齋京太: 銅と銅合金, vol.51 (2012), 207-211.
- 7) Keiji Mashimo, Yoshikazu Okuno, Shingo Kawata, Hiroyasu Nishikubo and Yasuyuki Ishimaru: "Fretting Analysis of Tin-coated Terminals under Rotational Motion," Proceedings of the 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (2014), pp.282-288, October 12-15.
- 8) Keiji Mashimo, Yoshikazu Okuno, Shingo Kawata, Hiroyasu Nishikubo and Yasuyuki Ishimaru: "Prediction of Wear Volume on Sliding Contacts Using Cellular Automata," Proceedings of the 61st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (In Press).
- 9) 笹田直: "連載講座 摩耗 (15)" 機械の研究, 養賢堂 58 (3) (2006), 379-388.