

技術紹介

2 金めっき接点の摩擦摩耗と潤滑処理

Friction, Wear and Lubrication of Gold Plated Contacts

譲原 靖弘 Yasuhiro Yuzuhara コネクタ開発本部 主任

キーワード：Auめっき、摩擦摩耗、潤滑

Keywords：Electrodeposited Gold, Friction and Wear, Lubrication

要 旨

コネクタのコンタクトに適用されるAuめっきの摩擦摩耗や潤滑について多くの研究が行なわれています。例えば、コネクタの抜き差しに伴いAuめっき接点は凝着により摩耗が進行し、電気接点としての信頼性に悪影響を及ぼします。この場合潤滑剤を塗布することで摩擦摩耗特性を大きく改善することが出来ます。この潤滑にはコンタクトオイルという流体潤滑剤を適用することが有効です。

航空電子におきましてもAuめっき接点のピンホールからの腐食抑制や摩擦摩耗特性を改善するため、それぞれの目的に合わせて3種類のAuめっき後処理を施しています。これら3種類の後処理（腐食防止処理、潤滑処理、ハイブリット処理）に関してこれまで行なってきた様々な評価試験から以下のような摩擦摩耗特性の実験結果を得ました。

航空電子の腐食防止処理は、摺動初期や少ない摺動回数（挿抜回数）では、高い（コネクタとして十分な）潤滑効果が達成されます。潤滑処理、ハイブリット処理では長期的な摩擦摩耗特性を大きく改善出来ます。ハイブリット処理は潤滑処理に比べて摺動初期の摩擦摩耗特性が優れ、長期的に見ても若干摩擦摩耗特性が良いといえます。また後処理なしの厚いAuめっきよりも薄いAuめっきに後処理を施した方が性能および経済的に効果的と判断できます。

SUMMARY

A number of researches are being made for friction, wear, and lubrication of the gold plating applied to contact of connector. For example, progress of wearing by adhesion of the Au plating contact point due to connection and disconnection has the adverse effect on reliability of electrical contact. By applying lubricant, the friction and wear property can be significantly improved. Use of the fluid lubricant, contact oil, is effective for improvement of lubrication.

At JAE, three of the post-treatments for Au plating are introduced corresponding to each purpose in order to improve the friction and wear property, and to inhibit the corrosion from pinholes at Au plating contact. For the three of post-treatments (corrosion prevention, lubrication and hybrid treatments), we can obtain the following experiment results on the friction and wear property from various evaluation tests conducted so far.

The corrosion prevention treatment at JAE can bring the high lubrication effect for connector at early stage of sliding (number of insertion and remove). Meanwhile, lubricant and hybrid treatments can significantly improve the long time friction and wear property. The hybrid treatment is superior to the lubricant treatment in the friction and wear property in early stage of sliding and, also, it rather keeps the good property for a long time. In addition, it is concluded that the thin Au plating with post-treatment is more effective in view of performance and cost than the thick Au plating without post-treatment.

1 はじめに

コネクタのコンタクト表面には多くの場合 Au (金) めっきや Sn (すず) 合金めっき等が施されています。コネクタは小型化が進んでおり、コンタクトの接触力は年々小さくなる傾向にあります。このような場合、酸化物等が生成せず低い荷重で安定した電氣的接触が得られる Au めっき接点を使用することになります。Au めっき接点の重要性はますます増大しているといえます。

Au めっき接点では中間層に Ni (ニッケル) めっきを施し、Au/Ni/Cu 合金 (銅合金素地) の組み合わせが一般的に利用されています。コスト上昇を抑えるために Au めっきは薄めつき化されていますが、これにより Au 皮膜には多くのピンホールが存在することになり、下地金属の腐食生成による接点信頼性の低下が問題となります。このため、Au 皮膜ピンホールからの腐食生成を抑制するための腐食防止処理は重要な技術となっています。

またピンホールによる腐食と同程度に問題とされるのが接点部分の摩耗です。近年、コネクタは 1 万回にも及ぶ多数回の抜き差し (以下、挿抜) を求められることが多くなってきました。コネクタの多芯数化による挿抜力の低減も必要となっています。このような場合には、摩耗による接点部分からの Au 消失とこれによる接触信頼性の低下を防止し、かつ挿抜力を下げるために、コンタクトの潤滑処理は必須になっています。この潤滑処理による接点の摩擦摩耗特性の改善は今後更に重要性を増すと考えられます。

以上のように、Au めっき接点では後処理として腐食防止処理と潤滑処理が施されています。

本報では、接点の摩擦摩耗と潤滑処理に注目し、まずコネクタ接点としての Au めっきの摩擦摩耗および潤滑剤の基礎的な部分について解説を行ないます。その後 航空電子の Au めっき後処理技術の紹介およびその摩擦摩耗特性の評価結果について報告します。

2 摩擦摩耗と潤滑

摩擦とは接触した2つの固体が互いに運動しようとしたとき、また運動しているときに生じる抵抗のことです。(前者を静摩擦、後者を動摩擦といいます。)

接触した2つの固体が互いに運動するとき、接触した固体表面に生じる材料損失を摩耗と呼んでいます。摩耗は摩擦の結果生じる現象といえます。

2.1 接点の摩擦摩耗

コンタクトはコネクタの挿抜によって摺動し、接点部分はすべりによる摩擦が発生します。すべり摩擦にともなう摩耗をすべり摩耗と呼びます。すべり摩耗はその機構により凝着摩耗とアブレッシブ摩耗に分類されます。以下にそれぞれの摩耗について簡単に説明します。

2.1.1 凝着摩耗(凝着摩擦)

2つの固体の接触面積は、①その幾何学的な形状からヘルツの理論式などにより計算されるみかけの接触面積、②更に表面の粗さを考慮した真実接触面積(本当に接触するのは表面の突起した部分)があります。凝着摩耗はこの真実接触面積に大きく影響されます。真実接触面積では表面の原子や分子がお互いに力を及ぼしあいます。共有結合、イオン結合、ファンデルワールス力等の結合力によって接触する2面間がくっつきあってしまうのです。この現象を凝着、その結合力を凝着力と呼んでいます。凝着の特徴は次のようになります。

- ・ 同一金属同士で強くなる。
- ・ 金属表面が清浄であると強くなる。
- ・ 表面に酸化膜が生成している場合は弱くなる。

凝着してしまった2つの固体を滑らせるためには、凝着部分をせん断しなければなりません。このときに発生する力が摩擦力(せん断による摩擦力)になります。

せん断による摩擦力 F_s は、真実接触面積 A_r に単位面積当りのせん断力 s を掛けたものになります。

$$F_s = A_r \cdot s$$

硬い材料では、真実接触面積は小さく、せん断力が大きくなります。軟らかい材料ではその逆になります。摩耗量は硬い材料のほうが小さくなりやすい傾向にあります。

せん断が凝着した表面ではなく固体内部で発生し、相手表面に移着、この移着が粒子として成長して表面から脱落すると摩耗粉になります。

2.1.2 アブレッシブ摩耗

アブレッシブ摩耗は研磨剤粒子や硬い表面突起の切削作用によって生じます。サンドペーパーで表面を磨く、彫刻刀で表面を削るようなイメージになります。アブレッシブ摩耗には次のような特徴があります。

- ・ 材料が硬いほど摩耗しにくい。
- ・ 鋭い表面突起がある場合ほど摩耗しやすい。
- ・ 研磨剤粒子が表面より硬いと摩耗する。
- ・ 研磨剤粒子が大きいほど摩耗しやすい。
- ・ 潤滑によって摩耗が増大する。

このため、同じ硬さである同一金属同士や平滑な接触面の摺動ではアブレッシブ摩耗は起こりにくいと考えられます。

2.1.3 Au めっき接点の場合

Au めっき接点は凝着摩耗が支配的になります。同じ金属同士の摩擦であり、かつ一方のコンタクトが他方のコンタクトを切削するような構造には設計されていないため、アブレッシブ摩耗にはなりにくいといえます。しかし、接点部に砂やほこり等の硬い異物をかみ込んだ場合や摩耗が進んで下地 Ni めっき層の酸化した硬い大きな摩耗粉が発生するような状況になるとアブレッシブ摩耗を考える必要があります。これは特殊な状況といえます。

コネクタ接点の Au めっきは一般に硬質 Au めっき (Hard Gold ともいいます) であり、下地には硬い Ni めっきを適用しているため、通常の純金めっきや固体としての Au に比べて摩擦摩耗特性は改善されています。しかし摩耗しないというわけではありません。

電気接点としての安定性を考えると表面層には Au が存在しつづけることが望ましいのですが、摺動を繰り返すと Au の凝着摩耗は避けることはできないといえます。Au 表面は通常環境において酸化物を生成しませんので、強い凝着を生じてしまいます。硬質 Au といっても、摺動部材に使用される鉄系の材料などに比べればはるかに軟らかいので真実接触面積 (=凝着面積) も大きくなります。Au はそもそも摩擦摩耗に強い材料ではありません。しかし、原因が凝着であるならばこれを抑制すれば、Au 接点部の摩擦摩耗を大幅に低減させることが可能と考えられます。凝着は金属表面が清浄であると強くなるので、潤滑剤などによって表面を覆うことで摩擦摩耗を抑制できるといえます。

2.2 潤滑剤について

凝着による摩擦摩耗を抑制するためには、オイルなど潤滑剤を利用するのが有効です。潤滑剤には大きく分けて、固体潤滑剤、半固体潤滑剤、流体潤滑剤があります。流体潤滑剤とは一般にオイルと呼ばれているものです。

固体潤滑剤：黒鉛、PTFE、MoS、軟質金属 (Au、Pb) など

半固体潤滑剤：グリース、ワックスなど

流体潤滑剤：オイル一般

また潤滑形態には、無潤滑 (乾燥摩擦)、境界潤滑 (境界摩擦)、流体潤滑 (流体摩擦) が存在しますが、コネクタでは安定した低い接触抵抗が求められるため、電氣的接触を妨

げない境界潤滑状態となるように設計されたオイルを使用することが多いといえます。

コネクタで使用されるオイルをコンタクトオイルや contact lubricant と呼んでいます。固体や半固体潤滑剤はコンタクトの接触力が低下してきているため、厚く塗布されていると接触抵抗が不安定になる可能性があります。また導電性を付与した潤滑剤もありますが、近接するコンタクト間の絶縁性に悪影響を及ぼす可能性があるためコネクタにはあまり使われません。

2.3 コンタクトオイルの基本構成

コンタクトオイルの構成は基油（ベースオイル）とその性能を改善または向上させるための各種添加剤から成り立っていると考えられます。

・ 基油

オイルの特性を支配する重要な成分です。原油を精製して作られる鉱油の他に合成油として炭化水素を付加重合して作られるポリアルファオレフィン油、酸とアルコールによって合成されたエステル系油等があります。

・ 添加剤

潤滑性向上、オイルの酸化安定性、防錆性などの特性を付与するために添加します。代表的なものを以下に記します。

<油性向上剤>

境界潤滑下での摩擦を低下させます。比較的マイルドな摺動条件の時に効果を発揮します。高級脂肪酸、エステル、アミンなどの極性化合物を配合します。

<極圧剤>

高荷重下のような比較的シビアな摺動条件のときに摩耗を減少させ、摩擦面の焼き付きを防止します。硫黄、りん、亜鉛またはモリブデンを含む有機化合物を配合します。

<腐食抑制剤（防錆剤）>

金属の腐食を抑制します。エステル、アミン類などを配合します。

<酸化防止剤>

基油の酸化による劣化を防止します。フェノール系、芳香族アミン系、硫黄系、りん系の有機化合物を使用します。

<粘度指数向上剤>

潤滑油の粘度温度特性（粘度指数）を向上させます。ポリブテン、ポリアルキルメタクレートなどを添加します。

上記したような数種類の化学物質を配合しコンタクトオイルとして製品化されているといえます。各メーカーによって組成や特性が異なります。またオイルの内容（組成）についてはほとんど公表されていないのが現実です。

このためオイルの導入に当っては様々な評価試験を繰り返し、その特性を十分に確認しておくことが重要となります。

3 航空電子の Au 接点の後処理技術

航空電子では Au めっき皮膜のピンホールからの腐食抑制、接点の潤滑を目的として以下の3種類の後処理を行なっています。

3.1 腐食防止処理

主に Au めっき皮膜に存在するピンホールから発生する腐食を防止します。封孔処理とも呼ばれます。接点部の耐腐食性を向上させ、安定した接触を達成することを目的として適用します。この技術により、Au めっき厚が $0.1 \mu\text{m}$ 程度の薄めっきでも実用的な接触信頼性を達成することができます。Au 表面に腐食防止皮膜を形成しています。この皮膜は絶縁性ですが極薄い皮膜であるため、トンネル効果によって導電性は確保されます。接触抵抗はほとんど変化しません。処理された Au 表面は Dry で、外観変化はほとんどありません。ゴミなどの付着に対しても除去しやすく有利な表面状態となっています。腐食防止効果の他に多少の潤滑効果も得られます。

3.2 潤滑処理

コンタクトオイルを塗布します。Au の摩耗抑制と接点部分の摩擦を低下させコネクタの挿抜力を下げることができます。接点部分の長期的な摩擦摩耗特性を大きく改善するため、多数回の挿抜が必要となるコネクタには必須の処理になっています。塗布された Au 表面はオイルで濡れた状態なので wet な表面といえます。油膜によってピンホールが覆われることで、腐食を抑制する効果も期待できます。

3.3 ハイブリット処理

腐食防止処理の後に潤滑処理を施します。これにより、薄膜層と流動層の2層構造となっています。耐腐食性と摩擦摩耗特性（耐摩耗性など）の向上に寄与します。それぞれの処理の相乗効果によって、より高い性能を達成することができます。

4 Au めっき後処理の摩擦摩耗特性

前項で航空電子の 3 種類の後処理技術を紹介しました。これら後処理の摩擦摩耗特性の評価を行ないましたので以下に示します。

4.1 サンプル

サンプルはツーピース型コネクタ（ピンコンタクトとソケットコンタクトの組み合わせ）を想定して、図1のようなU字型のテストピースを使用しました。テストピース素材はバネ用リン青銅を用い、このテストピースに所定の表面処理を施したサンプルを2つ一組にして、一方をソケットコンタクト（Riderと呼びます）、もう一方をピンコンタクト（Sliderと呼びます）として実験を行ないました。表1にサンプル概要を示します。

表 1 サンプルの表面処理仕様

サンプル名	Rider	Slider
Au (0.27) または無塗布	Au0.27 μ m/Ni2 \sim 3 μ m	Au0.27 μ m/Ni2 \sim 3 μ m
Au (0.9)	Au0.9 μ m/Ni2 \sim 3 μ m	Au0.9 μ m/Ni2 \sim 3 μ m
腐食防止処理	Au0.27 μ m/Ni2 \sim 3 μ m + 腐食防止処理	Au0.27 μ m/Ni2 \sim 3 μ m + 腐食防止処理
潤滑処理	Au0.27 μ m/Ni2 \sim 3 μ m	Au0.27 μ m/Ni2 \sim 3 μ m + 潤滑処理
ハイブリット処理	Au0.27 μ m/Ni2 \sim 3 μ m	Au0.27 μ m/Ni2 \sim 3 μ m + 腐食防止処理+潤滑処理

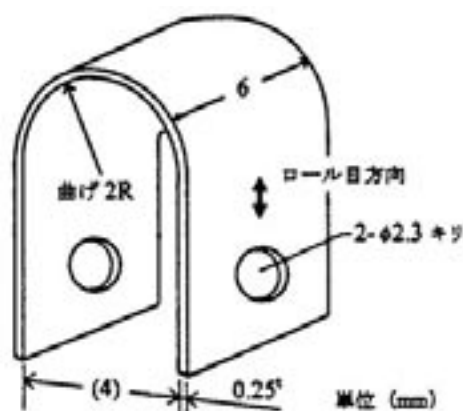


図1 テストピース

4.2 摩擦摩耗試験方法

試験機の概略を図2に示します。U字型サンプルの一方を固定側試料 (Rider)、もう一方を可動側試料 (Slider) にして、90度交差させ、所定の荷重で接触させます。摺動距離、摺動速度を一定にしてテーブルを往復運動させることで Slider を摺動させます。摩耗痕の形状は図3のようになります。

荷重は X 部分の歪ゲージで検出し、摩擦力 (動摩擦力) は Y 部の歪ゲージによって検出します。摺動中の接触抵抗の変化に関してもモニタすることが可能です。

< 試験条件 >

摺動距離：1.5 mm (往復 3 mm)

摺動速度：0.5 mm /s

接触荷重：0.49N

摺動回数：50 回、1000 回、10000 回
(1往復を一回とする)

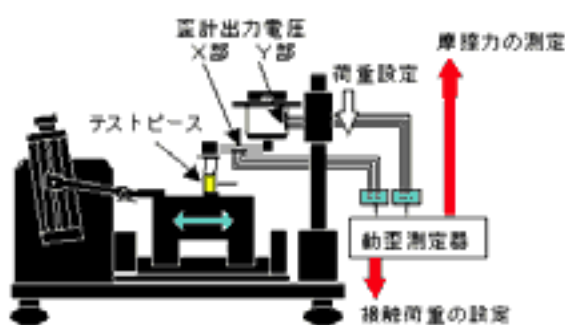


図2 摩擦摩耗試験機

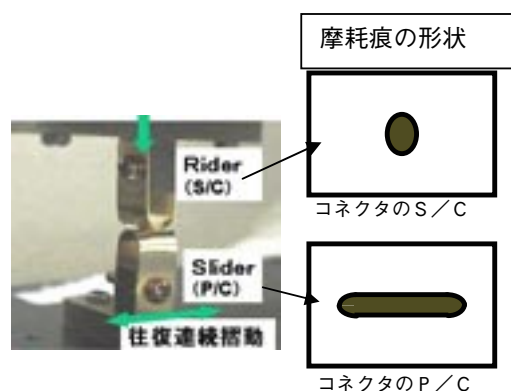


図3 摩耗痕の形状

4.3 評価方法

摩擦摩耗特性は動摩擦係数 μ と摩耗痕の光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察及びエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) による元素分析を用いて評価しました。

ここで動摩擦係数とは、サンプル摺動中に発生する摩擦力 F (動摩擦力) を接触荷重 W で割った値になります。

$$\mu = F / W$$

摩擦の第1法則である“摩擦力は荷重に比例する”を適用しています。この法則は無潤滑から境界潤滑の状態に至るまでほぼ成立する経験的法則と考えられています。試験中の荷重は一定であるので、 μ によって接触界面の変化や潤滑状況を検証することができます。実際のコネクタで考えると μ が小さいほど挿抜力が低くできるといえます。

摩耗痕の観察と分析では摩耗による接点の破損状況を確認することができます。Auの残存状況や摩耗粉の発生や摩耗の進行が主な評価ポイントになります。SEM観察は組成像 (10kV) により行なっています。今回の場合は、最もコントラストが高い部分 (白い) は

Au、中程度のコントラスト部分（灰色）は下地 Ni が透けているまたは露出、最もコントラストが低い部分（黒、濃い灰色）は酸化した Ni 摩耗粉やオイルになります。

4.4 結果

4.4.1 腐食防止処理の摩擦摩耗特性

図 4 に摺動回数と μ の関係のグラフ、図 5 に摩耗痕の写真を示します。摺動 50 回程度は一般的な Au 接点コネクタで求められる挿抜回数といえます。

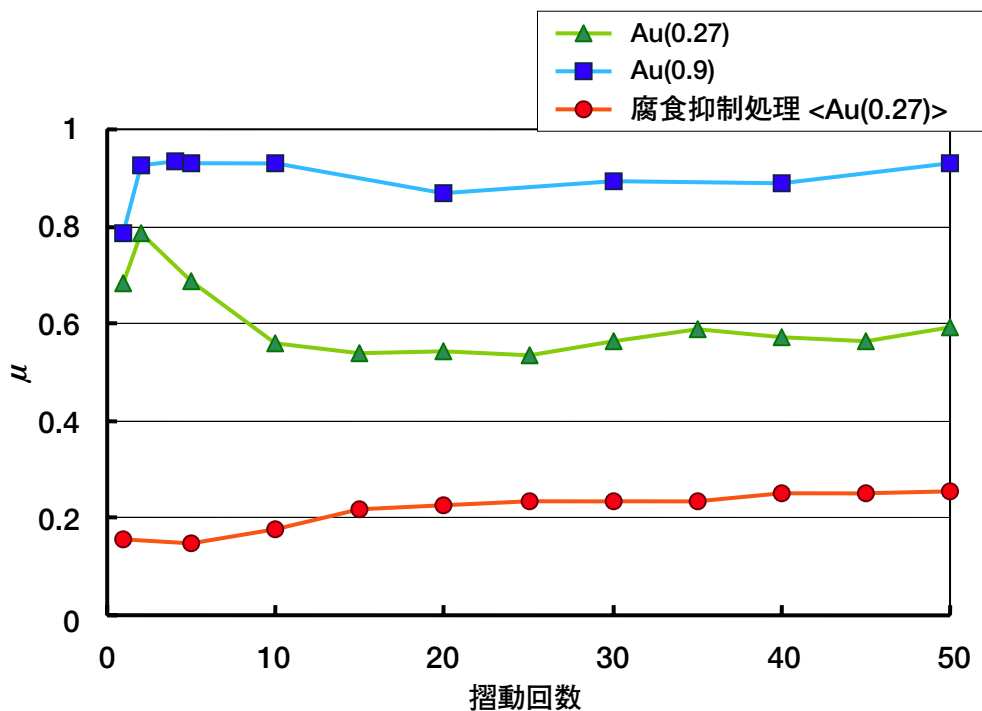


図 4 腐食防止処理と Au 厚さの違いによる動摩擦係数 μ

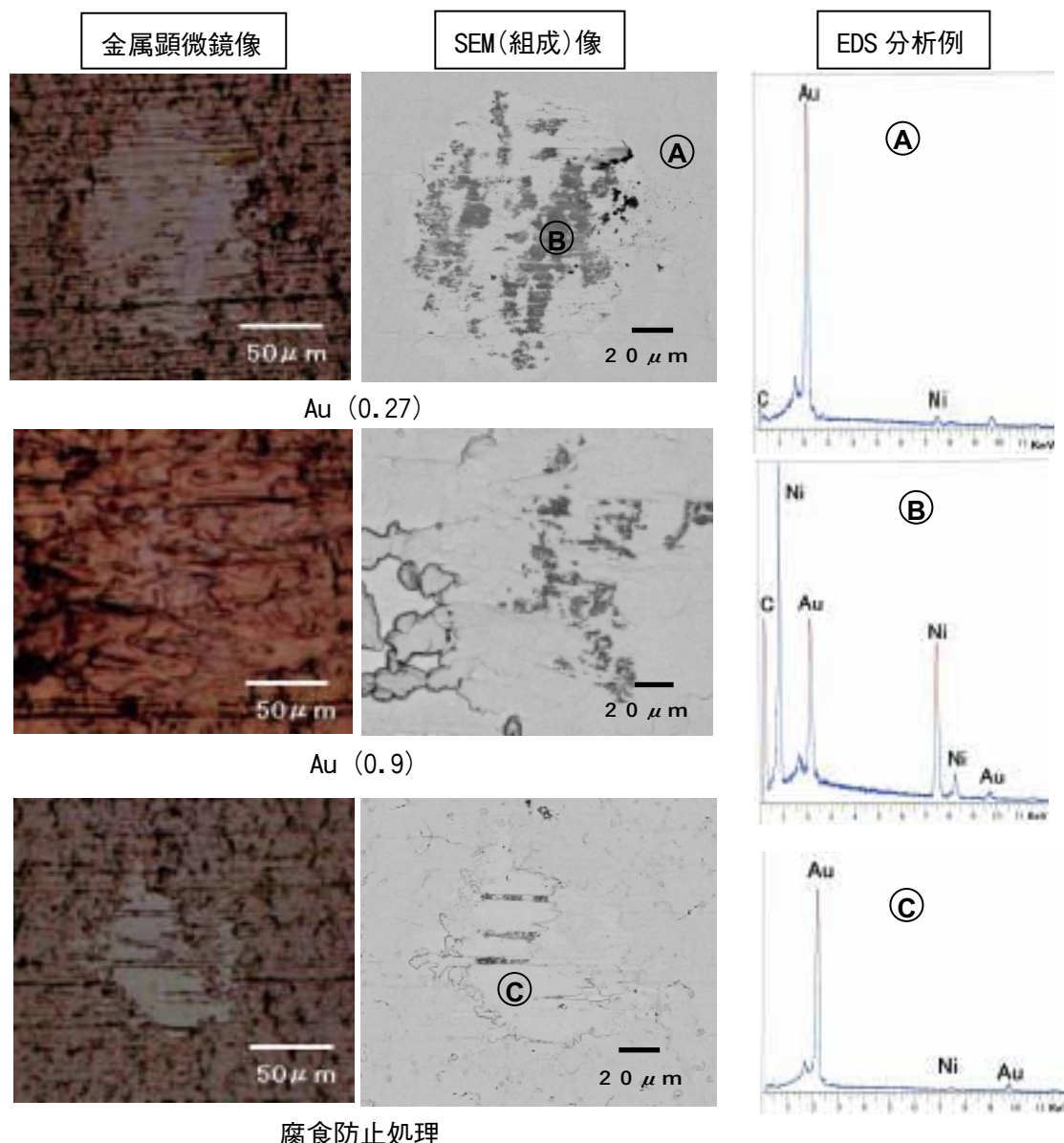


図5 摺動50回後のR i d e r 側摩耗痕の状況

薄めっきの Au(0.27) の場合、初期の μ は大きくその後低下します。摩耗痕では Au が薄くなり、下地の Ni めっき層が透けて見えています。完全に Au がなくなっているわけではありません（図5 分析点 B 参照）が、すでに摩耗痕周囲では酸化した Ni の摩耗粉の存在が確認できます。 μ が低下する理由としては、摩耗で Au が更に薄くなり、Ni 層の影響で初期より表面硬度が上昇すること、Ni に対して極薄い Au 層が固体潤滑剤として作用したためと考えています。

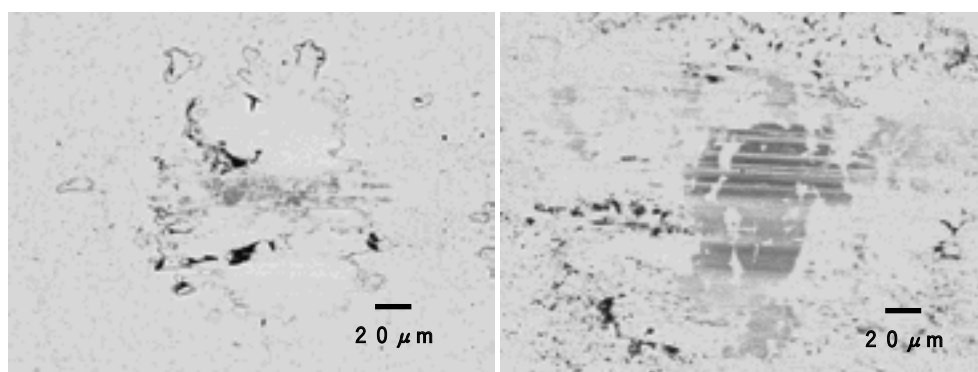
腐食防止処理のない Au(0.9) の場合は、Au めっき層が深く摩耗し、一部下地の Ni が透けている状況です。Au 自身の摩耗は抑えられていません。 μ は最も大きな値になっています。

Au (0.27)に腐食防止処理を施すと低い μ が達成されていることがわかります。Au の摩耗も軽微（図5 分析点 C 参照）で、下地 Ni は摩耗していません。ただし μ は上昇傾向が見られ、摺動によって徐々に腐食防止皮膜が消失している可能性があり、長期的な潤滑効果は望めないといえます。接点形状、表面状態、荷重にもよりますが、摺動 100 回前

後は潤滑効果を維持しています。

以上摺動 50 回において、Ni の摩耗まで至っていないという点で判断すると、摩耗の状況で腐食防止処理と腐食防止処理をしていない Au (0.9) は同等の性能を持つと判断できます。しかし、腐食防止処理をしていない Au (0.9) は挿抜力が大きくなる可能性があることやコストが高くなることなどから、腐食防止処理のほうが接点としては優れていると思われます。また、Au (0.9) に腐食防止処理を施した場合にも同様の潤滑効果が得られ、Au の摩耗を抑制できるといえます。

参考として摺動 1000 回の摩耗痕の写真を図 6 に示します。腐食防止処理をしていない Au (0.9) よりも腐食防止処理は摩耗が軽微といえ、摺動 50 回と比較しその差ははっきりとしています。



左：腐食防止処理(Au 0.27 μm) 右：Au 0.9 μm

図 6 摺動 1000 回後の Rider 側摩耗痕（組成像）

4.4.2 潤滑処理とハイブリット処理の摩擦摩耗特性

摺動回数 10000 回によって評価しています。この摺動回数はカード用のコネクタなど多数回の挿抜が要求される製品の規格を参考にしています。

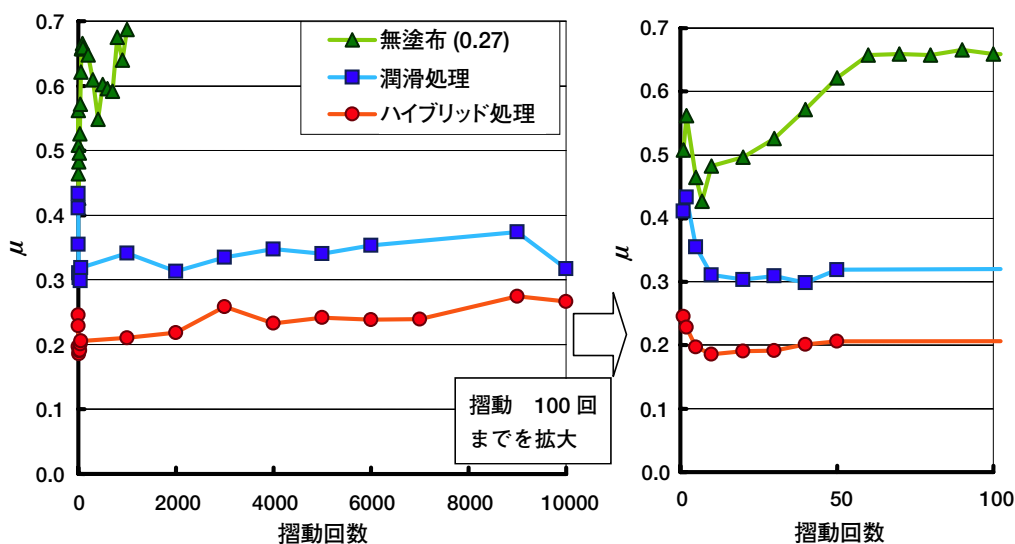


図 7 潤滑処理とハイブリット処理の動摩擦係数 μ

潤滑処理、ハイブリット処理ともに無塗布のAu (0.27) に比べて μ は低くなっています。ハイブリット処理は潤滑処理に比べて更に低い μ を達成しています。

潤滑処理では初期に比較的高い μ になっています。これは摺動初期では加工時の表面粗さがそのまま残っているため表面の凹凸が大きく、凸部分（真実接触面積に相当）では大きな圧力が掛かります。このため油膜が破断、Au の凝着を生じることで摩擦が大きくなります。摺動が進むと凸部が押しつぶされ摩耗し、表面が平滑化します。荷重を支える面積が広がり圧力は低下することになります。この結果油膜が破断しにくくなり Au の凝着を抑制でき、 μ が低下するものと考えられます。

ハイブリット処理では腐食防止処理の薄膜層が破壊されにくいため、初期から低い摩擦係数があらわれると考えられます。長期的には、コンタクトオイルによる潤滑処理の効果と腐食防止皮膜の相乗効果によって、良好な摩擦摩耗特性が達成されています。図8を見ると、摩耗痕の大きさもハイブリット処理の方が若干小さくなり、潤滑効果がより優れていることがわかります。（黒く見えているのは塗布されたオイルによるものです。）しかし、この差はわずかであり、潤滑処理だけでも十分な効果が得られているといえます。どちらの処理も摺動中及び試験後の接触抵抗に大きな変動はありません。

今回の試験では、潤滑処理とハイブリット処理に関しては、より厳しい試験条件とするため、Slider 側のみに処理を行ないました。実際のコネクタではピン・ソケット両側に処理を行なっているため、より高い効果が得られます。

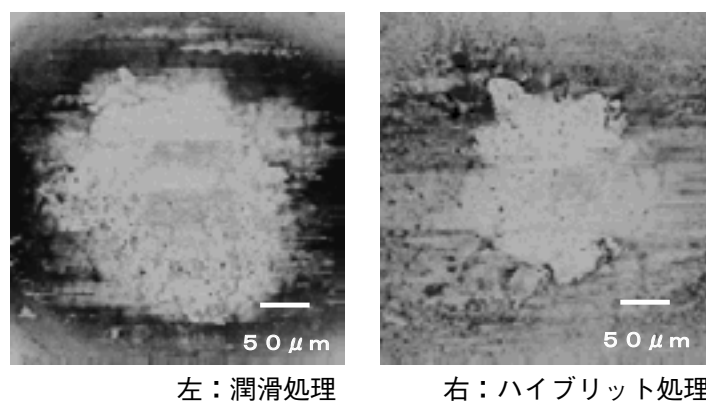


図8 摺動10000回後のRider側摩耗痕（組成像）

5 まとめ

コネクタの Au めっき接点の摩擦摩耗と潤滑剤について次のようにまとめることができました。

- ①コネクタ・コンタクトのようなすべり摩擦が発生する部分には、凝着摩耗（摩擦）とアブレッシブ摩耗（摩擦）の 2 つの摩耗機構が存在します。
- ② Au めっき接点では凝着摩耗が支配的であると考えられます。
- ③凝着摩耗は接触する 2 面間の真実接触面積の凝着により生じます。潤滑剤により、この凝着を抑制することで摩擦摩耗は改善されます。
- ④接点の潤滑には電氣的接触を妨げないオイル（コンタクトオイル）の適用が効果的です。

航空電子の Au めっき後処理についてまとめると以下ようになります。

- ⑤ Au めっきピンホールからの腐食抑制と Au の摩耗抑制やコネクタ挿抜力の低減のために 3 種類の後処理を行なっています。
 - ・腐食防止処理
 - ・潤滑処理（コンタクトオイル）
 - ・ハイブリット処理（腐食防止処理＋潤滑処理）
- ⑥ Au めっき厚 $0.27\ \mu\text{m}$ に腐食防止処理を施すことによって、腐食防止処理を施さない Au めっき厚 $0.9\ \mu\text{m}$ よりも優れた摩擦摩耗特性が達成されます。
- ⑦潤滑処理とハイブリット処理は摩擦摩耗特性を大きく改善します。この効果は摺動 10000 回という長期に亘って持続しています。ハイブリット処理のほうが若干効果は大きいといえます。

コネクタの小型化による接触力の低下、多芯数化による挿抜力の上昇、多数回挿抜の要求などによって、Au めっき接点部分の潤滑処理は重要性が高まっています。航空電子はこれら要求に対応するため、新しい潤滑化表面の評価検討を続けています。

【参考文献】

- 1) 河野彰夫 “摩擦の科学” 裳華房、1989
- 2) 田中久一郎 “摩擦のおはなし” 日本規格協会、1985
- 3) バウデン、テイバー “固体の摩擦と潤滑” 丸善、1961
- 4) 三科博司 “固体表面の凝着” 潤滑 33,8,P15,1988
- 5) 笹田直 “金属のアブレッシブ摩耗” 信学技報 EMD92-74,P23,1992
- 6) 河合 “金めっき摩擦・摩耗特性の研究” 航空電子技報 No.12,P62,1989
- 7) 小西誠一、上田亨 “潤滑油の基礎と応用” コロナ社、1992
- 8) 日本潤滑学会編 “増訂 潤滑ハンドブック” 養賢堂、1980
- 9) 福本、小澤 “パラジウム－ニッケル合金めっきの基礎研究” 航空電子技報 No.19,P15,1996