

錫及び銀めっき電気接点の接触抵抗予測

澤田 滋*・清水 佳織・島田 茂樹
服部 康弘

Prediction of Electrical Contact Resistance of Tin or Silver Plating — by Shigeru Sawada, Kaori Shimizu, Shigeaki Shimada and Yasuhiro Hattori — For virtual connector designing, it is important to predict contact resistance at a mating point. This study investigated the relationship between contact load and contact resistance in terms of contact shape, plating material and plating thickness. Tin or silver plated copper alloy was used in this study. The contact resistance between an embossment pattern and a flat plate was measured by the four-probe method, while the indentation contact area was examined using an optical microscope. This study consisted of two phases: the analysis of load-contact area relationship by FEM (Finite Element Method), and that of contact area-resistance relationship based on the constriction resistance theory with plated layer. For silver plated samples, which have no oxide films, the experimental results agreed with the theoretical predictions. Meanwhile, the results of tin plated samples, which are covered with oxide films, corresponded to the theoretical predictions at a high load region, in which terminal connectors were practically used. Thus it has become possible to predict a load-contact resistance curve.

Keywords: electrical contact, contact resistance, plating, contact load, contact area

1. 背景

自動車用ワイヤーハーネス (W/H) は、車両に搭載された制御用コンピュータや、センサー、アクチュエータ、ランプなどの電装品の電気的なやり取りを担っており、自動車用コネクタは、W/H 同士あるいは、W/H と電装品とを電気的に接続させる重要な部品のひとつである。

自動車用コネクタの端子には、錫や金、銀などのめっきを施した銅合金が広く用いられている。図1にコネクタの嵌合状態における端子断面の一例を示す。メス端子はバネ構造を有し、このバネの力による機械的な接触により、オス端子とメス端子との電気的な接続を実現している。端子を新規に設計する場合、嵌合時の抵抗値を端子試作前に知ることは非常に有用であり、そのためには、設計因子である接点の接触荷重や形状、めっき種などから電気接点の接触抵抗を予測することが重要となる。

接点における接触荷重と接触抵抗の関係については、多

くの研究者がさまざまな条件下にて研究を行っている^{(1)~(6)}。F.Ossartらは、接触荷重3N以下の領域において、有限要素法を用いた接触解析による接触抵抗の予測を試みている⁽¹⁾。また、X.Hernotらは、めっきのない銅合金接点において、接触荷重10Nまでの範囲で接触抵抗との関係を論じている⁽⁴⁾。これらの研究は、いずれも接触荷重10N以下の領域に焦点をあてたものである。一方、ハイブリッド自動車や電気自動車に用いる大電流用端子のニーズが、近年増加している。これらの端子は従来端子より大型で、10Nを越える接触荷重となっている。そのため、本研究では、10Nを超える接触荷重領域で、自動車用コネクタに広く用いられる錫めっき、および大電流用端子に用いられる銀めっきを施した模擬接点を用い、接触抵抗の実験値と理論値の比較を行い、予測手法の検討を行った。

2. 接触抵抗予測手法

電気接点は、表面粗さの影響等により機械的接触で得られる見かけの接触面の中に、電気的通電を担う真実接触面 (A-Spot) が存在すると Holm は提案している⁽⁵⁾。図2にそのモデル図を示す。

ここで、A-Spot における接触抵抗は、式 (1) に示すように、第1項の集中抵抗と第2項の被膜抵抗との和として表される⁽⁵⁾。

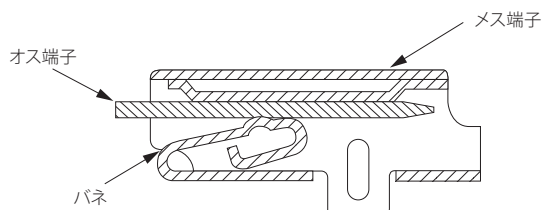


図1 一般的な端子における嵌合状態断面図

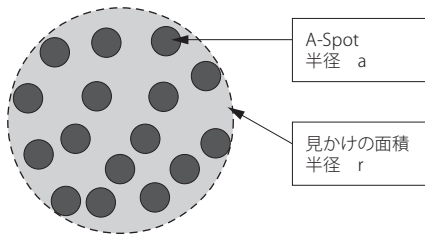


図2 見かけの接触面と真実接触面 (A-Spot) のモデル図

$$R_k = \frac{\rho}{2a} + \frac{\rho_f d}{\pi a^2} \dots\dots\dots (1)$$

ρ は、接点材料の抵抗率、 a は接触半径、 ρ_f は被膜の抵抗率、 d は被膜厚みを示している。10N を超える荷重領域においては、第1項の集中抵抗が支配的であることが報告されているため⁽⁶⁾、本研究においては、第1項の集中抵抗に着目した。

図2に示すようなA-Spotが複数存在する接点の集中抵抗は、Holmにより近似式(2)が、提案されている⁽⁷⁾。

$$R_k = \frac{\rho}{2r} + \frac{\rho}{2na} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 r は、見かけの接触面の半径、 n はA-Spotの数、 a は、A-Spotの半径である。

また、Greenwoodは、式(2)を修正し、A-Spot間の相互作用を考慮した接触抵抗近似式(3)を発表している⁽⁸⁾。

$$R_k = \frac{\rho}{2\sum a_i} + \frac{\rho}{\pi} \left(\sum_{i \neq j} \frac{a_i a_j}{S_{ij}} \right) \frac{1}{(\sum a_i)^2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 S_{ij} は、A-Spot間の距離、 a_i 、 a_j はそれぞれのA-Spotの半径を示している。図3に、A-Spotの半径を変化させて見かけの接触面積に対する真実接触面積比を変えた時の式(2)、(3)から得られた接触抵抗値を示した。縦軸は、真実接触面積の割合が100%、すなわち見かけの接触面積がすべてA-Spotである時の集中抵抗と、 R_k との比を示す。真実接触面積の割合が、20%以上あれば、見かけの接触面積がすべてA-Spotである場合に比べ、接触抵抗の増分は、14~25%程度に留まる結果となる。

そこで今回の研究では、まず見かけの接触面積から得られる接触抵抗は、真実接触面積の接触抵抗とほぼ等しいと仮定し、式(2)の第1項にのみ着目した式(4)を用いた。

$$R_k = \frac{\rho}{2r} \dots\dots\dots (4)$$

接触抵抗の予測の検討は、まず接点形状と接触荷重から見かけの接触面積を求める「機械的接触」と、次いで接触面積から接触抵抗を求める「電気的接続」の二つに分離して行った。

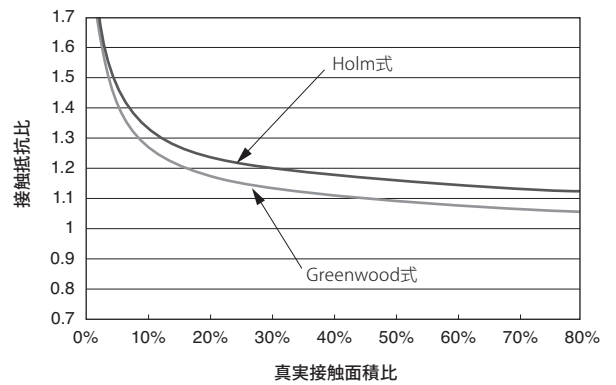


図3 真実接触面積の割合と接触抵抗比との関係

3. 実験方法および結果

錫めっき、銀めっきを施した銅合金材料および、比較用としてめっきのないサンプルを準備した(表1)。

表1 サンプル仕様

めっき材	めっき厚み (μm)	エンボス径 (mm)
錫	1	1
	3	1
	5	1
銀	2	3
	6	3
めっきなし	—	1, 3

端子構造を模擬したサンプルの形状を図4に示す。メス端子とオス端子の接触を模擬するため、サンプルには、半径1mm、3mmのエンボス加工を施し、エンボスと平板との接触での各荷重での接触抵抗の測定を4端子法にて行った⁽⁹⁾。図5に実験に用いた装置の概略図を示す。大電流端子での適用条件を想定し、通電電流を1A、最大荷重を

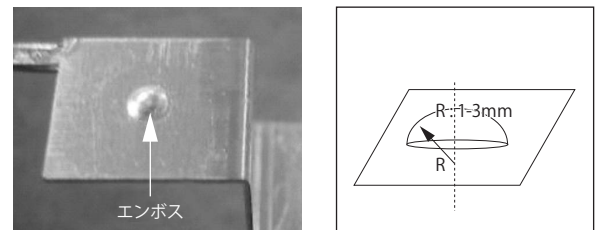


図4 サンプル形状

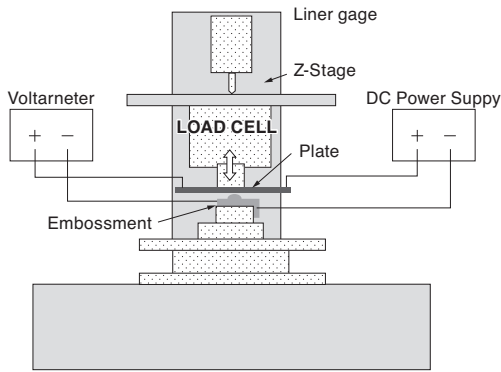


図5 測定装置模式図

40Nとして測定を行なった。各荷重における接触面積は、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察し、圧痕部分を見かけの接触面積とした。ただし、めっきのない銅合金サンプルでは、圧痕が直接観察できないため、銅合金サンプルを硫化処理し、薄くやわらかい硫化膜をつけることで、接触面積の測定を実施した。

図6に、銀めっき6μmと錫めっき5μmで測定した接触抵抗の接触荷重依存性を示す。接触抵抗は荷重が高くなると減少し、また、銀めっきを施すことにより、錫めっきの場合より接触抵抗値が低くなることが認められる。図7に、SEMにて接触痕を観察した例を示す。接触点の内部は全面

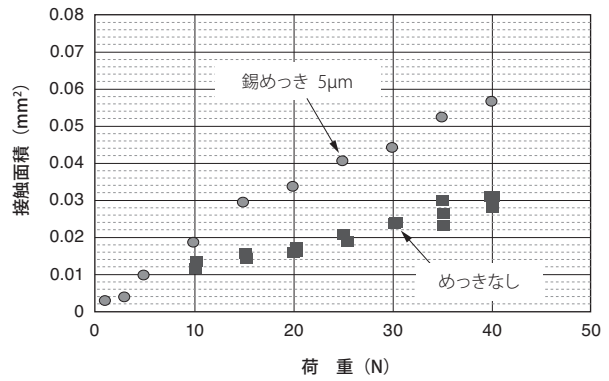


図8 荷重と接触面積の関係

に渡って表面が荒れており、接触の境界面がはっきりと観察されている。図8に、錫めっきおよび、めっきなしのサンプルでの接触面積の荷重依存性を示す。錫めっきをしたものは、めっきのないサンプルに比べて接触面積が大きくなっており、このことから接触面積は、めっきによる影響を大きく受けていることが認められる。

4. 荷重と面積の関係 (機械的接触)

エンボスと平板との接触を考える場合、まず、弾性接触と塑性接触の2つの場合について考える必要がある。球と平面との弾性接触における接触面積Sについては、ヘルツにより式(5)が示されている⁽⁹⁾。

$$S = \pi \left(\frac{2FR}{E} \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、Eは、材料のヤング率、Rはエンボスの半径、Fは接触荷重、νは、ポアソン比を示す。一方、塑性変形の場合での接触面積は、式(6)に表される。

$$S = \frac{F}{H\nu} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、Hνは、材料のビッカース硬度である。図9にめっきなし銅合金の場合での荷重と接触面積の実験結果と、式(5)および式(6)の計算結果との比較を示す。

実験結果は弾性変形の計算値とほぼ合致しており、めっきがない場合での荷重と接触面積の関係は、弾性接触となることがわかる。一方、表面にめっきがある場合は、ヘルツ式からの乖離が生じるため⁽¹⁰⁾、FEMによる弾塑性接触解析を試みた。図10に解析に用いためっき層つきの二次元軸対称モデル図を示し、また、解析に用いた物性値を表2に示す⁽¹¹⁾。一般にめっきは、バルクとは硬さが異なるため、めっきのひずみ-応力曲線は、バルクのひずみ-応力曲線とは異なる。本研究での錫めっきの硬度は、Hv24とバルクのHv6と異なったため、錫めっきの降伏応力σ_yを、式(7)

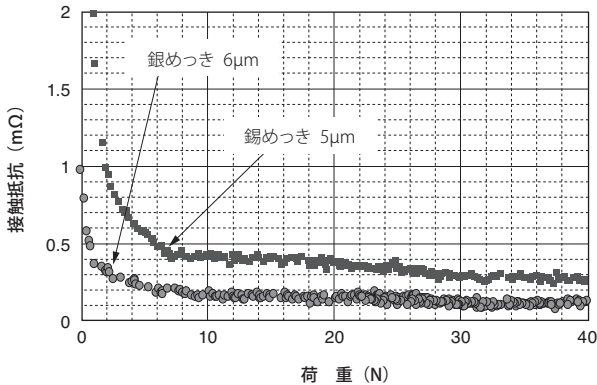


図6 接触抵抗と荷重の関係例

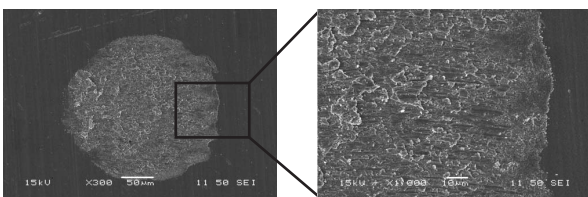


図7 錫めっき1μm, 荷重40Nでの接触痕

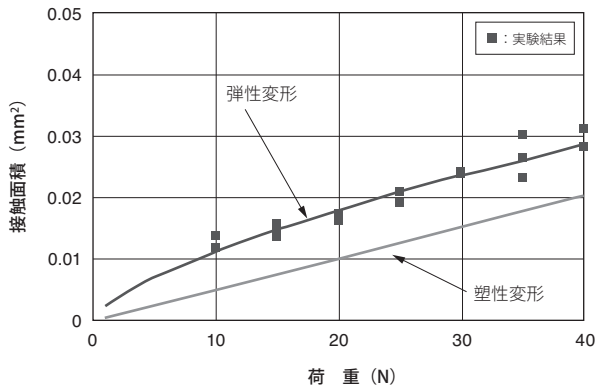


図9 めっきなし銅合金での荷重と接触面積の関係

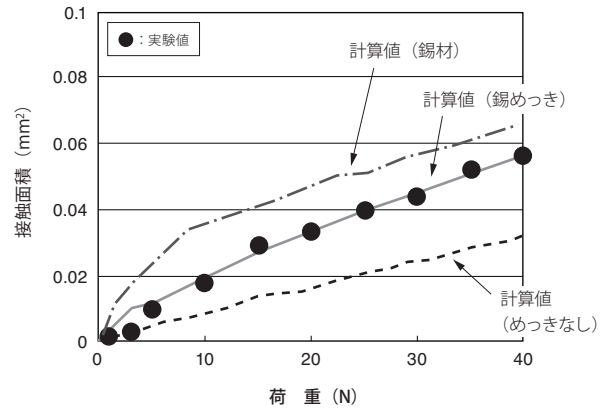


図11 錫めっきでの解析と実験結果との比較

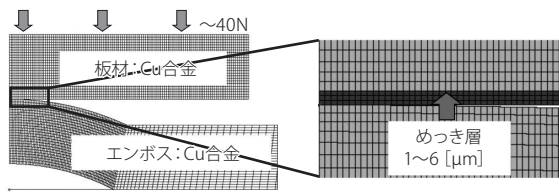


図10 2次元軸対称解析モデル図

表2 材料物性表

材料名	降伏応力 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
銅合金	485	126	0.34
錫めっき	81	46	0.34
銀めっき	21	75	0.34

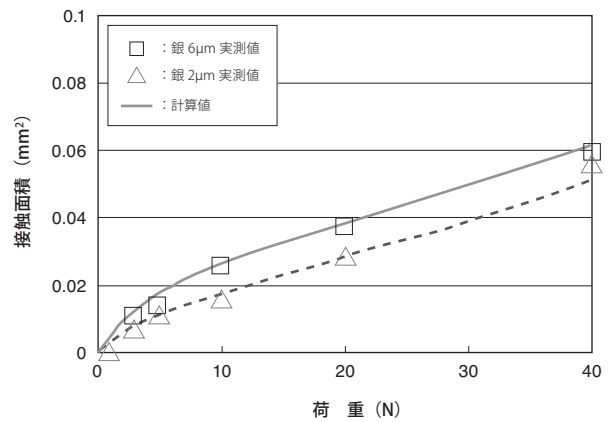


図12 銀めっきでの解析と実験結果との比較

を用いて算出し、ひずみ-応力曲線の補正を行った⁽¹²⁾。

$$Hv = 2.9\sigma_y \quad \dots\dots\dots (7)$$

一方、銀のような延性の高い材料に対しては、平野らによる式(8)を用いて、降伏応力 σ_y を算出しひずみ-応力曲線の補正を行った⁽¹³⁾。

$$Hv = X\sigma_y + Y \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$X = 2.701, Y = 123 - 1.81 \times 10^{-4}A^2$$

$$+ (4.499n^2 - 5.88n + 2.525)A$$

以上の条件で解析した結果と実験結果との比較を図11、12に示す。図11は、錫めっき層がある場合での計算結果と実験結果との比較を示す。錫めっき層の物性値をHv 6であるバルク材を用いた場合の計算結果も参考まで示した。錫のバルク材を用いた計算結果は、実測値よりも大き

な値を示し、錫めっきの硬さを実測したものから算出した計算結果は、実験結果と一致している。このことから、錫めっき層の硬度が接触面積に大きく影響することがわかる。図12は、銀めっきの場合での例を示す。この場合も、計算結果と実験値はよく一致している。以上の結果により、めっきの応力ひずみ曲線を実際のめっきの硬さから推測することで、荷重に対する接触面積をFEMによる弾塑性接触解析で求められることが確認された。また、硬い銅合金上にやわらかい錫、銀めっきが施されている場合、下地の銅合金の弾性変形と、最表面のめっきの塑性変形が複合した弾塑性変形挙動となることが明らかとなった。

5. 接触面積と抵抗の関係 (電氣的接続)

図13に、各条件における接触面積と接触抵抗の関係の実験結果を示す。図中、実線は、錫、銅合金、銀それぞれの材料の固有抵抗率 ρ 、接触面積Sから、式(4)を用いて得られた計算結果である⁽⁹⁾。接触面積が大きくなると接触

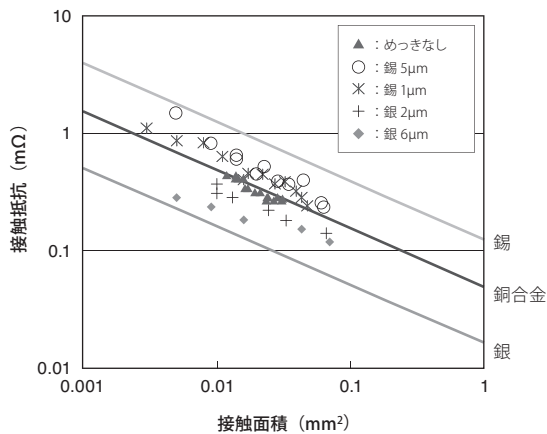


図13 接触抵抗と接触面積の関係

抵抗は減少し、また、導電率の高い銀めっきは、めっきなし銅合金に比べて接触抵抗が低く、逆に、導電率の低い錫めっきは、接触抵抗が高くなっている。以上のことから、めっき種、および、めっき厚みにより接触抵抗が影響を受けることがわかる。

このめっき層のある場合での集中抵抗の変化については、谷井らにより式(9)に示す数学解が報告されている⁽¹⁴⁾。めっき層のある集中抵抗は、めっきのない集中抵抗の値に、表面抵抗係数Φを掛けた形で与えられ、表面抵抗係数は、めっき層の厚み、接触半径、めっき、母材の導電率の4つの変数により決定される(式(9)~(12))。

$$R_k = \Phi \frac{\rho_1}{2a} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Φ : 表面抵抗係数

ρ₁ : 母材の抵抗率

$$\Phi = \frac{(1-K)}{(1+K)} \cdot \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2(-1)^n K^n F(2nd)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$K = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2 + \sigma_1} \quad \dots\dots\dots (11)$$

σ₁ : 母材の導電率

σ₂ : めっき層の導電率

d : めっき層厚み

$$F(x) = \int_0^{\infty} e^{-\lambda x} J_1(\lambda a) \sin(\lambda a) / \lambda \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots (12)$$

J₁ : 1次のBessel関数

この表面抵抗係数Φと、めっき厚みとの関係を図14に示す。横軸は、めっき厚みを接触半径で割った値で、縦軸が表面抵抗係数となる。図14は、それぞれのKの値に対する、Φの変化を示している。本研究では、錫めっきのK

の値は、-0.445、銀めっきでは、+0.504であった。また、d/aは、0.01から0.2の範囲となった。

ここで、めっき層がある場合の集中抵抗の式(9)の理解を深めるため、ラプラス方程式による静電場解析を行った。その結果を図15、16に示す⁽¹⁵⁾。図15は、めっきのない接点に流れる電流線と等電位線の変化を示している。接点に

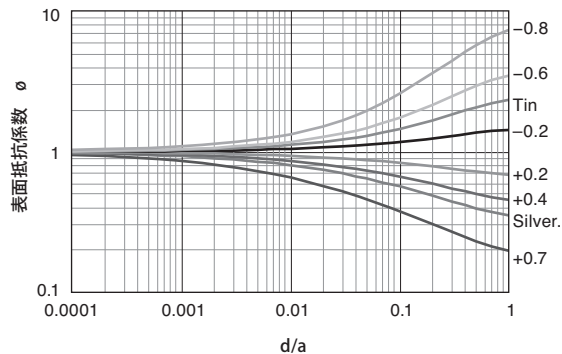


図14 表面抵抗係数Φとd/aの関係

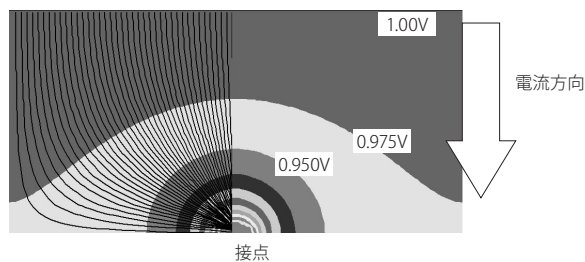


図15 めっきがない接点における電流線と、等電位分布図

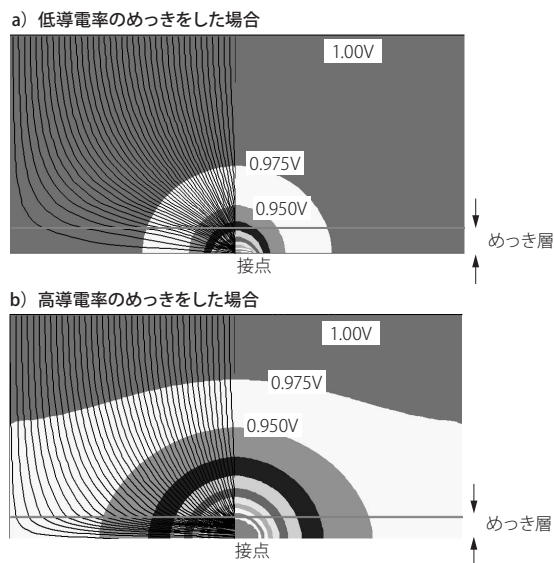


図16 めっきのある接点における等電位分布図

向かって電流線が集中し、等電位線が接点を中心に楕円状となっている。一方、表面に接点材料とは異なった導電率のめっき層がある場合の電流線の変化と等電位線の変化を図16に示す。低い導電率のめっきを施した場合、めっき層界面にて電流は接点の外側に向かい、また、高い導電率のめっきを施した場合は、接点の内側に向かって電流線が屈折している。その結果、より高い導電率のめっきを施すと接点中央部分に電流がより流れるようになり、接触抵抗が下がることになる。

次に、銀めっき2 μm 、6 μm 、錫めっき1 μm 、5 μm の場合について、図14より得られる集中抵抗の理論値とそれぞれの実験値との比較を図17に示す。酸化被膜のない銀めっきの場合、計算結果と実験値はよく一致しており、一方、酸化被膜のある錫めっきについても、計算結果に対して実験値がほぼ一致している。

6. 接触荷重と接触抵抗の関係

図11、12より、接触荷重と接触面積の関係が得られ、図17より、接触面積と接触抵抗の関係が得られたことから、両者を組み合わせることにより、接触荷重に対する接

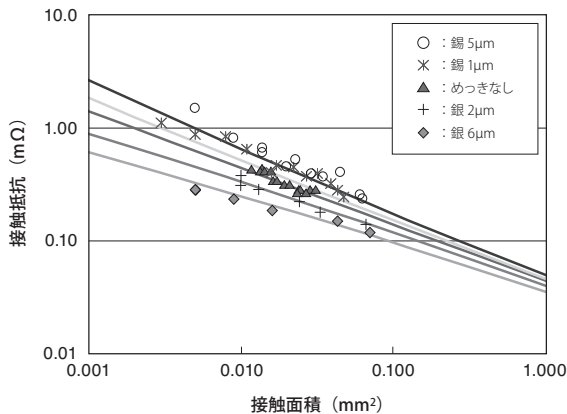


図17 接触面積と接触抵抗の関係

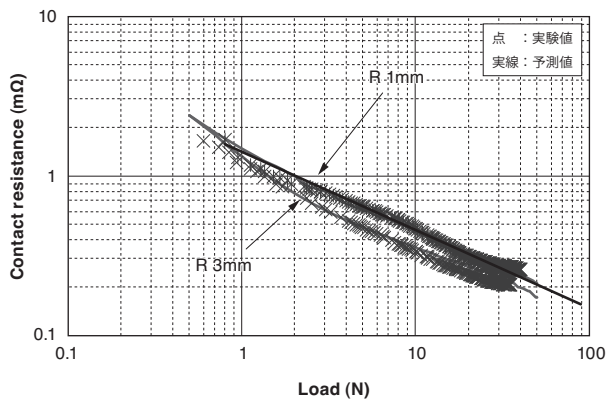


図18 接触荷重と接触抵抗の関係 (めっきなし)

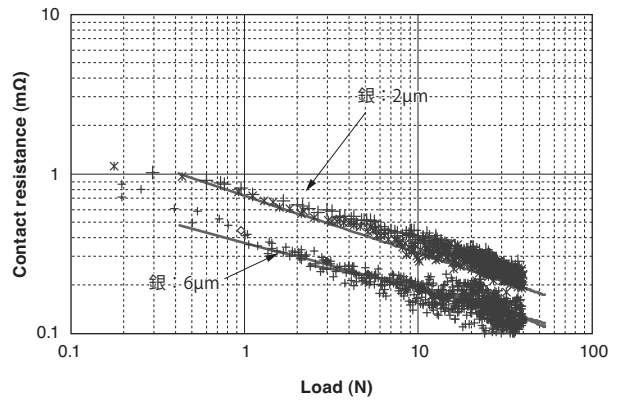


図19 接触荷重と接触抵抗の関係 (銀めっき)

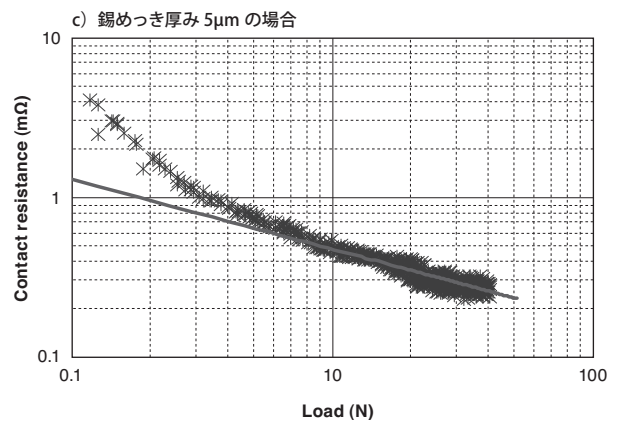
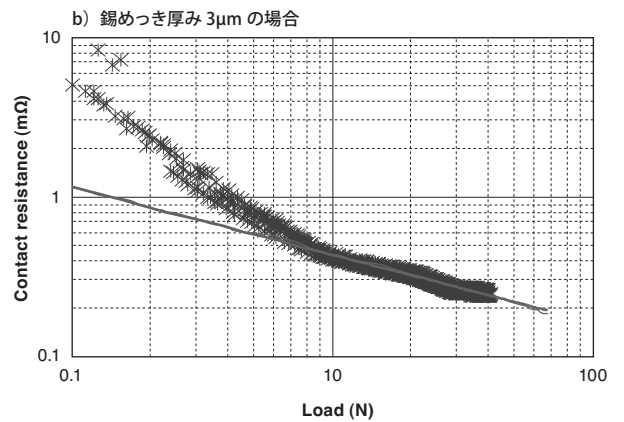
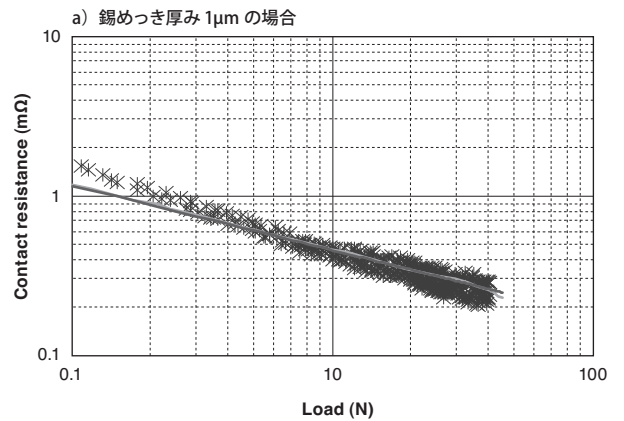


図20 接触荷重と接触抵抗の関係 (錫めっき)

触抵抗の予測を試みた。めっきのない場合でのエンボス半径 1mm および 3mm の接触抵抗の実験値と予測値との比較を図 18 に、銀めっき厚みが 2 μ m, 6 μ m の場合を図 19 に、錫めっきの場合を図 20 にそれぞれ示す。それぞれの図中、点が実験結果を示し、実線が解析から求めた予測値を示す。試験直前に酸化被膜除去を行っためっきなし銅合金の場合及び、酸化被膜のない銀めっきについては、実験結果と予測結果がよく一致している。また、酸化被膜のある錫めっきについては、集中抵抗が支配する領域において、実験結果と予測結果が一致している。

本実験では、図 7 に示すように圧痕は全面に荒れがみられ多くの A-Spot が存在することから、真実接触面積の割合は、みかけ面積に対して十分に存在すると推定される。そのため、FEM 接触解析で求められる見かけの接触面積から求めた接触抵抗が、実験結果と一致したと推定される。以上のことから、接触荷重が高く、真実接触面積の割合が多く存在する場合、FEM 解析で求めた見掛けの接触面積は、電気的通電での真実接触面積と考えて接触抵抗を計算しても実用上の問題は少ない。

7. まとめ

錫および銀めっきにおける接触抵抗の荷重依存性について解析を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

1. 接触荷重と接触面積の関係は、めっきの物性を考慮した弾塑性 FEM 解析により求めることができる。
2. 接触面積と接触抵抗の関係は、めっき層を考慮した集中抵抗の式を用いることで、算出可能である。
3. 各荷重での接触抵抗は、1. 及び 2. を組み合わせることで、予測することが可能である。
4. 酸化被膜のない銀めっきでは、実験結果と予測値がよく一致した。また、表面に酸化被膜のある錫めっきにおいては、集中抵抗が支配的となる荷重領域にて、予測値と実測値が一致した。
5. 接触荷重が高く、真実接触面積の割合が多い場合では、FEM 解析で求めた見掛けの接触面積は、電気的通電での真実接触面積と考えて接触抵抗を計算しても実用上の問題は少ない。

参 考 文 献

- (1) F. Ossart, S. Noel, D. Alamarguy, S. Correia and P. Gendre, "Electro-mechanical modelling of multilayer contacts in electrical connectors", Proc. IEEE Holm Conf. Electro Contacts 53th, pp.1-8 (2007)
- (2) J. L. Queffelec, N. Ben Jemaa, D. Travers and G. Pethieu, "MATERIALS AND CONTACT SHAPE STUDIES FOR AUTOMOBILE CONNECTOR DEVELOPMENT", Proc. IEEE Holm Conf Electr Contacts 36th, pp.225-231 (1990)
- (3) 塚本真史、佐野一仁、藤巻裕彦、「基礎モデル実験による接触抵抗メカニズムの検討」、矢崎技術リポート、Vol.20, pp.76-79 (1996)
- (4) X. Hernot, A. Senouci, A. El Manfalouti and N. Ben Jema, "Contact Resistance law for elasto-plastic domains in the force range (1mN-10N)", IEICE Technical Report, EMD2002-57, pp. 10-13 (2002)
- (5) R. Holm, "Electric Contacts theory and application", Springer-Verlag New York Inc. (1967)
- (6) Y. Saitoh, K. Iida, S. Sawada, K. Shimizu and Hattori, "Dependency of Contact Resistance on Load", Proc. of IEEE Holm conf., pp.70-75 (2007)
- (7) R. Holm, "Constriction resistance of an assembly of elongated as-spots", Proc. of ICEC, p.16, May (1970)
- (8) J.A.Greenwood, "Constriction resistance and real area of contact," Brit. J. Appl. Phys., Vol.17, pp.162-1632 (1966)
- (9) S. Sawada, K. Shimizu, Y. Hattori, Y. Saito, T. Tamai and K. Iida, "The effect of plating and contact shape of contact resistance in electric contact", Proc. International Conference of Electrical Contacts 24th, pp.257-261 (2008)
- (10) K. Shimizu, S. Shimada, S. Sawada and Y. Hattori, "Prediction of resistance of electrical contact with plated layer (2)-Contact area by FEM analysis -". IEICE Technical Report, EMD2008-89, pp.97-100 (2008-11)
- (11) K. Shimizu, S. Shimada, S. Sawada and Y. Hattori, "Contact area analysis by FEM with plating layer for electrical contact", IEICE Trans. Electron. Vol.E92-C, no.8, pp.1013-1019, Aug. (2009)
- (12) D. Tabor, The Hardness of Metals, Oxford (1951, 2000 republish)
- (13) 平野明彦、坂根政男、濱田直巳、「ビッカース硬さに及ぼす非弾性材料定数の影響について」、材料力学部門講演会講演論文集、Vol.2004、pp. 583-584 (2004)
- (14) 谷井琢也、「小形クロスバスイッチの通話路接点」、電電公社研究実用化報告、NTT Vol.15、No.5 pp. 760-791 (1966)
- (15) S. Sawada, K. Shimizu, Y. Hattori and T. Tamai, "Prediction of resistance of electrical contact with plated layer (1)-Theoretical analysis -". IEICE Technical Report, EMD2008-88, pp.93-96 (2008-11)

執 筆 者

澤田 滋* : (株)オートネットワーク技術研究所
回路接続研究部 基盤技術研究室
主席研究員 (三重大学駐在)
三重大学車載ネットワーク研究室にて、
コネクタの接触現象に関する研究に従事



清水 佳織 : (株)オートネットワーク技術研究所 回路接続研究部
基盤技術研究室

島田 茂樹 : 解析技術研究センター 主査

服部 康弘 : (株)オートネットワーク技術研究所 回路接続研究部
基盤技術研究室 室長

*主執筆