

技術紹介

2 原子変位エネルギーに基づく接触モデル解析(再考)

Electrical Contact Analysis Based on Displacement Energy of Atoms -Review-

田井 富茂 Tomishige Tai
小口 慎雄 Mitsuo Koguchi

中央研究所 研究開発部 接続技術マネージャー
コネクタ開発本部 主任

キーワード： 接点、電氣的接触、変位エネルギー、トンネル抵抗

Keywords : contact, electrical contact, displacement energy, tunnel resistance

要 旨

接点近傍での原子変位とエネルギー平衡の観点から、真の接触領域は基板表面皮膜を破って接触する領域とその周辺の表面皮膜を介して密着している領域から構成されるというモデルを提案しました。モデルに基づいて開発した、弾性体に金属薄膜を形成する接触構造においては、低荷重の面接触によるトンネル抵抗が支配的であり、これは実験結果をよく支持しています。

SUMMARY

We have proposed a new model of electrical contact from a viewpoint of atomic displacement, and analyzed the equilibrium energy for the contact. Based on the model, a contact load provides two contact areas; one is an intrinsic contact area generated by cracking a surface thin layer of the contact substrate, and the other is an appressed area surrounding the intrinsic contact area. To demonstrate the model, we have developed a novel electrical contact structure composed of thin metal films on an elastomer substrate. By employing this contact configuration, a tunneling conducting mode becomes dominant due to a low load sheet contact. The experimental results are in good agreement with those predicted from the model.

1 まえがき

現在、携帯電話に代表されるように各種電気電子機器は小型・高速化の一途にあり、これを支える高密度実装の発展には目覚ましいものがあります。コネクタ等の電氣的接続においても狭ピッチ、高密度化に伴い、占有面積、背高、熱、クロストーク、保持強度、安定性などの点から、従来の脱着可能な接続では遠からず限界が来ることが予測されます。そこで、基本に立ち返って従来の電気接点モデルを再考察することは意義あることと考えられます。本研究では、従来と異なる視点から接触構造をモデル化して解析した結果を解説します。

2 接点構造のモデル化

一般に従来の接触抵抗は、Holm の接触理論に従って図 1 に示すように電流が集中することによって発生すると考えられる集中抵抗 R_c とそれに直列につながる表面皮膜抵抗 R_f との和で表されます^{1) 2)}。

$$R = R_c + R_f \quad \cdots (1)$$

また 集中抵抗 R_c は荷重 W の関数として

$$R_c = k \cdot W^n \quad \cdots (2)$$

ここで、 k は材料・形状によって決まる定数、 n は表面粗さや荷重領域の大小に依存して $-1/3 \sim -3/4$ の値をとります。

この式は多くの場合実験式として良い近似を与えますが、フィティングパラメータとなっている n 値により定数 k の単位の次元が異なるという物理的には意味を成さないものであります。そこで接触抵抗を説明するため、図 2 のような接触構造モデルを提案しました³⁾。

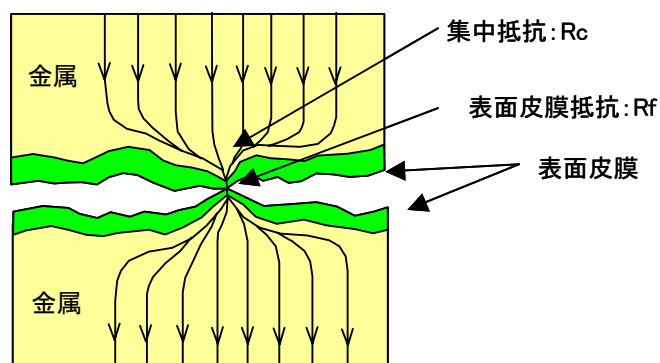


図 1 従来の接触抵抗の概念図

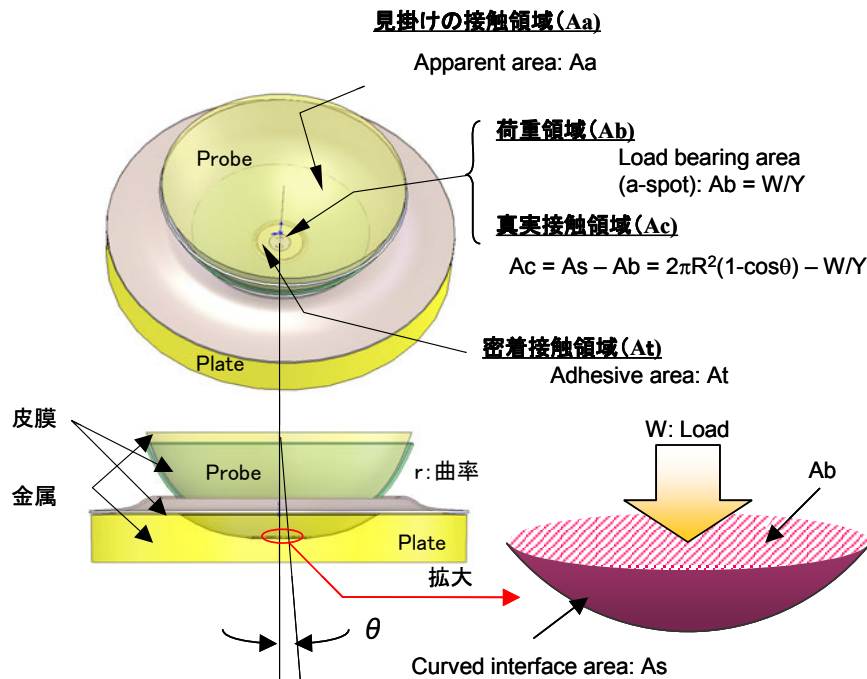


図2 接触構造のモデル化

このモデルでは、真実接触領域（基板表面皮膜を破って接触している領域： A_c ）とその周辺の密着領域（基板表面皮膜を介して密着している領域： A_t ）の抵抗が並列となり、さらに金属のバルク抵抗 R_{Bulk} が加わる (3) 式で表されます。

$$R = \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_t} \right)^{-1} + R_{Bulk} \quad \dots (3)$$

ただし、 R_c は A_c 部の抵抗、 R_t は A_t 部の抵抗、 R_{Bulk} は導体の抵抗値である。荷重領域 (A_b) はいわゆる「a-spot」と呼ばれる領域¹⁾であり、(4) 式のように Hook の法則の弾性限界値で表されます。

$$\sigma = \frac{W}{A_b} = Y \cdot \varepsilon \Big|_{l \rightarrow 0} = Y \quad \dots (4)$$

W：荷重 Y：ヤング率

真実接触領域 (A_c) は、荷重領域 (A_b) とそれに連なる曲面 (A_s) との差として (5) 式で与えられます。

$$A_c = A_s - A_b = \left[2\pi \cdot r^2 (1 - \cos \theta) - \frac{W}{Y} \right] \cong \frac{W^2}{4\pi \cdot r^2 Y^2} \quad \dots (5)$$

ただし、 r はプローブの曲率、 θ は A_b の見込み角です。

周辺の密着領域 (A_t) は、荷重 (W) が成した仕事量と原子の変位エネルギー (E_d) がエネルギー平衡状態にあると仮定して求めることができます。すなわち、密着領域は荷重領域の周辺で徐々に荷重が減少して変位エネルギーが減衰してゼロになるまでの領域として次式で与えられます。

$$r_t = r_b + r_{i0} \left(1 - \exp \left(\frac{\alpha \cdot S_a \cdot W}{\pi \cdot r E_d} \right) \right) \quad \dots (6)$$

$$A_t = \pi \cdot r_t^2 \quad \dots (7)$$

$$r_b = \sqrt{\frac{A_b}{\pi}} = \sqrt{\frac{W}{\pi Y}} \quad \dots (8)$$

$$r_{i0} = \frac{E_d}{E_s} \cdot r_g \quad \dots (9)$$

ここで、 r_t は A_t の半径、 E_d は原子一個あたりの変位エネルギー、 E_s は表面皮膜を破るのに必要なエネルギー、 α は皮膜の物性により決まる定数、 S_a は原子一個あたりの占有面積です。

また、見掛けの接触領域 (打痕を与える領域: A_a) は、荷重 (W) が成した仕事量からその半径を r_a とすれば以下の式に表されます。

$$r_a = \sqrt{\frac{3V_a}{\pi \cdot E_a} W + r(3\pi - 2)} \sqrt{\frac{9\pi^2 r^2}{4} - \frac{3V_a}{\pi \cdot E_a} W + \pi \cdot r^2 \left(3 - \frac{9\pi}{2} \right)} \quad \dots (10)$$

ここで、 V_a は原子一個あたりの占有体積、 E_a は金属の活性化エネルギーです。

以上から各々の面積が求められると、接触抵抗は以下に求まります。

$$R_c = \frac{\rho_c \cdot t_c}{A_c} \quad \dots (11)$$

$$R_t = \frac{\rho_t \cdot t_t}{A_t} \quad \dots (12)$$

ただし、 ρ_c は真実接触領域の抵抗率、 t_c は真実接触領域の皮膜の厚さ (プローブ表面皮膜を想定し、 $t_c = t_t/2$ と仮定します)、 ρ_t は密着領域の抵抗率、 t_t は密着領域の表面皮膜の厚さです。なお、抵抗率 ρ をトンネル抵抗と考えると次式で与えられる実験値⁴⁾から求めることができます。

$$\rho = 2.8 \times 10^{-10} \cdot \exp(1.2 \times 10^{-9} \cdot t) \quad \dots (13)$$

3 実験結果

図 3 に曲率 $25 \mu\text{m}$ のタングステンプローブへ 4N の Au をコートしたプローブを 4N および 18k の Au 基板に接触した場合のプローブ荷重に対する接触抵抗の測定値と計算値を示しています。測定値が計算値に良く一致していることがわかります。

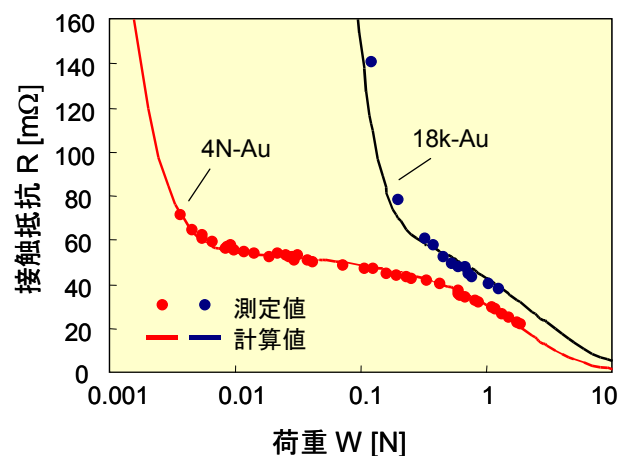


図 3 荷重 (W) — 抵抗 (R) の関係

高い荷重領域では荷重と共に緩やかに抵抗値は減少しますが、抵抗値の違いはヤング率の違いと表面の状態に依存しています。

また、図 4 に上記 4N の Au 基板への見掛けの接触領域 (A_a) の半径 r_a と荷重 (W) の測定値と計算値を比較します。測定値と (10) 式から導かれる計算値はよく一致していることがわかります。

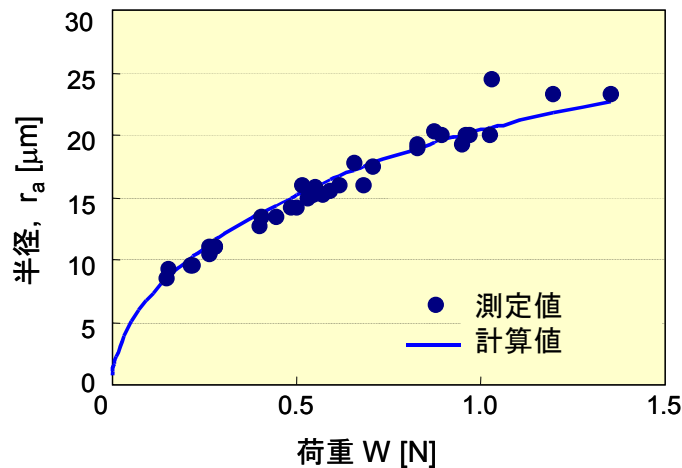


図 4 見掛けの接触領域 (A_a) の半径 r_a と荷重 (W) の関係

図 5 は、真実接触領域 (A_c) の抵抗 R_c と密着領域 (A_t) の抵抗 R_t の荷重 (W) に対する配分比を示しています。図から、低荷重域では密着領域 (A_t) のトンネル導電が抵抗を支配し、荷重 2N を超えるあたりから真実接触領域 (A_c) の導電が支配的になることが読み取れます。

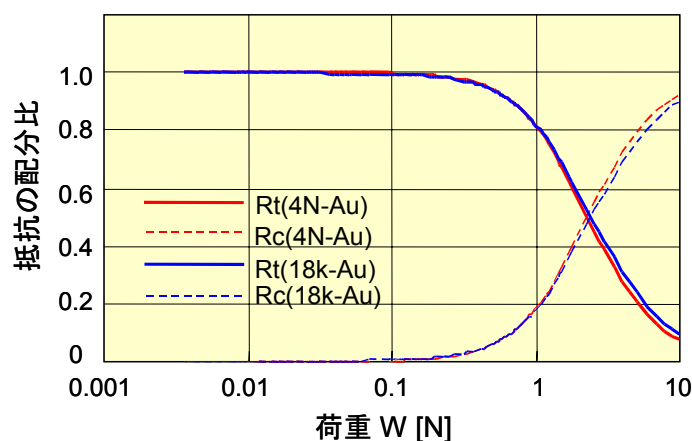


図 5 真実接触領域 (A_c) と密着領域 (A_t) の抵抗に占める割合

4 低荷重コネクタ構造

実装の高密度化に伴ってコネクタの狭ピッチ・多芯化が求められる昨今では、一芯あたりの荷重はできるだけ低いことが望まれています。私たちは、これまでに上記の考察に基づいて低荷重コネクタを提案してきました³⁾。すなわち、低荷重を実現するために密着領域 (A_t) のみで形成される電極として、ゲル上に金属薄膜を配したコネクタ端子です。ゲルはその弾力によって密着領域 A_t を増強するために採用されています。ゲル上に Ni/Au 薄膜を形成したコネクタの荷重 (W)—抵抗 (R) 特性 (接触面積 0.18mm^2) を図 6 に示します。ここでは薄膜の配線抵抗 R_{Bulk} を含んでいます。図から、 0.05N 以下の極めて低い荷重においても $50\text{m}\Omega$ 以下の低抵抗特性を実現していることがわかります。

また、金属薄膜の種類による接触抵抗の違いを図 7 に示します。Au, Sn とともに数 $10\mu\text{m}$ 角以上の電極面積で密着領域のみを形成する場合には、通常より充分小さな荷重で接触抵抗を安定させられることがわかります。ただし、Au 薄膜に比べて Sn 薄膜のほうが抵抗値は高く、また抵抗値のばらつきが大きくなります。これは、Sn 薄膜上に形成される Sn 酸化膜の影響でトンネル抵抗が高くなるためです。このことから、密着領域 (A_t) のみで低荷重接触する場合には、表面が化学的に安定な金属薄膜を選択することが重要です。

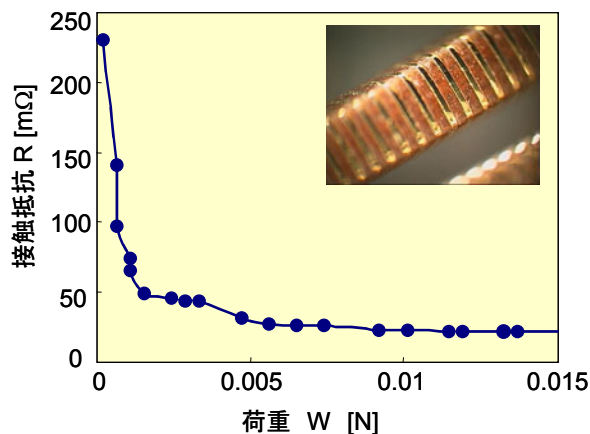


図 6 ゲル上に Ni/Au 薄膜を配した端子の W-R 特性

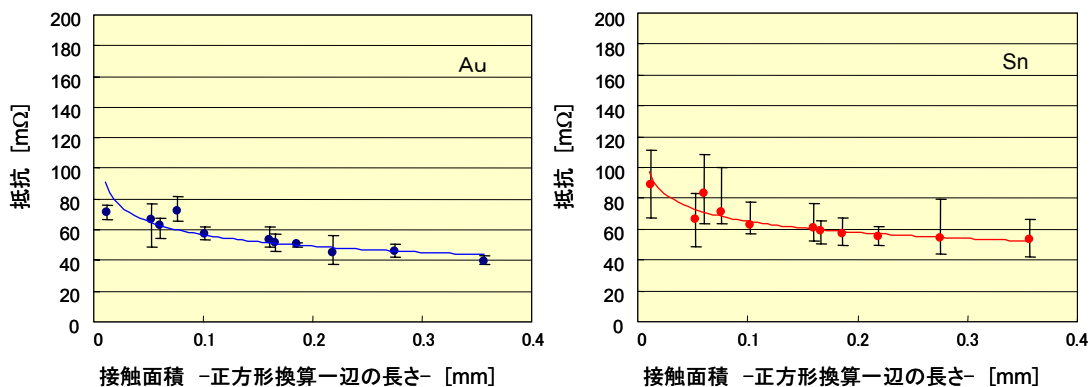


図 7 ゲル上に金属薄膜を配した端子の接触面積依存性(左は Au、右は Sn)

5 むすび

従来から電氣的接触に適用されてきたモデルとその視点や解釈が異なりますが、原子に働くエネルギーから観た接点モデルを提案し、解析しました。測定値は計算値と良く一致することから、本モデルの妥当性を検証しました。密着領域のみから形成される低荷重接触によって安定した低抵抗特性が得られることを実証しました。

【参考文献】

- 1) R. Holm, "Electrical contacts - Theory and Application" , Springer Verlag, Berlin, 1967
- 2) J.H.WHITLEY, "CONTACTS and DRY CIRCUITS" Presented at an invitational symposium held in Montreal, Ottawa, and Toronto on October 1, 2, and 3, 1963
- 3) T. Tai and M. Koguchi, "Structural Analysis of Electric Contact Obtained from the Energy between Atoms" JAE Technical Report, Vol. 25, 2002
- 4) Kenneth E. Pitney, Ney Contact Manual, The J.M.Ney Company