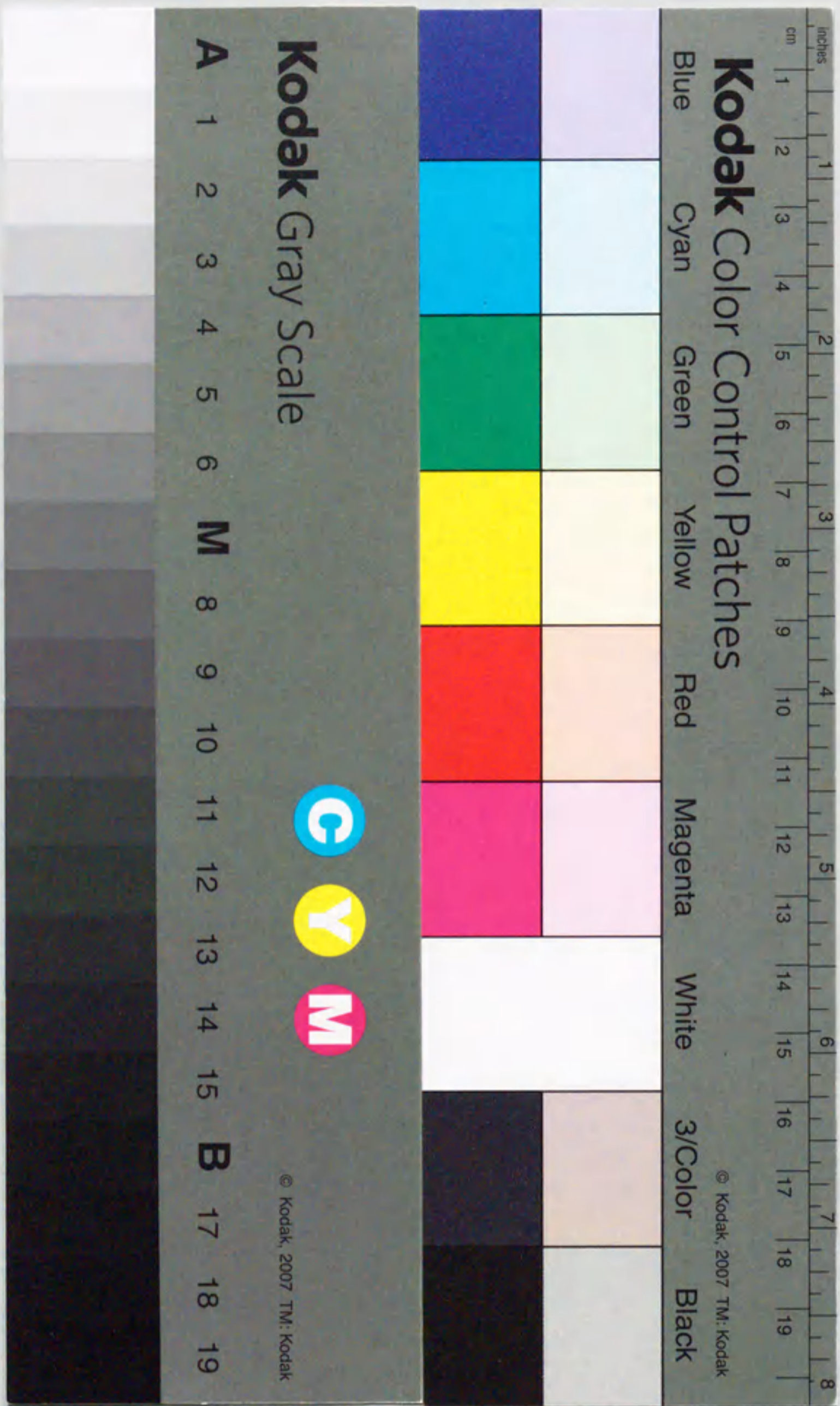


報告番号 乙第 5532 号

電気接触子の接触抵抗特性に関する
実験的研究

愛知久史



①

電気接触子の接触抵抗特性に関する
実験的研究

愛知久史

目 次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 本論文に用いた主な記号 | IV |
| 第 1 章 緒 論 | 1 |
| 1. 1 はじめに | 1 |
| 1. 2 接触抵抗の一般理論 | 1 |
| 1. 3 金属導体間に形成される接触面 | 8 |
| 1. 4 接触抵抗に関わる諸問題 | 14 |
| 1. 5 $\psi-\theta$ 理論による接触電圧の検討 | 16 |
| 1. 6 接触抵抗に関する研究の現状と問題点 | 20 |
| 1. 7 本研究の目的と本論文の内容 | 22 |
| [第 1 章の文献] | 23 |
| 第 2 章 電解浴槽を用いた接触子モデルによる 接触抵抗特性の解明 | 25 |
| 2. 1 はじめに | 25 |
| 2. 2 電解浴槽を用いた接触子モデル | 25 |
| 2. 3 点接触における接触面積と接触抵抗との関係 | 27 |
| 2. 4 複数の接触点形成時における接触抵抗特性 | 28 |
| 2. 5 複数の接触点形成時における接触点分布と 接触抵抗との関係 | 31 |
| 2.5.1 数値特性 | 31 |
| 2.5.2 実測特性 | 35 |
| 2. 6 線接触における接触面積と接触抵抗との関係 | 39 |
| 2.6.1 接触線長の伸展および線幅の拡大に伴う接触抵抗特性 | 39 |
| 2.6.2 線接触の形状と接触抵抗との関係 | 43 |
| 2. 7 線接触の並列配置における接触抵抗の挙動 | 46 |
| 2. 8 線から面接触への移行に伴う接触抵抗の挙動 | 49 |
| 2.8.1 各種接触形態と接触抵抗特性 | 49 |
| 2.8.2 線幅の極度な拡大に伴う面接触時の接触抵抗特性 | 52 |
| 2. 9 結 論 | 55 |
| [第 2 章の文献] | 55 |
| 第 3 章 光干渉法を用いた微細接触点の検出 | 57 |
| 3. 1 はじめに | 57 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2 | 実験手法 | 57 |
| 3.3 | レーザー光による単色光源を用いた観測 | 59 |
| 3.3.1 | 点接触の観測 | 59 |
| 3.3.2 | 平面接触の観測 | 62 |
| 3.4 | 白熱電球光の併用した接触点の確認 | 64 |
| 3.4.1 | 検出手法 | 64 |
| 3.4.2 | 接触点の確認 | 72 |
| 3.4.3 | 本観測手法の応用例 | 72 |
| 3.5 | 結論 | 80 |
| | [第3章の文献] | 80 |
| 第4章 | 接触点の直視観測と薄膜導体の接触抵抗特性 | 82 |
| 4.1 | はじめに | 82 |
| 4.2 | 薄膜導体に形成する接触点の接触抵抗 | 82 |
| 4.3 | 接触抵抗の実測 | 85 |
| 4.3.1 | 光干渉法の併用 | 85 |
| 4.3.2 | 点接触時の特性 | 85 |
| 4.3.3 | 複数の接触点形成時の特性 | 91 |
| 4.4 | 接触点間距離と接触抵抗との関係 | 94 |
| 4.5 | 近接した複数接触点の接触抵抗特性 | 101 |
| 4.6 | 結論 | 105 |
| | [第4章の文献] | 106 |
| 第5章 | SF ₆ 分解生成物が介在した接触子の通電特性 | 107 |
| 5.1 | はじめに | 107 |
| 5.2 | SF ₆ ガス中の火花放電にさらされた劣化接触子の接触抵抗特性 | 108 |
| 5.3 | 腐食ガス中に放置した点接触子の接触抵抗特性 | 117 |
| 5.3.1 | 腐食ガス容器および接触子の放置条件 | 117 |
| 5.3.2 | 接触抵抗と接触荷重との関係 | 119 |
| 5.3.3 | 高抵抗皮膜や異物を介した接触状態における接触抵抗の荷重依存性 | 121 |
| 5.4 | 正弦波交流電流の連続通電時における接触電圧および接触抵抗 | 123 |
| 5.5 | 減衰大電流通電時の接触子間電圧波形および接触抵抗 | 129 |
| 5.6 | 各種粉末を介在させた銅点接触子の接触電圧波形 | 135 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| 5.7 | 結論 | 137 |
| | [第5章の文献] | 138 |
| 第6章 | 直流300A通電時における接触子の接触抵抗特性 | 140 |
| 6.1 | はじめに | 140 |
| 6.2 | 接触抵抗の測定装置および供試接触子 | 140 |
| 6.3 | 各種金属導体を用いた点接触の接触抵抗と接触荷重との関係 | 142 |
| 6.3.1 | 直流1A通電時の接触抵抗特性 | 142 |
| 6.3.2 | 直流300A通電時の接触抵抗特性 | 144 |
| 6.4 | 各種金属導体を用いた点接触子の接触抵抗と通電電流との関係 | 146 |
| 6.4.1 | 銀および銅接触子 | 146 |
| 6.4.2 | アルミ接触子 | 149 |
| 6.5 | 接触子の軟化・溶融に伴う接触抵抗の挙動 | 151 |
| 6.5.1 | $\psi-\theta$ 理論による各種金属導体の接触電圧 | 151 |
| 6.5.2 | アルミ接触子 | 152 |
| 6.5.3 | 超音波アルコール洗浄処理を施した銅接触子 | 158 |
| 6.5.4 | 大気中に放置した銅接触子 | 161 |
| 6.6 | 結論 | 167 |
| | [第6章の文献] | 168 |
| 第7章 | 総括 | 169 |
| 7.1 | はじめに | 169 |
| 7.2 | 電解浴槽を用いた接触子モデルによる接触抵抗の解析 | 169 |
| 7.3 | 光干渉法を用いた微細接触点の検出 | 170 |
| 7.4 | 接触点の直視と接触抵抗特性の解析 | 171 |
| 7.5 | SF ₆ 分解生成物が介在した接触子の交流通電時における通電現象の解明 | 171 |
| 7.6 | 直流300A通電時における接触抵抗現象の解析 | 173 |
| 7.7 | 結言 | 173 |
| 謝辞 | | 175 |
| 本研究に関して公表した論文 | | 176 |

本論文に用いた主な記号

| | | |
|----------------|------------|-------------------------|
| | a | : a-スポット (接触点) の半径 |
| | A_a | : 見掛けの接触面の面積 |
| | A_b | : 加圧面の面積 |
| | b | : 完全導体球の半径 |
| | B | : 照射光 |
| B_1, B_2 | | : 反射光 |
| | D | : 球面の直径 |
| | D_f | : 皮膜 (薄膜導体) の厚さ |
| E_1, E_2 | | : ヤング率 |
| | G | : 空げき長 |
| | H | : 鮮明度 |
| | I | : 通電電流 |
| | j | : ベクトル電流密度 |
| | $2l$ | : 接触点間の距離 |
| | L_c | : 線接触の線長 |
| | n | : しま次数 |
| | N | : 接触点の数 |
| | P | : 加圧力 (接触荷重) |
| | q | : エネルギー流密度のベクトル |
| | r | : 見掛けの接触面の半径 |
| | R | : 接触抵抗 |
| | R_c | : 集中抵抗 |
| | R_{cN} | : N 個の接触点が形成した場合の集中抵抗 |
| | R_{cf} | : 薄膜導体に形成する接触点の集中抵抗 |
| | R_f | : 皮膜抵抗 |
| | S | : 接触面積 |
| | T | : 接触子温度 |
| | ΔT | : 温度上昇値 |
| | V_c | : 接触電圧 |
| | W | : 線接触の幅 |
| | γ | : 濃度 |
| | θ | : 温度 |
| | θ_m | : 接触点温度 |
| | κ | : 熱伝導率 |
| | λ | : 波長 |
| ν_1, ν_2 | | : ポアソン比 |
| | ρ | : 導体の抵抗率 |
| | ρ_f | : 皮膜 (薄膜導体) の抵抗率 |
| | σ | : 導電率 |
| | ψ | : 電位 |

第1章 緒 論

1. 1 はじめに

遮断器、断路器などの電力用開閉機器や継電器に代表される一般的な開閉機器の接触部分は2組の金属導体が機械的に加圧されて接合した状態にある。したがって、ろう付けや半田などによって接合させた部分とは区別される。電気学会から出版された電気専門用語集[1]によれば、電気接点の定義は「電気回路の開閉または接触を機械的に行う電気接触素子」と記述されている。なお、以下ではこの電気接触素子を『電気接触子』と記述することにする。また、接触抵抗は「接点の接触部分における電気抵抗」としている。

接触抵抗に関する研究は歴史的にも古くから行われており、中でもR.Holmの研究は著名であり、“Electric Contacts Handbook”が1958年に発刊され、1967年には第4版[2]が発刊されている。また、国内においては鳳誠三郎によって「電気接点と開閉接触子 第1版」[3]が1948年に発刊された。近年においては真野国男らによる研究[4], [5]がある。

また、金属の接触問題は機械的現象の一つであり、古くから研究されている。特に、TaborやBowdenによる機械的な接触現象に関する研究[6], [7]が知られている。

1. 2 接触抵抗の一般理論

二つの平面の金属導体が互いに機械的に加圧された状態について、R.Holmは図1. 1に示すようなモデルを提案している。対向する導体の平面部分を見掛けの接触面 A_a とし、その導体が圧力を受けて機械的に接触している部分を加圧面 A_b で示している。この加圧面は見掛けの接触面の大きさに比してごく一部分に過ぎない。これには導体表面の平坦度が影響し、導体表面の突部同士の接触によって加圧面が形成される。この加圧面は見掛けの接触面上の3カ所以上形成されることで安定した接触状態になるとされている。

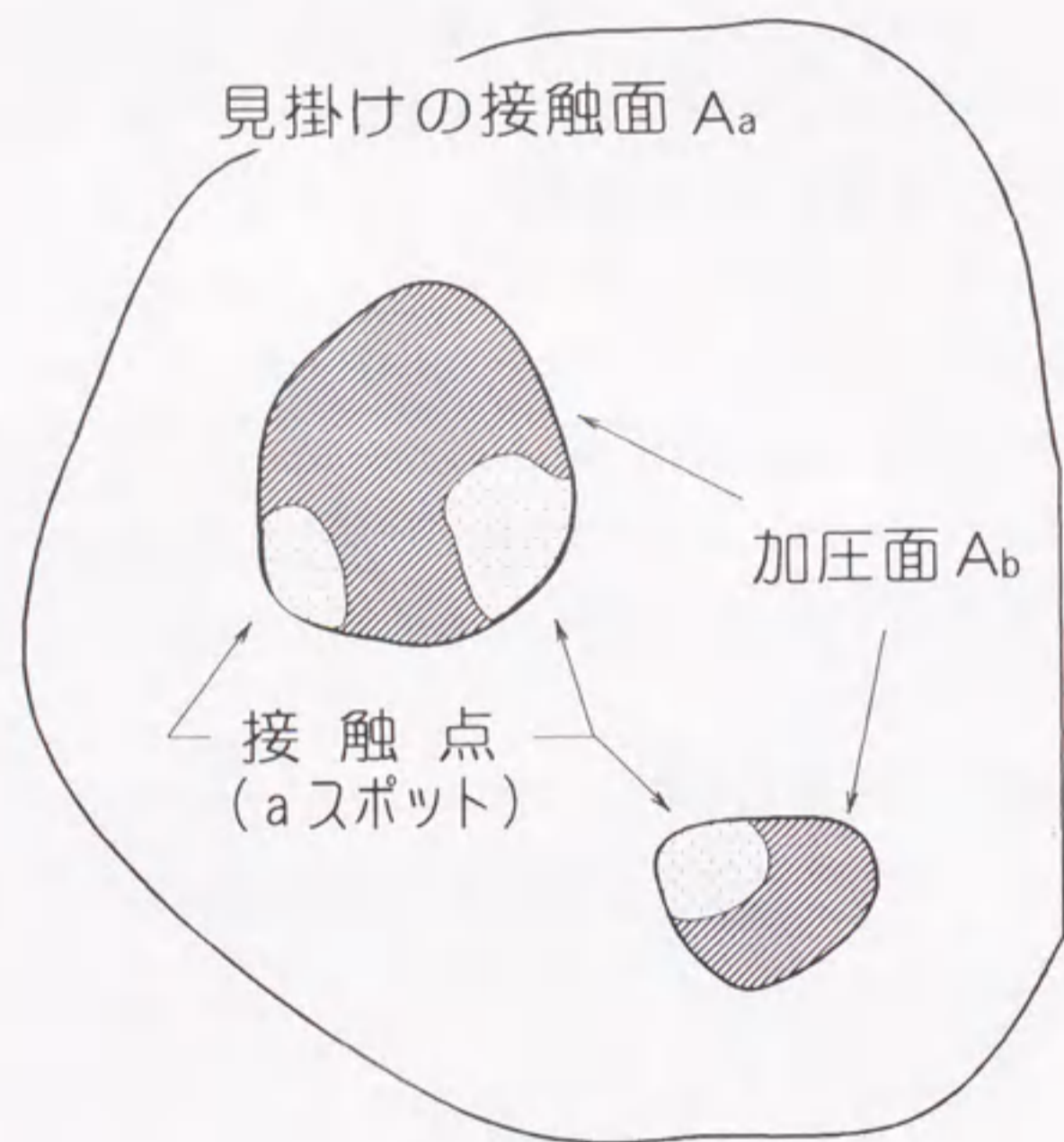


図 1. 1 接触面の接触形態

さらに、導体表面に酸化膜などの皮膜が生成されている場合には、加圧面全域の中でも、導体表面の微細な凹凸の影響により、局部的に圧力が高い微小部分で皮膜が破壊される。このような接触状態において、この金属導体に電流を流した場合、その電流は皮膜破壊を生じた部分に電流が流れる。この微細な通電部分は a-スポット（以下、これを接触点という）と称されている。この通電部分では導体内部の周囲から電流が集中する。その結果、電流密度は他の部分に比べて高くなり、抵抗の増加する現象が生ずる。この抵抗は集中抵抗と定義されている。

この電流集中に伴う集中抵抗の数値計算においては種々の方法[8]—[12]が示されている。図 1. 2 は R.Holm によって理想化された電流集中のモデル[9]を示したものである。二つの半無限導体の間に抵抗率がゼロの完全導体球(半径 b)を置く。導体 1 から導体 2 に流れる電流は導体球を中心として放射状に集中する。導体 1 において導体球の中心から半径 r と r + dr との間にある半球部分の抵抗 dR は次式で示される。ここで、ρ は導体の抵抗率である。

$$dR = \frac{\rho dr}{2\pi r^2} \dots\dots\dots (1. 1)$$

したがって、導体球の表面から導体 1 の無限遠までの導体内全域で生ずる集中抵抗 R は

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_b^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho}{2\pi b} \dots\dots\dots (1. 2)$$

となる。

導体内での電流集中部分における電流分布は、完全導体球に電荷を与えた場合に現れる電気力線の分布と相似であることから、集中抵抗 R は導体の静電容量 C に反比例する関係にある。ここで、半径 b の導体球の静電容量 C。および半径 a なる導体円板の静電容量 C_d は次式で与えられ、

$$\left. \begin{aligned} C_c &= 4\pi\epsilon_0 b \\ C_d &= 8\epsilon_0 a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1. 3)$$

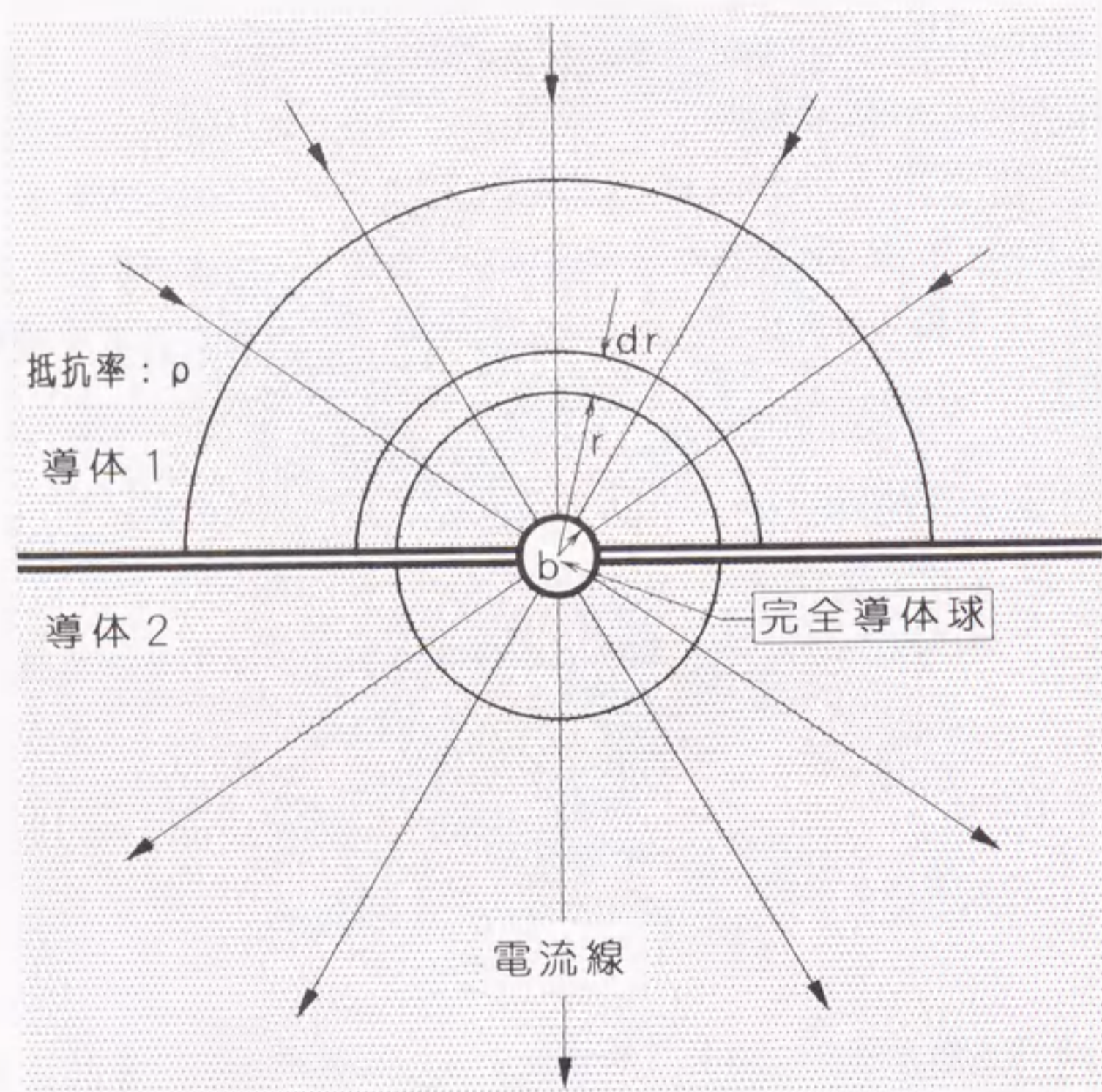


図 1. 2 電流集中のモデル

これより、導体球と導体平板の電荷および電位を同じとすれば

$$2 a = \pi b \quad \dots \dots \dots (1. 4)$$

なる関係から、半径 a なる円形の微小面における集中抵抗 R_c は(1. 5)式で表される [13]。

$$R_c = \frac{\rho}{4 a} \quad \dots \dots \dots (1. 5)$$

この集中抵抗は互いに接触する二つの導体のそれぞれに生ずるので、抵抗率が同じ金属導体からなる一組の接触子に生ずる集中抵抗は(1. 5)式で示される集中抵抗 R_c の 2 倍の抵抗値となる。また、接触点の接触面積 S に対する集中抵抗 R_c は、 $S = \pi \cdot a^2$ なる関係を用いて次式のように表される。

$$R_c = \frac{\rho \sqrt{\pi}}{4 \sqrt{S}} \quad \dots \dots \dots (1. 6)$$

平面同士の接触部分での接触状態のように、大きさの異なる多数の接触点が点在した場合の集中抵抗は、各接触点で生ずる電流束の相互作用がないとすれば、一つの接触点に生ずる集中抵抗の並列接続として(1. 7)式で与えられる。なお、 a_v は各接触点の半径である。

$$R_{cN} = \sum_v \frac{\rho}{4 a_v} \quad \dots \dots \dots (1. 7)$$

ここで、各接触点が半径 a なる同じ大きさであるとすれば、(1. 7)式の接触抵抗 R_{cN} は次式で示されるように接触点の数 N に反比例する特性となる。

$$R_{cN} = \frac{\rho}{4 a N} \quad \dots \dots \dots (1. 8)$$

また、各接触点の面積を総和した全接触面積 S ($S = \pi a^2 \cdot N$) によって集中抵抗 R_{cN} を表記すれば、次式のようなになる。

$$R_{cN} = \frac{\rho \sqrt{\pi}}{4 \sqrt{S \cdot N}} \dots \dots \dots (1.9)$$

しかしながら、各接触点が近接した状態においては、接触点で生ずる電流束が相互に影響し合い、接触抵抗は単なる並列接続と考えた場合より高くなると言われている。このような場合について次のモデルが提案されている。一般的には異なる大きさの接触点が図 1. 3(a) のように不規則に分布している。これを同図 (b) のように半径 a なる同じ大きさの円形の接触点が格子状に点在したものと等価的にみなし、接触抵抗の算定式として次式が提案されている [14]。

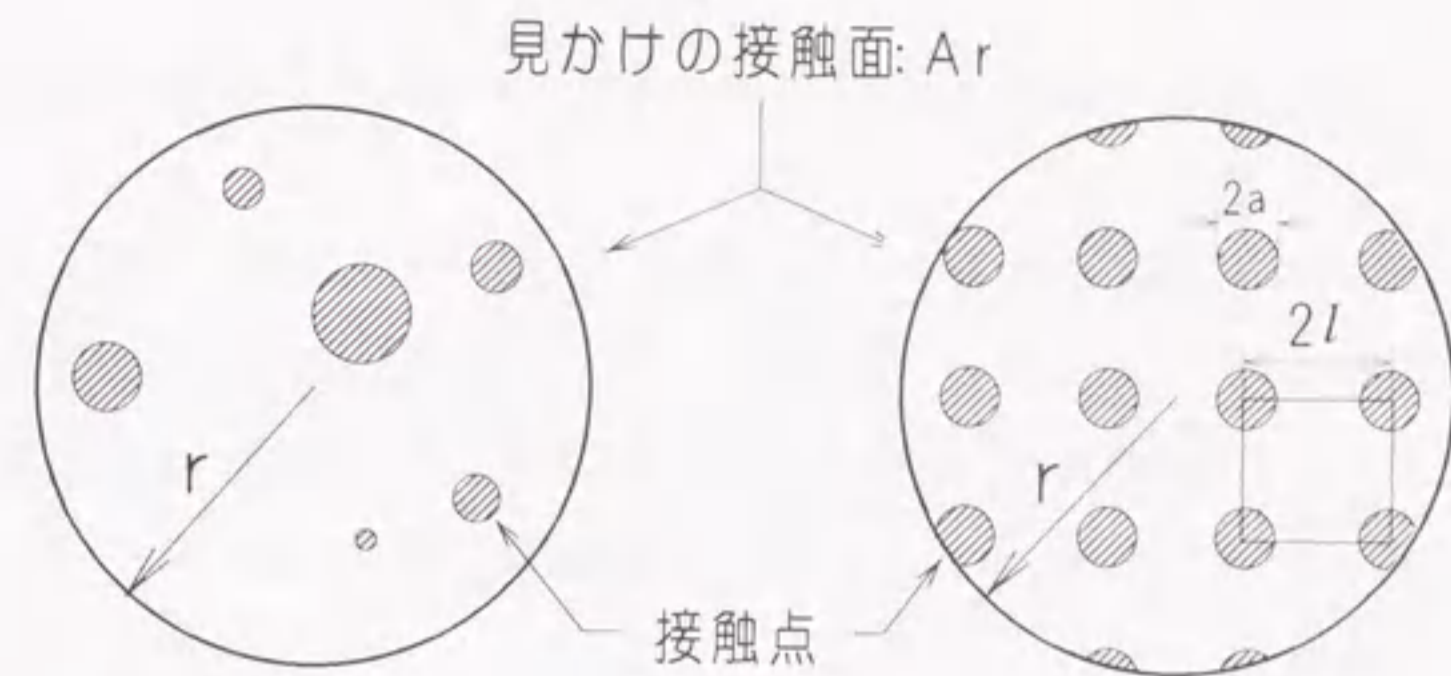
$$R(N, a, l) = \frac{\rho}{2 \pi N a} \tan^{-1} \frac{\sqrt{l^2 - a^2}}{a} - 0.6 \frac{\rho \sqrt{l^2 - a^2}}{A_r} + \frac{\rho}{4 r} \dots \dots (1.10)$$

$$A_r = \pi r^2 = 4 N l^2 \dots \dots \dots (1.11)$$

ここで、 a は接触点の半径、 N は接触点の数であり、 l は格子状に配列された各接触点間の距離の $1/2$ の値である。また、 r は見掛けの接触面の半径であり、 A_r はその面積である。

図 1. 4 は (1.10) 式より求めた集中抵抗の計算例を l/a の関数として示したものである。なお、図の縦軸は (1.10) 式から算出される集中抵抗 $R(N, a, l)$ を各接触点が隣接した状態にある見掛けの接触面の半径 r_0 なる円を一つの接触点とした場合の集中抵抗 $\rho / 4 r_0$ で除した比で表したものである。接触点が相互に隣接した状態では、 $l/a = 1$ となり (1.10) 式において右辺の第 1 項および第 2 項はゼロとなり、集中抵抗 $R(N, a, l)$ は第 3 項のみによって与えられることから、集中抵抗の比 $R(N, a, l) / (\rho / 4 r_0)$ は 1 となる。

反面、接触点間の距離 $2l$ が接触点の半径 a に比べて大きな値となる場合には、



(a) 一般的な接触点分布 (b) 規則化した接触点分布

図 1. 3 接触点の分布モデル

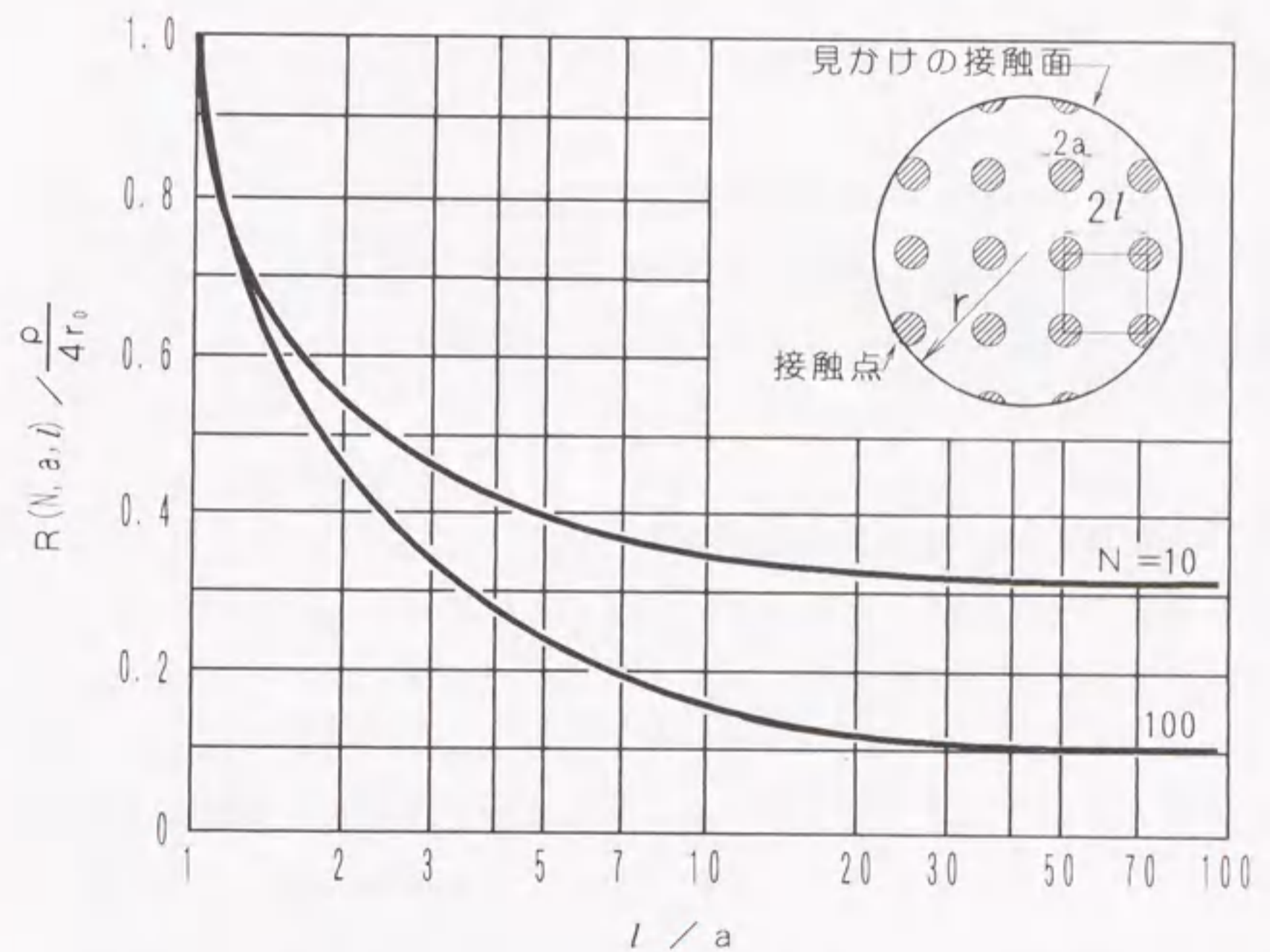


図 1. 4 l/a に対する集中抵抗 $R(N, a, l)$ の変化

右辺第2項および第3項はゼロに近づく。残る第1項は前述(1.8)式と等価になることから、接触抵抗は各接触点における電流集中の相互影響がない特性に帰着する。

他方、金属導体の表面に酸化膜などの皮膜が形成された状態では、通電部を通過する電流は皮膜を介して流れる。一般に、これら皮膜の抵抗率は金属導体に比して高いことから、その部分では高い抵抗値を示す。この抵抗は皮膜抵抗と称され、次式で与えられる。なお、 ρ_f は皮膜の抵抗率、 D_f は皮膜の厚さであり、 S は接触点の接触面積である。

$$R_f = \frac{\rho_f \cdot D_f}{\pi a^2} = \frac{\rho_f \cdot D_f}{S} \quad \dots \dots (1.12)$$

前述(1.6)式で示される集中抵抗 R_c と(1.12)式で表される皮膜抵抗 R_f の両者を比較すれば、集中抵抗 R_c は接触点の接触面積 S の1/2乗に反比例する特性であるのに対して、皮膜抵抗 R_f は接触面積 S に反比例する特性となっている。

これら2種類の抵抗の和が接触抵抗と定義されている。したがって、一般の接触子における接触抵抗は接触部分に形成される接触点の大きさ、形状、数、分布状態および表面状態などによってさまざまな挙動を呈することになる。

1.3 金属導体間に形成される接触面

二つの金属が加圧接触した場合に形成される接触面の解析の多くはTaborの研究[15]に代表される。以下では、球面と平面との接触において形成される接触面について記述する。

金属導体の表面に凹凸のない理想的な鏡面状態を仮定した平面と球面の金属が互いに加圧接触された部分では、まずHertzの接触理論に基づく弾性変形が起こる[16]。その様子を図1.5に示す。図(a)は加圧力が零の状態では接触している場合である。球面と平面とは幾何学的な点の接触状態にあり、点の大きさはゼロである。他方、荷重 P で球面と平面とを加圧した場合の接触部分の様相を図(b)

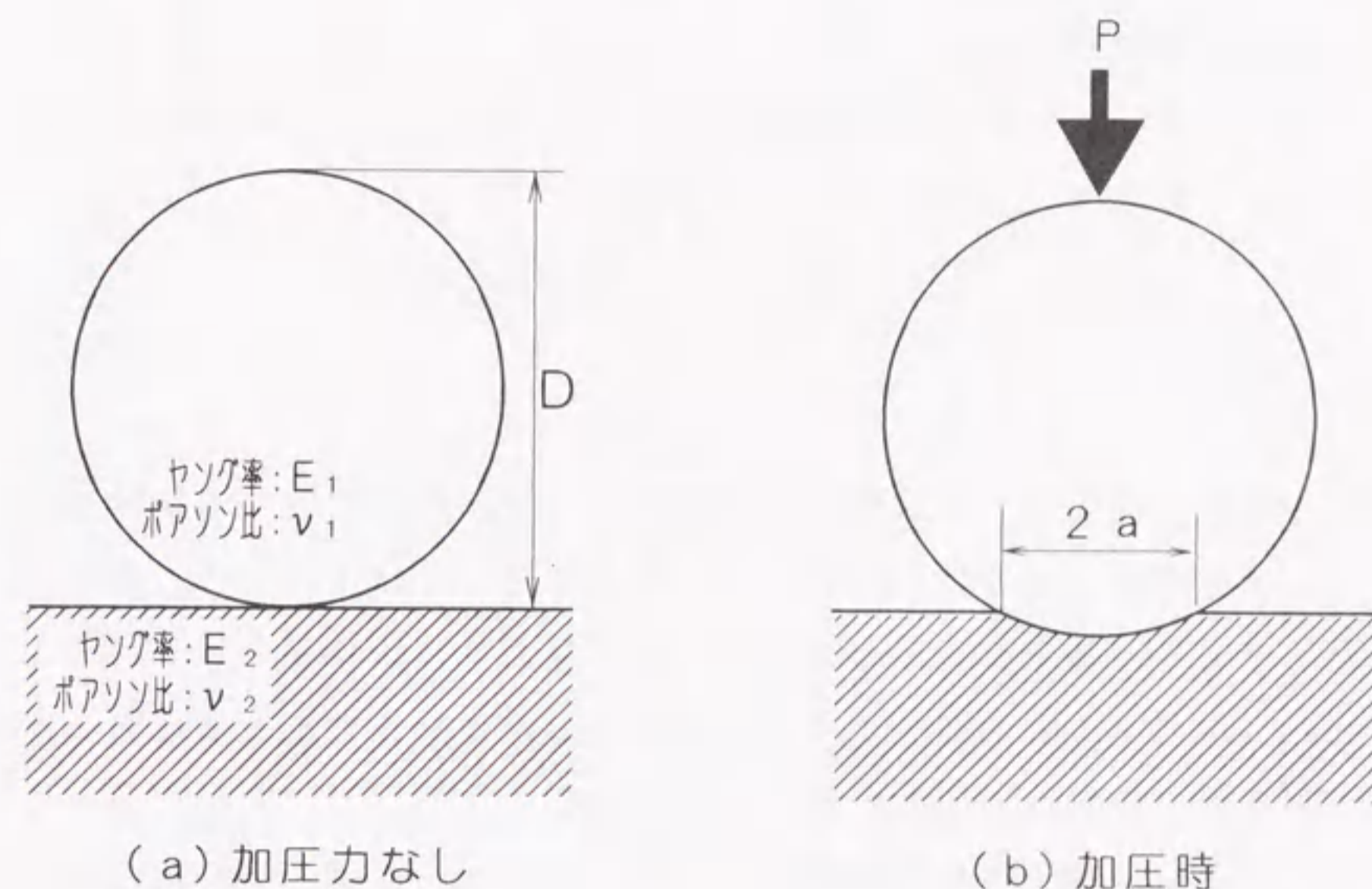


図1.5 球面と平面との接触による接触部の変形

に示す。この接触部分では、Hertzの接触理論に従う弾性変形が起こり、(1. 13)式で示される半径 a なる円形の接触面を形成する。

$$a = 0.721 \left[PD \left\{ \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right\} \right]^{1/3} \dots \dots \dots (1. 13)$$

ここで、 D は球面の直径であり、 E_1 および E_2 はそれぞれ球面および平面のヤング率（縦弾性係数）である。また、 ν_1 、 ν_2 はポアソン比である。

この弾性変形時における接触面の面積 S ($= \pi \cdot a^2$) は荷重 P の $2/3$ 乗に比例する。また、接触面の平均荷重である接触力 p_m は

$$p_m = \frac{P}{\pi \cdot a^2} \dots \dots \dots (1. 14)$$

で与えられる。図 1. 6 は接触荷重（加圧力） P の変化に対する接触面積 S と接触力 p_m との関係を定性的に図示したものである。このような弾性変形時の変形は可逆的であり、荷重 P を取り除けばそれぞれの形状に復帰する。表 1. 1 は R. J. Roark が種々の接触形態において弾性変形時に形成される接触面の形状および面の大きさの算定式を示したものである [17]。

しかしながら、荷重 P が増加するとともに球面および平面の接触部分では弾性変形の限界を越え、永久変形を生ずる塑性変形状態が起こる。図 1. 7 は球面と平面とを接触させた場合の平面の変形状態を示したものである。なお、平面は球面に対して柔らかい材質であるとし、接触面は平面の変形によって形成されると仮定したものである。金属導体は加圧力の増大に伴って平面の変形部分におけるひずみ応力が増し、その応力がせん断力に達した状態で塑性変形を生じる。したがって、平面が球面の加圧接触によって変形する場合、同図(a)に点 Z で示す位置において応力が最も高くなり、この点 Z から塑性変形が始まる。なお、点 Z の位置は平面より接触点の半径 a の $1/2$ の深さにある [18]。その後、荷重の増加とともに塑性変形の領域は拡大し、図(b)に示すように接触部全域に拡がる。

接触面積および接触力（正方目盛）

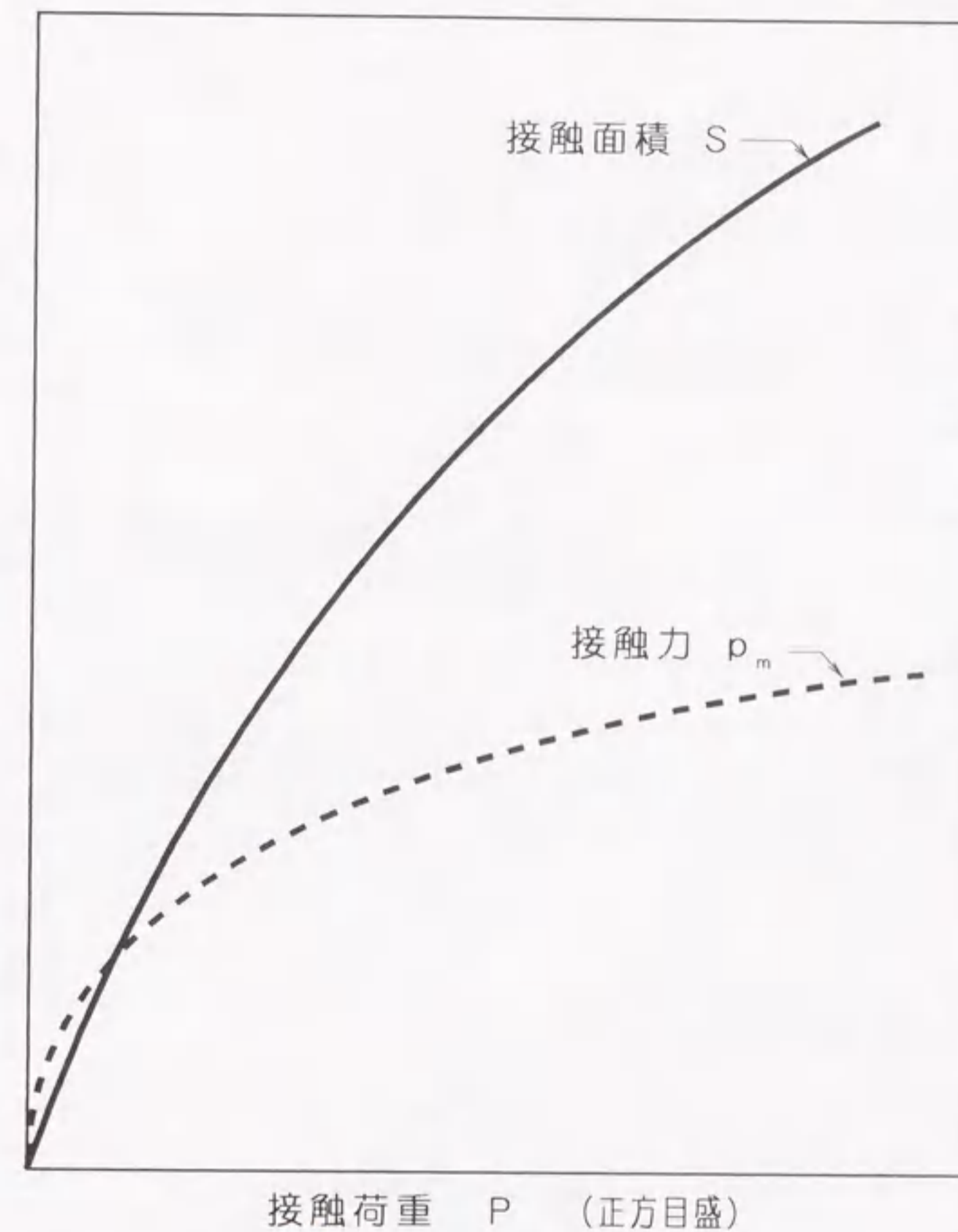
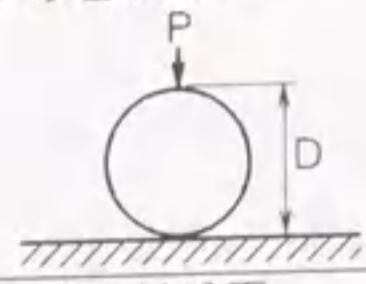
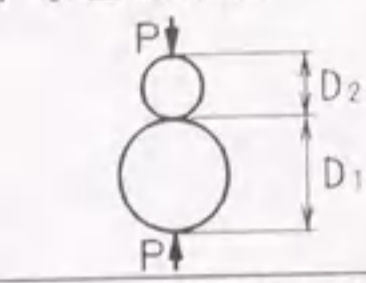
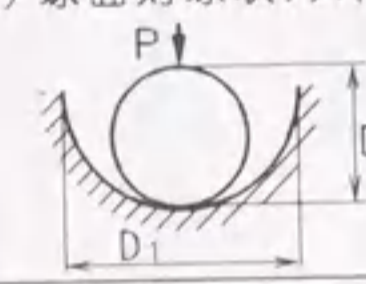
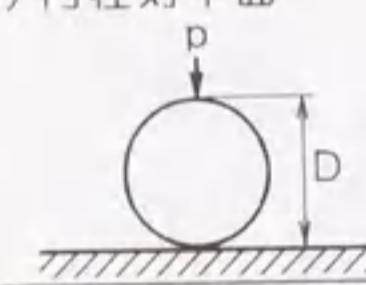
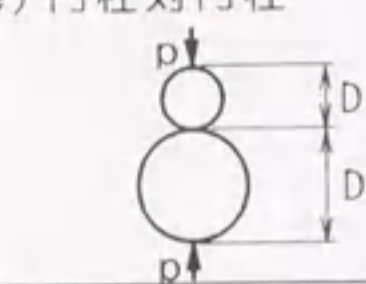
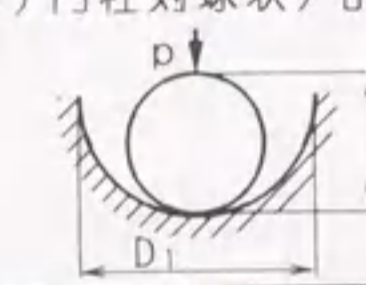
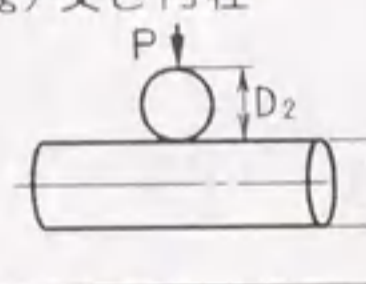
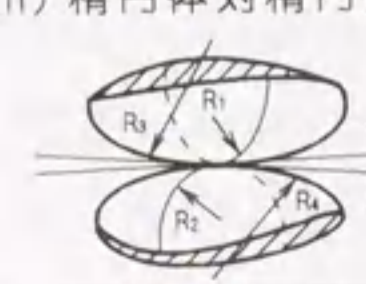
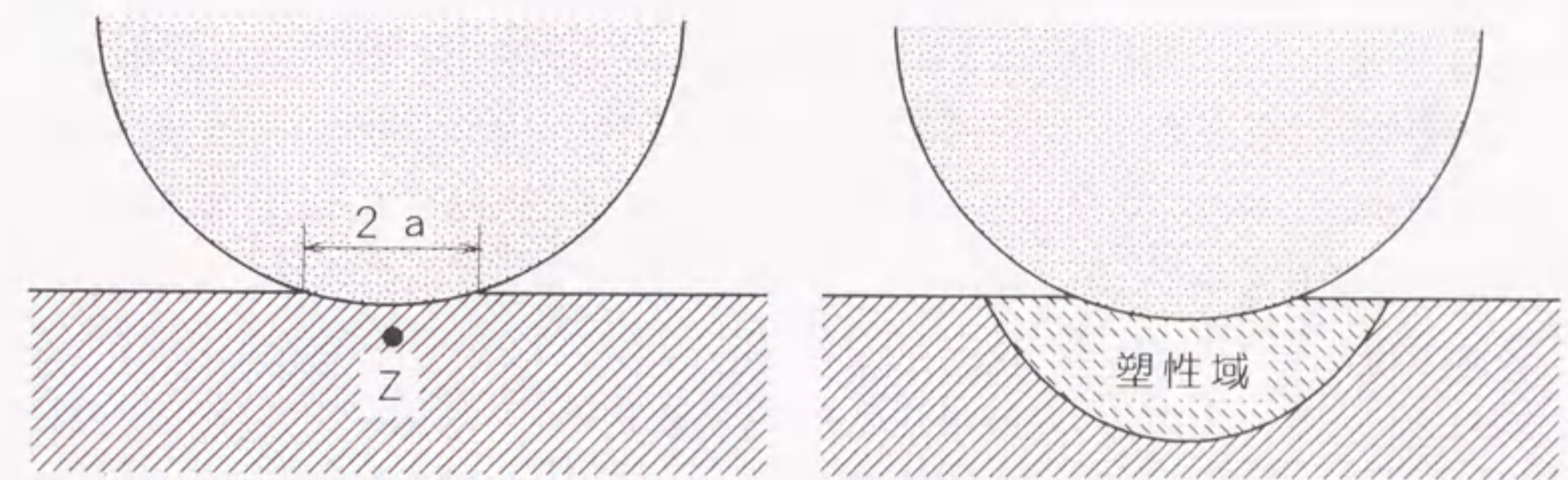


図 1. 6 弾性変形時における接触点の接触面積および接触力の荷重推移

表 1. 1 種々の形状金属の組合せと弾性変形時における接触面の算定式 [17]

| 金属導体の組合せ | 接触部に形成される接触面の算定式 |
|--|--|
| (a) 球面对平面  | 接触面は半径 a なる円形となる $a = 0.721 \left[P D \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}$ P: 加圧力, D: 球面の直径 E ₁ , E ₂ : 導体のヤング率, ν ₁ , ν ₂ : 導体のポアソン比 |
| (b) 球面对球面  | 接触面は半径 a なる円形となる $a = 0.721 \left[P \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}$ P: 加圧力, D ₁ , D ₂ : 球面の直径 E ₁ , E ₂ : 導体のヤング率, ν ₁ , ν ₂ : 導体のポアソン比 |
| (c) 球面对球状ソケット  | 接触面は半径 a なる円形となる $a = 0.721 \left[P \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 - D_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}$ P: 加圧力, D ₁ , D ₂ : 球面およびソケットの直径 E ₁ , E ₂ : 導体のヤング率, ν ₁ , ν ₂ : 導体のポアソン比 |
| (d) 円柱对平面  | 接触面は幅 b なる線状となる $b = 1.6 \left[p D \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/2}$ p: 単位長さ当たりの加圧力, D: 円柱の直径 E ₁ , E ₂ : 導体のヤング率, ν ₁ , ν ₂ : 導体のポアソン比 |
| (e) 円柱对円柱  | 接触面は幅 b なる線状となる $b = 1.6 \left[p \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/2}$ p: 単位長さ当たりの加圧力, D ₁ , D ₂ : 円柱の直径 E ₁ , E ₂ : 導体のヤング率, ν ₁ , ν ₂ : 導体のポアソン比 |
| (f) 円柱对球状ソケット  | 接触面は幅 b なる線状となる $b = 1.6 \left[p \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 - D_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/2}$ p: 単位長さ当たりの加圧力, D ₁ , D ₂ : 円柱およびグローブの直径 E ₁ , E ₂ : 導体のヤング率, ν ₁ , ν ₂ : 導体のポアソン比 |
| (g) 交差円柱  | 接触面は e および d を径とする楕円となる $e = \alpha \left[P \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 + D_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}, \quad d = \beta \cdot e$ P: 加圧力, D ₁ , D ₂ : 円柱の直径 ※ α, β は D ₁ および D ₂ の比から求まる関数 E ₁ , E ₂ : 導体のヤング率, ν ₁ , ν ₂ : 導体のポアソン比 |
| (h) 楕円体对楕円体  | 接触面は e および d を径とする楕円となる $e = l (P \delta / k)^{1/3}, \quad d = m (P \delta / k)^{1/3}$ $\delta = 4 / \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \quad k = \frac{8}{3} E_1 \cdot E_2 / (E_2 (1 - \nu_1^2) + E_1 (1 - \nu_2^2))$ E ₁ , E ₂ : 導体のヤング率, ν ₁ , ν ₂ : 導体のポアソン比 P: 加圧力, R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄ : 楕円体の短径および長径, l, m は楕円体の交角 φ から求まる関数 |



(a) 塑性変形の開始時

(b) 塑性変形の伸展した平面の変形状態

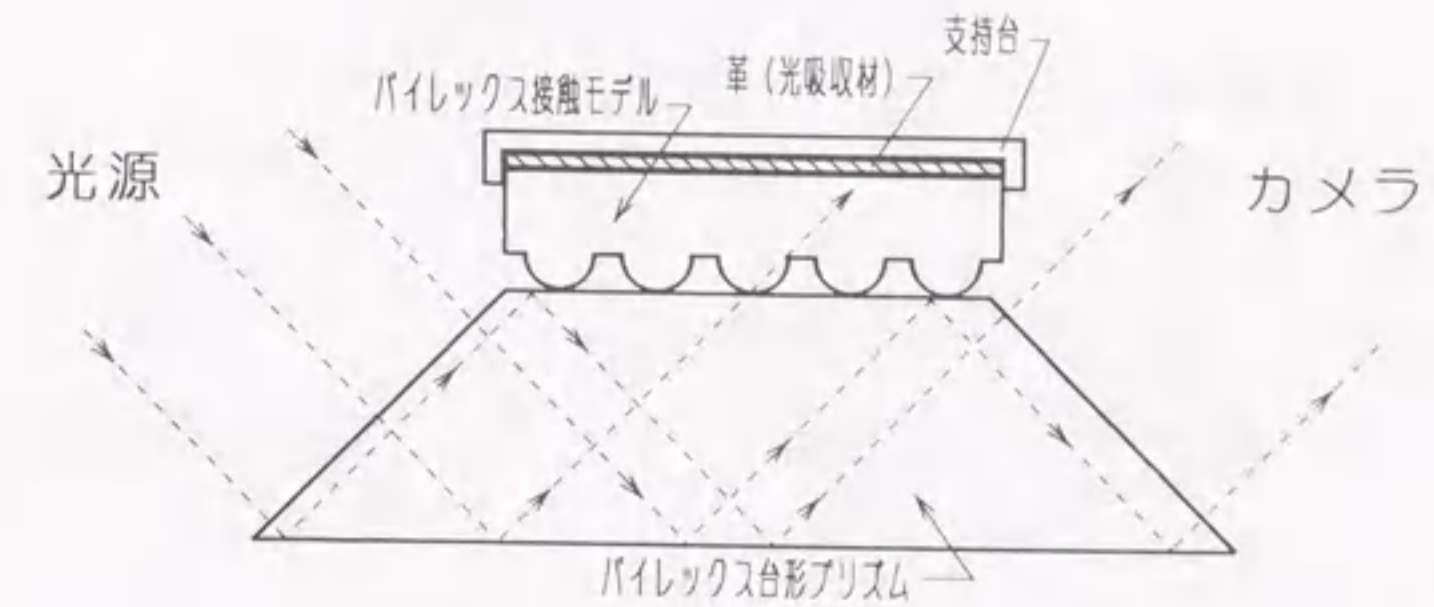
図 1. 7 平面より硬い球面との接触時における平面の変形状態

1. 4 接触抵抗に関わる諸問題

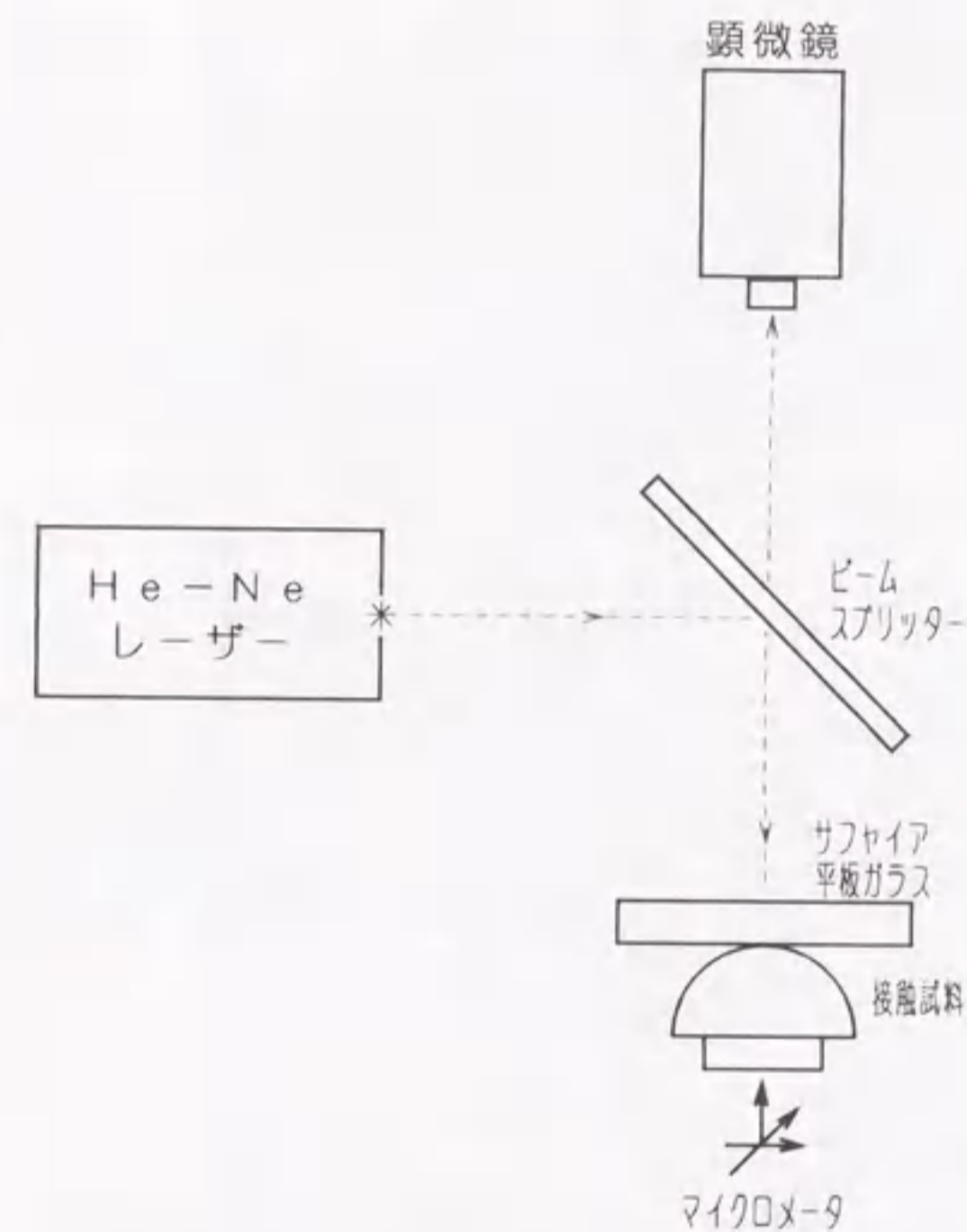
前節までに示したように、電気接触子をはじめとする金属導体同士が接触した場合に形成される接触部分の形態や接触抵抗に関する研究が進められてきた。しかしながら、これら一連の研究の多くは一つの点で接触する、いわゆる点接触における接触形態における現象ならびに接触抵抗について論じられたものであり、実際の金属同士の接触部分における接触状態について十分に解明されたものではないといえる。それは接触部分は種々の接触条件によってさまざまな様相を呈すると思われるが、その接触部分を直視することが困難であり、接触状態の実態を把握できないことに起因している。それゆえ、接触部分の接触状態を直視することが接触形態の解明および接触抵抗の解析において必要であり、かつ有用である。

これまで種々の手法によって接触部分の直視が試みられている。図1. 8(a)は J.F. Archard によって考案された実験装置 [19] の略図を示したものである。装置は台形のプリズムの上に球面突起を有するバイレックス接触モデルを置いたものである。水銀ランプの光を台形のプリズム左側面に照射すると、その光はプリズム下面で反射して上面に向かう。プリズムとバイレックス接触モデルの球面突起が接触している部分に到達した光はプリズムからガラスの内面に進み、光吸収材に入る。他方、プリズムとバイレックス接触モデルとが接触していない部分に到達した光はプリズムの内面で反射して再びプリズムの下側へ進み、プリズムの右側面から外へ出る。その結果、プリズムの右側面へはプリズムとガラス面と接触していない部分の光だけが到達するので、接触点は暗い点として観測することができる。

また、同図(b)は R.E. Cuthrell と D.W. Tipping による実験装置 [20] の光学系を示したものであり、光の干渉現象を応用した手法である。接触部近傍に現れる干渉模様を顕微鏡により観察し、その模様から微細な接触状態を測定するものである。しかしながら、これらの直視観測においても、粗面状態にある金属表面同士の接触状態に関して、その接触部分の形成状態については明確にされていない。このような状況から、粗面状態の接触部分の接触形態を表面粗さの統計的処理によって接触抵抗の諸特性を解析した研究報告 [21], [22] もある。



(a) J. F. Archard の装置



(b) R. E. Cuthrell, D. W. Tipping による装置

図 1. 8 接触部分の直視装置例

図1. 9は接触抵抗に関わる諸要因を示したものである。接触抵抗は集中抵抗と皮膜抵抗の2種類から成る。前者は通電路となる接触部分近傍の导体内部で生ずる電流集中に起因する抵抗である。後者は导体表面に生成された皮膜などが接触部分に介在した場合に生ずる抵抗である。これらの接触抵抗はいずれも导体の材質、接触子構成、接触子の大きさ、接触荷重、导体の表面粗さなど接触面の形成に関わる諸要因の影響を受ける。

さらに、その通電路に電流が流れる状況では前述の諸要因の他に通電電流に派生した要因が加わる。図1. 10は通電電流が接触形態に影響するような大電流通電時における接触抵抗への諸要因の関係を示したものである。特に、大電流通電時には、接触抵抗と通電電流によって接触部分においてジュール熱が発生する。この発生熱は导体の機械的性質を変化させるとともに、接触部分では导体の溶融を起こす可能性がある。この溶融現象は导体の開閉を基本とする接触子にとって非常に危険である接触障害を生ずる原因となる。このように接触部分においてジュール熱が発生する状況での接触電圧 ψ と接触点の温度 θ との関係を検討したものに次節で述べる $\psi-\theta$ 理論[23]がある。

1. 5 $\psi-\theta$ 理論による接触電圧の検討[23]

导体の導電率 σ と熱伝導率 κ が一様で、等温線と等電位線が一致する媒質中のベクトル電流密度 \mathbf{j} およびエネルギー流密度のベクトル \mathbf{q} は次式で表される。

$$\mathbf{j} = -\sigma \text{grad} \psi \quad \dots \dots \dots (1. 15)$$

$$\mathbf{q} = \psi \mathbf{j} - \kappa \text{grad} \theta \quad \dots \dots \dots (1. 16)$$

エネルギー保存則より

$$\text{div} \mathbf{j} = 0 \quad \dots \dots \dots (1. 17)$$

$$\text{div} \mathbf{q} = 0 \quad \dots \dots \dots (1. 18)$$

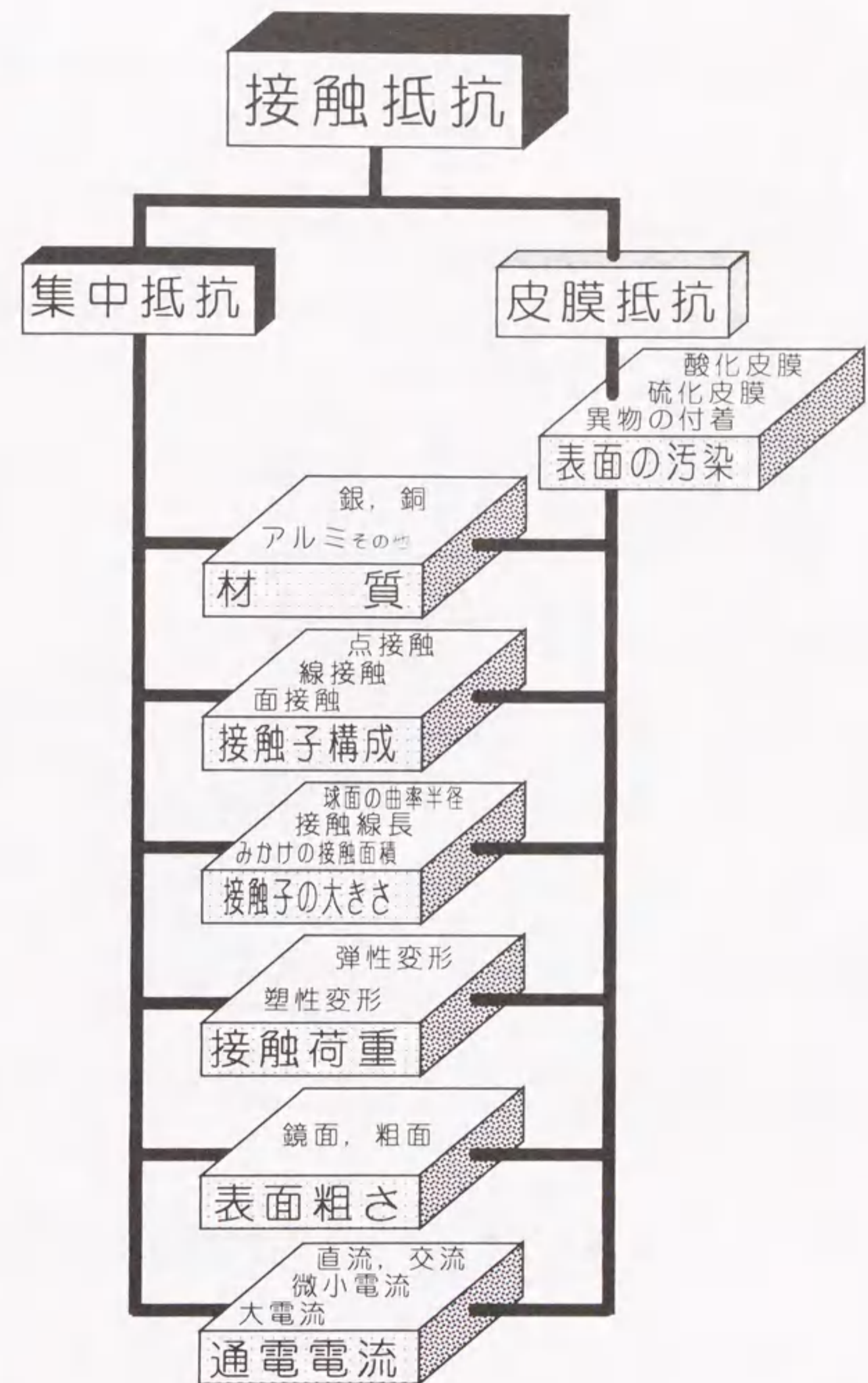


図1. 9 接触抵抗に関わる諸要因

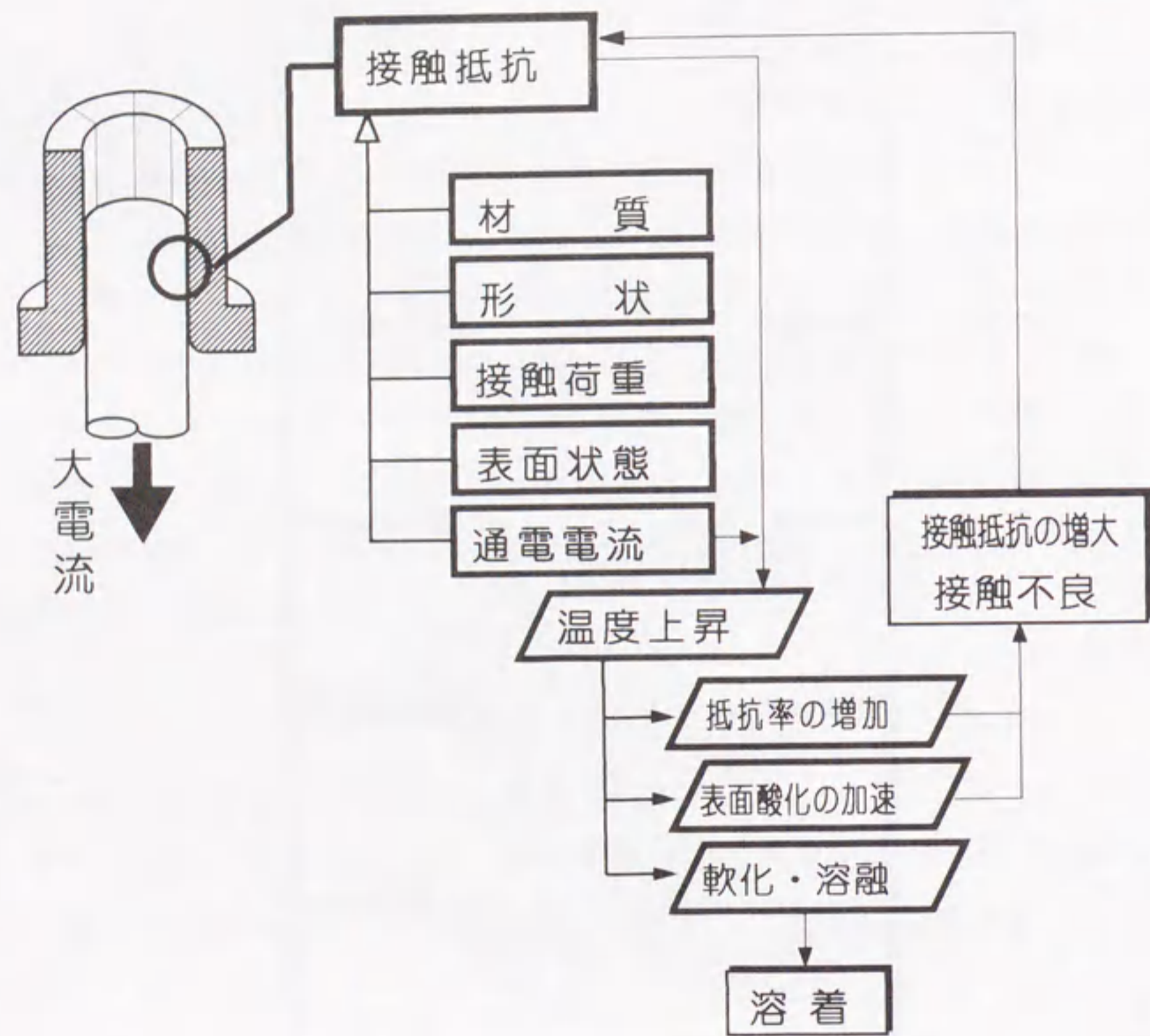


図 1. 10 大電流通電時における接触抵抗に関わる諸要因

として、(1. 18)式は(1. 15)、(1. 16)式を用いて(1. 19)式のように表される。

$$\text{div} [-\sigma \psi \text{grad} \psi - \kappa \text{grad} \theta] = 0 \quad \dots \dots \dots (1. 19)$$

ここで、[] 内が 0 なる条件においては(1. 19)式は常に満足され、これより温度 θ および電位 ψ に関して次式が成立する。

$$\frac{\kappa}{\sigma} \text{grad} \theta + \psi \text{grad} \psi = 0 \quad \dots \dots \dots (1. 20)$$

媒質中の最高温度を θ_m 、その点の電位を 0 として、(1. 20)式を熱流線に沿って温度 θ_0 の点まで積分すれば、

$$-\int_{\theta_m}^{\theta_0} \frac{\kappa}{\sigma} d\theta = \frac{1}{2} \psi^2 \quad \dots \dots \dots (1. 21)$$

ただし、温度 θ_0 の点の電位を ψ としている。これより電位 ψ と温度 θ との関係は次式によって与えられる。

$$\psi^2 = 2 \int_{\theta_0}^{\theta_m} \frac{\kappa}{\sigma} d\theta \quad \dots \dots \dots (1. 22)$$

金属伝導における Wiedemann-Franz の法則 [24] によれば

$$\frac{\kappa}{\sigma} = L \theta \quad \dots \dots \dots (1. 23)$$

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left[\frac{k}{e} \right]^2 \quad \dots \dots \dots (1. 24)$$

ここに、 k は Boltzmann 定数、 e は電子電荷、また L は Lorenz 数と呼ばれる定数であり、その値は $L = 2.45 \times 10^{-8} [\text{V}^2/\text{K}^2]$ である。(1. 23)式は $\text{Cu}(4\text{S}^1)$ 、 $\text{Ag}(5\text{S}^1)$ 、 $\text{Au}(6\text{S}^1)$ ではよく満足されるといわれる。

(1. 22)、(1. 23)式より

$$\psi^2 = 2 \int_{\theta_0}^{\theta_m} L \theta \cdot d\theta = L (\theta_m^2 - \theta_0^2) \quad \dots \dots (1. 25)$$

図1. 11に示す接触点近傍の電流線モデルにおいて接触点の温度 θ を θ_m 、電位 ψ を0とし、これより十分離れた両側の2点間の接触電圧を V_c とすれば

$$\psi = \frac{V_c}{2} \dots \dots \dots (1. 26)$$

よって

$$\theta_m^2 - \theta_0^2 = \frac{V_c^2}{4L} \dots \dots \dots (1. 27)$$

なる関係が成立する。さらに θ_0 を常温の300Kとし、 θ_m として金属の溶融温度1000K以上を想定した場合、 $\theta_m^2 \gg \theta_0^2$ なる条件によって(1. 27)式は次式のように簡略化できる。

$$\theta_m \cong \frac{V_c}{2\sqrt{L}} = 3200V_c \dots \dots \dots (1. 28)$$

1. 6 接触抵抗に関する研究の現状と問題点

開閉機器の接触子を流れる電流は、2組の金属導体が機械的に加圧されて接合した部分を通る。この接合部分の大きさは接触子導体の形状に比して小さく、電流はその部分に集中することになる。この集中現象によって接触抵抗の一つである集中抵抗が生ずる。また、金属導体の表面に酸化皮膜などが生成された状態においては、その皮膜を介して電流が通過するために、集中抵抗とは異なった皮膜抵抗と称される別の接触抵抗が現れる。これらの接触抵抗は、いずれも金属同士の加圧状態における接触面の形成状態を反映したものとなる。

一般に、電力用開閉機器の接触子においては、加圧力が高く、通電電流も大きく接触子表面に生成される皮膜は機械的あるいは電氣的に破壊し得る状況にあることから、通電時における接触障害は少ないとみなされ、接触子の開閉時に生ずる放電を伴った場合を対象として、接触子の消耗現象や接触抵抗特性に関する研究が行われてきた[25]。しかしながら、近年のSF₆ガス絶縁開閉機器の普及と電力重要の増大に伴って、通電時における接触子の接触障害が現れており、SF₆ガス絶縁機開閉器の通電時における接触性能に関する研究も開始されている[26]。

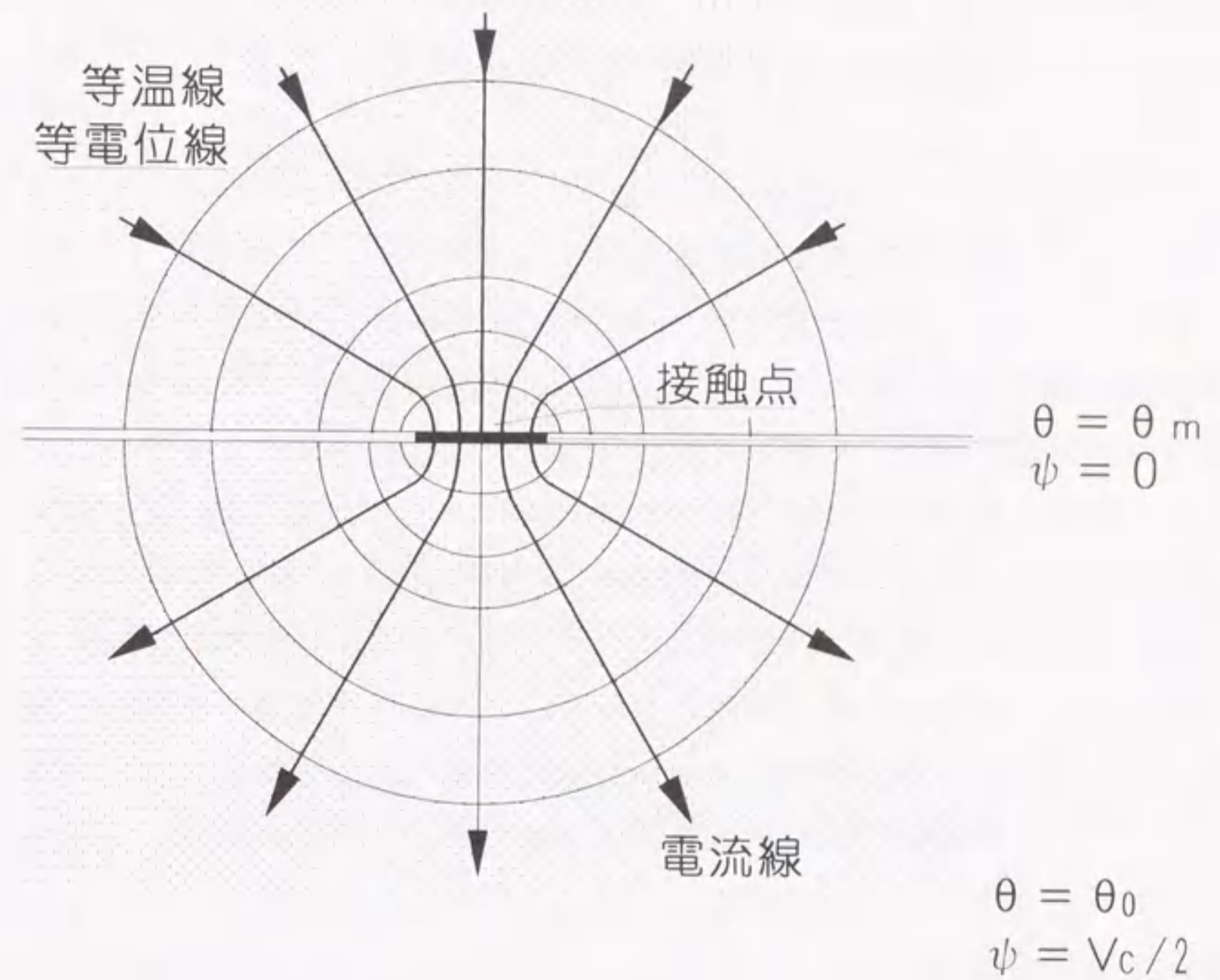


図1. 11 接触点近傍の電流線モデル

他方、この金属同士の接触に関わる諸特性は、摩擦、磨耗現象など機構学的にも重要な課題であり、加圧された接触部分における機械的接触状態に関して、金属の弾性変形および塑性変形理論に基づいた研究が行われている[27]—[31]。その成果は接触抵抗の解析においても参考にされているが、その接触部の実態については依然として未知なところが多い現状にある。したがって、電気接触子における接触抵抗に関する研究において、接触部分に形成される接触面の実態に基づいた解析が不可欠であると考えられる。

1. 7 本研究の目的と本論文の内容

筆者は、前述のような現状をかんがみ、開閉機器の接触子における接触抵抗の実態を解明することを目的としてきた。具体的には、まず微細な接触面を巨視的に取り扱える手法として電解溶液を用いた接触抵抗の測定手法を考案した。これにより複数の接触面が形成された接触状態における実験的な解析が実現でき、基本的な接触抵抗現象について解明することができた。また、接触部分に形成される微細な接触面の実態を把握することの重要性から、光干渉法を用いた光学的手法を開発し、接触部の直視観測を行った。さらに、接触部の観測とともに接触抵抗の同時測定を行い、接触点の形成状態と接触抵抗との関係について解析を進めた。これらの基本的な接触抵抗特性に基づいて、電力系統において多く採用されているSF₆ガスを用いた絶縁方式による開閉装置の接触子に関わる接触抵抗の挙動について実測を行うとともに、大電流通電時における接触子の接触抵抗現象について解析を行った。

本論文は、これらの成果をまとめたもので、7章で構成されており、2章以降の内容は次の通りである。

第2章においては、微細な接触面を等価的に1000倍以上の接触面積を有する巨視的な大きさを実現させる手法として考案した電解浴槽を用いた実験手法によって電流集中に起因する接触抵抗(集中抵抗)に関わる諸特性について解析を行った。まず、接触の基本である円形の接触面を一つ形成する点接触における接触抵抗の実測から得られた実験手法の有効性を記述し、複数個の接触点が生じた場合や、線状の接触面を形成する線接触における接触抵抗現象についての基本的な

特性を明らかにしている。

第3章では、接触部分に形成される微細な接触点を検出する手法として開発した光干渉法を用いた光学的手法について記述し、平板ガラスと種々金属を用いた模擬接触子との接触状態において形成される接触点の実態を明らかにしている。

第4章では接触部の観測において、導電性薄膜を被覆した平板ガラスを用いた接触抵抗の同時測定法を考案し、薄膜導体に形成する接触点の集中抵抗の理論的な解析に基づいて、さまざまな接触点の形成状態における接触抵抗の挙動について記述している。

第5章においては、実際に使用されているSF₆ガスが封入された開閉機器において発生している接触障害を解明するために研究を遂行した内容について記述し、SF₆分解生成物が介在する接触子の通電現象について解析している。

第6章では第5章で明らかとなった接触抵抗の挙動を基礎的に解明するために種々の金属導体を用いて、最大300Aの直流電流を通電した場合の接触抵抗を実測し、接触抵抗に及ぼす通電電流の影響を明らかにしている。

第7章では、本研究において得られた成果の要点をまとめている。

[第1章の文献]

- [1] 電気学会 電気用語標準特別委員会、接点用語専門委員会編、「電気学会・電気専門用語集」、No. 8、コロナ社、(1968)
- [2] R.Holm: "Electric Contacts", 4th. Edit., Springer, New York (1967)
- [3] 鳳: 「電気接点と開閉接触子」、第4版、金原出版(1967)
- [4] 真野 編: 「接触部品の信頼性」、総合電子出版社、(1976)
- [5] 土屋: 「電気接点技術」、総合電子出版社、(1980)
- [6] D.Tabor: "The Hardness of Metals", Oxford at the Clarendon Press, (1951)
- [7] F.P.Bowden, D.Tabor: "The Friction and Lubrication of Solids", Oxford at the Clarendon Press, (1954)
- [8] F.L.Jones: "The Physics of Electrical Contacts", Oxford at the Clarendon Press, pp.12-15 (1957)
- [9] R.Holm: "Electric Contacts", 4th, Springer, New York, pp.11-16 (1967)
- [10] 鳳: 「電気接点と開閉接触子」、第4版、金原出版、pp.116-118 (1967)

- [11] 電気学会:「遮断器・開閉器」, 第15版, 学献社, pp.22-26 (1975)
- [12] 佐藤:「電気接点」, 初版, 日刊工業, pp.2-4 (1984)
- [13] R.Holm: "Electric Contacts", 4th, Springer, New York, pp.3-4 (1967)
- [14] R.Holm: "Electric Contacts", 4th, Springer, New York, pp.21-25 (1967)
- [15] D.Tabor: "The Hardness of Metals", Oxford at the Clarendon Press (1951)
- [16] F.P.Bowden, D.Tabor: "The Friction and Lubrication of Solids", Oxford at the Clarendon Press, pp.10-11 (1954)
- [17] R.J.Roark: "Formulas for stress and strain", McGraw-Hill, pp.287-290 (1954)
- [18] S.P.Timoshenko, J.N.Goodier: "Theory Elasticity", McGraw-Hill Kogakusya Ltd., 3th.Edit., pp.409-414 (1970)
- [19] J.F.Archard: "Contact and Rubbing of Flat Surfaces" Journal of Applied Physics, Vol.24, No.8, pp.981-988 (1953)
- [20] R.E.Cuthrell, D.W.Tipping: "Application of Interference Fringe Microscopy to Electric Contact Problems" J.Appl.Phys., Vol.44, No.7, pp.3277-3283 (1973)
- [21] Weichien Chow: "Crossed Rod and Practical Electrical Contact Constriction Resistance Correlation" Proc. of the Eng. Seminar on Elct. Contact Phenomenas, pp.56-60 (1967)
- [22] 原田, 真野:「表面粗さを考慮した粗面鏡面コンタクトの集中抵抗」, 信学誌, 第50巻9号, pp.1549-1556 (1967)
- [23] F.L.Jones: "The Physics of Electrical Contacts", Oxford at the Clarendon Press, pp.17-26 (1957)
- [24] 橋本, 神山共訳:「テッカー 固体物理」, 第13版, コロナ社, pp.328-330 (1971)
- [25] 窪野:「DC30V-10A抵抗回路を開閉した4種Ag-Pd系電気接点での接触抵抗特性の比較」, 信学誌C-II, Vol.175-C-II, No.9, pp.483-490 (1992)
- [26] 堀, 大塚, 原:「S.F. ガス中の通電発熱による硫化皮膜生成と通電障害への進展」, 電学論誌B, Vol.116-B, No.6, pp.698-705 (1996)
- [27] J.A.Archard: "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", J.Appl.Phys., Vol.24, No.8, pp.981-988 (1953)
- [28] C.Storey: "Investigation into one of the assumptions of the Hertz theory of Contact" J.Appl. Phys., Vol.11, pp.67-68 (1960)
- [29] L.E.Goodman: "Contact Stress Analysis of Normally Loaded Rough Spheres", J.Appl. Mech., pp.515-522 (1962)
- [30] J.A.Greenwood, J.B.Williamson: "Contact of nominally flat surfaces", Proc.Roy.Soc., A-295, pp.300-319 (1966)
- [31] J.Harrison, J.Wilks: "The Hertz indentation test and Auebach's law", J.Appl.Phys., Vol.11, pp.73-81 (1978)

第2章 電解浴槽を用いた接触子モデルによる接触抵抗特性の解明

2.1 はじめに

一般に, 開閉機器の接触子における通電路は, 金属導体の表面に凹凸やうねりがあるために, 微細な接触点が線上または面状に点在した状態にある。したがって, 接触抵抗は接触点の集合現象として扱われるが, その挙動について系統的な解析を行うことは困難な状況にある。そこで, 電解溶液中に金属導体を配し, 点, 線および面接触の各種接触形態における接触点を巨視的にかつ系統的に形成させる手法を考案した[1]。本章では, 本実験手法の特徴と各種の接触形態における接触抵抗の挙動について述べる[2]-[4]。

2.2 電解浴槽を用いた接触子モデル

本章で提案する実験手法は次の通りである。電解溶液を入れた電解浴槽の液面上に金属導体を接触させて配置し, 浴槽の底面に設置した円盤状の電極との間に電流を流す。このとき金属導体近傍の溶液中において電流集中が起こるので, これに起因する接触抵抗(集中抵抗)を測定することができる。

本手法には, 通常の金属同士の接触では得られない以下の特徴がある。

- (1) 大型の電解浴槽を用いることによって, 金属同志の接触において形成される微細な接触点を1000倍以上の大きさとして巨視的に扱うことができる。
- (2) 電解溶液に設置する金属導体の形状ならびに配置条件によって解析目的に応じた接触点の形状, 大きさ, 数, ならびにそれらの分布状態を任意に設定できる。
- (3) 電解溶液の抵抗率は金属導体に比べて相当に高いことから, 金属導体内に生ずる接触抵抗の影響はほとんど無く, 電解溶液中に生ずる集中抵抗のみによる接触抵抗現象の解析ができる。

図2.1に実験装置の外観を示す。直径515mm, 深さ500mmの円筒形の電解浴槽に電解溶液として, 希硫酸(濃度:0.15 mol/l)90lを入れている。なお, 溶液の水深は約400mmである。浴槽の底に直径400mmの炭素円盤電極を置き, 電解浴槽内

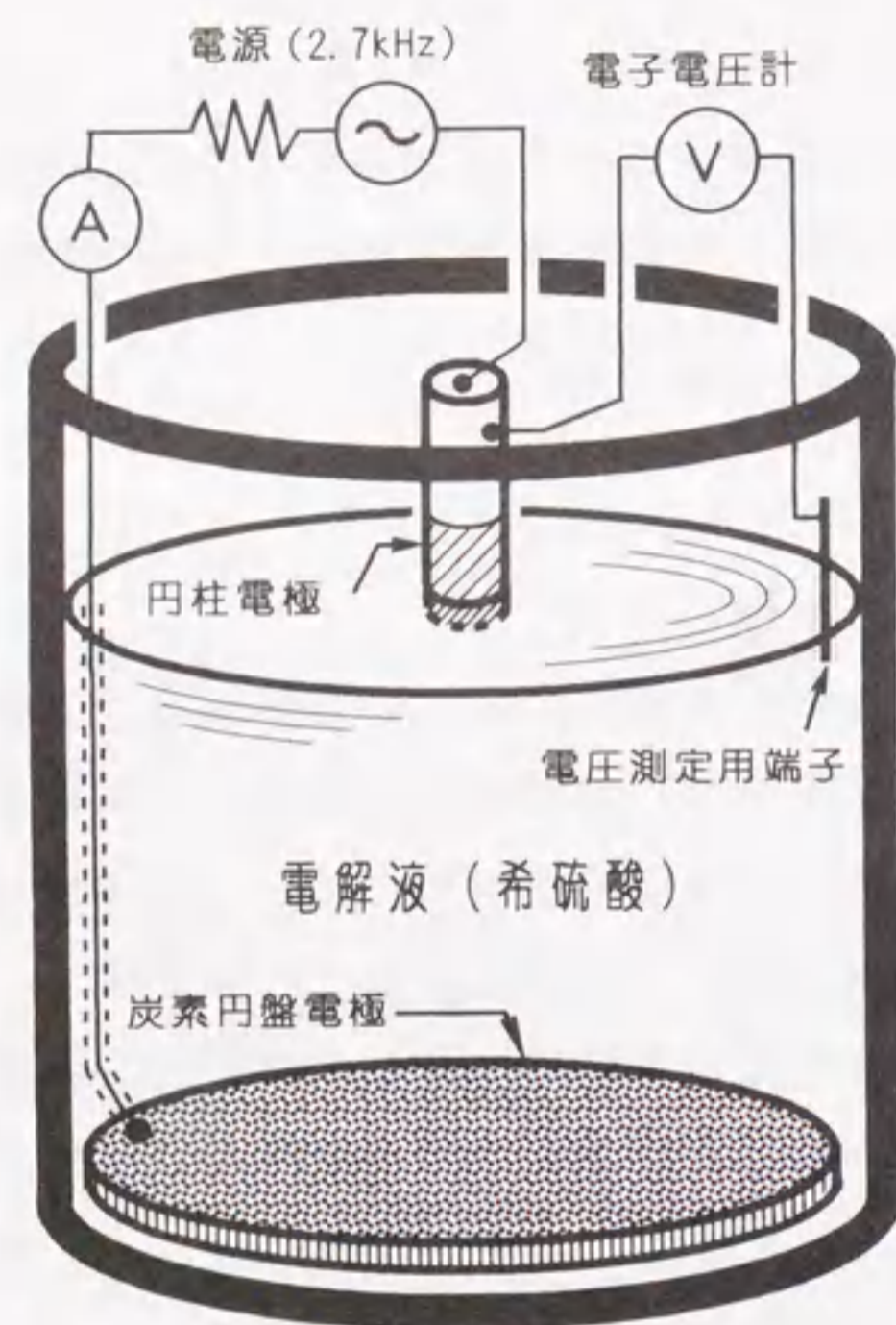


図 2. 1 実験装置

壁の溶液上部に電圧測定用端子を設置した。この設置場所は電解溶液内で生ずる電流集中の限界が現れる等電位面の位置である。図に示すように浴槽中央に半径 2~5mm の銅円柱 (以下、これを円柱電極という) を配置することで一つの接触点が形成する点接触の接触抵抗測定ができる。円柱電極の先端表面を平面状に加工して鏡面仕上げを行った。さらに、その表面には電解溶液である希硫酸による腐食を防止するために、実験直前に金めっき処理を施した。なお、電極の側面は樹脂で被覆して電気絶縁を行った。図中には一つの円柱電極を設置させた点接触の形成状態を示している。また、この円柱電極を線状の電極に置き換えることによって線接触における接触抵抗の測定も実施できる。

接触抵抗の測定は次のように行った。円柱電極を電解浴槽の中央部に配置し、電極の先端表面を液面下 5mm 程度沈める。2.7kHz の正弦波交流電源を用いて円柱電極と円盤電極との間に 250mA を通電する。ここで、実験に用いる電源の周波数および電流値は電解溶液がオーム性抵抗を示す条件として設定した値である。接触抵抗は円柱電極と電圧測定用端子との間に生ずる電圧降下を測定し、電圧電流計法から算出した。なお、本実験に使用する円柱電極の半径は浴槽の半径に対して 1/125~1/50 の比にある。これは半径 5mm の銅円柱の先端を曲率半径 5mm の球面と平面に仕上げ、それらを接触させて 20~30N の接触荷重で加圧された場合に形成される接触点の大きさと銅円柱の半径との比に相当する。

2. 3 点接触における接触面積と接触抵抗との関係

球対球面あるいは球対平面などの接触子構成では、円形の微小接触面を有する接触点の一つ形成される。互いに接触しているそれぞれの導体内部では接触点近傍において電流集中が起こり、これに起因する接触抵抗 (集中抵抗) R_c は第 1 章で述べたように

$$R_c = \frac{\rho}{4a} \dots \dots \dots (2. 1)$$

$$R_c = \frac{\rho \sqrt{\pi}}{4\sqrt{S}} \dots \dots \dots (2. 2)$$

で示される[5]。なお、 a は接触点の半径、 S は接触点の面積であり、 ρ は導体の抵抗率である。

そこで、半径2~5mmの各円柱電極を電解浴槽に配置した接触子モデルによる点接触における接触抵抗の実測を行い、(2.2)式から得られる特性との比較を行った。図2.2にその実測結果を示す。図中の○印は各電極に対して10回程度測定した実測値を算術平均した抵抗値である。各実測値のバラツキは○印の円内に含まれる程度に小さく、測定の再現性は非常に良い状況にある。接触抵抗は接触面積の増大に伴って減少している。また(2.2)式で与えられる接触抵抗は接触面積の1/2乗に反比例する関係にあり、両対数目盛で示されるグラフ上では実線で描かれた直線的な傾向となる。実測値はこの直線に沿って分布しており、(2.2)式で示される点接触の接触抵抗と接触面積との関係を満たす結果となっている。

2.4 複数の接触点形成時における接触抵抗特性

通常、平面对平面による面接触では、さまざまな大きさの接触点が散在した状態で形成される。この接触部分を通る電流は各接触点に分散し、それぞれの接触点近傍において電流集中が現れる。

ここで、同じ大きさの接触点が N 個形成した状態を仮定すれば、接触抵抗 R_{cN} は、各接触点に生ずる接触抵抗 R_c の並列接続として扱うことができ、 $R_{cN} = R_c/N$ で表される。したがって、各接触点の接触面積 S_0 を総和した全接触面積 $S_N (= N \cdot S_0 = N \cdot \pi a^2)$ に対する接触抵抗 R_{cN} は次式で与えられる。

$$R_N = R_c/N = \frac{\sqrt{\pi} \cdot \rho}{4 \sqrt{N \cdot S_N}} \dots \dots \dots (2.3)$$

これより、接触抵抗 R_{cN} は全接触面積 S_N ならびに接触点数 N に対して1/2乗に反比例する関係にあるといえる。

そこで、2本あるいは3本の円柱電極(半径:2~5mm)を用いて2点および3点の接触点が生じた場合の接触抵抗を測定した。図2.3は実測より得られ

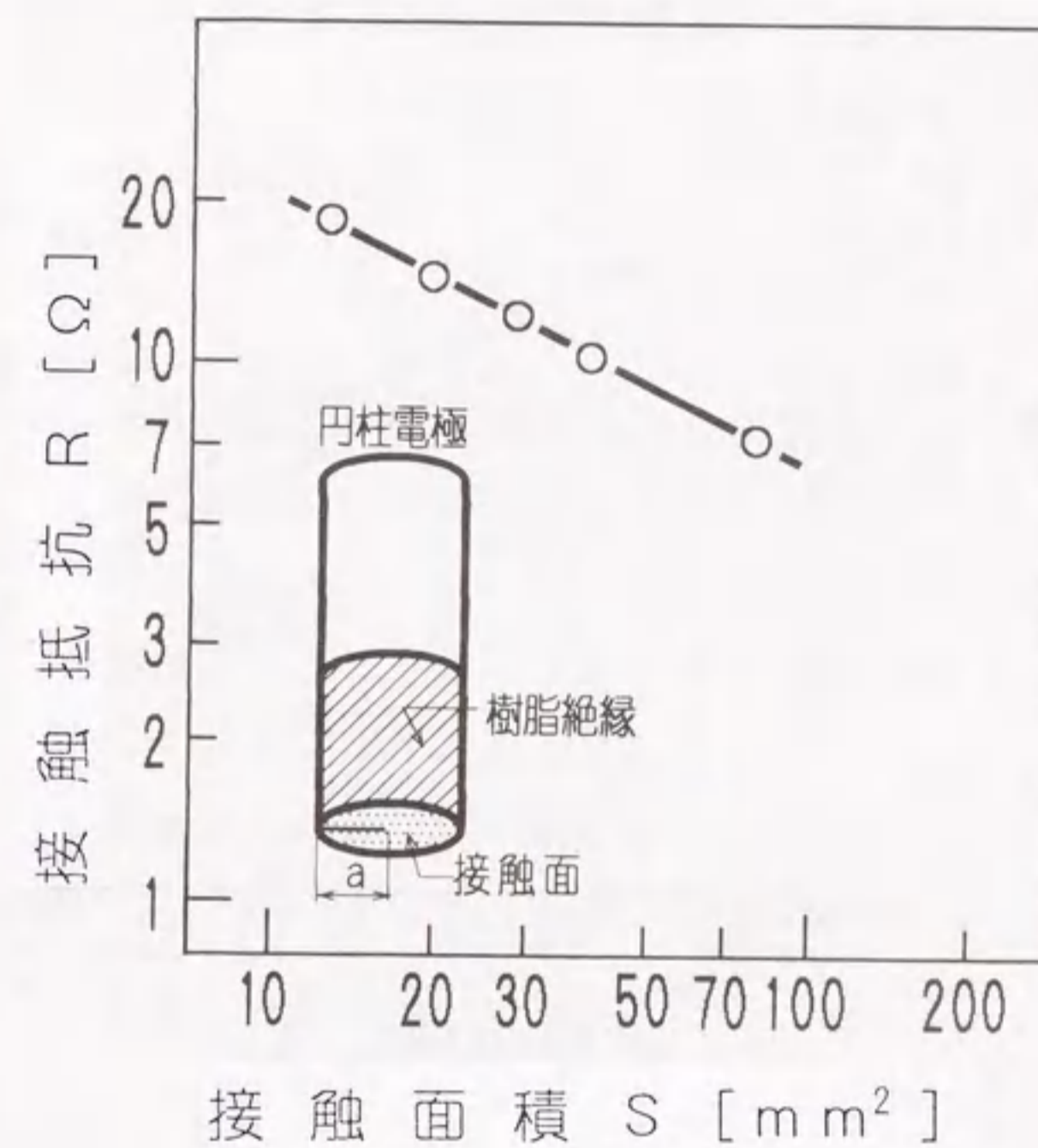


図2.2 点接触の接触面積と接触抵抗との関係

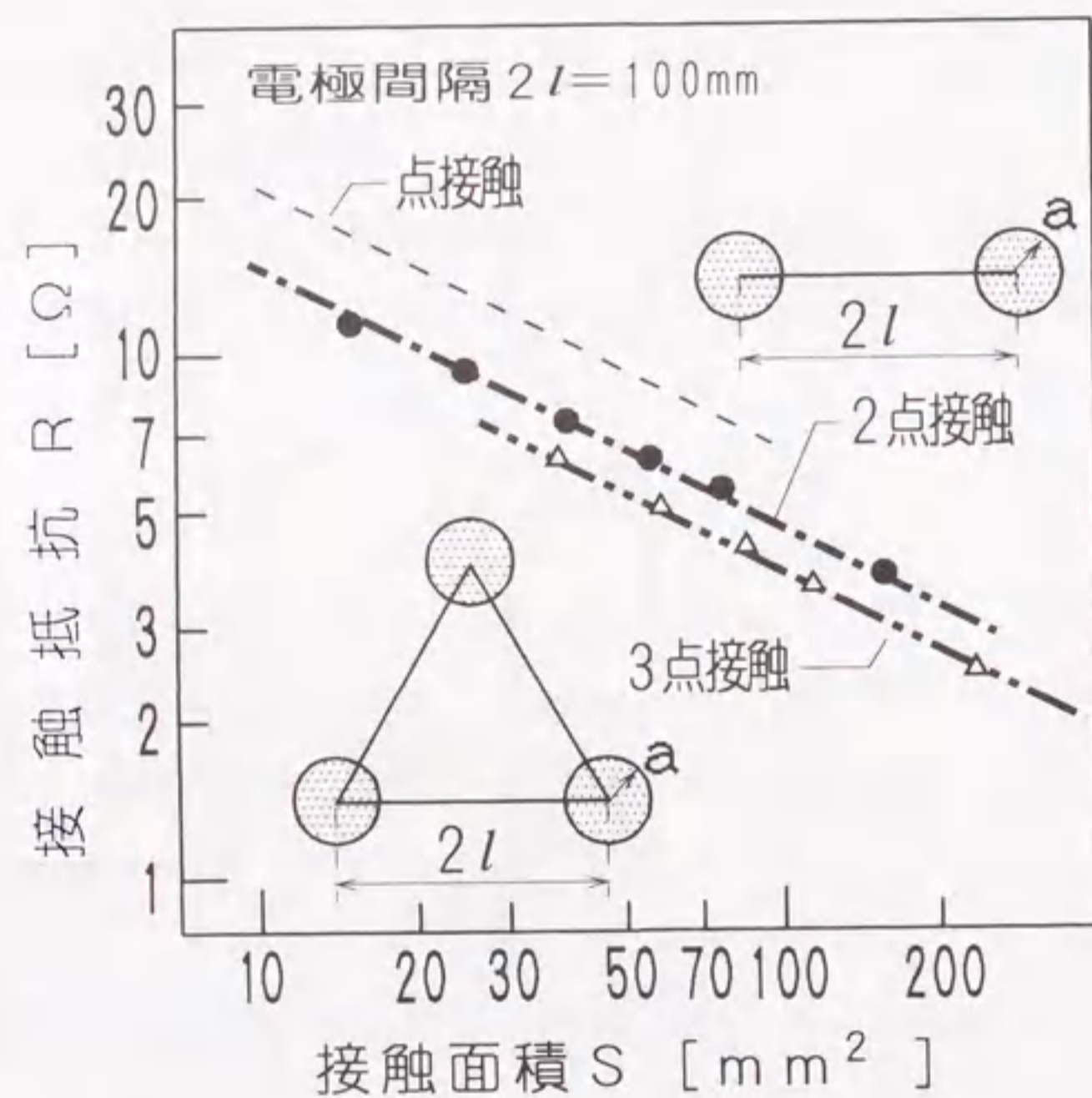


図 2. 3 複数接触点の形成時における接触面積と接触抵抗との関係

た接触面積と接触抵抗との関係を示したものである。各円柱電極の間隔（電極中心間の距離） $2l$ はいずれも 100mm とした。なお、3点接触をさせる場合、円柱電極を一辺の長さが $2l$ なる正三角形の各頂点に配置させた。

図中の●および△印は2点および3点接触においてそれぞれ10回の測定を行い、その算術平均した接触抵抗値を示したものである。また、一点および二点鎖線は破線で示す点接触の実測結果から(2. 3)式の関係を用いて算出した2点、3点接触の数値傾向である。各実測値はそれぞれの数値傾向に良く一致しており、(2. 3)式で示される接触抵抗 R_s と接触点数 N ならびに接触面積 S_s との関係を満たしていることがわかる。これらの実測より本実験手法が電流集中に起因する接触抵抗現象の解析に有効なものであると判断される。

2. 5 複数の接触点形成時における接触点分布と接触抵抗との関係

一般に、複数の接触点が生じた状態の接触抵抗は前述(2. 3)式で与えられ、本実測においても一致する結果を得た。しかしながら、各接触点相互に近接した場合にはそれぞれの接触点における電流集中の相互影響によって接触抵抗が増大することがHolmによって示唆されている[6]。

そこで、Holmの示す接触抵抗の算定式に基づいて数値特性を得るとともに、本章で提案している接触子モデルにおいて、2点、3点接触および9点接触について接触点の間隔を変化させて接触抵抗の実測を行った。

2.5.1 数値特性

前述の(2. 1)式あるいは(2. 2)式で与えられる接触抵抗は半無限導体に形成した接触点近傍において電流集中が放射状に現れる場合の特性である。しかしながら、複数個の接触点相互に近接して形成した場合には、各接触点近傍における電流の流れは相互に影響し、束縛される。

面接触において形成される接触点は図2. 4(a)に示すように大きさの異なる接触点が散在した状態にある。Holmはこの一般的な分布状態を同図(b)のように同じ大きさの接触点を格子状に配置したモデルによって相互に近接した場合の接触抵抗を次式で表している[6]。

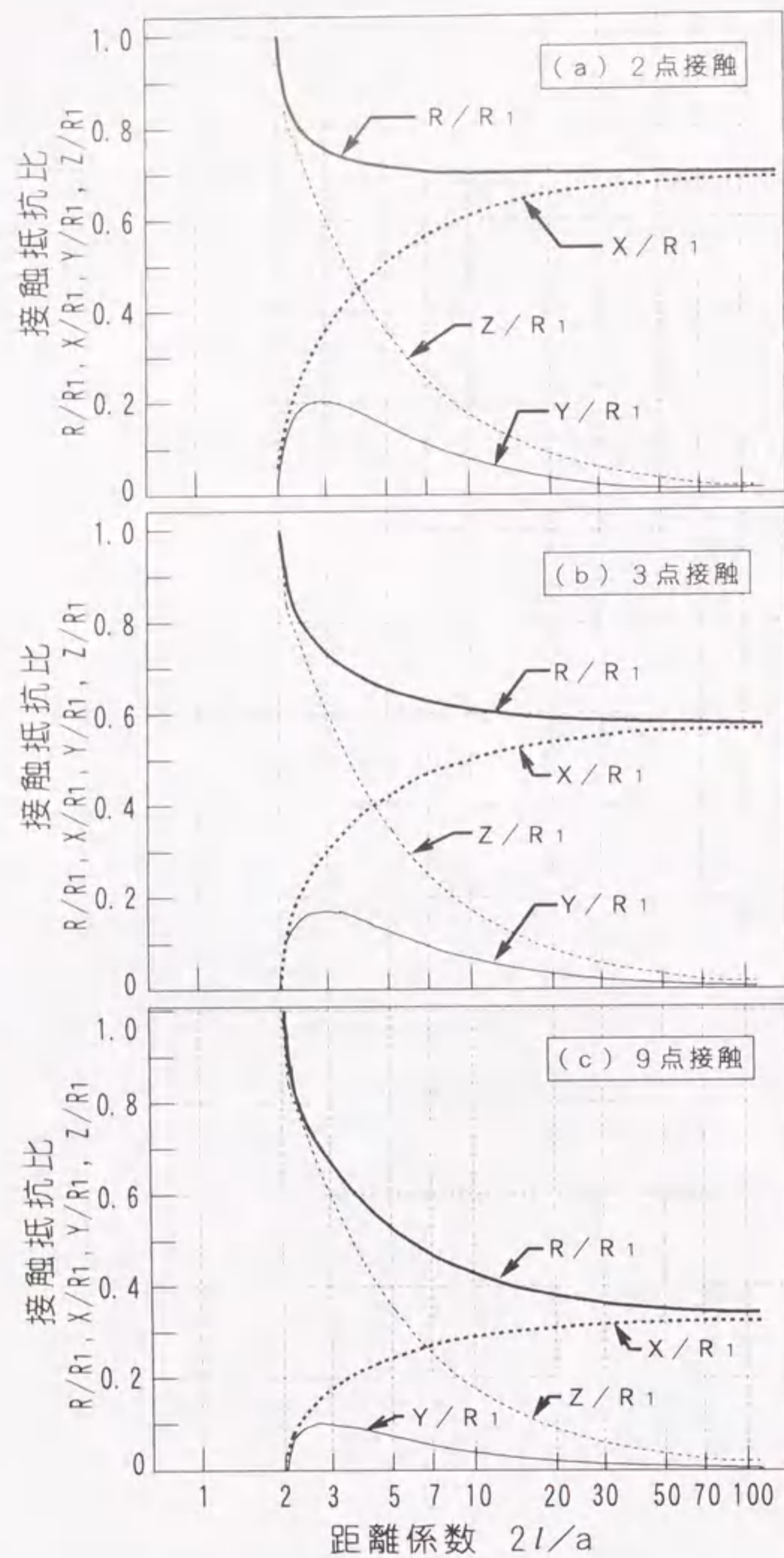


図 2. 5 接触点の距離係数と接触抵抗比

2点接触に比べて距離係数 $2l/a$ の増大に伴う抵抗比 R/R_1 の低下は大きくなっている。さらに図(c)に示す9点接触における抵抗比 R/R_1 は距離係数 $2l/a$ の増大に伴ってより大きく低下するが、相互作用の影響は距離係数 $2l/a$ の大きい範囲においても現れる様相を示している。なお、(2. 4)式の右辺3項目から求められる接触抵抗比 Z/R_1 はいずれの接触点数の特性においても距離係数 $2l/a$ に対して同じ傾向にある。また Y/R_1 は接触点数が多くなる程全体的に低く、接触抵抗比 R/R_1 への影響は少なくなっている。

2.5.2 実測特性

2本、3本および9本の円柱電極を用いて複数の接触点が生じた場合について接触点間隔を順次変化させて配置し、接触抵抗の実測を行った。図2. 6は2点接触について実測した距離係数 $2l/a$ に対する接触抵抗比 R/R_1 の関係を表したものである。半径2~5mmの各円柱電極2本を設置して実測した接触抵抗比 R/R_1 は○、□、▲などの印で示すようにそれぞれバラツキを有しているが、電極の大きさによる傾向の差異はない状況にある。距離係数 $2l/a$ の増加に伴って接触抵抗比 R/R_1 は低下している。図中の破線は前述の数値特性を示したものである。また、一点鎖線は(2. 3)式より算出した電流集中の相互影響がない場合の接触抵抗より算出した抵抗比 $R/R_1=0.71$ の値を表している。実測より得られた接触抵抗比は数値特性に対して全体的に高い状況にある。

図2. 7は3本の円柱電極を一辺の長さが $2l$ なる正三角形の各頂点に配置した3点接触について実測したものである。図2. 6で示した2点接触の場合と同様に接触点の大きさによる差異はなく、接触抵抗比 R/R_1 は距離係数 $2l/a$ の増加とともに低下している。また、各抵抗比は2点接触の場合よりも破線で示す数値特性に近づく傾向にある。

さらに、9個の接触点を格子状に $2l$ の間隔で配置させて実測した結果を図2. 8に示す。実測より得られた接触抵抗比 R/R_1 は図中に●、□印で表されているように破線で示す数値特性と非常によく一致していることがわかる。

これらの結果より接触点数が比較的多い9点接触における実測値が(2. 4)式から得られる数値特性を満足する結果を得た。反面、接触点が2、3個程度と少ない場合には数値特性と実測値との差異が大きい様相にある。これは(2. 4)式

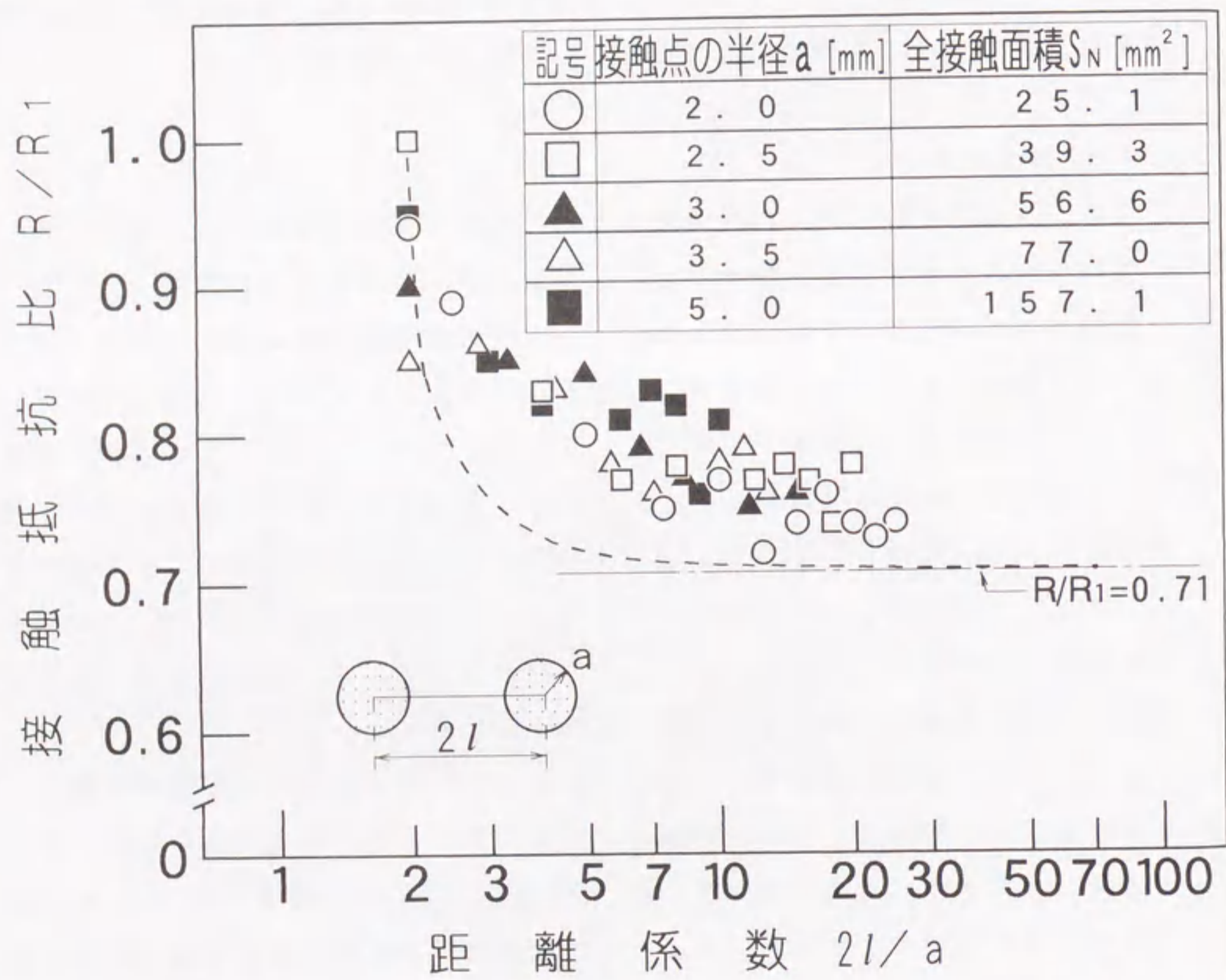


図 2. 6 2点接触の距離係数と接触抵抗比との関係

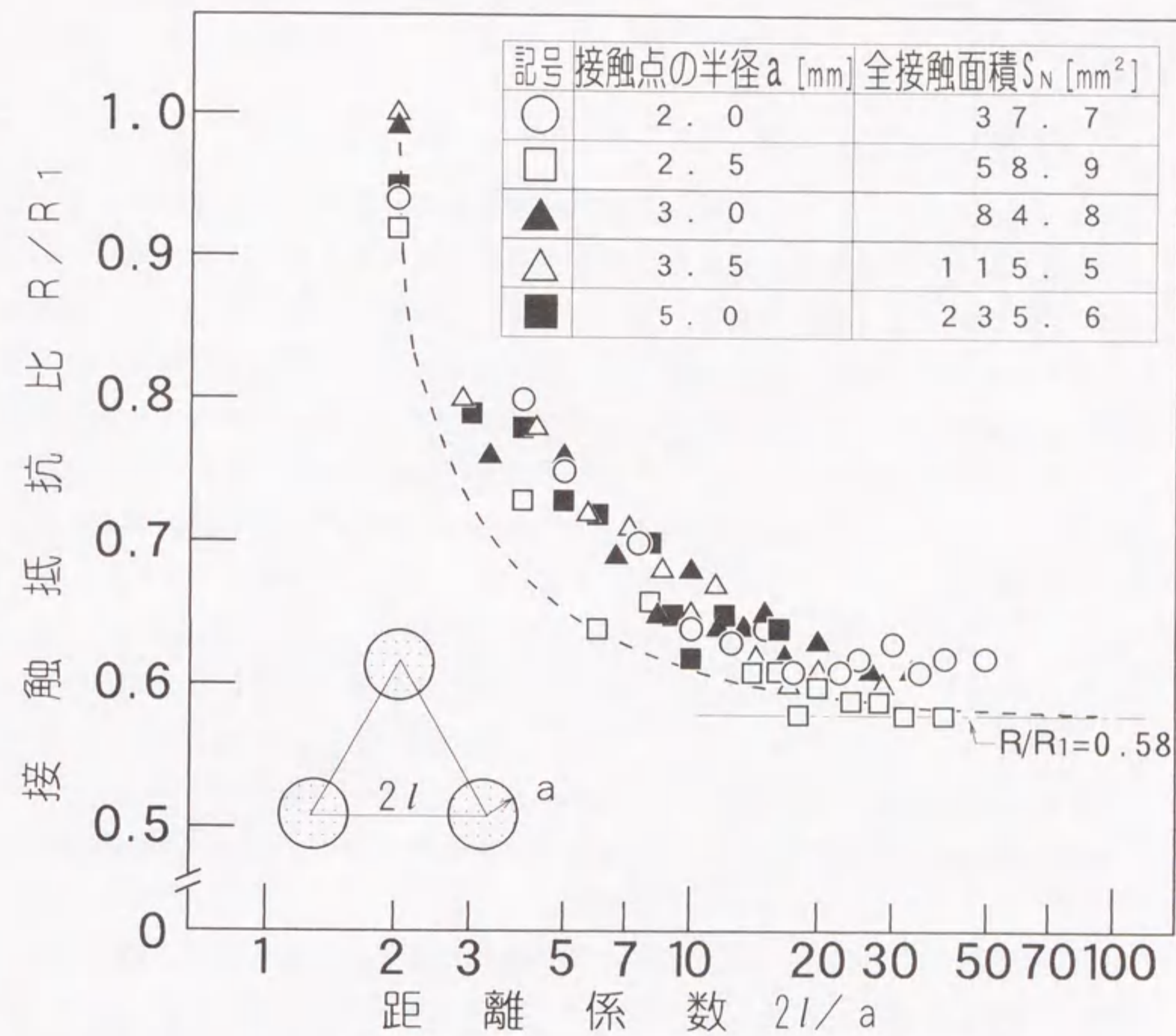


図 2. 7 3点接触の距離係数と接触抵抗比との関係

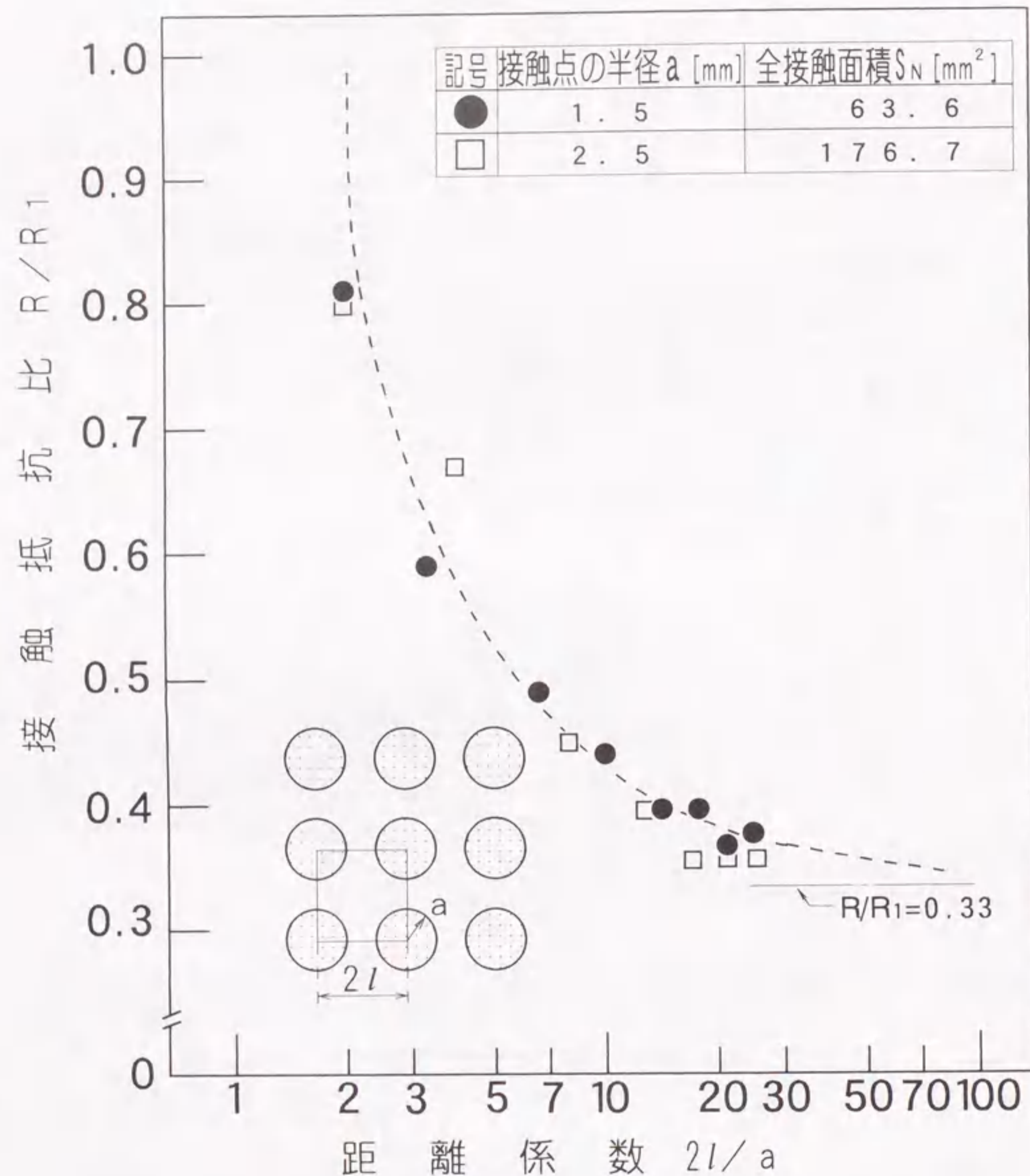


図 2. 8 9点接触の距離係数と接触抵抗比との関係

では多数の接触点形成時を仮定しており、一つの接触点を通る電流は周囲の接触点における電流の流れに対して一様に束縛された状態にある。しかし、接触点の数がごく少ない場合には各接触点の対向する側での電流は互いに束縛し合うが、その反対側では拡がりのある電流分布となり接触点を通る電流集中の分布が偏るためと推測される。

2. 6 線接触における接触面積と接触抵抗との関係

図 2. 9 に示すような銅の帯板電極あるいは長方形の箱形電極（以下、これを帯電極という）を前述の点接触の実験に用いた円柱電極と取り替えることで線接触の接触形態における接触抵抗が測定できる。電解溶液と接触する電極表面は点接触の場合と同様、鏡面仕上げを行った後、金めっき処理を施して実験に供した。なお、電極の側面は樹脂で被覆して電気絶縁を行った。この帯電極を電解浴槽の中央に電極の先端表面（接触面）を液面下 5 mm 程度沈めて配置した。

2.6.1 接触線長の伸展および線幅の拡大に伴う接触抵抗特性

線接触子の接触形状は線幅 W と線長 L_c の二つの要素からなり、接触抵抗は接触面の形状を反映すると考えられる。

そこで、まず電極幅 W が 1, 3, 5, 10 mm の各帯電極を用い、各電極の接触線長 L_c を 10 mm から 200 mm まで順次伸展させて接触面積 S を増大させた場合の接触抵抗を測定した。

図 2. 10 は本実測より得られた接触面積と接触抵抗との関係を示したものである。なお、接触面積 S は帯電極の線幅 W と接触線長 L_c の積 ($S = W \cdot L_c$) で算出した。いずれの帯電極についても接触抵抗は接触面積の増大に伴って両対数のグラフ上において傾きが同じ直線的な減少を示しており、接触抵抗 R は接触面積 S に対して $R \propto S^{-n}$ の関係にあることがわかる。この直線の傾きから指数 n の値は $n = 0.7$ となり、前述 (2. 2) 式で示される点接触の指数 $n = 0.5$ より大きい。これは、接触線長の伸展によって接触面積を増大させたことにより、接触線長に対する接触抵抗の挙動が現れた結果と推測される。

また、図 2. 11 は帯電極の線長 L_c を一定として電極幅 W を 2 mm から順次増大

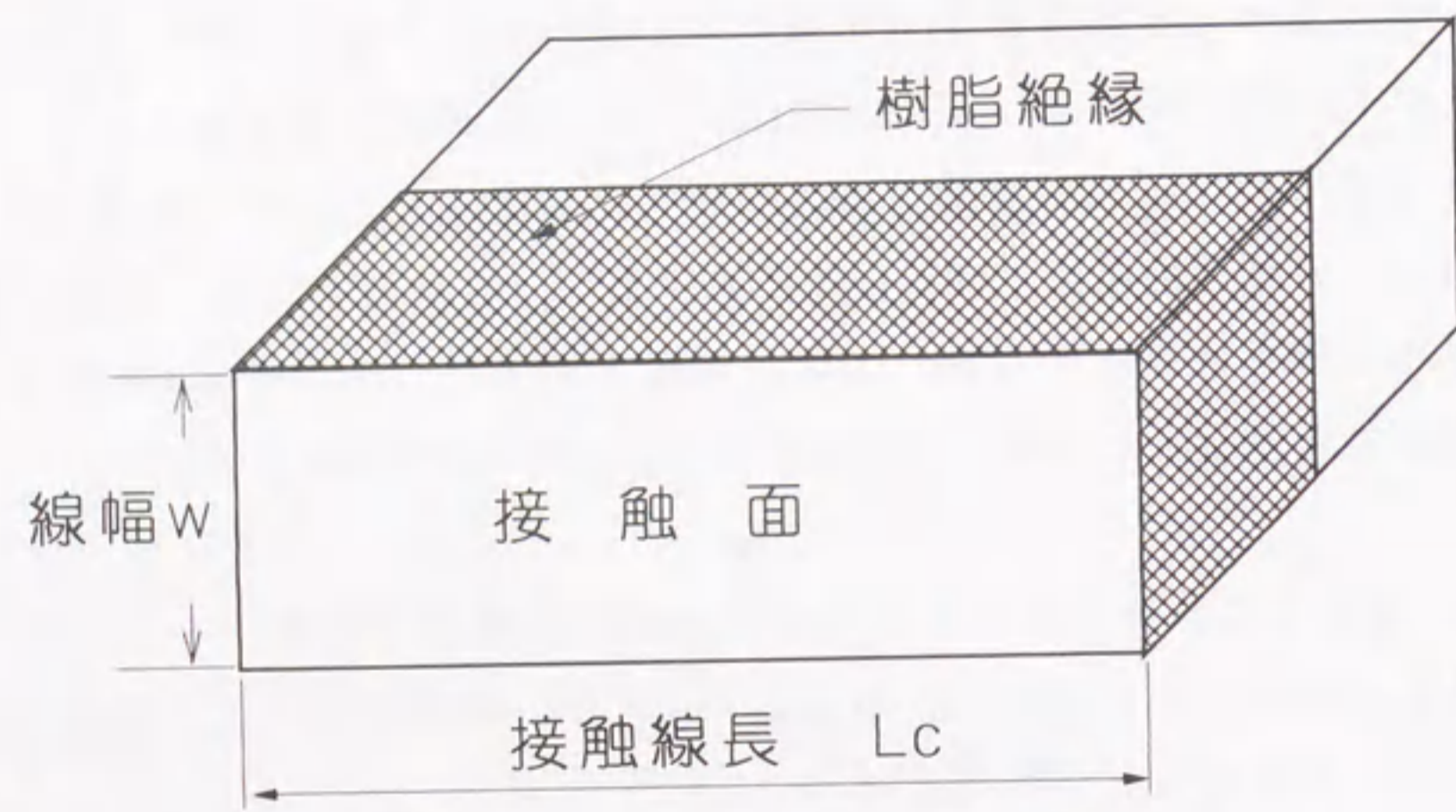


図 2. 9 帯電極の形状 (底面)

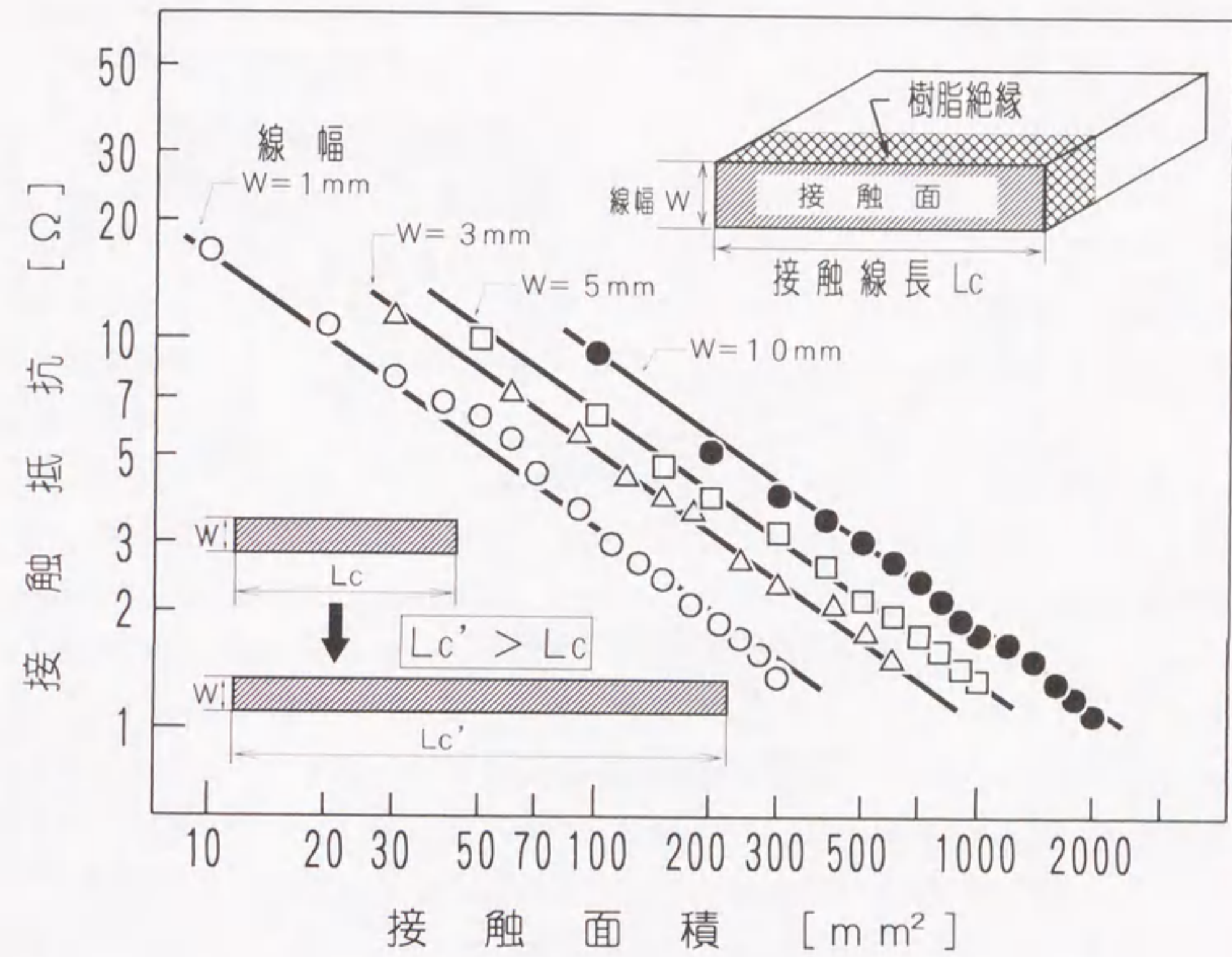


図 2. 10 接触線長の伸展に伴う
接触面積と接触抵抗との関係

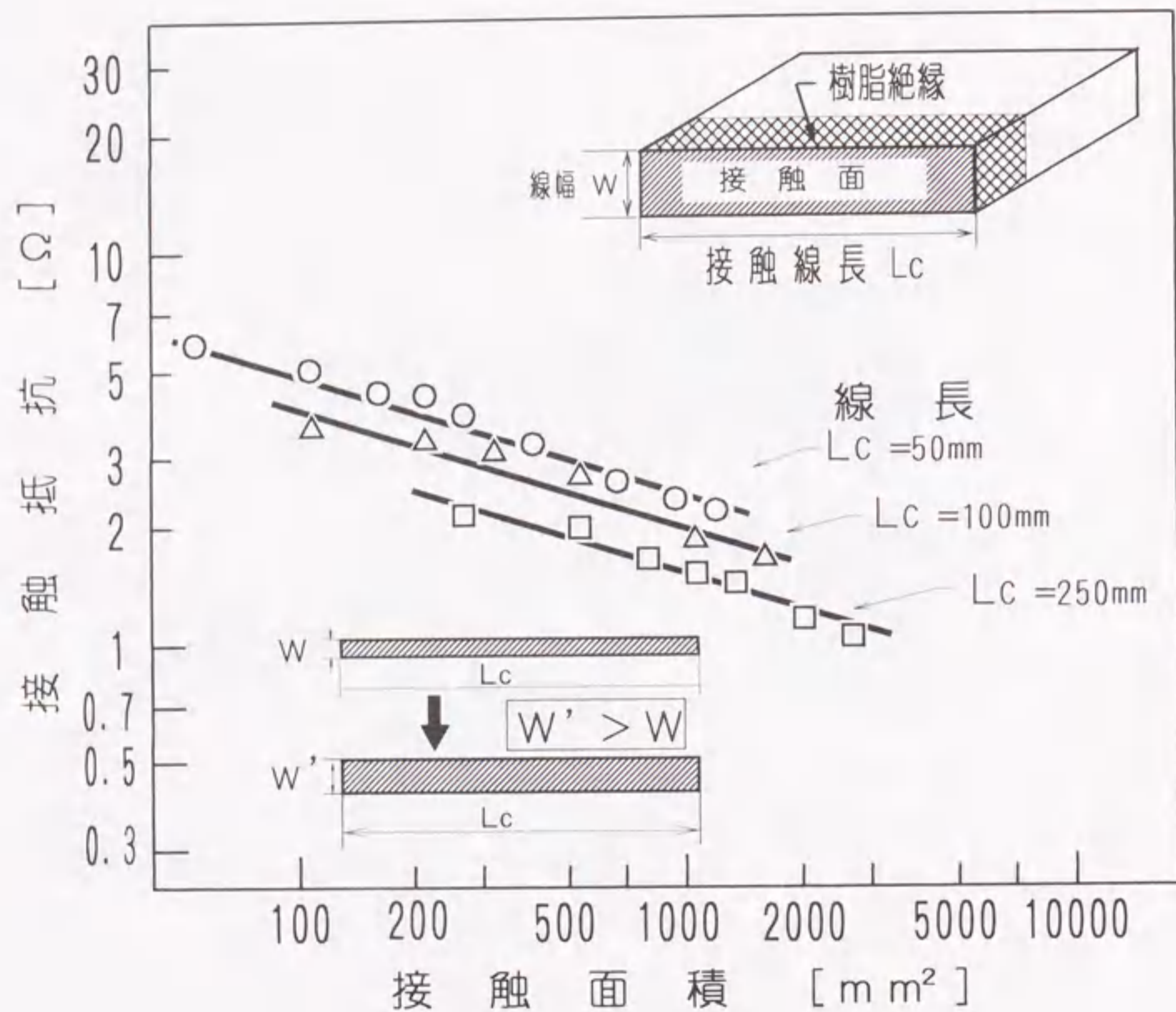


図 2. 11 線幅の拡大に伴う
接触面積と接触抵抗との関係

させて実測した接触抵抗と接触面積との関係を示したものである。なお、実験では線長 L_c を 50, 100, 250mm の 3 種類として実測した。各実測値は両対数のグラフ上において接触面積の増大に伴って接触抵抗が直線的に減少しており、その直線の傾きは -0.3 となっている。これは、前述図 2. 10 に示した線幅が一定で、接触線長を伸展させた特性に比べて、接触面積の増大に対する接触抵抗の低下割合が小さい様相にあることを示す。

2.6.2 線接触の形状と接触抵抗との関係

線接触の接触抵抗が線幅 W と接触線長 L_c の変化によってそれぞれ異なった特性を示すことが前述の実測によって明らかとなった。そこで、線接触の形状指標として接触線長 L_c を線幅 W で除した線長比 L_c/W を考え、線接触の形状と接触抵抗との関係について検討した [7]。

図 3. 12 は接触面積 S を 50, 100, 200mm² で一定とした条件における線長比 L_c/W と接触抵抗 R との関係を示したものである。線長比 L_c/W の増大に伴って接触抵抗は両対数のグラフ上において直線的に減少しており、いずれの接触面積においても直線の傾きはほぼ -0.2 である。したがって接触抵抗 R は線長比 L_c/W に対して $R \propto (L_c/W)^{-0.2}$ なる関係にあるといえる。

また、線長比 L_c/W を一定として接触面積を増大させた場合の接触面積と接触抵抗との関係を図 2. 13 に示す。いずれの線長比においても接触面積の増大に伴って接触抵抗は直線的に減少している。この直線の傾きは -0.5 で、 $R \propto S^{-0.5}$ なる特性を示し、(2. 2) 式で示される関係を満足している。これらの特性から、線接触の接触抵抗 R は線長比 L_c/W と接触面積 S によって次式のように表すことができる。なお、 k は比例定数である。

$$R = k \cdot (L_c/W)^{-0.2} \cdot S^{-0.5} \quad \dots \dots \dots (2. 6)$$

さらに、接触面積 S は $S = W \cdot L_c$ であるので、(2. 6) 式で示された接触抵抗 R は、線幅 W と接触線長 L_c によって次のように記述できる。

$$\begin{aligned} R &= k \cdot (L_c/W)^{-0.2} \cdot (W \cdot L_c)^{-0.5} \\ &= k \cdot W^{-0.3} \cdot L_c^{-0.7} \quad \dots \dots \dots (2. 7) \end{aligned}$$

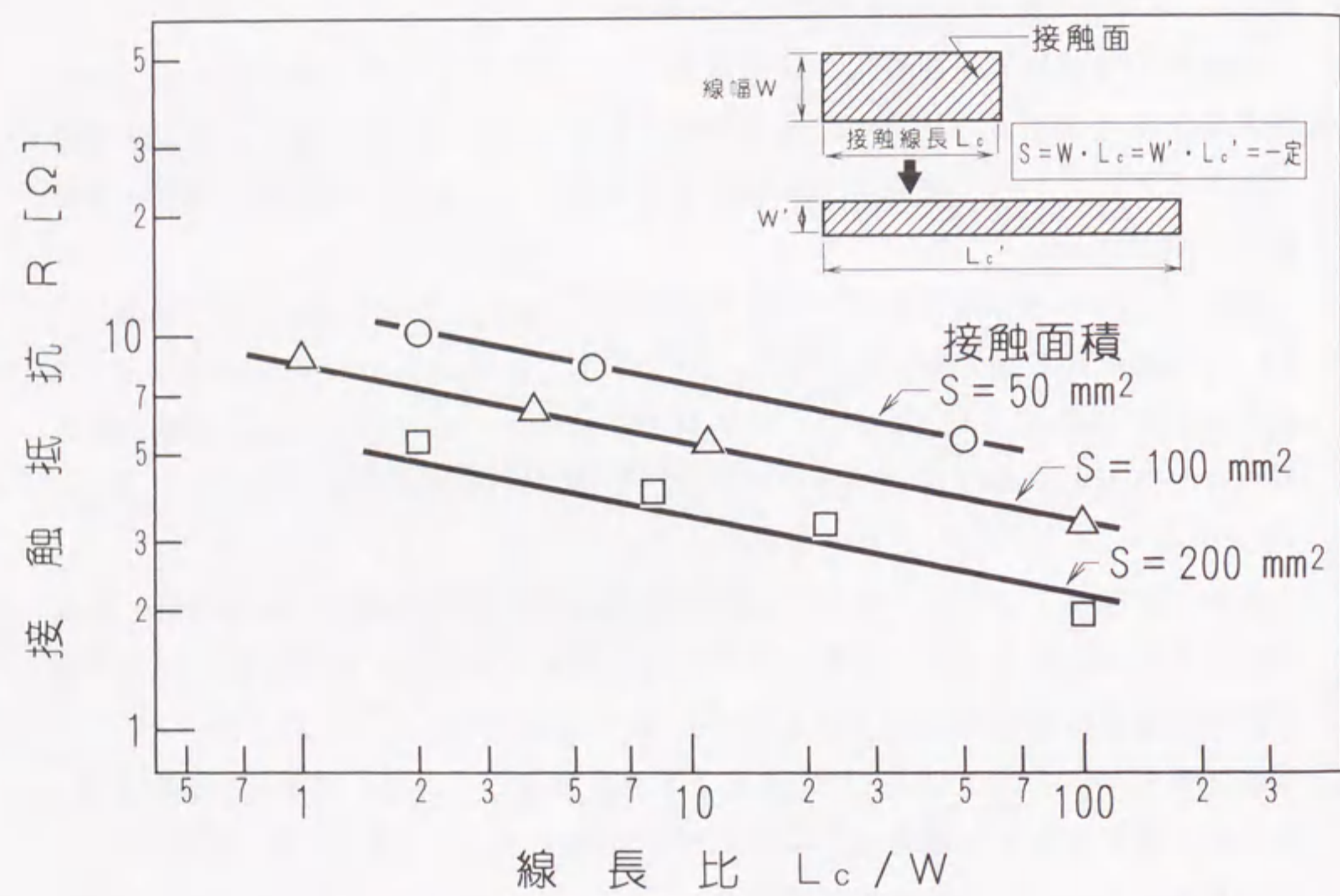


図 2.12 線接触の線長比と接触抵抗との関係

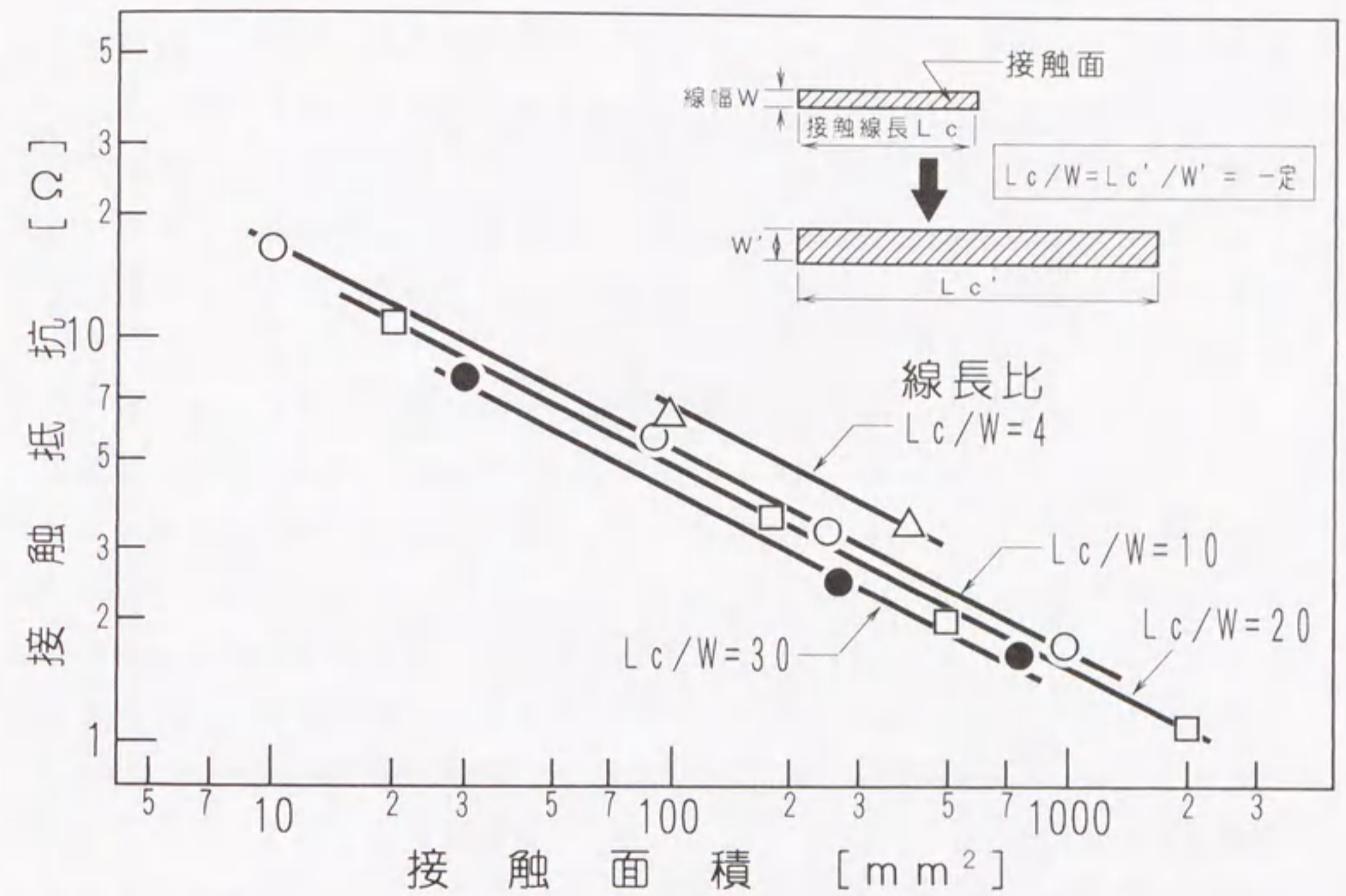


図 2.13 線長比を一定とした線接触の接触面積と接触抵抗との関係

その結果、線接触の接触抵抗 R は線幅 W の0.3乗に反比例し、接触線長 L_c の0.7乗に反比例する関係が見いだされる。

2.7 線接触の並列配置における接触抵抗の挙動

実際の電力用開閉機器に用いられている接触子構造に注目すれば、複数の線接触が並列して形成するように設計された構造のものがある。そこで、線接触を等間隔で複数本配置した接触形態における接触抵抗の挙動について検討した。

図2.14に示すように厚さ1mm、長さ50~250mmの銅帯板を用いた帯電極を2~6本まで並列に順次電解溶液上に配置して接触面積を増大させた。なお、実験は各電極を電極中心間で6.5mmまたは16.5mmの間隔で配置した二つの設置条件で行った。

図2.15は本実測から得られた接触抵抗 R と接触面積 S の関係を両対数グラフによって表したものである。図中の○印は電極の間隔を6.5mmに設定して線長が50mmの線接触について実測した抵抗値を示しており、線接触の形成本数の増加に伴って接触面積は100~300mm²まで変化している。また、線長を最大250mmとした場合の接触面積は500~1500mm²の範囲で変化しており、その時の接触抵抗値を●印で示す。これらいずれの線長においても接触抵抗は接触面積の増大とともに低下しており、その様相は図中に太い実線で示す直線上で変化している。他方、電極間隔を16.5mmとして実測した場合、図中に■印などのマークで示すように電極間隔を6.5mmとした場合よりも抵抗値は全体的に低く、太い点線で示す傾向となっている。いずれもこれらの直線はグラフ上において傾きが-0.7であり、前述図2.10で示した線長の伸展に伴う線接触における接触面積と接触抵抗との特性に一致している。

なお、複数の接触点が近接して形成した場合、各接触点に集中する電流が相互に束縛されることに起因する接触抵抗の増大現象がみられるが、本実測においても帯電極の間隔が狭い6.5mmとした場合の接触抵抗は間隔16.5mmで配置した場合よりも全体的に高い傾向にあり、各帯電極に生ずる集中電流の相互作用が現れていると判断される。

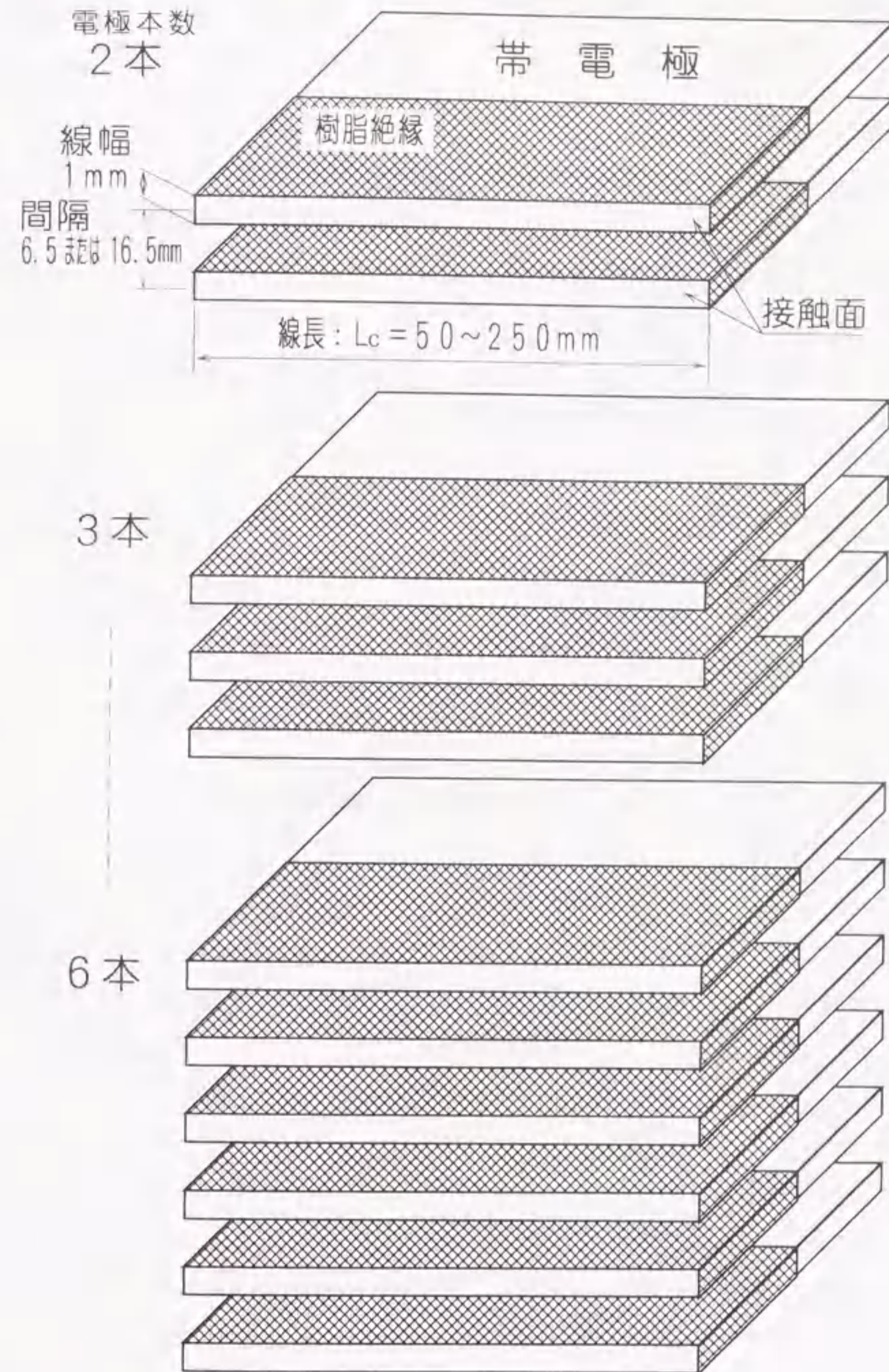


図2.14 帯電極の配置（底面）

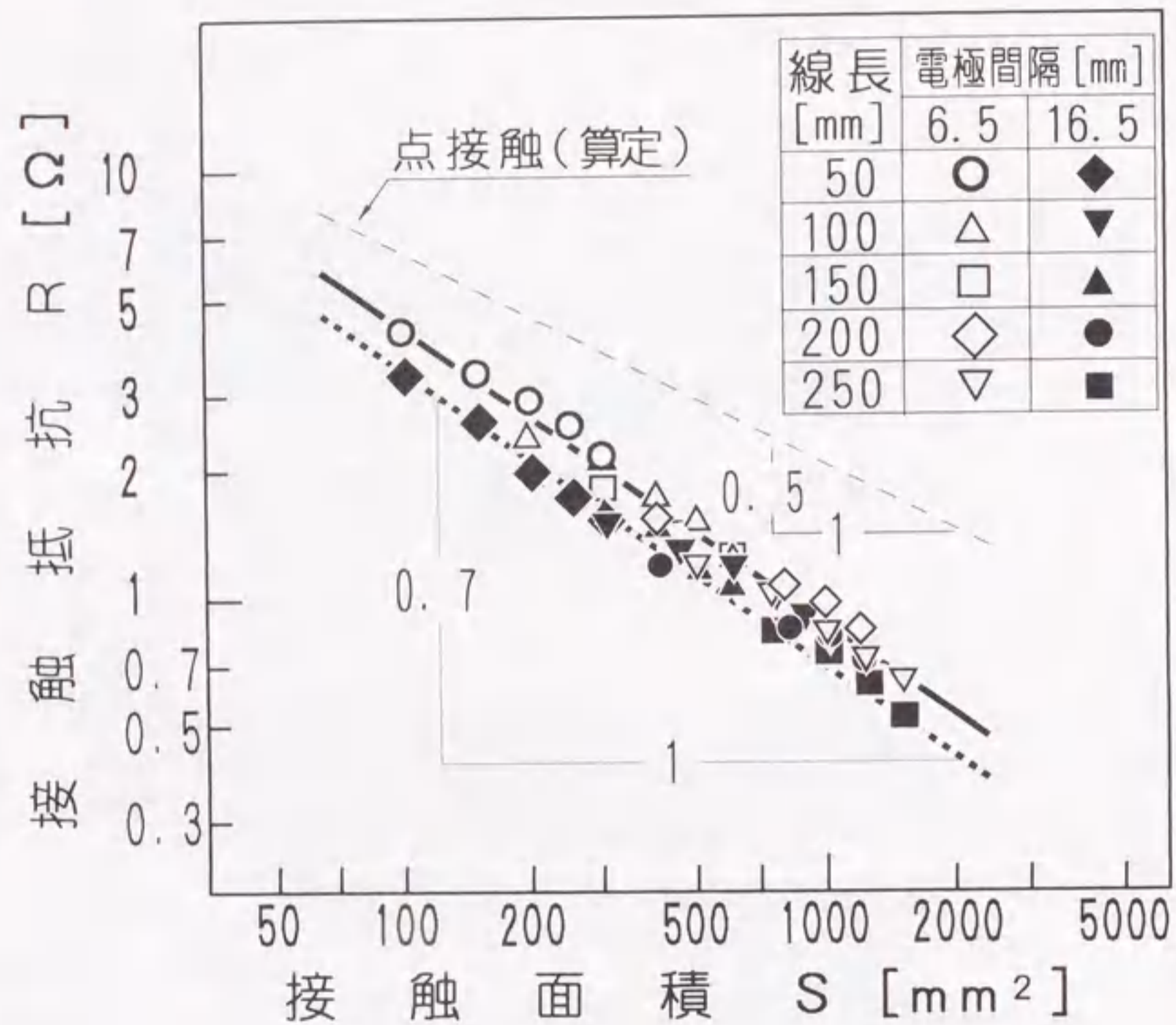


図 2.15 帯電極を均等間隔で配置した線接触子の接触抵抗と接触面積との関係

2.8 線から面接触への移行に伴う接触抵抗の挙動

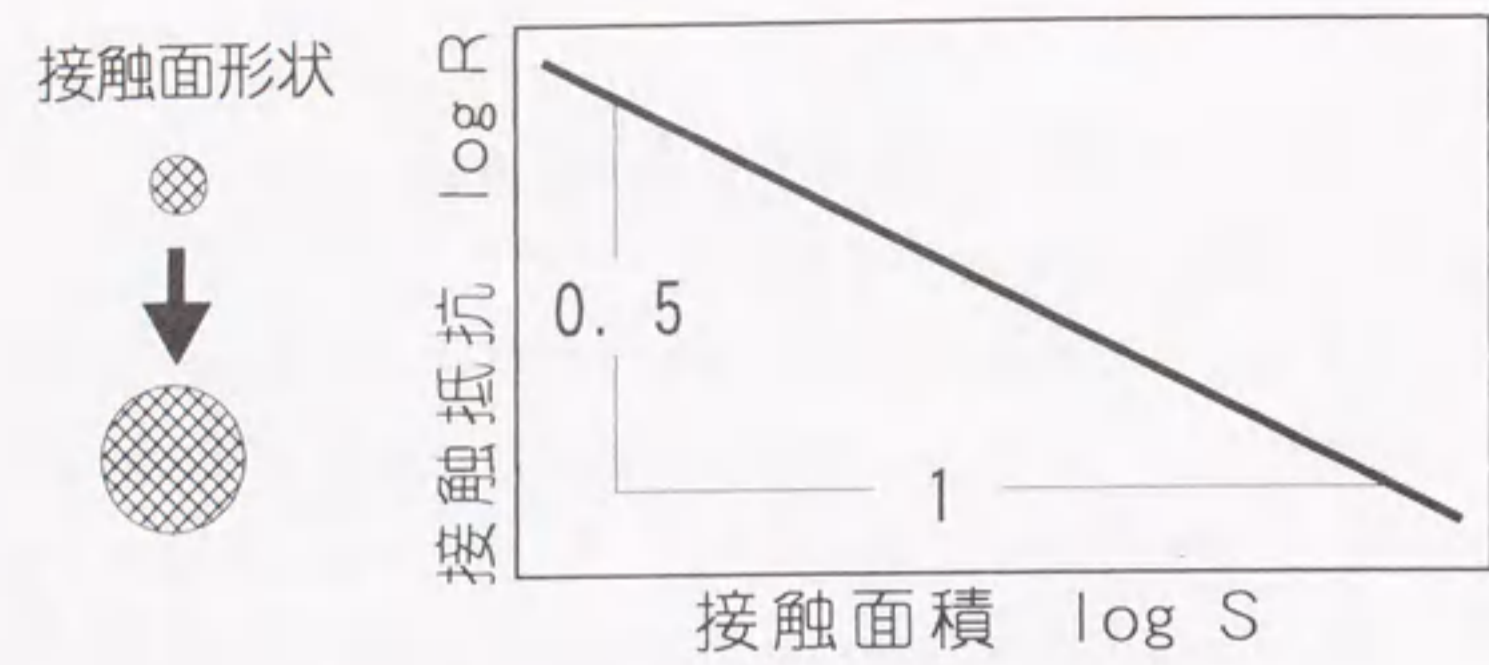
2.8.1 各種接触形態と接触抵抗特性

前述までの点および線接触における接触抵抗と接触面積との関係についてそれらの傾向を図 2.16 に示す。点接触における接触抵抗と接触面積との関係を両対数グラフ上に表した場合には前述(2.2)式で示されるように接触抵抗が接触面積の 0.5 乗に反比例する関係にあることから同図(a)に示すように傾きが -0.5 の直線傾向となる。

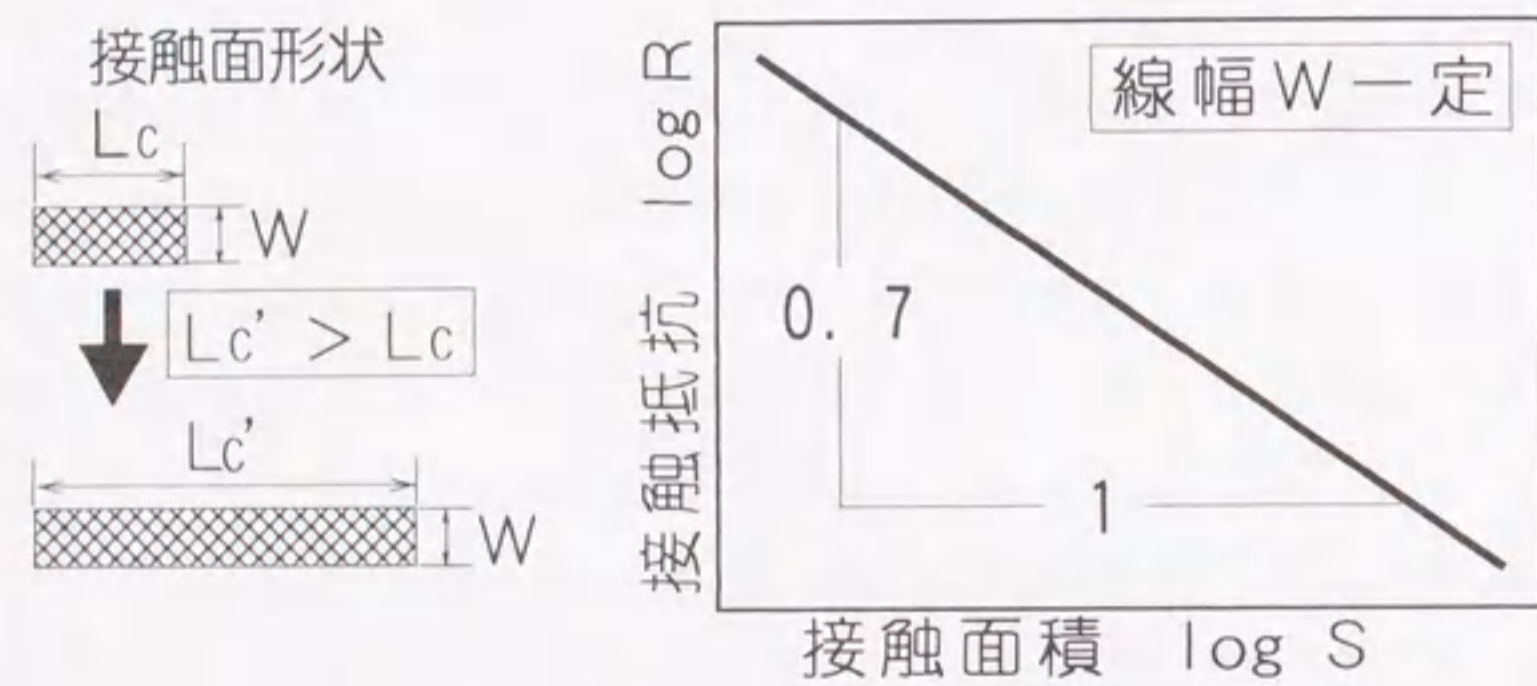
他方、線接触の傾向特性を図(b), (c)に示す。線接触では接触面積を増大させる手法として二通りある。その一つは図(b)に示すように線接触の線幅 W を一定として、線長 L_c の伸展によって接触面積が増大する場合で、線接触子の長さを変化させた場合の現象に相当する。この場合の接触抵抗は接触面積の 0.7 乗に反比例する特性を示す。反面、金属同志の接触において加圧力を増加させた接触状態では図(c)のように線幅の拡大によって接触面積が増大する。このような場合の接触抵抗は接触面積の 0.3 乗に反比例する様相となる。ただし、線幅 W は線長 L_c に対して $W > L_c$ の場合であり、線幅 W が線長 L_c に近い状態に拡大した状況では、後述 2.8.2 節で示すように異なった傾向が現れる。

図 2.17 は 2 本の円柱を用いて点接触から線、さらには面接触への連続的な接触形態の検討のための移行手法を示したものである。点から線接触への接触形態の移行は図(a)に示すように円柱の交叉角度を変化させる。交叉角度 θ が 90 度の場合には点接触を形成する。角度 θ を 90 度から小さく設定した場合、接触面の形状は円形から楕円に変形し、角度の減少とともに楕円の長径と短径の差は大きくなり線接触に近づく。最終的に角度 θ が $\theta = 0$ の状態では 2 本の円柱は平行状態で接触することとなり、線接触の接触形態に移る。これら楕円および線接触における接触面形状の理論特性については R.J. Roark によって示されている[8]。

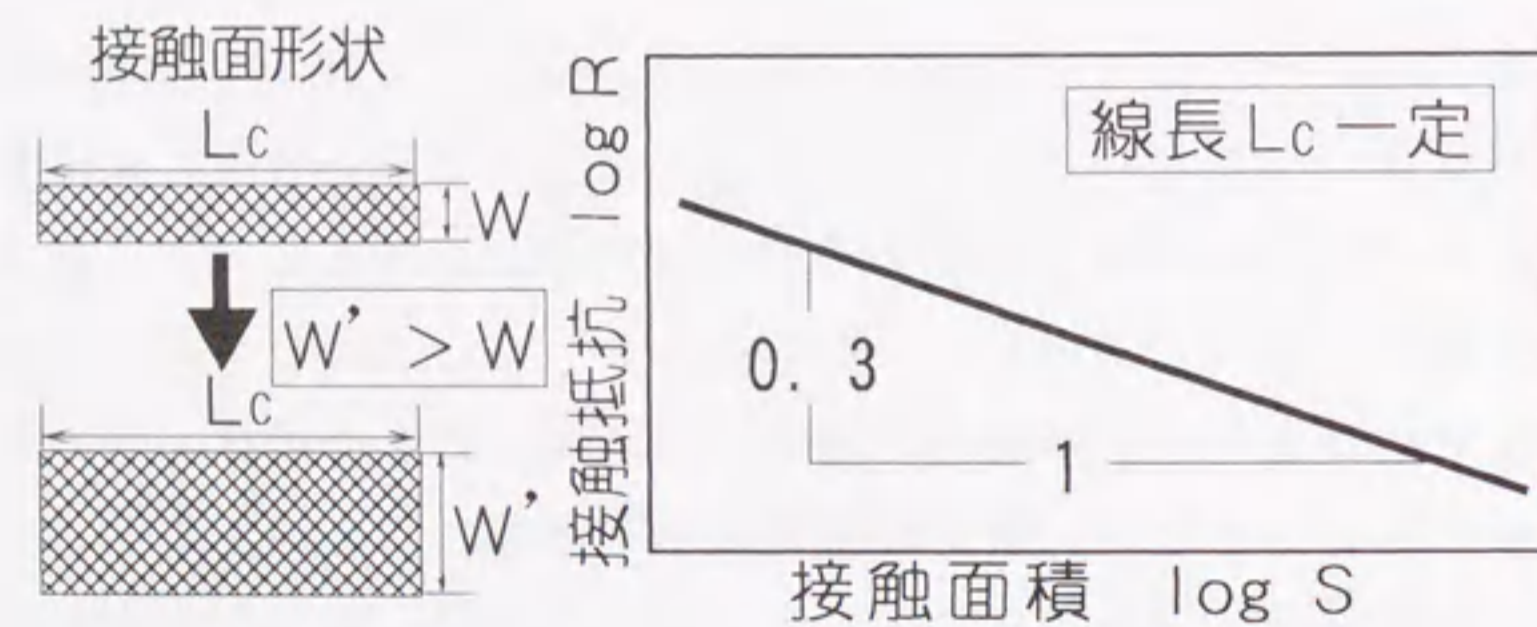
この線接触形態において円柱の曲率半径を大きくすれば、図(b)に示すように接触面の幅は拡大し、線から面接触に近似した接触状態になる。そこで、線接触の線幅を順次拡大させて面接触に近い接触形態へ移行させる過程の接触抵抗を実測し、その挙動について検討した。



(a) 点接触



(b) 線長の伸展に伴う線接触



(c) 線幅の拡大に伴う線接触

図 2. 16 点および線接触の
接触抵抗と接触面積との関係

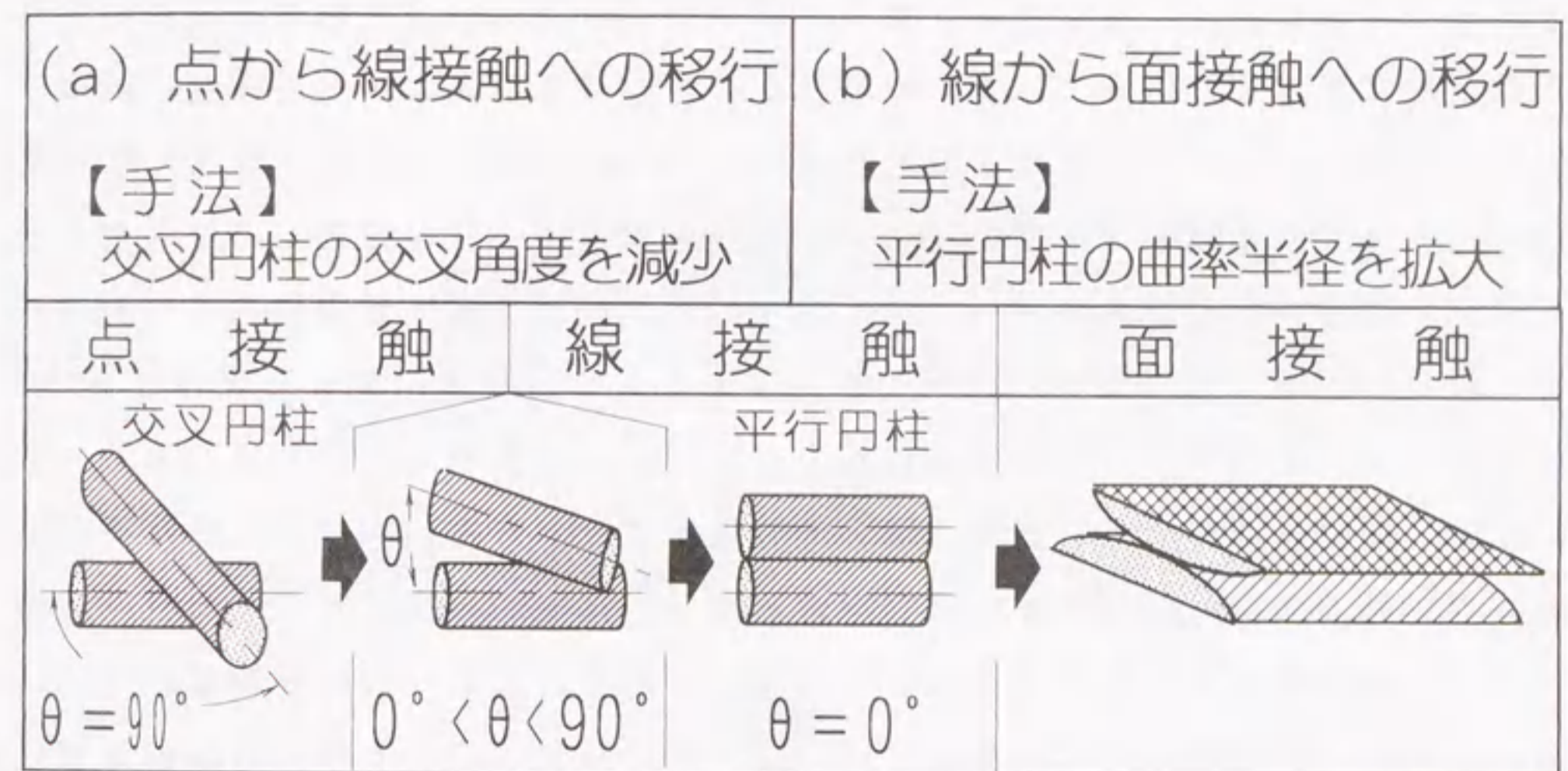


図 2. 17 各種接触形態の検討のため移行手法

2.8.2 線幅の極度な拡大に伴う面接触時の接触抵抗特性

実験は線長 L_c を50, 100, 250mmの3種類とし、線幅が2から50mmまで2mm毎に順次拡大した場合の接触抵抗を測定した。具体的には図2. 18に示すように線幅50mmで、長さが50, 100, 250mmなる各長方形の箱形電極を用いた。電極表面(箱形電極の底面)は鏡面仕上げを行い、金めっき処理を施した。その後、各線幅に応じた接触面以外の部分を電気絶縁するために樹脂シートを張り付けて種々の線接触を形成させた。

図2. 19は本実測から得られた接触抵抗 R と接触面積 S との関係を示したものである。図中の□, ○, △の各印は線長 L_c が50, 100, 250mmの各帯電極を用いた場合の実測値を示している。いずれの場合も接触面積の増大に伴って接触抵抗は低下している。しかしその様相は接触面積が数 100mm^2 の比較的小さい領域と数 1000mm^2 の大きな面積領域では異なっている。接触面積が小さい領域での接触抵抗はグラフ上において太い破線で示す傾きが-0.3の直線的な減少傾向にあり、前述図2. 16(c)に示した線接触の線幅が拡大する場合の特性と一致する状況にある。これは、接触面積が小さい場合には線接触の特徴が反映した特性といえる。

反面、接触面積が大きい領域では、太い破線で示す直線傾向から外れた様相を呈している。線幅の拡大が進行した場合、線長と線幅との比は小さくなり、線接触としての接触形態の特徴が消滅したと考えられる。これらの各実測値はグラフ上に実線で示す傾きが-0.5の直線にほぼ沿った点接触における様相に近似している。

一般に金属導体を用いた面接触子における接触抵抗の挙動は点接触とは異なった様相にあることが実測されている[9]—[12]。これは通常に用いられる金属導体の表面は理想的な鏡面状態ではなく、大小の起伏があるために微細な接触点が散在した接触状態に起因するものである。それに対して本実測では実験手法の特徴から、通常の金属同士の接触子では実現不能な一つの大きな接触面を形成させることができ、巨大化した点接触の接触抵抗特性の現れといえる。さらに、この接触面の大きさを接触子の断面積と同等にまで拡大すれば電流の集中は無くなる。

これらの実測より、接触面全域において通電路を形成する接触状態が得られるような理想的な面接触では電流集中に起因する接触抵抗は消滅することを実験的に示唆する結果が得られた。

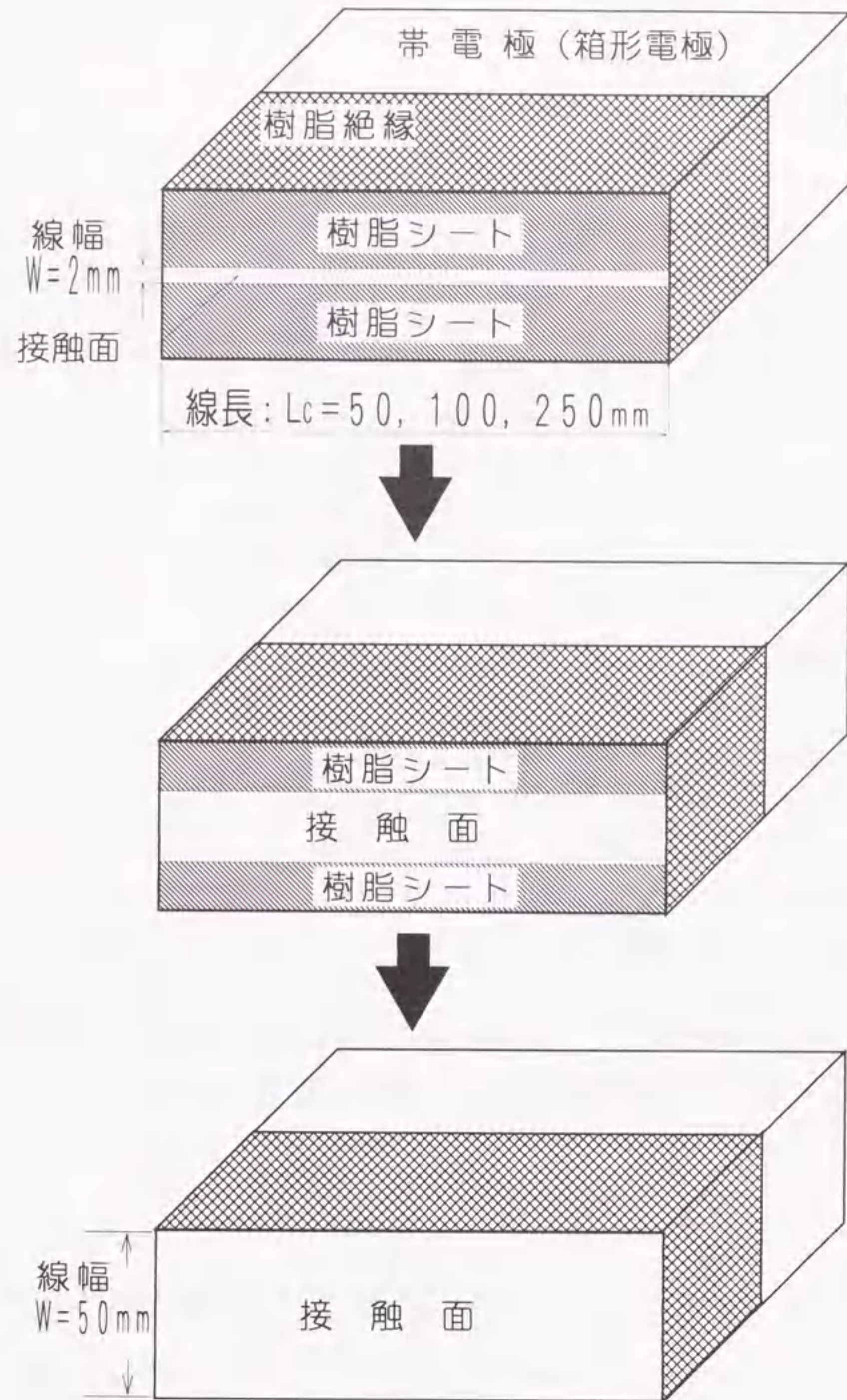


図2. 18 帯電極の形状 (底面)

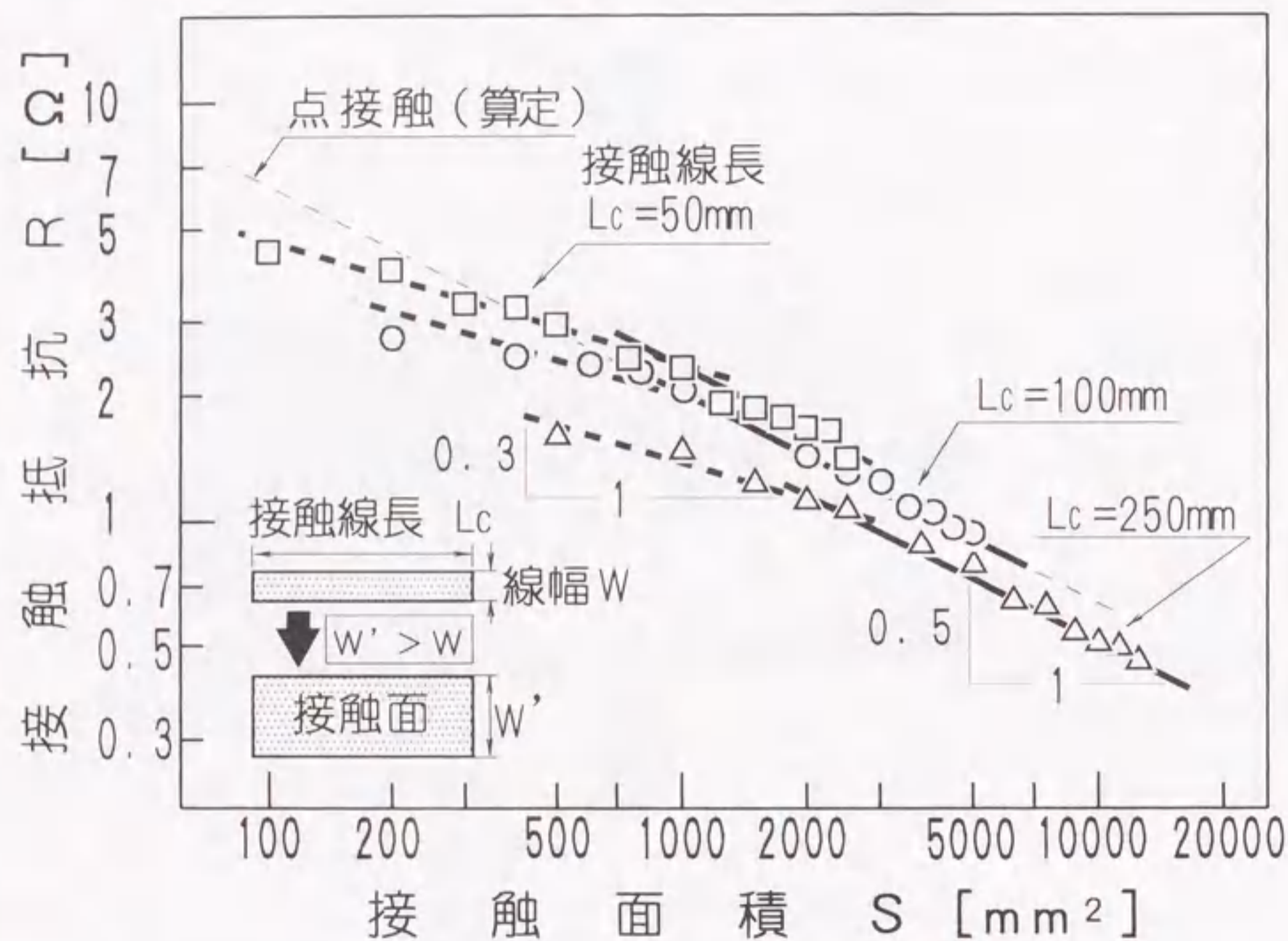


図 2.19 接触形態の移行に伴う
接触抵抗と接触面積との関係

2.9 結論

本章では、電解溶液を用いた実験手法によって巨視的な点接触や線接触の接触子モデルを用いて、その接触抵抗現象について解析した。各種接触形態と接触抵抗特性について考察し、以下のことが明らかになった。

(1) 半径2~5mmの各円柱電極1~3本を配置した接触点モデルによる実測において、接触抵抗が接触面積に対して1/2乗の反比例関係となり、電流集中に起因する接触抵抗の理論傾向に一致する結果が得られた。

(2) このことから、電解浴槽を用いた巨視的な接触子モデルによる実験手法が電流集中に起因する接触抵抗現象の解析に有効なものであることがわかった。

(3) また、複数個の接触点が相互に近接した場合の接触抵抗の挙動を実測し、数値特性との比較を行った。その結果、Holmによって示されている算定式は2点や3点接触のごく少ない接触点形成時には適用し難いことがわかった。

(4) 線接触形態において線幅の拡大を伴う接触面積に対する接触抵抗は接触面積の0.3乗に反比例する。反面、接触線長の伸展によって接触面積が増大する場合の接触抵抗は接触面積の0.7乗に反比例することがわかった。

(5) 複数の線接触を間隔において並列に配置した場合の接触抵抗は接触面積の0.7乗に反比例しており、線幅が一定で接触線長を伸展させた接触面積に対する接触抵抗特性と一致することがわかった。

(6) 線接触の線幅が極度に拡大した場合の接触抵抗は接触面積の0.5乗に反比例する点接触の接触抵抗特性となる。これは理想的な面接触では点接触の接触形態に帰着するすることが示唆される。

[第2章の文献]

- [1] 愛知, 佐土根, 宮地: 「電解槽を用いた接触点モデルの接触抵抗特性」, 1986年度電気関係学会東海支部連大, No.231 (1986)
- [2] H.Aichi, N.Tahara: "Analysis on the constriction resistance of the electric contact by the contact model using the electrolyte bath", Proc. 17th Intl. Conf. on Electrical Contacts, pp.1-6 (1994)
- [3] 愛知, 宮地: 「電解浴槽を用いた接触子モデルによる接触点の分布と接触抵抗特性に関する実験的考察」, 電学論文誌B分冊, Vol.116-B, No.10, pp.1292-1297 (1996)

- [4] 愛知, 宮地: 「線接触子の接触形態に伴う接触抵抗の実験的考察」, 電学論文誌 B 分冊, Vol.117-B, No.7, pp.1056-1060 (1997)
- [5] R.Holm: "Electric Contacts", 4th. Edit. Springer, New York, pp.11-16 (1967)
- [6] R.Holm: "Electric Contacts", 4th. Edit. Springer, New York, pp.21-23 (1967)
- [7] 愛知, 宮地: 「線接触の接触抵抗特性に関する基礎的解析」, 電気学会開閉保護研究会資料, SP-92-19, pp.11-18 (1992)
- [8] R.J.Roark: "Formulas for stress and strain", Mc.Graw- Hill, pp.287-289 (1954)
- [9] 大森, 大胡: 「点および線接触子の接触抵抗計算に関する考察」, 電学論文誌, Vol.85-8, No.923, pp.1402-1407 (1969)
- [10] 大森: 「開閉器具類の接触子の接触抵抗」, 電学論文誌 Vol.87-12, No.951, pp.2462-2467 (1967)
- [11] 愛知, 佐土根, 宮地: 「複数個の突起をもつ接触子の接触抵抗-荷重特性」, 1987年度電気関係学会東海支部連大, No.252 (1987)
- [12] 愛知, 佐土根, 宮地: 「分散した多数接触点の接触抵抗」, 1990年度電気関係学会東海支部連大, No.293 (1990)

第3章 光干渉法を用いた微細接触点の検出

3. 1 はじめに

球対球面, 球対平面あるいは二つの円柱の側面を直交させて加圧接触させた金属導体では微小な接触面積をもった接触点の一つ形成され, その接触面積は加圧力の増大とともに拡大する[1]。他方, 平面同士が接触した場合には複数の接触点形成し, 加圧力の増大によって各接触点の接触面積が増大するとともに接触点の数も増加すると予測される。第2章では, 微細な接触点を巨視的に形成させた接触子モデルを用いて種々の接触形態における接触抵抗の挙動について解明した。

一般に, 金属同士の接触部分に形成される接触点を直視することは容易ではなく, その実態については不詳な状況にある。一方, 球面ガラスの曲率半径を測定する方法の一つに, 球面ガラスを平板ガラスと接触させ, そこに光を照射させた場合に生ずるニュートンリングの干渉縞を利用する手法がある。また, 接触点の直視および接触機構解析手法の一つに, レーザ光を用いた光干渉による R.E. CuthrellとD.W. Tipping による方法がある[2]。しかしながら, 面同士の接触部分などに形成される微小な接触点の検出には至っていない。そこで, 面同士の接触部分の微細構造を明らかにする一つの手法として, 平板ガラスに金属導体を加圧接触させ, He-Neガスレーザ光の単色光源と白熱電球光の連続スペクトル光源を併用した光干渉法を用いた光学的手法を開発した[3], [4]。本章では, 接触点の検出手法ならびに接触点の観測例について述べる。

3. 2 実験手法

図3. 1は光干法によって接触部を観測する実験装置の光学系を示したものである。本実験では図のように接触子の一方を平板ガラスとし, 他方を接触子に用いられる種々の金属導体とした。レーザ光を用いた単色光, あるいは白熱電球光による連続スペクトル光を半透明ガラスを介して平板ガラス上方から照射する。

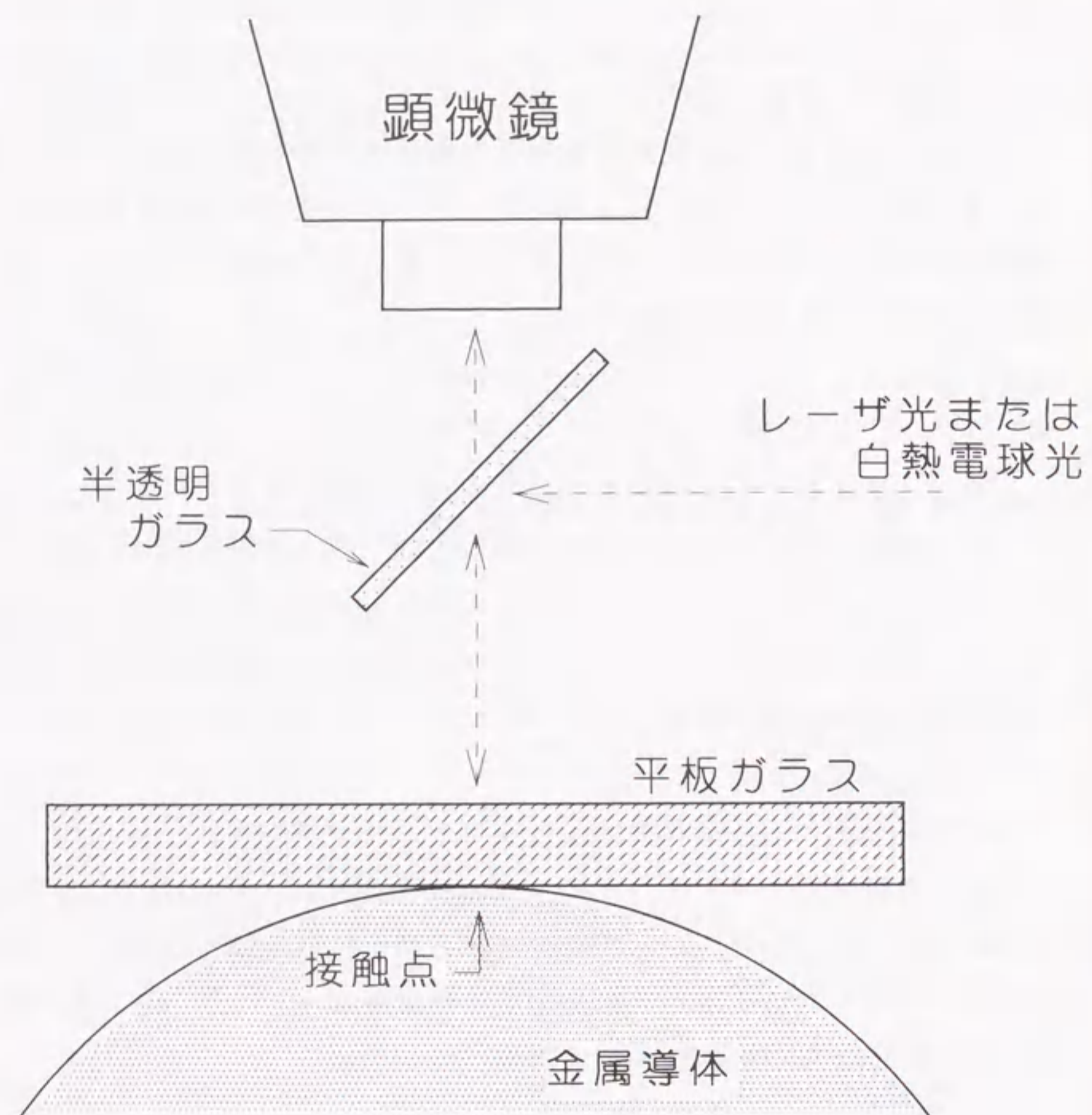


図 3. 1 実験装置の光学系

観測は半透明ガラス上方に設置した顕微鏡を用いて接触点近傍に現われる干渉像を直視する。

図 3. 2 は実験に供した天秤方式の加圧装置である。この場合、一方の平板ガラスを装置台に固定し、他方の金属導体を天秤の右端に取り付ける。天秤の左端にある水槽の水量を調節して金属導体を平板ガラスに加圧接触させる。これにより 4.9~24.5N まで連続的に接触荷重を変化させることができ、極めて安定な観測が可能となる。

3. 3 レーザ光による単色光源を用いた観測

3.3.1 点接触の観測

平面对球面、球面对球面あるいは交叉円柱などで構成される接触子の接触部は基本的には円形の微小な接触面積をもつ一つの接触点を形成する。そこで、金属導体に真球度の高いペアリングの鋼球(曲率半径:10.02mm)を平板ガラスに接触させ、平面对球面にできる点接触についてレーザー光を用いて接触部に現われる干渉像の様相を観測した。レーザー光としては、波長 632.8nm の He-Ne ガスレーザー光源を使用した。

図 3. 3 (a) は 4.9N の接触荷重で加圧させた場合に観測された干渉像の一例であり、干渉像は環状の干渉じまとなっている。また、同図 (b) はその接触状態の想像図である。平板ガラスと鋼球とが接触した場合、平板ガラスのヤング率は鋼球の値に比べて 1/3 程度と小さいので、接触点は平板ガラスの変形によって形成されるものと推定される。以下、干渉像の出現機構を図 (b) を用いて述べる。

平板ガラス上方から照射された光 B_1 は、その下面内側で反射する B_1 と、平板ガラス下面を通過し、鋼球(金属導体)の表面で反射する光 B_2 との二種類の反射光をつくる。これらの反射光は互いに干渉を起こすが、ガラス下面と金属導体の表面との空けき長 G が

$$G = (2n + 1) \lambda / 4 \quad \dots \dots \dots (3. 1)$$

を満足する位置では、 B_1 と B_2 との反射光は互いに強め合って干渉強度が最大となる。

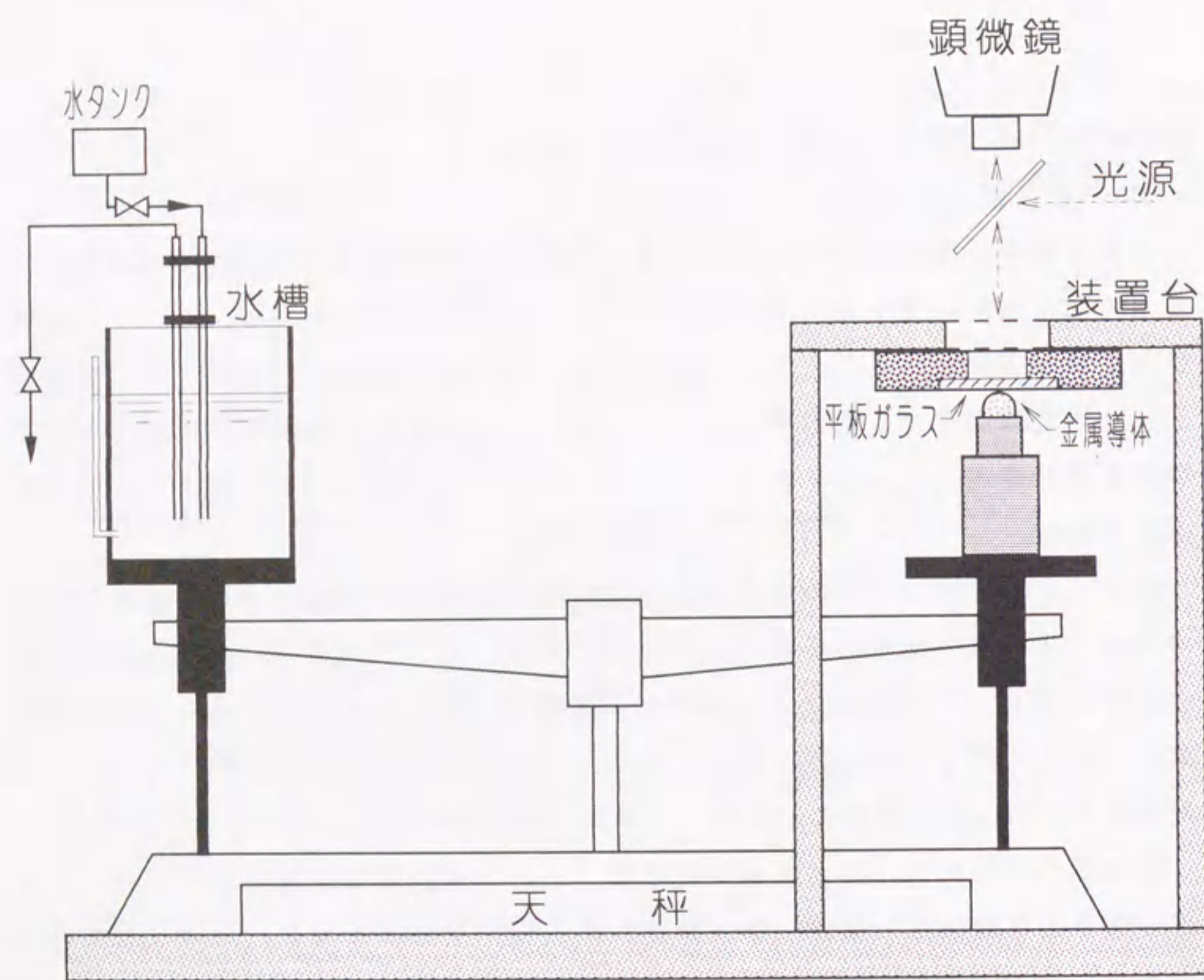


図 3. 2 接触部への加圧装置

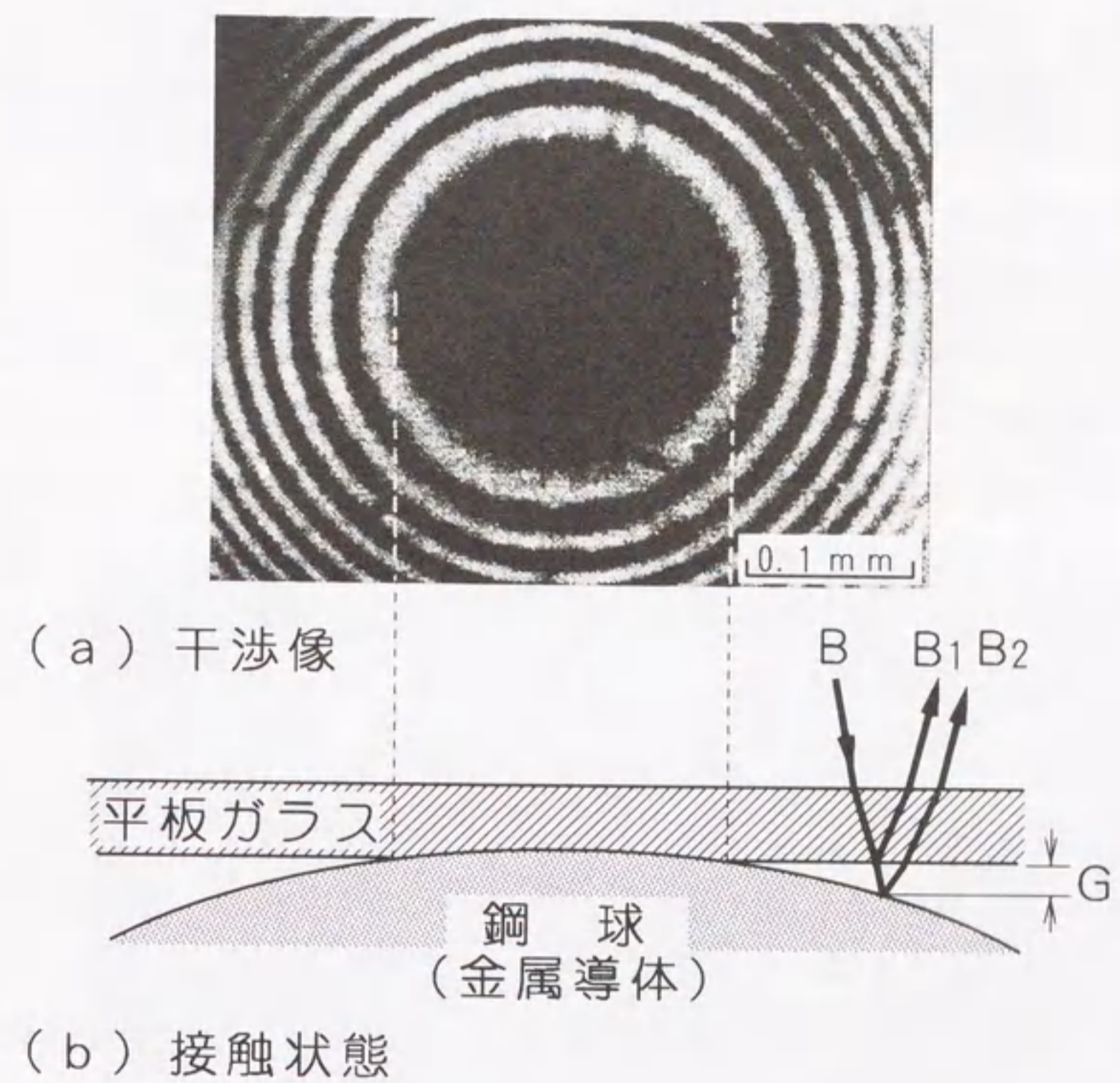


図 3. 3 平板ガラス対鋼球の点接触における干渉像
(接触荷重 : 4.9 N)

また、

$$G = 2n\lambda / 4 \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

であるような空げき長の位置では、 B_1 と B_2 との光が互いに弱め合うので干渉強度は最小となる。ここで、 λ は観測に用いる光源の波長であり、 n は0を含む正の整数値である。したがって、観測される干渉像は(3.1)式および(3.2)式に対応する空げき長の位置に沿った明暗のしま模様となる。

金属導体が平板ガラスに接触している部分では、空げき長 G が0であるので、(3.2)式において $n=0$ に対応し、干渉強度は最小となり、暗い像を呈する。他方、接触していない部分では $\lambda/4$ の奇数倍の空げき長に沿って明るいしま、 $\lambda/4$ の偶数倍の空げき長に沿って暗いしまが交互に現われる。

それゆえ、一つの接触点を観測すれば、図(a)にみられるように、暗い像をとりまく環状の干渉じまが現われ、このしま中央の暗部を接触点として確認できる。以下、このような干渉じまを干渉環という。したがって、干渉環中央に現れる暗部の大きさから接触点の形状や面積を計測することができる。なお、金属導体が平板ガラスに接触していないときには、後述 3.3.2節のような干渉環の中央が明るい像を呈する場合と暗い像となる場合が存在する。

3.3.2 平面接触の観測

通常、平面接触子において互いの面が実際に接触する部分は、面全体の大きさに比べてごく一部分にすぎない。これは接触子表面の細かい凹凸に起因しており、突起が互いに接触することにより接触点が散在する。このような接触部を光干渉法によって観測すれば、接触点の位置するところに前述の干渉環が現われ、接触点の数、大きさ、位置などの推定ができる。

図3.4(a)は電磁接触器に用いられている銀合金の平面接触子の表面を金属顕微鏡によって観測したものである。接触子の表面は凹凸のある状態となっており、このような面同士が接触したときには面全体の大きさに比べてごく一部分が接触するにすぎないと推察される。しかしながら、こうした表面観測では凹凸の状態を定量的に測定することは困難である。

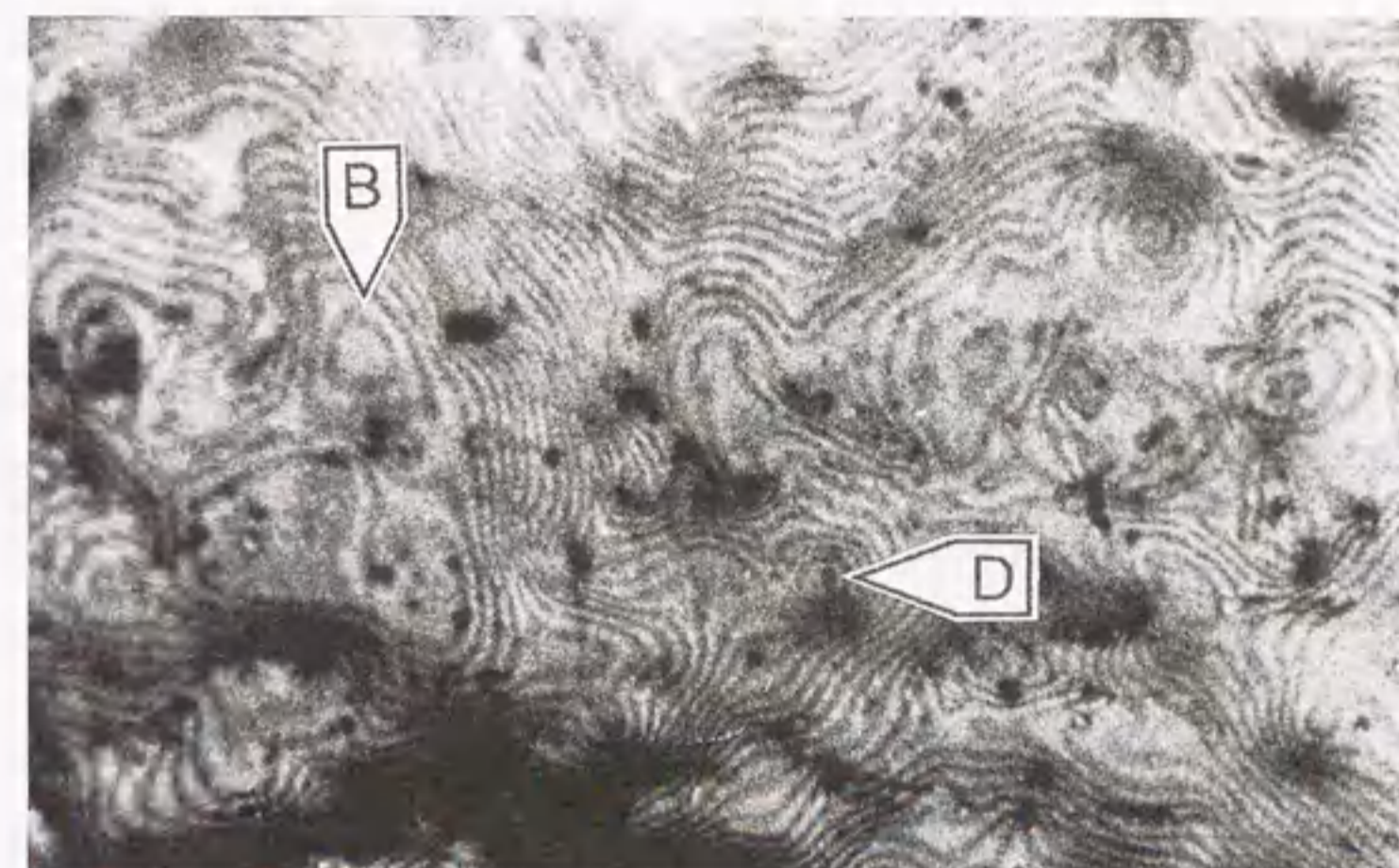
そこで、この接触子を平板ガラスに接触させ、同一場所をレーザー光によって観

1 mm

接触荷重 : 5.9 N



(a) 金属顕微鏡による表面像



(b) 干渉像

図 3. 4 銀合金の平面接触子の表面像

測した干渉像を同図(b)に示す。干渉像は複雑な模様干渉じまで示され、その様相は接触子表面の凹凸の状態を反映している。この干渉像には数個の干渉環が現われており、これによって接触点を検出することができる。なお、所々にみられる暗黒の部分は試料表面にある比較的深いくぼみである。

干渉環には二つの形態があり、図(b)においてBで示したように干渉環中央が明るい像を呈する場合と、Dで示したように暗い像を呈する場合とがある。前者では干渉環中央の干渉強度は極大となっている。これは(3.1)式の場合に相当し、突起の頂点と平板ガラスとの空げき長が $\lambda/4$ の奇数倍となる場合である。すなわち、空げき長は少なくとも $\lambda/4$ 以上あり、接触点に現われる干渉環とは区別することができる。

他方、干渉環の中央が暗い像を呈するDでは、環中央の干渉強度は極小な状態にあり、(3.2)式の場合に相当する。これは突起が平板ガラスに接触している場合と空げき長が $\lambda/4$ の偶数倍で離れて位置する場合のどちらかの状態にある。したがって、この状態からは正確に接触点を判別することは困難な状況にある。

3.4 白熱電球光を併用した接触点の確認

3.4.1 検出手法

レーザ光を用いた干渉法では、平面接触の観測において現われる干渉環は必ずしも接触点に対応しない。そこで、これらの干渉環の中から接触点に対応するものと、それ以外のいわゆる接触していない突起によって現われるものとを区別する必要がある。そこで、白熱電球光による干渉法を導入した[3]。

レーザ光を用いた場合には顕著な干渉性があるため、後述図3.6のごとく高次の干渉じまで明暗の強度差は大きく鮮明である。これに対して波長の異なる多数の光が同時に干渉を起す白熱電球光を用いた場合には、明暗の強度差は次数の増加に伴って小さくなり不鮮明となる。したがって、レーザ光を用いた場合に現われる干渉環の大部分は白熱電球光を使用した場合にはその大半が消滅し、ごく少数の干渉環のみが残る。一般に連続スペクトル光によって得られる干渉強度は(3.3)式で示される[5]。ここに、 $E(\lambda)$ は光源の分光放射強度、 $S(\lambda)$ は受光部の分光感度であり、 G は空げき長である。

$$I = \int E(\lambda) S(\lambda) \sin(2\pi G/\lambda) d\lambda \quad \dots \dots (3.3)$$

そこで、連続スペクトル光として、白熱電球光(100V, 200W)を使用した場合の干渉強度を求めるため、400~680nmの波長域で5nm間隔の57種類の光の重ね合せとして、(3.3)式を次の形で計算した。

$$I = \sum_{\lambda=400}^{680\text{nm}} E(\lambda) S(\lambda) \sin(2\pi G/\lambda) \Delta\lambda \quad \dots \dots (3.4)$$

ただし、 $E(\lambda)$ には白熱電球光の基準である標準白熱電球(A光源)の分光放射強度(比エネルギー)のJIS値[6]を用い、 $S(\lambda)$ には写真撮影に使用したフィルム(KODAK・TRIX-pan)の分光感度を用いた。図3.5にフィルムの分光感度、標準白熱電球光の比エネルギーおよびフィルムに感光される合成分光感度を示す。なお、これより長波長域では写真感度、短波長域では白熱電球光の放射強度が極めて弱いことから、400nm以下と680nm以上の領域を除外しても結果に大差がないものとして取り扱った。

図3.6は(3.4)式から求めた白熱電球光による干渉強度について、最大値を基準として表わした相対強度分布である。また、図中の破線はレーザ光を用いた場合の干渉強度である。いずれも強度は周期的に変化しており、その極大値が明るいしまをつくり、極小値は暗いしまとして観測される。白熱電球光による干渉強度の極大値と極小値との差は空げき長の増大に伴って小さくなり、干渉強度が一定値に収れんしている。他方、レーザ光の場合には干渉強度の極大値と極小値との差は常に一定で大きい。これはレーザ光によってつくられる干渉じまが常に鮮明であるのに対して、白熱電球光の場合には空げき長の増大に伴って干渉じまが不鮮明となることを示している。なお、図3.6に示す白熱電球光における相対強度の極大あるいは極小値の各次数と空げき長の値より(3.1)式または(3.2)式を用いて白熱電球光を単色光源と仮定した場合の波長を算出したところ、白熱電球光によってつくられる干渉じまは波長が620~650nmの単色光において現れるしまの周期に該当しており、空げき長の小さい所に現われる干渉じまは、波長が632.8nmのレーザ光によるしまに類似したものとなる。

図3.7(a)は平板ガラスに球面ガラス(曲率半径:60.5mm)を9.6Nの接触荷

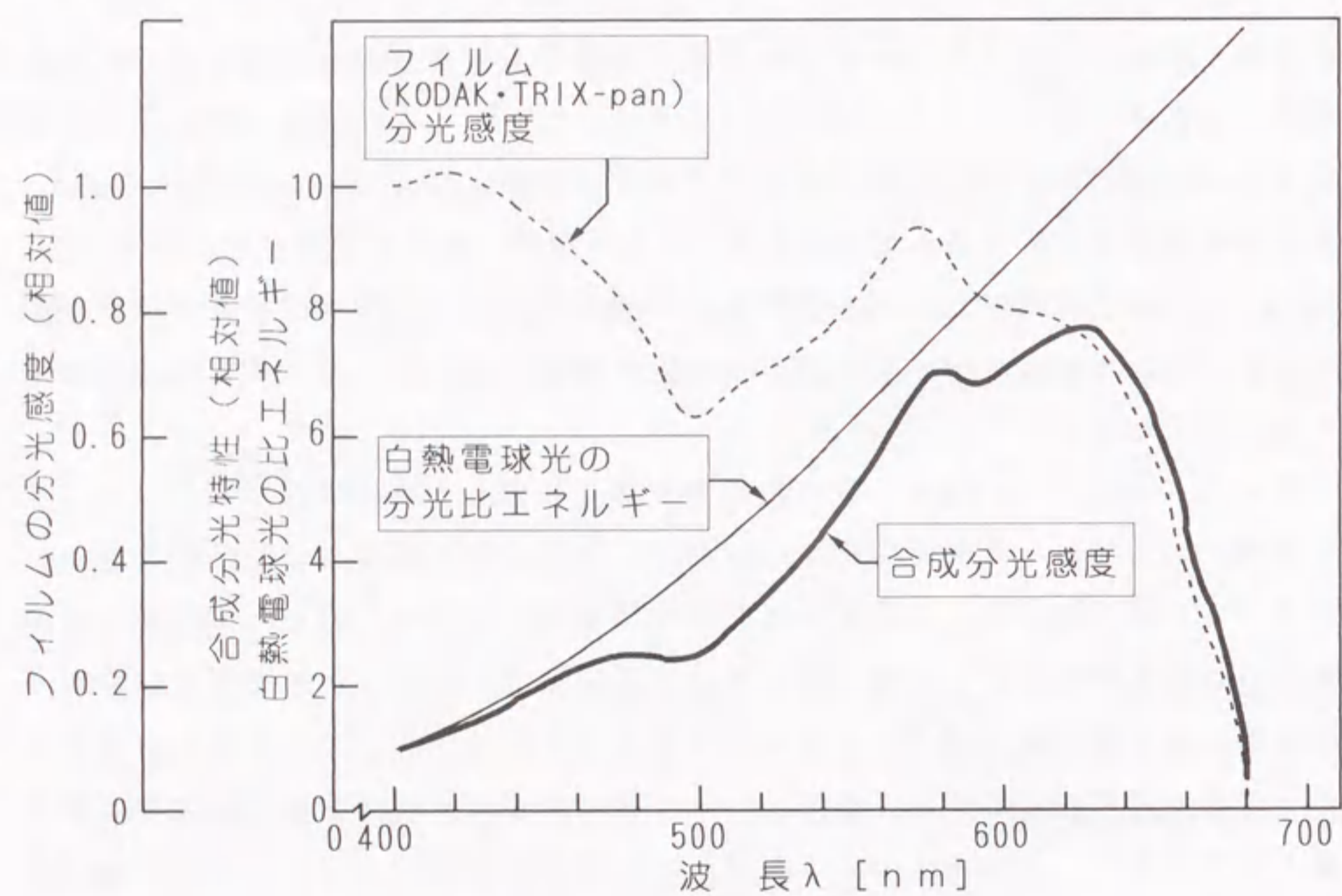


図 3. 5 フィルムおよび光源の分光特性

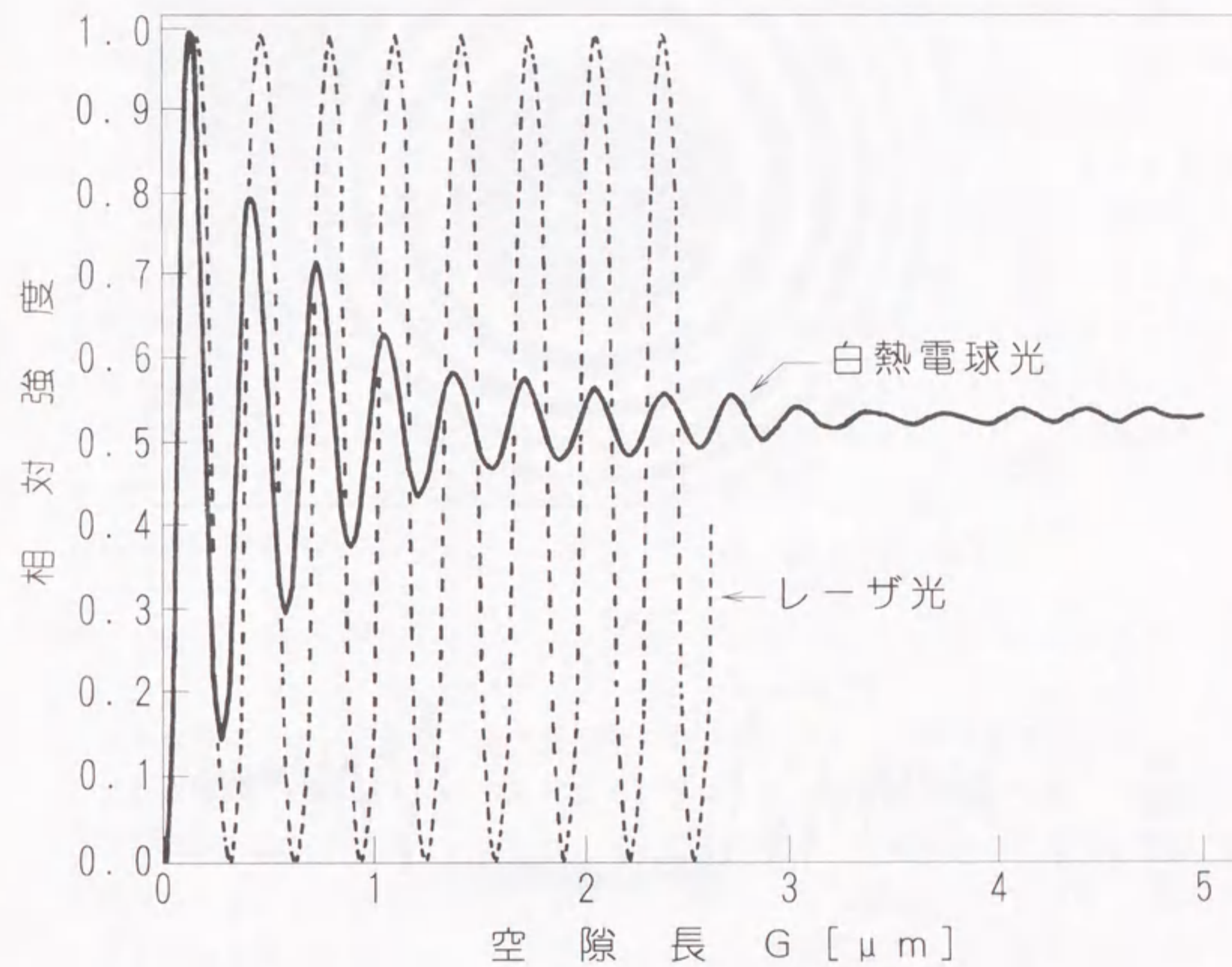
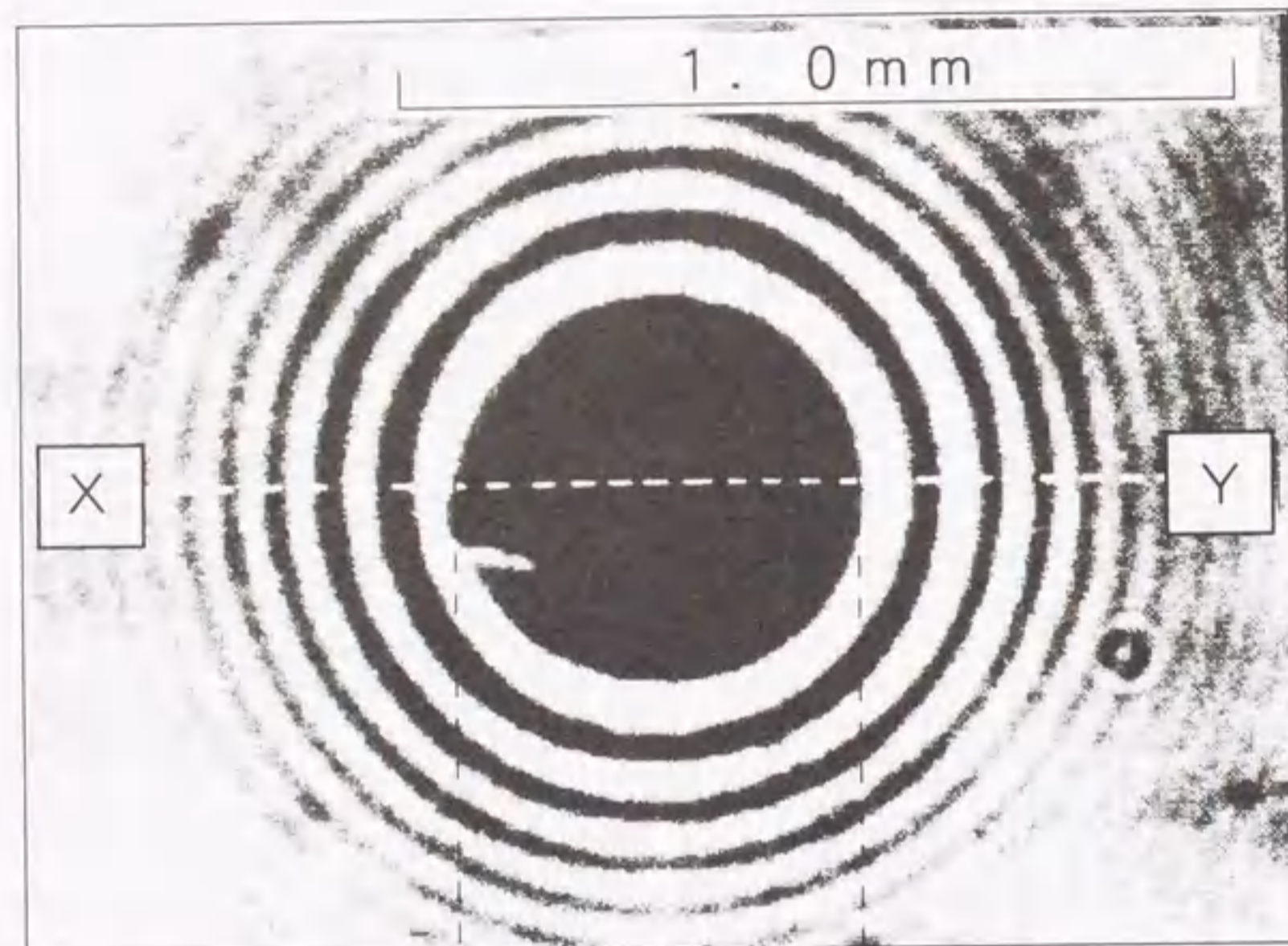
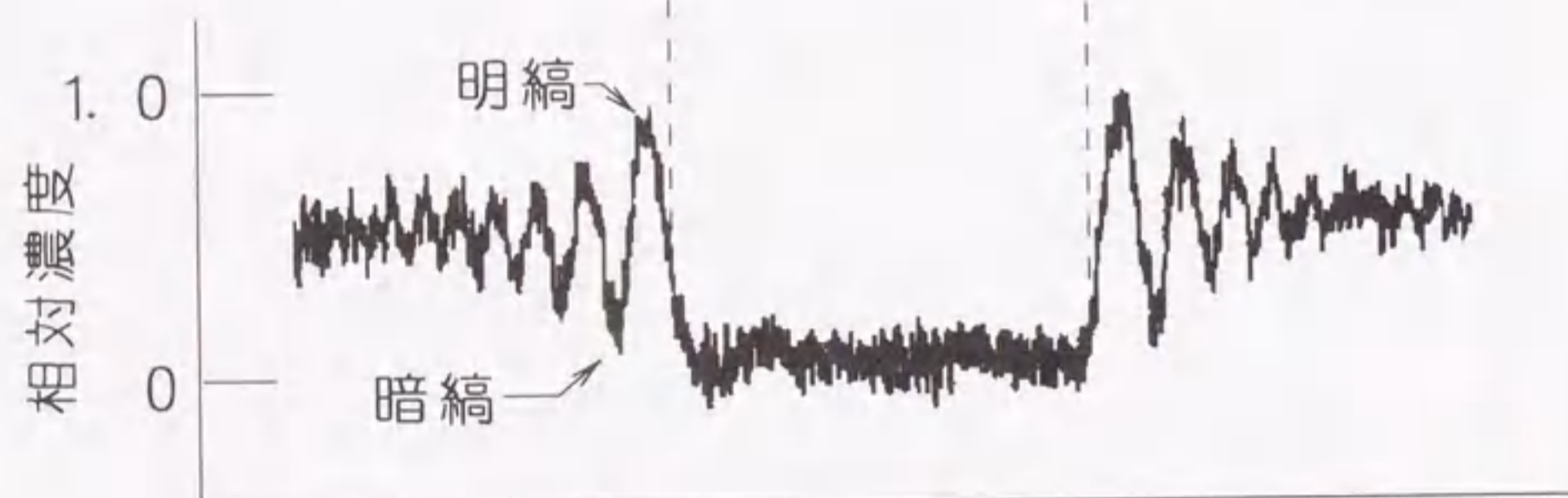


図 3. 6 白熱電球光による干渉強度分布



(a) 干渉像



(b) 干渉じまの濃度分布 (X-Y 線上)

構成：平板ガラス対球面ガラス (曲率半径：60.5 mm)
 接触荷重：9.8 N

図 3.7 白熱電球を用いた干渉像と濃度分布

重で接触させ、白熱電球光を用いて観測した干渉像である。同図(b)は図(a)に示したX-Y線上においてマイクロフォトメータを用いて測定した画像の濃度分布である。図中に暗縞と示した濃度の極小の所は、写真画像で暗いしまとなり、明縞と示した極大の所では明るいしまとなる。画像濃度の極大値と極小値との差は干渉環中央から遠ざかるに従い小さくなっており、図3.6で示した干渉強度分布と類似した様相を呈している。

写真撮影に使用したフィルムの感光濃度特性を用いて図3.6で示した干渉強度を画像の相対濃度に換算した。その計算値と図3.7(b)の実測値とを比較したものが図3.8である。明縞に対応する極大値と暗縞に対応する極小値との濃度差は干渉じまの次数の増大に伴って実測値および計算値のいずれも急減する傾向を示している。

しま次数 n の干渉じまに対応する画像濃度の極大値を γ_{2n+1} とし、極小値を γ_{2n} とし、(3.5)式で表わされるような干渉じまの鮮明度 H を図3.8で示した画像の相対濃度から求めた。

$$H = \frac{(\gamma_{2n+1} - \gamma_{2n})}{(\gamma_{2n+1} + \gamma_{2n})} \dots \dots \dots (3.5)$$

白熱電球光によって現われる干渉じまの鮮明度は図3.9の実線で示すようにしま次数の増大に伴ってほぼ指数関数的に減衰している。 $n=1$ の干渉じまにおける鮮明度 H は0.79であり、 $n=0$ の場合に比べて20%程度減衰しており、やや不鮮明な干渉じまとなる。さらに、 $n=2$ のとき $H=0.43$ 、 $n=3$ のとき $H=0.28$ と鮮明度が急減しており、 $n>10$ では $H \leq 0.01$ となり干渉じまはほぼ消滅した状態として観測される。

したがって、白熱電球光によってできる干渉じまのうち、 $n>10$ の干渉じまをつくる空げき長は $3 \mu\text{m}$ 以上に相当するので、平板ガラスと突起頂点との空げき長が $3 \mu\text{m}$ 以上あるような所では干渉環が現れない。

そこで、白熱電球光において現れる干渉環をレーザ光によるものと比較すれば、接触状態にない突起によって現れる干渉像は不鮮明なものとして観測される。反面、レーザ光によって得られる干渉像と同程度に鮮明であれば、その干渉環中央の暗い像を一つの接触点として検出することができる。

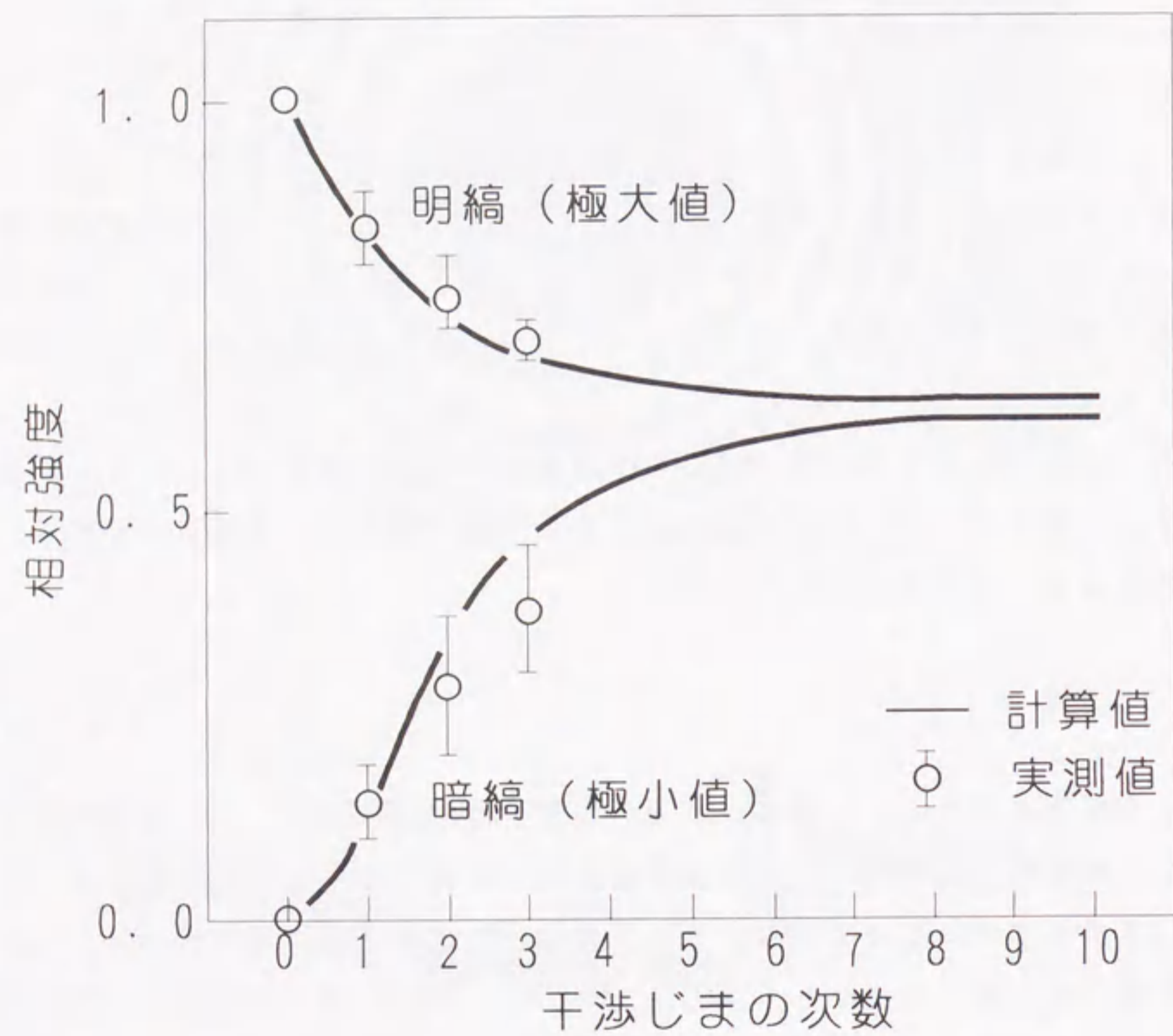


図 3. 8 白熱電球光を用いた干渉じまの次数と画像濃度との関係

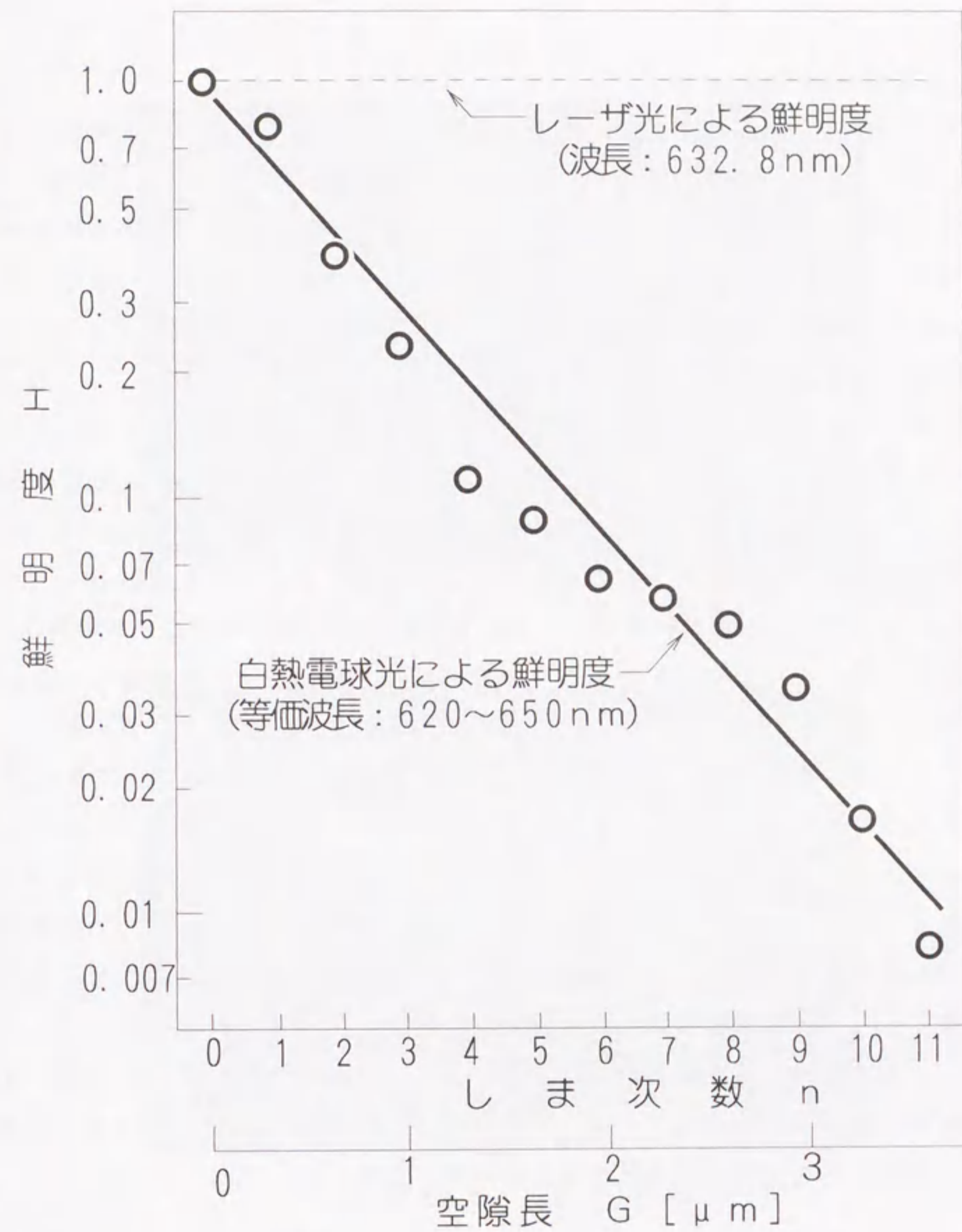


図 3. 9 干渉像の鮮明度

3.4.2 接触点の確認

図3. 10は二つの突起ができるように加工したアルミニウム導体と平板ガラスとの接触において得られた干渉像である。図(a)のレーザ光による干渉像では、それぞれの突起の位置する所において、図中にA, Bで示した二つの干渉環が現われており、その中央部分はいずれも暗い像となっている。しかし、前述のようにこれらの干渉環が接触点に対応するか否かは区別できない状況にある。なお、写真中央の暗黒部分は二つの突起の谷の部分である。

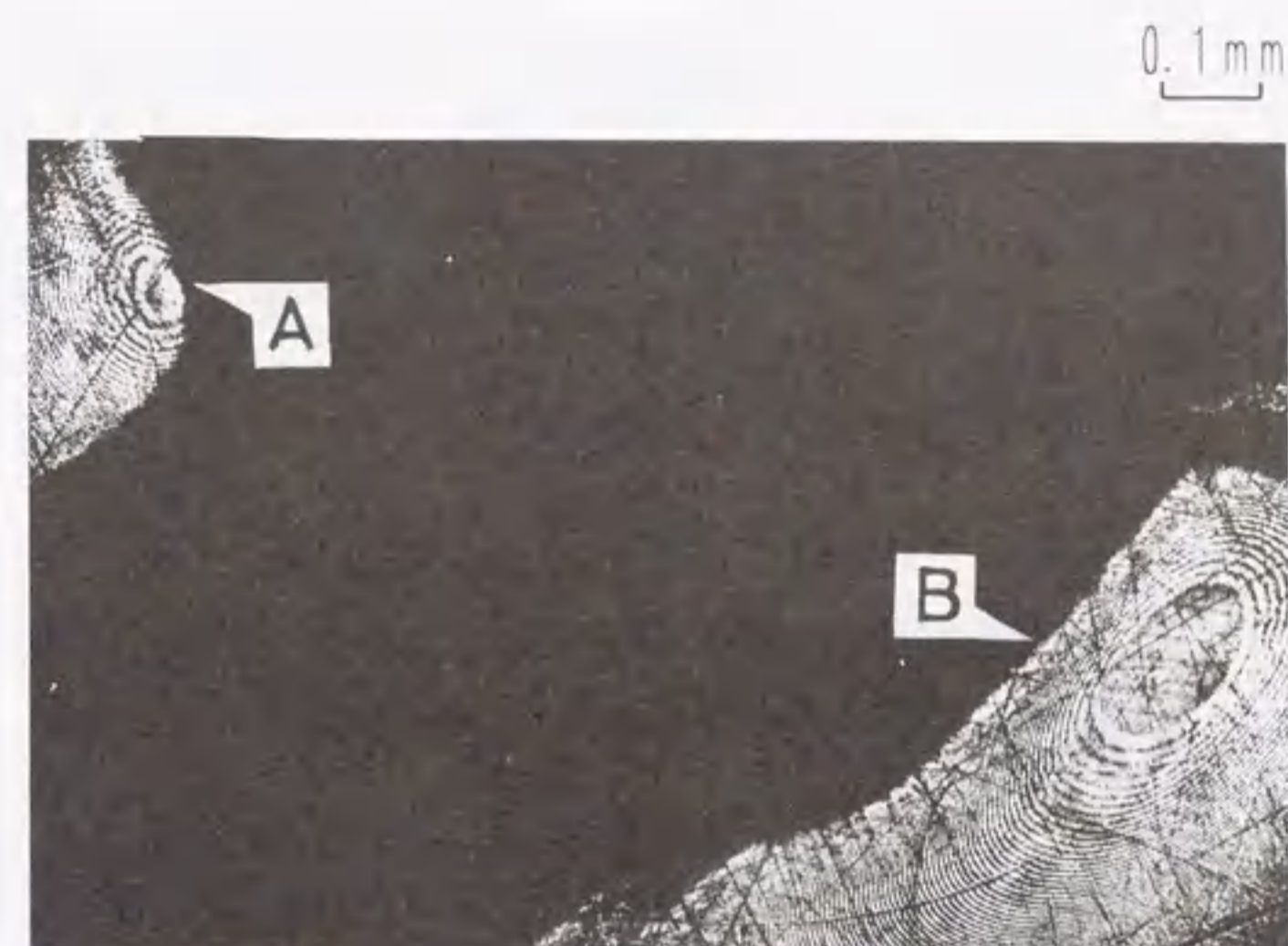
そこで、白熱電球光による干渉像を図(b)に示す。その結果を比較すればAで示した干渉環は図(b)では、完全に消滅している。他方、干渉環B'の中央の暗い像をとりまく干渉じまは、図(a)の干渉環Bと同程度に鮮明である。それゆえ、この干渉環中央の暗い像を一つの接触点として確認することができる。

また、アルミニウムの粗面導体を平面ガラスに接触させて観測した別例を図3. 11に示す。図(a)はレーザ光による干渉像であり、図(b)は白熱電球光によるものである。図(a)ではA, B, Cで示す中央が暗い像を呈する干渉環が散在しており、その周囲に入り組んだ模様の干渉じまが現われている。なお、干渉じまの現われていない暗黒の部分は導体表面の比較的大きなくぼみである。他方、図(b)の干渉像では図(a)において現われた干渉じまのほとんどは消滅しており、干渉環B, Cに対応する干渉環B', C'のみが残っている。この二つの干渉環はいずれも比較的鮮明であるとともに環中央が暗い像を呈していることから接触点に対応した干渉環である判断できる。

この二つの観測例から明らかなように、レーザ光を用いた観測のみでは、困難な接触点の検出が白熱電球光を用いた観測を併用することによって容易となり、接触点の数、大きさなどの定量的測定が可能となる。

3.4.3 本観測手法の応用例

本観測手法の応用例として、アルミニウムの粗面導体と平板ガラスとの平面接触において接触荷重を変化させた場合の観測結果を図3. 12に示す。図(a)~(h)は接触荷重を0.98Nから19.6Nまで変化させたもので、左側の写真はレーザ光により観測した干渉像であり、右側は白熱電球光を使用したものである。レー

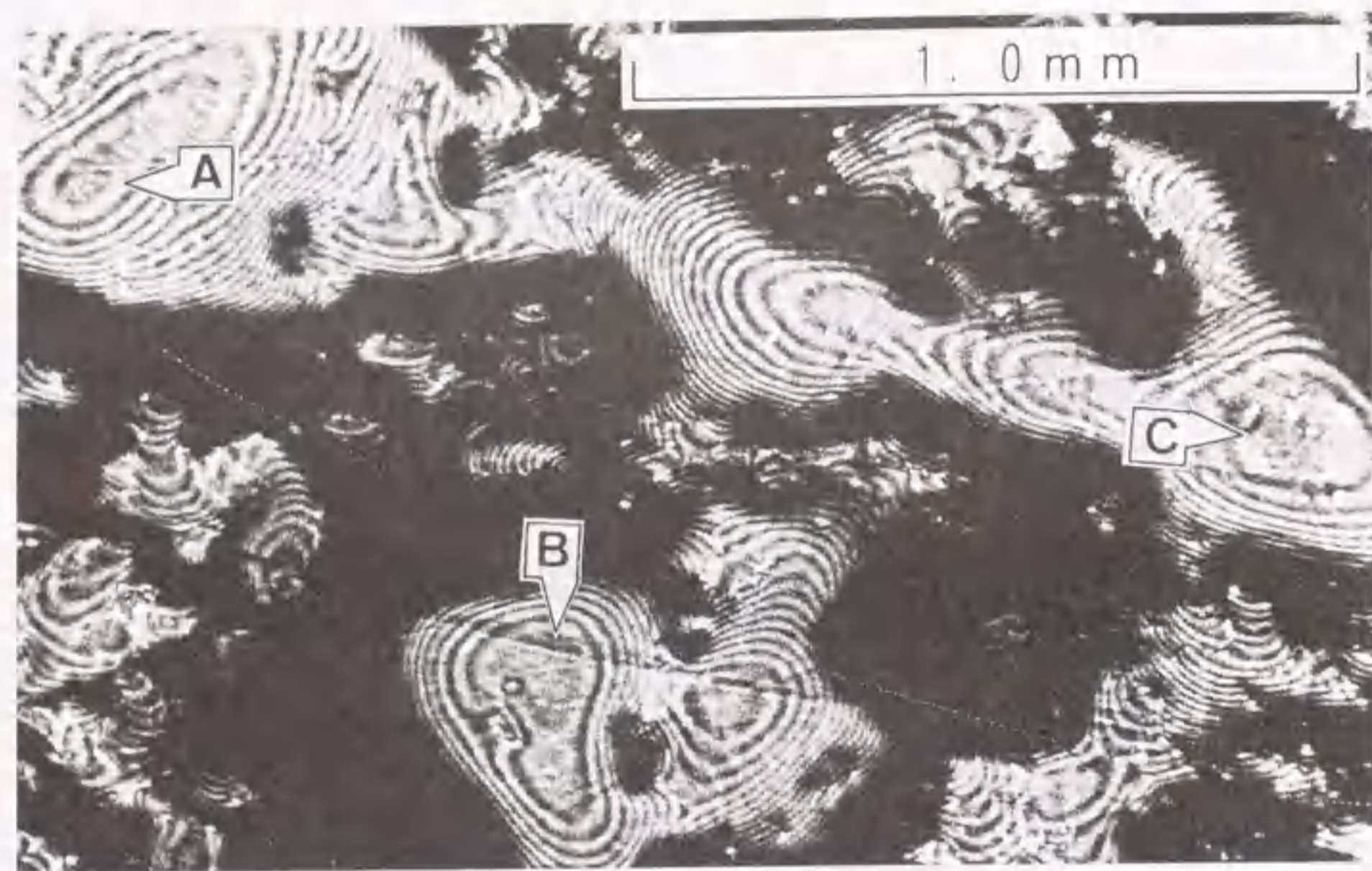


(a) 単色光による干渉像

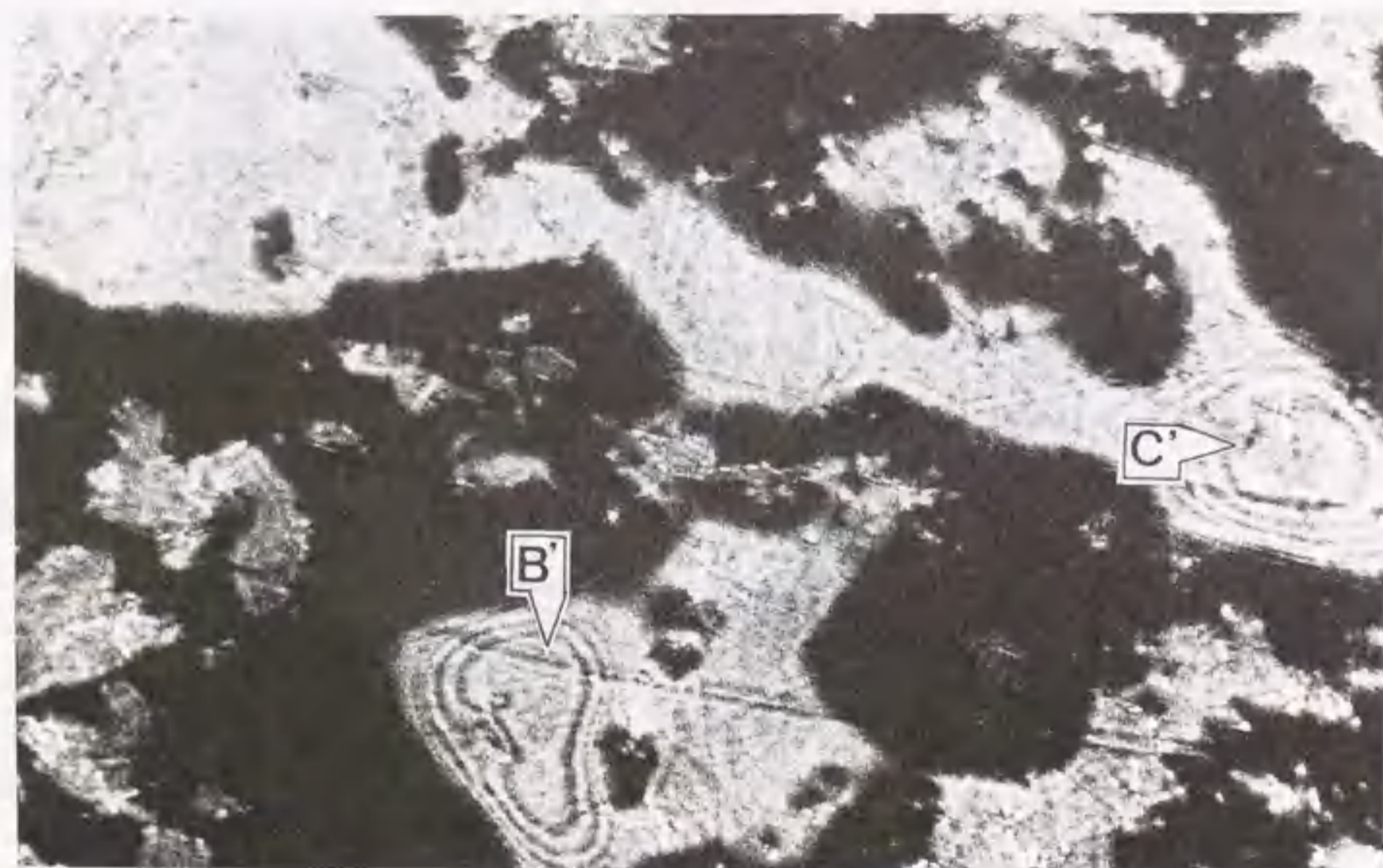


(b) 連続光による干渉像

図3. 10 平板ガラス対アルミニウム導体による観測例



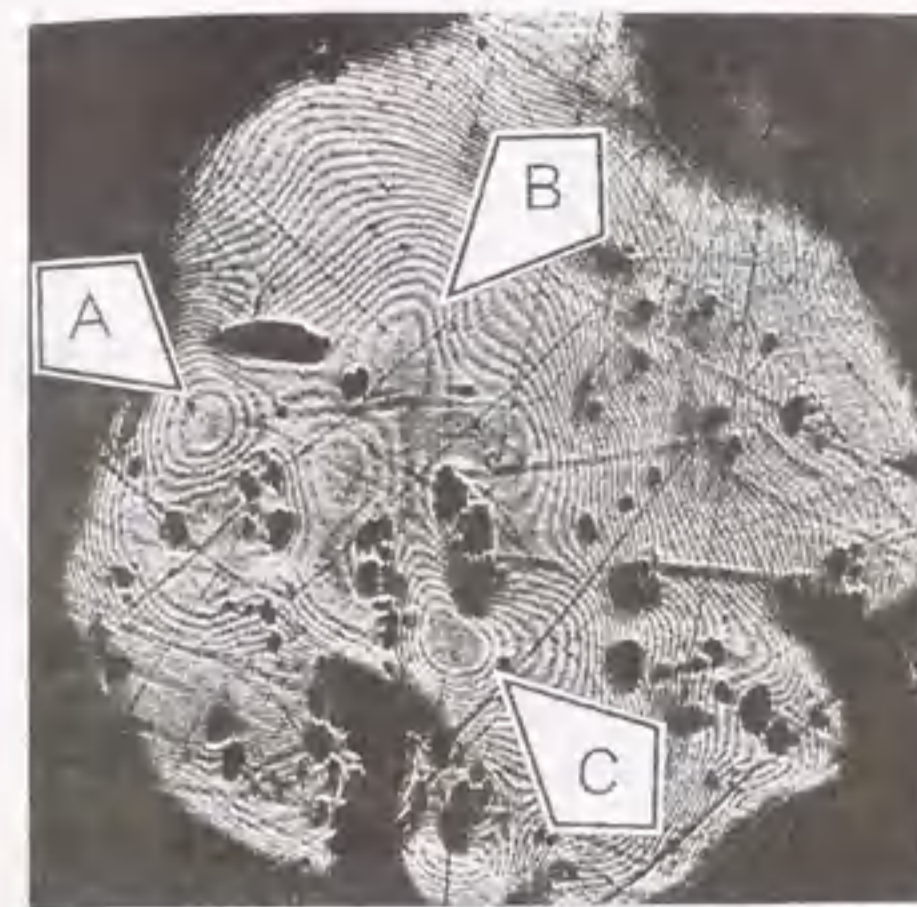
(a) レーザ光による干渉像



(b) 白熱電球光による干渉像

図 3.11 平板ガラス対アルミニウム粗面導体における観測例 (接触荷重: 1.96 N)

レーザー光



白熱電球光



(a) 接触荷重: 0.98 N



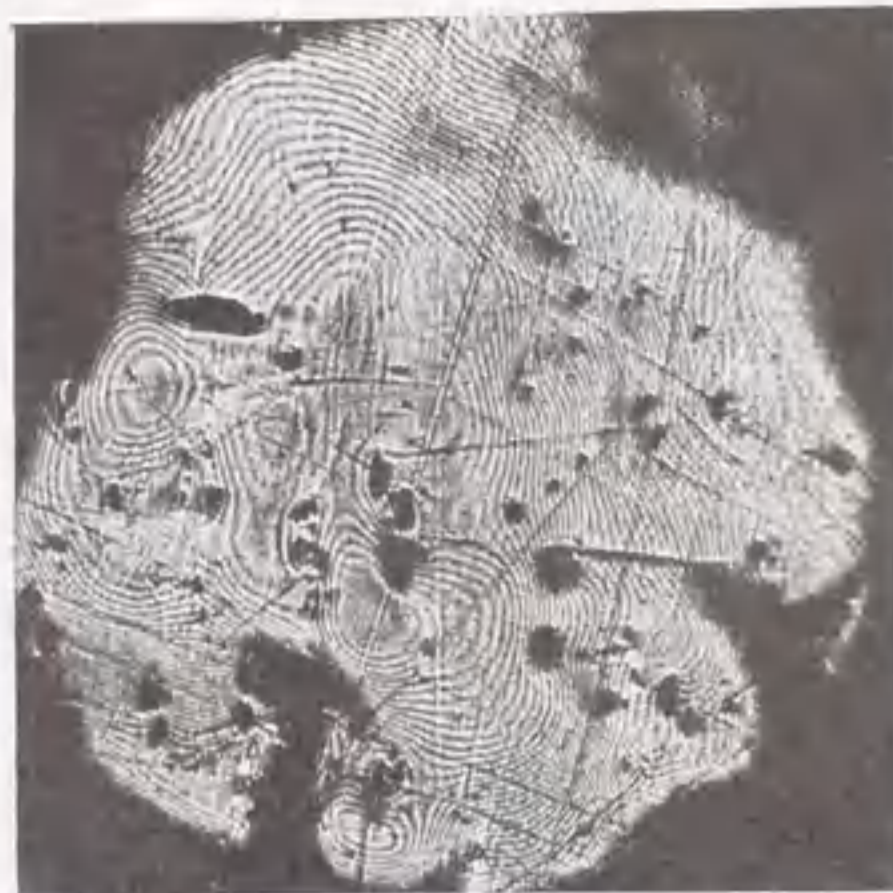
(b) 接触荷重: 1.96 N



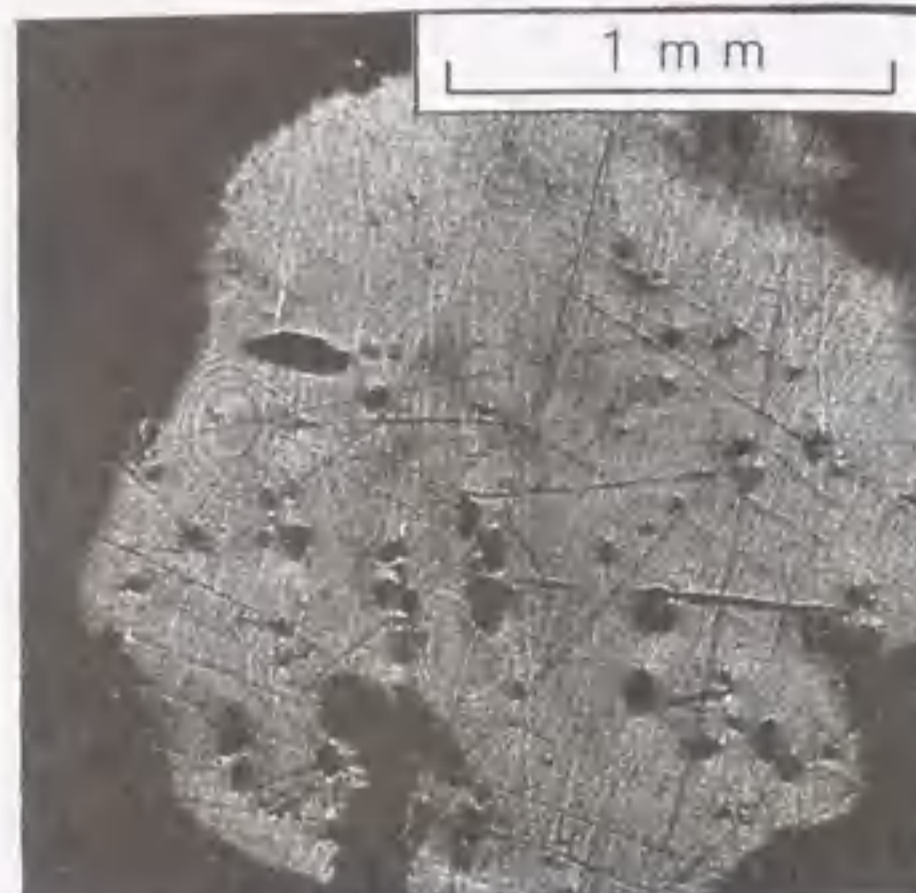
(c) 接触荷重: 2.45 N

図 3.12 平板ガラス対アルミニウム粗面導体を用いた荷重変化による観測例

レーザー光



白熱電球光



(d) 接触荷重: 2.94 N



(e) 接触荷重: 3.43 N



(f) 接触荷重: 5.39 N

図 3.12 平板ガラス対アルミニウム粗面導体を用いた荷重変化による観測例 (続き)

レーザー光



白熱電球光



(g) 接触荷重: 8.82 N



(h) 接触荷重: 19.6 N

図 3.12 平板ガラス対アルミニウム粗面導体を用いた荷重変化による観測例 (続き)

ザ光を用いた干渉像はいずれも複雑な様相を呈しており、アルミニウム粗面導体のでこぼした表面状態を反映している。その中でも干渉環の位置する部分は導体表面に散在する突起に対応しており、その一部は平板ガラスと接触して接触点を形成していると予測される。

図(a)に示した三つの干渉環A、B、Cに着目する。いずれの干渉環も環中央は暗い像となっており、接触点であることを確認するためには白熱電球光による観測が必要な状況にある。

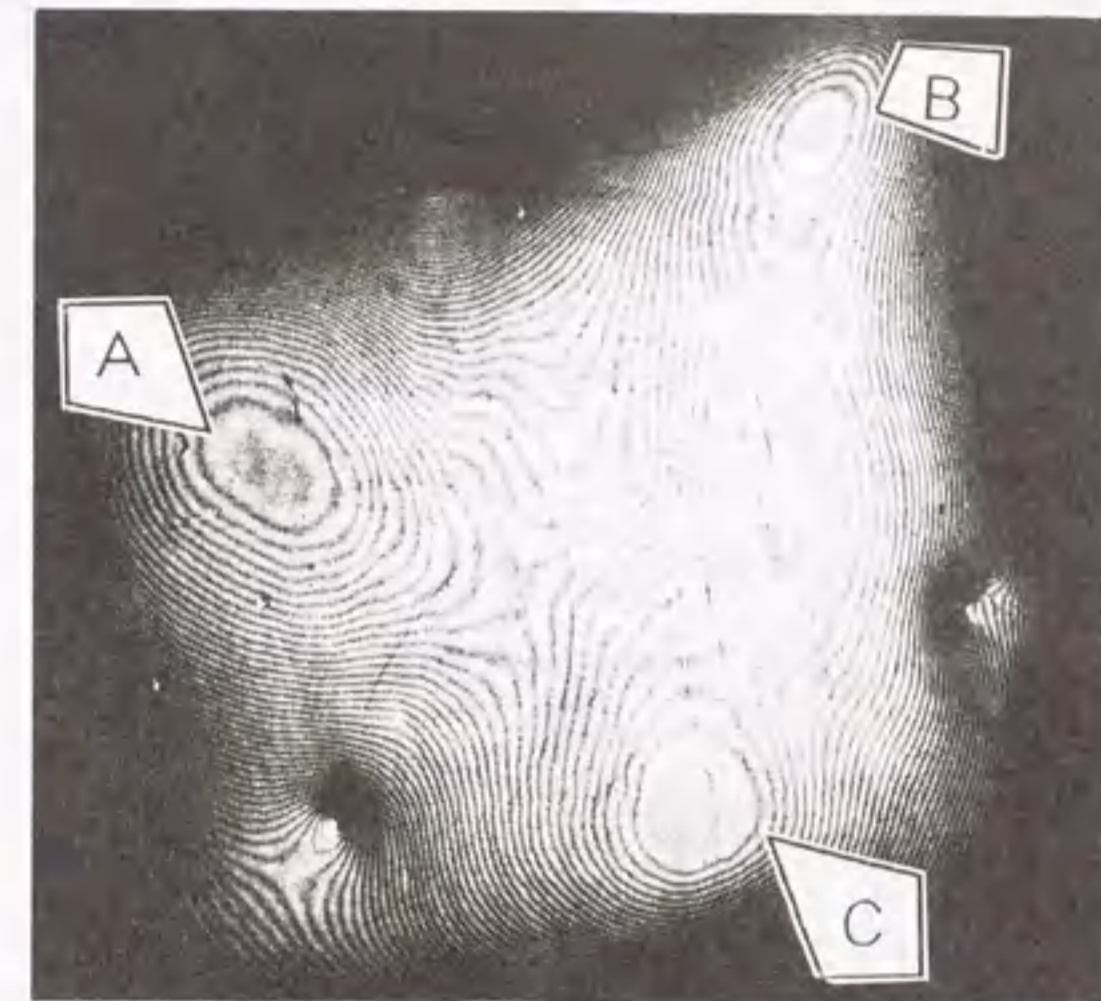
白熱電球光による観測を行った場合には干渉環Bは消滅している。したがって残る干渉環Aおよび環Cが接触点に対応した干渉環と予測される。しかし、干渉環Aについて、白熱電球光による観測の場合にはレーザー光による干渉環像よりも不鮮明であるので、平板ガラスにごく接近した突起によるものと推測される。他方、干渉環Cは白熱電球光による干渉像においても鮮明なものであり、唯一の接触点であると推定される。

図(b)は接触荷重を1.96Nで加圧させた場合である。図(a)と図(b)を比較すれば図(a)のレーザー光による観測において干渉環中央部が暗い像として観測された干渉環Aは図(b)では環中央は明るくなっている。したがって、干渉環Aの位置にある突起が接触荷重の増加によって平板ガラスにより接近したことを示している。また、干渉環Cの中央暗部の面積は大きくなっており、この干渉環が接触点に対応するものであることが確認できるとともに接触荷重の増加によって接触点の接触面積が増大する様相にあることがわかる。

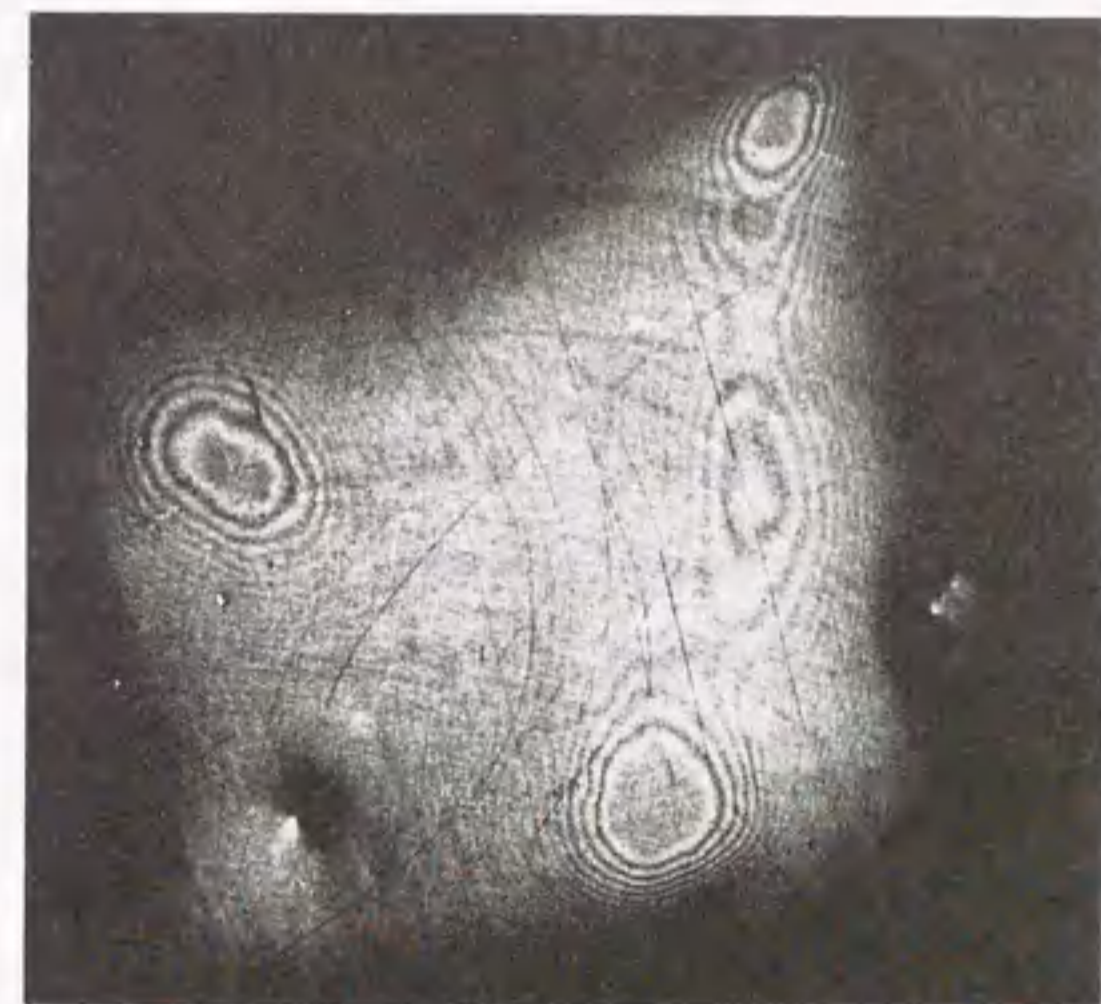
さらに接触荷重を2.45Nに増加させた場合を図(c)に示す。干渉環Aは環中央部が再び暗い像となっており、白熱電球光による観測においても干渉環は鮮明であり、接触点として形成した状態にあると推測できる。また、干渉環Bについても白熱電球光による観測時において干渉環が現れ始めている。その後、接触荷重の増加に伴って干渉環Aおよび環Cに対応する接触点の接触面積が増大し、干渉環Bについても図(f)以降の観測から接触荷重が5.39N以上の加圧状態において接触点として形成していると判断される。これらのことから、本観測手法を用いることによって接触点の形成される過渡的な様相をみることができ。

また、図3.13は電磁開閉器に使用されている銀合金の平面接触子を平板ガラスに接触させて観測したときの干渉像である。図(a)のレーザー光を用いた場合の

(接触荷重: 9.8 N) 1 mm



(a) レーザ光による干渉像



(b) 白熱電球光による干渉像

図3.13 平板ガラス対銀合金平面接触子による観測例

干渉像では四つの干渉環および接触子表面の凹凸の状態を反映した模様干渉じまが現れている。そのうち図中にはA, B, Cと示した三つの干渉環の中央が暗くなっている。他方, 図(b)に示す白熱電球光を用いた場合には四つの干渉環が観測されるにすぎない。これは3.4.1節で検討したように白熱電球光を用いた観測では平板ガラスと接触子との空げきが長くなるに従い干渉じまの鮮明度は低下し, 空げき長が $3\mu\text{m}$ 以上では干渉じまが観測されないという白熱電球光による干渉現象に起因するものである。したがって, 図(b)で観測された四つの干渉環のうちの中央部の暗い三つの干渉環に注目すれば, 図(a)の干渉環と同程度に鮮明であることから, これら三つの干渉環が接触点であると確認される。

3.5 結論

本章では接触子の接触機構を実験的に解明する一手法として, 平板ガラスに金属導体を加圧接触させた状態において, 接触部に形成される接触点の新しい光学的な検出方法を提案した。ここで開発した手法を用いて, 接触部に形成する接触点の直視観測を行った。その結果, 以下のことが明らかとなった。

(1) 本手法によれば, 加圧された接触状態において接触子表面の観測ができる。特にレーザ光によって得られる干渉像は非常に鮮明であり, 干渉じまから加圧された接触子表面の微細な変形状態を測定することができる。

(2) さらに, 白熱電球光による観測を併用することによって, レーザ光のみでは判定困難な平面接触子において形成される接触点の検出と確認が容易になる。

(3) 本手法を用いて接触荷重を順次変化させたときの接触点形成の過渡現象を測定することができた。

[第3章の文献]

- [1] R.J.Roark: "Formulas for Stress and Strain", Mc.Grow-Hill, pp.287-289(1954)
- [2] R.E.Cuthell & D.W.Tipping: "Application of interference fringes microscopy to electric contact problems" J.Appl.Phys., Vol.44, No.7, pp.3277-3283 (1973)
- [3] 愛知, 中山: 「A光源の干渉縞による微細接触部の検出」昭51全国大会 No.1052 (1976)

- [4] 愛知, 佐土根, 宮地: 「光干渉法による接触点の実験的検出に関する考察」電学論文誌B分冊, Vol.102-B, No.5, pp.313-319 (1982)

- [5] 久保田: 「波動光学」, 岩波書店, p.75 (1972)

- [6] JIS Z 8720(1973): 「測色用の標準の光及び標準光源」

第4章 接触点の直視観測と薄膜導体の接触抵抗特性

4.1 はじめに

第3章では、He-Neガスレーザー光の単色光源と白熱電球光の連続スペクトル光源を併用した光干渉法を用いた光学的手法による接触点の検出手法[1]の開発によって、平板ガラスに種々の金属導体を加圧接触させた場合に形成される接触点の実態を明らかにした。そこで、この実験手法の拡張として、平板ガラスに光学的に透明な酸化すずの導電性皮膜を被覆させることによって接触点の直視観測とともに電気的な接触状態をつくり接触抵抗の実測を行った[2]。本章では、薄膜導体に形成する接触点の接触抵抗現象についての理論的な解析と、接触点の形成状態と接触抵抗の挙動について述べる。

4.2 薄膜導体に形成する接触点の接触抵抗

通常の金属導体を用いた接触子では、通電路となる接触点の大きさは導体の大きさに比べて十分に小さい。したがって、接触点を通る電流は前述第1章図1.2に示したように導体内を3次的に周囲から放射状に集中する。他方、薄膜導体に形成される接触点においては、接触点の周囲から平面的に電流が集中することとなる。そこで、平面的に電流が集中する場合の接触抵抗について、新たに理論的な解析を行った。

図4.1は薄膜導体に形成した接触点に流入する電流集中の様子をモデル化したものである。この接触点は半径 a なる円形の微小接触面をもっているとする。接触子を通る電流 I が接触点の周囲から一様に流入するとすれば、接触点の中心から半径 r の位置と dr だけ隔たった位置との電位差 dV は

$$dV = \frac{\rho_r}{2\pi r D_f} dr \cdot I \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

となる。ただし、 ρ_r は薄膜導体の抵抗率であり、 D_f は膜厚である。したがって、同図において半径 a の接触点の境界から半径 b の任意の位置までの電位差 V

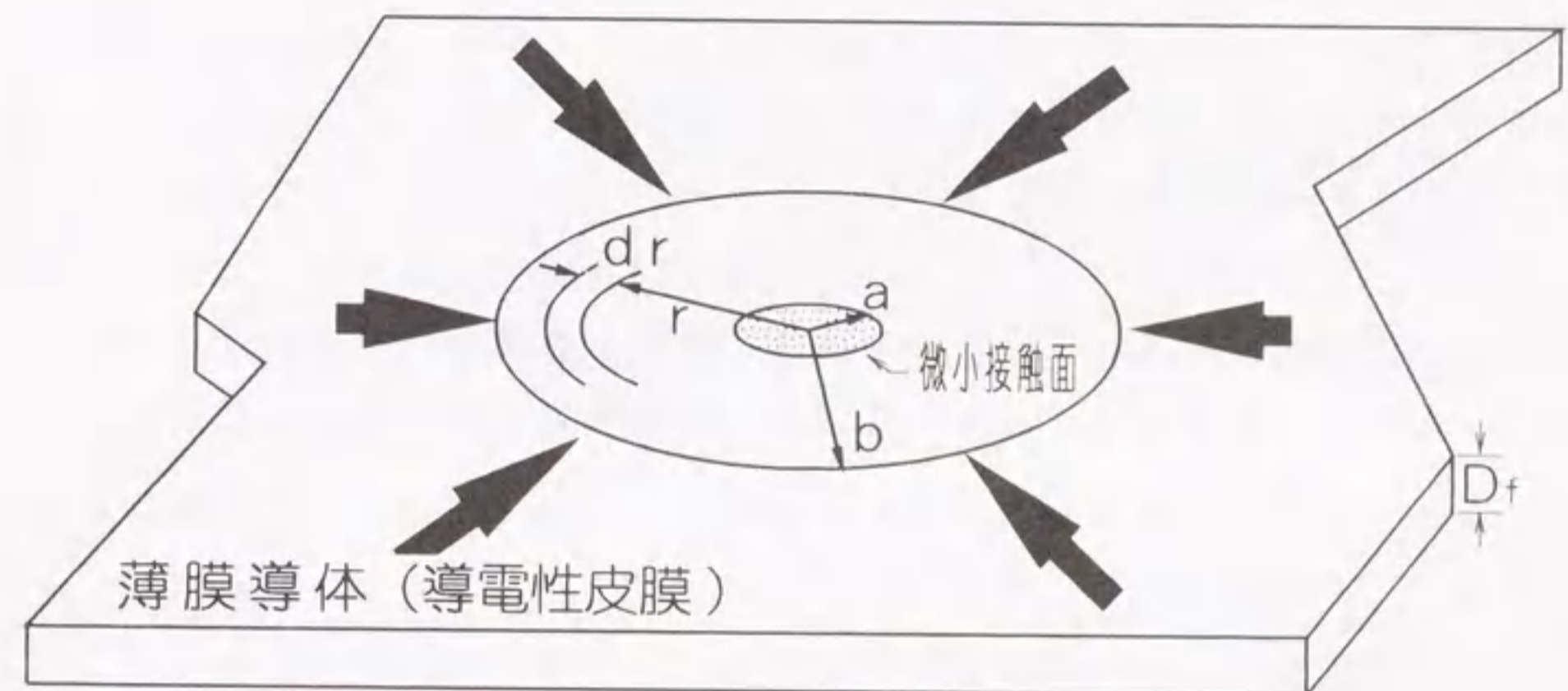


図4.1 薄膜導体に生ずる電流集中モデル

は下式によって求められる。ただし、 b は有限値をとることに注意せねばならない。

$$V = \int_a^b dV = \frac{\rho_f}{2\pi D_f} I \cdot \int_a^b \frac{1}{r} dr = \frac{\rho_f}{2\pi D_f} I \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad \dots (4.2)$$

よって a b 間の接触抵抗として次式を得る。

$$R_{cf} = \frac{V}{I} = \frac{\rho_f}{2\pi D_f} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad \dots (4.3)$$

また、半径 a の接触点が独立に N 個形成している場合の接触抵抗 R_N は各接触点における接触抵抗 R_{cf} の並列合成抵抗として求められ、接触点の全接触面積を S とすれば、

$$R_N = R_{cf} / N \quad \dots (4.4)$$

$$S = \pi a^2 \cdot N \quad \dots (4.5)$$

なる両式を(4.3)式に代入することによって、接触抵抗が次式のように求められる。ただし、各接触点に流入する電流の相互作用はないものとする。

$$R_N = \frac{\frac{\rho_f}{2\pi D_f} \ln(\sqrt{\pi} b \sqrt{N/S})}{N} \quad \dots (4.6)$$

ここで、 ρ_f 、 D_f は薄膜の材質、および厚さによって定まり、 b は接触抵抗を測定するために薄膜導体に設置される電圧測定端子の設定条件によって定まるので

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \rho_f / 2\pi D_f \\ K_2 &= \sqrt{\pi} b \end{aligned} \right\} \quad \dots (4.7)$$

を定数として用いれば、(4.6)式は接触点の全接触面積 S と接触点数 N との関係式として次のように表わすことができる。

$$R_N = \frac{K_1 \cdot \ln(K_2 \sqrt{N/S})}{N} \quad \dots (4.8)$$

本式によれば、接触抵抗 R_N は接触面積 S の逆数の $1/2$ 乗に対して対数的に減少することになる。

4.3 接触抵抗の実測

4.3.1 光干渉法の併用

図4.2は本実験に用いた接触子の構成および接触抵抗の測定回路を示したものである。本実験ではこれまでにこなしてきた光干渉法を用いた接触部の直視観測に加えて接触抵抗の同時観測を行なうために、接触子の一方には光学的に透明であるとともに導電性をもつ材質を選定する必要がある。そこで、平板ガラスに酸化すずの導電性薄膜を被覆したものを平面試料として用いることとした。他方、平面試料に対向する側には接触子表面に微小突起をもつように加工した銀および銅の模擬接触子を用い、複数の接触点を形成するようにした。なお、本実験を実施するために図4.3に示す実験装置を新たに作製した。特に本装置においては平面試料である平板ガラスと模擬接触子との接触状態を調整し、所定の接触点が形成できるような機構を備えている。

接触点の観測においては平面試料(平板ガラス)に白熱電球光あるいは He-Ne ガスレーザ光(波長 $\lambda = 632.8\text{nm}$)を照射する。これによって接触点に位置するところに微小な干渉環が現われる。この干渉像を顕微鏡によって直視観測ならびに写真撮影を行った。また、接触子間に直流 $10\mu\text{A}$ を通電したときの電圧降下を高感度直流電圧計によって測定し、電圧電流計法から接触抵抗を求めた。

模擬接触子を平面試料に押し付けて加圧接触させ、接触点の観測および接触抵抗の測定を行った。なお、模擬接触子の表面には、鏡面仕上げを行なった後、実験直前において $0.1\mu\text{m}$ 以下の金めっき処理を施し、接触子表面の酸化を防止した。

4.3.2 点接触時の特性

一つの接触点が形成した接触部を光干渉法によって観測すれば、前述第3章3.4.1節で示すように接触点の位置するところに暗い像をとりまく環状の干渉じまが現われる。

図4.4は直径 10mm の銅円柱の先端を曲率半径 5.29mm の球面状に仕上げ、平板

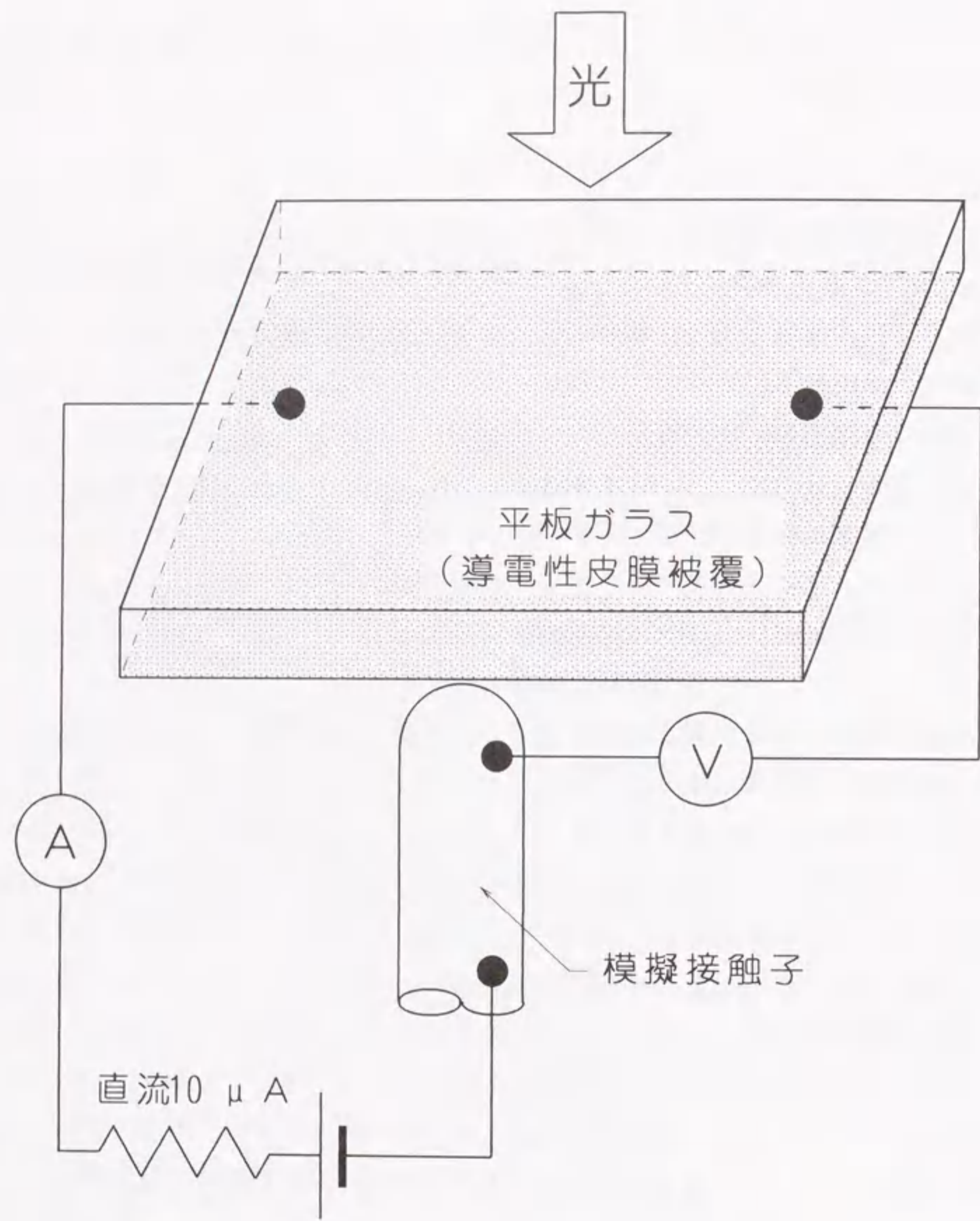
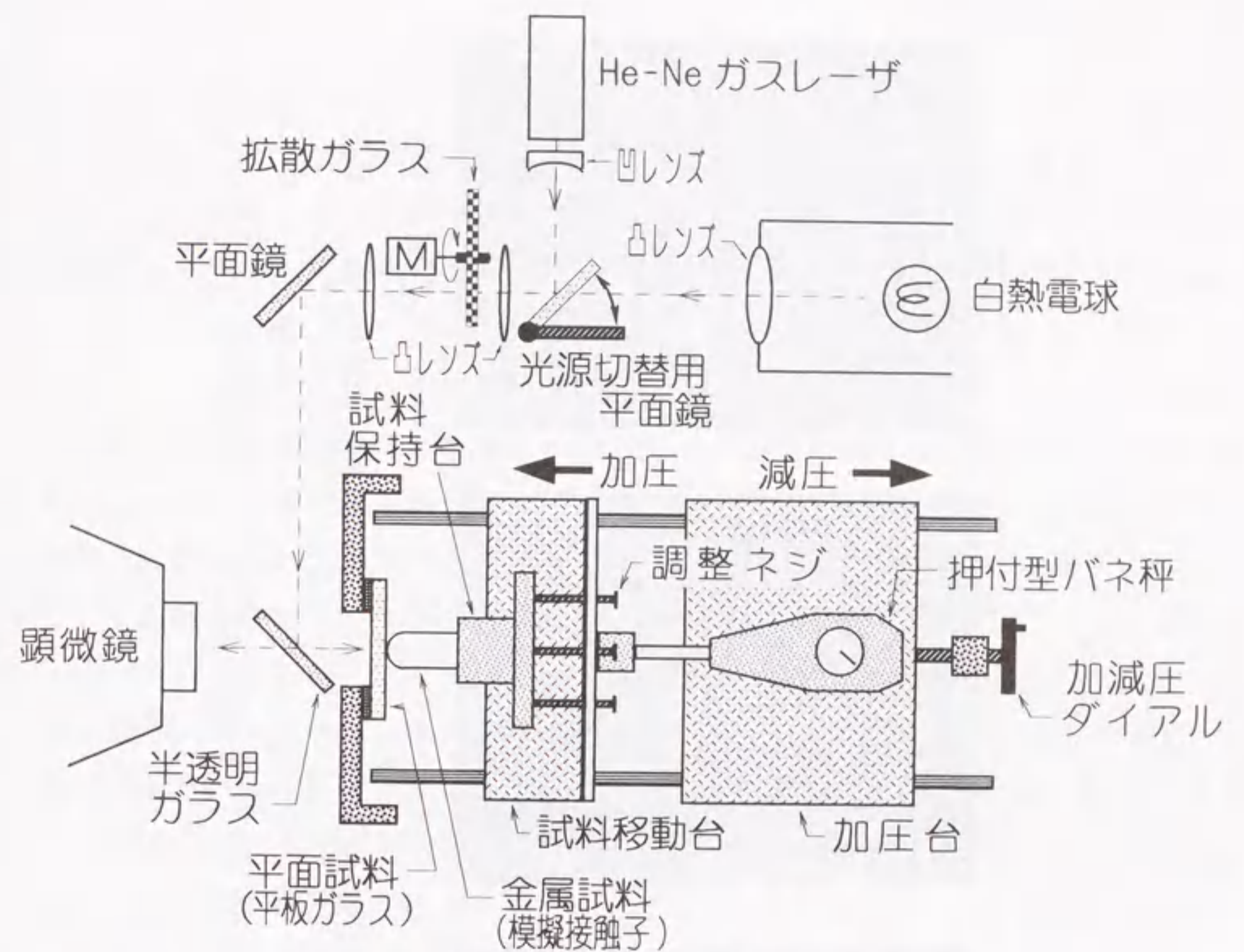
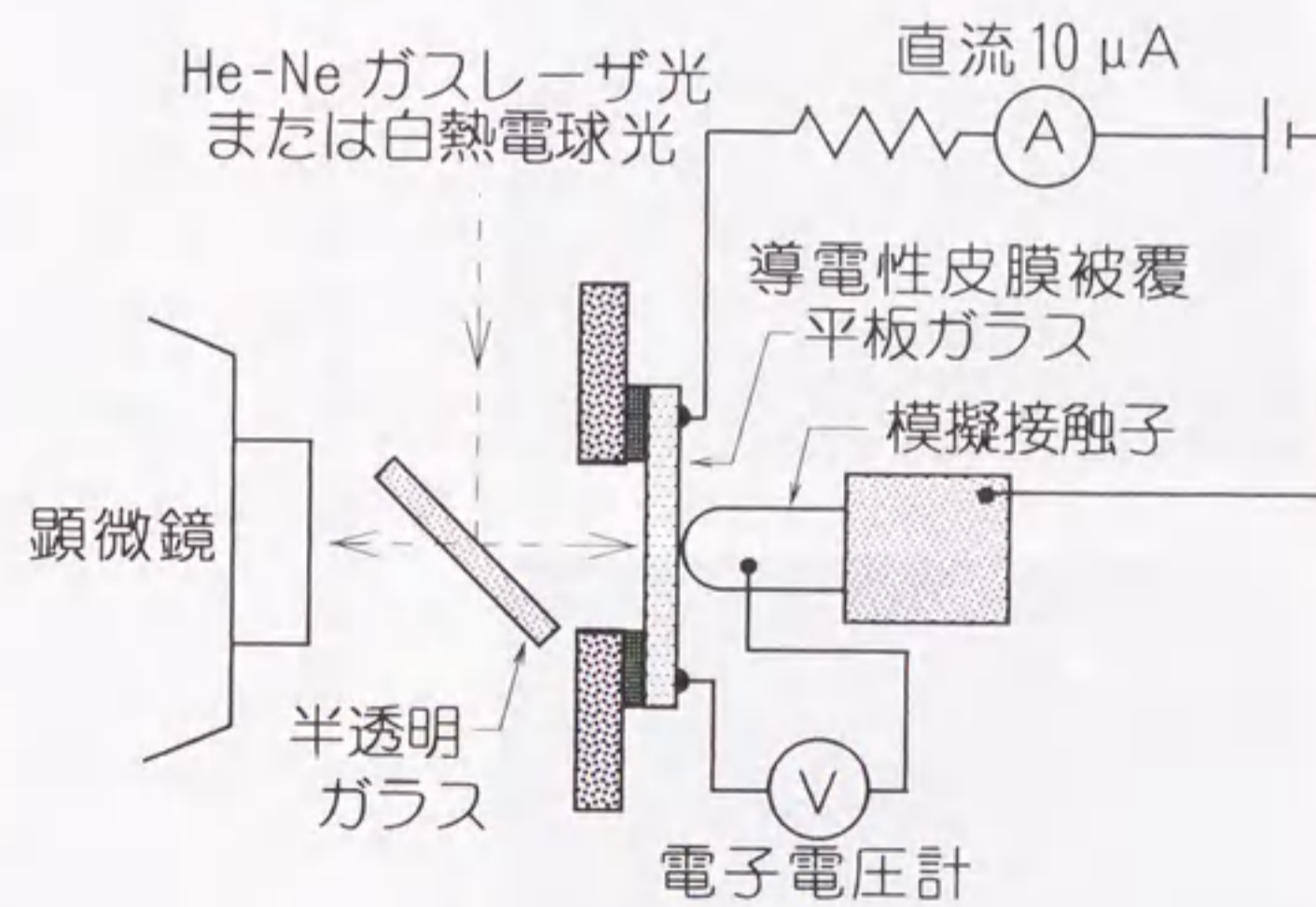


図 4. 2 接触子の構成および接触抵抗測定回路

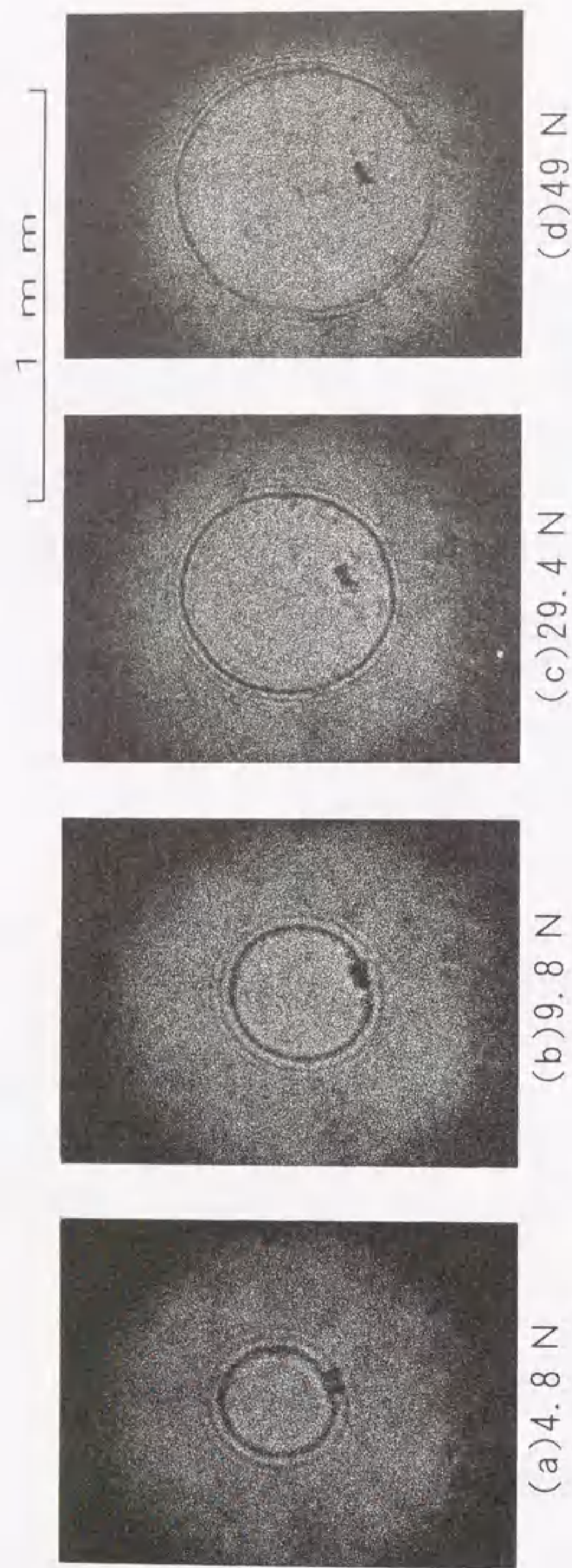


(a) 接触子加圧装置および光学系



(b) 接触抵抗測定回路

図 4. 3 実験装置の光学系および接触抵抗測定回路



〔銅を用いた球面試料（曲率半径：5.29mm）対平板ガラス〕

図4.4 白熱電球光を用いた接触点の干渉像

ガラスに接触させた場合の接触部を白熱電球光によって観測したときの干渉像である。同図(a)~(d)は接触荷重を4.8Nから49Nまで変化させたものである。干渉環中央の暗い像は円形であり、代表的な点接触の接触状態を形成していることがわかる。また、接触荷重の増大に伴って暗い像は大きくなっており、接触面積が増大していることを示している。

さらに、接触部の直視観測と同時に接触抵抗の測定を行なうことによって接触部に形成する接触点の接触面積と接触抵抗との関係が得られる。図4.5は、点接触における代表的な実測例を示したものである。図中の○、△、□などの印は直径10mmの銅円柱の先端を5mm程度の曲率半径で球面状に仕上げた数種の模擬接触子によって得られた各実測値を表している。いずれの実測においてもほぼ同一の傾向を示しており、接触抵抗は接触面積の増大に伴って、このグラフ上において直線的に減少している。

本実験における接触子構成は一方が薄膜導体であるので、4.2節で述べた薄膜導体に形成する接触抵抗の表式である(4.8)式に基づいて検討した。図中において接触抵抗値が直線的に減少していることは(4.8)式から推測される特性と一致している。そこで、実測の平均的な傾向として示した図中の直線から(4.8)式において $N=1$ における定数 K_1 および K_2 を求めたところ、 $K_1=17.72\Omega$ 、 $K_2=8.07\text{mm}$ を得た。以下ではこの定数値を用いて計算を行なった。

薄膜導体の ρ_1/D_1 および b の値は K_1 、 K_2 の値を(4.7)式に代入することによって求まり、 $\rho_1/D_1=111.3\Omega$ 、 $b=4.55\text{mm}$ となる。なお、 ρ_1/D_1 の値を薄膜導体の抵抗率を測定したところ、 $\rho_1/D_1=115.2\Omega$ なる結果が得られ、その実測から前述の値と良く一致した結果となっている。他方、 b の値は接触抵抗を測定するために薄膜導体に設置した電圧測定端子の位置、薄膜導体の材質および形状によって異なるので、点接触における接触抵抗の実測より算定する必要がある。

また、模擬接触子の金属導体内部においても集中抵抗が存在し、通常の金属導体に生ずる値は $R=\rho/4a$ なる関係式から計算できる[3]。ここで、 ρ は金属導体の抵抗率であり、 a は接触点の半径である。例えば、銅の抵抗率を $\rho=1.55\times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$ とし、接触点の半径を本実験において得られる小さい場合を考えて、 $a=0.05\text{mm}$ とすれば、集中抵抗 R は $R=77.5\mu\Omega$ となる。この抵抗値は実測される抵

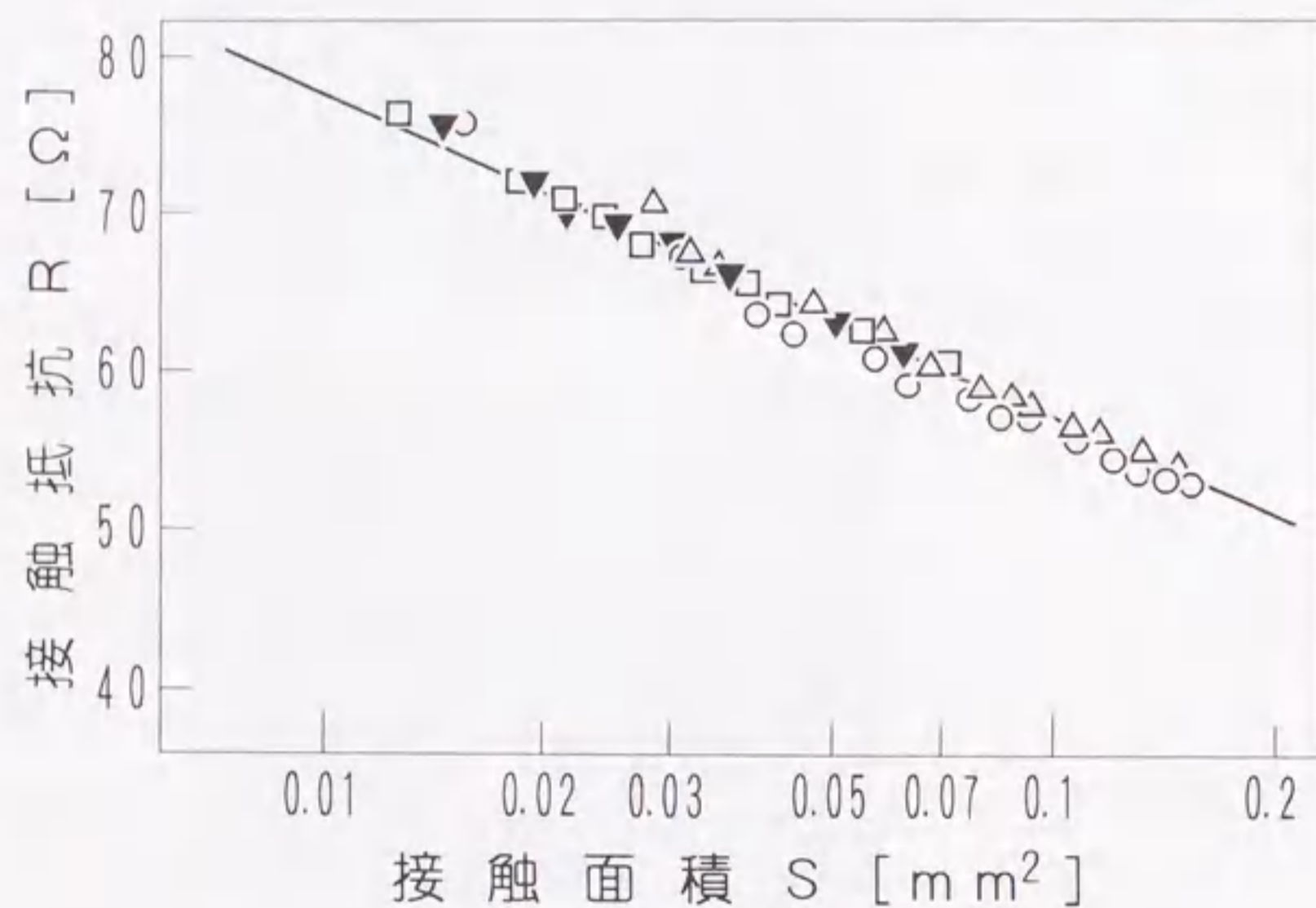


図4.5 点接触における
接触抵抗と接触面積との関係

抗値50~80Ωに対して省略できる程の値であることから、本実測値を薄膜導体に生ずる接触抵抗として取り扱った。

4.3.3 複数の接触点形成時の特性

一般に平面接触において互いの面が実際に接触する部分はごく一部分であり、接触子表面の比較的高い突起が接触することにより接触点が散在する。そこで、複数の微小突起をもつように作成した模擬接触子を平板ガラスに接触させて、複数の接触点が形成するようにした。模擬接触子は直径10mmの銀または銅円柱の先端を化学エッチングあるいは切削加工などによって凹凸を形成させた後、研磨処理によって数個の微小突起をもつように製作した。

図4.6は二つの突起をもつ銀および銅の模擬接触子と平板ガラスとの接触によって2点接触が形成したときの観測例である。いずれも、観測には白熱電球光を用いており、接触荷重を9.8Nで加圧させた場合の干渉像である。図(a)に示す銀の模擬接触子では二つの接触点が非常に接近しており、各接触点の中心間の距離は0.23mmとなっている。また、図(b)の銅の模擬接触子を用いた場合の接触点は0.75mmの距離で形成した状態となっている。なお、各接触点の形状は円形とは異なっている。これは突起の形状が球状でないことに起因するもので、通常は楕円に近い接触面となる。したがって、接触面積の測定は楕円近似として算出した。

2点接触の場合について、種々の接触状態における接触抵抗と接触面積との関係を図4.7に示す。図中に一点鎖線および二点鎖線で示した直線は前述の(4.8)式より算出した一点接触および2点接触における計算値である。各実測値はN=1の点接触とN=2の2点接触の計算値との間において広範囲に分散している。例えば図中に□印で表した抵抗値の高い特性は、前述の図4.6(a)で示した接触状態におけるもので、二つの接触点間の距離は0.23mmである。それに対して▼印で表した特性は2点接触の計算値に比較的近い抵抗値を示しており、光干渉法による観測によれば接触点間の距離は2.84mmとなっている。

これらの実測から接触点間の距離が短いほど、点接触の計算値に近い抵抗値を示す結果となっている。すなわち、二つの接触点が近接して接触している場合には各接触点の相互干渉によって接触抵抗が高くなる傾向にある。

1 mm



(a) 銀模擬接触子使用

1 mm



(b) 銅模擬接触子使用

(接触荷重: 9.8 N, 白熱電球光使用)

図4.6 平板ガラス対模擬接触子による2点接触の観測例

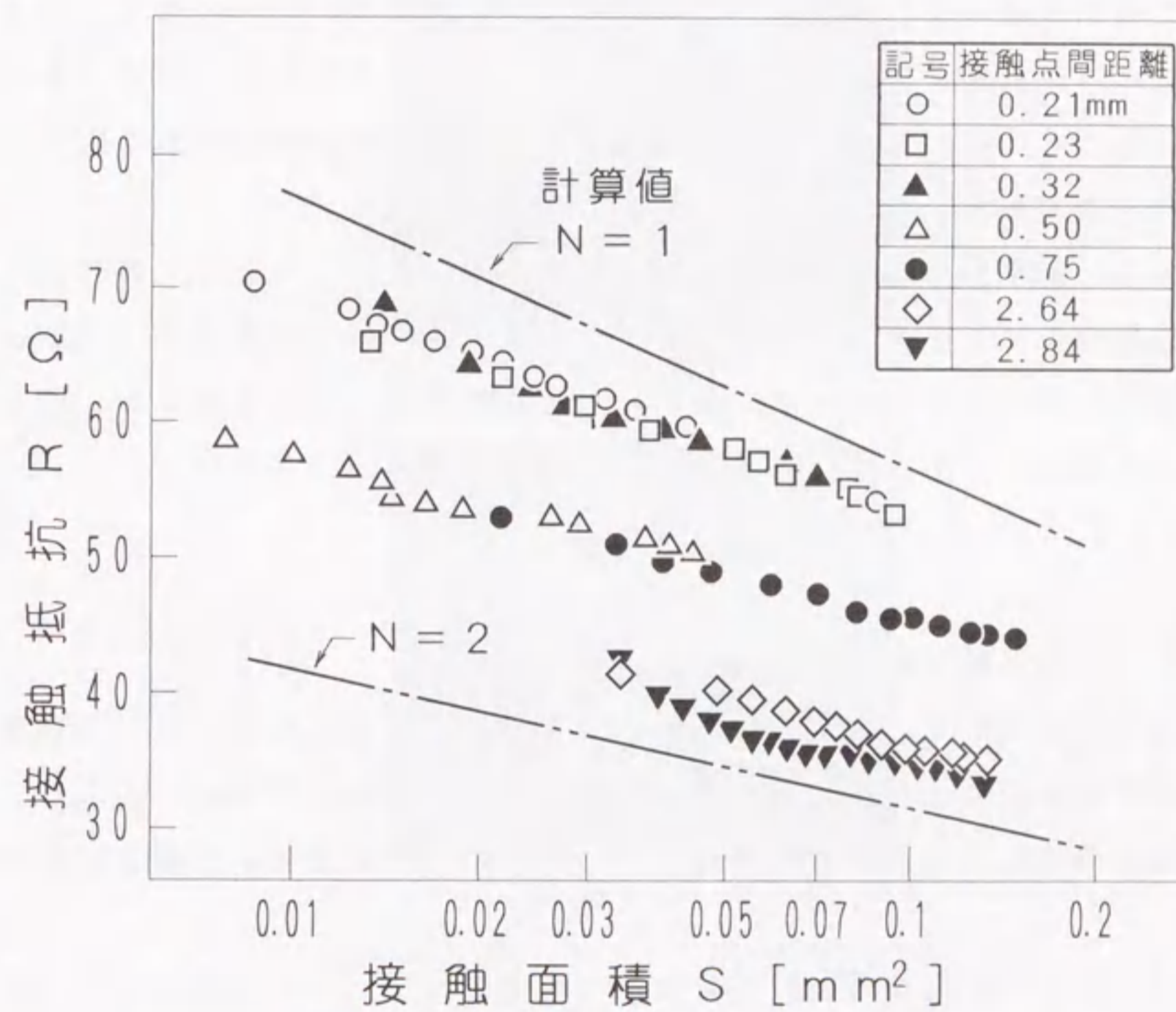


図4.7 2点接触における接触抵抗と接触面積との関係

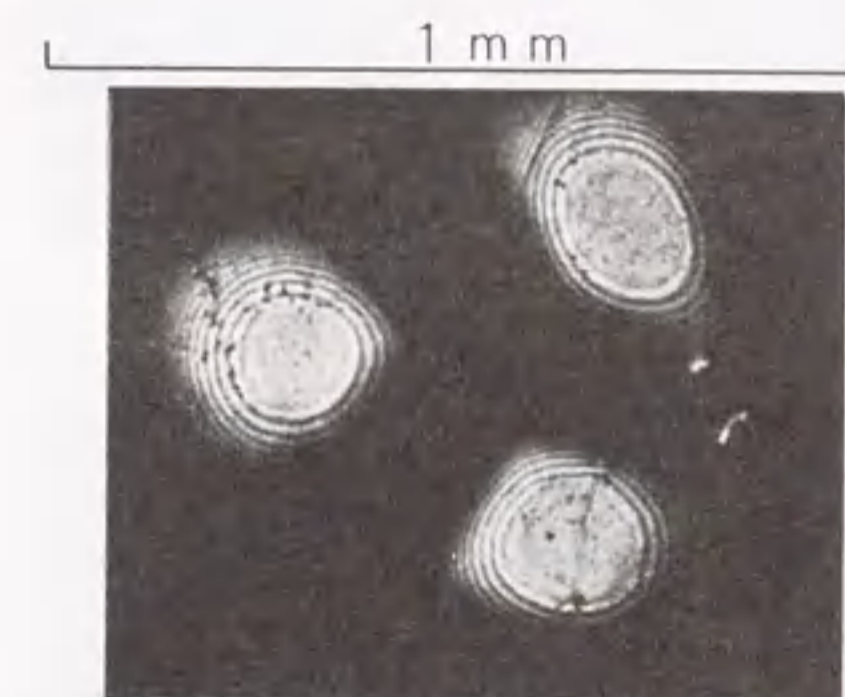
さらに、図4.8は3点接触を形成させたときの観測例を示したものである。同図(a)は、平板ガラスと銀の模擬接触子との接触によるもので、各接触点の平均距離は0.31mmとなっている。なお、接触点間の平均距離は各接触点相互の距離を相乗平均した値である。また、図(b)は銅の模擬接触子を用いた場合であり、各接触点の平均距離は2.84mmと比較的離れた状態にある。図4.9にこれら3点接触における接触抵抗と接触面積との関係を示す。図からも明らかなように、各実測値は一点鎖線で示す点接触の計算値から三点鎖線によって示す3点接触の計算値との間に現われている。図中の○印で表した実測値は、前述図4.8(a)で示した接触状態の特性であり、接触点間の平均距離は0.31mmと短く、点接触の計算値に近い抵抗値となっている。また、3点接触の計算値に近い◇印で表した特性は前述図4.8(b)で示した接触点間の平均距離が2.84mmの接触状態について実測したものである。

これらの観測から複数の接触点が形成している場合において、接触点相互の距離が接触抵抗に影響する状況にある。この現象については第2章2.5節において解析した内容と同じであるが、数値的な特性は異なった様相にある。次節では接触点間の距離と接触抵抗との関係について検討する。

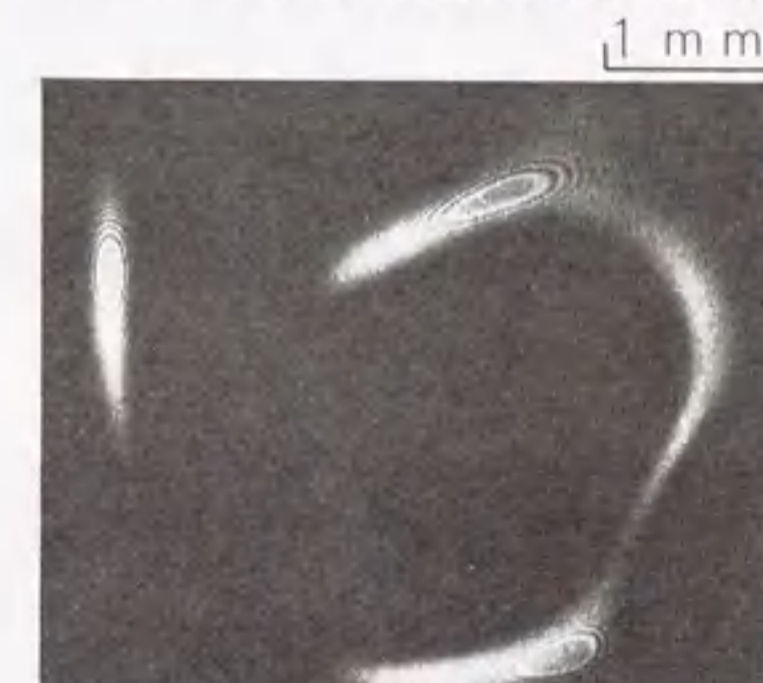
4.4 接触点間距離と接触抵抗との関係

複数の接触点が互いに近接している場合、接触面積の増大によって接触点相互の境界が隣接状態となることがある。図4.10は接触面積の増大によって二つの接触点が隣接し、これらが最終的には一つの接触点に変化した場合の観測例である。

図(a)に示す接触荷重が0.98Nの加圧状態では、二つの接触点はそれぞれ離れて2点接触を形成している。そのときの接触点間の距離は0.2mmであり、両接触点は非常に近接した状態にある。接触荷重を19.6Nまで増加させた図(c)の干渉像においては二つの暗い像が一つに融合している。したがって、複数の接触点が非常に近接した状態で形成している状況においては接触荷重の増加に伴って接触面積が増大する過程において相互の接触点が隣接し、点接触の接触状態へと変化する様相にある。



(a) 銀模擬接触子使用



(b) 銅模擬接触子使用

(接触荷重: 9.8 N, 白熱電球光使用)

図4.8 平板ガラス対模擬接触子による3点接触の観測例

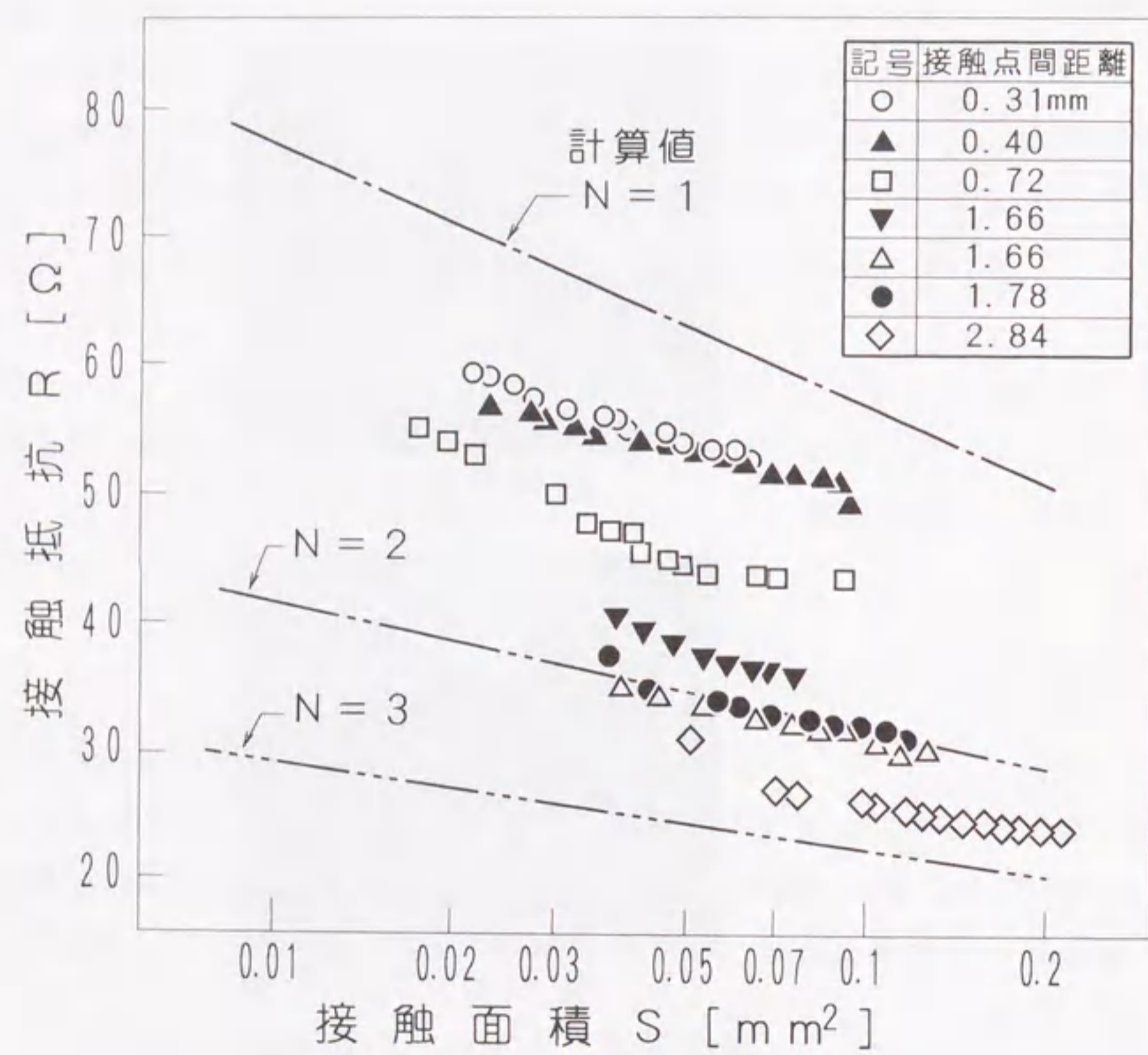


図4.9 3点接触における接触抵抗と接触面積との関係

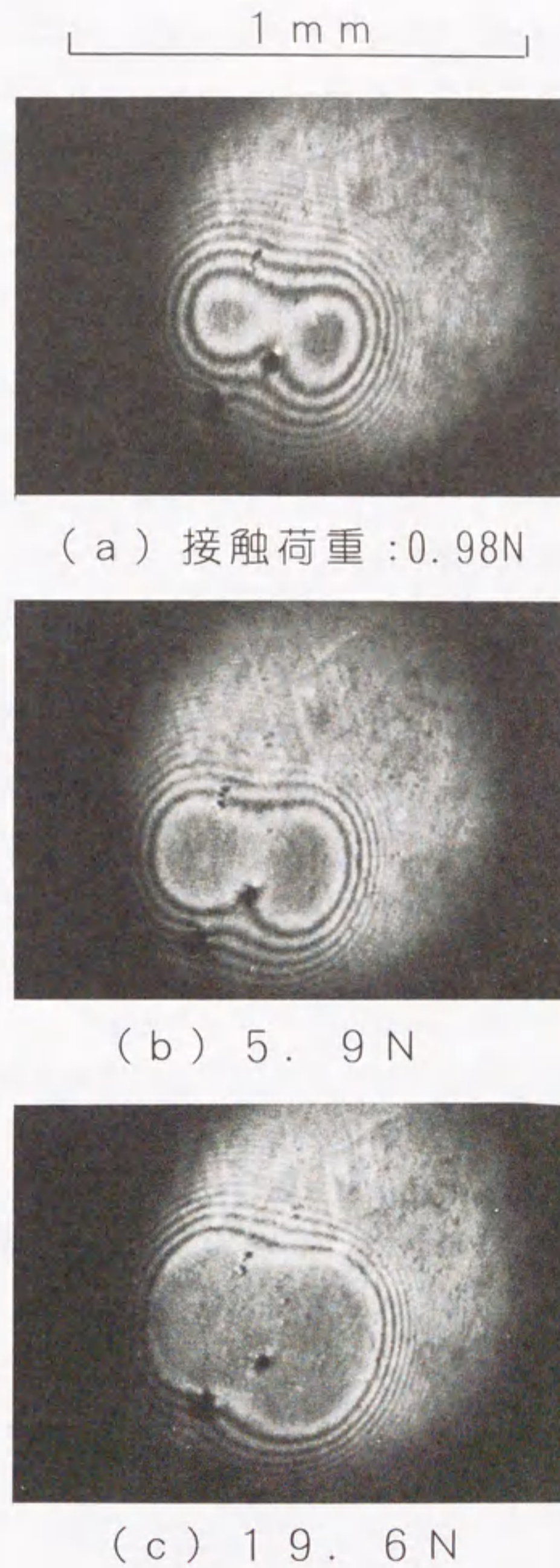


図4.10 隣接する複数接触点の干渉像

図4. 11は複数の接触点が隣接した状態の接触点モデルであり、各接触点は同じ大きさの微小な円形接触面を形成しているものとする。同図において接触点が相互に隣接している場合、接触点間の距離 $2l$ は全接触面積 S に対して次式のように表すことができる。

$$2l = 2 \cdot \sqrt{S / \pi N} \quad \dots \dots \dots (4. 9)$$

ここで、 N は接触点の数であり、図(a)の2点接触では $N = 2$ とし、図(b)に示す3点接触の場合には $N = 3$ として計算する。

図4. 12は前述の図4. 10で示した2点接触から点接触へと移行した場合の観測例について接触抵抗と接触面積との関係を示したものである。図中の○印は図4. 10の(a)および(b)に示すような2点接触の接触状態の場合である。接触抵抗は二点鎖線で示す2点接触の計算値に比べて相当に高く、一点鎖線で表わされた点接触の計算値に近い値となっている。また、●印は接触面積の増大によって図4. 10の(c)で示すように接触点が相互に隣接し、点接触の接触状態となった状況における接触抵抗を示している。これは図中の○印で示した2点接触における接触抵抗の推移を表した破線が点接触の計算値である一点鎖線と交差する接触面積において、二つの接触点が相互に隣接し、その後の接触状態においては点接触の接触抵抗特性となることを示唆している。

薄膜導体に複数の接触点が形成した場合の接触抵抗は、前述の(4. 8)式によって表わされる。しかし、接触点が近接している場合の接触抵抗 R は実測からも明らかのように、接触点の近接効果として接触抵抗が高くなる。そこで、接触抵抗の増分 ΔR を考え、それを(4. 8)式で示される接触抵抗 R_N に加えることによって次式のように表わされるとする。

$$R = R_N + \Delta R = \frac{K_1 \cdot \ln(K_2 \sqrt{N/S})}{N} + \Delta R \quad \dots \dots \dots (4. 10)$$

他方、点接触における接触抵抗 R_1 は(4. 8)式において接触点数 N を $N = 1$ として与えられ、

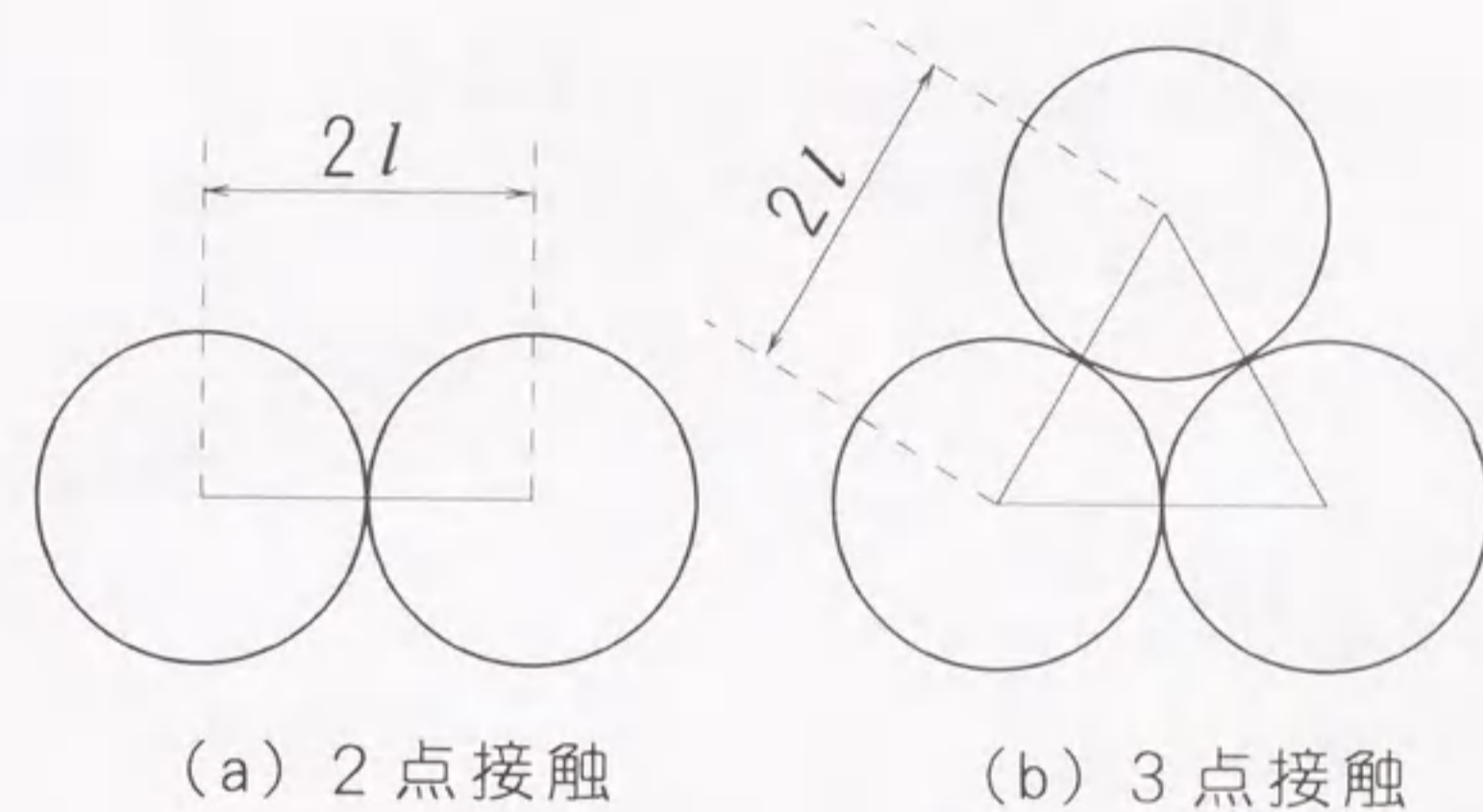


図4. 11 隣接する複数接触点モデル

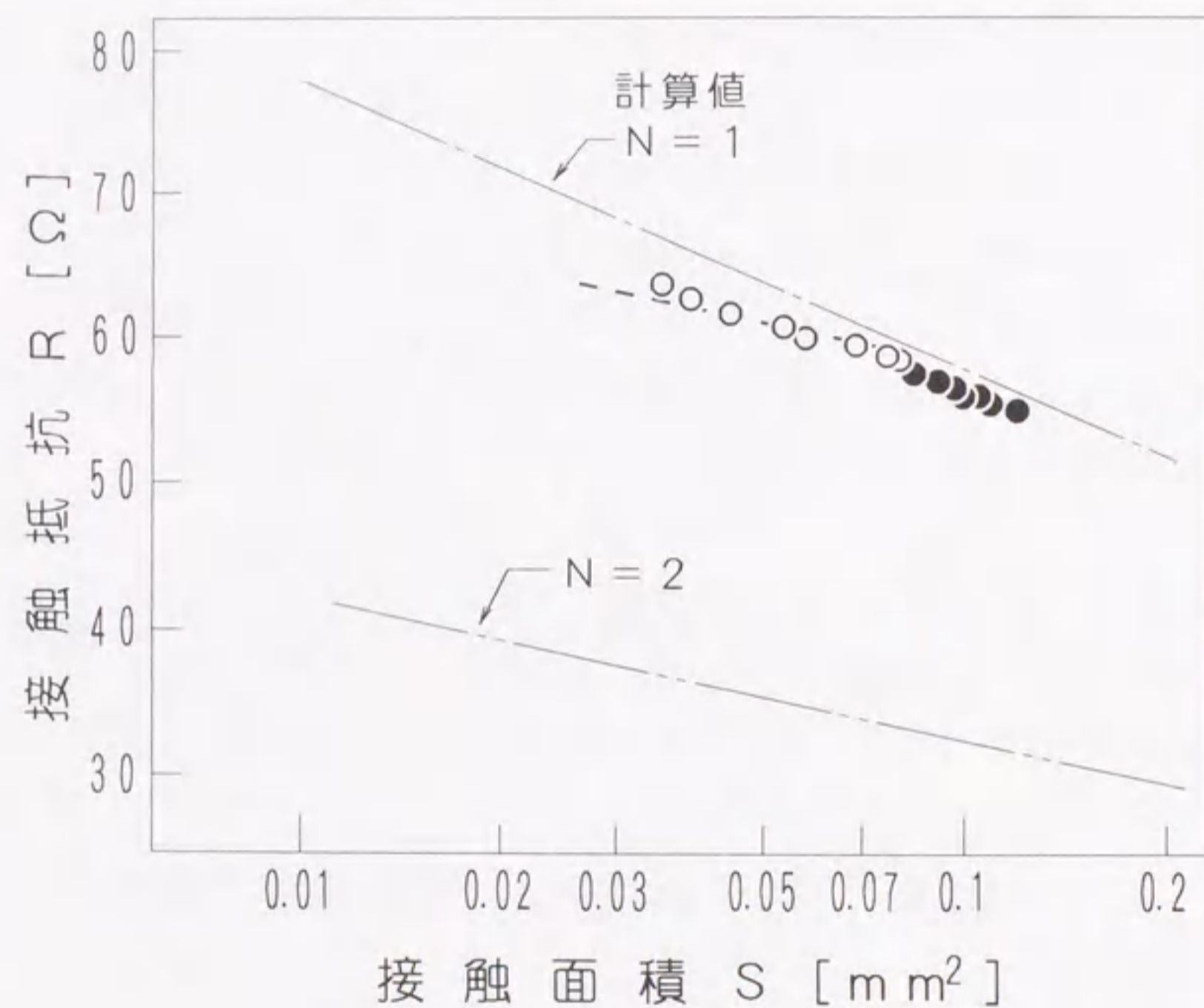


図 4. 12 隣接する接触点の接触抵抗と接触面積との関係

$$R_1 = K_1 \cdot \ln(K_2 \sqrt{l/S}) \dots \dots \dots (4. 11)$$

となる。

そこで、接触面積の増大によって接触点が相互に隣接した場合の接触抵抗 R は点接触における抵抗値にほぼ等しくなるので、(4. 10)、(4. 11)式の両辺において左辺を等しくすれば、接触点が隣接したときの接触面積 S に対する接触抵抗の差分 ΔR の関係式が得られる。

$$\Delta R = \frac{(N-1) K_1 \cdot \ln(K_2 \sqrt{l/S}) - K_1 \cdot \ln(\sqrt{N})}{N} \dots \dots \dots (4. 12)$$

さらに、前述の(4. 9)式を(4. 12)式に代入すれば、接触点間の距離 2l によって接触抵抗の差分 ΔR を次式で表すことができる。

$$\Delta R = \frac{(N-1) K_1 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot K_2}{2l \sqrt{\pi N}}\right) - K_1 \cdot \ln(\sqrt{N})}{N} \dots \dots \dots (4. 13)$$

4. 5 近接した複数接触点の接触抵抗特性

複数の接触点が近接して形成している場合の接触抵抗 R は前述の(4. 8)式で示される接触抵抗 R_N のほかに接触点の近接効果として接触抵抗の差分 ΔR が加わる。

そこで、実測によって得られた接触抵抗 R について(4. 8)式から計算される接触抵抗 R_N に対する接触抵抗比 R/R_N を求め、独立した複数個の接触点相互の接触点間距離 2l との関係を図 4. 13 に示す。図中の○、●および△印は 2 点、3 点および 4 点接触における実測値から算出したものである。具体的には図 4. 7 や図 4. 8 で示す各特性において接触面積が 0.05mm² のときの接触抵抗 R の値

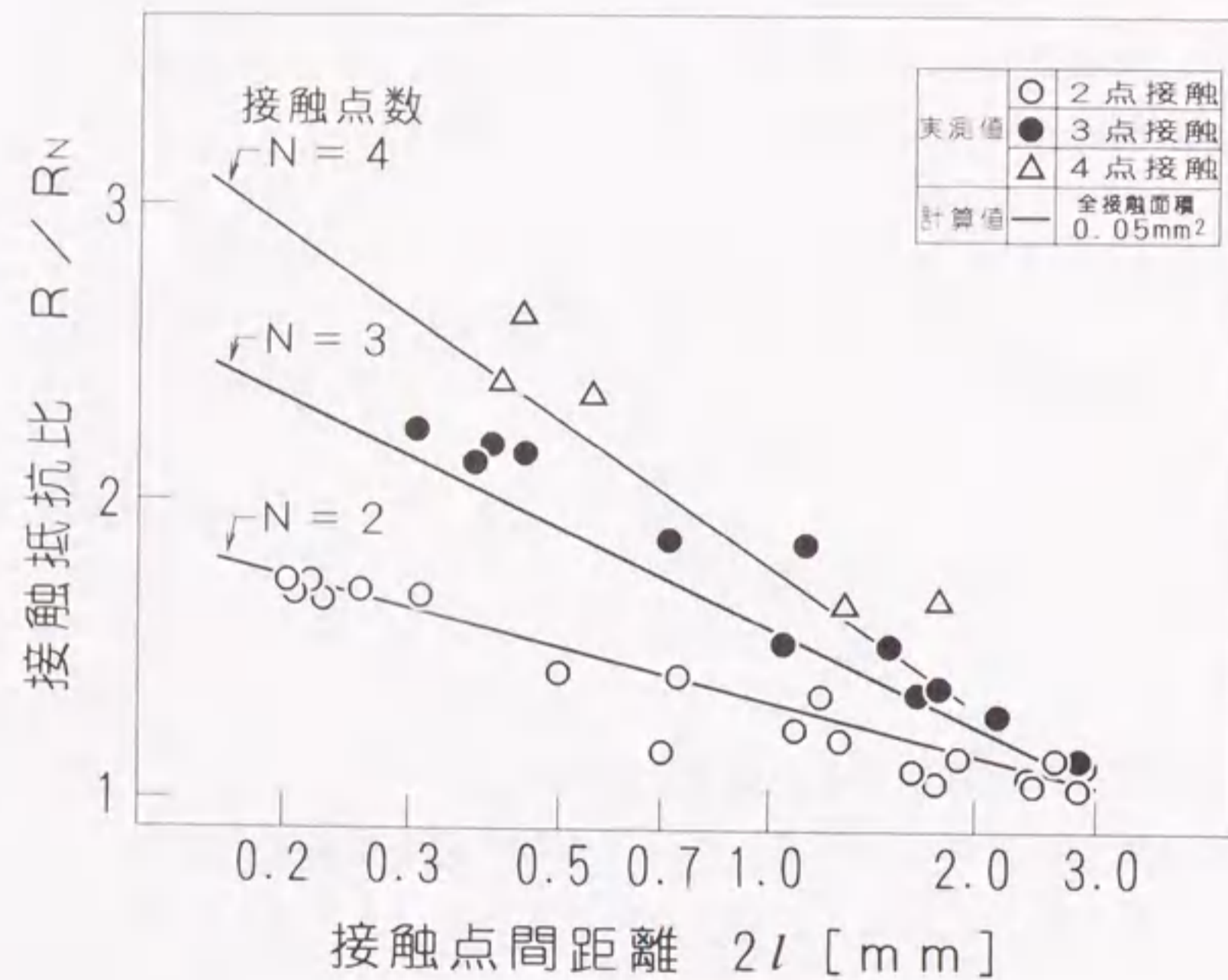


図4.13 接触抵抗の増加率と接触点間距離との関係

を用いた。また、各実線は(4.10)式および(4.13)式によって接触点の全接触面積 S を 0.05mm^2 とし、計算した接触抵抗 R より求めた数値特性である。ここで、前述図4.12で示した2点接触の特性に注目すれば、接触点間の距離 $2l$ は 0.2mm と接触点が非常に近接した状態にあり、接触抵抗比 R/R_N の値は 1.77 と高く、接触点の近接効果が大きく現れている。

2点、3点および4点接触のいずれの場合も各実線で示した計算から得られた数値特性と各実測より算出した抵抗比 R/R_N とは比較的良好に一致しており、各実線の傾向から接触抵抗比 R/R_N は接触点間距離 $2l$ の対数の増加に対して直線的に減少しているがわかる。しかしながら、複数接触において接触点の全接触面積が同じ場合、接触点の大きさは接触点の数によって異なる。したがって、接触点数が多くなれば一つの接触点の大きさは小さくなるので、接触点間の距離が同じ場合においても接触点の数によって接触抵抗に及ぼす接触点の相互作用は異なってくると考えられる。

そこで、接触点間距離 $2l$ を接触点の半径で除した相対的な接触点間の距離として表した距離係数 $2l/a$ を考える。また、接触抵抗 R については前述の(4.11)式で示される点接触の接触抵抗 R_1 を基準とした接触抵抗比 R/R_1 を算出し、この抵抗比 R/R_1 と距離係数 $2l/a$ との関係を求めることによって、接触点数の異なるそれぞれの複数接触における接触抵抗の比較ができる。

図4.14は2点、3点および4点接触における接触抵抗比 R/R_1 との関係について表したものである。なお、接触点の全接触面積 S は 0.05mm^2 とし、接触点の半径は各接触点と同じ円形接触面を形成しているものとして下式より求めた。ただし、 N は接触点の数である。

$$a = \sqrt{S/\pi N} \dots \dots \dots (4.14)$$

図中の○、●印および△印は2点、3点および4点接触の各実測における接触抵抗 R と接触点間距離 $2l$ の実測値より算出した特性であり、各実線は(4.10)式および(4.11)式を用いて計算した数値特性である。各接触点が隣接状態にある場合には前述の図4.11に示すように、接触点間の距離は接触点の半径 a の2

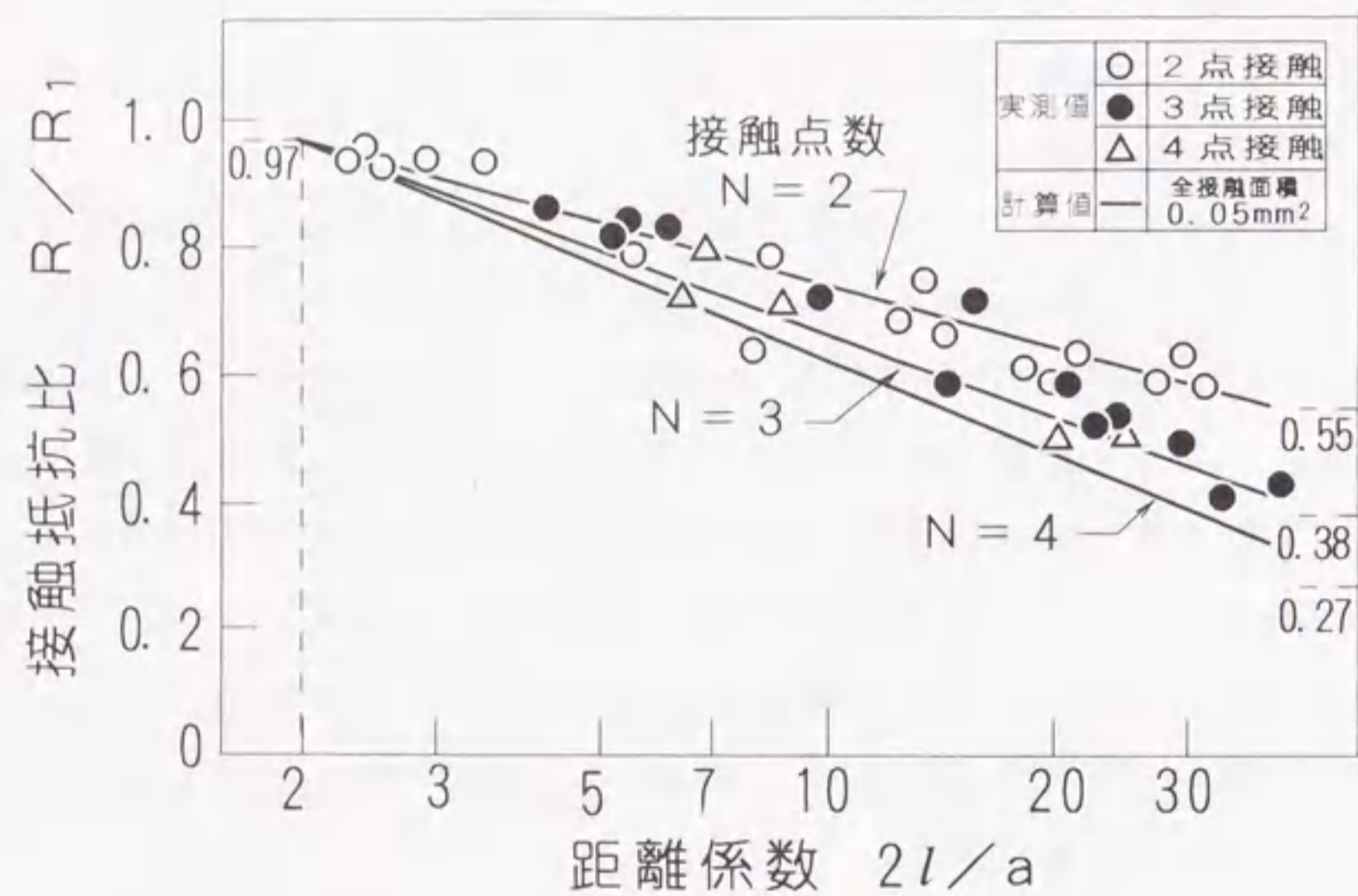


図 4.14 接触抵抗比と距離係数 $2l/a$ との関係

倍となる。したがって、距離係数 $2l/a = 2$ において隣接状態となり、 $2l/a$ の値が大きくなる程、接触点が離れて形成した状態にある。また、隣接状態にある接触抵抗 R は点接触における接触抵抗 R_1 にほぼ等しくなり、接触抵抗比 R/R_1 は近似的に 1 となる。なお、前述の図 4.12 の特性において、接触荷重が 0.98N の加圧初期における $2l/a$ は 2.75 であり、このときの R/R_1 は 0.97 となっている。

他方、接触点間の距離が長くなれば接触点の近接効果として現れる接触抵抗の増分 ΔR は 0 に近づき、接触抵抗 R は前述の (4.8) 式で示される接触抵抗 R_N に近い値となる。そこで、接触抵抗の増分 ΔR を 0 とすれば接触抵抗は $R = R_N$ となり、2点接触における接触抵抗比 R/R_1 は 0.55 となる。また、3点接触では 0.38 となり、4点接触においては 0.27 と算出される。

例えば、距離係数 $2l/a$ が 10 の場合における抵抗比 R/R_1 は 2点接触では 0.77 で、3点接触においては 0.69 となる。また 4点接触では 0.62 となり、接触点の数が多くなる程抵抗比 R/R_1 が低下する様相にある。さらに、 $2l/a$ が 50 以上となれば接触抵抗 R は (4.8) 式で示される接触抵抗 R_N と同程度の値となり、接触点間の相互作用による接触抵抗の増加は無くなる。

これらの傾向は図中の各実線で表わされるように、それぞれの複数接触において接触抵抗比 R/R_1 は距離係数 $2l/a$ の対数の増加に対して一次関数的に減少している。また、接触点の数が多いほど距離係数 $2l/a$ の増加に対する接触抵抗比 R/R_1 の減少傾向は大きくなっている。

4.6 結論

本章では接触子の接触機構を実験的に解明する一手法として、平板ガラスに金属導体を加圧接触させた状態において、平板ガラスに導電性薄膜を被覆した試料を用いることによって接触部の直視観測とともに接触抵抗の同時測定を可能にした。これによって、接触部に形成する接触点の分布状態と接触抵抗との相関を実験的に明らかにし、理論的解析との比較を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 本手法では薄膜導体に形成する接触点の接触抵抗を測定した。理論的には

接触点における二次元的な電流集中のモデルから計算できる。その結果、接触抵抗は接触点の接触面積の1/2乗の逆数に対して対数的に減少することがわかった。

(2) 複数接触において接触点の数が多くなれば接触抵抗は全体的に低下するが、接触面積の増大に伴う抵抗値の低下傾向は接触点数が多いほど小さい。

(3) 接触点が近接して形成している場合、接触点間の距離が短いほど接触抵抗は高くなる。特に、接触点が相互に隣接する場合の接触抵抗は点接触における特性とほぼ同様の傾向を示す。

[第4章の文献]

- [1] 愛知, 佐土根, 宮地: 「光干渉法による接触点の実験的検出に関する考察」電学論文誌B分冊, Vol.102-B, No.5, pp.313-319 (1982)
- [2] 愛知, 佐土根, 宮地: 「近接する複数接触点の接触抵抗」, 電学論文誌B分冊, Vol.105-B, No.10, pp.821-828 (1985)
- [3] R.Holm: "Electric Contacts"4th.Edit, Springer, New York, p16, (1967)

第5章 SF₆分解生成物が介在した接触子の通電特性

5.1 はじめに

電力系統における開閉保護装置には、SF₆ガスを用いた絶縁方式が多く採用されている。これらのガス絶縁機器は、本来信頼性が高く、保守、点検も簡単であると言われている。しかし、その通電部分は密閉容器内に収納されており、そこに異常が発生しても、その発見は容易でない。さらに、万一それが事故に発展した場合には、その復旧に長時間を要する面もある。したがって、事故にいたる前の段階で異常を発見し、対策を講じて、事故の発生を未然に防ぐことを目的として、異常予知に関する各種センサの研究開発が試みられている[1]。そのためには、ガス絶縁機器における異常の発生メカニズムおよび事故への進展過程を学理的に明らかにする必要がある。それによって、各種センサの開発が促進されるだけでなく、異常そのものの発生頻度を根本的に抑え、信頼性をより一層向上させることが可能となる。

ガス絶縁機器において、過去に事故にまで発展した異常の中には接触子で発生している[2]という事実がある一方で、SF₆ガス中における接触子の電気的特性については十分な研究がなされていないのが現状である。実規模のSF₆ガス遮断器の接触子を模擬し、棒状接触子がプラグ(チューリップ、接触荷重: 80~90N)に数mm程度挿入された状況で、数分の一秒にわたって接触子間電圧が三角波形になったという報告[3]がある。

SF₆ガスは、常温では化学的に安定であるとともに無臭、無害のガスである。接触子の開極時に発生するアーク等の放電で分解するが、大部分は短時間内に元のSF₆分子に再結合する特徴がある。ところが、アーク放電等によって蒸発した電極の金属蒸気などとSF₆分解ガスとの反応によって粉末状の化合物が生じる。

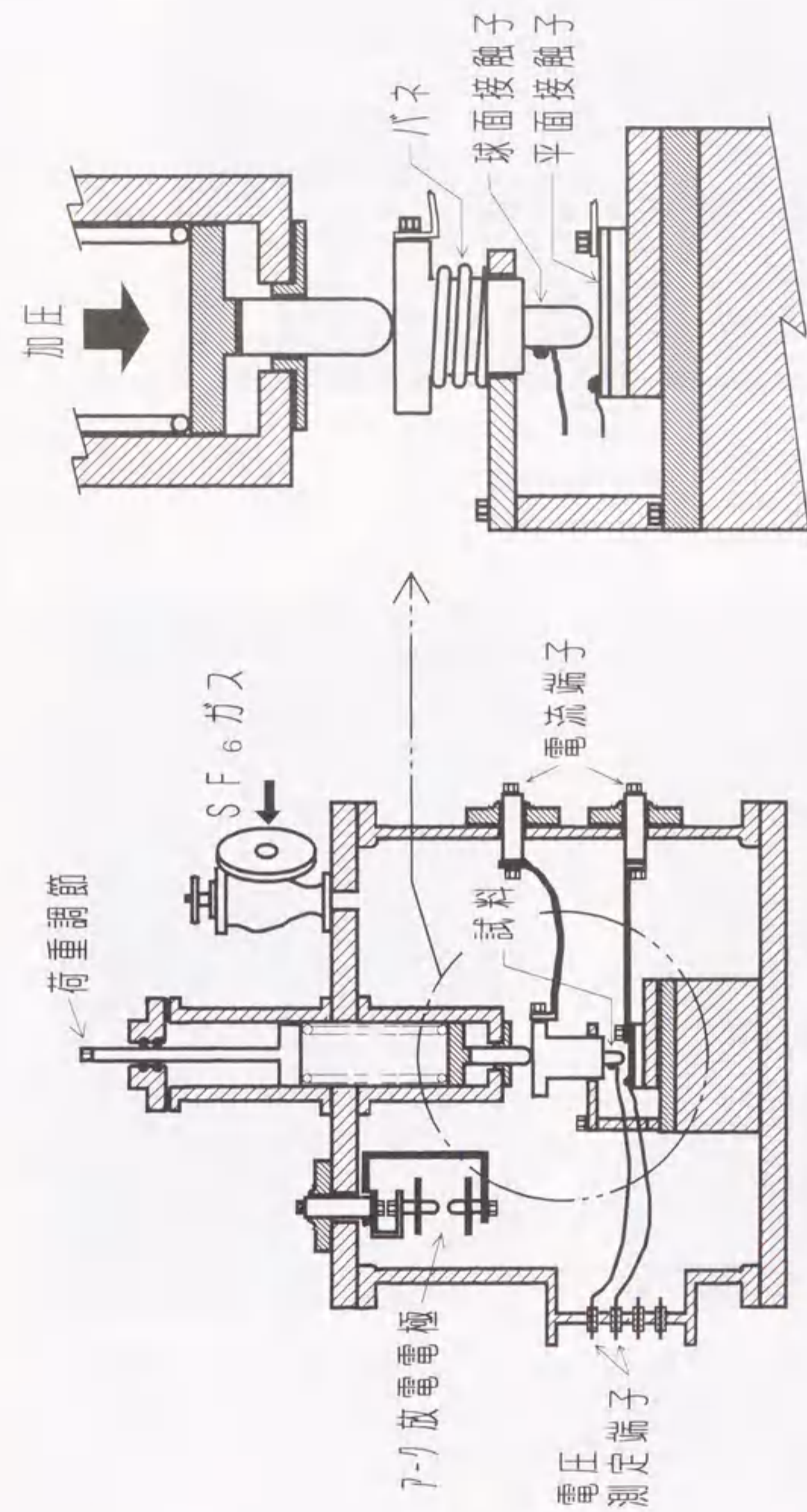
本章では、このSF₆分解生成物の粉末が介在した銅点接触子に数百Aの正弦波交流電流および数千A以上の正弦波状減衰振動大電流の通電を行い、接触子間

の電圧測定ならびに電圧波形を観測し、その特異現象および接触抵抗の挙動について調査した結果を述べる[4]。また、アーク等の放電を伴ったSF₆ガス雰囲気中に類似したフッ化水素ガスおよび接触子に対して有害とされている硫化水素ガスの腐食ガスの雰囲気中に放置させた銅点接触子の接触抵抗を測定し[5]、接触抵抗の荷重特性についても検討する。

5. 2 SF₆ガス中の火花放電にさらされた劣化接触子の接触抵抗特性

実験には銅円柱(10mmφ)の先端を半径5mm程度の球面に加工した球面接触子と、厚さ3mmの銅平板を用いた平面接触子を用いた。両接触子の表面は#1500の研磨紙で研磨した。なお、実験直前に化学研磨(H₂SO₄:HNO₃:H₂O=3:2:1の混酸にHClを少量加えた混合液で研磨後水洗する)を行い、接触子表面の皮膜を除去した。図5. 1に示すSF₆ガス密閉容器(内容積:約30l)の中へ球面接触子と平面接触子とを1mm程度の間隙で対向させて設置した。容器内にSF₆ガスを2気圧(絶対値)充填し、ネオトランスを用いて接触子間に12kVの高電圧を印加させた。20mA、60Hzの繰り返し火花放電が連続的に起こった状態で、これを1時間続けた。なお、本実験では吸着剤は用いていない。図5. 2(a)に接触子間に火花放電をさせた場合の様子を示す。また、放電後の平面および球面接触子の表面の状態を同図(b)、(c)に示す。平面接触子の放電部は接触子導体の蒸発によって円形の浅いくぼみができ、その表面は褐色の変質皮膜で覆われた梨地状をなしている。放電部周辺には白っぽい粉末が付着しており、放電部から離れる程付着量は少ない状況にある。

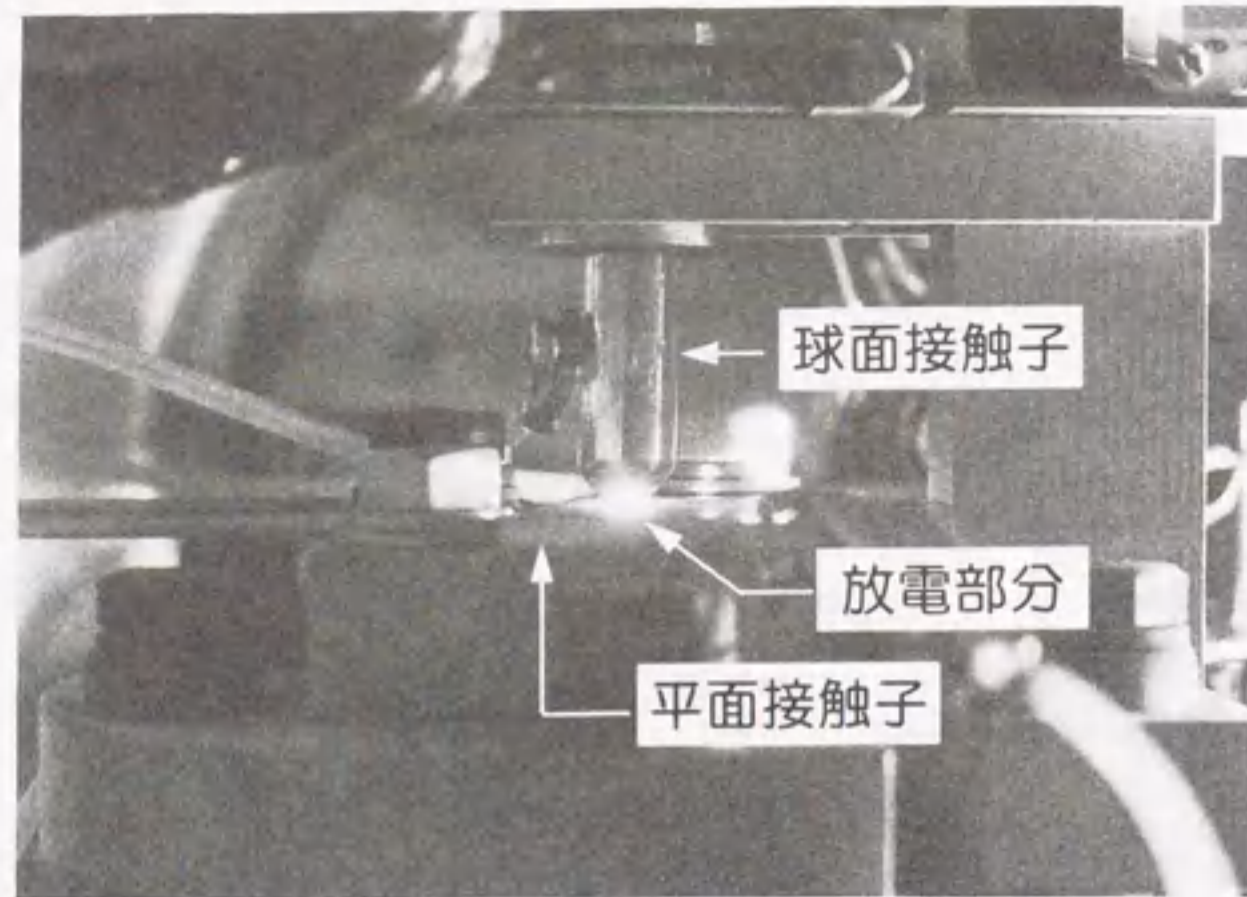
接触抵抗の測定は、放電直後および放電後そのまま容器内に48時間放置した後に行った。この平面接触子を大気中に取り出し、図5. 3に示す加圧装置の固定台に設置する。他方、放電させた球面接触子とは別の清浄な球面接触子(曲率半径:5mmで、鏡面仕上げをした表面に金めっきを施した)を可動台に取り付ける。この球面接触子を平面接触子に接触させて点接触を構成させる。平面接触子と球面接触子との接触位置は図5. 4(a)に示す平面接触子の(1)で表す放電部とその周辺(2)~(4)および実験前に樹脂フィルムで被覆した(5)の被覆部の5カ所とした。接触抵抗は直流1Aを通电した時の接触電圧から算出した。接触荷重を



(a) SF₆ガス密閉容器

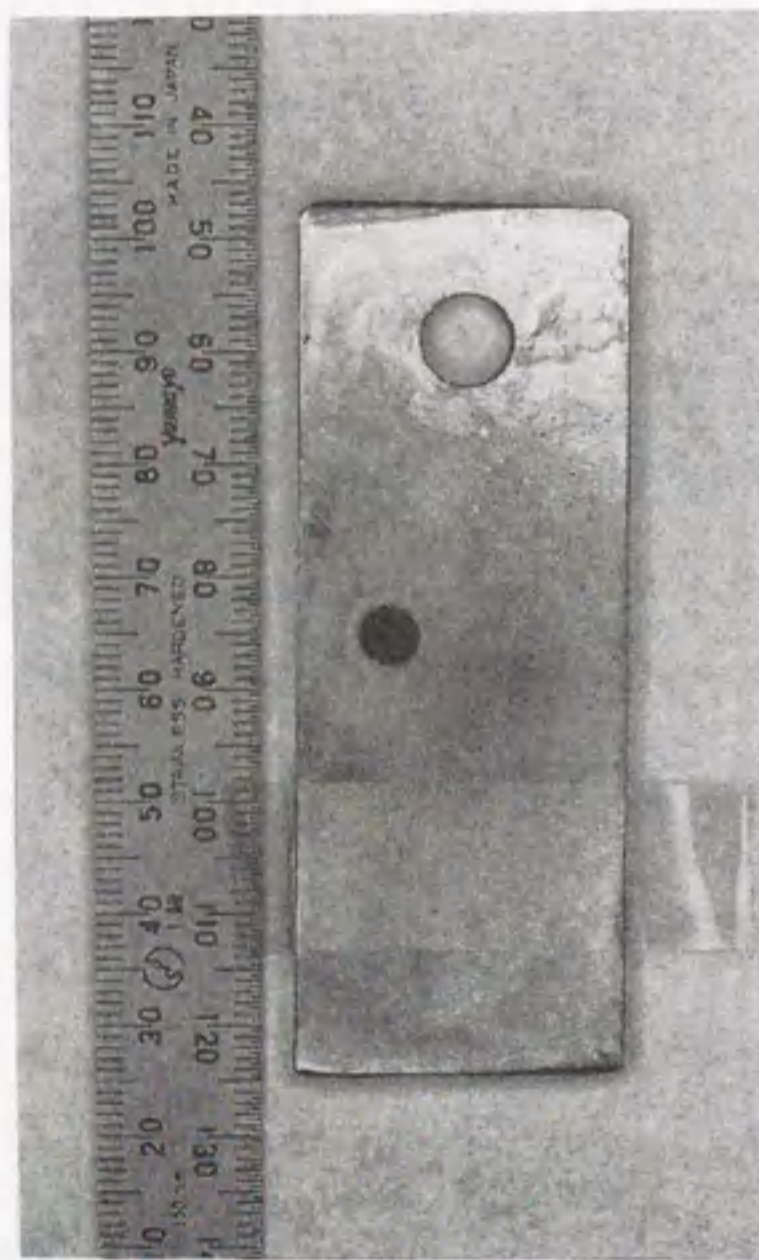
(b) 試料配置

図5. 1 SF₆ガス密閉容器、接触子配置およびアーク放電電極配置



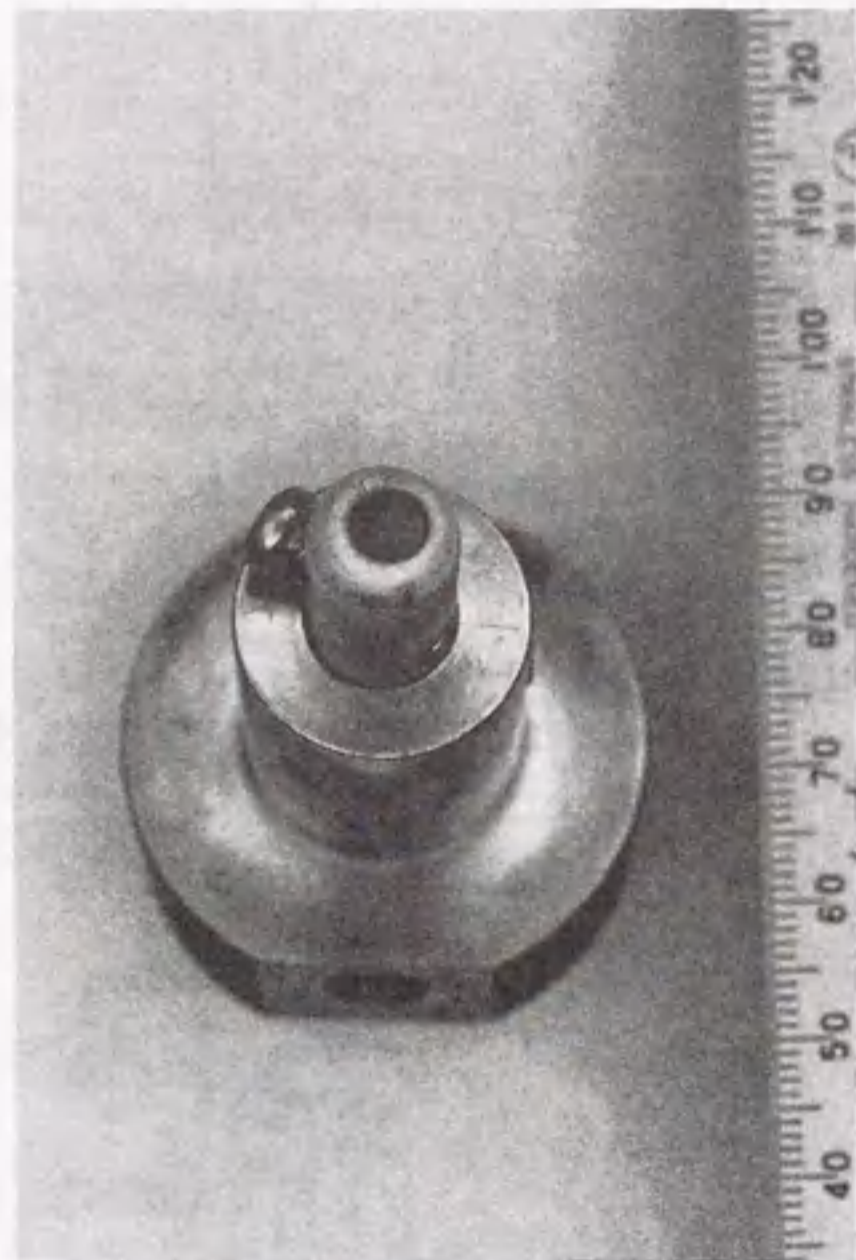
(a) 放電中の接触子

電極間隔 : 1 mm
電 源 : 12 kV
 ネオントランス



(b) 放電後の平面接触子

中央付近の黒い円形部分が放電跡。その周囲に白い粉末が付着している。



(c) 放電後の球面接触子

先端の黒い部分が放電跡。その周囲に白い粉末が付着している。

図 5. 2 放電中の接触子配置および放電後の接触子表面

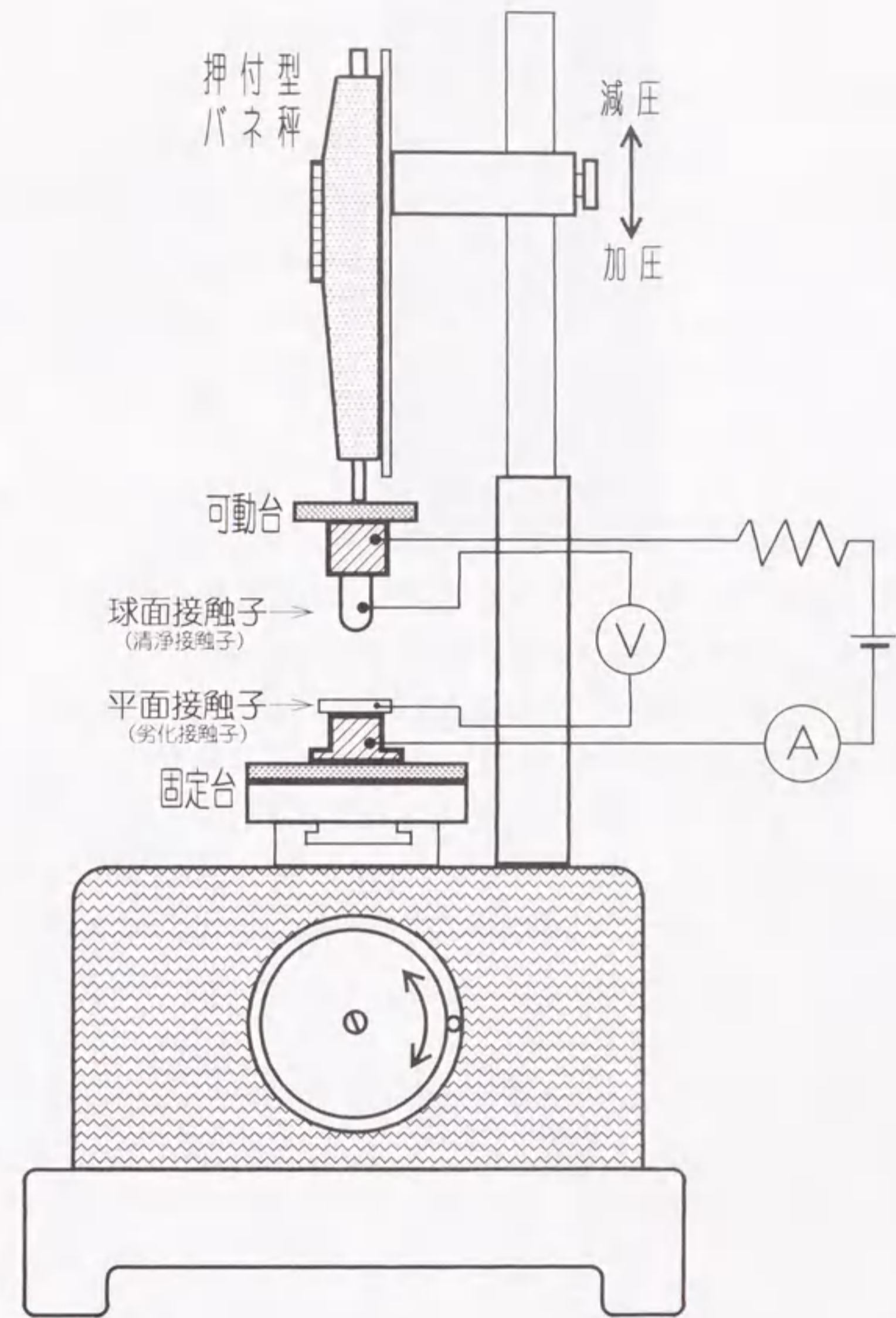
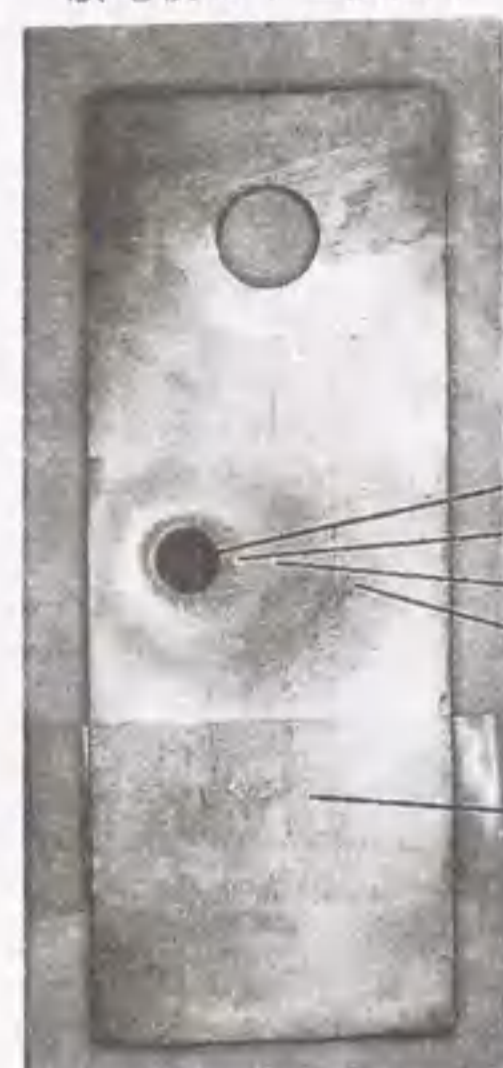


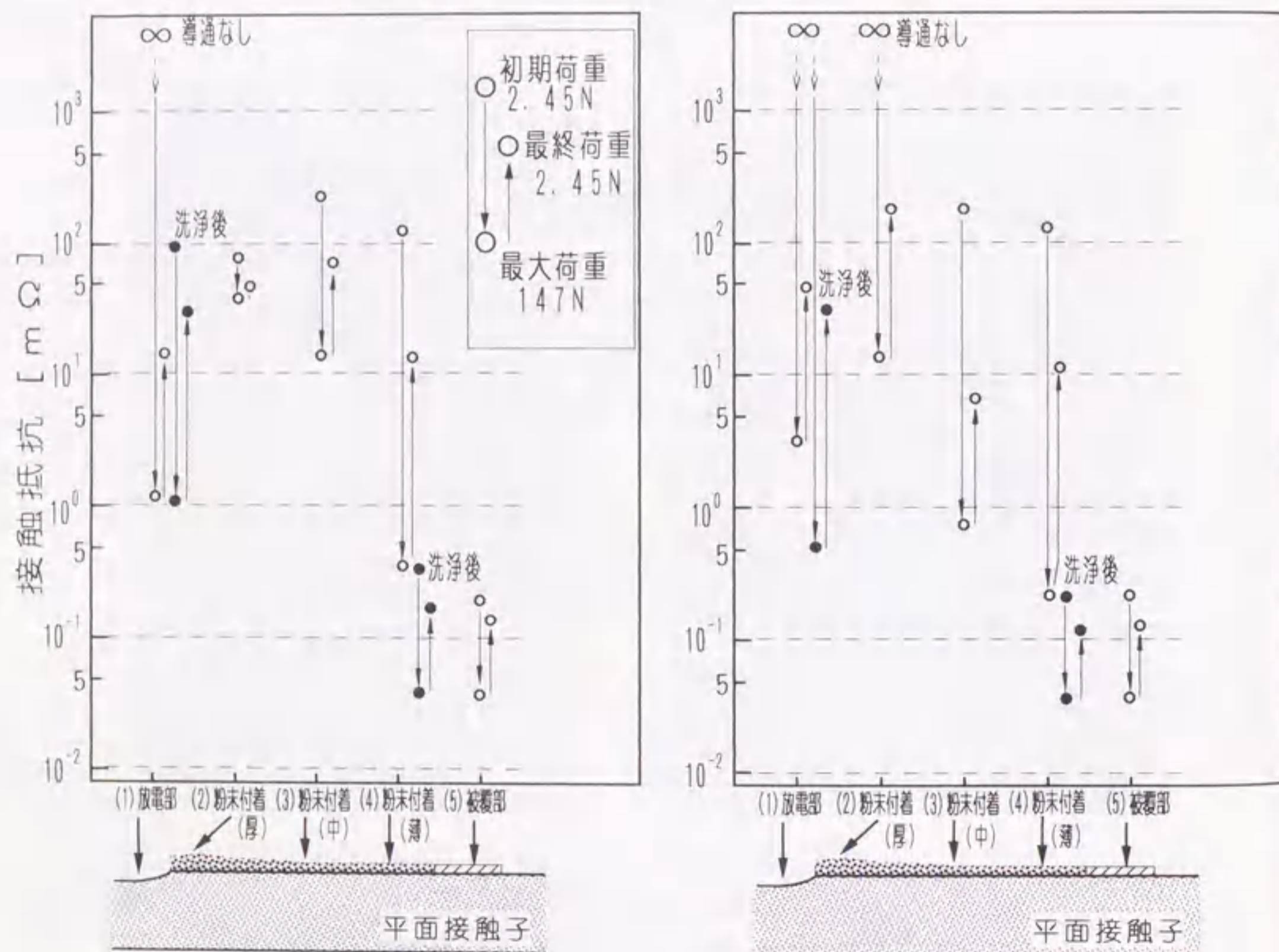
図 5. 3 接触子の加圧装置および接触抵抗測定回路

放電後の平面接触子



- (1) 放電部
- (2) 粉末付着 (厚)
- (3) 粉末付着 (中)
- (4) 粉末付着 (薄)
- (5) 被覆部

(a) 接触抵抗測定位置



(b) 放電直後

(c) 放電後48時間放置

図5.4 放電させた平面接触子各部の接触抵抗特性

2.45~147N の範囲で増減させて接触抵抗の変化を実測した。

放電直後の平面接触子を用いて実測した接触抵抗の様相を同図(b)に示す。放電部(1)での測定においては、初期荷重2.45Nの加圧状態では導通がない状況にあった。荷重を29.4Nに増加したとき初めて導通状態が得られ、荷重147Nで加圧したときの接触抵抗は1mΩとなった。放電部周辺における粉末付着の部分(2)~(4)の位置では、いずれの部分も初期荷重2.45Nにおいて100mΩ以上の高い抵抗値を示している。これは被覆部(5)で実測した接触抵抗0.1mΩに比べて1000倍以上の抵抗値にある。なお、147Nの荷重では粉末の付着量が少ない部分程、接触抵抗は低くなっている。

また、放電部(1)および粉末付着<薄>部(4)の表面をアルコールで洗浄した後も同様の測定を行った。その抵抗値を図中に●印で示す。放電部(1)では表面の変質皮膜は除去できなかったが、初期荷重2.45Nでも導通状態を示し、接触抵抗は100mΩ程度となっている。他方、付着粉末は洗浄で容易に除去できた。粉末付着<薄>(4)の部分における接触抵抗は被覆部(5)での測定値と同程度となっている。特に、最大荷重147Nにおける抵抗値は0.04mΩと低い。

放電後容器内に48時間放置した平面接触子について実測した接触抵抗特性を同図(c)に示す。放電部(1)および粉末付着<厚>(2)の部分において、初期荷重2.45Nの加圧時に導通が得られていない他は、放電直後に実測した場合とほぼ大体同じ傾向にある。

これらのことから、SF₆ガス中で火花放電に直接さらされた劣化部分の接触抵抗は、1mΩ以上と高い状況にあることがわかる。他方、反応生成物の付着した部分は100mΩ以上となるが、それを除去すれば0.1mΩ位で、劣化前と同程度の抵抗値となっている。

SF₆ガス中で火花放電などによって生成された分解生成物であるCuF₂は水分を吸着して二水和物であるCuF₂(H₂O)₂に変化することから接触抵抗特性に変化をもたらすことが予測され、その水分の影響が少ない条件として、密閉容器内で接触抵抗の実測を行った。実験手法としては、図5.1の密閉容器内に図5.5に示すように球面接触子から17mm離れた位置に平面接触子と1mmの間隙で対向させて放電電極(直径3mmの銅丸棒を加工したもの)を設置し、平面接触子との間にネオントランスを用いて15kVの高電圧を印加した。これにより、20mA、

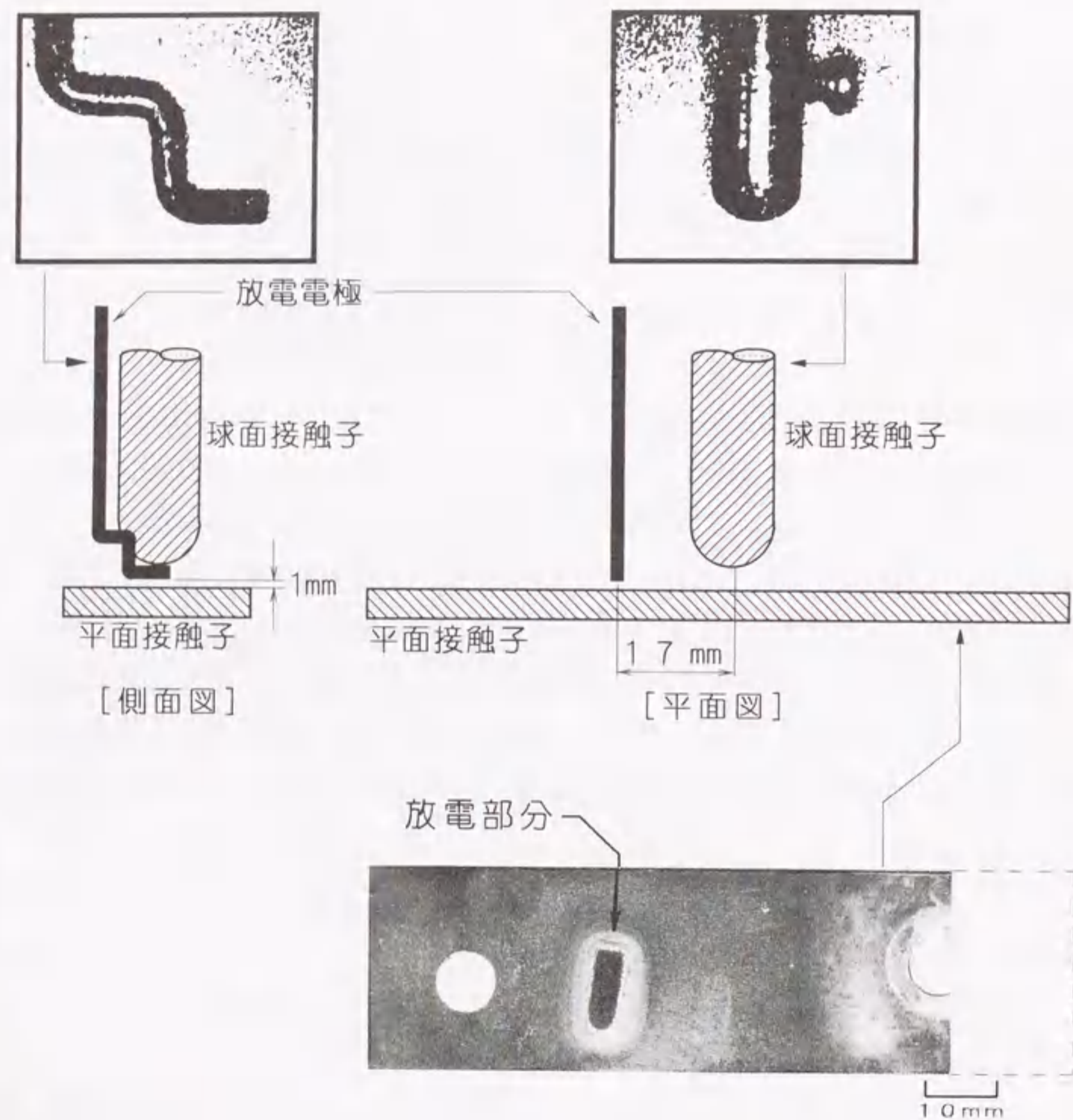


図5.5 放電電極を用いた火花放電
および接触子の配置

60Hzの繰り返し火花放電が連続的に起こる。これを2時間続けた。なお、本実験においても分解ガス等を吸着する吸着剤は使用していない。放電後、放電電極周辺には白い粉末状のSF₆分解生成物が付着する。放電電極から17mm程度離れた球面接触子および平面接触子の表面にも分解生成物が薄く付着した状況にあった。接触抵抗の測定にあたっては、球面および平面接触子をSF₆ガス密閉容器内に放電後20時間放置した後、密閉容器上部の荷重調節ネジを回転させて球面接触子を平面接触子に加圧接触させ、接触抵抗を測定した。

図5.6に実測した接触抵抗と接触荷重との関係を示す。図中の□印は荷重増加時の接触抵抗を示し、■印は荷重減少時の抵抗値を表している。加圧初期1.96Nの荷重における接触抵抗は130mΩ程度である。荷重の増加に伴って抵抗値はわずかに低下し、29.4Nの荷重では85mΩとなっている。その後接触荷重を減少させた場合、接触抵抗はほとんど変化せず、1.96Nで90mΩを示している。

この接触抵抗の様相と前述図5.4で示した大気中での測定結果と比較してみると、加圧初期1.96Nにおける接触抵抗は大気中で実測した場合に粉末が中程度または薄く付着した部分で測定した抵抗値に近似している。なお、実験終了後の接触子表面を観察したところ、接触部分近傍における粉末の付着量は少ない状況にあった。しかしながら、接触荷重を増加させた場合の接触抵抗は大気中での測定時の方が小さい状況にある。したがって、SF₆分解生成物であるCuF₂は、大気中に置かれた場合、気中の水分を吸着して二水和物CuF₂(H₂O)₂に変化すると思われるが、その機械的強度は低いものと判断される。

ここで、清浄な金属表面での接触子における接触抵抗特性として、化学研磨直後に測定した接触抵抗特性を図中に○印および●印で示す。この測定では、2本の銅円柱(10mmφ)の先端を半径5mm程度の球面および平面に加工、研磨した接触子を使用し、前述図5.3の加圧装置を用いて大気中で行った。1.96Nの荷重で接触させた加圧初期の接触抵抗は0.19mΩと低い。荷重の増加とともに抵抗値はこのグラフ上においてほぼ直線的に低下している。また、荷重減少時の接触抵抗は荷重の減少に伴って次第に高くなり、1.96Nまで荷重を減少させたときの抵抗値は0.15mΩであるが、SF₆分解生成物の介在した接触状態における接触抵抗に比して1/1000程度と低い状況にある。

これにより、放電によってできたSF₆分解生成物が接触子表面に付着したり、

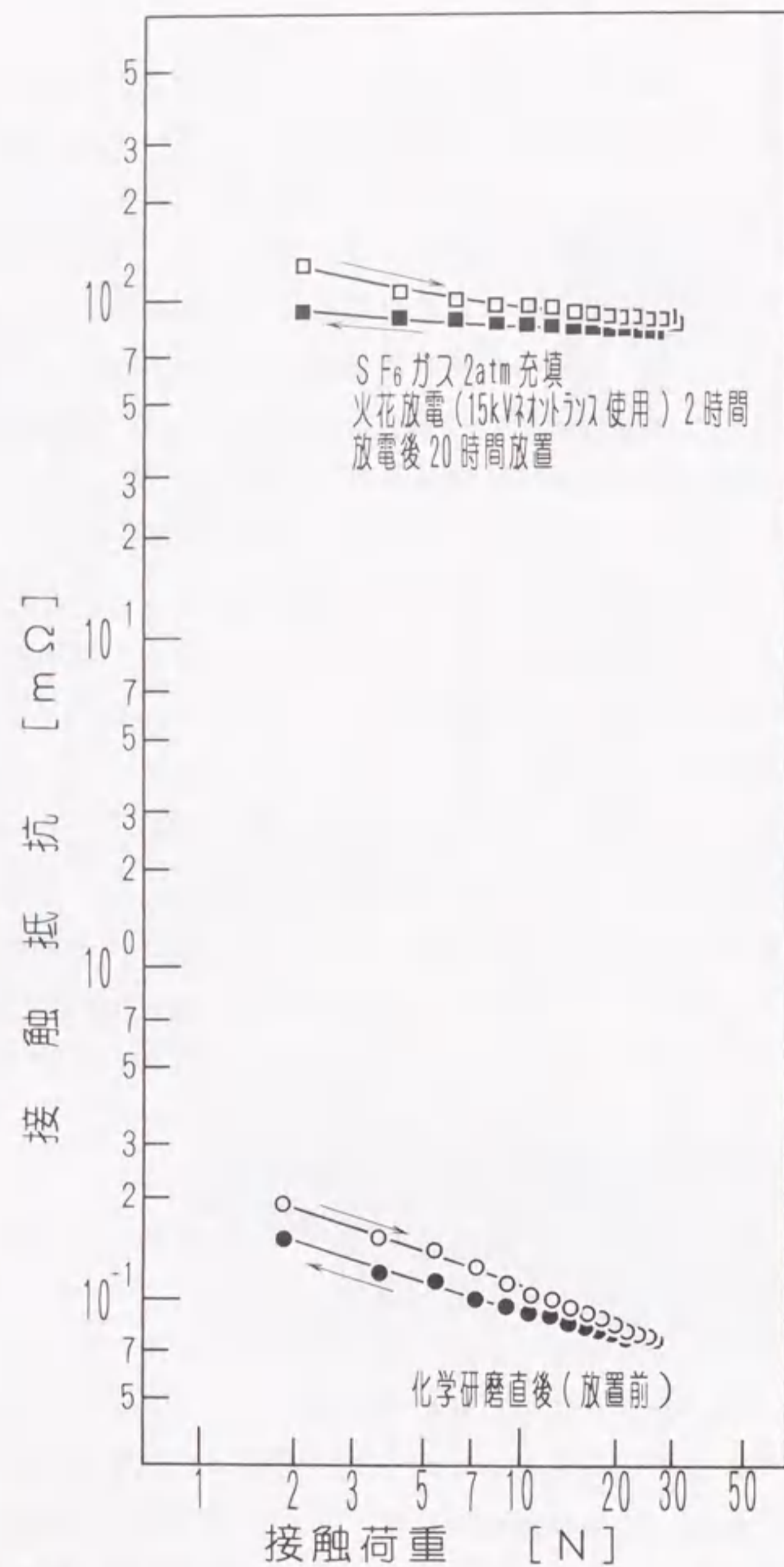


図 5. 6 火花放電後の SF_6 ガス中に放置した接触子の接触抵抗-荷重特性

SF_6 。分解ガスと接触子表面との反応によって生成した皮膜を介在した接触状況においては接触抵抗が非常に高いとともに、接触荷重に対する接触抵抗の変化が小さい様相にあることがわかる。

5. 3 腐食ガス中に放置した点接触子の接触抵抗特性

SF_6 。ガス中でアーク等の放電時に生じる粉末状生成物が接触部分に介在した接触状態において、接触抵抗は清浄な金属接触の状態に比べて100~1,000倍と高い抵抗値が観測され、ときには導通の得られない状況も生じた。また、接触抵抗が高い場合には接触荷重の増減時において接触抵抗の変化が非常に小さくなる特異現象がみられた。

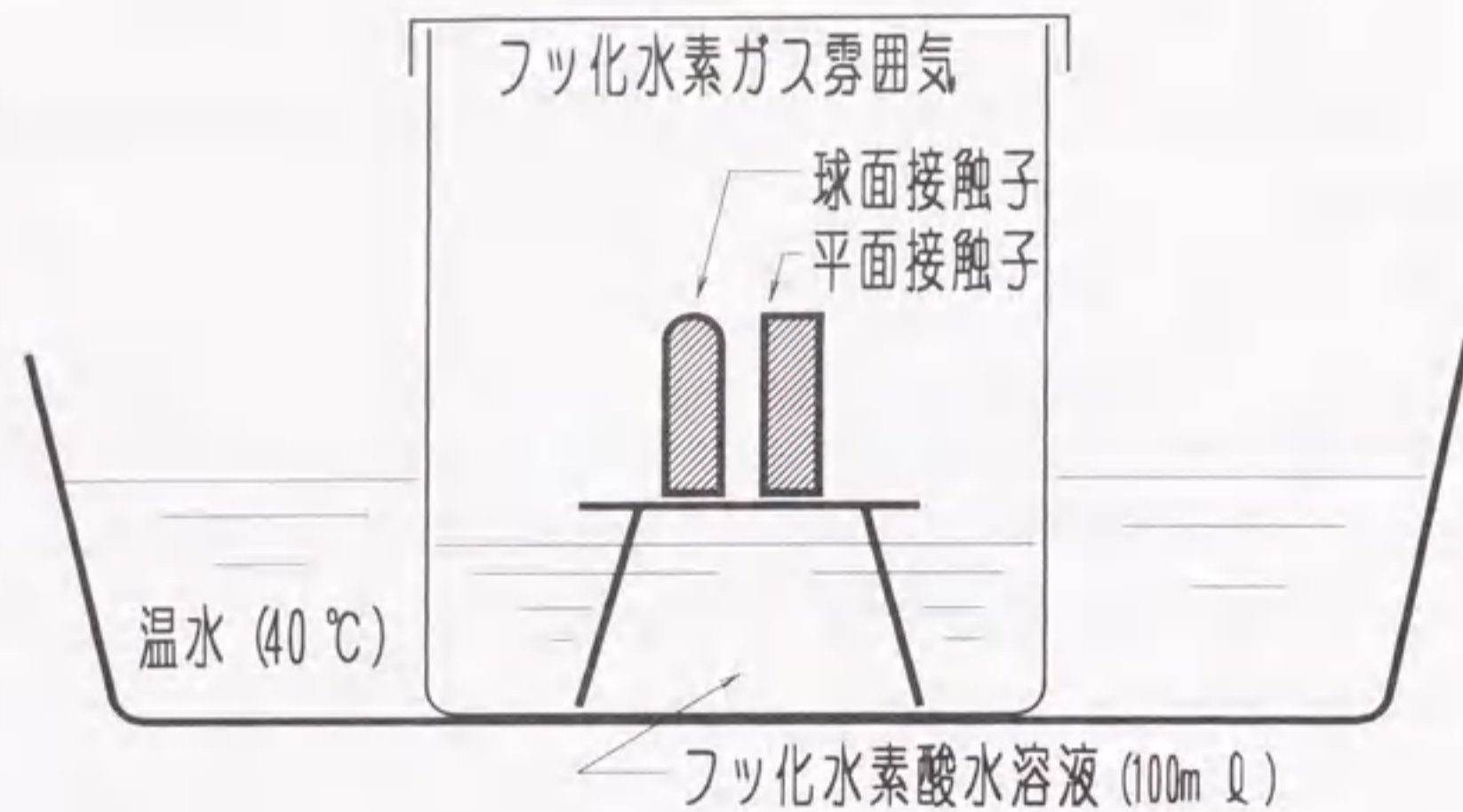
そこで、フッ化水素および硫化水素の腐食ガスの雰囲気中に放置した接触子の接触抵抗を測定し、特異な接触抵抗の挙動について検討した。

5.3.1 腐食ガス容器および接触子の放置条件

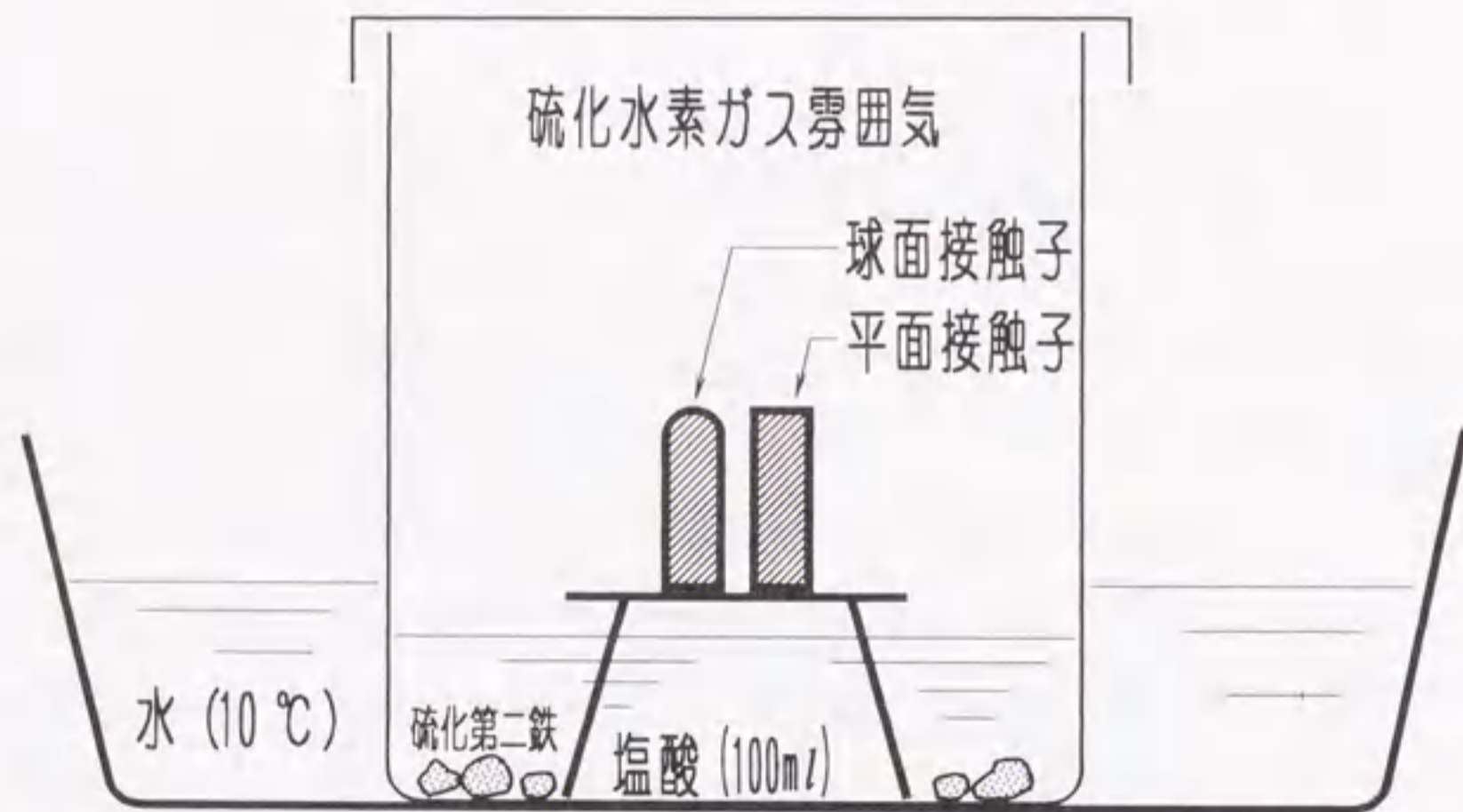
図 5. 7 に腐食ガス容器と接触子の配置を示す。本実験ではフッ化水素および硫化水素の腐食ガスを用いた。前者では、放電後の SF_6 ガス雰囲気中に放置された銅の接触子金属との反応によってできるフッ化物に類似する皮膜が生成され、後者では接触子の有害皮膜として扱われている硫化皮膜が接触子表面にできる。

図(a)にフッ化水素ガス容器および接触子の放置状況を示す。300mlの容器にフッ化水素酸水溶液(フッ化水素55%含有)を100ml入れ、容器を40℃の温水で温める。水溶液中のフッ化水素はガス化して容器内に充満する。直径10mmの銅円柱2本の各先端をそれぞれ曲率半径5mmの球面と平面に加工し、鏡面研磨を施した接触子を化学研磨処理後、フッ化水素酸水溶液に触れないように容器内に5~数十分程度放置させた。また、図(b)は硫化水素ガス容器を示したものである。700mlの容器内に塩酸100mlを入れ、そこに硫化第二鉄25gを加える。塩酸と硫化第二鉄との反応によって容器内に硫化水素ガスが充満する。その雰囲気内に接触子を1~10分程度放置させた。なお、ガスの生成を抑えるために容器は10℃の水で冷却した。

接触子を腐食ガス中に放置させた後、前述の図 5. 3 で示した加圧装置の固定



(a) フッ化水素ガス容器



(b) 硫化水素ガス容器

図 5. 7 腐食ガス容器および接触子の配置

台に平面接触子を設置し、可動台に球面接触子を取り付ける。可動台を下方に移動させて球面接触子を平面接触子に加圧接触させる。接触子間に直流安定化電源（開放電圧：10V）から直流電流 1 A を通電し、接触子間の電圧を測定して電圧電流計法により接触抵抗を求めた。

5.3.2 接触抵抗と接触荷重との関係

フッ化水素ガス雰囲気中に放置した接触子を用いて測定した接触抵抗と接触荷重との関係を図 5. 8 に示す。図中の (b)~(d) の特性はガス雰囲気中に接触子を 40°C でそれぞれ 5, 10, 15 分間放置した場合のものである。また、(e) に示す特性はフッ化水素酸水溶液を常温 (15~20°C) の状態で、接触子を 22 時間放置して測定したものである。なお、(a) の ○ 印および ● 印は前述図 5. 6 に示した化学研磨直後の特性である。

(b) に示す 5 分間放置した接触子では、荷重 1.96 N の加圧初期の接触抵抗は 0.3 mΩ を示し、化学研磨直後に測定した抵抗値の約 1.5 倍となっている。荷重の増加に伴って接触抵抗は低下し、29.4 N の荷重では約 0.1 mΩ まで低下している。荷重を減少させた過程において、接触抵抗は再び高くなるが 1.96 N まで減少させた時点での抵抗値は研磨直後の測定値に近くなっている。しかしながら、(c) の 10 分間放置した場合には、加圧初期における接触抵抗は 0.8 mΩ と相当に高いが、荷重の増加に伴って接触抵抗は急激に低下している。また、荷重を減少させた場合の接触抵抗は急激な変化はなく、1.96 N の荷重まで減少させたときの抵抗値は 0.24 mΩ で、加圧初期の 1/3 程度となっている。このように放置時間が長くなるほど接触抵抗は高い様相を呈している。ガス中に放置された接触子表面に生成した皮膜を光学顕微鏡で観測したところ、放置時間が長いほど皮膜の厚くなっていることが確認された。したがって、放置時間の長いほど接触抵抗が高くなる傾向は皮膜の厚さに起因するものと判断される。

(d) に示す 15 分間ガス中に放置した接触子においては、加圧初期 1.96 N の接触荷重では導通がなく、25.5 N の荷重で導通状態を得た。また、接触抵抗は化学研磨直後の接触子における抵抗値に比べて全体的に約 10 倍ほど高い状況にある。さらに (e) の特性においては、接触抵抗が 10 mΩ 以上と非常に高く、接触荷重の増減に伴う接触抵抗の変化も小さくなっている。この様相は図 5. 6 で示した火花

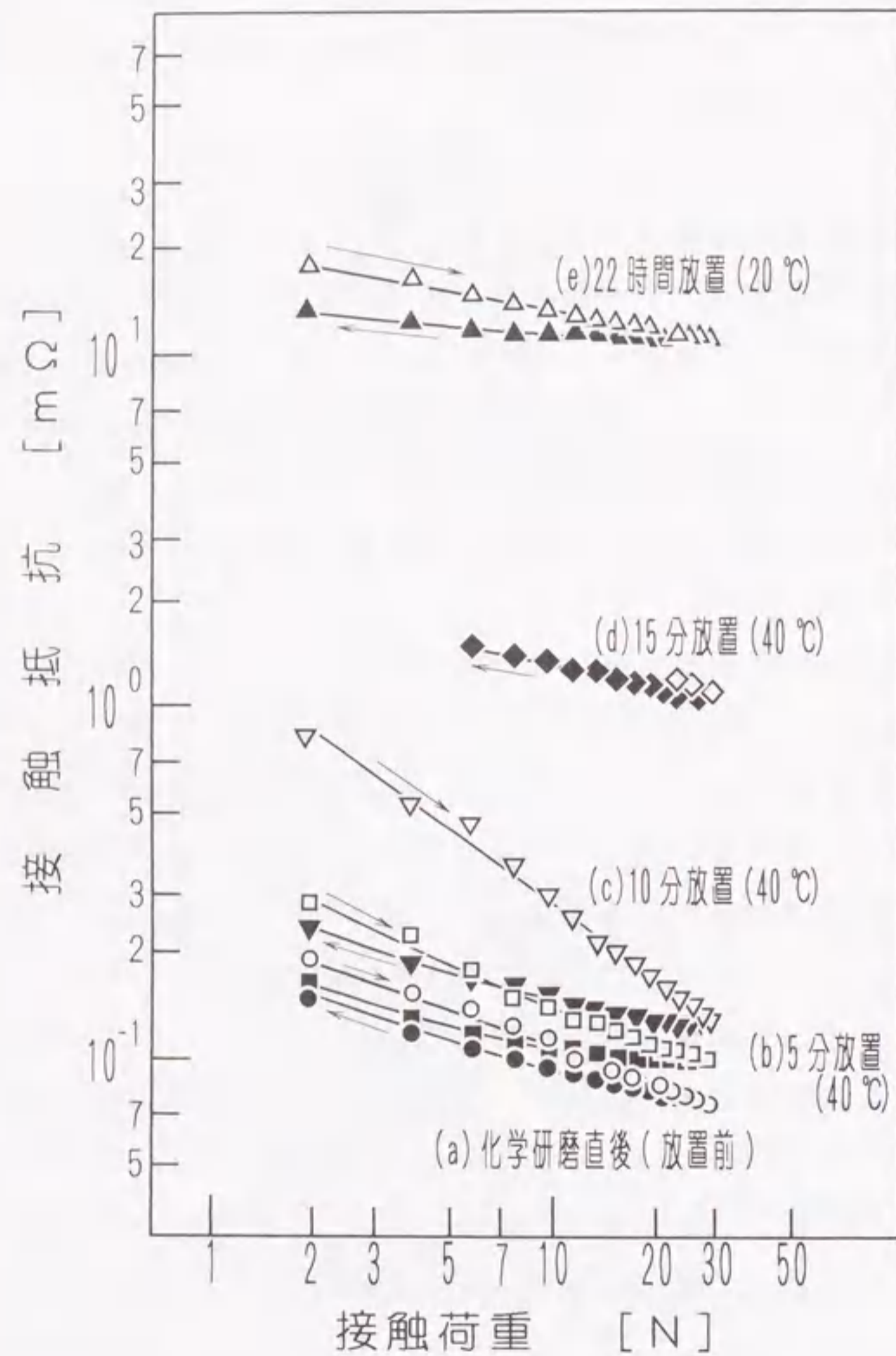


図 5.8 フッ化水素ガス中に放置した接触子の接触抵抗—荷重特性

放電後の SF₆ ガス雰囲気中に放置した接触子の接触抵抗特性と類似している。

次に硫化水素ガス中に放置した接触子の接触抵抗と接触荷重との関係を図 5.9 に示す。(b) に示す 1 分間ガス中に放置した接触子の接触抵抗は比較的 low、化学研磨直後の接触子の抵抗値比べて 1.3 倍程度である。また、接触荷重の増減に対する抵抗値の様相も化学研磨直後の特性に近似している。しかしながら、放置時間が長くなるにしたがって接触抵抗が高くなるとともに、接触荷重に対する抵抗値の変化も小さくなっている。(d) に示す 5 分間ガス中に放置した接触子においては、SF₆ ガス雰囲気中に放置した接触子やフッ化水素ガス中に長時間放置した場合と同様の様相を示している。

5.3.3 高抵抗皮膜や異物を介した接触状態における接触抵抗の荷重依存性

通常、大気中にさらされた接触子表面には酸化皮膜などの汚染皮膜が生成する。中でも、SF₆ ガス中での接触子はアークなどの放電時に生じる粉末状生成物や分解ガスによって生成される汚染皮膜を介在した状態で接触することになる。このような接触状態においては、清浄な金属表面同士による接触時の接触抵抗特性とは異なった様相を示す。

一般に、皮膜抵抗に起因する接触抵抗 R_f は円形接触面の半径 a および皮膜の厚さ D_f によって次式で表される [6]。なお、 ρ_f は皮膜の抵抗率であり、 S は円形接触面の面積である。

$$R_f = \frac{\rho_f \cdot D_f}{\pi a^2} = \frac{\rho_f \cdot D_f}{S} \quad \dots \dots (5.1)$$

この皮膜抵抗においても接触面の大きさに従うので、接触子の変形状態によって接触抵抗の特性が異なる。接触面が弾性変形によって形成される場合の接触面の半径 a は接触荷重 P の $1/3$ 乗に比例する。他方、塑性変形を伴って接触面が拡大する場合の接触面の半径 a は荷重 P の $1/2$ に比例する [7]。したがって、皮膜抵抗 R_f は接触荷重 P に対して $2/3 \sim 1$ 乗に反比例する。なお、このような接触状態においても接触部分での電流集中に起因する集中抵抗が現れるので、一般的には集中抵抗 R_c と皮膜抵抗 R_f との総和を接触抵抗 R として扱う。

$$R = R_c + R_f \quad \dots \dots (5.2)$$

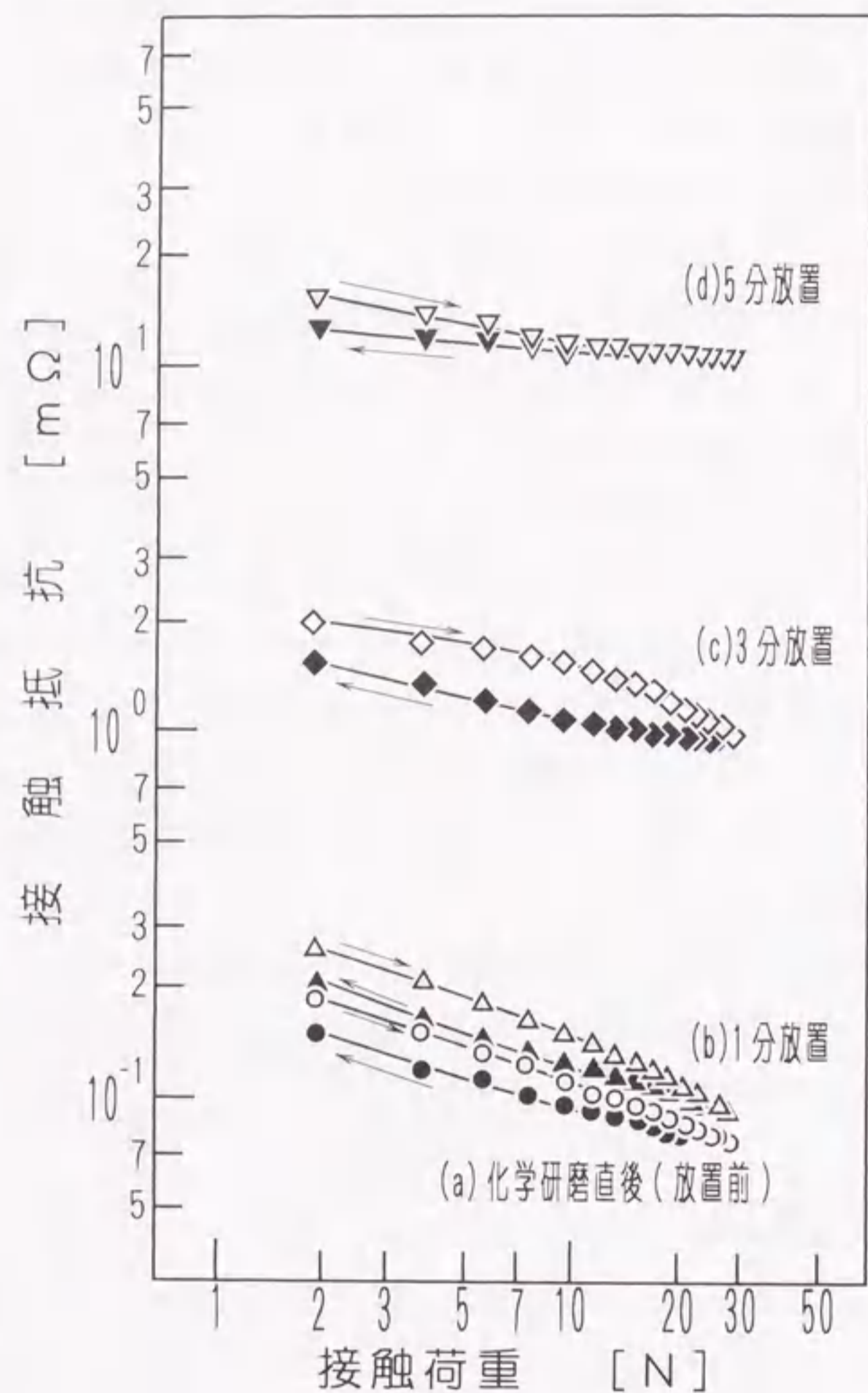


図 5.9 硫化水素ガス中に放置した接触子の接触抵抗-荷重特性

しかしながら、皮膜抵抗の抵抗値は集中抵抗よりも高い場合が多く、接触抵抗は(5.1)式で示される皮膜抵抗の特性となる。

本実測において図 5.8(c)に▽印で示すフッ化水素ガス中に10分間放置した接触子での特性が唯一(5.1)式に近似した様相にあり、両対数のグラフ上で傾きが1に近い様相となっている。その他、放置時間の長い場合には接触荷重に対する接触抵抗の変化は小さい状況にある。

これらのことから、本実験に用いたSF₆分解生成物や皮膜などが介在した接触状態においては、その介在物質は絶縁性が高く、前述(5.1)式で示されるような接触面全域において皮膜を介した導通状態は得られず、接触面の微小部分において機械的あるいは電気的な皮膜破壊が生じ、通電路を形成していると考えられる。また、この通電路は接触荷重の増加に関わらずほとんど拡大しないために、接触抵抗は非常に高く、接触荷重に対する抵抗変化が小さくなったと判断される。なお、実験後の接触子表面を光学顕微鏡で観察したところ、接触部分の中心部分において皮膜が破壊し、通電に寄与したと推測される痕跡を確認した。

5.4 正弦波交流電流の連続通電時における接触電圧および接触抵抗

前述図 5.1に示すSF₆ガス密閉容器内に球面および平面接触子を設置し、容器内上部に取り付けたアーク放電電極を用いて、放電を行った。アーク放電電極(ギャップ:5mm)は接触子から200mm程度離して配置し、接触子とは別に通電できる。ここに直流10Aのアーク放電を7分30秒間継続させた。これはSF₆ガス内ではアーク放電が不安定であるため、確実に継続する時間ということで設定した時間である。放電後粉末状のSF₆分解生成物が霧状に容器内に充満する。この粉末は白色で時間の経過とともに沈澱し、平面接触子の表面にも薄く堆積する。密閉容器内には分解ガス等を吸着する吸着剤を設置していないので、通常のガス絶縁機器における場合よりも、多量の分解生成物が生じていた。放電後、この粉末状生成物が平面接触子の上に堆積した状態でSF₆ガス容器内に約1日放置した後、容器上部の荷重調節ネジの回転によって球面接触子を平面接触子に押し付けて接触させた。なお、堆積した生成物を顕微鏡によって観測したところ、その粒径は数μm~数十μmの範囲にあり、それが2~3層堆積した状態にあった。

図5. 10に示す通電回路において、60Hz、200Vの商用電源からトランスを介して降圧し、粉末状のSF₆分解生成物が介在する銅点接触子に通電する。本実験では電源設備の都合上、電流を150A～600A(実効値)の範囲に設定した。なお、接触子間の開放電圧は、前述の電流範囲で1V～5V(実効値)である。

電流を150Aから300Aおよび450Aと段階的に増大させ、それぞれ5分間の通電期間において接触子間の電圧および電流波形を測定した。さらに、電流を600Aに増大させ、約4時間の連続通電を行なった。その後、電流を減少させる過程においても、450A、300Aおよび150Aの各電流値で波形の測定を行なった。

接触荷重を9.8Nに調整した場合の電圧および電流波形の一例を図5. 11に示す。通電当初、150Aおよび300Aの各段階で、少なくとも電圧波形が方形波に近い状態で持続している。しかしながら、電圧波形は電流の増大とともに変化し、450Aの通電時には三角波状を示している。さらに、600Aまで電流を増大させ、4時間の連続通電後の電圧波形は正弦波状に近い状態となっている。その後、電流を減少させた場合の電圧波形は正弦波状を保っている。

また、図5. 12は図5. 11の各電圧波形から求めた接触間電圧の波高値を通電電流の実効値に対してプロットしたものである。通電初期の150Aから600Aまで増大する過程では、接触子間電圧は波高値で160～170mVの間にあり、ほとんど変化していない。600Aの電流を4時間連続通電させた後の電圧波高値は158mVから118mVまで低下している。その後の電圧の波高値は通電電流にほぼ比例して低下する様相となっている。以上のような電圧波形およびその波高値の推移の特徴は、数回の同様の実験において再現性よく観測された。

このように実験の再現性は非常に良好なので、電圧波形は正弦波ではないが、図5. 11に示した各波形の通電電流最大瞬時に於ける電圧および電流値から接触抵抗を算定し、また、そのときの消費電力を求めた。その接触抵抗および消費電力と通電電流との関係を図5. 13に示す。図中の○印および●印は接触抵抗を示し、それぞれ電流増大時および減少時の抵抗値を表している。また、□印および■印は消費電力である。150Aの通電初期において、接触抵抗は0.77mΩ程度で、電流の増大に伴って抵抗値は通電電流にほぼ反比例して低下している。通電電流を600Aに増大した直後の接触抵抗は0.19mΩまで低下しており、4時間の連続通電を行なった後には、さらに0.14mΩまで低下している。その後、電流を減少

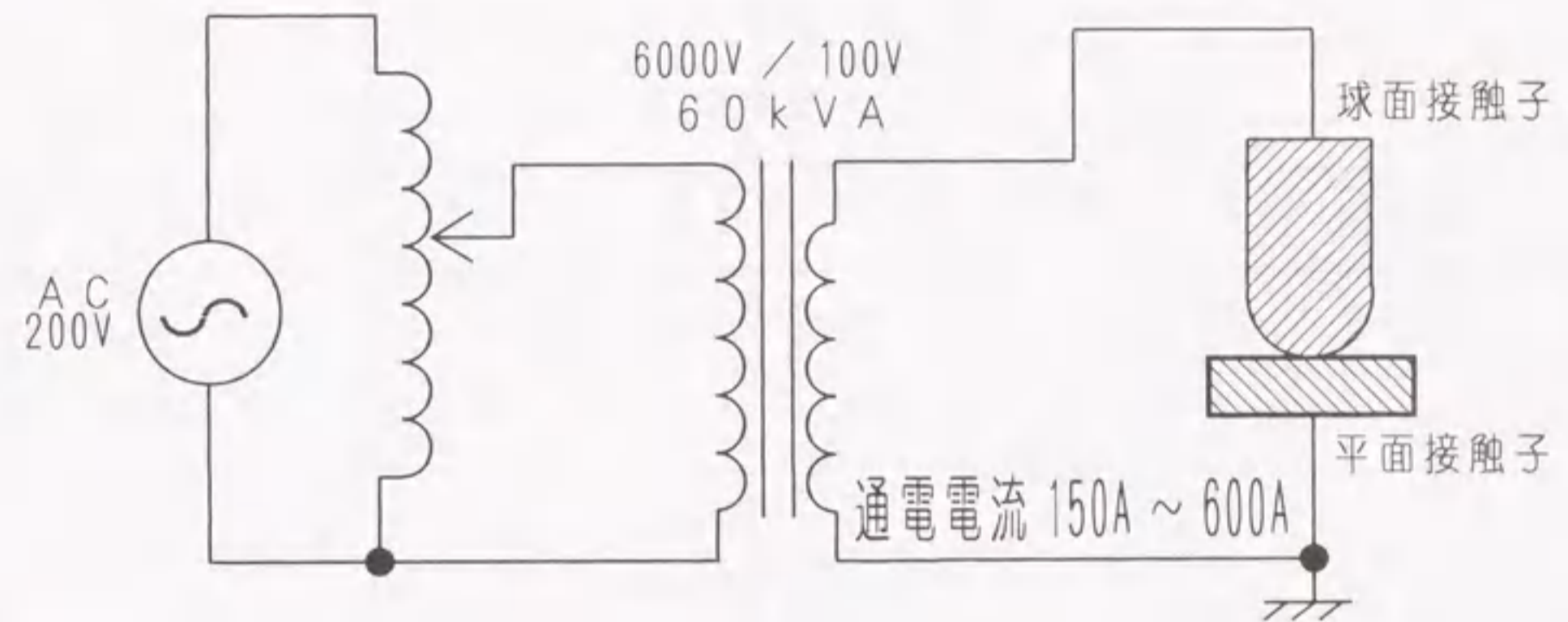


図5. 10 交流電流通電試験回路

(上段：電圧波形，下段：電流波形)

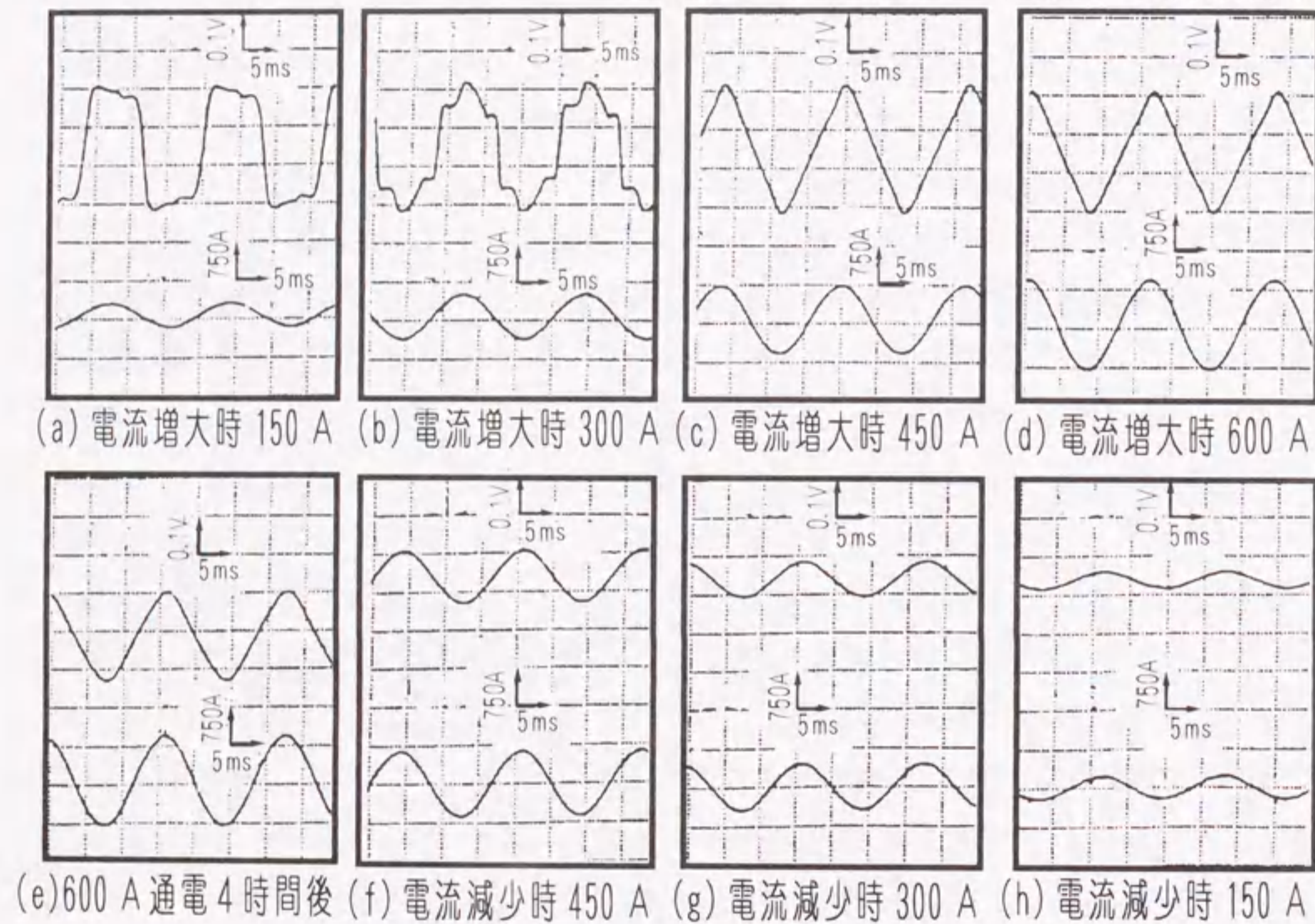


図 5. 11 SF₆ 分解生成物が介在した銅点接触子の交流通電時における接触子間電圧波形の推移 (接触荷重: 9. 8 N)

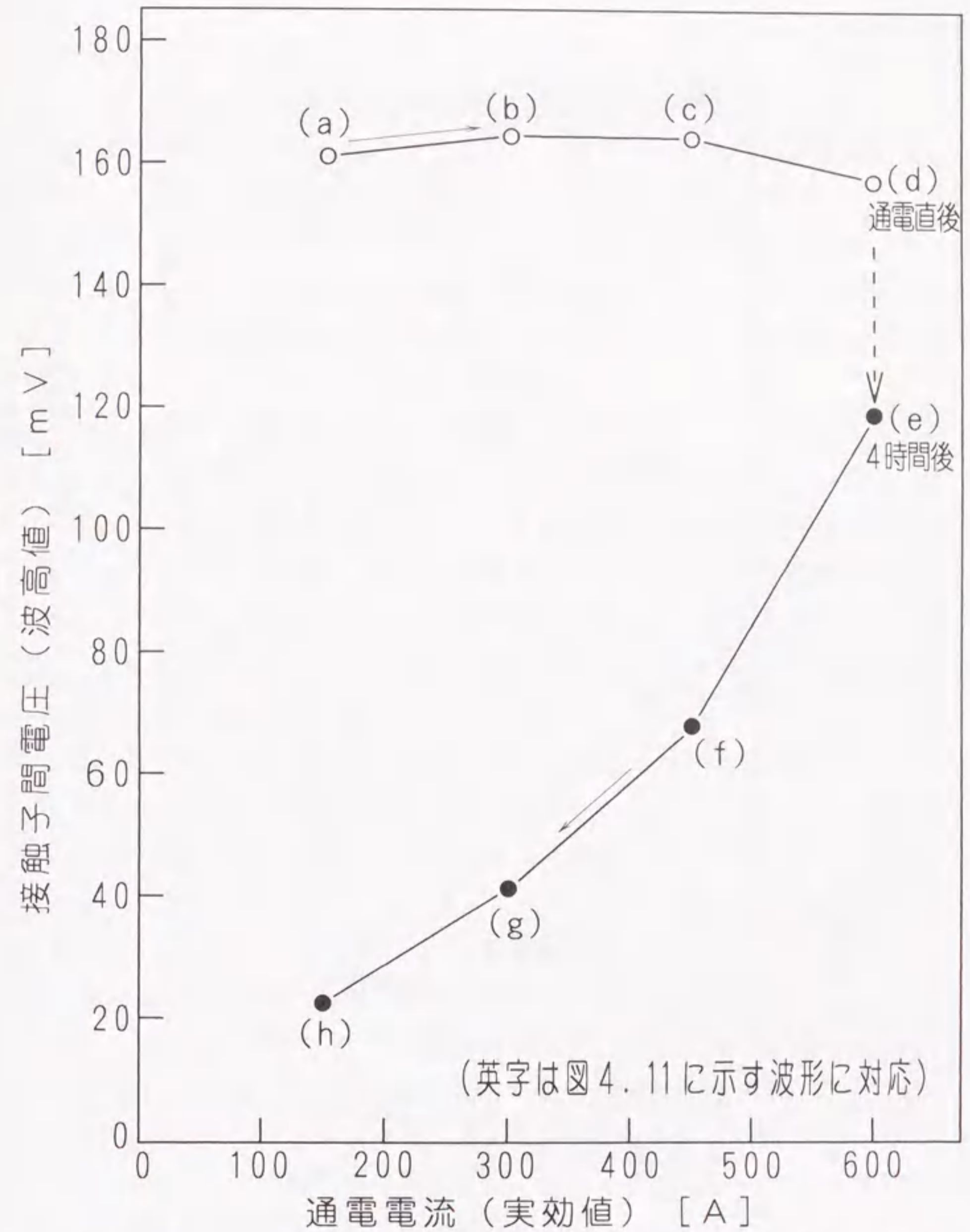


図 5. 12 SF₆ 分解生成物が介在した銅点接触子の交流電流通電時における接触子電圧波高値の推移 (接触荷重: 9. 8 N)

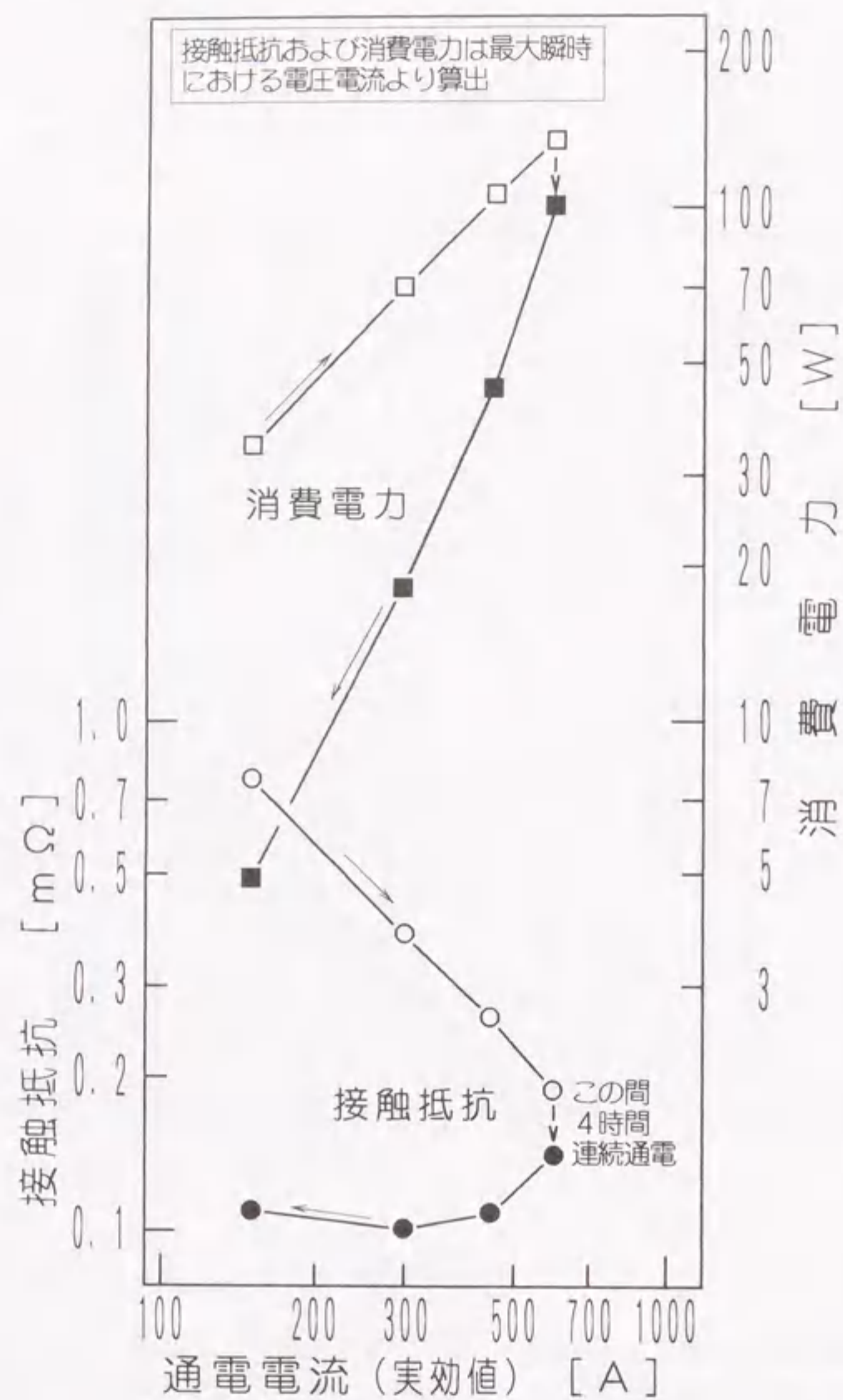


図 5. 13 SF₆ 分解生成物が介在した交流電流通電における接触抵抗および消費電力の変化 (接触荷重: 9.8 N)

させた場合、接触抵抗にはほとんど変化がなく、最終の150Aを通電したときには0.1mΩ程度で、通電初期の抵抗値に比べて約1/8となっている。

他方、この実験と同じ接触荷重で金属接触している清浄な銅接触子においてSF₆ガス中で通電試験を行ったところ、電圧波形は常に正弦波状であり、その大きさも700Aの通電で0.1V以上に達し、通電電流に比例して増減していることが確認できた。この場合の接触抵抗は約0.14mΩで、本実験の最終到達値のレベルにあった。このことから4時間以上の長時間を要して金属接触に近い状態になったと思われる。

また、接触子間の消費電力は通電電流の増大時において電流にほぼ比例する様相を示し、減少時には電流の2乗に比例して減少する傾向となっている。通常、オームの法則に従う金属接触子では、その部分で消費される電力は電流の2乗に比例する。しかしながら、本特性では電流の増大時において接触子間の電圧がほぼ一定であるために、消費電力の増加割合は比例的である。反面、電流の減少時には、接触抵抗がほとんど一定の状態にあることから、消費電力は電流の2乗にほぼ比例する傾向を示している。

これらのことから、SF₆分解生成物が介在した接触子において、通電電流が小さい場合には、接触抵抗が高く、消費電力も大きくなるので、接触不良や異常発熱等の接触子障害を誘発しやすい状況にあるといえる。

5. 5 減衰大電流通電時の接触子間電圧波形および接触抵抗

前節では、連続通電できる電源設備の制約から最大600A(実効値)までの通電試験を行った。さらに大電流通電時での特性を調べるために、図5.14に示すLC回路を用いて、正弦波状減衰振動大電流の通電試験を実施した。電流の周波数は150Hzであり、約20サイクル前後で電流は減衰消滅した。また、通電電流の大きさは、減衰振動電流第1波高値で500A~5,500Aの範囲にあった。

5.2節に示した手順で準備したSF₆分解生成物が付着した接触子を接触させ、振動電流の第1波高値を500A、1,000A、1,500Aと500A毎に増大させて繰り返し電流を注入する。なお、接触荷重は2N、9.8N、29.4Nおよび68.6Nとし、それぞれについて同様の通電試験を行った。

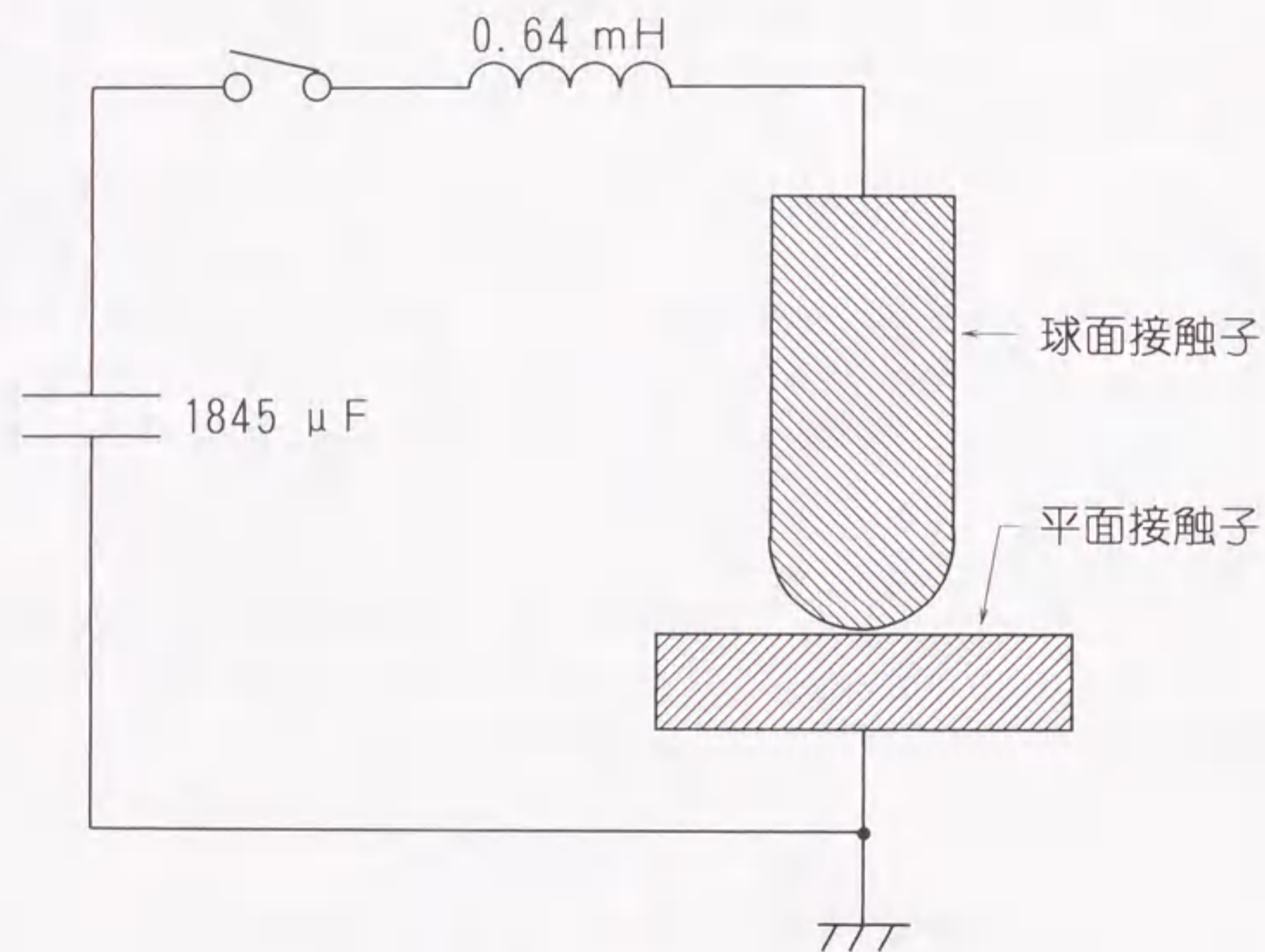


図 5. 14 減衰振動大電流通電試験回路
($f = 150 \text{ Hz}$)

SF。分解生成物が2～3層介在した接触子に第1波高値が1,000Aの減衰電流を通電させたときの接触子間の電圧波形および電流波形を図5. 15に示す。同図(a)は接触荷重が2Nの場合の波形である。接触子間の電圧波形は通電初期から方形波状の歪んだ状態となっている。また、電圧の大きさは電流の減衰に比例して低下せず、ほぼ一定の状態が続いた。12～14サイクル後、電圧の低下が始まり、それに伴って波形も三角波状を経由して正弦波状に変化した。同図(b)は68.6Nの荷重で接触させた場合の測定結果である。電圧の波形は、通電初期からほぼ正弦波状で、電圧の大きさも電流の減衰とともに低下している。

なお、比較のために、SF。分解生成物が介在していない銅の金属接触の場合についても同様の測定を行なったところ、接触子間電圧の波形は正弦波状であり、方形波状や三角波状の波形が現われることはなかった。また、電圧の大きさも電流の減衰に比例して低下した。

以上の観測結果から、SF。分解生成物の介在した点接触において、正弦波状減衰振動大電流の通電時に接触子間に現れる電圧波形には次の二つの特徴のあることが明らかとなった。(1)接触荷重が低く、しかも通電電流が比較的小さい場合には、接触子間の電圧波形は方形波状を呈する。(2)接触荷重が数十Nと高い場合、あるいは数千Aという大電流を通電した場合には、通常の金属接触している点接触子と同様に、正弦波状の電圧波形が観測される。

図5. 16は接触部分にSF。分解生成物が介在した点接触子を2N, 9.8N, 29.4N, 68.6Nの各接触荷重で加圧接触させたそれぞれの場合について、減衰振動電流を通電したときの通電電流と接触抵抗との関係を示したものである。接触抵抗の値は、前述図5. 15で示したそれぞれの電圧、電流波形を用いて、電流の第1波高値とその時点の電圧値から算出している。各接触子に500A(波高値)を通電した場合の接触抵抗は、 $0.3\text{m}\Omega$ から $0.4\text{m}\Omega$ の範囲にある。接触抵抗は、通電電流の増大に伴って低下し、2,000A以上の通電状態では、次に示す金属接触している銅点接触子の接触抵抗と同程度の大きさにまで低下している。

他方、SF。分解生成物が介在していない場合として、接触子表面が清浄な状態にあり、金属接触している銅点接触子における特性を図5. 17に示す。500Aを通電したときの接触抵抗は2Nの接触荷重で $0.2\text{m}\Omega$ 程度にあり、68.6Nの荷重では、 $0.05\text{m}\Omega$ と小さい。これらの抵抗値は、前述図5. 16で示したSF。分

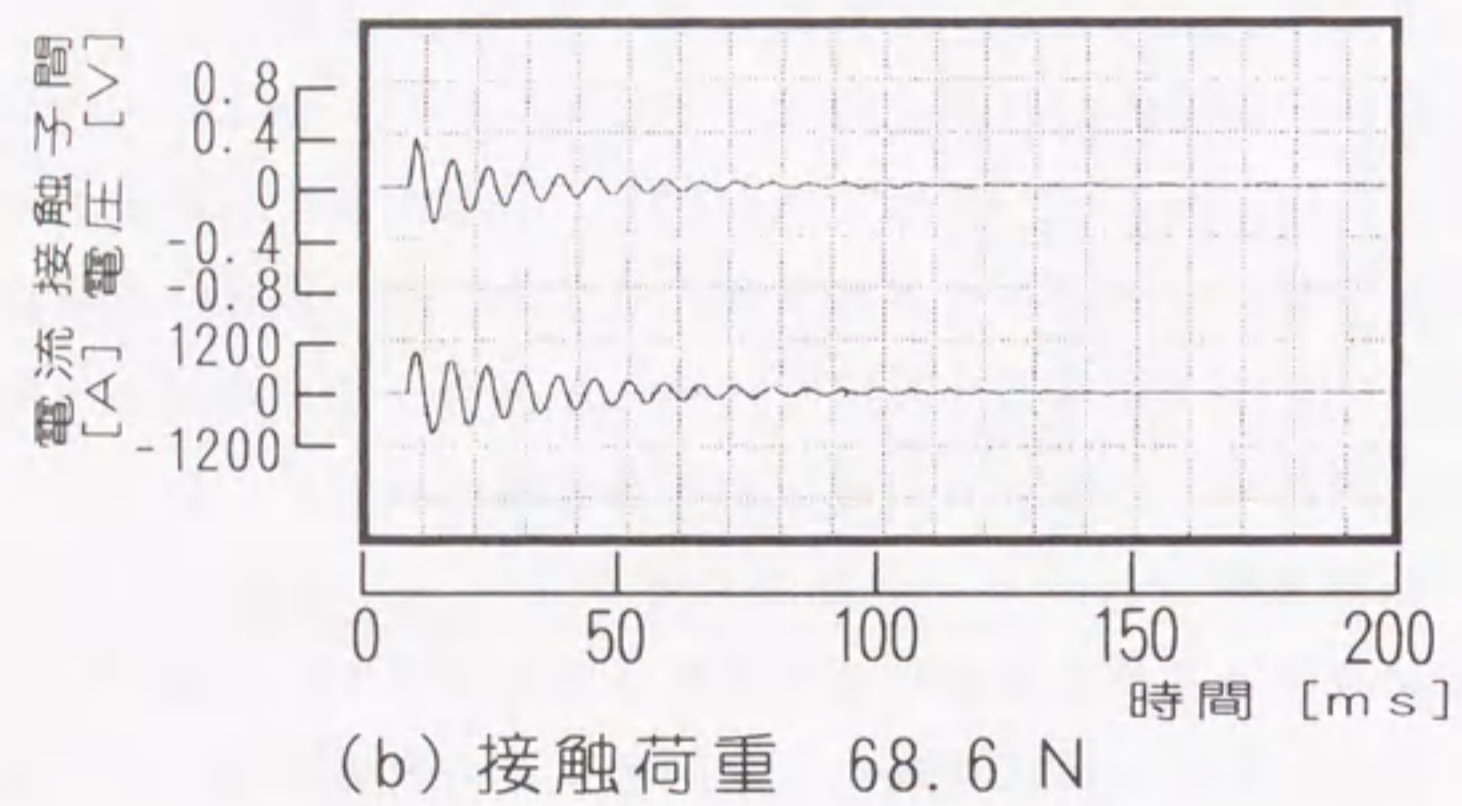
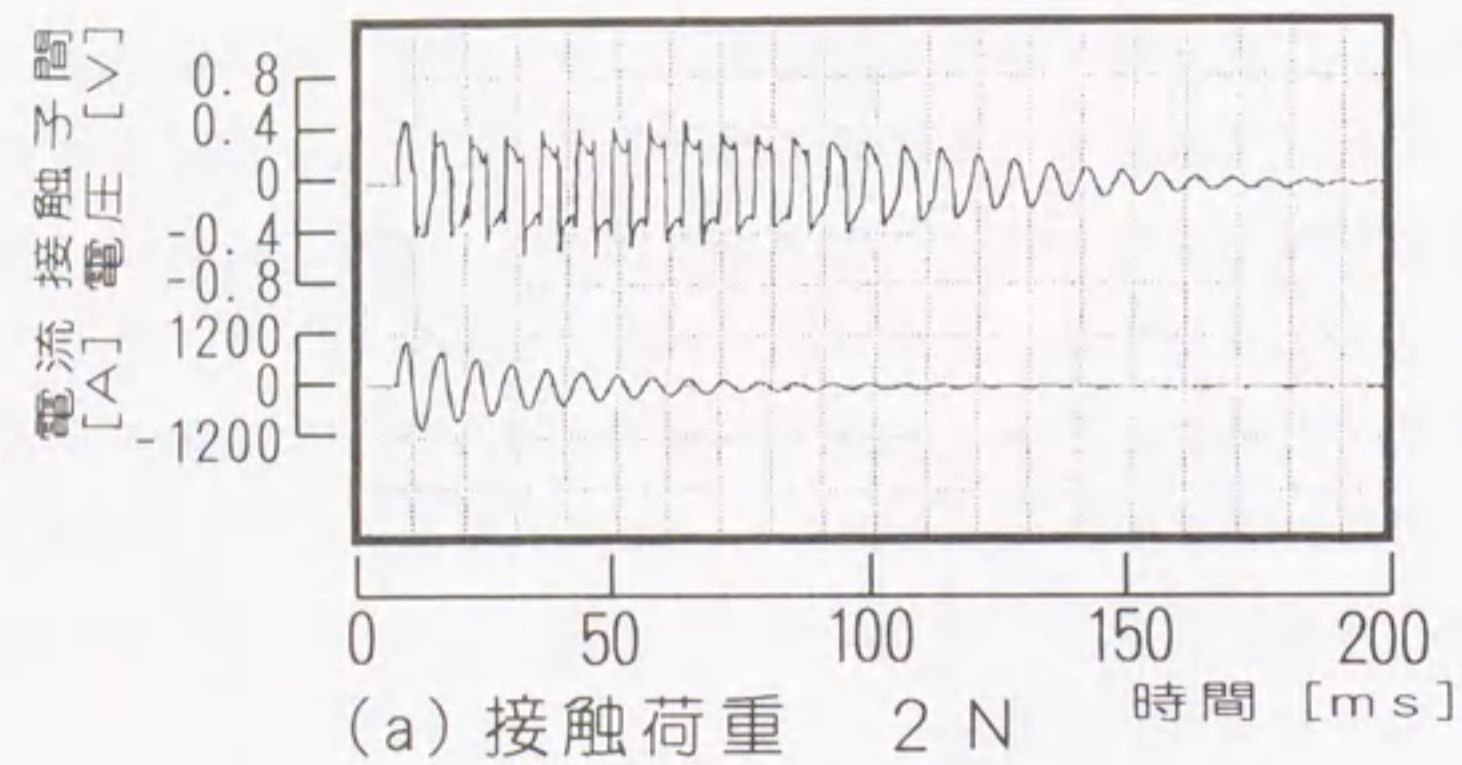


図 5. 15 SF₆ 分解生成物が介在した銅点接触子の減衰振動大電流通電時における接触子間電圧波形 (通電電流 : 1, 000 A)

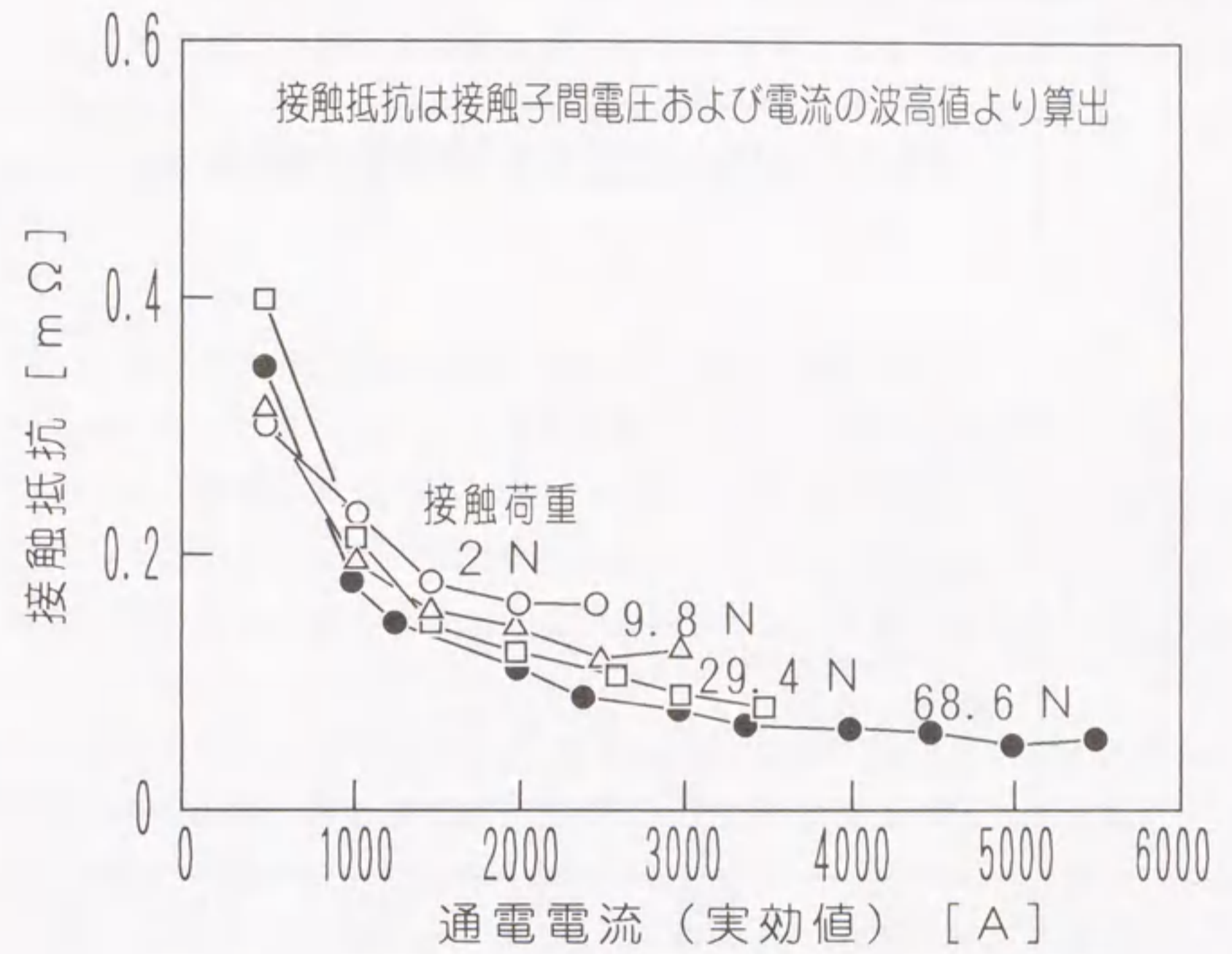


図 5. 16 SF₆ 分解生成物が介在した銅点接触子の減衰振動大電流通電時における接触抵抗 - 電流特性

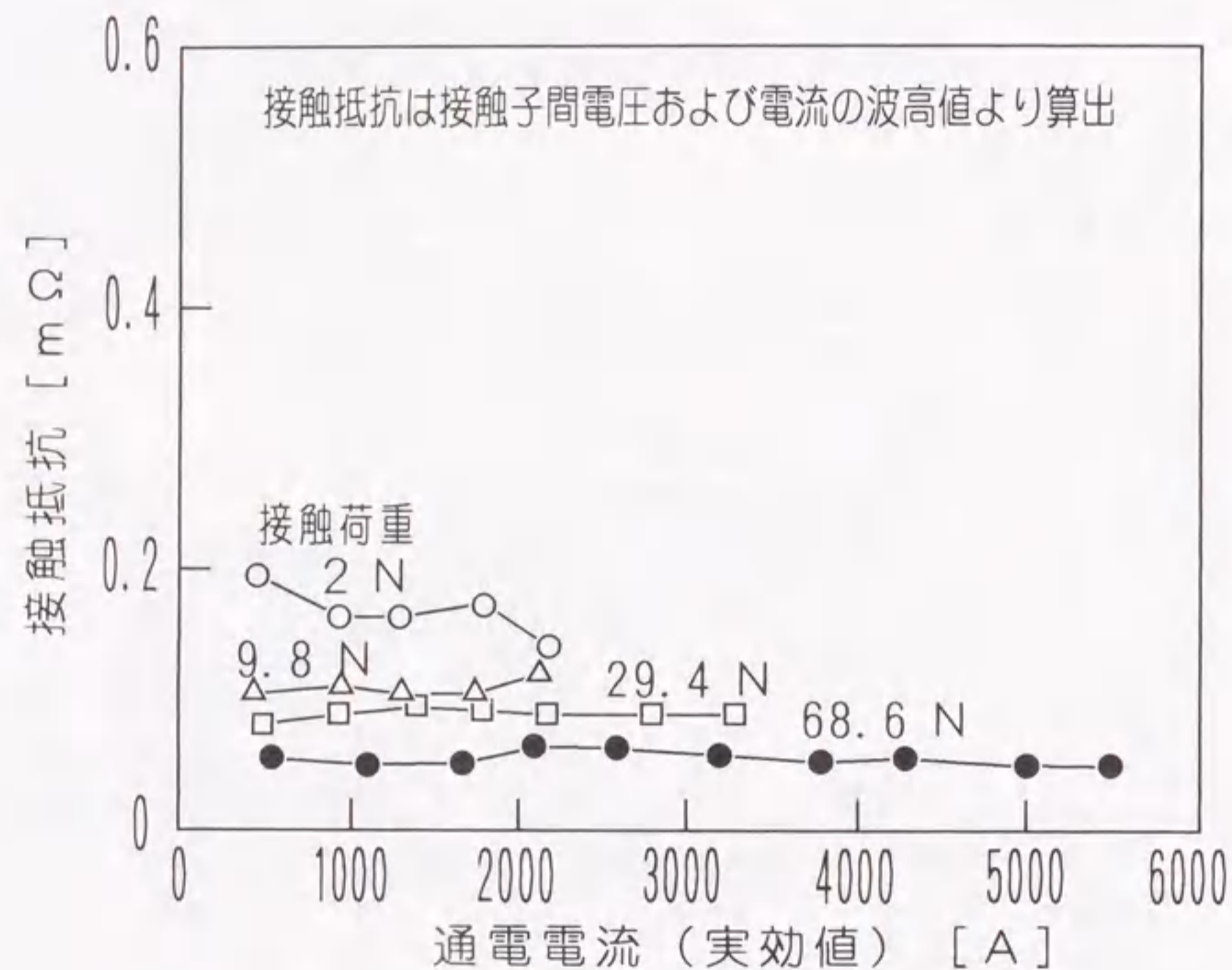


図 5.17 金属接触の銅点接触子の減衰振動大電流通電時における接触抵抗—電流特性

解生成物が介在した場合の接触抵抗に対して、 $1/2 \sim 1/5$ 程度である。また、通電電流が増大しても接触抵抗はほとんど変化していないとともに、接触荷重が高いほど抵抗値は全体的に低い様相にある。

これらのことから、SF₆分解生成物が介在した場合の銅点接触子の接触抵抗は、通電電流が小さい場合には高いが、電流の増大とともに抵抗値は低下する傾向にある。これは、SF₆分解生成物が大電流の通電によって破壊され、それにより接触子が金属接触を形成したためと推察される。

5.6 各種粉末を介在させた銅点接触子の接触電圧波形

前節で述べたように、SF₆分解生成物が介在した銅点接触子に正弦波状交流電流を通電した場合、接触子間に現われる電圧波形は方形波状や三角波状を呈することがある。これは、SF₆分解生成物の粉末状物質が接触子間に介在することに起因していると推測される。そこで別種の粉末を人為的に接触子間に介在させ、これを実験的に検証することとした。

SF₆分解生成物と同程度の粒径(数 μm ~数十 μm)の各種の粉末を銅接触子間に数層程度介在させて、5.2節と同様に正弦波交流電流の通電実験を行い、接触子間の電圧波形を観測した。粉末としては、酸化物として Al_2O_3 、 SiO_2 、 CdO 、 PbO 、他の化合物として BaSO_4 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ および他種金属としてZnの7種類を用意した。

これまでの実験に用いた球面対平面の点接触を対象として、平面接触子の上に各種粉末を180 μm メッシュのふるいを通して2~3粒子層に薄く堆積させる。その上から球面接触子を加圧接触させ、図5.10の通電回路を用いて大気中で通電試験を行う。開放電圧1V(150A通電が可能)の電圧を接触子間に印加した状態で、通電が得られるまで接触荷重を増加させる。通電状態となった後、電流を実効値150A、300A、600Aと段階的に増大させ、各電流値において5分間通電した。

各粉末についてそれぞれ数回の通電試験を行い、接触子間の電圧波形を観測した。その結果を表5.1にまとめて示す。同表には、比較のためにSF₆分解生成物を堆積させた接触子についての測定結果も⑧として併記した。

同表には、最上段から、粉末の種類、粒径、試験回数、そのうち荷重68.6Nま

表5. 1 各種粉末が介在した銅点接触子の交流通電時における接触子間電圧波形の変化

| 粉末種類 | ① Al ₂ O ₃ 数10 ^μ m | ② SiO ₂ 数10 ^μ m | ③ CdO 数μ〜数10 ^μ m | ④ PbO 数μ〜数10 ^μ m | ⑤ BaSO ₄ 数μ〜数10 ^μ m | ⑥ Mg(OH) ₂ 数μ〜数10 ^μ m | ⑦ Zn 数μm | ⑧ SF ₆ 分解生成物 数μ〜数10 ^μ m |
|----------------------------------|--|--|--------------------------------|--------------------------------|--|--|-------------|--|
| 粉末粒径 | 6 | 4 | 4 | 3 | 4 | 2 | 4 | 多数 |
| 試験回数 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 4 | 全ての試験で 波形を観測 |
| 荷重0.8, 6N以下で導通を 得た(波形状ができた)回数 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 4 | 全ての試験で 波形を観測 |
| 接触荷重 | 14.7N | 4.9N | 44.1N | 9.8N | 68.6N | 24.5N | 4.9N | 9.8N |
| 150A 通電初期 | 0.94mΩ | 1.7mΩ | 2.0mΩ | 1.6mΩ | 1.7mΩ | 1.1mΩ | 0.4mΩ | 0.64mΩ |
| 接触抵抗 | 1.1mΩ | 1.7mΩ | 1.7mΩ | 1.6mΩ | 1.3mΩ | 1.1mΩ | 0.4mΩ | 0.64mΩ |
| 150A 通電中の 波形変化 | 変化なし | 変化なし | 1.7mΩ 1分後 | 変化なし | 1.3mΩ 1分後 | 変化なし | 変化なし | 変化なし |
| 接触抵抗 経過時間 | 変化なし | 変化なし | 1.7mΩ | 変化なし | 1.3mΩ | 変化なし | 変化なし | 変化なし |
| 300A 通電初期 (5分間波形 変化なし) | 0.59mΩ | 0.45mΩ | 0.88mΩ | 0.63mΩ | 0.45mΩ | 0.45mΩ | 0.29mΩ | 0.32mΩ |
| 接触抵抗 | 0.27mΩ | 0.15mΩ | 0.44mΩ | 0.37mΩ | 0.20mΩ | 0.20mΩ | 0.17mΩ | 0.16mΩ |
| 600A 通電初期 (5分間波形 変化なし) | 0.27mΩ | 0.15mΩ | 0.44mΩ | 0.37mΩ | 0.20mΩ | 0.20mΩ | 0.17mΩ | 0.16mΩ |
| 接触抵抗 | 0.27mΩ | 0.15mΩ | 0.44mΩ | 0.37mΩ | 0.20mΩ | 0.20mΩ | 0.17mΩ | 0.16mΩ |

での範囲で導通の得られた回数およびその場合の観測波形例を示している。導通の得られた回数は、① Al₂O₃を用いた試験では6回の試験のうち3回、②の SiO₂では4回の試験で3回などとなっている。

波形例の欄には、導通が得られたときの接触荷重と150A, 300Aおよび600Aの通電中における端子間の電圧波形を示す。また、各波形の下に、電流の波高値とそのときの電圧値とから求めた接触抵抗の値を併記した。なお、150Aを通電した場合には5分間の通電中に波形が変化する場合があったので、通電初期および変化後の波形を示している。300Aおよび600Aの通電期間中(5分間)においては、波形の大きな経時変化は認められなかったため、通電初期のものを示している。

接触子間の電圧波形は、⑦のZnを除く6種類の粉末において、150Aの通電初期には方形波状である。時間の経過および電流の増大に伴い、波形は三角波状に変化している。これは、前述の図5, 11, 図5, 15および表5, 1⑧に示すように、SF₆分解生成物が介在した接触子において観測された結果とよく一致している。また、Znの場合、端子間の電圧波形は、電流値および通電時間の経過によらず、ほぼ正弦波状である。これは、Znが金属粉末であるので、接触子が金属接触しているためと考えられる。

実規模接触子において、数分の一秒のオーダの過渡的期間に三角波形が観測されたという報告[3]もあるが、本実験では数時間にわたって方形波や三角波が持続しており、しかも途中で波形が変わるなどの特徴がみられた。以上の検討から、SF₆分解生成物が介在した接触子において、正弦波状の交流電流あるいは振動電流の通電時に接触子間の電圧波形が方形波状あるいは三角波状を呈するのは、粉末状の非金属物質であるSF₆分解生成物が接触子間に介在することに起因していると考えられるが、物理的機構については明確ではない。なお、この実験では発光や音は観測されなかった。

5. 7 結論

本章では、SF₆ガス中に発生させたアーク放電によって生成される粉末状のSF₆分解生成物が接触子間に介在した場合について、交流電流通電時の接触子間電圧の実験的解析を行った。数百A程度の正弦波交流電流および数千A程度の

正弦波状減衰振動電流の通電試験の結果、次のことが明らかとなった。

(1) 粒径数十 μm 程度のSF₆分解生成物が数層介在した銅点接触子において、接触荷重9.8Nで加圧した状態で、数百A以下の比較的小電流を通電したときの接触抵抗は0.3~0.8m Ω と高い。通電電流の増大に伴って接触抵抗は低下し、数千A以上の通電状態では0.2m Ω 以下となる。これは、大電流の通電によってSF₆分解生成物が破壊されやすいことを示している。しかしながら、接触荷重が低く、小電流通電の状態では、分解生成物による接触不良や異常過熱等の接触子障害を誘発する危険性がある。

(2) フッ化水素および硫化水素の腐食ガス中に放置させた接触子を用いた接触抵抗の実測においても、SF₆分解生成物や皮膜が介在した汚染接触子と同様に接触荷重に対する接触抵抗の変化が小さい様相にある。

(3) 接触子に数百A以下の正弦波交流電流の通電時の数時間にわたって、接触子間の電圧波形において方形波状や三角波状を呈する現象がある。ほとんどの場合方形波から三角波、そして正弦波へと移行する。

(4) SiO₂等の酸化物、BaSO₄等の化合物の粉末を接触子間に介在させた場合にも、接触子間の電圧波形に方形波状や三角波状が現われることを確認した。したがって、SF₆分解生成物が介在した接触子においてみられる電圧波形のひずみ現象は、その生成物が導電性の低い粉末であることに起因するものと推測される。

[第5章の文献]

- [1] 藤波, 宅間, 八島: 「磁界センサによるGIS導体接触不良診断手法の開発」, 電気学会開閉保護装置研究会, SPD-88-33 (1988)
- [2] 仙石, 佐々木, 大野: 「遮断器の信頼性と診断技術の現状-遮断に関する信頼性と診断技術-」, 電気学会開閉保護装置研究会, SPD-87-2 (1988)
- [3] Y.Ohshita, et al.: "A Diagnostic Technique to Detect Abnormal Conditions of Contacts Measuring Vibrations in Metal Enclosures of Gas Insulated Switchgear", IEEE 89, WM 073-8 PWRD, New York, Jan.29 - Feb.3(1989)
- [4] 愛知, 佐土根, 松村, 鬼頭, 向山, 高木: 「SF₆分解生成物が介在した銅点接触子の交流電流通電特性に関する実験的考察」, 電学論誌B分冊 vol.111-B, No.5, pp.562-569 (1991)

- [5] 愛知, 佐土根, 松村, 鬼頭: 「腐食ガス中に放置した点接触子の接触抵抗-荷重特性」, 電気学会開閉保護研究会, SPD-91-14, pp.79-88 (1991)

- [6] R.Holm: "Electric Contacts", 4th. Edit., Springer, New York, pp.20-21(1967)

- [7] F.P.Bowden and D.Tabor: "The Friction and Lubrication of Solids", Oxford, pp.19-24 (1950)

第6章 直流300A通電時における 接触子の接触抵抗特性

6.1 はじめに

電力用開閉機器の接触子において、ジュール熱の発生によって接触子の温度上昇が生ずるような大電流通電時では、大気中に置かれた接触子は表面の酸化が速く進むとともに導体の抵抗率が上がるため接触抵抗がより高くなり、発熱も加速される。その結果、接触部分の溶融に伴う溶着現象などの接触障害を誘発する危険性がある。したがって、接触子に発生する接触抵抗を低く抑えることは重要な課題である。本章では、銀、銅およびアルミの導電材料を用いた点接触子によって数百アンペアの通電状態における接触抵抗の挙動について述べる[1]。

6.2 接触抵抗の測定装置および供試接触子

通電電流によって接触子の接触部分に発熱がある場合において、接触電圧 ψ と接触点温度 θ との関係を示した $\psi-\theta$ 理論[2]がある。本実験に使用する実験装置はこの理論を考慮して以下の条件を具備するよう製作したものである[3]。

- ①接触子の接触部分での発生熱を速やかに拡散させ、接触子全体の温度上昇を抑制する。
- ②接触子の保持部分および母線などの発熱源から接触子への熱流入を防止する。

図6.1に実験装置の外観を示す。接触子を保持する可動台および固定台に内径3mmφの銅管を3重に巻き付ける。この二つの銅管に常温の水道水をそれぞれ1.5 l/分程度通水する。これによって、接触部分での発生熱を速やかに拡散させるとともに接触子の保持部ならびに電線からの発生熱が接触子に流入することを防止した。接触子には直流電源（開放電圧5V）によって最大300Aまでの直流電流を通電することができる。なお、通電電流は通電回路に挿入された電子負荷装置ならびに炭素抵抗器によって調整する。

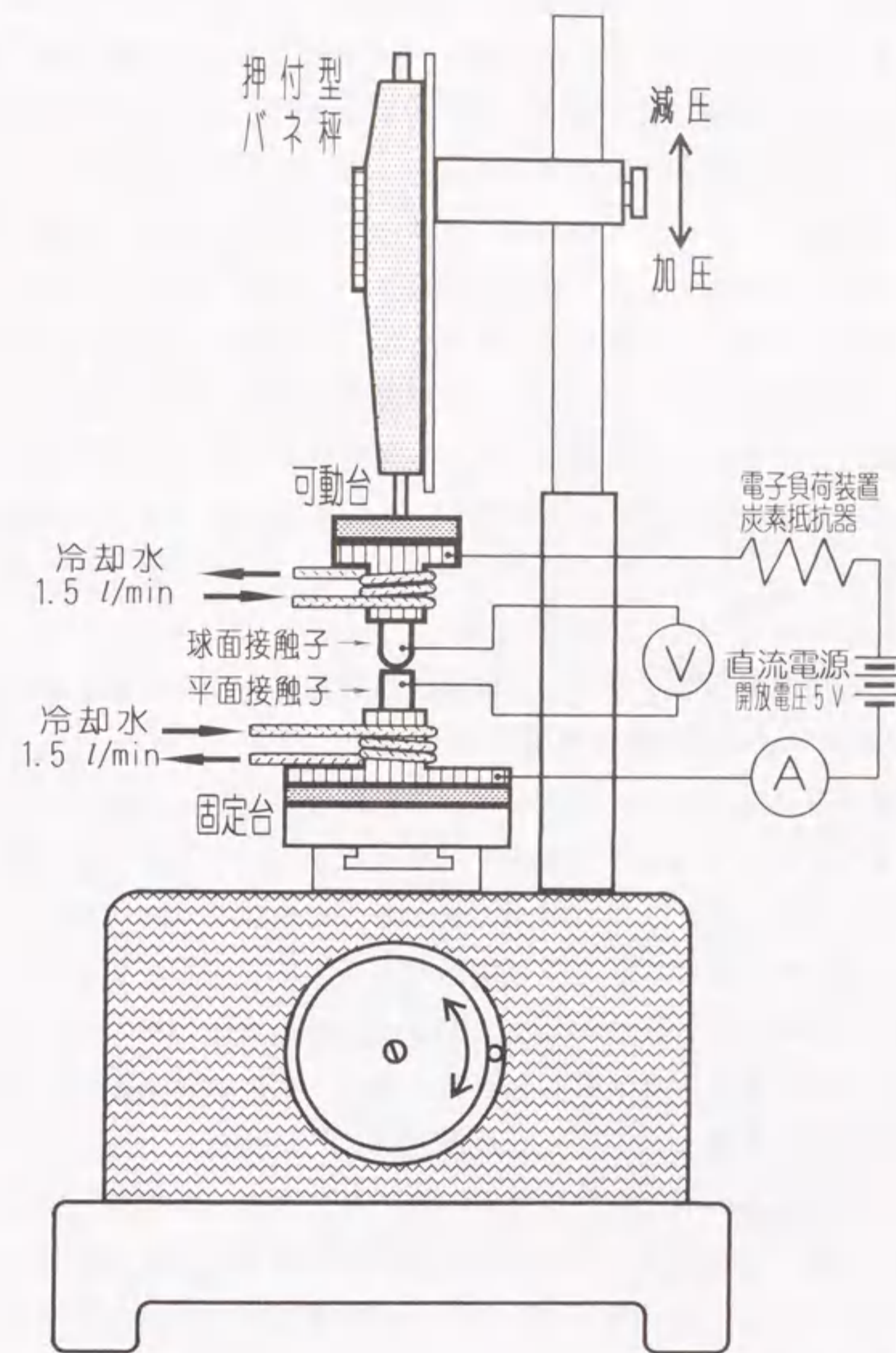


図6.1 実験装置

直径10mm, 長さ40~50mmの各種円柱導体2本の各先端をそれぞれ平面および曲率半径5mmの球面に加工し, 鏡面仕上げを行う。銀および銅導体の表面はアルコールにて洗浄した後, 実験直前に化学研磨あるいは金めっきの表面処理を行い実験に供する。他方, 大気中にさらされたアルミ導体の表面は強固な絶縁性皮膜が生成されており, 一般に皮膜のない清浄な金属表面を得ることは困難である。そこで本実験では試料の加工, 研磨工程において生成されたベールビー層(非晶質層)や表面に付着した研磨材等の異物を除去する目的で水酸化ナトリウム水溶液にて化学洗浄処理を施した。平面および球面接触子を実験装置の固定台および可動台に保持し, これらを接触させて点接触を構成する。接触抵抗は接触子間の接触電圧を高感度電子電圧計にて測定し, 電圧電流計法によって算出する。

6. 3 各種金属導体を用いた点接触の接触抵抗と接触荷重との関係

6.3.1 直流1A通電時の接触抵抗特性

本実験で用いた点接触の構成では, 加圧接触している接触子の接触部分は接触点と称される微細な円形の接触面を一つ形成する。この接触面は接触荷重の増加とともに接触点近傍において導体の弾性あるいは塑性変形を伴って拡大する。したがって, 接触抵抗は接触荷重の増加によって低下する様相を示す。

図6. 2は接触子に流れる電流によって接触部分の接触状態への変化が少ないと予測される直流1Aを通電した状態において接触抵抗を測定したものである。具体的には接触荷重を2.45Nから最大98Nまで可変させ, その増減過程において11ポイントの加圧状態で接触抵抗を実測する。なお, 本実験に使用した銅接触子は硫酸と硝酸を主成分とした混酸による化学研磨あるいは金めっき処理を施したものである。また, 銀接触子については希硝酸溶液にて化学研磨を行った。他方, アルミ導体を用いた接触子は水酸化ナトリウム水溶液によって表面の洗浄処理を行ったものである。なお, 各荷重の設定初期の接触電圧は若干低下する傾向にある。したがって, 図中に示す接触抵抗値は接触電圧が安定した電圧値から接触抵抗を算出したものである。

図中に○, ●印で示すアルミ導体を用いた接触子の接触抵抗は加圧初期2.45Nの接触荷重において約60mΩと高い抵抗値にある。その後, 接触荷重の増加とと

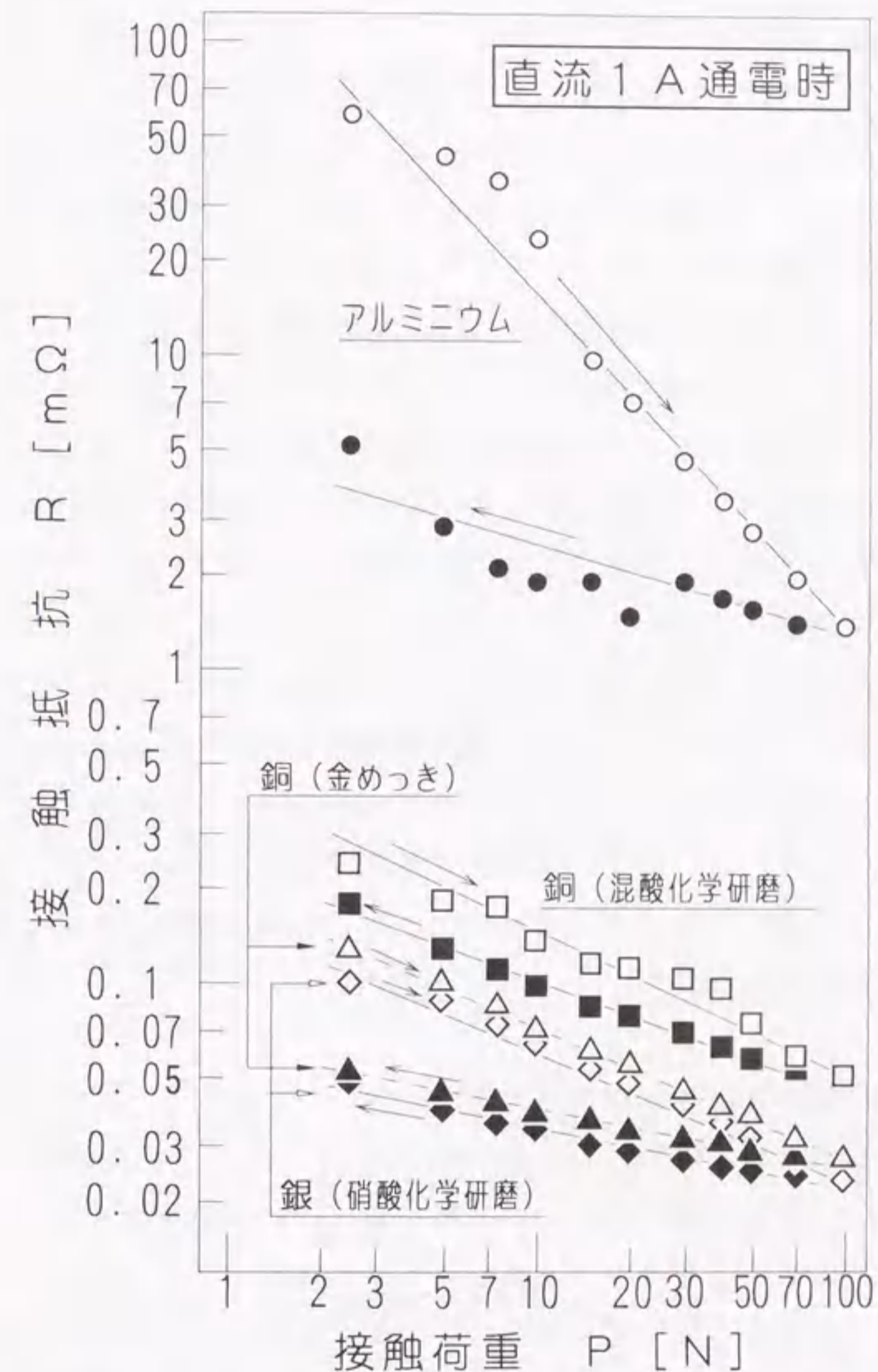


図6. 2 直流1A通電時における各種導体の接触抵抗と接触荷重との関係

もに抵抗値は急減し、98Nの最大加圧時には1.5mΩ程度まで低下している。他方、銅および銀接触子では、加圧初期2.45Nの低い接触荷重においても接触抵抗は0.1~0.25mΩ程度で、アルミ導体を用いた接触子の接触抵抗に対して1/100以下にある。さらに、接触荷重に対する抵抗値の変化もアルミ導体に比べて小さい状況にある。なお、銅接触子においては、混酸にて化学研磨処理を施した場合の接触抵抗は金めっき処理を行った場合よりも若干高い傾向にあるが、これは良好な化学研磨処理が得られなかったためと判断される。

本実験に使用したアルミ導体および銀導体の抵抗率はそれぞれ $3.19 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 、 $1.65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ （室温での実測値）である。また、各導体の機械的性質はほぼ同じであることからアルミ接触子において皮膜を介在しない清浄な金属接触が得られるとすれば、その接触抵抗は銀接触子の2倍程度の抵抗値と算定される。しかし本実測ではアルミ接触子を接触させた場合の接触抵抗は銀接触子に比べて50~500倍程度高い状況にある。これは大気にさらされたアルミ導体の表面には絶縁性の強固な皮膜が生成されており、この皮膜抵抗に起因する接触抵抗の現れといえる。いずれの接触子においても接触荷重を98Nから再び減少させた場合の接触抵抗値は荷重増加時よりも全体的に低い。これらの傾向は加圧によって生じた接触部分の塑性変形に起因する特性と考えられる。なお、アルミ接触子においては加圧による機械的な皮膜破壊も加わって、荷重増加時の抵抗値との差が大きくなったものと推測される。

6.3.2 直流300A通電時の接触抵抗特性

図6.3は銀導体を用いた点接触子について、3A、100Aおよび300Aの各電流値に設定した通電状態において、接触荷重を1.96Nから最大49Nまで増減させて実測した接触抵抗と接触荷重との関係を示したものである。

いずれの通電電流においても図中に各印で示すように接触荷重の増減過程における接触抵抗はほぼ同じ様相にある。荷重の増加に伴って抵抗値は減少しており、最大荷重49Nにおける接触抵抗は0.028mΩ程度である。また、荷重減少時の接触抵抗は増加時の抵抗値よりも全体的に低く、最小1.96Nの接触荷重では0.045mΩで、加圧初期における抵抗値の約1/2となっている。このことから、化学研磨処理直後に接触させた銀接触子などのように、接触子表面に酸化膜などの汚染

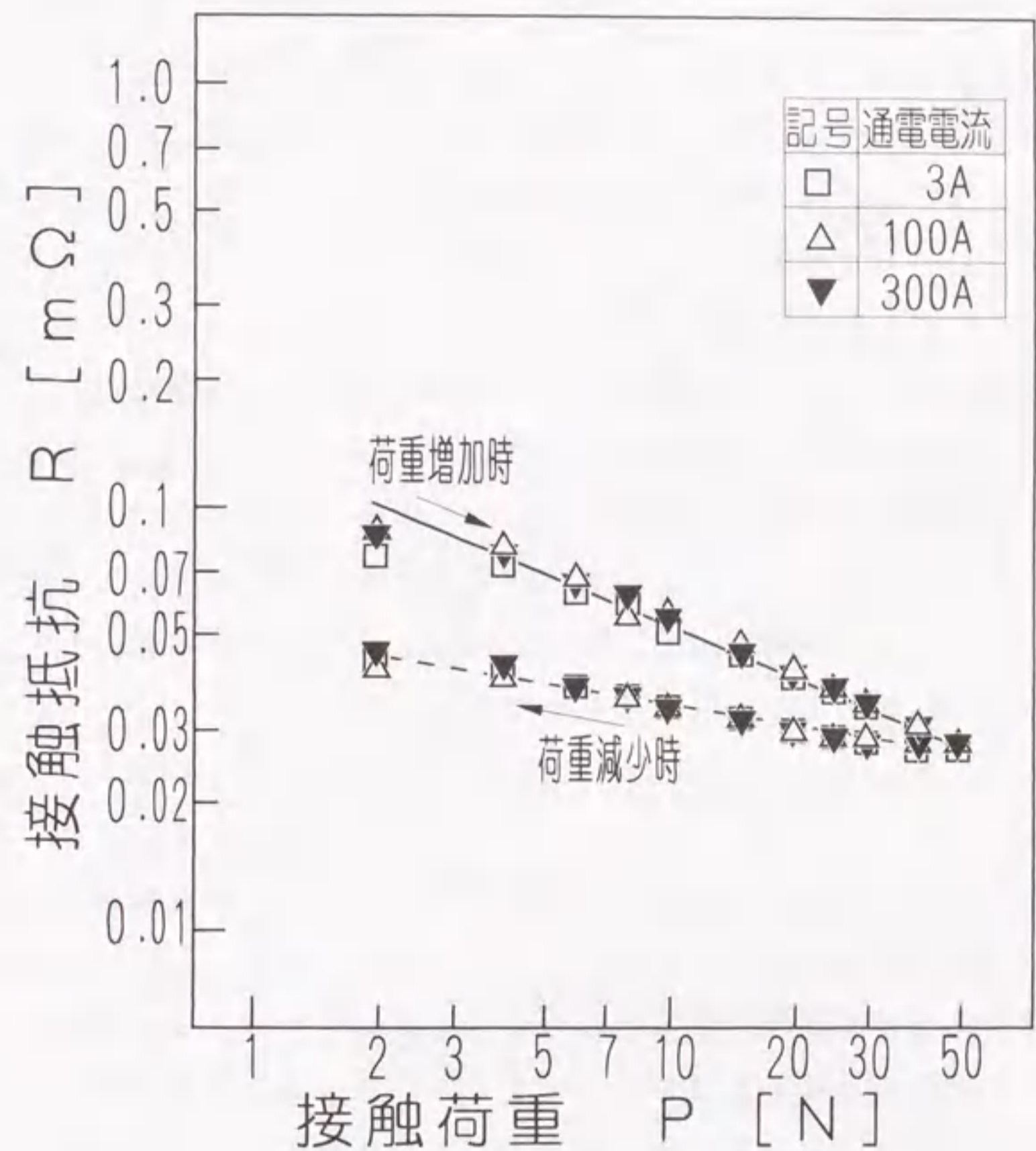


図6.3 銀導体を用いた点接触子の接触抵抗と接触荷重との関係

皮膜が介在しない接触状態においては、数百アンペアの通電時においても接触抵抗は低く、安定した状況にあることがわかる。

他方、アルミ導体を用いた点接触子の実測結果を図6.4に示す。通電電流を1Aに設定した場合、図中に●印で示すように接触抵抗は全体的に高く、加圧初期1.96Nの接触荷重における接触抵抗は250mΩ程度で、接触荷重の増加とともに接触抵抗は低下する様相にある。なお、この特性では前述図6.2に示した特性に比して接触抵抗が数十倍と高い状況にあり、各試料によって測定される抵抗値にバラツキが大きいのもアルミ導体の特徴となっている。最大荷重49Nの加圧時には約45mΩで加圧初期における抵抗値の1/5となっている。また、接触荷重の減少時には加圧力の減少とともに接触抵抗は再び増加している。しかしながら、通電電流の増大とともに接触抵抗は全体的に低下する様相を呈し、図中▽印で示す最大300Aを通電した場合の接触抵抗は加圧初期1.96Nの加圧状態で約0.6mΩで、1A通電時における抵抗値の1/400程度に低下している。さらに、接触荷重に対する接触抵抗の変化は通電電流の増大とともに緩やかになる傾向を示している。これは銀導体を用いた接触子とはかなり異なった様相にあり、接触状態が通電電流の影響を受けた現れと判断される。

6.4 各種金属導体を用いた点接触子の接触抵抗と通電電流との関係

6.4.1 銀および銅接触子

金属導体の表面処理を行うことによって皮膜の影響が少ない銀および銅接触子を用いて実測した接触抵抗と通電電流との関係を図6.5および図6.6に示す。ここで銀接触子は実験直前に希硝酸にて化学研磨を行い、銅接触子は混酸を用いた化学研磨処理を施したものである。

図6.5は銀接触子を用いて、接触荷重を1.96Nおよび9.8Nに設定した加圧状態において接触抵抗を実測したものである。いずれの場合も通電電流の増減において接触抵抗はほぼ一定の抵抗値で推移している。接触子表面を化学研磨にて表面処理を行った直後に接触させた場合の接触部分は酸化膜などの汚染皮膜の影響がほとんどなく、接触点近傍に現れる電流集中に起因した低い接触抵抗の特性となっている。その結果、接触部に発生するジュール熱は小さく、数百アンペア

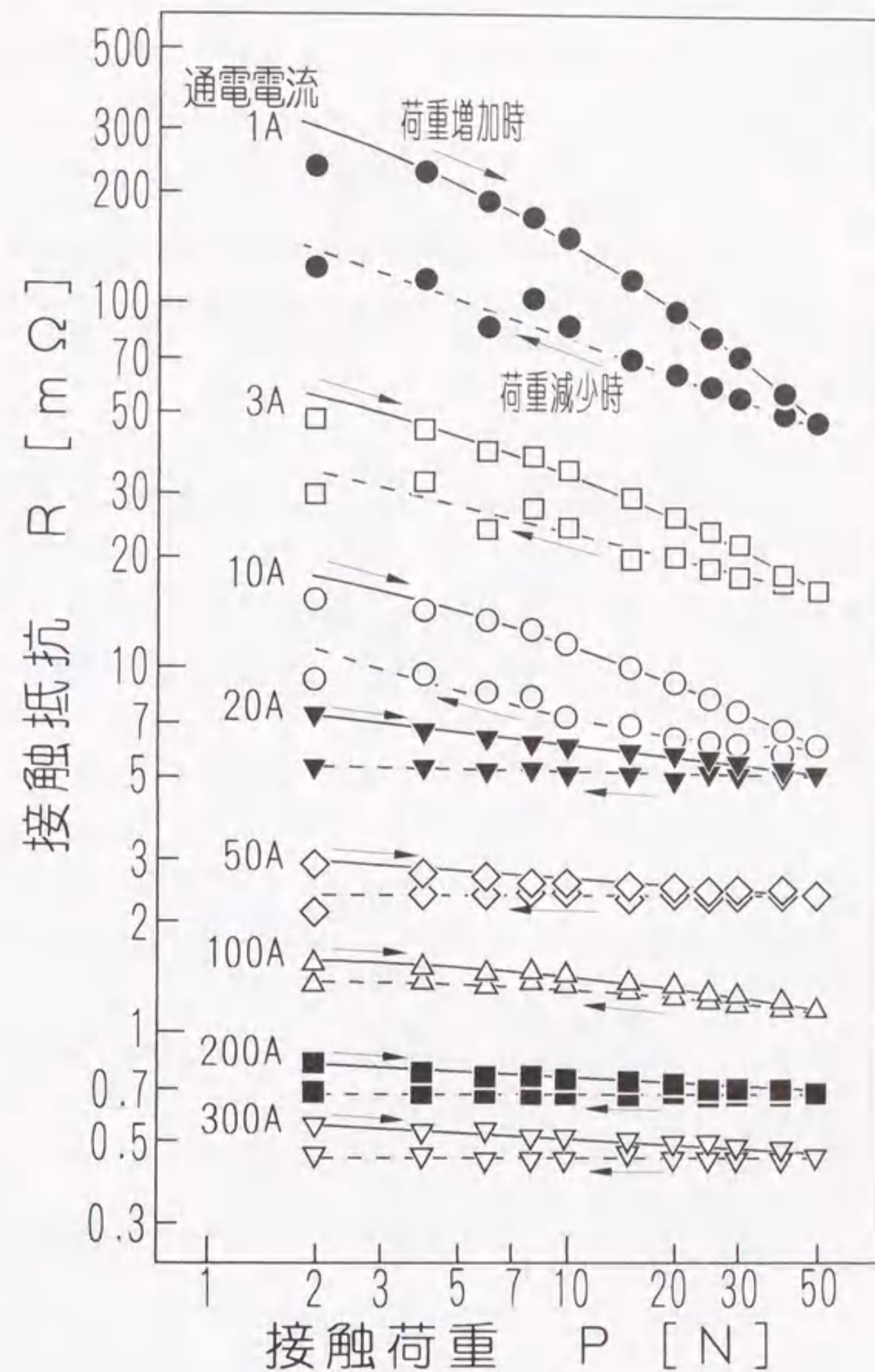


図6.4 アルミ導体を用いた点接触子の接触抵抗と接触荷重との関係



図 6. 5 銀接触子を用いた
接触抵抗と通電電流との関係



図 6. 6 銅接触子を用いた
接触抵抗と通電電流との関係

の通電電流域においても安定した接触状態が持続していると判断される。また、銅接触子を用いた実測においても図 6. 6 に示すように接触荷重 1.96 N および 49 N のいずれの加圧状態においても銀接触子の場合と同様に接触抵抗は通電電流の増減に対してほぼ一定で安定した状況にある。

6.4.2 アルミ接触子

図 6. 7 はアルミ接触子を用いて接触荷重が 1.96, 9.8, 49 N の各加圧状態において接触子に直流 1 ~ 300 A の電流を通電した場合の接触抵抗と通電電流との関係を示したものである。

接触荷重を 1.96 N に設定した場合、接触抵抗は通電初期 1 A の通電状態では 50 mΩ と高く、電流の増大とともに徐々に低下する傾向にある。10 A 以上の電流域における接触抵抗は通電電流にほぼ反比例して低下している。接触荷重を 9.8 N に設定して加圧接触させた場合の接触抵抗は通電初期 1 ~ 10 A 程度の電流域では 10 mΩ 前後でほぼ一定であるが、10 A 以上の電流域においては電流の増大とともに低下する様相にある。さらに接触荷重を 49 N に設定した場合には、通電電流が 30 A 程度までの接触抵抗は約 5 mΩ 一定の抵抗値で推移し、その後、通電電流の増大とともに接触抵抗は低下している。また、最大 300 A の通電状態から電流を減少させた場合の接触抵抗はほぼ一定の状態にあり、接触荷重の異なるいずれの加圧状態においても同じ抵抗値を示す様相が特徴的である。これらの実験から、アルミ導体を用いた接触子においては通電電流の増大とともに接触抵抗が低下することがわかる。なお、接触抵抗を測定する各電流値における接触電圧は本実験装置の特徴から電流設定の直後から安定した状況にある。

導体表面に生成された皮膜によって高い接触抵抗が現れる状況においては、ジュール熱の発生が大きく接触点の温度は高温となり、接触点近傍では導体の軟化や熔融を誘発することが予測される。この接触点温度は接触電圧と大きく関係している。次節では接触電圧と接触点温度との関係を示す $\psi - \theta$ 理論 [2] から種々の接触子における接触抵抗の挙動について検討する。

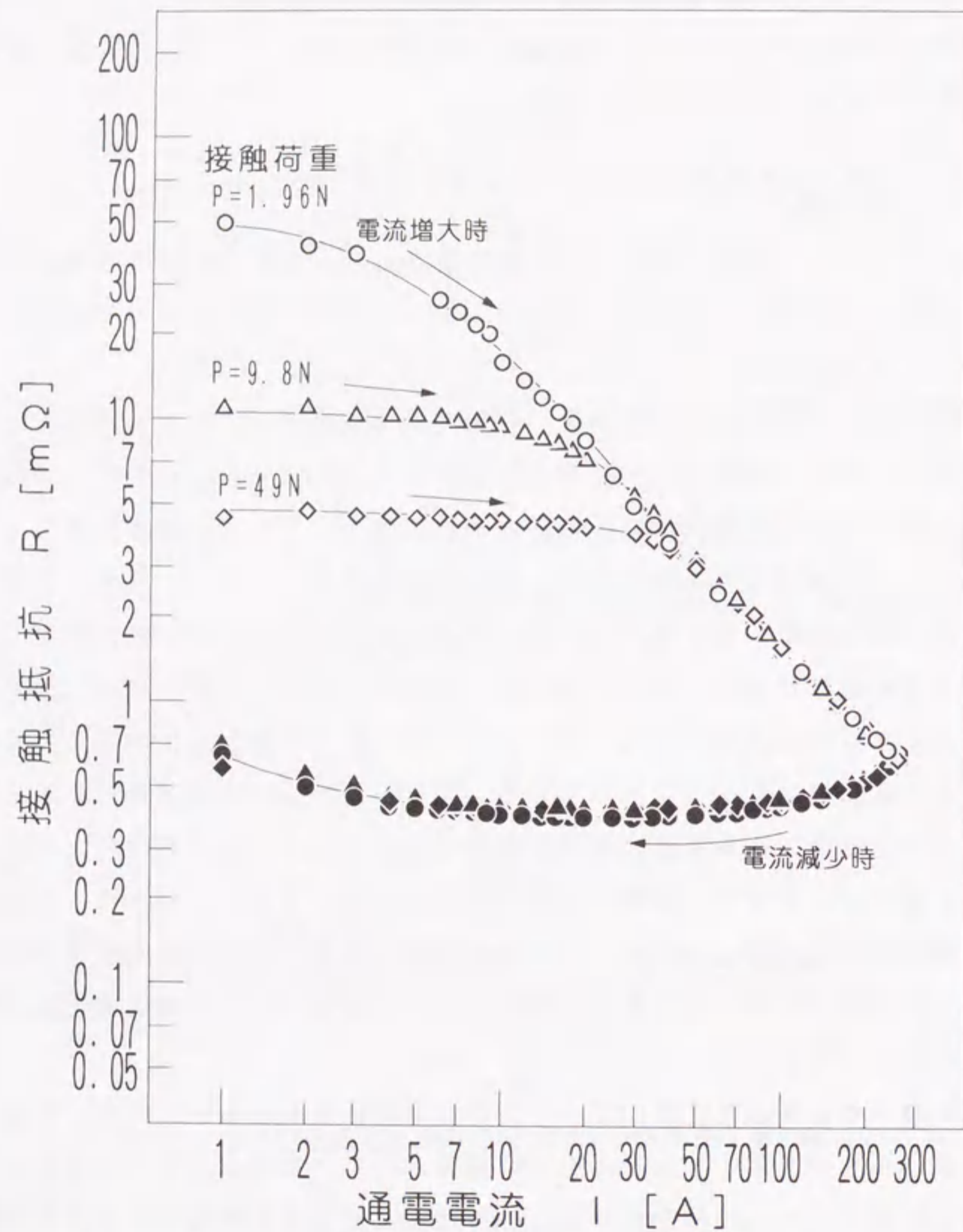


図 6. 7 アルミ接触子を用いた
接触抵抗と通電電流との関係

6. 5 接触子の軟化・溶融に伴う接触抵抗の挙動

6.5.1 $\psi - \theta$ 理論による各種金属導体の接触電圧

第 1 章 1.5 節において述べたように、接触子の接触電圧 V_c と接触点温度 θ_m との間には次式で表されるような関係がある。

$$\theta_m^2 - \theta_0^2 = \frac{V_c^2}{4L} \quad \dots \dots (6. 1)$$

ここで、 L は Lorenz 数と呼ばれる定数であり、その値は $L = 2.45 \times 10^{-8} [V^2/K^2]$ である。また、 θ_0 は接触点から十分に離れた位置での接触子温度である。

具体的な数値例として、(6. 1) 式から銀、銅およびアルミ導体について接触点が軟化温度 [4] および融点 [5] に達する接触電圧を算出し、表 6. 1 および表 6. 2 に示す。

表 6. 1 軟化温度から算定した接触電圧

| θ_0 (常温) | θ_m (軟化温度) | | V_c |
|-----------------|-------------------|-----|-------|
| K | ℃ | K | mV |
| 300 | Ag: 180 | 453 | 106 |
| " | Cu: 190 | 463 | 110 |
| " | Al: 150 | 423 | 93 |

表 6. 2 融点から算定した接触電圧

| θ_0 (常温) | θ_m (融点) | | V_c |
|-----------------|-----------------|------|-------|
| K | ℃ | K | mV |
| 300 | Ag: 962 | 1235 | 371 |
| " | Cu: 1085 | 1358 | 411 |
| " | Al: 660 | 933 | 274* |

* (6. 1) 式が Al (3P¹) に適用できるとした場合である。

以上のことから、許容される接触子の接触抵抗は接触子に流れる通電電流の値によって定まることになる。例えば、銀導体の接触子において1 Aの電流が流れる通電状態を仮定したとき、接触抵抗が370mΩ以上の接触状態で接触点は熔融温度に達することになる。また、1000 Aの大電流が流れる場合においては0.37mΩ以上の接触抵抗になれば接触点が熔融温度となる。

6.5.2 アルミ接触子

前述図6.7で示したアルミ接触子の接触抵抗特性を接触電圧と通電電流との関係に書き改めたものを図6.8に示す。図中に○印で示す荷重1.96Nの加圧状態における接触電圧は電流の増大に対して徐々に飽和する傾向で高くなっているが、通電電流が10 A以上の電流域では約160 mVの接触電圧で一定となっている。また、荷重を9.8 Nに設定した場合、通電電流が30 A程度までは電流にほぼ比例して接触電圧は増加するが、その後は1.96 Nの加圧状態の場合と同じ傾向を示している。さらに、49 Nの加圧時には50 A以上の電流域で接触電圧は一定となっている。いずれの接触荷重においても接触電圧が約160 mVの一定値を示す状況にあることは特徴的である。なお、通電電流を300 Aから再び減少させた場合の接触電圧は接触荷重による差異はなく、通電電流にほぼ比例して低下している。なお、この接触電圧の傾向は第5章5.4節において述べたSF₆分解生成生成物が接触部に介在した場合に現れた現象と類似した様相にあり、接触部分に皮膜や異物が介在した接触状況における特徴と考えられる。

そこで、表6.1および表6.2で示すアルミ導体の軟化温度あるいは融点に達する接触電圧を図中に一点鎖線および破線で示す。本実測において接触電圧が一定値に持続する電圧の推移は一点鎖線と破線の間位置している。また、図6.9はアルミ接触子の接触点が軟化あるいは融点に達し、表6.1あるいは表6.2で示した接触電圧V_cで一定の状態が持続すると仮定した場合の通電電流に対する接触抵抗の推移を前述図6.7で示した特性と併せて一点鎖線および破線で示したものである。実測から得られた接触抵抗は一点鎖線および破線で示す直線のほぼ中間的な抵抗値で推移している。

通電初期の数アンペアの通電状態では、加圧によって形成された接触面の大部分は高抵抗で機械的に強固な皮膜が介在しており、皮膜抵抗に起因する接触抵抗

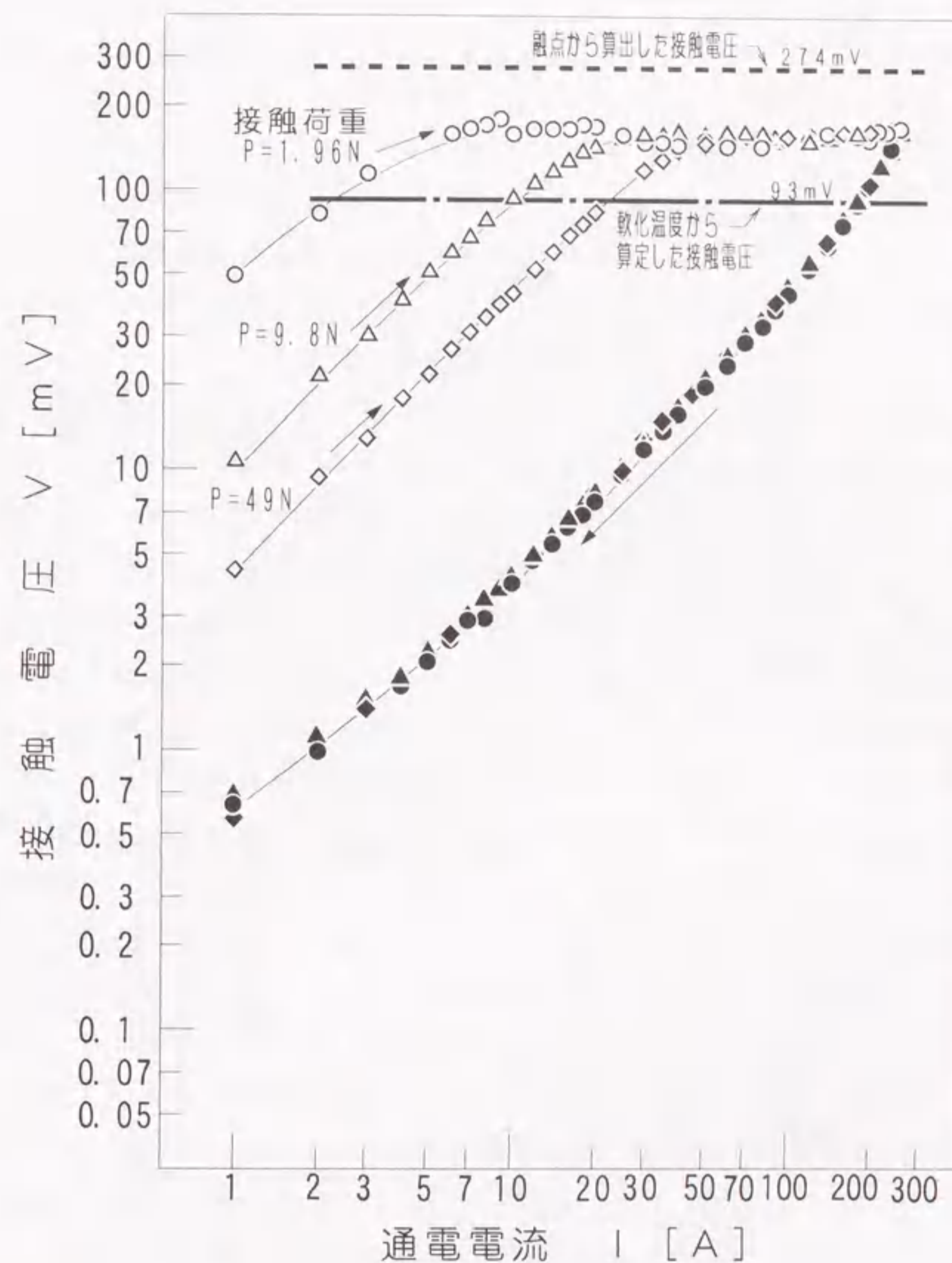


図6.8 アルミ接触子を用いた接触電圧と通電電流との関係

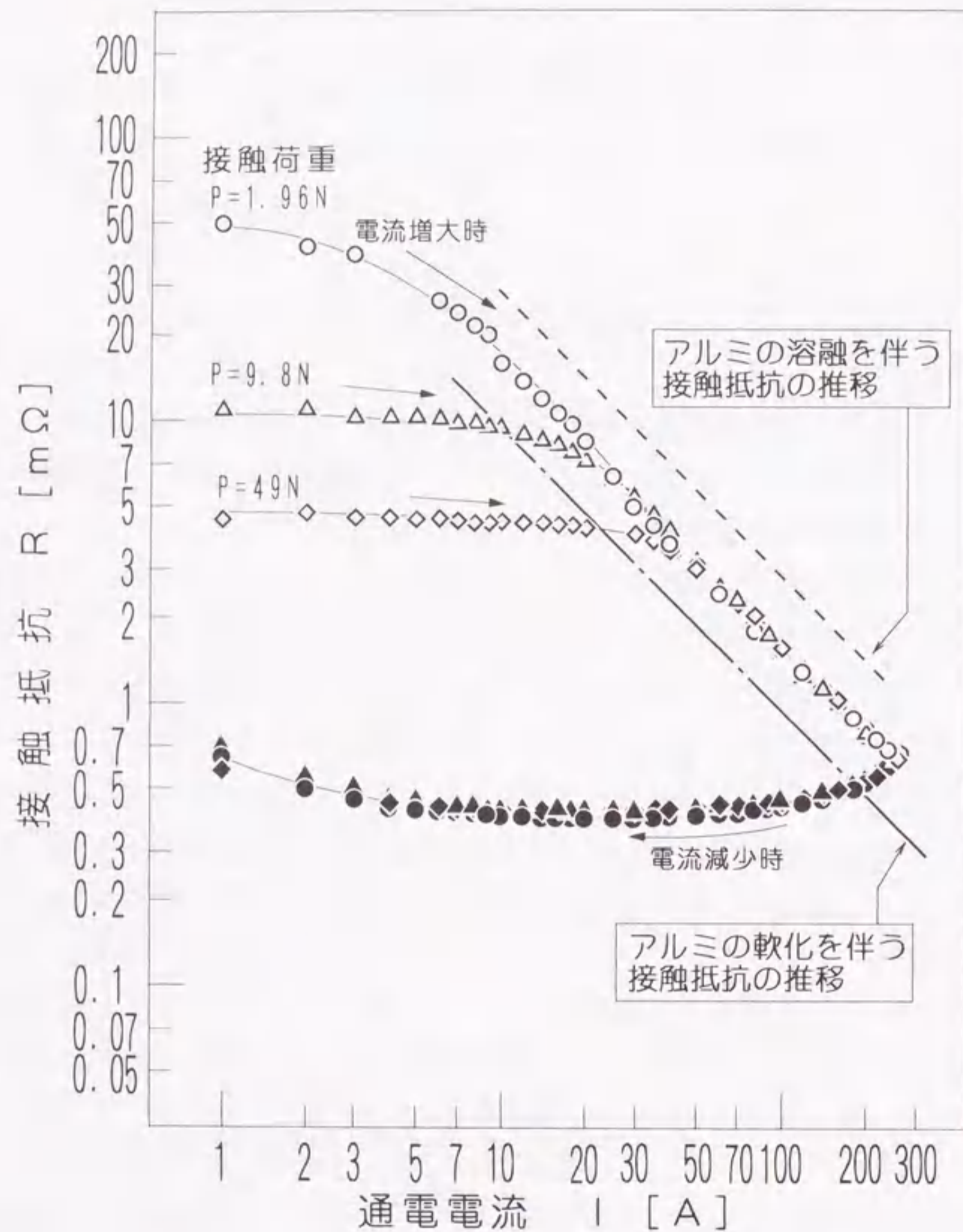


図 6. 9 アルミ接触子の軟化・溶融を伴う接触抵抗の推移

が支配的となり、その抵抗値は高い状況にある。このような接触状態において通電電流を増大させた場合、ジュール熱の発生は急増し、接触部分の温度は容易にアルミ導体の軟化温度に達すると予測される。その結果、接触部分は軟化に伴う変形によって大気中において生成された Al_2O_3 の皮膜が破壊し、接触面の微細な部分において金属接触が形成され、その部分に電流がより集中し、アルミ導体は融点に達して溶融状態になると推測される。

反面、接触面の大部分は皮膜が介在した状態にあり、加圧力の多くは皮膜の介在した部分に加わっているために、溶融部分の拡大は小さいと考えられる。したがって、清浄な金属同士の接触状態を前提として算定された表 6. 2 で示される溶融電圧 V_c より低い接触電圧を維持した状態で軟化に伴う皮膜破壊と溶融との複合現象によって接触抵抗が低下したと判断される。なお、実験後の接触部分においてはアルミ導体が溶融したと思われる痕跡も確認されている。

図 6. 10 は接触電圧と通電電流の乗算によって求めた接触部分における消費電力と通電電流の関係を示したものである。図中に ■ 印で示す銀接触子の場合、通電電流に対する消費電力はこの両対数グラフにおいて傾きがほぼ 2.0 の直線的な傾向にあり、消費電力 W が通電電流 I の 2 乗に比例する関係にあることがわかる。これは接触抵抗 R が通電電流 I に対してほぼ一定であり、消費電力 W が $W = I^2 \cdot R$ の関係を満たす結果となっている。他方、● 印で示すアルミ接触子の場合には、3 A 程度までは銀接触子と近い傾向にあるが、消費電力は銀に比して約 100 倍と高い状況にある。また、3 A 以上の通電電流域における消費電力は通電電流に対して正比例に近い様相にある。これは接触抵抗が通電電流に反比例することに起因するものであり、銀接触子の特性に対して消費電力の増大は緩やかである。しかし、300 A の通電時における消費電力は約 50 W で、銀接触子の 6 倍程度と高い状況にある。

そこで、簡易形放射温度計にて測定した接触子温度の一例を図 6. 11 に示す。温度測定は接触子の接触部分から約 10 mm 離れた位置で実施した。これは接触点における温度とは異なるが、その温度変化を反映した結果が得られると考えられる。銀接触子では、通電電流が 100 A 程度までは 16°C で、常温に近い温度推移となっている。しかしその後は温度が上昇する傾向となり、300 A の通電時には 23°C 程度に上昇しており、通電電流がさらに増大すれば温度も加速的に上昇すると推測

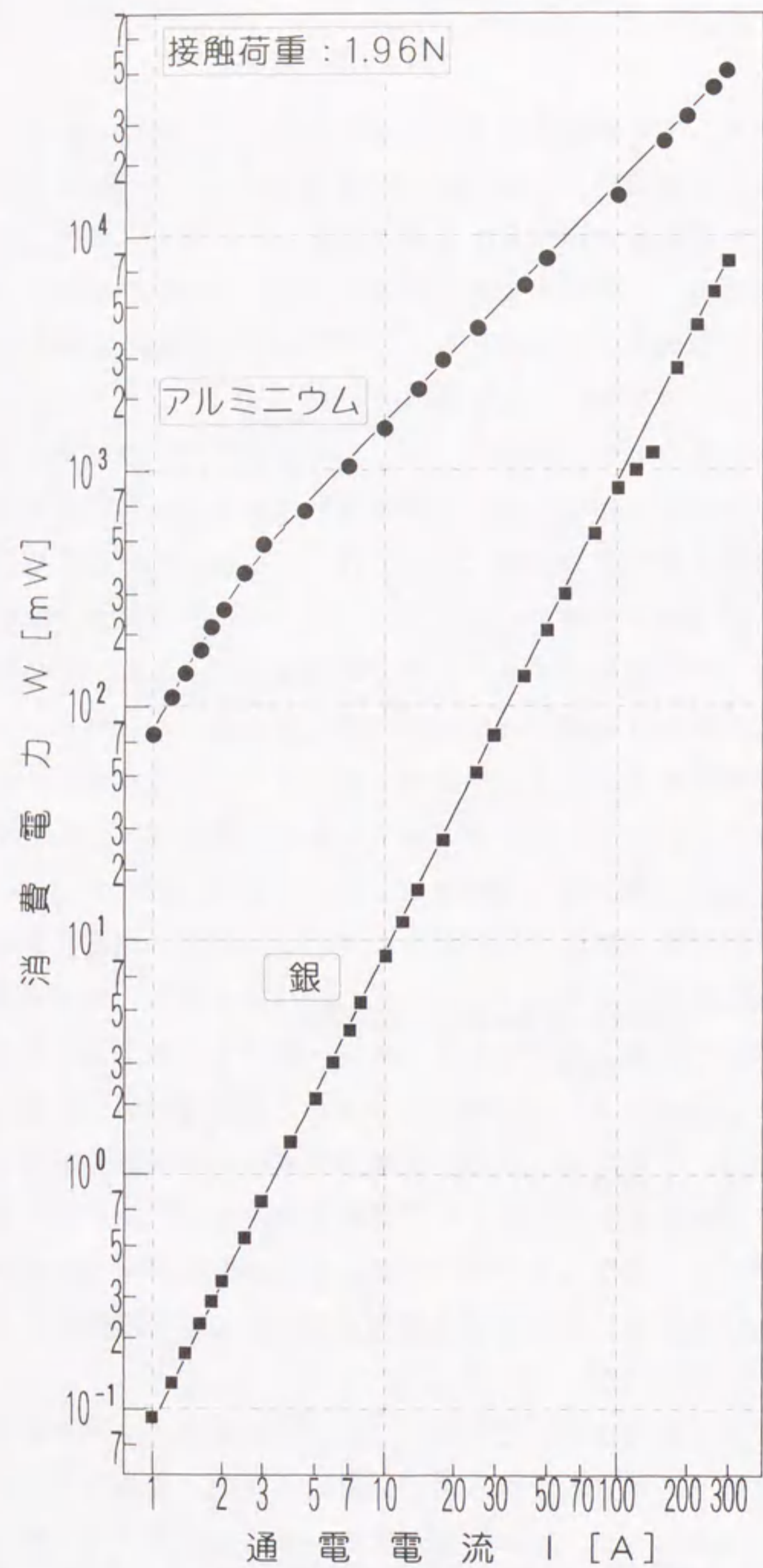


図6.10 接触子の消費電力と通電電流との関係

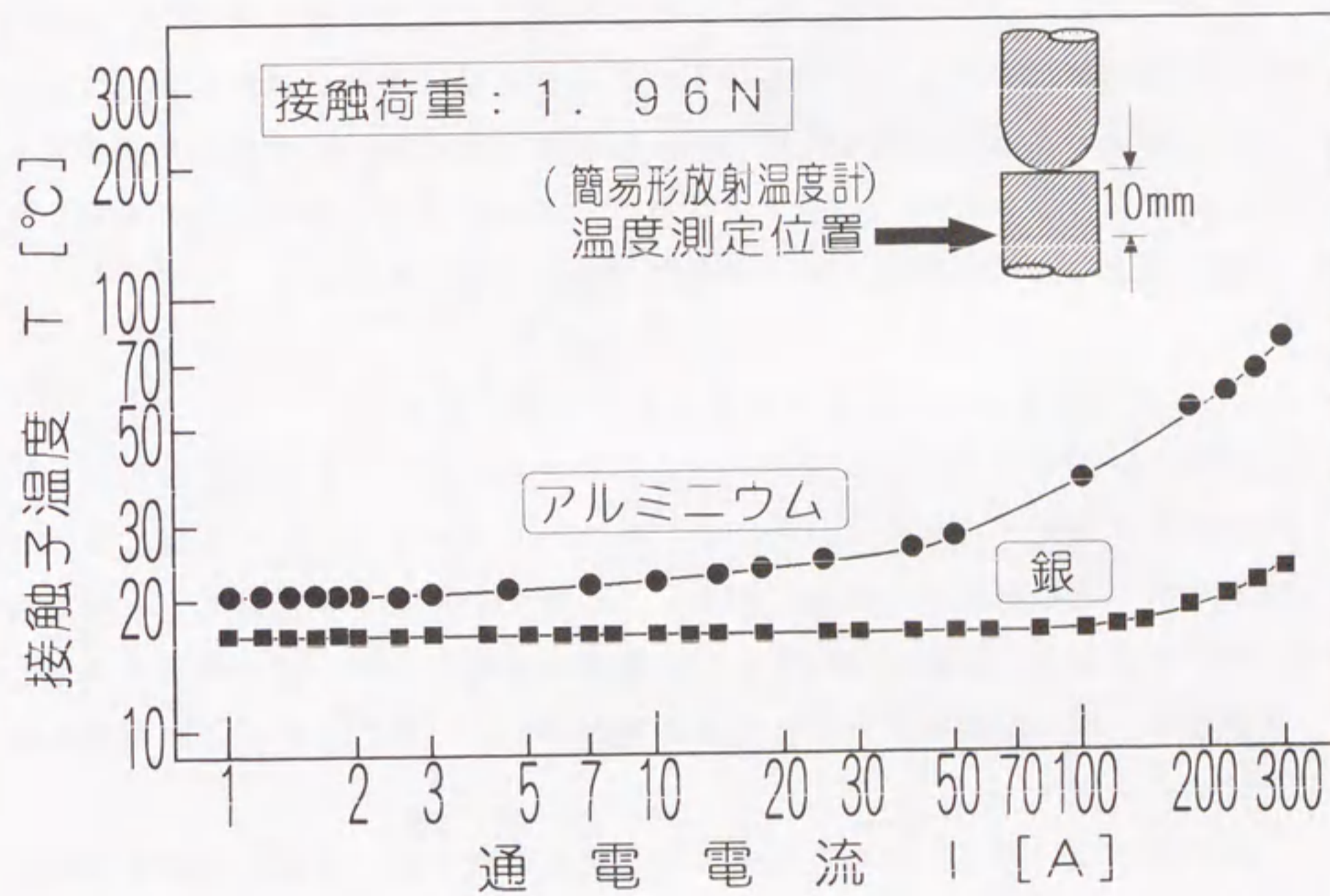


図6.11 接触子温度と通電電流との関係

される。他方、アルミ接触子では通電初期の接触子温度は21℃程度であるが、通電電流の増大とともに徐々に上昇している。30A以上の通電状態における接触子温度の上昇は顕著となり、100A通電時で35℃、300Aの通電状態では80℃程度の温度となっている。

また、各電流値における接触子の温度を通電初期の接触子温度で減算した接触子の温度上昇値 ΔT と接触点の消費電力 W との関係を図6.12に示す。銀およびアルミ接触子いずれの場合も温度上昇値 ΔT は図中に破線で示すように接触点の消費電力 W に比例する様相にある。この結果より本実験が熱的に安定した定常状態にあると判断できる。

以上の実測から、アルミ導体の点接触子に数百アンペアの電流を通電させた場合においては、ジュール熱の発生および接触点の温度上昇も大きく、接触点は容易に溶融状態に達することがわかる。このことは、アルミ導体に限らず、接触子表面に酸化膜などの汚染皮膜が介在した接触状態における接触抵抗現象を示唆するものであるといえる。そこで、銅導体の表面が汚染された接触子を用いた場合の通電電流に対する接触抵抗の挙動について次節で検討する。

6.5.3 超音波アルコール洗浄処理を施した銅接触子

実験には銅導体を用いた接触子の表面加工および研磨処理を行った後に、化学研磨等の表面処理を施さず、超音波アルコール洗浄処理によって加工および研磨時に付着した研磨剤等の異物を除去した状態での接触子を用いた。接触荷重を1.96Nに設定し、直流1~300Aまでの電流増減時における接触抵抗を実測した。実験は同一の加工処理を行った3組の接触子について行った。その結果を図6.13に示す。

図中に[A]、[B]、[C]で示すように通電初期1Aの通電時の接触抵抗は各接触子によって大きな差が現れている。○印で示す[A]の場合には、通電初期の接触抵抗は50m Ω と高い。3A以上の電流域では電流の増大とともに接触抵抗は通電電流に反比例する傾向で低下している。この傾向は[B]、[C]で示す特性においてもみられ、それぞれ10Aおよび150A程度から低下しており、いずれの場合も接触抵抗の低下傾向はほぼ一致している。最大300Aの通電時における接触抵抗は0.3m Ω 程度で、[A]の特性においては通電初期の1/100以下となっている。

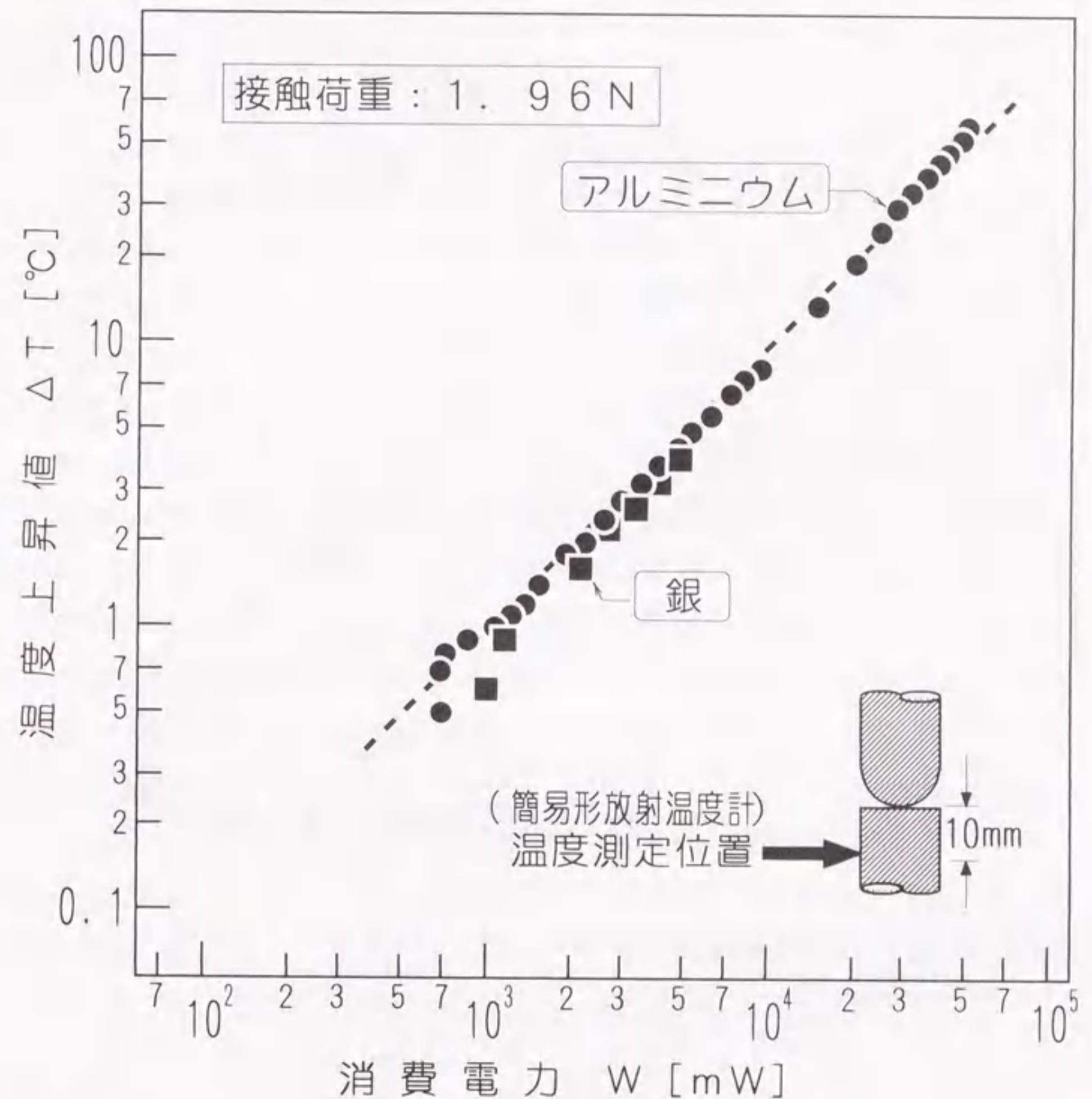


図6.12 接触子の温度上昇値と消費電力との関係

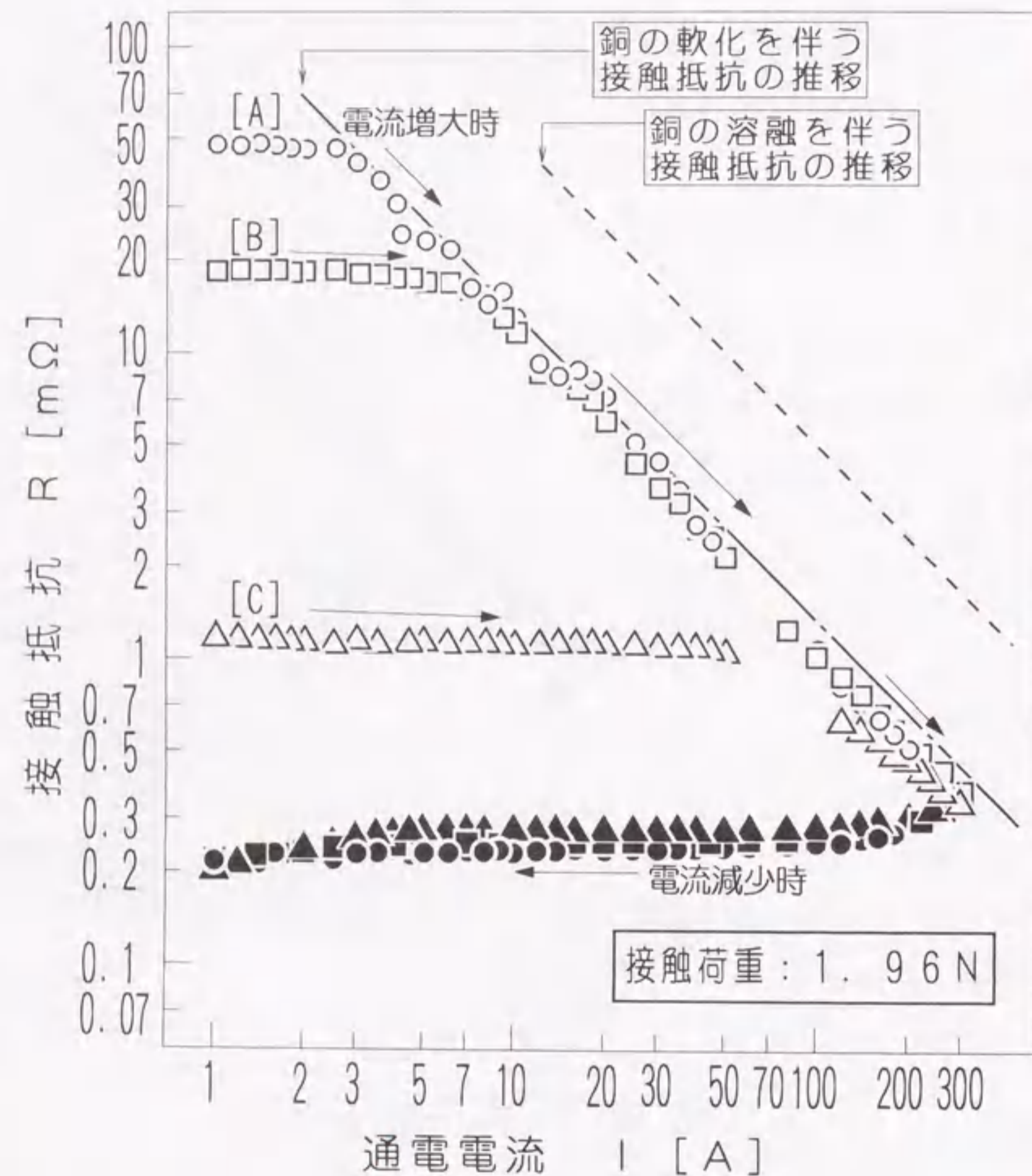


図 6.13 超音波アルコール洗浄を施した銅接触子の接触抵抗と通電電流との関係

その後、電流減少時の接触抵抗はほとんど一定の抵抗値で推移している。なお、本実測においてもアルミ接触子での実測と同様に各測定ポイントでの電流設定直後から接触電圧は安定した状況にある。

以上の実測結果より、接触子の加工後において表面洗浄のみを施して接触させた場合には、通電初期数アンペアの通電状態における接触抵抗はバラツキが大きい状況にあることがわかる。特に、通電初期に接触抵抗が高い場合には通電電流の増大とともに抵抗値は大きく低下する傾向にある。これは、前述のアルミ接触子の特性と近似した様相であり、洗浄処理のみを施した接触子表面は接触子の加工時に生成されたペールビー層（非晶質層）や酸化膜などの汚染皮膜に覆われた状態にあることによって、通電時の接触点に発生するジュール熱は大きく、接触点が軟化あるいは溶融状態に達することが予測される。

そこで、前述表 6.1 および表 6.2 で算出される銅導体の軟化温度あるいは融点に達する接触電圧が持続する状態での接触抵抗の推移を図中に一点鎖線および破線で示す。実測から得られた接触抵抗の低下傾向は一点鎖線で示す直線によく一致している。この特性は前述図 6.9 で示したアルミ接触子の場合とは様相が異なっている。大気内に放置した銅導体の表面に生成されている Cu_2O の皮膜はアルミ導体の酸化皮膜 (Al_2O_3) に比して機械的強度が小さく、接触部の変形によって皮膜は比較的容易に破壊され、清浄な金属表面同士の接触部分が形成されると予測される。これらのことから、通電に伴うジュール熱の発生に起因する接触部分の軟化によって微細な金属同士の接触部分での通電路が形成され、その後の接触抵抗は表 6.1 に示す軟化電圧と同じ接触電圧を維持した状態で抵抗値が低下したものと考えられる。

6.5.4 大気中に放置した銅接触子

また、銅点接触子を実際に大気中に放置させた場合の接触抵抗の挙動について実測した。これは、銅接触子が大気中において開放状態で放置された後に閉成された接触状態を想定したものである。

実験は銅接触子を化学研磨処理を施した後、大気中に1時間から最大2カ月間放置させ、それぞれの接触子について接触荷重を1.96 N および 49 N に設定した加圧状態で直流1~300 A までの電流増減過程において接触抵抗を実測した。図 6.14



図 6.14 大気中に放置した銅接触子の接触抵抗と通電電流との関係

は実測の中から1時間、1週間および2カ月間放置させた接触子について接触抵抗と通電電流との関係を示したものである。なお、各放置時間に対する接触抵抗の実測は2組の接触子について行い、図中の各特性はその一例について示したものである。

放置時間がもっと短い1時間放置の接触子について1.96Nの接触荷重で加圧した場合の接触抵抗を図中に○および●印で示す。また、接触荷重を49Nに設定した場合の接触抵抗については□、■印で示す。1.96Nで加圧した場合の接触抵抗は0.1mΩ程度で、電流の増減過程において抵抗値はほとんど変化していない。また、接触荷重を49Nに設定した場合の接触抵抗は0.05mΩ程度で、1.96Nの加圧時の抵抗値に比べて約1/2と低い様相にあり、接触子表面の劣化はほとんど進行していないと考えられる。

次に、1週間(168時間)放置した接触子を用いて実測した電流増大時の接触抵抗を△および▽印で示す。この場合、荷重1.96Nで加圧した場合よりも49Nの加圧の方が接触抵抗は高く、通電初期1Aにおける抵抗値は1.96Nの加圧時で1.8mΩ、接触荷重が49Nの場合には8mΩ程度となっている。また、通電電流の増大に対して49Nの加圧時の接触子では15A程度まではほぼ一定であるが、その後の接触抵抗は電流の増加とともに低下する様相を示している。反面、1.96Nの接触荷重で加圧した場合には50A程度まで接触抵抗はほとんど変化せず、50A以上において通電電流の増大とともに抵抗値が低下している。

さらに、2カ月(1488時間)間放置した接触子の場合には通電初期の接触抵抗は高く、1.96Nの加圧時においては通電初期から約10Aまでは15mΩ程度の抵抗値で推移し、その後低下している。反面、49Nの加圧条件では通電初期の接触抵抗は1.96Nの加圧時よりも10倍程度高い150mΩ程度の抵抗値を示しており、通電初期から抵抗値が急減する様相にある。これら通電電流の増大に伴って接触抵抗が低下する状況下の抵抗値はいずれの接触子においてもほぼ同じ傾向を示しており、300Aの通電時における接触抵抗は0.3mΩ程度にまで低下している。その後、電流を減少させた場合の接触抵抗はほとんど変化していない様相にある。

図中の一点鎖線は前述図6.13で示した銅導体の軟化温度から算定される接触電圧が持続する場合の接触抵抗の推移を示したものである。この一点鎖線の傾向と実測から得られた接触抵抗の低下域の特性とはほぼ一致しており、前述の超音

波アルコール洗浄を施した接触子における傾向と一致する状況にあることがわかる。また、1週間あるいは2カ月放置した接触子では、接触荷重を49Nに設定した場合の通電初期1Aにおける接触抵抗は1.96Nの加圧時よりも高くなっている。これは通常の金属接触時（化学研磨直後）の特性と異なっている。そこで、1時間から2カ月（1488時間）間放置した各接触子について通電初期1Aの通電時における接触抵抗と放置時間との関係を調べ、その結果を図6.15に示す。各放置時間および加圧条件についてそれぞれ2組の接触子を用いて得られた接触抵抗の各抵抗値を点線あるいは実線のエラーバーで表し、算術平均した平均抵抗値を○および●印で示す。1時間大気中に放置した2組の接触子において、接触荷重を49Nに加圧したときの接触抵抗の差異は少なく、その平均抵抗値は0.049mΩと低い。なお、この抵抗値は化学研磨直後に接触させた場合の接触抵抗にほぼ等しい状況にある。その後放置時間が長くなるとともに接触抵抗は増大しており、1カ月以上放置した場合には100mΩ前後の高い抵抗値を示している。これらのことから大気中に放置した接触子は放置時間の経過とともに接触子表面の劣化が進行し、接触抵抗は順次高くなることがわかる。

他方、接触子を1.96Nの接触荷重で加圧させた場合、放置時間が48時間までの接触抵抗は49Nの加圧条件の場合よりも全体的に高く、放置時間とともに抵抗値が増大している。しかしながら、その後長時間放置した接触子では2週間の放置接触子を除いて、49Nの高荷重時よりも接触抵抗は低い状況にある。これは接触抵抗の測定時において、通電した電流によって接触状態に変化が生じたためと予測される。

そこで、通電電流を低く抑えた状態で接触抵抗の実測を行った[6]。その結果を図6.16に示す。実験は大気中に68時間放置させた2組の銅点接触子について、通電電流を直流100μAに設定し、1.96Nから98Nまで接触荷重を順次増加させて接触抵抗の推移を実測した。図中に[A]、[B]で示す各接触子の接触抵抗は接触荷重が1.96Nの加圧状態では、いずれも数Ωと高い抵抗値にある。接触荷重の増加に伴って接触抵抗は低下し、荷重が50Nの加圧時では[A]、[B]両者の接触抵抗は800mΩ程度とほぼ同じ抵抗値となっている。さらに98Nまで加圧した状態では500mΩ程度まで低下しているが、これらの接触抵抗は前述図6.15の抵抗値よりもかなり高い様相にある。

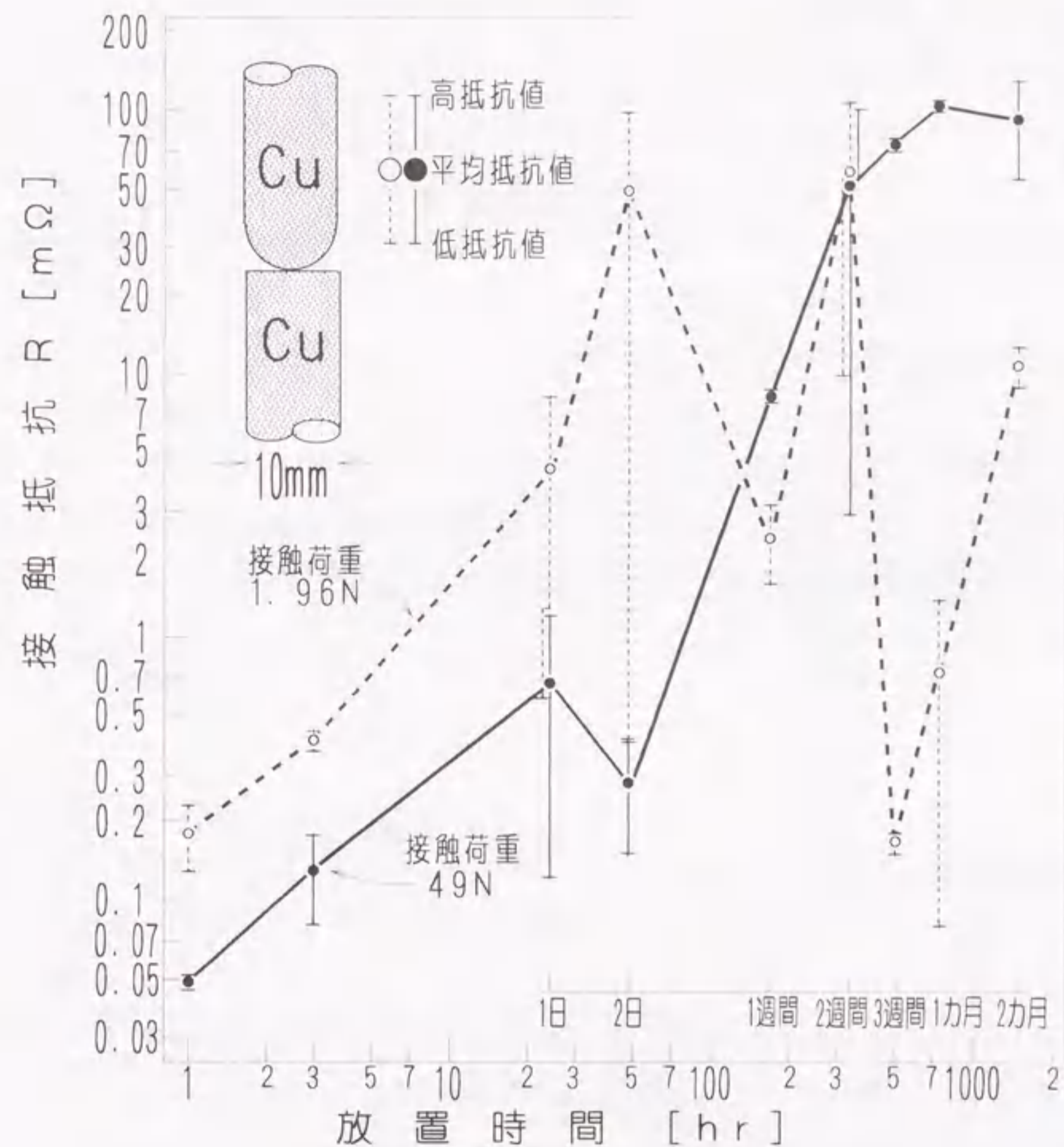


図6.15 大気中に放置した銅接触子の放置時間に対する接触抵抗の推移

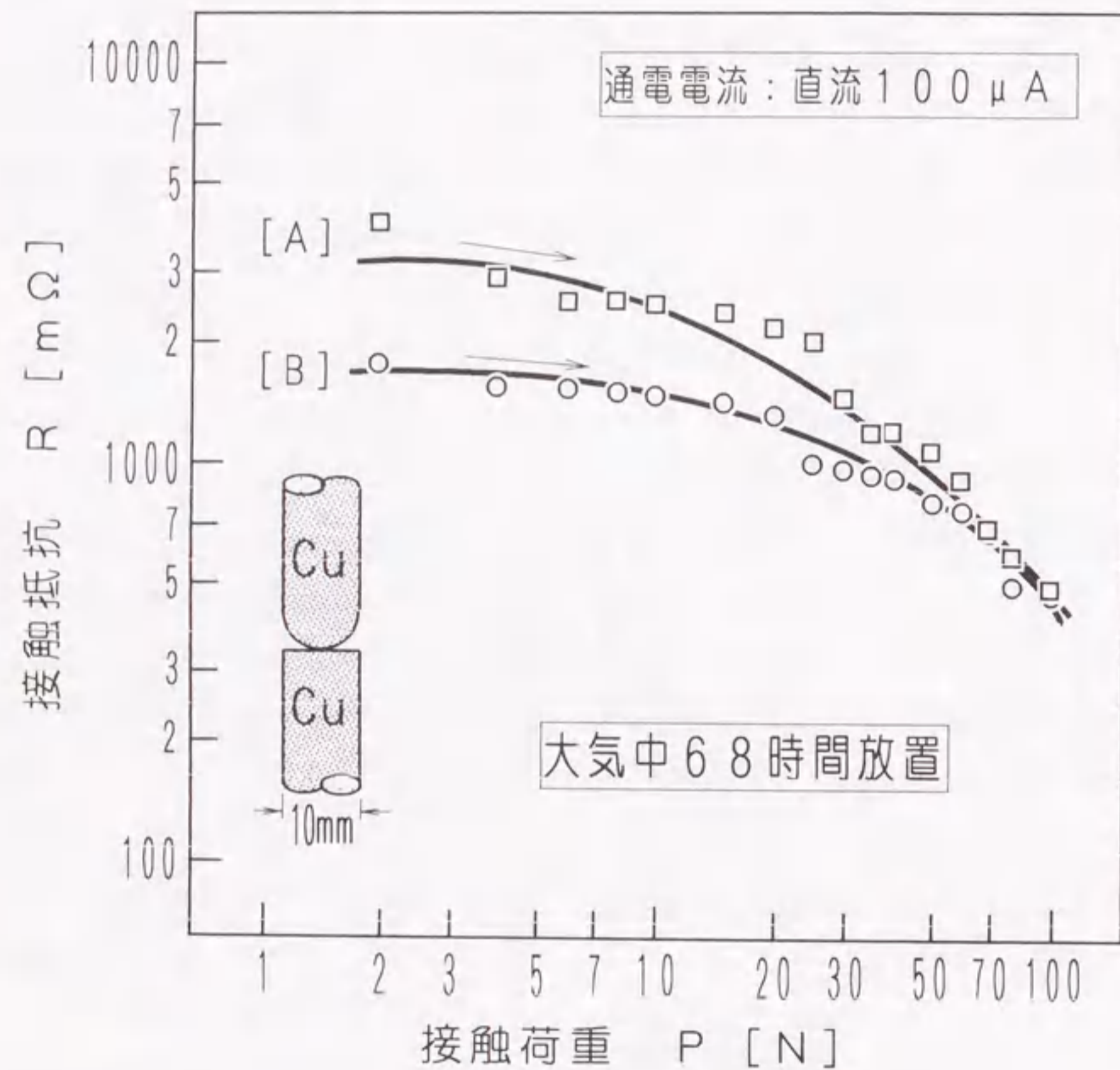


図 6.16 微小電流通電時の接触抵抗と接触荷重との関係

前述表 6.1 および表 6.2 において銅導体の軟化および融点温度に到達する接触電圧はそれぞれ 110mV, 411mV と算定されている。ここで、図 6.16 で示した [A] の実測例において接触荷重が 1.96N の加圧時の接触抵抗に注目すれば、そのときの抵抗値は 3,000mΩ 程度にある。この状態で接触子に 1A の電流を流した場合、通電電流の影響によって接触抵抗が変化しないと仮定すれば、その接触電圧は 3,000mV となる。この値は銅導体が融点に達する接触電圧 411mV の 7 倍以上と高く、接触部分での消費電力も 3W に達することから接触点が溶融すると予測される。反面、49N の加圧時における接触抵抗は約 1,000mΩ まで低下しており、1A の電流を通電させた場合の接触電圧は 1,000mV 程度にまで低下する状況にある。

これらのことから、前述図 6.15 で示した特性で、長時間放置させた接触子において 1.96N の接触荷重で加圧させた場合の接触抵抗が低下しているのは、通電開始の瞬時に高い接触電圧が現れ、接触面の微細な部分での溶融現象が生じたことによるものと考えられる。

6.6 結論

本章では、銀、銅およびアルミ導体を用いた点接触子において最大 300A の直流電流を通電させた場合の接触抵抗の実測し、その挙動を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 化学研磨などの表面処理を施した銀および銅接触子の接触抵抗は低く、300A の通電時においても安定した接触状態が得られる。

(2) アルミ導体を用いた接触子においては、数 A の通電時の接触抵抗は銀導体の接触子に比して 50~500 倍と高く、通電電流の増大とともに抵抗値が急減する様相にある。

(3) 化学研磨などの表面処理を行わない銅接触子や大気中に長期間放置した銅接触子の接触抵抗は高く、通電電流の増大とともに接触部分の軟化現象によって接触抵抗が低下する様相にある。

(4) 酸化膜などによって汚染された劣化接触子では微小電流の通電によって得られる接触抵抗は数百 mΩ から数 Ω と非常に高く、1 アンペア程度の通電時にお

いても接触点が軟化あるいは熔融温度に達し得る状況にあることがわかった。

[第6章の文献]

- [1] 愛知, 松村, 宮地: 「銀, 銅およびアルミ点接触子の直流300A通電時における接触抵抗特性」, 電学論誌B分冊, vol.118-B, No.7/8, pp.825-830 (1998)
- [2] F.L.Jones: "The Physics of Electrical Contacts", Oxford at the Clarendon Press, pp.17-26 (1957)
- [3] 愛知, 宮地: 「大電流通電接触子における接触抵抗測定に関する考察」平成8年電気学会全国大会, No.273 (1996)
- [4] R.Holm: "Electric Contacts", 4th.Edit., Springer, New York, p.436 (1967)
- [5] 国立天文台編: 「理科年表」, 平成9年, p.467 (1997)
- [6] 愛知, 宮地: 「大気中に放置した銅点接触子の通電電流-接触抵抗特性」, 電気学会開閉保護研資, SP-97-24, pp.7-11 (1997)

第7章 総 括

7. 1 はじめに

遮断器, 断路器などの電力用開閉機器や継電器に代表される一般的な開閉機器の接触部分是对向する金属導体が機械的に加圧されて接合した状態にある。近年の電力需要の増大に伴って電力用開閉機器の接触子における接触性能ならびに信頼性の向上が重要となっている。このような状況をかんがみ, 筆者は, 開閉機器における接触子の接触抵抗に関する基礎的な諸現象について研究を行った。

本研究では, まず微細な接触面を1000倍以上の接触面積を有する巨視的な接触面として取り扱うことができる一つの手法として電解溶液を用いた接触抵抗の測定に着手し, 種々の接触面が形成された接触状態において, 電流集中に起因する接触抵抗(集中抵抗)の基礎現象を系統的に解析した。また, 接触部分に形成される微細な接触面の実態を把握することの重要性から, 光干渉法を用いた光学的手法による接触部の直視観測を行うとともに, 微細な接触面の形成状態と接触抵抗との関係について解析を進めた。さらに, SF₆ガス遮断器の接触子に関わる通電特性について, その挙動を解析するとともに, 金属同士が接触する開閉機器の接触子を対象とした数100Aの通電時における接触子の接触抵抗現象を解明した。

以下に本論文のまとめと主要な成果について記述する。

7. 2 電解浴槽を用いた接触子モデルによる接触抵抗の解析

一般に, 開閉機器の接触子における通電路は微細な接触点によって形成され, その接触点の形成状態と接触抵抗との挙動を系統的に解析することは困難な状況にある。そこで, 電解溶液に金属導体を配し, 点, 線および面接触に形成する微細な接触面の大きさを1000倍以上の接触面として扱える巨視的な接触子モデルによる実験手法を考案し, 電流集中に起因する接触抵抗の挙動について検討した。

以下にその成果を記述する。

(1) 半径2~5mmの各円柱電極1~3本を配置した接触点モデルによる実測から,

接触抵抗が接触面積に対して 0.5 乗に反比例する関係にあることを検証し、電流集中に起因する接触抵抗の理論傾向に一致する結果が得られた。また、複数の接触点が相互に近接した場合の接触抵抗の挙動を実測し、数値特性との比較を行った。その結果、R. Holm によって示されている算定式が 2 点や 3 点接触のごく少ない接触点形成時には適用し難いことがわかった。

(2) 線接触の接触形態において線幅の拡大を伴う場合、接触面積に対する接触抵抗は接触面積の 0.3 乗に反比例することがわかった。反面、接触線長の伸展によって接触面積が増大する場合、接触抵抗は接触面積の 0.7 乗に反比例することを見いだした。さらに、線接触の線幅が極度に拡大した場合の接触抵抗は接触面積の 0.5 乗に反比例し、点接触の接触抵抗特性と同じになることを確認した。

(3) 複数の線接触を間隔をおいて並列に配置した場合、接触抵抗は接触面積の 0.7 乗に反比例しており、線幅が一定で接触線長を伸展させた場合の特性と一致することがわかった。

7. 3 光干渉法を用いた微細接触点の検出

球対球面、球対平面あるいは二つの円柱の側面を直交させて加圧接触させた金属導体では微小な接触面積を有する接触点の一つ形成され、その接触面積は加圧力の増大とともに拡大する。他方、平面同士が接触した場合には複数の接触点形成され、加圧力の増大によって各接触点の接触面積が増大するとともに接触点の数も増加すると予測される。そこで、接触抵抗現象の解明において、接触部分に形成される微細な接触面の実態を把握することの重要性から、面同士の接触部分に形成する微細な接触点を検出する一つの手法として、平板ガラスに金属導体を加圧接触させ、He-Ne ガスレーザ光および白熱電球光を併用した光干渉法を用いた光学的手法を開発した。以下にその成果を記述する。

(1) 光干渉法で観測される干渉像は接触点周辺の空けきにおいて明暗のしま模様をつくる。このしまは観測に使用する光源の波長 λ に対して $\lambda/4$ の奇数倍の空けき長に沿って明るいしま、 $\lambda/4$ の偶数倍の空けき長に沿って暗いしまが交互に現れ、接触点を取りまく干渉環が観測される。この光学的な特徴を用いることによって加圧された接触状態における接触子表面の観測ができる。特にレーザ光に

よって得られる干渉像は非常に鮮明であり、干渉じまから加圧された接触子表面の微細な変形状態が測定できる

(2) また、白熱電球光による観測を併用することによって、レーザ光のみでは判定困難な平面接触子において形成される微細な接触点の検出手法を見いだした。

(3) 本手法を用いて接触荷重を順次変化させたときの接触点形成の過渡現象を測定することができる。

7. 4 接触点の直視と接触抵抗特性の解析

光干渉法による実験手法の拡張として、平板ガラスに薄膜導体を被覆させることによって接触部の直視観測とともに接触抵抗の同時測定を可能にした。この実験において実測される接触抵抗は薄膜導体に形成した接触点の集中抵抗特性であることから、まずこの接触抵抗に関する理論的な解析を行った。これにより接触部に形成する接触点の分布状態と接触抵抗との相関について実験的および理論的な検討を行い、以下のことを明らかにした。

(1) 薄膜導体に形成する接触点に現れる電流集中は二次元的な現象であることから、金属導体に現れる三次元的な電流集中現象とは異なった様相にあり、接触抵抗(集中抵抗)は接触点の接触面積の 0.5 乗の逆数に対して対数的に減少することがわかった。

(2) 複数接触において接触点の数が多くなれば接触抵抗は全体的に低下するが、接触面積の増大に伴う抵抗値の低下傾向は接触点数が多いほど小さい。

(3) 接触点近接して形成している場合、接触点間の距離が短いほど接触抵抗は高くなる。特に、接触点相互に隣接する場合の接触抵抗は点接触における特性とほぼ同様の傾向を示す。

7. 5 SF₆ 分解生成物が介在した接触子の交流通電時における通電現象の解明

遮断器などの電力系統における開閉保護装置には、SF₆ ガスを用いた絶縁方式が多く採用されている。しかしながら、アーク放電等に伴って生じた SF₆ 分

解ガスと接触子導体からの金属蒸気との反応によって粉末状の化合物が生じ、接触子表面に付着する場合がある。

そこで、SF₆分解生成物の粉末が介在した銅点接触子に数百Aの正弦波交流電流および数千A以上の正弦波状減衰振動電流の通電を行い、接触子間の電圧測定ならびに電圧波形を観測し、その特異現象および接触抵抗の挙動について検討した。また、SF₆分解ガスに類似したフッ化水素ガスおよび接触子に対して有害とされている硫化水素ガスの腐食ガスの雰囲気中に放置させた銅点接触子の接触抵抗特性についても実測を行い、次のことが明らかとなった。

(1) 粒径数十 μ m程度のSF₆分解生成物が数層介在した銅点接触子において、接触荷重9.8Nの比較的低い状態で加圧した場合においては、数百A以下の比較的小電流を通電したときの接触抵抗は0.3~0.8m Ω と高い状況にある。通電電流の増大に伴って接触抵抗は低下し、数千A以上の通電状態では0.2m Ω 以下となる。これは、大電流の通電によってSF₆分解生成物が破壊されやすいことを示している。しかしながら、接触荷重が低く、小電流通電の状態では、分解生成物による接触不良や異常過熱等の接触子障害を誘発する危険性があることがわかった。

(2) フッ化水素および硫化水素の腐食ガス中に放置させた接触子を用いた接触抵抗の実測においても、SF₆分解生成物や皮膜が介在した汚染接触子と同様に接触荷重に対する接触抵抗の変化が小さい様相にあることがわかった。

(3) 接触子に数百A以下の正弦波交流電流を数時間にわたって通電した場合、接触子間の電圧波形は方形波状や三角波状を呈する状況がみられた。しかし通電時間の経過とともにほとんどの場合、方形波から三角波、そして正弦波へと移行することがわかった。

(4) SiO₂等の酸化物やBaSO₄等の化合物の粉末を接触子間に介在させた場合にも、接触子間の電圧波形に方形波状や三角波状が現われることを確認した。したがって、SF₆分解生成物が介在した接触子においてみられる電圧波形のひずみ現象は、その生成物が導電性の低い粉末であることに起因したものであることがわかった。

7. 6 直流300A通電時における接触抵抗現象の解析

電力用開閉機器の接触子において、ジュール熱の発生によって接触子の温度上昇が生ずるような大電流通電時では、大気中に置かれた接触子は表面の酸化が速く進むとともに導体の抵抗率が上がるため接触抵抗がより高くなる。また、接触部分の極度な温度上昇は接触子の軟化や溶融現象を招き、接触障害の原因となる。

そこで、銀、銅およびアルミ導体を用いた点接触子において最大300Aの直流電流を通電させた場合の接触抵抗の挙動を定量的に検討し、以下のことが明らかとなった。

(1) 化学研磨などの表面処理を施し、清浄な表面状態で加圧接触された銀および銅接触子の接触抵抗は低く、300Aの通電時においても安定した接触状態が得られる。

(2) 反面、アルミ導体を用いた接触子においては、数Aの通電時の接触抵抗は銀接触子に比して50~500倍と高く、通電電流の増大とともに抵抗値が急減する。また、化学研磨などの表面処理を行わない銅接触子の接触抵抗はアルミ接触子に類似した傾向にある。

(4) 大気中に放置された銅接触子の表面には酸化皮膜などの汚染皮膜が生成され、それらが接触した場合の接触抵抗は高い状況にある。また、通電に伴う接触部の発熱によって接触部の軟化や溶融現象が発生するとともに、通電路の拡大によって接触抵抗が減少する挙動を示すことがわかった。

7. 7 結 言

本論文は、開閉機器の接触抵抗現象の解明を目的として実験的解析を行った内容と成果をまとめたものである。

電解浴槽を用いた接触点モデルによって種の微細な接触形態を巨視的に取り扱える実験手法から、点、線、面接触における接触抵抗の基本特性を実験的に解明した。また、通常の金属同士の接触部分において形成されるような微細な接触点を検出する方法として、レーザ光および白熱電球光を併用した光干渉法による光学的手法を開発し、ガラス平板と金属導体との接触において形成される微細な接触点の挙動ならびに接触抵抗との関係について明らかにした。

さらに、電力用開閉機器の接触子を対象した接触抵抗現象の解明に取り組み、アーク等の放電によって分解されたSF₆分解ガス雰囲気中に放置された接触子の通電特性を明らかにした。また、銀、銅 およびアルミ導体を用いた点接触子において最大 300A の直流電流を通電させた場合の接触抵抗の挙動について解明した。

筆者の行った研究は接触子における接触抵抗特性の実態を明らかにしたものである。今後のさらなる安定した電力供給が要求される中で、開閉機器の接触子における信頼性の高い接触状態を維持することが必要となる。本論文で得られた成果は、接触障害の解明やその防止などを含めて、接触子における通電メカニズムの解明への端緒になると考えられる。

しかしながら、本研究は通電状態における接触抵抗の諸特性について解析したものであり、接触子の投入瞬時や短絡事故などに生ずる過渡的な大電流通電時などの動的な接触状況下での接触抵抗に関する解析や、SF₆ガス中、大気中に放置された接触子など導体表面が汚染された接触子における通電機構の解析には至らなかった。また、電力用開閉機器に使用されているCu・W合金材料や銀めっきの表面処理をされた接触子材料における接触抵抗特性も含めて、今後の研究において重要な課題と考えられる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始懇切なご指導とご鞭撻を賜った名古屋大学大学院工学研究科教授 松村 年郎 先生、同 工学研究科教授 大久保 仁 先生、また同 理工科学総合研究センター教授 鈴置 保雄 先生に厚く感謝いたします。

本研究を遂行するなかで、愛知工業大学客員教授・名古屋大学名誉教授 宮地 巖 先生の長年にわたるご指導、ご鞭撻を賜るとともに、大同工業大学元教授 故 中山 忠巳 先生、同 大学元教授 佐土根 範次 先生の日頃の助言、ご鞭撻を賜りましたことに厚くお礼申し上げます。さらに、本研究遂行に対してご指導賜りました国立豊田工業高等専門学校長・名古屋大学名誉教授 鬼頭 幸生 先生に感謝いたします。また、エネルギー技術研究会では、宮地 巖 先生をはじめ、信州大学名誉教授 永野 泰男 先生、名城大学名誉教授 長縄 廣司 先生、信州大学教授 田原 徳夫 先生、ならびに関係各位の先生から多くのご助言を戴き、ここに厚く感謝いたします。

最後に、本論文まとめの機会を与えて戴きました大同工業大学学長・名古屋大学名誉教授 堀井 憲爾 先生にお礼申し上げるとともに、実験等に終始協力して戴いた大同工業大学の卒業研究生各位に感謝の意を表します。

本研究に関して公表した論文

| 章 | 題 目 | 掲 載 誌 | 著 者 |
|-------|--|---|--|
| 第 2 章 | 電解浴槽を用いた接触子モデルによる接触点の分布と接触抵抗に関する実験的考察 | 電気学会論文誌 Vol.116-B, No.10 pp.1292-1297(1996) | 愛知 久史 宮地 巖 |
| | 線接触子の接触形態に伴う接触抵抗の実験的考察 | 電気学会論文誌 Vol.117-B, No.7 pp.1056-1060(1997) | 愛知 久史 宮地 巖 |
| | Analysis on the constriction resistance of the electric contact by the contact model using the electrolyte bath. | Proc.of the 17th International Conf. on Electrical Contacts pp.1-7, Nagoya, Japan July 4-9 (1994) | H.Aichi N.Tahara |
| 第 3 章 | 光干渉法による接触点の実験的検出に関する考察 | 電気学会論文誌 Vol.102-B, No.5 pp.313-319(1982) | 愛知 久史 佐土根範次 宮地 巖 |
| 第 4 章 | 光干渉法による接触点の実験的検出に関する考察 | 電気学会論文誌 Vol.102-B, No.5 pp.313-319(1982) | 愛知 久史 佐土根範次 宮地 巖 |
| | 近接する複数接触の接触抵抗 | 電気学会論文誌 Vol.105-B, No.10 pp.821-828(1985) | 愛知 久史 佐土根範次 宮地 巖 |
| 第 5 章 | SF ₆ 分解生成物が介在した銅点接触子の交流電流通電特性に関する実験的考察 | 電気学会論文誌 Vol.111-B, No.5 pp.562-569(1991) | 愛知 久史 佐土根範次 松村 年郎 鬼頭 幸生 向山 翼 高木 勲 |
| 第 6 章 | 銀, 銅およびアルミ点接触子の直流 300A 通電時における接触抵抗特性 | 電気学会論文誌 Vol.118-B, No.7/8 pp.825-830(1998) | 愛知 久史 松村 年郎 宮地 巖 |

