

りの結果が得られ坑道周囲の岩盤の歪変化についての大体の傾向を実測によつて知ることが出来た。この事は他の方法による測定と並んで坑内岩盤の応力について従来発表されている理論に対する一つの裏付として興味ある事実であると思われる。

本実験は山口大学工学部鉱山学科第4学年学生野見山優君の協力を得て行つたものである。また坑内測定を行つた沖ノ山、東見初、山陽無煙、沖宇部、常盤、東神原、松浜、神原、高松、山野の各鉱業所では所員各位に多大の御援助を賜わつた。ここに附記して厚く御禮申上げ

る次第である。

#### 文 献

- (1) 鈴木, 昭26-4日本鉱業会講演
- (2) Tincelin, International Conference about Rock Pressure and Support in the Workings, Liège 1951, English Text P. 158.
- (3) 杉原, 日本鉱業会誌, 49巻 581号, 711頁 (昭8-9)
- (4) Dorstewitz, Archiv f. Bergbauforschung, Bd. 1, S. 192 (1940).
- (5) Yamaguti, 土木学会誌, 15巻 4号, 291頁 (昭4-4).
- (6) Spackeler, (2) と同じ, P. 179.
- (7) Labasse, (2) と同じ, P. 45.

## 電気接触抵抗 (平面接触子を用いた場合の 電気接触抵抗の一性質)

山 岡 義 人

### 1. 緒 言

電気接触抵抗とは相接触している二つの導体の境界面間を電流が横切の際に受ける電気抵抗のことをいい、普通の導体内部における電導抵抗とは全く異なつた性質を有し、オームの法則に従わないことは従来の幾多の報告から見ても明らかである。この問題を研究するに当つては次の如き極めて多数の因子について考慮を払う必要がある。すなわち、接触子の材料、その硬軟、弾性、また接触子の形状、接触面の仕上程度すなわち粗滑、表面の皮膜、接触圧力、電流電圧等、及びこの他に接触抵抗に直接関係はないが、測定に当つては Volta 効果、Peltier 効果、Seebeck 効果、Thomson 効果、特にコヒラ作用等による影響を充分考慮する必要がある。このように電気接触抵抗は非常に広汎な問題であるので、その性質の解明は仲々容易ではない。しかも現在電気接触を利用している電気機器並びに電気回路は殆んど無数といつてもよい程で、

それらの故障の原因もまた直接電気接触によるものが甚だ多い現状である。それにも拘らず、電気接触抵抗の性質が未だに満足のゆく程度解明されていないとゆう理由の一つは結局上述したように極めて多数の因子が入り乱れて電気接触抵抗を左右する点にある。すなわち個々の測定結果が甚だまちまちで規則正しい一般的法則が仲々見出し難いのである。

従来電気接触抵抗は高抵抗の材料の方が低抵抗の材料よりも高いといわれている。これは二物体が接触している場合にはその表面における無数の凹凸の内の幾つかが確率的に接触し、その接触点で電流の流線がしぼられるとゆう考え方からすれば当然のことであろう。またその接触点における接触面積は接触圧力並びに材料の弾性に関係し、接触圧力が大きくて弾性が小さい程接触面積が大きくなり、結局電気接触抵抗が小さくなるとゆうことは考えられることである。そのような考えのもとに接触圧力が電気接

触抵抗に及ぼす影響について理論的に誘導された式がある。それは電気接觸抵抗を  $R$ 、接触子間の全圧力を  $P$ 、 $k$  を 1 つの常数とした場合に次の如き関係式で表わされている。

$$R = k / \sqrt{P}$$

E. Contius は尖頭接触子の場合についてある圧力の範囲内では、この式がよく実験と一致することを示し、更に平面間の接触では、

$$R = k / P^n$$

が成立するといっている。  $n$  の値はよく研磨した面で  $n = 2$  位で圧力が増加して全接触面の降伏点に近づくにつれて  $n = \frac{1}{2}$  に近づくといっている。

接触子表面の皮膜について考えて見ると、たとへ表面を理想的に清浄にした場合でも空気中にさらすと忽ち吸着された気体の単分子層によつて表面が覆われてしまう。また普通の場合においては水蒸気液体の単分子層によつて常に表面は覆われているものである。それにも拘らず、G. Windred によると、現在では電気接觸抵抗は一種の金属傳導であつてそのような気体液体の皮膜による電気傳導はそれに比べると問題にならないものであるとされていると述べている。従つてこの考え方からすると、可成りの程度清浄にした面ならば表面の皮膜の問題は左程心配する必要がなさそうである。しかし普通の金属面では酸化皮膜や硫化皮膜等が出来易く、これらの厚さは時間と共に増加する。そしてこれらの金属の酸化皮膜は一般に著しく電気抵抗を増加するので接触子材料としては普通膜の出来難い貴金属類を使用するものである。

またコヒラ作用は接触圧力が極く低い場合の現象で、相接触する物質間の機械的圧力又は電位差の変化に起因する抵抗変化のことをいい、筆者の行つた実験では接触圧力  $19.67 \text{ gr/cm}^2$  のもとで  $0.40 \text{ V} \sim 0.55 \text{ V}$  位でおこることが多かつた。これは O. Lodge に従えば金属原子が表皮層中で橋絡作用をなす爲であるとされており、R Holm もまた O. Lodge のこの説を実証している。要するにコヒラ作用が起るには一定の電界強度を必要とし、新しい皮膜で覆われている場

合に  $1.10 \times 10^3 \text{ V/cm}$  程度の電場を必要とするといわれている。R. Holm の説明によれば上記の一定電場に達すると自由イオンが放出され、次第にこれ等が列んで電導性の金属繊維を形成するとしている。

いづれにせよ電気接觸抵抗は極めて複雑な界面現象であるので 1 回 1 回の測定結果について説明づけることは困難である。そこで筆者はコヒラ作用の起る範囲を避け、出来るだけ同一条件のもとで多数の測定を行い、その平均値の性質を調べてゆくことにした。

## 2. 測定方法

色々な附隨的諸効果の影響を避けるために接触子としては化学的純粋な純金属を選定すべきであつたが、満足しうる程度の仕上平面をうる事が出来なかつた爲、止むなく理想的平面に近いと思われる津上製作所製 A 級ブロック・ゲージ、接触面積  $3.15 \text{ cm}^2$ 、を使用することにした。使用したブロック・ゲージを直接分析した値ではないが普通使用されるブロック・ゲージの材質の一例を挙げると

$$C = 1.10\% \quad Cr = 1.50\% \quad Mn = 0.31\%$$

$$Si = 0.22\% \quad P = 0.018\% \quad S = 0.018\%$$

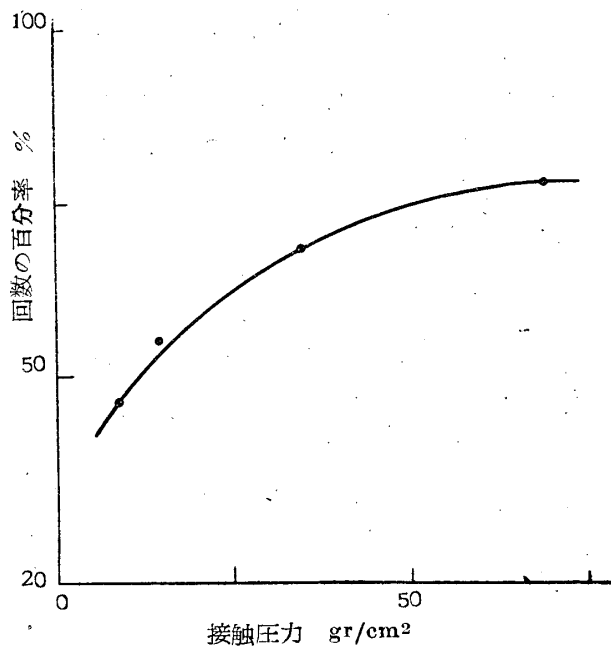
残り Fe, の如き組成である。このブロック・ゲージの側面に BS #41 エナメル絶縁銅線を半田付して電流を通じた。

面の清浄薬としてはエチル・エーテルを使用し、測定の都度 1 回 1 回上下の接触子を引き離して接触面を清浄にし直してから測定を行つた。また周囲からの振動の傳わるのを防ぐ目的で砂上に浮かしたコンクリート台上に接触子を置き、計器類は全部別の実験台に載せ、なるべく周囲の静かな時刻を選んで実験を行つた。

## 3. 測定結果

1 回 1 回の測定はこのように注意深い準備操作の後に入念に行つたのであるが、それでも規則正しい結果が得られることは単に確率の問題であるとしか考えられなかつた。何等かの予測出来ないちよつとした原因が測定結果を著しく大きく攪乱した。接觸圧力が小さい場合程この傾向は大きかつた。

測定回数は接触圧力 8.79gr/cm<sup>2</sup> で41回、14.49gr/cm<sup>2</sup> で162回、22.11gr/cm<sup>2</sup> で100回、34.72gr/cm<sup>2</sup> で100回、69.41gr/cm<sup>2</sup> で100回、であつた。この内有効と思われる測定結果は接触圧力が夫々 8.79gr/cm<sup>2</sup>、14.49gr/cm<sup>2</sup>、22.11gr/cm<sup>2</sup>、34.72gr/cm<sup>2</sup>、69.41gr/cm<sup>2</sup> に対して夫々 19回、89回、52回、68回、77回であつた。ここで有効と思われる測定結果と稱したのは少くとも一連の測定値がある規則正しい配列をとり電流の函数と考えられる如きものをいい、そうでないものは甚だしく測定値が不規則に飛躍するか又はコヒラ作用か永続的熔着かによると思われるもので、一定の低抵抗値に降下したまま電流の変動に無関係であるものものをゆう。このように電流と一定の関係を保つような測定結果の回数は一般に接触圧力が小さい程少ないとゆう結果になつた。今上記の測定回数に対する有効結果の百分率を接触圧力に対してとつて見ると

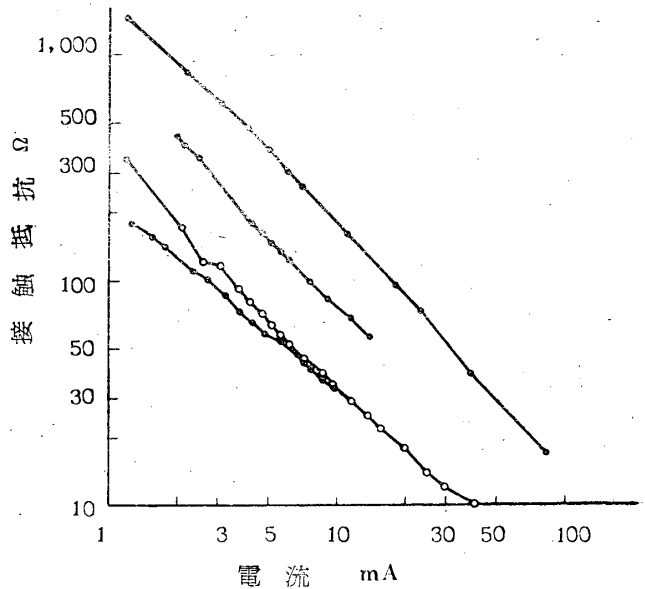


第1図 全測定回数に対する有効結果の回数の百分率と接触圧力との関係

第1図のようになつた。即ち接触圧力が増大するに従つて有効回数は増加し、逆に接触圧力が零に近づくにつれて急激に減少する傾向が見られる。従つて接触圧力が極めて小さい場合の電気接触抵抗の性質は極めて不規則で変動が激

しく、至つて氣紛れな結果になることが普通である。

次に電流とある函数関係を保つているような測定結果はその数例を第2図に示したように大

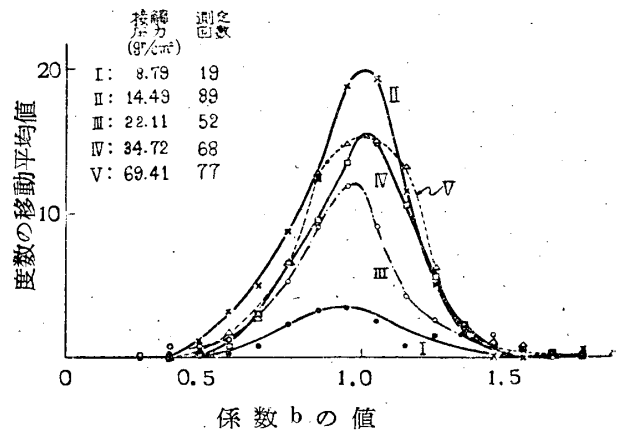


第2図 平面接触の場合の電気接触抵抗と接触面を横ぎる電流との関係

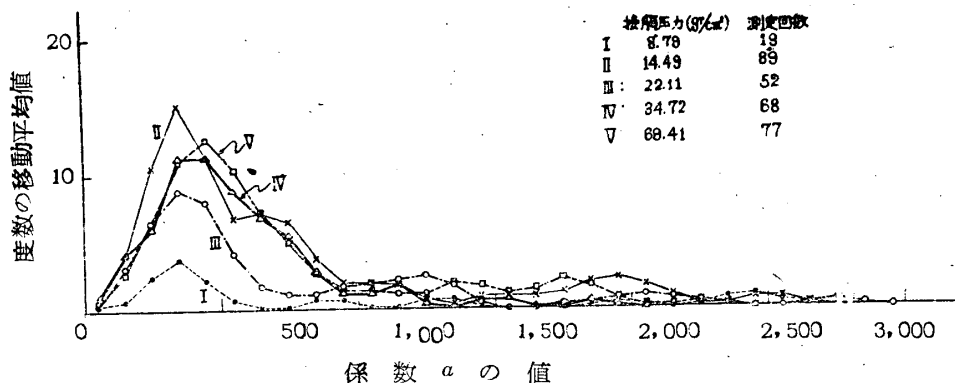
低両対数方眼紙上で直線となる。そこでこれを実験式で表わすと次の如くなる。電流を I、電気接触抵抗を R、a及びbを2つの常数とすれば

$$R = a I^{-b} \quad (1)$$

今式中の係数 a 及び b の値を測定結果から算出して、その度数分布を調べて見ると第3図及び第4図を得る。図中各曲線は夫々異つた接触



第3図 実験式  $R = aI^{-b}$  の係数 b の値の度数曲線



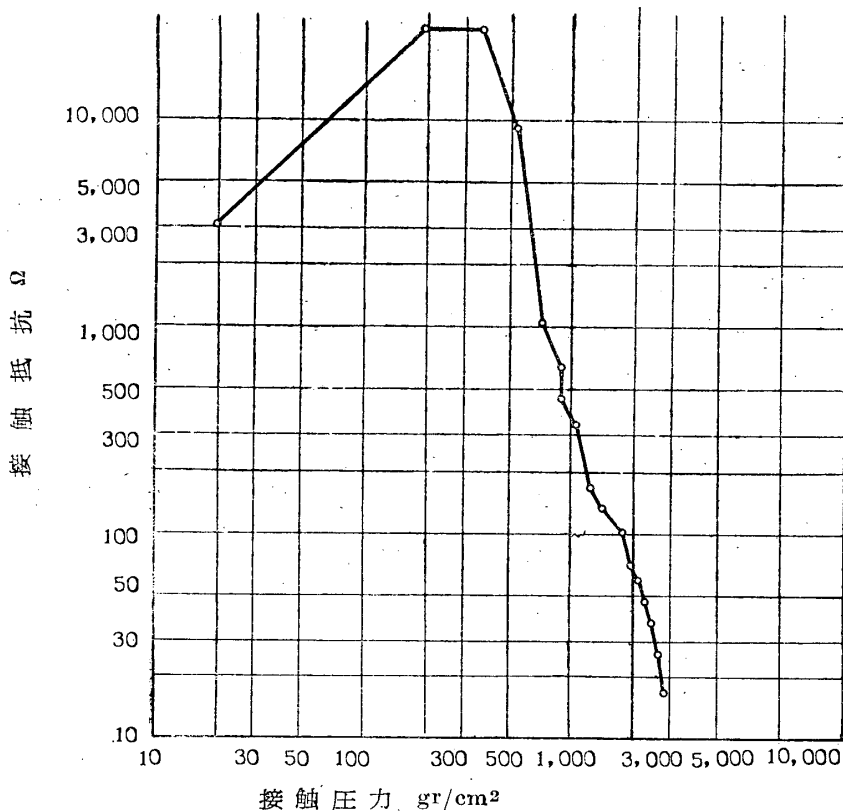
第4図 : 実験式  $R = aI^{-b}$  の係数  $a$  の値の度数曲線

圧力毎に別々に描いたものである。夫々の接 觸 圧 力 下 に お け る 係 数  $b$  の 平 均 値 は 接 觸 圧 力 8.79 gr/cm<sup>2</sup> で 1.01, 14.49 gr/cm<sup>2</sup> で 0.97, 22.11 gr/cm<sup>2</sup> で 0.96, 34.72 gr/cm<sup>2</sup> で 1.01, 69.41 gr/cm<sup>2</sup> で 1.00 であつて、この結果から見た所では  $b$  の 値 は 接 觸 圧 力 に は 直 接 関 係 が な い よ う で あ る。従つてゲージ・ブロックを用いた平面接 觸 子 の 場 合 に、清浄薬としてエチル・エーテルを用うるならば接 觸 圧 力 が 約 9 ~ 70 gr/cm<sup>2</sup> の 範 圍 内 で

は係数  $b$  は平均 0.99  $\approx$  1 で接 觸 圧 力 に は 無 関 係 で あ る と い う 結 論 に な る。従つて (1) 式 は こ の 場 合 次 式 の 如 く 簡 単 に な る。

$$I R = a$$

また係数  $a$  については同様に第4図からその 度 数 の 最 大 なる 点 の 値 を 見 る と 接 觸 圧 力 の 増 大 する と 共 に 平 均 値 が 少 し づ つ 増 大 する か に 思 わ れ る。但しこの場合には第4図でわかるように 分 布 曲 線 の 右 方 に 散 在 する 値 の 大 き い 点 が 可 成



第5図 平面接 觸 の 場 合 の 電 気 接 觸 抵 抗 と 接 觸 圧 力 と の 関 係

りあるので全体としての算術的平均値は接觸圧力 $8.79\text{gr/cm}^2$ で $1432, 14.49\text{gr/cm}^2$ で $806, 22.11\text{gr/cm}^2$ で $728, 34.72\text{gr/cm}^2$ で $603, 69.41\text{gr/cm}^2$ で $719$ となり接觸圧力の増大に伴つて反対に減少している。これは一見 E. Contus の結果に一致しているように思われるが、分布曲線としての最大頻度の点の  $a$  の値は上記の如く寧ろ少しづつ増加しており、統計的の見地からすればこの方の値を採用して現象の判断を行うのが寧ろ妥当であろう。そこで今  $a=1000$  迄の値のもののみをとつてその平均値を見ると、上記の値は夫々  $412, 464, 423, 454, 490$  となり接觸圧力の増加と共に寧ろ増加する傾向が見られる。E. Contus の場合には接圧面積  $1.6\text{cm}^2$  で荷重が  $3 \sim 100\text{kg}$  の場合についての結果であつて接觸圧力が可成り大きい。筆者の行つた実験では接觸圧力が大体  $0.3 \sim 3\text{kg/cm}^2$  の範囲内では第5図に示したようにこの E. Contus の行つた結果とよく一致した。しかし略  $0.3\text{kg/cm}^2$  以下の圧力では抵抗は逆に接觸圧力と共に増大しており E. Contus の結果とは一致していない。このような低圧力下においては或いはこういった性質がありうるのかも知れない。もしもこのような性質が低圧力下であり得るとするならば第4図の分布曲線の最大頻度の点のずれ方が一応諒解出来ることになる。しかしこの問題の確証については更に今後の慎重なる測定の結果にまたねばならない。

このように厄介ではあるが、ともかく統計的な方法によれば一応ある程度の確からしい電氣接觸抵抗の一般的性質の解明が出来そうである。

接觸子の材料並びに清淨薬を変えて行つた場合にも上記の結果と大体似た結果がえられたがそれについては未だ統計的取扱いに十分な測定

回数が増えぬから次の機会にゆづる。

#### 4. 結 言

電氣接觸抵抗は多くの予測出来ぬ因子によつて支配される導体界面現象の一つで、多くの場合その測定結果は再現性がなく、従つて少数の測定結果からその性質を決定することは妥当性を欠く恐れがある。そのような見地から筆者は同一条件下で出来るだけ多数の測定を繰返し、統計的にその性質を解明しようと試みた。その結果エチル・エーテルを面の清淨薬として用い、ゲージ・ブロックを接觸子とした場合に次の如くある程度の解明が可能であることを示した。

1. 接觸圧力が小さくなればなる程測定結果が不規則になる確率が増加する傾向にある。
2. 接觸圧力  $9 \sim 70\text{gr/cm}^2$  の範囲内では電流と接觸抵抗との間には、 $a$  を接觸圧力  $P$  のある函数と考え  $a(P)$  とおいた場合に次の関係式が成立する。

$$I R = a(P)$$

3. 電氣接觸抵抗と接觸圧力との関係は接觸圧力が約  $0.3\text{kg/cm}^2$  以上では E. Contus の結果とよく一致したが、それ以下では一致しなかつた。

このように統計的方法によれば電氣接觸抵抗の最も確からしい一般的性質の解明がある程度可能である。

終りに本研究を遂行するに當つて多大の御指導を賜つた京都大学教授阿部清博士に深甚の感謝の意を表すると共に終始実験を手傳われた信木丈郎、橋本堅太郎両君に感謝する次第である。

(本研究は昭和25年度文部省科学研究費による研究成果である。)