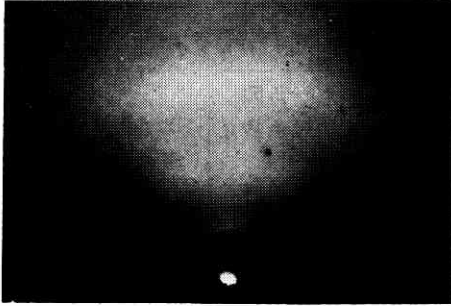


# 黒鉛と鋼仕上面との接触電気抵抗

松 永 正 久



仕上面のハロー像

## 1. は し が き

金属と金属との間の接触電気抵抗は抵抗溶接・金属の接触機構の研究として種々の発表がなされている。また黒鉛と銅系の金属・合金との接触抵抗も電気機器におけるカーボン・ブラッシの研究及びリケノームの取付金具に関する研究等<sup>(6)</sup>があり、黒鉛と黒鉛との接触抵抗はカーボン・パイルとして研究が行われている。この場合得られる抵抗値は第1表(1)乃至(4)に示す如くであり、何れ

る。黒鉛保持部には黄銅を用い、その接触抵抗は黒鉛と被測定金属との間の接触抵抗に比して無視し得ることをたしかめた。もちろん金属間接触及び回路の抵抗は遙かに小さい。使用条件において  $R_1=346\Omega$  であり、測定すべき抵抗  $R$  とアンメーターの読み  $I$ 、 $R$  を流れる電流  $I'$ 、及び  $R$  の端子電圧  $V$  との間の関係の計算値は第3図に示す如くであり、 $R=\infty$  のときの  $V=80.2mV$  である。今後本装置による測定を第1法と称することとする。種々の金属の仕上面に対する接触抵抗の値は既

第1表 接触抵抗値の比較

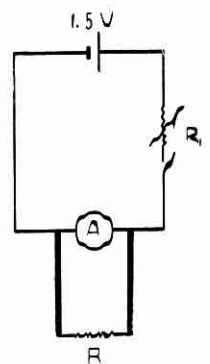
著 者	材 質	仕 上 方 法	見掛の接触面の大きさ (cm <sup>2</sup> )	荷 重 (kg)	抵 抗 値 ( $\Omega$ )	文 献
Bowden	鋼 と 鋼	ラップ仕上	21	5.0	$2.5 \times 10^{-4}$	(1)
吉 本	同 上	同 上	1.53	4.88	$5.5 \times 10^{-4}$	(2)
馬 場	黒鉛と黒鉛	—	—	0.75/cm <sup>2</sup>	$2.7 \times 10^{-2}$	(3)
一 木	同 上	板硝子研磨	3.14	1.0 5.0	$3.13 \times 10^{-2}$ $0.94 \times 10^{-2}$ (外挿値)	(4)
山 崎	黒鉛と鋼	鋼…バフ仕上面 黒鉛…鉛筆の芯	0.00845	0.11	500~1000	(5)

もそれほど大きなものではない。しかし黒鉛と鋼仕上面との間の接触抵抗は従来看却されており、しかも低電流で測定すると第1表(5)の如く異常に大きいことが見出された。<sup>(5)</sup> 筆者はこの原因を確めるため電子廻折像と対比して二三の実験を行いすでに本誌に報告した。<sup>(7)</sup> この現象は金属仕上面の酸化物の検出、機械的仕上面の表面及び金属表面の薄層の電気伝導度の測定等に利用できると考えさらに研究を進めたので、その結果をここに報告する。

## 2. 予 備 実 験

予備実験として使用した装置は S. Q. メータ<sup>(8)</sup> であり、回路は第1図の如くである。すなわち電流計と並列に測定すべき抵抗を入れ、電流計のフレを標準抵抗により較正して使用した。測定部は第2図の如くであり、黒鉛としては選択した鉛筆の芯を用い、その太さは 0.92 mmφ、比抵抗は 0.0133 $\Omega \cdot cm$ 、測定荷重は 110 gr であ

報の通りである。概要を述べれば、金属自身の電子廻折像の得られる面、すなわち金属の粗い仕上面、電解研磨面等においては接触抵抗値は何れも小さい。鋼においては機械的に仕上げれば仕上の良好なほど抵抗値は高く、ブロックゲージにおいては 1000 $\Omega$  以上に達する。銅・黄銅では仕上方法に拘らず抵抗値は低い。鋼をベンゼン中で酸化を防ぎながらバフ仕上して



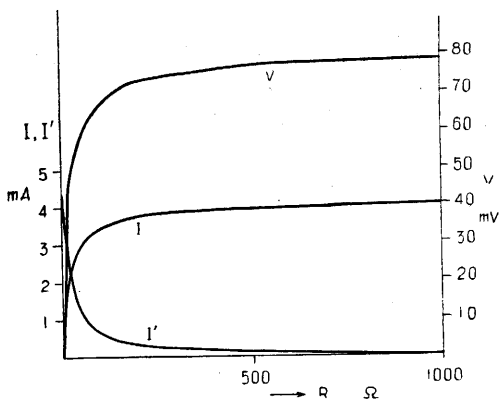
第1図 回路



第2図 測定部

第2表  $\alpha$ -Fe のハロー像の解釈

番号	透過写真よりの解析結果	$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	ハロー
(1)	2.53 s	2.53	2.01	2.27
(2)	2.10 w	2.10		
(3)	2.01 s			
(4)	1.61 w	1.61	1.166	1.325
(5)	1.483 m	1.483		
(6)	1.166 m			



第3図 接触抵抗値と電圧、電流との関係

ベンゼン中で測定すると抵抗値は低い、空気中に取り出して測定すると急速に抵抗値は上昇し、再びベンゼン中で測定すると大きい抵抗値を示す。しかしこのベンゼン中の測定をくりかえすと表面の磨耗のため抵抗値は低下する。銅又は黄銅の表面に生成した酸化物は電子廻折像より見れば Cu<sub>2</sub>O であり電気伝導度が高いことより考えれば鋼の仕上面の異常に大きな接触抵抗値は表面の酸化被膜によると考えるのが妥当である。

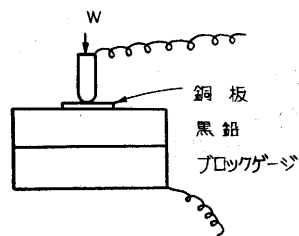
### 3. ハロー像の解釈

良く仕上げた面の電子廻折像はカットに示す如き2つのハローよりなり、その面間隔は下地の金属とは異っている。このハロー像の転位に対しては古来種々の説があり未だ定説はないようである。しかし上記の実験より鋼の場合には明かに電気的に絶縁性の化合物を生じ、それが廻折像に影響しているものと考えられ、Dobinski<sup>(6)</sup>及び Raether<sup>(7)</sup>の酸化物説を支持するものである。事実ベンゼン中でパフ仕上げして上記の抵抗の小さいときベンゼンにぬれたまま廻折装置に入れ廻折像をとると、 $\alpha$ -Fe の面間隔に一致したハローが得られる。さらに表面の廻折像が酸化物によるものならばその磨耗粉と同一であり、磨耗粉の廻折像は透過法によることができるため、精度の向上が期待できるので、磨耗粉による透過廻折像をとった。その結果は第2表に示す如くであり、 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* と  $\alpha$ -Fe との混合した廻折像を与える。すなわちこの場合表面の酸化物は  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と考えられ、その比抵抗は 10<sup>8</sup>Ω・cm 程度であるといわれているので、被膜の破かいさえ起らなければ上記の如き大きな接触抵抗を与えることは当然である。写真と対比すると強度の強い廻折環は(1)(3)の群と(5)(6)の群とであり、結晶が微細化された場合これらの廻折環が重合したと考え、その平均を

とれば第2表左欄の如くハローの位置は 2.27 及び 1.325 となりこの値は徒来得られた鋼のハローの面間隔と良く一致する。すなわち酸化物が薄いため下地の影響も表われたものと考えられる。このことに関してはさらに検討して他の金属による結果と共に別に発表する予定である。

### 4. 黒鉛とブロック・ゲージとの接触電気抵抗

以上の如く黒鉛と鋼仕上面との接触電気抵抗は特異な性質があることが分かったので、この性質をさらに検討するため次の如き実験を行つた。第1法では抵抗値を直読できる便宜はあるが第3図に示す如く、高抵抗部分の精度が不良である。しかしこの場合測定すべき抵抗の範囲は数Ω程度より数千Ωにも渉るため、所有計器の都合上単一の方法では適当な精度が得られないので、電流計とミリボルトメータによる方法、ホイートストンブリッジによる方法、ポテンシオメータ法等を作用した。また第1法では接触子の大きさが小さいためと接触荷重が小さいための誤差が考えられるので、なるべく見掛の接触面積を大きくして種々の荷重で測定し得る如くした。黒鉛は電気機器用のブラシでその固有抵抗は 0.0106Ω・cm 相手金属はブロック・ゲージを用い第4図の如く重ね合わせて使用した。両者の見掛の接触面の大きさは 9×28 mm である。黒鉛はエメリー紙 05 で仕上げた後硝子板で平坦になるまで仕上げたもので、表面の電子廻折像は大部分黒鉛の粉末像で、一部分方位配列が認められる。装置はマルテンス引揺硬度計を改造し固有の分銅の外に重錘により大きな荷重をも与え得る如くした。

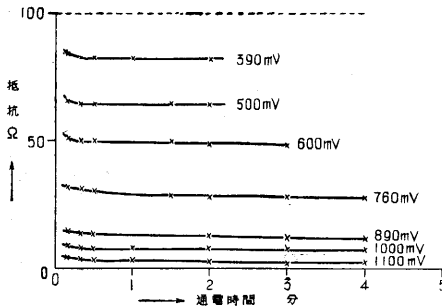


第4図 装置

(1) 通電時間と抵抗値との関係 接触抵抗値は場所により著しい相違がある。これは表面の酸化物の厚さ、性質及び生成状態、並びに接触面間の介在物(介在物は可成り除去するよう努めたが、完全に除去することは不可

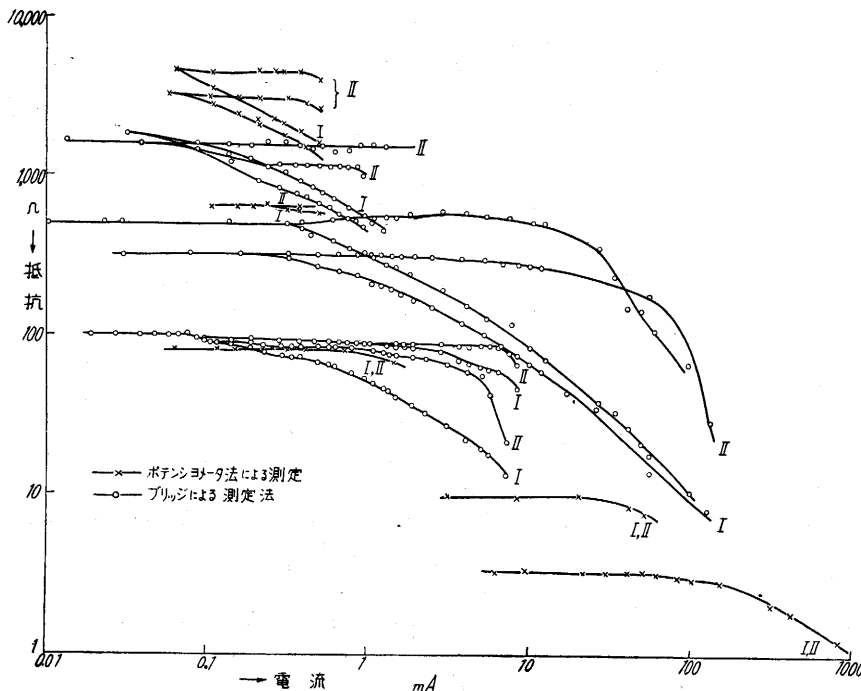
\* Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> とも考えられるが、 $\alpha$ -Fe の廻折環が存在する以上 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の生成したときは  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が共存するものと考えられる。加工のみによっては Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> は得られなかったが、やや厚い蒸着膜を加熱した場合の廻折環においては Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>+ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ $\alpha$ -Fe の廻折環を得た。

能と考えられる。)によるものと考えられる。また測定中に抵抗値の変化の生ずることを認めたので、これが時間と共に安定するか否かをたしかめておく必要がある。この実験ではほぼ一定の抵抗値を与える場所を第一法によって探し、端子電圧を種々に変えて電流計及び電圧計を用い抵抗値の通電時間による変化を求めた。結果の一例は第5図に示す如くであり、抵抗値は電圧により変化し、

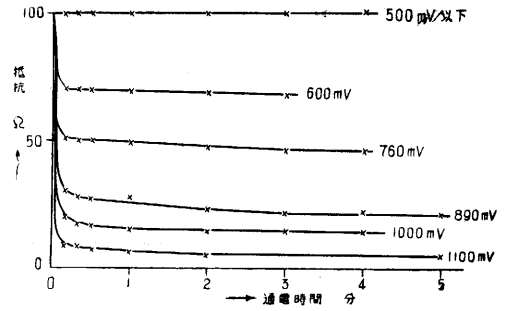


第5図 通電時間と抵抗との関係  
(電流計及び電圧計による測定結果)

電圧の高いほど抵抗は小さい。この場合再び低電圧(第1法)で抵抗を測定すると、抵抗値は高電圧で測定した場合よりも高くなる。低電圧で測定した場合の抵抗値は或電圧までは殆んど変化はないが、電圧を上昇すると絶縁が破れて低電圧に戻しても抵抗値は以前より低く、高電圧で測定した場合よりも高い値を示す。第5図は端子電圧を一定にした場合の抵抗の変化と通電時間との関係を示し、通電直後絶縁の破壊が起り、1分程度で安定し



第7図 抵抗値と電流との関係

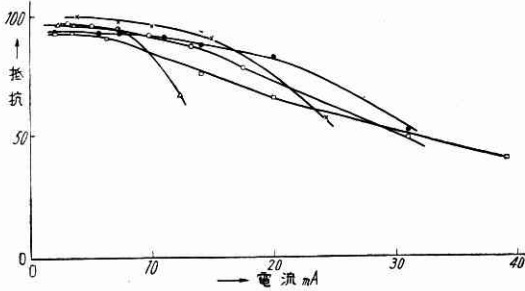


第6図 同前(通電後第1法による測定)

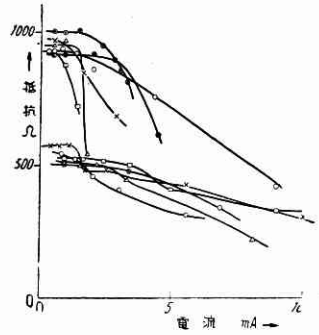
ていることを示している。第6図はおのおのの測定後第1法により測定した抵抗値で、600 mV 附近で絶縁の破れることを示している。この傾向はさらに高い抵抗(例えば 500 Ω 及 1000 Ω)においても同様である。100 mV 附近の低電圧部では数時間通電しても抵抗の変化はない。

(2) 電流と抵抗との関係 以上の如く約1分間で抵抗値はほぼ一定となることを確かめたので、同一の接触条件において電流と抵抗との関係を求めた。この場合は1分間通電して抵抗を測定した後、低電流(第7図の最小値)に戻して再び測定を行い順次電流を増加した。結果の一例は第7図に示す如くである。この測定はポテンシオメータ法及ブリッジ法を併用した。図においてⅠ曲線は横軸の電流を流したときの抵抗値でⅡ曲線はその測定を終わって後低電流で測定した場合の測定値である。第7図によると抵抗の高い場合(ほぼ1000 Ω 以上)にはⅠは電流と

共に減少するがⅡは多くの場合大差はない。しかしほぼ 1000 Ω 以下の部分では低電流の部分に抵抗一定の部分があり、或程度電流が増加するとⅠは低下するがⅡは殆んど一定である。さらに電流が増加するとⅡも低下し絶縁が破れたことを示す。またⅠ曲線の抵抗の低下を初める電流値は初期の抵抗の低いほど高い傾向がある。また初期抵抗の低い範囲(ほぼ 10 Ω 以下)では一旦抵抗値が低下するとⅠ、Ⅱ共ほぼ同一になる。またⅡ曲線の抵抗の低下し初める電流値及び曲線の形状は初期の抵抗が同一であっても必ずしも一定でなく、第8図及第9図に示す如くばらつきがある。すなわち



第8図 II 曲線の形状のパラツキ (その1)



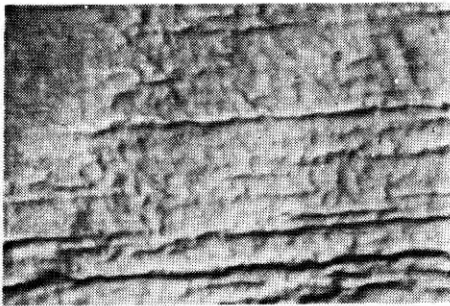
第9図 II 曲線の形状のパラツキ (その2)

このような被膜の抵抗を測定するには第7図のI曲線の水平部で測定を行わなければならない。前記の第一法はこの条件を満足している。

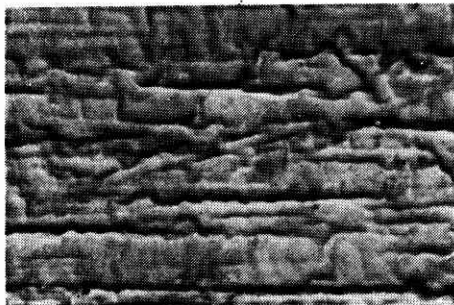
(3) 電流方向による変化 電流方向による変化は殆んど無く、黒鉛側

を正及負にして実験した結果は両者全く同一である。

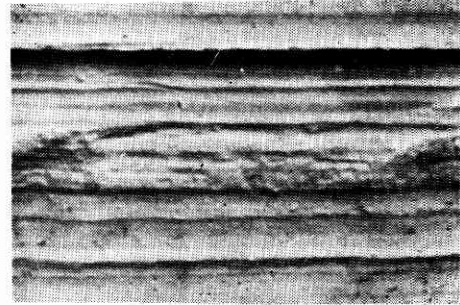
(4) 荷重及び表面仕上程度による変化 ブロック・ゲージの各仕上行程である精密研削面,酸化アルミナ#2000による湿式ラッピング面,酸化クロムによる乾式ラッピング面(中仕上),酸化クロムによる乾式ラッピング



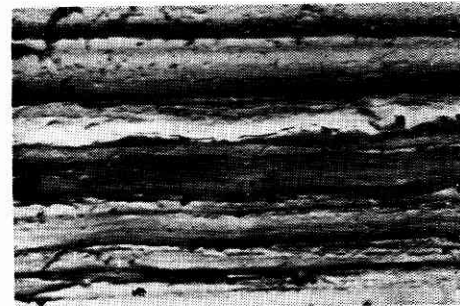
第10図 ブロック・ゲージ完成面 ×10,000



第11図 乾式ラッピング面 (前仕上面) ×10,000

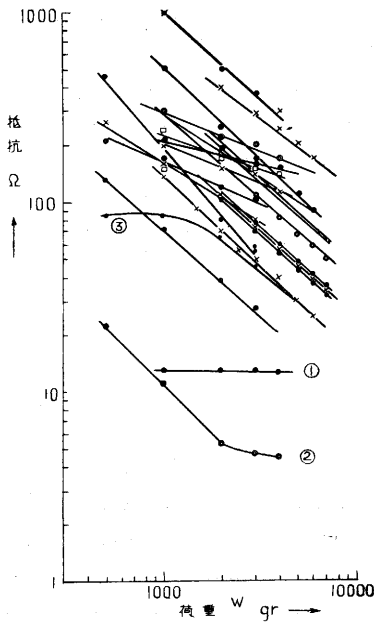


第12図 酸化アルミナ湿式ラッピング面 ×10,000

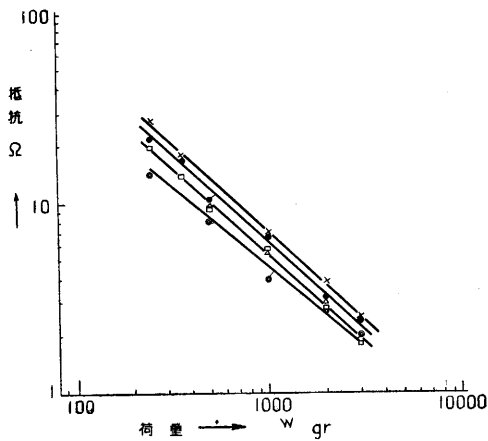


第13図 精密研削面 ×10,000

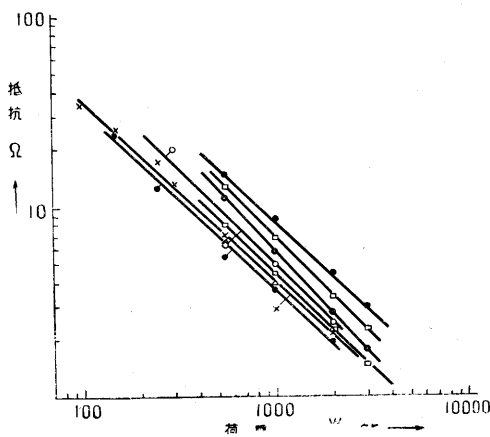
面(ブロック・ゲージ完成面)について荷重を変えて接触抵抗値を求めた。使用した試料の電子顕微鏡によるレプリカ像は何れも条痕が認められる。ブロック・ゲージの条痕は僅少で且つ短いが、仕上程度の粗いものほど条痕は多く且つ連続的である。第10図はブロック・ゲージ面,第11図は酸化クロムによる乾式ラッピング面(中仕上),第12図は酸化アルミナによる湿式ラッピング面,第14図は精密研削面の電子顕微鏡写真を示す。黒鉛との接触抵抗を第1法で測定すると仕上面良好なほど接触抵抗値は大きい。荷重  $W$  を変化させたときは低荷重の場合は再現性は悪いが、或程度以上荷重が大きくなると同一の場所においては再現性があり、荷重の大きいほど接触抵抗は小さくなる。荷重と接触抵抗との関係を両対数グラフに示したものが第14図乃至第18図である。これを見ると研削面及湿式ラッピング面及び仕上程度の悪い乾式ラッピング面においてはグラフの勾配はほぼマイナス1に等しいが、ブロック・ゲージ面においてはまちまちである。しかし詳細に検討するとマイナス1に等しい場合も多く含まれ、それより勾配の小さい場合も大きい場合もある。極端な場合は①の如く荷重を増しても抵抗の変化せぬ場合、或いは②の如く或る荷重までは勾配がマイナスに等しくそれから荷重を加えてもあまり変化せぬ場合、或いは③の如くこの逆の場合もある。金属が種々の接触型式をとる場合の接触抵抗値は Archard<sup>(10)</sup> により求められており、その結果は第3表に示す如くである。こゝに集中抵抗とは極めてせまい接



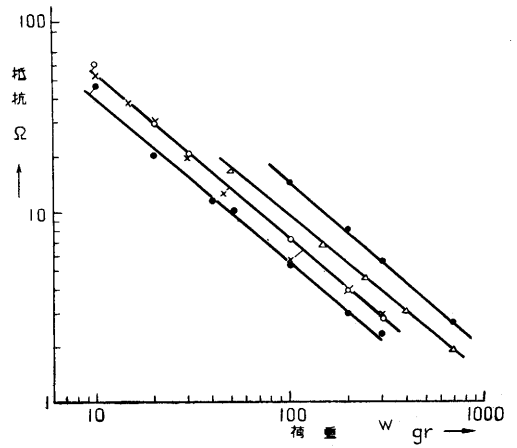
第 14 図 荷重と抵抗値 (乾式ラッピング面)



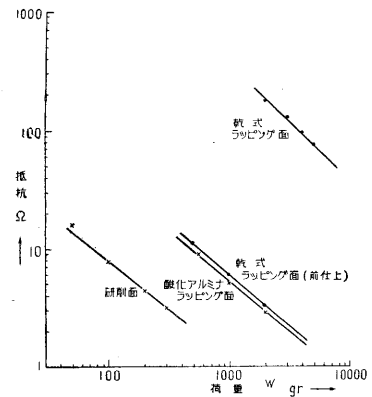
第 15 図 同 前 (乾式ラッピング前仕上面)



第 16 図 同 前 (酸化アルミナ #2000ラッピング)



第 17 図 同 前 (研削面)



第 18 図 同 前 (平均値)

第 3 表 接触形式と勾配との関係

接触部変形の形式	伝導形式	勾配の値	
		一点接触	多点接触
弾性変形	金属間接触	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{4}{5}$
"	被膜抵抗	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{4}{5}$
"	集中抵抗	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{3}{5}$
塑性変形	金属間接触	-1	-1
"	被膜抵抗	-1	-1
"	集中抵抗	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{3}{4}$

触部分を電流が流れる場合の抵抗を指し、これは接触部分の直径  $a$  に逆比例するので接触面積  $a^2\pi/4$  に逆比例する金属間接触または被膜接触の場合に比して、勾配の値は  $\frac{1}{2}$  になる。また多点接触とは同一の曲率を有する接触部分が微小距離を距て、つぎつぎに接触する場合である。黒鉛自体と金属との集中抵抗を考えても上記の測定範囲内では  $10^{-2} \Omega$  のオーダーであり、前記の接触抵抗値は黒鉛と鋼との直接接触による抵抗ではない。す

なわち接触部の変形が塑性的で被膜による抵抗と考えられる。またブロック・ゲージにおいては勾配がまちまちなのは、表面の仕上程度が良いために接触点の数が多く、荷重と共に接触点の数が急速に増加しておのおの接触点の下の被膜の状態が異なり、或いは異物により絶縁され、勾配がまちまちとなると考えられる。さらに金属と黒鉛との真実の接触面積は Bowden の仮定<sup>(1)</sup>の如く  $A=W/p_m$  (こゝに  $A$  は真実接触面積、 $W$  は荷重、 $p_m$  は平均有効圧力) としてブリネル硬度より求めた  $p_m=4600 \text{ kg/cm}^2$  を用い被膜の抵抗を求めると次の如くなる。但しブロック・ゲージの場合には勾配マイナス1の場合の平均値をとってある。

ブロック・ゲージ	$81.9 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$
乾式ラッピング(前仕上)面	$1.30 \times 10^{-3} \text{ ''}$
WAラッピング面	$1.13 \times 10^{-3} \text{ ''}$
研削面	$0.183 \times 10^{-3} \text{ ''}$

仕上程度の悪い程接触抵抗値の低いのは次の如く種々の原因が考えられるが、恐らくこれらの諸原因の重畳作用であろう。

- (1) 集中荷重による被膜の破かい。
- (2) 集中電荷による絶縁の破かい。
- (3) 表面の結晶の粉碎の程度による酸化の難易。
- (4) 作業条件による酸化の程度。

この接触抵抗値は黒鉛によってはじめて検出され、金属間ではそれほど大にならないことは簡単に考えれば被膜の破かいによるものと思われるが、さらに検討をするつもりである。

この結果によれば黒鉛と金属とは通常被膜を隔てゝ接触しており、金属間接触の場合とは著しく様子が異つている。黒鉛と金属との摩擦はすなわち黒鉛と酸化物との摩擦であり、電解研磨面及び機械的仕上面と黒鉛の摩擦係数に大きな相違があると考えられるが未だそれに対する検討は行っていない。これは本実験の黒鉛潤滑に対する応用として興味がある。

また、こゝには単なる実験事実の羅列だけで理論による裏付けを行っていない。事実  $r \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  の比抵抗値より計算すると上述の接触抵抗値は  $10^4$  乃至  $10^5 \Omega$  程度の値となる。加工面の酸化被膜の絶縁破かいの機構・薄層の電気伝導度等将来研究すべき事項は多い。

## 5. 応 用 例

この実験だけではまだ不明な点が多いのであるが、将来の研究によっては次の如き分野に応用できる可能性がある。多くの研究者の協力が望ましい。

### (1) 乾式ラッピング面の検定

第 15 図に示す如同じブロック・ゲージ面においても場所により著しく抵抗値が異つている、抵抗の低いところは表層の脱離等、何かの欠陥を示していると考えら

れる故、黒鉛接触子を移動しても抵抗値の低下しない面が乾式ラッピング面としては優良であろう。

### (2) 鋼の機械的仕上面の表面検査

これはすでに山崎氏によつて開拓された分野であるが、大体において粗さの粗い方が抵抗値は小さく出る。

### (3) 鋼の精密仕上面の酸化物の検出

完全な平坦な面ならば酸化物の検出は可能であるが、粗さの要素が入ってくると、双方の相互作用となる。

### (4) 鍍金または塗装面の管理

殆んど未開拓の部門であるが、この方面にも応用の途が少しずつ拓かれている。

## 6. む す び

以上の結果より次のことが結論される。

- 1) 黒鉛と鋼仕上面との接触電気抵抗値は金属間接触または黒鉛間接触の場合に比し著しく高い抵抗値を与え、これは金属表面の酸化物によるものである。
- 2) この接触抵抗値は測定電圧によつて著しく変化する。
- 3) 荷重と接触抵抗値とは両対数グラフをとるとその勾配はほぼマイナス1に等しく、接触部の変形が塑性的で被膜による抵抗であることを示している。
- 4) 機械的な仕上面においては仕上程度の悪い程接触抵抗値は小さい。
- 5) 電子廻折像のいわゆるポリッシュ像における面間隔の転位は表面に生じた化合物と下地との重合作用によるものとするとも既往の研究の説明が行い易い。

本研究は昭和29年4月7日応用物理関係連合講演会において発表したもので種々有益なる御助言を賜つた菅教授、沢井教授、久松助教授、実験に協力された秋生田助手、ブロック・ゲージの試料作製に当られた黒田狭範製作所社長黒田彰一氏、有益なる資料を提供された日立製作所一木利信氏及び電子顕微鏡像の撮影に当られた鈴木登氏に厚く謝意を表します。また研究費の一部は文部省科学研究費によつたものである。(1954・3・15)

## 文 献

- (1) Bowden and Tabor: Friction and Lubrication of Solid. (1950) 30
- (2) 吉本, 都添: 精密機械 19 (1953) 391
- (3) 馬場, 東海, 高橋: 「電機子用刷子の研究」学術振興会編
- (4) 一木利信: 日立評論 35 (1953) 1349
- (5) 山崎正八郎: 精密機械 20 (1954) 130
- (6) 中井達人: 科学研究所報告 25 (昭24) 192  
26 (昭25) 240
- (7) 松永正久: 生産研究 5 (1953) 294
- (8) Dobinski: Phil. Mag. 23 (1937) 397
- (9) Raether: Ann. Phys. 43 (1943) 520
- (10) Archard: J. App. Phys. 24 (1953) 981
- (11) Bowden and Tabor: 前出 19