

# トロリ線磨耗に関する一考察

## Consideration of Wear of Trolley Wires

武 政 隆 一\*  
Takaichi Takemasa

### 内 容 梗 概

硬銅および銀入り銅トロリ線について磨耗試験を行つたところ、銀入り銅は従来の硬銅トロリ線よりも磨耗が少なく、ことに電流および火花量がある程度大きいほど両者の差異は顕著に認められた。このように銀入り銅の方が良好であるのは銀入り銅の耐熱性が硬銅よりもすぐれているため硬度低下が少なくその結果に基因することを明らかにした。

次にトロリ線およびスライダの接触機構について考察および実験を行い、真の接触面積は見掛接触面積にほとんど関係なく接触圧力のみに関係することを述べた。また円形トロリ線の磨耗寸法は見掛接触面積が大きいほど減少するが、磨耗総量（重量）は見掛接触面積に関係がないことを実験的に明らかにした。結局真の接触は常に突出部分で行われる関係上、摺動接触の場合は突出部分が磨耗すると接触はほかの突出部分に移動する結果、見掛接触面積は一様に磨耗する。したがつて見掛接触面積が大きいほど磨耗面積は大きくなり磨耗寸法は減少するが、磨耗総量は変化がないものと解される。

### 〔I〕 緒 言

最近国鉄では主要幹線鉄道を漸次電化すると同時に、さらに高速度化する傾向にあり、また私鉄でも高速度化ならびに大容量化を計画されつつある。このような情勢に対して電車線の研究がさかんに行われ、著しく改良を加えられている。たとえば日立電線で開拓した耐熱電車線のごときは顕著な一例で、耐磨耗性ならびにそのほかの諸特性が従来の硬銅トロリ線よりも優秀であることが実用試験により確認され漸次実用化される傾向にある。

本研究では銀入り銅トロリ線が硬銅よりも優秀であることを確認すると同時に、見掛接触面積と磨耗との関係についても検討した。

### 〔II〕 実 験 方 法

#### (1) トロリ線磨耗試験機

トロリ線の磨耗試験は使用状態で測定するのが理想的であるが、諸条件を一定に保つことが困難なので、第1図のような試験機を用いた。直径800mmのトロリリング2個、通電用銅リング4個、測定用銀リング4個が同一軸に取り付けられ、直流電動機により駆動するようになっている。各トロリリングの内側には2本のトロリ線が張られ、またスライダは回転するトロリ線表面を固定の状態に摺動するようにした。

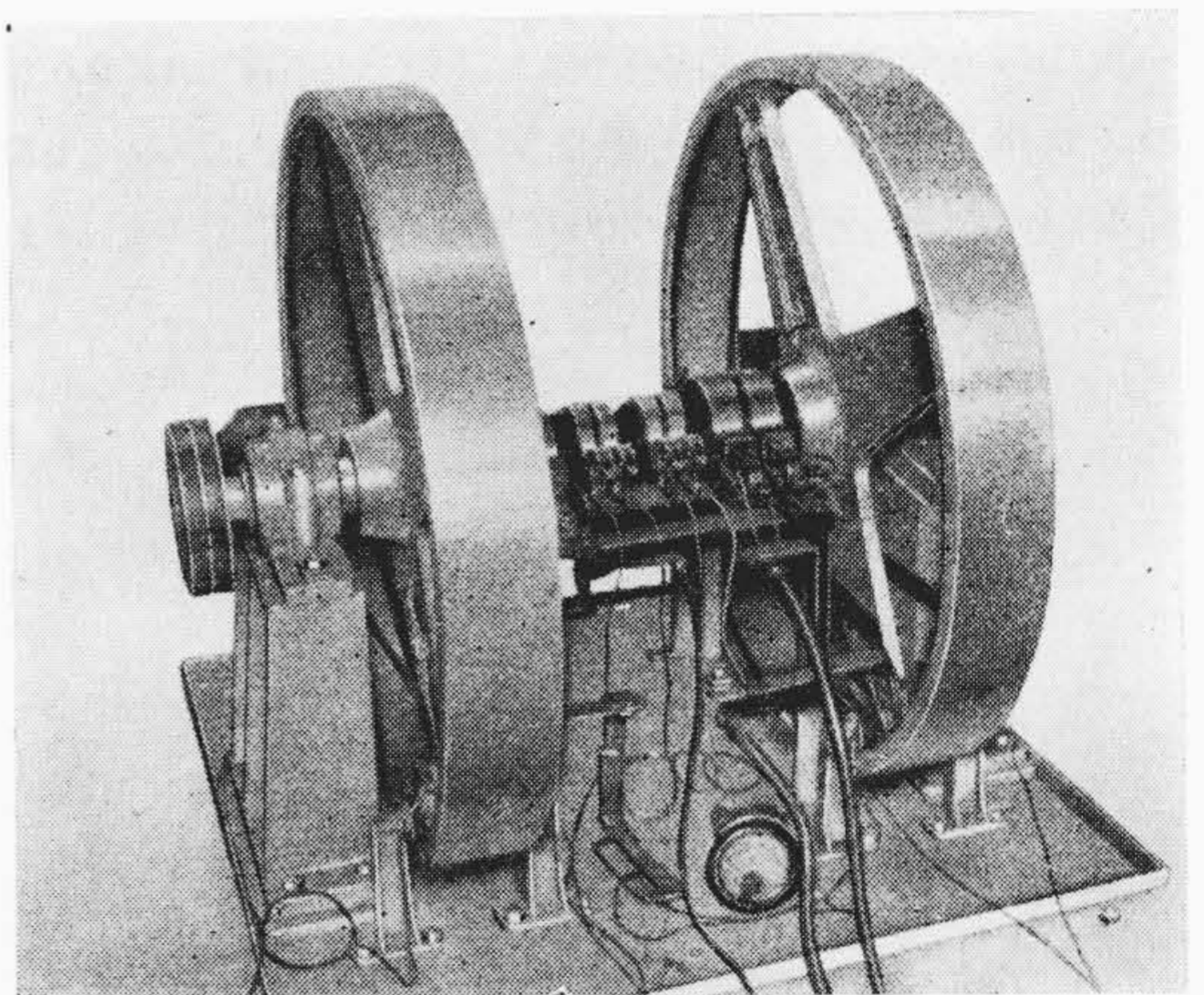
#### (2) 供試々料

トロリ線は公称断面積 $110\text{mm}^2$ の円形のもので、材質は硬銅および銀入り銅の2種類である。

スライダはブロイメット摺板から $10 \times 20 \times 25\text{mm}$ の試片をとり、これをブラシ状銅片に固定させた。

保持器は普通のブラシ保持器を用い、圧力の調整はナットによりバネ圧力を可変にした。実際の場合の接触圧

\* 日立製作所日立研究所



第1図 トロリ線磨耗試験機

力は5kg前後であるが、本実験では1.5kgとしトロリ線全体の平均温度を $50 \sim 60^\circ\text{C}$ 前後に保つようにした。

#### (3) 測定方法

##### (A) 磨耗量

トロリ線およびスライダの磨耗量は実験前後における寸法差および重量差を測定した。なおトロリ線の磨耗量についてはトロリリングから長さ10cmのトロリ線を取りはずし、該試料について測定した。

##### (B) 接触障害度<sup>(1)</sup>

トロリ線とスライダとの摺動接触が不良であれば火花を発生し、磨耗特性に影響を与えるので、火花量の目安をつけるために接触障害度装置により測定した。すなわち摺動接触の不良によつて生ずる脈動電流のみを抽出し、これを増幅整流して電流計に平均値を指示させた。したがつて電流計のよみ（以後接触障害度 $\mu\text{A}$ と呼ぶ）は間接的に摺動接触の良否を表わすことになる。

(C) 接触電圧降下

測定用銀リングを介してトロリ線とスライダとの接触電圧降下を測定した。

〔III〕 硬銅および銀入り銅トロリ線の特性

(1) 物理特性

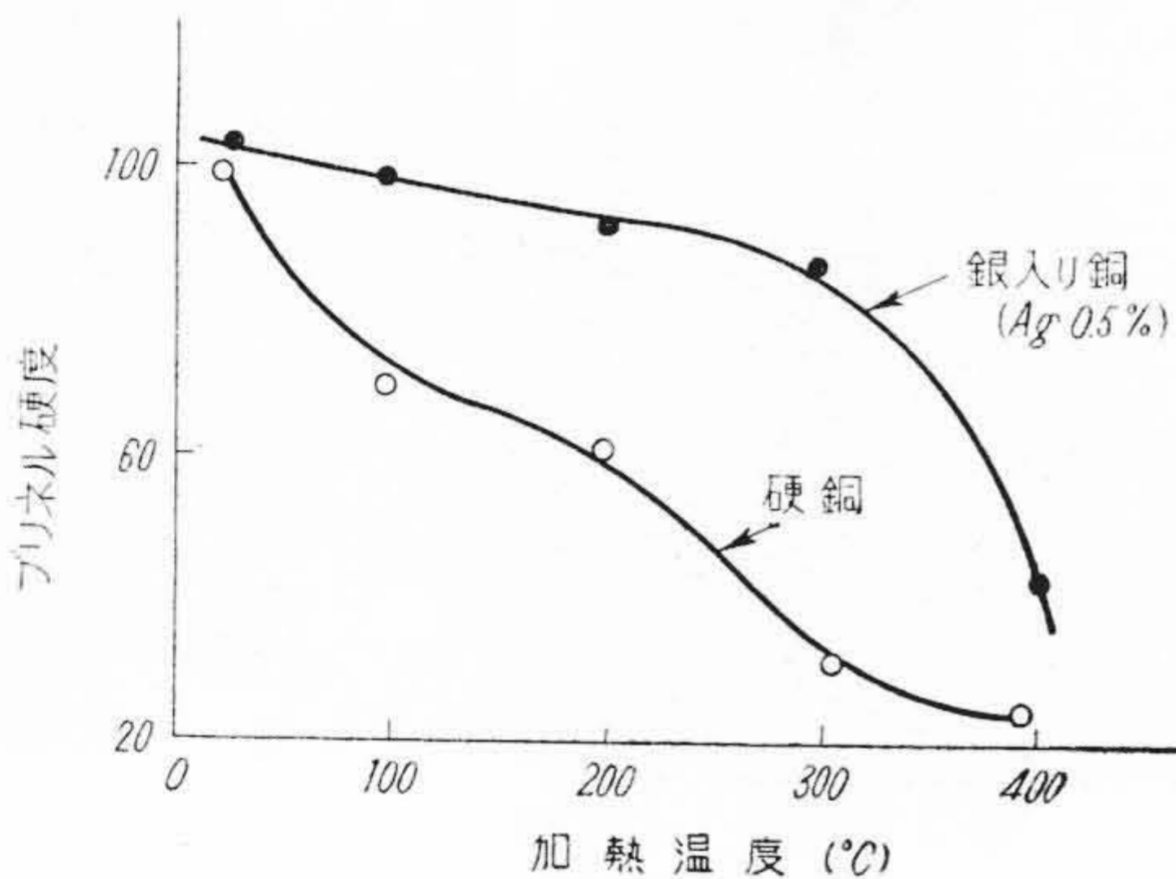
実験に使用した硬銅および銀入り銅トロリ線の物理特性は次表のとおりである。

第1表 硬銅および銀入り銅の物理特性

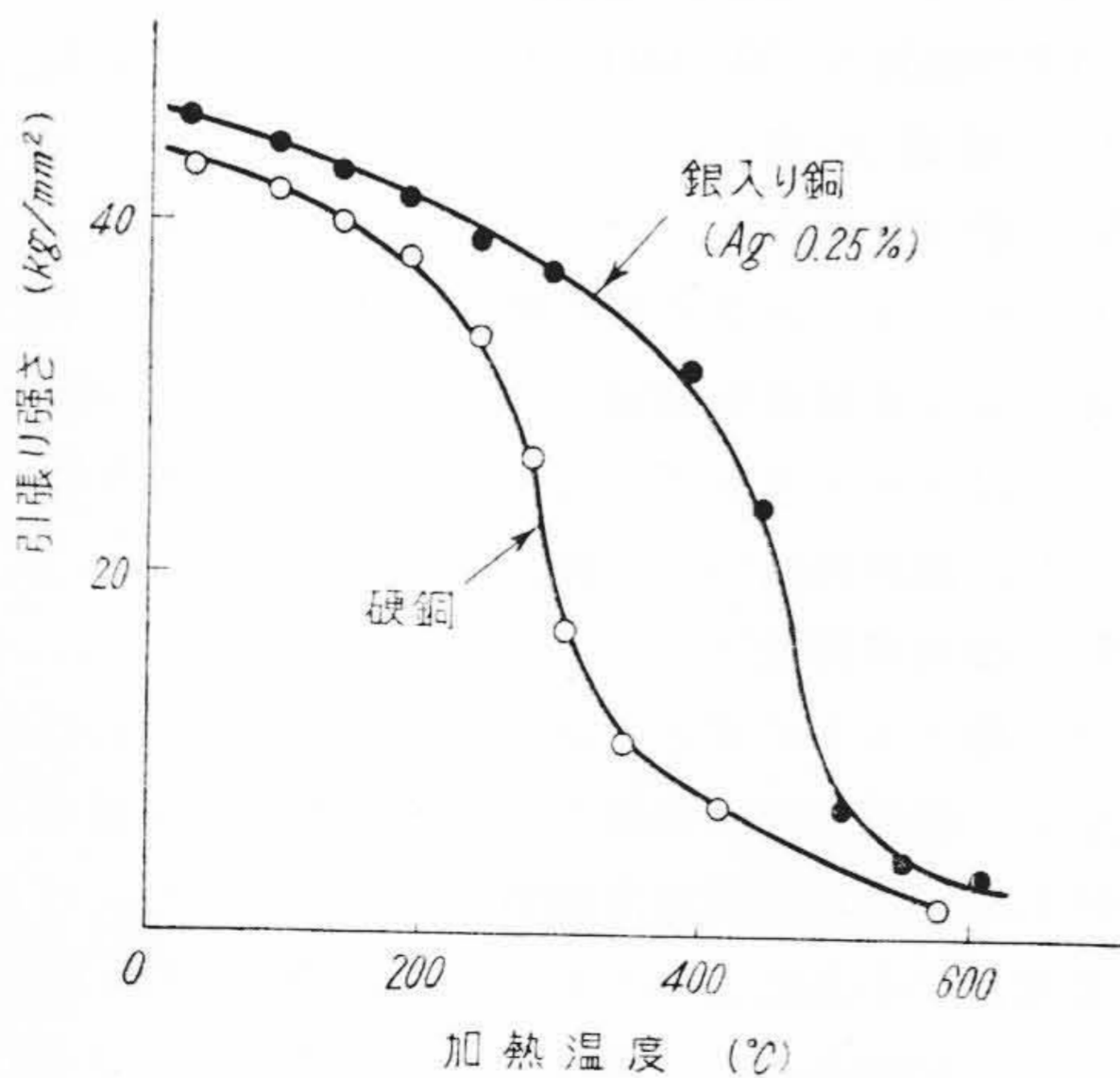
トロリ線材質	銀含有率 %	比重	固有抵抗 ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	弾性係数 ( $\text{kg/mm}^2$ )
硬銅	—	8.899	1.7853	12.250
銀入り銅	0.25	8.916	1.8270	12.500

(栗本, 飯塚両氏測定)<sup>(2)</sup>

次に加熱時における硬銅および銀入り銅 (Ag 0.5%) のブリネル硬度を示すと第2図のとおりで、硬銅は100°C前後から硬度が低下し、200°Cで60前後になった。また



第2図 高温度における硬銅および銀入り銅のブリネル硬度



第3図 硬銅および銀入り銅の高温引張り強さ

銀入り銅の硬度は300°C前後まではあまり低下しない。さらに栗本, 飯塚両氏の研究<sup>(2)</sup>によれば第3図に示したように、硬銅の高温引張り強さは250°C前後から急激に低下するのに対し、銀入り銅の場合は450°C前後から低下している。

(2) 摺動接触電圧降下, 接触障害度

およびトロリ線摺動面状況

トロリ線とスライダとの相対摺動速度が30km/h, 試験時間200時間の場合における接触電圧降下および接触障害度の平均値を示すと第2表のとおりである。

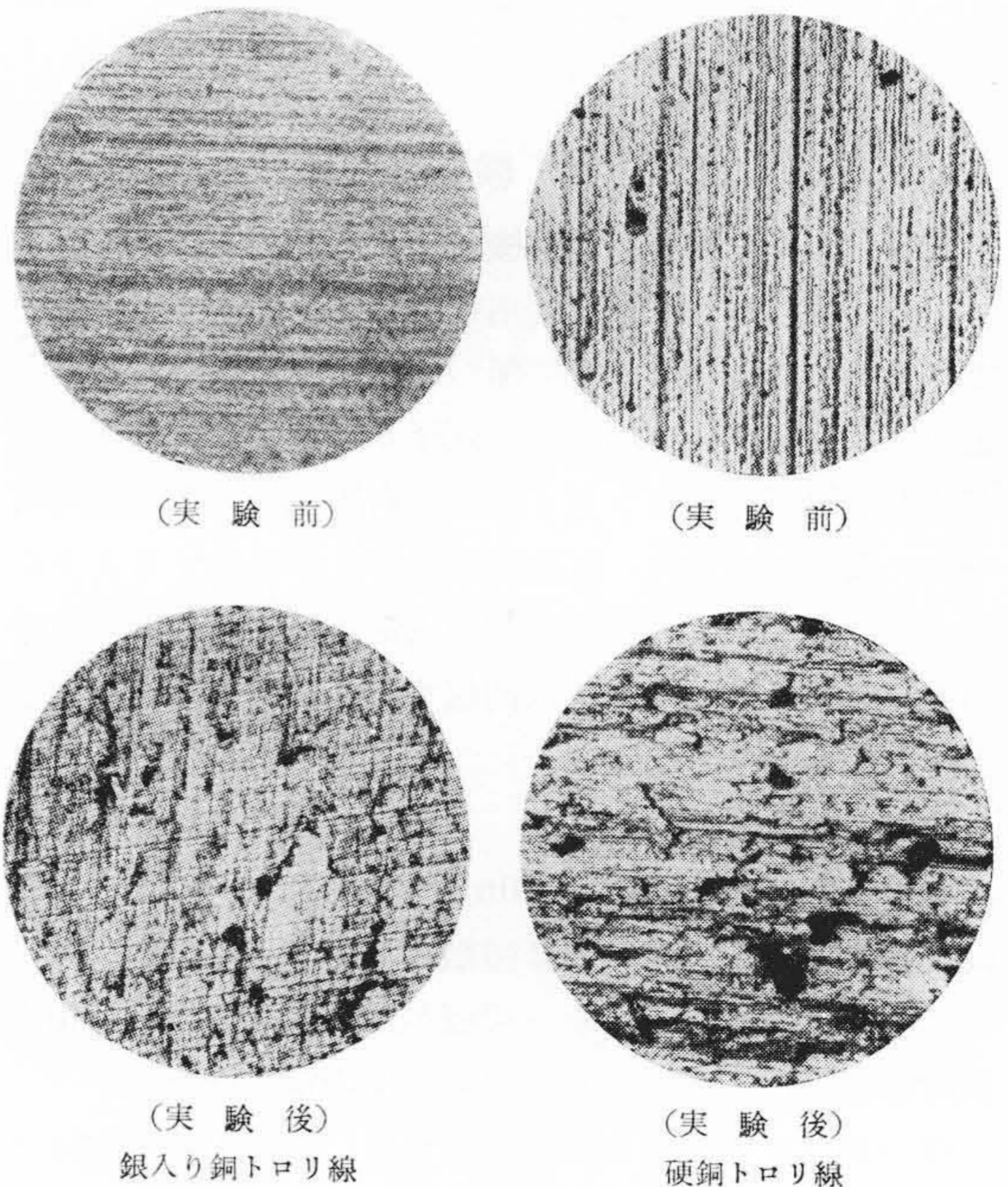
第2表をみると接触電圧降下は硬銅よりも銀入り銅の方が小さい。また接触障害度は銀入り銅の方が硬銅よりも若干大きい。火花は肉眼ではほとんど認められなかった。

次にスライダの摺動によりトロリ線表面がどの程度荒損するかをスンプ写真により観察した。その結果は第4図のとおりで銀入り銅の方が硬銅よりも荒損は少ない。

(ただし無電流)

第2表 接触電圧降下および接触障害度

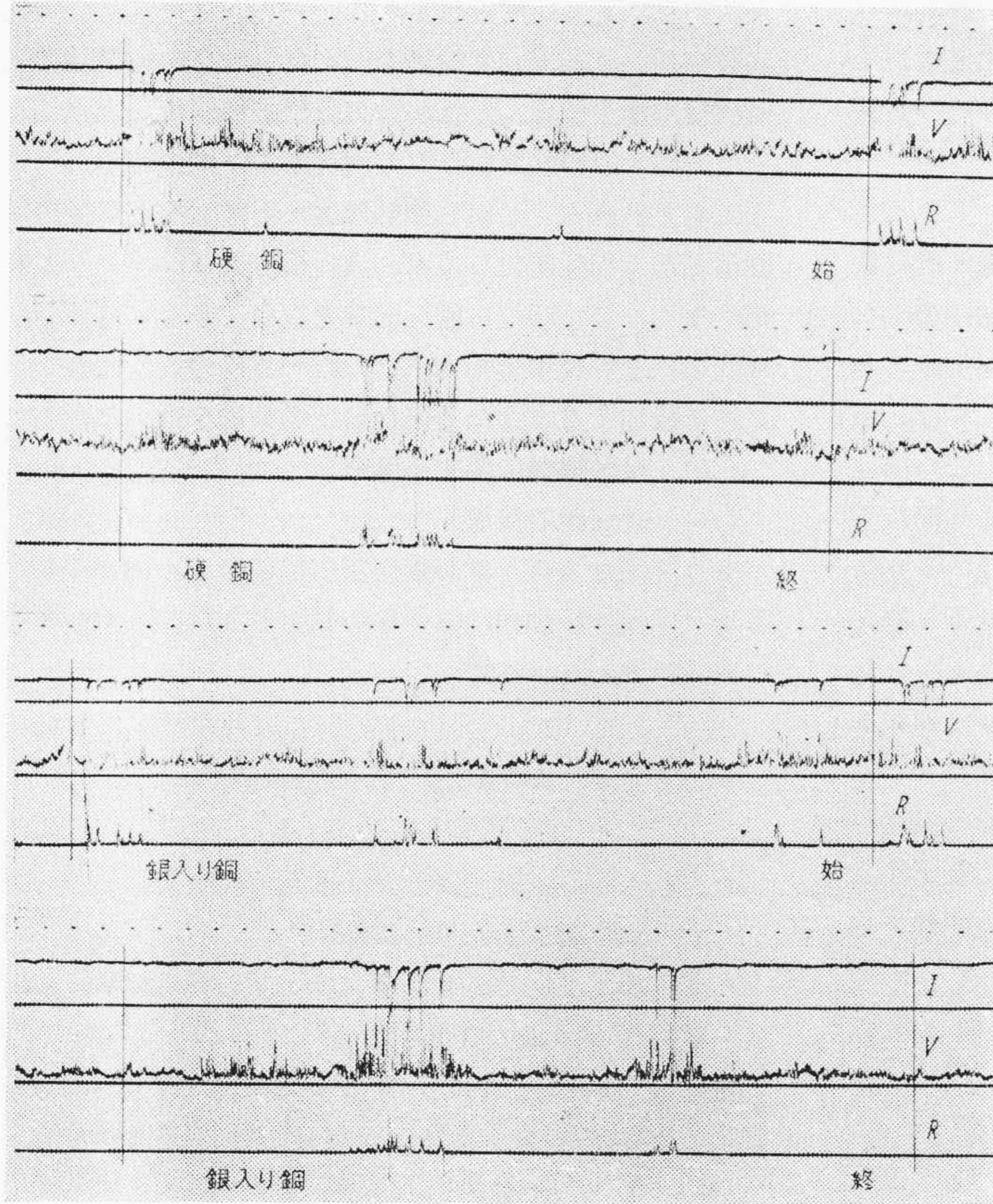
測定項目	トロリ線材質	
	硬銅	銀入り銅
接触電圧降下(V)	100A	0.25 <sub>6</sub>
	200A	0.35 <sub>1</sub>
接触障害度 ( $\mu\text{A}$ )	75	84



第4図 スライダ摺動によるトロリ線表面の荒損状況 (無電流)

第3表 電流密度を変えた場合の磨耗特性

実験時間 (h)	通電々流 (A)	摺動速度 (km/h)	硬銅トロリ線			銀入り銅トロリ線		
			磨耗量 (g)	接触障害度 ( $\mu A$ )	接触電圧降下 (V)	磨耗量 (g)	接触障害度 ( $\mu A$ )	接触電圧降下 (V)
100	50	30	—	—	—	0.070	54	0.17 <sub>0</sub>
100	100	30	0.080	76	0.25 <sub>6</sub>	0.090	122	0.21 <sub>2</sub>
100	200	30	1.034	72	0.35 <sub>1</sub>	0.670	84	0.30 <sub>8</sub>



第5図 火花発生時における接触障害度R, 接触電圧降下V, およびトロリ線通電々流Iのオシログラム

第4表 接触障害度(火花)とトロリ線磨耗量

接触障害度 (火花) ( $\mu A$ )	硬銅トロリ線		銀入り銅トロリ線	
	磨耗量 (g/100h)	接触電圧降下 (V)	磨耗量 (g/100h)	接触電圧降下 (V)
54	—	—	0.070	0.17 <sub>0</sub>
76	0.090	0.25 <sub>6</sub>	—	—
120	—	—	0.100	0.21 <sub>2</sub>
260	0.170	0.17 <sub>6</sub>	—	—
300	0.180	0.26 <sub>4</sub>	—	—
330	—	—	0.548	0.28 <sub>1</sub>
340	1.850	0.35 <sub>6</sub>	—	—
420	—	—	0.732	0.33 <sub>1</sub>

備考

トロリ線電流: 50A, 摺動速度 30km/h

(3) トロリ線の磨耗特性

(A) 電流密度の影響

硬銅および銀入り銅トロリ線の磨耗量と電流密度との関係を示すと第3表のとおりである。

第3表より明らかなように電流密度が大きくなるほど磨耗は大きくなり、かつ両者の差異は大きい。

(B) 火花による影響

前述の実験ではすべて通電状態において可視火花が発生しない場合であつたが、本実験では火花を発生させた状態で測定した。なお火花を発生させるために、試片とりつけ部分に厚さ0.07mmの紙1~4枚をはさみ、摺動面に微小な段をつけた。第5図は火花発生時における通電々流I, 接触電圧降下Vおよび接触障害度Rのオシログラムで、同図(上)は実験開始直後、(下)は終了後の状況である。また第4表はこのような状態で行つた実験結果である。

第4表よりあきらかなように接触障害度すなわち火花が大きいほどトロリ線の磨耗量は大きくなつている。また硬銅と銀入り銅トロリ線の磨耗特性を同一値の接触障害度で比較すると、硬銅よりも銀入り銅の方が良好で、この差異は接触障害度が大きいほど大きくなつている。

(4) 結果の考察

(A) 電流密度と磨耗との関係

電流密度が高くなるほど火花が多く発生しやすくなり磨耗が多くなるが、本実験では可視火花はほとんど認められず、

かつ接触障害度も電流増加による増大が認められなかつたから一応火花自身による影響は無視できる。次に考えられるのは電流の増加により摺動接触面の平均温度が上昇し、その結果トロリ線の硬度が低下し、磨耗量が増加することである。接触面の平均温度はトロリ線全体の平均温度より高いことは明らかであるから、かりに接触面の平均温度が200°Cに上昇したとすれば、第2図のように硬銅の硬度は低下し、その結果硬銅の磨耗量が急増する。これに対して銀入り銅は耐熱性が大きいから硬銅よりも硬度の低下が少なく、したがつて銀入り銅の方が硬銅よりも磨耗が少ないことが考えられる。ただ耐磨耗性と材質硬度との関係が問題になるが、一般に硬度Hが高いほど磨耗Aは少ないといわれている。たとえば Holm

の実験式を示せば<sup>(3)</sup>

$$A = Z \frac{PS}{H} \dots\dots\dots (1)$$

ただし

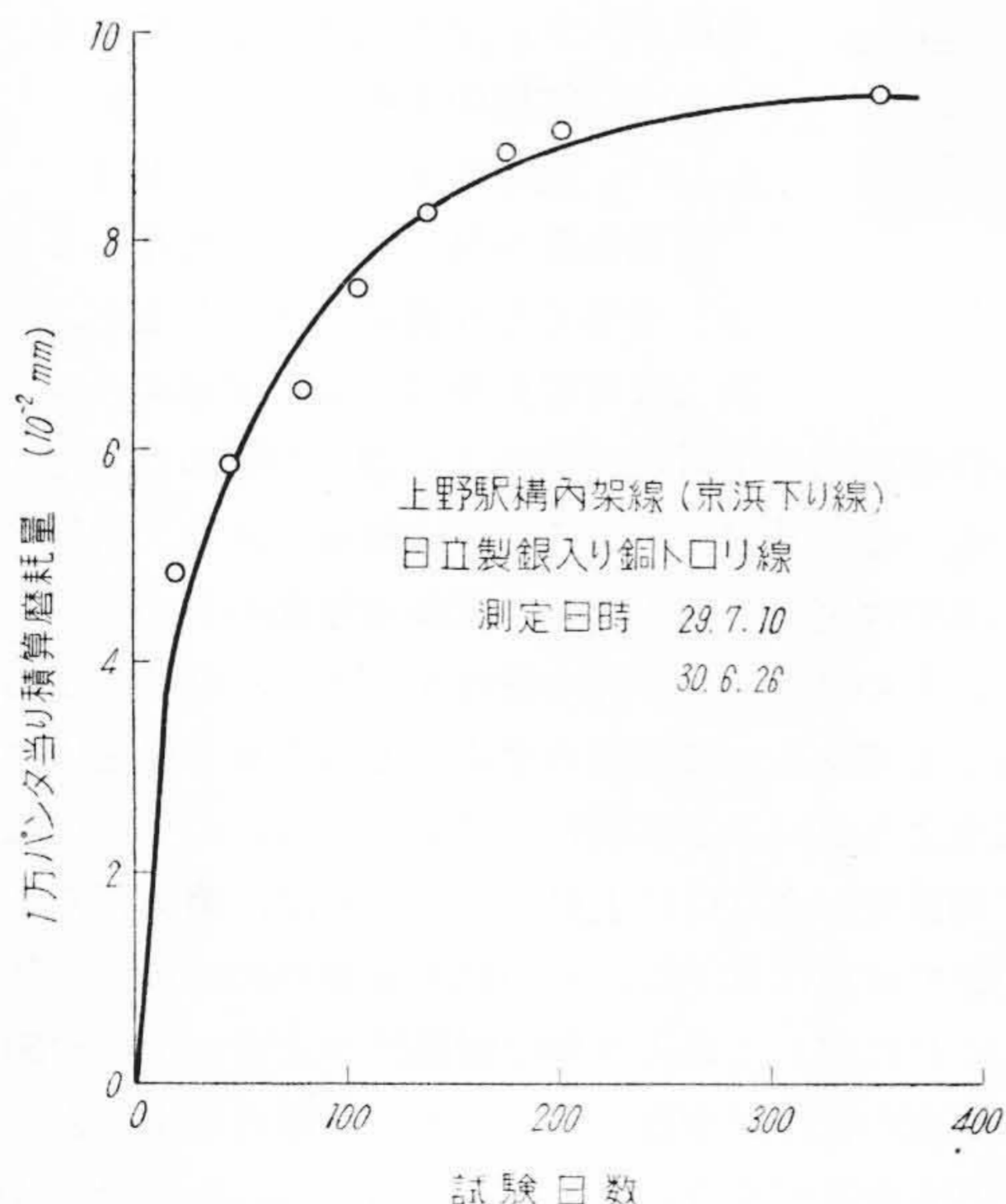
P: 接触圧力, S: 走行距離, Z: 物質定数

となる。宗宮博士の研究<sup>(3)</sup>によれば上式はスライダの実験結果とよく一致するとのことである。

上述のように考えれば、硬銅と銀入り銅との磨耗特性の差異は電流密度によつて影響され、高電流密度になるほど両者の差異は大きくなる(限界がある)という実験結果について一応説明ができる。

(B) 火花と磨耗特性

接触障害度すなわち火花が多いほどトロリ線の磨耗量は大きくなり、その磨耗量の急増する割合は硬銅の方が銀入り銅よりも著しいことは前述のとおりである。この現象については一応次のように説明ができる。すなわち火花によつてトロリ線の磨耗量は増加するが、この場合の磨耗は火花自身による磨耗よりも、火花により面が荒損されて機械的磨耗が増加すると同時に、火花により接触面の平均温度は高くなり、その結果硬度が低下し磨耗量が増大するものと考えられる。また硬銅よりも銀入り銅の方が耐磨耗性が大きいのは前述せるとおりで硬銅より銀入り銅の方が硬度低下が少ないことに基因しているためであると思う。なお火花がはげしく接触面の温度が著しく上昇し、銀入り銅の硬度がはなはだしく低下する場合には両者の差異はほとんどなくなるものと予想される。



第6図 上野駅構内における銀入り銅トロリ線の磨耗試験結果

[IV] 摺動接触面と磨耗との関係

(1) 使用状態におけるトロリ線の磨耗寸法

国鉄当局が上野駅構内に架線してある日立製トロリ線(銀入り銅)の磨耗を測定した結果を示すと第6図のとおりである。試験日数が多くなるほど、1万パンタ(パンタが1万回通過すること)あたりの磨耗寸法は減少し漸次飽和に近づいている。これをみるとスライダの摺動回数が多いほどトロリ線表面が磨耗し、その結果見掛接触面積が増大する。したがつて見掛接触面積が大きくなるために1万パンタあたりの磨耗総量が減少するかのよう考えられる。しかし接触理論から考えると見掛接触面積がある程度変化しても、真の接触面積はほとんど変化がなく、したがつて磨耗総量(重量、あるいは体積)は変化がないはずである。これらの点について究明するために後述するような考察ならびに実験を行つた。

(2) 接触機構に関する考察

(A) 幾何学的接触

トロリ線とスライダが幾何学的に接触する場合におけるトロリ線の接触面は幅の狭い長方形となり、その幅fは次式で表わされる<sup>(4)</sup>。

$$f = 2.15 \sqrt{\frac{P'}{2} - \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし

P': 単位長さあたりの接触圧力

E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>: トロリ線およびスライダの弾性係数

d<sub>1</sub>: トロリ線の直径

接触面の幅は上式より明らかなように、E<sub>1</sub>およびE<sub>2</sub>が一定なる場合、P'およびd<sub>1</sub>の平方根に比例する。

(B) 静止接触

前述の場合は幾何学的接触を考えたが、実際には幾何学的接触をさせることは不可能で、最初その面内では比較的突出している3点が接触し、接触面に加えられる圧力が漸次増加するにしたがい、最初接触せる3点が弾性あるいは塑性変形を起すため、つぎの突出部分が接触して漸次接触面積が増大する。したがつて接触圧力の増加とともに接触点の数(真の接触面積)も増加し接触抵抗は減少する。これは一般に3点接触理論<sup>(5)</sup>と呼ばれている。次式は本理論より求められた接触抵抗Rの式である。

$$R = \frac{C_1}{N \sqrt{\frac{P}{N}}} = \frac{C_1}{\sqrt{NP}} \dots\dots\dots (3)$$

ただし

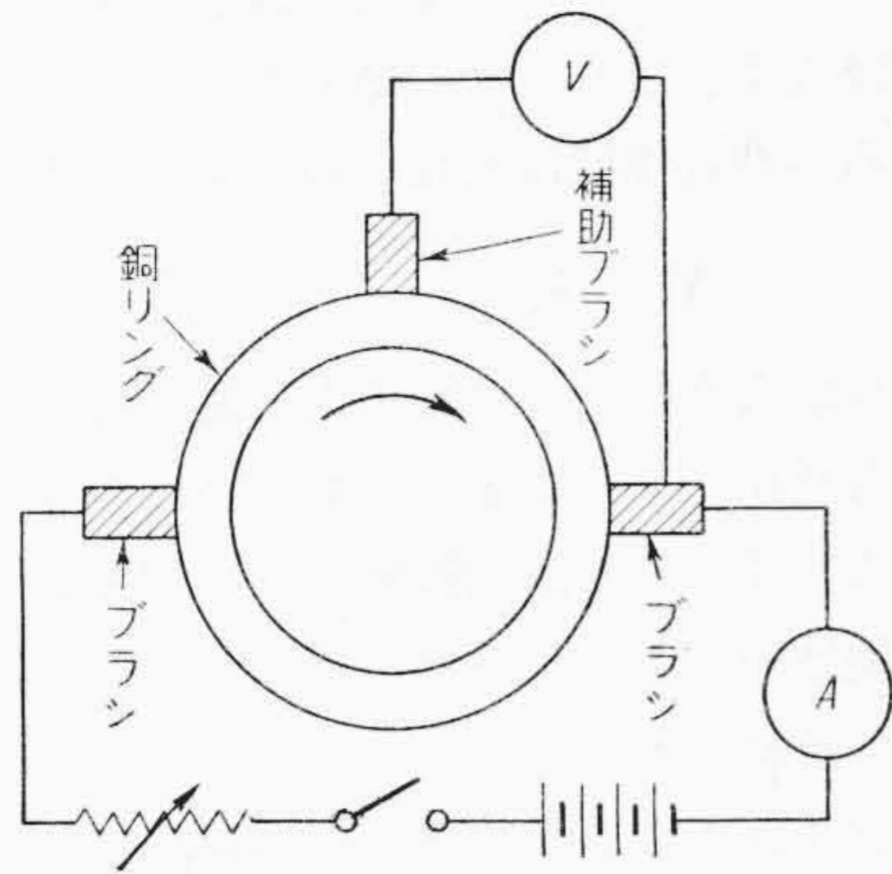
P: 接触圧力, C<sub>1</sub>: 常数, N: 接触点の数

上式より接触抵抗Rは全圧力Pの平方根に逆比例して減少するが、見掛接触面積の大小には直接関係のないこ

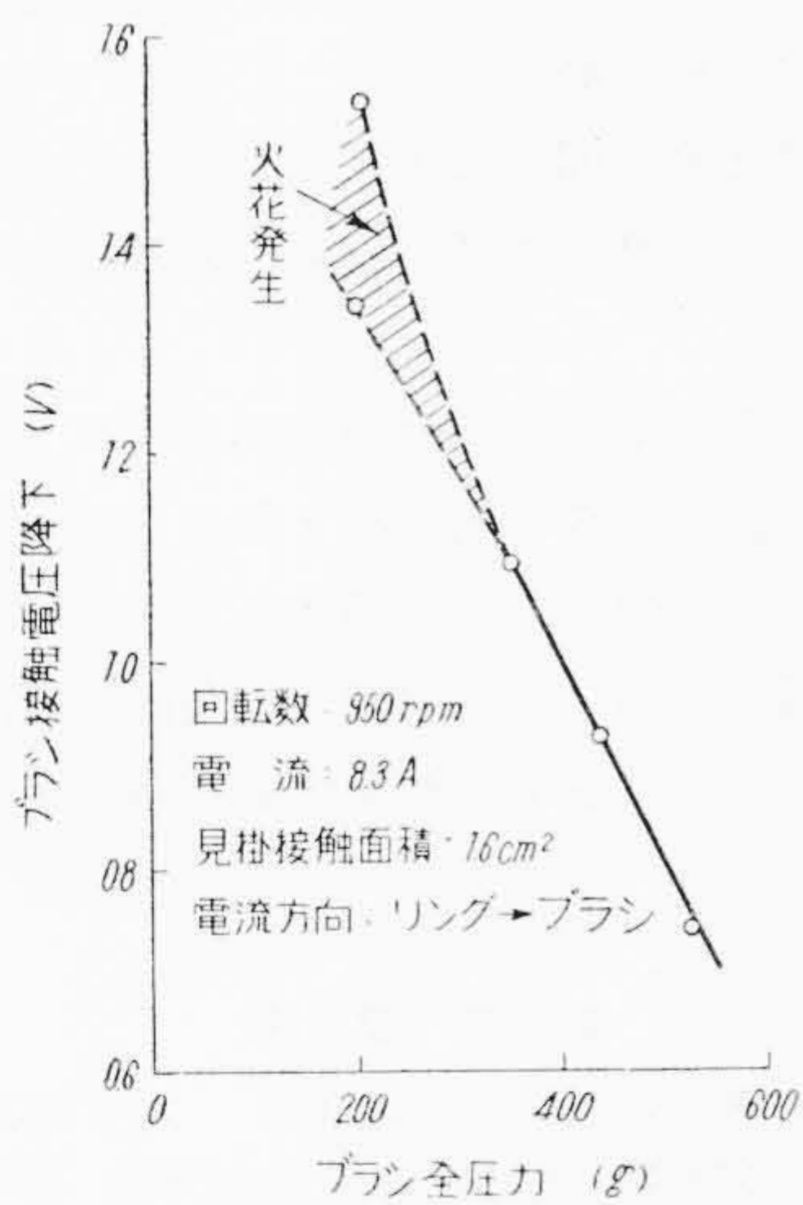
とがわかる。

(C) 摺動接触

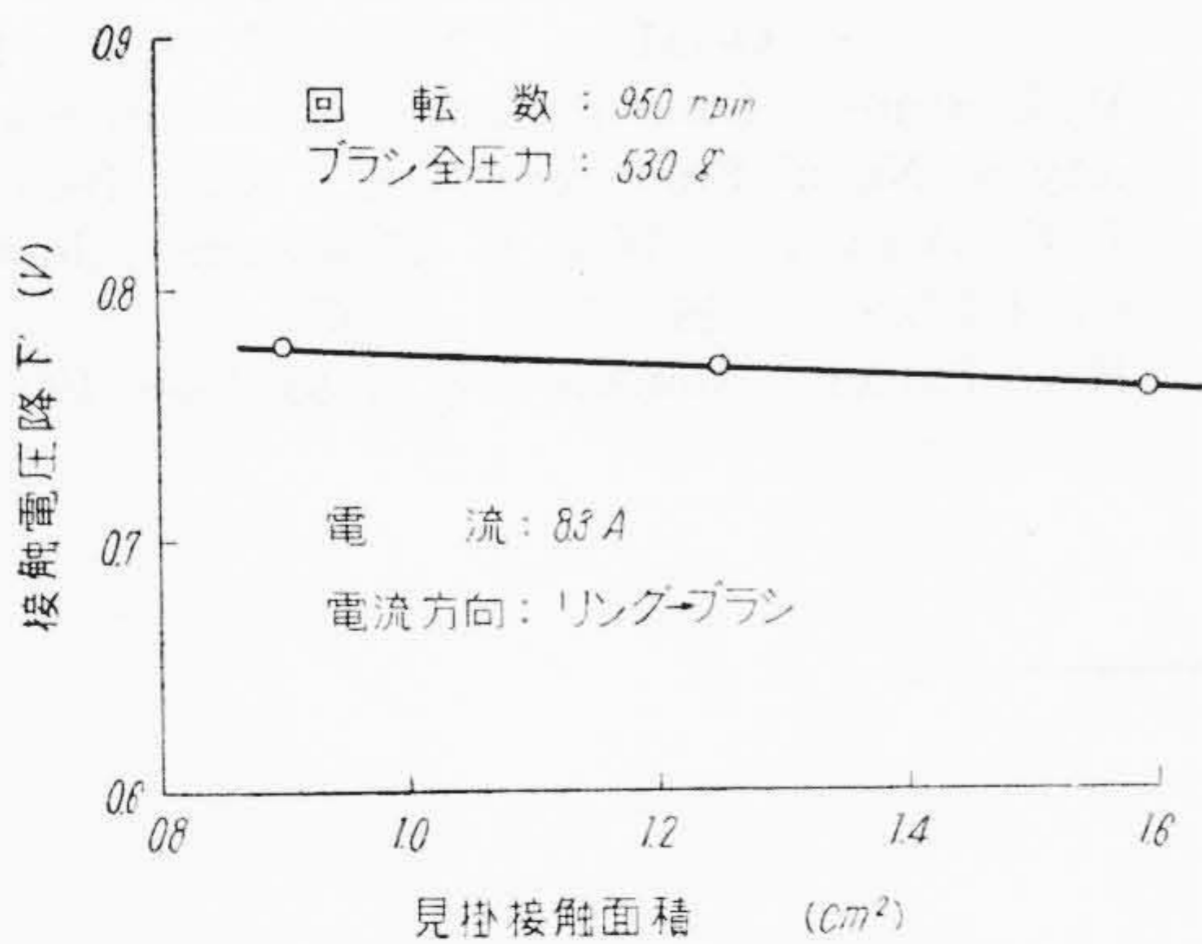
摺動接触に関してはStine<sup>(6)</sup>, BailyおよびCleghorne<sup>(7)</sup>の諸氏が発表している。次の実験式は H. G, Taylor 氏<sup>(8)</sup>の論文より引用せるものである。



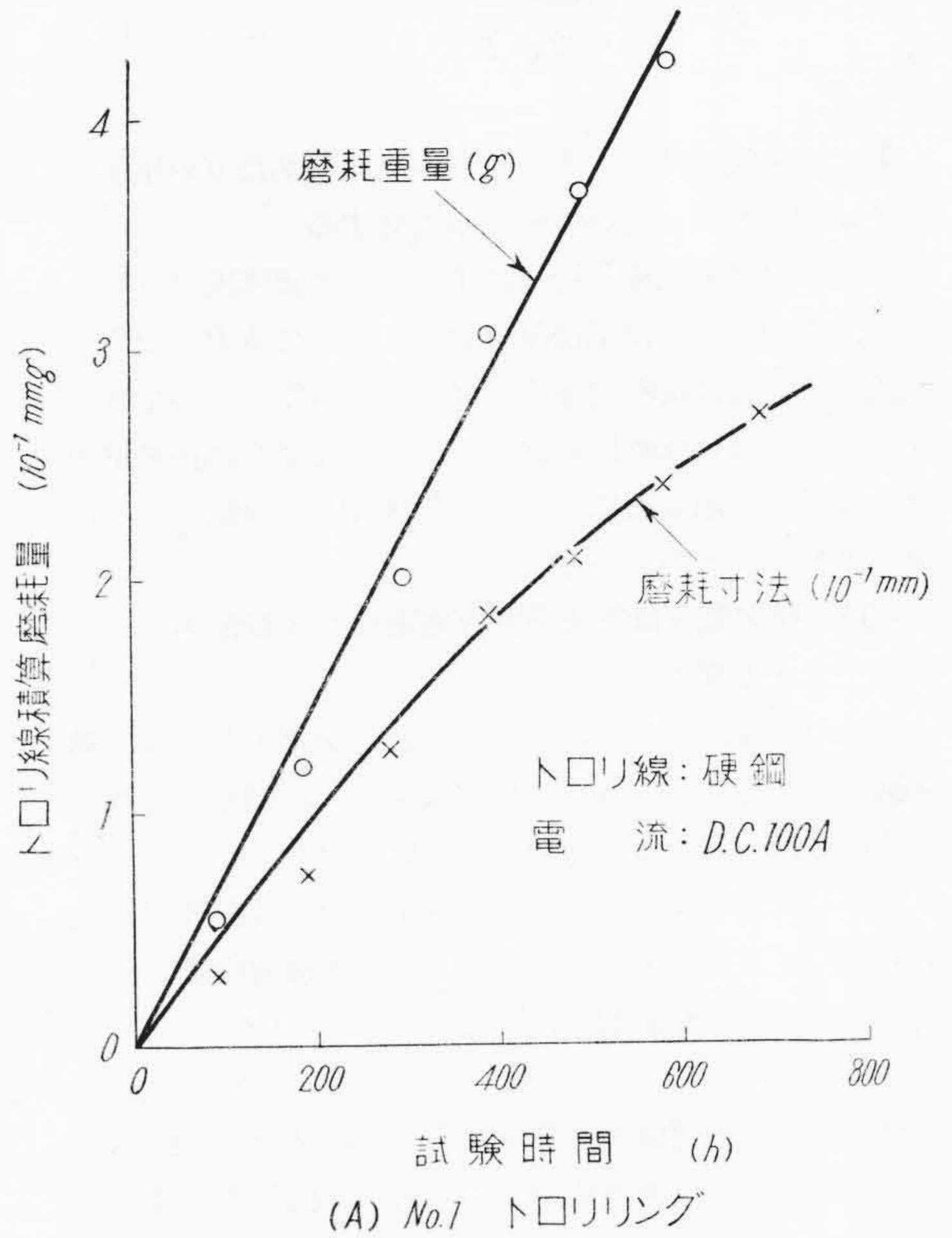
第7図 ブラシ—銅リング接触電圧降下測定回路



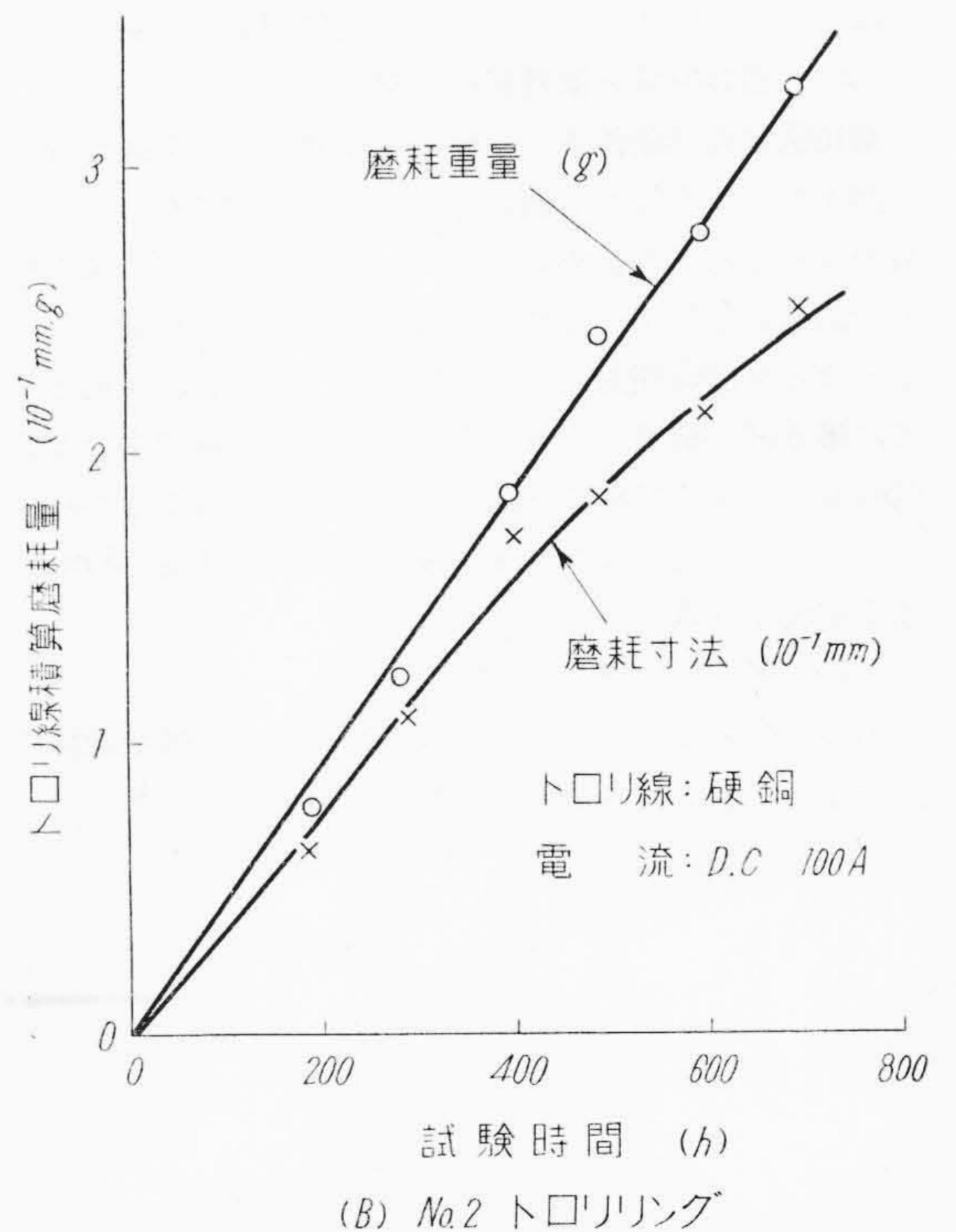
第8図 接触電圧降下とバネ圧力との関係



第9図 接触電圧降下とブラシ見掛接触面積との関係



第10図 (A) 試験時間とトロリ線磨耗量との関係



第10図 (B) 試験時間とトロリ線磨耗量との関係

$$V = \frac{i \cdot 0.28}{1 + 0.22\sqrt{P}} \dots\dots\dots (4)$$

ただし

$V$  : 接触電圧降下,  $P$  : 見掛単位面積あたりの圧力

$i$  : 電流密度 (見掛接触面積に対する)

いま見掛接触面積を $1/5$  にすると, 電流密度は $5i$  となり, 圧力の強さは見掛単位面積に対して $5P$  となるが上式の計算では接触電圧降下はわずか $7\%$  しか増加しない。結局 Taylor 氏の論文で明らかのように接触電圧降下は見掛接触面積にほとんど関係なく, 全圧力のみに支配されることがわかる。

### (3) 接触電圧降下と見掛接触面積および圧力との関係

前述の接触理論がどの程度正しいかを知るために, 第7図のようなブラシおよび集電環を用い, 接触電圧降下と見掛接触面積および圧力との関係を測定した。

ブラシ圧力を変えた場合の接触電圧降下は第8図のとおりで, ブラシ圧力が小さくなるほど接触電圧降下は増大し, 圧力が $200\text{ g}$  前後になると著しく不安定になり火花を発生した。

次に見掛接触面積の影響を知るためにブラシ摺動面に溝をつけ, 見掛接触面積を変えた場合の接触電圧降下を測定した。その結果は第9図のとおりで, 見掛接触面積が $1/2$ 前後になつても接触電圧降下はわずかに $2\sim 3\%$ 前後しか変化しない。したがって接触抵抗は見掛接触面積にほとんど無関係であり, 前述の接触理論と一致する。

### (4) 摺動時間と磨耗量との関係

第10図は円形硬銅トロリ線の積算磨耗量と試験時間との関係を示すもので, 磨耗寸法は試験時間に対して漸次減少する傾向がみとめられるが, 磨耗重量の場合は直線的である。したがって磨耗寸法の場合は摺動時間が多くなるほど単位時間あたりの磨耗寸法は減少し, 傾向としては第6図の結果と一致する。また磨耗重量の場合は摺動時間に無関係で常に一定の割合で磨耗することがわかる。なおこの場合における実験条件は摺動速度 $45\text{ m/h}$ , 通電電流 $100\text{ A}$ である。

### (5) 考 察

前述の結果より円形トロリ線の磨耗は見掛接触面積に関係なく, 単位長さあたりの磨耗重量が同じであるが,

これは常に一定の割合の体積が磨耗することを示すものである。したがって磨耗寸法の減少は単位長さあたりの磨耗面積が増加したことを示す。真の接触は常に突出部分で行われる関係上摺動の際これが磨耗すると, 次の突出部分へ移り結局見掛接触面が一様に磨耗されることはあきらかである。したがって見掛接触面積が大きいほど磨耗面積は大きくなり, その結果磨耗寸法(高さ方向)は減少するが磨耗体積は変化がないものと解される。

## [V] 結 言

硬銅より銀入り銅トロリ線の方が耐磨耗性は大きい。これは銀入り銅の方が硬銅よりも耐熱性がすぐれているためである。すなわち摺動接触面の平均温度が上昇しても銀入り銅は硬銅よりも硬度の低下が少なく, そのため銀入り銅の耐磨耗性は大きいものと解される。

円形トロリ線の磨耗寸法は見掛接触面積が大きくなるほど減少するが, 磨耗重量はほとんど変化がなかつた。これは真の接触が常に突出部分で行われる関係上, 突出部分が接触するとほかの突出部分へ接触が移り, 結局見掛接触面積は一様に磨耗される。したがって見掛接触面積が大きいほど磨耗面積は大きくなるので, たとえ磨耗寸法が減少しても磨耗体積(重量)は変化しないものと思う。

本研究を行うにあたり国鉄当局よりトロリ線現地実験そのほか御助言と御援助とを, また日立研究所今尾主任研究員および一木博士より御指導を, また日立電線株式会社電線工場, 大和, 久本両副部長高橋, 岡両主任より御援助を賜わつた。厚く御礼を申上げる。

## 参 考 文 献

- (1) 武政, 桑原: 日立評論 33, 833 (昭26)
- (2) 栗本, 飯塚: 日立評論別冊 9号 125 (昭30)
- (3) 宗宮, 宮地: 電気三学会連合大会予稿 468 (昭31-4)
- (4) Föppl: Technische Mechanik 5, 351 (1907)
- (5) 赤沼: OHM 25, 27 (昭13-1)
- (6) W. E. Stine: Journal of the American Society of Naval Engineers 37, 312 (1925)
- (7) F. G. Baily and W. S. H. Cleghorne: Journal I. E. E. 38, 162 (1907)
- (8) H. G. Tayler: Journal I. E. E. 68 1356 (1930)