

集電環表面温度とブラシの諸特性

Effect of Surface Temperature on Sliding Characteristics of Electro-graphite on Copper

星 野 雅* 武 政 隆 —**
Tadashi Hoshino Ryûichi Takemasa

要 旨

銅の集電環上を摺動(しゅうどう)するブラシの諸特性が、環表面温度 40~150℃ の範囲でどのような影響を受けるかについて実験を行なった。その結果、集電環表面の荒損は 80~120℃ の温度範囲で最も少ないこと、摩擦は 70℃ 付近で急激に低下し 120℃ 前後では 0.1 以下となるが、荒損の増大し始める 150℃ 付近では異常な変動を生ずること、ブラシ摩耗は温度上昇とともに増大することおよび接触電圧は温度上昇に伴って、順次低下し 150℃ では 0.2V 以下と著しく小さな値になり V-I 特性は直線となることなどが判明した。

1. 緒 言

直流機の運転にあたり、最も問題を起こしやすいのは、ブラシ関係で整流障害、整流子条こん、異常摩耗その他種々の障害が発生し、運転上支障をきたす場合が多い。これらの原因としては直流機、ブラシ材質、負荷条件および周囲条件などが考えられ、きわめて複雑である。また同一の直流機で同じ銘柄のブラシを用いても、負荷条件および周囲条件が異なると、整流、条こんおよびブラシ摩耗に重大な影響を与える。たとえば非常に高負荷であったり、あるいは周囲温度が非常に高いと、整流子面温度は高くなり、その結果、整流障害あるいは条こんが発生する。また逆に軽負荷の場合は整流子面温度が低く、その結果皮膜がうすく、条こんが発生することはしばしば経験することである。このように整流子表面温度(集電環表面温度を含む)によって、ブラシの性能に著しい影響を与えることはわかっているが、具体的にどのような影響を与えるかということに対してはほとんど解明されていない。よってこれらの現象を究明するため集電環の内部に電熱線を内蔵させて、集電環表面温度を変え、この場合における接触電圧降下、ブラシの電圧電流特性、摩擦、摩耗、条こんおよびブラシ材質の潤滑性と荒損の関係について実験を行なった。

本論文はこれらの結果をとりまとめ述べたもので、多少なりとも関係者各位のご参考になれば幸甚である。

2. 整流子表面温度と回転機の問題点

整流子または集電環表面の温度の大小が回転機の問題点としてとりあげられる例は少なくないが大別して 40℃ 以下で温度が低いために生ずるものと 100℃ 以上で高いために生ずる場合とがある。前者の場合は励磁機などにみられる整流子荒損現象がその典型的なものである。また後者に属するものとしては、密閉形の回転機、車両用の回転機などがあげられるが、最近のように過酷な運転を余儀なくされる状態ではむしろ回転機全般の問題といっても過言ではないであろう。おもな問題としては、接触電圧の変動、整流子の荒損、整流の悪化、ブラシの摩耗過大などがあげられる。これらの現象はいずれも整流子面に生成される皮膜の変動に密接な関係があるものと考えられている。

3. 集電環表面温度と荒損現象

一般に荒損発生の要因としては、周囲温度、電流密度の過少、火花、腐食性ガス、油、砂じんなど非常に多いが、これらの中で現象究明の基礎データとして温度の影響を知るために行なった実験結

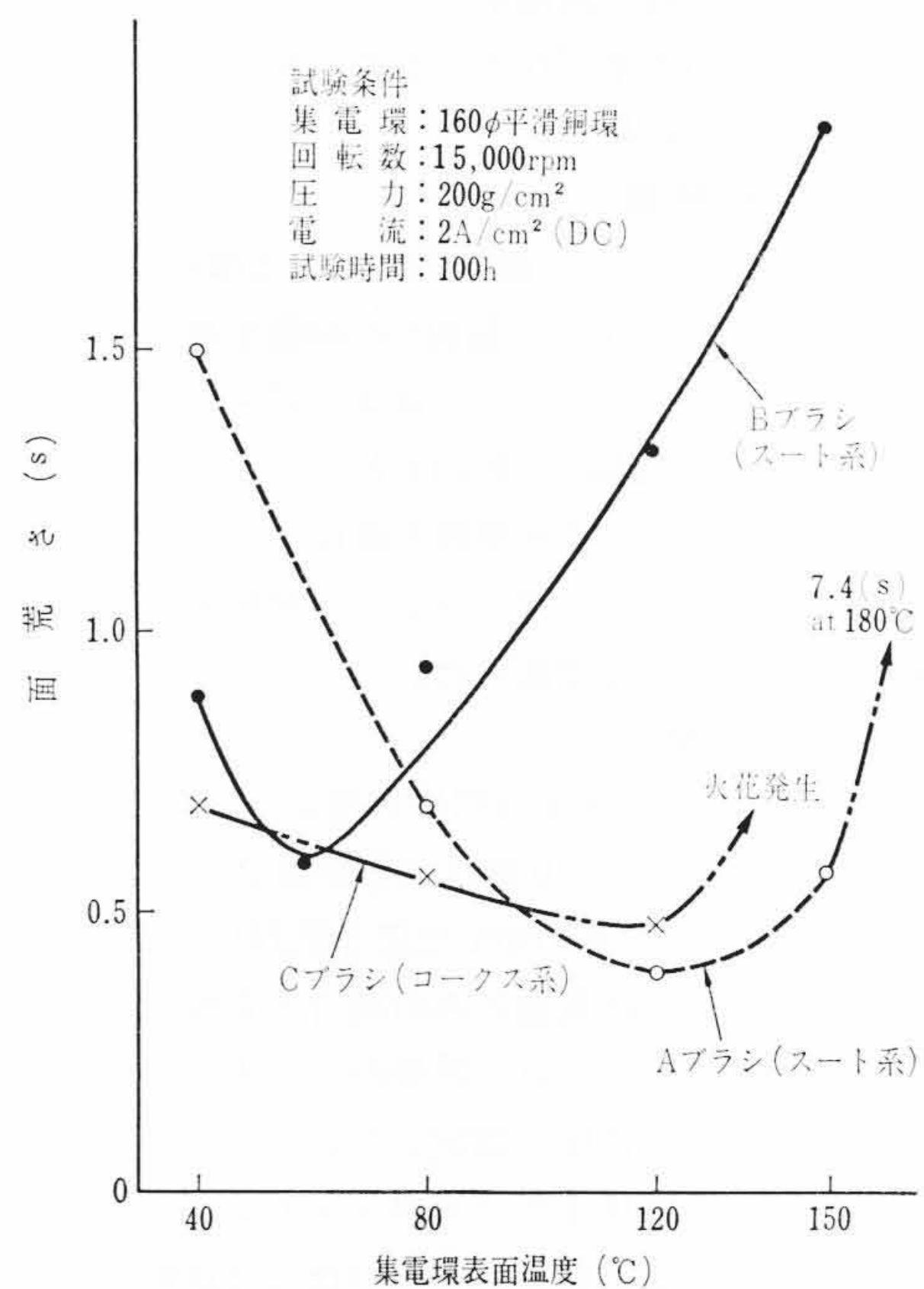


図1 集電環表面温度と荒損の関係

果を述べる。

図1は集電環に電熱線を内蔵し、通電電流とは無関係に任意に温度を調整できるように工夫した試験機を用いて実験した結果であるが、この結果より明らかなように集電環温度が 40℃ と比較的低い場合に荒損が発生しやすいが、温度が上昇するに伴い順次荒損が発生しにくくなり、ある温度を越えると再び荒損が増大する。いわゆるV字形またはU字形曲線となることがわかる。ただし曲線の形状はブラシの材質によってかなり著しい相違があり、コークス系のブラシは温度の影響が少ないが、スート系のブラシはその影響が著しく、典型的なVまたはU字形曲線となる。コークス系のブラシは低温側で荒損が発生しにくい反面、120℃ 以上になるとブラシがおどり、火花を発する。この火花のために荒損が増大する。これに対してスート系のブラシは低温側では荒損が発生しやすいが、高温側ではブラシがおどることなく 150℃ 付近までは荒損も少ない。ただしBブラシのように研磨性の大きなものでは全般に荒損が発生しやすく、また荒損の発生の少ない温度範囲がせまくしかも低温側に移動している。しかし後述するようにBブラシに特殊処理を行ない潤滑性を与えて摩擦係数を低下させると、曲線はV字形からU字形に変わり、曲線は全体に高温側に移動し、研磨性の少ないAブラシとほぼ近似の曲線となる。

* 日立化成工業株式会社桜川工場

** 日立化成工業株式会社桜川工場 工学博士

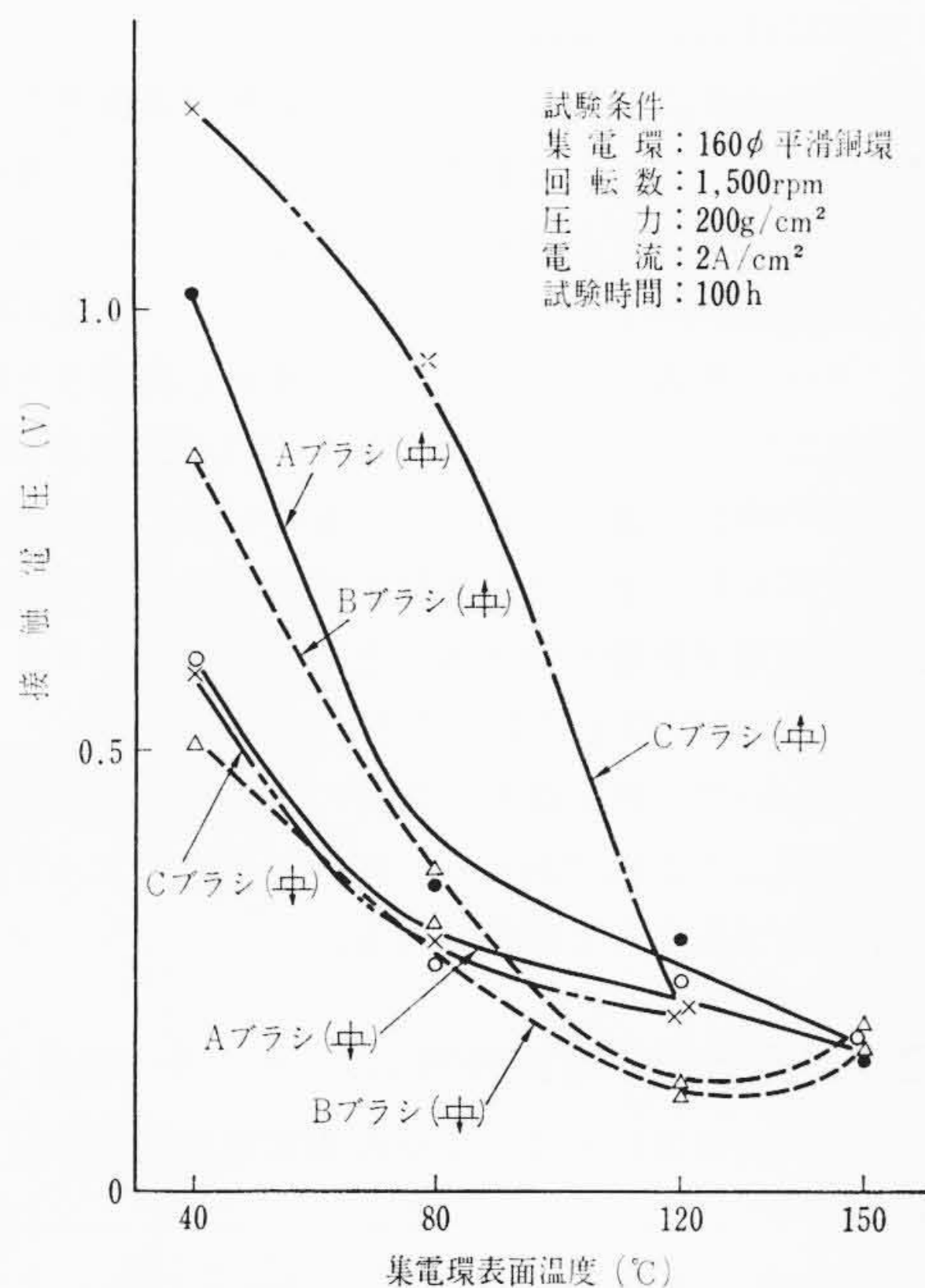


図2 集電環表面温度と接触電圧の関係

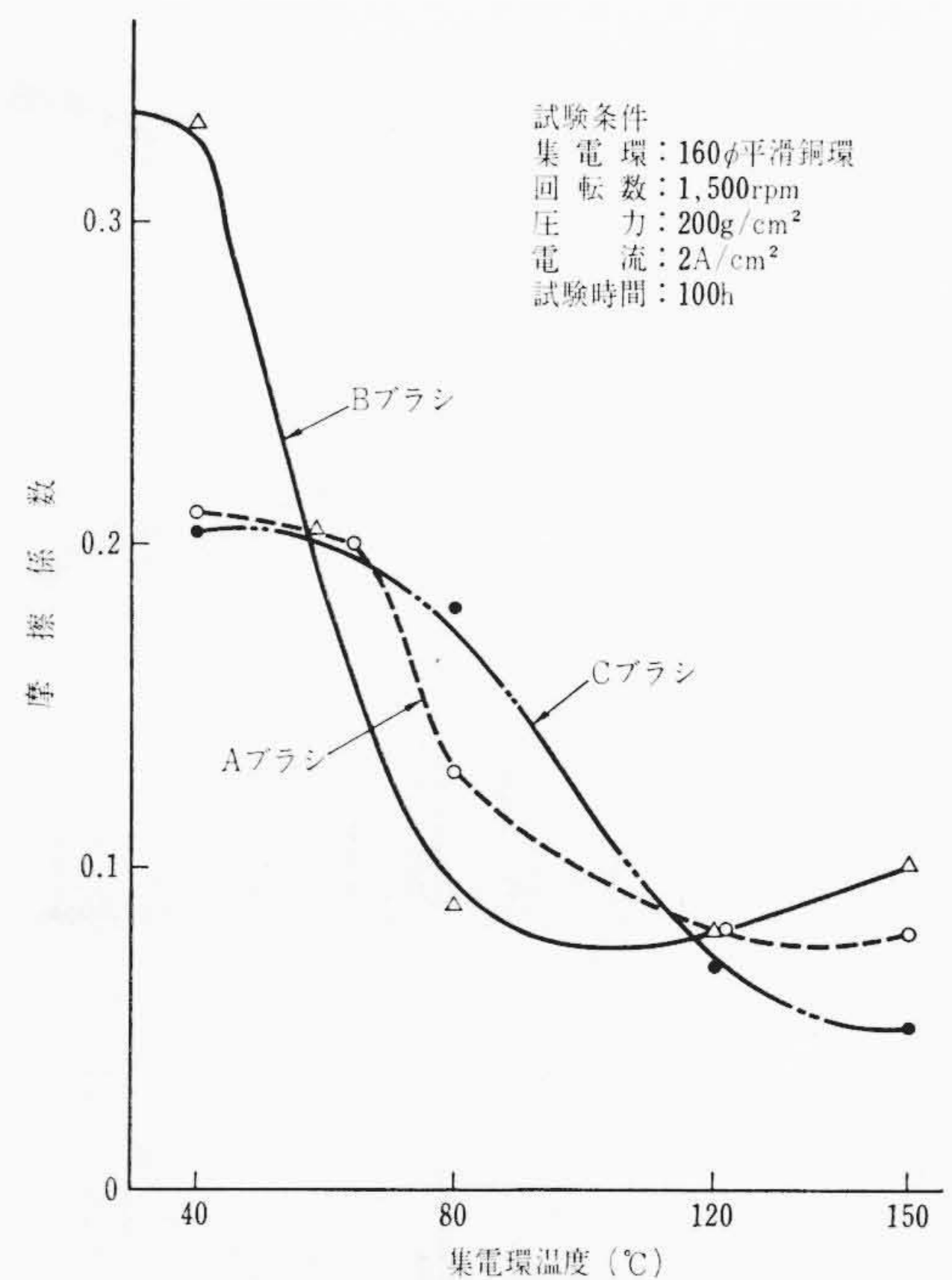


図3 集電環温度と平均摩擦係数との関係

表1 120°C 下における GH401 の接触電圧

項目	接触電圧 (V)	接触抵抗 (Ω)	備考
測定条件			
GH401 運転初期皮膜のない状態	0.1	0.031	集電環表面銅色
運転 5 分 後	0.11	0.034	集電環表面薄い橙色
運転 5 分後電流衝撃を数回加える。 (2 A/cm ² → 15 A/cm ²)	0.11	0.034	同上
運転 100 時間 後	0.11	0.034	ブラシの摺動している部分は黒ずんだ褐色。摺動部以外は黒ずんだ紫
集電環面をペーパーにて十分みがいたのち、大気中にて 5 分空転後ブラシを摺動させた直後に測定	0.17	0.055	集電環表面薄い橙色

4. 集電環表面温度と接触電圧

接触電圧値はブラシの整流性能および電気的な損失の大小に関係した数値として重要である。一般には接触電圧が大きいほど短絡電流を阻止する効果は大きく整流性能は良好となるが、当然のことながら電気的な損失は大きくなる。一方また数多くのブラシを並列に接続した場合、摺動部の接触抵抗が回路に占める割合は非常に大きいので、不平衡電流を左右する大きな要因となる。図2は2 A/cm²通電時の集電環温度と接触電圧の関係を示したものであるが、温度の上昇に伴って接触電圧は順次低下し、同時に正負の極性差が少なくなっていくことがわかる。特に温度上昇に伴う接触電圧の低下は著しく、たとえば120°C付近ではいずれのブラシも0.5V以下になってしまい、研磨性の大きなBブラシでは0.1V前後ときわめて低い値となることがわかる。この値は環表面温度40°Cの条件下において金属黒鉛系ブラシを用い、2 A/cm²通電した場合に得られる値に相当する。Bブラシの比抵抗は金属黒鉛系ブラシの約400倍であることから考えても、この値がいかに小さな値であるかがわかる。Bブラシにおける0.1Vという値は表1に示すように、測定条件を変えて種々実験を行なってもほとんど差異が現われない。このように高温時に接触電圧が著しく低くなる原因は現在のところ不明であ

るが、(イ)酸化皮膜のハク離、(ロ)縮流の低下など接触機構が本質的に変化するためであろうと想像される。一方また接触電圧の極性差が温度の上昇とともに小さくなっていく現象は、極性差を生ずる原因が銅酸化物の整流作用によるかどうかを論ずる場合の貴重な資料になるように思われる。

5. 集電環温度と摩擦特性

整流子温度が40~60°C付近の低い温度範囲で摩擦係数が0.3前後あるものが85°C前後になると0.1程度に減少することは、S. W. Glass氏によって発見され、その後温度と摩擦の関係については、高橋、一木両博士によって詳細な検討をされたが、図3にも示すように、本実験でも温度の上昇とともに摩擦係数が順次低下することが確かめられた。この傾向はスート系でもコークス系でも同様である。ただし図3でも明らかなように、摩擦係数値そのものが著しく低いことに注目すべきである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。たとえばスート系Bブラシの120°C時の $\mu=0.08$ という値であるが、この値は境界潤滑条件下で得られる値としてもかなり小さな値に属する。ところが、ここで一つの問題になるのは、Bブラシでは120°Cで荒損が比較的多い、また150°C下でも $\mu=0.1$ 程度であるが荒損はかなり著しい。荒損現象は一種の金属表面の摩耗であるから、むしろ摩擦は大きくなるはずであるが、逆に摩擦係数値は著しく小さい。この矛盾については図3における測定値が平均の摩擦係数値であること、および高温下における金属表面の摩耗が不連続的ではなからうかということが考えられる。このような観点から、摩擦の時間経過に伴う変動を測定したのが図4である。この結果より明らかなように高温側では低温側でみられなかった異常変動を生ずることがわかる。研磨性の少ないAブラシでも200°C前後になると、このような異常変動がみられる。このような現象が生じた場合には荒損が増大し進展していくようである。このように平均値としての摩擦係数が0.1前後と小さな場合でも、測定方法を工夫し、摩擦の変動を測定した場合には最大0.3に達する値が得られることがわかる。本実験では供試ブラシをささえるアームを摩擦トルクの大きさに正比例し0~300ミクロン程度移動できるように設定し、この変位を差動変圧器によって検出する方法をとっているが、測定アームの慣性をさらに小さくする工夫をす

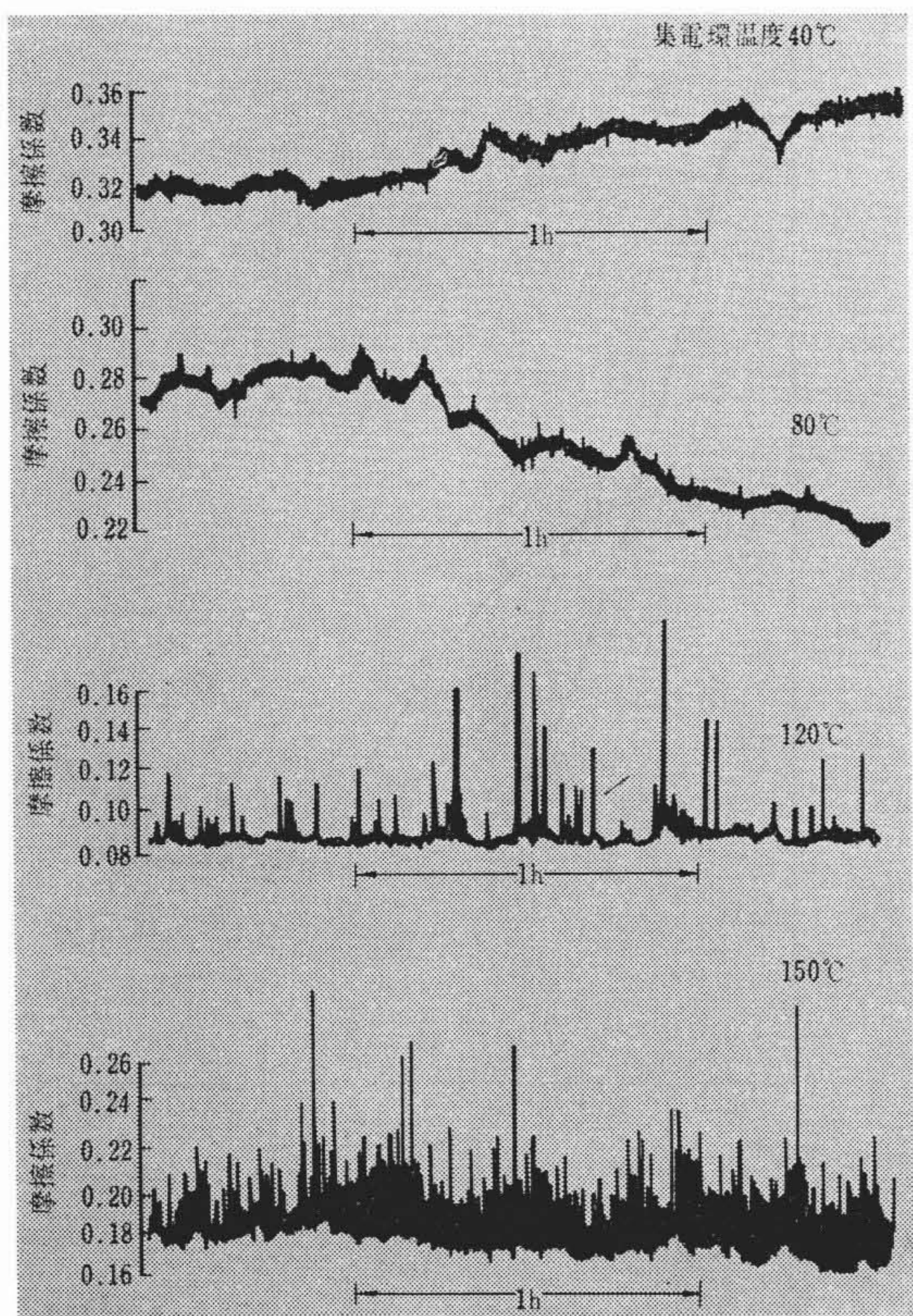


図 4 集電環表面温度と摩擦変動

れば、瞬時にはさらに大きな値に達することが考えられる。

6. 集電環表面温度とブラシの摩耗

黒鉛質ブラシでは、一般に通電電流が増大するに伴ってブラシ摩耗は増大する⁽⁶⁾が、これは電流密度が大きいほどブラシ摺動面の温度が上昇することに関係するとされている。図 5 は通電電流 2A/cm² の条件下における温度と摩耗の関係を実験した結果であるが、この結果より明らかなように温度が上昇すると摩耗が増大する傾向がみられる。ただしスート系 A ブラシのように 80°C 付近で摩耗が

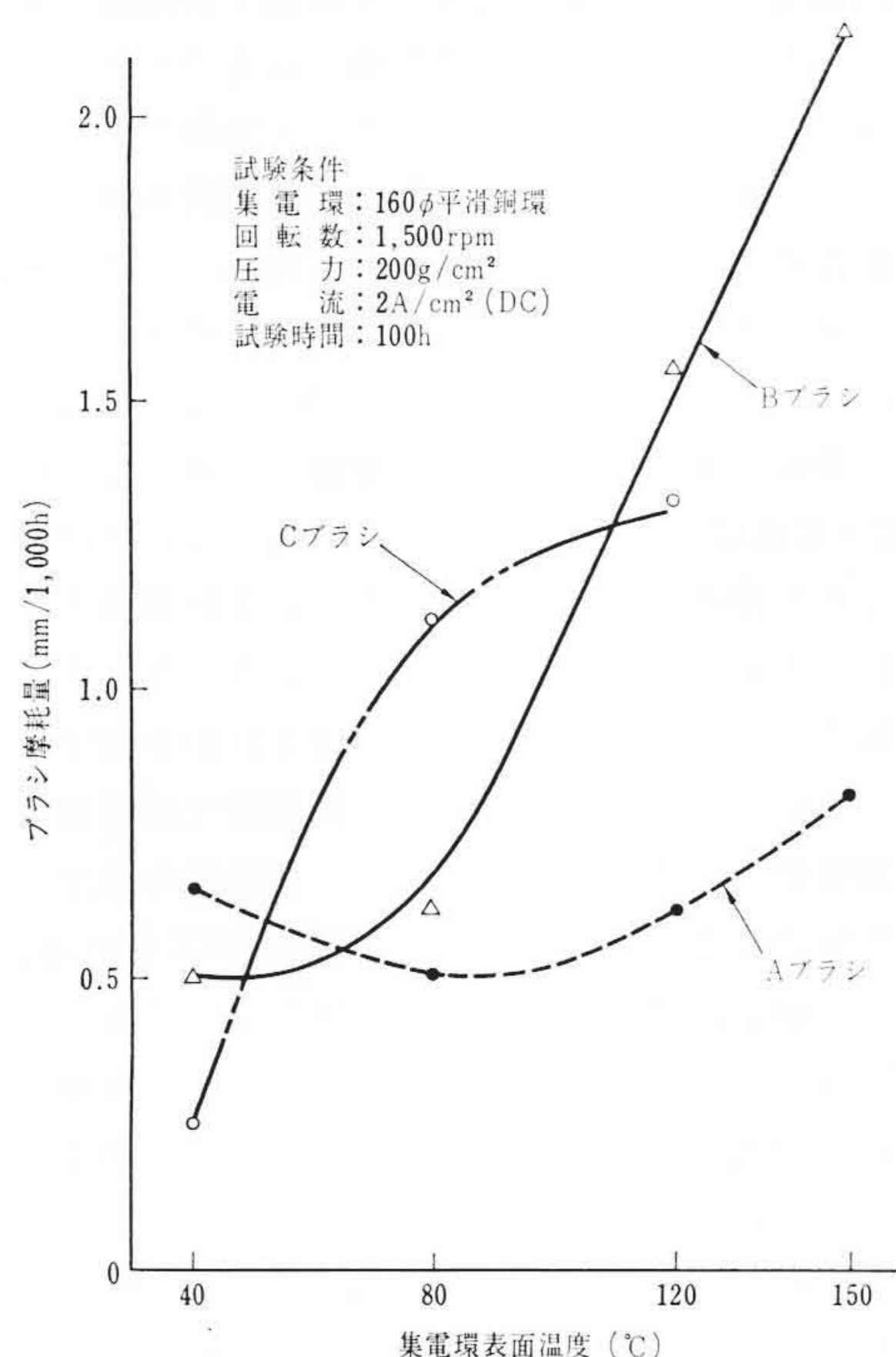


図 5 集電環表面温度とブラシの摩耗

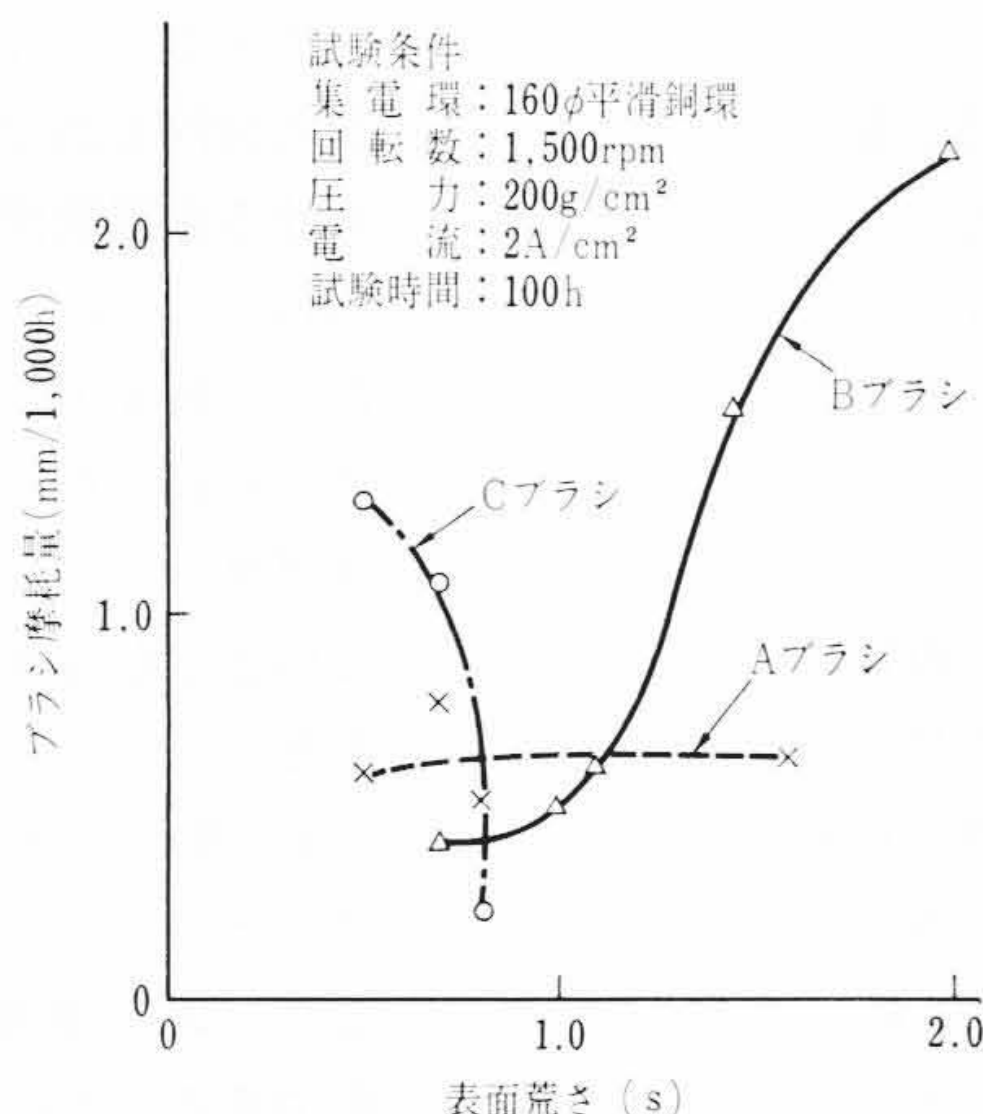


図 6 集電環表面荒さとブラシ摩耗の関係

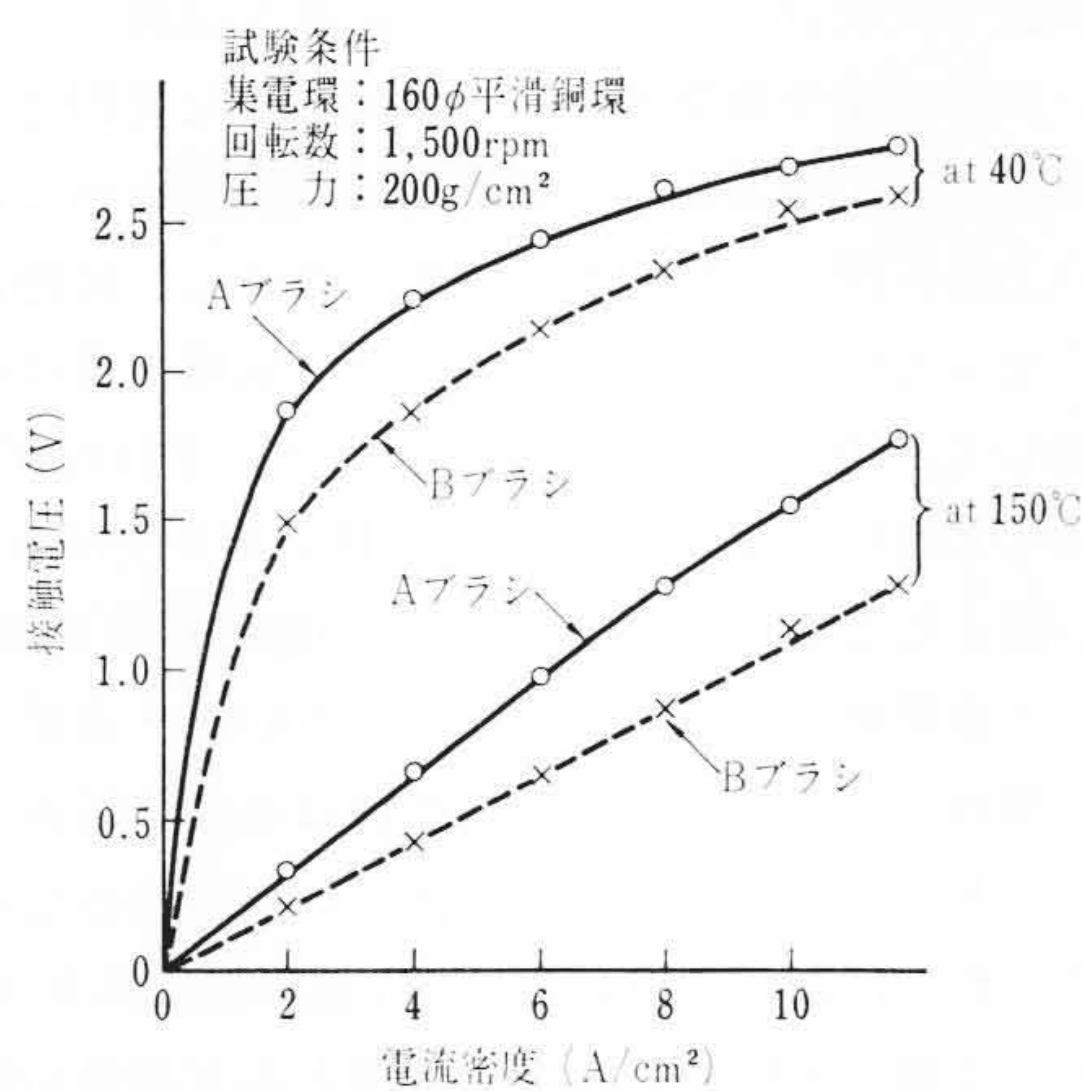


図 7 集電環表面温度と V-I 特性

最も少なく全体にゆるい凹曲線となるブラシもある。ここで図 1 と図 5 を比較しブラシ B に注目して考えると集電環表面荒さとブラシの摩耗に相関関係があるようにも考えられるが、ブラシ摩耗と環表面温度との関係を図示すると図 6 のようになり、コークス系 C ブラシではむしろ面荒れが減少しているところでブラシ摩耗が増大している。また、スート系 A ブラシでもブラシ摩耗と面荒れとの間には相関が認められない。したがって摩耗の増大は面荒れ 2S 以下であってかつ無火花の場合は温度上昇によるものと考えられる。ブラシを構成するカーボン粒、または粒と粒を結合させているバインダーがこの程度の温度差で影響を受けることは、これらのブラシの処理温度がいずれも 2,000°C 以上であることから考えがたい。ブラシと集電環の摺動において、最も温度の影響の受けやすいのは集電環またはブラシ摺動面上の皮膜であろう。皮膜の変化によって摩擦の機構が変化するためであろうと推定される。

7. 集電環温度と電圧電流特性 (以下単に V-I 特性と呼ぶ)

一般にブラシの接触電圧 V はブラシの通電電流密度を G とすれば

$$V = kG^{1/n} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $K > 0$, $n > 1$

(1) 式から⁽⁷⁾、V-I 特性は飽和曲線となる。つまり印加される電圧および電流によってブラシの接触抵抗が変化し、電流が大なるほど、接触抵抗は小さくなるわけであるが、これは酸化皮膜の電気的な破壊に基因すると考えられている。図 7 は V-I 特性を 40°C の条件下と 150°C の条件下で測定したものであるが 150°C 下では、ほぼ直線とみなすことができよう。この測定結果はきわめて重要である。つまり前述の接触電圧が 150°C 付近の高温側では著しく小さいことと考え合わせると高温側では酸化皮膜が電気的に破壊されているかまたは機械的に皮膜がハク離されている可能性があるからである。Stanley 氏は 100°C 以上で摩擦係数が低下することに関連し、黒鉛と銅の中間層における酸化物のせん断力が小さくなるためではないかと述べている⁽⁸⁾。このほかに ④ 温度の上昇に伴う銅と銅酸化物との熱膨張差によって酸化皮膜が遊離しやすくなることや、⑤ 酸化皮膜の脱水現象に伴う皮膜のハク離が考えられよう。いずれにしても低温側と高温側では摺動の機構が本質的に異なることが考えられる。

8. 特殊処理ブラシの荒損防止効果と集電環温度

主原料に油煙を用いた油煙系ブラシはコークス系ブラシに比較して潤滑性に乏しく摩擦特性も不安定になりやすい。これがため油煙系ブラシはコークス系に比較して整流子面を荒損させる確率が高い。しかし油煙系ブラシはコークス系ブラシに比較して整流が非常

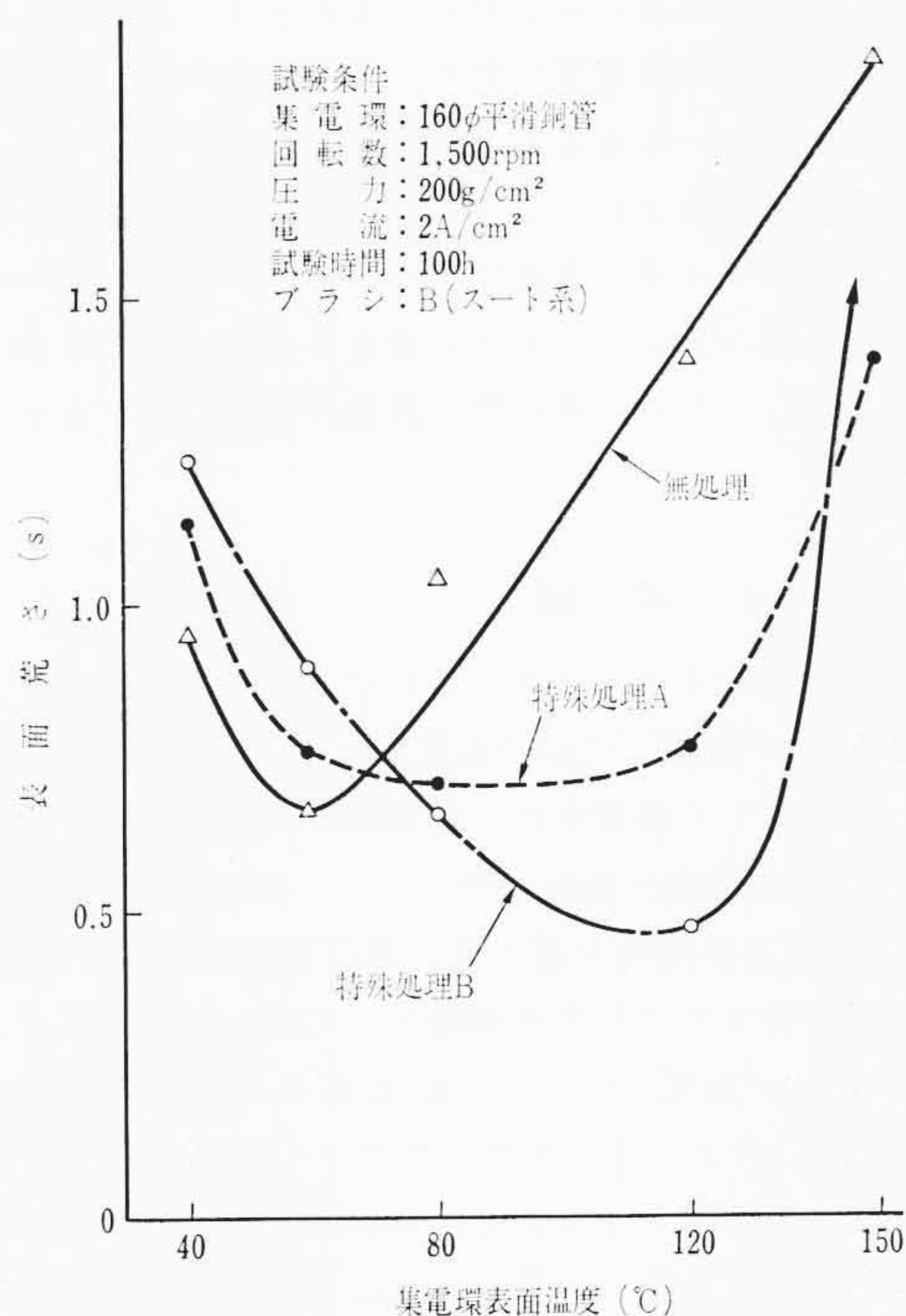


図8 特殊処理ブラシの荒損防止効果

表2 酸化皮膜の分析結果

種別	分析結果		皮膜厚さ (Å)
	成分	含有量 (%)	
下層	Cu ₂ O	65.8	210
上層	C	22.1	330
上層	SiO ₂ Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ CaO	12.1	—

に良好であるので、整流子の荒損を多少犠牲にしても油煙系ブラシを使用し得ざるを得ない現状にある。よって油煙系ブラシに特殊処理を施して潤滑性を与え⁽⁸⁾、摩擦係数を低下させた場合、荒損防止にどのような影響を与えるかを究明した。その結果は図8のとおりで、特殊処理を施し、潤滑性を与えることにより荒損の発生しにくい温度範囲が高温側に移動しかつ曲線の形がV字形からU字形に変化した。この曲線は研摩性の少ないスート系のAブラシに近似である。ただし150°Cの条件下ではAブラシに比較し荒損が発生しやすくなっている。

9. 酸化皮膜

整流子面における酸化皮膜はブラシの性能に重大な影響を与え、整流、条こん、摩耗と密接な関係があることは前にも述べたとおりであり、ブラシを取り扱ううえにおいて酸化皮膜はきわめて重要であるが、現在の段階では不明点が多く、ほとんど解明されていない現状である。本実験では電流による効果と温度による効果を分離して考えるため、集電環内部の電熱線により、集電環表面温度を変え、電流は2 A/cm²一定条件で実験したが、この実験の結果を中心にして、酸化皮膜を考えてみたい。

9.1 酸化皮膜の主成分

銅表面に生成される酸化皮膜については Brunt 氏および Savage 氏が発表しているが、この結果は表2のとおりである。

著者らのなかの一人の研究では、Cu₂O のほかに CuO も X線回折により検出されたが、以上の結果より考えると、銅表面に生成される酸化皮膜の主成分は Cu₂O であることは明らかである。

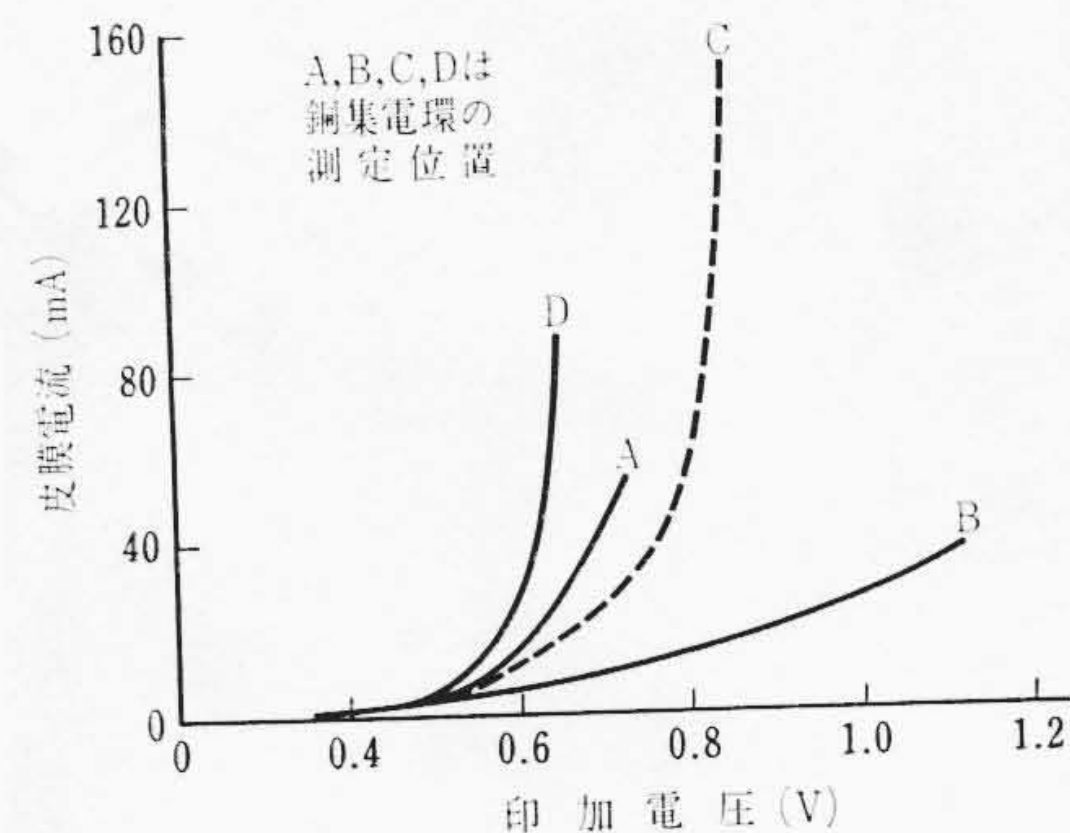


図9 印加電流と皮膜電流との関係

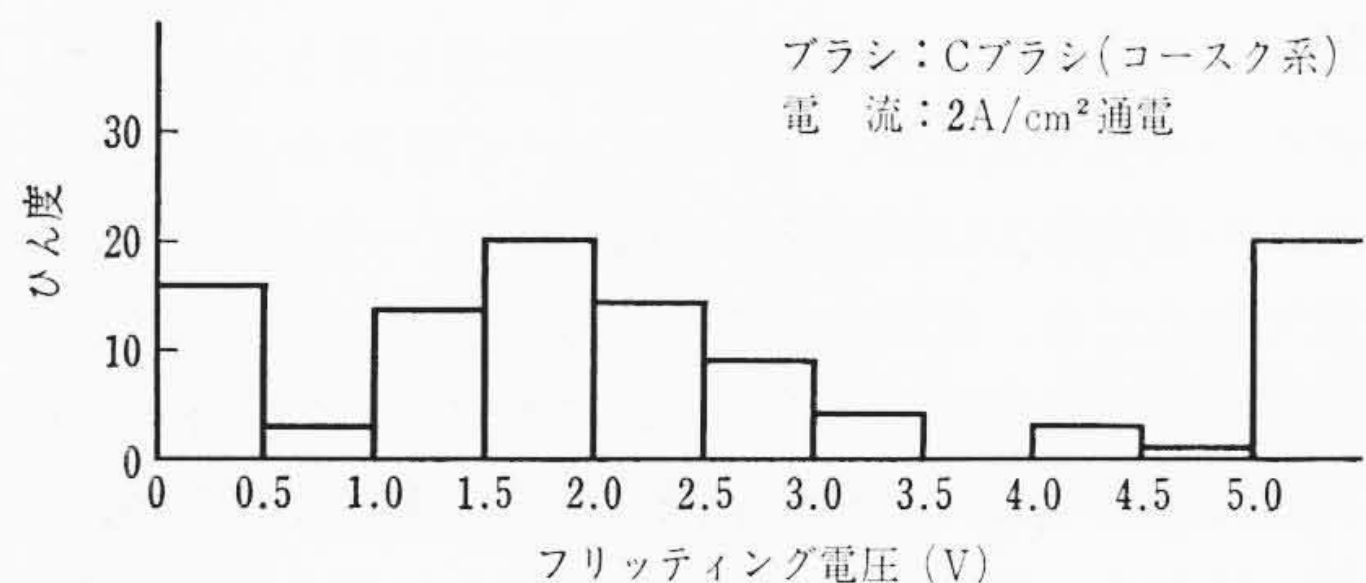
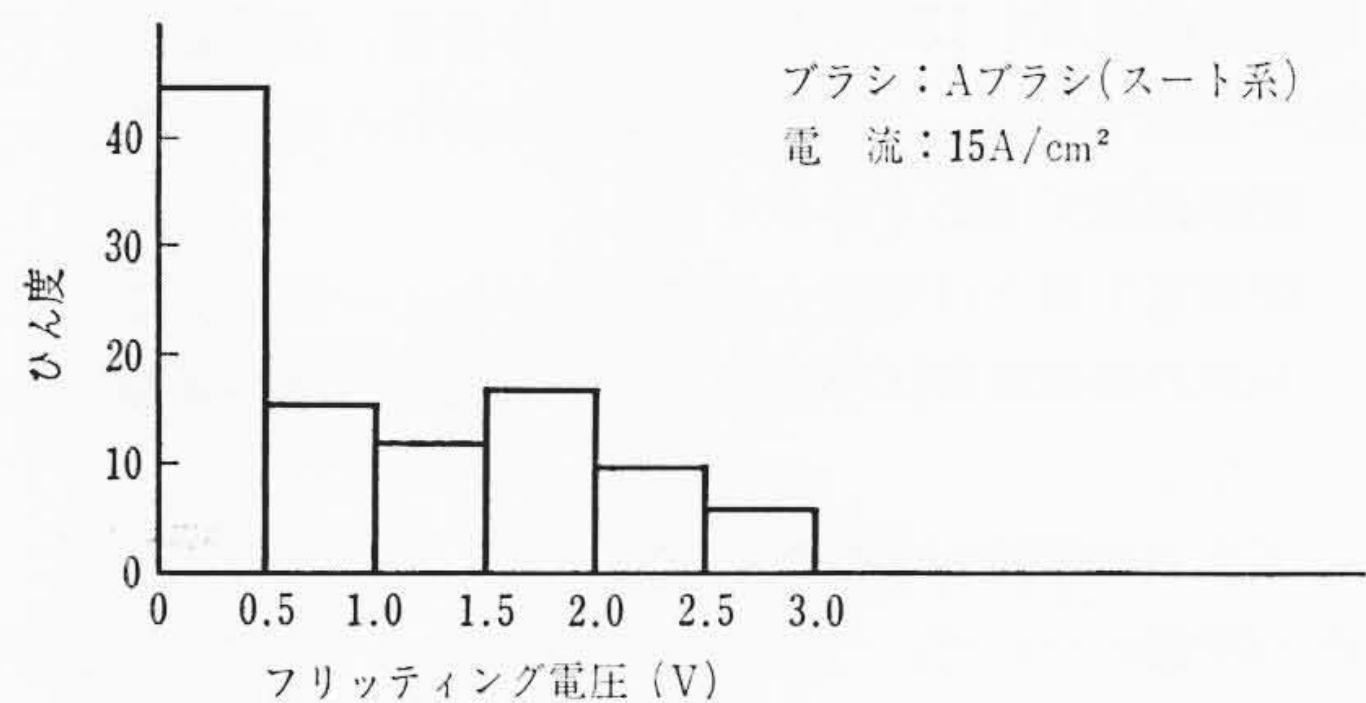
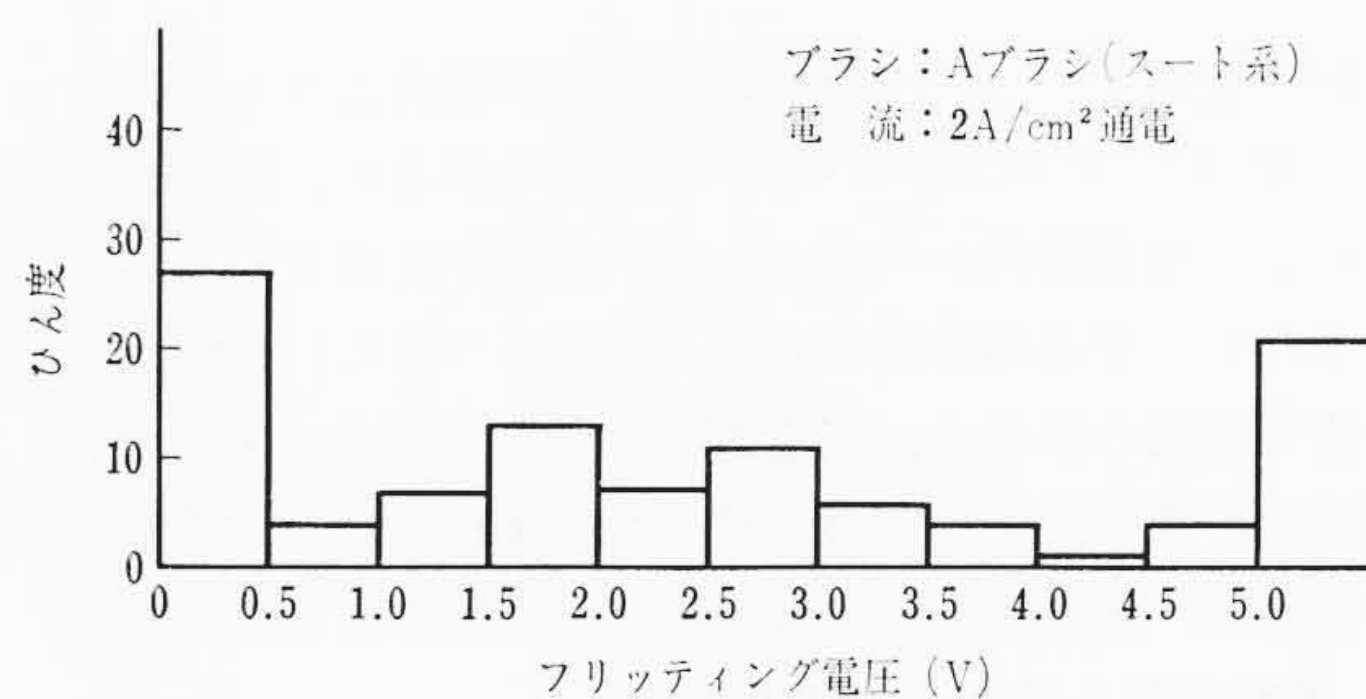


図10 フリッピング電圧測定結果

9.2 電流と酸化皮膜との関係

整流子面に生成される酸化皮膜抵抗は非常に高いが、印加電圧を徐々に高めると、ある電圧で皮膜が破壊する。図9はその実験例で、ある電圧において、皮膜が破壊され急速に電流が増大している（このように皮膜が電氣的に破壊される結果、流れる電流を以下単に皮膜電流と呼ぶことにする）。実際の直流機においても、皮膜が破壊され急速に接触電圧降下が低下する。このような現象をフリッピング現象と呼び、この値は皮膜の厚さおよび性質に関係する。

図10 ブラシ電流密度を変えた場合における銅集電環表面の皮膜について測定したフリッピング電圧⁽⁹⁾とひん度との関係を示したものである。図10より明らかなように電流密度2 A/cm²の場合よりも15 A/cm²の場合が、一般に低いフリッピング電圧で破壊されるひん度が大きい。これは15 A/cm²という高電流密度であるため、酸化皮膜が絶えず破壊されているため、電氣的に安定な酸化皮膜が生成されないためである。

9.3 極性による接触電圧降下

ブラシの接触電圧降下は極性により異なり一般に図2のように、

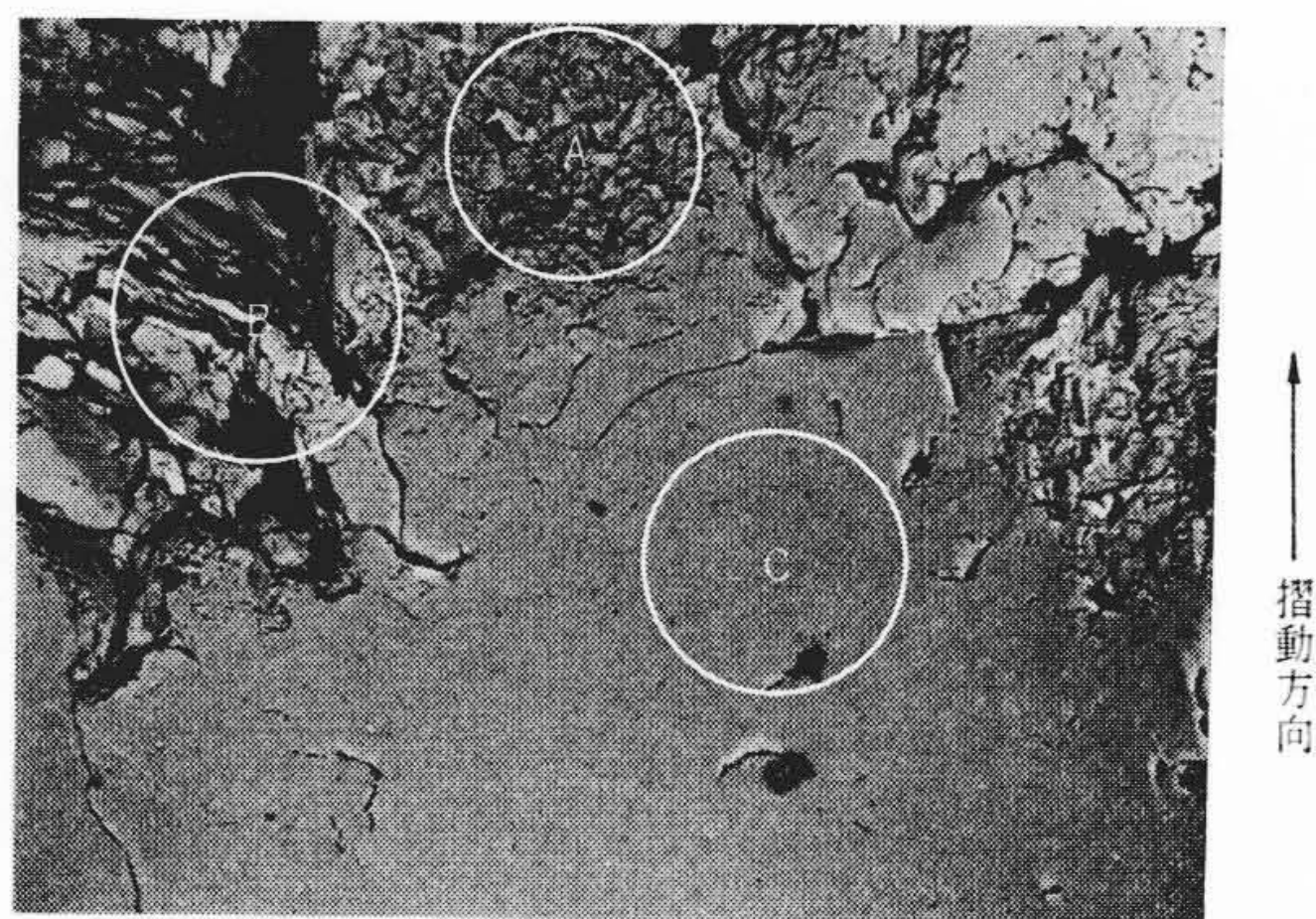


図11 ブラシ摺動面拡大写真 (4,000倍)

電流方向が整流子→ブラシのほうの方が逆の場合よりも高くなっている。この理由については、いろいろ考えられるが、筆者らの見解として次のような実験例から Cu_2O の半導体特性によるものと考えている。すなわち半導体特性を有する皮膜ができないカーボン集電環および銀集電環の場合は、電流方向による極性差は生じない。また高橋博士の研究では銅集電環の場合でも Cu_2O が生成されにくい真空中の場合は、極性差を生じないことを明らかにしている。

9.4 酸化皮膜と温度との関係

銅集電環表面温度を 150°C 前後に高めた場合、前述したように種種の現象が発生するが、このおもなものは次のとおりである。

- (イ) 接触抵抗が著しく小さくなる。
- (ロ) 接触電圧降下は電流方向に関係がなく一定である。
- (ハ) 平均的摩擦係数は小さくなるが、瞬間的摩擦係数は逆に高くなる。
- (ニ) ブラシの摩耗および銅集電環の条こんは増大する。

これらの現象について、つぎのような考察ができる。まず(イ)(ロ)の項であるが、 150°C の高温下では、酸化皮膜がうすくなり、かつ、 Cu_2O も高温のため、半導体的性質を失うことが考えられる。つぎに(ハ)項であるが、これについては次のように考えられる。すなわち本実験では終始 2 A/cm^2 という一定条件で、しかも低電流密度であるため、電流による皮膜破壊は少なく、したがって均一な皮膜が生成されやすいことは容易に想像される。また実際の場合は、高電流密度によって整流子面の温度が上昇するため、皮膜自体が不均一になる。したがって均一な皮膜のため、摩擦特性は安定化するが、一方、 Cu_2O と Cu との熱膨張の差異によって皮膜がハク離し、浮き上がるようなことになればその部分で摩擦は高くなり、この点で皮膜が削磨されることは十分考えられる。このように考えると、瞬間的に摩擦が高くなること、皮膜がうすくなることおよび(ニ)項のブラシ摩耗および集電環条こんが増大することも一応説明ができるように思う。

9.5 実機の整流子面皮膜

実機の場合は、高電流密度のために整流子面温度が高くなるので

本実験のように表面温度のみを高めたものとは、本質的に差異がある。実機の場合は高電流密度のため、縮流を生じ、皮膜が破壊されるので、かなり不均一になることが推定される。図11は 100 kW 車両用主電動機に使用されたブラシ面の電子顕微鏡写真を示したもので、A部はスート系、B部はコークス系ブラシに見られる組織で、これらに電流が集中したものと推定される。またC部は、ほとんど電流が流れないため、摩耗粉が組織の凹部に目づまりしたものと考えられる。

10. 結 言

以上の結果を要約するとつぎのとおりである。

- (1) 2 A/cm^2 通電下における荒損発生の難易は、集電環表面の温度によって著しく影響され、集電環表面温度が比較的低い場合 (40°C 付近) には荒損が発生しやすいが、温度の上昇に伴って、順次少なくなり、ある温度を越えると再び荒損が発生しやすくなる。いわゆるV字形またはU字形曲線として表わされる。
- (2) 2 A/cm^2 通電下における接触電圧は温度の上昇とともに低下し、 120°C 付近ではいずれのブラシも 0.5 V 以下になる。研摩性のあるスート系のブラシでは 0.1 V 前後になるものがある。
- (3) 摩擦係数は温度の上昇とともに低下する傾向を示し、 70°C 付近で低下が著しい。 120°C 前後で 0.1 以下となるが、荒損の増大し始める 150°C 付近では平均の摩擦係数値は小さいが、変動が著しく増大し、本実験では最高 0.3 という値が得られた。
- (4) ブラシの摩耗は温度の上昇とともに増大する。
- (5) V-I特性は集電環表面温度が低い場合には飽和曲線であるが、 150°C 付近では直線となる。
- (6) 特殊処理により潤滑性を与えたブラシの荒損防止効果は著しいが、本実験に関するかぎりでは、 40°C 付近の低温側における荒損防止効果は認められなかった。最も効果のあるのは、 $80\sim 120^\circ\text{C}$ の範囲である。 120°C 以上では再び荒損が増大するようである。

以上集電環温度のブラシ摺動特性に与える影響について述べたが多少なりとも参考になれば幸いである。なお、本研究を行なうにあたり、日立化成工業株式会社無機事業部長高橋博士、桜川工場佐藤部長、福田課長および日立製作所日立研究所一木博士よりご指導を賜わった。また桜川工場鮎川検査課滝田氏より種々実験についてご協力をいただいた。これらのかたがたに対し、深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) S. W. Glass: Iron and Steel Eng. 1937
- (2) 高橋、一木: 電気評論 Vol. 3, No. 1
- (3) I. W. Stanley, Brit: J. Appl. Phys. 1966 Vol. 17
- (4) 曾田: 摩擦と潤滑
- (5) F. P. Bowden and D. Tabon: The Friction and Lubrication of Solids.
- (6) 稲垣、伊藤: 炭素 No. 27 (昭35)
- (7) 武政: 電気ブラシの性能と使用法