ブ ラ シ 摩 耗 と 整 流 子 皮 膜

国 分 欣 治*

Brush Wear and Commutation Film

by Kinji Kokubu

(Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways)

(1) Brush wear depends upon current, brush pressure and characteristics of brushes in significant level, but commutator film and its temperature have only a little effect on brush wear.

(2) Commutator film could be estimated by fritting type, and fritting voltage which bears a close resemblance to Poisson distribution. Good film is A-type having a large mean value λ .

(3) Sparks cause film surface worse from type A to C, moreover, make increase the wear amount of brushes by dropping out of carbon particles.

(4) The amount of brush wear in rolling traction could be calculated by adding each wear rate in sparking, current and temperature.

1. は し が き

電動機保守の立場から、良好な整流子面はブラシ摩耗や整流によいことが経験的に良く知られている。しかし整流子面に影響をおよぼす因子は数多い上に交互作用を伴うものもあるので、極めて複雑である。そこで統計的手法によって、皮膜形成とブラシ摩耗に寄与する主要因子の解析を行なうと共に、両者に強い影響力を持つ火花の効果を皮膜の変質とブラシ摩耗形態の面から明らかにしようとしたのが本報告である。

2. 実 験 方 法

実験に使用した試験機は、模擬整流子(450φ, 幅 90 mm, 片数 280 枚)を同軸に 2 個取付け、その中間をベルト駆動する方式で、最高回転数 2,500 rpm, 試験回転数 1,000 rpm である。なお整流子面を外部から赤外線ランプで照射し任意の試験温度をとれるようにした。温度測定には整流子に埋め込んだ銅コンスタンタン熱電対を使用し、温度調節は電位差計式温度調節器によった。またブラシ電流はセレン整流器による直流であるが、そのリップルは 1% 以下である。また本試験機の整流子片は 4 枚一組で、これの片間に低圧の交流電圧を与えて、火花をブラシと整流子片間に発生させることが出来るよう

になっている。なお試験に用いたブラシの寸法は 12.5 × 50 × 50 mm でくさび(楔)形 2 分割リード付である。ブラシの材質は国鉄仕様書(昭和 34 年制定)の A. B. C. 種を使用した。主として Table 1 にあげる特性値の銘柄である。

整流子皮膜の厚さの測定は、フリットング電圧¹⁾から求めたが、その探極は白金ループが主体で Shobert²⁾の方法を参考³⁾にしたものである。

Table 1 Characteristics of Brushes

ブラシ品種 ブラシ特性	A	B	C
見掛比重 g/cm ³	1.61	1.73	1.70
電気抵抗 μΩ-cm	7,240	4,000	1,355
曲げ強さ kg/cm ²	224	358	388
ショア硬度 Hs	38	51	42
弾性率 kg/mm ²	555	732	666
摩擦係数 μ	0.28	0.28	0.26

3. 試 験 結 果

3.1 整流子皮膜に及ぼす諸条件の影響

整流子皮膜に影響する因子は多いが、極く共通的なもの

* 鉄道技術研究所化学試験研究室

のとして、ブラシ材質、整流子温度およびブラシ電流を、それぞれ3水準選んで試験した。即ちブラシ材質はA, B, Cの3種類、整流子温度は75°C, 95°C, 115°C, ブラシ電流は10A, 42A, 70Aである。尚ブラシ圧力は300 g/cm²一定とした。皮膜のフリッティング電圧は探極を正極性にして測定し、100個以上の測定値の平均値を採用した。平均値で皮膜を代表できると考えたのは、数多い皮膜のフリッティング電圧測定値からヒストグラムを作って分布型の適合度を検定したところ、ポアソン分布に近似することが確かめられたからである。又摺動接触の状態をR. Holm流に考察すると、通電点たるa-spot, 荷重をうけるb-spotの選択は2項分布的であって、しかもその確率は小さいと考えられるので、ポアソン分布形態になることが推定される。ポアソン分布であれば平均値で統計的な表示ができるわけである。

試験の結果を3元配置で分散分析すると、Table 2のようになる。F-検定の結果は整流子温度が1%有意で、ブラシ電流は傾向がある程度の関連性を持つが、ブラシ材質はほとんど関係がない様な結果になった。この主効果の関係をFig. 1の(1)にしめておいた。この図から

Table 2 Relations between film formation and various factors.

要 因	二乗和	自由度	不偏分散	F°	判定
ブラシ材質 A	3,147	2	1,543	0.70	
整流子温度 B	57,127	2	28,563	13.00	※※
ブラシ電流 C	8,961	2	4,480	2.04	
A × B	9,271	4	2,317	1.05	
A × C	74,477	4	18,619	8.47	※※
B × C	47,684	4	11,921	5.42	※
誤 差 E	17,574	8	2,196

Fig. 1 Influence of various factors on film formation.

温度と電流は皮膜に対して相反的な性質であることがわかる。また交互作用の内、ブラシ材質とブラシ電流が高度に有意で、ブラシ電流と整流子温度が5%で有意である。前者はブラシ材質によってその許容電流値がちがうことから理解され、特にB種ブラシの特性が高度有意性の原因になっていることがFig. 1の(3)から推察される。また後者は皮膜成長に対する温度と電流の相反性が単調なものでないことを示めていると思う。この関係はFig. 1の(4)に示めす通りである。一方ブラシ材質と温度の交互作用はFig. 1の(2)に示めされるように2折線は併行的で、有意差がないことを示めている。これは2要因の独立性を示めすものと考えてよい。

以上の実験から皮膜の形成に最も関係があるものは、整流子温度であって、ブラシ電流は皮膜を破壊する傾向があり、ブラシの材質はほとんど関係がないことが明らかにされたのである。しかしブラシ材質が無関係かという一般的ないえば反対で、荒損を起し易いものが使用されたなら当然高度の有意差がでるわけで、現車の場合問題になっているのが事実である。本実験に使用したブラシは、国産ブラシの中で実用面から定評のある一流ブラシであることを附記しておく。したがって上記の結果は正常運転時の現象として理解されなければならない。

3.2 ブラシ摩耗に及ぼす諸条件の影響

上記3要因によるブラシ摩耗を、皮膜測定と同時に測定した結果について、同様に分散分析するとTable 3が得られる。これの主効果および交互作用を図示したものがFig. 2である。主効果としてブラシ材質およびブラシ電流が1%で高度の有意性を示めている。両者が摩耗に関係があることは良く知られた事柄で、電流増加に比例して摩耗量が増加することは当然な事であるが、スト系系のA種に比較して、コークス系のC種の摩耗量が多いと言うことは現車一般の事実と必ずしも一致するものではない。後で述べるように多少なり共火花が発生するような場合にこの傾向があるのであって、現車でも

Table 3 Relations between brush wear and various factors.

要 因	二 乗 和	自 由 度	不 偏 分 散	F°	判 定
ブラシ材質 A	3,543,550	2	1,771,775	63.19	※※
整流子温度 B	90,352	2	45,176	1.61	
ブラシ電流 C	2,671,648	2	1,335,824	47.54	※※
A × B	101,981	4	25,495	0.90	
A × C	1,123,406	4	280,851	10.01	※
B × C	16,881	4	4,220	0.15	
誤 差 E	224,294	8	28,036

Fig. 2 Influence of various factors on Wear Rate of Brushes

整流が良好な場合にC種の方が摩耗量が小さい例が見受けられている。そこで実験条件が関係していると解釈してよいと思う。また整流子温度は Fig. 2 の (1) 及び Table 3 の数値から、有意差がなく傾向程度のものである。したがって材質および電流に比較すると、はなはだしく影響力が低いといえるわけである。今皮膜形成に関する上記の実験結果を想起すると、この場合には温度が極めて有意であったので、温度の有意性は皮膜の有意性におき換えることができる。そこで皮膜が持つ摩耗に対する影響力は傾向程度のものであるということが出来る。但しこれは通電時の時であって無通電の場合には Fig. 3 に見られるように十分有意性が認められている。このような皮膜が持つ一種の潤滑作用的なものは摩耗理論からも容易に推定し得ることである。

交互作用はブラシ材質と電流に5%の有意差で認められるが、主効果よりかなり低次である。この意味は前節で述べたように、ブラシ材質によって許容電流がちがうという特性から理解されよう。またブラシ材質と温度の

Fig. 3 Difference of Wear Rate by Film Thickness.

交互作用は皮膜の時と同様に有意差がなく、温度と電流の交互作用も認められない。ことに後者は Fig. 2 の (4) に見られるようにほとんど折線が平行的であるから、独立的な要素が高いと考えられる。

摩耗におよぼす因子で良く知られた重要なものにブラシ圧力がある。これを取り上げて実験するさいに、整流子温度についても、一般に摩耗因子に取り上げられているので、上記の実験を再び確かめる意味で、整流子皮膜の厚さをフリッティング電圧1.5~2.5Vに調節した状態で無通電の試験を行なった。上記電圧値を採用した理由は、国鉄の脈流主電動機の皮膜が大体この程度である点を考慮したものである。整流子温度とブラシ圧力に関する2元配置の実験は、B種ブラシで、温度60°C, 80°C, 100°C, 圧力150, 300, 450 g/cm²の3水準を採用した。この時80°Cでチャタリング音が発生したので、実験後ブラシ摺動面を鏡視したところ、細かい凹凸が無数に発生し、圧力が高い程この度合が高く屋根瓦状に見えるものもあった。ところが100°Cになるとチャタリング音もなく、平滑度がかなり回復している。こうした状態で摩耗量について分散分析した結果を Table 4 に示した。有意差が認められるものはブラシ圧力で、整流子温度には傾向的な関係があるだけであることが Fig. 4 から知られよう。

以上のブラシ摩耗に関する分散分析の結果から、摩耗に有意的な因子は、ブラシ材質、電流及び圧力で、温度は傾向的に作用する因子であることが明らかにされた。

Table 4 Effects of commutator temperature and brush pressure on brush wears.

要 因	二乗和	自由度	不偏分散	F.	判定
整流子温度 A	87,864	2	43,932	3.48	
ブラシ圧力 B	434,717	2	217,358	17.24	※
誤 差 E	50,431	4	12,607

Fig. 4 Wear Rate against Brush Pressure and Commutator Temperature.

Fig. 5 Change of Film Thickness and contact Resistance of Film by D. C. Sparking.

また通電摩耗時においては摩耗におよぼす皮膜の効果は、他の因子より低次で傾向的に作用する程度のものである。

3.3 ブラシ摩耗と皮膜におよぼす火花の影響

電動機保守の面から火花の影響は極めて大きいので、火花が整流子皮膜とブラシ摩耗に対してどのような影響があるかを調べた。

無火花時の皮膜は既に³⁾述べたように、亜酸化銅を主体とする酸化物型のA型が大部分で、Fig. 5 に示めすように電圧電流波形が垂直に立ち上がって絶縁物的である。この様な状態になっている整流子に、約3号火花を交流または直流で発生させ長時間運転を行なった。火花発生後15hrで上記A型は変質して亜酸化銅に導電性物質(グラファイト)を含むB形およびほとんどグラファイトのみからなるC型へと移行して行く。B形の波形はFig. 5 に示めすように、フリッピングを起こす前に微小電流が多少流れるもので、この皮膜に導電性のものが含まれていることを示めている。一方C型はフリッピング波形を示めさず、非線形な電圧電流特性を持っているもので、グラファイトが代表的なものである。50hr経過すると、直流火花の場合ブラシ材質と電流極性によってちがうが、見掛け上、火花量が減少し灰黒色の皮膜が光沢のある黒色となってくる。光沢がでるのは火花によって荒損した整流子面が、グラファイトによって埋められ、見掛けの凹凸度が減少したためと考えられる。この状態の皮膜はほとんどC型で、100mA時の皮

膜抵抗はFig. 5の(III)に見られるように、かなり高いヒストグラムが得られている。一方交流火花では見掛けの火花量が長時間後でもほとんど変化せず、皮膜が黒化することなく、B型波形の薄い皮膜抵抗がオーミックになる金属部分とからなり立つ荒損面になる。このように直流と交流とでは初めの火花番号が同じでも、長時間たつと見掛け火花数に差ができる一方、整流子面の様相がはなだしくちがってくる。

火花による皮膜の変質を図示したFig. 5 中左端の列はフリッピング電圧分布をヒストグラム化したもので、中央は皮膜フリッピング後の皮膜接触抵抗を100mAのところで求めたもので、右の列はフリッピング波形A, B, Cをモデル化したものである。また(I)の行は実験初期の無火花時、(II)が15hr後、(III)が50hr後の皮膜である。皮膜電圧分布では時間と共に高い方がなくなってくるのが目立ち、接触抵抗分布では高抵抗部分が増加して行くのがわかる。これから面の黒化過程が推定される。

火花とブラシ摩耗の関係を更に調べるため、整流子片間に交流電圧0~3.8V(R.M.S.)を掛けて、回転数2,000rpm、周速47m/sec、ブラシ圧力250g/cm²、室温12~25°Cで楔形2分割ブラシについて実験した結果はFig. 6の通りである。なおブラシはB種である。横軸に子片間電圧、縦軸にブラシ摩耗量を取り、図中に試験時間が数字で示めてある。この図からB種ブラシの摩耗量は2Vを少し越えたあたり約2.2V附近を境にし

Fig. 6 Relation Between Wear Rate of Brushes and Bar Voltage, Soot Brush is used at 12~25 °C, Humidity, 62~78%, 2000 rpm 47m/sec

Fig. 7 Wear Rate of Brushes against Testing Time at constant Bar Voltage. Tested at 2,000 r.p.m 47m/sec

て、相異なる2本の直線に支配されることがわかる。2Vの場合の火花は1~2号で、3Vで4~5号、3.8Vで7~8号であった。2.2Vのあたりが2~3号と推定される。以上の結果から火花の実害は火花号数の増加と共に増大することがよくわかる。これを摺動時間に対して引きなおすと **Fig. 7** が得られる。図中の数は子片間電圧値である。**Fig. 7** から時間に対してほぼ直線的な経過を採ることが明かである。また2V以下と3V以上とでは直線の勾配がはなはだしくちがひ、摩耗機構が別途のもので支配されている事をしめしている。

このようにブラシ摩耗は時間に対して直線的であり、子片間電圧に対しても、2Vを境にして単なる通電摩耗と火花摩耗とにわけて考えられるので、ブラシ品種間の差を見るだけなら試験時間の短縮と、測定点の小数化を行なっても目的は達せられよう。そこでA, B, Cの3品種で、30hr 摺動による試験の結果は **Fig. 8** の通り

Fig. 8 Comm. Bar Voltage influenced on Wear Rate of Brush Grades.

である。スート系ブラシのAおよびB種では **Fig. 6** と全く同様な結果が得られているが、コークス系のC種では2Vで既にかんりの摩耗量増加が認められる。2.5Vになると、荒損してきた面にグラファイトが埋め込まれた状態になってくるので、見掛け火花量も減少気味で摩耗量は比較的増加していない。皮膜の面から見ると、**Fig. 5** の(Ⅲ)の状態に近くなるので皮膜の接触抵抗が増加するため、火花電流が抑制されて、見掛け火花号数が減少するものと考えられる。なおA, B種ブラシの場合2.5Vでは3~4号火花であった。火花による実害面から見ると、子片間電圧で2.2~2.4V、火花号数で3号以下でないと、ブラシ摩耗量の増加から、電動機保守面で多大の困難と不経済性が発生すると思われる。C種ブラシで2.5V時の摩耗が比較的小さい結果が得られているが、現車の場合には温度条件や短絡電流の大きさ、ダストの影響など室内実験とちがうので、このような結果にはなかなかならないだろうと思われる。ブラシの摩耗形態はAおよびB種で得られたようなものであると考えてよい。

以上の摩耗実験において、どのような摩耗形態をブラシがとるかにについて、摺動面の顕微鏡観察を行なった。摩擦力を受けやすいブラシの入口側では、衝突の衝撃から端面に破損が発生したり、軟成分の摩損が目立ってくる。中央部でも軟成分の摩損が起って硬成分が浮き上がるようになる。またグラファイト配列の如何によっては衝突からクレパスのようなさけ目を生じたり、はく離を起こしたりする。硬成分で荷重を受け持つようになると、その周辺またはそれ自身にマイクロクラックを発生する。そしてクラックの進展から、粒子の脱落が引き起こされる。また Stick-Slip⁵⁾ 運動から、すべりと引掻きが起り摩擦振動を発生して、条痕を形成する場合もある。以上のように衝撃破壊、引掻き、摩損、はく離と粒

子脱落がブラシ摩耗の基本的な形態と考えられる、火花が発生すると、放電現象に伴う損耗凹痕のほか、上記硬成分に急熱急冷現象が加わるので、一種のスポーリングを起こしてマイクロクラック発生が頻度が増する。ある程度の急熱急冷に対してはブラシに抵抗力があるので、ある限度まではその負担に耐えられる。この限度を越えるとクラック発生になるので脱落摩耗が急増するようになる。上記実験では2.2V付近から摩耗形態が急変するので、このあたりがA、B種スート系の耐スポーリング限界と考えられる。スポーリングは集中電流密度に関係するので、接触点の数が問題になり、C種とA、B種では差があって、これらがC種の摩耗増と対応していると考えられる。この粒子脱落摩耗が火花摩耗の著しい特徴で、火花号数の増加と共に、エネルギーの増加からスポーリングが急増するのである。なお放電時の電子衝撃力もこれに加速作用をする。

ブラシ材質と摩耗の関係を上記実験およびその他から考察すると、先づブラシの摺動特性が良好でなければならない。これには摩擦係数および摩擦変動値が関係する。更にブラシの粒子結合度が高く、見掛け比重の大きいブラシの摩耗量が小さいことが摩耗形態から予測され、事実もその通りである。そこで耐スポーリング性の考察がブラシ製造面から重要であると考えられる。また電気抵抗がちがう品種間にあっては、火花電流の抑制効果と接触点の数の問題から、電気抵抗が高い方が有利である。しかしややもすると電気抵抗が高いものは銅が摺面に附着したりする傾向があり、本実験でも70A通電でA種ブラシに認められている。したがって材質の選定が特に必要である。

これまで述べたブラシ摩耗に関する室内実験の結果から摩耗量を10,000km走行当りのg数に換算すると、Fig. 9が得られる。図中(1)および(2)は3.2項で行なっ

Fig. 9 Relation between Wear Rate of Brush and effective Factors.

た3元配置の分散分析結果の内、電流および整流子温度に対する主効果から求めたもので、(3)は子片間電圧負荷による火花摩耗から求めたものである。ブラシ摩耗におよぼす因子は勿論多数存在するが、上記の3要素で考えた時にどのようになるかを考察してみよう。現車主電動機の整流状態が2号火花平均であるとする、曲線(3)から約0.5g、定格電流密度を10A/cm²と見ると、運行時の平均電流密度は7A/cm²程度が推定される。この値は曲線(2)で42Aであるから、ブラシ摩耗量は0.75g程度である。また整流子温度は90°C程度を予想すると、約0.25gの摩耗量が得られる。Table 3で整流子温度と電流には相乗作用がほとんどないので、両者は独立要因と考えてもよい。そこで3要因による摩耗の和をとると1.5gが得られる。ブラシの比重を1.6位に見ると、0.94cm³/10,000kmとなるので約1cm³と考えてよい。脈流電動機の場合、ブラシ接触面積は約5cm²であるから、10,000km当りの摩耗量は2mm弱、またMT52のように摺動面積が10cm²あるものは1mm弱が予想される。現車データを見ると、正常モータでは驚くほどよい一致が得られている。そこで摩耗量を3要因の加算から求める方式の確かしさが立証されたわけで、現車試験によらなくともブラシ摩耗量を室内試験から求めることができるわけである。

4. 結 論

- 1) ブラシ摩耗に有意な要因は、電流、ブラシ材質および田力であって、整流子温度は傾向程度である。また皮膜の効果も傾向程度である。
- 2) 摩耗量が少いブラシ材質としては、摩擦特性がよい上に粒子強度および見掛け密度が大きく、電気抵抗が高いものがよい。またその摩耗形態を考察した。
- 3) 火花はブラシ摩耗形態を変化させ、粒子脱落摩耗を急増させると共に、整流子皮膜をA型からC型へと悪化させる。
- 4) 皮膜形成に有意なものは整流子温度である。良好皮膜の電気特性はA型で、その分布はポアソンで近似され、平均値入が大きいものがよい。
- 5) 現車のブラシ摩耗量は、火花、電流、温度の要因別摩耗量の加算方式から、かなり正確に推定することができる。

5. む す び

本実験遂行に当って終始御指導を戴いた当所電力機械研究室長山村博士および化学試験研究室長赤羽博士に感謝すると共に、献身的な御協力を戴いた当室石川侃二氏に厚く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) R. Holm; Electric Contact Hand Book (1958)
- 2) Shobert II; A. I. E. E. Tech. Paper 54-91 Dec. (1953)
- 3) 国分; 炭素材料講演発表会予報 昭和36年12月

- 4) 国分; 炭素材料講演発表会予報 昭和37年12月
 - 5) Bowden F. P. and D. Tabor, The Friction and Lubrication of Solid (1954) Oxford.
- (昭和 39.4.11 受理)

炭 素 材 料 の 黒 鉛 化 度 と 被 削 性

柳 瀬 徹*

Effect of Graphitization Degree on Machinability of Carbon

by Tooru Yanase
(Showa Denko Co. Ltd.)

The purpose of the present study is to establish the standards for carbon products.

This paper reports the effect of the graphitizing degree on the machinability of carbons.

The test was carried out by machining eight grade of carbons of different graphitizing degree with milling machine.

The Results show that there exists a remarkable correlation between the machinability and the graphitization degree of carbon.

1. ま え が き

本研究は炭素材料の切削特性に関する一連①②③の試験研究の続報となるものであり報告①においては黒鉛質材料の切削特性を金属のそれと比較検討し、報告②においては人造黒鉛電極の切削上の問題点について検討し人造黒鉛電極内にもいわゆる削り難い電極の存在することを確かめ、その削り難い電極の発生する原因として炉内における黒鉛化温度のアンバランスに起因する黒鉛化度の相違が被削性に影響をもたらすものであろうと推定した。

今回の研究はその原因をさらに追求し併せて炭素材料にしばしばみられる研削性について微視的角度から究明することにより炭素材料の保有する研削性ないしは研削のメカニズムについて考察を加え被削性をもって炭素材料の黒鉛化度判定の一手段として利用し得る可能性についても確かめたく考えた。

すなわち被削性を左右するものとして黒鉛化処理温度の差により炭素材料中の非晶質炭素量に差が生じ、非晶質炭素量の差が被削性を左右するのであろうとの前提に

立脚することとした。

勿論被削性から推定される黒鉛化度の判定はX線回折等による2次元3次元的に結晶構造を直接確めるものではなく、非晶質炭素の保有するであろうと考えられる研削性を仮定した間接的な方法であることはいまでもないことである。

2. 試 験 方 法

2.1 試験方法の概要

黒鉛化度と被削性の間の相関についての解明の手段としては被削材として黒鉛化処理温度の異なる各種炭素材料を用意し、それ等のサンプルを特定工具により切削し工具フランク磨耗幅 $VB=0.4$ を寿命基準に採用することにより各サンプル毎の切削速度と工具寿命についての実験式から被削性常数を求め黒鉛化度と被削性の良否について判定する方法を採用した。黒鉛化度と被削性についての究明手段として被削性常数以外に各炭素材料サンプルをX線回折装置により結晶層面長さ C_0 , L_c の測定や光学電子顕微鏡による切削面を観察する直視的な方法も併用し被削性に差の生ずる因子についての究明もおこなった。

試験に使用した材料機器のうち共通である炭素材料サ

* 昭和電工株式会社