ブラシ組織の電子顕微鏡観察

国分欣治**・石川侃二**

Observation of Microstructures of Brushes by Electron Microscope

by

K. Kokubu and K. Ishikawa

(Railway Technical Institute of J. N. R. Tokyo)

As we found equi-centred multi-ringed bodies on each sliding surface of pitch coke brushes under an electron microscope, we tried to trace them to the origin in each manufacturing process and clear up their characteristics. As a consequence, we could confirm that they originated from vortex-like bodies which had been generated in flow layers of coal pitch coke through the coking process, but not in petroleum pitch coke; that these microstructures were formed with equi-centred multi-shells which were composed of fine carbon crystals and ordinary graphite grains in turn, whose orientations of crystalites on each shell were apparently perpendicular. Besides, dropping out traces of shells were observed easily on each polishing and sliding surface of brushes. Considering these structures and the others, then, we could estimate them to be hard or stiff and have high electric resistance.

Trying to investigate how influential the multi-shelled body had been on electric sliding contacts, we could notice that it played a significant role in the brush ability; commutation, damages of a commutator and brush wear, and that variances in brush ability depended upon its distribution on the sliding surface.

1. はし が き

炭素ブラシは物理特性が同一であっても、性能が異なることはよく知られた事実である。これは物理特性がブラシ素材に関する性質をよく表示していないか、性能を表示する特性を欠いているためである。一般に物理特性はブラシ素材に対する平均的な性質であるのに、ブラシ性能は整流子またはスリップリングとのすり接触から派生する現象により判定され、接触面の状態、材質特性、雰囲気、機器の特性と運転条件などから規定されるので、単なる物理特性からブラシ性能を表示することは本来困難な事柄である。すり接触の特徴はHolm⁽¹⁾やRabinowicz⁽²⁾らの研究から、接触時の真実接触点の数や面積は極めて小さいので、接触面の凹凸や摩擦および電気特性に関係を持つ微細構造が大きな影響を与えることが明白である。したがってブラシ材質の規定は一般物理特性による反面、特異的な微細構造面からもなされる必要が

ある。一方ブラシ性能のばらつきを物理特性面から究明し得ないことは経験に徴しても明らかで、接触面における微細構造の不均一分布に求めざるを得ない点がある。筆者はこれまですり接触の立場から、ブラシしゅう動がstick-slip運動をとることや、火花によるブラシ摩耗量の増加は粒子脱落摩耗であること、通電に当ってはフリッピング痕が発生するなど、ブラシの損傷を顕微鏡観察⁽³⁾によって明らかにしてきた。今回ブラシ素材に関する微細組織の研究が必要であることを痛感して、ピッチコークス系ブラシにつき電子顕微鏡による検討を行なった。この方面の研究はこれまであまりなされていなかったようである。その結果ブラシ素材中には径約数 μ の同心円からなる多重環構造体はかなり認められ、これは多重球殻構造をとって原料の石炭ピッチコークス中に内在することが判明した。またこれがブラシ性能におよぼす影響をすり接触特性面から検討して、この量および分布の如何がブラシ性能に影響するところ大であることを明らかにした。

* 炭素材料に関する第18回学術研究発表講演会発表、昭和40年12月3日（東京）

** 鉄道技術研究所

2. 試料および実験方法

試料は国鉄納入5社のピッチコークス系D種ブラシを使用した、その特性値はTable 1に示す通りである。

Table 1 Physical properties of test brushes

Brands of Brushes	Apparent Density g/cm^3	Specific Resistance $\mu\Omega\text{-cm}$	Transverse Strength kg/cm^2	Friction Coefficient μ
A	1.75	1.160	290	0.25
B	1.67	1.660	370	0.27
C	1.71	1.150	390	0.25
D	1.65	1.210	360	0.27
E	1.65	1.620	280	0.27

このブラシのすり接触面と素材研磨面を試料としたが、ブラシのすり面は温湿度自動調整付すり接触測定器⁽⁴⁾によって作成した。測定器の銅スリッパ径は160φ、600 rpm、ブラシ圧力1.6 kg、ブラシ寸法10×16×22 mm、雰囲気温度32~40℃、相対湿度15%、しゅう動時間50h以上で通電(D.C. 20 A/1.6 cm²)、無通電において実験した。

電子顕微鏡のレプリカはすり面をそのまま数回ビオデンで付着摩耗粉を除去した後一般レプリカを作り、これにクロームとカーボンを約45度の方向から真空蒸着するフィルムレプリカ方式を採用した。ブラシ素地の場合にはエメリ紙でよく研磨した後アルミナでバフ研磨を行ない、最後はアルコールによるバフ研磨仕上げをした後、上記のようにレプリカ作成をした。測定は日本電子製スーパースコープで行ない、直接倍率1,000~2,000倍を適宜引伸して観察したが5,000倍前後が多い。

3. 実験結果

3.1 ブラシすり接触面上の多重環

Photo 1はA銘柄の槽内温度40℃、湿度15%、600 rpm、20 A/1.6 cm²、しゅう動時間64hで得られたものであるが、このときのブラシ平均温度は75℃、リング温度は66℃であった。Photo 1-(a)の中央上部に径約4 μmの同心円からなる三重環構造体と、その左肩に不鮮明ながら小型の二重環が認められる。すり方向は矢印のように斜上方に向かい、この痕跡条痕がかすかに認められる。素地の中には集団をなして屋根瓦状に配列した結晶の突起が認められる。これはすり面とある傾斜方位をとる黒鉛結晶の露頭とも言うべきもので、しゅう動に伴う衝突力を受けて結晶が劈開したものと考えられる。レプリカのシャドウはすり方向から行なっているのですり方向に近い方が蒸着物が多くなるので黒くなり、反対側は影になるので色が薄くなる。小突起の下方が黒くな

(a)

(b)

Photo 1 A sliding surface of brush brand A with current 20 A/1.6 cm²

り上方が白色であるのはこのためである。黒色部の中に比較して白色部の方が広いので、この部分が劈開面であると推定したのである。電子顕微鏡の倍率が高く、面の研磨が上手に行なわれておれば、より鮮明な像が得られるので劈開面であるか否かの判定ができるであろうが、この写真からは推定の域をでない。Fulam⁽⁵⁾らの文献と対応させて考えれば劈開面とみる考え方の方が歩がある。すなわち露頭結晶子の傾斜角がすり方向とある鋭角値をとる場合に結晶の劈開が起ると表現することができる。このさい角度が小さ過ぎれば劈開は起り難くなり、

大き過ぎて直角に近くなれば投影図形が小さくなって写真に捕え難くなる。またこの写真中に平滑面が諸所に認められるが、これは結晶方位がすり面にほぼ平行している部分と考えた方がよい。劈開面の発達した摩耗片が付着配向して平滑部を形成することも考えられるが、一段レプリカ作成時に数回空取りしたビオデン膜に摩耗粉の付着が見られるからである。

Photo 1-(b)には径約5 μ の四重環のほか、すり方向にはほぼ直角なクレパスのような黒い線や、白黒が対になった微小三角点が認められるが、これも上記同様傾斜方位をとる結晶の露頭である。粒子脱落痕も認められる。

以上の点からブラシすり面は一見平滑に見えてもかなりの凹凸があり、その上多重環のような特異構造も存在することが明らかになった。これまでピッチコークス系ブラシに多重環構造体が存在すると言う報告例がないので、素材に予め存在するものか、通電などすり接触によって発生するか不明である。そこでまず無通電ブラシのすべり面を作成したが、その条件は槽内温度32℃、湿度15%、ブラシ圧力1.6 kg/cm²、600 rpm、52h しゅう動後のブラシ平均温度54℃、リング温度49℃であった。Photo 2はその一例であるが、Photo 1に比較して面の様相がかなり異っており、その傾向は2-(b)に著しい。2-(a)の中央には三重環が認められるほか、左上には多重環の脱落痕と思われる同形の凹痕があり、右下には内環が脱落した多重環がある。これらの観察から多重環は球殻構造であって、素地との結合力や同心殻層間の結び付きも強固でないことが推定される。2-(b)では二重環構造が認められるほか、すり方向に直角なクレパスのような発達が見られるが、全体が熱腐食面のような外観を呈している。これは配向した結晶子面に見られるピットと面の様相から推定したもので、無通電すり面の特異面である。

Photo 3に無通電すり面のパノラマ写真をあげたが、写真左側には多重環の脱落痕、右側には円形の凹痕とこれを取り巻く火口壁のような斜面、中央部には条根に直

(a)

(b)

Photo 2 A sliding surface of brush brand A with no current

Photo 3 A sliding surfaces of brush brand A under no current

角な突起が多数認められる。脱落凹痕面には結晶子に見合う多数の平滑面が認められるが、これは多重環を取り巻く素地の黒鉛結晶子の大きさや方位に対応するものである。また条痕をよく見ると条痕の濃淡や巾の広狭に気付くほか、中断または偏位する様相が判る。したがって接触時の振動や接触点の移動、さらに衝突の様相などを推定することができる。ブラシに対応するスリップリング側のすり面の一例はPhoto 4 にあげる通りで、Stick-Slip 運動を物語るクラックがすり方向と直角に成長しているのが判る。

以上のようにすり接触面の観察から、多重環は通電の有無に関係なくすり面上に見出される点を考慮すると、通電すり接触から派生したものではなく、素材に内在する見通しが高くなった。

Photo 4 A sliding surface of slip ring

3.2 ブラシ素材と多重環

ブラシ素材中の多重環検討に当って、摩耗粉の目づまりを防ぐためにアルコールによるバフ研磨を実施した。なお試料は Table 1 の 5 銘柄であるが、銘柄 B を除いて他の銘柄にはすべて多重環の存在が明らかにされた。その代表例をあげると Photo 5 の通りである。5-(a) には 4 個の核を持つ複合環に 1 個の環が連結した連結複合環が下部に認められる。この大きさは $21 \times 9 \mu$ を越えるもので、粉碎工程を受けたにもかかわらず、その形が保存されている点から環構造の剛性がかなりのものであることが推定される。また環を形成する黒鉛は微細型と細粒型とが交互に繰返され、前者は求心的な方位をとり後者は円周方位型である。一方素地黒鉛との比較から環構造体の低黒鉛化性が推定されるほか、上部の核脱落痕跡の存在から素地との結合が比較的弱いことも推定され

る。あたかも鉄鋼中の非金属介在物のように研磨の過程またはすり接触中に Photo 3 のように脱落する可能性をしめしている。5-(b) は独立多重環であるが、5-(c) 共々微細黒鉛の心核のみからなる環の存在をしめしている。これらの核の周囲には円周方位を持つ結晶子が存在している所から、環形成の少年期のものと推定される。また 5-(d) の下方に、中心核がこれまでの微細型と異った結晶性のよい粒子から成り立つ多重環が認められ、上方の環と対称的である。なお同心環の構造が両環ともに結晶性のよい粒子から成り立っているのも特徴的である。多重環の多くは微細型であるがこのように結晶度の高いものもあるので成因は色々あると予測される。銘柄差は上記のように多重環の種類と環形成の発達度の差異にあらわれるが、その分布と量のちがいが印象的であった。B 銘柄の写真は割愛したが、素地結晶子の発達がよい上に、スートと思われる粒子集団が存在していたことは、他銘柄と異なる点であり印象的である。

以上の観察から多重環は A 銘柄のみでなく石炭ピッチコークス系ブラシの共通特性であって、環の種類や量の差は原料コークス自体の差にもとづくものと推定される。

3.3 多重環の成因と特性

ブラシ黒鉛化品に認められる多重環の成因を確かめるために製造工程を遡上って追求した。A 銘柄の一次焼成品の組織は Photo 6 に示す通りで、長大な複合連結環が彎曲状態で認められるが、環の組織は目づまりのため不鮮明である。素地の結晶は未発達な様相をしめすほか、クラックが目立っている。

次いで成型品を検討したが、結合剤が研磨時に溶融して面を覆うために多重環の存在は輪郭を推定し得るが、確認には到らなかった。

さらに石炭ピッチコークスについて検討し、代表例を Photo 7 にあげた。このうち (a), (b) は中ピッチ、(c) は高ピッチの縦断面組織である。多重環の存在は明瞭に確認できるが、組織の詳細は目づまりのため不鮮明である。多重環の周囲にはいずれもピッチコークス特有な流れが認められるので、環の生成はピッチがコークス化するさいの流動過程において、渦生成類似の機構により同心の多重環がある時間経過を経て形成されたものと推定される。時間経過と流動体の性質如何によっては、各種の環が心核から連結複合環まで多種類に形成されることが推定できる。またこのさい中心核となるものはピッチ中に先天的に存在する遊離炭素分が低級分子を結合剤として形成されるか、Photo 5-(d) で指摘したように、流動過程に発達したゲル状の高分子成分が中心核となる場合も考えられる。一般に渦の中心核には周囲流体より密度の高いものがある可能性が多いので、この場

(a)

(c)

(b)

(d)

Photo 5 Examples of multi-ringed bodies

合も同様と考えられる。7-(a)の右上部には心核群が認められ、独立環周囲の流れの粒子配位が環に垂直である点が注目を引く。7-(c)左上部の二重環と7-(b)の多重環とは様相が異なるので、前者は中心核が結晶性のよい黒鉛からなる5-(d)に対応するものと思われる。

同心環の構造については、これまでも触れてきたが、求心方位環と円周方位環の交互繰返しが多い。このさい前者の結晶子は微細且緻密であるが、後者のそれははるかに発達が良い。環の厚みは生成条件によって異なるが、求心方位環が厚い場合の例が多い。厚みの如何では5-(d)に見られるように円周方位環のみのような例もあれば、5-(b)のように求心方位環がほとんどといった例もある。しかし両者の合成によって形成されていると考えた方がよい観測例が多い上に、環の脱落し易さを見ても

Photo 6 Primary heat treated structure of brush brand A

(a)

(b)

(c)

Photo 7 Microstructures of coal pitch coke

結合力が弱い点が明らかなので、合成構造と考える方が合理的である。勿論厚さは周囲条件から決定される。

多重環の形状については、切断面の直角断面をとって検鏡しても、同心多重環しか見当らず、脱落痕の形状を見ても球殻体であることを否定する資料はない。これらから多重球殻体であると推定して誤はない。その寸法は連結複合環のように長いものもあるし、Photo 8 のようにずんぐりした複合環もあって多様である。

多重環の特性についてはこれまで述べてきたように、環形成の黒鉛は微細で黒鉛化度が低いと推定される上、粉碎工程後でもその形状を保つ点などから硬質で剛性に富むと推定される。数百枚の電顕写真中から破碎環が得られたのは Photo 9 に見られるもので唯一の例である。これのブラシ銘柄は D であった。また電気特性を考える

Photo 8 Multi-ring complexes

と、一般的に微細組織で黒鉛化度が低いと予想される上に、結晶方位が直交する同心環構造になっているので、環体自身の電気抵抗が高いばかりでなく、素地との接触抵抗もまた大きいと推定される。

多重環の分布について金属顕微鏡を用いて石炭ピッチコークスを検討した所 Photo 10 が得られた。見られる通りかなり多量の多重環がピッチコークス中に存在することが明らかである。また黒鉛化品や一次焼成品中の分布も決して均一なものではなく銘柄差も存在する。

以上のように多重環は石炭ピッチコークスがコークス化するさいの流動過程中に乱流に基づく渦成分類似の過程を経て形成されるという推定がなされたが、B 銘柄のように環の存在が認められないものもある。そこで石油コークス (G. L.) を検討したが、Photo 11 に見る如

く多重環の存在はない。その組織は石炭ピッチコークスと比較して、流動模様が極めて屈曲性に富むことが (a) で代表され、粒子の発達のよさが各写真からうかがわれる。このようなコークス間の大きな差は、原料と製法によることと推定されるが、今後さらに検討を要する問題である。B 銘柄に環の存在が認められない理由は、石油コークスを使用したためと推定され、素地の結晶粒度が他銘柄と異なる点からもこれが裏付けられている。

4. 考 察

ピッチコークス系ブラシの多重環構造を明らかにするために電子顕微鏡観察を行なったが、より構造を明らかにするためには倍率の引上げが必要であり、これに伴ない研磨方法の改善やシャドウイングの工夫も必要である

Photo 9 A Fragment of multi-ringed body

(a)

Photo 10 A Distribution of multi-Ringed Bodies of coal pitch coke under a microscope

(b)

Photo 11 Micro-structures of G. L. coke

Photo 12 A Microstructure of multi-ringed body

直接倍率を7000倍に引上げた例をPhoto 12にあげたが、求心方位環と円周方位環の構造がいくぶんはっきりしてきたがまだ不充分である。

多重環の特性については電気抵抗が高いと推定を下したが、これは組織が微細である点から低黒鉛質炭素と考えられる点と、結晶方位が互に直交する環構造であるからその境界層には結晶不整が多いと考えられる上に環の脱落が起り易い点から接触抵抗が大きいと判断されたためである。また剛性に富んで硬質と判断した理由は炭素質に近い組織と破碎工程を経てなお破碎環が稀にしか観測されない点からである。硬度が高いものはもろいと言う一般通念があるので硬いが剛性に富むと言う性質は一見奇異である。しかし物性はすべて比較の表現であるから、鉄鋼中におけるソルバイト組織の鋼が剛性に富んで且比較的硬度が高い例もある。硬質であるか否かの直接的な測定は微少硬度の測定によるほかないが、数μの本体でしかも多重環から構成されているとするとその測定も容易ではない。よほど試料に恵ぐまれないと測定不能である。そこで電子顕微鏡的視野の組織と硬度の関係について広く検討すれば、比較値としての硬度は推定できと思う。今後さらに検討の必要がある。

多重環の特性を次のような(a)電気抵抗が高い、(b)硬質で環の脱落が起り易い、と考えた時にブラシ性能に及ぼす影響について考察してみよう。

すり接触時の真の接触面積は小さく、その数も少ない上に、通電点の数は皮膜状態にもよるが一般に荷重負荷点の数より少ないことが知られている。また荷重負荷点の総面積を A_b 、硬度を H 、接触圧力を P とすると、三者の関係は $P=HA_b$ であるとHolm⁽⁶⁾により与えられている。したがって硬度と荷重負荷点面積は反比例の関

係にある。また摩耗における一般通念から組織中の硬成分の摩耗量は素地よりも小さいから、硬成分の存在はこの個所での接触確率が高くなることを意味している。このさい接触面積は上式により減少するばかりでなく、接触点の数も硬成分の変形率が小さい理由から減少する方向にむかう。多重環の役割は特性(b)によって硬成分の仕事を演ずることになる。さらに通電点はこれらの接触点の中から選択されることになるが、このさい多重環は特性(a)から通電点となる確率は小さい。したがって通電点の数はさらに減少するので、通電個所での電流集中が過度になることは避けられない。この場合ブラシ性能の低下は明らかである。一方相手金属側の軟化や損傷も発生する。さらに多重環の存在が多量であれば上記の傾向が顕著になるので荷重点における平均応力は著増する。しかもブラシは振動を伴うものであるから両者の兼ね合いから極端な局部応力集中を発生する可能性が多い。この場合整流子側には各種の障害が発生する(Photo 4はその一例)。

また特性(b)の環の脱落性は、破碎され難さと伴って、脱落しても接触面間にある時間、形を保って存在するために接触不良の原因となるほか、すべり摩擦形態をころがり摩擦へと転化する。このような現象は摩擦変動増加の原因になり整流悪化とつながるものである。

一方ピッチコークス系ブラシ使用の整流子面は、使用日数の経過と共に面の黒化を発生し易い。黒化現象はグラファイトの付着であるから、放置すると整流悪化につながるために除去する必要がある。この作用をブラシにもたせたものが研磨性である。しかし研磨性についてはこれまで実体不明であるばかりでなく、測定法もない単なる抽象的な概念に過ぎなかったように思われる。勿論黒鉛化不良であったり灰分が多ければ研磨性が大きいと言われているが、これらは異常ブラシに属することであって、黒鉛化も良好であると言うピッチコークス系ブラシで、整流子荒損や整流悪化がばらつきとして存在するときの説明にはなり難い。多重環の存在が明らかになりその特性に対してもかなりの推定が成立つ現状においては、ばらつきや研磨性の問題をこれと関連させて考えることは当然な成り行きである。現車試験結果と対応させて5銘柄の特徴を述べると、A銘柄は荒損の傾向があるほか、異常摩耗を発生することがあり、B銘柄は整流子の黒化傾向を持つほか、摩耗量が多い傾向がある。C、D、Eの各銘柄は両者の中間型である。A銘柄は写真でも見られるように多重環が比較的大形であるばかりでなく、その量も多い。一方B銘柄には多重環がない。B銘柄の黒化傾向は摩耗量が多いことと結びつき、研磨性不足傾向はあらそえない。A銘柄の整流不良や荒損を、多

重環の量と特性に結びつけばこれまで述べてきた点から明らかに理解できるし、研磨性過多と呼ぶことが出来る。また異常摩耗を発生し易い点も多重環と素地との結合が平均状態より弱い場合には脱落摩耗形態が促進される点から推測することができる。このさい整流悪化が促進することも見逃がせない。

以上の点から多重環が研磨性と関連があり、少量且分布が良好である場合には好結果を生む。一方全然ない場合には研磨性不足から摩耗量を増加する。さらにまた多重環の分布如何がばらつきの原因になることが指摘される。これを広く言えば、組織のばらつきが性能のばらつきに対応していると言ひ得る。これまで物理特性面からのみばらつきが論ぜられていたが、その値は平均値であるばかりでなく、すり接触本来の現象を突いていない点があったと言える。この意味からブラシ組織の研究が必要であるが、これも緒についた時点と言えるに過ぎないので今後の研究がさらに必要である。

5. 結 論

ピッチコークス系ブラシ組織の電子顕微鏡観察を行なつて、次の結果を得た。

- 1) ピッチコークス系ブラシには径数 μ の多重球殻体があり、ときには複合型や連続型をとり 20μ を越えるものもある。
- 2) 球殻体は原料石炭ピッチがコークス化する流動過程で形成され、石油コークスには存在しない。
- 3) 球殻体は黒鉛化度の低いものが多く、緻密且硬質で素地から脱落し易い上、電気比抵抗が高い。

- 4) 球殻体の量と分布はすり接触と多大な関係があり、研磨性やばらつきの有力因子である。

6. む す び

本研究遂行に当り試料の提供その他の御協力を得た日本、東海、日立の各社に厚く御礼申し上げます。

文 献

- (1) Holm, R.; Eine Bestimmung der wirklichen Berührungs-Fläche eines Bürstenkontaktes. Wiss. Veröff. Siemens-Werk, 17/4(1938) 43
- (2) Rabinowicz, E. and D. Tabor; Metallic Transfer between sliding Metals; An autoradiographic Study Proc. Roy. Soc., Lond. A 208(1951) 455(60, 151, 217, 217)
- (3) 国分; Microscopic Observation on Sliding Surfaces of Carbon Brushes; Symposium On Carbon, Tokyo July 1964
- (4) 国分; ブラシのすり特性測定法, 学振 117 委, 117-93-B-1
- (5) Fukam, E. F., and R. H. Savage; Carbon Film Formation and Commutator Brush Wear as revealed by the Electron Microscope, J. Appl. Phys., 19(1948) 654
- (6) Holm, R.; Electric Contacts Handbook (1958) p. 35

ニュース

第8回国際炭素会議の発表論文

6月18日から23日まで、アメリカのパファロー市で開催される第8回国際炭素会議に発表申込みをされた論文数は合計184篇にのぼり、その国別内訳は次記のとおりである。

記

フランス 25, ドイツ 7, イギリス 30, 日本 18, ソビエト 2, 北アメリカ 91, ベルギー 4, エジプト 1, インド 1, スイス 2, ポーランド 2