

電気接点表面における被膜形成メカニズムの解明

Elucidation of film formation mechanism on the electric contact surfaces

福井大・工（院）*藤江 晃平 福井大・工（正）本田 知己 福井大・工（正）今 智彦

Kohei Fujie, Tomomi Honda, Tomohiko Kon

University of Fukui

1. 緒言

自動車産業をはじめとするあらゆる産業分野の電動化において、電気接点は必要不可欠な部品となっている。電気接点には、リレーなどの開閉接点やモータなどの摺動接点などがあるが、モータでいえば、自動車 1 台あたりの搭載数は、大衆車で約 50 個、高級車では 130 個に上り、今後も搭載数の増加が見込まれている¹⁾。したがって、コストや信頼性の面から車載モータの 90 % 以上に用いられている有接点 DC モータを研究対象とした²⁾。

有接点 DC モータは、固定電極（刷子）と、回転電極（整流子）が摺動しながら接触する機構を有している。摺動部では、接触により固定電極が摩耗することで回転電極表面に黒鉛が主成分の被膜が形成されるという特徴がある。回転電極表面における被膜形成過程は機械的な要因に加えて、電気的な要因の影響も大きく受けるため非常に複雑であり、科学的根拠に基づく評価手法が存在しない。そのため、有接点 DC モータはこれまで経験則によって設計・開発が行われてきた。そこで本研究では、回転電極表面における被膜形成メカニズムを解明することで、トライボ設計指標を提示することを目的とした。本報では、実機試験により得られた電気接点表面被膜の観察、被膜表面の黒鉛の結晶構造の分析および被膜内介在物の元素分析からその形成メカニズムを考察した。

2. 試験方法および供試材料

Figure 1 に軸方向および軸に垂直な方向の有接点 DC モータの回転電極と固定電極の摺動部の概略を示す。回転電極にあるスリットは整流部と呼ばれ、電流の向きを切り替えることでモータを連続して回転させる役割をもつ。試験装置は、有接点 DC モータを最大同時に 10 個回転させることができる実機試験機を使用した。試験機は、高速バイポーラ電源および有接点 DC モータで構成されており、電源の電圧を制御することでモータの回転速度を変化させることができる。モータへの負荷方法を Fig. 2 に示す。自動車の小型電装用途で一般的に使用される駆動条件を想定し、5 mN・m のトルクがかかるように、軸先端にファンを取り付けて負荷がかかった状態で試験を実施した。本試験では、温度 $22 \pm 3^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 10\% \text{RH}$ の環境条件で、自動車に搭載されている鉛蓄電池の電圧である 13.5 V で回転させた。試験時の回転条件は、自動車の小型電装用途で一般的に使用される駆動条件を想定して Fig. 3 に示すような 1 サイクル 5.0 s 間の回転動作を繰り返す条件で試験を実施した。試験時間は固定電極の寿命を基準に、初期 (3 h)、寿命の 1/2 (31 h)、寿命 (62 h) の 3 条件とした。試験終了後、回転電極表面の被膜について光学顕微鏡による観察、顕微ラマン分光分析装置による表面分析、透過電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分析装置 (TEM-EDX) による断面観察・元素分析を行った。本試験で用いた有接点 DC モータの摺動部の材質はそれぞれ、回転電極は Cu-Sn 合金、固定電極は、Cu と C の焼結材である。回転電極表面は、曲面部 (Curved area) および整流部 (Slit area) の 2 箇所に分けられる。

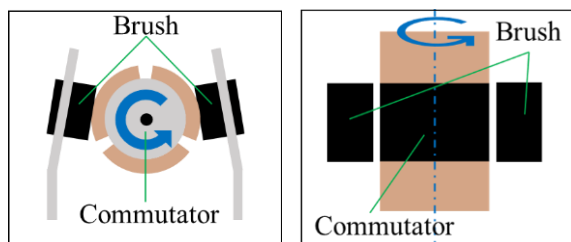


Fig. 1 Schematic of sliding parts of motor

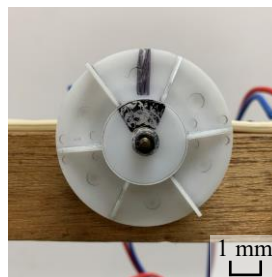


Fig. 2 Loading fan

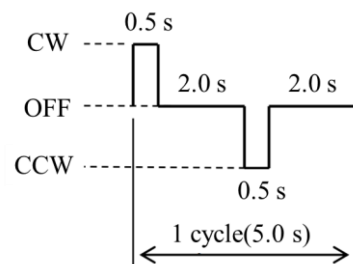


Fig. 3 Test condition

3. 試験結果

3.1 回転電極表面観察結果

回転時間ごとの回転電極の曲面部および整流部の表面観察結果を Fig. 4 に示す。曲面部では比較的光沢のある被膜が固定電極との摺動部に形成されたのに対し、整流部では焼き付いたような濃色の被膜が固定電極との摺動部をはみ出して広範囲に形成された。ともに回転時間による変化は見られなかった。

3.2 顕微ラマン分光分析装置による被膜表面分析

固定電極と回転電極の摺動に伴って回転電極表面に形成される被膜の欠陥や結晶性等の変化を調査するために、ラマン分光分析を実施した。分析結果はスペクトル強度で出力され、被膜の主成分の黒鉛では、構造の乱れが小さい場

合、主に 1582 cm^{-1} 付近に G バンドと呼ばれる黒鉛構造由来のラマンバンドが観測される。黒鉛の構造の乱れが大きくなると、 1350 cm^{-1} 付近に D バンドと呼ばれるダイヤモンド構造由来のラマンバンドが観測される³⁾。観測されたラマンバンドについて、半値幅およびピーク面積比を用いて評価を行った。Figure 5 に、試験前 (0 h) の固定電極表面および試験後の分析箇所、回転時間ごとの回転電極表面被膜の分析結果を示す。試験前の固定電極では G バンドに顕著な鋭いピークが検出された。回転電極曲面部では、G バンドおよび D バンドにピークが検出され、回転時間によるピーク形状の明確な変化は見られなかった。同整流部に関しては、G バンド、D バンドともに半値幅が大きいブロードなピークが検出され、回転時間によるピーク形状の明確な変化は見られなかった。ピーク分離が可能な曲面部の分析結果から G バンドと D バンドのピーク面積比を算出すると、G バンドが約 40 %、D バンドが約 60 %となることが明らかになった。

3.3 TEM-EDX による被膜内介在物分析

被膜内介在物の種類、形状、分布等をナノスケールで分析することを目的として、TEM-EDX により被膜断面の分析を実施した。Figure 6 に、寿命 (62 h) まで回転させた回転電極曲面部の被膜の TEM 像および EDX マッピングを示す。TEM 像から被膜の膜厚が約 400 nm であることが明らかになった。EDX マッピングから、炭素は満遍なく全体に分布し、銅については他元素を含まない丸い塊と、酸化銅と思われる酸素と同じ位置に存在する銅が混在して全体に分布している。また酸化銅は、被膜と回転電極素地の界面に薄く全体に分布していることがわかった。

4. 考察

Figure 4 の被膜観察の結果から、整流部に形成された焼き付いたような被膜は、回転原理上整流部で発生する大規模なアーク放電による火花で、固定電極が激しく摩耗するとともに、被膜が荒損することで形成されたと考えられる。Figure 5 に示すラマンスペクトルから、曲面部、整流部ともに回転時間によらず結晶構造が変化しないことが明らかになった。特に整流部では G バンド、D バンドの半値幅が大きくなり、結晶化度が大幅に低下することが明らかになった。ピーク面積比の算出結果から、曲面部の黒鉛の結晶構造は、黒鉛構造由来の炭素が約 40 %、ダイヤモンド構造由来の炭素が約 60 %で一定となり、回転時間によって材料特性が変化しないことが明らかになった。Figure 6 に示す TEM 像および EDX マッピングから、曲面部の被膜は黒鉛の層の中に、放電や摺動の熱で溶解および摩耗した銅が取り込まれた構造で、回転電極素地と被膜の間には酸化銅が生成されることが明らかになった。

5. 結言

- (1) 回転電極曲面部と整流部では外観および結晶構造が大きく異なり、整流部では結晶化度が大幅に低下する。
- (2) 回転電極曲面部の被膜の黒鉛の結晶構造比率は、回転時間によらず黒鉛構造由来の炭素が約 40 %、ダイヤモンド構造由来の炭素が約 60 %で一定であり、材料特性が変化しない。
- (3) 回転電極曲面部の被膜は黒鉛の層の中に、溶解した銅が取り込まれた構造で、膜厚は約 400 nm である。

参考文献

- 1) 山村・諸井・中村・河村：自動車用モータの技術動向，デンソーテクニカルレビュー，23 (2018) 37-44.
- 2) 稲吉：車載モータの動向とトライボロジー，トライボロジスト，55, 9 (2010) 597-602.
- 3) 長田・垣花：ラマン分光法による炭素材料の評価，炭素，228 (2007) 174-184.

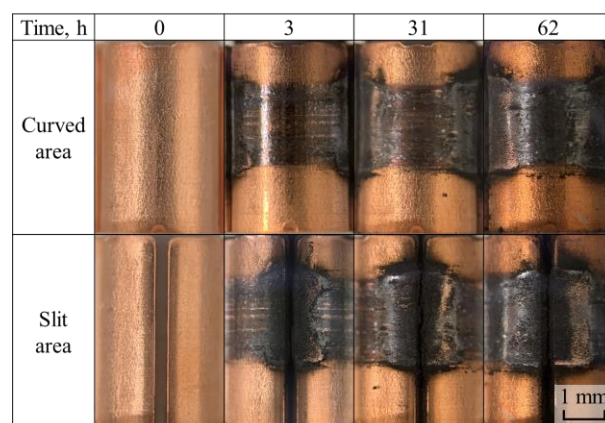


Fig. 4 Optical microscope image of the commutator

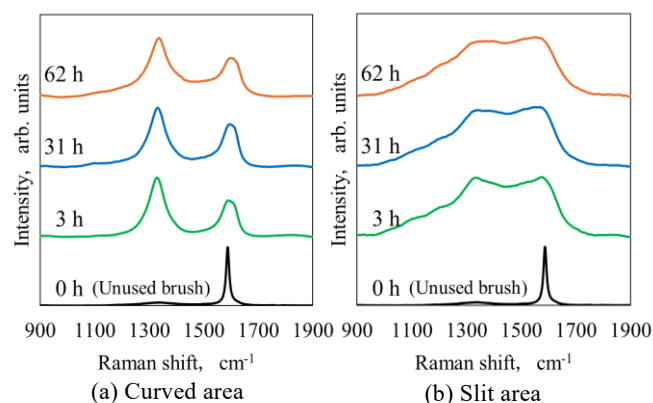


Fig. 5 Raman spectral changes of coating

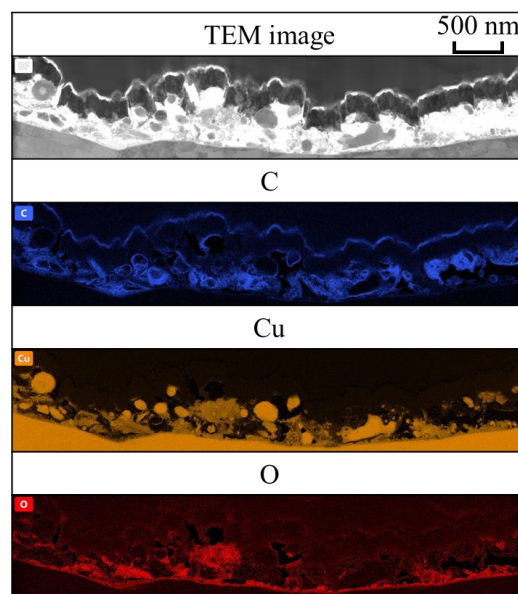


Fig. 6 TEM image and EDX mapping