

摺動電気接点における摩耗機構の解明

Elucidation of wear mechanisms in sliding electrical contacts

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電気接点などがあるが、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、高級車では約 130 個に上り、今後も搭載数の増加が見込まれている¹⁾。本研究では、自動車用モータのうち 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被膜が形成されるという特徴がある。しかし、摺動電気接点におけるこのような摩耗現象は全容が十分に解明されておらず、未だ科学的根拠に基づくモータの設計手法が確立されていない。そのためこれまでの有接点 DC モータの開発においては、経験則に基づく設計指標が主に用いられてきた。そのため現状の設計・開発では、性能を保障するために同一設計の複数のモータを長時間回転させる運転試験を行う必要があり、多くのコストや時間がかかっている。したがって本研究では、摺動電気接点における摩耗機構の解明を目的として、回転電極表面における被膜形成メカニズムの解明を目指す。本報では、実機試験で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断面の観察・元素分析からその形成プロセスを考察する。

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。試験機には、有接点 DC モータの回転条件を制御できる実機試験機を使用した。実機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いる。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 ± 3 °C、相対湿度 50 ± 10 %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。回転時間は固定電極の寿命（62 h）を基準に寿命に至るまでの途中経過を追うために、5, 15, 30, 45, 62 h 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、集束イオンビーム-走査型電子顕微鏡（FIB-SEM）、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 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。

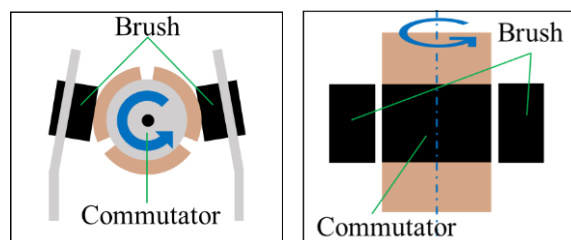


Fig. 1 Schematic of sliding parts of motor

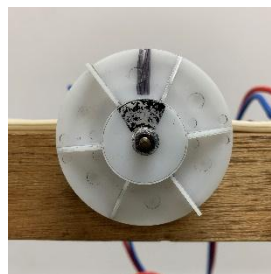


Fig. 2 Loading fan

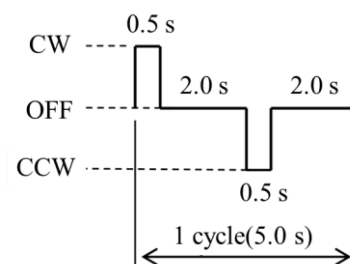


Fig. 3 Test condition

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を行った結果、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内に形成された。それに対し整流部では、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、半値幅を用いて評価を行った。Figure 4 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。

3.3 FIB-SEM, TEM-EDX による断面観察・元素分析

回転時間による被膜の膜厚や素地の変化を観察することを目的として、FIB-SEM により回転電極表面被膜の断面加工および観察を実施した。Figure 5 に回転初期 (5 h) 寿命の約 1/2 (30 h)、寿命 (62 h) における回転電極曲面部の断面観察結果を示す。各観察画像は主に三層構造となっており、上層に FIB 加工と蒸着で形成された保護膜、中層に被膜、そして下層には基材が観察された。まず回転時間 5 h では、中層の被膜がほとんど見られなかった。回転時間 30, 62 h においては、中層に膜厚 $300\sim 400\text{ nm}$ 程度の被膜が見られた。回転時間 62 h においては、特に基材の損傷も見られた。Figure 6 に回転時間 62 h の TEM 像および EDX マッピングを示す。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 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。Figure 5 に示す SEM 像より、回転電極曲面部の被膜は回転初期から徐々に積層され、寿命の約 1/2 程度で $300\sim 400\text{ nm}$ 程度で膜厚が安定するが、寿命に近づくとき基材への損傷が大きくなっていくことが明らかになった。Figure 6 に示す 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) 回転電極の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は回転初期から徐々に積層され、寿命の約 1/2 程度で $300\sim 400\text{ nm}$ 程度で膜厚が安定する。
- (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基材との界面に酸化銅が生成される。

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.

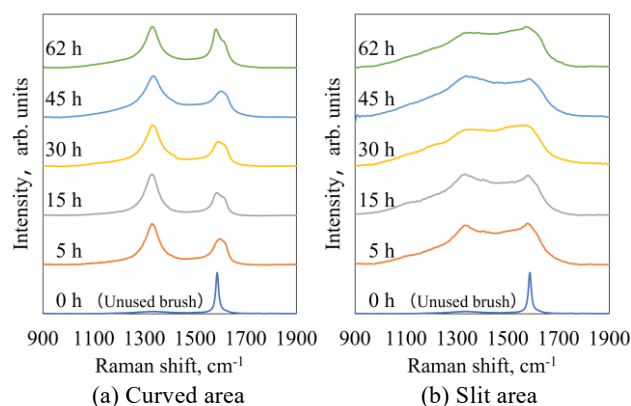


Fig. 4 Raman spectral changes of coating

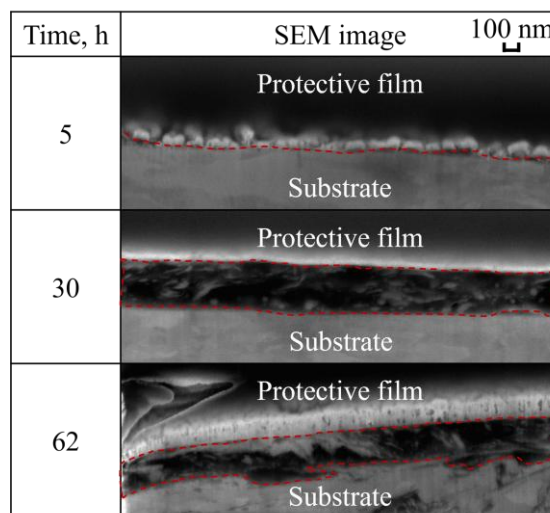


Fig. 5 SEM image of coating in curved area

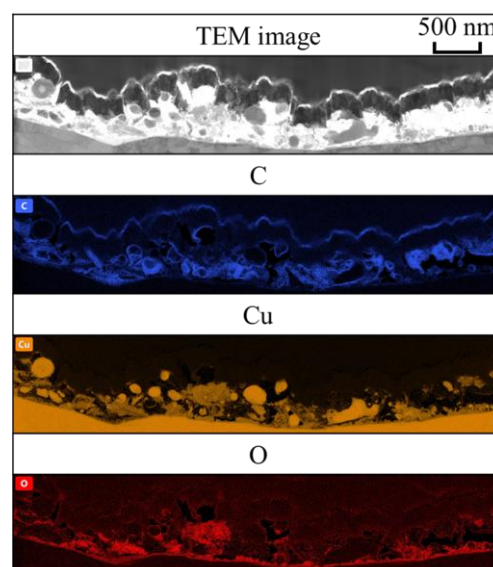


Fig. 6 TEM image and EDX mapping of coating in curved area (62h)