A213 高速度カメラによる小形モータの整流火花の可視化

花澤民雄[○], 山科正幸, 石田崇道, 江頭虎夫 (九州産業大学)

The Visualization of Commutation Spark of Small Motors by High-speed Camera

Tamio HANAZAWA, Masayuki YAMASINA, Takamichi ISHIDA, Torao EGASHIRA

ABSTRACT

Universal motors are used in mainly cleaners. The commutating processes take place by sliding contact of commutator segment and brush, and sparks occur when a segment separates from the brush. The commutation sparks cause wear on the brush and electromagnetic interference to other electronic machines. We visualized images of sparks on high-revolving-motors by a high-speed camera, and analyzed the mechanism of the spark generation. We devised external laser triggering using laser light for shuttering of the camera. This method make it easier to analyze images because it provides with images of the same point of the same segment every time. By photographing spark generation with a high-speed camera by external laser triggering we probed that sparks occurred on every other segment and also visualized that commutation spark occurred on one segment.

Keywords : Visualization, High-speed Camera, Commutation Spark, Universal Motor

1. はじめに

種々な流れの現象や高速現象について可視化を行うことで現象のメカニズム解明がなされているが、我々は、高出力化・高速化が進んでいる家電品の掃除機に用いられているユニバーサルモータの整流火花の発生メカニズムを可視化により解明する試みを行っている。これらのモータはブラシと整流子の摺動接触により整流作用が行なわれるため、整流子とブラシが離れる瞬間に火花を発生する。この整流火花によりブラシ摩耗を起こすため機器の寿命を縮める。又、他の機器に対して電磁ノイズを与えることが問題とされている。そこで、整流火花の発生メカニズムが解明されることは機器の寿命やノイズの抑制について検討ができる。整流火花については、電気的な面から直流機等において多く研究がなされ、整流電流やブラシと整流子間電圧の測定により解明がなされてきた^{1), 2)}。しかしながらこれらの報告は電気的な面のみで、画像面との両面からの検討はほとんどみられない。そこで、高速度カメラを用いてユニバーサルモータが高速回転中に発生する整流火花の可視化を行い、整流火花がどのように発生するか画像面から解明ができる。今回、実験には回転数 18,400rpm、整流子片数が 28 個のモー

タを使用して、ブラシと整流子片が離れる瞬間にどのように整流火花が発生し、整流子片のどの位置から、また、高速撮影により火花の発生の瞬間について可視化して検討を行ったので報告する。

2. 撮影実験構成

2.1 ユニバーサルモータ

実験に用いたユニバーサルモータの構造は励磁される界磁巻線と回転部分の電機子巻線が直列に接続された回路で構成されている。界磁巻線と電機子巻線の間の電力授受はブラシと整流子片により行われるが、この時に短絡回路が形成され、そこでお互いが離れる瞬間に高い電圧を発生して火花が発生することになり、これがいわゆる整流現象である。そこで、一方の界磁巻線と電機子巻線の端子電圧を求めると、基本波 60 Hz の波高値付近に重畳してパルス電圧が現れる。これは、整流中の短絡回路に発生するリアクタンス電圧が増幅して現れたもので、これが、火花発生の主要原因と云われている³⁾。そして、波高値付近の一部を拡大すると、大小の繰り返しパルス波形が現れ、このパルス周期は整流時間と一致しており約 232 μ s を示す。

2.2 高速度カメラ

ユニバーサルモータが回転中に発生する整流火花を捉え、そして、毎秒 300 回転している高速現象を可視化するため、毎秒 5,000~20,000,000 コマの撮影が可能な高速度カメラを用いて撮影実験を行った。高速度カメラはイメージコンバータ式のカメラで撮影では動くメカニカル部分がなく、シャッタリングや撮影シフト等の撮影に関わる一切をイメージコンバータチューブ内の電子の働きにより行われるので、非常に速い高速撮影が可能である⁴⁾。その高速度カメラの主な仕様を Table 1 に示すが、露出時間、インターフレーム、トリガ遅延時間はそれぞれ自由に設定が可能であり、撮影条件により設定が決められる。又、この高速度カメラは被写体の発光が微弱であったり、十分な照明が与えられない場合には光増幅撮影光学装置 (イメージインテンシファイア I.I.) を取り付けることで 100~100,000 倍の光増幅が行え、より高速度の撮影と短時間露光が可能である。

2.3 外部トリガ法

ユニバーサルモータが高速回転中に発生する整流火花を捉え、可視化するための撮影実験装置構成図を Fig.1 に示す。高速度カメラのシャッタリングには内部トリガ法と外部トリガ法の二通りの方法が用いられるが、内部トリガ法はオペレーション・ユニットによりシャッタリングを行う方法で、撮影結果より火花発生の撮影箇所がランダムで整流子片のどの位置を撮影したのか明白ではない。したがって、撮影結果から解析が出来、整流子片のどの位置から火花が発生したか確認が出来る撮影手法が必要となる。そこで、レーザ光を外部トリガ信号としてシャッタリングを行う外部トリガ法を考案した。整流子片はモータを冷却するファンと一体化構造になっているので、このファンに 1 mm の穴を設け、この穴をレーザ光が通過するようにレーザ装置を設定すれば、穴を通

過したレーザ光はモータの一回転周期に相当する光パルス信号となる。したがって、この光パルス信号を用いることにより常に整流子片の同位置で信号を捉えることが出来、高速度カメラのシャッタリングの外部トリガ信号とすることが出来る。レーザ光を外部トリガ信号として用いたのは、細いビーム状にでき、非接触で立ち上がり時間の速いトリガ信号が得られるためで、本実験では He-Ne レーザを用いた。この外部トリガ法は He-Ne レーザ光が高速回転するモータのファンの穴を通過するとカメラのシャッタリングの外部トリガ信号として、光検出器、パルスジェネレータを経由して高速度カメラに入り、整流火花の撮影が開始される。この手法を用いると、高速度カメラのシャッタリングに必要な外部トリガ信号の遅延時間をパルスジェネレータで設定することで、どの位置の整流子片からでも自由に選択して撮影する事が出来る。また、撮影と同時にシンクロスコープに高速度カメラへの外部トリガ信号と電気的情報としてモータの電機子端子電圧を計測することで、整流子片の火花発生位置や発生過程をより詳細に検討することが出来るようになった。

Table 1 Specification of high-speed camera

Photographing speed	5,000~20,000,000 [frame/s]
Frames recorded	8,12,15,18,24[frame]
Interframe	40[ns]~200[μ s]
Exposure time	10[ns]~200[μ s]
A setup of trigger delay	10[ns]~10[ms]

Fig.1 Experimental setup for photographing

Fig.2 Commutation spark (20,000 frame/sec)

Fig.3 Viewpoint of photograph

Fig.4 Armature terminal voltage V_a and external trigger signal T_0 (20,000 frame/sec)

3. 撮影結果

3.1 火花発生位置

モータには整流子片が 28 個設けられているが、ブラ

シと整流子片が離れる瞬間に火花が発生することは目視でも分かる。そこで、実際にブラシと整流子片の間でどのように発生しているかの確認を行った。**Fig.2** に撮影速度 20,000 コマ/sec、撮影枚数 15 枚の撮影結果を示す。又、**Fig.3** には撮影結果の写真の見方を示す。撮影結果をみると 1 コマ目で火花が捉えられ、2 コマ目で火花が最大に成長し、3 コマ目より 15 コマ目まで消滅していく過程が撮影されている。しかし、6 コマ目に 1 コマ目に発生した火花のすぐ右側に 2 ツ目の火花が発生し、後は消滅していくが、11 コマ目で何かの原因でアーク状になり消滅していく。又、10 コマ目でブラシの右端に 3 ツ目の火花が捉えられ、11 コマ目で最大になり、後は消滅の過程が撮影され、15 コマ目で新たな火花がブラシの真ん中に捉えられている。したがって、撮影結果より 1, 6, 10, 15 コマの 4 カ所で火花が発生している。

ここで、この撮影結果より整流子片のどの位置から発生したか検討を行う。**Fig.4** にカメラのシャッタリングと同時に記録したトリガ信号 T_0 と電機子端子電圧 V_a の波形を示したが、図よりトリガ信号のかかった位置から火花発生のコマ数とインターフレームと電機子端子電圧 V_a との関係を求める。撮影速度 20,000 コマ/sec では 1 コマのインターフレームは $50\mu s$ で、露光時間は $49.5\mu s$ に設定した。したがって、火花発生時の 1 コマ目 (▼印) は $0\sim 50\mu s$ 、6 コマ目 (◆印) は $250\sim 300\mu s$ 、10 コマ目 (■印) は $450\sim 500\mu s$ 、15 コマ目 (▽印) は $700\sim 750\mu s$ の間で火花が発生したことになる。**Fig.4** においてトリガ信号 T_0 と電機子端子電圧 V_a の波形で、大小の繰り返しパルス波形の大きいパルスと火花が発生した時間が一致していることが分かる。このよう

Fig.5 Commutation spark (500,000 frame/sec)

に火花は28個ある整流子片の一つ置きに、そして、電機子端子電圧 V_a の大きいパルス電圧の時に発生することが判明した。

3.2 高速撮影(500,000 コマ/sec)

ユニバーサルモータの火花発生は28個ある整流子片の一つ置きに、そして、電機子端子電圧 V_a の大きいパルス電圧と一致する。そこで、火花は整流子片の14箇所より発生するのであるから、その内の1箇所を撮影速度 500,000 コマ/sec の高速撮影を行うことで、火花発生の瞬間がどのようなになるか、そして、1整流子片において発生する火花の発生過程が詳細に検討できる。

撮影速度 500,000 コマ/sec では1コマのインターフレームは $2.0\mu s$ で、露光時間は $1.9\mu s$ に設定して撮影実験を行った。Fig.5 に撮影結果を示しており、写真には2コマ目で発生直後の小さい火花が捉えられ、7コマ目で最大になり、8コマ目から徐々に消滅していく過程が撮影されている。そして、3コマ目で初めに2コマ目で捉えられた火花の左側に2ツ目の火花発生が捉えられ、4コマ目から成長して8コマ目で最大となり、徐々に消滅していく過程が捉えられている。この撮影結果より1コマのインターフレームは $2.0\mu s$ であるので、トリガ信号によりカメラへのシャッターリングから2コマ目で記録されたのは、撮影開始より $2.0\sim 4.0\mu s$ で、3コマ目は $4.0\sim 6.0\mu s$ 間に火花が発生したことになる。又、火花は発生すると徐々に成長して最大になり、その後は消滅していく。そして、火花が捉えられて最大に成長する時間は約 $10\sim 12\mu s$ の間であることが判明した。

ユニバーサルモータが高速回転中に整流火花を発生するが、高速度カメラにより可視化を行うことでモータが回転中に整流子片の1つ置きに発生し、火花発生から除

々に成長して最大になることが確認できた。

4. まとめ

高速度カメラを用いてユニバーサルモータが高速回転中に発生する整流火花の発生メカニズムを画像面から解明する試みを行い、以下のような結果が得られた。

- (1) 整流中の整流火花は整流子片の一つ置きに発生する。
- (2) 整流火花は発生すると徐々に成長して最大になり、そして、最大に成長する時間は約 $10\sim 12\mu s$ の間である。

参考文献

- 1) 山村, 山崎: 電気学会, vol.80, No.860, pp.598-605(1960).
- 2) 鈴木, 松田: 電学論D: vol.109, No.2, pp.98-105(1988).
- 3) T.Fujii, T.Hanazawa: Con., Record, IEEE, ISA, Annual Meeting, 265(1989).
- 4) 安藤: 高速度撮影とフォトリソに関する総合シンポジウム 1993 講演論文集, pp.93-96(1993).