

Cu-C電気接点のアーク放電による電磁ノイズと 電極表面形状変化の計測

Measurement of Electromagnetic Noise and Surface Profile from arc discharge of Cu-C contact

○江原康生, 小泉俊彰, 曾根秀昭, 根元義章

○Yasuo EBARA, Toshiaki KOIZUMI, Hideaki SONE, Yoshiaki NEMOTO

東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Tohoku University

キーワード : 電気接点 (Electric Contact), アーク放電 (Arc Discharge), 電磁ノイズ (Electromagnetic Noise),
電極表面 (Surface Profile), 放電痕 (Trace of Discharge)

連絡先 : 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学 大学院情報科学研究科 根元研究室
江原康生, Tel.: (022)217-7140, Fax.: (022)263-9306, E-mail: eba@nemoto.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

電動工具や電気掃除機等の小形電気機器に使用されている整流子モータは、小形で高出力の駆動源といった長を有する反面、EMCの観点からは電磁ノイズ源とみなされている。ノイズ低減のためには、接点間で発生するアーク放電と電磁ノイズの関係を解明することが必要とされる⁽¹⁾⁽²⁾。

整流子(Cu)とカーボンブラシ(C)間で発生する電磁ノイズは、電流極性によって発生形態が異なることが従来の報告で明らかにされている⁽²⁾⁽³⁾。このことから、電流極性によって、ノイズ発生における現象の機構が異なることが考えられる。

一方、電極表面上ではアークの足である陰極点および陽極点が移動し、放電痕が形成されることが知られている⁽⁴⁾。電極表面の放電痕を詳細に調べることがノイズの発生機構の解明の一助になる

と考えられる。

本稿では、Cu-C 電気接点開離時におけるアーク放電によって生じる電磁ノイズ、および電極表面をそれぞれの電流極性において計測を行い、これらの関連性について実験的検討を行った。その結果について報告する。

2. 実験方法

計測システムの概要をFig.1に示す。デジタルストレージスコープを用いて、電極開離時のアーク電圧、およびノイズ波形の計測を行う。ノイズは電源ラインのノーマルモード成分をチョークコイルで検出し、スペクトルアナライザ(周波数 $f_c=5$ [MHz]、掃引停止、分解能帯域幅 $B=300$ [kHz]、ビデオ帯域幅 $f_o=10$ [kHz])の出力を観測する。実験条件をTable 1に示す。

また試験動作後のCu(無酸素銅)およびC(ブラシ

材)電極表面の顕微鏡写真を撮影し、放電痕の様子を観察する。

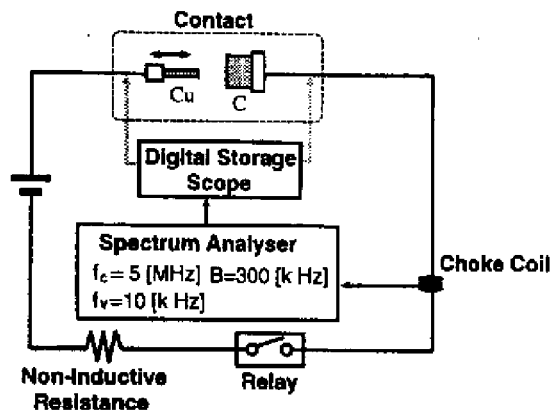


Fig. 1 計測システムの概要

Table 1 実験条件

電極	Cu(無酸素銅) 接触面: 1mmφ C(ブラシ材-人造黒鉛質) 接触面: 6mm×7mm
電源電圧	DC10~48V
通電電流	1~4A
負荷	無誘導性負荷抵抗
開離速度	40mm/s
動作回数	1回

3. 実験結果及び検討

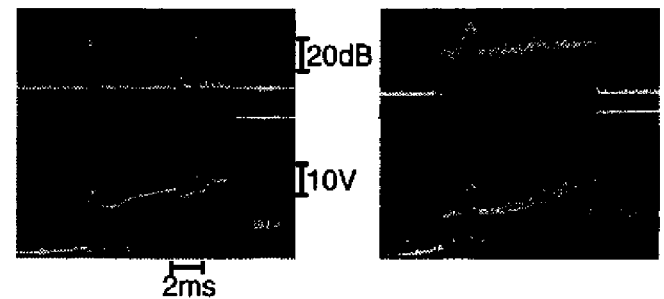
3.1 アーク電圧およびノイズと電極表面変化の電流極性依存性

開離時のアーク電圧および、ノイズ(相対値)波形の計測結果(DC48V、4A)をFig.2に示す。(a)がCu(陽極)-C(陰極)、(b)がC(陽極)-Cu(陰極)の場合である。従来の報告⁽²⁾と同様に(a)は散発的なバーストノイズが発生する。一方(b)ではアーク放電が生じている期間にバーストノイズが継続して発生する。

これらのデータに対応した電極表面の顕微鏡写真をFig.3に示す。(a)では、陰極表面の放電痕が複数の場所に存在している。これに関して波形データと参照して考察すると、複数のバーストノイズの発生と関連して、新たな放電痕が形成されたものと考えられる。(b)では、陽極表面に円形の放電痕が多数生じており、その大きさは不規則である。

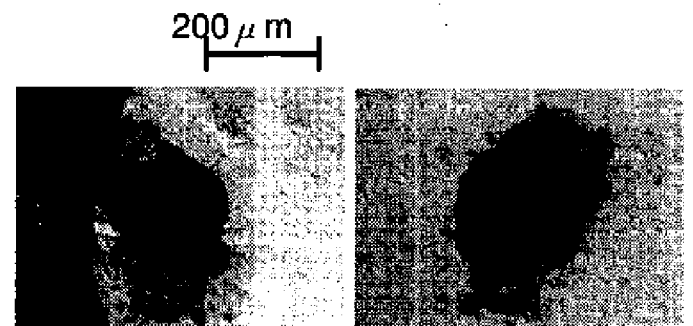
陰極表面には円形の放電痕が分散している。また他に光沢があり、表面が熔融した部分も見られる。

このように、電流極性によってノイズおよび電極表面変化が異なることが明らかとなった。本稿では両電流極性について、それぞれにおける特徴の解析に適した方法を用いて検討を行う。



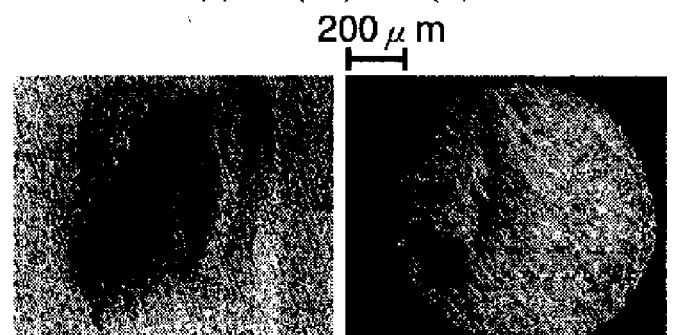
(a)陽極(Cu)-陰極(C) (b)陽極(C)-陰極(Cu)

Fig. 2 ノイズ(上)とアーク電圧(下)波形



陽極(Cu)表面 陰極(C)表面

(a)陽極(Cu)-陰極(C)



陽極(C)表面 陰極(Cu)表面

(b)陽極(C)-陰極(Cu)

Fig. 3 電極表面の顕微鏡写真

3.2 Cu(陽極)-C(陰極)の場合

3.2.1 バーストノイズの発生回数と放電痕数の関係

前節より、複数の散発的なバーストノイズの発生と関連して、新たな放電痕が形成されたことが考えられる。放電痕とノイズの発生回数との関係について、詳細に調べる必要がある。

そこで、同様の条件で計測を多数回行い、その結果を統計的に見てみる。データ数は70個とし、それぞれについて、バーストノイズ発生回数と陰極表面の放電痕数を求める。陰極点の挙動はランダム、あるいは回転運動とされており⁽⁴⁾、放電痕が重なりあって解析するのが困難である。本実験では、放電痕が重なり合わないようにするため、電極間と垂直方向に磁界をかけて陰極点を移動させる方式を用いる。

実験結果をTable 2に示す。これより、散発的なバーストノイズの発生回数が、生じる放電痕数と相関があるのがわかる。3、4回については、放電痕数の方が少ない場合が多いが、これは放電痕が重なったため判別できなかったことが理由として考えられる。すなわち、バーストノイズの発生回数と等しい数の放電痕が陰極表面に生じると考えられる。

Table 2 バーストノイズの発生回数と放電痕数の関係

バーストノイズ の発生回数	放電痕数				
	1	2	3	4	5
1(24/70)	22	2			
2(22/70)	1	20	1		
3(14/70)	1	10	3		
4(9/70)			7	2	
5(1/70)					1

3.2.2 開離時アーク電圧と電磁ノイズの関係

Fig.2(a)において、散発的なバーストノイズが発生した期間にアーク電圧に細かいゆらぎが生じているのがわかる。この対応関係について、アーク電圧波形とノイズ波形を観察し、検討を行う。

アーク電圧について、デジタルスコープの横軸、縦軸のレンジを拡大して、波形の計測を行った。サンプリング周波数は800kHzである。結果をFig.4に示す。(a)が全体の波形で、(b)がアーク開始時に生じるバーストノイズの部分を拡大したも

のである。

(b)より、ノイズレベルが小さい部分では、アーク電圧はゆらぎが小さく、いわゆる定常アーク放電が生じているものと考えられる。一方、バーストノイズが生じている部分においては、アーク電圧はシャワリング状にゆらいでいる。またそのゆらぎの詳細がノイズ波形のゆらぎと対応しているのがわかる。

このシャワリング状アークと定常アークの発生と電極表面の変化の関係について、更に検討を行う。

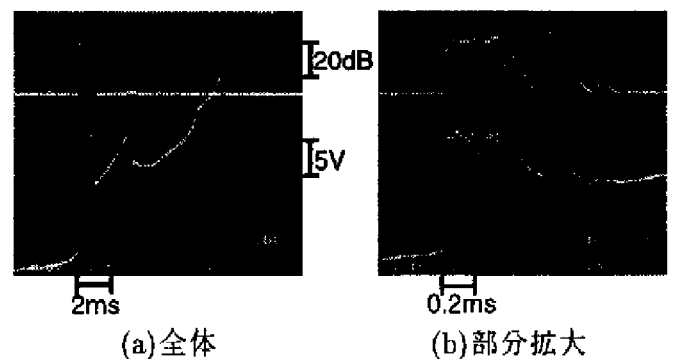


Fig. 4 ノイズ(上)とアーク電圧(下)波形

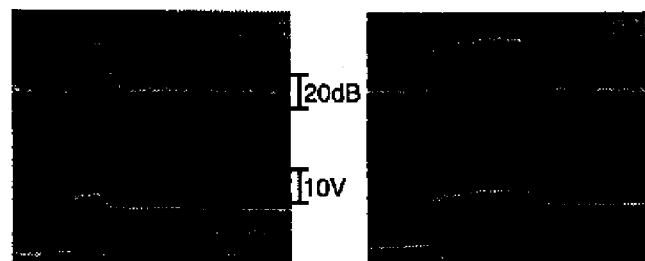
3.2.3 シャワリング状アークと電極表面の関係

前項よりアーク電圧がシャワリング状にゆらぐ時、散発的なバーストノイズが発生することが明らかとされた。シャワリング状アークの発生と電極表面変化の関係について考察する。

Fig.5に、アーク開始時に一回のみバーストノイズが発生する場合のアーク電圧とノイズ波形の例を示す。(b)の方が(a)より、シャワリング状アークの継続時間が長い。一对の電極について、Fig.6に陽極、Fig.7に陰極表面の顕微鏡写真を示す。

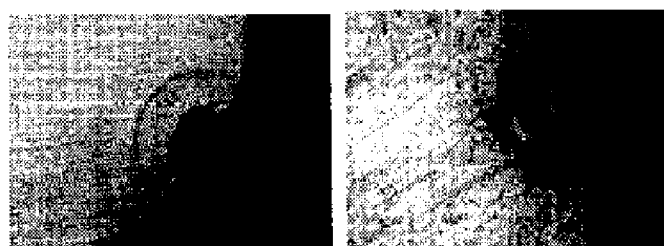
これより、写真に添えた模式図に示す色の濃い部分は放電痕と見られ、その大きさは(a)と(b)でそれほど差が見られない。一方、シャワリング状アークの継続時間が長い(b)では放電痕の周辺に光沢があり、表面が溶融したと見られる部分(模式図でうすい色の部分)が目立つ。この部分の形状は対向する電極の間ではほぼ対応しており、また表面の色から見ると、溶融または軟化した部分のCが、

Cu表面側に付着したものと思われる。これより、シャワリング状アークの発生は、電極表面に生じる溶融部分と関連性があることが考えられる。



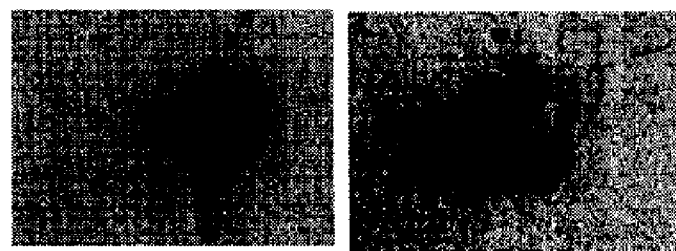
(a)バーストノイズが短い場合 (b)バーストノイズが長い場合

Fig. 5 ノイズ(上)とアーク電圧(下)波形



(a)バーストノイズが短い場合 (b)バーストノイズが長い場合

Fig. 6 陽極(Cu)表面の顕微鏡写真



(a)バーストノイズが短い場合 (b)バーストノイズが長い場合

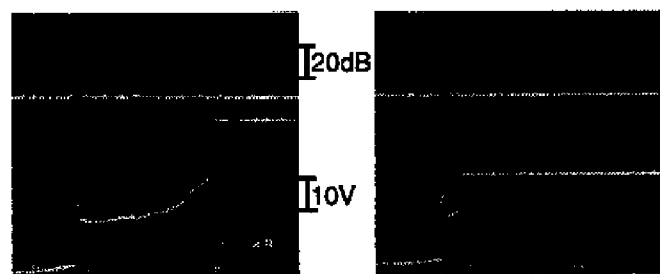
Fig. 7 陰極(C)表面の顕微鏡写真

3.2.4 定常アークと放電痕の関係

この項では、バーストノイズが生じない定常アークと電極表面の関連について考察する。本稿ではアーク継続時間からシャワリング状アークの継続

時間の和を減じたものを定常アーク継続時間と呼ぶこととする。

バーストノイズがアーク開始時に生じる場合に着目し、そのときの定常アーク継続時間と陰極表面に生じる放電痕直径の関係について、抵抗を一定にして回路電圧を変化させて調べた。Fig.8にアーク電圧とノイズ波形、Fig.9とFig.10に、その一回の動作をした電極の陽極と陰極表面の顕微鏡写真を示す。(a)がDC48V(4A)、(b)がDC30V(2.5A)の場合である。(a)と比べて(b)は、シャワリング状アークの継続時間は長い、定常アーク継続時間が短く、放電痕は(b)が小さい。



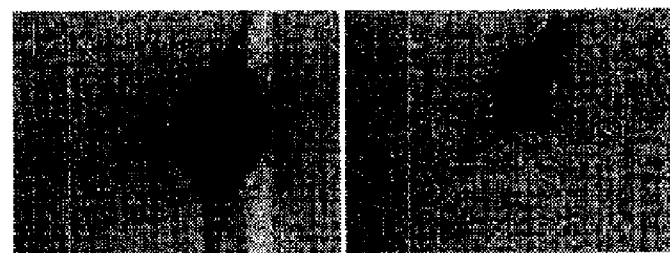
(a)48V(4A) (b)30V(2.5A)

Fig. 8 ノイズ(上)とアーク電圧(下)波形



(a)48V(4A) (b)30V(2.5A)

Fig. 9 陽極(Cu)表面の顕微鏡写真



(a)48V(4A) (b)30V(2.5A)

Fig. 10 陰極(C)表面の顕微鏡写真

同様にして、回路電圧を26~48Vの範囲で変化させたときの定常アーク継続時間 t_{as} と放電痕直径 d の関係をFig.11に示す。これより、回路電圧が小さくなるにつれて定常アーク継続時間が短くな

り、放電痕直径が小さくなることがわかる。一方、Fig.12に定常アーク継続時間と放電痕直径の関係について分布図を示す。これより、定常アーク継続時間が長いほど、放電痕直径は大きくなる。このことから電極表面に生じる放電痕は、定常アークと相関関係があると考えられる。また回路電圧を下げた場合、アーク開始時に生じるシャワリング状アーク継続時間は全体のアーク継続時間が短くなる割合に対して、それほど短くならない。このことから放電痕はシャワリング状アークとの相関関係が小さいと考えられる。

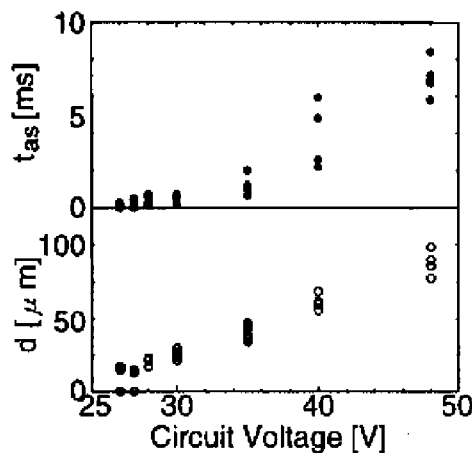


Fig. 11 回路電圧と定常アーク継続時間、放電痕直径の関係

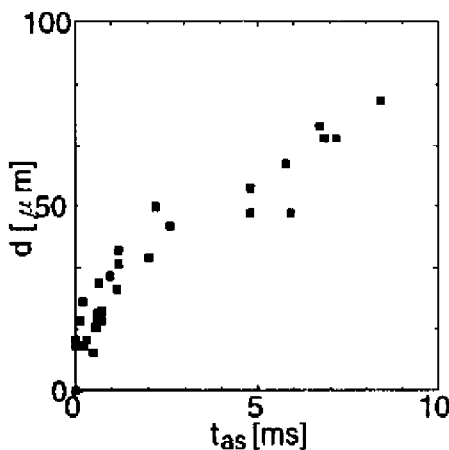


Fig. 12 定常アーク継続時間と放電痕直径の関係

3.2.5 検討

Cu(陽極)-C(陰極)の場合、放電中に生じる散発的なバーストノイズがくり返し発生する場合、バーストノイズの発生回数と等しい数の放電痕が陰極表面に生じる。また、バーストノイズが発生している期間では、アーク電圧はシャワリング状に細

かくゆらいでいる。またそのゆらぎがノイズ波形のゆらぎと対応しているのが明らかとされた。

シャワリング状アークの継続時間が長くなると、放電痕の周辺に表面にCが溶融したと見られる部分が目立つ。また定常アーク継続時間が短くなるにつれて、放電痕直径が小さくなることから、シャワリング状アークは電極表面の溶融部分と、定常アークは放電痕との相関関係があると考えられる。またこれより、電極表面に生じる溶融部分はシャワリング状アーク発生期間に生じ、放電痕部分は定常アーク発生期間に生じるという仮説が考えられる。

3.3 C(陽極)-Cu(陰極)の場合

3.3.1 回路条件によるアーク電圧波形および表面変化のパターン分布

3.1で述べたアーク電圧および電極表面変化の関連性について検討する。ここでは回路条件(電圧、電流)を変化させて、アーク電圧波形および表面変化について、以下に示す項目によって判別を行う。

- アーク電圧波形
 - アーク継続時間
S (短い)、L (長い)
 - 波形のゆらぎ
FN (なし)、FS (アーク開始直後)、
FE (後半)、FSE(開始および後半)
- 電極表面変化
 - 円形の放電痕
集中(TCC)、分散(TCD)
 - 溶融痕
なし(TMN)、分布(TME)、
広く分布(TMW)

回路条件による発生パターンの分布図をFig.13(アーク電圧波形)、Fig.14(表面変化)に示す。これより、両方の図において、四つの領域に分別されて、それらの領域の境界が類似しているのがわかる。

また、ノイズはFSおよびFSEの場合にアーク開始直後に高くなり、FNとFEの場合には変動が小さい。ノイズが高くなる条件においては表面変化はTCD、アーク電圧が後半ゆらぐ条件においてはTME(W)になり、これらに相関関係があると考えられる。

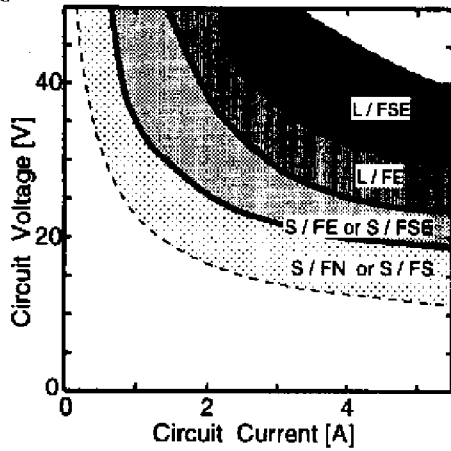


Fig. 13 回路条件によるアーク電圧波形パターンの分布図

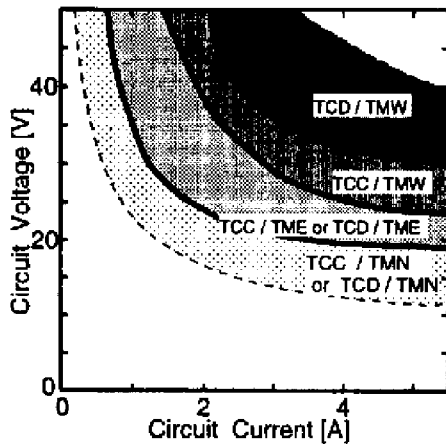


Fig. 14 回路条件による表面変化パターンの分布図

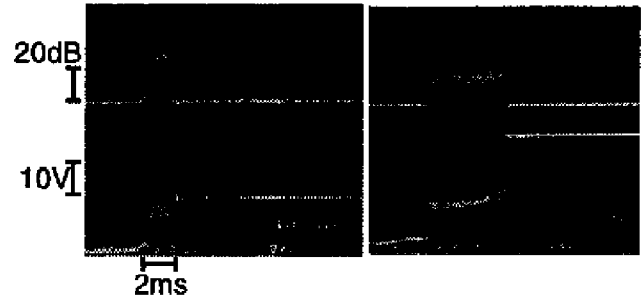
3.3.2 アーク電圧および表面変化パターンの分類

前節より、アーク電圧波形および電極表面の変化パターンはそれぞれ四種類に分別される。また、その分布領域が類似していることが明らかになった。そこでFig.13、14の結果より、アーク電圧と表面変化のパターンをまとめて、Table 3に示すようなA~Dのグループに分類した。

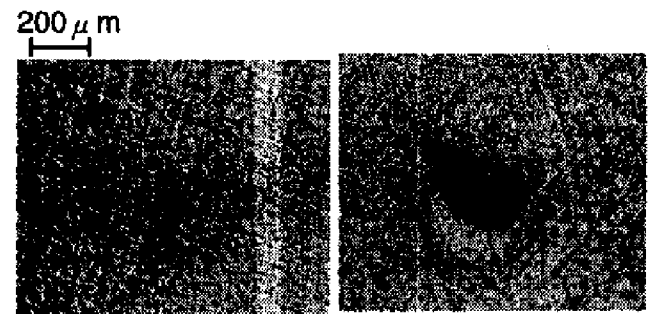
それぞれのグループにおけるアーク電圧およびノイズ波形と電極表面の顕微鏡写真の例をFig.15に示す。ただしAとBについては、それぞれA1、B1について示す。

Table 3 グループの種類

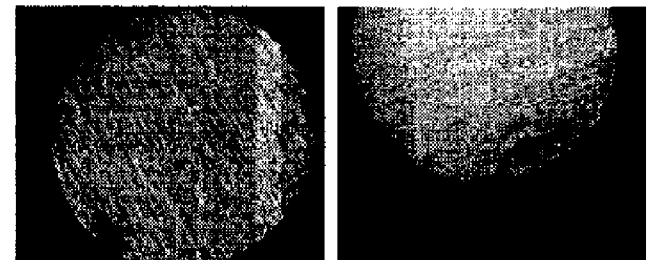
グループ	アーク電圧波形	表面変化
A1	S/FN	TCC/TMN
A2	S/FS	TCD/TMN
B1	S/FE	TCC/TME
B2	S/FSE	TCD/TME
C	L/FE	TCC/TMW
D	L/FSE	TCD/TMW



ノイズ(上)とアーク電圧波形



陽極(C)表面



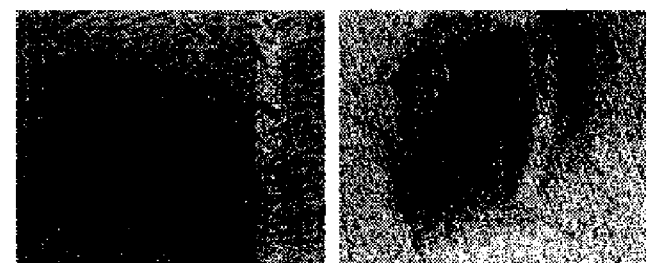
陰極(Cu)表面

(a)グループA

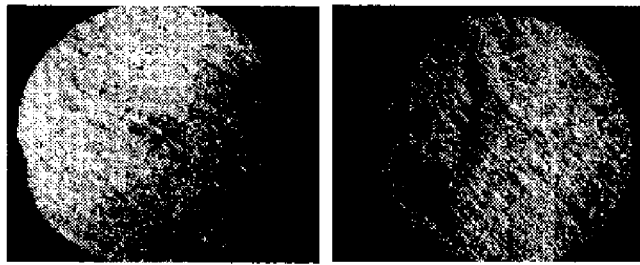
(b)グループB



ノイズ(上)とアーク電圧波形



陽極(C)表面



陰極(Cu)表面

(c)グループC (d)グループD

Fig. 15 各グループの特徴例

各回路条件(電圧、電流)とグループの関係について、Fig.16にアーク電圧波形、Fig.17に電極表面変化の場合を示す。Fig.16より、電圧と電流が大きくなるにつれて、A → B → C → D の順で発生頻度が高くなる傾向にあるのがわかる。一方、Fig.17においてもよく一致する傾向を示している。アーク電圧および表面変化について、これらのグループによって分類可能であることがいえる。このことから、アーク電圧と表面変化の間に相関関係があることが考えられる。

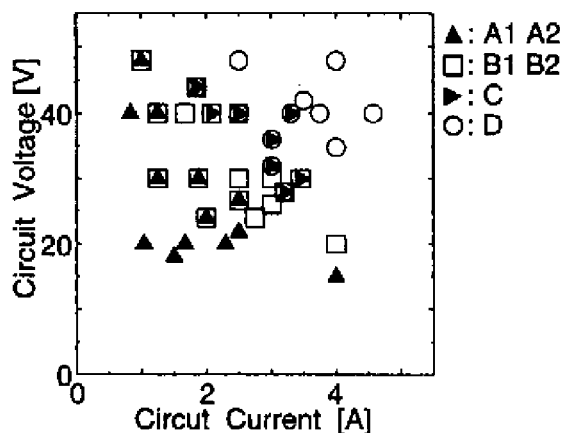


Fig. 16 回路条件とアーク電圧波形グループの関係

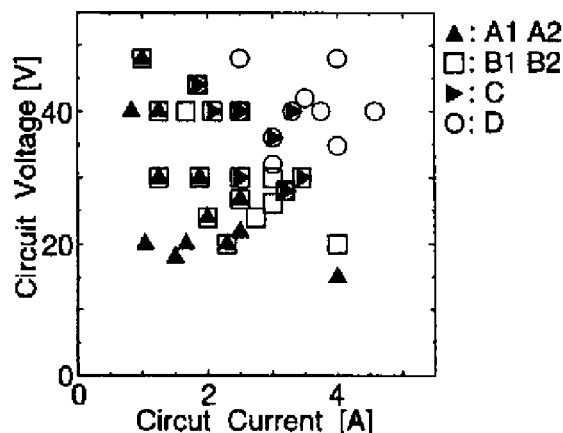


Fig. 17 回路条件と表面変化グループの関係

3.3.3 検討

C(陽極)-Cu(陰極)では、回路条件を変化させて、アーク電圧波形および表面変化のパターン分布を調べ、それぞれ四つの領域に分別され、その領域の境界が類似していることがわかった。また、四つの領域で分類した各条件グループと回路条件の関係が共に同様な傾向を示していることから、アーク電圧と電極表面変化の間に相関関係があることを明らかにした。

4. おわりに

本稿では、Cu-C電気接点開離時におけるアーク放電によって生じる電磁ノイズと電極表面の関係について検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) Cu(陽極)-C(陰極)の場合、散発的なバーストノイズの発生回数と等しい数の放電痕が陰極表面に生じる。バーストノイズの発生期間では、アーク電圧はシャワリング状にゆらぎ、ノイズ波形と対応している。また、シャワリング状アークは電極表面の溶融部分と、定常アークは放電痕との間に相関関係がある。
- (2) C(陽極)-Cu(陰極)の場合、アーク電圧波形および表面変化の発生パターンが四つの領域に分別され、その領域の境界が類似している。これよりアーク電圧と電極表面変化の間に相関関係がある。

参考文献

- 1) 高木 他:“電気接点のアーク放電現象”,コロナ社(1995.2).
- 2) 小泉,高橋,江原,曾根,根元:“C-Cu電極間の開離時アークと電磁ノイズに関する実験的検討”,信学技報,EMD96-87(1996-12).
- 3) 小泉,高橋,江原,曾根,根元:“C-Cu電極間のアークによる電磁ノイズ発生に関する一検討”信学技報,EMCJ97-(1997-10).
- 4) 糸山,相田:“接点开離時におけるアーク放電と消耗転移について”,信学技報,EMD93-59(1993-11).