

# 電気接点低速開離時のブリッジとアークの測定 Measurement of Bridge and Arc Phenomena at Low Speed Breaking Contact

埴真吾, 宮永和明, 萱野良樹, 井上浩

Shingo Hanawa, Kazuaki Miyanaga, Yoshiki Kayano, Hiroshi Inoue

秋田大学

Akita University

キーワード : ブリッジ( bridge ), アーク放電( arc discharge ), 閉成時電流( closed current ),  
開離速度 ( opening velocity ), 接点間電圧 ( contact voltage )

連絡先 : 〒010-8502 秋田市手形学園町 1 - 1 秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科  
電子応用 ( 井上 ) 研究室 埴真吾 ,

Tel : 018-889-2492, Fax:018-835-4651, E-mail : [hanawa@venus.ee.akita-u.ac.jp](mailto:hanawa@venus.ee.akita-u.ac.jp)

## 1. はじめに

電気接点において,電極間に材料が溶けて繋がった状態であるブリッジと,金属イオンや周囲ガスからなるアーク放電は,接点間に悪影響を与える要因となる.特に,アーク放電中に発生する大きな電磁ノイズは,低速度開離において金属相初期に高周波成分を含んでいることが明らかになっている[1].アーク継続時間を短くすることは接点の寿命や接触抵抗へ与える影響だけでなく,信頼性やEMCの観点から,高周波ノイズの発生時間の減少のためにも重要である.

このアーク放電は再びブリッジに戻る継続時間の短いアーク(短時間アークと呼ぶ)と,発生後,接点が開離する継続時間の長い

アーク(連続的なアークと呼ぶ)の二種類が観測されている[1][2].接点开離時において,接点間で形成されたブリッジが切れた後に短時間アークが発生し,その後再びブリッジを形成する.この現象を何度か繰り返した後,最終的に連続的なアークが発生して,接点は開離する.この現象は熱平衡に近い低速度で開離することで発生した特有の現象である可能性がある.つまり,開離速度が速い場合と比べて,ブリッジの発生条件が変化することによって,発熱量が変化する.それによってその直後に発生するアーク放電に与える影響が異なる可能性が考えられる.

そこで,ブリッジの発生条件を開離速度と閉成時電流を変えることによって変化させることで,アーク放電への影響を明らかにできると考えられる.電気接点开離動作中の電

圧波形からは、例えば、ブリッジ継続時の電圧は $\phi$ - $\theta$ 理論[3]より電極材料の軟化点と沸点の間の電圧値であること、アーク放電電圧は材料特有のアーク最小電圧(銀においては約12V)[4]を超える電圧値であることが一般には知られている。しかしながら、短時間アーク放電においては、12V以下でも観測されている。これは電磁環境両立性(EMC)の観点からも見逃せない問題であり、明らかにすべき現象である。

これまでの報告でブリッジ継続時間がその直後の短時間アーク継続時間に、短時間アーク継続時間がその直後のブリッジ継続時間に影響を及ぼすことが示唆された。その一方でブリッジ継続時間がその直後の連続的なアーク継続時間への影響は示唆されなかった[5]。

しかしながら、これらの現象は一連の流れで生じているため、連続的なアークだけが独立して発生しているとは考えにくい。

そこで、本報告では再ブリッジする短時間アークと開離する連続的なアークに着目し、それぞれが開離速度と閉成時電流からどのような影響を受けるかを明らかにすることで、接点間に生じるアーク放電現象を明らかにすることを試みた。

## 2. 実験方法

開離速度の範囲は、高周波ノイズの発生に関する文献[1]で使用した開離速度90 $\mu$ m/sからより速い速度の間で議論するため、80 $\mu$ m/s~238 $\mu$ m/sの範囲ではシンクロナスマータと斜板カムによる開離機構を[6]、102mm/sまでのより速い速度にはステッピングモータによる開離機構を使用した。

電源電圧は42V系のリレー[7]を想定した40V一定とし、閉成時電流は1.2Aから5Aとした。

表1は実験条件をまとめたものである。スイッチやリレーなどで使用される銀とし、電極形状はリレーやスイッチで主に使われているリベット型とした。電極はアルコールと蒸留水でそれぞれ10分間ずつ洗浄した後、十分に乾燥させたものを実験に用いた。電気接点は、一度開閉しただけでもアーク放電による表面形状や材質の変化によって接触抵抗などの接触条件が変化するので、開離1回目のみを測定し、電極を毎回交換して実験した。また、本条件で実験したところ、再ブリッジや短時間アークの発生なしに開離する場合が測定された。本論文での実験結果は、アーク放電がブリッジに戻るものと戻らないものについて議論することとし、短時間アークが発生した(再ブリッジした)時の結果のみ、各条件で10例ずつのデータで議論することとした。

負荷抵抗は無誘導抵抗器を使用した。しかし、結線に使用したケーブルには寄生キャパシタンスと寄生インダクタンスが存在し、それらを集中定数の等価回路で表した場合、表1のような $R, L, C$ の値であったので、高周波数に関する検討にはこれらの影響を考慮する必要があった。

接点开離開始から、アーク消弧までの接点

表1 実験条件

雰囲気	室温 22~27 , 湿度 28~47%		
電極	Ag, 2.5mm $\phi$ リベット型, 平坦		
開離時電圧 $E$	40V		
閉成時電流 $I$	1.2A	2.4A	5A
負荷	$R=33$	$R=16.5$	$R=8$
	$L=279\text{mH}, C=17.8\text{pF}$		
開離速度 $v$	80 $\mu$ m/s ~ 102mm/s		
接触力	1.5N		
試行回数	10回		

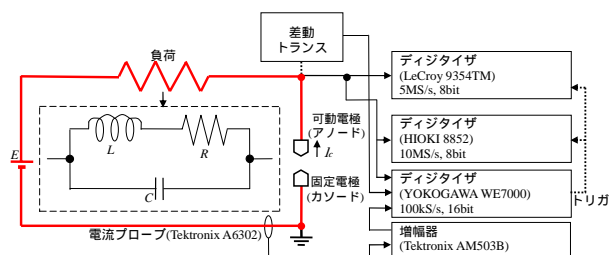


図 1 測定系

開離時波形全体を測定するための測定系を図 1 に示す。銀接点においてブリッジ電圧は 0~1V, 短時間アーク放電電圧は 30V 前後, 連続的なアーク放電時には電源電圧 (40V) を大きく超える電圧が発生する。そこで, それぞれに対応するために, デジタイザ (LeCroy 9354TM) の電圧レンジを 0~40V と 0~200V の 2Ch でサンプリング周波数を 5MS/s としたものと, デジタイザ (Hioki8852) の電圧レンジを 0~1V と 0~50V の 2Ch でサンプリング周波数を 10MS/s としたものでそれぞれ測定した。時間の同期をとるために, 電圧プローブと電流プローブと差動トランスの出力をサンプリング周波数 100kS/s でそれぞれデジタイザ (YOKOGAWA WE7000) で測定した。

### 3. 結果及び検討

#### 3.1 開離波形

閉成時電流 1.2~5A, 開離速度 80 $\mu$ m/s ~ 102mm/s の実験条件で測定した各波形の典型例を図 2~図 4 に示す。各波形において, (A) は接点間電圧で, (B) は接点間電圧の拡大波形 (ブリッジ拡大波形) である。図 3,4 の電圧波形において, 周期的 (0.064ms 毎) に発生しているスパイク状の波形はステッピングモータから発生するノイズによるアーチファクトであることが無通電時の測定により確認している。

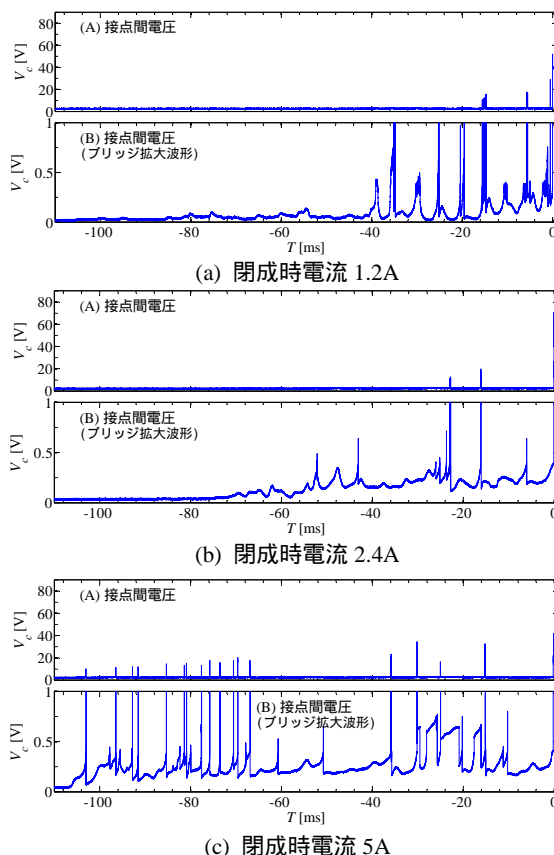


図 2 接点开離時の電圧波形 (開離速度 80 $\mu$ m/s)

図 2 (a) の閉成時電流が 1.2A の例の (A), (B) において,  $T=-110$ ms ~  $-40$ ms の間では接点間電圧は最大で  $1.36 \times 10^{-1}$ V であるので,  $\phi$ - $\theta$ 理論[3]から温度を推定すると  $2.54 \times 10^2$  となる。銀の軟化点 180 [3]に達していると考えられ, 接触部は柔らかくなっていると考えられる。次に,  $T=-40$ ms ~  $-20$ ms の間でブリッジ部分の電圧から温度を推定すると, 最大で銀の融点 961.93 (0.375V) [8]を超えていることから接点表面は溶融している。その後, 銀の沸点 2162 (0.757V) [8]を超えたところで短時間アークを発生するものの, ブリッジへ戻る (再ブリッジ)。この現象を何回か繰り返した後,  $T=0$ ms 付近で連続的なアークが発生する。その後, さらに電極間が開離して, アークが消弧すると接点は開離する。

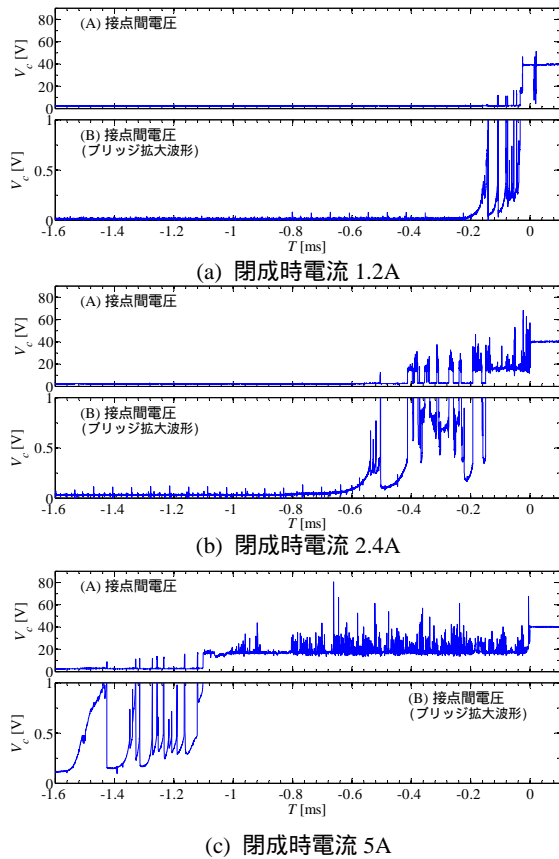


図3 接点開離時の電圧波形（開離速度 51mm/s）

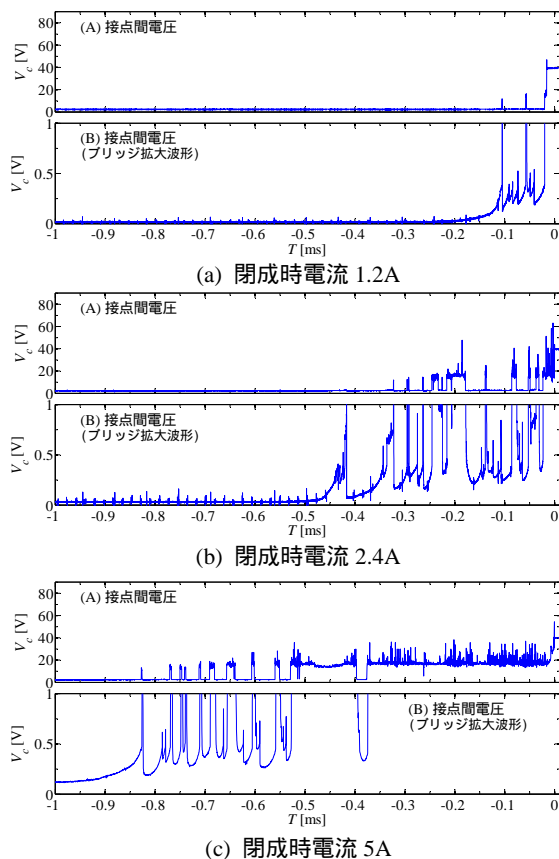


図4 接点開離時の電圧波形（開離速度 102mm/s）

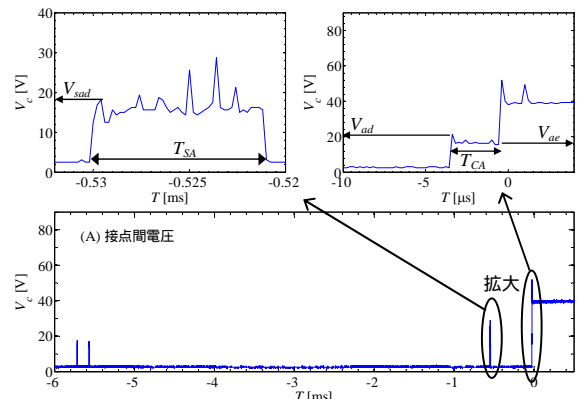


図5 各現象の定義

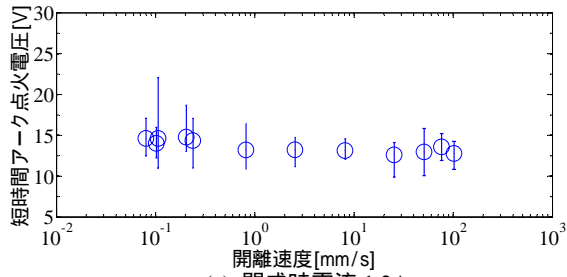
### 3.2 各現象の影響

低速度初回開離時において、発生する短時間アーク放電と連続的なアーク放電が開離速度と閉成時電流からどのような影響を受けるかについて、それぞれの電圧波形から検討する。そのための指標として、図5に短時間アーク継続時間 ( $T_{SA}$ )、連続的なアーク継続時間 ( $T_{CA}$ )、短時間アーク点火電圧 ( $V_{sad}$ )、連続的なアーク点火電圧 ( $V_{ad}$ )、連続的なアーク消弧電圧 ( $V_{ae}$ ) を示す。それぞれの図には、平均値と最大値、最小値を示している。また、短時間アークは各開離波形においていくつか測定されているが、本実験においては、そのうち一番最後に発生したものをそれぞれ着目している。

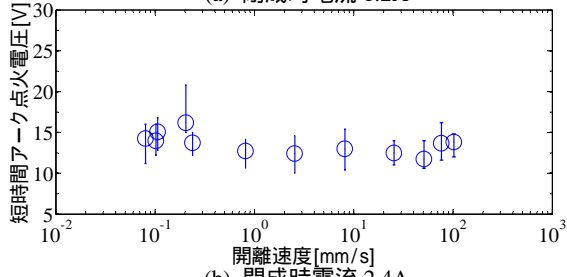
図6の(a)～(c)は開離速度に対する短時間アーク点火電圧の関係である。この図より、開離速度が速くなっても短時間アーク点火電圧は変化せず、閉成時電流が増加しても、短時間アーク点火電圧は変わらない結果となった。

図7の(a)～(c)は開離速度に対する連続的なアーク点火電圧の関係である。この結果に関しても、開離速度、閉成時電流が変化しても、連続的なアーク点火電圧は変化しない結果となった。

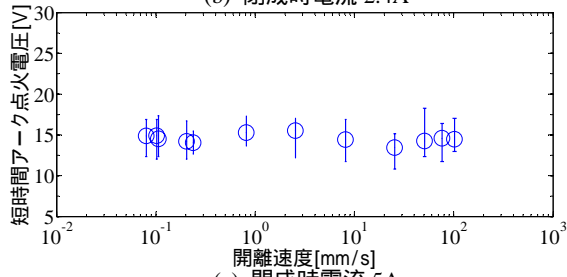
図8の(a)～(c)は開離速度に対する連



(a) 閉成時電流 1.2A

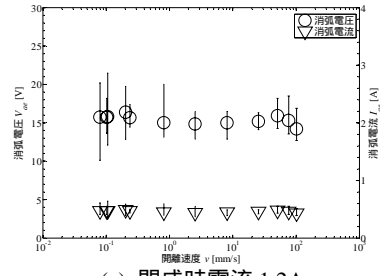


(b) 閉成時電流 2.4A

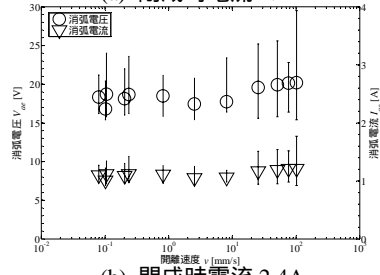


(c) 閉成時電流 5A

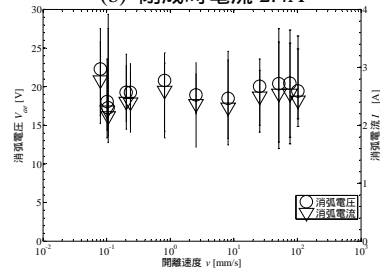
図 6 開離速度と短時間アーク点火電圧の関係



(a) 閉成時電流 1.2A

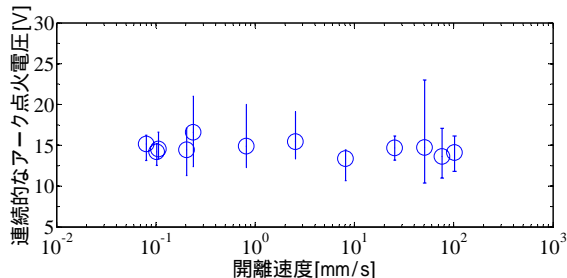


(b) 閉成時電流 2.4A

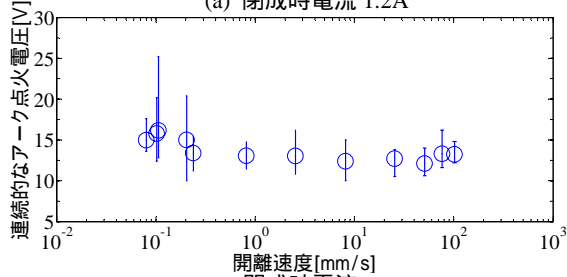


(c) 閉成時電流 5A

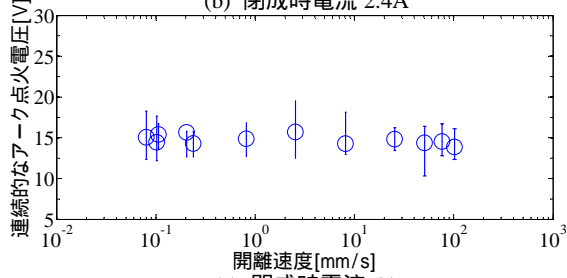
図 8 開離速度とアーク消弧電圧，電流の関係



(a) 閉成時電流 1.2A



(b) 閉成時電流 2.4A



(c) 閉成時電流 5A

図 7 開離速度と連続的なアーク点火電圧の関係

連続的なアーク消弧電圧，アーク消弧電流の関係である．アーク消弧電流との関係を示すためには，接点間の電流も高サンプリングで測定することが望まれる．しかしながら，測定器のチャンネルの数に制限があり，高サンプリングで測定できなかったため，急峻な立ち下がりを持つ電流の切れる時の値を正しく測定できなかった．そのため本報告では印加電圧，閉成時電流，連続的なアーク消弧電圧からアーク消弧電流の値を間接的に求めた結果となっている[4]．図 8 において， $V_a$  は連続的なアーク消弧電圧の 10 例の平均値を示しており， $I_a$  は連続的なアーク消弧電圧によって算出したアーク消弧電流の値である．この結果より，低速度初回開離時において，接点が開離するとき，アーク消弧電圧は閉成時電流が大きくなると高くなっている．それと同様に，閉成時電流が大きくなるにつれて，

アーク消弧電流が大きくなる結果となった。その一方で、開離速度が変化しても、閉成時電流の値が同じであればアーク消弧電圧、アーク消弧電流は変化しない結果となった。

図6と図7の結果より、低速度初回開離時において、短時間アーク、連続的なアークの点火電圧は開離速度、閉成時電流の影響を受けないことが明らかとなった。一方で、図8の連続的なアーク放電が消弧するとき、開離速度から影響は受けないが、閉成時電流の影響を受けている。

図7、図8より、連続的なアークが点火した時の電圧に比べて、消弧した時の電圧は高くなる。これはアーク柱を長さ $l$ 、断面積 $S$ 、抵抗率 $\rho$ とした時の抵抗 $R=\rho l/S$ と考えると、電極間距離が開くことによって距離(長さ $l$ )が長くなるのが原因として挙げられる。しかしながら、開離速度が変化しても点火電圧と消弧電圧の関係は比例的に変化しなかった。よって、抵抗 $R$ は長さ $l$ だけでなく、抵抗率 $\rho$ と断面積 $S$ と閉成時電流によっても変化しているのではないかと考えられる。

#### 4. おわりに

本稿では、電圧波形を測定することで、短時間アークと連続的なアーク放電が開離速度と閉成時電流からどのような影響を受けるかについて明らかにすることを試みた。

初回開離時において、短時間アーク、連続的なアーク点火電圧は開離速度、閉成時電流の影響をそれぞれ受けなかった。

連続的なアーク消弧電流は、開離速度の影響は受けないが、閉成時電流の影響を受ける結果となった。

今後は、 $\rho$ と $S$ と他のパラメータがどのように影響を及ぼしあうのか検討が必要である。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、接点材料をご提供頂いた田中貴金属工業株式会社および日頃議論していただく秋田県産業技術総合研究センター駒木根隆士氏に深く感謝致します。

#### 文献

- [1] T. Nakamura, K. Miyana, Y. Kayano and H. Inoue, "A Study on the Current and Radiation Noise from 30M to 3GHz Generated by Slowly Breaking Silver Compound Contacts", in *Proc. The 23<sup>rd</sup> International Conference on Electrical Contacts 2006*, Sendai, pp.81-86, Jun. 2006.
- [2] S. Hanawa, K. Miyana, Y. Kayano and H. Inoue, "A Study on Relationship between Opening Velocity and Short-Time Arc for Silver Contact", *信学技報*, vol.108, no.296, EMD2008-104, pp.157-160, Nov. 2008.
- [3] R. Holm "Electric Contacts, Theory and Applications", Fourth Edition, Springer, 1967.
- [4] 佐藤 充典, "電気接点 - 材料と特性 -", 日刊工業新聞社, 1984.
- [5] S. Hanawa, Y. Kayano, K. Miyana and H. Inoue, "A study on characteristics extraction of contact voltage waveform at slowly breaking silver contact", *信学技報*, vol.109, no.44, EMCJ2009-15, EMD2009-7, pp.35-40, May. 2009.
- [6] 井上 浩, "簡単な低速開離装置の試作", *信学論*, vol.J68-C, no.9, pp.775-776, Sep. 1985.
- [7] 電気学会・42V電源化調査委員会, "自動車電源の42V化技術", オーム社, 2003.
- [8] 国立天文台編, "理科年表", 丸善, 2003.