

細線爆破トリガー方式による真空ギャップの開発

伊藤 達也*・高野 三郎*・入沢 壽逸*

A Vacuum Gap Switch triggered by Exploding Wire

Tatsuya ITO, Saburo TAKANO and Juichi IRISAWA

In the studies of gap switches, there has been the main theme to develop of high speed switches with high reliability that is used in nuclear fusion and high energy physical experiments. Various switches with small delay time and jitter have been developed, but they have some problems, such as high cost complication.

However, switches with the delay time of about $10\ \mu\text{sec}$ are used in various places, for example a protection switches in JT-60. These switches with low cost, easy handiness and high reliability are available if simple triggering circuits are possible.

In this paper, a vacuum gap with simple triggering circuit that can be triggered by exploding a wire between the electrodes is proposed, and constructed. From the experimental results, the dependences of the starting delay time on the gap spacing, the applied voltages and distance between the main gap and a wire were investigated.

Key words: Vacuum gap switch/Exploding wire

1. 緒 言

現在、ギャップスイッチは高電圧、大電流を始動または断路する素子として多くの種類、目的で使われている。

ギャップスイッチの望ましい特性は、使用電圧や使用電流の広い範囲に渡って、始動時間遅れやそのばらつきが小さいこと、スイッチ抵抗とインダクタンスが小さいこと、さらには寿命が長いことが挙げられる。特に、始動時間遅れやそのばらつきは重要な特性であり、ギャップスイッチの形式やトリガー方式に敏感に関係している¹⁾。

従来のトリガー方式についての多くの研究は、始動時間遅れやそのばらつきをできるだけ小さくすることを目的としていた。その結果種々のトリガー方式が考えられ、始動時間遅れは数 nsec から数十 nsec、時間ばらつきは数 nsec 程度のトリガー方式が開発されている。しかし、現在のところトリガー回路が複雑で、かつ高価なものになっていることも事実である。

ところが現状には別仕様を持ったスイッチも各所で使われている。例えば、核融合電源の保護スイッチな

どであり、その始動遅れ時間は $10\ \mu\text{sec}$ 以下とされている²⁾。このような保護スイッチを簡単なトリガー回路で始動することができれば、保守が簡単となり高い信頼と低コストを得ることができると考えられる。

そこで、本研究は

- ・使用電圧は $0\sim 40\ \text{kv}$
- ・始動スイッチ特性（始動時間遅れ $10\ \mu\text{sec}$ 以下
時間ばらつき $1\ \mu\text{sec}$ 以下）
- ・電極間は高真空状態（ 10^{-5} Torr 程度）
- ・使用回数は数十回程度

とした場合、いかに簡単なトリガー方式でギャップスイッチを始動できるかについて検討することを目的とした。

トリガー方式については、金属細線爆発による方式を採用した。これは、真空ギャップ付近におかれた金属細線に衝撃電流を印加し気化し断断させ、その金属蒸気によって放電を引き起こすものである。

トリガー回路は市販の電解コンデンサーとスイッチ素子としてのサイリスタから成っている。コンデンサーの充電電圧は $1\ \text{kV}$ 以下と従来方式に比べ極めて低電圧であるので、誤動作などの心配はまずない。スイッチ素子としてサイリスタを使用しているため、通常のギャップスイッチに比べて保守が簡単で、高い信

原稿受付：平成元年 3 月 13 日

*長岡技術科学大学電気系

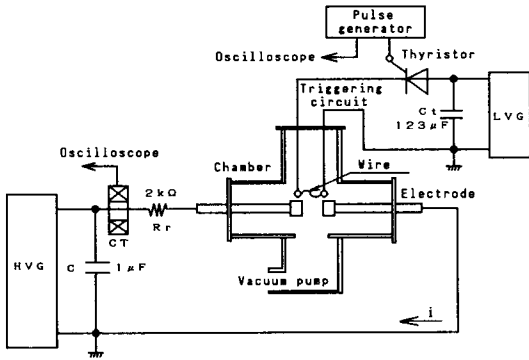


Fig. 1 Experimental Apparatus

頼性が得られる利点を持っている。

2. 実験装置

本研究で用いた実験装置を Fig. 1 に示す。

電極は角を丸めた黄銅製円柱で、直径は両極とも 30 mmφ、表面は 4000 番エミリー紙で鏡面仕上げしている。陰極は固定されているが、陽極はネジ機構によって一回転 1 mm の割合で水平方向に移動する。ギャップ長の零点は両電極間の電流通過で決定し、回転角で任意のギャップ長を設定する。回転角は分度器と回転軸に固定された指針で測定しており、回転角 1 度のとき $2.8 \mu\text{m}$ となる³⁾。高電圧発生器 HVG、低電圧発生器 LVG は倍電圧整流方式を用いており、各々の最高発生電圧は 40 kV、1.14 kV である。

真空装置の排気系としては油拡散ポンプを用い、到達気圧は 2×10^{-5} Torr である。

トリガー回路に用いたサイリスタ (CR100AX-Y) のターンオン時間は $2.45 \pm 0.06 \mu\text{sec}$ である。

また、金属細線を固定するために、改良した IC クリップを用いた。これにより、一度に 6 本の金属細線を固定することができ、細線長さも自由に設定することができる。

3. 金属細線爆発過程に関する検討

ギャップスイッチの重要な特性である始動遅れ時間とそのばらつきは、ギャップスイッチの形式や始動方式に大きく関係している。そのため金属細線爆発によるトリガー方式を検討するためには、その熔融爆発過程に関する基本的検討が必要である。

金属細線に衝撃大電流を供給すると、次の 4 段階の状態変化を経て気化遮断される⁴⁾。

- 1) 固体状態における温度上昇
- 2) 融点に達した後の熔融過程
- 3) 液体状態における温度上昇
- 4) 沸点に達して気化後、アーク発生を経て遮断

そこで、細線爆発過程をモデル化して、各状態変化ごとに数値計算を行い、実際に衝撃大電流を印加し、気化遮断した場合の細線の電圧降下、電流波形との比較を行った。

3.1 細線爆発トリガー回路のモデル⁵⁾

金属細線爆発トリガー回路を Fig. 2 のようにモデル化した。

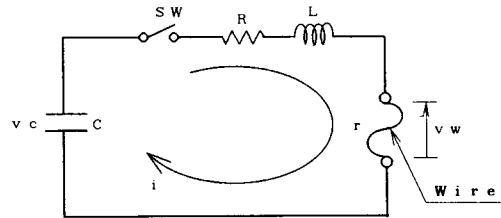


Fig. 2 Model Circuit

モデル回路において、あらかじめのコンデンサ C に電荷 q が蓄えられており、 C 両端の充電電圧を V_c とする。 $t = 0$ でスイッチを投入したとすると、 $t > 0$ に対する回路方程式は次のように表せる。

$$L \frac{di}{dt} + (R + r)i + \frac{1}{C}q = v_c \quad (1)$$

$$v_w = r \cdot i \quad (2)$$

ここで、 r は金属細線の抵抗で、その値は細線の温度上昇、相変化によって変化する。

気化速度は(3)式で、気化熱は(6)式で考慮する。

$$W = 44.33 P \sqrt{M / (\theta + 273)} \cdot K \quad (3)$$

$$\log P = G - F / (\theta + 273) \quad (4)$$

$$K = \exp\{-k(\theta - \theta_b)\} \quad (5)$$

$$\left[\begin{array}{l} \theta : \text{Temperature of wire (}^\circ\text{C)} \\ \theta_b : \text{Boiling point of a pressure} \\ M : \text{Atomic weight} \\ P : \text{Pressure (atm)} \\ W : \text{Rate of vaporization (g/cm} \cdot \text{s)} \\ F, G, k : \text{Constant} \end{array} \right] \quad (6)$$

$$hg = a(1 - T/T_c)^{0.38} \quad (6)$$

$$\left[\begin{array}{l} hg : \text{Heat of vaporization (J/g)} \\ T : \text{Temperature of wire (K)} \\ T_c : \text{Critical temperature (K)} \\ a : \text{Constant} \end{array} \right]$$

また、金属蒸気の導電率は零とし、固体と液体状態が共存する溶融過程の抵抗率は、固体と液体の割合に比例するものとする。

以上のモデルを金属細線に適用し(1), (2)式により、溶融爆発過程における電流 i 、細線の電圧降下 v_w を4次ルンゲクッタ法で計算した。

3.2 シミュレーションの例

一例として銅細線 ($\phi = 0.055 \text{ mm}$, $l = 6 \text{ mm}$) の場合について以下に示す。

回路の初期値を Table 1 に示す。

Table 1 Initial value of circuit parameters

Inductance L	: 3.7 (μH)
Resistance R	: 0.459 (Ω)
Capitance C	: 123 (μF)
Charging voltage V_c	: 600 (V)
Diameter of wire ϕ	: 0.055 (mm)
Length of wire l	: 6 (mm)
Temperature T	: 20 ($^{\circ}\text{C}$)
Resistivity	: 1.7 ($\mu\Omega\text{cm}$)

細線の抵抗率は室温を 20°C として計算したものを初期値とした。

銅細線の特性定数を Table 2 に示す⁶⁾。

Table 2 Thermal properties of copper wire

Atomic weight		63.55
Solid	Density (g/cm^3)	8.93
	Volume resistivity ($\mu\Omega\text{cm}$)	$1.70 \{1 + 3.95 \times 10^{-3} (\text{Temp} - 20)\} (20 \sim 977)$
	Expansion coefficient	$8.1 \{1 + 1.45 \times 10^{-3} (\text{Temp} - 977)\} (977 \sim 1083)$
	Specific heat ($\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$)	$16.5 \times 10^{-4} \{1 + 2.35 \times 10^{-4} (\text{Temp} - 20)\}$ $38.5 \times 10^{-4} \{1 + 2.33 \times 10^{-4} (\text{Temp} - 20)\}$
Fusion	Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	1083
	Heat of dissolution (J/g)	862
	Expansion coefficient	0.0415
Liquid	Density (g/cm^3)	$7.93 \{1 - 9.59 \times 10^{-5} (\text{Temp} - 1083)\}$
	Volume resistivity ($\mu\Omega\text{cm}$)	$21.1 \{1 + 4.05 \times 10^{-4} (\text{Temp} - 1083)\}$
	Specific heat ($\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$)	0.494
Gas	Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)	2582
	Vapor pressure $\log_{10} P$ (P: atm)	$5.552 - 15851/(\text{Temp} + 273)$
	Heat of vaporization (J/g)	$5654 \{1 - (\text{Temp} + 273)/8280\}^{0.38}$
	Critical temperature (K)	8280

ここで抵抗率率、比熱、密度など温度によって変化するものは最小2乗法で求めた近似式を用いた。

電流 i と電圧降下 v_w のシミュレーション結果と実験波形を Fig. 3 に示す。

これより、計算結果と実験波形がほぼ一致していることがわかる。例として銅細線について示したが、他の金属細線（金、銀、アルミ、ニッケル）についても計算を行い、実験波形と比較をしたところ同様の結果が得られている。

シミュレーションを行ったことで、金属細線に衝撃大電流を印加した場合の電流 i 、電圧降下 v_w 、細線温

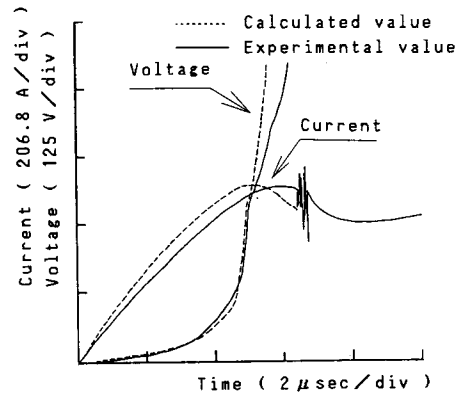


Fig. 3 Wave forms of voltage and current

度の時間変化を予測することができるようになり、溶融爆発過程の基本的な把握ができた。

3.3 始動遅れ時間の予測

金属細線爆発を用いてギャップスイッチをトリガーした場合の始動遅れ時間について考える。ここで考える始動遅れ時間とはサイリスタ・スイッチにトリガー信号が入力されてから、主ギャップに電流が流れ始めるまでの時間とする。

ギャップの絶縁破壊は、金属細線が気化し、その蒸気により引き起こされると考える。したがって、始動遅れ時間は、サイリスタのターンオン時間、細線が気化するまでの時間、金属蒸気が主ギャップまで移動する時間の総和と考えられる。

今回、実験に使用したサイリスタのターンオン時間は、 $2.45 \pm 0.06 \mu\text{sec}$ である。

細線が気化するまでの時間は、使用する細線、その諸条件により異なるため、一例として実験に使用した装置の諸条件を用いて気化開始時刻を計算してみると Table 3 となる。

Table 3 Calculated vaporize time

Diameter of wire (mm)	Vaporize time (μsec)				
	Cu	Au	Ag	Al	Ni
2.5×10^{-2}	1.8	1.4	1.5	1.3	—
5.0×10^{-2}	4.7	3.6	4.0	3.3	4.3
10×10^{-2}	16.2	11.2	13.0	10.0	9.9

$l = 10 \text{ (mm)}$, $C = 123 \text{ (}\mu\text{F)}$, $L = 3.7 \text{ (}\mu\text{H)}$, $R = 0.495 \text{ (}\Omega)$, $V_c = 600 \text{ (V)}$

蒸気が主ギャップまで移動する時間については、詳細な計算することができなかった。しかし、その時間は、上記の時間よりかなり短い⁷⁾と考えられるので、と

りあえずここでは蒸気が移動する時間について考えずに、サイリスタのターンオン時間と気化開始時刻を加えたものを始動遅れ時間とした。

銅細線を用いた場合における始動遅れ時間の計算結果と、実験結果を Fig. 4 に示す。初期値は Table 1 と同様であり、細線直径が 0.025 (mm) の場合も併せて示した。

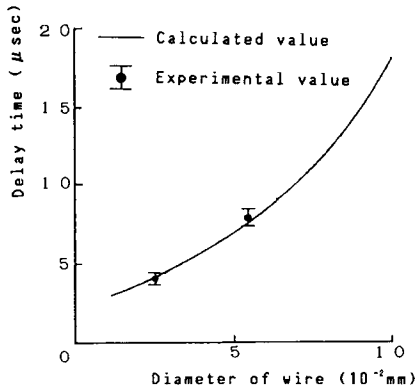


Fig. 4 Calculated and experimental delay time v.s. Diameter of wire

計算値と実験値がほぼ一致していることより、モデル化による計算がよい推定を与えていることがわかる。

4. トリガー特性について

細線爆発を用いたトリガー方式の特性を知るために、以下の実験を行った。

- 1) 始動遅れ時間—ギャップ長
- 2) 始動遅れ時間—電極間印加電圧
- 3) 始動遅れ時間—細線位置

また、それぞれのばらつき、電流立ち上がり時間についても調べる。

使用した細線は次の通りである。

- ① 銅 $\phi = 0.055$ (mm)
- ② 金 $\phi = 0.050$ (mm)
- ③ 銀 $\phi = 0.050$ (mm)

ここで、実験装置の諸条件は前述の通りであり、真空チャンバ内気圧は 2×10^{-5} (Torr) である。

4.1 始動遅れ時間—ギャップ長特性

電極間印加電圧 V_g を 10 (kV) 一定にし、ギャップ長を変化させて、そのときの始動遅れ時間を測定した。ギャップ長は 1 mm から 5 mm まで 1 mm 刻みで変化させた。また、細線の位置は負電極上 1 cm に固定し

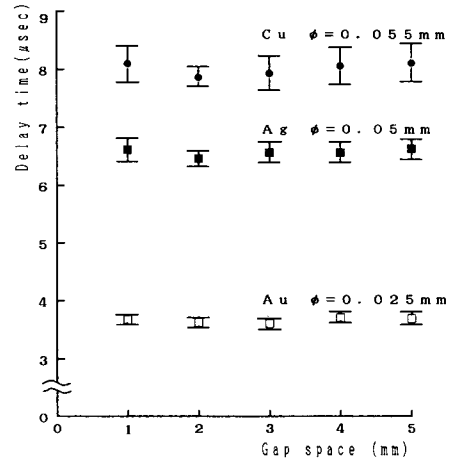


Fig. 5 Delay time v.s. Gap space

た。始動遅れ時間—ギャップ長特性を Fig. 5 に示す。

測定データは分散分析法を用いてまとめた。その結果より始動遅れ時間はギャップ長 (1 mm ~ 5 mm) に依存しないことがわかった。

4.2 始動遅れ時間—電極間印加電圧特性

ギャップ長を一定にして、電極間に印加する電圧を変化させて、そのときの始動遅れ時間を測定した。ギャップ長 2 mm において自爆電圧は約 25 kV である。そこで、電極間印加電圧は自爆電圧の 20% ~ 80% にあたる 5 kV ~ 20 kV まで 5 kV 刻みで変化させた。また、細線の位置は負電極上 1 cm に固定した。始動遅れ時間—電極間電圧特性を Fig. 6 に示す。

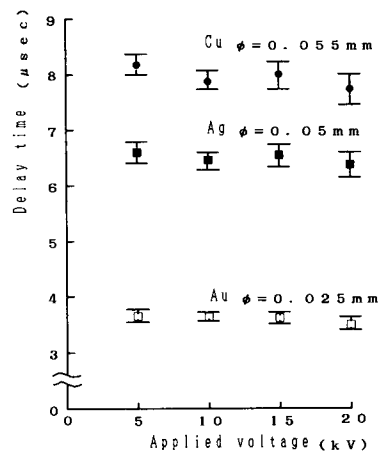


Fig. 6 Delay time v.s. Applied voltage

これより、始動遅れ時間は電極間印加電圧 (5 kV

～20 kV) に依存しないことがわかる。

4.3 始動遅れ時間—細線位置特性

電極間印加電圧を 10 kV、ギャップ長を 2 mm 一定にし、主電極と細線を固定する位置を変化させて、そのときの始動遅れ時間を測定した。細線の位置は負電極上 1 cm から 5 cm まで 1 cm 刻みで変化させた。細線位置に対する始動遅れ時間特性を Fig. 7 に示す。

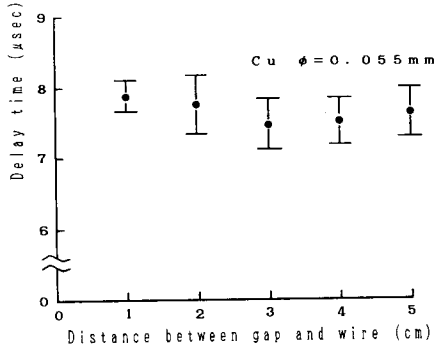


Fig. 7 Delay time v.s Distance between gap and wire

これより、始動遅れ時間は主ギャップと細線の距離 (~5 cm) には依存しないことがわかる。

金属蒸気の移動速度は、1 cm 当り数百 nsec 程度要すると考えられる。始動遅れ時間が主ギャップと細線の距離に関係しないということは、直接金属蒸気によって絶縁破壊を引き起こすのではなく、金属細線が衝撃電流によって爆発気化することで生じる他の因子によって絶縁破壊されると考えられる。他の因子として、細線が爆発するときに発生する紫外放射、金属蒸気による電界歪みなどが考えられるが、はっきりしたことは得られたデータからは推測できない。今後、さらに検討していく必要がある。

4.4 電流立ち上がり特性

絶縁破壊電流の立ち上がり時間をギャップ長、電極間印加電圧、細線位置を変化させて測定した。ギャップ長および電極間印加電圧特性については、値のばらつきがあり、はっきりとした関係をみることはできなかった。

細線位置特性を Fig. 8 に示す。細線距離が 1 cm～2 cm では値に差がない。しかし、3 cm 以上になると距離の増加にしたがって立ち上がり時間が遅くなっている。この原因としては、陰極にアーク痕があることから、主ギャップと細線の距離が比較的短い場合には、細線が気化遮断した後のアークが、細線を固定しているプラス側と主ギャップ陰極との間に生じ、その結果

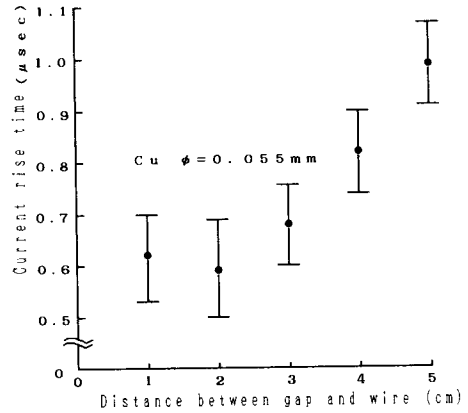


Fig. 8 Current rise time v.s Distance between gap and wire

絶縁破壊に至るため値に差がなく、距離が増加するに従い、主ギャップ陰極との間にアークが生じなくなるため、金属蒸気の移動距離に関係してくると考えられる。さらに詳しい検討が必要である。

実験結果として得られた絶縁破壊電流波形のほとんどは、Fig. 9(a)に示したような急峻な立ち上がりとなるが、同図(b)のようになだらかに立ち上がる波形も観測されている。また、この時の特徴として、急峻に立ち上がる時と比べ、数 μsec 始動遅れ時間が短いことが挙げられる。2つの異なる場合が生じる原因は、細線の熔融爆発過程の違いによるものではないかと考えられるが、さらに検討する必要がある。

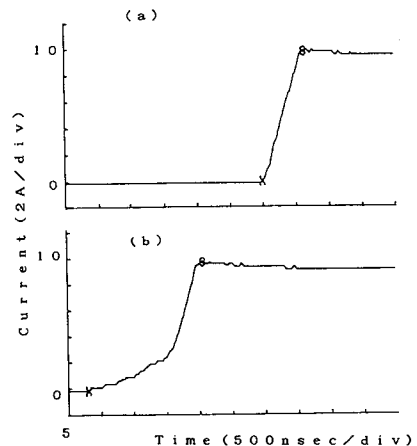


Fig. 9 Wave forms of current

4.5 ばらつき

始動遅れ時間のばらつきは、統計的な分布を示すものであるから、正確な値を求めるためには、相当数の

Table 4 Delay time and Jitter of the gap

		Delay time (μ sec)	Jitter (nsec)
Cu	$\phi = 0.055$ (mm) $l = 6$ (mm)	7.84	90
Au	$\phi = 0.025$ (mm) $l = 6$ (mm)	3.63	40
Ag	$\phi = 0.05$ (mm) $l = 6$ (mm)	6.51	70

実験を繰り返さなければならない。実験では 20 回以上を目標に行った⁸⁾。また、ばらつきは得られた各々の始動遅れ時間を統計的に処理し、始動遅れ時間の 95% 信頼区間をそれとした。今回の実験で使用した各金属細線のばらつきを Table 4 に示す。いずれの値も、目標値の 1 μ sec 以下となっている。

6. 結 論

本論で検討した金属細線爆発によるトリガー方式の始動遅れ時間 td は、今回行った実験の範囲内では細線が気化するまでの時間に関係し、ギャップ長、電極間電圧、細線位置には影響しない。また、絶縁破壊電流の立ち上がりは、主ギャップと細線の距離が比較的に長い場合では、その距離に関係して遅くなる傾向がある。

今回実験に使用した各細線の始動遅れ時間とそのばらつきは、いずれも目標値以内となった。本トリガー方式は、本研究の目的を達成することができる 1 つであることがわかった。

更に、シミュレーションにより金属細線の溶融爆発過程を把握することができた。これより、形状の異なるものや、他の金属細線を用いた場合の始動遅れ時間を予め予測することができるようになった。

参 考 文 献

- 1) 池田長康：“ギャップスイッチから見た放電現象の諸問題”，放電研究 76 号 (1979)。
- 2) N. Miya, R. Shimada, T. Aoyagi, S. Tamura: “JT-60 Ohmic Heating Power Supply”, Proc. 11th SOFT, 889 (1980)。
- 3) 鶴田浩一：“真空絶縁破壊の破壊臨界電界” ED-86-7。
- 4) 長田正義，横井良秀：“衝撃電流による銅細線の溶融爆発過程とアークしゃ断後の回復特性”，電気学会論文誌，349，昭 51-8。
- 5) 五十鈴川浩児，藤村勉，辻光英，安居正二：“金属細線の爆発過程に関する一モデル”，電気学会全国大会，昭 62，201。
- 6) 日本金属学会：“金属データブック”，丸善。
- 7) 電気学会：“放電ハンドブック”，pp. 141，昭 50。
- 8) 杉浦賢，池田長康，井口正之，竹田昭平：“大容量キャパシターバンクの制御に関する研究”，電子技術総合研究所研究報告，第 713 号，(1971)。