細線爆破トリガ方式による真空ギャップスイッチ

非会員 伊藤 達也 (長岡技科大)

正員 高野 三郎 (長岡技科大)

正員 入澤 壽逸 (長岡技科大)

Vacuum Gap Switch Triggered by Exploding Wire

Tatsuya Ito, Non-member, Saburo Takano, Member, Juichi Irisawa, Member (Nagaoka University of Technology)

In this paper, a vacuum gap triggered by exploding a wire set near the main electrodes is proposed. The process of an exploding wire was simulated by the Runge-Kutta method applied to a model circuit incorporating the temperature-dependent, nonlinear resistance of the wire. The time needed for the complete melting of the wire gave a good estimate of the delay time of the gap. The delay time was independent of the width of the gap, the applied voltage with fixed width, and the position of the wire. A delay time of less than 10 microseconds and a jitter of less than 1 microsecond were obtained. The triggering mechanism has not yet been confirmed, but it is clear that the diffusion of metal vapor can not explain the triggering characteristics of the gap.

キーワード：真空ギャップスイッチ，細線爆発

1. ま え が き

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，使用電圧或使用電流の広い範囲にわたって，始動時間遅れやそのばらつきが小さいこと，スイッチの抵抗とインダクタンスが小さいこと，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方式に敏感に関係している⁽¹⁾。

従来のトリガ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，種々のトリガ方式が考えられ，始動時間遅れは数 ns から数十 ns，時間ばらつき数 ns 程度のトリガ方式が開発されている。しかし，現在のところトリガ回路が複雑で，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も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，その始動遅れ時間は $10\ \mu\text{s}$ 以下でもかまわない⁽²⁾。このような保護スイッチを簡単なトリガ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

(1) 使用電圧は $0\sim 40\ \text{kV}$

(2) 始動スイッチ特性（始動時間遅れ $10\ \mu\text{s}$ 以下
時間ばらつき $1\ \mu\text{s}$ 以下）

(3) 電極間は高真空状態 (10^{-5} Torr 程度)

(4) 使用回数は数十回程度

とした場合，いかに簡単なトリガ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させ，その金属蒸気，またはその後のアーク発生に伴うプラズマ化によって，放電を引き起こすことを期待するものである。

真空ギャップのトリガ方式として，(i) 中性ガス入

射, (ii) プラズマ入射, (iii) レーザ照射, (iv) 表面フラッシュオーバー方式, (v) 電界ひずみ形, (vi) トリガトン方式など, 多くの方式が提案, 実験されている⁽³⁾。これらのうち, (i)~(iii)は主電極への細工は必要ないが, それぞれ入射装置が必要となる。(iv)~(vi)については, トリガピンの取付けなど主電極への細工が必要となる。また, 一般に高いトリガ電圧が必要となる。ただし, 電圧に関してはステップアップ変圧器の付加で常時高電圧を印加することは避けられる。

本方式は, 主電極への細工の必要がないこと, トリガ電圧は1kV以下の低電圧で十分であることの特長を有する。また, 細線は主電極から数cm離してもトリガ特性の劣化がないので, 主電極の周囲に容易に数十本の細線を配置することができる。

2. 実験装置

本研究で用いた実験装置を図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30mmφ, 表面は4,000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1mmの割合で水平方向に移動する。ギャップ間隔の零点は両電極間の電流導通で決定し, 回転角で任意のギャップ間隔を設定する。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2.8μmとなる。高電圧発生器, 低電圧発生器の各々の最高発生電圧は40kV, 1.14kV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。トリガ回路に用いた, サイリスタ(CR 100 AX-Y)のターンオン時間は, $2.45 \pm 0.06 \mu s$ 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。

図1 実験装置
Fig. 1. Experimental Apparatus.

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方式を検討するためには, その溶融爆発過程に関する基本的検討が必要である。

真空中で金属細線に衝撃大電流を供給すると, 一般に次の状態変化を経ると考えられる。

- (1) 固体状態における温度上昇
- (2) 融点に達した後の溶融過程
- (3) 液体状態における温度上昇と気化の顕著化
- (4) アーク発生に伴うプラズマ化

そこで, (1)~(3)の過程について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> 細線爆発トリガ回路のモデル⁽⁴⁾ 金属細線爆発トリガ回路を図2のようにモデル化した。

モデル回路において, あらかじめコンデンサCには電荷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。

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di}{dt} + (R+r)i &= V_c \\ V_c &= V_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_w = r \cdot i \dots\dots\dots (2)$$

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(5)式で考慮する。

$$W = 5.833 \times 10^{-2} P \sqrt{M / (\theta + 273)} \dots\dots\dots (3)$$

$$\log P = -17520 / (\theta + 273) - 1.21$$

$$\times \log(\theta + 273) + 13.21 \dots\dots\dots (4)$$

ここで, θ : 細線温度($^{\circ}C$), M : 蒸発原子のグラム原子量(g), P : 温度 $\theta(^{\circ}C)$ における飽和蒸気圧(Torr), W : 気化速度($g/cm^2 \cdot s$)

図2 モデル回路
Fig. 2. Model Circuit.

$$h_0 = a[1 - (\theta + 273)/(\theta_c + 273)]^{0.38} \dots\dots (5)$$

ここで、 h_0 : 気化熱(J/g), θ : 細線温度(°C), θ_c : 臨界温度(°C), a : 定数

(3)式における P と θ の関係は、飽和蒸気圧-温度曲線を近似した(4)式を使用した⁽⁵⁾。

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。気化については、飽和蒸気圧が大きくなる溶融完了後から考慮した。

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 を四次ルンゲ・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($\phi=0.055$ mm, $l=6$ mm)の場合について以下に示す。回路の初期値を表1に示す。

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。銅細線の物性定数を表2に示すが、これは五十鈴川らが「金属データブック」を中心に整理

表 1 回路定数の初期値
Table 1. Initial value of circuit parameters.

インダクタンス	$L: 3.7$ H
回路抵抗	$R: 0.459$ Ω
容量	$C: 123$ μ F
充電電圧	$V_c: 600$ V
銅線の直径	$\phi: 0.055$ mm
銅線の長さ	$l: 6$ mm
温度	$\theta: 20^\circ$ C
抵抗率	$\rho: 0.17$ $\mu\Omega\cdot$ cm

表 2 銅細線の物性定数
Table 2. Thermal properties of copper wire.

	原子量	63.55
固 体	密度(g/cm ³)	8.93
	体積抵抗率(μΩ·cm)	1.70(1 + 3.95 × 10 ⁻³ (θ - 20)) 8.1(1 + 2.45 × 10 ⁻³ (θ - 977))
	線膨張率	16.5 × 10 ⁻⁶ (1 + 2.35 × 10 ⁻⁴ (θ - 20))
	比熱(J/g°C)	38.5 × 10 ⁻² (1 + 2.33 × 10 ⁻⁴ (θ - 20))
溶 融	融点(°C)	1,083
	融解熱(J/g)	862
	体積增加率	0.0415
液 体	密度(g/cm ³)	7.93(1 - 9.59 × 10 ⁻⁵ (θ - 1083))
	体積抵抗率(μΩ·cm)	21.1(1 + 4.05 × 10 ⁻⁴ (θ - 1083))
	比熱(J/g°C)	0.494
気 化	蒸気圧 log ₁₀ P(P: Torr)	-17,520/(θ + 273) - 1.21 × log(θ + 273) + 13.21
	気化熱(J/g)	5,654(1 - (θ + 273)/8,280) ^{0.38}
	臨界温度(°C)	8,007

しなおしたものである⁽⁴⁾。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図3に示す。なお、参考のため細線の温度変化も示した。

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, アルミニウム, 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、その蒸気または、その後のアーク発生に伴うプラズマ化により引起こされると考えられる。しかしながら、さきのシミュレーションの結果によると、金属細線の溶融完了時間のほうがその後の気化完了時間に比べて十分長い。従って、始動遅れ時間を推定する際に、溶融完了時間がよい近似を与えるものと期待される。

細線が溶融完了するまでの時間は、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溶融完了時間を計算してみると表3となる。

銅細線を用いた場合における溶融完了時間の計算結果にサイリスタのターンオン時間を加えたものと、始動遅れ時間の実験結果を図4に示す。初期値は表1と

図 3 電圧・電流波形
Fig. 3. Wave forms of voltage and current.

表 3 溶融完了時間の計算値
Table 3. Calculated time of complete melting.

細線の直径 (mm)	溶融完了時間 (μ s)				
	Cu	Au	Ag	Al	Ni
2.5×10^{-2}	1.56	1.24	1.37	1.08	—
5.0×10^{-2}	4.17	3.25	3.67	2.80	2.81
1.0×10^{-2}	13.4	9.74	11.6	8.19	7.94

$l = 6 \text{ mm}$, $C = 123 \mu\text{F}$, $L = 3.7 \mu\text{H}$,
 $R = 0.495 \Omega$, $V_c = 600 \text{ V}$

図 4 始動遅れ時間の計算および実験値と細線直径との関係
Fig. 4. Calculated and experimental delay time vs. diameter of wire.

同様であり、細線直径が 0.025 mm の場合も併せて示した。

この図から、始動遅れ時間の予測として、溶融完了時間の計算値が良い推定を与えていることがわかる。

4. トリガ特性について

細線爆発を用いたトリガ方式の特性を知るために以下の実験を行った。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。

- (1) 始動遅れ時間-ギャップ間隔
 - (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
- 使用した細線は次のとおりである。
- (i) 銅 $\phi = 0.055 \text{ (mm)}$
 - (ii) 金 $\phi = 0.025 \text{ (mm)}$
 - (iii) 銀 $\phi = 0.05 \text{ (mm)}$

ここで、実験装置の諸条件は前述のとおりであり、真空チャンバ内気圧は $2 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ である。

〈4・1〉 始動遅れ時間-ギャップ間隔特性 電極間印加電圧 V_0 を 10 kV 一定にし、ギャップ間隔を変化

図 5 始動遅れ時間とギャップ間隔との関係
Fig. 5. Delay time vs. gap space.

図 6 始動遅れ時間と電極間印加電圧との関係
Fig. 6. Delay time vs. applied voltage.

させて、そのときの始動遅れ時間を測定した。ギャップ間隔は 1 mm から 5 mm まで 1 mm 刻みで変化させた。また、細線の位置は主電極の陰極側上 1 cm に固定した。始動遅れ時間-ギャップ間隔特性を図 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間隔 ($1 \sim 5 \text{ mm}$) 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 ギャップ間隔を一定にして、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。ギャップ間隔 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 $20 \sim 80\%$ にあたる $5 \sim 20 \text{ kV}$ まで 5 kV 刻みで変化させた。また、細線の位置は主電極の陰極側上 1 cm に固定した。始動遅れ時間-電極間印加電圧特性を図 6 に示す。

これより、始動遅れ時間は電極間印加電圧 ($5 \sim 20 \text{ kV}$) 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, ギャップ間隔を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。細線の位置は主電極の陰極側上1 cmから5 cmまで1 cm刻みで変化させた。始動遅れ時間-細線位置特性を図7に示す。これより, 始動遅れ時間は主電極と細線の距離(〜5 cm)には依存しないことがわかる。

〈4・4〉 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, 相当数の実験を繰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⁽⁶⁾。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表4に示す。いずれの値も目標値の1 μ s以下となっている。

〈4・5〉 トリガ機構の検討 トリガ特性に関する実験結果から, 始動遅れ時間は, (i) ギャップ間隔(1〜5 mm), (ii) 電極間印加電圧(5〜20 kV), (iii) 細線位置(1〜5 cm)には依存していない。ここでは, この三つの実験事実と矛盾しないトリガ機構について検討する。

蒸発した金属原子は真空中を蒸発源から与えられた熱エネルギーで決まる速度で飛散してゆく。この速度

として, 平均速度($v = \sqrt{8R(\theta + 273)/\pi M}$ (cm/s), ここで, R : 気体定数 8.32×10^7 (erg/mol $\cdot$ deg), θ : 金属原子の温度($^{\circ}$ C), M : 金属原子のグラム原子量(g))を例にとって考察する。図3の温度曲線から, 気化が激しくなっている時刻での銅原子の温度は高く見積もって約4,000 $^{\circ}$ Cである。この温度に対する平均速度は0.12 cm/ μ sとなる。すなわち, 銅原子が1 cm移動するのに要する時間は8.3 μ s, 5 cm移動するには41.7 μ sもの時間を必要とする。金, 銀については, シミュレーションによると温度も銅に比べ低く, 質量も大きいことから, 同じ距離を移動するには銅よりも長時間必要とする。以上のことから, 金属蒸気が主電極間に移動してくることがトリガの原因ならば, 始動遅れ時間は細線位置に依存することとなり, 実験事実(iii)に反する。温度4,000 $^{\circ}$ Cの電子の移動速度は5.2 cm/ μ sで, 5 cmを移動するのに要する時間は約1 μ sとなる。この時間は, ばらつき時間に近い値である。従って, 本方式のトリガ機構の因子として電子の存在を考えれば実験事実(iii)と矛盾しない。しかし, 実際にこの程度の時間で電子が電極付近に到達可能かどうかは, プラズマの両極性拡散の検討も含め, 今後の課題である。

5. 電流立上り特性

絶縁破壊電流の立上り時間をギャップ間隔, 電極間印加電圧, 細線位置を変化させて測定した。ギャップ間隔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見ることができなかった。

図7 遅れ時間と主電極・細線間距離との関係
Fig. 7. Delay time vs. distance between gap and wire.

表4 遅れ時間とばらつき
Table 4. Delay time and jitter of the gap.

細線種類 (mm)	始動遅れ時間 (μ s)	ばらつき (μ s)
銅 $\phi=0.055$, $l=6$	7.84	0.9
金 $\phi=0.025$, $l=6$	3.63	0.4
銀 $\phi=0.05$, $l=6$	6.51	0.7

図8 電流の立上り時間と主電極・細線間距離との関係

Fig. 8. Current rise time vs. distance between gap and wire.

図 9 電流波形

Fig. 9. Wave forms of current.

細線位置特性を図 8 に示す。細線距離が 1~2 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従って立上り時間が遅くなっている。

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、図 9 (a) に示したような急しゅんな立上りとなるが、(b) 図のようになだらかに立上る波形も観測されている。また、このときの特徴として、急しゅんに立上るときと比べ、数 μ s 始動遅れ時間が短いことが挙げられる。二つの異なる場合が生じる原因は、いまのところ不明である。

6. む す び

本論文で検討した金属細線爆発によるトリガ方式の始動遅れ時間 t_d は、今回行った実験の範囲内ではギャップ間隔、電極間電圧、細線位置には影響しない。また、絶縁破壊電流の立上りは、主電極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ばらつきは、いずれも目標値以内となった。本トリガ方式は、本研究の目的を達成することができる一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、ほかの金属細線を用いた場合の始動遅れ時

間をあらかじめ予測することができるようになった。
(平成 2 年 12 月 21 日受付, 同 3 年 6 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 池田: 「ギャップスイッチから見た放電現象の諸問題」, 放電研究, No. 76 (昭 54)
- (2) N. Miya, R. Shimada, T. Aoyagi & S. Tamura: "JT-60 Ohmic Heating Power Supply", Proc. 11th SOFT, p.889 (1980)
- (3) I. Vitkovitsky: High Power Switching, (1987) Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- (4) 五十鈴川・藤村・辻・安居: 「金属細線の爆発過程に関する一モデル」, 昭 62, 電気学会全大, No. 201
- (5) 日本金属学会: 金属データブック (昭 59) 丸善
- (6) 杉浦・池田・井口・竹田: 「大容量キャパシタバンクの制御に関する研究」, 電総研研報, No. 713 (昭 46)

伊 藤 達 也 (非会員)

昭和 39 年 5 月 16 日生。平成元年 3 月長岡技術科学大学大学院修士課程修了。同年 4 月東北電力(株)入社, 現在に至る。

高 野 三 郎 (正員)

昭和 22 年 7 月 5 日生。41 年 3 月新潟県立長岡工業高等学校電子科卒業。同年 4 月新潟大学工学部電子工学科勤務。現在, 長岡技術科学大学工学部電気系に勤務。主として, パルス電力工学に関する研究に従事。

入 澤 寿 逸 (正員)

昭和 16 年 2 月 5 日生。44 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月同大学工学部電気工学科助手。53 年 4 月長岡技術科学大学工学部電気系助教授, 現在に至る。工学博士。パルス電力工学, 電力系統工学の研究に従事。プラズマ・核融合学会, 物理学会会員。