

ギャップスイッチの自己破壊電圧特性について

STUDY ON SELF-BREAKDOWN VOLTAGE CHARACTERISTICS OF GAP SWITCHES

中田恭輔^{#, A)}, 伊藤俊輝^{A)}, 徳地明^{A)}

Kyosuke Nakata^{#, A)}, Toshiki Ito^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}

^{A)} Pulsed Power Japan Laboratory Ltd. (PPJ)

Abstract

Recently, high-performance semiconductor switches such as SiC and GaN have appeared and are widely used. However, semiconductor switches with ratings of several tens of kV or several kA are still not commercially available. Gap switches are simple in structure and can achieve high-voltage and high-current switching, which is difficult for semiconductor switches, but there are many uncertainties such as self-breakdown voltage. In this study, the characteristics of self-breakdown voltage of gap switches are investigated by focusing on the flowing current and the filling air pressure between gap switches.

1. 目的

数十 kV や数 kA オーダーのスイッチングを小型の素子で行いたい場合、半導体スイッチが高性能化してきた現在でもギャップスイッチが候補に挙がる。ギャップスイッチとは導体の電極の間に絶縁体を挟んだ隙間(ギャップ)を設け、絶縁体の絶縁破壊を利用してスイッチングを行うスイッチのことである。絶縁体には絶縁性能が回復する気体や液体が好まれる。特に気体の場合はギャップ間への印加圧力を上げることにより、絶縁破壊電圧を容易に調整することができるためよく用いられる。

小型かつ構造が簡単なギャップスイッチであるが、ギャップ間の絶縁体の状態やギャップ表面の状態によってギャップ間の自己破壊電圧が大きく変動する。自己破壊電圧が変動してしまうと、スイッチとしての制御性が悪くなってしまふ。本稿では、ギャップスイッチに流れる電流やギャップ間に印加する空気の圧力に着目しギャップスイッチの自己破壊電圧の特性を評価した。

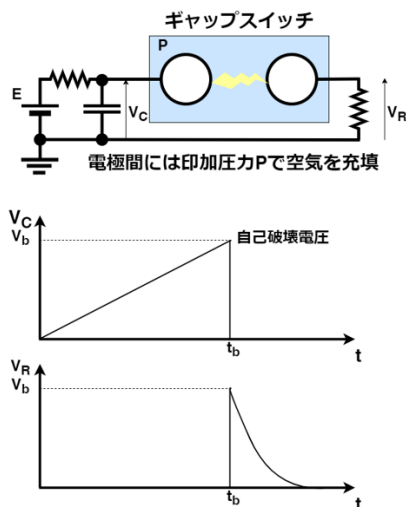


Figure 1: Behavior of the gap switch.

2. 試験内容

ギャップスイッチの特性を調査する試験を行うため、Fig. 2 に示す回路を用意する。回路図は Fig. 3 に示す。ここで、コンデンサの静電容量 C は 5.2 nF、ギャップスイッチ電極の材質は銅(C1100)である。

高圧プローブにより得られたコンデンサ端子間の電圧波形より、ギャップスイッチの自己破壊電圧 V_b を測定した。 V_b 測定のための放電は 1000 回行い、1000 回の統計データ(平均、変動係数等)から特性を評価した。変動係数は標準偏差を平均で割った、ばらつきの指標を示す値であり、値が大きいくほどばらつきが大きいことを示す。



Figure 2: Test circuit.

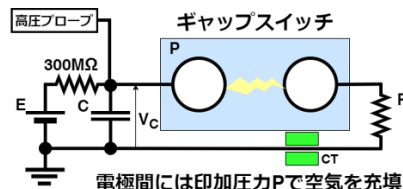


Figure 3: Test circuit diagram.

[#] nakata@myppj.com

2.1 電流による自己破壊電圧の特性調査試験

負荷となる抵抗 R の値を変化させることで、ギャップスイッチに流れる電流を変化させ、それに伴う V_b の特性の変化を測定した。試験手順を下記に示す。

- 1) ギャップスイッチ電極間の距離を 3 mm に調整する。
- 2) ギャップスイッチ電極間に印加する印加圧力 P を 0.45 MPa にする。
- 3) 負荷抵抗 R の値を短絡、200 Ω 、10 k Ω の 3 つの条件にてギャップスイッチを導通させ V_b を測定する。

2.2 印加圧力による自己破壊電圧の特性調査試験

ギャップ間に印加する空気の圧力 P の値を変化させることで、それに伴う V_b の特性の変化を測定した。試験手順を下記に示す。

- 1) 負荷抵抗 R の値を短絡にする。
- 2) ギャップスイッチ電極間の距離を 3 mm に調整する。
- 3) ギャップスイッチ電極間に印加する印加圧力 P を 0.05 MPa ずつ上昇させながら、ギャップスイッチを導通させ V_b を測定する。
- 4) ギャップスイッチ電極間の距離を 4 mm~6 mm に変更し、同様の試験を行う。

3. 試験結果と考察

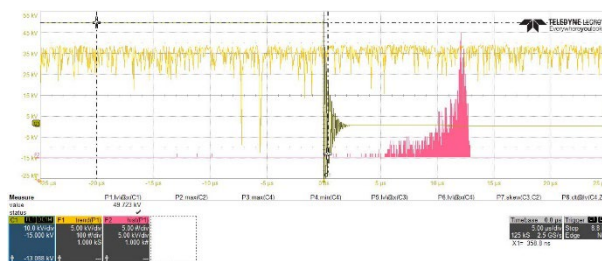
3.1 電流による自己破壊電圧の特性調査試験結果

得られた V_b の測定結果を Table 1 に示す。また、測定波形を Fig. 4 に示す。C1 がコンデンサの端子間電圧波形である。P1 が自己破壊電圧であり、オシロスコープのトリガがかかった時間から 200 μ s 前の電圧値とした。F1 と F2 は自己破壊電圧 P1 の波形である。F1 は縦軸が電圧であり、測定した順番に横軸に表示されている。F2 は縦軸が回数であり、横軸が電圧のヒストグラムにて表示されている。

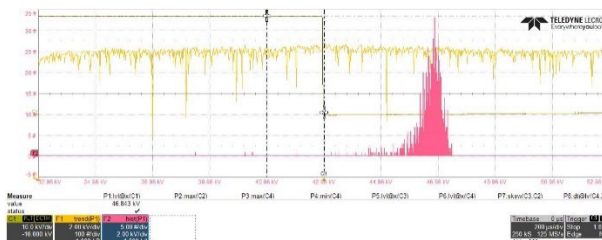
200 Ω と 10 k Ω においてはピーク電流値が 2 桁程差があるにも関わらず、自己破壊電圧のばらつきに差があまりない。これは 1.45 と 1.03 の変動係数に現れている。

Table 1: Self-breakdown Voltage Due to Current

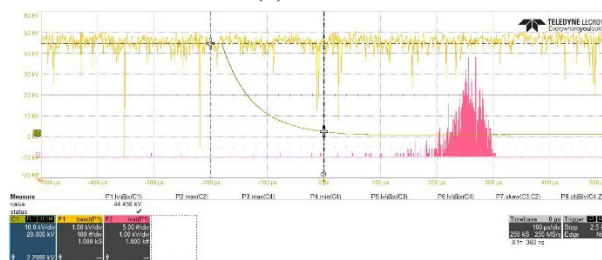
負荷抵抗	短絡	200 Ω	10 k Ω
平均ピーク電流	10 kA	233 A	4 A
ギャップ間印加圧力	0.45 MPa	0.45 MPa	0.45 MPa
平均自己放電電圧[V]	43673	46616	44274
中央値 (メジアン)	44404	46763	44345
変動係数	4.61	1.45	1.03
尖度	37.6	39.3	45.0
範囲	29694	8980	6086
最小値	15948	38465	38755
最大値	45641	47445	44841
データの個数	1000	1000	1000



(a) short



(b) 200 Ω



(c) 10 k Ω

Figure 4: Measured waveform 1.

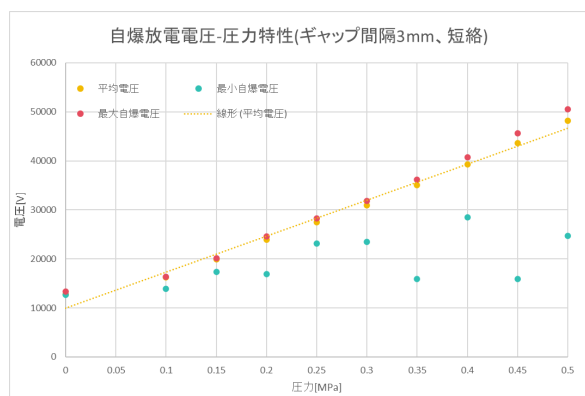
それに対し、10 kA は 4.61 と大きな変動係数を示した。また、平均が 44 kV なのに対し、最小では約 16 kV にて自己破壊を起こしている。これは負荷抵抗が短絡の時、コンデンサに溜まっていたエネルギーの大部分がギャップ電極にて短時間に消費されることで、電極の消耗や変形が起こってしまうためだと考えられる。

3.2 印加圧力による自己破壊電圧の特性調査試験結果

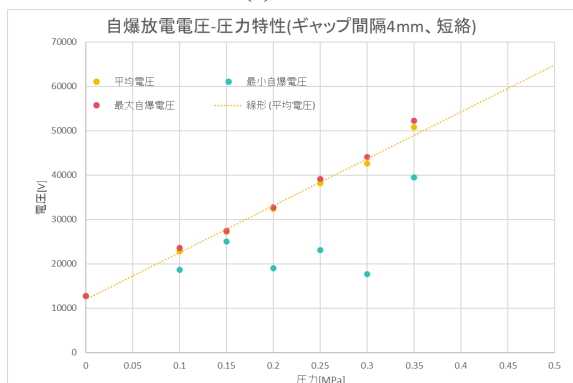
得られた V_b の測定データをまとめたグラフを Fig. 5 に示す。Figure. 5より圧力が上がるにつれて自己破壊電圧が高くなるのがわかる。また、圧力が高くなればなるほど自己破壊電圧のばらつきが大きくなった。また、同じ圧力で比較した時ギャップ間距離が大きくなると自己破壊電圧も大きくなった。

次に、異なるギャップ間距離にて近い自己破壊電圧にて比較した表を Table 2 に示す。近い自己破壊電圧にて比較したときでも、圧力が高い方が大きな変動係数を示した。

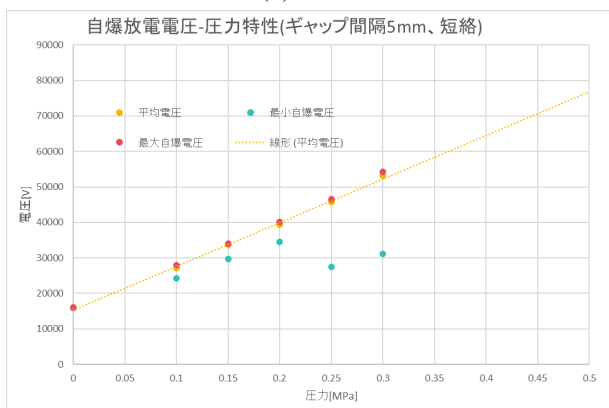
圧力が高くなると自己破壊電圧のばらつきが大きくなるのは、ギャップ間により大きな電界が印加されることで、ギャップ近傍の荷電粒子の振る舞いに変化していることが影響している可能性がある。



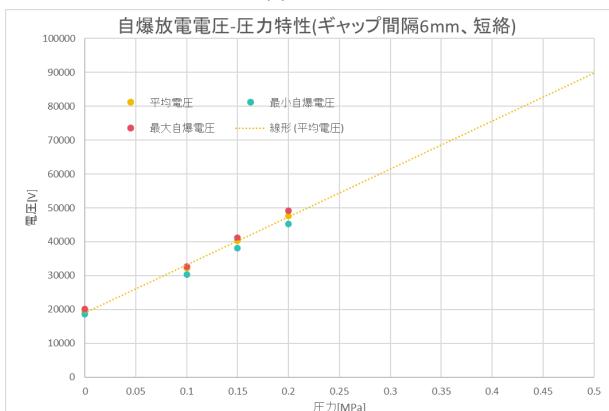
(a) 3 mm



(b) 4 mm



(c) 5 mm



(d) 6 mm

Figure 5: Self-breakdown voltage-pressure characteristics.

Table 2: Self-breakdown Voltage Due to Pressure

ギャップ間距離[mm]	3	4	5	6
ギャップ間印加圧力[MPa]	0.40	0.25	0.20	0.15
平均自己放電電圧[V]	39309	38155	39359	40359
中央値 (メジアン)	39771	38301	39429	40473
変動係数	3.58	2.27	1.05	1.00
尖度	12.8	112	25.5	2.6
範囲	12196	16086	5494	3010
最小値	28509	23085	34575	38149
最大値	40705	39171	40069	41159
データの個数	1000	1000	1000	1000

4. まとめ

ギャップスイッチに流れる電流やギャップ間に印加する空気の圧力に着目しギャップスイッチの自己破壊電圧の特性の評価を行った。圧力は大きくなるにしたがって、電流はある程度大きくなると、ギャップの自己破壊電圧のばらつきを大きくすることを確認した。今回の試験結果を踏まえて、流す電流や電極の材質、印加圧力に注意することでより安定したギャップスイッチを作成することができるだろう。

参考文献

- [1] A. L. Donaldson *et al.*, “Modeling of self-breakdown voltage statistics in high-energy spark gaps”, J. Appl. Phys., vol. 57, pp. 4981-4990, 1985.