

爆薬を用いた大電流遮断スイッチ

薄葉 州*, 角館洋三*, 吉田正典*, 青木勝敏*, 田中克己*,
藤原修三*, 宮本昌広**, 田 実**, 久保田 彰****

大電流の高速スイッチングシステムの開発を目的として、爆薬を用いた電流遮断スイッチを試作し基礎実験を行った。絶縁体の押し型と爆薬に挟まれた導電部のアルミニウム板を爆轟波により高速変形する方式で、最大40kAの電流遮断実験を行った。その結果、観測されたスイッチ抵抗の波形はアルミニウム板の変形条件と遮断電流の値の両方に強く依存すること、押し型の材質・形状や起爆方法の選択によりスイッチ抵抗波形の制御がある程度可能であることがわかった。スイッチ抵抗の起因としてはアルミニウム板の変形に伴って発生するアーク電流が関与している可能性があり、押し型内での電流経路の変形過程がスイッチ抵抗の時間変化に反映していることが推察された。

はじめに

電流回路の一部を爆薬の爆轟波で高速に変形すると、変形部分での電気抵抗が急激に増加し、回路電流を高速で遮断することができる。この爆薬による電流遮断を利用した大電流の高速スイッチング技術は、近年のプラズマ研究・及び各種ビーム発生技術の進展に伴い、重要性を増している。その理由のひとつは、爆薬発電機のような大電流源と組み合わせることにより、極めて高速の大電流パルス(立ち上がり時間1 μ s以下、ピーク値10MA以上)の制御が可能になるためである。Fig. 1に、スイッチングによる電流パルス成形の原理を示した。図中、S1, S2は、それぞれ遮断(開)、投入(閉)スイッチであり、2つをタイミング良く作動させることにより、電源からの出力のうち、必要な部分のみを負荷へ高速に供給できる。

Pavlovskiiらは爆薬による大電流プラズマの圧縮を利用した遮断スイッチを製作し、磁束濃縮型爆薬発電機と接続して立ち上がり時間0.5 μ s、ピーク値4MAの負荷電流を発生した¹⁾。また最近Goforthらは金属板を高速変形させる方式により、立ち上がり時間1.5 μ s、

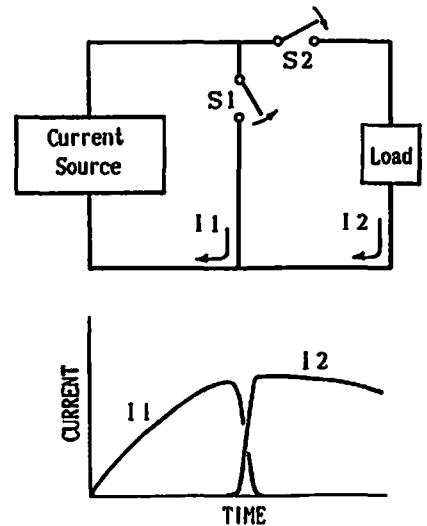


Fig. 1 Current transfer by an opening switch : S1 and a closing switch : S2

ピーク値6MAの負荷電流を得ている²⁾。これらの高速大電流は、プラズマピンチ法による中性子ビーム発生等の研究に应用到期待されている。

爆薬による電流遮断技術のもうひとつの重要性は、誘導エネルギー源への応用である。最近、核融合実験等の規模が大型化するにつれ、パルス電源のコンパクト化、特に初期エネルギー蓄積の高密度化が必要になっている。そこで従来のコンデンサーバンクに比べエネルギー密度が10倍以上高い、ストレージコイル内の誘導エネルギーを利用する方式が注目されている³⁾⁴⁾。

昭和63年11月2日受理

*化学技術研究所
〒305 茨城県つくば市東 1-1
TEL 0298-54-4798

**富士電機総合研究所

***株式会社

****株式会社

〒100 千代田区内幸町 1-1-1
インベリアルタワー16F
TEL 03-507-7811

コイルにエネルギーを蓄積するための一次電源としては、エネルギー密度の高いホモポラー発電機³⁾が有効である。しかし、コイルへのエネルギー蓄積には数百msの時間を要するので、コイル内に蓄えられた電流をパルス的に負荷に供給するためにはFig. 1示したように遮断スイッチが不可欠となる。

爆薬による電流遮断は、ヒューズを用いる方法やプラズマエロージョンスイッチなど、現在までに考察されている種々の方式⁴⁾に比べ、通電容量及び遮断開始時刻の制御などの点において著しく有利である。しかし誘導エネルギー源への応用を考えた場合、スイッチング回路のコンポーネントとして実用化するためには、1)作動時の抵抗変化の制御、2)使用薬量の削減、などの点で検討が必要である。1)は、負荷の特性に合った電流・電圧パルスの発生にとって重要であるが、抵抗増加の機構に関してはまだ十分な説明がなされていないの現状である。2)は回路コンポーネントとしての扱い易さの点で重要である。

我々は、爆薬を用いた実用的なスイッチングシステムの開発を目標として、爆薬による電流遮断の基礎的実験を行っている⁵⁾。ここでは、Goforthらが報告した金属板の変形による遮断方式を採用し、最大40kAでの遮断実験結果を基に、上記1)、2)の観点から遮断特性の評価を行い実用化に向けての検討を行った。

実験方法

試作した爆薬遮断スイッチの代表的な構造をFig. 2に示す。このスイッチは、導電部の金属板を、隣接した爆薬の爆轟波により、絶縁体の押し型へ高速変形させる方式である。爆薬の燃焼ガスと金属板とを電気絶縁するため、爆薬と金属板間のテフロンシートを挿入している。本実験では、金属板として幅40mm、長さ40mm、厚さ0.8mmのアルミニウム板を用い、爆薬にはPETNに30wt%のシリコンゴムを混入したものをを用いた。爆薬の形状は、直径100mm、厚さ15mmの円盤状で、密度と爆速はそれぞれ1.45g/cm³、6.7km/sである。

Fig. 2に示すように、押し型の構造は数枚の刃を持つ筒型の断面形状を持っている。この押し型の形状はGoforthらの報告に基づいたものである。我々は、刃の部分の材質、枚数、間隔が遮断特性に大きく影響するものと考え、刃の材質として、衝撃インピーダンスの異なるポリカーボネート、テフロン、アルミナ焼結体の3種類の絶縁体を選んだ。衝撃インピーダンスは爆轟による衝撃波がアルミニウム板を通過して刃に入射した際の刃の変形度合いを示すもので、 $\rho_0 \cdot U_s$ (ρ_0 : 物質の初期密度、 U_s : 物質内の衝撃波速度)で表し、この値が小さい程物質の変形量は大きい。アルミニウ

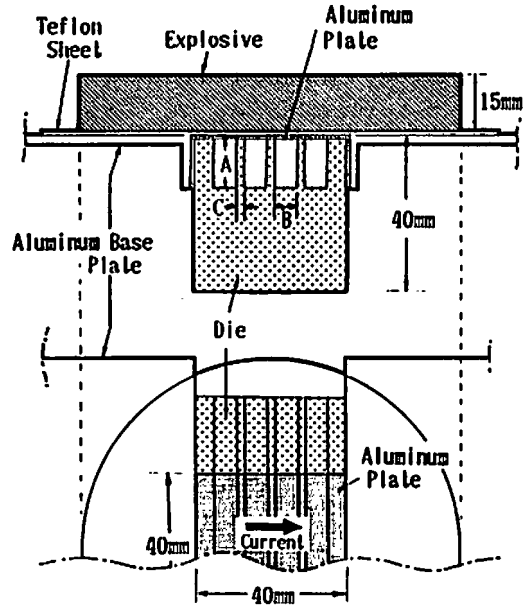


Fig. 2 Schematics of explosive opening Switch

ムと刃の材質のウゴニオ、及び爆薬の爆轟圧力から刃の内部の U_s を見積もって衝撃インピーダンスを計算すると、ポリカーボネート、テフロン、アルミナの場合、それぞれ、6.3、9.6、34.1 $\times 10^6$ kg/m²となる。刃の枚数、厚み、溝の深さ等(Fig. 2のA、B、C)に関してはTable 1に示すような種々の形状のものを製作した。

爆薬の起爆は2通りの方法を試みた。Fig. 3の(I)は平面爆轟波発生装置(爆薬レンズ)による平面起爆で、アルミニウム板の変形を全面で同時に開始させることができる。(II)は片側からの起爆で、電流方向に沿ってアルミニウム板の変形に時間差をつけることが目的である。

Fig. 4に、遮断実験の試験回路を示した。容量1000 μ Fのコンデンサバンクから最大40kAの放電電流を、6.3 μ Hのインダクターを通して爆薬スイッチに通電した。電流がピークに達した時点でクローバスイッチを作動させ、時定数約270 μ sの減衰回路にした状態で爆薬遮断スイッチを作動させた。なお本実験で用いたクローバスイッチも爆薬を利用する方式であるが詳細は省略する。

アルミニウム板の変形開始時刻は、爆薬の背面に接した光ファイバー先端での発光時刻から求めた。遮断スイッチの電流 $I(t)$ は、予め校正されたサーコイルにより観測した。

実験結果と考察

Table 2に、本研究での実験条件をまとめた。遮断特性として、スイッチ電圧 $V(t)$ と抵抗 $R(t)$ を、観測

Table 1 Experimental Conditions

Experiment	Open Current (kA)	Die (Cutting Edge)					Initiation Method
		Material	Number** of Plates	A (mm)	B (mm)	C (mm)	
A	17.2	PC.*	5	13	6.5	1.5	I
B	15.5	Teflon	5	13	6.5	1.5	I
C	15.2	Al ₂ O ₃	5	13	6.0	2.0	I
D	15.9	Al ₂ O ₃	2	13	30.0	2.0	I
E	39.3	Al ₂ O ₃	5	13 <td 6.0	2.0	I	
F	40.0	Al ₂ O ₃	5	13	6.0	2.0	II

* Polycarbonate

**Including two plates at both ends.

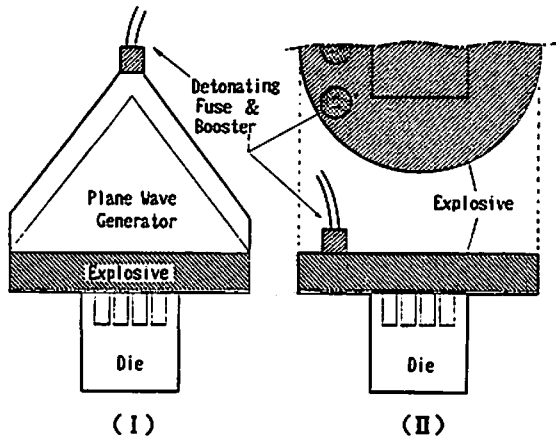


Fig. 3 Schematics of two Initiation methods

された $I(t)$ をもとに次式から求めた。

$$V = -R_0 I - L_0 \frac{dI}{dt} - V_0 \quad (1)$$

$$R = V/I \quad (2)$$

ここで、 R_0 、 L_0 は遮断スイッチを除いた回路の抵抗とインダクタンス、 V_0 はクローバスイッチのアーク電圧であり、遮断スイッチを動作させない時の電流波形から求めた値はそれぞれ $23\text{m}\Omega$ 、 $6.3\mu\text{H}$ 、 60V である。

Fig. 5は刃の材質としてアルミナを使用した場合の遮断実験結果で、スイッチの電流、電圧、及び抵抗波形を遮断電流が 15.2kA と 39.3kA の2つの場合(実験CとE)について示した。時間の原点はアルミニウム板の変形開始時刻とした。Fig. 5の電圧波形は、変形開始から約 $4\mu\text{s}$ 後に急速に立ち上がり、ピークに達した後時間とともに減少していく。その後Eでは約 $13\mu\text{s}$ からはほぼ一定の電圧を示す領域が見られる。この結果に限らず我々の行った実験では、一般に電流遮断

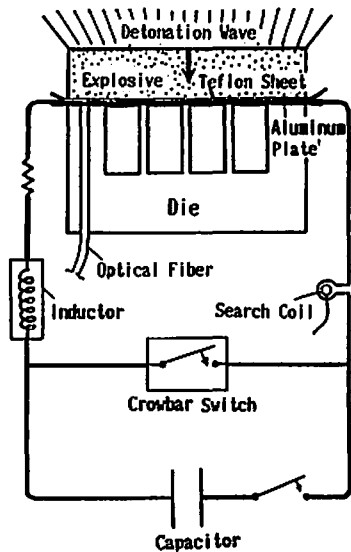


Fig. 4 Schematic diagram of experimental circuit

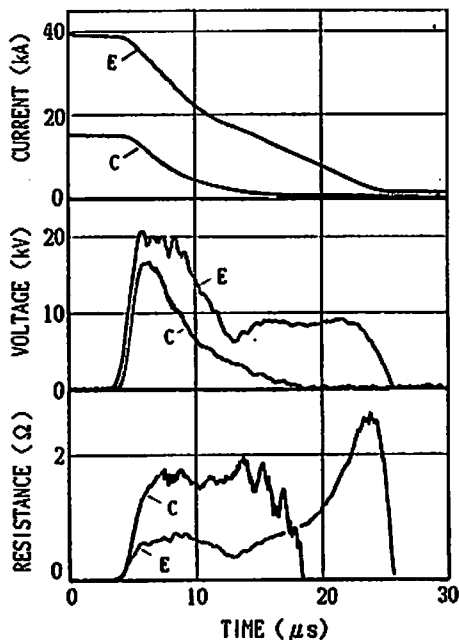


Fig. 5 Performance data from experiment C and E

が始まるのは変形開始から4~5 μ s後であり、遮断開始から終了までは10~30 μ sの時間を要した。この間の電圧波形には、遮断初期のピークを示す部分とそれに続く比較的緩やかに変動する部分の2つの領域が特長として認められ、電流遮断の過程がいくつかの段階に分かれている事が考えられる。アルミニウム板が変形を初めてから溝の底部に達するのに要する時間を爆薬とアルミニウム板の質量比からGurneyの方法⁸⁾によった見積もると約4 μ sとなる。従ってスイッチ電圧波形に押し型の形状・材質の効果が顕著に現れるのは、遮断初期の過程であると考えられる。本報告では、アルミニウム板の変形開始から約15 μ s迄の時間領域に注目し、各実験条件での遮断特性を比較した。

Fig. 5では、変形開始から約6 μ s後に実験C、Eの電圧がピーク値を示すが、この時刻での電流、電圧、抵抗の値を両実験で比較すると、Eの電流値がCの約2.7倍であるのに対し、電圧はCの約1.3倍であり、Eの抵抗値はCの半分以下になっている。両実験でのアルミニウム板の変形条件は同一であるから、もしスイッチ抵抗の増加がアルミニウム板の変形による抵抗増加に起因しているならば、抵抗は時間のみに依存し両実験の抵抗波形は同じになるはずである。Fig. 5の結果はスイッチ抵抗が電流にも大きく依存していることを示し、遮断初期におけるスイッチ電圧と抵抗がアーク電流に起因している可能性が考えられる。

Fig. 6は刃の材質として、ポリカーボネート、テフ

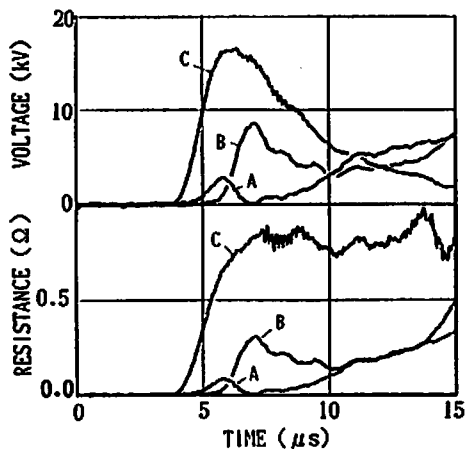


Fig. 6 Time dependence of voltage and resistance calculated from experiment A, B and C

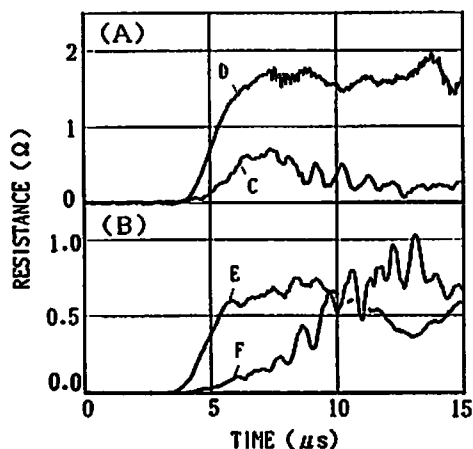


Fig. 7 (A) Resistance data from experiment C and D. (B) Resistance data from experiment E and F.

ロン、アルミナを用いた場合(実験A, B, C)でのスイッチ電圧と抵抗を示したものである。Fig. 6の結果は、衝撃インピーダンスが高くなるに従い、電圧、抵抗ともピーク値が著しく増加することを示している。アルミニウム板もしくはアークプラズマ中を流れる電流は、爆轟波の進行に伴い刃と刃の間の溝空間へ変形していくはずであり、刃自身の変形が小さい程電流経路の変形量は大きくなると予想される。従って刃の衝撃インピーダンスが高い程、電流経路の長さの増加や断面積の減少が著しくなり、みかけの抵抗値が増加するという可能性が考えられる。また発生したアークプラズマ中にテフロンやポリカーボネートの分解ガスが混入し、抵抗の増加を抑えている可能性もある。

同じ材質の刃を用い、電流経路の変形状態のみを変

化させた場合の比較を、Fig. 7に示す。(A)は、押し型の刃の枚数を変えた場合(実験CとD)のスイッチ抵抗であり、(B)は起爆方法を変えた場合(実験EとF)である。刃の枚数を5枚から2枚にすると、抵抗のピーク値は約半分以下になるがピークまでの立ち上がり時間はほぼ等しい。これに対して、片側起爆により、アルミニウム板の変形開始に、押し型両端の刃の位置で、 $3.3\mu\text{s}$ の時間差をつけると、平面起爆の場合と比べ、最終的な抵抗のピーク値はほぼ等しいものの、立ち上がりはほぼ時間差に相当する遅れを示した。(A)の結果は、刃の枚数を減らすことでアルミニウム板もしくはプラズマの総変形量が減少したことを、また(B)は、片側から起爆した場合の変形量の時間的な増加が、平面起爆の場合に比べて緩やかになることをそれぞれ反映していると考えられる。

本遮断方式を誘導エネルギー源のスイッチングに応用する場合 100kA 以上の電流遮断能力が必要であり、負荷との整合性を考慮すると、スイッチ抵抗のピーク値を $10\text{m}\Omega\sim 1\Omega$ 、立ち上がり時間を $1\mu\text{s}\sim$ 数 $10\mu\text{s}$ の間で制御できることが望ましい。本実験で観測された最大 40kA でのスイッチ抵抗に関してはアーク放電が関与している可能性があり、抵抗値の制御に関して電流値と独立に検討することはできない。しかし、押し型の形状・材質や起爆方法の選択により、 100kA 以上の抵抗波形をある程度制御することは可能と思われる。実用化が期待できる。

爆薬の爆速及び薬量も、スイッチ抵抗制御のためのパラメータと考えられ、要求されるスイッチ特性に応じて爆薬の種類の見直しが必要である。スイッチ抵抗の立ち上がり時間を $10\mu\text{s}$ 以上にできる場合は、爆薬レンズ等による平面起爆は必ずしも必要ではなく、使用薬量の大幅な削減が可能である。

結 論

爆薬で金属板を高速変形させる方式による大電流遮断実験を行い、次の知見を得た。

1. 最大 40kA の電流を $10\sim 30\mu\text{s}$ の時間で完全に遮断することができた。
2. スwitch抵抗の時間変化は電流値に依存しており、スイッチ抵抗が押し型内に発生するアーク電流に起因している可能性が考えられる。
3. スwitch抵抗の時間変化は金属板の変形条件にも大きく依存しており、電流経路の変形過程がスイッチ抵抗波形に反映していると考えられる。
4. 押し型の材質・形状の選択によりスイッチ抵抗波形の制御が可能であり、誘導エネルギー源への応用が期待できる。

文 献

- 1) A. L. Pavlovskii, V. A. Vasyukov, and A. S. Russkov, *Sov. Tech. Phys. Lett.* 3 (8), p320 (1977)
- 2) J. H. Goforth, R. S. Caird, et al., Report of Los Alamos National Laboratory LA-UR-87-2101, (Proceedings of the 6th IEEE Pulsed Power Conference (1987))
- 3) 電気学会技術報告(II部)第247号(1987)
- 4) K. H. Schoenbach, M. Kristiansen and G. Schaefer, *Proceedings of the IEEE*, 72 (8), p1019 (1987)
- 5) 薄葉 州, 角館洋三, 藤原修三, 他, 電気学会全国大会講演論文集, 分冊10, p1657 (1988)
- 6) 薄葉 州, 角館洋三, 吉田正典, 他, 工業火薬協会昭和63年度年会講演要旨集, p121 (1988)
- 7) *IEEE Transactions on MAGNETICS*, MAG-22 (6)
- 8) R. W. Gurney, BRL Report 405 (1943)

Explosive-driven high current opening switch

by shu USUBA, yozo KAKUDATE*, masatake YOSHIDA*,
katsutoshi AOKI*, katsumi TANAKA*, shyuzo FUJIWARA*,
masahiro MIYAMOTO**, minoru DEN***, and akira KUBOTA****

Performance of explosive-driven high current opening switches has been investigated. Electric currents up to 40 kA were interrupted by explosive deformation of conductors. Observed switch resistance was strongly dependent on both opening current and deforming condition. This suggested that resistance increase was caused mainly by initiation and following deformation of arc current in the switch. Feasibility of the switch in use with the inductive energy storage was discussed.

(*National Chemical Laboratory for Industry, Tsukuba, Ibaraki 305, JAPAN

**Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd., Yawata-Kaigandori,
Ichihara, Chiba 290, JAPAN

***Nichicon Corporation, Karasuma, Oikedori, Nakagyo, Kyoto 674, JAPAN

****Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 1-1 Uchisaiwaicho, 1-chome,
Chiyodaku, Tokyo 100, JAPAN
