

金属薄板の電磁圧接用放電回路に使う高速機械式クローバスイッチ ～ 耐電圧約6kV, 動作時間約8 μ s ～

相沢 友勝[†] 松澤 和夫^{††} 明渡 祐樹^{††}

[†] 東京都立工業高等専門学校 〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40

^{††} 東京都立産業技術高等専門学校 〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40

E-mail: [†]aizawa@mem.iece.or.jp

あらまし この高速機械式スイッチは、接点用A1小薄板(2枚)が2組で構成される。スイッチの耐電圧は約6kV、動作時間は約8 μ sである。2組の接点用薄板は、絶縁した平板状4ターンコイル上に横並びで固定される。2組の薄板は直列に接続され、その両端はそれぞれコイルの両端へ接続される。接点用薄板同士の接触は、コンデンサ電源からコイルへ減衰振動する放電電流を急激に流し、コイルと電磁結合する各組の下側薄板へ高密度磁束を加えて行われる。各組の下側薄板には電磁力が働き、それぞれが上側薄板へ高速衝突して2組の接点(スイッチ)が閉じる。2組の接点用薄板は電磁圧接される。放電電流が最大(約27kA)に達したとき、接点を閉じると、コイルへ流れる放電電流は接点を含む短絡回路へ転流する。コイルへ流れる電流は振動しなくなる。このような高速機械式スイッチの実験結果を報告する。

キーワード 金属薄板, 電磁圧接, 高速機械式スイッチ, クローバスイッチ, コンデンサ電源, 平板状コイル

High-speed mechanical crowbar switch used in discharge circuit for magnetic pulse welding of sheet metals ～ Withstand voltage about 6kV, operation time about 8 μ s ～

Tomokatsu AIZAWA[†] Kazuo MATSUZAWA^{††} Yuki AKEDO^{††}

Tokyo Metropolitan College of Technology 1-10-40, Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011, Japan

Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology 1-10-40, Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011, Japan

E-mail: [†]aizawa@mem.iece.or.jp

Abstract This high-speed mechanical switch consists of two sets of small Al contact sheets (2 pieces). The withstand voltage of the switch is about 6 kV, and the operation time is about 8 μ s. The two sets of contact sheets are fixed side by side on an insulated 4-turn flat coil. The two sets are connected in series, and both ends are connected to both ends of the coil. The contact between the sheets is performed by rapidly applying a damped oscillating discharge current from a capacitor bank to the coil, and applying a high-density magnetic flux to the lower sheets of each set that is electromagnetically coupled to the coil. Electromagnetic forces act on the lower sheets, and these sheets collide with the upper sheets at high speed, closing the switch. The two sets of sheets are electromagnetically welded. When the discharge current reaches the maximum (about 27 kA) and the switch is closed, the discharge current flowing through the coil commutates to the short circuit including the switch. The current flowing to the coil stops oscillating. We report the experimental results of such a high-speed mechanical switch.

Keywords Sheet metal, Magnetic pulse welding, High-speed mechanical switch, Crowbar switch, Capacitor bank, Flat coil

1. はじめに

金属薄板の電磁成形(加工), 電磁圧接(溶接)などでは、容量が数10～数100 μ F, 充電電圧が10kV以下, 充電エネルギーが数kJ以下のコンデンサ放電回路が使用される[1-8]. コンデンサ電源を充電し, 放電スイッチを閉じると, 大きな電流が短時間(100 μ s以下)だけ流れる。

負荷としてコイル(インダクタンス数 μ H以下)が使われる。コイルには高密度磁束が瞬間的に発生する。この磁束を、例えばアルミニウム(A1)薄板へ加えると、A1薄板は発生する非接触電磁力で急激に加速され、成形加工される[7]。加速されたA1薄板を他の金属薄板へ衝突させれば、両薄板は圧接(溶接)される[8]。使用するエネルギー

一が低く、電気、電子部品の成形、圧接に適している。また、Al薄板などを急加速し、衝突させる技術は、接点部分がAl薄板などで構成される高速機械式接触スイッチ（電磁接触器などとも呼ばれる）へも応用できる。

放電スイッチとして放電ギャップスイッチ、機械式スイッチ、イグナイトロンなどが使われている[9-11]。半導体スイッチも開発されているが、一般的に注文製品などで高価である。高電圧に耐える真空電磁接触器なども市販されている。高速機械式スイッチの駆動方式として、電磁式の他に圧縮空気式なども実験されている[12]。

負荷コイルへ流れる放電電流は、放電回路の抵抗が小さいので減衰振動して流れる。電磁圧接などは振動電流（波形）の最初の半周期（半周波）で終了する。後に続く電流にはほとんど影響されない。後続する電流（および電圧）が大きく振動し、方向（または正負）が変化すると、放電装置を高額にする[13]。半導体を用いた放電スイッチの使用を困難（または高額）にしている。

負荷コイルへ流れる放電電流の振動をなくすためには、放電電流が最大値に達したとき、負荷コイルの両端をコイルインダクタンスに比べて低インダクタンスの回路で短絡すればよい[13-25]。短絡し、電流を転流させる回路はクローバ回路、流れる電流はクローバ電流、短絡するスイッチはクローバスイッチと呼ばれている。この電流最大時点では、負荷コイル両端の電位差が零となる。クローバスイッチとして放電ギャップスイッチを使うと、短絡時にスイッチ電極間の電位差がなくなるので、短絡は容易でない。機械式スイッチで行う場合には動作時間が大きく、半導体素子スイッチを使うと高額になる。

筆者らは、電磁圧接に用いる放電電流を確実に短絡、転流させる高速機械式スイッチを提案し、実験結果も報告した[26-29]。この機械式スイッチの動作原理は基本的に電磁圧接法と同じであり、併用される[27, 30]。これまでの実験では、スイッチ接点の間隔を2mmに広げて耐電圧を約6kVに高めていた。このため、スイッチが閉じるまでの動作時間が10 μ s以上であった。

この報告では、このような高速機械式スイッチの接点用薄板2組を直列に使用し、各接点（2枚）の間隔を1mmにして耐電圧を約6kVで実験した。動作時間を7~8 μ sに短縮できた。その方法および実験結果を報告する。

2. 接点用Al/Al薄板の高速接触法

2.1 磁束発生用コイル

高密度磁束を発生する4ターンコイルの概略図を図1に示す。コイルはそれぞれ絶縁されたE字形のコイル板4枚（No. 1~No. 4）からなり、ぴったり重なる。コイル

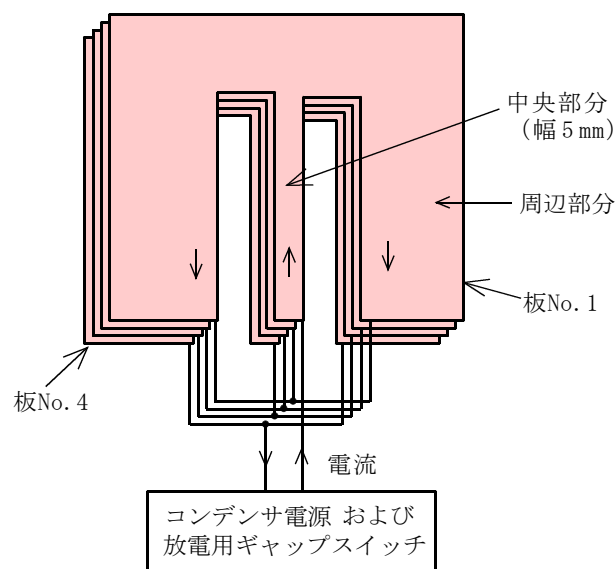


図1 高密度磁束発生用平板状4ターンコイル

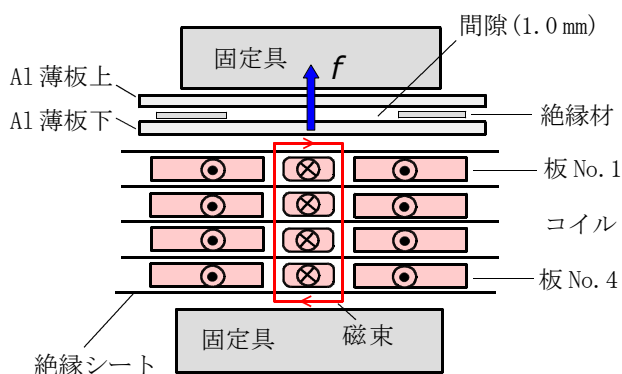


図2 接点用Al/Al薄板（1組）、コイルの固定法およびAl薄板下に働く電磁力（断面図）

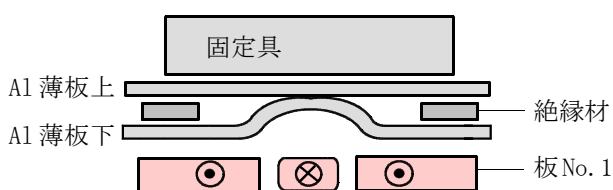


図3 電磁力で変形して衝突した接点用Al薄板下（断面図）

にはコンデンサ電源および放電用ギャップスイッチが接続される。電流は板No. 1の細長い中央部分（幅5mm）に上向に流入し、幅の広い両側周辺部分から下向きに戻る。コイルに流れる電流はこのようなターンを4回繰り返して板No. 4の周辺部から流出する。コイル中央部分には、4層の電流が集中して直列に流れる。各層に流れる電流が中央部分に生じる磁束は加算され、この部分に高密度磁束が発生する。コイル板同士は、図1の下側一部を工夫し、はんだ付けして接続される[31]。

2.2 Al/Al薄板の高速接触法

離れている接点用Al/Al薄板（説明し易いので1組だけ）を高速で接触させる方法を、図2（断面図）を用いて

説明する．A1/A1薄板は，絶縁されたコイル中央部分長手方向の半分を覆うように置かれ，間隙(1mm)を設け，大気中で図2のように固定される．

コイルとA1薄板は直流的に絶縁されているが，交流的に電磁結合している．図2の幅の狭いコイル中央部分へ電流が直列に流れると，この部分に高密度磁束が発生する．この磁束は下側のA1薄板へ交差して浸入する．この薄板には渦電流と呼ばれる誘導電流が流れ，磁束の浸入を防ぐ．渦電流はコイル電流と逆方向へ流れると見なせる．この結果，A1薄板(下)には上向きの電磁力 f が働く．A1薄板(下)は変形しながら図3のようにA1薄板(上)へ高速で衝突(接触)する．渦電流，電磁力 f などの数式は文献[27, 31]に示されている．

3. 機械式クローバスイッチ実験装置の構成

実験装置の構成図を図4に示す．コンデンサ電源，放電ギャップスイッチおよび4ターンコイル部分は，接点用薄板衝突前の放電回路であった．機械式クローバスイッチは，コイル上に置かれた左右2組のA1/A1薄板から構成された．2組の薄板は図4のように直列に接続され，その両端はコイルの両端へ接続された．各回路に残留する抵抗は小さいとし，放電，転流動作を説明する．

まず，充電されたコンデンサ電源を放電ギャップスイッチを閉じ，平板状4ターンコイルへ放電電流を流した．放電電流 I は図4の点線に沿った放電回路へ流れた．

次に，この放電電流が最大になった直後，A1薄板(下)を前述した電磁力でA1薄板(上)へ高速衝突させた．この結果，接点用A1薄板(機械式クローバスイッチ)が閉じ，コイルに流れている電流は，4ターンコイルに比べて低インダクタンスの短絡，転流回路へ流れ続けた．

なお，4ターンコイルにすると，放電電流が最大値に達するまでの時間は5ターンコイルを用いた前報告[27]に比べ短くなった．

4. 放電，転流回路および装置

放電，転流回路を図5に示す．コンデンサ電源(容量 $50\mu\text{F}$) C は直流高電圧電源 HV で充電された．放電ギャップスイッチ G を閉じて電源から4ターンコイル L_4 へ放電電流 I を流した．その後，前述した高速機械式クローバスイッチ S_2 を前述したように閉じ，コイル電流を転流回路へ流した．充放電電圧は $4\sim 5\text{ kV}$ であり，充放電エネルギーは $0.4\sim 0.5\text{ kJ}$ であった．この回路では，回路に存在する抵抗，コイル以外に存在するインダクタンスなどは省略してある．装置主要部分の外観例を図6に示す．

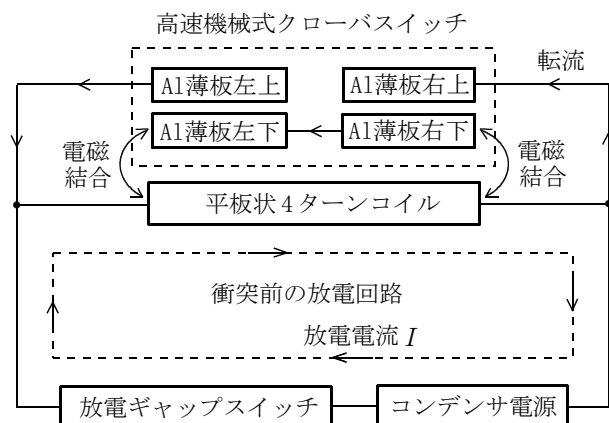


図4 高速機械式クローバスイッチ実験装置の構成図

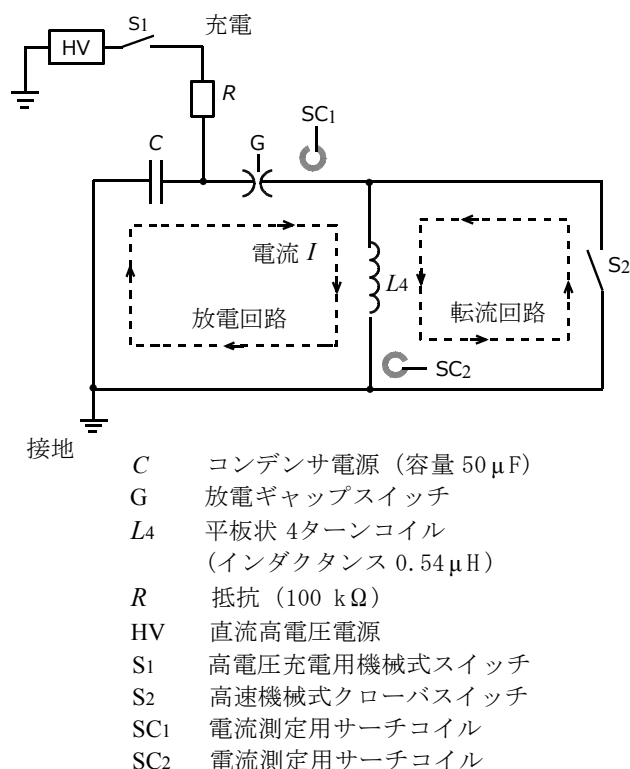


図5 コンデンサ電源の放電，転流実験回路



図6 装置主要部分の外観

コンデンサ電源，スイッチおよびコイルは接近して配置された．電源部分は容量 $25\mu\text{F}$ のコンデンサが2台並列に接続された．電源の接地部分は，充電部分とスイッチ部分から絶縁された下側にあり，コイル下側端子板へ接続された．

放電回路および転流回路へ流れる電流の数式などは文献[14]に詳しく記述されている．

放電電流波形は，放電ギャップスイッチG 近くおよび平板状4ターンコイル面上(周辺部分)近くに置かれた2つの電流測定用サーチコイル(SC1, SC2) で文献[27, 28]と同様に測定された．サーチコイルは，近くの電流路と交流的に電磁結合していた．両コイルは電流の時間変化(時間微分)に比例した電圧信号を検出した．電圧信号は，シールド室内の整合，積分回路，オシロスコープなどで電流に比例する電圧信号に変換され，記録された．

放電ギャップスイッチは，図7のような3つの電極から構成された．直径約20mmの主電極を間隙3mm程度で対向させ，接地側主電極の中心軸に空けられた穴に細いトリガ電極を絶縁させて挿入した．接地側主電極と露出したトリガ電極先端間にパルス電圧を加え，この間を小さく放電させて主電極間の放電を誘発させた．

コイル外観例を図8に示す．写真は，見やすくするため絶縁シートを挿入せず，各板を少し離して撮影された．手前左側に接続用端子板が付けられた．写真上面はコイル板No.1であった．各コイル板は銅合金製，板厚は0.5mmであり，各板中央部分の幅は5mm，長さは約110mmであった．各板の間に挿入する絶縁シートの材質はポリイミドなど，厚さは $50\mu\text{m}$ などであり，数枚を重ねて挿入した．各板を絶縁した状態で，コイル全体の厚さは，絶縁シートに付着する空気を含めて3～4mmであった．

機械式クローバスイッチ接点用Al薄板の材質は，工業用純アルミニウムであり，長さは約70mm，幅は約50mm，厚さは0.4mmであった．接点用Al/Al薄板に設ける間隙は1mmであった．Al薄板(上)とコイル端子板は，なるべく低インダクタンスになるように幅約20mm，厚さ0.1mmのステンレス鋼製リード板2並列で，それぞれをコイル中央部分から離して接続された．Al薄板(下)同士も同様に接続された．接続例は文献[28]に示されている．

なお，クローバスイッチの接点用Al薄板が閉じると，接点用薄板同士は全て高速衝突して電磁圧接された．一般に，薄板の電磁圧接は，電磁力で加速される薄板を放電電流の最大値近くで衝突させるとエネルギー効率よく圧接できた[32, 33]．また，このようにクローバスイッチを使用して転流電流を接点用薄板だけに流し，別の圧接用薄板へ流さないで，クローバ電流だけを併用して電磁



図7 放電ギャップスイッチを構成する電極

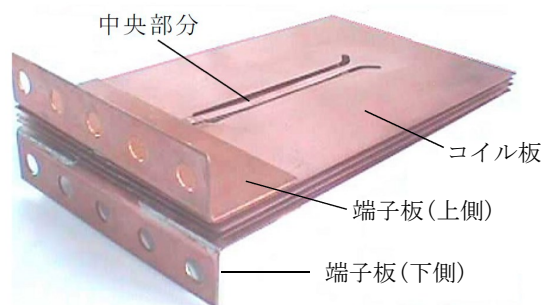


図8 平板状4ターンコイル外観

圧接することもできた[27, 30]．

5. 実験結果

まず，Al/Al薄板をコイル端へ接続せず，転流しなかった場合，放電回路へ流れた放電電流波形例を図9に示す．充放電エネルギーは0.4kJであった．コンデンサ電源およびコイルへ流れる電流波形は，共に減衰振動して同様に变化した．電流波形の最大値は異なるが，実際の電流最大値を算出するとほぼ同じ27kAであった．減衰振動の周期は $34\sim 35\mu\text{s}$ (周波数約29kHz)であった．放電開始から電流波形最大までの時間は $7\sim 8\mu\text{s}$ であった．放電後の両波形最大値に多少の時間差が見られるが，電流測定用サーチコイルの構造，コイルと放電回路との電磁結合状態などが異なるためと思われる．

次に，放電電流の最大値近くで高速機械式クローバスイッチを閉じ，同じ充放電エネルギーで転流実験した．この場合の両波形を図10に示す．コンデンサ電源に流れる電流は，最大値直後から振幅が小さくなり，振動周期も短くなった．コイルに流れる電流は，最大値直後から振動しなくなり，指数的に減衰した．これらの波形から，高速機械式スイッチが電流最大値近くで閉じ，コイルに流れる電流がクローバ回路へ転流したと言える．放電開始から転流するまでの時間は $7\sim 8\mu\text{s}$ であった．この時間は電流が流れてから両薄板が衝突するまでの時間でもあった．初速度零から加速された薄板が衝突する速度は $250\sim 280\text{m/s}$ と概算された．

充放電エネルギー0.4kJで転流実験し，圧接された接

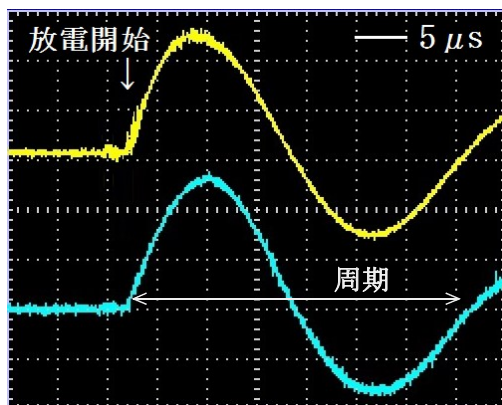


図9 転流しなかった場合の電流波形例
電源容量 $50\mu\text{F}$ 、放電エネルギー 0.4kJ
(上) コンデンサ電源に流れる電流波形
(下) 4ターンコイルに流れる電流波形

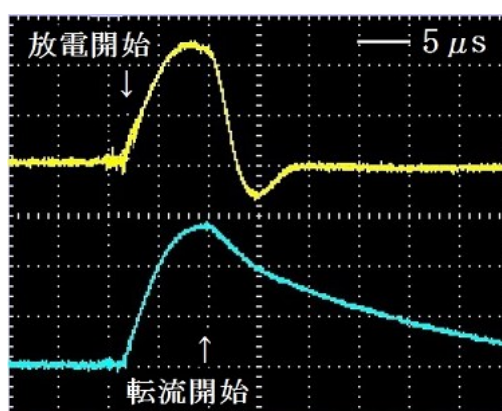


図10 転流した場合の電流波形例
電源容量 $50\mu\text{F}$ 、放電エネルギー 0.4kJ
(上) コンデンサ電源に流れる電流波形
(下) 4ターンコイルに流れる電流波形

点用A1/A1薄板(1組)の外観例を図11に示す。コイル側に置かれたA1薄板(下)中央部分は、電磁力が働いて図3のように変形した。この部分がA1薄板(上)へ高速衝突して圧接された。A1薄板(上)にはこのような変形が見られなかった。これらの外観は、同時に並べて実験した他の組についても同様であった。転流電流が流れるステンレス鋼製リード板と接触する各A1薄板表面に電流が通電した跡は、ほとんど見られなかった。

6. まとめ

電磁圧接に用いる放電電流を確実に短絡、転流させる高速機械式クローバスイッチの実験を行った。前回[27]は、平板状5ターンコイルと1組の接点用薄板を使用して接点用薄板間隔 2mm で実験した。

今回は、平板状4ターンコイルを用い、新たに2組の接点用A1/A1薄板を直列に使用し、各接点用薄板の間隔を 1mm で実験した。2組の接点用薄板で耐電圧を分圧でき、

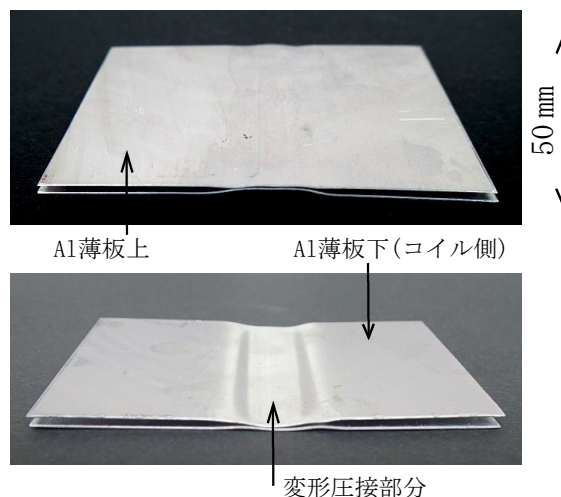


図11 圧接された接点用A1薄板(1組)の外観
薄板の長さ約 70mm 、幅約 50mm 、厚さ 0.4mm

表1 実験条件および実験結果の比較表

比較項目	今回	前回 [27]
コンデンサ容量	$50\mu\text{F}$	$50\mu\text{F}$
コイルターン数	4	5
コイル側接点薄板	A1	A1
接点用薄板間隔	1mm	2mm
接点用薄板の厚さ	0.4mm	0.4mm
薄板2枚一組の組数	2組直列	1組単独
接点間合計耐電圧	約 6kV	約 6kV
転流までの動作時間	$7\sim 8\mu\text{s}$	約 $10\mu\text{s}$
放電電流の振動周期	$34\sim 35\mu\text{s}$	約 $50\mu\text{s}$

各接点の間隔 1mm 、耐電圧(合計)約 6kV で実験できた。この結果、動作時間が $7\sim 8\mu\text{s}$ に短縮した。

これまでの実験結果は表1のようにまとめられる。今後、これまでと異なる条件で、放電電流最大値で短絡、転流実験する場合、コンデンサ容量、コイルターン数、スイッチ接点用薄板の組数、間隔などを表1を参考に選んで実験する必要がある。

電磁圧接実験を今回のように高速機械式クローバスイッチを併用して行くと、圧接用放電電流の振動を少なくでき、放電装置が安価になると共に放電ギャップスイッチ部分を半導体スイッチにすることも容易になる。

参考文献

- [1] 相沢，長野，皆川：“電磁力による金属薄板の高速穴あけ”，信学技報，EMD-1994-42，pp.1-6，1994.
- [2] 相沢，岡川，宮崎，下條：“平板状態に縮む電子部品用円錐ばねの電磁成形”，信学技報，EMD-2009-11

- 3, pp. 7-10, 2010.
- [3] 相沢, M. Kashani, 花崎: “アルミニウム端子板および電線の電磁圧接”, 信学技報, EMD-2005-100, pp. 19-124, 2005.
- [4] 杉山, 花崎, 相沢, 岡川: “電磁圧接を用いた自動車用FPC回路の重ね合せ溶接”, 溶接技術(日本溶接協会誌), 57巻6号, pp. 87-92, 2009.
- [5] 相沢, 松澤, 網谷: “金属ガラス薄帯へのアルミニウム薄板の電磁圧接”, 信学技報, EMD-2015-18, pp. 41-46, 2015.
- [6] 相沢, 杉山: “リジッド及びフレキシブルプリント配線板銅箔の電磁圧接(第2報)”, 信学技報, EMD-2016-15, pp. 39-42, 2016.
- [7] 日本塑性加工学会編: “電磁成形”, 衝撃塑性加工, コロナ社, pp. 168-187, 2017.
- [8] 日本塑性加工学会編: “金属薄板の電磁圧接”, 衝撃塑性加工, コロナ社, pp. 206-220, 2017.
- [9] 柳父: “クロージングスイッチ”, パルスパワー技術とその応用, オーム社, pp. 45-62, 1992.
- [10] Frank Früngel: “Modern High Power Switching Gaps”, Capacitor Discharge Engineering, Academic Press, New York, pp. 69-74, 2014.
- [11] J. Lehr, P. Ron: “Closing Switches”, Foundations of Pulsed Power Technology, Jon Wiley & Sons, New Jersey, pp. 147-250, 2017.
- [12] 山田, 横田, 平野: “超高速動作金属接触スイッチの開発”, 電気学会論文誌B, 103巻10号, pp. 663-670, 1983.
- [13] G. Klement, H. Wedler: “Switching Problems in Crowbar and Power Crowbar Systems”, Proc. of Int. Conf. on Energy Storage, Compression, and Switching, Asti-Torino, Italy, pp. 427-428, 1974.
- [14] 中野, 平野, 鈴木, 西山: “放電回路クローバ用真空スイッチ”, 電気学会雑誌, 84巻915号, pp. 1971-1976, 1964.
- [15] S. Kitagawa, K. Hirano: “Fast air gap crowbar switch decoupled by a low pressure gap”, Rev. of Scientific Instrum., Vol. 46, No. 6, pp. 729-734, 1975.
- [16] 加賀谷, 糟谷, 村崎: “反射衝撃波による気体の熱電離現象とそのクローバ・スイッチへの応用”, 応用物理, 45巻5号, pp. 407-415, 1975.
- [17] US Patent: “Crowbar switch”, US3944887A, Publication, 1976.
- [18] 伊藤, 染谷: “電磁駆動クローバスイッチ”, 静岡大学工学部研究報告, 32巻, pp. 1-11, 1981.
- [19] 相沢: “負荷電流にリプルの乗らないクローバ回路”, 電気学会論文誌B, 102巻3号, p. 186, 1982.
- [20] 相沢, 大谷, 渡辺: “誘導電場起動形放電ギャップ・スイッチ(第2報)クローバ・スイッチについて”, 都立工業高等専門学校研究報告, 18号, pp. 9-15, 1983.
- [21] 電気学会(大電流応用技術調査専門委員会)編: “電流クローバ”, 大電流工学ハンドブック, コロナ社, pp. 196-200, 1992.
- [22] 柳父: “クローバ回路”, パルスパワー技術とその応用, オーム社, pp. 87-89, 1992.
- [23] 菅原, 田中, 板垣, 阿部, 座主坊, H. Samaulah, 喜田村: “真空トリガギャップの極性効果を利用したクローバ電流の発生”, 電気学会論文誌A, 123巻, 5号, pp. 443-448, 2003.
- [24] Y. S. Jin, H. S. Lee, J. S. Kim: “Novel Crowbar Circuit for Compact 50-kJ Capacitor Bank”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 32, No. 2, pp. 525-530, 2004.
- [25] J. Lehr, P. Ron: “Capacitor Bank Circuit”, Foundations of Pulsed Power Technology, Jon Wiley & Sons, New Jersey, pp. 338-341, 2017.
- [26] 相沢: “金属薄板の電磁圧接における放電電流転流用高速機械式スイッチの提案”, 信学技報, EMD-2019-2, pp. 7-11, 2019.
- [27] 相沢: “Al/Cu薄板の衝突部へ放電電流を転流する電磁圧接法”, 信学技報, EMD-2019-7, pp. 1-6, 2019.
- [28] 相沢: “Al/Cu薄板の衝突部へ放電電流を転流する電磁圧接法(第2報)”, 信学技報, EMD-2019-36, pp. 1-6, 2019.
- [29] T. Aizawa: “Magnetic pulse welding method: Discharge current commutates to collision part of Al/Cu sheets”, IEICE Technical Report, Vol. 119, No. 84, pp. 1-4, 2019.
- [30] 相沢: “金属薄板の衝突を高速機械式短絡スイッチとして併用する電磁圧接法”, 第70回塑性加工連合講演会講演論文集, pp. 299-300, 2019.
- [31] 相沢: “平板状4ターンコイルによるAl/Cu薄板の電磁圧接シーム溶接”, 信学技報, EMD-2015-87, pp. 1-6, Jan. 2016.
- [32] 岡川, 相沢: “電磁シーム溶接における間隙の効果と特徴”, 塑性と加工, 48巻555号, pp. 323-327, 2007.
- [33] T. Aizawa: “Electromagnetic Energy Transmission in Magnetic Pulse Welding of Al/Cu Sheets using 1, 3, 4 and 6 Turn Flat Coils”, IEICE Technical Report, Vol. 117, No. 312, pp. 21-26, 2017.