

高エネルギー点火装置への応用を指向した 火花ギャップスイッチの放電特性評価

日大生産工(院) ○藤本 太智 日大生産工 今村 宰

1. 諸言

地球温暖化の影響は年々深刻化しており、その緩和に向けた迅速な対応が国際的に求められている。2023年3月に環境省が公表したIPCC(気候変動に関する政府間パネル)第6次評価報告書(AR6)統合報告書によると、気温上昇を 1.5°C に抑えるためには、2035年までに温室効果ガスを2019年比で約60%削減、CO₂では約65%削減する必要があるとされている⁽¹⁾。温室効果ガスの主要因であるCO₂の削減が重視される一方で、CO₂以外のガス、特に冷媒として使用されるフロン類(HFC・HCFCなど)の削減も強く求められている。これらの代替冷媒として微燃性冷媒(R32, R1234yf, R1234ze(E)など)は、地球温暖化係数(GWP)が低い一方で、燃焼下限界や最小着火エネルギーが大きく、着火しにくい特性を有している⁽²⁾。そのため、安全かつ確実に点火を行うためには、高エネルギーかつ適切に制御された点火システムが必要となる。また、微燃性冷媒は燃焼速度が小さい傾向にあり、燃焼挙動の把握には微小重力環境などの特殊環境下での実験も想定される。このような環境では、外部振動や衝撃に強く、低コストで堅牢な点火装置が求められる。従来は半導体スイッチを用いたシステムが一般的であるが、コストや耐衝撃性の課題が残る。本研究では、これらの課題を踏まえ、ギャップスイッチを用いた高エネルギー点火システムの開発に着目した。ギャップスイッチの試作および放電特性の把握を通じて、微燃性冷媒の安全性評価に資する安価で信頼性の高い点火技術の確立を目的とする。以下にその結果を報告する。

2. 実験装置の概要

本研究で用いた装置は、高電圧電源、キャパシタ、ギャップスイッチ、放電ギャップを直列に配した単純な構成である。Fig.1およびFig.2に全体図とギャップスイッチ部の概略を示す。

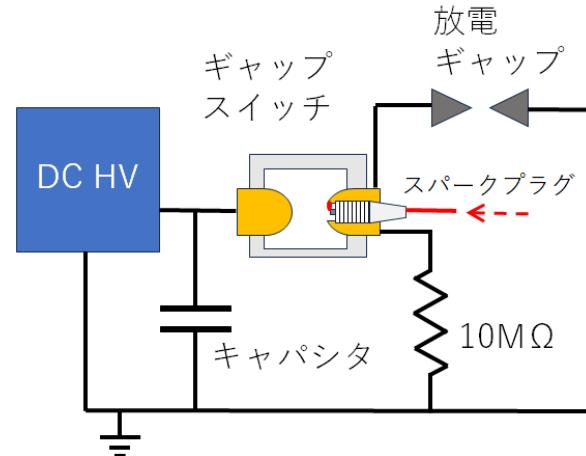


Fig.1 Schematic of the ignition system

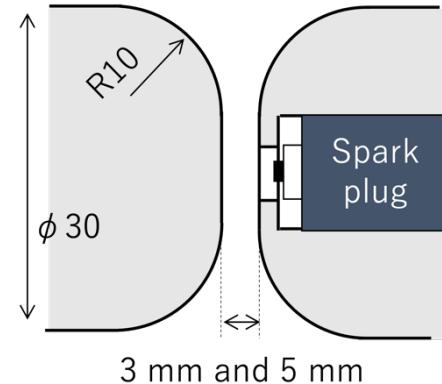


Fig.2 Detail configuration of the Gap switch

放電ギャップの放電電圧を一時的に上回る電圧を蓄え、所定の時刻にギャップスイッチで放電を開始することで、放電の大きさとタイミングを外部から制御することを目的とする。放電ギャップには電極間隙1mmのスパークプラグを用いた。ギャップスイッチは、直径30mmの真鍮棒先端をR10に加工した半球電極を向かい合わせ、電極間距離を3~5mmで調整可能とした。両電極は圧力容器内に収

め、容器内圧と気体種を切り替えられる構成とした。左側の電極は高電圧電源に接続し、右側の電極内部にはスパークプラグを挿入してねじ部で真鍮電極に導通させた。動作は次のとおりである。まず、高電圧電源によりギャップスイッチ両端を充電する。次に、右側のスパークプラグに点火すると、荷電粒子が電極間に供給され、条件が整えばギャップスイッチが導通する。そして、下流の放電ギャップに高電圧が一気に印加され、指定時刻に放電が発生する。放電エネルギーの安定化を図るために、高電圧電源とギャップスイッチの間に容量 500 pF の高耐圧コンデンサを直列挿入した。ギャップスイッチの動作電圧を調整することで、放電ギャップに投入するエネルギーを高い再現性で制御できる。また、コンデンサ容量を変更することで、供給エネルギー量の段階的な調整も可能となる。電源にはグリーンテクノ社製の小型高電圧電源 GT80 を用い、スパークプラグはイグニッションコイルで駆動した。点火タイミングは、Arduino からの 5 V・5 ms の信号で指示した。以上の構成により、ギャップスイッチを用いない場合と比べて、放電ギャップにより高い電圧を与えるとともに、放電時刻を外部信号に同期して制御できる。

3. 特性把握試験の結果と考察

Fig.3 と Fig.4 はギャップスイッチの動作特性をまとめたもので、Fig.3 は電極間隔 3 mm、Fig.4 は電極間隔 5 mm の結果である。図中の●は、外部から点火しなくともギャップスイッチが自発的に破壊する最小電圧を示す。これが自爆電圧であり、この値を超えるとスイッチ側で勝手に放電が起きるため制御できない。▲は、スイッチ内部のスパークプラグを点火したときに、スイッチ電極間で破壊が起きる最小電圧を示す。これが動作最低電圧である。●と▲の間の領域が、放電ギャップの放電を制御できる電圧範囲となる。なお、これらの点はスイッチ内部の圧力を変えながら測定した結果を重ねたものである。電極間隔 3 mm では、大気圧で自爆電圧が約 10 kV となり、動作最低電圧は確認できなかった。圧力を上げると両者の差が広がり、絶対圧 0.25 MPa では自爆電圧が 26 kV、動作最低電圧が 23 kV となり、3 kV の制御幅を確保できた。一方で電極間隔 5 mm では、大気圧で自爆電圧と

動作最低電圧がともに約 15 kV となり制御幅は見られなかつたが、圧力を上げると差が大きくなり、絶対圧 0.20 MPa では自爆電圧が 29 kV、動作最低電圧が 22 kV となり、7 kV の制御幅を得た。まとめると、電極間隔を広げると、より低い圧力から広い動作電圧範囲を取りやすい傾向がある。放電エネルギーは、容量 500 pF のコンデンサを用いた場合で、印加 23 kV のとき約 132 mJ、22 kV のとき約 121 mJ となった。コンデンサ容量を変えれば供給エネルギーは調整できる。たとえば 12.7 pF を使うと約 3 J 程度となる。ただし蓄えたエネルギーがそのまま点火に使われるわけではないため、回路定数や経路の見直しなど、放電回路の最適化が今後の課題である。また、スイッチ内部の気体をアルゴンや二酸化炭素に置き換えて試験したが、いずれも十分な動作電圧の確保が難しかった。運用面では、本方式はスパークプラグで点火してスイッチ電極間の破壊を誘導する狙いだが、条件によっては高電圧がスイッチ陰極ではなくスパークプラグの中心電極へ回り込みやすい。このときスパークプラグ側に高電圧が立ち、イグニッションコイルを制御する Arduino が故障する事例が複数回発生した。ダイオードの挿入などの対策は行っているが不十分な場合がある。今後は運用電圧を過度に高くしないことに加え、スイッチ部での放電経路を詳細に把握し、スパークプラグの配置を最適化する必要がある。高電圧側の電極からプラグを遠ざけることは有効だが、その場合は制御できる電圧範囲が狭くなるおそれがあるため、配置設計と制御性の両立を検討する。

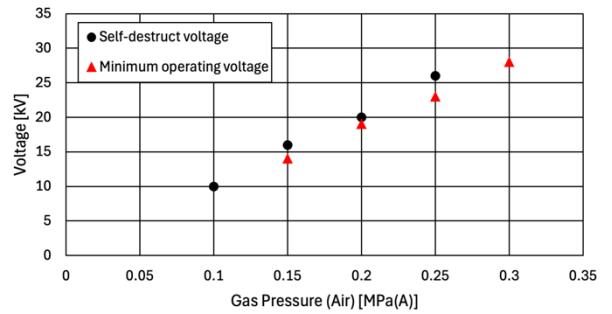


Fig. 3 Characteristics of gap switch at 3mm electrode distance

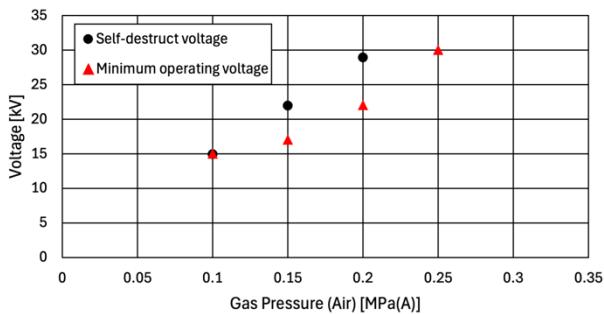


Fig. 4 Characteristics of gap switch at 5mm electrode distance

Fig.5は放電ギャップ間の電圧を示す図であり、点火プラグとギャップスイッチに内部抵抗があるため、観測電圧はキャパシタに実際にかかった電圧より小さく見える。イグニッショングループの充電が終わると直ちに放電が始まり、約30 μ s後に電圧の絶対値が最大となる。その後は約1 msの間は1 kVが続き、これはコイル由来の残留電圧であると考える。放電初期を拡大した Fig.6 では、放電開始から約30 μ sは電圧がゆっくり上がり、その後にごく短時間で急に立ち上がる様子が分かる。これは前駆電離で通り道が準備された後、一気にブレークダウンして導通が成立したことを示していると考える。以上より、放電は外部パルスに同期して立ち上がり、測定電圧は内部抵抗の影響で実際より低め結果となったと考える。

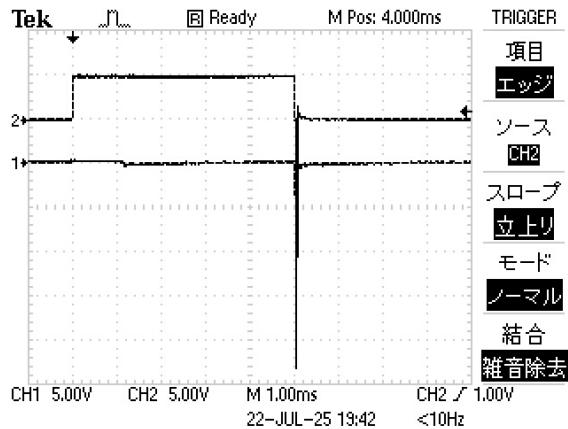


Fig.5 Voltage between the discharge gap after the end of charging to ignition coil

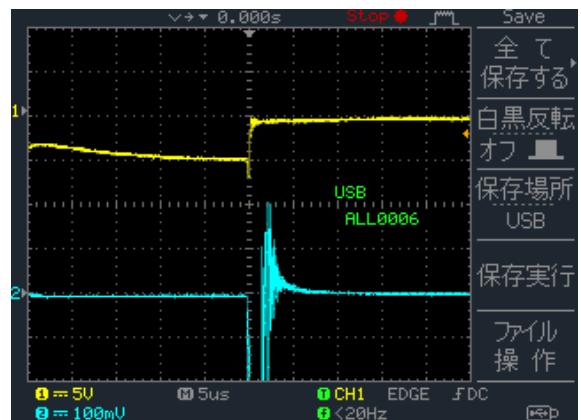


Fig.6 Changes in the voltage between discharge gap during the main discharge

4. 結論

高エネルギー点火の外部制御を実現するため、放電ギャップより高い破壊電圧をもつギャップスイッチを設計し、これを回路に組み込んだうえで、スイッチ内部のスパークプラグにて制御性を評価した。その結果、以下を確認した。まず、ギャップスイッチ内部が大気圧のままでは制御に使える電圧余裕は得られなかったが、内部圧力を上げると制御可能な動作域が現れた。電極間隔が3 mm のときは、絶対圧 0.25 MPa で 23–26 kV の範囲に約 3 kV の制御幅が生じた。電極間隔を 5 mm に広げると、絶対圧 0.20 MPa で 22–29 kV にわたる約 7 kV の制御幅を確保でき、より低い圧力条件から広い動作幅を得やすいことが分かった。今後の課題としては、放電ギャップに実際に投入される放電エネルギーの定量化と、ギャップスイッチ内部で生じる放電経路・形態の同定を進め、回路と配置の最適化する必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、日本大学生産工学部の高橋栄一教授、国立研究開発法人産業技術総合研究所 小口治久氏にご指導いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

1) 環境省, 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 6 次評価報告書 (AR6) サイクル, (2023)

<https://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/index.html> (参照 2025-10-15)

2) 日本冷凍空調学会, 微燃性冷媒を使用した低温機器のリスク評価報告書, 平成 29 年 11 月,

https://www.jraia.or.jp/outline/file/Report_20171114.pdf (参照 2025-10-15)