

高エネルギー点火装置の開発とその放電特性に及ぼす気体圧力の影響

日大生産工(院) ○藤本 太智 日大生産工 今村 宰

1. 緒言

地球温暖化による影響は、日に日に深刻さを増しており、深刻化する地球温暖化への迅速な対応が世界的に求められている。2023年3月にIPCC（気候変動に関する政府間パネル）が発表した第6次評価報告書（政策決定者向け統合報告書）によれば、気温上昇を1.5度に抑えるためには、2035年までに温室効果ガスを2019年比で60%削減（CO₂は65%削減）する必要があるとされている¹⁾。温室効果ガスの主な要因であるCO₂の削減が重要視される一方で、CO₂以外の温室効果ガスの削減も強く求められている。中でも、冷媒として使用されるフロン類がその代表例として挙げられるが、地球温暖化係数を低減させるためには、代替冷媒が微燃性を持つことが多い。微燃性を有する物質は、安全性の観点から注意が必要である。これらの物質は通常、点火に必要なエネルギーが大きいいため、適切に制御された高エネルギー点火システムが求められる。また微燃性の物質においては、燃焼速度も小さいことが予想され、その後の燃焼現象の把握においては微小重力環境のような特殊な環境での試験も想定される。このような点火システムの候補として、半導体を用いたスイッチング技術が考えられるが、コストが比較的高く、例えば微小重力実験において実験時に発生する衝撃や振動を考慮すると、より安価で堅牢な点火システムが必要とされる。本研究では、これらの課題を踏まえ、高エネルギー点火システムにおいてギャップスイッチに注目した。ギャップスイッチの試作とその特性の把握を行い、安全で効果的な点火システムの開発を目指している。以下にその結果を報告する。

2. 実験装置の概要

構築した実験装置の概要図をFig.1示す。このように高電圧電源を用いて、電源と放電ギャップ部分の間にギャップスイッチを挿入する構成とした。図中の放電ギャップが実際に高エネルギー、高電圧での放電を生じさせたい部分である。高電圧電源としては、小型高電圧電源（株

式会社グリーンテクノ製 GT80）を用いた。ギャップスイッチがなく、放電ギャップと小型高電圧電源が接続されている状況だと、放電ギャップ部における圧力、電極間距離に応じた絶縁破壊が生じる電圧（自爆電圧）に達すると火花放電が生じ、放電時のエネルギーもその自爆電圧によって支配される。ここでは高電圧電源と放電ギャップの間に、放電ギャップよりも自爆電圧の高いギャップスイッチを試作して挿入した。放電時のエネルギーを確保するため、高電圧電源とギャップスイッチの間にキャパシタ（500pF、高電圧耐性）を挿入した。このようにするとギャップスイッチで放電が生じる電圧は、放電ギャップでの自爆電圧よりも高く、またギャップスイッチでの動作電圧を調整することで、放電ギャップにおける放電エネルギーを制御することが可能である。ギャップスイッチの電極は機密容器の中に封入しており、ギャップスイッチの電極間の気体種と圧力を制御することが可能である。ギャップスイッチの制御には、ギャップスイッチの電極内にスパークプラグを挿入し、そのスパークプラグを放電させることで実施した。その詳細をFig.2に示す。

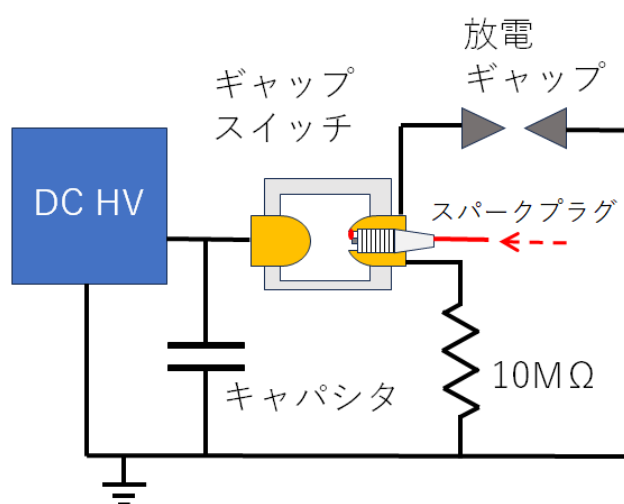


Fig.1 Schematic of the ignition system

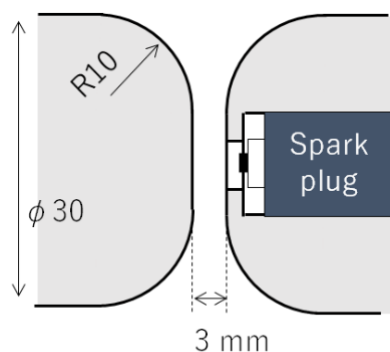


Fig.2 Detail configuration of the Gap switch

Fig.2にはギャップスイッチの電極部分の詳細図が示してある。ギャップスイッチの電極は真鍮製であり、直径30mmの真鍮棒の肩をR10で加工したものである。高電圧電源の接続されていない方（Fig.2では右側）の電極内部にスパークプラグを挿入しており、スパークプラグのネジ部は真鍮電極に接している。2つの真鍮電極は3mmの間隔であり、高電圧電源から電圧が供給されることで、この2つの電極間に電圧差が生じる。この状態でスパークプラグで放電が生じると、電子などの荷電粒子が真鍮電極のギャップ間に放出され、真鍮電極間にて放電が生じる。これによりギャップスイッチが導通するため、Fig. 1における放電ギャップにて大きな電圧にて放電することが可能となる。

3. 特性把握試験の結果と考察

今回試作したギャップスイッチの放電特性を把握するため、ギャップスイッチ内部の圧力を変化させて検証を行った。ここで把握した特性は、ギャップスイッチにおける自爆電圧の圧力依存性と、ギャップスイッチとして動作可能な最低電圧の圧力依存性である。ギャップスイッチ間の圧力を調整し、高電圧電源の電圧を徐々に上昇させることで、ギャップスイッチにおける自爆電圧を把握した。また自爆電圧よりも低い電圧でスパークプラグを放電させ、ギャップスイッチ間が導通した最も低い電圧を動作最低電圧と定義した。なおスパークプラグはイグニッションコイルを用いて放電させており、イグニッションコイルの充電時間は5msである。これらの結果をまとめたものがFig. 3である。この図に示されている電圧は、キャパシタに印加されている電圧値を示している。図の通り、大気圧では、自爆電圧が約11kV、動作最低電圧が10kVであり、制御できる電圧差はほとんどなかったが、圧力が上昇するにしたがって、その電圧差が大きくなり、0.25MPa(A)では自爆電圧が30kVに對

して、動作最低電圧は23kVとなり、7kVの動作電圧差を確保できることが明らかとなった。今回、500pFのキャパシタを使用しており、例えば印加電圧23kVの場合、キャパシタに蓄積しているエネルギーは132mJとなる。この値はキャパシタを変更することで調整可能であり、例えば12.7 pFのキャパシタ用いると3.3J程度となる。しかしながら、このエネルギーすべてが点火試験のための放電に使えるわけではなく、放電回路の調整は今後の課題である。

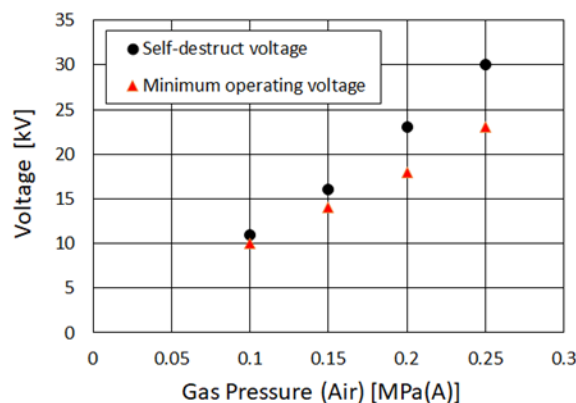


Fig. 3 Effect of gas pressure on the operation voltages of the gap switch

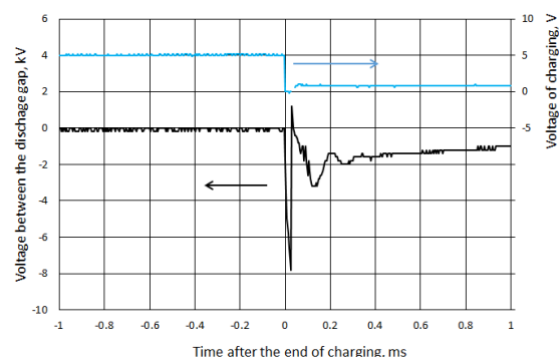


Fig. 4 Voltage between the discharge gap after the end of charging to ignition coil

Fig. 4には放電プロファイルを示しており、ここでは放電ギャップ間の電圧を測定している。ただし、放電ギャップ部分には点火プラグを用いており、内部抵抗が存在している。そのためここで測定している電圧は放電ギャップ部の点火プラグに含まれる内部抵抗による電圧降下を含んだ値となっている。またギャップスイッチ部分にも電気的な抵抗が存在し電圧降下があるため、ここで測定された電圧はキャパシタに印加されている電圧よりも小さい値となっている。Fig.4よりイグニッションコイルへの充電が終了した後にすぐに放

電は開始し、およそ30 μ s後に電圧の絶対値は最大となっていることがわかる。その後しばらく1msほどの間に1kV程度の電圧が測定されており、これはギャップスイッチに用いたイグニッションコイルの影響と考えられる。放電時の部分を時間分解能を上げて測定したものがFig. 5である。放電開始後、およそ30 μ sの間は比較的緩やかに電圧が上昇し、その後瞬時に急激な電圧上昇が生じていることがわかる。

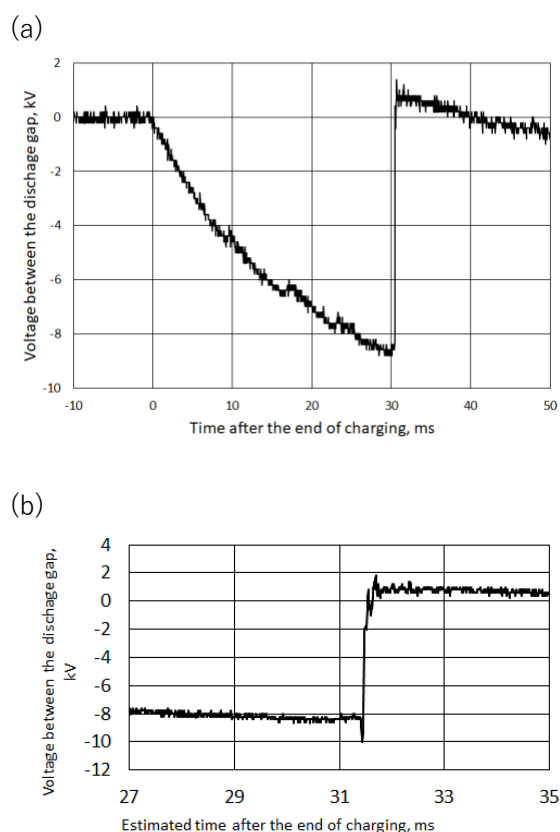


Fig. 5 Changes in the voltage between discharge gap during the main discharge (a) behavior after the end of charging, (b) closeuo around 31ms after the end of charging

今後、より制御しやすい点火システムを実現するために、ギャップ機構の再度検討を行う予定である。また、安全性を高めるために、高電圧電源を切り離した後に、ギャップスイッチを動作させる機構や、放電後にキャパシタの残存するエネルギーを除電するシステムの構築が必要であり、これらについて検討を進める予定である。

4. 結論

微燃性物質の燃焼特性を理解するために、高エネルギー点火が可能なシステムを構築することを目的として、本研究ではギャップスイッチを試作し、その特性把握試験を行った。検討の結果、明らかとなったことは以下のとおりである。

- ・本研究で用いたギャップスイッチ機構では、ギャップスイッチ部分が大気圧の場合には十分な制御可能な電圧差を確保することが難しい状況であった。ギャップ部の圧力を0.25MPa(A)とすることで7kVの動作電圧の幅を有することが確認できた。

- ・イグニッションコイルへの充電終了後、およそ30 μ s後に放電ギャップでの電圧が最大値に達することが確認された。

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2024-09-24)