

1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 10 月 28 日木曜日 午後 1 時～午後 4 時

天気 雨

気圧 1007.8hPa

気温 19.7℃

湿度 53.2%

2 実験の目的

数十 μs という短時間に、極めて高い電圧に達する標準雷インパルス電圧を発生させ、各種気中ギャップによる絶縁破壊実験を行う。これを通してインパルス電圧発生装置の原理とその操作方法を学び、高電圧技術への理解を深める。

3 実験の原理

3.1 インパルス電圧発生回路

インパルス電圧発生回路を図 1 に示す。主コンデンサ C_0 に貯めた電荷は放電ギャップ G を通じて放電され、並列接続されているコンデンサ C にインパルス電圧を生み出す。当実験ではさらに大きな電圧を得るために図 4 に示すようなマルクス型インパルス電圧発生装置を採用している。これは、16 個のコンデンサを並列に充電した後、放電ギャップを通じて直列に切り替えて放電させる方式である。

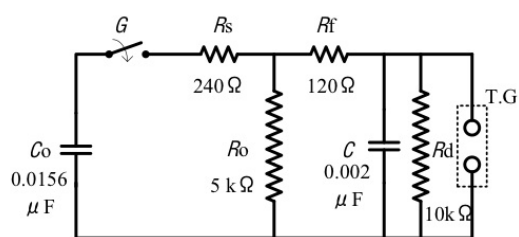


図 1 インパルス電圧発生器の基本回路

- C_0 : 主コンデンサ
- C : 波頭調整用コンデンサ
- R_f : 波頭調整用抵抗
- R_s : 制動兼波形調整用直列抵抗
- R_0 : 放電抵抗
- R_d : 放電兼波形観測用分圧抵抗
- G : 放電ギャップ
- $T.G$: 供試ギャップ

3.2 標準インパルス電圧

実世界で発生する雷電圧の波形の実測値から、次のような標準雷インパルス電圧波形が決められている。当実験では図 3 に示すような波形を生じさせている。ただし $T_f = 1.2\mu s$ 、 $T_t = 50\mu s$ である。

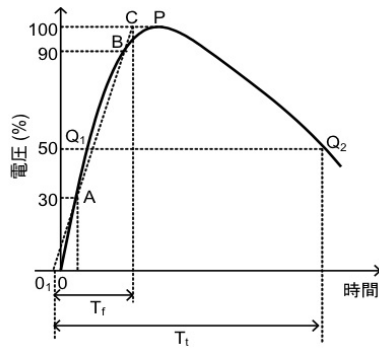


図2 雷インパルス電圧波形とその定義

T_r : 規約波頭長
 T_t : 規約波尾長
 O_1 : 規約原点
 Q_1, Q_2 : 半波高点
 P : 波高点

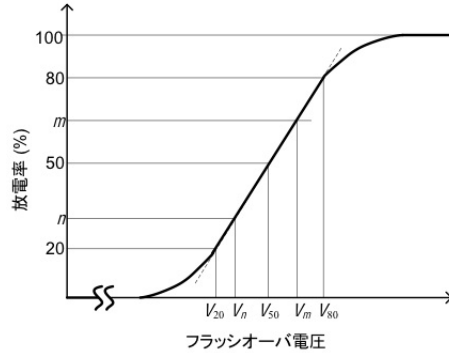


図3 フラッシュオーバー電圧－放電率特性

3.3 50% フラッシュオーバー電圧

電極間にインパルス電圧を印加した際のフラッシュオーバー電圧は偶発的原因に大きく支配されている。そこで放電率 ϵ は同じ波高値のインパルス電圧をできるだけ何度も印加し、フラッシュオーバーが起こる確率を計算するべきである。すなわち、インパルス電圧の印加回数を N 回、そのうちフラッシュオーバーが起こるのを n 回とすると、

$$\epsilon = \frac{n}{N} \times 100[\%] \quad (1)$$

と定義される。

一般的にフラッシュオーバー電圧は放電率が 50% になる電圧、つまり 50% フラッシュオーバー電圧 V_{50} (50% FOV) を採用する。当実験では放電率 20% から 80% の区間までのフラッシュオーバー電圧-放電率特性が図 3 のように線形であると仮定し、放電率 m ($=60 \sim 80\%$) を与える電圧 V_m 及び放電率 n ($=20 \sim 40\%$) を与える電圧 V_n を用いた補間法で V_{50} を求めることとする。すなわち

$$V_{50} = \frac{V_m(50 - n) + V_n(m - 50)}{m - n} \quad (2)$$

3.4 50% フラッシュオーバー電圧の相対空気密度補正

気中ギャップの 50% FOV は大気圧・気温によって変化するのでその都度補正が必要である。標準の大気状態 (気温 20 °C、気圧 1013hPa) における 50% FOV を求めるには次の補正式を用いる。ただし V_s : 標準大気状態 50% FOV、 V : ある条件下における 50% FOV とする。

(1) $0.95 < \delta < 1.05$ の場合

$$V = \delta V_s \quad (3)$$

(2) δ が (1) の範囲外の場合

$$V = k V_s \quad (4)$$

ただし δ は

$$\delta = \frac{p}{1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} \cong 0.289 \frac{p}{273 + t} \quad (5)$$

で与えられる相対空気密度である。ここで p : 測定時の大気圧 (hPa)、 t : 測定時の気温 (°C) である。

また k は表 1 で与えられる補正係数である。

表 1 補正係数 k の値

δ	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.05	1.10
k	0.72	0.77	0.81	0.86	0.91	0.95	1.05	1.09

3.5 インパルス電圧発生器の利用率 η

インパルス電圧発生器のコンデンサに加わる充電電圧値と実際に試供物に加わる電圧値は回路の抵抗の影響を受けて差が生じる。その利得割合が利用率で、次式のように定義される。

$$\eta = \frac{\text{コンデンサに加わる充電電圧値}}{\text{試供物に加わる電圧値}} \times 100[\%] \quad (6)$$

4 使用器具及び装置

- インパルス電圧発生装置（直流高圧電源・レントゲンケーブル・発生装置本体・波形観測装置）結線図を図 4 に示す。直流高圧電源の定格出力電圧は接地電圧に対し $\pm 50\text{kV}$ 、レントゲンケーブルの直流耐電圧は 50kV 、発生装置は耐電圧 100kV の複合型コンデンサを 8 段計 16 個接続し、最高充電電圧 800kV まで充電できる直列充電方式である。

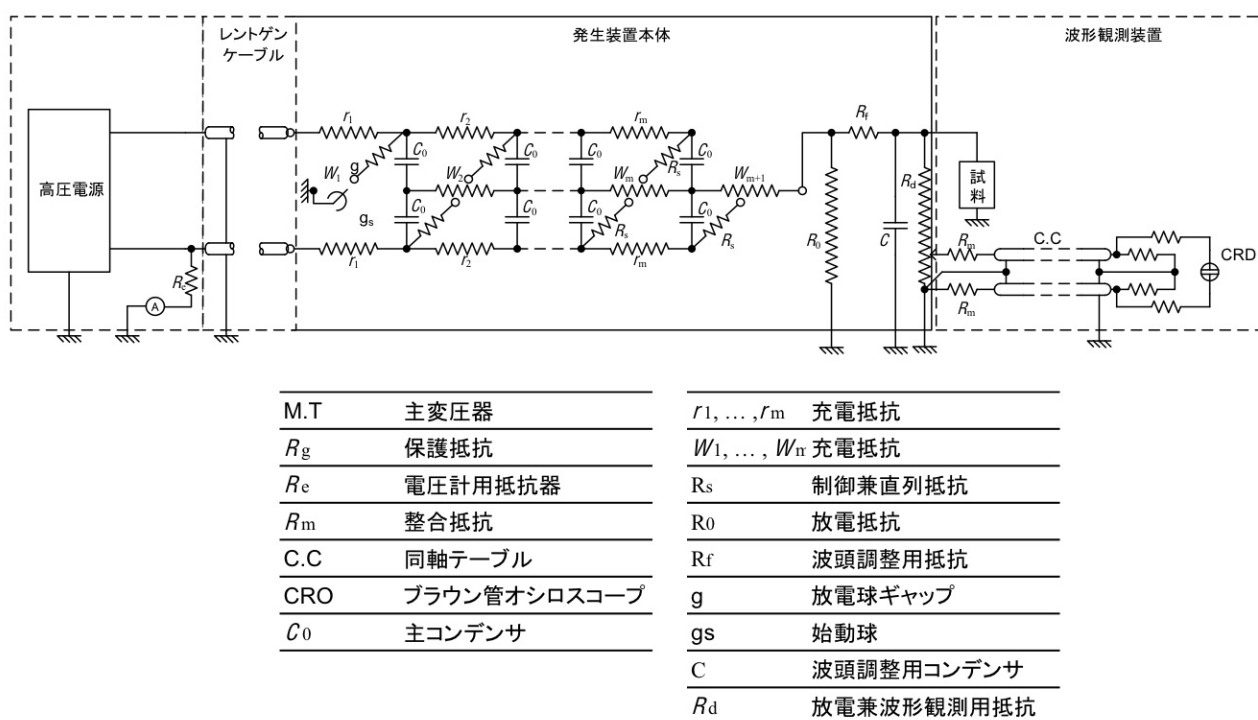


図 4 インパルス電圧発生装置結線図

- 筆記用具・トレーシングペーパー・実験レジュメ・実験ノート

5 実験結果

- (1) **インパルス電圧発生器の利用率 η の測定** 試供物として標準大気状態の 50% FOV が既知の標準球ギャップ（直径 12.5cm）を接続し、ギャップ長 10cm、印加電圧を正にした。そして電源装置の電圧を調節して 10 回電圧を印加し放電を発生させた。するとコンデンサの充電電圧と放電確率について表 2 の結果が得られた。よってコンデンサ 1 個あたりの充電電圧 V_{50} は補間法を用いて

表 2 標準球ギャップ測定

	フラッシュオーバー電圧 V[kV]	放電確率 [%]
m	16.50	70
n	16.20	30

$$V_{50} = \frac{16.50 \times (50 - 30) + 16.20 \times (70 - 50)}{70 - 30} = 16.35[kV] \quad (7)$$

となる。一方標準球ギャップは実験レジュメよりギャップ長 10cm・印加電圧極性が正の時 215kV である。これを実験日の大気圧・気温で補正したところ、

$$\delta = 0.289 \times \frac{1007.8}{273 + 19.7} = 0.995 \quad (8)$$

$$V = 0.995 \times 215 = 214[kV] \quad (9)$$

となった。よって利用率 η は

$$\eta = \frac{214}{16.35 \times 16} \times 100 = 81.8[\%] \quad (10)$$

となった。

- (2) **棒－平板ギャップの 50% フラッシュオーバー電圧の測定** 印加電圧極性を正のままにし、試供物をフラッシュオーバー電圧が未知の金属棒と金属平板に取り替え、50%FOV を求めた。
まず、ギャップ間を 10cm にして任意の電圧で放電させたところ、放電確率について次の表 3 の結果が得られた。よってコンデンサ 1 個に加わる充電電圧 V_{50} は

表 3 棒－平板ギャップ（10cm）

	フラッシュオーバー電圧 V[kV]	放電確率 [%]
m	5.51	70
n	5.33	30

$$V_{50} = \frac{5.51 \times (50 - 30) + 5.33 \times (70 - 50)}{70 - 30} = 5.42 \quad (11)$$

となり、全てのコンデンサに加わる充電電圧による 50%FOV E_{50} は

$$E_{50} = 5.42 \times 16 = 86.72[kV] \quad (12)$$

利用率および相対空気密度補正を考慮した標準大気状態の 50%FOV は

$$\frac{86.72 \times 0.818}{0.995} = 71.3[kV] \quad (13)$$

次にギャップ間を 20cm に変更して同様の実験を行ったところ表 4 の結果が得られた。よって補正前及

表 4 棒-平板ギャップ (20cm)

	フラッシュオーバー電圧 V[kV]	放電確率 [%]
m	9.50	70
n	9.13	30

び補正後の 50%FOV は

$$E_{50} = \frac{9.50 \times (50 - 30) + 9.10 \times (70 - 50)}{70 - 30} \times 16 = 148.8[kV] \quad (14)$$

$$\frac{148.8 \times 0.818}{0.995} = 122[kV] \quad (15)$$

さらにギャップ間を 30cm に変更して同様の実験を行ったところ表 5 の結果が得られた。これより補正

表 5 棒-平板ギャップ (30cm)

	フラッシュオーバー電圧 V[kV]	放電確率 [%]
m	13.19	80
n	12.70	30

前及び補正後の 50%FOV は

$$E_{50} = \frac{13.19 \times (50 - 30) + 12.70 \times (80 - 50)}{80 - 30} \times 16 = 206.3[kV] \quad (16)$$

$$\frac{206.3 \times 0.818}{0.995} = 170[kV] \quad (17)$$

最後にギャップ間を 10cm に戻し、印加電圧極性を負にして同様の実験を行ったところ表 6 の結果が得られた。よって補正前及び補正後の 50%FOV は

表 6 棒-平板ギャップ (10cm) ・印加電圧極性：負

	フラッシュオーバー電圧 V[kV]	放電確率 [%]
m	12.40	70
n	11.99	30

$$E_{50} = \frac{12.40 \times (50 - 30) + 11.99 \times (70 - 50)}{70 - 30} \times 16 = 195.1[kV] \quad (18)$$

$$\frac{195.1 \times 0.818}{0.995} = 160[kV] \quad (19)$$

以上の実験結果を表 7 にまとめる。

表 7 棒－平板ギャップ 50%FOV（標準大気状態）

ギャップ長 [cm]	印加電圧極性	フラッシュオーバー電圧 [kV]
10	正	71.3
20	正	122
30	正	170
10	負	160

- (3) **放電点の分布状態の観測** 棒－平板間のギャップ長を 30cm に、印加電圧極性を正に設定し、平板上にトレーシングペーパーを置いて自爆放電を 50 回発生させた。その時の放電点分布を ページに示す。

6 検討

- (1) 実験 (1) の標準球ギャップ測定と、実験 (2) の棒－平板ギャップ測定を比較する。50%FOV は前者が 215kV（文献値）、後者が 71.3kV であった（ともに標準大気状態）。

球ギャップは波形によらず一定のフラッシュオーバー電圧を持ち、高電圧を直接測定できる特性を持つため、測定の校正に用いられることが多い。球同士を向かい合わせるとその間には平等電界が生じるため、印加電圧を上昇したときにコロナ放電と呼ばれる自続放電なしで火花放電を生じる特徴がある。この時球ギャップはインパルス電圧の波高点近くで放電する。よって 50%FOV が高くなったと考えられる。

一方、棒－平板ギャップは間に生じる電界が不平等となる代表例であり、火花放電の前の前兆として絶縁破壊する寸前にコロナが観察される。これをコロナ放電と呼び、平等電界の時と火花放電が生じる条件が異なってくる。棒－平板間では電界が部分的に強く集中する部分ができ、その結果球ギャップよりも低い電圧で放電が生じたと考えられる。

- (2) 実験 (2) の結果を図 6 にまとめる。ギャップ長と 50%FOV の間には比例関係があり、 $50\%FOV[kV] = 4.935 \times \text{ギャップ長}[cm] + 22.4$ という数式で表されることが分かった。ただしギャップ長が 0 の時の 50%FOV は気中ギャップが存在しないため 0 になると考えられるので、この数式が適用できるギャップ長の範囲は限られると考えられる。

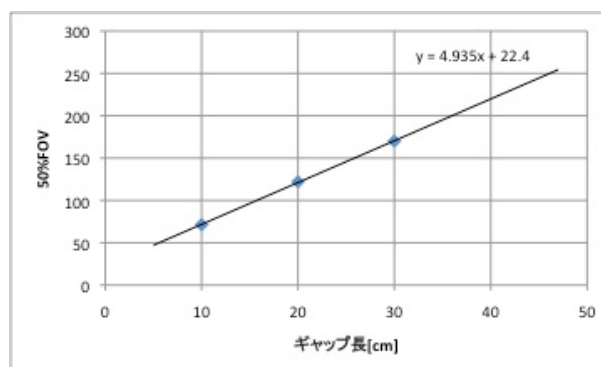


図 5 ギャップ長と 50%FOV の関係

- (3) 放電点の個数を中心からの距離ごとに集計した図を図??に示す。これより、棒ギャップに近づくほど放電点は多く分布することが分かった。ただし、棒ギャップの真下よりも少し離れた半径2～3cmと5～6cmの領域で放電点のピークが見られた。これは棒ギャップの先端が針状ではなく、四角形をしていたため、平面部分よりも局所電界が集中しやすい棒の角から放電したためと考えられる。

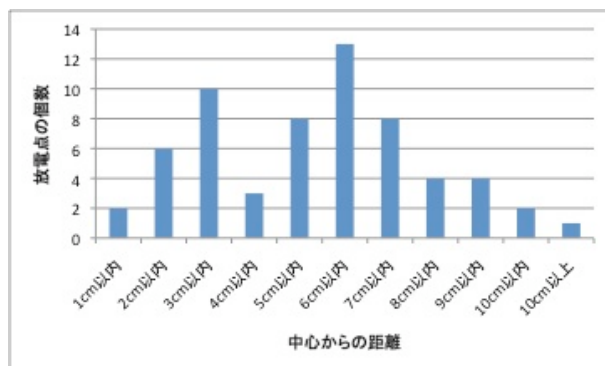


図6 棒ギャップ真下からの距離と放電点の個数の関係

- (4) 棒一平板ギャップのような不平等電界におけるコロナ放電では、極性効果と呼ばれる印加電圧の極性に応じて放電の過程が変化する現象が生じる。すなわち曲率が高い電極側に正極性の高電圧を印加した場合に生じる正コロナ放電と、逆に負極性の高電圧を印加した場合に生じる負コロナ放電に分類される。

正コロナ放電は印加電圧が低いうちに発光が見えない暗流が生じ、電圧が上がるに従って電極に薄く膜状コロナ・グローコロナが観察されるようになる。さらに電圧をあげるとブラシコロナに次いでギャップを橋絡したようなほつすコロナが観察され、火花電圧に達してようやく火花放電が生じる。

負コロナ放電は印加電圧が低いうちは暗流が生じ、電圧を上げていくとグローコロナを生じるのは共通であるが、さらに電圧をあげるとほとんどグローコロナを観察しないままに火花放電が生じる。

以上のように、コロナ放電のプロセスの違いとコロナの伸展具合により火花電圧が異なると考えられる。

- (5) 雷は長ギャップ放電の代表例である。長ギャップ放電を写真にとって観察すると、ギャップからリーダと呼ばれる太い光条と、その先にコロナストリーマと呼ばれる刷毛状の放電が見られる。

自然界では雲と地表の間で長ギャップが形成され、巨大な雷雲に分布している電荷が移動することで落雷として観察される。最初に下向きの先駆放電が起こると地表から帰還雷撃が上昇し、それに誘発されて再び下向きの矢形先駆放電が地上へ落ちる。この流れが繰り返されると多重雷撃となり雷が成長していく。この多重雷撃が発生するのは雷雲がいくつもの層に体積的に電荷を含んでいるため、地表に近い面の電荷が先駆放電で大地に達すると、上向きの帰還雷撃破が発生し、リーダが切り開いた放電路の上端に達する。ここで雷雲に残されていた負の電荷のために正の電荷が誘導されてストリーマが更に上へ伸びていく。

ここまでの説明は、下向きに落ちる雷であったが、上向きに放電する冬季雷も存在する。冬季雷は一般的な雷よりも低い高度の雷雲で生じるため、上向きの先駆放電を生じて大きなエネルギーを持つことで知られる。

7 結論

1. 高電圧を生じさせるにはコンデンサに貯めた電荷を一瞬で放電させて高電圧を得るマルクス形インパルス電圧発生装置がある。雷電圧の研究では標準インパルス電圧波形がよく用いられる。火花放電は偶発的であるため、50% フラッシュオーバー電圧を求めるには補間法などの方法で確率論的に求める必要がある。
2. ギャップの形状及び長さによって 50%FOV が変化する。形状はギャップ間の電界の形状を決定するのに重要で、電界が一定であるかそうでないかでフラッシュオーバー電圧が異なる。またギャップ間距離が広がるほどフラッシュオーバー電圧は大きくなる。さらに 50%FOV は大気圧・気温の条件によっても変化するので適宜補正が必要である。
3. 放電点の分布はギャップの形状に左右されると考えられる。放電は基本的に火花放電が起こるギャップに近い位置に生じやすい。

8 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 6 人と、丁寧に指導して下さいった先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

9 参考文献

- 実験テキスト「A1. ハイパワー衝撃回路の基礎実験 ～インパルス電圧による空気の絶縁破壊～」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第 2 版第 1 刷 第 2 編
- 「高電圧工学」大木正路著 槇書店 初版
- 「高電圧大電流工学」電気学会通信教育会著 オーム社 初版
- 「高電圧・絶縁工学」小崎正光編著 オーム社 第 1 版第 1 刷
- 「 \LaTeX 2_ε 美文書作成入門 改訂第 4 版」奥村晴彦著 技術評論社 第 4 版第 6 刷

以上