

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～

Keywords: インパルス電圧、気中放電、絶縁破壊、高電圧発生装置

1. 実験目的

雷(雷サージ)や、電力系統の遮断器の開閉に伴って発生する過電圧(開閉サージ)は、電力系統に発生する高電圧異常事象の理解に重要である。これらはいずれも短時間に最高電圧に達し、その後すみやかに減衰するインパルス電圧である。インパルス電圧には雷インパルス電圧と開閉インパルス電圧があり、前者は数十 μs 、後者は数 ms の継続時間を持つ。

本実験では、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インパルス絶縁破壊試験を行うことによって以下の項目を目的とする。

■実験目的

- (1) 雷電圧の相似波形である雷インパルス電圧の発生器の原理およびその操作方法を理解すること、
- (2) 高電圧技術および気中放電現象に関する理解を深めること、

2. 実験原理

インパルス電圧発生器(impulse generator, IG)は、基本的にコンデンサを高電圧充電し、短時間に放電を行うものである。

以下に本実験で使用する「2.1 インパルス電圧発生回路」について説明し、続いて「2.2 標準雷インパルス電圧波形」、「2.4 50%フラッシュオーバ電圧」および「2.5 50%フラッシュオーバ電圧の相対空気密度補正」について説明する。

2.1. インパルス電圧発生回路

インパルス電圧発生器の基本回路は図1に示すように、主コンデンサ C_0 に充電した電荷を、放電ギャップ G を通じて放電し、コンデンサ C の両端にインパルス電圧を発生させるものである。しかし、実際にはコンデンサの耐電圧、整流回路の逆耐電圧などにより、1 個のコンデンサでは発生電圧に限界が存在する。そこで、本実験装

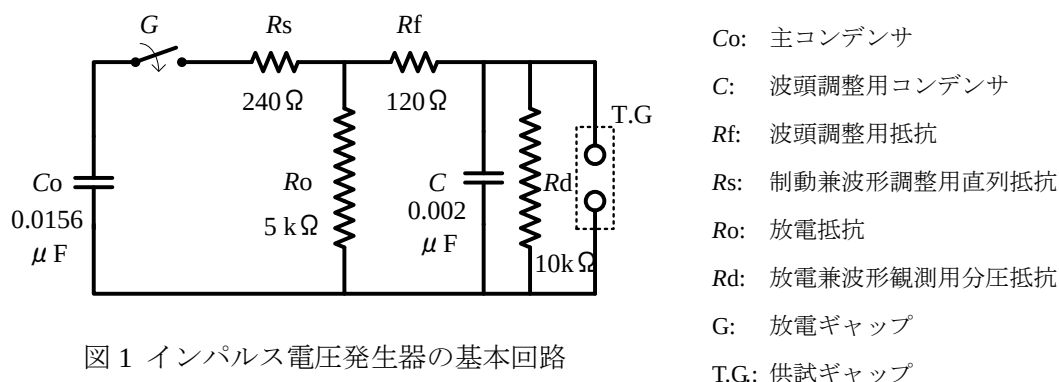


図1 インパルス電圧発生器の基本回路

置のインパルス電圧発生装置では、多数のコンデンサを抵抗を通して並列に充電し、これを放電ギャップによって直列に放電させる、いわゆる多段式（マルクス型）インパルス電圧発生器(Marx Generator)を採用している（図4参照）。

2.2. 標準雷インパルス電圧

電力系統に生じる雷電圧の波形は多種多様であるが、実測の結果から最も普遍的な波形として標準雷インパルス電圧波形が定められている。JEC-0202-1994 規格によれば図2に示すように規約波頭長 $1.2 \mu\text{sec}$ 、規約波尾長 $50 \mu\text{sec}$ を採用しており、本実験においてもこの標準波形を発生させる。

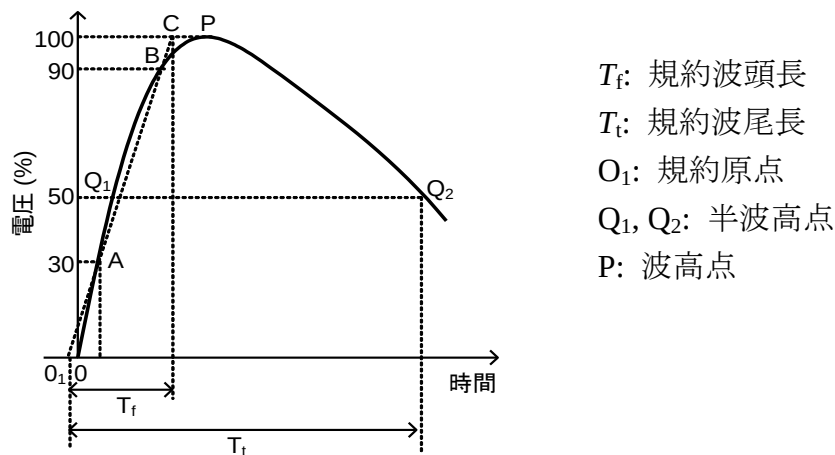


図2 雷インパルス電圧波形とその定義

2.3. 50%フラッシュオーバ電圧

ある電極間にインパルス電圧を印加した場合、そのときのフラッシュオーバは偶発的な原因に相当強く支配される。そこで放電率 ε は、同じ波高値のインパルス電圧を N 回印加したとき、そのうち n 回だけフラッシュオーバが起こったとき、次式のように定義されている。

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

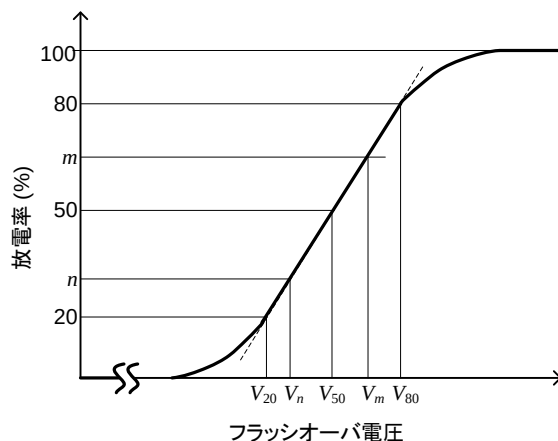


図3 フラッシュオーバ電圧—放電率特性

最も一般的に用いられるフラッシュオーバ電圧は放電率が 50%になる衝撃火花電圧を与える 50%フラッシュオーバ電圧である。

50%フラッシュオーバ電圧の測定法は種々あるが本実験では内挿法（補間法）を用いる。内挿法は、放電率が 20～80%の範囲内ではフラッシュオーバ電圧に比例すると考えた図3の放電率特性に基

づく測定法である。

いま、フラッシュオーバー電圧 V_m ならびに V_n のときの放電率がそれぞれ $m\%$ および $n\%$ とすると、図 3 の放電率とフラッシュオーバー電圧の関係から 50%フラッシュオーバー電圧 V_{50} は次式で与えられる。

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

2.4. 50%フラッシュオーバー電圧の相対空気密度補正

一般に、気中ギャップの 50%フラッシュオーバー電圧 (50% FOV) はその時の大気圧、気温によって変化する。このため、50% FOV は標準の大気状態 (気温 20 °C、気圧 1013 hPa) に対して次のような補正を実施する。標準大気状態における 50% FOV を V_s 、その時の大気状態におけるそれを V とすると、

(1) $0.95 < \delta < 1.05$ の場合

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

(2) δ が上記以外の場合

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

ここで、補正係数である相対空気密度 δ は、下式で与えられる。

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

ただし、

p : 測定時の大気圧 (hPa)

t : 測定時の気温 (°C)

また、補正係数 k は表 1 のように与えられる。

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. 実験方法

3.1. インパルス電圧発生装置の取り扱い

インパルス電圧発生装置は図 4 に示すように構成されている。

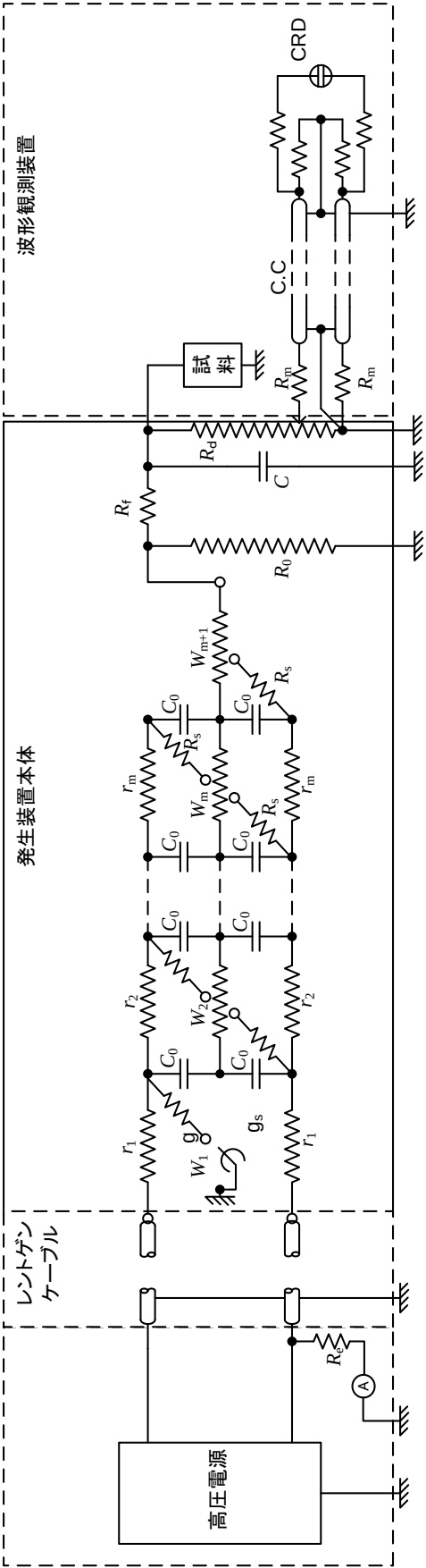
【インパルス電圧発生装置】

- | | |
|---------------|--|
| (1) 直流高圧電源 | 定格出力電圧は、接地電位に対して ± 50 kV |
| (2) リットゲンケーブル | 直流耐電圧 50 kV |
| (3) 発生装置本体 | 本装置は耐電圧 100 kV の複合型コンデンサ 8 段 (コンデンサ直列個数 16 個)、最高充電電圧 800 kV、直列充電方式である。 |
| (4) 波形観測装置 | 図 4 に示す平衡回路方式による。 |

以下、図4に従ってインパルス電圧発生装置の操作方法について説明する。

【インパルス電圧発生装置操作方法】

- (1) あらかじめ、備え付けの接地棒により発生装置本体（発生器）の放電球ギャップ g を短絡し、主コンデンサ各段の残留電荷を放電する。
（接地棒は取り扱い易い場所におく）
- (2) 放電球ギャップ g を適当なギャップ長に設定する。
- (3) 供試間隙を所定の位置に設け、発生器出力端子間に接続する。
- (4) 高圧電源の電圧設定ボリュームが零である事を確認する。
- (5) 高圧電源のインターロックのスイッチ「OPEN」を投入する。
- (6) スイッチ「HV ON」を押し、高圧回路を ON にする。ON 状態の時はパイロットランプが点灯する（予定）（OFF 状態にするには「HV OFF」を押す）。
- (7) 電圧計を監視しながら、ゆっくりと主コンデンサ充電電圧を上昇させ、その時の発生器自爆電圧を電圧計から読み取る。この時電圧計の読みは最下段コンデンサ 1 個の読みであるから自爆電圧はその 16 倍となる。実際に供試物に加わる電圧は図4のCの両端にかかる電圧であるから、その値に発生器の利用率 η をかけたものである。放電ギャップの不整現象を取り除くため、予備放電を 5 回以上行う。
- (8) 次に(8)と同様の操作で電圧を上昇させ、自爆電圧のおよそ 95%にセットして、手動トリガースイッチを押し、トリガー放電する事を確認する（トリガー放電しない場合には担当者に申し出る）。ここで適当回数一定電圧を印加し、供試ギャップの閃絡有無から電圧計の読みで $n\%$ フラッシュオーバ電圧を求める。次いで、印加電圧を変化させ $m\%$ フラッシュオーバ電圧を求める。
- (9) 20~80%フラッシュオーバ電圧が設定した放電球ギャップ g におけるトリガー放電発生電圧より低い場合は発生器下部に据付けられた手動ハンドルを操作し、 g のギャップ長を短くし、トリガー放電発生電圧の範囲がその範囲に入るようにする。高い場合は逆に g のギャップ長を長くする。手動ハンドル操作を行う前に(1)で述べたように必ず接地棒で火花ギャップを短絡し、コンデンサの残留電荷を放電する。なお、末尾の実験上の注意事項を必読すること。



M.T	主変圧器	$r_1, \dots, r_m$	充電抵抗
R g	保護抵抗	$W_1, \dots, W_m$	充電抵抗
R e	電圧計用抵抗器	R_s	制御兼直列抵抗
R m	整合抵抗	R_0	放電抵抗
C.C	同軸ケーブル	R_f	波頭調整用抵抗
CRO	ブラウン管オシロスコープ	g	放電球ギャップ
C 0	主コンデンサ	g s	始動球
		C	波頭調整用コンデンサ
		R_d	放電兼波形観測用抵抗

図4 インパルス電圧発生装置結線図

3.2. 実験項目

(1) インパルス電圧発生器の利用率 η の測定

一般にインパルス電圧発生器の利用率は次式となる。

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

コンデンサに加わる充電電圧は図4のKV計の読みから知る事ができる。但し、放電球ギャップが閃絡した時はこの読みの16倍となる。

今、Cの両端に標準の大気状態における50%フラッシュオーバー電圧が既知の標準球ギャップ（直径12.5 cm）を接続する。（その50%FOV値は表2使用、ただし、その際2.4で述べたように、実験時の大気状態に補正する。）

2.3節で述べた方法により E_{50} （コンデンサに加わる充電電圧による50%FOV）を実験から求め、上式より利用率を算出する。

表2 直径12.5 cm 標準球ギャップの50%フラッシュオーバー電圧 [kV]
(一球接地、標準大気状態：気温 20℃、気圧 1013 hPa)

ギャップ長 (cm)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
印加電圧 極性	+	31.7	59.0	85.5	110	134	155	(173)	(189)	(203)	(215)
	−	31.7	59.0	85.0	108	129	146	(161)	(174)	(185)	(195)

このときの電圧印加回数10回、ギャップ長は10cmとする。印加電圧の極性は正極性で行う。

(2) 棒－平板ギャップの50%フラッシュオーバー電圧の測定

太さ2 mm、先端半球状金属棒電極（高圧側）と1 m（縦）×1 m（横）×2 mm（厚さ）のアルミ平板電極（接地側）を使用し、ギャップ長10、20、30 cmの時のにおける50%FOVを2.3節の方法により、まず E_{50} （コンデンサに加わる充電電圧による50%FOV）として求める。それに(1)で求めた利用率および相対空気密度補正 δ を考慮し、標準大気状態のものとして求める。印加電圧の極性は正、負両極性とも行う。

(3) 放電点の分布状態の観測

上記(2)のギャップ長30 cmについて、50%FOV時の平板上の放電点分布を観測する。但し、閃絡数50回とする。

4. 考察、検討事項

- (1) 電極形状による 50%FOV の相違について考察する。
- (2) ギャップ長と 50%FOV の関係式の導出と考察を行う。
- (3) 放電点の分布状態の検討、考察を行う。
- (4) 印加電圧の極性による 50%FOV の相違について考察する。
- (5) 自然界の雷放電について次の 2 つの言葉を使って説明する（リーダ，冬季雷）。

実験上の注意

- A) 3.1 節 _____ 部の各事項は必ず守ること。
- B) 発生電圧は数十万ボルトに達するため、課電中は絶対に黄色の柵内へ入らぬこと。
- C) 供試ギャップを変更する際、必ず接地棒で高压側電極を接地してから調節すること。
- D) 実験者同志よく連絡をとり、実験室へは、電源を切り電圧計の読みが零である事を必ず確認してから入る。
- E) 低電圧と同様な安易な態度は生命の危険を伴うものと覚悟しなければならない。

レポートについて

提出先：E4-226 入って右側のトレイに入れること

締 切：実験翌週の木曜日の 13 時まで

（木曜日が祝日・冬休み・臨時休講などで休みの場合は次週）

（上記で次週も休みの場合は、さらに次週に持ち越し）

注意：実験結果をもとに「4. 考察・検討事項」の(1)～(5)の内容について考察を行うこと。その際、理工学図書館にて下記の文献等をもとに検討を行い、レポートに使用した参考文献を挙げること。

参考文献

- (1) 電気規格調査会標準規格 JEC-212；“インパルス電圧電流試験一般” 電気学会、1981 年
- (2) 電気規格調査会標準規格 JEC-213；“インパルス電圧電流測定法” 電気学会、1982 年
- (3) 中野義映；“高電圧工学” 現代電気工学講座、オーム社
- (4) 電気学会；“電離気体論” 電気学会大学講座
- (5) 電気学会；“高電圧大電流工学” 電気学会大学講座
- (6) 大木正路；“高電圧工学” 大学電気電子工学シリーズ、槇書店
- (7) 河野照哉；“新版高電圧工学” 電気工学基礎講座 17、朝倉書店

A1 ハイパワー衝撃回路の基礎実験 (E4-126) 実験手順

■進行

- (1) 実験の目的の説明
- (2) 高圧機器の取り扱い説明
- (3) 温度・湿度の記録
- (4) 気圧の記録
- (5) 標準ギャップ準備 (間隔 10 cm に設定)
 - ・ 予備放電 (装置操作の練習、接地棒操作の練習)
 - ・ 利用率の測定
- (6) 棒—平板ギャップ (間隔 10 cm に設定)
 - ・ 50%フラッシュオーバー測定
- (7) 棒—平板ギャップ (間隔 20 cm に設定)
 - ・ 50%フラッシュオーバー測定
- (8) 棒—平板ギャップ (間隔 30 cm に設定)
 - ・ 50%フラッシュオーバー測定
 - ・ 放電点の分布状態の測定 (トレーシングペーパー設置)... 合計 50 回
- (9) 棒—平板ギャップ (間隔 10 cm に設定)
 - ・ 電源逆極性に変更
 - ・ 50%フラッシュオーバー測定
- (10) (終了) : 目標 15:00

(以上)

付 録

電子情報工学専門実験第1部

A1 ハイパワー衝撃回路の基礎実験 テクニックノート

☆ 実験上の注意点

- ・ 供試ギャップ長の調整はギャップ長を所望の長さよりも広げて置き、ギャップ長を縮める方向にハンドルを回す事で調整する事。これは広げる方向への調整は精度がないためである。
- ・ 直流電圧原にも同じことが言え、電圧をある程度まで上げ、その後少しずつ上げる方向で所望の電圧値に調整すること。これは、電圧を下げる方向への調整をすると不安定になるためである。
- ・ ギャップ長を示す目盛りの針が若干曲がっているため、針の先ではなく、根元が所望の長さを示すように調整する。
- ・ 自爆電圧値を徐々に下げて行き、はじめてフラッシュオーバーがおこらなかったときの電圧値を基準として測定を行うと実験の効率が良い。
- ・ 最初ギャップ長を広めに設定し、自爆電圧を見ながら徐々に狭めていくと良い。

☆ 各測定におけるテクニックと注意点

以下に各測定におけるテクニックと注意点をまとめる

■ 標準球ギャップの測定

ギャップ長は **6.0mm** に設定。予備放電時、自爆する電圧(以下自爆電流)が 19.5 kV 以下であれば供試ギャップ長を縮める必要はない。50%フラッシュオーバーとなる電圧値は 16~17 kV 程度である。

全測定についていえる事だが、フラッシュオーバーが起こらなくなる電圧値を探索する事が測定を円滑に進めるためのテクニック(実験上の注意点参照)であると言える。

■ 棒—平板ギャップ 10cm の測定

50%フラッシュオーバーとなる電圧は 5.5 kV 程度である。

棒—平板ギャップ 10cm の測定が一番難しく厳密な精度が要求される。他の測定と比べ、装置の気まぐれにも大きく実験精度が左右される場合が多いが、ギャップ調整を上記のように行えば経験上ほぼ間違いなく測定する事が可能である。

■ 棒—平板ギャップ 20cm の測定

ギャップ長は **3.0mm** に設定。自爆電圧が 10.5 kV 程度になっていれば測定は可能。50%フラッシュオーバーとなる電流値はおおよそ 9~10 kV である。

■ 棒—平板ギャップ 30cm の測定

ギャップ長は **5.0mm** に設定。自爆電圧が 15 kV 程度になっていれば測定可能。ただし、自爆電圧

が高すぎると、ギャップ長が広すぎて 20%～40%の電圧を測定することができない場合がある。
4.5mm～5.0mm でその日の調子に応じて調節すれば良い。50%フラッシュオーバーとなる電圧値はお
よそ 13～14 kV である。

■ 棒－平板ギャップ 10cm の測定(負極性)

ギャップ長は **5.0mm** に設定。自爆電圧は日によってばらつきが激しい。50%フラッシュオーバーとなる電圧は実験によりばらつくことが多いが 13～14 kV 程度である。

なおギャップ長を微調整する場合、調整用のハンドルを 1/8 回転回すなどして細かい調整を刻み、そのたびに自爆電流を確認して調整を行うと良い。しかし、ギャップ長を微妙に変えても、自爆電流値にあまり変化は無いが、印加できる最低電圧は変化している場合が多い。また、ハンドル 1/4 回転で約 0.8 kV 動く。縮めすぎた場合はギャップ長を大きく広げ再度調整をしない必要があるので注意したい（実験上の注意参照）。

また、電圧を調節する際、希望の電圧値を大きく越えてしまった場合は、一度自爆又はトリガをかけて放電し、再度調整し直した方が効率が良い。

☆ 最適供試ギャップ長表

測定条件	最適ギャップ長
標準球ギャップ	6.0mm
棒－平板ギャップ 10cm	2.0mm
棒－平板ギャップ 20cm	3.0mm
棒－平板ギャップ 30cm	5.0mm
棒－平板ギャップ 10cm(負極性)	5.0mm

目指せ実験 15 時終わり！！