

1. 目的

インパルス電流を実験室で発生させ、それを計測する事により、LCR 回路の過渡現象、高電圧コンデンサの取り扱い、高電圧大電流計測の理解を深める。

2. 実験概要

(1) インパルス電流の発生

大容量のコンデンサを使用し充電する。充電したところから放電させる。今回の実験では 45kV の電圧を発生させる。これは電線にかかる電圧が 6.6kV と考えると、約 6 倍の電圧であり、今までの行ってきた実験の中で最も高い電圧である。

(2) インパルス電流の測定

測定は大電流を使用、尚且つインパルス電流を測定したいため、応答速度の速いオシロスコープを用いなければならない。オシロスコープは電圧測定を行う機器のため、分流抵抗器を使用して電流を測定する。また、オシロを電磁誘導から保護するための工夫として、オシロスコープはなるべく離れた位置に置き測定を行う。さらに、同軸ケーブルを使用すること、それを 2 本用意し平行にすることにより、誘導起電力のだいたいを相殺することができる。

その他に、充電を行うコンデンサの故障を防ぐため、電流計を用いる。このために高抵抗を用いなければならない。そのため、抵抗にはガード電極を使用し漏れ電流が起きないように工夫しなければならない。

また、図 1 から電流値を求める式は以下ようになる。

$$i = v \frac{r + R_1 + R_3}{rR_5}$$

R_1, R_2, R_3, R_4 はマッチング抵抗であり $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 75\Omega$ 、 $r \ll R_1, R_3$ となる。

R_5, R_6 はマッチング抵抗値の分圧される部分の抵抗であるため $R_5 = R_6 = 75\Omega$ とする。これより

$$i = v \frac{2}{r} \quad \dots (1)$$

と表される。

(3) インパルス電流の理論値の導出

波高値 i_m を求める式として、以下のように表す。

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad \dots (2)$$

とすれば、電流波形 $i(t)$ として

$$i(t) = \frac{E}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[\frac{-\alpha t}{\sqrt{LC}} \sinh \left[\sqrt{\alpha^2 - 1} \cdot \frac{t}{\sqrt{LC}} \right] \right] \quad \dots (3)$$

波高値までの時間 t_m とすると

$$t_m = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[\frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \right] \quad \dots (4)$$

$$i_m = E \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[-\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[\frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \right] \right] \quad \dots (5)$$

となる。

3. 使用機器

実験で使用した機器を以下の表 1 に示す

表 1 使用機器

名称	メーカー名	型番	規格
オシロスコープ	YOKOGAWA	7107110	200MHz
電流計 (μA)	TAKEMOTO	1558	可動コイル型
電流計 (mA)	YOKOGAWA	2142	交流、CLASS1.5
電圧計	YOKOGAWA	1102	45~65Hz、交流
コンサレータ	_____	_____	_____
コンデンサ	_____	_____	$2\mu\text{F}$
抵抗	_____	_____	$375\text{M}\Omega$ 、 8Ω
コイル	_____	_____	$10\mu\text{H}$

4. 配線図

以下に実験で配線した回路図を図 1 に示す。

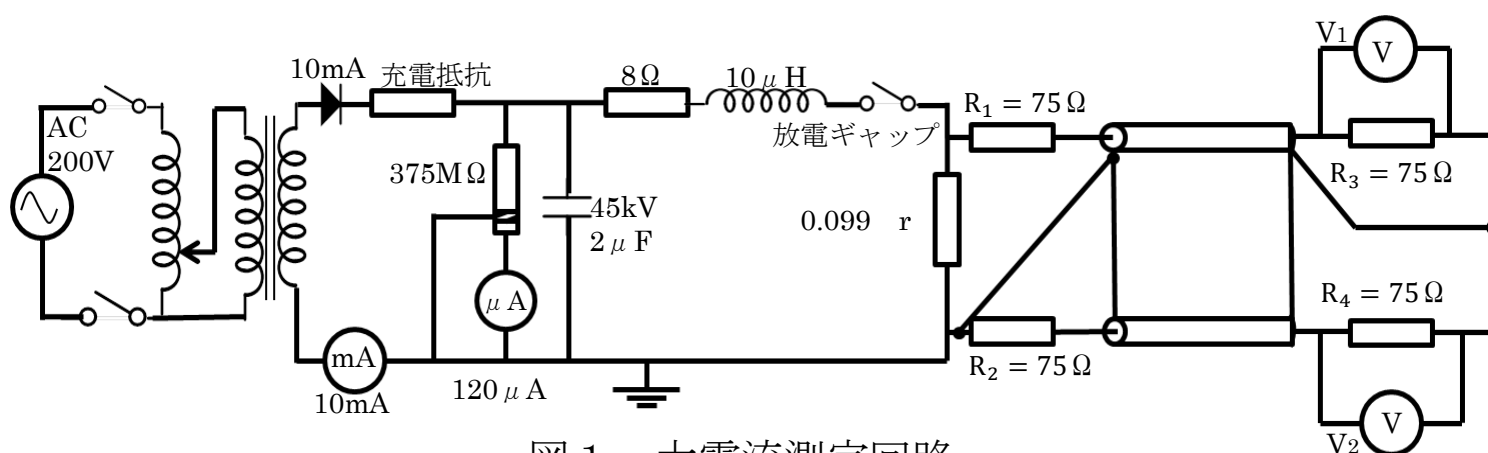


図 1 大電流測定回路

5. 実験方法

- (1) コンデンサを使用するため、十分な注意を心がけること。
- (2) 図 1 のように回路を設置する。このとき、接地棒を用いて電流が体に流れないようにする。
- (3) オシロスコープに波形を測定できるように設定をする。
- (4) 二次側スイッチは 2 個の球体をくっつける事によりスイッチ（放電ギャップ）を ON にする。そのため、長い紐を利用しそれを引くことにより安全にスイッチを ON することができる。
- (5) ドアを閉め、メンバー全員が安全であることを確認し、遮断器を ON にする。
- (6) 電源スイッチの入を押す。

- (7) スライダックを操作し、コンデンサの充電を行う。このとき充電電流を 10mA 以下にする。これ以上だとダイオードが破損する恐れがある。最大充電電圧は 45kV なので、 μA 計は $120 \mu A$ を超えないようにする。超えてしまうとコンデンサの寿命を縮めてしまう。
- (8) 充電が終われば電源スイッチを切り、大声で全員に知らせた後、放電ギャップを閉じ、インパルス電流を発生させる。
- (9) 発生した電流波形をオシロスコープのメモリーに記憶させ、波形と電流値を求める。
- (10) スライダックの値を変えて充電電圧を変え、電流を流しその波形を測定する。
- (11) 充電電圧、および、マイクロアンメータ指示値とインパルス電流波高値の関係を示す目盛り定め曲線を作成する。
- (12) LCR 回路の過渡現象波形を計算して実験結果と照合し、検討を加える。

6. 実験結果

オシロスコープで読み取った値を波形にしたグラフを以下の写真 1～8 に示す。

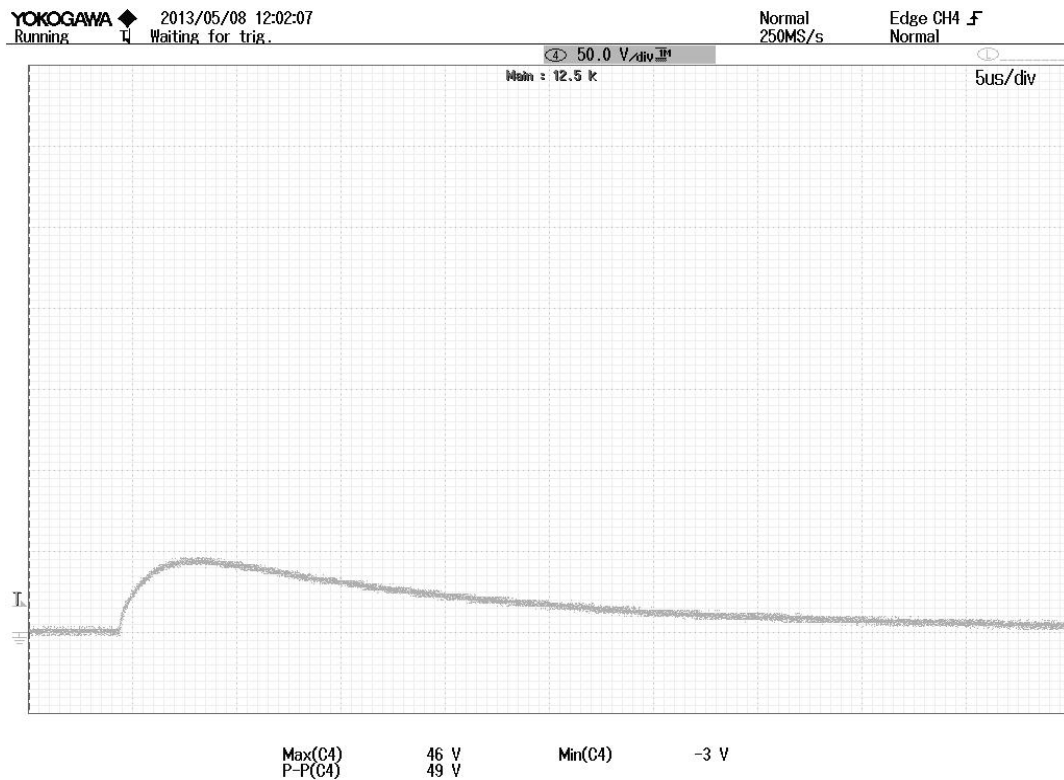


写真 1 オシロにより読み取った電圧波形 ($20 \mu A$)

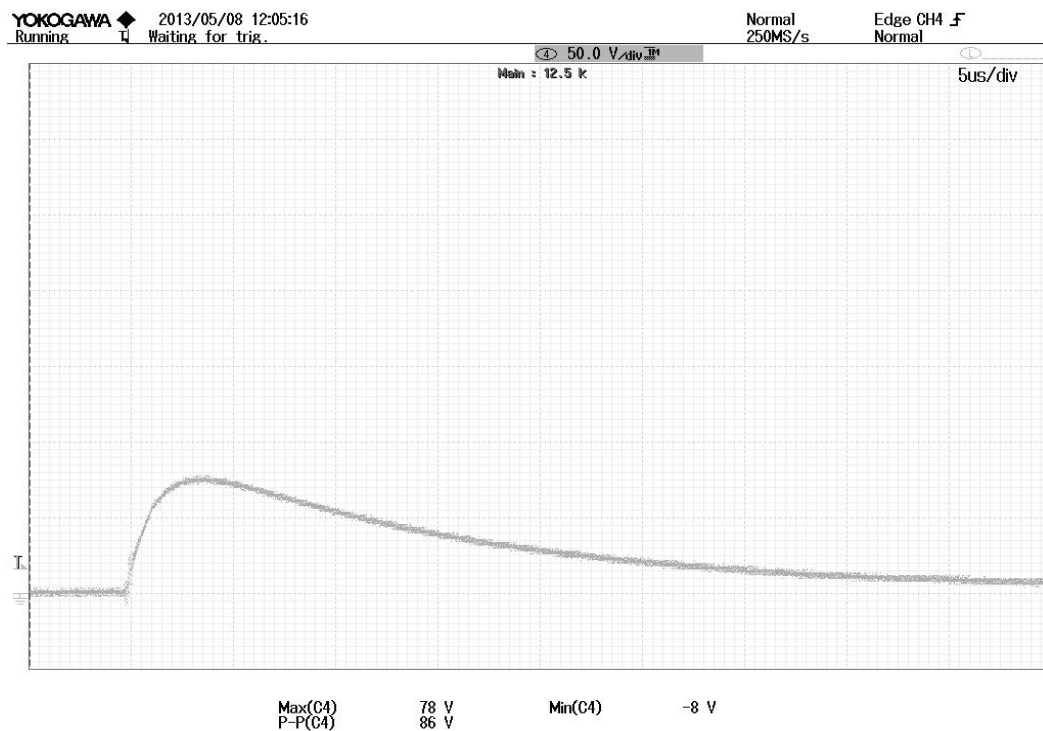


写真 2 オシロにより読み取った電圧波形 ($40\ \mu\text{A}$)

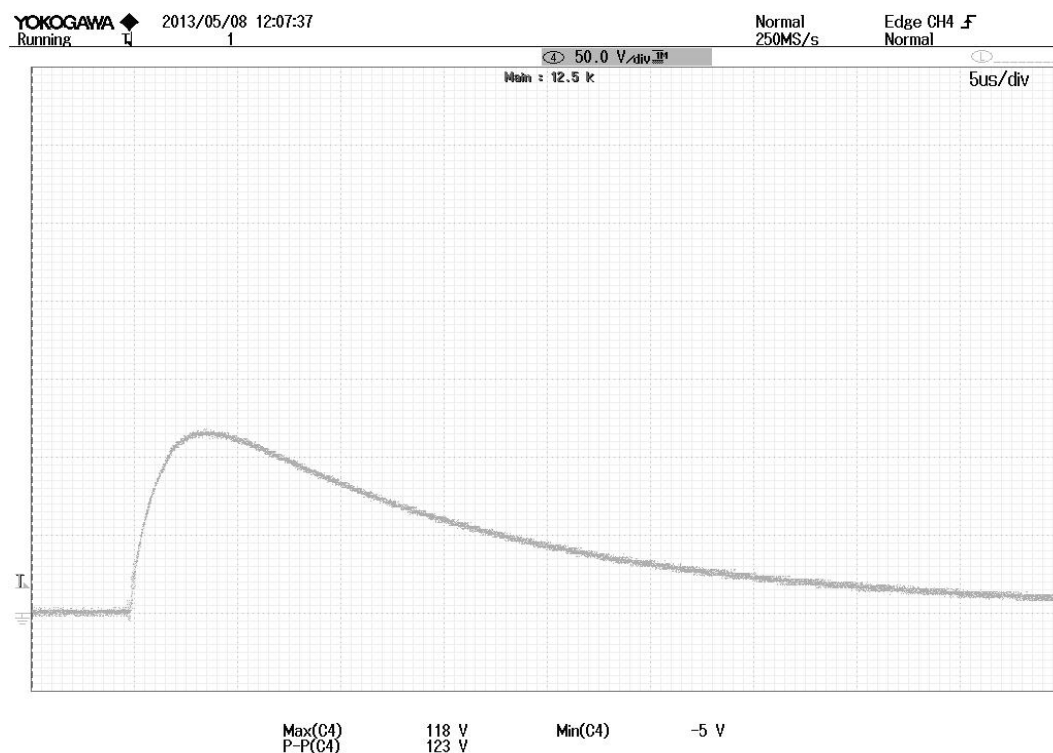


写真 3 オシロにより読み取った電圧波形 ($60\ \mu\text{A}$)

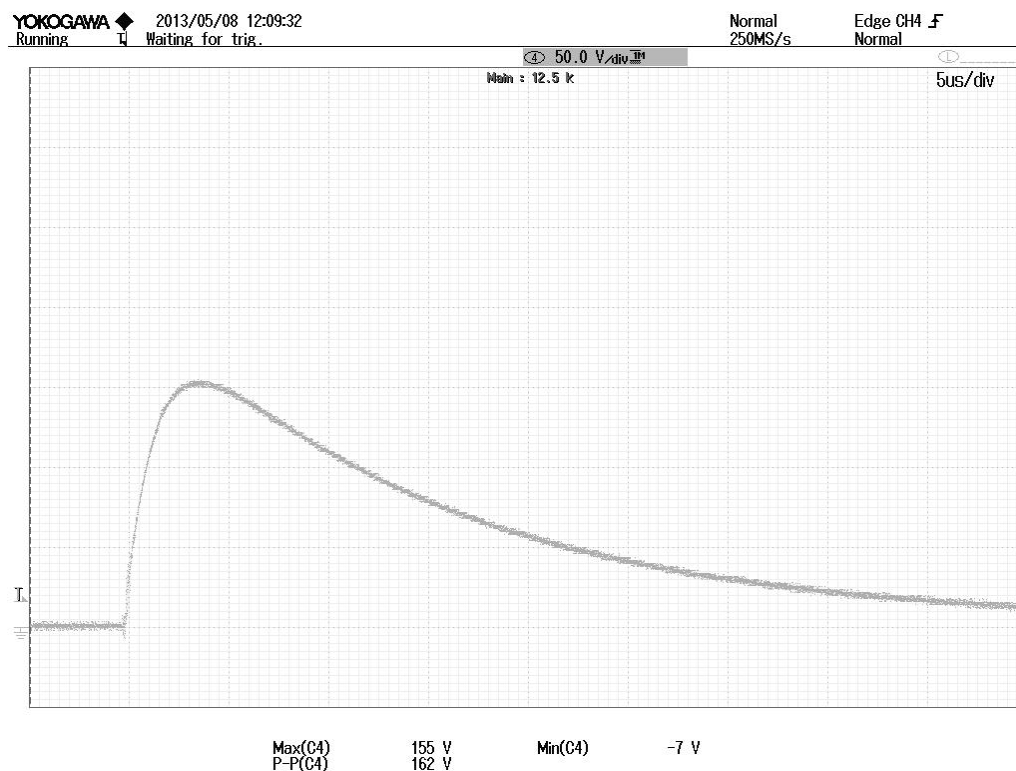


写真 4 オシロにより読み取った電圧波形 ($80 \mu\text{A}$)

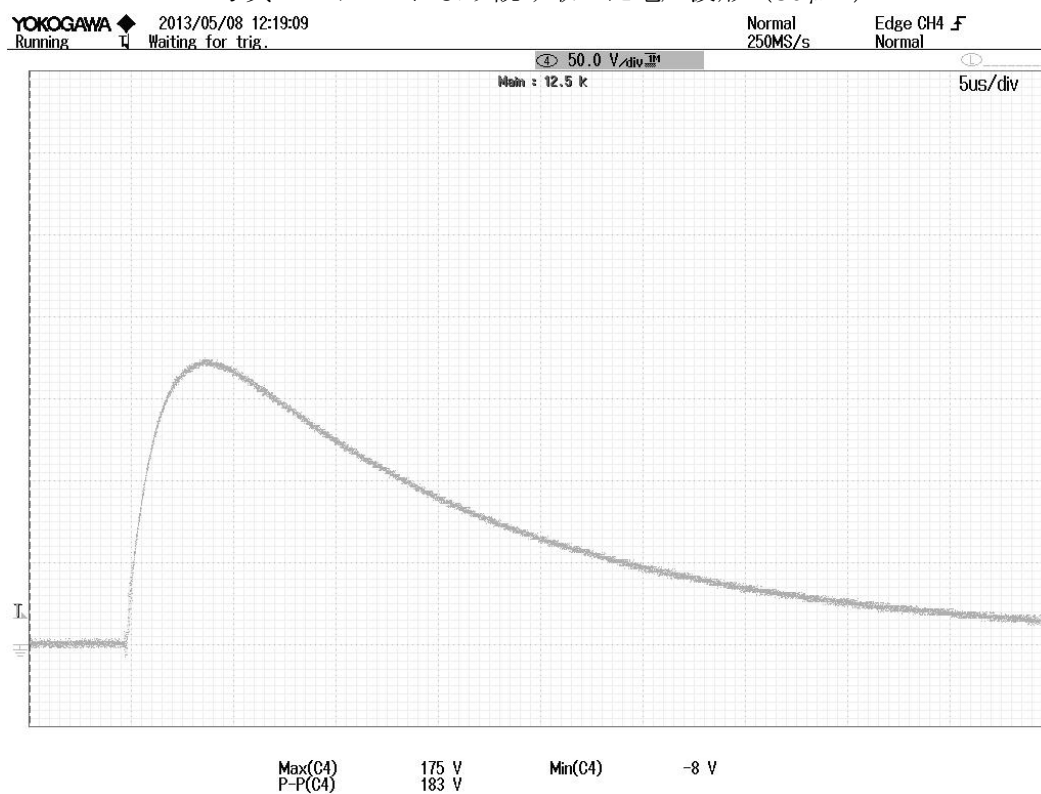


写真 5 オシロにより読み取った電圧波形 ($90 \mu\text{A}$)

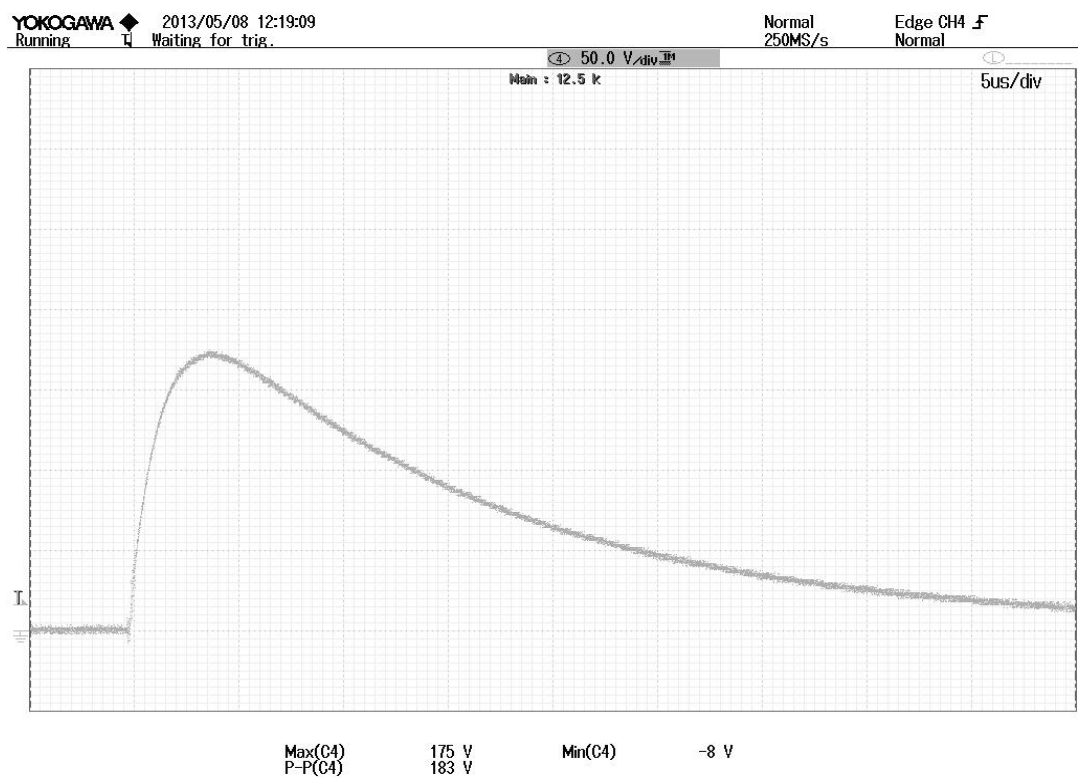


写真 6 オシロにより読み取った電圧波形 ($100 \mu\text{A}$)

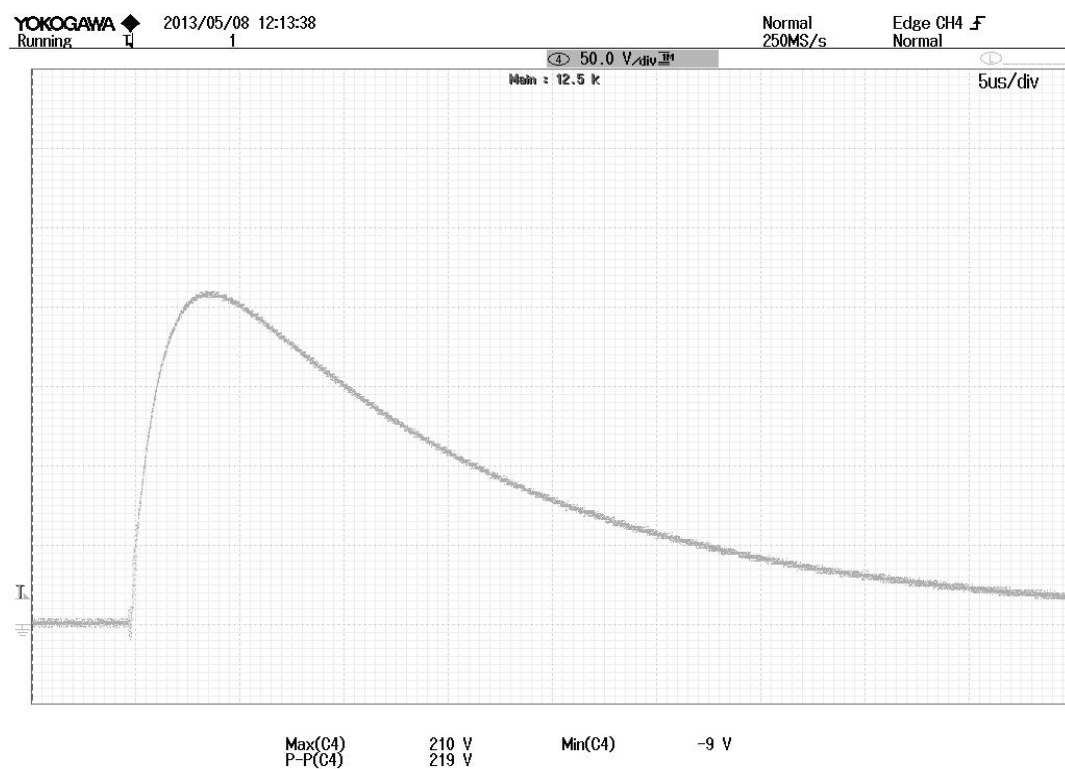


写真 7 オシロにより読み取った電圧波形 ($110 \mu\text{A}$)

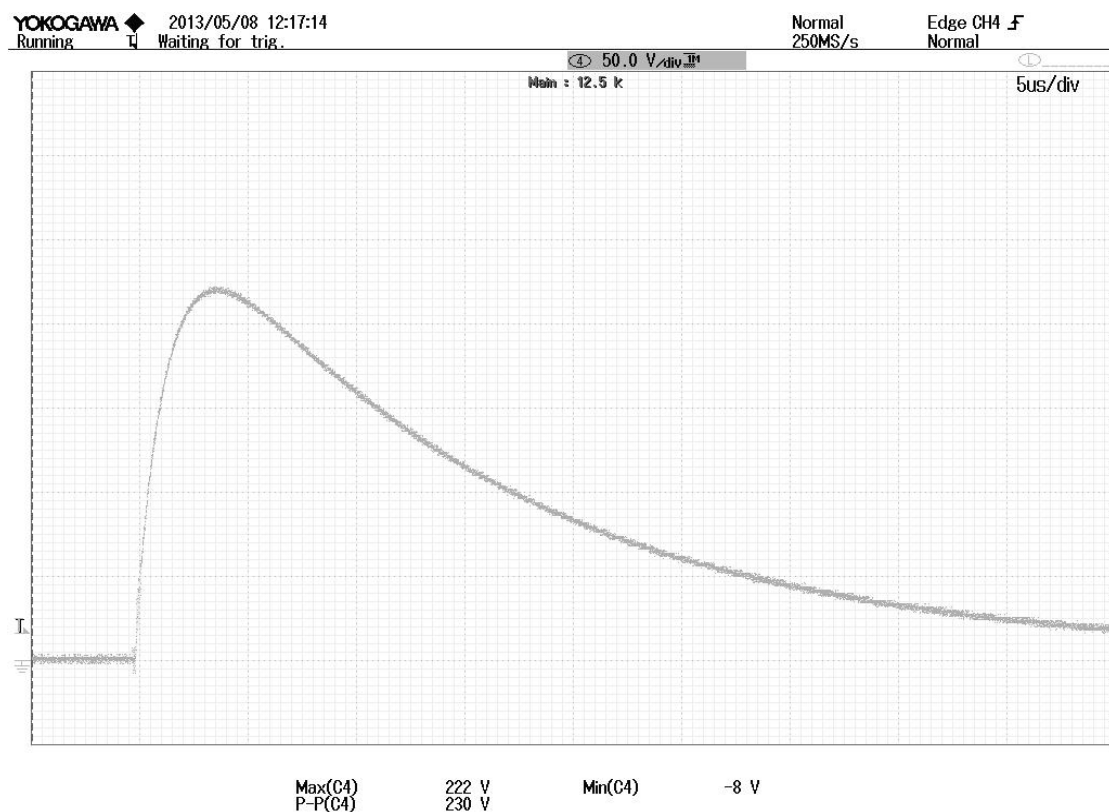


写真 8 オシロにより読み取った電圧波形 (116 μ A)

コンデンサの充電電圧を変えて測定、導出した数値を表 2 に示す

表 2 実験結果表

マイクロアンメータの指示値(μ A)	充電電圧 (kV)	インパルス電圧波高値(V)	インパルス電流波高値(kA)
20	7.5	46	0.93
39	14.6	78	1.58
60	22.5	118	2.38
80	30.0	155	3.13
90	33.8	175	3.54
100	37.5	192	3.88
110	41.3	210	4.24
116	43.5	222	4.48

・充電電圧

高抵抗 375M Ω とマイクロアンメータの指示値より、オームの法則を用いて充電電圧を求めると

$$v = Ri$$

より、一例としてマイクロアンメータの指示値を 20 μ A として考えると

$$v = 375 \times 10^6 \cdot 20 \times 10^{-6} = 7.5[kV]$$

となる。以下同様に 116 μ A まで求める。

・インパルス電流波高値

これは上記で行った (1) 式を用いて算出したものと同様に計算を行う。

一例としマイクロアンメータの指示値を $20\mu\text{A}$ として考えると

(1) 式より

$$i = v \frac{2}{r}$$

であるので、インパルス電圧波高値を写真 1 から読み取ると 46V であるので

$$i = v \frac{2}{r} = 46 \cdot \frac{2}{0.099} = 929.2 = 0.93[\text{kA}]$$

となる。以下同様に写真 1～8 の波高値を読み取り算出する。

また、充電電圧、および、マイクロアンメータ指示値とインパルス電流波高値の関係を示す目盛り定め曲線を以下の図 2、図 3 に示す。

また、LCR 回路の過渡現象を実験概要(3)を用いて算出する。
それぞれ $L=10\mu\text{H}$ 、 $C=2\mu\text{F}$ 、 $R=8\Omega$ 、 E =充電電圧である。まず、(2) 式を用いて α を求めると、

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{8}{2} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-6}}} = 1.788 = 1.79$$

となる。これを (5) 式に代入すると

$$\begin{aligned} i_m &= E \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[-\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[\frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \right] \right] \\ &= E \sqrt{\frac{2}{10}} \cdot \exp \left[-\frac{1.79}{\sqrt{1.79^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[\frac{\sqrt{1.79^2 - 1}}{1.79} \right] \right] \\ &= 0.447E \cdot \exp[-1.21 \cdot \tanh^{-1} 0.893] \quad \dots \dots (6) \end{aligned}$$

と表せる。これより表 2 から充電電圧が 7.5kV のときの電流波高値は

$$\begin{aligned} i_m &= 0.447E \cdot \exp[-1.21 \cdot \tanh^{-1} 0.893] = 0.447 \times 7500 \cdot \exp[-1.21 \cdot \tanh^{-1} 0.893] \\ &= 3353 \exp[-1.21 \cdot \tanh^{-1} 0.893] = 802.9 = 0.80[\text{kA}] \end{aligned}$$

となる。以下同様にして 43.5kV まで求める。

以下に、理論値で求めた電流波高値を表 3 に示す。

表 3 理論と実験から求めた電流波高値

充電電圧(kV)	理論値による電流波高値(kA)	実験によって求めた電流波高値(kA)
7.5	0.80	0.93
14.6	1.57	1.58
22.5	2.41	2.38
30.0	3.21	3.13
33.8	3.61	3.54
37.5	4.02	3.88
41.3	4.42	4.24
43.5	4.66	4.48

7. 考察

表 3 より、理論値から求めた電流波高値と実験によって求めた電流波高値を比較すると充電電圧 7.5kV のとき、 $|V_{\text{理}} - V_{\text{測}}| = |0.80 - 0.93| = 0.13\text{kV}$ と誤差が出ていることがわかる。充電電圧が 14.6kV の場合は 0.01kV と 7.5kV より誤差は少ないと言える。また、43.5kV の場合は 0.18kV である。これらの誤差の原因は電線内に発生する電磁誘導が発生してしまったと考えられる。これは実験概要の (5) 式

$$i_m = E \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp \left[-\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \tanh^{-1} \left[\frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha} \right] \right]$$

より、 L が大きいほど電流波高値は小さくなるため、今回の誤差もこのことが原因と思われる。更に、写真 1～8 の電圧波形からも負の方向へ電圧が出ていることからリアクタンスが発生したと考えられる。

8. 参考文献

『電気工学実験ⅡA・ⅡB』（電気システム工学科）

『高電圧工学』（著者：日高邦彦、出版：数理工学社）