

## 各種放電源からの静電気放電の等価回路の定数決定法

廣瀬 元\*, 吉田 孝博<sup>\*1</sup>, 増井 典明\*

(2011年9月12日受付; 2011年11月10日受理)

Calculation Method of RLC Constant for Equivalent Circuit  
of Various Electrostatic DischargeHajime HIROSE\*, Takahiro YOSHIDA<sup>\*1</sup> and Noriaki MASUI\*

(Received September 12, 2011; Accepted November 10, 2011)

It is desirable to simulate the ESD tolerance and immunity in advance because this pre-test method will achieve shortening of the development period and reduction of development cost. In the development of this ESD tolerance simulator, the ESD equivalent circuit which reflects real ESD characteristics is necessary to realize the simulator. Therefore, in this study, we developed calculation method of RLC constant for equivalent circuit of various ESD such as ESD gun (IEC61000-4-2), ESD from fingertip of charged human body, ESD from metallic tool handled by charged human body and ESD from charged metal. This method could calculate the constant from actual ESD current parameter, i.e. peak current and peak appearance time, as transient phenomena of RLC series circuit. In addition, we designed the some equivalent circuit which reproduced the current waveform of various ESD by the proposed method. As a result of comparison between the simulated current waveform using a circuit simulator "Agilent Technologies GENESYS" and targeted actual current waveform, we confirmed that the proposed method could calculate the RLC constant of equivalent circuit with high accuracy from the viewpoint of the shape of the waveform, the peak current value and the peak appearance time.

## 1. はじめに

近年, 半導体デバイスや電子機器の高集積化, 低動作電圧化が進むなかで, 帯電した人体の指先や人体が握った金属ツール等からの静電気放電 (ESD: Electrostatic discharge) による破壊や誤動作が問題となっている。

一方, 電子機器の ESD 耐性の評価方法としては, 国際標準規格 IEC-61000-4-2 で定められた ESD ガンによる試験法<sup>1)</sup>の様に, 評価対象となる試作機を用意して事後的に耐性評価する方法が主流であり, 開発期間の長期化やコスト増となる問題がある。その為, 電子機器の開発時に事前に ESD 耐性をシミュレーションにより評価できると望ましい。

この ESD 耐性シミュレーションを実現するには, SPICE 等の電子回路シミュレータ上にて, 現実に発生する ESD の様々な放電電流波形を模擬的に発生できる信号源モデルとなる等価回路が必要である。

そこで本研究では, 実測された放電電流波形を再現できる等価回路の RLC の各定数を, 放電電流波形の各パラメータから算出できる定数決定法を開発した。また, 本提案手法を用いて, 現実に発生した代表的な放電電流波形を再現した等価回路を設計し, その等価回路の再現性を回路シミュレータにて確認した。

## 2. 等価回路の定数決定法 (提案手法)

今回提案する, 各種放電源からの ESD の等価回路の定数決定法は, 放電電流波形の第一ピーク, 第二ピーク, 振動成分をそれぞれ RLC 直列回路の過渡現象として扱い, 各ピークの電流値, 出現時間 (振動成分の場合は周期) から各成分の RLC 直列回路の定数を決定し, 各 RLC 直列回路を並列接続することで等価回路を完成させる手法である。

## 2.1 定数決定のための計算式

図1のように, 予め電荷  $Q$ , 端子電圧  $V$  に充電されているコンデンサ  $C$  をインダクタンス  $L$  および抵抗  $R$  を通して放電する場合の回路方程式<sup>2),3)</sup>は

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = 0 \quad \dots(1)$$

となり, 式(1)を電荷  $q$  で表すと

キーワード: 等価回路, 過渡現象, ESD, シミュレーション, SPICE

\* 東京理科大学工学部電気工学科 (162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3)

Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku, Tokyo 162-8601, Japan

<sup>1</sup> yoshida@ee.kagu.tus.ac.jp

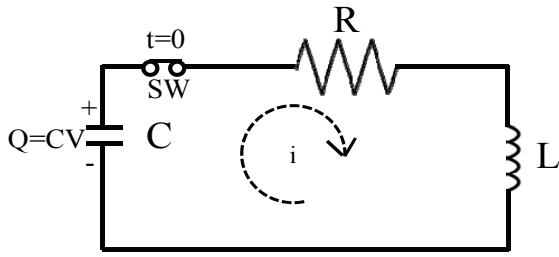


図1 RLC 直列回路  
Fig.1 RLC series circuit.

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad \dots(2)$$

である。  $q = Ae^{pt} \neq 0$  とし、式(2)を解くと

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0 \quad \dots(3)$$

$$p = -\frac{R}{2L} \pm \frac{1}{2L} \sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}} \quad \dots(4)$$

ここで、 $p$  の値は根号の中の値（零・正・負）により、臨界的・対数的・振動的の3つの場合に分けられる。表1に、各場合におけるピーク電流値  $i$  とピークの出現時間  $t$ （もしくは振動周期  $T$ ）を求める式を示す。これら3つの場合を放電電流波形の各ピークの特徴ごとに使い分けて、表1から式変形して得られる以下の(a)~(c)に示す式によりRLCの定数を求める。

(a)臨界的な場合 ( $R^2 - \frac{4L}{C} = 0$ )

臨界的な場合のRLC直列回路のRLCの定数は、以下の式(5)~式(7)にピーク電流値  $i$  とピーク出現時間  $t$  および帯電電圧  $V$  を代入して求める。なお、 $e$  は自然対数である。

$$R = \frac{2V}{ei} \quad \dots(5)$$

$$L = \frac{Vt}{ei} \quad \dots(6)$$

$$C = \frac{eit}{V} \quad \dots(7)$$

(b) 対数的な場合 ( $R^2 - \frac{4L}{C} > 0$ )

対数的な場合のRLCの定数は、以下のピーク電流値  $i$  の式(8)とピーク出現時間  $t$  の式(9)を用いて、目標とするピーク電流値  $t$  とピーク出現時間  $t$  となるRLCの値を探索することにより、RLCの定数を逆推定する。

表1 RLC直列回路のピーク電流と出現時間の計算式  
Table 1 Equations of peak current and appearance time on RLC series circuit.

要素	ピーク電流値	出現時間・振動周期
(a) 臨界的 $R^2 - \frac{4L}{C} = 0$	$i = \frac{V}{L\alpha} e^{-1}$	$t = \frac{1}{\alpha}$
(b) 対数的 $R^2 - \frac{4L}{C} > 0$	$i = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \left( \frac{\alpha - \gamma}{\alpha + \gamma} \right)^{\frac{\alpha}{2\gamma}}$	$t = \frac{1}{2\gamma} \log \frac{\alpha + \gamma}{\alpha - \gamma}$
(c) 振動的 $R^2 - \frac{4L}{C} < 0$	$i = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} e^{-\frac{\alpha}{\beta}\varphi}$	$T = \frac{2\pi}{\beta}$

但し、 $\alpha = \frac{R}{2L}$ ,  $\gamma = \frac{1}{2L} \sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}}$   
 $\beta = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{4L}{C} - R^2}$ ,  $\varphi = \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha}$

$$i = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \left( \frac{\alpha - \gamma}{\alpha + \gamma} \right)^{\frac{\alpha}{2\gamma}} = V \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \left( \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{4L}{CR^2}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{4L}{CR^2}}} \right)^{\frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{4L}{CR^2}}} \quad \dots(8)$$

$$t = \frac{1}{2\gamma} \log \frac{\alpha + \gamma}{\alpha - \gamma} = \frac{L}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}}} \cdot \log \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{4L}{CR^2}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{4L}{CR^2}}} \quad \dots(9)$$

(c)振動的な場合 ( $R^2 - \frac{4L}{C} < 0$ )

振動的な場合のRLCの定数は、以下のピーク電流値  $i$  の式(10)とピーク出現時間  $t$  の式(11)を用いて、RLCの定数を逆推定する。

$$i = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} e^{-\frac{\alpha}{\beta} t} = V \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\frac{1}{\sqrt{\frac{4L}{CR^2}-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{4L}{CR^2}-1} t} \quad \dots(10)$$

$$T = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{4\pi L}{\sqrt{\frac{4L}{C} - R^2}} \quad \dots(11)$$

2.2 定数決定手順

ここでは一例として、図 2(a)に示す金属ツール放電の実測放電電流波形に対する定数決定手順を以下に示す。

(i) 最初に現れる鋭い第1ピークは、前節 2.1(a)の臨界的な場合の式(5), (6), (7)に、放電電流波形から読み取ったピーク電流値、ピーク出現時間を代入し、RLC 直列回路の各定数を決定する。この第1ピークに対する RLC 直列回路にて、図 2(b)のシミュレーション波形が得られる。

(ii) 緩やかな減衰を持つ第2ピークは、前節 2.1(b)の対数的な場合の式(8), (9)を用いて、放電電流波形から読み取ったピーク電流値、ピーク出現時間となるように RLC の各定数を逆推定する。この第2ピークに対する RLC 直列回路にて、図 2(c)のシミュレーション波形が得られる。

(iii) 第1ピーク直後に出現する振動成分は、前節 2.1(c)の振動的な場合の式(10), (11)を用いて、放電電流から読み取った振動成分の電流値、周期となるように RLC の各定数を逆推定する。この振動成分に対する RLC 直列回路にて、図 2(d)のシミュレーション波形が得られる。

(iv) 上記(i)~(iii)で得られたそれぞれの RLC 直列回路を並列接続する。

(v)並列接続することでピーク値等がずれるため、シミュレータ上で波形を確認しながら、実測波形と合うように各定数を微調整することで、放電源の等価回路が完成する。

3. 回路シミュレーション方法

本研究で用いた回路シミュレータは、Agilent Technologies 社製 GENESYS である。図 3 に、設計した等価回路により放電電流波形をシミュレーションする際の回路構成を示す。シミュレーション開始前に、放電源の等価回路に高電圧が印加され、充電された状態となっている。そして、シミュレーション開始と同時に電源切断リレーによって放電源の等価回路が電源から切り離され、その直後に放電用リレーがオンとなり放電が開始される構成とした。

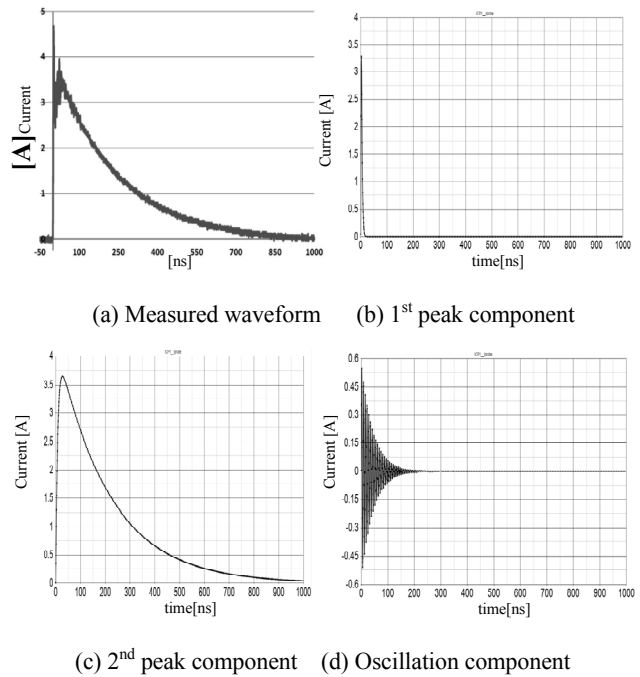


図 2 実測した放電電流波形と各成分の波形例

Fig. 2 Example waveforms of measured discharge current and each component.

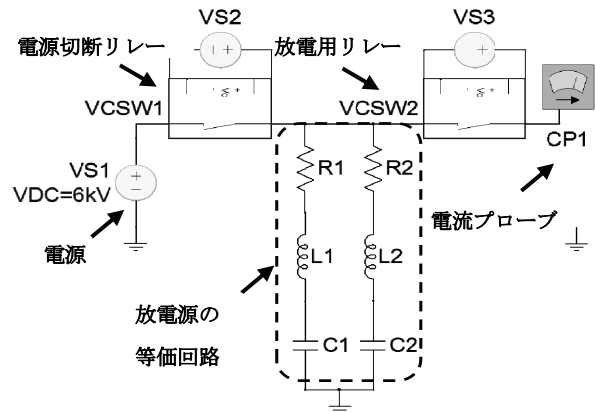


図 3 回路シミュレータ (GENESYS) 上での ESD シミュレーション用回路構成

Fig. 3 Circuit configuration for ESD simulation on the circuit simulator (GENESYS).

4. 設計した等価回路例及び検証結果

本章では、提案手法の評価のため、ESD ガンの規定波形や、金属ツール放電、指先放電の実測放電電流波形を例にとり、提案手法により等価回路を設計し、放電電流波形の再現性を検証した。なお、本章で用いた帯電した人体からの ESD の放電電流波形の測定は、過去の報告<sup>4),5)</sup>と同様の装置および方法にて行った。

4.1 ESD ガン (IEC61000-4-2)

表 2 に、IEC61000-4-2 で規定されている ESD ガンの試験レベル 3 (6 kV) における仕様を示す。また、図 4 に設計

表 2 ESD ガン (IEC61000-4-2) レベル 3 の定義

Table 2 Test level 3 of ESD gun specified in IEC61000-4-2.

第 1 ピーク 電流値	立ち上がり 時間	30 ns での 電流値	60 ns での 電流値
22.5 A	0.7-1 ns	12 A	6 A

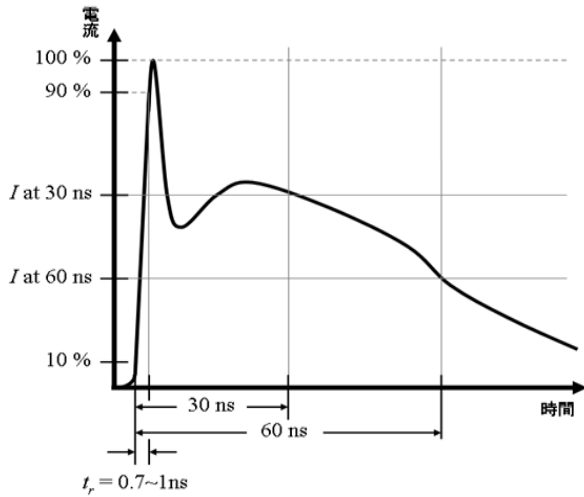


図 4 放電電流波形 (IEC61000-4-2)

Fig. 4 Waveform of discharge current (Specification of IEC61000-4-2).

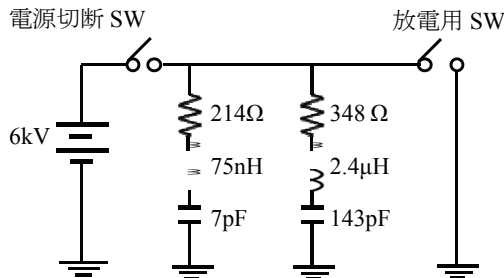


図 5 IEC 規格波形より算出した ESD ガン等価回路  
Fig. 5 Equivalent circuit of ESD gun calculated from waveform of IEC 61000-4-2 specification.

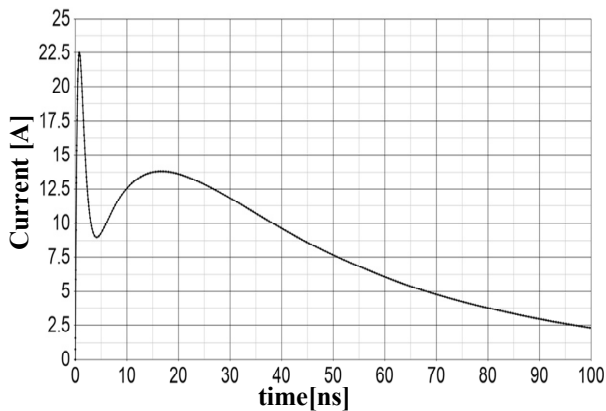


図 6 図 5 の等価回路による放電電流シミュレート結果  
Fig. 6 Simulated discharge current waveform from equivalent circuit shown in Fig. 5.

対象となる ESD ガンの放電電流波形を示す. 図 5 に設計した放電源の等価回路, 図 6 にこの等価回路によるシミュレーション結果を示す. 図 5 の等価回路内の RLC 直列回路は, 左から順に第 1 ピーク成分, 第 2 ピーク成分である.

図 6 より, 等価回路のシミュレーション波形の第 1 ピーク電流値は 22.5 A, 出現時間は 0.74 ns, 30 ns での電流値は 11.8 A, 60 ns での電流値は 6.1 A となり, 設計した等価回路は IEC 規格の放電電流波形の定義を再現できたといえる.

また, 設計した等価回路のキャパシタンスの合計値は 150 pF であり, これは ESD ガンの静電容量 150 pF と一致している.

#### 4.2 金属ツール放電

図 2(a) に示した, +6 kV に帯電した人体が握った金属ツールからの ESD で発生する放電電流波形の等価回路の設計例を図 7 に示し, そのシミュレーション結果を図 8 に示す. 図 7 で示した RLC 直列回路の並列接続は左から第 1

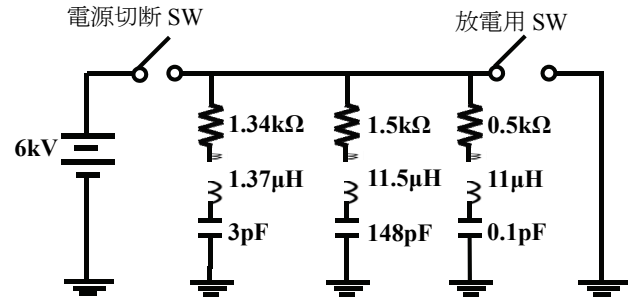


図 7 金属ツール放電の放電電流波形 (図 2(a)) より算出した等価回路

Fig. 7 Equivalent circuit of ESD from metallic tool handled by charged human body calculated from measured waveform shown in Fig. 2(a).

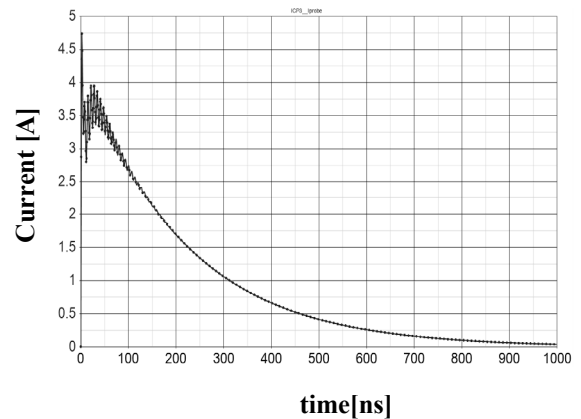


図 8 図 7 の等価回路による放電電流シミュレート結果  
Fig. 8 Simulated discharge current waveform from equivalent circuit show in Fig. 7.

ピーク, 第2ピーク, 振動成分を表している. また, 表3に実測値とシミュレーション結果との比較を示す. 実測時の測定条件は, 手に持った金属先端の曲率半径 0.97 mm, 接地電極の曲率半径 15 mm, 人体電位+6 kV, 接地抵抗 1 kΩ, 被験者の静電容量 189 pF である.

図8, 表3より, 設計した等価回路は実際の放電電流波形の波形形状, ピーク値, ピーク出現時間を再現できているといえる. また, 等価回路の容量は 151.1pF であるが, これは被験者の静電容量の約 80% となり, 実測の放電電流波形の放電電荷量や放電率とも近い結果となった.

表3 各ピークのシミュレーションと実測値との比較  
Table 3 Comparison between actual measurement value of each peak of discharge current and simulated value.

	第1ピーク		第2ピーク	
	電流値 (A)	出現時間 (ns)	電流値 (A)	出現時間 (ns)
実測値	4.68	2.37	3.92	24.0
シミュレーション	4.63	2.15	3.93	27.8

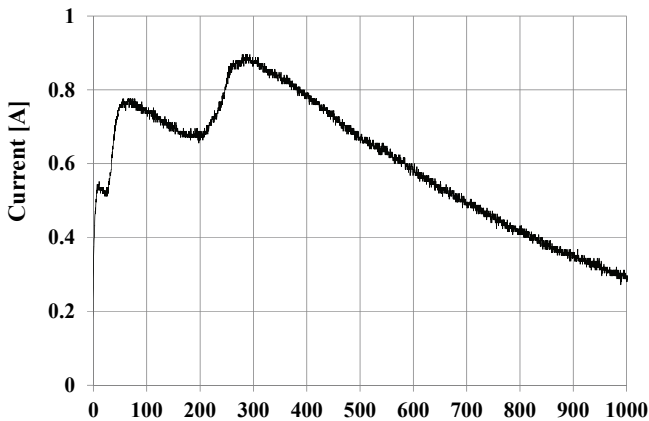


図9 指先放電の実測放電電流波形  
Fig. 9 Measured waveform of discharge current of ESD from fingertip of charged human body.

表4 各ピークのシミュレーションと実測値との比較

Table 4 Comparison between actual measurement value of each peak of discharge current and simulated value.

	第1ピーク		第2ピーク		第3ピーク	
	電流値 (A)	出現時間 (ns)	電流値 (A)	出現時間 (ns)	電流値 (A)	出現時間 (ns)
実測値	0.54	6.86	0.77	57.0	0.86	278
シミュレーション	0.58	7.05	0.72	55.6	0.84	270

4.3 指先放電

+6 kVに帯電した人体の指先からのESDで発生する放電電流波形の一例を図9に示す. 設計した等価回路を図10に示し, そのシミュレーション結果を図11に示す.

また, 表4に実際の放電電流波形とシミュレーション結果との比較を示す. 図10の等価回路は左から第1ピーク, 第2ピーク, 第3ピークを表している. 実測時の測定条件は, 接地電極の曲率半径が 15 mm, 人体電位が+6 kV, 接地抵抗 1 kΩ, 被験者の静電容量 189 pF である.

図11, 表4より, 設計した等価回路は実際の放電電流波

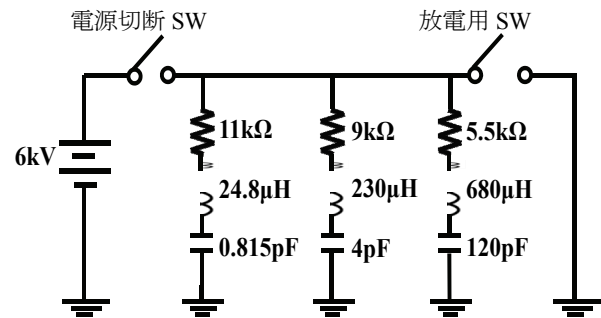


図10 指先放電の放電電流波形 (図9) より算出した等価回路

Fig. 10 Equivalent circuit of ESD from fingertip of charged human body calculated from measured waveform shown in Fig. 9.

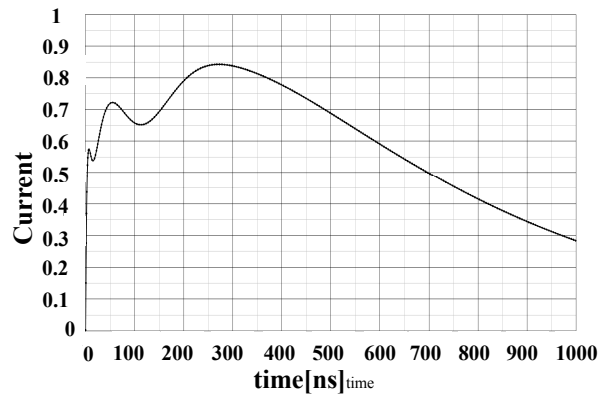


図11 図10の等価回路による放電電流シミュレート結果

Fig. 11 Simulated discharge current waveform from equivalent circuit show in Fig. 10.

るといえる。また、等価回路の容量は 124.8 pF であるが、これは被験者の静電容量の約 66%となり、実際の放電電荷量や放電率に近い結果となった。

## 5. まとめ

本研究で提案した等価回路の定数決定法により、ピーク電流値、ピーク出現時間共に実際の放電電流波形に近い等価回路を容易に設計することが可能となった。

今後の課題としては、より複雑な放電電流波形形状への対応が挙げられる。

この研究の一部は、(株)半導体理工学研究センター (STARC) の支援によるもので、ここに感謝の意を表します。また、本研究の提案や測定に関して、熱心に従事され

ました、平成 22 年度卒業研究生の北條武史氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 静電気学会：静電気ハンドブック，p. 251，オーム社 (1998)
- 2) 本郷忠敬：基礎過渡現象，オーム社 (1992)
- 3) 高木亀一，林泉，小林幹，堀田栄喜：大学課程過渡現象，オーム社 (1994)
- 4) 小村淳己，吉田孝博，増井典明：静電気学会春期講演会，2p-7, p. 95 (2011)
- 5) 小村淳己，吉田孝博，増井典明：静電気学会全国大会，14pD-2, p. 11 (2010)