

電子機器の静電気放電に対する
ノイズ耐性試験法における放電現象と
その特性解析

Discharge Phenomena and Their Characteristic Analyses in
Electromagnetic Noise Immunity Testing for Electronic
Equipment by Electrostatic Discharges

石田 武志

電気通信大学大学院情報理工学研究科
博士(工学)の学位申請論文

2016年3月

電子機器の静電気放電に対する
ノイズ耐性試験法における放電現象と
その特性解析

Discharge Phenomena and Their Characteristic Analyses in
Electromagnetic Noise Immunity Testing for Electronic
Equipment by Electrostatic Discharges

博士論文審査委員会

主査 肖 鳳超 教授

委員 唐沢 好男 教授

委員 和田 光司 教授

委員 藤原 修 教授

委員 石上 忍 研究マネージャー

著作権所有者

石田 武志

2016年3月

Discharge Phenomena and Their Characteristic Analyses in Electromagnetic Noise Immunity Testing for Electronic Equipment by Electrostatic Discharges

Takeshi Ishida

ABSTRACT

The electrostatic discharge (ESD) test from a charged human for electronic equipment is specified in International Electrotechnical Committee (IEC) IEC 61000-4-2 standard. This standard assumes the ESD phenomenon for table top or floor standing equipment from a charged human through a hand-held metal object. An actual ESD phenomenon from a charged human accompanies a spark in an air gap (air discharge), however, it is well known that the air discharge is an unstable phenomenon affected by temperature-humidity conditions, the approach speed of the metal object or electrode, the shape of the electrode and the surface condition. Therefore the international standard specified a contact discharge method using an internal relay switch in an ESD generator to connect the electrode and equipment. The contact discharge method has reasonable advantages and good test repeatability as well, however, this method differs from an actual ESD phenomenon.

This paper deals with ESD phenomena for an electronics device from a charged human, and its purpose is to clarify the differences in the phenomena between a contact discharge of the standard and an actual air discharge by experiment. The goal is to find an issue of ESD immunity testing.

First, the electromagnetic (EM) noises radiated from an ESD generator are analyzed in conjunction with their generation timing and noise amplitudes in air discharge and contact discharge mods, and an EM-noise generating model is developed. As a result, the ESD test method of the standard has possibly provided more severe or relaxant test results than actual ESD phenomena from a charged human. This is because the air discharge current from a charged human increases with charged voltages, however the air discharge

current is suppressed by a spark resistance at higher charge voltages. This phenomenon is different from that of the contact discharge with its characteristics proportionate to charge voltages. In addition, a new control sequence is proposed for reducing the EM noises from an ESD generator, and it ensures the effectiveness by measurement.

Second, a peculiar phenomenon occurs when conducting the contact discharge test method of the standard under the presence of a small gap caused by miss contacts or equipment conditions. It enhances the peak current twofold and also makes the rise time five times faster in comparison with normal contact discharge currents. This phenomenon is investigated with two parameters of applied voltages from 2 kV to 8 kV and small gap distances from 30 μm to 1 000 μm . Results clarify the phenomena consisting of complex structures. Furthermore, a circuit model is proposed to explain these phenomena, and then to analyze the enhanced discharge current structures based on a spark resistance formula.

Finally, since the international standard assumed the ESD phenomenon through only a hand-held metal object from a charged human, it cannot cover the ESD phenomenon for wearable electronic devices. From the point of view, measurements of the discharge currents from the metal electrode attached to head, arm, waist and hand instead of a wearable device are conducted. Results show that the peak discharge currents are a few times higher and the waveform energy is five times larger in comparison with the standard contact discharge current. Note that the decay time constants of discharge currents from the head, the arm and the waist are one-fourth of those from the hand and the standard discharge currents. This finding suggests that the international standard energy storage capacitance of 150 pF and discharge resistance of 330 Ω cannot be applicable to wearable devices. The storage capacitance and discharge resistance are investigated from the waveform energy and its time constant, to reveal that the largest storage capacitance is around the waist, and discharge resistance from the head, arm and waist are one-third of those from the hand and the standard discharge current. In addition, these values are validated from human impedance measurement by the reflection coefficient or S11 of scattering-parameters.

The following results are obtained from the study:

- EM noises with unnecessary and different characteristics are generated in the standard ESD testing, therefore, electronic equipment is exposed to EM noises different from actual air discharge EM noises.
- The contact discharge method of the standard causes an overstress ESD phenomenon by miss operation or equipment conditions, which consists of complex structures.
- ESD testing for wearable devices is not covered with the current standard ESD testing.

This study suggests that an ESD testing phenomenon of the international standard is different or deficient from an actual ESD phenomenon. These issues will be proposed for ESD immunity testing of an electronic device.

電子機器の静電気放電に対する ノイズ耐性試験法における放電現象と その特性解析

石田 武志

概要

帯電した人体から発生する静電気放電（ESD: Electrostatic Discharge）の電子機器に対する電磁ノイズ耐性試験は、国際電気標準会議（International Electrotechnical Committee : IEC）IEC 61000-4-2（以下、国際規格）で規定している。この ESD 試験は、人体の手に持った金属物からの ESD が、卓上又は、床置き of 電子機器に影響する現象を模擬している。人体からの実際の ESD は、空気中のギャップを介した火花を伴う気中放電となるが、気中試験は、周囲の温度・湿度条件、接近速度、人体側の金属物の形状及び放電対象の形状、また表面の粗さ・汚染度などの影響により、放電が安定しないことが知られている。このため国際規格では、1989 年の改訂で、電子機器の金属部分への ESD 試験は、予め放電電極を接触させて ESD 発生器内部のリレースイッチをオンすることで、人体相当の静電容量を充電したコンデンサに蓄えた電荷を注入する接触放電を主とした試験方法を規定した。この試験方法は、ESD 試験の合理性及び試験再現性の観点では優位な方法であるが、実際に帯電した人体からの気中放電での ESD 現象とは異なる試験器仕様及び試験方法が規定され、また限定された条件での試験を実施している。

本論文では、帯電人体から発生する ESD が電子機器に影響する現象を確認し、その現象を基に国際規格で規定する接触放電及び気中放電で起こる現象を実験により差異を明らかにし、分析することで、ESD 耐性試験の課題を提示することを目的とした。

はじめに規格で規定する接触放電と気中放電での放射電磁ノイズ特性を測定し、そのノイズの発生メカニズムをモデル化し、発生タイミングとそのノイズ振幅特性を解析した。測定及び解析結果から、規格で規定する試験方法は、実際の帯電人体からの ESD 現象より過度又は過小な ESD 耐性を評価する可能性があることが明らかになった。これは、人体からの ESD は、気中放電となるため、印加電圧の上昇と共に、電磁ノイズは増大するが、ある電圧より弱まる傾向を確認した。

このことは印加電圧に一次比例する接触放電の現象とは異なる。また充電及び放電を制御する内部リレースイッチのタイミングで、ESD 放電とは異なる周波数成分をもつ電磁ノイズの発生とその特性が明らかとなった。更にこれらの電磁ノイズを低減する新しい制御シーケンスを構築し、その低減効果を実証した。

つぎに、国際規格で規定する接触放電の特異現象として、接触時の不良に起因する微小ギャップを伴う ESD 発生器からの放電電流の測定によって、規格で規定する放電電流より振幅で 2 倍程度増大し、立ち上り時間で 5 倍程度短縮する特異現象を発見した。国際規格で規定する接触放電での印加電圧 2 kV~8 kV 及び微小ギャップの距離を 30 μm ~1000 μm として、この 2 つのパラメータに対する放電電流の特性を明らかにした。その結果、非常に複雑な特性を示すことがわかった。更にこの微小ギャップを介した接触放電の特異現象に対する回路モデルを提案し、この放電電流現象が発生する原理推定をおこない、火花抵抗を考慮した計算式による放電電流を増大させる機構の解明を試みた。

最後に、帯電人体が手にもったドライバーなどの金属棒から発生する ESD を想定した国際規格の試験では想定していない人体に装着するウェアラブル電子機器の ESD のストレスを放電電流の測定により評価した。ウェアラブル電子機器を想定した金属電極を人体の頭、上腕及び、腰に取り付け、更に手にもった金属棒からの各部分から発生する放電電流を測定し、国際規格での放電電流と比較した。この結果、人体の胴体部分からの放電電流は、規格で規定する放電電流より、最大値で数倍高く、波形エネルギーで最大 5 倍大きくなり、また頭、上腕、腰部の胴体部分に近い部位での放電電流の減衰時定数が、国際規格の ESD 発生器及び手からの放電電流より 1/4 程度短縮することがわかった。この現象より、国際規格で定める 150 pF, 330 Ω の人体静電容量・放電抵抗から発生する放電電流とは大きく異なり、既存の ESD 試験では対応できないことが明らかとなった。この波形エネルギー及び放電電流の減衰時定数から人体各部の静電容量及び放電抵抗値を推定した。その結果、腰部の静電容量が一番大きく、頭、上腕及び腰部の放電抵抗は、国際規格の 1/3 程度であることが推定できた。この値を更に検証するため、人体各部に金属電極を取付けたときの人体静電容量及び抵抗の推定を S パラメータの S_{11} 測定により実測し推定値の有効性を確認した。

これらの研究により、つぎの結果が得られた。

- 国際規格の ESD 試験では、不要かつ特性の異なる電磁ノイズが発生し、電子機器は、自然界での気中放電とは異なる電磁ノイズに曝される。
- 国際規格で独自に規定する接触放電では、試験方法の誤りや、試験対象の状態によっては、過度な ESD 試験を実施する可能性があり、その現象は複雑な機構からなっている。

- 人体装着するウェアラブル電子機器のESD耐性試験は、国際規格で規定するESD試験方法では、対応できない。

このことより、自然界で発生する帯電人体からの電子機器に対するESD現象と国際規格で規定しているESD発生器およびESD試験方法における相違点、規定できていないESD現象及び接触放電の課題を明らかにした。これらの課題を今後の電子機器のESD耐性試験に提唱する。

目次

1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 ESD 試験の背景と主な ESD 現象の要素	2
1.3 本論文に関する先行研究	3
1.4 本論文における研究の成果と応用分野	4
1.5 本論文における研究の目的	7
1.6 本論文の構成	7
参考文献	8
2章 電子機器への ESD 現象と ESD 耐性試験	11
2.1 はじめに	11
2.2 電子機器と EMC	11
2.3 電磁ノイズの伝達と電子機器への入力及び出力	14
2.4 ESD 現象と ESD 試験	14
2.4.1 帯電人体による ESD 現象	14
2.4.2 ESD 発生器による ESD 試験	15
2.4.3 ESD 試験規格と ESD 発生器の仕様	17
2.4.4 ESD 発生器の構造	17
2.4.5 ESD 発生器の放電電流波形規定	19
2.4.6 接触放電と気中放電	22
2.5 むすび	23
参考文献	23
3章 ESD 試験における接触放電と気中放電の直前直後に誘導される電磁ノイズ	25
3.1 はじめに	25
3.2 ESD 発生器と電磁ノイズ	25
3.2.1 ESD 発生器と試験方法	25
3.2.2 電磁ノイズ及び発生モデル	27
3.3. 実験検証	31
3.3.1 セットアップ及び測定方法	31
3.3.2 測定結果と考察	33

3.4 むすび	41
参考文献	41
4章 ESD 耐性試験における微小ギャップを伴う放電電流の測定と現象解析	43
4.1 はじめに	43
4.2 ESD 発生器と放電電流の規定	45
4.2.1 ESD 発生器の構造	45
4.2.2 放電電流の規定	45
4.3 微小ギャップを伴う放電電流の測定	48
4.3.1 測定方法	48
4.3.2 測定結果	50
4.4 考察	55
4.5 印加電圧 8kV でのギャップ放電現象とその解析	58
4.5.1 等価回路モデル	58
4.5.2 回路方程式	61
4.5.3 計算結果と考察	62
4.6 むすび	68
参考文献	68
5章 ウェアラブル電子機器を想定した人体装着の金属体 ESD モデルにおける放電電流の測定と現象考察	71
5.1 はじめに	71
5.2 ウェアラブル機器と測定方法	71
5.2.1 ウェアラブル機器を装着した人体の ESD	71
5.2.2 測定セットアップ及び方法	74
5.3 結果及び考察	77
5.3.1 放電電流波形	77
5.3.2 波形エネルギー	80
5.3.3 人体インピーダンス	82
5.4 むすび	86
参考文献	86
6章 結論	89

謝辭	91
論文目錄	93
著者略歷	95

第1章

序論

1.1 はじめに

人類が電気を利用し始めてから、今日の電気・電子機器の高度応用に至る一世紀以上の間に、電気の基本的な事象である放電現象及び電磁界現象に関する研究は数多く実施され、その文献も膨大な量となっている。しかしまだ解明できていないことも多く、ひとつの工学分野として現在も多くの研究が続けられている。帯電した人体による電子機器に対する静電気放電（ESD: Electrostatic Discharge）現象は、電磁界を伴う放電現象の一つであり、この障害に対する対応は、高度化社会を安心、安全に営むための基本的要素となっている。

ESD 現象は、数 GHz 帯の周波数成分を含む放電電荷エネルギーと ESD に伴う放射電磁界からの誘導による回路への結合によって、高度なデジタル電子機器にとって、深刻な障害をもたらすことから、ESD の電子機器に対する電磁ノイズ耐性試験を国際電気標準会議（International Electrotechnical Committee : IEC）において、規格 IEC 61000-4-2 が 1980 年代から改正を伴って策定された。今日、世界中の電子機器メーカーが同規格による ESD 耐性評価を実施し、対策された製品が世の中で利用されている。

一方、帯電人体からの放電現象は、空気中のギャップを介した絶縁破壊現象である気中放電であるが、気中放電は、帯電電圧、温度・湿度、接近速度及び双方の表面形状などの状態により大きく左右され、安定した放電現象を再現できない。そのため、IEC 61000-4-2 では、空気中の絶縁破壊による気中放電を用いないで予め放電電極を電子機器に接触させた状態で、ESD 発生器内の高電圧リレーによって、安定的な放電をおこない、電子機器に放電電流を注入する接触放電方式での代替試験法を推奨している。この方法により、比較的安定した ESD 試験が実現可能となり、電子機器の ESD による耐性レベルを国際的に統一することに貢献できている。しかしながら、自然界で発生する帯電人体からの気中放電での放電現象と異なる方式で実施していることから、様々な特異現象が発生し、そのため本質的に必要のない耐性の対応を強いられることもある。

本章では、ESD 試験の背景と本論文に関する先行研究を述べ、本論文の目的と

構成を示す。

1.2 ESD 試験の背景と主な ESD 現象の要素

現行の IEC 61000-4-2[1]の前身である 1984 年に発行された IEC pub801-2 規格[2]では、帯電した電極を供試機器 (EUT: Equipment under test) にアプローチして放電を発生させる気中放電を規格に採用していた。しかし試験再現性の問題から 1989 年には、現在の規格と同じ接触放電方式を主体に試験をおこなう規定に改正した経緯がある (Fig. 1-1 参照)。

Fig. 1-2 に、自然界で発生する帯電人体による電子機器への静電気現象、及び ESD 発生器を用いての ESD 試験規格での主要要素を示す。ESD 放電に関する要素のうち帯電人体によるもの及び ESD 発生器に関わるものに分類し、帯電人体にのみ関わる要素として、帯電電圧、人体インピーダンス/リアクタンス、人体抵抗及び分布静電容量などがあり、これらの要因により放電が発生したときに、放電の電圧及び電流が発生している。一方、ESD 試験では、高電圧放電リレーを用いた接触放電方式が主体となり、試験電圧、蓄積コンデンサ、放電抵抗 (Fig. 2-5 参照) が直接関連して、放電電流波形が規定されている。また近傍機器に放電する現象を再現する間接放電試験の結合板及びグラウンドプレーン、並びに試験テーブルなどの試験設備にも影響を受ける。帯電人体及び ESD 試験の共通項としては、気中放電があり、この気中放電は、温度、湿度、気圧、接近速度、電極の形上、電極の表面状態、放電距離及び火花などの影響を大きく受け、放電電流波形が変化する。またこれらの人体及び ESD 発生器の ESD により、電磁界が発生する。

Year	No.	Edition	
1984	IEC pub801-2	1 st Edition	Air discharge
1989	IEC pub801-2	2 nd Edition	Contact discharge
1991	IEC 801-2	2 nd Edition	
1995	IEC 1000-4-2	1 st Edition	
1997	IEC 61000-4-2	Convert number	
2008	IEC 61000-4-2	2 nd Edition	

Fig. 1-1 Development of international ESD test standard.

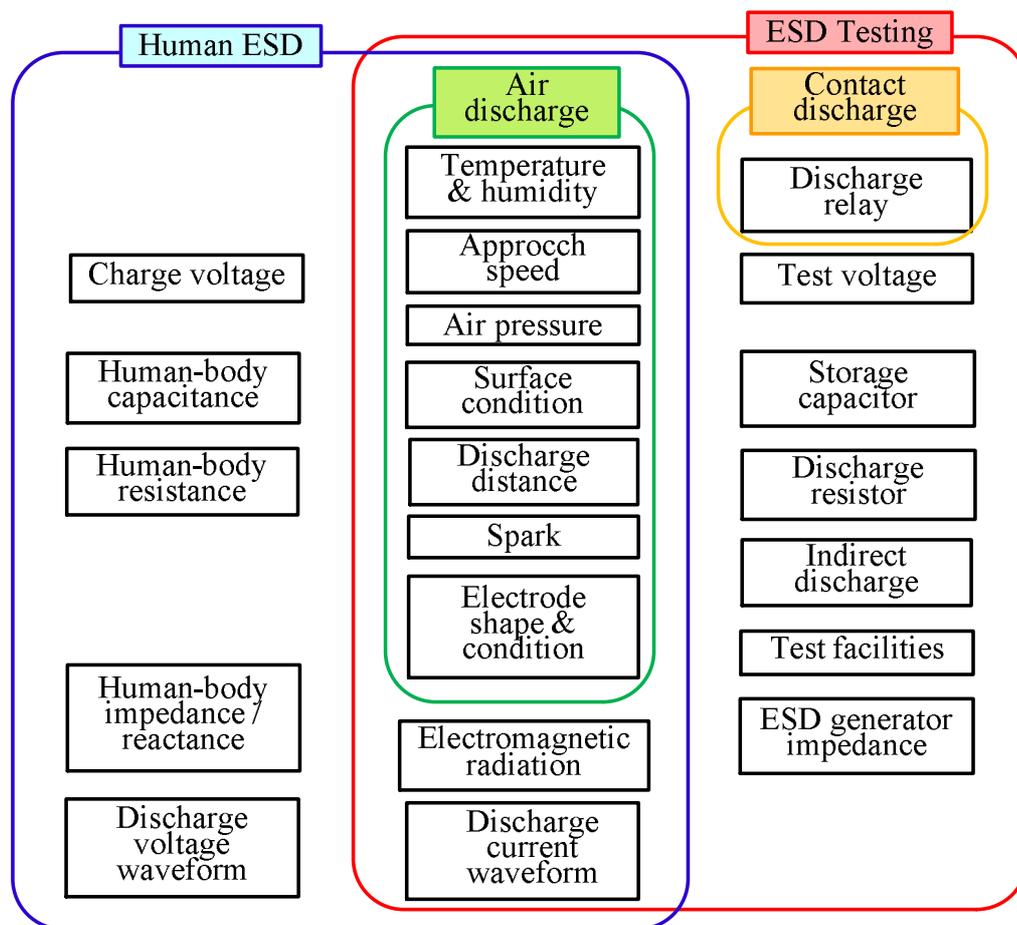


Fig. 1-2 Principal factors of ESD.

1.3 本論文に関連する先行研究

本論文の研究対象は、IEC 61000-4-2 で規定している ESD 発生器及び試験方法並びに試験目的に関するものであり、主につぎの3つについて記述している。

- 1) ESD 発生器の接触放電及び気中放電の電磁ノイズとその発生タイミング
- 2) 接触放電における微小ギャップを介した特異放電現象とその要因
- 3) 現行規格で想定していない帯電人体各部からの気中放電電流の測定と人体インピーダンス

これらの研究に関連する先行研究としては、つぎの研究が挙げられるが、本研究と直接関連するものは見当たらない。

- a) ESD 発生器の結果のばらつきの要因となる放電電流と発生磁界の関連研究[3]
- b) ESD 発生器の気中放電でのアプローチ速度と充電電圧との関連研究[4]
- c) ESD 発生器の内部等価回路モデル[5], [6]
- d) ESD 発生器の近傍磁界とその計算[7]

- e) ESD 発生器の接触放電と気中放電の放電電流波形のピーク電流と立ち上り時間測定[8]
- f) ESD 発生器の気中放電での放電電流測定[9]
- g) ESD 発生器の接触放電での供試体への放電電流推定[10]
- h) ESD 発生器の接触／気中放電に対する放電電流測定[11]
- i) ESD 発生器の放電電流に対するスペクトラム解析[12]
- j) 帯電人体からの気中放電電流に関する研究[13]
- k) 帯電人体からの気中放電での絶縁破壊電界の研究[14], [15]

1.4 本論文における研究の成果と応用分野

Table 1-1 に、本論文に関係する公表論文と Fig. 1-2 に示した ESD の要素との関係を示す。

Table 1-1 の No. 1 の論文は、ESD 発生器の高電圧リレーである放電リレーと充電リレーの動作による気中放電及び接触放電で発生する近傍磁界に関するもので、15 kV まで印加電圧を測定したものである。同時に高電圧リレー動作と高電圧電源の制御による誘導ノイズを抑制した場合の改善についても言及している。

No. 2 の論文は、微小ギャップを放電電極に設けた場合の放電現象で、ESD 発生器にだけ存在する接触放電での特異現象を示している。この特異現象は、ESD 試験にとって非常に厳しい結果となり、しばしば実際の ESD 試験において無意識に実施されている可能性がある。この現象を元に、No. 3 の論文では、火花抵抗則を用いた微小ギャップを伴う放電の解析について言及している。

No. 4 の論文は、人体に取付けて使用するウェアラブル電子機器の ESD 現象を人体からの放電電流の測定によって解析している。更にこの現象を No. 5 の論文では、人体インピーダンスの測定データにより得た抵抗・静電容量値を想定し、ウェアラブル機器にかかる ESD 現象を ESD 試験との対比をおこなっている。

本論文では、No.1 の論文の研究成果を第 3 章に、No.2 及び No.3 の論文の研究成果を第 4 章に、No. 4 及び No.5 の論文の研究成果を第 5 章に記載している。

Table 1-1 Relation between the published papers and this study with ESD categories.

No	published paper title	Contact discharge	Air discharge	Discharge relay	Electromagnetic radiation	Discharge distance	Discharge current	Climate conditions	ESD gun impedance	Body impedance	Chapter No.
1	<u>T. Ishida</u> , Y. Tozawa, M. Takahashi, F. Xiao, Y. Kami, O. Fujiwara and S. Nitta, "A Source Model and Experimental Validation for Electromagnetic Noises from Electrostatic Discharge Generator", IEICE Trans. Commun., Vol.E98-B, No.2, pp.317-323, Feb. 2015.	○	○	○	○		○	○			3
2	石田武志, 肖鳳超, 上芳夫, 藤原修, 仁田周一, "静電気放電耐性試験における微小ギャップを伴う放電電流の測定と現象考察," 電気学会論文誌 A, Vol.135, No.5, pp.287-293, 2015. "Measurements and Phenomenon Study on Discharge Currents with Small Gap in Electrostatic Discharge Immunity Test".	○	○	○		○	○		○		4
3 ¹⁾	石田武志, 肖鳳超, 上芳夫, 藤原修, 仁田周一, 「静電気試験器の微小ギャップを介した接触放電に対する放電電流の増大現象と等価回路による機構解明」, 電気学会論文誌 A, Vol.136, No.6, 2016. "Enhanced Phenomena and Mechanism Elucidations Circuit for Discharge Current through Small Gap in Contact Discharge of Electrostatic Generator".	○	○	○		○	○		○		4
4	<u>T. Ishida</u> , S. Nitta, F. Xiao, Y. Kami and O. Fujiwara, "An Experimental Study of electrostatic Discharge Immunity Testing for Wearable Devices", Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden 2015, TC-2, pp. 839-842, 2015		○			○	○	○		○	5

1) 採録決定

No	Published paper title	Contact discharge	Air discharge	Discharge relay	Electromagnetic radiation	Discharge distance	Discharge current	Climate conditions	ESD gun impedance	Body impedance	Chapter No.
5	<u>T. Ishida</u> , S. Nitta, F. Xiao, Y. Kami and O. Fujiwara, "Characteristics of Discharge Currents Measured through Body-Attached Metal for Modeling ESD from Wearable Electronic Devices" IEICE TRANS. COMMUN., VOL. E99-B, No.1, pp.186-191, Jan 2016.		○			○	○	○			5

1.5 本論文における研究の目的

IEC 61000-4-2 で規定する電子機器に対する ESD 試験は、試験の合理性及び試験再現性の観点から、実際に帯電した人体からの ESD 現象とは、大きく異なる試験器仕様及び試験方法が実施され、また限定された条件を用いている。この異なる試験方法、条件により実際の帯電人体からの ESD 現象より過度又は過小な ESD 耐性評価結果を得ることがある。

本研究では、ESD 試験と実際の ESD 現象との相違や、ESD 試験での特異現象及び現行の ESD 試験では、試験条件を満たしていない分野に関する課題を明らかにし、今後の ESD 試験規格の改善提案及び ESD 試験に関する考え方、試験の注意点を明確にして、現行の ESD 耐性評価法の再確認及び改善点を提案し、電子機器に対する ESD 耐性の向上につなげることを目的とする。

1.6 本論文の構成

本論文は、つぎの 6 つの章で構成されており、3 章～5 章が筆者のおこなった研究である。6 章に全体の結論を述べる。

1 章「序論」

本研究を進めるにあたり、ESD 試験が抱える課題項目を挙げ、その課題と本研究との関わり及び解決に向けての取り組みを示し、研究目的を達成するための過程を示している。

2 章「電子機器への ESD 現象と ESD 耐性試験」

帯電人体による ESD 現象と、ESD 試験の歴史、技術背景を示し、本論文で扱う上での基本的な ESD 現象及び ESD 試験の情報・知識を与えている。

3 章「ESD 試験における接触放電と気中放電の直前直後に誘導される電磁ノイズ」

ESD 発生器における本来試験の目的には不要な電磁ノイズの測定、発生構造の解析及びその改善を提示している。

4 章「ESD 耐性試験における微小ギャップを伴う放電電流の測定と現象解析」

ESD 試験固有の接触放電試験にだけ発生する放電の特異現象を測定し、その発生構造を構築した。またこの発生構造の数学モデルを構築してその妥当性を示した。

5 章「ウェアラブル電子機器を想定した人体装着の金属体 ESD モデルにおける放電電流の測定と現象考察」

ESD 試験規格では、想定していない人体各部に取付けた電子機器の対する ESD ストレスを放電電流の測定により推察し、更に人体各部のインピーダンスを測定することで、その妥当性を確認した。

6 章 「結論」

本論文全体の結論及び今後の課題を記述した。

参考文献

- [1] IEC (International Electrotechnical Commission), “IEC 61000: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test”, Edition 2.0, December 2008.
- [2] IEC (International Electrotechnical Commission), “Publication 801-2: Electromagnetic compatibility for industrial-process measurement and control equipment Part 2: Electrostatic discharge requirement”, First edition 1984.
- [3] Jayong Koo, Qing Cai, Cai Wang, John Maas, Takehiro, Takahashi, Andrew Martwick, and David Pommerenke : “Correlation between EUT failure levels and ESD generator parameters”, IEEE Trans. EMC, Vol.50, No.4, pp.794-801, 2008.
- [4] Qimgyun Yuan, Shanghe Liu, Xijun Zhang, Zhancheng Wu and Ming Wei: The Effect of Approach Speed and Charge Voltage on an Air Discharge, IEEE Trans. on EMC, VOL.52, pp.985-993, NO.4, Nov. 2010.
- [5] 藤原修, 田中秀幸, 山中幸雄: 「静電気試験器による放電電流の等価回路モデル」, 電気学会誌 A, Vol.123, No.8, pp.784-789, 2003.
- [6] 秋山雪治, 戸澤幸大, 石田武志: 「ESD ガンの等価回路モデルの改良 (IEC61000-4-2 Ed.2.0 対応)」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.14, No.4, pp.264-261, 2011.
- [7] 藤原修, 森育子, 石上忍, 山中幸雄: 「ESD ガンの接触放電に対する近傍空間の磁界計算」, 電学論 A, Vol.124, No.9, pp.763-768, 2004.
- [8] 森育子, 高義礼, 藤原修, 石上忍: 「ESD ガンの IEC イミュニティ試験法に対する放電電流の特性比較」, 信学論, Vol. J88-B, No. 12, pp.2401-2403, 2005-12.
- [9] 森育子, 藤原修, 石上忍, 山中幸雄: 「ESD ガンのグラウンドへの気中放電に対する放電電流の特性測定」, 電学論 C, Vol.125, No.12, pp.1798-1804, 2005-12.

- [10] 戸谷史彦, 森育子, 藤原修, 高義礼, 石上忍, 山中幸雄: 「ESD ガンの供試機器への接触放電に対する放電電流波形の推定」, 信学論 C, Vol.J94-c, No.10, pp.288-296, 2008.
- [11] 森育子, 藤原修: 「放電電流波形の広帯域測定に基づく IEC イミュニティ試験の厳しき評価」, 電学論 A, Vol.130, No.5, pp.457-461, 2010.
- [12] 山中幸雄, 戸谷史彦, 石上忍, 藤原修: 「静電気試験器の内蔵インダクタが引き起こす放電電流立ち上がりの波形歪み」, 電学論 A, Vol.132, No.5, pp.362-367, 2012.
- [13] 高義礼, 戸谷史彦, 藤原修, 石上忍, 山中幸雄: 「ESD ガンの接触放電に対する放電電流の IEC 規格波形と周波数スペクトル」, 電学論 A, Vol.135, No.10, pp.592-597, 2015.
- [14] 森育子・高義礼・藤原修: 「帯電人体からの金属棒を介した気中放電による放電電流の広帯域測定」, 電学論 A, Vol.126, No.9, pp.902-908, 2006.
- [15] 高義礼, 藤原 修: 「帯電人体のもつ金属棒の接近で生ずる絶縁破壊電界の推定と検証」, 電学論 A, Vol.130 No.5, pp.428-432, 2010-05.



第2章

電子機器へのESD現象とESD耐性試験

2.1 はじめに

本章では、本論文に関連する全般的な電磁両立性（EMC: Electromagnetic compatibility）に関する概念、一般的なESD現象及び国際規格でのESD試験についての規定内容について説明する。

2.2 電子機器とEMC

EMCは、Electromagnetic Compatibilityの略でCompatibilityの意味は、「矛盾しないこと」、「両立性」、「適合性」であり、あえて日本語に訳せば「電磁環境における両立性」となり、我が国では、広く電氣的・電磁波的ノイズを扱う学問、技術分野を表す言葉として使われ、「環境電磁工学」と呼ばれている[1],[2]。ここで「電磁環境」とは、「電磁界の存在する空間」のことで、つぎにその概要を説明する。

電線に電流が流れれば、その周囲に磁界が発生し、電位差があれば空間に電界が生じる。同時に、機器に接続されている電源線の電圧・電流に変動を与え、不要なサージ（Surge）波（瞬間的に発生する異常電圧）を与えることがある。電磁波が回路に誘導されれば、その回路に妨害を与える。また、電源線の電圧・電流の変動は機器動作に影響を与える可能性がある。さらに、乾燥期にドアの取手に触れたときに“ビリッ”とくる静電気や、その放電時に放出される電磁波も電磁ノイズである。我々が生活する空間には、雷放電のような自然現象を源とする電磁界、上に述べたようなESDによる電磁界及び人工システムが発生する人工電磁界が存在する。このような電磁界が存在する空間を「電磁環境」と呼んでいる[2]。なお、IECでは、「電磁環境」を「ある場所に存在する電磁現象のすべて」と定義している[2]。ここで、「ある場所」とは、機器の存在する場所で、住宅、商店、工場、病院、乗物、道路などのような場所のことである。

以上のように、すべての電気・電子機器は、その内部で電気量を扱っている以上、大小の差こそあれ、意図する（無線通信機、放送波）・意図しない（機器の目的とする性能・機能とは関係のない不要なエネルギーを放出する）に関わらず、

いわゆる電磁ノイズを外部に放出している。

以上に述べたことから、「電磁環境における両立性」とは、個々の人工システムが他に妨害を与える電磁エネルギー（電磁ノイズ）を放出することもなく、同時に電磁環境から電磁妨害を受けることもなく、本来その機器・システムの目的とする機能を十分に発揮できること、すなわち「電磁ノイズを出さない」、「電磁ノイズの影響を受けない」という二つの事項を「両立させなければならないところから生まれてきた要求」のことをいっている（Fig. 2-1 参照）。

なお、EMI（Electromagnetic Interference：電磁干渉）は、電磁ノイズを出す側の言葉で、日本工業規格（JIS: Japanese industrial standards）ではEMIを「電磁障害」と訳し、IECと同じく「電磁妨害によって引き起こされる装置、伝送チャンネル又はシステムの性能低下」[2]と定義されているが、業界においては、EMIを電磁ノイズと同義で用い、EMI対策とは、電磁ノイズの発生側でこれを抑えることであり、EMI測定とは、機器やシステムからの電磁ノイズを測定することとしている[2]。一方、電磁ノイズの影響を受けない、すなわち、電磁ノイズに対する耐力をイミュニティ（Immunity）、電磁ノイズに対する感受性（受けやすさ）をサセプティビリティ（EMS: Electromagnetic Susceptibility）と呼んでいる。

また電磁ノイズを分類すると、電源線上の電圧変動のように、線を伝搬する伝導性ノイズ（Conductive Emission/ Noise）と空間を伝播する電磁界を表す放射性ノイズ（Radiated Emission/ Noise）がある。

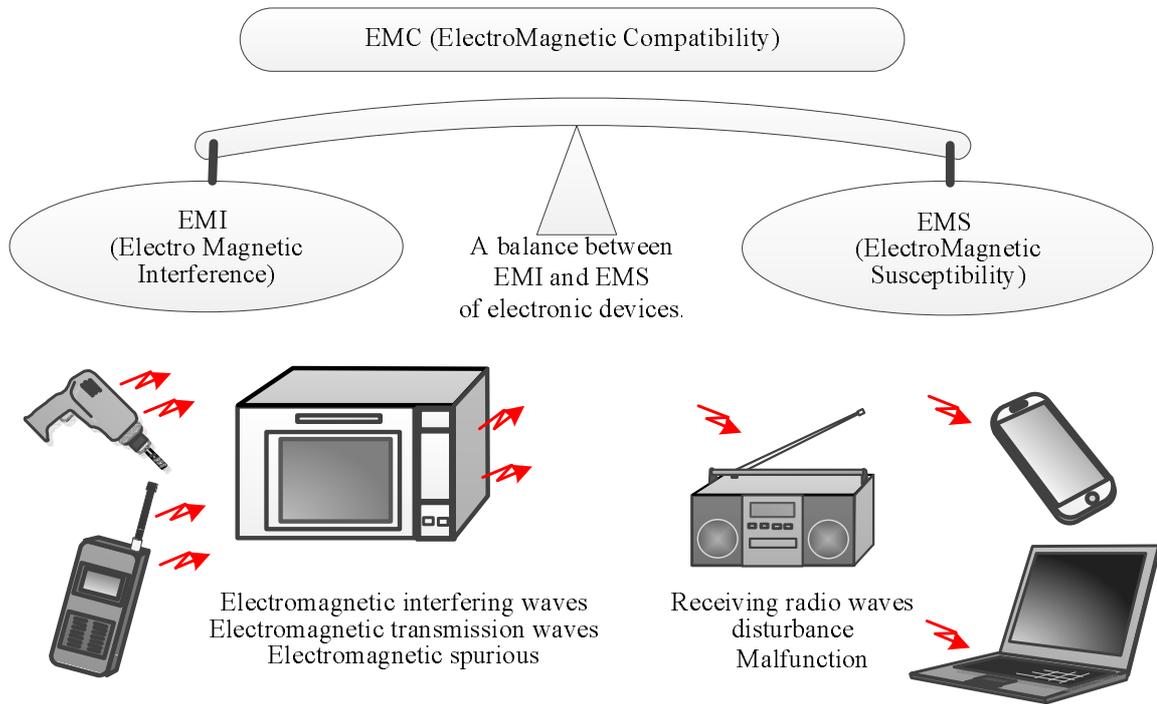


Fig. 2-1 Schematic diagram of EMC concept

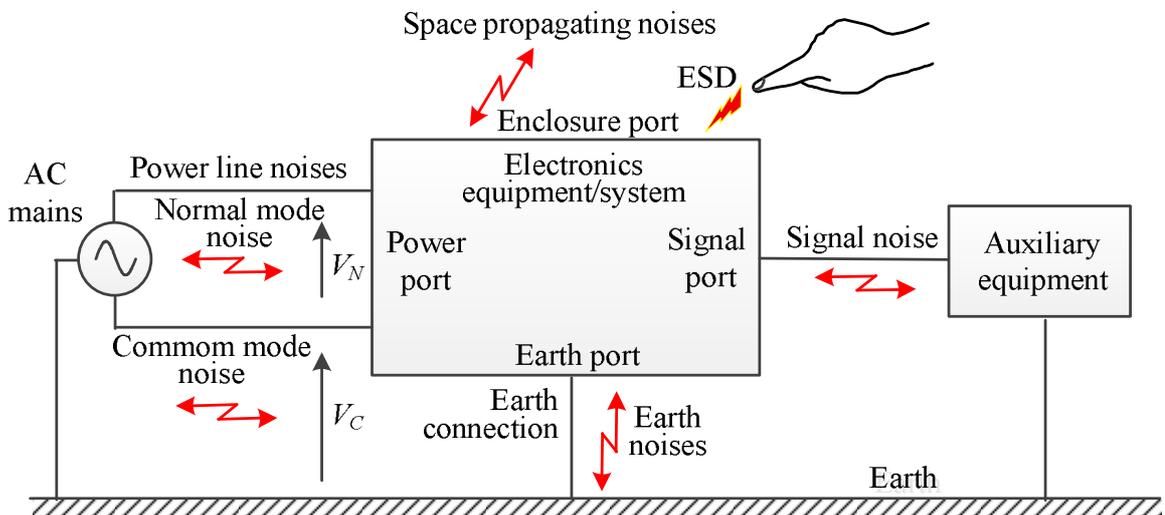


Fig. 2-2 Propagation of electromagnetic noises to electronic equipment.

[出典：山崎弘郎，仁田周一，齊藤成一，古谷隆志，上野美幸，オーム社，”デジタル回路のEMC”，平成14年11月25日，一部編集]

2.3 電磁ノイズの伝達と電子機器への入力及び出力

Fig. 2-2 に通常の商用電源の供給を受ける電子機器のモデルでの電子機器への電磁ノイズの伝わり方を示す。電線・ケーブルなどの導電体により伝わる伝電性のものと、無線のような空中から伝わる放射性の2つに分類される。

伝導性の電磁ノイズのインターフェースとしては、電源ポート、アースポート及び信号ポートがある[3]。これらの導体上に接続された他の機器からの伝導性の高周波ノイズが伝わってくる場合と、近傍に併走する他の導体からの放射電磁界が誘導して伝わる場合がある。逆にこの電子機器内部に発生する電磁ノイズがこの導体により外部に伝搬する場合もある。電源ポートのように2つまたはそれ以上の導体間に相対する電磁ノイズが結合することをノーマルモードノイズ若しくはディファレンシャルモードノイズという。一方、アース、グラウンドを基準として、電磁ノイズが相対する導体全体に結合することを、コモンモードノイズという。アースポートからの結合は、基本的にこのコモンモードノイズとなる。

落雷による電磁ノイズが屋外の電灯線に誘導し、電源サージとなって屋内の電源線、電話回線に入り込む現象では、ノーマルモード結合及びコモンモード結合の両方が存在する。

空中からの外来電磁ノイズは、筐体または電源線、信号線及びアース線に結合し、コモンモードとなって電子機器に影響を与える。ESDも電子機器の筐体に放電するため、筐体が電磁波のインターフェースとなる筐体ポートの電磁ノイズとなる。筐体ポートの電磁ノイズは、基本的にコモンモードノイズとなる。

2.4 ESD現象とESD試験

電子機器にとってのESD現象は、帯電した人体が操作または運搬等により手で機器に触ろうとするときに放電が発生することを想定している。ESD耐性試験も同様の状況を再現している。

2.4.1 帯電人体によるESD現象

Fig. 2-3 に帯電した人体による電子機器へのESD現象を示す。カーペット上を歩行するなどの動作により人体が大地（床）に対して帯電する。人体の大地に対する静電容量は、100 pF程度と言われており[4]、絶縁物である靴などを履いた足裏での静電容量が一番大きく、その他に身体全体と大地との寄生容量が加算される。通常、帯電していない電子機器を操作するため、手の指を近づけたときに帯電電圧に依存した距離での絶縁破壊が発生し、放電が発生する。放電が発生する理由は、電子機器と指との間に電位差があることである。放電により放電電流が発生し、人体に蓄積した電荷を減少させ人体の帯電電圧が低下する。放電電流の経路は、必ずしも明確になっていないが、電子機器の電源及び接地経路の電線を

伝わって、大地接地から床の経路により人体に戻るルートが直流的には考えやすいが、電子機器に電源系の接地経路が無い場合や、ゴムなどの絶縁物を介して設置されていても、放電は発生する。電気的な経路が確保されていなくても、電子機器と机、また床との間にできる寄生容量を充電する放電電流が流れる。

2.4.2 ESD発生器によるESD試験

Fig. 2-4にIEC 61000-4-2に従ったESD発生器によるESD試験の例を示す。試験再現性と電位基準を確実に定める理由から、床に基準グラウンド面である金属板を敷き、卓上機器の木製机は、高さ0.8 mに規定し、卓上面にも電位基準と金属机への放電を想定した水平結合板の設置を規定している。この水平結合板には、帯電電荷を除電するための両端に470 k Ω の抵抗を接続した抵抗ケーブルで、床の基準グラウンド面とつながっている。

ESD発生器は、人体の静電容量を150 pF、金属の鍵等を持って放電することを想定した330 Ω の抵抗を人体抵抗とした回路定数を持ち、この回路の基準を2 mのグラウンドリターンケーブルで人体が足で立つ想定で基準グラウンド面と接続する。帯電人体からのESD現象は、空気ギャップを介した気中放電であり、湿度などの環境により安定はしない。このためESD試験では、予め電子機器の金属部に放電電極を接触させた状態で、ESD発生器内の放電リレーをオンにすることで、放電電流を注入する接触放電を実施する。放電電流の経路は、基本的にFig. 2-3と同じであるが、水平結合板及び基準グラウンド面により、電子機器の大地に対する結合容量は増加し、より放電電流が流れやすくなる。なお高抵抗の抵抗ケーブルには、ESDによる過渡電流はほとんど流れない[6]。

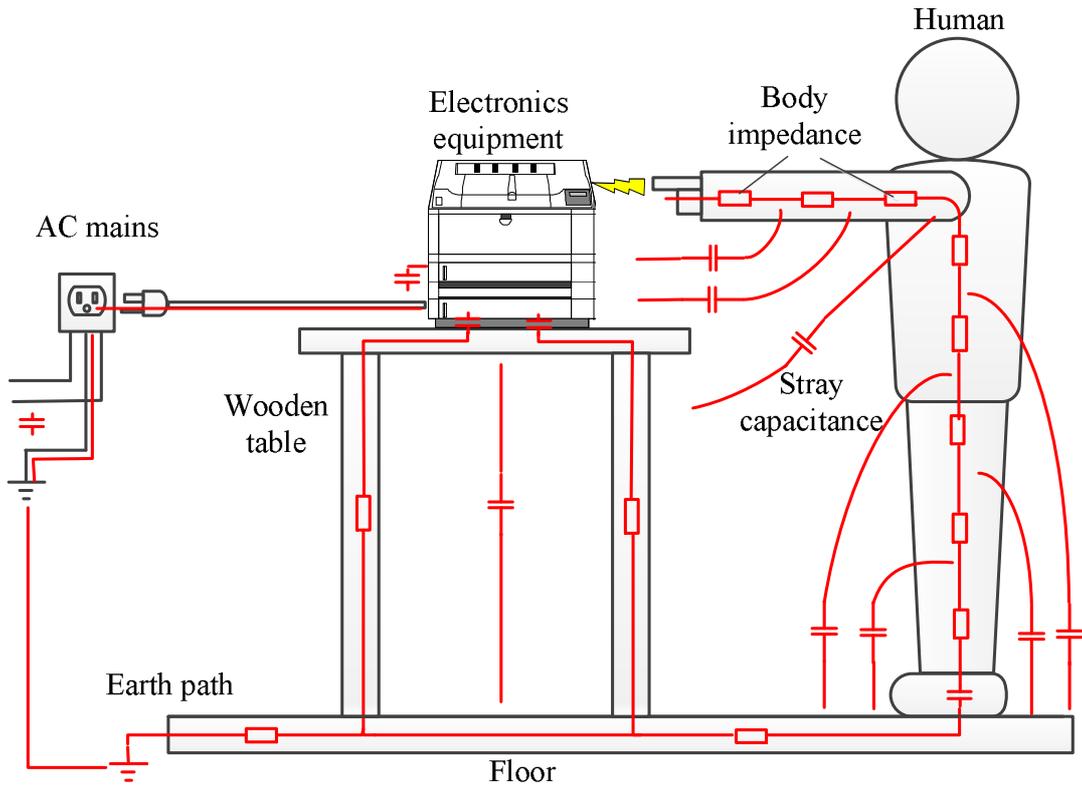


Fig. 2-3 ESD phenomenon of electronics equipment by charged human.

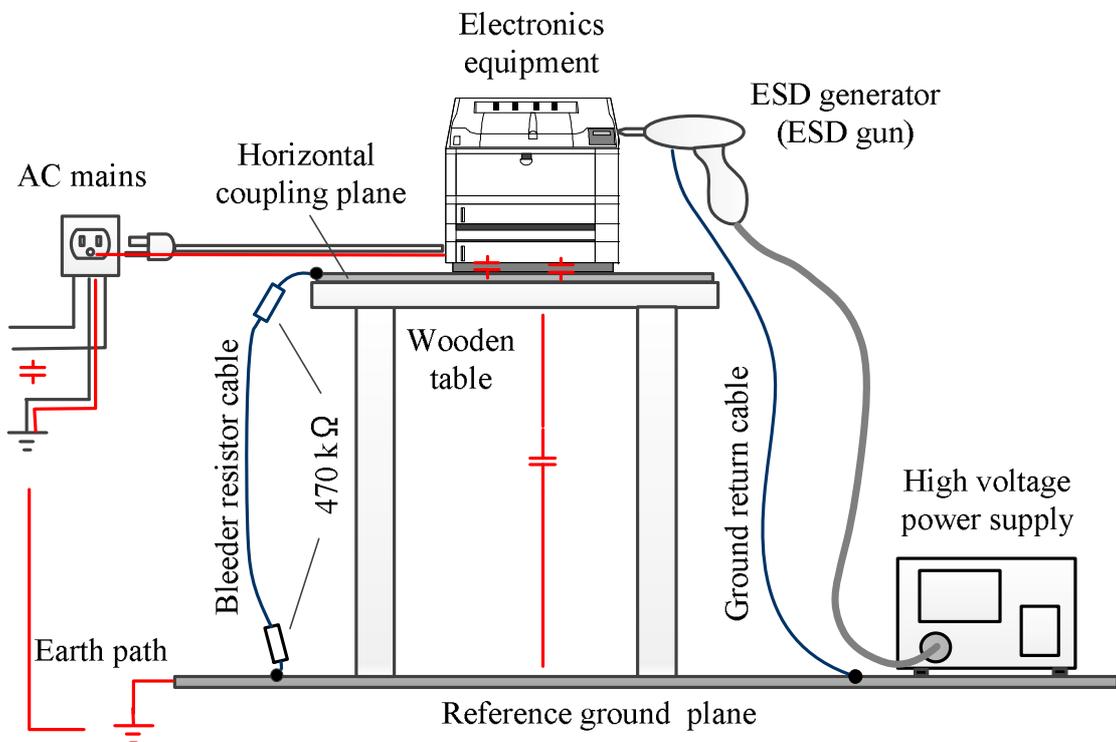


Fig. 2-4 Example of ESD testing for electronics equipment by ESD generator.

2.4.3 ESD試験規格とESD発生器の仕様

IEC 61000-4-2 では、ESD 発生器の仕様、ESD 試験における環境と試験セットアップ、試験の実行、試験の評価及び試験報告書の記載内容等の規定が記載されている。

2.4.4 ESD発生器の構造

ESD 発生器は、人体の静電容量を代表する 150 pF のエネルギー蓄積コンデンサに電荷を蓄え、人体抵抗を模擬した $330\ \Omega$ の放電抵抗を介してその蓄積された電荷を放電スイッチがオンになることで放電が開始する (Fig. 2-5 参照)。高電圧電源は、規格で規定する 15 kV 以上の直流高電圧を発生させ、充電抵抗 R_c を経由し充電スイッチ S_c がオンになることでエネルギー蓄積コンデンサ C_s を充電する。放電時には、 S_c をオープンにして充電回路を切り離し、放電スイッチ S_d がオンになることで C_s の電荷が放出され放電電流となって流れる。 S_d は、通常高気圧の不活性ガス (SF_6 等) を充満させ、空気より絶縁破壊電圧を高めた高電圧リレーが用いられ、気中での不安定な放電現象をこの高電圧リレーの絶縁性の高い気体中での高速に移動する接点により、高電圧リレー内で安定的な放電が発生する。またこの S_d は、放電電極での気中での放電に代わっておこなうため、必ず放電電極側に配置しなければならない。

EUT が樹脂筐体気中放電の場合には、放電電極が EUT に接触していない状態で、 S_d をオンにして、放電電極を C_s の充電電圧に保ったまま、EUT に近づけて近傍の金属物に対して空気中の絶縁破壊により放電することを試験する。このため、放電電極は、帯電電荷を電極に保持する目的で先が丸い半球状の気中放電用電極を用いる。一方、接触放電は、金属筐体の塗装面を突き破り確実な接触を目的として、先端が尖った円錐状の接触放電電極を用いる (Fig. 2-6 参照)。グラウンドリターンケーブルは、長さ 2 m の規定があり、基準グラウンド面に接続する。

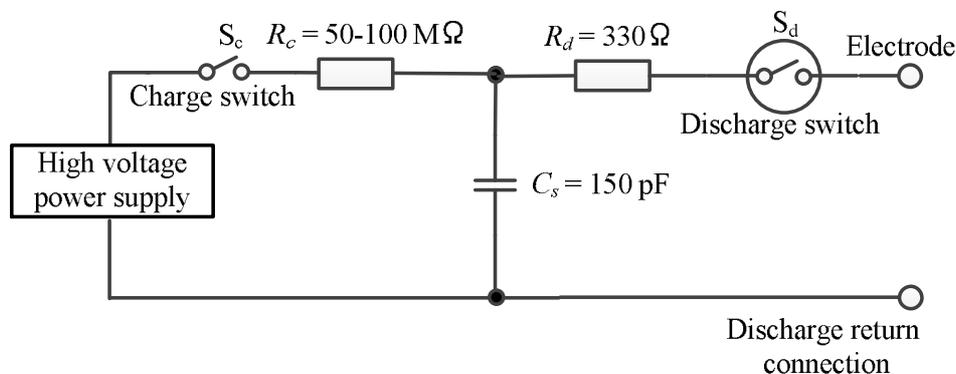


Fig. 2-5 Simplified diagram of ESD generator.

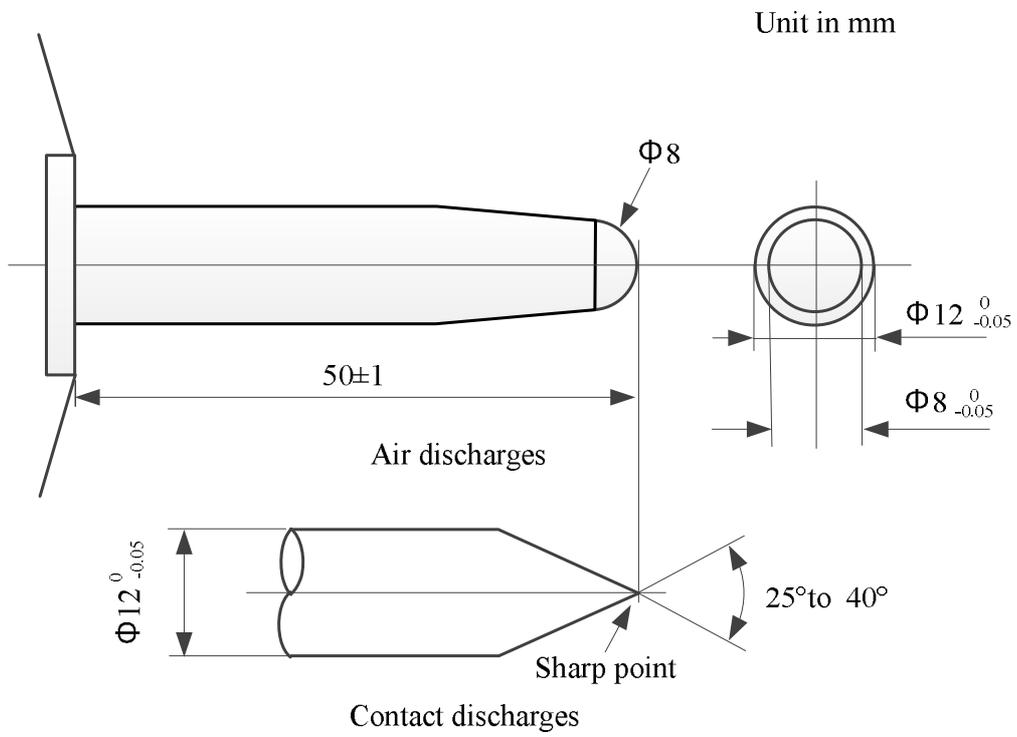


Fig. 2-6 Electrode of ESD generator for air and contact discharges.

2.4.5 ESD発生器の放電電流波形規定

ESD発生器の出力波形規定は、Fig. 2-7に示す接触放電における放電電流波形及びそのパラメータ（Table 2-1）が規定されている。温度及び湿度、接近速度などの外的要因により安定しない理由から気中放電による出力波形規定は、規定しないことが規格に記載されている[5]。規定点は4項目あり、第一ピーク部のピーク電流 I_p とそのピーク電流の10%から90%点までの時間間隔の立ち上がり時間 t_r が0.8 nsであること及び、第二ピーク部の30 ns及び60 ns時点での放電電流値（ I_{30} , I_{60} ）の規定をおこなっている。この放電電流波形は、Fig. 2-8に示すファラデーケージの前面の1.2 m×1.2 mのグラウンド板の中央に取り付けた電流ターゲットに接触放電で印加したときの波形である。電流ターゲットは、約2 Ωの合成抵抗でグラウンドに接続されており、印加により発生する電圧降下を50 Ω系の同軸線路でオシロスコープに接続することで、放電電流波形を観測することができる。合成抵抗の2 Ωは、51 Ωのチップ抵抗25本を並列かつ放射状にプリント基板に配置し、電力容量を増やし、直列インダクタンスを減らして高周波特性を維持している。電流ターゲットの直後には、減衰とインピーダンス整合を兼ねた20 dBのアッテネータを接続して、オシロスコープに同軸ケーブルで接続する。この電流ターゲットからオシロスコープまでの伝送系の周波数特性は、DC～1 GHzまで±0.5 dB、1 GHz～4 GHzまで±1.2 dBの平坦性を保っている[5]。

ファラデーケージの目的は、放電時のオシロスコープへのノイズの飛び込みによる測定波形の乱れを防止するためのもので、測定波形への干渉が認められない場合には困り込む必要はない。放電電流は、2つのピークを持つ波形となっているが、ESD発生器に内蔵している150 pFのコンデンサ及び330 Ωによる波形は、第二ピーク部のみを形成し、第一ピークは、ESD発生器の放電スイッチより内側の回路全体とファラデーケージのグラウンド面との寄生容量に蓄積された電荷が放電スイッチ S_d のオンにより短絡して発生する。従って、この第一ピークの放電電流は、グラウンドリターンケーブルを経由していない。第二ピークは、ESD発生器の約2 μHのグラウンドリターンケーブルを経由することにより立ち上がり波形が鈍る[6]。この2つのピークを持つ放電電流波形は、実際に帯電した人体による気中放電でも同様の波形が観測される[7]。

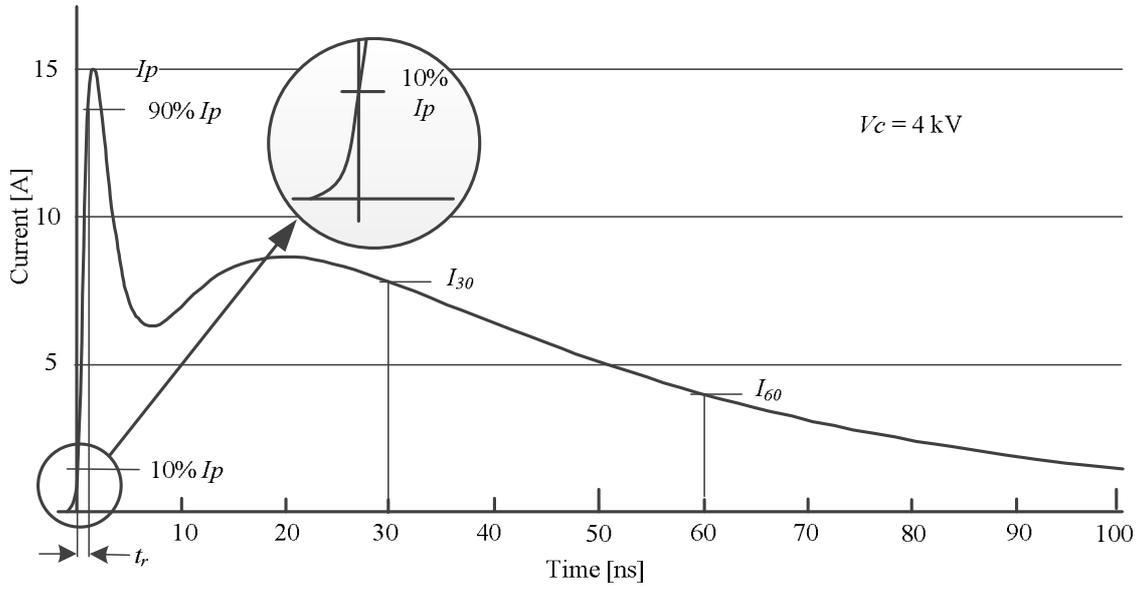


Fig. 2-7 Contact discharge current waveform of ESD generator.

Table 2-1 Specification of contact discharge current waveform of ESD generator.

Test Level	Indicated voltage kV	Fast peak Current I_p $\pm 15\%$ A	Rise time t_r $\pm 25\%$ ns	Current at 30 ns I_{30} $\pm 30\%$ A	Current at 60 ns I_{60} $\pm 30\%$ A
1	2	7.5	0.8	4	2
2	4	15	0.8	8	4
3	6	22.5	0.8	12	6
4	8	30	0.8	16	8

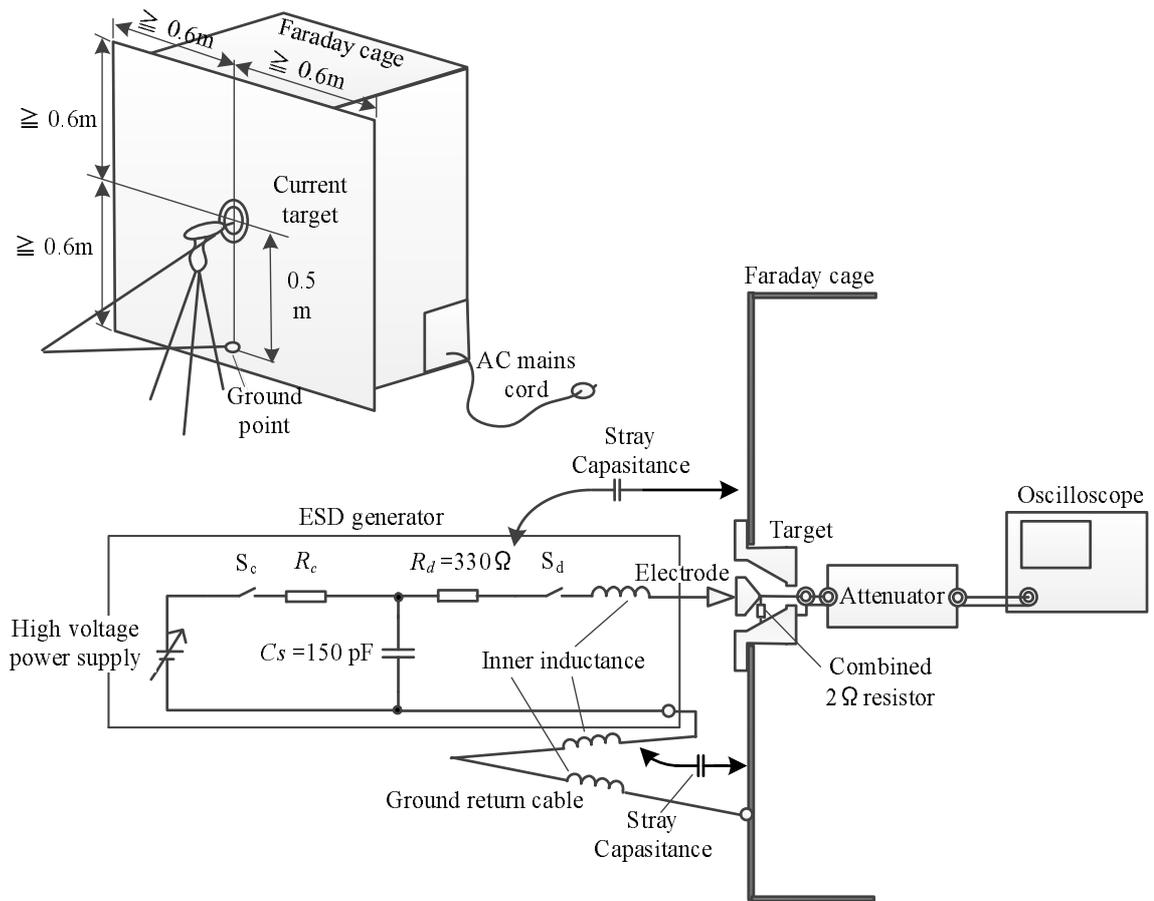


Fig. 2-8 Measurement setup of discharge current waveform.

2.4.6 接触放電と気中放電

帯電した人体から電子機器への ESD 現象は気中放電であるが、気中放電は、温度、湿度の環境、放電対象へのアプローチ速度及び帯電物と放電対象の表面形状及び汚染度等の表面状態により、放電距離、放電電流の大きさ及び波形変化、立ち上がり速度が大きく変化する[8], [9]。このため国際規格の 1984 年の制定時では、現在とは異なる構造の ESD 発生器を用いて気中放電方式での試験を規定していたが、上記理由により 1989 年より接触放電を優先する方式に変更した (Fig. 1-1 参照)。従って現行の ESD 試験では、予め放電電極を EUT の金属部に接触させ、放電スイッチにより放電電流を注入する接触放電を優先的におこなう。EUT が樹脂筐体の場合のみ、樹脂筐体の通風孔、筐体の嵌合部及び操作スイッチ周囲の隙間等から、内部のシャーシまたはプリント基板に放電することを想定した気中放電を実施する (Fig. 2-9 参照)。

気中放電試験の場合は、帯電人体からの ESD 現象に近く、放電による輻射の発生、及び放電電流が EUT に流れることでの、回路内への電磁干渉及びそこから発生する 2 次輻射がある。一方、接触放電試験では、高電圧リレーによる不活性ガス内の高速移動する接点での微小ギャップ放電により放電電流が EUT に流れる。この現象は、安定しているが、気中放電での放電現象とは放電電流の大きさ、立ち上がり時間及び 2 次輻射の発生が明らかに異なる。現象面では異なる放電方式を主体に試験を実施しているが、この ESD 試験規格を制定して 20 年以上の間、電子機器の ESD に対する耐性が向上し大きな問題は発生していないことは、評価できる。しかし ESD 試験は合格しても、フィールドにおいて ESD が原因と推定できるトラブルが発生していることも報告されている[10]。

2.5 むすび

この章では、EMC の概念と ESD 現象を基にした ESD 試験について概説した。電子機器に対する EMC 耐性試験において、ESD 試験は、ESD 現象の複雑さゆえ試験再現性を優先し、実際の帯電人体からの ESD 現象とは異なる方法で実施されている。このことが、ESD 試験の更なる課題となっている。

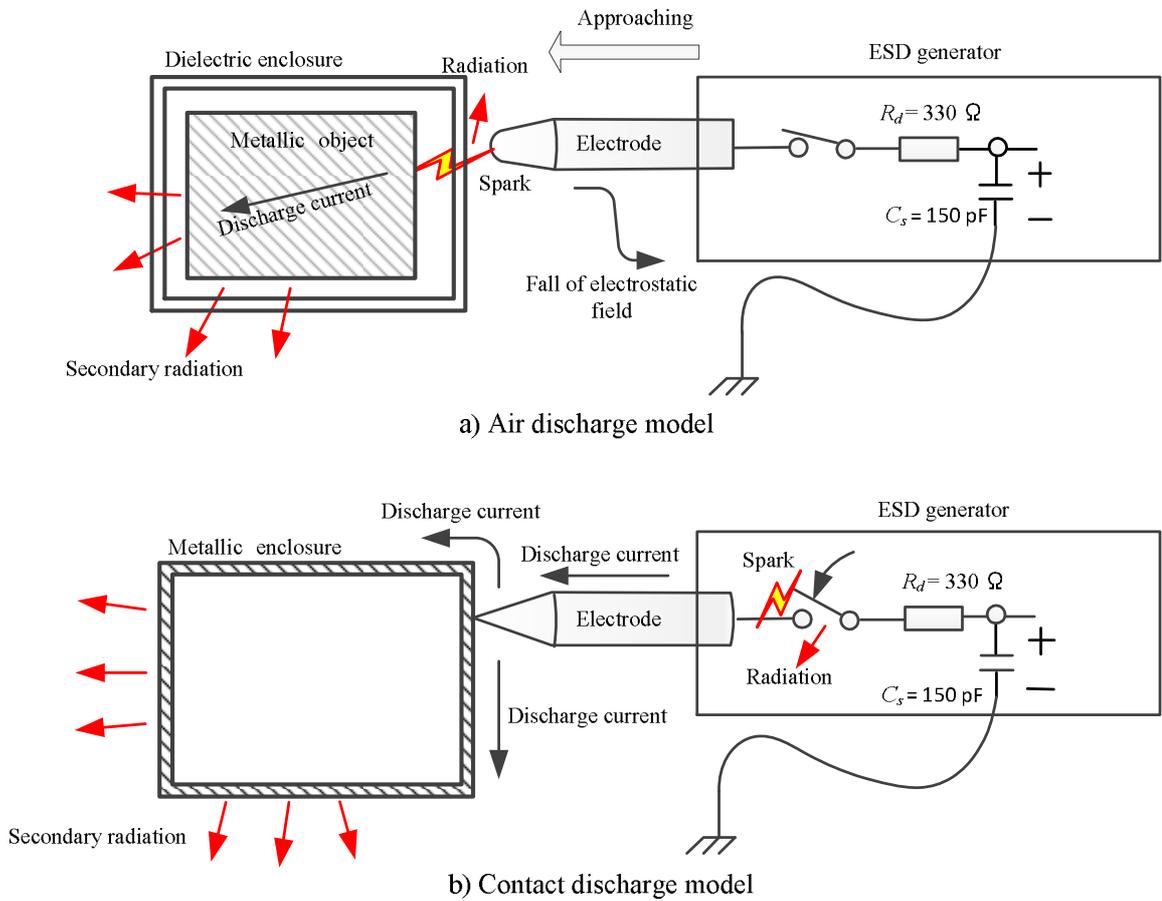


Fig. 2-9 Explanation diagram of air discharge and contact discharge.

参考文献

- [1] 一般社団法人電気学会編, 「電気学会 125 年史」, 一般社団法人電気学会, 平成 25 年 10 月 11 日初版発行, pp.199-200 (2013-10).
- [2] 電子情報通信学会編, 「改訂 電子情報通信用語辞典」, 株式会社コロナ社, p.38(EMC), pp.671-672 (電磁環境), pp.38-39 (EMI) 1999 年 7 月 9 日改訂版第 1 刷発行.
- [3] 山崎弘郎, 仁田周一, 斉藤成一, 古谷隆志, 上野美幸, オーム社, ”デジタル回路の EMC”, 平成 14 年 11 月 25 日.

-
- [4] 藤原修, 竹下裕章, 「人体帯電電位を決定づける靴の電気定数の特性測定」, 電学論 A, 117 巻 12 号, pp.1165-1169, 1997-12. ” Measurement of Electrical Properties of Shoes Determining Charged Human Body Potential”.
- [5] IEC (International Electrotechnical Commission), “IEC 61000: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test”, Edition 2.0, December 2008.
- [6] 秋山雪治, 戸澤幸大, 石田武志: 「ESD ガンの等価回路モデルの改良 (IEC61000-4-2 Ed.2.0 対応)」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.14, No.4, pp.264-261, 2011.
"Improvement of the Equivalent Circuit Modeling for an ESD-Gun (Based on IEC61000-4-2 Ed.2.0)".
- [7] Takeshi Ishida, Fengchao Xiao, Yoshio Kami, Osamu Fujiwara and Shuichi Nitta: An Experimental Study of electrostatic Discharge Immunity Testing for Wearable Devices, Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden 2015, TC-2, pp.839-842, 2015.
- [8] 森育子, 藤原修: 「放電電流波形の広帯域測定に基づく ESD に対する IEC イミューニティ試験の厳しさ評価」, 電学論 A, 130 巻 5 号, pp.457-461, 2010.
"Severity Evaluation of the IEC Immunity Test against ESD based on Wideband Measurement of Discharge Current Waveforms".
- [9] 高義礼, 川又憲, 藤原修: 「ESD ガンの気中放電に対する火花長の測定と検証」, 電学論 A, Vol135, No. 5, pp.259-264, 2015.
“Measurement and Validation of Spark Length for Air Discharges of Electrostatic Generator”.
- [10] 本田昌實, 磯福佐東至: 「誘導 ESD に曝された情報ケーブルにおける過渡雑音の測定」, 静電気学会誌, Vol. 36, No.1, pp.20-24, 2012.
“Measurements of Transient Noise on Information Cable Exposed by Induced ESD”.

第3章

ESD 試験における接触放電と気中放電の直前直後に誘導される電磁ノイズ

3.1 はじめに

電子機器及びシステムに対する ESD 試験は、IEC 61000-4-2[1]にて ESD 発生器の仕様、試験環境、試験方法及び試験結果の評価などを規定している。規格では、放電電流を直接 EUT に注入する接触放電方式を試験再現性の理由から採用している。しかし帯電した人体の ESD 現象を常に再現する訳ではない。接触放電の電流波形は規格で規定しているが、気中放電については、再現性の悪さから規定はない。また通常、実際の ESD 現象は、火花を伴うことが知られている。一方、ESD 試験の直前、直後に EUT が誤動作することが報告されている[2][3]。例えば、EUT の ESD 試験が合格となっても、そのあとに誤動作が発生することが、ときどき発生する。ESD 試験規格は、現実とは異なる矛盾した結果を得ることがあるが、その潜在的な原因は、明確に実証されていない。

本章では、上記のような現象の観点から、ESD 発生器からの ESD 試験における直前、直後及び試験時の電磁ノイズの発生源モデルと、さらに関係する組込まれたリレースイッチの制御シーケンスを検討した。発生源のモデルを検証するために、ESD 発生器が発生する気中放電と接触放電の両方を近傍に設置した磁界プローブを用いてそこに誘導する電磁ノイズを測定した。また、ESD 試験直後に発生する電磁ノイズを低減させる組み込み DC 高電圧電源及びリレースイッチの新しいシーケンス制御も提案する。

3.2 ESD 発生器と電磁ノイズ

3.2.1 ESD 発生器と試験方法

Fig. 3-1 (a) 及び Fig. 3-1 (b) にそれぞれ、接触放電と気中放電の ESD 発生器の簡易構成及び低周波領域でのその等価回路を示す。ESD 発生器は、150 pF の蓄積コンデンサ C_s 、及び 330 Ω の放電抵抗 R_d で構成し、 C_s が人体の静電容量及び R_d が金属物を持った人体の抵抗に対応している。充電抵抗 R_c は、53 M Ω となっている。またリレースイッチ S は、接点 c 及び接点 d を高圧の不活性ガス (SF_6) で充填され、ESD 発生器に組み込まれている。このリレースイッチ S は、規格で規定する Fig. 2-5 の S_c 及び S_d を一体化したトランスファー型のリレースイッチで、充

電時に、放電抵抗 R_d を経由するが、充電抵抗の値 $53 \text{ M}\Omega$ に対して殆ど無視できる 330Ω が加算されるため充電動作への影響はない。

ESD 発生器は、制御回路により同期して動作する。ESD 試験の前に、 C_s は、DC 高電圧からリレー接点 c が閉じて R_c を経由して充電される。Fig. 3-1 に示す ESD 発生器は、接触放電のとき、円錐の放電電極を用い、 C_s に蓄積した電荷を EUT に接触させて放電する。気中放電では、半球形状の放電電極を用い、リレー接点 d を閉じて帯電状態の放電電極を EUT に近づけ火花を介して放電させる。

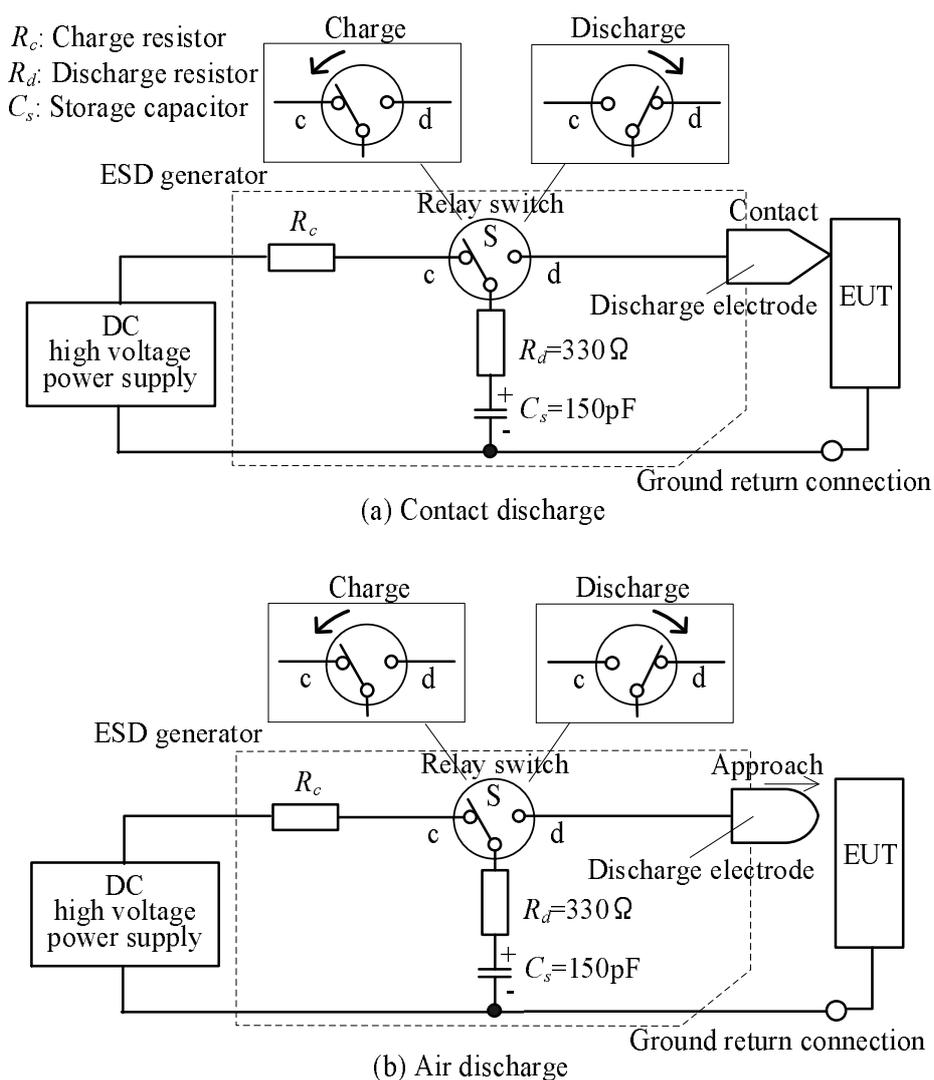


Fig. 3-1 Simplified structure of ESD generator and equivalent circuit in the low frequency range for (a) contact discharge and (b) air discharge.

3.2.2 電磁ノイズ及び発生モデル

電気接点の開閉における火花放電は、安定せず電磁ノイズを発生することが、知られている[4], [5]。このことは、ESD 発生器に組み込まれているリレースイッチの動作時に電磁ノイズが発生することにつながる。ここでは、Fig. 3-2 に示す接触放電時の電磁ノイズ発生モデルを提案する。ここに、 V_{ps} は、電源の電圧、 V_c は、充電されたコンデンサ C_s の電圧、 C_s 、 C_{sd} 及び C_{sc} は、それぞれ充放電回路部品及び寄生容量である。そして I_{tip} は、EUT に注入される放電電流である。Fig. 3-2(a)及び Fig. 3-2(b)は、スイッチが c から d 及びその反対の動作により発生するスパークによる電磁ノイズ発生する場所とタイミングを示している。

Fig. 3-3 は、気中放電時の電磁ノイズの発生モデルを示す。Fig. 3-3(a)は、ESD 試験直前のスパークを、Fig. 3-3(b)は、放電電極が EUT に近づくときのスパークの発生を、また Fig. 3-3(c)は、スイッチが d から c に変わり、 C_s を充電する直前の火花放電発生個所を”spark”でそれぞれ示す。

Fig. 3-4(a)及び Fig. 3-4(b)は、機能制御シーケンス及び接触放電及び気中放電試験時の電磁ノイズの発生タイミングを示す。接触放電試験は、リレースイッチ S が接点 d に動き放電を完了し、その 15 ms 後には、スイッチ S は、接点 c に戻る。このシーケンスは、通常 1 秒毎に繰り返す。この場合では、電磁ノイズは、つぎのような制御シーケンスのタイミングで発生する。スイッチ S が c から d に変わるとき、電磁ノイズは、ESD 試験と殆ど同期して直前に発生する。 C_s の充電のために、スイッチ S が d から c に移るときも、電磁ノイズは発生する。気中放電試験の場合、スイッチ S が c から d に移動するとき、ESD 試験前の火花放電による電磁ノイズが発生する。ESD 試験では、高電圧に帯電した放電電極が近づいたときスパークを伴い電磁ノイズが発生する。スイッチ S が d から c に戻ったときにも、電磁ノイズが発生する。

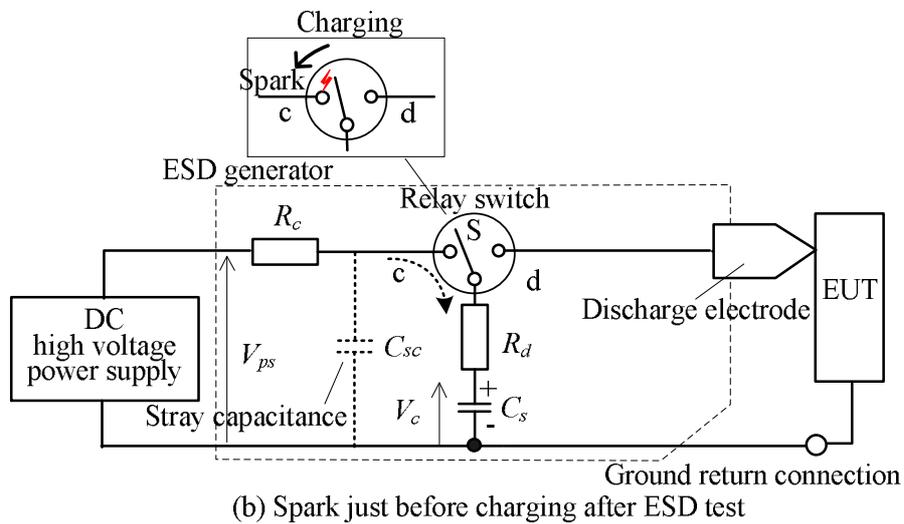
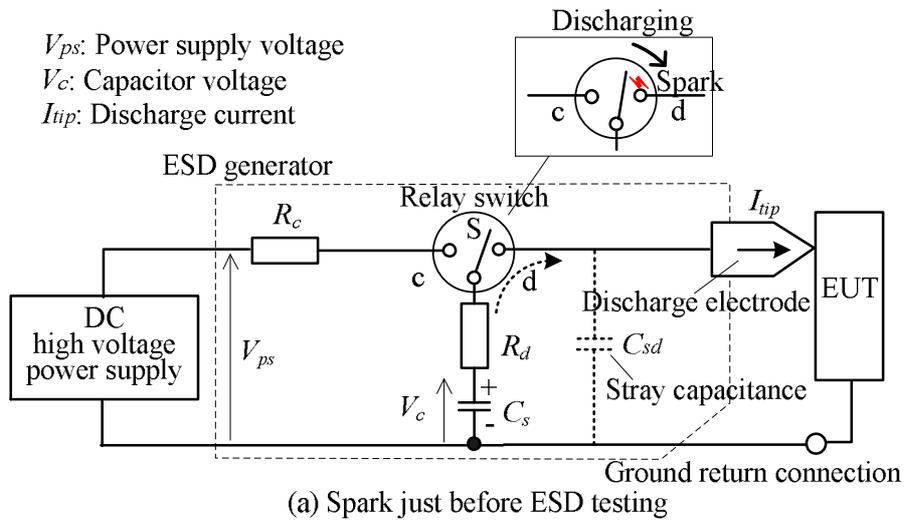


Fig. 3-2 Source model of EM noises due to sparks inside relay switch (a) just before and at ESD testing and (b) just before charging after ESD test for contact discharge.

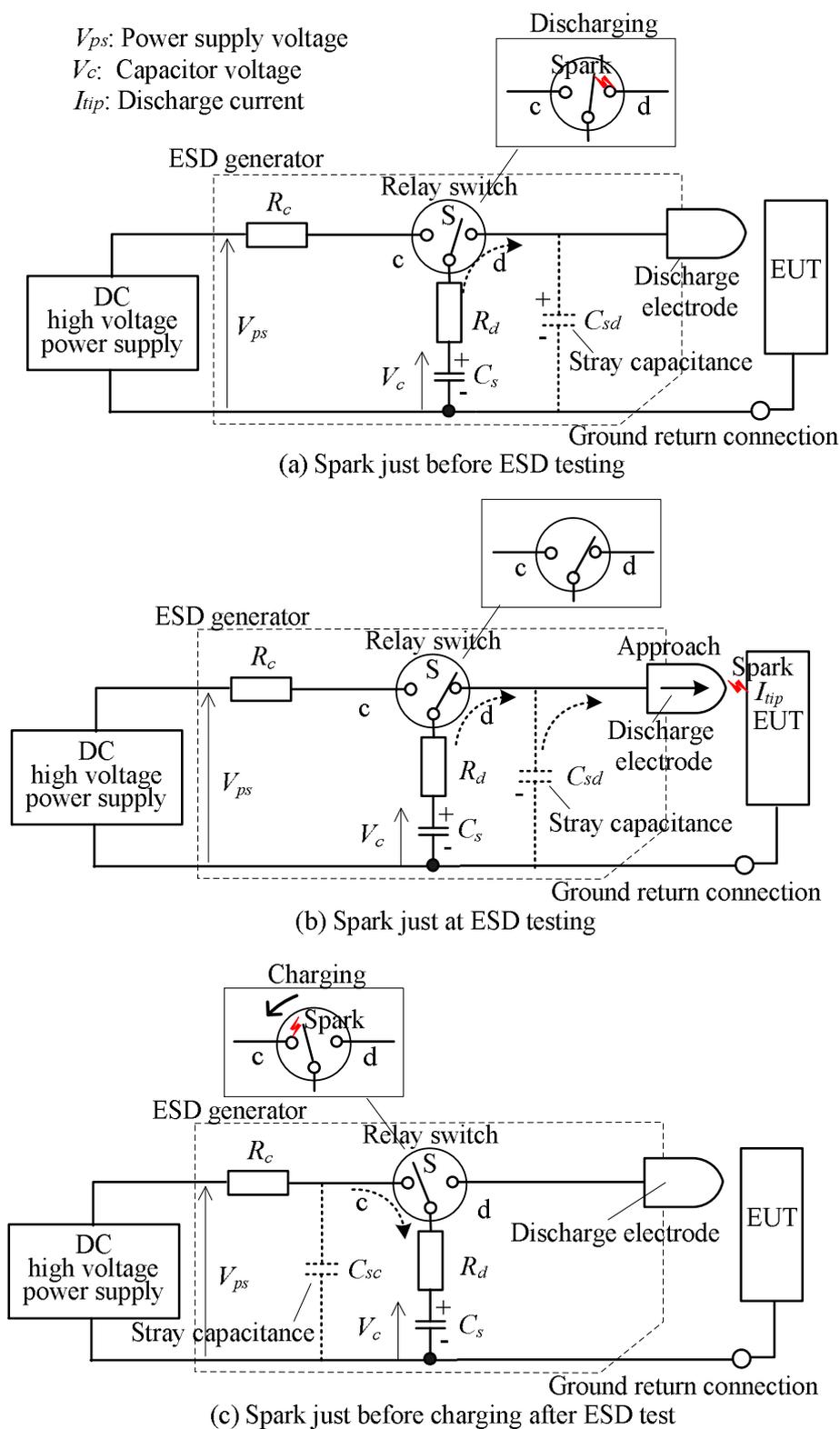


Fig. 3-3 Source model of EM noises due to sparks (a) just before ESD testing , (b) Just at ESD testing and (c) just before charging after ESD test for air discharge.

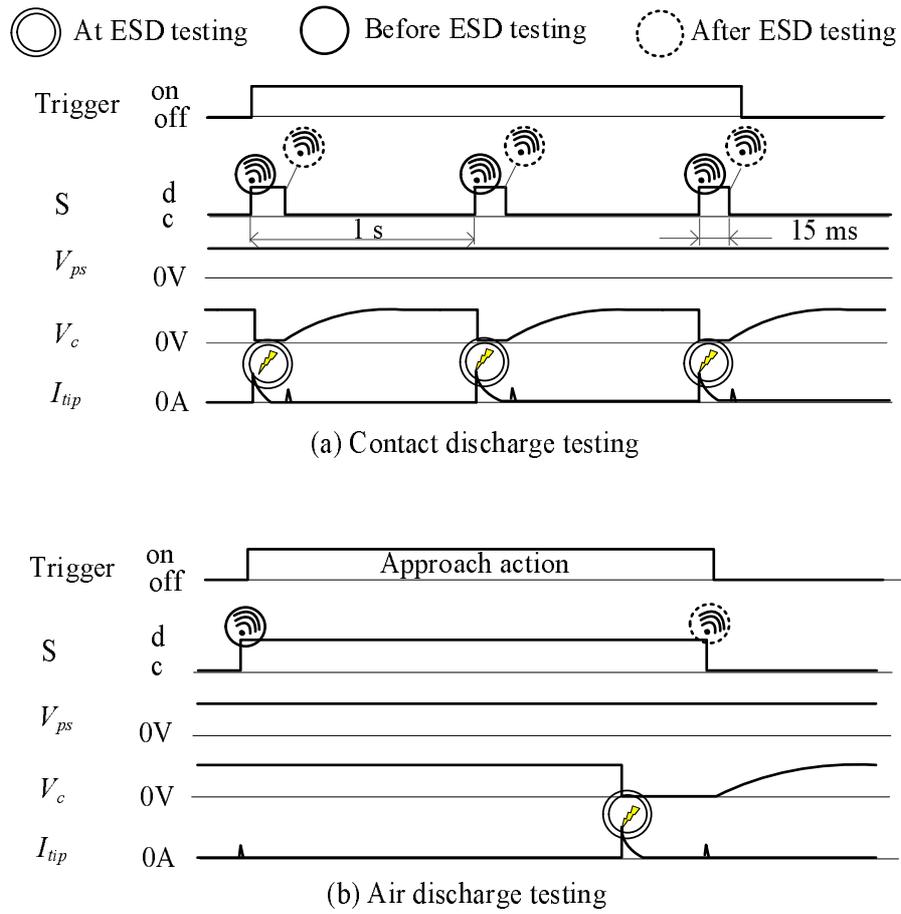


Fig. 3-4 Functional sequences and generation timing of EM noises for (a) contact discharge and (b) air discharge during ESD testing.

3.3. 実験検証

3.3.1 セットアップ及び測定方法

Fig. 3-5 に IEC 61000-4-2 に準拠した ESD 発生器 (Noiseken ESS-2000AX 及び TC-815R) からの電磁ノイズである近傍磁界の測定方法を示す。EUT の代わりにファラデーケージに取り付けた IEC 61000-4-2 で規定する電流ターゲット (Noiseken 06-00067A) を用いる。この電流ターゲットは、入力抵抗 2.04Ω 、伝達係数の周波数平坦性は、DC から 1 GHz まで ± 0.5 dB 以内、4 GHz まで ± 1.2 dB 以内となっている。ここではファラデーケージ及び電流ターゲットを、EUT とみなしている。ESD 発生器からの電磁ノイズは、直径 10 mm のシールドドローブコイルの磁界プローブをファラデーケージのグラウンド面及び ESD 発生器よりそれぞれ 50 mm 離れた位置に設置して測定する (Fig. 3-5 参照)。磁界プローブは、放電電極の放電電流による磁界が最大となるようにプローブの面を平行に設置している。

電磁ノイズの測定の前に、磁界プローブの周波数特性を 50Ω マイクロストリップラインを用いて測定した。Fig. 3-6(a) 及び Fig. 3-6(b) に測定方法とその測定結果を示す。0.6 GHz~3 GHz の範囲でほぼ平坦な周波数特性を示し、規格で規定する接触放電の第一ピークの放電電流波形から放出する電磁ノイズ測定の周波数帯域としては、十分な特性となっている。

接触放電の測定では ESD 発生器の円錐形状の放電電極を電流ターゲットに接触させる。気中放電での測定は、半球先端の放電電極を用いて、電流ターゲットの中心電極から 10 mm 離れた位置から、およそ 100 mm/s の移動速度で電流ターゲットに接触するまで移動させる。この状況のため、気中放電では磁界プローブと ESD 発生器との距離は、試験時の電磁ノイズの発生以外は、ESD 発生器が電流ターゲットの接触位置より 10 mm 分、移動している。電流ターゲットに接続したデジタルオシロスコープ (LeCroy Wave-Pro 760Zi 周波数帯域: 6 GHz, サンプリング周波数: 40 GHz) をファラデーケージのシールド内に設置して測定した。なお測定は、0.2 kV~4.0 kV の充電電圧の範囲とこれとは異なる日に、0.2 kV~15 kV の範囲での測定をおこなった。前者及び後者の測定時の気温と相対湿度は、それぞれ 25.0 °C, 55 % 及び 16.7 °C, 36 % であった。

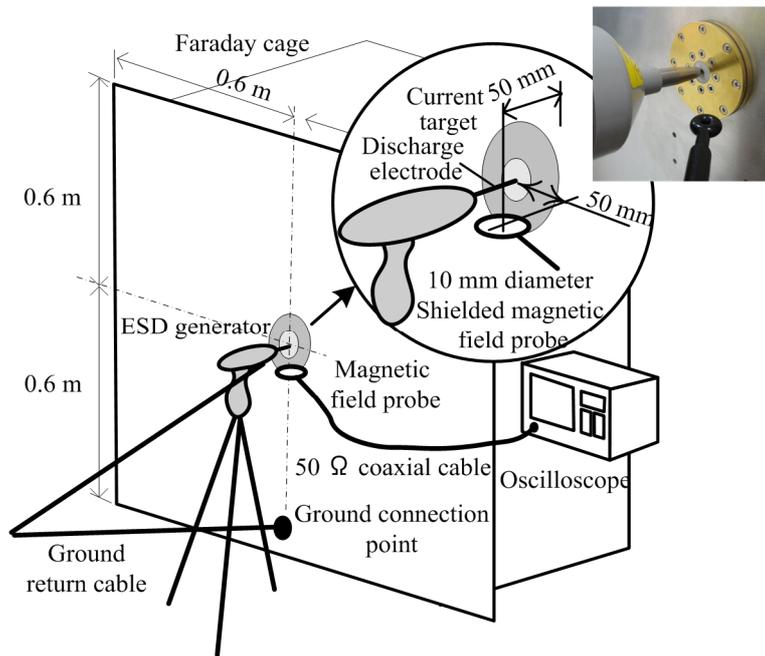


Fig. 3-5 Measurement setup for magnetic near field from ESD generator.

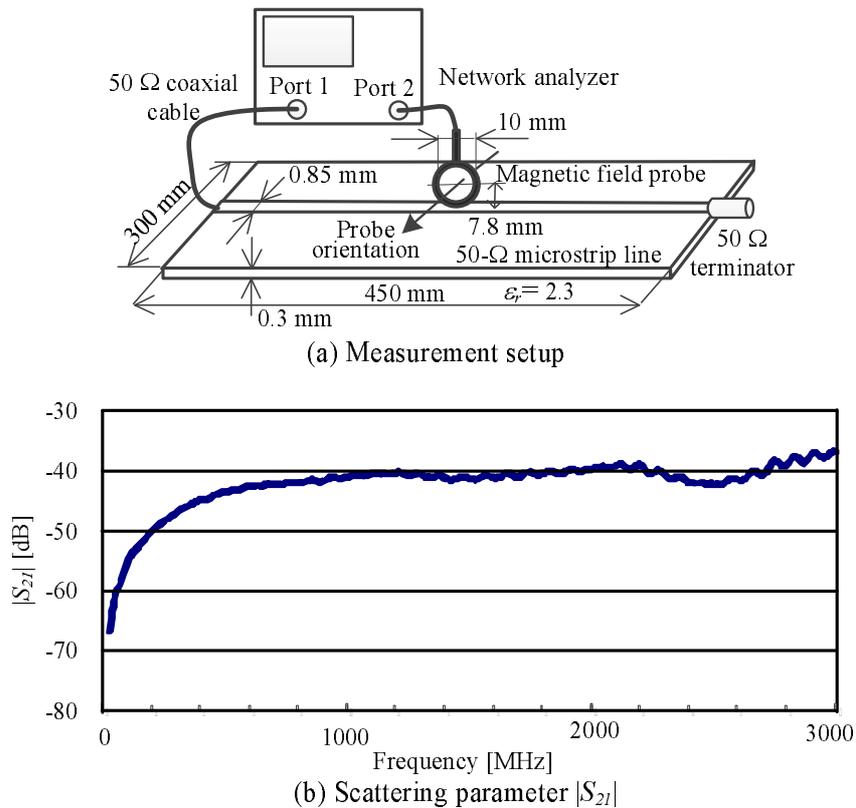


Fig. 3-6 (a) Measurement setup for output response of magnetic field probe to sinusoidal current flowing on microstrip line and (b) S_{21} frequency characteristics.

3.3.2 測定結果と考察

Fig. 3-7に制御シーケンスに従った4 kVの接触放電での電磁ノイズの測定波形を示す。Fig. 3-7(a)は、ESD試験時とその直前の電磁ノイズを、Fig. 3-7(b)は、ESD試験直後の電磁ノイズを示す。これらの波形は、不活性ガスを充填した高電圧リレーの動作に伴う接点間の微小ギャップ間の火花放電による電磁ノイズを示している。ESD試験時及び直前の電磁ノイズ波形のピークは、直後の電磁ノイズの波形に比べて4倍となっていることがわかる。興味深い点は、ESD試験時及び直前の電磁ノイズの波形は、400 MHzの減衰振動波となっている。しかし直後の電磁ノイズの波形の振幅は小さいが、非常に高い周波数の振動波となっているため、ピーク振幅が小さくてもEUTが誤動作する原因となる可能性が高い。

気中放電での制御シーケンスに従った4 kVの電磁ノイズの測定波形をFig. 3-8に示す。Fig. 3-8(a)は、ESD試験直前、Fig. 3-8(b)はESD試験時、そしてFig. 3-8(c)は、ESD試験直後の電磁ノイズの波形を示す。ESD試験時の波形振幅が一番大きく直前の電磁ノイズ振幅は、直後のそれより数倍大きい。直後の波形は、接触放電での直後の波形と動作的に同等なため、類似している。

上記のノイズピークと充電電圧との関係を明らかにするため、接触放電及び気中放電での充電電圧に対するノイズピークの振幅を測定した。その結果を接触放電はFig. 3-9に、気中放電はFig. 3-10に示す。このノイズピークは、文献[6]の異なる日に測定したそれぞれ0.2 kV～4 kV [Fig. 3-9 (a)及びFig. 3-10 (a)]及び0.2 kV～15 kV [Fig. 3-9 (b)及びFig. 3-10 (b)]の範囲の電圧で20回放電の平均から求めた。Fig. 3-9 (b)及びFig. 3-10 (b)のグラフのエラーバーは、20回の測定の標準偏差である。

Fig. 3-9 (a) 及び Fig. 3-9 (b)は、接触放電のノイズピークであり、この2つの結果は一致し、全て充電電圧に比例している。Fig. 3-10 (a) 及び Fig. 3-10(b)は、気中放電時のノイズピークであり、直前及び直後のノイズピークは、ほぼ一致しているが、試験時のノイズピークは、Fig. 3-10 (a)では、2.3 kV程度で、Fig. 3-10 (b)では、4 kV程度で接触放電の試験時のノイズピーク（破線）と反転している。またFig. 3-10 (a)では、1 kVで誘導電圧のピークとなるが、Fig. 3-10 (b)では、3 kVでピークとなり、そのピークの電磁ノイズは、接触放電の電磁ノイズの倍の差が発生している。これは気中放電において電磁ノイズの影響が異なる電圧ポイントで厳しいことを示している。この結果は、文献[6]とつぎの理由からおおむね一致する。

この磁界ループコイルによる誘導ノイズ電圧は、ループ面に鎖交する磁束の時間微分であり、EUTを模擬する電流ターゲットに流れる気中放電の電流の強さに比例する。文献[7]によれば、気中放電において放電電流の時間微分が2 kV～3 kVの充電電圧で最大に達し、ESD耐性試験として厳しいものとなる。加えて、Fig.

3-10で観測した気中放電の現象は、つぎのように定性的に説明できる。気中放電での電磁ノイズは、放電電極先端とEUTとの間に発生したスパークによる放電電極に流れる放電電流に支配的である。低い充電電圧時には、放電電極とのギャップは小さく充電電圧に伴い増大する。高い充電電圧時には、大きなギャップによるスパークとなり、このギャップの火花抵抗が大きくなることで、放電電流は、緩やかになる[7], [8]。この結果、ある電圧から充電電圧の上昇に伴い、誘導ノイズは減少する。ESD発生器の試験時の誘導電磁界の同様の現象は、文献[9]でも示されている。またFig. 4-10(b)における気中放電時の磁界プローブの誘導電圧が、6 kV付近から著しく低下する特性については、磁界測定に用いた磁界プローブの周波数特性[Fig. 3-6(b)]のおよそ500 MHz以下の感度低下によるものと推定する。文献[7]によれば、7 kV以上の気中放電では、接触放電電流の立ち上がり時間である800 psを超え、15 kVでは10 ns程度になる報告があり、この場合、30 MHz程度まで磁界プローブの特性を維持する必要がある今後の課題である。

今回の測定データによれば、4 kV~6 kV以上の試験においては、直前及び直後の電磁ノイズがESD試験時のそれを上回ることに注意が必要である。またこれらは、4 kV~6 kV以上の気中放電試験では、ESD発生器の電極先端に流れる放電電流より、電磁ノイズの方が支配的かもしれない。つまり4 kV~6 kV以上の気中放電では、ESD試験時ではなく、その直前、直後の電磁ノイズによりEUTが誤動作していることを示唆している。

実際のESD現象による電磁ノイズは、空気中の絶縁破壊時のみ発生するが、ESD発生器内部の高気圧の不活性ガス内のリレースイッチでのスパークを抑制できれば電磁ノイズが減少する。全ての電磁ノイズは制御できないものの、リレースイッチSがdからcに移動し蓄積コンデンサ C_s を充電するときの電磁ノイズは、電源の電圧 V_{ps} を0Vに制御することで解決できる。

Fig. 3-11 (a) 及び Fig. 3-11 (b) は、それぞれ接触放電及び気中放電の新たな機能制御シーケンスを示す。この制御シーケンスに従えば、リレースイッチSの接点がdからcに移動するとき、 C_s の電源電圧 V_{ps} は、供給していないため C_s に突入電流が流れず、ESD試験後の直後の電磁ノイズが減少する。上記の制御シーケンスの効果を確認するため、充電電圧に対する接触放電と気中放電のピークを測定した。その接触放電及び気中放電の結果をFig. 3-12(a)及びFig. 3-12(b)にそれぞれ示す。提案した制御シーケンスは、接触放電及び気中放電の試験直後の電磁ノイズを大幅に減少させることがわかる。

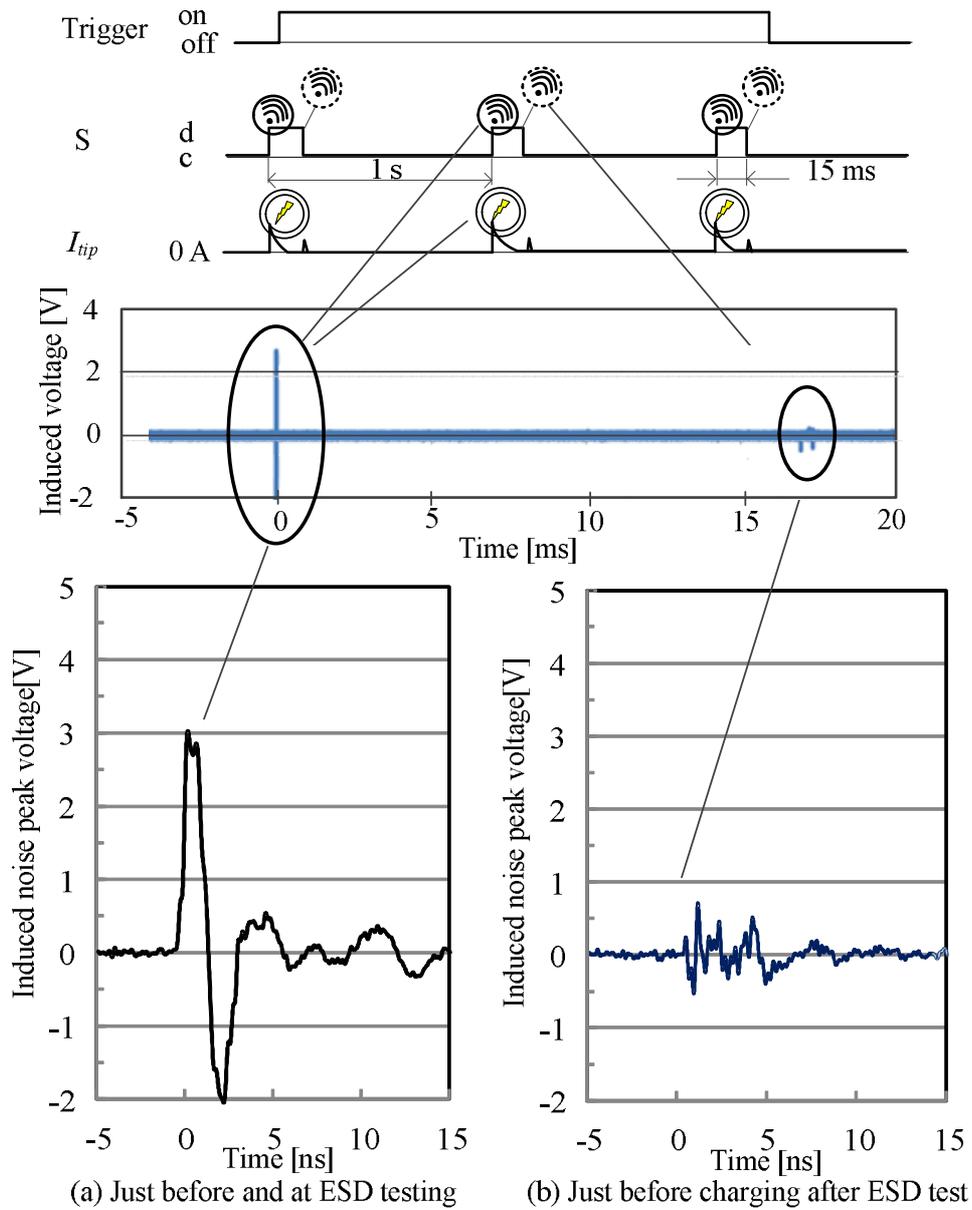


Fig. 3-7 Measured waveforms of induced noise voltage during 4 kV contact discharge testing using magnetic field probe.

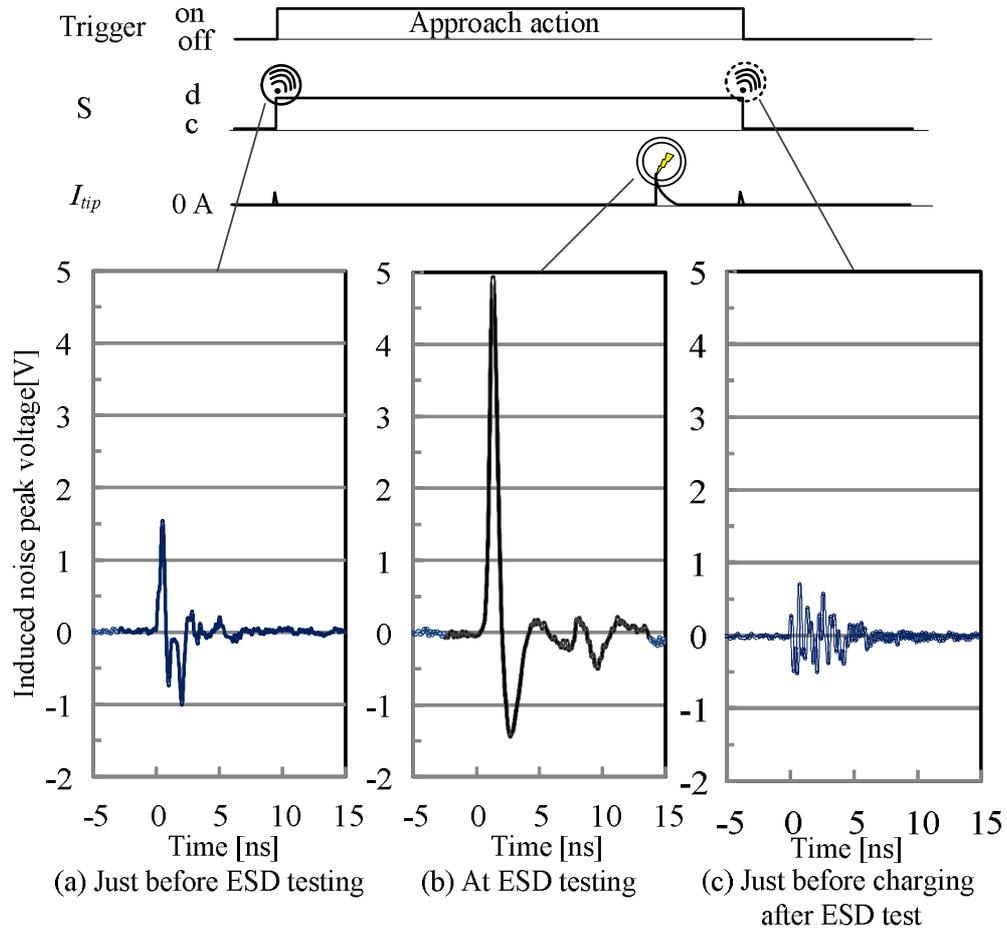
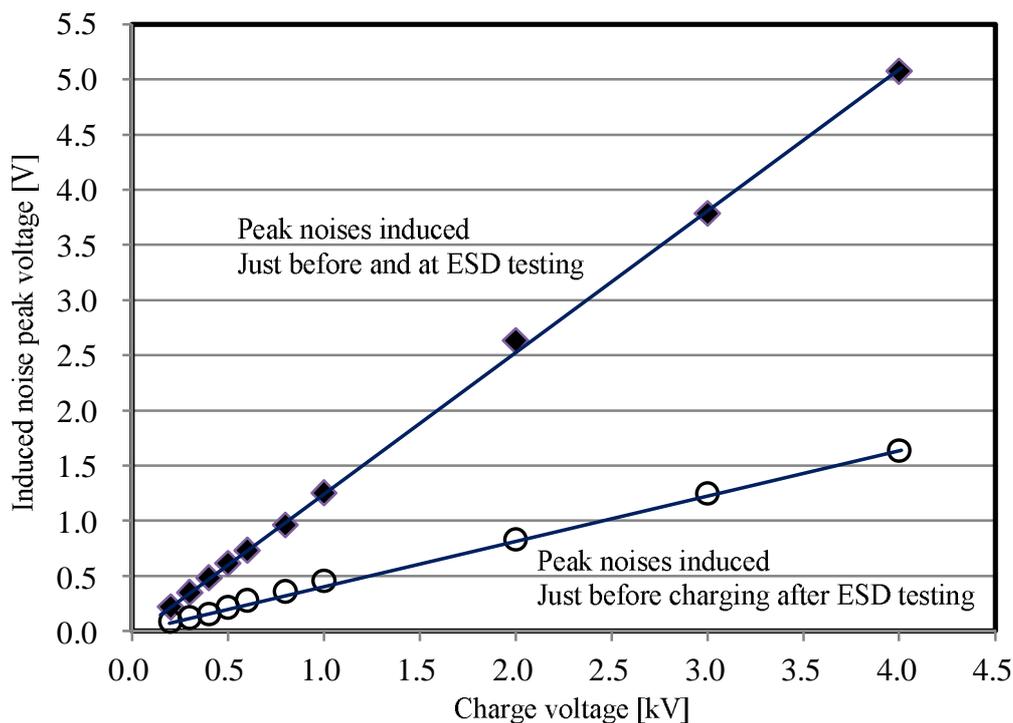
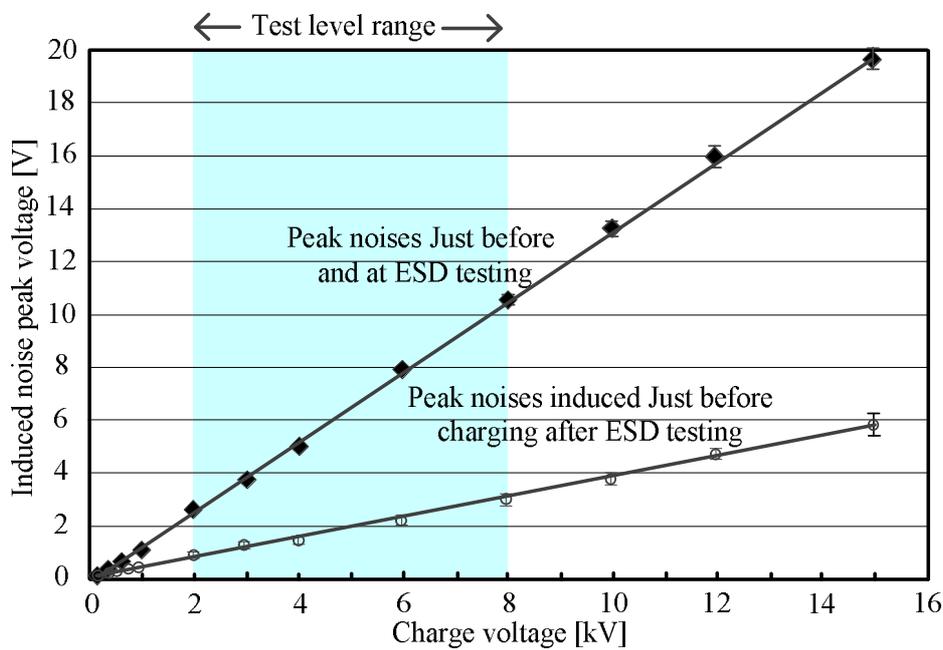


Fig. 3-8 Measured waveforms of induced noise voltage during 4 kV air discharge testing using magnetic field probe.

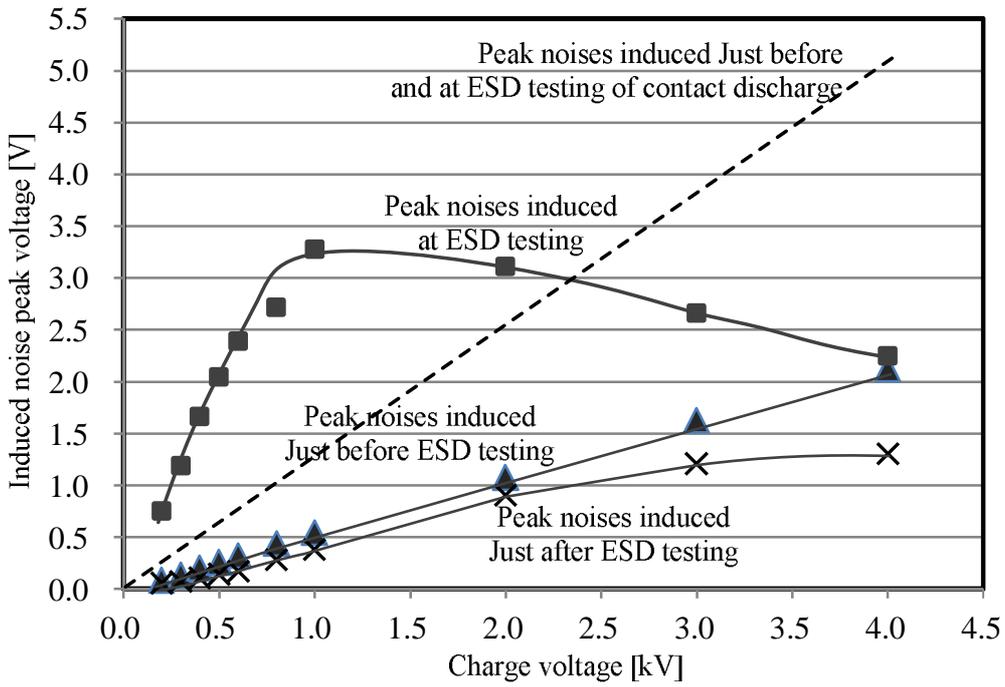


(a) Charge voltage V_c : 0.2 kV~4 kV

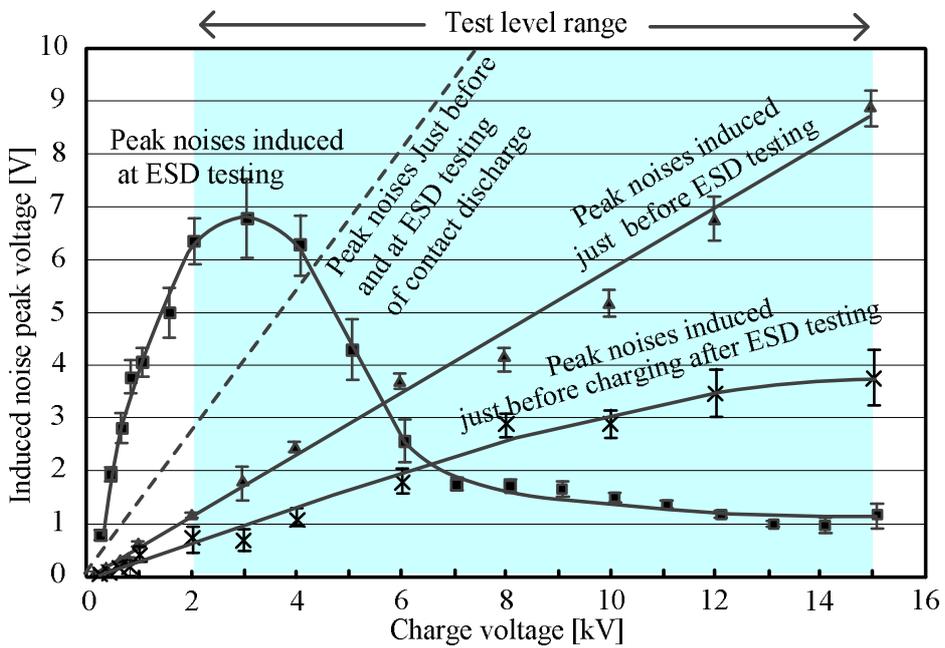


(b) Charge voltage V_c : 0.2 kV~15 kV

Fig. 3-9 Dependence on charge voltages of induced noise peak voltages during contact discharge testing.



(a) Charge voltage V_c : 0.2 kV ~ 4 kV



(b) Charge voltage V_c : 0.2 kV ~ 15 kV

Fig. 3-10 Dependence on charge voltages of induced noise peak voltages during air discharge testing.

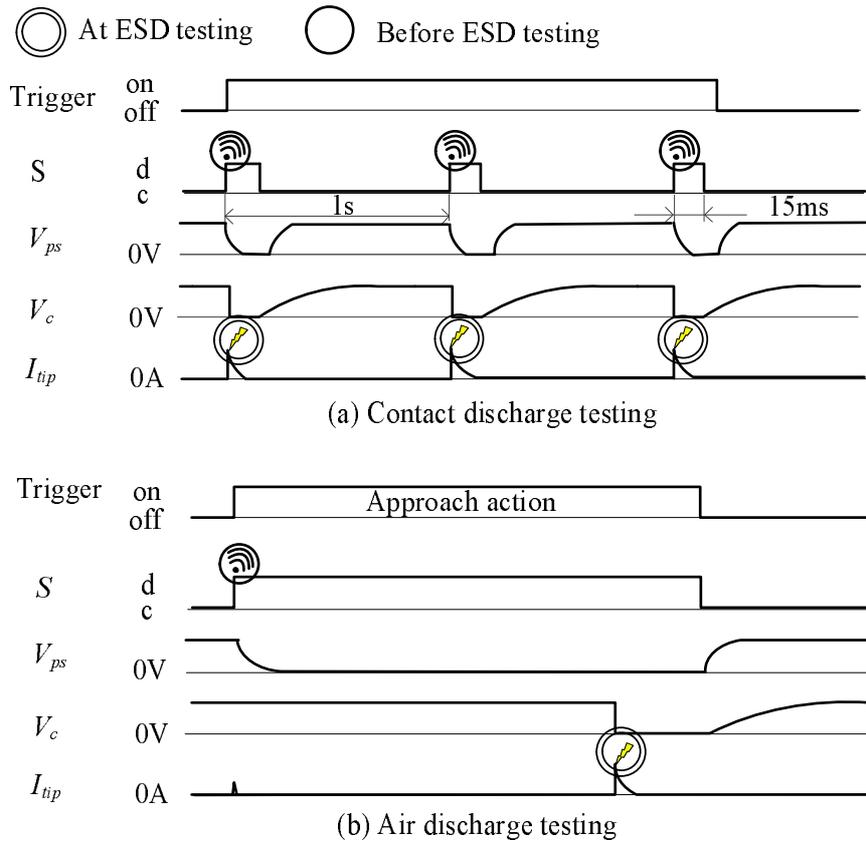
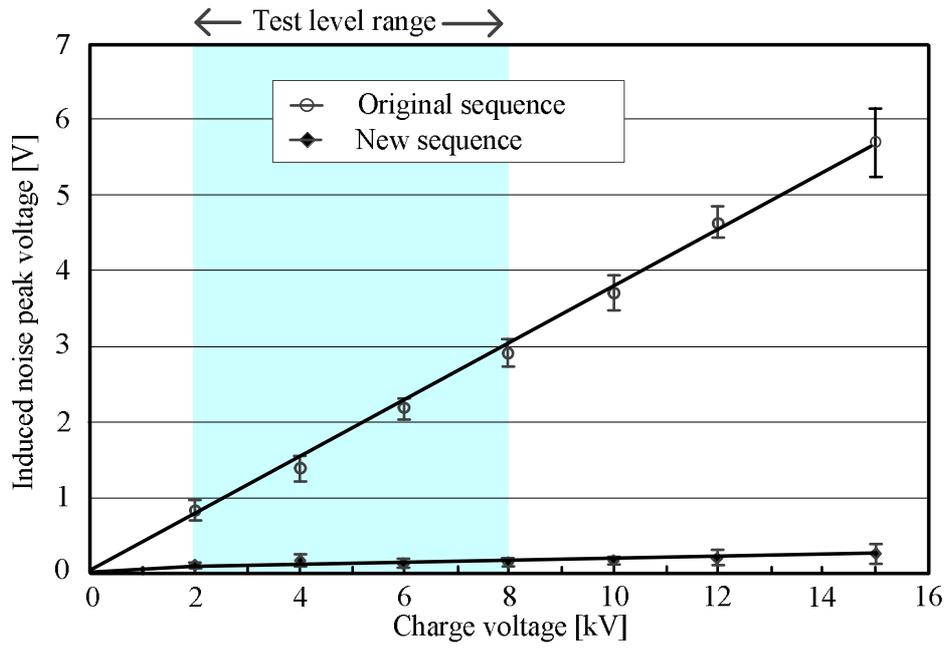
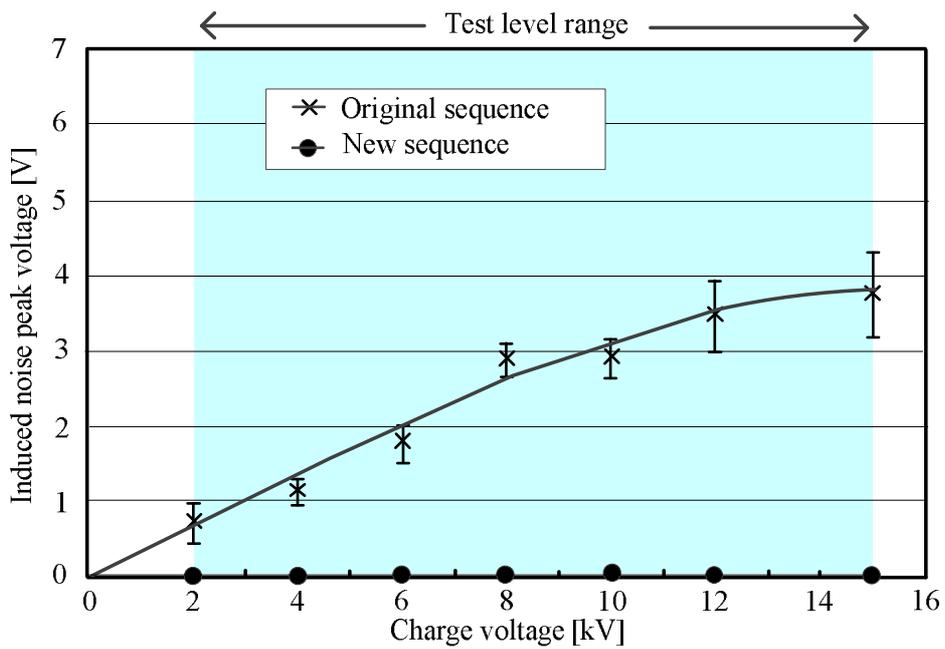


Fig. 3-11 New sequences for suppressing EM noises just before charging after ESD tests during (a) contact discharge and (b) air discharge testing.



a) Contact discharge testing



b) Air discharge testing

Fig. 3-12 Comparison of new sequence suppressing EM noises generated after ESD test in (a) contact discharge and (b) air discharge modes.

3.4 むすび

ESD イミュニティ試験の ESD 発生器からの電磁ノイズは、DC 高圧電源及びリレースイッチの機能制御シーケンスと関連していることがわかり、接触放電及び気中放電発生モデルを確立した。これは磁界プローブを用いて ESD 試験中の ESD 発生器からの電磁ノイズを測定し、その結果、接触放電及び気中放電の両方でリレースイッチ動作による ESD 試験の直前直後に、電磁ノイズが発生していることを確認した。接触放電では、充電電圧に伴いノイズピークが増大し、ESD 試験及び直前のノイズピークが直後のそれより、相対的に大きく、気中放電では、充電電圧に伴って増大することはない、充電電圧が 1 kV から 3 kV 時に最大となる。また充電電圧 4 kV から 6 kV 以上では、ESD 試験時のノイズピークより他の 2 つのノイズピークが大きくなる。

ESD 試験の後の直前の電磁ノイズを減少させるために、リレースイッチの新たな機能制御シーケンスを提案し、その電磁ノイズ測定から、提案シーケンスの有効性を確認することができた。

新たな課題として、気中放電の試験時の電磁ノイズの大きさは、気象条件である温度・相対湿度によると思われる条件の違いでの大きな差を概略把握し、更なる解明が必要となる。

参考文献

- [1] IEC (International Electrotechnical Commission), "IEC 61000: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test", Edition 2.0, December 2008.
- [2] J. Koo, Q. Cai, K. Wang, J. Maas, T. Takahashi, A. Martwick and D. Pommerenke: "Correlation between EUT failure levels and ESD generator parameters", IEEE Trans. EMC, Vol.50, No.4, pp.794-801 November 2008.
- [3] J. Koo, Qing Cai, G. Muchaindy Martwick, K. Wang and D. Pommerenke: "Frequency-domain measurement method for the analysis of ESD generators and coupling", IEEE. Trans. EMC, Vol.49, No.3, pp.504-511 August 2007.
- [4] 内村圭一, 相田貞蔵, 高倉英也, 寺田国広: 「銀接点の開離時と閉成時の雑音電流スペクトルの比較」, 信学論, Vol. J70-C, No.4, pp.569-571, 1987.
K. Uchimura, T. Aida, H. Takakura and K. Terada: "Comparison of Noise Current Spectra on Silver Contact Break with those of Contact Closure".
- [5] K.Uchimura:"Electromagnetic Interference from Discharger Phenomena of Electric Contacts," IEEE Trans. EMC, Vol.32, No. 2, pp.86-88,1990.
- [6] T. Ishida, Y. Tozawa, M. Takahashi, O. Fujiwara and S. Nitta, "A Measurement on Electromagnetic Noises from ESD Generator just Before and After

ESD Testing”, Proceedings of 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility Tokyo (EMC'14/Tokyo), 16A2-B2, pp.737-740, 2014.

- [7] 森育子, 藤原修: 「放電電流波形の広帯域測定に基づく ESD に対する IEC イミュニティ試験の厳しさ評価」, 電学論 A, 130 巻 5 号, pp.457-461, 2010.
"Severity Evaluation of the IEC Immunity Test against ESD based on Wideband Measurement of Discharge Current Waveforms".
- [8] O.Fujiwara: "An analytical approach to model indirect effect caused by electromagnetic discharge", IEICE Trans. Commun., Vol.E79-B, No.4, pp.483-489, 1996-04.
- [9] P.F.Wilson and M.T.Ma: "Field radiated by electrostatic discharges", IEEE Trans. EMC, EMC-33,1, pp.10-18, 1991-02.

第4章

ESD 耐性試験における微小ギャップを伴う放電電流の測定と現象解析

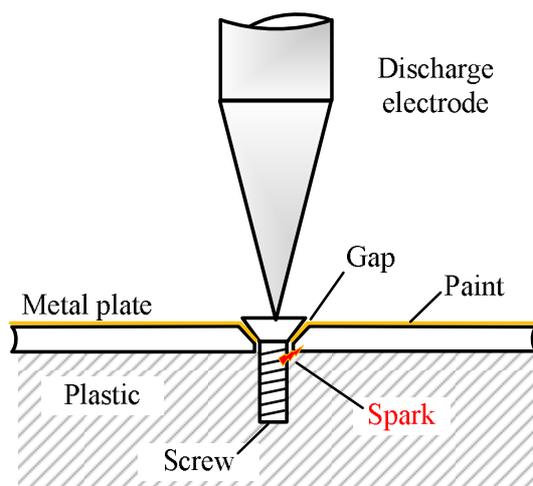
4.1 はじめに

帯電した人体からの電子機器に対する ESD に対する耐性試験は、IEC 61000-4-2[1]によって規定されている。自然界で発生する人体からの ESD 現象は、帯電した手（指）で電子機器に触れようとするアプローチ動作において、ある距離に達したときに絶縁破壊によるスパーク（気中放電）が発生して機器へ放電電流が流れるが、IEC では、気中放電の試験再現性の悪さから、あらかじめ ESD 発生器の放電電極を電子機器に接触した状態で放電電流を注入する「接触放電」を推奨している。この試験方法は、電子機器の金属筐体に ESD 発生器の放電電極を接触させ、発生器内の高気圧ガス封入りレースイッチによる安定した放電による電流注入をおこなう試験であり、自然界で発生する気中放電とは放電特性[2], [3]は、大きく異なるが、接触放電は、ESD 試験を安定した状態で再現性よく評価できることが国際規格上の利点となっている。

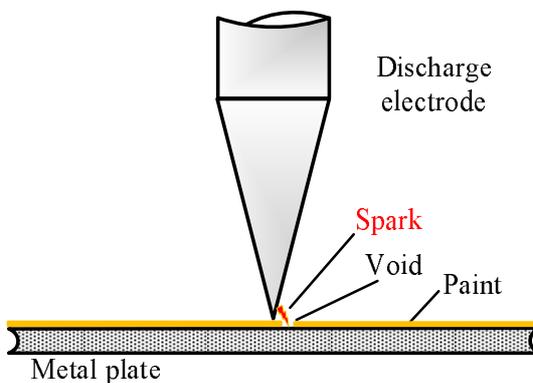
一方、ESD 発生器の電子機器への接触放電試験において、誤動作しなかった試験電圧で急に誤動作が発生する現象が報告される場合がある。接触放電の試験においては、放電電極を電子機器へ接触した際に微小な空隙ができると放電電流が増加することが経験的に知られている。たとえば、試験作業者の不注意で放電電極と金属筐体との電氣的接触が不十分であったり、あるいは絶縁塗装された金属筐体では、電極先端部は、塗装部位を貫通させて金属部に接触させるが、この貫通が十分でなかった場合などには、試験実施時に空隙が生ずる。また、放電電極と金属筐体との電氣的接触が良好であったとしても、機器筐体のねじの締め付けが不十分であると、結果として接触放電時に空隙が生まれてしまう恐れがあり (Fig. 4-1)、このようなことが上述した誤動作の原因ではないかと推察されている。しかしながら、放電電流を増大させる機構には不明の部分が多く、このことを、ESD 発生器を対象として検討した例は筆者の知る限りない。なお、電子機器に使用するコネクタの緩みで接触面でのインダクタンスと接触抵抗がわずかに増加し、これが放射電磁雑音の増大や耐性低下を招くとの報告例[4], [5]はあるが、ESD 発生器の放電電極と電子機器との接触部位における微小な空隙（以降はギャップ

と呼ぶ)の存在が放電電流にどのような影響を及ぼすかの報告例は、筆者の知る限り見当たらない。

本章では、現用の ESD 発生器の接触放電耐性試験において、意図的に設けた微小ギャップを介して放電電流を測定し、上述した現象の考察結果を示す。



(a) Screw through paint coating metal plate



(b) Paint coating metal plate with void

Fig. 4-1 Example of actual phenomena of contact discharge with small gap.

4.2 ESD 発生器と放電電流の規定

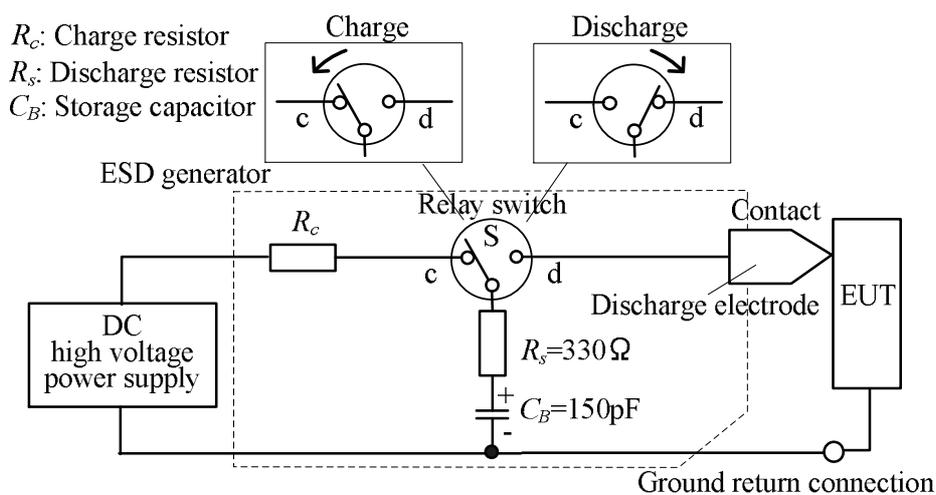
4.2.1 ESD 発生器の構造

ESD 発生器の概略構成図を Fig. 4-2 に示す。Fig. 4-2(a) は、接触放電、Fig. 4-2(b) は、気中放電の簡略回路であり、図に示すように、両者の基本構造は同じであるが、ステンレス製の放電電極は、先端部分が前者は円錐状、後者は半球状と異なっている。人体の帯電を模擬したエネルギー蓄積コンデンサ C_B と放電抵抗 R_s は、それぞれ 150 pF, 330 Ω を代表値としている。この C_B には、試験直前には高電圧電源から充電抵抗 R_c を経由して規定の試験電圧に充電が完了している。接触放電では、Fig. 4-2(a) に示すように、あらかじめ放電電極を EUT に接触した状態で、リレースイッチを放電電極側に切り替えることで、 C_B の電荷が R_s を経由して EUT に流れる。気中放電では、Fig. 4-2(b) に示すように、放電電極が EUT から離れた状態で、リレースイッチを切り替える。この状態で、半球形状の放電電極が試験電圧に帯電した状態を維持しながら、EUT にアプローチする段階で空気中での絶縁破壊によりスパークが発生し、EUT へ電流が流れる。

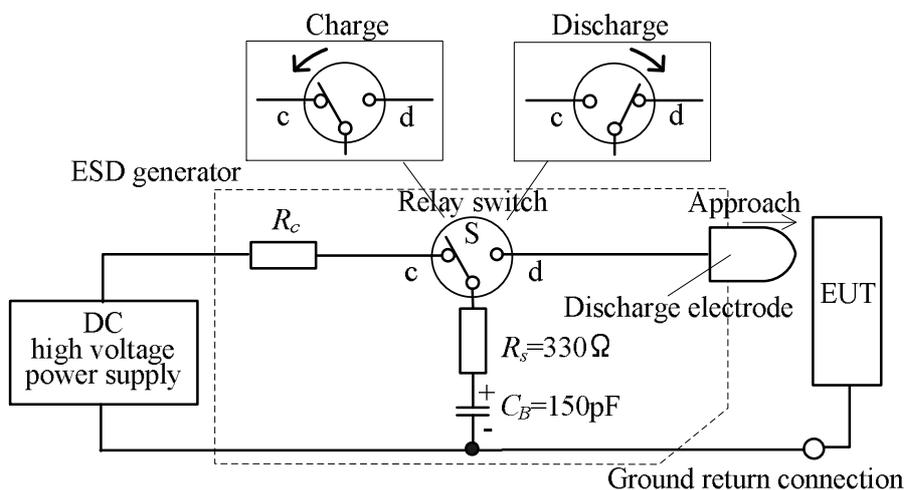
4.2.2 放電電流の規定

Fig. 4-3 に、IEC 61000-4-2 での ESD 発生器の校正のために規定された接触放電の放電電流波形例（試験電圧：4 kV）とその校正パラメータを試験電圧に対して示す。Fig. 4-3 に示すように、接触放電に対する放電電流波形にはふたつのピークがある。最初のピーク波形は、 C_B の電荷によるものでなく、ESD 発生器並びに放電電極とファラデーケージのグラウンド板との浮遊容量に蓄積された電荷による放電によって発生するため鋭く立ち上がるが、二つ目のピーク波形は、 C_B の電荷が放電抵抗 R_s と 2 m のグラウンドリターンケーブルを經由して放電するため、緩やかに立ち上がっている [6],[7]。IEC 規格では、Fig. 4-3 の表のように立ち上がり時間を 0.8 ns \pm 25 % とし、放電開始から第一ピーク値、30 ns と 60 ns での電流値に許容範囲を設けて規定している。Fig. 4-4 は放電電流の測定方法を示す。この図に示すように、放電電流は、国際規格に規定した 1.2 m 平方以上のグラウンド板と中央に取りつけた電流ターゲットに印加して流れた放電電流を、50 Ω 同軸ケーブルを通してファラデーケージ内のオシロスコープで観測する。この電流ターゲットは、 $r=2.04 \Omega$ の抵抗でグラウンドに接続された同軸構造（中心電極の先端部直径：5 mm）となっており、伝達インピーダンス（電流ターゲットへ注入される正弦電流の $Z_0=50 \Omega$ 負荷に現れる正弦電圧に対する比）は、Fig. 4-4 に示した等価回路から、 $V_0/i_d=r \cdot Z_0/(r+Z_0)=2.04 \Omega$ となるが、DC から 4 GHz まで平坦な周波数特性を備えている [8]。それ故に、放電電流 i_d が電流ターゲットに流れると、同軸ケーブルの 50 Ω 負荷に電圧 $V_0=2 \times i_d$ が現れるが、実際には電流ターゲット出力端に 50 Ω 入力 20 dB 減衰器をつなぎ、50 Ω 同軸ケーブルと 50 Ω 入力の 6dB

減衰器を介してオシロスコープ（ $50\ \Omega$ 入力）に接続しているため、 V_0 はオシロスコープ上では $2 \times i_d \times 0.1 \times 0.5 = i_d / 10$ として測定される（Fig. 4-5 参照）。なおターゲットの抵抗値 r は、高周波領域まで同じ抵抗値を保証するものではないが、 $4\ \text{GHz}$ までの平坦性が確保されていることで、 $2.04\ \Omega$ を前提として処理をしている。

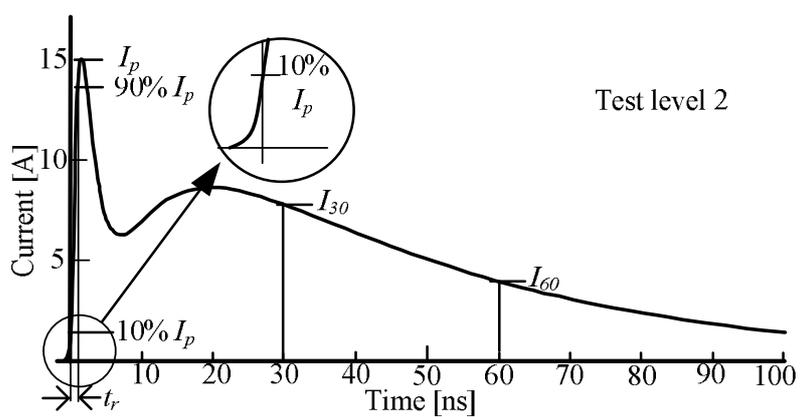


(a) Contact discharge



(b) Air discharge

Fig. 4-2 Simplified structure of ESD generator and equivalent circuit in the low frequency range.



Level	Charge voltage kV	First peak Current I_p $\pm 15\%$ A	Rise time t_r $\pm 25\%$ ns	Current at 30 ns I_{30} $\pm 30\%$ A	Current at 60 ns I_{60} $\pm 30\%$ A
1	2	7.5	0.8	4	2
2	4	15	0.8	8	4
3	6	22.5	0.8	12	6
4	8	30	0.8	16	8

Fig. 4-3 Contact discharge current waveform and its specification using current target of ESD generator.

4.3 微小ギャップを伴う放電電流の測定

4.3.1 測定方法

ESD 発生器の接触放電に対して、微小ギャップを伴う放電電流は、Fig. 4-4 に示す国際規格で規定した電流ターゲットを用いて測定する。その方法を Fig. 4-5 に示す。電流ターゲットに中心電極の直径と同等の 6 mm 直径の金属球（クロムメッキの鋼球）を接続し、球状電極先端との間に設けた微小ギャップを介して放電電流を測定する。金属球を用いた理由は、つぎのとおりである。通常、電流ターゲットは、接触放電に対してのみ使用するため、電流ターゲット中央の電極表面は、平面でかつ ESD 発生器の接触放電用の尖った先端部を接触させるために筒形状のくぼみが設けられている。したがって、放電電極から電流ターゲットへ微小ギャップを介して気中放電させた場合には電極先端部と電流ターゲットのくぼみとの間に不均一な電界が生ずるために放電ギャップ長が試験毎に変わってしまう恐れがある。本研究では、実験的に上記のように、ESD 発生器の放電電極と電流ターゲットとの間に中心電極のサイズと同等の金属球を設け、これを対向電極とすることで安定した放電を実現した。

微小ギャップを伴った放電電流の測定には、ESD 発生器の放電電極は、接触放電用の円錐形状のものを使用し、ESD 発生器の動作は、正極性の接触放電モードを選択する。放電電極先端部と電流ターゲットに設けた球電極との距離は、隙間ゲージによって間隔を確認し、30 μm 、50 μm 、100 μm 、200 μm 、500 μm 及び 1 000 μm とした。各設定ギャップ距離で接触放電に対する放電電流を、帯域 6 GHz（サンプリング周波数：40 GHz）のデジタルオシロスコープ（LeCroy Wave-Pro 760Zi）を用いて測定した。なお測定時の気温は、24.8 $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度は、44 %であった。

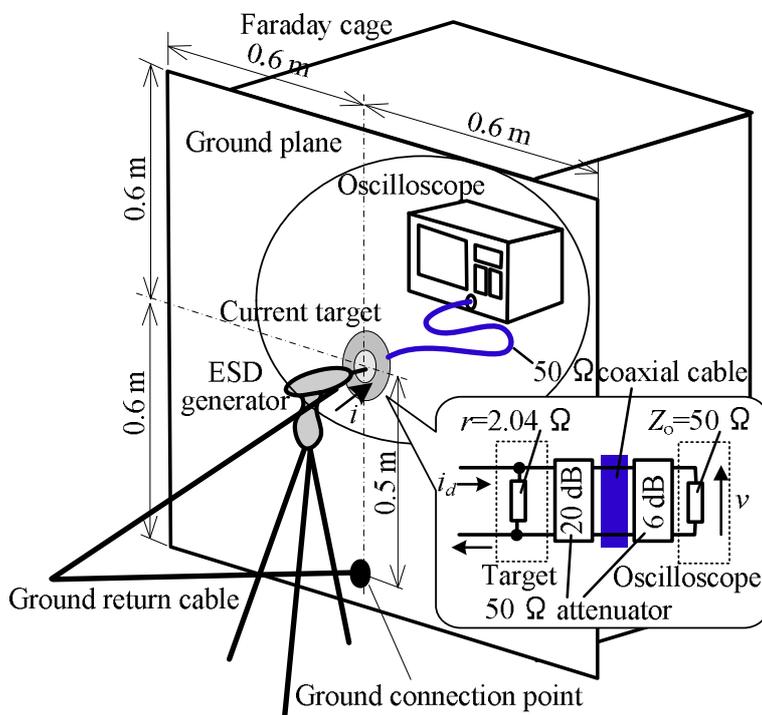


Fig. 4-4 Setup for discharge current calibration of ESD generator.

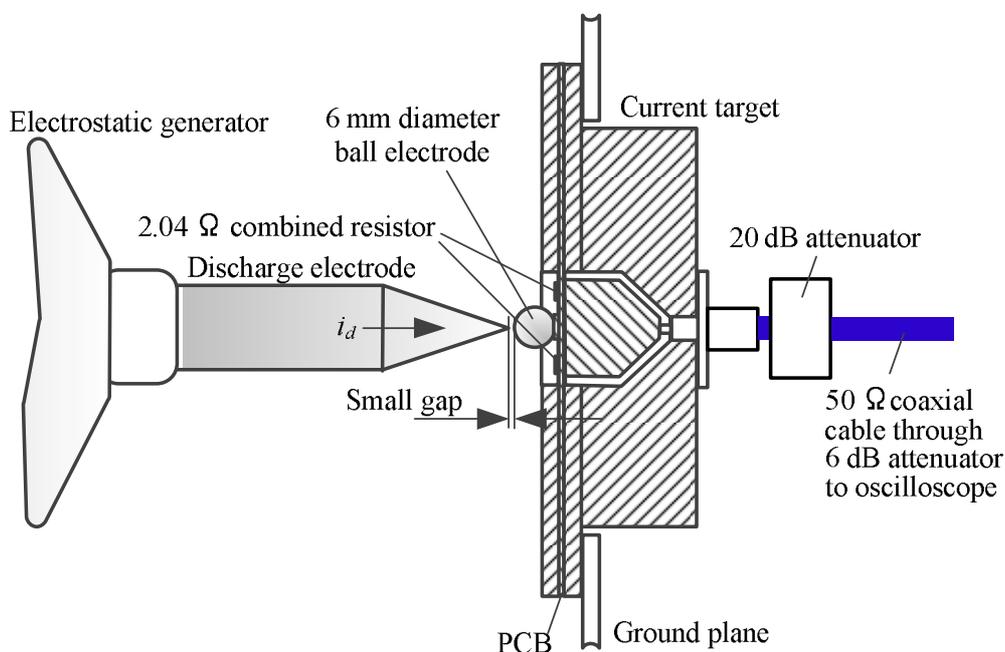


Fig. 4-5 Setup for contact discharge current through small gap measurement of ESD generator.

4.3.2 測定結果

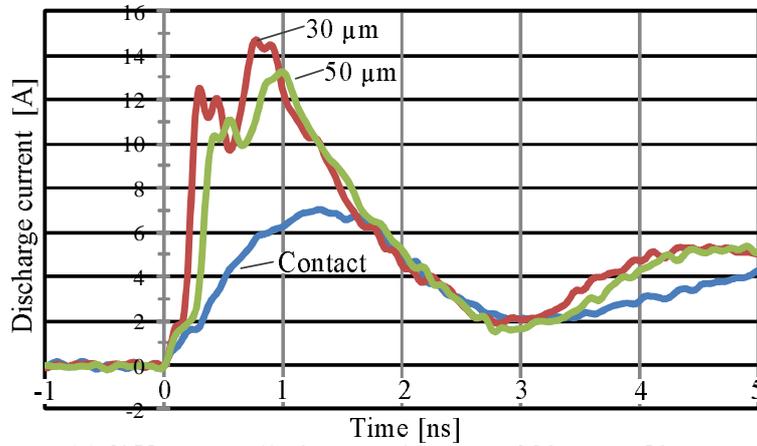
放電電流波形 30 μm , 50 μm , 100 μm , 200 μm , 500 μm 及び 1 000 μm に固定した微小ギャップを介しての 2 kV, 4 kV 及び 6 kV の放電電流波形の測定例を Fig. 4-6 に, 8 kV での放電電流波形の例を Fig. 4-7 に, また 8 kV での全体波形の例を Fig. 4-8 にそれぞれ示す。ギャップ長が大きくなると低い試験電圧では, 放電しないため, 放電が発生した波形のみ記録した。これらの放電電流波形は, ばらつきを含むため, 20 回の測定によって得られた代表的な波形を示している。各波形とも比較として IEC 61000-4-2 規定の接触放電に対する放電電流波形を "contact" (以降は単に接触放電とよぶ) として記載している。各試験電圧に対する微小ギャップを伴う放電電流波形は, つぎのような特徴をもつことがわかった。

- ・ 各試験電圧の共通事項として, ピーク電流は, 試験電圧が同じであっても接触放電の電流よりも大きく, ギャップ長によっては 2 倍程度に達する。
- ・ 各試験電圧の共通事項として, 接触放電の立ち上がり時間内 (0~1.0 ns) でギャップ長が短く試験電圧が低いほど複数のピークが現れ, ギャップ長が長く試験電圧が高いほどピーク数は減少し, 放電電流は接触放電の立ち上がり波形に近づく。
- ・ 最速の立ち上がり時間は, およそ 150 ps に達する。
- ・ ピーク電流は, 試験電圧が 2 kV と 4 kV ではギャップ長が短いほど増大するが, この傾向は 6 kV の 30 μm , 8 kV の 30 μm ~500 μm では必ずしも当てはまらない。
- ・ 8 kV の試験電圧では, ギャップ長が 1 000 μm の放電電流は接触放電と類似した波形になっている。さらに, この場合だけ 5 ns~10 ns 付近の電流波形には振動がみられない (Fig. 4-8)。

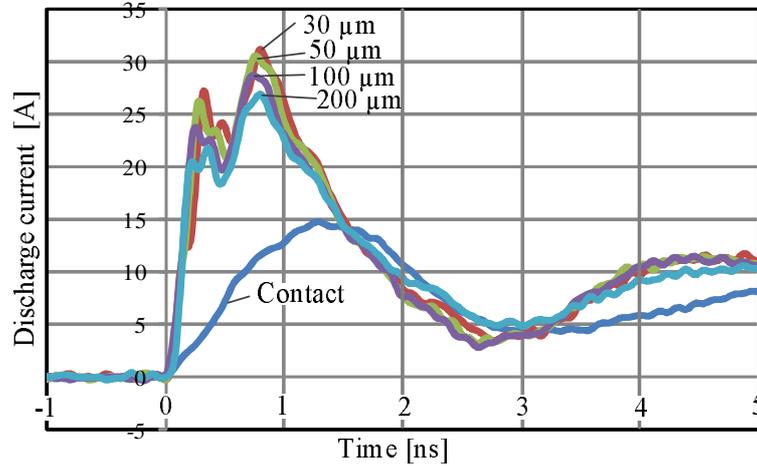
150 ps の立ち上がり時間を計測する測定器系の周波数特性は, ガウシアン分布に従えば, およそ 2.3 GHz の帯域が必要であるが, 電流ターゲット (4 GHz) 及びオスロスコープ (6 GHz) の特性から測定可能な領域となる。

取得した放電電流の各微小ギャップの試験電圧に対する放電電流のピーク変化 (平均値 \pm 標準偏差) をピーク電流の試験電圧依存性として Fig. 4-9 に示す。接触放電に対するピーク電流は試験電圧に比例して増大しているが, 微小ギャップを設けた放電電流のピークは, ほとんどの試験電圧で接触放電のそれを上回っており, 一定のギャップ長では試験電圧と共に上昇していることがわかる。

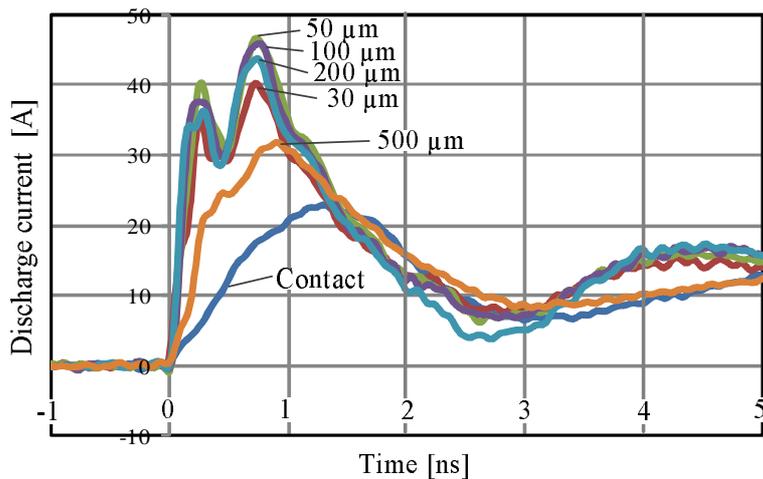
Fig. 4-10 にはギャップ長を横軸に, 縦軸にピーク電流を描いたピーク電流 (平均値 \pm 標準偏差) のギャップ長依存性を示す。ギャップ長 0 は, 接触放電に相当する。図から, ピーク電流は, 試験電圧に拘わらず, 30 μm ~200 μm 付近で最大となり, ギャップ長の増大と共に低下していることがわかる。



(a) 2kV contact discharges with gaps of 30 μm to 50 μm

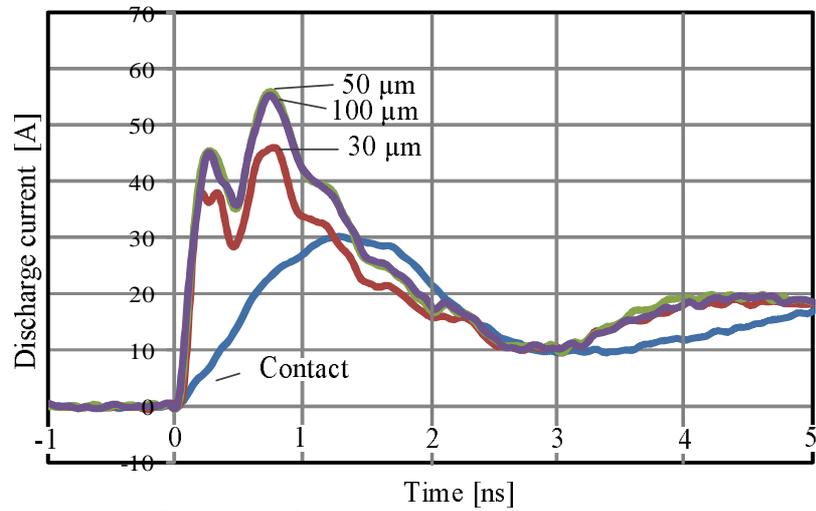


(b) 4kV contact discharges with gaps of 30 μm to 200 μm

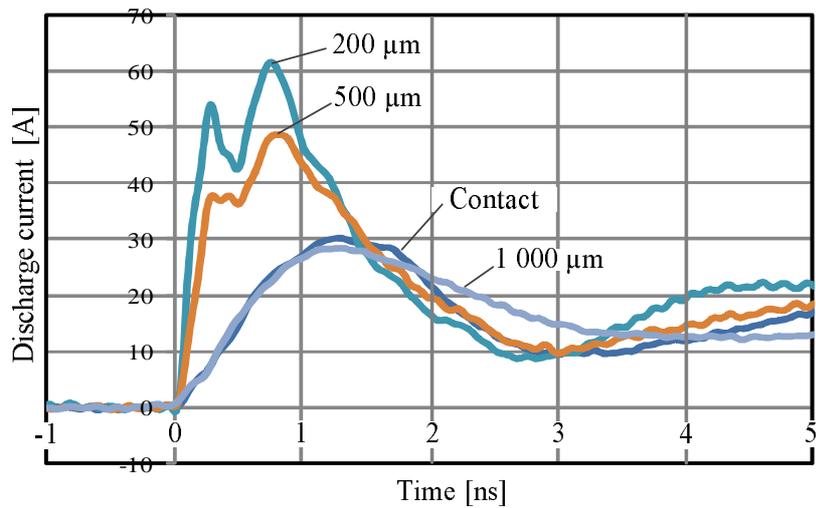


(c) 6kV contact discharges with gaps of 30 μm to 500 μm

Fig. 4-6 Measured waveforms of discharge currents for 2 kV to 6 kV contact discharges with small gaps.



(a) Contact discharges with gaps of 30 μm to 100 μm



(b) Contact discharges with gaps of 200 μm to 1000 μm

Fig. 4-7 Measured waveforms of discharge currents for 8kV contact discharges with small gaps.

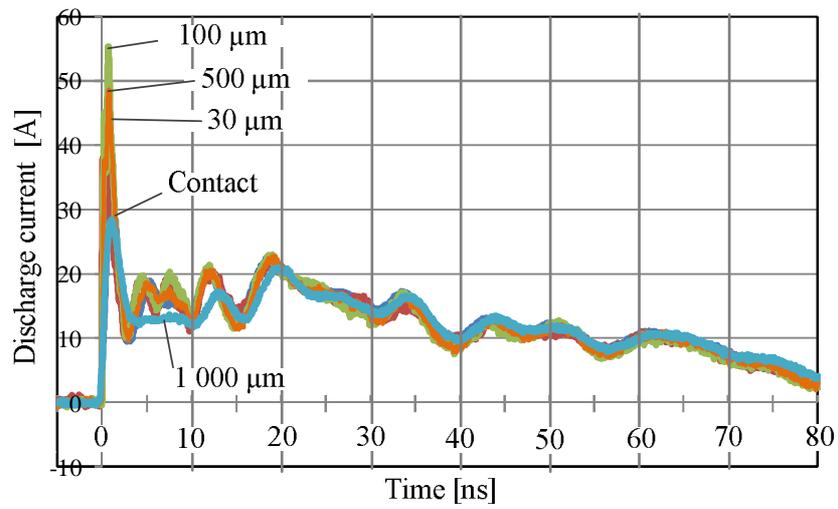


Fig. 4-8 Measured whole waveforms of discharge currents for 8 kV contact discharges with gaps of 30 μm to 1000 μm .

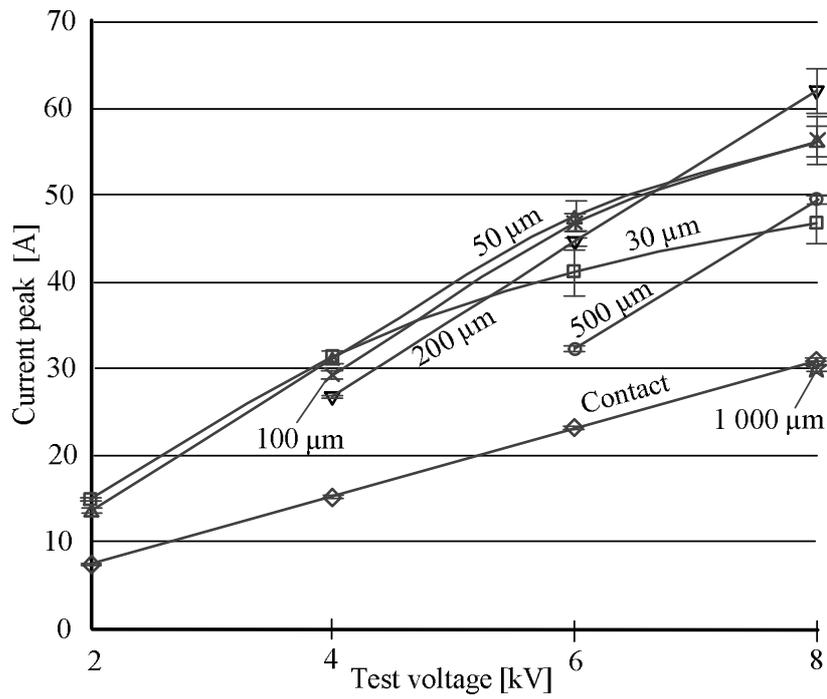


Fig. 4-9 Dependence of current peaks on test voltages.

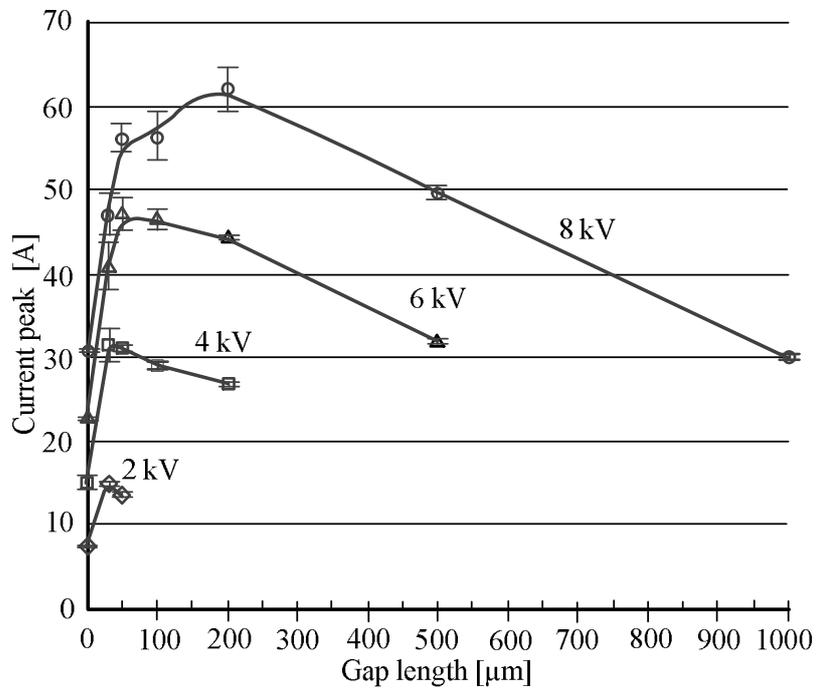


Fig. 4-10 Dependence of current peaks on gap length.

4.4 考察

4.3 で述べたように、ESD 発生器で微小ギャップを設けた接触放電モードの ESD 試験をおこなうと、同じ試験電圧でもピーク電流が増大し、立ち上がり時間が 1/5 程度に短縮することがわかった。本章では、この機構を定性的に説明するために、回路論的アプローチから考察する。Fig. 4-11 は、Fig. 4-5 に示した ESD 発生器の微小ギャップを設けた電流ターゲットへの接触放電に対する回路構造を示す。この構造に基づく等価回路を Fig. 4-12 に示す。ここで $R (=2.04 \Omega)$ は電流ターゲットの入力抵抗、 L は放電電極のインダクタンスであり、 C_1 と C_2 は放電電極がグラウンドプレーンとの間に形成する浮遊容量である。 C_s は ESD 発生器のグラウンド系とグラウンドプレーンとを結合する浮遊容量、 L_i は、立ち上がり波形の IEC 規定 ($0.8 \text{ ns} \pm 25\%$) を満たすために ESD 発生器へ内蔵されたインダクタのインダクタンス、 L_g はグラウンドリターンケーブルのインダクタンスである。

微小ギャップを介した接触放電に対する放電電流は、つぎのような機構で流れるものと推察する。なお、文献[6], [7]によれば、回路定数の間には $C_B=150 \text{ pF} \gg C_2 > C_1$, $L_g=(2 \mu\text{H} \sim 3 \mu\text{H}) \gg L_i \gg L$ という大小関係にある。

Fig. 4-12(a) は、接触放電をおこなった直後の等価回路であり、ギャップが存在するため放電電極の C_1 と C_2 が最初に充電される様子を示している。Fig. 4-12(b) は、 C_1 が充電されて電圧が上昇し、電極先端部の電界が増大してギャップ間にスパークが発生した状況を示している。ここで、 i_1 と i_2 はそれぞれ C_1 と C_2 の電荷の放電電流であり、 i_3 は C_B の電荷が C_s を介して戻る放電電流である。 $i_d=(i_1+i_2+i_3)$ は r を流れる電流であり、これが微小ギャップを介して測定される放電電流である。

Fig. 4-12(a) では、放電電極と電流ターゲットは、ギャップを隔てて絶縁状態にあり、リレースイッチ S_d の ON により、 C_B に蓄えられた電荷が L_i , L を経由して C_2 , C_1 を充電する。この状態では放電電流は流れていない。Fig. 4-12(b) において、 C_1 の両端の電圧がギャップ間の絶縁破壊電圧に達すると、最初に電流ターゲットに近い C_1 の電荷が火花通路を介して放電し、高速の i_1 が放電開始から最初のピークを発生させる。つぎに、 i_2 の電流が L を通して r に遅れて流れるため、二つ目のピークが現れるが、この時点では L_i が大きいため i_3 は i_2 に遅れて r に流れ込むことになり、三つ目のピークをもつ電流が測定されることになる。

微小ギャップを設けた接触放電のピークが通常の接触放電のそれよりも上回る理由は、つぎのように考える。Fig. 4-12(a) でギャップがなければ、接触放電前には C_1 と C_2 には電荷はなく、これらの容量は、接触放電と同時に L_i で電流の立ち上がりが抑えられながら、ゆっくりと充電された後に r へ放電される。一方、微小ギャップを設けた場合は C_1 と C_2 が予め充電された状態でギャップ間にスパークが飛べば、これらの電荷が r へ直接放電されるため、立ち上がりが鋭くなってピ

ーク電流が上昇するものと考える。

電流ピークの試験電圧やギャップ長依存性については、回路論的には説明はできないが、文献[9]において電気双極子がスパークした際の放電電流のピークは、電位傾度（放電電圧に対するギャップ長の比）の2乗に比例し、波形の立ち上がり時間は電位傾度の2乗に反比例することが理論的に明らかにされている。したがって、試験電圧が同じであっても、ギャップ長が短いほど電位傾度は増大するため、放電電流のピークは上昇し、立ち上がり時間も短くなるはずであるが、Fig. 4-6(a), Fig. 4-6 (b)及び Fig. 4-7(b)では試験電圧が高く、ギャップ長が短いほど放電電流は急峻になってピークも増大してはいるものの、Fig. 4-6(c), Fig. 4-7(a)及びFig. 4-8 をみると、そのような傾向には必ずしもなっていない。この理由は、つぎのように考える。設定ギャップの長さを δ 、絶縁破壊電圧を V_s 、試験電圧を V_c とすれば、ギャップ間は試験電圧で放電するとは限らず、本論文のギャップ長の範囲では $V_s < V_c$ である。一方、文献[10]によれば、ギャップ間にかかる電圧の上昇勾配（時間変化率）が大きいほど V_s は増加すること、その程度は時間変化率が同じでもギャップ長が長いほど大きいこと、などが知られている。したがって、同じ δ では V_c が高いほど時間変化率は増加するため電位傾度(V_s/δ)は上昇し、この場合には、Fig. 4-6, Fig. 4-7 でみられたように、 V_c が高くなると同じ δ でも電流ピークが増大して立ち上がり時間は短くなるものと考える。また、パッシェン曲線[11]から δ が小さいと V_s も低下するが、(V_s/δ)は増加するので、Fig. 4-6(a), (b) でみられたように同じ V_c でも δ が小さいほど電流ピークが増大するのであろう。しかしながら、 V_c が高くなると同じ時間変化率でも δ が長いほど(V_s/δ)が高くなるので、結果として、高い V_c では(V_s/δ)は δ が小さいほど大きくなるとは限らない。したがって、この場合には、Fig. 4-6(c), Fig. 4-7 でみられたように、たとえば、最小の δ (30 μm) でも電流ピークが最大とはならず、立ち上がり時間も最小にはなっていないものと考える。

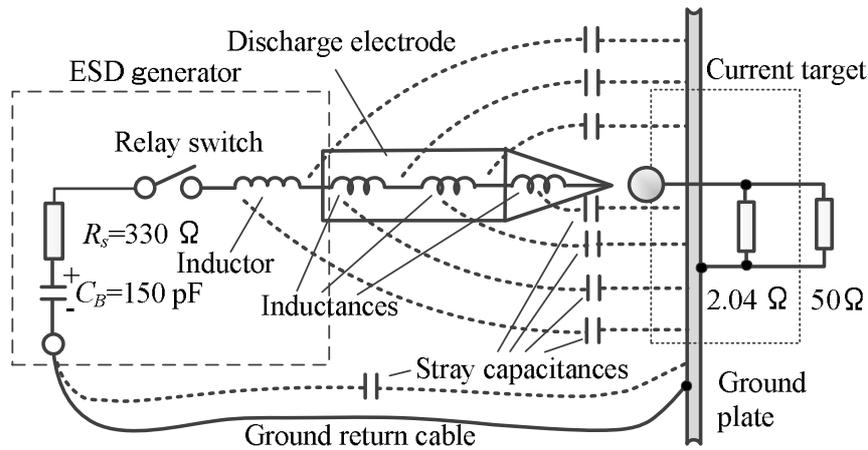
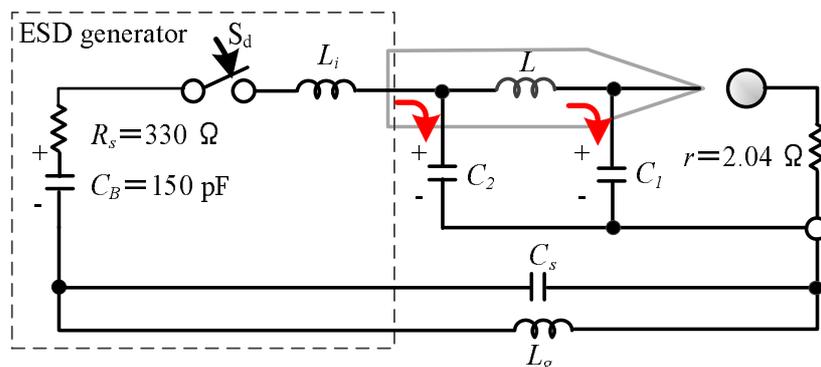
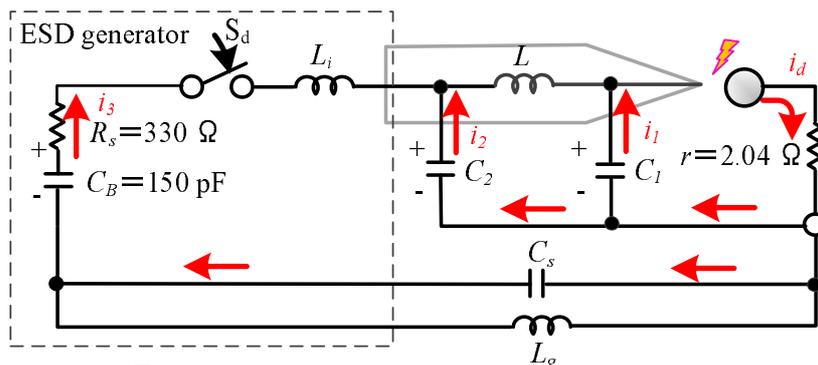


Fig. 4-11 Circuit structure for contact discharge of ESD generator through small gap to current target shown in Fig. 4-5.



(a) Equivalent circuit for charging before spark



(b) Equivalent circuit for second current peak after spark

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| C_B : Storage capacitor | r : Current target resistor |
| R_s : Discharge resistor | C_1 : Electrode stray capacitor |
| S_d : Relay switch | C_2 : Internal stray capacitor |
| L : Electrode inductance | C_s : Ground stray capacitor |
| L_i : Internal inductance | L_g : Ground cable inductance |

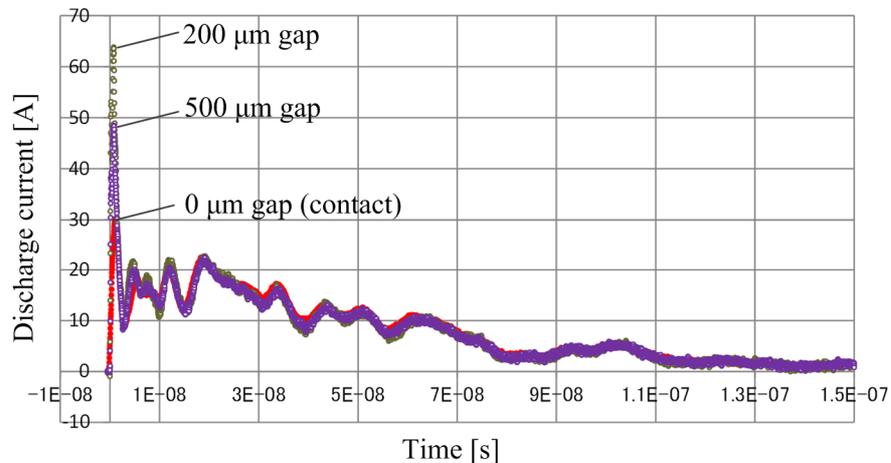
Fig. 4-12 Equivalent circuit to qualitatively explain current rising behavior for contact discharges with small gaps.

4.5 印加電圧 8kV でのギャップ放電現象とその解析

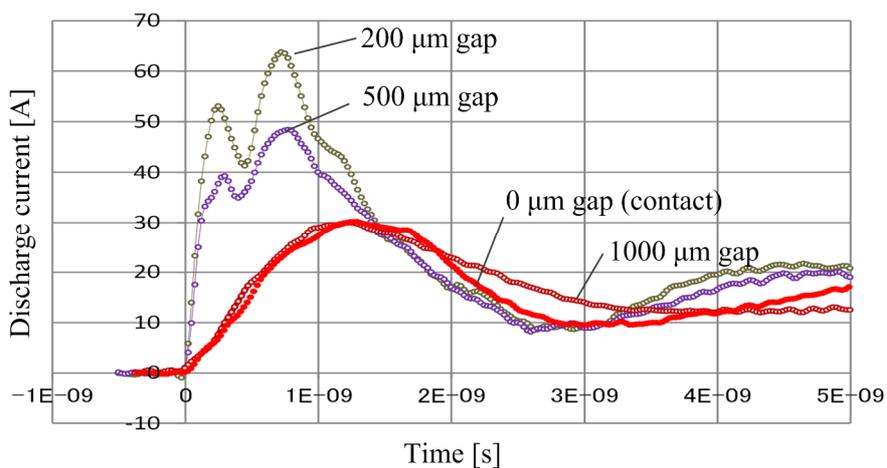
4.4 で示した放電現象の推定について、ひとつの印加電圧に着目し、等価回路での数学的解析を試みた。Fig. 4-13 に、4.3 の測定で得られた 8 kV での微小ギャップを伴う接触放電での放電電流波形を示す。Fig. 4-13(a)は、150 ns までの放電電流の全体を、Fig. 4-13(b)は、5 ns までの 0 μm , 200 μm , 500 μm 及び 1000 μm のギャップを伴う放電電流波形を示す。

4.5.1 等価回路モデル

Fig. 4-11 の微小ギャップを介した接触放電で想定される回路構造を Fig. 4-12 で示した。ESD 発生器の放電電極周辺には、ファラデーケージのグラウンド板周辺に、寄生容量による結合が存在し、放電電流経路には、ESD 発生器内部のインダクタンスと電流ターゲットとの間のギャップ間には火花抵抗がそれぞれ存在する。これを簡略化した等価回路を Fig. 4-14 に示す。ESD 発生器に内蔵している C_B と R_s に対して、放電電極の先端と後端部にそれぞれインダクタンス L と L_i を、キャパシタンス C_1 と C_2 を代表値として設定した。また、グラウンドリターンに対しては、グラウンドリターンケーブルのインダクタンス L_g 、発生器のグラウンド系とファラデーケージのグラウンドを結合する寄生容量 C_s を設定した。

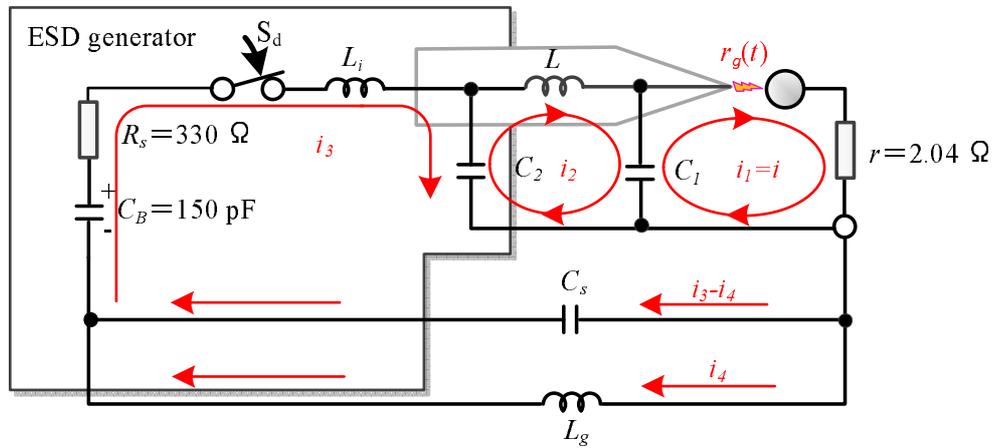


(a) Whole waveforms of discharge currents for contact discharges with gaps of 0, 200 and 500 μm



(b) Frontal currents for contact discharges with gaps of 0, 200, 500 and 1000 μm

Fig. 4-13 Measured waveforms of discharge currents for 8 kV contact discharges with different gaps.



- | | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| C_B : Storage capacitance | $r_g(t)$: Spark resistance |
| R_s : Discharge resistance | r : Current target input resistance |
| S_d : Relay switch | C_1 : Electrode stray capacitance |
| L : Electrode inductance | C_2 : Internal stray capacitance |
| L_i : Internal inductance | C_s : Ground stray capacitance |
| | L_g : Ground cable inductance |

Fig. 4-14 Simplified equivalent circuit to explain enhancement phenomena of discharge current due to spark of small gap.

4.5.2 回路方程式

Fig. 4-14 の等価回路から， C_B の充電電圧となる試験電圧を V_c とし，時刻 $t = 0$ でスイッチ S を閉じたとき，回路を流れる電流 i_1, i_2, i_3, i_4 は，

$$\left. \begin{aligned}
 -\frac{1}{c_1} \int_0^t (i_1 - i_2) dt' &= \{r_g(t) + r\} i_1 \\
 -\frac{1}{c_2} \int_0^t (i_2 - i_1) dt' &= L \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{c_1} \int_0^t (i_2 - i_1) dt' \\
 V_c - \frac{1}{c_B} \int_0^t i_3 dt' &= R_s i_3 + L_i \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{c_2} \int_0^t (i_2 - i_1) dt' \\
 &\quad + \frac{1}{c_s} \int_0^t (i_3 - i_4) dt' \\
 \frac{1}{c_s} \int_0^t (i_3 - i_4) dt' &= L_g \frac{di_4}{dt} \\
 i_1(0) = 0, \left. \frac{di_1}{dt} \right|_{t=0} &= 0 \quad i_2(0) = 0, \left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0} = 0 \\
 i_3(0) = 0, \left. \frac{di_3}{dt} \right|_{t=0} &= \frac{V_c}{L_i}, \left. \frac{di_4}{dt} \right|_{t=0} = 0 \\
 r_g(0) &= r_{g0}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

という微分方程式と初期条件を満たす。上式において， $r_g(t)$ は微小ギャップが放電した際の火花抵抗であり，ここでは，

$$r_g(t) = \frac{\delta}{\sqrt{\frac{2\alpha}{p} \int_{-\infty}^t i_1^2 dt'}} \quad (2)$$

と表される Rompe-Weizel の火花抵抗則[12]を用いた。式(2)の δ はギャップ長， p は圧力， α は放電部位を取り囲む雰囲気の種類や圧力及び火花の温度に依存して定まる定数であり，大気圧の空気中では $\alpha \doteq 1.1 \times 10^4 \text{ atm} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{V}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ である。 $r_g(0)$ は，ギャップの放電前の初期抵抗であり， S_d を閉じた後に現れるギャップ間の電圧に応じて電流（暗電流に相当）が流れ，これによって火花放電が開始するが，暗電流と火花電圧との関係は，現段階では不明である。

電流ターゲットに流れる放電電流 $i = i_1$ は，4.2.2 で述べたように， $v_i = i / 10$ の入力電圧としてオシロスコープ上で観測される。この観測波形はオシロスコープの帯域幅が有限であるため，一般には入力電圧 v_i の波形とは異なるので，ここでは

オシロスコープの観測電圧波形 v をつぎのような計算式で求めた。文献[13]と同じく、オシロスコープの垂直増幅器が一次遅れの周波数特性（帯域幅： $f_c = 6 \text{ GHz}$ ）をもつとすれば、 $v(t)$ は、

$$\begin{aligned} v(t) &= 2\pi f_c \int_0^t v_i(t') \exp\{-2\pi f_c(t-t')\} dt' \\ &= 2\pi f_c \int_0^t \frac{i(t')}{10} \exp\{-2\pi f_c(t-t')\} dt' \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられる。したがって、観測電圧値を 10 倍し、「ボルト」を「アンペア」に置き換えれば、同波形が放電電流の測定波形となる。

4.5.3 計算結果と考察

前節の微分方程式を初期条件の下で数値的に求めれば、放電電流波形が計算できる。数値計算には、MatLab (R2013b)の関数(ode45)を用いておこなった。数値計算の用いた諸量と文献[7]及び文献[14]における発生器の回路定数を Table 4-1 に示す。まず、接触状態での回路解析の結果と実際に測定した 8 kV での放電電流の全体波形を Fig. 4-15(a)、ピーク部の拡大波形を Fig. 4-15(b)にそれぞれ示す。実測した放電電流波形は、波形の振動成分を多く含んでいるが、式(1)で $r_g(t) \equiv 0$ とした計算波形に概ね一致していることが確認できる。なお、図中の点線は、オシロスコープの垂直増幅器の帯域制限（6 GHz）考慮しない計算波形であり、帯域制限を考慮した場合(実線)と重なっているが、これは立ち上がり時間が 1 ns と緩やかであることによる。

ギャップが存在する場合の放電電流は、ギャップ間の火花電圧に影響され、この電圧は火花発生前の暗電流に応じて変わるため、計算結果は火花抵抗の初期値 r_{g0} に依存する（計算の結果、 r_{g0} が大きいほど火花電圧は上昇する）。結果の一例を Fig. 4-16($\delta=200 \mu\text{m}$)、Fig. 4-17(a) ($\delta=500 \mu\text{m}$)、Fig. 4-17(b) ($\delta=1000 \mu\text{m}$)にそれぞれ示す。Fig. 4-16(a)は全体波形、Fig. 4-16(b)はピーク部の拡大波形であるが、計算結果は、 r_{g0} が大きいほど増大し、最初の立ち上がり部分も鋭くなるが、実測波形とは異なっている。図中の点線は、オシロスコープの帯域制限を考慮しない計算波形であるが、これを考慮した場合（実線）よりも最初のピークは大きくなっているのに対して、波形の緩やかな部分では実線にほぼ一致している。前者は鋭い立ち上がり波形の高周波成分によるものであるが、計算波形と測定波形との不一致の原因は、火花抵抗則の適用法にあるのか、簡易的な等価回路にあるのか、現時点では不明である。一方、Fig. 4-17 の $\delta=500 \mu\text{m}$ と $\delta=1000 \mu\text{m}$ の計算結果は、点線と実線はほとんど一致しており、実測波形に類似していることがわかる。

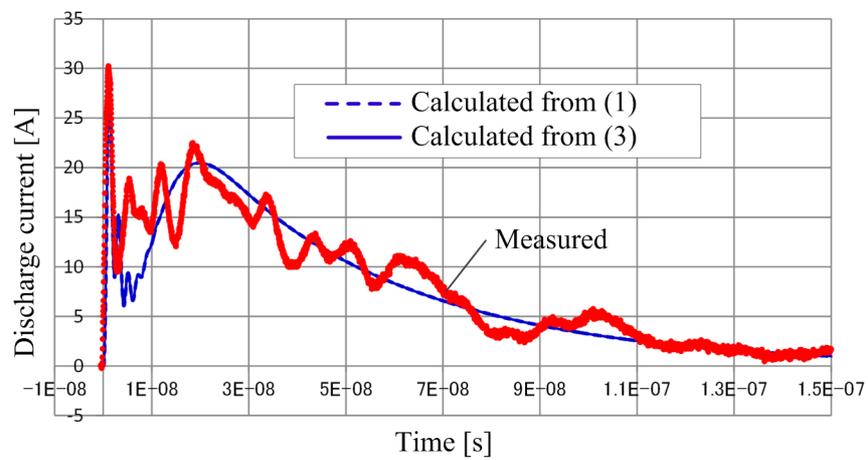
Fig. 4-18 にはギャップ長 δ に対するピーク電流の依存性を示す（計算結果は 6

GHz の帯域制限を考慮した場合を示す)。

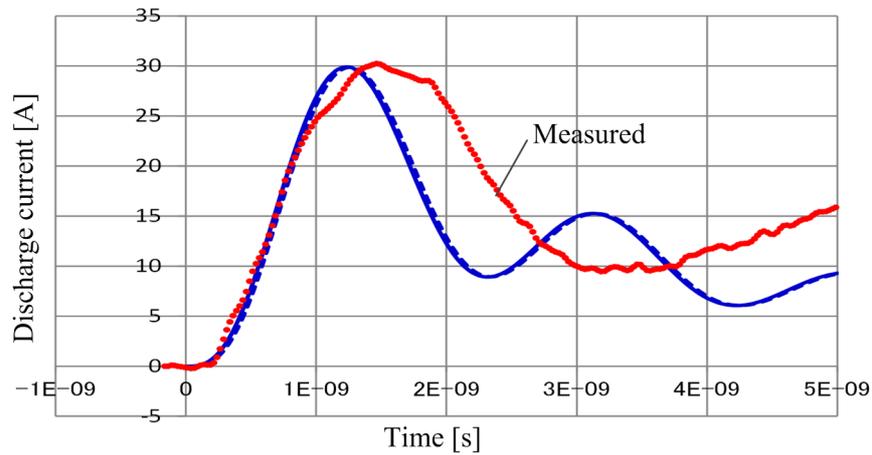
なお、実測波形は、どのギャップ長に対しても 2 番目のピークが最大であったが、計算結果は 350 μm よりも短いギャップ長では最初のピークが最大となっており、それ以降では 2 番目のピークが最大であった。図から、計算結果は、実測結果とは異なっているが、両者とも 100 μm - 200 μm 付近において最大のピーク電流となり、ピーク電流のギャップ長依存性は、大まかには傾向を表していることがわかる。

Table 4-1 Circuit parameters and their numerical values shown in Fig.4-14

$V_c = 8 \text{ kV}$	This calculation	Reference [14]	Reference [7]
$R_s [\Omega]$	330	330	330
$C_B [\text{pF}]$	150	150	150
$L_o [\mu\text{H}]$	2	638	2.1
$r [\Omega]$	2.04	50	2.03
$L_i [\text{nH}]$	100	420	100
$L [\text{nH}]$	54.8	54.8	-
$C_1 [\text{pF}]$	0.54	0.54	-
$C_2 [\text{pF}]$	2.24	2.24	-
$C_s [\text{pF}]$	10	3.13	12

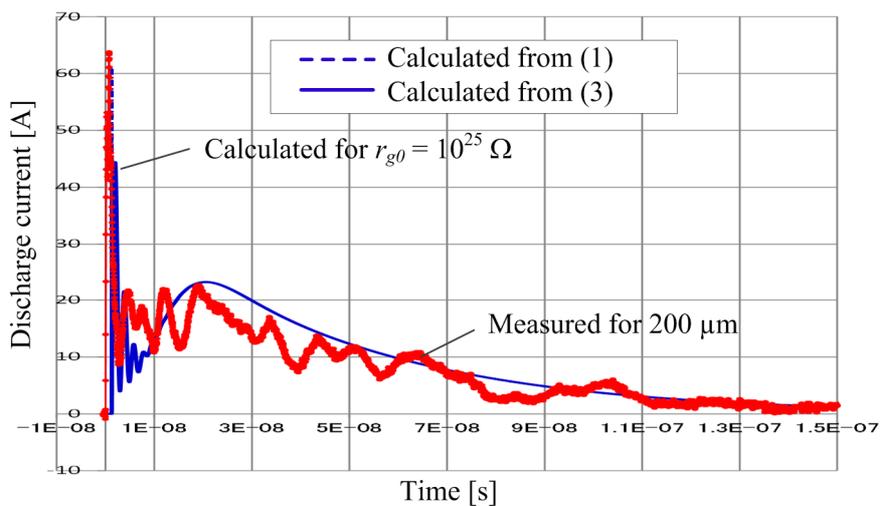


(a) Whole waveforms of discharge currents for contact discharges

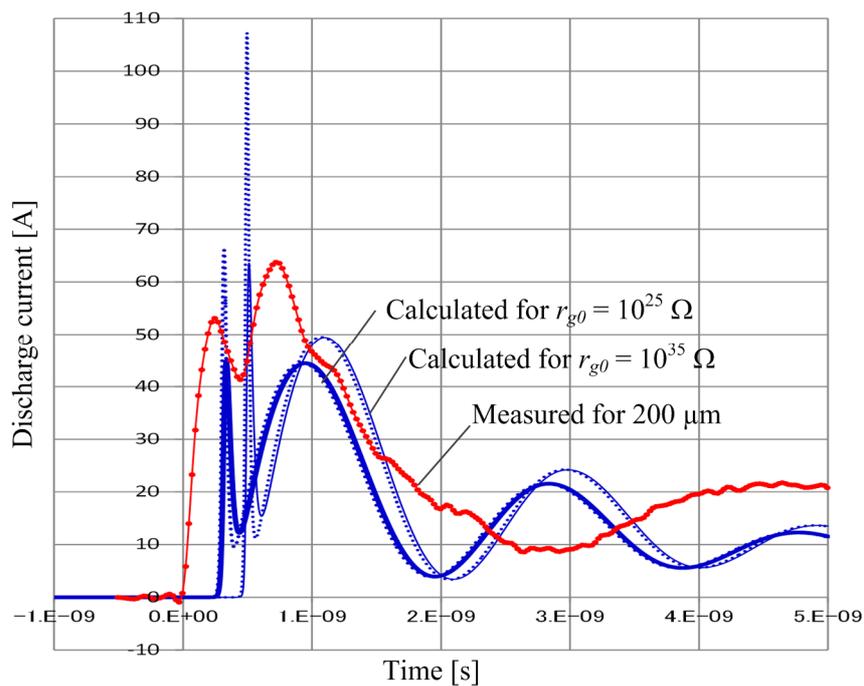


(b) Frontal currents for contact discharges

Fig. 4-15 Calculated and measured waveforms of discharge currents for 8 kV contact discharges.

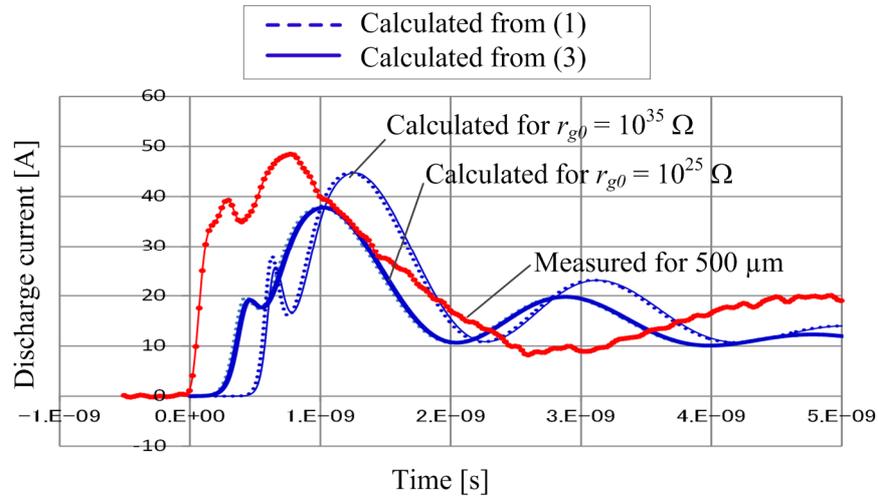


(a) Whole waveforms of discharge currents for contact discharges with a gap length of 200 μm

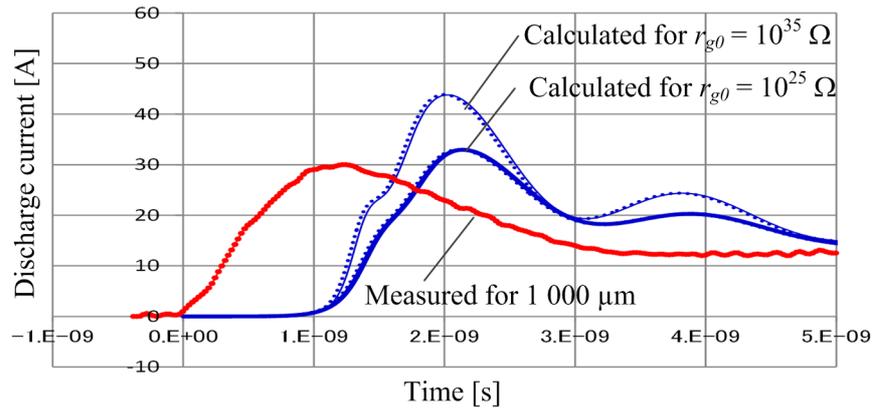


(b) Frontal currents for contact discharge with a gap length of 200 μm

Fig. 4-16 Calculated and measured waveforms of discharge currents for 8 kV contact discharges with a gap length of 200 μm .



(a) Frontal currents for contact discharges with a gap length of 500 μm



(b) Frontal currents for contact discharges with a gap length of 1 000 μm

Fig. 4-17 Calculated and measured waveforms of discharge currents for 8 kV contact discharges with different gap lengths.

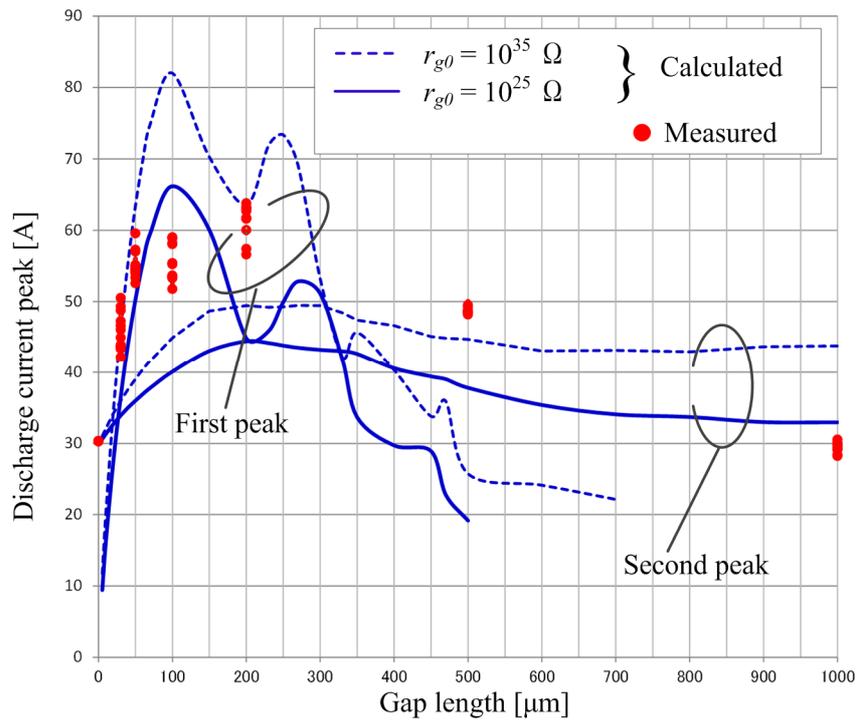


Fig. 4-18 Dependence of discharge current peak on gap length for 8 kV contact discharges with gaps.

4.6 むすび

本章では、国際規格で規定した接触放電の ESD 試験において、微小ギャップを伴う放電電流波形を測定した。その結果、放電電流の立ち上がり部分において複数のピークが現れ、通常の接触放電では観測されない特異な現象を見出した。電流ピークの試験電圧依存性、ギャップ長依存性を調べた結果、微小ギャップを介した放電電流波形は、ギャップ長によっては複数の電流ピークが現れること、ギャップのない通常の接触放電の場合と比較して試験電圧が同じであっても立ち上がり時間が数百 ps と短く、ピーク値も 2 倍程度に増大すること、などが明らかとなった。この特異現象を回路論的アプローチから考察した結果、接触放電時に電極先端部分の浮遊容量がまず充電されて微小ギャップ間の気中放電が生じたとき蓄積電荷が急速放電し、その後に通常の接触放電の電流がギャップの火花通路を通して流れ出すことによって現れるものと推定した。更にこの現象を ESD 発生器の簡易的な等価回路に火花抵抗を組み合わせた回路モデルを構築して放電電流の計算結果と観測波形を比較した。この結果、両者の相関を近似的に得ることができ、この特異現象を理論的に分析する糸口を見出すことができた。

今後の課題は、より精度の高い等価回路モデルを構築し、異なる試験電圧に対する放電電流を、火花抵抗の初期値と温度・相対湿度との関係において解析することである。

参考文献

- [1] IEC (International Electrotechnical Commission), "IEC 61000-4-2: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test", Edition 2.0, December 2008.
- [2] Takeshi Ishida, Yukihiro Tozawa, Mutsumu Takahashi, Osamu Fujiwara and Shuichi Nitta : "A Measurement on Electromagnetic Noises from ESD Generator just Before and After ESD Testing", IEICE Proceedings of 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility Tokyo (EMC'14/Tokyo), 16A2-B2, pp.737-740, 2014.
- [3] 森育子, 藤原修 : 「放電電流波形の広帯域測定に基づく ESD に対する IEC イミュニティ試験の厳しさ評価」, 電学論 A, 130 巻 5 号, pp.457-461, 2010. "Severity Evaluation of the IEC Immunity Test against ESD based on Wideband Measurement of Discharge Current Waveforms".
- [4] Yu-ichi Hayashi and Hideki Sone: "The Effect of Position of a Connector Contact Failure on Electromagnetic Near-field around a Coaxial Cable", IEICE Trans. Commun., Vol. E92-B, No.6, pp.1969-1973, 2009.

- [5] 松田和樹, 林優一, 水木敬明, 曾根秀昭: 「コネクタの緩みによる放射電磁雑音増大のメカニズムに関する一検討」, 電学論 A, Vol.132, No.5, pp.373-378, 2012.
"Fundamental Study on Mechanism of Electromagnetic Field Radiation from Electric Devices with Loose Contact of Connector".
- [6] 藤原修, 田中秀幸, 中山幸雄: 「静電気試験器による放電電流の等価回路モデル」, 電学論 A, 123 卷 8 号, pp.784-789, 2003.
"An Equivalent Circuit Modeling of Discharge Current Injected in Contact with an ESD-gun".
- [7] 秋山雪治, 戸澤幸大, 石田武志: 「ESD ガンの等価回路モデルの改良(IEC 61000-4-2 Ed.2.0 対応)」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.14, No.4, pp.264-261, 2011.
"Improvement of the Equivalent Circuit Modeling for an ESD-Gun (Based on IEC61000-4-2 Ed.2.0)".
- [8] 後藤剛史, 高義礼, 森育子, 藤原修, 石上忍, 山中幸雄: 「静電気試験器の較正用電流検出変換器に対する伝達インピーダンスの FDTD シミュレーション」, 電学論 C, Vol.131, No.3, pp.606-612, 2011-3.
"FDTD simulation of transfer impedance of calibration current target for ESD testing".
- [9] 藤原修: 「静電気放電の発生電磁界と FDTD シミュレーション」, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J94-B, No.11, pp.1452-1460, 2011.
"Electromagnetic Fields Due to Electrostatic Discharges and Their FDTD Simulation".
- [10] 富田一: 「充電電圧の時間変化率が帯電金属円板からの火花放電に及ぼす影響」, 電学論 A, 123 卷 9 号, pp.577-584, 2008.
"Effect of Change in the Time of Changing Voltage on Spark Discharge from a Metal Disk".
- [11] 静電気学会編: 「静電気ハンドブック」, "Handbook of Electrostatics", 株式会社オーム社, p.221, 1994.
- [12] O. Fujiwara: "An analytical approach to model indirect effect caused by electrostatic discharge", IEICE Trans. Commun., Vol.E79-B, No.4, pp.483-489, 1996-04.
- [13] 世古秀明, 藤原 修, 山中幸雄: 「静電気放電による発生磁界の火花電圧依存性」, 電学論 A, 123 卷 9 号, pp.914-919, 2003-09.
"Spark Voltage Dependence of Magnetic Fields Due to Electrostatic Discharge".

[14]藤原 修, 田中秀幸, 中山幸雄:「静電気試験器による放電電流の等価回路モデル」,電学論 A,123 卷 8 号, pp.784-789, 2003-08.

“An Equivalent Circuit Modeling of Discharge Current Injected in Contact with an ESD-gun”.

第 5 章

ウェアラブル電子機器を想定した人体装着の金属体 ESD モデルにおける放電電流の測定と現象考察

5.1. はじめに

電気／電子機器又は装置からの ESD 耐性試験は、IEC 61000-4-2[1]によって、ESD 発生器の仕様及び実際の試験方法を規定している。ESD 試験は、実際の帯電した人体が触れる行為によって発生する現象を基本としている。スマートフォンなどの普及に伴って、人体に取り付けた状態で、情報を与えるだけでなく、人体の状態などの生体データを監視・収集して他の PC に送るなどのウェアラブル機器の普及が拡大している[2]。これらの機器は、通常人体に装着しており、常時人体は、充電または放電により電位が変化している。この結果、ウェアラブル機器は誤動作の原因となる非常に近接した状態での電磁界に頻繁にさらされることになる。しかしながら、これらの ESD 耐性試験は現在の国際規格では取り扱われていない[1]。

本章では、ウェアラブル機器の ESD 耐性試験を開発するために、人体に取り付けたウェアラブル機器がグラウンドに放電する最悪ケースを想定し検討した。機器の代わりに金属棒及び半球電極を用いて気中放電での手に持った金属棒と頭、上腕部及び腰部に取り付けた半球電極からの放電電流を測定した。

5.2. ウェアラブル機器と測定方法

5.2.1 ウェアラブル機器を装着した人体の ESD

Fig. 5-1(a) 及び Fig. 5-1(b)は、それぞれ卓上に設置した機器と人体に装着した代表的なウェアラブル機器での ESD 現象を示す。ESD 試験規格では、Fig. 5-1(a)に示した卓上機器などに触れる状況を想定している。この場合、帯電した人体の手または手に持った金属が装置に接近し、人体と機器との間にスパークが発生し、人体から機器に放電電流が流れる。ESD 試験の放電電流は、ESD 発生器からの接触放電で放電電流を機器に注入する方法が用いられている。実際の ESD 現象では、大気中の絶縁破壊を伴う気中放電[4]-[7]となるが、試験再現性の良さ[8]から接触

放電を主体に試験がおこなわれる。ウェアラブル機器は、Fig. 5-1(b)に示すようにヘッドセットまたは眼鏡のように頭部に装着するもの、またベルトなどを使って上腕、腕、及び腰部に装着するものなどがある。ウェアラブル機器の ESD 現象は、Fig. 5-2 に示すつぎの 4 つのシナリオに分類できる[3]。

- 1) 機器を手で掴むときに発生する ESD
- 2) 人体に装着していた機器をグラウンド導体に置くときに発生する ESD
- 3) 機器を装着している帯電した人体が、手を介して放電するときに発生する ESD
- 4) 機器を装着している帯電した人体が、ウェアラブル機器を介してグラウンド導体に近づいて直接放電する ESD

上記のシナリオのうち、1) 及び 2) は、それぞれ手で卓上の機器を触ること、及びハンドヘルド機器と同じ状況であり、これらは、人体の静電容量である 150 pF のエネルギー蓄積コンデンサ及び手に金属を持った 330 Ω 人体抵抗を内蔵した IEC 61000-4-2 で規定する ESD 発生器を用いて評価できる。

シナリオ 3), 4) は、手による接触放電とは異なり、特にシナリオ 4) は、手を経由せず、ESD 電流が直接機器を通過するため、厳しいことが想定される。

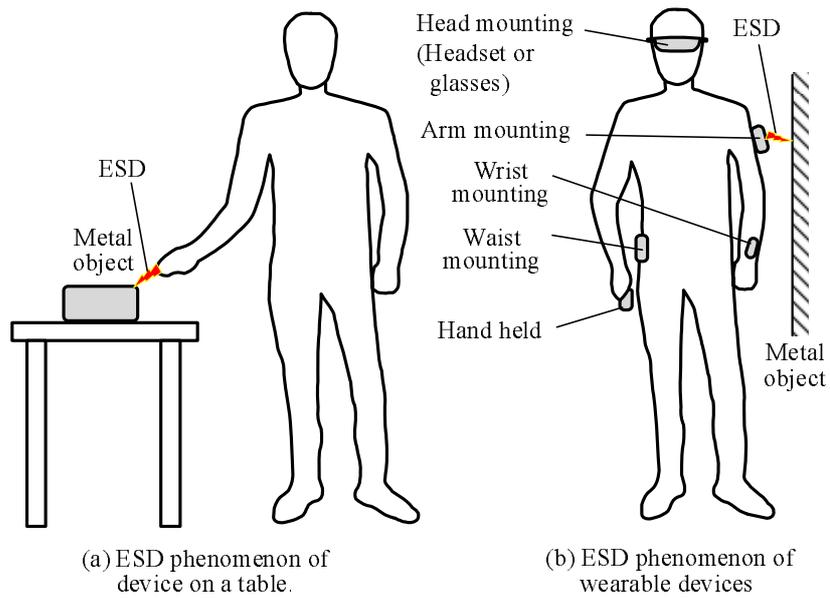


Fig. 5-1 Human ESD phenomena of electronics equipment.

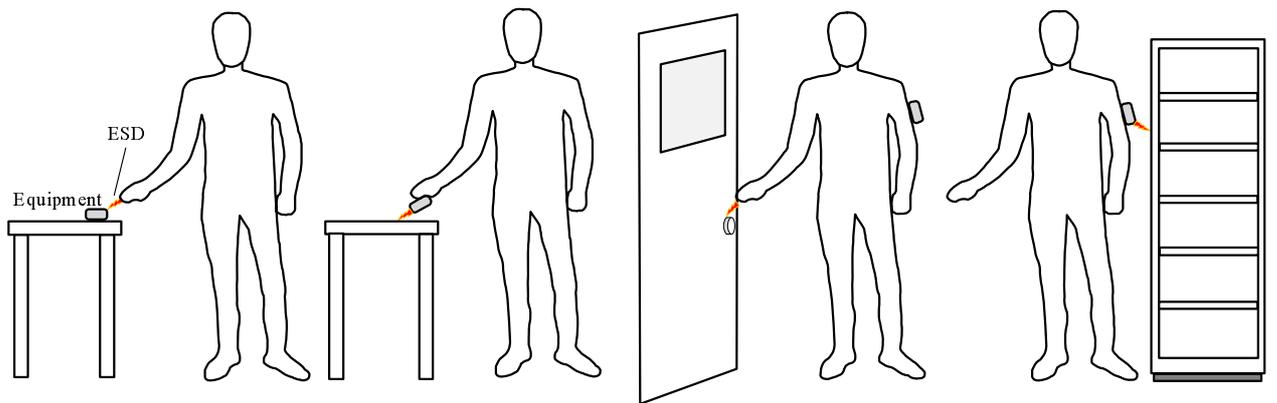


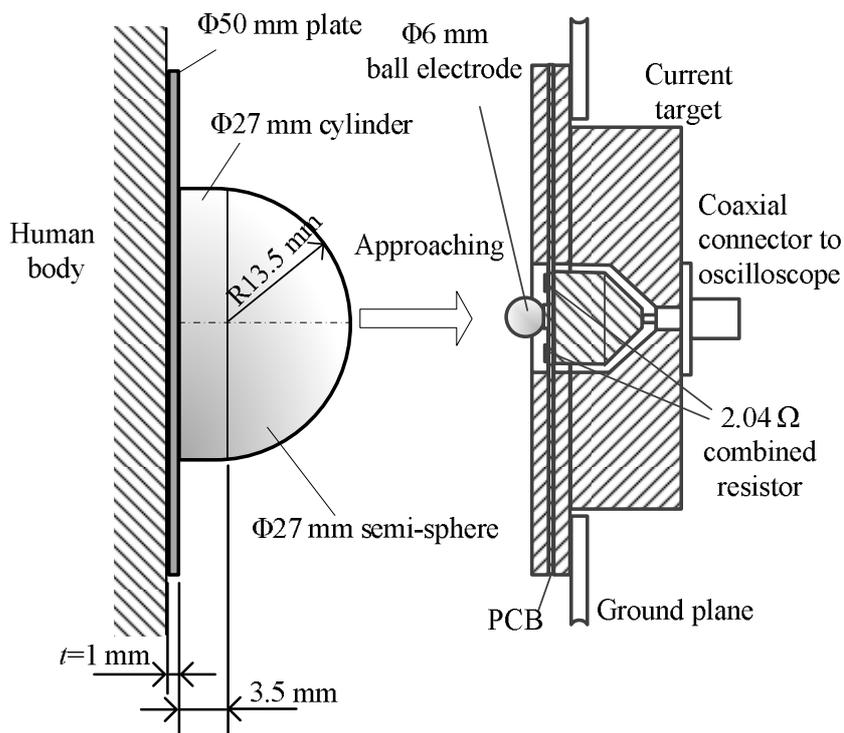
Fig. 5-2 Four scenarios of ESD phenomena for wearable devices.

5.2.2 測定セットアップ及び方法

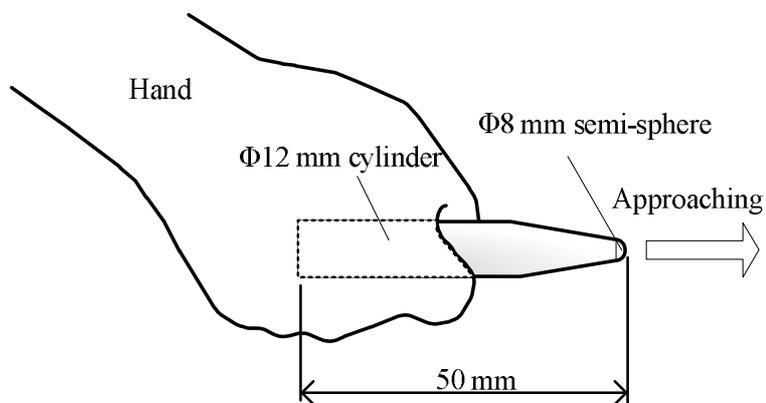
ここでは、前述のシナリオ 4) を前提として、ウェアラブル機器の ESD 耐性を想定した放電電流を調査した。実際のウェアラブル機器の代わりに、人体には、半球状の金属及び金属棒を使用した。帯電人体の気中放電での放電電流の測定には、IEC 61000-4-2 で規定した電流ターゲットを使用する。人体の頭部、上腕部及び腰部には、Fig. 5-3(a)の半球状の金属、及び手には、Fig. 5-3(b)の金属棒を使用した。帯電人体の半球金属及び金属棒の電極からの放電電流の測定は、Fig. 5-4 に示すファラデーケージの中央に取り付けた電流ターゲット (Noiseken:06-00067A) に近づけて放電させた。この電流ターゲットは、直流抵抗 2.04Ω 、DC~1 GHz までの周波数応答の平坦性は、 ± 0.5 dB 以内、また 1 GHz ~4 GHz では、 ± 1.2 dB 以内を保っている[7], [9]。これらの仕様は、IEC 61000-4-2 で規定されている。この電流ターゲットを 6 GHz 帯域のオシロスコープ (LeCroy Wave-Pro 760Zi, サンプル周波数: 40 GHz) に接続している。

ボランティア (身長:1.74 m, 体重 72 kg, 男性) は、1.8 m×1.0 m のグラウンドプレーン上の 0.02 m の絶縁支持台の上に、ファラデーケージの前面から約 0.05 m 離れた位置に立っている。本測定では、成人男性をモデルとしたが、子供及び体格の違いにより、床面およびファラデーケージの面との寄生容量は異なるため、異なる結果となることが推定されるが、これは今後の課題となる。

人体は、高電圧電源に $53 \text{ M}\Omega$ の抵抗を介した電極に触れて 1 kV に帯電させた。Fig. 5-3(a) に示した直径 50 mm の金属板を取付けた半球の放電電極を直接人体の頭部、上腕部及び腰部に取り付けた (Fig. 5-5)。電流ターゲットの中心電極は、接触を容易にすること及び電極のエッジによる気中放電の不安定性を避ける目的で、直径 6 mm の球状の電極に変更した。人体に取り付けた金属または金属棒の電流ターゲットへのアプローチ速度は、約 50 mm/s であった。人体各部の金属電極が電流ターゲットに印加できるように人体の姿勢は、変化させた。ハンドヘルド機器のための金属棒電極は、IEC 61000-4-2 で規定する ESD 発生器 (Noiseken ESS-2000AX と TC-815R:エネルギー蓄積コンデンサ $C_M=150 \text{ pF}$, 放電抵抗 $R_D=330 \Omega$) の気中放電電極を用いて印加した。併せてこの ESD 発生器の接触放電電流も測定した。測定は、半球電極を用いた人体各部、及びハンドヘルドの金属棒について各 20 回の印加の波形を記録した。測定時の室温は、 $25.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相対湿度は、40 %であった。



(a) Body-mounted semi-sphere metal and current target.



(b) Handled metal bar.

Fig. 5-3 Measurement method of discharge currents through metal object from charged human.

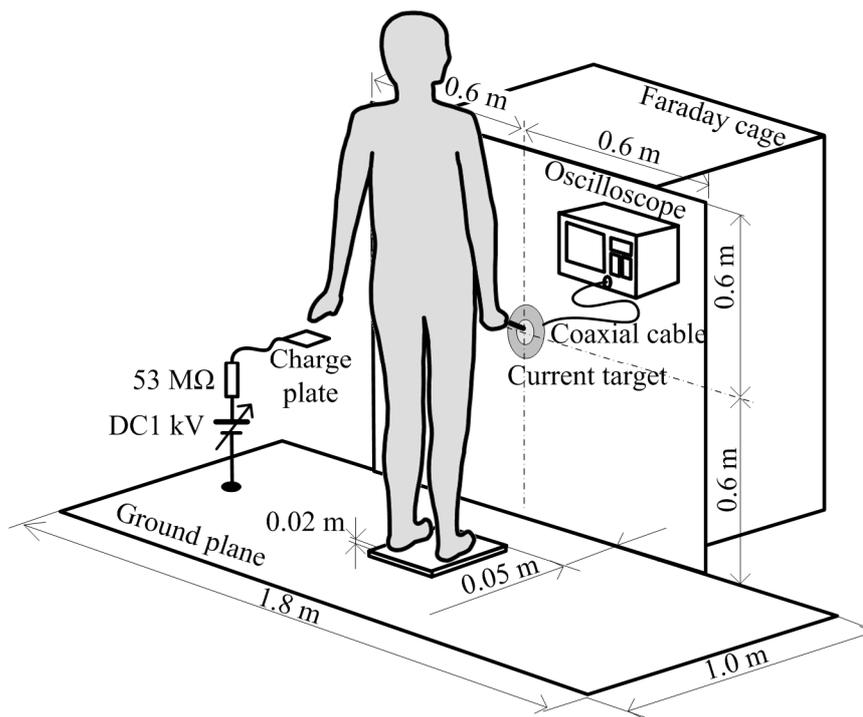


Fig. 5-4 Measurement setup of discharge current from human body.

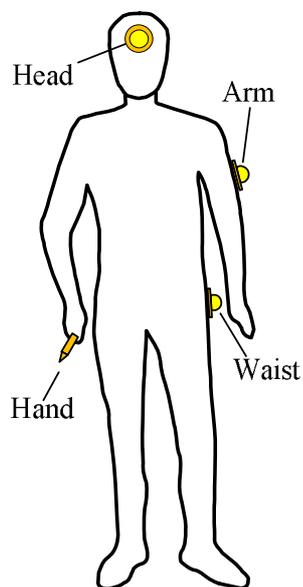


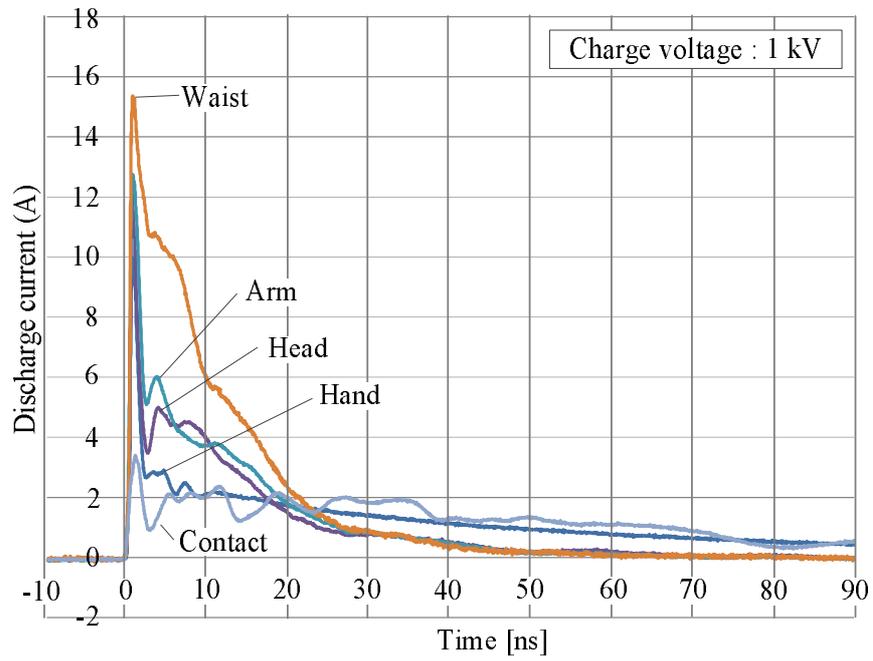
Fig. 5-5 Measurement discharge electrode setup of human body.

5.3. 結果及び考察

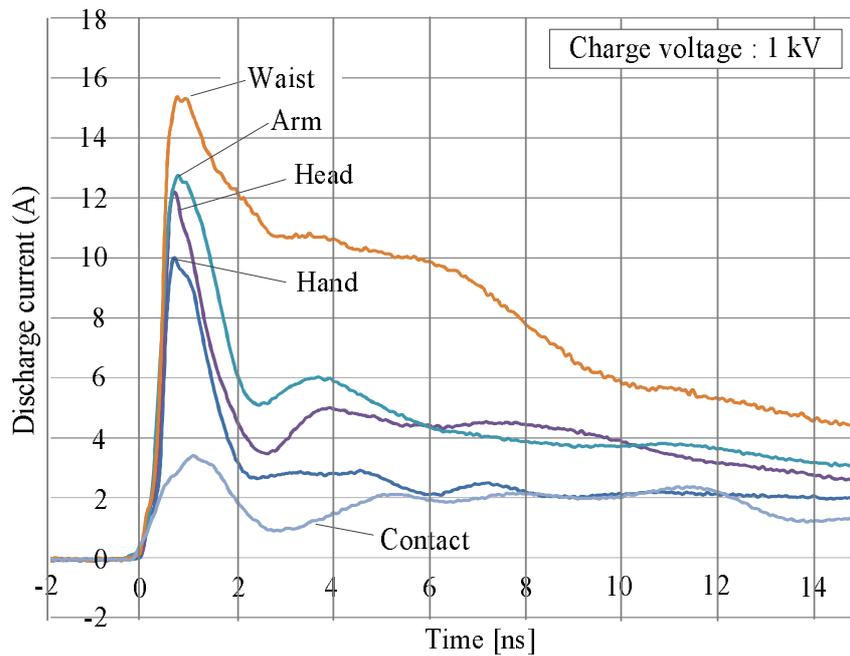
5.3.1 放電電流波形

Fig. 5-6 (a) 及び Fig. 5-6 (b)は、放電電流の全体及びピーク部の拡大をそれぞれ示す。これらの波形は、手、腕、頭及び腰の 1 kV に充電した人体からの 20 回の平均の代表的な波形を示す。また ESD 発生器の 1 kV での接触放電の電流波形も示す。Fig. 5-6 を見ると、腰からの ESD 放電電流が一番大きく、立上がり時間は、ESD 発生器の接触放電波形の 0.8 ns に対しておよそ 0.6 ns と高速になっている。また手持ちの金属棒及び ESD 発生器の接触放電の電流波形が 90 ns 時点で十分減衰していないのに対して、人体の胴体部近傍に取り付けた半球電極の波形は、取付部位に係わらず 50 ns でほぼ放電電流が 0 A に減衰し、手持ち金属棒及び ESD 発生器の放電抵抗に比べ胴体部の抵抗が小さいことを示していることに着目できる。

Fig. 5-7 は、ピーク電流、10 ns 及び 20 ns 時点の電流の平均と標準偏差を示す。人体に取り付けた半球電極及び、手持ちの金属棒の放電電流ピークは、接触放電より 3~4 倍高いことがわかる。人体に取り付けた半球電極ではピーク電流が、腰 (15.4 A)、上腕 (12.8 A) 及び頭 (12.2 A) の順となり、手持ちの金属棒 (10.0 A) が一番低いことがわかる。10 ns 時点では、胴体部の電極がおおよそ 2 倍以上となり、20 ns 時点では、大きな差がない。



(a) Discharge current waveform from -10 ns to 90 ns.



(b) Discharge current waveform from -2 ns to 15 ns.

Fig. 5-6 Measured waveform of discharge currents through handheld metal bar and body-mounted semi-sphere metal.

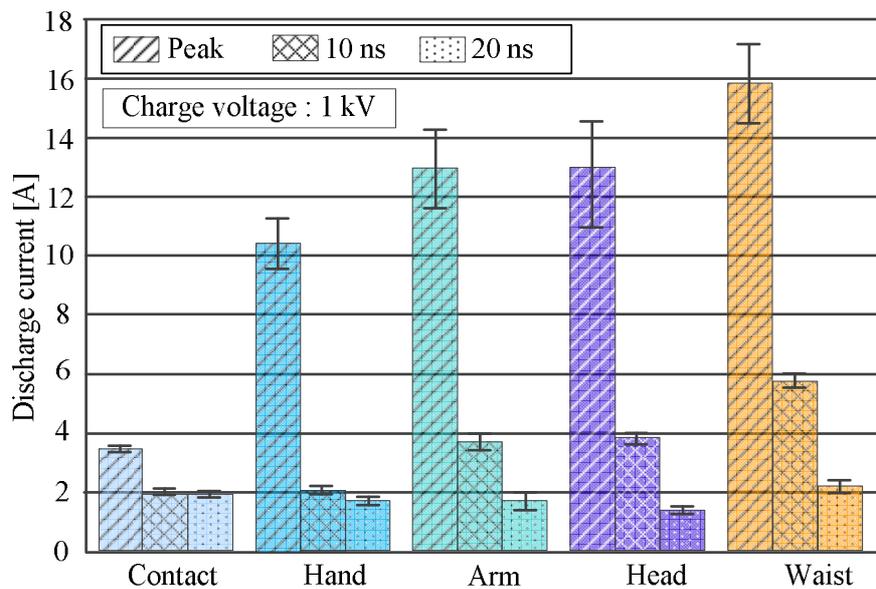


Fig. 5-7 Comparison of current peaks and current values at 10 ns and 20 ns through hand-held metal bar and body-mounted semi-sphere metal.

5.3.2 波形エネルギー

$V_c=1$ kV に帯電した人体の放電電流波形の特性を調べるために、 1Ω 当たり消費する波形エネルギー E [J] を放電電流 $i(t)$ より求める。Parseval の定理から、 E は

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |I(j\omega)|^2 df = \int_{-\infty}^{+\infty} i^2(t) dt = \int_T i^2(t) dt, \quad (1)$$

と与えられる。ここで、 $I(jf)$ は、 $i(t)$ のフーリエ変換で、 T は波形区間である。放電電流波形を特徴づけるため、放電抵抗 R_D 、充電蓄積容量 C_M 及び放電時定数 τ_D を導入する。これらの諸量と E との間には

$$R_D = \frac{\frac{1}{2} \left\{ \int_T i(t) dt \right\} V_c}{E} = \frac{\frac{1}{2} C_M V_c^2}{E} = \frac{\tau_D}{C_M}. \quad (2)$$

という関係式で結ばれる。

Fig. 5-8 は、波形区間 $T=90$ ns の式(1)から算出した標準偏差を用いて平均化した波形エネルギーを示す。手持ち金属棒及び接触放電より、腰に取付けた半球電極の放電電流波形のエネルギーは、5 倍大きいことがわかった。また放電電流波形から求めた頭と上腕のエネルギーは、腰の 40 % 以下となっている。

Table. 5-1 は、波形エネルギー E に従って、式(2)による放電抵抗 R_D 、充電蓄積容量 C_M 及び放電時定数 τ_D の計算値を示す。この表によると、腰に取付けた半球電極が、一番小さい R_D となり、 C_M は最大そして、最小の τ_D となった。手持ち金属棒及び ESD 発生器の τ_D は、人体からのそれより、それぞれ 2 倍、3 倍となっている。

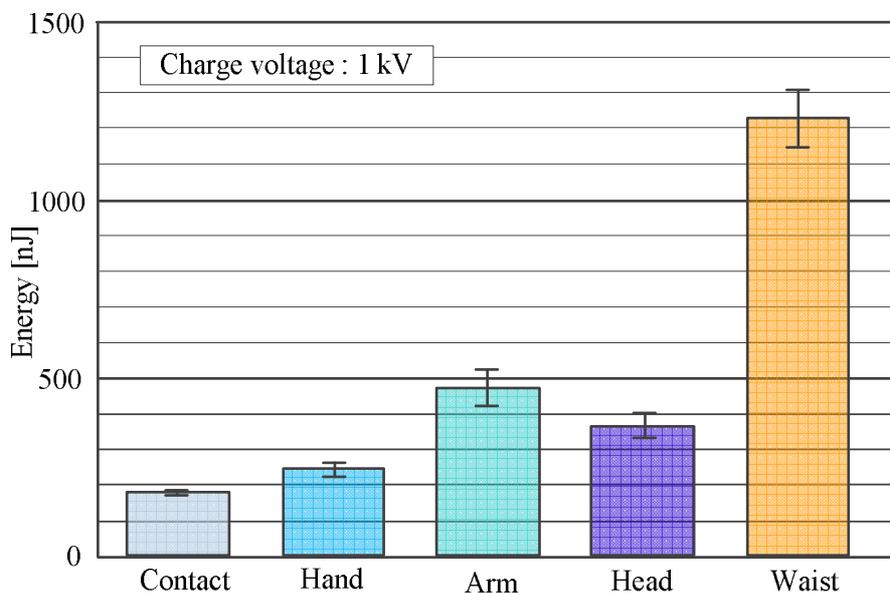


Fig. 5-8 Comparison of energy consumption of discharge currents.

Table 5-1 Waveform parameters to characterize discharge current through ESD generator, hand-held metal bar and body-mounted metal with charge voltage of $V_C = 1000$ V.

		Contact	Hand	Arm	Head	Waist
Waveform energy	E [nJ]	181	244	467	362	1223
Discharge resistance	R_D [Ω]	320	236	113	134	67
Charge storage capacitance	C_M [pF]	116	115	106	97	163
Discharge time constant	τ_D [ns]	37	27	12	13	11

5.3.3 人体インピーダンス

帯電人体からの放電電流の結果を更に検証するために、人体の各部位でのインピーダンスをベクトルネットワークアナライザ(VNA: Vector Network Analyzer)で測定した。Fig. 5-9 に、手持ち金属棒からの人体インピーダンスの測定セットアップを示す。人体からの放電電流を測定したファラデーケージの中央に取り付けた電流ターゲットの代わりに雌の SMA コネクタを取り付け、そのピンに 人体各部の電極を接触させた。VNA は、SMA コネクタ部でオープン、ショート及び 50 Ω 終端の校正をとり、反射係数 S_{11} の実部と虚部を測定した。これらから演算した 2 MHz~8.5 MHz の周波数範囲の抵抗及びリアクタンス成分を Fig. 5-10 に示す。また基準として 150 pF のコンデンサ C のリアクタンス($=1/\omega c$)の周波数特性も示した。ここに R 及び X は、それぞれ抵抗及びリアクタンスである。手の抵抗が最大であるが、2 MHz 以上の周波数で 300 Ω より小さく、10 MHz 以下では、1/3 になる。頭、上腕、腰及び手の 10 MHz 以下での 150 pF に近く、腰のリアクタンスが最小で、最大のエネルギー蓄積コンデンサに相当する。これらの結果は、放電電流波形及びそのエネルギーから説明できる。

この Fig. 5-10 のインピーダンスを対数で表示した抵抗及びリアクタンス成分をそれぞれ Fig. 5-11 及び Fig. 5-12 に示す。Fig. 5-11(b) 及び Fig. 5-12(b)は、その 2 MHz~100 MHz の周波数に対するインピーダンスで、破線は、Table.1 の放電抵抗 R_D 及び充電蓄積容量 C_M を示す。また Fig. 5-11(a)及び Fig. 5-12(a)の点線は、ESD 発生器の基準となる 330 Ω 抵抗及び 150 pF 容量を示した。最大の抵抗値は、ESD 発生器の規定を除いて手持ち金属棒であり、330 Ω は超えていない。そして腰の抵抗が最小で 10 MHz 以下の周波数では、手持ち金属部の抵抗の 1/3 以下となっている。なお Fig. 5-11 及び Fig. 5-12 には、Fig. 5-9 と同様の測定によって得られた ESD 発生器の内部インピーダンスも同時に示している。放電抵抗については、腰と手は、ほぼ一致し、頭と上腕については少し差異があるが、大きさの順序は、一致している。

頭、上腕、腰及び手のリアクタンスは、30MHz 以下では、150 pF 付近となっている。腰のリアクタンスは、一番低く 150 pF の充電蓄積容量に相当している。Fig. 5-11(b)及び Fig. 5-12(b)によると、10 MHz 以下での周波数で、抵抗及びリアクタンスは、殆ど Table. 5-1 の放電抵抗 R_D 及び充電蓄積容量 C_M に差異を含むものの大きさの順番は一致している。上記の結果は、放電電流の特性を表す Table 5-1 の波形パラメータが実用的であることを示している。10 MHz 以上の周波数領域における人体インピーダンスの乱れについては、測定系に起因するものかを含めて今後の課題である。

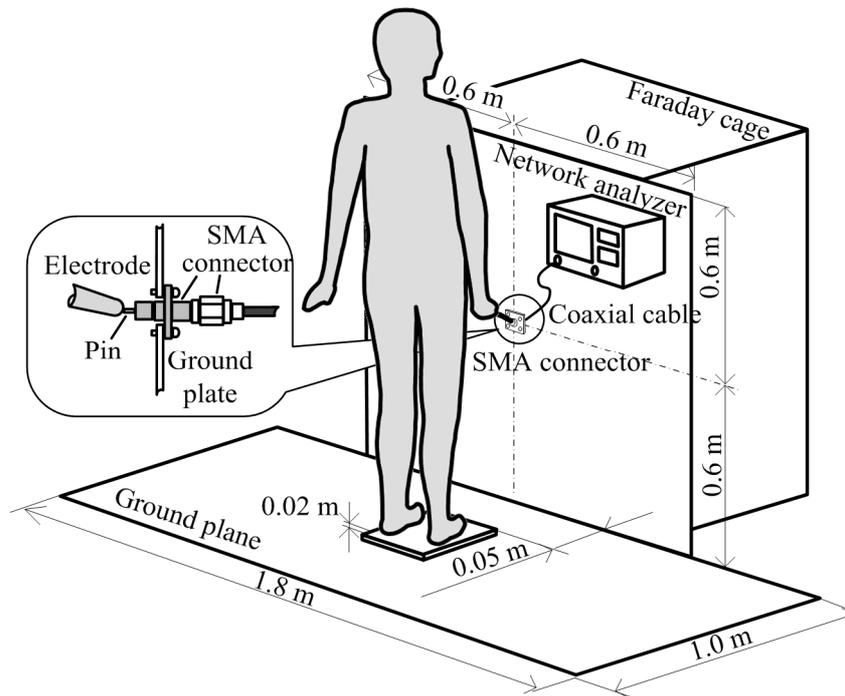


Fig. 5-9 Measurement setup of human body impedance seen from hand-held metal bar and body-mounted metal.

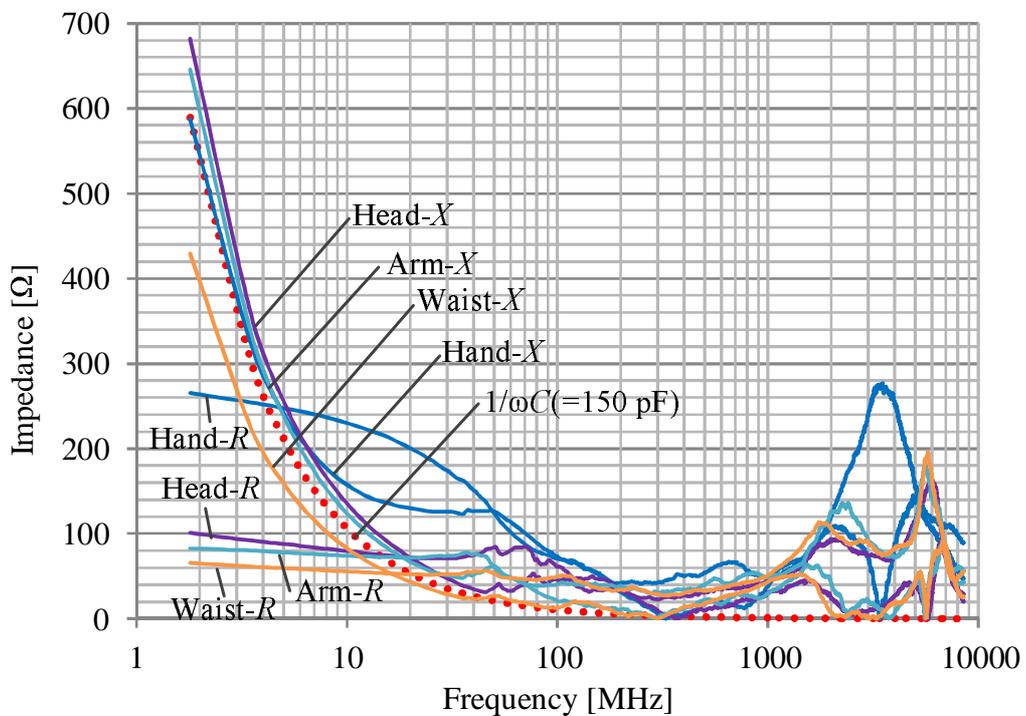
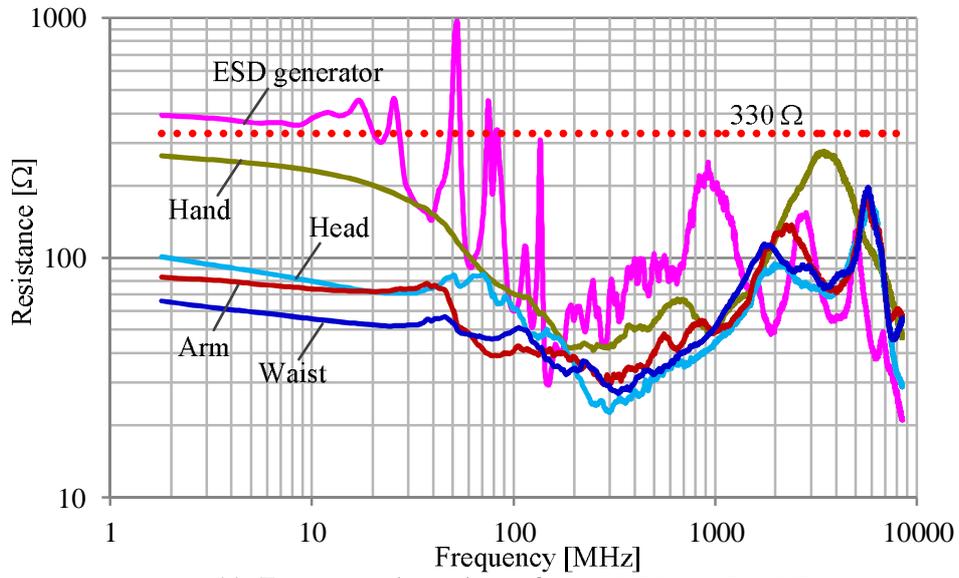
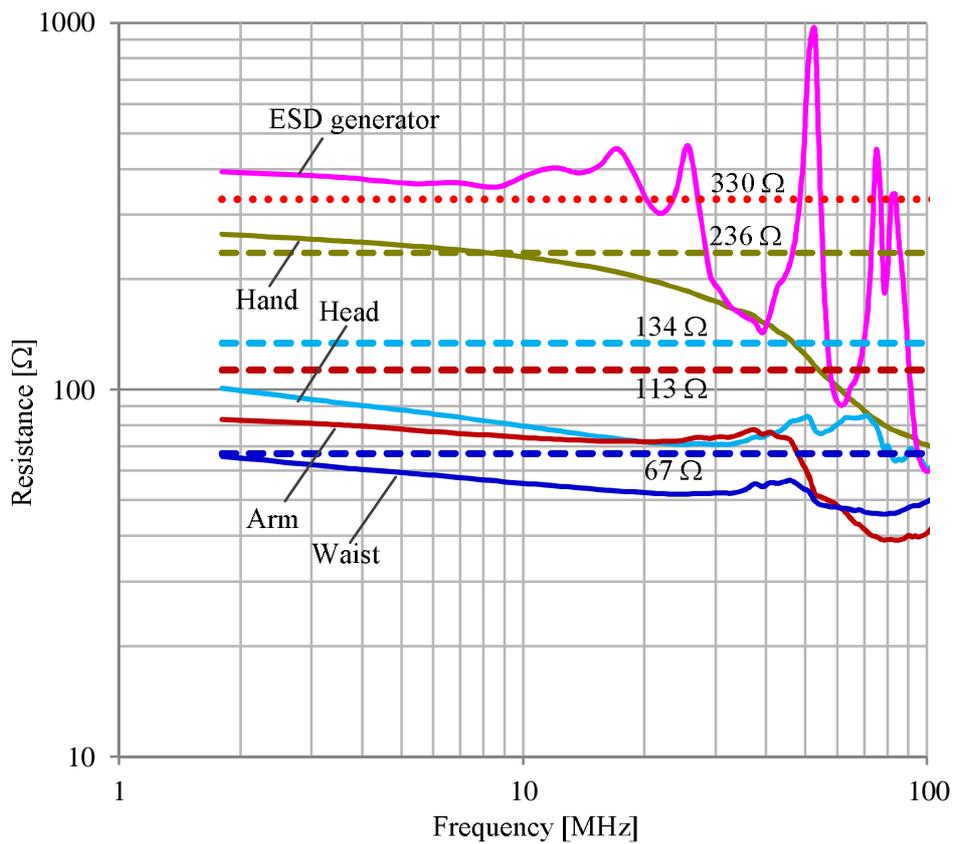


Fig. 5-10 Frequency dependence of human body impedance.

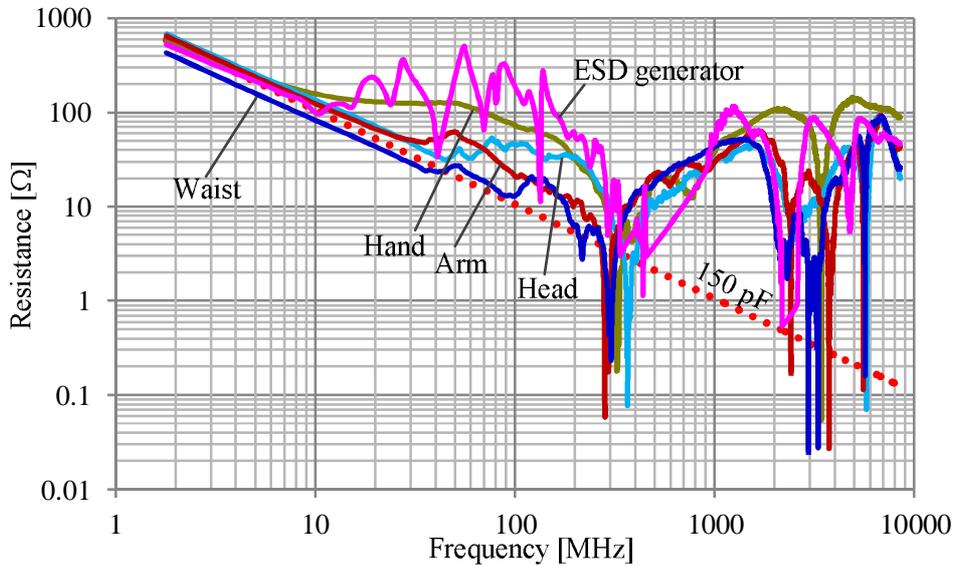


(a) Frequency dependence from 2 MHz to 8500 MHz

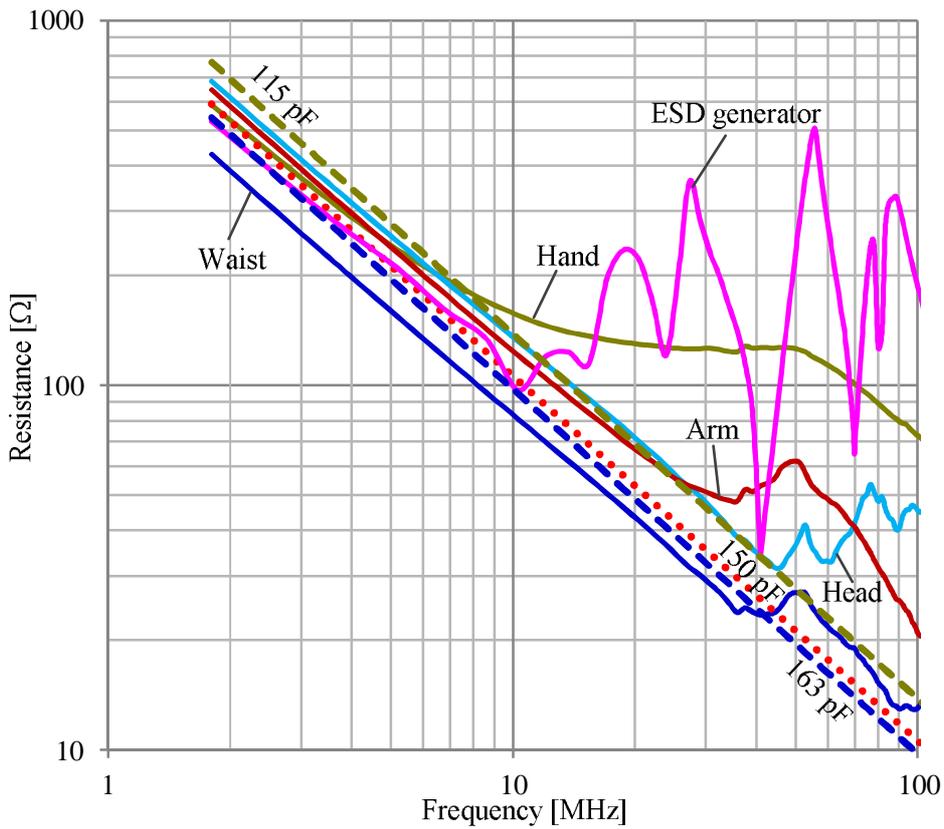


(b) Frequency dependence from 2 MHz to 100 MHz

Fig. 5-11 Measured frequency dependence of resistance of impedance seen from hand-held metal, body-mounted metal and ESD generator.



(a) Frequency dependence from 2 MHz to 8500 MHz



(b) Frequency dependence from 2 MHz to 100 MHz

Fig. 5-12 Measured frequency dependence of reactance of impedance seen from hand-held metal, body-mounted metal and ESD generator.

5.4. むすび

人体に取付けたウェアラブル機器の最も厳しい ESD イミュニティ試験として、グラウンド導体に接近する状況を想定し、実際の機器の代わりに帯電した人体の手持ちの金属棒、頭、上腕及び腰に付けた半球電極からの気中放電の放電電流を測定した。その結果、1 kV に帯電した人体からのピーク電流は、大きい方から半球金属装着した腰、上腕、頭及び金属棒をもった手の順となった。また人体の胴体部近傍からの放電電流は、50 ns でほぼ 0 A に減衰するのに対して、手からの放電は、90 ns 以上でも電流が流れている。これらの放電電流は、放電抵抗により特徴づけられており、充電蓄積容量と放電時定数は、波形エネルギーにより決まる。これらは、手及び人体の金属電極を通して測定した人体インピーダンスにより変化する。

以上の結果によりウェアラブル機器に対する ESD イミュニティ試験として、通常の ESD イミュニティ試験とは異なる静電容量及び放電抵抗での異なる放電試験方法の規定が必要なことを示している。

今後の課題は、異なる電極形状、異なる充電電圧及び接近速度を変化させたときにおこる人体に装着した金属からの放電電流の変化を調査することである。

参考文献

- [1] IEC (International Electrotechnical Commission), "IEC 61000: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test", Edition 2.0, December 2008.
- [2] Paul Lukowicz, Andreas Timm-Giel, Michael Lawo, and Otthein Herzog: "WearIT@work: Toward Real-World Industrial Wearable Computing", IEEE Pervasive Computing, Vol.6, No.04, pp. 8-13, 2007.
- [3] 石田武志, 肖鳳超, 上芳夫, 藤原修, 仁田周一: 「ウェアラブル機器への ESD イミュニティ試験の検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, EMCJ2014-72, pp.31-35, 2014-11.
"A Study of Electrostatic Discharge Immunity Testing for Wearable Equipment".
- [4] D. Pommerenke: "ESD: transient fields, arc simulation and rise time limit", Journal of Electrostatics, Vol.36, pp.31-54, 1995.
- [5] O. Fujiwara: "An analytical approach to model indirect effect caused by electromagnetic discharge", IEICE Trans. Commun., Vol.E79-B, No.4, pp.483-489, 1996-04.
- [6] S. Frei, M. Senghaas, R. Jobava and W. Kalkner: "The Influence of Speed of Approach and Humidity on The Intensity of ESD", 13th international Zurich

Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, 1999.

- [7] 森育子, 藤原修: 「放電電流波形の広帯域測定に基づく ESD に対する IEC イミューニティ試験の厳しき評価」, 電学論 A, 130 巻 5 号, pp.457-461, 2010.
"Severity Evaluation of the IEC Immunity Test against ESD based on Wideband Measurement of Discharge Current Waveform".
- [8] Takeshi Ishida, Yukihiro Tozawa, Mutsumu Takahashi, Osamu Fujiwara and Shuichi Nitta: "A Measurement on Electromagnetic Noises from ESD Generator just Before and After ESD Testing", Proceedings of 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility Tokyo (EMC'14/Tokyo), 16A2-B2, pp.737-740, 2014.
- [9] Yoshinori Taka, Takashi Adachi, Ikuko Mori, Osamu Fujiwara, Shinobu Ishigami and Yukio Yamanaka: "Transfer impedance of new-type calibration target and reconstruction of injected currents for air discharges from electrostatic discharge generators", IEICE Electronics Express, Vol.7, No.22, pp.1666-1671, 2010.



第 6 章

結論

帯電人体による電子機器への ESD 現象に対するイミュニティ試験は、国際規格 IEC 61000-4-2 によって規定され、現在の高度な情報装置を含む電子機器は、実用的な ESD 耐性を確保している。しかし本研究によりつぎの課題となる現象が確認された。

(1) ESD 発生器の電磁ノイズ

3 章より、ESD 発生器からの磁界プローブによる電磁ノイズを確認した。接触放電、気中放電の試験時以外にも直前直後に発生する内部のエネルギー蓄積コンデンサへの充電リレー切換動作および放電動作に伴い電磁ノイズが発生し、その電磁ノイズの周波数成分が放電時より高いことがわかった。電磁ノイズの誘起電圧の振幅である強度は、気中放電においては充電電圧には比例せず試験時の電磁ノイズが試験の直前、直後の放電リレー動作時より大きくなる場合があることも確認された。これらの直前・直後に発生する電磁ノイズは、高電圧電源の出力と充電リレーの動作タイミングを調整することで、低減することが実証できた。更に気中放電では、気象条件の違いと推定される電磁ノイズ振幅の再現性がないことも判明した。

(2) 微小ギャップを伴う接触放電の放電電流

4 章より、ESD 試験規格だけに定められている試験再現性を向上させる目的の接触放電方式において、放電電極が EUT に十分接触していない状況が発生すると、特異な放電現象が発生することが確認された。この現象は、EUT へのアプローチを伴う帯電人体からの気中放電での ESD 現象では発生せず、ピーク電流の増大と立ち上り時間の高速化を伴い、非常に厳しい試験結果を誘発する可能性がある。

この特異現象での電流ピークの試験電圧依存性、ギャップ長依存性を調べ回路論的アプローチでの考察をおこなった。その結果、微小ギャップを伴う接触放電では電極先端部分の寄生容量がまず充電されて微小ギャップ間の電圧の上昇によ

る絶縁破壊による気中放電が生じたとき蓄積電荷が放電し、試験器内蔵の波形成形用インダクタの影響を受けず、高速かつ高電流の放電波形が発生することが推定できた。

(3) 帯電人体に装着したウェアラブル機器の放電電流

5章より、設置してある電子機器に対する帯電人体が手で触る行為を前提にした国際規格は、人体に装着したウェアラブル電子機器のESD現象を包含していない。人体の手に持った又は頭部、上腕部及び腰に取付けた金属電極からでは、規格で定めた放電電流とは異なるピーク電流及び電流波形エネルギーの増大、並びに放電電流波形の減衰時定数の短縮などの現象が確認された。更にこれを裏付けるために、人体の手、頭部、上腕部並びに腰部での人体インピーダンスを測定し、放電電流から推定したエネルギー蓄積コンデンサの容量及び放電抵抗と人体インピーダンスから類推した値との妥当性を確認した。

これらの結果から国際規格のESD試験は、実際の電子機器に起こりうる帯電人体によるESD現象とは異なる現象が内在している。従って、自然界での電子機器に対するESD現象を再現できていない、若しくは過度のESD試験を要求している可能性がある。本研究によって得られたデータおよび課題が、ESD発生器の設計、また電子機器の設計及び評価する過程において理解され、反映されることを希望する。

今後に残された研究課題としては、つぎのように考える。国際規格IEC 61000-4-2では、試験再現性の観点から接触放電を主とした試験方法を規定している。しかし樹脂などの非導電体筐体においては、機器内部の導体部分に放電することを想定して、気中放電の実施が規定されているが、気中放電においては、放電の不安定性から電流波形などの試験規定はない。3章の結果から、空気中の火花放電を含む放電では、気象条件などの外的要因及び非線形の要素を多く含み、また4章の結果から火花を伴う気中放電では、火花抵抗が複雑な結果をもたらす。5章のウェアラブル機器を想定した人体からの放電電流においても、本研究では、試験電圧を1kVに限定しておこなったが、この放電電流は、気中放電によるものであり、異なる試験電圧とした場合、また異なる温度・相対湿度の条件では、更に異なる結果となることが予想される。この研究をさらに進めるにあたり、ESD発生器及びESD試験としての温度・相対湿度、試験電圧と気中放電との関連を明確にすることが不可欠となるため、この解明実験に着手することである。

謝辞

学位論文の審査にあたりご尽力いただいた電気通信大学 情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 肖 鳳超 教授に甚深なる謝意を表します。また同専攻の唐沢 好男 教授, 和田 光司 教授, 並びに学外審査委員として名古屋工業大学 藤原 修 名誉教授, 国立研究開発法人 情報通信研究機構 石上 忍 研究マネージャーに深く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり, 直接ご指導いただいた電気通信大学 情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 肖 鳳超 教授, 電気通信大学 産学官連携センター特任教授, 電気通信大学 上 芳夫 名誉教授, ならびに ESD 現象, EMC に関する多大な情報と助言を頂いた同産学官連携センター客員教授, 名古屋工業大学 藤原 修 名誉教授, 及び同産学官連携センター客員教授, 株式会社ノイズ研究所 取締役 (非常勤), 東京農工大学 仁田 周一 名誉教授に感謝の意を表します。

また研究成果の中間報告ならびにご助言を頂いた電気学会電磁環境技術委員会並びに同委員会傘下の調査専門委員会「放電に伴う過渡電磁界の調査専門委員会」委員長の東北学院大学 川又 憲 教授, 及び調査専門委員会「過渡電磁界の電子機器及び通信に対する障害調査専門委員会」委員長の国立研究開発法人情報通信研究機構の石上 忍 研究マネージャーをはじめ委員の皆さまにも感謝いたします。

更に, 在職中での社会人博士課程への就学ならびに, 研究のための社内の実験機材, 測定設備の使用を承諾いただき, 協力頂いた株式会社ノイズ研究所 藤垣 正純 代表取締役社長をはじめとする取締役役員・社員の皆様に感謝いたします。



論文目録

関連論文の印刷公表の方法及び時期

・論文誌

- 1) T. Ishida, Y. Tozawa, M. Takahashi, F. Xiao, Y. Kami, O. Fujiwara and S. Nitta:
"A Source Model and Experimental Validation for Electromagnetic Noises from Electrostatic Discharge Generator",
IEICE TRANS. COMMUN., Vol.E98-B, No.2, pp.317-323, Feb. 2015.
(本文の第3章の内容と関連)

- 2) 石田武志, 肖鳳超, 上芳夫, 藤原修, 仁田周一:
"静電気放電耐性試験における微小ギャップを伴う放電電流の測定と現象考察",
電気学会論文誌 A, Vol.135, No.5, pp.287-293, 2015.
"Measurements and Phenomenon Study on Discharge Currents with Small Gap in Electrostatic Discharge Immunity Test".
(本文の第4章の内容と関連)

- 3) 石田武志, 肖鳳超, 上芳夫, 藤原修, 仁田周一:
「静電気試験器の微小ギャップを介した接触放電に対する放電電流の増大現象と等価回路による機構解明」,
電気学会論文誌 A, Vol.136, 2016.
"Enhancement Phenomena and Mechanism Elucidation from Equivalent Circuit for Discharge Current through Small Gap in Contact Discharge of Electrostatic Generator".
(本文の第4章の内容と関連) (採録決定)

- 4) T. Ishida, S. Nitta, F. Xiao, Y. Kami and O. Fujiwara:
"Characteristics of Discharge Currents Measured through Body-Attached Metal for Modeling ESD from Wearable Electronic Devices",

IEICE TRANS. COMMUN., Vol.E99-B, No.1, pp.186-191, Jan 2016.

(本文の第 5 章の内容と関連)

・**国際会議プロシーディング**

1) T. Ishida, S. Nitta, F. Xiao, Y. Kami and O. Fujiwara:

"An Experimental Study of electrostatic Discharge Immunity Testing for Wearable Devices",

Proceedings of Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, Dresden 2015, TC-2, pp. 839-842, 2015.

(本文の第 5 章の内容と関連)

著者略歴

1957年11月20日生

1981年3月 東京電機大学工学部電子工学科卒業

1981年4月 日本エルエスアイ株式会社入社, マイクロコンピュータ制御開発・設計業務に従事

1983年3月 同社退社

1983年4月 株式会社コスモトロン入社, マイクロコンピュータ制御開発・設計業務に従事

1989年10月 同社退社

1989年11月 株式会社ノイズ研究所入社, EMC 関連機器の開発・設計業務に従事, 現在技術部上席部長

2013年10月 電気通信大学大学院情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 博士 後期課程入学, 2016年3月修了見込み

2015年8月 Joint IEEE International Symposium on EMC and EMC Europe, Dresden, Best Paper Award Honorary Mention 受賞

電気学会会員

電子情報通信学会会員

IEC SC77B MT12 エキスパートメンバー

電気学会 A 部門電磁環境技術委員会「過渡電磁界の電子機器及び通信に対する障害調査専門委員会」委員

自動車技術会 CISPR 分科会委員

電子情報技術産業協会 (JEITA) 半導体 EMC サブコミティ委員