

電磁雑音源としての衝突電極による
静電気放電に関する実験的研究

Experimental Study on Electrostatic Discharges due to
Collision Electrodes as Electromagnetic Noise Source

2015 年

富田 一

Experimental Study on Electrostatic Discharges due to Collision Electrodes as Electromagnetic Noise Source

Hajime Tomita

Abstract

Recently, there has been increased usage of electronic equipment with integrated circuits (ICs), which are used in high-speed and high-end semiconductor devices. Meanwhile, CPU clock frequencies have reached the order of several GHz, while signal voltages have decreased to 1 V. As the performance and functionality of electronic equipment have significantly improved, there have been several problems regarding malfunctions of electronic equipment due to electromagnetic noise.

With respect to electromagnetic noise, natural sources mainly include lightning, which is a natural phenomenon, and man-made sources include high-frequency welding, high-frequency sewing machines, electric discharge machines, lighting equipment such as fluorescent lights, electro-mechanical devices and digital-switching devices. When high-frequency energy is either emitted or propagated from equipment through its power cables, electromagnetic environment deteriorates.

During the development of ICs, electrostatic discharges (ESDs), which are among the main sources of electromagnetic noise, have rise times and frequency ranges of the order of sub-nanoseconds and above 6 GHz, respectively. Thus, discharge currents and electromagnetic waves due to ESD may interfere with clock pulses of electronic equipment and induce unexpected malfunctions. In particular, such failures are well-known to be frequently caused by ESDs due to the collision of charged objects, while the mechanism remains unknown.

In this study, we performed experiments to clarify the characteristic mechanism of the ESD phenomenon when a charged electrode collides with a grounded electrode. We fabricated an experimental apparatus by which a charged / grounded electrode makes a linear uniform motion. Spark lengths, discharge currents, and induced voltages were measured with the experimental apparatus. To determine the main cause for ESD due to the collisions of discharge electrodes, which generate an electric field between electrodes, we performed experiments with ESD when an increasing voltage was applied to fixed electrodes.

We used an AC servo-motor to make the collision speed constant, and performed the ESD experiment. The results show that as the collision speed increases, the average spark lengths decrease, the average values of the discharge current peak increase, the average rise times of the discharge current decrease, the average peak values of the induced voltage increase, and the average rise times of the induced voltage decrease. The collision speeds are also correlated with the spark lengths. With respect to the discharge current, the discharge peaks can be explained in a qualitative manner from an equation that was derived from the spark resistance

formula proposed by Rompe and Weizel. The time delay of the breakdown becomes shorter as the collision speed increases.

We investigated the ESD as the size of the electrode was varied. The results show that as the size of discharge electrodes becomes smaller for the same collision speed, the average spark lengths decrease, the average values of the peak discharge current increase, the average rise times of the discharge current decrease, and the average values of the peak induced voltage increase. To verify the reliability of the measured discharge currents through a commercially available current detection target which has a frequency flat response up to 4 GHz, we calculated the discharge currents based on the induced voltages in a magnetic loop probe with a diameter of 10 mm. We confirmed that the calculated results agree with the measured discharge currents for a spark length that is greater than approximately 0.5 mm, but they rise faster than the measured discharge currents when the spark length is approximately 0.2 mm, which may be due to the frequency limitation of the target.

In the next experiment, a grounded spherical electrode was made to collide with a fixed charged spherical electrode. The results show that as the collision speed increases, the average spark lengths decrease, the average peak values of the induced voltage increase, and the average rise times decrease. The spectrum intensities that were obtained by applying a short-time Fourier transform to typical induced voltage waveforms for each collision speed strengthened as the collision speed increased.

As the electric field between charged and grounded objects increases with time during their collision, the electric field between fixed electrodes, which has a gap length of 0.66 mm or 1.16 mm, was changed by increasing the rise velocity of a charging voltage for the fixed electrodes. The results show that as the rise velocity of the charging voltage increases, the discharge voltages and the peak discharge currents increase. Thus, the ESD phenomenon caused by the collision of the electrodes may be attributed to the rise velocity of the electric field between the electrodes.

To confirm the above speculation, we measured the effect of the rise velocity of the charging voltage for fixed electrodes that have gap lengths of less than 0.1 mm on discharge voltages and discharge currents. The results show that as the rise velocity of the charging voltage increases, the average discharge voltages and the average values of the peak discharge current increase.

In follow-up studies, it will be valuable to clarify the effect of collision speed on spark length theoretically, measure the discharge current using a wideband oscilloscope, and examine the effect of uniformity and condition of a spherical electrode, the dusts between electrodes, and humidity on ESDs.

電磁雑音源としての衝突電極による静電気放電に関する実験的研究

富田 一

概要

高速・高性能な半導体素子が集積されたIC などを用いた電子機器が一般的に使用され、CPU のクロックパルスの周波数はGHz に達し、信号電圧も1V までに低電圧となっている。このように電子機器が高速化、低電圧化が進展する一方で、電磁雑音による電子機器の誤動作のおそれも高まっている。

電磁雑音には自然現象による雷に加えて、人工システムである高周波ウェルダやミシン、放電加工機、蛍光灯などの照明機器、接点开閉装置、デジタルスイッチングデバイスなどがある。これらから高周波エネルギーの一部が放射されたり電源線を伝播して装置外に漏れると、電磁環境を悪化させることとなる。

電子機器が高速・高性能化する状況の中で、主要な電磁雑音源の一つである静電気放電 (ESD : Electrostatic discharge) は、立ち上がり時間がサブナノ秒オーダの高速の現象であって、6 GHz を超える広帯域の現象であることから、ESD による放電電流や電磁波が電子機器のクロックパルスと電磁干渉して、電子機器に不測の不具合を引き起こす。とくに、帯電体の衝突で生ずるESDは、機器の誤動作を頻発させることが知られてはいるものの、その機構については不明の部分が多い。

本研究では、ESD の中でも帯電電極と接地電極とが衝突するESD 現象に注目し、その特性機構の解明を目的とした。具体的には、帯電あるいは接地された電極を一定速度で等速直線運動が可能な実験装置を構築して、衝突速度とESD 現象にともなう火花長、放電電流および誘導電圧の測定を行った。つぎに、電極の大きさは、電極周囲に形成する電界強度の分布に影響を及ぼすことから、電極の大きさが衝突電極によるESD に及ぼす影響を調べた。さらに、衝突によるESD 現象に寄与する主要因を解明するために、電界がESDに及ぼす影響を固定電極間に印加する充電電圧の上昇速度を変化させて検討した。

まず、衝突速度を一定とするためにAC サーボモータを用いた速度制御によって衝突電極を用いたESD の実験を行った。その際、放電電流は4 GHzまでの伝達特性をもつESD 発生器検証用電流検出器 (ターゲット) で測定した。電磁雑音としては、直径10 mmのループの磁界プローブに生ずる誘導電圧を測定した。その結果から、衝突速度が速くなると、平均火花長は短くなること、放電電流ピーク値の平均値は大きくなり、放電電流の立ち上がり時間の平均値は短くなること、誘導電圧のピーク値の平均値は大きくなり、誘導電圧の立ち上がり時間の平均値は短くなることを示した。このことから、衝突速度と火花長、放電電流および誘導電圧との間に相関関係のあることを示した。また、火花長を用いて、Rompe-Weizel の火花抵抗則に基づいて導出された式から、放電電流の大きさの傾向については、定性的に説明できることを示した。衝突速度が速くなると、放電おくれは短くなることを示した。

つぎに、衝突電極の直径を変えて火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧を

測定した。その結果から、衝突電極の直径が小さくなると、同一の衝突速度でも、平均火花長は短くなること、放電電流ピーク値の平均値は大きく、放電電流の平均立ち上がり時間は短くなること、誘導電圧ピーク値の平均値は大きくなることを示した。ターゲットで測定した放電電流の信頼性を検討するため、磁界プローブへの誘導電圧から計算によって放電電流を算出したところ、計算波形は、火花長が0.5 mm 程度までは測定波形と一致し、ターゲットで放電電流を測定可能であるが、火花長が0.2 mm 程度になると、ターゲットの伝達周波数特性の限界から放電電流の立ち上がりが緩やかとなることを示せた。

つぎに、接地物体が固定された帯電物体に衝突する実験を行った。接地された球電極が静止した帯電球電極へ衝突する速度が速くなると、平均火花長は短くなること、誘導電圧ピーク値の平均値は大きくなり、誘導電圧立ち上がり時間の平均値は短くなることを示した。各衝突速度における典型的な誘導電圧に対して短時間フーリエ変換を適用することにより、衝突速度が速くなると、スペクトル強度も強くなることを示した。

以上のESD 実験において、電極が衝突する過程では帯電物体と接地物体間での電界強度が時間とともに強くなると推察されることから、ESD 現象に及ぼす電極間の電界の影響を調べるために、電極間隙長が0.66 mm、1.16 mm に固定された電極間に印加する充電電圧の上昇速度を速くすることによって、固定された電極間の電界強度を変化させた。その結果から、固定された電極間に印加する充電電圧の上昇速度が速くなると放電電圧が高くなり、放電電流ピーク値の平均値が大きくなることを示した。この結果は、電極間の電界強度の上昇速度が放電電圧を上昇させ、放電電流のピーク値を上昇させていることを示唆していることから、衝突電極によるESD 現象には電極間の電界強度の上昇速度が寄与していると確認できた。

さらに、0.1 mm 以下の電極間隙において、充電電圧の上昇速度が放電電圧、放電電流に及ぼす影響の実験を行った。その結果から、0.1 mm 以下の間隙長においても充電電圧の上昇速度が速くなると放電電圧の平均値が高くなること、放電電流ピーク値の平均値が大きくなることを示した。

今後の課題としては、衝突速度が火花長に及ぼす影響の理論的な解明、広帯域の電流センサを用いた放電電流測定によるESD 現象の解明が挙げられる。また、電極表面の均一性や状態、電極間の塵、湿度などがESD に及ぼす影響の解明がある。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	静電気の研究の歴史 [8]	2
1.3	静電気の帯電 [8, 9, 10, 12]	3
1.4	電磁妨害としての静電気放電 [8, 9]	3
1.5	静電気放電イミュニティ試験 [13, 14]	5
1.6	本研究の目的	8
1.7	本論文の内容と構成	10
第2章	帯電電極の衝突による ESD 実験	13
2.1	はじめに	13
2.2	ESD の発生装置	13
2.3	電極の衝突および ESD 測定方法	17
2.3.1	電極の衝突と ESD の発生	17
2.4	衝突による ESD の実験結果	18
2.4.1	衝突速度と火花長との関係	18
2.4.2	放電電流及び誘導電圧の衝突速度との関係	19
2.4.3	放電のおくれ	24
2.4.4	火花抵抗則からの放電電流の検討	24
2.5	まとめ	30
第3章	電極の大きさが ESD に及ぼす影響実験	31
3.1	はじめに	31
3.2	ESD の発生装置	31
3.3	ESD の発生と測定の方法	31
3.4	ESD の実験結果	33
3.4.1	衝突速度と火花長との関係	33
3.4.2	放電電流と衝突速度との関係	35
3.4.3	火花長と放電電流ピーク値・立ち上がり時間・上昇速度との関係	42
3.4.4	放電電流のターゲットによる測定の正確性	46
3.4.5	火花抵抗則による放電電流の検討	48
3.4.6	放電のおくれ	49
3.5	まとめ	50

第4章	接地電極が衝突するときのESD実験	53
4.1	はじめに	53
4.2	ESDの実験方法	53
4.2.1	接地電極を衝突させる実験装置	53
4.2.2	接地球電極の衝突方法	55
4.2.3	ESDの発生および測定方法	55
4.3	ESDの実験結果	56
4.3.1	誘導電圧及び放電電圧	56
4.3.2	火花長	59
4.3.3	誘導電圧ピーク値と立ち上がり時間	59
4.3.4	誘導電圧の短時間フーリエ変換	60
4.4	まとめ	63
第5章	充電電圧の上昇速度がESDに及ぼす影響実験	65
5.1	はじめに	65
5.2	充電電圧を制御するESD実験装置	65
5.3	ギャップ長が0.5 mmを超える場合	66
5.3.1	充電電圧の上昇速度を変化させるESD実験回路	66
5.3.2	放電電圧・放電電流の測定結果	67
5.4	ギャップ長が0.1 mm以下の場合	82
5.4.1	充電電圧の上昇速度を変化させるESD実験装置	82
5.4.2	ESDの実験結果及び考察	87
5.5	まとめ	98
第6章	結論	99
付録A	短時間フーリエ変換	101
	謝辞	102
	参考文献	103
	発表論文リスト	106

第1章

序論

1.1 背景

高速・高性能な半導体素子が集積された IC などを用いた電子機器が一般的に使用されている。パーソナルコンピュータに使用される CPU のクロックパルスの周波数は GHz にも達しており、消費電力を少なくする観点から信号電圧も 1 V までに低電圧となっている。このように電子機器が高速化、低電圧化が進展する一方で、電磁雑音による電子機器の誤動作のおそれも高まっている。昭和 57 年 3 月にはホイストクレーン (Hoist crane: 巻上装置として電気チェーンブロックを使用したクレーン) からの電気火花によって発生した電磁波が計算機数値制御 (CNC: Computerized Numerical Control) 旋盤に侵入したために、旋盤の主軸が突然に動き出して労働者が死亡する事故が発生している [1]。半導体素子に直接に静電気放電が発生すると半導体素子の破壊や劣化が発生している。このように電磁雑音に起因する半導体素子の破壊や電子機器の誤動作の可能性が高まっている。

電磁雑音には自然現象による雷に加えて、人工システムである高周波ウェルダやマシン、高周波表面焼き入れ装置、高周波メス、電子レンジ、整流子をもつ小形電動機、放電加工機、蛍光灯などの照明機器、接点機器などがある。これらから高周波エネルギーの一部が放射されたり電源線を伝播して装置外に漏れると、電磁環境を悪化させることとなる。そのためこれらを含む電磁雑音に応じて耐性 (イミュニティ) 試験として、静電気放電、放射無線周波電磁界、電氣的ファストトランジェント/バースト、サージ、無線周波電磁界によって誘導する伝導妨害、電源周波数磁界に関するイミュニティ試験などが国際電気標準会議 (IEC: International Electrotechnical Commission) の IEC61000 のシリーズ [2] において規格化されて、必要な対策が行われている。

このように電子機器が高速・高性能化する状況の中で、主要な電磁雑音源の一つである静電気放電 (ESD: Electrostatic Discharge) [3] は、立ち上がり時間がサブナノ秒の高速の現象 [5, 6, 7] であって、6 GHz を超える広帯域の現象 [4] であることから、ESD による放電電流や電磁波が電子機器のクロックパルスと電磁干渉して、電子機器が不測に誤動作するおそれがある。とくに、帯電体の衝突に起因して生ずる ESD は、機器の不具合を頻発させることが知られてはいるものの、その機構には不明の部分が多い。

このような背景から、本研究では、ESD の中でも帯電した電極と接地電極とが接近する衝突電極による ESD 現象に注目し、その特性機構を解明することを目的としている。具体的には、帯電あるいは接地された電極を一定速度で移動できる実験装置を構築して、衝突速度と ESD 現象にともなう火花長、放電電流および誘導電圧の測定を行うとともに、この ESD 現象に寄与している衝突に伴う過渡的な電界強度の上昇の影響についても検討

するものである。

本章においては、静電気放電の研究の歴史、帯電現象、放電現象、ESD イミュニティ試験について述べた後に、本研究の目的、本研究の概要について記述している。

1.2 静電気の研究の歴史 [8]

静電気現象としては、ギリシャのターレス (Thalēs) が、自身の身につけていた琥珀の首飾りが衣服と摩擦すると、細かなじん埃を吸引する現象を観察している。その後、近世まで静電気の研究は停滞した状態が続いていた。しかし近世になって、イギリスのギルバート (Gilbert) は、初めて検電器を考案し、琥珀以外にも吸引作用のあることを見だし、10種類の宝石、ガラス、硫黄、封蝋を列挙している。1660年頃にマグデブルグの市長であったゲーリッケ (Guerichke) は、摩擦した硫黄球を用いた実験を行い、金ばく、銀ばくなどが吸引された後に反発される現象や暗所で硫黄球を摩擦すると、光を発するとともにパチパチという音を発することを見いだしている。

オランダのライデン大学では、最初のコンデンサであるライデンびんを発明している。具体的にはライデン大学のムッシュンブレイク (Musschenbroek) らは、手のひらにのせた水が入ったガラスびんに起重機からの電気を流し、その後びんの入り口端子に手が触れたところ強烈な火花と電撃を受けたが、その要因は手のひらと水の間でコンデンサが形成されたことによる。

電磁気現象を定量的に解明する研究としては、1760年にベルヌーイ (Bernoulli) が、浮子式電気秤を用いて電気力が距離の2乗に反比例することを見だし、クーロン (Coulomb) は精密な実験によって、逆2乗則が1/2000の精度で成立することを確認している。1762年にはラプラス (Laplace) がポテンシャル場の基礎方程式であるラプラスの方程式を導出し、この方程式を拡張して空間電荷が存在する場合の静電界を記述する基礎方程式 (ポアソンの方程式) をポアソン (Poisson) が1812年に導出した。マックスウェル (Maxwell) は、有名なマックスウェルの方程式をまとめあげた。

その後は、電信電話、モータ、電灯の発明など動電気の時代となり、静電気は技術的関心が失われたまま20世紀に至ることとなったが、20世紀初頭にコットレル (Cottorell) が電気集じん機を発明したことによって再度日の目を浴びることとなった。コットレルは、直流高電圧電源を用いることによって電気集じん方式を工業化することに成功した。静電塗装技術、カールソン (Carlson) によって発明された静電複写技術は、その後、レーザー静電プリンタなどの多様な静電気応用技術へと進展することとなった。また、静電植毛などのファイバへの応用、エレクトレットコンデンサなどのフィルム形状への応用と進展していった。

一方で、第二次世界大戦後の石油化学工業、プラスチック工業の発達や石炭から石油へのエネルギー革命によって、静電気起因する障害・災害が問題となってきた。具体的には電気抵抗の高い炭化水素やプラスチック類を取り扱うときに発生する静電気起因する静電気放電によって、化学工場、製粉工場、製油工場、タンクローリ、大型タンカーなどにおいて生産障害や爆発火災などが発生した。また、静電気放電起因したコンピュータの誤動作、半導体素子の破壊や劣化が新たな問題として出現した。

1.3 静電気の帯電 [8, 9, 10, 12]

静電気は物体と物体との接触と分離の過程で発生する。固体どうしのみではなく、固体と液体、粉体と固体、液体どうしの接触と分離によっても帯電が発生する。ただし帯電を定量的に推定できるのは金属同士の接触による帯電に限られ、他の物体での帯電は定性的な段階にある。いま仕事関数が W_1 、 W_2 と異なる 2 種類の金属を接触させると、接触界面を介して電子の移動が起こり、両金属間に電位差が生ずる。電子は仕事関数の小さな金属から仕事関数の大きな金属へと移動し、仕事関数の小さな金属が正に、大きな金属が負電位となり、移動した電荷は界面間で二重層電荷を形成する。その電荷密度 σ は、接触電位差を V_c 、接触界面の単位面積あたりの静電容量を C_i とすれば、次式として表現される。

$$\sigma = C_i V_c \quad (1.1)$$

ここで、電気素量を e とすると、接触電位差は $V_c = (W_1 - W_2) / (-e)$ である。

接触後に両金属を分離すると、分離に伴う両電極の間隙の増大に伴って C_i の減少に起因する界面電位差を抑制して、 V_c を維持するように電子の逆流がトンネル効果によって起こると考えられている。

絶縁物の帯電現象は未解明の点が多いが、実験的に正に帯電しやすいものから負に帯電しやすいものへと順番に並べて Table 1.1[10] に示すような帯電列が得られている。具体的に人体の帯電電位を着衣の組み合わせでみると Table 1.2[12] のようになり、木綿と毛では 0.9 kV であるが、木綿とポリエステルでは 14.7 kV となっている。

1.4 電磁妨害としての静電気放電 [8, 9]

静電気放電には、大きくはコロナ放電、火花放電、沿面放電がある。コロナ放電は、針対平板電極のような著しい不平等な電界下で局部的に絶縁破壊によって発生する。火花放電は、全路破壊に至るきわめて短い時間に発生する過渡現象 [11] であって、急速な電流の上昇と高周波成分を含む電磁界が発生する。沿面放電は、異なる誘電体が相接する境界面に沿って発生する放電であって、気相と液相間、液相と固相間、気相と固相間などで発生する。

一方、IC は半導体素子が高集積化、高密度化しているために過電圧に対して脆弱となっている。帯電物体が IC に接近すると静電誘導によって半導体素子には電荷が現れ、この状態で接地体が接近すれば静電気放電が発生して放電電流が流れる。放電電流によって、素子の酸化膜の溶融、ピンホールの発生、入力インピーダンスおよび電流増幅率の低下などの劣化が発生する。半導体素子の損傷は放電条件に加えて、回路構成、パターン、材料などに依存するが、主として放電電荷量および放電エネルギーによって決定される。

最近の使用される電子機器のクロック周波数はギガヘルツと高速化していることから、静電気放電のようにインパルス的な放電が発生すると、放電による電磁雑音信号系に電磁干渉して誤動作の発生するおそれがある。具体的には人体、運搬用プラスチック箱、台車、椅子、ラインプリンタ用紙などが帯電して静電気放電が発生すると、インパルス的な電磁波が放射されるとともに放電電流が電子機器内の接地線に流れると、ほかのモジュール間配線などへの電磁結合や接地電位の変動などによって、電子回路の動作が不安定に

Table 1.1: Example of triboelectric series[10].

Metal	Fiber	Natural material	Synthetic resin
+	+	+	+
		Human hair, fur	
		Glass	
		Mica	
	Wool		
	Nylon		
	Rayon		
Lead	Silk		
	Cotton	Cotton	
	Linen		
		Wood	
		Flesh	
	Fibrous glass		
Zinc	Acetate		
Aluminum			
		Paper	
Chrome			Ebonite
Iron			
Copper			
Nickel			
Gold		Gum	Polystyrene
	Vinylon		
Platinum			Polypropylene
	Polyester		
	Acrylic		
			Polyethylene
	Polyvinylidene chloride	Celluloid	
		Cellophane	
			Vinyl chloride
			Polytetrafluoroethylene
-	-	-	-

As triboelectric series are obtained using pure substances, the table is only a guide.

Table 1.2: Human potential due to the combination of clothes[12].

Underwear Clothing	Cotton	Wool	Acrylic	Polyester	Nylon	Vinylon/ Cotton
Cotton 100 %	1.2	0.9	11.7	14.7	1.5	1.8
Vinylon/Cotton 55/45	0.6	4.5	12.3	12.3	4.8	0.3
Polyester/Rayon 65/35	4.2	8.4	19.2	17.1	4.8	1.2
Polyester/Cotton 65/35	14.2	15.3	12.3	7.5	14.7	13.8

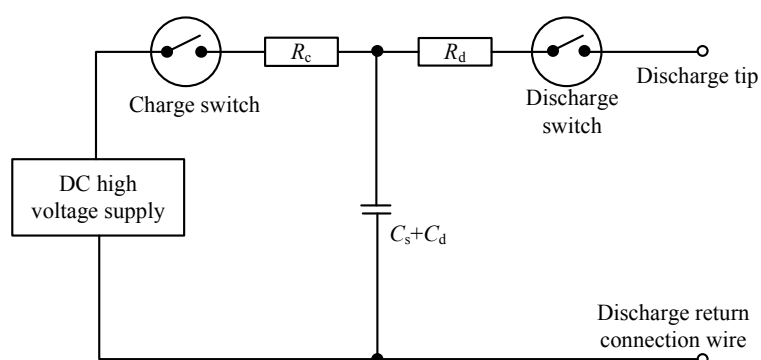
Unit:kV

なったり誤動作の発生するおそれがある。テレメータの誤動作が生産管理に障害を及ぼしたり、誤動作が原因で二次的な災害として労働災害が発生する可能性もある。

1.5 静電気放電イミュニティ試験 [13, 14]

静電気放電が電子機器に及ぼす影響を調べるためのイミュニティ試験が、国際電気標準会議 (IEC: International Electro-Technical Commission) の IEC61000-4-2 第 4-2 部：試験及び測定技術 静電気放電イミュニティ試験 [13] において規格化され、我が国においても国際規格に準拠した日本工業規格 (JIS: Japanese Industrial Standards)[14] が規格化されている。この規格は帯電人体が把持した金属から電子機器に対して静電気放電が発生する場合を模擬するものであり、試験レベルは Table 1.3 のように規定されている。静電気放電試験器の基本構成図は Fig.1.1 であり、基本的には 150 pF のコンデンサと 330 Ω の抵抗より構成されている。

異なった静電気放電発生器で得られた試験結果の比較ができるように、Fig.1.2[14] の放電電流波形およびその特性において Table 1.4[14] に示す特性が確認できなければならない。



NOTE 1 C_d is a distributed capacitance which exists between the generator and its surroundings.
 NOTE 2 $C_s + C_d$ has a typical value of 150 pF.
 NOTE 3 R_d has a typical value of 330 Ω.

Fig. 1.1: Simplified diagram of the ESD generator[14].

Table 1.3: Test levels[14].

Level	Contact discharge [kV]	Air discharge [kV]
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15
X ^a	x	x

^a "x" can be any level, above, below or in between the others. The level shall be specified in the dedicated equipment specification. If higher voltages than those shown are specified, special test equipment may be needed.

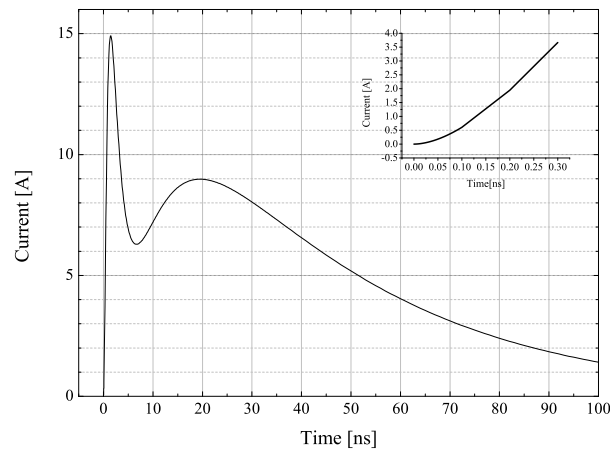


Fig. 1.2: Ideal contact discharge current waveform at 4 kV[14].

Table 1.4: Contact discharge current waveform parameters[14].

Level	Indicated voltage [kV]	First current of discharge (%) [A]	peak of discharge (±15 %)[A]	Rise time t_r^a (±25 %)[ns]	Current (±30 %) at 30 ns [A]	Current (±30 %) at 60 ns [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

^a The rise time, t_r , is the time interval between 10 % and 90 % value of 1st peak current. The reference point for measuring the time for the current at 30 ns and 60 ns is the instant when the current first reaches 10 % of the 1st peak of the discharge current [14].

静電気放電発生器には被試験機器 (EUT:Equipment Under Test) に静電気放電を印加するための電極として、接触放電用 (Fig.1.3(a)) と気中放電用 (Fig.1.3(b)) とがある。優先する試験方法は接触放電法であり導電性の表面及び結合板に適用し、気中放電法は接触放電法が適用できない場合に用いる。EUT に用いられる導電材料の表面が塗装されている場合に、EUT が絶縁塗装されていると明示されていない場合は、とがった放電電極で塗膜を貫通させ、導電材料に電極を接触させる。製造業者によって、絶縁塗装が明示されているときは気中放電のみを行い、接触放電を実施しない。

試験室で行う形式試験 (適合性試験) の試験配置の例を Fig.1.4[14] に示す。

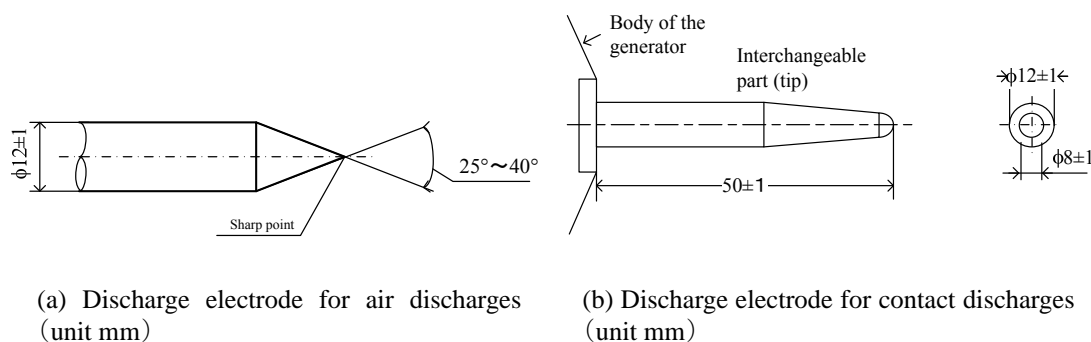


Fig. 1.3: Discharge electrodes of the ESD generator[14].

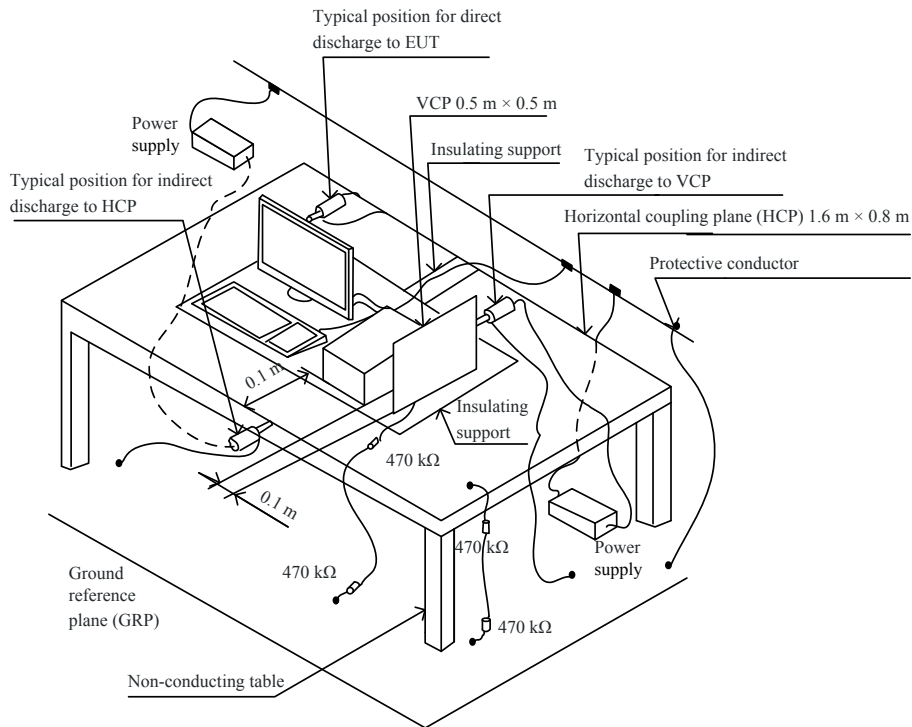


Fig. 1.4: Example of test set-up for table-top equipment, laboratory tests[14].

1.6 本研究の目的

1.4 節で述べたとおり電子機器のクロック周波数が高速となるとともに電磁雑音に対して誤動作が発生するおそれが高まっている。そのような電磁雑音の一つとして ESD による電磁妨害が深刻となっている。ESD 対策には帯電を抑制することが基本であるが、現在までに静電気の発生を完全に抑制することは実現されていない。また、発生した静電気を完全に除去するための対策には、帯電物体が導体であるか絶縁体であるかによって異なり、導体であれば接地によって対策が可能であるが、絶縁体であれば、導電性のフィラーを混ぜての導電化、加湿、除電器による帯電電荷の中和など多岐にわたるとともに、すべての物体を完全に対策することは実際には困難である。

したがって、静電気の放電は現状では避けられない状況にあるため、ESD による電磁妨害の対策の一環として前節で述べた IEC61000-4-2 第 4-2 部：試験及び測定技術 静電気放電イミュニティ試験 [13] に基づいたイミュニティ試験を行ってあらかじめ必要な対策を行うことが一般的に行われている。静電気放電イミュニティ試験の規格では接触放電と気中放電が規定されている。再現性の点からは接触放電が一般的に行われているが、実際の ESD では気中放電が一般的であることから、気中放電のほうがより実際的な試験であるといわれている。静電気放電イミュニティ試験のなかで、被試験機器が絶縁塗装されているときには、気中放電のみを行い、接触放電は実施しないと規定されている。気中放電を行う場合には「発生器の放電電極を、できるだけ速く EUT に接近及び接触させる。」と

規定されているのみで、具体的な速度については規定されていないことから、今後の検討課題となっている。

上記の静電気放電イミュニティ試験の規格化の一環として、また、ESD に起因する電子機器への影響や対策、ESD 現象の解明を目的として多くの研究が行われている [15]-[24]。このような ESD 研究の中で、静止した帯電スチール製の椅子と他の静止したスチール製の椅子との間での ESD では近くに設置されたパーソナルコンピュータが誤動作しなかったが、帯電したスチール椅子を静止したスチール椅子に急激に衝突させて ESD を発生させると、近くに設置されたパーソナルコンピュータが誤動作した事例が報告されている [15]。

帯電物体が接地体への衝突を伴う ESD 現象を解明するために、IEC で規定された先端が半球状の電極、指輪、腕時計を帯電させ、それらの接地体への衝突速度を速くすると放電電流ピーク値が大きくなることが報告されている [16]。同様に静電気放電試験器の充電された放電電極を接地体に急速に接近させながら ESD を発生させると、放電電流の立ち上がり急峻となるとともに放電電流のピーク値が大きくなる結果が報告されている [25, 26]。

充電された半球棒電極を回転させて固定された半球棒電極との間で火花放電を発生させて、回転による接近速度が速くなると放電電流の立ち上がり速度が速くなり、火花長と放電電流の立ち上がり速度とは相関関係のあることが報告されている [17]。このときの火花長の測定には顕微鏡を用いて測定している。Pommerenke は、帯電物体の衝突速度を変化させて、火花長と放電電流のピーク値・電流の時間微分の最大値とに相関のあることを報告している [21]。火花長の測定には、衝突する帯電物体に取り付けられたリニアポテンシオメータを用い、衝突途中の過渡的な位置を求めることができる。ただし、衝突過程の速度制御の方法については明確に記述されていない。Chundro らは帯電人体が IEC の規格で定められた気中放電用の電極を把持して、その電極を ESD 発生器検証用放電電流検出器（ターゲット）に接近させて、火花長と放電電流のピーク値・立ち上がり時間との間に相関関係あることを報告している [27]。

馬杉は静電気放電試験器の充電された放電電極を接地体に急速に衝突させながら ESD を発生させると、帯電電位を同一とした放電電極を緩やかに接地体に衝突させた場合の ESD に比較して、発生する電磁界強度が強くなることを報告している [20]。離散ウェーブレットによる多重解像度を用いた解析¹の結果においては、静電気放電試験器の充電された放電電極を接地体に衝突させながら ESD を発生させると、高周波領域における放電電流エネルギーが増加し、電磁雑音のレベルが上昇する可能性が指摘されている [20, 23]。

帯電物体の大きさが接近する ESD に及ぼす影響については、馬杉が球電極と円柱電極を用いて電極の形状が放電電流に影響を及ぼす影響を報告している [24]。ただし、定量的な衝突速度に対する ESD の放電電流依存性までは報告されていない。

以上のように、衝突を伴う ESD においては、接地物体を固定しておいて、帯電した物体を接地物体に衝突させることが一般的に行われている。しかし、実際の静電気が発生する環境においては、たとえば帯電した椅子が静止していて、接地された椅子が帯電椅子に衝突する過程で ESD の発生が考えられるが、このような場合の ESD については、吉田ら

¹元の信号を高周波成分と低周波成分とに分解し、分解された低周波成分をまた高周波成分と低周波成分に分解するという処理を繰り返す解析をいう。

は、接地した半球銅電極を一定速度で充電された固定電極に衝突させて、火花長、放電電流を測定し、火花長と放電電流のピーク値・立ち上がり時間との間に相関があることを、相対湿度が 4.9 % 以下で電極の衝突速度が 4 mm/s 以下の場合について報告している [37]。

静電気放電イミュニティ試験においては、気中放電において電極をできるだけ速く近づけると記述されているのみで、速度について明確な記述がなされていない。本研究では、イミュニティ試験の気中放電の規格化に寄与する基礎的なデータを提供することを目的としている。具体的には、静止した電極間での火花長から衝突を伴う場合に火花長が短縮した長さとの比（以下、火花長の短縮率という）を定量的に明らかにするとともに、放電電流、誘導電圧を測定し、衝突電極による静電気放電現象の解明を目的としている。ここでは球電極を用い、材料は多くの種類があるが真鍮を用いた。既に報告されている論文においては接近速度の影響について、速度の設定条件が明確に記述されていないことから [21]、AC サーボモータを用いることによって電極を一定速度で衝突させて、火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧を測定する。これによって、衝突速度の条件を明確化したうえで最大 100 mm/s までの一定速度で電極を衝突させたときの ESD によって、衝突速度に対する火花長、放電電流ピーク値、誘導電圧ピーク値の傾向を明らかとする。

ESD が発生するときの帯電物体には、スクリュードライバーのように先端が鋭角のものから、椅子などのように形状が丸いものまで多様性がある。電極の大きさは、電極周囲に形成する電界強度の分布に影響を及ぼすことから、電極の大きさが衝突電極による ESD に及ぼす影響を調べる。また、電極が衝突する場合に、帯電物体が静止した接地体に衝突する場合と接地体が静止している帯電物体が考えられることから、接地体が静止している帯電電極に衝突する場合の ESD 現象を測定する。

以上の衝突に至る過渡的な現象としては、帯電物体と接地物体との両者の間の電界強度が時間とともに強くなると考えられる。そこで、衝突による ESD 現象に寄与する主要因を解明するために、電界が ESD に及ぼす影響を固定電極間に印加する充電電圧の上昇速度を変化させて検討する。

1.7 本論文の内容と構成

本論文は全 6 章から構成されており、各章のあらまは以下の通りである。

第 2 章では、Pommerenke[21] の実験方法において、衝突条件を明確化するために AC サーボモータを用いた速度制御によって衝突電極を用いた ESD の実験を行う。そのために、電極を一定速度で衝突させる装置を製作し、衝突に伴う ESD について、火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧を測定する。その際、放電電流は 4 GHz までの伝達特性をもつターゲットで測定し、誘導電圧は、電流の近傍磁界で直径 10 mm のループの磁界プローブに生ずる電圧を測定する。その結果、衝突速度が速くなると、平均火花長は短くなること、放電電流ピーク値の平均値は大きく、放電電流の立ち上がり時間の平均値は短くなること、誘導電圧のピーク値の平均値は大きくなり、誘導電圧の立ち上がり時間の平均値は短くなることを衝突速度を一定とした条件下で明らかとする。また、火花長を用いて、Rompe-Weizel の火花抵抗則に基づいて藤原によって導出された火花電流から定

性的な傾向を推定できることを示す。衝突速度が速くなると、放電おくれが短くなることを示す。

第 3 章では、第 2 章で製作した装置を基本として、衝突電極の直径を変えて火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧を測定する。衝突電極の直径が小さくなると、同一の衝突速度でも、火花長の平均は短くなること、放電電流のピーク値の平均値は大きく、放電電流の立ち上がり時間の平均値は短くなること、誘導電圧のピーク値の平均値は大きくなることを示す。測定放電電流の信頼性を、磁界プローブへの誘導電圧から検討し、火花長が 0.5 mm 程度までは用いたターゲットで測定可能であるが、0.2 mm 程度になると立ち上がりが緩慢となることを示す。放電電流のピーク値・上昇速度は火花長が 1.2 mm 程度までは、Rompe-Weizel の火花抵抗則に基づいて藤原によって導出された火花電流より推定できることを示す。

第 4 章では衝突のために移動する電極を接地電極として、接地電極が静止した充電電極に衝突するときに火花長、磁界プローブへの誘導電圧を測定する。この場合においても、衝突速度が速くなると、火花長の平均は短くなること、誘導電圧ピーク値の平均値は大きく、誘導電圧の立ち上がり時間の平均値は短くなることを示す。各接近速度における典型的な誘導電圧に短時間フーリエ変換を適用して、衝突速度が速くなると、スペクトル強度も強くなることを示す。

第 5 章は第 2～4 章で得られた結果の考察である。第 2～4 章で実験した電極が衝突する過程では帯電電極と接地電極間での電界強度が時間とともに強くなると考えられることから、ESD 現象に及ぼす電極間の電界の影響を調べるために、電極間隙長が 0.66 mm、1.16 mm である固定された電極間に印加する充電電圧の上昇速度を速くすることによって、固定された電極間の電界強度の上昇速度を変化させる。その結果、固定された電極間に印加する充電電圧の上昇速度が速くなると放電電圧が高くなり、放電電流ピーク値の平均値が大きくなることを示す。また、充電電圧の上昇速度が速くなると、放電電流のスペクトル強度が強くなることを示す。

つぎに、0.1 mm 以下の電極間隙で充電電圧の上昇速度が放電電圧、放電電流に及ぼす影響の実験を行う。その結果 0.1 mm 以下の電極間隙長においても充電電圧の上昇速度が速くなると放電電圧が高くなり、放電電流ピーク値の平均値が大きくなる傾向となることを示す。

第 6 章は、本研究のまとめおよび結論である。

第2章

帯電電極の衝突による ESD 実験

2.1 はじめに

前章で述べたように、衝突電極による ESD については、つぎのような報告がある。文献 [17] においては、充電された半球棒電極を回転させて固定された半球棒電極との間で火花放電を発生させて、回転による衝突速度が速くなると放電電流の立ち上がり速度が速くなり、火花長と放電電流の立ち上がり速度とは相関関係のあることが指摘されている。文献 [21] では、リニアポテンショメータを用いて火花長を測定し、火花長と放電電流のピーク値・時間微分の最大値とに相関のあることが報告されている。ただし、衝突方法・衝突速度の導出方法については明確に記述されておらず、衝突速度と火花長との関係については、30 mm/s での帯電電圧依存性のみが示されている。

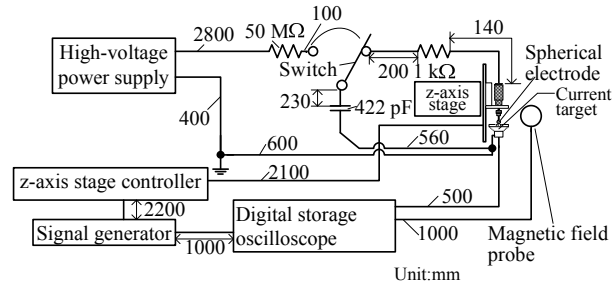
本章では、AC サーボモータで駆動される z 軸ステージを用いて、帯電球電極が静止接地体に向かって直線的に一定速度で衝突するときの ESD、火花長、放電電流及び磁界プローブへの誘導電圧を測定する。

2.2 ESD の発生装置

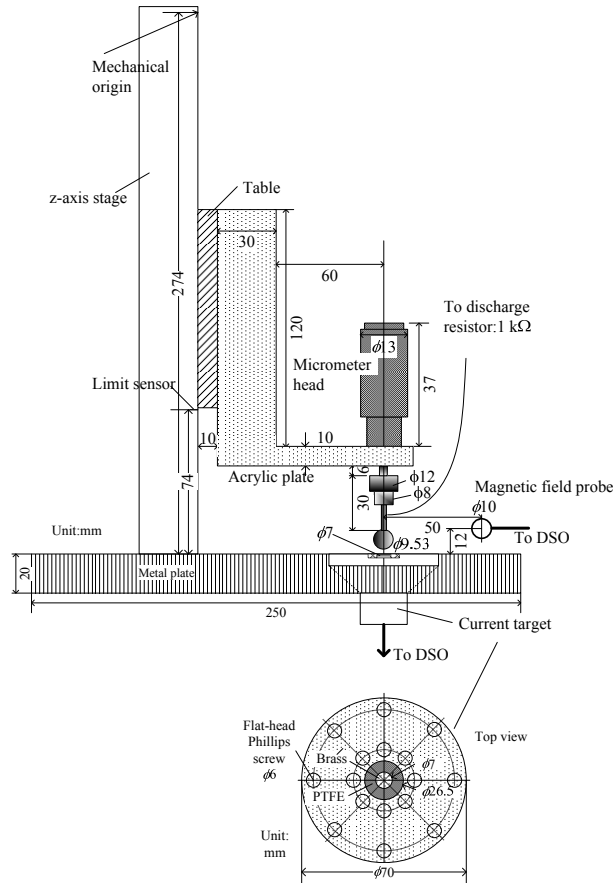
Fig.2.1(a) には帯電物体と放電部分を模擬する回路を示す。直流高電圧電源（松定プレシジョン、HER-10P3）は抵抗 (50 M Ω) を介して、高電圧スイッチ (Switch) の端子に接続されている。ESD の発生と放電電流測定のための回路は、帯電物体を模擬するコンデンサ (422 pF)、放電抵抗 (1 k Ω)、放電が発生する真鍮製球電極 ($D_{\text{brass}}=\phi 9.53$ mm)（以下、球電極という）及び ESD による放電電流を測定するための ESD 試験器検証用電流ターゲット（ノイズ研究所、MODEL : 06-00067A、以下、ターゲットという）より構成されている。

Fig.2.1(b) には z 軸ステージ（コムス、SAFG-100ZTI-B）と放電が発生する部分である真鍮製の球電極とを示す。球電極が取り付けられたマイクロメータヘッドは電気絶縁用のアクリル板を介して z 軸ステージの可動テーブル (100 mm \times 100 mm、厚さ : 10 mm) に接続されている。テーブル上端が機械原点に位置するときには、z 軸ステージの台座として水平に置かれた金属板の上面から 274 mm 上方に位置し、最大 100 mm 下降できる機構となっている。球電極に対向するように配置されたターゲットは、IEC61000-4-2 Ed.2[13] 静電気放電イミュニティ試験の規格において規定されたものであり、SMA ケーブル（長さ 500 mm）を介してデジタルストレージオシロスコープ（Tektronix、DPO70404B、周波数範囲 : DC \sim 4 GHz、サンプリング周波数 : 25 GHz、立ち上がり時間 (10-90 %、代表値) : 93 ps、以下、DSO と略記し、オシロスコープという）に接続されている。

第 2. 帯電電極の衝突による ESD 実験



(a) Circuit diagram



(b) Collision device for a charged spherical electrode

Fig. 2.1: Experimental setup for electrostatic discharge when a charged metal spherical electrode collides with a current target.

なお SMA ケーブルのターゲット側には 20 dB のアッテネータ、オシロスコープ側には 6 dB のアッテネータがそれぞれ取り付けられ、オシロスコープでの測定電圧を 10 倍することによって放電電流に換算できる。ここでターゲットに内蔵された抵抗回路を説明する。ターゲットを球電極側からみた Fig.2.1(b) の下側に示す図のように、球電極に対向する真鍮製の円板電極は直径 $\phi 7 \text{ mm}$ であり、この円板電極の下部には放電電流測定のために同心円状に配置された抵抗値 51Ω の抵抗 25 個が $\phi 7 \text{ mm}$ の円板電極と接地体間に並列に接続されている。これらの抵抗の出力端子は先述の 20 dB アッテネータが取り付けられた N 型コネクタに接続されている。ターゲットの放電電流測定用の合成入力抵抗値は 2.04Ω であり、その透過係数 (S_{21}) の変動は、DC~1 GHz で $\pm 0.5 \text{ dB}$ 以内、1 GHz~4 GHz で $\pm 1.2 \text{ dB}$ 以内となっている [39]。

ESD による誘導電圧を測定するための磁界プローブ (ETS LINDGREN、7405-903B、 $\phi 10 \text{ mm}$ 、芯線： $\phi 0.5 \text{ mm}$) は、ターゲットの中心から 50 mm 離れた箇所に中心が配置され、球電極とターゲット間で発生する磁界が最大に鎖交するようにループ面の中心が金属板の上面から 12 mm の高さに固定されている。磁界プローブは同軸ケーブル (特性インピーダンス： 50Ω 、長さ 1 m) を介して先述のオシロスコープに接続されている。

なお、磁界プローブの自己インダクタンス L は式 (2.1) によって求められる [28]。

$$L = \mu_0 b \{ \ln(8b/a) - 2 \} \quad (2.1)$$

ここで、 a 、 b 、 μ_0 は芯線の半径、ループの半径、真空の透磁率をそれぞれ表す。式 (2.1) の a 、 b 、 μ_0 に 0.5 mm 、 5 mm 、 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ を代入して L は 19.3 nH となる。上限共振周波数は 2.3 GHz であり、アンテナファクタを Fig.2.2[29] に示す。

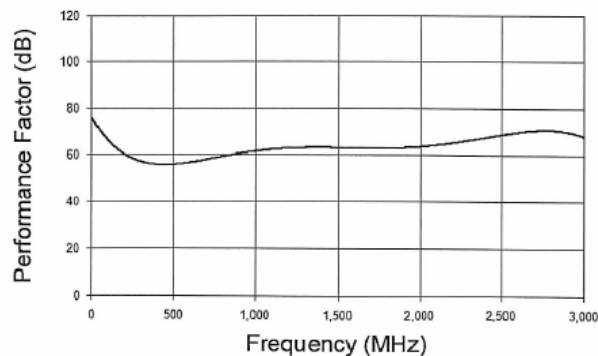
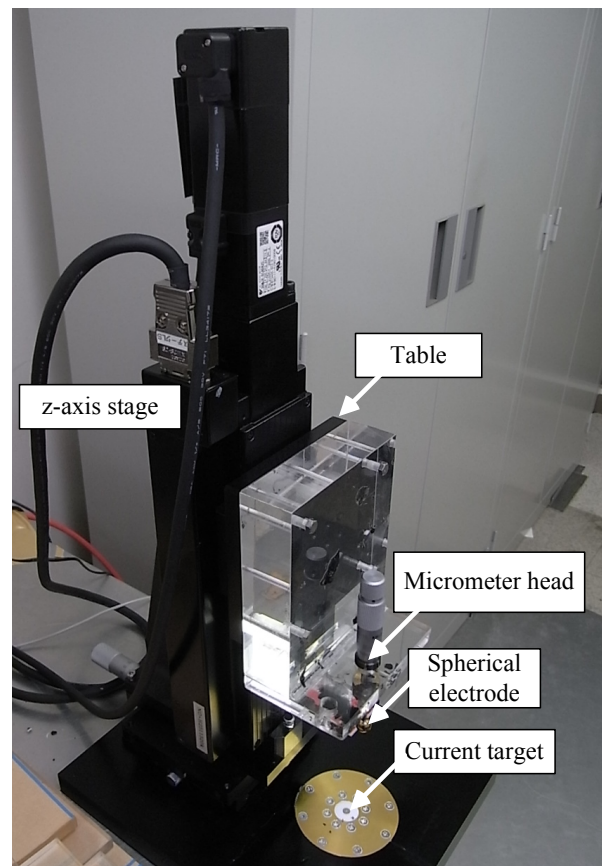
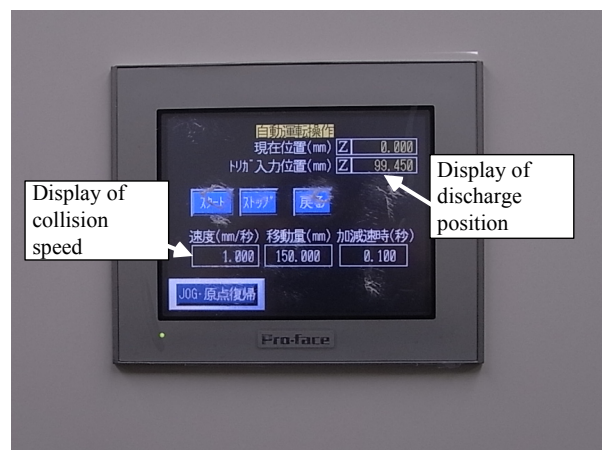


Fig. 2.2: Antenna factor for a magnetic probe. [29]

Fig.2.3(a) には z 軸ステージ、Fig.2.3(b) には z 軸ステージのコントローラ (YASUKAWA SGD V-R90F01A、Keyence KV-3000、KV-MC20V、KV-MX1、以下、コントローラという) の写真を示す。タッチパネルによって 100 mm/s までの衝突速度を任意に設定可能となっている。また、z 軸ステージに取り付けられたリミットセンサが動作することによって、テーブルに取り付けられた球電極が急停止する機構となっている。



(a) z-axis stage



(b) z-axis stage controller

Fig. 2.3: z-axis stage and controller.

2.3 電極の衝突および ESD 測定方法

2.3.1 電極の衝突と ESD の発生

実験準備として、球電極を 1 mm/s で下降させて下端に設置されたリミットセンサが作動して z 軸ステージのテーブルが静止したときに、リミットセンサの感知特性にばらつきがあるため、テーブルの可動する上限である機械原点からの距離は 99.815~99.847 mm であった。このときに、球電極がターゲットと衝突しないことを目的に、球電極とターゲットとの間隙が 40 μm となるように、マイクロメータヘッドによって調整した。

つぎに z 軸ステージのテーブルを原点復帰コマンドによって機械原点に復帰させた後に、球電極が等速度でターゲットに衝突する速度 (v_0 、以下、衝突速度という) を設定した。ここで v_0 は、1 mm/s、20 mm/s、40 mm/s、60mm/s、80 mm/s、100 mm/s の六つの場合とした。

ESD 発生のために、まず直流高電圧電源から 50 M Ω 抵抗を介してコンデンサを充電する。充電後に高電圧スイッチによって、コンデンサと直流電源とを切り離すとともに、コンデンサと球電極側の線路とを接続することによって、球電極側の回路を充電する。コントローラのスタートスイッチを押すと、0.15 秒後に設定された衝突速度で球電極がターゲットに向かって直線的に移動する。球電極の移動中に ESD が発生すると、ターゲットでの放電電流による電気信号がオシロスコープに送られて、放電電流が測定されると同時に、放電電流測定時にオシロスコープの AUX OUT 端子から出力されるパルス (50 Ω 負荷への出力レベル: 1.26 V、パルス幅: 400 μs)¹ が信号発生器に送信されて、信号発生器からテーブルを急停止させるためのパルス (ステージ負荷への出力レベル: 5.7V、パルス幅: 400 μs) が出力されて、テーブルが停止する。停止信号を受信時のテーブルの位置及びテーブルが完全に停止した位置がコントローラの液晶画面に表示される。また、静電気放電時の磁界プローブへの誘導電圧がオシロスコープによって測定される。なお、信号発生器がオシロスコープからのパルスを受信してから、急停止用のパルスを出力するに要する時間は 40 μs ² である。急停止用のパルス信号には振幅 4.5 V 以上、パルス幅 10 μs 以上であることが必要とされる。

本実験で火花長としている静電気放電発生時の球電極とターゲットとの間隙は、テーブルの位置と線形の関係を有していることから、火花長は、テーブルが停止信号を受信したときのテーブルの位置を用いて求められる。急停止信号の発生と急停止信号に必要とされる持続時間を加えた時間である 50 μs 及び z 軸ステージでの割り込み処理時間 (65 μs) を合わせて 115 μs を要する³ ことから、本実験での最大の電極移動速度である 100 mm/s では 11.5 μm ⁴ の誤差を有するが、本研究ではこの誤差⁵ を無視している。

¹ 「50 Ω 負荷への出力レベルが 1.8 V から 0V に立ち下がり、100 μs 後に 1.8 V に立ち上がるパルス」に訂正する。

² 60 μs に訂正する。

³ 「オシロスコープの AUX OUT からの立ち下がり信号が 1.8 V から 0 V となり、再度 1.8 V に立ち上がるに要する時間である 100 μs 、急停止信号の発生と急停止信号に必要とされる持続時間を加えた時間である 70 μs 及び z 軸ステージでの割り込み処理時間 (65 μs) を合わせて 235 μs を要する」と訂正する。

⁴ 「23.5 μm 」と訂正する。

⁵ コントローラの KV-3000 と KV-MC20V 間の通信には 1 ms の時間を要することから、KV-3000 での急停止位置の算出は 1 ms ごとに行われる。そのためコントローラに表示される放電位置には 0~1 ms の不確

直流高電圧電源の出力電圧 E_{out} は、+6.5 kV、+10 kV の二つの場合とし、各出力電圧における ESD の発生前に球電極及びターゲットをエタノールによって清浄にした。各衝突速度における 5 回の連続した放電を、衝突速度を変えながら気温 21 °C、相対湿度 55 % の電磁シールドルーム内で行った。なおコンデンサを充電後に球電極がターゲットに衝突する過程である移動中に ESD が発生するまでには最長 100 秒程度を要するが、電荷の漏洩によって帯電電位が低下しないことを、非接触式である表面電位計（春日電機、KSD-3000）を用いて確認している。

2.4 衝突による ESD の実験結果

2.4.1 衝突速度と火花長との関係

Fig.2.4 は衝突速度と火花長との関係図であって、シンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。衝突速度が速くなるとともに、火花長の平均値は短くなっている。衝突速度が 100 mm/s に達すると、 E_{out} が +6.5 kV、+10 kV ではおのおの火花長が静止した

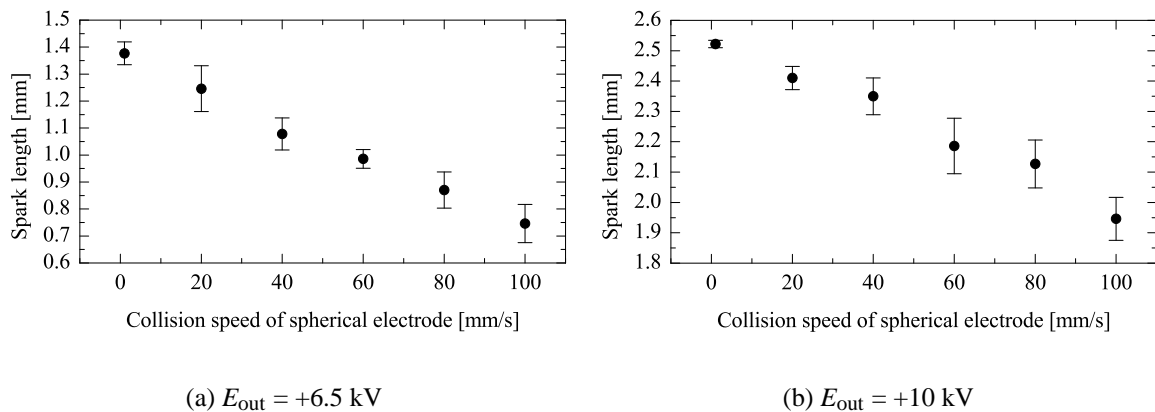


Fig. 2.4: Dependence of the spark length on the collision speed of the spherical electrode.

電極間の火花長（2.4.3 で後述）に比較して、約 49%、約 23 % 短縮している。また、衝突速度が 40 mm/s では、 E_{out} が +6.5 kV、+10 kV ではおのおの火花長が静止した電極間の火花長に比較して、約 27 %、約 8 % 短縮している。

衝突による火花長は、静止した電極間での火花長に比較して衝突速度が 30 mm/s で短くなった Pommerenke の結果 [21] と同様に、1 mm/s から 100 mm/s までの衝突速度において、衝突速度が速くなると火花長は短くなっている。

Fig.2.4 の結果について、衝突速度に対する各火花長をプロットした図を Fig.2.5 に示す。衝突速度 v_{0i} と火花長 l_i とのデータ列 $(v_{0i}, l_i) (i=1, 2, \dots, 5)$ に対して相関係数 R を式 (2.2) に基づいて算出する。

定な時間に起因する誤差が含まれている。具体的には、衝突速度に 1 ms を乗じた値となり、たとえば 10 mm/s では 10 μ m の最大誤差が生じることとなる。

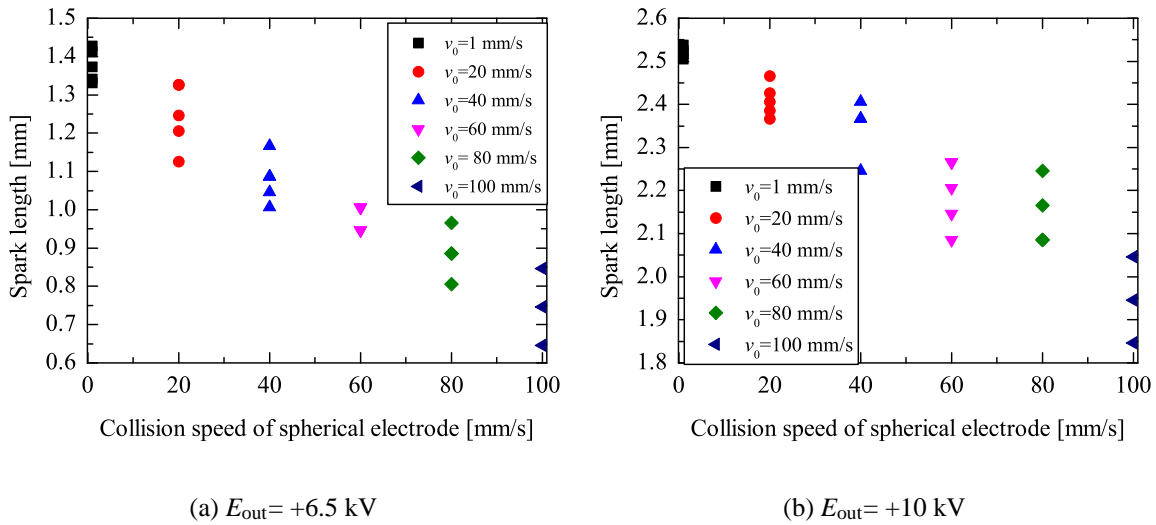


Fig. 2.5: Distribution of the spark length to the collision speed.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^5 (v_{0i} - \bar{v}_0) (l_i - \bar{l})}{\sqrt{\sum_{i=1}^5 (v_{0i} - \bar{v}_0)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^5 (l_i - \bar{l})^2}} \quad (2.2)$$

ここで、平均衝突速度 \bar{v}_0 、平均火花長 \bar{l} である。

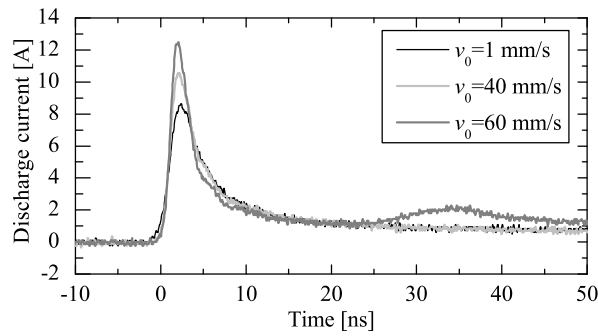
E_{out} が +6.5 kV、+10 kV について相関係数 R はおおよそ -0.96、-0.95 であり、“強い相関” のあることがわかる。衝突速度は火花長に影響を及ぼしているが、他の因子（電極の表面状態、酸化膜、塵など）も影響を及ぼすため、衝突速度がどの程度火花長を決定しているかを把握するために相関係数を求めた。相関が強ければ、衝突速度が火花長を決定づけているが、相関が低ければ、衝突速度以外の因子も火花長を決定づける因子として影響している状況と考える。

2.4.2 放電電流及び誘導電圧の衝突速度との関係

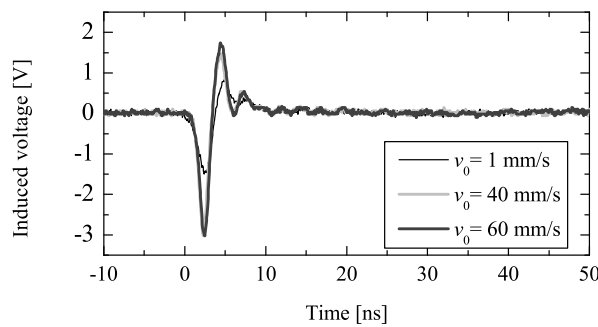
(1) 直流高電圧電源の出力電圧が +6.5 kV の場合

E_{out} を +6.5 kV とし、衝突速度を変えた場合の放電電流波形の典型例を Fig.2.6(a) に示す。同図に示す放電電流の第一のピークは主にマイクロメータヘッドと球電極に帯電した電荷によるものであり、第二のピークは主にコンデンサに充電された電荷による。ここでは放電電流の第一のピーク（以下、ピークという）に着目して検討する。衝突速度が速くなると、放電電流のピーク値は大きくなるとともに、立ち上がり時間 (10-90%) は短くなっている。文献 [16, 17, 25] において、衝突速度が速い場合には、遅い場合に比較して、放電電流のピーク値が大きくなるとともに立ち上がり時間が短くなる結果が報告されている。Fig.2.6(a) の結果は、文献 [16, 17, 25] と同じ現象が発生していることを示している。

Fig.2.6(a) の放電電流が得られた場合の誘導電圧波形を Fig.2.6(b) に示す。衝突速度が速くなると、誘導電圧のピーク値が大きくなるとともに、立ち上がり時間（誘導電圧の絶



(a) Discharge current waveforms due to ESD



(b) Induced voltage waveforms corresponding to the discharge currents shown in (a)

Fig. 2.6: Examples of discharge current due to ESD and induced voltage waveforms in the magnetic probe at E_{out} of +6.5 kV.

対値がピーク値の 10% から 90% に変化するに要する時間) も短くなっている。Fig.2.7 は衝突速度に対する放電電流のピーク値 (i_p)_{measured} と立ち上がり時間との関係であって、シンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。衝突速度が速くなると放電電流ピーク値の平均値は大きくなる傾向となっている一方、放電電流の立ち上がり時間の平均値は短くなっている。ただし、衝突速度が 60 mm/s ~ 100 mm/s では、放電電流の立ち上がり時間の衝突速度に対する依存性は小さくなっている。

Fig.2.8 は誘導電圧のピーク値と立ち上がり時間の平均値及び標準偏差の衝突速度依存性であり、シンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。衝突速度が速くなると誘導電圧ピーク値の平均値は大きくなる一方で、誘導電圧の立ち上がり時間の平均値は短くなっている。同図で衝突速度が速くなると誘導電圧ピーク値の標準偏差は大きくなっているが、要因については不明である。

第 2. 帯電電極の衝突による ESD 実験

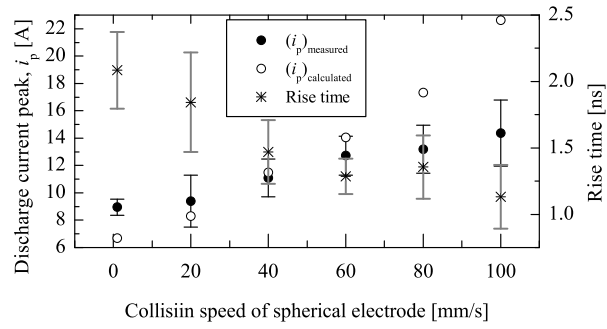


Fig. 2.7: Dependence of the peak value and the rise time of discharge current due to ESD on the collision speed of the spherical electrode at E_{out} of +6.5 kV.

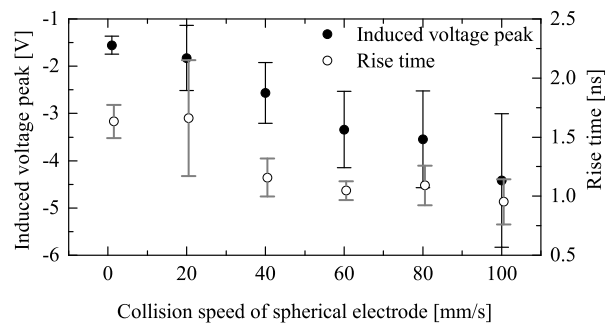


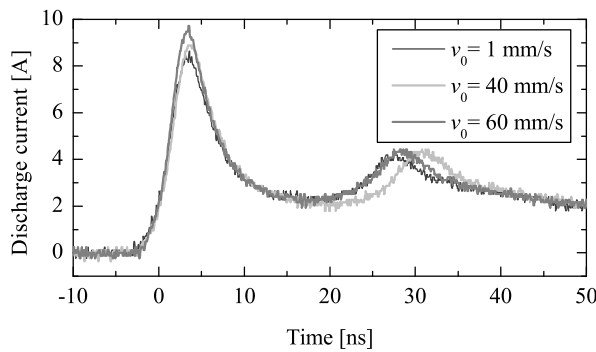
Fig. 2.8: Dependence of the peak value and the rise time of induced voltage on the collision speed of the spherical electrode at E_{out} of +6.5 kV.

(2) 直流高電圧電源の出力電圧が+10 kV の場合

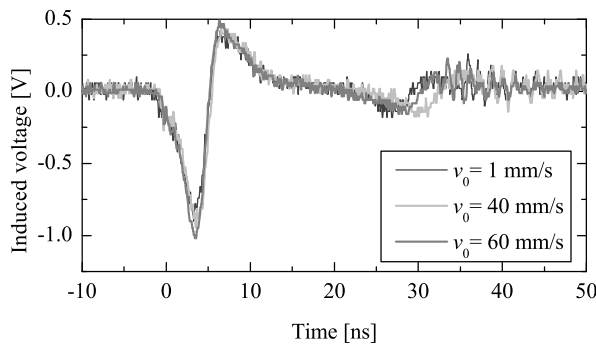
E_{out} を+10 kV に設定した場合について、放電電流波形の例を Fig.2.9(a) に、それらの放電電流に対応する誘導電圧の波形を Fig.2.9(b) に示す。 E_{out} が+6.5 kV の場合と同様に、衝突速度が速くなると、放電電流のピーク値は大きくなるとともに立ち上がり時間は短くなり、誘導電圧のピーク値も概略大きくなっている。

Fig.2.10 は衝突速度に対する放電電流のピーク値 (i_p)_{measured} と立ち上がり時間との関係図であり、シンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。衝突速度に対して、放電電流ピーク値の平均値は増加と減少を繰り返しながら増大している。一方、衝突速度が速くなるとともに放電電流の立ち上がり時間の平均値が短くなっている。同図に示す計算値 (i_p)_{calculated} については、2.4.4 項において後述する。

Fig.2.11 は誘導電圧のピーク値と立ち上がり時間の平均値及び標準偏差の衝突速度依存性であり、シンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。衝突速度が速くなると、誘導電圧ピーク値の平均値は増減しながら増大する一方、誘導電圧の立ち上がり時間の平均値は、短くなっている。



(a) Discharge current waveforms due to ESD



(b) Induced voltage waveforms corresponding to the discharge currents shown in (a)

Fig. 2.9: Examples of discharge current due to ESD and induced voltage waveforms in the magnetic probe at E_{out} of +10 kV.

第 2. 帯電電極の衝突による ESD 実験

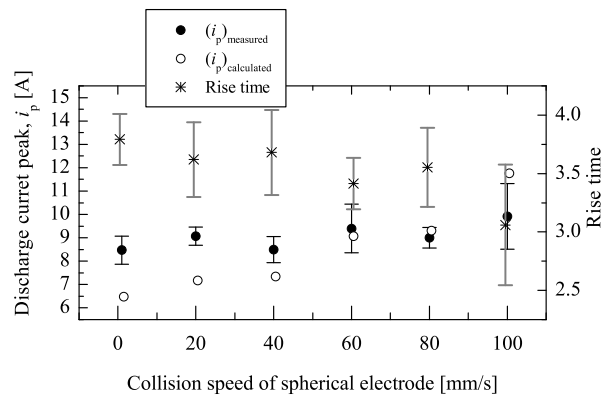


Fig. 2.10: Dependence of the peak value and the rise time of discharge current due to ESD on the collision speed of the spherical electrode at E_{out} of +10kV.

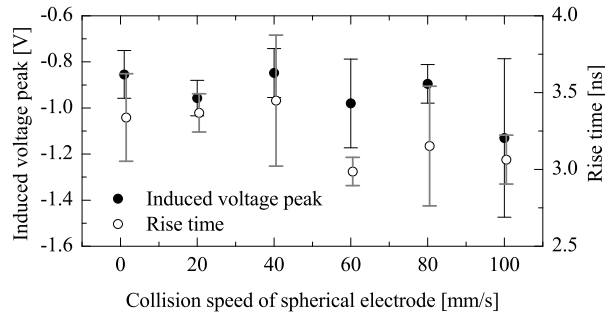


Fig. 2.11: Dependence of the peak value and the rise time of induced voltage on the collision speed of the spherical electrode at E_{out} of +10 kV.

2.4.3 放電のおくれ

ESD が発生するときに電極が衝突を伴うことによって火花長が短くなる現象の説明としては、つぎの可能性が指摘されている [42]。充電された電極が静止した接地体に衝突するときには、衝突電離などによって自由電子が生成される領域が非常に小さく、陰極から離れた場所で生成された自由電子が放電路に到達するには、固定された電極間隙間に印加する直流電圧を徐々に上昇させることによって得られた火花長となる時点から時間を要する可能性がある。その必要とする時間が要因となって、静止した電極間での ESD による火花長に比較して、電極が衝突を伴いながら ESD が発生する場合の方が火花長が短くなる可能性があると考えられている。

Fig.2.4 に示す衝突速度が要因となって火花長が短くなる現象は、衝突速度が放電のおくれを生じさせることに起因していると考えられていることから [21, 34, 37]、放電のおくれについて検討する。

E_{out} に充電された電極が衝突速度 v_0 で静止した接地体に衝突する場合の火花長を l_1 とする。電極間隙が l_0 である固定電極間に印加する直流電圧を徐々に上昇させて、 E_{out} で火花放電が発生したとき、その火花長を l_0 とする。同一の E_{out} に対する火花長 l_1 と l_0 とを用いて、統計的放電のおくれと放電の形成おくれを合わせた放電のおくれ t_d は式 (2.3) のように定義される [34]。

$$t_d = (l_0 - l_1) / v_0 \quad (2.3)$$

ここで、火花電圧が E_{out} [kV] であるときの火花長を l_0 [cm] とするとき、式 (2.4) に示す火花放電の実験式 [35] の関係を用いている。

$$E_{out} = 23.85 \sigma l_0 \left(1 + \frac{0.329}{\sqrt{\sigma l_0}} \right) \quad (2.4)$$

式 (2.4) の σ は気圧 101.325 kPa、気温 20 °C を基準とした気圧 p_1 [kPa]、気温 t [°C] における式 (2.5) に示す相対密度である。

$$\sigma = \frac{2.889 p_1}{273 + t} \quad (2.5)$$

式 (2.4)、(2.5) を用いて、 $p_1=101.325$ kPa、 $t=21$ °C の条件下で、 $E_{out}=+6.5$ kV 及び +10 kV における火花長 l_0 は各々 1.473 mm、2.549 mm となる。これらの火花長 l_0 と Fig.2.4 に示す平均火花長 l_1 を式 (2.3) に代入して、 E_{out} が +6.5 kV 及び +10 kV であるときの放電のおくれ t_d を求めると、Fig.2.12 となる。衝突速度が 1 mm/s から 20 mm/s と速くなると放電のおくれは短くなるが、衝突速度が 20 mm/s 以上の速度では、放電のおくれの衝突速度依存性は小さく、 E_{out} が +6.5 kV、+10 kV では、おおよそ 10 ms 程度、6 ms 程度となっている。

2.4.4 火花抵抗則からの放電電流の検討

ESD による放電電流は最初に火花電流が流れ、引き続いてアーク電流が流れ、さらにグロー放電による電流が流れていると考えられる。ESD 開始時の火花電流の特性を Rompe-

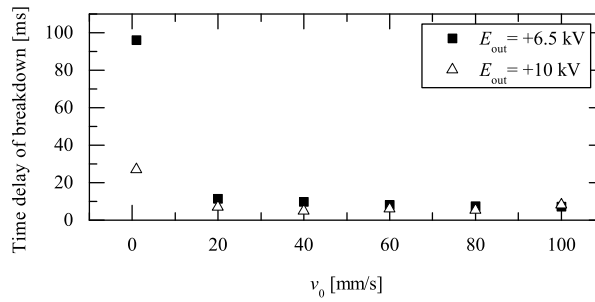


Fig. 2.12: Dependence of the time delay of breakdown on the collision speed of the spherical electrode.

Weize の火花抵抗則から検討するために、火花抵抗則から導出された式 (2.6) の火花電流 $i(t)$ [31] との比較を行った。ただし、文献 [32] で指摘されているように、球電極と対向するターゲット間での火花電流はターゲットによる放電電流の測定では正確には測定できていないため、ターゲットによる放電電流測定の精度を次章において検討する。

$$i(t) = I_{\max} F(t/\tau) \quad (2.6)$$

$$I_{\max} = \frac{C_0 V_s}{\tau} = \frac{C_0 V_s (\alpha/p) (V_s/l)^2}{3\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \frac{2\sqrt{21}-3}{75\sqrt{6-\sqrt{21}}} C_0 V_s (\alpha/p)^2 (V_s/l)^4 \quad (2.8)$$

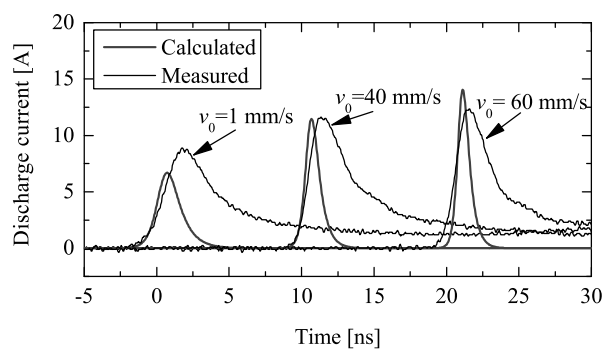
$$F(x) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \exp\left\{3\sqrt{3}(x-x_0)\right\} \cdot \left[1 + \exp\left\{3\sqrt{3}(x-x_0)\right\}\right]^{-1.5} \quad (2.9)$$

ここで C_0 :放電部の静電容量、 V_s :火花電圧、 l :火花長、 α : ガス圧力、気温によって決定される火花係数、 p : 気圧、 $\alpha/p \approx 1.1 \text{ atm}\cdot\text{cm}^2/(\text{V}^2\text{s})$ 、 x : 変数、 x_0 : 積分係数を表す。

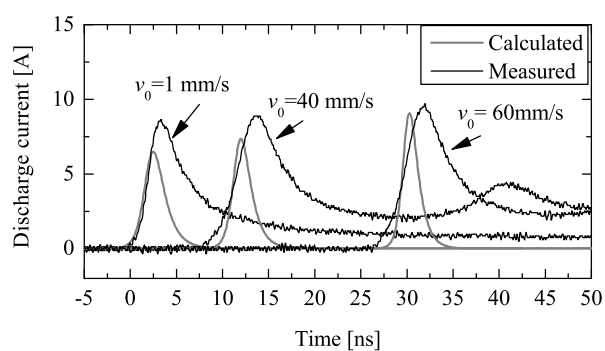
各衝突速度に対する平均火花長における放電回路の $1 \text{ k}\Omega$ 端子より球電極側のケーブル、マイクロメータヘッド部分の静電容量を LCR メータ (HP 4285A) によって 100 kHz において測定した。結果を Table 2.1⁶に示す。

⁶Table 2.1 の静電容量については、測定器の接地側の絶縁処理が不良であったために誤差を生じており、再測定の結果を Table 2.2 に示す。

第 2. 帯電電極の衝突による ESD 実験



(a) $E_{\text{out}} = +6.5 \text{ kV}$



(b) $E_{\text{out}} = +10 \text{ kV}$

Fig. 2.13: Discharge current waveforms obtained by calculation and measurement.

Table 2.1: Measured capacitance of the spherical electrode and micrometer head.

+6.5 kV		+10 kV	
Spark length [mm]	Capacitance [pF]	Spark length [mm]	Capacitance [pF]
1.38	2.18	2.52	1.95
1.25	2.22	2.41	1.97
1.08	2.29	2.35	1.92
0.97	2.35	2.19	2.05
0.87	2.26	2.13	1.99
0.75	2.17	1.95	2.10

Table 2.2: Measured capacitance of the spherical electrode and micrometer head measured when the terminal is insulated properly.

+6.5 kV		+10 kV	
Spark length [mm]	Capacitance [pF]	Spark length [mm]	Capacitance[pF]
1.38	3.06	2.52	2.92
1.25	3.06	2.41	2.93
1.08	3.09	2.35	2.94
0.97	3.11	2.19	2.96
0.87	3.14	2.13	2.96
0.75	3.17	1.95	2.99

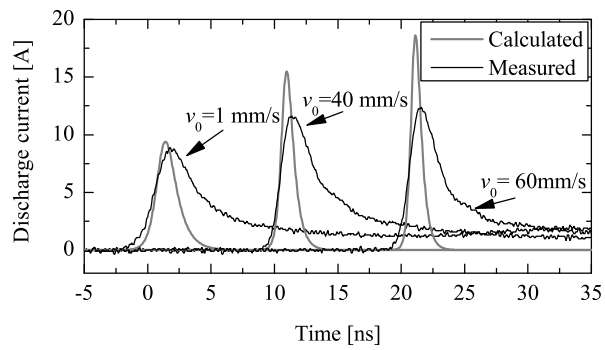
Table 2.1 の静電容量、火花長、火花電圧を式 (2.6) に代入して $i(t)$ を求めて、実験による放電電流との波形を比較した結果を Fig.2.13⁷ に示す。同図は、異なる衝突速度における放電電流波形を併記するために、衝突速度ごとに ESD の放電開始時間をずらして示している。測定と計算による放電電流立ち上がり部分の変化には類似性が認められる。衝突速度が速くなるとともに計算による火花電流のピーク値も測定値と同様に大きくなっている。ただし、放電電流のピークから立ち下がる部分については類似性が見られないが、コンデンサからの電荷による電流が重畳していることが一つの要因と考えられる。

式 (2.7) によって求めた火花電流ピーク値 $(i_p)_{\text{calculated}}$ を Fig.2.7 及び Fig.2.10⁸ に併記している。計算による火花電流ピーク値と実験による放電電流ピーク値の衝突速度依存性には類似性がみられ、Rompe-Weizel の火花抵抗則によって ESD の発生直後に測定された放電電流の実験結果を定性的に説明できることがわかる。

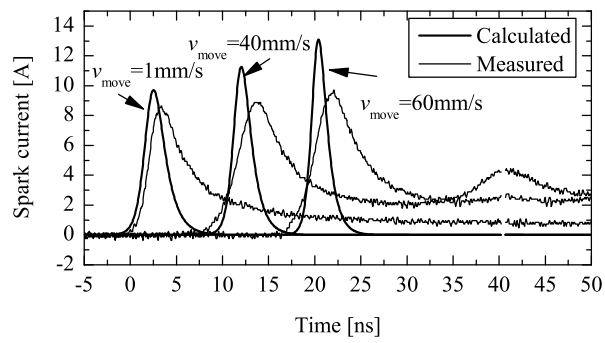
Fig.2.7 に示すように、衝突速度が速くなると放電電流のピーク値が大きくなるとともに、立ち上がり時間が短くなったことから、衝突速度が速くなると、放電電流に対応する Fig.2.8 に示す誘導電圧のように、磁束の時間微分によって得られる誘導電圧のピーク値が大きくなるとともに、立ち上がり時間も短くなると考えられる。同様に衝突速度が速くなると Fig.2.11 に示す誘導電圧が大きくなる結果も、Fig.2.10 に示す放電電流の衝突速度依存性によって説明される。

⁷Fig.2.13 で用いた Table 2.1 の静電容量には誤差があることから、Table 2.2 に示す静電容量を用いて実験による放電電流との波形を比較した結果を Fig.2.14 に示す。

⁸再測定した Table 2.2 に示す静電容量に基づいて ESD による放電電流のピーク値と立ち上がり時間の衝突速度依存性を Fig.2.15 に示す。



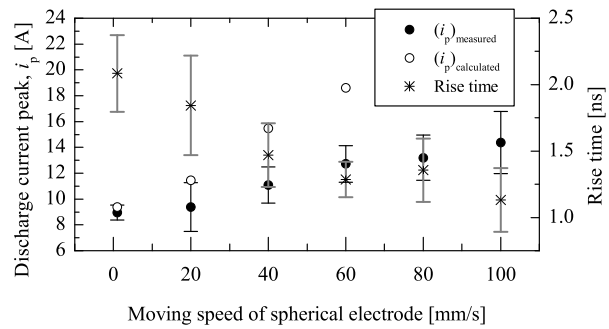
(a) $E_{out} = +6.5$ kV



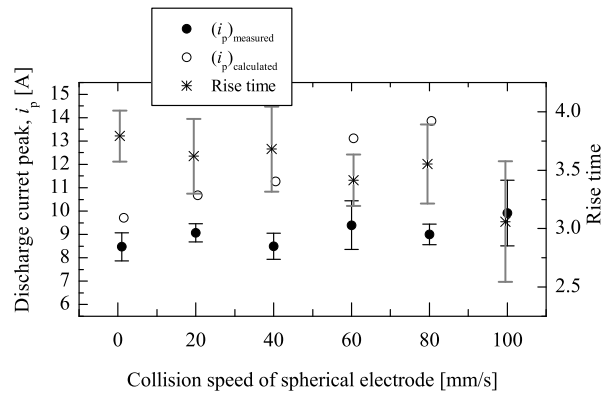
(b) $E_{out} = +10$ kV

Fig. 2.14: Discharge current waveforms obtained by calculation using the capacitance in Table 2.2 and measurement.

第 2. 帯電電極の衝突による ESD 実験



(a) $E_{out} = +6.5$ kV



(b) $E_{out} = +10$ kV

Fig. 2.15: Dependence of the peak value and the rise time of discharge current due to ESD on the collision speed of the spherical electrode when the capacitance in Table 2.2 is used.

2.5 まとめ

充電コンデンサに接続された球電極が等速直線運動によって静止した接地体に衝突中に ESD を発生させて、火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧を測定した。その結果、衝突速度に反比例して火花長の平均値は短くなる結果を得た。衝突速度が 100 mm/s に達すると、 E_{out} が +6.5 kV、+10 kV ではおのおの火花長が静止した電極間の火花長に比較して、約 49%、約 23% 短縮した。また、衝突速度が 40 mm/s では、 E_{out} が +6.5 kV、+10 kV ではおのおの火花長が静止した電極間の火花長に比較して、約 27%、約 8% 短縮した。

放電電流については、衝突速度が速くなると、放電電流のピーク値を平均した値は大きくなり、立ち上がり時間の平均値は短くなった。誘導電圧については、衝突速度が速くなると、誘導電圧のピーク値を平均した値は大きくなり、立ち上がり時間の平均値は短くなった。

衝突速度が速くなると放電のおくれは短くなるが、衝突速度が 20 mm/s 以上の速度では、放電のおくれの衝突速度依存性は小さく、 E_{out} が +6.5 kV、+10 kV では、おのおの 10 ms 程度、6 ms 程度となった。

放電電流ピーク値の火花長に対する特性は、Rompe-Weizel の火花抵抗則によって定性的には説明できた。

第3章

電極の大きさがESDに及ぼす影響実験

3.1 はじめに

前章において、電極の衝突速度および衝突のための電極の移動方法を明確化してESDを発生させ、衝突速度と火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧との関係を示した。一方、帯電物体にはスクリュードライバ、はさみのように小さなものからスチール製の机、いすや人体のように大きなものまで様々な大きさのものがある。文献[42]によって指摘されているように、充電された電極が静止した接地体に向かって移動するときには、衝突電離などによって自由電子が生成される領域が非常に小さく、陰極から離れた場所で生成された自由電子が放電路に到達するには、電極間隙が固定された電極による火花長となる時点から時間を要する可能性がある。その必要とする時間が要因となって、静止した電極間でのESDによる火花長に比較して、衝突を伴ってESDが発生する場合の方が火花長が短くなる可能性があると考えられている。

本章では、帯電物体の大きさに依存して帯電物体が形成する電界が周囲に及ぼす影響度が異なることから、衝突する電極の大きさが火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧に及ぼす影響について実験的に検討する。

3.2 ESDの発生装置

実験回路は前章の Fig.2.1(a) と同様の Fig.3.1(a) のとおりである。使用機器についても前章と同様の機材を使用し、ESD回路はコンデンサ (422 pF)、抵抗 (1 kΩ)、球電極 ($D_{\text{brass}} = \phi 5.0 \text{ mm}$ 又は 15.9 mm) 及びターゲットより構成されている。放電時の誘導電圧を測定する磁界プローブ (ETS LINDGREN、7405-903B) は、放電発生部から 200 mm 離れた箇所に中心が配置され、球電極間で発生する磁界が最大に鎖交するようにループ面の中心が金属板表面の延長線上に固定されている。磁界プローブは SMA ケーブル (特性インピーダンス: 50 Ω、長さ 1 m) を介して先述のオシロスコープに接続されている。また前章の Fig.2.1(b) において、本章では球電極とテーブルとの距離を 50 mm として Fig.3.1(b) に示す衝突用の電極を用いた。

3.3 ESDの発生と測定の方法

ESDの発生と測定方法を述べる。2.3.1の項で記述したと同様に、z軸ステージのテーブルが機械原点復帰後に衝突速度を設定する。高電圧スイッチによってコンデンサと100

MΩ 抵抗とを電氣的に接続して ESD 回路を充電する。コントローラのスタートスイッチを押すと、0.1 秒後に定められた衝突速度で球電極がターゲットに接近する。球電極の接近中に ESD が発生すると放電電流が測定されると同時に、オシロスコプの AUX OUT 端子から出力される立ち下がり信号が信号発生器 (HP 8116A) に送信される。信号発生器からはテーブルを急停止させるためのパルス (出力レベル: 5 V) が KV-3000 に送信され、KV-MC20V を介して SGDV-R90F01A にテーブルを急停止させる信号が送られる。KV-MC20V のカウンタを参照して放電位置が算出され、コントローラの液晶画面に表示される。本実験で火花長としている ESD 発生時の球電極とターゲットとの間隙は、放電位置を用いて求められる。DSO からの立ち下がり信号が信号発生器に送信されるに要する時間 (0.1 μs)、信号発生器から発生されるパルスの持続時間 (20 μs)、kV-3000 に送られたパルスが急停止信号と認識されるためにパルス信号が 0 V になった後に要する時間 (10 μs)、kV-3000 から KV-MC20V へ急停止命令を送信するに要する処理時間 (65 μs) を合わせた 95.1 μs を補正して、火花長を算出している。なお KV-3000 と KV-MC20V 間の通信には 1 ms を要することから、KV-3000 での急停止位置の算出は 1ms ごとに行われる。そのためコントローラに表示される放電位置には 0~1 ms の不確定な時間に起因する誤差が含まれている。具体的には、衝突速度に 1 ms を乗じた値となり、たとえば 10 mm/s では 10 μsm の最大誤差が生じることとなる。

直流高電圧電源 (松定プレジジョン、HER-10P3) の出力電圧 E_{out} は +4.0 kV、+6.5 kV とし、放電前に球電極及びターゲットを粒径 0.2 μm のアルミナを含有する研磨剤で表面を磨いた後にエタノールで清浄にした。数十回の予備放電の後に、各衝突速度における連続した放電を衝突速度を変えながら行った。実験は電磁シールドルーム内で、各 E_{out} 、球電極の直径 D_{brass} における気温 T 、相対湿度 RH 、気圧 p を Table 3.1 として行った。コンデンサを充電後に球電極がターゲットに接近中に ESD が発生するまでには最長 20 秒程度を要するが、電荷の漏洩によって帯電電位が低下しないことを、非接触式である表面電位計 (春日電機、KSD-1000) によって確認している。

Table 3.1: Experimental condition.

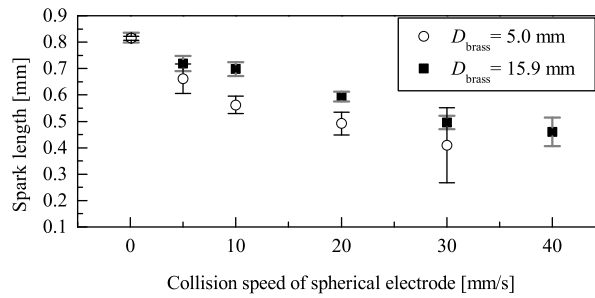
E_{out} [kV]	D_{brass} [mm]	T [°C]	RH [%]	p [kPa]
+4.0	5.0	23~24	47~48	100.9
+4.0	15.9	23~25	47~53	101.3
+6.5	5.0	24~25	41~52	100.9
+6.5	15.9	25	38~41	100.9

3.4 ESD の実験結果

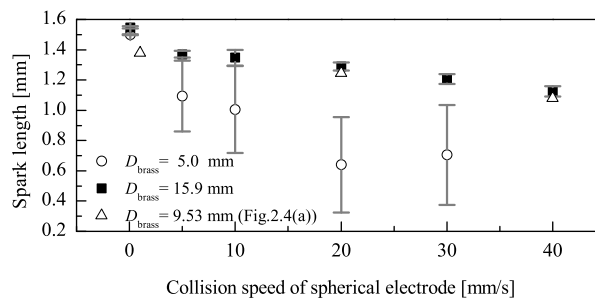
3.4.1 衝突速度と火花長との関係

衝突速度 v_0 が 0.1 mm/s では、ESD が安定していたことから、ターゲットとの電極間隙が約 2 mm の箇所を球電極の接近開始位置として 3 回の放電、衝突速度が 5 mm/s 以上で

第3. 電極の大きさがESDに及ぼす影響実験



(a) $E_{out} = +4.0$ kV



(b) $E_{out} = +6.5$ kV

Fig. 3.2: Dependence of the spark length on the collision speed of the spherical electrode.

は機械原点を球電極の接近開始位置として10回の放電を行った。

Fig.3.2は衝突速度と火花長との関係図であって、シンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。同図で電極直径が5.0 mm、衝突速度が40 mm/sでの値がプロットされていないが、火花長の誤差率が12%を超える値を除外したためである。Fig.3.2の結果は、電極直径9.53 mm、 E_{out} を+6.5 kV、+10 kVとした前章の結果と、衝突速度が速くなると火花長の平均値が短くなる結果について同様の特性となっている。衝突速度が0.1 mm/sでは5.0 mm、15.9 mmのいずれの電極直径でも平均火花長にほとんど差がないものの、衝突速度が5 mm/s以上では、同一の衝突速度に対して電極直径を5.0 mmとした方が15.9 mmに比較して平均火花長が短くなっている。電極直径が15.9 mmのときに、衝突速度が40 mm/sに達すると、 E_{out} が+6.5 kV、+4 kVでは火花長が静止した電極間の火花長に比較して、それぞれ約28%、約46%短縮している。Fig.3.2(b)にはFig.2.4(a)で示した E_{out} が+6.5 kV、 D_{brass} が9.53 mmの場合も併記し、本実験での火花長と概略一致している。それらの結果を火花長の短縮率としてFig.3.3に示す。Fig.3.2の結果について、衝突速度に対する各火花長をFig.3.4に示す。球電極の直径が15.9 mmの場合には衝突速度に対する火花長の相関性が高いが、直径が5.0 mmの場合には相関性が低くなっている。Table 3.2に示すように、球電極の直径5.0 mmで E_{out} が+6.5 kVの場合が-0.55と相関の強さは”中間の強さ”であり、他の場合は”強い相関”のあることがわかる。

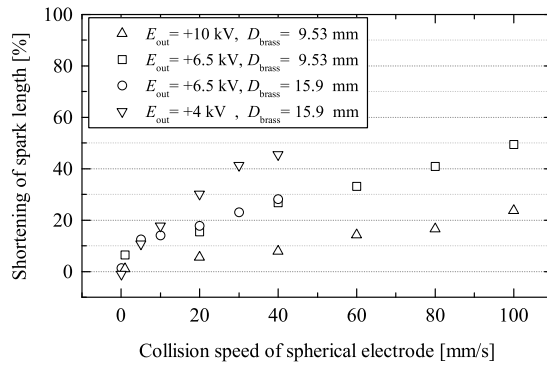


Fig. 3.3: Dependence of the shortening of spark length on the collision speed of spherical electrode.

Table 3.2: Correlation coefficient between the collision speed and the spark length.

$E_{out}(kV)$	$D_{brass}(mm)$	5.0	15.9
	+4.0		-0.80
+6.5		-0.55	-0.93

3.4.2 放電電流と衝突速度との関係

(1) E_{out} が +4.0 kV の場合

各衝突速度における平均的な放電電流波形の例を Fig.3.5 に示す。2.4.2 項で述べたとおり、Fig.3.5 ののピークは主にマイクロメータヘッドと球電極に帯電した電荷によるものであり、第二のピークは主にコンデンサに充電された電荷による。本章においても放電電流の第一ピーク（以下、ピークという）に着目して検討する。衝突速度が速くなると、放電電流のピーク値は大きくなるとともに、立ち上がり時間 (10-90 %) は短くなっている。衝突速度が 0.1 mm/s では電極直径が 5.0 mm、15.9 mm のいずれでも放電電流のピークに大きな差がないものの、衝突速度が 20、40 mm/s では、同一の衝突速度に対して電極直径が 5.0 mm 方が 15.9 mm に比較して放電電流のピーク値が大きく、立ち上がり時間が短くなっている。文献 [16, 20, 26] において、衝突速度が速い場合には遅い場合に比較して、放電電流のピーク値が大きくなるとともに立ち上がり時間の短くなる結果が報告されている。Fig.3.5 の結果は、文献 [16, 20, 26] と同じ現象の発生していることを示している。

Fig.3.5 の放電電流が得られた場合の誘導電圧波形を Fig.3.6 に示す。衝突速度が速くなると、誘導電圧のピーク値が大きくなるとともに、立ち上がり時間（誘導電圧の絶対値が

第 3. 電極の大きさが ESD に及ぼす影響実験

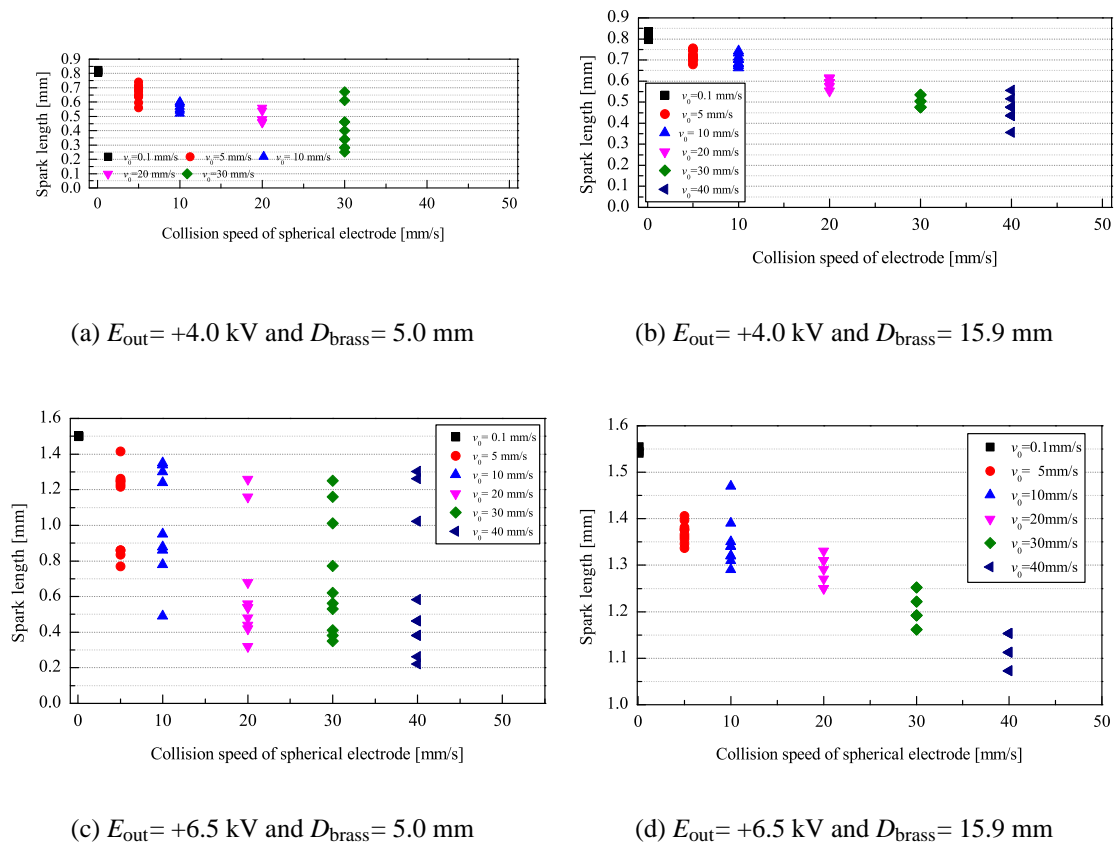


Fig. 3.4: Distribution of the spark length to the collision speed.

ピーク値の 10 % から 90 % に変化するに要する時間) も短くなっている。衝突速度が 0.1 mm/s では電極直径が 5.0 mm、15.9 mm のいずれでも誘導電圧に大きな差がないものの、衝突速度が 5 mm/s 以上では、同一の衝突速度に対して電極直径が 5.0 mm 方が 15.9 mm に比較して誘導電圧のピーク値が大きく、立ち上がり時間は短くなっている。衝突速度に対する放電電流のピーク値、立ち上がり時間の統計結果を Fig.3.7 に示す。同図でシンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。衝突速度が速くなると放電電流のピーク値の平均値は大きくなり、立ち上がり時間は短くなっている。同一の衝突速度に対しては、0.1 mm/s では電極直径が 5.0 mm と 15.9 mm との放電電流ピーク値の平均値の差異は小さいものの、衝突速度が 5 mm/s 以上では電極直径が 5.0 mm 方が 15.9 mm に比較して放電電流ピーク値の平均値は大きくなり、平均の立ち上がり時間の平均値は短くなっている。誘導電圧ピーク値の平均値及び標準偏差の衝突速度依存性を Fig.3.8 に示す。同図でシンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。同一の衝突速度に対しては、0.1 mm/s では電極直径が 5.0 mm と 15.9 mm との誘導電圧ピーク値の平均値の差異は小さいものの、衝突速度が 5 mm/s 以上では電極直径が 5.0 mm 方が 15.9 mm に比較して誘導電圧ピーク値の平均値は大きくなっている。

第 3. 電極の大きさが ESD に及ぼす影響実験

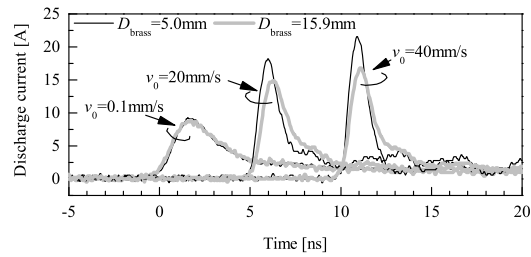
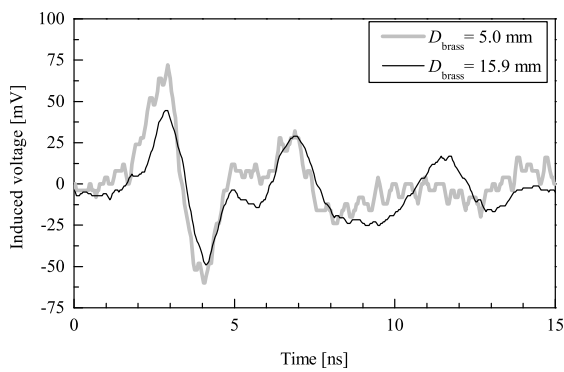
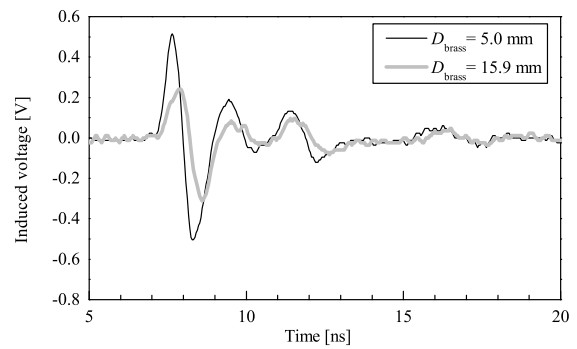


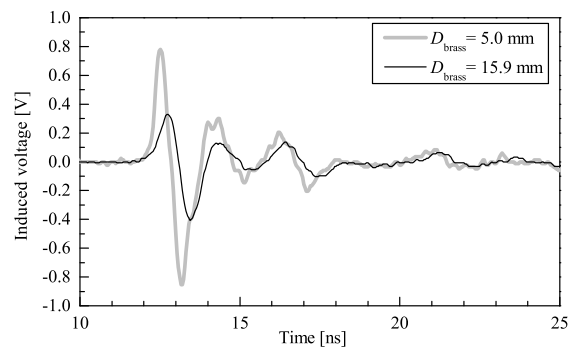
Fig. 3.5: Examples of discharge current due to ESD at an E_{out} of +4.0 kV.



(a) $v_0 = 0.1 \text{ mm/s}$



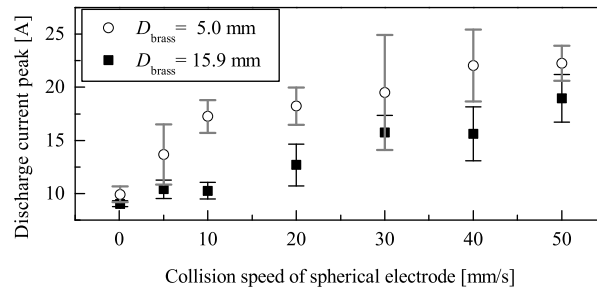
(b) $v_0 = 20 \text{ mm/s}$



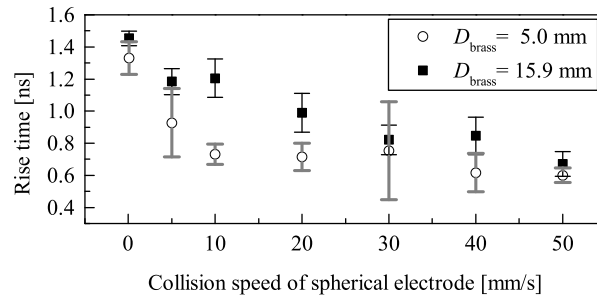
(c) $v_0 = 40 \text{ mm/s}$

Fig. 3.6: Induced voltage waveforms in the magnetic probe corresponding to Fig.3.5

第 3. 電極の大きさが ESD に及ぼす影響実験



(a) Discharge current peak



(b) Rise time

Fig. 3.7: Dependence of the peak value and the rise time of the first peak of the discharge current on the collision speed of spherical electrode at E_{out} of +4.0 kV.

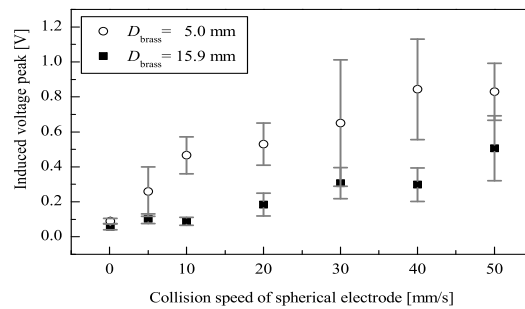


Fig. 3.8: Dependence of the peak value of the induced voltage on the collision speed of spherical electrode at E_{out} of +4.0 kV.

(2) E_{out} が +6.5 kV の場合

衝突速度を変えた場合の平均的な放電電流波形の例を Fig.3.9 に示す。 E_{out} が +4.0 kV の場合と同様に、衝突速度が 0.1 mm/s では電極直径が 5.0 mm と 15.9 mm とによる放電電流のピークにほとんど差異はみられないものの、衝突速度が 20、40 mm/s では、同一の衝突速度に対して電極直径が 5.0 mm の方が 15.9 mm に比較して放電電流のピーク値が大きく、立ち上がり時間が短くなっている。

Fig.3.9 の放電電流が得られた場合の誘導電圧波形を Fig.3.10 に示す。衝突速度が 0.1 mm/s では電極直径が 5.0 mm と 15.9 mm とに誘導電圧波形の差異がみられないものの、衝突速度が 20、40 mm/s では、同一の衝突速度に対して電極直径が 5.0 mm 方が 15.9 mm に比較して誘導電圧のピーク値が大きく、立ち上がり時間は短くなっている。

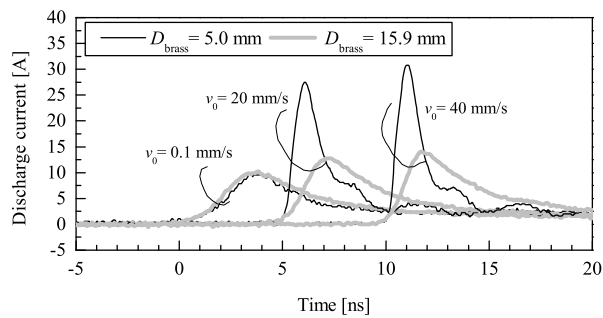


Fig. 3.9: Examples of discharge current waveforms at E_{out} of +6.5 kV.

衝突速度に対する放電電流のピーク値と立ち上がり時間との統計結果を Fig.3.11 に示す。同図でシンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。同一の衝突速度に対しては、衝突速度が 5 mm/s 以上では電極直径が 5.0 mm の方が 15.9 mm に比較して放電電流のピーク値の平均値は大きくなり、立ち上がり時間の平均値は短くなっている。誘導電圧ピーク値の平均値及び標準偏差の衝突速度依存性を Fig.3.12 に示す。同図でシンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。衝突速度が速くなると誘導電圧ピーク値の平均値は大きくなっている。同一の衝突速度に対しては、電極直径が 5.0 mm 方が 15.9 mm に比較して誘導電圧ピーク値の平均値は大きくなっている。

第 3. 電極の大きさが ESD に及ぼす影響実験

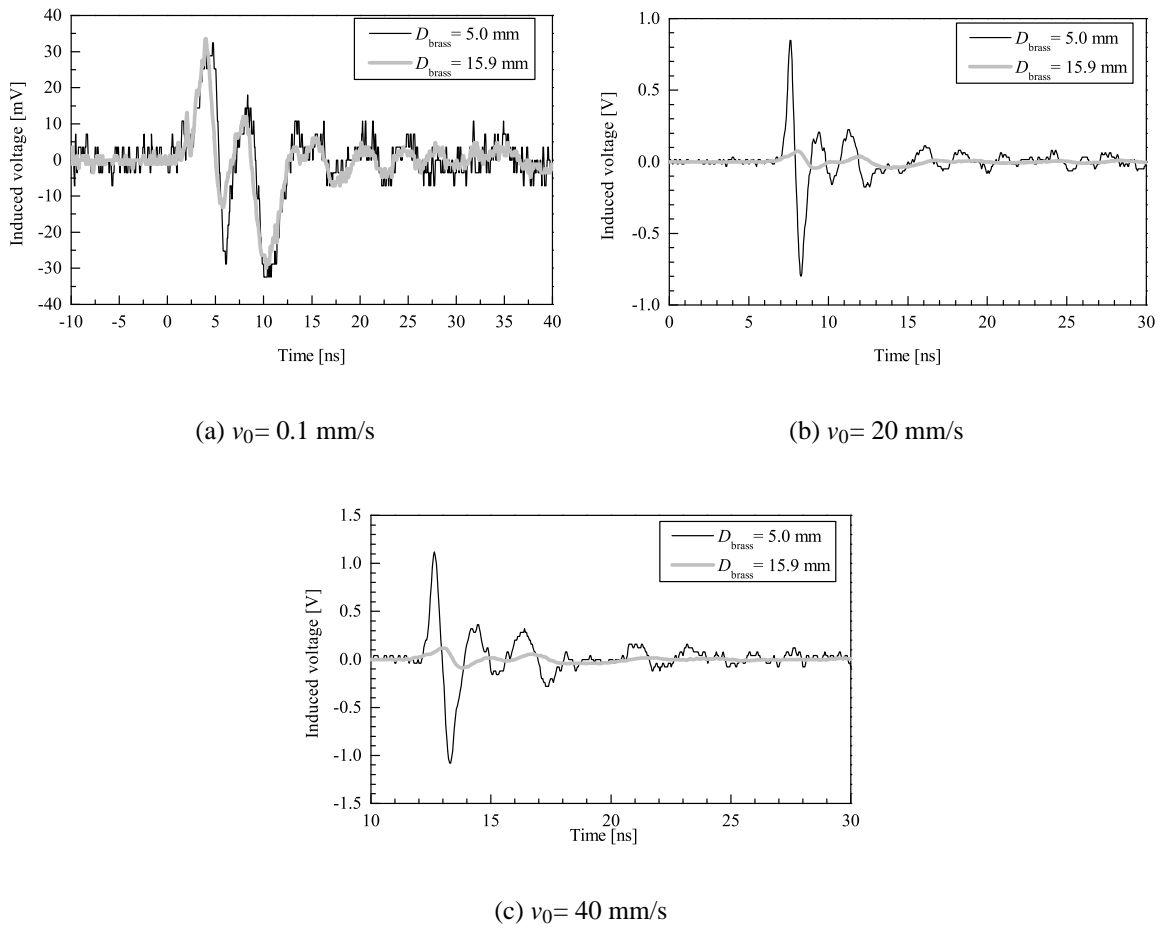
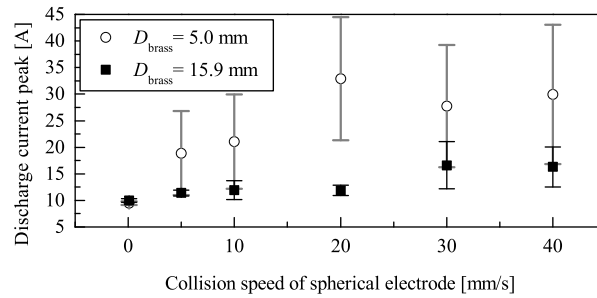
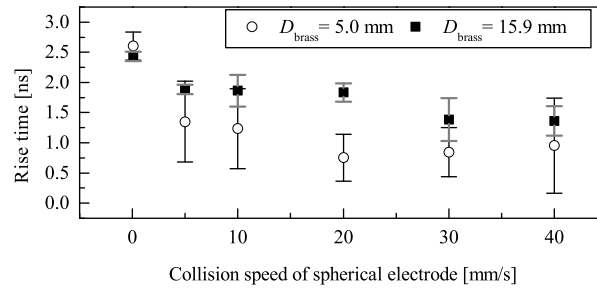


Fig. 3.10: Induced voltage waveforms in the magnetic probe corresponding to Fig.3.9.

第 3. 電極の大きさが ESD に及ぼす影響実験



(a) Discharge current peak



(b) Rise time

Fig. 3.11: Dependence of the peak value and the rise time of the first peak of the discharge current on the collision speed of spherical electrode at E_{out} of +6.5 kV.

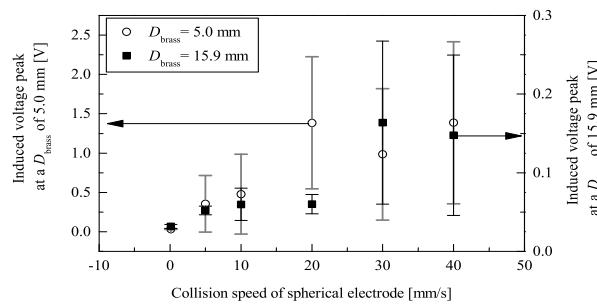
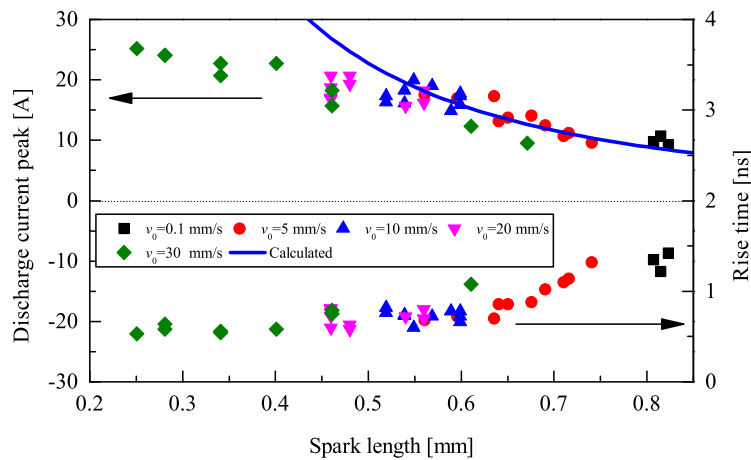


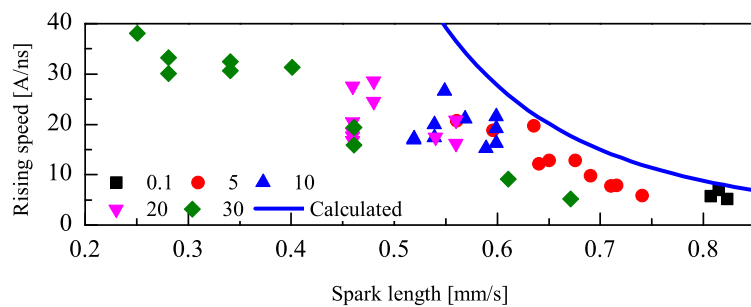
Fig. 3.12: Dependence of the peak value of the induced voltage on the collision speed of spherical electrode at E_{out} of +6.5 kV.

3.4.3 火花長と放電電流ピーク値・立ち上がり時間・上昇速度との関係

文献 [21, 17] では火花長と放電電流のピーク値・上昇速度とに相関関係のあること、文献 [37] では放電電流のピーク値及び立ち上がり時間と絶縁破壊の電界強度とに相関関係のあることが報告されている。ここでは放電電流のピーク値、立ち上がり時間及び上昇速度（放電電流のピーク値の+10%から+90%に上昇するに要する速度）と火花長との関係を、 E_{out} が+4.0 kV で電極直径が 5.0 mm、15.9 mm の場合についておのおの Fig.3.13、Fig.3.14、 E_{out} が+6.5 kV で電極直径が 5.0、15.9 mm の場合についておのおの Fig.3.15、Fig.3.16 に示す。



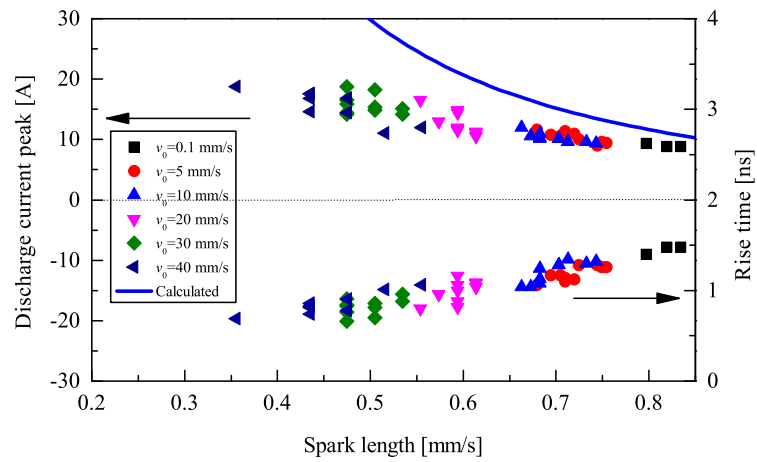
(a) Peak and rise time of discharge current



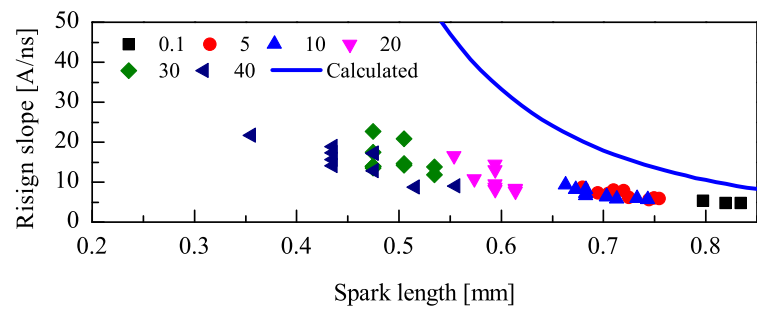
(b) Rising speed of discharge current

Fig. 3.13: Dependence of the peak value, rise time, and rising speed of the first peak of the discharge current, on the spark length at E_{out} of +4.0 kV and D_{brass} of 5.0 mm.

本研究の結果においても、同一の E_{out} に対する放電電流のピーク値、立ち上がり時間及び上昇速度は、火花長と相関関係のあることがわかる。同一の E_{out} に対する放電電流のピーク値、立ち上がり時間及び上昇速度は、火花長が同じであれば、球電極の直径への依存性は小さいことがわかる。

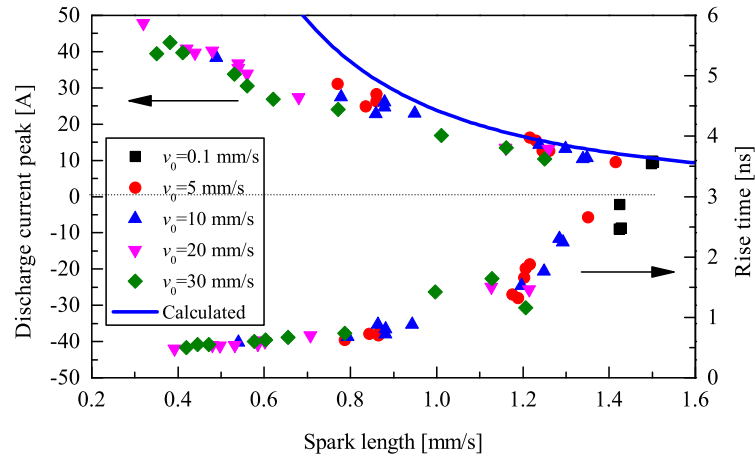


(a) Peak and rise time of discharge current

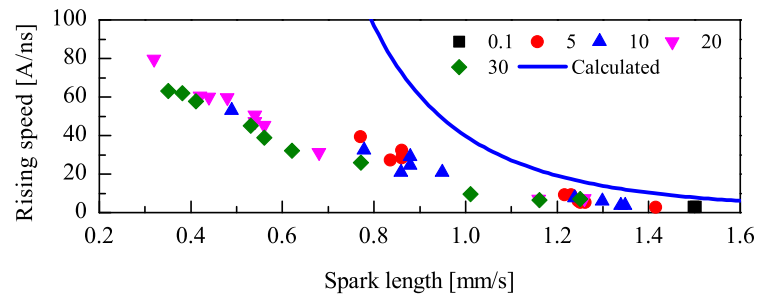


(b) Rising speed of discharge current

Fig. 3.14: Dependence of the peak value, rise time, and rising speed of the first peak of the discharge current, on the spark length at E_{out} of +4.0 kV and D_{brass} of 15.9 mm.

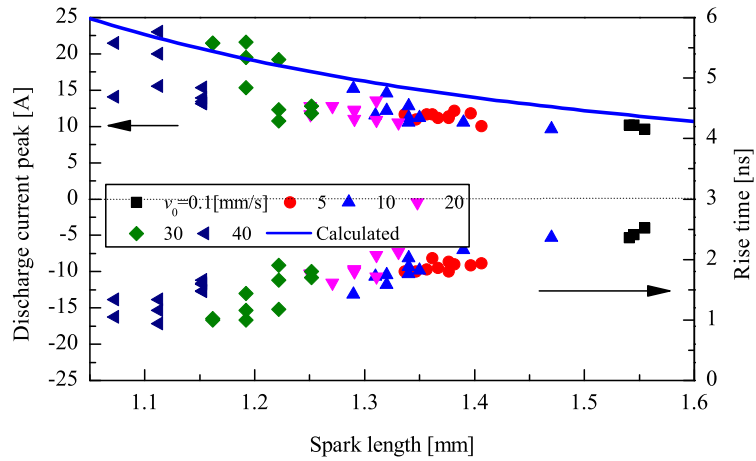


(a) Peak and rise time of discharge current

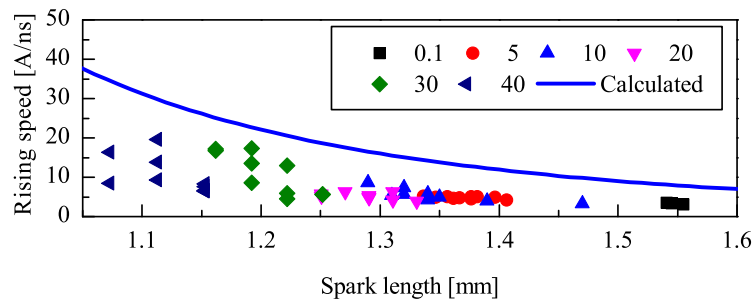


(b) Rising speed of discharge current

Fig. 3.15: Dependence of the peak value, rise time, and rising speed of the first peak of the discharge current, on the spark length at E_{out} of +6.5 kV and D_{brass} of 5.0 mm.



(a) Peak and rise time of discharge current



(b) Rising speed of discharge current

Fig. 3.16: Dependence of the peak value, rise time, and rising speed of the first peak of the discharge current, on the spark length at E_{out} of +6.5 kV and D_{brass} of 15.9 mm.

放電電流のピーク値、立ち上がり時間及び上昇速度の分布している領域については、電極直径が 15.9 mm では火花長と衝突速度とに相関関係のあることがわかる。これは Fig.3.2 に示すように、電極直径が 15.9 mm の場合には衝突速度に対する火花長のばらつきの小さいことによる。

一方、電極直径が 5.0 mm では、放電電流のピーク値、立ち上がり時間及び上昇速度の分布している領域と衝突速度との相関性が低くなっている。これは Fig.3.2 に示すように、電極直径が 5.0 mm の場合には、衝突速度に対する火花長のばらつきの大きいことによる。電極直径が小さくなると、放電電極とターゲット間に形成される電界の空間分布の変化が大きくなるために、ESD が不安定となる可能性が考えられる。

3.4.4 放電電流のターゲットによる測定の正確性

放電電流のピークである火花電流の特性を検討した。ただし、文献 [32] で指摘されているように、球電極と対向するターゲット間での火花電流はターゲットでは正確に測定できていない。まず測定した放電電流の正確性を検討するために、3.3 節で使用した磁界プローブ (ETS-Lindgren 7405-903B、自己インダクタンス:19.3 nH) の中心とターゲット中心との距離が 20 mm で金属板表面からの高さが 9 mm の箇所に、鎖交磁束が式 (3.1) [40] に示す最大値となるように磁界プローブを配置したうえでオシロスコープにアッテネータ (30 dB、DC~8 GHz) を介して接続し、発生磁界による誘導電圧から放電電流を算出した。放電電流は一様に流れているとして、式 (3.2) を用いて放電電流 $i_0(t)$ [25] を算出した。

$$\Phi = \mu_0 i_0(t) (d - \sqrt{d^2 - a^2}) \quad (3.1)$$

$$i_0(t) = \frac{L}{\mu_0 a} \left\{ \frac{d}{a} + \sqrt{\left(\frac{d}{a}\right)^2 - 1} \right\} \left\{ \frac{v(t)}{Z_0} + \int_0^t \frac{v(t') dt'}{L} \right\} \quad (3.2)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 L は磁界プローブの自己インダクタンス、 a は磁界プローブの半径、 d はターゲットと磁界プローブの中心との距離、 Z_0 は 50 Ω 、 $v(t')$ は磁界プローブへの誘導電圧である。実験条件を Table 3.3 に示す。

Table 3.3: Experimental condition for the measurement of induced voltage and discharge current.

$E_{\text{out}}[\text{kV}]$	$D_{\text{brass}}[\text{mm}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$RH[\%]$	$p[\text{kPa}]$
+4.0	5.0	22	61	101.3
+4.0	15.9	22	61	101.3
+6.5	5.0	23	60	101.3
+6.5	15.9	22	60	101.3

E_{out} が +4 kV、電極直径が 5.0 mm における誘導電圧と誘導電圧からアッテネータを考慮して算出された放電電流及び測定した放電電流の波形を Fig. 3.17 に示す。衝突速度が 0.1、

第3. 電極の大きさがESDに及ぼす影響実験

20 mm/s では放電電流の立ち上がり部分の計算値と測定値とはほぼ一致しているが、衝突速度が40 mm/s では、計算値の方が測定値よりも立ち上がりが急峻となっている。Fig.3.18 に示すように、他の条件での計算と測定による放電電流の立ち上がり部分はほぼ一致している。

以上のように、火花長が0.5 mm程度までは、ターゲットによって放電電流をほぼ測定できているが、火花長が0.2 mm程度になると放電電流の立ち上がり部分がターゲットでは緩慢となることを確認できた。後者の理由は、ターゲットの伝達特性とオシロスコープの帯域の限界によるものと考えられる。

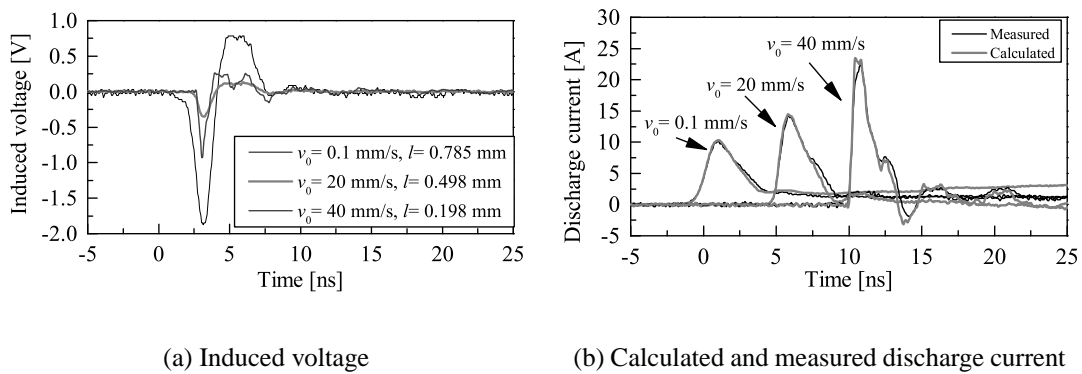
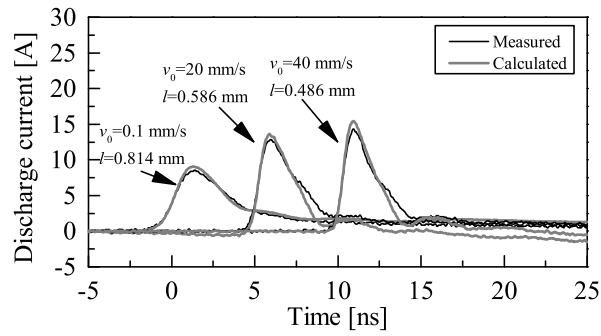
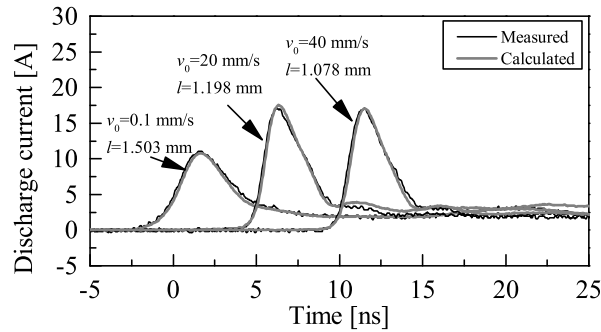


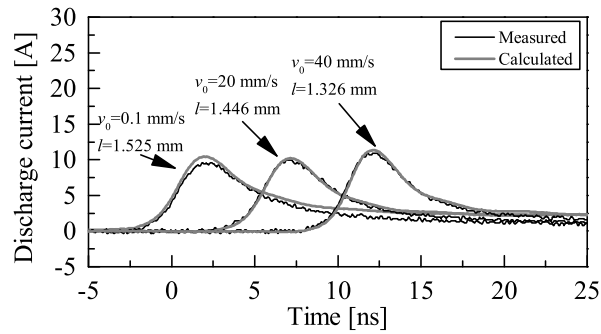
Fig. 3.17: Waveforms of induced voltage in the magnetic probe (a), and calculated and measured discharge current (b) at E_{out} of +4.0 kV and D_{brass} of 5.0 mm.



(a) $E_{out} = +4.0$ kV and $D_{brass} = 15.9$ mm



(b) $E_{out} = +6.5$ kV and $D_{brass} = 5.0$ mm



(c) $E_{out} = +6.5$ kV and $D_{brass} = 15.9$ mm

Fig. 3.18: Waveforms of calculated and measured discharge current.

3.4.5 火花抵抗則による放電電流の検討

Rompe-Weizel の火花抵抗則から検討するために、2.4.4 項で示した火花電流 $i(t)$ [31] の式 (2.6) と測定電流との比較を行った。

LCR メータ (HP 4285A、測定周波数: 75 kHz) を用いテーブルを最下点に固定した状態で、マイクロメータヘッドのスピンドルを上昇させながらギャップ長を調整して、放電回路の 1 kΩ 端子より球電極側のケーブル、マイクロメータヘッド部分の静電容量を測定した。平均火花長の範囲での静電容量 C の測定結果を Table 3.4 に示す。スピンドルを固定して行った ESD 実験における静電容量に比較して、最大で 0.2 pF 大きく測定されているが、その誤差が 5% 程度であることから無視している。平均火花長の範囲での静電容量の変動は小さいことから、本研究では静電容量を一定として Table 3.4 に示す C_{ave} とした。静電容量 C_{ave} を式 (2.7) に代入して、放電電流のピーク値 I_{max} を計算した結果を Calculated として Fig 3.13(a)~3.16(a) に併記している。また、式 (2.8) を用いた $(di/dt)_{max}$ の計算値を Calculated として Fig.3.13(b)~3.16(b) に併記している。放電電流のピーク値については、火花長が 0.8 mm 程度までは計算値は実験結果と同程度となっている。放電電流の上昇速度については、火花長が 1.2 mm 程度までは計算値は実験結果と同程度となっている。

Table 3.4: Measured capacitance.

E_{out} [kV]	D_{brass} [mm]	C [pF]	C_{ave} [pF]
+4.0	5.0	4.12~4.28	4.2
+4.0	15.9	4.88~5.18	5.03
+6.5	5.0	4.04~4.16	4.1
+6.5	15.9	4.67~4.77	4.72

3.4.6 放電のおくれ

Fig.3.2 の結果は放電のおくれが電極直径にも依存していることを示していることから、放電のおくれについて検討する。

静止電極間での火花長を l_0 として、電極が衝突を伴う場合の平均火花長を l_1 とする。同一の E_{out} 及び電極直径に対する l_1 と l_0 を用いて、統計的放電のおくれと放電の形成おくれを合わせた放電のおくれ t_d (式 (2.3)) を算出する。

Table 3.5: Experimental condition when the spherical electrode is fixed.

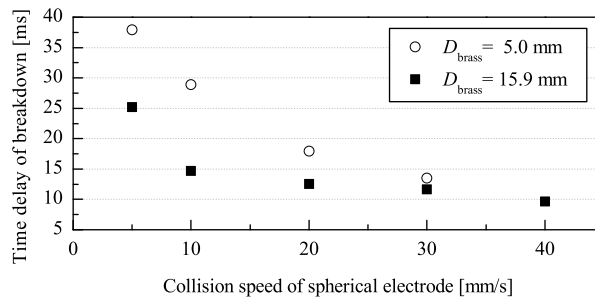
E_{out} [kV]	D_{brass} [mm]	T [°C]	RH [%]	p [kPa]	l_0 [mm]
+4.0	5.0	22	40	101	0.851
+4.0	15.9	22	40	101.3	0.845
+6.5	5.0	20	39	100.9	1.571
+6.5	15.9	20	39	100.9	1.567

Table 3.5 に示す火花長 l_0 、Fig.3.2 に示す平均火花長 l_1 を式 (2.3) に代入して、 E_{out} が +4.0 kV、+6.5 kV における放電のおくれを求めると、Fig.3.19 となる。前章での結果において、

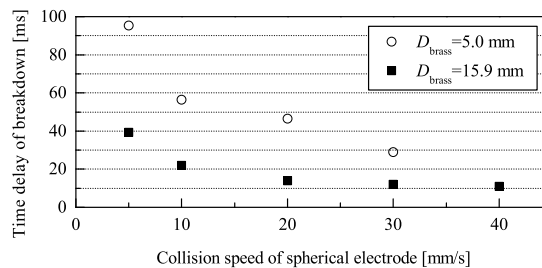
第 3. 電極の大きさが ESD に及ぼす影響実験

衝突速度が 20 mm/s 以上では放電のおくれの衝突速度依存性が小さかったが、本実験においても電極直径が 15.9 mm の場合には、衝突速度が 20 mm/s 以上では 10 ms 程度となっている。

電極直径が 5.0 mm、15.9 mm のいずれの場合においても、衝突速度が速くなると放電のおくれは短くなっている。同一の衝突速度に対しては、電極直径が 15.9 mm の場合に比較して、直径 5.0 mm の方が放電のおくれが長くなっている。直径 5.0 mm のほうが 15.9 mm に比較して球電極による帯電電荷が影響を及ぼす領域が小さいために、陰極から離れた領域において衝突電離などによって生成された自由電子が放電路に現れるに要する統計的な時間が、電極直径が 15.9 mm の場合に比較して 5.0 mm の場合の方が長くなっている可能性が考えられる。



(a) $E_{\text{out}} = +4.0$ kV



(b) $E_{\text{out}} = +6.5$ kV

Fig. 3.19: Dependence of the time delay of breakdown on the collision speed of the spherical electrode.

3.5 まとめ

帯電物体の大きさ、特に ESD が発生するときの放電部分の大きさが ESD に及ぼす影響を、直径が 5.0 mm、15.9 mm の 2 種類の大きさの球電極を用いて測定した。その結果、放電電流のピーク値、立ち上がり時間及び上昇速度は、火花長と相関関係があることが確認

された。電極の衝突速度が速くなると、放電電流と誘導電圧ピークの平均値は大きくなり、放電電流の立ち上がり時間の平均値は短くなり、放電のおくれは短くなった。球電極の直径が小さいと衝突速度に対する平均火花長のばらつきは大きく、衝突速度と放電電流との相関関係は低いものであった。電極直径が 15.9 mm のときに、衝突速度が 40 mm/s に達すると、 E_{out} が +6.5 kV、+4 kV では火花長が静止した電極間の火花長に比較して、それぞれ約 28 %、約 46 % 短縮した。

同一の衝突速度に対しては、球電極の直径が小さくなると火花長の平均値は短くなり、放電電流のピーク値の平均値は大きくなるとともに立ち上がり時間の平均値は短くなり、誘導電圧ピーク値の平均値は大きくなった。また同一の衝突速度に対して、球電極の直径が小さくなると、平均火花長に対する放電のおくれは長くなった。 E_{out} が +4kV、+6.5kV、電極直径が 15.9 mm のときに衝突速度が 20 mm/s 以上では、放電のおくれは前章と同じく 10 ms 程度となった。

第4章

接地電極が衝突するときのESD実験

4.1 はじめに

前章までは充電された電極が静止した接地電極に衝突するときのESDを測定した。他の先行文献においても充電電極が衝突する実験を主に行っている。

一方、帯電物体と接地物体との衝突によるESDでは、帯電物体が静止した接地物体に衝突する場合の他に、接地物体が静止した帯電物体に衝突する場合が考えられる。接地物体が静止した帯電物体に衝突する場合のESD現象については、吉田らが衝突速度が4 mm/sまでの相対湿度が4.9%以下の低湿度環境下で実験を行っている状況である [37]。

本章においては、接地物体が静止した帯電物体への衝突速度がESD現象に及ぼす影響を実験的に解明するために、一軸アクチュエータを用いて100 mm/sまでの衝突速度で接地球電極が静止した帯電球電極に衝突するときESDを発生させて、通常の室内環境下で火花長及び磁界プローブへの誘導電圧を測定した。

ただし、本章での実験装置では、前章での実験装置において、帯電球電極を固定しておいてターゲットを動かすようにはなっていない。接地側の球電極が移動することによって静止した帯電球電極に衝突する場合に、衝突速度に対する火花長及び誘導電圧の傾向を確認した。

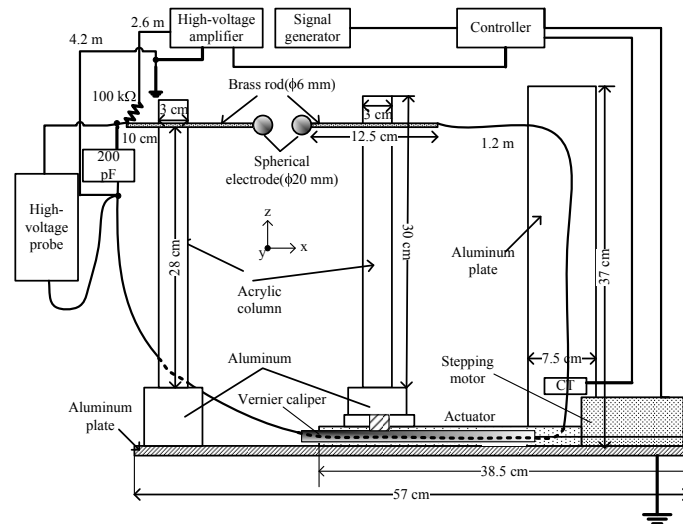
4.2 ESDの実験方法

4.2.1 接地電極を衝突させる実験装置

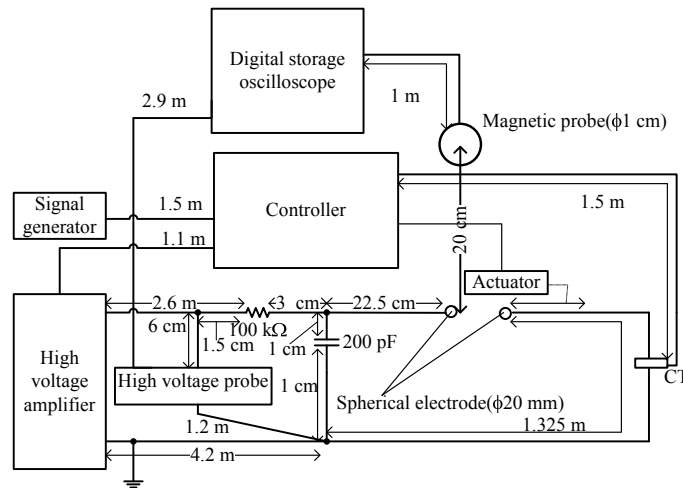
Fig.4.1(a)、4.1(b)に接地電極を静止した充電球電極に衝突させる実験装置の構造、実験回路図をそれぞれ示す。衝突する電極である二つの真鍮性球電極 ($\phi 20$ mm、以下、球電極という)は対向して配置され、1軸アクチュエータの作動によって接地球電極は一方向に移動し、両者の間隔は最大100 mmに設定されている。球電極は真鍮棒(長さ125 mm、 $\phi 6$ mm)に取り付けられ、真鍮棒は断面の1辺の長さが30 mmの正方形であるアクリル製角柱に固定されている。アクリル製角柱の一方はアルミニウム製台座に固定されており、その固定角柱に把持された真鍮棒に接続された導線には、高耐圧コンデンサ(200 pF)及び高電圧プローブ(Tektronix、P6015A、DC~75 MHz)が取り付けられている。その導線は、100 k Ω の高耐圧抵抗を介して、高電圧増幅器(松定プレジジョン、HEOPT-10B10、電圧増幅度:1000)と接続されている。高電圧増幅器の出力電圧は信号発生器によって+10 kVに調整されている。他方の球電極に取り付けられた真鍮棒は、長さ1.2 mの接地線を

第 4. 接地電極が衝突するときの ESD 実験

介して、高耐圧コンデンサの接地極に接続されている。接地線にはトロイダルコア (CT) が挿入されており、放電電流によってトロイダルコアに誘導された電圧がトリガ信号となって、高電圧増幅器と信号発生器の間に接続されたスイッチがコントローラによって遮断される。接地された球電極の取り付けられた亚克力製角柱は 1 軸アクチュエータに搭載され、高電圧が印加される静止球電極に向かって等速度で衝突する機構となっている。装置の写真を Fig.4.2 に示す。



(a) Structure of ESD experimental setup



(b) Experimental circuit for ESD

Fig. 4.1: Experimental setup for the study of ESD when a grounded metal sphere collides with a charged metal sphere.

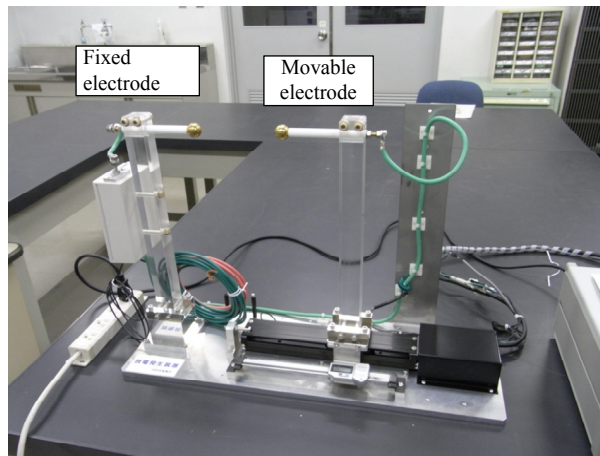


Fig. 4.2: ESD experimental setup.

4.2.2 接地球電極の衝突方法

接地された球電極の充電電極への衝突はつぎのように行われる。まず、コントローラの機械原点復帰ボタンによってステッピングモータ（以下、モータという）が作動して、アクチュエータが機械原点に復帰する。このとき、球電極の間隔は 100 mm となる。その後、コントローラの高電圧スイッチを投入すると、高電圧側の球電極には +10 kV が印加される。この後で、コントローラのスタートスイッチを投入すると、4 mm/s で起動した後に、133.3 mm/s² で加速して、定められた速度に達すると等速度運転に移行する。等速度運転での速度が 4 mm/s より遅い場合には、4 mm/s で起動した後に、直ちに設定された等速度での運転に移行する。ここでは、等速度運転時の衝突速度 v_0 として、1 mm/s、20 mm/s、40 mm/s、60 mm/s、80 mm/s、100 mm/s の六つの場合について、各 5 回の ESD を発生させた。

接地された球電極が静止した充電球電極に衝突する過程で ESD が発生すると、放電電流によってトロイダルコアに誘導される電圧がトリガ信号となって、コントローラからモータに急停止信号が送信される。モータが急停止信号を受信してからアクチュエータが静止するまでに、慣性による時間遅れが生じる。静止するまでの移動距離は、等速度運転時の速度に依存することから、予め衝突速度とモータが急停止信号を受信後に慣性によって静止するまでに移動する距離との関係を求めて、その値を火花長算出のための補正值として用いた。

4.2.3 ESD の発生および測定方法

各衝突速度での ESD 実験開始前に、球電極は鏡面仕上げ材で電極表面を磨いた後に、エタノールで清浄にした。その後、5 回の連続した ESD 実験を繰り返した。Fig.4.1 で木製テーブル上に置かれた接地線 (1.2 m)、高耐圧コンデンサ、真鍮棒及び球電極で構成された ESD 回路は xz 面に配置され、静止した球電極先端の放電発生部を原点とすると、

磁界プローブ（ETS LINDGREN、7405-903B）は放電発生部から 200 mm 離れた場所 (0,-200 mm,0) に中心が配置され、球電極間で発生する磁界が最大に鎖交するようにループ面を xy 面上に固定し、ESD 発生時の誘導電圧を観測した。磁界プローブはオシロスコープ（Tektronix、DPO70404B）の 50 Ω 入力端子に BNC ケーブル（長さ：1 m）によって接続されている。本実験ではオシロスコープの周波数帯域は DC~1 GHz、サンプリング周波数は 25 GHz に設定した。

ESD の発生の都度、接地された球電極が静止したときの電極間の間隙をアクチュエータと連動して移動するノギスによって測定した。衝突後に静止したときの電極間の間隙長から慣性による補正長を差し引いて、火花長を算出した。

実験は気温 16~18 $^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 30~32 % の大気圧環境下で行った。

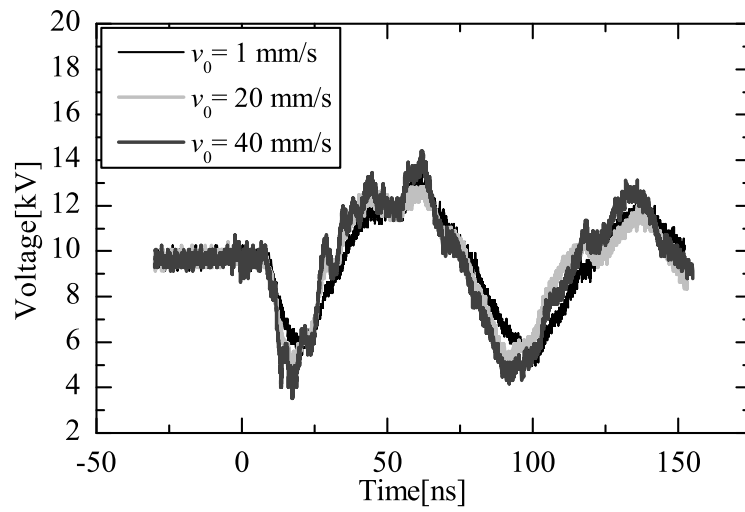
4.3 ESD の実験結果

4.3.1 誘導電圧及び放電電圧

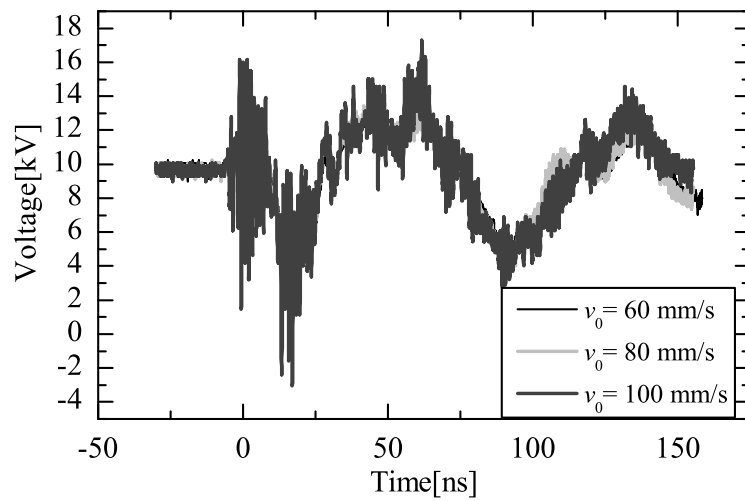
ESD が発生したときの高電圧プローブでの電圧波形例を Fig.4.3 に、その電圧波形が得られたときの磁界プローブでの誘導電圧の波形を Fig.4.4 に示す。ESD の発生とともに、高電圧プローブでの電圧波形が約 13 MHz の周波数で減衰振動している。これは高耐圧コンデンサ C 、放電回路のインダクタンス L 及び ESD 回路の有する抵抗 R によって構成される $R-L-C$ 回路の過渡現象に起因する。一方、誘導電圧の波形には、最初の部分に顕著な波形が観測された後に、やや緩慢な減衰振動波形が観測されている。最初の波形の部分は球電極に充電された電荷による火花放電によって誘導された電圧、その後の緩慢な減衰振動波形は、主に高耐圧コンデンサに充電された電荷の放電によると考えられる [32]。

Fig.4.4 の結果より、衝突速度が速くなるとともに、誘導電圧の第一ピークが大きくなっている。これは衝突速度が速くなるとともに火花長が短くなっていることから（後述）、火花電流が大きくなることに伴って放電ギャップでの火花抵抗が小さくなることに起因していると考えられる [31]。

なお、Fig.4.3 に示す高電圧プローブでの電圧波形は、Fig.4.4 に示す誘導電圧の波形よりも約 10 ns の時間遅れが生じており、これは磁界プローブと高電圧プローブに取り付けられた信号線の長さの相違が要因である。

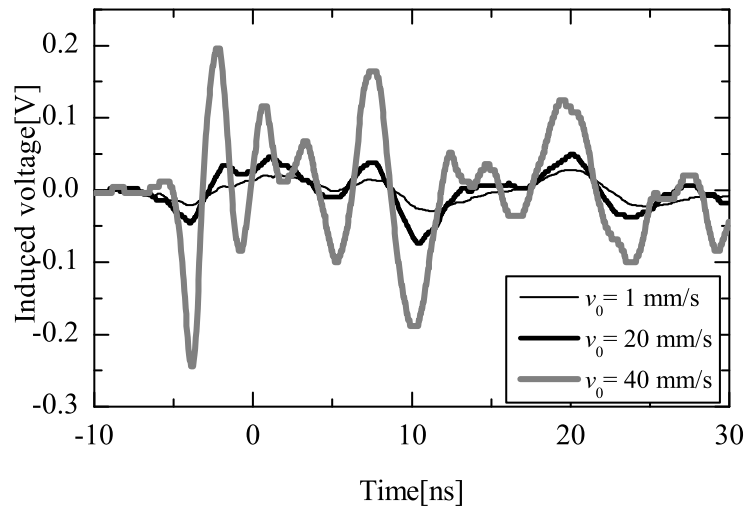


(a) $v_0 = 1, 20, 40$ mm/s

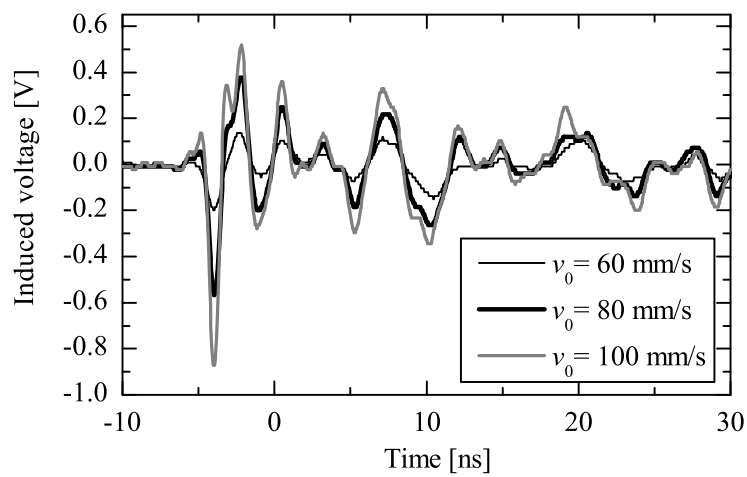


(b) $v_0 = 60, 80, 100$ mm/s

Fig. 4.3: Example of voltage waveforms in the high-voltage probe.



(a) $v_0 = 1, 20, 40$ mm/s



(b) $v_0 = 60, 80, 100$ mm/s

Fig. 4.4: Example of induced voltage waveforms in the magnetic probe.

4.3.2 火花長

Fig.4.5 には、Fig.4.3、Fig.4.4 の結果が得られた場合の火花長及び同一の衝突速度で5回のESDを発生させた場合における火花長の平均値と標準偏差とを示す。同図で黒い四角によって示したシンボル、エラーバーはそれぞれ火花長の平均値、標準偏差を示している。衝突速度が速くなるとともに、火花長が短くなっている。衝突速度が80~100 mm/sでは、火花長の衝突速度に対する依存性が小さくなっている。これらの結果は、帯電した電極が静止した接地電極に向かって衝突する速度が速くなると火花長が短くなった文献[21]、本論文の2、3章の結果と同様の現象が発生していることを示している。

Fig.4.5 の結果が得られたときの衝突速度に対する各火花長を Fig.4.6 に示す。接近速度が速くなると火花長が短くなる傾向を示しており、その相関係数は-0.63であり、“中間の強さ”の相関の強さがあることがわかる。

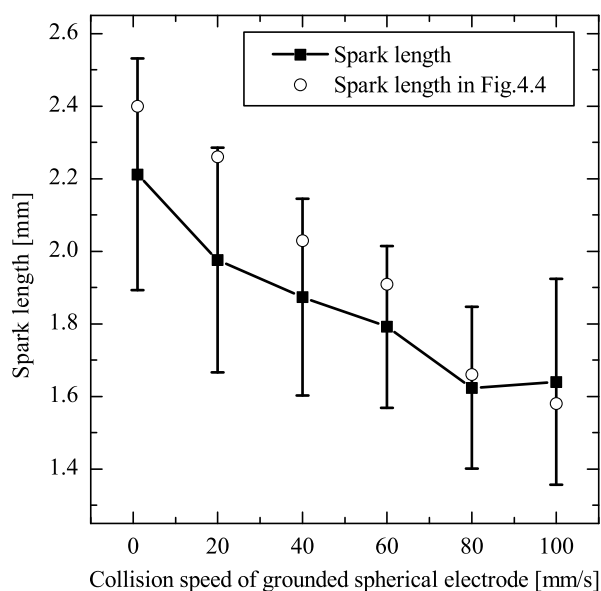


Fig. 4.5: Dependence of the spark length on the collision speed of the grounded metal sphere.

4.3.3 誘導電圧ピーク値と立ち上がり時間

Fig.4.7 には衝突速度と誘導電圧の第一ピーク値及び第一ピークの立ち上がり時間(10-90%)との関係を示す。同図でシンボル、エラーバーはそれぞれ平均値、標準偏差を示す。衝突速度が1 mm/s から 100 mm/s に速くなると、誘導電圧の第一ピークの立ち上がり時間を平均した値は短くなっている。また、衝突速度が80 mm/s から 100 mm/s の間では、誘導電圧の第一ピークの立ち上がり時間を平均した値の変化は小さくなっている。一方、衝突速度が速くなるとともに、誘導電圧の第一ピーク値が大きくなっている。この結果は、Rompe-Weizel によって提案された火花抵抗に関わる実験式に基づく火花電圧と火花電流との関係において、同一火花電圧に対して火花長が短くなると、火花電流のピーク値が大

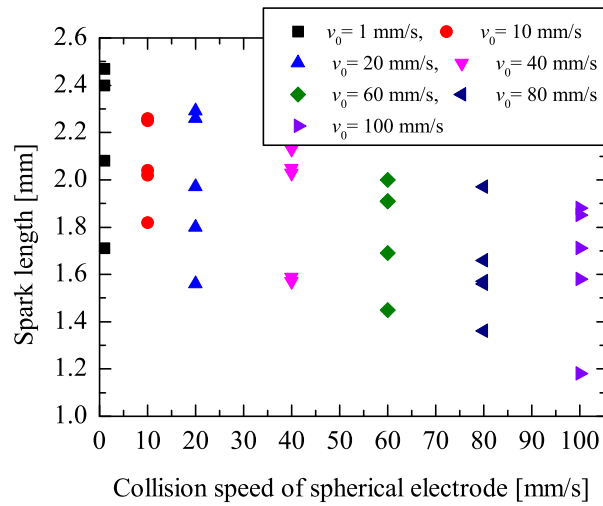


Fig. 4.6: Distribution of the spark length to the collision speed.

きくなる式 (2.7) と共に時間変化率が大きくなる式 (2.8) より、定性的には説明される [31]、[21]。

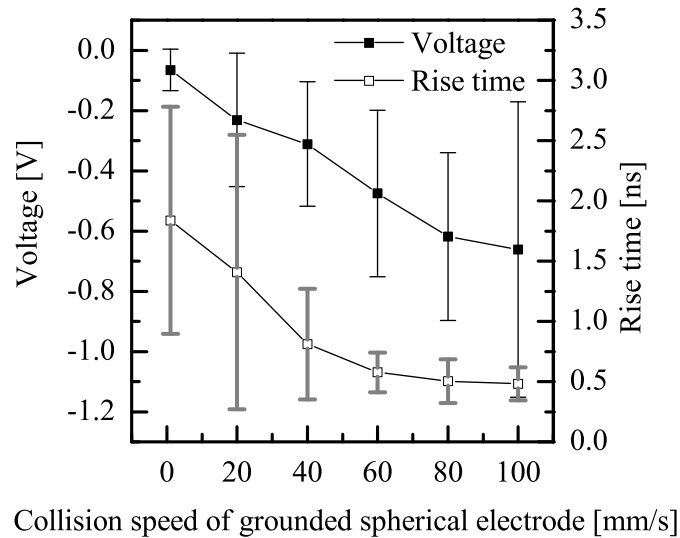


Fig. 4.7: Dependence of the peak value and the rise time of the first peak of the induced voltage on the collision speed of the grounded metal sphere.

4.3.4 誘導電圧の短時間フーリエ変換

Fig.4.4 に示された誘導電圧波形では、第一のピークは球電極間に帯電した電荷の放電に起因するものであり、その後の減衰振動波形は主に高耐圧コンデンサに蓄えられた電荷の放電によっていると考えられる [32]。球電極に帯電した電荷による火花放電は衝突速度

に依存することから (Fig.4.5 参照)、球電極に帯電した電荷による誘導電圧のスペクトルを主として解析するために、誘導電圧に対して短時間フーリエ変換を適用することによって、時間一周波数解析を行い、その特徴を考察することとする。短時間フーリエ変換は、付録 A で説明するように短時間の分析フレームに対してフーリエ変換を適用してスペクトルの時間的な推移を得るものである [36]。誘導電圧波形については、第一ピークのタイミングが同じになるように設定した上で、4096 ポイントの標本値を用いて短時間フーリエ変換を行った。

分析フレームの長さとして 64 の標本値 (=2.56 ns) を使用し、この標本値に対して窓関数として Hanning 窓を適用した。分析フレームのシフト量としては、分析対象データ長 64 の 1/2 となる 32 の移動を行った。この計算には MATLAB を用いた。ここでは、衝突速度に対して火花長が短くなった Fig.4.4 の誘導電圧について計算した。Fig.4.4 を用いたのは次の理由による。Fig.4.5 に示した火花長の平均値が衝突速度と共に短くなる傾向は、Fig.4.4 の場合と定性的には同様の特性であったことから、定性的な傾向を Fig.4.4 の誘導電圧波形によって把握可能と考えたことによる。周波数成分として、DC、390.625 MHz、781.25 MHz に対する振幅スペクトルの時間変化を比較した結果を Fig.4.8 に示す。誘導電圧の第一ピークの部分である約 5 ns における計算結果について比較すると、衝突速度が速くなると、振幅が大きくなっていることがわかる。これは、4.3.3 項で記述したように、Rompe-Weizel の火花抵抗に関わる実験式に基づいて得られた火花長と火花電流の関係において、同一の火花電圧に対して火花長が短くなると、式 (2.7) に示すように火花電流のピーク値が大きくなると共に式 (2.8) に示すように時間変化率が大きくなるため、火花電流によって磁界プローブに誘導される電圧も振幅スペクトルの振幅が大きくなることによる。

第4. 接地電極が衝突するときのESD実験

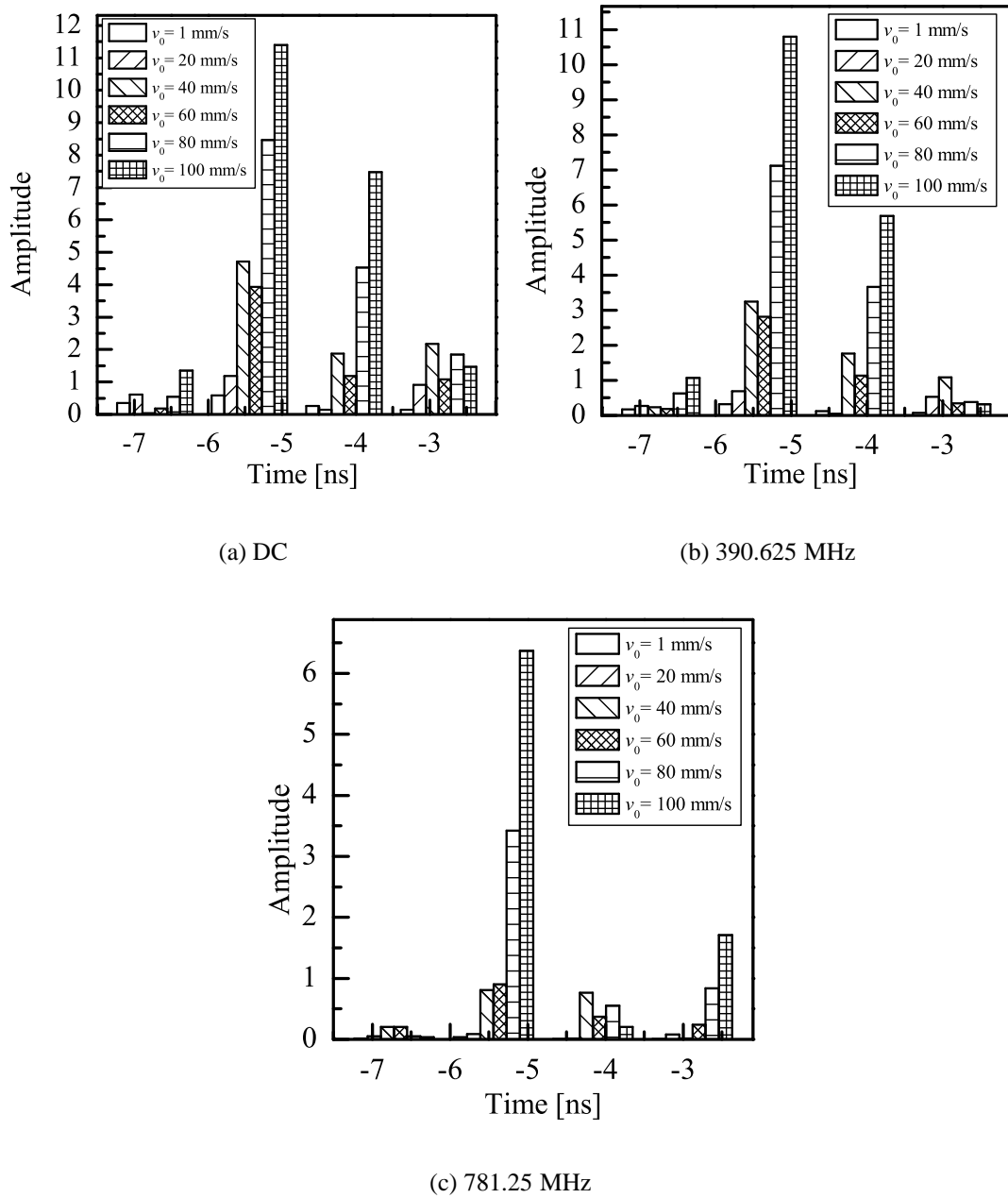


Fig. 4.8: Amplitude spectra of induced voltage waveforms shown in Fig.4.4 obtained by short-time Fourier analysis.

4.4 まとめ

接地物体が静止帯電物体に向かって衝突する時に発生する ESD を実験的に解明することを目的として、静止した帯電金属球に向かって接地金属球が等速度で衝突する場合の ESD について実験を行い、つぎの結果を得た。

1. 帯電物体が静止した接地体に衝突するときと同様に、接地金属球の衝突速度が速くなるとともに、火花長の平均値は短くなった。
2. 接地金属球の衝突速度が速くなるとともに、ESD の発生時における磁界プローブへの誘導電圧の第一ピーク値を平均した値は大きくなり、立ち上がり時間の平均値は短くなった。これらの結果は、Rompe-Weizel の火花抵抗則に基づく火花長と火花電流との関係によって定性的には説明される。
3. ESD 発生時における誘導電圧の第一ピークに短時間フーリエ変換を適用した結果、接地金属球の衝突速度が速くなると、第一ピークでの振幅スペクトルの振幅は大きくなった。この結果は、Rompe-Weizel の火花抵抗則に基づく火花長と火花電流との関係によって定性的には説明される。

第5章

充電電圧の上昇速度がESDに及ぼす影響実験

5.1 はじめに

前章までは充電電極が静止した接地電極に衝突するときのESDと接地された電極が静止した充電電極に衝突するESDの実験を行った。充電電極と接地電極とが衝突する過程においては、充電電極と接地電極とが時間とともに接近することになるため、両者間の電界強度は時間とともに概略強くなっていくことと考えられる。電極の衝突にともなって電極間の電界強度が強くなることによるESD現象の解明を目的として、文献[33]では充電回路の静電容量 C と抵抗 R の時定数を変化させる手法を提案しているが、その方法による実験結果は報告されていない。

本章では、充電するための時定数によって充電電圧の時間変化率を制御する代替方法として、固定された電極間に印加する充電電圧を、信号発生器と高電圧増幅器とを用いて発生させることによって、充電電圧の上昇速度が放電電流に及ぼす影響を実験する。この方法を採用することによって、繰り返して充電電圧を印加する場合のインターバルも任意に設定することが可能となる。

既に固定電極間にパルス的な電圧を印加すると、徐々に印加電圧を上昇させる場合に比較して、過電圧にならないと放電が発生しないことが報告されているが[41]、パルス的ではなく、人体の動作によっても実現可能な充電電圧の上昇速度に設定した上で、前章までに行った実験であるギャップ長が0.5 mmを超える場合と、実際に衝突電極での実験では測定が困難なギャップ長が0.1 mm以下の場合について実験を行った。

5.2 充電電圧を制御するESD実験装置

充電電圧として、一定速度で上昇するランプ波あるいは時間ともに上昇速度が速くなる電圧波形を使用してESDを発生させる。基本的な実験装置をFig.5.1に示す。信号発生器から充電電圧の元となる信号を発生させて、その信号を高電圧増幅器で増幅し、これを固定された電極間に印加する。そのときに高電圧プローブによって放電電圧を観測するとともに、放電電流を電流センサあるいは抵抗を用いて観測するものである。

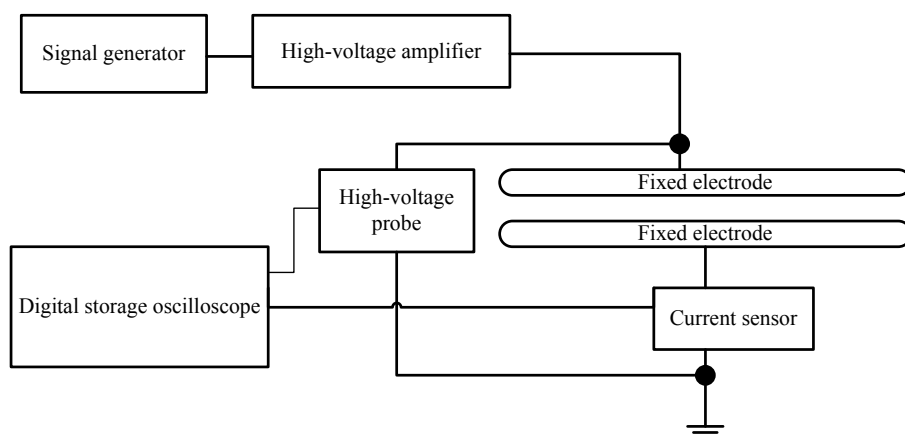


Fig. 5.1: Experimental setup for ESD when the rise velocity of charging voltage is changed.

5.3 ギャップ長が 0.5 mm を超える場合

5.3.1 充電電圧の上昇速度を変化させる ESD 実験回路

(1) 電極および電流センサ

Fig.5.2 に模擬帯電物体である金属円板電極と接地電極を示す。高電圧が印加される真鍮製円板電極（以下、充電電極という）は直径が $\phi 30$ mm、厚さ 3 mm である。対向する真鍮製円板電極（以下、接地電極という）は、直径が $\phi 30$ mm、厚さ 3 mm であり、中心には直径が $\phi 5$ mm の穴が開いている。その穴には直径が $\phi 4$ mm の真鍮製球電極が配置されている。球電極の最上部は接地電極表面より 0.84 mm 上方にある。接地電極と球電極とは電流センサ (Tektronix、CT2、1.2 kHz~200 MHz) の接続された撚り線 ($\phi 0.18$ mm の線 32 本で構成、長さ 45 mm) によって連結されて、撚り線と CT2 とは電氣的に絶縁されている。

メーカーから提供されている技術資料によると、CT2 の低周波側の遮断周波数は Fig.5.3(a)

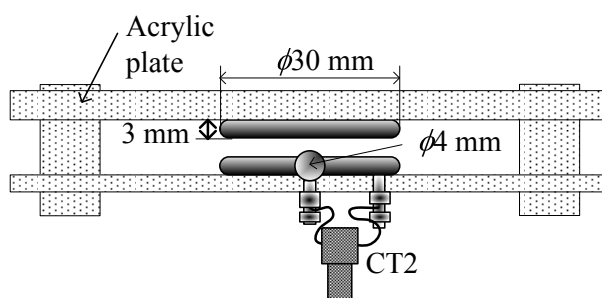


Fig. 5.2: Discharging electrodes.

[44] に示すとおり、直流成分が重畳していない場合には 1.2 kHz であり、6 kHz~200 MHz では平坦な特性であって、測定電流は CT2 に接続された 50Ω 終端抵抗での測定電圧と 1:1 の関係となっている。測定に用いたデジタルオシロスコープ (Tektronix、TDS680B、DC ~1 GHz、最高サンプリング周波数: 5 GHz、垂直分解能: 8 ビット、以下、オシロスコープ

という)の周波数帯域が DC~1 GHz であることから、200 MHz~1 GHz までの特性を電流センサ (Tektronix、CT6、250 kHz~2 GHz) を用いた校正によって求めると、Fig.5.3(b) のとおり、800 MHz 付近で測定電圧が測定電流の 2 倍程度になっている。本研究では CT2 によって測定した電圧と測定電流とが 1:1 の関係があるとして、測定電圧を放電電流に換算しているため、CT2 の測定可能周波数外である 200 MHz~1 GHz での放電電流は最大で 2 倍程度の誤差を含んでいる。

充電電極と接地電極との間隙は 1.5、2 mm の二種類とし、このとき充電電極と球電極先端とのギャップ長はおおの 0.66、1.16 mm となる。

なお、アクリル板に固定された充電電極と接地電極および球電極とはアクリル板を介して 4 本のアクリル製円柱 ($\phi 10$ mm) によって連結されている。

(2)ESD 実験回路

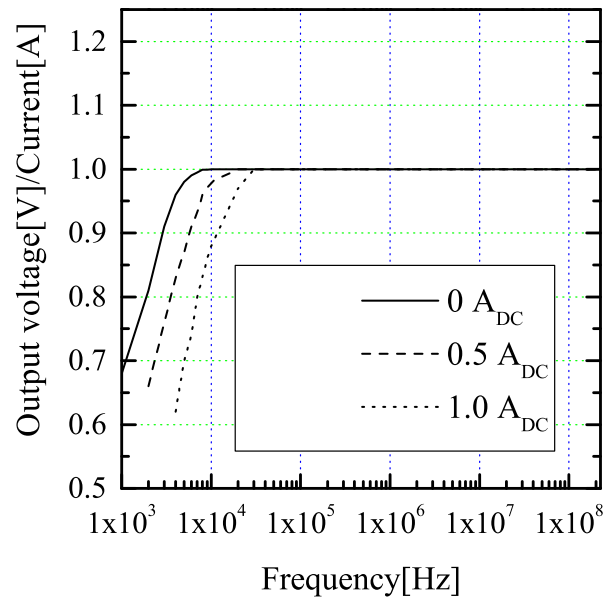
Fig.5.4 に ESD 電気回路を示す。信号発生器 (Tektronix、AFG310) と接続された高電圧増幅器 (TREK、Model 664、最高スルーレート: 180 V/ μ s、電圧増幅度: 1000) には高圧出力用のケーブル (2.8 m) が取り付けられ、そのケーブルには高耐圧抵抗 (1 M Ω) が接続されている。高耐圧抵抗の他端に取り付けられた導電性ゴムひも (約 65 k Ω 、約 1.2 m) を介して充電電極に接続されている。一方、高電圧増幅器の接地線 (0.9 m) に接続された導電性ゴムひも (約 23 k Ω 、約 0.77 m、体積抵抗率: 3 $\Omega \cdot$ cm) は、球電極が取り付けられた撚り線に接続されている。高耐圧抵抗は ESD 発生後に高電圧増幅器からの高電圧による電流を制限する目的で使用されている。導電性ゴムひもは、充電電極と球電極間での ESD が発生するときに高電圧増幅器からの影響を抑制する目的で使用されている。

CT2 は信号線の一端にセンサ本体が接続され、他端に取り付けられた BNC 型コネクタはアッテネータ (10:1) を介してオシロスコープの 50 Ω 入力端子に接続されている。高電圧プローブ (Tektronix、P3000、DC~120 MHz、2.5 pF/500 M Ω) の高電圧及び接地端子は鱗口クリップによって導電性ゴムひもに接続されている。高電圧プローブの信号線 (3.05 m) はオシロスコープのインピーダンスが 1 M Ω である入力端子に接続されている。

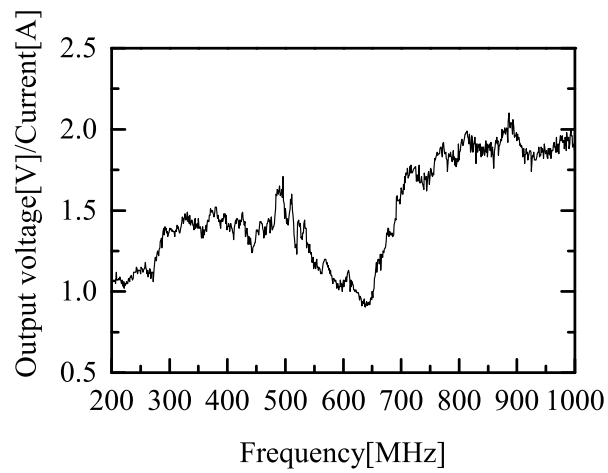
充電電極への充電は次の通りである。信号発生器で発生させたランプ波を高電圧増幅器によって増幅して、高耐圧抵抗、導電性ゴムひもを介して充電電極を充電した。充電に伴って発生する ESD による放電電流及び放電電圧はオシロスコープによって観測され、サンプル数は 2500、トリガは 42 % の位置とした。放電は約 6 秒間隔で間欠的に発生させた。実験は気温 25~26 $^{\circ}$ C、相対湿度 68~74 % 大気圧環境下にある電磁シールドルーム内で行った。

5.3.2 放電電圧・放電電流の測定結果

ESD による放電電圧と放電電流の測定に先立ち電極を清浄にする目的で 400 回の予備放電を行った。



(a) Data of manufacturer.



(b) Characteristics from 200 MHz to 1 GHz.

Fig. 5.3: Current sensing characteristics of CT2.

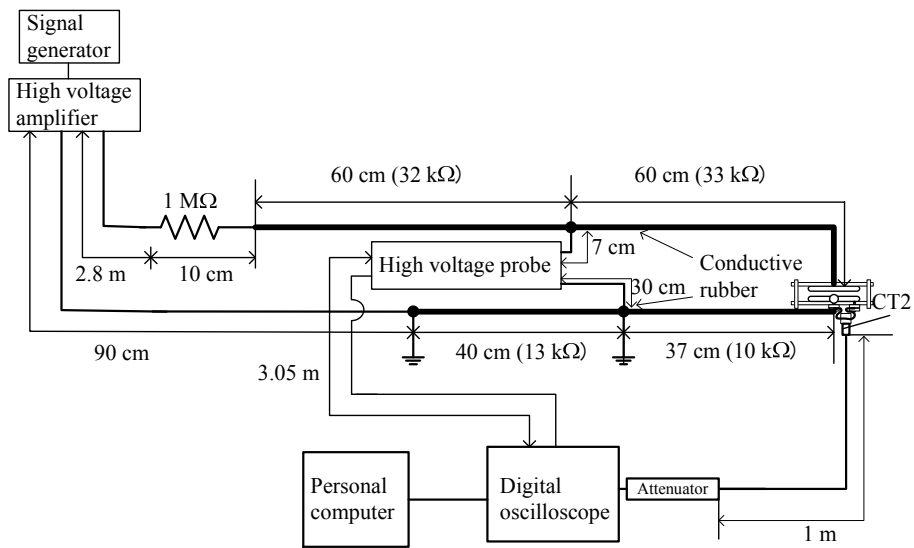


Fig. 5.4: Experimental setup.

(1) 実験に用いた充電電圧

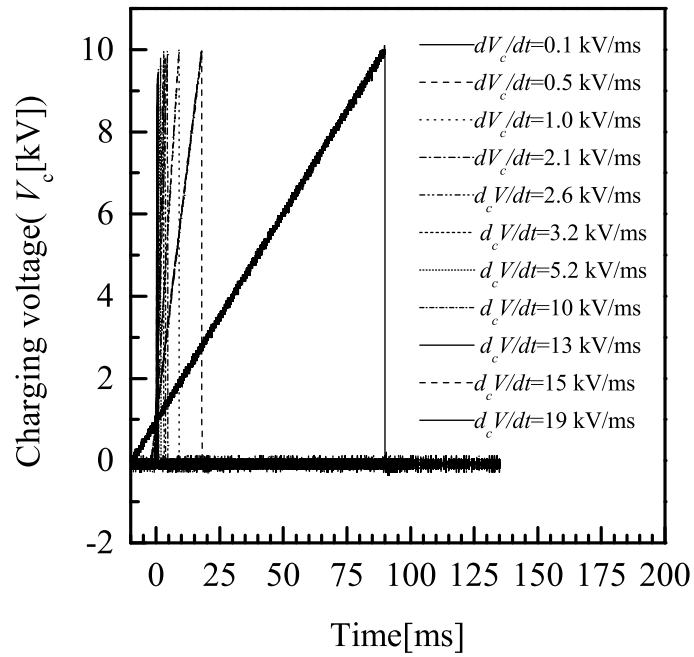
充電電極に印加される充電電圧としては、本実験では基本的な特性を把握するために、時間とともに単調に増加するランプ波として Fig.5.5 に示す波形を用いた。充電電圧の上昇速度 (dV_c/dt) は電圧の極性が正では $0.1 \text{ kV/ms} \sim 19 \text{ kV/ms}$ 、負については $-0.1 \text{ kV/ms} \sim -19 \text{ kV/ms}$ とした。

(2) 放電電圧と放電電流

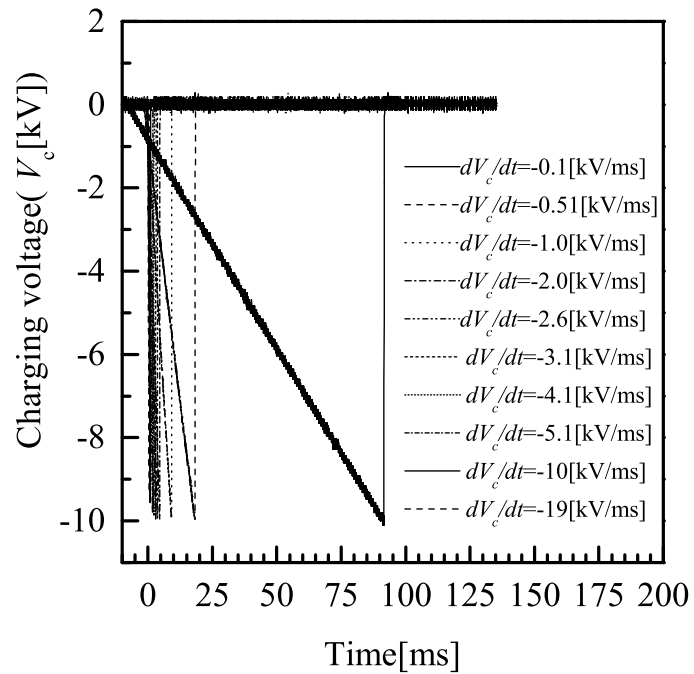
高電圧プローブの有する静電容量 2.5 pF に起因する充電電荷が放電電流に及ぼす影響を抑制する目的で、放電電圧の測定においては導電性ゴムひも間の電位差を測定している。本実験においては充電電極と接地電極間での放電電圧に加えて導電性ゴムひもでの電圧が加わった値を「放電電圧」としている。電極間の間隙長（以下、ギャップ長という）を 0.66 mm に設定した条件下で、充電電圧の上昇速度を $0.1 \text{ kV/ms} \sim 19 \text{ kV/ms}$ まで変化させて 10 回測定した後の平均した放電電圧を比較したところ、導電性ゴムひもでの電圧降下の影響によって、本実験の放電電圧は $10 \sim 30 \text{ V}$ 高く測定されていることから、本実験の放電電圧は最大で 30 V の誤差を含んでいる。

ギャップ長が 0.66 mm の場合に、充電電圧の上昇速度を変化させたときの放電電圧と放電電流の波形の例を Fig.5.6 に示す。放電電圧にリップルがみられるが、オシロスコープでの A/D 変換に伴う量子化が要因である。充電電圧が正負のいずれでも、充電電圧の上昇速度が速くなるとともに、放電電流のピーク値、放電電圧は上昇している。

同様にギャップ長が 1.16 mm の場合について放電電圧と放電電流波形の例を Fig.5.7 に示す。Fig.5.6 と同様の特性が示されている。Fig.5.6、Fig.5.7 のように放電電圧が上昇するのは、充電電圧として時間的に上昇する電圧を用いたことが要因であり、直流の放電電圧よりも過電圧を加えないと放電に至らないことに起因していると考えられる。

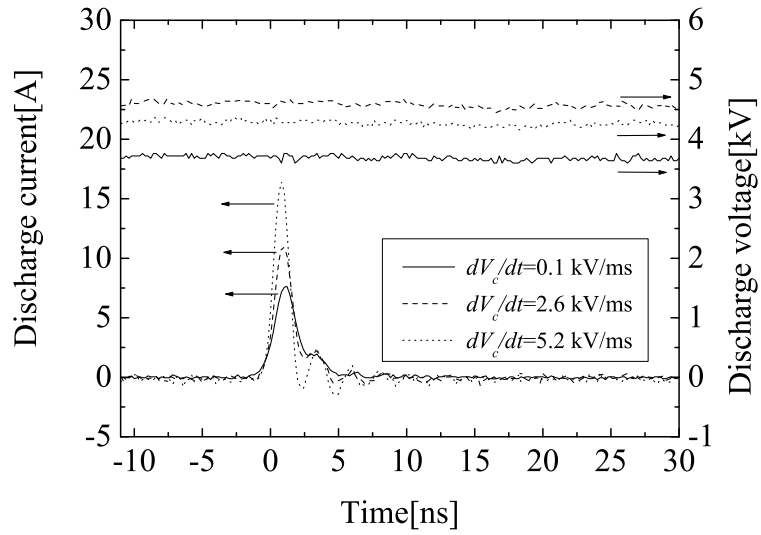


(a) Polarity of charging voltage: positive

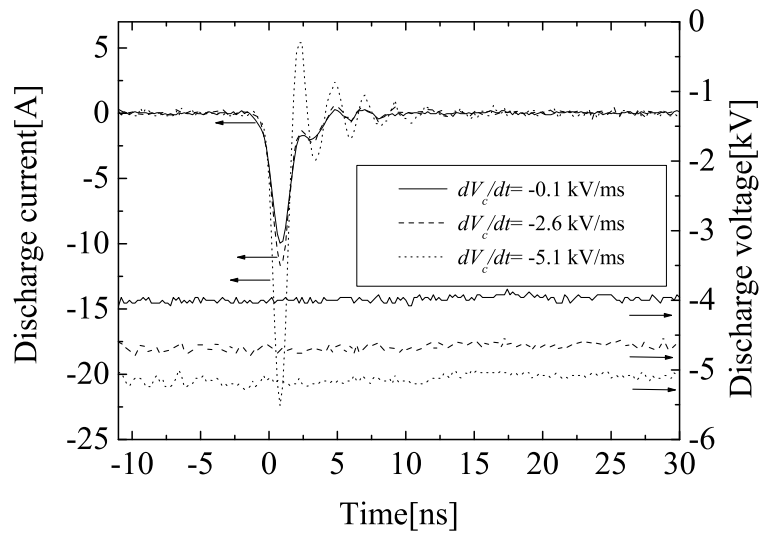


(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.5: Charging voltage waveforms.

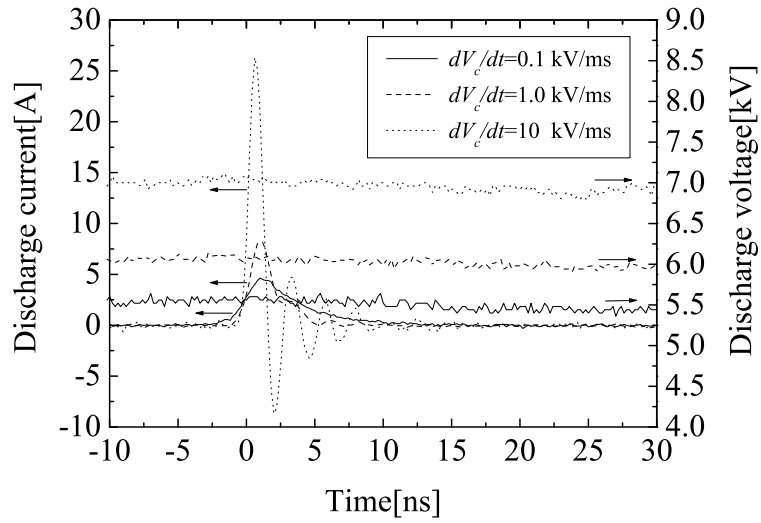


(a) Polarity of charging voltage: positive

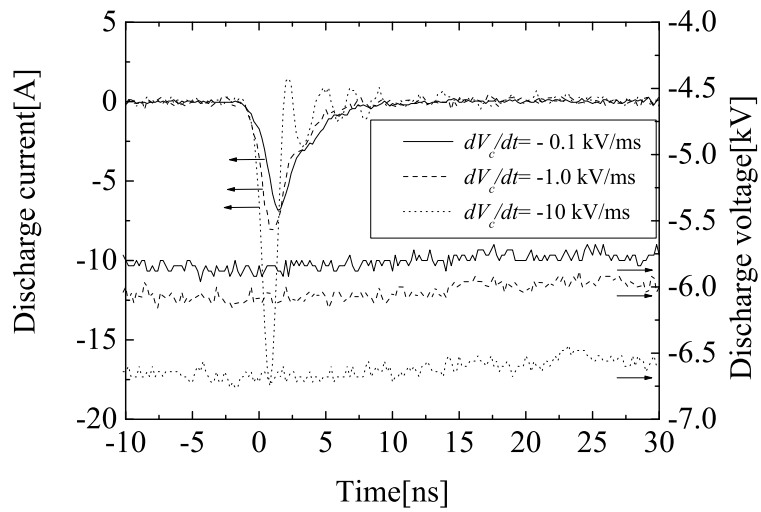


(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.6: Discharge voltage and discharge current waveforms for the gap length of 0.66 mm when the change in the time of the charging voltage varied.



(a) Polarity of charging voltage: positive



(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.7: Discharge voltage and discharge current waveforms for the gap length of 1.16 mm when the change in the time of the charging voltage varied.

各ギャップ長について 100 回の ESD を発生させて、充電電圧の上昇速度を変化させたときの放電電流のピーク値と放電電圧の測定結果を Fig.5.8 に示す。放電電圧はオシロスコープでの A/D 変換による量子化誤差を平均し、放電電流が高電圧プローブの測定値に及ぼす影響を排除するために、トリガポイントから 5 ns さかのぼった -5 ns ~ -10 ns 間の電圧を平均して求めている。高電圧プローブからの信号は CT2 のそれに比較して約 10 ns の伝搬時間遅れがあるため、放電電圧は放電電流のトリガポイント（充電電圧の極性が正：2 A、負：-2 A）を基点として -15 ns ~ -20 ns での電圧の平均となる。

ギャップ長が 0.66 mm については、Fig.5.8(a) に示すように充電電圧の上昇速度が 0.1 kV/ms から 10 kV/ms と速くなると、放電電圧の平均値が 3.8 kV から 5.3 kV に、放電電流ピーク値の平均値は、電流センサの特性を補正しないことに起因して 200 MHz 以上の周波数成分での誤差が含まれているものの、7.8 A から 24 A に上昇している。充電電圧の極性が負での結果を Fig.5.8(b) に示す。充電電圧の上昇速度が -0.1 kV/ms から -5.1 kV/ms に速くなると、放電電圧の平均値が -4.0 kV から -5.1 kV に、放電電流ピーク値の平均値が -11 A から -27 A に上昇している。ギャップ長が 1.16 mm の結果を Fig.5.9 に示す。Fig.5.9(a) に示す充電電圧の極性が正の場合では、充電電圧の上昇速度が 0.1 kV/ms から 19 kV/ms に速くなると、放電電圧の平均値が 5.6 kV から 7.7 kV に上昇し、放電電流ピーク値の平均値は 4.9 A から 20 A に上昇している。Fig.5.9(b) に示す充電電圧の極性が負では、充電電圧の上昇速度が -0.1 kV/ms から -19 kV/ms に速くなると、放電電圧の平均値が -5.9 kV から -7.2 kV に、放電電流ピーク値の平均値が -8.2 A から -19 A に大きくなっている。Fig.5.8、Fig.5.9 において放電電圧、放電電流が充電電圧の極性に依存しており、その一因としては充電電極が円板であるのに対して、対向する接地側の電極が球電極である電極の非対称性が挙げられる。

以上のように、充電電圧の上昇速度に依存して、放電電圧が上昇し、放電電流が大きくなり、その立ち上がり時間が短くなっている。これらの結果は、前章までの実験結果と整合するものであり、衝突電極間での電界強度は測定はできていないものの、衝突電極間の充電電圧と電極間の電界強度とは密接な関係にあることから、帯電電極と接地電極間の電界強度の上昇速度が ESD に影響を及ぼしていると考えられる。

本実験では放電電流は 200 MHz までは測定できていることから、200 MHz までの周波数帯域における放電電流のスペクトルを求めて、充電電圧の上昇速度との関係をつぎに検討する。

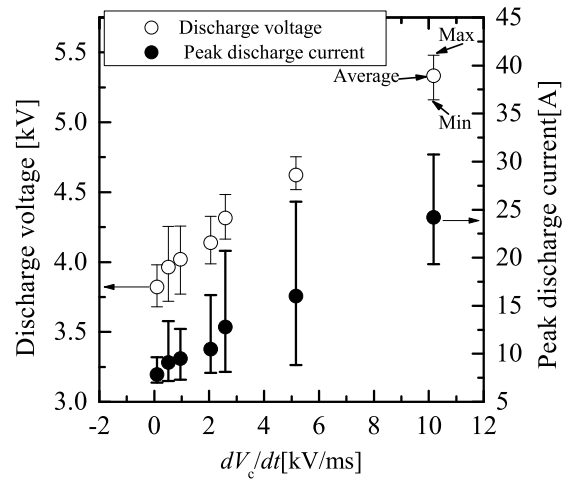
(3) 放電電流のスペクトル

各 ESD のサンプル数は 200 ps 毎に 2500 ポイントであり、スペクトル計算には放電電流 $i(kt_0)$ の測定開始後 2048 ポイントを使用して、式 (5.1) に基づいてスペクトル成分 $I(n\omega_0)$ の絶対値を計算している。

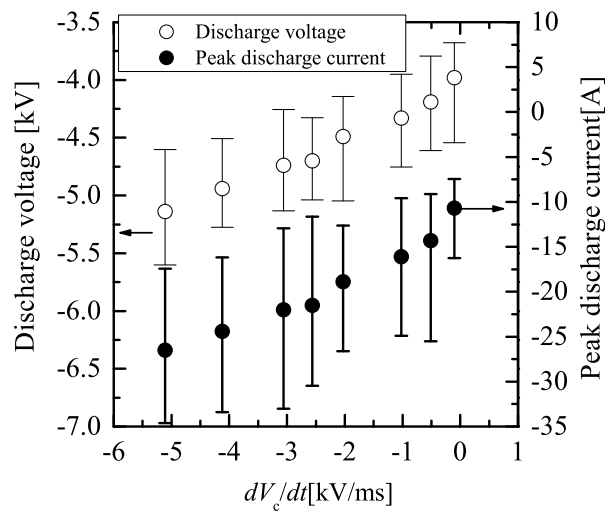
$$I(n\omega_0) = \frac{\sum_{k=0}^{2047} i(kt_0) \exp(-jnk\omega_0 t_0)}{2048} \quad (5.1)$$

ここで、 $t_0=0.2$ ns、 $\omega_0 = 2\pi/(0.2 \times 10^{-9} \times 2048)$ rad/s である。

すなわち、高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform、FFT）によってスペクトルを算出した後に、総サンプル数 2048 で除算し、直流成分を除く周波数成分の振幅スペクトル

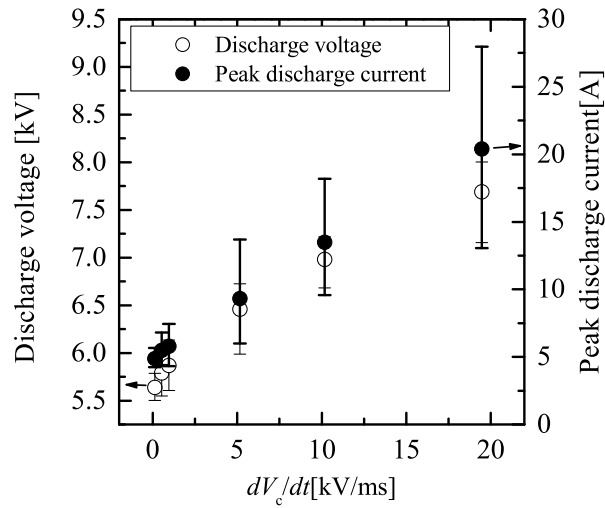


(a) Polarity of charging voltage: positive

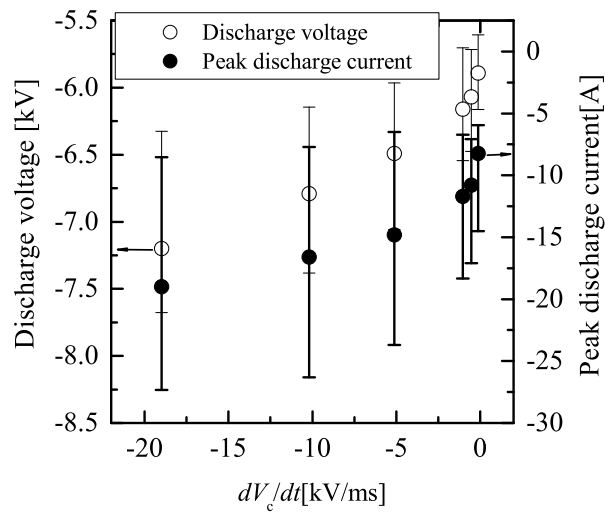


(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.8: Dependence of the discharge voltage and peak discharge current on the change in the time of the charging voltage (gap length= 0.66 mm).



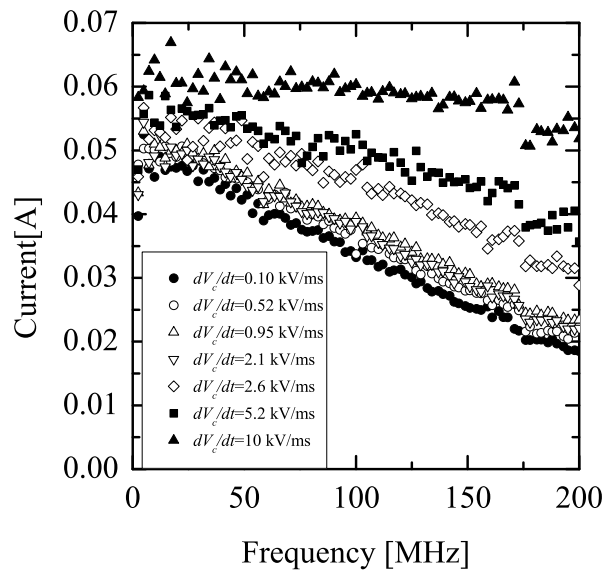
(a) Polarity of charging voltage: positive



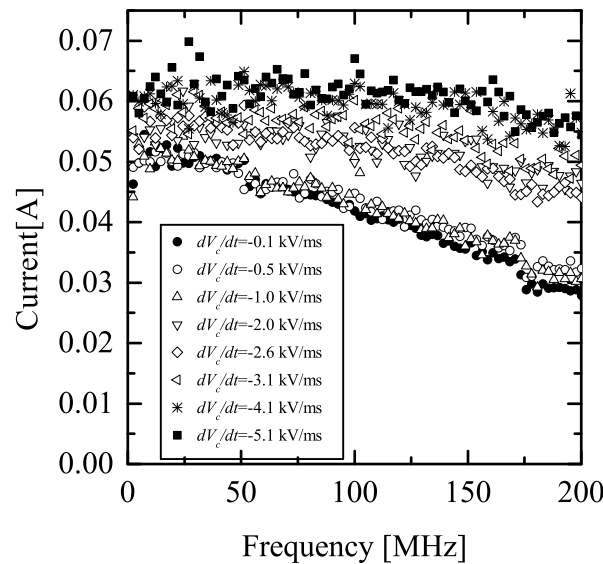
(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.9: Dependence of the discharge voltage and peak discharge current on the change in the time of the charging voltage (gap length= 1.16 mm).

を求めている。なお、スペクトル計算に際しては窓関数を使用していない。具体的な計算にはデータ解析ソフト Origin を用いた。ここで直流成分を求めているのは、電流センサの測定範囲外であることによる。10 回の放電電流について式 (5.1) の $I(n\omega_0)$ の絶対値の計算をおこなった後に平均した振幅スペクトルを Fig.5.10、Fig.5.11 に示す。ギャップ長が 0.66 mm の場合について放電電流の振幅スペクトルを Fig.5.10 に示す。

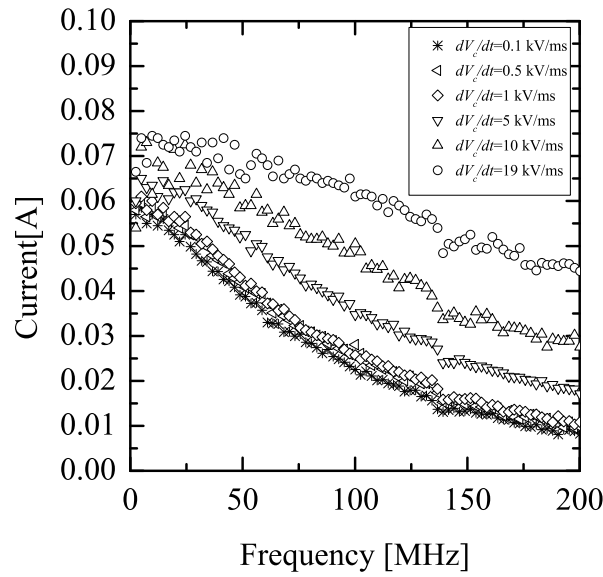


(a) Polarity of charging voltage: positive

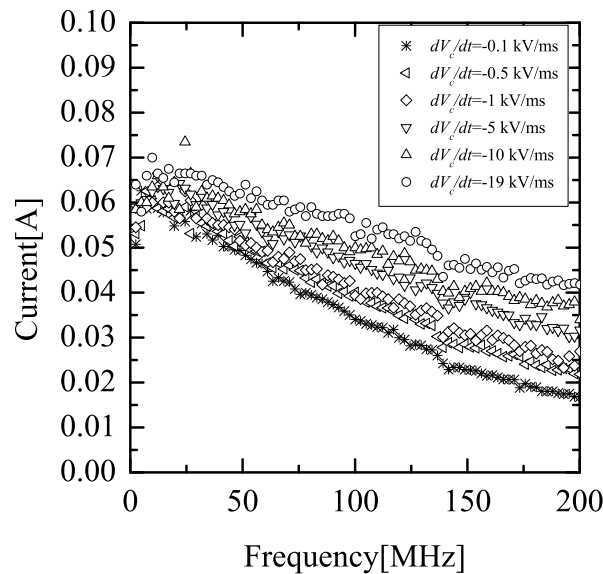


(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.10: Amplitude spectra of the discharge current for the gap length of 0.66 mm.



(a) Polarity of charging voltage: positive



(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.11: Amplitude spectra of the discharge current for the gap length of 1.16 mm.

Fig.5.10(a)に示す充電電圧の極性が正の場合では、充電電圧の上昇速度 (dV_c/dt) が速くなるとともに、放電電流の振幅は概略大きくなっている。また充電電圧の上昇速度 (dV_c/dt) が速くなるとともに周波数が 2.44 MHz から 200 MHz へと高くなるに従い、 dV_c/dt が 0.1 ~ 5.2 kV/ms では放電電流の振幅が小さくなるのに対し、 dV_c/dt が 10 kV/ms では放電電

流の振幅分布が平坦に近くなっている。Fig.5.10(b) に示す充電電圧が負の場合も同様の傾向であり、 dV_c/dt が $-0.1 \sim -3.1$ kV/ms では周波数が高くなるとともに放電電流の振幅が小さくなるのに対して、 dV_c/dt が -4.1 、 -5.1 kV/ms では放電電流の振幅が平坦に近くなっていることがわかる。

ギャップ長が 1.16 mm の場合の結果を Fig.5.11 に示す。2.44 MHz から 200 MHz に周波数が高くなるに従い放電電流の振幅は小さくなる傾向を示している。また、Fig.5.10(a) と同様に、 dV_c/dt が速くなるとともに放電電流の振幅が大きくなっている。

(4) 火花抵抗則に基づく火花電流とのスペクトル比較

Rompe-Weizel による火花抵抗則に基づき得られた火花電流の式 (2.6) を用いて、測定で得られたスペクトルとの比較検討する。

放電電圧の上昇に伴い放電電流のピーク値が大きくなる実験結果については、火花電流のピーク値が火花電圧の自乗に比例する式 (2.7) によって定性的には説明される。

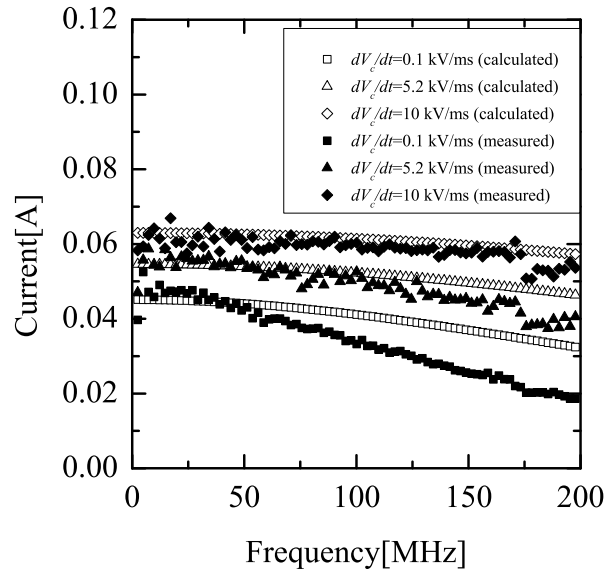
式 (2.6) による火花電流と実験によって得られた放電電流の振幅スペクトルを比較検討するため、Table 5.1 の諸量を式 (2.6) に代入して火花電流を求めた後、式 (5.1) に基づいて火花電流の振幅スペクトルの絶対値を計算し、2~200 MHz の範囲で比較を行った。Table 5.1 に示す静電容量は LCR メータ (Hewlett-Packard、4285A、75 kHz~30 MHz) を用いて 1 MHz において測定した。

Table 5.1: Numerical values used for calculation.

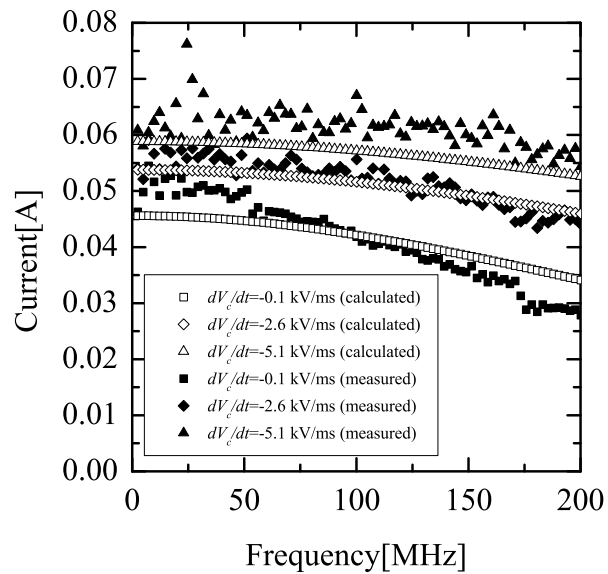
Gap length [mm]	Capacitance [pF]	dV_c/dt [kV/ms]	Discharge voltage [kV]
0.66	4.69	+0.1	3.8
		+5.2	4.6
		+10	5.3
		-0.1	-4.0
		-2.6	-4.7
		-5.1	-5.1
1.16	3.62	+0.1	5.6
		+10	7.0
		+19	7.7
		-0.1	-5.9
		-1.0	-6.2
		-10	-6.8

ギャップ長が 0.66 mm、1.16 mm の結果をそれぞれ Fig.5.12、Fig.5.13 に示す。式 (2.6) に基づく火花電流においても、周波数が高くなるに従い火花電流の振幅が小さくなること

や充電電圧の上昇速度が速くなるとともに火花電流の振幅が大きくなる特性は、実験結果と整合しているものの、数値計算と実験結果とは差異が認められる。この理由としては、ESD に及ぼす因子は 30 以上もある複雑な現象 [14] であることが指摘されており、式 (2.6) が得られたときの実験と本実験との条件の差違が考えられる。

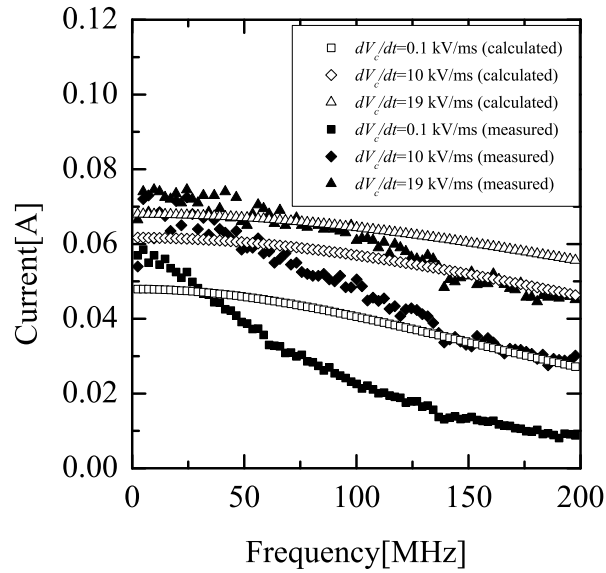


(a) Polarity of charging voltage: positive

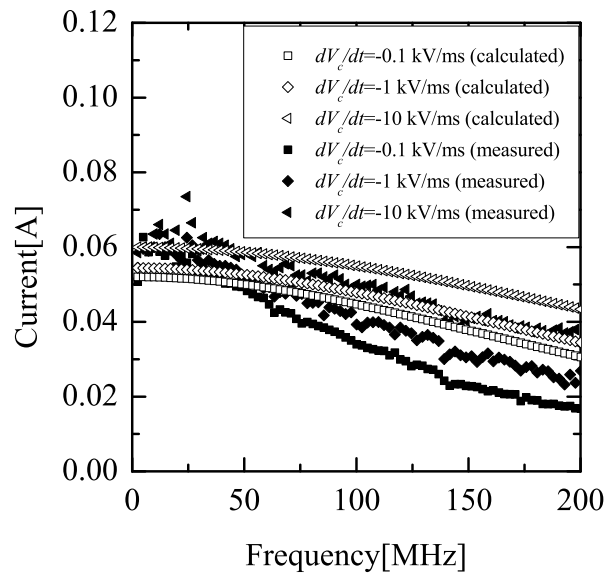


(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.12: Comparison of amplitude spectra between the measured discharge current and calculated spark current from the sparking resistance formula for the gap length of 0.66 mm.



(a) Polarity of charging voltage: positive



(b) Polarity of charging voltage: negative

Fig. 5.13: Comparison of amplitude spectra between the measured discharge current and calculated spark current from the sparking resistance formula for the gap length of 1.16 mm.

5.4 ギャップ長が 0.1 mm 以下の場合

前節ではギャップ長が 0.5 mm を超える場合について、固定電極間の充電電圧の上昇速度が ESD に及ぼす影響を実験した。本節においては、ギャップ長が 0.1 mm 以下の場合について固定電極間での充電電圧の上昇速度が ESD に及ぼす影響を実験する。これは、前章までに用いた衝突実験装置では、衝突速度が数十 mm/s と速くなると衝突に伴う 0.1 mm のオーダでの火花長の測定が困難であることから、今後の衝突実験に寄与するデータを得ることを目的としている。

5.4.1 充電電圧の上昇速度を変化させる ESD 実験装置

(1) 放電電極

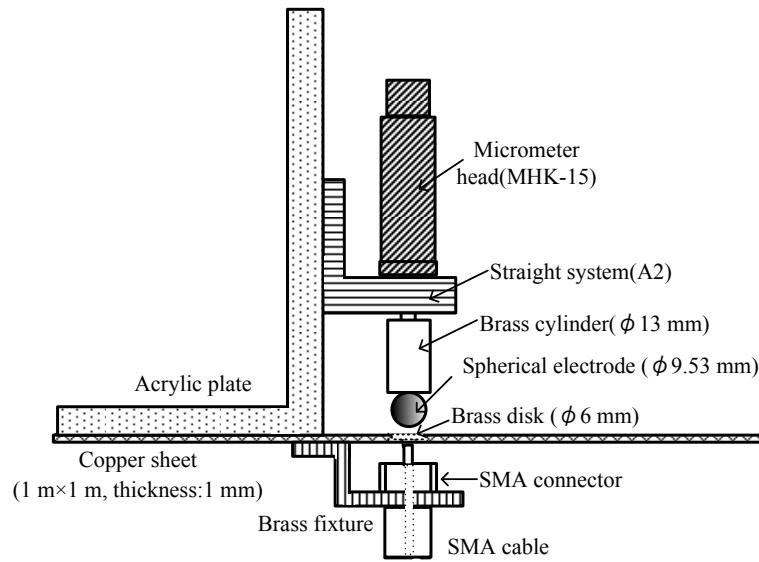
放電電極である真鍮製球電極を含む放電部分を図 5.14(a) に示す。真鍮製球電極 ($\phi 9.53$ mm、以下、球電極という) は真鍮製円筒を介してマイクロメータヘッド (ミットヨ、MHK-15) に取り付けられ、マイクロメータヘッドはストレートステム (ミットヨ、A2) によってアクリル板に固定されて、接地銅板 (1 m \times 1 m、厚さ : 1 mm) と電氣的に絶縁されている。球電極は接地銅板の中心より鉛直上方に配置され、銅板の中心には直径が $\phi 10$ mm の開口部がある。その開口部には、接地銅板表面との表面の高さが同一となる薄い真鍮製円板 ($\phi 6$ mm) が球電極と対向するように配置され、真鍮製円板は SMA 同軸ケーブル (Agilent 8120-4949、1 m) の信号線の端子と直接に接続され、同軸ケーブルの接地側のコネクタは接地銅板と真鍮製治具によって連結されている。

(2) ESD 実験回路

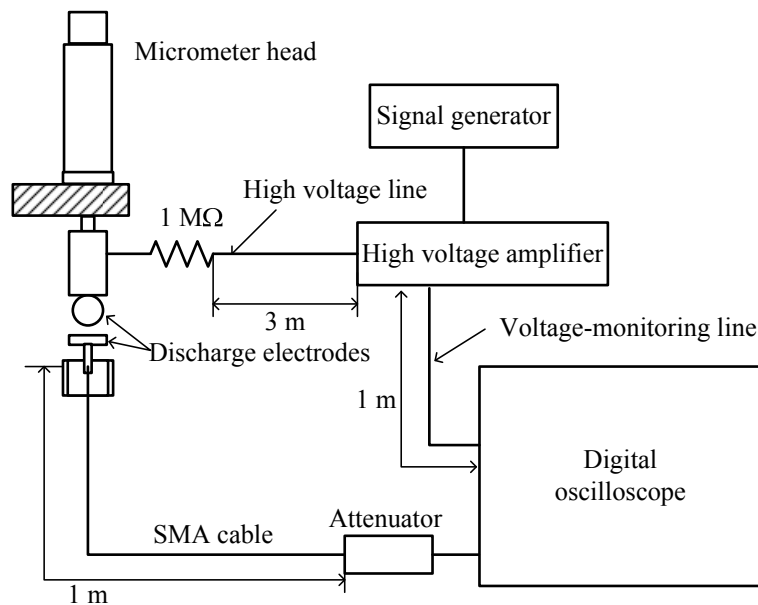
ESD 実験回路を Fig.5.14(b) に示す。マイクロメータヘッドと球電極とを接続する真鍮製円筒は、100 k Ω の高耐圧抵抗を介して、高電圧増幅器 (TREK、MODEL 10/10B、電圧増幅率 : 1,000 V/V、スルーレート : 250 V/ μ s、電圧モニター/出力比率 : 1 V/1000 V) の高圧ケーブル (長さ 3 m) と接続されている。高電圧増幅器から発生される充電電圧波形の制御には、任意波形発生器 (Tektronix、AWG2021、最高クロック周波数 : 250 MHz、垂直分解能 : 12 ビット) を使用した。球電極と対向する真鍮製円板に接続された SMA 同軸ケーブルは同軸形固定アッテネータ (多摩川電子、SFA-01AXPJ-30、30 dB、DC~8 GHz) を介してデジタルオシロスコープ (Tektronix、DPO70404、以下オシロスコープという) の 50 Ω 入力端子に接続されている。この端子に放電電流 i_s によって発生する電圧 V_s とアッテネータの減衰量 30 dB 及び入力インピーダンス 50 Ω を考慮して、式 (5.2) によって放電電流を 25 GHz のサンプリング周波数によって得ている。

$$i_s = \frac{V_s \times 10^{1.5}}{50} \approx 0.632 \times V_s \quad (5.2)$$

また、高電圧増幅器からの出力電圧を観測するための電圧モニター端子 (出力インピーダンス : 47 Ω) は同軸ケーブル (1 m) を介して先述のオシロスコープの 50 Ω 入力端子と接続されている。



(a) Discharge electrodes



(b) Experimental circuit

Fig. 5.14: Experimental setup for observing ESD from spherical electrode for different rates of increase in charging voltage.

(3) 充電電圧波形と実験方法

平等電界が形成されている帯電物体と接地体間で、帯電物体と静止接地体間の間隔が約 50 mm の箇所から、帯電物体が静止接地体に向かって 200 mm/s、20 mm/s の速さで衝突すると単純に仮定した場合について、これらと同様の電界変化となるようにギャップ長 l が 20~80 μm において充電電圧を発生させた。帯電物体の衝突速度 200 mm/s を簡易的に模擬するために、高電圧増幅器の周波数特性が理想的と仮定して、高電圧増幅器から出力される充電電圧のピーク値を $V_{\text{ch}}[\text{V}]$ とすると、任意波形発生器での出力電圧 $V [\text{V}]$ は式 (5.3) と表現される（ここでは、Case I という）。

$$V = \frac{l \times 0.001 \times V_{\text{ch}}}{0.05 - 0.2(t - t_0)} \quad (5.3)$$

ここで、 $t [\text{s}]$ は時間であり、 $0 \sim (0.05 - l)/0.2 + t_0 [\text{s}]$ まで変化することから、 $V [\text{V}]$ の最大値は $V_{\text{ch}}/1000 [\text{V}]$ となる。 $l [\text{m}]$ はギャップ長、 t_0 は離散データ数が 8 の倍数となるための調整用の時間であり 1 $\mu\text{s} \sim 7 \mu\text{s}$ の値をとる。

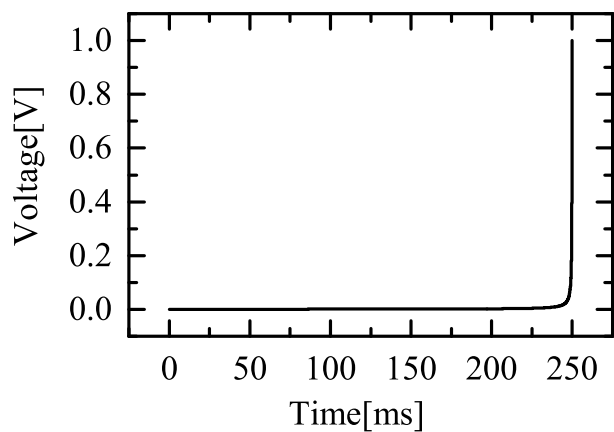
式 (5.3) に基づく波形作成に際しては、波形作成ソフト (Tektronix、WaveWriter) によって、ピーク値が 1 V となる波形を 1 μs 間隔で作成した後、パーソナルコンピュータから任意波形発生器に送信している。Fig.5.15 には、ギャップ長 l が 20 μm の場合について WaveWriter で作成された波形を示す。このとき $t = 0 \sim 0.249903 \text{ s}$ 、 $t_0 = 3 \mu\text{s}$ であり、総データ数は 249,904 となる。高電圧増幅器の増幅度が 1,000 であることを考慮して、任意波形発生器での出力電圧が調整されている。

帯電物体の静止接地体への衝突速度が 20 mm/s と仮定した場合の出力波形は、Case I について WaveWriter を用いて作成された離散データの時間間隔を、任意波形発生器において 1 μs から 10 μs に設定変更することによって得ている（ここでは、Case II という）。

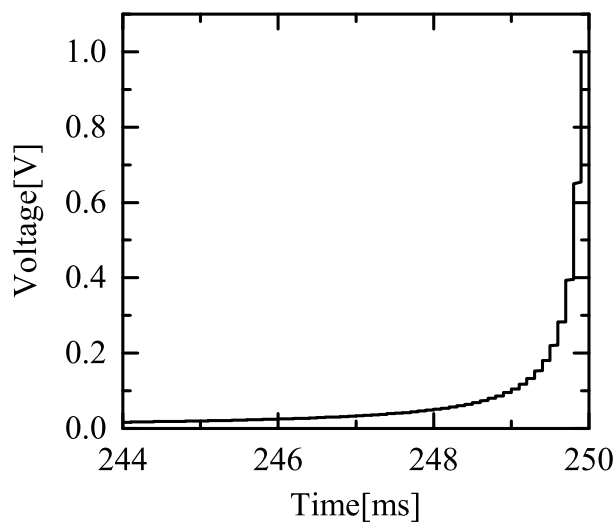
Fig.5.16 にはギャップ長 l を 20 μm と想定した Case II について、任意波形発生器での出力電圧の最大値を 540 mV とした場合の電圧モニターでの電圧波形及び高圧プローブ (Tektronix, P3000, 2.5 pF/500 M Ω) で測定した球電極部の電圧波形を示す。電圧モニターのピーク値は 292 mV であり、球電極での電圧のピーク値 V_{cp} は 544 V となった。高電圧増幅器は入力電圧をほぼ 1,000 倍に増幅していることがわかる。一方、電圧モニターのピーク値をインピーダンスに基づいて算出すると 280 mV となり、測定値との差異の一因には量子化誤差が考えられる。

Fig.5.17 にはギャップ長 l を 20 μm と想定した Case I について、任意波形発生器での出力電圧の最大値を 680 mV に調整した場合に、電圧モニターでの電圧波形及び高圧プローブ (Tektronix、P5100、2.75 pF/10 M Ω) によって測定した球電極部の電圧波形を示す。電圧モニターからの出力のピーク値は 344 mV、球電極での充電電圧のピーク値 V_{cp} は 648 V であった。高電圧増幅器からの出力電圧は、任意波形発生器での設定電圧の 1,000 倍よりも小さくなっている。これは高電圧増幅器の有する帯域制限によって高周波での増幅度が小さくなることに起因している。そのため任意波形発生器での出力電圧と高電圧増幅器での出力電圧との関係を予め実験的に求めた。

ESD の実験においては、ギャップ長 l を固定した後に、任意波形発生器から式 (5.2) に基づく電圧を発生させて球電極を充電した。温湿度の測定には温湿度計 (佐藤計量器製作



(a) Charging voltage waveform



(b) Enlarged waveform

Fig. 5.15: Charging voltage waveform produced using WaveWriter for the gap length $l = 20 \mu\text{m}$ (Case I).

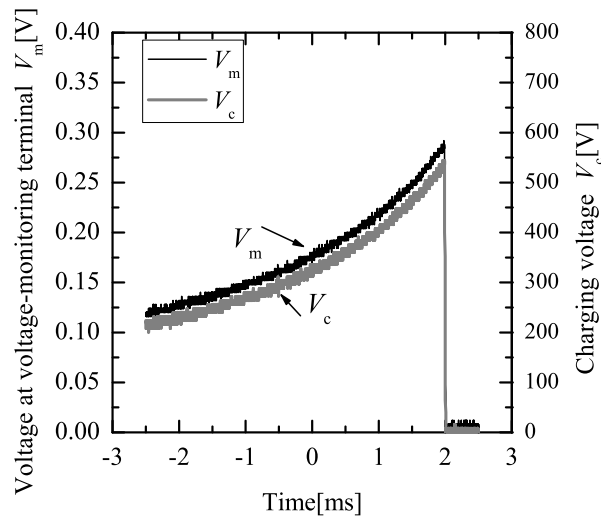


Fig. 5.16: Example of charging voltage waveform at the spherical electrode and voltage-monitoring terminal of high-voltage amplifier(Case II).

所、シグマ II 型温湿度記録計) を用い、気温 27.5~28.5 °C、相対湿度 58~60 % の大気圧環境下で ESD の測定実験を行った。

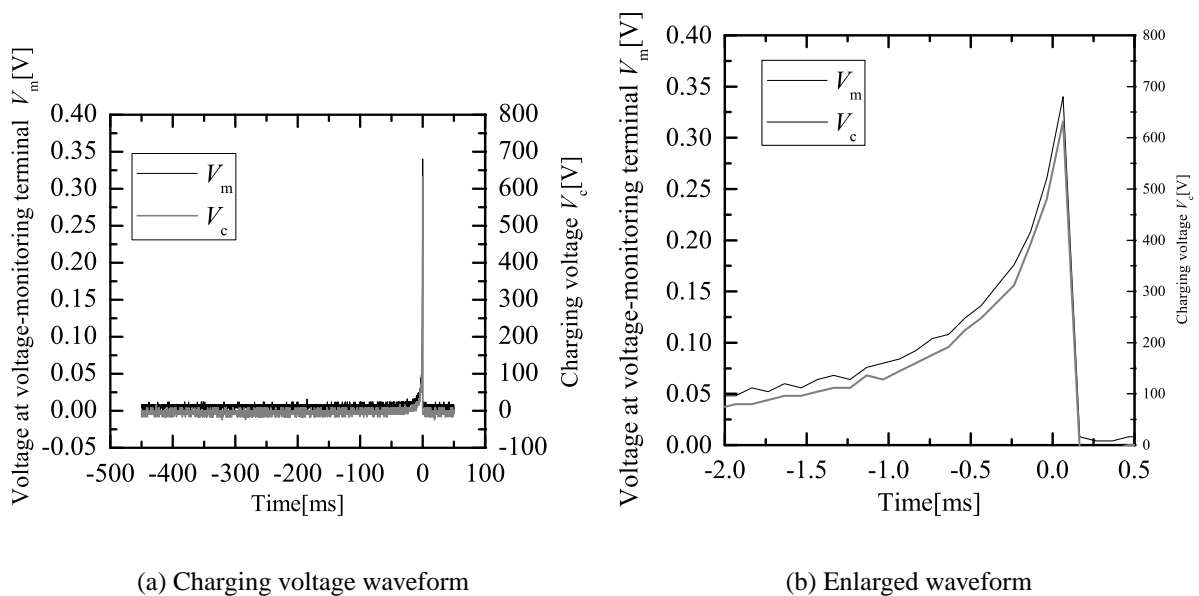


Fig. 5.17: Example of charging voltage waveform at the spherical electrode and voltage-monitoring terminal of high-voltage amplifier (Case I).

5.4.2 ESD の実験結果及び考察

(1) 放電電流・放電電圧波形

Fig.5.18 には充電電圧のピーク値 V_{cp} を変化させたときの放電電流波形の例を示す。 V_{cp} には、予め実験的に求めた任意波形発生器での出力電圧と高電圧増幅器での出力電圧との関係を用いている。

Fig.5.18 に示されたギャップ長 l 、充電電圧のピーク値 V_{cp} がおのおの $20 \mu\text{m}$ 、 540 V の場合について、高電圧増幅器の電圧モニターでの電圧と放電電流の波形を Fig.5.19 に示す。電圧モニターでの電圧には直流的な電圧波形の後に、放電電流の発生から 5 ns 程度遅れて減衰振動する波形がみられる。減衰振動は放電電流によって影響を受けたことに起因するものと考えられる。電圧モニター電圧の 5000 サンプル値を平均した値である 0.288 V と換算計数（充電条件ごとに実験的に求めた球電極における電圧の電圧モニター電圧に対する比）を乗じて放電電圧を求めている。換算係数には 1862 を用い、この場合の放電電圧は 537 V となる。なお減衰振動する部分も平均値の算出に用いているが、減衰振動部分を除いたサンプル値に基づく平均値との差は 0.35% であったため、減衰振動が平均値に及ぼす影響を無視している。同様の手法によって各放電に対する放電電圧の算出を行った。

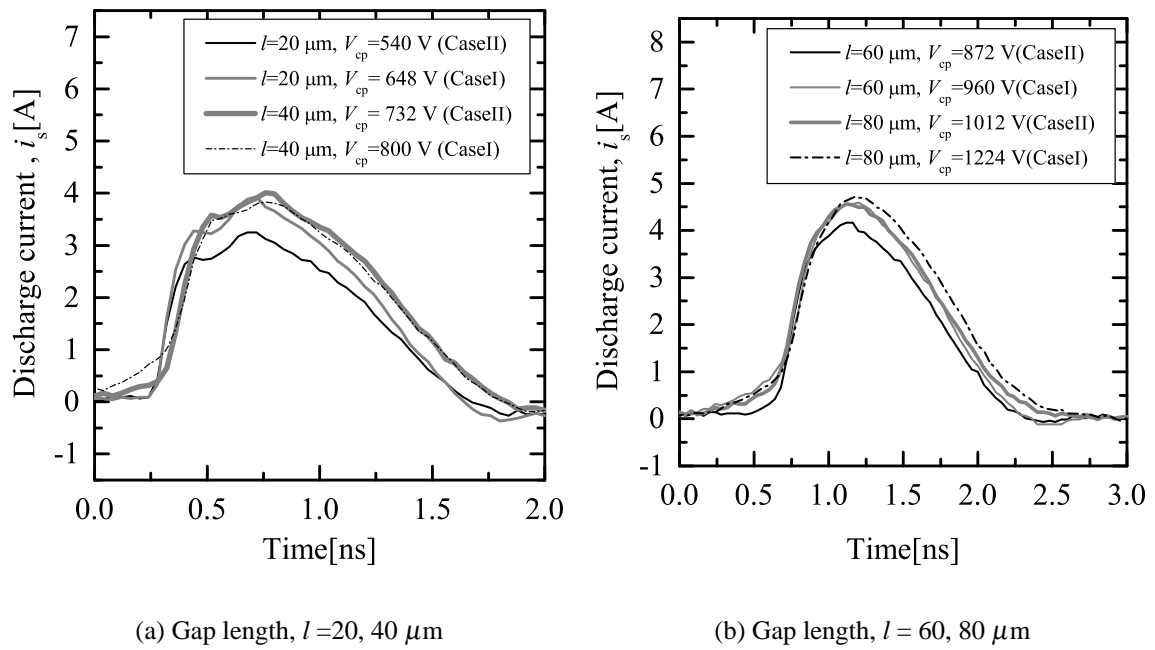


Fig. 5.18: Example of discharge current waveforms.

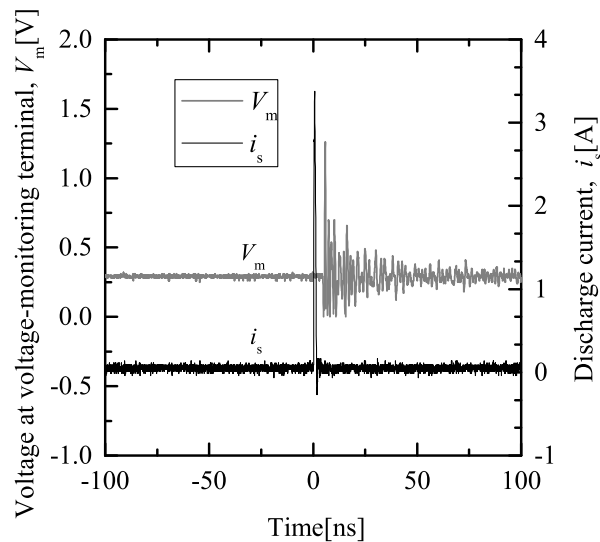


Fig. 5.19: Example of discharge current and voltage at the voltage-monitoring terminal, ($l=20 \mu\text{m}$, $V_{cp}=540 \text{ V}$ (Case II)).

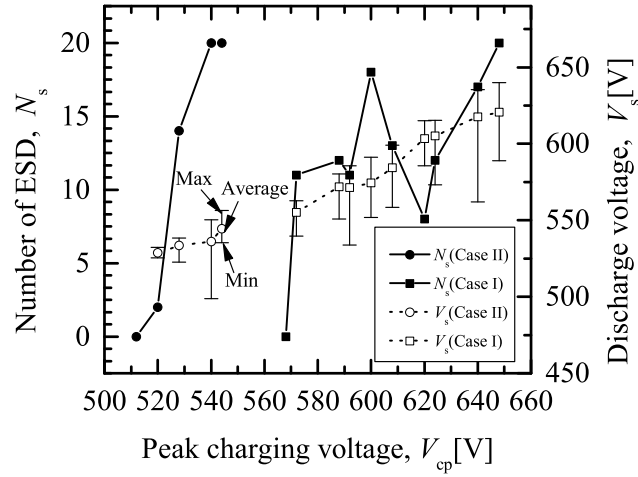
(2) 放電電圧、放電電流のピーク値・立ち上がり時間

各条件において約 6 秒間隔で 20 回の充電電圧の印加を行って、放電回数、放電電流のピーク値と立ち上がり時間を測定した。

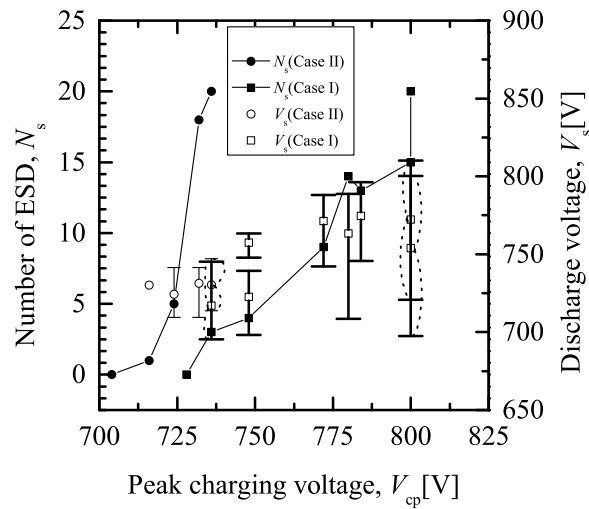
Fig.5.20、Fig.5.21 には、充電電圧のピーク値 V_{cp} に対する放電回数、放電電圧の変化を示す。ここでは任意波形発生器からの出力電圧を制御して充電電圧のピーク値 V_{cp} を制御しており、ESD が発生しない出力電圧から 10 mV ステップで上昇させた。同一のギャップ長において、ESD が発生しなかったときの V_{cp} の最大値は Case I のほうが Case II より高い電圧となった。充電電圧を印加した 20 回全てで ESD が発生した場合の放電電圧の平均値は、Case I のほうが Case II より高い電圧となった。このことは、充電電圧の上昇速度が速くなると、放電電圧が上昇することを示している。

充電電圧を印加した 20 回全てで ESD が発生した場合について、放電電圧、放電電流のピーク値と立ち上がり時間（10-90 %）を統計処理した結果を Fig.5.22 に示す。同図でシンボルは平均値、エラーバーは標準偏差をそれぞれ示す。Fig.5.22(a) に示すように、同一のギャップ長については、充電電圧の上昇速度が速くなると、放電電圧の平均値は高くなっている。また同一の充電電圧の上昇速度に対しては、ギャップ長が広がると、放電電圧の平均値は高くなっている。Fig.5.22(b) に示すように、同一の充電電圧の上昇速度に対して、ギャップ長が広がると、放電電流ピーク値の平均値は大きくなっている。また同一のギャップ長に対しては、充電電圧の上昇速度が速くなると、放電電流ピーク値の平均値は大きくなっている。

放電電流の立ち上がり時間については、Fig.5.22(c) に示すように、同一のギャップ長に対して、20 μm の場合を除いて、充電電圧の上昇速度が速くなると放電電流の立ち上がり時間が長くなっている。20 μm では、立ち上がり時間に差がみられなかったが、オシロスコープ固有の立ち上がり時間が 93 ps であって、この値よりも放電電流の立ち上がり時間が高速であったことが要因と考えられる。また同一の充電電圧の上昇速度に対しては、ギャップ長が広がるとともに、放電電流の立ち上がり時間が長くなっている。Fig.5.18 に示すように放電電流の立ち上がり部分には二つのピークが見られたが、これらの二つのピークが重なることが一つの要因となって、結果として Fig.5.22(c) のような立ち上がり特性となった可能性が考えられる。

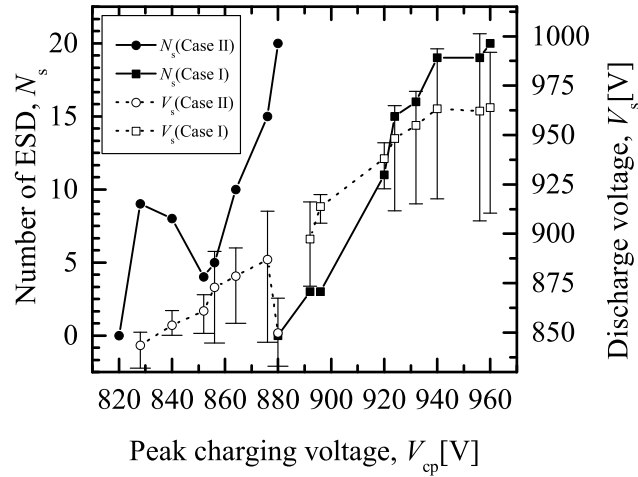


(a) Gap length, $l = 20 \mu\text{m}$

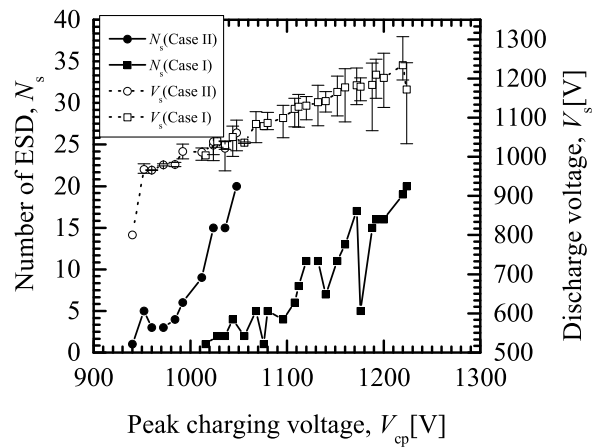


(b) Gap length, $l = 40 \mu\text{m}$

Fig. 5.20: Dependence of the number of ESD and discharge voltage on the peak charging voltage (gap length, $l = 20, 40 \mu\text{m}$) .

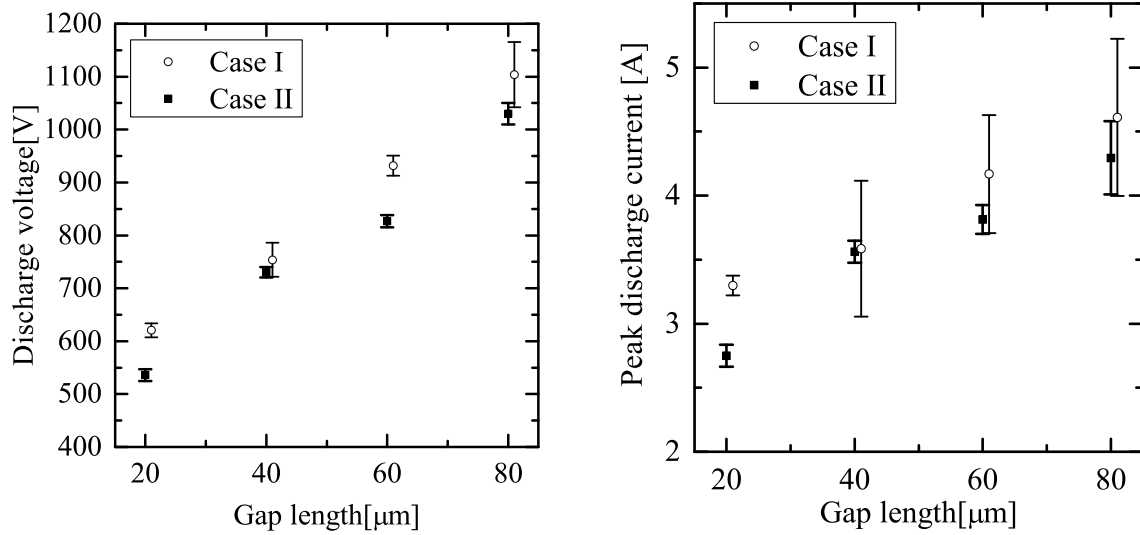


(a) Gap length, $l = 60 \mu\text{m}$



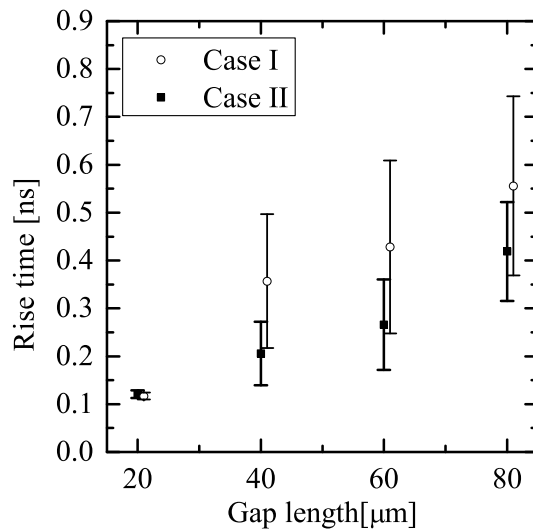
(b) Gap length, $l = 80 \mu\text{m}$

Fig. 5.21: Dependence of the number of ESD and discharge voltage on the peak charging voltage (gap length, $l = 60, 80 \mu\text{m}$).



(a) Discharge voltage

(b) Discharge current



(c) Rise time

Fig. 5.22: Dependence of the discharge voltage, peak discharge current, and rise time of discharge current on the gap length.

(3) 放電電流の周波数スペクトル

Fig.3.17(b)に示すように、火花長が0.2 mm程度になるとターゲットによる放電電流の立ち上がりが誘導電圧に基づく放電電流に比較して緩やかになっていることから、Fig.5.22(b)の結果が得られた時の放電電流について、振幅スペクトルを求めた。

各放電電流の5000サンプル値のうち、サンプル開始後の452番目から4547番目までの4096個のサンプル値に対して、窓関数としてHanning窓を適用してFFTによって振幅スペクトル算出した。同一の放電条件ごとに20回の放電電流の振幅スペクトルを平均した結果をFig.5.23に示す。Fig.5.23より、DC~4 GHzの範囲において、周波数が高くなるとともに振幅は概略小さくなっている。Fig.5.23(a)より、Case Iについては、400 MHz程度よりも低い周波数においては、ギャップ長が広いほど相対的に振幅が大きいが、1 GHz程度以上では、ギャップ長が広いほど相対的に振幅が小さくなっている。Fig.5.23(b)より、Case IIについては、500 MHz程度よりも低い周波数においては、ギャップ長が広いほど相対的に振幅が大きいが、1 GHz程度以上では、20 μm の場合を除いては、ギャップ長が広いほど相対的に振幅が小さくなっている。

Fig.5.23(a)及びギャップ長が40 μm について、ギャップ長ごとに振幅スペクトルと充電電圧の上昇速度とにプロットし直した結果をFig.5.24、Fig.5.25に示す。ギャップ長が20 μm の場合には、周波数がDC~4 GHzの範囲においてCase IのほうがCase IIより振幅が相対的に大きい。ギャップ長が40 μm の場合には、200 MHz程度より低い周波数ではCase IのほうがCase IIより相対的に振幅が大きいが、400 MHz程度より高い周波数ではCase IIのほうがCase Iより相対的に振幅が大きいが、700 MHz程度より低い周波数ではCase IのほうがCase IIより相対的に振幅が大きいが、700 MHz程度より高い周波数ではCase IIのほうがCase Iより相対的に振幅がほぼ大きい。ギャップ長が80 μm の場合には、300 MHz程度より低い周波数ではCase IのほうがCase IIより相対的に振幅が大きいが、600 MHz程度から2 GHz程度の周波数範囲ではCase IIのほうがCase Iより相対的に振幅がほぼ大きく、その周波数より高くなるとCase IIとCase Iによる振幅の差は明瞭ではなくなっている。以上のように、20~80 μm のギャップ長において、200 MHz程度より低い周波数においてはCase IのほうがCase IIより相対的に振幅が大きい。

(4) 考察

Fig.5.22のとおり、ギャップ長が0.1 mm以下・放電電圧が1300 V以下の場合であって、ギャップ長が同一であるとき、充電電圧の上昇速度がCase IIからCase Iへと速くなると放電電圧は上昇している。特に600 V程度の場合にも放電電圧の上昇がみられる。この結果は放電電圧が800 V以上の場合[43]と定性的には同様である。充電電圧としてパルス波が印加されたときには、直流の充電電圧に比較して、過電圧になることは周知の現象であるが、本実験で用いた充電電圧の場合にも、パルス波による充電電圧を印加した場合と同様に過電圧の現象が発生していると考えられる。

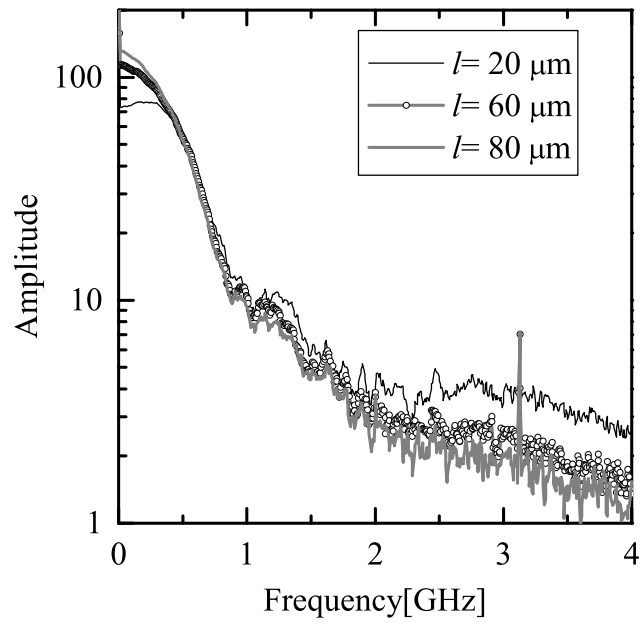
Fig.5.18の火花電流波形には二つのピークがみられる。第一のピークは球電極に帯電した電荷の放電に起因するものであり、第二のピークはマイクロメータヘッド部分の帯電電

荷による。またギャップ長が $80\ \mu\text{m}$ になると、電流の 2 つのピークが重なり合って、2 つの電流を区別しにくい状況になっている。これは球電極の帯電電荷による放電電流の立ち上がり時間 (10-90 %) が長くなることに起因している。

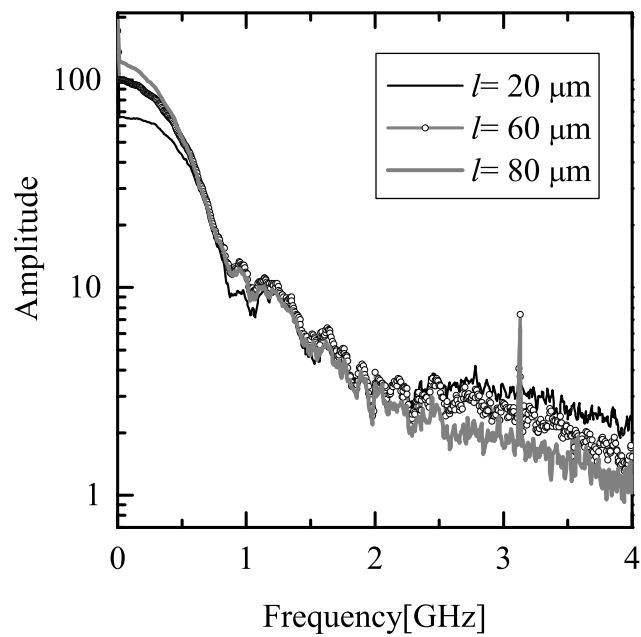
放電電極部分の帯電電荷に起因する放電電流は一つのピークを有している形状が一般的に報告されているが [43]、ギャップ長が短く、かつ放電電極の電荷が電極部分以外にも帯電している場合には、電極部の帯電電荷による放電と電極以外の電荷による放電とが分離されて観測されることとなる。

20~80 μm のギャップ長において、Fig.5.22(b) に示すとおり、充電電圧の上昇速度が Case II から Case I へと速くなると、放電電流ピーク値を平均した値は大きくなっている。Rompe-Weizel の火花抵抗則に基づくと、式 (2.7) の通り放電電圧が上昇すると放電電流のピーク値も上昇することとなる [31]。Fig.5.22(a)、Fig.5.22(b) のとおり、放電電圧が上昇すると放電電流ピーク値を平均した値も大きくなっており、本実験での結果は火花抵抗則に定性的には整合している。

放電電流の振幅スペクトルに関する Fig.5.23(a)、Fig.5.23(b) の結果は、概略つぎのように考えられる。Fig.5.22(b)、Fig.5.22(c) に示すように、同一の充電電圧の上昇速度に対しては、ギャップ長が広がるとともに、第一の火花電流ピークの平均値が大きくなるが、立ち上がり時間が長くなることから、スペクトルの振幅は大きくなるが、高周波側の振幅は相対的に小さくなることに起因していると考えられる。

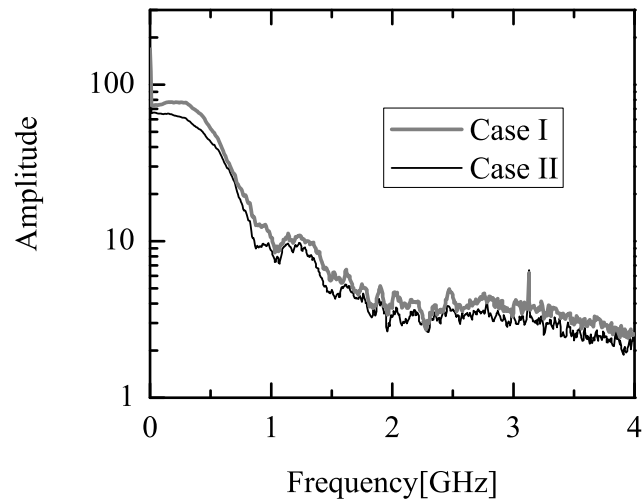


(a) Case I

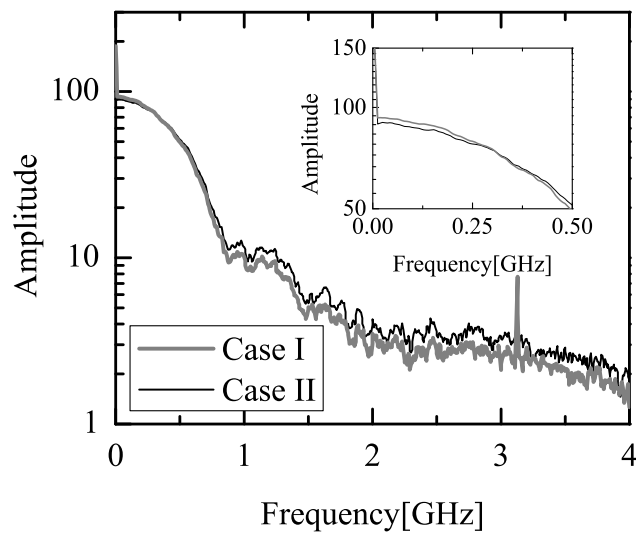


(b) Case II

Fig. 5.23: Amplitude spectra of discharge current for different rates of increase in charging voltage.

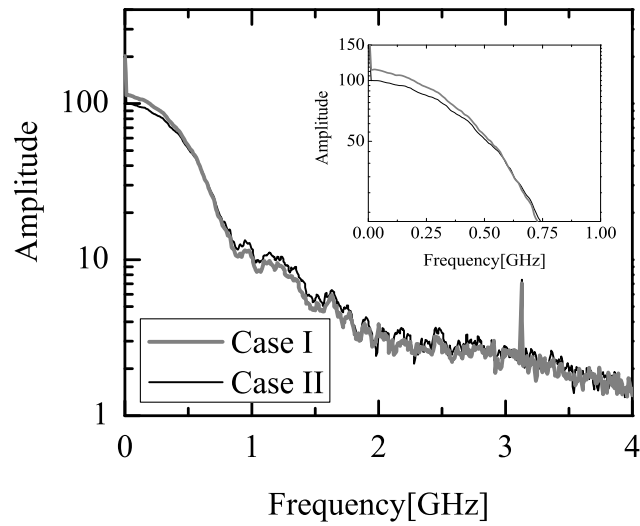


(a) Gap length, $l = 20 \mu\text{m}$

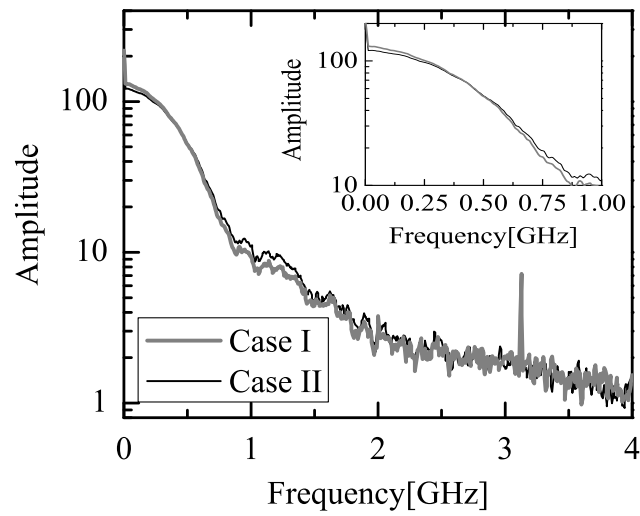


(b) Gap length, $l = 40 \mu\text{m}$

Fig. 5.24: Amplitude spectra of discharge current for different gap lengths($l = 20, 40 \mu\text{m}$).



(a) Gap lengths, $l = 60 \mu\text{m}$



(b) Gap lengths, $l = 80 \mu\text{m}$

Fig. 5.25: Amplitude spectra of discharge current for different gap lengths($l = 60, 80 \mu\text{m}$).

5.5 まとめ

電極の衝突による ESD 現象の要因を検討するために、固定電極間に印加する充電電圧の上昇速度が ESD に及ぼす影響を実験した。その結果、充電電圧の上昇速度が速くなると放電電圧および放電電流のピーク値が大きくなった。したがって、充電電圧の上昇速度と密接な関係にある電極間の電界上昇速度が ESD に影響を及ぼしており、電界の上昇速度が速くなると、放電電圧および放電電流のピーク値が大きくなるとの結論が導かれる。

したがって前章までに得られた衝突電極による ESD においては、電極間の電界強度の上昇速度が影響を及ぼしていると考ええる。また、火花長が 0.1 mm 以下の衝突に伴う ESD においても、衝突速度は放電電圧、火花長に影響を及ぼす可能性がある。

第6章 結論

電磁雑音源としての帯電物体と接地物体との衝突に伴う ESD 現象を対象とし、その特性を解明するための基礎的な実験的研究を行った。

衝突速度については、衝突条件を明確化して衝突速度を一定とするようにするために AC サーボモータを用いた速度制御によって衝突電極を用いた ESD の実験を行った。衝突電極による ESD によって、火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧を測定した。その結果、衝突速度が速くなると、平均火花長は短くなることを定量的に示し、放電電流ピーク値の平均値は大きくなり、放電電流の立ち上がり時間の平均値は短くなること、誘導電圧のピーク値の平均値は大きくなり、誘導電圧の立ち上がり時間の平均値は短くなることを、衝突速度を一定とした条件下で明らかとした。このことから衝突速度と火花長との間に相関関係のあることを示した。放電電流の大きさについては、火花長を用いて、Rompe-Weizel の火花抵抗則に基づいて藤原によって導出された火花電流から定性的な傾向を推定できることを示した。衝突速度が速くなると、放電おくれは短くなることを定量的に示した。

つぎに、衝突電極の大きさは、帯電電荷の及ぼす空間の領域に影響することから、衝突にともなう ESD にも影響すると考えられる。そこで衝突電極の直径を変えて火花長、放電電流、磁界プローブへの誘導電圧を測定した。その結果、各衝突電極に対しては、先の結果と同様に、衝突速度が速くなると、平均火花長は短くなることを定量的に示し、放電電流ピーク値の平均値は大きくなり、放電電流の立ち上がり時間の平均値は短くなること示せた。誘導電圧については、ピーク値の平均値は大きくなった。衝突電極の大きさに対しても、衝突電極の直径が小さくなると、同一の衝突速度でも、平均火花長は短くなること、放電電流ピーク値の平均値は大きく、放電電流の平均立ち上がり時間は短くなること示せ、誘導電圧については、ピーク値の平均値は大きくなった。測定した放電電流の信頼性を、磁界プローブへの誘導電圧から計算によって放電電流を算出した結果、火花長が 0.5 mm までは用いたターゲットで放電電流を測定可能であるが、火花長が 0.2 mm 程度になると立ち上がりが緩慢となることを確認した。放電電流のピーク値・上昇速度は火花長が 1.2 mm 程度までは、Rompe-Weizel の火花抵抗則に基づいて藤原によって導出された火花電流の式より推定できるものであった。

先述までの実験では、帯電電極が静止した接地電極に衝突するものであったが、接地電極が静止した帯電電極に衝突する実験を行った。この場合においても、衝突に伴って、接地電極の衝突速度が速くなると、平均火花長は短くなること示せ、誘導電圧ピーク値の平均値は大きくなり、誘導電圧立ち上がり時間の平均値は短くなった。各接近速度における典型的な誘導電圧に対して短時間フーリエ変換を適用することにより、衝突速度が速く

なると電極間での ESD に起因するスペクトル強度も強くなった。

これまでの ESD の実験において、電極が衝突する過程で帯電電極と接地電極間での電界強度が時間とともに強くなると考えられることから、ESD 現象に及ぼす電極間の電界の影響を調べるために、ギャップ長が 0.5 mm 以上の固定された電極間に印加する充電電圧の上昇速度を速くすることによって、固定された電極間の電界強度を変化させた。その結果、固定された電極間に印加する充電電圧の上昇速度が速くなると平均放電電圧が高くなり、放電電流ピーク値の平均値が大きくなり、その立ち上がり時間は短くなった。この結果は、電極間の電界強度の上昇速度が放電電圧を上昇させ、放電電流のピーク値を上昇させていると示唆されることから、衝突電極による ESD 現象には電界強度の上昇速度が大きく寄与しているもの考える。

つぎに、0.1 mm 以下のギャップ長で充電電圧の上昇速度が放電電圧、放電電流に及ぼす影響の実験を行った。その結果 0.1 mm 以下のギャップ長においても充電電圧の上昇速度が速くなると放電電圧が高くなり、放電電流ピーク値の平均値が大きくなった。この結果は、火花長が 0.1 mm 以下の場合であっても、衝突電極によって火花長が短くなり、放電電圧が上昇する可能性のあることを示している。

今後の課題としては、衝突速度が火花長に及ぼす影響の理論的な解明、広帯域の電流センサを用いた放電電流測定による ESD 現象の解明が挙げられる。また、電極表面の均一性や状態、電極間の塵、湿度などが ESD に及ぼす影響の解明がある。

付録 A

短時間フーリエ変換

短時間フーリエ変換（Short-time Fourier Transform、STFT）とは、時間とともに周波数成分がどのように変化するかを分析するために用いられるものであって、関数に窓関数を時間的にずらしながら掛けて、それにフーリエ変換を適用するもので、音声の声紋分析などの信号処理の分野で用いられている。

関数 $x(t)$ に窓関数 $w(t)$ を適用することによって、時刻 t 付近の波形成分を式 (A.1) のように切り出すことができる。

$$x_{st}(\tau, t) = x(\tau)w(\tau - t) \quad (\text{A.1})$$

これを τ に関してフーリエ変換すると、時刻 t 付近における短時間スペクトル $X_{st}(\omega, t)$ が得られる。

$$X_{st}(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x_{st}(\tau, t) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (\text{A.2})$$

ここで、信号がオシロスコープで得られる離散信号のサンプリング周波数を f_s 、サンプル数を N とすると、得られる周波数 f の周波数範囲は $0 \leq f \leq f_s$ となり、そのときの分析フレームの時間の長さ t は N/f_s 、周波数分解能 Δf は f_s/N となる。よって、サンプル数を増加させると周波数分解能が向上する一方で、分析フレームの時間長が長くなるために時間分解能が低下する。

本研究では、誘導電圧の時間変化が数 ns であったことから、サンプル数を 64 とした。サンプリング周波数が 25 GHz であることを考慮すると、分析フレームの時間長は 2.56 ns、周波数分解能は 390 MHz となる。時間分解能は、分析フレーム長に加えて、シフト量にも影響されるため、分析シフト量としてはサンプル数の 1/2 である 1.28 ns とした。窓関数としては Hanning 窓を採用して、数値解析用ソフトである MATLAB によって計算を行った。

謝辞

本研究の実施および論文の作成にあたり、懇切なご指導と有益なご助言を多数賜りました名古屋工業大学名誉教授藤原修先生、名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻王建青教授に厚くお礼申し上げます。また、本論文を進めるに当たり様々な分野において有益なご助言を頂き、本論文を審査いただきました、名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻菊間信良教授、名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻榊原久二男教授に深い感謝の意をささげます。

本研究を実施する上で、インパルス物理研究所本田正実氏、東北学院大学工学部川又憲教授、立命館大学理工学部馬杉正男教授には理論・実験両面にわたる多くのご助言、ご教授を賜りました。感謝いたします。

労働安全衛生総合研究所前田豊前理事長、本山建雄元理事、小川康恭理事長は、本研究を支援し、論文としてまとめるよう勧めてくださいました。改めて感謝申し上げます。

労働省産業安全研究所での静電気放電による電磁雑音に関する研究を開始され、著者が本研究を開始するきっかけを提供してくださった労働省産業安全研究所田畠泰幸元所長に感謝いたします。

本研究を進めるにあたって、実験装置の設計・製作にご協力いただいた大熊康典元研究員に感謝いたします。

最後に、多くの先輩、ならびに研究を継続するうえでの精神的、体制的に支援くださった市川健二元部長に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 電気学会電磁波雑音のタイムドメイン計測技術調査専門委員会編：電磁波雑音のタイムドメイン計測，コロナ社，p.265 (1995-05)
- [2] 編集委員会編：電磁波の吸収と遮蔽，日経技術図書，pp.483-486 (1999-09)
- [3] 「ノイズ対策最新技術」編集委員会編：ノイズ対策最新技術，総合技術出版，p.69 (1986-07)
- [4] 本田昌実：「ESDの特徴と計算機に対する影響（その6）」，電子情報通信学会技術研究報告，EMCJ88-1, pp.1-4 (1988)
- [5] 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」，電子情報通信学会論文誌，Vol.J88-B, No.12, pp.2401-2403 (2005-12)
- [6] 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」，電気学会論文誌A, Vol.130, No.5, pp.457-461(2010-05)
- [7] 石上忍：静電気放電による過渡電磁界及び伝送線路との結合に関する研究，電気通信大学大学院電気通信研究科博士学位論文（1997-09）
- [8] 静電気学会編：静電気ハンドブック，オーム社 (1981-05)
- [9] 赤尾保男：環境電磁工学の基礎，電子情報通信学会 (1991-03)
- [10] 独立行政法人労働安全衛生総合研究所：静電気安全指針 2007，労働安全衛生総合研究所，JNIOOSH - TR - NO.42 (2007)
- [11] 電気用語辞典編集委員会：新版電気用語辞典，コロナ社 (1982)
- [12] 仁田周一：電子機器のノイズ対策法，オーム社，p.50 (昭和 61 年)
- [13] IEC 61000-4-2 Ed. 2.0:2008 (b): “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test” (2008-12)
- [14] JIS C 61000-4-2: 電磁両立性- 第 4-2 部：試験及び測定技術 静電気放電イミュニティ試験 (2012)
- [15] M.Honda and Y.Ogura: “Electrostatic spark discharge: three factors are critical”，Proc. of EOS/ESD Symposium, EOS-7, pp.149-154 (1985)

-
- [16] P. Richman: "Classification of ESD hand/metal current waves versus approach speed, voltage, electrode geometry and humidity", Proc. IEEE Int. Symp. on Electromag. Compat., pp.451-460(1986)
- [17] B.Daout and H.Ryser: "The correlation of rising slope and speed of approach in ESD tests", Proc. of Electromag. Compat. 1987, pp.461-466 (1987)
- [18] P.F.Wilson and M.T.Ma: "Field radiated by electrostatic discharges", IEEE Trans. Electromag. Compat., Vol.EMC-33, pp.10-18(1991-02)
- [19] 馬杉正男, 村川一雄, 桑原伸夫, 雨宮不二雄: 「間接 ESD に伴う電磁パルスの測定と解析」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-B-II, No.9, pp.647-654 (1992-09)
- [20] 馬杉正男: 「衝突電極から放射される電界の過渡解析」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.93, No.68(EMCJ93 8-17), pp.31-36 (1993-05)
- [21] D.Pommerenke: "ESD: transient fields, arc simulation and rise time limit", Journal of Electrostatics, Vol.36, pp.31-54 (1995)
- [22] D.Pommerenke and M.Aidam: "ESD: waveform calculation, fields and current of human and simulator ESD", Journal of Electrostatics, Vol.38, pp.33-51 (1996)
- [23] 馬杉正男: 「多重解像度解析を用いた静電気放電の EMI 評価」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-B, No.11, pp.2048-2058 (2001-11)
- [24] M.Masugi: "Multiresolution analysis of electrostatic discharge current from electromagnetic interference aspects", IEEE Trans. Electromag. Compat., Vol.45, No.2, pp.393-403(2003-05)
- [25] 森育子, 高義礼, 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の特性測定」, 電気学会論文誌 C, Vol.125, No.12, pp.1798-1804 (2005-12)
- [26] D.Liu, A.Nandy, F.Zhou, W.Huang, J.Xiao, B.Seol, J.Lee, J.Fan and D.Pommerenke: "Full-wave simulation of an electrostatic discharge generator discharging in air-discharge mode into a product", IEEE Trans. Electromag. Compat., Vol.53, No.1, pp.28-37(2011-02)
- [27] D.Chundro, D.Pommerenke, K.Wang and T.V.Doren: "Characterization of human metal ESD reference discharge event and correlation of generator parameters to failure levels-Part I: Reference event", IEEE Trans. Electromag. Compat., Vol.46, No.4, pp.498-504 (2004-11)
- [28] M.Kanda: "Standard probes for electromagnetic field measurements", IEEE Trans. Antenna and propagation, Vol.41, No.10, pp.1349-1364 (1993-10)
- [29] ETS · LINDGREN: Model 7405 near-field probe set user manual, ETS · LINDGREN, p.22

-
- [30] 藤原修, 雨宮好文:「広間げきプラグにおける点火雑音発生機構」, 電気学会論文誌 C, Vol.99, No.5, pp.111-118 (昭和 54 年 5 月)
- [31] O.Fujiwara :“ An analytical approach to model indirect effect caused by electrostatic discharge ”, IEICE Trans. Commun., Vol.79-B, No.4, pp.483-489 (1996)
- [32] 石上忍, 岩崎俊:「静電気放電による過渡電磁界の二放射源モデル」, 電子情報通信学会大会講演論文集, ISSN : 1349-1369, Vol.1997 ソサイエティ B1, p.223 (1997-09)
- [33] W.D.Greason: “ Methodology to simulate speed of approach in electrostatic discharge ”, Journal of Electrostatics, Vol.44, pp.205-219(1998)
- [34] W.D.Greason:“Generalized model of electrostatic discharge (ESD) for bodies in approach: analyses of multiple discharges and speed of approach ”, Journal of Electrostatics, Vol.54, No.1, pp.23-37(2002)
- [35] 武田進: 気体放電の基礎, 東京電機大学出版局, p.72 (1990-01)
- [36] 吉田孝博, 久保田敬吾, 澤井丈徳, 増井典明:「帯電した人体からの放電電流波形の時間一周波数解析」, 静電気学会誌, Vol.31, No.3, pp.113-118(2007)
- [37] 吉田孝博, 増井典明:「電極の接近速度が金属間 ESD に及ぼす影響の一検討」, 電気学会論文誌 A, Vol.132, No.5, pp.381-382 (2012-05)
- [38] M.Masugi: “ Effect of discharge gap shape on high speed electrostatic discharge events ”, IEICE Trans. Commun., Vol.E-95B, No.12, pp.3898-3901(2012-12)
- [39] ノイズ研究所: EMC 試験機器カタログ, ノイズ研究所, p.11(2013)
- [40] 若桑光雄:電磁気学演習, 昭晃堂, pp.355-356(1973-04)
- [41] 武田進: 気体放電の基礎, 東京電機大学出版局, p.80 (1990-01)
- [42] M.Hara, T.Yamashita and M.Akazaki: “ Microdischarge characteristics in air gap between spherical particle and plane ”, IEE Proceedings, Vol.130, No.6, pp.329-335 (1983-09)
- [43] 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」, 電気学会論文誌 A, Vol.126, No.9, pp.902-908 (2006-9)
- [44] CT-1/CT-2 current transformer user’s guide, Tektronix, Part No.070-7957-00, p.2(1990-04)

発表論文リスト

学術論文（査読あり）

1. 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」，電気学会論文誌 A，Vol.128，No.9，pp.577-584(2008-09)
2. 富田一：「充電電圧の増加率が金属球からの火花放電に及ぼす影響」，電気設備学会誌，Vol.30，No.6，pp.472-481(2010-06)
3. 富田一：「接地球の帯電金属球への移動速度が火花放電に及ぼす影響」，電気学会論文誌 A，Vol.131，No.3，pp.159-163(2011-03)
4. 富田一：「帯電金属球電極の移動速度が静電気放電に及ぼす影響」，電気学会論文誌 A，Vol.132，No.9，pp.753-759(2012-09)
5. 富田一：「帯電球の大きさが接近する帯電球からの静電気放電に及ぼす影響」，電気学会論文誌 A，Vol.133，No.12，pp.622-629(2013-12)

国際会議録（査読あり）

1. Hajime Tomita: “ Dependence of current and induced voltage due to spark discharge on gap length”, Proc. of 1999 International symposium on Electromag. Compat., pp.138-141(1999)
2. Hajime Tomita: “ Influence of rise velocity of charge voltage on spark discharge from a metal sphere”, 2009 IEEE International Symposium on Electromag. Compat. - EMC 2009, pp.206-210(2009)