

トミタ ハジメ

氏 名 富田 一

学位の種類 博士(工学)

学位記番号 論博第292号

学位授与の日付 平成27年9月2日

学位授与の条件 学位規則第4条第2項該当 論文博士

学位論文題目 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)

論文審査委員 主査 教授 王建青  
教授 菊間 信良  
教授 榊原 久二男

## 論文内容の要旨

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ー( $10^{-9}$ 秒よりも短い時間オーダー)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。

このような背景から、本研究では、帯電電極と接地電極とが衝突する際のESDを対象とし、その特性解明を目的とした。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。

本論文は、以上の研究成果を取りまとめたもので、全6章から構成される。

第1章は、序論であり、本研究の背景と目的を述べ、本論文の内容と構成を示した。

第2章では、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、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、誘導電圧の立ち上がり時間の平均値は短くなること、などを示した。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が示された。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も示した。

第3章では、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、などを示した。ESD 発生器検証用電流検出器（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、火花長が 0.5 mm 程度まではターゲットでの放電電流と同程度となり、測定可能といえるが、火花長が 0.2 mm 程度になると、ターゲットの伝達特性の限界から放電電流の立ち上がり部分がターゲットでは緩慢になることを確認した。

第4章では、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物体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、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。

第5章では、第2章から第4章で得られた結果を考察した。これまでの 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 現象には電界強度の上昇速度が寄与していることを確認できた。つぎに、0.1 mm 以下の電極間隙長において、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、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の平均値が高くなり、放電電流ピーク値の平均値が大きくなる傾向となった。

第6章は総括であり、本研究成果の結論と今後の課題について述べた。

## 論文審査結果の要旨

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現象であり、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。このような背景から、本論文では、帯電電極と接地電極とが衝突する際のESDを対象とし、その特性解明を目的とした。

第2章では、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、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、誘導電圧の立ち上がり時間の平均値は短くなること、などを示した。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が示された。また、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も示した。

第3章では、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、などを示した。ESD発生器検証用電流検出器 (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、火花長が0.5 mm程度まではターゲットでの放電電流と同程度となり、測定可能といえるが、火花長が0.2 mm程度になると、ターゲットの伝達特性の限界から放電電流の立ち上がり部分がターゲットでは緩慢になることを確認した。

第4章では、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物体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、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。

第5章では、第2章から第4章で得られた結果を考察した。これまでの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現象には電界強度の上昇速度が寄与していることを確認できた。つぎに、0.1 mm以下の電極間隙長において、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、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の平均値が高くなり、放電電流ピーク値の平均値が大きくなる傾向となった。

以上のように、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開発し、電磁雑音源としての衝突電極の衝突速度とESD現象にともなう火花長、放電電流および誘導電圧の関係を定量的に明らかにした。また、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に及ぼす影響も明らかにした。さらに、衝突によるESD現象の発生要因を考察するために、静止電極間に印加する充電電圧の上昇速度を変化させることにより電界を変化させた実験を行い、静止電極間の電圧 (電界) 上昇速度は衝突電極の衝突速度に対応し、衝突電極によるESD現象の主要因として示すことができた。これらの成果は、学術誌論文としてフルペーパー5篇、国際会議論文2篇に公表されている。よって、本論文は、博士 (工学) の学位論文に値するものと認める。