

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月17日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560319

研究課題名（和文） 静電気放電現象における発生電磁パルスの放電特性依存性と着火危険性評価に関する研究

研究課題名（英文） Relationship of Characteristics of Electromagnetic Pulse due to Spark Discharge to Incendivity of Electrostatic Discharge

研究代表者

大熊 康典（OHKUMA YASUNORI）

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：80287581

研究成果の概要（和文）：静電気放電現象の一つである，帯電体と接地体が接近する際に生じる火花放電現象を解明するために，固定された帯電金属球電極に向かって接地金属球電極が等速度で移動する時の火花長，火花電流および電磁パルス測定プローブへの誘導電圧を測定した。その結果，電極移動速度が速くなるとともに火花長の平均値は短くなった。また，電極移動速度が速くなるとともに，火花電流および誘導電圧のピーク値の平均値は大きくなる傾向となった。さらに，電極移動速度が速くなるとともに，火花電流および誘導電圧の立ち上がり時間を平均した値は短くなる傾向となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we experimentally clarified the nature of the characteristics of the spark discharge that occurs when a grounded object moves toward a stationary charged object. The spark lengths, spark currents, and induced voltages in a probe were measured when a grounded metal spherical electrode approached a stationary charged metal spherical electrode connected to a capacitor for different moving speeds of the grounded metal spherical electrode. According to the result, the average gap length shortened with the moving speed of the spherical electrode. The average peak values of the spark current and the induced voltage were likely to increase with the moving speed of the spherical electrode. The average rise times of the spark current and the induced voltage were likely to reduce with the moving speed of the spherical electrode.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：静電気放電，電磁パルス，放電エネルギー

1. 研究開始当初の背景

静電気によって生じる放電は，可燃性物質の着火・爆発や電気・電子機器の誤作動等を引き起こすことがある。静電気放電現象については，これまでも放電に伴う火花電流・

火花電圧の特性や，放電の際に放射される電磁パルスに関する種々の研究が行われてきた。しかし，事故原因が明確に特定できないときは，静電気放電が原因の一つとして挙げられている場合が多いことから分かるよ

うに、静電気放電現象に関する研究は非常に長い歴史があるにもかかわらず、未だ解明されていない多くの未知の分野が取り残されている。さらに、近年では、静電気放電を電気・電子機器の誤作動要因である電磁雑音源の一つとして、機器に及ぼす影響や誤作動等の障害対策に関する研究が多く、放電現象として着火の危険性を高める要因の解明や着火危険性の度合いの評価に関連した研究はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

静電気放電による火災、爆発、誤作動等の障災害を防止するためには、実際の静電気放電現象に則した実験からその特性を明らかにし、着火や誤作動の危険性を高める要因に着目して、その度合いを定量的に評価する技術を確立することが必要であると考えた。

静電気放電が発生する代表的な状況としては、(a)帯電物体が移動しながら接地体に接近し、ある限界距離に達したところで放電が発生する、(b)接地体の近傍にある物体の電圧が徐々に上昇して放電発生電圧に到達し、放電が発生する、(c)接地体の近傍にある物体の電圧が放電の開始電圧以上に急激に高くなって放電が発生する、という場合が考えられる。状況の(a)は、例えば帯電した人体(指先)から生じる放電であり、状況の(b)は、例えば粉体輸送時のような静電気が連続して発生する場合に生じる放電である。したがって、実際の静電気放電による着火や誤作動の多くがこの2つの状況によって起こると考えられる。

本研究は、放電電極の移動速度や印加電圧の時間変化率を変えた放電実験を行って静電気放電をシミュレートし、電磁パルス等の放電特性依存性を明らかにすることで、静電気放電現象を対象とした、放電による着火や誤作動の危険性の度合いを評価する方法を提案することを目的としている。

3. 研究の方法

(1)放電発生装置

静電気放電が発生する代表的な状況を模擬したモデル実験を行うため、(a)一定の電圧を充電したコンデンサを接続した放電電極に接地電極を接近させて放電発生のしきい値電極間隙長を測定する電極間隙長変化法、(b)電極間隙長を固定した放電電極に接続したコンデンサを徐々に充電して電圧をゆっくりと上昇させて放電発生のしきい値電圧を測定する充電法、による放電実験を行うことができる装置を製作した。

この実験装置は、主に放電電極、1軸ステージ、リニアスケール、ステッピングモータ

およびコントローラで構成される。真鍮製球電極($\phi 20$ [mm])が対向して配置され、移動速度が $0\sim 100$ [mm/sec]で設定可能な1軸ステージの作動によって、接地側の球電極を高電圧が印加された高圧側の固定球電極に向かって等速度で移動させることができる。

高圧側の球電極には、高耐圧コンデンサと放電抵抗が取り付けられており、高耐圧コンデンサは、高耐圧抵抗を介して高電圧増幅器と接続されている。高電圧増幅器の出力電圧は、信号発生器によって調整される。

一方、接地側の球電極は、接地線を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が挿入されており、火花放電が発生すると、火花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り、高電圧増幅器と信号発生器の間に接続されたスイッチを遮断させると同時に、コントローラからステッピングモータに緊急停止信号が送信され、1軸ステージを緊急停止させる機構となっている。

(2)放電の発生および測定方法

本研究では、主に電極間隙長変化法の実験を行った。接地球電極が固定された帯電球電極に向かって等速度運転する時の速度が 1 [mm/s]、 20 [mm/s]、 40 [mm/s]、 60 [mm/s]、 80 [mm/s]、 100 [mm/s]の6つの場合について、各5回の火花放電を発生させ、火花長および火花電流、電磁パルスによる誘導電圧を観測した。

接地電極は放電とほぼ同時に帯電電極への接近を停止する仕組みになっており、放電ごとに静止したときの電極間の間隙を放電発生装置の1軸ステージと連動して移動する、分解能が 0.01 [mm]のノギスによって測定し、静止時における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、室温： $21\sim 22$ [$^{\circ}\text{C}$]、相対湿度： $54\sim 55$ [%]の環境下で行った。

4. 研究成果

(1)主な実験結果

電極間隙長変化法による実験結果として、放電発生装置の高耐圧コンデンサ容量を 422 [pF]、放電抵抗値を 1 [k Ω]、印加電圧を $+6.5$ [kV]としたときの、電極移動速度に対する火花長、火花電流のピーク値と立ち上がり時間および誘導電圧のピーク値と立ち上がり時間を、それぞれ図1、図2、図3に示す。シンボルは平均値、エラーバーは標準偏差を表している。

高耐圧コンデンサ容量や印加電圧を変えて行った実験でも、火花長、火花電流、誘導電圧について同様の関係が示され、以下のような結果が得られた。

- ・接地球電極の移動速度が速くなると、火花長の平均値は短くなる傾向を示した。
- ・接地球電極の移動速度が速くなると、火花電流ピーク値の平均値が大きくなり、立ち上がり時間（10～90％）の平均値は短くなる傾向を示した。ただし、電極移動速度が60～100[mm/s]では、火花電流の立ち上がり時間の電極移動速度への依存性は小さくなる傾向を示した。
- ・接地球電極の移動速度が速くなると、誘導電圧ピーク値の平均値が大きくなり、立ち上がり時間（10～90％）の平均値は短くなる傾向を示した。また、電極移動速度が速くなると、誘導電圧ピーク値の標準偏差は大きくなる傾向を示した。

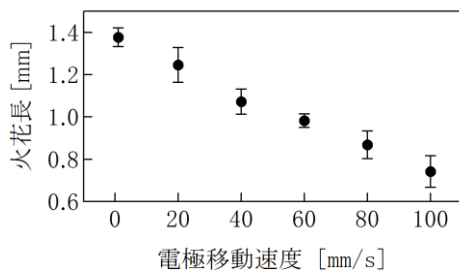


図1 電極移動速度と火花長の関係

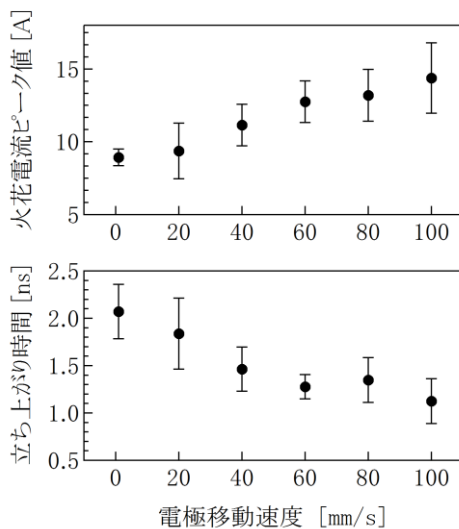


図2 電極移動速度と火花電流の関係

火花長が電極移動速度によって短くなる現象は、電極移動速度が火花放電の時間遅れを生じさせることに起因していると考えられる。また、火花長と火花電流および誘導電圧との関係は、Rompe-Weizelの提案した火花抵抗則に基づいて得られた、火花長と火花電流との関係式によって定性的には説明できる。

一方、帯電体と接地体が接近するときには、両物体間の距離が短くなるとともに電界強度が上昇することから、電極間隙長（火花長）を固定してコンデンサへの充電電圧の時間

変化率を変えた、充電法による放電実験を比較実験として行い、以下の結果が得られた。

- ・充電電圧の時間変化率が大きくなると、火花電圧が高くなり、火花電流のピーク値が大きくなる傾向を示した。
- ・充電法による実験の方が、電極間隙長変化法による実験よりも火花放電開始電圧のばらつきが大きくなる傾向を示した。
- ・火花放電開始電圧と火花長の関係から、充電法による放電の方が電極間隙長変化法の放電よりも放電を発生しやすいといえる傾向を示した。

このような結果は、球電極間の電界分布の時間変化が充電法と電極間隙長変化法で異なることに起因すると思われる。本研究では、球電極間の電界強度測定を試み、電界計測に関する多くの新たな知見を得たが、実験結果に関する現象の解明には至っていない。しかし、静電気放電の特性に及ぼす要因を定性的に示すことができた。

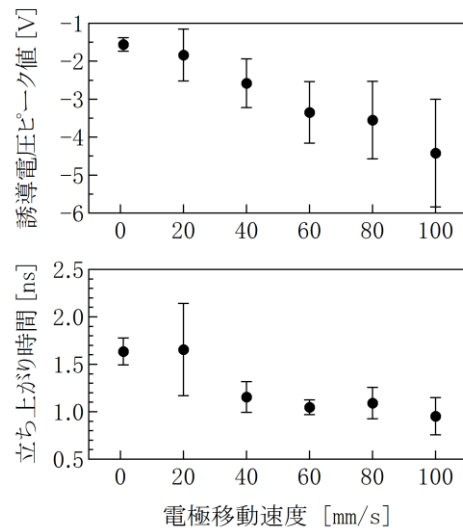


図3 電極移動速度と誘導電圧の関係

(2) 得られた成果の位置付け

- ① 静電気障害を防止する実務知識の提供
火花放電は一条の強い発光と破壊音を伴う放電で、この放電が起こると帯電電荷によって蓄えられていた静電エネルギーのほとんど全てが短時間に放電エネルギーに変換するとされている。したがって、火花放電の放電エネルギーは次式で表されることになる。

$$W = CV^2 / 2$$

ここで、 W [J]は放電エネルギー、 C [F]は静電容量、 V [V]は帯電電位である。この放電エネルギーがガス蒸気や粉体の最小着火エネルギーより大きい場合に、着火危険性をもつが、これには放電エネルギーの時間変化について考慮されていない。本研究の実験か

ら得られた結果は、静電気放電が発生する状況によって放電特性が異なり、放電エネルギーの放出過程における時間推移を考慮した評価が必要であることを示唆している。静電気の安全管理を有効に実施するためには、対象となる生産工程における静電気放電の発生要因を把握することが必要である。本研究は基礎研究ではあるが、定量的な知見を提供することで、静電気障害災害に対抗する実務知識として、さまざまな分野の業種に対して貢献できることが考えられる。

② 静電気放電イミュニティ試験への提言

静電気放電イミュニティ試験規格の間接放電試験 (IEC61000-4-2 試験規格) については、静電気試験器をターゲットに接近させる際の速度など多くのパラメータに依存することが指摘されており、試験の再現性の観点から、直接放電試験が推奨されている。しかし、実際の生産工程での静電気放電現象の多くは空中放電であると思われることから、間接放電試験法を確立させることは、試験結果の生産工程への適用を向上させることに貢献すると考えられる。本研究で得られた帯電体と接地体が接近しながら発生する火花放電の特性は、試験法を確立するための有益な情報になると思われる。

③ 電界強度測定法の提案

外乱を最小限に抑えて電磁パルスの時間的変化を高分解能で測定する必要から、電界強度の測定と解析の手法を確立するために、磁場反転配位プラズマ周辺での電界を検出するための装置を製作し、電界を作り出すプラズマ表面電荷密度の構造を考察するという実験研究を行った。この実験研究で最も重要な要素である電界計測装置の製作と解析手法の確立は、本研究課題の内容と密接に関係していることから、本研究課題における研究成果の一部として発表するとともに、米国の物理系の学術雑誌に投稿した。

(4) 今後の展望

放電現象の再現性を向上させるために、実験室内の湿度・温度の制御を効率よく行えるように工夫するとともに、放電電極間に紫外線を照射するといった方法等を導入することでばらつきの少ない実験データを増やし、結果の信頼性を上げることが必要であると考えている。また、新たな知見を得た電界強度測定法を電磁パルスの測定に適用して、プローブの出力から電界強度を直接得ることにより、電磁パルスの測定から静電気放電のエネルギーを推定できるようになる。これにより、外乱を最小限に抑えた間接測定によって放電による着火危険性の度合いを評価できる手法を確立できると考えている。この基

礎研究で得られた成果は、静電気による火災や爆発の防止を推進するのに役立つことが予想される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Y. Ohkuma, T. Ikeyama and Y. Nogi, Double-sensor method for detection of oscillating electric field, Review of Scientific Instruments, Vol. 82, No. 4, 2011, pp. 043501/1-6, 査読有
[DOI:10.1063/1.3571299](https://doi.org/10.1063/1.3571299)
- ② T. Ikeyama, M. Hiroi, Y. Ohkuma and Y. Nogi, Detection of electric field around field-reversed configuration plasma, Physics of Plasmas, Vol. 17, No. 1, 2010, pp. 012501/1-8, 査読有
[DOI:10.1063/1.3280023](https://doi.org/10.1063/1.3280023)

[学会発表] (計4件)

- ① 大熊康典, 野木靖之, 静電誘導法による電場測定, 日本大学生産工学部第44回学術講演会, 2011年12月3日, 日本大学生産工学部
- ② 富田一, 大熊康典, 帯電金属球電極の移動速度が帯電金属球電極と接地体間での火花放電に及ぼす影響, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, 2011年11月25日, 電気通信大学
- ③ 大熊康典, 池山多恵子, 廣井雅典, 野木靖之, 磁場反転配位プラズマ周辺部の電場計測, 日本大学生産工学部第42回学術講演会, 2009年12月5日, 日本大学生産工学部

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大熊 康典 (OHKUMA YASUNORI)
日本大学・生産工学部・准教授
研究者番号: 80287581