

論 文

電極表面の粗さが微小ギャップ
静電気放電に及ぼす影響

増井典明^{*1}, 藤原岳史*, 海老沼康光^{**2}, 新條達俊*

(2002年8月9日受付; 2003年3月17日受理)

Effect of Surface Roughness of Electrode on Electrostatic
Discharge in Short Air Gap

Noriaki MASUI^{*1}, Hirotake FUJIHARA*, Yasumitsu EBINUMA^{**2}
and Tatsutoshi SHINJO*

(Received August 9, 2002; Accepted March 17, 2003)

Electrostatic discharge (ESD) is generated when a charged body approaches the grounded conductor. The electrostatic discharge can cause direct and indirect damage to semiconductor devices and electronic systems. In general, the characteristics of ESD from the charged body depend on the ambient atmosphere, characteristics of the electrodes (surface roughness, material, geometry, etc.) and the potential of a charged body. In this paper, by using spherical electrodes, the effects of surface roughness of charged body and the relative humidity of ambient atmosphere on the waveform of discharge current and the gap length of discharge inception are investigated experimentally. Material of the electrode is brass. Grounded electrode approaches the high voltage electrode at 0.4mm/s and spark discharge is generated. The gap length of discharge inception becomes large with increases of the surface roughness of the electrode and the relative humidity of atmosphere. When the applied voltage is constant, peak current depends on only the gap length of discharge inception and decreases with increase of the gap length. Moreover, dependence of the waveform of discharge current on the gap length of discharge inception is also discussed.

1. はじめに

静電気放電(ESD)による、電子機器の誤動作や半導体デバイスの破壊が数多く発生している。電子機器のESD耐性は、国際規格に基づき10 kV程度を保証値としているケースが多い。さらに、ESDシミュレータの試験電圧として1kV程度の電圧印加でも、誤動作が発生する場合も報告さ

キーワード : ESD, 微小ギャップ, 電極表面の粗さ

*東京理科大学工学部電気工学科 (162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3) Department of Electrical Engineering, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601, Japan

**昭和電線電纜株式会社基礎技術センター技術管理室 (229-1133 神奈川県相模原市南橋本 4-1-1) Technology Management Sect., Base Technical R&D Center, Showa Electric Wire & Cable Co.,Ltd., 4-1-1 Minami Hashimoto Sagamihara-City, Kanagawa, 229-1133, Japan

¹masui@ee.kagu.tus.ac.jp, ²k720125@snt1.swcc.co.jp

れている¹⁾。これらの電圧では、放電はミリメートルオーダーからそれ以下のギャップ間で発生する。このような静電気放電は、帯電した人体あるいはアースから浮いた状態にある帯電導体等と、半導体デバイスや電子機器が接近し、発生する場合と、これとは逆に半導体デバイスが帯電し、接地導体との間で静電気放電が発生する場合がある。前者の場合に発生する静電気放電を想定し、その基礎特性を検討するため、我々は球電極を用いて、ミリメートルオーダーからそれ以下のギャップ（以下、微小ギャップと言う）で発生する放電特性を調べてきた^{3~5)}。

帶電体は種々の形状、材質のものがあり、その表面状態（表面の粗さ等）も一定ではない。ここでは、とくに帶電体の表面の粗さと静電気放電特性との関係を知ることを目的に、球ギャップを用い、球電極表面の粗さが微小ギャップ放電に及ぼす影響について、実験的に検討している。

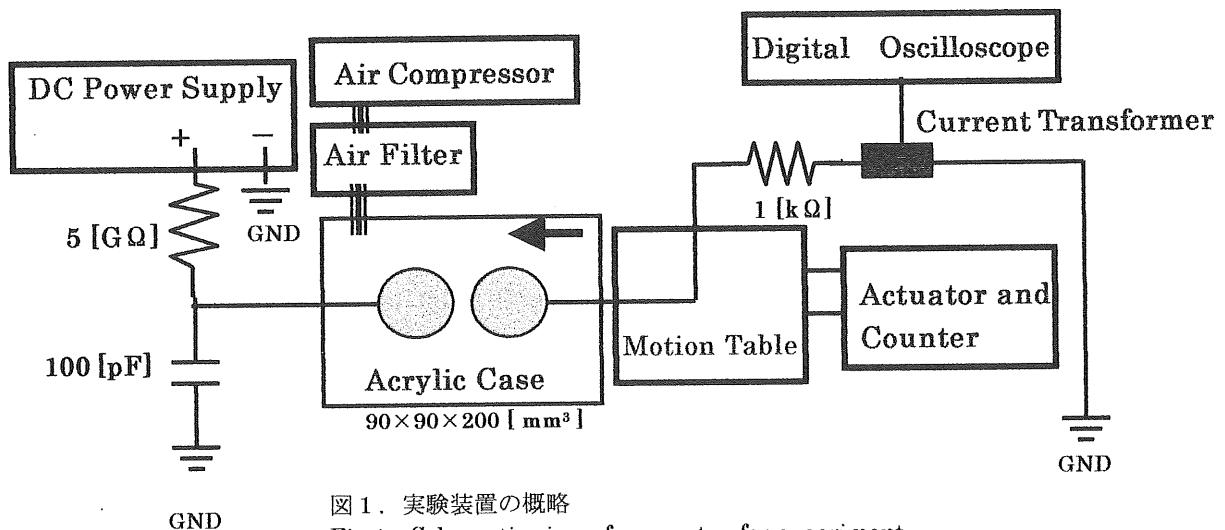


図1. 実験装置の概略

Fig.1 Schematic view of apparatus for experiment

さらに、放電電流波形と放電開始ギャップ長との関係についても検討した。

2. 装置及び方法

図1に装置の概略を示す。球電極として、直径 20mm の真鍮球を使用した。球表面を#30 および#150 研磨粉で研磨処理したものと、未処理(U)のものと計3種類の表面の粗さが異なる真鍮球を使用した。使用した研磨粉は鉄とガラスの粉末を混合したもので、#30 および#150 研磨粉の平均粒径は、それぞれ 595 μm および 74 μm である。未処理球としては、顕微鏡下で表面の滑らかなものを選んで使用した。通常、静電気放電は帶電体と接地導体が互いに接近するときに発生することから、ここでは、高電圧側の球電極を固定し、接地球電極を一定の速さで接近させ、100pF のセラミックコンデンサに充電した電荷を放電させる方法を用いた。接近速度は 0.4mm/s とした。

放電が発生すると同時に、ギャップ長を計測しているカウンタの読みを止め、微動台とモータを接続しているクラッチを切る。停止の信号が入ってからカウンタの読みが停止するまでに 1ms を要するが、この間に電極が進む距離は 0.4 μm でほとんど無視できる。

両電極が接触したときを、カウンタの指示が零の位置としている。コンデンサは 5GΩ の抵抗を介して電源に接続されている。球電極間の静電容量は、計算によると最大で約 2.1pF と求められる⁶⁾。このときのギャップ長は 60 μm で、これは本実験において +6kV 印加時の最小放電開始ギャップ長である。電極間の接近速度を考慮すると、放電開始時の電圧の低下は僅かであると考えられる。

本実験では印加電圧は +4kV および +6kV で、主たる検討は +6kV の結果について行っている。実験は、相対湿度がほぼ 2% および 50% になるように調湿されたアクリル製容器内で行っている。各測定条件で 50 回の測定を行った。電極はその表面を放電 10 回毎にアルコールで拭き、乾燥させた後使用している。放電電流波形は、接地抵抗(無誘導抵抗: 1kΩ)の接地側で電流プローブ(CT-1)を介して、デジタルオシロスコープ (TDS380, 400MHz, 2GS/s : ソニテクトロニクス) で観測した。

3. 結果および考察

3-1. 電極表面の粗さと放電開始ギャップ長の関係

印加電圧 +6kV、放電雰囲気の相対湿度約 2%，温度 25 ~ 27°C における放電開始ギャップ長の分布状態を、ヒストグラムで表したものを図2に示す。

未処理球 (U) 同士の場合 (図2 (a))、放電開始ギャップ長は広い範囲に分布し、0.3mm 付近に分布の中心がある。#150 研磨球同士の場合 (図2 (b))、1.1~1.3mm 付近にギャップ長の分布の中心がある。#30 研磨球同士の場合 (図2 (c))、1.2~1.4mm 付近にギャップ長が集中して分布している。放電開始ギャップ長の分布をその広がりの順に並べると、

未処理球 > #150 > #30 研磨球

の順番になり、未処理球が最も広く、#30 研磨球が最も狭くなる。

ギャップ長が球電極の直径より十分に小さい場合、平等電界の性質を示すと言われているので、球電極間の電界強度を V/d で近似し、放電開始ギャップ長との関係を求めるとき、図3の直線 A のようになる。ここで、 V は印加電圧 (+6kV)、 d は放電開始ギャップ長である。図2に

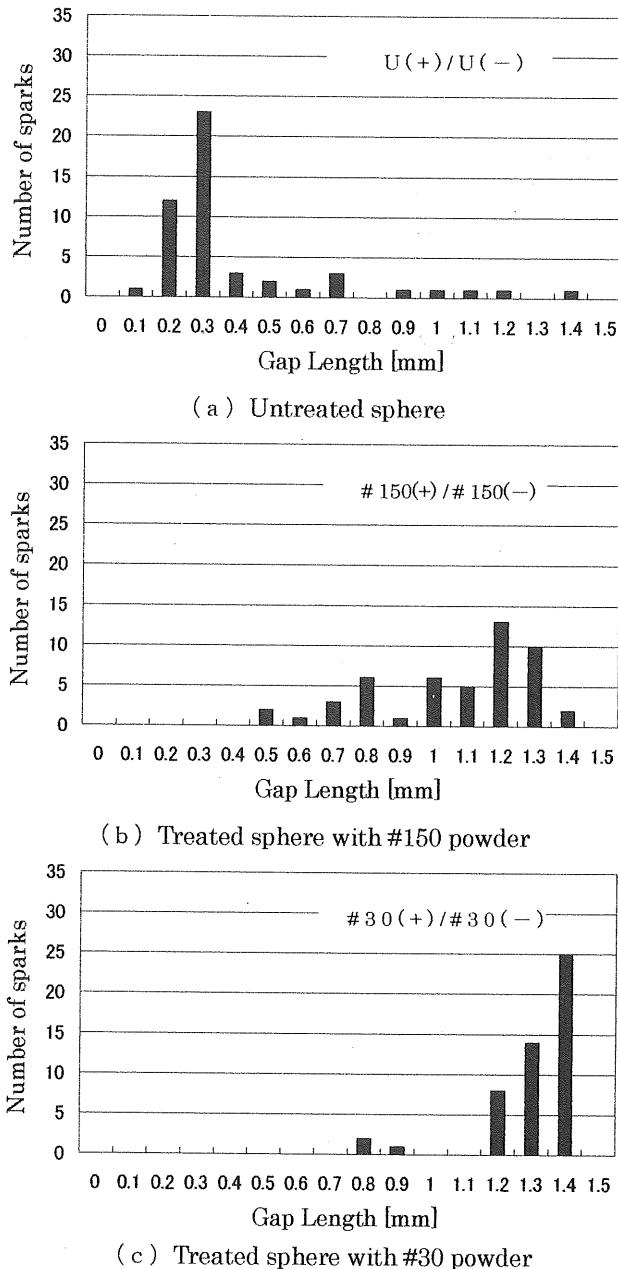


図2 電極表面の粗さに対する放電開始ギャップ長の分布（相対湿度：2%RH, 印加電圧：+6kV）

Fig.2 The gap length of discharge inception for different surface roughness of electrode. (RH: 2% Applied voltage : +6kV.)

示された結果から求めた、各電極間の放電開始電界強度の平均値が直線A上にプロットされている。また、直線Aは、得られた全データの範囲を示している。未処理球同士の場合、放電開始電界強度の平均値は 1.75×10^4 kV/m, #150研磨球同士の場合 5.87×10^3 kV/m, #30研磨球同士の場合 4.77×10^3 kV/mとなる。

曲線Bは、平等電界における空気の火花電圧 V_s を与える実験式⁷⁾を用い、平行平板電極間の火花電界 $E_s = V_s/d$ から求めた。

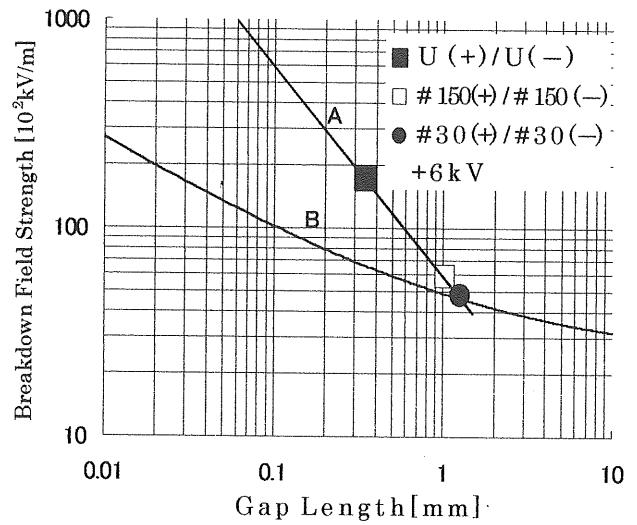


図3 放電開始電界強度と放電開始ギャップ長の関係。
A: 測定結果, B: 実験式(1)⁷⁾

Fig.3 Relationship between breakdown field strength and gap length. A: Experimental results, B: Empirical equation (1)⁷⁾.

$$E_s = 23.85\delta\left(1 + \frac{0.329}{\sqrt{\delta d}}\right) [kV/cm] \quad (1)$$

$$\delta = \frac{0.289 p}{273 + t}$$

ここで、 δ は相対空気密度、 t は放電雰囲気の温度[°C], p は気圧 [hPa] である。本測定では、 δ の値はほぼ1である。#30研磨球の場合、放電開始電界強度は曲線Bに非常に近い値になることがわかる。このように、球電極表面の粗さが増すとともに、放電開始時の電界強度分布は低い値にその中心が移行する。#30研磨球も含めほとんどの場合、平行平板電極間の火花電界よりも大きな電界で放電が発生している。図2および図3に示されるように、印加電圧が同じであっても、放電開始電界強度がある分布を示すことは、火花の遅れ（統計的遅れ+形成遅れ）に対応しているものと考えられる。電極の表面が滑らかになるとともに、火花の遅れは大きくなり放電開始電界強度は大きくなる。

電極表面の粗さが放電に及ぼす影響をさらに詳しく調べるために、未処理球と#30研磨球を使用し、正極側および負極側に、それぞれ未処理球および#30研磨球を使用した場合(U(+)/#30(-))と、これと逆の組合せ(#30(+)/U(-))で放電させたときの放電開始ギャップ長を測定した。結果を図4に示す。印加電圧は+6kV、相対湿度は約2%である。この二つの球の組合せで、正極側に

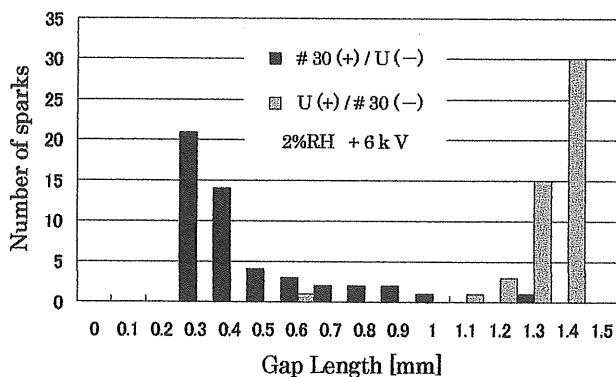


図4. #30(+)/U(−)およびU(+)/#30(−)に対する放電開始ギャップ長の分布

Fig.4 Polarity effect with treated and untreated spheres under very low humidity.

未処理球を、負極側に#30 研磨球を使用したときには、放電開始ギャップ長の分布は#30 研磨球同士の場合とほとんど一致する。これとは逆に、負極側に未処理球を使用すると、未処理球同士の場合とほぼ同じ分布を示す。このように、放電開始ギャップ長（放電開始電界強度）は、負極側に使用する電極の表面の粗さに依存することがわかった。本実験では、#30 研磨球の場合にこの特性が顕著に現れた。

電極表面に汚れや欠陥部があると、電極表面の電界強度が 10^3 kV/m のオーダーでも、電極表面から電子の放出が起こる可能性があると言われている⁸⁾。このことから本実験で得られた結果は、負極表面が粗くなると、その電極表面から放電開始に必要な初期電子の供給があることを示唆していると考えられる。表面が粗くなると、滑らかな表面に比べ凸部の分布がまばらになり、凸部への電界の集中度が増し、電子が放出されやすくなるものと考えられる。

3-2. 放電開始ギャップ長と相対湿度の関係

図5に、放電雰囲気の相対湿度を 50%前後に保った状態で行った、未処理球同士および#30 研磨球同士の放電結果を示す。印加電圧は+6kVである。未処理球同士の場合、相対湿度 2%のときより放電開始ギャップ長は長くなり、放電開始電界強度が小さくなることがわかる。#30 研磨球の場合は、放電開始ギャップ長の分布状態は、相対湿度 2%の場合とほとんど変わらない。したがって、#30 研磨球の場合、放電開始電界強度の分布は、湿度が変わってもほとんど変わらない。

相対湿度 50%の条件下で、図4と同様の測定を行った結果を図6に示す。この場合も、放電開始ギャップ長は、負極側の電極表面の粗さに依存することがわかる。

酸化した金属表面からは、電子が放出されやすくなる

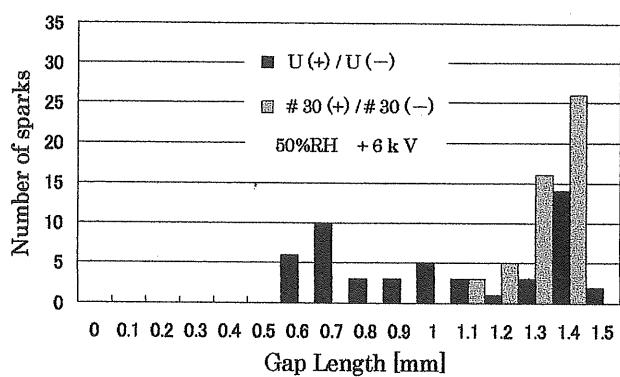


図5. U(+) / U(−)および#30(+) / #30(−)に対する放電開始ギャップ長の分布

Fig.5 Effect of humidity for discharge inception.

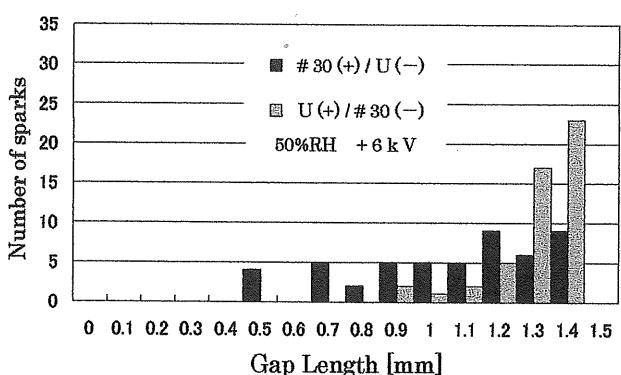


図6. #30(+) / U(−)およびU(+) / #30(−)のときの放電開始ギャップ長の分布

Fig.6 Polarity effect with treated and untreated spheres under 50% humidity.

と言われている（マルター効果⁹⁾）。加湿時に未処理球の放電開始の電界強度が小さくなるという現象は、このようなマルター効果の発生を示唆しているものと考えられる。

3-3 放電開始ギャップ長とピーク値の関係

図7に、放電開始ギャップ長と放電電流のピーク値の関係を示す。今回の測定で得られた全データを、放電開始ギャップ長の関数としてグラフに示した結果である。図には、印加電圧が+4kV の結果と合わせて示されている。印加電圧が一定であれば、放電電流のピーク値は放電開始ギャップ長の増加とともに低下していることがわかる。さらに、これらの結果は一定の印加電圧のもとでは、電極表面の粗さおよび放電雰囲気の相対湿度は、放電開始ギャップ長に影響を与えるが、放電電流のピーク値は、放電開始ギャップ長にのみ依存するということを示している。

また、図7に示された結果は、電極の表面状態、放電空間の湿度等により、放電電流のピーク値が、印加電圧

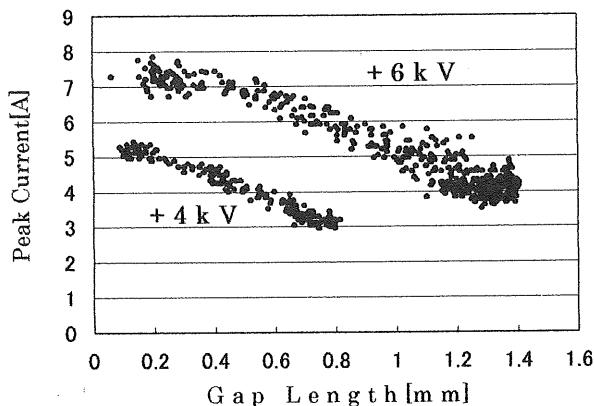


図7 放電电流のピーク値と放電開始ギャップ長の関係。

Fig.7 Relationship between peak current and gap length of discharge inception.

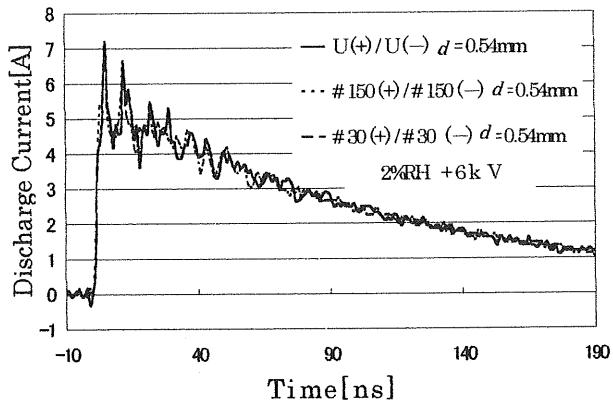


図8 放電电流波形と電極表面の粗さとの関係。

Fig.8 Waveforms of discharge current when the gap length is 0.54mm.

が+6kVのときよりも+4kVの方が大きくなることもあるということを示している。このことは、放電電圧が低いときでも、それよりも高い電圧で発生する放電よりも大きな影響を、電子機器や半導体デバイスに与えることがあり得ることを示している。

3-4. 放電电流波形と放電開始ギャップ長の関係

図8および図9に、それぞれ放電開始ギャップ長 d が 0.54mm 付近および 1.3mm 付近のときの放電电流波形が示されている。これらの結果は、電極表面の粗さや放電雰囲気の相対湿度が異なっても、放電開始ギャップ長が同じであれば、电流波形もほぼ同じ形になることを示している。50%RH の結果が図には示されていないのは、50%RH ではギャップ長が 0.54mm より長くなるためである。これらは、印加電圧+6kV の結果であるが、印加電圧が異なっても、これらの図に示された傾向は変わらない。

図9に示すように、放電開始ギャップ長が長くなり、電界強度が平行平板間の火花電界に近づくと、放電电流波

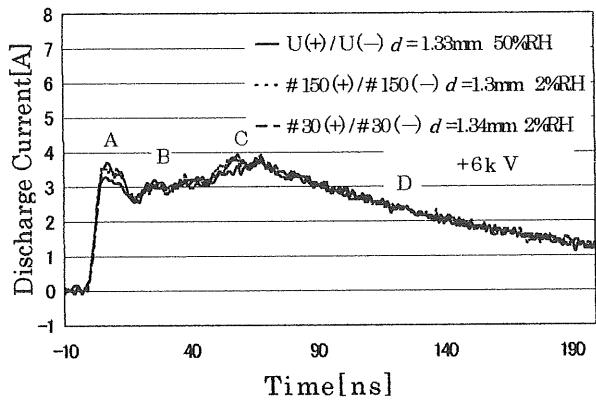


図9 電極表面の粗さおよび相対湿度を変えたときの放電电流波形。

Fig.9 Waveforms of discharge current when the gap length is approximately 1.3mm.

形にピークが二つ現れる。これらのピーク値は、ギャップ長が短いときのピーク値に比べ小さな値になる。

図8の电流波形には、共振によるものと思われる振動が現れている。これは、測定系がもっている漂遊容量やインダクタンス成分に起因するものと考えられる。今後検討を要する課題である。

固定ギャップ間に衝撃電圧を印加し、過電圧率を増加していくと、放電時に異なる電圧波形および电流波形が観測される¹⁰⁾。過電圧率が小さいときには、放電開始後に、グロー放電を経てアーカ放電に移行する過程を示す電圧波形および放電电流波形が観測されている。過電圧率の増加とともに、アーカ放電に至る時間が短くなり、さらに過電圧率を増すと、グロー放電を経ないで直ちにアーカ放電が発生している。図8に示された結果は、上述の過電圧率が大きい場合に相当し、グロー放電を経ないでアーカ放電が発生し、コンデンサに充電された電荷が一気に流れ出していることを示しているものと考えられる。

これに対し、図9に示された結果は、過電圧率が小さい場合に相当し、放電開始後まずグロー放電が起こり、これに関連して最初のピーク (A) が現れる。グロー放電では放電ギャップ間の電圧降下が高く、そのためアース側に挿入した抵抗 ($1\text{k}\Omega$) に流れる電流は小さい。その後グロー放電を経て (B)，陰極点の破壊が起こり、全路破壊 (アーカ放電) が発生し (C)，コンデンサの残りの電荷が放出される (C-D)。コンデンサの電圧が一定であれば、グロー放電を経てアーカ放電に至る間にギャップ間に流れる電流は増加し、最初のピークよりも非常に大きな電流が流れるようになる。しかし、本実験では、コンデンサと電源との間に高抵抗 ($5\text{G}\Omega$) を挿入して

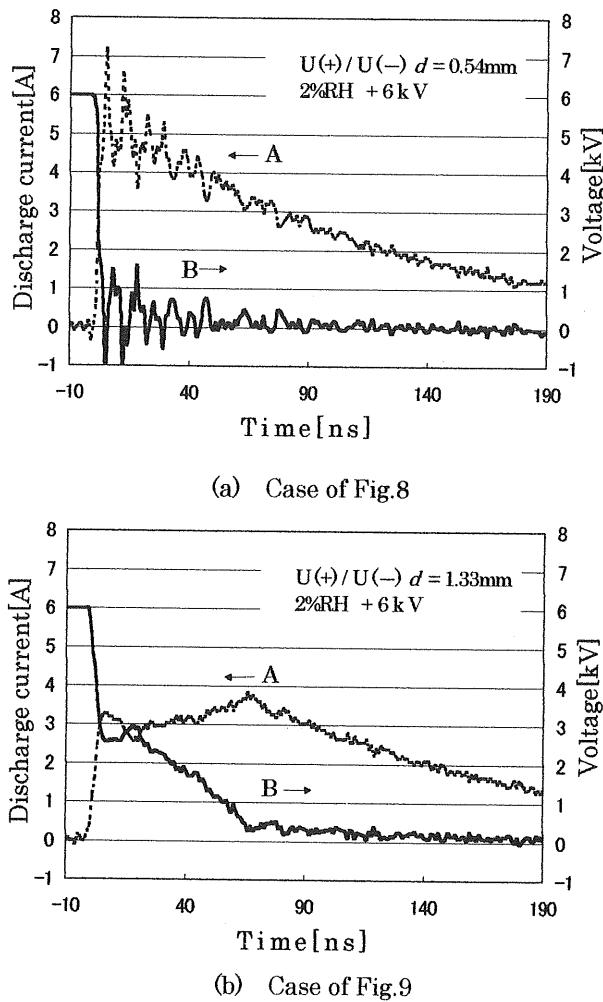


図 10. 放電電流波形とギャップ間電圧の関係。
Fig.10 Relationship between waveform of discharge current and voltage of gap spacing.

いることから、グロー放電が発生しているときにコンデンサの電圧が減少するため、アーク放電発生時の電流値が図 9 (C) のような値になったものと考えられる。

図 10 に、ギャップ間電圧の時間変化を、コンデンサの残留電圧から $1\text{k}\Omega$ の抵抗にかかる電圧を差し引くことによって求めた結果が示されている。図中、曲線 A および B は、それぞれ放電電流およびギャップ間電圧を表している。これらの結果から、図 10 (a) のように放電電流のピークが一つの場合、ギャップ間電圧は急激に減衰し、アーク放電の発生を示唆している。一方、(b) のように放電電流に二つのピークが現れる場合、ギャップ間電圧は文献 (10) に示される階段状の減衰を示し、アークに至る前のグロー放電の発生を示唆している。

3・5. 放電電流ピーク値に対する検討

放電電流のピーク値がギャップ長の増加とともに減少する原因について以下のような検討を行った。

定常アーク放電の維持電圧 V は次の式で表される¹¹⁾。

$$V = V_c + V_a + E_a \rho \quad (2)$$

ここで、 V_c ：陰極降下、 V_a ：陽極降下、 E_a ：陽光柱電位傾度、 ρ ：アーク放電の長さ、である。

維持電圧 V は電極間の電位差を表すから、接地側電極とアースとの間に挿入した抵抗 R ($=1\text{k}\Omega$) に流れる電流 I_R は ρ の増加とともに減少する。陽光柱の長さ ρ (アーク放電の長さ) は放電ギャップ長の増加とともに増加するので、 R に流れる電流 I_R はギャップ長の増加とともに減少する。このことが図 7 に示されるように、放電電流のピーク値がギャップ長の増加とともに減少する原因と考えられる。

放電ギャップ長が 1.06mm 以上になると、図 9 に示される電流波形が確実に現れる。このときの電界強度 (V/d) は $5.65 \times 10^3 \text{kV/m}$ となり、(1) 式から求めた火花電界、 $4.79 \times 10^3 \text{kV/m}$ 、に近い値 (1.18 倍) になっている。

このように、今回の測定結果から、電極表面の粗さおよび放電雰囲気の相対湿度に関係なく、球ギャップ間の電界強度が平行平板間の火花電界の約 1.2 倍より小さな値になると、図 9 に示されるような電流波形が得られることがわかった。印加電圧 $+4\text{kV}$ の場合にも、これと同様の傾向がみられた。このような放電電流波形の違いは、固定ギャップ間に衝撃電圧を印加したとき、過電圧率の違いによって異なる放電電流波形が現れる、と言うことに対応しているものと考えられる。

4. 結 論

今回の測定から以下のようないくつかの結論が得られた。

(1) 互いに接近する球電極間の放電開始電界強度は、電極表面が粗く (研磨粉の平均粒径が大きく) なるとともに小さくなり、平行平板電極間の火花電界に近づく。

本実験では、#30 研磨球を使用したとき、放電開始電界強度は、平行平板電極間の火花電界に非常に近い値を示した。

(2) 放電開始の電界強度は、負極側の電極表面の粗さに依存する。

(3) 放電電流のピーク値は、印加電圧が同じであれば、放電開始ギャップ長の増加とともに減少し、電極表面の粗さ、放電空間の相対湿度には依存せず、放電開始ギャップ長だけに依存する。

(4) 印加電圧が同じ場合、放電電流波形は放電開始ギャップ長が同じであれば、他の条件が変わってもほとんど同じ形を示す。

(5) 放電開始ギャップが短くなると、見かけ上過電圧

率が増加することになり、それに応じた放電電流波形が現れる。ギャップ長の増加とともに放電電流のピーク値が減少する理由として、見かけ上の過電圧率の違いによる放電形態の変化が挙げられる。

最後に、本研究を進めるにあたって、東京理科大学元卒業研究生玉村晋也氏には、実験に対する援助をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 本田昌實：RCJ EOS/ESD シンポジウム予稿集，(2000) 147
- 2) 竹井澄明：トランジスタ技術, p.291, CQ 出版社 (1998年5月号),
- 3) 藤原史岳, 増井典明, 谷 辰夫: 静電気学会講演論文集, p.93 (1998)
- 4) 小出 学, 藤原史岳, 増井典明: 静電気学会講演論文集, p.309 (1999)
- 5) 小出 学, 増井典明, 谷 辰夫: 静電気学会春季講演会, p.45 (2000)
- 6) William D. Greason : *Electrostatic Discharge in Electronics*, JOHN WILEY & SONS INC. pp.51-54 (1992)
- 7) 大木正路: 高電圧工学, 横書店, p.84, (1997)
- 8) 松本 崇, 岡部昭三 訳: 高電圧工学, 東海大学出版会, p.17 (1975)
- 9) N. E. Domorod, V. V. Kozharinov, V. P. Khrapovitskii, and S. N. Cherenkevich : Sov. Phys. Tech. Phys., 32 (2) (1987) 158
- 10) 森 為可: 電気学会雑誌, 75 (1955) 1156
- 11) 中野義映: 大学課程高電圧工学, オーム社, p.31 (1968)