

論文の内容の要旨

論文題目 マイクロギャップの放電現象

氏名 仁田 工美

電力ケーブルやガス絶縁開閉機器など電力機器においては、異種の絶縁物を組み合わせて絶縁を行う複合絶縁方式が一般に用いられる。これら複合絶縁方式では、異種材料の間に界面が存在し、界面における絶縁特性がシステム全体に重大な影響あるいは効果をもたらしていることはよく知られている。複合絶縁において界面の種類は多岐にわたり、またその現象は複雑なため、いまだ解明されていない事象が多い。界面ではボイドや不純物の混入によって微小な隙間が生じ、機器の絶縁特性を低下させる要因のひとつになっていると考えられている。マイクロギャップにおける絶縁破壊現象を解明し、その放電モデルを確立することは機器の絶縁耐力を向上させるために重要である。

また超高密度集積回路、半導体微細加工を援用したマイクロマシン、プリント回路など各種電子デバイスにおいては、インバータ・サージ、雷サージなど通常の運転電圧を超えて瞬間的に発生する過電圧によって、絶縁破壊や機能停止、劣化などの影響を被ることがある。微細化が進むにつれ、マイクロギャップにおける絶縁特性の把握が一層求められている。MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 分野におけるシリコン 及び金属ギャップ間の放電状態を観測した例や、マイクロ放電加工分野における放電加工時のエネルギー密度分布についての報告はみられるが、マイクロギャップにおける放電現象機構に踏み込んだ研究はなされていないのが現状である。

個々の事象ではなく体系的にマイクロギャップの絶縁耐力及び放電現象を論じることは、工学的に重要な意味を持っていると考えられる。そこで、マイクロメータオーダのギャップにおける放電現象を観測する実験装置を構築し、金属電極間及びシリコン電極間の絶縁破壊電圧を測定した。1mm 以下のマイクロギャップの破壊遅れ時間についての実験を行うことで、初期電子発生メカニズムと放電進展過程の検討を行い、タウンゼント理論における陰極からの二次電子放出係数 の作用を3つの主要因に分離し、マイクロギャップの放電現象のモデル化を行った。

タウンゼント機構による火花放電進展過程は、与えられた電界の下において、図1に示すように、初期電子の数を1個と仮定すると、衝突電離作用 (α 作用) によって電子数が増倍し、陽極に達する時には $A = \exp(\alpha d)$ 個になっている。電子数は差し引き $\exp(\alpha d) - 1$ 個増し、同時に同じ数のイオンが発生している。二次電子放出機構としては、この正イオンが電界の作用を受けて陰極に到達する際に二次電子を放出させる作用 (γ_i 作用) α 作用と同時に起こっている衝突励起や再結合の結果生じた光が、陰極に当たって光電子を放出する作用 (γ_p 作用) 準安定励起分子が拡散によって陰極近傍に移動し、陰極(金属)に接触して、準安定

励起分子からのエネルギーによって、金属原子から二次電子が放出される作用 (γ_m 作用) が考えられる。

考察した放電過程を基に、形成時間遅れが実験結果と一致する $\gamma = \gamma_p + \gamma_i + \gamma_m$ を求めた。その際、従来測定されている γ の傾向から γ_i は E/p に伴って増加し、 γ_p 及び γ_m は電極間距離の二乗に反比例すると推定し、以下のような仮定を行った。

$$\gamma_i = A \left(\frac{E/p}{526} \right) \quad A: \text{定数}, E: \text{電界[V/cm]}, p: \text{圧力[Torr]} \quad (1)$$

$$\gamma_p = B \left(\frac{10}{d} \right)^2 \quad B: \text{constant}, d: \text{gap length}[\mu\text{m}] \quad (2)$$

$$\gamma_m = C \left(\frac{10}{d} \right)^2 \quad C: \text{constant}, d: \text{gap length}[\mu\text{m}] \quad (3)$$

上式中の定数 A、B、C は $E/p = 526 \text{ V/cm/Torr}$ 及びギャップ長が $10 \mu\text{m}$ の値を基準とし、完全探索法によって実験結果と一致する値を求めた。この際用いた $A = 1.8 \times 10^{-3}$ 、 $B = 4.2 \times 10^{-4}$ 、 $C = 6.6 \times 10^{-3}$ をそれぞれ (1)、(2)、(3) 式に代入し、ギャップ長及び E/p を変化させ、形成時間遅れの推定を行った。その結果を図 2 に示す。計算結果、実験結果のいずれも、ギャップ長が大きくなるほど、電界強度のわずかな変化で形成時間遅れが大きく変化する傾向にあることがわかる。計算結果と実験結果はどのギャップ長でも一致していると考えられ、(1)、(2)、(3) 式のように、二次電子放出機構の主要因である 3 種類の γ に、二次電子放出係数が分離できたと考えられる。放電電圧がわかれば、ギャップ長、電界と圧力の比 E/p を与えることで、平等電界下の金属電極間における大気圧室温での放電時の形成時間遅れが推定できることを示した。さらに、大気圧の変化の影響を検討し、金属電極及びシリコン電極での不平等電界下における形成時間遅れを測定し、一般化を図った。