

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32706

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14712

研究課題名（和文）極小pd下における放電現象に関する研究

研究課題名（英文）Breakdown phenomena across micron gap under extremely low-pressure

研究代表者

岩淵 大行（Iwabuchi, Hiroyuki）

湘南工科大学・工学部・准教授

研究者番号：50757341

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では低気圧・マイクロメートルオーダーギャップにおける絶縁破壊現象のメカニズムを、実験とシミュレーションの両面から検証した。その結果、低気圧・マイクロギャップにおける絶縁破壊現象は真空放電と類似する現象となり、絶縁破壊電圧が陰極表面からの電界電子放出現象を起点として引き起こされることが分かった。電界電子放出現象は電極の表面電界に強く依存することから、表面状態を清浄に保つことが絶縁設計上重要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって得られた低気圧・微小ギャップにおける放電のメカニズム、及び絶縁破壊特性の基礎データは、微細な機構をもつ電気機器の信頼性に直結するものであり、絶縁設計技術の合理化に指針を与えるものである。また、微小空間における放電現象は、その対象とする空間と電子の平均自由行程を比較すると真空放電に類似する点が多く、未だ統一した見解の得られていない真空放電のメカニズム解明にも資するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, the mechanism of breakdown phenomena in low-pressure and micrometer-scale gaps was investigated both experimentally and by simulation.

As a result, it was found that the breakdown phenomenon at low pressure and micro-gap is similar to that of vacuum discharge, and that the breakdown voltage is triggered by field emission from the cathode surface. Since the field electron emission phenomenon strongly depends on the surface electric field of the electrode, it is important in insulation design to keep the surface condition clean.

研究分野：高電圧・大電流工学

キーワード：パッシェンの法則 沿面放電 絶縁破壊 電子デバイス 電界電子放出

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1 . 研究開始当初の背景

数  $\mu\text{m}$  以下の微小なギャップ (以下マイクロギャップと記す) における絶縁破壊 (放電) 現象の解明は、デバイスなどの信頼性を確保するうえで重要な課題である。特に近年の微細加工技術の発達に伴い、気体中や絶縁物表面の微小ギャップにおける絶縁破壊現象が大きな問題とされるようになり、マイクロギャップ間の絶縁破壊現象に関する研究が盛んにおこなわれるようになってきている。例えば、マイクロアクチュエータに代表されるようなトルク出力が要求されるデバイスでは、出力が電界強度によって決定されるため、 $\mu\text{m} \sim \text{nm}$  オーダのギャップ間の絶縁の把握が重要な鍵となる。また、今後大容量化を目指して SiC を代表とする新しい素子を用いた機器が普及することが予想され、微細な構造に高電圧がかかることによる絶縁破壊のリスクの考慮がますます重要になる。マイクロギャップにおける放電現象は電気機器の信頼性に直結するのみならず、微小な表面加工技術など幅広い分野で応用されており、マイクロギャップ放電機構解明の要請は強い。

このように、マイクロギャップ間における放電現象は広範な応用範囲を持ち、研究例は数多く報告されているが、これまでの研究報告は大気圧環境下での使用を暗黙の前提として実施されたものであり、機器、デバイスの絶縁設計上不可欠となる雰囲気気体圧力の影響を考慮した放電機構に関する検討が全くなされていない。これが研究開始当初の背景であった。

## 2 . 研究の目的

電気機器やデバイスの絶縁設計に用いられているパッシュェンの法則によれば、絶縁破壊電圧は圧力  $p$  とギャップ長  $d$  の積  $pd$  に依存する関数であるが、特に電気自動車に使われるデバイスはギャップ長  $d$  が  $\mu\text{m}$  オーダと小さいうえ高所など低気圧環境下での使用が想定され、極小  $pd$  下という極限状態における放電現象の把握が不可欠となった。そこで、本研究では放電研究の分野で未開拓のまま残されてきた低気圧・微小ギャップにおける放電現象にスポットを当てる。実験とシミュレーションの両面から、低気圧・微小ギャップにおける放電現象を検証し、絶縁破壊の物理メカニズムを構築する。最終的に絶縁設計に不可欠な指針を提唱することを目的とする。

## 3 . 研究の方法

本研究の実施方法を 4 項目に分けて述べる。

### ( 1 ) mm オーダ沿面ギャップにおける絶縁破壊特性の測定 ( 予備実験 )

誘電体として、 $r=3.4$  のポリイミドを用い、誘電体上に厚さ  $100 \sim 200\text{nm}$  の金属膜をギャップ長  $0.5 \sim 1.5\text{mm}$  で形成したサンプルに直流電圧を印加した。その後、印加電圧を  $100\text{V/s}$  のペースで上昇させた際の部分放電開始電圧 (PDIV) と絶縁破壊電圧を測定した。測定の結果、部分放電開始電圧 (PDIV) は電極間のギャップ長によらず一定となり、絶縁破壊電圧はギャップ長が増加するにしたがって、 $1.0\text{kV}$  から  $3.0\text{kV}$  の範囲で増加した。

### ( 2 ) $\mu\text{m}$ オーダ沿面ギャップにおける絶縁破壊特性の測定

Si-SiO<sub>2</sub> 基板上にタングステン電極対を作製したサンプルを用いて、絶縁破壊特性の測定を行った。基板は  $525 \mu\text{m}$  厚の Si 層と  $2 \mu\text{m}$  厚の SiO<sub>2</sub> 層で構成されている。この基板上の  $100 \text{nm}$  厚タングステン膜に対して、ギャップ長が  $1, 3, 5, 10 \mu\text{m}$  となるよう電極対を加工した。印加電圧は、電極への損傷を最小限とするため、立ち上がり時間  $t = 0.2 \mu\text{s}$  のインパルス電圧を印加した。その結果、 $\mu\text{m}$  オーダのギャップにおける絶縁破壊電圧には強い極性効果が見られ、負極性インパルス電圧印加時の絶縁破壊電圧は  $300 \sim 350\text{V}$ 、正極性インパルスで夏印加時の絶縁破壊電圧は  $500 \sim 550\text{V}$  となった。また、絶縁破壊電圧はギャップ長に依存しない特性となった。

### ( 3 ) $\mu\text{m}$ オーダ沿面ギャップにおける放電シミュレーション

ペガサスソフトウェア社製 PIC-MCC シミュレーションソフト “PEGASUS” を用いて、マイクロギャップ放電の成立に至る過程のシミュレーションを行った。誘電体表面の二次電子放出係数は  $\gamma = 0.8$  とし、陰極からは、Fowler-Nordheim の式にしたがって電子がギャップ間に放出されるモデルを用いた。陰極の表面粗さを模擬するため、陰極表面に電界強化係数を与えた。

シミュレーションの結果、いずれのギャップ長においても印加電圧  $V = 340\text{V}$  の際は電界電子放出電流が一定であるのに対し、 $V = 360\text{V}$  を印加すると、 $10 \sim 50 \text{ps}$  のオーダで電界電子放出電流が急激に増加することが分かった。これは、負極性インパルス電圧印加時の絶縁破壊電圧と

極めてよく一致するものであった。

#### (4) 低気圧・ $\mu\text{m}$ オーダ沿面ギャップにおける絶縁破壊特性

低気圧環境下での絶縁破壊特性測定に向けたチャンバ排気系の整備および回路系の構築を行い、低気圧環境下でのV-t特性を取得した。サンプルは、Si-SiO<sub>2</sub>基板上にタンゲステン電極対を作製したものをを用いた。その結果、圧力を1/10atm, 1/100atm, ギャップ長を1-10 $\mu\text{m}$ とした場合、絶縁破壊遅れ時間は0.1 $\mu\text{s}$ -100 $\mu\text{s}$ , 絶縁破壊電圧は50-500Vの間でばらつきが観測されたが、極性依存性は小さかった。とくに負極性電圧印加時は負極を起点とした放電となり、高压電極のみに溶融が発生した(図1)。

ギャップ長1 $\mu\text{m}$ では、接地電極表面も電界強度が $10^9\text{V/m}$ を超え、両電極から電界電子放出が発生しうる電極構成であったため極性効果が小さくなったと考えられる。これらの結果から、低気圧環境下での放電現象には電界電子放出が強く影響していることが示唆される。

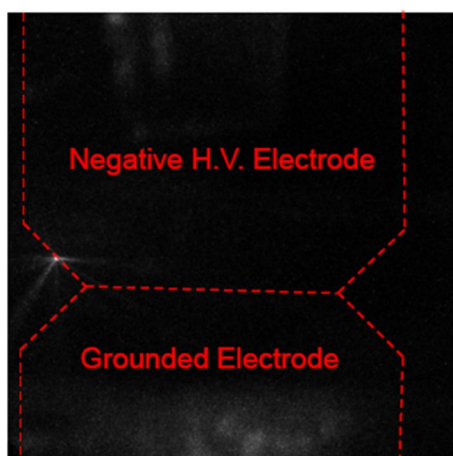


図1 1/100 気圧, 1 $\mu\text{m}$ , 負極性電圧印加時の発光

## 4. 研究成果

前節で述べた実験結果, シミュレーション結果から,  $\mu\text{m}$  オーダギャップにおける絶縁破壊メカニズムを下記のように提唱した。

### (1) 負極性電圧印加時の放電モデル

負極性電圧印加時の絶縁破壊機構は, 図2のようにモデリングできる。

陰極に電圧が印加されるとFowler-Nordheimの式に従って電界電子放出が発生する。印加電圧を徐々に上昇させると, ある電圧から陰極の上面からFowler-Nordheimの法則に従って放出される電子は急速に増大する。

放出された電子は電気力線に沿って進む。電気力線が直接ギャップ間を結ぶギャップ長の場合は, 放出された電子は直接対向電極との間の気中を橋絡する。ギャップ長が長い場合は, 電気力線は誘電体表面と交差するため, 電子は誘電体表面に衝突し, 誘電体表面を負極性に帯電させる。電子はガス中の中性粒子と電子を増倍させながら接地電極に達する。

最終的に, 絶縁物表面の帯電電荷の効果により陰極上面から陽極にかけての放電路が形成される。ガス中で生成された正イオンは陰極近傍に移動し, 陰極表面の電界を増幅させる。これにより電界放出電流そのものに正のフィードバックがかかり, 絶縁破壊に至る。

### (2) 正極性電圧印加時の放電モデル

正極性電圧印加時の電子放出源である接地電極表面は電界強度が低く, 電界電子放出を発生させるのに十分ではない。そこで, 高压電極近傍の誘電体表面からFowler-Nordheimの式に従った電子放出が発生するとし, 放出された電子のエネルギーで陽極表面が加熱されるモデル(図3)を考える。

誘電体表面からFowler-Nordheimの法則に従って放出された電子は, 電気力線に沿って移動し, 陽極のエッジに衝突する。

電子の衝突のエネルギーで陽極は加熱され, 金属蒸気が放出される。放出された金属蒸気はギャップ間に拡散する。

金属蒸気がギャップ間に満たされると, 実質的にギャップ間の圧力が上昇し,  $\mu\text{m}$  オーダの

ギャップであっても気中の沿面放電と同様の機構で電極間が橋絡される。

以上のプロセスにより、陰極から陽極エッジにかけての放電路が形成されると考えられる。

このように、低気圧・マイクロギャップにおける絶縁破壊現象は真空放電と類似する現象となり、絶縁破壊電圧が電界電子放出現象を起点として引き起こされることが分かった。電界電子放出現象は電極および誘電体の表面電界に強く依存することから、電極や誘電体の表面状態を清浄に保つことが絶縁設計上最も重要であるという結論を得た。

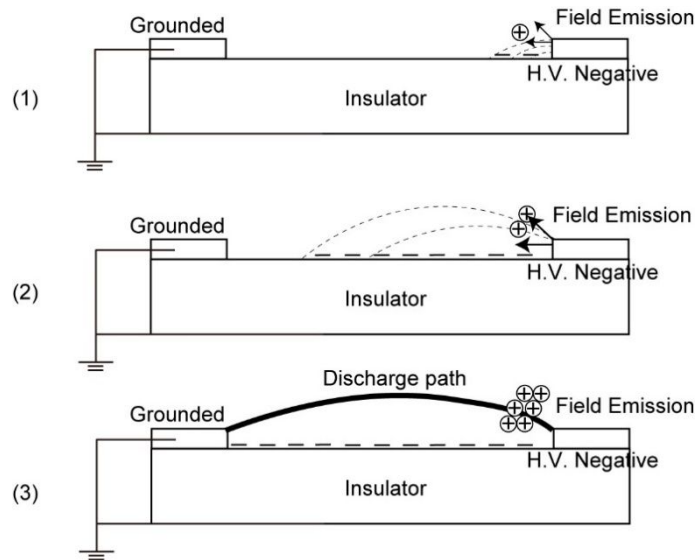


図2 負極性電圧印加時の放電モデル

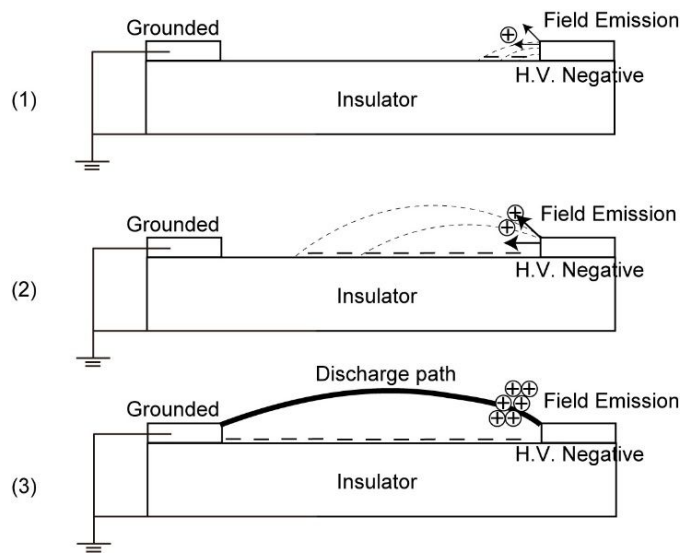


図3 正極性電圧印加時の放電モデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iwabuchi Hiroyuki, Oyama Tsutomu, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiro	4. 巻 214
2. 論文標題 Polarity effect of breakdown characteristics across micrometer scale surface gap	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electrical Engineering in Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eej.23316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inada Yuki, Kikuchi Ryo, Nagai Hiroyuki, Yamano Yasushi, Maeyama Mitsuaki, Iwabuchi Hiroyuki, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiro, Kaneko Eiji	4. 巻 48
2. 論文標題 A Systematic Comparison of Intense-Mode Vacuum Arc Between CuCr and AgWC Electrode by Using Various Optical Diagnostics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 2224 ~ 2236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPS.2020.2992675	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwabuchi Hiroyuki, Oyama Tsutomu, Kumada Akiko, Hidaka Kunihiro	4. 巻 140
2. 論文標題 Polarity Effect of Breakdown Characteristics across Micrometer-scale Surface Gap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 342 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.140.342	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩淵大行
2. 発表標題 mmオーダ沿面ギャップにおける放電シミュレーション
3. 学会等名 電気学会放電・プラズマ・パルスパワー / 開閉保護 / 高電圧合同研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------