

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04447

研究課題名（和文）誘電体沿面上のマイクロギャップ放電の基礎現象解明

研究課題名（英文）Fundamental study of discharge phenomena in micrometer-scale gap on dielectrics

研究代表者

上野 秀樹 (Ueno, Hideki)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：90301431

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）：仕事関数など物性の異なる電極材料、誘電体材料を用いて、電極・誘電体表面・三重点からの電子供給がマイクロメートルスケールの沿面ギャップにおける放電の開始や進展に及ぼす影響について検討を行った。その結果、ギャップ長によって、気中放電による絶縁破壊から沿面放電絶縁破壊に移行する現象を見出した。静電界解析により、最も高い電界部が、電極先端の場合と三重点の場合があり、マイクロギャップ放電の起点となる初期電子の供給過程、荷電粒子の振る舞いへの影響を解明した。これらの結果とフラッシュオーバー電圧等の電氣的計測を総合して、詳細な荷電粒子の挙動・状態の解明を図り、マイクロギャップにおける放電メカニズムを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑な現象である固体誘電体沿面に形成されたマイクロメートルサイズのギャップ中の放電とそのメカニズム解明を行った。特に、誘電体沿面のマイクロメートルサイズのギャップでは、電極金属のみならず、誘電体表面や金属電極/固体誘電体/気体誘電体の接点である三重点が、放電の発生・進展を支配する電子の供給源として作用することを実験的、理論的に示すことができた。この結果は従来明確になっていなかった事象を明確にしたという学術的意義は大きい。また、MEMSに代表される微細化された電子デバイスにおける絶縁設計や絶縁信頼性の確保、サージ保護とそのためのデバイス構築の基礎となる重要な知見を含んでいる。

研究成果の概要（英文）： Using various dielectric materials with different work functions and other physical properties, the effects of electron supply from the electrode, dielectric surface, and triple point on the initiation and propagation of discharge in micrometer-scale creepage gaps have been investigated. As a result, a transition from dielectric breakdown due to air discharge to creepage discharge breakdown depending on the gap length has been found. Static electric field analysis revealed that the highest electric field is at the tip of the electrode or at the triple point, and the effects on the initial electron supply process, which is the starting point of the microgap discharge, and on the behavior of charged particles were elucidated. By combining these results with electrical measurements such as the flashover voltage, we have elucidated the behavior and state of charged particles in detail and proposed a discharge mechanism for microgap discharges.

研究分野：高電圧工学

キーワード：マイクロスケールギャップ 絶縁破壊 気中放電 沿面放電 仕事関数 絶縁設計

1. 研究開始当初の背景

近年、微細加工技術の発達により、電子機器の高集積化が急速に進んでいる。今後さらに、電子機器の小型化・高性能化、すなわち素子の縮小微細化・薄膜化および回路の高密度化がマイクロスケールからナノスケールまで進む。このときに問題となるのが機器・デバイスのサージ(異常電圧)耐性の低下である。数 μm 以下の金属ギャップを有するMEMSや絶縁層上や内部に形成された配線間のマイクロメートルオーダーのギャップ(以下マイクロギャップと称する)を有する電子デバイスでは、低い電圧印加によってもこのマイクロギャップでは高電界となる。このような構造において、駆動電圧をさらに上昇させた場合や、静電気放電等に起因したサージが人体や電源等から侵入した場合、絶縁体基板上的高電界となる金属間のマイクロギャップで放電が生じる可能性がある。この放電が素子の焼損などを引き起こし、故障や誤動作の原因となる。特にウェアラブル機器の普及により、デバイスが人体からの静電気放電の影響を受ける可能性が高まっており、MEMSなどのマイクロスケールからナノスケールのデバイスにおける、絶縁設計・絶縁信頼性確保やマイクロギャップでの放電を応用したサージ保護デバイスの設計の点から、マイクロギャップでの放電現象とそのメカニズム解明が求められていた。

大気圧下のマイクロギャップでの放電現象については、これまでに精力的に理論・実験の両面から研究がなされてきた。一般に火花放電電圧(フラッシュオーバー電圧)と pd 積(圧力 \times ギャップ長)の関係は、V字型の曲線で示されるパッシェンカーブとしてよく知られているのに対して、大気圧マイクロギャップ放電では、ギャップ長が数 μm 以下において、パッシェンカーブから外れて、火花放電電圧の下限値よりもさらに低い電圧で火花破壊となる(F. W. Strong et al.: J. Micromech. Microeng., 18, 075025 (2008), D. B. Go, D. A. Pohlman: J. Appl. Phys., 107, 103303 (2010))。また、大気圧下でのこの領域のギャップ長では、紫外線や放射線等による初期電子の存在確率は低く、電子の平均自由行程も短いため、電極からの電界電子放出が主要な電子供給プロセスであると推測されていたが(山野: 静電気学会誌, Vol. 36, pp. 146-151 (2010))、詳細は明確となっていなかった。

誘電体沿面に形成されたマイクロギャップでは、単なるマイクロギャップとは異なる点として、放電の発生・進展に関わる空間での、①固体誘電体の介在、②金属電極/誘電体/ガス誘電体の3つの界面(三重点)の存在が挙げられる。したがって、誘電体沿面に形成されたマイクロギャップで生じる放電は、これらから電子供給の影響を受けず、単純なマイクロギャップ中と同様の放電の発生・進展となるのか、あるいはそれらの影響を受け、ミリメートルサイズの沿面ギャップと同様の誘電体表面に沿う沿面放電が発生・進展するのかなど未解明な点が多く存在していた。実際のMEMSやサージ保護デバイスの観点からもこれらを解明することは重要と認識されていたが、研究例には必ずしも多くない状況であった(例えば、H. Iwabuchi et al.: IEEE Trans. DEI, Vol. 26, pp. 1377-1384 (2019))。また研究例の大半は、Siウエハ表面の形成された SiO_2 上のマイクロ沿面ギャップにおける放電に関するもので、誘電体材料や電極金属材料の物性と放電特性に関する系統だった研究例は見当たらなかった。沿面ギャップを形成する誘電体や電極金属の物性ととの相関を検討し、誘電体や三重点の電子供給に対する影響を解明することが必要であった。

2. 研究の目的

本研究の学術的成果がデバイスの絶縁設計・絶縁信頼性、サージ電圧からの保護という工学的応用に寄与するためには、誘電体沿面に形成されたマイクロギャップ中における放電現象とそのメカニズム解明が必須である。本研究では、まず前述のマイクロギャップで起こる放電と沿面マイクロギャップで放電の相違点を明確にするとともに、放電の発生・進展に関わる空間に存在する固体誘電体および三重点の影響を解明することを目的とした。

特に、誘電体沿面に形成されたマイクロギャップにおける放電現象や放電メカニズムに関する研究は重要であるにもかかわらず、その研究例は必ずしも多くなく、先行研究の大半は、Siウエハ表面の形成された SiO_2 上の沿面マイクロギャップにおける火花放電電圧(フラッシュオーバー電圧)などの放電特性に関するものである。一方、沿面ギャップを形成する誘電体や三重点が放電の発生・進展に及ぼす影響の解明に関する系統的な研究とそのレポートは見当たらないことから、本研究では、この点に焦点を当てた検討を行い、固体誘電体上の沿面ギャップにおいて、フラッシュオーバー電圧のギャップ長依存性における誘電体材料、電極金属材料の影響を調べ、電極、誘電体や三重点からの電子供給と放電過程について検討し、マイクロギャップにおける放電現象、放電メカニズムの解明を目的としている。

3. 研究の方法

誘電体沿面に形成されたマイクロギャップ中における放電現象とそのメカニズム解明が本研究における学術的課題・研究目的である。マイクロギャップ中での放電の発生・進展に必要な電子の供給源を解明することが最も重要である。誘電体が介在しない単純なマイクロギャップにおける放電では、電極からの電界電子放出が主要な電子供給だけではなく、介在する固体誘電体

表面からの電子供給、三重点（金属電極/誘電体/ガス誘電体の3つの界面）からの電子供給の可能性はある。したがって、これらの影響を明確にする必要がある。特に、誘電体からの電子供給、三重点からの電子供給は、誘電体物性（特に仕事関数）の影響が大きいと考え、異なる仕事関数を持つ誘電体として、ガラスおよびZnOを取り上げて、フラッシュオーバー電圧等の検討を進めた。本研究では、上記成果をさらに発展させ、沿面マイクロギャップ中における放電現象とそのメカニズム解明を図るため、下記の点に焦点を当てて詳細な検討を実施した。

- (1) 誘電体表面・三重点からの電子供給に及ぼす誘電体材料物性の影響の検討
 - (2) 金属電極および三重点からの電子供給に及ぼす電極金属材料物性の影響の検討
- また、沿面マイクロギャップ中における放電において、次のような方法を用いて、誘電体材料物性や電極金属材料物性の放電現象に対する検討を行う。
- (1) フラッシュオーバー電圧、放電電流等の電気的計測による荷電粒子の挙動の解明
 - (2) 顕微光学手法による放電発生・進展様相の観測、発光観測による荷電粒子の状態解明
 - (3) シミュレーションによる荷電粒子の挙動の推定

4. 研究成果

(1) 気中・沿面マイクロギャップにおける破壊電圧のギャップ長依存性と電極金属の影響 3種類の金属の電極を用いて破壊電圧を測定した結果（図1）、気中ギャップ、沿面ギャップともに、ギャップ長が $d = 15 \mu\text{m}$ より大きな領域において、破壊電圧はいずれのギャップ長においても概ね銅電極の場合が一番高く、次いで真鍮電極が高く、タングステン電極において最も低くなった。マイクロメートルレベルのギャップにおいては、大気圧下では放射線等による初期電子の存在確率は低く、電子の平均自由行程も短いことから、電極からの電界電子放出の影響が大きいと考えられる。一般に電極金属の仕事関数が大きいほど、電極からの電子放出が起こりにくくなるため、ギャップ内での衝突電離も起こりにくくなる。その結果として破壊電圧は高くなると予想される。今回用いた電極金属多結晶体の一般に知られている仕事関数は、銅が 4.65 eV 、真鍮は 4.61 eV 、タングステンは 4.55 eV 電極である。仕事関数の差はそれほど大きくないものの、概ね先に述べた破壊電圧の大小関係と一致する。よって、仕事関数、すなわち電子放出のしやすさが破壊電圧に影響を及ぼすことが示された。これまでのマイクロギャップ放電に関する研究においては、このような電極金属の物性と相関については未解明であったが、本研究において明確とした。また、ギャップ長が短いマイクロギャップ領域の絶縁破壊は、電子なだれによるTownsend型絶縁破壊機構ではなく、真空中の絶縁破壊と同様、電界電子放出電流に基づく局所的な電極金属の熔融・蒸発の過程が重要と考えられる。タングステンの融点は約 3380°C と他の2種類の金属に比べて高く、電極金属の加熱蒸発は起こりにくい。一方、機械的な加工が難しく今回用いた電極においては表面が荒く、他の金属電極に比べて表面に微小突起が多く存在し、その部分が高電界となり電子放出を促進、電流密度が高くなり過熱蒸発が起こる。これらの効果によって、ギャップ長が $d = 15 \mu\text{m}$ 以下において破壊電圧に差が表れなかったことも示唆された。

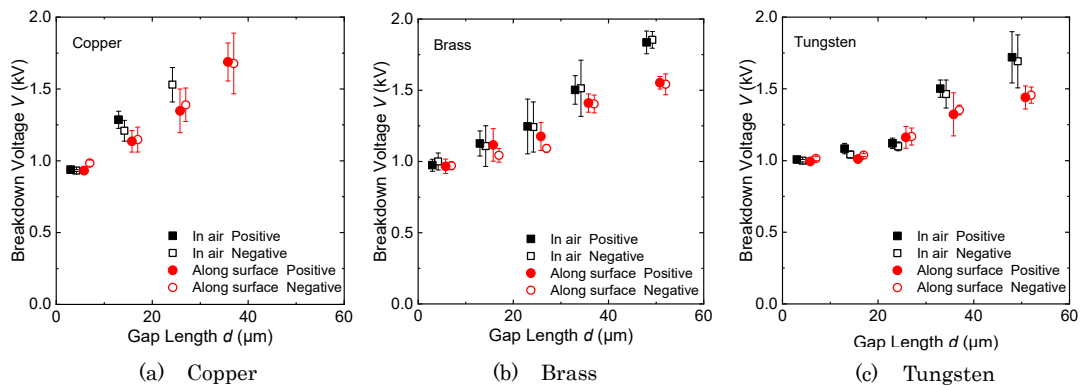


図1 破壊電圧のギャップ長依存性

(2) 破壊電圧のギャップ長依存性における印加電圧立ち上がり時間の影響 印加電圧立ち上がり時間の影響について検討した（図2）。ギャップ長を大きくしていくにしたがって、電圧立ち上がり時間による破壊電圧の差異が明確となった。立ち上がり時間 25 ns では $d = 50 \mu\text{m}$ では気中ギャップ、沿面ギャップともに電圧波頭部での絶縁破壊は起こらず、 $d = 35 \mu\text{m}$ の場合はガラス上のみ波頭部での破壊電圧の測定が可能であった。一方、立ち上がり時間 80 ns では $d = 50 \mu\text{m}$ で気中ギャップ、沿面ギャップのいずれにおいても破壊電圧の測定は可能となった。気中ギャップ、沿面ギャップで比較すると、 $d = 5 \mu\text{m}$ において差異はなかったが、 $d = 15 \mu\text{m}$ よ

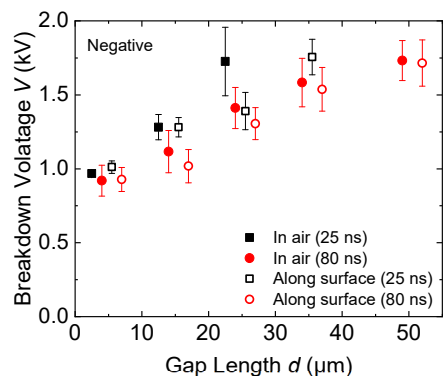


図2 印加電圧立ち上がり時間の影響

り大きなギャップ長においては気中ギャップより沿面ギャップの方が低い破壊電圧を示し、さらに各ギャップ長において立ち上がり時間 80 ns の方が立ち上がり時間 25 ns の場合よりも明らかに低い破壊電圧となった。マイクロギャップでは、ギャップの電界は極めて高い電界となっており、先に述べた陰極から電界電子放出により初期電子が供給される。そのため、初期電子供給の統計的遅れが小さくなり放電遅れ時間としても小さくなる。その結果、ギャップ長が $d=5\ \mu\text{m}$ という極短ギャップでは立ち上がり時間において大きな差異はでなかったと考えられる。しかし、ギャップ長が大きくなるにつれて電界が弱まり、統計的遅れが徐々に大きくなり放電遅れ時間も大きくなる。その結果として、立ち上がり時間の違いにより破壊電圧に差が生じたものと考えられる。

(3) 放電様相の観測 マイクロギャップ中放電における荷電粒子の挙動、放電メカニズムの検討を行うための情報を得るため、ギャップ長 $d=5\sim 50\ \mu\text{m}$ の気中ギャップ、沿面ギャップに対して、負極性、波高値 $-2\ \text{kV}$ の電圧印加における、電極間で生じる絶縁破壊時の放電様相を顕微光学的手法により直接的に観測、放電像の撮影を実施した。図 3 にはギャップ長 $d=25\ \mu\text{m}$ の気中ギャップにおける放電発光像を示した。図 3(a)は電圧印加前の電極を撮影したものである。赤い破線で囲った電極先端が対向する気中ギャップにおいて、いかなる発光は確認されない。これに対して、図 3(b)に示した電圧印加時においては、発光は弱く見づらいものの、赤線で囲んだ部分の中心付近に電極先端間を結ぶ 1 本の光の筋が撮影され、電極先端間において絶縁破壊時の放電発光が観測された。また、気中ギャップの場合、ギャップ長、印加電圧極性を変化させても、ギャップ長 $d=25\ \mu\text{m}$ の場合と同様に、電極先端間での放電発光が観測され、電極先端間で絶縁破壊が生じていることが確認された。次に、ギャップ長 $d=15\ \mu\text{m}$ および $d=25\ \mu\text{m}$ のガラス上における沿面ギャップの放電様相を撮影した結果を図 4 に示した。図 4(a)のギャップ長 $d=15\ \mu\text{m}$ の沿面ギャップの場合、すでに図 3(b)に示した気中ギャップの場合と同様に、電極先端間で放電発光が観測された。このことは、沿面ギャップが $d=15\ \mu\text{m}$ の場合も気中ギャップと同様、電極間を直接橋絡する放電が生じ、絶縁破壊に至っているものと考えられる。一方、図 4(b)に示したギャップ長 $d=25\ \mu\text{m}$ の沿面ギャップの場合では、両電極の下部の電極・ガラス・空気の接点近傍からギャップ間のガラス沿面に拡がった淡い放電発光が観測された。すなわち、ギャップ長の増大により、電極先端間の気中ギャップの放電から、沿面放電に放電形態が変化したものと言える。発光像より、三重点付近から放電が発生し、ガラス沿面を放電が進展し、電極間を橋絡、絶縁破壊に至ったと推察される。従来、このような顕微光学的手法によるマイクロギャップ中の放電の直接的観測の報告例はほとんどなく、系統だったマイクロギャップ放電と絶縁破壊の観測結果は、非常にオリジナリティの高いものであり、学術誌への投稿し、採録されている。

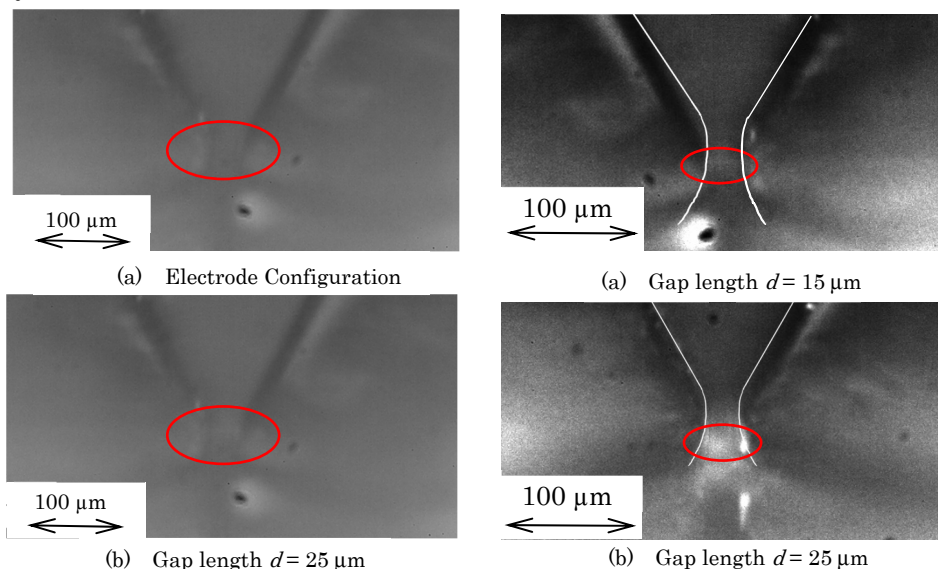


図 3 気中マイクロギャップでの放電像 図 4 沿面マイクロギャップでの放電像

(3) マイクロギャップ中の荷電粒子の挙動解析と放電メカニズムの検討 気中および沿面マイクロギャップにおける破壊電圧のギャップ長依存性および放電形態の観測結果から、主として負極性のマイクロギャップにおける放電のメカニズムについて検討を行う。気中ギャップおよび沿面ギャップの静電界解析を有限要素法により行った。コンター図により各ギャップ長において定電圧印加条件電界の強い領域を示した。なお、気中ギャップ・沿面ギャップともにほぼ一定電圧印加条件とした（気中と沿面で電圧条件は異なる）。また、沿面ギャップについては、

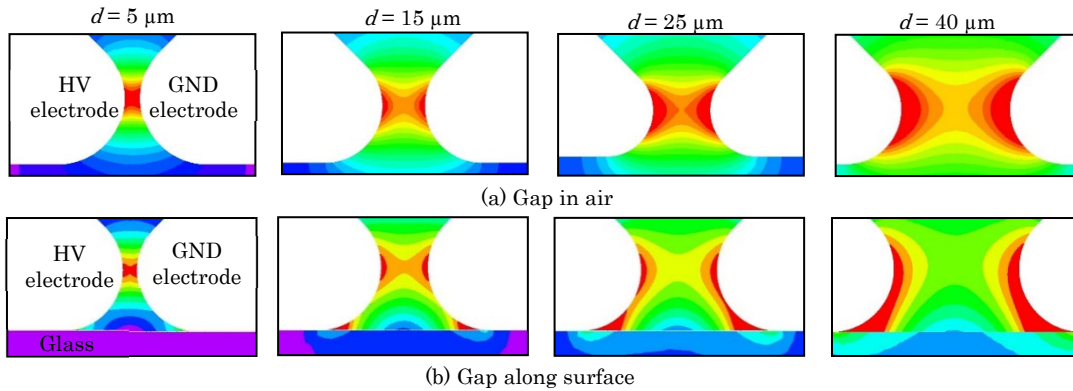


図5 気中ギャップおよびガラス沿面マイクロギャップの静電界解析

実際の破壊電圧測定、放電形態の観測においては背後電極を設置していないが、本解析においては、背後電極を設置したモデルにて電界解析を行ったが、ギャップ長に対してガラスの厚みが 1 mm と差が大きい条件となっている。図5に電界解析によるコンター図を示した。暖色（赤）の領域が高電界領域を表している。先ず、気中ギャップにおいては、ギャップ長に係わらず、両電極先端近傍が高電界領域となっていることがわかる。これまでの検討より、電極先端の電界は、数 $10 \sim 100\text{ MV/m}$ 程度見積もられている。このことから、気中ギャップでは、負極性においては、ギャップ

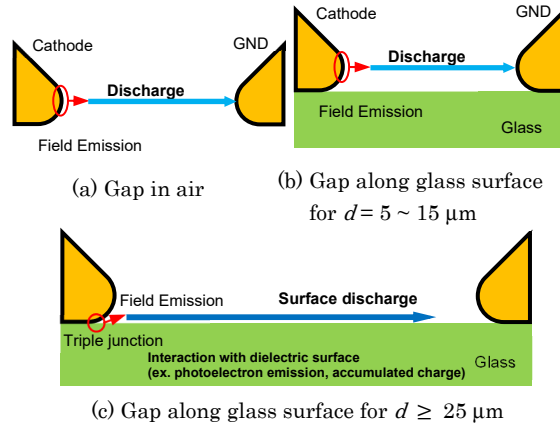


図6 マイクロギャップの放電メカニズム

長に関係なく、陰極先端から電界電子放出により放出された電子が衝突電離を引き起こし放電が進展し、電極先端間で絶縁破壊が生じる。ギャップ長が大きくなるにしたがい、電極先端電界が弱まるため、電極間での破壊電圧は高くなる。これは図3(b)に示した気中ギャップの放電像とも整合している。次に、沿面ギャップにおける破壊メカニズムについて検討を行う。ギャップ長 $d = 5\text{ }\mu\text{m}$ の場合、図5(b)に示したように背後電極を有する場合であっても、陰極側の三重点の電界よりも陰極先端の電界が強い。そのため、気中ギャップの場合と同様に、陰極先端から電界電子放出による電子が起点となる放電の発生、進展により、電極先端間で絶縁破壊が生じる。このため、ギャップ長 $d = 5\text{ }\mu\text{m}$ における気中ギャップと沿面ギャップの破壊電圧は同じ値となっていることも理解できる。ギャップ長 $d = 15\text{ }\mu\text{m}$ の場合では、電極先端部に加えて三重点近傍も高電界となってくるが、実際には背後電極が無い場合三重点近傍の電界は陰極先端部に比べて低いものと推測されること、陰極三重点から陽極までの距離がギャップ長に比べて長いことから、ギャップ長 $d = 5\text{ }\mu\text{m}$ の場合同様、直接電極先端間での破壊となる。ギャップ長が長くなるために破壊電圧が高くなるものの、気中ギャップと沿面ギャップの負極性破壊電圧には差がみられないことから、この考え方が支持される。さらにギャップ長 $d = 25\text{ }\mu\text{m}$ の場合では、ギャップ長の増大により電極先端部電界に対して、陰極三重点近傍の電界が高くなる。そのため、陰極からの電界電子放出は陰極先端部よりもむしろ三重点で活発となる。この三重点から放出される電子が初期電子となり、背後電極が無いことから、電子はガラス表面に沿って陽極方向に加速されて、ガラス沿面で衝突電離を繰り返し、沿面放電が進展することになる。このとき、一部の電子はガラス表面に蓄積することも考えられるが、三重点からの電子供給に加えて、放電進展時の放電発光によるガラス表面からの光電子放出も可能であり、進展する放電の先端部には、豊富な電子供給が行われるものと推測される。このため、ガラス表面での沿面放電の進展は促進され、その結果として、図1に示したように、同じギャップ長の気中ギャップに比べて沿面ギャップでの破壊電圧は低くなる。この影響はギャップ長が増大するほど顕著に表れるものと考えられる。以上の負極性における気中およびガラス沿面のマイクロギャップにおける放電メカニズムを図6にまとめ、提案を行い、学術誌に投稿、掲載された。

(4) 今後の課題 マイクロギャップ中の放電に関する荷電粒子の挙動、放電メカニズムの検討を行ってきたが、荷電粒子の密度、エネルギーの定量的評価までには至らなかった。また、正極性のマイクロギャップにおける放電・破壊メカニズムについては、陽極近傍のガラス表面からの電子放出、接地極の三重点近傍からの電子放出の可能性などの詳細な検討が必要である。これらについては、マイクロギャップ中放電の全容を解明するための今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 上野秀樹, 岡田 翔, 三ツ橋昂起, 比田悠斗, 谷 直樹	4. 巻 31
2. 論文標題 マイクロメータスケールギャップにおける放電特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気材料技術雑誌	6. 最初と最後の頁 26-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 比田悠斗, 三ツ橋昂起, 岡田 翔, 上野秀樹
2. 発表標題 固体誘電体上のマイクロギャップにおける絶縁破壊特性
3. 学会等名 第335回電気材料技術懇談会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比田悠斗, 三ツ橋昂起, 岡田 翔, 上野秀樹
2. 発表標題 マイクロギャップの絶縁破壊特性における印加電圧の立ち上がり時間の影響
3. 学会等名 令和4年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三ツ橋昂起, 比田悠斗, 岡田 翔, 上野秀樹
2. 発表標題 銅電極におけるマクロギャップ放電の背後電極の影響
3. 学会等名 令和4年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三ツ橋昂起, 比田悠斗, 岡田 翔, 上野秀樹
2. 発表標題 ガラス上マイクロギャップにおける背後電極を用いたときの放電特性に及ぼすガラス厚さの影響
3. 学会等名 令和4年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比田悠斗, 三ツ橋昂起, 岡田 翔, 上野秀樹
2. 発表標題 マイクロギャップ中の放電における印加電圧の立ち上がり時間の影響
3. 学会等名 令和4年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三ツ橋昂起, 比田悠斗, 岡田 翔, 上野秀樹
2. 発表標題 背後電極を有するマイクロギャップの放電特性における電極材料の影響
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 比田悠斗, 三ツ橋昂起, 岡田 翔, 上野秀樹
2. 発表標題 酸化亜鉛上のマイクロギャップにおける絶縁破壊電圧特性
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上野秀樹
2. 発表標題 ミリメータ/マイクロメータギャップ沿面放電現象とその特性
3. 学会等名 第329回電気材料技術懇談会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 比田悠斗・三ツ橋昂起・岡田 翔・上野秀樹
2. 発表標題 ガラス上および空気中のマイクロギャップにおける絶縁破壊電圧特性
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三ツ橋昂起・比田悠斗・岡田 翔・上野秀樹
2. 発表標題 マイクロギャップにおける絶縁破壊電圧のギャップ長特性と電極材料の影響
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022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
研究 分担 者	岡田 翔	兵庫県立大学・工学研究科・助教	
	(Okada Sho)		
	(90633123)	(24506)	

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
---------	---------