真空ギャップにおける絶縁破壊前駆電流特性と 絶縁破壊電圧の関係

正員 高橋英治 (日新電機) 非会員 江部明憲 (日新電機)
非会員 緒方 潔 (日新電機) 正員 林 義紀 (日新電機)
学生員 真壁大輔 (武蔵工大) 正員 曾禰元隆 (武蔵工大)

Relation between Breakdown Voltage and Pre-Breakdown Current in Vacuum Gap
Eiji Takahashi, Member, Akinori Ebe, Non-Member, Kiyoshi Ogata, Non-Member,
Yoshinori Hayashi, Member, (Nissin Electric Co., Ltd.)
Daisuke Makabe, Student, Mototaka Sone, Member (Musashi Institute of Technology)

Two different surface treatments (mechanical polishing, thin film deposition) were done on cathode surfaces, and the field emission current from the cathodes were measured by using MCP. In order to discuss a relationship between the breakdown voltage and pre-breakdown current in vacuum gap, breakdown voltage was measured after a field emission measurement. The V-I characteristics of field emission and breakdown voltage were influenced by surface treatment, the breakdown voltages of mechanical polished cathodes were lower than thin film deposited cathodes. It was found that the probability of breakdown was higher as the field emission current was reached at 10^{-11} A. From atomic force microscope (AFM) measurement, there were a lot of protrusion on the cathode surface at a case of thin film deposition treatment, and we estimated by using finite element method that these protrusions, however, make field enhancement effect low. It was supposed that the breakdown voltage in vacuum gaps could be increased by thin film deposition method.

キーワード：電界電子放出、真空絶縁破壊、表面処理、F-Nプロット、有限要素法

1. まえがき

真空は、 α 効果による電子の電離増倍過程が存在しない空間であるため、絶縁破壊の発生を抑制または防止する能力を持つ優れた絶縁媒体となり得る可能性を有している。そのため、古くから真空を遮断器やスイッチに利用するための研究が続けられ、現在では、この優れた絶縁耐力を利用した実用製品が開発されるに至っている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、絶縁破壊の発生を防止する技術は、未だ確立されておらず、絶縁耐圧に限界を有しているのが現状である。従って、より高い電圧下においても絶縁性能を維持していくためには、絶縁破壊の発生に影響を及ぼす要因を明確に把握した絶縁設計が必要不可欠となってくる。

一般に、真空ギャップでの絶縁破壊は、電極表面状態に大きく影響を受けることが経験的に知られ、その発生には陰極表面より電界放出機構⁽³⁾を経て放出された電子が必要であると仮定されている⁽²⁾。従って、電極表面状態および陰極放出電流(=絶縁破壊前駆電流)が破壊の発生に与える効果を明確にすることが重要となる。文献^{(4)~(7)}は、

絶縁破壊の発生に対し電極表面状態の効果について注目した代表例であり、絶縁破壊の発生が表面状態に大きな影響を受けることを報告している。これら報告に対し、文献⁽⁸⁾⁽⁹⁾は、陰極放出電流に着目した報告であり、絶縁破壊は、陰極放出電流が陽極を局所的に加熱することで発生すると結論づけている。

しかし、陰極放出電流に着目した報告は、電極に十分なコンディショニング処理が施された特殊条件下においての電流領域 $\mu \sim \text{mA}$ オーダのみの検討であり、コンディショニング前の初期表面状態における 10^{-6} A以下の陰極放出電流と絶縁破壊の関係については不明な点が多い。コンディショニング処理と陰極放出電流との関係に着眼した報告では⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、未処理表面状態の電極ではピコアンメータ(P・A)を利用しても、電流が測定されず、絶縁破壊が発生することを明らかにしている。従って初期表面状態においては、絶縁破壊前に電極間に流れる微小電流の測定が行えなかったために、陰極放出電流と絶縁破壊の関係が検討されていなかったと推測することができる。このことから、初期表面状態の電極において、陰極放出電流が絶

縁破壊の発生に与える効果を明らかにするためには、P・A測定限界下である 10^{-9} A以下の微小電流を測定することが必要不可欠であるといえる。

一方、著者らは、陰極放出電子の放出形態を解明することを目的とし、文献⁽¹²⁾において、蛍光膜付きマイクロチャンネルプレート(MCP)を利用し、電子放出源の視覚的観測を行った。このときMCPの電子増倍効果を利用して、コンディショニング処理の無い初期表面状態であっても、 $10^{-18} \sim 10^{-15}$ Aオーダの陰極放出電流が測定可能となった。従って、MCPによる微小電流測定方法を利用することで、初期表面状態の電極においても、陰極放出電流が絶縁破壊の発生に及ぼす効果について明確にすることができると考えられる。

そこで本論文ではMCPを利用し、 $10^{-17} \sim 10^{-12}$ Aオーダの陰極放出電流を測定することで、初期表面状態の電極における絶縁破壊発生以前のギャップ印加電界—陰極放出電流特性(電子放出特性)と絶縁破壊電界の関係を明らかにする。このとき、陰極表面状態が、電子放出特性に影響を与えるという報告⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を考慮して、初期表面状態として物理的凹凸の違いに着目し、まず、これら表面状態が電子放出特性へ与える効果について検討し、その後、これらの特性と絶縁破壊電界の関係について検討していく。以下にその詳細を示す。

2. 実験装置および方法

<2.1> 実験装置ならびに試料電極 陰極放出電流および絶縁破壊電界の計測に使用した装置を図1に示す。真空チャンバは、材質がステンレス鋼(SUS)で、内径約152mm、長さ360mmの円筒型である。排気系には荒引き用にロータリーポンプを、主排気用に良質の真空が得られるターボ分子ポンプを用いた。これらを併用することにより、最高到達圧力は 10^{-5} Pa以下である。

試料陰極は、図2に示した形状をもつ無酸素銅(純度99.9%以上)であり、大別して以下の2通りの表面処理を施した。

(1) 機械鏡面処理 (26samples)

- ・エメリー紙および金属研磨材による鏡面仕上げ、
- ・微粒子研磨により表面凹凸を制御

(中心線平均粗さ $R_a = 2 \text{ nm}$ 、 20 nm 、 200 nm)

(2) 薄膜形成処理 (13samples) : 真空中にてイオンビーム照射と同時に銅薄膜を電極上に形成。イオンビーム照射条件を変化させることにより、形成される薄膜の状態(幾何学的凹凸、結晶性、密着力)を変化させることが可能⁽¹³⁾。

・処理条件

薄膜材質 : Cu

膜厚 : 1000 nm

照射イオン : Ne

イオンエネルギー : 0.5 、 10 keV

① VACUUM PUMP ② POWER SUPPLY FOR MCP
③ PICO AMMETER ④ CATHODE ⑤ MESH ANODE
⑥ MCP ⑦ 2ch PEN RECORDER ⑧ DC POWER SUPPLY

図1 実験装置

Fig. 1. Experimental apparatus

図2 陰極サンプル

Fig. 2. Cathode sample

陽極には、線径 0.03 mm 、線間、 0.3 mm のタンダステンに金メッキを施したメッシュを使用し、陰極から放出された電子はこのメッシュ電極を通り抜けてMCPへ入射される。入射電子はMCPにより増幅され ($G_{ain} : 8.0 \times 10^3$)、同軸ケーブルを介してP・Aにより電流として観測される。観測電流は陰極への印加電圧とともに2chペンレコーダにより記録される。

<2.2> 実験方法 チャンバ内の圧力が 4×10^{-5} Paに達した後、マイクロメータによりギャップ長を 1 mm に調節し、ギャップ印加電圧—絶縁破壊前駆電流特性(電子放出特性)の測定を行う。ここで、ギャップ印加電圧とは、試料陰極と陽極との電位差である。電子放出特性の計測は、ギャップ印加電圧のステップ幅を 5 kV とし、各電圧において60秒間の電流測定を行った。ここで得られた電流の平均値をピコアンメータによる検出電流値とし、 $10^{-17} \sim 10^{-12}$ Aオーダの範囲で電流計測を行う。

また、絶縁破壊電界は破壊時に生じる大電流からMCPを保護するため、メッシュ電極とMCPとの間に保護板を挿入した後、電流測定と同様の条件で測定を行った。

陰極表面の分析には、原子間力顕微鏡 (AFM) を用い、陰極放出電流測定後の陰極前面 $100\ \mu\text{m}^2$ ($10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$) 部分における表面凹凸の高さを測定した。このとき、測定部分の選択は任意に行っている。また、表面凹凸の高さ情報は、 512×512 のデータの平均値を $0\ \text{nm}$ として表現され、表面凹凸の 2D、3D 画像処理、および表面粗さの指標となる中心線平均粗さ (R_a)、凹凸の密度計算を容易に行うことができる。

3. 結果および検討

〈3・1〉 各種表面処理電極からの電子放出特性

図 3 に各種表面処理電極の印加電圧—電子放出電流特性を示す。機械鏡面処理を施した電極では印加電圧 $4\ \text{kV}$ 付近より電子放出が開始され、印加電圧の増加に伴い電子放出量は増加する。ただし、サンプルの個体差による電流値のばらつきが大きく、同一印加電圧においても 3 桁以上の電流差が生じている。一方、薄膜形成処理を施した試料電極では電子放出開始電圧が $6\ \text{kV}$ から $9\ \text{kV}$ 付近に分布しており、機械鏡面処理電極よりも開始電圧は高電圧側へシフトする。また印加電圧の増加に対して放出電流はいずれのサンプルも直線的に増加し、サンプル間の電子放出特性には大きなばらつきが見られない。このように表面処理形態の違いにより電子放出特性は異なり、表面状態と電子放出との間に密接な関係があることが予想される。

図 3 各種サンプルの電子放出特性
Fig.3. Field emission characteristics of two different surface treatments

一般に金属表面からの電子放出は表面に存在する微小な突起の電界増倍効果によって開始され、突起による電界増倍は電界増倍係数 β として扱われる。この β 値は従来より電子放出特性を決定づける重要な因子とされ、電氣的・幾何学的表面状態を表す値として用いられてきた。

図 4 は表面処理電極からの電子放出電流を F-N プロット化したものであり、 β 値はこの F-N プロットの傾きから算出される。ところがいずれの処理電極のプロットも

傾きがなだらかに変化しており、 β 値が電子放出電流の増減に対して変化していると考えられる。そこで図中の点線に示したように F-N プロットの傾きを 3 つの電流領域によって区分し、各処理電極の β 値をそれぞれの電流領域区分において算出することとする。

図 4 F-N プロット
Fig.4. F-N Plots

図 5 にそれぞれの処理電極について電流領域で区分した β 値を示す。いずれの処理電極においても β 値算出対象の電流領域が高電流になるほど β 値は低下する。このとき薄膜形成処理電極ではサンプル間のばらつきが小さく、 $1 \times 10^{-12}\ \text{A}$ では $200 - 400$ の間に集中している。一方、鏡面処理電極ではサンプル間のばらつきが大きく、また薄膜形成処理に比べて β 値はいずれの電流領域区分においても高いことが判る。 β 値は表面状態を表す指数であることから、鏡面処理電極の表面状態は画一化されておらず、さらに凹凸が大きいことが予想される。また薄膜形成処理は電子放出に対する安定性に優れた表面を形成する

図 5 各電流領域での電界増倍係数 β
Fig.5. Field enhancement factor β at each emission current range

ことができるものと考えられる。この安定性とは表面の平滑性のみならずイオンビームを照射したことによる最表面層の結晶性や不純物の除去効果などが大きく関与するものと予想される。

〈3・2〉 電子放出特性と破壊電圧値との相関性について

前節では表面処理形態の違いにより電子放出に寄与する電極表面の状態が大きく変化していることが判明した。そこで真空絶縁破壊と電子放出特性との相関を明確にするため、各種表面処理電極の真空絶縁破壊試験を行った。図6において薄膜形成処理電極の破壊電圧値は20–25 kVの範囲に分布しており、破壊電圧値に大きな差は見られない。一方、鏡面処理電極の破壊電圧値は最低9 kVから最高22 kVの範囲で変化し、サンプルの個体差により破壊電圧値が大きく異なり、また薄膜形成処理に比べ破壊値が低いことが判る。

図6 各種表面処理サンプルの破壊電圧
Fig.6. Breakdown voltage of samples

ギャップ間に電圧が印加された場合の実効電界 E_p は、平均電界 E_0 （印加電圧／ギャップ長）と電界増倍係数 β の積（ βE_0 ）となり、 E_p は β に比例して高くなる。このことから薄膜形成処理に比べ高い β 値を有する鏡面処理電極では、実効電界が高くなるため電子放出電流値が多く、また破壊電圧が低くなったと予想される。これは Xu, Latham⁽¹⁴⁾らによって報告された高い β 値ほど破壊電圧値が低くなるという結果とも一致する。

しかし真空破壊のメカニズムとして提唱されている陰極加熱説や陽極加熱説では、いずれの場合も陰極からの電子放出が破壊に関与するとされている。つまりこれらのメカニズムによって破壊が進行するものとする、 β 値と破壊電圧との相関を検討するよりも、陰極からの電子放出電流値と破壊電圧との関係を検討することが本質的であると考えられる。ただし電子放出電流の計測と破壊電圧との同時計測は技術的に困難である。そこで図3で計測した電子放出電流（破壊前駆電流）の印加電圧依存性を利用して、任意の電子放出電流値に必要とされる電圧（電子放出電

圧）と破壊電圧値との相関について検討する。

図7はすべての処理電極の任意電子放出電流における電子放出電圧を示したものである。電子放出電流 10^{-16} Aにおいて、薄膜形成処理電極の電子放出電圧の平均は約7 kVである。これに対して鏡面処理電極は電子放出電圧が低くなり、薄膜形成処理よりも低電圧で 10^{-16} Aの電子放出が可能なことを示している。また放出電流を 10^{-12} Aに設定した場合、電子放出電圧はいずれの処理電極も増加し、電子の放出にはより高電圧が必要となる。さらに高電圧が印加された場合には、電子放出量は増加し、いずれ破壊に至るものと予想される。破壊時における電子放出電流値の電子放出電圧は破壊電圧値と一致するはずである。つまり各電流領域での電子放出電圧と破壊電圧値との相関が高くなれば、破壊時の電子放出電流値が予測できることになる。

図7 各電子放出量での電子放出電圧
Fig.7. The voltage which keeps optional amount of field electron emission current

この特性を利用して電子放出電圧の変化と破壊電圧値との関係を図8に示す。同図において放出電流値の設定値を 10^{-16} Aとした場合、電子放出電圧は5 kVから8 kV程度に分布しているものの、破壊電圧値との相関は低い。一方、設定電流値を 10^{-12} Aまで増加させた場合、絶縁破壊電圧と電子放出電圧が1：1に対応する特性（図中の点線）の傾きに近くなる。つまり電子放出が 10^{-12} Aまで増加すると、破壊電圧値との相関が高くなることが判る。

そこで電子放出電流値と絶縁破壊電圧値との相関係数算出し、破壊に必要な電子放出電流値を予測した。相関係数の算出しにはピアソンの積率相関係数（式1）を使用した。図9は各放出電流領域での相関係数であり、電流の増加とともに相関係数は高くなり 10^{-12} Aでは相関係数0.9となっている。この特性から推測すると 10^{-11} Aから 10^{-10} Aの電子放出において真空破壊に至るものと考えられる。磯野ら⁽¹¹⁾によるとコンディショニング放電なしの電極は、ピコアンメータによって計測される破壊前駆電流

図8 電子放出電圧と破壊電圧値との関係

Fig.8. Relation between the breakdown voltage and the voltage which keeps optional amount of field emission

図9 電子放出電流と真空破壊との相関

Fig.9. Relation between electron emission current and breakdown voltage

が観測されずに放電に至るとの報告があり、これはピコアンメータの計測限界付近の値である 10^{-11} A から 10^{-10} A にて真空破壊が生じていたものと考えられる。

このように真空絶縁破壊電圧は陰極からの電子放出量によって一義的に決定されることが予想された。このことから真空絶縁破壊は電子放出（破壊臨界電流）が 10^{-10} A 以上に至るとその確率が高くなる（90%以上）為、破壊電圧向上には破壊臨界電流以下の電子放出電圧を向上させることが重要となる。

4. 考察

＜4.1＞ 電子放出に及ぼす表面粗さの影響について 試料電極表面の機械的研磨や薄膜処理による β 値の変化は、表面の幾何学的状態の変化を反映しているものと考えられ

(a) 機械鏡面処理表面

(b) 薄膜形成処理表面

図10 AFM測定結果

Fig.10. AFM Images

る。そこでAFMによる試料電極表面の観測を行い、試料表面の粗さと電子放出との相関性について検討を行う。図10は観測結果の代表例であり(a)図は鏡面処理、(b)図は薄膜形成処理後のAFM画像である。鏡面処理を行った試料表面には研磨痕と見られる筋状の凹凸が見られ、また部分的に突起のような凹凸が観測されている。一方、薄膜形成処理を施したサンプルは突起状の凹凸が観測面全体に分布しており、各突起の高さは50nmに及んでいる。全試料表面を観測したところ鏡面処理後の試料表面は(a)図のように平滑化されているものの部分的に突起状の凹凸が見られ、薄膜形成処理ではいずれの試料も(b)図のような形態を示した。(ただしエメリー紙研磨電極についてはAFM観測不能であった)

Niedermann ら⁽¹⁵⁾の報告によれば、Nb陰極上の電子放出源を観測したところ、陰極表面に存在するC、S、Ti、Agなどの不純物粒子が電子放出源として確認されており、鏡面処理電極に見られる突起状の凹凸もこれらの不純物粒子に類似していることが判る。一方、薄膜形成処理に

見られる多くの突起は、膜形成時に照射されるイオンビームのスパッタ効果によるものと考えられる。つまり、本報告で用いた薄膜形成処理では膜堆積と同時にイオンビーム照射を行っているため、結晶粒界に存在する欠陥もしくは非晶質部が膜形成時に選択的にスパッタされることにより、結晶化度の高い部分のみが突起状に堆積されたものと考えられる^{(16)~(18)}。

これらの突起に電界が集中した場合、 $10^7 - 10^8 \text{ V/cm}$ を越える電界が印加されるとトンネル効果が生じ、突起一つ一つが電界電子放出源になりうる。したがって突起密度の高い薄膜形成処理電極には無数の電子放出源が存在することとなる。ところが薄膜形成処理では鏡面処理に比べ電子放出が起こりにくく、個体差によるばらつきが少い結果となっていた。これは突起密度が高くなるに従い電界集中が緩和され、突起先端の電界強度が見かけ上、平等電界に近づくものと推測される。つまり機械鏡面処理では平均粗さは低いものの、突起密度が疎であるために、そこに電界が集中することで電子放出が開始され、また破壊電圧も低くなったものと考えられる。

そこで図11のように高さ50nm、幅50nmの円錐状の突起を仮定し、この突起の間隔が可変された場合の電界増倍を二次元での有限要素法によってシミュレートする。このとき図中に示した様に突起の間隔とはAFM画像解析から求められた実際の突起密度から算出したものである。その結果、突起密度が表面処理により変化した場合、突起密度の低下に伴い電界増倍率は高くなる傾向にある。そして突起密度の最も低かった機械鏡面処理では平等電界に比べて1.8倍以上の電界増倍を示す。このことから金属表面に存在する突起の密度が異なれば電界増倍効果が異なり、電子放出特性や破壊電界強度に強く影響することが判る。また実際の突起の高さや幅は各サンプルごとに異

図11 有限要素法により算出した突起密度変化による電界増倍効果の変化

Fig.11. Relation between field enhancement effect calculated by finite element method (FEM) and density of protrusion

なるため、突起密度が異なれば電界増倍の差は更に大きくなるものと予想される。

従来より行われてきた金属表面の鏡面処理は、表面粗さを低下させ平滑な表面に仕上げる事が出来るものの、部分的に形成される突起には高電界が印加されてしまう。したがって鏡面処理は電界に対する部分的弱点部の形成につながり、電子放出特性の抑制や安定化には至らないということが明らかとなった。一方、突起密度を増加させた薄膜処理では突起による電界緩和効果、不純物粒子の低下、各突起の結晶化度向上などにより、電子放出が安定して行われることになる。このような薄膜処理表面はKobayashiら⁽¹⁹⁾によって報告されているコンディショニング放電500回後の陽極表面と類似している。つまり陰極と陽極の違いはあるものの、電極表面の突起密度の増大は電界集中を緩和させ、電子放出特性と破壊特性向上に大きく影響しているものと考えられる。

4・2> 電子放出開始から真空破壊に至るまでの電子放出源の挙動について 真空破壊時の実効電界強度は破壊電界（破壊電圧／ギャップ長）に β 値を乗算することで近似することができる。図12は各サンプルの破壊電界 E_b （破壊電圧／ギャップ長）、 β 値より算出された近似破壊電界強度 βE_b 、および有限要素法による電界増倍率から算出される破壊時の電界強度を示す。なお横軸は各サンプルの表面粗さ R_a を示している。破壊電圧をギャップ長で除した見かけ上の破壊電界 E_b は、 $2 \times 10^6 \text{ V/cm}$ となり、トンネル効果の生じる電界よりも遙かに小さい。これに対し突起による電界増倍を考慮した βE_b は 10^7 V/cm 以上となる。一方、有限要素法による電界増倍率と E_b との積は βE_b よりも一桁小さい値を示している。この差については、有限要素法が二次元近似であるため実際の電界増倍よりも低い値となったこと、破壊時の β 値はF-Nプロットより算出される β 値よりも小さいこと等によるものと考えられ、これらを考慮した場合、この差は小さくなるものと考えられる。

図中に示した実線は全サンプルの電子放出開始時の平均電界値 βE_s であり、いずれのサンプルも $5 \times 10^7 \text{ V/cm}$ 一定となっている。これは電界放出に必要な電界強度がいずれのサンプルもほぼ同じであることを示す。一方、 βE_b は印加電圧の増加に伴い βE_s よりも高電界となることが予想されるが、電子放出開始電界 βE_s と大きな差が見られないことが判る。このことは電子放出から破壊に至るまで突起先端における電界強度の変化が少ないことを示す。すなわちF-Nプロットの屈曲から判るように、 β 値は電子放出量とともに変化し、電子放出点もこれに伴い移り変わるものと考えられる。電子放出点を視覚的に観測した結果では、放出点は印加電圧および課電時間に対して著しく変化していることが確認されている⁽¹²⁾。このことから、破壊に至るまでの全電流領域において、電界強度が一定となる突起が選択的に電子放出を行っているものと考えられる。つまり、一つの放出点が破壊に至るまで

電子を放出し続けるのではなく、印加電圧の変化に対して電界強度を一定に保つような突起が電子の放出を行っていると考えられる。

図 12 絶縁破壊時の電界強度
Fig. 12. Field strength at breakdown

5. まとめ

各種表面処理を施した電極からの電子放出電流を測定したところ以下のことが明らかとなった。

- ・機械的鏡面処理を施した場合、電子放出開始電圧が低く、個体差による電流値のばらつきも大きい。一方、薄膜形成処理を施した場合、電子放出開始電圧が高電圧側へシフトし、個体差による差も少なく安定な電子放出特性を示す。
- ・電子放出特性と絶縁破壊電圧との相関を検討したところ、電子放出が 10^{-11} – 10^{-10} A に至ると破壊に至る確率が高くなることが予想された。
- ・薄膜形成処理は突起密度の非常に高い表面を形成することが可能であり、これにより電界集中の緩和が生じ、安定な電子放出特性を示すことが判った。一方、鏡面処理では平滑面に点在する突起に電界が集中することで電子放出源となり、また点在する突起が個体差によるばらつきの要因となっていた。
- ・電子放出開始から絶縁破壊に至るまで電子放出点の電界強度はほぼ一定に保たれており、印加電圧の増加に対して実効電界強度を一定とする突起から選択的に電子が放出されていると予想された。

以上の結果から、真空絶縁破壊の抑制および安定化には、表面を平滑にするよりも、均一かつ密度の高い突起を形成することが効果的であることが示された。これは従来のコンディショニング放電による放電抑制効果を説明するものであり、またプラズマを用いた薄膜形成処理が真空絶縁破壊の抑制に対して有効であることが示された。

(平成 10 年 5 月 25 日受付、平成 10 年 7 月 27 日再受付)

文 献

- (1) 「真空遮断器の大容量化とその基礎技術」, 電学技報, 422 (1992)
- (2) 「真空中での放電の利用とその抑制」, 電学技報, 586 (1996)
- (3) R. H. Fowler, L. Nordheim: "Electron Emission in Intense Electric Fields", Proc. Roy. Soc. (London) Ser., A, 119, 137 (1928)
- (4) 鶴田ら: 「高真空中のガス吸着と Micro Discharge 発生」, 電学論 A, 110, 6, 365 (1990)
- (5) 塩入ら: 「真空ギャップの絶縁破壊特性に及ぼす酸化の影響と真空加熱処理による表面の洗浄効果」, 電学論 B, 111, 7, 777 (1991)
- (6) 塩入ら: 「真空ギャップ間に金属粒子が存在する場合の絶縁破壊特性」, 電学論 B, 113, 4, 313 (1993)
- (7) 小林ら: 「超高真空中における無酸素銅電極の絶縁破壊特性」, 電学論 A, 14, 2, 91 (1994)
- (8) 鶴田ら: 「前駆電流測定による真空インパルス放電の検討」, 電学論 A, 18, 15 (1978)
- (9) 高橋ら: 「真空絶縁破壊と暗電流の関係」, 電学論 A, 46, 15 (1978)
- (10) 菅原ら: 「真空中の電圧-電流特性に及ぼす陰極表面状態の効果について」, 電学論 A, 108, 1, 15 (1988)
- (11) 磯野ら: 「電界放出電子と電極表面の微小突起との関係」, 電学論 A, 109, 9, 383 (1989)
- (12) 高崎ら: 「真空中の電界放出機構における電子放出源の挙動について」, 電学論 A, 114, 2, 84 (1994)
- (13) 江部明憲: 「イオンビーム支援蒸着法によるポリイミドフィルム上への銅薄膜形成における界面制御の研究」, 博士学位論文、大阪大学、(1998)
- (14) N S Xu: "Electrical and Spatial Correlations between Direct Current pre-breakdown Electron Emission Characteristics and Subsequent Breakdown Events" J. Phys. D: Appl. Phys., 27 (1994)
- (15) Ph. Niedermann: "Field Emission from Broad-area Niobium Cathode Effects of High-temperature treatment", J. Appl. Phys. 59, (3) 1 February (1986)
- (16) Y. Andoh: "Crystal Orientation Control by the IVD Method", Nuclear Inst. and Methods. B39 (1989)
- (17) W. Ensinger: "Growth of Thin Films with Preferential Crystallographic Orientation by Ion Bombardment during Deposition" Surface and Coating Tech. 65 (1994)
- (18) 後藤、清水: 「イオンスパッタによるコーン形成の1つの可能性」, 真空, 33, 3 (1990)

- (19) S.Kobayashi: "Vacuum Breakdown Strength of Vacuum-degassed Oxygen-free Copper Electrodes" IEEE Trans. Electrical Insulation Vol.28 No.4, August (1993)

式1 : ピアソンの積率相関係数

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / n}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / n}}$$

r_{xy} : x と y の間の相関係数 n : データ数

x_i, y_i : データ $\bar{x}, \bar{y}$: データ x_i, y_i の平均値

高橋 英治 (正員) 1969年7月28日生まれ。1992年3月

武蔵工業大学工学部電気電子工学科卒業。1994年3月同大学大学院工学研究科修士過程修了。同年日新電機(株)入社。主として、放電現象および薄膜形成処理技術に関する研究に従事。IEEE、表面技術協会会員。

江部 明憲 (非会員) 1965年10月20日生まれ。1988年3月

武蔵工業大学工学部電気電子工学科卒業。1998年3月大阪大学大学院工学研究科博士後期過程修了。1992年4月日新電機(株)入社。工学博士。主として、薄膜形成処理技術に関する研究に従事。応用物理学会会員。

緒方 潔 (非会員) 1954年4月3日生まれ。1978年3月

武蔵工業大学工学部電気電子工学科卒業。1984年3月同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年日新電機(株)入社。工学博士。主として、放電現象および薄膜形成処理技術に関する研究に従事。応用物理学会会員。

林 義記 (正員) 1947年10月14日生まれ。1970年3月

武蔵工業大学工学部電気工学科卒業。同年日新電機(株)入社。主として、高圧コンデンサ及び誘電体の研究開発、予測保全技術開発に従事。現在調相システム事業部部長。

真壁 大輔 (学生員) 1974年4月1日生まれ。1992年3月

武蔵工業大学工学部電気電子工学科卒業。1998年3月同大学大学院工学研究科修士課程修了。主として、気中放電現象に関する研究に従事。

曾禰 元隆 (正員) 1942年1月12日生まれ。1968年3月

武蔵工業大学大学院電気工学専攻修士課程修了。65年4月同大学電気電子工学科勤務。91年4月同教授、現在に至る。この間、84年アメリカ・クラークソン大学に客員研究員として一年間赴任。工学博士。主として、有機絶縁材料の絶縁破壊機構および気中放電現象に関する研究に従事。82年電気学会論文賞受賞。IEEE、電気情報通信学会会員。