

モールド絶縁における微小空気ギャップの絶縁特性

正員 東山 雅一* 正員 鈴木 勇人* 正員 広瀬 達也**
正員 中村 勇介** 正員 前田 照彦** 学生員 葉山 貴志***
正員 中村 修平*** 正員 梅村 時博*** 正員 小迫 雅裕****
正員 匹田 政幸****

Insulation Behavior of Small-air-gap for the Molded-insulation System

Masakazu Higashiyama*, Member, Hayato Suzuki*, Member, Tatsuya Hirose**, Member, Yusuke Nakamura**, Member, Teruhiko Maeda**, Member, Takashi Hayama***, Student Member, Shuhei Nakamura***, Member, Hiro Umemura***, Member, Masahiro Kozako****, Member, Masayuki Hikita****, Member

(2010年10月27日受付, 2011年2月10日再受付)

Insulation behavior of small-air-gap for the molded insulation system has been investigated by comparing the wellknown Paschen curve. Three electrode systems Metal-Gap-Metal(MGM), Metal-Gap-Insulator(MGI) and Insulator-Gap-Insulator(IGI) were employed as the test samples. It was found that V_s (breakdown voltage of the air gap)of the MGM were higher than the conventional Paschen curve, which can be attributed to the lacked initiating electron for V_s . This behavior was also obtained for MGI and IGI system. However, X-ray irradiation gives the remarkable effect on these V_s , resulting in the coincidence to the Paschen data. According to the references' data-review and some experimental data for Paschen minimum region, new fundamental and universal Paschen curve for the solid insulation system was proposed.

キーワード: 微小ギャップ、モールド変圧器、部分放電、初期電子、Paschenの法則、エポキシ樹脂

Keywords : small-air-gap, cast-resin transformer, partial discharge, initiating electron, Paschen's law, epoxy-resin

1. はじめに

モールド機器等の絶縁システムは、導体をエポキシ樹脂で注型した固体絶縁系で、基本的には空気と樹脂とのハイブリッド絶縁システムである。実際のモールド機器では、注型するエポキシ樹脂やシート絶縁材料、導体の絶縁皮膜等、さまざまな界面が存在し、これらの剥離や機器製造の注型プロセスにおけるボイドなどの可能性を考慮しなくてはならない。モールド機器の絶縁システ

ムでは、空気の絶縁破壊電圧(すなわち火花電圧)に関するPaschen則^{(1),(2)}が機器の絶縁設計における重要基本事項と位置づけられている。しかしながら、モールド機器の絶縁設計に有用なPaschen則に関する実用的なデータは比較的少なく、Meekら⁽²⁾のまとめたPaschen曲線を絶縁設計の基本としているのが実情であろう。

実際のモールド機器においては、Paschen則の圧力(P)とギャップ長(d)に対する値としてさまざまな可能性があり、モールド機器の一層の小型化、高信頼性を実現するには、より実器を考慮したPaschen則の検討が不可欠となってきた。また、固体絶縁中に存在するボイドでは放電の発生遅れ^{(3),(4)}があり、機器の品質管理の観点からもPaschenの法則^{(1)~(9)}を実用的な観点から詳しく検討する必要があることが分かって来た。

このような背景から、本論文では、まずPaschen則に関する文献^{(2)~(9)}を詳細にレビューし、実際のモールド機器の絶縁システムにどのように適用するべきかなどを検討した。本研究では、モールド絶縁システムに応用する目的で、金属-金属電極(MGM)、金属-樹脂コーティング電極(MGI)、そして樹脂-樹脂電極(IGI)を

* 東芝産業機器製造(株)
〒510-8521 三重県三重郡朝日町縄生 2121
Toshiba Industrial Products Manufacturing Co.
2121 Nao, Mie-Gum, Mie 510-8521
** (株)東芝
〒510-8521 三重県三重郡朝日町縄生 2121
Toshiba Co.
2121 Nao, Mie-Gum, Mie 510-8521
*** 三重大学
〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577
Mie University
1577 Kurimamachiya machi, Tsu 514-8507
**** 九州工業大学
〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1
Kyusyu Institute of Technology
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyusyu-city 804-8550

選定した。

まず, MGM電極, MGI電極, IGI電極のそれぞれについて広い「 $P \cdot d$ 」積の領域における放電開始電圧 (火花電圧) を求めて, 従来のPaschenデータとの比較検討を行った。さらに, モールド絶縁システムで重要な「放電遅れ」に関するさらなる知見を得るために, 本研究の実験電極系に対するX線照射効果についても検討した。

2. 実験方法

〈2・1〉 電極系 本実験に用いた電極系は, 金属電極 (MGM) 系, 金属-樹脂電極 (MGI) 系, そして樹脂-樹脂電極 (IGI) 系の3種類とした。これらの外観をFig.1に示した。上部電極は, 直径25mmの半球形状とし, 下部電極は直径50mmのディスク状とし, いずれも真鍮製で表面を鏡面仕上げとした。

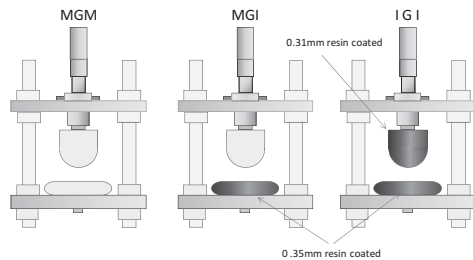


Fig. 1. Test electrodes for MGM, MGI, and IGI systems.

電極表面への樹脂コーティングは, 樹脂を薄く注型する専用の型を作成して実施した。コーティングする樹脂は実際のモールド機器に使用されているビスフェノール系で, 真空含浸注型法にて電極表面にこの樹脂を薄くコーティングした。電極にコーティングされた樹脂の厚さは, その電極を切断して顕微鏡にて観察して計測した結果, 下部電極が0.35mm(±0.01mm), 上部電極が0.31mm(±0.01mm)であった。

電極のギャップ長は0.1~7mmとし, MGMでは電極ホルダーに取り付けたマイクロメータとテスターにてゼロ点を確認して調整した。MGIおよびIGI電極系のギャップ長は, 電極ホルダーに取り付けたマイクロメータと読み取り顕微鏡を用いて適宜調整した。ギャップ長の調整精度は約0.01mmであった。

〈2・2〉 部分放電計測システム 本研究では, 3種類の電極系に対する空気の破壊電圧 (火花電圧) は各電極ギャップに対する部分放電の発生する電圧 (PDIV: partial discharge inception voltage) を計測して, 試料の絶縁破壊電圧(V_s)とした。

Fig.2は, 電極システムの部分放電特性を測定するブロック回路図を示した。試験用変圧器は, 3kV, 6kVお

よび30kVのモールド型計器用変圧器を利用し, 測定範囲に適した電圧クラスのものを選択した。本実験の電源は, エヌエフ回路ブロック (株) 製のWF1973信号発生器にて発生させた交流正弦波を, 同4502増幅器を用い増幅して得た。電極系への電圧の印加方法は, パーソナルコンピュータ (PC) を用いて, 電圧の印加と停止, 昇圧速度を自動制御し, エクセルファイルに測定結果を自動保存させるシステムを作製して行った。

各電極系の部分放電開始電圧 (PDIV) は, 日本計測 (株) 製のCD6部分放電計測システムを用い, 検出感度5pCにて行った。本実験では, 部分放電の開始はそのまま空隙ギャップの全路破壊であった。

何回かの予備実験を参考にし, Fig.2に示す電圧印加パターンにて部分放電開始電圧を求めた。まず昇圧速度60V/secにて0Vから昇圧を開始し, 最初の部分放電検出後, 直ちに電圧を最初の検出値の50%に低減する。次に, この50%値から, 同じ速度で再び電圧を昇圧・印加し, 以降の部分放電検出は直前の検出値の70%から繰り返し電圧を印加する方法とした。この測定手順では, PCで自動制御するために昇圧速度と実験シーケンスが同一になるので安定した部分放電の測定が可能となり, データのばらつきを最小限に抑えることが可能となる。

この一連の測定では, 直前の絶縁破壊における残存電子や解離イオンなどの影響が懸念されるが, 直前の絶縁破壊における残存電子や解離イオンなどの空間電荷の影響と思われる様な破壊電圧の顕著な変動は無かった。この詳細については, 続報にて報告する予定である。

測定データは12個とし, そのうちの最大値と最小値を除いた10個の平均値を求めて部分放電開始電圧 (PDIV), すなわち破壊電圧 (V_s) とした。この取り扱い, 異常に高い測定値と異常に低い測定値を除くことによる実験的精度の向上を目的として採用した。

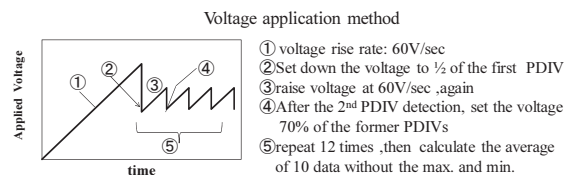
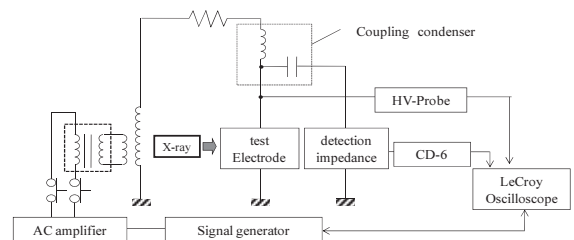


Fig. 2. Block diagram for partial discharge measurement.

X線照射効果の実験は、松定プレジジョン(株)製のX線モジュール XM10-60-05 を用いて、出力 5W、電極からの照射距離 25cm として実施した。また、実験に用いた電極の表面荒さは、(株)キーエンス製 VK-8710 走査型レーザ顕微鏡を用いて測定した。このときの測定精度は、水平及び垂直方向のいずれも 10nm であった。

3. Paschen 則のレビュー

モールド絶縁システムにおける部分放電の発生電圧は、この絶縁システムに対する空気の火花電圧 (V_s) と考えて良い。空気の火花電圧は、多くの研究者によりさまざまな条件で求められているが、実際のモールド機器の絶縁設計に適用するには、圧力、絶縁距離 (ギャップ長)、温度、複合絶縁構成、ポイドや剥離、電界集中、トリプルジャンクション⁽¹⁰⁾等さまざまな条件を考えねばならない。

Fig.3 は、これまでに報告されている数多くの文献⁽²⁻⁹⁾のデータを検討・整理して、モールド絶縁システムに重要と考えられる代表的なデータを整理してまとめた。文献のデータは、Hackam ら⁽⁴⁾と Schreier⁽⁹⁾が交流 (ac-peak)、そのほかは直流 (dc) による実験データである。ここでは、横軸を Paschen 則の圧力とギャップ長との積 $P \cdot d$ ($\text{Pa} \cdot \text{m}$) で整理した。本研究では、Paschen 曲線の最小値よりも「 $P \cdot d$ 」の大きい領域を Paschen ライト ($P \cdot d > 1$)、小さい領域を Paschen レフト ($P \cdot d < 1$)、最小値付近を Paschen ミニマム、さらに ($P \cdot d < 0.01$) を高真空領域と定義する。

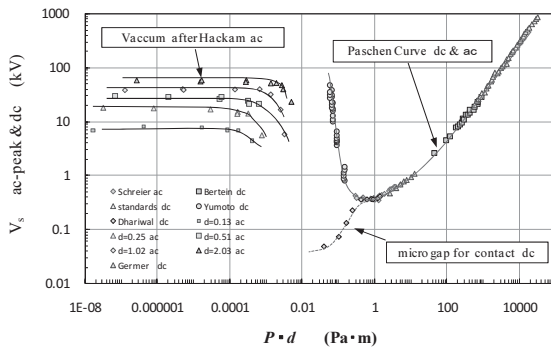


Fig. 3. Paschen curves of air for various $P \cdot d$ ⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾.

Paschen ミニマムおよびライトの領域は、Meek ら⁽²⁾のまとめた結果が幅広く参照されている。モールド機器の絶縁設計においても、この特性は基本絶縁思想に取り入れられているが、ギャップ長が数ミリ以下のライト領域からミニマム領域以下については、実用的にはいくつか課題がある。例えば、ギャップ長が 1 mm 程度以下に

なると、Paschen 曲線よりも火花電圧が高く測定されること⁽¹¹⁾、また前述した発生遅れ^{(3),(4)}等があり、これらをどのように絶縁設計に反映すべきが重要な課題となっている。

Paschen レフトでは、Yumoto ら⁽⁶⁾が示した「 $P \cdot d$ 」の減少とともに火花電圧が上昇する特性と、Torres ら⁽⁷⁾および Dhariwal ら⁽⁸⁾が大気圧の μm ギャップで報告している「 $P \cdot d$ 」の減少とともに火花電圧が減少する特性がある。この相反する特性は、機器の絶縁設計を行うに当たっては極めて重要な課題である。

Yumoto ら⁽⁶⁾の報告 (窒素ガス、電極径 168 ϕ 、ギャップ長 17-33mm, dc) では、特殊な凹形電極を用いて電極端部からのロングギャップ放電を避けることにより Schreier⁽⁹⁾の報告結果よりさらに低「 $P \cdot d$ 」領域への延長として Paschen レフトの特性が得られている。

Torres ら⁽⁷⁾および Dhariwal ら⁽⁸⁾の 15 μm 以下における火花電圧 (dc) の研究報告 (Fig.3: micro gap for contact で示すデータ, $0.04 < P \cdot d < 1.4$) では、電極からの電界電子放出および量子的トンネル効果による破壊電圧の著しい低下挙動を示すとしている。これらは、鏡面仕上げの電極を使用しているにもかかわらず、ギャップ長が短くなることにより電極の電界が高くなり、破壊メカニズムが「真空の放電メカニズム」と同様になるためと言われている。

次に、Hackam ら⁽⁴⁾が求めた高真空領域の特性 (電極径 13.5 mm の銅製ディスク、ギャップ長をパラメータ) は、圧力に依存しない特性である。この特性は、Paschen レフトよりもさらに低「 $P \cdot d$ 」の特性となり、Paschen レフトの特性とどのような関係となるかは議論すべき点である。

以上に示した幅広い「 $P \cdot d$ 」領域に関する絶縁破壊挙動を明確にすることは、モールド機器の絶縁設計の基本思想を明確にするために極めて重要である。本研究では、 $0.2 < P \cdot d < 100$ ($\text{Pa} \cdot \text{m}$) の領域における空気の絶縁破壊電圧 V_s を部分放電開始電圧として求め、以上に説明した従来データと比較検討する。

4. 実験結果と考察

<4-1> MGM, MGI, IGI 電極系の Paschen 曲線

Fig.4 は、MGM 電極系における部分放電開始電圧と「 $P \cdot d$ 」との関係を示す。同図には、Fig.3 に示した Paschen の文献データも記載した。ここでは、各実験条件 (圧力とギャップ長の異なる 54 種類の組み合わせ) に対する測定値の平均、最大、最小を示した (ここでは、前述した 10 個の測定データから求めた)。今回実験した 54 の条件では、最初の絶縁破壊値が高い値とな

る確率はおよそ 28%であった。特定の圧力もしくはギャップ長でこの初期値が必ず高い破壊値となる傾向は認められなかった。この現象は、以下に示す MGI 電極系および IGI 電極系のいずれも同様であり、最初の破壊値が必ず高くなる確率はそれぞれ全実験条件の約 22%, 約 25%あった。

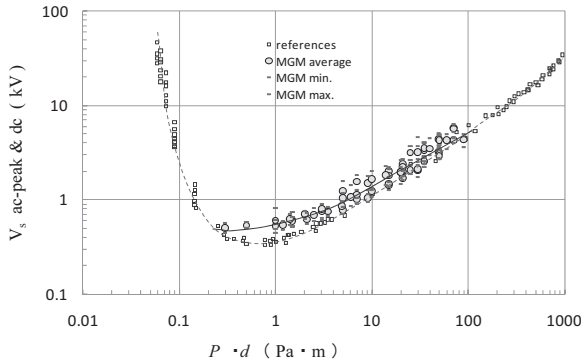


Fig. 4. Breakdown behavior of MGM electrode systems.

Fig.4 から明らかなように、MGM 電極系の領域「 $0.5 < P \cdot d < 10$ 」では、空気の V_s の平均値 (図中に実線で示した) はいずれも Paschen 曲線よりも高い値であった。空気の V_s が従来の Paschen 曲線よりも高くなる現象は、僅かではあるが「 $P \cdot d$ 」の小さいほど顕著になる傾向があり、この結果は花井ら⁽¹¹⁾、Mansour ら⁽¹²⁾ の SF₆ ガス微小ギャップに関する報告と一致し、初期電子の不足^{(2),(11),(12)}によると思われる。

Fig.5 は、MGI 電極系における部分放電開始電圧と「 $P \cdot d$ 」との関係を示す。ここで、ギャップ長 d は、コーティングした 0.35 mm 厚さの樹脂層を含まない、空隙のギャップとし、 V_s も空気 (比誘電率 = 1.0) 層と樹脂 (比誘電率 = 4.1) 層の容量分担として空隙の分担電圧として求めた。MGI 電極系では、平均値が MGM 電極系よりも従来の Paschen 曲線に近づく傾向であり、特に領域「 $10 < P \cdot d < 100$ 」では、Paschen 曲線とほぼ一致している。一方、最小値は Paschen 曲線よりも低くなる傾向を示した。

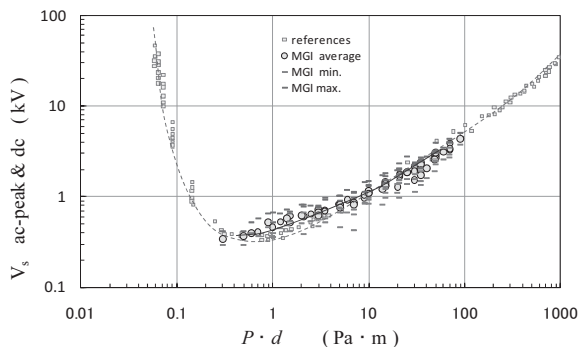


Fig. 5. Breakdown behavior of MGI electrode systems.

Fig. 6 は、IGI 電極系について MGI 電極系と同様に部分放電開始電圧と「 $P \cdot d$ 」との関係を、平均値、最大値、最小値とともに示した。ここでも、ギャップ長 d は、樹脂厚さを含まない空隙のギャップとし、 V_s も空気層と樹脂層の容量分担から空隙の分担電圧として求めた。IGI 電極系においても、MGI 電極系とほぼ同様の結果が得られたが、その平均値は、Meek ら⁽²⁾のまとめた Paschen 曲線により近づく傾向であった。

以上に示したように、ギャップ長が比較的短い領域の空気の火花電圧 V_s は、従来報告されている Paschen 曲線よりも高い傾向であることが明らかになった。その傾向は、「MGM 電極系 > MGI 電極系 > IGI 電極系 \geq 従来の Paschen 曲線」であることが確かめられた。

<4-2> 空気の火花電圧 V_s に対する X 線照射効果

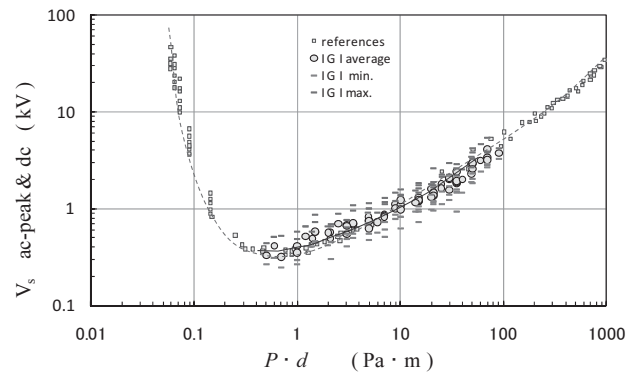


Fig.6. Breakdown behavior of IGI electrode systems.

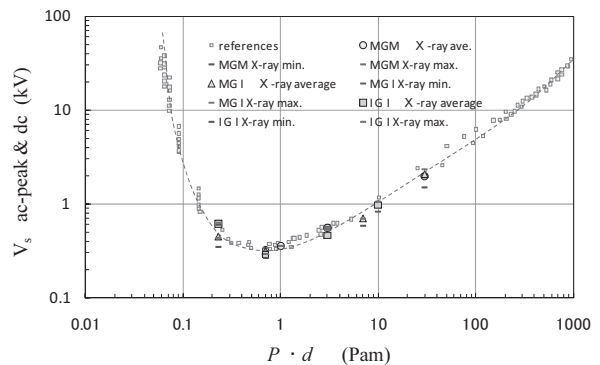


Fig.7. X-ray irradiation effect on Breakdown behavior.

各電極系に対する X 線照射効果について、MGM 電極系は $0.3 < P \cdot d < 30$ の 7 条件、MGI 電極系は $0.23 < P \cdot d < 30$ の 6 条件、IGI 電極系は $0.23 < P \cdot d < 10$ の 4 条件として実施した。ギャップ長は、0.1 mm 及び 1 mm を基本とし、X 線の照射は電極から 25cm 離れた位置から、出力 5W の強さで行った。Fig. 7 に測定結果を従来の Paschen 曲線とともに示した。

同図から明らかなように、X 線の照射により最大値

と最小値の差が小さくなり、且つ測定値がよく知られている Meek ら⁽²⁾のまとめた Paschen 曲線とほぼ一致することが明確になった。この事実、MGM, MGI, IGI いずれの電極系に於いても同様であり、電極系による違いは認められなかった。

従って、本実験にて得られた「破壊電圧 V_s 」が高くなる原因は、ギャップ空間の初期電子の不足⁽²⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾によると判断される。また、「高い破壊電圧 V_s 」の傾向が「MGM 電極系>MGI 電極系>IGI 電極系≧Paschen 曲線」であることは、部分放電による電荷がエポキシ樹脂の表面に堆積することによる可能性⁽¹¹⁾を示唆すると思われるが、現在さらに検討中であり、別途報告する計画である。

〈4-3〉 Paschen ミニマム近傍の検討 大気圧のマイクロギャップについて求めた報告 (Fig.3) では、Paschen ミニマム近傍からレフトにかけて「 $P \cdot d$ 」の低下とともに V_s が著しく低下し、電極表面からの電界電子放出によると説明されている^{(7),(8)}。電界電子放出は、F-N (Fowler - Nordheim)理論から 3MV/mm 以上の電極表面電界が必要であるが、実際にはこの二桁以上小さい電界で生ずるとも報告されている⁽¹³⁾。ちなみに、Germer⁽⁵⁾によれば電界電子放出は 40kV/mm 以上と言われている。そこで、本実験における電極の表面電界 E_s を次式にて算出し電界電子放出の可能性について検討した⁽¹⁴⁾。

$$E_s = \beta \times \alpha \times (V/d) \dots \dots \dots (1)$$

$$\beta = 2 + h/r \dots \dots \dots (2)$$

ここで β は電極の表面荒さなどによる電界増倍係数、 α は電極の幾何学的形状に依存する電界不平等率、 V は印加電圧、 d はギャップ長、 h は電極表面の微小突起の高さ、 r はこの微小突起の半径である。

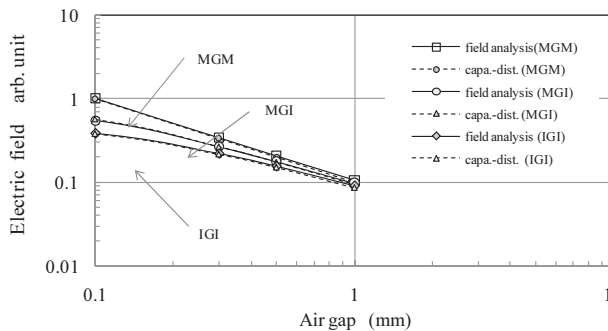


Fig. 8. Electric field for MGI as a function of air gap distance

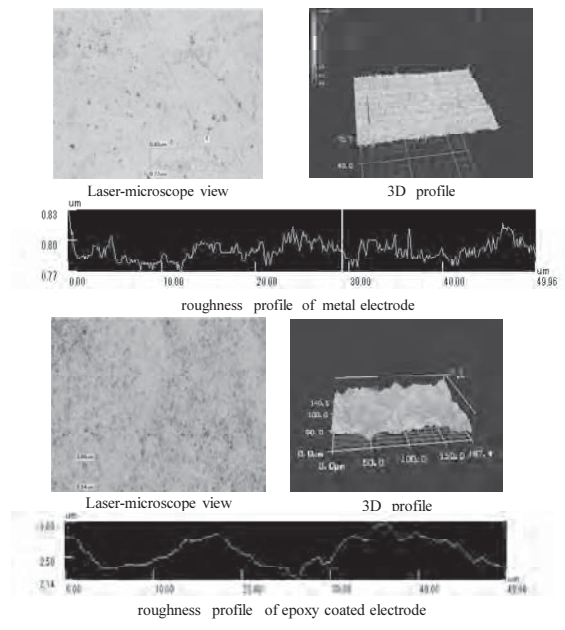


Fig. 9. Surface profile of metal- and epoxy-coated-electrodes.

電界不平等率 α を検討するため、本実験の電極系のギャップの空気層の電界を求め、静電容量分担として求まる平均電界(V/d)と併せて Fig. 8 に示した。同図より、電界解析結果と平均電界はほぼ一致し、本実験のギャップ長においては、電界不平等率 α がほぼ 1 であることを確認できた。

次に、電界増倍係数 β を検討するために本実験に用いた真鍮電極及びエポキシ樹脂をコーティングした電極の表面粗さを測定し、その結果を Fig. 9 に示した。

表面荒さ R_a は、真鍮電極で $R_a = 0.01 \sim 0.03 \mu\text{m}$ 、エポキシ樹脂をコーティングした電極で $R_a = 0.19 \sim 0.37 \mu\text{m}$ であった。また、電極表面の微小突起の高さ h 、微小突起の半径 r は、真鍮電極で $h = 0.03 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 、 $r = 0.05 \sim 3 \mu\text{m}$ 、樹脂をコーティングした電極で $h = 0.3 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 、 $r = 3 \sim 10 \mu\text{m}$ であった。これらの測定結果から、(2)式より本実験の電極の β は約 2~2.4 と近似でき電極表面の電界は高々 19 k V/mm 程度と見積もることが出来る。以上から、本実験の範囲では、電界電子放出は考えられないことが分かった。

5. まとめ

本論文では、Paschen則に関する文献⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾を詳細にレビューし、MGM, MGI, IGI電極系の「 $0.2 < P \cdot d < 100$ 」領域における放電開始電圧 (火花電圧) を求めて、実用的なモールド絶縁の観点から検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 部分放電開始電圧として求めた微小ギャップの空

気の火花電圧 V_s の平均値は, 従来のPaschen曲線よりも高くなり「MGM電極系>MGI電極系> IGI電極系 \geq Paschen曲線」の傾向となることがわかった。

- (2) X線照射効果から, 微小ギャップの空気の火花電圧 V_s の高い原因がギャップ内の初期電子の不足によることを検証した。さらに, X線照射によりいずれの電極系でも従来の文献値(直流)に示されている火花電圧 V_s とほぼ一致することが確認された。

今後, Paschen レフト, ミニマム, ライト及び遷移領

域における各「 $P \cdot d$ 」領域の破壊メカニズムに関して別途報告する予定である。

最後に, X線照射効果の実験において, 九州工業大学 匹田研究室の高田一氏および林昌幸氏に多大なご協力を頂いたのでここに謝意を表します。

文 献

- (1) F. Paschen: "Tuber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei verschiedenen drunken erforderliche Potentialdifferenz", Weid Ann. Physik und Chemie vol. 37, pp. 69-81 (1889)
- (2) J.M. Meek and J. D. Craggs: "Electrical breakdown of gases", Oxford Univ. press, pp. 533-653 (1989)
- (3) T. Mori and M. Tan: "Partial discharge property in a spherical void", Trans IEEJ, Vol. 104, No. 11, pp. 629-634 (1984) (in Japanese)
森内, 丹: 「球状ボイド内における放電時間遅れ」, 電学論誌, Vol. 104, 11号, pp. 17-22 (1981)
- (4) R. Hackam and L. Altchek: "ac (50Hz) and dc electrical breakdown of vacuum gaps and with variation of air pressure in the range 10-9-10-2 torr using OFHC copper, nickel, aluminum, and niobium parallel planar electrode", J. Applied Physics, Vol. 46, No. 2, pp. 627-636 (1975)
- (5) L. H. Germer: "Electrical breakdown between lose electrodes in air", J. Applied Physics, Vol. 30, No. 1, pp. 46-51 (1959)
- (6) M. Yumoto, N. Yamaoka and T. Sakai: "Current-voltage characteristics of nitrogen-gas discharge to the left of the Paschen minimum", J. Applied Physics, Vol. 22, pp. 1856-1861 (1989)
- (7) J. M. Torres and R. S. Dhariwal: "Electric field breakdown at micrometer separation", Nanotechnology, Vol. 10, pp. 102-107 (1999)
- (8) R. S. Dhariwal and, J.-M. Toress and M .P. Y. Desmulliez : IEEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 147, No. 5, pp. 261-265, (2000)
- (9) S. Schreier: "On the breakdown voltage of some electronegative gases at low pressure", IEEE Trans PAS-83, pp. 468-471 (1964)
- (10) T. Takuma, T. Kouno and H. Matsuda: "Field behavior near singular points in composite dielectric arrangement", IEEE Trans. EI Vol. EI-13, No. 6, pp. 426-435 (1978)
- (11) 花井: 「SF₆ ガス絶縁変圧器の電気絶縁性能向上に関する研究」, 学位論文 pp 25-49 (2008年)
- (12) D. A. Mansour, H. Kojima, N. Hayakawa, F. Endo and H. Okubo: "Surface charge accumulation and partial discharge activity for small gaps of electrode/epoxy interface in SF₆ gas", IEEE Trans. DEI Vol. 16, No. 4, pp. 1150-1157 (2009)
- (13) 電気学会: 「放電ハンドブック」, pp. 302-303, 上巻 (1998)
- (14) Y. Inagawa, F. Miyazaki, K. Kato, M. Sakaki, H. Ichikawa and H. Okubo: "Effect of surface roughness on conditioning effect under non-uniform electric field in vacuum", DEI-04-25 (2004) (in Japanese)
稲川, 宮崎, 加藤, 榎, 市川, 大久保: 「真空中不平等電界下コンディショニングの電極表面粗さ依存性」, 放電, 誘電・絶縁材料, 高電圧合同研究会, DEI-04-25 (2004)