

沿面放電方式アイオナイザー素子の物性評価

西澤 理*, 中村 裕之, 山田 憲二, 松嶋 茂憲, 小畑 賢次

Characteristic Feature Evaluation of the New Type Dielectric Discharge Ionizer

Satoshi NISHIZAWA, Hiroyuki NAKAMURA, Kenji YAMADA, Shigenori MATSUSHIMA, Kenji OBATA

Abstract

A new type of ionizer discharge element controlling static charges in clean-room has been developed. Both their surface chemical contaminations and their electric features were investigated with SEM/EDX, by complex impedance measurement, respectively. Advantages of this element, has a high voltage electrode and back electrode in each surface of a thin mica sheet strip, are easier maintenance, more uniform discharge area and the relatively longer life than the usual type using corona needles. According to the chemical surface analysis, the process of manufacturing was modified and the life of this element becomes about 5 times longer than a usual corona type ionizer. The structure of a discharge electrode affected to a starting voltage of dielectric discharge with micro plasma. The element with a structure modified electrode shows a good electric property for being longer life and low voltage operation.

Keywords:: dielectric discharge, ionizer, mica, multiple material, impedance spectroscopy analysis, micro plasma

1. 緒言

CPU・メモリなどの半導体素子製造から、太陽電池や液晶パネル等の応用製品を製造する半導体関連分野において、製造工程での静電気除去は喫緊の課題となっている。現在よく利用されている方法は、針状高電圧電極を使うコロナ放電を利用した除電器であるが、大面積での一様性を得るために、放電部と製品との間に一定の距離が必要であり、大掛かりな装置となっている^(1,2)。そこで、放電素子を、面上の放電形態の素子とすることで、一様性を確保し、小型軽便化を図り、また、電極部が平面状である為、塵埃等の汚染に対してのメンテナンスの簡便化を図ることが期待されている。

既にこのような素子は開発されており、図1に除電器に用いられている沿面放電方式放電素子の一例を示す⁽³⁾。薄い人工マイカシートを誘電体として、シートの片面に放電電極を、裏面に誘導電極を設け、高周波の高電圧を印加することで、図2に示すようなマイクロプラズマを生成している⁽⁴⁾。このような素子は、通常用いられている針状コロナ放電素子と比べメンテナンス性において優位にあるが、メンテナンスフリーでの運転時間においても優位となるための長寿命化には、複合素材であるため、沿面マイクロ放電現象を解明し、最適の形態にすることが大きな課題である⁽⁵⁻⁹⁾。また、放電による劣化⁽¹⁰⁻¹²⁾のメカニズムを理解することで、劣化の加速度試験法の確立が可能となる。

本研究では、この新しい形態の面状放電素子の放電メカニズムを、SEM等を用いた形態学、蛍光X線等による生成物の化学分析、素子の複素インピーダンス測定から解明し、更に、劣化評価のための加速度試験法を検討するものである。

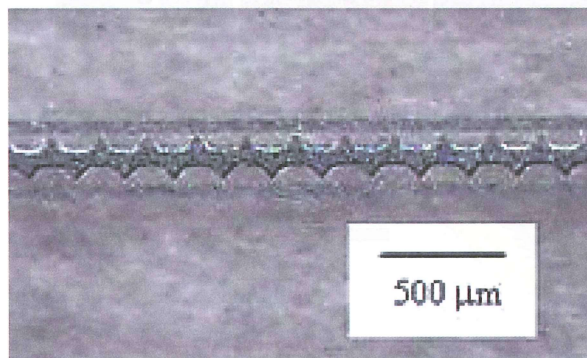


図1. 沿面放電方式放電素子の一例

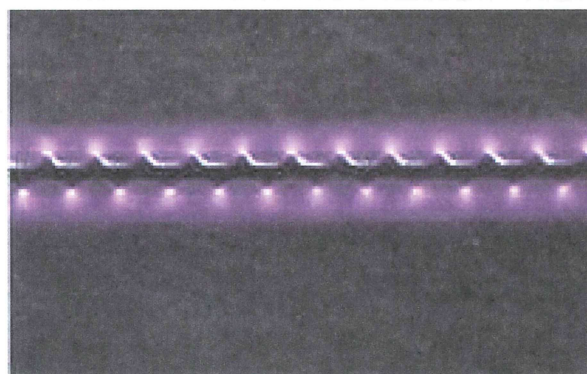


図2. 沿面放電方式放電素子での放電の様子

* 北九州工業高等専門学校専攻科物質化学工学専攻2年

2. 実験方法

2. 1 沿面放電素子の電極構造

本実験に使用した多種の複合素材の相違点は、接続端子部電極と放電部電極の構造の違いである。

標準電極とされているA及びその電極構造変形型であるB、Cを図3に示す。種々の実験には、この3種の放電部電極の構造を、数ミクロン単位で微細に変化させた素子も使用、測定している。また、この3種とは別に、A構造の接続端子部を変形させたものが図4である。これらの複合素材は、図5に示す断面図のように、2つの電極が、マイカシートを挟み込むような構造をしている。

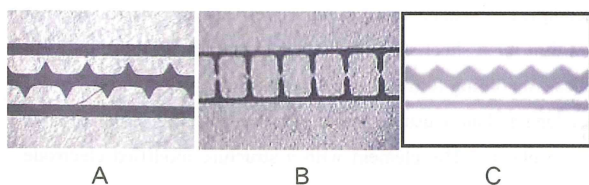


図3. 放電部電極の構造の違い

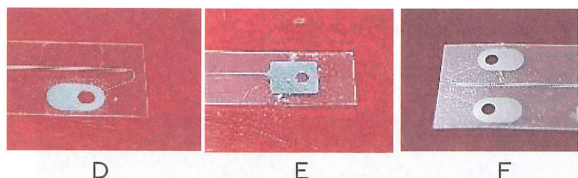


図4. 接続端子部の構造の違い

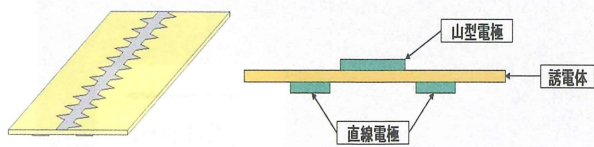


図5. 放電素子の模式断面図

2. 1. 1 最大印加電圧の測定

放電素子の特性を調査するための条件を得るため、接続端子や接続部の大面積部からの放電、素子の表裏の二極間の外に放電してしまう電圧を、その素子の最大印加電圧とし、図4のような接続部の電極構造の違った3種D、E、Fについて測定した。

2. 1. 2 電極構造の変化による放電状態への影響

図3に示すような放電部電極の構造を変えた素子A、B、Cの3種の放電状態を観察した。

2. 2 EDX/SEMによる放電素子の視覚的・化学的解析

EDXとSEMは、九州工業大学機器分析センターの装置を使用した。未使用状態の放電素子のSEM画像による視覚的な解析と、EDXによる化学的な元素分析を行った。

2. 3 複素インピーダンス測定

周波数特性分析器（エヌエフ回路設計ブロック製 FRA5096）を用いて放電素子の複素インピーダンス測定を行った。まず、微細構造の変化を含む電極構造の変化による複素インピーダンス

スペクトルへの影響を調べ、次に、本研究室で考案した複素インピーダンスモデルでフィッティングし、回路定数を特定した。

2. 4 除電特性評価測定

帯電装置に電圧を印加して帯電させた後、放電素子を動作させ除電を行い、帯電電圧の減少速度を測定することにより除電特性を測定した。以下に手順を示す。

①帯電装置の電圧印加用としてDC電源（㈱リソー応用工学製 PH-7B）を用い、図1に示すような帯電装置に500VのDC電圧を印加した。

②放電素子の高圧電源として、AC100Vをスライダックとネオントランスで数kVに昇圧し放電素子に印加した。放電電流は1.0mAに固定して、放電を発生させた。

③静電圧測定器（㈱シンド静電気製 STATIRON-DZ3）、デジタルマルチメータ（Agilent社製 6 1/2 Digit multi-meter）、デジタルオシロスコープ（Tektronix社製 TDS2002）を接続し、放電素子から約5cm 離して設置した帯電装置の電圧値及び除電器の電流値の時間変化を測定した。また、種々の測定もこれらの機器を用いた。

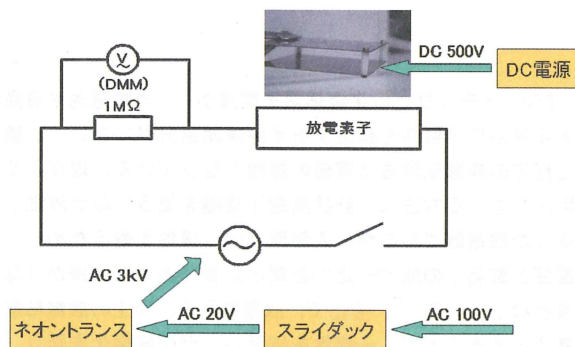


図6. 除電特性評価試験回路

3. 測定結果

3. 1 沿面放電素子

3. 1. 1 最大印加電圧の測定

接続端子部の電極構造の違う素子D、E、Fについて、外部への放電が生じずマイクロプラズマ放電が安定に発生する最大の印加電圧を測定した。素子D、E、Fの最大印加電圧はそれぞれ4.47kV、7.68kV、4.58kVであり、素子DおよびFは、接続部と放電部が近く、その間で外周部経由の放電が、比較的低電圧でも起こりやすくなっていることがわかった。また、この2つの素子は、接続部電極がカーブしている部分において、表側から裏側への外周部での放電が確認された。

素子Eでは接続部と放電部の距離があるために、その間では放電せず、比較的大きな電圧を印加した際に、放電部電極において、表側の電極から裏側の電極へ向かって外周部放電が起こった。

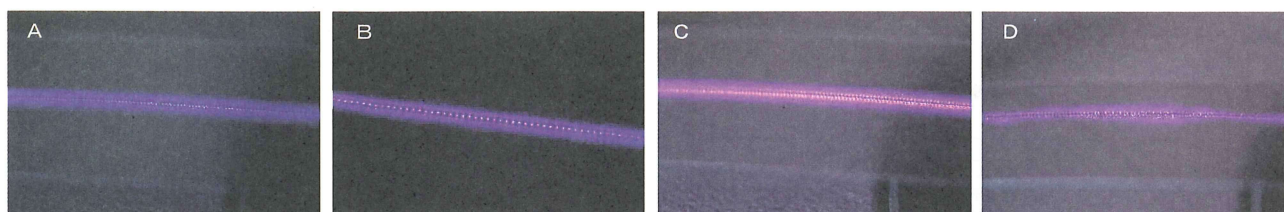


図 7. 電極構造の変化による放電現象の変化

(A) 電極構造 A (B) 電極構造 B (C) 電極構造 C (D) 使用後劣化した電極構造 A

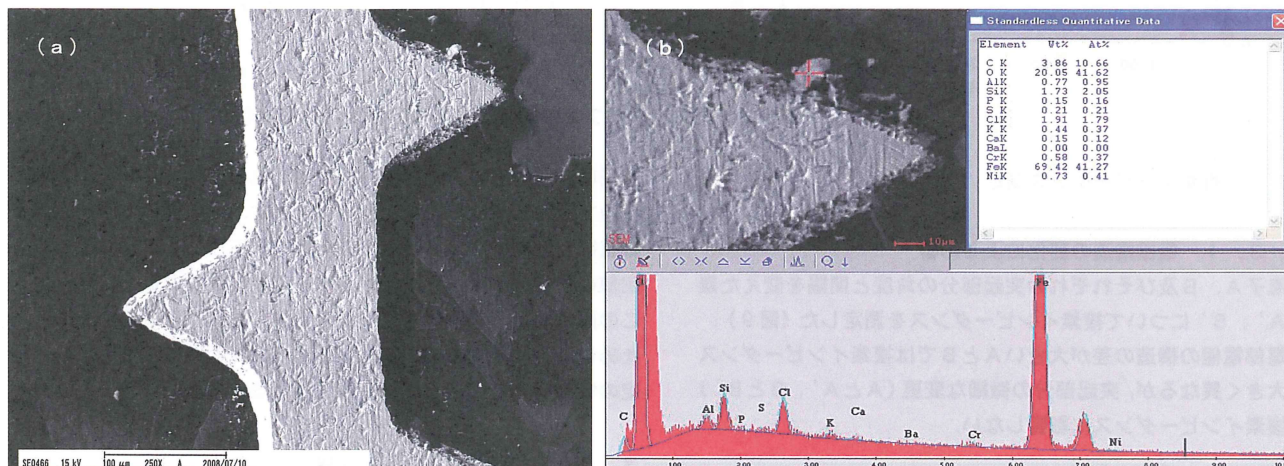


図 8. EDX/SEM解析結果

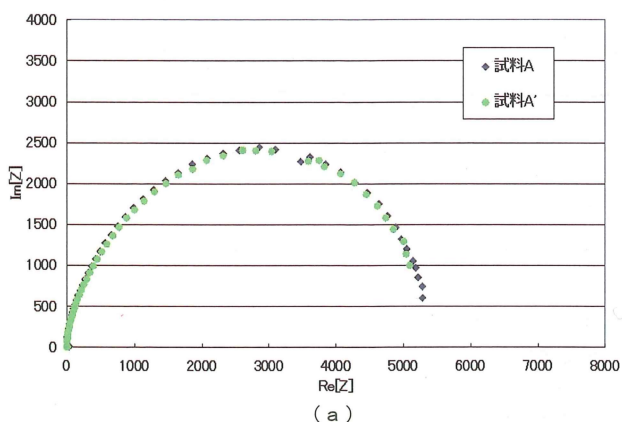
(a) 電極構造 A の SEM 画像 (b) 破片の元素解析結果

3. 1. 2 電極構造の変化による放電状態への影響

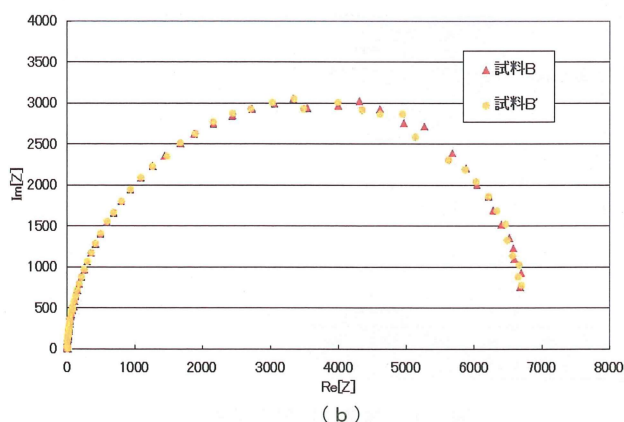
放電部電極の突起構造を変化させた素子 A, B, C および使用後劣化した構造 A の放電の様子を図 7 に示す。電極構造の変化によってプラズマ発光の強さ、形状分布が変わっている。また、構造 A で使用後試料はプラズマ発生がまばらであり、劣化している。

3. 2 EDX/SEM解析結果

電極構造 A の未使用品を用いた SEM 観察画像、及び EDX



(a)



(b)

図 9. 電極構造の複素インピーダンス測定結果

(a) 放電素子 A と A の微細構造変更品 A'

(b) 放電素子 B と B の微細構造変更品 B'

による表面元素分析の結果を図 8 に示す。これより、電極部の尖った部分の周辺に電極のエッチング破片があることや素子を構成する元素以外の成分である塩素が含まれていることがわかった。

電極バリ部の破片を元素分析したところ、鉄と酸素の割合が高かった為、酸化鉄であると考えられる。また、放電素子の構成元素でない塩素が検出されたことから、これはエッチング液の残渣と考えられる。

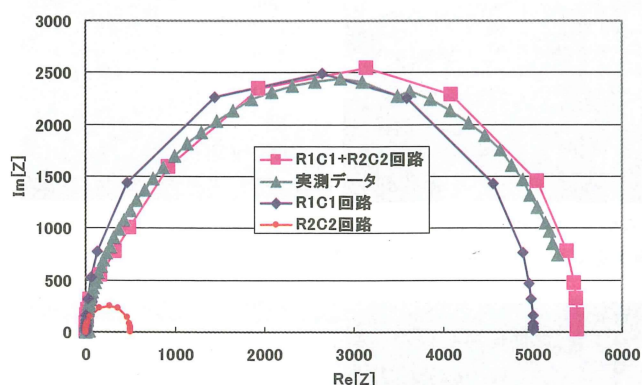


図 10. 複素インピーダンスモデルによるフィッティング結果と推測される回路

3. 3 複素インピーダンス測定

3. 3. 1 電極構造の変化による影響

素子 A, B 及びそれぞれの突起部分の角度と間隔を変えた素子 A', B' について複素インピーダンスを測定した(図 9)。放電部電極の構造の差が大きい A と B では複素インピーダンスも大きく異なるが, 突起部分の微細な変更(A と A', B と B') は複素インピーダンスに影響しない。

3. 3. 2 複素インピーダンスモデルによるフィッティング

電極構造 A の実測データを用い, 当研究室で考案した複素インピーダンスモデルによって, フィッティングによる回路決定を行った。図 10 にその結果と回路のモデルを示す。

通常, 単一的な回路であれば, インピーダンススペクトルは正半円である。インピーダンス測定結果が, 綺麗な半円状ではなく, 横長の半楕円形になっていることから, 単一の RC 並列回路ではなく, 性質の似た並列回路が, 幾つか組み合わさった図 10 に示すような複合的な回路であると考えられ, これを測定データとフィッティングすることで, マイカ誘電体, 両面の電極などの複合構成材の効果を回路表現として解析する手掛かりを得た。

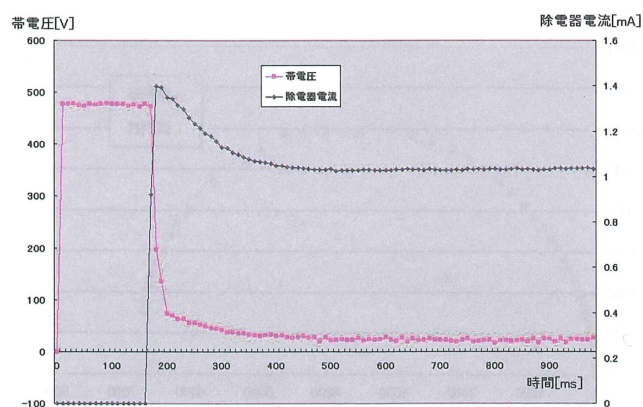
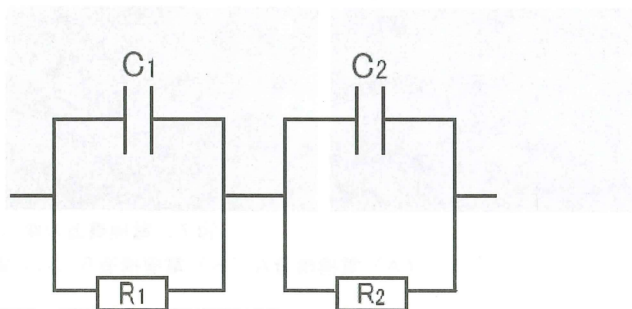


図 11. 除電特性評価試験

3. 4 除電特性評価試験

3. 4. 1 除電特性評価試験

図 6 の回路で除電特性を評価した。図 11 に示すように, 除



電器は放電開始直後に過渡的な電流が流れ, 約 110ms の時定数で減少し設定電流値に近づく。一方, 帯電電圧は, 除電開始直後から約 13ms の速い時定数で低下し, 除電器電流が設定値になる頃に帯電電圧値もほぼ一定値になっている。従ってこの除電器は十分な性能を有すると言えるが, 除電特性評価のためには, 放電開始直後の過渡電流が流れている状態でなく一定の電流が流れている状態で評価したほうが良い。

3. 4. 2 隔壁を導入した試験法

図 11 の結果を踏まえ, 一時的に絶縁素材である紙(大王製紙製 厚さ 96.5μm)を隔壁として帯電装置と除電器の間に入れ, 帯電電圧と除電器電流を安定状態にした後で, この隔壁を取り外し, 除電を行なった。

回路に隔壁を入れた除電測定模式図が図 12 であり, その除電特性評価試験の結果が図 13 である。

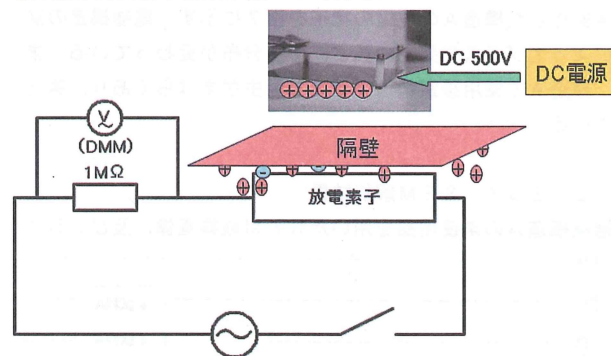


図 12. 隔壁を導入した回路モデル

実験手順は、

- ①隔壁を入れた状態で除電器を放電させ, マイクロプラズマを発生した。
 - ②隔壁を取り除き, 除電を開始した。
 - ③帯電電圧が 0V 付近に収束したため, 除電が完了したとみなし, 1500ms 付近で除電器の電流を止めた。
- この除電器では帯電電圧を完全に 0V にすることはできず, 10~20V の電圧が帯電装置に残留していることがわかった。また, 帯電電圧は除電開始後約 29ms の時定数で低下しているのが分かった。本測定では, サンプル周期が 20ms のデータを取得している。このため除電特性をさらに高精度に調べるには測

定法の改善が必要と思われる。

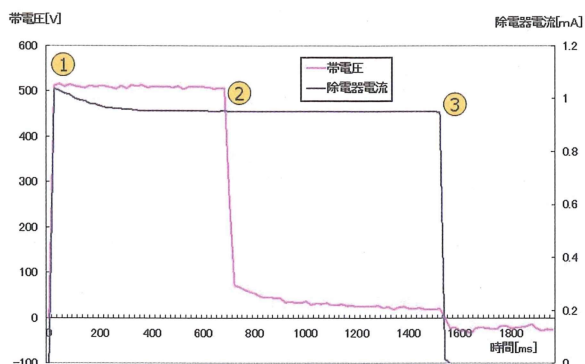


図13. 隔壁を用いた除電特性評価試験
① 電圧印加 ② 除電開始 ③ 測定終了

3. 4. 3 印加電圧と構造による除電特性への影響

まず、各放電素子における放電開始電圧を測定した。同一の放電素子で、数回様々な電圧で測定したが、ばらつきが多く、放電開始電圧は一定しなかった。このため、その素子が放電した電圧の最低値を放電開始電圧とした。電極構造A, B, Cの放電開始電圧はそれぞれ2.3, 2.7, 1.5 kVであった。

次に、劣化の加速度試験の基礎データとして、各放電素子における除電特性評価試験を次の2パターンで測定した。

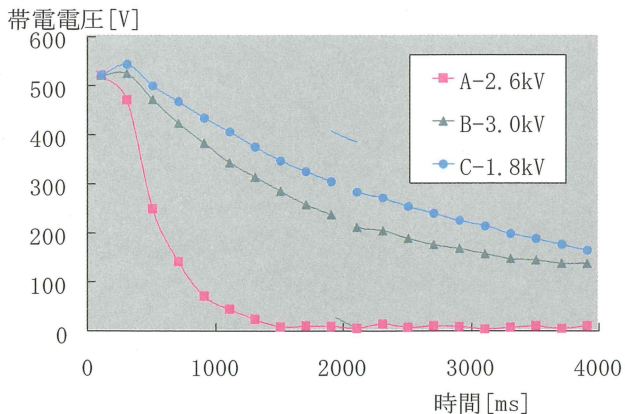
(1) 放電開始電圧より300V高い電圧を印加した場合

(2) 放電開始電圧に関わらず、全ての素子に一定の電圧を印加した場合

図14の(1)および(2)に結果を示す。

これらの実験より、構造の違う3種の放電素子の特徴は次のように挙げられる。

Aの素子は、2.3~3.0 kVの間で安定的で高い除電能力を持っていた。Bの素子は、比較的低い電圧では放電できず、ほとんど除電能力を示さないが、高電圧になるほど除電能力が顕著になった。しかし、除電能力は3つの素子の中で一番低かった。



Cの素子は、高電圧では電極の外周部への放電が起こってしまうが、低電圧で放電を開始することができ、また同一電圧をかけた際には、Aと同程度の高い除電能力を有していた。低電圧で除電を行い素子に負荷をかけないことが、放電素子の劣化を防ぐ1つの方法であるため、Cの素子が一番優れていると考えられる。

4. 結論

接続端子部電極の構造の違いは、電極外部への放電が起こる電圧に影響を与えた。最も高い電圧まで耐えうる電極構造は、図4のE構造であり、その値は7.68 kVであった。

EDX/SEMを用いた測定では、放電部電極の微細構造を観察し、元素分析により酸化鉄や塩素を発見したことで、電極を作製する際の金属エッチングの洗浄不良であると断定できた。この結果から、製造工程を改良することで、素子の製造品質、寿命が改善された。

複素インピーダンス測定において、電極構造の違いによりインピーダンススペクトルが大きく変化することがわかった。また、それぞれの素子の電極構造を微細に変化させても、インピーダンススペクトルには殆ど影響しないこともわかった。また複素インピーダンスモデルを実測データにフィッティングさせることにより、放電素子を複数のRC並列回路からなる素子として解析できることが分かった。

除電特性評価試験において、隔壁を導入し、電圧印加および放電開始直後の過渡現象の影響を防ぐことで安定して正確な測定を行うことができるようになった。

放電部電極の構造の違いが、放電開始電圧や除電速度、マイクロプラズマ放電の放電様式、更には除電特性に大きく影響することが分かった。また、放電の様子を観察することによって、素子の劣化診断ができることがわかった。今回実験を行った中で最も優れた除電特性を持つものは、図3のC電極であり、これは他の素子よりもかなり低い電圧である、1.5 kVから放電が開始され、一定の電圧を印加した場合の除電能力は、他と同程度かそれ以上であった。

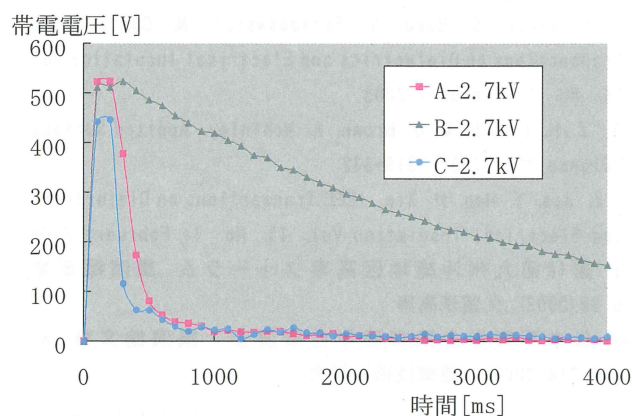


図14. 3種の構造を用いた除電特性評価試験

(1) 放電開始電圧から300V上昇させた電圧を印加した場合 (2) 全ての素子に一定の電圧を印加した場合

以上の結果より、EDX/SEMによる素子表面の化学分析では、製造工程の改善により、放電素子の長寿命化が実現した⁽¹³⁾。次に複素インピーダンス測定から、放電素子の等価回路の特定や解析を行うことができた⁽¹³⁾。更に、劣化評価のための加速度試験法の開発段階として、様々な実験を行い、除電特性評価測定を行い、放電の様子を観察することが劣化診断役立つこと、放電素子の構造が劣化阻止と長寿命化に大きく影響することが分かった⁽¹⁴⁾。

5. 謝辞

本研究の一部は財団法人北九州産業学術推進機構(FAIS)の平成20年度受託研究として実施、助成されました。また、実験に使用した各種電素子試験片は(株)岡部マイカ工業所より提供されました。EDX/SEM測定には、九州工業大学機器分析センターと福岡県工業技術センター機械電子研究所の装置を利用させて頂いた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 除電器・静電気ハンドブック (株)キーエンス (2008)
- 2) Y. Hozumi, T. Seto, M. Hirasawa, M. Tsuji, A. Okuyama, Journal of Electrostatics 67 (2009) p. 1-6
- 3) マイクロプラズマイオン化素子 (株)アフジェ
URL http://www.afjeinc.com/product/dynac_fd.html
- 4) J. Laurentie, J. Jolibois, E. Moreau, Journal of Electrostatics 67 (2009) p. 93-98
- 5) S. B. Kwon, H. Sakurai, T. Seto, Y. J. Kim, Aerosol Science 37 (2006) p. 483-499
- 6) E. Moreau, C. Louste, G. Touchard, Journal of Electrostatics 66 (2008) p. 107-114
- 7) S. L. Park, J. D. Moon, S. H. Lee, S. Y. Shin, Journal of Electrostatics 64 (2006) p. 275-282
- 8) T. Seto, S. B. Kwon, H. Sakurai, T. Taishi, T. Koyama, J. Aerosol Res., 21 (3), p. 226-231 (2006)
- 9) T. Yamauchi, T. Maekawa, T. Seto, S. B. Kwon, K. Okuyama, Earozoru Kenkyu, 23 (2), p. 108-113 (2008)
- 10) P. Maity, S. Basu, V. Parameswaran, N. Gupta, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 1; February 2008
- 11) Z. H. Liu, N. M. D. Brown, A. McKinley, Applied Surface Science 108 (1997) 319-332
- 12) Z. Jia, Y. Hao, H. Xie, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, No. 1; February 2006
- 13) 第18回九州沖縄地区高専フォーラム 講演概要集 p. 82 (2008), 久留米高専
- 14) 日本高専学会第15回年会講演会 講演論文集 p. 217-218 (2009), 豊橋技術科学大

(2009年10月9日 受理)