

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2014

課題番号：26630114

研究課題名(和文) マイクロバリスタを用いたサージ抑制器(複合材バリスタ)の研究

研究課題名(英文) Study on the composite varistor with epoxy resin and microvaristor

研究代表者

石辺 信治 (Ishibe, Shinji)

九州工業大学・工学部・特任教授

研究者番号：00648686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)： 自在な形状にできるメリットを持つ複合材バリスタ(ZnO主成分の直径50～100 $\mu$ mのマイクロバリスタとエポキシ樹脂の複合材)は、樹脂の硬化中に電界を印加し、エポキシ内にマイクロバリスタの連鎖(チェーン)を形成することで、優れた非線形抵抗特性を発現させる。このチェーン形成条件の最適化に関して、重力、粒径、電界の影響度を明らかにし、チェーン形成のシミュレーション法を確立した。また $\mu$ バリスタ粒子と複合材バリスタのサージ吸収能力を明らかにし、チェーンの並列分流を有効に活用できれば、様々なサージ責務に対応できることが解った。

研究成果の概要(英文)： The composite varistor of epoxy resin and microvaristor has the nonlinear voltage-current characteristics owing to the microvaristor chains which work as current paths. These chains are formed by applying an electric field during curing process. In this composite varistor, voltage-current characteristics and surge absorption capability are typical basic performance and strongly influenced by the chain formation and intrinsic characteristics of microvaristors. Therefore, the influence of gravity, microvaristor size and electric field on the formation of the chains was clarified by experiment and simulation. It is also reported that the performance of the composite varistor can be controlled by its thickness and cross sectional area, the contents of microvaristor, and the varistor voltage of microvaristor.

研究分野：送配電工学、高電圧工学

キーワード：バリスタ エポキシ複合材 サージ

### 1. 研究開始当初の背景

家庭用電気製品や 200~400V 産業用モータ、6.6~500kV 発電機器などの電気回路内で発生する過電圧サージ(図1)は、絶縁設計上で重要な検討要因であり、これらの電気製品の大きさや信頼性に大きく影響する。この過電圧サージを抑制する手段としては、一般的には避雷器/バリスタが用いられ、適用する電圧クラスや対象とする過電圧サージのエネルギーに応じて様々な大きさや厚みの酸化亜鉛素子で構成されている。この酸化亜鉛素子は、ZnOを主成分にした、1000℃程度の高温で焼結したセラミック半導体で、高温で作るため製品に割れ・欠けなどの現象が発生しやすく、製品形状の自由度が小さいという問題がある。

最近、酸化亜鉛素子を作る過程でできる粉末を1000℃程度で焼結することで直径50~100μmの半導体粒子(図2(a)、μバリスタ)を作り、これをエポキシやシリコンに入れて絶縁抵抗に非線形性を持たせる研究が行われている。しかし、この研究はケーブル端末などの電界緩和を目的としており、μバリスタを介して確実な電流経路が無い場合、バリスタとしては使用できない。

本研究では、μバリスタをエポキシなどの絶縁物に充填して、硬化段階で電界を印加することでμバリスタの連鎖(チェーン)を形成することで、形状が自在な複合材バリスタ(図2(b))を製造する技術とその性能・実用性を研究した。本研究が実用化された場合、電気製品に本来使用している各種絶縁物とバリスタを一体化することができ、また形状が自在でスペースを取らないため、効果的なサージ保護により電気製品の信頼性向上と小形化・コストダウンが期待できる。

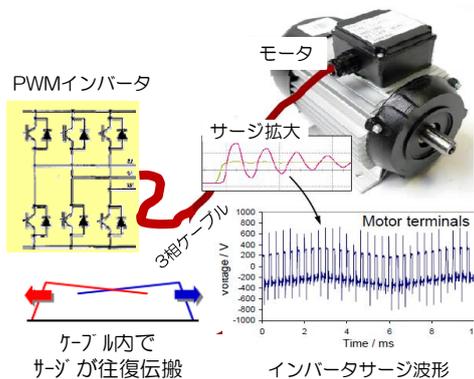
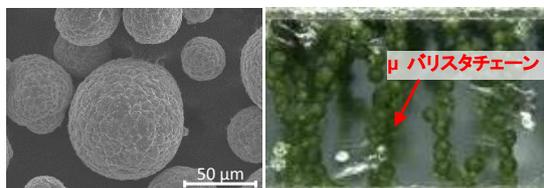


図1 インバータ回路でのサージ



(a) μバリスタ (b) 複合材バリスタの断面

図2 μバリスタ

### 2. 研究の目的

“硬化段階で電界を印加することでμバリスタのチェーンを形成させて(図3)、複合材料に非線形抵抗特性を出す”という本研究のアイデアが実現可能であることは、前年度までの研究で解っている。そこで、今年度の研究では、チェーン形成条件の最適化を目指した各種影響要因の検討と、複合材バリスタとしてのサージ電流通電性能の確認を行い、実用可能性と課題・解決策を検討した。

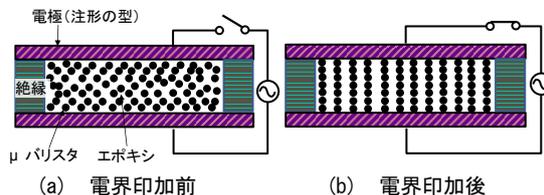


図3 μバリスタのチェーンの形成方法

### 3. 研究の方法

#### (1) μバリスタのチェーン形成条件の最適化検討

複合材バリスタの電圧-電流特性のばらつきや一部のチェーンへの電流集中を避けるため、均一な(蛇行が少なく粒子径が揃った)チェーンを作る必要がある。チェーン形成には、印加電界、粒径、充填率、重力、樹脂粘度、電極間距離などが影響するが、その中でも、μバリスタの粒径が50~100μmと大きいため、重力の影響が大きい。そこで、重力・電界・粒径の影響を実験的に把握するとともに、各種要因の影響を解析できるシミュレーション手法を検討した。

#### (2) 複合材バリスタの実用性能と改善策の検討

複合材バリスタの適用可能対象を決めるキーとなる性能は、課電寿命性能(回路電圧に対する)とサージ電流通電性能である。課電寿命性能については、単純にμバリスタ粒子自体の固有性能に依存する面が大きく、その性能は材料配合や焼結方法により改良の余地があること、また課電ストレスは使用条件によって様々であることなどから、ここではサージ電流通電性能に焦点をあてて検討した。特に、断路器サージやインバータサージの抑制などを視野に入れて、繰り返しサージに対するサージ吸収能力を確認した。またこの性能を踏まえて、実用可能性と課題の検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) μバリスタのチェーン形成条件の最適化検討

##### ① 重力・電界・粒径の影響に関する実測

図4に、印加電界が重力と同方向の場合の、チェーンを形成・維持するための電界 $E_c$ の実測結果を示す。粒径が大きいほど $E_c$ が大きくなり、μバリスタの平均粒径 $d$ の1/2乗にほぼ比例して増加している。

このことは理論的にも理解できる。μバリスタには、粒子間相互作用力 $F^{int}$ 、重力 $F^g$ 、

流体中の抗力  $F^{fluid}$  が働くが、チェーン形成後は粒子の動きが無いとして  $F^{fluid}=0$  と考える事が出来る。チェーンが維持されるための条件は、他のチェーンからの受ける力が小さく無視できると仮定すると、次式となる。

$$F^{int} \geq F^g \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $F^{int} \propto d^6 E^2 / r_{ij}^4$  ( $d$ : 粒子直径,  $r_{ij}$ : 粒子間距離,  $E$ : 電界値)、 $F^g \propto d^3$  で、チェーン形成後は  $r_{ij} = d$  のため、最終的に式(1)は  $E \geq Ad^{1/2}$  ( $A$  は定数)となる。

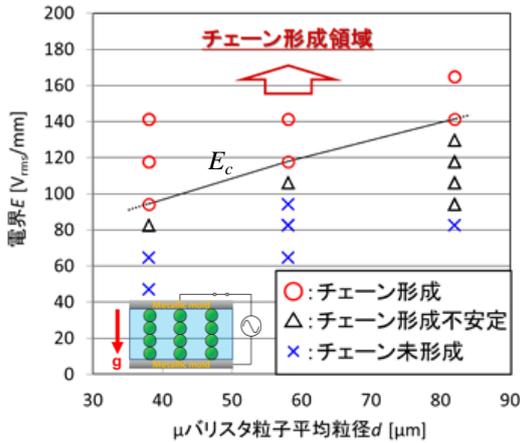


図4 チェーン形成・維持するための電界  $E_c$  (印加電界が重力と同方向)

図5に示すように、印加電界が重力と垂直の場合には  $E_c$  は粒径にほとんど依存しない。このことは以下のように説明できる。

チェーンを維持するためには、チェーンと電極間に働く摩擦力  $F^f$  と重力  $F^g$  が次式の関係を満たす必要がある。

$$F^f \geq F_n^g / 2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $F^f = aF^{int}$  ( $a$ : 電極と粒子間の摩擦係数)、 $F_n^g = nF^g = (l/d)F^g$  ( $n$ : 1つのチェーンの粒子直列数,  $l$ : 電極間距離) で、これらを式(2)に代入すると、

$$E^2 \geq lB/aD \quad (B, D: \text{定数})$$

となり、チェーン維持のための電界が、 $\mu$  バリスタ粒子の粒径に依存しないことになる。

従って、作成したい形状・特性の複合材バリスタごとに、上記のようなチェーン形成・維持できる電界を把握して、作成条件を最適化する必要がある。

## ② チェーン形成過程のシミュレーション

現在チェーン形成過程をシミュレーションできる汎用ソフトは無いが、解析ソフトの一つの COMSOL で粒子間に働く力を考慮することが最近可能となったため、このソフトを用いて粒子に働く各種力を外部定義することで挙動解析を行い、実測と良く合うことを確認した (図6)。

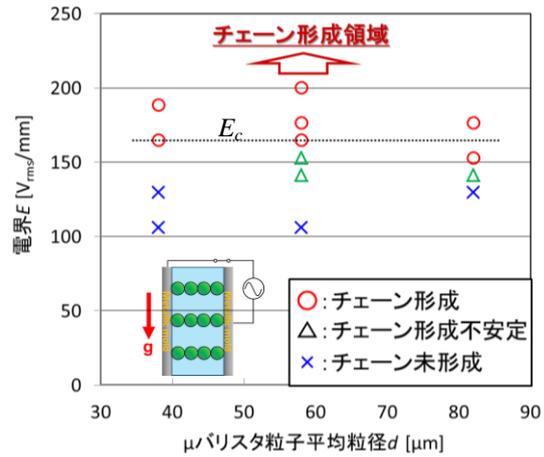


図5 チェーン形成・維持するための電界  $E_c$  (印加電界が重力と垂直方向)

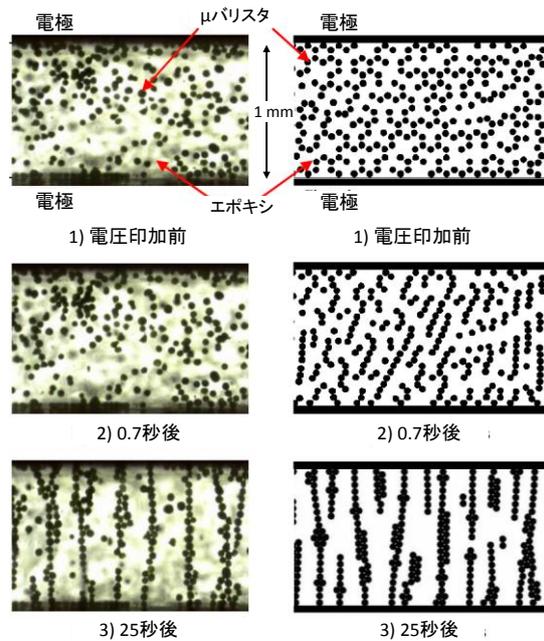


図6  $\mu$ バリスタ粒子挙動の実測と解析の比較 (印加電界: 450 V<sub>mm</sub>、粒子径: 50  $\mu$ m)

$\mu$  バリスタ粒子は、電界で生じる双極子モーメントに起因する粒子間相互作用力で移動・チェーン形成を行うが、この双極子モーメントが作る局所電界が周囲の粒子内電界に与える影響は、チェーン形成上非常に重要である。粒子  $i$  が粒子  $j$  の電界に影響を与え、影響を受けた粒子  $j$  が逆に粒子  $i$  の電界に影響を与えて、それを繰り返して一定値に落ち着く (ここでは電界の高め合いと呼ぶ)。図7は、チェーンの粒子数を増やした場合の粒子中心の電界を示している。この高め合いは、チェーン形成・維持する電界に大きく影響するため、挙動解析に考慮することが重要である。そこで、図8の計算フローに示すような方法で、粒子間の電界の高め合いを COMSOL内の関数を用いて加算した。図7に高め合いの加算回数と得られた電界を示しており、回数を多くすると電界解析で求めたものに近

づく。しかし、この加算回数を多くすると、多粒子の挙動解析時間が膨大となり実用的では無いため、極力少ない回数として3回を選択した。

図9は、チェーン維持電界の計算と実測を比較したものである。上述の手法を用いた維持電界は、高め合いの影響を考慮していない場合と比べて実測に近い値となっている。それでも実測よりも大きな値であるが、各種状況下のチェーン形成条件を解析で把握する上では、安全側の評価ができると考える。

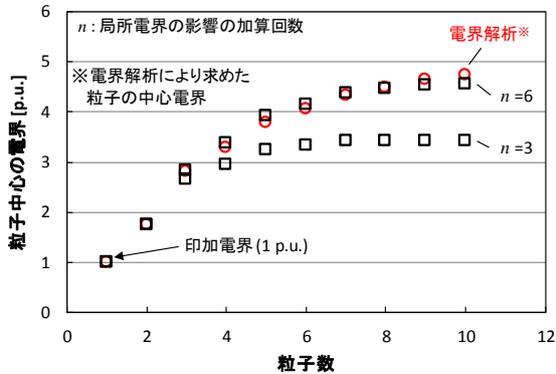


図7 粒子が作る局所電界が粒子内の電界に及ぼす影響

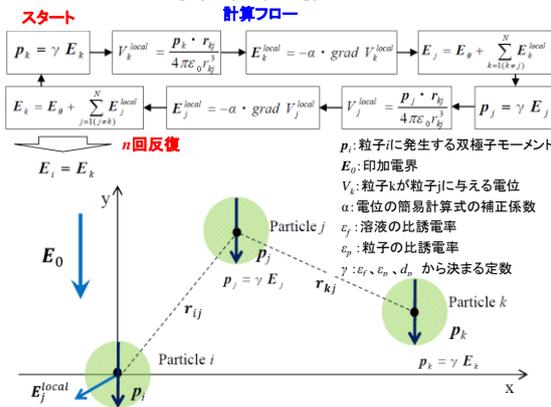


図8 粒子間の電界高め合いの計算フロー

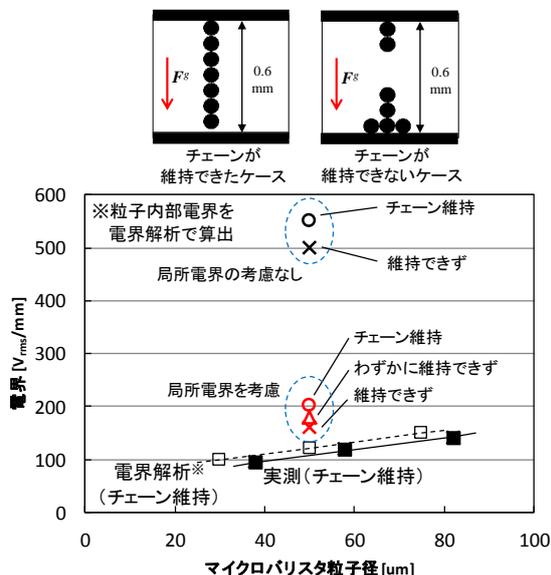


図9 チェーン維持電界

## (2) 複合材バリスタの実用性能と改善策の検討

### ① μバリスタ粒子のサージ吸収能力

単発サージに対してμバリスタ粒子が破壊するまでに吸収する電荷量を、粒子径で換算した単位面積あたりの電荷量 (C/cm<sup>2</sup>) の平均値は 131 mC/cm<sup>2</sup> で (図10)、ワイブル分布で破壊確率を求めると破壊確率ゼロ (位置パラメータ) の値が 58 mC/cm<sup>2</sup> である (図11)。

また、繰り返しサージ印加時、粒子径で換算した単位面積あたりの電荷量とサージ印加回数に応じた特性変化 (サージ印加前後の電圧変化率) を評価した。その結果を図12に示す。電荷量が約 150 mC/cm<sup>2</sup> 以下では破壊が起きず、電荷量が大きいくほど、またパルス印加回数が多いほど、特性変化が大きいく。

### ② 複合材バリスタのサージ吸収能力

複合材バリスタの繰り返しサージ吸収能力の試験結果を図13に示す。複合材バリスタのサージ吸収能力は、粒子が有効にチェーン形成に寄与しているかどうか、及び各チェーン間の電流通電ばらつきにも依存する。特に各チェーン間の電流ばらつきについては、μバリスタ自体の非線形抵抗特性のため、チェーン間の電圧の10%の差は電流で3~5倍

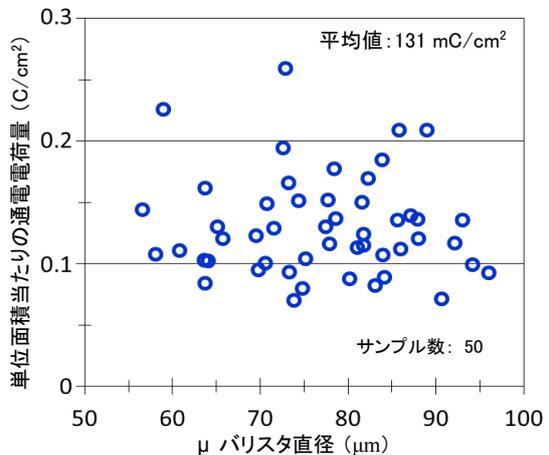


図10 単位面積当たりの破壊電荷量

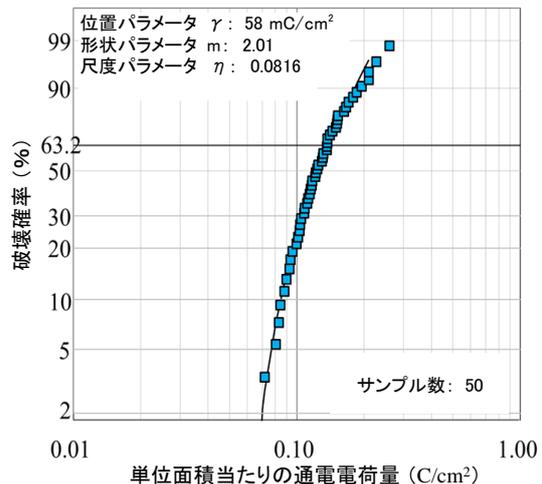


図11 単位面積当たりの電荷量の破壊確率

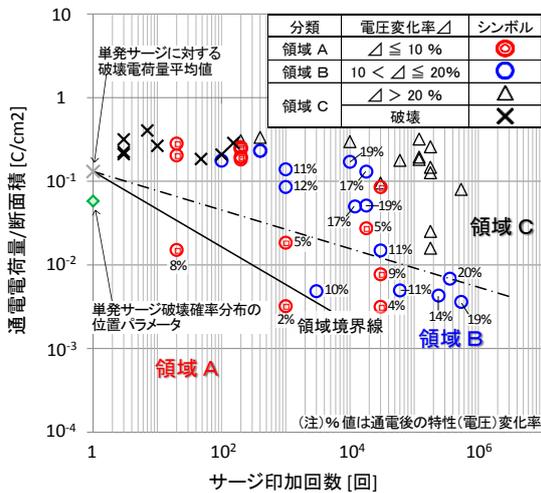


図 12  $\mu$  バリスタの繰り返しサージ吸収能力

(電流領域にもよる)に相当するため、チェーンの蛇行の影響や粒子サイズのばらつきの影響など今後の研究課題は多い。しかし、ここでそれらの影響をパラメータにして暫定的な性能を把握することとし、複合材料バリスタの単発サージ吸収能力 ( $C_{cv}$ ) を次式のように考えた。

$$C_{cv} = N \cdot C_{chain} \cdot \alpha \cdot \beta \quad \dots \quad (3)$$

ここで、 $C_{chain}$  はチェーン一本分のサージ吸収能力で、単発サージ破壊電荷量の平均値 (131 mC/cm<sup>2</sup>) に今回用いた  $\mu$  バリスタ (平均粒径 60  $\mu$ m) の断面積を掛けた値で、 $N$  は充填率、電極面積、サンプル厚み等から導き出した理想的なチェーン本数である。 $\alpha$  は、粒子のわずかなバリスタ電圧の違いやチェーン自体の蛇行などから生じる分流効率、 $\beta$  はチェーンを形成する粒子の全粒子に対する割合で、これまでの観察経験から暫定的にそれぞれ 0.1 と 0.5 とした。図 13 の領域境界線は、式 (3) で求めた  $C_{cv}$  を起点として、図 12 の領域境界線と同じ勾配で描いたものである。図 13 からわかるように、試験回数と試験前後の特性変化率の関係に着目すると、1 回目の試験前後の変化率が大きく、その後は変化率が小さくなる傾向が見られた。

一般的に雷サージ電流を直接吸収するような配電用/電力用避雷器や盤用バリスタが対象としている雷サージ電荷量は数十~数百 mC/回、誘導雷サージや回路内サージを対象としている低圧回路用バリスタでは数 mC~数十 mC/回、静電気を対象としているようなバリスタは数  $\mu$ C/回である。これらはいずれも繰り返し回数としては 1 回~数回と非常に少ない。本研究のような多数のサージが想定されるのは例えばインバータ回路で、この場合は電荷量が非常に小さく数  $\mu$ C/半サイクル (10 ms) のレベルであり、これが今回の試験条件の背景になっている。従って、インバータサージを対象とする場合、今後さらに長時間印加の影響を確認してゆく必要が

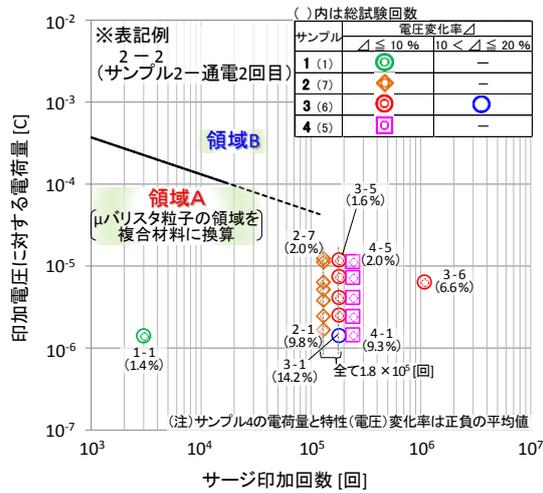


図 13 複合材バリスタの繰り返しサージ吸収能力

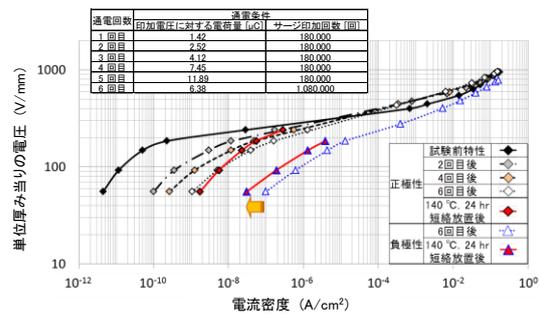


図 14 繰り返しサージ吸収後の特性変化と復帰

ある。また、サージ吸収能力の見積りで用いた係数 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) は複合材バリスタのサージ吸収能力に大きく影響を与えるため、今後詳細に把握する必要がある。

繰り返しサージ印加後の特性変化は、試験回数を重ねるごとに低電流領域の抵抗が低下する方向に変化している (図 14)。また、最終的 (6 回目後) な特性を、繰り返しサージ試験で印加した電圧方向と同方向 (正極性) と逆方向 (負極性) の特性で比較すると、逆方向の変化が大きくなった。また、両電極を短絡した状態で、140°C (エポキシの劣化を防ぐため 140°C とした) の高温下で 24 時間放置した結果、特性の復帰がみられた (図 14)。この復帰は、温度が高いほど、また放置時間が長いほど大きいと考えられる。

このような現象が一般の酸化亜鉛素子において生じる事はすでに報告されており、これは限界領域に電荷が蓄積してショットキー型障壁が変形することが原因であると考えられている。この特性変化は、酸化亜鉛素子では添加物と焼成条件の改良により改善が行われており、今回使用している  $\mu$  バリスタ粒子が試作レベルのものであることから、製造条件を改良する事によりサージ吸収能力の改善は可能であると考えられる。

