

## 論 文

等価回路モデルによるバリスタの  
ノイズ吸収機構の解明

鈴木 雅 史\*, 柴 田 信 悦\*\*, 吉 村 昇\*,

(2000年10月20日受付; 2001年3月5日受理)

Analysis of Noise Absorption Characteristics of Ceramic Varistor  
Using Equivalent Circuit

Masafumi SUZUKI\*, Shinetsu SHIBATA\*\* and Noboru YOSHIMURA\*

(Received October 20, 2000; Accepted March 5, 2001)

Varistor has a lot of advantages in comparison with zener diode, such as the symmetry of electric polarity in the voltage-current curve, the large electrostatic capacity and the high responsibility. Therefore, it is used as a protective component against not only the static electricity but also the surge noise for the portable telephone, video camera, CD-ROM, DVD-ROM and DC motor. Especially, SrTiO<sub>3</sub> varistor is available for the noise absorption, since it has a large electrostatic capacity and a large non-linear coefficient between applied voltage and current at the region of a large current. However, the noise absorption characteristics have been hardly investigated. In this study, simulations were made to analyze it and to present the data for designing a ceramic varistor using the determined equivalent circuit of ceramic varistor. It was found that 80% current flowed from the surface of varistor to the inside conduction layer and that it was returned to the surface again.

## 1. はじめに

バリスタはツェナーダイオードと比べ電圧-電流特性が正・負対称であるため極性に依存しない, 大きな静電容量を有するため高周波ノイズの除去にも有効である等の利点を有し, 応答性もツェナーダイオードと同等以上である. このため静電気対策はもちろん, サージノイズ吸収用として携帯電話, ビデオカメラ, CD-ROM, DVD-ROM, 直流小型モータなどに広く用いられている.

最近ではモータをコンピュータまたは電子回路により制御する機器が増えており, モータで発生するサージノイズや高周波ノイズを効率よく吸収し, 機器の誤動作や破壊を未然に防ぐことが重要となっている. バリスタの中でも特に SrTiO<sub>3</sub> 系セラミックバリスタは, 比較的電

圧-電流特性の非直線性( $\alpha$ 係数)が大きく, 静電容量も大きいので, サージ吸収のみならず高周波ノイズの吸収にも優れた特性を示し, 直流モータ等のノイズ対策としても広く用いられている. しかしながら, モータの特性が変わった場合には必ずしも十分なノイズ吸収が行えない場合もあり, 使用するモータの特性に応じたバリスタ特性の最適化が望まれている.

前報<sup>1)</sup>で筆者らはセラミックバリスタの構造の物理的意味合いを考慮しながら, バリスタを粒界, 粒内に分け, さらにバリスタ表面から内部に向けての粒界の特性の違いも考慮した等価回路モデルを提案し, これが実際のバリスタの電気的特性を満足することを示した. この等価回路モデルは, バリスタのノイズ吸収機構を解明したり, その特性改善にも利用でき, 有益な指標を与えるものである.

本研究では, 先に決定したこの等価回路モデルを用い, 直流モータにおいてインダクタンスのキックオフに伴うサージノイズがバリスタのどの部分でどのように吸収されるか, PSpiceによるシミュレーションを用いることにより検討を加えた.

キーワード: セラミックバリスタ, 回路シミュレータ, 誘電特性

\* 秋田大学工学資源学部電気電子工学科 (010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

Engineering and Resource Science, Akita University, 1-1 Tegata Gakuenmachi, Akita 010-8502, Japan

\*\*TDK 株式会社 (018-0402 秋田県由利郡仁賀保町平沢字立沢 200)

TDK, 200 Hirawasa, Tatsusawa, Akita 018-0402, Japan

2. 等価回路モデル

等価回路モデルの作製手順の詳細は前報<sup>1)</sup>に示してあるので、ここでは省略するが、本研究に用いたバリスタは、図1に示すようなリング形状の表面再酸化型 SrTiO<sub>3</sub> バリスタである。このバリスタにおいて、電圧-電流の非線形性は粒界層の空乏層によりもたらされており<sup>2)</sup>、粒内は比較的小さな抵抗値を示す。このため、バリスタを構成する粒界、粒内を表す基本となる等価回路は図2のように考えることができる。実際のバリスタにおいては、この粒界と粒内が網目・層状につながっていると考えることができるので、バリスタの等価回路は図3に示すように表される。なお、図3に示した等価回路において、抵抗、電圧依存型抵抗および静電容量はセラミック粒子一つの粒内および粒界を表したのではなく、複数

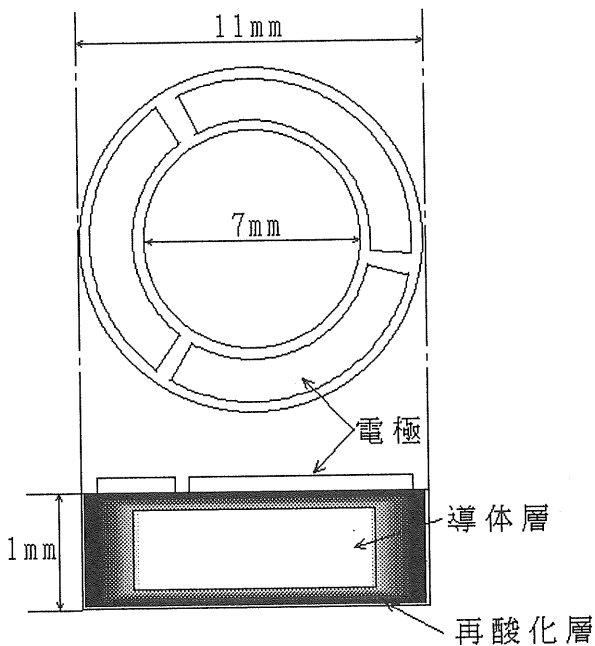


図1 解析に使用したバリスタ  
Fig.1 Schematic of varistor.

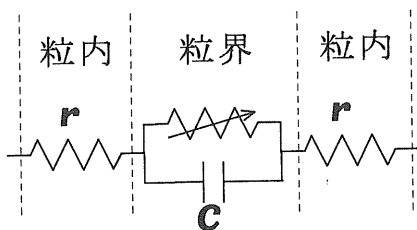


図2 セラミック粒子のモデル  
Fig.2 Model of ceramic grain.

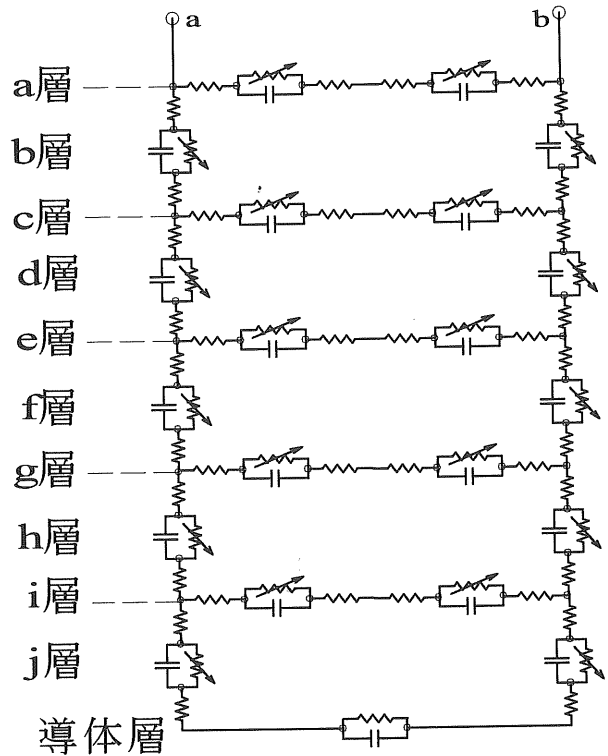


図3 バリスタの等価回路モデル  
Fig.3 Equivalent circuit of ceramic varistor.

個のセラミック粒子の特徴をまとめて表現したものである。

等価回路中の各抵抗値、静電容量、電圧依存型抵抗の特性は実際のバリスタを研削しながらその静電容量の周波数依存性、誘電正接を実測し、また等価回路モデルからは a,b 層, c,d 層のように2層ずつ取り除き、回路シミュレータを用いて静電容量の周波数依存性、誘電正接を計算し、これらが一致するように"cut and try"で決定されていく。表1に決定された各パラメータ値をまとめて

表1 等価回路のパラメータ

Table 1. Parameter of equivalent circuit.

	粒 内		粒 界	
	r	抵抗(Ω)	c	静電容量(nF) 抵抗(Ω)
a層	6.64		28.0	
b層	0.085		140.0	
c層	6.64		1.0	印加電圧に依存し、抵抗値は図4および図5に示すように変化する。
d層	0.085		390.0	
e層	6.64		2.0	
f層	0.085		150.0	
g層	6.64		2.0	
h層	0.085		230.0	
i層	6.64		1.0	
j層	0.085		100.0	
導体層	26.55		4.99	

示す。なお、表中で粒内抵抗は例えば a 層ならすべての抵抗値が同じであることを示す。

なお、本研究で作製した等価回路モデルが、実際のバリスタの静電容量や誘電正接の周波数依存性、電圧-電流特性などの電気特性を再現できることは前報<sup>1)</sup>で示した通りである。

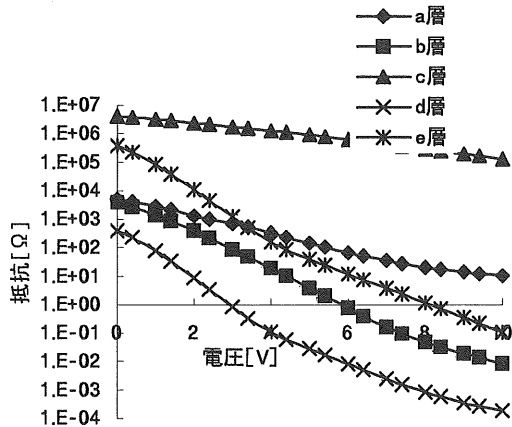


図4 a から e 層の抵抗値の変化  
Fig.4 Change of resistance value in each layer a to e.

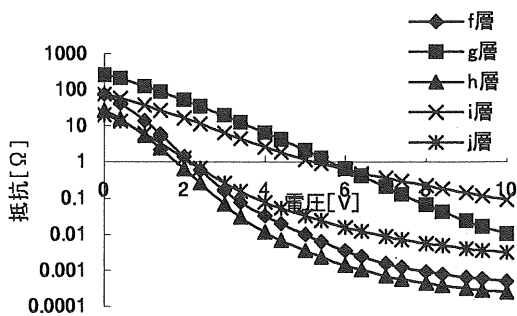


図5 f から j 層の抵抗値の変化  
Fig.5 Change of resistance value in each layer f to j.

### 3. ノイズ吸収特性の解析

前述のように、バリスタの等価回路モデルが決定されたので、これを用いてノイズがバリスタのどの部分で効果的に吸収されているのかを回路シミュレーションを用いて求める。これは、実際のバリスタにおいて実測することは不可能で、シミュレーションによる解析は非常に大きな意義を有する。

### 3.1 マイクロモータから発生するノイズ

シミュレーションには一般的に用いられている直流マイクロモータを対象とした。ノイズは整流子片がブラシにより短絡および開放された瞬間に発生すると考えられる。いま、ノイズ発生部分だけに注目すると図6のような等価回路を構成することができる。直流モータの1極はインダクタンス  $L$ 、および巻線抵抗  $R$  の直列回路として表すことができる。モータが動作することにより  $L$  が時間的に変化することを考えると、回路方程式は、

$$e = Ri + \frac{d}{dt}(Li) \quad (1)$$

のように表される<sup>3)</sup>。上式右辺第2項は、位置に対するインダクタンスの変化と、速度(回転数)の積で表すことにより次式が得られる。

$$e = Ri + \frac{d}{dt}(Li) = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

ここで右辺第3項は、モータの逆起電力を表した項である。ここで、 $L$  の位置による変化率及び回転速度は一定であると仮定すると  $\frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt}$  は定数となり、これを  $R'$  とすると (2) 式は

$$e = (R + R')i + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

とおける。この  $R + R'$  を新たに  $R$  とおき、図6に示す等価回路は構成されている。これによりモータの負荷が変動した場合、回転数が変化した場合  $R$  の値を変更することにより対応できる。前報<sup>4)</sup>で詳しく述べたように、本研究で対象とするノイズは、整流子のスイッチングに伴うコイルの逆起電力によるものである。そこで、この

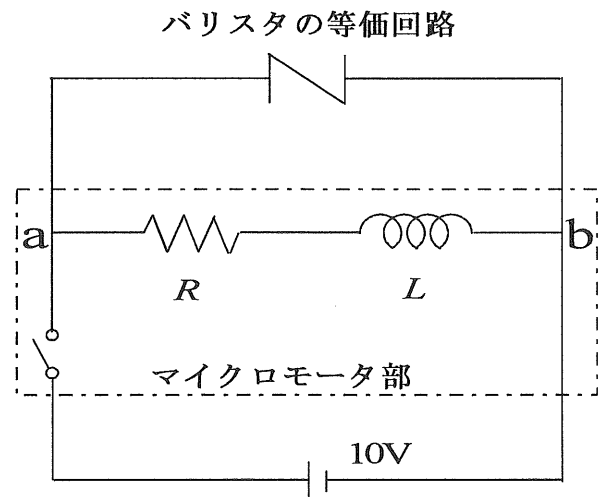


図6 シミュレーション回路  
Fig.6 Simulated circuit.

ノイズ電圧はスイッチング時間 (スイッチが on の状態から off の状態に移り変わる微小時間) に依存し、この時間が短いほどノイズのピーク電圧は大きくなる。しかし、シミュレーションによりスイッチング時間とノイズ電圧の関係を調べたところ、スイッチング時間が  $10\mu\text{s}$  より短ければいかなる条件でもノイズ電圧に変化はみられなかった。そこで、本研究でもスイッチング時間を前報<sup>4)</sup>と同様に  $1\mu\text{s}$  とする。なお、図6に示した回路において、モータの巻線のインダクタンスは  $1\text{mH}$ 、定格電圧は  $10\text{V}$  と仮定した。また、抵抗  $R$  は  $40\Omega$  とし、パルスの周波数は  $1\text{kHz}$  とした。ここで、パルスの周波数はモータの回転速度に比例するが、本研究ではインダクタンスのキックオフに伴うノイズ波形について議論するため、通常のモータの回転数ではノイズ波形はパルスの周波数の影響を受けないとした。

3.2 シミュレーションと実測によるノイズ波形の比較

図6の回路に、先に決定したバリスタの等価回路モデルを組み込み (図6中の a-b 端に図3に示したバリスタの等価回路の a 層上部の両端 a-b が接続される)、スイッチの off に伴うノイズ波形を算出した。このシミュレーション結果を図7に示す。また、比較のためバリスタを用いない場合のノイズ波形のシミュレーションの結果を図8に示す。この場合は、バリスタのノイズ吸収効果がなく、回路中に静電容量が含まれないため、ノイズの減衰振動は即座に収まっているが、インダクタンスのキックオフに伴う極めて急峻で大きなノイズが観測される。

図7と図8を比較すると、図7ではまだノイズの存在は認められるものの、バリスタを付加しない場合に比べると大幅なノイズ低減効果がみられる。また、シミュレーション結果を検証するため、実際に図6に示す回路を作製し、これにサンプルバリスタを挿入し、ノイズ波形

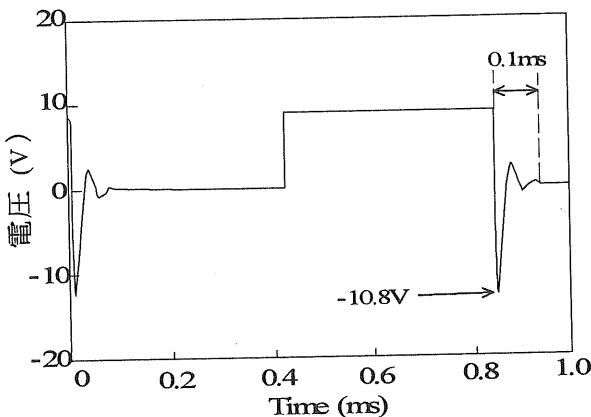


図7 ノイズ波形  
Fig.7 Calculated noise wave form.

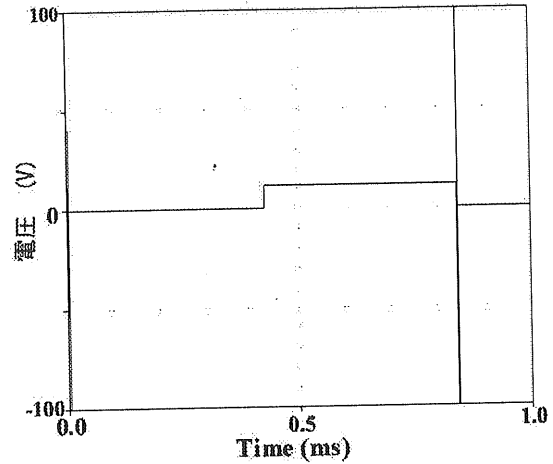


図8 バリスタを用いない場合  
Fig.8 Noise wave form without varistor.

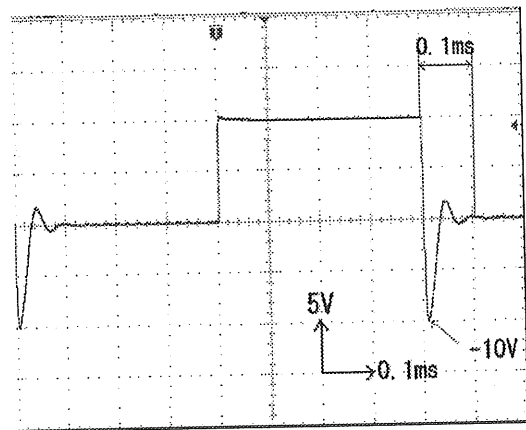


図9 ノイズ波形の実測値  
Fig.9 Measured noise wave form.

の実測を行った。この結果を図9に示す。スイッチ off に伴うノイズ電圧のピークは実測で約  $-10\text{V}$ 、シミュレーションでは約  $-10.8\text{V}$  となった。ノイズの減衰振動が収まるまでの時間は、実測で約  $0.1\text{ms}$ 、シミュレーションで  $0.1\text{ms}$  となり、等価回路モデルを使用して行ったシミュレーションは実際のバリスタのノイズ吸収特性を正確に再現していることが確認された。また、先に示した誘電特性、電圧-電流特性の一致と合わせて本研究で使用した等価回路モデルの妥当性も検証された。

3.3 ノイズ吸収機構の考察

表面再酸化型の  $\text{SrTiO}_3$  系セラミックバリスタは、導体層に近い内部の再酸化層と表面に近い再酸化層では酸素濃度を異にし、粒子および粒界の電気的特性が異なる。そのためバリスタによるノイズ吸収がどの部分で主として成されているのかを各部の実測によって明らかにすることは容易ではない。そこで、ここでは等価回路モデルを用いて行ったシミュレーションの結果からどの部分で

ノイズが吸収されているのかを考察した。

図 10 に、バリスタの各層に流れる電流のピーク値の割合について考察した結果を示す。このピーク値の割合は導体層を含む各層に流れる電流のピーク値の和で各層の電流のピーク値を除いた割合である。図 10 より電流が多く流れるのは a 層, b 層, d 層, f 層, h 層, j 層および導体層であることがわかる。先に述べたように、再酸化層の厚さは約  $80\mu\text{m}$  と電極間の  $1\text{mm}$  に比べて薄く、このために抵抗値は小さい。また、導体層の抵抗値も比較的小さいため、電極からバリスタに流入した電流は、表面から真っ直ぐに導体層へ向かい、ここを通過して再び表面へと流れるものと思われる。このルートを通じて流れる電流は全体の 80% に達する。一方で、導体層以外で電極間に流れる電流は全体の 20% で、導体層に近い内部ほど流れる電流の量が多い。これは、再酸化層の内部ほど酸素濃度が低く、インピーダンスが小さくなっているためである。しかし、最も表面に近い a 層では全体の 11% と比較的大きな電流が流れている。

以上の結果より、バリスタのノイズ吸収は導体層へ向かうルート、および、比較的表面に近い領域で主に成されていることがわかる。従来の研究<sup>1)4)</sup>では、導体層を通るルートのみを対象として解析を行ってきたが、表面近傍の特性がノイズ吸収に与える影響も無視できないほど大きいことが示唆された。

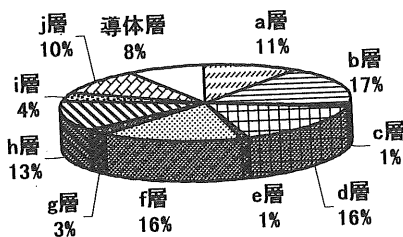


図 10 各層に流れるピーク電流の割合

Fig.10 The ratio of peak current in each layer.

#### 4. まとめ

本研究においては、表面再酸化型  $\text{SrTiO}_3$  系セラミックバリスタを内部の微細構造を考慮した電気的な等価回路に置き換え、この等価回路から直流モータの整流子の短絡、開放に伴うノイズがバリスタによりどのように吸収されているのかを解析した。得られた結果を以下に示す。

1) バリスタの内部構造を考慮した電気的等価回路モデルを使用して、実際にモータの動作を模擬した回路でノイズ吸収のシミュレーションを行ったところ、電圧波形の計算値が実測値と良く一致し、バリスタのノイズ吸収機構に寄与する特性が判明した。

2) バリスタのどの部分でノイズが吸収されているかをシミュレーションにより求めたところ、ノイズ電流は表面から内部の導体層へ向かい、ここを通過して再び表面へ向かうものが全体の 80% 程度と大きいこと、表面近傍を流れる電流も全体の 11% 程度と比較的大きくなっていることが判明した。

これらのことから、等価回路モデルを用いると、ノイズの吸収機構とともに、表面から内部に向かう各部の特性の変化とノイズ吸収特性への効果が明らかとなり、本成果は今後のバリスタの最適化に極めて有用であると思われる。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究補助金の援助により行われた。また、日頃よりご助力頂いた小笠原正氏を始めとする TDK (株) 電子デバイス事業本部の関係各位に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 鈴木雅史, 柴田信悦, 吉村 昇: 静電気学会誌, **24** (2000)343
- 2) (株)サイエンスフォーラム, スーパーファインセラミックス制御技術ハンドブック (1990)
- 3) 宮入庄太著: 「電気・機械エネルギー変換工学」, 丸善出版 (1980)
- 4) 鈴木雅史, 柴田信悦, 吉村 昇: 電学論, **116-A** (1996) 177