

論 文

セラミックバリスタの等価回路モデルの作製

鈴木 雅史*, 柴田 信悦**, 吉村 昇*

(2000年 8月 11日受付, 2000年 9月 12日受理)

Determination of Equivalent Circuit of Ceramic Varistor

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

(Received August 11, 2000, Accepted September 12, 2000)

Recently, various motors are being controlled by a computer. Therefore, a countermeasure toward surge noise which occurs in the motor and the high frequency noise is important to prevent faulty operation of the machine and destruction. Since SrTiO₃ varistor has a large electrostatic capacity and a large non-linear coefficient between applied voltage and current at the region of a large current, it is often used for DC motor to prevent these noise and surge. However, this large electrostatic capacity sometimes causes a series resonance together with an inductance and a resistance of the motor. A ceramic varistor must be designed in consideration of the character of the motor.

1. はじめに

各種モータがコンピュータにより制御されるようになった今日では、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である。特に直流モータにおいてはブリッジ整流子片でインダクタンスのキックオフ等とともにノイズの発生が問題となり、これらを除去するためにバリスタが用いられる場合が多い。特にSrTiO₃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(α 係数)が大きく、静電容量も大きいため、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す。このため、各種携帯機器等の静電気対策としては勿論のこと、直流モータ等のノイズ対策としても広く用いられる。しかしながら、大きな静電容量は時としてモータのインダクタンスとともに共振現象などを引き起こすことがある。このため、使用するモータの特性に応じたバリスタ特性

の最適化が望まれる。

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、粒内に分け電気的特性を満足する等価回路モデルに置き換えるノイズ吸収特性の最適化を目指してきた¹⁻³⁾。これにより、粒界部分の静電容量の変化がバリスタのノイズ吸収特性に与える影響、 α 係数の変化がバリスタのノイズ吸収に与える影響を分離して評価することが可能となり、サージノイズを効果的に吸収するにはできるだけ α 係数を大きく、粒界の静電容量を小さくすることが必要であることを明らかにした。しかし、実際にバリスタを作製する際には焼成温度や焼成時の添加物などを変えその特性を制御する。このため、バリスタ表面から内部への酸素濃度勾配などを模擬できる等価回路が望まれる。

等価回路を用いてバリスタの解析を行なった例としては、Elayyan ら⁴⁾の研究があげられる。彼らは ZnO バリスタを分布定数回路を用いて表現することにより、誘電率、誘電損失などにおいて実測値と非常に良い一致を示すモデルを提案している。しかし、バリスタは電圧-電流特性において大きな非線形性を示すため、 α 係数を考慮したノイズ吸収特性の解析を彼らのモデルで行うことは必ずしも容易ではない。また、実際のセラミック粒子の制御精度(粒径、添加物分布など)を考えると、集中定数を用いた手法でも十分な精度が得られると考えられる。

本研究ではバリスタ表面から内部への酸素濃度勾配な

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 aza Tatsusawa, Akita 018-0402, Japan

どを模擬でき、かつ非線形性を考慮した等価回路を作製し、そのノイズ吸収特性について回路シミュレータを用いることにより検討を加えた。

2. 等価回路モデル

2.1 モデル構成

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 SrTiO₃ 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⁵⁾、粒内は比較的小さな抵抗値を示す。これより、バリスタを構成するセラミック粒子の等価回路は図2のように粒内を表す小さな値の抵抗と、粒界を表す電圧依存型抵抗とコンデンサの並列モデルが直列につながっていると考えることができる。実際のバリスタはこの等価回路モデルが網目状につながっていると考えるので、本研究ではバリスタを図3に示すような等価回路に置き換えた。ここにおいて

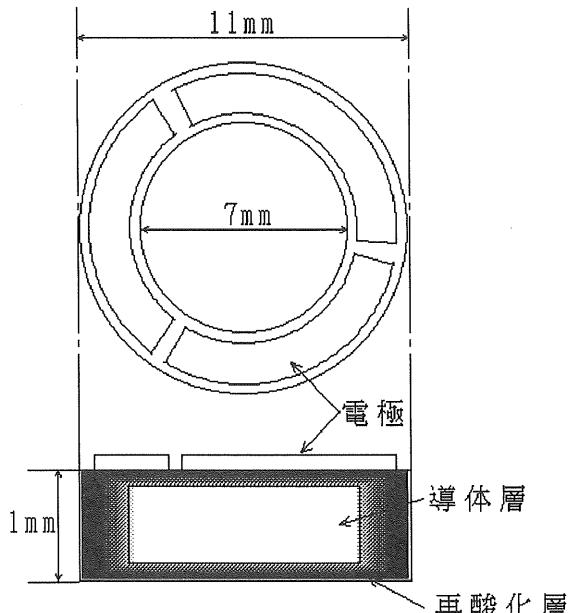


図1 解析に使用したバリスタ

Fig.1 Schematic of varistor.

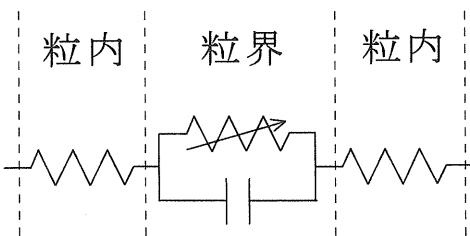


図2 セラミック粒子のモデル

Fig.2 Model of Ceramic grain.

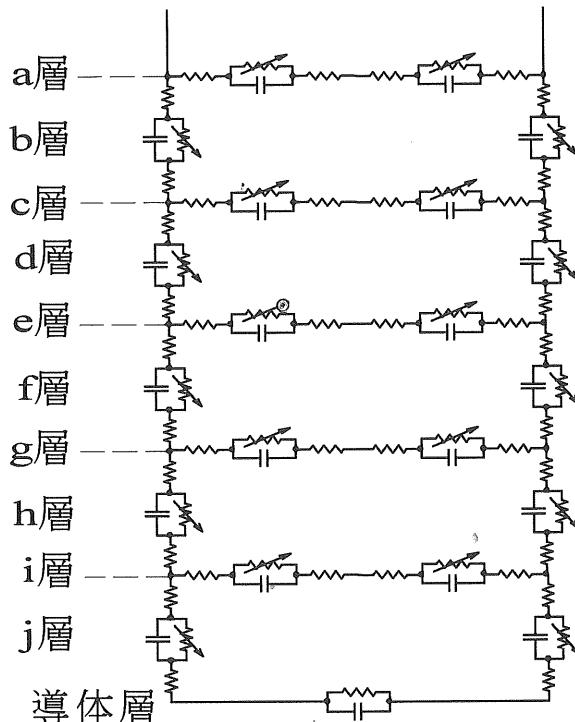


図3 バリスタの等価回路モデル

Fig.3 Equivalent circuit of ceramic varistor.

a,c,e,g,i 層は表面から順に内部へ向かう横方向の粒子群の電気的等価回路であり、b,d,f,h,j 層は同様に縦方向の粒子群の電気的等価回路を示す。

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コンデンサはセラミック粒子一つの粒内および粒界を表したものではなく、複数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。

2.2 等価回路パラメータの決定

この等価回路中のパラメータは以下の手順で決定された。始めに、サンプルバリスタの電圧-電流特性、誘電特性を求める。次に、このバリスタを図4に示すように表面から 20 μm ずつ研削し、同様に電圧-電流特性、誘電特性を求める。なお、ここで研削厚さを 20 μm としたのは、等価回路を作製する際に再酸化層の特性を十

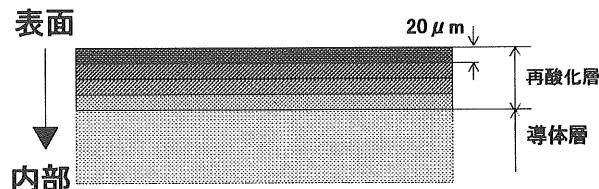


図4 バリスタの研削方法

Fig.4 Grind method of a varistor.

分に表現できるよう、表面から内部へ向かい5層程度に分割するためである。

図5に電圧-電流特性を示す。バリスタを表面から研削するにつれ、抵抗値が減少するとともに、非線形性が薄れていくことがわかる。研削厚さが $80\mu\text{m}$ を越えると、バリスタの電圧-電流特性の非線形性はあまり見られなくなり、ほぼ線形性を示すようになる。これより、主に電圧-電流特性の非線形性を示すのはこの部分までであると考え、再酸化層の厚さはおよそ $80\mu\text{m}$ と仮定した。このときの電圧-電流特性の傾きから図3に示した等価回路の導体層の抵抗値が決定される。

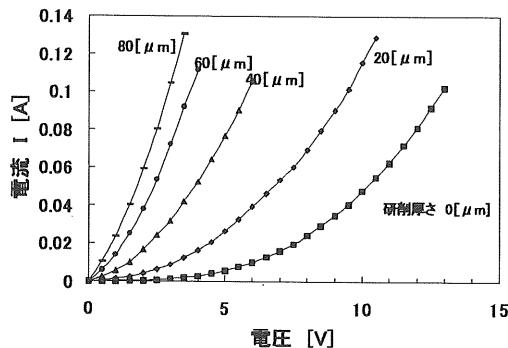


図5 電圧-電流特性
Fig.5 DC characteristics.

図6、図7にサンプルバリスタの静電容量の周波数依存性、誘電正接の周波数依存性をそれぞれ示す。この中の、研削厚さが $80\mu\text{m}$ の場合の特性と、先に決定した導体層の抵抗値を用いて、図3に示した等価回路のa~j層が削り取られて無いものとし、導体層の静電容量が決定される。

次に、図3に示した等価回路のうち、i層とj層がサンプルバリスタの表面から $60\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$ の部分を表すと仮定し(図8)，上述のように決定した導体層の抵抗値(R_c)、静電容量値(C_c)を用い、研削厚さ $60\mu\text{m}$ の場合のサンプルバリスタの電圧-電流特性、静電容量の周波数依存性および誘電正接の周波数依存性を満足するようにi層、j層の抵抗値、静電容量値を決定する。なお、この際に電極間距離は約1mmで、厚さ方向に比べ50倍程度の長さがあることを考慮し、i層の抵抗値をj層に比べ十分大きくなるようにする。具体的には、以下に示す手法による。

①サンプルバリスタの電圧-電流特性より、各印加電圧(0~10V)における R_c 、 R_{j1} 、 R_{j2} 、 R_{i1} 、 R_{i2} を含む図8の回路の合成抵抗が求まる。この中で R_c は既知であるため、 R_{j1} 、 R_{j2} 、 R_{i1} 、 R_{i2} の関係が求められる。

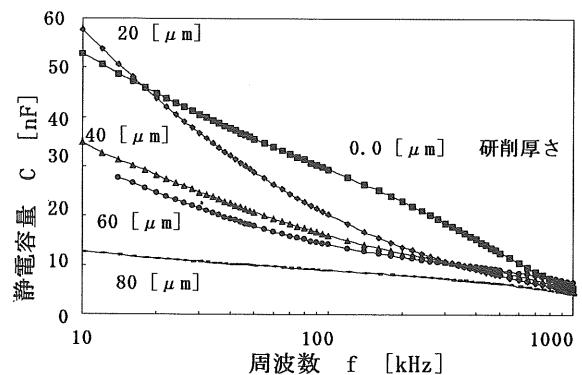


図6 静電容量の周波数依存性
Fig.6 The dependence of capacitance on the frequency.

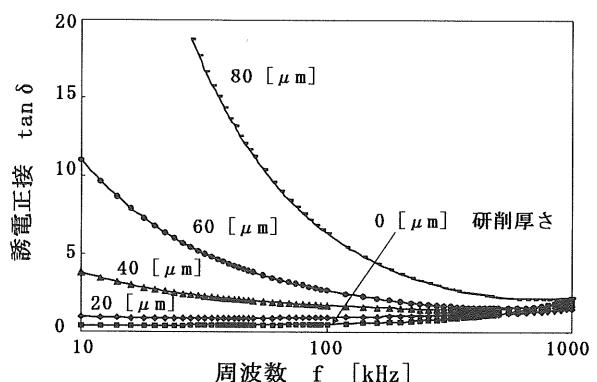


図7 誘電正接の周波数依存性
Fig.7 The dependence of $\tan \delta$ on the frequency.

②静電容量の周波数依存性および誘電正接の周波数依存性も同様にDCバイアス(0~10V)を印加した状態で測定される。①において求められた各抵抗間の関係を考慮し、かつ静電容量の周波数依存性および誘電正接の周波数依存性を矛盾無く再現できるように R_{j1} 、 R_{j2} 、 R_{i1} 、 R_{i2} および C_j 、 C_i を“cut and try”により決定する。なお、 R_{j1} 、 R_{i2} は電圧依存型抵抗であり、DCバイアスによりその値が異なる。

③ R_{j2} 、 R_{i2} の電圧の分圧比より電圧-抵抗値の関係を求め、これが研削したサンプルバリスタの電圧-電流特性を矛盾無く再現できることを確認する。

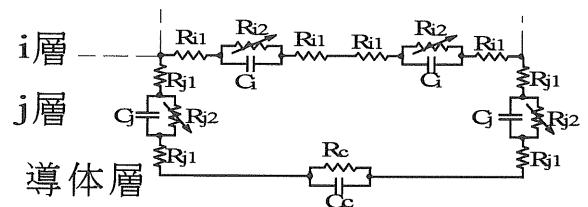


図8 パラメータの決定法
Fig.8 Determination method of each parameter.

表1 等価回路のパラメータ

Table 1 Parameter of the equivalent circuit.

	粒 内		粒 界
	抵抗 R(Ω)	静電容量 C(nF)	抵抗 R(Ω)
a層	6.64	28.0	
b層	0.085	140.0	
c層	6.64	1.0	図8および図9に示すように電圧値により
d層	0.085	390.0	変化する。
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	

以下同様にして、これらの値（導体層の抵抗値、静電容量値およびi層,j層の抵抗値と静電容量値）をもとに、研削厚さ $40\mu\text{m}$ の時の実測値からg, h層の抵抗値および電圧依存型抵抗の電圧-抵抗値の関係と静電容量を求める。これら一連の作業を繰り返すことにより、導体層からa層に向かってバリスタの等価回路のパラメータが順次決定される。以上一連の手順により得られた図3の等価回路の各層の抵抗値、静電容量値を表1に示す。なお、粒界部分の抵抗値はバリスタの非線形性を表すものであり、電圧によりその値が変化する。印加電圧に対するa～j各層の抵抗値の変化を図9から図10に示す。いずれも縦軸は対数の片対数グラフで表示してある。

これらの図より、バリスタの表層部に近い部分では一般に抵抗値が大きく、内部に移るに従い抵抗値が小さくなっていることが分かる。また、内部ほど電圧の増加に

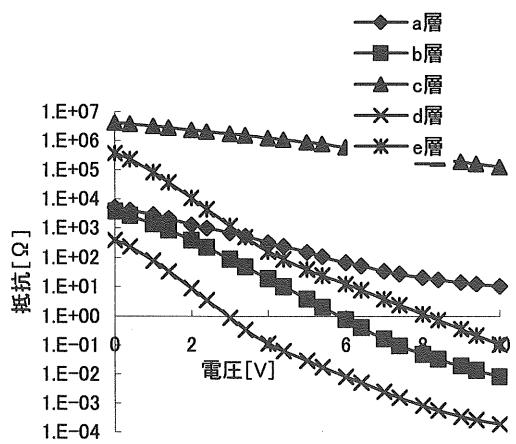


図9 a から e 層の抵抗値の変化

Fig.9 A change in the resistance value of layer a to e

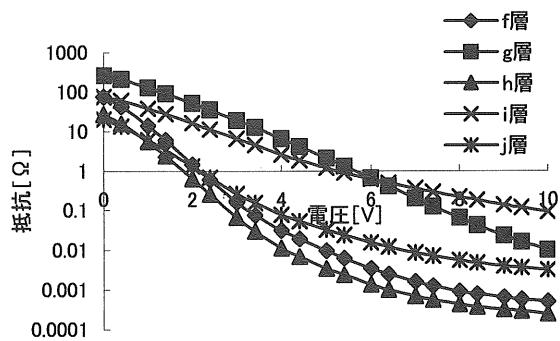


図10 f から j 層の抵抗値の変化

Fig.10 A change in the resistance value of layer f to j.

に対する抵抗値の低下が著しくなっている。これは表層部ほど再酸化の影響を強く受けているためであると思われるが、本研究では複数の粒子群をまとめて図2に示したような基本構成としているため、個々の粒子の粒界部の電圧-電流特性の非線形性との対応に関しては今後さらに検討の必要があると考えられる。しかしながら、後述するように、実際のサンプルの電気的特性と、等価回路モデルより計算される特性が極めて良く一致することから、本モデルは充分に実際のバリスタを模擬できていると考えられる。

2.3 等価回路パラメータの妥当性

上述の手順で、表1に示すような値で決定されたサンプルバリスタの等価回路モデルが、実際のバリスタの電気的特性を満足するか確認するため、静電容量及び誘電正接の周波数依存性、電圧電流特性をサンプルバリスタにおいては実測し、等価回路モデルにおいては回路シミ

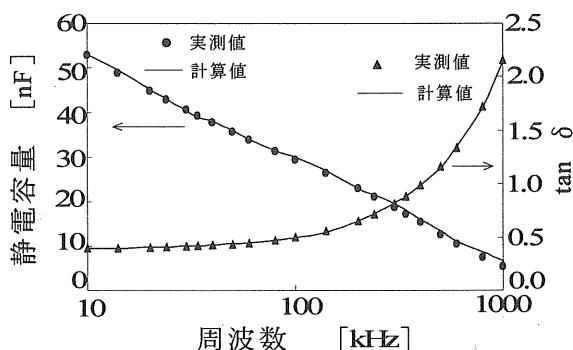


図11 誘電特性の計算値と実測値

Fig.11 Calculated and measured frequency characteristics

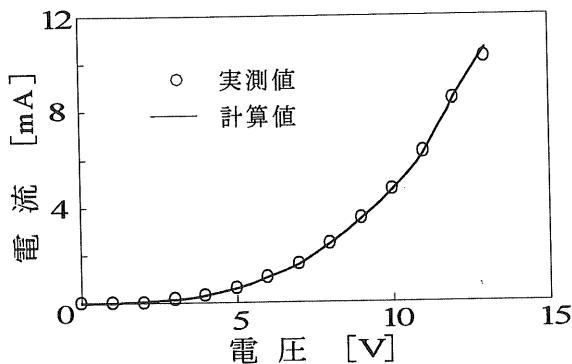


図12 電圧ー電流特性の計算値と実測値

Fig.12 Calculated and measured DC characteristics

ュレータを用いて計算し、比較した。静電容量及び誘電正接の周波数依存性を図11に、電圧ー電流特性を図12にそれぞれ示す。なお、実測にはインピーダンスアナライザ(HEWLETT PACKARD 4192A)を用いた。図から明らかのように、本研究で決定された等価回路モデルは実際のバリスタの特性を極めて良く再現できていることがわかる。特に、従来の研究^{1,3)}では完全に再現できなかつた、静電容量および誘電正接の周波数依存性が、ほぼ完全に再現できるようになった。これは粒界および粒内を表す抵抗、コンデンサを網目状に配置したこと、より実際のバリスタを正確に再現できたためと考えられる。

3. まとめ

本研究においては、表面再酸化型 SrTiO₃系セラミックバリスタの内部の微細構造を考慮し、これを電気的な等価回路に置き換えることを目的とした。得られた成果を以下に示す。

(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考案した。また、バリスタを表面から研削し、誘電特性、電圧ー電流特性を実測し、cut and tryにより計算値と比較することにより、等価回路モデルの各パラメータ値を求めた。

(2) 決定されたバリスタの等価回路モデルは、実際のサンプルのバリスタと誘電特性、電圧ー電流特性などの電気的特性が極めて良く一致することを示した。

これらのことから、本研究により決定されたバリスタの等価回路は極めて妥当性が高い事がわかる。また、表面から内部に向かう各部の特性の変化によりノイズ吸収特性がどの様に変わるか検討することが容易になり、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：電学論, 115A(1995)384
- 2) 鈴木雅史・柴田信悦・吉村昇：電学論, 116A(1996)177
- 3) M.Suzuki, S.Shibata and N.Yoshimura: Proc. 3rd International Conference on Materials Engineering for Resources, p.37, Akita(1998)
- 4) H S B Elayyan and S N Al-Refaie: J. Mater. Sci., 31(1996)1199
- 5) (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)