

論 文

EHD 流動の数値シミュレーションとプラスチック薄板の
電荷注入促進効果の推定

江 渡 充 芳*, 加 川 幸 雄**,

(2000年3月22日受付, 2000年9月12日受理)

Numerical Simulation of EHD Flow and Effect Estimation of
the Thin Plastic Plate on Charge Injection Enhancement

Mitsuyoshi ETO* and Yukio KAGAWA**

(Received March 22, 2000; Accepted September 12, 2000)

The liquid circulation occurs in insulating oils under the electric field application due to the electrohydrodynamic phenomenon. Its driving force is the interaction between the electric field and the ions polarized in the oil. A jet flow is observed when the one of the electrodes is partially covered with the thin plastic plate such as chlorinated vinyl or Teflon. This fact suggests that the charge injection from the electrode is accelerated with the presence of the plastic plate. The magnitude of acceleration of charge injection by plastic plate was estimated comparing the flow patterns and the maximum flow speeds obtained from numerical simulations and observations. The charge injection density of the covered part of an electrode was about 10 times of that of the non-covered part. For further study, the mechanism of the charge injection by plastic plate must be investigated.

1. はじめに

絶縁油等の液体誘電体に金属電極を浸して直流高電圧を印加すると液体が流動する現象が見られる。これはEHD (Electrohydrodynamic) 流動と呼ばれており、金属電極から注入された空間電荷が液体分子に付着してイオンを形成し、静電力を受けてイオンドラッグを引き起こすためと考えられている。

絶縁油中における電界やイオンの分布についてはすでに報告した¹⁻³⁾が、それらに伴う現象の一環として、絶縁油に平行平板アルミニウム電極を設け、直流高電圧を印加した場合に生じる液体のサーチュレーションについての実験を行ってきた。これらの現象を解析するためには電極から注入されるイオン密度を知ることが必要であるが、これは直接測定できない。筆者等は、これまで種々の方法で推定した値を用いてEHD流動の数値シミュレーションを行い、実験値と比較してきた⁴⁻⁶⁾。すなわち、実験と数値シミュレーションを比較することにより電荷やイオン分布を推定できる。

キーワード: 電気流体力学、電荷注入、絶縁油、シミュレーション

* 八戸短期大学経営情報学科 (031-0844 八戸市美保野 13-384)

Department of Management and Information,
Hachinohe Junior College 13-384, Mihono, Hachinohe
031-0844, Japan.

** 岡山大学工学部電気電子工学科 (700-0082 岡山市津島中 3-1-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering,
Faculty of Engineering, Okayama University, 3-1-1,
Tsushima Naka, Okayama 700-0082, Japan.

本論文は特にプラスチック薄板の電荷注入促進効果について考察したものである。これは実験の過程で電極の一部をプラスチックのフィルムや薄板で覆ったとき観測された、強い流れが生じる現象に関するものである⁷⁾。この原因は現段階では解明されていないが、流動を観測した結果、金属電極表面を覆ったプラスチック板が電荷の注入を促進しているものと考えることができる。

本報ではこれまでの結果を参照しながら、プラスチック薄板の効果に関するシミュレーションを行い、電荷の注入がどの程度促進されているかを推定する。

2. EHD 発生のメカニズム

絶縁油中には水分の反応などにより正負のイオンが存在することが知られており、これがEHD流動の主な原因である。これまでの観測結果を考慮して、その発生メカニズムを次のように仮定することができる。

正負のイオンは静電力を受け、それぞれ反対電極に向かって移動するが、大部分のイオンは電極でブロックされ、電極表面付近に集積する。集積したイオンは拡散作用により反対電極（イオンと同符号の電極）に向かってほぼ対数的に減少する形で分布する。電極付近に集積した電荷の一部が電極からの電荷注入によって電荷を交換し、電極と同符号のイオンが発生する。

これがEHD流動を起こす可動イオンとなり、電界の作用により液体の流動が発生する。液体の流動により電荷が移動するため電荷分布、電界分布、電位分布が変化する、電荷および電界の分布の変化に伴って液体の流動が

変化する。これらが互いに影響し合い、流動が絶えず変化する。

このように、電極付近には反対符号のイオンが集積するが、電極と同符号の可動イオンも共存する。電位分布や電界分布の測定によって得られる値はこれらの代数和であり、可動イオンの密度は直接測定することができない。観測されるのは、それによって生じた流動だけである。そこで流動シミュレーションを行う必要性がある。

3. 支配方程式

ここでは流動を2次元モデルとし、渦度と流れ関数により表わし、渦度に関する方程式、流れ関数に関する方程式、電荷の移動に関する方程式を連立させる。これらについて有限要素法を適用し、解を交互に求める。EHD流動を解析するためのシミュレーションプログラムは、駆動項を除いては熱対流のシミュレーションプログラムと同一である。EHD流動に適用する場合主な違いは次のとおりである。

熱対流における駆動力は、温度上昇による液体の密度の減少と重力加速度によって生じるため、駆動条件として、加熱面と冷却面の温度を与える。EHD流動における駆動力は可動イオンと電界の強さによって生じるため、駆動条件として両電極表面における注入電荷密度を与える必要がある。電界の強さは位置と電荷分布によって変化し、電荷密度は正負イオン密度の代数和で表わされる。

これらを考慮してEHDの支配方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -\omega \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} \\ = E \left(\frac{\partial q}{\partial x} - \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \nu \nabla^2 \omega \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial q}{\partial y} = \chi \nabla^2 q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{q}{\epsilon} \quad (4)$$

$$E = -gradV \quad (5)$$

ここで

φ : 流れ関数

ν : 動粘性係数

ω : 渦度

χ : 電荷の拡散係数

$$\begin{array}{ll} q: \text{電荷密度} & \epsilon: \text{液体の誘電率} \\ E: \text{電界の強さ} & V: \text{電位} \end{array}$$

である。

式(1)～(5)を順に計算し、微小時間経過毎に新しい値を求め、必要回数繰り返す。この場合、実測においてもシミュレーションにおいても定常には達しない。

4. 数値シミュレーションによる注入電荷密度の推定

両電極表面における注入電荷密度を直接測定することは困難なので流動の観測とシミュレーションを比較して推定した。

まず平行平板アルミニウム電極に絶縁性鉱油を充たし、微小な気泡を注入し、電圧を印加してEHDを発生させる。これをいろいろな長さの電極に対して行い、流線を写真に記録する。写真の気泡の軌跡から最大流速を測定する。

次にこれに対応したシミュレーションを行う。この場合、注入電荷密度は未知であるが、電位分布の測定などから推定した値から始める。この結果を実測の流線および最大流速と比較し、必要があれば注入電荷密度を試行錯誤法により修正してシミュレーションし直し、注入電荷密度を推定する。

測定容器は図1に示すように縦6cm、横18cm、高さ6cmのプラスチック製で、電極は間隔6cm、長さは1～18cmの間で任意に調節できるようにしてある。この図は容器の真上から見たものであり、重力の方向は紙面から裏面に向かっている。

図2はこの測定容器に共石2号絶縁性鉱油（粘性係数 8.2×10^{-3} Ns/m²、比誘電率2.2）を充たし、電極の長さを9cmとして、電圧20kVを印加した場合の流れの様子を観測したものである。十分に脱水、脱気した試料では流動が極めて緩慢となるので、ここでは適度に吸湿したもの（抵抗率 1.5×10^{10} Ω·cm程度）を使用した。

流れを可視化するため絶縁性鉱油に微小な気泡を注入している。医療用の注射器（5mL）を用い、針を付けず

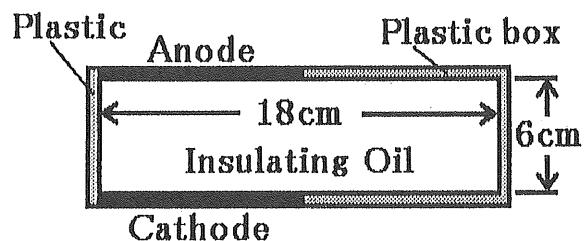


図1 EHD流動の測定容器

Fig. 1 Box cell for EHD flow.

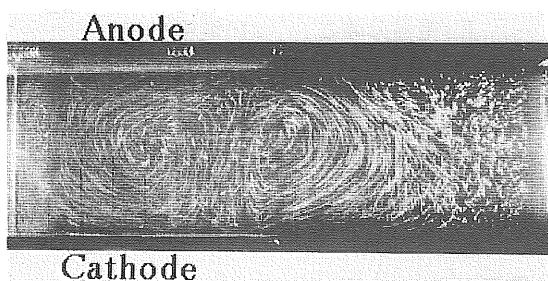


図2 絶縁性鉱油におけるEHD流動

電極長:9 cm, 電圧:20 kV/6cm, Vmax:約 20 mm/s.

Fig. 2 EHD flow in mineral insulating oil.

Electrode length:9cm.

に絶縁性鉱油を2 mL程吸い込み、更に空気を2 mL程吸い込む。この先端を液面から4 cm程度の位置まで浸し、注射器中の液体を勢い良く注入すると、直径0.1mm程度の気泡が多数発生する。この操作を3~4回繰り返した後、液体が静止するまで30秒程放置すると気泡はほぼ液体全体に広がる。これに横方向から光を照射し、光束を調節して上方向から観測すると、液面から2~3 cmの部分の流れを良く観測することができる。図2は電圧印加の2~3分後、絞り11、シャッター速度1/2 sで測定したものである。フィルムはASA 400のモノクロームフィルムである。

液体の流速を調べるために、気泡の注入を少なくし、シャッター速度を速くして撮影した数枚の写真およびビデオに記録した気泡の軌跡を分析して推定した。図2の場合の最大流速は20 mm/s程度であった。

図3は同一条件でシミュレーションを行った結果である。領域を 12×36 に分割し864の三角形一次要素として用いた。時間間隔0.01 s、ステップ数20000回とした。図3は電圧印加後3分20秒後の流線を示していることになる。

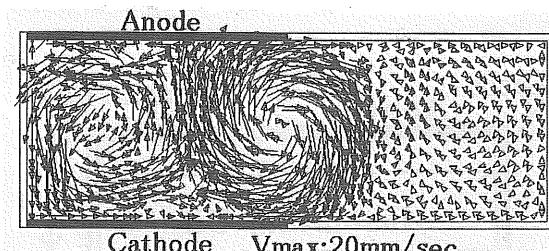


図3 EHD流動のシミュレーション

電極長:9 cm, 電圧:20 kV/6 cm.

Fig. 3 Simulated EHD flow.

途中経過は、2000回毎に最大速度とともに流れのベクトル図が表示されるようになっている。

これによって電圧印加からの経過を確認でき、推定値が不適切な場合は計算を中断することもできる。

絶縁油のEHD流動は前述のように絶えず変動する。シミュレーションにおいても流れの様子は変化するが、長時間(5000ステップ程度)のシミュレーションにおいては突然大きく流れが変化することがあった。この原因は、計算の誤差が蓄積し、電極間のある点の電荷密度が、電極表面の電荷密度(注入電荷密度)より大きくなるためであることが判明し、改善された。

すなわち、電極間の電荷密度の上限および下限を、それぞれ正負の注入電荷密度として制限した。また、電極外ではそれぞれの注入電荷密度の1/2を上限および下限とした。

その結果、流線および最大流速は安定し、実測において比較的多く出現する流線の代表的パターンおよび最大速度が比較できるようになった。

注入電荷密度の推定に当たっては、正負イオンの注入電荷密度の絶対値を等しくすると渦の回転方向が安定しないので、負イオンの密度をやや大きく仮定した。その結果、正イオン密度を $3 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ 、負イオン密度は正イオン密度の1.2倍程度とした場合、流線の形が実測に近く、電極中央付近の最大流速も実測値約20 mm/sに対して計算値20 mm/sとなった。電極の長さを2~16 cmの間で変えると流れの形は変わるが、同じ推定電荷密度で良好な結果が得られた。

5. プラスチック薄板の挿入による電荷注入の促進

電極の長さを容器の長さに等しくすると、容器全体に亘って緩やかな不規則な流れが生じる。これは、正負両極から同程度の電荷注入があるため、互いに反対方向の流れが生じるためであろう。

この状態で金属電極の一部をプラスチックの薄板またはフィルムで覆うと、その部分から強い流れ(10 cm/s程度のジェット流)が発生することが観測された。

図4および図6(上)~8(上)は厚さ2 mmの塩化ビニル板についてのもので、絞り5.6、シャッター速度1/8 sで撮影した写真である。厚さ0.1 mmの塩化ビニルフィルムや厚さ1 mmのテフロンシートでも同様の効果が見られた。

これらを観察すれば、プラスチック板を正電極側に挿入すると正電荷の注入が促進され、負電極側に挿入すると負電荷の注入が促進されるものと考えることができる。

この仮定を確認するため次のような平行平板テストセ

ルを製作した。すなわち、内径 11 mm、長さ 20 mm のプラスチックパイプの両端にアルミニウム製の円板電極を平行に取り付ける。上部電極の中心に直径 4 mm の小孔を設け、流出した液体を導くため内径 4 mm の透明なビニルチューブを接続する。下部には液体の流入口を設ける。これを絶縁鉛油に浸し、ビニルチューブを液面の上に出して直流高電圧を印加する。

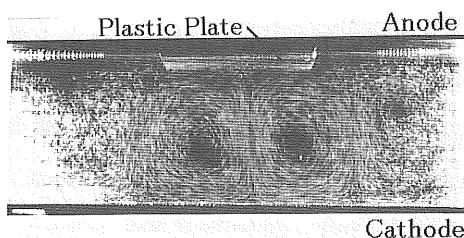


図 4 プラスチック板を正電極側に挿入した場合のジェット流
流れは正電極から負電極へ

Fig. 4 Jet flow produced from anode to cathode when a thin plastic plate covers the anode.

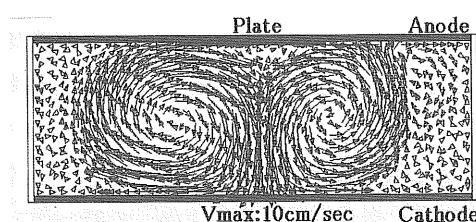


図 5 ジェット流のシミュレーション
プラスチック板を正電極中央に挿入
流れは正極から負極へ

Fig. 5 Simulated jet flow from anode to cathode when a plastic plate covers the anode at the center part.

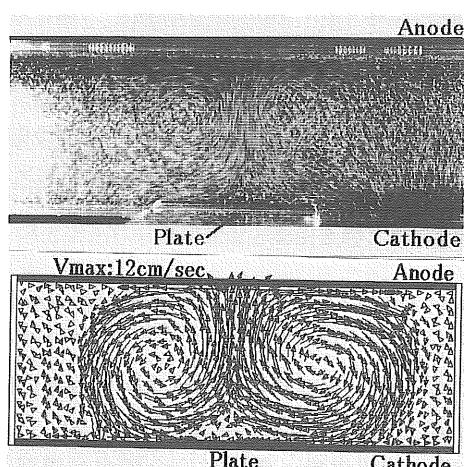


図 6 負電極中央に挿入した場合の実測(上)とシミュレーション(下)
流れは負電極から正電極へ

Fig. 6 Observation (top) and simulation (down) of EHD flow from anode to cathode by inserting a plastic plate over the center of the cathode.

印加電圧 25 kV の場合、液体の上昇は殆ど見られず痕跡程度であるが、下部電極の表面を幅 4 mm、厚さ 0.1 mm の塩化ビニルのフィルムで覆った場合、液体は数 mm 上昇した。上部電極を正電極、下部電極を負電極とした場合は効果がやや小さい。この実験においてフィルムの厚さを 0.1 mm および 0.25 mm、電極を覆う面積は下部電極の約 80 ~ 20 % の範囲で連続的に変化させてみたが、液体の上昇には大きな変化が見られなかった。

これらの結果は下部電極の一部をプラスチックフィルムで覆った場合、下部電極からの電荷注入が増加することを示している。

6. 数値シミュレーションによるプラスチック薄板の電荷注入促進効果の推定

前節で述べたジェット流の発生機構は現段階では不明であるが、Felici and Tobazeon⁸⁾ は二トロベンゼンに浸した金属電極を各種のポリエチレン等のフィルムで覆うと電荷注入が生じることを報告しており、これと類似の現象と考えられる。筆者等の観測結果と必ずしも一致しない点もあるが、電荷の注入が促進されていることは一致している。

この電荷の注入密度を直接測定することが困難であるので、この場合、数値シミュレーションと実測値を比較することによってその大きさを推定する。

その前提として次のように考える。

(1) プラスチック薄板で覆われていない部分の電荷注入

密度は 4. 注入イオン密度の推定で得られた

正イオン密度 $3 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$

負イオン密度 $3.6 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$

と仮定する。

(2) プラスチック薄板で覆われた部分からの電荷注入密度は(1)に比例するものと仮定する。

(3) 倍率 N は試行錯誤により求める。その条件として実測値とシミュレーションを比較して流線および流れの最大速度が十分合うように調整する。

この方法で得られた N の値は 10 程度であった。図 5 および図 6(下)~8(下)は N を 10 と仮定して、厚さ 2 mm の塩化ビニル板を正電極、負電極の中央、正電極の左右に挿入した場合のシミュレーション結果である。プラスチック板を正電極中央に挿入した場合に対応する実測は前掲の図 4 である。最大流速は実測値で約 10 cm/s、シミュレーションでは 7~12 cm/s となった。

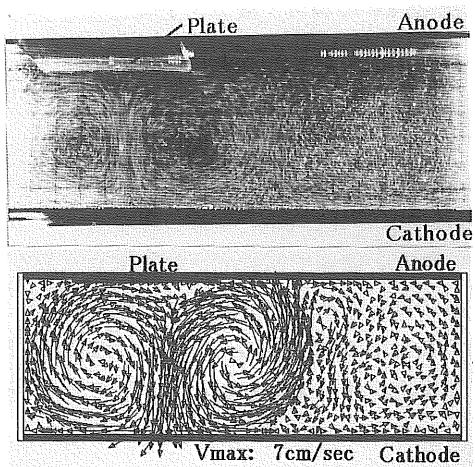


図7 正電極左端に挿入した場合の実測(上)とシミュレーション(下)
流れは正電極から負電極へ

Fig. 7 Observation (top) and simulation (down) of EHD flow from anode a plastic plate covers the anode at the left end.

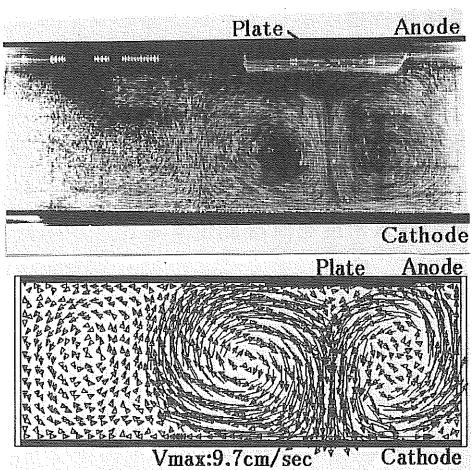


図8 正電極右端に挿入した場合の実測(上)とシミュレーション(下)
流れは正電極から負電極へ

Fig. 8 Observation (top) and simulation (down) of EHD flow from anode to cathode when plastic plate covers the anode at the right end.

7. 考察

絶縁性鉱油におけるEHD流動について実測した流線、最大流速とシミュレーションによる値が等しくなるように電荷注入密度を調整し、これより電荷密度を得た。電極の一部をプラスチック薄板によって覆った場合に電荷注入が促進される現象についても、実測とシミュレーションの結果を比較することでその効果の程度を推定した。

その結果、電極をプラスチック薄板で覆うと、その部分の注入電荷密度が約10倍になることが分かった。

これは、平行平板テストセルにおいて、プラスチックフィルムを挿入しないで25kV印加した場合に液面上昇が数mmとなることと、ほぼ等しい値である。

Felici and Tobazeon⁸⁾はニトロベンゼンに浸した金属電極を各種のポリエチレンやフッ素樹脂等のフィルムで覆うと強い電荷注入が生じることを報告しており、ある種のポリマーは負電荷を注入し、他のポリマーは正電荷を注入すると述べている。筆者等の観測では同じ塩化ビニルの薄板が、正電極においても負電極においても同程度の注入促進効果を示している。

この効果の推定値を正電極負電極ともに10倍程度としたが、平行平板テストセルで極性を変えると効果がやや低下することや、図6では実測より大きくなっていることから判断すると、負電極側ではこの値をやや小さく見積ることが必要であろう。

8. むすび

平行平板電極の一部をプラスチック薄板で覆うと、その部分からジェット流が生じる現象について、電荷注入が促進されるものと考えた。

その促進効果を推定するため流線と最大速度を実測するとともに、これらとシミュレーションの結果を比較して、試行錯誤法により促進効果が約10倍という結果を得た。

このような方法で促進効果を求めるためには、プラスチック薄板が無い場合の注入電荷密度が正確に知られていることが必要である。

これについては、いろいろな長さの電極について実測とシミュレーションを比較して試行錯誤的に注入電荷密度を求めた。またシミュレーションのモデルが適切であることが前提となるが、Aroclor (PCBの一種)の電界分布について行った実測と本モデルに基づいたシミュレーションの比較でも妥当な結果が得られている。

しかし、この現象の発生原因については現段階では不明であり、その面からの更なる考察が必要であろう。

参考文献

- 1) J.D. Cross and M.Eto:*Proceedings of the 5th International Conf. on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquid*, p.142 (1975)
- 2) M. Eto and J.D. Cross: IEEE Trans. Electr. Insul. EI-12(5) (1977).317
- 3) M. Eto: Jpn. J. Appl. Phys., 24 (1985) 446
- 4) 江渡充芳, 加川幸雄: 電気学会全国大会講演論文集, p.3-123 (1994)
- 5) M. Eto and Y. Kagawa: IASTED Proceedings of Int. Conf. Modeling, Simulation and Identification, p.52 (1994)
- 6) 江渡充芳, 加川幸雄: 計算電気・電子工学シンポジウム予稿集, 15(1995)157
- 7) 江渡充芳, 加川幸雄: 計算電気・電子工学シンポジウム予稿集, 17(1996)245
- 8) N.J. Felici and R.E. Tobazeon: J. Electrostat., 11(1981)135

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にともなう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