

小論文**パーコレーションクラスタによる****沿面放電のシミュレーション**

若本直己*, 大山龍一郎*, 金古喜代治**

(1995年10月16日受理)

Simulation of Surface Discharge Patterns by Percolation Cluster

Naoki WAKAMOTO,* Ryu-ichiro OHYAMA*

and Kiyoji KANEKO**

(Received October 16, 1995)

The authors have been studied on simulation techniques for creating the surface discharge patterns by a percolation cluster. The percolation cluster is used as a model of a statistical explanation for permeation phenomena. This paper explains the simulations of surface discharge patterns by the percolation cluster. In addition, this paper introduces percolation quantities Pe of which the value characterizes perimeter of fractal figures such as the discharge pattern. Finally, the similarities between real discharge patterns and the simulated cluster patterns are analyzed and considered by using fractal dimensions D and percolation quantities Pe .

1. まえがき

一般に、放電現象において観測されるリヒテンベルグ图形のような放電パターンは、幾何学的な自己相似性を持っていることから、フラクタル性を有しているものと考えられている¹⁻³⁾。したがって、これらの放電图形についてはフラクタル次元に基づいて数量化が試みられている。先に Niemeyer ら¹⁾は沿面放電の图形をシミュレートするために、二次元のラプラス場における放電路の成長確率を考慮したモデルを提案している。また、原ら²⁾はストリーマの進展過程を決定付ける要因として、ストリーマ上の電圧降下を考慮したシミュレーションモデルを提案している。一般に、フラクタルの自己相似性を用いたシミュレーションモデルは、実際に観測される放電图形の形状パターンを分類するような場合に利用することが多い。

著者らは、ランダムで複雑な現象を呈する物理現象を

キーワード: パーコレーション, クラスタ, 沿面放電, フラクタル

* 東海大学電気工学科 (259-12 平塚市北金目 1117)
Department of Electrical Engineering, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, 259-12 Japan

** 九州東海大学電気工学科 (862 熊本市渡鹿 9-1-1)
Department of Electrical Engineering, Kyushu Tokai University, 9-1-1 Toroku, Kumamoto, 862 Japan

数理モデル化し、数値解析が可能であるパーコレーション理論⁴⁾に着目して、放電图形をシミュレートする手法について検討してきた⁵⁻⁷⁾。一般に、パーコレーションは多孔質の媒質中を流動性物質が浸透する様子を表した数理モデルで、ランダムな場において隣り合う格子点間のつながり方を理解するのに利用されてきた⁸⁾。すなわち、パーコレーション理論は階層的で複雑な分岐構造をもつ放電路の進展を解析するのに好都合である。

本研究は、沿面放電現象を一種の浸透現象として取り扱うことにより、パーコレーションクラスタを用いて沿面放電图形のシミュレーションを試みたものである。本論文では、シミュレーション結果についてパーコレーション過程の基本量を観測実験より得られた放電图形と比較検討した結果に関する概要を報告する。

2. 沿面放電の観測実験

図 1 は沿面放電图形のパーコレーション基本量を求めるために用いた実験装置の概略を示す。沿面放電実験は棒-平板電極系の電極間に透明なアクリル板 (200 × 200 × 1 mm) を挟んで大気中において行った。棒電極は直径 5 mm の真ちゅう製であり、その先端を半球状に研磨したものを使用し、平板電極としては透明なネガガラスを用いた。また、実験は棒電極に 1.2 × 50 μs の雷インパルス電圧を印加し、平板電極を接地した。

アクリル板面上に生じた沿面放電の图形は、ネガガラ

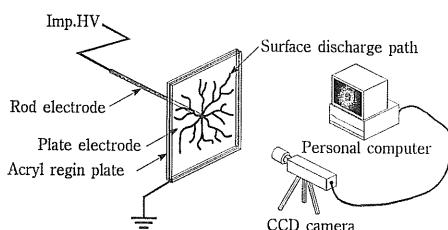


図 1 沿面放電の観測装置の概略

Fig. 1 Outline of experimental equipment.

ス製の平板電極を透過した放電の残光を CCD カメラにより撮影した。沿面放電の画像データは、パソコン (Macintosh) に取り込んで画像処理し、パーコレーションの基本量を求めた。

図 2 は沿面放電の実験から得られた放電パターンである。沿面の放電光は棒電極の先端からアクリル板面上に沿って、放電開始点から径方向に遠ざかるように進展している。一般に、沿面放電の放電路はフラクタル性を有している¹⁻³⁾。そこで、シミュレーション結果を評価する意味で、ボックスカウント法³⁾によってフラクタル次元を求めた。その結果、実際の放電图形のフラクタル次元は $D=1.39$ であった。

3. パーコレーションクラスタによるシミュレーション

著者らは、沿面放電に見られるような複雑でランダムな分岐構造を検討するために、パーコレーション過程を用いたシミュレーション法が有効であることに注目してきた⁵⁾。一般に、パーコレーション過程では格子点上にある原子がランダムに分布する場合に、隣接する格子点に同種の原子が占める塊のことをクラスタと呼んでいる⁶⁾。放電图形のシミュレーションは、二次元の正方格子につくられるパーコレーションクラスタを放電路として取り扱うことにより実行することができる。パーコレーションの基本量には、クラスタの大きさ s と周縁 t が定義されている⁴⁾。クラスタの大きさ s はクラスタを構成する格子点の総数であり、周縁 t はクラスタに隣接する格子点の数である。すなわち、複雑なランダム系を構成する要素のつながり方は s と t によって表現される。したがって、著者らは正方格子上につくられるクラスタを放電路の進展として取り扱うことにより、パーコレーション過程を用いた沿面放電图形のシミュレーションを実行した。

図 3 はパーコレーションによる沿面放電のシミュレーション法の概略を示す。沿面放電のシミュレーションパターンを得るには、まず正方格子の 1 点を放電開始点と

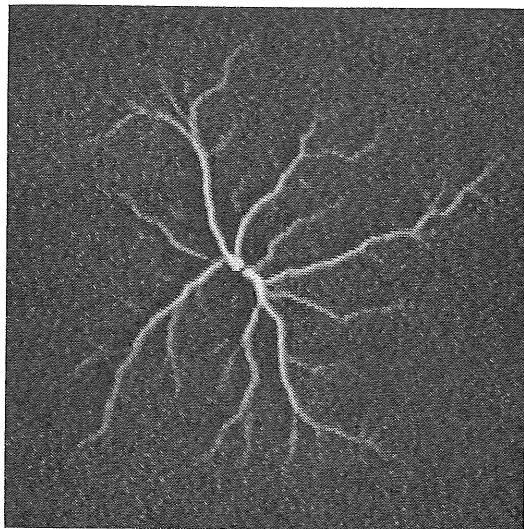


図 2 沿面放電の実測パターン

Fig. 2 Observational result of surface discharge pattern.

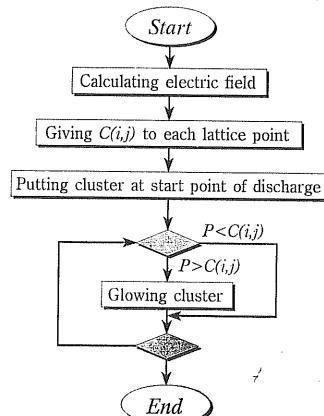


図 3 パーコレーションによるシミュレーション法の概略

Fig. 3 Flowchart of forming discharge pattern by percolation.

して設定する。次に、すべての格子点にはクラスタの形成に条件を付けるために(1)式の $C(i, j)$ を与える。

$$C(i, j) = R(i, j) + k/E(i, j) \quad (1)$$

ここで i, j は格子点の座標を表す。また $R(i, j)$ は乱数である。放電路の形成にはランダムな要素があるので、格子点には 0~100 までの乱数を発生させている。 $E(i, j)$ は放電開始前の電界であり、絶縁体表面を無限に広い平面と仮定し、その平面上の放電開始点となる 1 点に電荷を配置した二次元場の電界分布である。また、 k は沿面媒質によって決まる係数である。

沿面放電路のシミュレーションは、以下に示す [1] ~

[3]の手順によって実行する。

- [1] 放電開始点に相当する格子点にクラスタを発生させる。
- [2] そのクラスタに隣接する格子点の中で、分布確率 P に対して $P > C(i, j)$ を満足する格子点に新たにクラスタを進展させる。すなわち、 $C(i, j)$ が分布確率 P よりも小さければ放電路の進展が可能であると認識し、逆に大きければ放電路の進展が不可能な格子点であると判断するものである。クラスタに隣接する格子点では $C(i, j) < P$ であれば、クラスタを連結して順次クラスタを進展させる。
- [3] クラスタの成長が止まるまで[2]の手順を繰り返し実行する。

図4は本手法により作成した沿面放電図形のシミュレーション結果である。このシミュレーションパターンのフラクタル次元は $D=1.53$ となり、図2に示した実験で観測された沿面放電図形のフラクタル次元に近似している。したがって、本シミュレーション結果の沿面放電図形は実験で観測された沿面放電図形と幾何学的に相似している。

また、図5は沿面放電の観測実験から得られた沿面放電のパターンとシミュレートした沿面放電パターンに対してクラスタの大きさ s と周縁 t の関係を示している。著者らは、これらグラフのプロット点が良い直線性を示すことから、直線の傾きによって定量的にパターンの比較ができるものと考えている。著者らは s と t の直線関係の傾きを便宜的にパーコレーション量 Pe と呼んでいる。このパーコレーション量について、沿面放電の実測パターンにおいて $Pe=1.15$ であり、シミュレーションパターンで $Pe=1.16$ となった。すなわち、パーコレーション量 Pe においても、本シミュレーション法により得られた沿面放電図形は、実験で観測された沿面放電図形と値が近似している。

4. ま と め

高電圧放電現象の放電パターンは、複雑でランダムな分岐構造をもつことから、従来よりフラクタル次元により放電形状の分類と解析が行われ、コンピュータによりシミュレーション放電パターンを求めることが多かつた。著者らは、パーコレーション過程に注目してパーコレーションクラスタを用いた新しいシミュレーション法を提案し、放電路の解析を行った。その結果、本研究では以下のようなことが明らかになった。

- (1) 沿面放電の放電パターンをパーコレーションクラスタによりシミュレートする手順を明らかにし、良好な

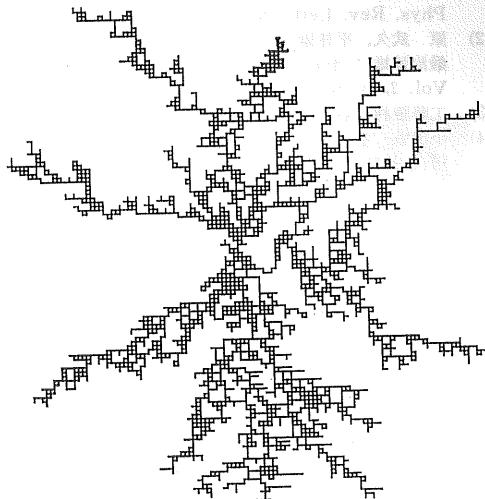


図4 沿面放電のシミュレーションパターン

Fig. 4 Simulation result of surface discharge pattern.

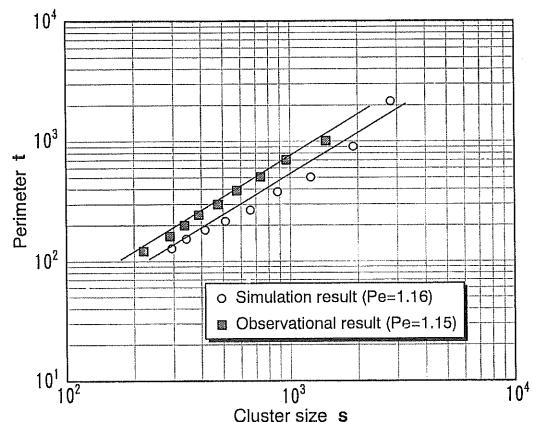


図5 沿面放電の大きさ s と周縁 t の関係

Fig. 5 Relation between cluster size s and perimeter t .

シミュレーション結果を得ることができた。

(2) 本シミュレーション法により得られた放電パターンと実測放電パターンのフラクタル次元 D は、ほぼ類似していることから、両者は幾何学的に相似であることがわかった。

(3) パーコレーションの基本量であるクラスタの大きさ s と周縁 t の関係は良い直線性を示した。その直線の傾き(パーコレーション量 Pe)は、実測パターンのパーコレーション量 Pe と近似した値を示した。

参 考 文 献

- 1) L. Niemeyer, L. Pietronero and H.J. Wiesmann:

- Phys. Rev. Lett., 52 (1984) 1033
- 2) 原 武久, 平林康芳, 林 敏幸, 山本 修, 林 宗明,
鍛治幹雄 : 平成 3 年度電気学会全国大会講演論文集,
Vol. 2, p. 87 (1991)
- 3) 工藤勝利 : 静電気学会誌, 16 (1992) 115
- 4) 小田垣 孝 : パーコレーションの科学, pp. 2-11, 裳華
房 (1993)
- 5) 若本直己, 大山龍一郎, 金古喜代治 : 平成 6 年度電気関
係学会九州支部連合大会講演論文集, p. 446 (1994)
- 6) 若本直己, 大山龍一郎, 金古喜代治 : 第 22 回可視化情
報シンポジウム講演論文集, Vol. 14, Suppl. No. 1,
p. 143 (1994)
- 7) 若本直己, 大山龍一郎, 藤森成一, 金古喜代治 : 平成 7
年電気学会全国大会講演論文集, Vol. 2, p. 168 (1995)