

μ s パルス電圧印加による液体誘電体中の 負極性ストリーマ進展のフラクタル性

非会員 若松 隆 (岩手大)
 正員 藤原 民也 (岩手大)
 正員 山田 弘 (岩手大)
 非会員 後藤 邦之 (岩手大)
 会員 工藤 勝利 (明治大)

Fractal Characteristics of Negative Streamer Propagation in Liquid Dielectrics
 under Micro-second Pulse Voltage Application
 Ryu Wakamatsu, Non-member, Tamiya Fujiwara, Member, Hiroshi Yamada, Member Kuniyuki Goto,
 Non-member (Iwate University), Katsutoshi Kudo, Member (Meiji University)

Branching structure of negative streamer in liquid dielectrics is found to have fractal characteristics. The fractal dimension of negative streamer in liquid dielectrics is constant during voltage application period, which also has been reported for several solid dielectrics. In case of the mixtures of hydrocarbon liquids and carbon tetrachloride, the fractal dimension decreases as the aspect of negative streamer is changed from bush-like one to tree-like one. The patterns of negative streamer aspects obtained from the simulation are compared with those obtained from the experiment.

キーワード：フラクタル性，フラクタル次元，ストリーマ，液体誘電体， μ s 破壊，添加効果

1. まえがき

気体中では、SF₆など自由電子を捕獲する電気的負性添加物を加えることにより衝突電離が抑圧されるので絶縁耐力が高くなる。液体においても電気的負性添加物を加えることにより、その絶縁耐力の向上が予想され、添加効果が詳細に調べられている⁽¹⁾。しかし、四塩化炭素の微量添加では予想とは反対に負極性ストリーマの進展を容易にする結果が報告されている⁽²⁾。このことは、視点を変えれば、四塩化炭素を添加物として用いれば、正極性に比べて進展が困難な負極性ストリーマを容易に進展させることができ、その形状の観察が可能であることを示す。

他方、フラクタルという概念を使って複雑な放電パターンを解析する研究が最近注目されている⁽³⁾。また、比較的単純なシミュレーションモデルによって得られた放電パターンがフラクタル性をもつことが知られている⁽⁴⁾。しかし、気体・固体誘電体中に発生する放電パターンについてのフラクタルによる解析は行われているが、液体誘電体中のストリーマ進展に関しては試みられていない。

このような観点から、ここでは、イメージコンバータカ

メラによって捕らえた液体誘電体中のストリーマのフラクタル性について検討し、さらに、シミュレーション放電パターンを作成し、実際の放電パターンと比較検討を行った。

2. 実験方法

<2.1> 実験方法 実験装置の概略図を図1に示す。この装置は高電圧発生装置、写真撮影系、電流測定系、テストセルから構成されている。電極構成は針対平板であり、針電極には電界研磨された先端曲率半径5 μ m程度のタングステン針、平板電極には表面が鏡面研磨された直径20 mmのステンレス鋼製円板を用いた。電極間のギャップ長は4 mmであり、針電極に印加される高電圧パルスは、パルス幅を4.0 μ s、電圧値を45 kVの一定とした。駒撮り写真は、シュリーレン法を用いてイメージコンバータカメラ(HADLAND社製)により撮影され、同時に光電変換法を用いてストリーマ進展時の電流波形が観測できる。写真の駒撮り間隔は500 ns(その中の露光時間は100 ns)である。用いた試料はシクロヘキサン、トルエン、ベンゼンおよびそれらと四塩化炭素の混合液である。混合比は、シクロヘキサン、トルエン、ベンゼンの分子数

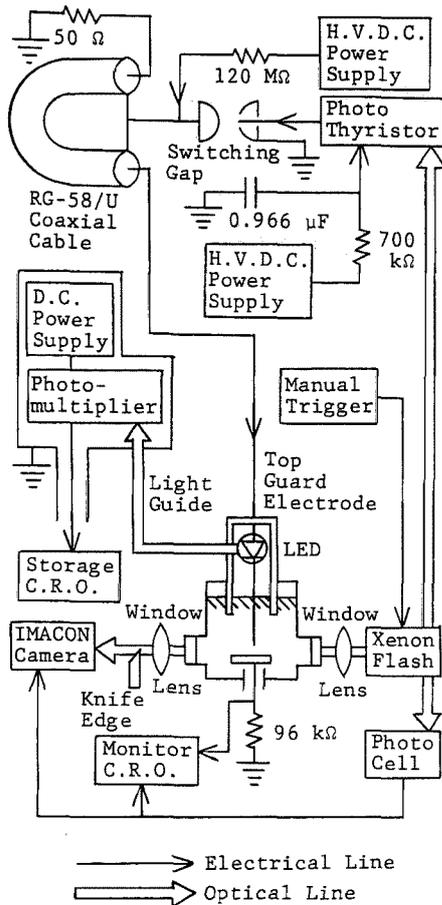


図1 実験装置の概略
Fig.1. Schematic diagram of experimental set-up.

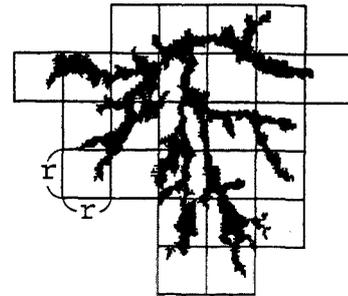
と四塩化炭素の分子数の割合で999対1, 99対1, 9対1の3種類とした。また、正極性ストリーマは進展速度が速く、添加効果があまり見られないため、負極性ストリーマについてのみフラクタルによる解析を行った。なお、実験は室温、大気圧下で行われている。

〈2・2〉 フラクタル次元の計算 得られた駒撮り写真から各駒ごとの針電極軸方向へのストリーマの伸びを求めるとともに、イメージスキャナ (OMRON社製 HS40CL-H) を用いてパーソナルコンピュータに読み込み、画像処理を行い、以下で述べるカバー法 (Box Counting法と呼ばれることがある) によってフラクタル次元を求めた。

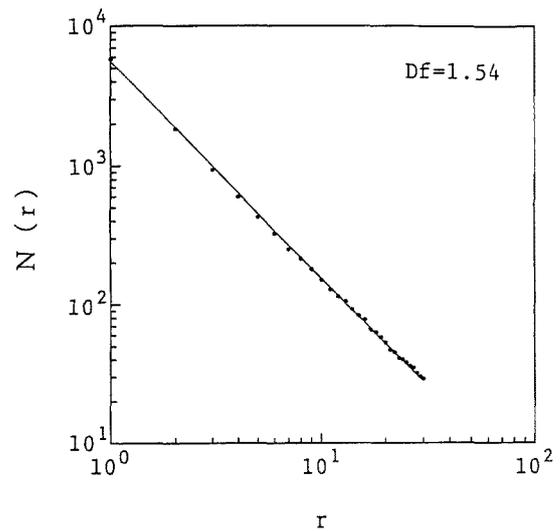
ストリーマの解析に使用したフラクタル次元はカバー法により求めた。この方法は対象とする図形を1辺が r の正方形で被覆したとき、被覆できる正方形の数を $N(r)$ とすると、(1) 式の関係が成り立つことを利用したものである。

$$N(r) \propto r^{-Df} \quad (Df: \text{フラクタル次元}) \dots (1)$$

すなわち、まず被覆できる正方形の数 $N(r)$ を r に対



(a) 画像処理法により得られたストリーマパターン
(a) A streamer pattern obtained using an image analysis method.



(b) r と $N(r)$ との関係

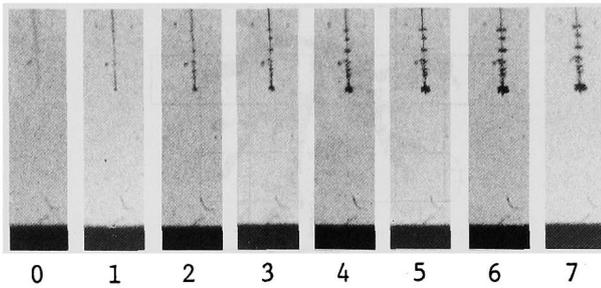
(b) The relation between $N(r)$ and r .

図2 カバー法によるフラクタル次元の求め方
Fig.2. Estimation of fractal dimension using a scale covering method.

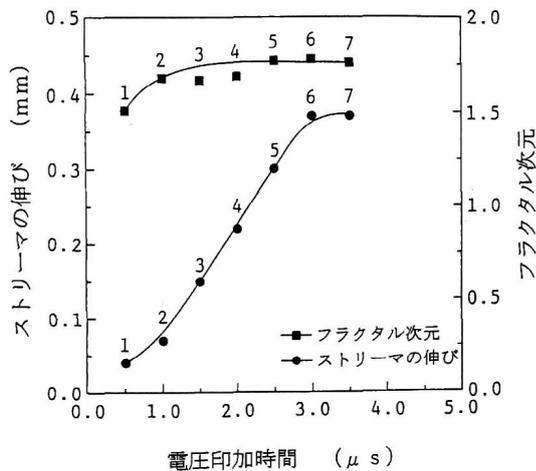
して両対数プロットをする。もし、対象とする図形がフラクタルであるならば、その関係が直線性を示し、(1) 式から直線の傾きの絶対値がフラクタル次元 Df を表わすことになる。すなわち、この直線性が高いことはフラクタル性をもつことを示す。

3. 実験結果と考察

図2に1例として、シクロヘキサンと四塩化炭素の混合比が9対1の場合のカバー法による結果を示す。(a) 図は実際の写真から画像処理によりショック波などの不要な情報を除いたストリーマである。(b) 図は r を変化させて $N(r)$ を測定し、 r と $N(r)$ との関係を表わしたものである。この場合の Df は1.54であり、直線性がきわめて高く、ストリーマ進展はフラク



(a) シクロヘキサン中の負極性ストリーマ進展
(a) Negative streamer development in cyclohexane.



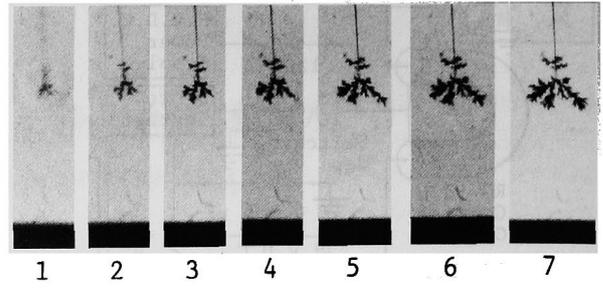
(b) 対応するストリーマの伸びおよびフラクタル次元の変化
(b) The corresponding streamer length and fractal dimension.

図3
Fig. 3.

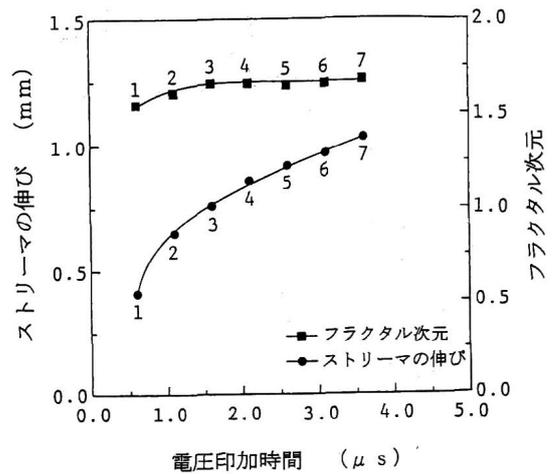
ル性をもつことがわかる。他のいずれの場合も高い直線性が得られた。

図3 (a) にシクロヘキサンのみの場合のイメージコンバータカメラによる放電進展の様相を示す。1駒目に小さなまわりも状の放電領域が針端に現われ、これが7駒目まで少しずつ大きくなるが、平板電極に向かって進展するストリーマには成長しない。(b) 図には電圧印加時間に対するストリーマの伸びおよびフラクタル次元の関係を示す。なお、(a) 図の駒番号は(b) 図中の番号と時間的に対応する。(b) 図においてストリーマの伸びは時間とともに増加するが、フラクタル次元はほぼ一定の1.8である。

図4 (a) は、シクロヘキサンと四塩化炭素の混合比が999対1の場合の放電進展の様相を示す。(b) 図は、電圧印加時間に対するストリーマの伸びおよびフラクタル次元の関係である。全路破壊には至っていないが、わずか0.1%の四塩化炭素の混合によりストリーマはブッシュ状になり、進展しやすくなる。この場合もストリーマの伸



(a) シクロヘキサンと四塩化炭素の混合比が999:1の場合の負極性ストリーマ進展
(a) Negative streamer development for the mixing ratio of cyclohexane to carbon tetrachloride of 999:1.



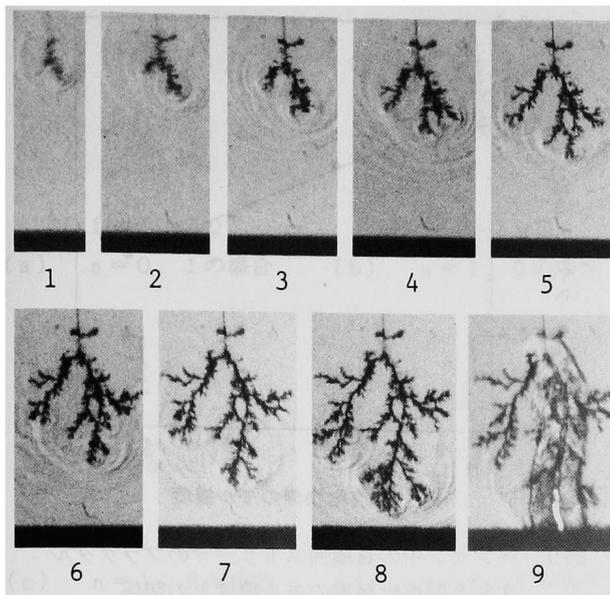
(b) 対応するストリーマの伸びおよびフラクタル次元の変化
(b) The corresponding streamer length and fractal dimension.

図4
Fig. 4.

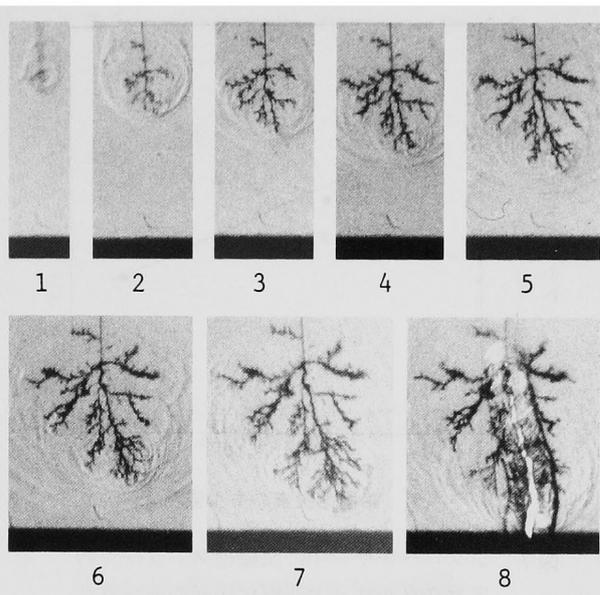
びは、時間とともに増加するが、フラクタル次元はほぼ一定の1.7である。

混合比を99対1に高めると図5 (a) に示すようにストリーマの形状はトリー状になり、9駒目(電圧印加から4.5 μs後、すなわち電圧パルス立ち下がり後)で全路破壊に至っている。この場合もストリーマの伸びとフラクタル次元の時間的変化は同様な傾向を示し、フラクタル次元はほぼ1.6である。

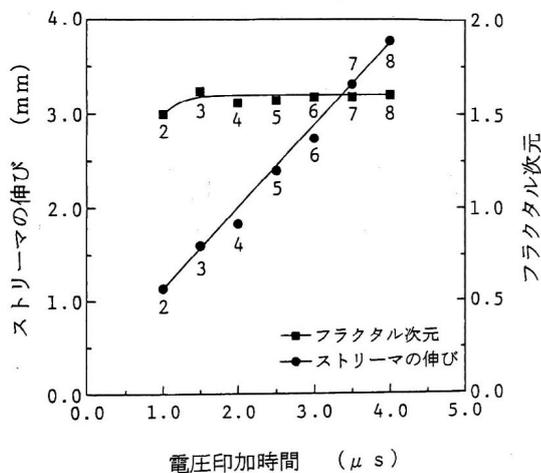
図6には混合比が9対1の場合のストリーマ進展とそれに対応するストリーマの伸びおよびフラクタル次元の変化を示す。混合比99対1の場合と比べてストリーマの直径は小さくなる傾向を示し、さらに平板電極方向に進展しやすくなる。また、それに伴い破壊に至る時間も4.0 μs(8駒目)と短くなっている。(b) 図よりストリーマの伸



(a) シクロヘキサンと四塩化炭素の混合比が99:1の場合の負極性ストリーマ進展
 (a) Negative streamer development for the mixing ratio of cyclohexane to carbon tetrachloride of 99:1.

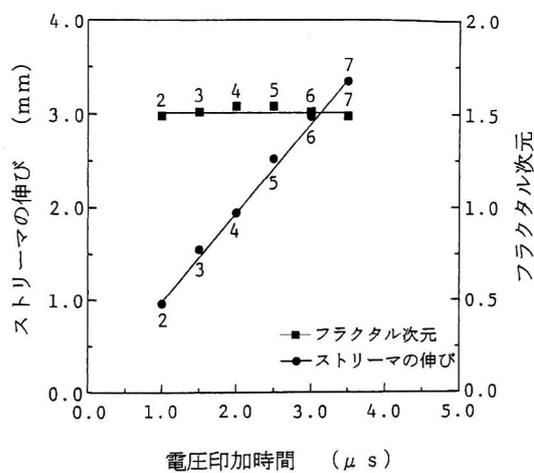


(a) シクロヘキサンと四塩化炭素の混合比が9:1の場合の負極性ストリーマ進展
 (a) Negative streamer development for the mixing ratio of cyclohexane to carbon tetrachloride of 9:1.



(b) 対応するストリーマの伸びおよびフラクタル次元の変化
 (b) The corresponding streamer length and fractal dimension.

図5
 Fig. 5.



(b) 対応するストリーマの伸びおよびフラクタル次元の変化
 (b) The corresponding streamer length and fractal dimension.

図6
 Fig. 6.

伸びは時間とともに増加するが、フラクタル次元はほぼ一定の1.5である。

図7は電圧印加時間が3.0 μsにおけるシクロヘキサン中のストリーマのフラクタル次元と四塩化炭素のモル濃度との関係を示したものである(ただし、混合比が999対1の場合は3.1 μs)。四塩化炭素の添加量を増加さ

せるとフラクタル次元が減少する傾向があることがわかる。

同様に、電圧印加時間が約3.0 μsにおけるストリーマのフラクタル次元と四塩化炭素のモル濃度との関係をトルエン、ベンゼンについてそれぞれ図8および9に示す。この場合もシクロヘキサンの場合と同様、四塩化炭素の添加量を増すとフラクタル次元が減少することがわかる。

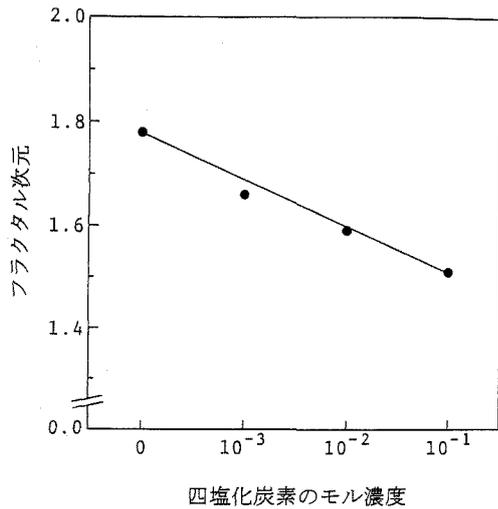


図7 シクロヘキサン中の負極性ストリーマのフラクタル次元と四塩化炭素のモル濃度との関係

Fig. 7. Effect of carbon tetrachloride molar fraction on the fractal dimension of negative streamer in cyclohexane.

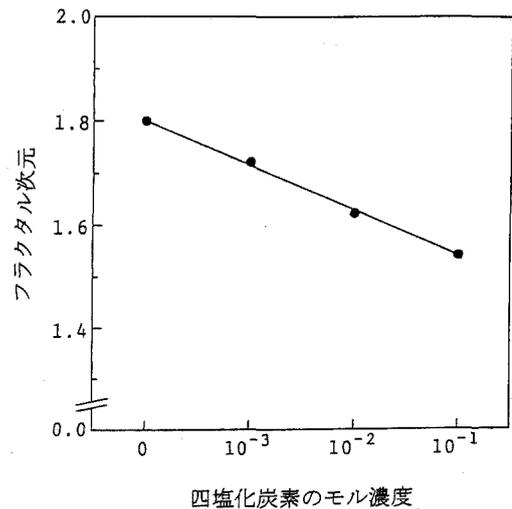


図9 ベンゼン中の負極性ストリーマのフラクタル次元と四塩化炭素のモル濃度との関係

Fig. 9. Effect of carbon tetrachloride molar fraction on the fractal dimension of negative streamer in benzene.

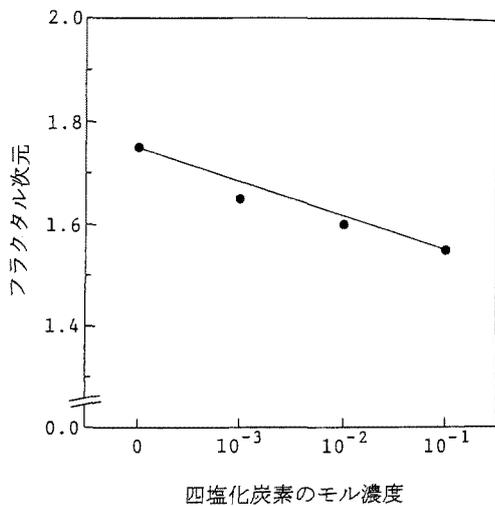


図8 トルエン中の負極性ストリーマのフラクタル次元と四塩化炭素のモル濃度との関係

Fig. 8. Effect of carbon tetrachloride molar fraction on the fractal dimension of negative streamer in toluene.

以上のことから、電圧印加時間の増加とともにストリーマの伸びは増加するが、ストリーマはフラクタル次元を一定に保つように、つまり複雑さの程度を一定に保つように進展することがわかる。このことは固体であるPMMA樹脂中における交流トリートメントの時間特性と類似する⁽⁶⁾。また、四塩化炭素の添加量を増加すると、ストリーマのフラクタル次元が減少することがわかる。

4. シミュレーション

実際の液体誘電体中の負極性ストリーマはあまりも状からトリー状へと変化することから、ここでは、それらの形状を比較的容易にシミュレート可能である成長確率を考慮した工藤ら⁽⁶⁾の2次元シミュレーションモデルに従い、シミュレーション放電路の作成を行った。このシミュレーションでは以下のような手順に従い放電路を成長させる。

2次元正方格子においてラプラス方程式 $\nabla^2 \phi = 0$ (ϕ :ポテンシャル)を次の(2)式のように離散化して反復緩和法によって解く。

$$\phi_{i,k} = \frac{1}{4}(\phi_{i+1,k} + \phi_{i-1,k} + \phi_{i,k+1} + \phi_{i,k-1}) \dots (2)$$

ここで、指標 i, k は離散格子座標を表わしている。この場合、ポテンシャルを求めるための境界条件は、仮想平板電極では、 $\phi = 1$ とし、仮想針電極、外壁全体および放電路(内部は等電位面とする)では $\phi = 0$ とする。

次に放電路先端部での進展可能な格子に対して、局部電界 E_i を求める。放電路先端部での成長確率 P_i は、局部電界 E_i と次の(3)式のように関係づけられる。

$$P_i = E_i^\eta / \sum E_i^\eta \dots (3)$$

この(3)式を用いて成長点を決定する。分母の総和は進展可能なすべての格子に対して行われる。べき指数 η は放電路進展に及ぼすランダム性と電界効果に関するパラメータである⁽⁶⁾。 η が大きいほど、放電路進展時の成長確率に

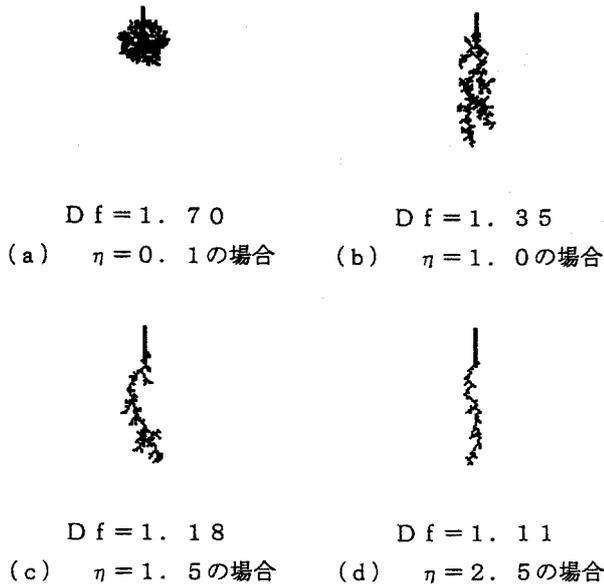


図10 2次元シミュレーション放電パターンの一例
Fig.10. An example of two-dimensional simulated discharge patterns.

及ぼす局部電界の効果が大きくなる。選ばれた格子を成長する放電路先端部に付け加える。この新しい放電パターンが境界条件となり、再び計算が繰り返される。以上の手順を放電路進展がある決められた値に達するまで繰り返す。また、このシミュレーションでは放電路が微小距離進むたびに、全体のポテンシャルを計算する必要があり、長時間の計算が要求される。このためここでは、シミュレーション領域を80×80の正方格子とした。

5. シミュレーション結果と考察

図10にパラメータ η を0.1から2.5まで変化させたときの2次元シミュレーション放電パターンの一例を示す。図2から5に示される実際の負極性ストリーマのようにパラメータ η が大きくなるにつれて、シミュレーション放電パターンはまりも状からブッシュ状そしてトリー状へと変化し、フラクタル次元 Df は小さくなる。

図11には2次元シミュレーションにおける η とフラクタル次元 Df との関係を示す。 η が大きくなるとフラクタル次元 Df は減少することがわかる。この図11の直線部分($\eta=0.1\sim 1.0$)ではフラクタル次元が1.70から1.35まで変化する。また、図7から9の負極性ストリーマのフラクタル次元と四塩化炭素のモル濃度との関係では、四塩化炭素の添加量が増すとフラクタル次元が約1.8から1.5まで変化する。シミュレーションのデータ数および四塩化炭素の添加量の種類が少なくはっきりとしたことを述べることは難しいが、四塩化炭素の添加量が増してもパラメータ η が増加してもフラクタル次元がともに単調減少することは興味深い。また、2次元シミュレー

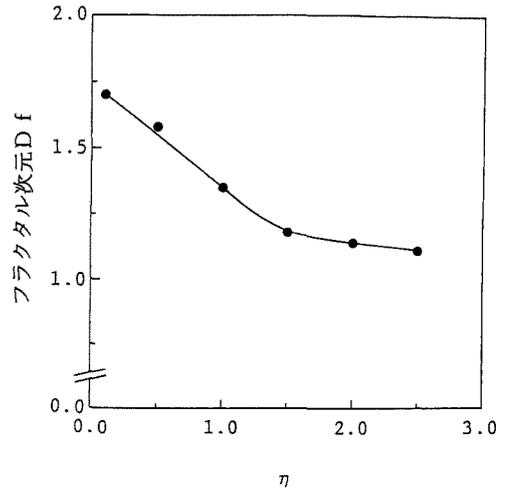


図11 2次元シミュレーションにおける η とフラクタル次元 Df との関係
Fig.11. The relation of the fractal dimension Df to the exponent η for two-dimensional simulation.

ション放電パターンと実際の負極性ストリーマを比較するとそれらの形状が類似することから、負極性ストリーマの形状を決定する大きな要因は、放電路先端部での電界の効果と放電進展にかかわるランダム性であると考えられる。電気力線の向きから、電界効果が大きいと、針から平板電極方向、すなわち、各ストリーマ図では上から下方向のストリーマ進展が促進する。これに対し、ランダム性が高くなる、すなわち、 η が小さいことは各ストリーマ図では横方向の進展性が高いことを示す。これらのことから、液体誘電体中に四塩化炭素を添加することにより、放電路先端部での電界効果の方がランダム性の効果より支配的になり、負極性ストリーマの形状がまりも状からブッシュ状さらにトリー状へと変化するものと考えられる。

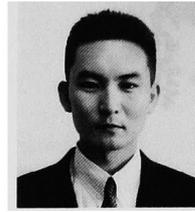
6. まとめ

液体誘電体中の負極性ストリーマの分岐構造は、フラクタル性をもつことが明らかになった。四塩化炭素を添加することによりストリーマの形状は、まりも状からトリー状まで変化し、そのフラクタル次元は小さくなる。シミュレーション結果との比較から、負極性ストリーマ進展に関しては、放電路先端部での電界効果と放電進展にかかわるランダム性が重要であると考えられる。また、四塩化炭素の添加量が増すと電界効果の方がランダム性の効果より支配的になり、負極性ストリーマが進展しやすくなるものと思われる。

(平成7年2月8日受付, 同7年5月15日再受付)

文 献

- (1) 山田弘・谷口宏・藤原民也・玉田耕治：「シクロヘキサンの破壊前駆電流と破壊の進展速度に及ぼす四塩化炭素の添加効果」, 電学論A, 112, 651-657, (1992)
- (2) 山田弘・大石豊・若松隆：「マイクロ秒パルス電圧印加によるベンゼン中の放電進展に及ぼす四塩化炭素の添加効果」, 電学論A, 114, 236-242, (1994)
- (3) 丸山悟・小林正三・工藤勝利：「高分子絶縁材料中における交流トリートのフラクタル性」, 電学論A, 113, 480-485, (1993)
- (4) L. Niemeyer, L. Pietronero and H. J. Wiesmann: "Fractal Dimension of Dielectric Breakdown", Phys. Rev. Lett., 52, 1033-1036, (1984)
- (5) 工藤勝利・丸山悟：「PMMA樹脂中における交流トリートの進展特性とフラクタル次元」, 電学論A, 111, 682-683, (1991)
- (6) 金峯稔昌・椎野茂宏・小林正三・丸山悟・工藤勝利：「成長確率を考慮した3次元シミュレーショントリートのフラクタル」, 電気学会絶縁誘電研究会試料, DEI-93-108, 47-55, (1993)



若松 隆 (非会員)

昭和45年7月26日生。平成7年3月岩手大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。



藤原 民也 (正員)

昭和22年4月17日生。48年4月一関高専勤務, 50年4月岩手大学工学部勤務, 現在に至る。62年4月~63年3月MIT客員研究員。



山田 弘 (正員)

昭和22年7月27日生。54年5月岩手大学工学部勤務, 現在に至る。59年4月~61年3月MIT客員研究員。



後藤 邦之 (非会員)

昭和44年4月25日生。平成7年3月岩手大学工学部電気工学科卒業。



工藤 勝利 (正員)

昭和18年9月21日生。49年明治大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在, 同大学理工学部教授。