液体中の絶縁破壊前駆現象の3次元観測

学生員 大月 俊策, 学生員 山澤 一彰, 正員 山下 久直 (慶應義塾大学)

A Study of Three-dimensional Observation of Pre-breakdown Phenomena in Dielectric Liquids

Shunsaku Otsuki, Student Member, Kazuaki Yamazawa, Student Member, Hisanao Yamashita, Member (Keio University)

This paper presents a new method which visualizes the high-speed three-dimensional images of the pre-breakdown streamers in dielectric liquids. A new optical system, having two crossed light axes to observe the needle tip from different directions was designed. The shadowgraphic images from these two directions were combined through a beam splitter and focused on the photo-cathode of image converter camera. The photograph taken by this high-speed shadowgraph system was reconstructed to the three-dimensional images using an image scanner and a computer. Using this system, the growth and the decay processes of the streamer in cyclohexane was investigated.

キーワード: 3次元観測, 液体誘電体, 破壊前駆現象, ストリーマ, 高速度撮影

1 はじめに

筆者らは、これまでイメージコンバータカメラを用いて各種液体中の針対平板電極構成における破壊前駆現象を観測してきた。その結果、炭化水素液体におけるストリーマの形状は、針電極の極性だけでなく分子構造によっても異なることを示した[1]。最近の研究で、針端曲率半径が小さい針電極において、シクロヘキサン中のストリーマ初期形状は、印加電圧の上昇に伴い、負針では球状、半球状、パゴダ状、ブッシュ状へと変移し、正針では、ブッシュ状からフィラメント状へと変移することを明らかにした[2]。しかし、これらの研究では、1方向からしか観測が行われておらず、同条件の観測において異なった形状のストリーマが観測された。

これらの研究で得られたストリーマの映像は2次元であるが、実際のストリーマは空間内を3次元的に進展する。そのため、これらのストリーマの正確な挙動を明らかにするには、従来の1方向からの観測では情報が不十分であり、少なくとも同時に2方向から観測する必要がある。

複数の方向から観測している研究としては、ForsterとWongが2方向からストリーマを、高速度シュリーレン光学系を用いて観測したものがある[3]。この研究では、ストリーマを2方向から40nsの時間差で2枚の映像として観測した。Ihoriらは誘電液体中の電界分布を球対球電極構成でカー効果を利用して3次元観測を行っている[4]。また、雷放電路の形状を把握するために雷を2方向から観測し、放電路の3次元像を再現する方法が開発されている[5, 6]。その他にもいくつかの研究がなされている。しか

しながら、液体中のストリーマの発生・進展・消滅過程を3次元的に高速度で時間分解して観測した研究は報告されていない。

そこで、ストリーマの進展・消滅過程をより詳しく知るために、2方向から同時に高倍率、高速度で観測することが可能な光学系を新たに構築した。さらに画像処理を行うことで、ストリーマの進展、消滅過程を空間的に捉えることが可能となった。

本論文は、この新しい観測方法を用いてシクロヘキサン中のストリーマの観測を行い、ストリーマの進展、消滅過程について考察した。

2 実験方法

実験には試料として純度 99.5%のシクロヘキサンを用いた。使用したテストセルは、容量 700cm²の円筒形ガラス容器で、2対の光学的に平面な石英ガラスの観測窓を持っている。電極構成は針対平板電極を用いた。針電極はタングステン製、針端開度 20度、針端曲率半径 0.5μmの表面状態が均一なものを、平板電極はニッケル製、直径 35mmのロゴスキ型のものを使用した。ギャップ長は 5.0mmとした。針電極にインパルス電圧を印加し、平板電極を接地した。印加したインパルス電圧の立ち上がり時間は 0.2μs、半値幅は 540μsである。

次に、新たに構築した高速度 3次元観測のためのシャドウグラフ光学系と、それにより得られた映像を3次元像に再構成する手順を説明する。

図 1. 高速度 3 次元観測のための光学系

Figure 1. High-speed three-dimensional shadowgraph optical system.

L1: Lens 100mm, CL1: Camera Lens 85mm f/1.4

L2: Lens 300mm, CL2: Camera Lens 50mm f/1.2

BS: Beam Splitter

2.1 光学系

図 1 は、ストリーマを 2 方向から同時観測するために新たに構築した光学系である。この光学系は、同時刻の 2 方向からの映像を記録するために、全く同一の 2 組の対称なシャドウグラフ光学系を組み合わせたものである。光源にはキセノン (Xe) フラッシュを用いた。このフラッシュはチューブ型で水平方向に一様に光を放射するため、フラッシュから 2 方向に光を取り出し、ミラーを用いることで 90 度異なる 2 方向から針先を照らすことができる。この 2 つの光路からの同時刻の映像を、キューブ型ビームスプリッタを用いて 1 つの像とし、イメージコンバータカメラ (ICC) で経時変化を記録した。写真の各フレームの左半分の映像が光路 1 からの像であり、右半分の映像が光路 2 からの像である。

2.2 3 次元像への再構成

以下の手順で、得られた映像からストリーマの 3 次元像の再構成を行った。

- (1) スキャナを用いて写真を取り込む。
- (2) 図 2(a)のように、各フレームごとにストリーマと針を抽出し、2 値化する。
- (3) 2 つの光路の映像を分離し、それぞれの針先を特定する。
- (4) 針先と針先から平板方向への距離は左右の映像で同じである。そこでこの方向を z 軸とし、図 2(b)のように直行座標系を用い、針先を原点として、左の映像を x - z 平面、右の映像を y - z 平面とし、それぞれのストリー

Optical path 1 Optical path 2
(a)

Optical path 1 Optical path 2
(b)

(c)

図 2. 3 次元像への再構成の流れ

Figure 2. Process of reconstructing the 3-D images.

マの軌跡の座標を求める。

- (5) ストリーマの軌跡に垂直な断面を円あるいは楕円と仮定し、軌跡からの半径を求める。
- (6) 図 2(c)のように、左右のストリーマの軌跡の座標を z 軸を基準に合成し、軌跡の 3 次元座標を求める。
- (7) ストリーマを円あるいは楕円の集合として進展形状を 3 次元像に再構成する。

3 実験結果および検討

先に述べたように、シクロヘキサン中のストリーマは印加電圧、針端曲率半径により様々な進展形状を形成する。本研究では、2.2節で述べた方法で3次元像を再構成するために、形状が単純なフィラメント状正ストリーマと半球状負ストリーマに着目して、ストリーマの進展、消滅過程について考察した。また、半球状負ストリーマよりも形状が複雑なパゴダ状負ストリーマについても3次元像の再構成を行った。

3.1 フィラメント状正ストリーマ

図3は典型的なフィラメント状正ストリーマの進展の様子をICCにより捉えたものである。同図より、ストリーマの進展形状が観測方向により異なることが確認できる。つまり、1方向からの観測では、ストリーマの正確な3次元構造は分からない。

図4(a)は図3の5~8フレームまでの進展過程の軌跡の経時変化を30度から見たものを3次元像に再構成したものであり、図4(b)は8フレーム目をいくつかの角度から見たものを3次元像に再構成したものである。図4(a)を見ると、フィラメント状正ストリーマがランダムに空間内を進展していることが分かる。図4(b)の0度から見たものが図3の8フレーム目の左半分の映像に、90度から見たものが右半分の映像に相当する。同図より、0度、30度から見た映像はストリーマが屈曲しながら進展しているように見えるが、60度、90度から見るとほとんどまっすぐに進展しているように見える。つまり、観測方向により見かけのストリーマの進展長は異なるので、真の進展長は3次元像より求める必要がある。

図5は、図3のフィラメント状正ストリーマの3次元像

図3. シクロヘキサン中のフィラメント状正ストリーマ
Figure 3. Positive filamentary streamer in cyclohexane.

図4. 図3のストリーマの軌跡の3次元像
Figure 4. 3-D images of the filamentary streamer propagation in Figure 3.

図5. 図3のストリーマの進展長の比較
Figure 5. Contrast the propagation length of the streamer in Figure 3.

から求めた進展長(軌跡の長さ)と従来の方法による進展長(針先からストリーマ先端までの距離)を比較したものである。この図を見ると、両者は大きく異なっており、この差はストリーマが進展するほど大きくなっている。これは、ストリーマが遅く進展しているように見えても、実際には速く進展しているためである。つまり、ストリーマが針先から平板電極に垂直に進展する場合には観測方向による差はなく、平行に進展する場合にはその差が最も大きくなる。しかし、どちらの場合もステップ状の進展が見られた。

図6は、枝別れたフィラメント状正ストリーマをICCにより捉えたものである。この図を見ると、左の映像ではストリーマは枝別れているのに、右の映像では枝別れていないように見える。また、図6の左の映像のストリーマの枝の部分が右の映像のストリーマと重なっており、そ

+30.02 kV, 50 ns/Frame

図 6. シクロヘキサン中のフィラメント状正ストリーマ
Figure 6. Positive filamentary streamer in cyclohexane.

図 7. 図 6 のストリーマの軌跡の 3 次元像
Figure 7. 3-D images of the filamentary streamer in Figure 6.

の部分左の映像に比べて右の映像のストリーマの方が太いことが分かる。図 7 は図 6 の 5 フレーム目の 3 次元像である。同図より枝が重なっている様子が分かり、枝の位置関係を知ることができる。このように一見枝別れていないようでも、別の角度から観測すると枝別れている場合がある。

ストリーマの観測において、1 方向から観測しただけでは実際の進展形状、進展長を知ることができず、2 方向から観測することでより正確な進展形状、進展長を知ることができる。しかし、フィラメント状正ストリーマの進展は定性的には同じ傾向があり、これまでの 1 方向からの観測で測定したデータを否定するものではない。

3.2 半球状負ストリーマ

図 8 は半球状負ストリーマの消滅過程を ICC により捉えたものである。この結果を見ると、図 8(a)では左右どちらの映像でも 2 個のバブルに分裂している。図 8(b)では左の映像では 2 個のバブルに分裂しているが、右の映像では分裂していない。これまでの 1 方向からの観測では、半球状負ストリーマの消滅過程において 1 個、2 個あるいはそれ以上のバブルになるものがあった。Watson らは、高粘度

(a) -9.27 kV, 500 ns/Frame

(b) -8.39 kV, 200 ns/Frame

(c) -8.83 kV, 200 ns/Frame

図 8. シクロヘキサン中の半球状負ストリーマ
Figure 8. Negative hemispherical streamer in cyclohexane.

のシリコン油中に hot liquid のジェットが発生し、その結果、vortex ring と呼ぶリング状の渦が発生すると考えた

図9. 図8(b)の半球状負ストリーマの消滅過程の3次元像

Figure 9. 3-D images of the negative hemispherical streamer decay process in Figure 8(b).

[7]。さらに、シクロヘキサンにおいて得られた2個の球状ストリーマはこのvortex ringの中心に存在する気泡であると説明した[8]。しかし、図8(a)と(b)が同一のものであると考えられる。つまり、どちらも半球状ストリーマが2個のバブルに分裂しているのを捉えたものである。仮にvortex ringであれば観測方向に係らず2個の黒点として観測されるはずである。したがって、消滅過程で2個のバブルとして観測されていたものはvortex ringを捉えたものではないと言える。しかし、vortex ringがシクロヘキサン中で形成されないわけではない。

図8(c)を見ると、6フレーム目の右の映像ではストリーマが斜めになっているのに対し、左の映像ではストリーマがリング状に写っている。針先から離れた半球状ストリーマはvortex ringにより内側が凹み、リング状になると共に収縮を始める。同図はこの収縮過程において左右異なる映像が得られたものであり、最終的には2つの気泡に分裂したものと考えられる。この左右の映像から、vortex ringとvortex ring内に存在するリング状のストリーマは2個のバブルとして観測されるのではなく半球状ストリーマとして観測される。つまり、リング状のストリーマはシャドウグラフ像としては半球状ストリーマと区別がつかないと考えられる。また、シクロヘキサン中のvortex ring内のリング状ストリーマは200~400nsで崩壊していくつかのバブルに分裂することが分かった。

図8(a)、(b)を見ると、ストリーマが針からはなれた後もバブルが膨張したり収縮したりしていることが分かる。ストリーマが針から離れたということはエネルギーの注入がないということである。エネルギーの注入がないにもかかわらずストリーマが膨張、収縮することから、このバブルは気泡であると言える。また、分裂したバブルが気泡だとすると、エネルギーの注入がある段階、つまり進展している段階でのストリーマはすでに気泡状態であると言える。

図9は、図8(b)の半球状ストリーマの消滅過程を3次元像に再構成したものである。この図を見ると、5フレーム目を60度から見たときの2個の気泡の位置関係が図8(a)の5フレーム目の右の映像と同じであることが分かる。

この様に、3次元観測を行うことで半球状負ストリーマの消滅過程における気泡の位置と挙動を知ることが可能となった。

3.3 パゴダ状負ストリーマ

図10はパゴダ状負ストリーマの消滅過程をIOCにより捉えたものである。このパゴダ状負ストリーマについても3次元像の再構成を行った。その結果が図11である。この図を見ると、パゴダ状負ストリーマの上の段は下の段か

図 10. シクロヘキサン中のパゴダ状負ストリーマ
Figure 10. Negative pagoda-like streamer in cyclohexane.

図 11. 図 10 のパゴダ状負ストリーマの消滅過程の 3 次元像
Figure 11. 3-D images of the negative pagoda-like streamer decay process in Figure 10.

ら離れ、2 個のバブルに分裂している。また下の段は、3 フレーム目で 2 つの凸部ができ、4 フレーム目で 2 つの凸部と針を挟んで反対側の 3 つの部分の核にして、3 個のバブルに分裂している。この様に 3 次元観測を行うことで、パゴダ状負ストリーマの消滅過程がどのように推移しているかが明らかとなった。

この様に半球状ストリーマだけではなく、パゴダ状ストリーマのような複雑な形状のものでも 3 次元像を再構成することができた。

4 結論

高速度 3 次元観測が可能なシャドウグラフ光学系と 3 次元像に再構成する方法を構築した。この方法を用いることで、ストリーマの進展形状が観測方向により異なる形状として観測されることが確認できた。正針において、フィラメント状ストリーマがランダムに進展している様子を捉えることができた。ストリーマ消滅過程の 3 次元的観測から、ストリーマの収縮過程が *vortex ring* 内部で起こることを明らかにした。また、これらの結果はストリーマの進展段階において既に気相が存在することを明示している。

(平成 9 年 10 月 3 日受付、平成 9 年 12 月 24 日再受付)

文献

- [1] H. Yamashita and H. Amano, "Prebreakdown Phenomena in Hydrocarbon Liquids", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol.23, No.4, pp.739-750, 1988
- [2] H. Yamashita, K. Yamazawa, W. Machidori and Y. S. Wang, "The Effect of Tip Curvature on the Prebreakdown Density Change Streamer in Cyclo-hexane", Conf. Rec. of the 12th ICDL pp.226-229, 1996
- [3] E. O. Forster and P. Wong, "High-speed schlieren studies of electrical breakdown in liquid hydrocarbons", CAN. J. CHEM. Vol.55, pp.1890-1898, 1977
- [4] H. Ihori, T. Kishi, I. Kitani and K. Arai, "Three-Dimensional Electric Field Mapping in Dielectric Liquids Using Kerr Electrooptic Measurement with ART", Conf. Rec. of the 12th ICDL pp.415-418, 1996
- [5] 永井、園井、大友、松原、「雷放電路の立体解析システムの開発」、平成2年電気学会電力・エネルギー部門全大 177
- [6] 本間、鈴木、大友、松原、「雷放電画像立体解析の高速化」、平成8年電気学会全国大会 1565
- [7] P. K. Watson, W. G. Chadband and M. Sadeghzadeh-Araghi, "The Role of Electrostatic and Hydrodynamic Forces in the Negative-point Breakdown of Liquid Dielectrics", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol.26, No.4, pp.543-559, 1991
- [8] P. K. Watson, H. Yamashita and W. G. Chadband, "Ring Vortices in Point-Plane Gaps at Sub-Breakdown Fields", Conf. Rec. of the 12th ICDL pp.206-209, 1996

大月 俊策

(学生員) 1974年12月4日生まれ。1997年3月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。現在慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻前期博士課程在学中。

山澤 一彰

(学生員) 1970年6月30日生まれ。95年3月慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。現在慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻後期博士課程在学中。

山下 久直

(正員) 1945年2月20日生まれ。72年3月慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年慶應義塾大学工学部電気工学科助手に任用。主として液体絶縁物の伝導と破壊過程に関する研究に従事。88年～90年アメリカ商務省NIST, EEELの招聘研究員およびCatholic大学物理科客員教授。92, 93, 94年イタリア、ローマ大学電気工学科訪問教授。現在、慶應義塾大学理工学部電気工学科助教授。工博