

## 論 文

# パルス電圧印加における *n*-ヘキサンの破壊 遅れに及ぼすアセトフェノンの添加効果

山 田 弘\*, 大 石 豊\*, 若 松 隆\*, 藤 原 民 也\*

(1994年12月12日受理)

## Additive Effect of Acetophenone on Breakdown Time Lag in *n*-Hexane under Pulse Voltage Application

Hiroshi YAMADA,\* Yutaka OISHI,\* Ryu WAKAMATSU\* and Tamiya FUJIWARA\*

(Received December 12, 1994)

The electrical breakdown phenomena in mixtures of *n*-hexane and acetophenone for point-to-plane electrode configuration have been investigated using a photo optical current measuring system and a 760 nano-second rectangular high-voltage pulse generator. The time lag is precisely measured from the prebreakdown current. The average velocity of streamer propagation is estimated from the linear relation between formative time lag and gap spacing. The propagation velocity for a negative point in *n*-hexane is exceedingly increased by a small amount of acetophenone as an additive, more extremely than that for a positive point. The results is considered to be due to a space charge effect on ionization of liquid molecules in the streamer development. An Auger-like electron emission process for negative polarity and the field ionization process assisted by a polarization for positive polarity are proposed to account for the additive effect.

## 1. まえがき

架橋ポリエチレン(XLPE)は未架橋ポリエチレンと比べて交流電圧に対するトリーイング破壊が起こりにくく、極めて優れた電気的性能を有する。また、それを用いたケーブルは機械的性質も優れているため従来のOFケーブルやSLケーブルに比べて付設・接続が容易であり、現在500kV超高压級電力ケーブルの実用化までに至っている。しかし、XLPEの直流絶縁性能はアセトフェノンなど架橋剤分解残渣の影響を受けることが知られている<sup>1)</sup>。アセトフェノンはカルボニル基を極性基として含むため、これがトラップセンターとして働き破壊進展を促進することが考えられるが、その破壊機構における役割は未だよく知られていない。

液体絶縁物と比べ、固体絶縁物の破壊機構を実験的に調べる上で不利な点として次のことが挙げられる。ポリ

エチレンなどの固体絶縁物はラメラ、球晶などの高次構造を含み、微視的には材料の不均一性が複雑に絡み合った構成となっている。絶縁破壊現象ではこれらの構造的影響を考慮する必要があるため、実験結果の解析が困難である。また、固体では電極との接触が試料ごとに異なり、特に、針電極のような鋭い形状の電極に対する密着性が悪いため、実験結果の再現性が低い。さらに添加物の混合比を自由に変えて添加効果を効率よく調べることが困難である。

他方、*n*-ヘキサンを代表する液体炭化水素は密度がポリエチレンとほぼ等しいのみならず、パルス電圧印加による破壊現象では以下のような共通点が見られる。すなわち、液体炭化水素中のストリーマ(トリー)の発生電圧は正針よりも負針の場合が高く<sup>2)</sup>、その形状<sup>3)</sup>もポリエチレン中のトリー<sup>4)</sup>と似ている。液体炭化水素中<sup>5)</sup>とポリエチレン中<sup>4)</sup>のストリーマ進展速度は両極性ともオーダー的に一致し、両極性において初期ストリーマの他にオーダー的に速度の異なる二次ストリーマが認められる<sup>4,5)</sup>。液体炭化水素とポリエチレンの双方でパルス電圧の立ち下がり部において活発な破壊進展が起こりやすい<sup>6)</sup>。これらの結果は液体炭化水素とポリエチレンには

キーワード：破壊遅れ、ns破壊、破壊前駆電流、ストリーマ速度、添加効果

\* 岩手大学工学部電気電子工学科 (020 盛岡市上田 4-3-5)  
Department of Electrical and Electronic Engineering,  
Iwate University, Ueda 4-3-5, Morioka, 020  
Japan

共通する基本的破壊機構があることを示す。

このような観点から、ここではポリエチレンと類似の鎖状構造をもつ *n*-ヘキサンにアセトフェノンを加え、破壊前駆電流と破壊遅れとに及ぼす添加効果を調べ、破壊進展過程における絶縁物中のアセトフェノンの役割を考察した。

## 2. 実験方法

破壊前駆電流測定系の概略を図 1 に示す。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  $\mu\text{m}$  程度のタングステン線、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。針電極に印加される高電圧パルスの電圧値は 45 kV の一定とした。パルス電圧の波形を図 2 に示す。パルスの立ち上がりは 20 ns、パルス幅は 760 ns である。電流を光信号に変換する発光ダイオード(LED)（横河ヒューレットパッカード社製 MLMP1201）は針電極側に配置される。発光ダイオードと針電極の大部分を囲む上部カバー電極にも同時に電圧が印加されるため、針電極先端部から注入される電流成分と変位電流のみが測定される。全路破壊後の大電流を制限し、発光ダイオードを保護するために平板電極とアースとの間には 96 k $\Omega$  の抵抗（多摩電気工業社製 PN 型高周波抵抗）が直列に接続されている。発光ダイオードからの光信号はライトガイドを経て光電子増倍管（浜松ホトニクス社製 R955）に導かれ、再び電気信号に変えられストレージ・オシロスコープ（テクトロニクス社製 7633）に送られる。この電流測定系の応答速度は発光ダイオードの立ち上がり時間で決まり約 10 ns である。検出可能な最低電流は約 10  $\mu\text{A}$  であり、オシロスコープの入力電圧と針電極を流れる電流は 12 mA まで比例関係を保つ。用いた試料は純度 99.0% 以上の *n*-ヘキサンとアセトフェノンおよびそれらの混合液である。混合比は *n*-ヘキサンとアセトフェノンの分子数の割合で 999 対 1, 99 対 1, 9 対 1 の 3 種類とした。以下では混合比を *n*-ヘキサン対アセトフェノンで表す。購入した後の試料の純化は行わず、実験は室温、大気圧下でなされている。

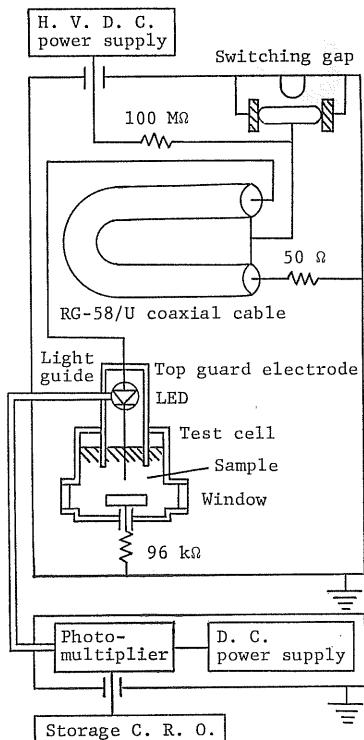


図 1 電流測定系  
Fig. 1 Current measurement system.

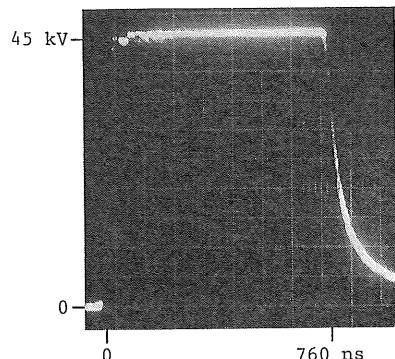


図 2 印加電圧波形

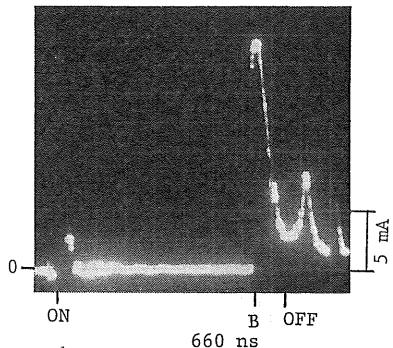
Fig. 2 Applied voltage trace.

抗（多摩電気工業社製 PN 型高周波抵抗）が直列に接続されている。発光ダイオードからの光信号はライトガイドを経て光電子増倍管（浜松ホトニクス社製 R955）に導かれ、再び電気信号に変えられストレージ・オシロスコープ（テクトロニクス社製 7633）に送られる。この電流測定系の応答速度は発光ダイオードの立ち上がり時間で決まり約 10 ns である。検出可能な最低電流は約 10  $\mu\text{A}$  であり、オシロスコープの入力電圧と針電極を流れる電流は 12 mA まで比例関係を保つ。用いた試料は純度 99.0% 以上の *n*-ヘキサンとアセトフェノンおよびそれらの混合液である。混合比は *n*-ヘキサンとアセトフェノンの分子数の割合で 999 対 1, 99 対 1, 9 対 1 の 3 種類とした。以下では混合比を *n*-ヘキサン対アセトフェノンで表す。購入した後の試料の純化は行わず、実験は室温、大気圧下でなされている。

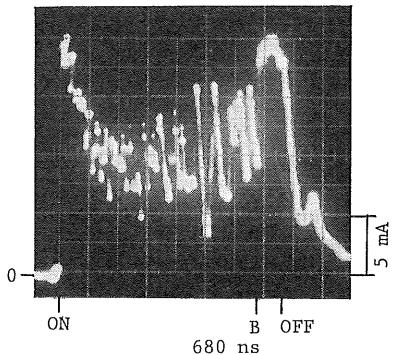
## 3. 実験結果および考察

### 3.1 破壊前駆電流

*n*-ヘキサンおよび混合比が 9 対 1 の場合の正針における破壊前駆電流を図 3 と 4 に示す。同様に、*n*-ヘキサンおよび混合比が 9 対 1 の場合の負針における電流波形を図 5 と 6 に示す。それぞれの図で電流 0 のレベルを記号 0 で示し、またパルス電圧の印加開始時、電圧の立ち下がり時、全路破壊時をそれぞれ記号 ON, OFF, B で示す。この場合、電流急増の開始時を全路破壊時とした。破壊遅れは電圧の立ち上がり開始から全路破壊に至るまでの時間として求めることができる。測定誤差は 10 ns である。前駆電流を互いによく比較できるように、破壊遅れが 470 ns から 680 ns のものをこれらの図として選んである。しかし、次節で述べるように *n*-ヘキサンの負針における破壊進展速度は小さいため、図 5 ではギャップ長が 0.2 mm であるが他の 3 つの場合は 1.8~3.8 mm である。図 3 では電圧印加直後のピークと破壊完了時の

図 3 *n*-ヘキサンの正針における電流波形

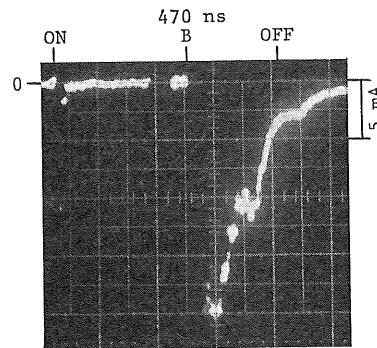
パルス幅: 760 ns, 印加電圧: +45 kV, ギャップ長: 3.5 mm.

Fig. 3 Current trace with a positive point for *n*-hexane.  
760 ns pulse, +45 kV point voltage, 3.5 mm gap.図 4 *n*-ヘキサンとアセトフェノンの混合比が9対1の場合の正針における電流波形

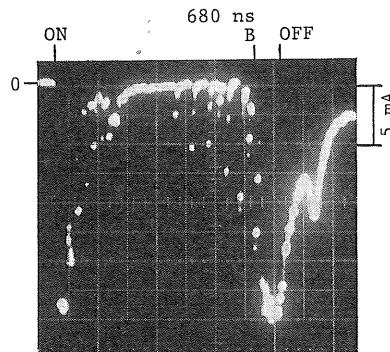
パルス幅: 760 ns, 印加電圧: +45 kV, ギャップ長: 3.8 mm.

Fig. 4 Current trace with a positive point for the mixing ratio of *n*-hexane to acetophenone of 9 : 1.  
760 ns pulse, +45 kV point voltage, 3.8 mm gap.

大きなピークを除き、電圧のパルス幅内に顕著な電流は認められない。最初の電流ピークと同時に針電極先端領域においてパルス状の発光がおこることから、このピークは吸収電流と針先端から注入される自由電荷による電流が合わさったものと考えられる。B点以後は光電子増倍管内の空間電荷効果が加わるため波形は正しい電流値を示さない。また、B点以前の波形は  $96 \text{ k}\Omega$  の制限抵抗の有無により影響されない。正針の場合、混合比が999対1の場合の全体的な電流波形は*n*-ヘキサンのみと変わらないが、99対1では破壊前駆電流が大きくなり、波形は図4の9対1と同様になる。図4では電圧印加直後の大きなピークに続き、多くの小さな電流パルスを重畳しながら破壊前駆電流が増加し、全路破壊時に電流が急増している。針の先端電界値は図3の*n*-ヘキサンの

図 5 *n*-ヘキサンの負針における電流波形

パルス幅: 760 ns, 印加電圧: -45 kV, ギャップ長: 0.2 mm.

Fig. 5 Current trace with a negative point for *n*-hexane.  
760 ns pulse, -45 kV point voltage, 0.2 mm gap.図 6 *n*-ヘキサンとアセトフェノンの混合比が9対1の場合の負針における電流波形

パルス幅: 760 ns, 印加電圧: -45 kV, ギャップ長: 1.8 mm.

Fig. 6 Current trace with a negative point for the mixing ratio of *n*-hexane to acetophenone of 9 : 1.  
760 ns pulse, -45 kV point voltage, 1.8 mm gap.

みの場合とほぼ等しいことから電流の増加はアセトフェノンの添加効果と考えられる。

負針の場合、混合比が999対1と99対1の場合の電流波形は*n*-ヘキサンのみの場合と変わらないが、次節で述べるように破壊に至るまでの時間が短くなる。図6の混合比が9対1では前駆電流に数個のパルスが重畳し、ポリエチレンの正針における電流波形<sup>5)</sup>と類似したものとなる。このように、添加により正の電流波形の変化が大きいのに対し、負の電流波形の変化はあまり顕著でない。この極性効果はシクロヘキサンに四塩化炭素を添加した場合<sup>7)</sup>と反対である。すなわち微量の四塩化炭素添加によりシクロヘキサンの負針では多数のパルス状電流が現われる。図6でOFF点以後のピークは第1の放電チャネルが完成した後も別のストリーマ枝が継続進

展して第2の放電チャネルを形成したことによると考えられる。

### 3.2 破壊遅れのギャップ長依存性

*n*-ヘキサン、混合比999対1、99対1、9対1およびアセトフェノンの正針における破壊遅れとギャップ長との関係をそれぞれ図7から図11に示す。同様に負針における破壊遅れとギャップ長との関係をそれぞれ図12から図16に示す。図中の1つのプロットは1つの電流波形から得られている。各図中で最上部のプロットは全路破壊に至らない場合を示す。一般的に、電圧印加条件

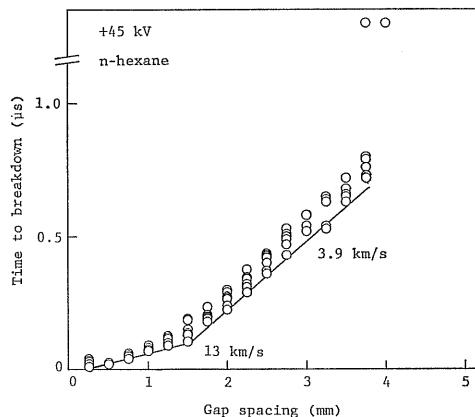


図7 正の45 kV印加における*n*-ヘキサンの破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 7 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for *n*-hexane, at a fixed voltage of positive 45 kV.

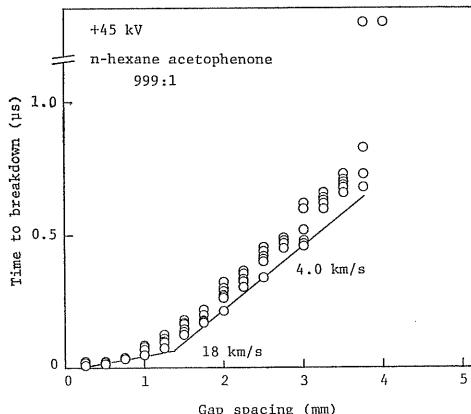


図8 正の45 kV印加における*n*-ヘキサンとアセトフェノンの混合比が999対1の場合の破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 8 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for the mixing ratio of *n*-hexane to acetophenone of 999:1, at a fixed voltage of positive 45 kV.

を一定に保った場合の最小の破壊遅れが形成遅れと定義される。破壊遅れが形成遅れのみである場合でも、全路破壊ごとに針先端から平板電極に至る放電ストリーマの経路に相違が生じる。このため最小の遅れは形成遅れの中でも放電ストリーマの経路が電極軸に最も近いものといえる。また、図16におけるギャップ長0.5 mm以上では、破壊遅れのばらつきが大きく、破壊遅れには統計遅れが含まれていると考えられる。さらに液体絶縁物の破壊進展速度が一般にギャップの一部<sup>③</sup>で比較的一定で

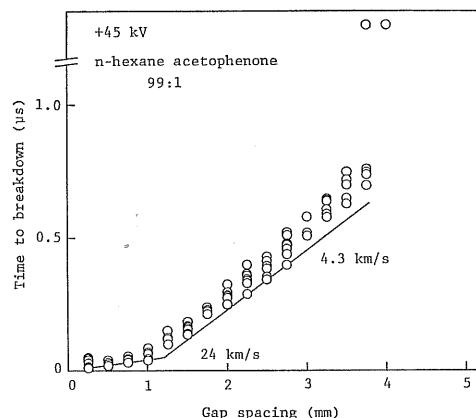


図9 正の45 kV印加における*n*-ヘキサンとアセトフェノンの混合比が99対1の場合の破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 9 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for the mixing ratio of *n*-hexane to acetophenone of 99:1, at a fixed voltage of positive 45 kV.

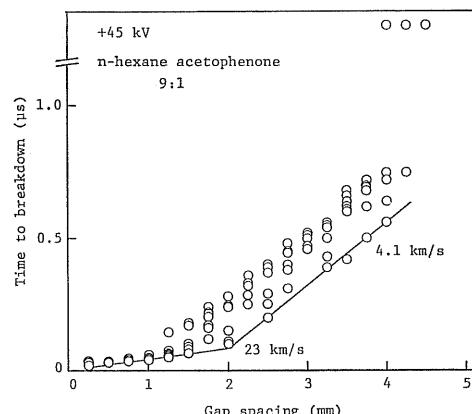


図10 正の45 kV印加における*n*-ヘキサンとアセトフェノンの混合比が9対1の場合の破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 10 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for the mixing ratio of *n*-hexane to acetophenone of 9:1, at a fixed voltage of positive 45 kV.

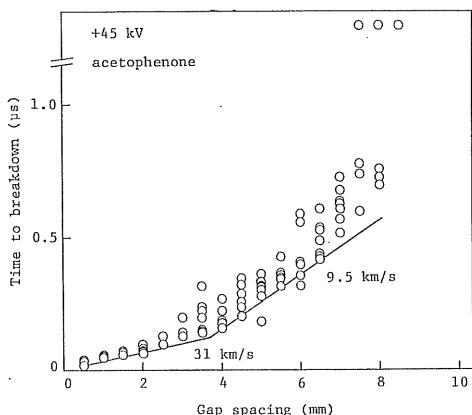


図 11 正の 45 kV 印加におけるアセトフェノンの破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 11 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for acetophenone, at a fixed voltage of positive 45 kV.

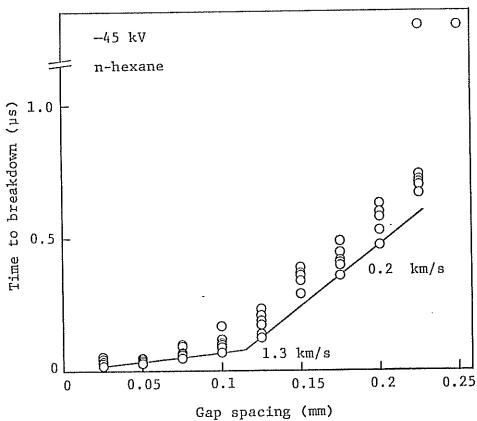


図 12 負の 45 kV 印加における n-ヘキサンの破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 12 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for n-hexane, at a fixed voltage of negative 45 kV.

ある報告を考慮すると、各図において最小の破壊遅れのプロットを結ぶ直線の傾きからストリーマの進展速度を求めることができる。図 7 では形成遅れの最小値を示すプロットは傾きの異なる 2 つの直線上にあり、その傾きから平均の放電進展速度として 13 km/s と 3.9 km/s が得られる。他方、ベンゼン<sup>10</sup>などでは進展途中で放電路の形状と速度が変わることが報告されている。この場合小さい速度の初期ストリーマ (primary streamer) から大きい速度の 2 次ストリーマ (secondary streamer) に変わり、その反対は起こらない。このことから図 7 のギャップ長 1.5 mm 以上の実線上のプロットに関する

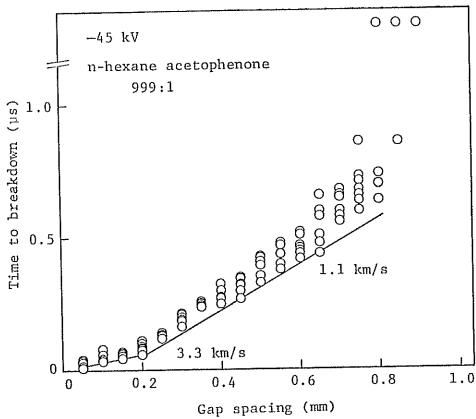


図 13 負の 45 kV 印加における n-ヘキサンとアセトフェノンの混合比が 999 対 1 の場合の破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 13 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for the mixing ratio of n-hexane to acetophenone of 999 : 1, at a fixed voltage of negative 45 kV.

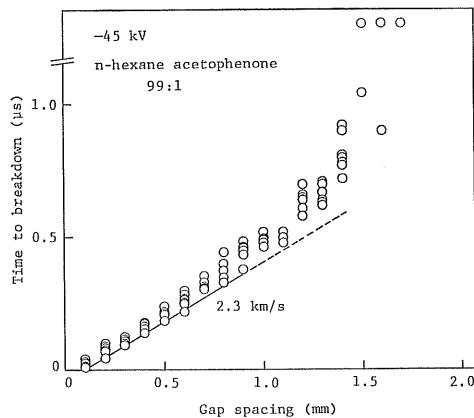


図 14 負の 45 kV 印加における n-ヘキサンとアセトフェノンの混合比が 99 対 1 の場合の破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 14 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for the mixing ratio of n-hexane to acetophenone of 99 : 1, at a fixed voltage of negative 45 kV.

破壊では、まず針電極より 3.9 km/s の速度で進展を開始した放電ストリーマがギャップの途中で速度 13 km/s のストリーマに変わり平板電極に至ったと思われる。

負針における図 12 の 2 つの直線の傾きから n-ヘキサン中の負ストリーマ速度として 1.3 km/s と 0.2 km/s が得られる。筆者らの知る限り音速と等しい進展速度をもつ負ストリーマは報告されていないが、1.3 km/s の進展速度は、室温における n-ヘキサン中の音速と等しい。ベンゼン<sup>10,11</sup>やシクロヘキサン<sup>10</sup>の正針において、

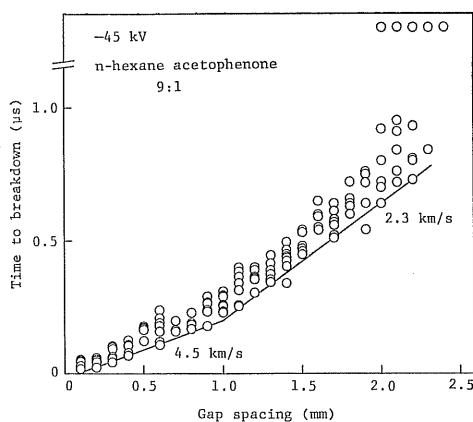


図 15 負の 45 kV 印加における *n*-ヘキサンとアセトフェノンの混合比が 9 対 1 の場合の破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 15 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for the mixing ratio of *n*-hexane to acetophenone of 9:1, at a fixed voltage of negative 45 kV.

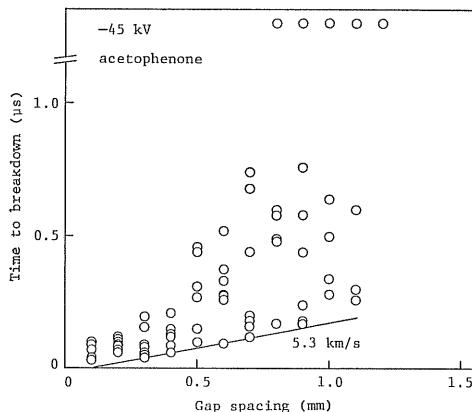


図 16 負の 45 kV 印加におけるアセトフェノンの破壊遅れとギャップ長との関係

Fig. 16 Dependence of breakdown time lag on gap spacing for acetophenone, at a fixed voltage of negative 45 kV.

電圧印加直後に針端から伝播するショック波面とストリーマ先端が一致して進展する様相が超高速度カメラにより観測されている。負針でもショック波の頭で構成分子中の電子が励起され電離が助長される破壊進展機構があると思われる。また、図 12 と図 13 における平均の進展速度の比較から、わずか 0.1% のアセトフェノンの添加により破壊進展速度が著しく増すことがわかる。しかし、既に述べたように前駆電流波形には変化が現われないので、0.1% の添加によりストリーマの枝数はほとんど増加しないと思われる。全路破壊が起こる最大のギャ

表 1 *n*-ヘキサンに対するアセトフェノンの添加率とストリーマ速度との関係

Table 1 Dependence of streamer velocity on molar fraction acetophenone in *n*-hexane.

	Molar fraction acetophenone in <i>n</i> -hexane	0	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1
Positive primary		3.9	4.0	4.3	4.1	9.5
Positive secondary		13	18	24	23	31
Negative primary		0.2	1.1	2.3	2.3	5.3
Negative secondary		1.3	3.3	—	4.5	—
Streamer velocity (km/s)						

ップ長も 0.1% の添加により 0.23 mm から 0.85 mm に増す。

表 1 には、直線の傾きから求めた各混合比におけるストリーマ速度を示す。負の初期ストリーマ速度に対するアセトフェノンの添加効果が他の場合よりも大きいことがわかる。正針において混合比を 999 対 1 から 9 対 1 にアセトフェノンの添加率を増しても、初期ストリーマ速度はほとんど変化しないが、前述のように破壊前駆電流の大きさには顕著な差異が現われる。電流パルスの数とストリーマ枝の数はほぼ一致する<sup>4)</sup>ことから、正針では添加率を高めるとストリーマの枝分かれが進むためと思われる。表 2 には 45 kV を印加した場合の各混合比における全路破壊が起こる最大のギャップ長を示す。両極性とも最大ギャップ長と初期ストリーマ速度との相関性が高いのは、どの場合も、針電極から平板電極に至る放電チャネルの大部分が初期ストリーマの進展により形成されるためと考えられる。しかし、負針では混合比 9 対 1 の場合よりもアセトフェノンのみのストリーマ速度が大きいにもかかわらず、最大ギャップ長はアセトフェノンのみの場合が小さく 1.1 mm である。アセトフェノンのみの場合、電圧印加と同時に初期ストリーマが進展を開始すると仮定すれば、その進展速度 5.3 km/s により 760 ns の時間で負ストリーマは約 4.0 mm の距離を進展するはずである。この最大ギャップ長の減少は、ギャップ長を大きくすると針端電界が低下し、初期ストリー

表 2 *n*-ヘキサンに対するアセトフェノンの添加率と破壊に至る最大ギャップ長との関係

Table 2 Dependence of critical gap spacing for total breakdown on molar fraction acetophenone in *n*-hexane.

	Molar fraction acetophenone in <i>n</i> -hexane	0	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1
Positive point		3.8	3.8	3.8	4.3	8.0
Negative point		0.23	0.85	1.6	2.3	1.1
Critical gap spacing (mm)						

マの進展開始が困難になったことによると考えられる。

### 3.3 絶縁破壊進展機構

ストリーマ進展に先立つ初期電子の発生機構として、負針ではショットキー形放出と電界放出、正針ではプールフレンケル形放出と電界電離が考えられる。これらの電子放出はいずれも高電界下において顕著な現象である。この中でショットキー形放出とプールフレンケル形放出は温度に依存する。しかし、*n*-オクタデカン<sup>12)</sup>では電流波形やストリーマ速度が温度に依存しないので、同様の分子構造をもつ*n*-ヘキサンにおいても電極およびバルク内におけるショットキー形の電子放出は支配的でないと思われる。

一方、針電極の先端における電界は次の Mason の方程式<sup>13)</sup>で表される。

$$E = 2V\{R \ln(1+4d/R)\}$$

ここで、*V*：印加電圧、*R*：針電極先端の曲率半径、*d*：ギャップ長である。これを用いると、針の先端電界として正針、負針ともに 2 GV/m 以上の値が得られるが、電界放出と電界電離を起こす十分な大きさである。以上のことから正針では電界電離<sup>14)</sup>、負針では電界放出<sup>15)</sup>が起きているものと思われる。ストリーマが高い導電率をもち、その先端曲率半径が  $\mu\text{m}$  オーダーであるならば、これらの電離は液体バルク中でも継続することが考えられる。両極性におけるこれらの電荷放出機構は似ているが、正ストリーマ同様に負ストリーマもショック波と同じ速度で進展する場合があることも、負ストリーマは正ストリーマと類似の進展機構をもつことを示す。ショック波頭では液体の圧縮により液体分子の変形すなわち価電子のエネルギーの増加が起り、電界放出や電界電離が起りやすくなるためと考えられる。

*n*-ヘキサンのみの場合の負ストリーマ速度 0.2 km/s は 0.1% の微量添加により 1.1 km/s に変わることから、アセトフェノンの電子親和性はかなり大きく、負ストリーマ中の電荷密度を高める役割をもつことが推測される。Devins ら<sup>14)</sup>もモル濃度わずか 0.006% の塩化エチルを Marcol 70 に添加すると負ストリーマの進展速度が急増することを報告している。アセトフェノンの添加効果は両極性で認められるが、負極性で顕著であることから、負極性では Kao<sup>16)</sup> が提案しているオージェ電子を介する電離進展機構、または、類似の機構により破壊が進むと思われる。すなわち、電界放出により負針から注入された初期電子はすみやかに *n*-ヘキサン、アセトフェノン、混入酸素などのバルク中分子に捕獲される<sup>17,18)</sup>。捕獲分子中においてこの電子が低いエネルギー準位に遷移することにより別の分子内電子にエネルギーを与え、これを新たな放出電子とする。この放出電子は

別の中性分子に捕獲され、再びオージェ電子を放出する。負ストリーマ先端では以上の過程が繰り返されると考えられる。この過程で一旦形成されたイオンは高いエネルギー状態を保つためストリーマ中の電導性は高められ、後続する自由電子の移動は容易となる。このように、自由電子の伝導路の形成はストリーマ進展にとって重要であるが、ジュール熱によりガス化が起こると電荷密度が低くなるため負ストリーマの進展が困難になり、負ストリーマ速度が小さくなるか、または、その進展が停止する。超高速度カメラの観測では、進展が停止したシクロヘキサン中のストリーマ枝の先端からショック波の発生<sup>19)</sup>が見られるが、ガス化によりストリーマが停止した結果と思われる。

正ストリーマ進展では、初めに電界電離により液体分子の電子が針電極に引き抜かれ、この分子は正イオンに変わる。続いてこのイオンが背後の分子から電子を引き抜くことを繰り返す。負ストリーマの場合と同様に、形成された正イオンは高いエネルギー状態を保つため、正ストリーマは高い電導性をもつ。ここで、アセトフェノンはカルボニル基をもつため、この分子の比較的大きな分極現象<sup>20)</sup>も電離過程では無視できない。分子分極は電界からエネルギーを得た一種の励起現象なので、高電界下において大きな分子分極を起こした中性分子は電界電離が容易になるとを考えられる。Girdinio ら<sup>21)</sup>は液体中のストリーマ先端の曲率半径は進展中に変化せず 2  $\mu\text{m}$  程度であり、その先端電界が 10 GV/m に達することを報告している。この値を用いるとストリーマ先端では、分子 1 個あたりの分極エネルギーは 1 eV オーダーとなり、分子の電離が容易になることが考えられる。

この分極による液体分子のエネルギー上昇は負極性の破壊進展過程でも起こるが、アセトフェノンの混合比が高くなるとアセトフェノン分子のベンゼン構造の役割が大きくなると考えられる。すなわち、アセトフェノンの混合比率が高く針端電界が比較的低い場合には、アセトフェノン分子のベンゼン構造が自由電子のエネルギーを吸収する効果が大きく、負ストリーマの発展が抑制されると考えられる。このことが、混合比 9 対 1 の場合よりもアセトフェノンのみの場合の最大ギャップ長が小さい理由と思われる。

## 4. まとめ

アセトフェノンの微量添加により *n*-ヘキサンの負針における破壊遅れは著しく小さくなり、全路破壊が起るギャップ長が増す。しかし、負針におけるこの最大ギャップ長は添加率 10% の場合よりもアセトフェノンのみの場合が小さい。

破壊遅れとギャップ長との関係は直線性を示し、これより初期ストリーマと2次ストリーマに対応する速度が得られる。両極性ともアセトフェノンの添加によりストリーマ速度は大きくなるが、正ストリーマ速度に対する効果は負ストリーマ速度より小さい。また、正の初期ストリーマ速度と全路破壊が起こる最大ギャップ長との相関性が高く、速度が増すとこの最大ギャップ長が大きくなる。

アセトフェノンの添加がもたらす現象としてアセトフェノン分子の電子親和性により空間電荷密度が大きくなり、ストリーマ先端の電界が高まる現象が考えられる。さらに、高電界下における分子分極効果も無視できない。負極性ではストリーマ先端においてオージェ過程を介する電離が起り、正極性では分子分極が助長する電界電離が起こると考えられる。

### 考 考 文 献

- 1) 遠水敏幸: 電気学会論文誌 A, 97 (1977) 61
- 2) H. Yamada, S. Sakamoto and Y. Nakao: J. Electrostatics, 7 (1979) 155
- 3) 山田 弘, 大石 豊, 若松 隆, 藤原民也: 素材物性学雑誌, 1 (1994) 58
- 4) 山田 弘, 木村眞吾, 佐藤 淳: 素材物性学雑誌, 2 (1989) 35
- 5) E.O. Forster: IEEE Trans. Electr. Insul., 25 (1990) 45
- 6) H. Yamada, T. Fujiwara, Y. Yamauchi, K. Kusano, S. Kimura and K. Tamada: Jpn. J. Appl. Phys., 32 (1993) L1818
- 7) 山田 弘, 谷口 宏, 藤原民也, 玉田耕治: 電気学会論文誌A, 112 (1992) 651
- 8) H. Yamada, T. Murakami, K. Kusano, T. Fujiwara and T. Sato: IEEE Trans. Electr. Insul., 26 (1991) 708
- 9) H. Yamashita and H. Amano: IEEE Trans. Electr. Insul., 23 (1988) 739
- 10) 山田 弘, 村上 勤, 山内良文, 草野上総, 玉田耕治: 電気学会論文誌A, 113 (1993) 835
- 11) 山田 弘, 大石 豊, 若松 隆: 電気学会論文誌A, 114 (1994) 236
- 12) 山田 弘, 志賀一良, 藤原民也: 静電気学会誌, 17 (1993) 359
- 13) J.H. Mason: Proc. IEE, pt. C, 102 (1955) 254
- 14) J.C. Devins, S.J. Rzad and R.J. Schwabe: J. Appl. Phys., 52 (1981) 4531
- 15) K. Dotoku, H. Yamada, S. Sakamoto, S. Noda and H. Yoshida: J. Chem. Phys., 69 (1978) 1121
- 16) K.C. Kao: J. Appl. Phys., 55 (1984) 752
- 17) E.O. Forster: IEEE Trans. Electr. Insul., 17 (1982) 517
- 18) E.O. Forster, H. Yamashita, C. Mazzetti, M. Pompili, L. Caroli and S. Patrissi: IEEE Trans. Dielec. and Electr. Insul., 1 (1994) 440
- 19) 山田 弘: 静電気学会誌, 18 (1994) 440
- 20) H. Yamada, T. Sato and T. Fujiwara: J. Phys. D, 23 (1990) 1715
- 21) P. Gordinio, P. Molino, G. Morinari, A. Viviani, G.J. FitzPatrick and E.O. Forster: IEEE Trans. Electr. Insul., 23 (1988) 669