室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

誘電体の絶縁破壊機構とその類似性について

メタデータ	言語: jpn
	出版者: 室蘭工業大学
	公開日: 2014-05-28
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 沢, 茂夫
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3178

誘電体の絶縁破壊機構とその類似性について

沢　茂　夫

On the Similarity of the Electrical Breakdown Mechanism of the General Insulating Materials

Shigeo Sawa

Abstract

The similarity of the mechanism of the electrical breakdown of general insulating materials, which includes gas, liquid and solid, is described in this paper.

The appearance of the trace dealing with the insulating breakdown differs greatly from the insulating materials, such as gas, liquid or solid. Therefore, it seems that the process, the mechanism of the breakdown differs greatly as well. However, by repeating careful experiments, it is made clear that with each kind of the insulator, the insulating breakdown is performed with the streamer mechanism based on the ionization by collision of electron. And, as their orders having one common mechanism, each one of them shows itself a pure electric breakdown phenomenon; nevertheless, it depends on the conditions that a thermal-electric breakdown phenomenon called tracking or treeing follows it in some cases.

The phenomenon mentioned above is also seen to be common in the impulse voltage, D.C. voltage, commercial frequency A.C. voltage and the high frequency electric field of the long wave.

I. 緒　　言

気体，液体，固体の絶縁物において，それぞれの中に電極を配置して，破壊するに十分な高電界を与えれは絶縁物は火花短絡，すなわち絶縁破壊を起す。しかるにこれ等の三態中の絶縁破壊現象は，それぞれが外観上非常に異なった様相を呈するのが普通である。そのために破壊機構そのものが三態間において本質的に異なっているかの如く論ぜられている文献が多い。又気体を扱った論文においては気体中の放電と呼ばれコロナ，火花，グロー，アーク放電等の名によって分類区別して論ぜられている。これに対して液体，固体の両者における文献はかかる分類をしているものは寧ろ少なく，液体又は固体独自の放電機構として扱われているものが多い。処でこれ等の文献を要約して総合してみると，気体をのぞけば液体，固体における絶縁破壊は現象論的に純電気的破壊と，純熱的破壊および熱電気的破壊の三つに大別することができるようである。このうち純熱的と考えられているもののうちには電流熱に主体をおくものと，高周波電界にみられる誘電体損失熱に基ずくものも含まれている。

本文においては主として直流，交流，衝撃電圧を印加した時の放電現象について三態間相

互の類似点や関連性の有無等を整理して，一般絶縁物の絶縁破壊現象を体系づけようとしている。

II. 気体中の放電

気体中の放電は液体，固体の絶縁破壊に比し電界その他の影響が大きく外観も複雑多岐である。したがって一般にコロナ，グロー，火花，アーク等の名称で分類区別せられた個々について論ぜられていることが多く，絶縁破壊機構の立場から論じ，殊に液体，固体の破壊と比較対照して検討している文献は稀である。

処で気体の絶縁破壊である火花理論を総合してみると，たとえば J. S. Townsend によるタウンゼント理論および，これを修正する考え方のものと鳥山，篠原氏等の提唱している如き所謂ストリーマ理論又はこれに類する考え方のものとに大別することができる。

タウンゼント理論の場合は暗流より出発して，電流の急昇する火花特性を重視してこれを表式化し，これに電子および正イオンの衝突電離作用を考えて火花条件を導いている。

ストリーマ理論はリヒテンベルヒ像又はこれの応用あるいは霧箱内の飛跡等から導かれる考え方である。本文では三態間のストリーマの比較を便にするためにリヒテンベルヒ像である表面電荷図を用いた場合の実験経過を中心にして述べる。今任意の気体，たとえば空気中におかれた絶縁板上に一対の電極を配して電圧を加え，板上のストリーマの発生ならびに進展の経過をみると，先ず正，負の両電極より正，負のストリーマが別々に発生して相手電極に向って成長する。両ストリーマが発展して途中で相会すれば互に交わり正は負の，負は正のストリーマを伝わって相手電極に進む。若し負のストリーマが正電極に到達して，しかも十分な電子流が負極より放出される場合は，火花音を発し強い輝きをもつ光をともなって短絡する。すなわちアーク放電となる。我々は最初のストリーマの初期の短小なる時をコロナと呼び，アーク放電となる瞬間迄のストリーマの過程を火花放電と呼ぶ。したがってこの火花放電の終る過程の段階をもって全路の絶縁破壊が終ると定義する。すなわちアーク放電は絶縁破壊後の現象と考えている。

破壊現象を実用面から考えればコロナと呼ばれる初期のストリーマは既にその部分の局部破壊現象ではあるが，気体の場合はその対流性によってコロナの生じた部分は分散消失して新な気体と入れ替わる。したがってこの種のコロナ放電が再び発生し更に進展してストリーマの形をとらぬかぎり全路破壊となることはない。その意味で絶縁破壊とは区別するのである。

一般にコロナあるいはストリーマは正，負が同時に相対的に両電極から発生するのが普通であるが，不平等電界の如く電位傾度の配分如何によっては正，負何れか一方のストリーマのみが単独に発生して相手電極に進展するものである。たとえば正又は負の電位側を制御して，負又は正のストリーマのみを発生発達せしめると，この単性のストリーマのみが相手電極迄橋

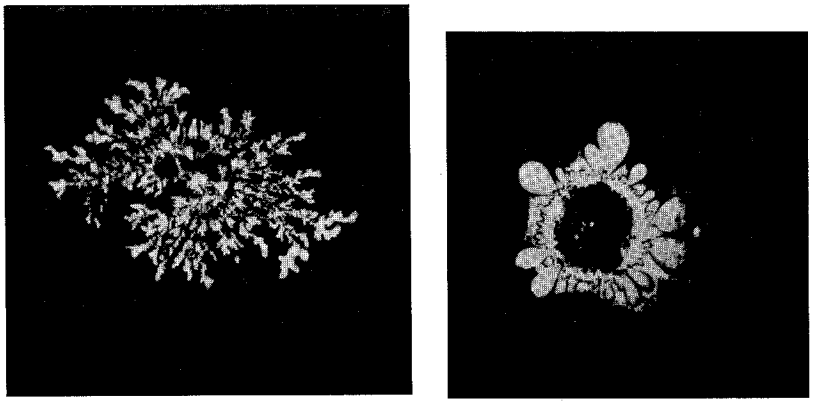
絡せしめることができる。しかしこれだけでは火花音は発せず，短絡電流も流れることがないすなわち火花放電とはならない。一般にこの一方的なストリーマが正である場合はこれが負極に達すると，初めて負のストリーマが誘発されてこの先着の正のストリーマを伝わって正極に向い，負のストリーマが正極に達すると火花音を発する。又一方的ストリーマが負である場合はこれが正極に達した瞬間正のストリーマを誘発して先着の負のストリーマが正のストリーマを負極に誘導する。この場合重要なことは正のストリーマが負極を橋絡することが火花放電の条件となるのではなくて，負極自体からの電子流が正極に橋絡することである。したがってこの場合の初めに現われた負のストリーマは気体中の電離に基ずく電子と負のイオン群が主体となっているものであって，負極自身の電子放射による電子群を含まぬか，あるいは僅少であるということである。すなわち気体中のストリーマには気体中の電子による衝突電離を主とするものと，負極自身からの放射電子流を主とするものとの区別があるということである。したがって前者のストリーマは見掛け上の火花放電を起すが電極間を短絡するアーク放電とはならないのが特徴である。故にこれは局部的破壊に属するけれども完全全路破壊とはかなり性質の違ったものである。この種の放電はボイド放電[1]に見られる現象である。

以上は後述する三態間に共通した現象である。この実験は主として衝撃電圧によって観察されたストリーマの経過であるが交流，直流電圧によっても同様な経過を観察することができる。ただし交，直流電界の場合は空間電荷と呼ばれるイオン群の放電をともなう。この種の放電はストリーマの発生，成長に著しい影響を与えるため衝撃波の場合と異なり火花放電の外観を複雑なものにしている。殊に長波長の高周波電界[2]においては熱破壊をともなうため更に複雑な外観を与えている。しかし一般にこの種の放電は直接の絶縁破壊とはならぬもので寧ろ火花特性に論議せられる電流の急昇現象に関係が深いようである。又この空間電荷群は蓄積すると静電的にその部分の電位を高めることになり，この静電位によって衝撃的な二次放電[3]が起ることがある。この二次放電はボイド放電にみられる如き性質のストリーマを生じ，二次的に局部破壊を起す。又この空間電荷群は電位の分布を変えることがあって火花放電を抑制する作用をすることがある。

III. 液体中の放電

液体の絶縁破壊すなわち液体中の火花放電の外観は気体中の放電に比して遙に単純である。しかるにその火花機構に関する文献の理論は多種多様である。これ等のあるものは実験的に符合せしめうるものもあるが，これは寧ろ特殊な場合に属し，普遍的妥当性を欠くものが多い。たとえば電流熱による熱破壊説等は衝撃波による破壊現象にはあてはまらない。又電流—電圧曲線[4]を元にして論じている考え方は電荷図等によって示されるストリーマ機構にはあてはまらない。

液体絶縁物中においても気体中と同様の帯色粉末を用いて表面電荷図でえられる。これを利用するか特殊加工電極[5]を使用するリヒテンベルヒ像およびその他の方法を併用して実験を繰り返えせば，気体中の放電と全く同様の過程をもつストリーマ機構[6]によって火花放電，すなわち絶縁破壊が行なわれることがわかる。しかし液体分子の構成，密度等は気体と異なっていることがそのままストリーマの延び方や形等にも現われ，気体中のそれとは外観は異なって見える。第1図は液体中の放電図形の一例である。(a) 図は気体中のストリーマに相当するも



第 1 図

(a)
Positive Dust Figure on Window Glass in Transformer Oil. Impulse Voltage 39.5 kV. max.
R.H. 47% T. 21°C

(b)
Negative Dust Figure on Window Glass in Transformer Oil. D.C. Voltage 28 kV.
R.H. 43% T. 18°C

のでその成因は全く気体中と同様と考えている。(b) 図は絶縁破壊には直接関係しないが空間電荷的作用をする放電であってこれは電流に関係がある。本文では前者を樹枝状図形と名づけ後者を木葉状図形と仮りに呼ぶことにする。気体中の放電において直流，交流電界におけるコロナが液中のものより複雑に見える原因にこの木葉状図形に相当する放電が影響している場合が多い。 木葉状図形は 気体中では 拡散する傾向があってこれが空間電荷として作用するのである。

前にも述べた如く 樹枝状図形は 交われば 火花放電となる性質のもので 絶縁破壊を意味する。木葉状図形は正，負が交っても単に交叉附近の電荷が中和するだけで絶縁破壊とはならない。しかしこの種の放電は結局電荷の移動作用をするために火花特性に見られる電流急昇の大きい原因をなしているものと思われる。又この種の電荷が蓄積すればその部分の電位が高まる結果静電的電源となって衝撃的二次放電[7]を起してストリーマを発生する。これは気体中の二次放電と全く同様であり局部破壊を意味する。又これ等の空間電荷が火花放電を起さぬような場合でも，電荷は熱のエネルギーに変って液体の温度を上昇せしめる。したがって木葉状放電

は間接に絶縁油を劣化せしめる原因ともなる。一方においてこの種の電荷は電位傾度の配分を変えるために寧ろストリーマの発生を抑制することになり，直流電界においてこの現象は特に著しく見られる。このことは気体中の現象と共通している。

IV. 粉体中の放電

固体中に電極を装置して高電界を与えれば絶縁破壊してアーク短絡となることは，その媒質が結晶性であると非結晶性であるとを問わず同様である。ただ印加電圧の大小，印加条件の如何によっては結晶性のものは結晶軸の方向にストリーマが延び固体特有の亀裂が生ずる。若し印加電圧が急激かつ強大である場合は，結晶軸とは無関係に電界の方向にしたがってストリーマがのびて絶縁破壊するのが普通である。この場合固体中に発生するストリーマの性質が気中，液中のものと同様であるか否かを外部から判断することは困難である。しかし検流計[9]を用いて徐々にストリーマ，すなわち亀裂を深めて正，負を近ずければ正，負のストリーマは相接するにいたる。しかしそれだけでは電流は流れない。更に電圧をあげて亀裂を滲透せしめると急激に電流の流れることを観察することができる。この現象は気体，液体の場合の正，負のストリーマが単に途中で相会しても絶縁破壊すなわち短絡電流は流れないというのと一致している。

この固体中のストリーマを表面電荷図を用いて検する手段として，固体絶縁物を一旦細粉化してその中に絶縁板と電極を配置して，再び粉体全体に機械的圧力を加えて固型化すれば，若干の空気を含む准固体すなわち多孔性の固体として扱うことができる。この方法で電圧印加毎に粉体をのぞけば粉体中の電荷図がえられる。第2図がその一例である。図で明なる如くストリーマは液体中のものと酷似していることがわかる。したがって帯色粉末を用い，あるいは

第2図　Positiv Figure D.C. Votage

電流—電圧曲線を求めつつ電荷図と対照すれば粉体中の火花機構を知ることができる。この方法によって粉体中でも気体，液体中の場合と全く同様なストリーマ機構によって絶縁破壊を起すものであることを確認し，しかもストリーマ自体の性質も全く気体，液体の中のものと共通であることが確められる。しかも電流とは殆んど無関係であることが明となった。これは粉体中の特異な現象として注目されるべきことで，粉体中においては電荷図およびリヒテンベルヒ像を求める際に印加電圧の波形の如何に関係なく樹枝状図形が容易にえられるという事実と密接な関係がある。すなわち木葉状図形に相当する放電状態が他の絶縁物中とかなり異なっているためである。このためにストリーマ機構をより明瞭に確認できるのと絶縁破壊に直接関係のない木葉状的放電が殆んど電流曲線に影響を与えていないということを意味する。しかし粉体中の木葉状図形に相当する放電は，破壊機構とは別個に液体の場合より更に媒体の温度上昇を早める作用をする。これは熱放散のしにくい媒体構造が大きい原因の一つと考えられる。

粉体の場合に気体，液体と著しく相違する点は粉体すなわち固体の場合は一旦コロナが発生すればその痕跡は旧に復することがなく亀裂状のストリーマ痕を残すことである。したがって反復してコロナが発生するような場合は重畳してストリーマの跡は焼損して熱的に劣化して後発のコロナの延びを助長することになり，比較的低い電圧で絶縁破壊となる。この場合のストリーマ痕は tracking 又は treeing と呼ばれるもので普通のストリーマとはその成因も性質も異なり，これは熱電気的破壊と呼ばれるものである。かかるストリーマは電気的破壊に始まり，熱的破壊をともなう現象で気体や液体中におかれた固体表面や，電力ケーブルの内部絶縁紙の層間等に屢々見られるものである。

V. 結　　論

誘電体の中に発生するストリーマは気体，液体，固体何れの場合も類似した共通性をもつ。すなわちストリーマの生成機構も大体共通した電離現象に基ずく。したがって誘電体の三態における絶縁破壊機構は類似のストリーマ機構による電気的破壊である。

現象論的にいえば絶縁破壊は媒体分子が電子による衝突電離に始まるストリーマの発生によって局部的な電気的破壊が起り，これが進展延長して電極間を橋絡し，最後に負極よりの電子流によってアーク短絡となる現象である。

ストリーマは絶縁物の局部的絶縁破壊であるが気体，液体においては破壊電圧が不十分であれば全路破壊とはならず直ちに消失するが，固体においては亀裂状のコロナあるいはストリーマ痕を残し，これが反復重畳すれば tracking あるいは treeing と呼ばれる焼損をともなう熱電気的絶縁破壊となる。固体におけるストリーマ痕はそれを残すストリーマやコロナの性質が気体や液体中のものと異なるためではなくて，絶縁体物質の構造の差だけによるものである。

(昭和36年8月31日受理)

文　　献

1) 沢： 電学論文集 **2**, 8 (1941)
2) 鳥山・篠原・沢・市村： 電学誌 **55**. 567 (1935)
3) 沢： 電学論文集 **4**, 3 (1943)
4) A. Nikuradse： Archiv. f. Elekt. **25** (1931), Ann. d. Phys. **13** (1932), E. u. M. **34** (1932
5) 沢： 電学論文集 **2**, 8 (1941)
6) 前出 5)
7) 前出 3)
8) 沢： 電学論文集 **4**, 7 (1943)
9) 稲田, 副島： 4工大 35 (1940)