直流電界下におけるPEフィルムの絶縁破壊発生までの 電極界面電界の測定

正員 福間 眞澄 (松江高専)
正員 長尾 雅行 (豊橋技科大)
正員 小崎 正光 (豊橋技科大)

Measurement of Cathode and Anode Electric Field up to Electrical Breakdown in Polyethylene Film under DC Electric Field

Masumi Fukuma, Member(Matsue National College of Technology), Masayuki Nagao, Member, Masamitsu Kosaki, Member(Toyohashi University of Technology)

In this paper, we made the simultaneous measurements of DC electric strengths and space charge distributions in a 100 μ m thick low-density polyethylene (LDPE) films up to electrical breakdown by using pulsed electro-acoustic method. Here the cathode and anode electric field modified by the accumulated space charges in front of each electrode were estimated from the measured charge density at the cathode and the anode, respectively. The sample film was placed in the iron sphere - aluminum plane electrode system and the DC step voltage increased 2kV and 5min. was applied to the film up to the electric breakdown.

The electric strengths of LDPE film decreased with temperature and electric strengths at aluminum cathode was lower than that at iron cathode, suggesting that the carrier injection from the electrodes play some role in the DC breakdown. At room temperature, both the cathode and the anode electric fields were nearly equal the applied electric field at the breakdown, showing the little space charge accumulation in the bulk. With increase of temperature, the cathode electric field decreased and kept the value almost equal to the average electric field, while the anode electric field were higher than applied electric field before the electrical breakdown. The above results suggest that both the negative carrier injection from the cathode and the hetero space charge accumulation near the anode affect the DC electrical breakdown of LDPE film at higher temperature.

キーワード：絶縁破壊、直流電界、空間電荷分布、ポリエチレン、電極界面

1. まえがき

高分子材料であるポリエチレン (PE) は電力ケーブル用絶縁材料として広く用いられている。また、長距離送電用直流電力ケーブルの絶縁材料としても着目されている¹⁾。PEの絶縁破壊現象については空間電荷の存在が実効的な材料内部の局所電界を歪ませることが絶縁破壊特性に影響を及ぼしていると報告されている²⁾。このことから、破壊電界に至る過程でのポリエチレン内部の局所電界を評価することは絶縁破壊特性を理解する上で重要である。

最近、高分子材料内部の空間電荷の存在を非破壊で測定する技術として、レーザ誘起圧力パルス法³⁾やパルス静電応力 (PEA) 法⁴⁾が開発され、絶縁材料中の空間電荷の直

接測定が行われるようになってきた。特に、PEA法は、センサ部が完全にシールドされているため、絶縁材料に電圧を印加し、絶縁破壊が発生した場合でも装置に影響がなく、絶縁破壊発生直前までの空間電荷分布が測定できる利点がある⁵⁾。

ここでは前野氏らによって、開発された高分解能PEA法装置⁶⁾を参考にして、製作した装置で厚さ100 μ mのPEフィルムについて絶縁破壊直前までの空間電荷を直接測定した。その結果をもとに、電極界面近くの試料内部の局所電界を評価した結果について報告する。破壊時の平均印加電界 (Fb: 絶縁破壊の強さ) と電極界面近くの局所電界の関係は、室温から90℃までの温度領域について調査を行った。

その結果、測定したPEフィルムのFbは温度上昇に対し負の温度依存性を示した。室温では、電極界面の局所電界は

印加電界（平均印加電界）に対してほぼ比例関係があり、絶縁破壊直前の平均印加電界でも試料内部の空間電荷の蓄積は小さいことが判った。また、室温以上の温度領域では、絶縁破壊直前の平均印加電界において、陽極近傍の局所電界はFbを大きく上回る電界まで達していることが判った。また、陰極近傍の局所電界は、絶縁破壊直前でも平均印加電界程度までしか達していないことが判った。

これらの結果から、測定したPEフィルムにおいては、陰極からの負の電荷注入が温度上昇とともに増加し、試料内部を移動して、陽極近傍にヘテロ電荷として蓄積する現象が起こっているものと考えられた。PEフィルムの絶縁破壊の強さが温度上昇とともに減少することと、陽極近傍のヘテロ電荷の存在は、陽極近傍の局所電界の変歪の大きさから考えて、絶縁破壊特性に強く関係している可能性があると考えられた。

2. 試料および実験方法

図1 実験装置

Fig.1 Experimental setup.

<2.1>測定装置

絶縁破壊発生までの空間電荷の測定には前野氏らによって、開発された高分解能PEA法装置⁶⁾を参考に製作した装置を用いた。図1はその測定系の構成を示している。測定装置は厚さが7μmのポリフッ化ビニリデン(PVDF)を圧電素子とした。信号の検出には広帯域増幅器(利得30dB、帯域500MHz、入力インピーダンス50Ω)を用いた。圧電素子および広帯域増幅器は鉄製のケースによりシールドされている。記録には毎秒1ギガサンプルのサンプリング速度を有するデジタルオシロスコープ(HP54510B)を使用した。

絶縁破壊までの空間電荷測定を行う場合には、直流高電圧に高さ+500V、幅5nsの方形波パルス電圧を重ねし電圧印加中での空間電荷の測定を行った。空間電荷分布測定における平均化処理は約500回とした。空間電荷測定の温度依存性の測定については、シリコンオイルの温度を変化させることにより行った。

<2.2>試料

供試試料としては、公称厚さ100μmの低密度PEフィル

ム(三菱化学製)を用いた。絶縁破壊の強さ(Fb)の測定値は、絶縁破壊が発生したときの印加電圧を試料厚さで割った値で示した。電極系については、PEフィルム面内での絶縁破壊発生場所を限定し、空間電荷の測定を行うために球電極(鉄(Fe):φ10mm)を上部電極にした球-平板電極系を用いた。平板電極は測定装置の下部電極(アルミ(Al):厚さ12mm)である。

PEフィルムの絶縁破壊特性を測定する場合に、電極に面積を有する平板-平板電極系を用いると、試料の弱点部や電極のエッジ部分で破壊が発生し、Fbが正確に評価できない可能性がある。絶縁破壊発生場所についての空間電荷を測定するために球-平板電極系を用いた。この場合には、球電極の電極面積と平板電極の面積が異なるため、球電極近傍の空間電荷分布の信号が小さくなることが考えられる。そのため、球電極近傍の空間電荷が平板電極と同等に評価できないことになる。そこで、測定では球電極の印加電圧の極性を替え平板電極(下部電極)近傍の空間電荷分布から電極近傍の電界を評価し、Fbと陽極および陰極近傍の局所電界の関係について調査を行った。

図2 絶縁破壊の強さの温度依存性

Fig.2 Temperature dependence of electric strength.

3. 実験結果および考察

<3.1>絶縁破壊の強さの温度依存性

試料に直流ステップ高電圧を2kV刻みに5分ごとに印加し、絶縁破壊発生までの電圧印加中の空間電荷とFbの測定を行った。図2はFbの温度依存性の測定結果を示したものである。測定結果は各温度について正および負極性の電圧を上部電極に印加し、それぞれについて3回の測定を行った。各温度でのFbの平均(■)と標準偏差(バー)が図2に示してある。また、図には各極性についてFbの平均を印加電圧の下部電極の極性が正の場合(▲)と負の場合(●)について示してある。Fbは30°Cで5MV/cm程度であるが温度上昇とともに低下し、90°Cでは2MV/cm程度まで低下していることが判る。Fbは下部電極の電圧の極性により差が生じており、40°C以上では下部電極の電圧の極性が負の場合にFbは約1MV/cm低くなっている。

3. 2>絶縁破壊発生までの空間電荷測定

30℃、60℃および90℃の絶縁破壊発生までの空間電荷の測定結果の例を図3に示す。下部電極界面の空間電荷を求める方法については文献⁶⁾の信号処理の方法を用いた。信号処理に用いた基準波形には試料を装置に装着した後、周波数60Hz、波高値2 kVの交流電圧を印加した場合の、PVDFの出力信号を用いた。基準波形に交流印加時のPVDFの出力信号を用いたのは、周波数が60Hz程度の交流電圧印加時にはPE試料内部には空間電荷が観測されない可能性が高いことからこの波形を基準波形とした^{7, 8)}。

信号処理のパラメータとして、ガウシアンフィルタのG値を0.05、ウィナーフィルタのW値を 1×10^{-12} とした。G値は信号処理において、分解能に関するパラメータであり、G値が1の時、分解能を最も高く設定したことになる。

しかし、試料の厚さに対し装置の分解能が不十分な状態で、G値を大きくしすぎると信号処理が困難となる問題があり、ここでは小さい値を用いた。W値は信号処理段階で起こるゼロ割を回避するもので、大きい値を用いると分解能が低下する。ここでの設定値は十分に小さく、信号処理の結果に悪い影響を与えていない。

(a) lower electrode :Al(-)-PE-upper electrode :Fe(+) 30℃

(b) lower electrode :Al(+)-PE-upper electrode:Fe(-) 30℃

(c) lower electrode :Al(-)-PE-upper electrode:Fe(+) 60℃

(d) lower electrode :Al(+)-PE-upper electrode:Fe(-) 60℃

(e) lower electrode :Al(-)-PE-upper electrode :Fe(+) 90℃

(f) lower electrode :Al(+)-PE-upper electrode:Fe(-) 90℃

図3 下部電極界面の電荷密度分布の印加電界依存性

Fig.3 Applied field dependence of charge density distribution at the interface between lower electrode and bulk.

(a) at 30°C.

(b) at 60°C.

(c) at 90°C.

図4 下部電極界面の電荷密度の印加電界依存性

Fig.4 Applied field dependence of charge density at the interface between lower electrode and bulk.

測定した空間電荷分布において、下部電極と試料界面の電荷密度の平均印加電界に対する変化に着目すると以下のことが判る。

30°Cでは図3(a)、(b)に示すように、平均印加電界に対して下部電極界面の電荷密度の変化はほぼ比例関係があり、絶縁破壊直前でもその関係が保たれ絶縁破壊に至ることが判る。

60°Cの場合には図3(c)、(d)に示すように、下部電極の印加電圧が正極性の場合に比べ、下部電極の印加電圧が負極性の場合の方が絶縁破壊に至る直前での下部電極界面の空間電荷密度が小さいことが判る。

90°Cの場合には図3(e)、(f)に示すようにその傾向はさらに顕著になることが判る。90°Cの場合に、上部電極側からの信号がほとんど見られないのは、高温で材料中の音波の減衰が大きくなり、上部電極側の信号が小さくなるためではないかと考えられる。また、これら60°Cと90°Cの測定結果においては試料に印加する電界の極性により空間電荷分布に違いが見られる。この理由については温度の上昇により試料が軟化し、音波の減衰が大きくなることの他に、上部電極に球電極を使用していることによる信号の変化があると思われるがその点は明かではない。

<3.3>下部電極近傍の局所電界

図4は図3に示した各温度での下部電極界面の空間電荷密度の変化を平均印加電界に対して示したものである。図中には絶縁破壊直前での下部電極と試料界面の電荷密度の測定結果から求めた局所電界を示した。また、図中の直線(A)は試料内部に空間電荷が存在しない場合に現れる電極界面での電荷密度の変化を示している。

下部電極と試料界面では試料内部に存在する空間電荷が電極につくる誘導電荷と電圧印加による誘導電荷が合成され現われていると考えられる。従って、電極界面の電荷密度の印加電界に対する変化から、電極界面での局所電界を評価することも可能であると考えられる。直線(A)よりも下部電極界面の電荷密度が大きくなることは下部電極近傍にヘテロ空間電荷が存在することを意味している。この直線よりも電荷密度が小さくなる場合には下部電極近傍にホモ空間電荷が存在していることを示していると考えられる。しかし、電極近傍の電荷が測定装置の距離分解能よりも電極に近づいた場合には、互いに打ち消し合い測定結果には現れないことも考えられる⁶⁾。従って、この評価方法では、空間電荷の蓄積が電極界面に極めて近い場合に評価できないことも考えられる。

下部電極が平板(Al)で上部電極が球(Fe)の電極系の測定結果において、下部電極が陰極もしくは陽極となった場合の下部電極近傍の局所電界を比較すると以下になる。

図4(a)は30°Cの場合について示したものである。平均印加電界の上昇に比例して陰極および陽極の電荷密度は直線にほぼ沿って上昇している。一方、陰極の電荷密度は直線をやや下回って上昇し絶縁破壊に至っていることが判る。絶縁破壊発生直前の両電極における局所電界を求めると、

下部電極が陽極の場合では4.8MV/cm (Fb : 4.8MV/cm) で、陰極の場合では4.0MV/cm (Fb : 5.2MV/cm) であった。陽極および陰極の場合の絶縁破壊直前の局所電界が平均印加電界に比例して上昇することと、絶縁破壊直前の陽極の局所電界が平均印加電界と同程度であったことから、試料内部には絶縁破壊直前の平均印加電界でも電界を歪めるほどの電荷が存在していない可能性が考えられる。

図4 (b)は60℃の場合の結果である。下部電極が陽極の場合での電荷密度の平均印加電界に対する変化は30℃の場合と異なり、直線(A)を大きく上回り絶縁破壊に至っている。破壊直前の陽極の局所電界は9.3MV/cm (Fb : 3.8MV/cm) で、平均印加電界よりも5.5MV/cmも大きくなっている。陰極の絶縁破壊直前の局所電界は2.6MV/cm (Fb : 3.2MV/cm) でほぼ平均印加電界に近い値を示した。

図4 (c)は90℃の場合の結果である。下部電極が陽極の場合の電荷密度は印加電界が1MV/cmから急激に上昇し、絶縁破壊に至っていることが判る。この場合の絶縁破壊発生直前の陽極の局所電界は7.6MV/cm (Fb : 2.4MV/cm) である。この場合の平均印加電界との差は5.2MV/cmにも達しており印加電界の2倍程度もの変歪が起こっていることになる。この陽極近傍の局所電界の変歪はその大きさから絶縁破壊の強さに影響を与えている可能性が考えられる。絶縁破壊直前の陰極の局所電界は、ほぼ平均印加電界である1.3MV/cm (Fb : 1.4MV/cm) であった。

<3. 4>絶縁破壊と空間電荷

これら電極の電荷密度の平均印加電界に対する変化から、30℃を越え温度が上昇するに伴い、絶縁破壊直前には、陽極の局所電界が平均印加電界大きく上回ることが判った。これらの結果から試料内部には温度上昇に伴い陽極近傍にヘテロ電荷の蓄積が存在し絶縁破壊に至っている可能性が考えられる。

図5に各温度において陽極および陰極について絶縁破壊直前の電界とFbの比較した場合の結果を示す。図5 (a)は下部電極が陽極の場合の結果である。30℃以上の高温でFbが低下するのに対して、絶縁破壊直前の陽極の局所電界はFbを大きく上回り絶縁破壊に至っている。そして、陽極近傍の局所電界は温度上昇に対し、増加もしくは低下といった傾向を示していないことが判る。一方、下部電極が陰極の場合には、各温度で陰極の局所電界は平均印加電界と同程度で絶縁破壊に至っていることが判る。

これらの結果から、30℃の場合の測定結果では試料内部に電界を大きく変歪させる電荷は存在せずに絶縁破壊に至っていると考えられる。また、60℃以上の温度領域では、下部電極 (Al) が陽極であり、上部電極 (Fe) が陰極の場合に、陽極近傍の局所電界の変歪が大きい。この理由として、試料および電極の温度が高くなると、陰極からの負の電荷の注入量が増加し、その電荷は試料内部を移動して、陽極近傍にヘテロ電荷として蓄積するためと考えられる。

図2のFbの温度依存性については、下部電極 (Al) が陰極の場合にFbが各温度に対して低くなっている。これはAlと絶縁体が接触する部分で (注入された電子をトリガとする) 絶縁破壊が起こり易いために、Fbが低下する可能性が考えられる⁹⁾。絶縁破壊の発生原因としては陽極近傍でのヘテロ電荷の蓄積による局所電界の変歪が、ある値を超えた場合に起こる電子的破壊の可能性が考えられる¹⁰⁾。また、これら高温での空間電荷分布の形成は、試料の温度上昇による陰極からの電荷注入や試料内部での電荷の移動に依存していると考えられる。高電界領域での電荷の移動はジュール熱による温度上昇などとも関係しており、熱的な要素の加わった破壊の可能性もある¹¹⁾。いずれの場合にしても、測定した試料において、高温で陽極近傍の局所電界が平均印加電界に比べ大きくなっていることから、空間電荷の存在は絶縁破壊の強さに影響を及ぼすと考えられる。

(a) at Anode

(b) at Cathode

図5 絶縁破壊の強さと下部電極界面の電界の比較
Fig.5 Temperature dependence of electric strength and electric field at lower electrode.

4. むすび

パルス静電応力法の装置を基に、厚さ100μmの低密度ポリエチレンフィルムの絶縁破壊直前までの電極界面の電荷

密度の測定を行い、絶縁破壊特性と陽極および陰極近傍の局所電界との関係についての考察を行った。

その結果、次のことが判った。

(a) 30℃では、印加電界に対して電極界面の電荷密度がほぼ比例関係を保ち絶縁破壊に至ることから、試料内部の局所電界を大きく変歪させる空間電荷は存在しない状態で絶縁破壊に至る。

(b) 絶縁破壊直前での陽極近傍の局所電界の平均印加電界からの変歪は、50℃以上の高温では平均印加電界の1.5から2倍近い大きさであることから空間電荷の存在は絶縁破壊の強さに大きく影響を及ぼしている可能性が考えられる。

最後にパルス静電応力法の装置の製作には通信総合研究所・前野氏、福永氏、武蔵工業大学・高田先生ならびに研究室の皆様にご指導頂きましたことを付記し、謝意を表します。なお、本研究の一部は文部省平成6年度特定研究経費の援助によって行われた。

(平成9年2月28日受付, 平成9年8月18日再受付)

文 献

- (1) 穂積ら「実規模±250kV直流CVケーブルの空間電荷挙動」、電学論A、117、13(平7-1)
- (2) A. Bradwell, R. Cooper et al: "Conduction in polyethylene with strong electric fields and the effect of prestressing on the electric strength", Proc. I.E.E., Vol.118, pp. 247-254(1971).
- (3) G. M. Sessler, J. E. West & R. Gerhard, "High-Resolution Leaser-Pulse Method for Measuring Charge Distribution in Dielectrics", Phys. Rev. Lett, Vol.48, pp. 563-566 (1982).
- (4) Li Y, Yasuda M and Takada T, "Pulsed Electroacoustic Method for Charge Accumulation in Solid Dielectrics", IEEE Trans. Dielectrics Elect. Insul., pp. 1188-1195(1994).
- (5) 福間・長尾・小崎: 「高分子フィルムにおける絶縁破壊直前までの空間電荷分布測定」、電気学会研究会資料、誘電・絶縁材料研究会、pp. 113-122, DEI-96-111(1996)
- (6) 前野、福永、田中、高田: 「高分解能PEA法空間電荷測定装置における信号処理」、電学論A、115、405(平7-5)
- (7) 福間・長尾・小崎: 「LDPEフィルムの交流絶縁破壊と空間電荷」、平成8年度電気学会全国大会、No. 250(1996)
- (8) 村田・酒井・田中・高田: 「低周波交流電圧印加により低密度ポリエチレン中に形成される空間電荷」、平成7年度電気学会全国大会、No. 256 (1995)
- (9) 福間・長尾・小崎: 「ポリプロピレンフィルムの絶縁破壊強さの電極金属依存性とその数値解析モデルによる考察」、電学論A、115、874(平7-9)
- (10) 鈴置・服部・水谷・重次: 「ポリプロピレン中の空間電荷と絶縁破壊」、第26回絶縁材料シンポジウム予稿集、pp. 427-430, S4-6 (1994)
- (11) 福間・長尾・小崎: 「過渡的空間電荷を考慮した熱的-電子的複合破壊モデルの提案」、電学論A、112、202(平4-3)

福間 眞澄 (正員)

1960年10月29日生。1985年3月豊橋技術科学大学・電気電子工学専攻修士課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。1990年9月松江工業高等専門学校・電気工学科講師。1994年7月助教授、現在に至る。工学博士。主として、電気絶縁材料の研究に従事。静電気学会会員。

長尾 雅行 (正員)

1950年4月16日生。1978年3月名古屋大学大学院博士課程修了。以後、同大学を経て、1980年4月豊橋技術科学大学・電気電子工学系講師、1985年4月助教授、現在に至る。工学博士。主として、高分子の高電界電気物性、絶縁劣化

現象に関する研究に従事。1991年電気学会論文賞受賞。応用物理学会、IEEE、CIGRE、低温工学協会会員。

小崎 正光 (正員)

1939年9月10日生。1962年3月名古屋大学・電気工学科卒業。1966年6月カルフォルニア大学バークレー校大学院工学研究科・原子核工学専攻修士課程修了。以後、名古屋大学工学部助手、同講師を経て、1979年4月豊橋技術科学大

学・電気電子工学系教授、現在に至る。工学博士。主として、高分子の電気物性、極低温電気絶縁に関する研究に従事。1979、91年電気学会論文賞受賞。IEEE、低温工学協会会員。