Temperature Measurement of Polyethylene Exposed to Partial Discharge

Tatsunobu Ichiyanagi Member (Nihon University)

Tomoyasu Hayakawa Member (Nihon University)

Keywords : polyethylene, temperature measurement, partial discharge, X-ray diffractometer

In this paper, we measured the temperature of a polyethylene resin exposed to partial discharge.

Polyethylene (PE) resin is known to be a crystalline polymer that can adopt a folded chain conformation. With increased temperature, the molecular chains move and the PE transforms from the crystalline state that exists before heating.

Fig.1 was a characteristics of PE temperature vs the diffracted intensity using an X-ray diffractometer based on the fact that thermal vibration of the polyethylene molecules.

Parallel plate electrodes (two glass plates with an aperture in between) were attached to the goniometer of the X-ray diffractometer to generate partial discharge in Fig.2. A discharge was generated by applying a PE film to each glass plate electrode and the change in diffracted intensity was recorded in Fig.3.

The discharge was found to increase the temperature of the PE film by about 16 degrees above room temperature. This temperature rise is considered an average value resulting from penetration of the PE film by X-rays.

Fig. 1. Characteristics of temperature vs. diffracted intensity

Fig. 2. A composition of a partial discharge electrode (A,B: glass plate, C:conductor)

Fig. 3. Characteristics of voltage vs. the diffracted intensity

部分放電に曝されたポリエチレンの温度測定

正 員 一柳 龍伸* 正 員 早川 朝康*

Temperature Measurement of Polyethylene Exposed to Partial Discharge

Tatsunobu Ichiyanagi*, Member, Tomoyasu Hayakawa*, Member

We measured the temperature of a polyethylene film exposed to partial discharge using an X-ray diffractometer based on the fact that thermal vibration of the polyethylene molecules attenuates the diffracted intensity exponentially. Polyethylene (PE) resin is known to be a crystalline polymer that can adopt a folded chain conformation. In bulk, PE is composed of amorphous and crystalline regions. With increased temperature, the molecular chains move and the PE transforms from the crystalline state that exists before heating. When a film temperature was at less than 60 degrees above room temperature, the diffracted intensity was at the same value as at room temperature.

Parallel plate electrodes (two glass plates with an aperture in between) were attached to the goniometer of the X-ray diffractometer to generate partial discharge. Discharge by the electrodes only did not change the diffracted intensity. As such, the effect of X-ray dispersion by the electric field or discharge-generated gas was considered. A discharge was generated by applying a PE film to each glass plate electrode and the change in diffracted intensity was recorded. After the discharge had stopped, the PE film was heated to determine the temperature which gave the same diffracted intensity as that obtained by discharge. The discharge was found to increase the temperature of the PE film by 16 degrees above room temperature. This temperature rise is considered an average value resulting from penetration of the PE film by X-rays.

キーワード : ポリエチレン, 温度測定, 部分放電, X線回折

Keywords : polyethylene, temperature measurement, partial discharge, X-ray diffractometer

1. まえがき

空気中の放電によって発生するガスの温度は堀井ら⁽¹⁾によると光のスペクトルから 710~880K (437~607℃) と報告されている。一般的なポリエチレン樹脂の融点および分解温度は、それぞれ 110~130℃および 400℃程度であるから、ポリエチレンは放電ガスによって熔融および分解されてしまう。部分放電に暴露された電気絶縁材料の温度を計測する方法には、IEC の棒—平板電極 (空気の間隙を持たない電極構成) を用いた 2 つの方法が報告されている。Ahmed ら⁽²⁾は、絶縁材料内に熱電対を埋設して求めた。平林ら⁽³⁾は、絶縁材料からの赤外線を赤外線温度検出器により計測した。

本論文では、IEC が推奨するガラス板を用いた試験電極⁽⁴⁾で部分放電 (以下、放電と呼称する) を発生させ、ポリエチレンフィルム (以下、PE フィルムと呼称する) を部分放電に暴露した。その結果、PE フィルムの形状変化は見出せ

なかった。そこで、PE フィルムを水中で加熱処理した後、室温において処理前後の試験片の寸法を比較したところ、60℃以上の熱処理温度で変化が始まった⁽⁵⁾。ここで用いた放電電極による温度上昇は、60℃未満と考えられる。

部分放電に暴露された PE フィルムの温度を計測するために、結晶性高分子の温度因子を利用した。X 線回折装置のゴニオメータに放電電極を取り付けて PE フィルムの温度をその回折強度より求めた。以下、これらについて記述する。

2. 実験方法

〈2・1〉 試料 ポリエチレン樹脂は、大倉工業(株)製の低密度 PE フィルムを使用した。その性質は、密度:0.920g/ml (浮沈法, at 30℃), 結晶化度: 80.3% (X 線回折法), 分岐数: 19 (赤外吸収法, -CH₃/1000C), 厚さ: 0.095±0.005mm (マイクロメータ, 精度 0.001mm) であった。つぎに、温度特性として熱変形温度: 59.8℃ (直交ニコル間で PE フィルムを暗黒に配置し、温度を上昇させて直交ニコルが明るくなったときの温度と呼称する), 融点: 117℃ (島津製作所製, 微量融点測定装置) のフィルムであった。測定結果のバラツキを少なくするために、幅 1m, 長さ 100m のロールから

* 日本大学短期大学部
〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1
Nihon University Junior College
7-24-1, Narashinodai, Funabashi 274-8501

Fig. 1. The Composition of a partial discharge electrode.

長方形 (M 方向×T 方向=25mm×40mm) に切り出した。ただし、M 方向はフィルム製造時の巻き取り方向、T 方向はフィルム面内で M 方向と直角な方向、フィルム厚さ方向を N 方向と呼称する。

つぎに、フィルム表面の滑剤および油脂などの汚れをエタノールおよびベンゼンで洗浄した後、デシケータ内に入れ、五酸化リン (P_2O_5) で 24 時間乾燥した。

〈2・2〉 放電電極の構成 平行平板のガラス電極には 2 枚の導電性ガラス (旭ガラス製、厚さ: 1.78mm, ガラスの片面が導電性を持つ) を用いた。Fig.1 の A,B はガラス電極 (A: $11 \times 13 \text{ mm}^2$, B: $28 \times 43 \text{ mm}^2$) を示している。電極は導電性面-ガラス-空隙-ガラス-導電性面を、空隙間隔が 2.2mm で平行に配置した。C は直径 6mm の真鍮円筒で交流電圧 (50Hz) を A のガラス電極に伝え、一方の B のガラス電極を接地した。これらの電極を構成するために電気絶縁性、耐熱性および機械的強度の良好なガラスエポキシ樹脂(D)を用いた。

〈2・3〉 ポリエチレンの回折強度測定 PE フィルムは製造時にローラーで圧延され巻き取るため、その結晶軸は配向している⁽⁵⁾。

測定の再現性を得るために PE フィルムは、M 方向を電極面 B の短辺に合わせ、上部と下部をテフロンテープで弛まないように貼り付けた。

X 線は、その発生管 (フィリップ社製、出力: 1kW) の銅電極 (ターゲット) から生じる K_α 線 (波長 $\lambda = 1.542 \text{ \AA}$) の単色光を用いた。Fig.2 は対称透過法の配置であり、エックス線発生間のターゲットから生じた X 線が放電電極に入射角 θ (放電電極面と X 線の中心線との間の角度) と反射角 (または散乱角) が等しくなるように配置した。空气中に放出された X 線は、発散スリット (幅可変) から空気分子や原子によって散乱されて試料に到達し、そこで散乱された X 線が受光スリット (幅固定) に集中した⁽⁶⁾後、検出管 (GM 管) へ入射する。ポリエチレンの回折角は、ブラックの反射則により (110), (200) および (020) のミラー面をもち、それぞれの θ が 10.83° , 12.03° および 18.23° であった。

採用した (110) 面の回折強度は他のミラー面よりも大きく θ がもっとも小さいため、PE フィルム面に多くの X 線を入射することができる。Table 1 に X 線回折計の X 線発生

Fig. 2. The method of symmetrical reflection.

Table 1. Many conditions of the X-ray diffractometer.

X-ray emission tube voltage.	D.C. 40kV
X-ray emission tube current.	D.C. 10mA
Disvergence slit.	0.5 mm(Varies.)
Light reception slit.	0.4 mm(Fixation.)
Detection tube voltage.	D.C. 1.5kV
Time constant.	10sec.

管電圧・電流、発散スリット、受光スリット、検出管電圧、時定数についての諸条件を示した。なお、ゴニオメータの角度 (精度 0.01°) は水晶粉末によって校正した。

〈2・4〉 ポリエチレンの温度測定 計測部以外の温度の影響を低減するために、Fig.1 の放電電極をポリ塩化ビニル製のパイプ (内径: 158mm, 肉厚: 6mm, 高さ: 308mm) と平板のスレート (厚さ: 5.5mm) によって覆った (容積: $6,039 \text{ cm}^3$)。しかし、X 線はポリ塩化ビニルを透過しにくいためにパイプの一部を切り取り、X 線を透過しやすい雲母 (厚さ: 0.05mm) を窓材料に使用した。さらに容器内の温度を均一にするため、容器内部にヒータとファンを設置した。

はじめに、室温時の回折強度を求め $2 \sim 5^\circ \text{C}$ 上昇させ、その強度が 3 分間一定値を示した後、室温へ戻した。それらの回折強度をチャート付きペングラフで記録した。温度の調整範囲は $24 \sim 50^\circ \text{C}$ であり、試料面の温度をガラス封入サーミスタ温度計で計測した。

〈2・5〉 放電時の温度測定 前述したポリエチレンの温度測定で使用したヒータおよびファンを止め、サーミスタを取り外して室温に戻した。

放電を発生する条件は大気圧、空気中および室温として 50Hz の交流電圧を 3kV $\sim$ 7kV まで変化させた。

電圧の印加方法は 3kV を 5 分間加えて、室温時の回折強度が変化しないとき電圧を取り除いた。つぎに、電圧を 3kV から 1kV ごとに高めて、回折強度が減少したときはチャート紙上で 5 分以上一定値を示した後に電圧を取り除いた。その後、室温に戻して回折強度が放電前の強度と一致したか否かを確認した。これらの回折強度の変化をチャート紙上に記録した。

3. 結果

〈3・1〉 PE フィルムの回折強度 PE フィルムの (110) 面の回折強度を得るために、X 線回折計のゴニオメータに放電電極を Fig.2 のように固定した。PE フィルムへの照射

面積は、発散スリット幅を 0.5mm 開いたときに、PE フィルム面上に幅 5.32mm×高さ 10.0mm の蛍光塗料を塗った紙片で計測することによって確認した。また、他のミラー面（例えば、(200), (020), (002) 面など）からの回折強度は (110) 面に比較して弱いことを確認した。

Fig.3 に発散スリットを 0.5mm に固定し、PE フィルムの枚数とその回折強度特性を示した。〈2・2〉節で述べた放電電極の構成で B のガラス電極に数枚の PE フィルムを重ねた結果、回折強度は 4 枚まで比例して増加した。5 枚以上の強度は飽和傾向を示した。それらの回折強度の半値幅 [回折角 θ を 10~11.5° の範囲で可変しながら回折強度図形を記録し、(110)面の最大回折強度の 0.707 倍になる幅] も増加した。

Fig.4 にガラス電極およびその電極に 1 枚の PE フィルムを貼り付けた各状態における発散スリット幅と (110) 面の回折強度特性を示した。図中の「ガラス電極」は、X 線がガラス電極自身によって散乱された回折強度であり、発散スリット幅に比例した。「PE フィルム+ガラス電極」は 1 枚の PE フィルムを Fig.1 の B の電極面にテフロンテープで貼り付けた測定結果で、その回折強度は 0.1~0.5mm の発散

スリット幅まで比例した。0.6mm 以上のスリットでは、飽和する傾向を示した。なお、図中の実線は比例関係を示す。これらの結果から、1 枚の PE フィルムで十分な X 線回折強度を得られることが分かった。

〈3・2〉 放電時の PE フィルム温度

X 線の発散スリットを 0.5mm に固定し 1 枚の PE フィルムを使用して、つぎの結果が得られた。Fig.5 に PE フィルム温度の回折強度とその時間特性を示した。550cps (counts per second) 付近の強度は室温の値であり、24℃~40℃まで温度を変化させた後、室温に戻すとほぼ同じ値となった。つぎに、Fig.6 に回折強度の温度特性を示した。Fig.5 で求めた各温度における回折強度を示したもので、室温から温度の上昇にともない減少した。

Fig.7 に印加電圧と PE フィルムの回折強度変化を示した。

回折強度は印加電圧が 3kV~5kV まで変化なく、6kV および 7kV で減少した。室温時の回折強度は 550cps であり、6kV および 7kV でのそれが 350cps であったので、Fig.6 より判断すると約 16℃の温度上昇に相対していることがわかる。測定に含まれる回折強度の変動（ペン先の振動）は 17cps 程度であり、0.8℃に相当した。また、Table 1 の時定数を 10sec. から 1sec. に変えることによって生じる温度幅は 0.8℃から

Fig. 3. Diffracted intensity of PE films.

Fig. 4. Diffracted intensity of electrode & PE film.

Fig. 5. Characteristics of diffracted intensity.

Fig. 6. Temperature characteristics of diffracted intensity.

Fig. 7. Characteristics of voltages vs. X-Ray diffracted intensity.

1.8℃に変わった。

回折強度は 6kV と 7kV で減少し、放電を止めると室温時の強度に戻った。また、7kV の放電による温度上昇変化が 6kV よりも早かった。

4. 考 察

〈4・1〉 ポリエチレンの回折強度 PE フィルムの (110) 面の回折強度は、Fig.3 より 4 枚まで枚数に比例しながら増加した。これは X 線が PE フィルム内を透過しやすいためと考えられる。回折強度の増加は高感度な測定を可能にする。しかし、ポリエチレン樹脂の熱伝導率が約 $0.34 [1/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ と低いために多数のフィルムを重ねるよりも、1 枚のフィルムで測定することが良いと考える。

PE フィルムを 5 枚以上重ねた回折強度は飽和する傾向を示した。その傾向を示すのは、〈3・1〉節で記したように (110) の半値幅が広がったことにより、表面およびガラス電極に接するフィルム面からの散乱 X 線が受光スリットで収束しなくなったためと考えられる。

ガラス電極自身の回折強度 (Fig.4) はガラスが非晶質であり、特定の回折角に鋭いピークを持たない散漫散乱 X 線であるため発散スリット幅に比例したと考えられる。

ガラス電極に 1 枚の PE フィルムを貼り付けて発散スリット幅を変えた場合、その回折強度は 0~0.5mm の発散スリット幅まで比例し、0.6mm 以上で飽和する傾向を示した。この飽和する傾向は Fig.1, Fig.2 より、A-B 電極間隔 (2.2mm) と A 電極の幅 (11mm) が X 線発生管より発散された X 線を遮蔽するか、あるいはフィルム面からの散乱 X 線が受光スリットで収束しなくなるためと考えられる。

〈4・2〉 PE フィルムの温度因子 PE 分子鎖は炭素原子の共有結合であり、分子鎖間の結合はファン・デル・ワールス力である。それらの原子は平衡位置を中心に熱振動している。Fig.6 より、加熱中の回折強度が室温時よりも減少するのは、温度の上昇に伴って原子間の距離が微小変位するためである。熱振動による回折強度の減少は高い温度ほど、回折角が大きく高次反射ほど大きくなる。さらに、

Fig. 8. Equivalent circuits of partial discharged electrode.

熱振動によって (110) 面の回折角を中心に幅広い散乱になる (熱散漫散乱)。熱振動による効果は原子散乱因子とデバイ・ワラー因子 (あるいは温度因子) の積になることが知られている⁽⁷⁾。

この結果、熱処理後に室温の回折強度に戻るの、熱によって結晶質の分子は振動するが、結晶質の PE の分子鎖が流動しなかったためと考えられる。

〈4・3〉 放電によるポリエチレンの温度特性 部分放電に暴露された PE フィルムの温度変化は、回折強度の変化として現れた。発散スリットを 0.5mm に固定したときの回折強度は温度の上昇に伴って減少した。放電による温度上昇が回折強度を減少させる印加電圧は 6kV と 7kV であり、到達する温度は同じであった。しかし、その温度に至る時間は 7kV が早かった。一般的に高い印加電圧において、より多くの放電を生じる。そこで放電電極に加わる電圧を等価回路より求めた (Fig.8)。

ここで C_a を電極周り、 C_e を 1 枚のガラス、 C_g を電極間の静電容量、それぞれの比誘電率を ϵ_a および ϵ_e 、 ϵ_g とした。印加電圧を V とおくと、電極間のギャップに加わる電圧 V_g は (1) 式となる。

$$V_g = \frac{VC_e/2}{C_g + C_e/2} [V] \quad (1)$$

また、非対称の電極面積を等しく、ガラスの厚さとギャップ長を d_e 、 d_g とするとギャップ間電圧 V_g は、(2) 式に置き換えられる。

$$V_g = \frac{V\epsilon_g/2d_e}{\epsilon_g/d_g + \epsilon_e/2d_e} [V] \quad (2)$$

この式に、 $d_g=2.20\text{mm}$ 、 $d_e=1.78\text{mm}$ 、 $\epsilon_g=1.00$ 、 $\epsilon_e=8.85$ を代入するとギャップ間電圧 V_g は、(3) 式となる。

$$V_g = 0.99V [V] \quad (3)$$

放電によって PE フィルム温度が上昇した前後の印加電圧 V とギャップ間電圧 V_g および電界の強さ E_g の関係を Table 2 に示す。この表より、大気圧中で放電が開始する電界の強さは 3kV/mm であるから、 $V=6\text{kV}$ 以上の電圧を印加すれば部分放電が開始する。しかし、この開始電圧では温度上昇が見出せなかったことから、温度上昇が検出できないほど小さいことが考えられる。

$V=6\text{kV}$ 以上の電圧では放電による電離度が高くなり、ポ

Table 2. Relationship applied voltages and discharge voltages.

V [kV]	V_g [kV]	E_g [kV/mm]
4.00	3.96	1.80
5.00	4.95	2.45
6.00	5.94	2.94
7.00	6.93	3.43

リエチレンの温度が上昇したと考えられる。ただし、 $V=6\text{kV}$, 7kV の温度上昇が等しいことはつぎの二つの事項が考えられる。

(1) 高電圧によってさらに電離度が増し、電離したイオン同士が衝突するためにフィルムの温度がほぼ等しくなった。

(2) 電極の導電面が電極端までであるため、電極端に放電が集中して放電電極下における電離度は変わらないために電圧の上昇に対してフィルム温度が変わらなかった。

放電電極の下で部分放電に暴露されたポリエチレンの温度上昇は約 16°C であった。Fig.5 の指針 (ペン先) の振動は 17cps であり、その振動は X 線の不連続性によるもので Table 1 の時定数を 10sec. から 1sec. に変えることによって約 0.8°C から 1.8°C に広がった。

部分放電に暴露された電気絶縁材料の温度を計測する方法には、IEC の棒—平板電極 (空気の間隙を持たない電極構成) を用いた 2 つの方法が報告されている。Ahmed ら⁽²⁾ は絶縁材料内に熱電対を埋設して求めた。平林ら⁽³⁾ は絶縁材料からの赤外線赤外線温度検出器により計測した。これらの室温より上昇する温度は印加電圧を高めると、より高温になっている。

本論文の温度上昇は印加電圧を高めても一定の温度を示した。使用した電極は面積の異なるガラス平行平板電極で空気の間隙を有する点が異なる。その原因は、イオンの電離度や放電が放電電極の端で発生しやすいエッジ効果が考えられる。

5. むすび

部分放電電極を X 線回折計のゴニオメータに設置して、ポリエチレンフィルムの回折強度変化から放電による温度上昇を計測した。ポリエチレンの X 線回折強度は (110) 面がもっとも大きく、その回折強度は加熱によって減少する。

加熱によってポリエチレン分子鎖が移動すると室温時の回折強度が変化するため、室温時の強度が変わらないことを確認しながら計測した結果、つぎの事柄が判明した。

(1) X 線はポリエチレンフィルムを透過するため、その表面および内部に区別なく平均的な温度を測定した。

(2) この温度測定方法はポリエチレンフィルムの熱変形温度以内 (60°C 未満) であれば非接触で再現できる。

今後は、ここで用いた放電電極の X 線照射面とエッジの電離度を計測したいと考えている。終わりに、ご指導いただきました日本大学名誉教授 山本 滋 先生に深く感謝いたします。

(平成 18 年 11 月 20 日受付, 平成 19 年 4 月 27 日再受付)

文 献

- (1) 堀井憲爾・藤 幸生:「固体絶縁物のエアギャップ中におけるコロナ放電の発光スペクトルの測定」, 電気学会雑誌, Vol.86-4, No.931, pp.591-595 (1966-4)
- (2) F. S. Ahmed: "Breakdown of Solid Insulating Films by Partial Discharge, Using Sinusoidal and Pulse Voltages.", *IEEE Trans. EI*, Vol.13, No.5, pp.337-342 (1978)
- (3) 平林庄司・永田秀次・平沢栄一・犬石嘉雄・長谷川武敏:「部分放電劣化試験における電圧および周波数加速限界の検討」, 電学論 A, Vol.100-A, No.6, pp.345-352 (1980-6)
- (4) 例えば, 電気学会編: 放電ハンドブック, p.480 オーム社
- (5) 早川朝康・黄 明煥・山本 滋:「低密度ポリエチレンフィルムの結晶部, 非晶部の配向について」, 電学論 A, Vol.103-A, No.12, pp.43-50 (1983-12)
- (6) 高良和武:「X 線回折」, 実験物理学講座 20, p.117, 共立出版 (1988)
- (7) 菊田惺志:「X 線回折・散乱技術 上」, 物理学実験 15, p.103, 東京大学出版会 (1992)

一 柳 龍 伸

(正員) 昭和 32 年 9 月 11 日生。昭和 57 年 3 月日本大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。昭和 57 年 4 月日本大学短期大学部工業技術学科助手, 現在に至る。主として電気計測および絶縁材料の部分放電, 材料の性質に関する研究に従事。

早 川 朝 康

(正員) 昭和 25 年 8 月 12 日生。昭和 51 年 3 月日本大学大学院理工学研究科修士課程修了。平成 5 年 4 月日本大学短期大学部工業技術学科専任講師, 現在同大短期大学部基礎工学科に名称変更。博士 (工学)。主として高分子絶縁材料の部分放電, 高分子材料の光学的性質に関する研究に従事。