低密度ポリエチレンへの多環芳香族系物質添加による 電気トリー発生電圧の上昇

正 員 山野 芳昭* 非会員 石垣 恵*

Increase in Tree Initiation Voltage for Low Density Polyethylene by Additive of Polycyclic Aromatic Compound

Yoshiaki Yamano*, Member, Megumi Ishigaki*, Non-member

The polycyclic aromatic compounds were added to low density polyethylene (LDPE) with the concentration of 0.1-1.6wt% to restrict the generation of electrical tree in LDPE. The compounds used were naphthalene(Nf), anthracene(An), tetracene (Te), pentacene(Pn) and 9,10 bromo-anthracene(Br-An). AC(50Hz) high voltage was applied to a needle electrode inserted to a block of PE with the additive. The experimental results show that when the concentrations of additive are in the range from 0.5wt% to 0.75wt%, the tree inception voltage for LDPE/An is 3.5-4 times higher than that for LDPE without additive. However, the addition of An is not able to restrict the propagation of tree generated in the specimen. The addition of the other additives except for Nf has much less effect for the increase in the inception voltage than that of An, and the inception voltage for LDPE/Nf is almost the same as that for LDPE without additive. The mechanisms for increasing the tree inception voltage by An were discussed refereeing to our experimental results with UV absorption spectrum, DSC and SPM. SPM observation revealed that high density fibrous construction is formed only on the surface of LDPE/An and surface roughness on LDPE/An is almost 0.17times smaller than that on the other materials. The roughness of the other samples is not small as that of LDPE/An. It is estimated that free volume at an interface between electrode and polymer for LDPE/An is smaller than that for LDPE without additive. It is considered that the increase in the inception voltage for LDPE/An results mainly from the small size of free volume at the interface.

キーワード：電気トリー， トリー発生電圧， 添加剤， 低密度ポリエチレン， 多環芳香族系物質

Keywords : electrical tree, tree initiation voltage, additive, LDPE, polycyclic aromatic compound

1. はじめに

今日まで、電力ケーブルや高電圧機器の信頼性向上の一環として、電気トリー（以下、トリーと称す）発生防止のための研究・開発がなされてきた。その成果のもとに絶縁材料中のボイド、異物、半導電層突起などの欠陥除去等の方法によりトリーの発生防止が図られてきた。一方、添加剤等による絶縁材料の改質とトリー発生や進展の抑制効果についても検討されている。古くは、XLPE などに存在する架橋剤残渣（アセトフェノン）によるトリーの抑制効果が明らかにされている⁽¹⁾。また、有機半導体である多環芳香系物質や電荷移動錯体の添加によるキャリア電子のトラップ効果を想定したトリー発生電圧の上昇についての報告もな

されている⁽²⁾⁽³⁾。最近では、添加剤を酸化防止の観点からとらえ、酸化防止剤がトリーイング劣化過程を阻止することによるトリー発生電圧の上昇等を実験的に検討している⁽⁴⁾。

多環芳香族系物質を低密度ポリエチレン（LDPE）に加えた場合、 π 電子の励起に基づくキャリア電子の運動エネルギーの吸収、キャリア電子のトラップ、LDPE の高次構造変化などにより破壊電圧特性の向上、耐部分放電性・耐トリーイング性の向上が期待できる。我々は、多環芳香族系の添加剤を用いて LDPE フィルムの直流破壊電圧の上昇効果などについて検討を行ってきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。今回、多環芳香族系物質の中から単純な構造のものを選出し、それらを LDPE 中に添加して、トリーの発生電圧の上昇効果および進展の抑制効果について検討を行った。従来から添加剤として用いられる物質は分子構造が複雑なことが多く、発揮される機能や効果と分子構造との基本的な対応を関係づけることが困難であった。そこで我々は、多環芳香族のなかで最も

* 千葉大学教育学部
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
Faculty of Education, Chiba University,
1-33, Yayoichou, Inage-ku, Chiba 263-8522

単純な構造を持つアセン系列の物質（縮合環が直線上に並んだ物質）を添加剤として主に用いた。実験の結果、アントラセン添加の LDPE 中におけるトリ発生電圧は、無添加と比較して、3.5～4 倍程度高いトリ発生電圧を示すことがわかった。本論文では、数種類の多環芳香族添加剤によるトリ発生電圧の上昇特性を示すとともに、その要因について検討を行った結果を報告する。

2. 実験方法

〈2・1〉 添加剤および試料作成方法 使用した添加剤は図 1 に示す 5 種類である。これら添加剤を重量比にして 0.1～1.5%の割合で LDPE 中に添加した。添加剤を LDPE に混入した試験用試料は我々が実験室において作製を行った。その作製手順を以下に示す。

(1) ペレット状の LDPE をトルエン中に入れて加熱溶融 (130℃) させる。

(2) 加熱溶融した LDPE に添加剤を混入し、緩やかに攪拌した後、超音波にて LDPE 溶液中の気泡を取り除く。

(3) LDPE が半固化するまでトルエンを揮発させたのち、常温にしてトルエンを完全に揮発させる。その後、LDPE を試料成型用の型に入れ、加熱圧縮(130℃)させて試験試料の形状（ブロック状）に整形する。

(4) 試験針挿入用のジグにブロック状試料をセットし、加熱した状態(140℃)で高電圧印加用の試験針を試料に挿入する。針挿入後、1℃/min の割合で室温まで降温させる。

使用した試験針は、直径 1mm、先端角度 30°、先端曲率半径 5μm のオクラ宝石精機製のものである。針先端と PE ブロック底面との間の距離（電極間隔）は 5mm である。ブロック底面は導電性塗料を塗布している。なお、厚さ 5mm のブロック状試料の中にある針電極の先端を顕微鏡で鮮明に観測できないため、ブロック状試料側面を針先端付近の高さの位置から底部に至るまで、厚さ約 3mm 程度にまで彫刻刀で削って薄くした。また、作製した添加剤入り PE の結晶化度はすべて 37-39%の範囲にあり（密度による）、この値は無添加のものと差異はなかった。

〈2・2〉 トリ発生電圧の測定 図 2 に示すように、試験試料の針に交流高電圧（50Hz）を印加して、トリイング試験を行った。試験試料はシリコン油に浸してある。図中の Z はトリ発生に基づく PD パルスをオシロスコープで観測するための検出用インピーダンスである。電圧印加は、まず 7kV まで印加電圧を上昇させ、その状態で 5 分間電圧を維持する。その間、オシロスコープにて PD パルスの発生の有無を観測する。その後、いったん印加電圧を 0V まで緩やかに降下させ、トリ発生の有無を顕微鏡で観測する。トリ発生が確認されなかった場合は、7.5kV まで印加電圧を上昇させる（すなわち前回印加した電圧の 0.5kV 増の電圧）。以上の手順を、PD パルスの発生あるいは顕微鏡によるトリ発生が確認されるまで繰り返した。

なお、顕微鏡で観測できる最小トリ長は、2～3μm である。また、部分放電パルスの検出可能な最小放電電荷は

図 1 使用した添加剤
Fig. 1. Additives used.

図 2 試料形状および実験回路
Fig. 2. Configuration of specimen and experimental circuit.

2pC である。

〈2・3〉 その他の測定 添加剤によるトリ発生電圧上昇のメカニズムを検討する目的で、試料材料の UV 吸収スペクトルの測定, SPM(走査型プローブ顕微鏡)による試料の微細凹凸の観測, DSC(示差走査熱量計)による熱分析を行った。UV スペクトルおよび DSC の測定では、トリ試験に使用した材料をフィルム状に成形したものを用いた。SPM による観測では、試料をスライドガラスに挟んで加熱成形を行い、成形した平坦な試料材料表面を DFM(ダイナミックフォースモード)にて測定を行った。なお、UV 吸収スペクトル, DSC および SPM 観測用試料の作製に際しての試料の降温速度は、トリ試料作成時と同じである。

3. 実験結果と考察

〈3・1〉 添加剤によるトリ発生電圧の上昇 図 3 は使用した添加剤がトリ発生電圧へ及ぼす影響を示したものである。添加剤の濃度は 0.5wt% である。図のプロットおよびパラッキはそれぞれ 5 個の試料の平均値および最低値と最高値を示している。図に示すとおり、LDPE/An(An を添加した試料)のトリ発生電圧は、無添加試料と比べて 3.5～4 倍程度高い値を示す。LDPE/Nf 以外の添加試料についてもトリ発生電圧の上昇は見られるが、その上昇率は

図3 トリー発生電圧

Fig. 3. Tree inception voltages.

LDPE/An よりも低い。LDPE/Nf のトリー発生電圧は無添加とほぼ同じ値である。なお、LDPE/An の場合、印加電圧が約 37kV 以上になると PD パルスが発生せずにいきなり短絡するケースがある。この場合、針先から発生した短絡路は、試料ブロック側面（トリー観測用に薄く削った部分）を突き抜けてシリコン油中をアース板電極に至っている。これはおそらく、印加電圧が高いため、針先端から発生したトリーが急速に横方向にも伸びる結果、試験ブロックを薄く削った部分からシリコン油へ放電路が突き抜けるためと考えられる。図 3 の LDPE/An に関するトリー発生電圧は、このように試料を横方向に突き抜けて短絡したときの電圧もトリー発生電圧として取り扱っている。なお、印加電圧を一旦 0V に戻さず、一定の速度 (0.5kV/5min) で上昇させたときのトリー発生電圧特性についても測定を行ったが（この場合は電流波形のみでトリー発生の有無を確認）、その結果は図 3 とほぼ同様の特性であった。

図 4 は発生したトリーの形状を撮影した写真である。これらの写真は、トリー発生電圧において、PD パルス発生後 3 分間電圧を印加し続けた後に撮影したものである。写真に示すように、無添加試料におけるトリーは樹脂状の形状を示している。LDPE/An におけるトリーは、上記したように PD が発生せずにいきなり短絡するケースがみられるが、観測されているトリーについては図に示したようにマリモ状となる。また、針の挿入方向に対して直角の方向へトリーが広がっているのが見られる。LDPE/Br-An の場合は、無添加試料と比較すると、発生しているトリーが密であり、ブッシュ状の形状である。これら 3 種類の試料におけるトリー形状の違いの原因については、印加電圧がそれぞれで異なるので一概には議論できないが、LDPE/An で観測されるトリーの形状は常にマリモ状であった。

図 5 はトリー発生電圧と添加剤の濃度との関係を示したものである。図のプロットおよびバラツキはそれぞれ 5 個の試料の平均値および最低値と最高値を示している。LDPE/An において、添加剤濃度が 0.5wt%~0.75wt% の濃度で、トリー発生電圧の上昇率が最大を示している。LDPE/Br-An および LDPE/Te においても、トリー発生電圧の上昇効果が少ないものの、およそ 0.5~0.75wt% 程度で最大値を示している。図には示していないが、LDPE/Nf およ

図4 トリー形状

Fig. 4. Shapes of tree.

図5 添加剤濃度とトリー発生電圧との関係

Fig. 5. Relation between concentration of additive and tree inception voltage.

び LDPE/Pn でも同様の傾向が見られる。LDPE/Nf を除く他の試料においては、添加剤濃度が 0.5wt% を超えると、試料表面に添加剤の析出が観測される。添加剤濃度が濃すぎると、試料内部においても添加剤の析出が顕著となり、それが原因となって針電極先端の電界を乱し、結果としてトリー発生電圧の上昇効果が発揮されなくなるものと考えられる。

図 6 はトリーの進展長と時間との関係を示したものである。図中の A は無添加試料、B は LDPE/An である。発生したトリーの形態は A はトリー状、B はまりも状である。図中の C は、LDPE/An において、38kV にてトリーの発生を確認した直後に印加電圧を 11kV に低下させ、その後のトリー進展長を観測したものである。その際のトリーの進展

図6 トリー進展長と時間との関係

Fig. 6. Relation between length of tree and lapse of time.

はトリー状の形態を示す。印加電圧 11kV とは、無添加 LDPE 試料の進展長を観測したときの（図中の A）印加電圧と同じである。曲線 A と曲線 C を比較すると、電圧を印加して 4min 後には両者の進展長がほぼ同じになっている。すなわち、An 添加剤はトリー発生電圧を上昇させる効果を有するが、発生したトリーの進展を抑制する効果は有していないものと判断できる。

以上のことから、An を LDPE に 0.5～0.75wt% 程度添加すると、トリー発生電圧が無添加と比較して 3.5～4 倍程度上昇することがわかった。使用したその他の添加剤については、トリー発生電圧の上昇効果を有するものもあるが、上昇率は顕著ではない。また、An の添加は、トリー発生電圧を上昇させる効果を有するが、トリーの進展を抑制する効果はないこともわかった。

〈3・2〉 トリー発生電圧上昇の要因 トリー発生の原因は、高電圧電極から放出された電子が、LDPE 中のフリーボリューム内等を走行する際に電界により加速し、LDPE 分子との衝突により LDPE ラジカルを発生させることが一般に考えられている⁽⁷⁾。したがって、トリー発生電圧を上昇させるためには、LDPE 分子に衝突する電子の運動エネルギーの増加を抑制するか、あるいは電極からの電子放出自体を抑制する必要がある。本実験で用いた多環芳香族系添加剤の場合、電子の運動エネルギーの増加を抑制する効果として考えられる要因は、(1)添加剤による電子のトラップ効果、(2)電子と添加剤分子との衝突に基づく添加剤分子の励起およびイオン化、(3)添加剤混入による LDPE の高次構造の変化に起因した非晶質部やフリーボリュームの体積減少が考えられる。また、電極からの電子放出を抑制する効果としては、(4)誘電泳動による電極先端近傍への添加剤の移動あるいは電極付近に存在する添加剤にトラップされた電荷に基づく電界緩和が考えられる。

電子トラップの効果は Br-An の方が An よりも強いことが以前の測定で明らかにされている⁽⁶⁾。もし電子トラップによる電界緩和作用が顕著に発揮されているのであれば、LDPE/An より LDPE/Br-An の方が高いトリー発生電圧を

示すはずである。また、添加剤の誘電泳動による電界緩和効果については、仮に An が誘電泳動によって電極近傍に移動するとすれば、ほぼ同じ導電率を示すと考えられる Br-An も移動が可能ではある。つまり上記の(1)および(4)の添加剤によるトラップや電界緩和効果が LDPE/An のみに観測されるトリー発生電圧上昇の主要因とは考えにくい。

また、多環芳香族系物質を LDPE に添加した場合、イオン化エネルギーの低い添加剤ほどトリー発生電圧が上昇するという報告が過去になされている⁽⁴⁾。本実験に使用したようなベンゼン環が直線上に縮合しているアセン系芳香族物質のイオン化エネルギーはベンゼン環の縮合数が多くなるほど低くなる⁽⁸⁾。したがって、本実験で使用した添加剤においてイオン化エネルギーの低さがトリー発生電圧の上昇効果と関連があるとすれば、縮合数の最も多い Pn を添加した場合に最も高いトリー発生電圧を示すはずである。つまり、本実験における LDPE/An によるトリー発生電圧の上昇効果は、添加剤のイオン化エネルギーの大きさとは対応がつかない。

このようなことから、以下ではトリー発生電圧上昇の要因として前述の(2)のうち添加剤分子の励起および(3)についての検討を以下でおこなう。

〈3・3〉 添加剤試料の UV 光吸収特性 本項では、LDPE/An におけるトリー発生電圧の上昇の原因として考えられる添加剤分子の π 電子効果について検討を行う。すなわち、電子が電界により加速されて An 分子に衝突する際、An 分子に存在する π 電子の励起作用によって電子の持つ運動エネルギーが吸収される作用である。

図 7 は実験に使用した試料材料の UV 光吸収スペクトルの測定結果である。各試料材料とも、250～280nm の波長域 (4.9～4.4eV に相当) に吸収のピークが見られる。LDPE/An および LDPE/Br-An では、350～420nm の間 (3.5～3eV に相当) にも吸収が見られる。また LDPE/Te の吸収は、440～540nm の間にも見られる。針電極先端から放出された電子が電界により加速し、運動エネルギーが 3～5eV 程度の値を持つことは十分に考えられるので、An 分子がキャリア電子との衝突の際に励起している可能性がある。しかし図 7 のグラフが示すように、LDPE/An のみで特徴的な吸収スペクトル特性が現れるわけではない。つまり LDPE/Br-An と LDPE/An の吸収スペクトルは、波長に若干のずれがあるものの、ほぼ同じ特性を示しているにもかかわらず、トリー発生電圧の顕著な上昇効果は LDPE/An のみで観測されている。つまり、添加剤分子の π 電子効果については、発揮されている可能性は否定できないが、LDPE/An におけるトリー発生電圧の顕著な上昇の主原因とは考えにくいことになる。

〈3・4〉 添加剤試料の高次構造 絶縁材料の高次構造は、トリーの発生や進展特性に大きく影響を与えることが知られている。そこで、添加剤が試料の高次構造に及ぼす影響を調べるため、試料材料の DSC による融解熱の測定、および SPM による試料材料表面の観測を行った。DSC を

図7 添加剤入り試料のUV光吸収スペクトル

Fig. 7. UV absorption spectrum for materials with additive.

用いて温度上昇にともなう融解熱の発生特性を測定することにより、添加剤混入による結晶化度や球晶の大きさの変化を知ることができる。また、SPMにより試料表面におけるnmオーダーの微細な凹凸を観測することができる。

図8はDSCの測定結果の代表例である。測定に際しては、2.5mgの試料を室温から3°C/minで昇温させた。図8に示した3つのグラフを見る限り、添加剤入りの各試料の吸熱曲線は、無添加試料(図中のLDPE)と比べて顕著な変化は現れていない。図に示していないが、LDPE/NfおよびLDPE/Pnについても、無添加試料とほぼ同様の吸熱特性を示している。これらのことから、試料材料の結晶構造は添加剤の混入によって顕著には変化していないものと考えられる。このことは、密度法にて測定した結晶化度に添加剤依存性が顕著に表れていない結果と対応している。しかし、図8(a)に示すLDPE/An試料の曲線において吸熱のピークを示す温度は無添加試料と比べて2°Cほど高温側にシフトしている。この高温側へのシフトについては再現性をもって観測される。その他の添加剤入り試料では吸熱ピークのシフトは観測されない。このことは、Anの添加によって高次構造に何らかの変化が生じているものと考えられる。

図9はSPMによる試料材料表面の観測結果である。凹凸の状態は、白黒の濃淡によって示され、そのスケールが各試料の右側に示されている。図には示していないが、LDPE/NfおよびLDPE/Teについては、LDPEとほぼ同様の凹凸を示す。図に示すように、LDPE/Anの表面には、細かいフィブリル状の凹凸模様が多数観測される。このような細かいフィブリル状の模様はLDPE/An表面でのみ観測され、他の試料材料表面と形態が大きく異なっている。観測されるフィブリル状の模様は、おそらくラメラによるものと考えられる。図9において、試料表面全体の平坦さを各試料の写真右側の濃淡スケールから比較すると、(LDPE)>(LDPE/Te)>(LDPE/Br-An)>(LDPE/An)の順に凹凸が小さくなっていることがわかる。このことは、ガラスと接触させて熱成形をした界面に生じるLDPE/Anの微小空隙(数10~数100nm)は他の試料材料と比較して小さくなっていることを示している。さらには、ガラスと同様の無機物質である金属電極と接触界面における試料ポリマー表面は図9と同様の傾向を有する凹凸の状態であると予想される。

図8 DSC測定による吸熱特性

Fig. 8. Endothermal characteristics by DSC measurement.

上記のことから、トリー発生電圧の上昇のメカニズムとして以下のことが考えられる。すなわち、針電極とポリマーとの接触界面における微小空隙が小さいと、針電極から放出された電子が空隙で加速される際、電子の走行距離が短いので、得られる運動エネルギーは他の試料と比較して小さくなる。従って、LDPE/Anの微小空隙内を走行した電子とLDPE分子とが衝突する際に生じるLDPE分子の劣化は、他の試料と比べて抑えられることになる。つまり、LDPE/Anにおけるトリー発生電圧は上昇することになる。

図9においてLDPE/Anで観測された表面状態の特異性は、DSCの測定からは顕著に現れていない。しかし、図8(a)においてLDPE/AnのDSCピークが約2°Cほど高温側にシフトする現象は、おそらくLDPE/Anにおけるフィブリル状の凹凸と関係があるものと考えられる。

なお、LDPEフィルムの添加剤効果で直流破壊電圧はBr-Anが最も効果があり、その原因は電子のトラップ作用にあると報告している⁽⁶⁾。しかし、微小空隙に起因したLDPEのトリー劣化は、短時間直流課電よりも、今回の交流課電の方が顕著に現れると考えられ、LDPE/Anにおける微小空隙の減少がトリー発生電圧の上昇に顕著な効果を及ぼしたものと考えられる。また、高電界下での電子等の衝突や酸素イオンの存在が原因となって、Anの外側のHが置換反応によってLDPEのラジカルと置き換わり、LDPEの自動酸化反応⁽⁴⁾を断ち切るような酸化防止作用が生じていることも考えられる。しかし、電圧印加済みのLDPE/An(ト

図9 SPMによる試料表面の観測結果

Fig. 9. Surface conditions of test materials observed by APM.

リー発生なし)について、針先近傍の材料のUV吸収スペクトルを観測した限り、スペクトル特性の変化は観測されていない。

4. まとめ

多環芳香族系物質をLDPEに添加した材料を用いて、トリー発生電圧の上昇特性について検討を行った。実験に用いた添加剤は、naphthalene (Nf), anthracene (An), tetracene (Te), pentacene (Pn)および9,10bromo-anthracene (Br-An)である。本論文で得られた結果を以下示す。

(1) Anを0.5~0.75wt%添加した試料のトリー発生電圧は、無添加試料と比較して3.5~4倍程度の上昇がみられる。他の添加剤については、Nfを除いてトリー発生電圧の上昇がみられるものの、Anのような顕著な上昇効果はみられない。Nf添加試料のトリー発生電圧は無添加とほぼ同じ値である。ただし、Anの添加はトリーの進展速度を抑制する効果はないものと考えられる。

(2) An添加試料のみに見られるトリー発生電圧上昇の主要原因は、添加剤分子の π 電子の励起によるキャリア電子の運動エネルギーの吸収効果とは考えにくい。また添加剤による電子のトラップ効果は交流課電におけるトリー発生電圧上昇の主要原因とは考えにくい。さらには、各試料のDSCを測定した結果、添加剤の種類による吸熱曲線の顕著な変化は見られない。ただし、An添加試料のみ吸熱のピークが無添加より2℃高い温度で現れる。

(3) ガラス表面に熔融成形させて作製した試料表面をSPMによって観測した結果、An添加試料の表面は他の試料と比べて凹凸がきわめて少ないことがわかった。このことから、An添加試料において針電極とポリマーとの接触界面における微小空隙の大きさは、他の試料と比べて小さい

ものと考えられる。このことがAn添加試料においてトリー発生電圧が上昇する主要原因と考えられる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究C)によって行われた。

(平成16年12月21日受付, 平成17年4月5日再受付)

文献

- (1) R.Patsch: "On Tree-Inhibition in Polyethylene", *IEEE Trans. EI*, Vol.14, No.4, pp.200-206 (1979)
- (2) M.Morita, M.Hanai, and K.Hoshino: "Some electrical Properties of Polyethylene added Organic semi-conductor", *Shouwa-dennsen-denran Rev.*, Vol.19, No.2, pp.31-37 (1969) (in Japanese)
森田 稔・花井 節・星野一三: 「有機半導体添加ポリエチレンの電気的諸特性」, 昭和電線電纜レビュー, Vol.19, No.2, pp.31-37 (1969) (in Japanese)
- (3) Technical report of IEEJ (Pt.2) No.342, "Effects of Additive and Filler for Solid Insulating Materials", IEEJ, pp.63-67, (1990) (In Japanese)
「固体絶縁材料の添加剤・充てん剤効果」, 電気学会技術報告(II部), No.342, pp.63-67 (1990)
- (4) K.Hirota, Y.Kanemitsu, N.Kamada, and Y.Sekii: "The influence of antioxidants on the electrical tree generation in XLPE", *T.IEE Japan*, Vol.120-A, No.2, pp.154-159 (2000-2) (in Japanese)
廣田 憲・銚 康訓・鎌田憲久・関井康雄: 「架橋ポリエチレンの電気トリーに及ぼす酸化防止剤の影響」, 電学論A, 120, 2, pp.154-159 (2000-2)
- (5) Y.Yamano and M.Okada: "Reduction of PD in a Void by Additives of Azobenzoic Compound in HDPE Insulating Material", *IEEE Trans. DEI*, Vol.8, No.6, pp.889-896 (2001)
- (6) Y.Yamano and M.Ishigaki: "Increase in Breakdown strength of PE Film by Addition of Polycyclic Compound", *T.IEE Japan*, Vol.123-A, No.9, pp.926-931 (2003-9) (in Japanese)
山野芳昭・石垣 恵: 「多環縮合系物質の添加によるPEフィルムの絶縁破壊強度の上昇」, 電学論A, 123, 9, pp.926-931 (2003-9)
- (7) L.A.Dissado: "Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory", *IEEE Trans., DEI*, Vol.9, No.4, pp.483-497 (2002)
- (8) P.A.Clark, F.Brogli, and E.Heilbronner: "The π -Orbital Energies of the Acenes", *Helv. Chim. Acta*, Vol.55, pp.1415-1428 (1972)

山 野 芳 昭

(正員) 1951年3月17日生。1976年3月東京農工大学大学院工学研究科修了。同年4月東洋紡績(株)入社。1980年6月東京農工大学工学部助手。1988年4月千葉大学教育学部講師, 同助教授を経て, 現在同教授。工学博士。主として電気絶縁工学, 静電気工学の研究に従事。1990年電気学会論文賞受賞。電子情報通信学会, 静電気学会, IEEE 会員。

石 垣 恵

(非会員) 1978年12月10日生。2001年3月千葉大学教育学部卒業。同年4月千葉大学大学院教育学研究科入学。2004年同研究科退学, 現在に至る。