ポリマー碍子における撥水性と 複合劣化現象

吉村 昇^{*1}・熊谷 誠治^{*2}

Hydrophobicity and Multiple Aging Phenomena of Polymer Insulators

Noboru YOSHIMURA (Department of Electrical and Electronic Engineering, Akita University), Seiji KUMAGAI (Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Akita Prefectural University)

Advantages of polymer insulators over traditional ceramics insulators are light weight, high mechanical strength to weight ratio and high vandal damage resistance. Easy handling, easy installation and the thereby reduced cost are expected to contribute to more effective and labor-saving power delivery systems. The induced aging can reduce the electrical performances as well as the durability of polymer insulators. This is a peculiar nature of polymer insulators. Nowadays, silicone rubbers incorporated with alumina trihydrate ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) filler are representative housing materials of polymer insulators. One merit of using silicone rubbers is providing stable hydrophobicity, which can be quickly recovered even when it is lost as a result of discharges and/or deposits of contaminations, to insulator surfaces. Stable and recoverable hydrophobicity prevents water film to form, restricting leakage current passing through the water film and thus enhancing the capability of electrical insulators even in wet and contaminated conditions. Fundamental understanding is reviewed on the loss and the recovery of hydrophobicity of silicone rubbers in association with a formation of low molar mass cyclic silicone oligomers, a formation of silanol groups and an orientation of methyl groups. A correlation of the hydrophobic variation with the electrical insulating performances is also reviewed.

Key Word : Polymer insulator, Silicone rubber, Hydrophobicity, Contamination, Leakage current

1. は じ め に

電力が発電所から変電所を経て工場や一般家屋に輸送される際、鉄塔やコンクリート柱を支持体とした架空送電線が多く利用されている。支持体(接地側)と送電線(高電圧側)間の電気絶縁と送電線支持という機械的役割を碍子は担っている。磁器は碍子の材料として100年以上の長い歴史を有しており、設計、製造、メンテナンス、事故処理方法等、それらに関連した技術はすでに成熟の域にある。それにも関わらず、繊維強化プラスチックを機械的荷重を受けるコア材とし、それを保護する外皮材として高分子を用

いたポリマー碍子が最近注目を浴びている。ポリマー碍子はポリマー碍子、高分子碍子、有機碍子又は複合碍子とも呼ばれ、碍子をがいしと表記される場合もあり、その名称は統一化されていない。また、研究や産業の分野によっても名称が異なるが、本稿ではポリマー碍子に統一する。ポリマー碍子の利点として、磁器碍子より格段に軽量であり、落下等の衝撃に強いこと、また、塩分、大気汚染、雨、霧等により碍子表面が電解液に覆われた際の電気絶縁性(汚損特性と称する)が格段に良いということが挙げられる。これら利点を活かした電力輸送の省力化と効率化が期待されており、現在我国において、電力会社を中心として重電

^{*1} 秋田大学工学資源学部電気電子工学科(〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)教授・学部長、工学博士。昭和44年、秋田大学大学院鉱山学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年秋田大学鉱山学部電気工学科助手、昭和58年同教授。平成7～10年、秋田大学鉱山学部学部長、平成10～12年、学部名称変更に伴い秋田大学工学資源学部学部長、平成14年、同学部長、現在に至る。専門は電気・電子材料工学、バイオ電磁気工学。日本素材物性学会名誉会長、静電気学会理事。IEEE、電気学会会会員。

^{*2} 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科(〒015-0055 本荘市土谷字海老ノ口84-4)助手、博士(工学)。平成12年秋田大学大学院鉱山学研究科システム工学専攻博士後期課程修了。同年日本学術振興会特別研究員。平成14年、秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科助手、現在に至る。専門は電気材料および電力工学(主に電気絶縁材料、放電材料加工・処理、電力経済システム)。IEEE、電気学会、日本機械学会、電気加工学会会員。

図1 ポリマー碍子表面上の水分の形状。外皮材の撥水性により玉状から膜状に変化する。

等多くの関係会社が、ポリマー碍子の実線路への本格採用を目指し、各地で実地試験を長期に渡り実施している¹⁻³⁾。

ポリマー碍子の歴史はそれほど浅くない。1950年代イギリスで脂環式エポキシ樹脂を一体成形した碍子が商品化された。1960年代アメリカにおいても脂環式エポキシ樹脂製碍子が商品化されたが、樹脂のトラッキング(炭化)、浸食やパンクに起因する事故が多発し、広く普及しなかった⁴⁾。しかし、1970年代から1980年代半ばにおいて、耐トラッキング・浸食性を高める充てん材を使用するなど屋外電気絶縁に適した組成の高分子外皮材が開発され、それ以降北米を中心に世界的にポリマー碍子が浸透していった⁵⁾。1990年代から、ポリマー碍子外皮材として組成が適正化されたEPDM(エチレンプロピレンジエン三元共重合体)ゴムやEVA(エチレン酢酸ビニル共重合体)ゴムが軽汚損地域に、シリコンゴムが重汚損地域に用いられている。

ポリマー碍子の外皮材といえば暗にシリコンゴムを指すほど、それは優れた汚損特性を碍子に付与してくれる。ポリマー碍子の信頼性と電気絶縁性は外皮材の撥水性と密接な関係を持つ。導電性湿潤と電氣的ストレス以外にも砂塵などの不溶性不導電性物質の表面付着、紫外線、酸性雨などポリマー碍子外皮材に副次的な影響を与える諸因子もある。本稿では屋外電気絶縁用シリコンゴムの撥水性と劣化現象、およびその電気絶縁性との関連についての最近の研究結果を紹介する。

2. シリコンゴム碍子表面の事象

シリコン系材料は結合力の高いシロキサン結合(Si-O-Si)を主鎖とし、撥水性に寄与するメチル基(-CH₃)を側鎖に有する無機系高分子である。ポリマー碍子の外皮材に使用されるシリコンゴムは、ポリジメチルシロキサンをベースポリマーとし、耐トラッキング・浸食性を向上させる水和アルミナ(水酸化アルミニウム)、それらのなじみを良くする可塑剤、シリカ補強材、過酸化合物系加硫剤、その他適当な添加剤を含んだものを高温(140-200℃)で加硫し、その後ポストキュアされたものが多く使用されているようである。シリコンゴム固体内部には、シリコンオイルのような液状低分子量成分が含まれている。この表面張力の小さい低分子量成分が高分子材料の中では比較的ポラスな固体中を移動し、表面に分散することで、撥水性の表面層が形成されている^{5, 6)}。撥水性が保たれているシリコンゴム表面に水分が存在すると、それは膜にならず

立った状態になるため、それらの空隙で電気絶縁が保たれる(図1, a)。しかし、長い時間が経過すると、水分との界面において、シリコンゴムのメチル基(非極性基)がバルク方向に反転する現象が起きる⁷⁾。また、表面に沿った水分の落下運動により、表面を覆っていた低分子シリコン成分が洗い流される。一方、課電された状態では、水滴、シリコンゴム、空気の三接点に電界が集中し、水滴からコロナが発生し始める^{8, 9)}。水滴の導電度の上昇に従い、電界の集中度も高まり、コロナが発生しやすくなるとも報告されている⁸⁾。コロナによる電子衝突、それに伴う酸化により、シリコンゴム表面で極性基のシロキサン結合とSi-OH結合(シラノール基)が増加し、非極性基のメチル基は減少する^{10, 11)}。メチル基の反転、低分子量成分の洗い流し、コロナによる表面酸化が複合し、シリコンゴムの撥水性が低下していく。水滴の形が半球から電界方向に伸びていくと、高まった電界により水滴が更に変形する。このことにより、極性基の反転、低分子量成分の洗い流し、コロナによる表面酸化が更に加速され、水滴は最終的に薄い膜となる。水分量、導電性、電界強度の関連からミリアンペアレンジの電流が流れ始めると、ジュール熱により水膜の一部分が蒸発し、狭い空隙(乾燥帯、ドライバンド)が形成される(図1, b)。その乾燥帯には高い電圧が分担されるため、その部分で放電が発生する。このエネルギーの大きい放電はドライバンドアークと呼ばれ、それが発生するようになると、シリコンゴム表面は完全に濡れ、撥水性は喪失する。撥水性の低下に従い、無放電、コロナ、ドライバンドアークと表面の放電形態が変遷する。ドライバンドアークに過度に曝されるとトラッキングや浸食を許し、碍子の電気絶縁性や機械的機能が大幅に低下し、故障や事故の原因となる。

3. シリコンゴムの撥水性維持力と回復力

シリコンゴムの撥水性は一旦低下しても、降雨や放電のない乾燥状態におかれると、極性基の再反転又は材料内部からの低分子量成分が分散し、次第に撥水性の高い表面層を短時間で再形成する。図2にシリコンゴムの撥水性低下と回復を説明した図を示す。非シリコン系材料においても、同様の機構で撥水性の回復が起きることがある。しかし、極性基の再反転の速度、低分子量成分の含有量と分散速度の高さは、シリコンゴムの分子構造に起因した独特の特性である。シリコンゴムがEPDMゴム等の他の高分子と比べて、ドライバンドアークを簡単に許さないのは、コロナにより若干撥水性が低下した箇所に低分子量成分が順次分散し、局所的な撥水性の低下を許さないためと考えられる。一方、表面に溶性不溶性問わず汚損物の堆積があった場合、汚損物による表面の親水化と表面粗さの増大に伴い、撥水性は一時的に低下するが、時間経過に伴

図2 シリコンゴムの撥水性の低下と回復を示した模式図¹²⁾。

い回復する。この場合は、極性基の反転の効果よりも、汚損物層上への低分子量成分の分散による効果が主である。図3にシリコンゴム(水和アルミナ充てん有無の二種)と非シリコン材料としてEVAゴム(水和アルミナ充てん)を人工的に塩霧と不溶性粉塵(カオリン粉末)で汚損湿潤させた後のそれらの撥水状態を示す。ただし、課電は行われない。一般に撥水性は、材料と純水と周囲空気との表面張力の関係で決まる接触角(contact angle)の大きさに定量化される(図3右下参照)。同じレベルの汚損湿潤においても、シリコンゴムの撥水性は高く保たれ、かつ回復に要する時間も短い。また、水和アルミナ等無機物の充てんは撥水性の安定性と回復性を若干低下させるが、耐トラッキング・浸食性の大幅な向上というメリットを考えれば、十分容認できる低下レベルである。汚損湿潤後回復した接触角が、汚損湿潤前のものより大きくなっているが、それは汚損物による凹凸により表面面積が大きくなり、低分子量成分がその汚損物に対して取り囲むように分散していくため、撥水性がより強調されるためである¹³⁾。

ドライバンドアークに長時間曝されると、メチル基が完全に破壊され、表面層はSiO₂構造に移行する^{15, 16)}。更に、充てん材の析出により、表面は非常にポーラスで粗さが増加している。この場合も、主として低分子量成分の分散により撥水性が回復する。しかし、汚損物の堆積量が極めて高い場合、また、深い層にまでドライバンドアークによる劣化が生じている場合、低分子量成分の分散による撥水性

図3 無充てんシリコンゴム、水和アルミナ充てんシリコンゴム、水和アルミナ充てんEVAゴムの塩霧粉塵汚損後の撥水状態とその回復特性¹⁴⁾。0～8時間：塩霧暴露、8時間：粉塵堆積(カオリン懸濁液噴射)、8～24時間：休息(自然乾燥)を1サイクル(24時間)とする汚損手順を19サイクル行い、20サイクル目の塩霧暴露終了後、回復開始。 図4 IEC60587傾斜平板法で発生させたドライバンドアークに曝された高温加硫シリコンゴムの撥水性回復特性¹¹⁾。Point B, Tはそれぞれ下部、上部電極付近の箇所の撥水性を示している。(a) 6時間暴露後、(b) 50時間暴露後。

回復効果が期待できなくなる可能性がある。図4にドライバンドアークに長時間曝された後の高温加硫シリコンゴムの撥水性回復特性を示す。IEC60587傾斜平板法によりドライバンドアークを発生させ、6時間、50時間曝した後、上下部電極付近二点の接触角を測定した結果である。曝された時間が長くなるに従い、元の撥水レベルまで回復するのに非常に長い時間が必要となる。

シリコンゴムの撥水性の回復メカニズムは、その喪失メカニズム以上に重点的に研究がなされている。低分子量成分の表面分散あるいは極性基の反転による撥水性回復効果は、そのベースゴムの組成、充てん材の量および特性、

図5 塩霧粉塵課電試験後の高温加硫シリコンゴム表面部(厚さ0.5mmまで)と表面堆積汚損物の代表的GC/MSトータルイソクロマトグラフ(著者データ)。200℃, 2分保持クライオトラップによる熱脱着GC/MS。GC温度は50~300(15℃/分)。(a)シリコンゴム表面部, 約1 mg, (b)汚損物(塩分とカオリン粉末), 約0.1mg。

更にはそれまで受けた劣化の種類や暴露量など数多くのパラメータに依存することが系統的研究により明らかになっている。また、撥水性の回復に寄与する低分子量成分の同定が、ガスクロマトグラフ質量分析(GC/MS)を用いて試みられている。シリコンゴム表面に人工的な汚損層を形成させ、汚損物上に滲み出す低分子量成分の分析が行われた。その主成分は環状のポリジメチルシロキサンで、 D_3 ($D_n = (\text{SiO}(\text{CH}_3)_2)_n$) が最も多く、 D_{13} までが検知されたと報告されている^{17, 18)}。図5に塩霧と不溶性粉塵(カオリン粉末)で高温加硫シリコンゴムを汚損湿潤させた後、その表面汚損層とゴム表面部(厚さ0.5mmまで)の代表的GC/MSトータルイソクロマトグラフを示す。ここでのシリコンゴムの表面部分には D_7 – D_9 が多く存在し、そのため、汚損物表面に分散しているものには D_3 – D_5 も多いが、 D_7 – D_9 も多い。このように、可動性低分子量成分はシリコンゴムそのものの組成に大きな影響を受ける。

一方、表面劣化として材料の低分子化が進むことで、撥水性回復に寄与する低分子量成分が増加又は減少することがある。屋外で想定される種々のストレスがシリコンゴム中の低分子量成分の性状、量に与える影響についても調査され^{11, 19, 20)}、紫外線、ドライバンドアークは低分子量成分を低下させ、コロナは増加させるとの報告がある。図6は紫外線照射後の高温加硫シリコンゴムの撥水性回復特性を示したものである。紫外線により低分子量成分が枯渇するため、撥水性の回復がほとんど観察されなくなる。また、実際屋外で使用されたシリコンゴムについて調査が行われ、使用年数の増加に伴い低分子化が進み、未劣化では少なかった D_3 – D_5 の増加が確認されたと報告されて

図6 紫外線照射後の高温加硫シリコンゴムの撥水性回復特性¹¹⁾。紫外線源はキセノンショートアークランプ。凡例中の時間は紫外線照射時間。回復時間(Recovery time)は紫外線照射から開放した時点からの経過時間を示す。

いる²¹⁾。また、 D_3 – D_5 は移動性が高い分、極めて揮発性が高い物質である。このため、これらは碍子最表面層に長期間安定に存在できないという考えもある。むしろ、早期の撥水性の回復はこれら低分子量成分によってなされるが、安定した撥水性の維持はもっと分子量の高い成分によってなされるのではないかという報告もある²²⁾。劣化副産物として生成した低分子量シリコンが、撥水性の維持と回復に本当に有効であるかはまだ分かっていない。逆にシリコンゴムのトラッキングや浸食の進展を助長するとの報告もある²³⁾。実際の屋外における劣化では、種々の劣化要因が複雑に絡み合う。そのため、シリコンゴム中では低分子量成分の増加と減少が繰り返されると推定される。しかし、 D_3 – D_5 などの低分子量成分と架橋反応による SiO_2 構造への移行により、その撥水性の維持と回復の能力の低下は避けられない。しかし、その能力は実際の屋外で何年保たれるかなどの議論はまだなされておらず、今後の研究課題である。

4. 撥水性の維持力および回復力と電気絶縁性

ポリマー碍子用外皮材の汚損湿潤時の電気絶縁性(汚損特性)の評価にはいくつかの試験法がある。塩霧試験はその中で材料の撥水性維持力と回復力を試験結果に適正に反映できる。それはまだ国際的標準試験法とはなっていないが、CIGRE(国際大電力システム会議)や日本の電気学会において、標準化に向けた議論がなされている。塩霧試験は丸棒状又は板状の試験材料に上部と下部の電極を取り付け、それを塩水の霧で満たした大よそ1 m³のチャンバの中心部に設置し、電極間に電圧を印加する。材料の撥水性が高く維持され、電極間での電気絶縁性が保たれている場合、電流は計測されない。しかし、先に述べた機構により材料の撥水性が低下すると、材料表面上の水分が膜状となり、電流が計測され始める。計測された電流を時間積分

図7 塩霧試験における試験時間と累積電荷量(電流の時間積分値)の関係²⁴⁾。HTV-SIRは水和アルミナ充てん高温加硫シリコンゴム, EVAはエチレン酢酸ビニルゴム, MSR AとMSR CはシリコンゴムとEVAゴムのブレンドゴム。両者とも水和アルミナが充てんされ, MSR Cの方がシリコンゴムのブレンド比が高い。塩水の導電率は $1600\mu\text{S}/\text{cm}$, 噴霧量は $300\text{ ml}/\text{hour}$ 。平板試料を使用し, 電極間距離は 80 mm で印加電圧は交流 4800 V 。

図8 図7における塩霧試験終了後の試料の撥水性とその回復特性²⁴⁾。試料名等は図7の説明を参照。塩霧試験20サイクル目の塩水噴霧終了時(464時間目)を回復時間の開始時間とする。撥水性の回復は室内自然条件のもと行われた。

した値(累積電荷量, cumulative charge)をもって, 材料の電気絶縁性, すなわち汚損特性が定量化される。塩霧試験は1サイクル24時間で行われ, チャンバ内への塩霧の導入は8時間だけ行われ, 自然環境における降雨を模擬している。撥水性回復力が高い材料は, 塩霧不導入時にその撥水性を回復し得るので, 撥水性維持力と回復力, 両能力が電流という計測結果に反映される。塩霧試験は基本的に塩霧と電気ストレスの二種を想定しているが, 不溶性粉塵や紫外線の影響を二次ストレスとして取り込むことが可能である。

高温加硫シリコンゴム, 非シリコンゴム(エチレン酢酸ビニルゴム), それらのブレンドゴム二種を試料として用いた塩霧試験の結果が報告されている(図7)²⁴⁾。シリコンゴム, ブレンドゴム, エチレン酢酸ビニルゴムの順に累積電荷量が多く, シリコンゴム含有量が高いほど漏れ電流が効果的に抑制されていることが分かる。また, 塩

図9 紫外線照射(2000時間)前後の試料の塩霧試験結果¹⁴⁾。試験条件は図7における塩霧試験のものと同じ。1サイクルは24時間。試料名に関しては図7の説明文を参照。Glass(ガラス)はセラミックを模擬した参考試料。

表1 紫外線照射(2000時間)前後の試料の接触角¹⁴⁾。HTV-SIR0, 25, 50は水和アルミナ0, 25, 50wt%充てん高温加硫シリコンゴムで, 組成は全て同一。EVAはエチレン酢酸ビニルゴム, BlendはシリコンゴムとEVAゴムのブレンドゴム, 両者とも水和アルミナが充てん。

試料	照射前の接触角 (°)	照射後の接触角 (°)
HTV-SIR0	115	100
HTV-SIR25	110	99
HTV-SIR50	111	102
Blend	109	90
EVA	110	60

霧試験終了後の撥水性とその回復特性も報告されており(図8), シリコンゴム含有量が高い程, 撥水性の低下幅も小さく, 初期レベルに回復する時間も短いことが分かる。ポリマー碍子の汚損特性は外皮材で決定されることから, この結果はシリコンゴムがポリマー碍子の外皮材として非常に優れた材料であることを示唆している。

紫外線劣化を施した試料に塩霧試験を行う複合ストレス試験の結果を紹介する。太陽光のスペクトルに似た光を放射できるキセノンランプにより試料を2000時間紫外線劣化させた後, 先と同じ条件で塩霧試験を行った。紫外線照射前後の試料表面の接触角を表1に, 塩霧試験結果を図9に示す。紫外線照射により全ての試料の接触角が低下しているが, シリコンゴム含有量が低いほど, 撥水性低下の程度も大きい。図9の塩霧試験結果から, 紫外線劣化後のブレンドゴムとEVAゴムは, 未劣化の場合より多くの累

積電荷量が計測されている。紫外線による初期の撥水性の低下と撥水性回復力の低下が容易に放電を発生させ、その結果、多くの電流が許されたものと考えられる。しかし、シリコンゴムに関しては、撥水性低下の程度が小さかったためか、ほとんど紫外線照射の影響が現われていない。また、水和アルミナ充てんの影響も出ていない。シリコンゴムは接触角が約70°まで低下しないと漏れ電流が継続的に発生しないという報告がある²⁴⁾。紫外線による撥水性およびその回復力の低下はシリコンゴムでも避けられないが、汚損特性の低下というマクロ的特性の低下に至るまでは、他の材料と比較して長い時間を要する。

5. ま と め

本稿では、ポリマー碍子用外皮材として最も適用が進んでいるシリコンゴムの撥水性と劣化現象、および電気絶縁性との関連についての最近の研究結果を紹介した。撥水性の維持力と回復力に優れるシリコンゴムを外皮材に用いれば、汚損湿潤時の碍子の電気絶縁性を高く維持することができる。旧来の碍子にはなかったこの特性が、軽量性や耐衝撃性等の利点とも相まって、今後はポリマー碍子が広く普及していくと予測される。ポリマー碍子の更なる技術的発達には、シリコンゴム特有の複雑な撥水性挙動の解明が重要である。特に撥水性の低下と回復は、ポリマー碍子の特性を左右する重要な現象であり、その機構解明が待たれるところである。

参 考 文 献

- 1) 本間宏也, 畔柳俊幸, 泉 邦和: 電気学会論文誌B, **120-B**, 527(2000)
- 2) 小林 哲, 松崎 豊, 新子谷悦宏, 木股隆三: 古河電工時報, **108**, 55(2001)
- 3) 電気協同研究会: 架空送電用有機がいしの現状と今後の展望,

電気協同研究, **56**, 2000

- 4) 今駒 崇, 石原正道, 松岡良輔, 篠窪弘行: 静電気学会誌, **18**, 347(1994)
- 5) Hackam, R.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **6**, 557(1999)
- 6) Kim, J., Chaudhury, M. K., Owen, M. J.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **6**, 695(1999)
- 7) Kim, S. H., Cherney, E. A., Hackam, R.: *IEEE Trans. Elec. Insul.*, **27**, 610(1992)
- 8) EI-Kishky, H., Gorur, R. S.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **3**, 450(1996)
- 9) Philips, A. J., Childs, D. J., Schneider, H. M.: *IEEE Trans. Power Delivery*, **14**, 1081(1999)
- 10) Hillborg, H., Gedde, U. W.: *Polymer*, **39**, 1991(1998)
- 11) Yoshimura, N., Kumagai, S., Nishimura, S.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **6**, 632(1999)
- 12) 本間宏也: シリコンゴム外部絶縁性評価のための撥水性および経年劣化に関する研究, 博士論文(横浜国立大学, 2001), 第1章
- 13) Wang, X., Yoshimura, N.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **6**, 781(1999)
- 14) Kumagai, S.: Fundamental Research on Polymeric Materials Used in Outdoor High Voltage Insulation, 博士論文(秋田大学, 2000), Chapter A1
- 15) Kim, S., Cherney, E. A., Hackam, R., Rutherford, K. G.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **1**, 106 (1994)
- 16) Kumagai, S., Wang, X., Yoshimura, N.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **5**, 281(1998)
- 17) Homma, H., Kuroyagi, T., Izumi, K., Mirley, C. L., Ronzello, J., Boggs, S. A.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **6**, 370(1999)
- 18) 越野幸広, 梅田逸樹, 西島羽勝, 石割美千男: 電気学会研究会資料, 放電/誘電・絶縁材料合同研究会, ED-01-57, DEI-01-74(2001)
- 19) Deng, H., Hackam, R.: *IEEE Trans. Power Delivery*, **12**, 857(1997)
- 20) Deng, H., Hackam, R.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **6**, 84(1999)
- 21) Homma, H., Kuroyagi, T., Izumi, K., Mirley, C. L., Ronzello, J., Boggs, S. A.: *IEEE Trans. Power Delivery*, **15**, 796(2000)
- 22) 李 昌龍, 本間宏也, 泉 邦和: 電気学会論文誌A, **120-A**, 1025(2000)
- 23) Kumagai, S., Yoshimura, N.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **6**, 211(1999)
- 24) Kumagai, S., Yoshimura, N.: *IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul.*, **8**, 679(2001)

*

*

*

*

*