直流水トリーに関する検討

正員 吉 満 哲 夫 (東 芝)

正員 三 井 久 安 (東 芝)

正員 見 城 享 (東 芝)

1. ま え が き

水トリー現象が発見⁽¹⁾されてから既に久しい。この間、本現象の解明に寄与してきた電気学会の貢献は大きく、まとめられた2編の技術報告⁽²⁾⁽³⁾は海外から注目されるところとなっている。しかしながら、その発生・進展の本質的なメカニズムに関しては、多くの仮説が提唱されてはきたものの、いまだ統一の見解は得られていない状況にある。

さて、直流電界（以後、直流とは極性のみならず値も一定である場合に用いる）のもとに水トリーが発生するか否か、また発生するとしたらどのような特性を有するかを明確にしておくことは、水トリー発生・進展の本質的なメカニズムを考察するうえで極めて重要である。既に、このことは以前から随分議論され試験されてはきたが、直流電界での水トリー（以後、直流水トリーと称す）は存在しないとする報告が大多数であった。このため直流水トリーを観察したとの極めて興味ある二、三の発表^{(4)~(6)}もあったが、後述するようにその試験条件のため、電圧リプルの影響ではないかとの意見が交わされていた⁽³⁾。

かかる状況のもとに、著者らはエポキシ樹脂中にダブルニードル形水電極を形成させ、直流水トリーに関する試験を行なった。この結果、明らかに直流水トリーが存在し、しかもかなりの低電界で発生するとの確証を得、既にその結果の一部を報告した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。本論文では、その後引き続き行なってきた試験で得られた新しい知見も交えて、これまで著者らが観察した水電極

法によるエポキシ樹脂の直流水トリーに関する試験結果をまとめて報告する。また、これまで提唱されてきた水トリー発生・進展のメカニズムに関する仮説と観察された直流水トリーとの関連性を検討する。

2. 試験手法と試験内容

今回行なった試験の基本的な手法と調査した内容を述べる。

〈2・1〉 試験手法 水電極法（水溶液を満たしたニードル形電極を使用する手法）による水トリー再現試験法を用いた。水電極を発生源とした水トリーの発生・進展特性については、既にこれまでに能登氏⁽⁹⁾、新田氏⁽¹⁰⁾らによって、その興味ある研究成果が幾つか報告されている。しかし、これらの試験法ではいずれもシングルニードル形水電極が用いられている。今回は、特に極性効果を明確にはあくするために、以下述べるダブルニードル形水電極手法を使用した。これは各種水トリー再現手法の中で初めての試みである。

(1) ブロック状試料の作製 まず図1(a)に示すように、左右2箇所に直径0.5mmのキリ穴を有するブロック状エポキシ試料を作製した。用いたエポキシ樹脂の組成を表1に示す。樹脂は80℃で2時間加熱後、150℃で4時間のアフターキュアを加え硬化させた。キリ穴はその寸法精度ができるだけ高精度になるように、No.2 P-HIGH-PRECISION-JIG-BORER (SIP 社製) にて加工した。これにより、キリ穴の拡大代ばらつき（キリ穴の拡大写真から判断した直径のばらつき）は ± 0.025 mm、また左右キリ穴の同心度（中心線のずれ）は ± 0.05 mmに抑えられている。キリ穴間隔（図1(a)の d ）は試料により異なるが、特に断わらない限り0.7~0.8mmの範囲内にある。

(2) ダブルニードル形水電極の形成 次にプロ

Considerations on DC Water Tree. By Tetsuo Yoshimitsu, Member, Hisayasu Mitsui, Member & Susumu Kenjo, Member (Heavy Apparatus Engineering Lab., Toshiba Corporation).

吉満哲夫：正員，東京芝浦電気(株)重電技術研究所
三井久安：正員，東京芝浦電気(株)重電技術研究所
見城 享：正員，東京芝浦電気(株)重電技術研究所

図 1 試験手法

Fig. 1. Testing method.

表 1 エポキシ樹脂の組成

Table 1. Composition of epoxy compound.

組 成	名 称	重量比 (%)	
エポキシ (ビスフェノール A 形)	Epon 828 ^①	40	100
	Epon 871 ^①	60	
硬化剤	HHPA ^②	59	
反応促進剤	TAP ^③	—	1

① シェル化学製ビスフェノール A 形エポキシ

② ヘキサヒドロ無水フタル酸

③ 2, 4, 6 トリス (ジメチルアミノメチル) フェノール

ック状試料のキリ穴を有する面に、図 1 (b) のように熱収縮ポリエチレンチューブをかぶせた。この後、試料を十分真空引きした状態で、脱泡された試験用の各種水溶液中に浸せきし大気圧にもどすことで、その水溶液をチューブとキリ穴の内部 (同図の打点領域) に注入した。この後、直径 0.3 mm の白金線をチューブ外からキリ穴先端近くまでそう入し、水溶液が飛散もしくは蒸発しないようにチューブ両端をガラス栓にて密封した。試料の外部へ導出している白金線に電圧を印加することにより、キリ穴に注入された試験用各水溶液はダブルニードル形水電極を形成する。

(3) 電圧印加と観察手法 図 1 (b) の試料を、同図 (c) に示すように純水にて 100% RH に調湿したデシケータ内に設置した。このデシケータを 50 ± 0.5°C に温度調節し、各種波形の電圧を印加した。任意の時間にデシケータ内より取出し、同図 (b) の A 方向からダブルニードル形水電極周囲の経時変化を光学顕微鏡で観察した。

〈2・2〉 試験内容 主として以下の内容を明確にすることを主眼に試験を行なった。水トリを発生させる手法は、(2) 項以外は上記基本手法に従った。

(1) 直流水トリの確認 直流水トリは存在

するか。特に電圧リプルを無視し得る試験条件下でどうか。

(2) 直流ボウ・タイ状水トリの確認 水電極以外の発生源 (例えば、絶縁体中のボイド、異物) から、同様に直流水トリが発生するか。

(3) 電圧波形の効果 直流、交流および整流波の各電圧を、同一試験条件下で印加した場合の特性の差はどうか。

(4) 水溶液の効果 水電極に使用する水溶液の種類を変えた場合の発生・進展特性はどのように異なるか。

(5) 電界強度の試算 大まかな発生電界を試算する。

(6) 物理化学的解析 直流水トリ部にどのような物理化学的構造の変化が起きているか調べる。走査形電子顕微鏡 (SEM)、透過形電子顕微鏡 (TEM) およびフーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) による状態分析を行なう。

3. 試験結果とその考察

〈3・1〉 直流水トリの確認 ダブルニードル形水電極にある大きさの直流電圧を印加すると、時間の経過と共に電極先端にトリ状の劣化現象が現われてくる。水電極に 0.05N 濃度の NaOH 水溶液を満たし、距離 0.7 mm の電極間に直流 5.0 kV を印加し、約 15 時間後に観察されたこのような劣化現象の例を図 2 (a) に示す。このトリ状劣化現象は、乾燥処理により同図 (b) のように全く観察できなくなってしまうので、いわゆる水トリ現象であるとみなされる。

第 1 章にも述べたように、直流電界で観察された水トリに関する報告は極めて少ない。いずれもポリエチレンケーブルに関するものであるが、その最初の詳細な報告は Franke 氏によるものである⁽⁵⁾。氏は ±22 kV/mm 以上の直流高電界を加えたところ、交流電界に比べ進展速度は遅いが水トリが観察されたと発表した。国内では、山本氏らにより一部閉閉サージを重ねた 10 kV/mm 以上の直流電界で水トリらしきものを観察したとの報告が行なわれた⁽⁴⁾。その後、福田氏らによって、リプルの効果は明確ではないが ±50 kV/mm 以上の直流高電界で水トリが観察された⁽⁶⁾との興味ある報告が行なわれている。一方、直流電界では水トリは発生しないとの報告は数多く、それだけに極めて重要な上記各発表も容易にその事実が受け入れられていない面があった。すなわち、交流水トリがわずかに数 kV/mm の低電界下で発生するのに比較し、これらポリエチレンケーブルで観察された直流

図 2 直流水トリーの例

Fig. 2. Example of DC water tree.

水トリーは、いずれもかなりの高電界下であったり、あるいは閉閉サージが重畳する電界での試験観察結果であった。そのため、電圧の脈動による効果を無視できないとする見方⁽³⁾が一部にあった。

今回試験に用いた直流電源は、Model 410 B (John-Fluke-MFG 社製) であり、その電圧リプルは 1 mV 以下である。また〈3・5〉節に述べるように、水トリーは電界強度的にも水電極表面の低電界領域から発生している。従って、その発生・進展過程における電圧脈動分の効果は全く無視できる。更に、交流水トリーに比較し極めて特徴的なことは、観察される水トリーがすべて極性効果を有し、一方向にのみ発生・進展していることである。図 2 (a) に見られるように、水トリーは正極からのみ進展し、負極側からは全く発生しない。この極性効果はダブルニードル形水電極を使用しているので、以下により容易に更に明確に確認できる。すなわち、図 2 (a) の状態で極性を反転させれば、既に発生していた水トリーは進展を止め、逆に対向電極 (反転後の正極) から水トリーが発生し進展し始める。

以上述べたように、今回水電極先端に観察されたトリー状劣化現象は、加熱によって消失し、電圧脈動を無視できる低い電界で発生し、また何よりも直流電界を反映した明りょうな極性効果を有している点で、「直流水トリー」であると言える。

〈3・2〉 直流ボウ・タイ状水トリーの確認 交流電界で絶縁体中のボイドあるいは異物などを起点に発生する水トリーを特にボウ・タイ状水トリーと総称している⁽³⁾。一般にボウ・タイ状水トリーは、課電して比較的長時間の潜伏期間の後初めて観察される。これに比較し水電極から発生する交流水トリーは、極めて短時間に発生させることが可能である⁽¹⁰⁾。また、場合

図 3 模擬ボイドからの直流ボウ・タイ状水トリー
Fig. 3. DC bow-tie-type water tree from pseudo-void.

によっては加熱しても完全に消失しないものもある。従って、今回の試験のように実験室的に水電極から発生させた水トリーの場合、ポリエチレンケーブルなどで問題となるボウ・タイ状水トリーと、その発生・進展のメカニズムが異なるとの見方も一部にある。そこで直流水トリーが水電極表面だけでなく、ボイドあるいは異物からも発生するかどうかを試験した。

図 3 はエポキシ樹脂中のボイドからの発生を調べたものである。ボイドは (a) 図のように、pH=9.0 の標準緩衝液をあらかじめ満たした直径 0.5 mm の円柱形空けき (以後、模擬ボイドと称す) を、電極間中央に配置させたものである。直流 5.0 kV を図 1 (c) と同じ状態で印加し、模擬ボイド周辺の様子を観察した。課電後約 100 時間経た時点て観察された図 3 (a) の領域 A の状態を、同図 (b) に示している。負極側に面する模擬ボイドの表面から、負極に向かって水トリーが発生しているのを確認できる。すなわち、条件さえ整えば絶縁体中のボイドからいずれ直流ボウ・タイ状水トリーが発生してくることを裏付けている。

次に異物からの直流ボウ・タイ状水トリーの発生を調べた。まず図 1 (a) のブロック状試料を作製する段階で、強制的に樹脂中に異物を混入させ硬化させた。異物は植物種子の毛を脱脂漂白した脱脂綿の単繊維 (セルロース) の粉末である。水電極として同様に pH=9.0 の標準緩衝液を用い、直流 5.0 kV を印加し、電極間に散在している異物からの水トリー発生を調べた。約 10 時間後には水電極 (正極) 表面から直流水トリーが発生し、約 15 時間後には異物から発生している水トリーを観察できた。この例を図 4 に示す。水電極間に位置しているセルロース粉末から直流ボウ・タイ状水トリーが発生しているのを確認できる。この

電極間隔: 0.65 mm, 印加電圧: 5.0 kV
水溶液: pH=9.0 標準緩衝液, 印加時間:
約 15 時間

図 4 異物からの直流ボウ・
タイ状トリー

Fig. 4. DC bow-tie-type water
tree from contaminant.

図 5 試験電圧波形

Fig. 5. Voltage wave form for experiment.

場合も同様に、正極側から負極に向かってのみ進展している。

以上述べたように、絶縁体中のボイドあるいは異物からも直流水トリーが発生・進展し得る。著者らは、これらボウ・タイ状水トリーも、基本的には水電極から発生する水トリーと本質的なメカニズムは変わらないと考えている。両者の場合、水の供給のされ方だけが異なり、水電極の場合は容易に水が供給されるので、それだけ短時間に発生し、また進展速度も速くなると思われる。なお今回の試験に関する限り、直流ボウ・タイ状水トリーは必ず方向性を有し、すべて発生源から一方向にのみ進展している。従って、これらの水トリーをボウ・タイ状水トリーと称することは、ボウ・タイの語源（蝶ネクタイ）を考えれば適切かどうか問題である。しかし、非対称に進展する交流水トリーもボウ・タイ状水トリーと総称しているので⁽³⁾、とりあえず直流ボウ・タイ状水トリーと称する。

〈3・3〉 電圧波形の効果 図 5 に示す回路で得られる交流、半波整流、全波整流と、この交流の実効値に等しい直流電圧での水トリー伸びの経時変化特性を比較した。

水電極に pH=9.0 の標準緩衝液を使用し、交流波高値 3.0 kV 相当の電圧を印加し、140 時間後に観察された水トリーの例を図 6 に示す。交流〔(d)図〕の場

図 6 電圧波形の効果

Fig. 6. Effect of voltage wave form.

図 7 水トリー伸び特性

Fig. 7. Growth of water tree.

合を除き、すべて水トリーは正極側からのみ発生した。また、課電 140 時間までの水トリー最大伸びの経時変化特性を図 7 に示す。最大伸びは、正極側から発生している水トリーの最先端と正極との最短距離で各試料 3 点ずつである。その伸びやすさを比較すると

交流 < 半波整流 < 直流 ≤ 全波整流

のようになる。電圧が連続的に印加され、しかも一定方向の電流が流れていることが、その正極側での水トリーの成長を大きく促進させ、逆に負極側の水トリー発生を抑制しているようである。

〈3・4〉 水溶液の効果 表 2 に示す各水溶液を水電極とし、直流 5.0 kV を印加し水質の効果を調べた。課電 15 時間後の水トリー発生状況と、その最大伸びを同表に示す。すなわち、水溶液 C~G ではわずか 15 時間後に図 8 (a), (b) にその例を示すような直流水トリーがいずれも発生した。また、水溶液 B では 500 時間後に水トリー発生が確認された。しかし、水溶液 A の場合 2,000 時間後も何ら変化は認められ

図 10 物理化学的分析手順

Fig. 10. Procedure of physical and chemical analysis.

図 11 FT-IR 差スペクトル

Fig. 11. FT-IR differential spectrum.

吸収差スペクトルである。

直流水トリー発生領域は健全なエポキシに比べ、図内に示したような化学種が減少または消滅したり、あるいは逆に増加または生成したりしていることがわかる。すなわち、直流水トリー発生領域は水分量が増加するほかに、化学的に明らかな劣化反応をきたしていることが明確である。

4. 直流水トリー発生・進展のメカニズムの考察

今回の試験でエポキシ樹脂に直流水トリーが発生することがわかった。また、この直流水トリーに関して判明した主なことは、

- (1) 条件が整えば数 kV/mm 程度の低電界でも発生する。
- (2) 特に正極側から負極側に向かって進展しやすい。
- (3) 水溶液の導電率より、むしろ水溶液の pH も

しくはイオンによって大きく左右される。特に陽イオンが重要な効果を持つようである。

(4) ミクロンオーダーの物理的劣化こん跡は検出され難いが、明らかな化学的劣化こん跡が認められる。

(5) 実効値が等しい電圧波形を考えたとき、直流水トリーの発生のしやすさは以下のとおりである。

交流 < 半波整流 < 直流 ≤ 全波整流

などである。これらの知見を基に、その発生・進展のメカニズムを検討する。

<4.1> 幾つかの仮説と得られた知見との関連

主としてポリエチレンの交流水トリー発生・進展特性を基に、そのメカニズムに関する多くの仮説が提唱されてきている。いずれも重要で興味ある説であるが、これらの仮説を今回得られた直流水トリーの知見にあてはめた場合、説明できるかどうかを検討する。

吉村氏⁽⁹⁾、宮下氏⁽¹¹⁾、一色氏⁽¹²⁾、岩田氏⁽¹³⁾らは、

いずれも主たる要因としてポリマー内の液体界面に働くマクスウェルストレスを挙げ、ポリマーの疲労破壊もしくは水の浸入が起きるとしている。これらの説のほとんどは、交番電界におけるマクスウェル繰返しストレスの考え方である。マクスウェルストレス F_n は、例えば電界 E に垂直な境界面の場合、基本的に(3)式で与えられる。直流電界では、時間的に電束密度

$$F_n = 1/2 \cdot \{(1/\epsilon_2) - (1/\epsilon_1)\} D^2 \dots\dots (3)$$

ϵ_1 : 液体の誘電率, ϵ_2 : 絶縁体の誘電率

D が一定となり、当然のことながら力の繰返し力にはなくなる。また、直流電界でも力 F_n は働くが、極性を反映しない D^2 の関数である。従って、主にこの力が水トリー発生・進展を左右しているのであれば、負極からも同じように直流水トリーは発生してくるはずである。つまり、これらの考え方で今回得られた知見を説明するのは困難に思える。

山之内氏⁽¹⁴⁾、宮下氏⁽¹⁾、新田氏⁽¹⁰⁾らは、加速電子によるポリマー切断、水トリー先端での真性破壊、あるいはまた部分放電により水が気化しクラックを生じさせるなどの考え方を提唱している。これらはいずれも高電界気中でみられる電気破壊に近い考え方である。しかし、今回観察された直流水トリーは、これら高電界電気破壊が起きないような低電界でも生じる。また、水溶液の導電率より pH によって大きく左右される。また、これら電気破壊を主に直流水トリーが進展するとすると、その部分にボイド、細管などの物理的劣化こん跡が容易に検出されないのは不思議である。主たる要因はほかにあるように思える。

松葉氏⁽¹⁵⁾らは、電界の効果による水ボイドの化学ポ

テンシャルの減少が原因で、このボイド内圧力が上昇しボイドが拡大し、次第に水トリー形成につながっていくとしている。氏らの説は、これまでの内外の水トリーに関する理論の中で、交流水トリーの発生・進展特性を、最も定量的にしかも統一的に取扱ったものとして注目される。しかし、氏らによると水トリーの成長要因となるボイド内圧力上昇 ΔP は基本的に(4)式で示される。

$$\Delta P = 1/2 \cdot \rho_0 \varepsilon_0 K_0 \{ |3\varepsilon_1/(\varepsilon_2^* + 2\varepsilon_1)|^2 E_0^2 \quad (\text{Newton/m}^2) \dots (4)$$

ただし、 ρ_0 : 水の密度 (kg/m^3), ε_0 : 真空の誘電率 ($8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), K_0 : 定数 ($79 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$), ε_1 : ポリマーの誘電率 (F/m), ε_2^* : 水の複素誘電率 (F/m), E_0 : ポリマー内電界 (V/m)

E_0 が直流電界である場合、 ε_2^* は ∞ となり、 ΔP は 0 となり水トリーは成長しない。このことは松葉氏自らによって説明しており、少なくとも今回得られた知見を説明するには今後理論の拡張が必要となる。

田中氏⁽¹⁶⁾は、誘電泳動により絶縁体中に水が引き入れられ、その後水の加熱熱が起きるなど多くの示唆を与えた。しかし、これらの力のほとんどが電界の強さの 2 乗 E^2 の関数となり、極性効果を説明するには同様に理論の拡張が必要に思える。また、交流と全波整流波間の極端な水トリーの発生差の説明するのも困難に思える。井上氏⁽¹⁷⁾による過飽和液滴核の生成、隈氏⁽¹⁸⁾による凝縮水の噴流放出説にしても同様である。

Mole 氏⁽¹⁹⁾は、絶縁体中に nm オーダの径を有する細孔の存在を仮定し、細孔に満たされた液体の電気浸透 (Electro-osmosis) により水トリー発生・進展を説明できるとした。この電気浸透の考え方をすれば、細孔壁に形成される電気二重層の液体側の層電荷が負であれば、直流電界で正極側からのみ進展する水トリーを説明できる。しかし、電気浸透で仮定されるような細孔がエポキシ樹脂中に存在するかどうか疑問である。また、電気浸透力のためポリマーは粘性流を起こし、物理的な変化をきたし水トリー形成につながっている。しかし著者らは、水トリーはもはや単なる物理現象では説明し得ず、その発生・進展の過程に何らかの手段で化学的劣化が起きる過程を導入し説明せざるを得ない段階にきていると考える。

〈4・2〉 電界に誘起される化学分解 著者らは前報⁽²⁰⁾で、交流電界で生ずるポリエチレン、エポキシあるいはポリエステルなどの水トリーが、化学分解と密接な関連性を持つことを示した。また、併せてその発

生・進展のメカニズムとして電界に誘起される化学分解説を提唱した。すなわち、水-高分子系に課電すると、系の化学平衡定数は最終的に(5)式に示されるように変化する。

$$RT \ln(K(E)/K(0)) = (v/2)(\partial \varepsilon^*/\partial \eta) E^2 \quad (5)$$

ただし、 R : 気体反応定数 ($\text{J/deg} \cdot \text{mol}$), T : 絶対温度 (K), v : 水-高分子系の単位体積 (m^3), ε^* : 系の複素誘電率 (F/m), n : 反応の進行度パラメータ, E : 電界の強さ

今回得られた直流水トリーに関する知見も、上式を背景とした化学分解反応の発生をその発生・進展のメカニズムの骨子と考えれば説明できる可能性がある。以下、定性的で完全ではないが、その可能性を論じる。

(5)式は基本的に周波数の関数ではないので、直流電界でも成り立つ。また、試験に使用した表1のエポキシ樹脂は、分子構造に水と反応するエーテル結合、水酸基あるいは残存 HHPA のエステル結合などが見られる。水電極先端でこれらの部分と水との劣化分解反応が直流電界で誘起され、次第に水トリー形成につながっていくモデルが考えられる。分解前後としては、表3のような分子構造変化が起きているものと推定される。水の複素誘電率は比較的大きいので、劣化、更には分解した領域に水が新たに供給されなければ、 ε^* は反応後のほうが小さくなる可能性もある。しかし、劣化分解反応をきたしたこれらの領域は、むしろ水分吸着能力を増し、反応前より多量の水分を吸着する可能性のほうがはるかに大きい。こうして劣化分解が加速度的に進行し増々多量の水分を吸着し、周囲との屈折率の差が徐々に大きくなり、次第に外部から直流水トリーとして観察されるに至るものと考えられる。これらは直流水トリー一部が化学的劣化をきたしていることと一致する。

化学的に劣化し多量の水分を吸着した直流水トリー一部は、乾燥処理で水分を蒸発させても分子構造は周囲と異なる。しかし、光学顕微鏡で周囲と区別できるほどの屈折率の差がなくなるため、もはや水トリーとして観察され得ない。乾燥によって消失するゆえんである。また、分解反応が進み水トリーが成長していけば、次第にボイドあるいは細管などが形成されてくる可能性もある。しかし今回の観察結果のように、その途中段階ではミクロンオーダの物理的劣化の痕跡は観察され得ない。

さて、直流水トリーに生ずる極性効果は、今後水トリー発生・進展のメカニズムを考察していくうえで極めて重要なポイントを握っていくものと考えられる。既に多くの理論で、これを説明するのは困難に思えること

表 3 化学劣化前後の分子構造

Table 3. Molecular structure before and after chemical degradation.

を述べた。このほかに正極と負極周囲の水分吸着量の違いを検討してみる必要がある。Cooper 氏ら⁽²¹⁾は、課電された高分子の水分吸着量を調査し、貴重な試験結果を得ている。それによると、直流電界での吸着量は電界強度と、とりわけ水中に溶解しているイオンによって影響を受ける。しかしながら、極性に関する限り吸着量の差はない。従って、両極周囲の水分吸着量の差で、今回の顕著な極性効果を説明するのも極めて困難に思える。

一方、ここで著者らが提唱する電界に誘起される化学分解反応説を基にその極性効果を説明しようと思っても、基本式となる(5)式が E^2 の関数であるので単純ではない。しかし、(5)式で誘起されるとした化学分解反応が、実際に生ずるかどうかに着目すれば説明できる可能性が出てくる。すなわち、今回使用したエポキシ樹脂の加水分解反応には Na^+ , K^+ あるいは NH_4^+ などの陽イオンが直接関与したり、あるいは、触媒的作用のため分解反応が促進されていることが考えられる。これら劣化反応式の詳細はまだ明確ではない。しかし、上述のように化学反応に極性効果があり、これが直流水トリーの極性効果として現われる可能性は十分ある(最近、ポリエチレンの水トリーの場合も陽イオンの重要性が井上氏⁽²²⁾、山之内氏⁽²³⁾に指摘されている)。また、正極側に比べその潜伏期間ははるかに長くなっても、いずれは負極側からも直流水トリーが発生してくることが基本的に予想される。更に、このような考え方が成り立てば、得られた電圧波形の効果は、その波形の下で分解反応に重要な役割を果たすと思われる陽イオンが、水電極先端で高分子とどの程度多くの遭遇確率を持つかを考えれば説明できる。更にまた、得られた水溶液の効果は、これらの陽

イオンが各水溶液の中にどの程度多く含まれているかを考えれば同様に説明できる。

5. ま と め

エポキシ樹脂で直流水トリーの発生を確認したことおよび得られた知見とその考察を述べた。観察された直流水トリーの最大の特徴は、その顕著な極性効果である。また完全ではないが、電界に誘起される化学分解でこれらの知見を説明できる可能性を述べた。

水トリー発生・進展のメカニズムについては、著者の説も含めてこれを統一的に説明し得る理論は現在のところ見あたらない。しかし一方では、水トリーの基本的な抑制方法あるいは水中で利用できる新しい絶縁システムの開発が強く望まれている。今後も引き続き更に深い議論が展開され、水トリー現象の本質的な解明が行なわれていくことを期待したい。

最後に、本研究について種々の御指導と貴重な御助言を賜りました九州大学 赤崎正則教授、名古屋大学 家田正之教授ならびに日ごろより御べんたついただいている当社重電技術研究所 山本充義所長、村野 稔次長に深く感謝申し上げます。

(昭和 56 年 7 月 27 日受付, 同 57 年 3 月 17 日再受付)

文 献

- (1) 宮下・井上: 電学誌, 87, 2009 (昭 42-10)
- (2) 絶縁材料耐電界性常置専門委員会: 電気学会技術報告 I 部, iii 号 (昭 49)
- (3) 絶縁材料耐電界性常置専門委員会: 同上, II 部, 95 号 (昭 55)
- (4) 一色・山本・新元: 第 8 回電気絶縁材料シンポジウム, I, 6, 65 (昭 50)
- (5) E. A. Franke, et al.: IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-12, 218 (1977)
- (6) 福田: 昭 52 電気学会大会, No. 284, 367
- (7) 吉満: 昭 53 同上 No. 266, 313
- (8) 吉満: 第 11 回電気絶縁材料シンポジウム, P 8, 101 (昭 53)
- (9) N. Yoshimura & F. Noto: IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-12, 411 (1977)
- (10) 新田: 電学論 A, 94, 17 (昭 49-4)
- (11) 宮下・井上: 電学誌, 90, 937 (昭 45-5)
- (12) 一色・山本・阿部: 藤倉電線時報, No. 58, 27 (昭 48-7)
- (13) Z. Iwata & T. Fukuda: "Deterioration of cross-linked polyethylene due to water treeing", NAS Conference, p. 200 (1972-10)
- (14) 山之内, 他: 昭 50 電気学会大会, No. 354
- (15) 松葉・川井: 電学論 A, 95, 401 (昭 50-10)
- (16) 田中: 絶縁劣化研究懇談会資料, 37, No. 19 (昭 47-11)
- (17) 井上, 他: 大日本電線時報, No. 57, 40 (昭 49-4)
- (18) 隈・杉・坂口: 電気学会絶縁材料研資, EIM-78, No. 23 (昭 53)
- (19) G. Mole: "A mechanism of water treeing in polyethylene cable insulation", WELC paper, 3A, No. 64 (1977)
- (20) 吉満・中北: 電学論 A, 99, 543 (昭 54-11)
- (21) D. W. Auckland & R. Cooper: Proc. Instn. Elect. Engrs, 121, 406 (1974)
- (22) 加藤・植田: 昭 52 電気学会大会, No. 280, 361
- (23) 山之内・古川: 絶縁技術懇談会資料, No. 257 (昭 53-11)