

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：84431

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13751

研究課題名（和文）分子間相互作用から紐解く高分子材料の絶縁破壊現象

研究課題名（英文）The role of molecular interactions in electrical breakdown of polymeric insulation

研究代表者

岩田 晋弥（Iwata, Shinya）

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・研究員

研究者番号：10642382

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：高分子電気絶縁材料は、多くの電気システムや電子機器で使用されており、我々の社会基盤を支える重要な要素のひとつである。しかし、電氣的要因での劣化や破壊のメカニズムには未解明な点が多い。本研究では、量子化学計算や分子動力学計算を中心とした計算機シミュレーションを活用し、絶縁破壊・劣化およびその抑制作用の原理の検証や物理モデルの構築を行った。特に、劣化抑制剤の作用に着目し、分子間の相互作用の観点から検証を行い、ポリエチレン架橋剤分解残渣、界面活性剤や紫外線吸収剤の機能についてモデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に、高分子電気絶縁材料には、添加剤による補強が施される。本研究では、ポリエチレン架橋剤分解残渣、界面活性剤、紫外線吸収剤に対し、分子間の相互作用に着目しながら、凝集・拡散の観点から絶縁劣化抑制機能の解明を行った。取り扱った系は、過去の実験的事実が示されているものを用いた。本研究は、量子化学計算や分子動力学計算をはじめとした計算機シミュレーションの活用例でもあり、現象の原理探究のみならず、材料の設計や選択の指針の一助となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Polymeric electrical insulating material is one of the most indispensable elements for modern society. However, the mechanism of the degradation and breakdown of insulating material is still unclear from the view point of molecular science. In the present research, the suppression mechanisms of electrical breakdown and degradation were studied by quantum chemical calculation and molecular dynamics simulation. In particular, we focused on the role of the intermolecular force and proposed physicochemical models for the function of additive molecules such as by-products of a crosslinking agent, surfactant, and ultraviolet absorber.

研究分野：電気絶縁材料

キーワード：絶縁破壊 絶縁劣化 電気トリマー 量子化学計算 分子動力学計算 分子間相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電気絶縁材料は、電気の発電・送電・配電、電気自動車、電気・電子機器など極めて多くのシステムや製品で使用されており、我々の社会基盤を支える重要な要素のひとつである。高分子材料は、電気絶縁材料として広く使用されているが、近年、従来以上の安全性や信頼性の向上が要求されている。その背景には、機器の高電圧・高電界下での使用、使用環境の多様化、直流高圧送電の本格的な導入などが挙げられる。高分子材料の絶縁性の低下(絶縁劣化)や絶縁破壊には未解明な点が多く、物理化学的観点での現象解明が喫緊の課題である。

### 2. 研究の目的

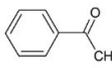
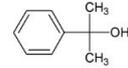
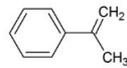
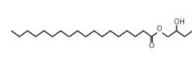
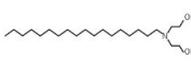
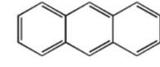
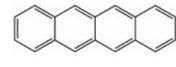
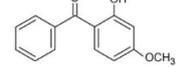
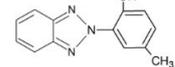
本研究は、高分子材料およびそれらに添加される材料などを対象とし、分子間の相互作用に着目しながら、絶縁劣化・絶縁破壊ならびにその抑制に関する現象を解明することを最終的な目的としている。典型的な高分子電気絶縁材料としてポリエチレンが挙げられるが、一般的には添加剤によって補強がなされる。例えば、架橋剤分解残渣、界面活性剤、紫外線吸収剤などが電気トリリーや水トリリーを中心とした絶縁劣化に対し、その進行を抑制する効果を有することが実験的に示されてきた<sup>(1-6)</sup>。しかし、抑制メカニズムに対し、いくつかの仮説が提案されてはいるが、未解明な点が多く分子サイズレベルでの理解が必要である。本研究では、量子化学計算および分子動力学計算を活用し、これまでに提唱されてきた仮説の検証や新規モデルの提案を行った。また、絶縁材料への空間電荷形成および電荷流入現象の実験的評価方法の構築を目的として、電流電荷積分法による絶縁劣化評価を実施した。

### 3. 研究の方法

量子化学計算として、Gaussian09<sup>(7)</sup>を使用し、密度汎関理論(DFT: Density Functional Theory)に基づく計算を行った。計算対象とした添加剤は、ポリエチレン架橋剤分解残渣(AP: Acetophenone、CA: Cumyl alcohol、MS:  $\alpha$ -Methylstyrene)、界面活性剤(GMS: Glycerol monostearate、SDA: Stearyl diethanolamine)、紫外線吸収剤(An: Anthracene、Te: Tetracene、UV<sub>1</sub>: 2-Hydroxy-4-methoxybenzophenone、UV<sub>2</sub>: 2-(2-Hydroxy-5-methylphenyl)benzotriazole)であり、詳細を表1に示す。いずれも、絶縁劣化抑制効果を有することが実験的に確認されている<sup>(1-6)</sup>。計算時に使用した汎関数はB3LYP、基底関数系は6-311++G\*\*である。分子静電ポテンシャル(MEP: Molecular Electrostatic Potential)はMK(Merz-Singh-Kollman)法による電荷情報から導出した。また、イオン化ポテンシャル(IP: Ionization Potential)は、1価のカチオンの全エネルギーと電気的に中性な分子の全エネルギーの差と定義し、垂直IP(IP<sub>v</sub>)と断熱IP(IP<sub>A</sub>)を求めた。IPは電気トリリー進展モデルに取り入れられているため、母材となる樹脂と比較してIPの小さな分子の導入は、電気トリリー抑制という観点からは望ましくないと考えられる。

添加剤の絶縁劣化抑制に関し、これまでに提唱されているモデルでは、添加剤分子の凝集、拡散、周囲分子との相互作用が重要であることが指摘されてきた<sup>(1-6)</sup>。本研究では、分子動力学(MD: Molecular Dynamics)計算によるモデル検証を行った。計算エンジンとしてGROMACS<sup>(8,9)</sup>を利用した。MD計算は、対象とする原子や分子の軌跡をニュートンの運動方程式に基づき求める手法である。このとき、原子や分子間の相互作用を中心とした粒子に作用する力や系の温度、圧力などの粒子の統計集団(アンサンブル)としての性質を考慮する。DFT計算およびMD計算において、その一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した。

表1: 計算対象とした添加剤分子

種類	架橋剤分解残渣			界面活性剤	
名称	Acetophenone	Cumyl alcohol	$\alpha$ -Methylstyrene	Glycerol monostearate	Stearyl diethanolamine
構造式					
化学式	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>21</sub> H <sub>42</sub> O <sub>4</sub>	C <sub>22</sub> H <sub>47</sub> NO <sub>2</sub>
分子量	120.1	136.2	118.2	358.6	357.6
本稿での記号	AP	CA	MS	GMS	SDA
種類	紫外線吸収剤				
名称	Anthracene	Tetracene	2-Hydroxy-4-methoxybenzophenone	2-(2-Hydroxy-5-methylphenyl)benzotriazole	
構造式					
化学式	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>14</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>13</sub> H <sub>41</sub> N <sub>3</sub> O	
分子量	178.2	228.3	228.2	225.3	
本稿での記号	An	Te	UV <sub>1</sub>	UV <sub>2</sub>	

#### 4. 研究成果

(1) 図1にDFT計算結果の例として、紫外線吸収剤分子( $UV_1$ と $UV_2$ )の構造最適化計算後のMEP、最高被占軌道(HOMO: Highest Occupied Molecular Orbital)最低空軌道LUMO(LUMO: Lowest Unoccupied Molecular Orbital)を示す(他の分子については、文献<sup>(11-13)</sup>を参照)。いずれも酸素原子や窒素原子に起因し、MEPに偏りが生じている。電荷密度の偏りは、分子間相互作用の観点から考えると、双極子-双極子相互作用(広義には水素結合も含む)の起源となる。図2に全エネルギーの外部電界依存性を示す。分子軸は図1のとおりである。電界印加はGaussian09におけるFieldキーワードを使用しており、印加方向の(+,-)の符号はキーワードの指定と同一である。いずれも、電界印加方向に対して、非対称なグラフを示しており、 $x$ - $y$ 面内での分子構造の非対称性を反映していることが分かる。

固体の電気絶縁破壊を電子なだれモデルで表現した場合、対象となる物質のIPは重要な要素の一つである。AP、CA、 $UV_1$ 、 $UV_2$ において、 $IP_A$ および $IP_V$ は、7.5~9.0 eVの範囲であり、大きな違いは確認されなかった。これらの値は、 $C_{30}H_{62}$ (8.7 eV)とも近く、孤立分子のIPという観点から見た場合、AP、CA、 $UV_1$ 、 $UV_2$ の添加が、ただちに電子なだれに影響を与えるわけではないと考えられる。また、外部電界の影響を検討したところ、全エネルギー(図1)や $IP^{(10)}$ に電界方向依存性が確認された。ポリエチレン中において、紫外線吸収剤分子や架橋剤分解残渣分子がどのような配置(配向性)を有しているかは明らかではないが、これらの分子の間に働く相互作用による分子配置の規則性が絶縁性に影響を与える可能性も示唆される。

(2) - 架橋剤分解残渣は、水分子と相互作用し、空間電荷形成に大きな影響を与えることが指摘されている<sup>(5)</sup>。MD計算を利用し、架橋剤分解残渣分子と水分子が共存している系において、外部電界が水分子の挙動に与える影響を検証した<sup>(10)</sup>。まず、図3(a)に示すようなMD計算のセルを作成した。初期状態では、両サイドのセル( $\alpha$ および $\gamma$ )には添加剤分子が、中央セル( $\beta$ )には水分子がそれぞれ配置してある。セルの接合部分には0.3 nmの空間を設けてあり、セル全体の大きさは $3.1 \times 3.1 \times 6.2$  nmである。最急降下法(steepest descent algorithm)によるエネルギー最小化計算の後に、300 Kにおける100 psのNVT(constant-volume and constant-temperature)計算と1 nsのNPT(constant-pressure and constant-temperature)計算を実

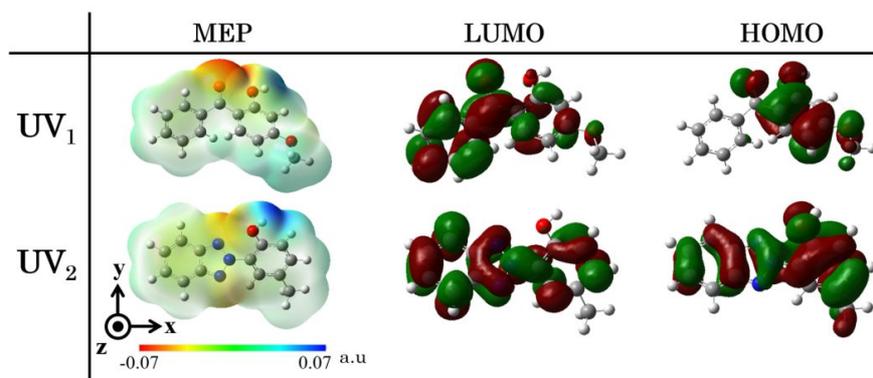


図1 量子化学計算によって得られた、紫外線吸収剤のMEP、LUMO、HOMO。図中の分子軸およびカラスケールは、 $UV_1$ と $UV_2$ に共通する。

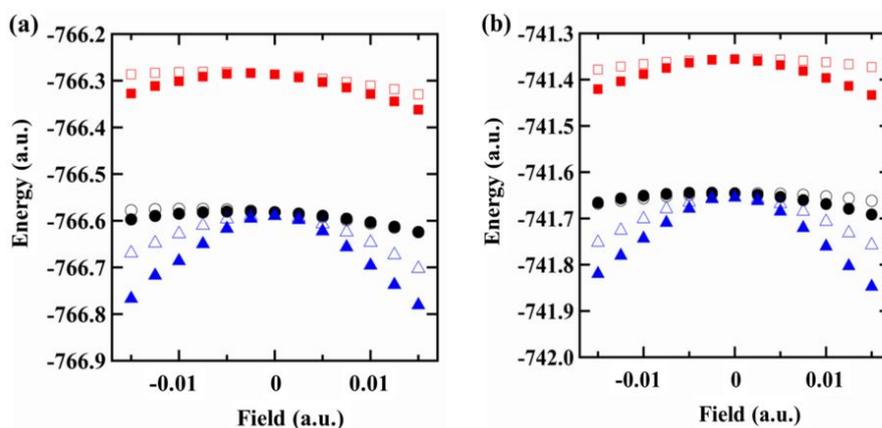


図2 (a)  $UV_1$  (b)  $UV_2$ の全エネルギーの外部電界依存性。x軸方向印加を塗りつぶし記号、y軸方向印加を白抜き記号で示す。また、中性分子を黒、1価のカチオンを赤、1価のアニオンを青でそれぞれ示す。

行した。最終的に、101 kPa、300 K における 20 ns の NVT 計算を production run として最終構造を得た。この時、外部電界 (1 GV/m) の有無の影響を検討した。温度制御と圧力制御には Nosé-Hoover thermostat および Parrinello-Rahman barostat をそれぞれ使用した。1 タイムステップは 2 fs とし、1,000 ステップごとにトラジェクトリデータを保存した。また、相互作用計算には、PME (Particle-Mesh Ewald) 法を用いた。図 3(b)(c) に計算結果の例として、セル $\alpha$  とセル $\gamma$  に AP を配置した場合の水分子の z 軸方向への移動の様子を示す。外部電界がない場合、20 ns の NPT 計算後、水分子は中央セルに留まっている。一方、外部電界が印加されている場合、計算後に水分子はセル全体に拡散したことが分かる。この時の分子の分布の様子を図 3(d) に示す。z 軸方向に着目した場合、セル全体に分布していることが明らかとなった。一方、同様のシミュレーションを SDA に対して行った場合、図 3(e) に示すように、水分子は外部電界の有無に関わらず、中央セルに留まっている。これは、水分子セル-SDA セル界面において、異種分子同士の強い相互作用が生じ、水分子の拡散を妨げているものと考えられる。このような結果は、過去の実験的な検証により提唱された仮説<sup>(3-5)</sup>を支持する。

(2) - 絶縁劣化抑制を目的として添加剤を用いるとき、複数種類を同時に混入させることが多い。例えば、ポリエチレンへ架橋剤分解残渣と紫外線吸収剤を共添加すると、電気トリー発生電圧が上昇する<sup>(1)</sup>。この現象は、架橋剤分解残渣と紫外線吸収剤の凝集が重要な役割を果たしていると指摘されているが、詳細は不明である。また、複数の添加剤が関与する場合、どのような組み合わせが最適かを計算機シミュレーションによって検討できれば、材料開発プロセスの削減に貢献できる。ここでは、架橋剤分解残渣 (AP と CA) および紫外線吸収剤 ( $UV_1$  と  $UV_2$ ) の組み合わせの結果を示す。モデルとして、電極近傍の空隙内での添加剤分子を想定し、架橋剤分解残渣分子 500 個に対し、質量比約 10% の紫外線吸収剤分子を含む系で MD 計算を行った。エネルギー最小化計算および 300 K での 1 ns の NVT 計算の後に、20 ns の NPT 計算を実行し、最終構造を得た。図 4(a)(b) に計算中における、AP および CA の平均二乗変位を示す。さらに、図 4(c) に最終構造における分子の重心間距離の同径分布関数を示す。これらのデータが示すように、架橋剤分解残渣分子と紫外線吸収剤分子を組み合わせ場合に、架橋剤分解残渣分子の拡散が抑制されることが明らかとなった。これらの傾向は、量子化学計算によって求めた MEP からも推定されることであり、過去の実験結果<sup>(1)</sup>も同様の傾向を示す。特に、CA と  $UV_2$  の組み合わせ時に分子間の距離が小さく、CA の拡散が最も抑制されることが明らかとなった。詳細は文献<sup>(11, 12)</sup>で報告した。

(2) - An と Te については、時間依存 DFT 計算により紫外可視吸収スペクトルの推定を行い、MD 計算によって凝集の温度依存性を検証した<sup>(13)</sup>。MD 計算の結果、300 K から 400 K 付近において、An および Te の分子間距離に温度依存性が確認された。ところで、An は紫外線により二量体を形成する。高分子材料の絶縁劣化時には、紫外線も重要な要素のひとつであるため、今後、An の二量体形成の観点からも研究を進める必要がある。

(3) 絶縁材料への空間電荷形成および電荷注入現象の実験的評価方法の構築を目的とし、電流電荷積分法による絶縁劣化評価を実施した。対象とした試料は、エポキシ樹脂であり、針電極を埋め込み、交流高電圧により電気トリーを発生させた。電気トリーの進展状況に応じて、電荷信号の差異を解析し、回路モデルによる解析を行った<sup>(14)</sup>。

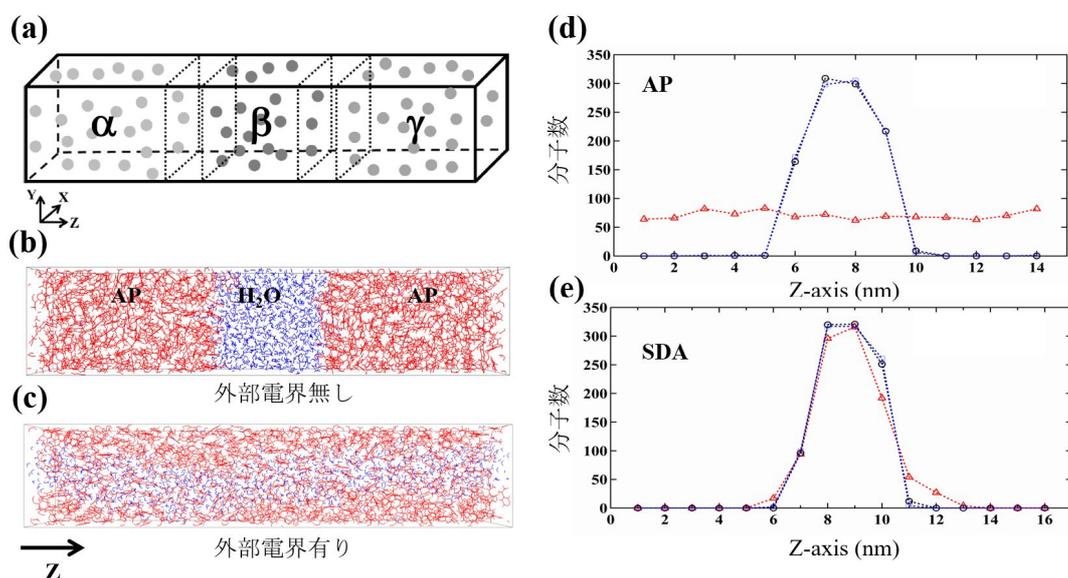


図3 (a)シミュレーションセル (b)・(c) セル $\alpha$ および $\gamma$ に AP を配置した場合の計算後のスナップショット (d)・(e) 計算後のセル全体内の水分子の z 軸方向の分布。○：初期状態、△：計算後 (外部電界無し)、◇：計算後 (外部電界有)

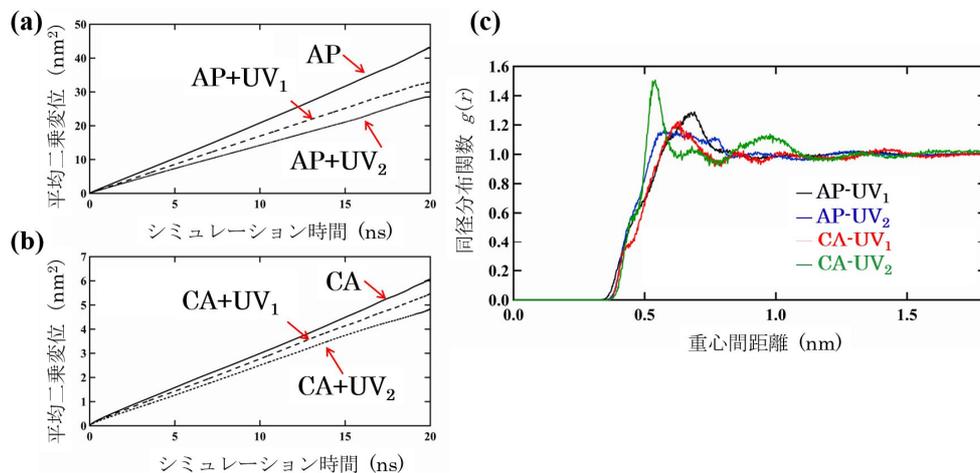


図4 各計算モデルにおける (a) AP (b) CA の平均二乗変位 (c) 分子の重心間の同径分布関数。 (a)・(b)中の AP および CA は、架橋剤分解残渣のみの系における結果を示す。

(4) 低密度ポリエチレンシートに対し、外力の有無が Raman 散乱スペクトルに与える影響を実験的に評価し、スペクトルに差異を得た。絶縁劣化において、分子間距離の連続的な変化が劣化進展に大きな影響を与えると考えられる。今後は、分子間の結合とともに原子間の結合状態およびその変化に着目し、絶縁劣化・絶縁破壊現象のさらなる解明を目指す。

#### <引用文献>

- (1) 廣田 憲, 岡田 聡郎, 丸田 賢一, 関井 康雄, 架橋ポリエチレンの電気トリーに及ぼす架橋分解残渣と酸化防止剤の効果に関する実験, 電気学会論文誌 A, **119** (1999) 848-853.
- (2) 廣田 憲, 金光 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, 電気学会論文誌 A, **120** (2000) 154-159.
- (3) Y. Sekii, N. Momose, K. Takatori, T. Goto, A study of water tree suppression in polymeric insulating materials, 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, **1** (2000) 347-350.
- (4) Y. Sekii, N. Momose, K. Takatori, Y. Kanemitsu, T. Goto, Effect of surfactant on water tree generation in XLPE, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, (2003) 927-931.
- (5) N. Hirai, R. Minami, T. Tanaka, Y. Ohki, M. Okashita, T. Maeno, Chemical group in crosslinking byproducts responsible for charge trapping in polyethylene, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **10** (2003) 320-330.
- (6) Y. Yamano, M. Iizuka, Suppression of electrical tree initiation in LDPE by additives of polycyclic compound, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **16** (2009) 189-198.
- (7) M.J. Frisch, *et al.*, Gaussian 09 Revision E.01, Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2013.
- (8) H.J.C. Berendsen, D. Spoel, R.V. Drunen, GROMACS: a message-passing parallel molecular dynamics implementation, Computer Physics Communications, **91** (1995) 43-56.
- (9) M.J. Abraham, T. Murtolad, R. Schulz, S. Páll, J.C. Smith, B. Hess, E. Lindahl, GROMACS: high performance molecular simulations through multi-level parallelism from laptops to supercomputers, SoftwareX, **1-2** (2015) 19-25.
- (10) S. Iwata, H. Uehara, Y. Sekii, T. Takada, Behavior of water molecules between molecular layers of by-products of dicumyl peroxide or surfactants in an external electric field: Computational insight, Computational Materials Science, **163** (2019) 134-140.
- (11) 岩田 晋弥, 植原 弘明, 関井 康雄, 木谷 亮太, 高田 達雄, 計算機シミュレーションによる紫外線吸収剤および架橋剤分解残渣の電気トリー抑制効果の検討, 放電研究 **61** (2018) 25-30.
- (12) S. Iwata, H. Uehara, Y. Sekii, T. Takada, Suppression of Electrical and Water Tree by Additive Molecules: A Computational Insight, Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering, **2** (2019) 12-21.
- (13) S. Iwata, H. Uehara, Y. Sekii, T. Takada, Electrical tree suppression mechanism using anthracene and tetracene, 電気材料技術雑誌, **28** (2019) 5-11.
- (14) S. Iwata, R. Kitani, T. Takada, Diagnostic Technique for Electrical Tree by Current Integration Method, 2019 IEEE Electrical Insulation Conference, (2019) 317-320.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Iwata, H. Uehara, Y. Sekii, T. Takada	4. 巻 163
2. 論文標題 Behavior of water molecules between molecular layers of by-products of dicumyl peroxide or surfactants in an external electric field: Computational insight	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computational Materials Science	6. 最初と最後の頁 134 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.commatsci.2019.03.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岩田晋弥, 植原弘明, 関井康雄, 木谷亮太, 高田達雄	4. 巻 61
2. 論文標題 計算機シミュレーションによる紫外線吸収剤および架橋剤分解残渣の電気トリー抑制効果の検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 放電研究	6. 最初と最後の頁 25 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Uehara, T. Okamoto, S. Iwata, Y. Sekii, T. Takada, Y. Cao	4. 巻 -
2. 論文標題 Intermolecular Interaction and Electric Field Dependence of Reverse Micelle on Water Tree Initiation in Polyethylene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena	6. 最初と最後の頁 30 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CEIDP47102.2019.9009701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Iwata, H. Uehara, Y. Sekii, T. Takada	4. 巻 2
2. 論文標題 Suppression of Electrical and Water Tree by Additive Molecules: A Computational Insight	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering	6. 最初と最後の頁 12 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-31680-8_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Iwata, R. Kitani, T. Takada	4. 巻 -
2. 論文標題 Diagnostic Technique for Electrical Tree by Current Integration Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE Electrical Insulation Conference	6. 最初と最後の頁 317 ~ 320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/EIC43217.2019.9046562	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Iwata, H. Uehara, Y. Sekii, T. Takada	4. 巻 28
2. 論文標題 Electrical tree suppression mechanism using anthracene and tetracene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気材料技術雑	6. 最初と最後の頁 5 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 岩田晋弥
2. 発表標題 計算機シミュレーションによる絶縁劣化現象の解析
3. 学会等名 放電学会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩田晋弥, 木谷亮太, 高田達雄
2. 発表標題 X線CTによる高分子材料の電氣的破壊の解析
3. 学会等名 第314回電気材料技術懇談会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Uehara, T. Okamoto, S. Iwata, Y. Sekii, T. Takada, Y. Cao
2. 発表標題 Intermolecular Interaction and Electric Field Dependence of Reverse Micelle on Water Tree Initiation in Polyethylene
3. 学会等名 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Iwata, R. Kitani, T. Takada
2. 発表標題 Diagnostic Technique for Electrical Tree by Current Integration Method
3. 学会等名 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Iwata, H. Uehara, Y. Sekii, T. Takada
2. 発表標題 Suppression of Electrical and Water Tree by Additive Molecules: A Computational Insight
3. 学会等名 21st International Symposium on High Voltage Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩田晋弥, 植原弘明, 関井康雄, 高田達雄
2. 発表標題 ポリエチレン架橋剤分解残渣中の水分子の拡散特性～分子動力学計算による検証～
3. 学会等名 令和元年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	木谷 亮太  (Kitani Ryota)		
研究協力者	植原 弘明  (Uehara Hiroaki)		
研究協力者	高田 達雄  (Takada Tatsuo)		
研究協力者	関井 康雄  (Sekii Yasuo)		