



直流XLPEケーブル誕生秘話ほか 矢作吉之助先生の教え ～真実を求めよ～

Behind the Scenes of the Development of DC XLPE Power Cables
The Teachings of Prof. K. Yahagi: "Seek the Truth"

片貝 昭史
Shoshi Katakai

筆者は、2019年に電気学会 誘電・絶縁材料技術委員会の技術貢献賞である「矢作賞」を受賞した。筆者は、賞の名を戴く故矢作吉之助教授の教え子であり、ここではいくつかの矢作先生の思い出を紹介するとともに、先生の「真実を求めよ」という教えに従って取り組んだ電力ケーブルの研究開発について記載した。特に、この教えに従い真実を追求した結果、世界最高電圧を誇る架橋ポリエチレン絶縁超高圧直流ケーブルが誕生したともいえる。

The author received the Yahagi Memorial Award 2019 from the Institute of Electrical Engineering of Japan, Technical Committee on Dielectrics and Electrical Insulation. In this paper, memories of the late Prof. Kichinosuke Yahagi and his teachings are described by a former student. The teachings of Prof. K. Yahagi can be summarized as "Seek the Truth." The author pursued a number of truths according to the teachings in his research and development endeavors. The development of cross-linked polyethylene insulated DC power cables rated for the world's highest voltage was brought about as one of the results of the teachings.

キーワード：矢作賞、XLPEケーブル、直流ケーブル、空間電荷、トリートメント

1. 緒言

筆者は、2019年に度電気学会 誘電・絶縁材料技術委員会の技術貢献賞である「矢作賞」を受賞した。同委員会では誘電・絶縁材料研究を世界レベルにまで引き上げた三先生、犬石嘉雄先生（大阪大学）、家田正之先生（名古屋大学）、矢作吉之助先生（早稲田大学）の名を冠する学術・技術貢献賞があり、矢作賞は特に業界への貢献が著しい者を顕彰すると規定されている。筆者は、その矢作研究室出身であり、学生の時から矢作先生の薫陶を受け、その研究スタイルは、矢作先生の教えを受け継いでいる。ここでは、先生のいくつかの思い出と先生の教え、さらにその教えがもたらした研究成果を紹介することとする。なお本稿は、矢作賞受賞記念講演の予稿⁽¹⁾をもとに、再編集したものである。

て先生は次のように言われた。「その画家のフェルメールと同じ名前の方です。ガラスの絶縁破壊の論文⁽²⁾です。この論文に、先日の学会で匹田さん（当時、名古屋大学博士課程学生。後に九州工業大学教授）から受けた質問の答えが書いてあります。熟読するように。」矢作先生は、私が回答に窮していた質問に解を授けて下さったのであった。当時私は、ポリエチレンの高温領域の絶縁破壊の研究⁽³⁾をしており、熔融領域のポリエチレンは、完全アモルファスであるガラスの絶縁破壊に共通点があるので勉強せよ、という意であった。しかし、ガラスの絶縁破壊理論以上に「画家のフェルメール」の方が強烈に印象に残ったのであった。

また、ポリエチレンの絶縁破壊の印加電圧波形依存性の話をしている際、先生は次のように発言された。「人間は、きつく当たればきつい反応をするし、ソフトにあたればソ

2. 矢作先生の教え

矢作吉之助先生は、何事に対しても非常に厳しい先生として知られていた。すなわち“怖い”というイメージの先生であったが、意外なことに私は、矢作先生から画家の「フェルメール」を教えてもらっている。私が大学院生のとき、先生に呼ばれ、一冊の論文を渡され、「片貝君、君は“フェルメール”という画家を知っていますか？」と問いかけられた。「牛乳を注ぐ女」や「真珠の耳飾りの少女」等で有名なフェルメールであるが、地方から東京に出てきた私には、絵画は無縁の世界であった。ましてや、矢作先生から画家の問いかけをされるとは夢にも思わなかった。続け



写真1 故矢作吉之助・教授（中央）、穂積直裕氏（現豊橋技術科学大学教授）（左）と筆者（右）（1983年当時）

フトに返ってきますよね。ポリエチレンも同じです。急峻波や緩波頭、直流、交流など、与える波形によって違う顔をするのです。」妙に哲学的な説明に意表を突かれた。

私はこのようなやりとりもあり、ケーブルメーカーに就職し、ポリエチレンに魅せられた人生を送ることになった。忘れもしないのが、卒業して旅立とうとするときの言葉である。「とにかく真実を追求しなさい。真実を追い求めていれば、いつかは他から認められるようになります。」この後、この「真実を求めよ」を座右の銘として、私は研究開発に励むこととなった。以下、その事例のいくつかを紹介する。

3. 真実の追究-1 事故原因の究明 ～真綿状トリーの発見と再現～

メーカーの研究部門にいと、製品事故が起こると、その対応に駆り出されることが多い。特に、重要製品や記録品の事故となると、真因究明を至上命題として課される。真因究明は推定論に留まらず、その原因であることを実証すべく再現試験の実施、さらには、既納入品の波及範囲の限定と発生抑止対策まで立てる必要がある。事故事例は積極的に報告することは少ないが、事例解明に発見等が伴った際は、学会発表することもある。その一例を以下に示す⁽⁴⁾。ある製品の絶縁破壊箇所を観察したところ、写真2に示すように、「くも膜下出血」かのような方向不定の電気トリーが絶縁体中に認められた。かかる事例を見た者は誰もいなかった。破壊原因を突き止めたにしても、この現象を再現させることは不可能と誰もが思っていた。ともあれ、この現象を表すのに「くも膜下出血状トリー」というのはあまりに無粋と考え、その命名から始めた。なかなかいい言葉は見当たらなかったが、かつての流行りの曲「シクラメンのかほり」にも出てきた「真綿」をヒントに、「真綿状トリー」と命名し、問題の解明を開始した。絶縁破壊の原因自体は、比較的短時間に「ボイド」発生にあると特定することができた。しかし、人工ボイドを作り破壊試験を繰り返したが、

返したが、ボイドを起点とした電気トリーは認められるものの、何度やっても写真2のような方向不定の電気トリーの片りんさえ認められない。そこで、模擬試験と実機の現象と何が違うのかを考えた。模擬試験はごく短時間での破壊現象であり、実機は年オーダーで生じた現象であった。また、電界も十～百kV/mmではなく、ほんの数kV/mmの破壊現象であった。一般にボイド放電からの絶縁破壊（電気トリーの発生）を考えた場合、寿命指数 n ($V-t$ 則 ($V^n \times t = \text{一定}$, ここで V : 電圧, t : 時間)) は、 $n=9$ とされている⁽⁵⁾。これは、ボイド内で放電が続いたとしても、なかなかボイド壁面の浸食は進まず電気トリー転換（発生）までに時間を要することを意味する⁽⁶⁾。また、通常の破壊試験は数十kV/mm以上の高電界で実施されることが多く、ひとたび電気トリーが発生した場合は、即座に全路破壊に至る。しかし、実機ではボイド周辺の電界は高々数kV/mmであり、ボイドから電気トリーが発生したとしてもなかなか電気トリーは伸展せず、全路破壊までに時間を要するのではないかと考えた。そこで次の実験を行った⁽⁴⁾。

試料はケーブル絶縁体と同材質の架橋ポリエチレン(XLPE)ブロックである。このブロックに先端曲率半径10 μm のトリーイング針を挿入し、まずAC18kVを30分間印加して、電気トリー（いわゆる、まりも状トリー）を発生させた。その後、電圧を10kVに下げ、長時間電圧印加を続け、そこで発生するトリー形状を観察した。写真3にAC18kV \times 30分+AC10kV \times 2時間印加後の試料のトリー形状を示す。針先端にまりも状トリーが認められ、その先端からいくつもの方向不定の樹枝状トリーが発生していることがわかる。まりも状トリーから先に伸展したトリーは、後のAC10kV課電中に発生したものである。この錯綜した樹枝状トリーは個々に見れば従来の電気トリー形状であるが、集団的に見ればその形状はトリーの伸展方向が錯綜しており、まさに写真2の実機の破壊箇所に認められた「真綿状トリー」とほぼ同じ形状である。さらに別試料を用いて、絶縁破壊（貫通破壊）発生まで長時間課電をAC10kVで課電を継続したところ、17時間で貫通破壊が発生した。

こうして、再現不可能と思われた「真綿状トリー」は再現させることができたが、次の課題は、なぜ方向不定の電



写真2 主絶縁体の破壊バス近傍に認められた方向不定の電気トリー（真綿状トリー）⁽¹⁾

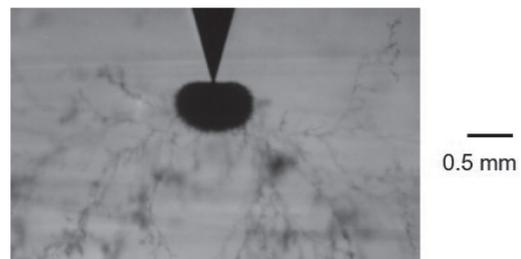


写真3 AC18kV \times 30分 + AC10kV \times 2時間後に発生した電気トリーの形状（マリモ状トリーと真綿状トリー）⁽⁴⁾

気トリーが発生したかを説明することであった。かかる特異トリー形状は、電子線照射ポリエチレンやPMMAブロックに観察されるリヒテンベルク像⁽⁷⁾、すなわち空間電荷に起因する現象を連想させる。そこで空間電荷が関与するかどうか、ダストフィガー法⁽⁸⁾によりその検討を行った。**写真4**に、**写真3**のサンプルをスライスしその断面に見られたダストフィガーを示す。断面には明らかにトナーの付着が認められ、空間電荷が蓄積していたことが伺える。その極性は、正負混在したものであり、電荷の分布は複雑であるが、トリーの幹にあたる近傍の絶縁体には正電荷が多く存在し、トリー先端近傍の絶縁体には負電荷が多いように見える。一般的に、XLPE絶縁体中に交流課電により空間電荷が顕著に蓄積するという報告はない。しかし、この実験では交流課電でも電気トリー周辺には明らかに空間電荷が蓄積していることが確認された。本実験の最初のAC18kVの課電で、まリモ状トリーを発生させている。このまリモ状トリーは、電気トリーが発生したボイドと見ることができよう。従って、その後のAC10kV課電における電気トリーは、放電を伴いながら長時間かけて伸展したものと考えられる。すなわち、この空間電荷の蓄積は、放電と電気トリーの伸展により生じたものと考えられる。ちなみに、球状ボイド中の放電のみで空間電荷蓄積が起こるか確認したが、緩やかなボイド壁面における放電だけでは、空間電荷は認められなかった。しかし、電気トリーが発生していると、トリー先端の形状は極めて鋭利なため、放電時に電荷の注入・引抜きが繰り返され、電荷の極性により注入・引抜きの距離にアンバランスが生じるため、結果として空間電荷が蓄積するものと考えられる。トリー先端近傍に電荷が集中的に蓄積した場合、交流の半サイクル毎の極性反転時に局部高電界が発生し、部分的な破壊（トリーの伸展）が生ずる可能性がある。真綿状トリーの発生は、この放電・電荷の蓄積・トリー伸展という現象が繰り返されたものと考えられる。この発生メカニズムを模式的に示したものが、**図1**である。

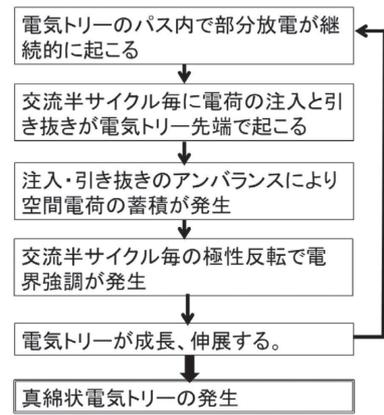


図1 真綿状トリー発生メカニズムの概要⁽⁴⁾

ところで、メーカーは、もの作りと販売を続けている限り、何らかの事故が起こることを避けることは難しいかもしれない。しかし、事故解明への真摯な取り組みは、解析能力を始め、設計、製造、検査能力を高めることができる。また原因究明と対策が万全であれば、顧客からの信頼を回復することもできるので、前向きに取り組む必要がある。なお、事前検討（FMEA、DRBFM等）⁽⁹⁾で事故の未然防止を図ることが重要であることは言うまでもない。

4. 真実の追究-2 直流XLPEケーブルの開発～失敗を克服して～

私の矢作賞受賞の一因は、直流XLPEケーブルの開発にあるかと思う。実際、私自身が独自のケーブル配合を考案し、北海道一本州連系線等で実用化できたという点で、実績を伴うエポック的な発明になったと思うが、これに至るまでには、数多くの失敗の積み重ねがあった。ここでは、その一例について述べることにする。

4-1 XLPEの直流絶縁上の問題点の究明

交流用XLPEケーブルでは、2000年には500kV長距離線路が実用化されている⁽¹⁰⁾が、それを直流用として使用することは、下記の問題があり困難であった⁽¹¹⁾。①直流破壊強度自体が低い、②直流破壊強度の厚さ依存性が大きい、③直流破壊強度の温度依存性が大きい、④逆極性インパルス重畳破壊強度が低い、⑤極性反転破壊強度が低い。

これらの原因を究明することをまず行った。直流ケーブルの電界は体積抵抗率 ρ で決まるので、XLPEケーブル絶縁体の径方向の ρ 分布を調査した⁽¹²⁾。**図2**にその結果を示す。ここではXLPEケーブルの絶縁体を径方向に薄くスライスし、 ρ と架橋剤分解残渣量 W を調査した。絶縁体の径方向の部位を三層（内・中・外層）に分けると、内層、外層の ρ は高いが、絶縁体中層の ρ は低い。かかる ρ 分布の状況で直流電圧が印加されると、電圧は主として内層、外層

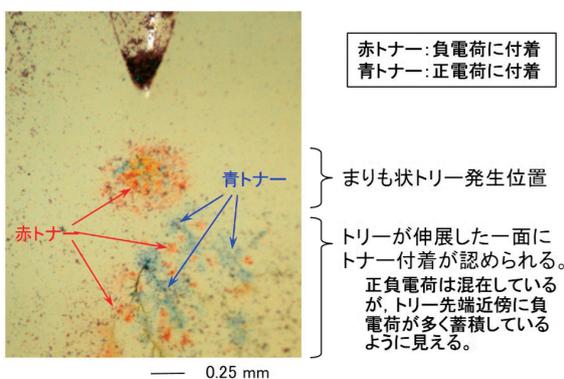


写真4 AC18kV×30分+AC10kV×2時間印加後のダストフィガーの様相⁽⁴⁾

に分担され、ケーブルの実効絶縁厚が低下してしまう。この ρ 分布の原因は、残渣量の分布に起因している。XLPEの ρ は、残渣の濃度依存性があり、残渣量が多いほど ρ は低下する。ケーブル絶縁中の残渣は、外側ならびに導体の隙間に向け揮散し易いため、**図2**のように、径方向の残渣量分布は絶縁体中層に多く、内層外層が少ない分布になる。従い、 ρ 分布は、内層外層が高く、中層が低い分布となる。

また、XLPEの空間電荷蓄積量を熱刺激電流 (TSC) で調査した⁽¹³⁾。その結果を**図3**に示す。**図3**には、XLPEだけでなくその母材である低密度ポリエチレン (LDPE) や比較のため高密度ポリエチレン (HDPE) のデータも併せて示した。この結果によれば、XLPEのTSCのピークが非常に大きく、電荷の蓄積量が多いことがわかる。一方、その母材であるLDPEのピークはそれほど大きくなく、ポリエチレン自体の空間電荷の蓄積は多くない。同一母材でありなが

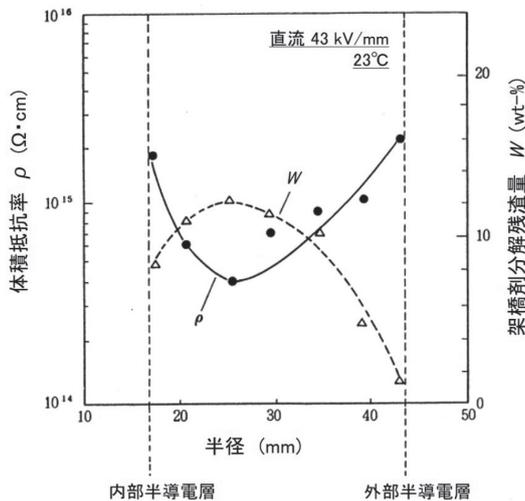


図2 AC275kV XLPEケーブル (27mm-t, 600mm²)の体積抵抗率 ρ と架橋剤分解残渣量 W の絶縁体径方向の分布⁽¹²⁾

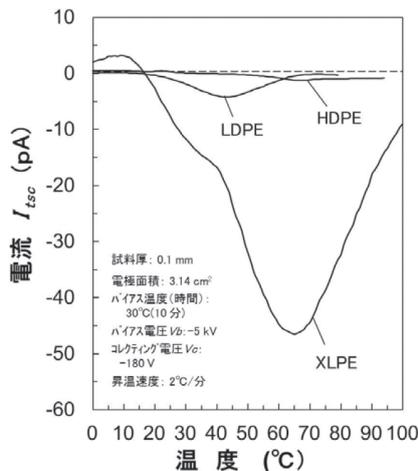


図3 XLPE, LDPE, HDPEのTSC⁽¹³⁾

ら、電荷蓄積量が違うのは、添加物の影響であると予想される。この蓄積量増大の原因について詳細に調査したところ、主たる原因は架橋剤分解残渣にあることがわかった⁽¹²⁾。

以上、架橋剤分解残渣の存在で、 ρ の低下や空間電荷蓄積量が増大することが判明した。XLPEの直流絶縁上の問題点として挙げられた①~⑤は、①~③は ρ 分布やその絶対値で説明することができ、④、⑤は空間電荷の蓄積で説明が可能である。①、②は、空間電荷が原因となって発生する局部高電界による説明も可能である。いずれも架橋剤分解残渣に起因することから、直流ケーブルの開発のカギは架橋剤分解残渣の影響を抑止することにかかっている。

4-2 HDPEによる直流ケーブル開発のアプローチ^{(12), (13)}

図3にXLPE, LDPE, HDPEのTSCを示したが、ここではHDPEのTSCは最も小さく、空間電荷の蓄積が小さいことがわかる。電荷の蓄積はポリエチレン分子の分岐長に起因し、HDPEは直鎖状で分岐長が短いことが功を奏している⁽¹²⁾。ところで、ポリエチレンの絶縁破壊強度は、密度との相関性があり、密度が大きいほど絶縁破壊強度は高くなる^{(12), (13)}。すなわち、HDPEは、空間電荷の蓄積が少なく、かつ絶縁破壊強度が高い材料である。また、HDPEの融点は130°C近くあることから、ケーブルの連続運転温度を90°Cと考えれば、ケーブル絶縁体を非架橋で使うことも可能である。非架橋であれば、架橋剤も使用しないことから、架橋剤分解残渣の影響を考える必要がない。かかる観点から、直流ケーブル用絶縁体としてHDPEを採用することは一つの道であると考えた。そこで、絶縁厚3~13mmのモデルケーブルを試作評価した。期待通り、絶縁厚3mmのケーブルではインパルス、直流破壊性能ともに良好な性能が得られた。しかし、絶縁厚が厚くなるに従い、**図4**に示すように直流破壊強度の低下が大きく認められた。この原因を種々調査した結果、絶縁厚が厚くなると、絶縁体中にボイドが多く発生することが明らかになった。**図5**に絶縁厚13mmのケーブル絶縁体の密度分布を示す。この図から、絶縁体密度は内層になるに従い低下していることが

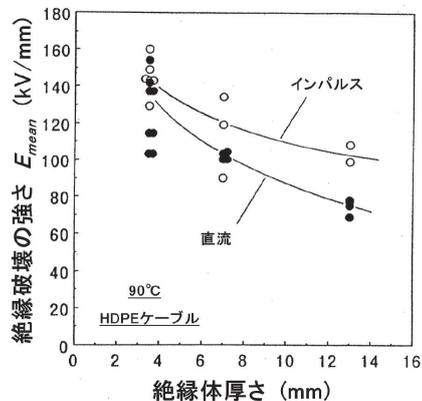


図4 HDPEケーブルの絶縁破壊の強さの絶縁厚さ依存性⁽¹³⁾

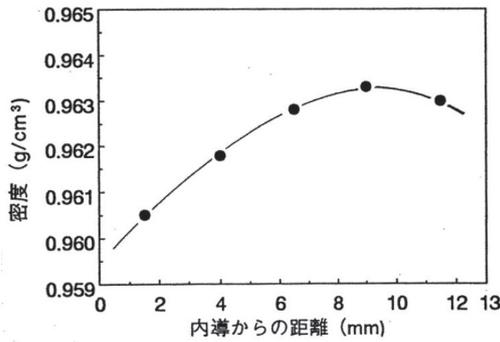


図5 HDPEケーブル(絶縁厚:13mm)の密度分布⁽¹³⁾

わかる。しかし一般的には、ケーブル製造時に絶縁体の内層は外層に比べ徐冷されるため、内層の結晶化度が高くなり、密度は高くなるはずである。そこで、密度の低下にはボイドの発生が関与しているかもしれないと考え、絶縁体のボイド観察を行った。その結果、絶縁厚が厚くなるとボイドの量ならびに大きさも増大していた⁽¹³⁾。HDPEの特徴として、結晶化する際に急激に体積収縮が起こる。ケーブル絶縁厚が厚くなると絶縁体内層、外層の温度差が大きくなり外層側が固化しても内層側はまだ熔融状態にあることから、HDPEのように体積変化が大きいと、径方向に応力が大きく働きボイドが発生しやすくなる。すなわちボイド発生は、HDPEの結晶化時の急激な体積変化に起因する。このような結晶化時の特性から、HDPEは厚肉成型に不向きであり、厚肉で性能が出ないことが判明した。結果的にHDPEによる直流ケーブルの開発は断念せざるを得なかった。製品開発としては失敗であったが、超高圧の直流ケーブル用絶縁体には、直流絶縁性能が優れるだけでなく、厚肉成型性にも優れることが必要であるという知見を得た。

4-3 充填剤による直流XLPEケーブル開発^{(14)~(18)}

厚肉成型性では、XLPEは交流用ケーブル絶縁体として実績もあり、優れた材料である。そこで、XLPEをベースとして直流ケーブルを開発するアプローチに重点をおくこととした。しかし、XLPEをベースとするには、4-1節で述べたように、架橋剤残渣の影響を抑止することが課題であった。幸いなことに、かつて充填剤による直流XLPEケーブルの検討例⁽¹⁴⁾があり、直流性能だけをみれば、良好な特性を有していた。そこで、充填剤の効果を洗い直した。

図6に充填剤入りXLPEケーブル(絶縁厚13mm)の絶縁体の径方向の ρ 分布を示す⁽¹⁵⁾。比較のために、汎用(非充填)XLPEケーブルの ρ 分布も示す。充填剤入りXLPEケーブルの ρ は絶対値が高く、かつ径方向にほぼ同一の分布を有している。なお、充填剤入りXLPEケーブルの残渣量は、内層に多くの残渣があり、外側は少ない分布となっている。しかるに径方向に ρ が均一であることは、充填剤入りXLPEの ρ は残渣の影響を受けにくいことを示唆している。図7

に充填剤入りXLPEのTSC測定結果を示す⁽¹⁵⁾。ここでも、比較のため汎用XLPEのTSCも併せて示した。図7は、TSC測定時のコレクティング電圧 V_c の極性を振っての測定結果である。汎用XLPEが V_c の極性でTSCピークの極性が変わるのに対し、充填剤入りXLPEのTSCは、 V_c の極性を変えても変化がなく、初期バイアス電圧 V_b 印加時と逆極性の電流のみが認められる。これは、汎用XLPEのTSCは、内部電荷(蓄積電荷)による電流を反映しているが、充填剤入りXLPEのTSCは、脱分極現象を主に反映しており、また蓄積電荷がほとんど認められないことを示している。図6、7の結果から、充填剤を添加することにより、 ρ の向上と電荷蓄積の抑制があり、また残渣の影響をなくす効果があると考えられる。

このように充填剤は直流絶縁上優れた効果を示すが、一方でポリエチレン中のいわゆる異物として作用するため、インパルス破壊強度を低下させてしまうという欠点を有していた⁽¹⁵⁾。そこで、超高圧級の直流XLPEケーブルを開発

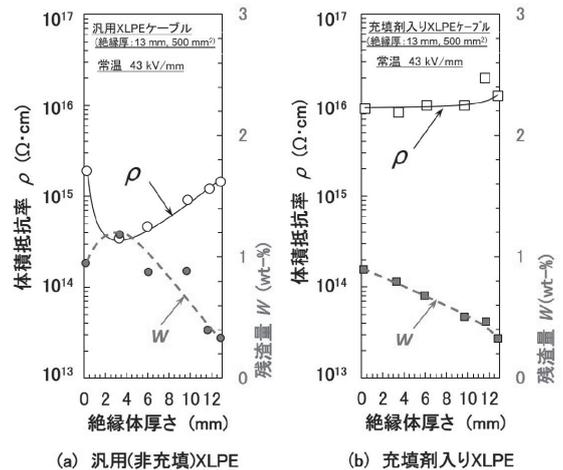


図6 充填剤有無によるXLPEケーブルの体積抵抗率と架橋剤分解残渣量の絶縁体径方向の分布の相違⁽¹⁵⁾

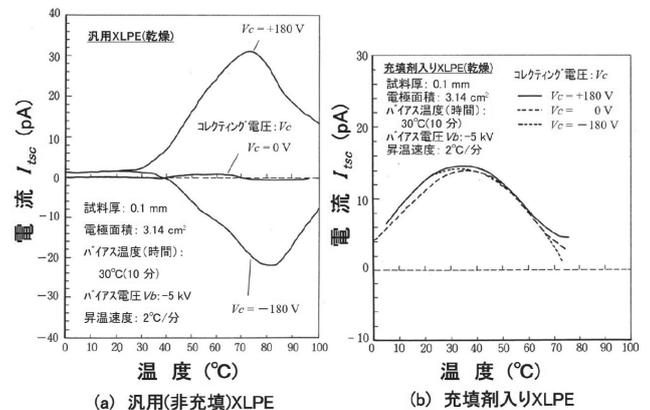


図7 充填剤有無によるXLPEのTSCの相違⁽¹⁵⁾

するには、充填剤の直流上の優れた特性を確保しつつ、インパルス破壊性能を向上させることが必要であった。当時の検討に用いていた充填剤は、タルクやクレー等の天然鉱石を原料とするものであった。従い種々の成分が混ざっているため、まずそれらの成分分析を行い、どの成分が直流特性上に寄与しているのかを探るとともに、インパルス特性上悪影響を及ぼさない成分を探った。評価は、それぞれの成分の試薬をポリエチレンに混練し、TSC測定ならびにインパルス破壊試験を実施した。その結果、直流特性改善に寄与している主成分とインパルスにあまり影響を与えない成分を導きだすことができた。そこで、充填剤を種々調査し、高純度かつ超微細の充填剤（ナノフィラー）が存在することを見いだした。その後、この新充填剤（高純度ナノフィラー）入りXLPEで評価を進めたところ、インパルス破壊性能もさることながら、直流特性が格段に向上した⁽¹⁶⁾。図8に90℃における新充填剤入りXLPEの ρ 特性を示す⁽¹⁷⁾。図中には比較のため汎用XLPEの ρ 特性も記してある。新充填剤入りXLPEは、高温高電界でも極めて高い ρ を有しており、汎用XLPEに比べると2桁以上高い。また、図9にパルス静電応力法（PEA法）による空間電荷測定結果を示す⁽¹⁸⁾。新充填剤入りXLPEには空間電荷の蓄積がほとんど認められない。図10に絶縁厚9mmのケーブルの直流破壊性能を示すが、新充填剤入りXLPEケーブルは140kV/mmもの直流破壊強度があり、汎用XLPEに比べ倍以上の直流破壊強度を有する⁽¹⁷⁾。また、インパルス破壊性能も、500kV級実機ケーブル（絶縁厚：23mm、導体サイズ3,000mm²）において、2,000kV近い性能を有するとともに、逆極性インパルス重畳破壊性能も、バーダー係数KでK=0.5と良好な特性が得られた⁽¹⁶⁾。この新充填剤入りXLPEケーブルは、CIGRE TB-219⁽¹⁹⁾に準拠した±250kV級のPQ試験、Type試験をクリアし、2012年12月より北海道一本州間直流幹線として運転を継続中である⁽¹⁸⁾。また、本材料を用いた直流ケーブルは、国内のみならず、英国-

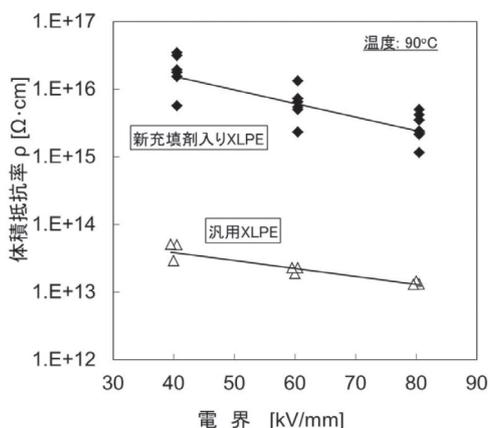
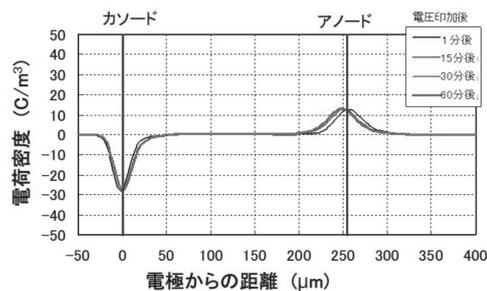
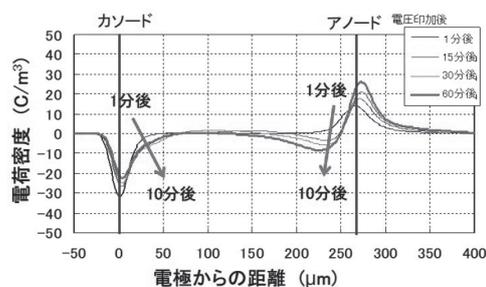


図8 新充填剤入りXLPEと汎用（非充填）XLPEの体積抵抗率の電界依存性⁽¹⁷⁾



(a) 新充填剤入りXLPE



(b) 汎用(非充填)XLPE

図9 新充填剤入りXLPEと汎用（非充填）XLPEの空間電荷分布⁽¹⁸⁾

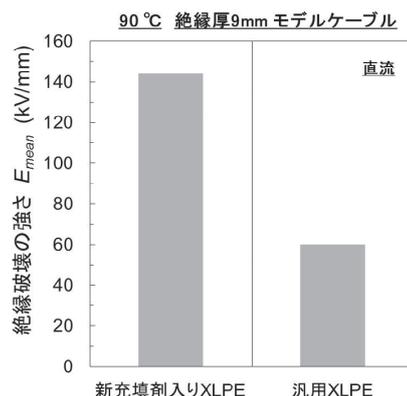


図10 新充填剤入りXLPEケーブルと汎用（非充填）XLPEケーブルの直流絶縁破壊強度の比較⁽¹⁷⁾

ベルギー間の±400kV直流連系線として2019年1月より運転を開始した⁽²⁰⁾。なお、±525kV級ケーブルもCIGRE TB-496⁽²¹⁾準拠のType試験、PQ試験をすでに完了している。

5. 真実の追求-3 BTTの有害性の評価 ～メカニズム検討とともに～

最近、前々からの筆者の懸念事項の再評価を行った。それは、BTT（ポウ・タイ状水トリー）からの電気トリー発生メカニズムを半定量的に評価するというものである⁽²²⁾。さらにその検討を受けて、現在の超高圧XLPEケーブルの

設計に考慮されていないBTTの影響を、再考すべきと考えた⁽²³⁾。背景には、275kV線路が設計寿命の30年を迎えること、500kV線路も20年の経年を迎えることがある。

5-1 BTTからの電気トリー発生メカニズムの検討

浸水環境下で使用されるXLPEケーブルには課電により水トリーが発生し劣化現象が起こる。水トリーが伸展すると、写真5に示すように水トリー部(写真5ではBTT)から電気トリーが発生し絶縁破壊が起こる。その電気トリーの発生起点は、BTTが小さいうちはBTTの先端部であることが多いが、BTTが伸展した場合には、写真5に示すように、BTT先端から若干内部に入ったところから電気トリーが発生することがある。筆者らは、水トリーからの電気トリーの発生現象に注目し、その発生メカニズムについて半定量的な検討を行った⁽²²⁾。その検討は真の破壊現象を説明するものとして、2020年電気学会論文賞を受賞した。詳細説明については、その文献⁽²²⁾に譲るが、ここでは、水トリーの長さや絶縁破壊の関係、すなわち水トリーの有害性評価に関して論述する。

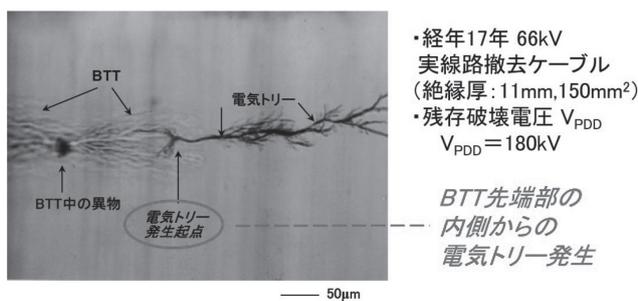


写真5 実線路撤去66kVケーブル絶縁体に認められた破壊起点 (BTTからの電気トリーの発生)⁽²²⁾

5-2 BTTの有害性の評価

水トリーは水が充填された微小ボイドの塊りであると言われている。ポリエチレンの比誘電率 $\epsilon_r(PE) = 2.3$ であり、水の比誘電率 $\epsilon_r(H_2O) = 80$ であるので、水トリー (BTT) の比誘電率 $\epsilon_r(BTT)$ は、周囲のポリエチレンより高いと思われる。すなわち、BTTはポリエチレン中の異種誘電体と考えることができる。そこで、BTT内部の比誘電率を均一の値を有する誘電体と捉え、BTT先端電界が電気トリー発生電界に達したときに電気トリーが発生する、すなわち絶縁破壊が発生すると仮定した。かかる考え方によれば、 $\epsilon_r(BTT)$ の値と電気トリー発生電界 E_i の値を決めることで、BTT長とケーブル破壊強度の関係を導くことができる⁽²²⁾。この概念を示したものが図11である。

このようにして、絶縁厚6mmのXLPEケーブルのBTTの長さや、破壊電圧の実測値と計算値を示したものが図12で

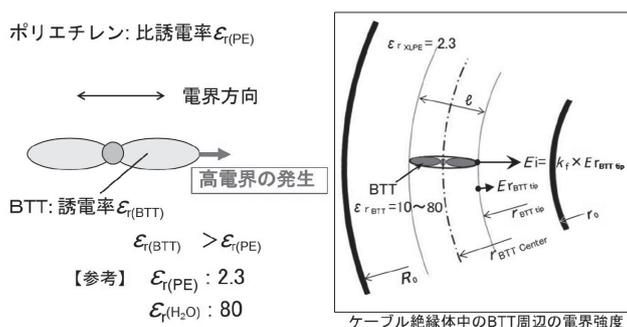


図11 BTTをポリエチレン中の高誘電率を有する異種誘電体と見立てたモデル⁽²²⁾

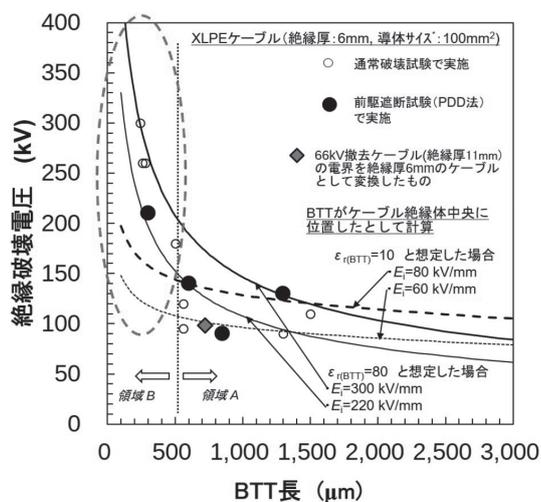


図12 BTT長とXLPEケーブルの残存破壊電圧の関係⁽²²⁾ (BTTを高誘電率を有する異種誘電体と想定した場合の計算値と実験値の比較)

ある。ここで注目すべきは、BTT長が500μm以下の短い領域(領域Bと記載)では、 $\epsilon_r(BTT)$ の値を $\epsilon_r(BTT) = 80$ 、電気トリー発生電界 E_i を $E_i = 220 \sim 300 kV/mm$ と仮定した場合の方が、 $\epsilon_r(BTT)$ を低く見積もった場合よりも実プロットに合う。しかし、 $\epsilon_r = 80$ とは水の ϵ_r そのものであることから、BTTが短い領域、すなわち劣化が進んでいない領域で $\epsilon_r(BTT) = 80$ になるとは考えにくい。しかるに、 $\epsilon_r(BTT) = 80$ と考えた方が合うということは、 $\epsilon_r(BTT) = 80$ に相当する現象が起こっていると考えるべきである。BTT長500μm以下のケーブル破壊電圧はいずれも高い絶対値を有しており、平均電界 E_{mean} で30~50kV/mmを超えている。従い、BTTの電気伝導に非線形性が出現する⁽²⁴⁾可能性、すなわち抵抗率が急減する可能性が高い。かかる抵抗率が小さい場合は、誘電率ではなく抵抗率が優勢になると考えられる。そこでどの程度の ρ になれば、BTT先端電界が220~300kV/mmになるかを検討した。その結果を図13に示す。 $\epsilon_r(BTT) = 80$ としたときの電界増倍率 k_f と同じ

値となる ρ の値を求めると、 $\rho = 1.46 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ となった。この ρ の値は、文献⁽²⁴⁾のBTTの $\rho = 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ に比べると若干小さいが、本対象が30~50kV/mmという高電界であり、高電界下でのBTTの電気伝導の非線形性を考えれば、十分現実的な値である。すなわち、BTTが短い領域Bにおいては、高電界下でBTTの ρ が低下したことにより $\epsilon_r = 80$ と等価な現象が起きていると考えられる。

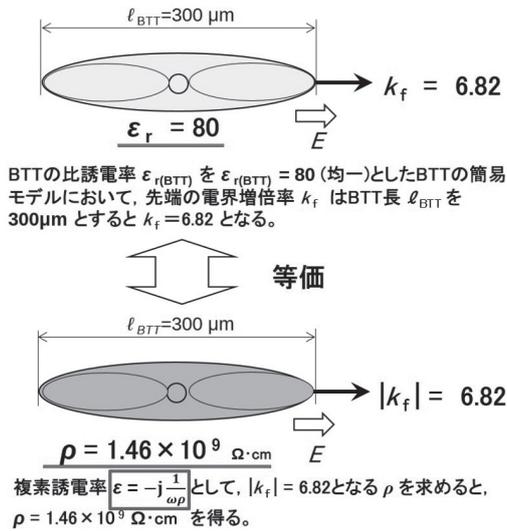


図13 電界増倍率 $|k_f|$ の値が等しくなる比誘電率 ϵ_r と体積抵抗率 ρ の等価値⁽²²⁾

5-3 経年超高压XLPEケーブルへのBTTの有害性評価

金属被(遮水層)を有する超高压XLPEケーブルにおいては、浸水の影響がないとしてBTTの影響は設計に考慮されていない。確かに大きなBTTの発生は認められていないものの、ケーブル絶縁体中に内存する水分でも、微小なBTTは短時間課電においても発生する。一般的に外部からの浸水のないケーブルでは、BTTの成長は200 μm 程度で飽和する⁽²⁵⁾といわれており、BTTの影響を考慮する必要はない。しかし、経年30年を迎えるにあたり、超高压XLPEケーブルに対しBTTの影響について改めて検討した。BTTが小さいうちは、ケーブルの破壊電界が高いことから、BTTの等価比誘電率 $\epsilon_{r(\text{BTT})}$ は、 $\epsilon_{r(\text{BTT})} = 80$ と見なすことができ、BTT先端の電気トリ-発生電界 E_i は、 $E_i = 300\text{kV/mm}$ と考えてよいことは、図12の結果が示す通りである。ここで、 $E_i = 300\text{kV/mm}$ は、XLPEにおける課電ステップ15分における値であるので、ケーブルの設計寿命である30年運転後での電気トリ-発生電界 E_{i30y} を $V-t$ 則に基づき求める。超高压XLPEケーブルの寿命指数 n は、 $n=15$ であるが、実力的には $n=20$ 以上は期待できる⁽¹⁰⁾。そこで、 $n=20$ で計算すると30年後の E_{i30y} は次のようになる。

$$E_i^n \cdot t = E_{i30y}^n \cdot t_{30y} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $E_i = 300\text{kV/mm}$ 、 $t = 15$ 分、 $t_{30y} = 30$ 年、 $n = 20$ とすれば、 $E_{i30y} = 150\text{kV/mm}$ となる。なお、ここでの E_{i30y} は、継続的に150kV/mmにさらされた場合の数値であるので、評価としてはかなり厳しめのものとなる。 $n=20$ を想定して得られた E_i 、すなわち、 $E_i = 150\text{kV/mm}$ と $\epsilon_{r(\text{BTT})} = 80$ として、絶縁厚23mm、導体サイズ1,000 mm^2 の275kV XLPEケーブル、ならびに絶縁厚27mm、導体サイズ2,500 mm^2 の500kV XLPEケーブルでBTT長とケーブル絶縁破壊電圧の関係进行を計算した。図14にその結果を示す⁽²³⁾。図中には、経年30年後に撤去調査として実施された残存破壊試験結果と観察されたBTT最大長⁽²⁶⁾も◇プロットで併せて示した。この図によれば、◇プロットは計算曲線に比較的近いところにある。この図から、275kV XLPEケーブルのBTT有害長 l (対地運転電圧 $V=159\text{kV}$ で破壊するBTT長)は、 $l = 1.57\text{mm}$ となり、500kV XLPEケーブルのBTT有害長 l (対地運転電圧 $V=318\text{kV}$ で破壊するBTT長)は、 $l = 0.58\text{mm}$ となる。275kVケーブルのBTT有害長は、実際の275kV撤去ケーブルで認められたBTT長200 μm ⁽²⁶⁾に比べ長く、性能的には余裕を持っている。しかし、500kVケーブルのBTT有害長は、あまり余裕のない数値である。従い、かかる裕度を確認する上でも、今後、超高压ケーブル(275kV級、500kV級)の撤去調査(残存破壊試験やBTT観察)を行い、劣化実態を把握することが必須であると考えられる。

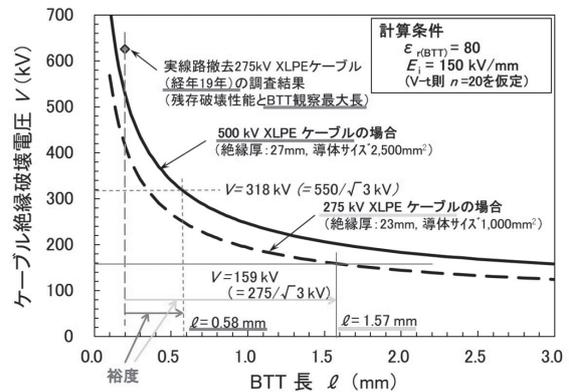


図14 275kVと500kV XLPEケーブルにおけるBTT長と絶縁破壊電圧の関係⁽²³⁾

6. 結 言

「矢作賞」受賞に際して、矢作先生の思い出を記載するとともに、矢作先生の「真実を求めよ」という教えに従った研究開発のいくつかを記述した。今後の若い世代の方々にも、こうした偉大な先生により世界に誇る誘電・絶

縁材料の研究が築かれたことを忘れず、次世代に向けた研究開発を進めてもらいたいと考える。

なお、本研究開発を進めるにあたりましては、電源開発(株)、東京電力(株)の関係の皆様にご多大なるご支援いただきました。厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 片貝昭史、「ポリエチレンに魅せられて 矢作先生の教え ～真実を求めよ～」、第50回電気電子絶縁材料システムシンポジウム予稿、M-2、2019-9-17～19、名古屋、pp.11-20 (2019-9)
- (2) e.g. J.Vermeer, "The Impulse breakdown strength of pyrex glass," *Physica*, Vol.20, pp.313-326 (1954)
- (3) e.g. S. Katakai, K. Yahagi, "Effect of Thermal Aging on Breakdown Strength of Polyethylene," *JJAP*, Vol.24, No.4, pp.441-445 (1985-4)
- (4) 片貝昭史、村田義直、高橋憲司、「低電圧・長時間における電気トリー進展形状の検討」、平成11年電気学会全国大会、No.293、1999-3-22、山口、pp.2-44～45 (1999-3)
- (5) F. H. Kreuger, "Endurance Tests with Polyethylene Insulated Cables Methods and Criteria," *CIGRE* 1968, No.21-01 (1968)
- (6) 電気協同研究、「CVケーブル及び接続部の高電圧試験法」、第51巻第1号、3-6節、電気協同研究会 (1995-7)
- (7) e.g. B. Gross, S. V. Nablo, "High Potentials in Electron-Irradiated Dielectrics," *Journal of Applied Physics*, Vol.38, pp.2272-2275 (1967-4)
- (8) 例えば、神永建二、武田直樹、片貝昭史、村田義直、金岡護ら、「500 kV CVケーブルの直流耐圧試験の検討」、*電学論B*、117巻1号、pp.92-100 (1997-1)
- (9) 例えば、多田直彦、「モノづくりにおける実践のDRBFM—より高い品質をめざした未然防止手法のすすめタイトル」、友月書房 (2014-3)
- (10) T. Kubota, Y. Takahashi, S. Sakuma, M. Watanabe, M. Kanaoka, H. Yamanouchi, "Development of 500-kV XLPE Cables and Accessories for Long Distance Underground Transmission Line—Part I," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.9, No.4, pp.1741-1749 (1994-10)
- (11) 直流ケーブル技術動向調査専門委員会、「直流ケーブルの技術動向と今後の課題」、電気学会技術報告第745号 (1999-10)
- (12) T. Suzuki, S. Katakai, M. Kanaoka, Y. Sekii, "DC Characteristics of Cable Insulating Materials," *Proceedings of the 3rd ICSD*, 3-6 July 1989, Trondheim, Norway, B-7, pp.66-71
- (13) 神永建二、武田直樹、片貝昭史、村田義直、金岡護、高橋憲司、「ケーブル絶縁材料の直流破壊現象」、*電学論A*、117巻1号、pp.42-50 (1997-1)
- (14) 安藤順夫、沼尻文哉、登守邦明、村木浩二、熊谷竹男、「±250 kV 直流CVケーブルの開発」、*日立評論*、Vol.58, No.10, pp.806-811 (1976-10)
- (15) 前川雄一、山口昭生、原信、関井康雄、「直流CVケーブルの開発に関する研究」、*電学論B*、112巻10号、pp.905-913 (1992-10)
- (16) 前川雄一、渡部知津夫、浅野光正、村田義直、片貝昭史、嶋田光正、「直流500kV XLPEケーブルの開発」、*電学論B*、121巻3号、pp.390-398 (2001-3)
- (17) Y. Murata, S. Mashio, S. Katakai, et al., "HVDC XLPE Cables and Accessories at a Rated Voltage up to 500kV," *CIGRE Colloquium on HVDC and P.E. Systems*, 7-9 March 2012, San Francisco, USA, B1-3
- (18) C. Watanabe, Y. Itou, H. Sasaki, S. Katakai, M. Watanabe, Y. Murata, "Practical Application of ±250 kV DC-XLPE Cable for Hokkaido-Honshu HVDC Link," *CIGRE 2014*, B1-110 (2014-8)
- (19) Working Group 21-01 CIGRE, "Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 250kV," *CIGRE Technical Brochure* 219 (2003)

- (20) T. Igi, S. Asai, S. Mashio, S. Nishikawa, et al., "Qualification, installation and commissioning of-world' s first DC 400kV XLPE cable system," *Proceedings of the 10th JICABLE*, A6-1, 23-27 June 2019, Versailles, France
- (21) Working Group B1.32 CIGRE, "Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV," *CIGRE Technical Brochure* 496 (2012)
- (22) 片貝昭史、日渡重雄、鈴木弘、「ボウ・タイ状水トリーからの電気トリー発生メカニズムの検討」、*電学論A*、139巻5号、pp.264-276 (2019-5)
- (23) S. Katakai, S. Hiwatashi, K. Suzuki, S. Mashio, H. Suzuki, "Study of Inception Mechanism of Electrical Trees from Bow-Tie Trees," *Proceedings of the 10th JICABLE*, E6-5, 23-27 June 2019, Versailles, France
- (24) 豊田毅彦、向井茂雄、大木義路、李英、前野恭、「ポリエチレン中の水トリーの導電率と誘電率」、*電学論A*、120巻7号、pp.750-754 (2000-7)
- (25) 大島勝一、勝田銀造、岩田善輔、丸山義雄、関井康雄、金岡護、「CVケーブルの長期絶縁特性に関する検討」、*電学論B*、112巻9号、pp.821-828 (1992-9)
- (26) 浅井洋平、井上昌宏、「経年275 kV CVケーブル設備の劣化評価」、平成29年電気学会全国大会、7-170 (2017-3)

執 筆 者

片貝 昭史

：フェロー
電力事業部
博士 (工学)
電気学会フェロー
電気学会進歩賞 (2014)、文部科学大臣
表彰科学技術賞 (2015)、電気学会
矢作賞 (2019)、電気学会論文賞 (2020)
受賞

