

$$Q(t) = \sum_{i \in S} Q_i(t)$$

where
 $S = \{\text{disp, abs, cond}\}$

誘電・絶縁特性評価における電流積分法の役割と今後の展開

Role and Future Perspective of Current Integration Method for the Evaluation on Dielectric and Insulating Properties

関口 洋逸*
Yoitsu Sekiguchi

栗原 隆史
Takashi Kurihara

高田 達雄
Tatsuo Takada

福岡 眞澄
Masumi Fukuma

三宅 弘晃
Hiroaki Miyake

田中 康寛
Yasuhiro Tanaka

HVDC 技術と高分子絶縁技術が進歩するに従い、絶縁体中の電気伝導および空間電荷挙動の正確な評価の需要が増している。通常、これらの計測は、試料中の弱い電流を計る微小電流計測や、空間電荷挙動を計るパルス静電応力 (PEA) 法など、測定対象に応じて適切な手法が選択される。しかしながら、それは、これらの手法が特定の物理現象に特化しており、計測にしばしば特別な処理が必要であることの裏返しでもある。日本では、最近、電流が関わる現象を相補的かつ俯瞰的に理解しようと、「電流積分法」(Q-t法)の利用が増えている。Q-t法は、積分コンデンサを試料と直列に接続し、試料内を流れる弱い電流を積分して電荷量として計測する方法である。積分により得られる利点を誘電計測に活用するため、材料の選別・評価の他、絶縁体の状態診断、使用限界条件の把握など広い応用範囲を考えることができる。ここでは、Q-t法の特長とその応用例をいくつか紹介する。

This paper focuses on the current integration method (Q-t method), which has been widely used in Japan in recent years to understand the electrical conduction and space charge behavior of insulating materials in conjunction with the advancement of high voltage direct current (HVDC) technology and polymer insulation technology. The Q-t method involves connecting an integrating capacitor to the sample in series and measuring the integrated small currents passing through it. This method allows comprehensive and panoramic observation of electrical phenomena. By applying this advantage to dielectric measurements, it enables a wide range of applications such as condition monitoring, understanding the limits of insulation material usage, and facilitating material selection and evaluation. This paper provides examples of its applications and highlights its unique advantages and functionality.

キーワード：誘電・絶縁材料、電流積分法 (Q-t法)、スクリーニング、状態診断

1. 緒言

我々の生活を支える電気エネルギーや種々の家電製品には、必ず電気絶縁材料が使用されている。特に近年、電気エネルギーの生成や伝送に用いられる機器に直流 (DC) が使用されるケースが増え、DC 電圧下における絶縁材料の誘電・絶縁特性の理解と制御が研究者・技術者の重要な技術課題となっている。また、従来の交流で使用される機器類でも、設備保守の観点から有効な状態診断技術の開発が求められる。

このような一見多岐にわたる技術分野において、共通しているのは「誘電・絶縁特性」の把握が重要であることで、従来はこれらの計測は個別の手法を用いて行われてきた。しかし、別個の特性のように見えても、特性間には物理的なつながりがあるため、相補的、俯瞰的な計測ができれば個々の計測結果の理解深化および誤解の回避につながる。電流積分法 (Q-t法)^{*1}はこのような観点から非常に優れた手法である。ここでは、これまでに報告されている Q-t法の応用について概観し、今後の考えられる展開について記述する⁽¹⁾。

2. Q-t法の特長

Q-t法の特長については、住友電工テクニカルレビューに過去二回にわたって報告している^{(2),(3)}ように、簡単な操作で多くの情報を得られることが大きな利点である。また、「積分^{*2}」することによって得られる利点も多い。Q-t法の特長は以下のようにまとめることができる。

- 積分によってランダムノイズがキャンセルされるため、ランダムノイズの影響が抑制される。
- Q-t法による測定は、電極の形状・配置に依存しない。
- 電流成分 (注入、蓄積、空間電荷の移動、電気伝導など) を含む物理現象を包括的に評価することができる。
- 積分によって、初期値である $Q(0)$ ($= C_s V_{DC}$) を明確に測定することができる。
- $Q(0)$ を使用することにより、誘電特性の理解に役立つ“電荷量比 ($R_c = Q(t_m)/Q(0)$)”および“電荷量差 ($D_c = Q(t_m) - Q(0)$)”という新しいパラメータが定義される。

3. 応 用

Q-t法の特長をうまく利用することにより、以下に示すような応用が可能である。まず、産業分野では、

- (1) 誘電特性の広い視点からの材料・製品スクリーニング
 - (2) 積分した微小電流を用いた状態監視
- が挙げられる。2項に挙げた (A) から (C) の特長に、(D) (E) による工夫を加えることによりデータの持つ意味合いが平面的なものから立体的なものに変わる。

また、電気物理を主とする学術・基礎分野では、(3) 電流成分が関連する物理現象の解析が挙げられる。こちらは (A) から (C) の特長を最大限に活用しながら、(D) (E) による工夫を加える点は前述のものと同様であるが、絶縁材料として使用される高分子の特性を理解しながら、数学や物理の力を借りて解析を工夫する必要があり、分野としての奥行きはかなり広いと考えておくべきである。有効な解析手法が開発できれば、基礎的な工夫の成果が産業分野に還元されることも出てくると考えられる。

以下に、参考文献⁽¹⁾にまとめた内容を中心に、実際の応用例を紹介する。

3-1 材料スクリーニング

通常、ポリマー絶縁材料の誘電特性は、それぞれの現象に応じた適切な方法を使用して個別に取得される。方形波電圧^{*3}を印加する場合、Q-t法で計測する電荷量は、式(1)に示すように3つの成分で表すことができる。

$$Q(t) = \sum_{i \in S} Q_i(t) = Q_{\text{disp}}(t) + Q_{\text{abs}}(t) + Q_{\text{cond}}(t) \dots (1)$$

ここで、 $S = \{\text{disp, abs, cond}\}$

ここで、 $Q_{\text{disp}}(t)$ は瞬時充電電荷量、 $Q_{\text{abs}}(t)$ は吸収電荷量、 $Q_{\text{cond}}(t)$ は伝導電荷量であり、それぞれ試料をコンデンサと見た時の充電電荷量(= $C_s V_{DC}$)、主として空間電荷の注入・蓄積・移動に伴う電荷量、試料中の電気伝導による電荷量を表す。課電初期の瞬時の現象であることから、以後、 $Q_{\text{disp}}(t)$ は $Q(0)$ と表すこととする。

Q-t法では、これらの電荷量成分を同時に測定し、解析を行う。

まず、方形波電圧の印加と同時に起こる $Q(t)$ の初期上昇部分である $Q(0)$ を考える。電圧に対する電流の応答が線形である場合、 $Q(0)$ は印加電圧 V_{DC} に比例するので、 V_{DC} に対する $Q(0)$ の直線性の確認が非常に重要である。 $Q(0)$ には静電容量 C_s が含まれるため、静電的な誘電率 ϵ を得ることができる。

二つ目に、定常状態における $Q(t)$ プロファイルを考える。縦軸に電荷量比 $R_c (= Q(t)/Q(0))$ を取ると、試料内に吸収電流も伝導電流も流れない理想的なコンデンサの場合、図1(a)に示すように R_c は“1”を保持する。試料内に伝導電流のみが流れる場合、縦軸に電荷量比 $R_c (= Q(t)/Q(0))$ を取ると、図1(b)に示すように、 R_c は t に対して直線的な

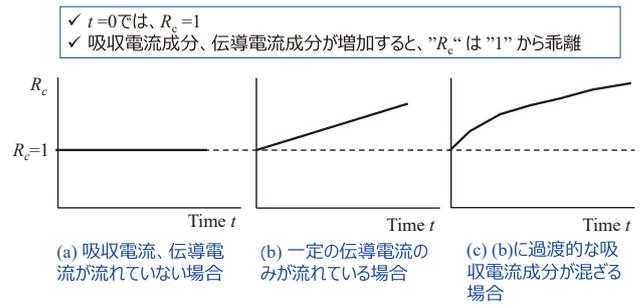


図1 Q(t)プロファイルのイメージ
(a)吸収電流、伝導電流がない場合、(b)一定の伝導電流のみが流れる場合、(c)吸収電流と伝導電流が流れる場合

変化を示し、 $Q(t)$ 曲線の傾きは伝導電流 $I_{\text{cond}}(t) (= dQ(t)/dt)$ と等しくなる。 $I_{\text{cond}}(t)$ から電気伝導率 κ が得られる。

最後に、電圧印加初期の $Q(t)$ プロファイルの過渡現象を考える。この段階では、過渡的な電荷挙動に起因する吸収成分が検出される。縦軸に電荷量比 R_c を取ると、過渡的な吸収電荷量成分が含まれると、伝導電荷量成分からの乖離成分が上乗せされる図1(c)のような曲線が得られる。この曲線を解析することにより、吸収電荷量成分の情報を得ることができる。

誘電特性の温度および電界依存性を理解するためには、これらの手順を異なる温度および電界条件下で実施する必要があることは言うまでもない。

3-2 ケーブルの状態診断

外部からの水の浸入を防止するための遮水層を持たない電力ケーブル(特に配電ケーブル)には、水トリー劣化と呼ばれる劣化形態が存在し、状態診断による劣化程度の早期診断の検討が数多くなされている。直流漏れ電流法もそのような状態診断手法の一つである⁽⁴⁾が、この手法では絶縁体を橋絡(水トリーが内部半導電層と外部半導電層をつなぐほど成長することを表現)するような水トリーは検出可能であるが、橋絡に至らない水トリーの検出は困難であった。直流漏れ電流の計測にQ-t法を利用した手法が栗原等により検討されている⁽⁵⁾。検討では、二種類の撤去ケーブル⁽⁶⁾と新品ケーブルを加速劣化させた、劣化の程度の異

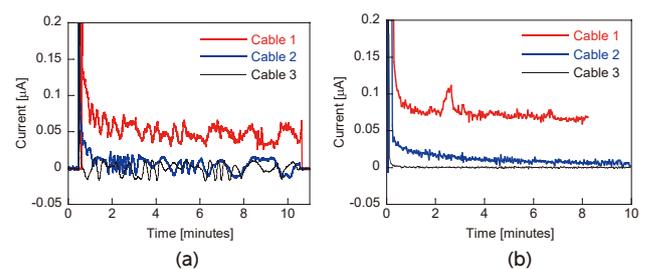


図2 試料ケーブル1-3の漏れ電流の比較⁽⁵⁾
(a)直流漏れ電流法、(b)Q-t法

なる三種類のケーブル（ケーブル1から3。1は重度、2は中度、3は軽度の劣化。）を用い、従来法である直流漏れ電流法とQ-t法の比較を行った。その結果、従来法では、重度に劣化した、前述の橋絡水トリーが存在するケーブル1は異常ありと診断されたが、軽・中度の劣化の区別はつかなかった。それに対し、Q-t法では、図2に示すように、それぞれの状態に応じた検出結果が得られ、Q-t法は劣化の程度まで識別できる可能性を持つことが示された⁽⁵⁾。

3-3 薄肉フィルム

有機エレクトロニクス分野や、コンデンサでは、非常に薄いポリマーフィルムを評価することが多い。これら薄肉フィルムにおける電気伝導や空間電荷挙動の評価にもQ-t法は適している。

通常、膜試料の厚さが薄くなるほど、空間電荷挙動の測定は難しくなる。パルス静電応力法（PEA法）は、電荷挙動の評価に有効な方法であり、試料内の電荷の分布を測定できる点は他に類を見ない。しかし、解像度の制限のため、10 μm未満の極端な薄膜には適用できない。Q-t法はこのような場合に効果的である。Q-t法では試料の厚み方向における電荷分布までは測定できないが、試料内の総電荷量を正確に測定することができる。Q(t)の時間、温度、および電界依存性を測定することで、試料内の電荷挙動を調べることができる。

3-4 パワーモジュール

電気および電子デバイスは、しばしば非線形の電場を伴う複雑な構造を持っていることがある。しかし、このような場合でも、Q-t法を利用すると、効果的かつ有用な知見が得られる。

Mimaらは、IGBTモジュールやダイオードブリッジなど、市販されているパワーエレクトロニクスデバイスを、室温から80℃までの範囲で、100から4000 Vの方形波電圧を印加して評価した⁽⁷⁾。図3に示すように、IGBTの温度依存性の電荷量比 R_c （ $=Q(t)/Q(0)$ ）を評価した。この図では、室温および40℃において、 $R_c \sim 1$ であり、DC電源から供給される電荷がほぼ電極付近で誘起し、そこに蓄積している、絶縁層への注入や移動は起こっていないことがわかる。一方、60℃では、500から4000 Vの範囲で $R_c =$

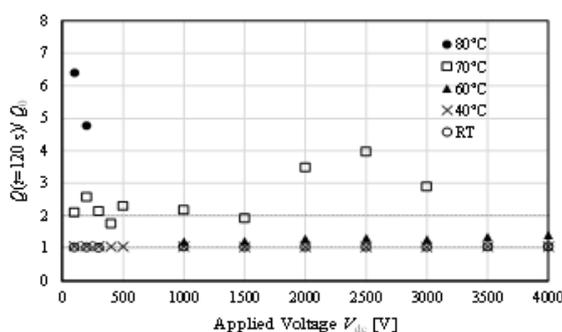


図3 IGBT試料に直流電圧を印加した時の電荷量比の温度依存性⁽⁷⁾

1.5であり、電極からの注入電荷がIGBTモジュールの絶縁層内に蓄積した、いわゆる吸収電荷が蓄積した可能性がある。さらに、70℃および80℃では、 R_c が“2”を超えており、この領域では伝導電流が吸収電流よりも支配的となっている可能性が高い。従って、Q-t法は電力ケーブル以外のデバイスにも適用できるので、様々な電気および電子デバイスやそれらの絶縁材料の評価において、Q-t法の活用が大幅に増加することが期待される。

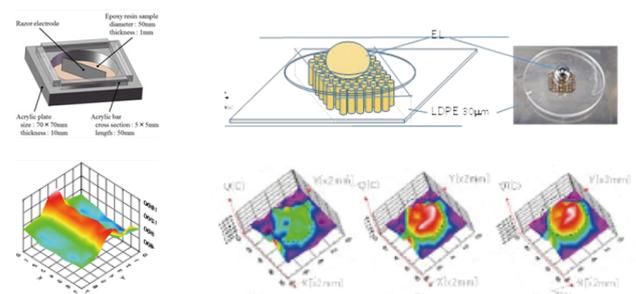
（注：電極から注入された電荷が均一に移動する理想的な系を考えると、電荷の注入・移動がない場合は $R_c = 1$ であるが、電荷の注入が起こると徐々に R_c が1から乖離する。この時、ちょうど $R_c = 2$ は誘電緩和時間 τ が計測時間 t_m と等しくなることを表しており、物質中のトラップサイトが埋まることを電磁気学的に表すことができる⁽⁸⁾。従って、 $R_c > 2$ では電気伝導が主体となると考えることができる。ただし、このモデルは理想的な、均一に電荷が動くことを前提にしており、あくまでも目安であることを付け加えておく。）

3-5 誘電・絶縁現象の現象論的理解

以下に示すように、Q-t法の特長のいくつかは、ポリマー絶縁体の科学的および技術的評価に利点をもたらす。最も重要な特長は、微小電流計測と比較すると、積分によりランダムノイズを低減でき、また、Q-t法では方形波電圧が印加された際のQ(t)の初期値を定義・取得することができる点である。これらの特長により、Q(t)プロファイルの俯瞰的かつ相補的な傾向を見つけることができる。以下に、いくつかの例を示す。

(1) マルチチャンネルQ-t計測システム

Q-t法の特徴を活用することにより、小サイズの電極でも高い精度でQ(t)を測定することが期待される。福間らは、各電極が直径1.5 mmの60個の電極を備えた複数電極系（マルチチャンネル）Q-tメータを構築し、ブレード、球体、または棒状の電極など、不均一な電界下における電荷および電流の分布を測定している^{(9),(10)}。方形波電圧を印加した際のブレードと球体電極の測定結果を図4に示す。明らかに、電荷はブレード電極の先端に蓄積されている。しかし、球体電極の場合、電荷は電極の先端には蓄積され



(a) 線状電極

(b) 球電極

図4 不均一電界下における電荷分布^{(9),(10)}

ていない。従って、この方法は不均一な電場における電荷蓄積と電流分布に特に有用であると期待される。

(2) 三角波電圧を利用する解析

ここまでの技術では、印加する直流電圧として方形波電圧を使用していたが、方形波以外の電圧でも有用な知見を得ることができる。福岡等は、三角波電圧^{*3}を用い、ポリマーフィルム試料のQ-t計測を実施した⁽¹¹⁾。

一定の速度で電圧を変化させて $I(t)$ を計測すると、瞬時充電電流成分は $C_s dV_{DC}(t)/dt$ のように表される。この値は、**図5 (a)** に示すように一定となる。伝導電流は、**図5 (b)** に示すように印加電圧に対して昇圧時と降圧時とで同じ経路をたどる。一方、吸収電流成分は**図5 (c)** に示すように電圧に対して非線形の応答を示すので、電圧の上昇とともに増加し、昇圧時と降圧時とでたどる曲線が異なる。従って、吸収電流成分と伝導電流成分とを足し合わせると、**図5 (d)** に示すように吸収電流成分の増加に伴い伝導電流成分の経路からそれるような応答を考えることができる。

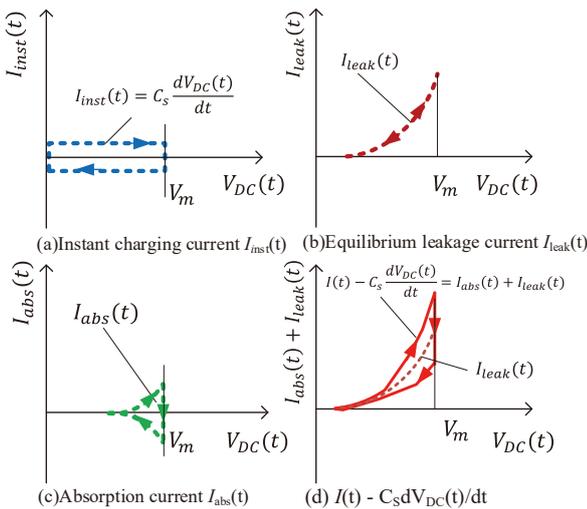


図5 三角波電圧印加時の電流応答イメージ⁽¹¹⁾

$$I(t) - C_s \frac{dV_{DC}(t)}{dt} = I_{abs}(t) + I_{cond}(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

結局、**図5 (d)** の赤線で示す昇圧時のカーブと、緑線で示す降圧時のカーブとに囲まれる面積が、吸収電荷量成分とみなされる。**図6**にLDPEにおける実測結果を示す。

式(2)の両辺を積分すると、式(3)に示すように電荷量 $Q(t)$ の関係が得られ、吸収電荷量と伝導電荷量の合計を直接求めることができる。

$$Q(t) - C_s V_{DC}(t) = Q_{abs}(t) + Q_{cond}(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

このように、三角波電圧を用いると、より短時間で試料の電気伝導性や空間電荷挙動に関する情報を定性的に把握することが可能である。

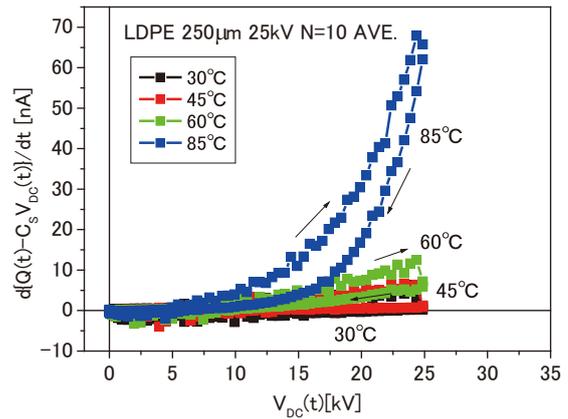


図6 LDPEにおける三角波電圧印加時の $I(t) - C_s \frac{dV_{DC}(t)}{dt}$ の電圧依存性⁽¹¹⁾

(3) 電気伝導および空間電荷挙動の解析

Q-t法におけるランダムノイズの影響が抑えられる特長は、誘電・絶縁特性の計測にいくつかの利点をもたらす。厚さ0.2 mmの電力ケーブル用の通常の架橋ポリエチレン (AC-XLPE) のシート試料に対する電流測定結果を**図7 (a)** に示す。温度と電界が低くなるほど、小さな電流の測定は困難になる。しかし、Q-t法による $I(t)$ の積分を使用することで、**図7 (b)** に示すように安定した曲線を描く $Q(t)$ データを取得することができ、各 $Q(t)$ 曲線の勾配として電流の変化を明確に観察することができる。また、各 $Q(t)$ 曲線の類似性から、時間-温度や時間-電界の換算則の存在が示唆される。Q(t) 曲線に時間・温度換算則を適用した例を**図8**に示す⁽¹²⁾。実時間を換算時間に変換する因子をシフト

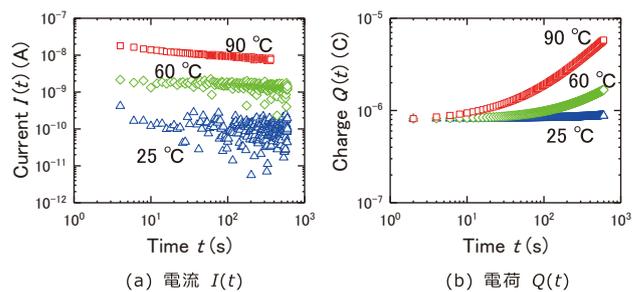


図7 AC-XLPEの75kV/mm印加時における $I(t)$ および $Q(t)$ プロファイル⁽¹²⁾

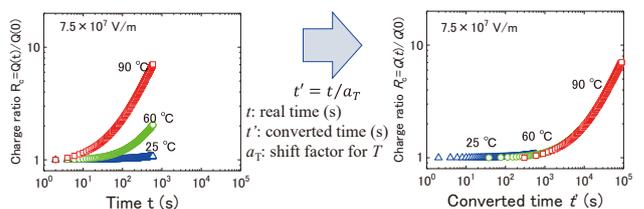


図8 時間-温度換算則をAC-XLPEの R_c-t データに適用した例⁽¹²⁾

ファクターと言う。得られたシフトファクターの持つ物理的な意味について詳しく解析する必要があるが、それにより発展的に新たな発見がなされることが期待される。

4. 今後の展開

ここまで見てきたように、Q-t法は大きく分けて二つの技術分野に貢献が可能である。一つは電力ケーブルをはじめとする産業分野への貢献であり、もう一つは電気物理を中心とする微小電流を取り扱う基礎・学術分野である。

産業分野への貢献としては、ここで紹介したように、既にケーブル絶縁体の状態診断手法として検討が始まっている。ただ、現時点では撤去してきたケーブル試料を用いる試料試験であり、撤去ケーブルの劣化の程度を正確に把握することに主眼が置かれており、実線路での評価には至っていない。なお、コンデンサを持った測定機器を接地側に配置した場合、試料を電氣的に浮かせた状態で計測することになる。これを回避するには、装置を高圧側に設置すれば良いが、装置が高電位にさらされることになり、その対策が必要となる。実線路への適用には困難が多いと考えられるが、解決の手法を考案できれば実線路の有用な診断手法となり得る。

また、学術分野への適用としては、ここでも記述しているQ-t法の特長を最大限に活用すると、電気伝導現象を従来の手法とは異なる視点で解析が可能となる点を挙げる事ができる。うまく活用するには、電磁気学だけでなく、絶縁体に用いられる高分子の特徴も加味し、物理的、化学的な視野からも考察を行う必要がある。これらの総合的な視野がQ-t法をうまく活用するための鍵になる。

5. 結 言

HVDC技術とポリマー絶縁技術の進展に伴い、HVDC機器向けの改良材料と評価技術の需要が増している。既存の技術だけでなく、新たに開発された技術も、HVDC技術のさらなる発展に向けて活用する必要がある。この観点から、Q-t法はこの目標を達成するための有望な候補である。

Q-t法の最も魅力的な特長は、絶縁性能の包括的かつ補完的な理解を可能にすることである。この能力は、特に他の評価方法と組み合わせる場合に発揮され、実験データの不完全な解釈や誤った解釈を回避するために役立つ。積分の効果もQ-t法のもう一つの重要な特徴である。電流の積分により、ランダムノイズへの許容度が向上するとともに、初期値としての積分定数が明確化される。前者の特徴は、比較的簡単な方法で微小な電流の測定を可能にし、後者は絶縁特性の解析プロセスに有効である。本論文では、Q-t法のいくつかの可能な応用例を示した。

我々は、Q-t法を効果的に、活発に活用することがHVDC技術の進歩に貢献すると考えている。加えて、Q-t法を使用した科学的解析手法のさらなる開発により、HVDC技術

だけでなく、従来のAC技術や電力ケーブル以外の機器類の改善にもつながると考えている。

用語集

※1 電流積分法 (Q-t法)

これまでの論文では「電流積分電荷法 (Q(t)法)」と表していたが、電気学会における用語統一の動きに合わせ、電流積分法 (Q-t法)に変更した。

※2 積分

ここでは、電流 $I(t)$ を積分コンデンサに蓄積して電荷量 $Q(t)$ として測定することを指して「積分」と呼んでいる。測定値を数学的に積分処理することではないことに注意して欲しい。

※3 方形波電圧、三角波電圧

所定の直流電圧を速やかに印加し、その電圧を保持する形の電圧を方形波電圧と言う。一方、一定の昇圧(降圧)速度で電圧を変化させるような形態をランプ(ramp)電圧と言う。ランプ電圧で所定の電圧 V_{max} まで昇圧し、その後降圧するような形の電圧はその時間に対する形状から三角波電圧と呼ばれる。

参 考 文 献

- (1) Y. Sekiguchi, T. Kurihara, H. Miyake and T. Takada, "Direct Current Integrated Charge Method as a Useful Tool for Dielectric Measurements," cigre2024 Paris Session, No.11055, 2024. (in press)
- (2) 関口 洋逸、高田 達夫、三宅 弘晃、田中 康寛、「電流積分電荷法による絶縁材料の高圧誘電」、SEIテクニカルレビュー第193号、pp. 58-62 (2018年)
- (3) 関口 洋逸、細水 康平、山崎 孝則、高田 達雄、田中 康寛、「架橋ポリエチレンの空間電荷・伝導挙動のQ(t)法による理解と解析」、住友電工テクニカルレビュー第200号、pp. 23-28 (2021年)
- (4) 日本電線工業会、技術資料「高圧CVケーブルの保守・点検指針 技資116号D (2012年)」
- (5) 栗原 隆史、佐藤 智之、万木 剛、野呂 友樹、「乾式架橋・三層同時押出方式6.6kV CVケーブルの交流破壊電圧や劣化診断データに及ぼす絶縁厚と浸水有無の影響と未橋絡水トリー検知の可能性に関する検討」、電気学会電力・エネルギー部門誌、140巻4号、pp.243-252 (2020年)
- (6) 栗原 隆史、佐藤 智之、樺澤 祐一郎、長嶋 友宏、「橋絡水トリーが発生した乾式架橋・三層同時押出方式6.6 kV CVケーブルの水トリー劣化診断に関する基礎検討」、電気学会基礎・材料・共通部門誌、139巻4号、pp.226-233 (2019年)
- (7) 美馬 まいみ、花澤 大樹、土方 規実雄、三宅 弘晃、田中 康寛、高田 達雄、井上 隆、「パワーモジュール絶縁層の電荷蓄積の電流積分電荷法による評価」、電気学会 基礎・材料・共通部門誌、139巻、4号、pp.197-204 (2019年)
- (8) 高田 達雄、関口 洋逸、田中 康寛、「Q(t)法における電極電荷・蓄積電荷・漏れ電荷の区別」、電気学会 基礎・材料・共通部門誌、141巻4号、pp.245-251 (2021年)
- (9) M. Fukuma, Y. Sekiguchi, "Current Distribution Measurement under Non-uniform Electric Field by Current Integration Meter," International Symposium on Electrical Insulation Materials (ISEIM2017), DM-3 (2017)

- (10) M. Fujii, M. Fukuma, S. Mitsumoto, Y. Sekiguchi, "Deterioration Diagnosis of Epoxy Resin Evaluated by Current Integration Meter," International Symposium on Electrical Insulation Materials (ISEIM2017), P1-5 (2017)
- (11) 福間 眞澄、関口 洋逸、「高分子フィルムの三角波電圧印加時の測定」、第52回 電気電子絶縁材料システムシンポジウム、GP(O)-15 (2021年)
- (12) Y. Sekiguchi, O. Urakawa, T. Inoue, "Time-temperature and time-electric field correlation for integrated currents in XLPE," International Symposium on Electrical Insulation Materials (ISEIM2023), M-1 (2023)
-

執 筆 者

関口 洋逸* : エネルギー・電子材料研究所 主幹



栗原 隆史 : (一財)電力中央研究所 上席研究員
(工学博士)



高田 達雄 : 東京都市大学 名誉教授
(工学博士)



福間 眞澄 : 松江工業高等専門学校 教授
(工学博士)



三宅 弘晃 : 東京都市大学 教授
(工学博士)



田中 康寛 : 東京都市大学 教授
(工学博士)



*主執筆者