アゾベンゼン系物質の添加によるボイド放電の減少効果

非会員 岡田 めぐみ 正員 山野 芳昭 (千葉大)

Reduction of Void Discharges by additive of Azo-Benzene Compound

Megumi Okada, non-Member and Yoshiaki Yamano, Member
(Chiba University)

The void wall in HDPE was modified by additive to reduce the void discharge. The additives used were four kinds of azobenzonic materials; azobenzene, *p*-nitroazobenzene, *p*-aminoazobenzene and nitrobenzeneazo-resolcinol. The specimen with void was composed of five layers of films of which total thickness was 360 μ m: HDPE film (thickness of 100 μ m) with three holes of 1mm ϕ (voids) was sandwiched between the HDPE films with additive; Furthermore, they were sandwiched between HDPE films of 100 μ m thick. The voids in specimen were a cylindrical configuration of 1mm ϕ in diameter and 100 μ m in height. The HDPE film with additive (thickness of 30 μ m) was prepared by solution casting method. The specimen was set between plane electrodes. It was confirmed that PD in void was remarkably reduced by using the film with additive. The reduction of PD in void was observed in all kinds of additive used. The effective concentration of the additive in HDPE lies from 0.05 to 0.1 wt%. The PD for the specimen with additive was reduced to as low as about 20% of that for the specimen without additive under the applied voltage of 1.55kV. The reduction of PD in void was observed in all kinds of additive used. The mechanisms for the reduction in the PD are discussed focusing on the two points. One is the prevention of secondly electron emission from void wall due to the excitation of additive. Another is the prevention of electron detachment from the wall due to the modification on characteristics with electrification of the wall by the additive.

キーワード: ボイド放電, 部分放電, 添加剤, アゾベンゼン

1. はじめに

高電圧機器の絶縁部におけるボイド放電の発生は、電気トリーの発生や絶縁破壊等につながり、高電圧機器の絶縁信頼性を低下させる要因となる。そのため、ボイド放電の発生を抑制する方法は古くから検討されている。たとえば、絶縁物を形成する際に減圧・脱気を行うことによって、ボイドの数を極力少なくする方法がある¹⁾。また、絶縁部中に半導電性の添加剤を混入し、添加剤のブリード効果によってボイド壁の表面抵抗の減少を図り、ボイド内の電界強度を弱めてボイド放電が発生しにくい状態にする方法もある²⁾。しかし、何らかの原因でボイドが生成され、さらにボイド放電が発生する状況においても、ボイド放電の発生数や強度を減少させるための方法を検討した例は少ないと考えられる。

ボイド放電は、密閉空間で対向する2つの絶縁物表面の間で発生する部分放電である。ボイド放電が発生すると、陽極あるいは陰極となる絶縁物表面(ボイド壁)に電荷(ボイド放電により発生したもの)が帯電する。陽極に相

当するボイド壁には負電荷が帯電する。印加電界が反転すると、ボイド壁に帯電した負電荷には、今度はボイド壁からボイド空間に向かう力が作用する。ボイド放電の発生は、主として、ボイド空間内における電子なだれ等の発生に基づくと考えらるので³⁾、もしボイド壁に帯電している負電荷のうち電子がボイド空間へ放出されれば、これが新たなボイド放電の発生へつながるであろう。さらには、陰極に相当する絶縁物表面からの二次電子放出作用もボイド放電の発生につながるものと考えられる。このようなことを考えると、ボイド壁からボイド空間への電子の放出(帯電電子の放出や二次電子の放出)を何らかの方法で抑制できれば、ボイド放電が発生する電界強度下においても、ボイド放電を減少させることができる可能性があると考えられる。

本研究は、絶縁物(ポリエチレン:PE)に添加剤を混入することにより、ボイド壁面の電気的特性を改質し、発生するボイド放電(以下では、PDと略記する。)を低減させることを目的とした。添加剤としては、アゾベンゼン系の物質を用いた。筆者の一人は以前アゾベンゼン系添加剤を用

いてポリエチレンの絶縁破壊強度の向上を試みたことがある^(4,5)。アゾベンゼン系の物質は、同じ分子骨格でベンゼン環に電子受容基や電子供与基を付加したものが試薬として多数存在する。電子供与基あるいは受容基を持つアゾベンゼン系物質を PE に添加することで、電子のボイド壁への帯電特性(トラップ特性)を変化させることができるものと期待できる^(6,7)。さらには、アゾベンゼン系物質に存在するベンゼン環は、その π 電子効果により、絶縁物表面の二次電子放出効果を抑制できる可能性が考えられる。このような観点のもとに、本報告では4種類のアゾベンゼン系物質を添加した PE を用いて、アゾベンゼン系添加剤によるボイド放電の減少効果について検討を行った。

2. 実験方法

〈2・1〉 添加剤および試料 試料の構成を図1に示す。

試料は合計5枚の円形フィルムを重ねたものである。フィルム B および D は HDPE (高密度ポリエチレン) 製で、片面を添加剤の入った HDPE でコーティングしてある。コーティングの厚さは $10\mu\text{m}$ である。図ではコーティング部分を黒で示してある。これらフィルムの厚さはコーティングも含めて $30\mu\text{m}$ である。フィルム C には、図のように3つの穴($h:1\text{mm}$ ϕ)を 10mm 間隔で空けてある。フィルム B と D のコーティング面がフィルム C に接触するように重ね、これらをさらにフィルム A とフィルム E で挟んである。なお、フィルム A, C および E の厚さは、それぞれ $100\mu\text{m}$ である。この試料のボイドは、フィルム C に空けた3カ所の穴と、その穴の上面と下面が添加剤入り HDPE の表面で塞がれた状態で形成されている。なお、本実験で用いたポリエチレンはすべて HDPE であるので、以後はこれを PE と略記する。

添加剤入り PE は、溶液キャスト法によりフィルム B と D の表面にコーティングを行った。PE ペレット (エースポリマー:B5031) に重量比で $0.01 \sim 0.1\%$ のアゾベンゼン系添加剤を混入したものをトルエンに入れ、約 110°C にて

図1 試料の構成

A, E : HDPE フィルム(厚さ $100\mu\text{m}$), B, D : 添加剤入り HDPE をコーティングした HDPE フィルム(厚さ $30\mu\text{m}$), C : 穴あき HDPE フィルム(厚さ $100\mu\text{m}$), h : ボイド用の穴 (1mm ϕ , 3個)を示す。

Fig.1 Construction of specimen

図2 使用したアゾベンゼン系添加剤

Fig.2 Azo-benzoic additives used.

図3 ボイド放電の測定系

A: 高電圧電極, B: 平板電極, D: 試料, E: エポキシモールド, AMP: 増幅器(30dB, DC ~ 10MHz), C, R: 検出インピーダンス($C=1000\text{pF}$, $R=3\text{k}\Omega$), $C_0=(4700/3)\text{pF}$, $R_0=680\text{k}\Omega$

Fig.3 Experimental setup for void discharge.

加熱・攪拌し、PEフィルム上に展開した後、乾燥させた。また比較のため、添加剤を混入しない状態のトルエン溶解 PE を PEフィルム上に展開して乾燥させたものも作製した。

添加剤として実験に用いた4種類のアゾベンゼン系物質を図2に示す。これ以降、本論文では各添加剤を図2に示してある略号で呼ぶことにする。使用した添加剤は、アゾ基に付く2つのベンゼン環に何も付加されていない Az、アゾ基に電子供与基(NH_2)を1つ導入した Az_a、電子受容基(NO_2)を1つ導入した Az_n、そして2つの電子供与基(OH)と1つの電子受容基(NO_2)を導入した Az_hn である。

〈2・2〉 ボイド放電の測定 ボイド放電 (以下では PD と略記する。) の測定は、図3に示す測定系で行った。高電圧電極(図中の A)は 30mm ϕ のアルミ製円柱電極で、端部は曲率 10mm で丸めてある。高電圧電極端部から部分放電が発生するのを防止するため、端部はエポキシ樹脂でモールドしてある(図中の E)。高電圧電極と平板電極(B)の間に、試料(D)を挿入した。

検出インピーダンス (図中の C, R) により検出された PD

図4 接触帯電測定装置

Fig.4 Experimental setup for measurement of contact charging.

信号は、増幅器(AMP)とデジタルストレージオシロスコープ(Digital OSC; HP54510B)を経て、PCに蓄積される。一回の操作で、交流印加電圧(50Hz)の1サイクル間のPD信号をPCに取り込む。1つの試料につき、印加電圧1サイクル間のPDパルスを、30秒間隔で計300サイクルの測定を行い、それらをデータとして使用した。なお、本実験では、2pC以上の放電電荷を持つパルスをPDパルスとして取り扱った。

測定時の印加電圧は、PD開始電圧(約1.4kV)から2kVの範囲である。PD開始電圧は、電圧印加後5分間に2pC以上のPDパルスが検出される最低の電圧とした。

なお、試料は合計5枚のPEフィルムを重ねたものである。各フィルム間のわずかな隙間からPDが発生することも考えられる。そこで、図1中のCで示した穴あきフィルムを、穴なしフィルムに置き換えて、PDの測定を行った。その結果、穴なしフィルムを用いた場合に検出されるPDパルス数は、実験を行った印加電圧の範囲で、穴の空いたフィルムを用いた場合の1/100以下であった。すなわち本実験で用いる試料では、フィルム間の微小間隙で発生するPDを無視できるものとした。

〈2・3〉 絶縁物表面の帯電特性に及ぼす添加剤の影響の評価 添加剤の混入によって生じるPEフィルムの帯電特性の変化を調べるため、図4に示す装置を使ってクロム球と添加剤入りPEフィルムとの接触帯電特性を測定した。試料は厚さ20 μ mの添加剤入りPEフィルムで、アルミ板上に溶液キャスト法で作成したものである。図のように、試料及びクロムメッキ板は15deg傾けてある。リザーバーにあるクロム球(1mm ϕ 、総重量:3.0g)からクロムメッキ板上(ともに接地してある)を転がった後、添加剤入りPEフィルム上を転がり、ファラデーケージに入る。添加剤入りPEフィルムとクロム球とは、接触帯電によりお互いに異符号の電荷が等量帯電するはずである。ファラデーケージの電圧を測定することにより、フィルム表面に帯電した電荷量を求めた。

3. 実験結果と検討

〈3・1〉 添加剤入りフィルムを用いた試料のPD特性

図5はPDパルスとその発生位相(印加電圧の位相)との関係を、添加剤の種類毎にプロットしたものである。印加電圧にして300サイクル分のPDパルスを積算して図に示している。測定時の印加電圧は各試料とも1.55kVであり、添加剤の濃度は各試料とも0.05wt%である。図中の正弦波は印加電圧の位相を示している。

図の各グラフに示すドットの密度を比較すると、添加剤入りフィルムを用いた試料(以後、添加試料と略記)のPDパルスの発生数は、無添加フィルムを用いた試料(以後、無添加試料と略記)と比較して大きく減少していることがわかる。PDパルスの最大放電電荷については、添加剤の種類への依存性は顕著ではなく、なおかつ無添加試料と比べて大きな違いは見られない。

図6は添加剤の濃度とPDの積算放電電荷との関係を示したものである。図が煩雑になるのを防ぐため、代表的な2種類の添加試料と無添加のデータについてのみ示している。PDの積算放電電荷とは、測定した印加電圧300サイクル分の正負PDパルスについて、それらの放電電荷の絶対値を積算したものである。各添加試料とも添加剤の濃度が0.05~0.5wt%あたりで顕著な減少効果を発揮する傾向にある。図には特に示さないが、PDパルス数の積算についても、図

図5 PDパルスの放電電荷と印加電圧位相との関係

Fig.5 Relation between magnitude of PD pulse and appearance phase of applied voltage.

図6 PDパルスの積算放電電荷と添加剤濃度との関係

Fig.6 Relation between integrated magnitude of the PD and concentration of additive.

図7 PDパルスの積算放電電荷と印加電圧との関係

Fig.7 Relation between integrated magnitude of PD pulse and applied voltage.

6の放電電荷の積算と同様の傾向を示し、0.05～0.5wt%あたりの添加濃度で顕著な減少効果を示す。なお、図6を見ると、添加濃度が高いとPDパルスの減少効果が少なくなる傾向にある。添加濃度が0.5wt%を越えるとフィルム表面に局所的な添加剤の析出が見られることから、この傾向は添加剤とPEとの相溶性に原因があると考えられる。

図7は、印加電圧とPDパルスの積算放電電荷との関係を示している。これは添加濃度0.05wt%のフィルムを使用したときのデータである。図が煩雑になるのを防ぐため、代表的な2種類の添加試料と無添加試料のデータについて示している。図7に示すように、印加電圧が高くなると、添加試料によるPDの減少効果が低下する傾向にある。なお、PD開始電圧は、添加試料、無添加試料ともに、約1.4kVである。したがって、添加試料におけるPDの減少は、PD開始電圧付近の印加電圧で効果が現れていることになる。

図8は、PDパルスの積算放電電荷と積算発生数を各添加試料毎に示したものである。データは、添加剤濃度0.05%、印加電圧1.55kVのときのものである。図に示すように、各

図8 添加剤によるPDパルスの積算放電電荷及び積算発生数の変化

Fig.8 Changes in integrated magnitude and number of PD by additive.

添加試料におけるPDパルスの積算放電電荷と積算発生数は、無添加試料と比べて減少している。積算放電電荷と積算発生数ともに無添加試料の15～20%程度まで減少している。PDパルス減少効果の添加剤の種類への依存性は、顕著ではない。しかし、AzとAz_aの方がAz_nとAz_hnよりも、減少効果が若干高い傾向を示している。

〈3・2〉 添加試料におけるPD減少の要因 添加剤試料におけるボイドは、ボイド壁のPEに添加剤が混入されていることが異なるのみで、無添加試料におけるボイドと形状、大きさは同じである。したがって、前項で示した添加剤試料におけるPDの低減効果は、ボイド壁の電気的特性の変化が何らかの要因となっているものと考えられる。図7に示した実験結果からもこのことが間接的に裏付けられる。すなわち、印加電圧が上昇するとボイド内の空間で電離等が優勢になり、PDの発生数・放電電荷が増加する。その結果、ボイド壁面におけるPD減少効果が相殺されるため、図7に示すように印加電圧が高くなるとPDの減少効果が低下するものと考えられる。このようなことから、本項では添加剤入りボイド壁がPD減少に果たす要因について考えてみる。

PDがボイド内で発生すると、PDに起因したUV光が発生する。UV光がボイド壁面に照射されると、ボイド壁から二次電子が放出されることが考えられる。すなわち、壁面近くのPEバルク内にトラップされていた電子がUV光のエネルギーを得て、二次電子としてボイド壁から放出されることが考えられる。また、PDの発生によってボイド空間で発生した正イオンが陰極に相当するボイド壁面に衝突すると、トラップされている電子が、正イオンの運動エネルギーを得ることによってもボイド壁面から二次電子として放

出されることも考えられる^(8,9)。いずれの場合においても、二次電子がボイド壁から放出されると、それが更なる PD の発生を促進させるであろう。アゾベンゼン系物質を添加したボイド壁面において、もし添加剤分子の励起作用により UV 光のエネルギーあるいは正イオンの運動エネルギーが吸収されれば、二次電子放出は抑制されることになり、それが PD の減少に効果をもたらすことが考えられる。

次にボイド壁面の電荷の帯電特性の変化と PD との関係について考える。使用した添加剤によって、ボイド壁面の帯電特性が変化することが考えられる。ボイド壁の帯電特性の変化は、以下に述べる理由により PD の発生特性に影響を与えると考えられる。すなわち、PD の発生によって、正極側に相当するボイド壁面には負電荷が帯電する。ボイド内の電界が反転すると、帯電している電子の一部がボイド壁面から離れ、対向する壁面に向かって運動するであろう。そして、電子の運動に起因して電子なだれが生じると、さらなる PD の発生へとつながる。もし、ボイド壁面の帯電特性の変化によって帯電電子がボイド壁面から離れにくくなれば（電子がボイド壁に強くトラップされれば）、PD の発生は減少するであろう。

最後に、添加剤の混入によりボイド壁面の表面抵抗が低下することも考えられる。その結果、ボイド内の電界が緩和され、PD の発生が抑制される可能性がある。しかし、本実験で作成した添加剤入り PE の表面抵抗率は、全ての添加剤入り PE において、 $10^4 \Omega$ 以上（20℃, 50%RH）の値であった。また、PD 発生電圧は、添加剤の有無や種類による顕著な変化は見られず、約 1.4kV であった。したがって、本実験の添加試料において、PD の低減効果はボイド壁の表面抵抗の低下に起因しているとは考えにくい。

以下では、添加剤分子の励起効果と添加剤によるボイド壁面の帯電特性の変化とに焦点を当てて、ボイド壁面における添加剤入り PE が PD の発生や成長の抑制に果たす役割を検討する。

〈3・3〉 添加剤分子の励起作用による PD 減少の可能性

前項でも述べたように、ボイド壁から二次電子が放出されると、それが新たな PD の発生を促進させることになる。ボイド壁面が添加剤入り PE の場合は、添加剤分子の励起作用により UV 光のエネルギーあるいは正イオンの運動エネルギーが添加剤分子に吸収されれば、それによって二次電子放出が抑制されることが考えられる。本項では、添加剤分子の励起作用に基づく、ボイド壁面からの二次電子放出の抑制効果について検討を行う。

実験に使用したアゾベンゼン系添加剤の UV 光吸収特性を図 9 に示す。各添加剤の最大吸収を示す波長は、図に示すように、およそ 320nm ～ 450nm の範囲にある。添加剤の励起エネルギーを UV 光の吸収波長から換算すると、その範囲は約 2.8eV ～ 3.8eV となる。一方、PE にトラップされている電子の光による放出も、およそこの範囲のエネルギーによって生じると報告されている⁽¹⁰⁾。したがって、添加

図 9 添加剤の UV 吸収スペクトル
(エタノール溶液にて測定。)

Fig.9 UV spectrum of absorption for additive.

剤分子の励起作用により、UV 光によるボイド壁からの二次電子放出が抑制されることが十分に考えられる。

次に、このような励起エネルギーをもつ添加剤の入ったボイド壁に正イオンが衝突する場合を想定してみる。印加電圧を 1.55kV とすると、実験試料中のボイド内の電界は約 47kV/cm となる。空気分子の平均自由行程を 0℃, 1 気圧で約 6.06×10^{-6} cm とすると⁽¹¹⁾、平均自由行程内で正イオンは約 1.6eV の運動エネルギーを得ることになる。したがって、正イオンが数回の弾性衝突をくり返してボイド壁面に衝突する際には、正イオンの持つ運動エネルギーが添加剤分子の励起作用によって吸収されることも十分に考えられる。

〈3・4〉 添加剤によるボイド壁面の帯電特性の変化による PD 減少の可能性

実験に使用したアゾベンゼン系添加剤は、Az を除いて、電子供与基あるいは電子受容基が導入されている。添加剤分子に付加されている基の種類が変わると、添加剤を混入した PE の帯電特性は変化するものと考えられる^(6,7)。本項では、添加剤によるボイド壁面の帯電特性の変化が PD の減少に及ぼす効果について検討を行う。

図 10 は、PE 表面のクロム球に対する接触帯電特性を、使用した添加剤毎に示したものである。図 10 において、無添加 PE を基準と考えると、Az 添加の PE 表面は（図中の PE+Az）、クロム球との接触によって、無添加 PE 表面よりも正に帯電しやすい傾向を示している。すなわち、Az 添加

図 10 添加剤入りフィルム表面の帯電電荷量
(クロム球との接触後)

Fig.10 Quantity of surface charge on PE film with additive

の PE は無添加 PE よりも電子を供与しやすく、電子を供与した後は正極性に帯電する性質があるものと考えられる。Az_n 添加の PE については(図中の PE+Az_n)、無添加 PE よりも電子を受容しやすく、電子を受容した後は負極性に帯電する性質があるものと考えられる。使用した他の添加剤を含めて考えると、Az あるいは Az_a を添加した PE は、無添加 PE と比べて、電子供与的な性質を示すのに対して、Az_n あるいは Az_hn 添加の PE は電子受容的な性質を示す傾向にあることを図 10 は示しているものと考えられる。

本実験では、電子供与的な性質の添加剤及び電子受容的な性質の添加剤のどちらも PD の低減効果が見られた。その減少効果については以下のような説明が可能と考えられる。まず、電子供与性を示すボイド壁について考える。ボイド壁に正イオン (PD の発生に起因するもの) が付着すると、添加剤から供与される電子と中和し、添加剤が正に帯電する。ボイド内の電界が反転し、添加剤が正に帯電した壁面に電子 (PD の発生に起因するもの) が付着すると、添加剤分子と中和するかあるいは電気二重層を形成する。そのため、この状態で再度ボイド内の電界が反転しても、ボイド壁から電子はボイド空間へ飛び出しにくいはずである。次に電子受容性を示す壁面について考える。ボイド壁面に電子 (PD の発生に起因するもの) が付着すると、電子は電子受容性の添加剤に取り込まれ、添加剤が負に帯電する。ボイド内の電界が反転しても、添加剤に取り込まれた電子は、ボイド壁面から空間に向かって飛び出しにくいはずである。

以上、アゾベンゼン系添加剤分子がボイド内の PD の低減効果に果たす役割について、2つの可能性(励起効果と帯電特性)を検討した。今後、UV吸収波長が低エネルギー側にあり、かつ吸収効率の低い添加剤を使用するなどして、2つの可能性のうち、どちらが顕著に作用しているかを検討していく予定である。

4. まとめ

本報告では、アゾベンゼン系添加剤によるボイド放電(以下、PD)の低減効果について検討を行った。以下に、本報告で得られた事項を番号順にまとめて示す。

- (1) 実験に使用した 4 種類すべての添加剤において、添加剤含んだ PE でコートした PE フィルムを用いると、ボイド内で発生する PD パルスの発生数及び放電電荷ともに減少することがわかった。
- (2) 添加剤試料による PD の減少効果は、添加濃度については 0.05 ~ 0.5wt% の範囲で、印加電圧についてはボイド放電開始電圧の近傍で顕著に現れた。
- (3) 上記(2)の範囲で、添加剤試料における印加電圧 300 サイクル分の PD の積算放電電荷ならびに積算発生数は、無添加試料と比較して最大 15 ~ 20% にまで減少した。この減少効果の添加剤の種類への依存性は顕著には見られない。
- (4) アゾベンゼン系物質の添加により PD が減少する理由

として、添加剤を混入したボイド壁における二次電子放出の抑制による効果ならびに添加剤混入によるボイド壁の帯電特性の変化による効果が考えられる。

(平成 11 年 8 月 27 日受付, 平成 11 年 12 月 2 日再受付)

文 献

- (1) 電気学会技術報告第 559 号 "有機複合材料の電気・電子絶縁への適用技術の動向", 電気学会, 第 2 章, 1995.
- (2) 電気学会技術報告(II 部)第 342 号 "固体絶縁材料の添加剤・充てん剤効果", 電気学会, 第 4 章, 1990.
- (3) Stven A. Boggs, "Partial Discharge - Part III: Cavity-Induced PD in Solid Dielectrics", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.6, No.6, pp.11-20, 1990.
- (4) 遠藤, 山野 "アゾベンゼン系添加剤による PE フィルムの絶縁破壊強度の上昇", 電気学会論文誌 - A, Vol. 118-A, No. 5, pp. 496-504, 1998.
- (5) Y.Yamano, H.Endoh, "Increase in Breakdown Strength of PE Film by Additives of Azocompounds" IEEE Trans. on DEI, Vol.5, No.2, pp.270-275, 1998.
- (6) 小口, 玉谷 "有機無機粉末の帯電", 静電気学会誌, Vol.7, No.5, pp.292-299, 1983.
- (7) 小口, "顔料の帯電", 色材, Vol.58, No.8, pp.476-485, 1985.
- (8) Y.Yamano, "Sparks in a Small Gap between HV Spherical Metal Electrode and Corona-charges Organic Film", IEEE Trans. on DEI, Vol.1, No.3, pp.503-508, 1994.
- (9) 山野, "帯電した高分子フィルムと高電圧金属とか作る微小間隙における放電開始電圧", 静電気学会誌, Vol.17, No.2, pp.130-137, 1993.
- (10) 新版静電気ハンドブック, 静電気学会編, pp.1027-1029, 1998.
- (11) 気体放電現象, 本多, 東京電機大学出版局, p.15, 1978

岡田 めぐみ (非会員) 1974 年 4 月 30 日生まれ。97 年 3 月千葉大学教育学部卒業。99 年千葉大学大学院教育学研究科修了。

山野 芳昭 (正員) 1951 年 3 月 17 日生まれ。76 年 3 月東京農工大学大学院工学研究科終了。同年 4 月東洋紡績(株)入社。80 年 6 月東京農工大学工学部助手。88 年 4 月千葉大学教育学部講師。同助教授を経て、現在同教授。工学博士。主として電気絶縁工学、静電気工学の研究に従事。平成 2 年電気学会論文賞受賞。電子情報通信学会、静電気学会、IEEE 会員。