

トラッキング劣化によって発生する 炭化路の画像計測

正員 西田 眞 (秋田大)

正員 吉村 昇 (秋田大)

正員 能登文 敏 (八戸工大)

Image Processing Data of Carbon Path due to Tracking Deterioration

Makoto Nishida, Member, Noboru Yoshimura, Member (Akita University), Fumitoshi Noto, Member (Hachinohe Institute of Technology)

This paper proposes an image processing system as detectors of tracking deterioration on the surface of organic insulating materials. The binary images for the image processing system were able to detect the trace of the deposited carbon path. It was also observed that the area of the carbon path increases as the carbon path length increases under all test voltages. In addition, the time dependence of the area for Bisphenolic based epoxy resin (EX) differs from that of Polycarbonate (PC). The EX shows a negative voltage dependence. On the other hand, the PC shows the positive one.

In order to investigate the different voltage dependences between two samples, the light pulses for the scintillation discharge were measured by the light pulse count method. It was clarified that the voltage dependence of the carbon area for each sample corresponds with the accumulated numbers of light pulse. Therefore, it is indicated that the visual image provides quantitative and real time information regarding the propagation process of the carbon path.

キーワード：トラッキング劣化，炭化路，画像計測，炭化面積，光パルス

1. ま え が き

有機絶縁材料の多くはその表面で放電が発生すると局部的な炭化劣化を生じ、これが進展し最終的にはトラッキング破壊に至ることが知られている。従来、トラッキング劣化に関しては破壊結果に着目した報告は多く見られる^{(1)~(5)}が、劣化プロセスを経時的に測定し検討を加えた例は少ないのが現状である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これはトラッキング劣化状態を定量的・経時的に把握可能な測定手法が確立されていないことに起因すると考えられる。このため著者らは、トラッキング劣化の各プロセスの推移を評定する一つの方法として、特定波長範囲の光パルスを計測する方法を提案し、その有効性については既に報告した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかしながら、光パル

スを計測する方法は、トラッキング劣化を促進する放電発生数の経時変化を測定するには適しているものの、放電の発生位置あるいは炭化路の発生状態の推移を把握することは困難であった。

一方、材料表面上に炭化物の析出あるいは炭化路が形成されると、炭化路と材料間では色調の異なることが多い。従って、この色調の相違を画像データとしてコンピュータに取込み、画像処理を施すことによって炭化路の伸び長さ、炭化面積および炭化路形状に関する特徴を把握することが可能であると予想される。更に、画像データより得られる結果は、トラッキング劣化を検討するうえで新たな情報を与えるものと期待される。

本論文では、トラッキング劣化による炭化路の進展

状態を定量的・経時的に計測する方法を確立することを目的に、新たに画像計測法を提案すると共に画像データの基礎特性に関して検討を加えたので、その結果について報告する。また、画像計測法と光パルス計測法との結果の対応についても検討したので報告する。

2. トラッキング試験装置および試料

トラッキング試験は IEC Publ. 587⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ に規定された試験法および試験条件に基づいて行った。試験電圧としては 1.5, 2.5, 3.5, 4.5kV の 4 種類の電圧を用いた。試験液としては 0.1% NH₄Cl 水溶液に界面活性剤 (TRITON-X100: 非イオン性) を 0.02% 添加した水溶液を使用した。試験液の抵抗率は約 396 Ω・cm (23°C) である。

試料には石英粉を添加したビスフェノールタイプのエポキシ樹脂、無充てんのポリカーボネートの 2 種類 (以下、EX および PC と略記) を用いた。試料の大きさは両試料とも 50 mm×120 mm で、厚さは 6 mm (EX) と 5 mm (PC) である。EX は 240 番のエメリーペーパーで上下電極方向に軽く均一に研磨した後、イソプロピルアルコールで洗浄し乾布でふき、24 時間以上シリカゲル入りデシケータ中に保存乾燥したものを試験に使用した。PC はイソプロピルアルコールで洗浄し乾布でふき、EX と同様の方法で乾燥したものを使用した。

3. 画像計測システム

電極および画像入力用カメラの配置を図 1 に示す。本法で使用した画像計測システムは赤外線フィルタ、画像入力用カメラ、インタフェースおよびパーソナルコンピュータより構成されており、そのシステム構成を図 2 に示す。画像入力用カメラとしては、MOS 型固体撮像素子 (GT-20, エプソン社製) を使用した。使用システムは画素数: 59,536 画素 (縦 244×横 244)、階調: 16 階調、画像取込み時間: 1/60 秒、画像転送時間: 0.4 秒の特性を有している。カメラからの入力画像はインタフェースを通じ、パーソナルコンピュータの画像メモリー上に取込んだ。その後、入力画像に二値化処理を施し、二値化画像間で演算処理を行い炭化路の進展長さおよび炭化路の面積などの計測を試みた。なお、放電により発生する赤外線がカメラの撮像素子を破損するのを防ぐため、赤外線フィルタを設置することによって、赤外線のカメラへの入力を防止した。

また、画像入力系に使用したレンズの影響で画面のエッジに近づくにつれ画像のひずみが大きくなった。

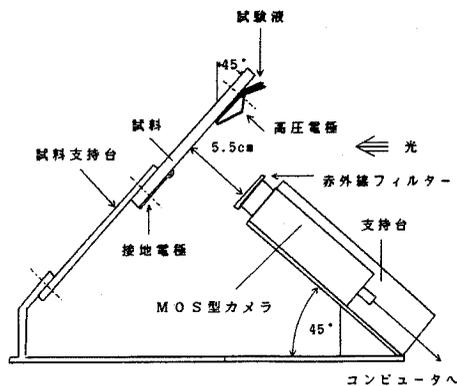


図 1 電極および画像入力用カメラの配置
Fig. 1. Arrangement of the electrodes and the visual image camera.

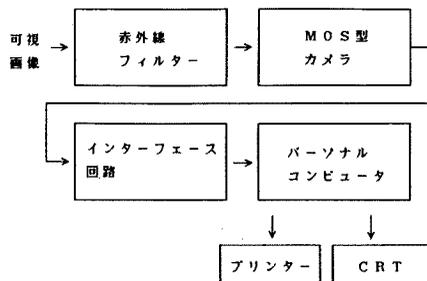


図 2 画像計測装置の構成図
Fig. 2. Image processing system block diagram.

このひずみの影響をできるだけ最小とするため、画像データは画像エッジ部分を除いた 200 ピクセル×200 ピクセルの範囲で使用した。この結果、本システムにおける画像の解像度は約 250 μm となった。また、放電光の画像への混入を防止するため、パーソナルコンピュータへの画像の取込みは試料への課電を一時停止した状態でいった。

4. 画像計測結果および検討

〈4・1〉炭化路の二値化画像 画像計測システムによって得られた炭化路のデータに二値化処理を施した出力結果の例を図 3 に示す。EX, PC ともに炭化路は接地電極から高圧電極に向けて進展し、トラッキング破壊に至る様子が認められる。一方、炭化路の分岐の状態およびこん跡の経時変化は EX と PC では異なっている。例えば、EX では接地電極に近い位置での炭化路は太く、先端に近づくほど細くなる様子が認められる。これに対して、PC では電極間のギャップ

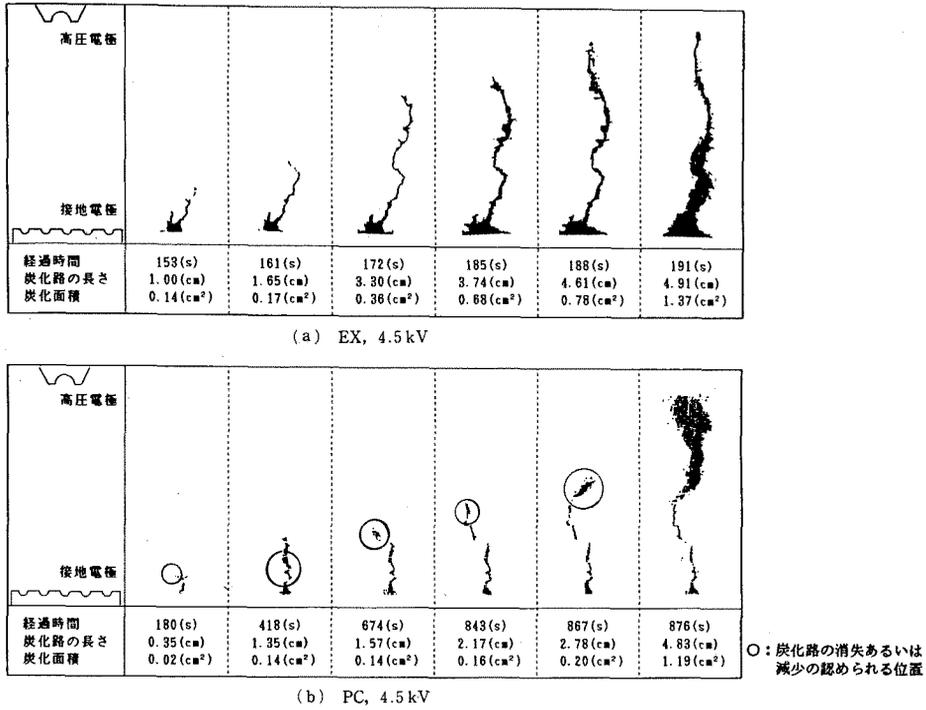


図 3 炭化路の二値画像出力例
Fig. 3. Binary image of the carbon path.

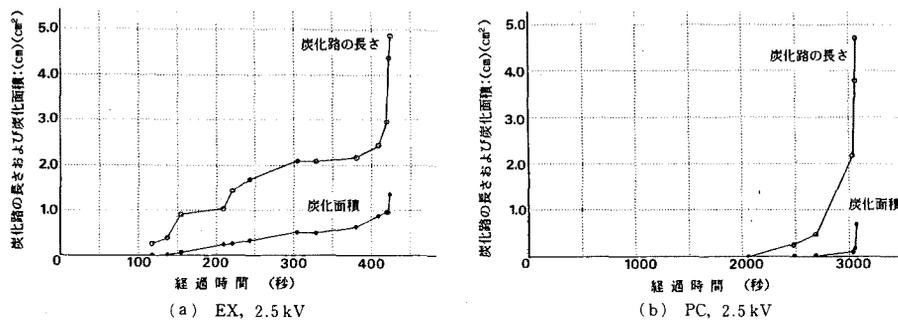


図 4 炭化路の長さおよび炭化面積の経時変化の測定結果
Fig. 4. Time dependence of length and area of carbon path.

の約1/2, すなわち炭化路の長さが約 25 mm に達するまではほぼ均一な太さで進展し, その後は炭化路先端部分の面積が急増している様子が認められる。

更に, EX では一度形成された炭化路は消失することは少なく常に炭化こん跡として存在していることが確認される。これに対して, PC では時間の経過に伴って炭化こん跡の一部に消失あるいは減少の様子が明りょうに観察された。例えば, 図 3(b)中の○印で囲った部分に存在した炭化物が, 時間の経過に伴って

消失あるいは減少していることが認められる。これは PC では試験液の流下に伴って, 炭化物の流失が生じていることを意味している。このように, 画像計測システムによって得られた二値化画像から, 炭化路進展時における炭化路の状況の時間的推移を定性的に判読することが可能である。

〈4・2〉 炭化路の長さおよび炭化面積の経時変化

炭化路の進展および炭化面積の経時変化を画像データより計測した結果を図 4 に示す。EX, PC ともに

炭化路の伸びが電極間ギャップのほぼ1/2 (25 mm)に達すると急増する様子が認められる。また、炭化路の進展と面積の時間的な推移には対応が認められるなど、画像データから炭化路の伸び長さや面積の時間的な推移を定量的に把握することが可能である。

次に、炭化路の伸び長さや面積の関係を求めた結果を図5に示す。炭化路の進展に伴って、炭化面積も増加することが認められる。しかしながら、トラッキング破壊に至る直前における炭化面積の電圧依存性はEXとPCで異なる様子が認められる。そこでトラッキング破壊直前(炭化路の長さが45 mmに達した時

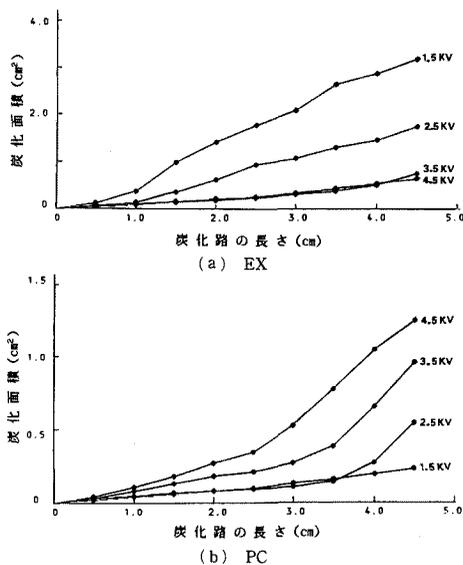


図5 炭化路の長さや炭化面積の関係
Fig. 5. Relation between length and area of carbon path.

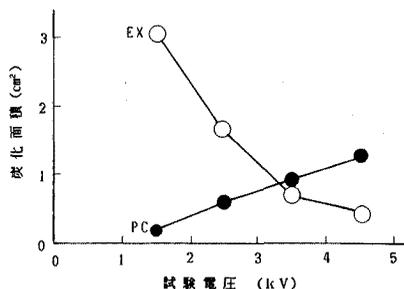


図6 トラッキング破壊直前の炭化面積の電圧依存性
Fig. 6. Relation between area of carbon path just before tracking breakdown and test voltage.

点)における炭化路の面積や印加電圧との関係を求めた結果を図6に示す。

同図に見られるように、PCの炭化面積は印加電圧の上昇に伴って増加する、いわゆる正の電圧依存性を有するが、EXでは逆に減少する傾向(負の電圧依存性)が認められる。この結果は、炭化路の進展プロセス(炭化進展起点の発生からトラッキング破壊まで⁽⁶⁾⁽⁸⁾)における炭化路の伸び、および面積の推移が、放電の発生状態に依存している可能性を示唆するものであろう。

〈4.3〉 画像計測と光パルス計測結果との対応

炭化路の進展状態は放電、特にシンチレーションの発生と関連している。そこで、放電発生時の経時変化を光パルス計測法⁽⁶⁾を用いて測定した。光パルス測定用の受光部の配置を図7に示す。使用した光センサは700~1,140 nm (ピーク波長: 960 nm)に感度を有するシリコンフォトダイオードである。なお、光パルスの測定位置は接地電極近傍(S-1)および接地電極と高圧電極のほぼ中間位置(S-2)の2箇所とした。

光パルス累積数の経時変化の測定例を図8に示す。なお、図8中に示された過程I、IIおよびIIIはそれぞれ、シンチレーション発生過程、炭化進展起点の発生過程および炭化進展過程を意味している⁽⁶⁾⁽⁸⁾。

EXの光パルス累積数はS-1、すなわち接地電極近傍のほうが常に多い値を示すことが観測される。このことは、炭化路の伸びの程度にかかわらずシンチレーションの発生あるいは赤熱現象⁽⁶⁾⁽⁸⁾が接地電極近傍で継続的に生じていることを示唆している。これに対して、PCでは炭化進展開始直後はS-1の光パルス累積数が多いものの、所定の時間が経過すると逆にS-2の累積数が増える様子が認められる。このことは炭

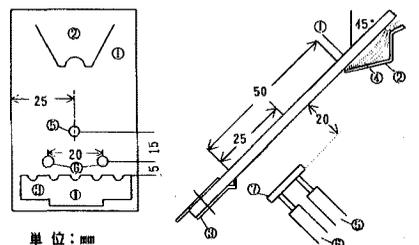


図7 電極と光センサの受光部の配置
Fig. 7. Arrangement of the electrodes and the optical measurement system.

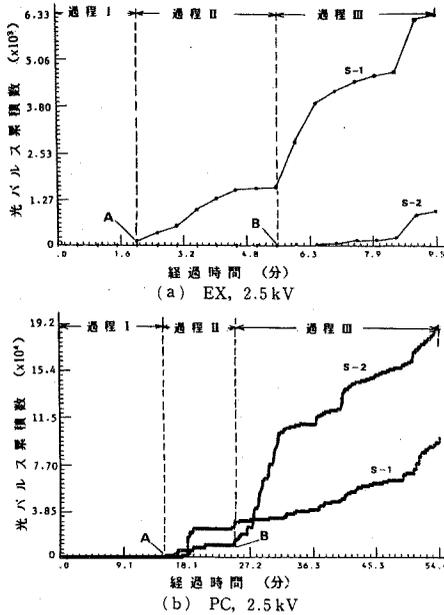


図 8 光パルス累積数の測定結果例
Fig. 8. Accumulated number curve of the light pulse.

化路がある程度進展すると、主に炭化路先端でシンチレーションが集中的に発生していることを示すものである。

このように、炭化路の高圧電極方向への進展およびシンチレーションの発生状態および発生位置は EX と PC では異なっている。

そこで、破壊直前における放電の発生数の光センサの計測位置による相違を検討するため、S-1 と S-2 の光パルス累積数の比 R を次式より求めた。

$$R = TN[S-1]/TN[S-2]$$

ここで、 $TN[S-1]$ および $TN[S-2]$ はそれぞれ S-1 と S-2 のトラッキング破壊直前の光パルスの累積数を示している。累積数の比 R と印加電圧の関係を求めた結果を図 9 に示す。EX の累積数の比 R は各電圧とも 1 以上の値となるのに対して、PC の場合には常に 1 以下の値となる。

累積数の比 R の値が 1 以上では、接地電極近傍で発生する見掛けの放電総数が電極中央部で発生する放電数を上回っていることを意味し、逆に比 R が 1 以下では電極中央部でより多くの放電が発生することを意味する。一方、累積数の比 R の電圧依存性は EX と PC の両試料間で異なり、EX では負の、PC では

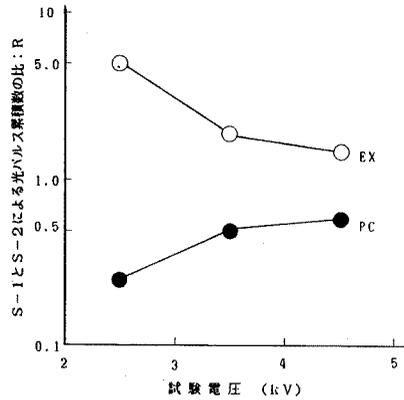


図 9 S-1 と S-2 による光パルス累積数の比 R の電圧依存性
Fig. 9. Ratio of accumulated number between S-1 and S-2.

正の電圧依存性を示している。

更に、図 6 と図 9 より炭化面積と光パルス累積数の比 R の電圧依存性には同一の特徴が確認される。すなわち、EX では破壊直前の炭化路の面積および比 R はいずれも負の電圧依存性を示すのに対して、PC では正の電圧依存性を示す。炭化路の二値化画像の観察結果によると EX では炭化物の消失が少なく、PC では消失しやすいことを確認している。このことから、析出する炭化物の性情および付着状況が試料によって異なり、これが炭化面積や光パルス累積数の比 R の電圧依存性に相違をもたらしているものと考えられる。

以上の結果より、本論文で新たに提案した画像計測法は、材料の炭化物の析出状況、炭化路の進展長さおよび面積の時間的推移など、試料の炭化特性の情報を知らうえで有効な方法になりうるものと考えられる。

5. あとがき

本論文ではトラッキング劣化による炭化路の進展状況を定量的・経時的に計測する方法として、新たに画像計測法を提案し、画像データの基礎特性について検討を加えた。また、画像計測法と光パルス計測法によって得られる結果の対応性についても検討を加えた。本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 画像計測法によって得られた炭化路の二値化画像から、炭化路の状況の時間的推移を定性的に判読することが可能である。

(2) 画像データから炭化路の伸び長さと面積の経時的推移を定量的に把握することが可能である。ま

た、画像データから求めた炭化路の長さや炭化面積の時間的な推移には対応性が認められることを明らかにした。

(3) PCの炭化面積は試験電圧に伴って増加する、正の電圧依存性を有するが、EXでは逆に減少する傾向(負の電圧依存性)を示すことが明らかとなった。

(4) 異なる計測位置で得られた光パルス累積数の比 R と炭化面積の電圧依存性を比較すると、両者は同一の特性を示すことが明らかとなった。

(5) 炭化路の二値化画像の観察結果から、PCでは一度析出した炭化物は炭化路の進展に伴って流失しやすく、EXでは流失しにくいことが確認された。このことから、析出する炭化物の付着状況が試料によって異なり、これが炭化路の面積あるいは光パルス累積数の比 R の電圧特性に相違をもたらす原因と考察した。

(6) 以上の結果より、本論文で提案した画像計測法は試料固有の炭化劣化の状況および経時変化を把握するうえで有効な方法となりうるということが明らかとなった。

最後に、本研究に対し御協力下された本学電気工学科鈴木雅史助手、高橋重雄技官および久本基(現、三菱電機)に感謝する。試料を提供下された日本チバガイギー(株)にお礼申し上げる。本研究は文部省科学研究費(奨励研究)の援助の下に行ったことを付記し謝意を表す。(平成2年12月17日受付)

文 献

- (1) 「IEC Publication 112による絶縁材料の耐トラッキング性試験方法」, 電気学会技報(II部), 115 (昭56)
- (2) A. J. Day & D. J. Stonard: "Creepage and Clearance Distance in Electrical Equipment for Shipboard Use", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-12, 191 (1977)
- (3) M. J. Weller, "Variation in the Results of Inclined Plane Tracking Test", IEE Conf. Publ., No. 177, 282 (1979)
- (4) H. Suhr: "Probleme der Kriechstromfestigkeit: Untersuchungen über den Einfluss der Prüflösung", *Zeitschrift für Werkstoff-technik*, 5, 437 (1974)
- (5) 鴨沢・吉村・西田・能登・舂井: 「エポキシ樹脂のトラッキング劣化に及ぼす紫外線の影響」, 電学論A, 108, 397 (昭63-9)
- (6) 西田・吉村・鴨沢・下津・能登: 「試験液の表面張力がトラッキング劣化に及ぼす影響」, 同上A, 107, 431 (昭62-9)
- (7) 西田・吉村・能登: 「有機絶縁材料表面のトラッキング劣化過程で発生する放電の光パルス計測」, 同上A, 104, 41 (昭59-1)
- (8) M. Nishida, N. Yoshimura & F. Noto: "Light Sensors As Detectors of Tracking Deterioration", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-22, 509 (1987)
- (9) "Test method for evaluating resistance to tracking and erosion of electrical insulating materials used under severe ambient conditions", IEC Publ. 587, First Ed. (1977)
- (10) IEC SC 15A (Central Office) 44, Draft for an amendment to IEC publication 587 (1981)



西 田 眞 (正員)

昭和27年1月18日生。49年3月秋田大学鉱山学部電気工学科卒業。同年4月トヨタ自動車工業(株)入社。50年4月秋田大学鉱山学部電気工学科助手, 62年10月同講師, 現在に至る。工学博士。主として, 高分子絶縁材料表面劣化に関連した計測およびリモートセンシングデータの画像処理に関する研究に従事。63年11月~平成元年11月クラークソン大学客員研究員。59年電気学会論文賞, 63年静電気学会論文賞受賞。応用物理学会, リモートセンシング学会, 写真測量学会, 静電気学会, IEEE会員。



吉 村 昇 (正員)

昭和18年11月5日生。44年3月秋田大学大学院修士課程電気工学専攻修了。同年4月同大学鉱山学部電気工学科助手, 講師, 助教授を経て, 58年4月同教授, 現在に至る。工学博士。電気・電子材料, 特に絶縁材料の劣化現象と絶縁破壊, 誘電体および半導体セラミックスの電気特性および電磁気工学の生物工学への応用に関する研究に従事。53年1月~54年8月クラークソン工科大学客員研究員。平成元年クラークソン大学客員教授。59年電気学会論文賞, 61年, 63年静電気学会論文賞受賞。平成2年日本素材物性学会会長。電子情報通信学会, 応用物理学会, 静電気学会, IEEE会員。



能 登 文 敏 (正員)

大正11年1月5日生。昭和19年9月東京工業大学電気工学科卒業。同年9月秋田大学専門学校助教授, 22年8月同教授。学生改革に伴い26年4月秋田大学助教授, 38年4月同教授, 62年3月定年退官。同年4月八戸工業大学教授(一般教育部長)となり, 現在に至る。工学博士。この間, 秋田大学学生部長を2期, 付属図書館長を1期および学部長を2期併任。主として, 絶縁材料の耐放電性, 耐電界性およびその試験法に関する研究に従事。現在, 電気規格調査会, CIGRE国内委員会SC15分科会委員。59年電気学会論文賞, 61年, 63年静電気学会論文賞, 63年静電気学会功績賞受賞。応用物理学会, 計測自動制御学会, 太陽エネルギー学会会員。IEEEフェロー。