平板電極を用いた PEA 法による CV ケーブル中の空間電荷分布測定装置

学生員 室 中 嗣 也 (武蔵工大)

非会員 新 谷 伸 行 (武蔵工大)

正 員 田 中 康 寛 (武蔵工大)

正 員 高 田 達 雄 (武蔵工大)

正 員 丸 山 悟 (古河電工)

正 員 武 藤 秀 二 (古河電工)

Measurement System of Space Charge Distribution in CV Cable using PEA Method with Flat Electrode

Tsuguya Muronaka, Student Member, Nobuyuki Niiya, Non-Member,

Yasuhiro Tanaka, Member, Tatsuo Takada, Member(Musashi Institute of Technology),

Satoru Maruyama, Member, and Hideji Muto, Member(The Furukawa Electric Co.,LTD)

The Pulsed Electro-Acoustic (PEA) method has been used for the measurement of space charge distribution in coaxial cables. When the PEA method are applied to the measurements of cables with various radius, however, it is necessary to make the curved surface electrode which fit with each outer radius of various cables. Therefore, we attempt to develop the PEA system with a flat electrode instead of curved surface electrode. To develop the new system, an analysis of optimum size of piezo-electric sensor is carried out. Furthermore, a structural improvement is adopted to reduce a noise level. Using the newly developed system, the PEA method become to be applicable to the any kind of cables with various radius.

キーワード：パルス静電応力法、平板電極

1. はじめに

直流高電圧用 CV ケーブルの開発にあたり、直流高電圧の印加時にケーブル絶縁体中に蓄積する空間電荷分布について検討する必要がある。これまで、著者らはパルス静電応力法(以下 PEA 法と略す)を用いてケーブル絶縁体中に蓄積された空間電荷分布を測定する技術を開発してきた[1,2,3]。

PEA 法は空間電荷が存在する試料にパルス高電圧を印加し、空間電荷にパルス静電応力による圧力波を発生させ、この空間電荷情報を含んだ圧力波を圧電素子により検出する方法である[4]。PEA 法をケーブルのような円筒状試料に用いた時、圧力波は放射状に伝搬するため、伝搬媒体である電極も扇型形状に加工して用いた[1,2,3]。

しかし、実際の測定では外径の異なる種々電圧レベルのケーブルを測定するため、従来の測定装置では、その都度ケーブル外径に適した扇型電極を設計、製作し交換する必要があった。そこで、著者らは、検出電極を交換することなく様々な外径のケーブルでも測定可能な平板電極型の空間電荷分布測定装置を開発した。

本論文では、まず、平板電極型に改良するために、圧力波検出の圧電素子の幅と出力信号の大きさの関係を検討した。さらに、開発した平板電極型空間電荷分布測定装置により、実ケーブルでの電荷分布の測定が可能であることを確認した。

2. 平板型電極による同軸ケーブル中の空間電荷分布測定

＜2.1＞扇型と平板型測定装置の比較 従来の扇型電極を使用した同軸ケーブル中の空間電荷分布測定装置の概要図を図1に、今回開発した平板型電極を用いた空間電荷分布測定装置の概要図を図2に示す。従来の測定装置は下部電極に図1の扇型電極を使用していたために、外径の異なるケーブルを測定する際、ケーブルの外径に適した扇型電極をそれぞれ製作し、その都度交換する必要があった。また、扇型電極の製作には、形状が複雑なため製作コストが高く、製作日数を要する上、扇型電極を交換するごとに圧電センサのセッティング、検出部の評価を行う必要があり煩雑であった。さらに、検出された信号を増幅するアンプがシールドボックスの外に設置されていたため、ノイズの

影響が非常に大きかった。今回開発した平板型の測定装置は、下部電極に平板型電極を使用したため、一つの平板型電極で外径の異なる様々なケーブルの測定が可能となっている。

また、従来型ではアンプをシールドボックスに設置していたが、今回は外部雑音を軽減するためにアンプをシールドボックス内に二つ(ANALOG MODULES 社製 352A, 利得:40dB, TRONTECH 社製 W500K, 利得:30dB)内蔵した。その結果、S/N 比を約 10dB 改善することができた。

図1 従来型ケーブル用空間電荷分布測定装置
Fig.1 Ordinary PEA system for cable shape sample.

図2 平板電極型ケーブル用空間電荷分布測定装置
Fig. 2 Improved PEA system for cable shape sample with flat electrode.

＜2.2＞圧力波検出用 PVDF サイズの選択 扇型電極から平板型電極に改良する際、考慮しなければならないのは圧力波検出の圧電素子 PVDF の幅と信号の大きさの関係である。ここで、図3に示すモデル図により、扇型電極と平板型電極の音波検出用 PVDF の幅の選択方法の違いについて説明する。

ここでケーブルの内径を a 、外径を b 、電極の厚さを c 、圧力波を $P(t)$ 、扇型電極におけるケーブルと電極の接触する面の中心角を θ_0 、平板電極におけるケーブルと電極の接触する面の中心角を θ_h とする。なお、平板電極の場合、理想的にはケーブルと電極とは線接触するはずであるが、実際にはケーブルの締め付け荷重のためなどにより、数 mm 幅で面接触している。その接触幅に対応する中心角をここでは θ_h とした。また、圧力波 $P(t)$ の伝搬してくる領域の幅を h 、PVDF の幅を g 、長さを l 、厚さを d とする。さらに PVDF からの誘起信号をリード線に接続するために、信号を取り出す部分が必要となり、その面積を S とする。

まず、扇型電極では、電極とケーブルが接触する面の中心角 θ_0 が決まると、PVDF の幅を $\theta(b+c)$ と等しくすれば、伝搬してくる圧力波 $P(t)$ をすべて検出することができるため、最大の信号電圧を得ることができる。

これに対して平板電極では、ケーブルと電極の接触する面積が小さくなり、また、接触面積が不明であるため、圧力波 $P(t)$ の伝搬してくる領域の幅 h を、求めることは困難である。従って、平板電極を使用する場合は、圧力波 $P(t)$ の伝搬してくる領域の幅 h と PVDF の幅 g 、さらに、出力信号の大きさとの関係について検討し、PVDF の最適な幅を決める必要がある。そこで、PVDF の幅と出力信号の大きさとの関係について行った検討について以下に述べる。

図3 PVDF 形状のモデル図
Fig.3 Schematic model of the size of PVDF film.

検討で使用したモデル図は図3であり、ここで、圧力波 $P(t)$ が PVDF を通過することにより PVDF に誘起する電荷量を $Q(t)$ 、アンプで出力される信号電圧を $V(t)$ とする。

まず、PVDF の幅 g が圧力波 $P(t)$ の伝搬してくる領域の幅 h よりも小さい時 ($g \leq h$)、電荷量 $Q(t)$ は(1)式で表される。

$$Q(t) = d_{33} P(t) gl \quad (1)$$

$$Q(t) = d_{33} P(t) hl \quad (2)$$

なお、 d_{33} は PVDF の圧電定数である。このとき、PVDF の静電容量 C_{PVDF} は(3)式で表される。

$$C_{PVDF} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{(gl + S)}{d} \quad (3)$$

従って、実際に出力される信号電圧 $V(t)$ は、PVDF の幅 g が圧力波伝搬領域 h より小さい時 ($g \leq h$) は、(4)式となり、PVDF の幅 g が圧力波伝搬領域 h よりも大きい時 ($h \leq g$) は、(5)式のようにそれぞれ与えられる。

$$V(t) = \frac{Q(t)}{C_{PVDF}} = \frac{gl}{gl + S} \cdot \frac{d_{33}d}{\epsilon} P(t) \quad (4)$$

$$V(t) = \frac{Q(t)}{C_{PVDF}} = \frac{hl}{gl + S} \cdot \frac{d_{33}d}{\epsilon} P(t) \quad (5)$$

(4)式と(5)式の関係を簡単な図に表したものを図4に示す。

図4 出力信号と PVDF の幅の関係

Fig.4 Relationship of output signal and width of PVDF

図4より、実際の出力信号 $V(t)$ と PVDF の幅 g の関係は、圧力波 $P(t)$ の伝搬してくる領域の幅 h と PVDF の幅 g が等しいとき ($g = h$) に、出力信号電圧が最大となる。従って、平板型電極においても扇型電極と同様に伝搬してくる圧力波 $P(t)$ をすべて検出できるように PVDF の幅 g を圧力波 $P(t)$ の伝搬してくる領域の幅 h と等しくすればよい。

しかしながら、実際に圧力波 $P(t)$ の伝搬してくる領域の幅 h を厳密に求めることは困難であるため、今回開発した平板電極型空間電荷分布測定装置を使用し実際に測定を行い、PVDF の最適なサイズの検討を行った。

<2.3> PVDF センサ幅の決定実験 測定に使用したケーブル試料は、6.6kV、22kV 及び 66kV 級の 3 種類の古河電工社製 XLPE ケーブルである。PVDF の最適なサイズの検討を行うため、図5に示すように各ケーブルにつき4種類の幅の PVDF を用意し測定を行った。

なお、PVDF の奥行き方向の長さは 20mm 一定である。ケーブル形状及び測定条件を表1に示す。

表1 測定条件

Table 1. Measurement condition

ケーブル	6.6kV級	22kV級	66kV級
絶縁厚さ (b-a) [mm]	3.0	6.0	9.0
ケーブル外径 b [mm]	20	29	36
印加電圧 Vdc [kV]	-40	-40	-40
パルス電圧 Vp [kV]	-4	-4	-8
パルス幅 τ [nsec]	50	50	100
絶縁厚さの時間換算値 [μ sec]	1.5	3.0	4.5

図5 測定に使用した PVDF の幅

Fig.5 The width of PVDF film.

3. 実験結果及び検討

<3.1> センサ幅の決定 66kV 級 XLPE ケーブルの圧力波検出用 PVDF の幅 g を、変化させた際の出力信号電圧値の比較を図6に示す。図6中において、a の点線上の出力信号は内部導体側の信号であり、芯線に-40kV の直流高電圧を印加しているため、内部導体側の出力信号の極性は負極性となる。また、b の点線上の出力信号は外部導体側の信号であり、極性は正極性となる。なお、b 点の右側に現れる信号は、音響インピーダンスの不整合やアンプの特性により生じる装置の特性上の擾乱であると考えられる。しかしこの擾乱はデコンボリューション処理を行うことによって取り除くことができる[5]。

図6 PVDFの幅変化時における出力信号の比較
(66kV級XLPEケーブル)

Fig.6 Comparison of output signal using various size of PVDF in 66kV-class-cable

図7 各ケーブル試料の陽極側出力電圧値の割合

Fig.7 Rate of output signal of anode side in each cable

ここで、外部導体側の出力信号電圧の最大値を基準として規格化した図を図7に示す。なお、66kV級XLPEケーブルだけでなく、6.6kV級XLPEケーブル、22kV級XLPEケーブルについても同様の処理を行っている。

図6、図7より、PVDFの幅を変化させることにより、6.6kV級XLPEケーブルでは幅6mmのPVDFで、22kV級XLPEケーブルでは幅7mmのPVDFで、66kV級XLPEケーブルでは幅9mmのPVDFで出力信号の最大値を得ることが確認できた。また、図7は図4の出力信号電圧の大きさとPVDFの幅の関係を表した図の傾向と一致している。

以上のことから、圧力波の伝搬してくる領域の幅 h を厳密に求めることは難しいが、実際に測定を行うことで各ケーブル試料において最大の信号電圧を出力できるPVDFの幅を求めることができた。

<3.2> 位置分解能の検討 この実験結果から求めたPVDFの幅を基に、各サイズのケーブルで発生した圧力波が、PVDFセンサに到達する際に生じる時間差についての検討を行う。ケーブル絶縁体中で発生した圧力波は放射状に伝搬し、その圧力波を幅 g のPVDFセンサで検出するとき、ケーブルの中心線を伝搬してくる圧力波と、中心角 θ_0 で広がってPVDFセンサの端に到達する圧力波との間には時間差が生じてしまう。この時間差は、次のようにして求めた。内部導体面($r=a$)の誘導電荷から発生した圧力波が一番大きい時間差を生ずるので、この圧力波がPVDFセンサの中心に到達する時間(最短時間)と、PVDFセンサの端に到達する時間(最長時間)との差を求め、時間差とし検討を行った。

実験結果から時間差を求めると6.6kV級ケーブルでは22.6nsec、22kV級ケーブルでは26.7nsec、66kV級ケーブルでは41.5nsecとなる。これらの時間差は、各ケーブルにおける絶縁厚さの時間換算値(表1)の約1%であるため、測定誤差として十分見なすことができると考えられ、以上の実験結果及び検討から、各ケーブルにおけるPVDFの最適なサイズを求めることができた。

4. まとめ

本論文では、平板電極を有するパルス静電応力(PEA)法測定装置により、CVケーブルのような円筒状試料中の空間電荷分布が測定可能であることを示した。これにより扇型電極においての幾つかの問題点を改善し、より簡単に、様々な外径を有するケーブルの測定が可能となった。

また、この装置開発において最適なPVDFのサイズの検討を行った結果、3.5~9.0mmの絶縁厚のケーブルでは6~9mm幅の圧電素子(PVDF)を用いることで高出力が得られることを明らかにした。

今後、平板型電極の利点を生かし、圧電センサの交換なしに測定を行うためには、20~36mm程度の外径を有するケーブルにおいては、圧電素子の幅を6~9mm程度に設定することでケーブル絶縁体中の空間電荷分布測定が可能になると思われる。しかしながら、平板型電極を使用すると、

ケーブル状試料が変形し電界分布が微少ながら歪められたり、面接触することにより圧力波がセンサに到達する時間に差が生じたりすると考えられる。これらは誤差と見なせるとしても、厳密な測定を行う際は、従来の扇型電極を使用した方が良いと考えられる。なお、この研究の一部は文部省科学研究費（No.08650390）を得て行われた。

（平成9年4月23日受付，平成9年10月1日再受付）

文献

- [1] 福永、宮田、杉森、高田：「パルス静電応力法によるケーブル絶縁体中の空間電荷分布測定」、電学論A, 110巻9号, pp. 647-648 (1990)
- [2] M.Yasuda, M.Itou and T.Takada "Measurement of Charge Distributions in Coaxial Cable Using the Pulsed Electroacoustic Method", JJAP, Vol.30(1991)Supplement 30-1, pp.71-73
- [3] R.Liu, T.Takada and N.Takasu: " Pulsed Electro-acoustic Method for Measurement of Space Charge Distribution in Power Cables under both DC and AC Electric Field", J. Phys. D, Appl.Phys., pp986-993, Vol.26(1993)
- [4] Y.Li, *et al.*, " Pulsed Electroacoustic Method for Measurement of Charge Accumulation in Solid Dielectrics", IEEE Trans. DEI., 1, pp.188-195,1994
- [5] 前野、福永、田中、高田：「高分解能 PEA 空間電荷測定装置における信号処理」、電学論 A, 115 巻 5 号, pp405-410 (1995)

室中 嗣也（学生員） 1972年9月12日生まれ。1995年3月武蔵工業大学機械工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科生産機械工学専攻修士課程入学、現在に至る。主として、固体誘電体内部の電荷分布測定法に関する研究に従事。

新谷 伸行（非会員） 1973年10月19日生まれ。1992年4月武蔵工業大学工学部機械工学科入学、現在に至る。主として、固体誘電体内部の電荷分布測定法に関する研究に従事。

田中 康寛（正員） 1961年9月10日生まれ。91年3月早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。90年4月同大学理工学部助手嘱任。92年4月武蔵工業大学機械工学科専任講師着任。工学博士。有機高分子材料の高電界特性、特に空間電荷分布の研究に従事。90年電気学会論文発表賞受賞。

高田 達雄（正員） 1939年8月8日生まれ。63年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。66年東北大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻修士課程修了。67年4月武蔵工業大学講師、74年4月同助教授、86年同教授。工学博士。81年9月～83年2月アメリカ MIT 客員研究員。主として高分子絶縁体中の帯電現象と空間電荷測定技術の研究に従事。74年、81年、90年電気学会論文賞受賞。96年電気学会進歩賞受賞。IEEE 会員。

武藤 秀二（正員） 1958年5月24日生まれ。1985年3月横浜国立大学大学院工学研究科電気工学科専攻卒業。同年4月古河電気工業株式会社入社。現在、同社千葉研究所に勤務。1988年から1年半 NRC 客員研究員として、プラスチックの劣化現象の研究に従事。主として高電圧プラスチック絶縁ケーブルの研究開発に従事。

丸山 悟（正員） 1967年3月16日生まれ。1994年3月明治大学大学院博士後期課程修了。1995年4月古河電気工業株式会社入社。現在、同社千葉研究所勤務。主に、高電圧プラスチック絶縁ケーブルの電気特性に関する研究に従事。工学博士。