



Title	直流ケーブル絶縁紙の空間電荷測定
Author(s)	仲川, 隆
Citation	電気材料技術雑誌. 2000, 9(3), p. 19-25
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/81635
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

直流ケーブル絶縁紙の空間電荷測定

仲川 隆

関西電力株式会社 総合技術研究所
〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20

Space Charge Measurement in Oil Impregnated Paper of DC Cable

Takashi NAKAGAWA

Technical Research Center, The Kansai Electric Power Co., Inc
3-11-20 Nakouji, Amagasaki, Hyogo 661-0974, Japan

ABSTRACT

We measured behavior of space charge when we applied voltage on oil impregnated PPLP for DC submarine cables. The PPLP is composed of a sheet of polypropylene sandwiched between two thin sheets of kraft paper. While it is imposed with a DC voltage, we assured gradual accumulation of charge on surface of the polypropylene sheet, which has a high resistivity. Analysis of electric field intensity based on the measurement result revealed that an intense electric field is born by polypropylene under the steady state with a DC voltage. Rate of this charge accumulation is higher with PPLP impregnated with insulation oil for OF cables, whose viscosity is low, than with PPLP impregnated with MI cables, whose viscosity is high. The difference is attributable to ion mobility rate in insulation oil.

キーワード：直流ケーブル，OFケーブル，油浸絶縁紙，半合成紙，空間電荷

1. まえがき

本州と四国間の電力連系を目的に、紀伊水道を直流海底ケーブルで結ぶ工事が進められ、平成12年に運開した。今後、この直流線路を長期にわたり高信頼度で運用していくためにケーブルの絶縁特性を把握しておくことは重要である。近年、パルス静電応力法による空間電荷測定技術の発達により、高い位置分解能で絶縁材内部の電荷分布を測定することが可能となった⁽¹⁾。今回、ケーブルの絶縁特性の変化を把握する手法のひとつとして油浸クラフト紙、油浸半合成紙（PPLP）内部

の空間電荷挙動を測定したのでその結果について報告する。

2. 直流海底ケーブルの概要

本州と四国間の電力連系に使用される海底ケーブルは、直流500kV、送電容量 2, 800MWの大容量ケーブルである。従来、直流海底ケーブルには高粘度絶縁油を含浸させたソリッドケーブルが採用されるケースが多かったが⁽²⁾大容量化が容易で信頼度が高いOFケーブルが採用された。構造を図1に示す。

この海底ケーブルは絶縁厚を低減するために従来のクラフト紙よりも絶縁強度が高い半合成紙 (PPLP) を主絶縁に採用し、半合成紙の正極性インパルス特性改善のため半合成紙層内側に0.5mmのクラフト紙層が設けられている。また、半合成紙層外側にもストレス緩和、ケーブル布設時の機械的保護の目的で2.5mmのクラフト紙層が設けられている。絶縁油はソフトアルキルベンゼンである。ケーブル絶縁体の構成を図2に示す。

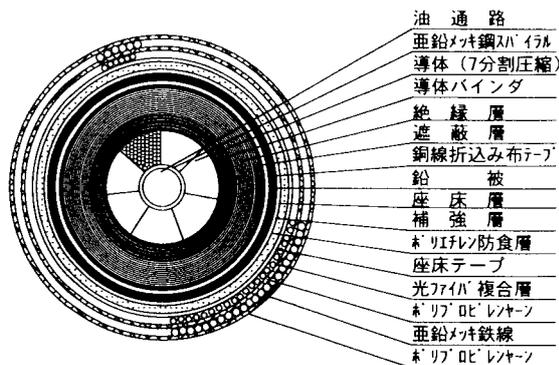


図1 直流海底ケーブルの構造
 Fig.1 : Cross-section of the Submarine DC Cable

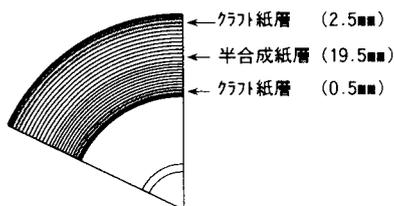


図2 絶縁体の構成
 Fig.2 : Construction of the Insulator

半合成紙は図3に示すとおり、2枚の薄いクラフト紙でポリプロピレンを挟み込んだような構造であり、その優れた絶縁強度、低誘電損失の特性から、交流用送電ケーブルの絶縁材として使用実績がある。

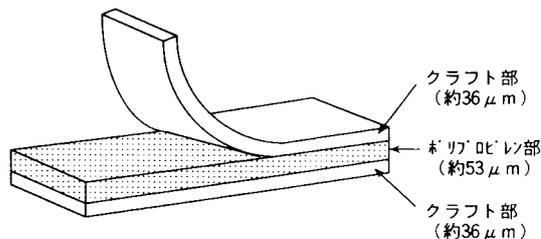


図3 半合成紙の構造
 Fig.3 : Construction of the PPLP

3. 試験方法

試料として公称厚さ125μmの半合成紙と100μmのクラフト紙を用意した。それに含浸させる絶縁油にはソフトアルキルベンゼンと、比較試料としてソリッドケーブルに使用される高粘度絶縁油を用い、気圧-0.1MPa、温度110℃の条件で24時間、真空乾燥、浸油処理をおこなった。

空間電荷測定はパルス静電応力法による高位置分解能測定装置⁽¹⁾を用いた。当装置で、半合成紙に直流電圧を印加したときに測定される電荷分布のイメージを図4に示す。

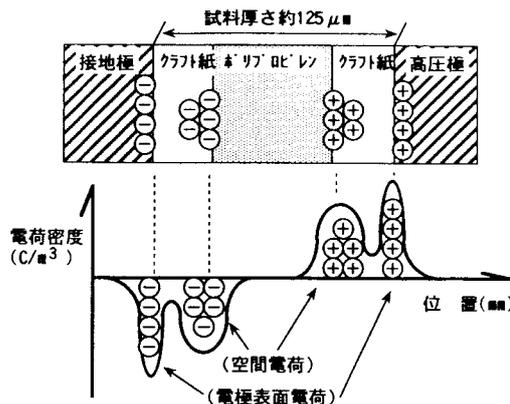


図4 半合成紙内の電荷分布イメージ
 Fig.4 : Image of charge distribution in PPLP

測定温度は室温である。試料に加える電圧は、直流海底ケーブルが無負荷の時に半合成紙層に加わる電界を考慮して直流30kV/mmとした。半合成紙は前述のとおり交流系統での使用実績があることから、電圧種別による空間電荷挙動の相違を比較するため、一部、交流電圧印加時の測定も実施した。測定構成を図5に示す。

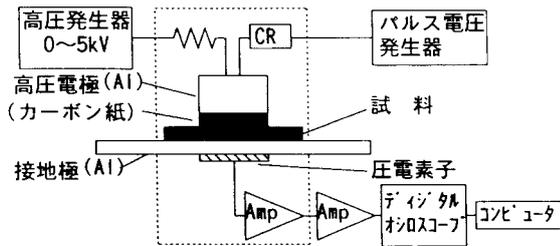


図5 測定装置の構成
Fig.5 : Setup for Measurement

4. 測定結果および考察

4-3 絶縁紙内の空間電荷挙動

ソフトアルキルベンゼンを含浸させた半合成紙に直流電圧を印加したときの60分間の空間電荷挙動と定常状態の状況を図6に示す。

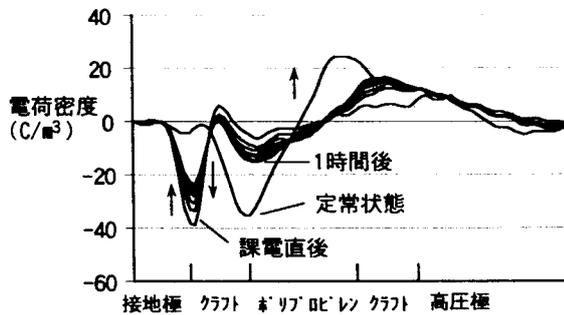


図6 空間電荷分布の経時変化
(ソフトアルキルベンゼン含浸半合成紙)
Fig.6 : Change with Time of Space Charge Distribution
(soft alkylbenzene impregnated PPLP)

本来、接地極と高圧極上において点对称な電荷分布が想像できるが、パルス静電応力法は試料に印加する測定パルス電圧と、試料中の電荷との静電気応力によって発生する音波が試料内部を伝搬して下部（接地）電極に達したものを圧電素子で観測するといった原理上⁽³⁾⁽⁴⁾、高圧極側の試料内位置分解能が接地極側に比べて低下しており、高圧極（正極）界面近傍における現象は明確ではない。よって、ここではおもに接地極側での現象によって考察をすすめることとする。

電圧印加から時間とともに接地極ークラフト紙部の表面電荷が減少し、クラフト紙部ーポリプロピレン部界面の電荷が増加していく状況が見られる。この現象は電圧印加直後は

クラフト紙部、ポリプロピレン部の誘電率に依存した電荷分布であるが、時間の経過とともに主としてそれらの抵抗率に依存した電荷分布に移行することによる。なお、定常状態に至るまでの時間は約20時間であった。

定常状態で高圧極を接地した直後の測定結果を、電圧印加直後、定常状態の結果とあわせて図7に示す。高圧極を接地するとクラフト紙部ーポリプロピレン部界面の電荷に対応する誘導電荷が接地極表面に現われる状況が見られた。

参考までにソフトアルキルベンゼンを含浸させた半合成紙に60Hz 交流電圧を印加したときの測定例を図8に示す。交流電圧印加時は誘電率に依存した電荷分布であり、直流電圧印加直後の測定結果と同様である。半合成紙は直流絶縁特性、交流絶縁特性ともに優れるが交流絶縁に使用する場合と直流絶縁材と

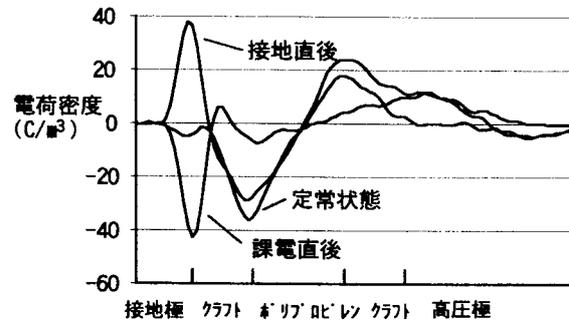


図7 電極接地時の空間電荷分布
(ソフトアルキルベンゼン含浸半合成紙)
Fig.7 : Space Charge Distribution when electrode is grounded
(soft alkylbenzene impregnated PPLP)

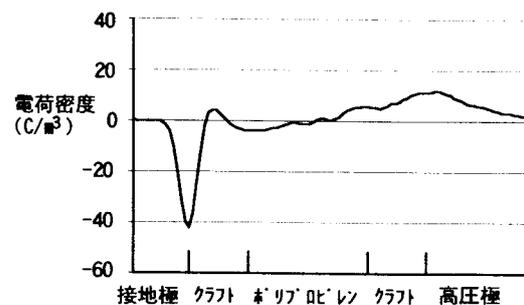


図8 交流電圧印加時の空間電荷分布
(ソフトアルキルベンゼン含浸半合成紙)
Fig.8 : Space Charge Distribution when AC voltage applied
(soft alkylbenzene impregnated PPLP)

して使用する場合とでは、その内部の電荷分布が大きく異なる。

次に公称厚さ $100\mu\text{m}$ のクラフト紙と半合成紙を1枚ずつ重ねた状態で空間電荷測定をおこなった。これは、ケーブル絶縁体(図2)のクラフト紙層と半合成紙層との界面を模擬した測定である。定常状態では印加電圧の大部分を半合成紙のポリプロピレン部が分担することが予想されたので、直流印加電圧は半合成紙1枚の測定と同じ電圧とした。測定結果を図9に示す。この測定結果からも定常状態では半合成紙のクラフト紙部-ポリプロピレン部界面に多量の電荷が蓄積することがわかる。定常状態に至った後に高压極を接地した直後の測定結果を電圧印加直後、定常状態の結果とあわせて図10に示す。

高压極を接地すると半合成紙単独での測定結果(図6)と同様、クラフト紙部-ポリプ

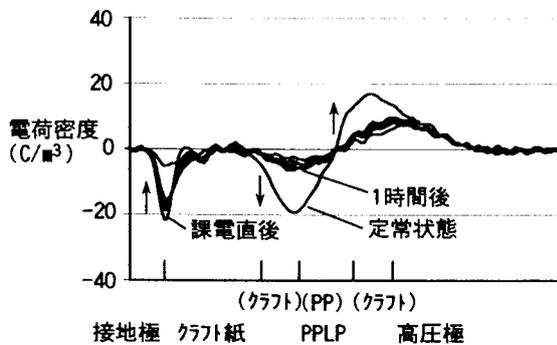


図9 空間電荷分布の経時変化
 (ソフトアルキルベンゼン含浸半合成紙, クラフト紙)
 Fig.9 : Change with Time of Space Charge Distribution
 (Soft alkylbenzene impregnated PPLP and Kraft Paper)

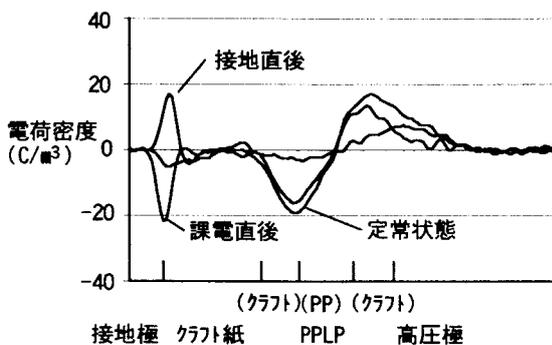


図10 電極接地時の空間電荷分布
 (ソフトアルキルベンゼン含浸半合成紙, クラフト紙)
 Fig.10 : Space Charge Distribution when electrode is grounded
 (soft alkylbenzene impregnated PPLP and Kraft Paper)

ロピレン部界面の電荷に対応する誘導電荷が接地極表面に現われる状況が見られた。このクラフト紙と半合成紙を1枚ずつ重ねた測定結果では、公称厚さ $100\mu\text{m}$ のクラフト紙と半合成紙界面において電荷の蓄積は認められず、クラフト紙と半合成紙のクラフト紙部の電気的特性は等しいと考えられる。

高粘度油を含浸させた半合成紙に直流電圧を印加したときの60分間の空間電荷挙動と定常状態の状況を図11に示す。ソフトアルキルベンゼンを含浸させた半合成紙の場合とはその内部での電荷挙動が異なり、半合成紙のクラフト紙部内を塊状の電荷がポリプロピレン界面に移動するように見える。また、定常状態に至るまでの時間は約30時間であった。これらソフトアルキルベンゼンを含浸させた半合成紙の場合との違いは、クラフト紙部内の電荷の移動度の違いが要因と考えられる。

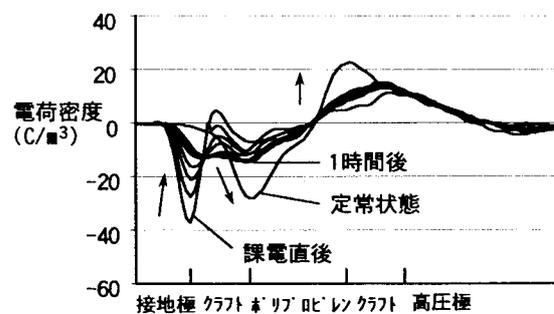


図11 空間電荷分布の経時変化
 (高粘度絶縁油含浸半合成紙)
 Fig.11 : Change with Time of Space Charge Distribution
 (High viscosity oil impregnated PPLP)

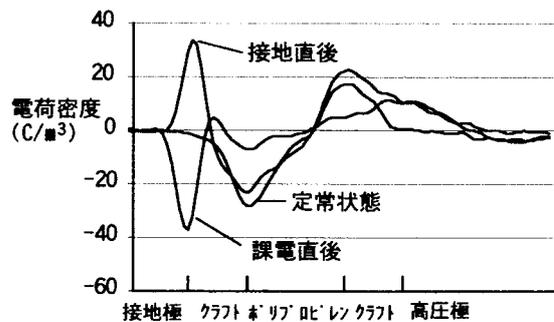


図12 電極接地時の空間電荷分布
 (高粘度絶縁油含浸半合成紙)
 Fig.12 : Space Charge Distribution when electrode is grounded
 (High viscosity oil impregnated PPLP)

定常状態に至った後に高圧極を接地した直後の測定結果を電圧印加直後、定常状態の結果とあわせて図12に示す。高圧極を接地するとソフトアルキルベンゼンを含浸させた半合成紙での測定結果（図6）と同様、クラフト紙部ーポリプロピレン部界面の電荷に対応する誘導電荷が接地極上に現われる状況が見られた。

今回、高圧極を接地した後の測定は接地直後のみ実施しており、接地後のクラフト紙部ーポリプロピレン部界面電荷の減衰時間特性がわからないが、ソフトアルキルベンゼンを含浸させた半合成紙と高粘度油を含浸させた半合成紙に電圧を印加して定常状態に至るまでの時間の違いを考えると、高粘度油を含浸させた半合成紙の方がクラフト紙部ーポリプロピレン部界面電荷の減衰が遅いと考えられる。

4-2 絶縁紙内の電界分布試算

ポアソンの式で電界分布を表わすと式(1)となる。

$$E(x) = \int \rho(x) dx / \epsilon_0 \epsilon_s \dots\dots\dots (1)$$

式(1)に基づきソフトアルキルベンゼンを含浸した半合成紙内の電荷分布の測定結果（図7）をもとに電界分布を算出した。計算結果を図13に示す。電界分布を定量的に評価するには、パルス静電応力法の原理上、半合成紙がクラフト紙とポリプロピレンの複合材であり、音響インピーダンス等の定数がそれぞれの部位で異なることを考慮する必要があるが、今回の空間電荷測定では半合成紙を音響的に均一なものとして扱っている。また、比誘電率もクラフト紙とポリプロピレンの合成した値（半合成紙の実測値 $\epsilon_s = 2.75$ ）を使用しており、誤差が考えられるが、今回はおおよその値として評価する。ちなみに直流電圧印加直後の電界はそれぞれの部位の誘電率に依存するとし、式(2)、(3)によって電界理論

値を計算するとポリプロピレン部は 40.6kV/mm, クラフト紙部は 20.3kV/mm となる。

$$E_p = \epsilon_k V / (\epsilon_p d - (\epsilon_p - \epsilon_k)t) \dots\dots\dots (2)$$

$$E_k = \epsilon_p V / (\epsilon_p d - (\epsilon_p - \epsilon_k)t) \dots\dots\dots (3)$$

E_p : ポリプロピレン部の電界

E_k : クラフト紙部の電界

ϵ_k : 油浸クラフト紙の比誘電率(4.2)

ϵ_p : ポリプロピレンの比誘電率(2.1)

d : 半合成紙の厚さ

t : ポリプロピレン部の厚さ

図13の結果をみると、直流定常状態では半合成紙内のポリプロピレンに大きな電界が掛かっていることがわかる。直流定常状態での電界分担は材質の抵抗率に依存し、抵抗率が高いポリプロピレン部が直流電圧の大部分を分担する。ポリプロピレンは直流絶縁耐力が高いため、半合成紙は優れた直流絶縁特性を示すとされている⁽⁵⁾。

高圧極接地直後は、空間電荷測定結果で述べたとおり電極上に誘導電荷が現われ、半合成紙のクラフト紙部に電界が掛かる。

直流送電系統では潮流方向を変えるために極性反転が実施される。今回の測定では極性反転時の測定をおこなっていないが、極性反転直後の電界分布は誘電率分担の電界に反転

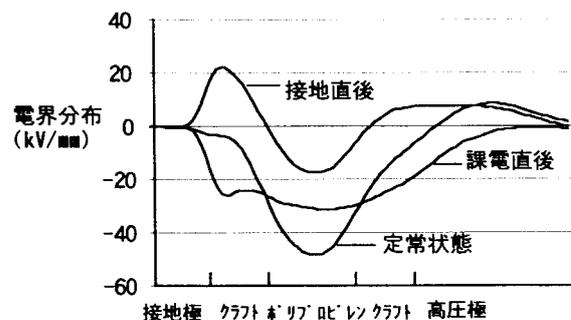


図13 直流電圧印加時の半合成紙内電界分布 (ソフトアルキルベンゼン含浸半合成紙)

Fig.13 : Electric field in PPLP when DC voltage applied (soft alkylbenzene impregnated PPLP)

前の残留電界が重畳されるものとする式(4),(5)と図13の結果をもとにシミュレーションをおこなった。その結果を図14に示す。

$$E_{DC} = \frac{dVC}{dx} + \frac{d\Delta V}{dx} \dots\dots\dots (4)$$

$$E_{PR} = \frac{dVC}{dx} + \frac{d\Delta V}{dx} \dots\dots\dots (5)$$

E_{DC} : x の位置における反転直前の電界
 E_{PR} : x の位置における反転直後の電界
 VC : 誘電率分担電圧
 ΔV : 残留電圧

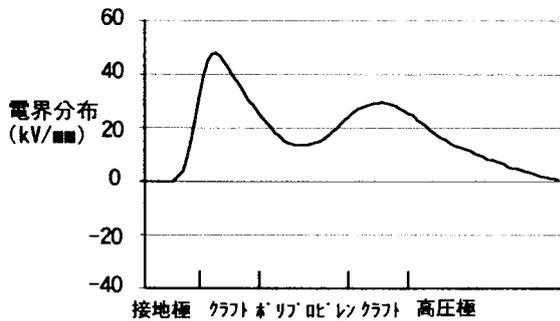


図14 極性反転時の半合成紙内電界分布
 シミュレーション結果
 (ソフトアルキルベンゼン含浸半合成紙)

Fig.14 : Simulated Electric field in PPLP when polarity reverse
 (soft alkylbenzene impregnated PPLP)

なお、式(4),(5)の第1項が誘電率分担電界を表わし、図13の電圧印加直後の値を使用した。第2項は残留電界を表わし、接地直後の値を使用した。

図14の結果は、直流定常状態ではほとんど電界が掛かっていなかったクラフト紙部に極性反転直後、高い電界が掛かることを示している。

5. まとめ

直流ケーブルに使用される油浸絶縁紙の空間電荷測定およびその結果をもとに電界分布計算をおこない、次の結論を得た。

油浸半合成紙に直流電圧を印加した直後

は、交流電圧印加時と同様な電荷分布であるが、直流定常状態に至るとクラフト紙部—ポリプロピレン部界面に多くの電荷が現われ、直流印加電圧の大部分をポリプロピレン部が分担する。

定常状態に至ったのち電極接地により、クラフト部—ポリプロピレン部界面電荷の誘導電荷が電極上に現われ、クラフト紙部電界を強める。この残留電界は印加電圧の極性反転をおこなったときに半合成紙内の電界分布に大きく影響を及ぼすと考えられる。

ソフトアルキルベンゼンを含浸させた半合成紙とクラフト紙を重ねた状態で直流電圧印加時の空間電荷測定をおこなった結果、両者の接触面において電荷蓄積等の現象は見られず、ここでの界面現象は考慮しなくてよいと考えられる。

紀伊水道を横断する直流海底ケーブルに使用されたソフトアルキルベンゼンを含浸させた半合成紙と多くの直流ケーブルに使用されているソリッドケーブルの高粘度絶縁油を含浸させた半合成紙の空間電荷挙動を比較した結果、半合成紙内のクラフト紙部を移動する電荷の動き方が異なり、高粘度絶縁油を含浸させた半合成紙内では電荷が塊状に移動する様子が見られた。また定常状態に至る時間も長く、電荷の移動度が小さいと考えられる。

今後、経年劣化による絶縁紙の絶縁性能の変化と空間電荷性状の変化について相関を求め、空間電荷測定技術の直流OFケーブル寿命推定や使用期間延長に関する判定基準等への適用性を評価する予定である。

参 考 文 献

-
- (1) 前野, 福永, 田中, 高田 : 電気学会論文誌A115(1995) 405
 - (2) 直流ケーブル技術動向調査専門委員会 : 電気学会技術報告第745号(1999)
 - (3) 櫛部, 前野, 高田 : 電気学会論文誌A106(1986) 118
 - (4) T.Maeno, T. Fujii, H.Kushibe, T.Takada & C. M. cooke : IEEE Trans. Elect.Insul., Vol.23(1988) 433
 - (5) 畑, 広田 : 電気学会論文誌A120(2000) 965
-

(2000年11月6日受理)



仲 川 隆

1971年1月12日生。1991年3月 舞鶴工業高等専門学校卒業。同年 4月関西電力(株)入社。現在、同社総合技術研究所勤務。主として地中送電関係の研究に従事。

(本論文は平成11年度電気材料技術優秀賞の受賞内容をまとめたものである。)