

氏名（本籍）	熊澤孝夫（愛知県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第28号
学位授与年月日	平成7年3月24日
専攻	電子情報システム工学専攻
学位論文題目	地中配電用高分子絶縁材料の長期信頼性と劣化診断に与える水分の影響・効果に関する研究
学位論文審査委員	（主査）教授 有馬 泉 （副査）教授 渡邊 貞司 教授 清水 宏晏

論文内容の要旨

第1編では、6.6kV 級CVケーブル（架橋ポリエチレン絶縁ポリ塩化ビニルシースケーブル）の活線劣化診断法の一つである直流成分電流法について、劣化信号の発生機構の解明ならびにその適用範囲の検討を行った。まず、劣化CVケーブルの絶縁体から貫通水トリーを含むように試料を切出し、これに半導電層および遮蔽銅テープを模擬した表面腐食処理銅板（処理銅）ならびに心線に相当する表面腐食処理しない銅板（未処理銅）を密着させて、交流電圧を印加したときの直流成分電流を測定した。その結果、直流成分電流は、処理銅から測定器に向かって流出する傾向を強く示したが、半導電層が乾燥するとほとんど流れなかった。また、直流成分電流は交流印加電界に対してPoole-Frenkel型の依存性を示したほか、1個の貫通水トリーが流し得る直流成分電流は数十pAであることが判明した。これらの結果から、貫通水トリーは、直流成分電流の起源には直接関与しないものの、電流を制限する重要なエレメントであると考えられた。そこで、絶縁体のみを取除いた状態で、交流電圧を印加したときの直流成分電流を測定した。この場合も直流成分電流は、処理銅から測定器に向かって流出する傾向を強く示したほか、半導電層が乾燥するとほとんど流れなかった。また、直流成分電流は交流印加電圧に対して、半導体整流器に類似した依存性を示したのち飽和域に達した。このときの処理（未処理）銅と半導電層の間の電位差は概ね1.5V以上で、CVケーブルにおいては、水トリー部の絶縁抵抗と半導電層のスポット抵抗との電圧分担によって生じる範囲であった。また、飽和域での見掛け上の起電力は70～80mVであった。この起電力は、処理（未処理）銅と半導電層中の水分との界面で生じた可能性があるため、さらに処理（未処理）銅を水中浸漬して交流電圧を印加したときの直流成分電流を測定した。その結果、直流成分電流は、上記と同様に処理銅から測定器に向かって流出する傾向を強く示した。これらの結果を総合して、直流成分電流の起源は、処理（未処理）銅の酸化・還元反応の平衡性の破れ、あるいは、p型半導体である亜酸化銅（X線回折で確認）と水との界面で生じる整流作用に基づくと考えられる。なお、数十μA以上の導電性の交流損失電流が存在すると、劣化判定指標となる1nA以上の直流成分電流が流れることが実験により示されたことから、直流成分電流法は、ケーブル全長に亘って、100個単位の貫通水トリーが存在するCVケーブルの劣化診断に適用可能と考えられる。

第2編では、地中配電用機器の主要絶縁材料であるエポキシ樹脂の吸水劣化挙動ならびに劣化機構の解明を行った。機器の内部は高温・多湿になる場合があり、このような使用環境における吸水劣化を想定し、まず、実際に使用されている代表的なエポキシ樹脂5種類をテストピース試料として、これらを恒温・恒湿槽に入れて環境加速劣化を施し、さらに適当な時間間隔を設けて、絶縁破壊強度・引張強度・表面および内部構造変化・化学的構造変化等を総合的に調べた。その結果、吸水-時間特性は、ガラス転移温度のほか、樹脂-充填材界面の密着性にも影響を受けることが示唆された。さらに、引張強度の低下においては、吸水率依存性が大きく変化する吸水率領域が存在すること、また、その領域における強度保持率（保持された強度の初期強度に対する割合）は、充填材の種類に依存することが判明した。絶縁破壊強度は、この吸水率領域をやや超えたところで急激に低下したため、その低下には、樹脂-充填材界面の状態変化が密接に関与していると考えられた。表面および内部構造観察では、走査型電子顕微鏡・水銀ポロシメータにより、試料表面で樹脂-充填材界面の剥離による $0.1\mu\text{m}$ 以下の隙間の発生が認められた。レーザ走査型超音波顕微鏡による観察では、超音波の散乱・吸収の増加が認められたが、試料の乾燥後も回復しなかったため、この散乱・吸収は、3次元的に多数発生した隙間に起因すると考えられた。次に示差走査熱量計によりガラス転移温度を測定した結果、吸水により、やや降下がみられたほか、界面剥離した試料を中心に、架橋密度が異なる2つの領域が樹脂中に形成されていることが確認された。赤外線吸収スペクトル測定においても、架橋密度を低下させる樹脂-水分の水素結合の生成が示唆された。これらの結果から、引張強度は吸水により、樹脂-充填材の界面密着強度とともに低下すると考えられる。また、温水浸漬により吸水させたエポキシ樹脂の体積固有抵抗・誘電特性を調べた結果、体積固有抵抗は界面剥離にはほとんど影響を受けないものの、誘電損失率は著しく影響を受けることが示唆された。これらより、吸水による交流破壊電圧の低下は、試料表面近傍の界面剥離層に侵入した水分により交流損失が急増し、熱破壊が生じ易くなったためと考えられる。

論文審査の結果の要旨

本論文は、第1編で水トリ-劣化CVケーブルの直流成分電流発生機構に関する実験的考察を行い、第2編で電気絶縁用エポキシ樹脂の吸水劣化特性とその評価に関して検討を行った。得られた成果は次の通りである。

第1編では、直流成分電流の起源が、絶縁体バルクではなく、その外部に存在する種々の界面にあると仮定し、発生機構を実験的に考察した。まず、水トリ-劣化した6.6kV CVケーブルから採取された貫通水トリ-を1個有する絶縁体に、半導電層および銅板電極対を密着させた試料系で発生する直流成分電流について考察を行った。この試料系で観測された直流成分電流は、表面処理銅から測定器に向かって流出する傾向を強く示し、半導電層の吸水状態が乾燥状態に進むと直流成分電流の絶対値が減少することなどを明らかにした。さらに、直流成分電流の交流印加電界依存性を調べた結果、水トリ-一部に Poole-Frenkel型の電流制限機構が存在することを見出した。これらの実験結果を基に、直流成分電流の発生機構をモデル化し、銅酸化物と半導電層中の水分との界面での整流作用により、見掛け上の起電力が生じ、この起電力によって、Poole-Frenkel則に支配される導電率を有した貫通水トリ-一部を直流成分電流が流

れると考えた。

第2編では、地中配電用機器の長期信頼性評価、寿命評価を最終的な目標ととらえ、その前段として、電気絶縁に多用される充填材入りエポキシ樹脂の吸水劣化に着目した。まず、温水浸漬にて吸水劣化させた充填材入りエポキシ樹脂試料を用いて、交流および直流破壊電圧ならびに誘電特性等を調べ、吸水による破壊電圧低下の機構を考察した。その結果、直流破壊電圧の低下には、体積固有抵抗が大きく関与し、樹脂-充填材界面の剥離は、直接的には関与しないこと、交流破壊電圧（実効値）と直流破壊電圧の差は、界面の剥離が顕著な試料ほど大きく、界面の剥離が分極損失の増大に直接的に関与している可能性があることなどを明らかにした。これにより、試料表面近傍で界面の剥離が多数発生している場合は、誘電損失率が局所的に極めて大きくなること、また、誘電損失率に対する分極損失の寄与も支配的になるとした。そして、4層誘電体モデルを提案して、試料表面近傍で異常樹脂層と界面剥離層が同程度の体積を占め、誘電損失率が局所的に急増し得ることを定性的に示した。

以上の研究で得られた成果は、工学的に意義があり、博士（工学）の学術論文として価値あるものと認める。