

氏名	たてまつあきよし 立松明芳
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博第2387号
学位授与の日付	平成16年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科電気工学専攻
学位論文題目	数値電界計算法の高度化と帯電電荷測定法への応用

論文調査委員 (主査) 教授 島崎真昭 教授 大澤靖治 教授 引原隆士

### 論文内容の要旨

高電圧絶縁機器では、高電圧導体を支持するためにバルク状固体絶縁物の存在が不可欠である。近年になって広く普及するようになったガス、真空絶縁などの絶縁方式では、バルク状絶縁物表面の帯電電荷の存在は高電圧機器の絶縁性能を低下させる要因となりえることがわかってきた。そのため帯電状況を考慮した機器の設計や絶縁性能評価を行うために、バルク状絶縁物の帯電電荷測定法の開発の重要性も広く認識されるようになってきた。本論文は、バルク状絶縁物表面の帯電電荷測定に適した多点測定法に基づく帯電電荷測定法を定量性、汎用性の高い実用的な測定法として確立することを目的として、理論的および実験的に検討した結果をまとめたものであって、7章から成っている。

第1章は序論であり、バルク状固体絶縁物の帯電電荷測定法の重要性や、数値電界計算や逆計算を要する多点測定法に基づく帯電電荷測定法の高度化に向けて検討すべき課題について述べ、最後に各章の内容説明を行っている。

第2章では、帯電電荷測定法に適した数値電界計算法である表面電荷法や境界要素法について、計算原理や、計算精度に影響する未知数表現関数、形状表現関数、境界条件の定式化について述べている。また、計算時に必要な記憶容量、演算量とともに $O(N)$  ( $N$ :未知変数の数)にまで削減可能とする高速多重極法の原理や高速多重極法を表面電荷法や境界要素法へ適用する方法について述べている。

第3章では、表面電荷要素の電位・電界の計算に使用した数値面積分手法や解析式、数値電界計算コードの計算精度について述べている。電荷密度表現関数を二次関数、三次関数とした三角形および四角形表面電荷要素の電位・電界の解析式を導出している。さらに数値積分と解析式による電位・電界の計算値の比較を行い、数値積分の精度評価を行った結果を示している。数値電界計算例として一様電界中の誘電体球を対象として電界計算を行い、数値電界計算コードが帯電電荷測定に対して十分な計算精度を達成していることを確認している。

第4章では、帯電電荷測定法の高度化、高精度化について数値解析的あるいは数学的に検討を行っている。多点位置での測定値と電荷分布を数値モデル化した未知変数と関係付ける計数行列の計算アルゴリズムである直接法と $\lambda$ 関数法に、第2、3章で高精度化した数値電界計算法を適用し両者の計算値を比較することで係数値の高精度計算の実行を可能としている。帯電電荷分布の推定精度について逆計算の観点から検討を行い、ラプラシアンフィルタに基づいてフィルタ行列を設計するペナルティ付き最小二乗法(RLS)を用いた安定な逆計算手法を示し、さらにRLSを適用した場合に、RLSによる推定解を基準とした係数値誤差や測定誤差による推定解の変動の上限値を与える式を導出し、RLSを適用した際の推定精度について定量的な検討を可能としている。

第5章では、厚みを有するブロック状固体絶縁物を対象として、帯電電荷測定の実験的な検討を行っている。直接法および $\lambda$ 関数法で計算した係数行列を用いて推定した分布を比較し、係数行列の計算精度が実用レベルに達していることを確認している。次にプローブと絶縁物表面との距離、ガード電極位置、絶縁物厚さを変化させて実験を行い、係数行列の条件数が小さく良条件である場合は逆行列計算により帯電分布の推定が可能であることを示している。プローブと絶縁物表面の距

離が大きくなると逆計算は不安定になるが、RLSを適用することで全体的な分布の変化を捉えることが可能であり、RLSの適用が有効であることを示している。

第6章では、高速多重極法を適用した表面電荷法、境界要素法を用いることにより、係数行列の計算に必要な演算量、記憶容量がそれぞれ $O(N^2)$ 、 $O(N)$ となる解析法を示している。任意の帯電区分形状あるいは帯電区分内の電荷密度を一次関数で表現した場合においても適用可能なラプラシアンフィルタの設計方法を提案している。モデルスペース表面に数千の帯電区分を設定した場合の帯電電荷測定の数値シミュレーション、実測を行い、RLSの適用により安定した逆計算が可能であることを示している。また帯電電荷区分を区分毎に一次関数で表現する方法が帯電電荷測定に適用可能であることを数値シミュレーション、実測結果から明らかにしている。

第7章は、結論であり、本研究で得られた成果のまとめを示している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、高電圧絶縁機器において重要なバルク状絶縁物表面の帯電電荷測定に適した多点測定法に基づく帯電電荷測定法を定量性、汎用性の高い実用的な測定法として確立することを目的として、理論的ならびに実験的に行った研究の結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 表面電荷法において、電荷密度表現関数として従来一次関数を用いられていたが、本論文で電荷密度表現関数を二次関数、三次関数とした三角形および四角形表面電荷要素の電位・電界の解析式を導出している。数値積分に基づく表面電荷法による電位・電界の計算値と解析式に基づく表面電荷法の結果とを比較し、数値積分による方法の計算精度の評価を行っている。

2. 電荷分布を数値モデル化した未知変数と多点位置での測定値とを関係付ける係数行列の計算アルゴリズムである直接法と $\lambda$ 関数法に、本論文で提案した高精度数値電界計算法を適用し両者の計算値を比較し、高精度計算の実行を可能としている。帯電電荷分布について逆計算の観点から検討を行い、ラプラシアンフィルタに基づいてフィルタ行列を設計するペナルティ付き最小二乗法(RLS)を用いた安定な逆計算手法を示し、さらにRLSを適用した場合に、RLSによる推定解を基準とした係数値誤差や測定誤差による推定解の変動の上限値を与える式を導出し、RLSを適用した際の推定精度について定量的な検討を可能としている。

3. ブロック状固体絶縁物を対象として、帯電電荷測定の実験的な検討を行い、直接法および $\lambda$ 関数法で計算した係数行列を用いて推定した分布を比較し、係数行列の計算精度が実用レベルに達していることを確認している。プローブと絶縁物表面との距離が大きな場合、係数行列の条件が悪化し、逆計算は不安定になるが、RLSを適用することで全体的な分布の変化を捉えることが可能となり、RLSの適用が有効であることを示している。

4. 高速多重極法を適用した表面電荷法、境界要素法を用いて、係数行列の計算に必要な演算量、記憶容量がそれぞれ $O(N^2)$ 、 $O(N)$ となる解析法を示し、任意の帯電区分形状あるいは帯電区分内の電荷密度を一次関数で表現した場合においても適用可能なラプラシアンフィルタの設計方法を提案している。モデルスペース表面に数千の帯電区分を設定した場合の帯電電荷測定の数値シミュレーションと実測とを行い、RLSの適用により安定した逆計算が可能であることを示している。

以上要するに本論文は、表面電荷法・境界要素法に基づく高精度電界計算法を開発し、それを応用して、高電圧絶縁機器において重要なバルク状絶縁物表面に対する帯電電荷測定法を理論的に検討するとともに、実験により検証し、その適用性を向上させたものであって、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認められた。