

学位論文題名

電界誘因流動を伴う鉱油の電気的特性に関する研究

学位論文内容の要旨

最近の絶縁油は、電気機器の技術革新に伴って機器の電気絶縁システムの構成要素として評価されるようになり、優秀な電気特性の他に、物理的、化学的安定性と良好な冷却作用、難燃性と耐熱性に富むこと等の厳しい要求がなされている。このような多岐にわたる要求に対して、アルキルベンゼン、シリコン油等の合成絶縁油が出現している。しかしながら、これらの合成絶縁油は、鉱油に比較して高価であるうえに、安定した供給が難しいことから、使用量の少ない電力ケーブル、コンデンサ等に使用が制限されている。

鉱油は体積抵抗率、絶縁破壊電圧、誘電正接などの優れた電気的特性を有し、かつ、安定的に低価格で得られることから、古くから電気機器に欠くことのできない電気絶縁材料であり、現在は、多量の絶縁油を使用する電力用変圧器に主に使用されている。

鉱油の原料は、最近、流動点の低いナフテン系原油の枯渇化に伴って、流動点の高いパラフィン系原油に移行しているため、鉱油を構成する成分割合が変化し、更に鉱油を使用している電気機器が多く輸出されるようになって、その品質がJIS規格以外のIEC規格と外国規格に適合しなければならぬ状況になっていることから、電気的特性に関する基礎的データの新たな蓄積と見直しが必要となっている。

鉱油の体積抵抗率と誘電正接は絶縁破壊電圧や比誘電率と並んで油入電気機器の絶縁設計に必要な電気的特性である。従って、これらの値はJIS規格で定められた測定法によって求められている。特に、測定用電界として、体積抵抗率の場合は $250\text{V}/\text{mm}$ の直流電界、誘電正接の場合は、周波数 50Hz または 60Hz の $500\text{V}/\text{mm} \sim 1000\text{V}/\text{mm}$ の交流電界が定められている。しかしながら、鉱油はこれらの測定用電界以上の高電界で使用される場合が多いため、体積抵抗率と誘電正接の電界依存性について明らかにする必要がある。

本研究では、体積抵抗率が伝導電流の値から求められること、更に商用周波数領域の誘電損がイオン伝導に依存することから、電気伝導の電界依存性に注目する。特に、鉱油と接する金属および固体誘電体界面に存在する荷電粒子によって誘起される電界誘因流動に注目して、直流電界における電気伝導並びに商用周波数領域の誘電正接と電界誘因流動の関係を明らかにする。

流動を誘起する荷電粒子源として、鉱油と接する金属及び固体誘電体の界面に存在する電気二重層を考え、この電気二重層と電気伝導の関係を、ステンレス鋼電極/ポリプロピレンフィルム/鉱油/ステンレス鋼電極の二層誘電体とステンレス鋼電極/鉱油/ステンレス鋼電極の単一誘電体にステップ状直流電圧を印加した際の電界誘因流動を伴った電気伝導現象の観測によって調べた。その結果、流動は臨界電圧以上の電圧を印加した後に時間遅れを伴って正極性電極側の界面近傍から発生し、電界方向へ移動すること、流動の誘起は電流の大きさを増加させ、その波形の時間変化にピーク現象をもたらすことを見いだした。また、電気二重層を正の荷電粒子の注入電荷源として設定した流動誘起機構と荷電粒子の輸送過程モデルによって、これらの諸特性が説明できることを明らかにした。

周期的に電極極性の変化する一定振幅の電圧を印加し、その充電周期長を変化させることによって電極近傍に蓄積する荷電粒子量を制御し、電気二重層内に存在する荷電粒子量と蓄積荷電粒子量の電界誘因流動に及ぼす影響を調べた。その結果、流動は、充電周期長

が比較的短い領域で陽極界面から誘起し、電界方向へ移動すること、充電周期長が長い領域で、電圧印加側電極近傍から最初の流動が誘起され、この流動の後に両電極近傍から新たな流動が誘起して電界に対して同方向と逆方向に、それぞれ、移動することと、この流動は電流を増加させ、その電流波形にピーク現象をもたらすことを見いだした。また、陽極近傍から誘起する流動の諸特性は、電気二重層内の正の荷電粒子量に正の蓄積荷電粒子量を加えた荷電粒子量を注入電荷源として設定したモデルによって、一方、陰極と陽極近傍から誘起する流動の諸特性は、陰極と陽極近傍に蓄積する正と負の荷電粒子量を注入電荷源として設定したモデルによって比較的よく説明できることを明らかにした。

蓄積電荷量に支配される電界誘因流動現象を明らかにするため、電極近傍に蓄積できる荷電粒子量が電極間に存在する全荷電粒子の場合と充電電圧に制限された荷電粒子量の場合の二つの蓄積条件に分けられることをモデルによって定量的に表した。また、このモデルと充電周期長の長い領域で設定した流動誘起機構モデルが、電極極性反転後の電気伝導現象の一般的な解析に適用できることを確認するため、導電率と充電電圧の大きさ及び電極間隔を変化させてこの異なる蓄積条件を設定して実験を行った。その結果、得られた諸特性が、これらのモデルによって比較的よく説明できることを明らかにした。

60Hz正弦波交流電圧印加した場合に電極界面近傍から誘起する電界誘因流動現象を見だし、この現象をステップ状直流電圧印加時の流動誘起機構モデルによって解析し、流動誘起臨界電界の特性式を導出した。更にこの特性式の妥当性を周波数領域 5Hz~300Hzにおける臨界電界の周波数依存性から確認した。

電界誘因流動と誘電正接の関係並びに鉱油と接する金属及び固体誘電体界面の誘電正接への影響を、鉱油単一誘電体と鉱油-ポリプロピレンフィルム複合誘電体で調べ、電界誘因流動が誘電正接の電界依存性の要因なることを明らかにした。

本論文に於ける全体の構成は、以下の通りである。

第1章は序論で、本研究に対する背景と研究の特色及び論文構成の概要を述べている。

第2章では、電気二重層と電気伝導の関係を明らかにするために、鉱油-ポリプロピレンフィルム二層誘電体と鉱油単一誘電体にステップ状直流電圧を印加して、油層内に発生する流れのシュリーレン影像、電流の時間変化、界面近傍における鉱油の密度変化を観測した結果を述べる。つぎに、流動誘起機構と荷電粒子の輸送過程を説明するために設定したモデルを用いた実験結果の検討について述べる。

第3章では、電極近傍に蓄積する荷電粒子量と電気二重層内の荷電粒子量の電界誘因流動に及ぼす影響を明らかにするために、周期的に極性の変化する一定振幅の電圧を印加し、その充電周期長を変化させた場合のシュリーレン影像の観測結果と電流の時間変化の測定結果を述べる。つぎに、充電周期長を短い領域と長い領域に分けて、それぞれの領域に適合する流動誘起機構モデルを設定し、このモデルを用いた実験結果の検討について述べる。

第4章では、電極近傍に蓄積できる正と負の荷電粒子量が二つの蓄積条件で示されることをモデルを用いて明らかにし、この二つの蓄積条件を、導電率と充電電圧の大きさ及び電極の間隔を変化させることによって設定して実験を行い、その結果を、この蓄積モデルと充電周期長の長い領域で設定した流動誘起機構モデルを用いて検討したことを述べる。

第5章では、正弦波交流電圧を印加した場合の電界誘因流動を調べるために、鉱油単一誘電体に60Hzの交流電圧を過渡的に印加した際の界面近傍における鉱油の密度変化の応答信号の観測結果を示し、つぎに、交流電圧印加時の流動誘起機構を第2章で設定したモデルを用いて解析し、流動誘起臨界電界の特性式を導出する。

第6章では、電界誘因流動と誘電損の関係を調べるために、鉱油の単一誘電体と鉱油-ポリプロピレンフィルム複合誘電体に、周波数20Hz~300Hzの交流電圧を印加して誘電正接の電界依存性の測定結果を示す。更に流動誘起に伴う誘電損の増加量と液体運動に伴う摩擦損を対応させて考察し、電界誘因流動が誘電正接の電界依存性の要因なることを示す。

第7章では、電界誘因流動を伴う電気伝導現象が絶縁油の劣化判定と熱伝達促進装置に応用できることを示す。

第8章では、本研究で得られた研究成果の取りまとめを行っている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	田頭	博昭
副査	教授	長谷川	淳
副査	教授	酒井	洋輔
副査	教授	長谷川	英機
副査	教授	横田	和明

学位論文題名

電界誘因流動を伴う鉱油の電気的特性に関する研究

鉱油は体積抵抗率、絶縁耐力、誘電正接等の高電圧絶縁特性に優れ、かつ安価で供給も安定しており、多量の絶縁油を必要とする電力用変圧器の主要な絶縁材料である。鉱油の原料はナフテン系原油とパラフィン系原油に分かれるが、最近、流動点の低いナフテン系原油の枯渇化に伴って、流動点の高いパラフィン系の原油の使用が増加しているため、鉱油の構成成分比が変化し、更に、鉱油を用いている電気機器の輸出が盛んになるにつれて、品質がJIS規格以外のIEC規格や外国規格との適合性が求められ、鉱油の電気的特性に関する基礎的データを改めて蓄積する必要が生じている。

本論文は鉱油と接する金属あるいは固体誘電体界面に存在する電気二重層の荷電粒子によって誘起される電界誘因流動に注目して、直流電界における電気伝導並びに商用周波数領域の誘電正接と電界誘因流動の関係を調べ、これらから鉱油の体積抵抗率及び誘電正接という絶縁体としての重要なパラメータの特性を明らかにしたものである。

本論文は全8章から成っている。第1章は序論で、本研究分野の背景、本研究の特色並びに論文構成を述べている。

第2章は電気二重層と電気伝導の関係を明らかにするため、鉱油-ポリプロピレンフィルム2層誘電体と鉱油単一誘電体にステップ電圧を印加し電流の時間変化、界面近傍における鉱油の密度変化を測定し、流動は正極性電極側から局所的に発生し、電界方向に移動すること、流動には臨界電圧が存在すること等を明らかにしている。

第3章は電極近傍に蓄積する荷電粒子量と電気二重層内の電界誘因流動におよぼす影響を調べた。周期的に極性が変化する一定振幅電圧を印加して実験を行なっている。その結果、流動は10s以上の長周期領域で、陽極側か遅れを伴って発生する。流動の誘起は電流を増加させ、その波形にピークが存在する、80s以上の長周期では電極極性に拘らず電極近傍から最初の流動が発生する、等のことを明らかにした。またモデルを設定して計算を行ない、実験とよい一致をみている。

第4章では蓄積電荷量に支配される電極極性反転後の流動現象を明らかにするため、充電電圧の印加によって電極近傍に蓄積できる荷電粒子量を定量的に表わすた

めのモデルを設定し、更に、その確認のための実験を行なった。その結果、電流増加開始時間とピーク電流発生時間は導電率と充電電圧の増大に伴って短縮される等のことが明らかにされている。

第5章では鉱油単一誘電体に60Hzの正弦波交流電圧を過渡的に印加した時の電界誘因流動を調べ、流動開始には臨界電圧があり遅れを伴うこと、正極性電極から開始すること、電気二重層を注入電荷源としたモデルで説明できること等を明らかにしている。

第6章は電界誘因流動と誘電損の関係を調べた章で、低周波交流電圧を印加して誘電正接の電界依存性を測定した。その結果、電界誘因流動が誘電正接の電界依存性の要因となること、電極間隔が狭い領域及び周波数の低い領域、油温の上昇とともに影響が大きくなる等の重要な知見を得ている。

第7章は電界誘因流動を伴う鉱油の電気伝導現象が絶縁油の劣化判定、あるいは熱伝達促進装置として、電力用変圧器の絶縁材料としての他に、応用分野の可能性があることを、実験的に明らかにしている。

第8章は結論で、本研究の主要な成果について述べている。

以上を要するに、本論文は電力用変圧器の絶縁等、高電圧機器の重要な絶縁材料である鉱油の絶縁性能を記述する際の主要なパラメータである導電率及び誘電損に大きな影響を与える電界誘因流動について詳細な研究を行ない、その特性を明らかにしたものであって、電気絶縁工学及び電力工学の進歩に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。