

第35号

平成27年10月1日

博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(平成27年度 前学期授与分)

金沢工業大学

目 次

◇博士

(学位記番号) (学位の種類) (氏名) (論文項目)

| | | | |
|------------|--------|-------------|---|
| 博甲 第 104 号 | 博士(工学) | Fri Murdiya | RESEARCH ON CREEPING DISCHARGE PHENOMENA IN INSULATING OILS: VEGETABLE-BASED OILS AS SUBSTITUTE OF MINERAL OIL 1 |
|------------|--------|-------------|---|

は し が き

本誌は、学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

| | | | | |
|---------|---|-----------|-------|-------|
| 氏名 | フリー・ムルディア Fri Murdiya (Republic of Indonesia) | | | |
| 学位の種類 | 博士 (工学) | | | |
| 学位記番号 | 博甲 第104号 | | | |
| 学位授与の日付 | 平成27年9月11日 | | | |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項相当 | | | |
| 学位論文の題目 | RESEARCH ON CREEPING DISCHARGE PHENOMENA IN INSULATING OILS: VEGETABLE-BASED OILS AS SUBSTITUTE OF MINERAL OIL | | | |
| 論文審査委員 | (主査) 教授 | 花岡 良一 | 教授 | 深見 正 |
| | | 教授 金丸 保典 | 教授 | 作道 訓之 |
| | | 元・金沢大学 教授 | 山田 外史 | |

論文内容の要旨

鉱油は、電気絶縁と冷却効果に高い性能を有することから、絶縁油として広く使用されている。しかしながら、近年、鉱油に対して、貧弱な生分解性、低い引火点、低い比誘電率、僅かな毒性、近い将来における鉱油資源の枯渇、硫化銅腐食、焼却時の大気汚染、油漏れによる地下水汚染と言った解決すべき多くの問題が、環境保護の見地から指摘されている。今日では環境に無害な植物由来の絶縁油が鉱油の代替として期待され、過去十年に渡って、部分放電特性や沿面放電と絶縁破壊現象に関する植物由来絶縁油と鉱油との比較が、多くの研究者によって報告されている。一方、配電変圧器や電力変圧器などの油入電力機器には、絶縁油とプレスボードの複合絶縁系が内部電気絶縁を保証するために広く使用されている。しかし、電力機器内部の電界中で生じる事故は、絶縁油とプレスボード界面の沿面放電に起因する例が極めて多く、油浸プレスボードの表面は沿面放電が容易に進展する弱点部として懸念される。しかるに、種々の条件下における沿面放電特性の明確化は、信頼性の高い電気絶縁設計を確立する上で最も重要な課題の一つである。

本研究において、植物由来の絶縁油を鉱油に代わる電気絶縁油として実用するために解決すべき幾つかの問題が洞察され、特に油中沿面放電の振る舞いとその特性が実験的に明確化されている。植物由来絶縁油（菜種原油およびヤシ油脂肪酸エステル(PFAE)油）と商用鉱油（変圧器油：JIS C2320）が、供試絶縁油として本実験に使用された。絶縁油／プレスボード界面を進展する沿面放電現象は、針電極と背後電極を有する電極モデルを使用し、

インパルス高電圧 ($0 \sim \pm 140 \text{ kV}_{\text{peak}} : \pm 1.2/50 \mu\text{s}$ and $\pm 1.2/1000 \mu\text{s}$ 波) および交流高電圧 ($0 \sim \pm 45 \text{ kV}_{\text{rms}} : 60 \text{ Hz}$) を印加することによって研究された。

本研究では、次の重要な四つの課題に取り組み、植物由来絶縁油中の沿面放電特性に関する新しい知見を得た。

課題 1 : 菜種原油と鉱油中のインパルスアーク放電とコロナ放電によって油中に溶解したガス成分分析 (Dissolved gas-in-oil analysis : DGA) 、および DGA 試験に基づく異常診断評価

課題 2 : PFAE 油と鉱油中における誘電体バリアの狭い隙間を進展するインパルス沿面放電特性の明確化

課題 3 : PFAE 油、菜種原油および鉱油中における絶縁油/プレスボード界面の交流沿面放電特性の明確化

課題 4 : 熱加速劣化した菜種原油と鉱油中における絶縁油/プレスボード界面の交流沿面放電特性 (交流沿面放電特性に関する絶縁油の劣化効果) の明確化

課題 1 の研究では、絶縁油中の放電によって、水素 (H_2)、メタン (CH_4)、エタン (C_2H_6)、エチレン (C_2H_4)、およびアセチレン (C_2H_2) などの可燃性ガスが油中で発生することを示した。特に、 C_2H_2 ガスは、 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ を超える温度 (普通、 $500 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$) で発生することから、沿面ストリーマチャンネル近くの局部領域が $500 \text{ }^\circ\text{C}$ を超える温度にまで上昇し得ることを明らかにした。また、DGA 試験結果に基づく異常診断評価から、植物由来絶縁油においても鉱油と同様な診断基準で内部異常が特定できることを明らかにした。

課題 2 の研究では、狭い誘電体バリア間 (約 1 mm 以下) を進展する沿面ストリーマの成長には、特異な極性効果が有ることを明らかにした。すなわち、従来の油/誘電体バリア界面におけるストリーマ進展は、負ストリーマより正ストリーマにおいて長い。狭い誘電体バリア間を進展する正・負ストリーマの成長は、これとは反対の関係となる。これは、電力機器内部の電気絶縁設計を行う際に考慮すべき重要な結果である。

課題 3 では、交流沿面放電特性として、放電様相、ストリーマ進展長、ストリーマ速度、放電電流、放電エネルギー、プレスボード表面のトラッキング、およびプレスボード貫通破壊が詳細に計測され、植物由来絶縁油と鉱油中における放電の振る舞いを明らかにした。また、放電様相に似たプレスボード表面上の白い痕跡と放電後に残るトラッキング（導電性の炭化痕）の形成が DGA 試験結果を踏まえて考察され、そのメカニズムを明らかにした。

課題 4 では、絶縁油の劣化は、変圧器事故の主な誘発原因の一つとなり得ることから、熱加速劣化した絶縁油中の交流沿面放電特性が、新油中の特性と比較して詳細に計測された。その結果、交流沿面放電は、一定印加電圧の下で、特徴的な様相を持って時間と共にゆっくり進展するが、劣化油中の沿面放電に付随した電流パルスの振幅が新油中のそれらに比べて非常に大きくなることを明らかにした。これは、放電の活性化を意味するので、注目すべき点である。

本論文は、これらの成果を纏めたものであり、7 章から構成される。

第 1 章では、本研究の背景、研究目的および本論文の概要について述べている。

第 2 章では、植物油の化学・物理的特性、絶縁性液体中の平等・不平等電界における電気伝導特性、不平等電界中の空間電荷効果とその極性効果、絶縁油中の沿面放電現象、および鉱油中の溶解ガス分析に関する過去の研究について調査している。

第 3 章～第 6 章では、上記の課題 1～課題 4 の研究で得られた成果をそれぞれ詳細に述べている。

第 7 章は結論であり、本研究で得られた重要な結果を纏めると共に、今後の課題について言及している。

論文審査の結果の要旨

絶縁油として広く使用されている鉱油は、電気絶縁と冷却効果に高い性能を有するが、貧弱な生分解性、低い引火点、僅かな毒性、将来的な鉱油資源の枯渇、硫化銅腐食、焼却時の大気汚染、油漏れによる地下水汚染と言った多くの問題が、環境保護を考慮した見地から指摘されている。今日では環境に無害な植物由来の絶縁油が鉱油の代替として期待され、部分放電、沿面放電、絶縁破壊などの電氣的現象に関して、植物由来絶縁油と鉱油との比較研究が成されている。一方、配電用変圧器や電力変圧器などの油入電力機器には、絶縁油とプレスボードの複合絶縁系が内部電気絶縁を保証するために広く使用される。しかし、電力機器内部の電界中で生じる事故は、絶縁油とプレスボード界面の沿面放電に起因する例が極めて多く、プレスボード表面は沿面放電が容易に進展する弱点部として懸念される。しかるに、種々の条件下における沿面放電特性の明確化は、信頼性の高い電気絶縁設計を確立する上で最も重要な課題の一つである。

本研究では、植物由来絶縁油（菜種原油およびヤシ油脂肪酸エステル(PFAE)油）を鉱油の代替絶縁油として実用する上で、解決すべき問題を洞察し、

次の四つの重要な課題；

課題1： 菜種原油と鉱油中のインパルスアーク放電とコロナ放電によって油中に溶解したガス成分分析（Dissolved gas-in-oil analysis: DGA）、および DGA 試験に基づく異常診断評価

課題2： PFAE 油と鉱油中における誘電体バリアの狭い隙間を進展するインパルス沿面放電特性の明確化

課題3： PFAE 油、菜種原油および鉱油中における絶縁油／プレスボード界面の交流沿面放電特性の明確化

課題4： 熱加速劣化した菜種原油と鉱油中における絶縁油／プレスボード界面の交流沿面放電特性（交流沿面放電特性に関する絶縁油の劣化効果）の明確化

に取り組み、植物由来絶縁油中の沿面放電特性に関する新しい知見を得ている。

課題 1の研究では、絶縁油中の放電によって、水素、メタン、エタン、エチレン、アセチレンなどの可燃性ガスが油中で発生することを示した。特に、アセチレンガスは、500℃を超える温度（普通、500～700℃）で発生することから、沿面放電ストリーマ付近の局部領域が500℃を超える温度にまで上昇し得ることを明らかにした。また、DGA試験結果に基づく異常診断評価から、植物由来絶縁油が鉱油と同等な診断基準で内部異常を特定できることを明らかにした。

課題 2の研究では、約1mm以下の狭い誘電体バリア間を進展する沿面ストリーマの成長には、特異な極性効果が存在することを明らかにした。すなわち、従来の油/誘電体バリア界面における放電ストリーマの進展長は、負ストリーマより正ストリーマにおいて長くなるが、狭い誘電体バリア間を進展する正・負ストリーマの成長は、これとは反対の関係となる。これは、電力機器内部の電気絶縁設計を行う際に考慮すべき重要な結果である。

課題 3の研究では、交流沿面放電特性として、放電様相、ストリーマ進展長、ストリーマ速度、放電電流、放電エネルギー、プレスボード表面のトラッキング、およびプレスボード貫通破壊が詳細に計測され、植物由来絶縁油と鉱油中における放電の振る舞いを明らかにした。また、放電様相に似たプレスボード表面上の白い痕跡と放電後に残るトラッキング（導電性炭化痕）の形成がDGA試験結果を踏まえて考察され、そのメカニズムを明らかにした。

課題 4の研究では、絶縁油の劣化が変圧器事故誘発原因の一つとなり得ることから、熱加速劣化絶縁油中の交流沿面放電特性が、新油中の特性と比較して詳細に計測された。その結果、劣化油中の沿面放電に付随した電流パルスの振幅が、新油中のそれに比べて増大することを明らかにした。これは、放電の活性化を意味するので、注目すべき点である。

本論文は、これらの成果を纏めたものであり、7章から構成される。

第1章では、本研究の背景、研究目的および本論文の概要について述べている。

第2章では、植物油の化学・物理的特性、絶縁性液体中の平等・不平等電界における電

気伝導特性、不平等電界中の空間電荷とその極性効果、絶縁油中の沿面放電現象、および鉱油中の溶解ガス分析に関する過去の研究について調査している。

第3章～第6章では、上記の課題1～課題4の研究で得られた成果をそれぞれ詳細に述べている。

第7章は結論であり、本研究で得られた重要な結果を纏めると共に、今後の課題について言及している。

本研究の成果は、査読あり論文3編（内2編は筆頭著者）および国内外発表論文8編で報告され、学協会でも高く評価されている。氏が取り組んだ植物由来絶縁油中の沿面放電に関する研究は、今後の環境負荷低減型油入電力機器の新規開発に貢献するところが大きい。

よって、申請者は、博士（工学）の学位を受ける資格が十分あるものと判断する。