

# 鉱油における交流破壊電界の距離効果と水分量の影響<sup>\*</sup>

蒲 原 聖 也<sup>\*\*</sup>  
高 村 紀 充<sup>\*\*\*</sup>  
荒 岡 信 隆<sup>\*\*\*</sup>  
花 井 正 広<sup>\*\*\*</sup>

## Effects of Distance and Water Content on AC Breakdown Electric Field in Mineral Oil

Seiya KAMOHARA<sup>\*\*</sup>, Norimitsu TAKAMURA<sup>\*\*\*</sup>, Nobutaka ARAOKA<sup>\*\*\*</sup> and Masahiro HANAI<sup>\*\*\*</sup>

### Abstract

Currently, mineral oil is used mainly liquid insulating material. Mineral oil has the distance effect as one of the insulating properties. The distance effect is that the breakdown electric field decreases, when the gap length becomes longer. The breakdown electric field is said to be in proportion to  $(-1/3)$  power of the gap length. On the other hand, it recently reported that it has little dependence on gap length and more flat. Therefore, we reinvestigated the distance effect of mineral oil. In addition, we investigated the effect of water content in mineral oil on breakdown voltage.

**Key Words** : Mineral oil, AC Breakdown electric field, Distance effect, Water content

### 1. はじめに

近年、電力用変圧器において、高信頼性、大容量化、小型化、環境負荷の低減が求められている。環境負荷の低減を目的に鉱油の代替としてパーム油や菜種油等の植物由来のエステル油に関する研究<sup>(1)(2)</sup>が行われ、電力用変圧器の液体絶縁材料として使用され始めている。また、油入変圧器で使用されている劣化鉱油をエステル系絶縁油に入れ替えること(レトロフィル)も検討されている<sup>(3)</sup>。しかし、鉱油と比較してエステル系絶縁油は誘電正接が高い傾向にあるため<sup>(4)</sup>、依然として鉱油が主に使用されている。

代表的な油入変圧器は液体絶縁材料として鉱油、固体絶縁材料としてプレスボードを使用した複合絶縁構成で設計されている。鉱油の比誘電率がプレスボードよりも

低く、鉱油の部分に高電界が加わることになる<sup>(5)</sup>。このため、油入変圧器を設計する際には、液体絶縁材料と固体絶縁材料の比誘電率や抵抗率等の特性と、絶縁破壊特性を考慮して設計しなければいけない。鉱油は液体絶縁材料として長年使用され、鉱油の各種絶縁特性は調査されていることから、その特性はよく知られている。鉱油の絶縁破壊特性の一つとして、絶縁破壊電界はギャップ長の $(-1/3)$ 乗で低下する距離効果<sup>(6)</sup>が知られている。

一方、近年の研究報告では破壊電界のギャップ長依存性は、ギャップ長の $(-1/3)$ 乗よりも小さく、ギャップ長による破壊電界の低下は小さいと報告<sup>(7)(8)</sup>されている。このように、従来から知られていた特性が、油の精製方法の進歩等の影響により異なる結果が生じる可能性がある。そのため以前から知られている特性について再度調査する必要があると考えられる。

本論文では、直径 12.7 mm のステンレス製球電極を対向させた平等電界において、鉱油の交流破壊電圧を昇圧速度 3 kV<sub>ms</sub>/sec で印加し、交流破壊電圧を調査し距離効果について検討を行った。また、鉱油中の水分量は交

<sup>\*</sup> 平成 29 年 11 月 30 日受付

<sup>\*\*</sup> 工学研究科電気工学専攻

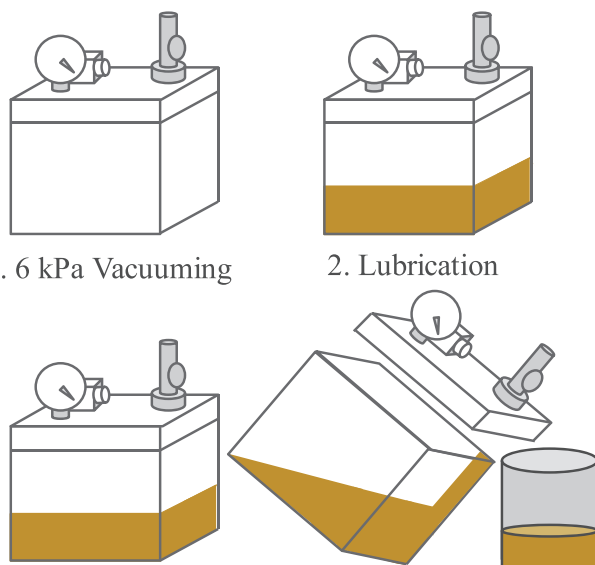
<sup>\*\*\*</sup> 電気工学科

流破壊電圧へ影響を及ぼすため、鉱油中の水分量による交流破壊電圧への影響についても調査を行った。

## 2. 実験方法

本実験では、鉱油はコスモ高圧絶縁 (COSMO OIL LUBRICANTS CO.,LTD) の新油を使用した。図1に脱気処理の概略図を示す。真空ポンプ (DA-20D, ULVAC KIKO,INC.) を用いて真空デシケータ (VXS, AS ONE Corp.) を6 kPaに真空引きし、鉱油を真空脱気注油した後、10分間大気圧下の空气中 (気温 27～29℃, 湿度 53～68%) で放置した。

図2に、本実験で用いた装置の概略図を示す。試験ケースはアクリル製で、直径12.7 mm (1/2 inch) のSUS304



3. Leave at atmospheric pressure(10 minute) 4. Transfer

図1 脱気処理の概略図

Fig. 1. Schematic of degassing treatment.

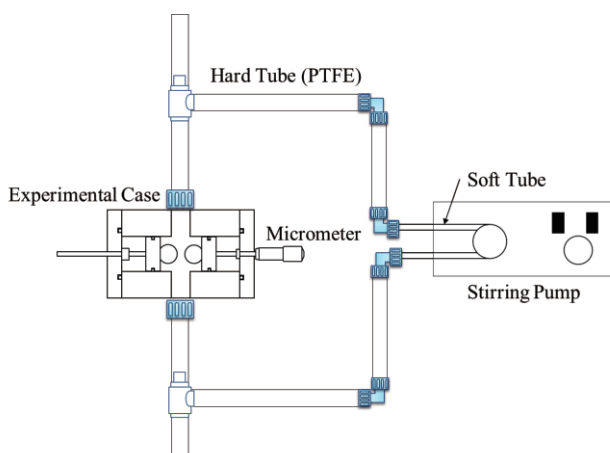


図2 試験装置の概略図

Fig. 2. Schematic of experimental equipment.

製球電極を2個対向させ、マイクロメータ (MHN1-25T, Mitutoyo Corp.) を用いてギャップ長を1.00 mm, 1.50 mm, 2.00 mm, 2.50 mmの計4種類に設定した。配管は主に硬質チューブであるPTFEチューブ (TOMBO NO.9003-PTFE, NICHIAS Corp.) を使用し、攪拌用ポンプ (13-876-2, Thermo Fisher Scientific Inc.) の部分のみ軟質チューブであるタイゴンチューブ (Tygon ®3350, Saint-Gobain K.K.) を使用した。図1において脱気処理した鉱油を別容器に移し替え、大気圧下で試験装置に約100 mL注油し試験を行った。脱気処理は、主に鉱油中の水分量の減少や脱ガスを目的に行っている。本実験では、鉱油中の水分量による判別を行った。

図3に、本実験で使用した試験電極の外観を示す。試験電極は、片側の電極に電圧を印加し、他方の電極を接地して60 Hzの交流電圧を昇圧速度3 kV<sub>ms</sub>/secで電極間に印加した。絶縁破壊により電極間に生じる不純物の影響を小さくするため、絶縁破壊後、攪拌用ポンプを1分間作動させた。ポンプ停止後、1分間静置した後、再度電圧を印加した。各ギャップ長において絶縁破壊を計10回発生させ、平均破壊電圧、標準偏差を調査し、平均破壊電界を求めた。平均破壊電界はより実際の破壊電界に近づけるために電界計算を行い、不平等率を考慮した結果を算出した。なお、球電極は、各ギャップ長の試験毎に未使用の球電極を使用した。

鉱油中の水分量は、カール・フィッシャー反応の原理を電量滴定法に適用して水分を測定する微量水分測定装置 (CA-31, MITSUBISHI CHEMICAL ANALYTECH CO.,LTD.) を用いて測定を行った。滴定セルにヨウ化物イオン、二酸化硫黄、およびアルコールを主成分とする電解液を入れ、電気分解により必要なヨウ素を内部的に発生させて測定する。

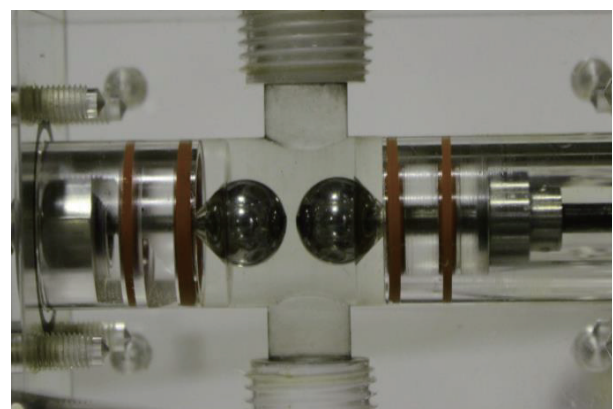
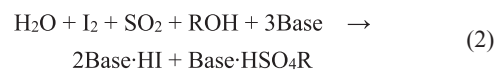
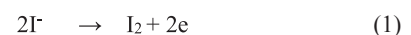


図3 試験電極

Fig. 3. Experimental electrodes.

(1) 式で発生したヨウ素が (2) 式に従い消費されると、検出電極がヨウ素消費を検出し、再び電気分解により (1) 式から陽極でヨウ素を発生させる。発生するヨウ素はファラデーの法則に従い電流量に比例する。(1) 式より、 $\text{H}_2\text{O} : \text{I}_2 = 1 : 1$  で反応することから、水 1 mol (18 g) は  $2 \times 96500 \text{ C}$  に相当するため、電気分解に要した電流量より、水分量を換算している<sup>(9)</sup>。

また、鉱油中の水分量は交流破壊電圧に影響を及ぼすことが知られている<sup>(10)</sup>。本実験では、常温の鉱油の破壊電圧への水分量の影響を水分量が 20 ~ 40 ppm の範囲においてギャップ長を 2.50 mm で固定して調査した。

### 3. 実験結果と考察

図 4 に、鉱油の水分量が 20 ~ 25 ppm, 30 ~ 35 ppm のときの破壊電圧とギャップ長の関係を示す。縦軸は実効値の交流破壊電圧、横軸はギャップ長、エラーバーは破壊電圧の標準偏差を示している。図 5 に、各ギャップ長における累積破壊確率と破壊電圧の関係を示す。図 5 (a) は 20 ~ 25 ppm, 図 5 (b) は 30 ~ 35 ppm での累積破壊確率と交流破壊電圧の関係である。鉱油の交流破壊電圧は、ギャップ長とともに増加し、鉱油中の水分量が少ない方が破壊電圧は高い傾向にあることが確認できる。また標準偏差（ばらつき）は、どちらも比較的大きいことが確認できる。一般に液体絶縁材料の破壊理論として、系内の最も破壊強度が低い部分（弱点部）の特性に系全体の特性が支配されるという考えの弱点破壊<sup>(11)</sup>が考えられている。つまり、電圧印加中に不純物が電極近傍に存在すると、不純物によって低い破壊電圧を示す可能性があり、不純物が存在しない場合は高い破壊電圧を示す可能性がある。今回、絶縁破壊すると電極間に不純物（炭化物など）が生成されるため、攪拌用ポンプにより電極間から排出を行った。しかし、鉱油中には絶縁破壊で生じた不純物が存在しているので不純物による影響を受け、標準偏差（ばらつき）が大きくなったと考えられる。

図 6 に鉱油の交流破壊電界とギャップ長の関係（距離効果）を示す。今回の平均破壊電界は電界計算により導

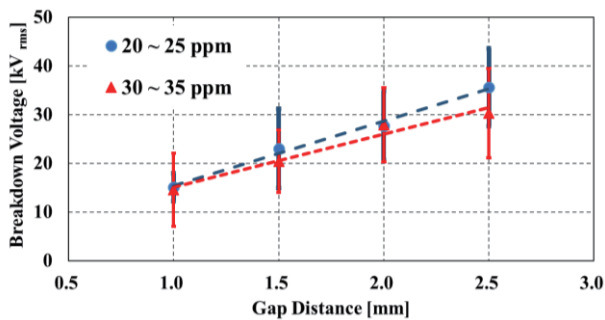
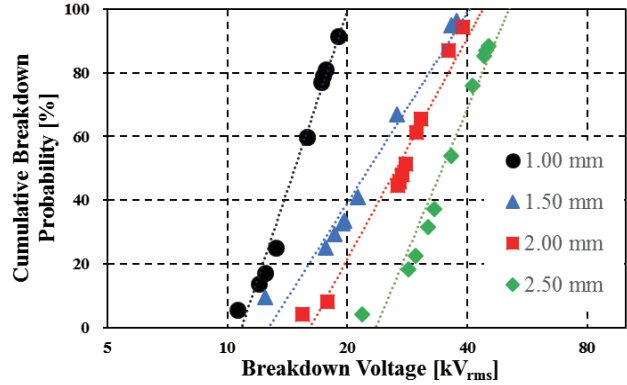
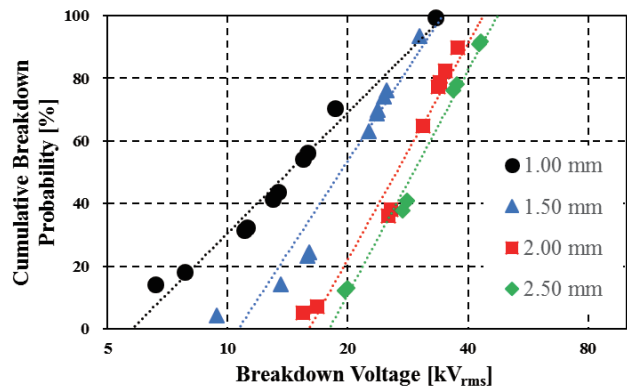


図 4 鉱油の交流破壊電圧とギャップ長  
Fig. 4. Relation between AC breakdown voltage and gap length of mineral oil.

出した不平等率を考慮した平均破壊電界とした。鉱油中の水分量が 20 ~ 25 ppm の場合、傾きはフラットで、30 ~ 35 ppm の場合では (-1/13) 乗で低下する特性となった。従来、距離効果はギャップ長の (-1/3) 乗で破壊電界が低下すると知られていたが、今回の結果より、近年報告されていた鉱油の距離効果の報告のように、従来のギャッ



(a) 20 ~ 25 ppm



(b) 30 ~ 35 ppm

図 5 累積破壊確率と交流絶縁破壊電圧

Fig. 5. Relation between Cumulative breakdown probability and AC breakdown voltage.

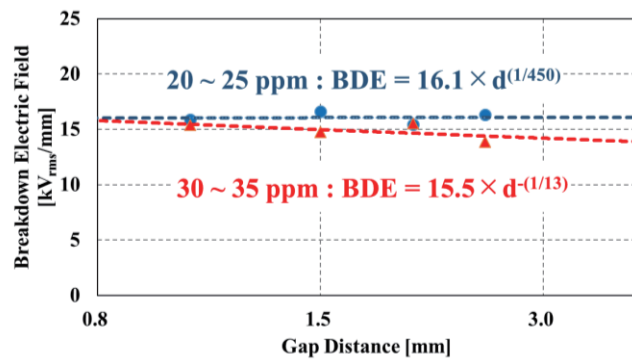


図 6 鉱油の交流破壊電界とギャップ長（距離効果）  
Fig. 6. Relation between AC breakdown electric field and gap length (distance effect).

ブ長の  $(-1/3)$  乗で低下として知られていた特性が、それよりもフラットな傾きで、破壊電界のギャップ長による低下が小さいという結果を得た。このため、油入変圧器の小型化に繋がる可能性がある。

また、図 7 に、鉱油中の水分量と交流絶破壊電圧の関係を示す。縦軸は交流破壊電圧、横軸は鉱油中の水分量、エラーバーは交流破壊電圧の標準偏差を示している。水分量の増加に伴い交流破壊電圧が低下していることから、鉱油中の水分量が交流破壊電圧へ影響していることが確認できる。鉱油中の水分量が多い方が交流破壊電圧は低く、水分量が少ないと交流破壊電圧は高い傾向にあり、水分量の  $(-1/2)$  乗で破壊電圧は低下する結果となった。

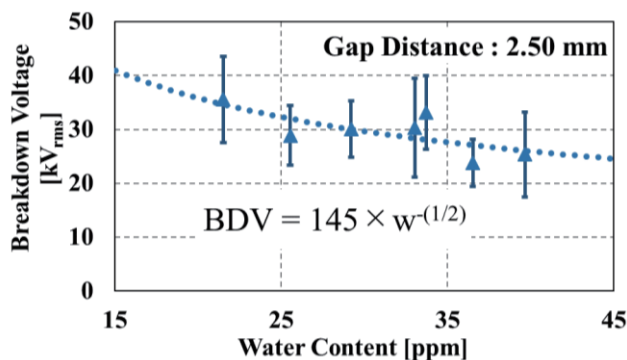


図 7 鉱油中水分量と交流破壊電圧

Fig. 7. Relation between water content and AC breakdown voltage of mineral oil.

#### 4. おわりに

鉱油は液体絶縁材料として長年使用されている絶縁油の一つである。その鉱油の絶縁破壊特性として距離効果があるが、近年の報告では従来のギャップ長の  $(-1/3)$  乗で低下するよりも、傾きがよりフラットで交流破壊電界の低下は小さいと報告されている。そのため、鉱油の特性を再度調査する必要があると考えられる。このため著者らは、鉱油の絶縁破壊特性を再度検証することを目的として鉱油の距離効果、鉱油中の水分量による交流破壊電圧への影響について実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 鉱油の交流破壊電界はギャップ長の増加に伴い、低下し、その傾きは従来知られていたギャップ長の  $(-1/3)$  乗で低下するのではなく、よりフラットな傾きで低下、またはほとんど破壊電界の低下が起らないことが確認された。このためギャップ長の増加による交流破壊電界の低下は従来よりも低い傾向にあることがわかった。
- (2) 鉱油中の水分量が多いと、交流破壊電圧は低くなる傾向にあり、水分量の  $(-1/2)$  乗で低下することが確認できた。

#### 文 献

- (1) N. I. A. Katim, M. T. Ishak, S. Razali, M. H. A. Hamid, M. M. Ariffin and N. Azis : 「Investigation on AC Breakdown of vegetable Oils with Insulate Electrodes」, Conference Proceedings of ISEM2017, V2-6, pp.504-507 (2017)
- (2) 平松悠史, 村本裕二 : 「植物系絶縁油の交流破壊特性に及ぼす水分の影響」, 平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会論文集, 5-P-55, p.408 (2016)
- (3) 黒田竜平, 小柳洋介, 宮城克徳, 花岡良一 : 「平等電界におけるブレンド油 (エステル系絶縁油と劣化鉱油) の絶縁破壊特性」, 平成 28 年電気学会基礎・材料・共通部門大会論文集, 5-A-a1-1, p.45 (2016)
- (4) 電気学会・技術伝承を目的とした電力設備の絶縁診断技術調査専門委員会編 : 「電力機器・設備の絶縁診断技術」, p.5 (2015)
- (5) 鎌田譲, 前島正明 : 「油入大容量変圧器の新しい絶縁技術」, 電気学会論文誌 B, Vol.112, No.4, pp.289-293 (1992)
- (6) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編 : 「放電ハンドブック下巻」, 電気学会, p.89 (1998)
- (7) 井上保, 山田慎, 吉田聡, 寺西常治 : 「変圧器油の油ギャップ絶縁破壊特性」, 平成 23 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 235, pp.24-7~24-8 (2011)
- (8) 井上保, 山田慎, 吉田聡, 寺西常治 : 「変圧器油における被覆ギャップ絶縁破壊特性」, 平成 24 年電気学会全国大会論文集, 5-129, p.199 (2012)
- (9) 三菱化学アナリティック社 : 「微量水分測定装置 (電量滴定方式自動水分測定装置) CA-31 型」, 製品取扱説明書, p.1-1, ZCA31MJ-00
- (10) 石田敏次, 上田実 : 「絶縁油の交流破壊電圧に及ぼす水分の影響」, 電気学会論文誌 A, Vol.92, No.3, pp.154-158 (1972)
- (11) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編 : 「放電ハンドブック下巻」, 電気学会, pp.63-64 (1998)