



Title	生分解性絶縁油を用いたコンデンサの開発
Author(s)	佐野, 侑也; 笹谷, 幸生; 小倉, 慎太郎 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2019, 28(1), p. 19-25
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76114
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

生分解性絶縁油を用いたコンデンサの開発

佐野 侑也¹ 笹谷 幸生¹ 小倉 慎太郎¹
鈴木 貴志²

¹ 日新電機株式会社 〒615-8686 京都府京都市右京区梅津高畝町 47 番地

² ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ株式会社 〒132-0035 東京都江戸川区平井 7-2-1

Development of capacitors using biodegradable insulating oil

Yuya Sano¹, Yukio Sasatani¹, Shintaro Ogura¹
Takashi Suzuki²

¹ NISSIN ELECTRIC CO., LTD 47, Umezu-Takase-cho, Ukyo-ku, Kyoto 615-8686, Japan

² LION SPECIALTY CHEMICALS CO., LTD 7-2-1, Hirai, Edogawa-ku, Tokyo 132-0035, Japan

Rapeseed oil, soybean oil and palm fatty acid ester, which have less impact on the environment, have been applied to transformers, but application to capacitors is hardly seen.

We have developed a new biodegradable insulating oil that can be applied to capacitors.

キーワード：コンデンサ、生分解性絶縁油

1. はじめに

過去、コンデンサ用電気絶縁油は PCB（ポリ塩化ビフェニル）が使われていたが、カネミ油症問題によって 1972 年より PCB の製造・輸入・使用が禁止となった。以降、様々な絶縁油開発が行われ、現在では主に芳香族炭化水素であるアルキルジフェニルアルカンを主成分とする合成油が用いられている⁽¹⁾。しかし、アルキルジフェニルアルkanは生分解性や魚毒性といった環境特性が低いという特徴がある。

近年、環境負荷を低減するため、国内外の変圧器においては大豆油や菜種油などの環境ラベルを取得した植物油を用いた報告や、植物油の問題である粘度を低くするためにパーム油を低分子化させた、パームヤシエステル油を用いた報告などが増えてきている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、コンデンサにおいては、環境対応を満足した絶縁油の適用報告は見られない。これは、コンデンサの交流運転電界や試験電界が、他の

油入電気機器に比べ、5～10 倍以上高い⁽⁵⁾ゆえに、高い絶縁破壊電圧や優れた部分放電特性を有する絶縁油である必要があるためである。

今回、様々な新規絶縁油の評価・開発を行い、従来のコンデンサ用電気絶縁油が有している電気特性を満足しつつ、生分解性や魚毒性といった環境特性に優れた電気絶縁油を開発した。

本報告では、開発した電気絶縁油の特徴と、比較として市販エステル油の特徴、それらを注油したコンデンサの諸特性について報告する。

2. 市販エステル油の電気絶縁油としての評価

市販されている下記 4 種類のエステル油について、電気絶縁油としての評価を実施した。

- ・植物エステル（不飽和脂肪酸エステル）
（以下、UFAE）

表1 試料油の性状一覧

Table 1. General properties of sample oil

試料油	植物エステル UFAE	植物エステル SFAE	天然エステル NFAE	合成エステル POE	JIS5種2号油 ADA
密度 g/cm ³	0.88	0.87	0.91	0.97	0.99
動粘度 mm ² /s(40℃)	4.5	2.8	37	28.8	5.3
引火点 ℃	184	153	338	261	144
流動点 ℃	10.0	<-55	-37.5	-57	-47.5
酸価 mgKOH/g	0.01	<0.01	0.014	0.004	<0.01
比誘電率 (80℃)	2.9	3.2	2.9	3.09	2.51
誘電正接 %(80℃)	0.17	0.67	0.147	0.652	0.008
体積抵抗率 TΩm(80℃)	0.42	0.10	0.16	0.034	7.1
絶縁破壊電圧 kV/2.5mm	91	83	80	91.8	90
H ₂ ガス吸収性 mm ³ /min	0.0	-1.0	-24.5	18.3	-57.5
部分放電開始電圧(%)	105	102	104	97	100
部分放電消滅電圧(%)	32	12	12	12	66

- ・植物エステル（飽和脂肪酸エステル）
（以下、SFAE）
- ・天然エステル（菜種油）
（以下、NFAE）
- ・合成エステル（ポリオールエステル）
（以下、POE）
- ・JIS5 種 2 号油アルキルジフェニルアルカン
（以下、ADA）（比較用）

UFAE、SFAE は脂肪酸とアルコールからなるエステル化合物であり、前者は脂肪酸分子の構造内に炭素－炭素二重結合である不飽和結合を有し、後者は脂肪酸の炭素数が 8 の脂肪酸エステルである。NFAE は菜種油を精製した天然エステルであり、トリグリセリドで構成されている。POE としては、ペンタエリトリールのエステルを用いたが、塩化された脂肪酸や芳香族カルボン酸のエステルではないものを評価した。

これらの性状を表 1 に示す。一般物性と電気絶縁特性は JIS C 2101 に準拠して測定した。部分放電開始電圧、部分放電消滅電圧については、図 1 に示すモデルコンデンサ（静電容量：6nF 程度）を製作し、JEC-0401-1990 に準拠して測定した。なお、部分放電開始電圧および消滅電圧は、ADA の部分放電開始電圧を 100(%)とした時の相対値として評価した。

今回検討した 4 種の絶縁油は、いずれも部分放電開始電圧は比較油である ADA とほぼ同等であり、



図 1 モデルコンデンサの外観
Fig. 1. Appearance of model capacitor

十分高かったが、部分放電消滅電圧はいずれも低く、適用に向けての大きな障害となることが判明した。部分放電の消滅は部分放電によって発生したガスの量と絶縁油のガス吸収速度、ガスを吸収した絶縁油の拡散速度などが影響を与えると想定されるため、H₂ ガス吸収性や動粘度が部分放電開始・消滅電圧を決める要因の一つである⁽⁶⁾と思われる。

H₂ ガス吸収性は分子構造内にある、炭素－炭素二重結合に起因していると考えているが、不飽和結合の割合を増やしても明確な差が認められなかったことから、今回使用した試料油をコンデンサに適用することは難しいと判断した。

3. 環境特性が良好なコンデンサ油の開発

環境特性が良好で、且つ部分放電消滅電圧を改善するため、過去のコンデンサ用電気絶縁油に関する様々な報告⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾を調査した。これらの知見より、芳香環を有することで部分放電消滅電圧を改善し、脂肪酸エステルを有することで良好な環境特性が得られると考えた。これより、分子構造内に芳香環を有する脂肪酸エステル及び組成物を新たに開発し、その評価を実施した。

開発油の性状一覧を表 2 に示す。一般物性と電気絶縁特性は JIS C 2101 に準拠して測定した。H₂ ガス吸収性試験は IEC 60628 Method A に準拠、部分放電特性は 2 項の図 1 に示すモデルコンデンサを製作し JEC-0401-1990 に準拠して測定し、測定した値を表 1 の ADA の部分放電開始電圧を 100(%)とした時の相対値として評価した。

表 2 開発油の性状

Table 2. Properties of developed oil

試験項目		単位	開発油
一般物性	密度 (15℃)	g/cm ³	0.9
	動粘度	mm ² /s	3.4
	引火点	℃	150
	流動点	℃	<-55.0
	酸価	mgKOH/g	<0.01
	水分	ppm	<100
絶縁特性	比誘電率	-	2.7
	誘電正接	%	0.1
	体積抵抗率	TΩm	3.1
	絶縁破壊電圧	kV/2.5mm	86
H ₂ ガス吸収性		mm ³ /min	-73.4
部分放電開始電圧		%	103
部分放電消滅電圧		%	58

開発油はコンデンサ用絶縁油で重要な H₂ ガス吸収性¹⁰⁾が ADA と同等以上の特性を有するほか、低動粘度、低流動点などの特長がある。一方、比誘電率、誘電正接が高く、体積抵抗率は低いというエステル油の特性も現れている。

部分放電特性については、部分放電消滅電圧が

58%と ADA と同水準まで改善することができた。芳香環を分子内に導入したことによる影響が大きいと考えられるが、分子構造内に占める芳香環の割合(芳香族炭素率%*C_A*)は、ADA の%*C_A*が 75 であるのに対して、開発油は 40 であるため、従来の考え方「%*C_A*が大きい＝ガス吸収性が高い」⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾とは異なる。これは、開発油が低動粘度であり、コンデンサ素子間の油対流性に優れることからガス拡散性が部分放電消滅電圧の向上に寄与していると推測している。

4. 環境特性評価

日本では環境ラベルとして、公益財団法人日本環境協会が実施するエコマークが知られている。開発油について、エコマークの認定基準を満たした品質水準であることを確認するため、環境特性の評価を行った。なお、評価は電気絶縁油の様な潤滑油を対象品目とした「生分解性潤滑油 Version2.6」の認定基準を参考にし、魚類に対する急性毒性試験と生分解度試験(28 日後)を行った。

生分解性試験は、OECD テストガイドライン 301F Manometric Respirometry Test(1992)に準拠して実施し、28 日後の生分解度を求めた。結果、開発油は 75%の生分解性を示し、エコマーク「生分解性潤滑油 Version 2.6」認定基準の 1 つ、「28 日後における分解度 60%以上」を満足していることを確認した。

魚類に関する急性毒性試験は OECD テストガイドライン 203 Fish, Acute Toxicity Test(1992)に準拠して実施した。エコマーク認定基準では試験開始から 96 時間後の半致死負荷率(LL₅₀: Median Lethal Loading Rate)あるいは半致死濃度(LC₅₀: Lethal Concentration 50)の値が 100mg/L 以上であることとされている。試験の結果、LL₅₀が 100mg/L を超えており、基準を満たしていることが確認された。

以上の結果を受け、開発油は公益財団法人日本環境協会のエコマーク認定を得た。(認定番号: 16 110 001)

5. コンデンサ共存材料との相溶性

コンデンサは主な材料としてアルミ箔と PP フィ

ルムを用いており、その他にパッキン（ゴム）類、銅材、エポキシモールド材が油と接触・浸漬している。開発油との相性を確認するため、構造から溶解度パラメータ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾（以下 SP 値：Solubility Parameter 単位： $(\text{cal}/\text{cm}^3)^{1/2}$ ）を算出し、検討を行った。

結果、ADA の SP 値 9.76 に対し、開発油は SP 値が 8.71 である成分を含むことから、ポリプロピレン（SP 値 8.1）やゴム系材料（SP 値 7.7～8.3）への影響があるのではないかと考え、それらを中心に検討を行った。

5.1 ポリプロピレン（PP）との相溶性

コンデンサの主要誘電体材料である PP との相溶性を把握するため、油中加熱劣化試験を行い、膨潤性・溶解性の評価を行った。

試験方法は、PP フィルムを所定の大きさに切り出し、秤量を行い、初期重量とした。開発油に浸漬させた状態で、80℃の恒温槽内に所定の時間保管した。24 時間後、72 時間後、240 時間後に PP フィルムを取り出し、付着している油をウェスでふき取り、重量測定を行った。初期重量からの増加率を求め、膨潤量とした。

$$\text{膨潤量} = (W_1 - W_2) / W_1 \times 100$$

W_1 ：初期フィルム重量

W_2 ：フィルム表面の油拭き取り後の重量

また、取り出し後の PP フィルムをアセトンで脱脂後、重量測定を行い、初期重量からの減少率を求め、溶解量とした。

$$\text{溶解量} = (W_1 - W_3) / W_1 \times 100$$

W_1 ：初期フィルム重量

W_3 ：脱脂後のフィルム重量

膨潤量の測定結果を図 2 に、溶解量の測定結果を図 3 に示す。

図 2 より、PP 膨潤量は加熱 1 日でほぼ一定値に達することが判った。また図 3 より、PP 溶解量では、溶解が進むのは短時間であり、以降はほとんど溶解していないことが判った。これより、PP の膨潤・溶解は、各油共に安定しており、経年的に大きな変化はないことが判った。PP からの絶縁油への影響についても、誘電正接、比誘電率、体積抵抗率、絶縁破壊電圧を測定し影響が無いことを確認した。

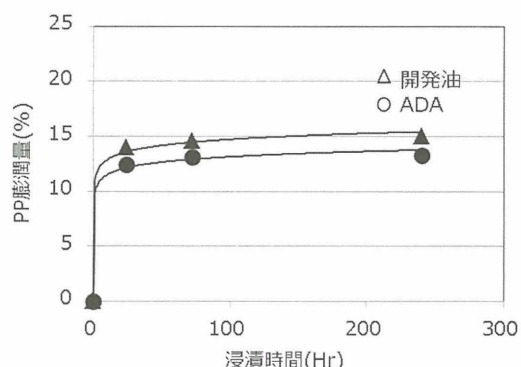


図 2 開発油の PP 膨潤量

Fig. 2. PP swelling amount of developed oil

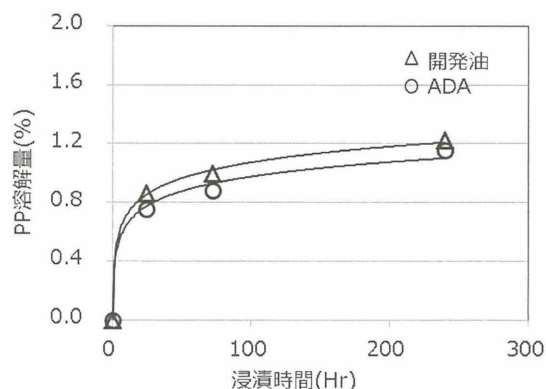


図 3 開発油の PP 溶解量

Fig. 3. PP dissolution amount of developed oil

5.2 その他の共存材料との相溶性

コンデンサに用いられるパッキン（ゴム）類、銅材、エポキシモールド材に対する影響を把握するため、開発油との共存加熱試験を実施して、油の誘電特性変化を検証した。その結果、誘電特性の変化は ADA の場合と同等であることが判った。さらに、パッキン（ゴム）について、油中での圧縮永久歪評価を実施したが、圧縮永久歪率、硬度ともに ADA の場合と比較して有意な差異は認められず、現行パッキンを用いても問題ないことを確認した。絶縁油への影響についても、PP と同様、誘電正接、比誘電率、体積抵抗率、絶縁破壊電圧を測定し影響が無いことを確認した。

6. 実験用コンデンサによる評価

開発油とコンデンサ共存材料との相互作用は小さいと判断できたため、図 4 に示す実験用コンデンサ（定格：2.3kV、容量：18kvar）に開発油を注油、封

入したコンデンサを作製、各種特性評価を実施した。なお、比較用として ADA を注油、封入したコンデンサを作製し、比較した。

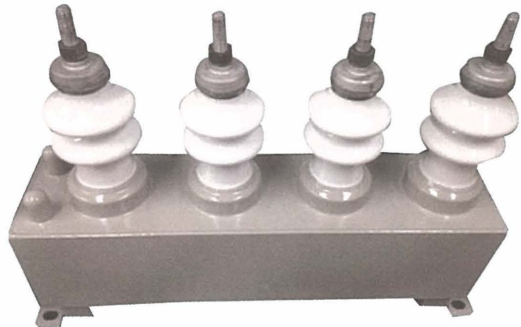


図 4 実験用コンデンサ外観

Fig. 4. Appearance of experimental capacitor

6.1 静電容量および損失特性

JIS C 4902-1 に準拠して測定を行った。各絶縁油を注油した実験用コンデンサの 20℃での静電容量を 100%とした時の 0℃～60℃での静電容量と損失率 ($\tan \delta$) の変化を図 5 に示す。開発油、ADA をそれぞれ注油した実験用コンデンサの特性に大きな差異はなく、静電容量、損失率ともに同等レベルの特性を示している。

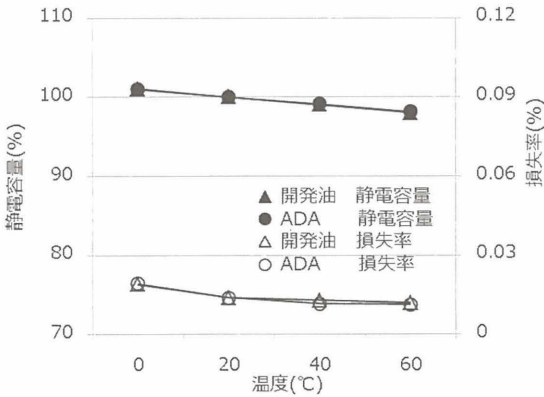


図 5 実験用コンデンサの静電容量・損失率

Fig. 5. Capacitance and dielectric loss of experimental capacitor

6.2 部分放電特性

JEC-0401-1990 に準拠して測定を行った。実験用コンデンサに一定の昇圧速度で電圧を印加し、部分放電が発生する電圧を部分放電開始電圧とした。そ

の後すぐに電圧を降下し、部分放電が消滅する電圧を部分放電消滅電圧とした。ADA 注油コンデンサの 20℃での部分放電開始電圧を 100%として、相対評価した結果を図 6 に示す。

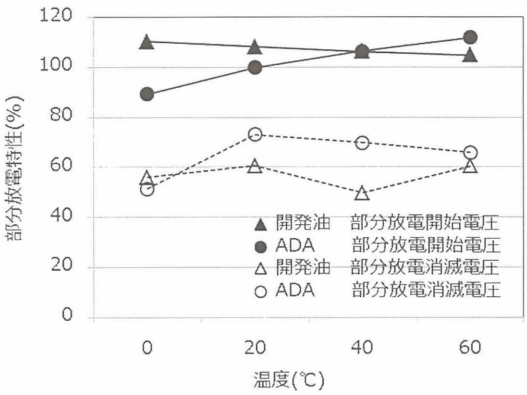


図 6 実験用コンデンサの部分放電特性

Fig. 6. Partial discharge characteristics of experimental capacitor

開発油を注油した実験用コンデンサの部分放電消滅電圧は ADA を注油した実験用コンデンサと比較して、やや低い値となった。一般に絶縁油の部分放電特性を示す指標として水素ガス吸収性が用いられるが、開発油 (-7.34mm³/min) は ADA (-57.5mm³/min) よりも優れた値を示すことが分かっている。しかし、本結果では開発油がやや低いと水素ガス吸収性の結果と逆の結果になった。これは、部分放電が発生した際の放電電荷量が大きく、放電によるガスの発生量が多かったと推測している。コンデンサとしての性能と絶縁油単体の特性との関係は明確になっておらず、今後の課題としたい。

6.3 交流破壊 V-t 特性

開発油を注油した実験用コンデンサに部分放電開始電圧近傍の電圧を印加、保持し、絶縁破壊が起こるまでの時間を測定した。結果 (V-t 特性) を図 7 に示す。

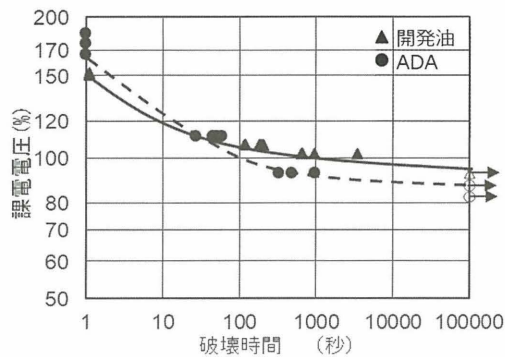


図7 実験用コンデンサの V-t 特性

Fig. 7. V-t characteristic of experimental capacitor

課電電圧 (%) は 20℃における部分放電開始電圧を 100%としてプロットしている。開発油を注油した実験用コンデンサは短時間破壊の場合、ADA を注油した実験用コンデンサより低くなった。これは、短時間では放電電荷量が多い開発油の方が、多くのガスが発生したため、早期に破壊が起こったと推測している。また、長時間の方では短時間と逆転し、開発油を注油した実験用コンデンサの方が ADA を注油した実験用コンデンサよりも高くなった。逆転したのは、部分放電開始電圧付近であるため、電圧維持時の部分放電発生までの時間の違いや動粘度が低いことや、水素ガス吸収性が高いことが影響していると推測している。また低温時における ACV- t 試験を行った結果を図 8 に示す。

温度の低下により開発油の V-t 特性が低下している。部分放電特性においては、0℃と 20℃に差はな

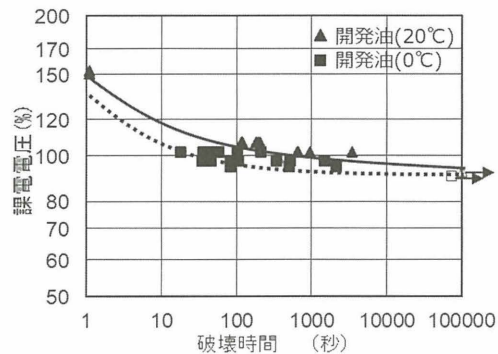


図8 開発油を注油した実験用コンデンサの V-t 特性(0℃、20℃)

Fig. 8. V-t characteristics (0 ° C, 20 ° C) of experimental capacitor impregnated with developed oil

いため、電圧印加時間、部分放電開始電圧、動粘度及び放電電荷量が関係していると推測しているが、明確になっていないため、今後の課題としたい。

6.4 長期信頼性評価

IEC/TS 60871-2 の試験方法に準拠して、長期信頼性を評価した。60℃で定格電圧の 1.4 倍相当の電圧を印加して 10000 時間まで保持した時のコンデンサの静電容量と損失率の経時変化を図 9 に示す。

コンデンサの静電容量、損失率ともにほとんど変化は認められず、極めて安定な特性を示すことが確認できた。

7. まとめ

今回、生分解性に優れるエステル油のコンデンサへの適用に向けた評価、開発を行った。その結果、芳香環を有する脂肪酸エステル油を含む組成物がコンデンサ用電気絶縁油として適用できる可能性を見出し、以下の知見を得た。

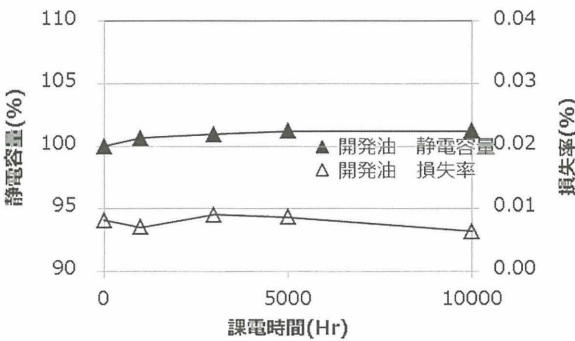


図9 開発油を注油した実験用コンデンサの長期信頼性

Fig. 9. Long-term reliability of experimental capacitor impregnated with developed oil

- 1) 飽和脂肪酸エステル油は、部分放電消滅電圧が低く、コンデンサ用電気絶縁油としての適用は難しい。
- 2) 脂肪酸エステルに不飽和結合を導入すると、部分放電消滅電圧の改善が認められるが、コンデンサ用電気絶縁油としての適用は難しい。
- 3) 芳香環を分子構造内に有する脂肪酸エステル油を開発して評価を実施したところ、ADA

を注油したコンデンサとほぼ同等の部分放電特性を有することが判明し、芳香環の導入効果が大きいことが分かった。

- 4) 開発油は芳香環を有するが、易分解性であり、魚類に対する急性毒性試験においても安全と判断されるレベルであることが確認でき、エコマークの認定を得ることができた。
- 5) 実コンデンサへの適用に向け、開発油と使用共存材料との適合性を調査したが、特に問題は認められなかった。また、開発油を注油した実験用コンデンサの特性は、ADA を注油した実験用コンデンサの特性とほぼ同等であり、長期信頼性試験においても極めて安定した特性を有していることを確認した。
- 6) 開発油を注油した実験用コンデンサは、ADA を注油した実験用コンデンサとほぼ同等の電気特性を有しつつ、従来品にはない優れた環境適合性を備えている。

参考文献

- (1) 村岡：「電力用コンデンサの歴史ーそのコンパクト化と低ロス化の歩みー」、SEI テクニカルレビューNo.176、pp.31-39、(2010)
- (2) 高本：「環境対応型電気絶縁油の変圧器への適応性評価」、石油学会第 25 回絶縁油分科会研究発表会要旨集、pp.41-45、(2005)
- (3) 狩野 他：「パームヤシ脂肪酸エステル of the 化学構造と絶縁特性」、石油学会第 26 回絶縁油分科会研究発表会要旨集、pp.43-47、(2006)
- (4) 変圧器の不燃性難燃性向上技術調査専門委員会：「変圧器の難燃性・不燃性向上技術の現状と動向」、電気学会技術報告第 1090 号、(2007.7)
- (5) 電気学会：「電気機器・絶縁材料技術の横断的評価と共通技術の体系化」、電気学会技術報告書第 945 号 (2003)
- (6) 西松 他：「絶縁油の化学構造と電気特性」、日新電機技報、Vol.24.No.1、pp.104-114、(1979)
- (7) 高橋 他：「新しいコンデンサ用絶縁油」、

日新電機技報、Vol.29.No.4、pp.48-51、(1984)

- (8) 西松 他：「コンデンサ絶縁油の最近の動向」、日新電機技報、Vol.28.No.3、pp.87-97、(1983)
- (9) 高橋 他：「新しいコンデンサ用絶縁油 1,2-CPE」、第 3 回絶縁油分科会研究発表会要旨集、pp.1-11、(1983)
- (10) 上島 他：「水素ガス吸収性と絶縁油組成との関係についての検討」第 31 回絶縁油分科会研究発表会要旨集、pp.50-56、(2011)
- (11) 石油学会編：「電気絶縁油ハンドブック」、pp.223-225、(1987)
- (12) 上田 他：「添加剤の溶解性パラメータに関する考察」、塗料の研究 No.152、pp.41-46、(2010)

(2019 年 7 月 23 日 受理)

著者略歴

佐野 侑也

1983 年生。2008 年群馬大学大学院応用化学・材料工学科修士課程修了。同年日新電機（株）入社。電気絶縁油の研究開発に従事。

笹谷 幸生

1970 年生。1992 年立命館大学理工学部化学科修了。同年日新電機（株）入社。絶縁材料（主にコンデンサ材料）、圧電材料等の研究開発業務に従事。

小倉 慎太郎

1971 年生。1996 年名古屋大学大学院工学研究科修了。同年日新電機（株）入社。主に油浸コンデンサの製品開発に従事。

鈴木 貴志

1981 年生。2006 年 3 月中央大学大学院理工学研究科応用化学専攻修了。同年 4 月ライオン（株）入社。2015 年 7 月ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ（株）研究開発本部 平井研究所 副主任研究員。環境対応型電気絶縁油の研究開発に従事。