

油浸絶縁紙のコロナ劣化

Corona Deterioration of Oil Impregnated Paper

松 垣 勝* 堤 泰 行* 加 子 泰 彦**
 Masaru Higaki Yasuyuki Tsutsumi Yasuhiko Kako

要 旨

変圧器主絶縁のモデルとして、平等電界下の油浸紙のコロナ劣化を検討した。電界、コロナ電荷量、絶縁厚み、固体絶縁物の占積率、ボイドが電極に接する構造と接しない構造の違いなどが寿命に及ぼす影響、および寿命のばらつき、変圧器油のガス吸収性などについて調べた。その結果、最近の高電圧変圧器の主絶縁は、コロナ劣化に対して十分な裕度があることがわかった。

1. 緒 言

高電圧変圧器の絶縁構造の合理化を検討するためには、コロナ放電による絶縁物の劣化や絶縁破壊の研究が重要な要素となる。

本報ではモデル平板電極を用いて高圧-低圧巻線間の主絶縁を模擬しコロナと油浸紙の絶縁劣化の関係を調べた。

2. 実験の方法

2.1 電 極

電極は、図1に示すような黄銅製平行平板電極であり、上下対称である。

2.2 乾燥クラフト紙

厚み 70μ のクラフト紙を 10^{-3} mmHg に減圧し、約 130°C で6時間乾燥した後脱気油を含浸した。

2.3 吸湿クラフト紙

コロナ開始電圧を低下させる目的で、上記の乾燥含浸紙とともに少量の吸湿紙を使用することも行なった。この吸湿紙は、炭酸カリウム飽和水溶液を用いて湿度40%にしたデシケータ中に2日以上保管し、実験に用いるときにはデシケータから取り出すとただちに脱気油に浸して含浸紙の状態で使用した。この吸湿紙の水分量は、油浸前の状態で6~8%であった。

2.4 油

変圧器油を 10^{-2} ~ 10^{-3} mmHg の減圧下で数回噴射、循環して脱気し、使用した。

2.5 試料構成

図2(a)は、全絶縁厚 d_t mm のうち中心の $d_t/3$ mm の厚さだけクラフト紙に約 $5\text{mm}\phi$ の穴をあけ、油隙をもうけたものである。この試料構成で、すべて乾燥含浸紙を用いるとコロナ開始電界の強さが 40 kV/mm 程度となり、それより低い電界におけるコロナ劣化の実験ができないので、コロナ開始電圧を下げる目的で油隙に接する上下各1枚に2.3で述べた吸湿紙を用いた。

図2(b)は、絶縁厚 1.4 mm のうち上部電極側から d_0 mm の厚さだけクラフト紙に穴をあけ、油隙が電極に接するようにしたものである。クラフト紙にはすべて乾燥含浸紙を用いているが、コロナ開始電界の強さは 15 kV/mm 程度である。

図2(a), (b)に示すように試料を配置した後、30分間 10^{-2} ~ 10^{-3} mmHg に減圧してボイドや紙層中のガスを取り、その後脱気油を含浸し大気圧にもどし、約30分放置して電圧を加えた。

2.6 高圧回路および電圧印加法

図3は高圧(交流 50 c/s) 回路で、 C_0 はコロナ測定のための結合コンデンサである。

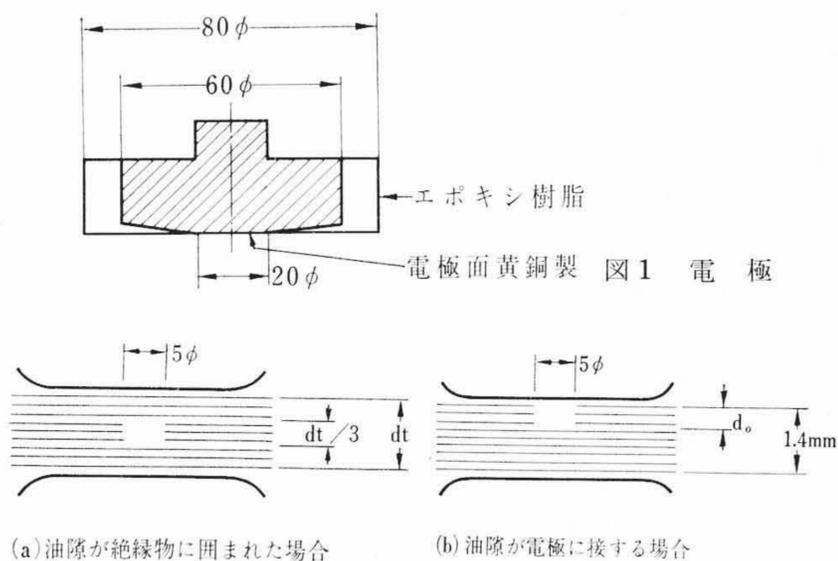


図1 電 極

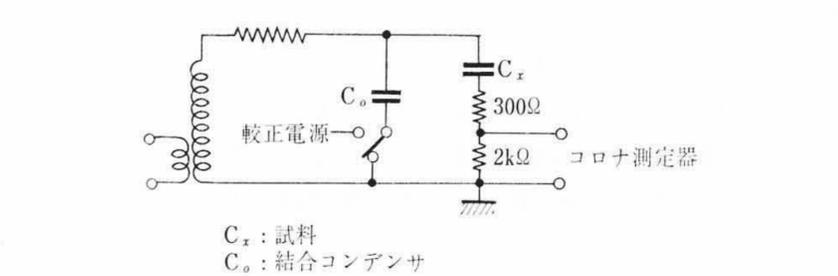


図2 試 料 構 成

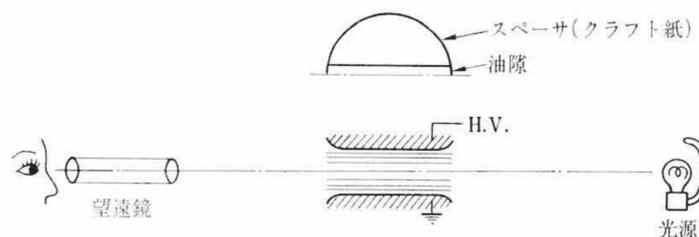


図3 高 圧 回 路

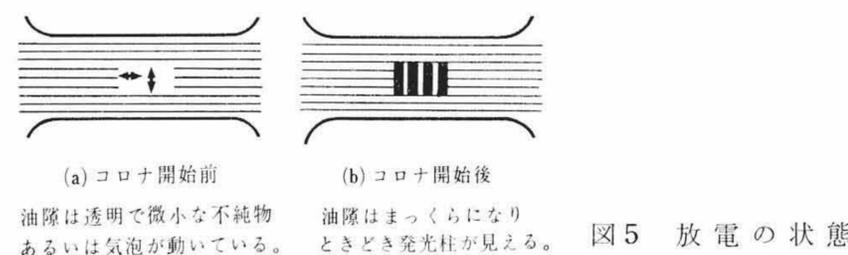


図4 放 電 の 状 態

電圧は数秒間で所定の値に達し、破壊するまでその電圧に保たれた。

3. 実験結果および検討

3.1 コロナ放電の観察結果

図4のように、平板電極に油隙付き絶縁物をはさみ、側面より油隙中の放電を観察した。ある電圧になると、図5(a)に示すように

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立研究所 工学博士

微小な気泡あるいは不純物と思われるものが数個あらわれ、激しく上下に動くのが見られる。さらに電圧をあげると、急に油隙内はまっくらになる。これはコロナ放電によって生じた微小な気泡のために光が散乱されるためと考えられる。しばらくすると、図5(b)に示すような輝度の高い発光柱が観察される。

図2に示すような油隙をつけた構造では、油隙の部分で放電が起こり、長時間コロナを発生させると絶縁層中に放電が進展してゆく。このことは、図6に示すように放電を受けた試料をアニリン染色して確認した。

3.2 コロナパルスの時間的变化

図7, 図8は電界の強さ21.0 kV/mm, 28.9 kV/mmにおけるコロナ電荷量(クーロン/s)およびコロナパルス数の時間的变化の代表的な例である。

これらは、図9のようにA, B, Cの三つの部分に分けられる。

A領域の幅は電界の強さに大きく依存しており、図10に電界とA領域の幅との関係を示した。この領域は、前節で観察したように、放電をはじめから輝度の高い発光柱が観察されるまでの時間と考えるのが妥当であろう。A領域でパルス数が極大になることが多いが、これはコロナが発生し始めたころは弱い放電が多数発生し、その後次第に少数の強い放電に移行することを示している。

B領域では、コロナパルス数も若干増加する傾向にあるが、そのこう配は小さいので安定した放電が発生していると見られる。

C領域でコロナ放電量が増加するのは、コロナ放電が油隙の部分だけにとどまらず、油隙の外まで伸びてきた場合や電界方向にクラフト紙をつき抜けて放電が伸びだしたことと対応する。

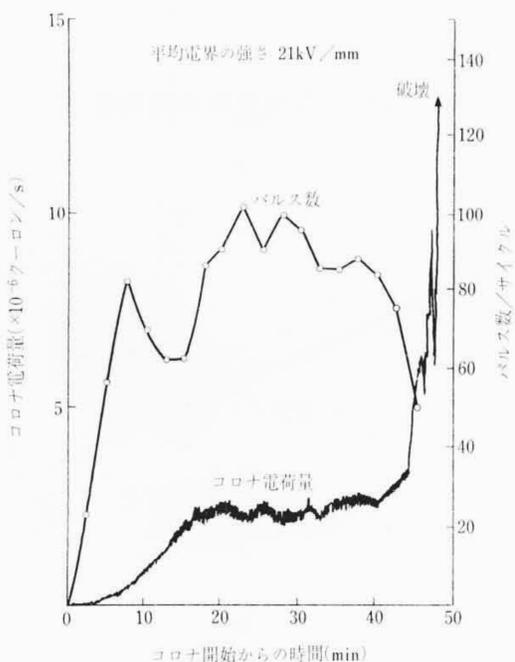


図7 コロナの時間的变化

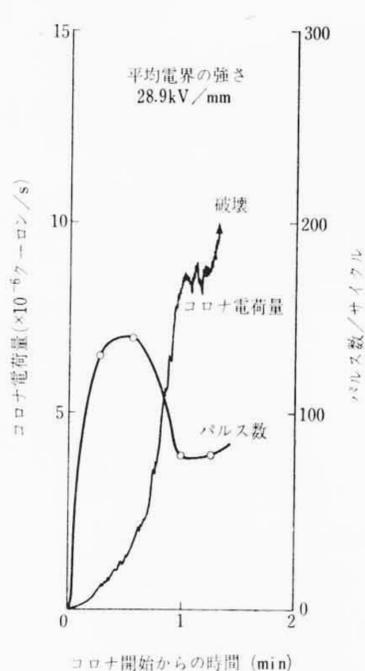


図8 コロナの時間的变化

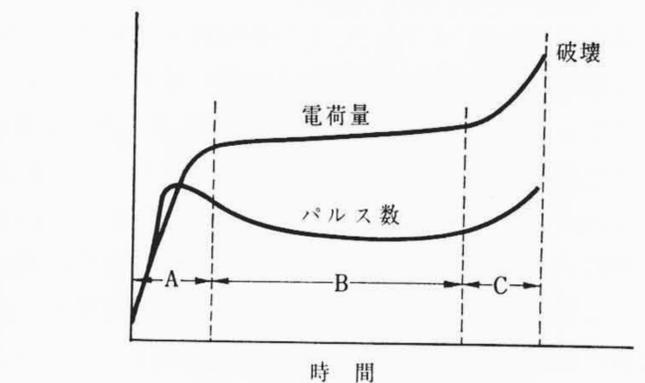


図9 コロナパルスの時間特性

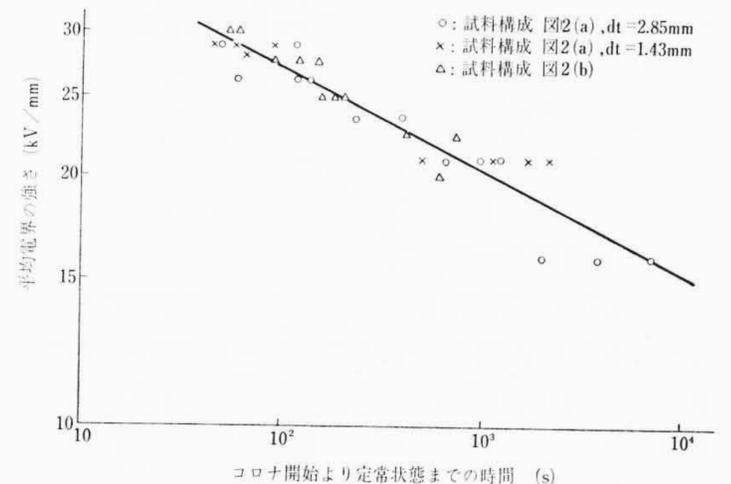
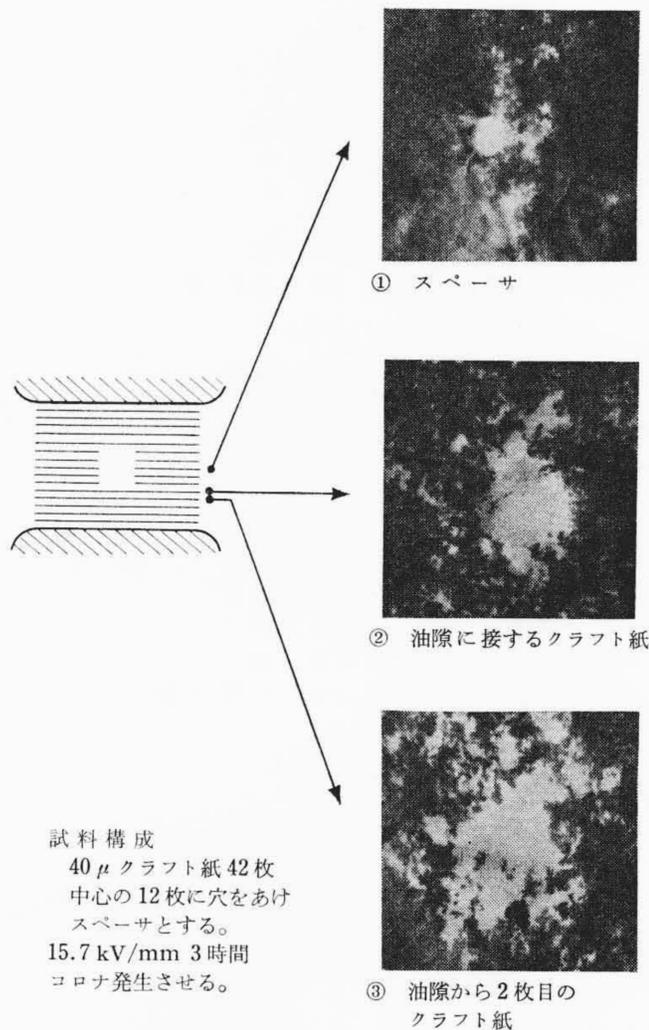
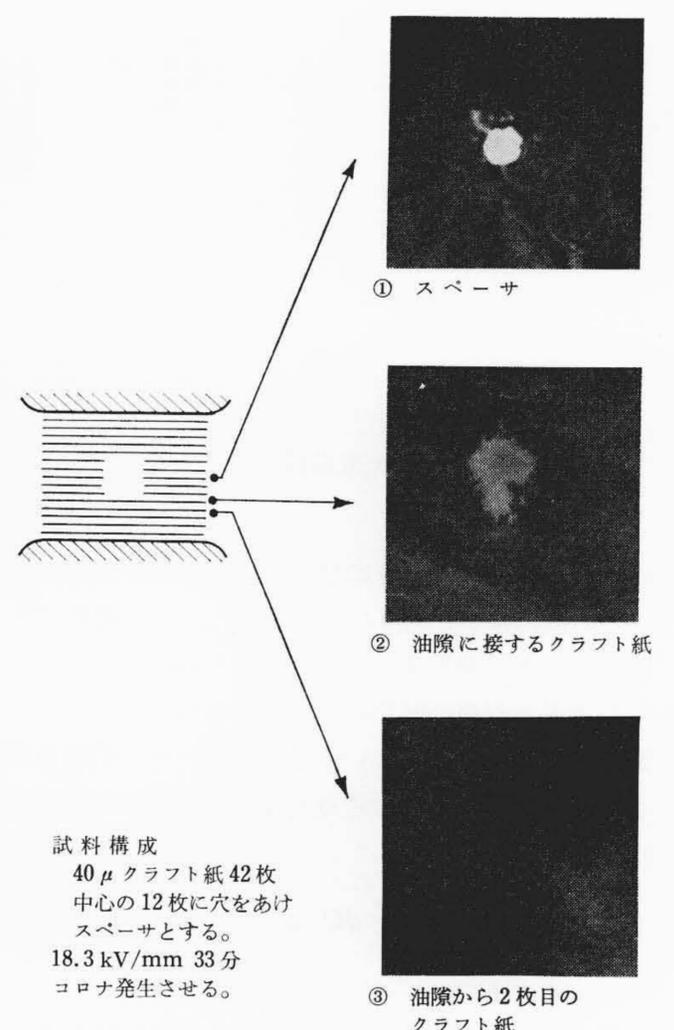


図10 平均電界の強さと定常状態までの時間との関係



(a) 油隙外へ放電が伸びた場合



(b) 油隙内だけで放電が起こる場合

図6 放電の進展状態

3.3 コロナ電荷量と寿命の関係

図11は、1発のコロナ電荷量の大きさと寿命の関係を示す。同一絶縁構造で同一電界の強さならば、電荷量も同じくらいにならないが、300%程度のばらつきがある。電荷量の値としては、放電が比較的安定した状態(図9のB領域)の値を取っている。

変圧器のコロナの判定法として、たとえば 10^{-9} クーロン以上なら有害であり、以下なら無害であるという考え方も一部にはあるが、

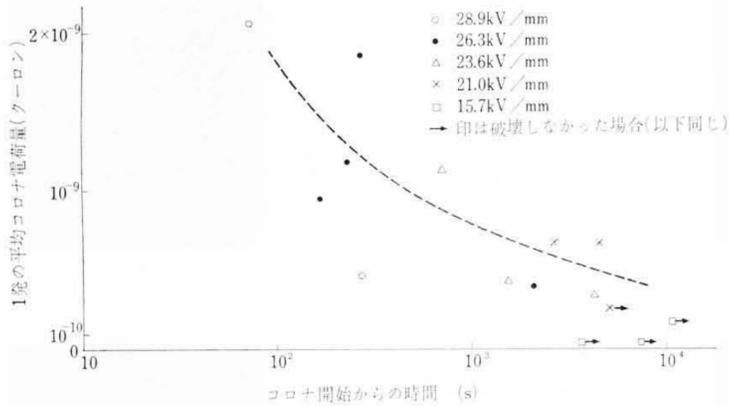


図11 1発のコロナ電荷量と破壊までの時間との関係

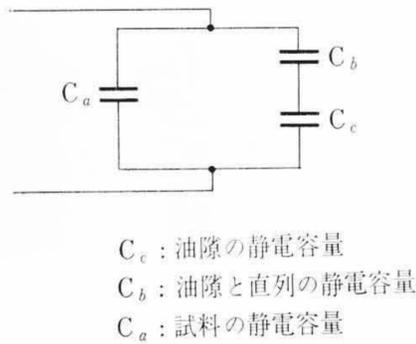


図12 コロナ放電の等価回路

C_c : 油隙の静電容量
 C_b : 油隙と直列の静電容量
 C_a : 試料の静電容量

この図からわかるように必ずしも電荷量の大きさだけで有害性を論ずるわけにはいかない。図11から、同一電界の下でも大きな電荷量のコロナが発生すると、破壊までの時間は短い、この関係は後述の電界と寿命の関係に比べてばらつきが大きく、寿命の推定には電界を用いるほうがよい。図12はコロナ放電の等価回路であり、この図から見かけの放電電荷量 $\Delta Q'$ と真の放電電荷量 ΔQ との関係がわかる。

$$\Delta Q' = \frac{C_b}{C_c + C_b} \Delta Q \dots\dots\dots (1)$$

ここに $C_a \gg C_b$, $C_a \gg C_c$ とした。

図11に示した電荷量は、図2(a)の試料構成における見かけの電荷量であって、このときの1発当りの真の電荷量は(1)式から計算でき、 $\Delta Q = 1.4 \Delta Q'$ である。

図13は、電界と平均コロナ電荷量および破壊までの全コロナ電荷量の関係を示す。電界の強さが大きくなると、平均コロナ電荷量も増加する傾向にあるが、破壊までの時間は大幅に短くなるので、平均コロナ電荷量と破壊までの時間の積である全コロナ電荷量は電界が強くなるにつれて低下する傾向にある。この結果はコロナ劣化には電荷量だけでなく、電界の強さが大きく影響していることを示している。

3.4 電圧-寿命特性

コロナが発生し始めてから破壊するまでの時間と電界の強さとの関係を求めたのが図14であり、その絶縁構成は図2(a)および(b)に示してある。図2(a)の場合には油隙に接するクラフト紙が炭化をおこすことはなく、外観上なんらの変質もみられないが、図2(b)の場合には比較的低電界(20 kV/mm)でもコロナによる炭化がおり、コロナによる損傷はより激しいものとなる。しかし寿命に及ぼす影響について図14に示した実験範囲内ではその差はほとんどない。もしコロナによる損傷でしだいに残存試料厚みが減少してゆき、最後に破壊するという機構を考えるならば、上述のような特性は説明できない。しかし、たとえば、コロナ放電によってガスが発生し、クラフト紙中の油の含浸率がしだいに低下し、ついに絶縁破壊を起こす破壊機構を考えれば、コロナによるクラフト紙表面の損傷は大きな問題ではない。

図14の特性を実験式で示すと、

$$E = 47T^{-1/10} \dots\dots\dots (2)$$

である。ここに、 E : kV/mm, T : sec にとっている。

3.5 絶縁構造の影響

平均電界を一定(20 kV/mm)とし、全絶縁厚に対するクラフト紙の占める割合(占積率)を変えて、コロナ開始から破壊までの時間を求めた。図15は縦軸に、油隙が短絡したときにクラフト紙に加わる電界をとっている。このV-t特性は絶縁構造一定として、印加電圧を変えて求めたV-t特性(図14)ときわめてよく一致する。実験式を用いてこれを数式化すれば次のとおりである。

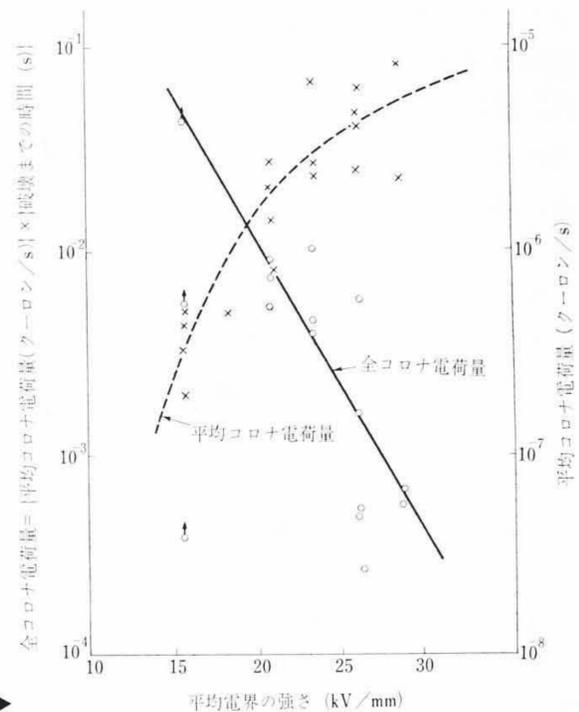


図13 平均電界の強さと平均コロナ電荷量、全コロナ電荷量との関係

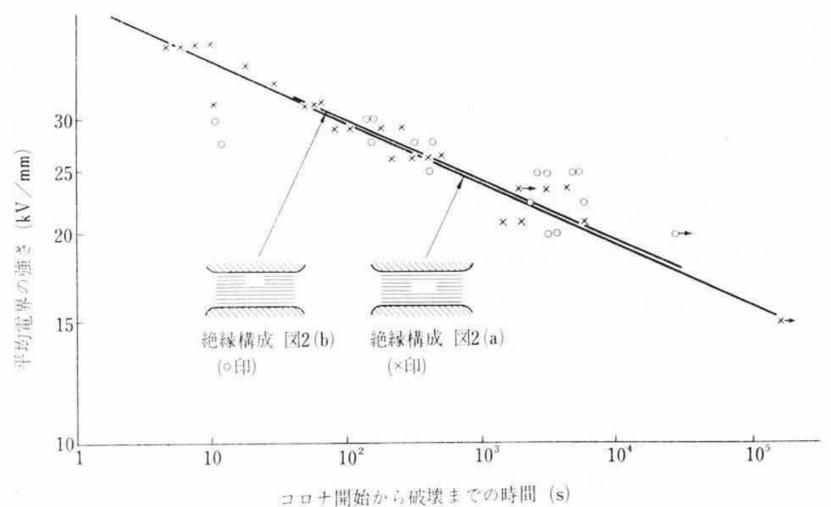


図14 平均電界の強さと破壊までの時間の関係

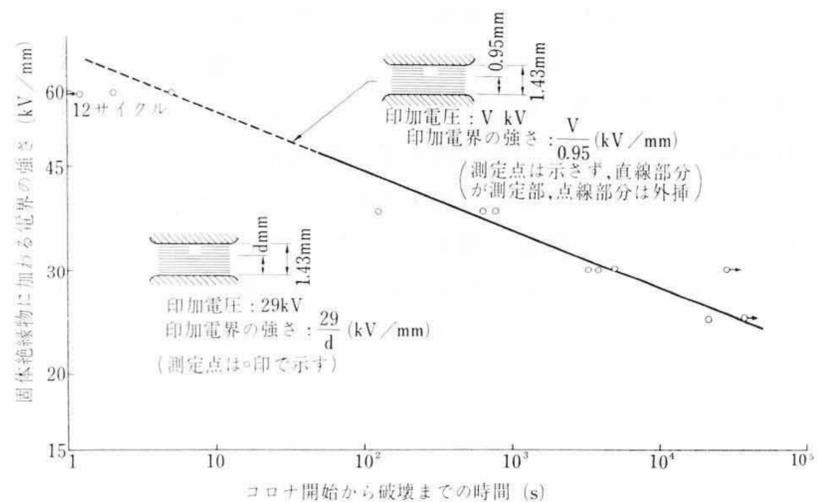


図15 占積率による寿命の変化とV-t特性の関連性

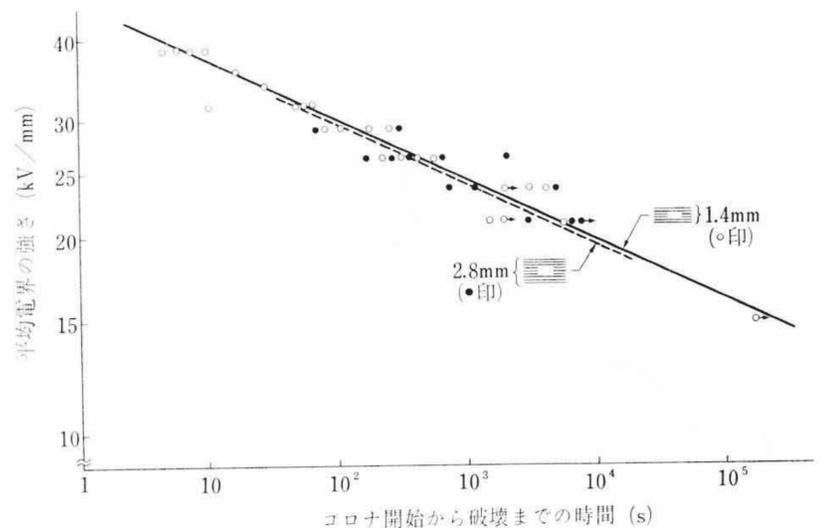


図16 絶縁厚を変えたときの電界-寿命特性の比較

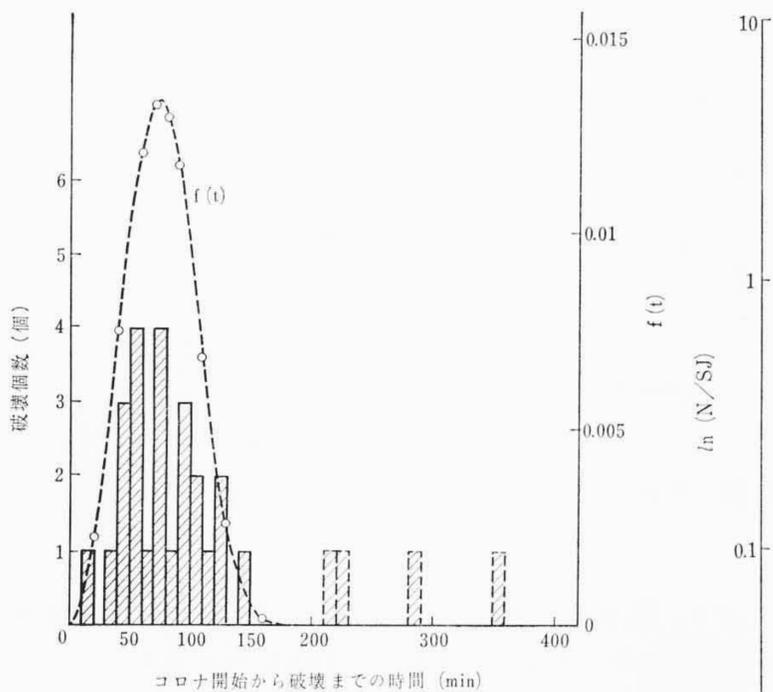


図17 平均電界の強さ 20 kV/mm における寿命の分布

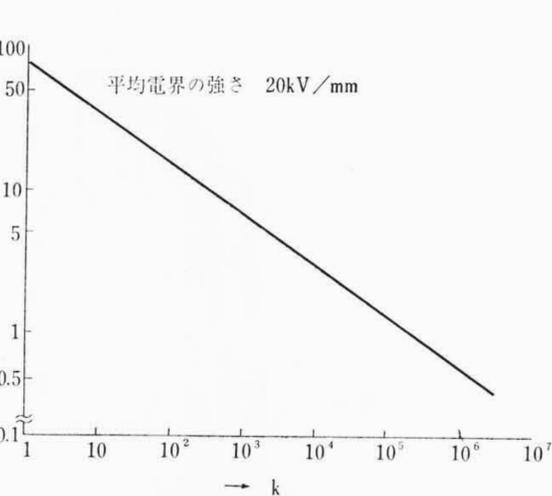
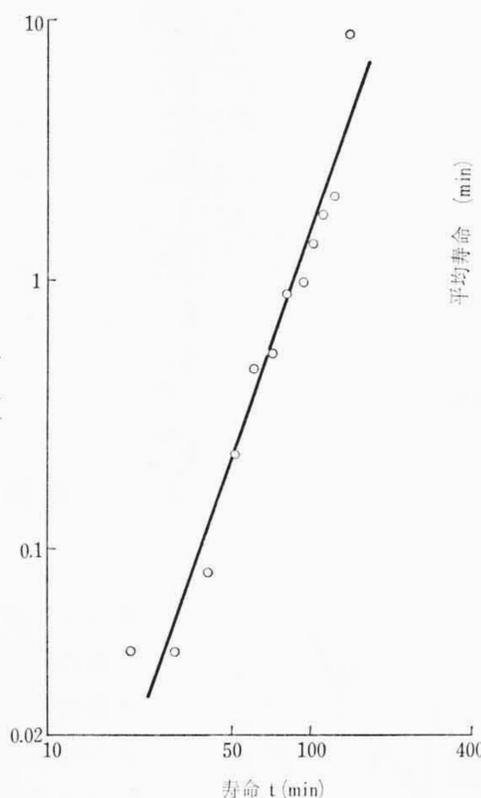


図19 放電面積比 k と寿命との関係

図18 Weibull 分布関数の定数 m, t_0 の決定

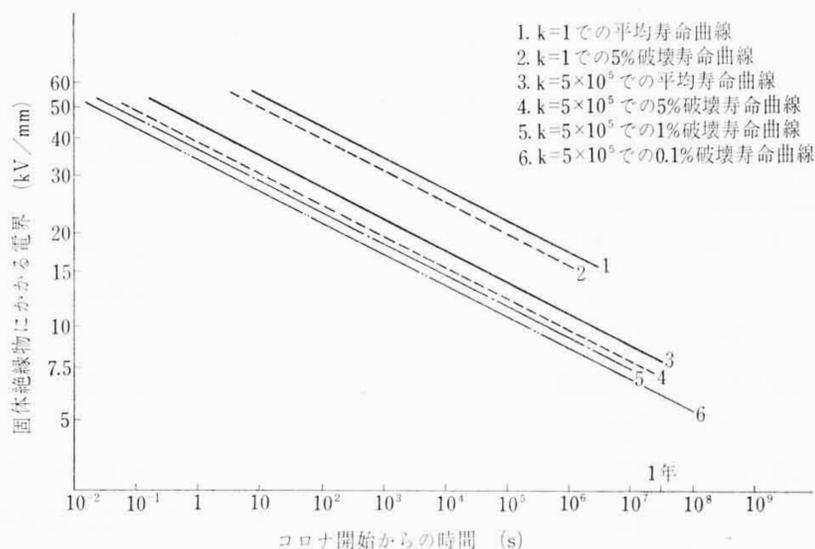


図20 $k=1, 5 \times 10^5$ における破壊確率を変えたときの電界-寿命特性の変化

印加電圧を V (kV), コロナ開始から破壊までの時間を T (s) とすれば、油隙の厚さのいかにかわらず、クラフト紙層は次の厚さでなければならない。

$$d = \frac{2}{3} V \times \frac{T^{1/10}}{47} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式は(2)式に比べて2/3だけ異なっているが、図14のデータが2/3の占積率を基準にしているため、これを補正する意味で加えてある。

油隙をもうけて全体の絶縁厚を大きくすると、コロナ開始電圧を高くするには役立つが、絶縁物に加わる電圧がコロナ開始電圧以上であれば、油隙で放電が起きたときの残りの固体絶縁物にかかる電界によって寿命が決まるために、破壊までの寿命は改善されないと考えられる。

図16は、絶縁厚がコロナ劣化に及ぼす影響を調べたもので、図中の2曲線は試料構成の図2(a)において、 $d=1.4$ mm および $d=2.8$ mm に対応している。絶縁厚が2倍になっても平均電界の強さが等しければ、破壊までの時間はほとんど変わらないことがわかる。

3.6 試料の大きさの影響

図14の実験結果は、5φの油隙内でのコロナ劣化によるV-t特性であり、実際の変圧器では主絶縁の面積が大きくなるため、短い時間で絶縁破壊をおこす確率が増大するものと思われる。面積の小さい試料で、実験結果のばらつきの分布を調べれば、面積の大きな試料の寿命を推定することができる。図14と同一試料で、20 kV/

mm における絶縁破壊までの時間を28個測定し、分布を求めたのが図17の棒グラフである。図17の絶縁破壊の起こる確率は Weibull 分布関数により整理したものである。

図18は時間の対数に対して $\ln(N/SJ)$ をプロットしたもので、寿命の長い4点(図17中の点線で示したものは考慮に入れていない。図18の関係はかなり直線に近く、Weibull 分布関数でよく表わされることがわかる。ここに、 N は被試験数、 SJ は t 秒後の生残り数であり、Weibull 分布関数 $F(t)$ は、

$$F(t) = 1 - \frac{SJ}{N} = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{m}{t_0^m} t^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right\} \dots\dots\dots (5)$$

である。図18のグラフより、 $m=28.6$, $t_0=85.1$ 分であることがわかる。なお、このときの平均値 $\mu=75.8$ 分、標準偏差 $\sigma=28.8$ 分である。(5)式を用いて計算した $f(t)$ を図17中に示した。

試料の面積が k 倍になれば、 t 秒以内に破壊する確率は $1 - [1 - F(t)]^k$ となる。 $1 - [1 - F(t)]^k = 0.5$ とおき、 k と t の関係を求めると図19のようになり、この図から試料の面積が大きくなるにつれて寿命が短くなる様子がわかる。

変圧器主絶縁の電界の強さは、図14の実験値よりかなり低い範囲になるので、図14の結果を低電界まで外そうして寿命を推定する必要がある。試料面積が大きい場合、ばらつきが大きいと寿命が短くなるので、低電界における寿命のばらつきについて仮定が必要となる。図14の結果で、電界が低くなると寿命のばらつきも大きくなるが、寿命の平均値に対する寿命のばらつきの比はあまり変わっていないように思われる。したがって、低電界における寿命を推定するにはこのことを仮定した。この仮定を図14でいえば、寿命のばらつきの範囲を示す境界線が寿命の平均値の直線と平行であることを意味する。このような仮定を用いて、 $k=5 \times 10^5$ のときの電界と寿命の関係を図20に示す。この図には、破壊確率を5, 1, 0.1%としたときの電界と寿命の関係が示されている。図中の電界の強さは、油隙が放電したとき残りのクラフト紙に加わる平均の電界を表わしている。

図20の結果は、高電圧変圧器の絶縁で、まわりが固体絶縁物で囲まれた油隙でコロナ放電が生じた場合の寿命を推定するのに利用できる。

最近の高電圧変圧器の寿命を推定してみると、試験電圧でコロナ

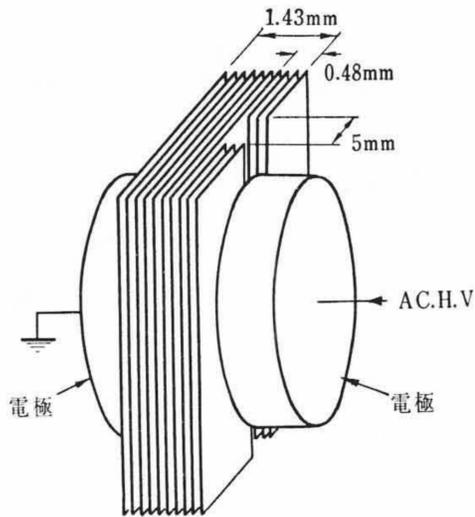


図21 絶縁構成

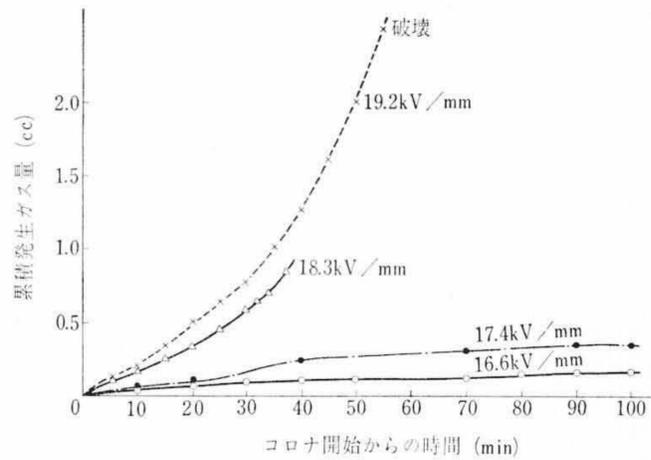


図24 平均電界の強さと発生ガス量の時間的変化の関係

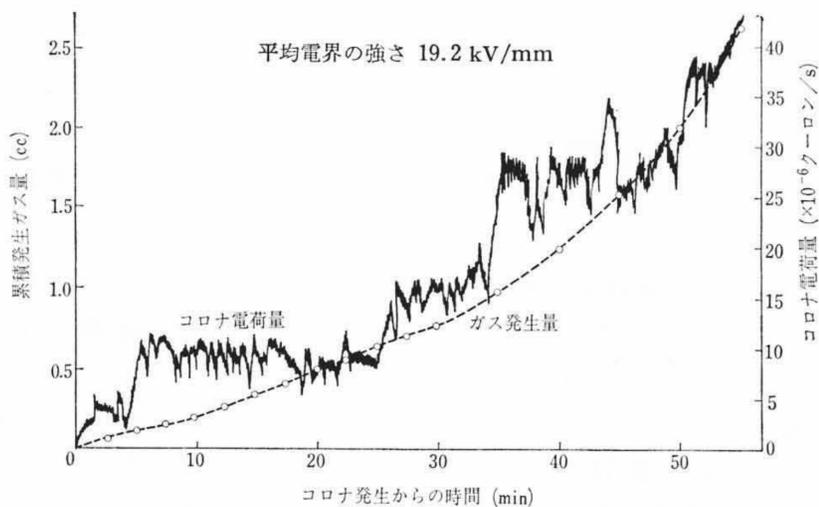


図22 19.2 kV/mmにおけるガス発生量の時間的変化

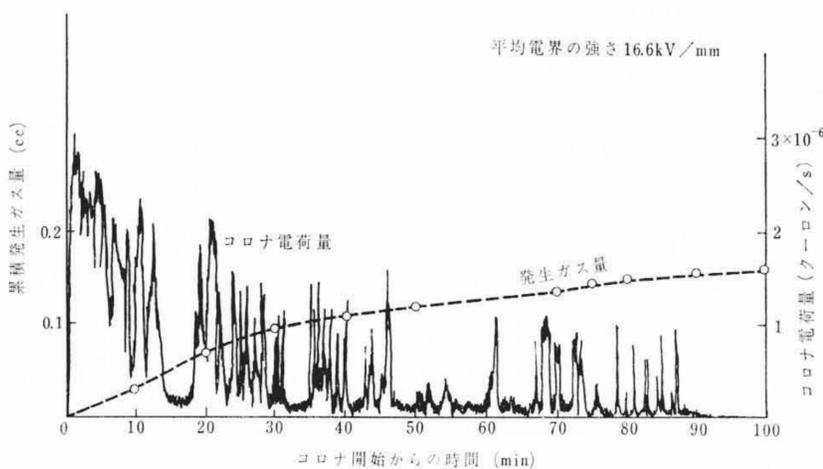


図23 16.6 kV/mmにおける発生量の時間的変化

放電が発生しても、短時間で貫通絶縁破壊を起こすことはないことが明らかである。

3.7 変圧器油のガス吸収性

変圧器油のガス発生と吸収とをしらべるために、図21のように、試料構成を前と同じようにし、油隙を縦につくり、油隙中でコロナ放電により発生したガスが上に逃げるような構造とし、上に逃げたガスを捕集して発生ガス量を求めてみた。その例を、図22と図23に示す。ガス量は累積の発生量である。いずれの場合も、コロナ開始電界の強さが25 kV/mm近くであるので、一度コロナ開始まで電圧を上昇し、コロナが開始すると直ちに試験電圧にまで下げた。このため、図23のような低電界でも一度発生したガスが残っているため、初めのほうではコロナ電荷量が大きくなっているものと思われる。図22は、電界が高く比較的短時間で破壊する例で、時間とともにガス発生量は増加している。図23は、電界が低く上に逃げてゆくガス量のために、電荷量は急激に減少しついにコロナ放電がと

まってしまう。図24は、平均の電界の強さを変えたときの発生ガス量の時間変化を示したものであるが、18 kV/mmあたりが、ガス発生と消滅の境界になっている。コロナ放電の状態は、油隙の大きさによっても変わると考えられ、油隙が大きくなると、コロナ発生消滅の境界となる電界は、これより小さくなるかもしれない。

4. 結 言

本論文は、油浸紙のコロナ放電による劣化を検討したものであり、変圧器主絶縁のコロナ劣化について一つの目安を得ることができた。主要な結果を示すと次のとおりである。

- (1) コロナ電荷量は、放電開始後しだいに大きくなるが、ある時間後安定した状態になり絶縁破壊を起こす直前に再び増大する。
- (2) 同一の絶縁構造では、1発の電荷量が大きいほど破壊までの時間は短くなる。
- (3) 電界が高いほど単位時間当たり発生する電荷量は大きく、絶縁破壊までの時間で積分した全電荷量は電界が高いほど小さい。
- (4) コロナ劣化による寿命は、全絶縁厚を考慮に入れた平均電界よりむしろ油隙で放電が起きたとき残りの固体絶縁物に加わる電界の強さを考えたほうが都合がよい。
- (5) 固体絶縁物で囲まれた油隙でコロナ放電が発生した場合の寿命は図20から推定でき、変圧器主絶縁の実用電界における寿命は十分長く、また破壊が生ずるときは貫通破壊を起こすより前に沿層せん絡を起こすものと考えられる。
- (6) 低電界ではたとえ放電が発生してもしだいにガス発生量が減少し、コロナが消滅するが、高電界では発生ガス量は増大し破壊に至る。

以上の検討により、現在の変圧器絶縁にはコロナ劣化に対し、かなり余裕があることがわかるが、一方ここで行なった実験では、実際の変圧器に比べて絶縁厚みが異なることや油隙が固体絶縁物で囲まれていないなどの相違点があり、また絶縁劣化の機構についても不明の点も多いので、これらの点を今後さらに検討してみたい。

終わりに臨み、本研究に対し終始ご指導ご激励をいただいた、日立製作所国分工場村山部長をはじめ関係者のかたがた、日立製作所日立研究所木村部長、井上主管研究員に深謝申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 井関, 倉橋: 電学誌 81, 874 (July, 1961)
- (2) F. J. Vogel: Trans. A. I. E. E. 78, 23 (1959)
- (3) 電気学会: 放電ハンドブック