

有機絶縁材料のトラッキング現象の サイクル表示による評価

菊 地 光 一

Evaluation of Tracking Phenomena on Organic
Insulated Matirals by Cycle

Kōichi Kikuchi

(昭和53年10月31日受理)

1 ま え が き

有機絶縁材料の耐トラッキング性を評価するため試験法の単純化、合理化を図る方向から、または在来の試験法を改善、改良する立場から、あるいは材料の物性や化学構造の立場から多くの検討がなされ今日迄多くの試験法が提案されている。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾しかし有機絶縁材料のトラッキング生成過程が複雑であるため、その解析が困難で、今迄開発された多くの試験法も一長一短があり、⁽¹⁾⁽²⁾その量的評価と使用上の結果と対応のよいことが強く要望されている。筆者等是有機絶縁材料のトラッキング進行過程に伴う電流波形を観測、検討した結果、その経過過程はいくつかの代表的モードに分けることが出来、測定試料に特有なサイクル表示が可能であることが判明したので、本研究はそのサイクル表示によってトラッキング現象の評価を試み、トラッキング現象のモデル化を実現するための基礎的試料を得ることを目的としたものである。

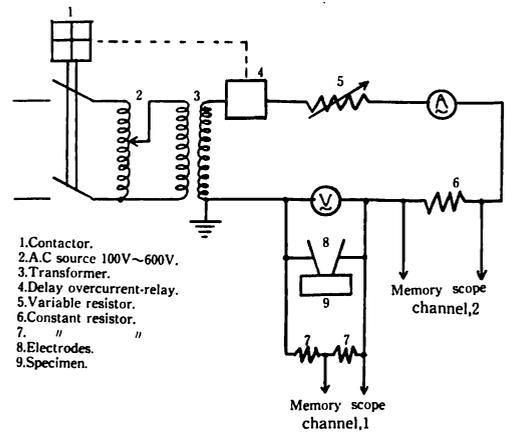
2 実 験 方 法

耐トラッキング性の試験方法は IEC. Draft 15A Secretariat (December 1975)⁽⁴⁾に準拠した。

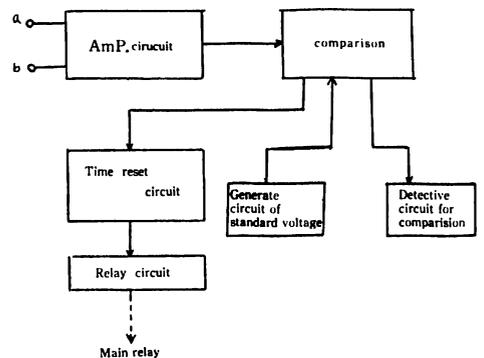
2-1 試 験 回 路

試験回路は [Fig 1] に示す。試験回路の力率は 0.9~1.0 で短絡電流がそれぞれの電圧で (1 ± 0.1) A になるよう調整されている。

トラッキングの判定は試験回路に 0.5A 以上の電流が 2 秒間流れた時に、トラッキング判定装置が O.C.R を動作させて判別する。[Fig 2] はトラッキング判定装置のブロックダイアグラムで [Fig 3] はそ



[Fig 1] Test circuit



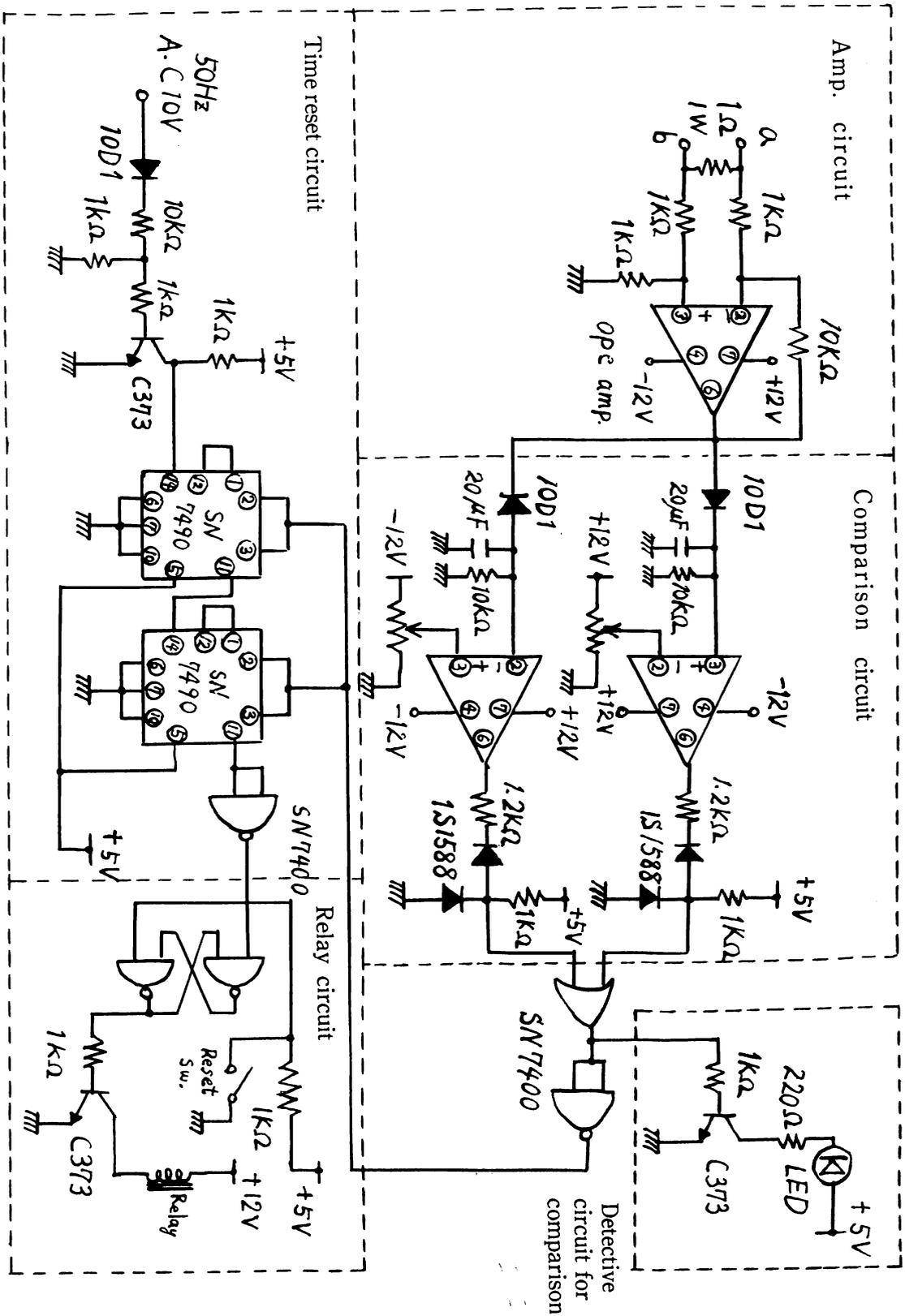
[Fig 2] Tracking judgement device (block diagram)

の回路図である。

2-2 滴 下 装 置

佐々木式分注機にモータを結合して (30 ± 5) 秒間隔で (20 ± 5) mm³ の試験液を一滴 (30~40) cm の

有機絶縁材料のトラッキング現象のサイクル表示による評価



[Fig3] Tracking judgement device (circuit diagram)

高さより自動的に滴下する。使用した滴下液は A 液⁽⁴⁾である。

2-3 電極および電極配置

電極配置は [Fig 4] のとおりで、電極の材質は黄銅を使用した。両電極には試料面に対して、それぞれ 100g の圧力がかかるおもりが乗っている。測定前に電極はアルコールを浸した清浄な木綿で表面の付着汚損物を除去する。

2-4 試 料

試料の大きさは 15mm × 15mm × 2 mm 以上のものを用い試験面に傷のないものを選択する。使用した種類は紙基材フェノール、ネオプレン、カーボン入りポリエチレン、アクリル、プチルゴムである。

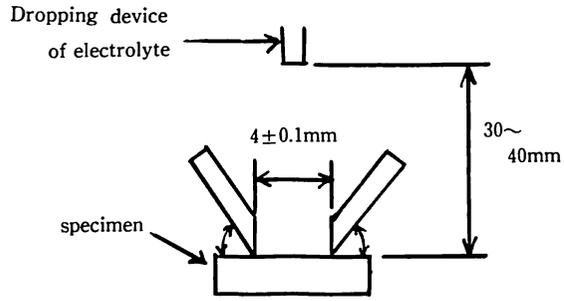
2-5 試験方法

試験における周囲温度は (20 ± 5) °C である。試料を水平に支持台に固定し、測定試験電圧に対して短絡電流が 1.0 [A] になるように可変抵抗を調節する。次に滴下液が規定の時間間隔で規定量⁽⁴⁾滴下されているかを確認し、次の測定を行なう。

① C.T.I (比較トラッキング指数) の測定

それぞれの試料について C.T.I⁽¹⁾⁽²⁾ を測定する。同種の試料、同一課電圧で 5 回測定し、そのうち最大値と最小値を捨てて中間値の平均を取って C.T.I を求める。

600V 迄の間に C.T.I が求められず侵食となる試料については 51 滴下直後における侵食最大深さを測定する。



[Fig4] Arrangement of electrodes

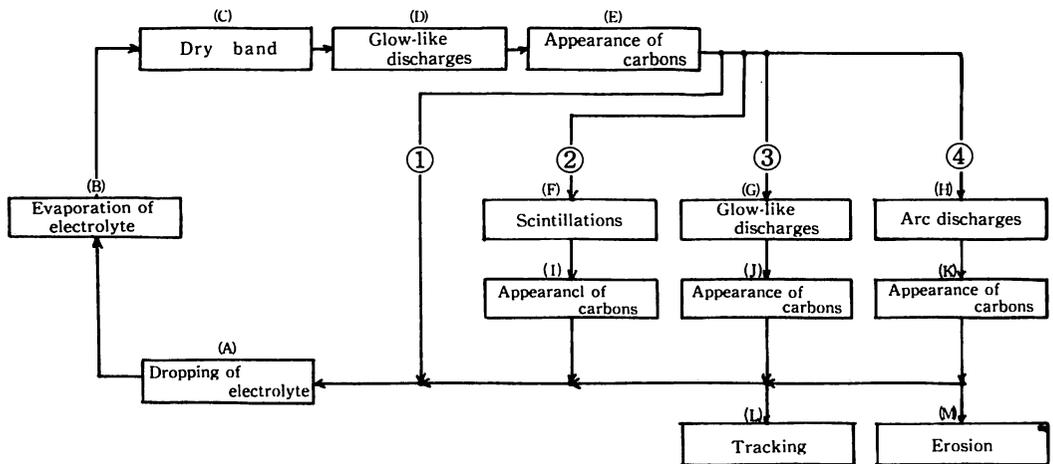
②電流、電圧波形の観察

それぞれの試料についてトラッキング (または侵食) の進行過程に伴う電流波形、電圧波形をメモリスコープで観察し、特徴的な波形を写真にとり、表面劣化の進行に伴ってどのように変化するかを追求する。特にトラッキング (または侵食) の進行過程でシンチレーション、グロー状放電、アーク放電等が、どのような役割を果たしているか、またカーボンがどのように形成され、形成されたカーボンがどのような働きをしているか、そしてそれ等の現象が電流、電圧波形にどのように現われているかを観察する。

③トラッキング (または侵食)

現象のサイクル表示

前記の電流、電圧波形の観測の結果と現象の対応関係を検討し、それぞれの試料について特徴的傾向を求め、トラッキング (または侵食) の形成過程についてサイクル表示を行ない、トラッキング (または侵食) 現象のモデル化の基礎資料を得る。



[Fig5] Cycle of Tracking (or Erosion) phenomena

有機絶縁材料のトラッキング現象のサイクル表示による評価

3 実験結果と考察

実験結果は割当頁数の関係から、トラッキング現象のサイクル表示と波形観測の結果を中心に述べる。

3-1 トラッキング (または侵食)

現象のサイクル表示

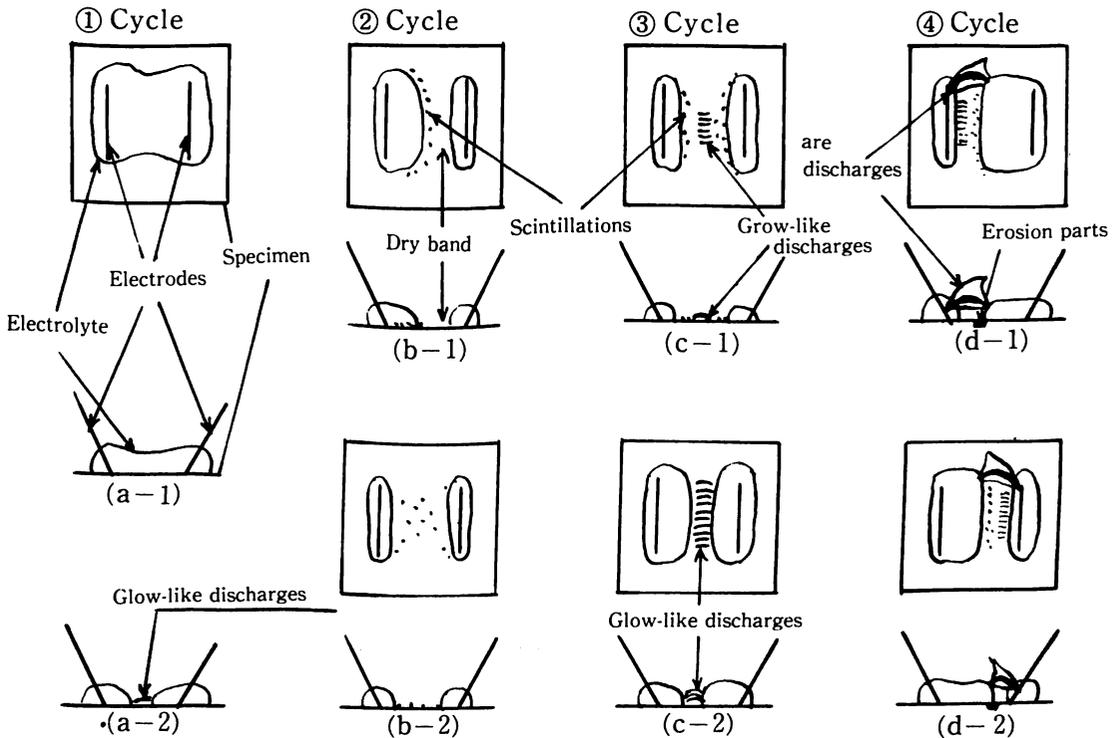
トラッキング (または侵食) 現象の主要なモードを整理して、サイクル表示したものが [Fig 5] である。また試料表面の代表的モードは [Fig 6] のとおりである。

a (①のサイクル) ……①のサイクルは初期の段階であり A 液が滴下されると試料面が液でおおわれ、その電解液を通じて正弦波電流が流れる。その時の試料表面の状態は [Fig 6] (a-1) のとおりである。その後電解液を流れるジュール熱によって電解液の温度が上昇し、水分が蒸発してドライバンドが出来、電流は流れなくなる場合もある。ドライバンドの幅が狭いとそれに集中した電界によって微小なグロー状放電が発生し、材料によってはカーボンを析出することがある。その表面状態は (a-2) のとおりである。30秒後には再度 A 液が滴下され、

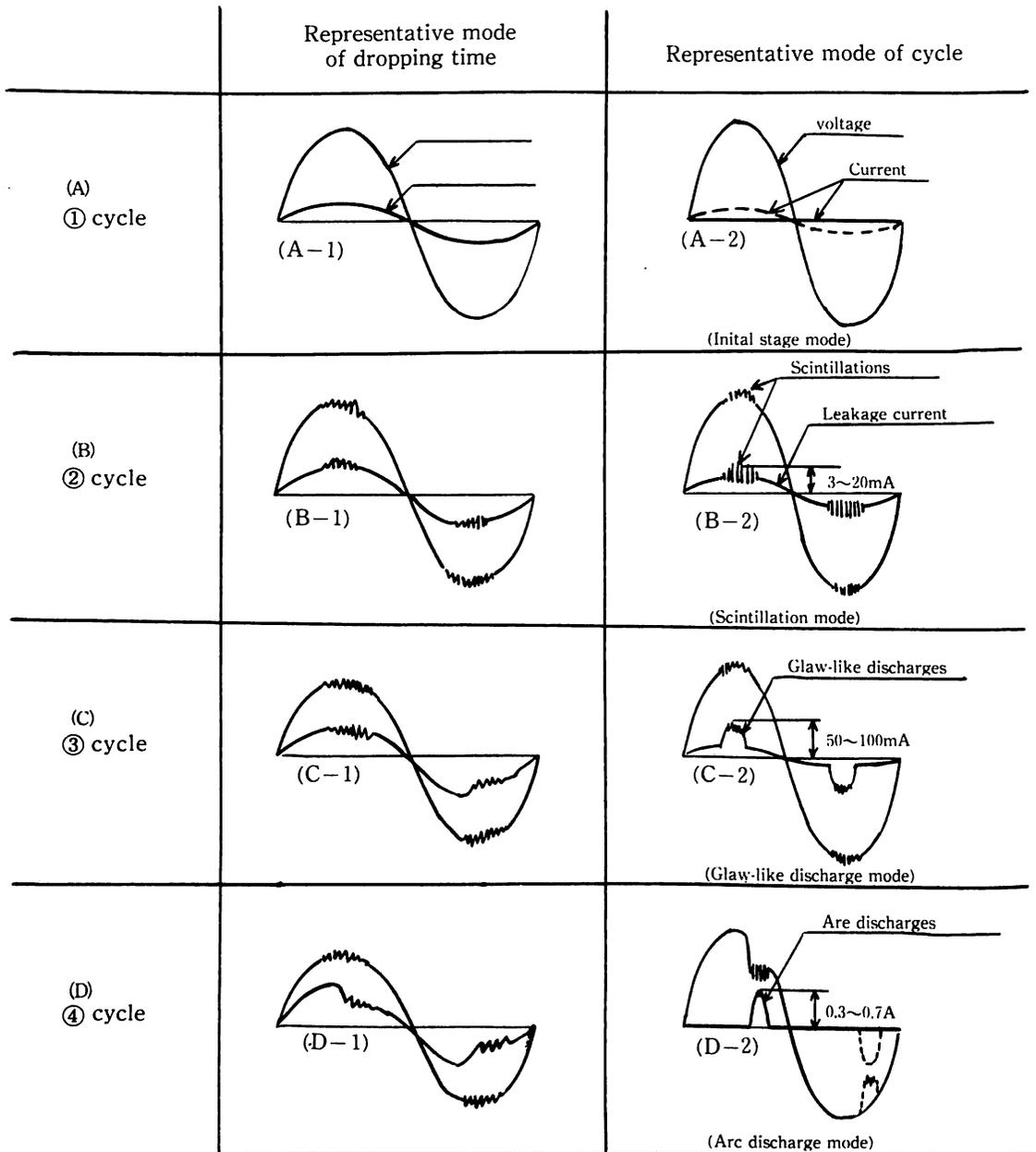
このサイクルを繰り返して析出されたカーボン量は少しずつ増加する。

b (②のサイクル) ……①のサイクルを何回か繰り返しているうちにカーボンの析出量が多くなると②のサイクルに移向し、カーボンを媒介して、シンチレーションが発生し、シンチレーションによってまたカーボンが析出する。その表面のカーボン析出状況は (b-1) の状態から、だんだん (b-2) の状態に移向する。電流波形は [Fig 7] の(B)のように滴下時には若干歪んだ正弦波が観測され、シンチレーション発生時は (B-2) のように正弦波にパルスが重畳される波形となり、合成波の波高値は 3~20mA 程度である。有機絶縁材料におけるシンチレーションは遊離カーボンまたは電極よりの溶出金属を媒介として発生し、同位相のものあるいは少しずつ移相がずれて発生する継続時間の極めて短い単発性の微小放電であり、洩漏電流の正弦波の正負のいずれの半波にもランダムに乗ってくる。このサイクルを繰り返しているうちに一般にシンチレーションの発生頻度が増加し、次のサイクルに移向する。

c (③のサイクル) ……③のサイクルは②のサイクルのシンチレーションのモードの部がグロー状放電



(Fig6) Representative mode of specimen's surface



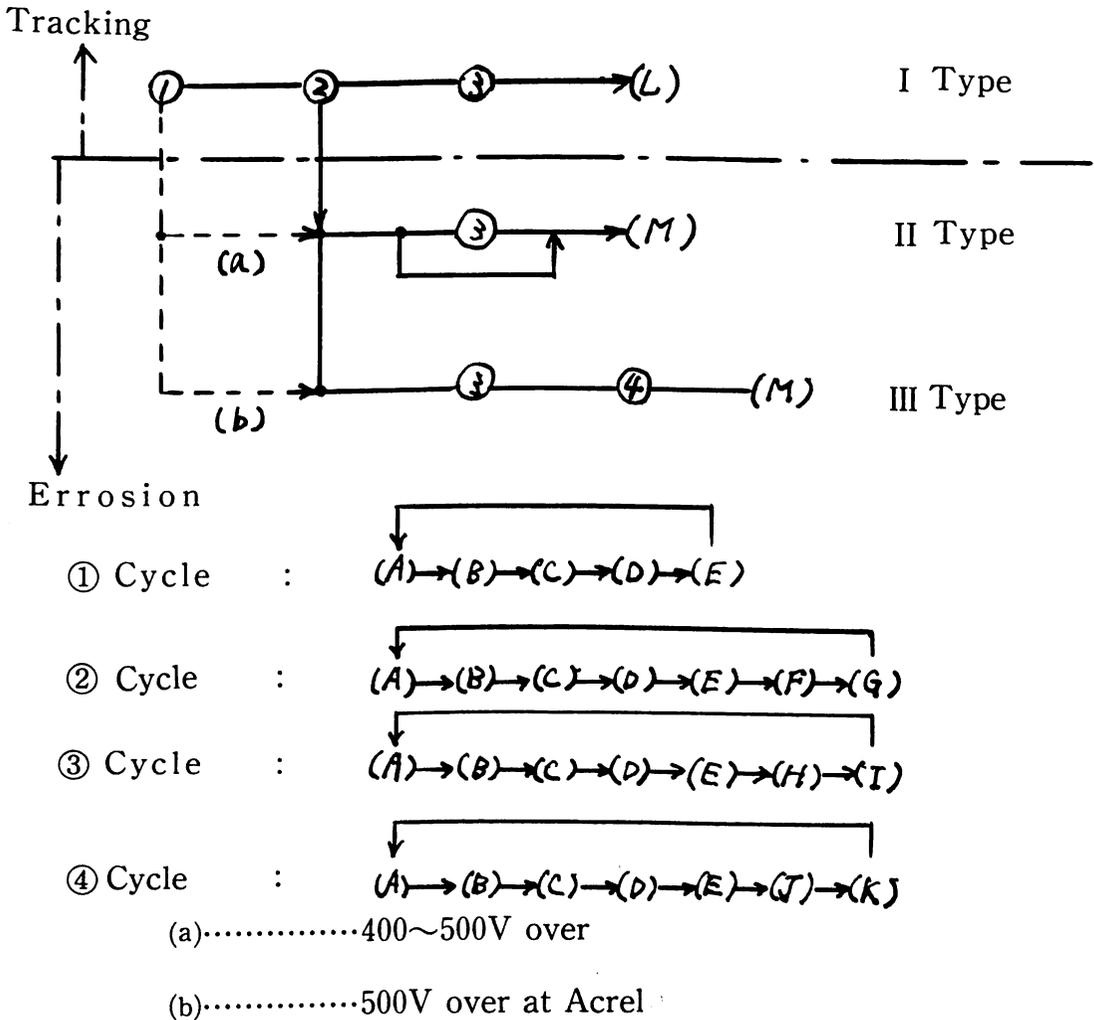
[Fig7] Representative Current and Voltage wave forms

有機絶縁材料のトラッキング現象のサイクル表示による評価

のモードに置き変わったもので滴下時は[Fig 7]の(C-1)のような波形で②サイクルの(B-1)よりも更に歪んだ波形となる。グロー状放電のモードは(C-2)のような波形となり、材料によっていくらか相違はあるがグロー状放電にシンチレーションによるパルスが重畳された波形となり、電流の最大値は時間とともに変化し50~100 [mA] 程度である。このサイクルを繰り返しているうちにパルスの発生頻度が増大し、材料によってはブロー状放電や、シンチレーションによって炭化が進み、遂には炭化導電路を形成してトラッキング破壊に至る。しかしトラッキングに至らずに次の④サイクルに移向する材料もある。

d (④のサイクル) ……④のサイクルには③のグロー状放電のモードとアーク放電のモードが置き

変わったもので、この領域では滴下時は[Fig 7]の(d-1)のように(c-1)よりも電流波形の歪みが大きい。アーク放電領域では(D-2)のようにグロー状放電よりも更に振幅の大きい半波整流波形が現れる。PVCについてはこの半波整流波形の出現が既に報告されている⁽⁶⁾がPVC以外の材料についても確認される。⁽⁶⁾この半波整流は正または負の半波整流でこれにグロー状放電とシンチレーションが同時に発生するケースが多く、正の半波はドライバンドがアース電極側に寄っている場合に生じ、負の半波は電源、電極側に寄っている場合に生ずる。アーク放電の発生原因としてはグロー放電や、シンチレーションによる電離気体や滴下電解液の蒸気等がドライバンドの上部に浮遊し、ドライバンド上面空気の絶縁特性を悪くする。更にこの電離気体の正負の電



[Fig8] Cycle of specimen's type

荷はクーロン力で反対の電極に引きつけられる。ドライバンドは電界が集中しており、その電界の強さと上面気体の絶縁劣化および電荷の移動等の相乗効果でアーク放電が発生し、アークの継続エネルギーは電極から供給され、0.5A以上の電流が2秒間続けばトラッキング判定回路が動作する。このサイクルは何回も繰り返すこともあるが一回で終り、侵食になるかまたはトラッキングとなる場合もある。このサイクルの半波整流波形（電流波形）は電圧波形より20°~35°遅れ、そのパルス幅が周期の約5~10%程度である。電流、電圧の位相差を生ずる原因はアークのインダクタンス分による。

なお①~④サイクルの電圧波形は電流波形の歪みに対応してだんだん大きな歪みを保有する正弦波となる。

3-2 試料に特有なサイクル表示

それぞれの供試料について実験した結果、トラッキング現象の経過過程は供試料の種類によって特有のサイクル表示が可能であることが判明した。その

代表的モードを〔Fig 8〕に示す。

●①, ②, ③, ④はそれぞれのサイクル経過のプロセスを示す。

●トラッキングに到達するのはIのタイプで供試料のうち紙基材フェノール樹脂とネオプレンがそれに対応する。このタイプは設定課電圧値によって経過するプロセスは変わらない。

●IIとIIIのタイプは侵食になる供試料でIIになるものはカーボン入りポリエチレンIIIとなるものはブチルゴムとアクリルである。

●IIのタイプとなるものは設定課電圧値によって、経過するプロセスは異なり、課電圧400V未満の場合①→②→③→Mとなり③のサイクルを経由する場合と経由しない場合がある。また課電圧が400V~500Vを超えた時は②のサイクルを経由しないで(a)の経路を経由する。

●IIIのタイプも設定課電圧によって経過するプロセスは異なり、課電圧500V未満では①→②→③→④→Mのプロセスを経由し、課電圧500V以上では②を経由しないで(b)の経路を経由する。

〔Table1〕 The number of times of continuation on each cycle (dropping time 30 ± 1 sec)

Specimen	Voltage(V)	①	②	③
Phenol resin of paper laminate	500	—	1	under 1
	450	—	1	〃
	425	1	2	〃
	400	2	3	〃
	300	4	6	〃
	200	4	10	1~2
Neoprene	500	1	2	1~2
	400	—	1	〃
	300	1	22	〃
	200	6	17	〃
Polyethylene (containing carbons)	500	1	—	4~5
	400	1	3~4	—
	300	2	34~35	—
	200	9	64~65	—
Acrylic resin	500	4	—	45
	400	4	10	—
	300	6	6	—
	200	28	—	—
Butyl rubber	500	4	5	60
	400	4	10	—
	300	14	15	—
	200	41	—	—

有機絶縁材料のトラッキング現象のサイクル表示による評価

3-3 電流波形観察による

トラッキング劣化の評価

トラッキング（または侵食）現象は前記のとおり、サイクル表示が出来、それぞれのサイクルに対応する波形の観測により、劣化の進行過程をある程度判定することが出来る。

- 各サイクルの継続時間は〔表1〕のとおりで、同一の試験電圧では、耐トラッキング性の良いものほど各段階への移行が遅い。
- また同一の試料では試験電圧の高い程、各階級への移行が速くなる。
- 以上の結果より供試料の電流の波形観測によってそれぞれの試料の劣化のプロセスがわかり、耐トラッキング性の比較が出来る。特に侵食性となる試料は一般に耐トラッキング性が良く、なかなかトラッキング破壊に至らずCTIを求めることの出来ないものが多い。更に今後新しい耐トラッキング性の高い高分子材料が開発の可能性もあり、現在の耐トラッキング試験法では耐トラッキング性の評価が困難となる。

現在侵食となるものは侵食深さで耐トラ性の比較を行っているが本法のサイクル表示による各段階までの滴下数によって耐トラッキング性をより明確に比較することが可能となる。

4 結 論

(1)有機絶縁材料のトラッキング現象の経過過程は次の四つの段階のサイクル表示が出来る。

- ① 初期段階のサイクル (Initial stage of cycle)
- ② シンチレーション段階のサイクル (Scintillation cycle)
- ③ グロー状放電段階のサイクル (Glow-like discharge cycle)
- ④ アーク状放電段階のサイクル (Arc discharge cycle)

(2)上記のそれぞれの段階のサイクルにおいて、それぞれ特徴的な電流波形が観測され、電流波形の観測により供試料の劣化の進行程度がある程度判別出来る。トラッキングになる供試料と侵食になる供試料は劣化の経過過程は相違し、アーク放電による半波整流波形は侵食となる材料にのみ観測される。

なお半波整流波形はドライバンドが接地電極側に寄るか電源電極側に寄るかによって+側または一側のいずれかの半波に発生する。

- (3)同一の試験電圧では耐トラッキング性の良いも

の程、次段階（次のサイクル）への移行が遅い。またC.T.Iを求めることの出来ないような耐トラッキング性の秀れた材料や侵食性材料に対して、本法によるサイクル表示による電流波形の観測と各段階（各サイクル）での滴下数調査で耐トラッキング性の比較が出来、なおトラッキング現象の解析に有効な情報を提供する。

(4)トラッキング現象経過プロセスの代表的モードがサイクル表示という形式によって明らかとなり、またそれぞれのモードに対応する電流波形の特徴が判明したので前記の四つの段階（四つのサイクル）のモードをモデル化する糸口をつかむことが出来る。

○—————○

最後にこの研究にいろいろご助言をいただいた秋田大学能登文敏教授、河村允鴻講師ならびに協力の労を惜しなかつた本校学生を小松義一（現在検査エンジニアリングKK勤務）水沢卓見、高橋義和君に深く御礼を申しあげる次第である。

文 献

- (1)絶縁材料耐トラッキング性試験法専門委員会：電気学会技術報告（I部）第82号：【絶縁材料の耐トラッキング性試験について】（1967. 9月）
- (2)絶縁材料耐トラッキング性試験法専門委員会：電気学会技術報告（I部）第86号：【トラッキング現象と耐トラッキング試験法の動向】（1968. 7月）
- (3)能登、青池、菊地：電気学会絶縁材料研究会資料IM-71-27「耐トラッキング試験（電解液間欠流下法）における昇圧による試験範囲の拡張」（1971. 10月）
- (4)IEEE Elect. Insul. Group: Preliminary Report IEEE Summer Power Meeting, No.31, PP. 66-358 (1966)
- (5)C.F. Wallace, C.A. Bailey: IEEE Summer Power Meeting, No.31, PP.66-360 (1966)
- (6)International Electrotechnical Commission: Technical Committee Draft 15A Secretariat (Dec.1975)
- (7)河村、林、佐藤、能登：昭和52年度電気関係学会東北支部連合会：2 F 5【トラッキング試験での遊離炭素生成過程における整流特性について】（1977. 10月）
- (8)菊地、河村、能登：昭和53年度電気関係学会東北支部連合会：2E 3【有機絶縁材料のトラッキング現象のサイクル表示による評価】（1977. 8月）