

開閉サージ絶縁耐力に関する二、三の実験

Some Experiments for Switching Surge Strength

都 築 繁 彦* 秋 丸 舜 二**
Shigehiko Tsuzuki Shun'zi Akimaru

内 容 梗 概

変圧器は雷サージのような外雷を受けるひん度がきわめて多く、従来この現象の解明および対策に多大の努力が払われてきた。しかし最近の超高圧送電の気運とともに経済的な見地から機器絶縁の低減が討議されるようになり、それとともに従来の外雷のほかに遮断器の開閉にともなう開閉サージなどにたいする機器の絶縁強度を検討する必要性が生じてきた。本文は変圧器を対象として、内部絶縁強度評価の基準となる素材の外雷および開閉サージ絶縁耐力について比較検討をおこなった結果につき報告したものである。

1. 緒 言

中性点直接接地方式の普及と避雷器の急速な発達により特に超高圧送電系統では変圧器絶縁を合理的に低減せしめる傾向にあり、すでに二段低減絶縁の変圧器の実現も伝えられている。絶縁の低減は寸法の縮小によって損失、リアクタンスなどを低減し、変圧器性能の向上に有効なだけでなく、超高圧大容量変圧器になるほどその経済的利益は大きくなる⁽¹⁾。しかしかかる変圧器絶縁の低減を合理的に行うには、あらかじめ外雷、開閉サージなどの異常電圧に対する内部絶縁強度の適正な基準が必要で、本文は変圧器絶縁素材に関するこれら絶縁耐力について行った二、三の実験結果につきのべたものである。

2. 油浸紙の絶縁耐力

2.1 実験方法および試料

一般送電系統の開閉サージ周期は、20～2,000 μ s であることが実系統調査結果として報告されている⁽²⁾。本実験では上記範囲の開閉サージ第1波を模擬する単極性（正波）緩波頭サージを採用した。

サージの波頭長としては、それぞれ 10, 50, 100 および 500 μ s を選定した。破壊電圧値は段階的に印加電圧を上昇して求めたので、試料には破壊までに約 10～15 回繰返し電圧が印加されることになり、特に稜角電極ではコロナストリーマの繰返し発生による耐圧低下が懸念された。W. G. Standring⁽³⁾ の 500 回繰返しで 15%，H. C. Hall⁽⁴⁾ の 200 回繰返しで 13%，Howard⁽⁵⁾ の 100 回繰返しで 10% と、それぞれの絶縁耐力低下に関する資料があるが、10～15 回程度の繰返しではまず大きな影響はないとみてこの影響は考慮しなかった。

使用電極はしんちゅう製の円板および平等平板電極である。（第1図参照）油浸紙の絶縁耐力は電極材質により $\pm 2\%$ 前後の変動があるといわれているので⁽⁴⁾、材質は耐力比較の便宜上、一定とした。試料はプレスボードおよびクラフト紙で、乾燥処理後油浸したものをを用いた。絶縁油は十分含浸しており、測定値のばらつきも少なかった。絶縁油耐圧は標準電極で AC 61.5 $\pm$ 3.4 kV の範囲にあった。

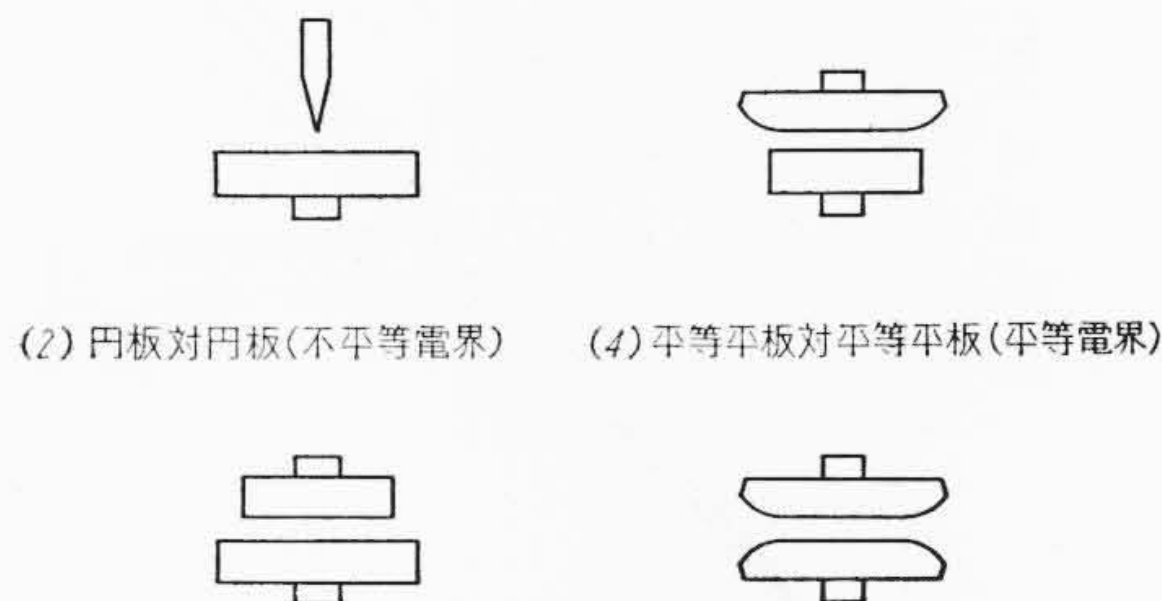
2.2 実験結果

第2図および第3図は平等平板電極を用いた場合の電圧一波頭長曲線の実測例である。前者はプレスボード、後者はクラフト紙を5, 10 および15枚重ねた場合である。波頭長の増大につれて極端な絶縁耐力の低下はないが、それらを標準衝撃波と波頭長 500 μ s の開閉サージ絶縁耐力について求めたものが第1表である。破壊電圧値

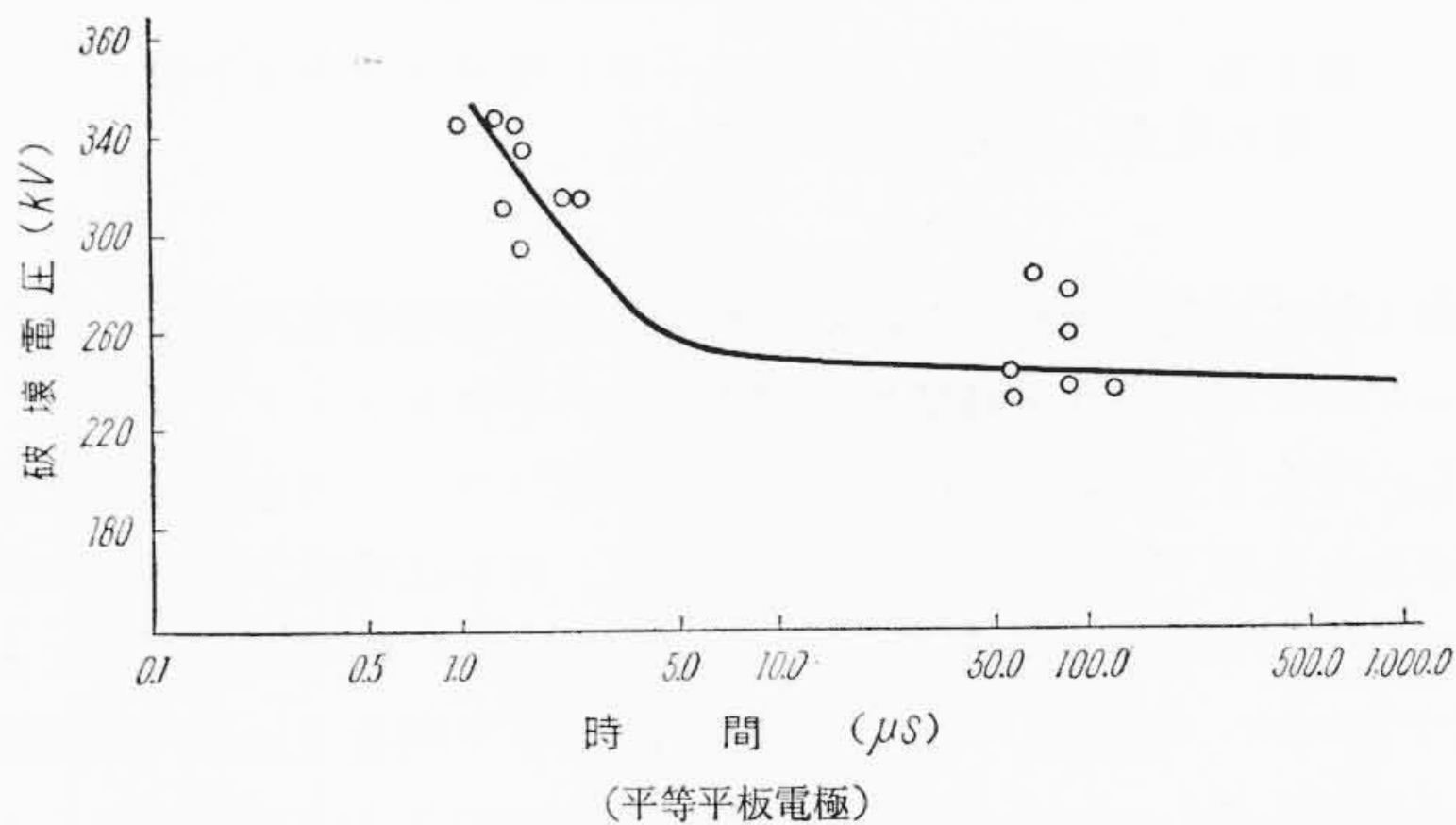
* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所国分工場

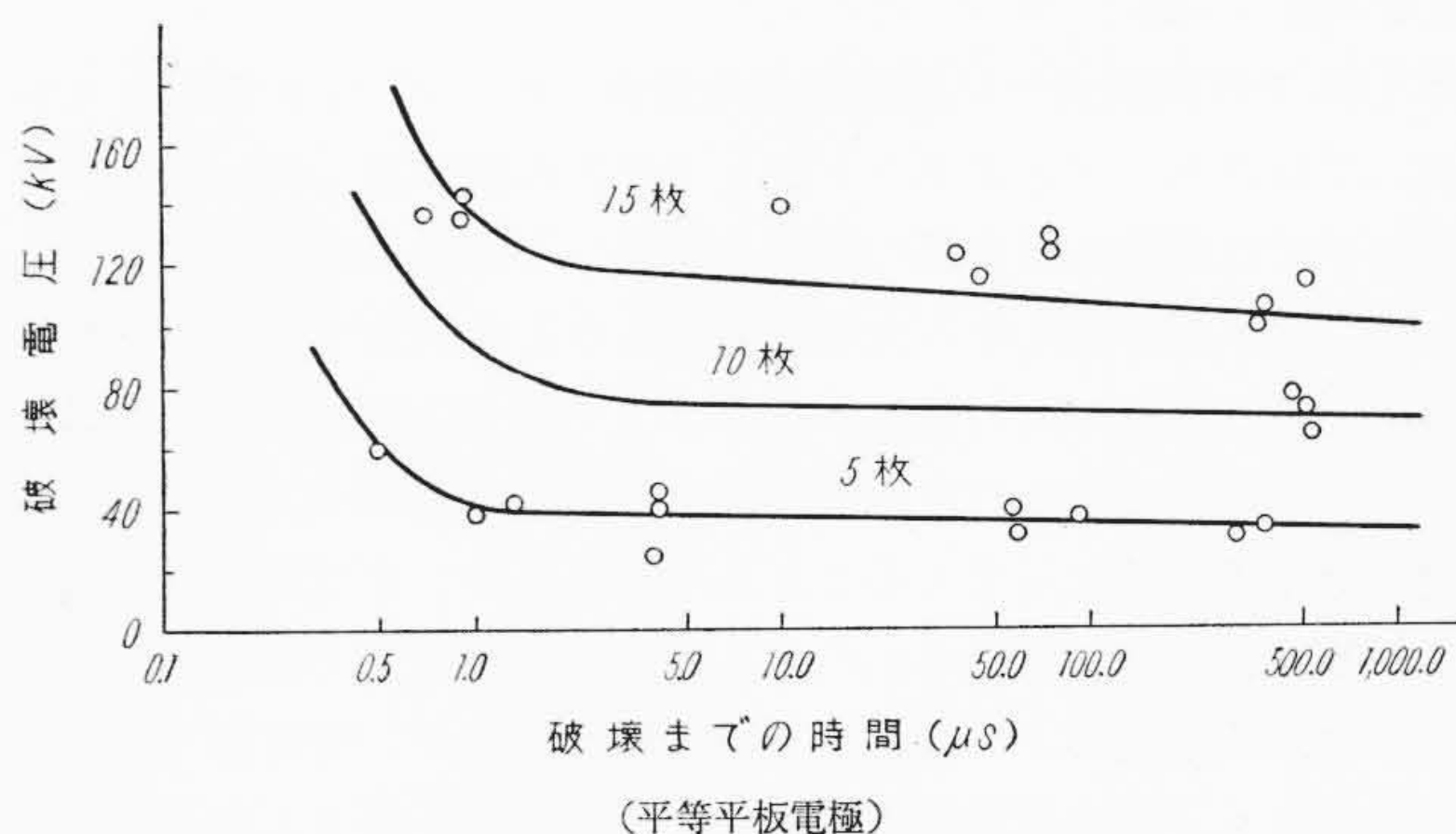
(1) 針対円板(不平等電界) (3) 平等平板対円板(不平等電界)



第1図 絶縁油耐圧試験用電極



第2図 油浸プレスボードの電圧波頭長曲線

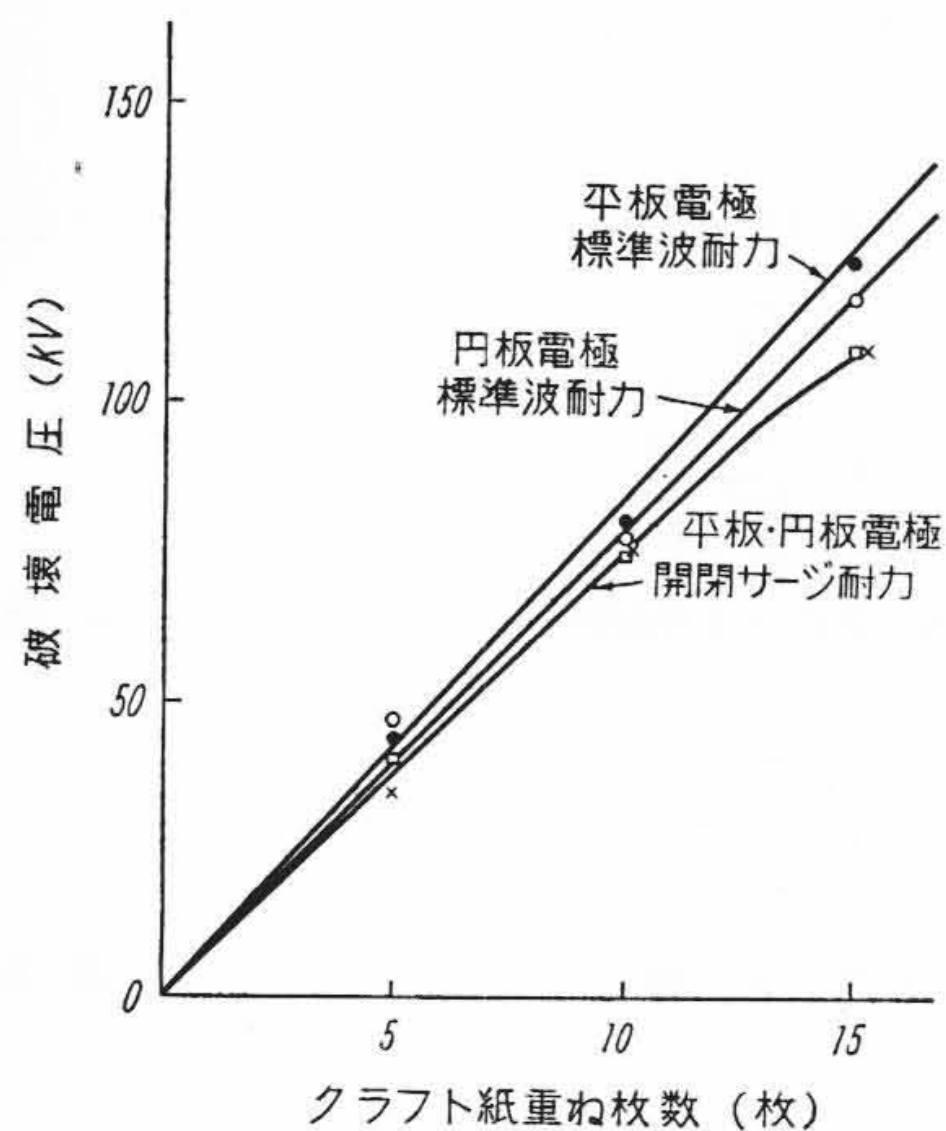


第3図 油浸クラフト紙の電圧波頭長曲線

にはもちろんばらつきがあるので、すべて平均値の比較を示している。総合平均では、開閉サージ耐力は標準波の87%となっており、一般に報ぜられている値とほぼ一致する。第4図はクラフト紙重ね枚数と標準波および開閉サージ耐力の関係を前記の二種類の電極について求めたもので、いずれも平均値をとってある。標準波に対しては、円板電極においては平等平板電極より5%破壊値は低下しているが、500 μ s 開閉サージではほとんど差異がない。

第 1 表 油浸紙の標準波および $500\mu s$ 開閉サージ絶縁耐力の比較

紙の類	条 件	標準波破壊電圧 (kV)	$500\mu s$ 開閉サージ破壊電圧 (kV)	$500\mu s$ 開閉サージの標準波に対する比 (%)	差の検定(危険率 5%)
プレスボード	平等平板電極	165	120	72	有意差有り
	円板電極	165	135	82	有意差有り
クラフト紙	平板電極	5枚	43	35	有意差有り
		10枚	80	77	有意差なし
		15枚	126	111	有意差有り
	円板電極	5枚	47	41	有意差なし
		10枚	78	76	有意差なし
		15枚	120	111	有意差なし



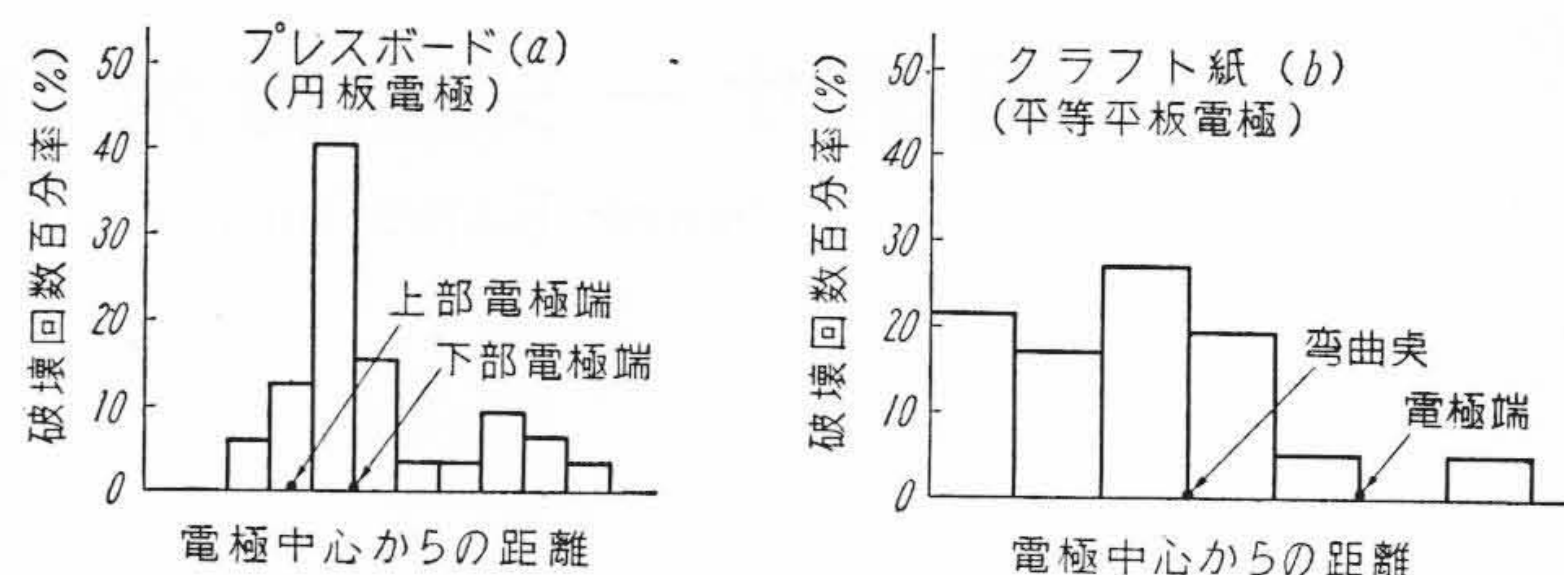
第 4 図 標準波および開閉サージに対するクラフト紙重ね枚数と破壊電圧の関係

第 5 図は以上の実験における円板および平板電極使用時のプレスボードおよびクラフト紙破壊位置を、それぞれヒストグラムで示したものであり、前者の(a)図では電極端部(ストレス集中部)で破壊するものは、全体の40%で比較的多く、ほかは電極と試料の接触面外へのストリーマ伸展破壊がおもであるが、電極構成の異なる(b)図では、電極端より外での破壊は僅少で弯曲点以内の接触面での破壊が多く、ストリーマの伸びは(a)図のように極端に長くはならない。

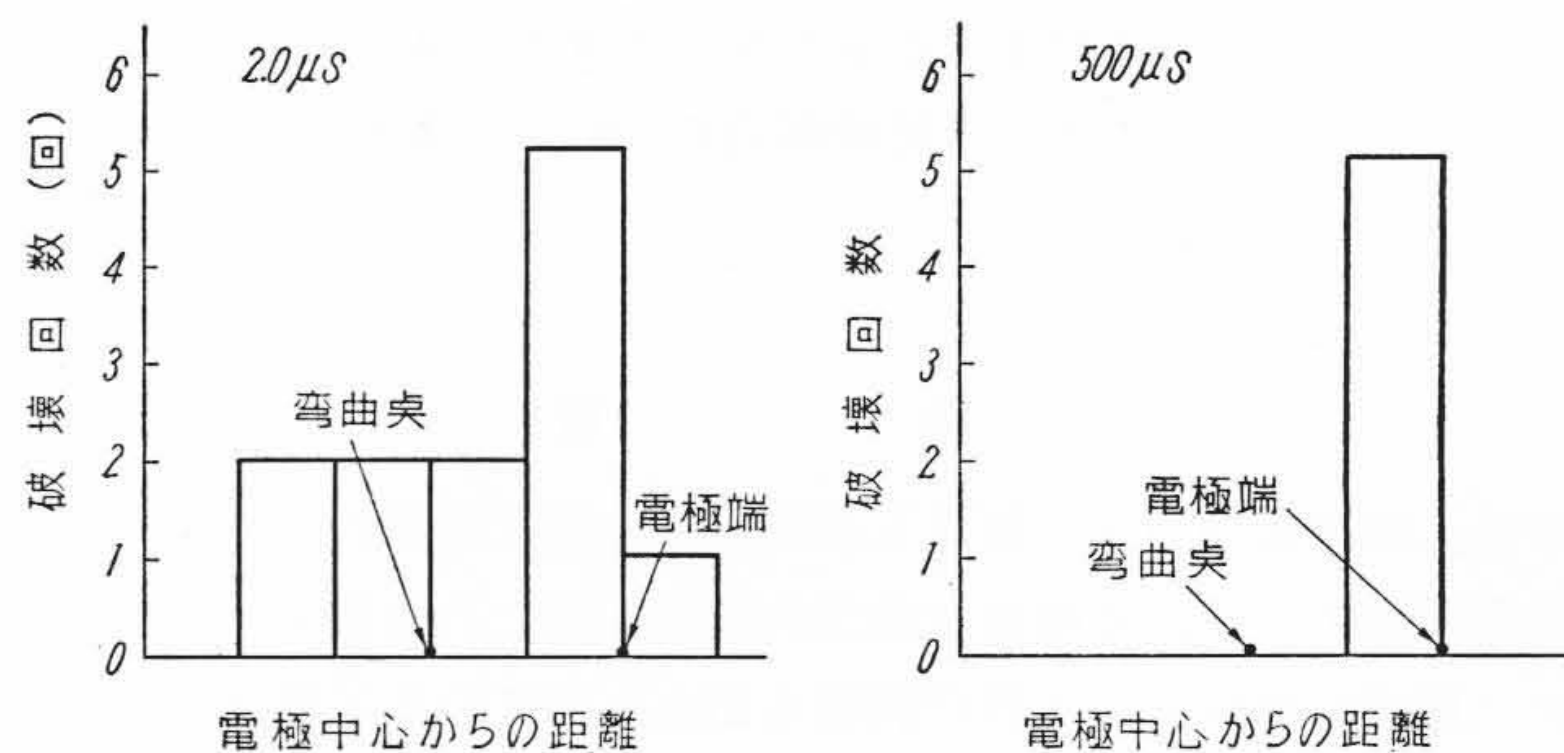
2.3 考 察

第 1 表 では開閉サージ絶縁耐力は総合平均で 87% に低下しているが、プレスボードとクラフト紙とでは内容的に違っている。プレスボードでは明確に両者間の差異を判定しうる結果が得られているが、クラフト紙では、その大半が差異ありとは判定できない結果となっている。これのみの結果からクラフト紙では絶縁耐力に差異なしとただちに判定するのは危険であるが、紙の種類により開閉サージ耐力低下率が異なってくることも予想される。また円板電極端部は、平等平板電極よりはるかにストレスが高いはずであるが、実測結果では、標準波および開閉サージ領域にわたり、両電極で著しい耐力差はなく、逆に円板電極において耐圧の高い場合も若干みられた。これは両電極とも破壊の半数以上がストレス集中点以外の平等電界部および電極外の位置での弱点破壊であり、破壊経路が類似しているためと考えられる。

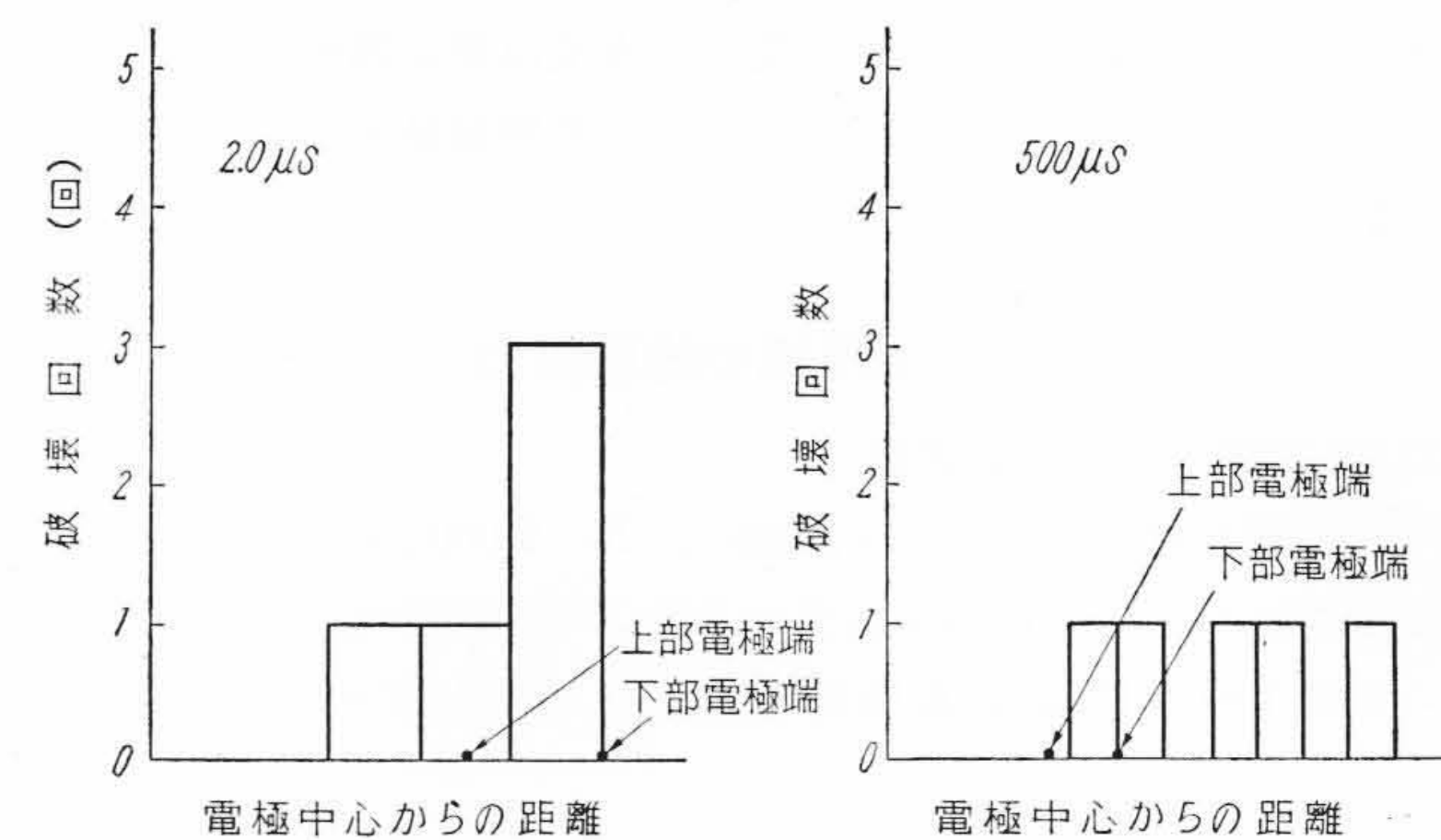
第 6 図は平等平板電極使用時のプレスボード破壊位置を標準波および $500\mu s$ 開閉サージに分類したもので、開閉サージ破壊点は、この場合ほとんど全部が電極との接触面外へのコロナストリーマの伸展破壊となり、第 7 図の円板電極の場合と同一破壊経路をとっており、開閉サージ絶縁耐力は電極形状の影響をほとんどうけないことがわかる。



第 5 図 円板および平等平板電極使用時のプレスボードおよびクラフト紙の破壊位置のヒストグラム



第 6 図 平等平板電極によるプレスボード破壊位置のヒストグラム



第 7 図 円板電極によるプレスボード破壊位置のヒストグラム

3. 変圧器絶縁油の絶縁耐力

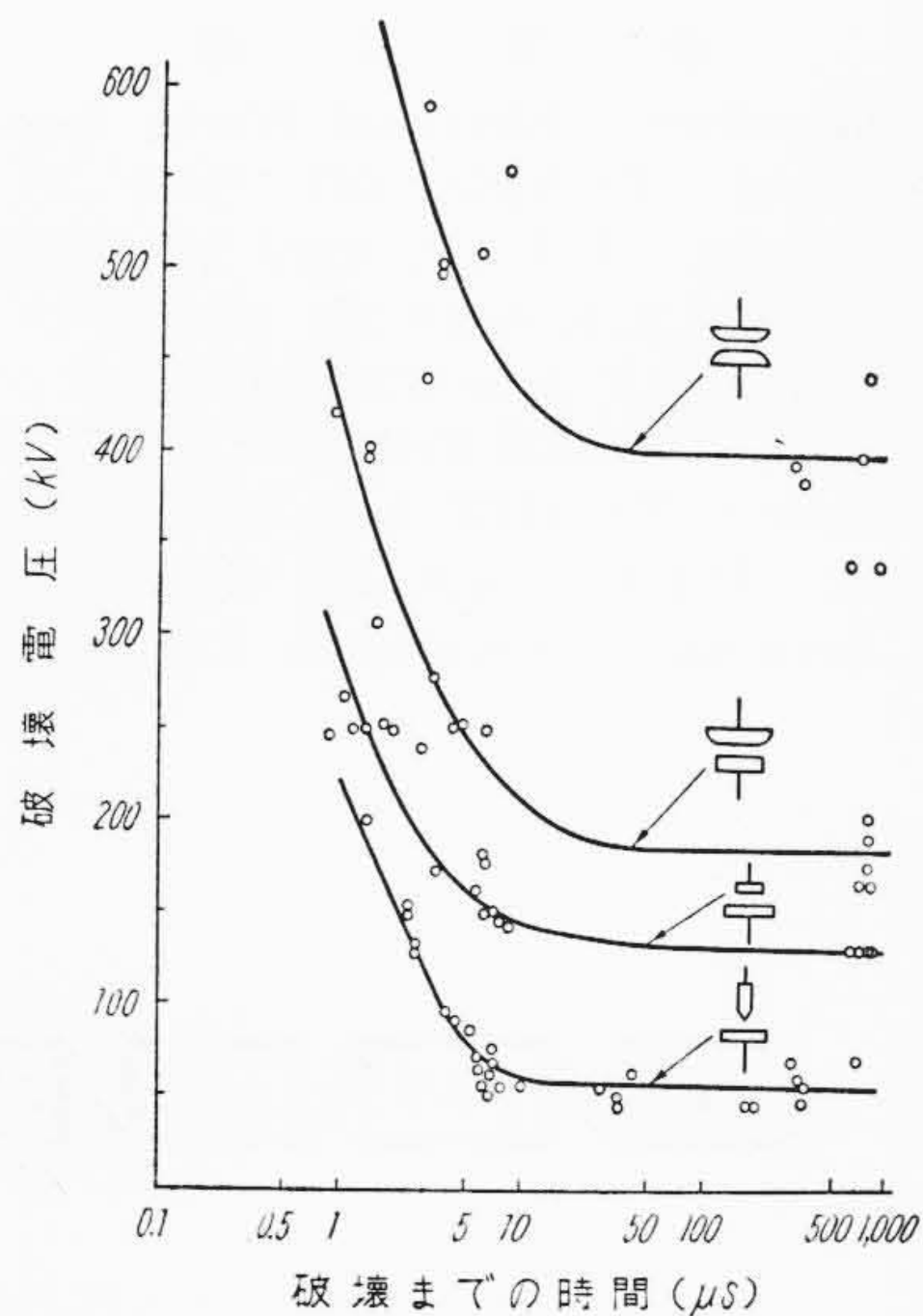
3.1 実験方法

各種電極形状に対する絶縁油の耐力を標準波および 2.1 記載の開閉サージについて求めた。使用電極は第 1 図と同一である。衝撃波に対する絶縁油の耐力はそれほど不純物に影響されないことが報告^(3,6,7)されているが、実験中定期的に耐力をチェックした。また電極材質の影響もほとんどない⁽⁸⁾といわれているので、すべてしんちゅう電極を用いた。電極面への気泡付着度が異なるため電極配置を水平にするか垂直にするかにより耐力が異なるとの説⁽⁹⁾もあるが、本実験ではすべて電極面を水平配置とし、破壊時生ずる気泡は真空ポンプで除去した。

3.2 実験結果

第 1 図に述べた電極形状は最も、過酷なストレスを与える針一円板電極より、平等電界を与える平等平板電極に至るまでの一連の形状を選んだものであり、変圧器電極構成はほとんどすべてこの範囲にはいる。

第 8 図は第 1 図電極使用時の絶縁油の電圧波頭長曲線を示すもので、油浸紙の場合と異なり、そのほとんどが $10\mu s$ 付近から絶縁耐力が急激に上昇している。いまこれらの測定値の中から前節同様に



第8図 電極に対する絶縁油の電圧波頭長曲線

第2表 各種電極構造と絶縁油絶縁耐力の比較

電極番号	電極別	標準波破壊電圧 (kV)	500 μs 開閉サージ破壊電圧 (kV)	500 μs 開閉サージの標準波に対する比 (%)	差の検定(危険率5%)
1	針-円板	69	59	85	有意差あり
2	円板-円板	183	129	71	有意差あり
3	平等平板-円板	259	179	69	有意差あり
4	平等平板-平等平板	506	382	76	有意差あり

標準波および 500 μs 開閉サージに対する破壊電圧の平均値を求めると、第2表のようになる。絶縁油の場合は油浸紙に比べ開閉サージ絶縁耐力の低下はきわめて明確であり、そのすべてが5%の危険率で差異ありと判定できる結果が得られている。特に電極形状によっては70% 前後まで開閉サージ絶縁耐力の低下するものも実測された。

3.3 考察

以上の実験から油浸紙に比べ、絶縁油では破壊値のばらつきの多いこと、開閉サージ絶縁耐力が標準波絶縁耐力に比べ明らかに低下することならびにきわめて電極形状の影響をうけやすいことなどが明確になった。絶縁油の標準波耐力はさほど純度に影響されないことは前述のように諸氏により認められているところであるが、一方交流持続電圧にあってはきわめて微小な浮遊物でも、その電界方向への移動集中のため時間依存性のあることが知られている。一般に使用される絶縁油においては、多少の微小浮遊物はいくぶん存在すると考えられるので、絶縁油のみの場合標準波に対する開閉サージ絶縁耐力低下率は、油浸紙に比べて比較的大きいことは、これらの影響をうけるからと思われる。

絶縁油のみの場合は油浸紙に比べ、電極形状の影響が大きいことについてもこの場合は電極の最大ストレス部間で破壊を生じており、油浸紙の場合のように紙面上のストリーマの伸展による電極形状のひずみ（等価的ひずみ）や弱点破壊を伴わず破壊形式がおのずから異なってくることから説明できる。

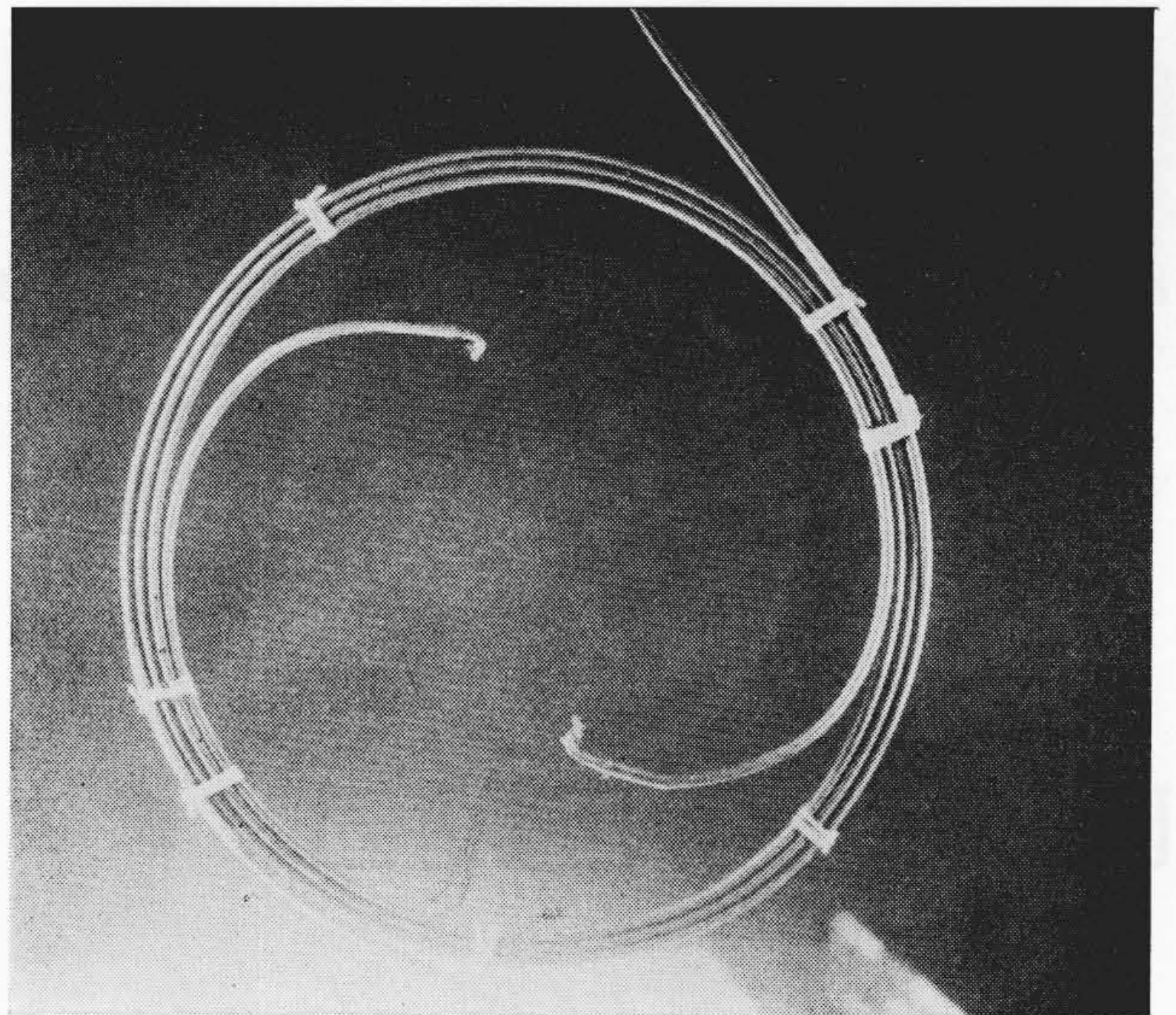
4. 変圧器巻線素線の耐力

4.1 実験方法および試料

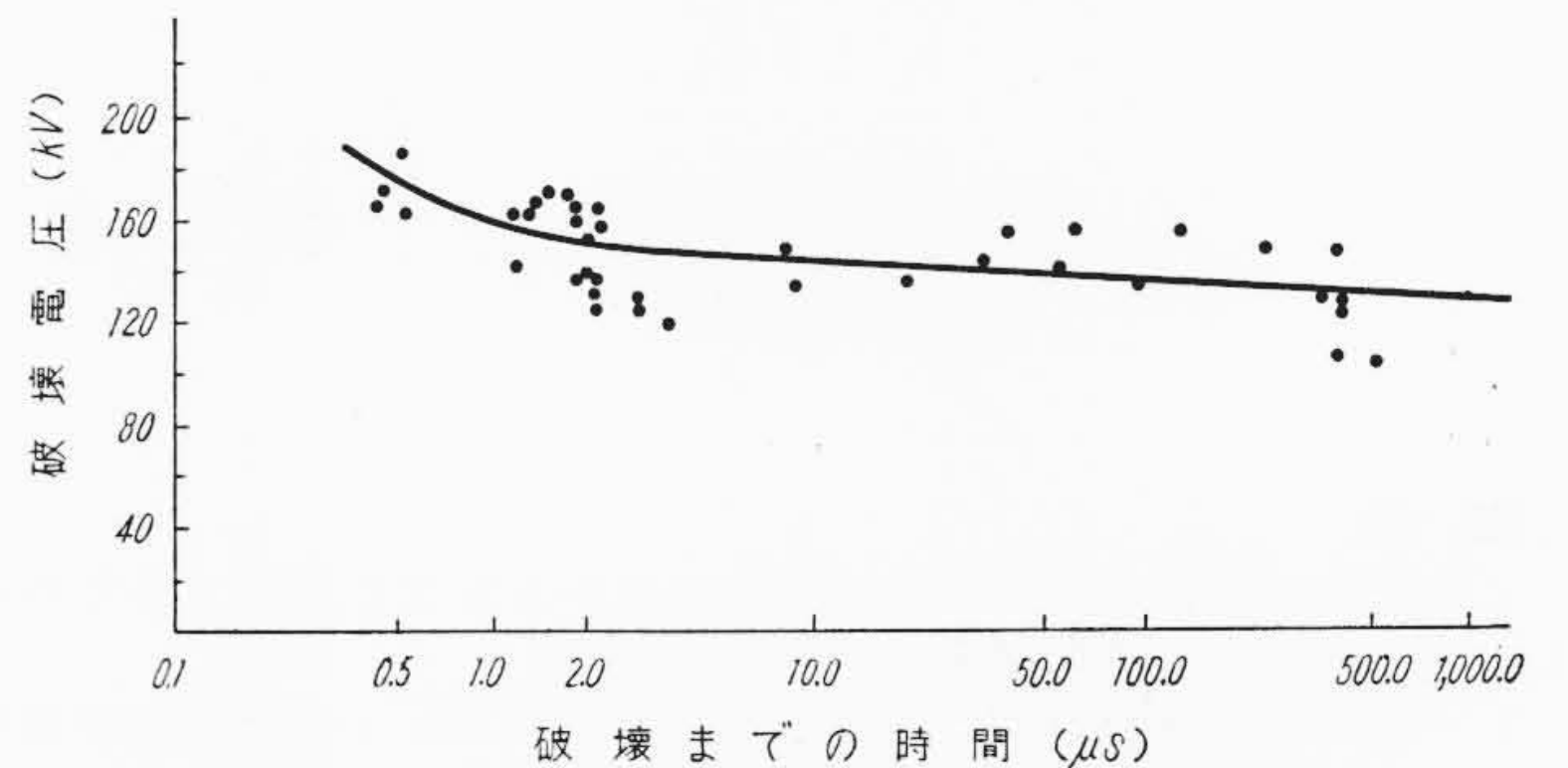
試料は変圧器巻線の素線を取りだした第9図のような構成を有し、導体2本を並列にまき、一方を接地して、他方に印加した。これらはすべて普通の製作工程にしたがって処理を行ったのち試験に供され、順次電圧を上昇して破壊値を求めた。

4.2 実験結果

第10図に標準波および開閉サージに対する電圧波頭長曲線を、



第9図 供試絶縁巻線



第10図 巻線素線の電圧波頭長曲線

第3表 変圧器巻線の標準波および 500 μs 開閉サージ絶縁耐力の比較

標準波破壊電圧 (kV)	500 μs 開閉サージ破壊電圧 (kV)	500 μs 開閉サージの標準波に対する比 (%)	差の検定危険率 5%
306	244	80	有意差あり

第3表に標準波と 500 μs 開閉サージの平均絶縁耐力値比較を示す。5%の危険率で差異ありと判定された。

4.3 考察

破壊の大略の径路は貫通、クリープ、貫通の形態をとるものがきわめて多く、複雑な破壊方式となっているが、その大部分は導体端部間で生じており、電界強度の強い部分より破壊が進展するという理論と一致する。

5. 結 言

以上の結果を要約すると次のとおりである。

5.1 油 浸 紙

(i) クラフト紙およびプレスボードの開閉サージ絶縁耐力は、標準波絶縁耐力の平均87%であったが、クラフト紙の場合は、明確な絶縁耐力低下は認められない。

(ii) 電極間に油浸紙をはさんだ本実験のような配置では破壊電圧は電極形状の影響をほとんどうけない。

5.2 絶 縁 油

(i) 油浸紙に比べ開閉サージ絶縁耐力の低下は明りょうであり電極形状の影響も相当うける。開閉サージ絶縁耐力の低下は約75%であるが電極形状によってはもっと低下する場合もある。

(ii) 絶縁油の開閉サージ絶縁耐力は、油中の微小浮遊物に影響されると考えられる。

5.3 巻線素線

- (i) 開閉サージ絶縁耐力は約 80 % に低下する。
 (ii) 導体端部からの破壊が多い。

本実験はなお継続中であり、開閉サージに対する素材の沿面耐力、絶縁モデルの耐力などのほか短時間交流絶縁耐力などなすべき問題がきわめて多い。

最後に本実験にあたり終始ご指導をいただいた日立製作所日立研究所ならびに国分工場変圧器部関係者に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) A. C. Kemppainen: Electrical World, Sept. 7, 48 (1959)
 (2) P. L. Bellaschi: Tr. AIEE 1047 (1946)
 (3) W. G. Standring: P. I. E. E April 583 (1956)
 (4) H. C. Hall: P. I. E. E April 571 (1956)
 (5) Howard: P. I. E. E June 315 (1953)
 (6) H. E. Fiegel: Tr. AIEE Feb. 1312 (1957)
 (7) H. S. Endicott: Tr. AIEE Aug. 393 (1957)
 (8) R. Hancox: P. I. E. E Sept. 250 (1957)
 (9) Blume, Boyajian: Transformer Engineering



新 案 の 紹 介



実用新案登録 第 496755 号

氏 原 良 男・若 森 俊 郎

巻 上 機 の 安 全 装 置

構 造

この考案の装置は炭車、ケーシングそのほかを安全に運転するためのもので、つぎのような構造からできている。

1. ふだんは接点が切れている制限開閉器 LS_1 とふだんは接点がいっている制限開閉器 LS_2 とを、炭車 2 の停止位置許容範囲 l の両端に設け、ふだんは接点がいっている制限開閉器 LS_3 を深度計 A の正規停止位置 6 に指針 4 により作動されるよう設ける。
2. 制限開閉器 LS_1 , LS_2 を操作回路 B 間に直列に入れ、その直列回路に制限開閉器 LS_3 を LS_1 , LS_2 に対して並列に連結する。

作 用

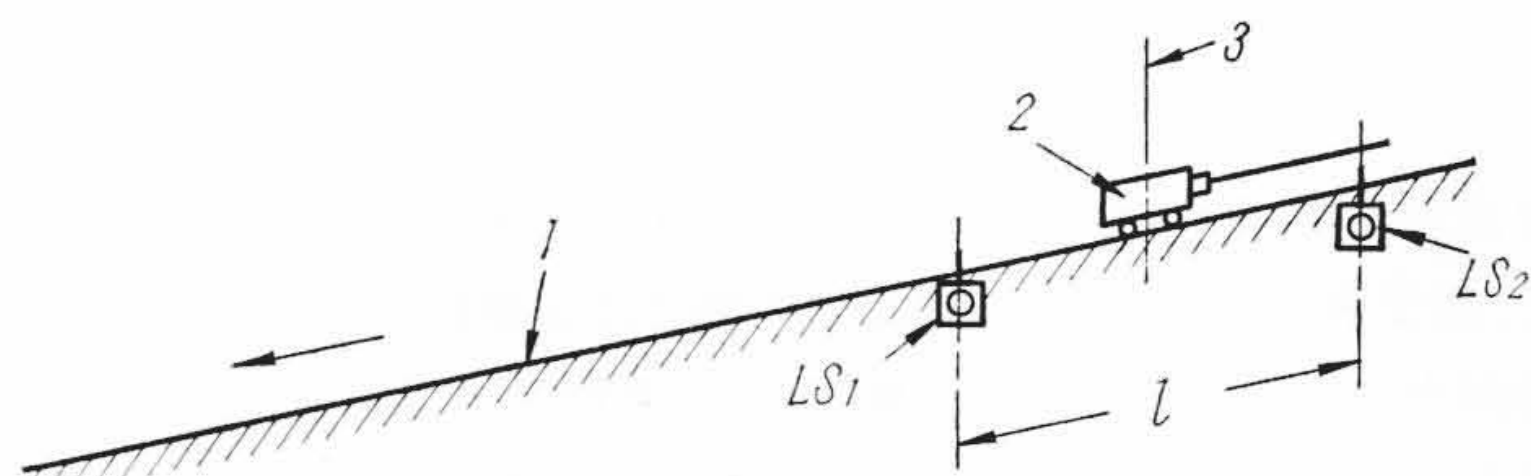
炭車 2 を下方から巻上げる場合、深度計の指針 4 が正規停止位置 6 にきても炭車 2 がまだ制限開閉器 LS_1 の手前にあるときは（すなわち巻き不足の場合）、制限開閉器 LS_3 の接点が切れ、電磁開閉器 Mg の消磁により非常制動がかかる。

深度計の指針 4 が停止位置 6 にきたとき炭車 2 が制限開閉器 LS_2 を越えた場合（すなわち過巻きの場合）は、制限開閉器 LS_2 , LS_3 の接点が切れ非常制動がかかる。

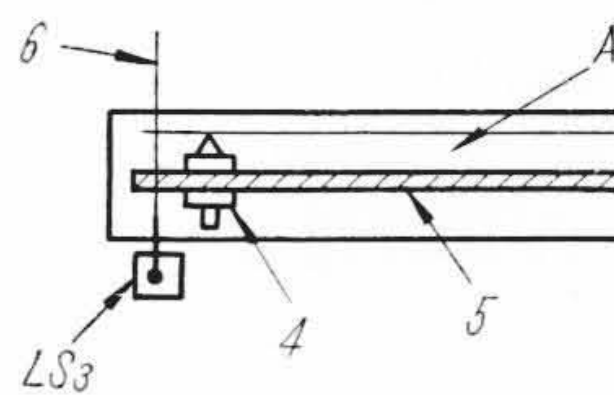
深度計の指針 4 が停止位置 6 にきたとき炭車 2 が制限開閉器 LS_1 , LS_2 の間にあった場合は、制限開閉器 LS_3 の接点は切れるが、 LS_1 の接点はいり、あらかじめ LS_2 の接点はいっているゆえ、非常制動はかからない。

このように炭車の巻き不足および過巻きのときには非常制動がかかり、炭車が許容範囲 l 内にあるときは非常制動はかからない。

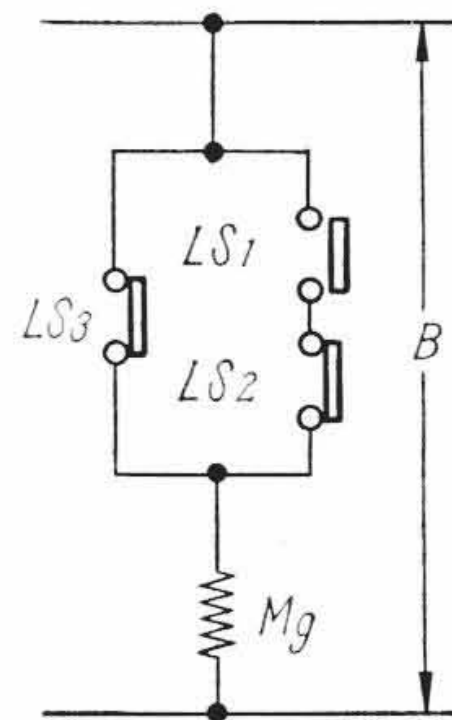
(富田)



料坑の断面図



深度計の側面図



操作回路