

無溶剤形発電機固定子コイル絶縁の経年変化

Aging Properties of Solventless Resin Bonded Mica Insulation Systems for Actual Use in Generator Stator Coils

津久井 勤* 兼子 慶市* 磯部 昭二**
Tsutomu Tsukui Keiichi Kaneko Shoji Isobe

要 旨

無溶剤形発電機固定子コイルの経年変化について検討した報告である。約10年間使用しても非破壊試験においては若干の電気的特性の変化が認められたが、破壊電圧の低下は認められなかった。また、従来から使用されていたコンパウンド発電機固定子コイルと比較して熱的にも安定で吸湿しにくく電気的特性がすぐれていることがわかった。

1. 結 言

大容量発電機固定子コイルの絶縁は、過去においてコンパウンド方式が主流を占めていたが、近年の合成樹脂材料の急速な発展によって無溶剤形合成樹脂注入方式が確立され、今日では全面的に採用されている。

この無溶剤形合成樹脂を使用した無溶剤形発電機固定子コイル(以下無溶剤形発電機コイルと呼ぶ)の絶縁については、各方面で熱心な研究が行なわれており、その信頼性の非常に高いことが報告されている^{(1)~(7)}。ところが、長時間運転した実機コイルの破壊試験を含めた絶縁性能を調査した報告は、過去に用いられたコンパウンド発電機固定子コイル(以下コンパウンド発電機コイルと呼ぶ)に多く見受けられるが⁽¹⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾、無溶剤形発電機コイルについてはほとんど見受けられないのが現状である。これは、運転実績が浅く適当な試料が得がたいためであるが、発電機の信頼性を実証するうえでその経年変化の実体を調査しておくことはきわめて重要なことである。幸いにも、定格電圧6.6kVならびに11kVで約10年間運転実績のある水車発電機固定子コイルを入手することができたので、この試料をもとに電気的特性を測定し、初期値と比較することにより無溶剤形発電機コイル絶縁の経年変化を検討した。さらに、コンパウンド発電機コイル絶縁の経年変化を調査した文献を引用し⁽¹⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾、無溶剤形発電機コイルとの比較を行なった。

2. 電気的諸量の定義

2.1 非破壊試験

直流試験から求められる絶縁抵抗、成極指数、誘電正接試験から求められる $\tan \delta_0$ 、 $\Delta \tan \delta$ 、交流電流試験から求められる電流急増点(第1電流急増点を P_{i1} と呼び、第2電流急増点を P_{i2} と呼ぶ)発電機巻線絶縁劣化判定基準委員会のもとにまとめられた「発電機巻線絶縁劣化判定基準⁽¹⁰⁾」に従ったものである。

また、誘電正接試験より求めた $\tan \delta$ の温度係数は(1)式に示す値によって定義⁽⁸⁾したものである。

$$\tan \delta \text{ の温度係数} = \frac{\tan \delta_2 - \tan \delta_1}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、温度 t_2 および t_1 ($t_2 > t_1$)における $\tan \delta$ の値をそれぞれ $\tan \delta_2$ および $\tan \delta_1$ とする。ここでは、 $t_2 = 75^\circ\text{C}$ 、 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ にとり、 $\tan \delta$ は常規電圧で測定した値である。

部分放電開始電圧は見かけの最大部分放電電荷 5×10^{-9} クローンの部分放電が1サイクルに1個発生したときの電圧である。

表1 破壊試験における電圧印加法

破壊試験項目	実験条件	電 圧 上 昇 法	
		ふん囲気	
商用周波電圧破壊	油 中 (一部気中)	奈川渡 コイル	30 kV まで1 kV/sで上昇それ以後 は2.5 kV ステップ1分間保持 (一部 1 kV/s 連続)
		潮 コイル	1 kV/s 連続
衝撃波電圧破壊	油 中	60 kV から10 kV ステップ) 各3回電圧 80 kV から 5 kV ステップ) 印 加	
直流電圧破壊	油 中	1 kV/s 連 続	

2.2 破壊試験

破壊試験は商用周波電圧、衝撃波電圧($3 \times 40 \mu\text{s}$ 標準波)ならびに直流電圧について行なった。その電圧印加方法は表1に示すとおりである。また、これらの値より定義した α 、 β 、 γ は(2)~(4)式のように表わされる。

$$\alpha = \frac{\text{商用周波破壊電圧(実効値)}}{P_{i2}(\text{実効値})} \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta = \frac{\text{衝撃波破壊電圧(波高値)}}{\text{商用周波破壊電圧(波高値)}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\gamma = \frac{\text{直流破壊電圧}}{\text{商用周波破壊電圧(実効値)}} \dots\dots\dots (4)$$

なお、このときの商用周波破壊電圧は1 kV/sの連続昇圧法により求めた値である。

ここで、 α は寺瀬氏の提唱によるもので、コイルの種類が違って平均値で2.36になるといわれている⁽¹⁾。このことから、 P_{i2} を求めることにより商用周波破壊電圧の推定ができることになる。商用周波破壊電圧から衝撃波破壊電圧を推定するため β が検討されているが、新品コイルで求めた β は1.1~1.5となり、コンパウンド発電機コイルより無溶剤形発電機コイルのほうが大きいようである⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。また、経年変化により小さくなる傾向にあるといわれている⁽¹¹⁾。最後に γ は、最近の発電機の発電容量の増加に伴って発電機が大形となりコイルの静電容量が大きくなるため、耐電圧試験に過大な充電電流が流れるために耐電圧試験を商用周波電源に代わって直流電源で行なうため検討されつつあるが、 γ は1.6~2.7の範囲にあり⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾、絶縁構成によっても違いがみられ、新品コイルで大きく、経年変化により小さくなる傾向にあるといわれている⁽¹⁵⁾。

3. 供 試 コ イ ル

3.1 奈川渡発電所発電機固定子コイル

(1) 発電機の仕様と運転期間

この発電機固定子コイルは東京電力奈川渡発電所の閉所に伴い

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立工場

表 2 奈川渡発電機の仕様

種 別	仕 様
級 別	10,000 kVA 12P-500 rpm
電 圧	6.6 kV
周 波 数	50 Hz
電 流	875 A
相 数	3
力 率	90%
結 線 法	6 列 Y, 3 本口出

表 3 奈川渡コイル試料数

試験法		供試コイル		初期コイル		予備コイル		使用コイル					
								U		V		W	
		上	底	上	底	上	底	上	底	上	底	上	底
非破壊試験		3	3	5	4	25	35	20	—	—	—	35	—
破壊試験	a. c.	1	—	1	1	10	10	10	10	—	—	—	—
	Imp.	—	1	1	1	—	—	10	10	10	10	10	10
	d. c.	—	—	1	1	10	10	—	—	10	10	10	10

注： a. c.：商用周波
Imp.：衝撃波 (3×40 μs)
d. c.：直 流

表 4 潮 発 電 機 の 仕 様

種 別	仕 様
級 別	20,000 kVA 12P-600 rpm
電 圧	11 kV
周 波 数	60 Hz
電 流	1,050 A
相 数	3
力 率	90%
結 線 法	1 列 Y, 3 本口出

入手したものである。発電機の仕様を表 2 に示す。発電機は大正 14 年日立製作所が製作したもので、無溶剤形発電機コイルに巻き替えてからの発電機使用年数は、昭和 33 年 4 月から昭和 43 年 12 月までの 10 年 9 ヶ月間であるが、正味の運転時間は 7.43×10^4 時間である。また、このときの運転温度は季節により差はみられるが埋入温度計の読みで 80~90℃ であった。

(2) 試 料 数

奈川渡発電所発電機固定子コイル(以下奈川渡コイルと呼ぶ)はダイヤモンド形のため発電機より取り出すとき無理がかからないよう頭部を切断してハーフコイル状にした。したがって、測定はハーフコイル状で行なわれた。このほか、予備コイル 5 本もハーフコイル状にして測定された。非破壊試験、破壊試験に使用したコイル本数は表 3 に示すとおりである。ここで、初期コイルとは立会試験時に測定したコイルを言い、予備コイルとは発電機巻線といっしょに納入し保管されていたコイルを言う。また、使用コイルとは上述の発電機から取り出したコイルを言う。

3.2 潮発電所発電機固定子コイル

(1) 発電機の仕様と運転期間

発電機の仕様は表 4 に示すとおりである。発電機は昭和 31 年日立製作所が製作したもので、同年 4 月から運転を開始し、昭和 41 年 10 月その発電機固定子コイルの一部を抜き取って試験する機会に恵まれた。この間、コイルは 10 年 7 ヶ月間使用されてい

表 5 電 気 的 諸 特 性

測定項目	種 類 単 位	奈 川 渡 コ イ ル			潮 コ イ ル		
		初 期 コ イ ル	予 備 コ イ ル	使 用 コ イ ル	初 期 コ イ ル	予 備 コ イ ル	使 用 コ イ ル
絶 縁 抵 抗	MΩ	—	$5.4 \pm 1.6 \times 10^5$	$1.7 \pm 1.6 \times 10^6$	—	3.1×10^5	1.2×10^6
成 極 指 数	—	—	3.8 ± 1.6	4.5 ± 0.6	1.9	2.6	3.6
誘 電 $\tan \delta_0$	%	2.1 ± 0.2	3.2 ± 0.5 ↓ (1.7)	1.3 ± 0.2	2.6 ± 0.3	2.4	1.6 ± 0.2
正 接 $\Delta \tan \delta$	%	0.6 ± 0.5	3.2 ± 0.5 ↓ (1.7)	1.1 ± 0.7	0.2 ± 0.1	0.3	0.6 ± 0.4
部 分 放 電 電 圧 開 始 電 圧	kV	—	5.0 ± 0.5	6.3 ± 1.5	—	8<	8<

() 内は 130℃, 40 時間の熱処理で低下した値を示す。

たことになるが、正味の運転時間は 5.52×10^4 時間である。また、このときの運転温度は季節により差はみられるが埋入温度計の読みで約 80℃ であった。

(2) 試 料 数

潮発電所発電機固定子コイル (以下潮コイルと呼ぶ) は初期コイル 2 本, 予備コイル 1 本, 使用コイル 2 本である。このうち使用コイルは線路側から中性点側に連なる 198 コイル直列接続のうち 63 番目と 167 番目を抜き取ったものである。

4. 実 験 方 法

4.1 前 処 理

測定条件をそろえるためにコイルに次の前処理を行なった。まず、コイル表面を溶剤を使って清掃したのち、使用した溶剤を飛ばす程度の 100℃ 常圧乾燥を 20 時間行なった。なお、この乾燥前後でコイルの電気的特性が変わらないことを確認した。

4.2 非破壊試験方法

非破壊試験として、誘電正接、部分放電開始電圧、交流電流ならびに直流電流の測定をそれぞれ大気中でガード電極をとって測定した。また、これらの測定により 2 で定義した成極指数, $\Delta \tan \delta$, P_{i1} , P_{i2} などを求めた。

4.3 破壊試験方法

破壊試験は表 1 に示した電圧印加方法により絶縁油中に行なわれたので、コイル表面に防油処理を行なってコイル内への油の浸入を防いだ。このとき、コロナシールドにより電極端部の電界緩和を図っている。

4.4 デ ー タ 処 理

試料数が多い場合の実験結果は平均値と標準偏差で示した。また、絶縁抵抗については対数表示による平均値, 標準偏差で示した。

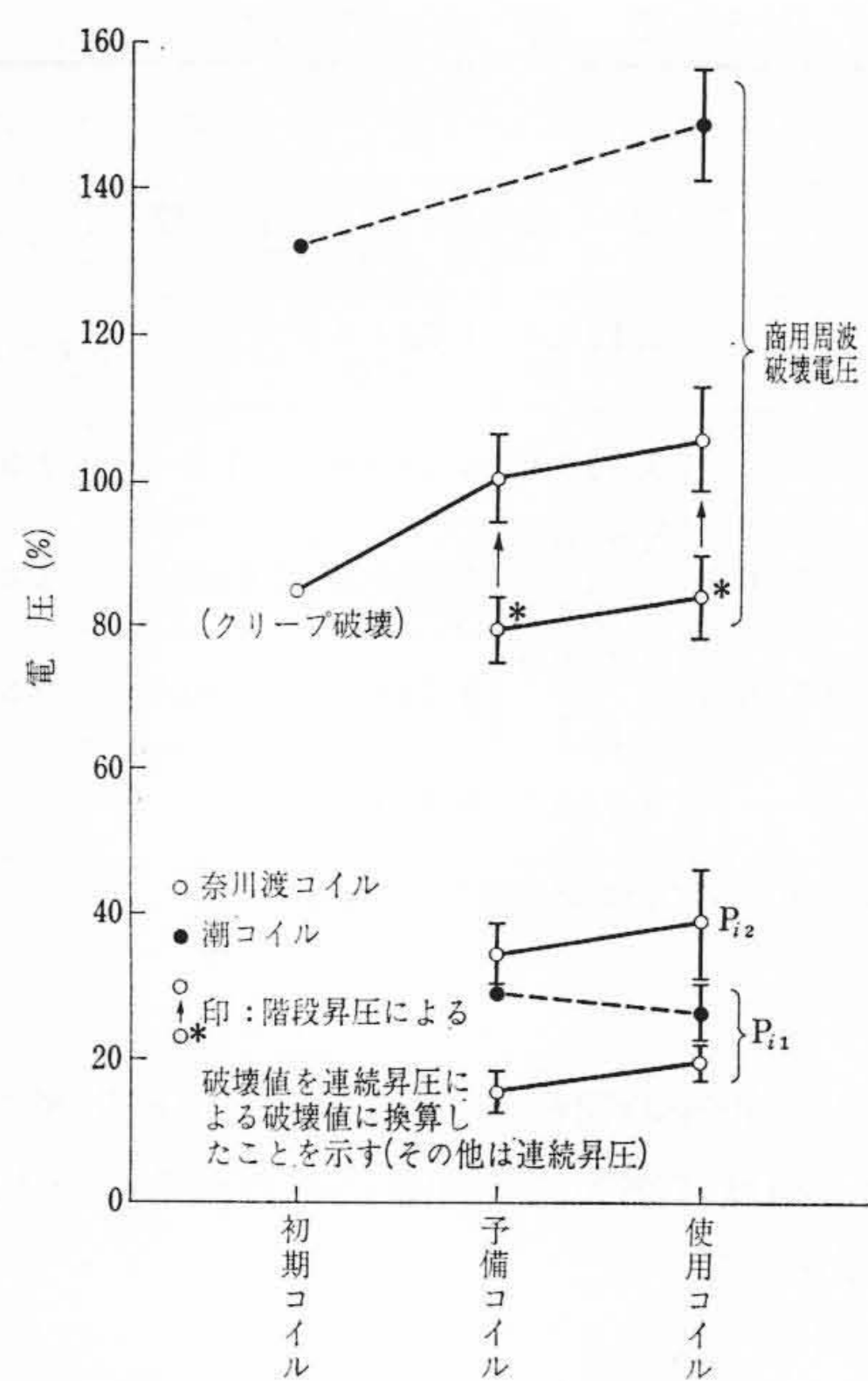
5. 電気的特性測定結果と検討

5.1 直 流 試 験

供試コイルの絶縁抵抗, 成極指数は表 5 に示すとおりである。なお、ここで示した測定電圧は奈川渡コイルにおいては 2.5 kV, 潮コイルにおいては 0.5 kV である。絶縁抵抗では奈川渡コイル, 潮コイルいずれにおいても使用コイルより予備コイルのほうが低い。成極指数からみると、使用コイル, 予備コイル, 初期コイルの順に低くなっている。予備コイルが 2 以上であり, W. Schneider 氏が経験的に求めた吸湿程度⁽¹⁷⁾で判断すると、吸湿なしの分類にはいる。

5.2 誘 電 正 接 試 験

誘電正接試験より $\tan \delta_0$ ならびに $\Delta \tan \delta$ をそれぞれ求めて表 5 に示した。 $\tan \delta_0$ をみると、初期コイルに比べ使用コイルが低くなっているが、予備コイルでは同程度かいくぶん大きくなっている。し



奈川渡コイルにおける予備コイルの商用周波破壊電圧の平均値を100%として示した。

図1 P_{11} , P_{12} ならびに商用周波破壊電圧の比較

かし、前節で述べたように成極指数の判定から予備コイルは吸湿なしの分類にはいるので後述のように別の原因を考えなければならぬ。

5.3 部分放電開始電圧の測定

部分放電開始電圧の測定結果は表5に示すとおりである。使用コイルの部分放電開始電圧は予備コイルのそれと同じくらい高く、常規電圧 $6.6/\sqrt{3}$ kV (奈川渡コイル), $11/\sqrt{3}$ kV (潮コイル) では部分放電のみられないことが確認された。

5.4 交流電流試験

交流電流試験より P_{11} , P_{12} をそれぞれ求めて破壊電圧と同時に図1に示した。潮コイルの場合は20 kVまでの測定であったので、予備コイルで P_{11} のみ検出されたが P_{12} はなく、使用コイルでも P_{11} の検出のほかには微少な電流急増点が検出されたが P_{12} の条件⁽¹⁰⁾を満足せず、結局 P_{12} はこの範囲の測定電圧では見いだせなかった。

5.5 破壊試験

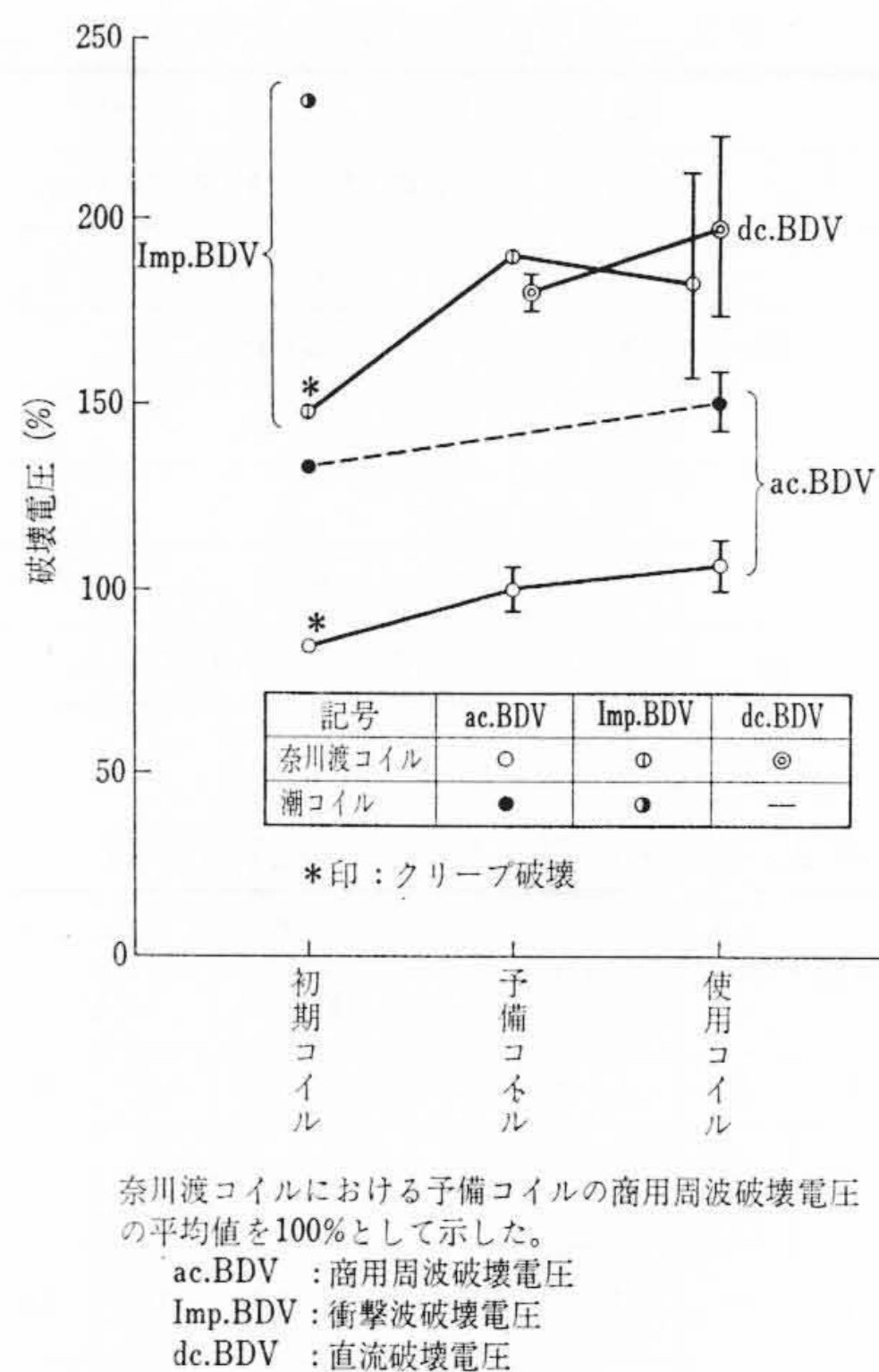
(1) 電圧昇圧法の違いによる破壊電圧の比較

商用周波破壊電圧や直流破壊電圧を測定する場合の電圧印加方法として階段昇圧法と連続昇圧法の二とおりが一般に用いられている。直流破壊電圧は印加電圧の昇圧法が違ってそれほど変わらないが、商用周波破壊電圧はかなり違って来る。したがって、この両電圧昇圧法で奈川渡コイルの商用周波破壊電圧の比較を行なった。その結果、連続昇圧法では階段昇圧法の1.25倍となることがわかった。これは、松延氏らの理論⁽¹⁸⁾の値と一致している。

(2) 破壊電圧の比較

商用周波破壊電圧、衝撃波破壊電圧ならびに直流破壊電圧の結果は図2に示すとおりである。奈川渡コイルでは、初期値が沿面クリープ破壊のため低い値であるが、予備コイルの破壊電圧から考えて、使用コイルの破壊電圧の低下はないものと思われる。また、潮コイルでは初期と比較して、使用コイルの破壊電圧の低下はないものと思われる。

次に、これらの結果より求めた奈川渡コイルにおける α , β , γ の各平均値はそれぞれ2.75, 1.21, 1.80となる。潮コイルにおける α は P_{12} が検出できなかったため求められないが、初期コイルにおける β は1.25である。



奈川渡コイルにおける予備コイルの商用周波破壊電圧の平均値を100%として示した。
ac.BDV : 商用周波破壊電圧
Imp.BDV : 衝撃波破壊電圧
dc.BDV : 直流破壊電圧

図2 電源波形の違いによる破壊電圧の比較

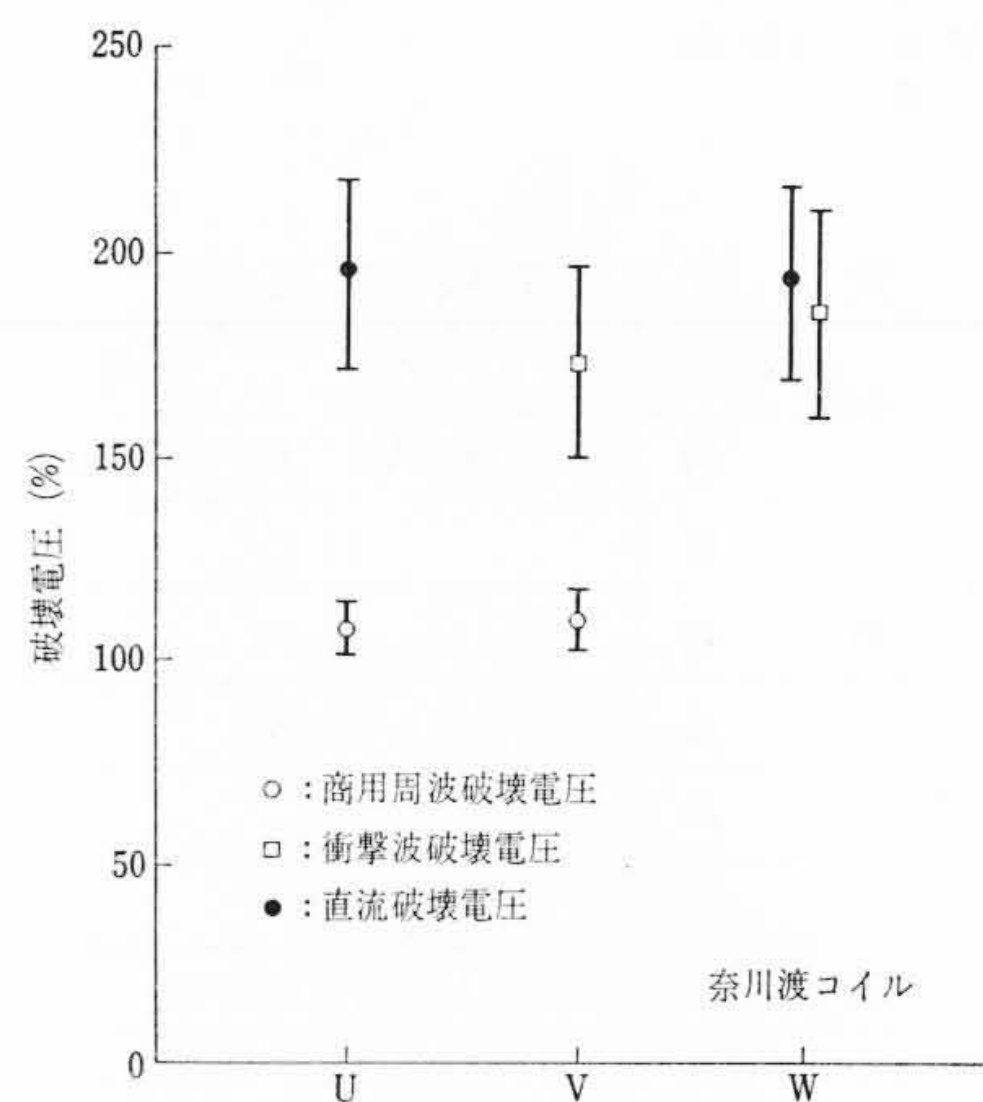


図2に示した奈川渡コイルにおける予備コイルの商用周波破壊電圧の平均値を100%とした。

図3 相別破壊電圧の比較

(3) 巻線の相別および位置の差異による比較

奈川渡コイルにおいて、商用周波破壊電圧と衝撃波破壊電圧ならびに直流破壊電圧について相の違いによる比較を行なった結果は図3に示すようである。たとえば、送電機器の関係でサージ電圧がある特定の相にだけかかるようなことが起こればその相がほかの相より破壊電圧が低下するということが考えられるので相の違いによる破壊電圧の比較を行なったものである。U, V相で商用周波破壊電圧, V, W相で衝撃波破壊電圧ならびに W, U相で直流破壊電圧をそれぞれ比較した結果、いずれの場合も有意差がみられなかった。

次に、コイル位置による破壊電圧の変化を調査した。これは、運転状態では線路側のコイルには対地に対して常規電圧が印加され、中性点側ではほとんど電圧がかからないことから、対地に加わる電圧の差異によってコイルの劣化状態がどうなるか商用周波破壊電圧を測定して調べた。その結果は図4に示すように、線路側で破壊電圧が低下しているということとはなかった。

また、潮コイルでも試料数こそ少ないが、3.2で述べたように、それぞれのコイルで運転時における対地間電圧が違っているが、

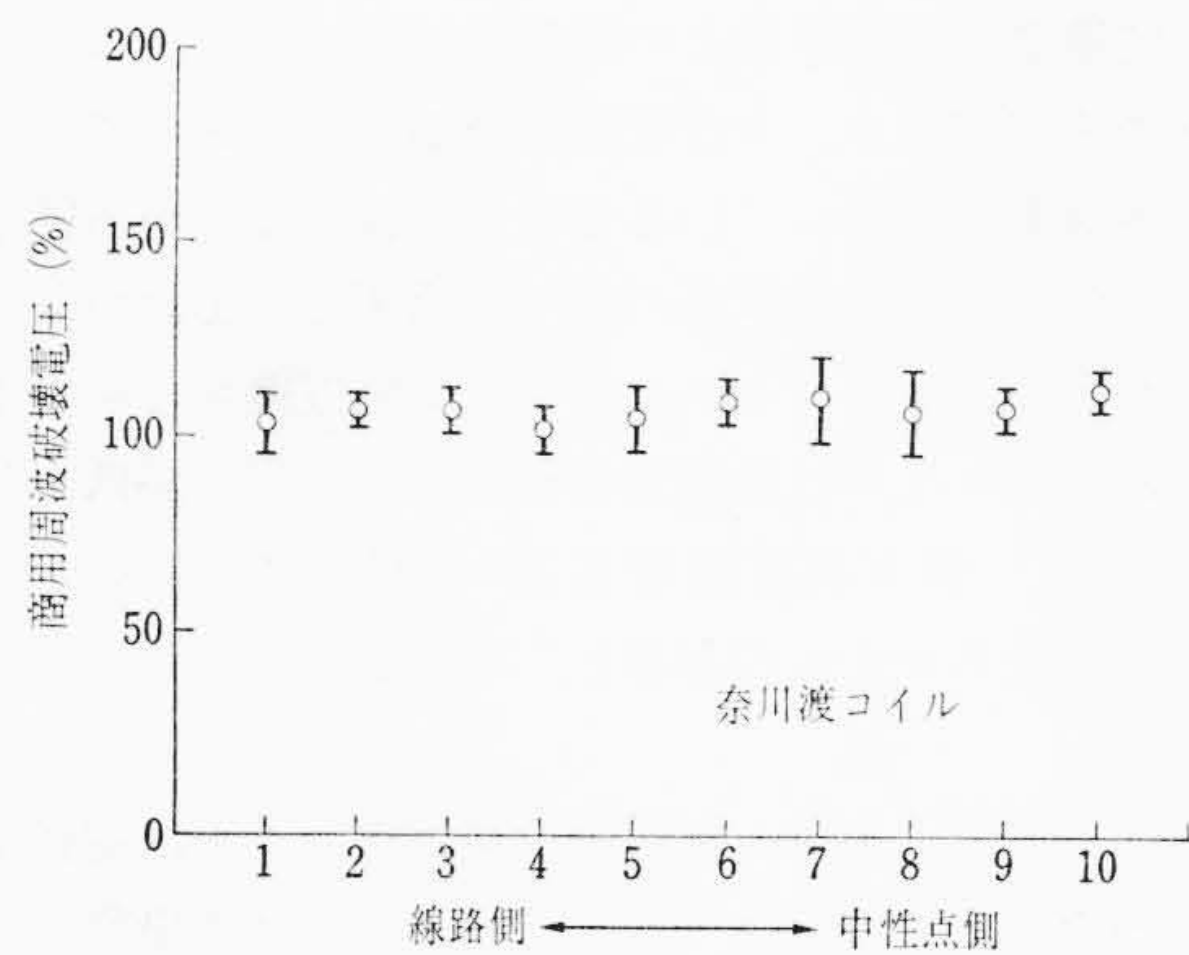


図2に示した奈川渡コイルにおける予備コイルの商用周波破壊電圧の平均値を100%とした。

図4 コイル位置の違いによる破壊電圧の比較

図2に示したように高い電圧のかかっている抜取コイルでも初期値より破壊電圧が低いということはない。

6. 考 察

6.1 無溶剤形発電機コイルの経年変化

今まで述べてきたように、予備コイル、使用コイルを初期コイルと比較すると破壊電圧には差がみられず、成極指数や $\tan \delta$, $\Delta \tan \delta$ などの電気的特性に若干の違いがみられた。

コイル絶縁層の主構成材料であるマイカは物理的、化学的にきわめて安定であるため運転中での変化はないと考えられるが、注入ワニスなどにいわゆる絶縁層の枯れが起こり、そのため $\tan \delta$ が減少し、またその際の収縮により絶縁層にボイドを生じ $\Delta \tan \delta$ の増加、部分放電開始電圧などの低下を招くといわれている。この現象が、使用コイルにいくぶんみられたのであるが、その変化は少ない。また、これらの非破壊試験結果を経過年数と関係づけることは困難であるが、ここで調べた奈川渡、潮両発電機コイルでは破壊電圧の低下がなかったため寿命は非常に長いものと考えられる。

また、予備コイルは、常温に放置されたままなので使用コイルのように熱的影響は受けていない。したがって、常温で長期間放置された予備コイルの絶縁層の有機物のアフターキュアは進行しないと考えられる。定格電圧におけるみかけの最大放電電荷とか単位時間あたりの累積放電電荷量を測定したところ予備コイルと使用コイルとで差はみられなかった。

予備コイルと使用コイルとの差は表5に示した130℃、40時間の加熱乾燥後の測定結果からでもわかるように、適度の乾燥により電気的特性がさらに向上することを示している。

6.2 コンパウンド発電機コイルとの比較

(1) 直 流 試 験

コンパウンド発電機コイルの成極指数は図5に示したように、初期値に比べ予備コイルはもちろん使用コイルでも低下する傾向にあると言われており1.5以下となるコイルが多い⁽⁹⁾。これは、コンパウンド発電機コイルが吸湿しやすいためと考えられるが、同時に適度の加熱乾燥によりそれほど吸湿程度がひどくなく成極指数が1.5以上となり割合早く乾燥する⁽⁸⁾(75℃約50時間以内)ようである。ところが、無溶剤形発電機コイルは、表5に示したように吸湿しにくい、その代わり95℃、90時間の加熱乾燥によっても最初の値とほとんど変わらない電気的特性を示している。

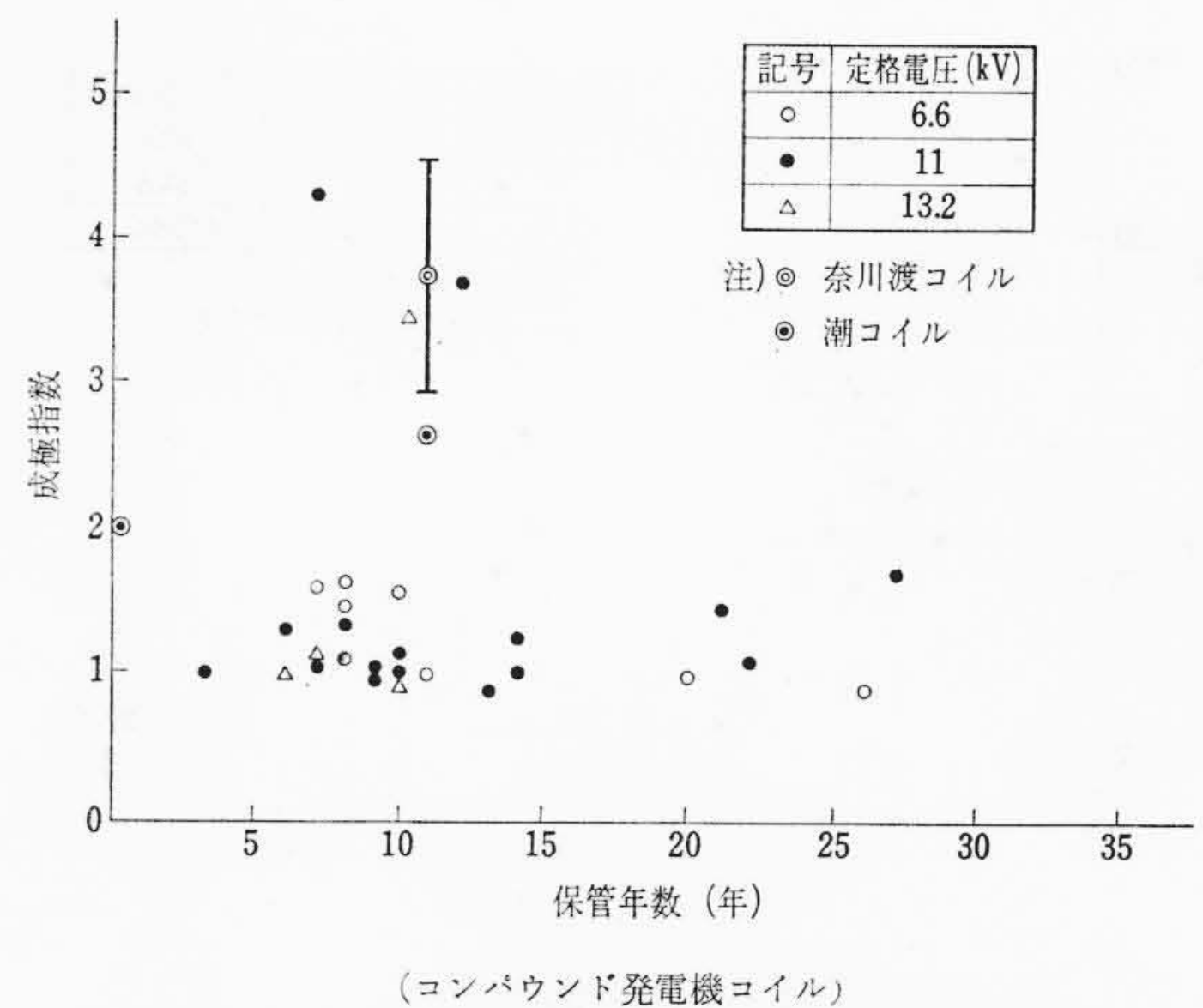


図5 予備コイルの成極指数の経年変化⁽⁸⁾

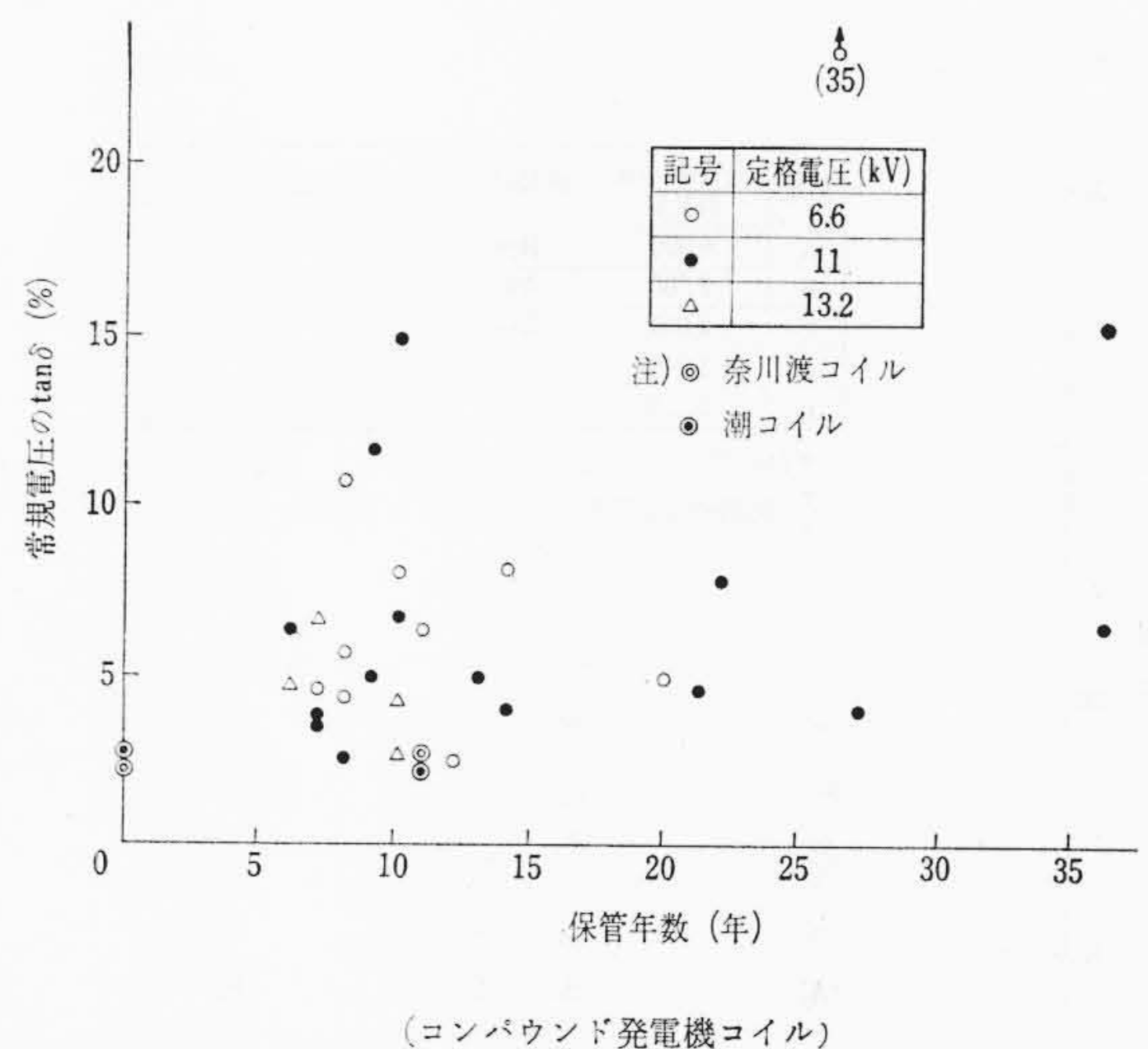


図6 予備コイルの誘電正接の経年変化⁽⁸⁾(その1)

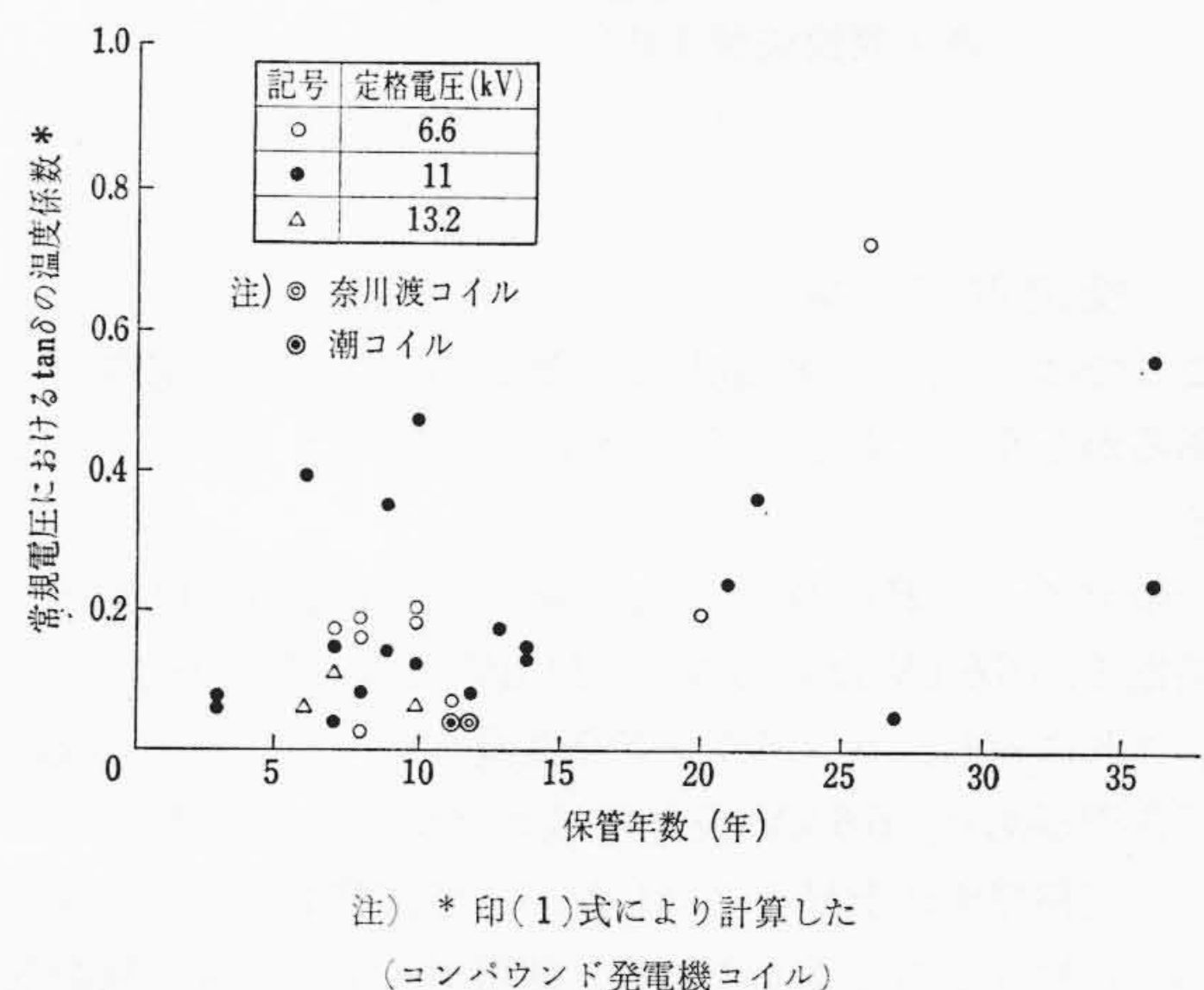
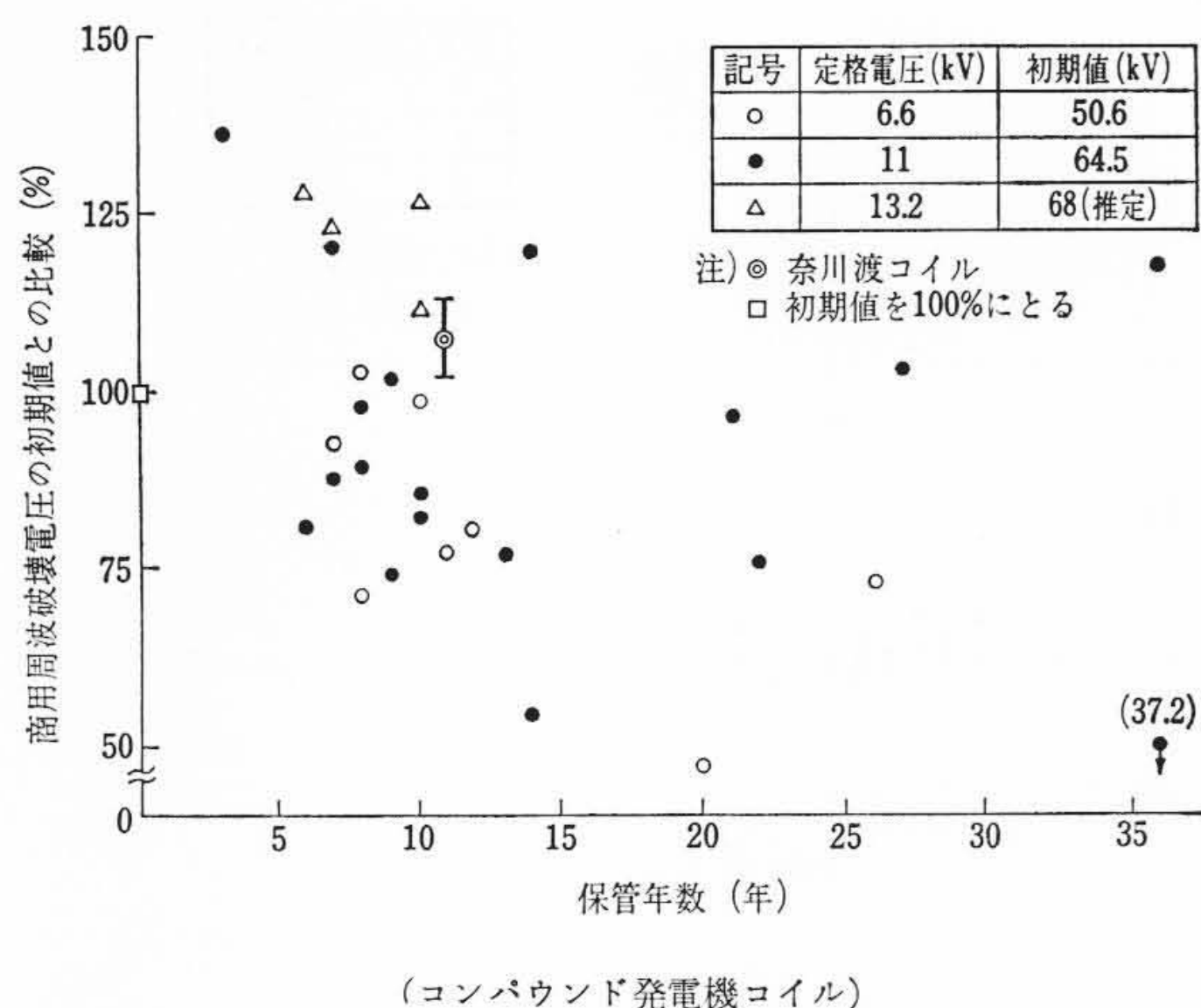
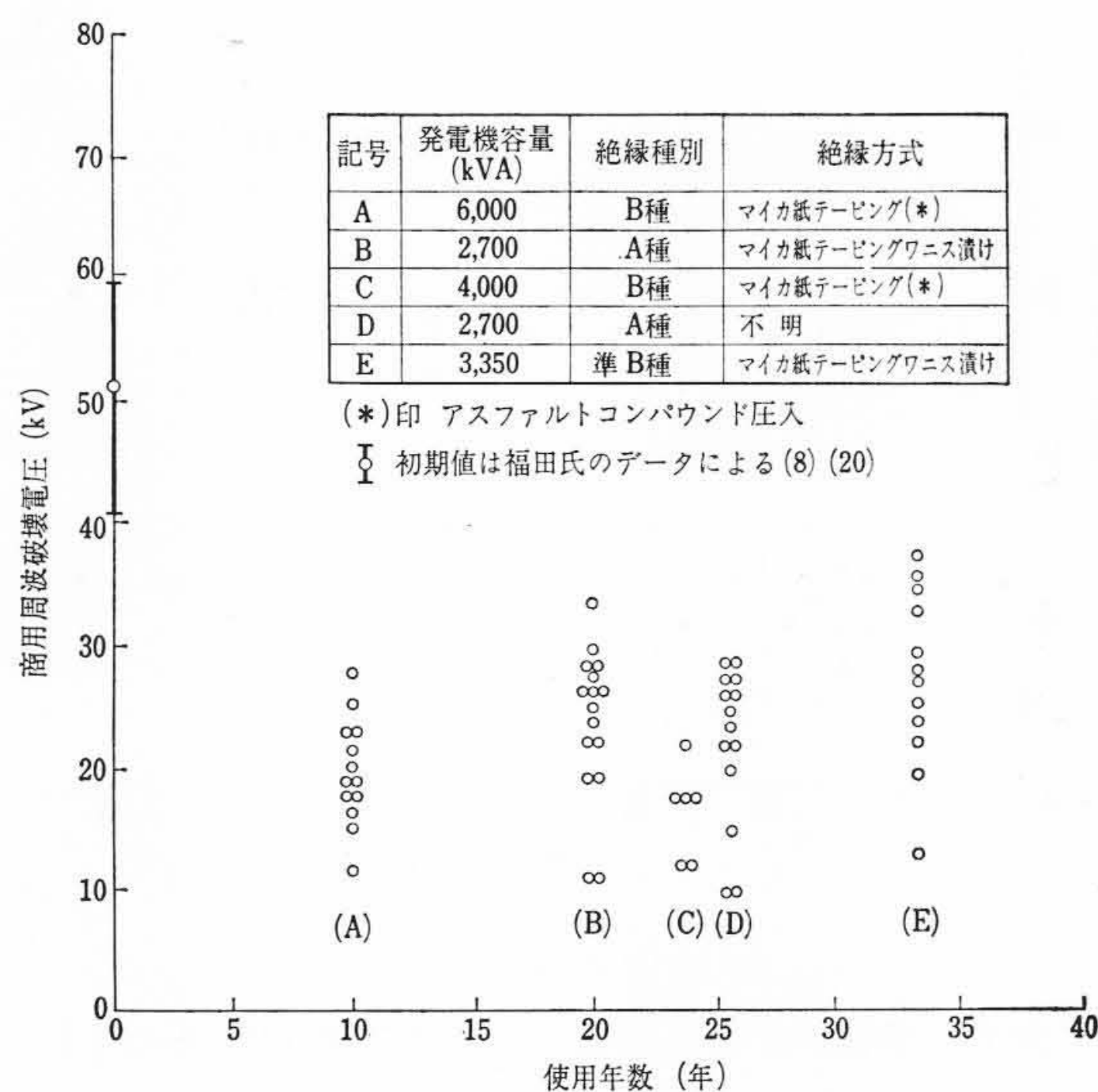


図7 予備コイルの誘電正接の経年変化⁽⁸⁾(その2)

(2) 誘電正接試験

予備コイルにおける常規電圧の $\tan \delta$ を図6に、この温度係数を図7に示した。これより、無溶剤形発電機コイルのほうがコンパウンド発電機コイルより低く、予備コイルを長期間保管しても変化の少ないことより経年変化に対して安定した特性を有していると言える。

図8 予備コイルの商用周波破壊電圧の経年変化⁽⁸⁾図9 6.6 kV 級発電機旧式絶縁コイルの商用周波破壊電圧⁽¹⁾

(3) 交流電流試験

ここでは、 P_{11} が定格電圧より低いか、あるいは定格電圧以上であるかどうかを中心に予備コイルと使用コイルについて考察する。

予備コイルの P_{11} の経年変化は無溶剤形発電機の供試コイルで定格電圧が 6.6 kV はもちろん、11 kV でも定格電圧以上であった。これに対し、コンパウンド発電機コイルについては福田氏らの報告⁽⁸⁾があり、6.6 kV 級発電機コイルでは定格電圧以上であるが、定格電圧が上昇するにしたがって定格電圧以下でも P_{11} がみられる場合があるようである。使用コイルの場合も無溶剤形発電機コイルの P_{11} は定格電圧以上であったが、コンパウンド発電機コイルの場合寺瀬氏の報告⁽¹⁾によると 3.3 kV 級では P_{11} は定格電圧以上になるけれども 6.6 kV 以上になると定格電圧以上となるコイルはきわめてまれのようである。

(4) 破壊試験

初期値を基準（昭和 25 年から昭和 35 年ころ製作された新品コイルの平均値⁽²⁰⁾）にした予備コイルにおける商用周波破壊電圧の経年変化を図 8 に示した。また、使用コイルにおける商用周波破壊電圧の経年変化を図 9 に示した。この図 9 は寺瀬氏の著書⁽¹⁾か

ら引用して筆者が使用年数との関係でプロットしなおしたものである。ところで、図 8、9 は定格電圧が同じであっても製造会社も違い、絶縁方式も違っていると考えられることから経年変化による厳密な意味での破壊電圧の低下を論ずることはできない。しかし、これらの図からでもコンパウンド発電機コイルの予備コイルならびに使用コイルは経年変化により破壊電圧が低下していることがわかる。10 年程度保管あるいは使用されていたコイルでもかなり低下するコイルのあることを示している。

(5) 総括

以上述べてきたように、無溶剤形発電機コイルは定格電圧が低いとコンパウンド発電機コイルと比較して特性の優位性が表われないが、定格電圧が高くなるとその優位性が表われてくることがわかった。この定格電圧の低いコイルで優位性が表われないのは、図 8 の初期値をみてもわかるように、定格電圧の低いほど定格電圧の割合からみて破壊電圧に裕度があるためと考えられる。さらに、使用コイルの非破壊、破壊試験結果から無溶剤形発電機コイルの電気的特性がコンパウンド発電機コイルよりすぐれていることが実証された。

7. 結 言

以上述べてきたように、約 10 年間使用した無溶剤形発電機コイルの非破壊試験においては若干の電気的特性の変化は認められたが、破壊電圧の低下は認められなかった。また、文献からの引用によるコンパウンド発電機コイルの電気的特性との比較において無溶剤形発電機コイルは熱的にも安定で吸湿しにくく、経年変化による電気的特性の変化も少なく安定であることが実証された。

最近のコイルでは、注入樹脂ならびに構成基材の改善がなされており、いっそう安定な性能が期待できると考えられる。

従来、コンパウンド発電機コイルについての経年変化特性を報告した例は多いが、無溶剤形発電機コイルの経年変化特性について行なった報告はこれが最初かと思われる。関係者のご参考になれば幸いである。

最後に、本研究に対し種々のご便宜を図っていただいた東京電力株式会社ならびに中国電力株式会社の関係者各位に、個人的にご指導いただいた電力中央研究所工学博士福田氏ならびに中部電力株式会社工学博士寺瀬氏に、また終始ご指導いただいた日立製作所日立工場西副工場長、北野部長ならびに日立研究所工学博士山崎部長、宮下室長に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 寺瀬：電気機器非破壊絶縁試験法（オーム社）
- (2) 安芸ほか：第 22 回絶縁劣化研究懇談会資料 22-2（昭 40）
- (3) A. Wichmann：AIEE Winter General Power Meeting No. 62-192（1962）
- (4) C. M. Laffoon et. al：AIEE Trans. 70. pt. 1.（1951）
- (5) A. Wichmann：Siemens Review 34, 8（1967）
- (6) 原：第 16 回絶縁劣化研究懇談会資料 16-5（昭 37）
- (7) A. Anderson et. al：IEEE Trans. PAS-86, 2（1967）
- (8) 福田ほか：電力中研技報 No. 64070（1964）
- (9) 電研：第 3 回絶縁劣化研究懇談会資料 3-4（昭 29）
- (10) 広瀬ほか：電力中研技報 No. 67001（1967）
- (11) 電研：同期機専門委員会資料（昭 44）
- (12) 寺瀬：第 22 回絶縁劣化研究懇談会資料 22-9（昭 40）
- (13) B. V. Bhimani：AIEE 80 pt. III, 148（1961）
- (14) K. M. Stevens et. al：AIEE 73 pt. III, 10（1954）
- (15) H. G. Tempelaar：CIGRÉ No. 133（1966）
- (16) A. M. Nemetz：AIEE 76 pt. III, 8（1957）
- (17) W. Schneider：AIEE Misc Paper No. 51-129（1951）
- (18) 松延ほか：電学誌 89, 971（昭 44）
- (19) 電研：第 10 回絶縁劣化研究懇談会資料 10-5（昭 34）
- (20) 福田：電学誌 82, 883（昭 37）