# 乾式変圧器用絶縁材料の評価

### Evaluation of Insulating Materials for Dry Type Transformers

H種乾式変圧器の絶縁材料として、各種の繊維強化プラスチック、シート材、電 線、及び含浸ワニスが用いられる。次々と登場するこれらの新材料から選択し、コ ンパクトで信頼性の高い変圧器絶縁を決めるため、一連の試験法を開発した。

単体テスト,組合せテスト,端部モデルテスト,及び実機モデル(トランスレッ ト) テストを位置づけ、体系化した。この体系に従い、各種の繊維強化プラスチッ ク, 含浸ワニス, シート材, 及び電線を評価して絶縁寸法を決定し, コンパクトで 信頼性の高い、H種乾式変圧器絶縁を開発した。

門谷建蔵\* Kenzô Kadotani 土井良太\* Ryôta Doi 森戸 延\*\* Tadasu Morito 竹内新平\*\*

Shinpei Takeuchi

乾式変圧器は小形軽量であり、また火災の危険が少ないこ とから, ビルや都市部の工場, 地下鉄などの変電所に広く採 用されている。最近は不燃油(PCB)が使用禁止になった ため,不燃油入変圧器に代わり使用される傾向にあり、需要 が増加している。

一方,最近の高分子材料の発展は目覚ましいものがあり, 乾式変圧器の絶縁材料として使用できる耐熱性プラスチック 複合材料が、次々と開発されている。乾式変圧器の絶縁材料 には、各種の繊維強化プラスチック(以下、FRPと略す)、 シート材、電線、及び含浸ワニスがある。

次々と開発されるこれらの新材料から選択し、コンパクト で信頼性の高い変圧器絶縁を決めるため、単体テスト、組合 せテスト、端部モデルテスト、及び実機モデル (トランスレ ット) テストを位置づけ、体系化した。

この評価体系に従い,一連のテストを運用することにより、 各種FRP(絶縁筒,及びスペーサ材),シート材(層間絶縁 物,及び端部絶縁物),電線,及び含浸ワニスを評価して絶縁 寸法を決定し、コンパクトで信頼性の高い、 H種乾式変圧器 絶縁を完成した。この論文はその概要について紹介する。

#### 2 乾式変圧器絶縁決定体系

乾式変圧器の絶縁材料, 及び絶縁寸法を決定するために運 用されるテストの流れを体系化すると、図1に示すようになる。 絶縁筒とスペーサはFRPであり、単体でテストし、材料 の選択,及び寸法の決定を行なう。電線及びシート材は、含 浸ワニスと組み合わせた電線モデル,並びに積層板モデルで, 含浸ワニスともどもその相性が評価される。 層間絶縁, 及び 端部絶縁の材料の選択,及び寸法の決定は、電線、シート材、 及び含浸ワニスを組み合わせた端部モデルで行なわれる。

実機モデル(トランスレット)は、実機に採用すべき材料 をすべて組み合わせ, 絶縁寸法は実機に採用したいと考える 寸法のままで, コイルの直径とターン数だけを縮小したモデ ルであり、最終的な寿命の確認テストとして運用される。

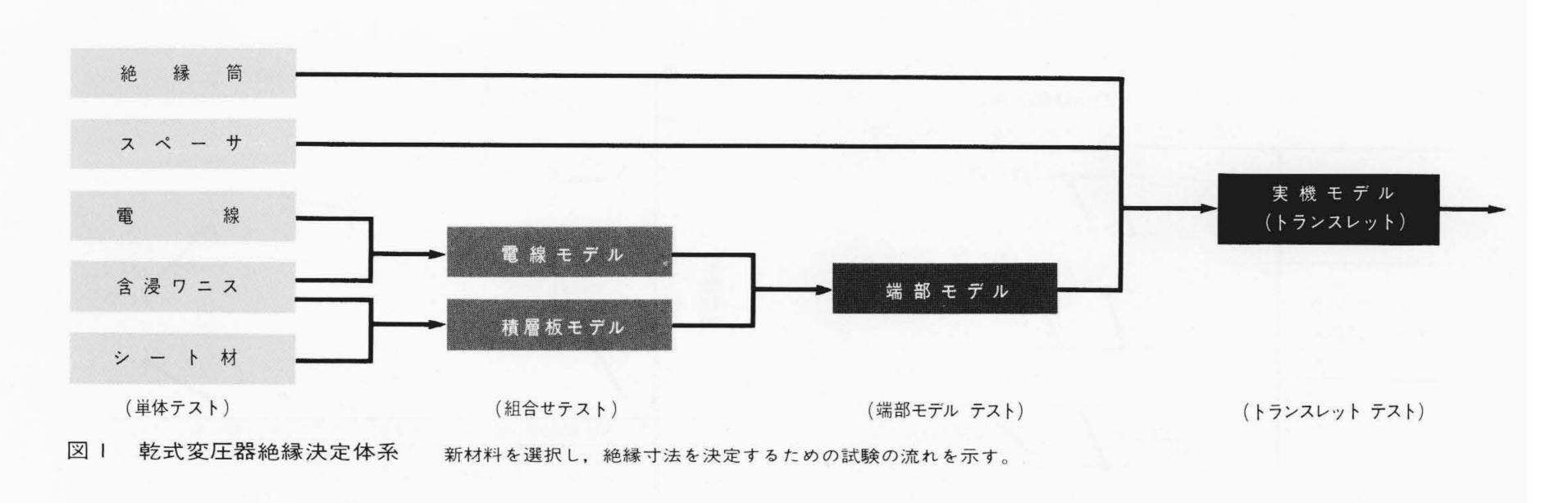
以下に材料の電気的性質を主に紹介しながら, この体系の 運用例について述べる。

#### 3 単体テストによる評価

### 3.1 劣化条件

乾式変圧器用絶縁材料は,耐熱性と耐湿性が重要であり, 熱劣化や吸湿劣化を与えた後に評価する。熱劣化は230℃, 10日, 20日, 40日を標準とし, 必要に応じて温度, 及び日数 を種々変えた。10°C半減則によると、230°Cで40日の劣化は、 165℃ (導体平均温度)で約10年に相当する。寿命の最終的な 評価は、通電加熱で劣化するトランスレット テストによるこ とになるが、材料のスクリーニングには便宜上、恒温槽内加 熱の230°C, 40日を標準にした。

吸湿劣化は40℃, 90~95%RH中, 24時間を標準とした。 更に必要に応じて、塵埃を付着させてテストするが、この論



<sup>\*</sup>日立製作所日立研究所

<sup>\*\*</sup> 日立製作所国分工場

文では触れない。

#### 3.2 絶縁筒

各種絶縁筒,及びスペーサの特長を**表 1** に総括して示した。 絶縁筒は、コイルの機械的支持と絶縁(低圧コイルと鉄心間 及び高圧コイルと低圧コイル間)とを受け持つ。短絡時にコ イルの求心力がスペーサを介して、絶縁筒の周方向の圧縮応 力になる。絶縁筒は周方向により多くガラス繊維を配向して 強化したフィラメント ワインディング(FW)筒が有利である。

絶縁筒では、機械的性質、破壊電圧のほかに、耐アーク性 や耐トラッキング性を比較して選択する。その厚みは機械的 耐力から主に決定する。図2に絶縁筒の破壊電圧を示す。

#### 3.3 スペーサ

スペーサには短絡時に圧縮力が加わり、また絶縁的には沿面クリープ電圧が問題となる。従って、沿面の耐電圧と圧縮強さとを測定して選択する。

図3にスペーサ沿面のコロナ特性を示す。同図からアスベスト紙をシリコーン ワニスではり合わせたスペーサを使用する場合の電界強度の選定には、特に注意する必要がある。

表 | 絶縁筒,スペーサの特長 ()は特性優秀, △は使用可, ×は使用不可をそれぞれ表わす。

絶縁 材	構成	耐熱性	電気的耐力	機械的 耐力
絶 縁 筒	シリコーン ガラス クロス	0	Δ	Δ
	ジフェニル系 ガラス クロス	0	0	0
	エポキシ ガラスロービング(FW)	Δ	0	0
スペーサ	シリコーン アスベスト紙	0	×	$\triangle$
	シリコーン ガラス クロス	0	0	0
	ポリエステル ガラス ロービング	×	0	Δ
	耐熱ポリエステル ガラス ロービング	Δ	0	$\triangle$

スペーサには高温における圧縮強さが要求される。図4に、各種スペーサの圧縮強さを示す。ガラス クロスを積層したスペーサでは、圧縮強さが非常に大きい。ガラス ロービング引抜き棒のスペーサは、機械加工が不要で寸法精度も良い利点があるが、高温での強さが小さいので次に述べるようなことにより、強度低下が防止できる。図5はスペーサ内温度分布を測定するための送風装置である。コイルを模擬した熱板を180°Cに保ち、ブロワで送る空気の風速を変えて、スペーサ内温度を測定した。図6に温度と、また送風時に測定した圧縮強さを示す。自冷式では風速1m/s以下であるが、風冷式では風速7m/s以上であり、スペーサ内温度はコイルよりかなり低く、圧縮耐力もかなり余裕がでてくる。

スペーサをガラス クロスで補強すると、表2に示すように圧縮強さが増す。実際はスペーサの2面は、絶縁筒及びコイルに接し、含浸ワニスで接着されているから、表2におけるガラスクロスを2面にはり付けたと同様の補強がなされている。

従って、スペーサはガラス ロービング引抜き棒を適用できる。スペーサの厚み、幅、及び間隔は、冷却、機械力、絶縁を考慮して決定する。

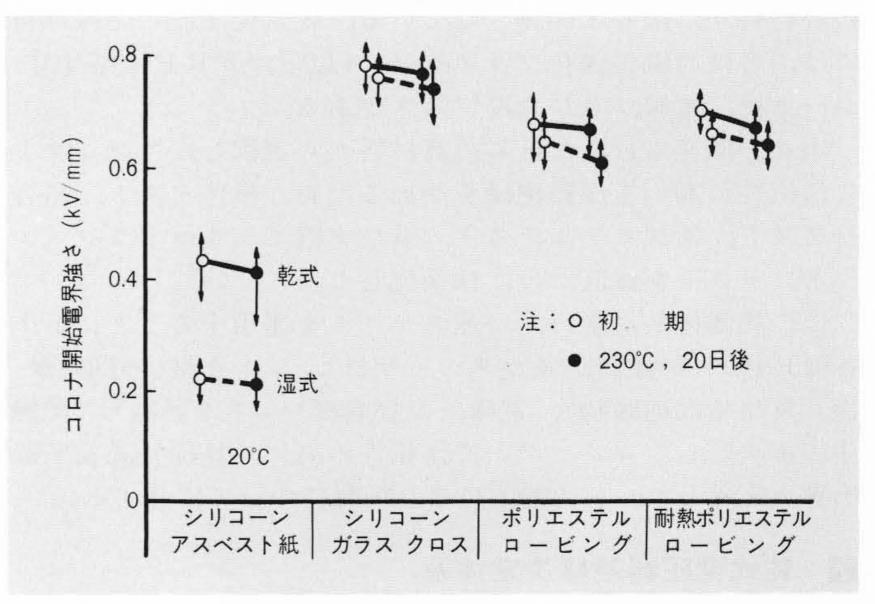


図 3 スペーサのコロナ特性 スペーサを平板電極にはさんで測定した。アスベスト基材のものが劣る。

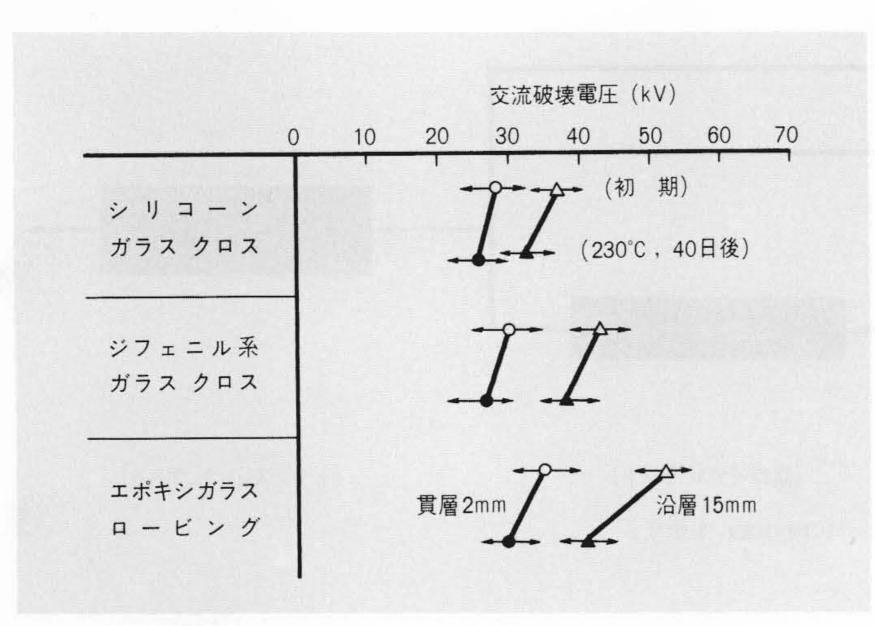


図 2 絶縁筒の破壊電圧 シリコーン ガラス クロス積層管のほうが幾分劣る。

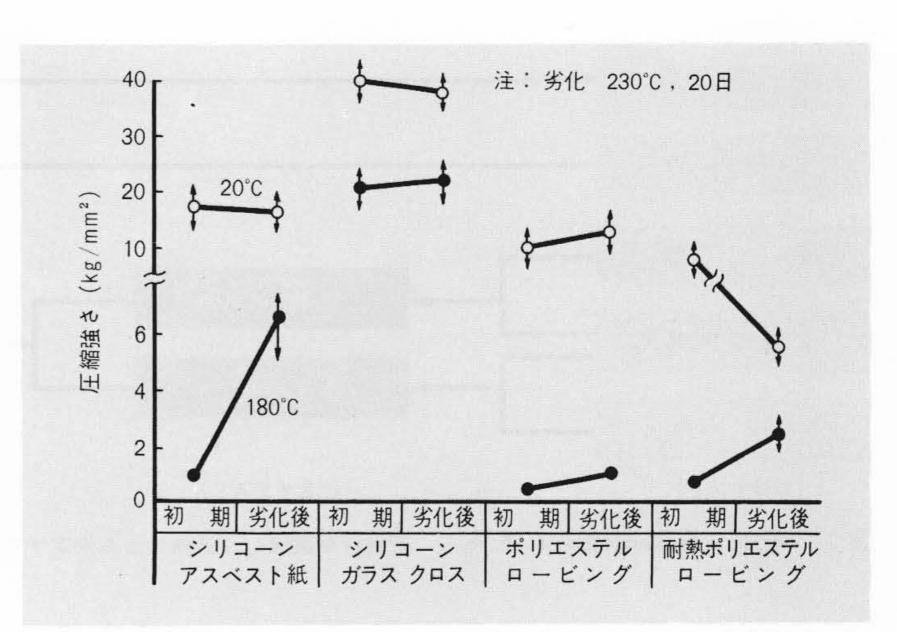


図 4 スペーサの圧縮強さ ガラス ロービング引抜き棒は、高温で弱いが熱劣化すると強くなる。

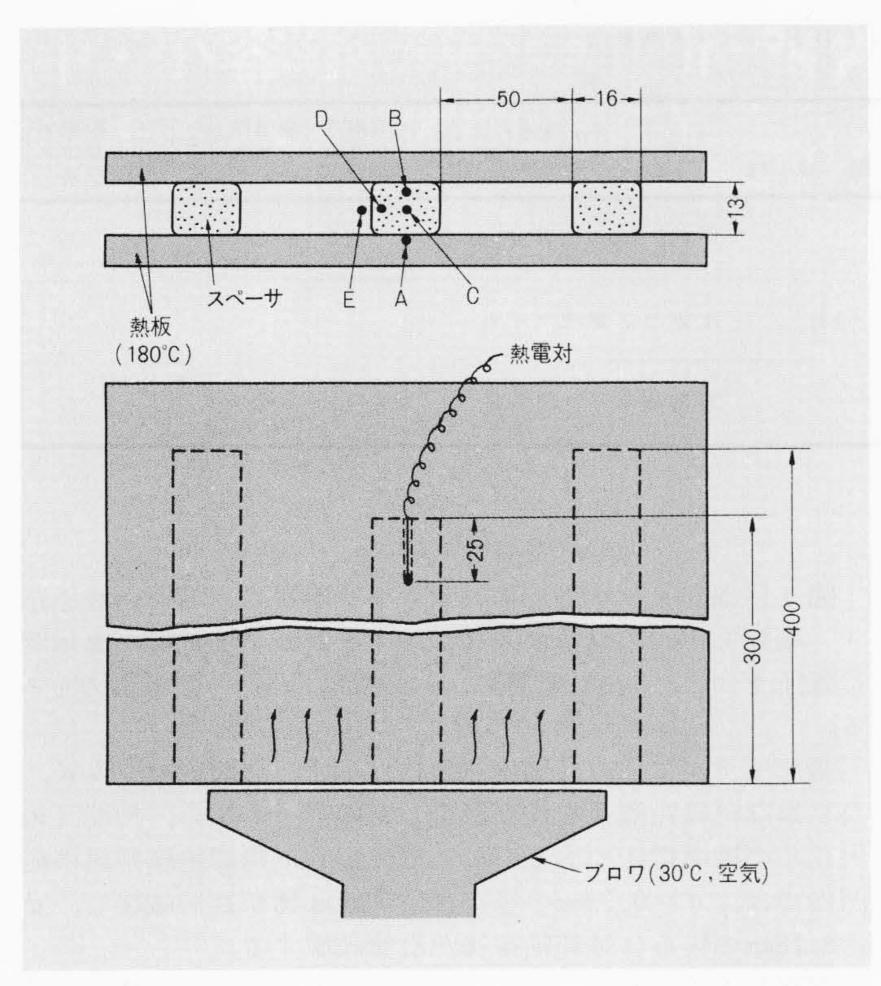


図 5 送風装置 図中のB点及びD点は表面より2mm内側である。また、 E点は外側2mmの位置である。

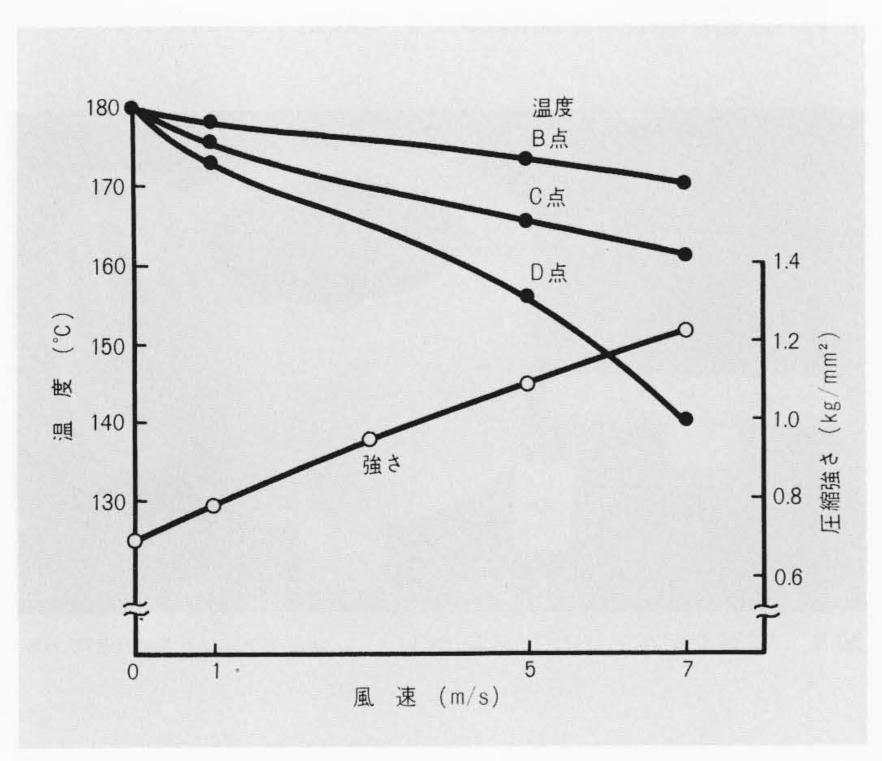


図 6 送風時のスペーサ内温度と強さ 風速が増すと温度が低下し 圧縮強さが大きくなる。耐熱エポキシ ガラス ロービングのスペーサである。

表 2 スペーサの補強 ガラス ロービング一方向強化棒の圧縮強さは ガラス クロスの補強で向上する。

スペーサ	形状	原形	ガラス クロス		
圧縮強さ	20°C	8.5	8.7	8.5	9.0
(kg/mm <sup>2</sup> )	180°C	0.70	1.7	3.0	3.2

#### 3.4 その他

電線,シート材,及び含浸ワニスは,作業性の観点から, それぞれ単体でテストするが、電気的性質ではないので,こ こでは省略する。

#### 4 組合せモデルによる評価

電線及びシート材は、含浸ワニスと組み合わせたモデルで、 含浸ワニスともどもその相性と耐熱性を評価される。**表3**に 相性の大略を示す。

#### 4.1 電線モデル

電線は比較的耐コロナ性に優れた二重ガラス巻絶縁平角線 (低圧コイル用)、芳香族ポリアミド紙・ガラス巻絶縁平角線 片ガラス マイカ巻絶縁平角線(高圧コイル用)などが主に使われ る。今回は前者2種類の電線について述べる。ガラス巻は、 ガラスロービングを、少量のバインダ(シリコーン、エポキ シなど)により固定している。

このガラス巻層に含浸ワニスが入り、絶縁耐力が増すのであるが、含浸ワニスの含浸性はバインダとの相性に左右される。この相性を調べるため、2本の電線を背合せにし、含浸ワニス処理した「電線モデル」を用いる。

図7に、電線モデルで各種含浸ワニスとの相性を、破壊電圧で比較して示す。シリコーン バインダのH種電線との相性は、同系のシリコーン ワニスは優れている。他のワニスはシリコーン バインダ電線との相性は悪く、逆にエポキシ

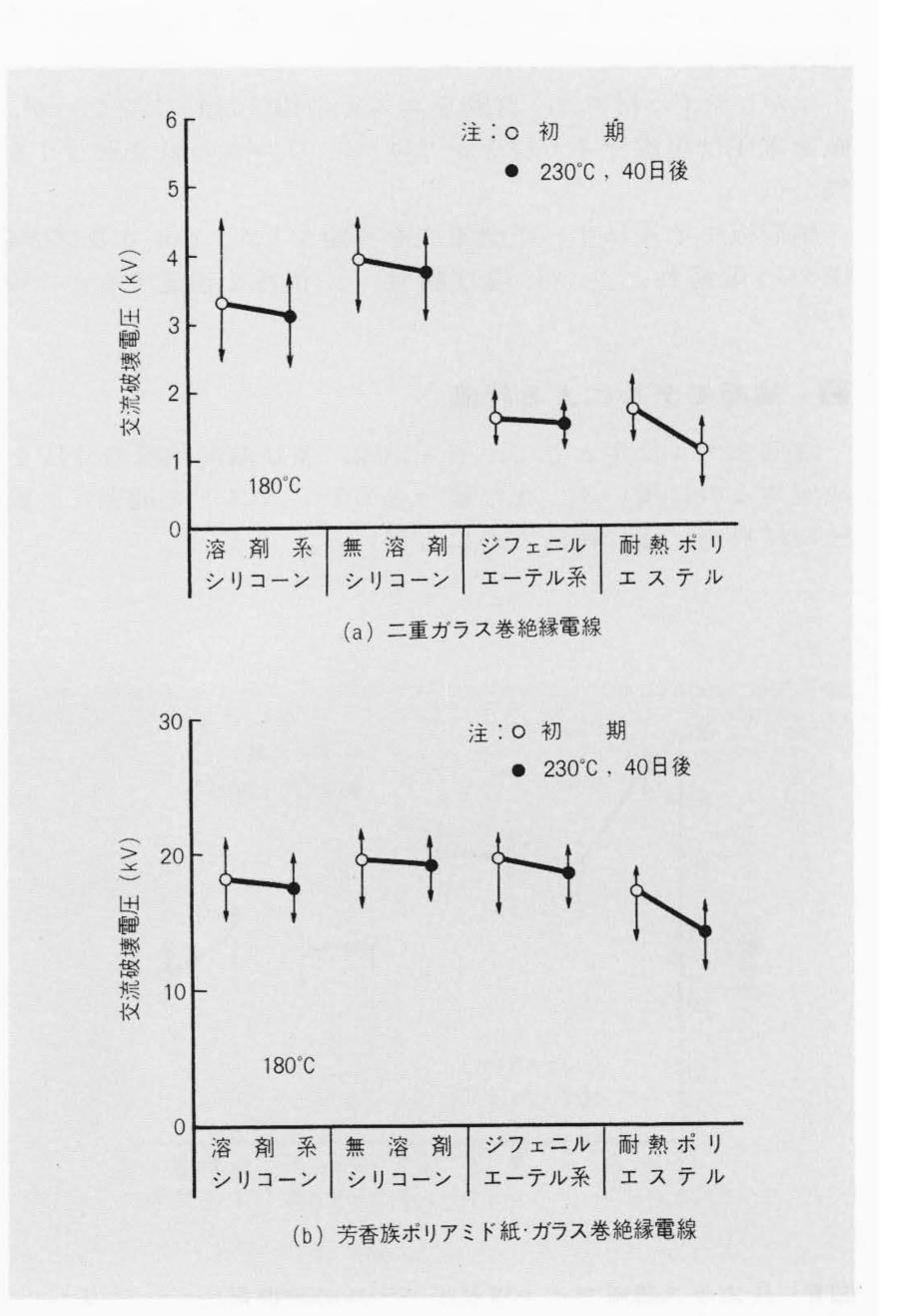


図 7 電線モデルの破壊電圧 シリコーン バインダのH種電線と含浸 ワニスの相性である。シリコーン系ワニスは相性が良い。

表 3 含浸ワニスと絶縁材の相性 れ表わす。

相性について○は良、△はやや悪く、×は悪いことをそれぞ

絶	含浸ワニス 縁 材	溶剤系 シリコ ーン	無溶剤 シリコ ーン	ジフェ ニルエ ーテル 系	耐熱ポ リエス テル	新
	二重ガラス巻絶縁 (エポキシ バインダ)	×		×	×	i a
電線	二重ガラス巻絶縁 (シリコーン バインダ)	0	0	×	×	シー
	芳香族ポリアミド紙 ガラス巻絶縁 (同 上)	0	0	0	Δ	

絶縁		溶剤系 シリコ ーン	無溶剤 シリコ ーン	ジフェ ニルエ ーテル 系	耐熱ポ リエス テル
	片ガラスはがしマイカ	0	0	0	0
シート材	片ガラス集成マイカ	0	0	Δ	×
	芳香族ポリアミド紙	0	0	0	0

バインダのF種電線との相性は良いが、この組合せでは耐熱性が不足する。芳香族ポリアミド紙・ガラス巻絶縁電線では、芳香族ポリアミド紙の層への含浸性が、どの含浸ワニスとも良好なので、特に差がでない。

#### 4.2 積層板モデル

層間絶縁物、及び端部絶縁物として用いるシート材は、含 浸ワニス処理した「積層板モデル」で、主に破壊電圧を測定し て含浸ワニスとの相性を評価する。

層間絶縁物には貫層耐電圧の優れたマイカ材を用い、端部絶縁物には沿層耐電圧の優れた芳香族ポリアミド紙を用いる。後者はどの含浸ワニスとも相性が良い。前者はバインダによって相性がある。シリコーン バインダの H 種集成マイカ材と、シリコーン ワニスとは相性が良い。図8に破壊電圧の比較を示す。

はがしマイカ材では、含浸ワニスとの相性は特にでないが、 破壊電圧は集成マイカ材とシリコーン ワニスの組合せよりも 幾分低い。

積層板モデルは主に破壊電圧を測定するが、 $tan \delta D U$ 誘電率の吸湿特性、並びに温度特性も、相性を判定するのに役だつ。

#### 5 端部モデルによる評価

端部モデルは主として, 層間絶縁, 及び端部絶縁の寸法を 決定するのに用いる。また組合せモデル テストを通過した数 種の材料を, 更に絞るためにも用いる。

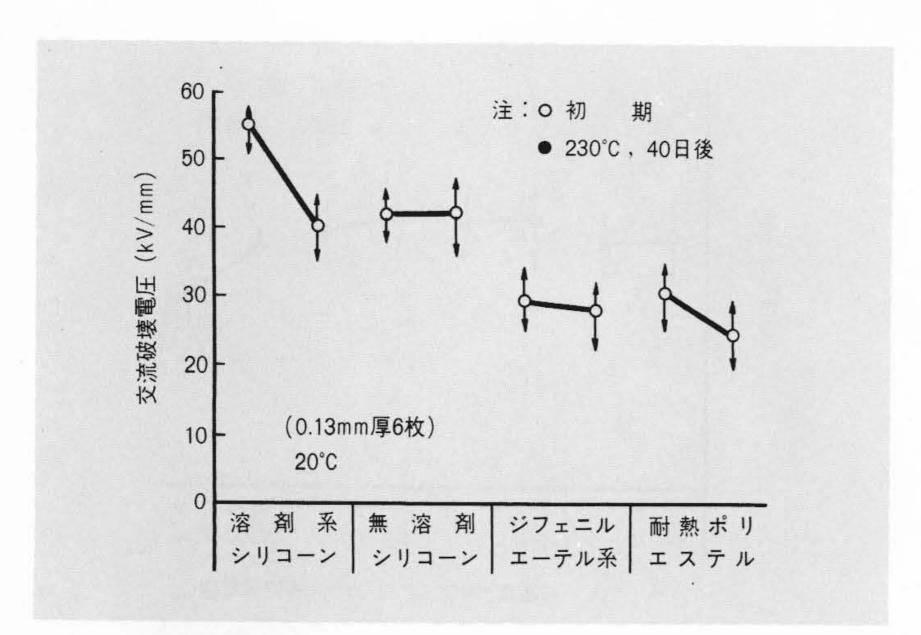


図 8 片ガラス集成マイカ積層板モデルの破壊電圧 シリコーン バインダのH種シート材と含浸ワニスの相性である。シリコーン系ワニスは相 性が良い。

図9に端部モデルと、後述するトランスレットの外観を示す。端部モデルの構造は図10に示すとおりで、電線の導体間に電圧を加え、層間(貫層)ないし端部(沿層)の絶縁耐力をみる。

端部モデルによる評価例を図11に示す。層間絶縁厚みd,及び端部絶縁距離 l を種々設定した端部モデルの、初期(未劣化)の破壊電圧である。ここに設定した端部絶縁距離の範囲内では、d=0.52mmの場合は層間絶縁物が貫層破壊し、d=0.78mmの場合は端部絶縁物が沿層破壊する。

端部モデルは、更に熱劣化及び吸湿劣化を与え、且つ長時間課電圧寿命特性を測定し、破壊個所、破壊電圧値、及びコロナ特性を十分に考察したうえで、トランスレットの絶縁寸法を決めるのに用いる。材料を絞るためには、 *l* 及び *d* を二とおり(層間破壊用と端部破壊用)に設定するだけでよい。

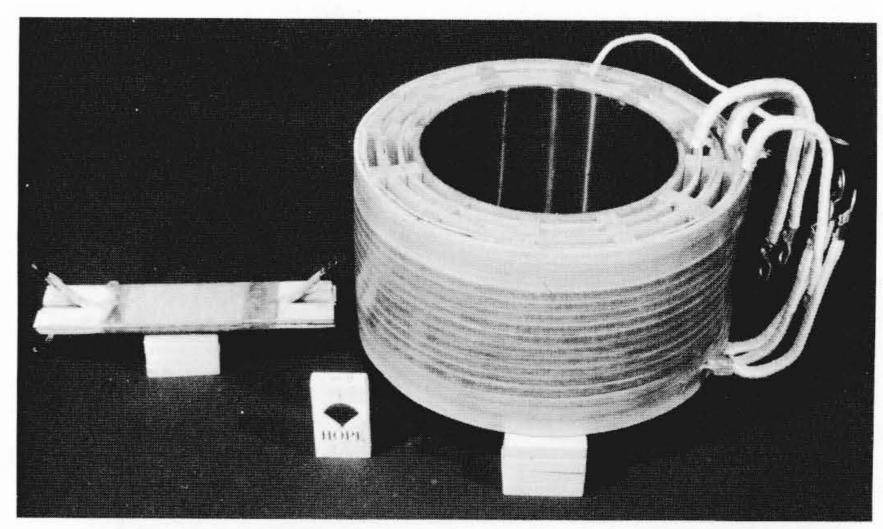


図 9 端部モデルとトランスレット

端部モデルは非常に小形である。

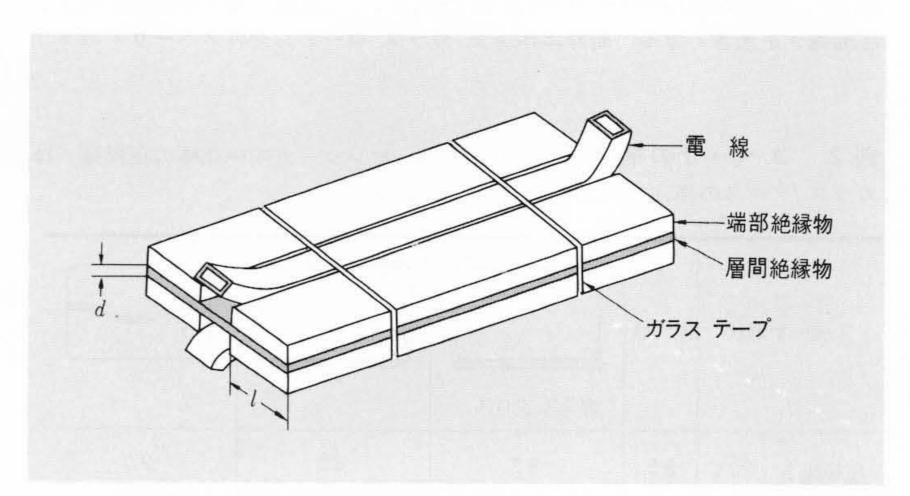


図 10 端部モデル 長さは約250mm (直線部150mm)で、d 及び l を種々に設定する。

#### 6 トランスレットによる評価

組合せモデルまでの評価で選出された材料と、端部モデル の評価で決めた絶縁寸法を基にして、実機モデル(トランス レット)をつくり、最終的な寿命評価を行なう。

トランスレットの外観を図9に、その構造を図12に示す。 すなわち、低圧コイル1段と高圧コイル2段から成り、選出 した絶縁筒、スペーサ、層間絶縁物、端部絶縁物、及び含浸 ワニスで構成する。

図13に示した通電加熱劣化を主体とし、吸湿処理を含むサイクルにより寿命を評価する。耐電圧テストで絶縁破壊したときで寿命をみる。トランスレット テスト案としては、

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEE E), No. 65<sup>(1)</sup> と, IEEE, No. 259 <sup>(2)</sup> とが知られており、前

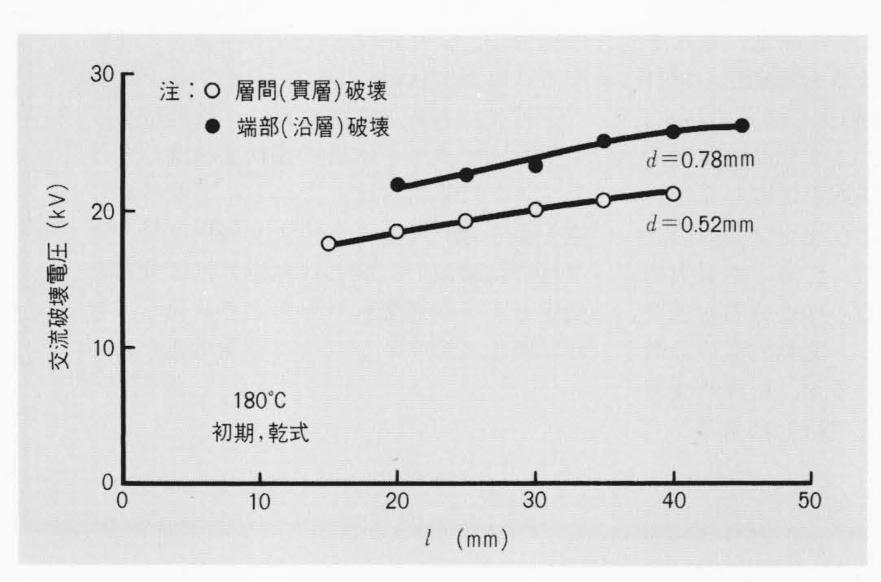


図 II 端部モデルの破壊電圧 片ガラス集成マイカ(層間), 芳香族ポリアミド紙(端部), シリコーン バインダニ重ガラス巻電線, 及び溶剤系シリコーン ワニスから成る端部モデルである。

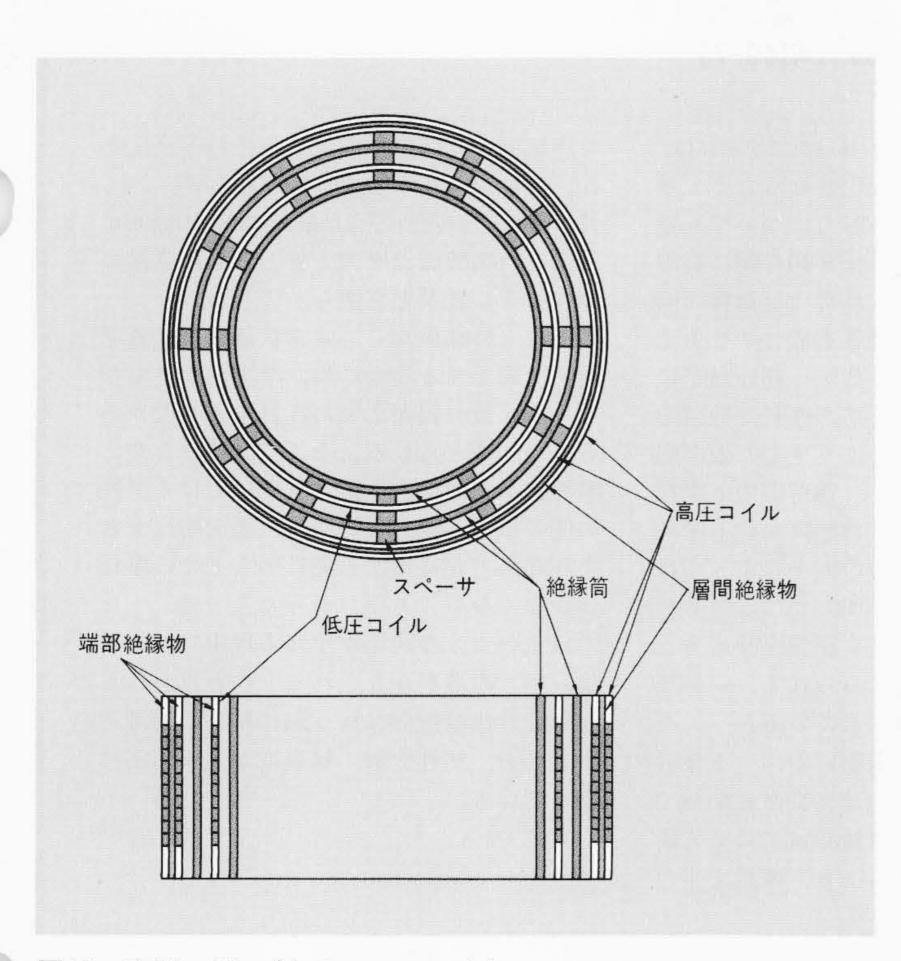
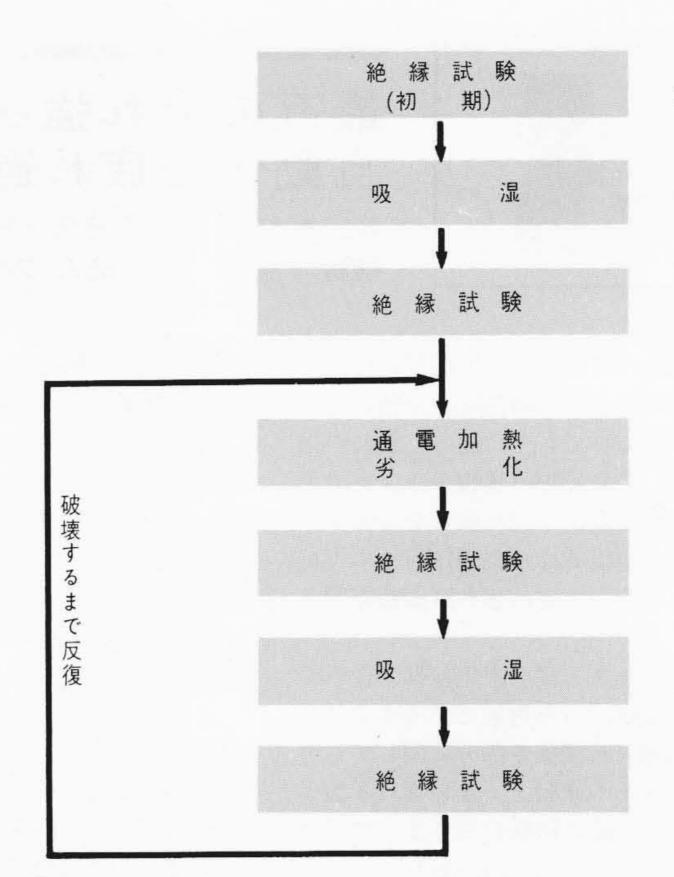


図12 実機モデル(トランスレット) 実機の絶縁寸法はそのままで、 コイル ターン数と直径を縮小したモデルである。



耐電圧,絶縁抵抗 コロナ特性,tan δ 20~40°C 90~95%,48h

図13 トランスレット テスト サイクル 通電加熱による熱劣化を 主体とするサイクルである。

者は乾式変圧器用で後者は特殊変圧器用である。図13に示すサイクルは I E E E No. 65に準じて定めた。通電加熱は、トランスレット 6 個を直列にし、各トランスレットの 3 段のコイルも直列に配し、直流により行なう。トランスレット 6 個のうち、1 個には各部の温度を測定するため、20個の熱電対を付け、導体最高温度を制御する。通電加熱劣化は、導体最高温度230°Cで16日、246°Cで8日、263°Cで4日をそれぞれ1サイクルとする。I E E E No. 65に準じて、H種の場合にそれぞれ10サイクル以内で破壊するように選んだ。

最終的な寿命推定は以上の結果を基に、誘導電動機の場合(3)と同様、Arrheniusの式に当てはめて行なう。

トランスレット テストの次には,実機試作を行ない,コロナ特性試験,耐電圧試験,短絡試験などをそれぞれ実施し,実機寸法での確認を経て製品に適用する。

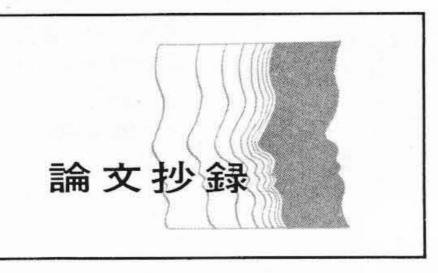
### 7 結 言

H種乾式変圧器の絶縁構造を決めるための一連の試験法を位置づけ、且つ体系化した。この体系に従い、各種FRP、含浸ワニス、シート材、及び電線を評価した。紙面の都合でトランスレット テストの詳細な結果については言及できなかった。次の機会に譲りたい。

終わりに,この研究に御協力いただいた日立製作所国分工 場磯部副技師長,及び片淵主任技師はじめ関係各位に対し, 深く感謝の意を表わす次第である。

#### 参考文献

- (1) "Proposed Test Procedure for Thermal Evaluation of Ventilated Dry Type Power and Distubution Transformers" IEEE, No. 65 (1956)
- (2) "Proposed Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulation for Specialty Transformers" IEEE, No. 259 (1965)
- (3) 角田, 袴田, 狩野「誘導電動機絶縁の機能試験法」日立評論 54, 404 (昭47-5)



## 最近の疲れ強さ評価法……疲れ試験の 自動化と疲れ過程のシミュレーション

日立製作所 小谷純久・鯉渕興二 機械学会誌 76-652, 27-34 (昭48-4)

最近、機械の高速化、高性能化に伴い、 製品の小形軽量化、信頼性向上が特に重視 されるようになってきた。従って製品の強 度設計に際しても最新の解析手法, 実験手 段を導入して精度よく疲れ強さを評価する 必要がある。本稿では日立製作所での実施 内容を中心に最近の疲れ強さ評価法を紹介 した。

材料の疲れ強さを検討するには, 従来の ように疲れ限度のみを対象とするのではな く、S-N曲線の時間強さ部分に関しても疲 れき裂発生までの挙動と、その疲れき裂が 伝搬して部材が最終破断に至るまでの挙動 とに分けた詳細な解析が行なわれるように なった。

すなわち、疲れき裂の発生寿命について は、繰返し荷重下で材料に発生する応力-ひずみ応答と関連づけた解析が有効であり, 平滑材, 切欠き材に関して多くのデータが 蓄積されつつある。例えば、ばねとスライ ダを組み合わせたレオロジモデルによって

材料の変形を模擬し、電子計算機を用いて 複雑な変動波形下の挙動を精度よく予測し た報告がある。

一方,破壊力学を適用して部材の許容応 力, 許容欠陥寸法を推定したり, 走査形電 子顕微鏡による破面観察結果から破壊時の 力学的条件を推定するなど(ミクロフラクト グラフィの応用)、疲れき裂伝搬特性の解析 は強度評価に不可欠なものとなってきた。

これらの解析手法を導入するに際して, 筆者らは応力-ひずみ応答の測定,疲れき 裂の検出などに専用の機器を開発し、材料 強度実験の精度向上,自動化を図っている。

実際の強度設計では、まず製品の実働荷 重あるいは実働応力の状態を把握しなけれ ばならない。予測が困難な場合は類似品, 試作品を用いて実測する。このとき最大応 予測の有力な資料となる。変動波形の計数 法は数多く提案されているが, 材料の変形 挙動と疲れ被害についての研究結果及びデ

ータ処理自動化の都合から, 筆者らはレイ ンフロー計数法を採用している。すなわち, 抵抗線ひずみ計などで検出した変動波形の 電気信号をオンラインにて小形電子計算機 HITAC 10で読み取り、自動的に精度よく 計数処理を実施する方式である。

実働応力波形が分かれば, 従来の研究結 果を参考にして,一定振幅波形下の部材の 疲れ強さから実機の疲れ強さが予測できる。 しかし、複雑な変動波形、複雑な部材形状 の場合に、より精度よく実機の強度を評価 するには実働状態のシミュレーション試験 が不可欠である。そのために、最近になっ て電気油圧式サーボ機構疲れ試験機が普及 してきた。筆者らは、これと小形電子計算 機を組み合わせることにより実働波形によ り近い試験波形,例えば極値の頻度分布を 力のみならず、変動応力の頻度分布が強度 指定した不規則変動波形などを負荷して疲 れ試験を実施するシステムを実用化した。



### 焼入れした0.4%C鋼の乾燥摩擦で生じた 摩擦面応力

日立製作所 佐々木敏美・山田俊宏,他 1名 日本金属学会誌 38-7,599 (昭49-7)

金属材料の多くは機械加工, あるいは熱 処理を行なって使用されるが、その際、加 工条件, 又は熱処理条件によって決定され る種々の応力が表面に残留し、材料の諸特 性に影響を与えることが考えられる。従っ て,このような残留応力と諸特性との関係 については種々の検討がなされており、と りわけ、疲れ強さに及ぼす影響については 多くの報告がある。しかし、摩擦あるいは 摩耗と残留応力の関係を論じた報告は少な く、その結果も研究者により異なっている のが現状である。これは機械加工や熱処理 によって残留応力を制御しようとすると, 同時に試験片の組織, あるいは硬さの変化 を伴うことが多いために、純粋に残留応力 の影響を検討することが困難であるためと 考えられている。また、摩擦・摩耗に伴う 塑性変形, 及び摩擦熱の発生が表面層の性 質を著しく変化させることも摩耗と残留応 力の関係を複雑にしている。従って、摩擦・

摩耗と残留応力の関係を明らかにするには, 残留応力だけを単独に変化させることもさ ることながら、摩擦後の応力についても検 討すべきである。筆者らはS40C鋼に高周 波焼入れを行ない, 焼入れ部と反対側の面 を除去して、組織及び硬さを変化させるこ となく残留応力だけを-3~-76kg/mm²に 変化させた試験片を用いて, 摩耗と残留応 力の関係,並びに摩擦により生じた表面応 力につき検討した。まず、残留応力と摩耗 の関係については、 定常状態における摩耗 は摩擦前の圧縮残留応力の大小によってほ とんど変化しないことを明らかにし、もし 摩擦前の残留応力が摩耗に影響を与えると すれば、摩擦開始初期にみられる、いわゆ る初期摩耗であると推測している。

次いで摩擦で生じた表面応力につき検討 した結果、摩擦前の応力は初期摩耗領域で 消滅し、その後の定常摩耗領域では全く新 しい圧縮応力が発生すること、摩擦で生じ

た圧縮応力は摩擦条件によってのみ決定さ れ、摩擦前の残留応力には依存しないこと, 及び摩擦後の表面応力は最大で-110kg/mm<sup>2</sup> に達し、摩擦面温度の上昇とともに急激に 減少することなどを明らかにした。

これらの結果から、定常状態における摩 耗を問題とする場合には、摩擦前よりもむ しろ摩擦後の表面応力に注目する必要があ るものと考えられる。そこで、観点を変え 摩擦後の表面応力と定常状態における摩耗 の関係につき検討した結果,表面層に大き な圧縮応力が残留する条件のもとでの摩耗 は少なくないことが分かった。

以上のような現象が生じる理由について は、種々の考察がなされるものと思われる が筆者らは摩擦熱に伴う固体粘性の増減, すなわち、塑性変形の難易度が主原因と推 察している。