

小形機器用無溶剤形絶縁ワニスの耐熱寿命試験

Thermal Life Tests of Solventless Varnishes for Small  
Rotating Machine Windings

杉 江 忠\* 牛 山 武 美\*  
Tadashi Sugie Takemi Ushiyama  
川 島 秀 男\* 樫 村 寿 雄\*  
Hideo Kawashima Toshio Kashimura

要 旨

最近、ポリエステルおよびエポキシ系の無溶剤形ワニスを使用する傾向が増大し、その耐熱性を評価することが、ますます重要になってきている。本報は無溶剤形ワニスを対象に、より合せ試験法、ヘリカルコイル試験法、導線引抜き試験法およびモータレット試験法によって、耐熱寿命試験を実施し、試験法の相関性について検討したものである。

その結果、ヘリカルコイル試験法あるいは導線引抜き試験法によって、無溶剤形ワニスの耐熱寿命評価を決定することは実用上問題があること、より合せ試験法は、エナメル線とワニスの適合性を含めたモータレット試験法の劣化機構をよく反映し、小形機器用の無溶剤形ワニスの実用的な耐熱寿命試験法であることなどがわかった。

1. 緒 言

数年前から電気機器メーカーにおいて、滴下含浸法によるワニス処理方式が脚光をあび、すでに小形回転機にこの方式が広く実用化されている。それに伴って、使用するワニスは溶剤形ワニスからポリエステルおよびエポキシ系の無溶剤形ワニスへと移行している。また回転機の小型化およびF種化の傾向によって、耐熱性のすぐれたワニスの要求が高まっている。そのため、ワニスの耐熱寿命評価は重要な試験項目となり、特に無溶剤形ワニスの耐熱寿命試験法の確立が強く要望されている。

しかし、溶剤形、無溶剤形をとわず、ワニスの耐熱寿命試験法として標準化された方法が、いまだに確立されていない。

最近 IEC から新しい試験法がつぎつぎと提案され<sup>(1)</sup>、わが国においては、電気学会耐熱性試験法専門委員会で、各種試験法の研究<sup>(2)(3)</sup>が行なわれている。

筆者らは絶縁ワニスメーカーの立場で、独自に耐熱寿命試験法の検討を行なっているが、すでに溶剤形ワニスに関しては、IEC 提案のカーブ電極法が機能的試験法として有望であることを指摘した<sup>(4)</sup>。無溶剤形ワニスは、溶剤形ワニスに比べて、一般にかたい皮膜を形成するなどの特殊事情から、たとえば溶剤形ワニスに有効なカーブ電極法が、ほとんど応用できないなどの問題がある。したがって、異なった観点から試験法を選ばなければならない。

最近の無溶剤形ワニスの需要増大にもかかわらず、それらの試験法の検討が、ほとんどなされていないのが実情である。そこで筆者らは、IEC から提案されている種々の新しい試験法のなかから、無溶剤形ワニスに適用できそうな方法として、ヘリカルコイル試験法、導線引抜き試験法を選んだ。そのほかに、従来から行なわれている IEEE No. 57 のより合せ試験法を加え、さらに、実機に近い試験法として広く行なわれているモータレット試験法をとりあげた。

本報はそれらの試験法を用いて、無溶剤形ワニスの耐熱寿命試験を行ない、実用性の観点から試験法を吟味したものである。

2. 供試料ワニスと一般特性

試験に用いた無溶剤形ワニスとして、日立化成工業株式会社で開発した代表的なコイル含浸用無溶剤形ワニスを3種類選んだ。それぞれのワニスの一般特性は表1に示すとおりである。

\* 日立化成工業株式会社山崎工場

表1 供試ワニスの一般特性

| ワニス                                |      | ポリエステルA            | ポリエステルB                  | エポキシC                       |
|------------------------------------|------|--------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 項 目                                |      |                    |                          |                             |
| 主 成 分                              |      | 不飽和<br>ポリエステル      | イソフタル酸系<br>不飽和<br>ポリエステル | 酸 硬 化 形<br>エ<br>ポ<br>キ<br>シ |
| 主 用 途                              |      | 中形ステータ             | 小形ステータ                   | 小形<br>アーマチュア                |
| 粘 (P) 度 25℃                        |      | 1.7                | 9.0                      | 40.0                        |
| ゲル化時間 120℃<br>(s)                  |      | 92.0               | 225                      | 745                         |
| 曲 げ 強 さ<br>(kg/mm <sup>2</sup> )   |      | —                  | 10.2                     | 13.5                        |
| 引 張 り 強 さ<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) |      | 0.23               | 3.9                      | 7.6                         |
| 伸 び<br>(%)                         |      | 48.8               | 1.5                      | 3.4                         |
| せん断接着力<br>(kg)                     | 25℃  | 30.0               | 56.2                     | 78.0                        |
|                                    | 150℃ | 3.9                | 14.3                     | 28.6                        |
| 絶 縁 破 壊<br>電 圧 の 強 さ<br>(kV/mm)    | 25℃  | 20.1               | 21.5                     | 22.3                        |
| 誘 電 正 接<br>(%)                     | 25℃  | 3.9                | 0.9                      | 0.3                         |
| 体 積 抵 抗 率<br>(Ω-cm)                | 25℃  | 10 <sup>14</sup> < | 10 <sup>15</sup> <       | 10 <sup>15</sup> <          |

3. 試 験 方 法

3.1 ヘリカルコイル試験法

IEC の規格案<sup>(5)</sup>の試験法に準じて行なった。ポリアミドイミド線 1.0φ を用い直径 6.3 mm、長さ 75 mm のヘリカルコイルを作成した。ワニスの処理および硬化条件は各ワニスともに1回目 120℃で10分、2回目 120℃で30分とした。ポリエステルワニスの場合、含浸処理、ゲル化および硬化工程中に架橋モノマが飛散し、硬化皮膜の樹脂組成が変わることが予想される。したがって、この種のワニスは、処理および硬化条件による硬化皮膜の特性をあらかじめじゅうぶん確認したうえでモノマ配合量を規定しており、本実験で用いたワニス処理および硬化条件もそれらの点をじゅうぶんに考慮したものである。

加熱劣化条件は表2に示したとおりである。所定の時間ごとに5個の試験片を取り出して、試験速度 100 mm/min、支点間距離 50 mm の試験条件により、室温で接着強度を測定した。

表2 1サイクルの加熱条件

| ポリエステル線        |        | ポリアミドイミド線 |        |
|----------------|--------|-----------|--------|
| 温度 (°C)        | 日数 (d) | 温度 (°C)   | 日数 (d) |
| 220 }<br>200 } | 1      | 220       | 1      |
| 180            | 4      | 200       | 4      |
| 160            | 14     | 180       | 14     |

表3 モータレット試験条件

| ワニス名    | 加熱条件      | 試験条件                | 耐電圧             |
|---------|-----------|---------------------|-----------------|
| ポリエステルA | 200°C 2日  | 振動 1,500 cpm 2.5 時間 | 線間 240 V/15 min |
| ポリエステルB | 180°C 8日  | 振幅 1 mm             | 層間 800 V/15 min |
|         | 160°C 28日 | 吸湿 40°C 90% RH. 3日  | 対地間 800V/15min  |
| エポキシC   | 220°C 2日  | 振動 3,000 cpm 1時間    | 線間 120 V/15 min |
|         | 200°C 8日  | 振幅 0.2 mm           | 層間 600 V/15 min |
|         | 180°C 28日 | 吸湿 40°C 90% RH. 3日  | 対地間 600V/15min  |

表4 モータレットの絶縁仕様

| ワニス名    | エナメル線    | スロットライナ                     | 層間絶縁                        | スロットくさび        | ワニス硬化時間             |
|---------|----------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------|
| ポリエステルA | ポリエステル   | ポリエステル系フィルム                 | ポリエステル系フィルム                 | ポリエステル系シート     | 120°C 10分+150°C 30分 |
| ポリエステルB | ポリエステル   | ポリエステル系フィルム                 | ポリエステル系フィルム                 | ポリエステル系シート     | 120°C 5分+150°C 30分  |
| エポキシC   | ポリアミドイミド | ポリアミドイミドフィルムと<br>ノーマックスの張合せ | ポリアミドイミドフィルムと<br>ポリエステル系不織布 | エポキシガラス<br>積層板 | 120°C 30分+135°C 60分 |

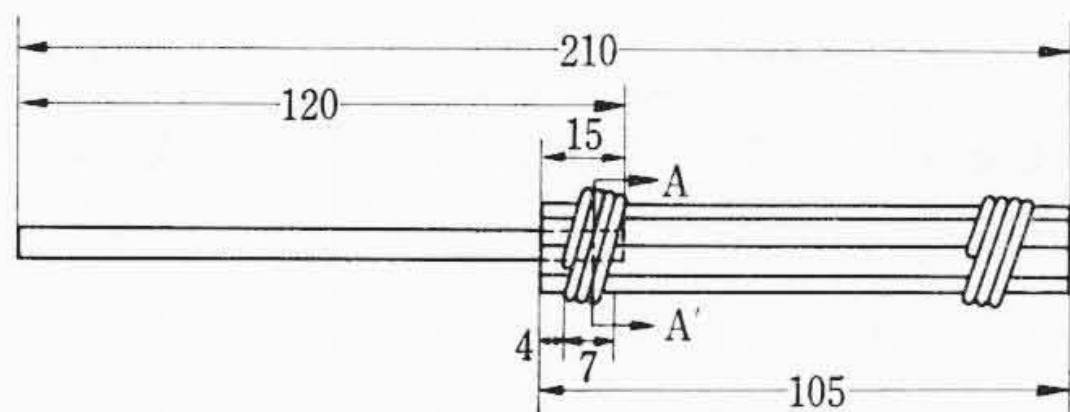


図1 導線引抜き法の試験片

### 3.2 導線引抜き試験法

IECの規格案<sup>(6)</sup>に従って行なった。ポリアミドイミド線 1.5φの回りに図1のように長さ105mmの同種の線6本でとり囲み、直径0.35mmの軟銅線で束ねた。ワニス処理条件、加熱劣化の条件は3.1と同じである。加熱劣化後、引張り速度50mm/min、つかみ間距離150mmとし、中央の線を周囲の6本から引き抜く力を測定した。

### 3.3 より合せ試験法

IEEE No. 57の試験法を用いたが、1.35kgの張力を加えて、試験片に約5%の伸びを与え、120mmの部分を9回より合わせた点と、加熱劣化によって発生する微細なき裂の検出を容易にするため、試験電圧を2,000Vにとった点が異なる。エナメル線としてはポリエステルおよびポリアミドイミド線各1.0φのものを使用した。試験片をシリコンガラス積層板で作ったスペーサに取り付け、100°Cで30分加熱処理後ワニス処理をした。ワニス処理および硬化条件は3.1で述べた条件と同じである。AC 3,000Vで初期耐電圧試験を行ない、合格した試験片を各劣化温度ごとに、ワニス処理しないものを20本、ワニス処理したものを10本1組にして試験に使用した。

### 3.4 モータレット試験法

ポリエステルAおよびBワニスについては、IEEE No. 510の試験法に従い1.5kW、4極ステータを作成してモータレット試験を行なった。ただし、振動・耐電圧試験の条件は規定より過酷に表3のように設定した。振動条件として、振動数1,500cpm、振幅1mmで行なったのは、加速度1.25gに高めて過酷な条件の寿命の推定をねらったためである。

エポキシCワニスについてはIEEE No. 1Cの小形固定子巻線のモータレット試験法に準じ、試験電圧を440～550Vに相当する条件とし、加速度1gの振動条件で試験した。

モータレットの絶縁仕様は表4に、絶縁構成のスロット断面は図2に示すとおりである。

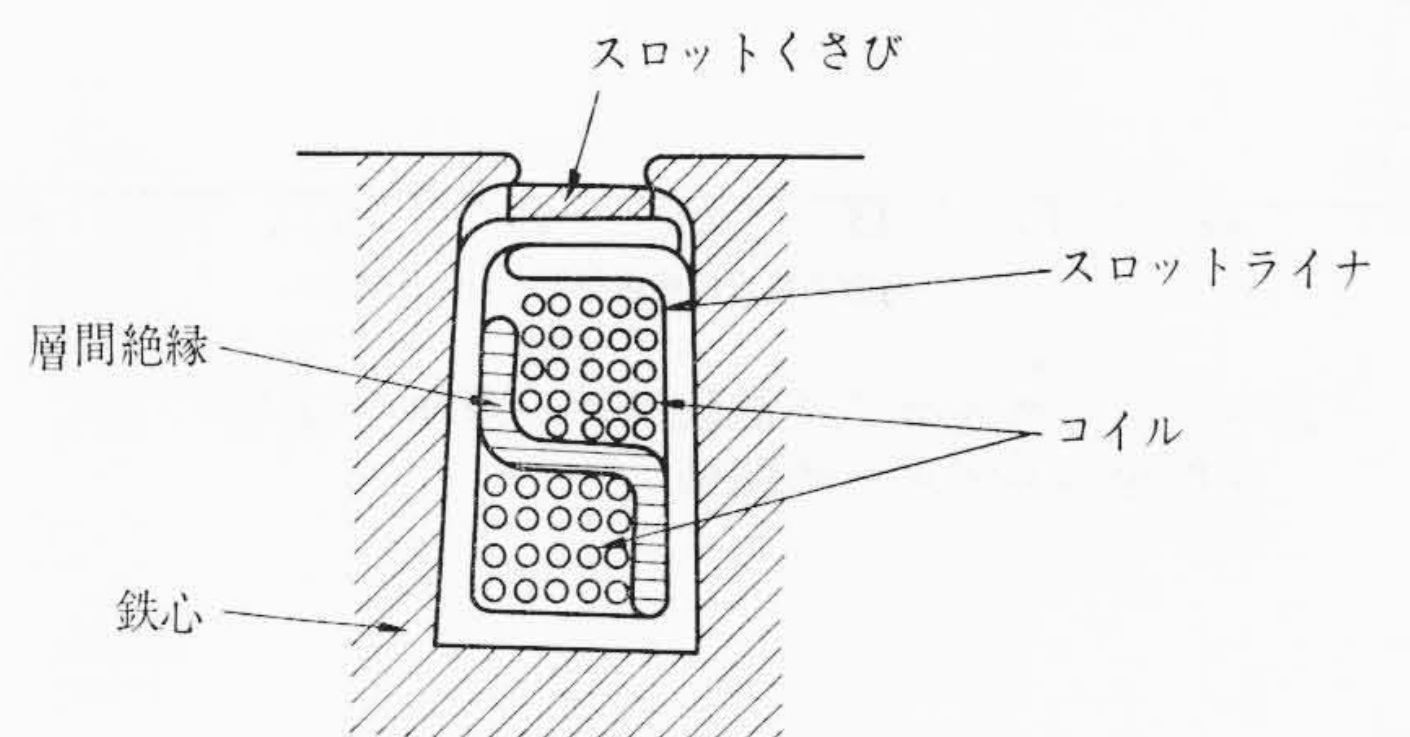


図2 モータレット絶縁構成

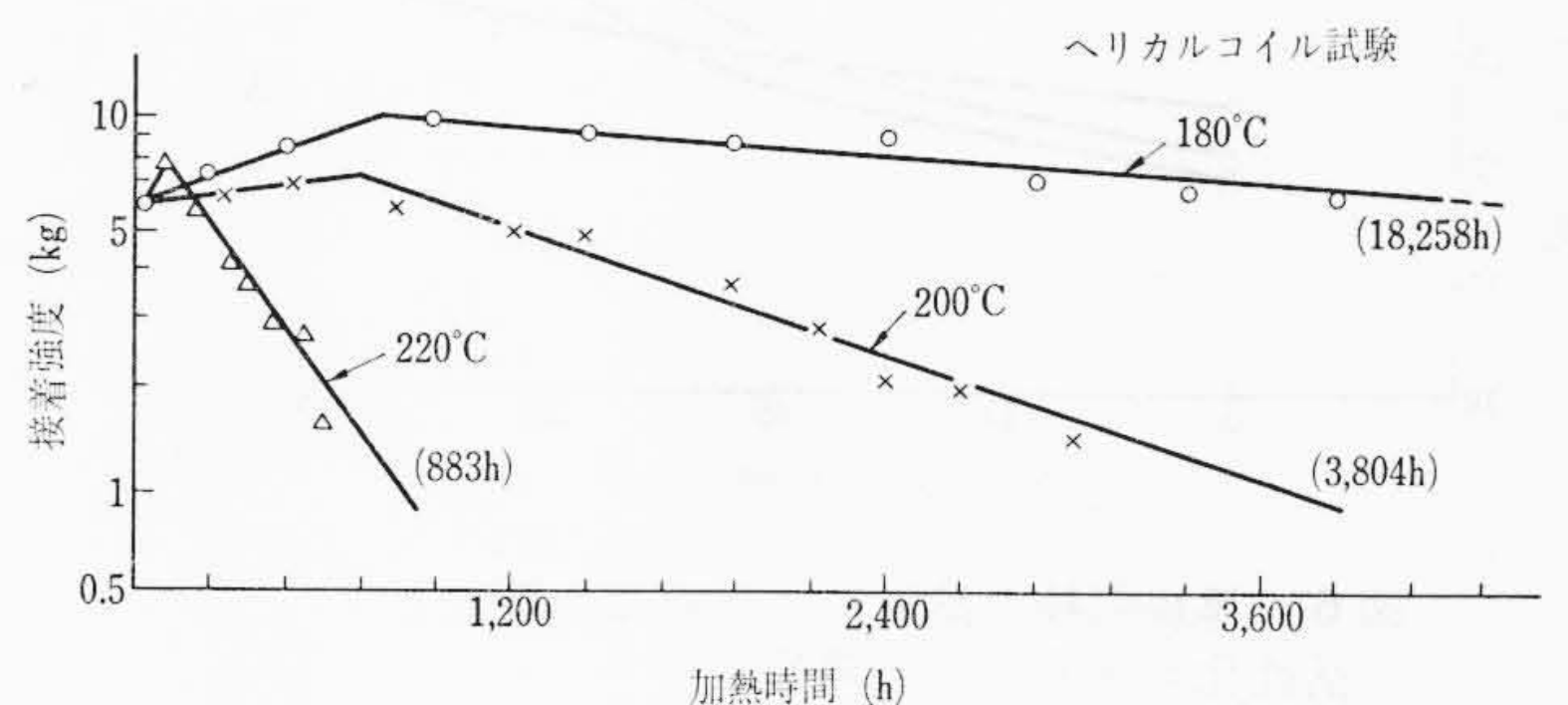


図3 ポリエステルAの加熱時間と接着力の関係

## 4. 試験結果の整理

試験結果は、かなりばらつきがあるので、寿命直線を求める際のデータ処理法は最小自乗法に基づいて1次回帰直線を求めるようにした。まとめ方についてはW. H. Hortonの論文<sup>(7)</sup>、電気学会技術報告<sup>(8)</sup>を参考にした。

## 5. 試験結果および考察

### 5.1 ヘリカルコイルおよび導線引抜き試験

各ワニスのヘリカルコイルとの接着強度は、加熱劣化時間とともに低下し、その低下度合いはワニスの種類によって異なるが、ポリエステルAの場合には図3のようになる。その他のワニスについてもほぼ同じ傾向を示している。すなわち、加熱の初期において一度上昇し、ある時間で最高値に達してから徐々に低下する。この現象は溶剤形ワニスにも認められる<sup>(4)</sup>。加熱初期の変化は硬化反応が進行することによると考えられる。

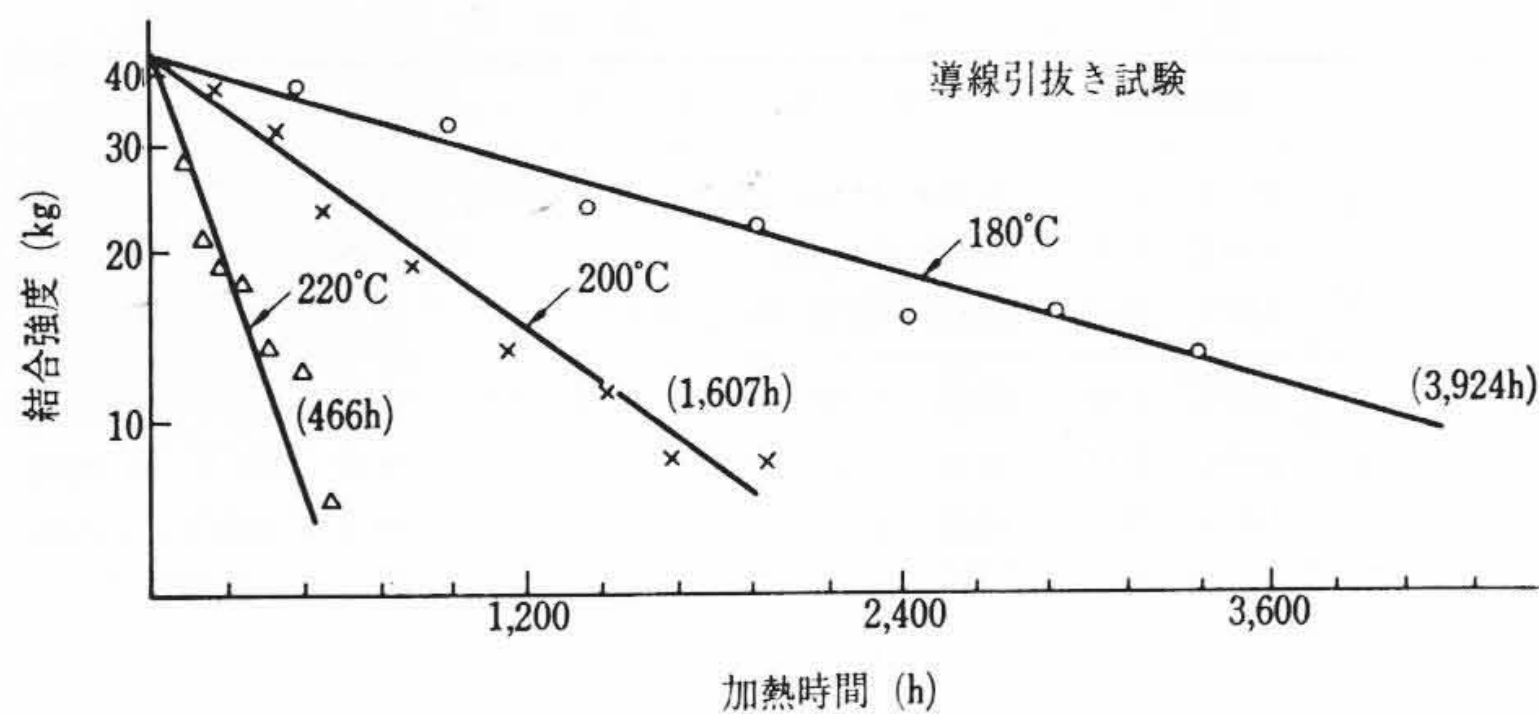


図4 ポリエステルAの加熱時間と結合強度の関係

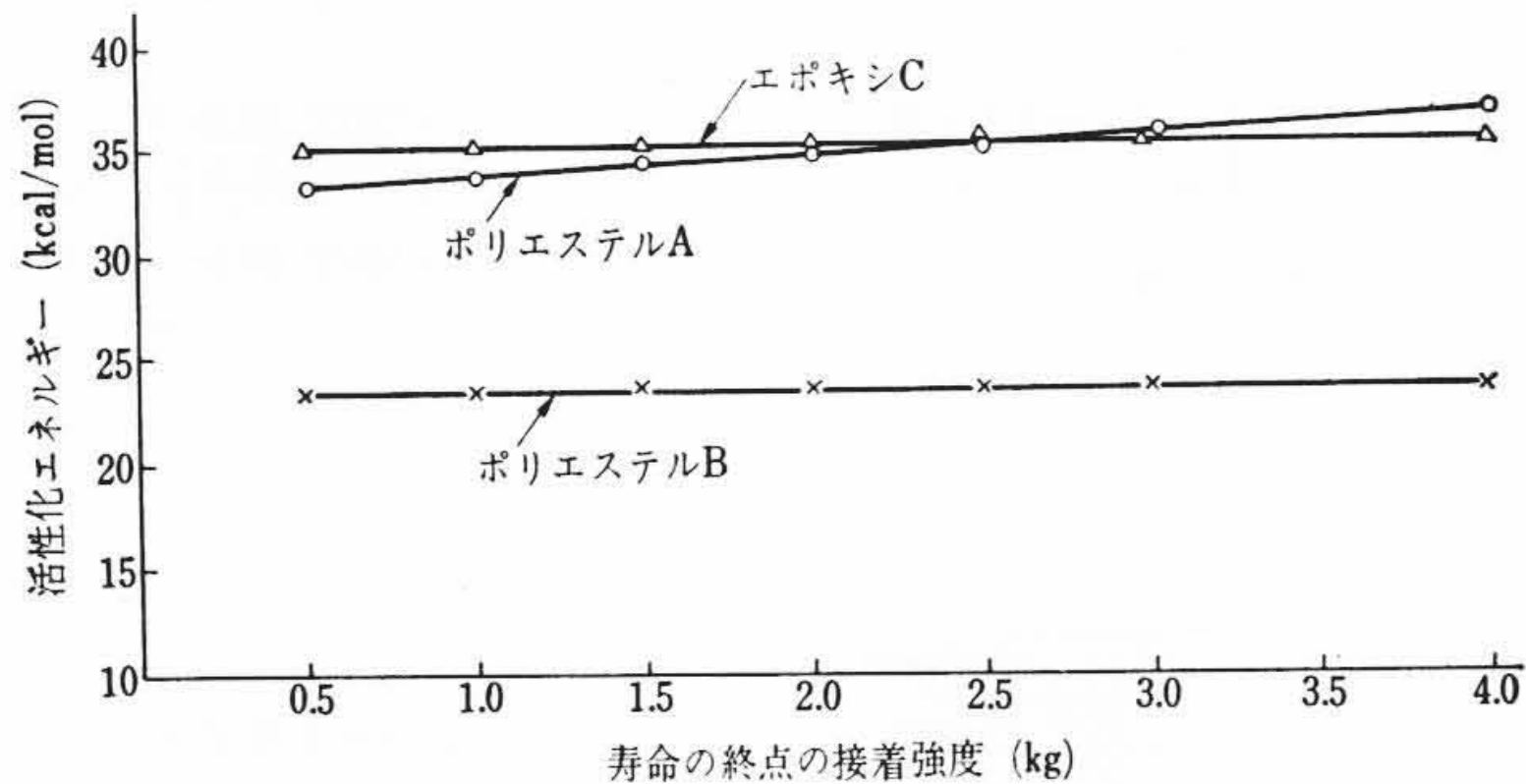


図5 ヘリカルコイル試験による寿命の終点と活性化エネルギーの関係

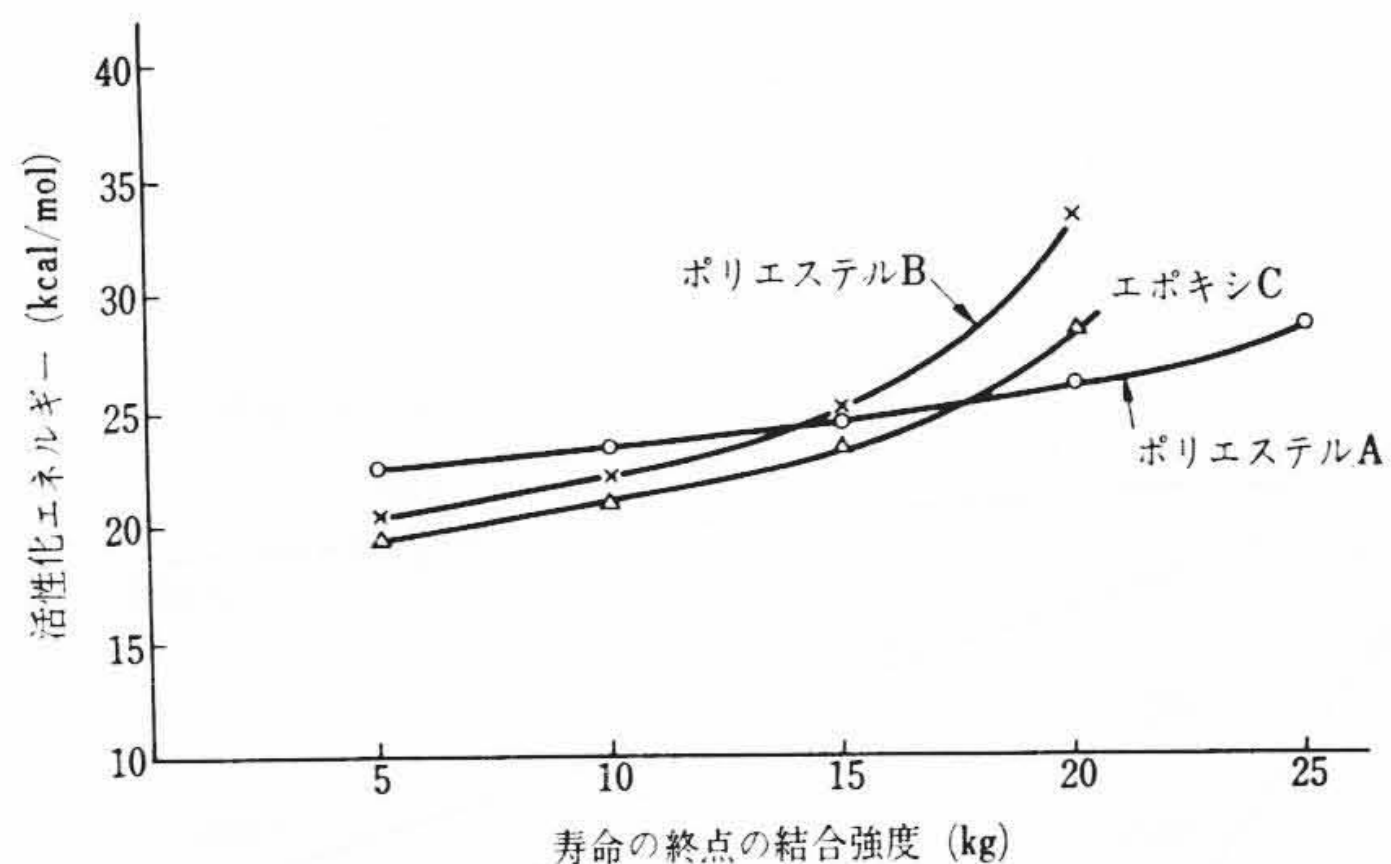


図6 導線引抜き試験による寿命の終点と活性化エネルギーの関係

表5 ヘリカルコイル試験法の寿命の終点 (\*\* 99% 有意)

| ワニス名     | 加熱温度 (°C) | 回帰直線の式                        | 相関係数 R    | y=1.0 のときの時間 t (h) |
|----------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------|
| ポリエステル A | 180       | $\log y = 1.1342 - 0.00006 t$ | 0.81687   | 18,258             |
|          | 200       | $\log y = 1.0493 - 0.00028 t$ | 0.92659** | 3,804              |
|          | 220       | $\log y = 0.9368 - 0.00106 t$ | 0.99147** | 883                |
| ポリエステル B | 180       | $\log y = 1.3269 - 0.00009 t$ | 0.98490** | 14,178             |
|          | 200       | $\log y = 1.4093 - 0.00029 t$ | 0.97676** | 4,832              |
|          | 220       | $\log y = 1.3218 - 0.00079 t$ | 0.96080** | 1,682              |
| エポキシ C   | 180       | $\log y = 1.1634 - 0.00005 t$ | 0.91359** | 22,408             |
|          | 200       | $\log y = 1.1291 - 0.00029 t$ | 0.96662** | 3,948              |
|          | 220       | $\log y = 1.1508 - 0.00122 t$ | 0.97476** | 944                |

表6 導線引抜き試験法の寿命の終点 (\*\* 99% 有意)

| ワニス名     | 加熱温度 (°C) | 回帰直線の式                         | 相関係数 R    | y=10 のときの時間 t (h) |
|----------|-----------|--------------------------------|-----------|-------------------|
| ポリエステル A | 180       | $\log y = 1.6342 - 0.00016 t$  | 0.97516** | 3,924             |
|          | 200       | $\log y = 1.5615 - 0.00035 t$  | 0.94676** | 1,607             |
|          | 220       | $\log y = 1.5189 - 0.00111 t$  | 0.99398** | 466               |
| ポリエステル B | 180       | $\log y = 1.5751 - 0.00010 t$  | 0.99055** | 5,594             |
|          | 200       | $\log y = 1.4804 - 0.00027 t$  | 0.99464** | 1,801             |
|          | 220       | $\log y = 1.4012 - 0.00049 t$  | 0.98267** | 820               |
| エポキシ C   | 180       | $\log y = 1.4701 - 0.00007 t$  | 0.91508** | 6,846             |
|          | 200       | $\log y = 1.3280 - 0.00010 t$  | 0.93316** | 3,435             |
|          | 220       | $\log y = 1.34775 - 0.00038 t$ | 0.88331** | 920               |

表7 寿命一覧表 (ヘリカルコイル法, 導線引抜き法)

| ワニス名                | ポリエステル A |          | ポリエステル B  |          | エポキシ C   |          |
|---------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
|                     | ヘリカル     | 引抜き      | ヘリカル      | 引抜き      | ヘリカル     | 引抜き      |
| 試験法                 | ヘリカル     | 引抜き      | ヘリカル      | 引抜き      | ヘリカル     | 引抜き      |
| 直切                  | -11.9479 | -7.7523  | -7.2475   | -6.5093  | -12.6264 | -6.8069  |
| 線こう配 A              | 7,344    | 5,154    | 5,165     | 4,665    | 7,685    | 4,843    |
| 相関係数                | 0.99813* | 0.99706* | 0.99988** | 0.99685* | 0.99948* | 0.99943* |
| 活性化エネルギー (kcal/mol) | 33.6     | 23.6     | 23.6      | 21.3     | 35.2     | 22.2     |
| 20,000 時間の温度 (°C)   | 178.6    | 154.6    | 174.3     | 156.2    | 181.0    | 163.0    |
| 155°C の寿命 (h)       | 162,076  | 19,432   | 66,447    | 21,426   | 213,336  | 32,313   |

注: \*.....95% 有意 \*\*.....99% 有意

寿命直線の式  $\log_{10} t = \frac{A}{T} + B$ 

はなく、全測定点を劣化領域とみなして解析した。

以上の方法で求めた各ワニスおよび各劣化温度ごとの接着(結合)強度—加熱時間の関係を示す回帰直線式とその直線性の検定結果を表5, 6に示した。

ポリエステルAのヘリカルコイル試験法の結果を除いては、すべての回帰直線が99%の有意で直線性が認められた。

次に、寿命の終点を与えて各温度における寿命を求め、その結果から最終的に温度と寿命の関係を求めた。IEC規格案では、寿命の終点に関してなんら具体的な指示はないので、筆者らの考えで決定した。その前に、終点の選び方の違いによって得られる寿命直線のこう配, すなわち、見かけの活性化エネルギーが、どの程度影響を受けるかについて検討した。その結果は図5, 6に示すとおりである。これらの図からわかるように、ある程度の範囲で寿命の終点の値を変えても、活性化エネルギーに大きな変動を与えないことがわかった。このことは、寿命の終点を大きくとることによって、試験時間を短くする可能性を示している。ここではヘリカルコイル試験法では接着力が1 kg、導線引抜き試験法では結合力が10 kgになったときを寿命の終点として温度と寿命の関係を求めた。表7は寿命直線

図4は導線引抜き試験の結合強度と加熱時間の関係の代表例を示したものである。ヘリカルコイル試験結果のように極大を示してから減少する傾向は認められない。このことは、ヘリカルコイル試験の場合よりきわめて短時間に極大になって測定されなかったのか、または試験法の性質の違いによるためなのかは明らかでない。

以上の例で示した接着(結合)強度と加熱劣化時間の関係をもとにして、適当な寿命の終点を与えることにより、寿命と温度の関係を求めることができる。熱劣化反応は、温度範囲が広い場合には、幾つかの異なった次数の反応を考える必要があるが、本報での試験温度範囲では1次反応と仮定して解析した。図3で代表される各ワニスのヘリカルコイル試験法の熱劣化特性に対しては、極大値より左側の領域を硬化領域、右側の領域を劣化領域と考え、寿命は劣化領域の測定値を解析して得られた回帰直線を外挿(そう)して決定した。ポリエステルAの場合だけ図3に示したように、180°Cでの強度低下が少なかったため直線の外挿値を寿命とした。

一方、導線引抜き試験法については図4にプロットした平均値で

の解析結果、活性化エネルギー、寿命 20,000 時間に対する温度および 155℃ における寿命を示している。図 7 は各ワニスの温度と寿命の関係を示したものである。

ヘリカルコイル試験法では、ワニスの皮膜が熱劣化を受けてかたく、かつ脆(もろ)くなる傾向が、曲げ強度に反映されて寿命に影響を与え、導線引抜き試験法では、接着結合力の差が寿命を左右すると考えられ、その意味で択一的な試験法の性格が強い。したがって、両試験法から得られた寿命直線のこう配も異なり、各ワニスの曲げ強度あるいは接着強度の熱劣化特性の優劣が結果に反映されて、ワニスの耐熱性の評価順位も入れ替わっている。

供試ワニスのなかで最もかたい皮膜を形成し、接着力が最もすぐれているエポキシ C ワニスの耐熱性が、ヘリカルコイル試験法では最も下位に評価され、導線引抜き試験法では、最も上位に評価されている図 7 の結果が両試験法の特徴を示す良い例である。

5.2 より合せ試験とモータレット試験

表 8 は絶対温度の逆数に対する寿命対数の関係を、回帰直線近似の解析結果で示したものである。平均寿命の回帰直線の係数、直線性の検定結果、活性化エネルギー、寿命 20,000 時間に対する温度および 155℃ における寿命が列記されている。図 8, 9 はそれぞれポリエステル線とポリアミドイミド線による、より合せ試験から得られた温度と寿命との関係を示したものである。比較のために、無処理エナメル線の AC 1,000V 耐電圧試験から求めた寿命直線と、モータレット試験から求めた寿命直線が併記されている。これらの結果から、ワニスとエナメル線との組合せが同系統の場合には、より合せ

試験結果とモータレット試験結果の寿命直線の傾斜が、近似していることがわかる。ここで示したモータレット試験の寿命は、ポリエステルワニス 2 種類とも、大部分が線間破壊で寿命に達し、その後さらに劣化サイクルを続行した結果、相間と対地間で破壊することが認められた。エポキシ C ワニスについて、破壊場所ごとに求めた寿命直線と見かけの活性化エネルギーを示したのが図 10 である。この結果から明らかなように、線間に比べて相間および対地間の寿命から求めた見かけの活性化エネルギーは若干小さい傾向がある。

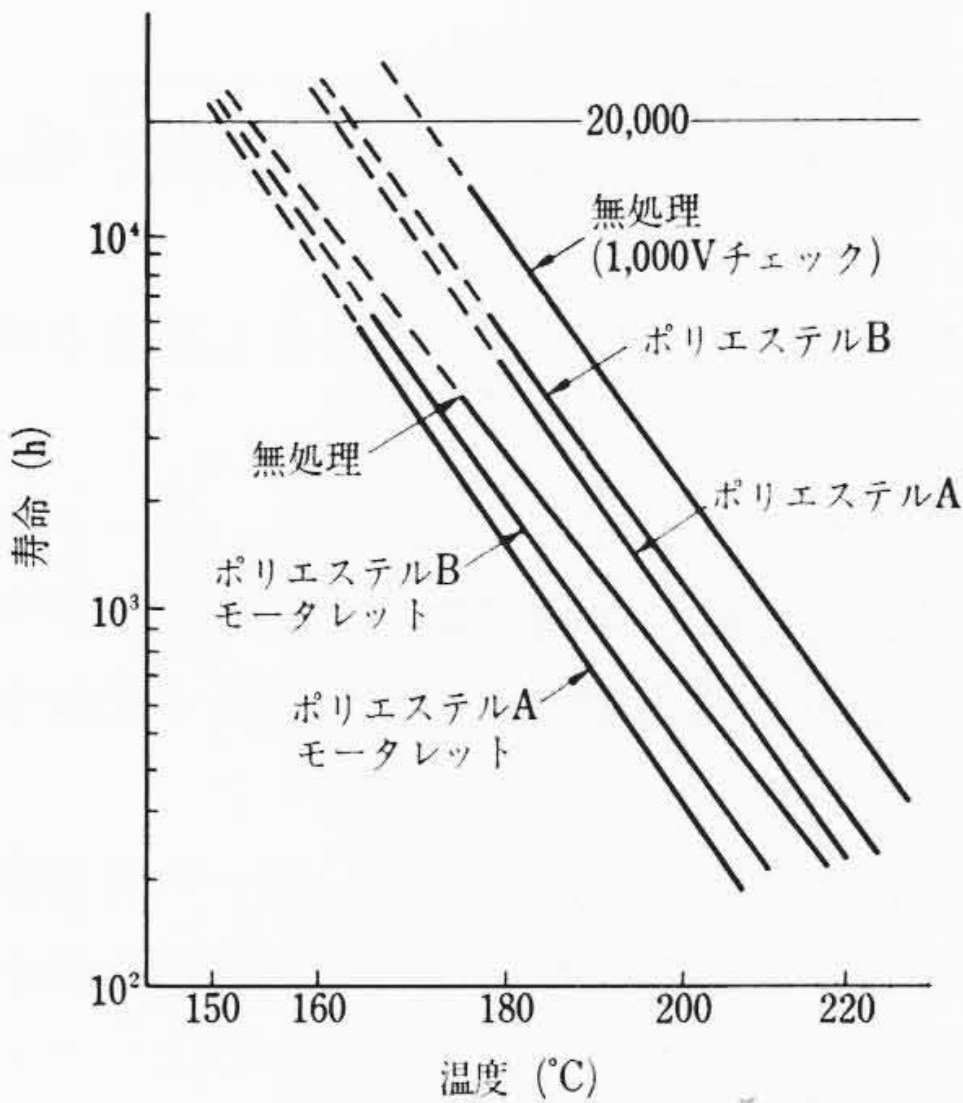


図 8 より合せ試験法による寿命と温度の関係(ポリエステル線使用)

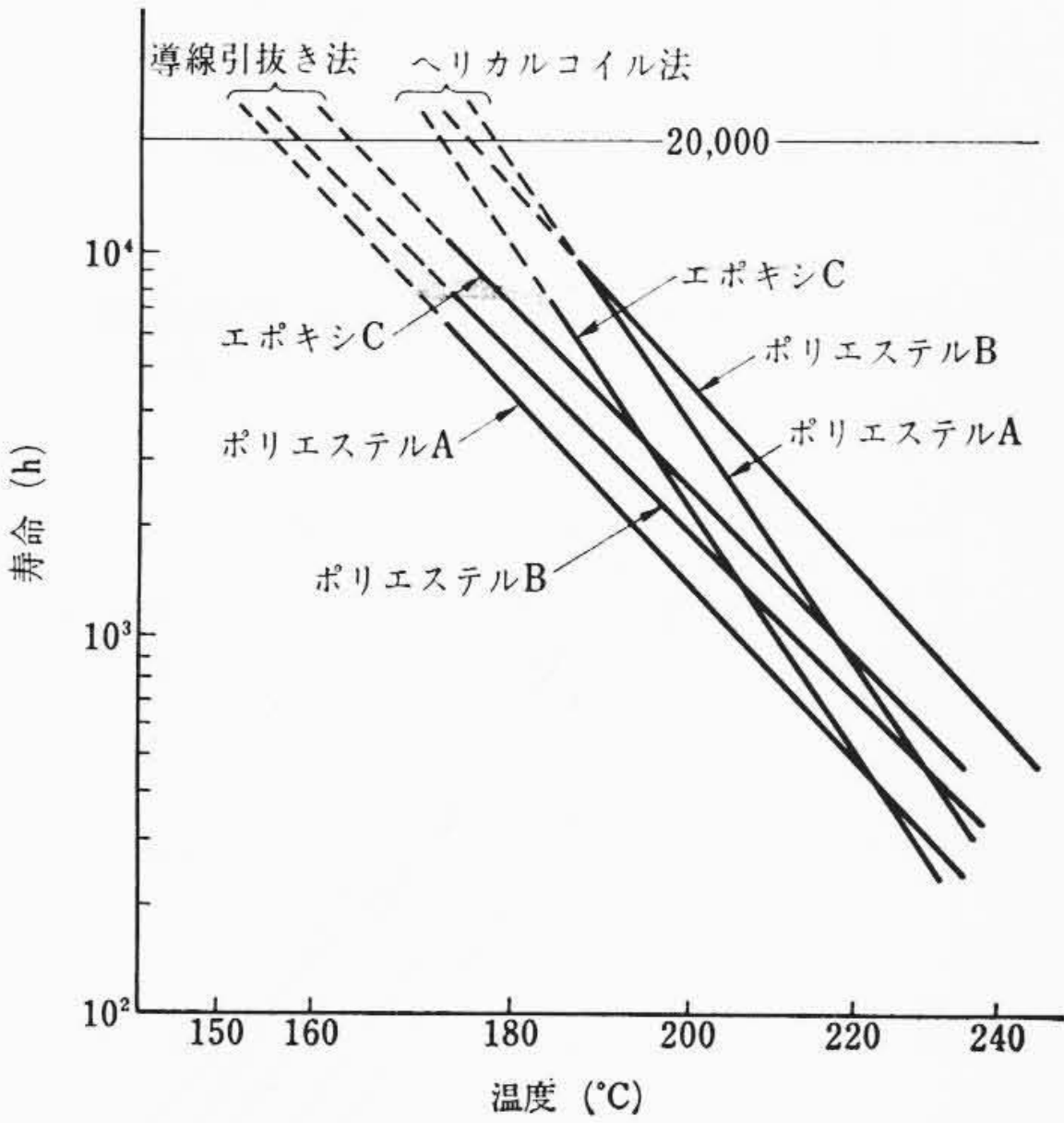


図 7 ヘリカルコイル法および導線引抜き法の寿命直線

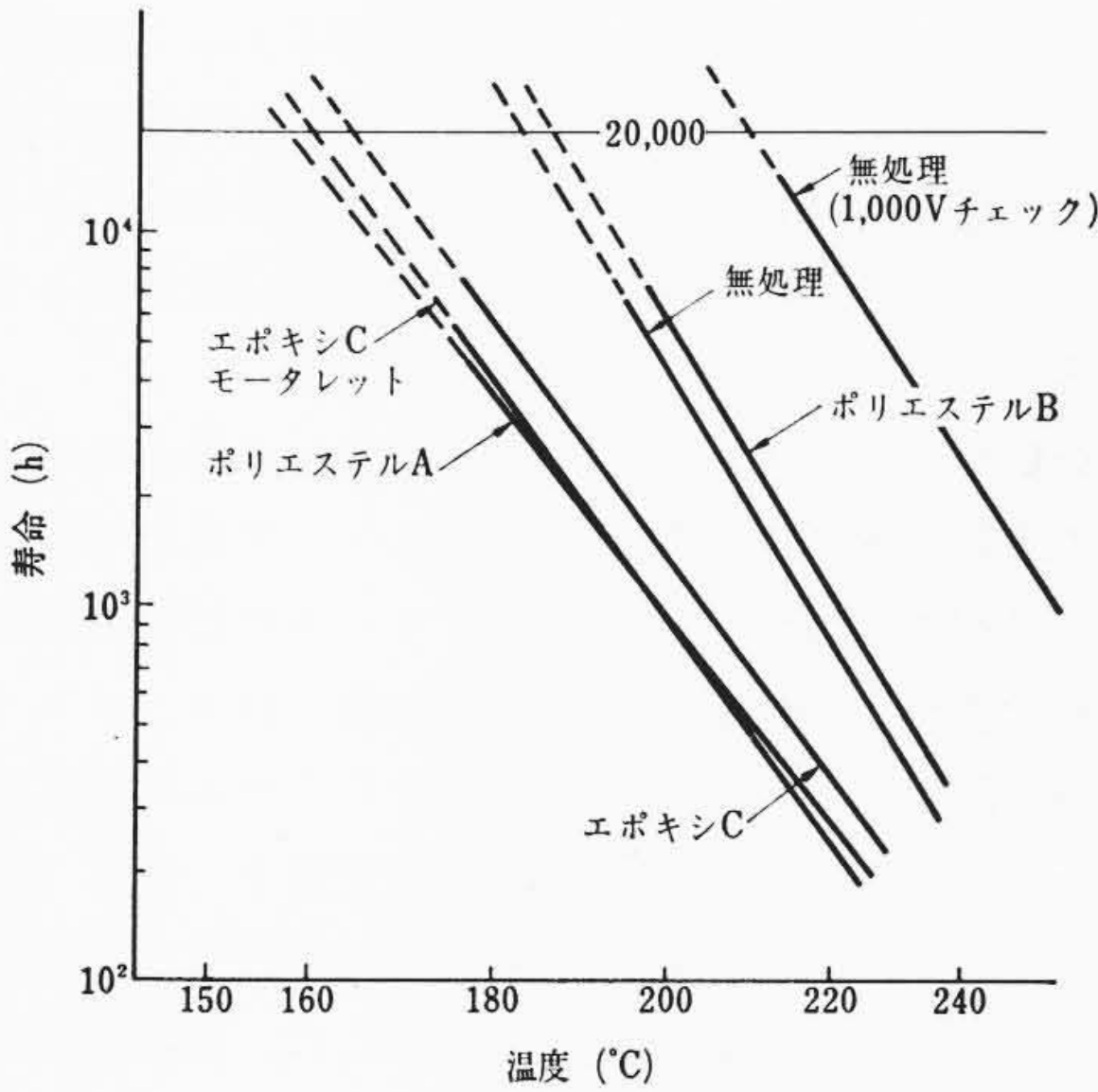


図 9 より合せ試験法による寿命と温度の関係(ポリアミドイミド線使用)

表 8 各ワニスの寿命一覧表

| ワニス名     | 試験方法          | 平均寿命回帰直線 |       | 相関係数      | 活性化エネルギー<br>(kcal/mol) | 20,000 時間の温度<br>(℃) | 155℃ における寿命<br>(h) |
|----------|---------------|----------|-------|-----------|------------------------|---------------------|--------------------|
|          |               | 切辺 B     | こう配 A |           |                        |                     |                    |
| ポリエステル A | モータレット法 (P)   | -11.0557 | 8,156 | 0.99545** | 37.3                   | 152.3               | 15,177             |
|          | より合せ試験 (P)    | -12.7280 | 7,420 | 0.99557** | 33.9                   | 162.8               | 40,680             |
|          | より合せ試験 (A I)  | -10.7364 | 6,472 | 0.99307** | 29.6                   | 157.4               | 24,263             |
| ポリエステル B | モータレット法 (P)   | -12.6511 | 7,212 | 0.99630** | 33.0                   | 152.4               | 15,817             |
|          | より合せ試験 (P)    | -13.2738 | 7,713 | 0.99457** | 35.3                   | 165.9               | 55,972             |
|          | より合せ試験 (A I)  | -14.3645 | 8,577 | 0.99877** | 39.5                   | 186.5               | 473,775            |
| エポキシ C   | モータレット法 (A I) | -11.1609 | 6,680 | —         | 30.6                   | 159.0               | 27,913             |
|          | より合せ試験 (A I)  | -11.0557 | 6,715 | 0.99665** | 30.7                   | 164.0               | 42,941             |
| 無処理      | より合せ試験 (P)    | -9.6177  | 5,887 | 0.98220** | 26.9                   | 150.0               | 13,712             |
|          | より合せ試験 (A I)  | -12.2900 | 7,519 | 0.99034** | 34.4                   | 180.0               | 189,143            |

注：P……ポリエステル線、A I……ポリアミドイミド線

\*\*\*\*99% 有意、寿命回帰直線の式……  $\log_{10} t = \frac{A}{T} + B$

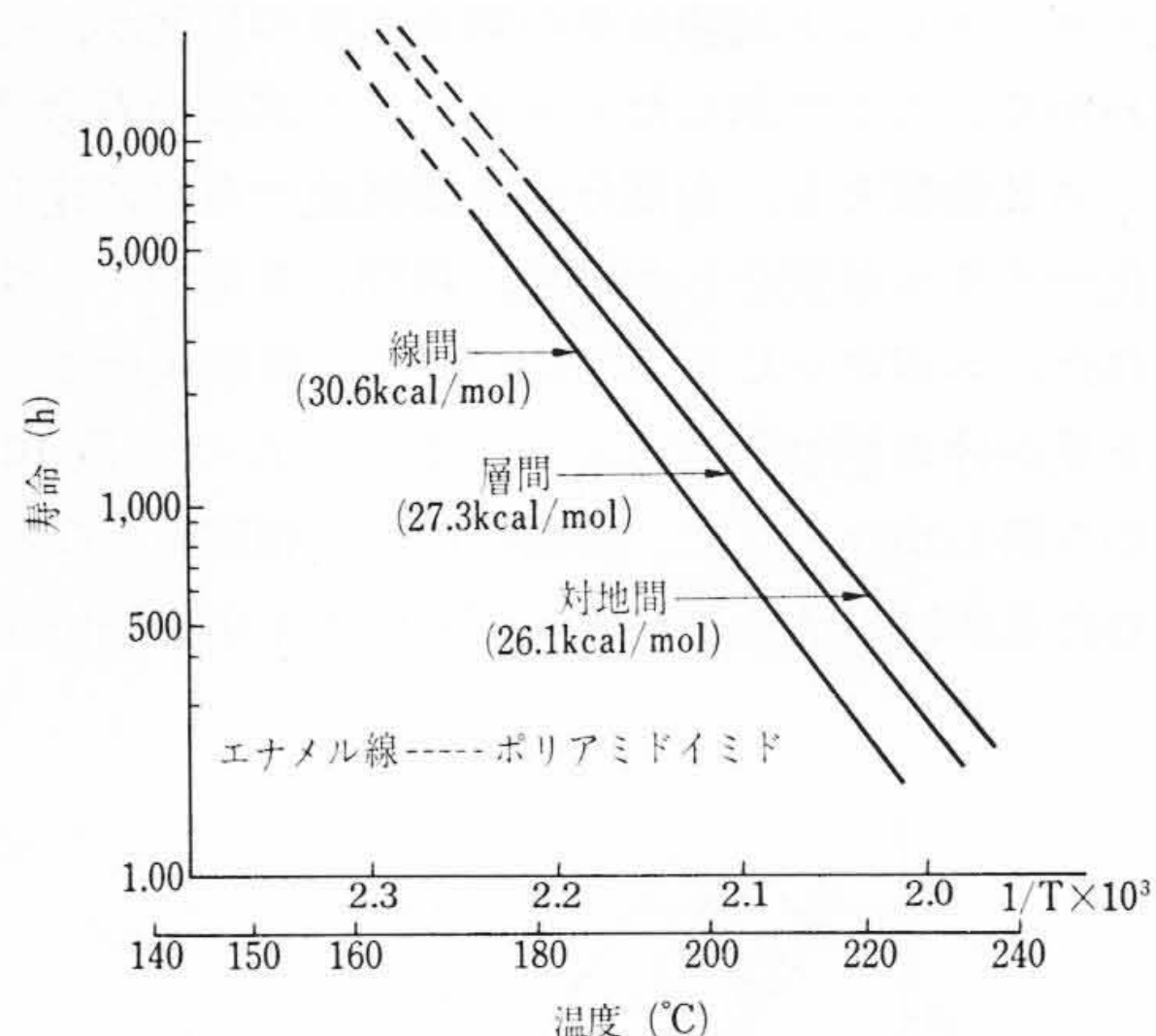


図10 エポキシCワニスの寿命と温度の関係

このような結果から、より合せ試験法は、モータレット試験に使用されている各種絶縁材料の耐熱性が適当にバランスしているときの線間破壊につながる熱劣化機構を非常に良く反映するものと考えられる。

図8と図9を比較することによって、同一の無溶剤形ワニスでも組み合わせるエナメル線の種類によって、耐熱性がかなり異なることがわかる。ポリエステルどうしの組合せでは、ワニス処理を行なうことによって寿命が数倍長くなっている。しかし、ポリアミドイミド線とポリエステルおよびエポキシワニスを組み合わせた場合には、ポリエステルBのように、寿命を向上させるワニスとポリエステルAやエポキシCのように、ワニス処理によって逆に寿命を低下させるワニスとがある。より合せ試験法は以上で述べたようなワニスとエナメル線との適合性をも含めた耐熱性評価ができる点で、モータレット試験、さらには実機の耐熱性に近い情報を与えるものと考えられる。

エポキシCワニスとポリアミドイミド線との組合せは、F種絶縁組織としてはじゅうぶん使用可能であるが、劣化サイクル中の絶縁破壊に至る過程を観察すると、まず、ワニスのたまり部に、肉眼でわかる程度のきれつが生じ、きれつ発生後、数サイクルで破壊することが認められた。このことから、おそらくワニス層に始まったきれつが進行し、ついには、エナメル線の皮膜まで達してしまうものと考えられる。一般に無溶剤形ワニスの付着量は、溶剤形ワニスに比べて多いため、きれつと耐熱寿命の間には、密接な関係があると予想され、ワニス付着量を適切に管理することによって、さらに耐熱性を向上できると考えられる。本実験でのワニス処理は、いずれも原液のワニスを2回処理したものであって、ワニス付着量を変えて実験していないので、寿命との関係を議論することはできない。しかし、ワニス付着量の大小が寿命を左右することはじゅうぶん予想され、今後検討すべき問題と考えている。

モータレット試験法で20,000時間の寿命のものは、より合せ試験では表8の結果から約40,000～50,000時間となる。このような相違は、より合せ試験の劣化条件に振動、吸湿がないため、劣化の促進効果がモータレット試験より緩慢なためであり、これらの条件を加味することには、今後検討の余地があると考えられる。

### 5.3 試験法の比較

絶縁ワニスの耐熱性を考える場合、ワニス単独に注目する場合と、実機に使用したときに重要となる材料相互の組合せの問題まで含む場合とでは、当然区別して考える必要がある。

モータレット試験法は、材料の適合性まで考慮に入れた試験法であることはいうまでもない。より合せ試験法も、材料の組合せ方によって、その絶縁系の耐熱性が極端に変わるような特殊な組合せを

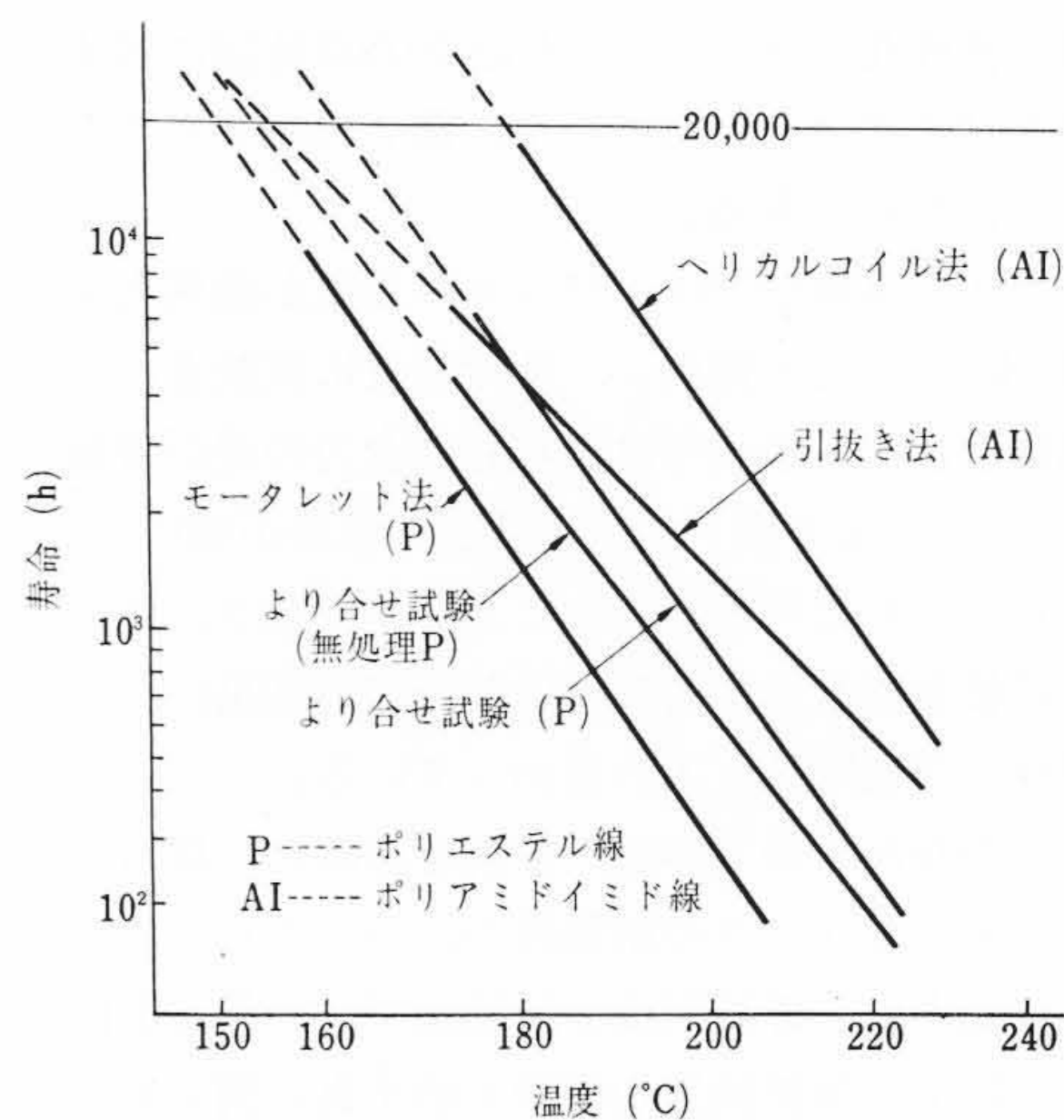


図11 ポリエステルAワニスの寿命直線

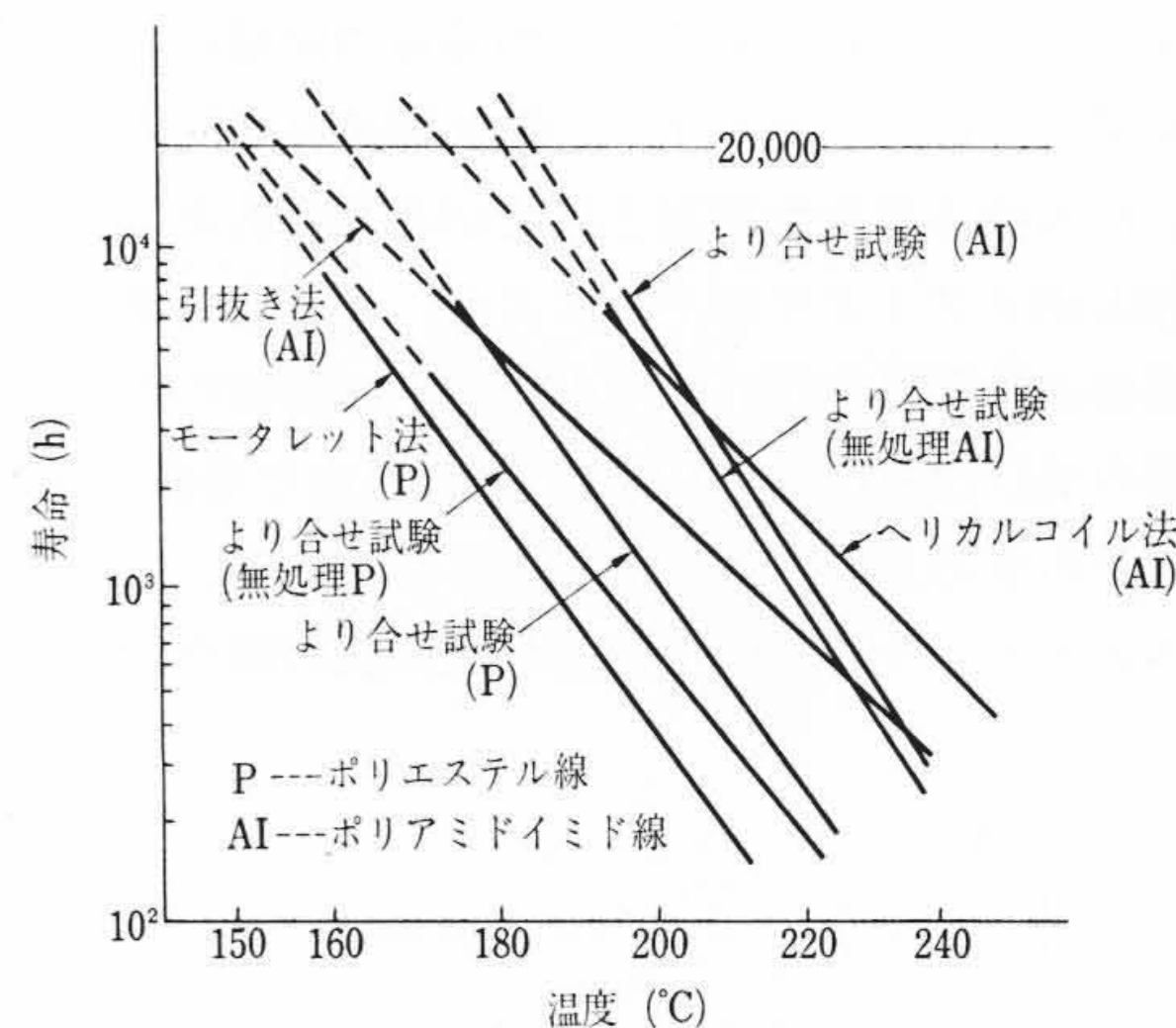


図12 ポリエステルBワニスの寿命直線

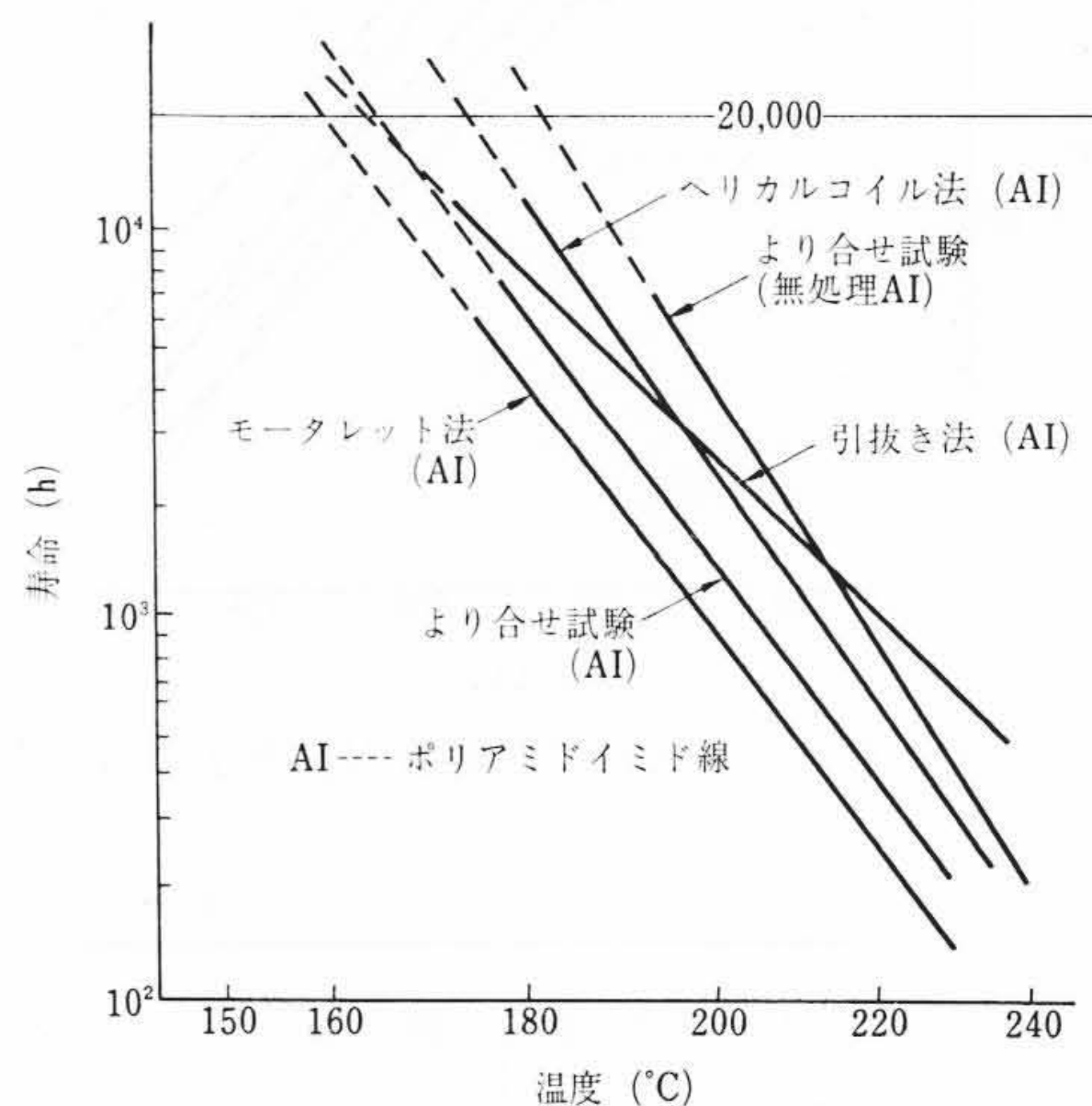


図13 エポキシCワニスの寿命直線

除いては、一応エナメル線とワニスの組合せを含んだ試験法である。

判定手段は異なるが、ヘリカルコイル試験法、導線引抜き試験法も、エナメル線を使用した場合は組合せ試験法といえる。

本報で取り上げた4種類の試験法と判定手段の点から考えてみると、ヘリカルコイル試験法と導線引抜き試験法は、ワニスの機械的性質の劣化に重点をおいた試験法であるといえることができる。

一方、より合せ試験法は耐電圧という電氣的な判定手段を用いており、モータレット試験法は、劣化の過程で振動を与えて機械的劣化を促進してはいるが、最終的には電氣的手段で寿命を決定している。

図11～13は各ワニスに対して4種類の試験法から求めた寿命直

線を示したものである。これらの図から、各試験法から得られる寿命直線の傾斜は必ずしも一致しないことがわかる。このことは、試験法の違いによって、観測される劣化の活性化エネルギーが異なることを意味し、その結果、耐熱評価にも違いが生ずることを示している。したがって、一つの試験法による結果によって、ワニスの耐熱性を評価することは、かなり危険であると考えねばならない。

絶縁材料の熱劣化は化学的变化に始まり、次いで機械的な性質の劣化が起こり、やがて電気的な破壊に至ることはよく知られている。モータレット試験法においても、使用した材料が特に電気的な弱点を持っていない限り、劣化の進行に微小なきれつなどの機械的破壊が先行し、その結果、耐電圧試験で電気的破壊として検出されるというのが実体であり、実機の寿命に至る過程と類似しているものと考えられる。しかし、モータレット試験法では、振動を与えて機械的劣化を促進しているので、機械的破壊と電気的破壊との時間的遅れは、より合せ試験法の場合ほど大きくないと考えられる。

モータレット試験法とより合せ試験法との相関性は、試験時間の長短はあるが、対応が非常によく、ほとんど同様な劣化機構を追跡していると考えることができる。

ヘリカルコイル試験法と導線引抜き試験法は、電気的性質の劣化を全く無視している点で、モータレット試験および実機と直接対応づけることには、かなり無理があり、これらの試験結果だけからワニスの最終的な耐熱寿命を決定することは適当でないと考えられる。

各試験法はいずれも表9に示したように一長一短がある。したがって、実際にワニスの耐熱寿命を評価するにあたっては、それぞれの試験法の特徴をふまえたうえで、試験法の選択とその評価結果の適用範囲を誤らないようにする必要がある。

6. 結 言

無溶剤形ワニスの耐熱寿命試験法を実用性の観点から吟味するため、3種類の無溶剤形ワニスを対象に、4種類の試験法について検討した。その結果を要約すると次のようである。

- (1) ヘリカルコイル試験法は、熱劣化に伴うワニス皮膜の曲げ強度の優劣が耐熱寿命評価に影響する。それに対して、導線引抜き試験法はワニスの接着力の優劣が強く反映する。
- (2) ヘリカルコイルおよび導線引抜き試験法は、機械的性質の劣化だけに着目した試験法であるため、より合せ試験法やモータレット試験法との関連性にとぼしく、また両試験法から求めた寿命直線のこう配が異なって、耐熱性の評価順位も入れ替わる可能性がある。したがって、両試験法の結果だけで実機を想定した耐熱性の評価を決定することは実用に即しない。

表9 各試験法の比較

| 試 験 法                  | 長 所                                                      | 短 所                                                                                                         |
|------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ヘリカルコイル試験法<br>導線引抜き試験法 | (1) 利用範囲が広い。<br>(2) 試験が簡単である。<br>(3) 測定結果を数量化できる。        | (1) 試験時間が長い。<br>(2) 多くの試験片を必要とする。<br>(3) 試験片の作成に多大な時間と労力を要する。<br>(4) 寿命の終点が明確でない。<br>(5) モータレット試験法との対応がわるい。 |
| より合せ試験法                | (1) モータレット試験法との対応がよい。<br>(2) 試験が簡単である。<br>(3) 試験片が少なくすむ。 | (1) 試験時間が長い。<br>(2) 試験片作成に比較的多くの時間と労力を要する。                                                                  |
| モータレット試験法              | (1) 実機に近い試験ができる。<br>(2) 試験結果の信頼性が高い。                     | (1) 試験時間が長い。<br>(2) 試験材料費、労力、時間が最もかかる。                                                                      |

(3) より合せ試験法はエナメル線とワニスの適合性を含めたモータレット試験法における劣化機構をよく反映する方法である。したがって、小形回転機巻線を対象とした無溶剤形ワニスの耐熱寿命試験法に適しており、その結果から実機の耐熱寿命に近い情報をうることができる。

現在、溶剤形、無溶剤形ワニスを問わず、ワニスユーザーはできるだけ労力と費用をかけずに短時間で耐熱寿命を評価し、そして得られた評価が実機と対応している試験法の確立を強く要望している。

本報で行なった検討は、その第1段階に過ぎないので今後さらに検討をすすめ、より合理的な試験法を確立したいと考えている。

最後に本研究を遂行するにあたり、かねてよりご指導を賜わっている電気学会耐熱性試験法専門委員会の委員各位、ユーザーの立場でご協力をいただいた日立製作所習志野工場の各位ならびに電子計算機の使用にあたり、ご便宜を図っていただいた日立製作所日立研究所技術計算室の五島、加藤両氏に深謝申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 中島：電学誌 Vol. 88-9, No. 960 (1968)
- (2) 吉岡：第2回電気絶縁材料シンポジウム予稿集 D-1(昭44)
- (3) 吉岡：第3回電気絶縁材料シンポジウム予稿集 VII-1(昭45)
- (4) 杉江、牛山、檜村：日立評論 50, 1135 (昭43-12)
- (5) IEC: Draft, 15 B (C. O) 1 (1966-3)
- (6) IEC: Draft, 15 B (S) 17 (1967-5)
- (7) W. H. Horton: AIEE Power Apparatus & Systems, 74, 405 (1956-6)
- (8) 有機材料劣化問題専門委員会：電気学会技術報告 第19号 (昭32-9)