

滴下含浸法およびそのワニス

Trickling Method and Its Varnishes

土 屋 昭 夫* 金 沢 均*

Akio Tsuchiya

Hitoshi Kanazawa

要 旨

最近、汎用モータ、家電品、電動工具、電装品などの小形モータのワニス処理に滴下含浸法 (Trickling method, drip method) が採用されて、ワニス処理の自動化、工程短縮、コイルの性能向上に効果をあげているが、本文では滴下含浸法の概略とわれわれが開発したワニス、および滴下含浸処理されたコイルの諸性能について紹介する。

1. 緒 言

小形電気機器コイルのワニス処理は一般に常圧含浸または真空注入によってワニスをコイル絶縁層の内部に浸透させてから乾燥しているが、これらのワニス処理法は一般に長時間の乾燥を要し液状粘性のワニスを扱うため治工具や作業場が汚れやすい欠点がある。

乾燥時間を短縮するためポリエステルワニスやエポキシワニスのような無溶剤ワニスを用いることによって短時間でワニスを硬化させコイルの絶縁処理を大幅に短縮し、しかもワニス処理工程を機械化するようになった。たとえば汎用モータのコイル含浸ワニスを溶剤形ワニスからポリエステル系無溶剤ワニスである PS-202 に換えることにより乾燥時間を従来の 1/2~1/3 に短縮できた。しかもコイルの耐湿性および耐熱性も向上しポリエステルエナメル線と組み合わせたいわゆるオールポリエステル絶縁として大いに効果があった⁽¹⁾。

しかしこの種の無溶剤ワニスはいわゆる二液形であって硬化剤を混合してからワニスのポットライフが短いこと、およびワニス含浸後コイルを加熱乾燥する際硬化するまでに一部ワニス流れ落ちることなどの欠点があるのでこれを補うため種々の工夫がなされている。たとえばエポキシワニスを処理したコイルを加熱する前にコイルに付着したワニスの表面だけを常温硬化性の硬化剤で処理して硬化させてから内部のワニスを硬化させワニスの流れ落ちるのを防止したり⁽²⁾、あるいはワニスにコロイドシリカを混合してチクソトロピックにするなどである⁽³⁾。

しかしこれらの方法はワニス処理の機械化という点ではまだ十分でない。ここで述べる滴下含浸法はスイス・チバ社が開発したもので⁽⁴⁾これまで述べてきた無溶剤ワニスの欠点を逆に利用してワニス処理時間を短縮しワニス処理の全機械化を可能にし、さらにワニスのむだを従来よりも少なくできる利点がある。

2. 滴 下 含 浸 法

図1のようにアーマチュアコイルを 100~150℃ に予熱し(予備乾燥をこれにあててもよい)これを水平面に対して 10~15 度傾け、毎分 10~50 回転させておく。そしてコイルの上部エンド部からゲル化時間の短い無溶剤ワニスを約 10~60 cc/分の速度で滴下する。滴下したワニスはコイルの予熱により粘度が低下し、流動性を増して重力と毛細管現象によりコイル内部に浸透してゆく。

なおコイルは回転しているのでワニスの粘度が低下してもコイルから流れ落ちることはない。このようにしてコイル内部に完全にワニス浸透すれば滴下を止めてワニスゲル化するまでコイルを水平にして回転させる。ワニスゲル化すればコイルを加熱炉に入れて 100~150℃ で 1~2 時間のアフターキュア (アフターキュアはワ

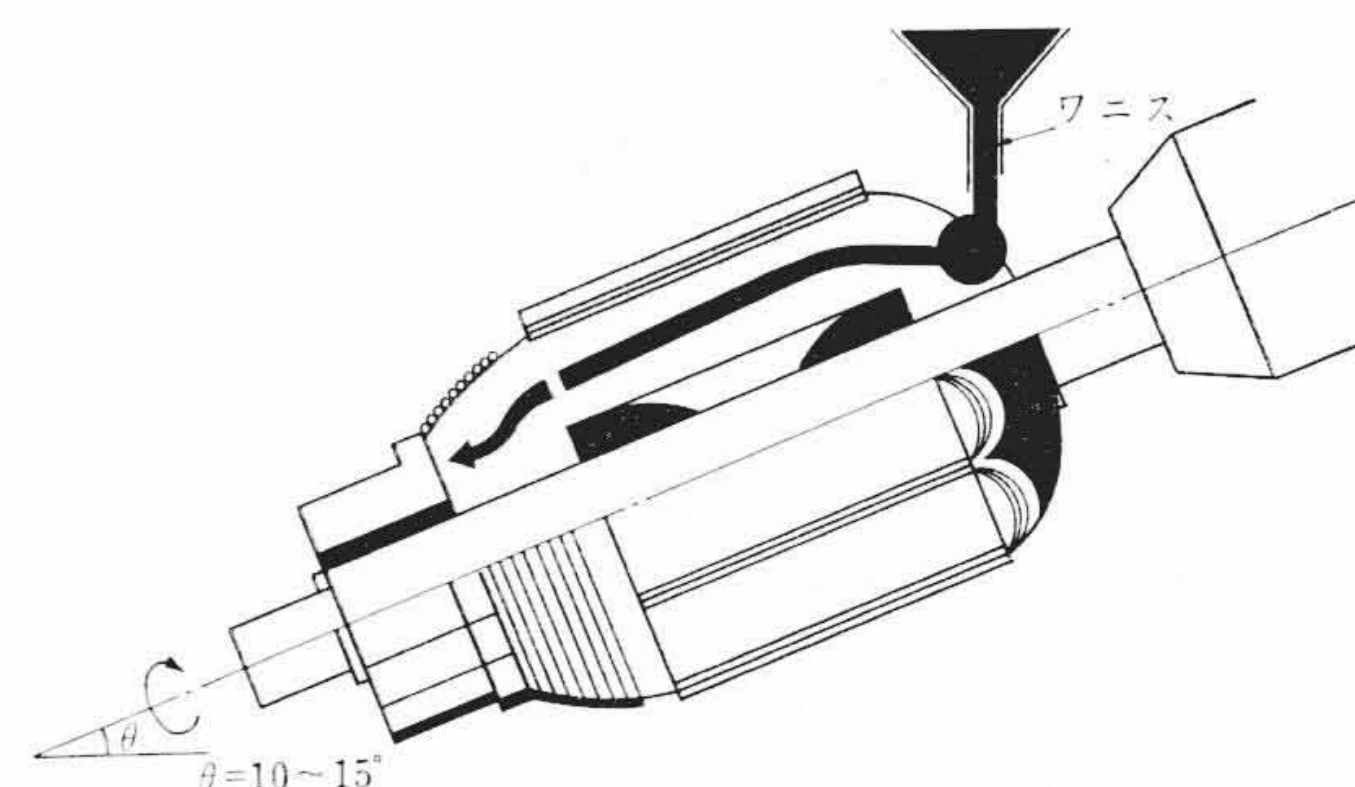


図1 滴下含浸法の原理

表1 ワニスの種類と混合比

ワニスの種類	組 成	硬化剤混合比 (A/B)	
		重 量 比	容 積 比
KE-570	液 状 エ ポ キ シ 樹 脂	100/18	100/20
KE-573	液 状 エ ポ キ シ 樹 脂	100/82	100/78
PS-51	不飽和ポリエステル樹脂	100/1	—
PS-202	不飽和ポリエステル樹脂	100/1	—
PS-542	不飽和ポリエステル樹脂	100/1	—

ニスによって必要ない場合がある。)を行ないワニス処理を完了する。

これらの工程は機械により比較的簡単に自動化できる。滴下法の長所をまとめると次のようになる。

- (イ) ワニス処理時間が短縮され機械化が可能。
- (ロ) コイル含浸に必要なワニス量だけワニスを滴下するのでワニスのむだがない。
- (ハ) コイルの耐湿性、電気特性、機械特性が向上する。
- (ニ) アーマチュアコイルの場合は回転に対する重量バランス取り、バンドかけなどが簡略化される。

以上のような利点があるためわが国でも数年前から一部で採用されている。日立化成工業株式会社ではこの滴下含浸法について早くから検討を行ないこの処理法に適するエポキシワニスおよびポリエステルワニスを開発した。ここでは滴下含浸法を導入する場合の検討方法とこの種ワニスの特性について述べる。

3. 滴下含浸法用ワニス

滴下含浸法の検討方法を説明するにはワニスの粘度やゲル化時間などの特性が必要なのでまずワニスの特性について紹介する。

表1に日立化成工業株式会社が開発した滴下含浸法用ワニスの種類を示す。

表1でKE-570以外のワニスは硬化剤を混合しても室温で1週間~2週間のポットライフがあるので処理装置の中で混合装置 (樹脂と硬化剤の混合用) が不用になり安価な装置となる。なお樹脂と硬

* 日立化成工業株式会社山崎工場

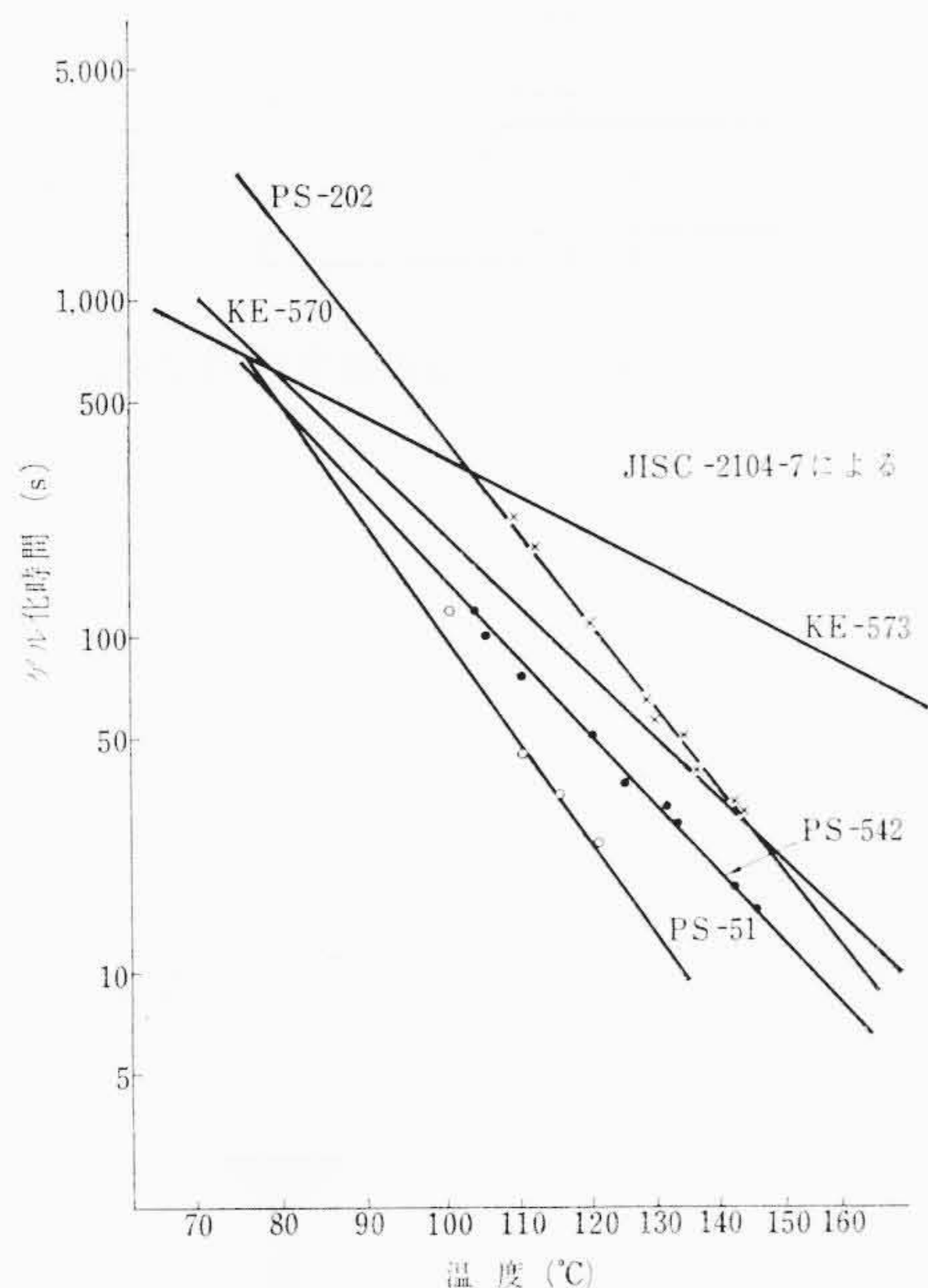


図2 ゲル化時間の温度特性

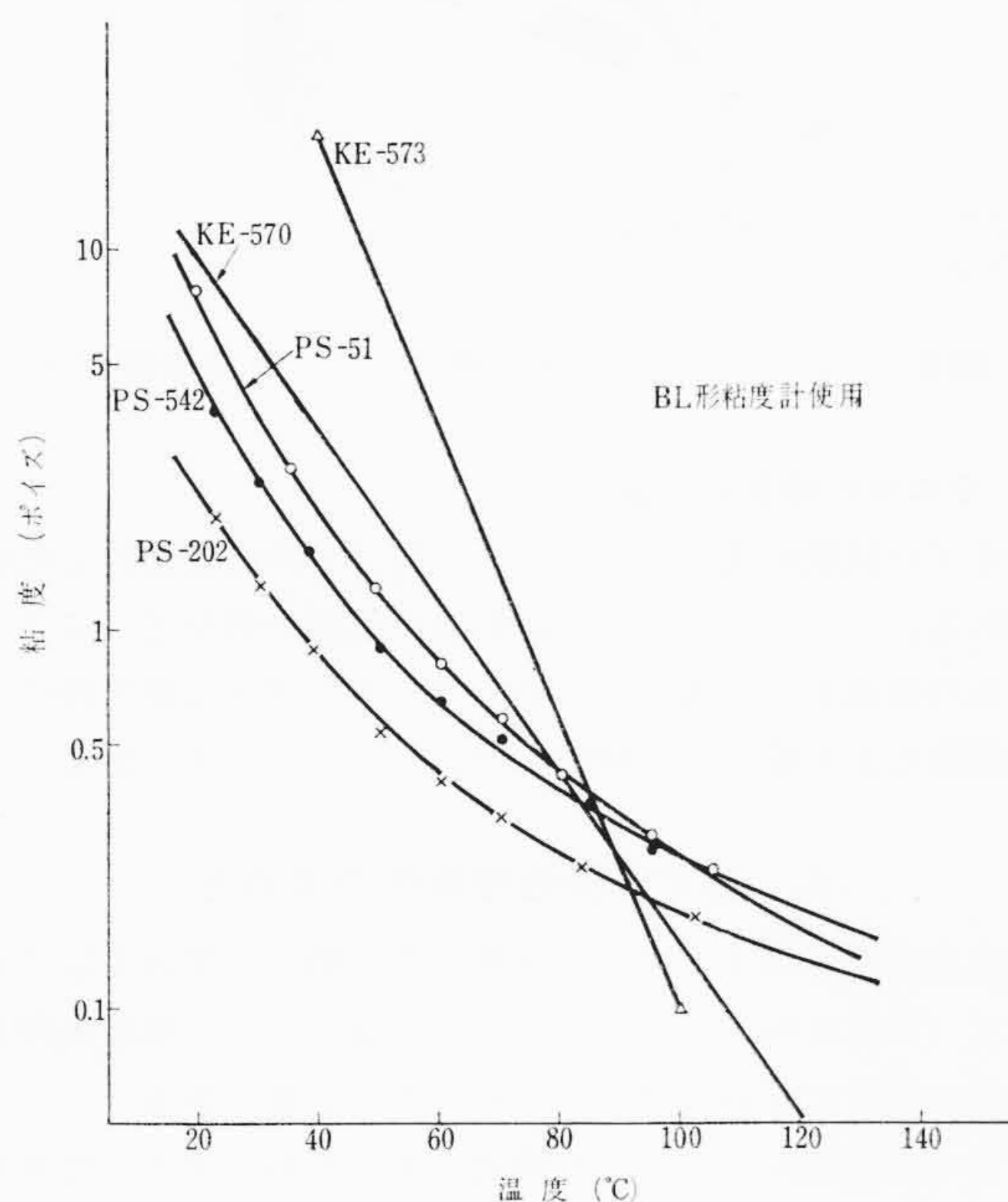


図3 粘度の温度特性

化剤の混合は数日分を1回で人手によって混合し使用することができる。

3.1 ワニスの一般特性

3.1.1 ゲル化時間

無溶剤ワニスのゲル化時間には特に決まった測定法がないのでここではJIS C2104-7に準じて熱板法により温度を変えながら測定した。

その結果を示したのが図2である。

3.1.2 粘 度

BL形回転粘度計を用いて温度を変えて測定した。その結果を示したのが図3である。硬化剤混合後の各ワニスは高温ではゲル化時間が短いため粘度の測定が困難なのでゲル化時間の比較的長い30~90℃の範囲で測定しそれを高温部まで外そうし高温の粘度(ゲル化する前の粘度)を推定した。

表2 ワニスの硬化条件と熱変形温度

ワニス		硬 化 時 間 (h)			熱変形温度 (°C)
		120°C	135°C	150°C	
KE-570	①	2			108
	2	3			109
	3		2		109
	4		3		109
KE-573	5		2		128
	⑥		3		136
	7		1	2	136
	8		1	3	138
PS-51	9	1			70
	⑩	2			73
	11	3			73
PS-202 (注)	12	1			—
	⑬	2			—
	14	3			—
PS-542	15	1			56
	⑯	2			63
	17	3			65

(注) PS-202の熱変形温度が室温以下なので測定せず、ここでは電気特性で硬化条件を決めた。

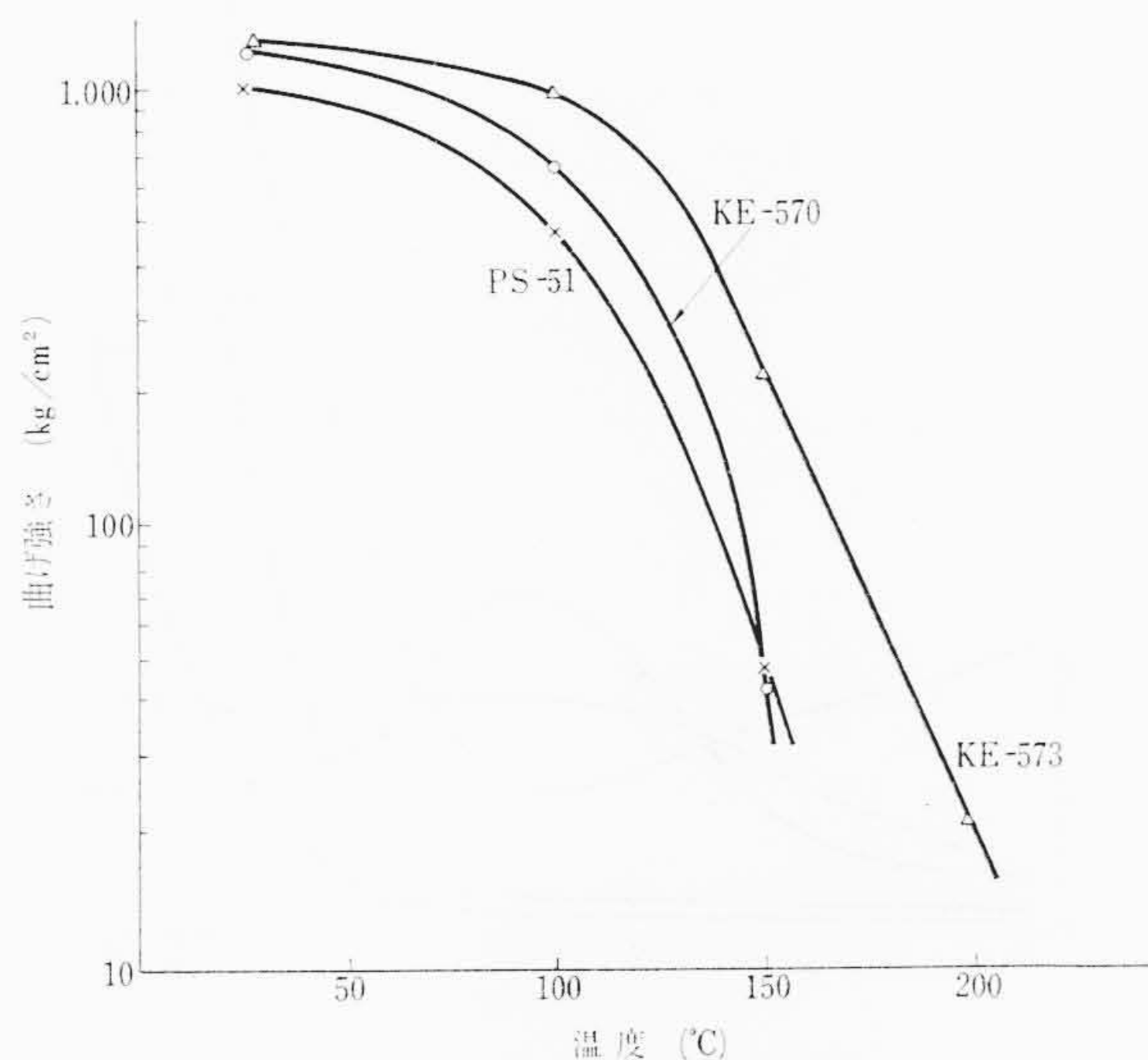


図4 曲げ強度の温度特性

3.2 硬化ワニスの特性

3.2.1 熱 変 形 温 度

熱変形温度はそのワニスの硬化条件を決める一つの目安に使用されているが、その結果は表2に示すように熱変形温度が加熱時間に対して一定になる時間がある。これを硬化時間と仮定すればいずれのワニスも1~2時間の加熱により乾燥(ワニスの硬化)が終了すると考えられる。なおこの乾燥はコイルの運転中の温度上昇を利用すれば省略できる場合もある。

3.2.2 曲 げ 強 度

曲げ強度の温度特性を図4に示したがKE-573とKE-570はすぐれた特性を示している。小形モータのアーマチュアコイル処理用ワニスはコイルの遠心力と温度上昇を考慮して選択すべきと考えられる。この観点からみればKE-573, KE-570は高温高速回転用に適しておりポリエステル系ワニスは多少エポキシ系ワニスよりも回転数や温度上昇の低い所で使用できると思われる。

3.2.3 せん断接着力

2.0φのPEWを図5のように組み立て、これをワニス処理し、5 mm/minの引張り速度で測定した。その結果を図6に示す。KE-573, KE-570のエポキシ系ワニスは高温においても接着力の低下が少なくすぐれていることがわかる。

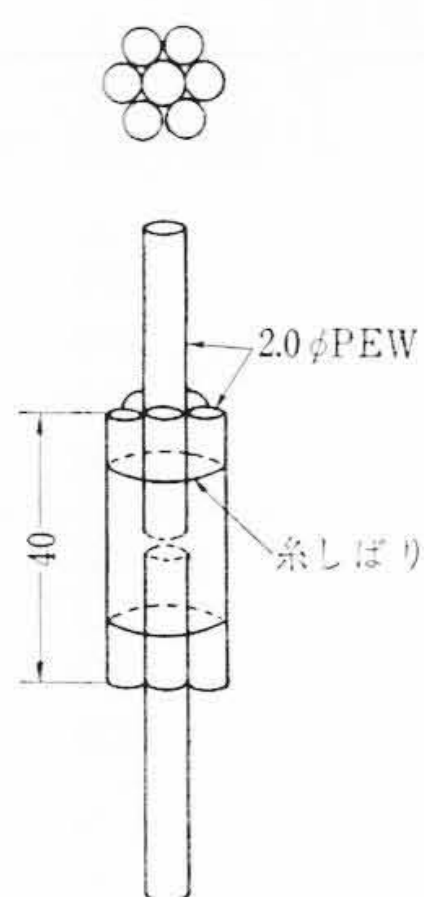


図 5 せん断
接着力試験片

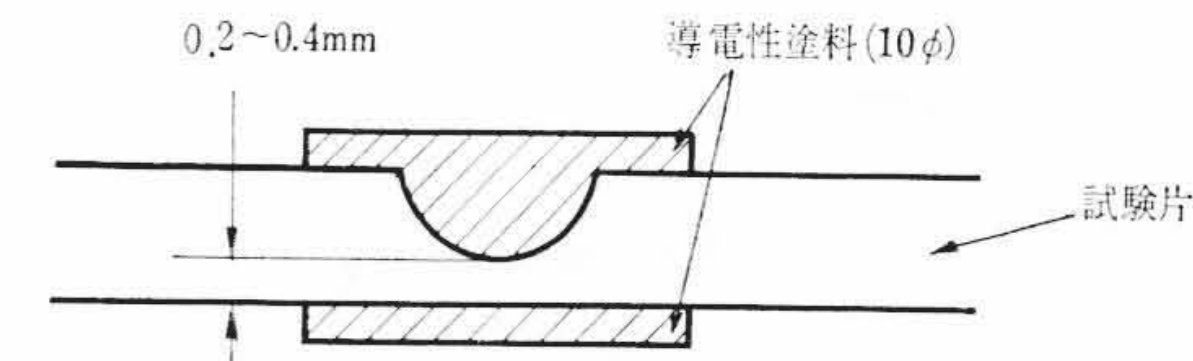
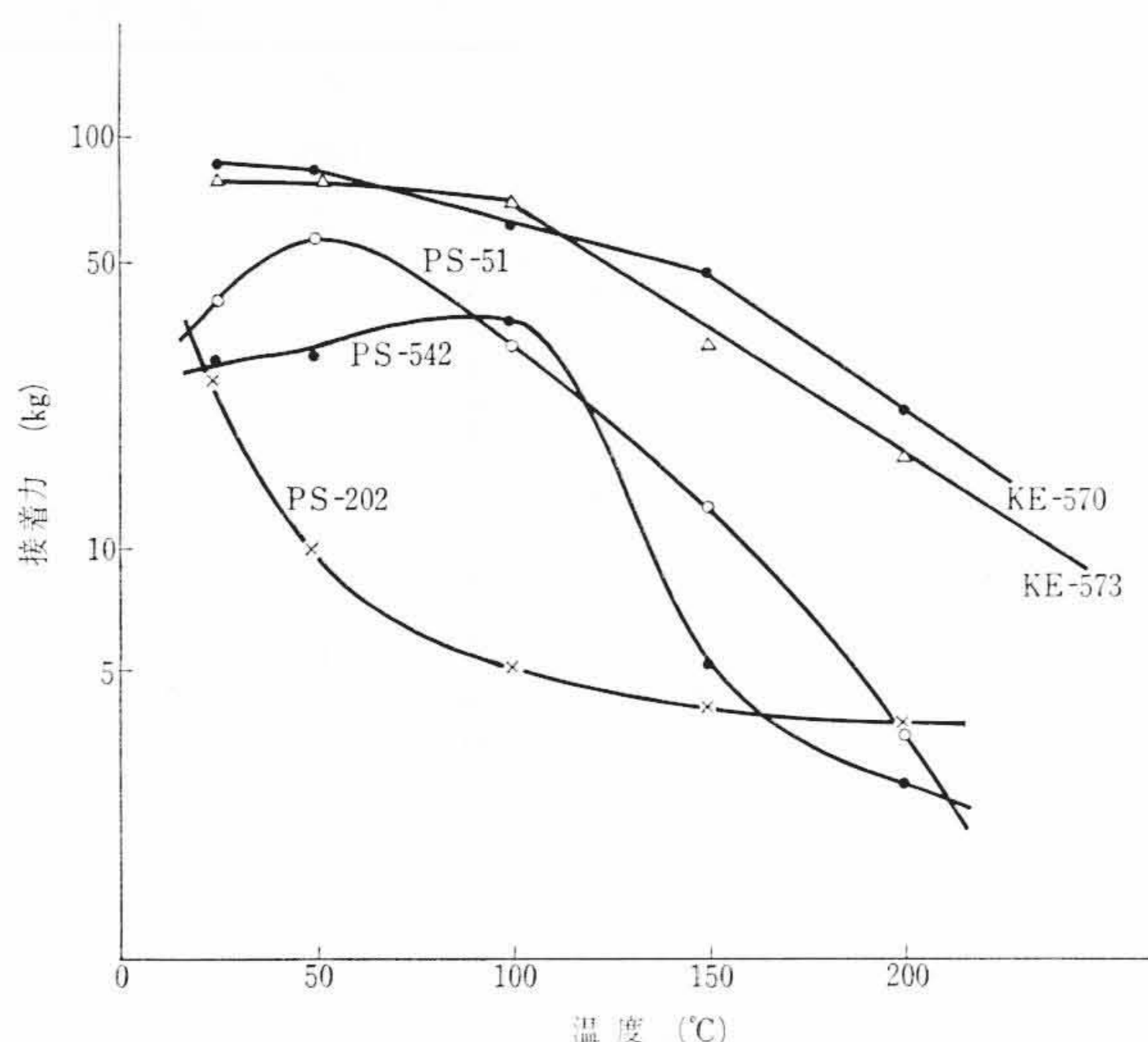


図 7 絶縁破壊電圧測定用試験片

図 6 せん断接着力と温度との関係

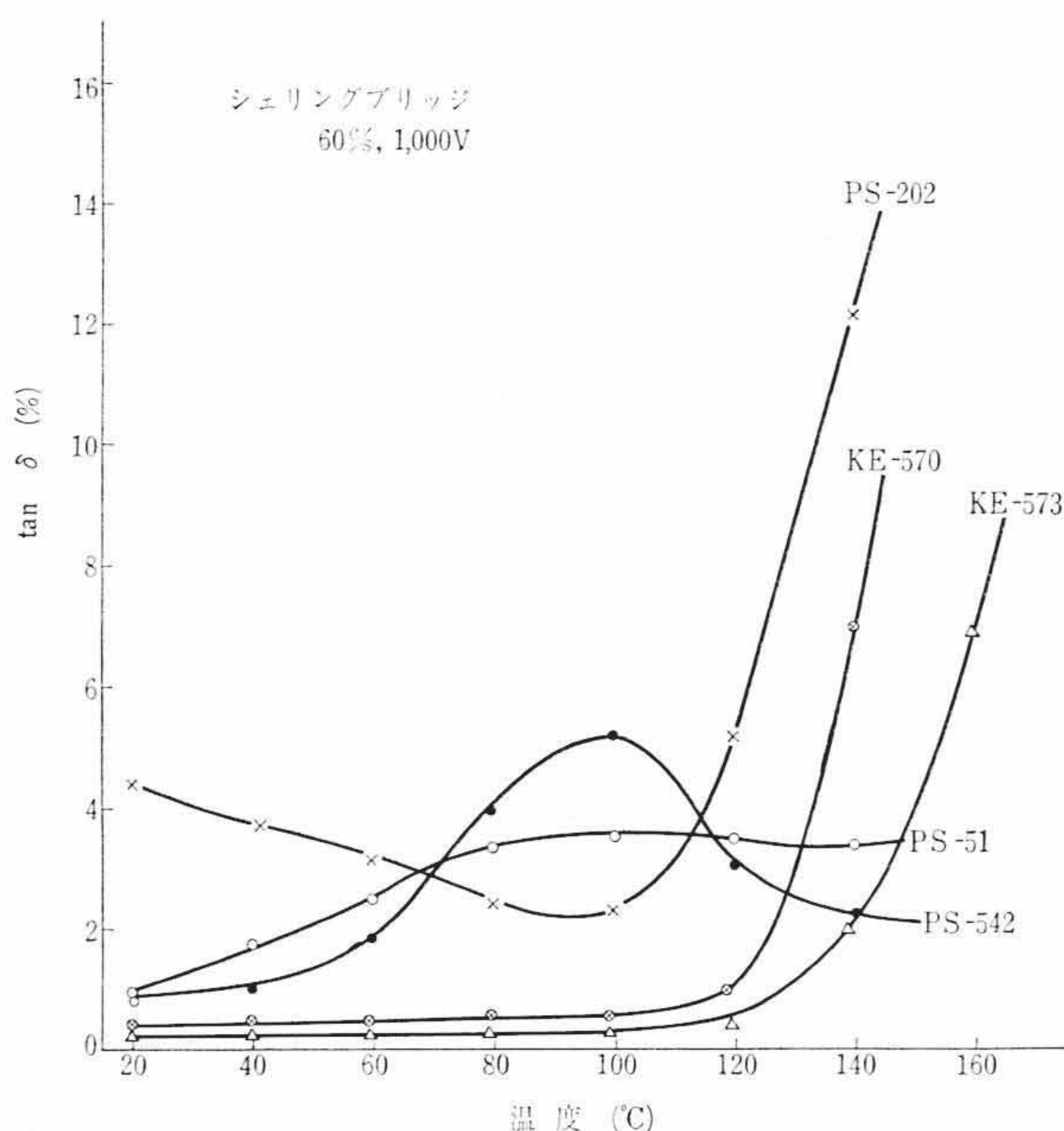


図 8 $\tan \delta$ の 温 度 特 性

表 3 ワニスの絶縁破壊電圧

ワニス	絶縁破壊電圧 (kV/0.1 mm)
KE-570	10.4
KE-573	10.2
PS-51	10.3
PS-202	11.9
PS-542	9.8

(注) 硬化条件は表 2 の○印の温度と時間でおこなった。測定は室温。

表 4 ワニスの 特 長 と 用 途

ワニス	特 長	用 途
KE-570	速硬化, 低粘度, 機械特性良好	中負荷, 高温度上昇のアーマチュアコイル
KE-573	中速硬化, 機械特性, 耐熱性良好	重負荷, 高温度上昇のアーマチュアコイル
PS-51	速 硬 化	重負荷, 中温度上昇のアーマチュアコイル
PS-202	速硬化, 可とう性良好, 空乾性	ステータコイル
PS-542	速 硬 化	軽負荷, 中温度上昇のアーマチュアコイル

3.2.4 電 気 特 性

厚さ 2 mm の樹脂板を用い, 導電性塗料を塗布し電極として $\tan \delta$ を測定した。また絶縁破壊電圧は図 7 のように試験片に凹部を作り導電性塗料の電極で 1 kV/s の電圧上昇速度で測定した。その結果を図 8 および表 3 に示した。機械特性と同様エポキシ系ワニスが電気特性においてもすぐれている。

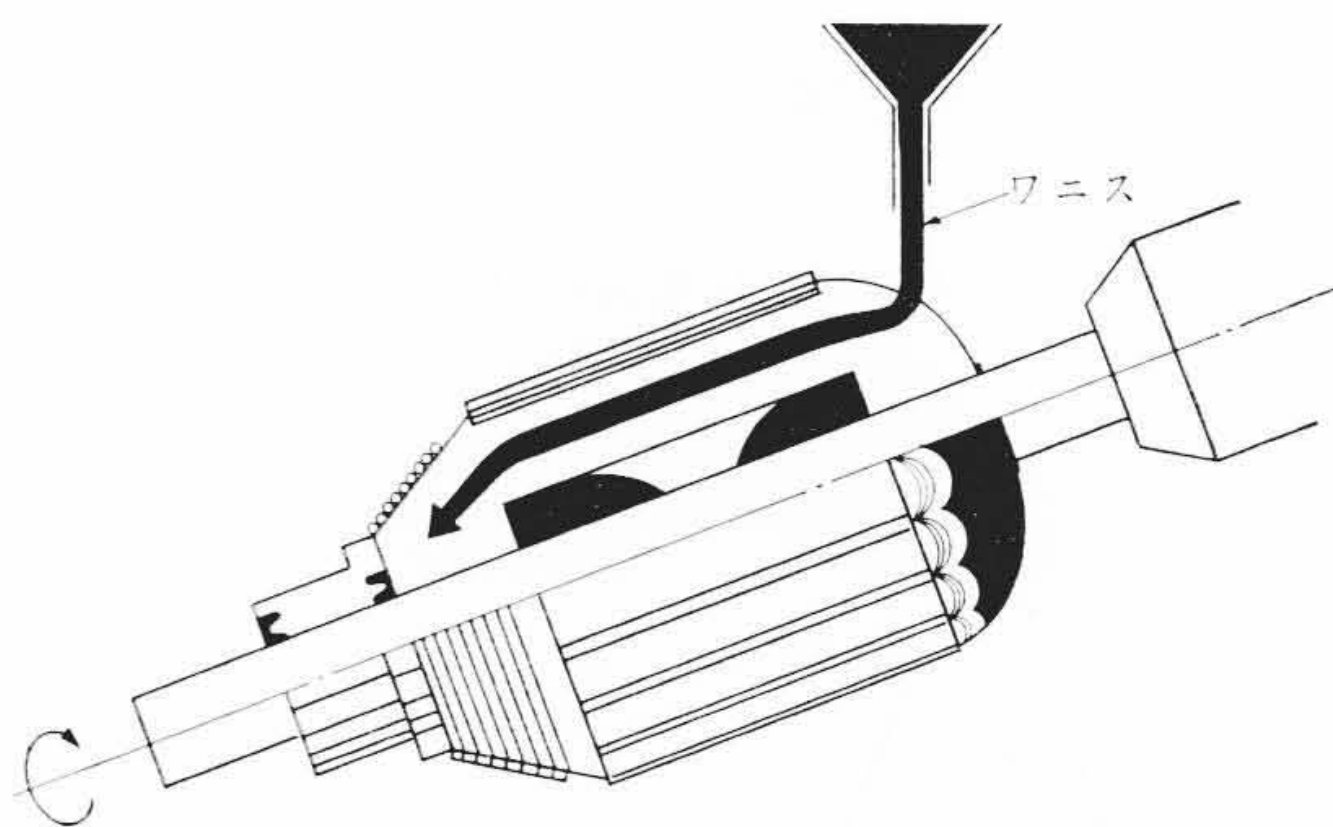


図 9 V_d が V_a より小さい場合のワニスの含浸状況

3.3 ワニスの特長と用途

これまでの試験結果から各ワニスの特長と用途を検討した結果が表 4 である。しかし使用条件 (回転数, 温度上昇など) によってはこれ以外の用途も十分考えられる。ワニスの選択は要求特性, 使用条件, 価格などを総合的に検討して行なわれるべきである。

4. 滴下含浸処理条件の求め方

滴下含浸法を採用する場合, 予熱温度, 傾斜角度およびワニスの滴下速度 (単位時間あたりのワニス滴下量) などの処理条件を決め処理装置の設計に必要な諸元を求めておく必要がある。

これらの処理条件はコイルの構造, 使用材料 (主としてスロット絶縁物) によって異なるので適用しようとするコイルについて実験的に求めなければならない。

予熱温度, 傾斜角度, 滴下速度は相互に関係があるので実験する際には予熱温度, 傾斜角度をパラメータにして含浸時間 (ワニスの滴下を始めてからコイル内にワニスが完全に含浸するまでの時間) と滴下速度の関係を求めたほうがやりやすい。ワニスの含浸状況は滴下速度の大小により次の二つに分けることができる。

(A) 滴下速度 (V_d) が吸収速度 (V_a) より小さい場合

V_a とはコイルが一定の粘度のワニスを吸収して含浸するときの単位時間あたりのワニス量で図 9 のように V_a よりも小さい V_d で滴下する (この場合予熱温度, 傾斜角度は適当に決めておく。普通は予熱温度 120°C, 傾斜角度 12 度ぐらいから始めるのがよい。) とワニスはコア外周を流れることなく完全にコイルエンド部から順次吸収されて最後にはコイル内部にボイドを形成させることなく完全な含浸状態が得られる。しかし V_d が V_a より小さいことは滴下時間が長くなることを意味するので, できるだけこの滴下時間を短くして処理能率ひいては生産量を高めなければならない。

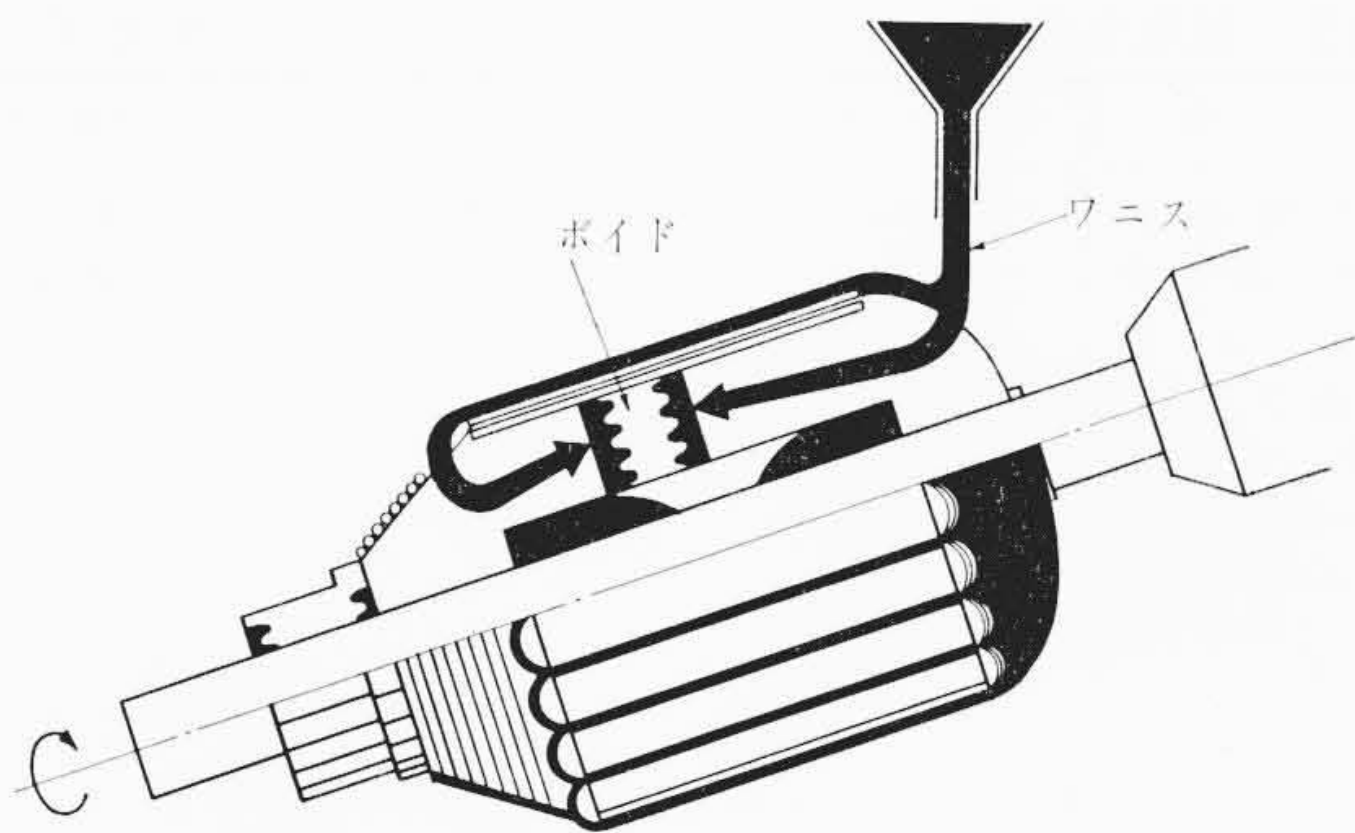


図10 V_d が V_a より大きい場合のワニスの含浸状況

(B) V_d が V_a より大きい場合

図10のように V_d が V_a より大きいとコイルエンド部に滴下したワニスをコイルが全部吸収できなくなり余分のワニスはコア外周を流れるようになる。ワニスがコア外周を流れると下部エンドコイルに付着したワニスによりコイル内の空気の排出がスムーズにできなくなり内部にワニスが完全に含浸されないのボイドができたり、またコア外周に付着したワニスを最後に削るのでワニスのロスが増しさらにワニスの付着が不均一になりやすくコイルの回転に対する重量のアンバランス量が増すなどの不都合が起こる。

したがって(A)(B)いずれでも処理条件としては不適當である。この理想的な条件は V_d と V_a が等しくなることである。すなわち $V_d=V_a$ であれば滴下時間を最短にできしかも含浸を完全に行なうことができる。このときの V_d を以後 V_{dm} (最大滴下速度)と呼ぶ。 V_{dm} を求めるには適当なワニス(溶剤形ワニスでもよい)をシンナーで粘度を調節し、室温のコイルで実験すると都合がよい。含浸時間(t_i)と V_d (V_{dm})との関係は実際にはコイルを予熱して表1のワニスを用いて行なうべきであるが、実験を簡単にするために室温でやってもよい。なぜならばコイルを予熱してこの熱により滴下されたワニスの粘度を下げて含浸させるのと、はじめから前もって粘度を下げたワニスを用いて室温で含浸させることは等価だからである。なおこの実験から予熱温度を求めるには実験に用いたワニスの粘度と等しい点を図3上に求めその点から横軸に垂線をおろし横軸との交点を求めればよい。

家庭電気品用の小形モータのアーマチュアコイルについて t_i と V_d との関係を求めた結果を図11～図13に示す。図11から図13の V_{dm1} , V_{dm2} , V_{dm3} はそれぞれ P_1 , P_2 , P_3 の粘度のワニスを滴下した場合の最大滴下速度である。すなわち実線部分はワニス含浸がよく行なわれているが A_1 , A_2 , A_3 を越えて点線部分になるとワニスがコア外周を流れ含浸がよくないことを意味する。

以上のことをまとめると次の実験式が成立する。

$$Q = V_d \cdot t_i \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Q : ワニスの含浸量 (cc)

t_{i1} , t_{i2} , t_{i3} は V_{dm1} , V_{dm2} , V_{dm3} に対する含浸時間でこの式により V_d と t_i から Q を求めることができる。

予熱温度を求めるには前にも述べたように実験に使用したワニスの粘度を図3の採用しようとするワニスの粘度曲線上に求めこの点から横軸に垂線をおろせばよい。たとえばKE-570の場合には0.05ポイズになる温度(T_p)は図3から120℃となる。

T_p が求められると T_p におけるワニスのゲル化時間(t_g)を図2から求め、これをその温度における t_i と比較し t_i が t_g より短ければワニスは含浸途中でゲル化することなくコイル内に十分含浸される。すなわちこの場合には(2)式が成立する。(2)式はそのワニスを用いて T_p で処理できるかどうかを判定するのに使用できる。

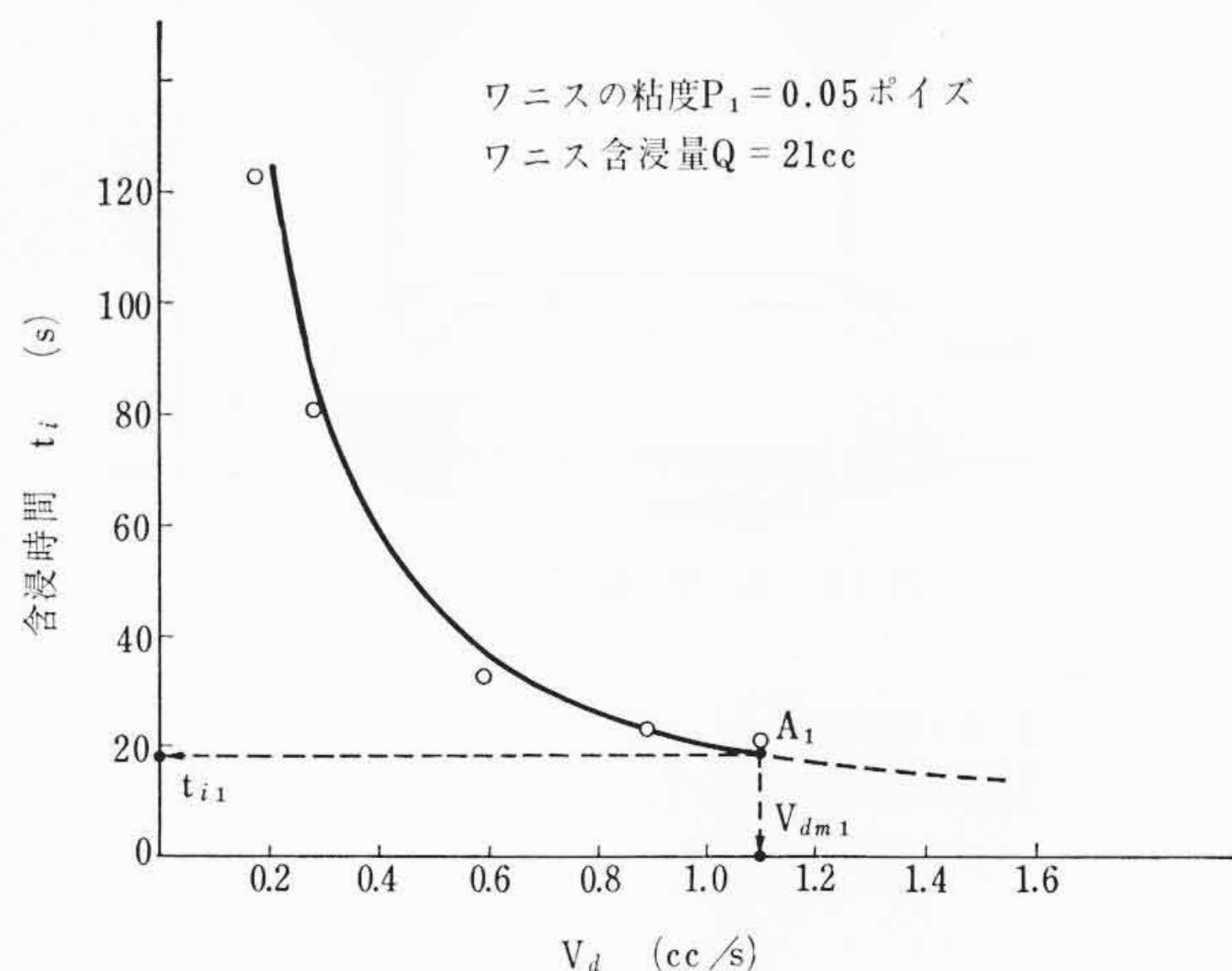


図11 含浸時間と滴下速度の関係

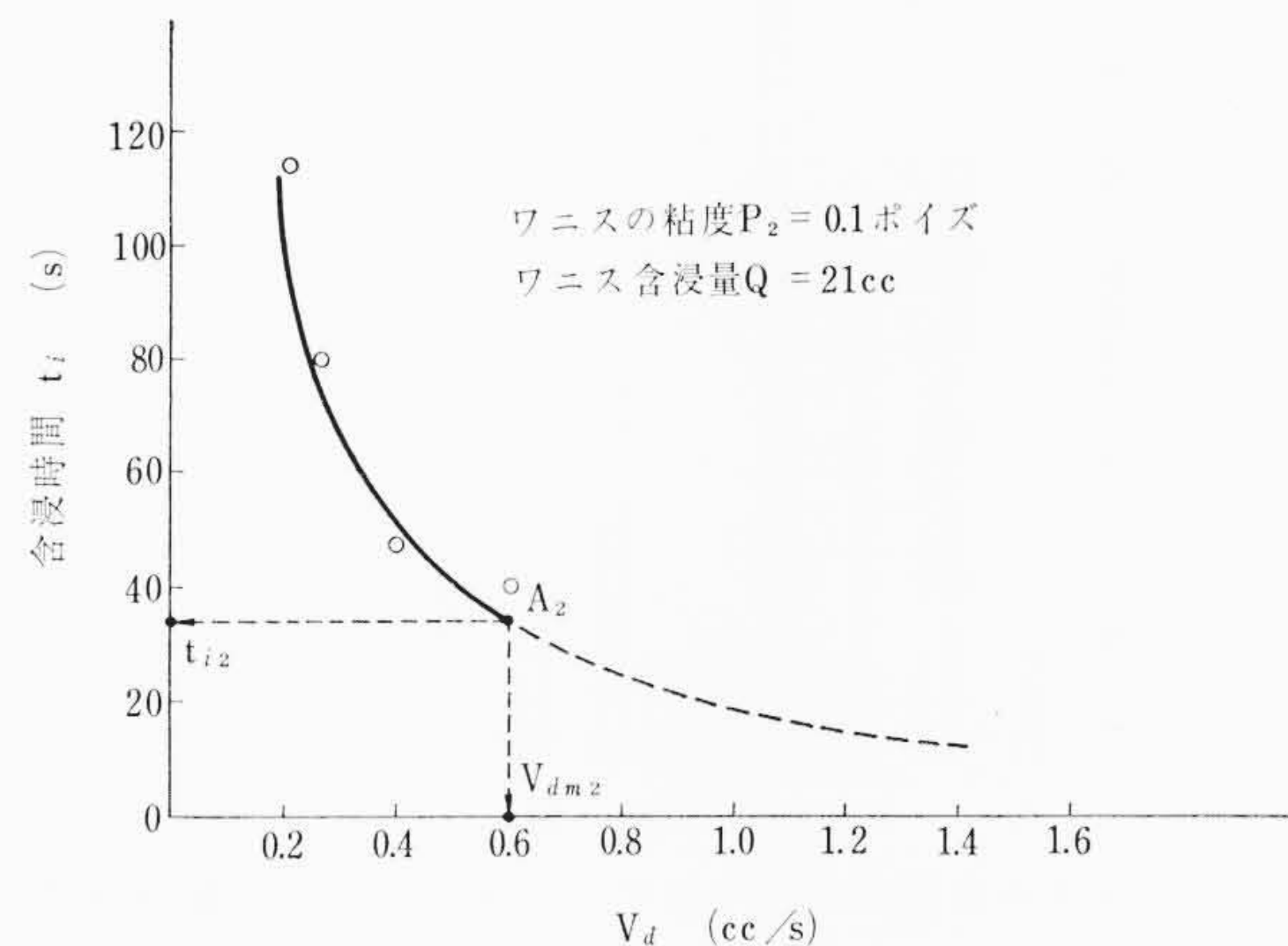


図12 含浸時間と滴下速度の関係

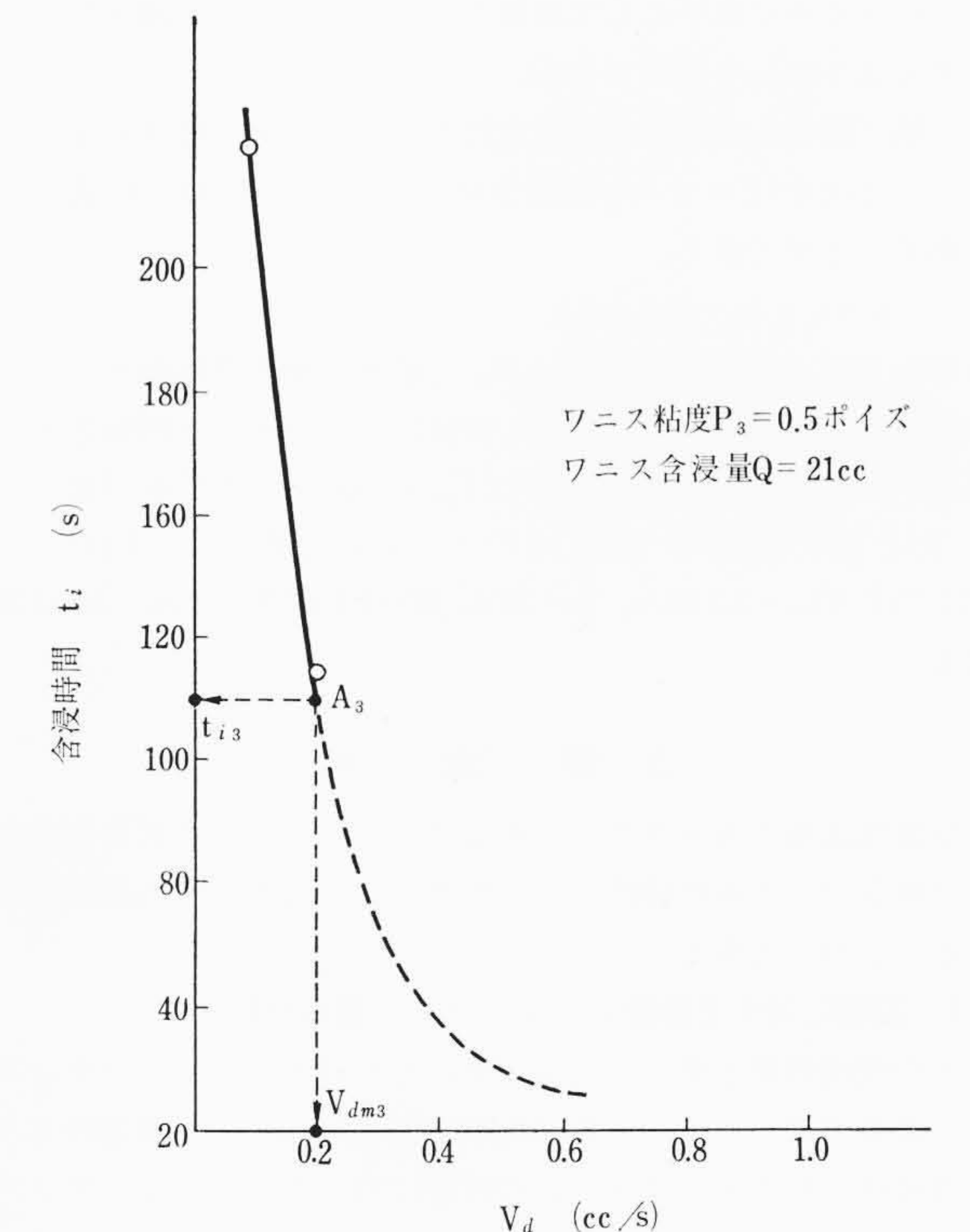


図13 含浸時間と滴下速度の関係

$$t_g \geq t_i + K \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 K : 定数 ((0.1~0.2) × t_i)

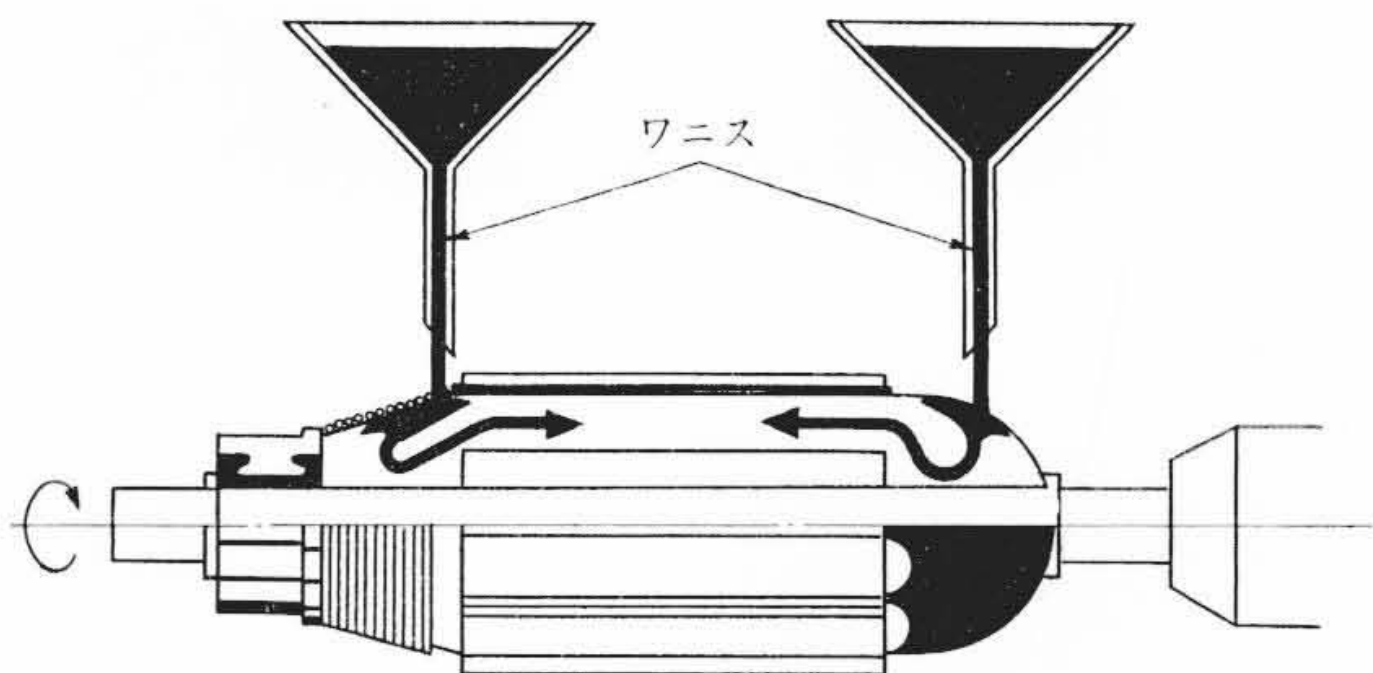


図 14 水平滴下含浸法

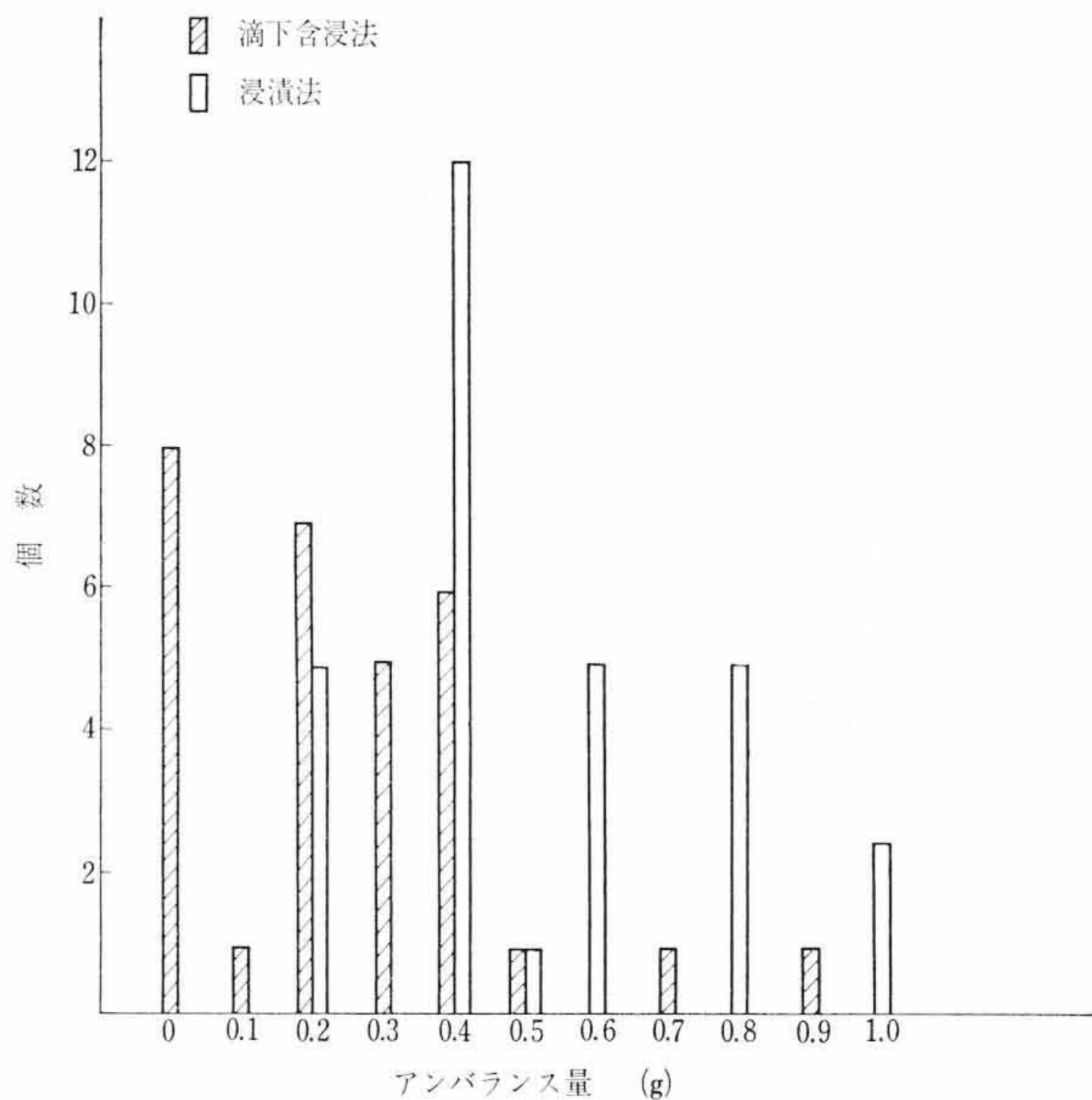


図 15 コイルの回転に対するアンバランス量の分布の一例

(2)式が成立しない場合には T_p をもっと下げるかあるいは図 14 のようにコイルを水平にして両端のエンドコイルから滴下して t_i を短くするようにして解決できる。

次に滴下開始から最後に滴下されたワニスがゲル化するまでの時間、いいかえればコイルを回転させておく時間(t_r)は(3)式によって求めることができる。

$$t_r = t_g + (t_i + K_2) \div 2t_g \dots\dots\dots (3)$$

なぜならば t_r は滴下時間($t_i + K_2$)と最後に滴下されたワニスがゲル化するまでの時間(t_g)の和でこの時間だけコイルを回転させておく必要があるからである。以上で T_p , V_d , Q , t_i および t_r が求められた。たとえば KE-570 で図 10 のコイルを処理するとすれば $T_p = 120^\circ\text{C}$ では $V_{dm} = 1.1 \text{ cc/s}$, $t_i = 19 \text{ s}$, $Q = 1.1 \times 19 \div 21 \text{ cc}$, $t_r \div 160 \text{ s}$ となる。

5. 実 施 例

家庭電気品用のモータアーマチュアコイルについて KE-570 を処理した場合のコイルの特性について述べる。滴下含浸処理条件は表 5 に示すとおりである。

5.1 回転に対する重量のアンバランス量の比較

従来の浸漬処理と滴下含浸法でそれぞれ処理したアーマチュアコイルの重量のアンバランス量の比較を図 15 に示す。前述のように滴下含浸法で処理すればワニスの付着は均一になり重量のアンバラ

表 5 処理条件の一例

項 目	条 件
コイル回転数	30 rpm
予熱温度	110℃
傾斜角度	10 度
最大滴下速度	0.4 cc/s
滴下時間	46 s
コイル回転時間	5 分
アフターキュア条件	120℃ 2h

表 6 温度上昇試験結果の一例

コイルの処理	温度上昇(平均値)
滴下含浸法	35(℃)
浸漬法	46(℃)

表 7 ワニス処理費の比較の一例

処 理 法	材 料 費	工 賃	計
浸 漬 法	100	100	100
滴下含浸法	104	55	66

(注) 浸漬法を 100 とした場合の小形アーマチュアコイルのワニス処理費

ンスは少なくなることが図 15 でもよくわかる。

5.2 コイルの温度上昇

表 6 に温度上昇の結果を示した。なお供試したコイルは処理ワニス以外はすべて同じ材料(電線, スロット絶縁, 縛り糸など)を使用した同一仕様のコイルである。滴下含浸法でワニス処理することにより機械特性のすぐれた無溶剤ワニスを使用することができるのでコイルの寿命も長くなりさらに温度上昇も低くなっている。

5.3 ワニス処理費の比較

表 7 にワニス処理費の比較を示す。滴下含浸法では材料費は浸漬法より多少高くなっているが処理工賃が大幅に小さくなって全体として滴下含浸法は浸漬法より特性のよいコイルを安価に製造できることになる。

6. 結 言

絶縁材料の進歩はめまぐるしいがそれにとまって新しい絶縁処理法も開発されている。一般にエポキシワニスや不飽和ポリエステルワニスはかなり高価でかつポットライフが短いために使用のむずかしいワニスであったが滴下含浸法などの新しい処理法により今後電気機器コイルへの応用はますます盛んになるものと思われる。本報では説明は主としてアーマチュアコイルで行ってきたがこの方法はステータコイルにも適用できる。

なお処理装置は二, 三輸入機器として販売されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾がわが国では需要家が自家製して使用しているようである。その際に述べた処理条件に従って設計すれば比較的簡単に装置を作ることができる。

最後に本研究に対して種々ご指導たまわった日立化成工業株式会社山崎工場研究部曾根博士, 仲野研究員, サービス課樫村課長, 日立製作所多賀工場の関係者に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 園山, ほか 2 名: 日立評論 43, 907 (昭 36-7)
- (2) 村元, 鈴木: 特許公報 昭 39 No. 15925
- (3) 日立化成カタログ (PS 51 B)
- (4) Von Heiuz Adam, Kunststoffe Bd 54, 1964, Heft 8, p. 490
- (5) Micafil Ltd, カタログ
- (6) The Globe Tool d Engineering Company. カタログ