

Fクラス用フィルム・シート絶縁材料の特性

Properties of Insulating Film and Sheet Materials for "Class-F Insulation"

板 山 秀 勝* 富 永 亨*
Hidekatsu Itayama Tôru Tominaga

上 村 広 一* 菊 池 正 雄*
Hiroichi Kamimura Masao Kikuchi

要 旨

汎用のFクラス薄葉絶縁材料の開発を目的として、ポリアミドイミド樹脂を用いた新規な耐熱性フィルム“パイフロン®-6”および芳香族ナイロンペーパーとポリエチレンテレフタレートフィルムを貼(は)り合わせた“SLNYN-202020”(以下NYNと略す)を製品化した。いずれもポリエチレンテレフタレートフィルムに比べて、すぐれた機械特性、電気特性を有し、特に耐熱性を向上させたものである。

これらの絶縁材料を適切な絶縁ワニスと組み合わせることによって電気機器の小形軽量化、機器の信頼性向上が期待される。

1. 緒 言

電気機器はますます小形化あるいは大容量化の方向に移行しているが、それに伴い耐熱性、絶縁特性のすぐれた絶縁材料の開発が強く要望されている。絶縁ワニスについてはポリイミド、シリコン、エポキシおよび耐熱ポリエステルなどがあり、マグネットワイヤについてもポリイミド、ポリエステルイミドなどがある。薄葉絶縁材料として広く用いられているポリエチレンテレフタレートフィルム(以下ポリエステルフィルムと略す)はすぐれた機械特性、電気特性を兼ね備えており、かつ量産効果によって比較的安価に供給されているが耐熱区分はBクラス以下とされている。従来からF~Hクラス用としてはワニスガラスクロス、ガラスクロスマイカなどが用いられていたが、単位厚さあたりの絶縁破壊電圧が比較的低く、また電工作業時ガラスクロスが折れるなど作業性に問題があり、機器の小形軽量化への一つの障害となっていた。近年開発された芳香族ナイロンペーパー(Du-Pont社NOMEX® #410タイプ、以下ノーメックスと略す)は耐熱性の点できわめてすぐれているが、その構造上単位厚さあたりの絶縁破壊電圧はじゅうぶんではない。これらの問題に対処するために種々検討した結果、ポリアミドイミド樹脂を用いて変性した耐熱性フィルムパイフロン®-6(以下PA-6と略す)、ノーメックスとポリエステルの貼り合わせ品NYNを開発し製品化した。これらの製品についてモータレット試験をはじめとする特性試験を行なった結果、適切な絶縁ワニスとの組み合わせによりFクラスにじゅうぶん使用できる見通しを得たので以下特性を中心にその概要を述べる。

2. 材料の構成

図1はFクラス用フィルム・シート絶縁材料の構成を示したものである。

PA-6には種々の厚さのものがあるため記号により表示している。記号の説明は次のとおりである。

たとえば、PA-6 — 0.05

製品厚さ (mm)

パイフロン-6(PA-6)を表わす

NYNは厚さ2ミルのポリエステルフィルムの両面に厚さ2ミルの

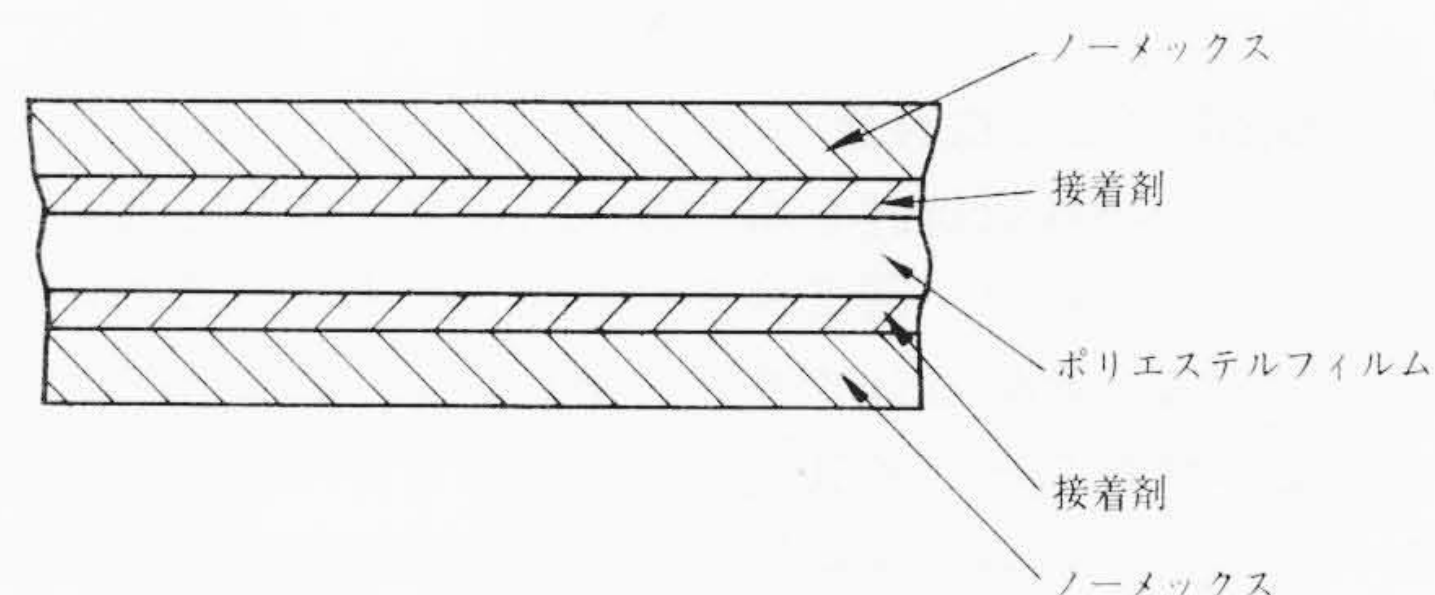


図1 NYNの材料構成

のノーメックスを耐熱性接着剤を用いて貼り合わせたものである。

3. 一般特性

3.1 試験方法

(1) 見掛けの比重

100mm×100mmの大きさに切断した試験片を105℃で1時間加熱したあと重量と体積を測定して求めた。体積は厚さから算出した。

(2) 引張強さ、破断伸び率、5%伸びに対する応力

15mm×100mmの大きさに切断した試験片をASTM-D-638に準じて5mm/minの速度で荷重を掛けて測定した。

(3) 端裂抵抗

20mm×200mmの大きさに切断した試験片をJIS C 2317に準じて200mm/minの速度で荷重を掛けて測定した。

(4) 引裂強度

(a) エレメンドルフ

63mm×76mmの大きさに切断した試験片をエレメンドルフ試験機により測定した。

(b) 直角、円

試料を直角形あるいは円形に打ち抜きASTM-D-638に準じて5mm/minの速度で荷重を掛けて測定した。

(5) 絶縁破壊電圧

200mm×200mm以上の大きさに切断した試験片を直径25mmの黄銅製平板電極にはさみ50Hz交流電圧を500V/sの速度で上昇させJIS C 2317に準じて測定した。

その他の特性試験方法についてはそのつど述べる。

3.2 一般特性

表1に一般特性の試験結果の一例を示した。表には比較のためポリエステルフィルムおよびノーメックスの特性をも示した。こ

* 日立化成工業株式会社山崎工場

表 1 一般特性 (測定値の一例)

製品記号		PA-6	PA-6	PA-6	PA-6	NYN	ポリエステルフィルム 1.5ミル	ポリエステルフィルム 2ミル	ポリエステルフィルム 7.5ミル	ノーメックス 2ミル	ノーメックス 7ミル
項目		-0.06	-0.08	-0.15	-0.22						
厚さ	mm	0.062	0.082	0.150	0.219	0.194	0.038	0.050	0.188	0.050	0.189
引張強さ	kg/15幅	15	19	39	50	23	10	19	47	7	30
破断伸び率	%	119	109	130	133	18	80	120	148	10	30
5%伸びに対する応力	kg/15幅	9	10	20	39	18	6	10	26	6	26
端裂抵抗	kg/20幅	34	46	79	100	50	30	40	100	6	40
引裂強度	エレメントルフ	g	58	74	179	420	31	60	170	50	500
	直 角	kg	2	2	5	3	2	2	8	0.5	0.5
	円	kg	9	7	19	12	5	7	26	2	17
絶縁破壊電圧	kV	12	13	20	26	10	8	9	26	0.8	6

れから明らかなようにPA-6, NYNはすぐれた機械特性および電気特性を有している。PA-6, NYNはF種材料として絶縁破壊電圧がすぐれているのが特長である。

4. 電気特性

4.1 体積抵抗率の温度依存性

体積抵抗率は超絶縁抵抗計を用い直流 500Vを印加し 1 分間充電後の値から求められた。図 2 はその体積抵抗率と温度の関係を示したものである。PA-6 はポリエステルフィルムに比べて同一温度における体積抵抗率が約10倍大きい値をもっている。NYN はポリエステルフィルムの高温における体積抵抗率の低下をじゅうぶんにカバーしノーメックスの高温特性とほぼ同等のすぐれた値をもっている。

4.2 誘電率, 誘電正接の温度依存性

誘電率, 誘電正接の測定にはシェーリングブリッジを用い, 50 Hz交流電圧 500Vを印加して測定した。その温度特性の試験結果は図 3, 図 4 に示すとおりである。PA-6 の誘電率および誘電正接の温度変化はポリエステルフィルムとほとんど同じである。

NYNの誘電率,誘電正接の温度特性はノーメックス単独に比べて, 誘電分散および誘電正接の立上り温度がかなり低くなっている。

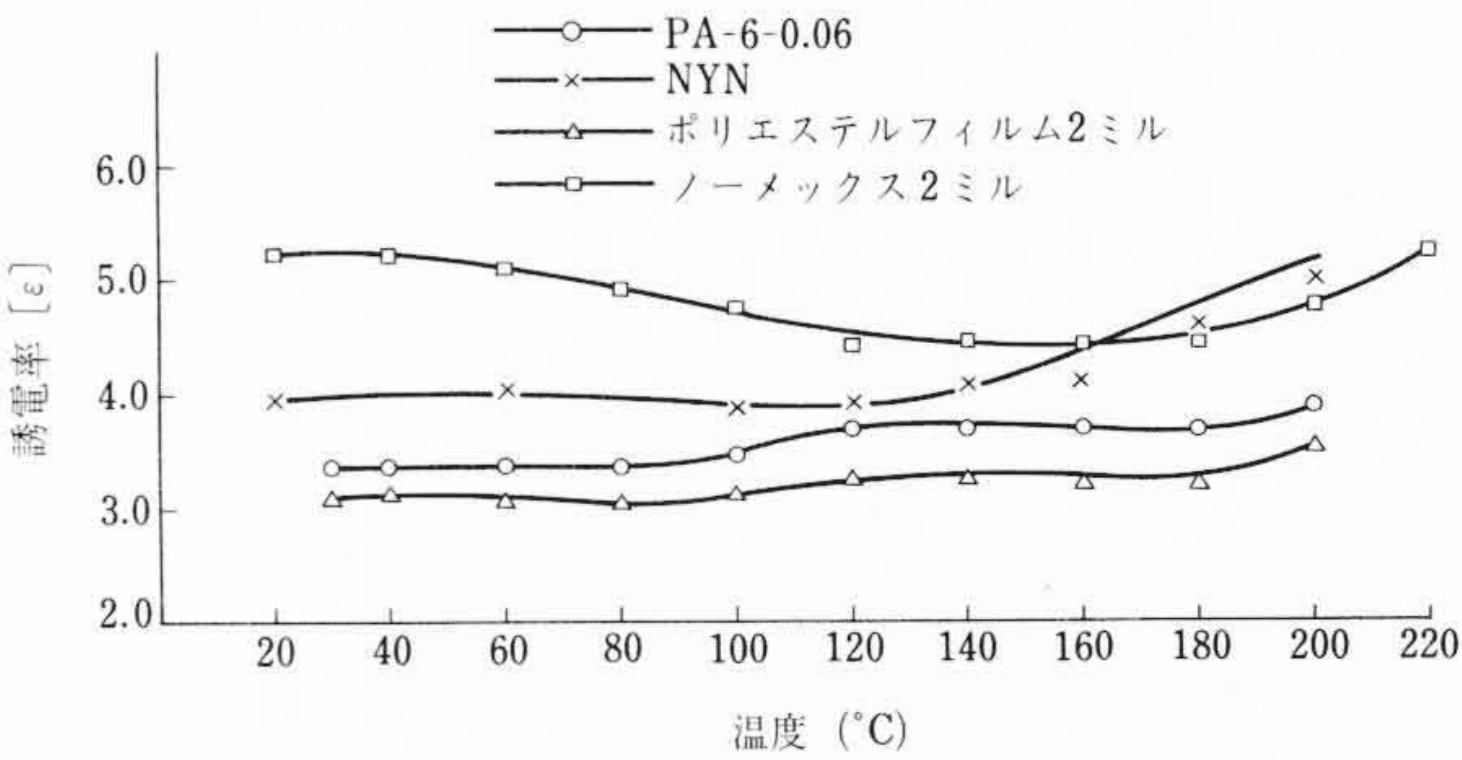


図 3 誘電率の温度特性

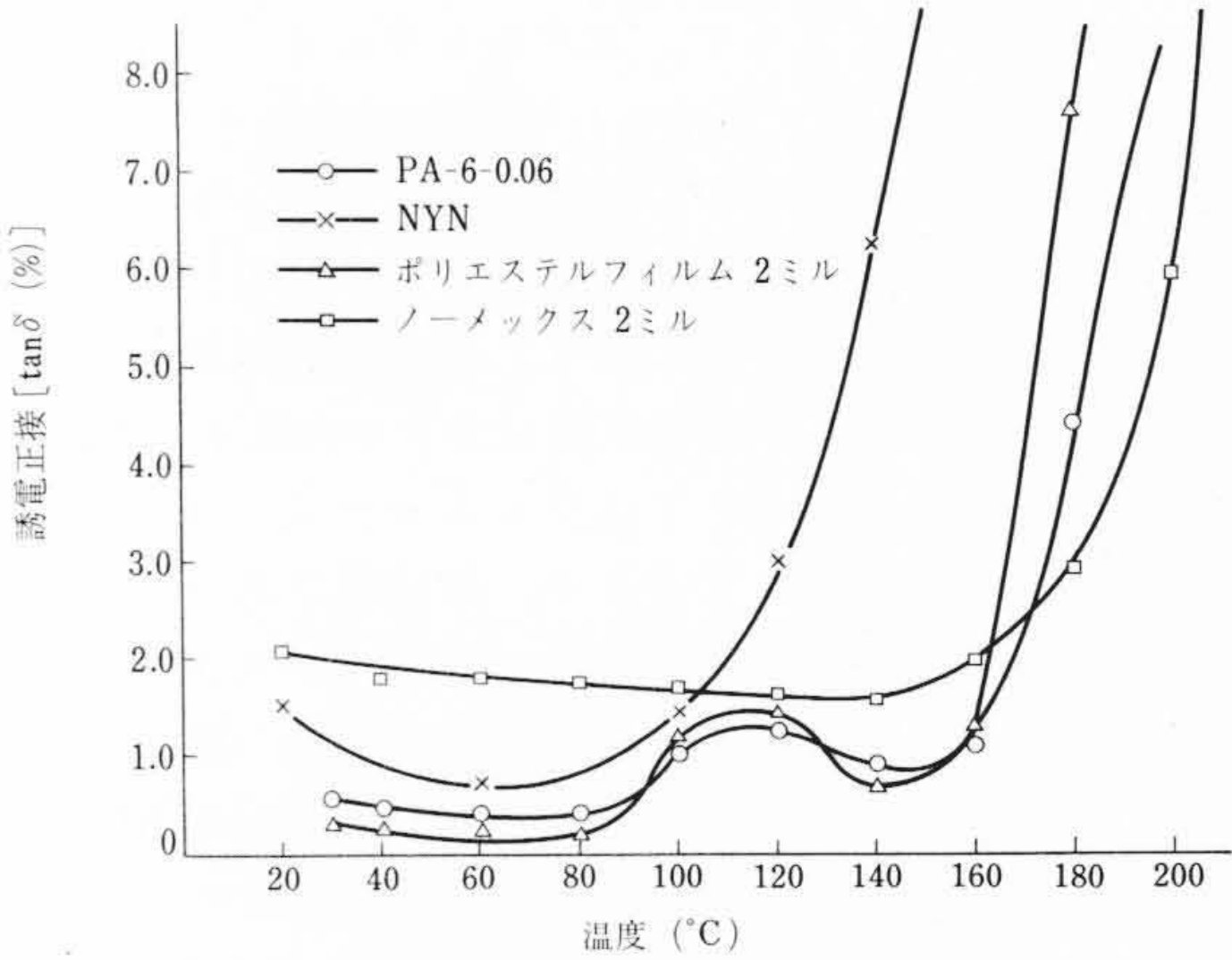


図 4 誘電正接の温度特性

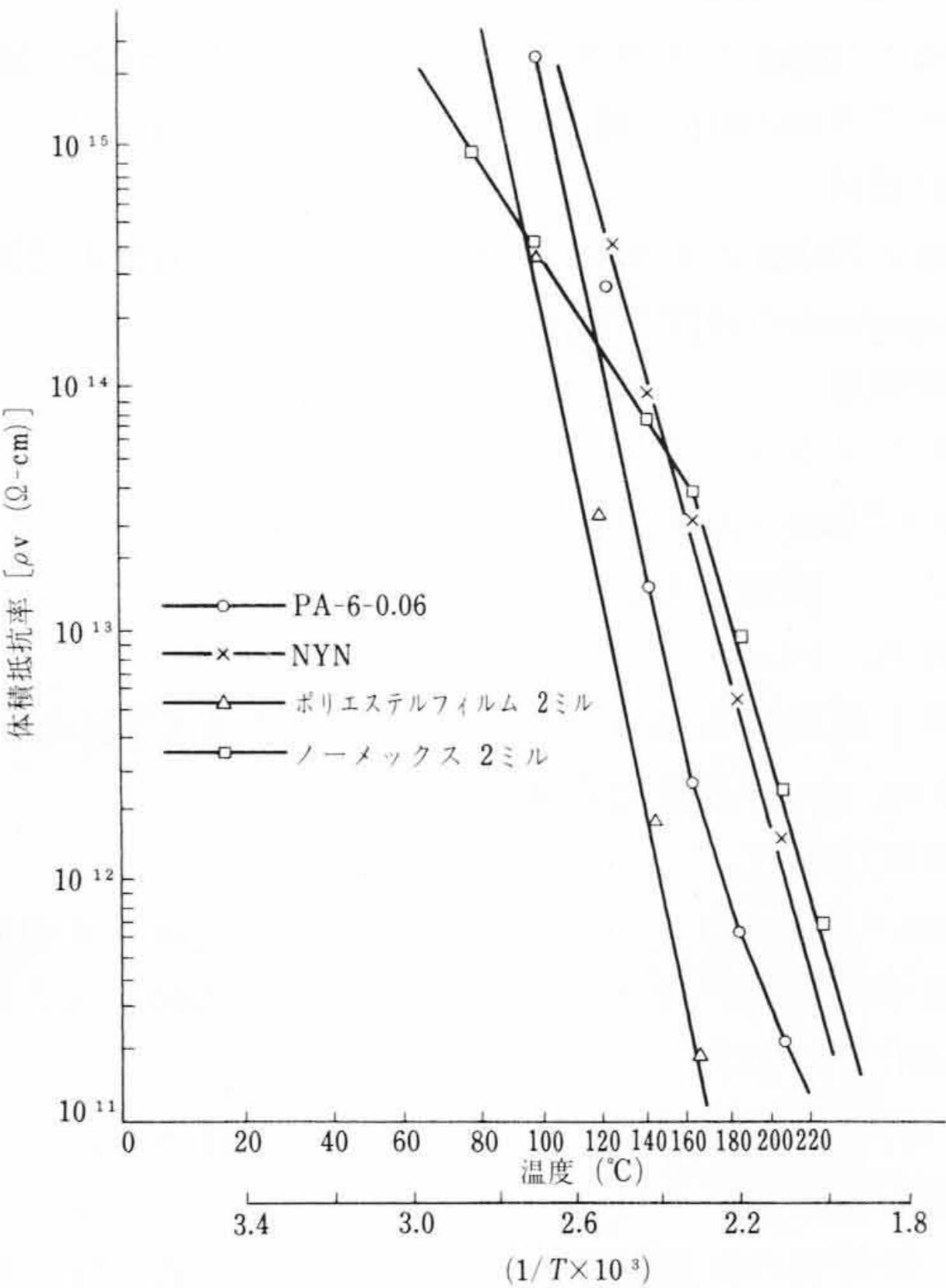


図 2 体積抵抗率の温度特性

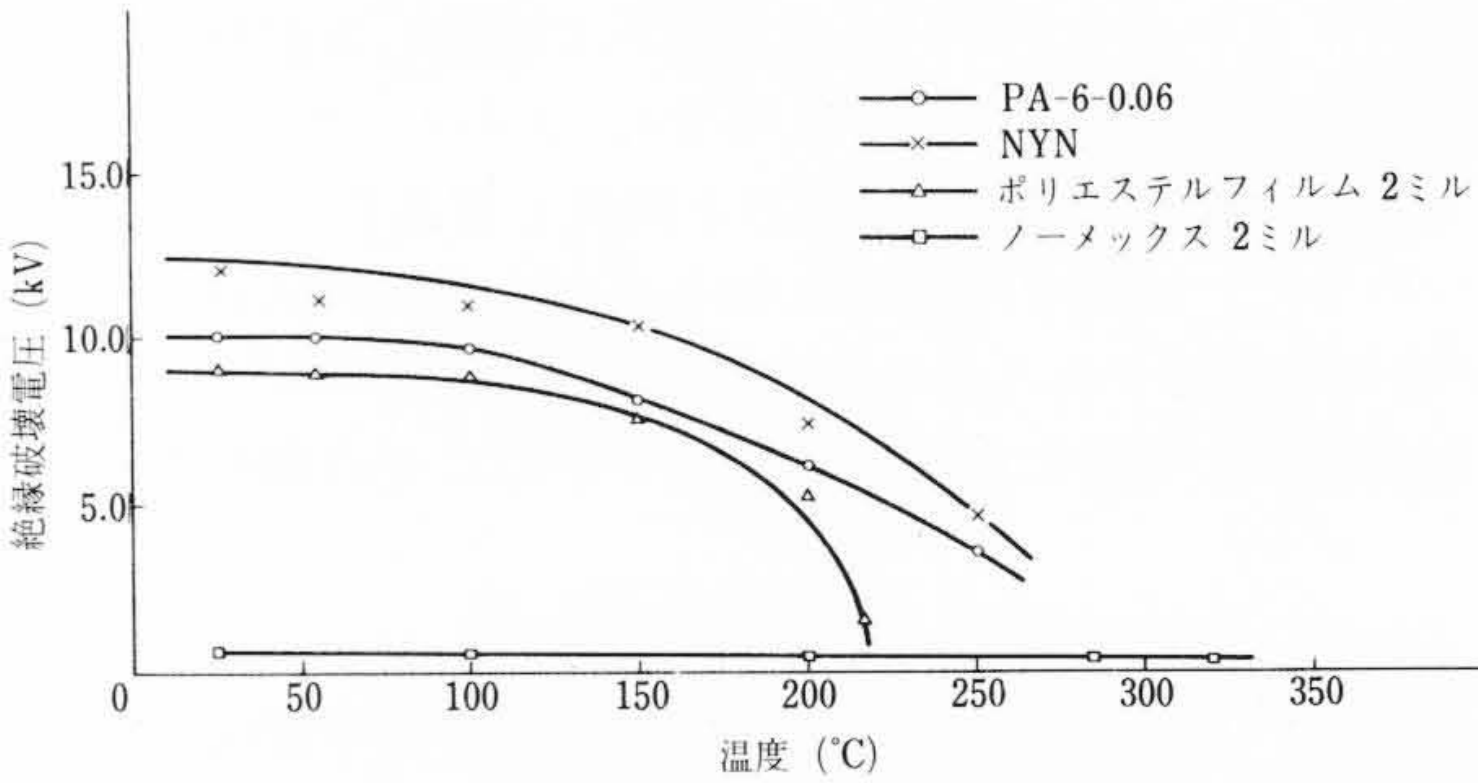


図 5 絶縁破壊電圧の温度特性

4.3 絶縁破壊電圧の温度依存性

図 5 は各試料の絶縁破壊電圧と温度との関係を示したものである。PA-6 の絶縁破壊電圧はポリエステルフィルムでは測定不能となる 220°C以上の高温でもすぐれた値を保持している。NYN は単位厚さあたりの絶縁破壊電圧は小さいが, これはノーメックス単独の絶縁破壊電圧が低いためである。実用に際しては, じゅうぶん乾燥処理しワニスをよく含浸させることが必要である。

5. 耐 熱 性

5.1 耐クラック性から見た耐熱性

約50mm×150mmの大きさに切断した試験片を180°C、200°Cおよび220°Cの乾燥器に入れ所定時間加熱したあと3φのマンドレルに折り曲げ、クラックの発生する時間を寿命として判定した。図6はその寿命と加熱時間との関係を示したものである。2,000時間に相当する耐熱温度を比較するとほぼ同じ厚みのポリエステルフィルムに比べ、PA-6は約25~30°C以上も向上していることがわかる。

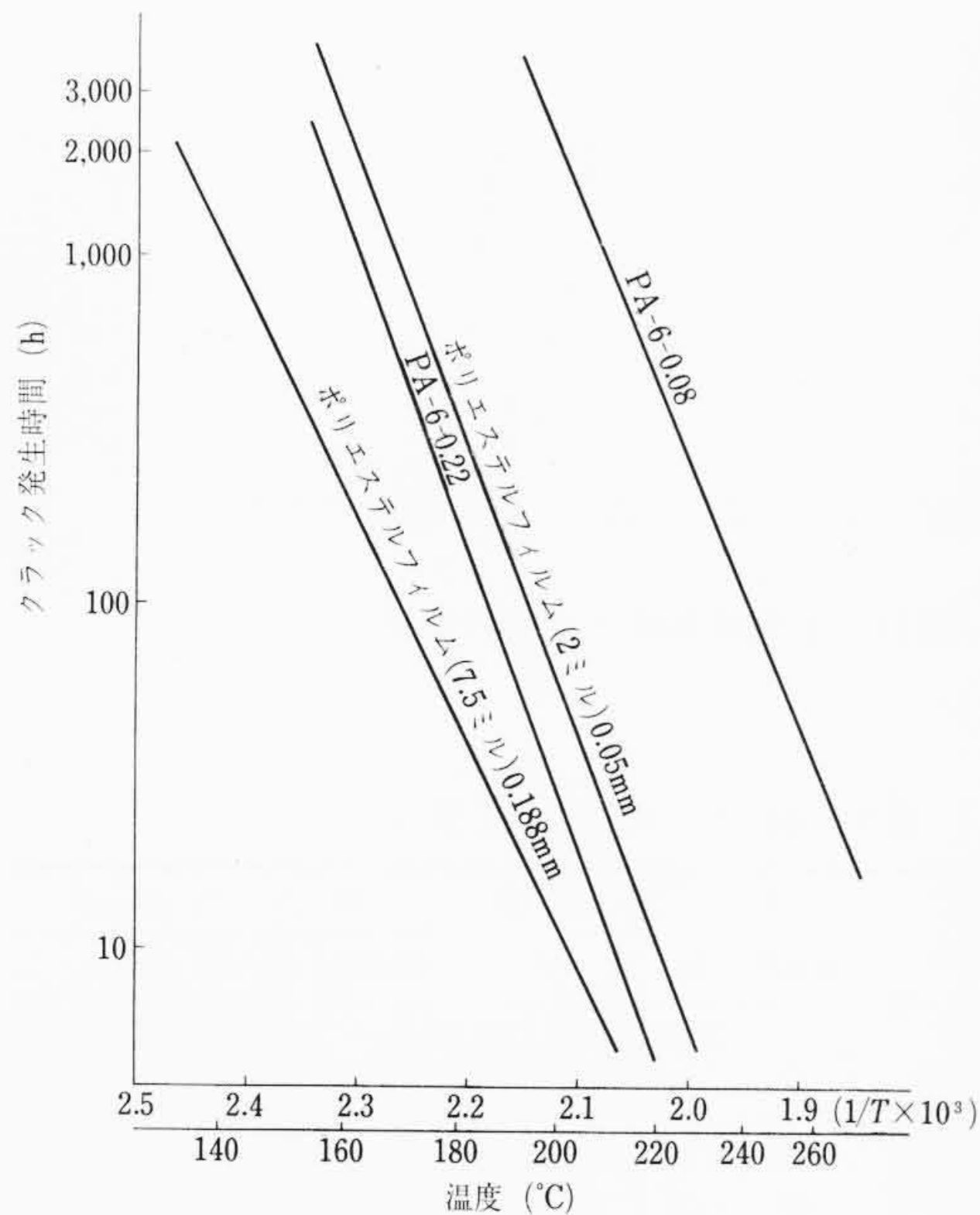


図6 クラック発生時間と温度との関係

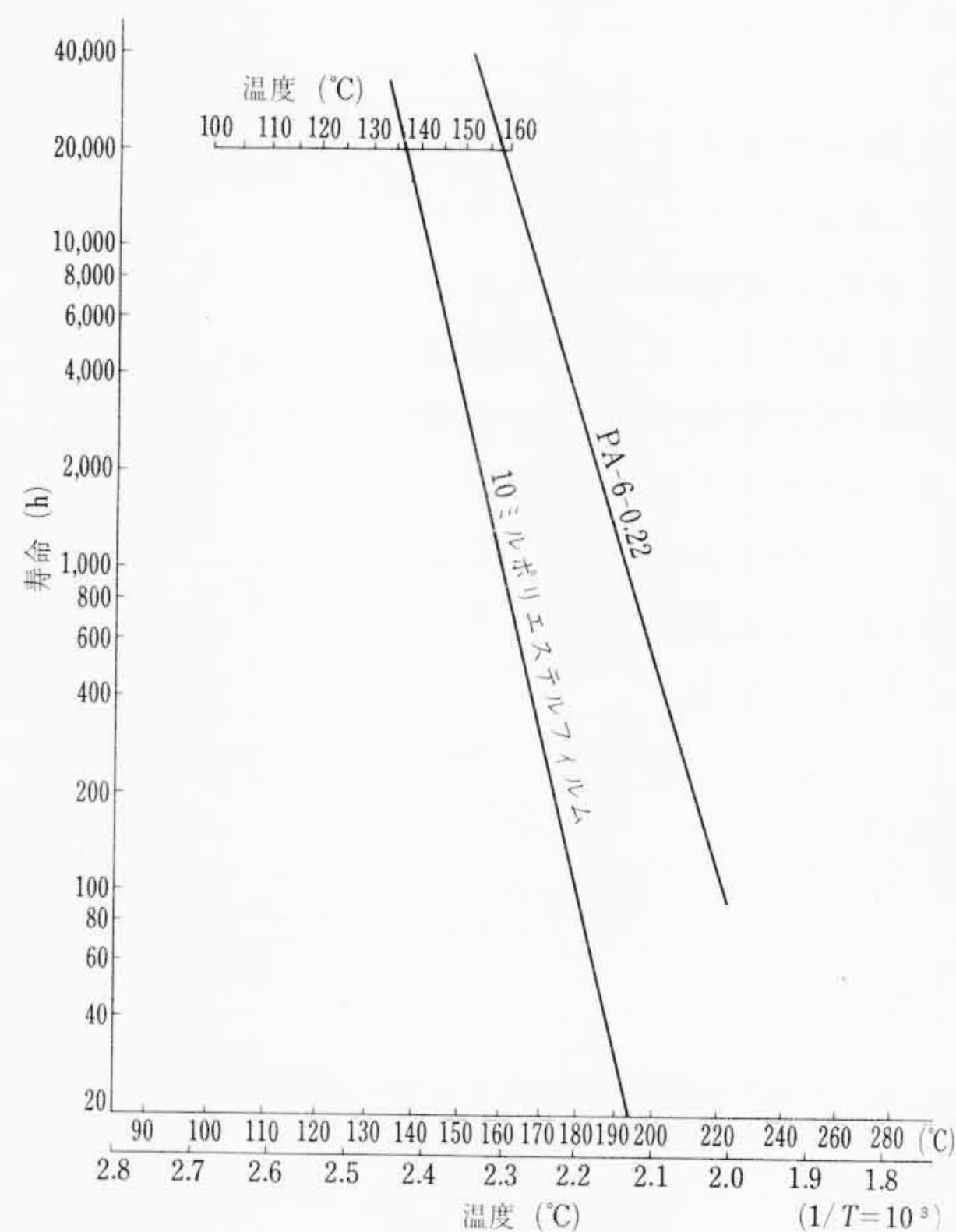


図9 温度と寿命との関係

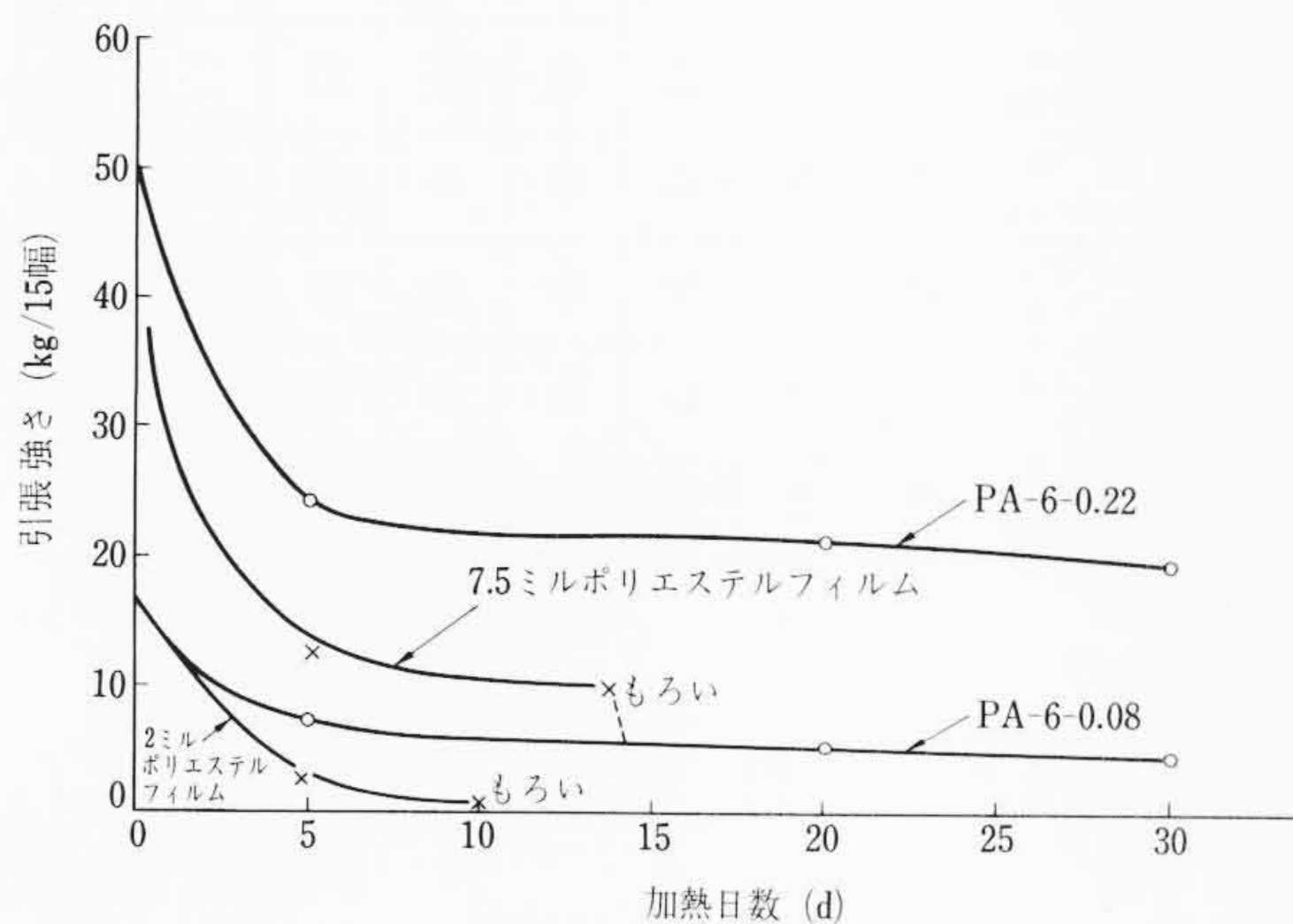


図7 引張強さと加熱日数の関係

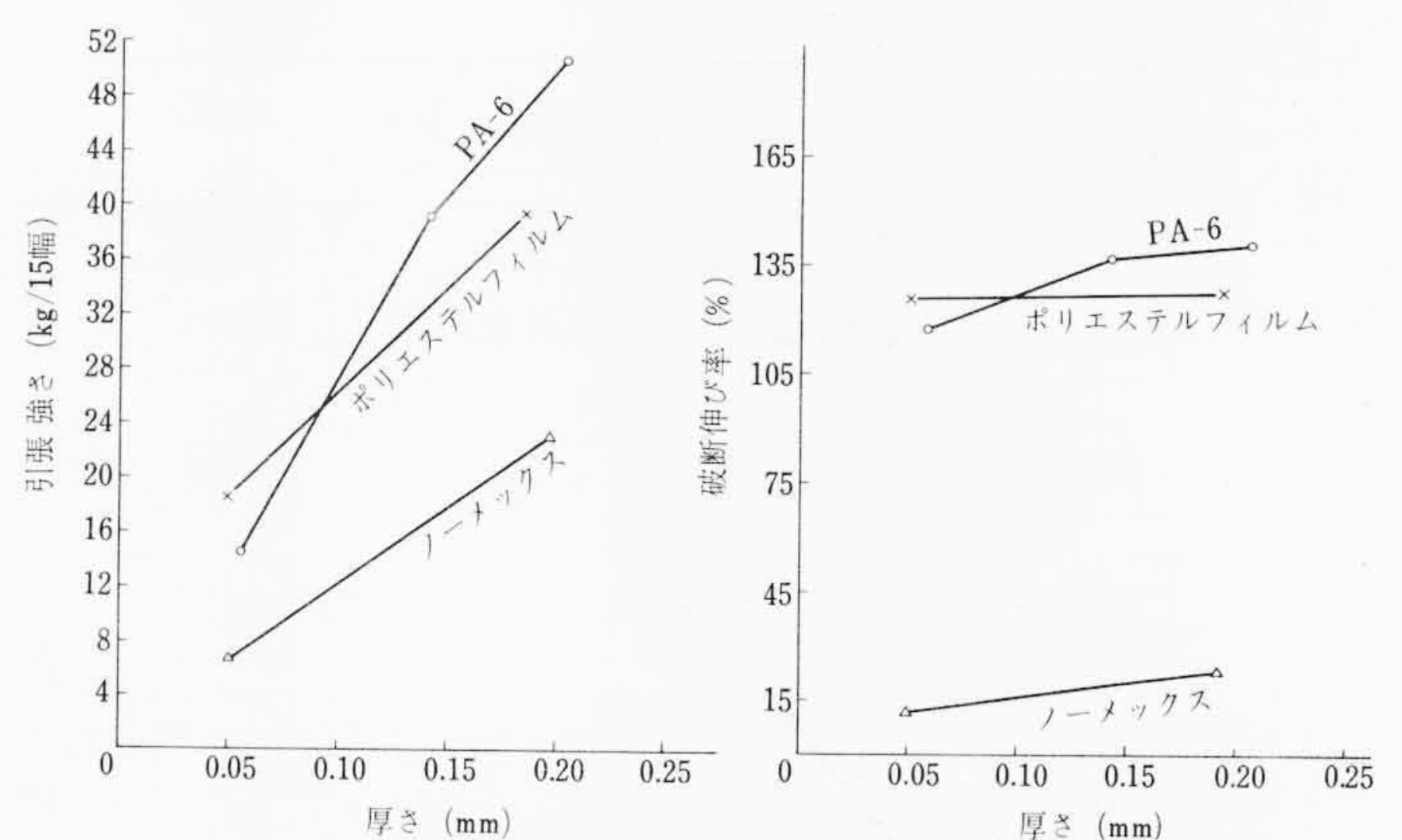


図10 引張強さおよび、破断伸び率と厚さの関係

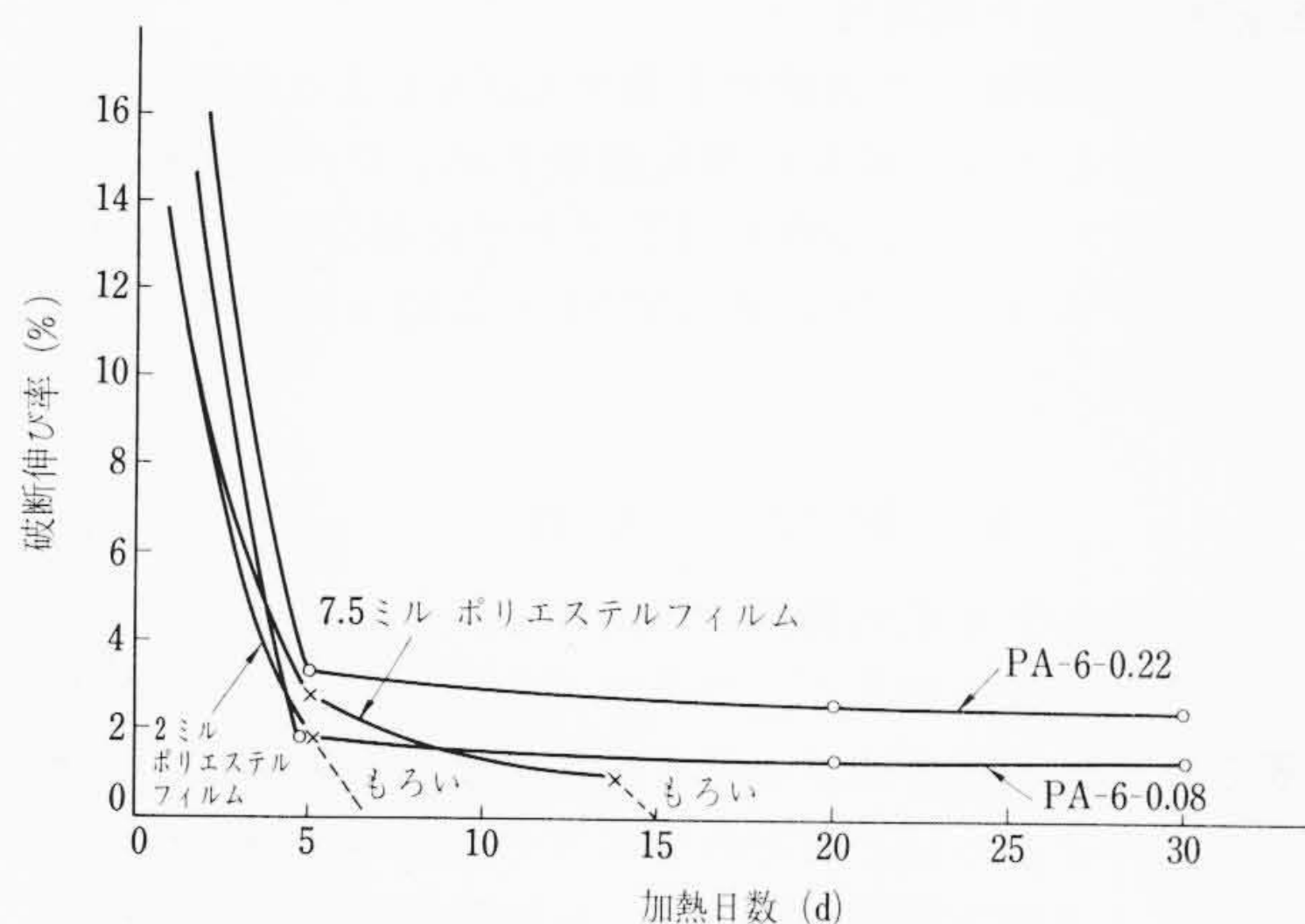


図8 破断伸び率と加熱日数の関係

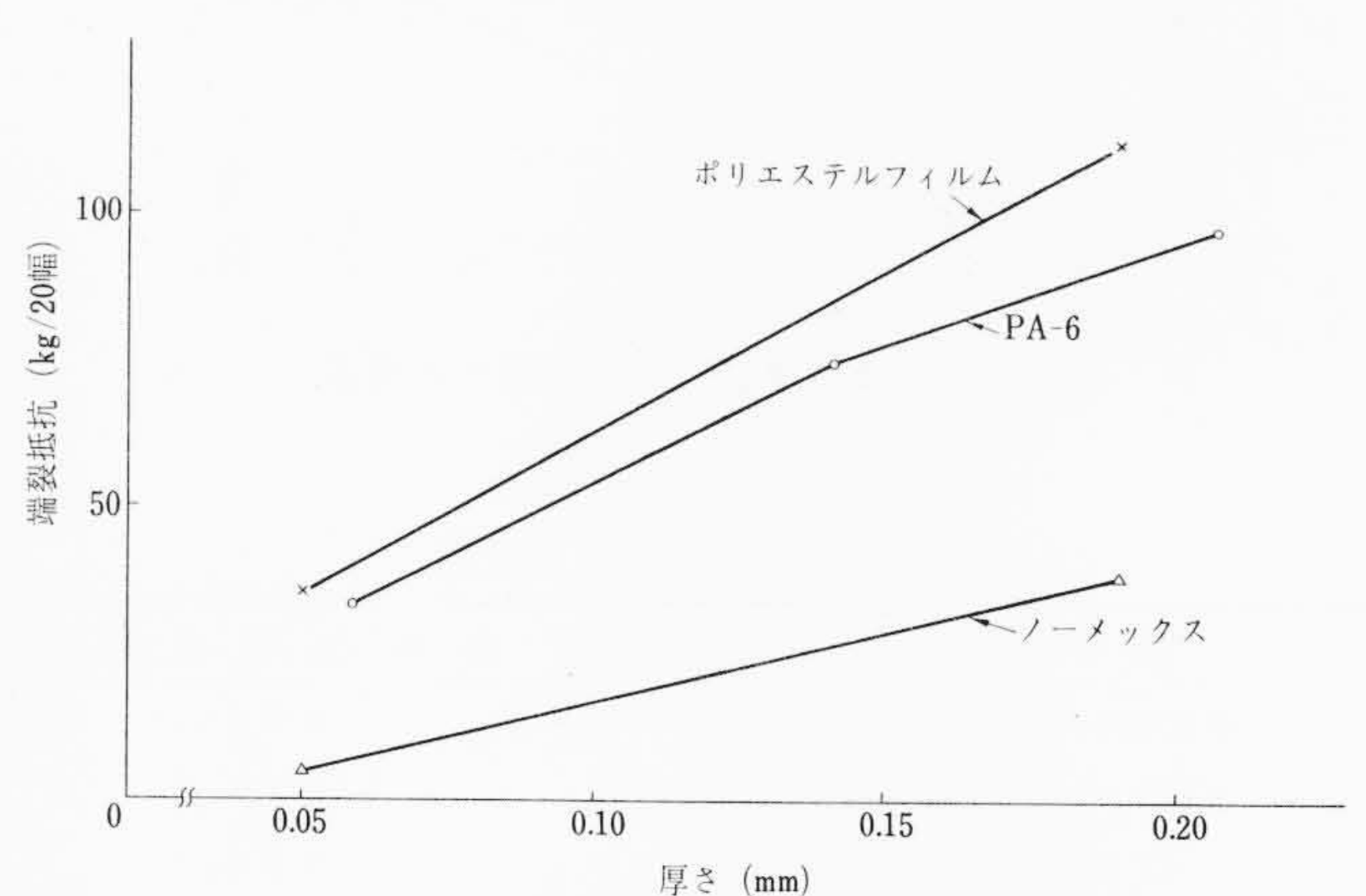


図11 端裂抵抗と厚さの関係

5.2 引張強さ、破断伸び率からみた耐熱性

5.1と同じ試験片を180°C、200°C、および220°Cの乾燥器に入れ所定時間、加熱したあと引張試験を行ない、引張強さおよび破断伸び率と加熱日数との関係を求めた。200°Cで加熱した場合の結果は図7、図8に示すとおりである。これによると200°Cでは厚さ2ミルおよび7.5ミルのポリエステルフィルムはそれぞれ5日および14日で完全に脆化(ぜいか)し、以後の測定が不可能となるのに対して、厚さ2ミルのポリエステルフィルムにほぼ対応するPA-6-0.08 および厚さ7.5ミルのポリエステルフィルムに対応するPA-6-0.22は10日間加熱後特性がほぼ一定となり30日

間加熱後もほとんど低下せず、耐熱性が非常にすぐれていることがわかる。図9に初期の引張強さの値が50%に低下したときを寿命とした寿命直線を示した。20,000時間に延長して比較するとポリエステルフィルムよりも20~30°C耐熱性が向上していることがわかる。図10、図11は常態における引張強さ、破断伸び率および端裂抵抗と厚さとの関係を示したもので、同一厚さではノーメックスに比べ約3倍以上、またポリエステルフィルムと同等以上のすぐれた機械的強度を有していることがわかる。

5.3 絶縁破壊電圧からみた耐熱性

規定の試験片を200°Cの乾燥器に入れ、所定時間、加熱したあと絶縁破壊電圧を測定し、加熱日数との関係を図12のようになる。引張試験のときと同様にポリエステルフィルムは途中で脆化し、測定が不可能となったが、PA-6は30日間を経過しても初期値を維持し、さらにノーメックスの同じ厚さのものと比較すると4～5倍すぐれた値を有している。図13は絶縁破壊電圧の初期値と製品厚さとの関係を示したものである。絶縁破壊電圧11kVを確保するためにはノーメックスが12ミルを必要とするのに対し、NYNは8ミルでよく、PA-6およびポリエステルフィルムは2ミル程度でじゅうぶんであることがわかる。

5.4 熱軟化性からみた耐熱性

試験法は長さ約100mm、直径1φの裸銅線を2本とり、これに約50mm×50mmの大きさの試験片をはさんで直交させて平板上におき、重ね部分の上にHクラス以上に耐える耐熱絶縁フィルムを置いて銅線と絶縁し、この上に200gの荷重を加える。2本の裸銅線間には50Hzの交流電圧100Vを加え、周囲の温度を4°C/minの速度で上昇させ、試験片が熱軟化して短絡したときの温度を測定する。表2は12個の測定値の平均値を示したものである。これによると、PA-6の熱軟化温度は製品厚さにほとんど関係なくポリエステルフィルムに比べ約20～30°C高いことがわかる。

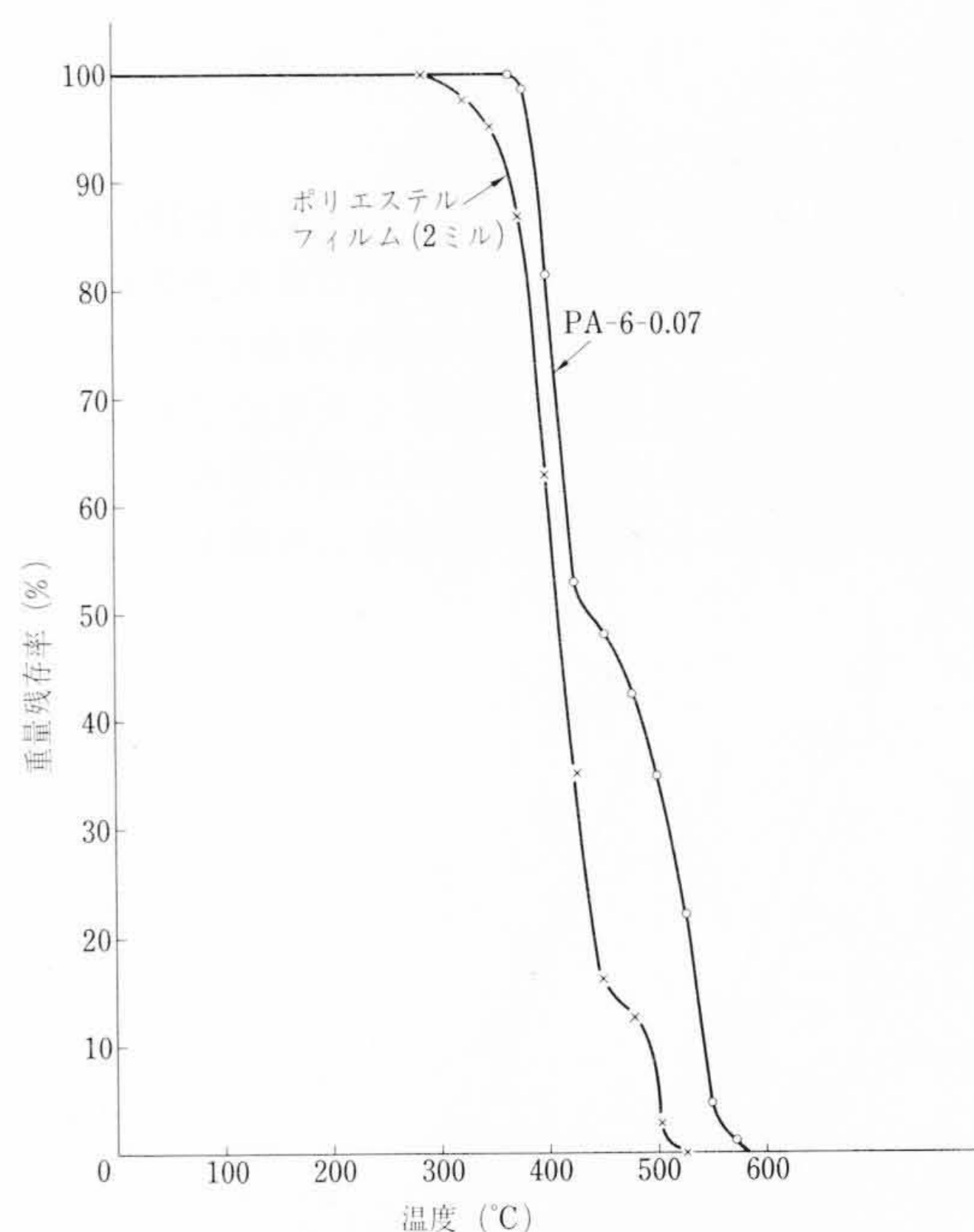


図14 重量残存率と温度の関係

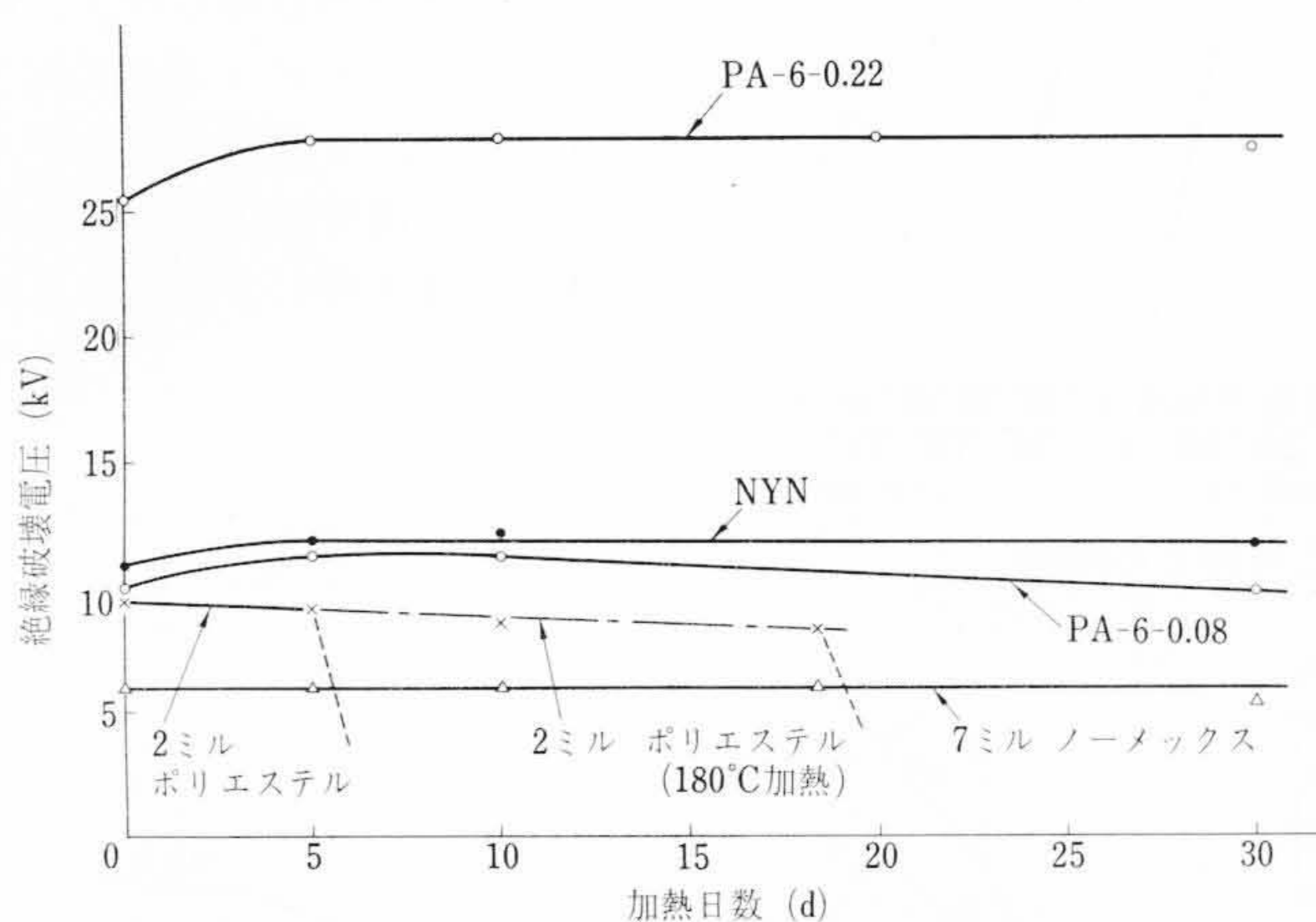


図12 絶縁破壊電圧と加熱日数の関係

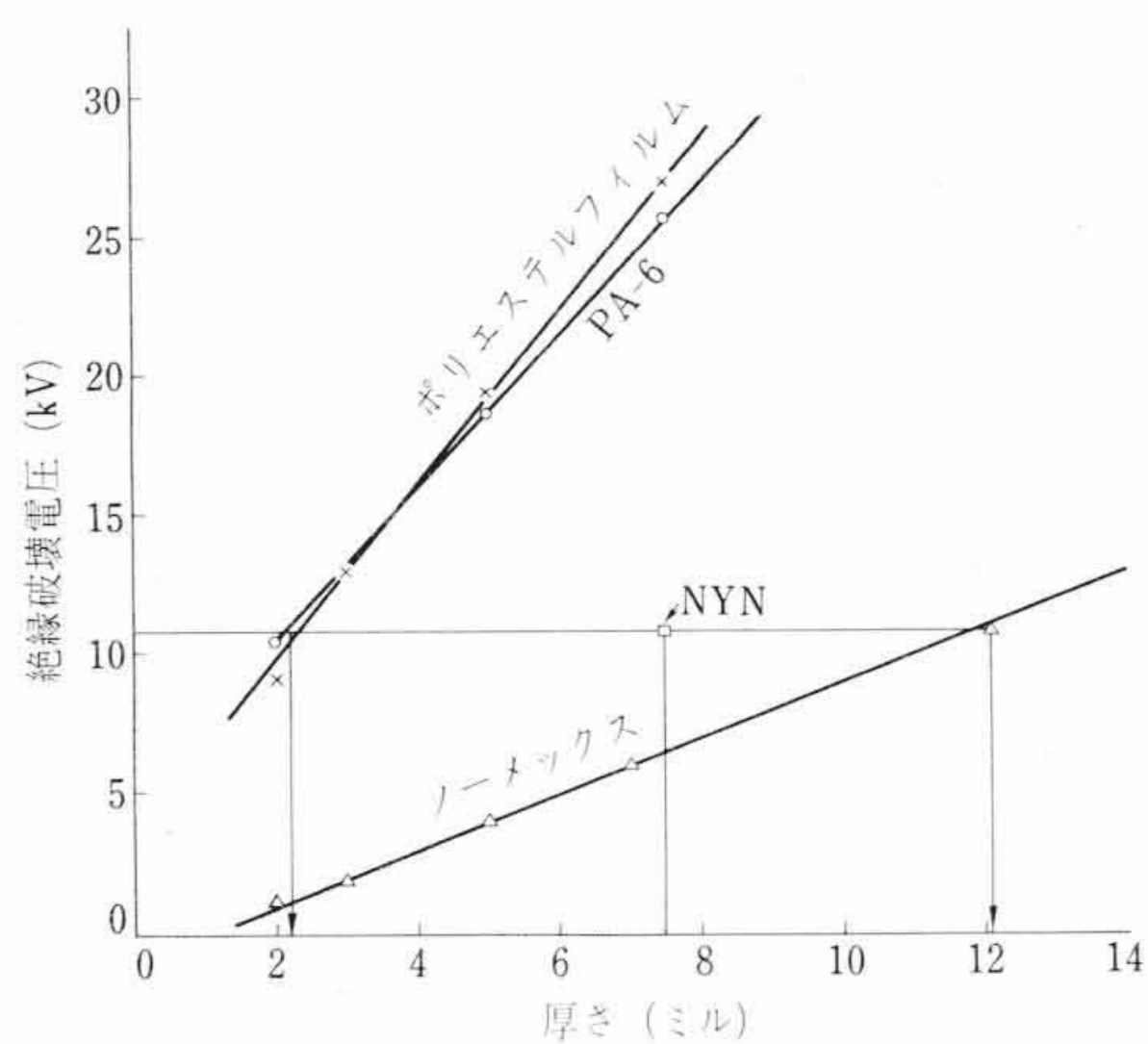


図13 絶縁破壊電圧と製品厚さの関係

表2 熱軟化温度

試料	熱軟化温度 (°C)
ポリエステルフィルム (2ミル)	276
ポリエステルフィルム (5ミル)	266
PA-6-0.08	306
PA-6-0.15	303

表3 耐ワニス試験結果

浸せき条件 処理の有無	ワニスの 内容	常温 - 24 h				80 °C - 24 h			
		無処理				無処理			
		—	180°C	200°C	220°C	—	180°C	200°C	220°C
エピコート-828	エピ、ビス系エポキシ	○	○	○	○	○	○	○	○
ユノックス-221	脂環式エポキシ	○	○	○	○	○	○	○	○
ユノックス-206	脂環式エポキシ	○	○	△	△	○	△	△	×
MHAC-P	液状メチルハイミック酸	○	○	○	○	○	○	○	○
PS-202	不飽和ポリエステル	○	○	○	○	○	○	○	○
wI-294	ポリエステルワニス	○	○	○	○	○	○	○	○
wF-285	エポキシエステルワニス	○	○	○	○	○	○	○	○
HS-212	シリコーン樹脂	○	○	○	○	○	○	○	○

供試料 PA-6-0.22

○……全く異常なし
○……良好
△……若干膨潤
×……膨潤

5.5 加熱減量から見た耐熱性

フィルムを微細に切断した試験片を熱てんびんによって5°C/minの速度で上昇させたときの減量の測定結果を示したのが図14である。ポリエステルフィルムは300°C以下ですでに熱分解を開始し、520°Cで完了するのに対し、PA-6は370°Cから徐々に分解が始まり、580°Cで完了している。

6. 耐ワニス性

モータをはじめとする電気機器では絶縁シート材料はワニスと組み合わせて用いることが多く、ワニスとの相性がしばしば問題となる。表3はPA-6と各種ワニスとの相性試験結果を示したものである。これによるとほとんどのワニスとの組み合わせが可能であるが脂環式エポキシ樹脂の場合については使用する前に相性をチェックすることが望ましい。

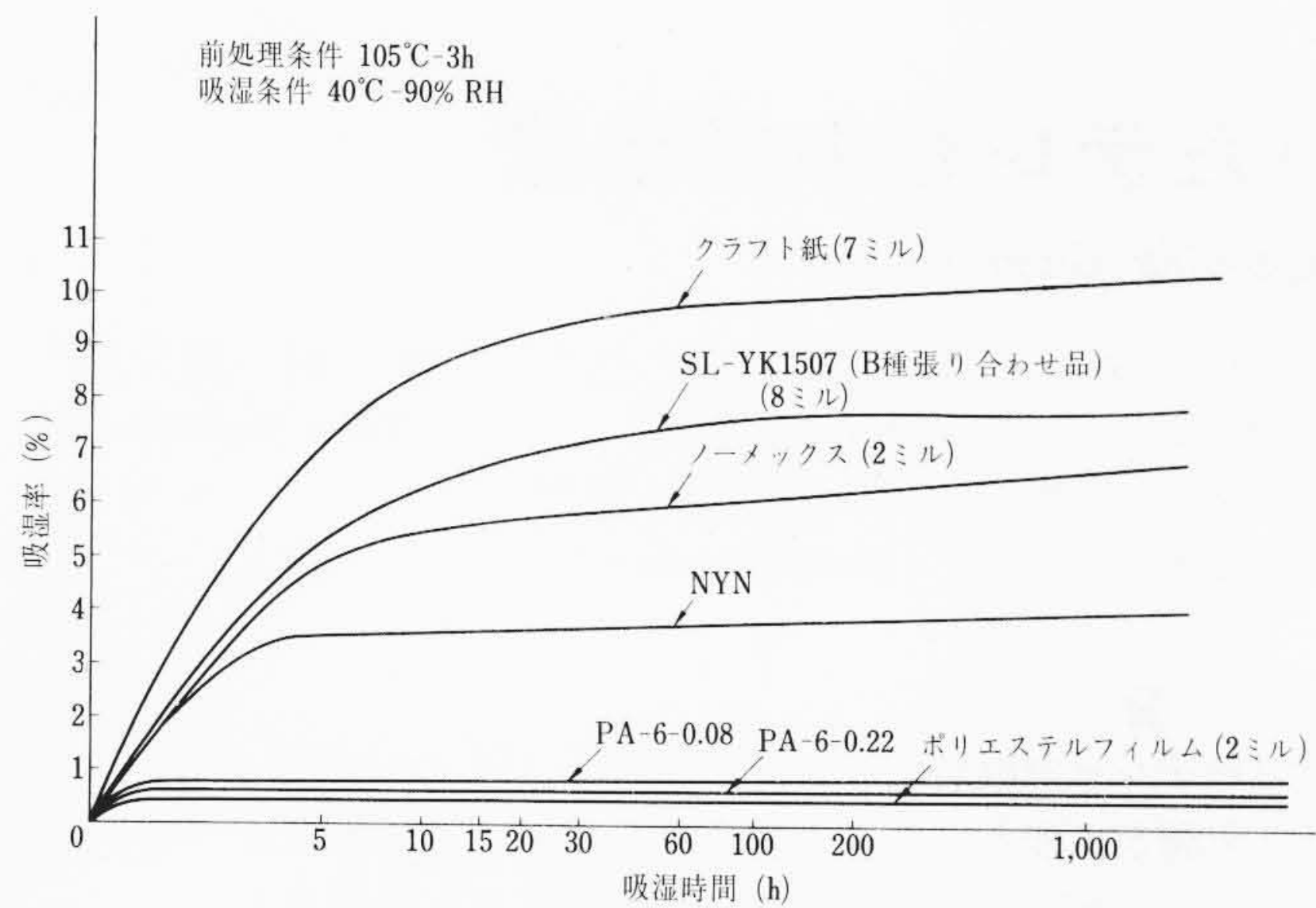


図15 吸湿時間と吸湿率の関係

7. 吸 湿 性

図15は40°C、90%相対湿度のふんい気中における放置時間と吸湿率との関係を示したものである。PA-6の吸湿率は短時間で飽和し、値はわずか1%以下であり、ノーメックスに比べてきわめて少ないことがわかる。NYNは3～4%で飽和しノーメックスの約半分の値である。

8. モータレット試験

PA-6、NYN、ポリエステルフィルムをスロットライナ、層間絶縁としてモータレット試験機に組み込み、IEEE No.1cに規定されている試験方法に準じて試験した。絶縁仕様、試験条件および劣化サイクルのスケジュールはそれぞれ表4、表5、図16に示すとおりである。試験は現在未完了のものもあるが、F種限界線

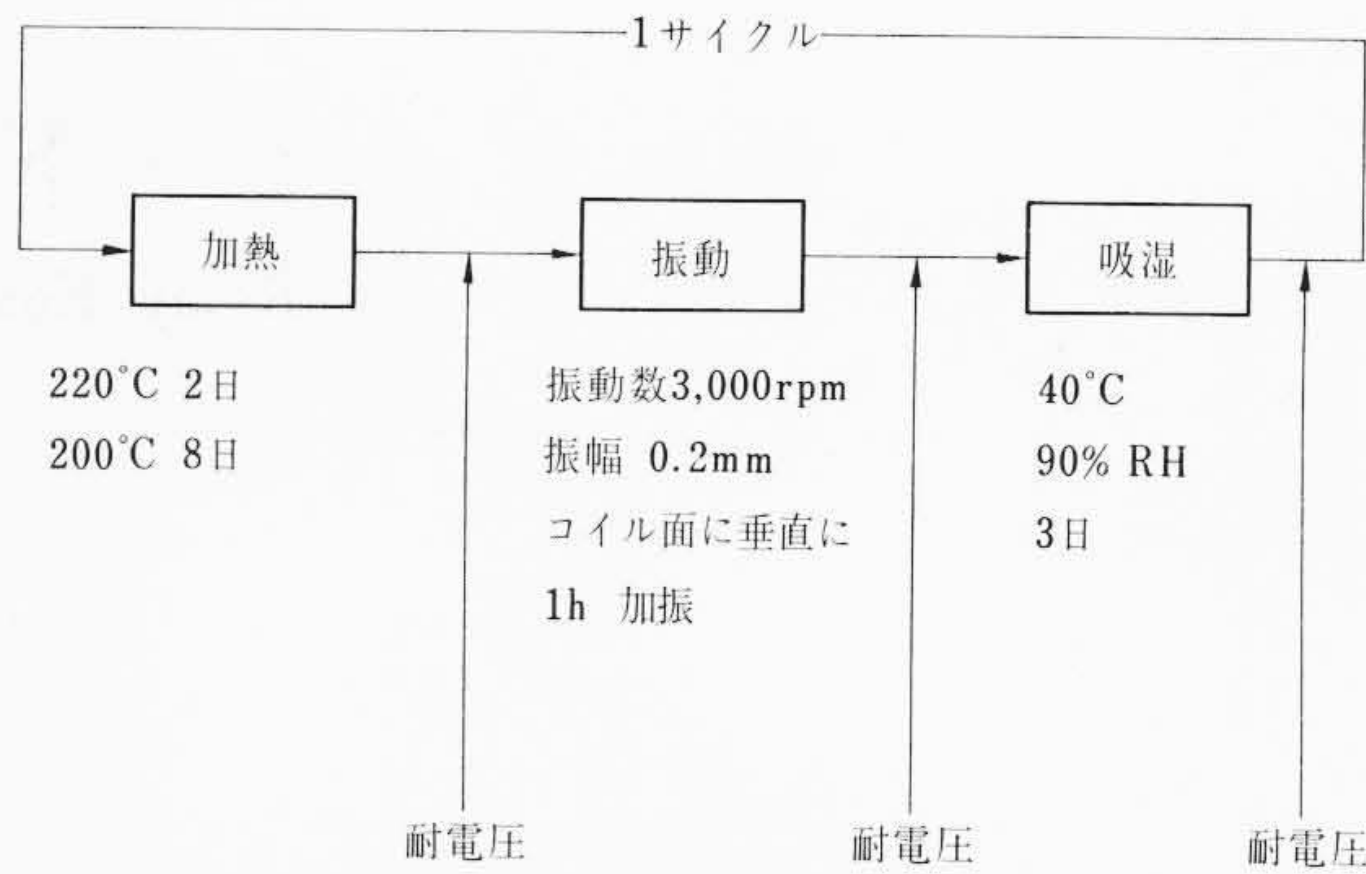


図16 劣化サイクルのスケジュール

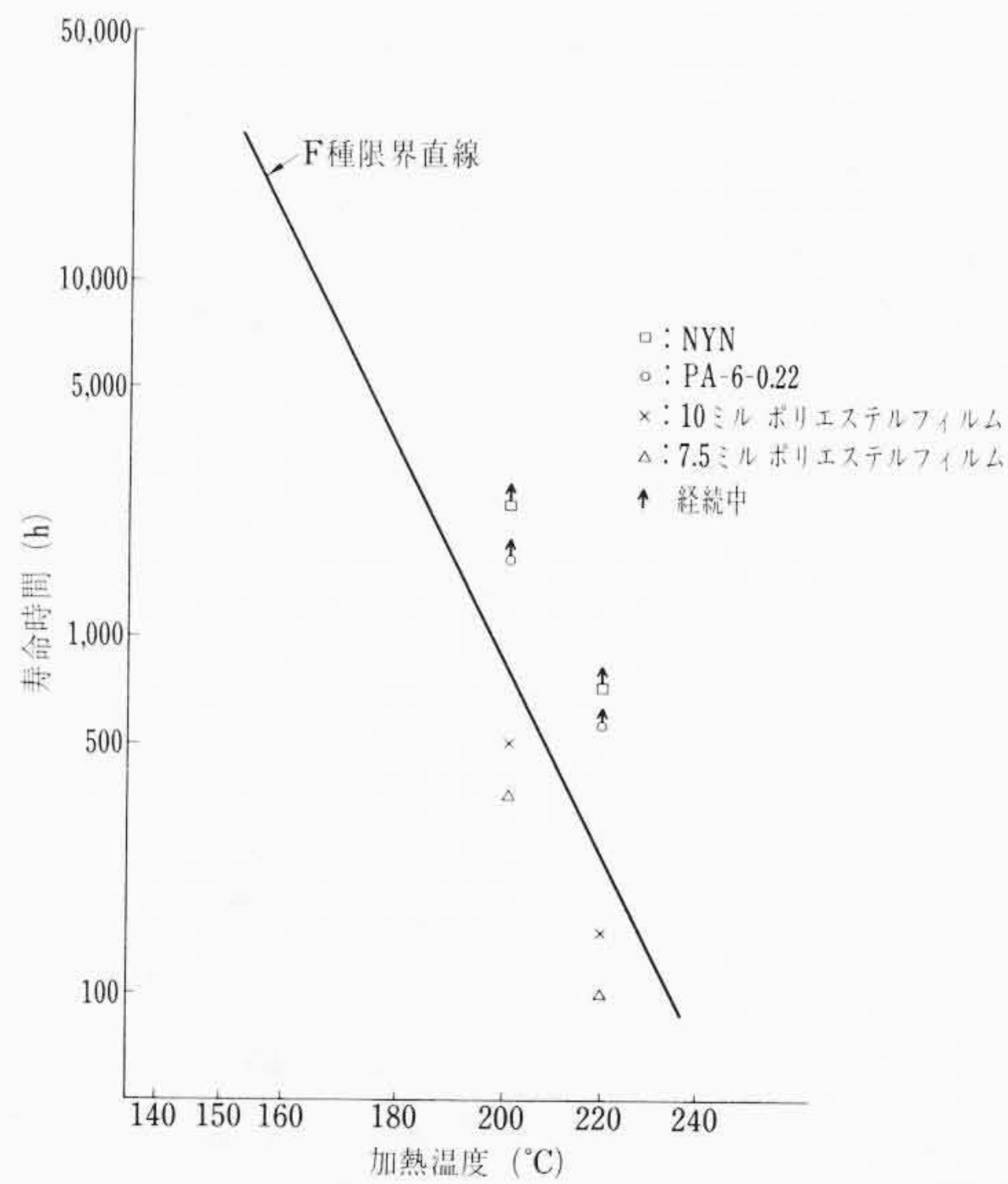


図17 モータレット寿命特性

表4 モータレット絶縁仕様

試料	使用ワニス	使用電線	絶縁構成			ワニス	
			スロットライナ	層間絶縁	くさび	処 理 条 件	処 理 条 件
試料 1	WP-2711	AIW 0.6φ ^{mm}	PA-6-0.22	PA-6-0.22	LE-61N 1.2mm t	1回目 120°C 5分	2回目 120°C 5分 150°C 30分
試料 2	PS-202	PEW 0.6φ	10ミル ポリエステルフィルム	SL-YB 2010	LE-61N 1.2mm t	1回目 120°C 60分	2回目 150°C 90分
試料 3	WP-264K	PEW 0.6φ	7.5ミル ポリエステルフィルム	7.5ミル ポリエステルフィルム	LE-61N 1.2mm t	1回目 120°C 60分	2回目 150°C 90分
試料 4	WP-2711	PEW 0.6φ	NYN	NYN	LE-61N 1.2mm t	1回目 120°C 5分	2回目 120°C 5分 120°C 30分

注：WP-2711、PS-202、WP-264K；不飽和ポリエステルワニス LE-61N；エポキシガラス積層板を併記して各試験温度での寿命をプロットした。層間およびアース間の耐圧チェックから求めた結果は図17に示すとおりである。厚さ 7.5ミルのもので比較するとポリエステルフィルムに比べ、PA-6-0.22およびNYNの耐熱性は約30°C以上すぐれておりFクラス絶縁材料としてじゅうぶん実用性のあることがわかる。

表5 試験電圧と時間

試験部分	試験電圧 (V)	試験時間 (min)
線 間	1 2 0	1 5
層 間	6 0 0	1 5
ア ー ス 間	6 0 0	1 5

9. 結 言

Fクラス用フィルム、シート絶縁材料として新たに開発したポリアミドイミド樹脂変性の耐熱性フィルムPA-6およびポリエステルフィルムの両面にノーメックスを貼り合わせたSL-NYNはすぐれた耐熱性、機械特性、および電気特性などを有し、Fクラスとしてじゅうぶん実用性のあることがわかった。PA-6およびSL-NYNはFクラス用絶縁材料として電動機、発電機、変圧器、電子機器などに応用され、機器の性能向上が期待されている。終わりに臨み、本研究にご協力いただいた日立製作所関係各位に厚く感謝する次第である。