

F種銅線用エナメルワニス“HI-441”の特性

Properties of Enameled Wire Coated with Class F Varnish HI-441

Some time ago, Hitachi Chemical Co., Ltd. marketed the HI-400 polyamide imide thermal resistant copper wire varnish. Polyamide imide wire coated with this varnish is in wide use in such electrical equipment as electric tools, electric motors and the like whose insulating capability must be Class F or higher. However, despite the superior properties and characteristics of this polyamide imide wire, its applications are limited due to its high price.

After long research to find an economical heat resistant wire varnish, Hitachi Chemical Industry, Ltd. recently developed a special degenerated imide system varnish and has marketed it under the trade name HI-441. Copper wire coated with this special varnish has proved to have superior resistance to heat, thermal shock and thermoplastic flow, along with superior workability. It is therefore highly suitable for use in Class F–H insulated electric appliances and apparatuses.

小山剛司* Takeshi Koyama
宮川徹郎* Tetsurô Miyakawa
岡田泰典* Yasunori Okada

1 緒 言

近年、標準モータの絶縁構成がE種からB種あるいはF種へ格上げされようとしている。わが国では中容量モータについては、すでに37kW級のF種モータが市販されており、小容量モータについてもいっそうの小形化、信頼性向上の見地から、2.2kW以下のものはB種、2.2～37kWのものはF種化の方向で統一されつつある。このような電気機器業界の動きに対して、各社から種々のタイプのF種銅線用ワニスが市販されており、そのうち代表的なものとしては、アルコール成分に耐熱性にすぐれたトリス(2-ヒドロキシエチル)イソシアヌレートを使用したポリエステルイミド⁽¹⁾ワニス(A)および低価格ポリエステルイミド⁽²⁾ワニス(B)があげられる。一方、日立化成工業株式会社ではすでに耐熱銅線用ワニスとして、ポリアミドイミド系のHI-400系ワニスを開発^{(3) (4)}しており、ポリアミドイミド線として電動工具、F種モータなどに使用されている。ポリアミドイミド線は特性的に申し分ないが高価なため、前述の電気機器業界の実状を考えると、より経済的に使いやすい

耐熱銅線用ワニスを開発する必要があった。われわれはこのような情勢に対処するため、種々検討した結果、独自の技術で、前記目的にそった特殊変性イミド系の耐熱銅線用ワニス“HI-441”を開発することができたので、このものと他社製品であるポリエステルイミド系ワニス(A)、(B)およびHI-400”とについてエナメル線特性を比較検討したのでその結果について報告する。

2 供 試 料

表1は、比較試験に用いた各ワニスの特性を、また図1は“HI-441”の粘度と不揮発分の関係を示すものである。一般に分子量と耐熱性、機械的特性の間には相関があり、分子量が小さいとこれらの特性が劣る。そのため合成時の分子量を大きくしなければならない。その結果、必然的に粘度は上がり、作業しやすい粘度に調整すると不揮発分が下がる。われわれは、材料の選択、配合量の検討と合せ、焼付時に高分子

表1 各種銅線用ワニスのワニス特性と塗装条件 各種銅線用ワニスの性状とそれぞれのワニスの適正な塗装条件を示した。“HI-441”は他のワニスに比較し樹脂分濃度が高い。

Table 1 Varnish Properties and Coating Conditions of Various Wire Enamels

品 名			“HI-441”	“HI-400”	THEIC 変性	ポリエステルイミド
項 目			日立化成工業株式会社製品	日立化成工業株式会社製品	ポリエステルイミド A社製品	B 社 製 品
ワ 特 ニ ス 性	不揮発分(200℃ 2時間)		39.4%	31.0%	26.5%	35.2%
	粘 度(300℃ BL形)		4 8 P	6 8 P	5 P	4 6 P
	色 相		暗赤色	暗赤色	赤褐色	暗赤色
焼 付 条 件	炉 温 (℃)	上 段	4 0 0	3 2 0	4 0 0	4 0 0
		中 段	3 5 0	3 0 0	3 5 0	3 5 0
		下 段	3 0 0	2 8 0	3 0 0	3 0 0
	塗 装 方 式		ダイス	ダイス	ダイス	ダイス
	塗 装 回 数(回)		6	8	9	8
	線 速(m/min)		9	9	13	11

* 日立化成工業株式会社山崎工場

化を図る考えで硬化剤等の研究を進めた結果、比較的高不揮発分の“HI-441”を合成することができた。

3 エナメル線の諸特性

本実験では導体径1.0mmφの銅線に供試料を焼き付けしたエナメル銅線を試験試料として用いた。エナメル銅線は既報⁽⁴⁾の立て形エナメル線焼付機を用いて作製した。表1は焼付条件を示したものである。“HI-441”は不揮発分が高いため、ほ

かのワニスに比べて塗装回数を数回少なくして焼き付けることができる。エナメル線の一般特性は、エナメル銅線試験方法 JISC-3003-1969 に準じて試験したが、結果は表2に示すとおりである。

3.1 機械的特性

(1) 可とう性

エナメル線にはまず第一に可とう性が要求される。各種エナメル線の可とう性を、無伸張、20%伸張および加熱劣化後巻き付けして試験した。表2はその試験結果を示すものである。“HI-441”は他のエナメル線に比べ20%伸張後の巻付性がやや劣るが、実用上問題はないと考える。加熱劣化後の巻付性についてはいずれも1倍径でき裂が発生せず良好である。

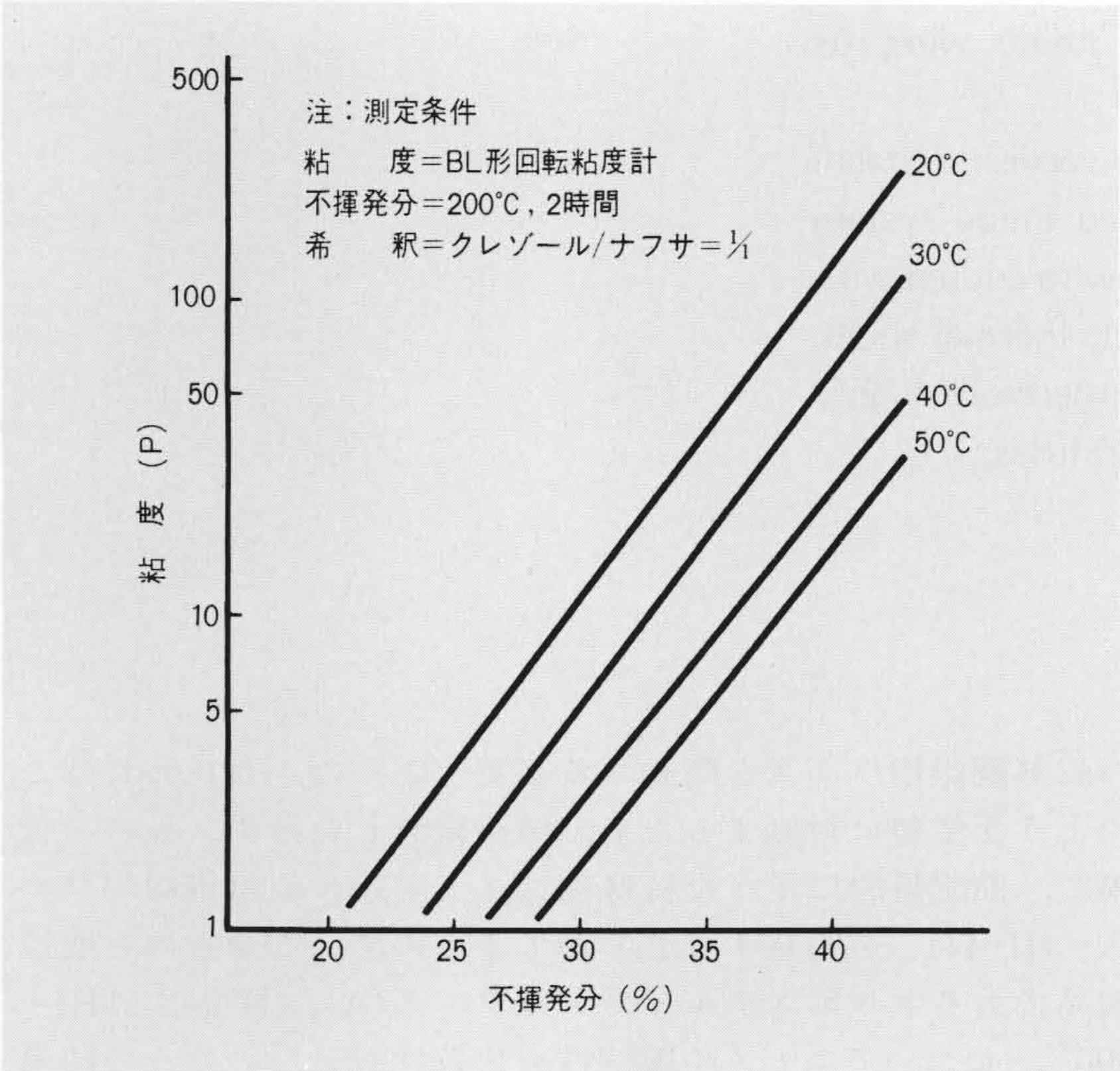


図1 “HI-441”の粘度と不揮発分の関係 各温度における不揮発分と粘度の関係について示した。

Fig. 1 Relation between Non-volatile Matter and Viscosity of HI-441

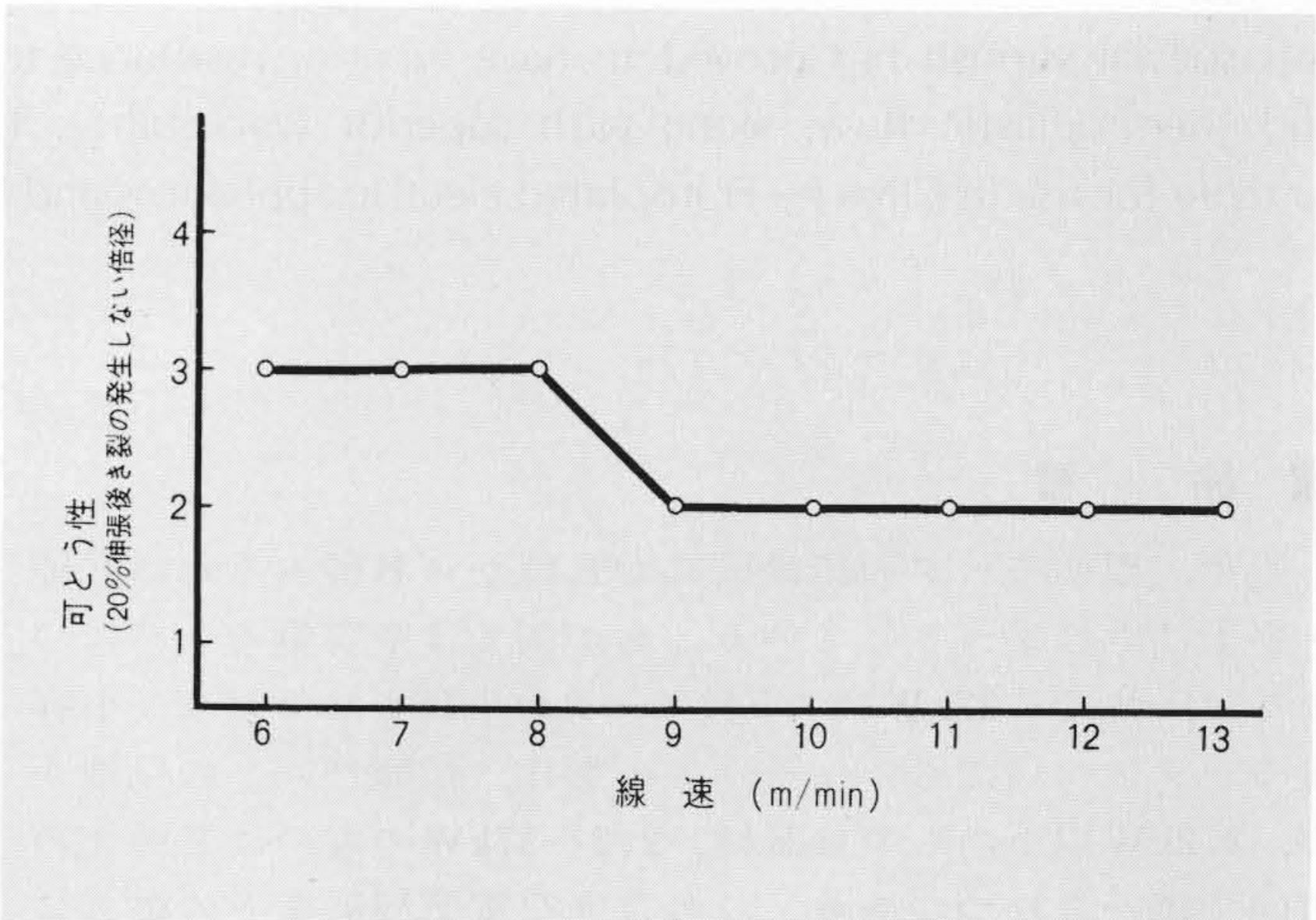


図2 “HI-441”の可とう性と線速の関係 “HI-441”は線速が6～13m/minまでの間で可とう性の大きな差が認められない。

Fig. 2 Relation between Flexibility and Baking Speed of HI-441

表2 エナメル線の一般特性 各種エナメル線の一般特性を示す。“HI-441”は、可とう性が他のエナメル線に比べやや劣るが、耐熱軟化性、耐摩耗性にすぐれている。

Table 2 Properties of Enameled Copper Wires

試料		“HI-441”	“HI-400”	他社製品A	他社製品B
項目					
寸法 (mm)	仕上り外径	1,088	1,087	1,088	1,085
	導体径	1,008	1,006	1,008	1,009
	皮膜厚さ	0.040	0.041	0.040	0.038
機械的特性	可とう性* (ピンホール)	無伸長 20%伸長	1×OK 2×OK	1×OK "	1×OK "
	耐熱劣化性	200°C 6時間	1×OK	1×OK	1×OK
	耐捻回性	(回)	93	85	98
	耐摩耗性	600g (回)	49	160	32
熱的特性	耐熱衝撃性	200°C, 1時間 220°C, 1" 240°C, 1"	1×OK 2×OK "	1×OK 2×OK "	1×OK 2×OK "
	耐熱軟化性	700g(°C)	399	410	397
電気的特性	絶縁破壊電圧(kV)	—	11.6	13.4	10.3
化学的特性	耐薬品性	常態	5 H	7 H	5 H
	ベンゼン		"	"	"
	(室温 24時間)		"	"	"
	鉛筆硬度	硫酸(比重1.2)	6 H	"	"

注：* 1×OKとは同一線径に巻き付けた場合、ピンホールが生じないことを意味する。

“HI-441”の20%伸張後の巻付性と焼付線速（以下線速と略す）の関係は図2に示すとおりである。線速を変えても巻付性は大きく変化しないが、線速8m/min以下で若干低下している。これは線速がおそくなると架橋構造が多くなり皮膜の可とう性が乏しくなるためである。

(2) 耐摩耗性

コイル巻き作業が手巻作業より自動機械巻作業に変わるにつれ耐摩耗性のよりすぐれたエナメル線が要求されるようになった。往復摩耗試験機を用い荷重600gでの摩耗回数は、表2に示すとおりである。また荷重を400～800gまで変えて摩耗回数を測定したが、その結果は図3に示すとおりである。“HI-441”の耐摩耗性は“HI-400”より劣るが、Bとはほぼ同等でありAよりもすぐれている。

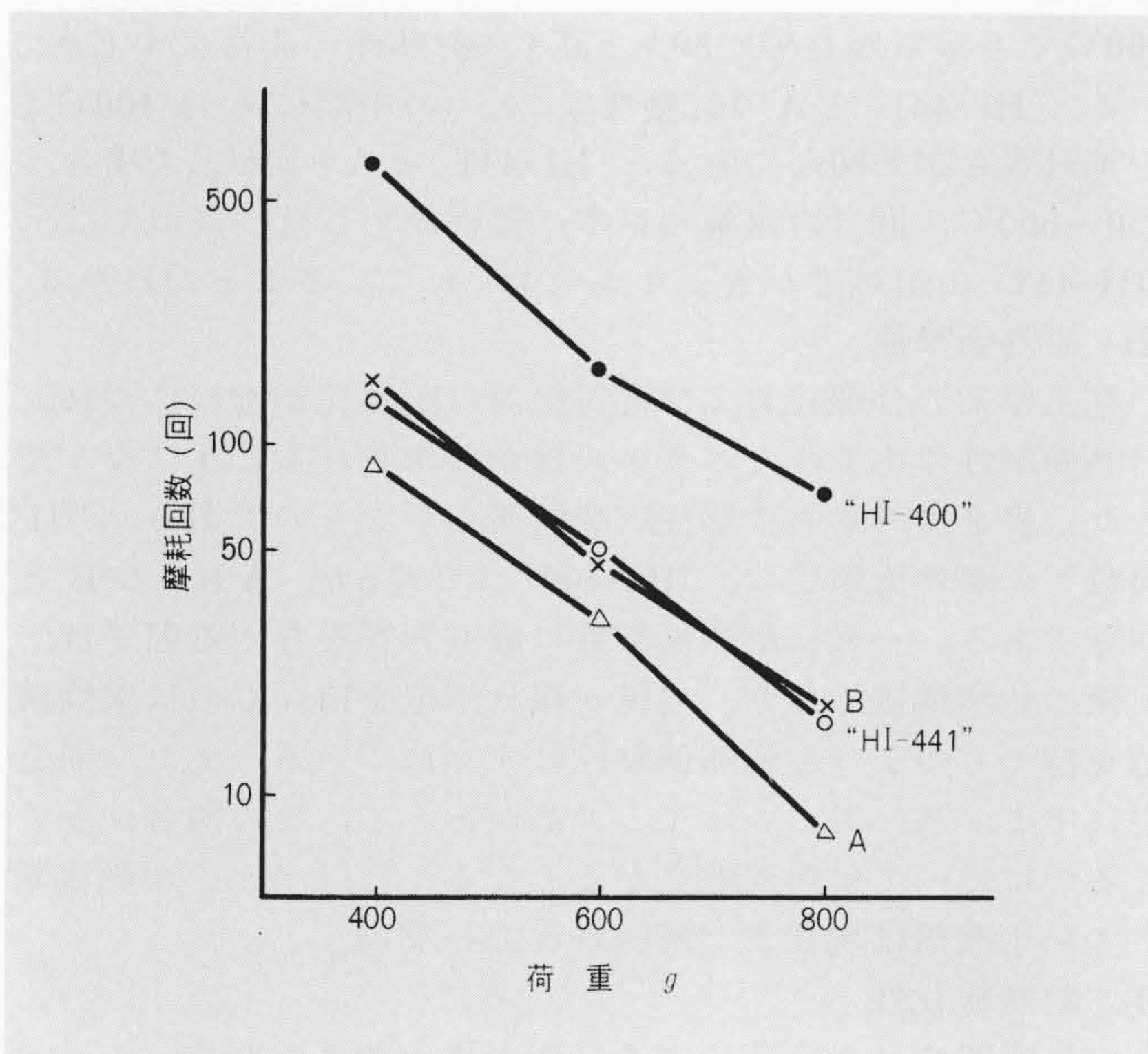


図3 往復摩耗試験機による荷重と耐摩耗性の関係 “HI-441”は荷重を増すことにより直線的に摩耗が低下するが、Aよりは低下がやや少ない。

Fig. 3 Relation between Load and Repeated Scrape Abrasion

エナメル線を自動巻線機でコイル巻きする場合、エナメル線に張力がかかり伸ばされる。エナメル線の伸び率は自動巻線機のコイル巻きスピードや線径によって異なるが、平均8%、最大20%も伸張される。伸張されることによりエナメル線の皮膜厚さは薄くなり耐摩耗性は低下するが、この低下率は少ないことが好ましい。伸張率0～20%伸張後の摩耗回数を測定したが、その結果は図4に示すとおりである。“HI-441”はAおよびBと比較して摩耗回数の低下率が少なく、耐摩耗性にすぐれている。また“HI-441”の耐摩耗性と線速の関係は、図5に示すとおりである。線速を速くすると耐摩耗性は低下する傾向があるが、実用的には線速11.5m/minまで使用可能と考えられる。

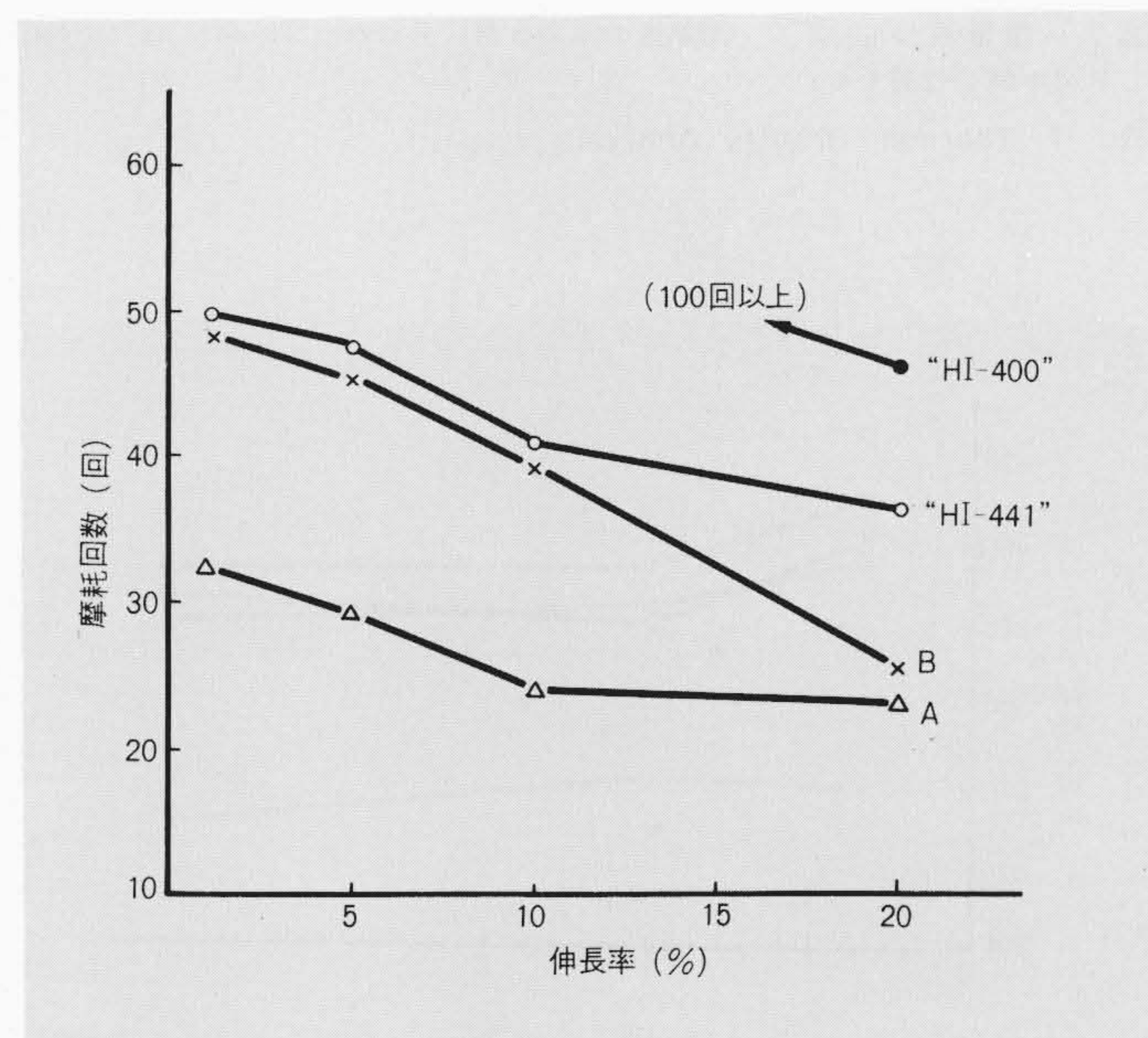


図4 往復摩耗試験機による伸張率と耐摩耗性の関係 “HI-441”は伸張率を変えても耐摩耗性の低下率が少ない。

Fig. 4 Relation between Elongation and Repeated Scrape Abrasion

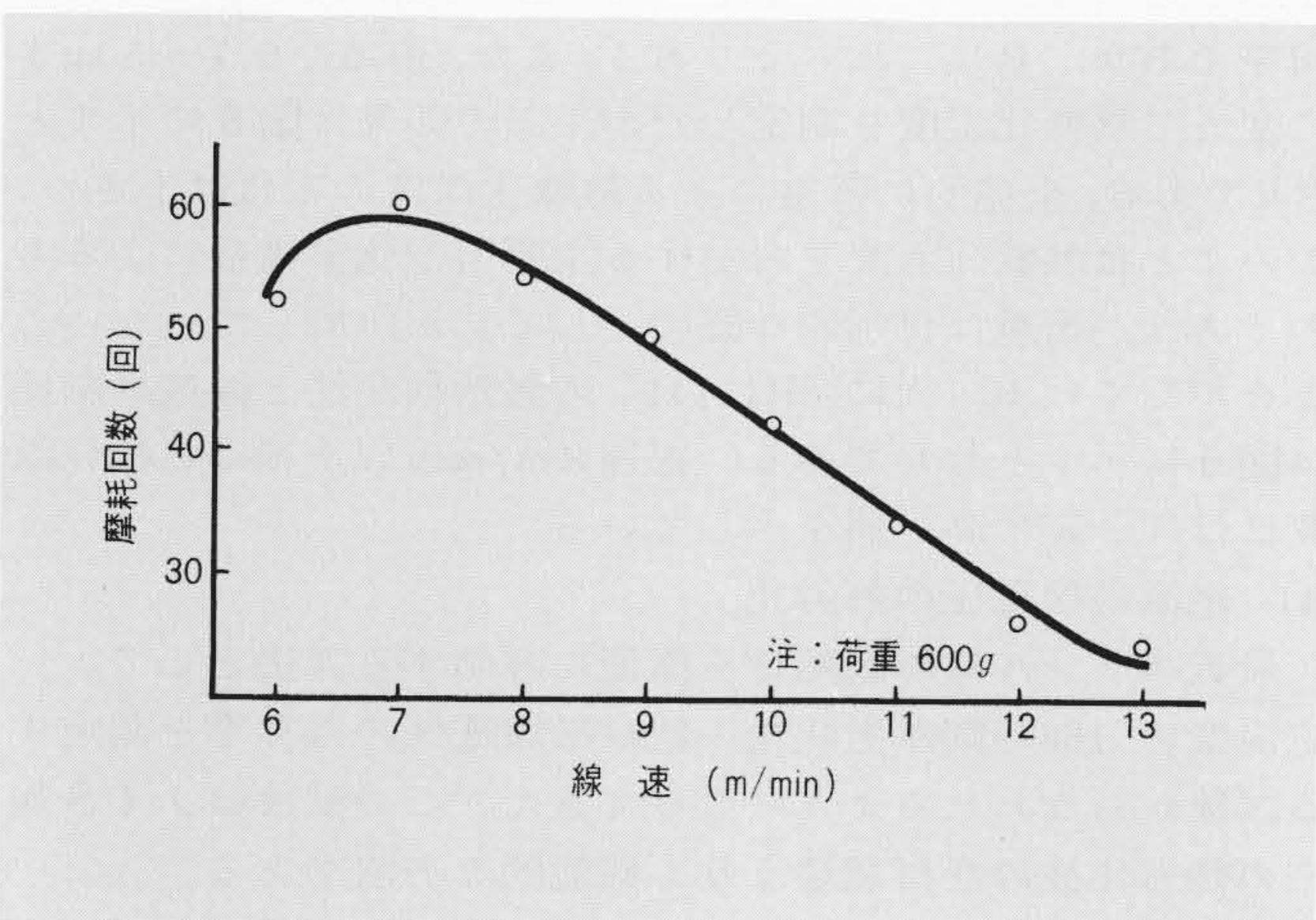


図5 “HI-441”の耐摩耗性と線速の関係 高線速では耐摩耗性が直線的に小さくなる。これは架橋密度の影響と考えられる。

Fig. 5 Relation between Repeated Scrape and Baking Speed of HI-441

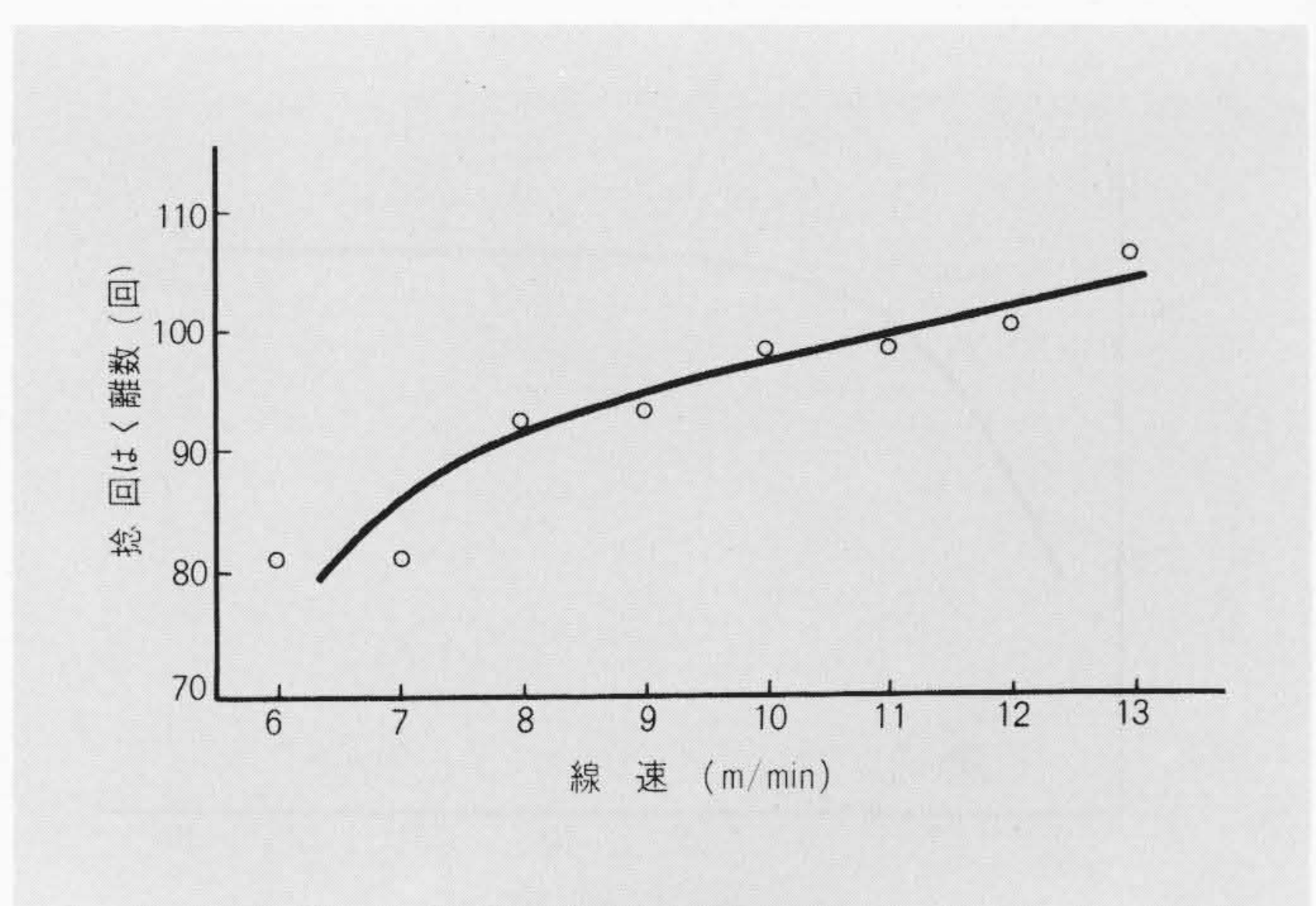


図6 “HI-441”の捻回抵抗と線速の関係 高線速では捻回抵抗が増すが、これは架橋密度が少なくなるためと思われる。

Fig. 6 Relation between Twisting Resistance and Baking Speed of HI-441

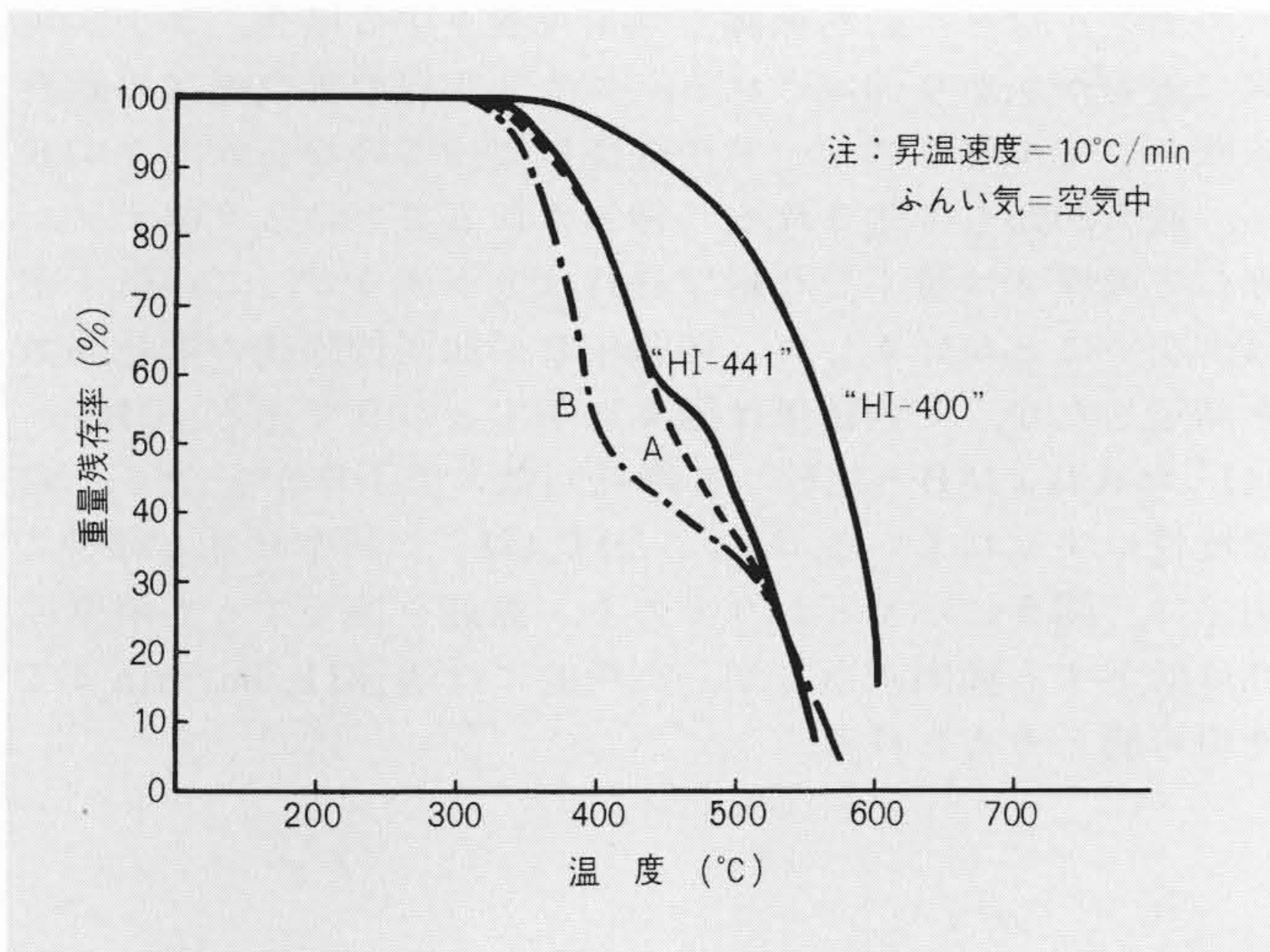


図7 重量減少曲線 耐熱性の点で3群に分かれ、“HI-441”は“HI-400”とBの中間に位置する。

Fig. 7 Thermal Gravity Analysis

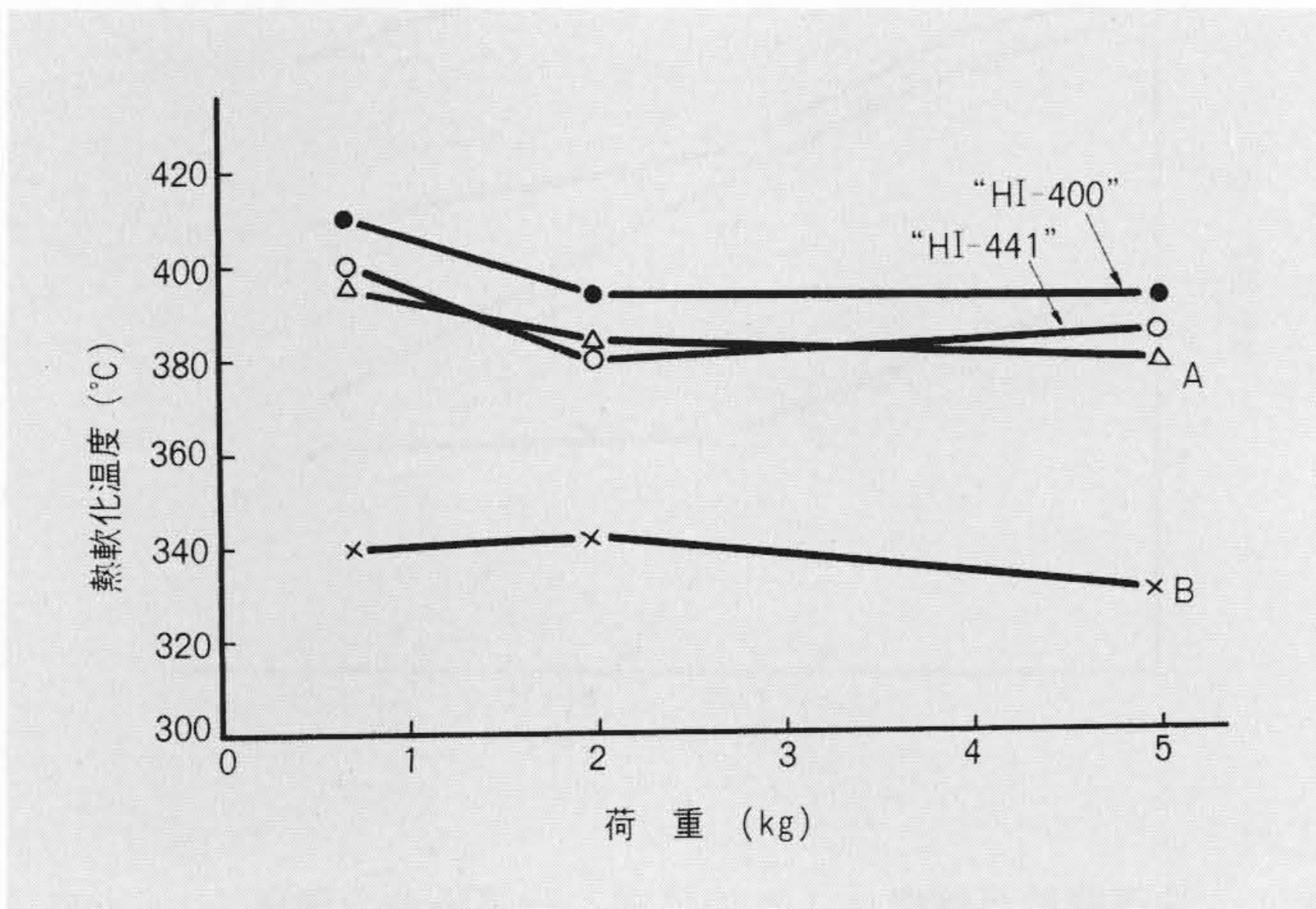


図8 荷重と熱軟化温度の関係 荷重を増しても熱軟化の低下率は少ない。

Fig. 8 Relation between Load and Cut Through Temperature

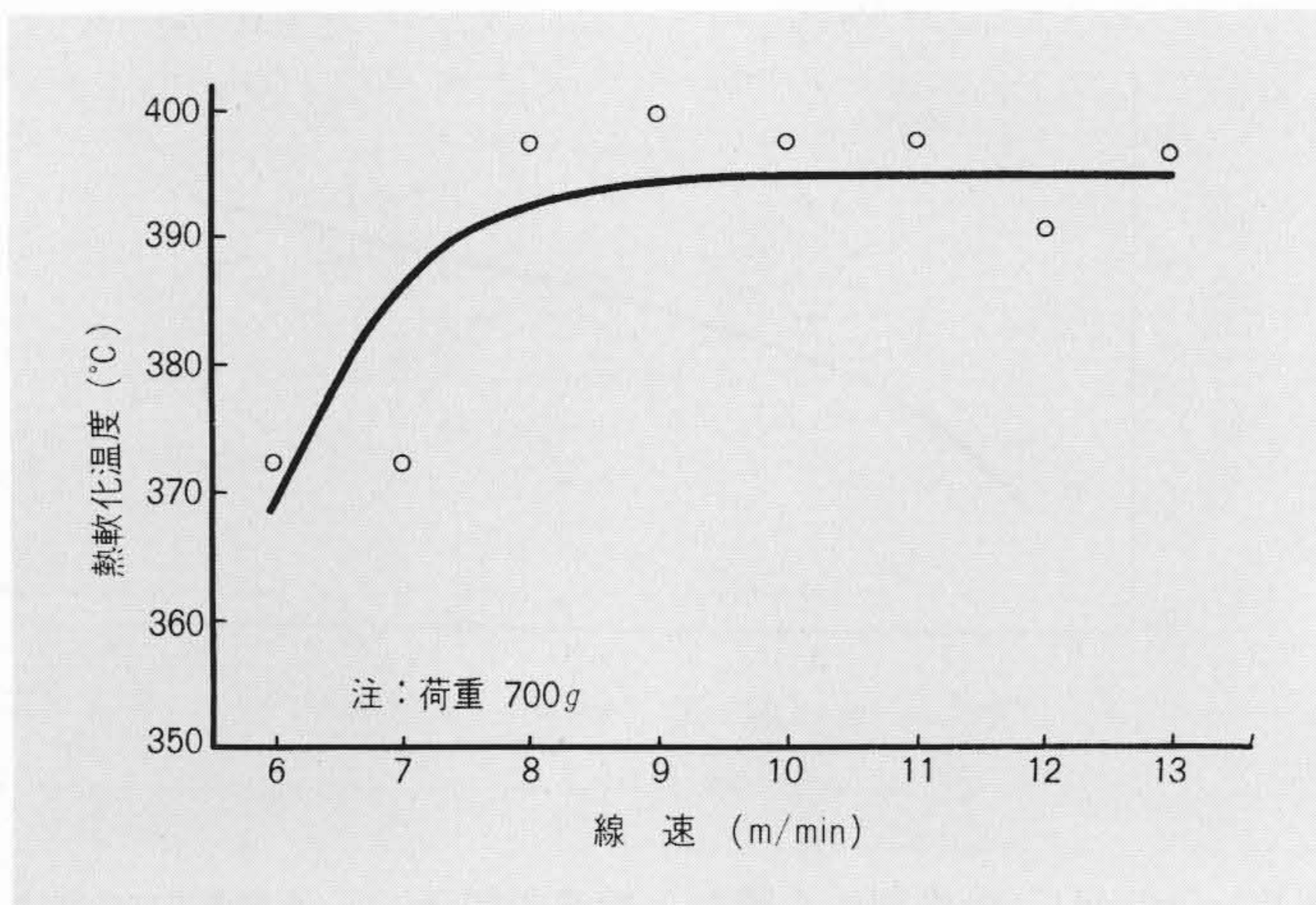


図9 “HI-441”の耐熱軟化性と線速の関係 線速8～13m/minでは熱軟化はほとんど変化しない。

Fig. 9 Relation between Cut Through Temperature and Baking Speed of HI-441

(3) 耐捻(ねん)回性

エナメル線の導体と皮膜の密着性を調べる方法として捻回試験がある。表2は、耐捻回性試験の結果を示すものである。“HI-441”は“HI-400”以上の捻回はく離回数があるので実用上問題はない。また“HI-441”の耐捻回性と線速の関係は図6に示すとおりである。一般に耐捻回性は焼付度の影響を大きく受けるが、線速を速くすると捻回はく離回数が大きくなる。

3.2 熱的特性

(1) 皮膜の加熱減量

理学電機株式会社製No.8002形熱てんびん装置を使用し、空気ふんい気下でのエナメル線皮膜の加熱減量を測定した。図7は、その測定結果を示すものである。同図から明らかなように、4種のワニスには耐熱性で三群に分かれる。Bは耐熱性が劣り400°Cでの重量残存率が50%しかない。一方、“HI-400”は500°Cでも重量残存率が80%と高く、耐熱性に非常にすぐれている。“HI-441”とAの耐熱性はこれらの中にあり、400°Cでの重量残存率が80%である。“HI-441”とAを比較した場合、450～500°Cの間での重量残存率に差が認められ、高温では“HI-441”の耐熱性がAよりややすぐれていることがわかる。

(2) 耐熱衝撃性

電工作業の合理化および電気機器の耐熱化が進むにつれ、耐熱衝撃性のすぐれたエナメル線が要求されるようになってきた。表2は、耐熱衝撃性試験結果を示すものである。“HI-441”の耐熱衝撃性は、“HI-400”より劣るが、AおよびBと同等である。一般に耐熱衝撃性に最も影響を与える因子は、皮膜の化学構造であり、皮膜が線状構造を持つものは架橋構造を持つものよりも耐熱衝撃性にすぐれている。また、構造中にアミド基、あるいはイミド基があつて、その割合が多くなるのに従って耐熱衝撃性がよくなる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、耐熱衝撃性の発生機構は現在まだ解明されていない。

(3) 耐熱軟化性

耐熱機器では過負荷による温度上昇が大きいので、エナメル線の耐熱軟化性は重要視される。熱軟化温度の測定はNEMA (National Electrical Manufacturers Association) 規格に準じた方法で行なった。すなわち、直角に交差したエナメル線に一定荷重をかけ、昇温速度3°C/minで上昇させ熱軟化する温度を測定した。表2は、荷重0.7kgでの熱軟化温度を示すものである。“HI-441”は、“HI-440”およびAとほぼ同等であり、Bはこれらより劣る。また、荷重を0.7～5kgまで変えて熱軟化温度を測定したが、その結果は図8に示すとおりである。全体的に荷重による熱軟化温度の変化は小さい。このことは熱軟化温度を左右する主要因が化学構造によるものであり、荷重は付加的な要因としてしか作用していないことを示している。次に“HI-441”の耐熱軟化性と線速の関係は図9に示すとおりである。線速8m/min以上では熱軟化温度はほぼ一定の高い値を示している。

(4) 絶縁破壊電圧の熱劣化

最近エナメル線の耐熱性を簡便に評価する方法として、一定温度で168時間熱劣化後の絶縁破壊電圧の残存率を測定する試験が行なわれるようになってきた。この試験はJIS規格の熱劣化後の巻付試験よりも機能的な方法である。

図10は、200°C、220°C、240°Cおよび260°Cの各温度で、168時間熱劣化後の絶縁破壊電圧の残存率を測定した結果について示したものである。“HI-441”は“HI-400”よりやや劣るが、AおよびBよりも絶縁破壊電圧の残存率が高い。

(5) 過負荷特性

バーンアウト試験機を用いて過負荷特性を測定した。この試験はエナメル線の耐熱性、耐熱衝撃性、耐熱軟化性、熱劣化後の機械的特性を総合的に評価する簡便で機能的な試験方法である。12cm中16回より合わせた試験片に過電流を20秒ON、10秒OFFのサイクルで流し、線間のチェック電圧120Vで20mAの漏えい電流が流れたときを終点とした。この測定結果は図11に示すとおりである。“HI-441”およびAは、“HI-400”とBの中間の特性を示している。

3.3 電気的特性

(1) 絶縁破壊電圧

表2は、絶縁破壊電圧測定結果を示すものである。いずれも10kV以上の値を示し問題はない。

3.4 化学的特性

(1) 耐溶剤および薬品性

表2は、耐溶剤および薬品性試験結果について示すものである。ベンゼン、カ性ソーダ(5%)、硫酸(比重1.2)に常温で24時間浸せき後、いずれも外観には異常を認めず、また鉛筆硬度も初期値のかたさを保持しており良好である。

(2) 耐冷媒性

冷蔵庫、ルームクーラーなどの小形冷凍機では、モータが冷媒系内に内蔵されているため、コイルは潤滑油と冷媒の混合液に直接接触することになる。したがって、このような用途に使用するエナメル線にはすぐれた耐冷媒性が必要である。冷媒としては、フロン12および同22がよく用いられるが、ここでは化学作用のより強いフロン22に対する耐冷媒性を調べた。表3はその結果を示すものである。“HI-441”とAの間にはほとんど差は認められないが、125℃、168時間の条件では、“HI-441”はAよりややすぐれている。また、“HI-400”の耐冷媒性は格段にすぐれていることがわかる。

(3) 耐ワニス性

一般にエナメル線はコイルワニスと組み合わせて用いられる。ワニス処理時、エナメル線は機械的および熱的ストレスのある状態で、ワニス中の溶剤、樹脂、硬化剤などから化学的攻撃を受ける。電気機器の信頼性を向上するためにエナメル線の耐ワニス性をあらかじめ調べておくことが必要である。ここでは代表的な5種類の耐熱性コイルワニスに対するエナメル線の耐ワニス性を試験した。12%伸張したエナメル線と、1~10倍径のテーパコイルとを表4に示す条件でワニスに浸せき後、皮膜の鉛筆硬度とき裂発生の有無を調べた。表4は、その試験結果を示すものである。“HI-441”はこれらのワニスで処理しても問題ないことがわかる。

(4) 耐湿熱性

ハーメチックモータのような密閉形の機器においては、空

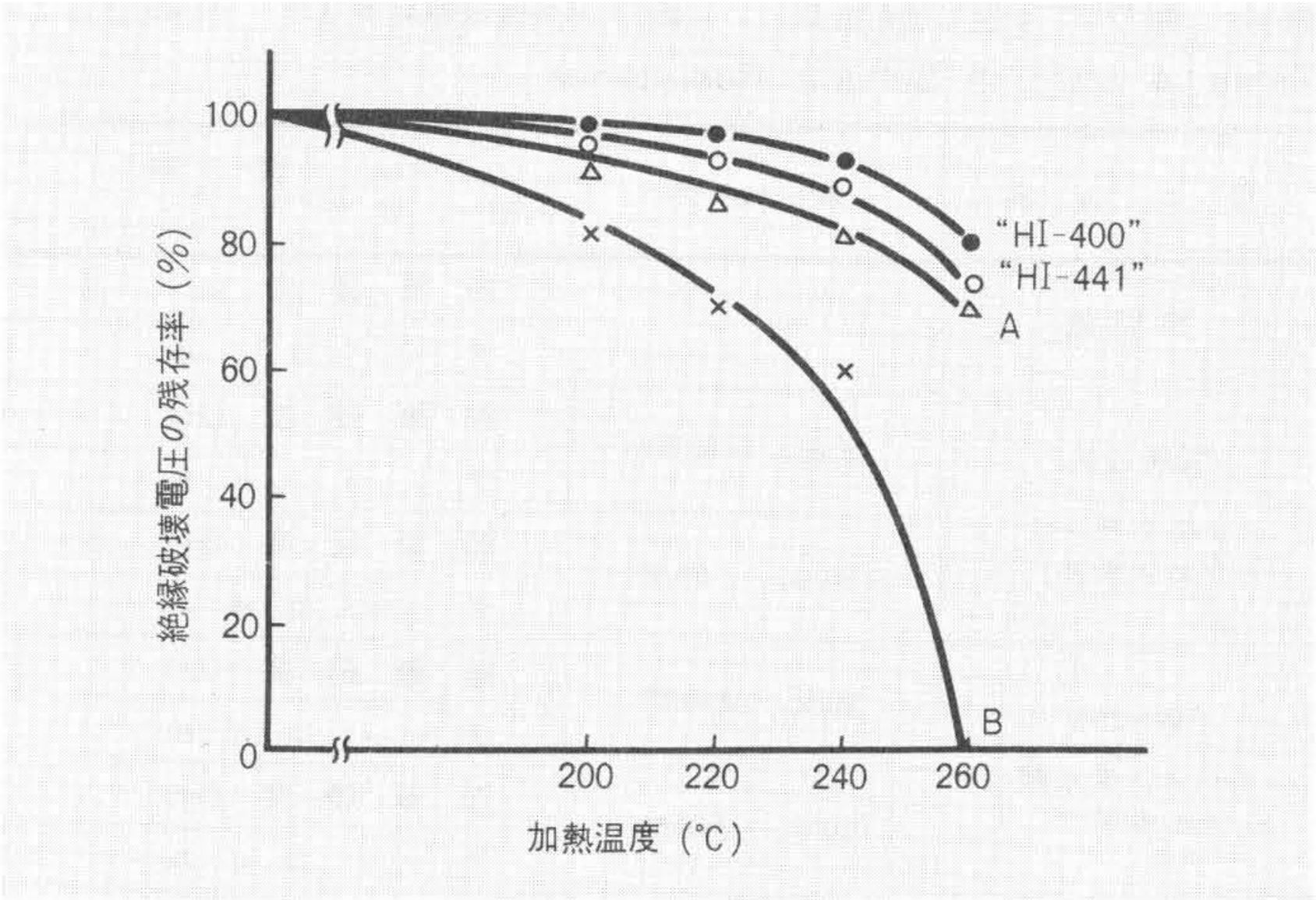


図10 168時間加熱後の絶縁破壊電圧の保持率 “HI-441”は260℃の高温でも、絶縁破壊電圧の低下が少なく、十分F~H種機器に使用できる材料である。

Fig. 10 Breakdown Voltage After Thermal Aging for 168h

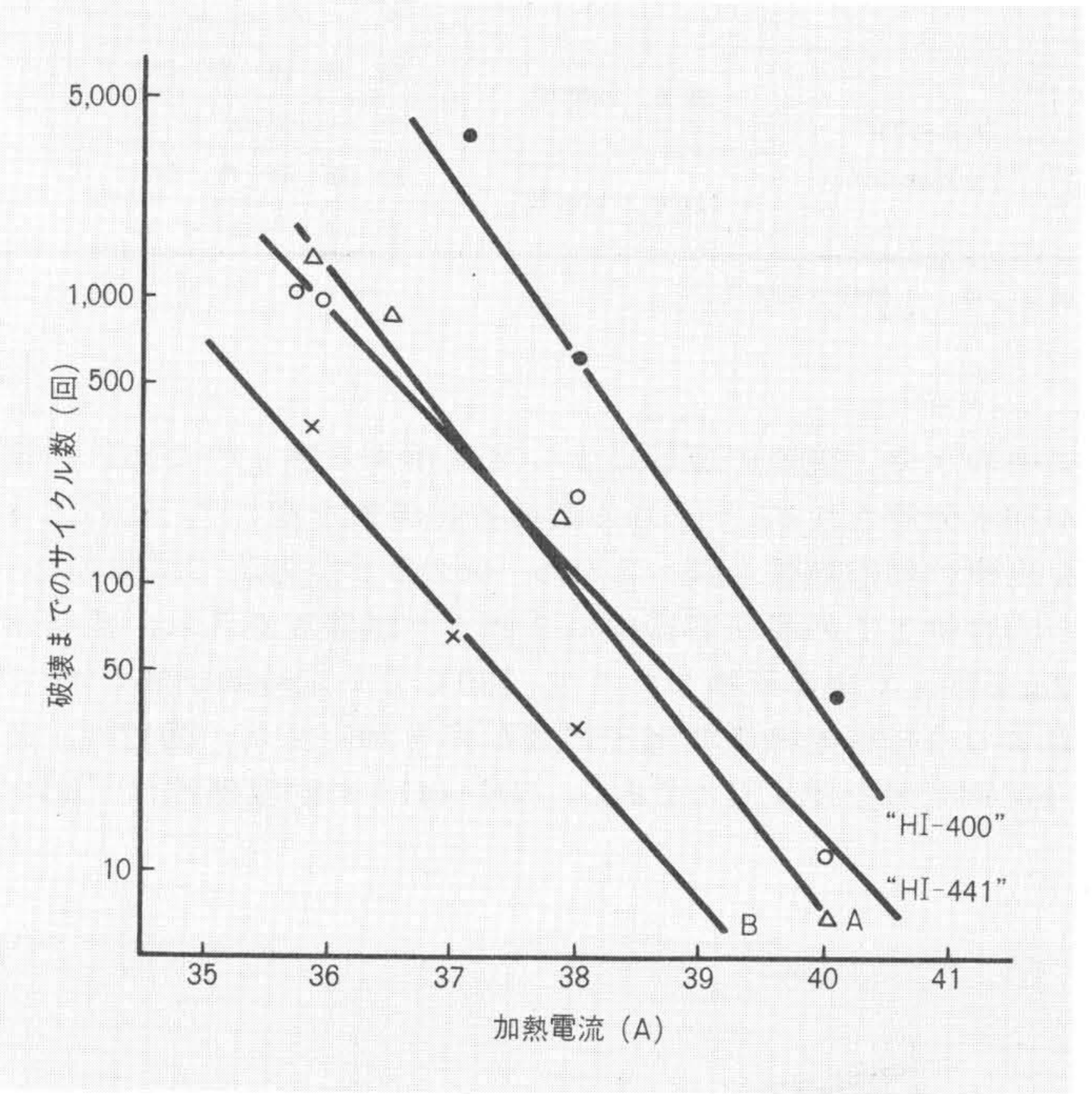


図11 バーンアウト試験による過負荷特性 過負荷特性試験とは、耐熱性を評価する一手段として用いられるが、“HI-441”は“HI-400”とエステルイミドBとの中間に位置することがわかる。

Fig. 11 Burn Out Test

表3 R-22による耐冷媒性試験結果 R-22による耐冷媒性試験結果より、“HI-441”はAとほぼ同じ特性であるが、高温特性はややすぐれている。

Table 3 Refrigerant Resistance in Freon R-22

試料	条件 項目	初 期 値		常 温, 168時間			125℃, 168時間		
		鉛 筆 硬 度 (H)	絶 縁 破 壊 電 圧 (kV)	ブ リ ス タ	鉛 筆 硬 度 (H)	絶 縁 破 壊 電 圧 (kV)	ブ リ ス タ	鉛 筆 硬 度 (H)	絶 縁 破 壊 電 圧 (kV)
“HI-441”		5	11.6	△	5	12.0	◎	5	12.5
“HI-400”		7	13.4	◎	7	12.5	◎	7	14.2
A		5	10.3	△	5	9.2	○	5	8.7
B		”	12.3	×	”	13.1	×	”	13.3

注：◎＝発泡(ぼう)なし ○＝小発泡(自己径以下)
△＝大発泡(自己径~2倍径) ×＝特大発泡(2倍径以上)

表 4 耐ワニス性試験結果 耐ワニス性試験結果より“HI-441”はこれらのワニスで処理しても問題はない。

Table 4 Varnish Solvent Resistance

ワニス名	条件	試料項目	“HI-441”	“HI-400”	他社製品A	他社製品B
初期値	—	鉛筆硬度(H)	5	7	5	5
		テープコイル	○	○	○	○
“WF-285” (エポキシ エステル)	常温, 24時間	鉛筆硬度(H)	4	6	4	3
		テープコイル	○	○	○	○
	130℃, 2時間	鉛筆硬度(H)	5	7	5	3
		テープコイル	○	○	○	○
“WI-295” (イソフタル酸 アルキド)	常温, 24時間	鉛筆硬度(H)	4	6	5	3
		テープコイル	○	○	○	○
	130℃, 2時間	鉛筆硬度(H)	5	6	5	3
		テープコイル	○	○	○	○
“HPD-200” (耐熱性 アルキド)	常温, 24時間	鉛筆硬度(H)	4	6	5	4
		テープコイル	○	○	○	○
	150℃, 4時間	鉛筆硬度(H)	5	6	5	4
		テープコイル	○	○	○	○
“WP-2711” (不飽和 ポリエステル)	常温, 24時間	鉛筆硬度(H)	4	6	5	4
		テープコイル	○	○	○	○
	120℃, ½時間	鉛筆硬度(H)	5	6	4	3
		テープコイル	○	○	○	○
“KE-573” (エポキシ)	常温, 24時間	鉛筆硬度(H)	5	6	5	4
		テープコイル	○	○	○	○
	120℃, ½時間	鉛筆硬度(H)	5	6	5	4
		テープコイル	○	○	○	○

注：○は、1倍径き裂なし。

気中の水分と機器の運転によって発生する熱とのために皮膜が加水分解される、いわゆる湿熱劣化現象を起こす。このような皮膜の耐湿熱性を調べるため、次のような方法で試験した。

内容積 1 l の耐圧容器中に 2 個より試験片を入れ、蒸留水 2 g を加えて窒素置換したのち、180℃で一定時間加熱した。常温まで冷却後絶縁破壊電圧の残存率を測定した。図12は、その試験結果を示すものである。“HI-441”の耐湿熱性は“HI-

400より劣るが、AおよびBよりすぐれていることがわかる。

4 結 言

今回、新しく開発した耐熱銅線用ワニス“HI-441”と他社製エステルイミド系ワニスA、Bおよび“HI-400”についてエナメル線特性を比較し検討した。その結果、“HI-441”は“HI-400”に比べると全般的にやや劣るが、他社製品Aと比較し、耐摩耗性、耐湿熱特性、作業性などがすぐれており、また、他社製品と比較した場合、耐熱軟化性、耐熱性、耐冷媒性、化学的特性などにすぐれており、F～H種電気機器に使用可能と考えられる。

現在、最適な絶縁組織を選定することによって、さらに電気機器の性能を向上できるように、コイルワニスとの適合性試験を含めた各種寿命試験を実施中である。

参考文献

- (1) Schnectady Chemical 社, 「導電体用被覆組成物」 特公昭39-28288
- (2) Dr.Beck 社, 「エステルイミド樹脂の製造方法」 特公昭38-21500
- (3) 日立化成工業株式会社, 「ポリアミドイミド樹脂の製造法」 特公昭44-19274
- (4) 川島ほか 2 名: 「ポリアミドイミド系ワイヤエナメルの開発」, 日立評論48, 312(昭41-2)
- (5) L.J.PAYETTE ほか 1 名: “Investigations of Polyesterimide Wire Designs”, “Proceeding of the 7th Electrical Insulation Conference”, IEEE32C 79-75
- (6) 宮川ほか 3 名: 「ポリアミドイミド系マグネットワイヤエナメルの特性(第 5 報)」, 昭和46年 電気学会東京支部大会予稿集 (p. 129)

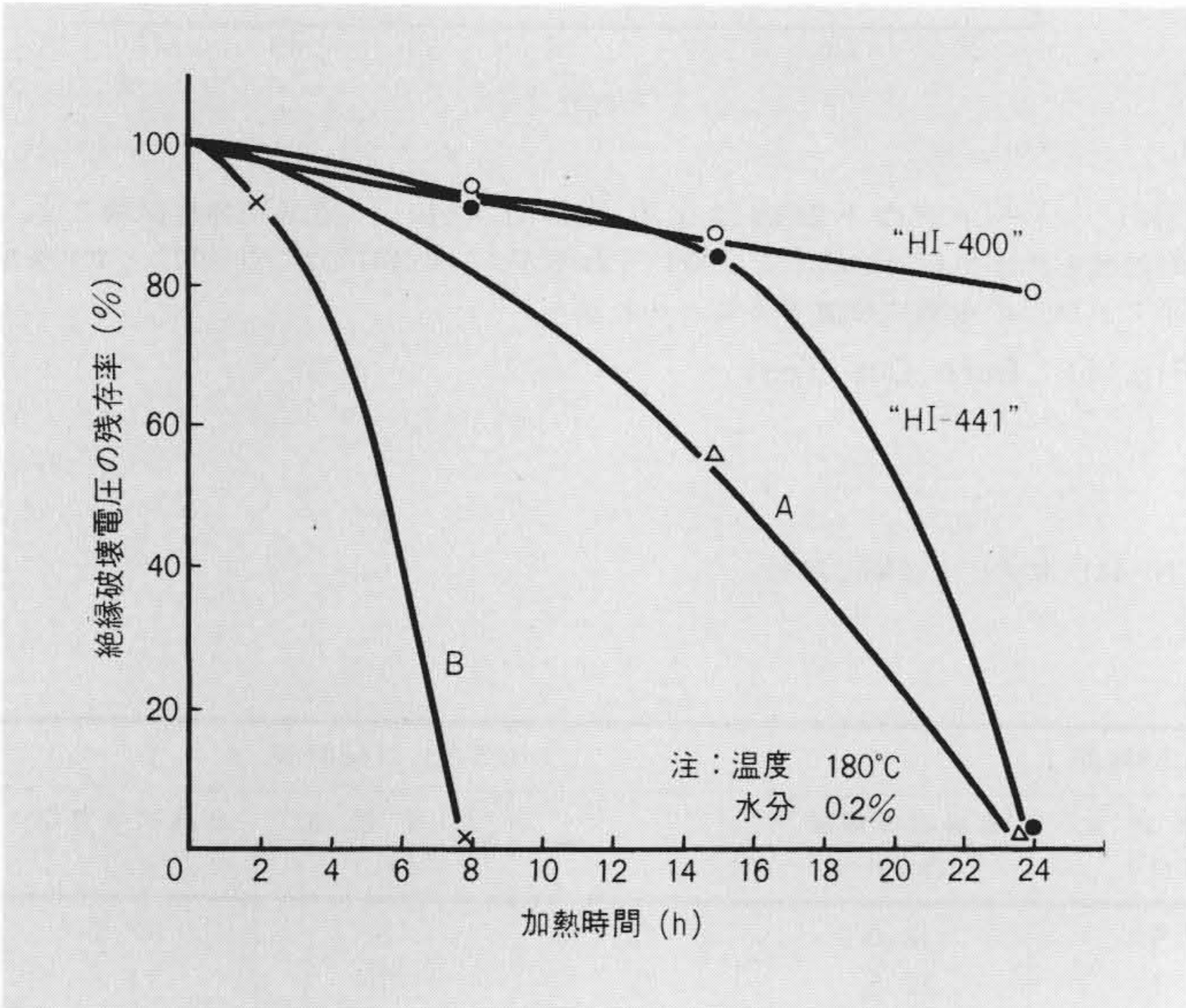


図12 湿熱劣化による絶縁破壊電圧の保持率 “HI-441”は“HI-400”に次ぐ湿熱特性を示している。

Fig. 12 Hydrolytic Stability