

ノーウエット クレージング性 ホルマール線に関する研究

Studies on the None-Wet Crazeing Polyvinyl Formal Enameled Wire

鈴木 勇* Isamu Suzuki

各種エナメル線のクレージング現象について述べた後、ノーウエット クレージング性ホルマール線の開発とその諸特性について検討した。

その結果、ホルマール線のウェット クレージング現象は吸水によるストレス緩和現象で、水中における課電により促進されることを確認した。更に、これらの実験結果をもとにノーウエット クレージング性ホルマール線を開発した。新開発のノーウエット クレージング性ホルマール線は優れた耐ウェット クレージング性をもっている。

1 緒 言

ホルマール線は1938年アメリカのゼネラル・エレクトリック社により発明された合成樹脂エナメル線である⁽¹⁾⁽²⁾。ホルマール線は優れた機械的特性、電気的特性、化学的特性及び過電流焼損性を保持しており、今日においても耐熱区分がAクラス(105°Cクラス)の最も代表的な万能エナメル線として実用されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

さて、高分子材料は伸長や曲げなどのストレスを与えてから高湿度ふんい気下、あるいは水中へ浸せきすると微細なひび割れを生ずる現象がある。この現象はウェット クレージング又は水中クラックと呼ばれている。エナメル線においても一般の高分子材料と同様にウェット クレージング現象が見られる⁽³⁾。特にホルマール線、ポリウレタン エナメル線、ポリエステルイミド エナメル線の三者は、ウェット クレージング性エナメル線として知られている⁽⁴⁾。これに対しノーウエット クレージング性エナメル線としては、ポリエステル エナメル線、ポリヒダントイン エナメル線、ポリアミドイミド エナメル線、ポリイミド エナメル線などが代表的なものである。

一方、電気機器に対する信頼性の向上要求は年々高まる傾向にある。このような情勢になるにつれ、電気機器用マグネットワイヤとしてノーウエット クレージング性エナメル線が注目されるようになってきた。日立電線株式会社では、従来よりノーウエット クレージング性ポリウレタン エナメル線を市販してきたが、今回ノーウエット クレージング性ホルマール線の開発にも成功した。本稿ではこれらの問題について述べる。

2 エナメル線のウェット クレージング現象

2.1 各種エナメル線のクラック現象

エナメル線は導体上に高分子物質を主成分とした塗料を薄く塗布焼付したものであるため、種々な要因によりクラックが発生しやすい。表1は代表的なエナメル線について、常態及び100°C熱劣化後の可撓性試験を、表2はストレス後の各種環境試験を行なった結果について示したものである。

同表に示すように、供試エナメル線は常態の可撓性がいずれも良好なものである。これらのエナメル線を100°C 6時間熱劣化するとホルマール線、ポリウレタン エナメル線の2種は巻付によりクラックが発生する。これはホルマール線及びポ

リウレタン エナメル線の塗膜が熱劣化し、巻付により容易に分子主鎖の切断が起こるためと考えられる。エナメル線を熱以外の酸、アルカリ、有機溶剤などに浸せきしてからストレスを与えても同様なクラック現象が起こる場合がある⁽⁴⁾。

これに対しエナメル線は、ストレスを与えてから高温、水、有機溶剤などのふんい気下においても表2に示すようなクラック現象が見られる。ヒートショックは、比較的大きいストレスを与えてから高温に暴露したとき発生するものである。このヒートショックは高温におけるストレスの緩和現象で、塗膜の高温伸長率が小さいポリエステル エナメル線、ポリウレタン エナメル線、ポリエステルイミド エナメル線などに見られる⁽⁷⁾。ソルベント クレージングは伸長、曲げなどのストレスを与えてから有機溶剤に浸せきしたとき発生する微細なクラックで、クラックの様相はエナメル線の種類と有機溶剤の組合せにより異なるのが常である。表2のソルベント クレージング試験は、アセトン浸せきの場合である。この試験においてホルマール線、ポリウレタン エナメル線、ポリエステルイミド エナメル線、ポリヒダントイン エナメル線などにソルベント クレージングが見られる。ウェット クレージングはストレスを与えたエナメル線を、水あるいは種々な化合物の水溶液に浸せきしたとき発生する微細なクラックである。空気中には微量の水分が含まれているため、実際のコイル巻線作業中においてもウェット クレージングが発生する場合がある。

2.2 ホルマール線のウェット クレージング現象

高分子材料のストレス クレージングの機構については、分子論的立場から多くの研究が行なわれている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。ホルマール線のウェット クレージングの機構についても既に増沢、藤田らが発表している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。そこで本稿ではウェット クレージングの機構についてはそれらの文献に譲り、ノーウエット クレージング性ホルマール線を開発する立場からL₂₇(3¹³)直交配列実験によりホルマール線のウェット クレージング試験を行なった。表3は実験に用いた要因と割付けを、図1～4は有意要因とウェット クレージングとの関係をそれぞれ示したものである。

図1から分かるように、ストレス前に水中に浸せきしたホルマール線は、ウェット クレージングの発生率が高い。これ

* 日立電線株式会社電線工場

表 1 各種エナメル線の常態及び200℃ 6 時間熱劣化後の可撓性試験結果 供試エナメル線の常態可撓性はいずれも良好である。200℃ 6 時間熱劣化するとホルマール線及びポリウレタン エナメル線の可撓性は低下する。

試験名 寸 法 エナメル線 種 別	寸 法 (mm)		常 態 の 可 撓 性 試 験												熱 劣 化 後 の 可 撓 性 試 験					
			常 態 伸 長 試 験						常 態 巻 付 試 験						200℃ 6 時 間 熱 劣 化 後 の 巻 付 試 験					
	導体径	皮膜厚	1 %	3 %	5 %	10%	20%	30%	1 倍径	2 倍径	3 倍径	4 倍径	5 倍径	10倍径	1 倍径	2 倍径	3 倍径	4 倍径	5 倍径	10倍径
ホルマール線	1.000	0.043	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5	5	3
ポリウレタン エナメル線	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	4	1	0
ポリエステル エナメル線	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	0	0	0	0	0	"
ポリエステルイミド エナメル線	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
ポリヒダントイン エナメル線	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
ポリアミドイミド エナメル線	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
ポリイミド エナメル線	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
備 考	—		長さ30cmのエナメル線を伸長し、結果を試験片5本の内のクラックの発生した試験片の数で示す。						エナメル線を各巻付倍径に10回巻きしたコイルとし、結果をコイル5個の内のクラックの発生したコイル数で示す。						エナメル線を200℃ 6 時間熱劣化してから、各巻付倍径に10回巻きしたコイルとし、結果をコイル5個の内のクラックの発生したコイル数で示す。					

表 2 各種エナメル線のヒートショック試験、ソルベント クレージング試験及びウエット クレージング試験 ヒートショック現象はポリウレタン エナメル線、ポリエステル エナメル線、ポリエステルイミド エナメル線の3種に見られる。アセトン中のソルベント クレージング現象は、ホルマール線ポリウレタン エナメル線などに見られる。ウエット クレージング現象は、ホルマール線ポリウレタン エナメル線、ポリエステルエナメル線などに見られる。

試験名 寸 法 エナメル線 種 別	ヒ ー ト シ ョ ッ ク 試 験 (巻付後の高温暴露試験)						ソ ル ベ ン ト ク レ ー ジ ン グ 試 験 (伸長後の有機溶剤浸せき試験)						ウ エ ッ ト ク レ ー ジ ン グ 試 験 (伸長後の水中浸せき試験)					
	1 倍径	2 倍径	3 倍径	4 倍径	5 倍径	10倍径	1 %	2 %	3 %	5 %	10%	20%	1 %	2 %	3 %	5 %	10%	20%
ホルマール線	0	0	0	0	0	0	2	4	5	5	5	5	3	5	5	5	0	0
ポリウレタン エナメル線	5	5	3	2	"	"	"	5	"	"	"	"	5	"	"	"	3	"
ポリエステル エナメル線	"	"	"	0	"	"	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	"
ポリエステルイミド エナメル線	"	1	0	"	"	"	1	3	5	5	5	5	2	5	5	5	"	"
ポリヒダントイン エナメル線	0	0	"	"	"	"	2	"	"	"	"	"	0	0	0	0	"	"
ポリアミドイミド エナメル線	"	"	"	"	"	"	0	0	0	0	0	0	"	"	"	"	"	"
ポリイミド エナメル線	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
備 考	エナメル線を各巻付径に10回巻きしたコイルとしてから200℃ 1 時間高温に暴露した。結果は供試コイル5個の内のクラックの発生したコイル数で示す。						エナメル線を空気中で伸長した後、20～30秒以内にアセトンに浸せきした。結果は1 分浸せき後の30cm試験片5本の内のソルベント クレージング発生試験片数で示す。						エナメル線を空気中で伸長した後、20～30秒以内にフェノールフタレイン添加0.2%食塩水中に浸せきし直ちに直流12Vを1分課電した。結果は30cm試験片5本の内のウエット クレージング発生試験片数で示した。					

に対しストレス後に熱処理したホルマール線は、図 3 に示すように熱処理温度が高いほどウエット クレージングの発生率が低い。一般にストレス後の熱処理は、アニーリング、あるいはキュアーと呼ばれており、その熱処理温度はホルマール線塗膜の二次転移点以上で、且つ著しい熱劣化が生じない温度以下の範囲に選ばれている。

また図 4 から分かるように、ウエット クレージングは水中における課電電圧が高いほど発生する傾向がある。これは、ストレスにより生じた分子鎖の欠陥部が高い電圧ほど破壊されやすいためと考えられる。

これらのウエット クレージング試験結果から、ホルマール線のウエット クレージング現象は次のように考えることがで

表3 L₂₇(3¹³)直交配列実験によるホルマール線のウェット クレージング試験に用いた要因と水準 L₂₇(3¹³)直交配列実験によるホルマール線のウェット クレージング試験に用いた要因はストレス前処理, ストレス, ストレス後の放置時間, ストレス後の熱処理, 浸せき水温及び水中課電直流電圧の6要因である。

要 因		水 準			直 交 表 へ の 割 付 け (列)
要 因 記 号	要 因 名	水 準 1	水 準 2	水 準 3	
A	ストレス前処理	無 処 理	130℃ 10分熱処理	20℃ 水中 10分浸せき	1
B	ストレス伸長 (%)	0	2.5	5.0	2
C	ストレス後の放置時間 (min)	0.1	10	1,000	5
D	ストレス後熱処理	無 処 理	80℃ 10分熱処理	130℃ 10分熱処理	9
E	浸せき水温 (℃)	20	50	80	10
F	水中課電直流電圧 (V)	10	"	100	12

きる。

ホルマール線塗膜は線状の高分子物質のポリビニル ホルマール樹脂, 三次元に硬化した熱硬化性樹脂, 熱硬化性樹脂により架橋したポリビニル ホルマール樹脂, 異種の熱硬化性樹脂同士が架橋した硬化物などが複雑にからみ合った分子構造を有している⁽¹⁰⁾。ホルマール線に伸長や曲げなどのストレスを与えると, 分子鎖が相互に位置変換し秩序, 無秩序の分子鎖の界面に空けきを持った欠陥部ができるものと考えられる。この欠陥部には加えられた外部エネルギーが残留しているため, 水分が浸入すると応力に耐えられなくなり, 微細なクラック, すなわちウェット クレージングを発生して応力を緩和するものと考えられる。分子内のカルボキシル基やヒドロキシル基などの親水性極性基は, 水分の浸入を容易にするため, これらの基の存在はウェット クレージングを助長するものと考えられる。

従って, ノーウェット クレージング性ホルマール線はホルマール線塗膜の外部エネルギー分散性を高め⁽¹¹⁾, 親水性極性基を極力少なくした分子構造とすることにより開発できるものと考えられる。

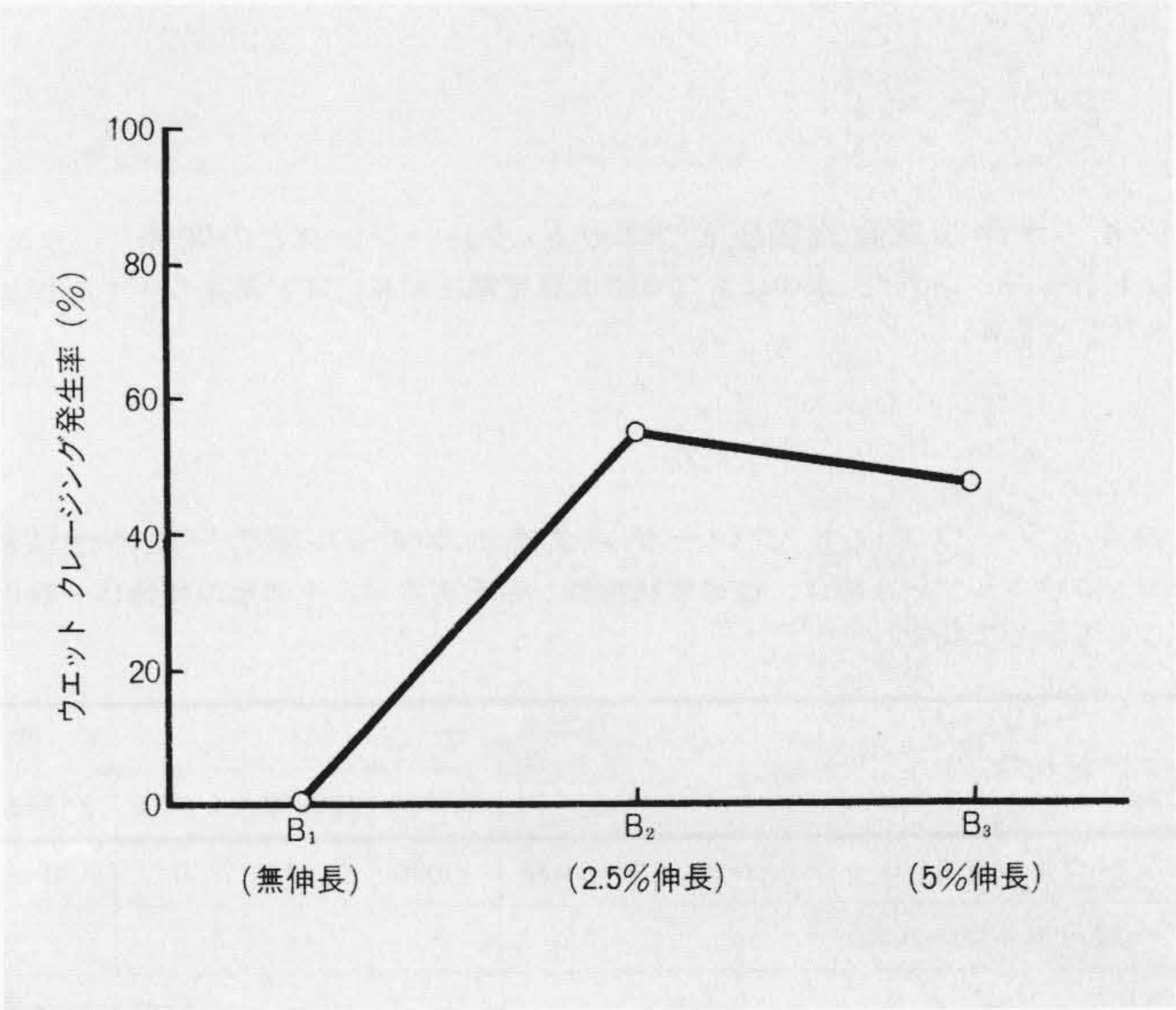


図2 伸長率とウェット クレージングとの関係 ウェット クレージングは伸長率と密接な関係にあることを示している。

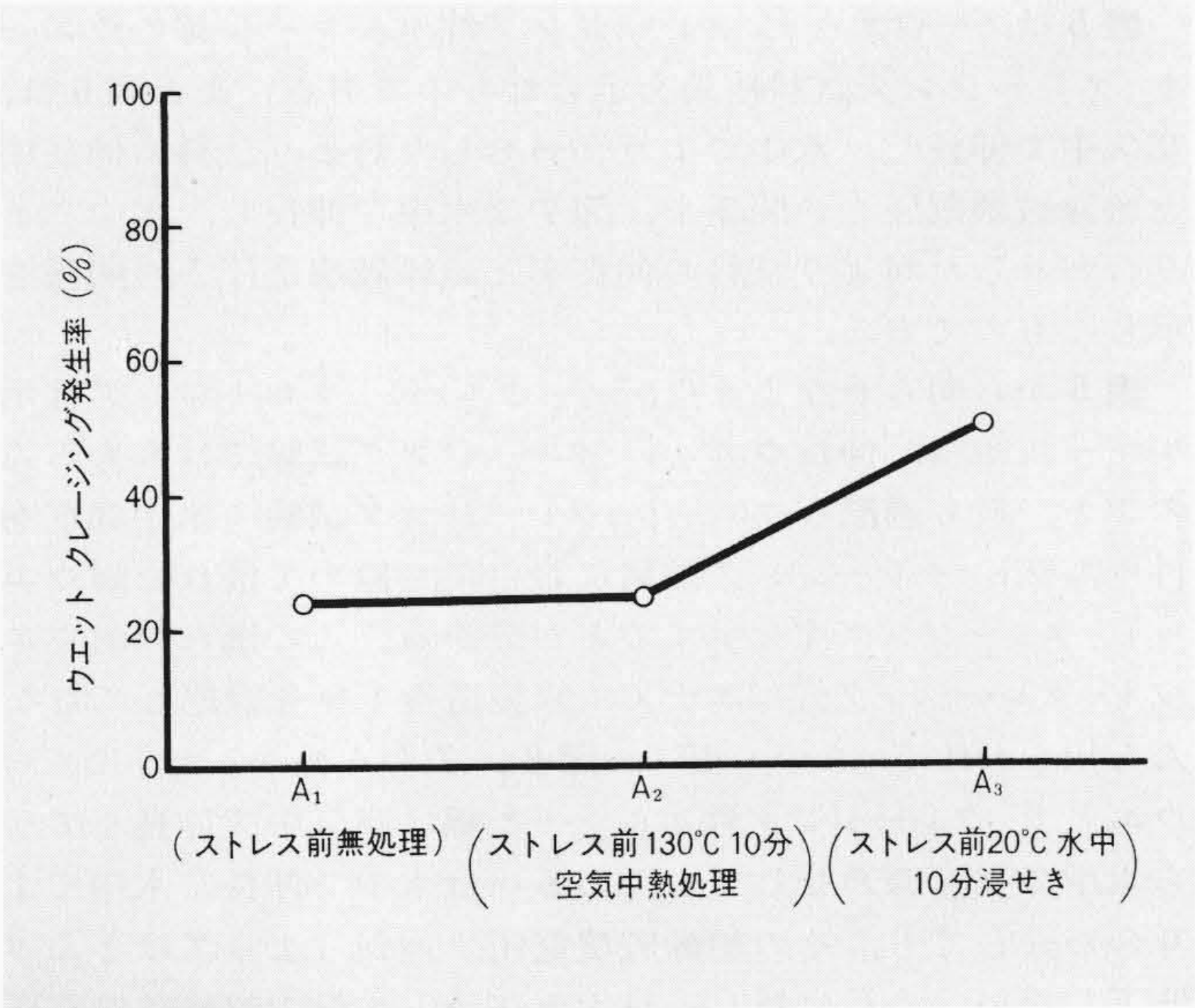


図1 ストレス前処理条件とウェット クレージングとの関係 ストレス前に水中へ浸せきするとウェット クレージングが発生しやすいことを示している。

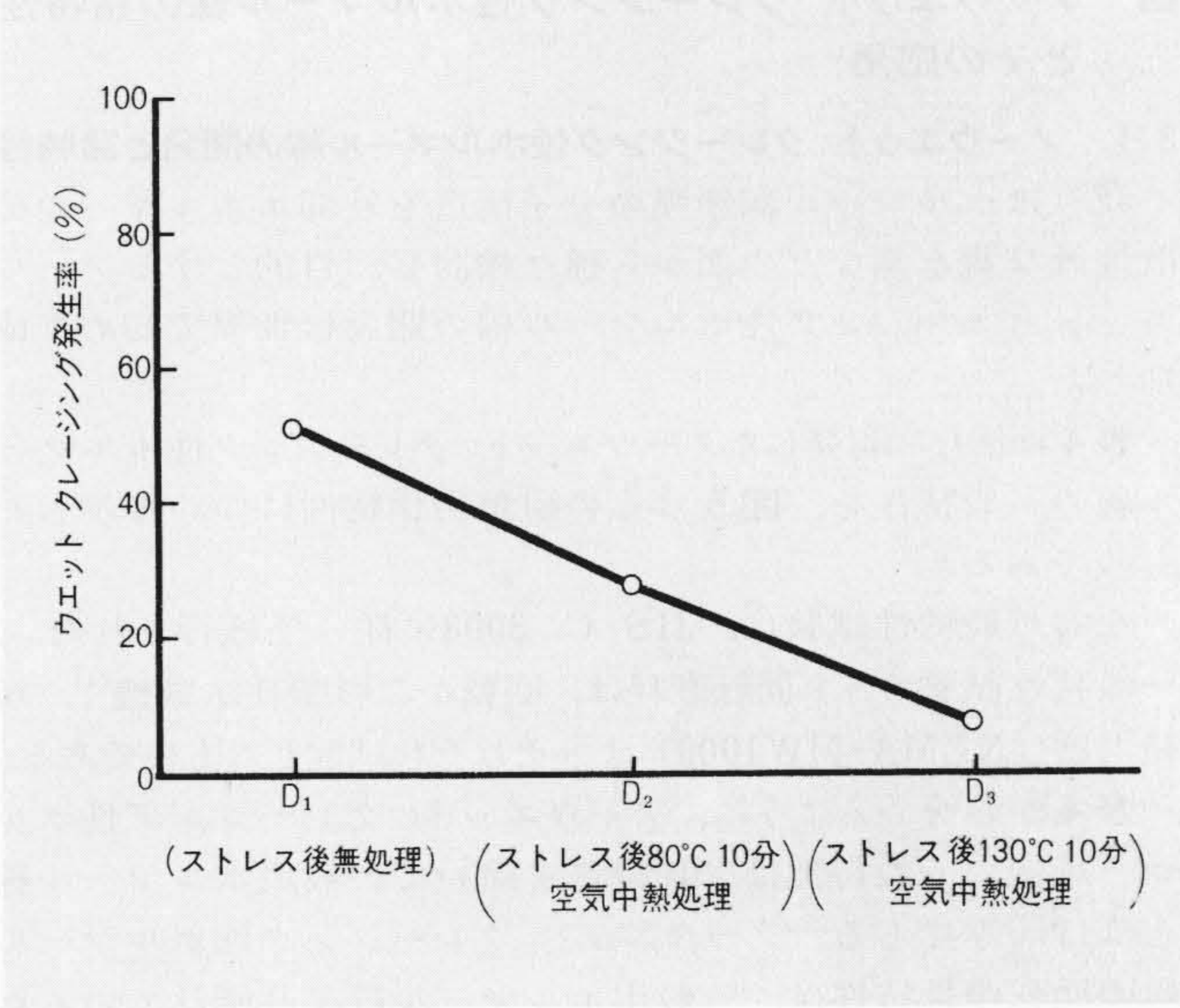


図3 ストレス後の熱処理とウェット クレージングとの関係 ウェット クレージングは, ストレス後熱処理することにより抑止できることを説明している。

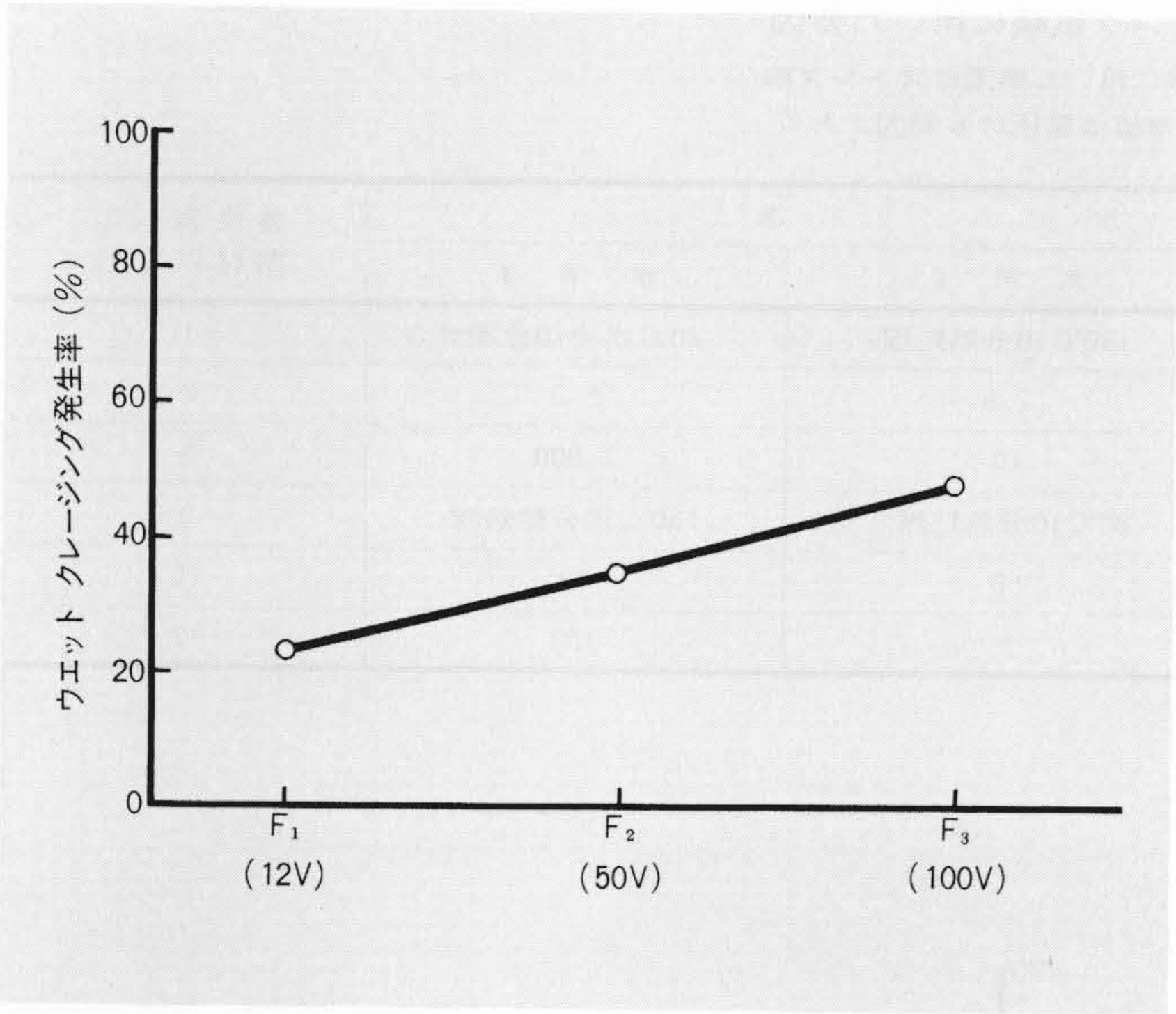


図4 水中課電直流電圧とウェット クレージングとの関係 ウェット クレージングは、水中における直流課電電圧が高いほど発生しやすいことを示している。

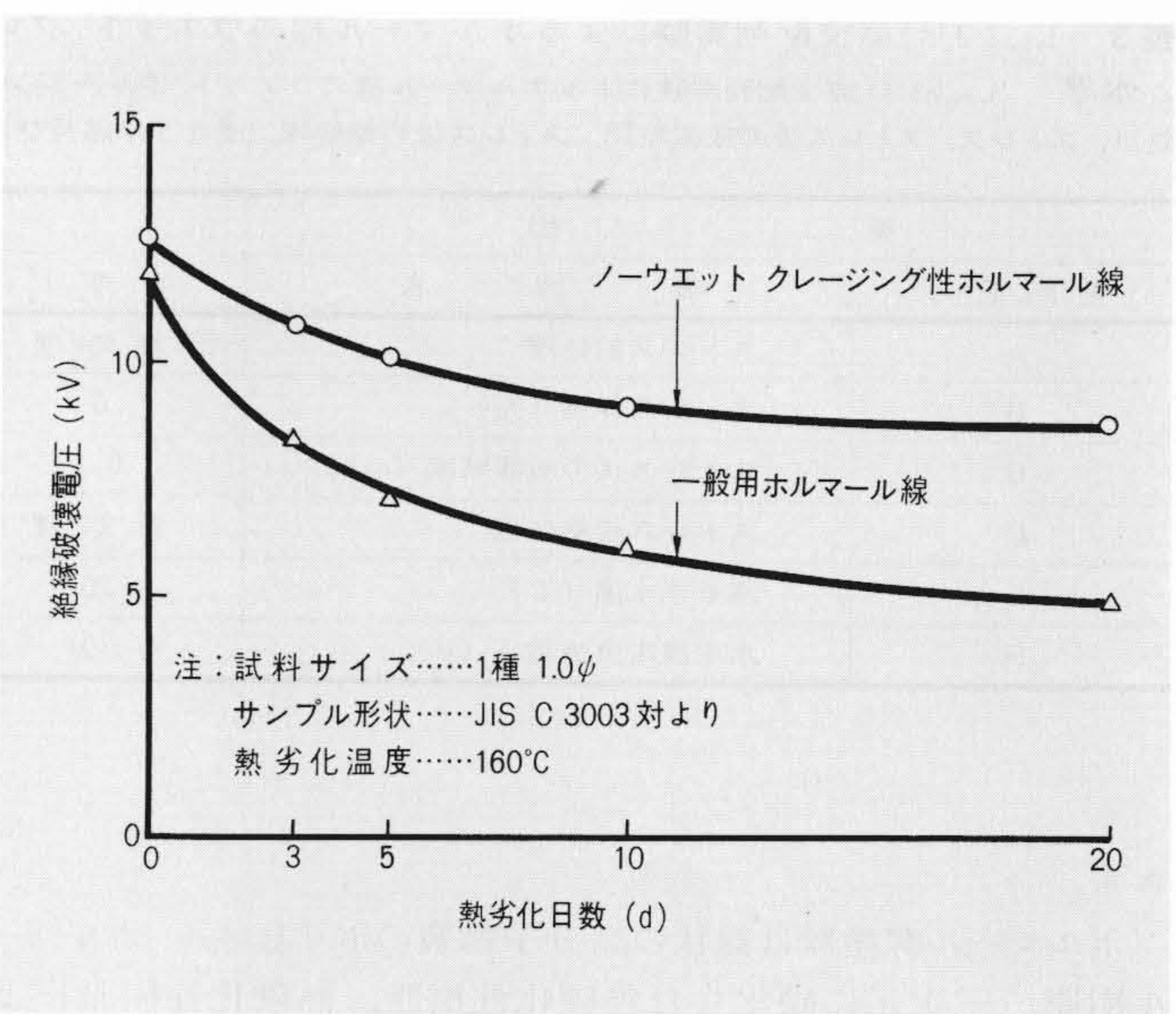


図5 ノーウェット クレージング性ホルマール線の耐熱劣化特性 ノーウェット クレージング性ホルマール線の耐熱劣化特性は、一般用ホルマール線より優れていることを示している。

表4 ノーウェット クレージング性ホルマール線の一般特性試験結果 ノーウェット クレージング性ホルマール線は、往復摩耗特性が若干劣るが、その他の特性は一般用ホルマール線と同等か優れていることを示している。

エナメル線 種 別	試験名 寸 法	寸 法 (mm)		常 態 巻 付 試 験					捻回試験 (回)	往復摩耗 (回)	回転摩耗 (回)	短絡温度 (℃)	絶縁破壊電圧 (kV)
		導体径	皮膜厚	1 倍径	2 倍径	3 倍径	4 倍径	5 倍径					
ノーウェット クレージング ホルマール線		1,000	0.043	0	0	0	0	0	121	39	188	305	12.6
一般用ホルマール線		"	"	"	"	"	"	"	117	52	81	286	12.1
備 考		10回巻コイル 5 個の内のクラックの発生したコイル数で示す。							5 本測定し、その平均値で示す。	荷重0.7kgで6点測定し、その平均値で示す。	荷重13kgで5本測定し、その平均値で示す。	荷重 2 kgで5 回測定し、その平均値で示す。	対より 5 本を測定し、その平均値で示す。

3 ノーウェット クレージング性ホルマール線の諸特性とその応用

3.1 ノーウェット クレージング性ホルマール線の開発と諸特性

我々はホルマール線塗膜の分子構造を外部エネルギーの分散性及び親水基などの面から種々検討し、目的とするノーウェット クレージング性ホルマール線の開発に世界で初めて成功した。

表4は新たに開発したノーウェット クレージング性ホルマール線の一般特性を、図5はその耐熱劣化特性について示したものである。

なお一般特性試験は、JIS C 3003に従って施行された。一般特性試験のうち回転摩耗は、回転かご形摩耗試験機⁽⁴⁾、短絡温度はNEMA-MW1000によりそれぞれ試験したものである。

表4から分かるように、ノーウェット クレージング性ホルマール線の一般特性は摩耗特性を除いて一般用ホルマール線とほぼ同等である。ノーウェット クレージング性ホルマール線の回転摩耗特性は、一般用ホルマール線より優れているが往復摩耗特性は逆に劣る結果を示した。

また図5から明らかなように、ノーウェット クレージング性ホルマール線の耐熱劣化特性は一般用ホルマール線に比べて若干良好である。

表5はノーウェット クレージング性ホルマール線のウェット クレージング試験結果を示したものである。また図6は、空气中で伸長し、水中でより合わせした対より試料の伸長率と絶縁破壊電圧との関係を、図7は水中で伸長し、水中でより合わせした対より試料の伸長率と絶縁破壊電圧との関係を示したものである。

表5から明らかなように、ノーウェット クレージング性ホルマール線は、伸長ウェット クレージング試験ではもちろんのこと、最も過酷なウェット クレージング試験の水中課電巻付ウェット クレージング試験においても極めて優れた耐ウェット クレージング性を示すことが分かる。この優れた耐ウェット クレージング性はエナメル線製造後1年を経過してもなんら損なわれていない。更に、図6、7から分かるようにノーウェット クレージング性ホルマール線は空气中で伸長してから水中でより合わせしても、あるいは水中で伸長し水中でより合わせしても、その絶縁破壊電圧は伸長によってほとんど低下しない。これに対し一般用ホルマール線の絶縁破壊電圧は、伸長率の増加するに従い著しく低下する傾向を示している。一般用ホルマール線の絶縁破壊電圧が伸長後の水中対より合せで著しく低下するのは伸長による本質的電気的特性の低下⁽¹²⁾とウェット クレージングによる電気的特性の低下が重

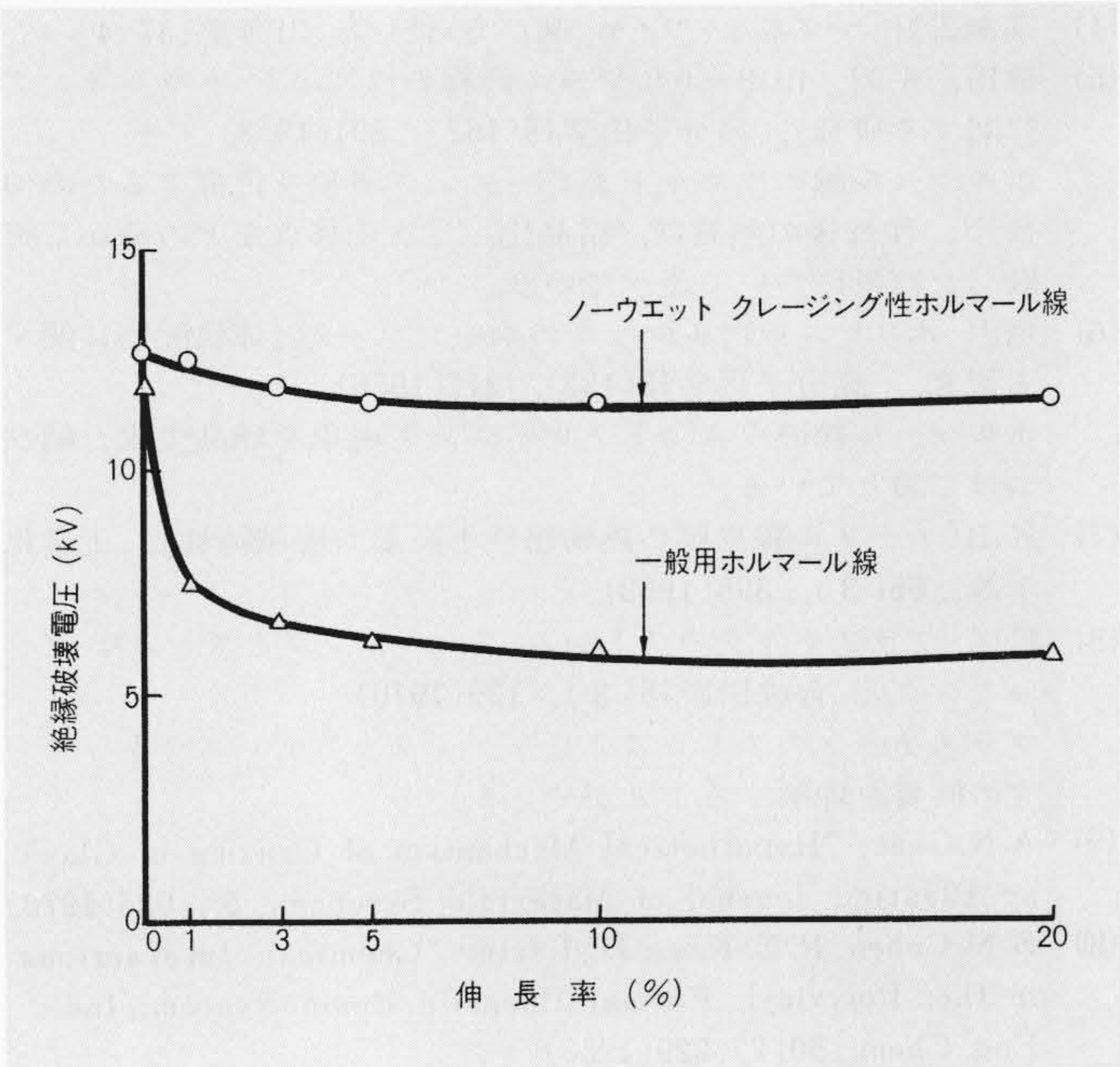


図6 ノーウエット クレージング性ホルマル線の空气中伸長、水中より合わせした対より試料の伸長率と絶縁破壊電圧との関係
ノーウエット クレージング性ホルマル線は、空气中で伸長してから水中でより合わせしても、その絶縁破壊電圧はほとんど低下しないことを示している。

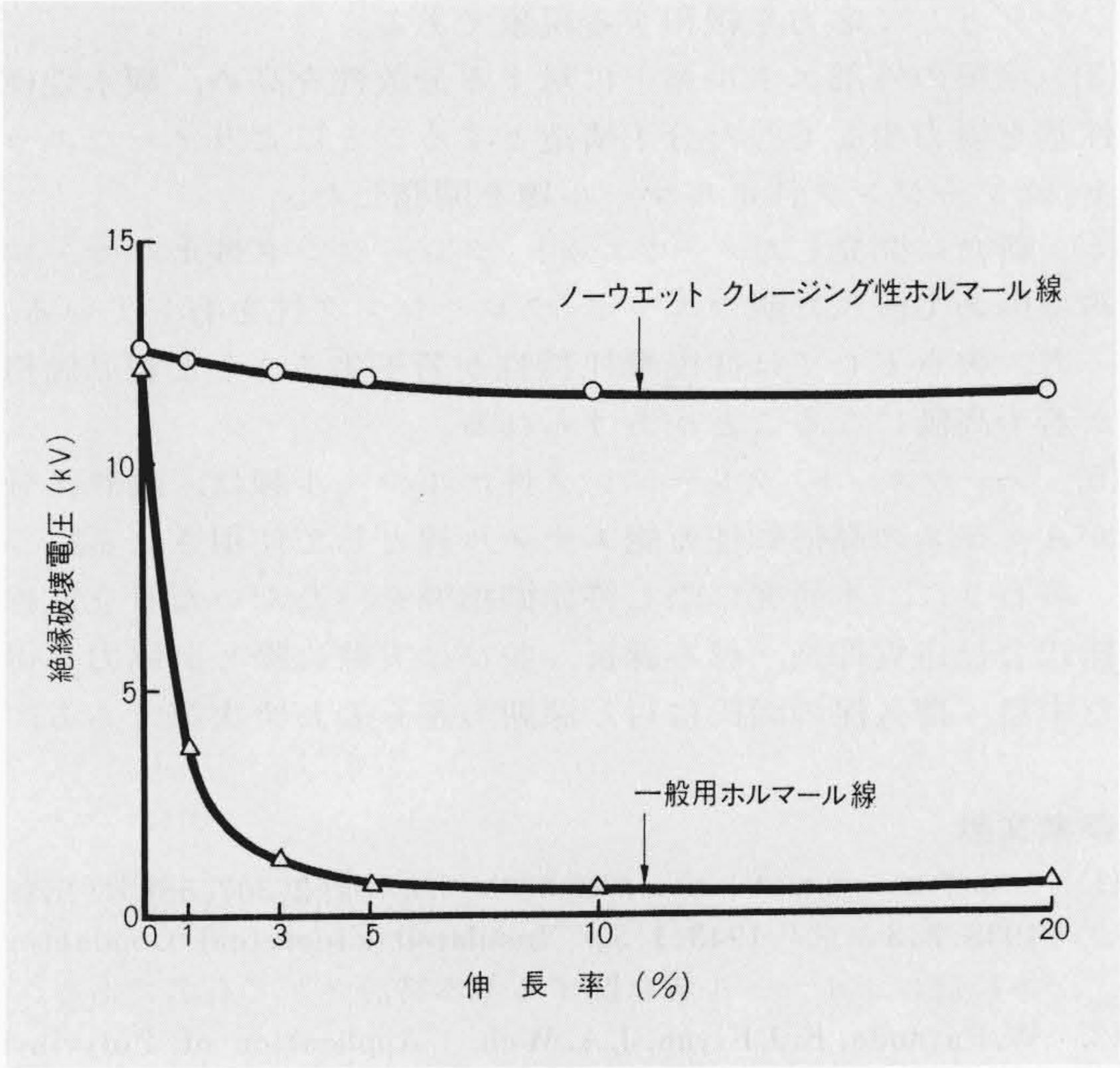


図7 ノーウエット クレージング性ホルマル線の水伸長、水中より合わせした対より試料の伸長率と絶縁破壊電圧との関係
ノーウエット クレージング性ホルマル線は、水中で伸長してから水中でより合わせしても、その絶縁破壊電圧はほとんど低下しないことを示している。

表5 ノーウエット クレージング性ホルマル線のウエット クレージング試験結果
ノーウエット クレージング性ホルマル線は、一般用ホルマル線に比較し極めて優れた耐ウエット クレージング性を有していることを示している。

サンプル区分 試験名 ストレス	常 態 の ウ ェ ッ ト ク レ ー ジ ン グ 特 性										製造1個年経過後のウエット クレージング特性			
	伸長ウエット クレージング試験						水中課電巻付ウエット クレージング試験				水中課電巻付ウエット クレージング試験			
	1%	3%	5%	10%	20%	30%	10倍径	20倍径	30倍径	40倍径	10倍径	20倍径	30倍径	40倍径
エナメル線名														
ノーウエット クレージング性ホルマル線	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
一般用ホルマル線	5	5	5	"	"	"	5	5	5	5	5	5	5	5
備 考	エナメル線を空气中で伸長した後、20～30秒以内にフェノールフタレイン添加0.2%食塩水中に浸せきし、直ちに直流12V 1分を課電した。結果は30cmの試験片5本の内のクレージングの発生した試験片の数で示す。						エナメル線をフェノールフタレイン添加0.2%食塩水中に浸せきし直ちに直流12Vを課電しつつ導体径の10～40倍径に5ターンずつ巻き付けた。結果は1分後の5ターンの内のクレージングの発生したターン数で示した。							

なったためと考えられる。
一方、ノーウエット クレージング性ホルマル線の絶縁破壊電圧が伸長後の水よりでもほとんど低下しないのは、塗膜の外部エネルギーに対する分散性及び非親水性が優れているためと考えられる。

3.2 ノーウエット クレージング性ホルマル線の応用

今回開発したノーウエット クレージング性ホルマル線は、極めて優れた耐ウエット クレージング性を有しており、その他の諸特性においても一般用ホルマル線とほぼ同等である。一方、ノーウエット クレージング性ホルマル線の欠点としては、往復摩耗特性が若干劣るほか高級素材を用いるため製品価格が高価になることがあげられる。

ノーウエット クレージング性ホルマル線は、一般用ホルマル線と同様に耐熱区分がAクラスの電気機器マグネットワイ

ヤとして使用することができる。特に、ウエット クレージングが懸念されるワニス処理なしで用いられる電気機器や、高湿度下で使用される電気機器などのマグネットワイヤに適している。

4 結 言

エナメル線のクラック現象について述べた後、ノーウエット クレージング性ホルマル線の開発とその諸特性について検討した。得られた結論をまとめると次のとおりである。
(1) エナメル線にはヒートショック、ソルベント クレージング、ウエット クレージングなどの種々なクラック現象がある。
(2) ホルマル線のウエット クレージングは、ストレスにより生じた分子鎖の欠陥部に外部エネルギーが蓄積し、その部分へ水分が浸入して微細なクラック、すなわちウエット クレー

ジングとして応力を緩和する現象である。

(3) 塗膜の外部エネルギーに対する分散性を高め、親水性極性基を極力少なくした分子構造とすることによりノーウエット クレージング性ホルマール線を開発した。

(4) 新たに開発したノーウエット クレージング性ホルマール線は極めて優れた耐ウエット クレージング性を有している。一方、欠点としては往復摩耗特性が若干劣ることと製品価格が若干高価になることがあげられる。

(5) ノーウエット クレージング性ホルマール線は、耐熱区分がAクラスの高信頼性万能エナメル線として使用される。

終わりに、本研究に際し終始御指導をいただいた日立電線株式会社古賀部長、杉本課長、並びに実験に際し御協力を得た中島、押久保の両氏に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- (1) ゼネラル・エレクトリック社：アメリカ特許2,307,588号(出願1938.7.8, 公告1943.1.5)「Insulated Electrical Conductor」本特許はホルマール線に関する基本特許として有名である。
- (2) W. Patnode, E. J. Flynn, J. A. Weh, "Application of Polyvinyl Acetal Type Resin to Magnet Wire., Ind. Eng. Chem., 31, 1063 (1939)
ホルマール線の特性について初めて発表された論文である。
- (3) 電気学会マグネットワイヤ専門委員会編「合成樹脂エナメル線」コロナ社 (37-8)
この論文の中でホルマール線にはウエットクレージング現象があることが述べられている。
- (4) 間瀬喜好「マグネットワイヤ 選び方・使い方」山海堂 (37-4)
- (5) 藤田、平岡、山田「ホルマール銅線のウエット クラッキングに関する研究」、高分子化学15(162), 591(1958)
ホルマール線のウエットクレージング現象を把握するため伸長率、伸長後の熱処理、結晶化、二次転移点などの面から実験した結果について述べている。
- (6) 増沢「ポリビニルホルマールの水中クラックと球状配列に関する研究」、高分子化学13(133), 211(1956)
ホルマール線のウエットクレージング現象を球晶生成と結びつけて論じている。
- (7) 外山「エナメル線皮膜の熱衝撃性と高温の機械特性」、工業化学雑誌66(3), 395(1963)
- (8) 松尾「プラスチックのストレス クレージングとストレス クラッキング」、合成樹脂16(3), 129(1970)
プラスチックのストレスクレージングとストレスクラッキングの概要を理解することができる。
- (9) A. N. Gent, "Hypothetical Mechanism of Crazeing in Glassy Plastic., Journal of Materials Sciences 5, 925(1970)
- (10) S. M. Cohen, R. E. Kass, E. Lavin, "Chemical Interactions in the Polyvinyl Formal Phenolic Resin System., Ind. Eng. Chem., 50(2), 229(1958)
ポリビニルホルマール樹脂とフェノール樹脂の反応について述べている。
- (11) T. L. Smith "Rupture Process in Polymer., Pure Appl. Chem., 23(2/3), 235(1970)
高分子の強度を分子論的立場から述べている。
- (12) 古賀、中里、矢田「各種エナメル線の伸長による特性変化」、日立評論43, 331(昭36-2)

論文抄録

B, N及びArイオンを打ち込んだAlの性質について

日立製作所 北田正弘・鴨下源一

日本金属学会誌 37-12, 1284 (昭48-12)

イオン打ち込み法は、半導体への不純物導入法として近年脚光を浴び盛んに研究されているが、半導体への研究に比較して金属へのイオン打ち込みに関する研究は極めて少ない。金属においてイオン打ち込みが積極的に研究されなかった原因は、半導体に打ち込まれる程度の比較的少量のイオンを打ち込んでも金属の諸特性が十分に変化しないと考えられていたためである。しかし、金属においても通常の合金化法では得ることのできない過飽和合金や化合物の形成、表面硬化、合金層あるいは析出物層の形成、金属の非晶質化、規則合金の不規則化、磁気特性の変化などの応用のほか、後方散乱を利用した結晶解析なども考えられる。

本研究は金属へのイオン打ち込み応用の試みと、金属へのイオン打ち込みに関する基礎的知見を得る目的で行なった。対象材料にはAlを選び、打ち込みイオンとしてはAlと反応しないAr及びAlと反応して化合物を形成する可能性のあるB及びNを選んだ。こ

れらのイオンを打ち込まれたAlの表面硬度の変化、電気抵抗の変化及び内部微細構造の変化について調べた結果を報告している。

イオン打ち込み装置は50keV加速器で、N及びAr源としては99.999%の市販ガスを用い、B源としては99.99%の固体Bを蒸発させて用いた。イオン打ち込みの温度はすべて室温である。Alのイオン打ち込みされた部分の硬度はヌーブ硬度計で測定(荷重は0.5g)した。電気抵抗は室温と4.2°K(残留抵抗)の電気抵抗を求め、その比で相対的な比較をした。内部微細構造は透過形電子顕微鏡により観察した。得られた主な結果は、

- (1) B, N及びArイオンを打ち込んだAlの表面硬度は打ち込み量及びイオンの加速電圧とともに大きくなる。表面硬度の増加量はB, N, Arの順に大きくなる。
- (2) B, N及びArイオンを打ち込んだAlの表面硬度は打ち込み後の熱処理によって変化し、 10^{17}cm^{-2} のBを打ち込んだAlでは表面硬度の増大がみられ、 10^{17}cm^{-2} のNを打ち

込んだ試料では300°Cで極大値を示す。 10^{16}cm^{-2} 以下のB, N及びArを打ち込んだAlの表面硬度は熱処理により単調に減少する。

(3) B, N及びArイオンを打ち込んだAlの4.2°Kにおける残留電気抵抗は打ち込み量の増加とともに大きくなる。増加量はB, N, Arの順に大きくなり、表面硬度の増加量の打ち込みイオン依存性と一致する。

(4) 10^{17}cm^{-2} のBを打ち込んだのち、熱処理した試料の4.2°Kにおける残留電気抵抗は極大値を示し、表面硬度の熱処理依存性と一致する。

(5) 10^{16}cm^{-2} 以上のB, 10^{15}cm^{-2} 以上のN, 10^{15}cm^{-2} 以上のArイオンを打ち込んだAlでは、打ち込まれたイオンが凝集したとみられる点状のコントラストが観察され、空孔などの凝集したとみられる転位ループ及び転位線が多数存在する。 10^{17}cm^{-2} のBを打ち込んだAlでは熱処理によって析出物が生じ、675°Cの熱処理ではAl-AlB₂系共晶が形成された。