

大形回転機固定子コイル用 スーパーハイレジン絶縁方式

Super Hi-Resin Insulation System for Stator Coils of Large Rotating Machines

High voltage stator coils for alternating current generators are required to keep their insulation properties stabilized over a long period of service. Since synthetic resin replaced asphalt compound as an insulating material for coils, the stator coil witnessed a distinct improvement in insulation reliability.

In the experiments with coils insulated with a new type of epoxy resin, named "Super Hi-Resin," the authors confirmed that the reliability had been improved a step further. The results of the experiments and characteristics of this new epoxy resin are described.

安芸文武* *Fumitake Aki*
松延謙次* *Kenji Matsunobu*
谷口正俊* *Masatoshi Taniguchi*
磯部昭二** *Shôji Isobe*
兼子慶市*** *Keiichi Kaneko*
堺 昌彦*** *Masahiko Sakai*

1 緒 言

大形発電機用高電圧固定子コイルは、起動停止の繰返しに対するヒートサイクル特性、温度上昇による熱劣化特性、振動、短絡などに対する機械的特性などに対して長い期間にわたって安定した特性を維持しなければならない。信頼性の高い固定子コイルを製作するために国内外の電機メーカーは合成樹脂を用いた絶縁方式を採用してきた。

日立製作所においても昭和24年以来の研究の結果、不飽和ポリエステルによる絶縁方式のSLSコイル（不飽和ポリエステルレジン真空注入方式コイルの日立商品名）を完成し昭和32年以来大形発電機に適用しすぐれた実績を得てきた^{(1)~(3)}。

一方、早くからエポキシレジンの電氣的、機械的特性のすぐれていることに着眼し試作検討を続けた結果、SLSコイルとはほぼ同一の工程で品質の一段とすぐれたエポキシコイル（ハイレジンコイル）を量産化することに成功した⁽⁴⁾。また、最近各メーカーにおいて開発実用化されている真空注入方式とは全く別の製造方式であるプリプレグ絶縁方式についても開発を進め、ハイモールドコイルとして実用化した⁽⁵⁾。ヨーロッパにおいてはプリプレグ絶縁方式がしだいに拡大適用されてきており、近い将来は真空注入方式にとって代わることもありうると思われるようになっているが、わが国において全面的にプリプレグ絶縁方式へ切り換わるのはまだ数年先のことと考えられるので、今回は真空注入方式であるハイレジンコイルを種々の点で改良、開発したスーパーハイレジンコイルについてその性能を紹介し、参考に供したいと考える。

なお、本論文では新たに開発実用化している「日立製作所の新エポキシレジン」を「スーパーハイレジン」、従来のエポキシレジン単に「ハイレジン」と称することにする。

2 コイル含浸用レジン

含浸用レジンの性能は真空含浸を行なうときに問題となる粘度やポットライフ（使用可能時間）などに伴う作業上の問題点と、硬化時の収縮率および硬化後の電氣的、機械的、熱的特性、経済性などを総合的に評価して判断しなければならない

い。この場合、最近のように合理的な考え方をベースとするときには、必要最小限の特性は満足されなければならないのはもちろんであるが、いたずらに過剰品質であることは避けなければならないと考えられる。またコイルを構成する個々の材料が良好な特性を持たなければならないことは重要ではあるが、多少の欠点があっても、種々の材料を用いた総合的な絶縁システムが、互いに個々の材料の欠点をカバーし合って絶縁システムとして良好なものであれば実用上は十分であることが広く認められつつある。

スーパーハイレジンとは芳香族系、脂環系、脂肪族系など多数のエポキシレジンと各種硬化剤を組み合わせることで要求特性を満足するようにしたものである。その特長は低粘度で、真空含浸作業が容易に行なわれることおよびハイレジンに比べポットライフが約2倍長く、エポキシレジンの欠点の一つである短いポットライフを改善したものであり、くり返し使用に対し非常に有利である。

3 コイルの製作法

コイル素線にはガラス被覆線を使用し、素線固めをしアース絶縁を施してある。アース絶縁用マイカテープは巻付け性を良好にするためにやわらかいものが必要であり、またテーピングマシンを用いて機械巻きを行なうためにある程度の引張強度が必要である。今回新たに開発されたマイカテープは、この点を改良したもので特殊なマイカバインダを用い、この両者の特性を兼ね合わせたもので作業性が著しく向上し、テーピング工程が短縮され、均一品質のものが製作可能となった。このマイカテープを半重ね巻きで所要回数巻き付け、最外層に保護のためのガラステープを巻いてある。テーピングを終えたコイルを真空乾燥して、コイル絶縁層の中に含まれている水分や揮発性物質を完全に除去する。次に低粘度のスーパーハイレジン真空下で注入し、さらに加圧して絶縁層内部の微小な間げきまで完全にレジンに浸透させる。このときレジンのポットライフを長くするために、操作はすべて室温

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所国分工場 *** 日立製作所日立研究所

付近の低温度で行なわれる。含浸タンクより取り出されたコイルは加熱硬化させ、レジンの重合反応を行なわせる。このようにして完全に一体となった強固なコイル絶縁層が完成する。これらの真空乾燥工程、含浸圧入工程、加熱硬化工程については、長い経験、実績のあるSLSコイル、ハイレジンコイルの製作の条件を参考にして決定したもので、温度、真空度、圧力、時間などはすべて最適条件が採用されている。硬化の終了したコイルにはコロナ防止用の特殊処理を施し、その後に品質管理のために、寸法測定、誘電正接-電圧特性などのチェックを行なうとともに、全数耐電圧試験を実施している。

4 コイルの特性

コイル絶縁の性能評価はその寿命により決められるが、実際には短期間にその寿命の絶対値を求めることは困難であり、一般的に初期におけるコイルの誘電正接-電圧特性、交流電流特性、絶縁抵抗特性およびコロナ放電特性などを測定し、かつ劣化の特性を実際の劣化状態に近づけ、かつ短期間で長期間の劣化を模擬するため種々の強制加熱劣化試験および実際の運転状態を模擬した過酷なヒートサイクル試験などを行ない、従来の実績と経験の豊富な絶縁システムと同等以上の諸特性を有することを相対的に比較し評価を行なっている。その場合、ベースになるデータとしてはSLSコイルの比較的初期の時代に製作したコイルが、十数年たった運転後でも絶縁破壊電圧の低下がほとんどなく、レジンコイルは非常にすぐれた特性を示すということをつかんでいる⁽³⁾。図1はその中の一例を示すものであるが、最近のエポキシレジンSLSレジンよりも耐熱性その他の特性がすぐれているのでいっそう安全であると考えている。

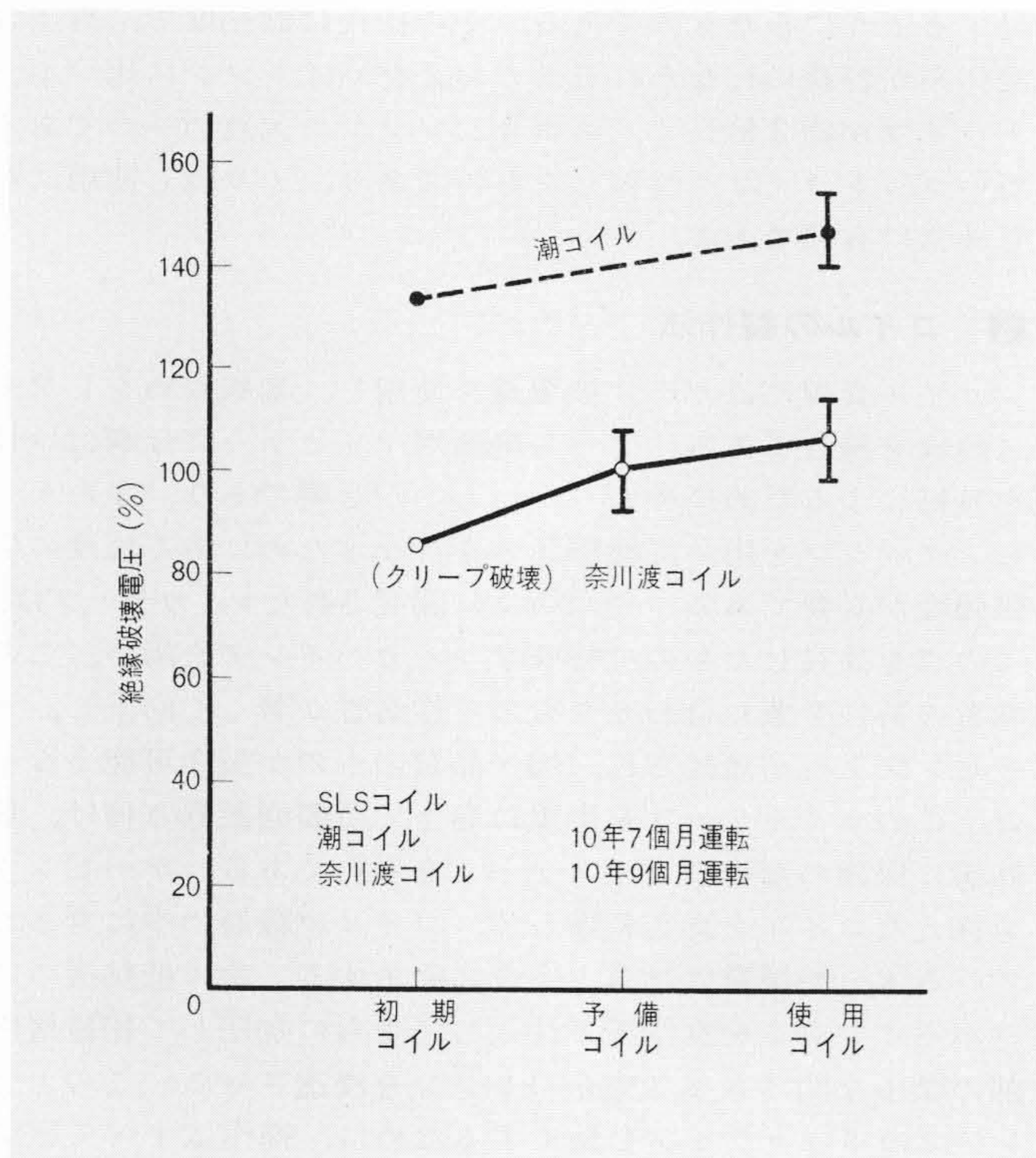


図1 SLSコイルの経年変化特性⁽²⁾ 実機で運転されていた固定子コイルを取り出して絶縁破壊し、初期の値と比較して低下のないことを示した。

Fig. 1 Ageing Characteristics of SLS Coils

4.1 誘電正接特性

図2は11kV定格コイルの誘電正接($\tan \delta$)-電圧特性の一例を示すものである。最近のレジンコイルはレジンの含浸性が良く、また真空含浸技術も高度になっているので、誘電正接-電圧特性は良好で常規電圧(運転状態での最高電圧)までは電圧上昇に基づく誘電正接値の増加が見られず、絶縁層内部のボイドがほとんどないことを意味している。

図3は誘電正接-温度特性の測定結果の一例を示すものである。いずれも温度に対する変化が少なく良好である。

4.2 熱劣化特性

長期間の連続運転によりコイル絶縁層が劣化してくることは当然であるが、実際の場合には劣化の原因となる因子は非常に多く簡単には再現試験ができない。通常はその最も大きな要因を占めると考えられる熱劣化試験、機械の起動停止または負荷の変動などに基づくくり返しの熱膨張による機械的

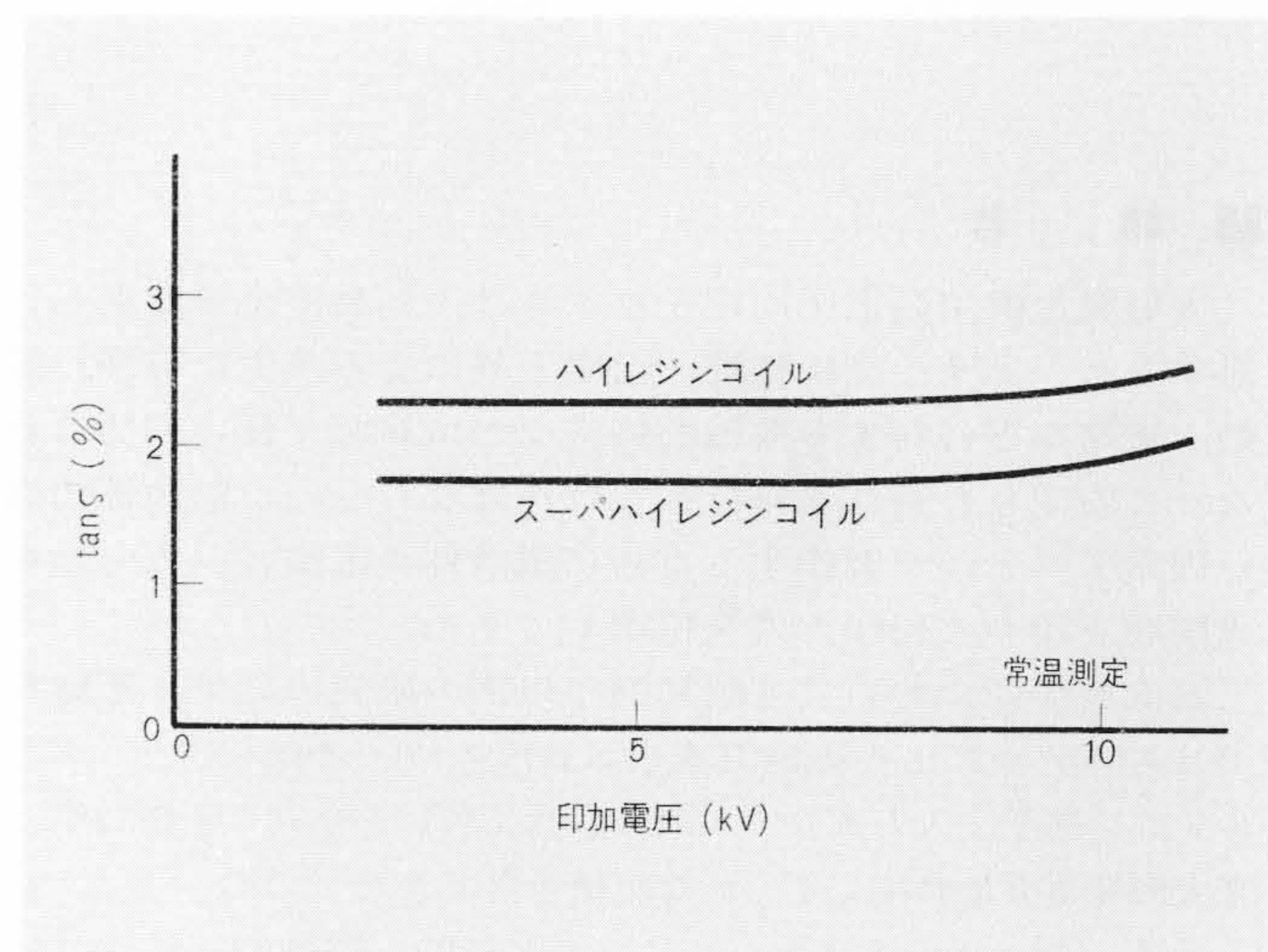


図2 誘電正接-電圧特性の一例 エポキシレジンコイルの電圧に対する $\tan \delta$ (誘電正接)の特性を示したものである。

Fig. 2 Example of $\tan \delta$ -Voltage Characteristics of Resin Coils

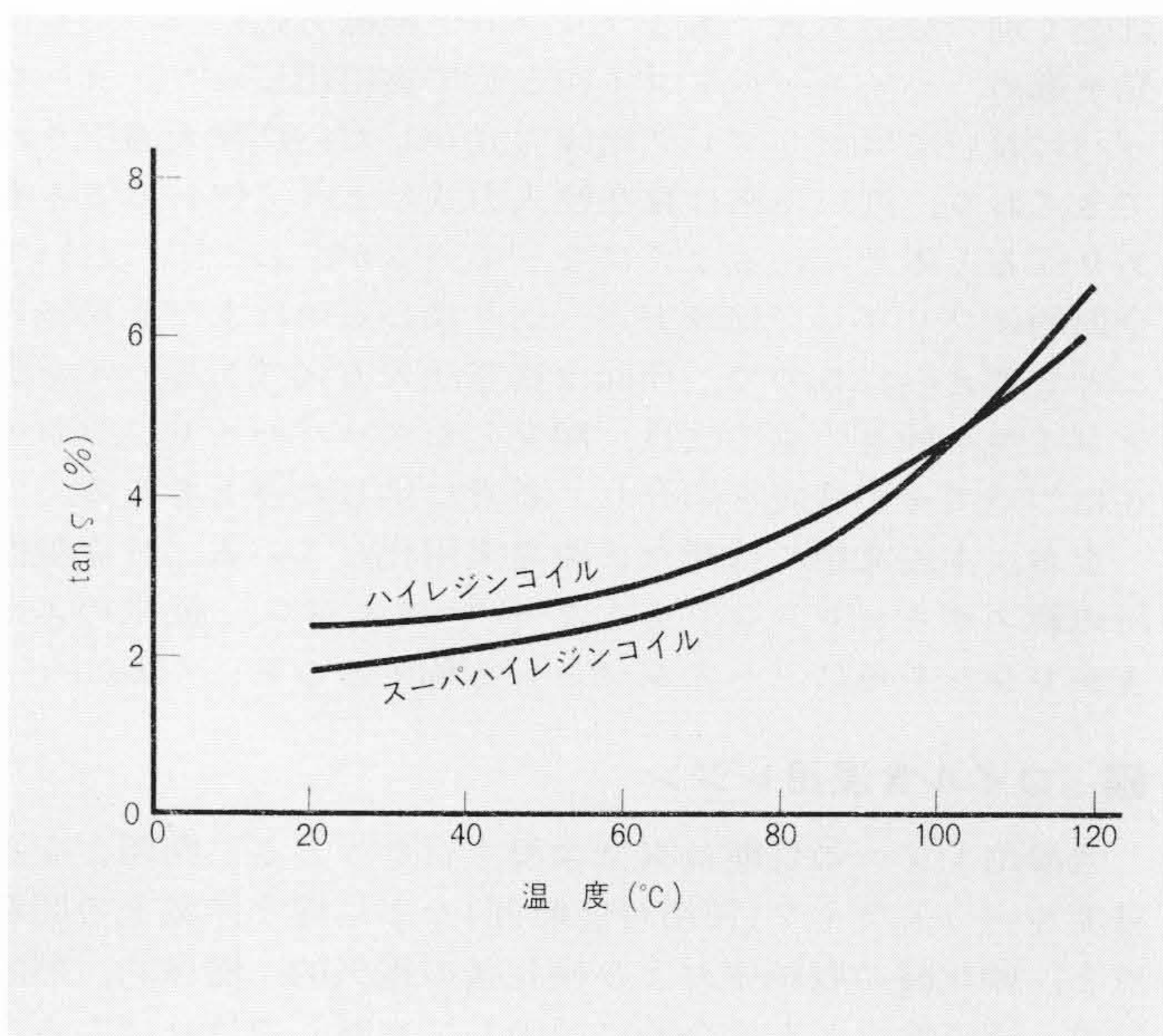


図3 誘電正接-温度特性の一例 エポキシレジンコイルの2kV電圧印加時の $\tan \delta$ (誘電正接)の各温度における特性を示したものである。

Fig. 3 Example of $\tan \delta$ -°C Characteristics of Resin Coils

劣化を模擬したヒートサイクル試験、機械の振動に基づく振動疲労試験などが実施され、試験条件を実際に運転中に加わると考えられる条件よりも過酷にして加速劣化試験とし、従来の実績ある安定した材料を用いたコイルの特性と比較検討するのが普通である。

図4および図5は、固定子コイルについて行なった180℃200日間の強制加熱劣化試験の結果を示すものである。約15%程度の絶縁破壊電圧の低下を示したが、図1に示すように実機にて低下が全然なかったことからみても相当に過酷な加速劣化試験であったものと考えられる。

4.3 ヒートサイクル特性

コンパウンドコイルにおいては、高温時の接着力が強くないために長大なコイルの場合には発電機の起動、停止のくり返しによって少しずつ絶縁層の移動が生じ、girth crack（絶縁層のくびれ現象）を生じたり、テープのはく離を生じたりする事故があった。しかし合成樹脂系のレジンが使用され

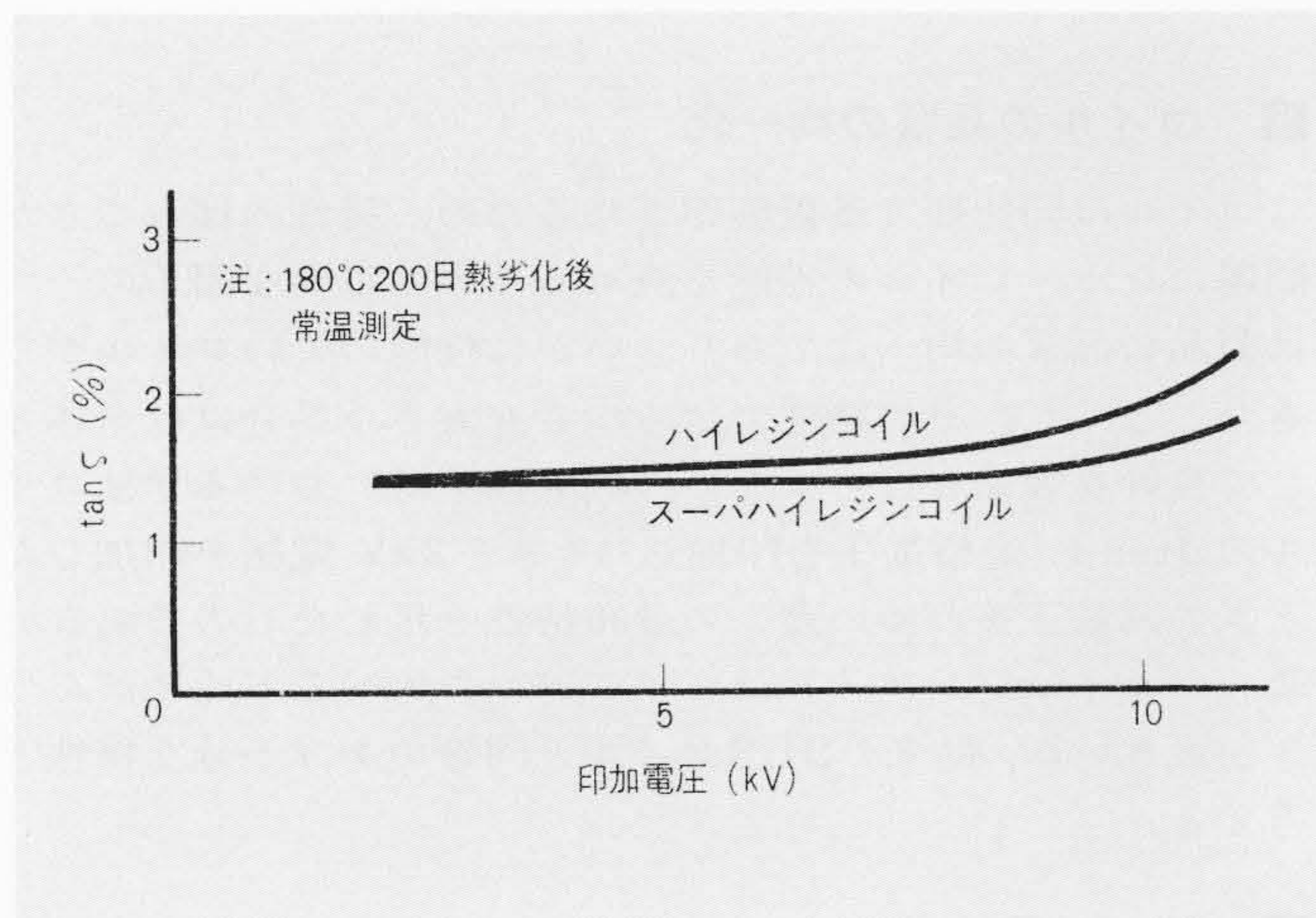


図4 熱劣化後の誘電正接-電圧特性の一例 180℃で200日間恒(こ)温そう中にて加熱劣化した後のtanδ-電圧測定を示したものである。

Fig. 4 Example of $\tan \delta$ -Voltage Characteristics of Resin Coils After Ageing

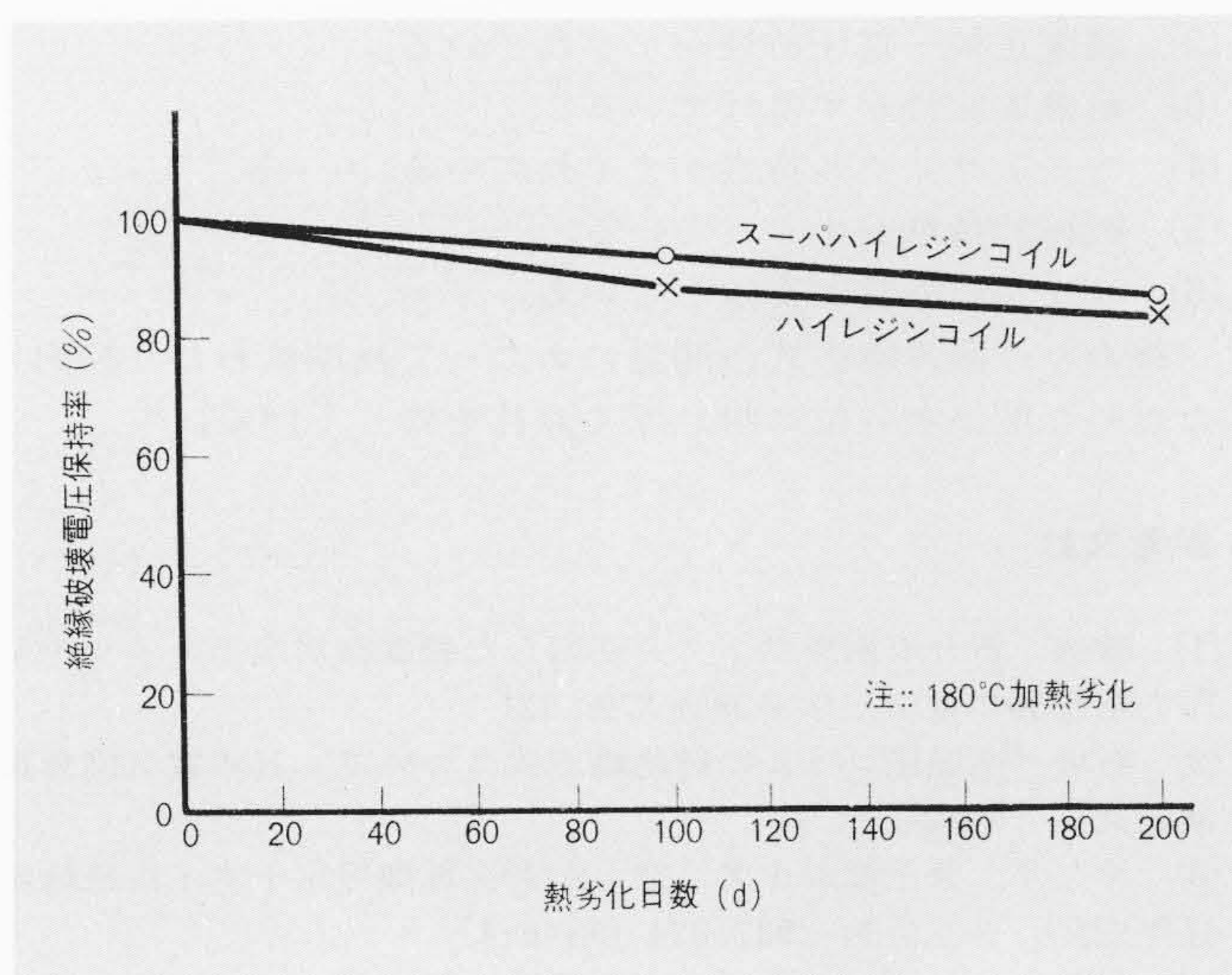


図5 熱劣化特性の一例 180℃で熱劣化を行なったとき100および200日後に取り出し、絶縁破壊電圧を測定して低下の割合を比較したものである。

Fig. 5 Example of Ageing Characteristics

るに及んでこの種の事故はほとんどなくなった。しかし、このような経験および近年のように起動停止がひんぱんに行なわれる揚水式発電電動機やせん頭負荷用発電機の増大に伴い、耐ヒートサイクル特性の検討が必要となった。

発電機の大形化に伴い固定子コイルも長くなり、負荷変動によりコイルの絶縁層に過酷な影響を与えることになった。すなわち、負荷の変動により冷熱サイクルを受け、その都度コイル導体と絶縁層の熱膨張係数の差、それぞれの冷却、加熱速度の相違などが原因となって伸縮に差を生じ、導体と絶縁層の間でずれが生じてくることが考えられる。実際の運転時の条件に似た条件で加速したヒートサイクル試験を行ない、絶縁層を評価することが望ましいわけであり、各社とも試験条件は異なるが、寿命を推察する一手段として広く採用されている。

日立製作所においてもすでに十数年前からヒートサイクル試験を実施し、レジン改良時の判定基準の一つと考えてきた。今回もスーパーハイレジンコイルを評価するにあたり、モデルコアにコイルをセットした状態で行なった。全長約4mのモデルコア内にコイルをそう入し、導体に電流を通じて加熱するとともにモデルコアに蒸気を通して加熱し、鉄損に応じた温度上昇を与える。コイル温度が140℃になったとき、電流および蒸気をしゃ断しモデルコア内に冷却水を通して冷却し、図6に示したようなスケジュールになるように自動制御している。このスケジュールでは、時間に対する温度の変化は実際の機械が遭遇する条件に比べて非常にきびしく、このため絶縁層に発生する応力変化は非常に速く、強度、接着性などすぐれたレジンでなければとうてい追従しきれないと考えられる。またこれは、試験時間短縮化のためにも非常に有利な試験方法である。図6はその試験結果を示すものである。外観上もテープのはく離は認められず全然異常はなかった。

4.4 機械的特性

一般にエポキシコイルはかたくてもろいのではないかという懸念があったが、高電圧コイル用として研究、開発されたエポキシレジンには、種々の基礎データの採取およびダイヤモンド形コイルへの適用実績、全電圧短絡試験の実績、6年に及ぶ使用実績などからみて、従来のSLSレジンコイルとほと

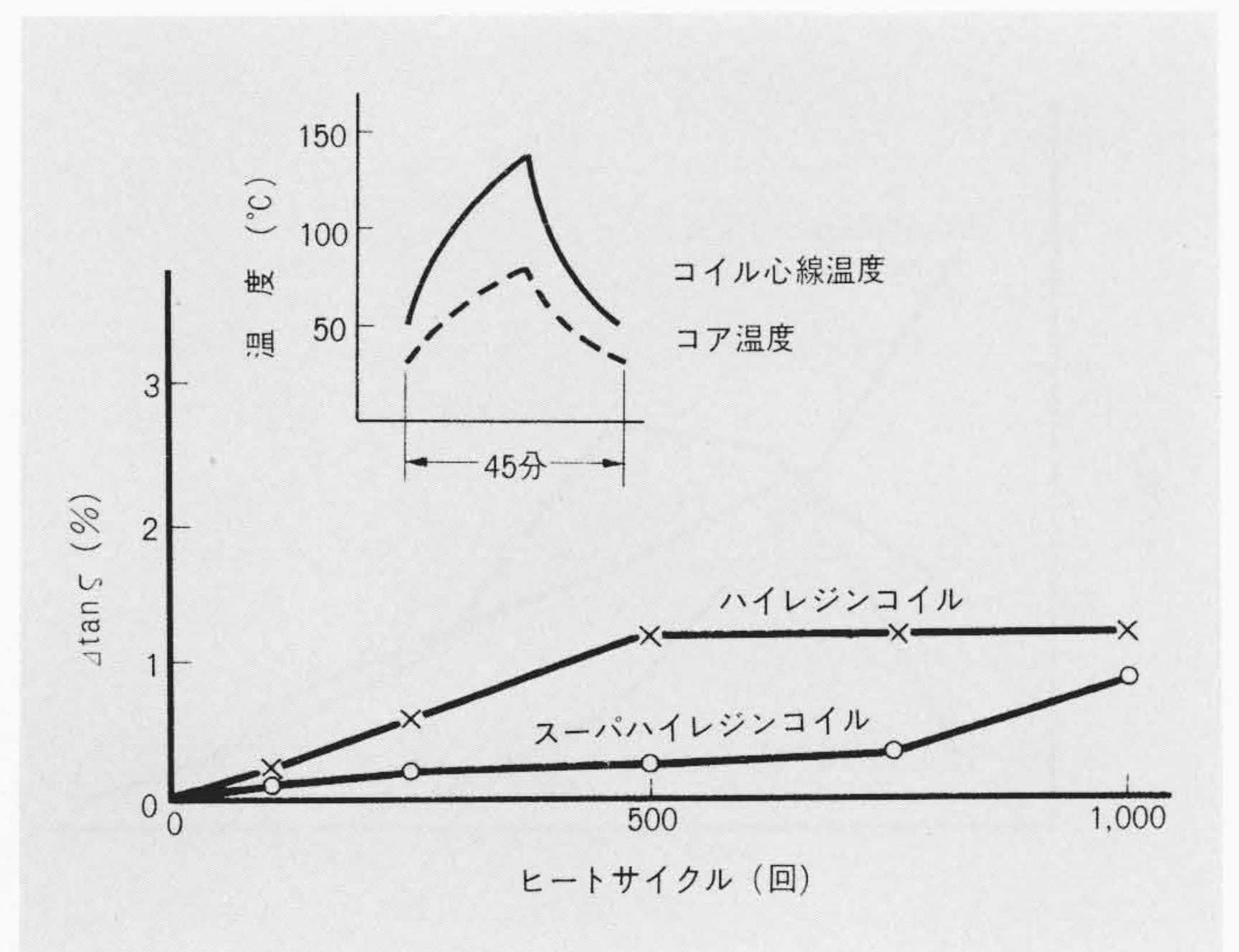


図6 ヒートサイクル特性の一例 レジンコイルに図示の冷熱サイクルを加え、加速劣化させたときの $\Delta \tan \delta$ の変化を測定したものである。

Fig. 6 Example of Heating and Cooling Cycles Characteristics

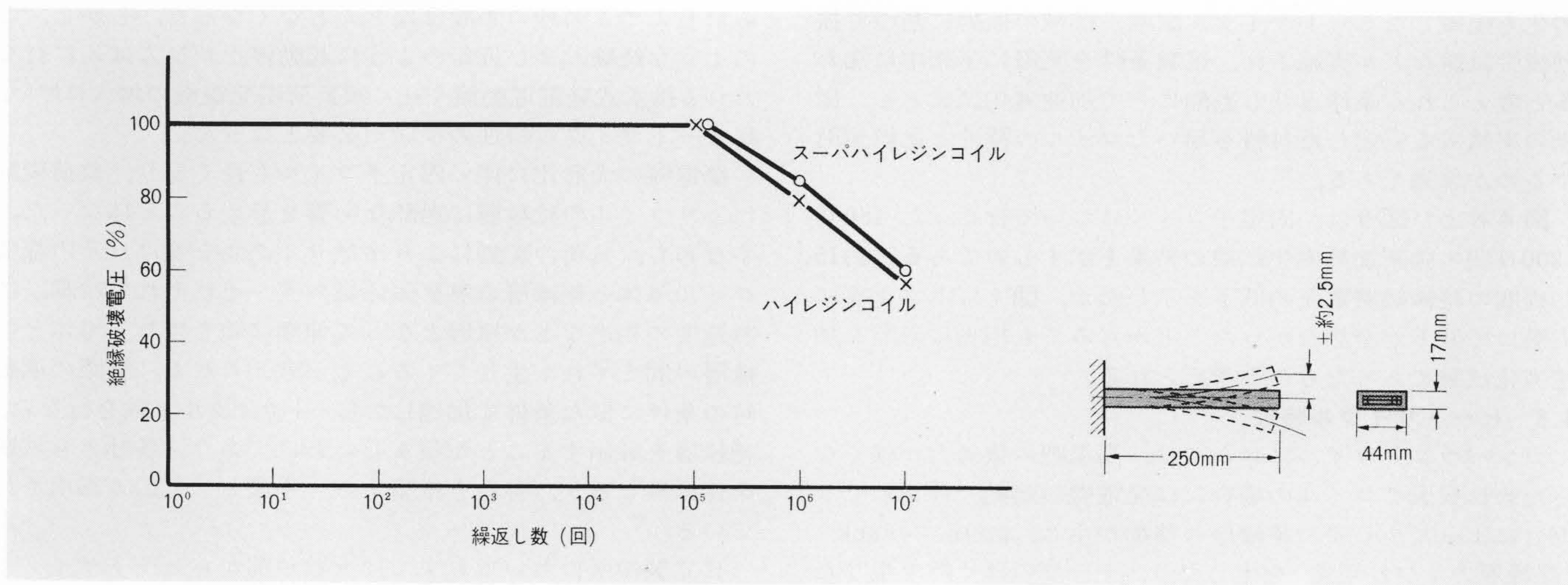


図7 曲げ疲労特性の一例 コイルを片持ばりとして両振幅を与えて繰返しの曲げ疲労を与えた後の絶縁破壊電圧の低下を測定したものである。

Fig. 7 Example of Bending Fatigue Characteristics of Resin Coils

んど同様な実用上のやわらかさを持つことが実証されている。

機械的特性としては、静的曲げ強さ、静的ねじり強さ、衝撃ねじり強さおよびせん断強さなどの諸特性を種々検討したが、図7に代表例として機械の振動による長期間の繰返し疲労に対する特性を示した。コイルを片持ばりとして先端に両振りの繰返し力を印加してコイル表面の最大発生応力がコイル絶縁層の機械的曲げ破壊応力の約 $\frac{1}{3}$ の 500kg/cm^2 になるようにして 10^7 回までの繰返し疲労を加え、その後の絶縁破壊電圧を測定した。外観上はなんらの異常も認められなかったが、絶縁破壊電圧はくり返し数が多くなると低下が大きくなる。しかし 10^5 回後では初期値の絶縁破壊電圧をほぼ保持している。発電電動機の始動時におけるコイル絶縁層の応力は、自己始動方式の機械でも機械的破壊強度の約 $\frac{1}{10}$ 程度以下に設計されているし、また1日1回起動としても40年間で約 1.5×10^4 回であることから、発電電動機のコイルとしても十分な耐力を有するといえることができる。

5 コイルの品質の均一化

コイルは同仕様で多数製作されるため、特性のばらつきが問題になる。コイルの性能を決めるための重要な因子の一つは製品の品質の均一化であり、いかに性能のよいコイルができたとしても、その特性にばらつきが大きい場合には全体として良好な製品とはいえない。図8は実機における単独コイルの $\Delta \tan \delta$ （定格電圧を印加したときと 2kV 電圧を印加したときの誘電正接の値の差）の分布特性を示したものであるが、スーパーハイレジンコイルはハイレジンに比べるとややばらつきが大きい、従来のSLSコイルと同等であり十分な特性と考える。

6 結 言

以上、新しく開発、実用化されたスーパーハイレジンコイルの特性について試験結果を述べた。

これを要約すると、

- (1) 低粘度、長ポットライフのエポキシレジンを使用により、コイル製作作業の改善を行なった。
- (2) 誘電正接—電圧特性がすぐれている。
- (3) 耐熱安定性がすぐれている。
- (4) ヒートサイクル特性がすぐれている。
- (5) 機械的特性がすぐれている。
- (6) コイルの品質が安定している。

終わりに臨み本方式の開発にあたって長期にわたり協力いただいた関係者各位に対し厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 磯部「新合成樹脂ワニスを使用した発電機固定子コイルの製作」昭和30年電気三学会連合大会 321
- (2) 石坂「高電圧コイルの新絶縁方式について」日本電気協会講演論文集（昭32）
- (3) 津久井、兼子ほか1名「無溶剤形発電機固定子コイル絶縁の経年変化」日立評論 53, 324（昭46-4）
- (4) 安芸、松延ほか3名「大形発電機用固定子コイルのエポキシレジン絶縁方式」日立評論 49, 682（昭42-6）
- (5) 藤本、田中ほか4名「大形回転機固定子コイル用ハイモールド絶縁方式」日立評論 54, 611（昭46-7）

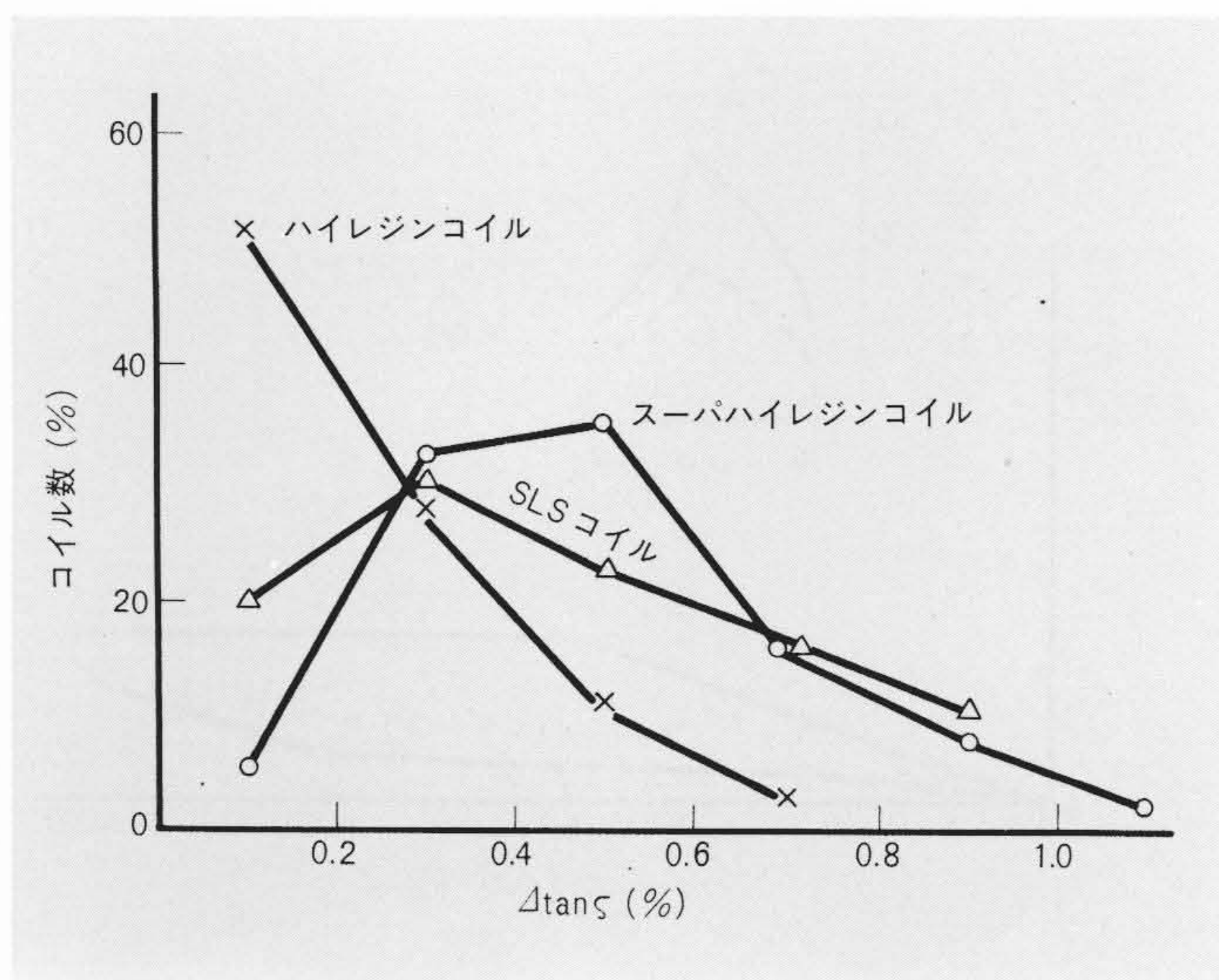


図8 $\Delta \tan \delta$ -特性の一例 レジンコイルの $\Delta \tan \delta$ （本文5. 参照）の度数分布をとり、そのばらつきぐあいを示したものである。

Fig. 8 Example of $\Delta \tan \delta$ Characteristics of Resin Coils