

回転機マイカ絶縁の最近の進歩

Recent Development of Mica Insulation for Large Rotating Machines

大形発電機用高電圧固定子コイルや核融合装置用磁場発生コイルの絶縁には、電気的特性と機械的特性が共に優れているエポキシマイカ絶縁が採用される。この論文では高圧固定子コイルの絶縁方式として実績のある「スーパーハイレジン」と「ハイモールド」の2方式に加えて、新たに耐ひずみ性の優れたプリプレグ絶縁として開発したフレークマイカプリプレグ絶縁方式の、それぞれの特長について述べる。

また最新の技術として、特殊な電圧波形が加わる核融合装置用コイルに対する、周波数非線形抵抗特性をもつSiC塗料によるコロナシールド方式、マイカ絶縁コイルの絶縁劣化診断及び零位法による平行コイル間電位分布測定について紹介する。

門谷 建蔵* *Kadotani Kenzō*
安芸 文武** *Aki Fumitake*
松延 謙次*** *Matsunobu Kenji*
市野沢晴孝**** *Ichinosawa Harutaka*

1 緒言

日立製作所では大形発電機用高圧固定子コイルの絶縁方式として、真空加圧注入方式では「ハイレジン」と「スーパーハイレジン」を、またプリプレグ絶縁方式では「ハイモールド」をそれぞれ実用化し優れた実績を得てきた。^{1)~3)} これらの絶縁は、レジンとして電気的・機械的特性の優れたエポキシレジンを採用し、マイカテープとしては、「ハイレジン」ではフレークマイカを、「スーパーハイレジン」ではフレークマイカと集成マイカとを併用している。マイカは耐コロナ性と機械強度が極めて優れており、高度の信頼性が要求される大形発電機や核融合装置の絶縁には不可欠な材料である。

集成マイカは、大きなフレークにできないマイカ鉱石を粉碎し抄造したシートであるが、省資源化に適し均質性ではフレークマイカに勝っている。しかし、絶縁層に非常に大きなひずみ(あるいは応力)が加わった場合のタフネスでは、フレークマイカのほうが勝っており、均質性とタフネスの長所を組み合わせる方法として「スーパーハイレジン」の併用絶縁方式が考えられた。

先に大形発電機用高圧固定子コイル絶縁の将来方向として、プリプレグ適用方式の拡大を提唱したが、⁴⁾ 更に最近での核融合装置の大形環状コイルでは、真空加圧注入方式は設備的に適用が困難であり、プリプレグ方式を採用せざるを得ない。プリプレグ絶縁でのマイカテープは大部分が集成マイカであるため、その絶縁層はタフネスの点ではいくぶん劣る。大形発電機用高圧固定子コイルの絶縁方式としては十分な信頼性があるが、一般に核融合装置用コイルの絶縁層に繰り返し加わるひずみは、大形発電機の固定子コイルに短絡時に加わる最大ひずみの約2倍が想定されるため、新たにフレークマイカプリプレグ絶縁方式を開発した。この方式は、従来の集成マイカプリプレグとフレークマイカプリプレグとを併用した新絶縁方式であり、均質性とタフネスを兼備し、核融合装置の大形環状コイルに好適な絶縁方式である。

核融合装置用磁場発生コイルには、運転時で電圧立上り時間が数マイクロ秒から数ミリ秒の範囲に及ぶ様々な波形の電圧が加わる。コイルの接続部での沿面クリープ破壊を防止するため、この範囲の電圧波形に共通して有効な周波数非線形抵抗特性をもつシリコンカーバイド(SiC)塗料によるコロナ

シールド方式を見いだした。またマイカ絶縁層の絶縁劣化診断に関して、コイルの平部と角部に独立した分割電極を設けて一連の実験を行ない、劣化のメカニズムや診断の可能性についての知見が得られた。以下にこれらの最新の技術を紹介して参考に供したい。

2 フレークマイカプリプレグ絶縁

「スーパーハイレジン」絶縁と「ハイモールド」絶縁、及び新たに開発したフレークマイカプリプレグ絶縁のそれぞれの特長を、コイルの曲げひずみと絶縁特性の関係から述べる。

11kV級モデルバーコイルに図1に示す4点曲げ負荷を加え、曲げひずみによる $\Delta \tan \delta$ [定格電圧と2kVでの $\tan \delta$ (誘電正接)の差]の変化を示したのが図2である。また、各10本のコイルを供試し、曲げひずみと絶縁破壊電圧の傾向をみたのが図3であるが、これらから次のことが分かる。

- (1) 「スーパーハイレジン」絶縁は、比較的小さいひずみから絶縁劣化が起こり、絶縁層の均質性ではいくぶん劣るが、大きいひずみが加わっても絶縁破壊電圧の低下は緩やかであり、タフネスの点で優れている。
- (2) 「ハイモールド」絶縁は、小さいひずみが加わっても絶縁劣化がほとんど起こらず、均質性の点で優れているが、非常に大きいひずみが加わると著しく絶縁破壊電圧が低下し、タフネスの点でいくぶん劣る。

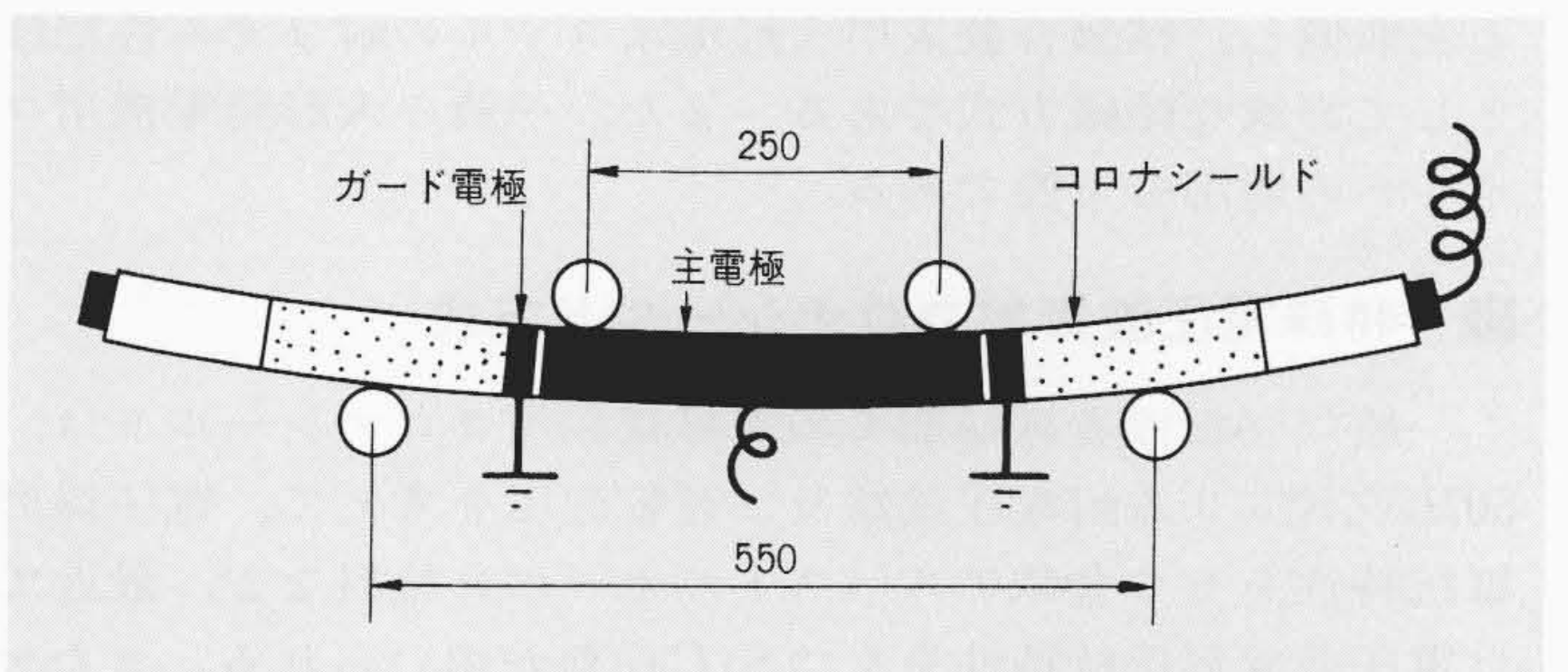


図1 コイルの4点曲げ負荷法 主電極内(長さ300mm)の絶縁層には、ほぼ均一のひずみ加わる。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立工場 工学博士 **** 日立化成工業株式会社山崎工場

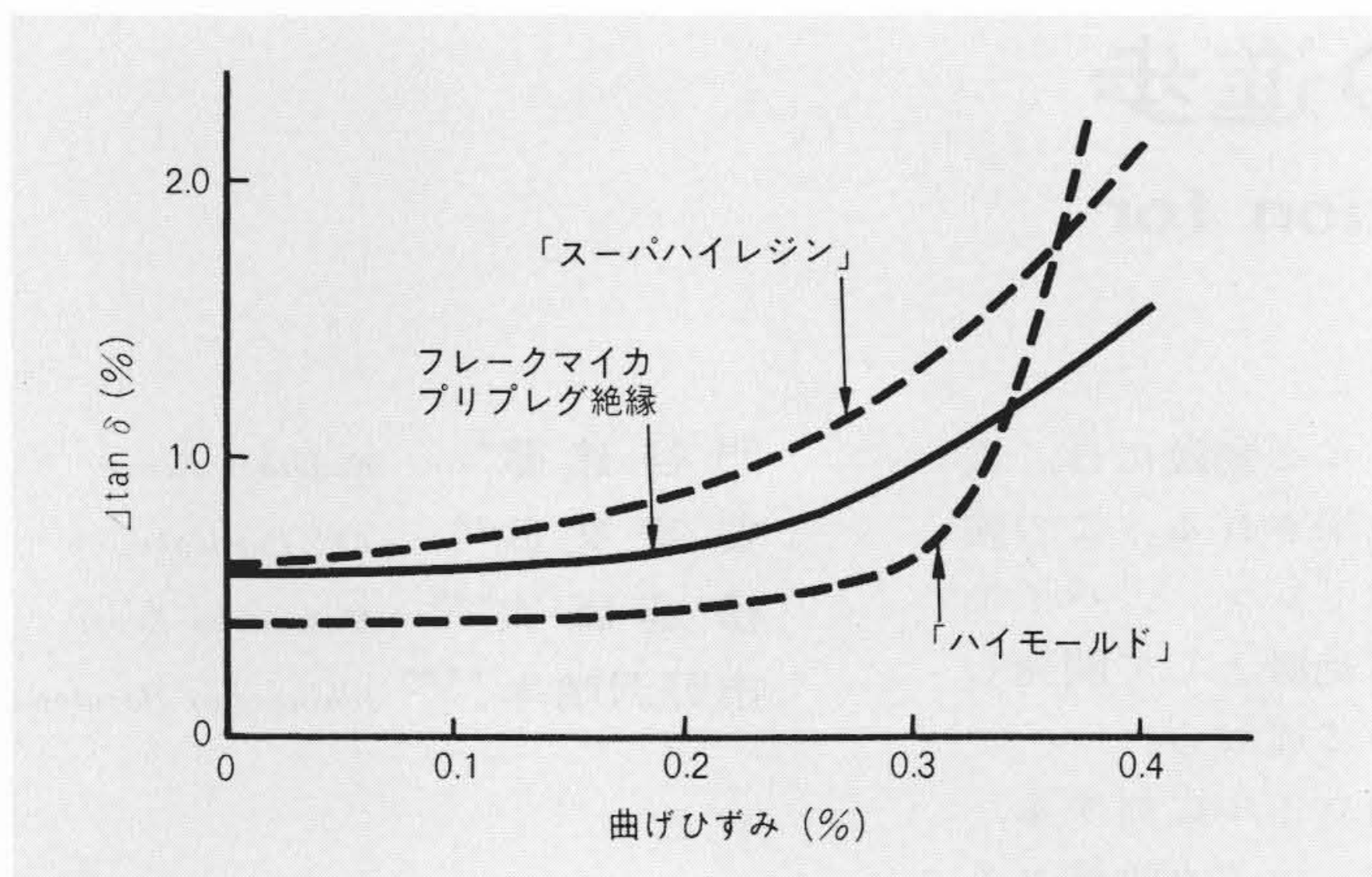


図2 コイルの曲げひずみと $\Delta \tan \delta$ フレークマイカプリプレグ絶縁層は、クラックやはく離を生じにくいことが分かる。

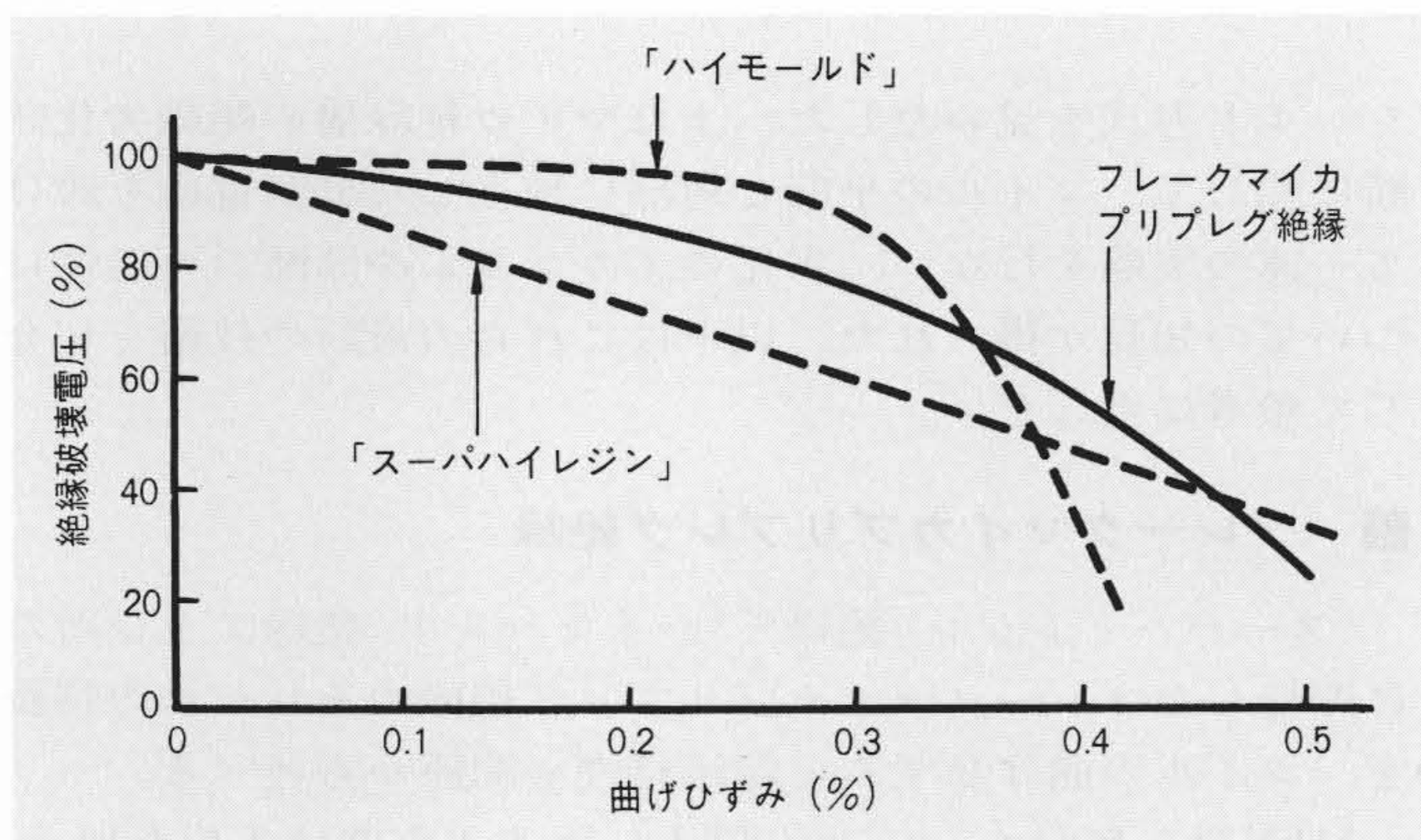


図3 コイルの曲げひずみと絶縁破壊電圧 「ハイモールド」は均質性に優れ、「スーパーハイレジン」はタフネスに優れる。フレークマイカプリプレグ絶縁は、両方の長をもつ。

(3) フレークマイカプリプレグ絶縁は、両者の中間の特性をもっている。すなわち、タフネスの点では「ハイモールド」絶縁よりも優れており、これはフレークマイカを使用しているためである。また均質性の点では「スーパーハイレジン」絶縁よりも優れており、これはプリプレグであるためマイカフレークとレジンのぬれがよく、界面の接着が十分に行なわれているためと考えられる。

このように、新たに開発したフレークマイカプリプレグ絶縁方式は、フレークマイカのタフネスとプリプレグの均質性とを兼備し、核融合装置用大形環状コイルの耐ひずみ性絶縁として好適な絶縁方式である。また、一般の大形発電機用コイルへの適用も可能である。

3 特殊電圧波形用コロナシールド方式

一般に回転機巻線端部での電界緩和用コロナシールドは、50Hz交流による耐電圧試験及び運転電圧を考慮して、電圧線形抵抗特性をもつ含鉄アスベストやカーボン塗料など、最近では電圧非線形抵抗特性をもつSiC塗料が用いられる。またケーブルの端部などでのインパルス電圧に対するコロナシールドは、抵抗値の低いカーボン塗料が用いられる。

電圧立上り時間が、数マイクロ秒から数ミリ秒の範囲に及ぶ核融合装置の磁場発生用コイルのコロナシールドを、従来の方式で行なうには抵抗値を離れた3段以上の長いコロナシ

ールドを設ける必要がある。日立製作所及び日立化成工業株式会社は、SiC塗料を用いた特殊なコロナシールド層が周波数非線形抵抗特性をもち、電圧立上り時間が短い電圧波形に対しては抵抗値が低下して、電界緩和効果が広範囲に及ぶことを見いだした。図4はSiC塗料によるコロナシールド層のインピーダンスの値と、その位相の周波数特性を示すものである。位相がほぼ90度であることから、コロナシールド層のインピーダンスはほとんどがキャパシタンス分であり、高周波(電圧立上り時間が短い)領域ではインピーダンスが著しく低下していることが分かる。

図5はモデルコイルの表面に200mmの距離をおいて電極を設け、この間のクリープ破壊電圧を電圧立上り時間が $1\mu\text{s}$ ～5msの間の電圧を印加して測定したものである。一方の電極の端にSiC塗料によるコロナシールド層を長さ l だけ設けているが、 l が長くなるにつれていずれの電圧波形でもクリープ

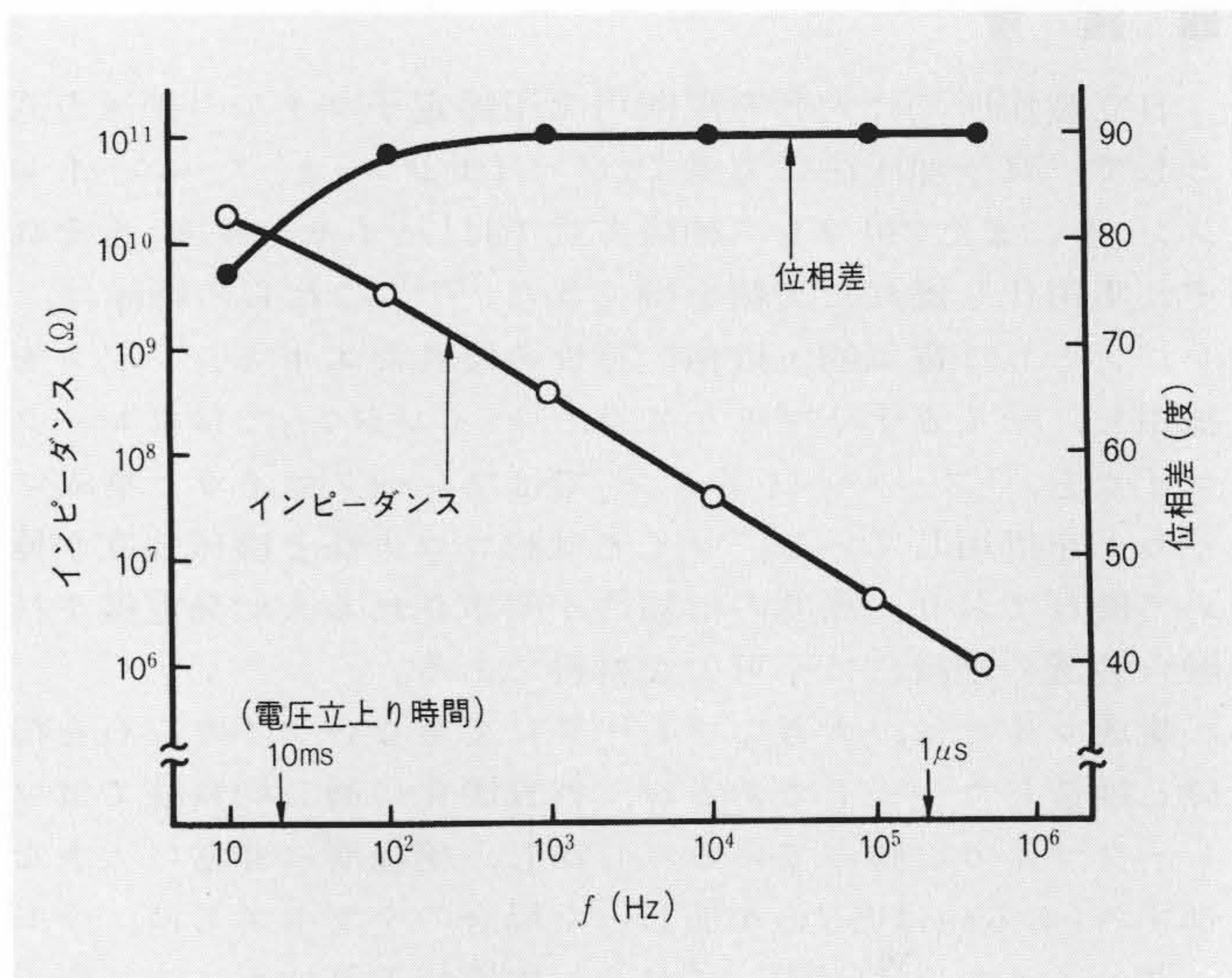


図4 SiCコロナシールド層の周波数特性 インピーダンスのほとんどがキャパシタンス分であり、高周波では著しく低下する。

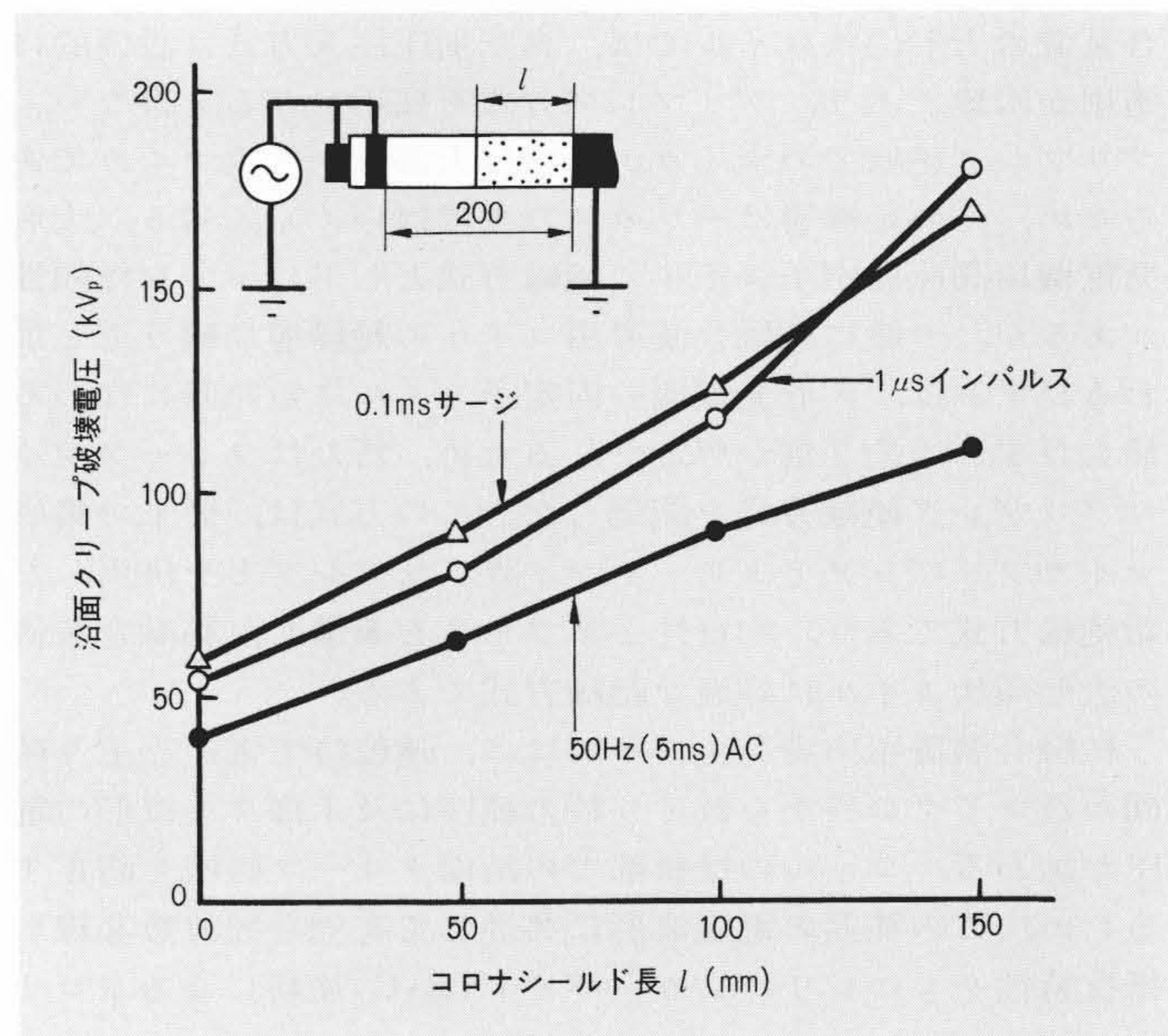


図5 SiCコロナシールドと沿面クリープ破壊電圧 SiCコロナシールドは、電圧立上り時間 $1\mu\text{s}$ ～5msの電圧波形に対し共通して効果がある。

破壊電圧が向上している。
このように、電圧立上り時間が広範囲に及ぶ特殊電圧波形が加わる(例えば核融合装置用コイルなどの)新コロナシールド方式を開発した。

4 マイカ絶縁層の絶縁劣化診断

4.1 絶縁劣化診断の一般的方法

従来から発電機固定子巻線の絶縁劣化診断試験として、コロナ試験、tanδ試験、交流電流試験及び直流試験が一般的に行なわれてきた。これらの非破壊試験での測定値と絶縁破壊電圧との相関が、コンパウンド絶縁巻線の場合には顕著であり、「発電機巻線絶縁劣化判定基準」(昭和42年)がまとめられている。⁵⁾ この基準は、あくまでもコンパウンド絶縁巻線を対象とし、劣化判定に有用であった。

しかし、不飽和ポリエステルレジン更にエポキシレジンによる絶縁巻線に対しては、これらの非破壊試験による判定基準の設定が困難であり、現在まだ決められていない。レジン絶縁巻線は運転中の絶縁劣化が少なく、非破壊測定値の変化も小さいために、外部コロナやコロナシールド層の影響、絶縁破壊電圧と直接関係のない特性上のばらつきなどに隠れて、破壊電圧との相関がつけにくい。⁶⁾

日立製作所及び日立化成工業株式会社はレジン絶縁巻線に対する絶縁劣化診断の可能性をみるため、外部コロナやコロナシールド層の影響をガード電極で除き、また初期特性のばらつきが比較的小さいモデルコイルを用いて理想的な状態で一連の実験を行なった。

4.2 複合劣化コイルによる相関性の検討

11kV級「スーパハイレジン」コイル12本を実験に供試し、表1に示すような劣化を与えた。これらの劣化コイルに対し表2に示す非破壊測定を行なったのち、交流短時間破壊試験を実施した。これらのデータを、非破壊測定値と破壊電圧の相関としてプロットした。図6にΔtanδ(誘電正接の増加分)と破壊電圧の関係を示すがあまり相関がない。図7は常規電圧6.35kV(11/√3kV)でのQmax(最大コロナ電荷量)と破壊電圧の関係であるが相互の相関はあまりない。Vi(コロナ発生電圧)は更に相関がなかった。図8はAIA⁷⁾(Automatic Insula-

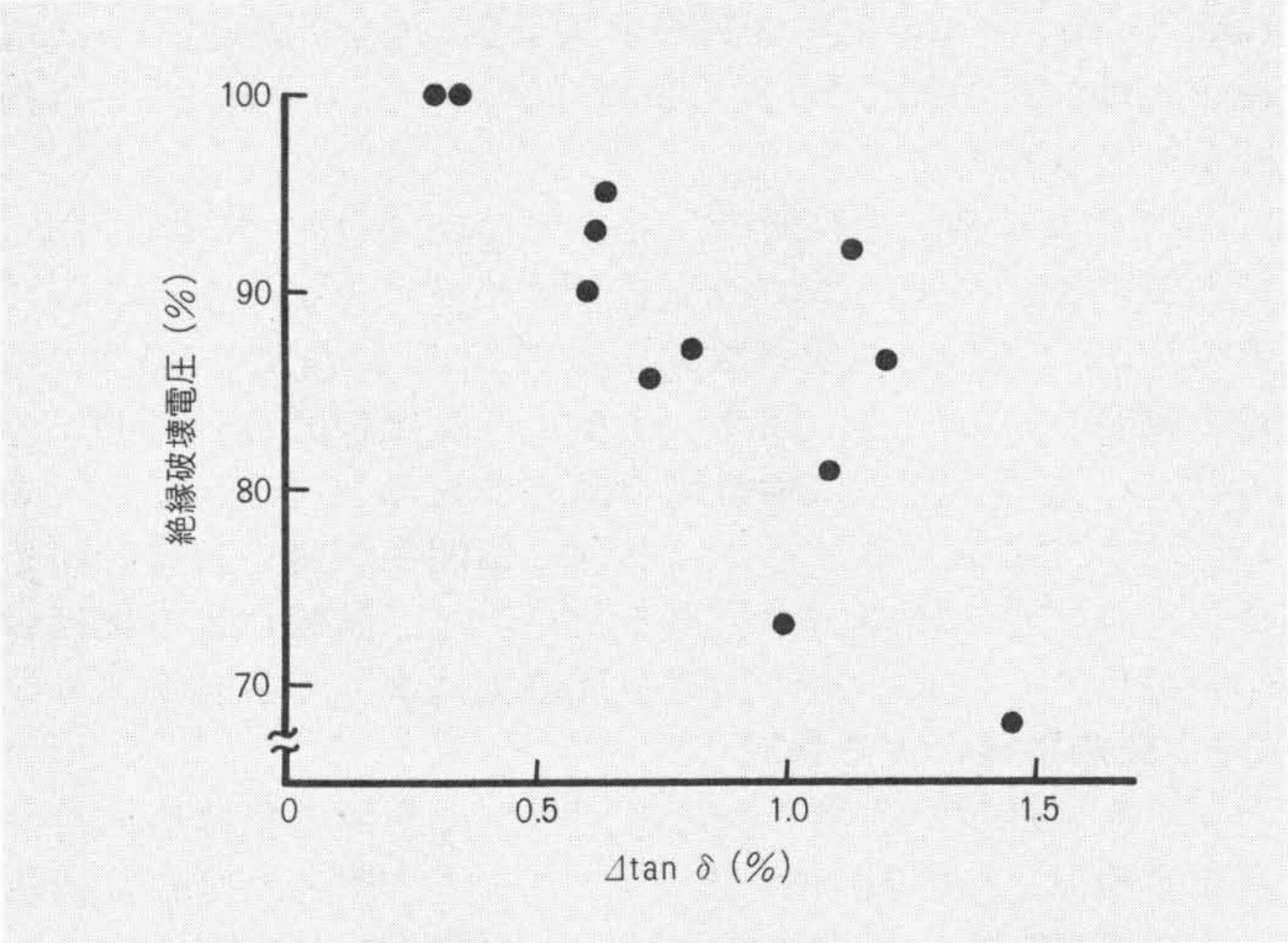


図6 劣化コイルのΔtanδと絶縁破壊電圧 Δtanδと破壊電圧は、あまり顕著な相関がみられない。

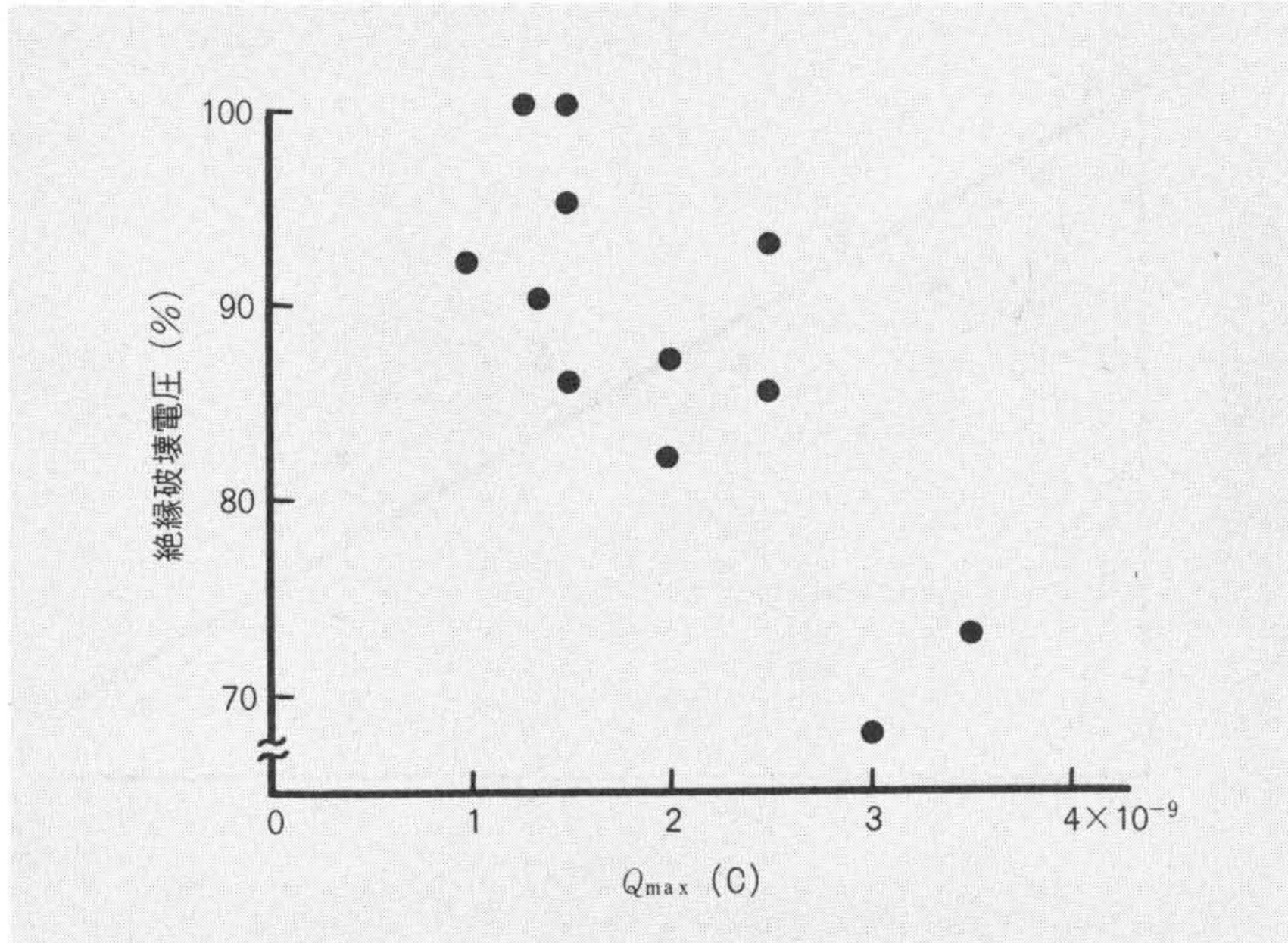


図7 劣化コイルのQmax(at6.35kV)と絶縁破壊電圧 Qmaxと破壊電圧は、あまり顕著な相関がみられない。

表1 11kV級供試コイルの複合劣化条件 静的曲げひずみと課電の複合劣化を加えた。

コイル No.	曲げひずみ (%)	課電劣化 (kV-時間)
1, 2	—	—
3, 4	—	35-100
5, 6	—	30-100
7, 8	0.10	30-100
9, 10	0.10	25-100
11, 12	0.20	25-100

表2 非破壊測定項目 表1に示した劣化コイル(定格11kV)に適用する。

項目	測定内容
Δtanδ	定格電圧Eでのtanδと2kVのtanδの差
Vi	最大コロナ電荷量が1×10 ⁻⁹ C(クーロン)になる電圧
Qmax	常規電圧E/√3での最大コロナ電荷量
m	AIA(自動絶縁特性解析装置)によるmの値

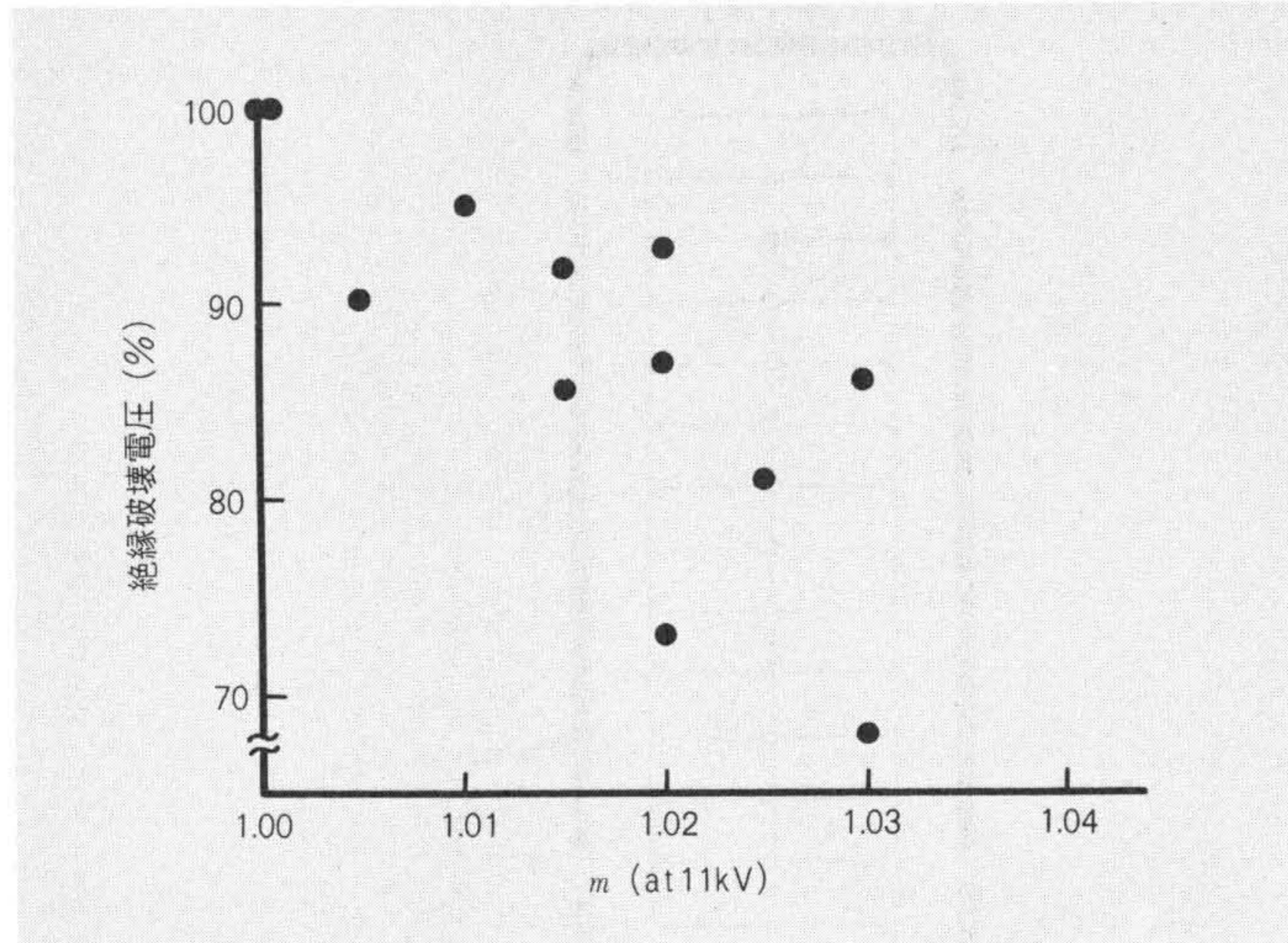


図8 劣化コイルのm(at11kV)と絶縁破壊電圧 定格電圧11kVのmと破壊電圧は相関がみられない。mは交流印加電圧V、電流Iとして、電流増加傾向ΔI/ΔVの変化を表わす。低電圧でのΔI/ΔVを1.0としてその増加の傾向を示している。

tion Analyser：自動絶縁特性解析装置)により測定した m (電流増加傾向の増加倍数)の定格電圧での値であるが、これも相関がみられない。

AIAによる測定の長所は、非常に短時間(10～20 s)で測定できるので、高電圧まで印加しても絶縁劣化が少ないことである。⁷⁾そこで、耐電圧試験電圧の1.2倍に相当する30kVでの m を測定したところ、図9に示すような比較的良い相関がみられた。このように試験時間を極めて短くして、なるべく高い電圧まで試験するということは、相関性の良い絶縁診断を行なうアプローチの一つである。しかし、試験による絶縁劣化の進行がないよう、印加電圧は慎重に決める必要がある。

4.3 分割電極による検討

コイルに曲げひずみを加えて、平部と角部の絶縁層の特性変化を検討した結果は既に述べた。⁸⁾ここで用いた分割電極法により絶縁診断の可能性を検討した。図10に分割電極を示す。図11は11kV級「スーパーハイレジン」コイル10本の初期での $\tan\delta$ のばらつき幅を示す。平部の特性はばらつきが小さいが、角

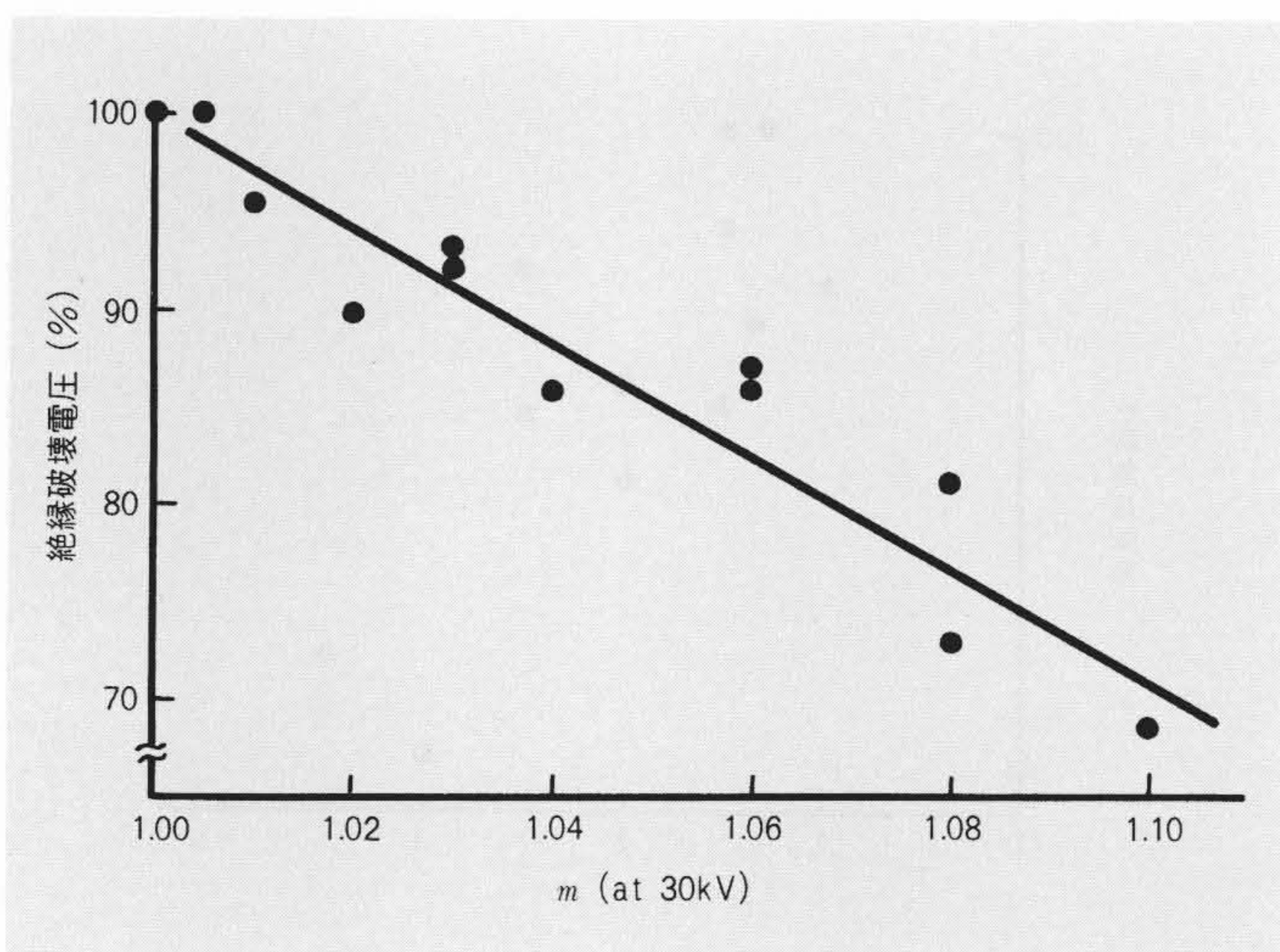


図9 劣化コイルの m (at 30kV)と絶縁破壊電圧 試験電圧 $2E+3=25kV$ の1.2倍の電圧30kVの m と破壊電圧は、比較的良い相関がみられる。

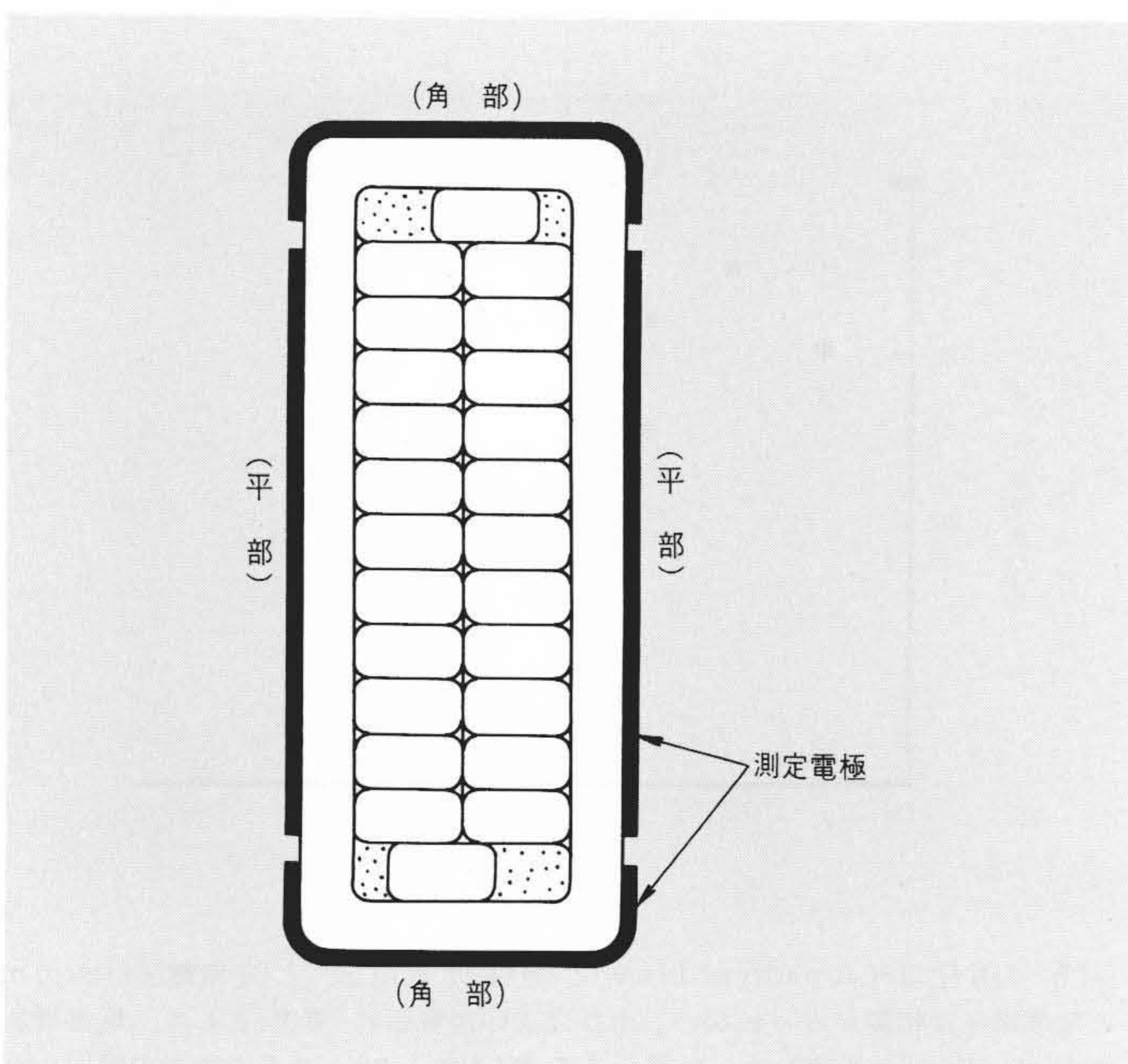


図10 コイルの測定電極(主電極)の分割 「平部」と「角部」に分ける。

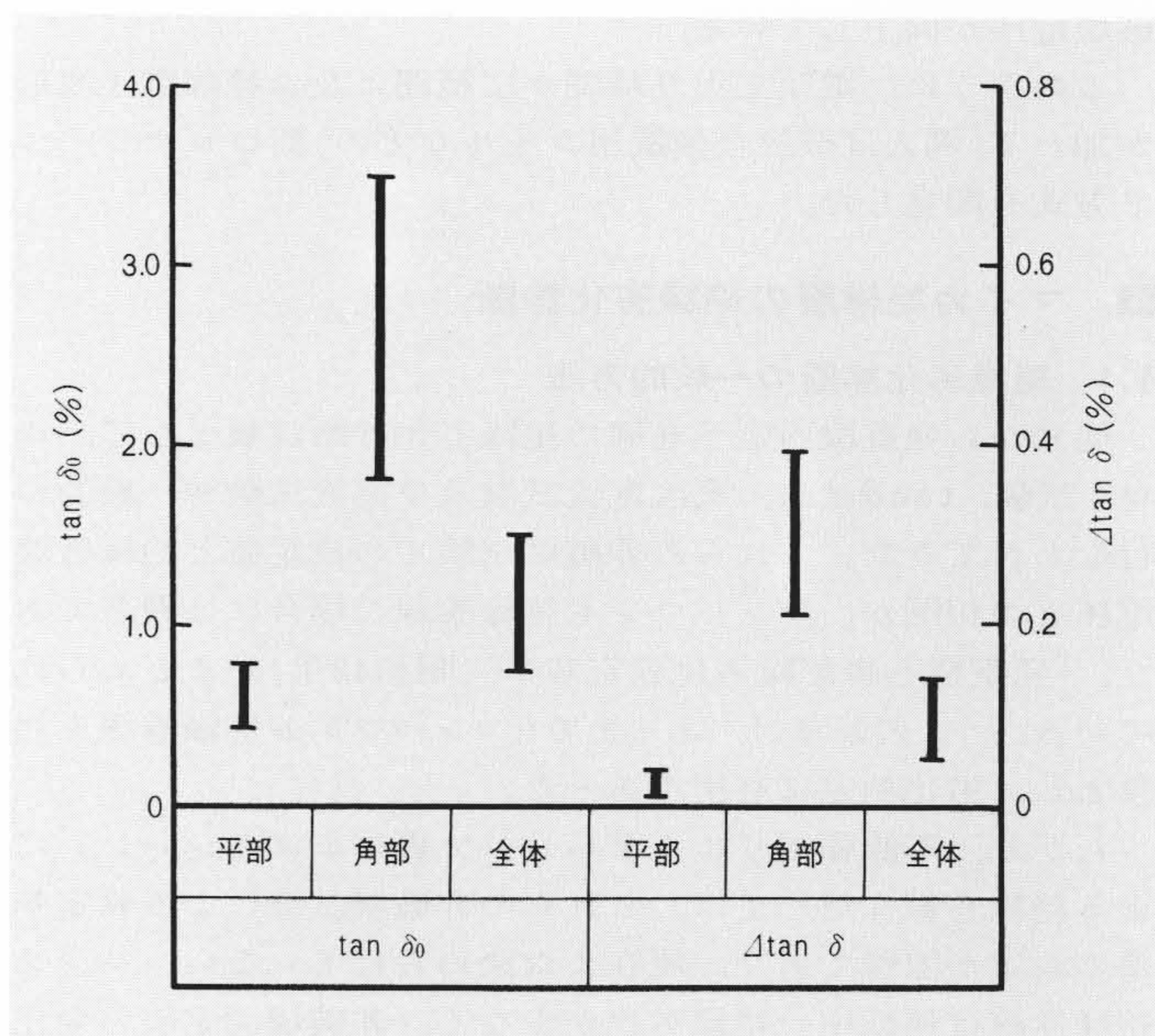


図11 モデルコイルの $\tan\delta$ $\tan\delta_0$, $\Delta\tan\delta$ 共に角部のほうが大きく、ばらつきの幅も広い。全体電極では角部の影響がかなり大きい。

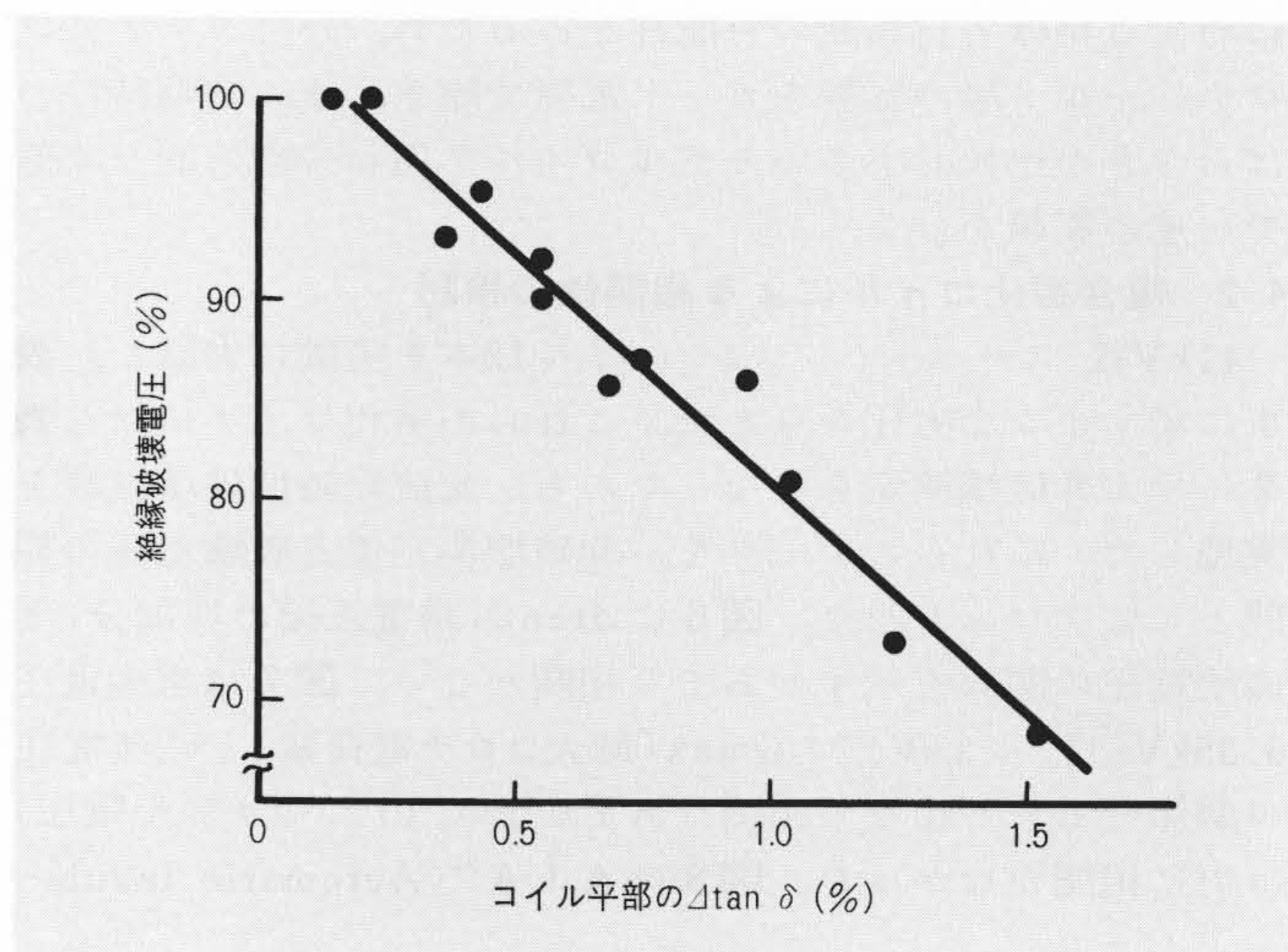


図12 劣化コイルの平部の $\Delta\tan\delta$ と絶縁破壊電圧 平部の $\Delta\tan\delta$ と破壊電圧は、比較的良い相関がみられる。

部の特性のばらつきが大きいので主電極で測定した特性にばらつきがみられる。この初期での $\Delta\tan\delta$ と破壊電圧との相関は全くない。初期特性のばらつきの小さい平部の劣化後の非破壊測定値と破壊電圧には比較的良い相関がみられる。図12には一例として $\Delta\tan\delta$ を示す。

また図13は13.2kV級コイルに、曲げひずみ0.20%と課電30kV200時間の複合劣化を加え、AIAにより $m-V$ 特性をみたものである。 m の急増電圧 Pi_2 は「平部」に現われる。このように、劣化コイルの平部に独立した分割電極を設けて測定することは、相関性の良い絶縁診断を行なうアプローチの一つである。

5 平行コイルの電位分布

5.1 零位法による測定

発電機固定子巻線のエンド部や核融合装置用コイルの接続部などで、コロナシールドを施したコイルがわずかなギャップをへだてて平行に並ぶ場合がある。このような箇所ではコイ

ル間のコロナを発生させない設計を行なうには、ギャップでの電位分布を正確に把握することが重要である。また、コロナシールド上の電圧はその絶対値と位相が同時に変化するので、2点間の電位差を正確にとらえるには両者を測定する必要がある。日立製作所と日立化成工業株式会社は零位法による電位分布の測定を導入して一連の解析を行なった。

図14に零位法による電圧分布の測定方法を示す。零位法では、電気力線を乱さない程度の細い「振動片」に別電源から電圧を与え、振動片が静止するのを望遠鏡で検知し、このとき別電源の電圧の絶対値と位相差とを読み取り、振動片の先端位置の電圧ベクトルを測定する。零位法による電位分布の測定では、非接触で測定でき内部インピーダンスが非常に大きいために誤差が少なく、また振動片の挿入によりギャップ内の電位分布を点測定することができる。すなわち、図15に示すように、A点、B点の電圧を位相差までとらえ正確な電位差を求めることができる。図16は零位法によって測定したSiCコロナシールド層の電圧ベクトル分布を示すものである。

5.2 平行コイルの表面電位差分布

次に述べる実験では絶縁厚さ4.0mmの「スーパーハイレジン」コイルを用いて行なった。図17に示すように、導電性塗料(シルバーペイント)を塗布した主電極とSiC塗料とで構成したコロナシールドを設けた2本のコイルを平行に並べ、両コイルに交流50Hz電圧を加えて、コイルのギャップ側表面の電圧ベク

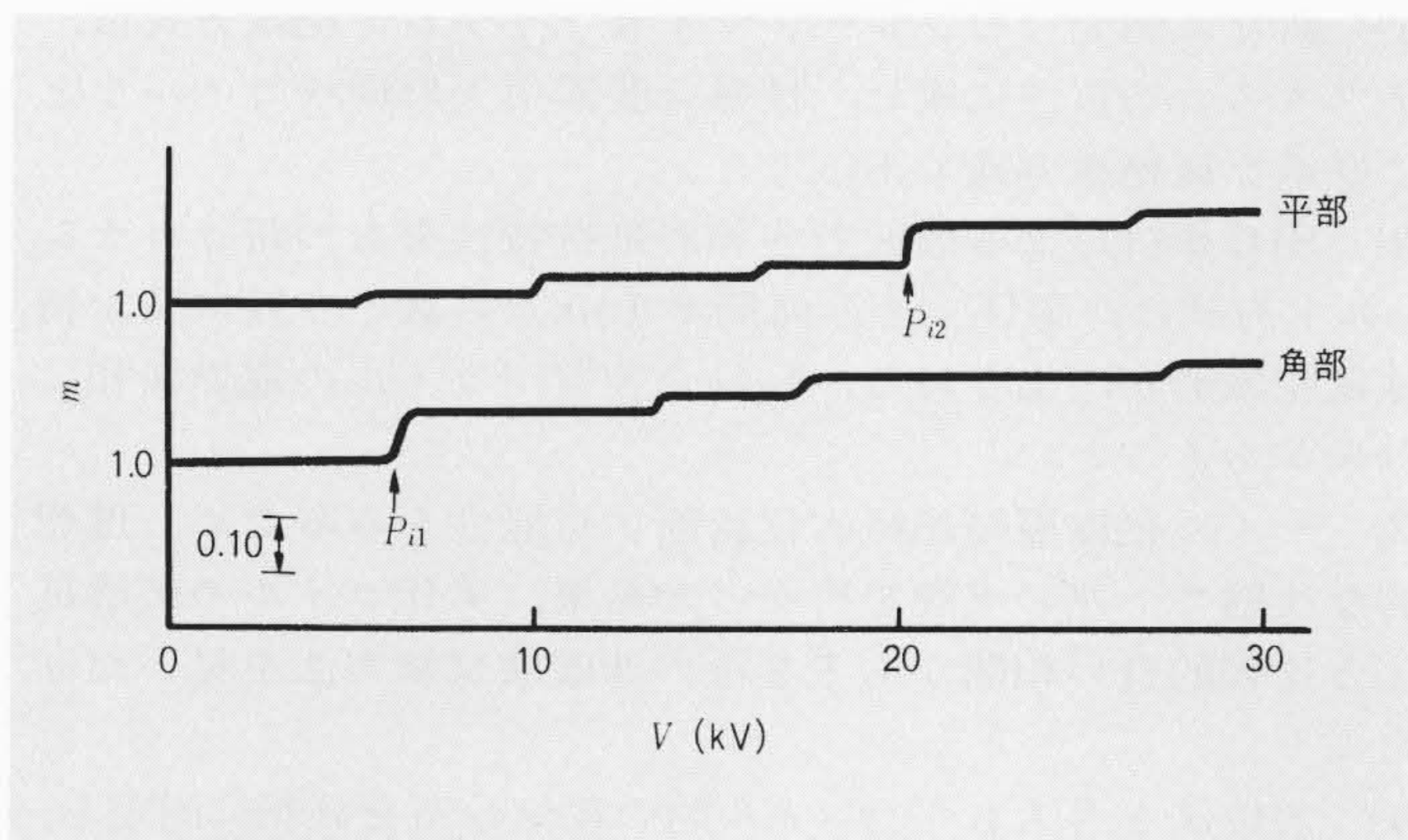


図13 13.2kV級劣化コイルの m - V 特性 この供試コイルの破壊電圧は、49.5kV(初期の46%)である。 P_2 の約2.5倍であるが、 P_2 は「平部」に現われる。

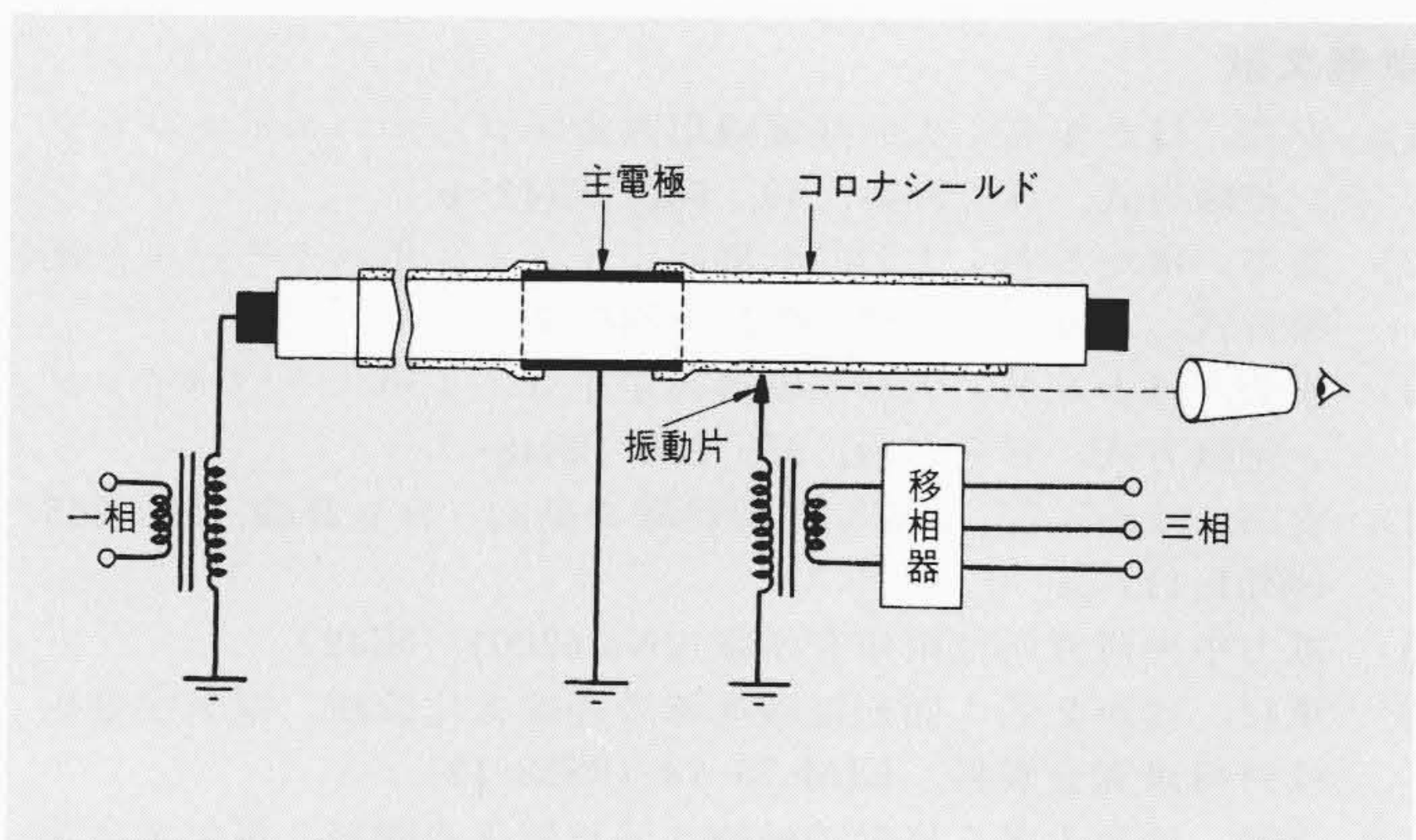


図14 電位分布測定方法 振動片に別電源から電圧を与え、静止したときの電圧値と位相を読み取る。振動片は非接触で、電圧値・位相が対向点と同じになったとき静止する。

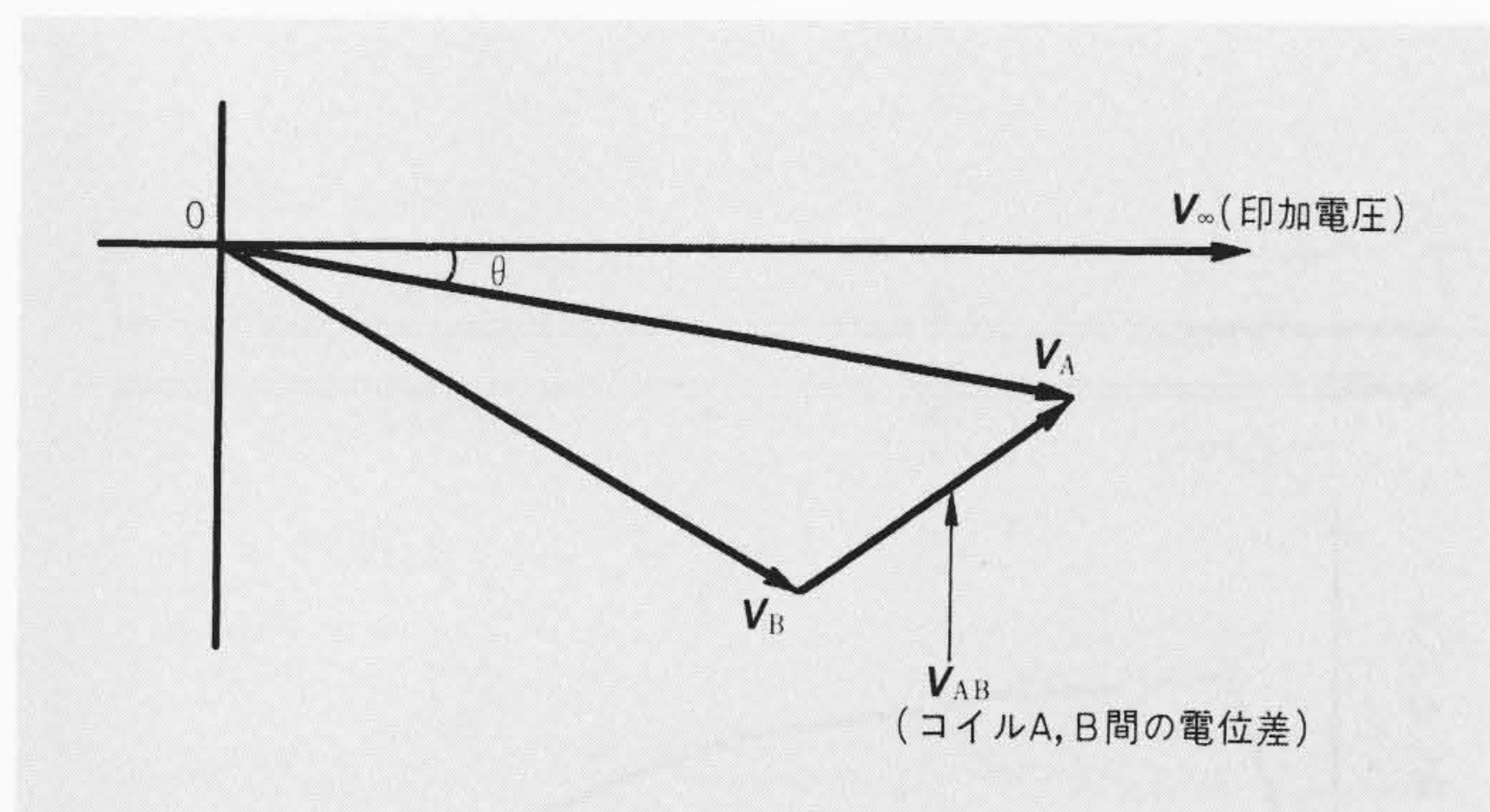


図15 位相差を考慮した電位差 $|V_{AB}|$ は、同一コイルの沿面上の2点あるいは平行コイルの対向点、A点とB点の電位差となる。

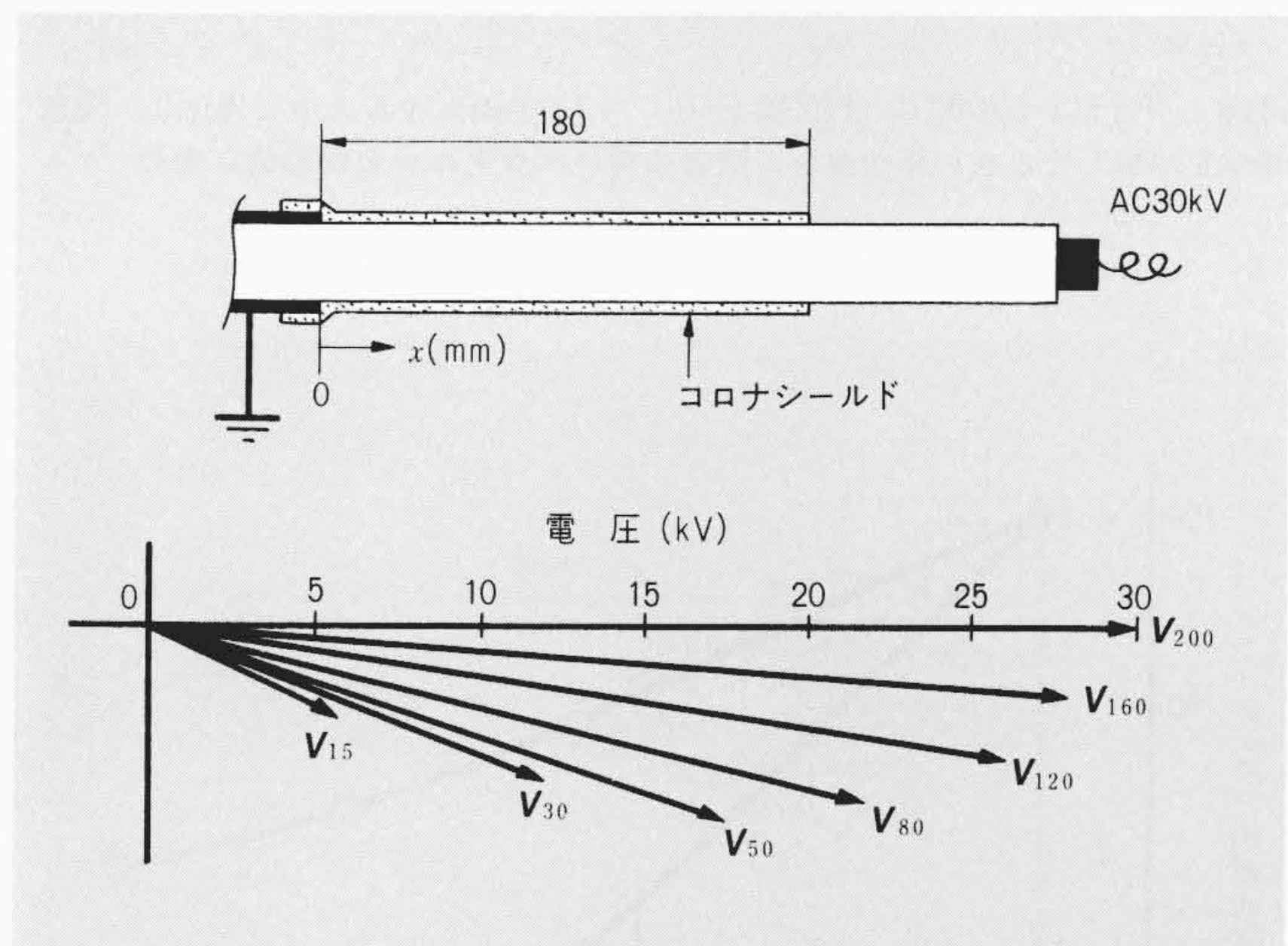


図16 コイル表面の電圧ベクトル分布 16kV級コイルに交流30kVを印加して、距離 x での表面電圧ベクトル V_x を測定した。

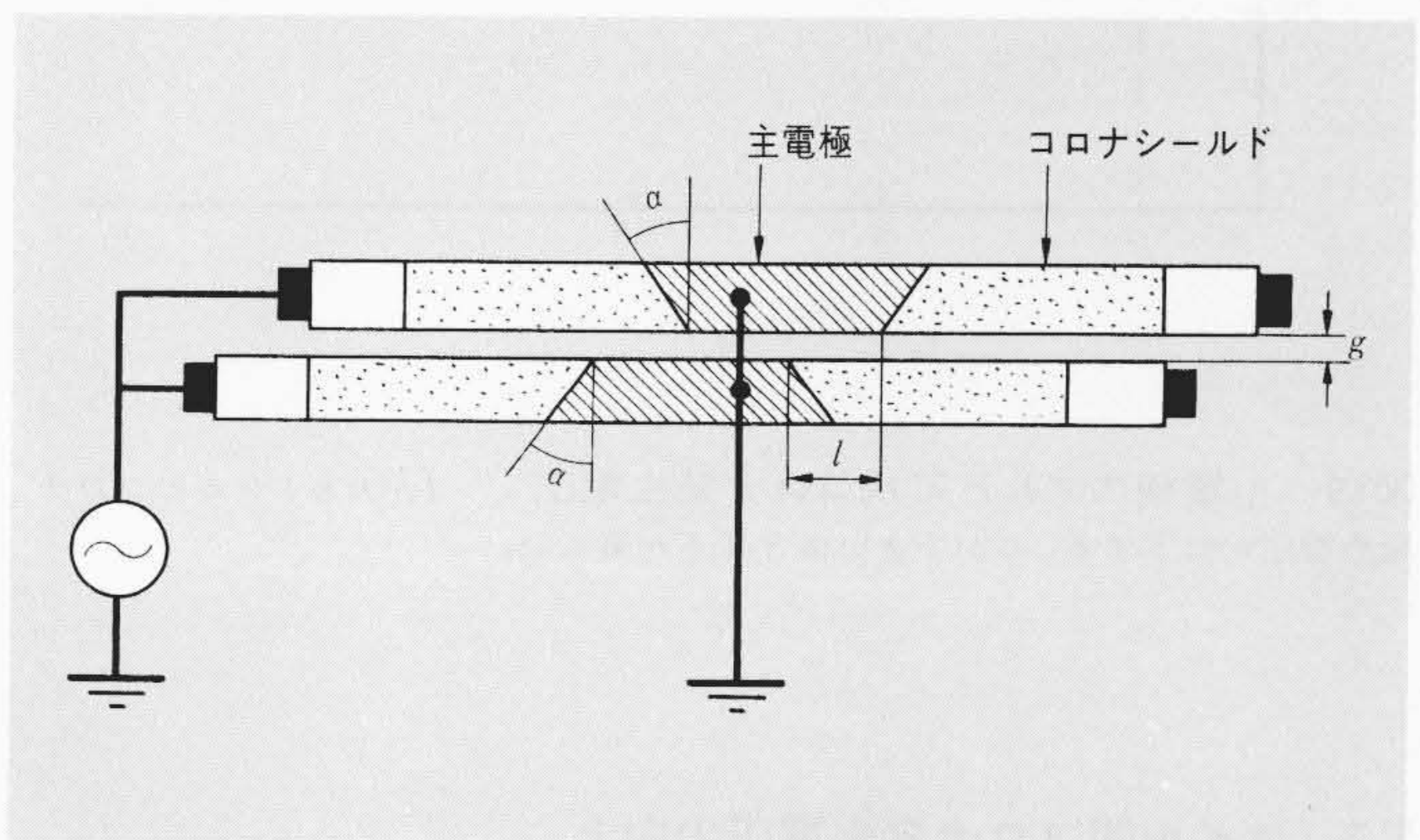


図17 平行コイル 両コイルの主電極のずれが l でギャップが g である。

トル分布を測定し、これから対向点間の電位差を図形的に求めた。図18は主電極端のずれ l が15mmで、ギャップ g が5mmの場合であるが、コイルAとコイルBのコイル表面間の電位差は、コロナシールドの付け根付近で最大となり、ここでコロナが見られる。図19は可視コロナ発生電圧と l 及び g の関係を示すものであり、ギャップ g が狭い場合に電極端のずれ l が大きくなると、コロナ発生電圧が著しく低下することが分かる。

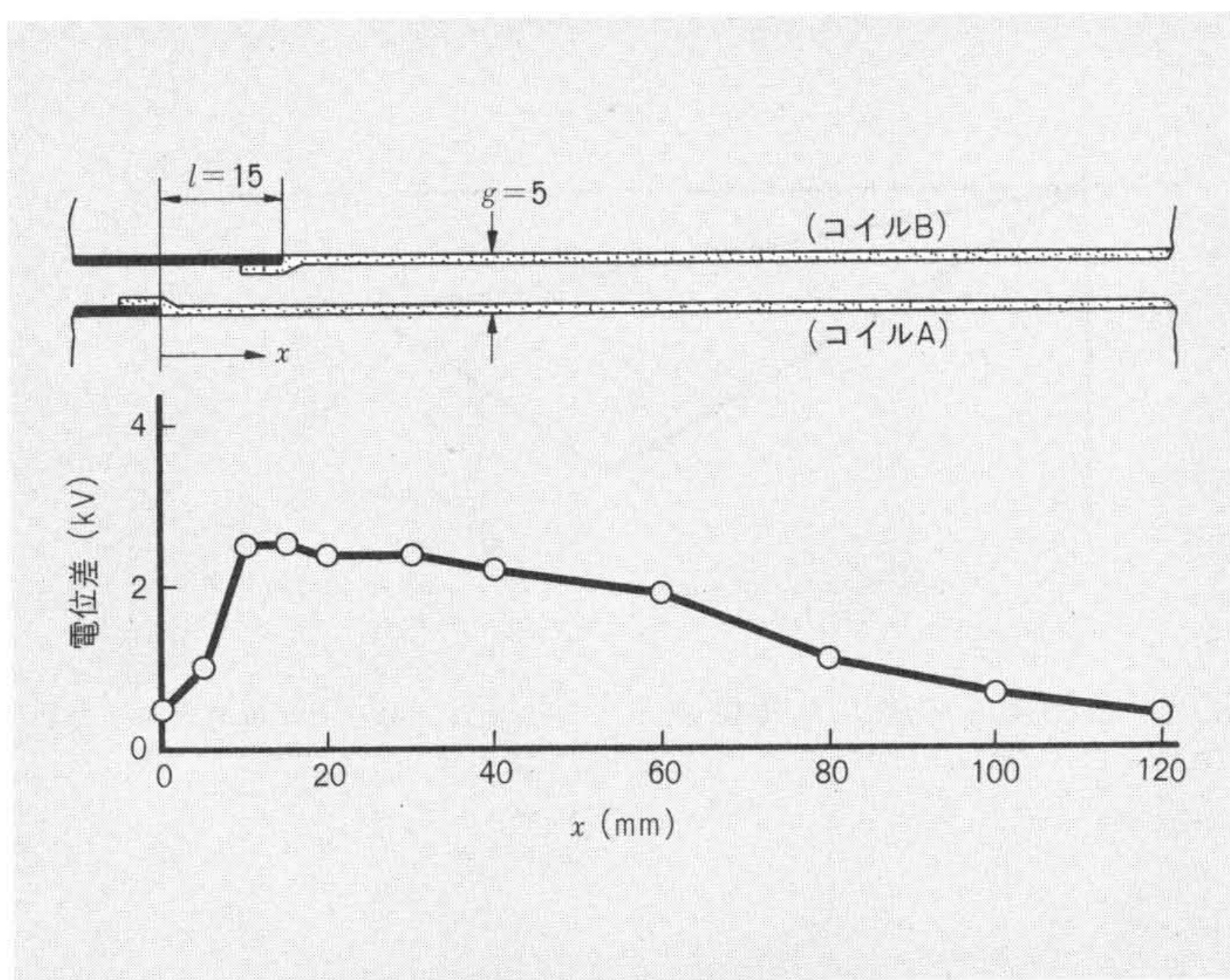


図18 平行コイル間の電位差分布 A, B両コイルの中心導体に、交流20kVを印加したときの電位差を、両者の電圧ベクトルから図形的に求めた。

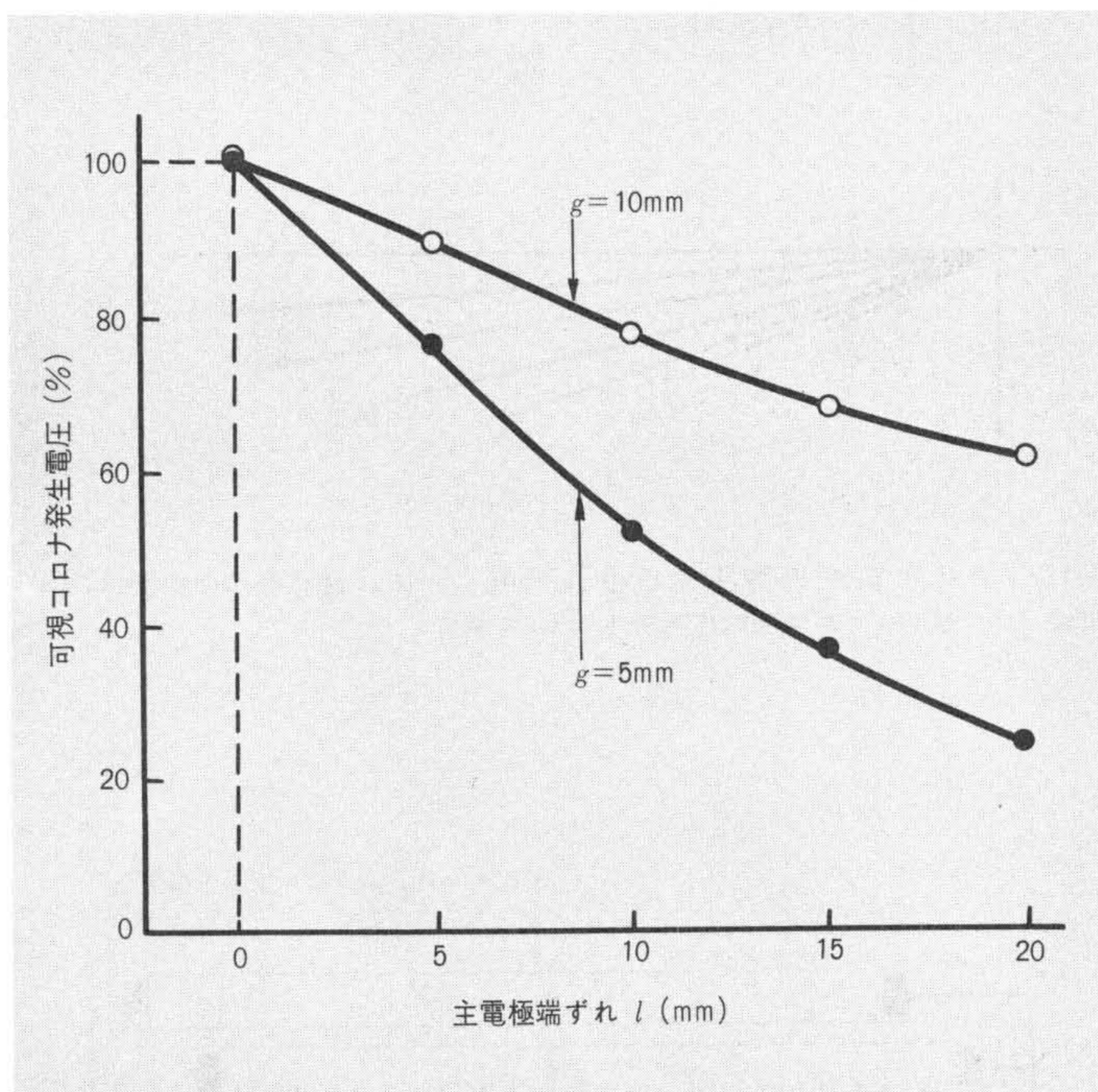


図19 主電極のずれと可視コロナ発生電圧 l が大きくなるとコロナ発生電圧が低下する。 g が小さいほど低下が著しい。

5.3 コイル間コロナ発生電圧の向上

主電極端(あるいは低抵抗シールド端)がずれることは発電機固定子巻線ではほとんどないが、核融合装置用コイルの接続部などでは起こり得る。この場合の対応策として、主電極端に先に示した図17での角度 α を付けることを見いだした。図20は角度 α とコロナ発生電圧との関係を示すもので、角度 α を付けることによりコロナ発生電圧が著しく向上することが分かる。

平行(ないしは隣接)コイル間のコロナを抑制する方法には、低抵抗シールド端に角度を付ける方法のほかに、低抵抗シールドとSiCコロナシールドとの間に、中抵抗シールドを設ける方法を見いだしている。この方法は、発電機固定子巻線の高電圧化に対しても非常に有効である。

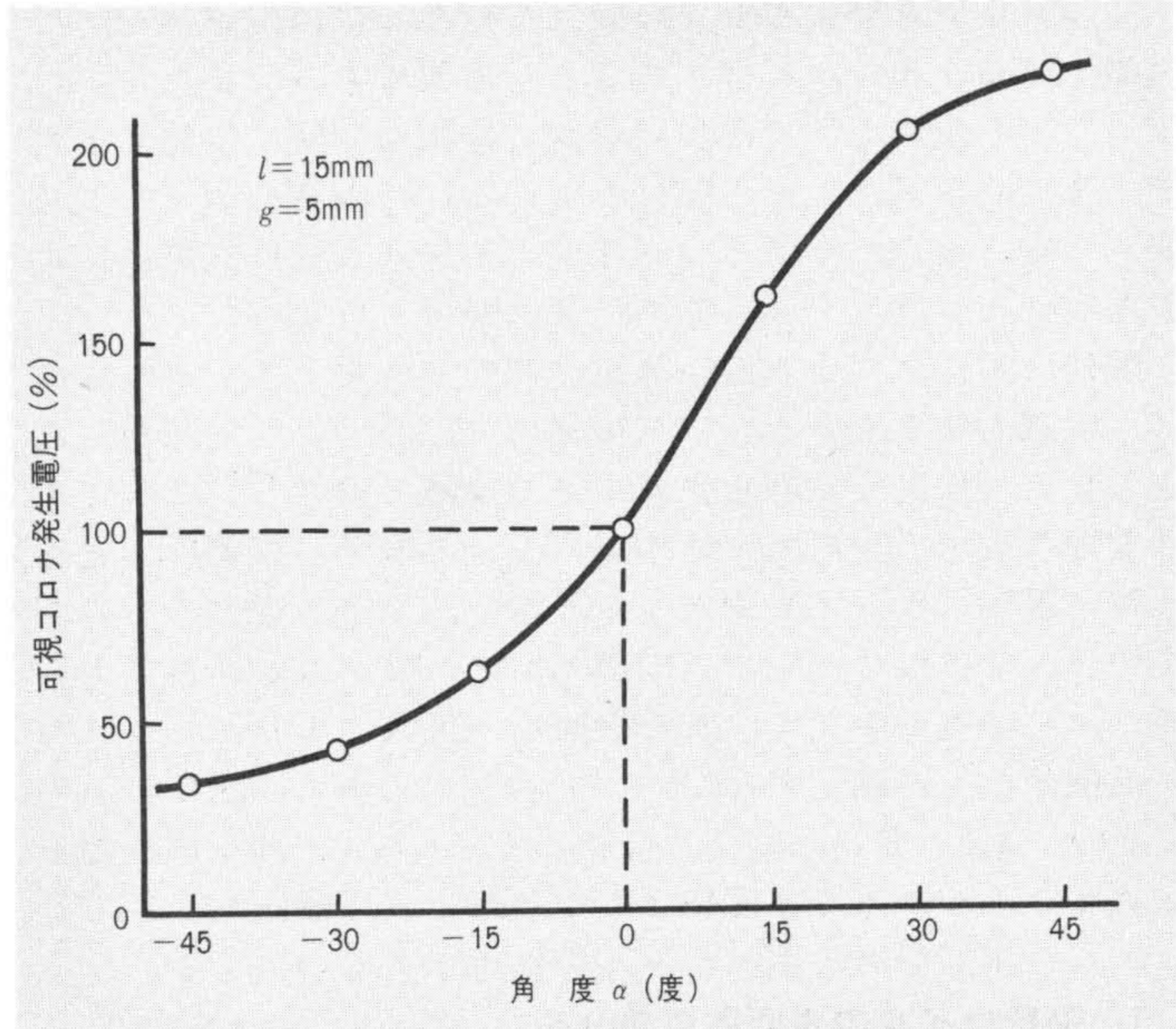


図20 主電極端角度 α と可視コロナ発生電圧 主電極端に角度 α を付けることにより、コイル間のコロナ発生電圧が著しく改善される。 α が負になると反対に低下する。

6 結 言

以上述べたことを要約すると、

- (1) 新たに開発したフレクマイカプリプレグ絶縁方式は、タフネスと均質性に優れ、核融合装置用大形環状コイルなどに好適な新絶縁方式であること。
 - (2) SiC塗料による周波数非線形抵抗特性をもつ新コロナシールド方式は、電圧立上り時間が $1\mu\text{s}$ から数ミリ秒に及ぶ特殊電圧波形が印加される、核融合装置用コイルの電界緩和に効果があること。
 - (3) マイカ絶縁層の絶縁劣化診断の可能性をみるため、理想的な状態で一連の実験を行なった結果、劣化コイルの破壊電圧と比較的良好な相関がある2種の非破壊試験方法を見いだせたこと。
 - (4) 零位法を導入し平行コイル間の電位分布を詳細に測定し、電極端のずれ及び角度とコイルギャップのコロナ発生電圧の関係をとらえられたこと。
- という四つの知見が得られた。

参考文献

- 1) 安芸, ほか4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)
- 2) 藤本, ほか5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)
- 3) 安芸, ほか5名: 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, 日立評論, 55, 679 (昭48-7)
- 4) 安芸, ほか3名: 大形回転機絶縁の動向, 日立評論, 58, 865 (昭51-11)
- 5) 電力中央研究所技術研究所報告No.67001 (昭42)
- 6) 東村, ほか2名: 回転電機巻線の絶縁劣化診断, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-78-74 (昭53-12)
- 7) 寺瀬, ほか1名: 自動絶縁特性解析装置の開発, 電気学会論文誌, 93-A, 45 (昭48-2)
- 8) 門谷, ほか2名: マイカ絶縁の環境劣化, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-78-40 (昭53-5)