

ポリエチレン電力ケーブルの絶縁破壊特性

Breakdown Phenomena of Polyethylene Insulated Power Cables

宮沢定雄* 依田文吉* 桑原次男*
Sadao Miyazawa Bunkichi Yoda Tsugio Kuwabara

内容梗概

ポリエチレン電力ケーブルの絶縁破壊特性を究明するために、絶縁体厚さおよび導体の大きさを異にするポリエチレン電力ケーブルについて、交流短時間破壊、交流長時間破壊および衝撃電圧破壊試験を行った。

これらの破壊試験において破壊時平均電位傾度、最大破壊電位傾度と、絶縁体の厚さおよび導体半径との関係を求めた。その結果次のことが明らかとなった。

(1) 交流短時間、交流長時間および衝撃電圧破壊のすべての場合において、最大破壊電位傾度は一定とならず、導体サイズが大きくなるにしたがって低下する。

(2) 破壊時平均電位傾度は衝撃電圧破壊においてはほぼ一定となるが、そのほかの場合では一定でない。

(3) ポリエチレンケーブルの絶縁破壊特性は紙ケーブルより劣るが、ブチルゴムケーブルよりすぐれている。

またケーブルをその外径の6倍径まで屈曲させた状態においても破壊電圧が低下しないことが明らかとなった。

1. 緒言

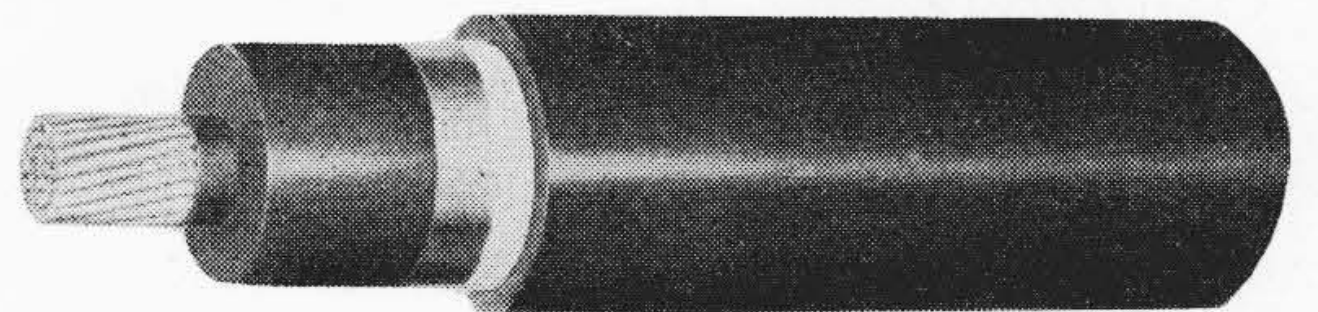
ポリエチレンはすぐれた電気的特性をもち、化学的に安定であり、熱による老化や透水がほとんどないのですぐれた電気絶縁材料として認められている。このため塩化ビニルについて電線、ケーブルの絶縁体として数多く用いられ、すでに数年を経ている。その電気的特性を發揮するものとしてポリエチレン絶縁電力ケーブルが当然考えられ、古くから電力ケーブルとしてもっぱら用いられてきた紙絶縁鉛被ケーブルにかわって広く用いられるようになった。

これらポリエチレン電力ケーブルの特性については多くの報告がすでになされているが⁽¹⁾⁽²⁾、現在わが国においては10kV以上のポリエチレン電力ケーブルの実績はきわめて少ない。しかるに最近、外国では10kV以上においても実用化される傾向にあり注目をひくようになってきた。

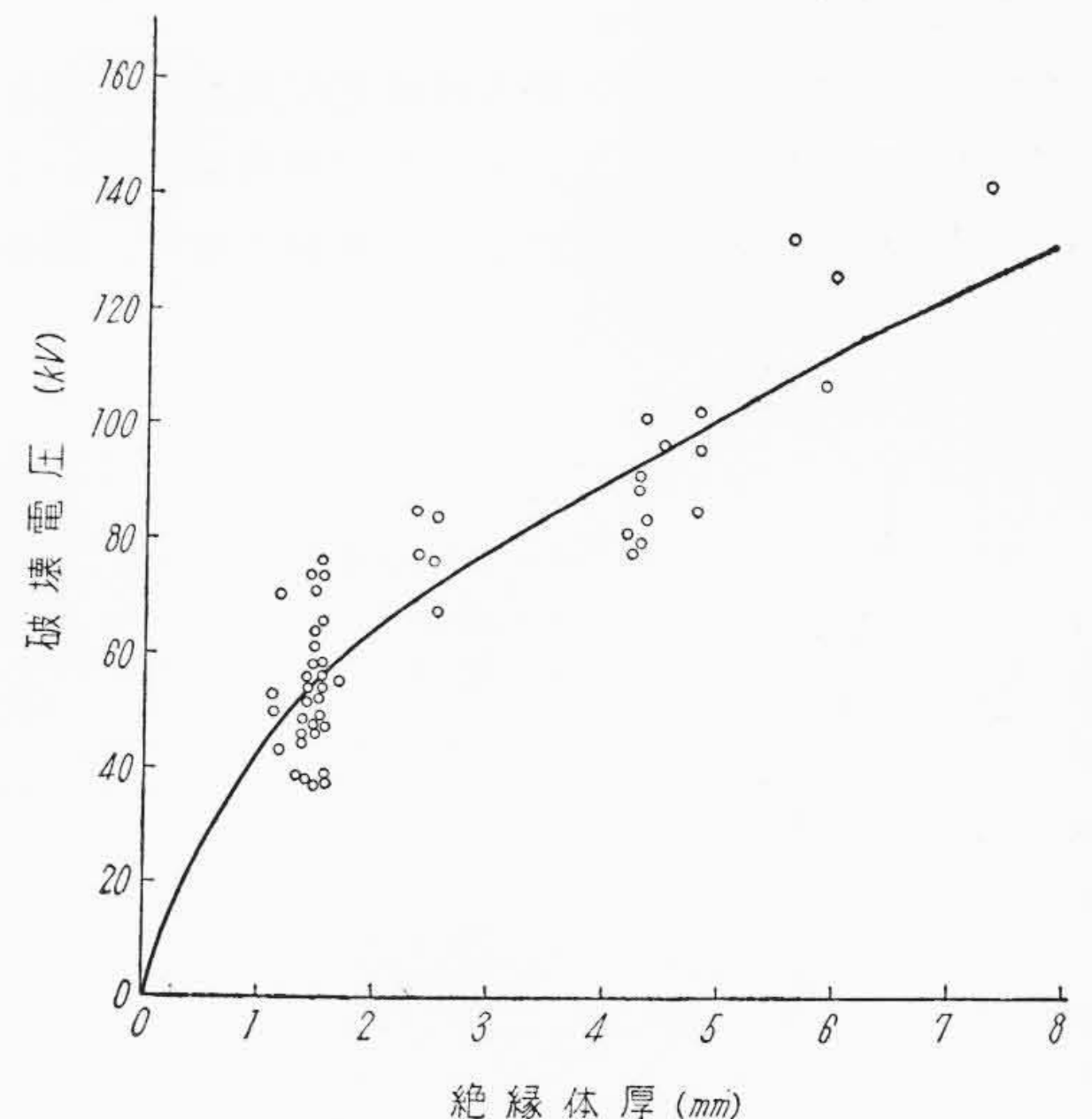
10kV以上の高電圧電力ケーブルを設計するにはその絶縁材料の絶縁破壊特性を把握することが一つの根本問題である。ケーブルの絶縁破壊の理論として最大電位傾度説が古くからいわれているが、ポリエチレンケーブルではW. A. Del Mar氏⁽¹⁾らは最小電位傾度説を、またH. Pairitsch氏⁽³⁾は平均電位傾度（破壊電圧を絶縁体厚さで割った値）の方がむしろ基準と考えられるといっている。

そこでわれわれははたしてポリエチレンケーブルの場合にはどの説が成立するかどうかを確認するために種々の絶縁破壊試験を行った。

* 日立電線株式会社電線工場



第1図 20kV ポリエチレン電力ケーブル



第2図 交流短時間破壊の絶縁体厚と破壊電圧の関係（導体半径 0.9~13 mm）

2. 試料ケーブル

破壊試験に用いた供試ケーブルは600Vないし20kV用として製作した単心ケーブルの完成品および多心ケ

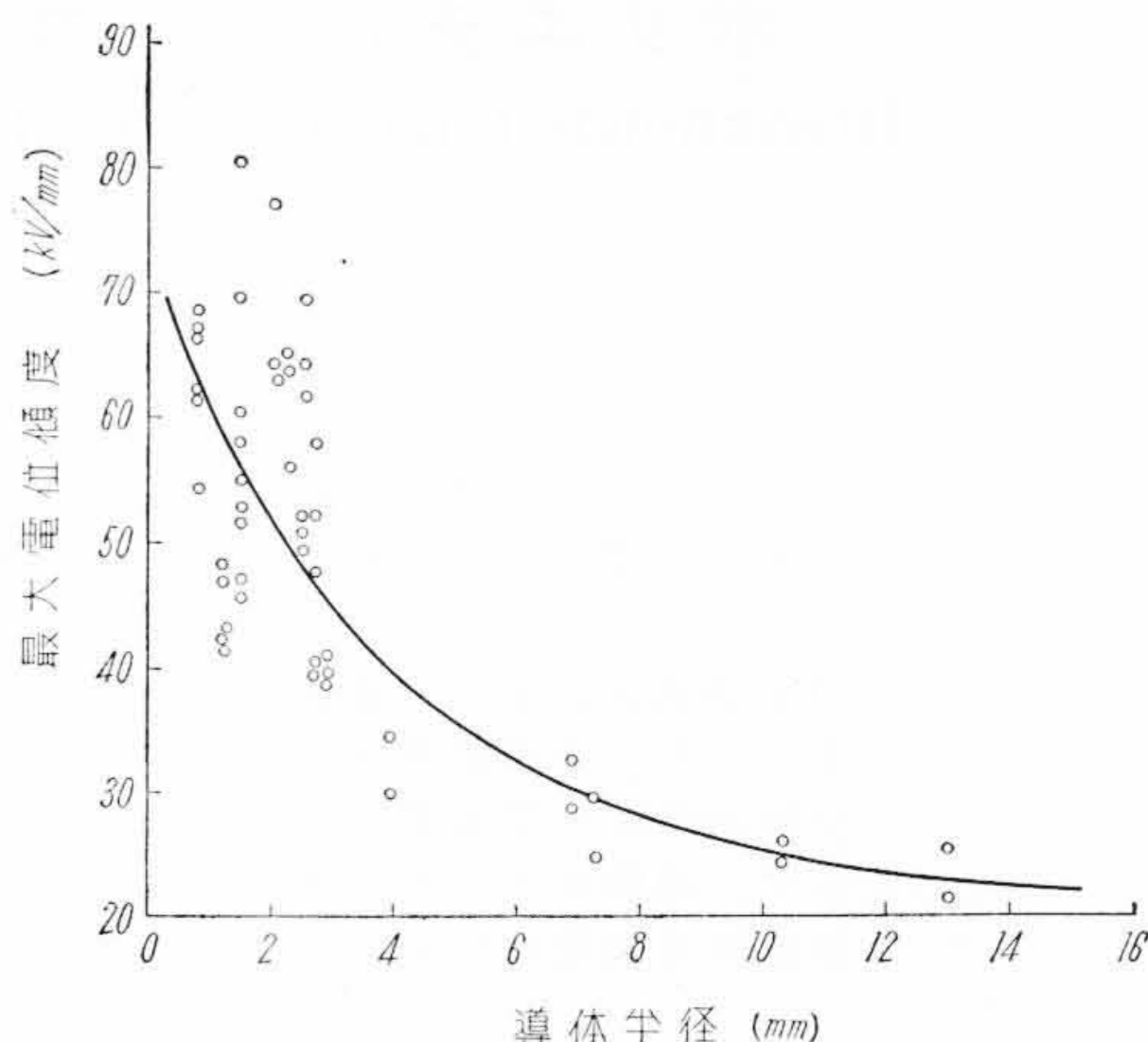
ケーブルの絶縁線心である。導体の大きさは公称断面積 $2.0 \text{ mm}^2 \sim 400 \text{ mm}^2$ まで、絶縁体厚さは約 $1.5 \text{ mm} \sim 7.5 \text{ mm}$ にわたる種々のものを使用した。一例として第1図に 20 kV ケーブルの写真を示す。また導体はすべて円形撚線導体であって二、三の試料を除いて導体遮蔽は施さないものである。したがって最大電位傾度は撚線効果を考慮した Levi-Civita の計算式による方がよいが、今回はこれによらず真円として計算した。

3. 交流短時間破壊

まず最初に交流短時間破壊について述べる。試験は 50 c/s の交流電圧を印加し、 500 V/s の割合で電圧を上昇させ破壊に至らしめた。その結果を図示すると第2～4図のようになる。

第2図は絶縁体の厚さと破壊電圧の関係を示している。これを平均電位傾度と絶縁体の厚さの関係に表わすと第3図のようになる。平均電位傾度は図より明らかなように絶縁体の厚さの増加とともに著しく低下する。そしてわれわれのえた値と H. Pairitsch 氏の値はほとんど同じである。また橋本氏⁽⁴⁾や W. A. Del Mar 氏⁽¹⁾がシートについて行った交流短時間破壊の結果は第3図の点線となり、ケーブルの結果のばらつきの中に含まれてしまい、ほとんど等しいといえる。したがってポリエチレンケーブルではケーブルにした場合加工効果による破壊特性の低下がなく、シートの特性よりケーブルの短時間破壊値が推定できる。

次に第4図は導体半径と最大破壊電位傾度を示す。結果は導体半径の小さいといろで相当ばらつきがあるが平均的な値をとると図のような曲線となり、導体半



第4図 交流短時間破壊の導体半径と最大電位傾度
の関係 (絶縁体厚 約 $1.5 \sim 7.5 \text{ mm}$)

径の増大とともに最大電位傾度は減少している。

最大電位傾度は次式で表わされる。

$$G_{\max} = \frac{V_{BD}}{r \log_e \frac{r+t}{r}} = \frac{G_{\text{ave}} \cdot t}{r \log_e \frac{r+t}{r}} \quad \dots (1)$$

ただし V_{BD} : 破壊電圧, G_{ave} : 平均電位傾度

G_{\max} : 最大電位傾度, r : 導体半径, t : 絶縁体厚
したがって t をパラメータとした場合それぞれの t について r の増加にともなって G_{\max} の低下する曲線がえられるのであるが、試験の結果では破壊電圧のばらつきから第4図のような代表的な曲線として表わされる。

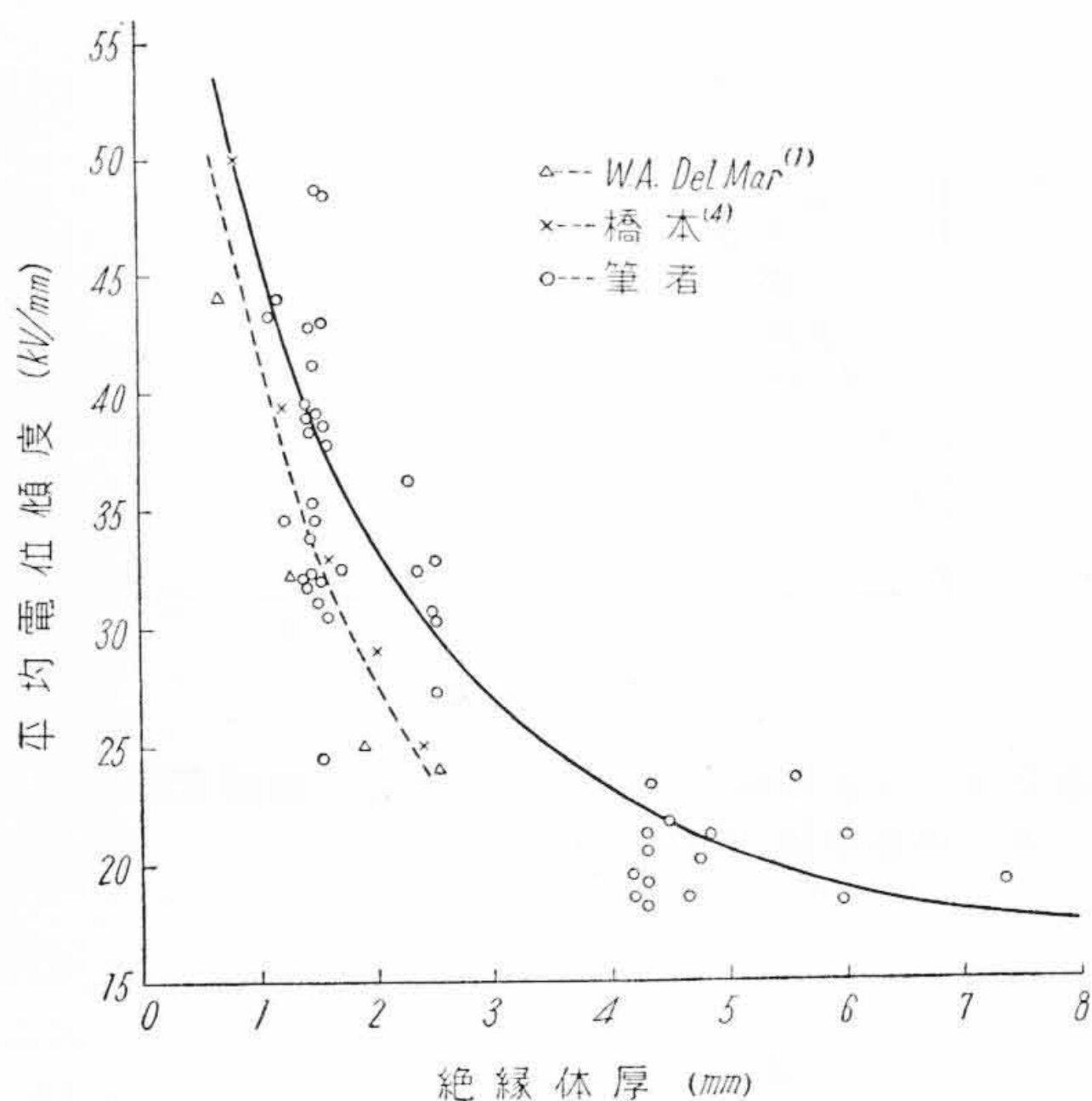
4. 交流長時間破壊

交流短時間破壊について、交流長時間破壊の結果について述べる。課電方法はその開始電圧を絶縁体の厚さの減少にしたがって低電圧とし、電圧は 5 kV ごとにおのおの1時間保持し階段状に上昇させた。その結果を示すと第5～8図のとおりとなる。

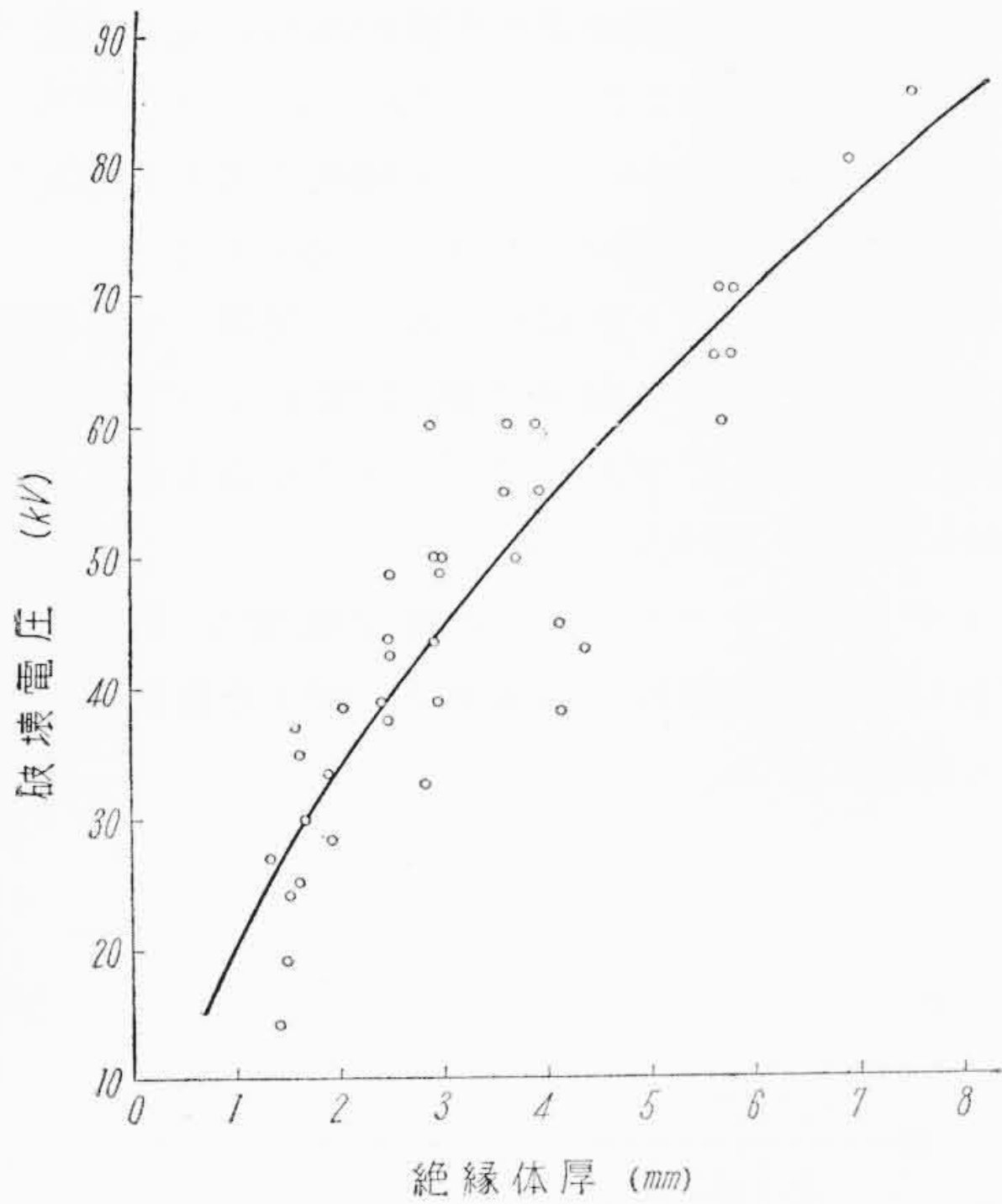
第5図は破壊電圧と絶縁体の厚さとの関係を示す。破壊電圧は相当ばらつきがあるが、その傾向は図のような上にやや凸の曲線となる。最大電位傾度説によるものとするれば同一絶縁体厚の場合導体サイズの大きいものほど破壊電圧は高くならなければならないが、必ずしもそのようになっていない。

第6図は平均電位傾度と絶縁体の厚さとの関係を示す。平均電位傾度はやはり絶縁体の厚さの増加とともにやや低下する傾向がみられ、その値は短時間破壊の約 50% となっている。

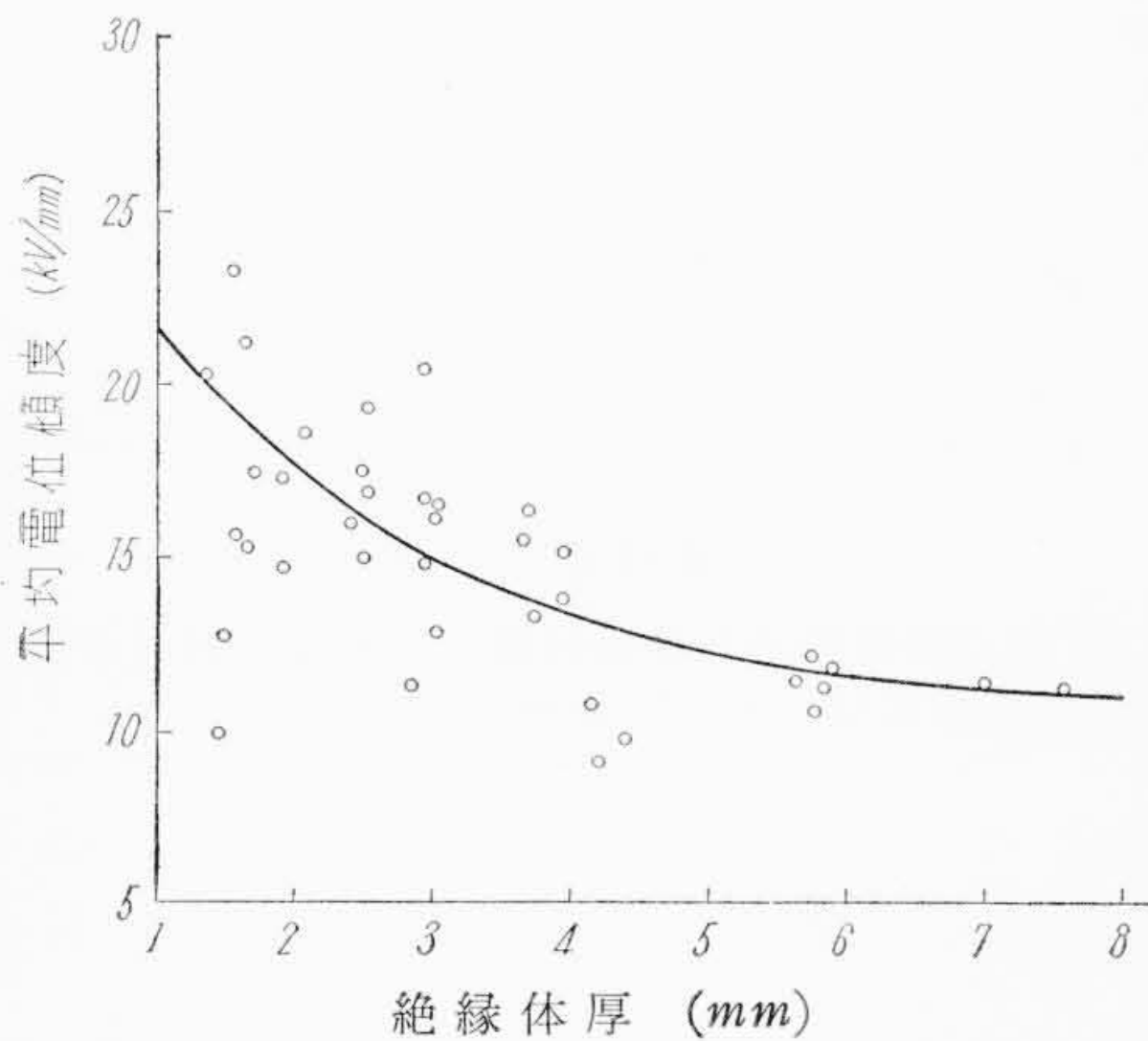
H. Pairitsch 氏がえた値は平均電位傾度が $9 \sim 13 \text{ kV/mm}$ であるといっているが、われわれの結果では厚



第3図 交流短時間破壊の絶縁体厚と平均電位傾度
の関係 (導体半径 $0.9 \sim 13 \text{ mm}$)



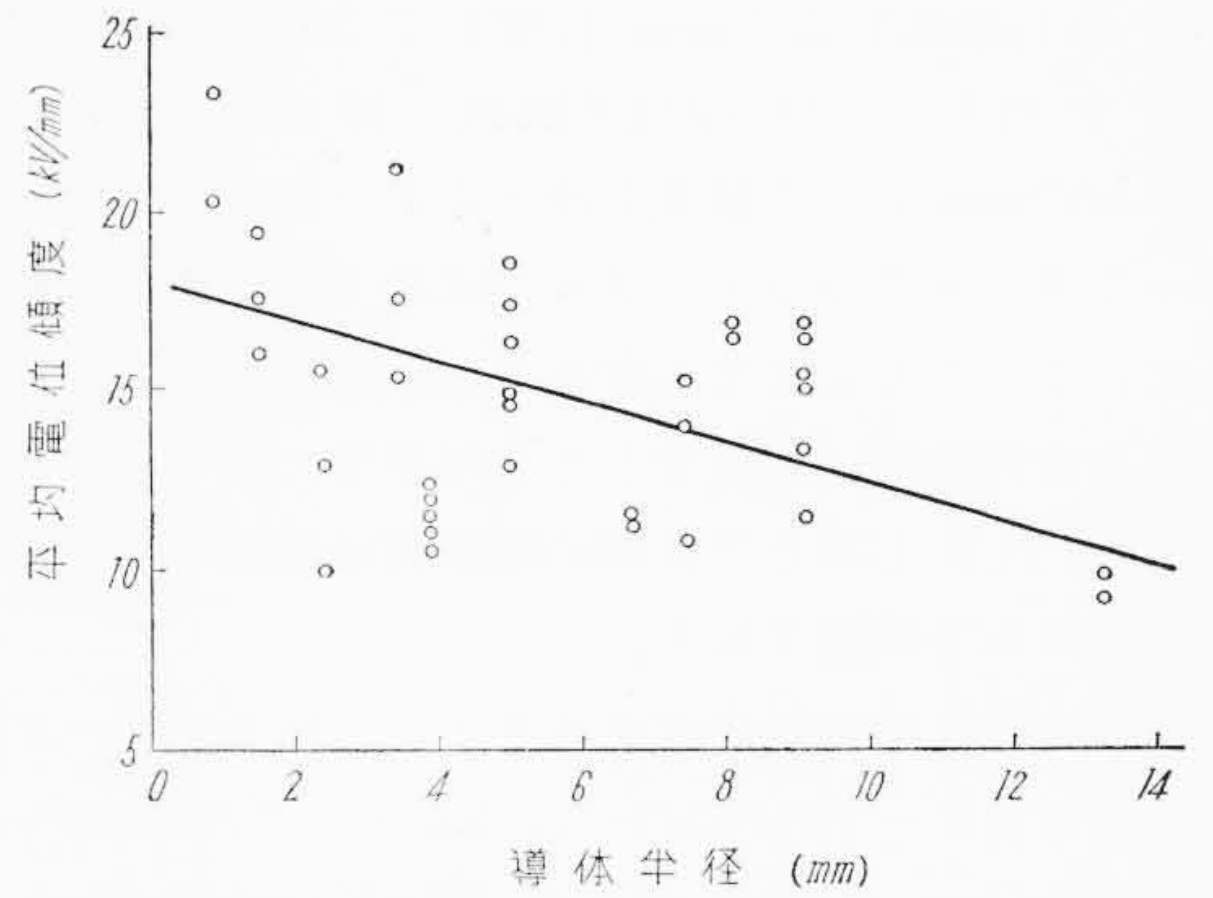
第5図 交流長時間破壊の絶縁体厚と破壊電圧の関係 (導体半径 0.9~13 mm)



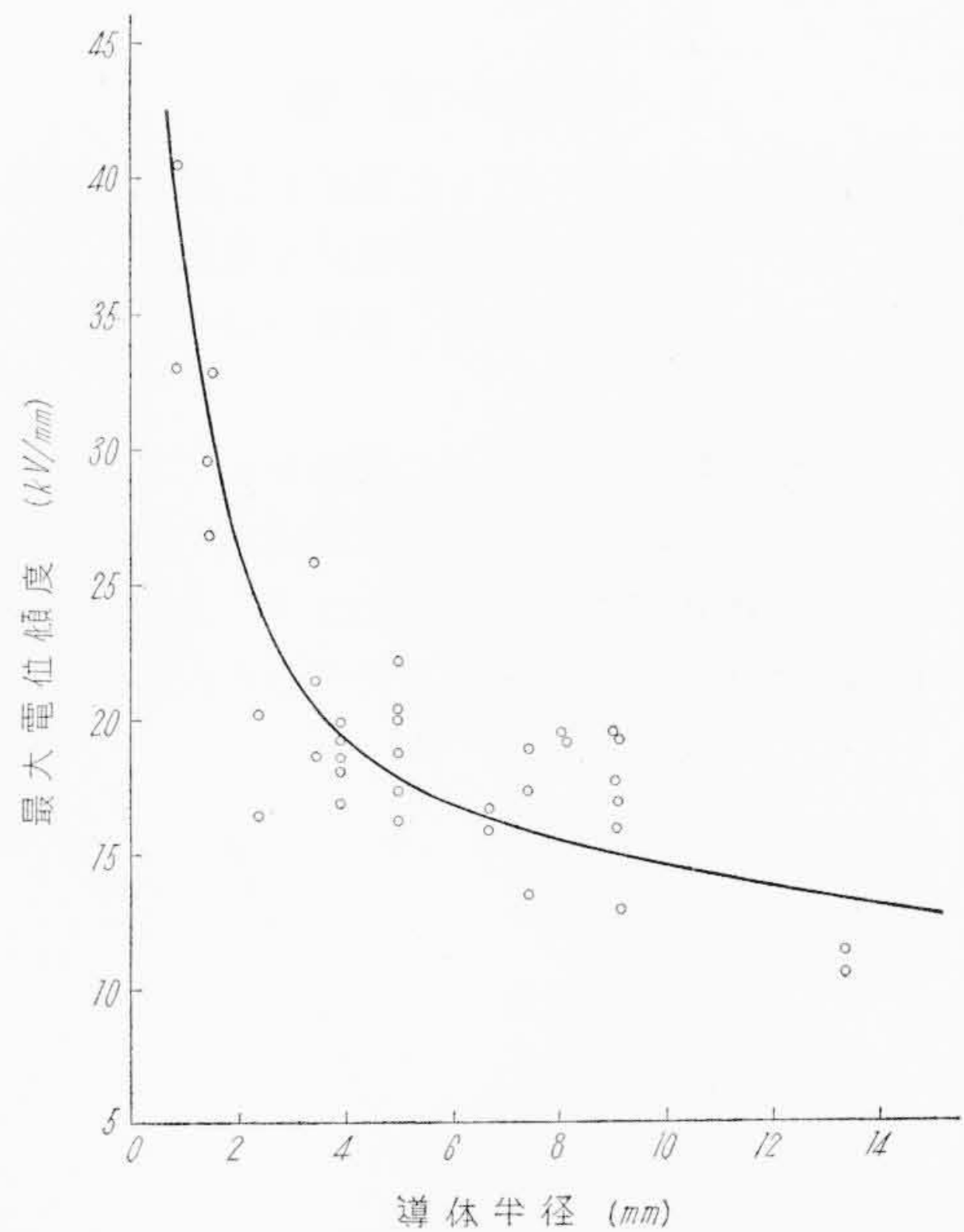
第6図 交流長時間破壊の絶縁体厚と平均電位傾度
の関係 (導体半径 0.9~13 mm)

きの薄い方で 15~20 kV/mm とやや高くなっている。この相異は課電方法が1時間ごとの電圧上昇であるが、H. Pairitsch 氏の場合は 3~12 時間ごとの電圧上昇でその時間が非常に長く、かつ電圧の上昇の割合がわれわれの場合に比べて小さいということに基因するものと思われる。

次に導体半径と平均電位傾度の関係および導体半径と最大電位傾度を示すとそれぞれ第7図および第8図のようになる。平均電位傾度は相当にばらついているが、一定でなくわずかに導体半径の増加とともに低下す



第7図 交流長時間破壊の導体半径と平均電位傾度
の関係 (絶縁体厚 約 1.5~7.5 mm)



第8図 交流長時間破壊の導体半径と最大電位傾度
の関係 (絶縁体厚 約 1.5~7.5 mm)

るようである。しかし平均電位傾度を 10 kV/mm として設計すれば任意の導体半径に対する最低の長時間破壊電圧値が推定できる。一方最大破壊電位傾度は明らかに導体半径の増加とともに低下している。すなわち最大電位傾度説は成立しないといえる。

鈴木氏⁽⁵⁾は「絶縁体の厚さが同じであるにもかかわらず細い導体の方が太い導体よりも破壊電圧が高かったり、また最大電位傾度が同じになるように設計された二つのケーブルでも細い導体の方が太い導体よりも破壊電圧が高いという事実があってもこれらは最大電位傾度説をくつがえすものでなく、試料が十分な均一性を欠いたためである」といっている。しかし第8図の値は H. Pai-

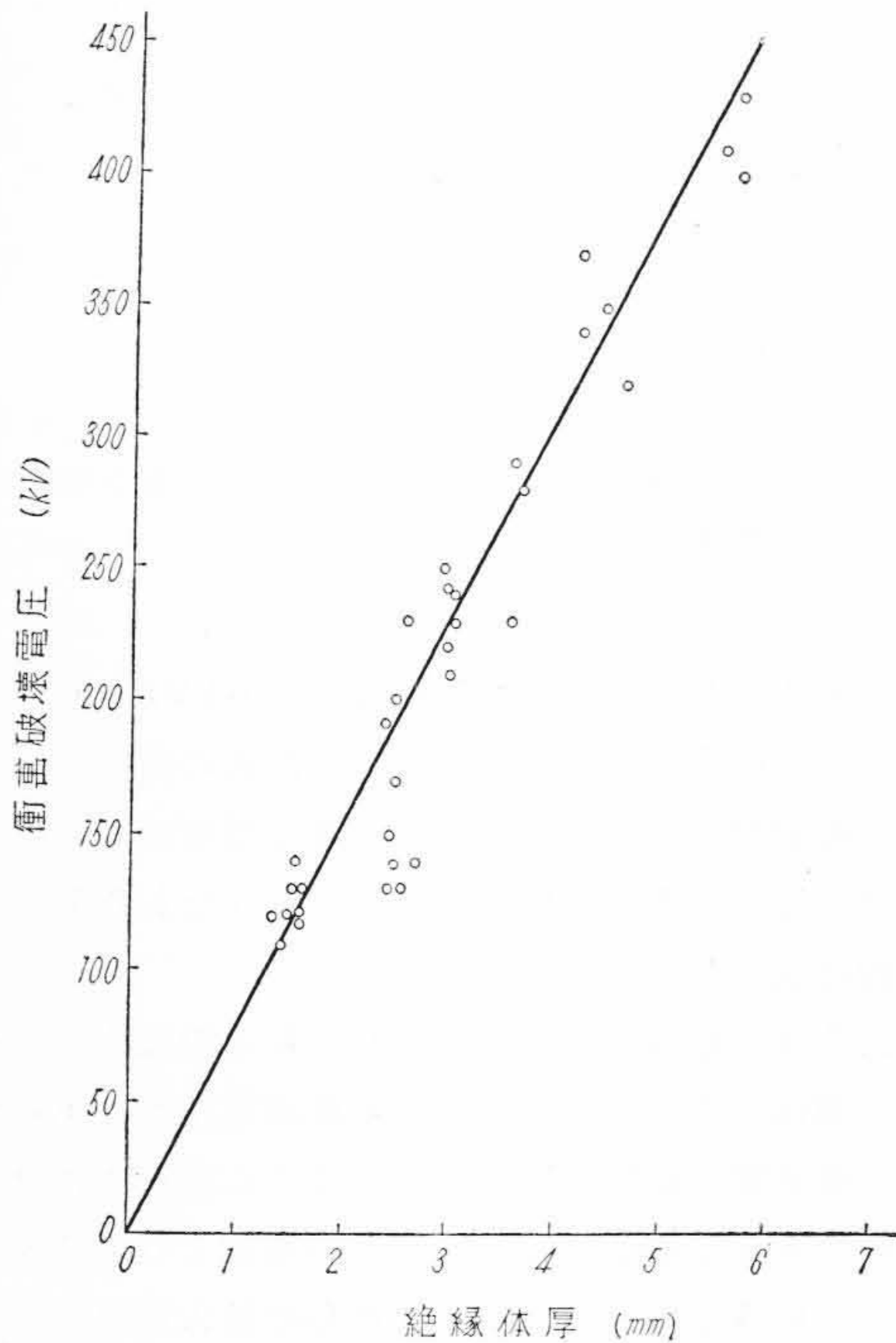
ritsch 氏の導体半径 1 mm に対して 30kV/mm 以上、5 mm に対して 14~20 kV/mm, 10 mm に対して 12~14 kV/mm という結果とほとんど一致している。したがってポリエチレンケーブルでは最大電位傾度説が成立しないということはなんらかの理由があるものと思う。これを理論的に解明することは非常にむずかしいことである。しかし高分子材料の絶縁破壊機構の研究においては興味ある問題である。

次に最大電位傾度説が成立するといわれる紙ケーブルやブチルゴムケーブルにおいて、SL ケーブルは 20~25 kV/mm, ブチルゴムケーブルは 15 kV/mm⁽⁶⁾であり、これとポリエチレンケーブルを比較すると導体の細い方ではポリエチレンが有利であるが、太い方ではブチルゴムとほとんど同程度となる。

5. 衝 撃 破 壊

衝撃破壊試験は 10 kV ごとに電圧を上昇し、各電圧において 3 回ずつ標準波形の衝撃電圧を印加した。なお電圧の極性はいずれも負である。結果を示すと第 9~12 図のようになる。

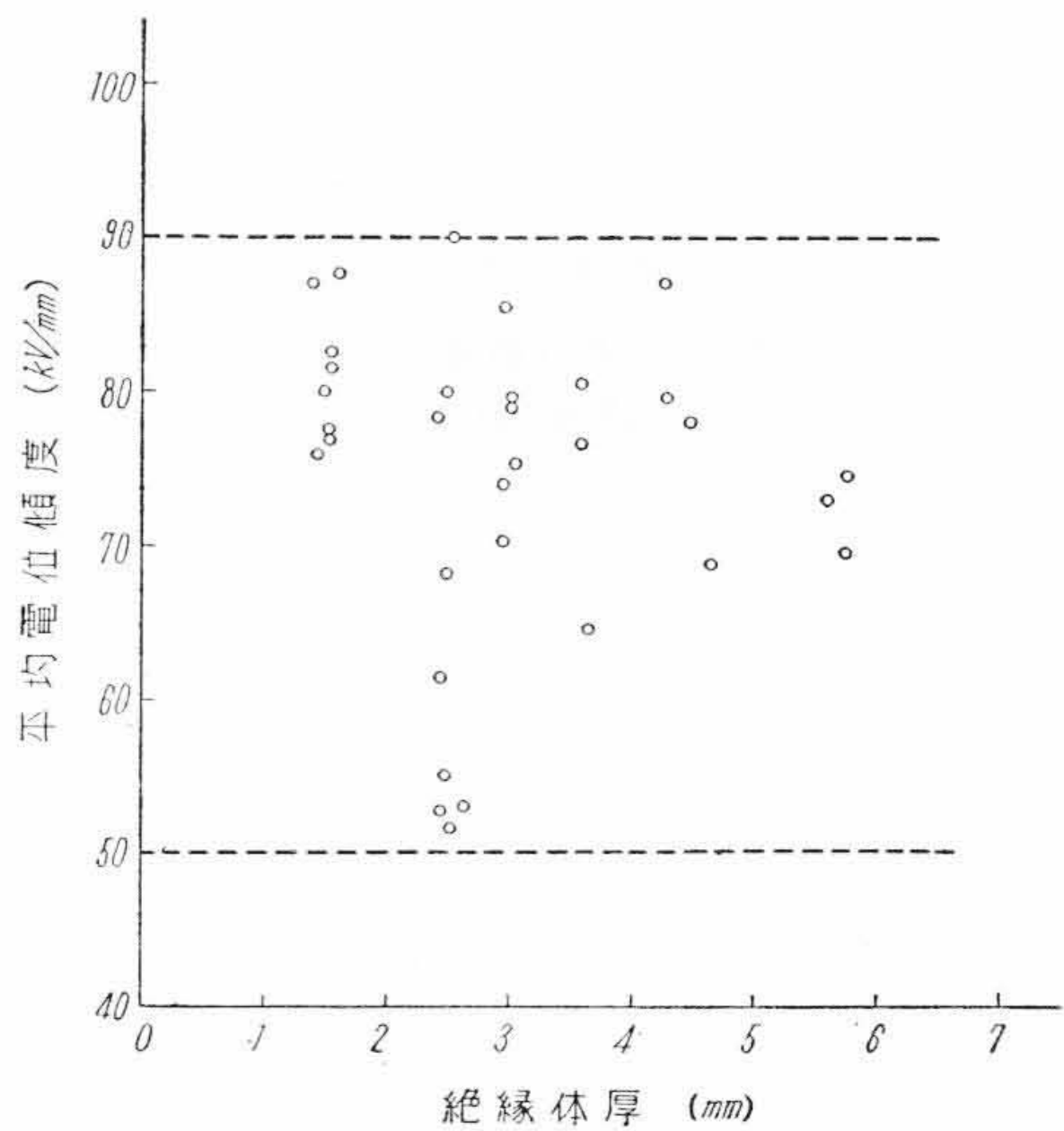
まず絶縁体の厚さと破壊電圧の関係を示すと、第 9 図のとおりとなり、ほとんど直線関係が成立する。この直線は約 70 kV/mm である。この値は W. A. Del Mar 氏や H. Pairitsch 氏らの結果と比べるとかれらの高い



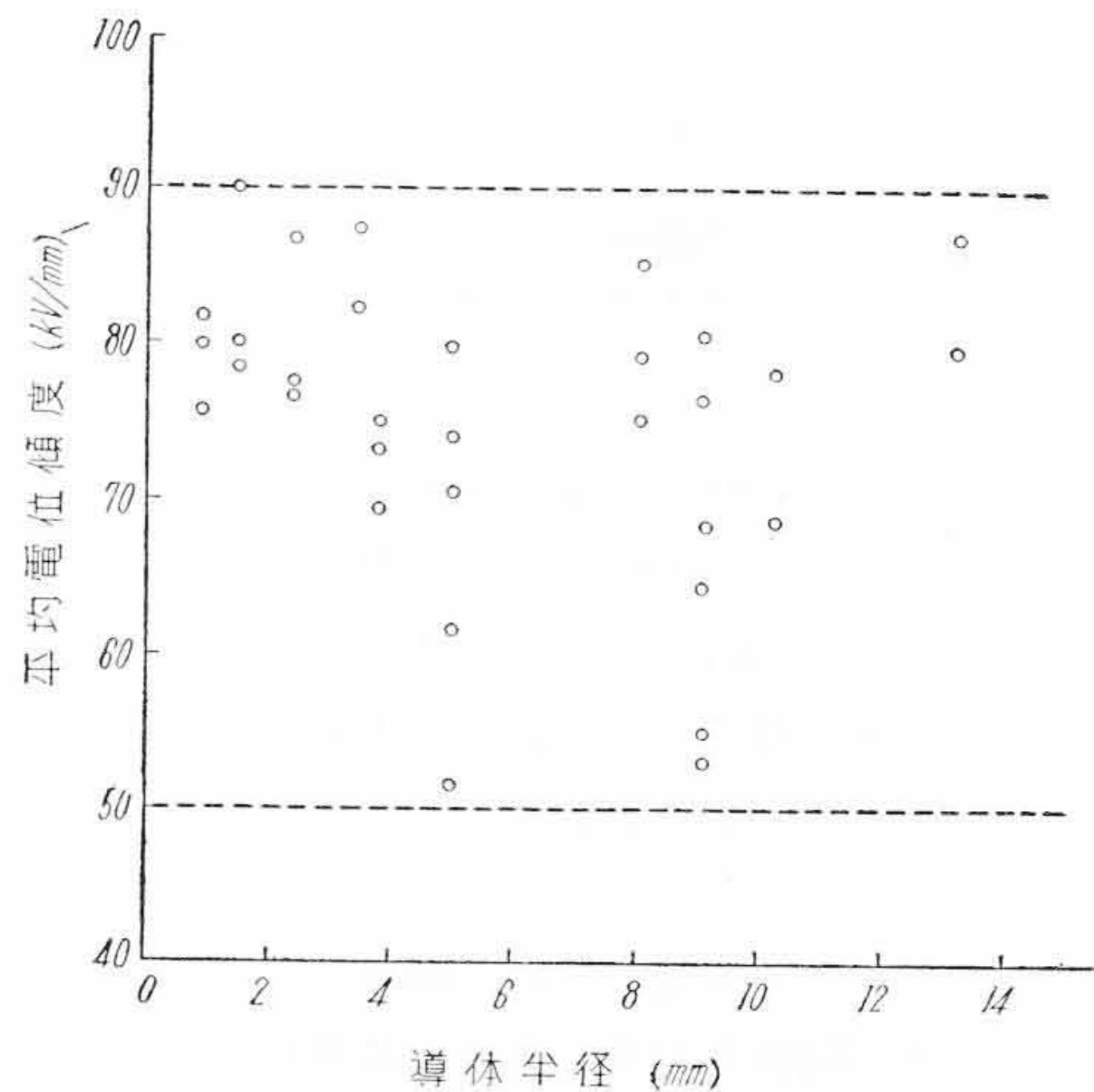
第 9 図 衝撃破壊電圧と絶縁体厚の関係 (導体半径 0.9~13 mm)

方の限界線とほぼ等しくなっている。これは電圧の極性が正の場合には衝撃破壊電圧が負の極性の場合に比べて 10~40% 低くなることが報告されているので⁽³⁾⁽⁷⁾, もしわれわれの試験においても正の極性を含ませるならば 70 kV/mm より低い値になるものと思われる。

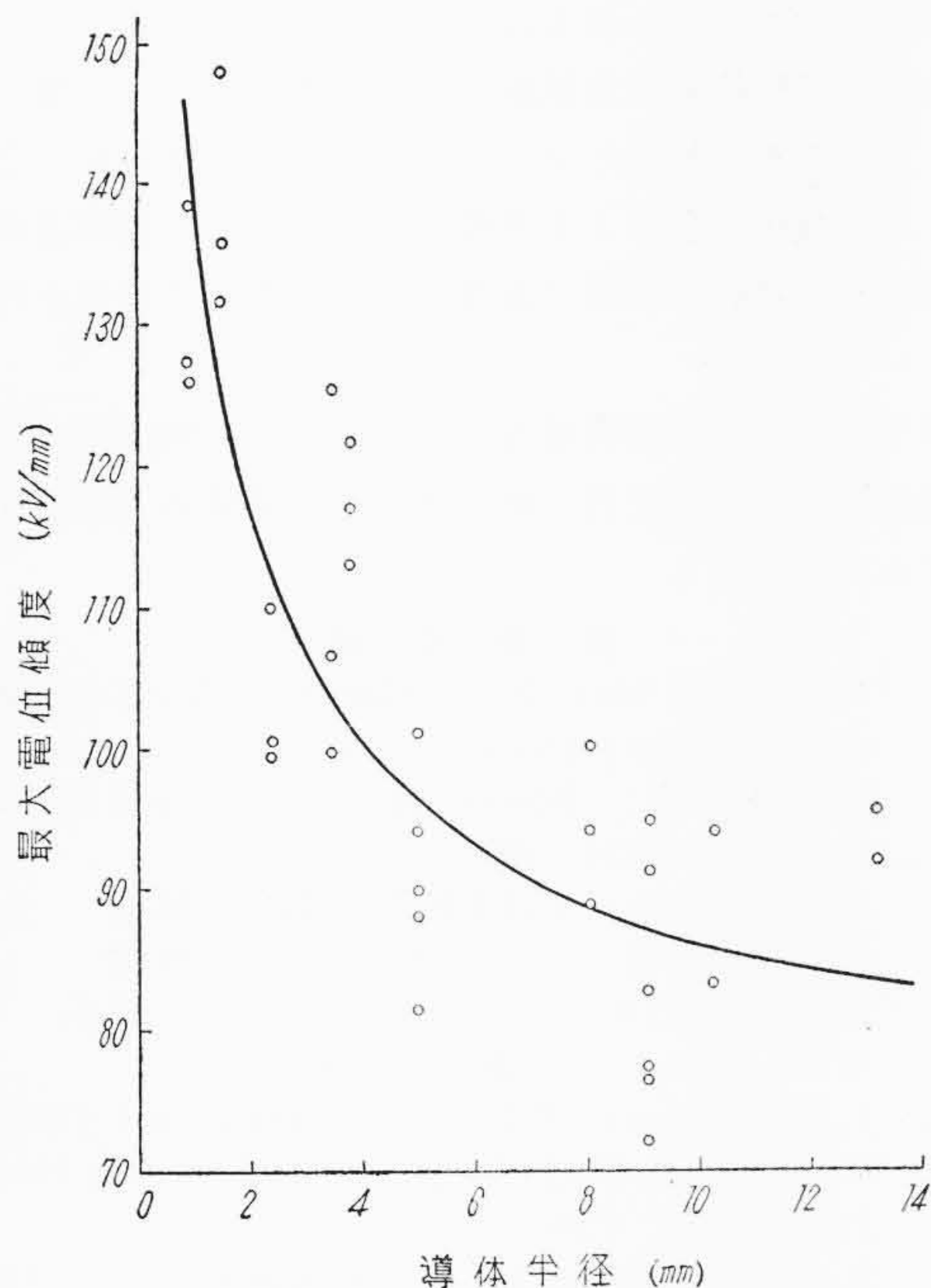
次に平均電位傾度と絶縁体の厚さの関係、および平均電位傾度と導体半径の関係は第 10 図および第 11 図のとおりであって、いずれもばらつきは相当大きくなるが約 50 kV/mm~90 kV/mm の範囲に入る。したがってポリエチレンケーブルでは平均電位傾度を 50 kV/mm とすれば任意の絶縁体、導体半径に対する最低衝撃破壊電圧が推定できる。



第 10 図 衝撃破壊の絶縁体厚と平均電位傾度の関係 (導体半径 0.9~13 mm)



第 11 図 衝撃破壊の導体半径と平均電位傾度の関係 (絶縁体厚 約 1.5~5.7 mm)



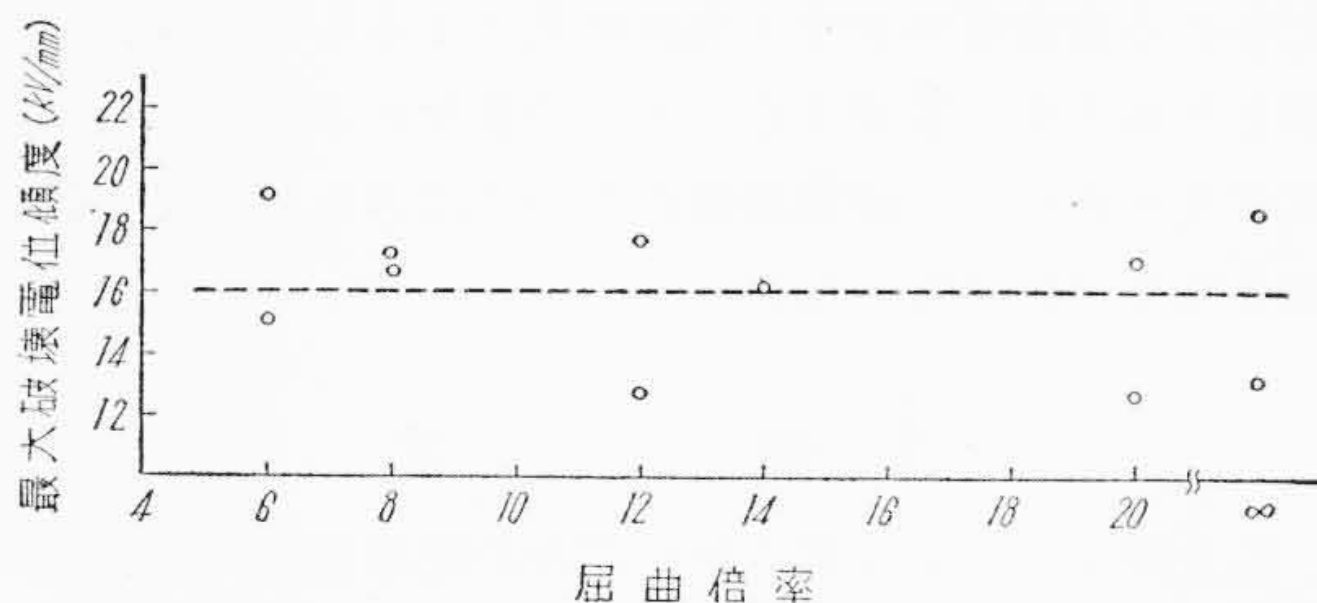
第12図 衝撃破壊の導体半径と最大電位傾度の関係 (絶縁体厚 約 1.5~5.7 mm)

最後に最大電位傾度と導体半径の関係を示すと第12図のようになり、明らかに最大電位傾度は導体半径の増大とともに急激に低下している。以上のポリエチレンケーブルの値と紙ケーブルおよびブチルゴムケーブルの特性を比較すると、一般に SL ケーブルは 120kV/mm⁽⁸⁾ ブチルゴムケーブルは 45~50 kV/mm といわれているので、ポリエチレンケーブルは両者の中間であるといえる。このことは S. J. Rosch 氏⁽²⁾によっても報告されている。

6. 屈曲破壊

前節までに述べてきた各種の絶縁破壊試験はケーブルがほとんど屈曲されていない状態におけるものであるが、実際にケーブルが布設されている場合には当然屈曲されることを予想しなくてはならない。そこでケーブルを屈曲した状態において絶縁破壊試験を行ったとき、屈曲度によって破壊電圧がどのように変化するかをみるために試験を行った。

試験はケーブルの絶縁線心とその外径の 20~6 倍の直径の円周に沿って屈曲させたまま交流長時間破壊を行った。その結果を示すと第13図のようになる。各屈曲率において相当ばらつきがあるが、屈曲径が小さくとも低下する傾向はみられず、ほとんど一定である。6 倍径に屈曲した場合において、導体表面に接する部分の絶縁体の伸びを計算すると約 9% である。



第13図 屈曲倍率と最大破壊電位傾度の関係

日立電線株式会社におけるブチルゴムケーブルについての屈曲破壊試験の結果によると、伸びが 5% 以下では破壊電圧が変化しないが 5% 以上では伸びに比例して低下することが明らかにされている。これに比べるとポリエチレンはブチルゴムほど絶縁体の伸びが破壊電圧に影響を与えないようである。また R. C. Mildner 氏⁽⁹⁾らはポリエチレンケーブルの破壊が異常に低くなる原因の一つとしてポリエチレン中の集中ひずみによる影響について報告しているが、今回行った屈曲によるひずみの程度ではあまり影響されないものと思われる。

7. 絶縁破壊現象に対する考察

ポリエチレン絶縁体の絶縁破壊の研究は多くの人によって行われてきた。たとえば A. E. W. Austen 氏と H. Pelzer 氏⁽¹⁰⁾および W. G. Oakes 氏⁽¹¹⁾は熱破壊や夾雑物の影響をなくしてポリエチレン固有の破壊電界を測定して 10⁶ V/cm 程度の値を得、そして A. Von Hippel 氏⁽¹²⁾や H. Fröhlich 氏⁽¹³⁾の理論にしたがって物性論的な説明を試みている。

また J. H. mason 氏⁽⁷⁾は内部放電によるポリエチレンの破壊を次の二つの機構について考えている。すなわち放電による劣化が、放電エネルギーの集中による熱劣化か、あるいはボンバードメント (bombardment) による炭化水素結合の切断となり、これが究極的に破壊となる場合、および上記で生じた炭化溝が高電界においてただちに破壊を誘発する場合である。この前者は長時間破壊となり、後者は短時間破壊となる。

Simplex 社の D. W. Kitchim 氏と O. S. Pratt 氏⁽¹⁴⁾はポリエチレンが透明であることを利用して破壊にいたるまでのポリエチレン中の tree の成長を観察している。そして破壊は絶縁体中に潜在する溝状欠陥に起因するといっている。この tree の成長時間は 10⁶~10⁻⁶ 秒にわたる程度に各様であり、衝撃電圧に対しては低電圧の交流を長時間印加した場合よりも tree の枝が少ないと述べている。筆者らは衝撃電離による電子雪崩模型にしたがって破壊機構が説明できないかと考えた。そして純粋液体の理論から求めた平均自由行程と、これを基にして

えられる破壊電界強度と実験結果によるものとを比較検討したがうまく説明することができなかった。したがってポリエチレンの破壊機構についてはさらに今後の研究にまたなければならない。

8. 結 言

以上ポリエチレン電力ケーブルの絶縁破壊特性について報告したが、これを要約すれば次のとおりである。

- (1) 交流短時間破壊、交流長時間破壊および衝撃電圧破壊において破壊時の最大電位傾度はいずれも一定とならない、そして導体サイズの増大とともに低下することが確認された。
- (2) 破壊時平均電位傾度は衝撃破壊においてはほぼ一定といえるが、交流短時間破壊および交流長時間破壊では必ずしも一定とはいえない。
- (3) しかしながらケーブルの設計にあたっては最大電位傾度より平均電位傾度を採用したほうがよいと思われる。
- (4) 今回報告した各種ポリエチレン電力ケーブルの絶縁破壊特性は、紙ケーブルとブチルゴムケーブルの中間の性能を有しているものといえる。しかしながら導体サイズの相当大きいものについてはブチルゴムと同等となる。
- (5) 絶縁体外径の6倍の直径の円周に沿って屈曲させるという実際の布設においては考えられないような苛酷な屈曲を与えた状態においても、破壊電圧が低下しないことがわかった。これはポリエチレンケーブル

の一つの特長であると思う。

今回の各種絶縁破壊試験により、ポリエチレン電力ケーブルの初期特性のすぐれていることが明らかとなったが、負荷試験による初期特性の変化と、導体遮蔽の絶縁破壊特性に及ぼす影響について引続き研究を行いたいと思う。

終りに本研究に御指導をいただいた日立電線株式会社電線工場、久本部長、杉山課長以下関係者各位に深謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) W. A. Del Mar, E. J. Merrell: AIEE Symposium on Polyethylen (1952)
- (2) S. J. Rosch: Power Apparatus and System 75, No. 26 824 (1956)
- (3) H. Pairitsch: CIGRE No. 205 (1956)
- (4) 橋本, 川和田: 日立評論 89 (昭 29-8)
- (5) 鈴木: 電力ケーブル (オーム社 昭 26-5)
- (6) 依田, 増岡: 日立評論 別冊 15
- (7) J. H. Mason: PIEE 102, Part C 254 (1955)
- (8) H. C. Hall, D. J. Skippen: PIEE 103, No. 12 Part A 571 (1956)
- (9) R. C. Mildner, E. D. Humphries: CIGRE No. 209 (1958)
- (10) A. E. W. Austen, H. Pelzer: JIEE 89, Part I 487 (1942)
- (11) W. G. Oakes: PIEE 95, Part I 36 (1948)
- (12) A. Von Hippel: Z. F. Phy. 67, 707 (1931): 68, 309 (1931): 75, 145 (1932)
- (13) H. Fröhlich: Proc. Poy. Soc. A 160, 230 (1937): 172, 94 (1939): A 188, 532 (1947)
- (14) D. W. Kitchin, O. S. Pratt: E. E. 77, 218 (1958)



新 案 の 紹 介



実用新案第467854号

大和和夫・宮沢定雄

プラスチック絶縁電力ケーブル

プラスチック絶縁電力ケーブルの絶縁体にはポリエチレンなどの誘電正接の小さいものが使用されるが、多心ケーブルにおいては線心燃合せの際の介在物としてジュートなどそれ自身誘電正接のきわめて大きい繊維物質が用いられるため、ケーブル全体としての誘電正接を著しく増大させる欠点があった。この場合、介在物としてポリエチレン紐を使用するか、もしくは各絶縁線心周上に金属テープの纏巻を施すことが考えられるが、いずれもケーブル価格を高騰させる欠点がある。

この考案はこのような点にかんがみ、図に示すように導体にポリエチレン絶縁体を設けたプラスチック絶縁線心の燃合間隙に、カーボンブラック、グラハイトなどの導電性粉末を多量に配合した塗料をジュートに含浸させたものごとき導電性繊維質介在物を設け、その上に押えテープ巻層、遮蔽層、プラスチックシースを順次被覆

したものである。

このように構成すれば導電性繊維質介在物には導電性塗料が含浸されているから、介在物自体の誘電正接はきわめて小さくなり、したがってケーブル全体の誘電正接の増大は、わずかな手数と費用をもって防止できる実用効果がある。(齊藤)

