U.D.C. 621.315.211.4

低ガス圧ケーブルの自己回復作用と絶縁特性

A Study on the Self-Healing Action of Low Pressure Gas-Filled Cable and Insulation Characteristics

加　子　泰　彦*
Yasuhiko Kako

内　容　梗　概

低ガス圧ケーブルのイオン化開始電圧が使用中次第に上昇していくことは一般に知られた現象であり，これらの機構についてはさきに実験により解明した。しかし自己回復作用が起るためには，ある期間ボイド放電が続くことが前提となっているために，この作用の実用上の価値を決定するものはイオン化開始電圧の変化の過程に起る絶縁性能の変化，特に破壊電圧の変化である。筆者らはモデルならびに実ケーブル試料を用いた実験により，これらについて検討した。すなわち油浸紙はボイド放電に対してはすぐれた性能を有し，ボイドがワックス化された油で充填され安定化するまでに起る油浸紙自体の劣化はわずかであり，ボイドを含む構造としての破壊電圧はかなり上昇する。また自己回復作用によって，ボイド放電は完全に消滅し，その後の劣化の可能性は少なく，低ガス圧ケーブルの寿命は長いことが推定される。また現在製作される標準の低ガス圧ケーブルは，十分満足な自己回復作用を示し，初期のイオン化開始電圧が比較的低いにもかかわらず大きな安全率があることが判明した。

1. 緒　　言

低ガス圧ケーブルはその構造上絶縁層内にゲージ1気圧の窒素ガスの入ったボイドが存在するため，製造時のイオン化開始電圧は比較的低く使用電圧に接近している。しかし使用中にはイオン化開始電圧は次第に上昇していくことが知られており，この作用は自己回復作用と名づけられている(1)。筆者らはさきにモデル実験により自己回復作用の機構を解明し報告した(2)。すなわち自己回復作用はボイド中に油が流入し，そこでワックス化されることによりボイドが安定に充填されることであるが，この油の移動は従来考えられていたような印加電界による静電気力によるものよりも，ボイド放電が起った場合の局部的強電界の発生，空間電荷の生成などによる作用が主原因である。また流入した油が温度変化などにより再流出しないためには，ワックス化などによりボイド部に油が固定されることが必要である。したがって自己回復作用によるケーブルのイオン化開始電圧の上昇，性能の安定化は，ある期間ボイド放電が継続した後に起るということができる。このような状況のもとでは，自己回復作用が起る過程において放電による絶縁劣化が起ることが当然考えられ，特に破壊電圧の変化は自己回復作用の実用上の価値を左右する重要な問題である。今回はこれらの点について検討するためにガス圧，温度などの条件を実ケーブルと等しくしたようなモデル実験により，油浸紙自体の性能の変化を検討し，またボイドを含む構造についての破壊電圧の変化，自己回復作用の速度などを検討し，低ガス圧ケーブルの自己回復作用は実用上非常に好ましい性質であることを確認することができた。さらに実ケーブルについての実験では，現在日立電線株式会社において製作される低ガス圧ケーブルにおいては十分満足な自己回復作用が起ることを確かめることができた。

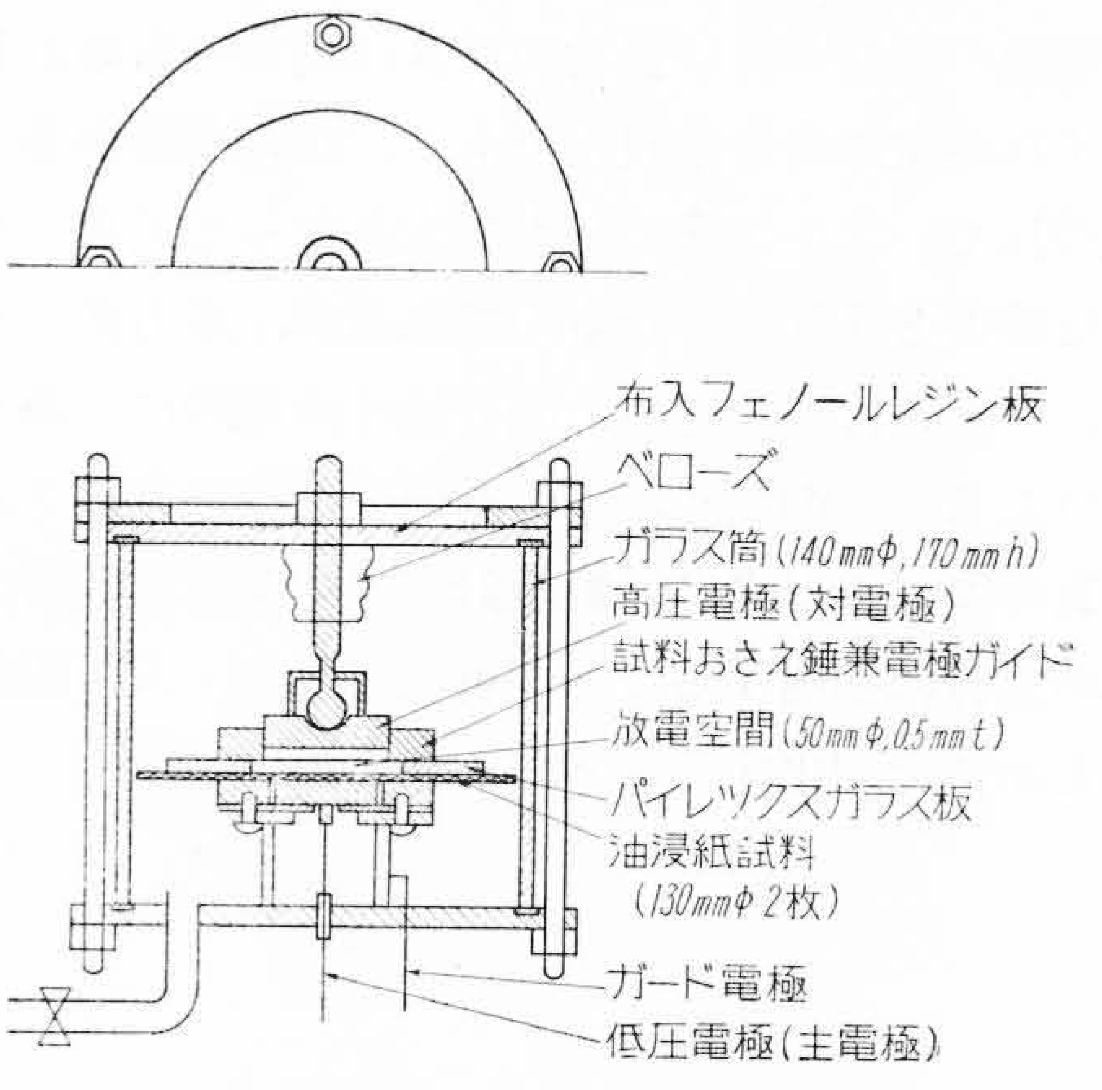
* 日立製作所日立研究所

2. ボイド放電による油浸紙の劣化

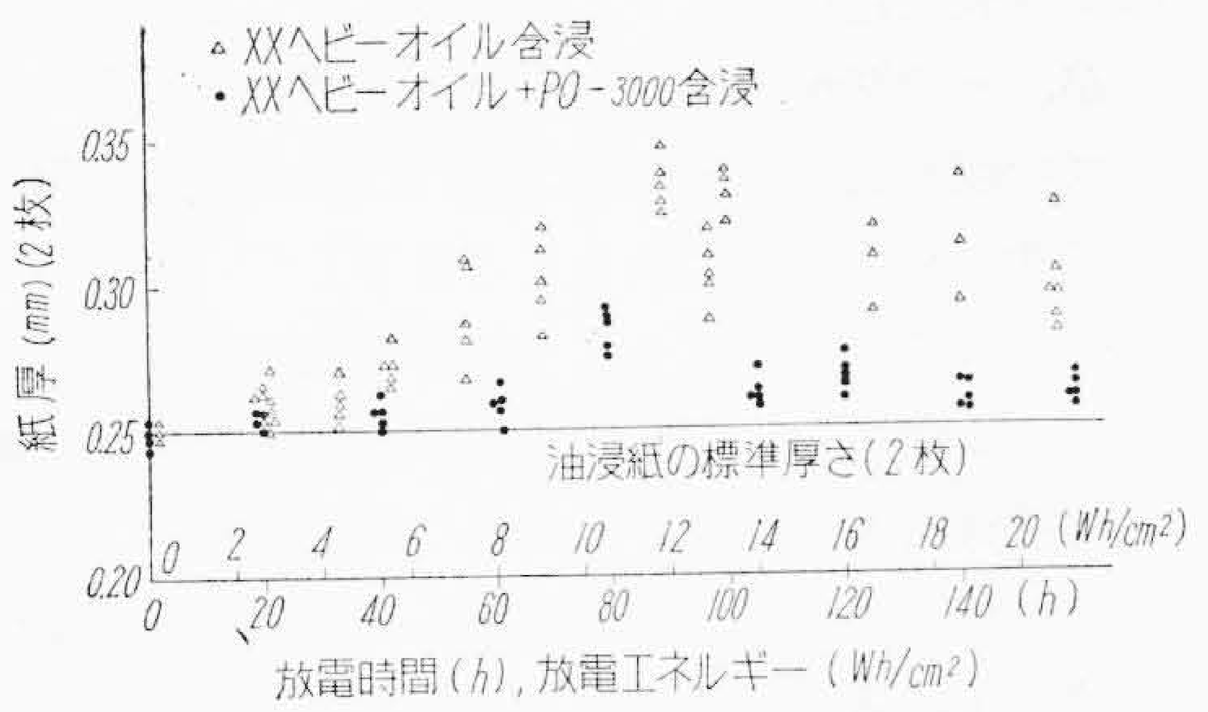
2.1 実　験　法

油浸紙の絶縁材料としての組成は複雑なものであってその性能は種々の条件により左右される。特にガス圧ケーブルに使用される状態では，油浸紙中の油の量すなわち油浸率が大きな影響を与える。したがって劣化試験の試料としては油浸率の一定なものを製作して用いた。ケーブルの場合油は全部が紙の組識の中に含まれるものではないが，ここでは試料の油浸率をケーブルの場合の実効油浸率とほぼ等しい値として 30% を選んだ。

放電劣化試験容器は**第1図**に示す構造のもので，



第1図　油浸紙放電劣化試験装置



第2図　ボイド放電による有効紙厚の変化

130 mmϕ の油浸紙2枚を重ね，上部電極と試料間の約0.5 mm の空間で放電を行わせた。容器中には窒素ガスをゲージ1気圧に封入し，これを 60°C の恒温槽中に入れてケーブルとほぼ等しい条件とした。電源は 1 kc の周波数のものを用い，放電による劣化を商用周波の約20倍に加速した。

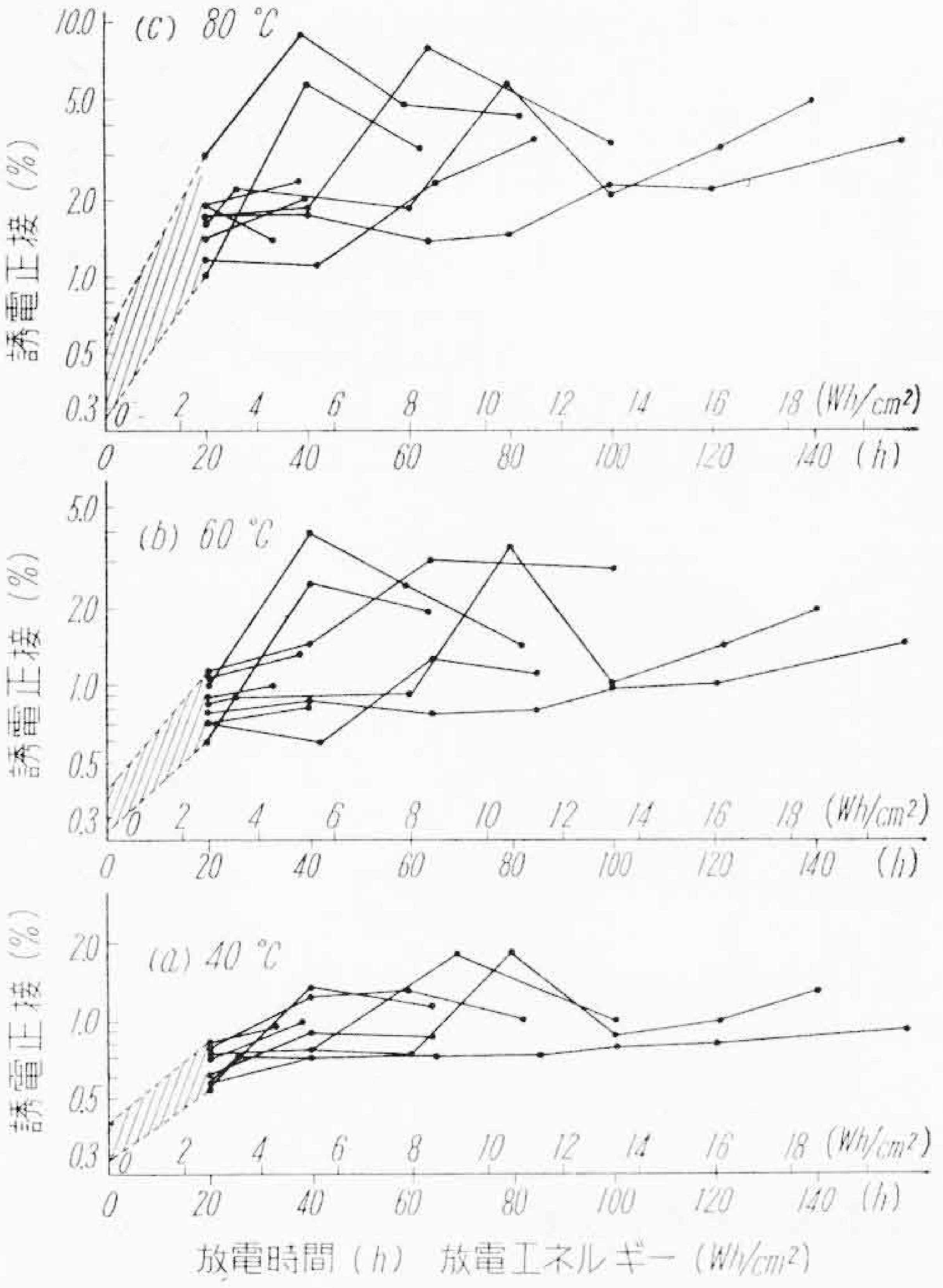
試料の誘電正接の測定は上部電極を下げて試料を押さえて行い，劣化試験の途中の変化を測定した。破壊試験は試料をとり出して破壊試験電極装置に入れ，真空処理後コンデンサ油を注入し，油中で測定した。

2.2 ワックスの生成

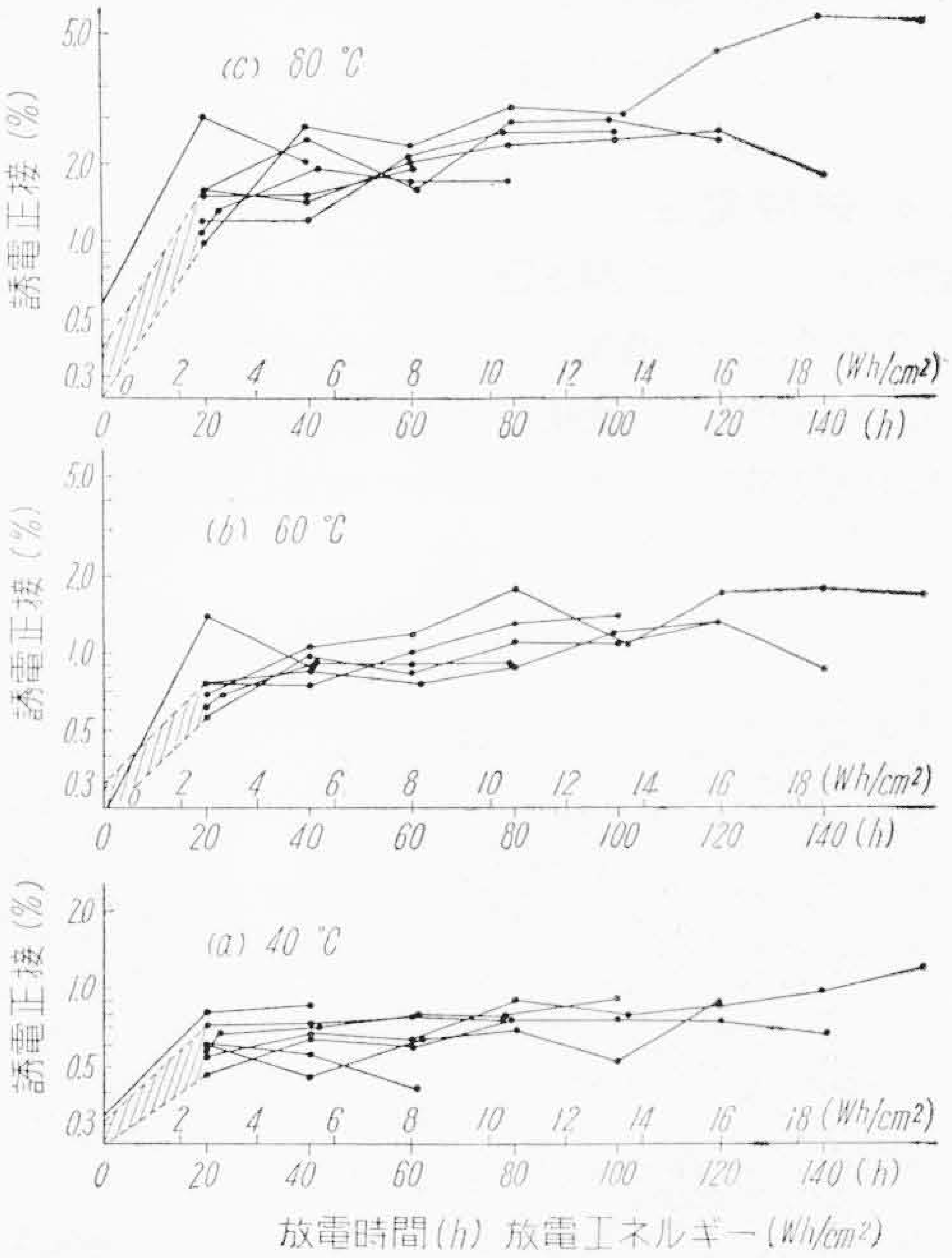
この実験では放電はボイド部のみで起っているため，試料周辺から油が移動しボイド部でワックス化が起り，試料の見掛けの厚さが次第に増大する。油浸紙試料として XX ヘビーオイルを単独で含浸したものと，PO-3000 を混合した高粘度油を含浸したものについて，厚さの変化を第2図に示した。測定は破壊試験のとき試料をとり出して行ったもので，各測定値は別々の試料についての値である。第2図の結果より，含浸油量が等しければ粘度の高い方が移動量が少ないことがわかる。またこの実験により油の移動はボイド放電によって起ることが再確認され，ケーブルの自己回復作用では移動しうる油の量が問題であって，ボイドの大きさはこの作用には無関係であることが判明した。

2.3 誘電正接

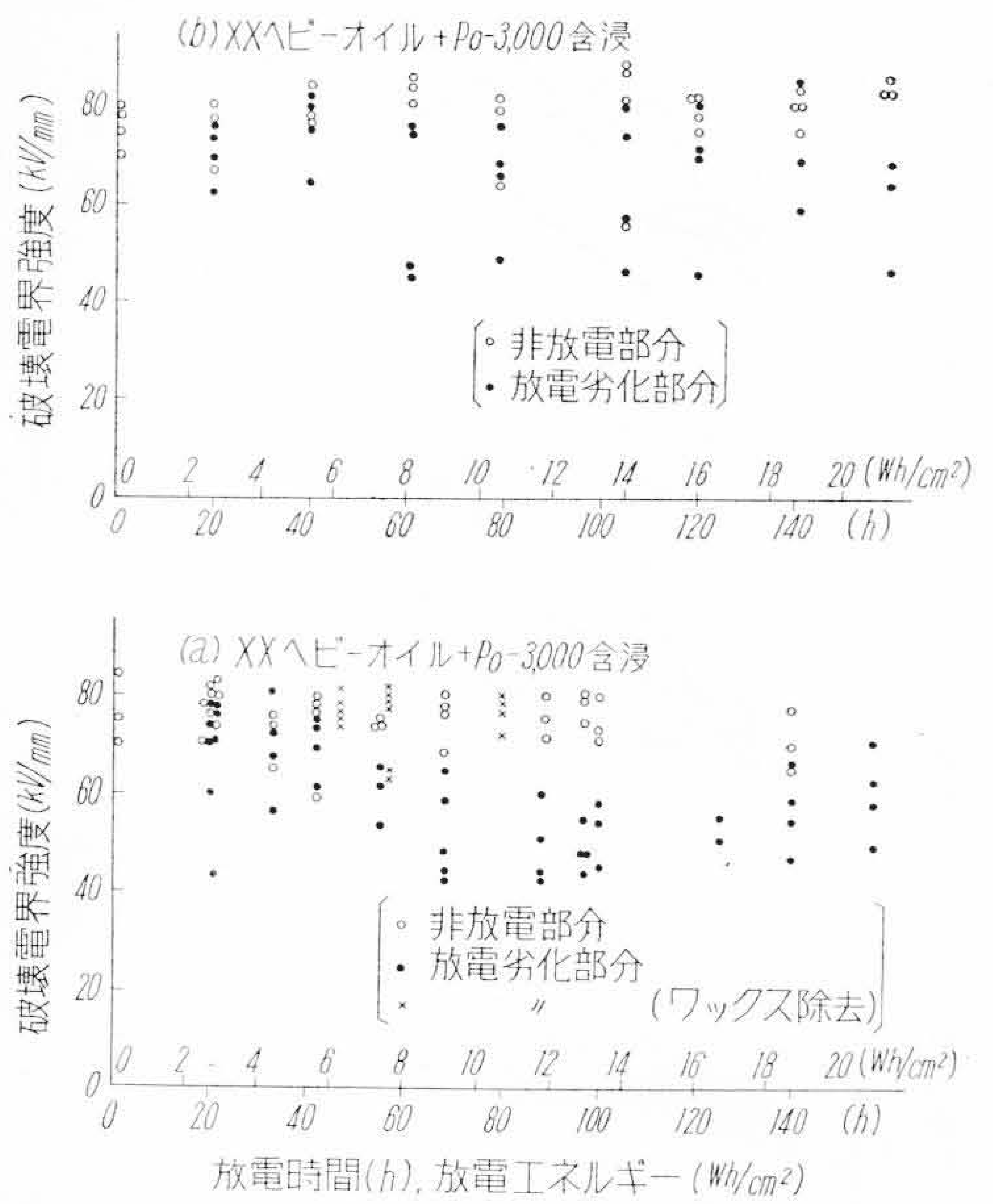
上述のように試料はワックスと油浸紙の複合層となるため，油浸紙自体の特性は求められないが，2種の油浸紙試料の放電による誘電正接の変化を第3，4図に示した。ワックスの量を考慮すれば両者特に差異はないものと推定される。またこのような試料の状態は，ケーブルにおいてボイドがワックスで充填された状態に対応するものであるが，ケーブル全体としてはボイドの面積は小さいので，このような大きな誘電正接を示すことは考えられない。油単独の放電劣化試験[3]の結果に比して高温時の誘電正接の増加が大きく，イオン伝導性の物質の生成が多いことを示している。これは紙と油と共存したことにより生じたことでもあるが，この場合放電は片面金属電極に接するボイドで起っているため，金属の影響も大きく，ワックスの色も紫褐色を呈している。後述する



第3図　放電劣化による誘電正接の変化（XX ヘビーオイル含浸紙）



第4図　放電劣化による誘電正接の変化（XX ヘビーオイル＋PO 3000 含浸紙）



第5図　ボイド放電をうけた油浸紙の破壊電圧

油浸紙間のボイドによる実験と比較し，このような状態はケーブルではほとんど起らない苛酷な状態と考えられ，その意味で第3，4図の値を劣化の上限と考えることができ，その場合はこれらの値はただちに危険を招来する値ではないものと考えられる。

2.4 破壊電圧

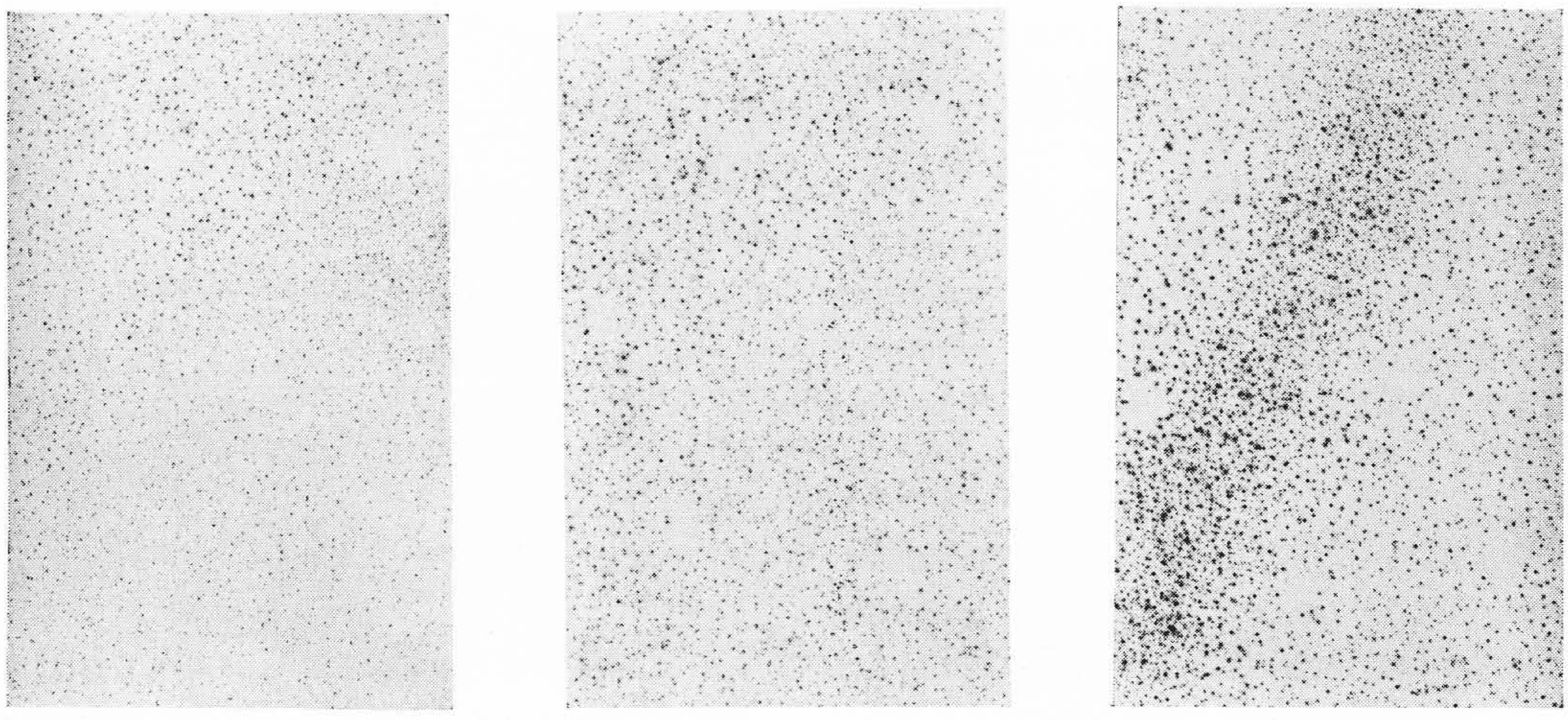
破壊電圧の変化を第5図に示した。ここで電界強度はワックスのために増加した後の厚さ（第2図）について求めたものである。比較のために放電の影響をうけない試料の周辺部の破壊電圧も同時に測定した。第5図では放電により破壊電圧は低下し同時にばらつきも多くなっているが，その機構を検討するため一部の試料についてワックスを取り去った後に破壊電圧を求めた。第5図（a）に示すこれらの値はほとんど低下していないと考えることができる。このことより破壊電圧の低下はワックス生成による構造変化が原因で起ったものであり，油浸紙自体の材質的劣化はほとんど起らないものと考えられる。しかし放電がなんらかの原因により局部的に集中すれば破壊電圧は著しく低下することが予想され，これらについては後述の油浸紙間のボイド放電の実験により検討した。

2.5 乾紙放電劣化試験

放射線照射をうけた場合には，紙は絶縁材料としては劣化しやすいものであることが知られている。しかし前述のように油浸紙はボイド放電によりほとんど劣化が起らない。このような相違が生じた原因を検討するため，乾紙について放電劣化試験を行ってみた。実験はI.E.C.法（またはA.S.T.M法[4]）に準拠して1mm厚のガラス板間に試料をおき，試料と上部ガラス板間に1mmの放電間隙をもうけ，上下両ガラス板の外面に電極をもうけて電圧を印加しボイド放電を起させた。実験は常温，常圧の窒素ガス中で行い，電源には1.8kcのものを用いた。電極の冷却を行っているために試料の平均温度上昇はわずかしか起らないが，試料には非常に短時間で小孔が貫通する。小孔の貫通が認められるまでの最小放電エネルギーは約1.3Wh/cm²であり他の一般の固体絶縁材料に比して非常に劣化が早い。長時間の劣化で多くの小孔が生じた一例を第6図に示した。

2.6 考　　察

以上の結果を総合すると，絶縁紙は乾紙の状態では放



（a）13 Wh/cm²　　（b）25 Wh/cm²　　（c）38 Wh/cm²

第6図　ボイド放電による小孔の発生（乾紙）

電により非常に劣化しやすいものであるが，油浸紙の状態では劣化しにくい性能を示し，ボイド放電による破壊電圧の低下はほとんど起らない。これはボイド放電の場合は放射線照射の場合と異なり，個々の電子のもつエネルギーはわずかであるため変化はほとんど表面に局限される。したがって油浸紙では油が放電をうけてワックス化を起し，これが表面を保護するため紙はほとんど劣化しないものと考えられる。ここに用いた含浸油は油単独の放電劣化試験[3]でも判明しているように，安定なワックスになりやすいものであるためこのようによい性能が得られたものと考えられる。これらの実験により油浸紙の放電劣化の速度は小さいことが判明したが，自己回復作用の速度と関連してケーブルの性能も決定されるので，それらについては別に実験検討を行った。

3. 油浸紙間のボイド放電による自己回復作用

3.1 実験法

80 mmφ の油浸紙（0.125 mm 厚，油浸率 32 %）を3枚重ね，中央の紙には 20 mmφ の孔をあけてこれをボイドとし，**第7図**に示すような電極構成として電圧を印加し，ボイド内で放電を起させた。この場合も電源は周波数 1.8 kc のものを使用して変化を加速した。容器内には劣化試験の場合と同じくゲージ1気圧の窒素ガスを封入し，60°Cの恒温槽中で実験を行った。ケーブルでは約 15 mm 幅の紙より隣接する 0.5～1.0 mm 幅のボイドに油を供給するものと考えられるが，この実験では3枚の紙から油がボイドに流入するとして紙とボイドの面積比を決定した。含浸油には XX ヘビーオイルを単独で用いた。

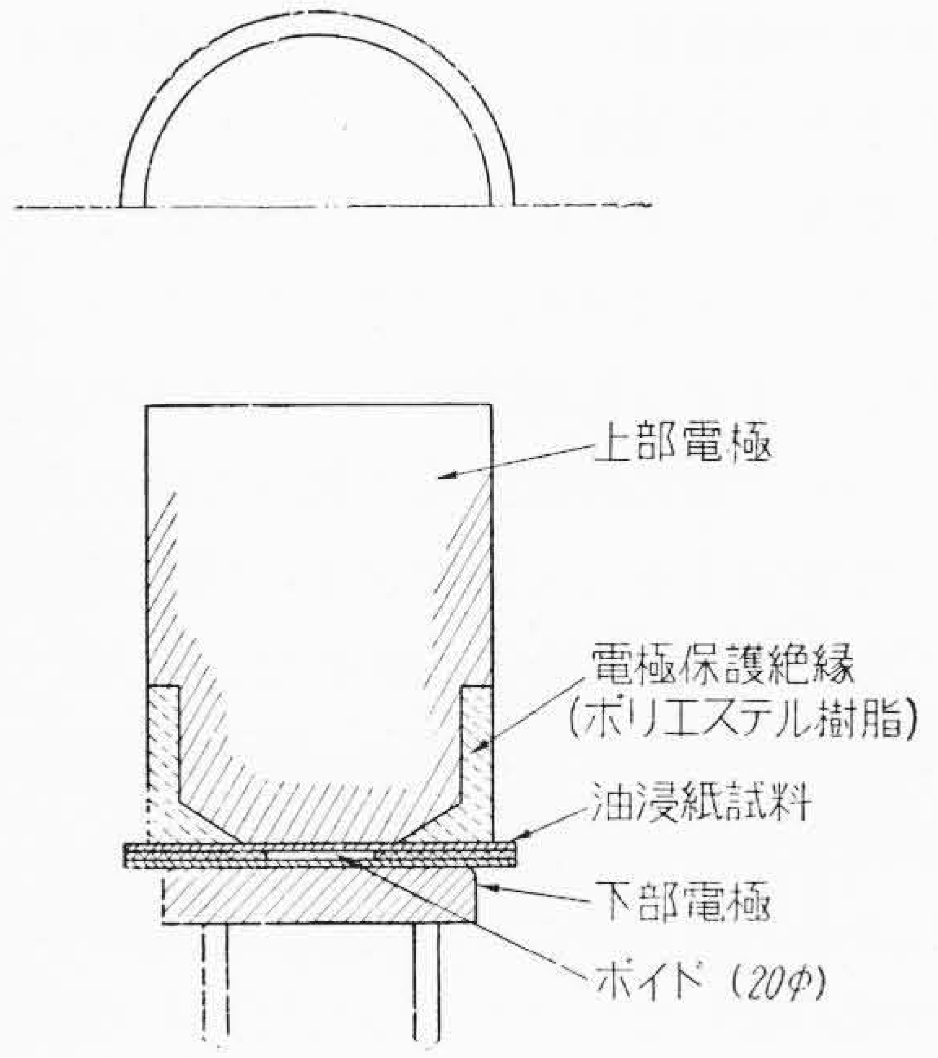
3.2 モデルと実ケーブルのボイド放電に対する等価性

ボイド放電のない均一材料についての試験の場合と異なり，ボイドで放電が起る場合は単に平均電界強度のみでは異なった構造についての実験の比較はできない。モデル実験の結果をケーブルに適用するために等価条件を考えてみる。

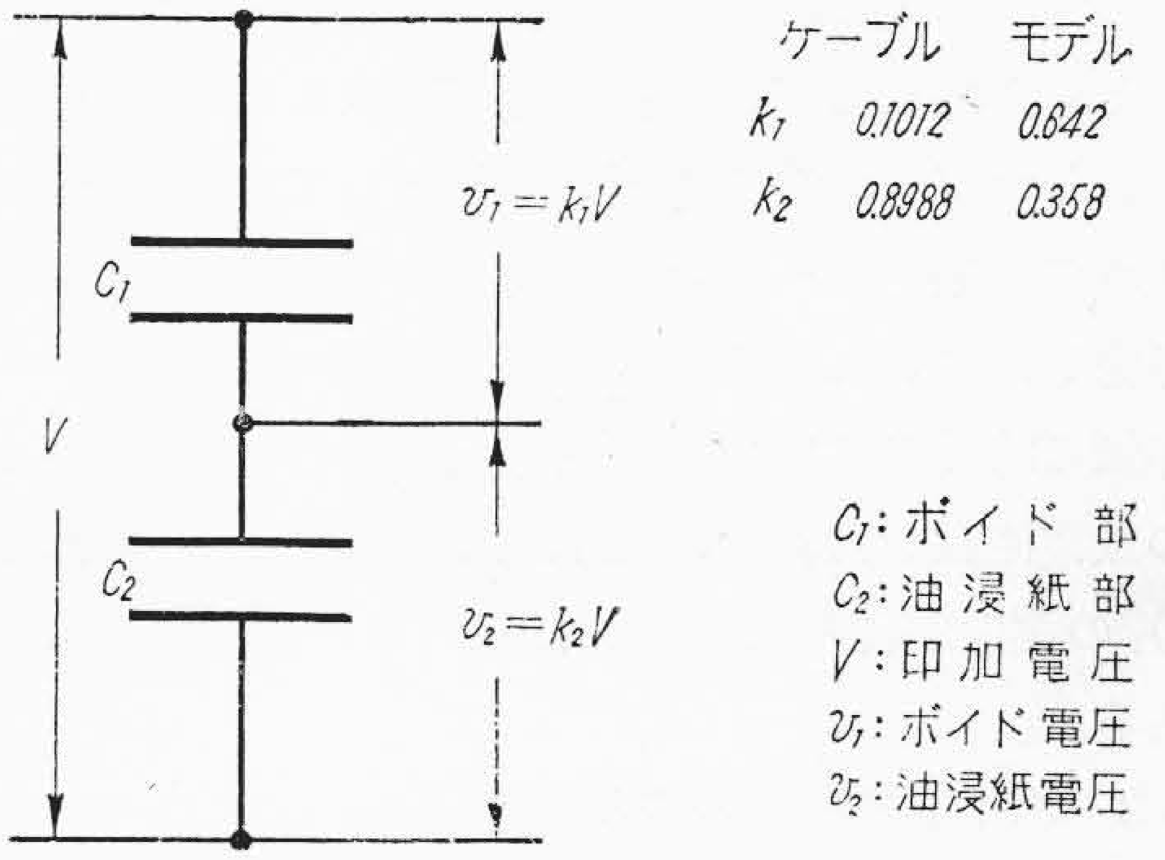
まず周波数については，印加電圧と構造が等しければ 1 c/s 中に起るパルスの数は低周波領域では等しいと考えられる。したがってこの範囲内で周波数を上昇させると放電エネルギーは周波数の倍数だけ大きくなる。この場合放電による熱のための温度上昇が大きくならなければ周波数の倍数だけ変化を加速したと考えて差しつかえない。

次に電圧については，ボイド放電の絶縁物に及ぼす影響を衝突する電子，イオンの個々のエネルギーのみによるものとすれば，放電時のボイド内の電界強度はガスの状態のみで定まるため，印加電圧の大小は 1 c/s 中の放電回数の大小だけの問題となる。しかし実際にはボイド放電により絶縁破壊の起るまでの時間については単に放電回数の大小で比較できないほど大きな電圧の影響をうける。したがってここでは放電時油浸紙にかかる電界強度を等しくする電圧を等価電圧と考えた。

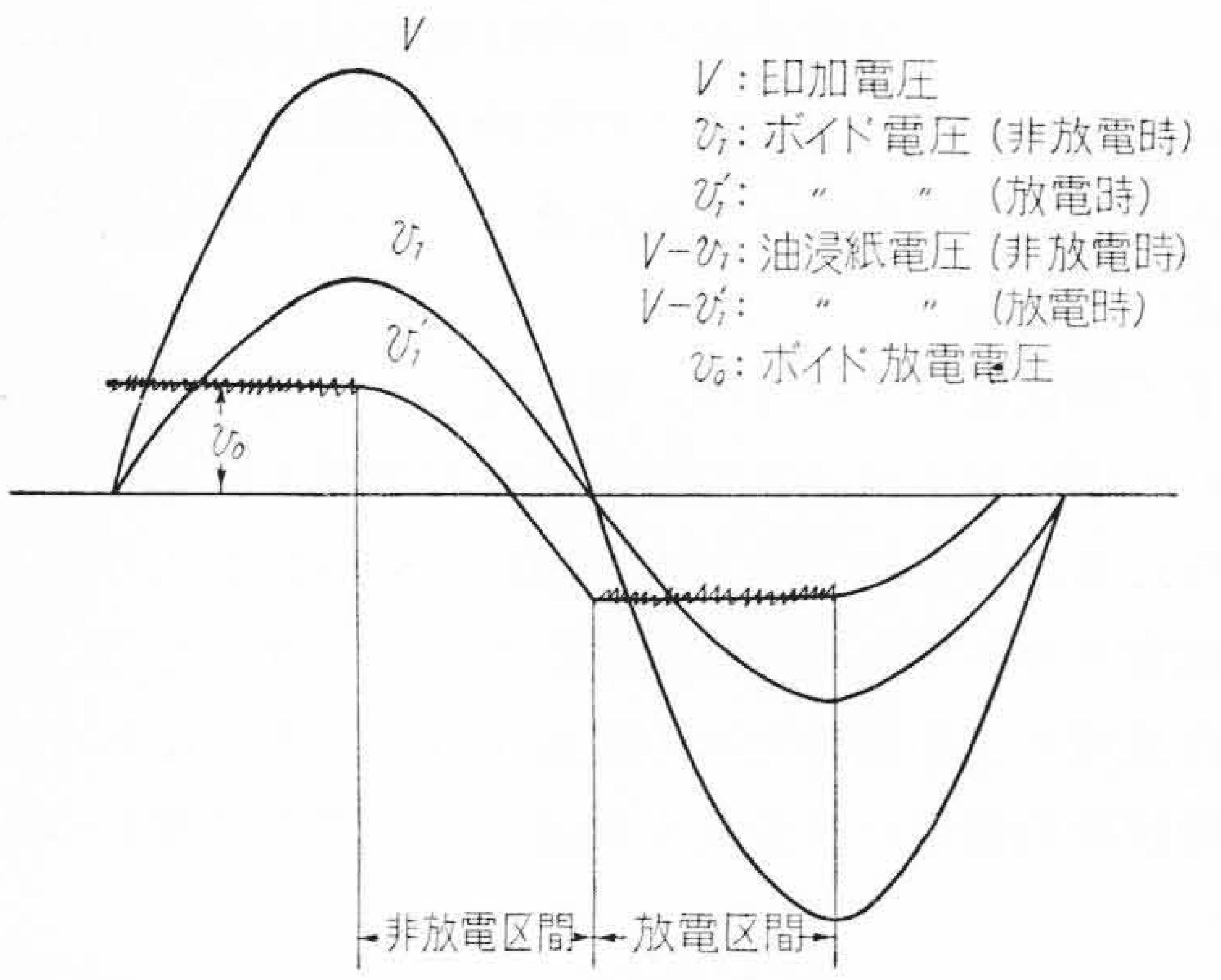
ボイドを含む絶縁構造の等価回路として**第8図**に示す回路を考え，この場合ケーブルは $100\ mm^2$ 圧縮導体の 20kV 低ガス圧ケーブルを考える。ケーブルにおいてボイドは実用的な最悪条件として絶縁最内層にあるものとする。等価回路の C_1，C_2 の電圧分担比（k_1，k_2）は図に示すような値となる。 C_1 で放電が起ると電圧分担は**第9図**のように変化する。このような波形は直接観測できないが，別な実験[4]により確かめることができる。この場合ボイド電圧は平均的なものを表わしており，実際にはボイド内の個々の放電点において，ガスの種類，気圧，間隙長で定まる放電電圧に達して発生した放電は，ある電圧まで低下して消滅し，これを繰り返すものと考えられる[5]。ボイド放電が起ると**第9図**に示すように油浸紙にかかる電圧は不連続となるが，印加電圧とボイド放電電圧の比を種々変化させて波形を求めてみると実用



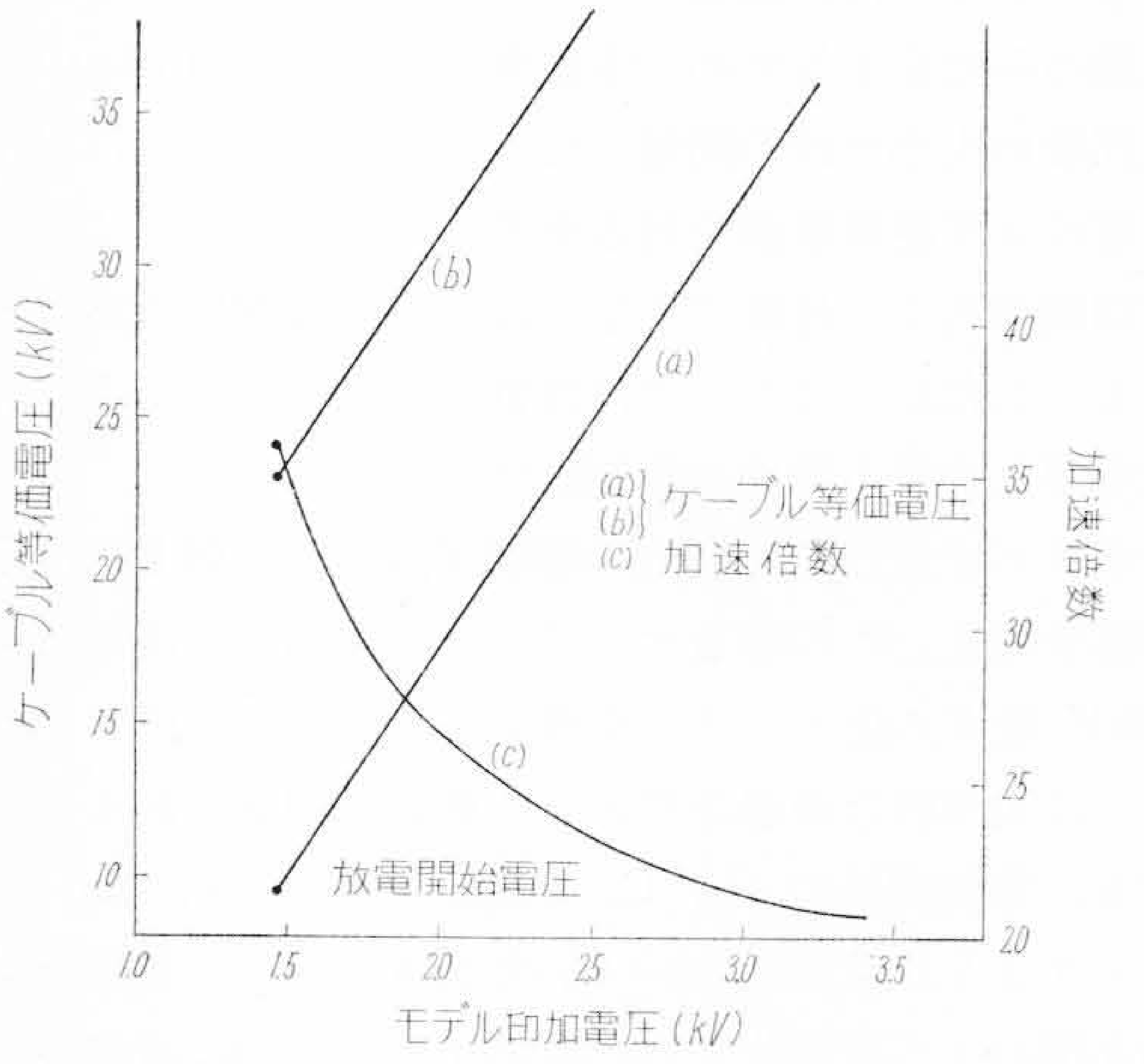
第7図　モデルボイド装置



第8図　ボイドを含む構造の等価回路



第 9 図　ボイドに放電が起る場合の電圧分担



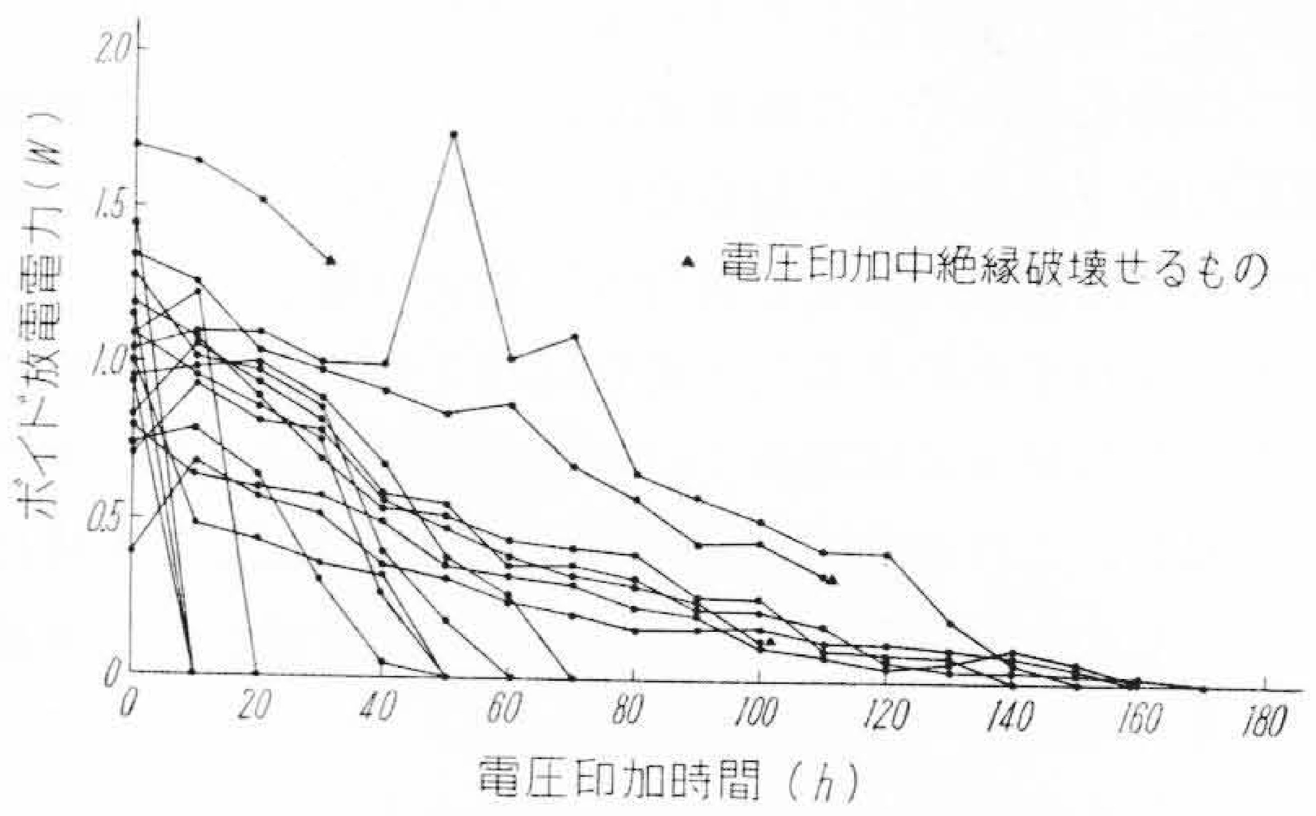
第 10 図　モデルと実ケーブルの等価関係

的には連続な正弦波と考えて差しつかえないことがわかる。このようにしてモデルとケーブルの印加電圧の等価関係を求めると第 10 図のようになる。直線（a）は第 9 図に示すように放電時ボイド電圧は一定の放電電圧に保たれるとした場合であって，（b）は前述のような発生消滅を繰り返すボイド内各部の放電において個々の放電の消滅する電圧を零と仮定した場合[6]の関係を示すものである。実際にはこれらの中間に真の等価関係が存在するものと考えられるが，これを詳細に求めることは困難である。したがって等価電圧の関係として（a）をとれば，モデルの結果をケーブルに適用する場合かなりの安全率を考慮したことになる。

等価の時間については等価電圧における両者の 1 c/s 中の放電回数を計算し，これと周波数の比より第 10 図（c）の関係が得られる。これは（a）に対応するものである。

3.3　ボイド放電の減少状態

ボイド放電が継続すると放電量は次第に減少していく

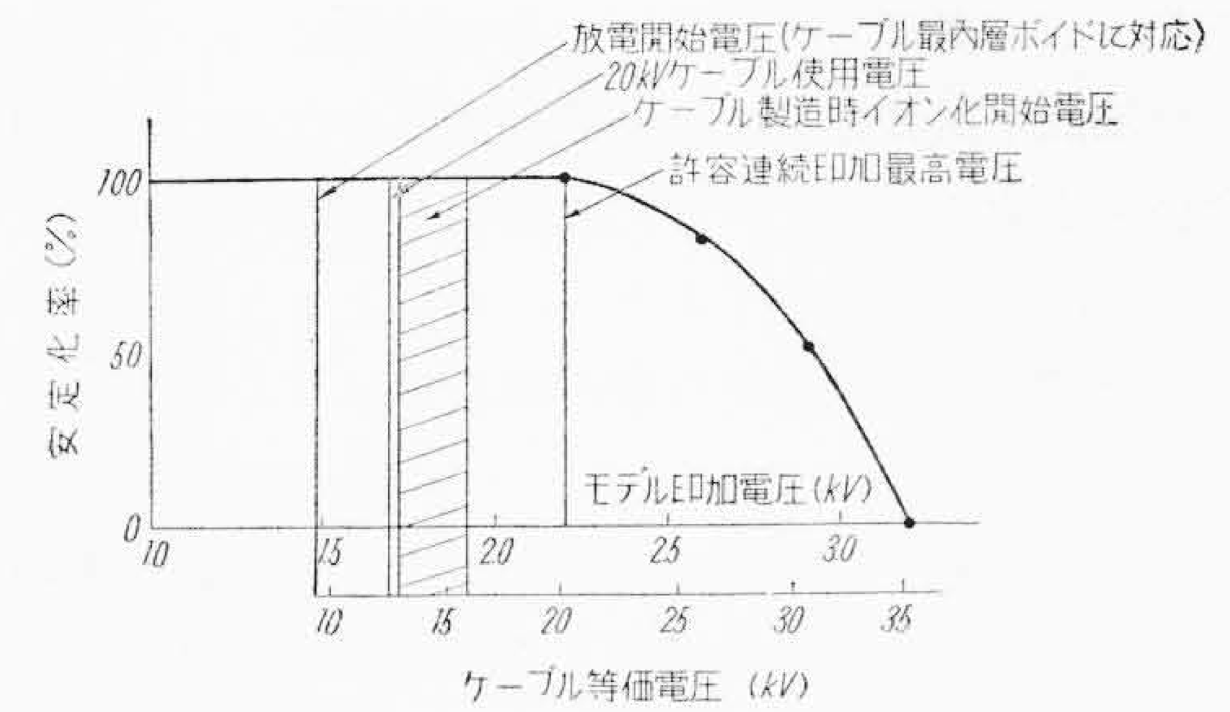


第 11 図　ボイド放電電力の変化
（1.8 kc，2.6 kV 印加）

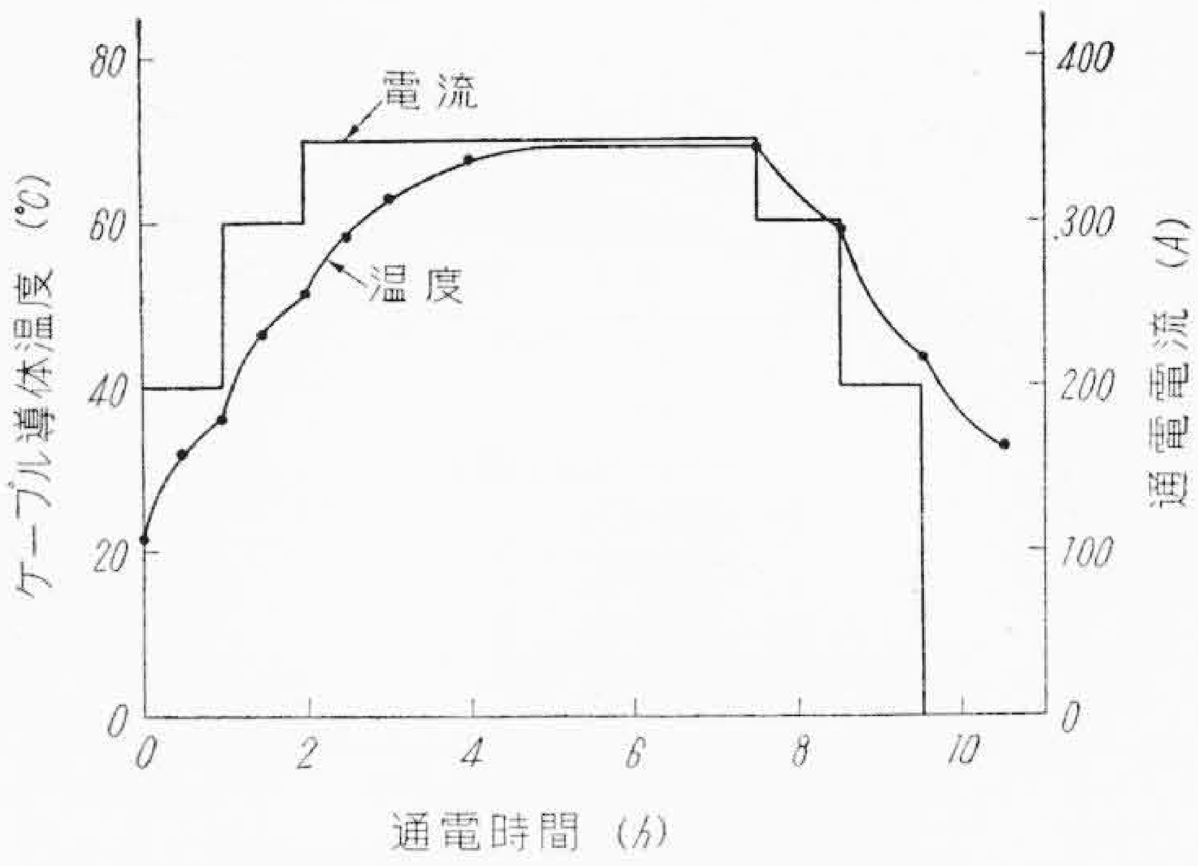
が，ここでは放電量を表わすものとして放電電力をとりその変化状態を測定した。実験結果の一例を第 11 図に示した。印加電圧を大きくするとボイド放電が消滅する前に破壊するものの数が多くなるが，放電電力の変化の傾向は第 11 図とほぼ同じである。電圧印加後短時間で放電電力が零となったものは，油浸量ならびに試料中の油の分布の不均一により比較的多くの油がボイドの周辺にあってそれがボイドに流入したものである。これらの試料を解体してみるとワックス化しない油がボイドに充満している。これに対し数十時間以上放電の続いた後に消滅したものではボイドはワックス化した油で充填されているのが認められる。ただし前者のボイド中のワックス化しない油も長時間電圧印加を続けると，温度変化その他により若干の移動が起り，電力測定のできない程度の微小な放電が起り次第にワックス化されていくことが確かめられた。第 10 図の特性と比較してケーブルの場合の自己回復作用により安定化するまでの時間の大体の値を推定することができる。

3.4　イオン化開始電圧

第 11 図において放電電力が零となって後さらにある程度の時間電圧印加をつづけた試料について，さらに高感度のコロナ検出器によりイオン化開始電圧を求めると，このときの印加電圧以上に上昇していることが確認された。従来ケーブルにおいて個々のボイドの微小な放電を検出することは非常に困難であるため，誘電正接の電圧特性よりイオン化開始電圧を求めるのが普通であった。したがって自己回復作用の起った後の真のイオン化開始電圧は測定することができず，自己回復作用の効果についても若干の不安をまぬかれなかった。すなわち誘電正接の値に影響しないような，微小な放電でもこれが長期間継続する場合は絶縁劣化の原因となることは当然考えられるからである。この実験で確かめられたように完全に放電が起らないようになれば，その後の劣化はわずかであると考えられ，ケーブルの寿命についてはこの



第12図　自己回復作用による安定化率



第13図　通電電流とケーブル温度上昇

状態に達するまでの絶縁性能の変化を検討すればよいことになる。

3.5 耐圧試験結果

長時間電圧印加試験前の試料の破壊電圧は，ボイドのために低くなっているが（平均 10.34 kV，標準偏差 0.76 kV），自己回復作用によりボイドがワックスで充填された試料は全部 15 kV の耐圧試験に耐え，材料自体の劣化は若干起っていることが当然考えられるにもかかわらず，構造としての絶縁耐力はかなり上昇していることが確認された。耐圧試験は常温で実験容器のままゲージ1気圧の窒素ガスの満たされた状態で，商用周波の電源を用いて行ったものである。

3.6 自己回復作用による安定比率

各印加電圧について実験途中で絶縁破壊の起ったものを除いて，放電電力が零となって安定化したものの全実験数に対する割合を安定化率とすると，第12図の特性が得られる。ここに 100 mm^2 のケーブルについての値を求めると，許容連続印加の最高電圧は初期のイオン化開始電圧よりかなり高いことがわかる。ここに示した等価電圧は，前述のようにかなり大きな安全率をとっているため，この関係より実用上のケーブルの性能を推定することができる。

3.7 む す び

以上の結果より自己回復作用においては，ボイドが安定化するまでに起る放電による材料自体の劣化はわずかであり，逆に構造としての破壊電圧はかなり上昇し，またボイド放電は完全に消滅してその後の劣化の可能性は非常に小さいことがわかる。ケーブルにこれらの実験結果を適用すると，現在製作される標準の低ガス圧ケーブルは，十分に高い安全率を有し，長期の寿命を有することが推定される。

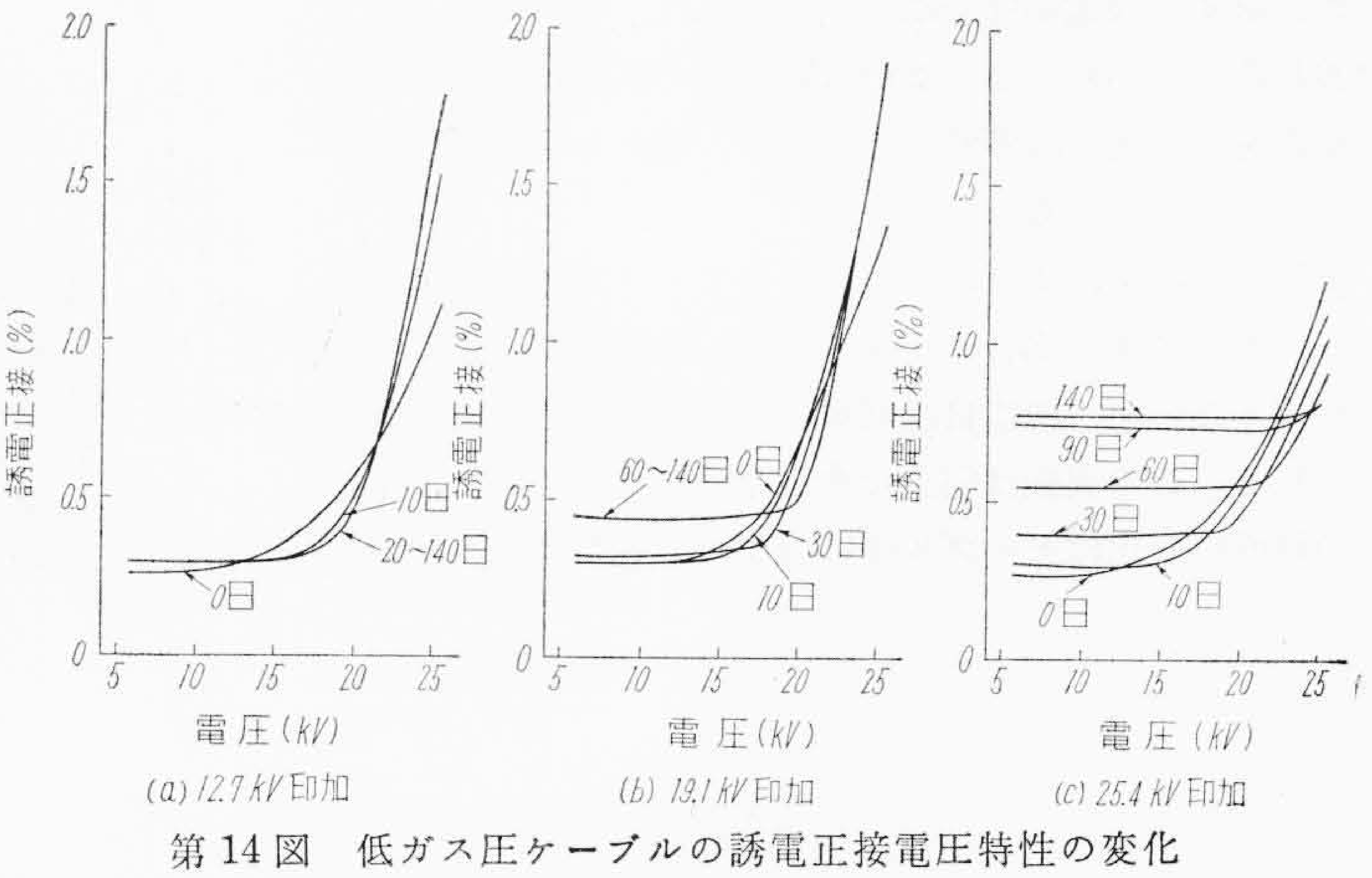
4. 実ケーブルによる自己回復作用の検討

4.1 実 験 法

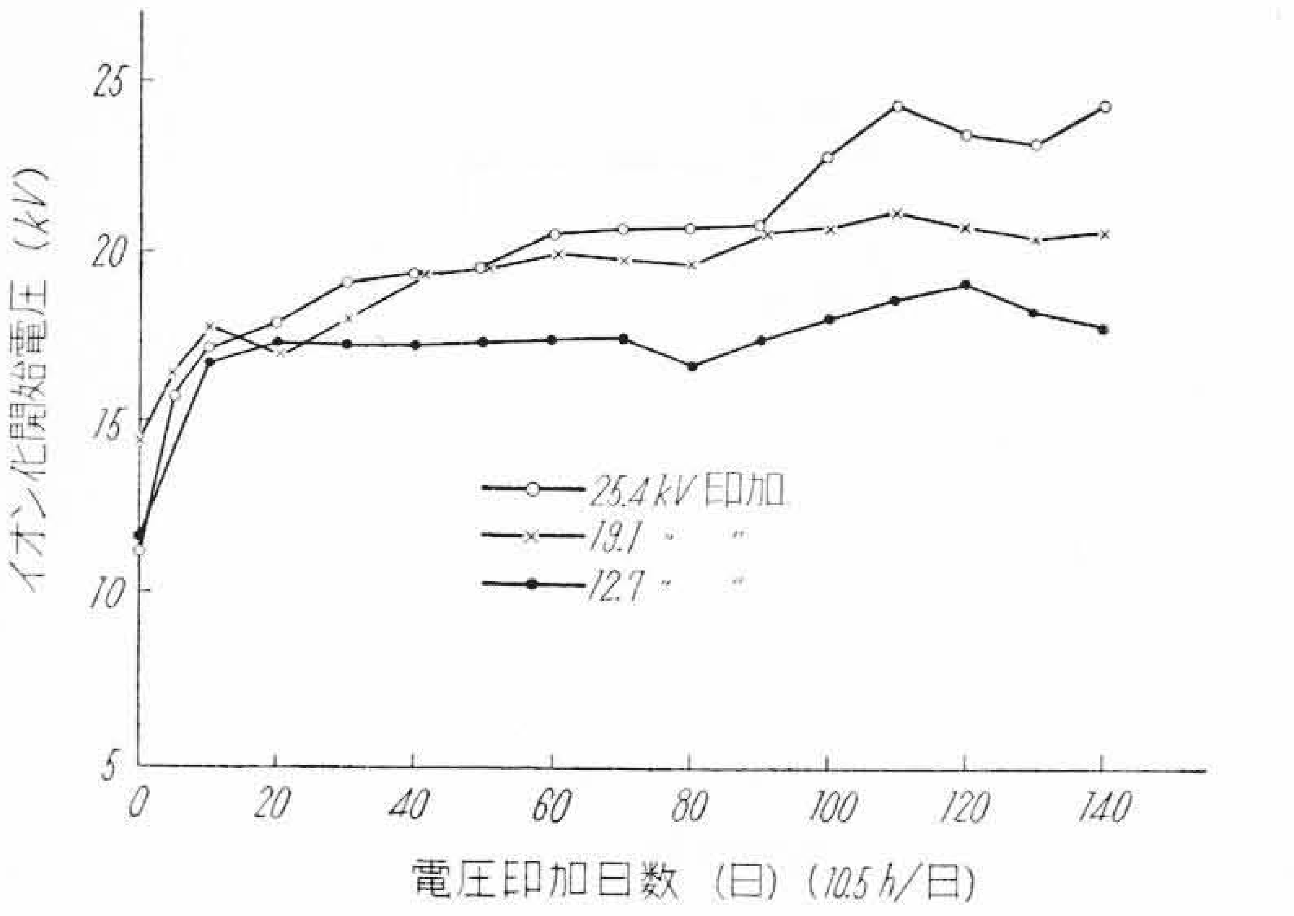
モデル実験によって得た結果を総合的に検討するために実ケーブルについて実験を行った。試料は 100 mm^2 圧縮導体の 20 kV 実験用単心低ガス圧ケーブルである。試料の有効長は 5 m で，これらを端末をも含めて水平に布設し，ケーブルヘッド内の端末補強絶縁にはハイボンテープ，ポリエステル樹脂を用い，実験中ケーブルに余分の油が流入するのを避けた。印加電圧は使用電圧の 12.7 kV とそれの 1.5 倍(19.1 kV)，2 倍(25.4 kV)の3段階の電圧について実験した。ヒートサイクルは導体に通電して行い，実験は1日に 10.5 時間ずつ行った。この場合の通電電流，導体温度は第13図に示すようである。

4.2 特性の変化

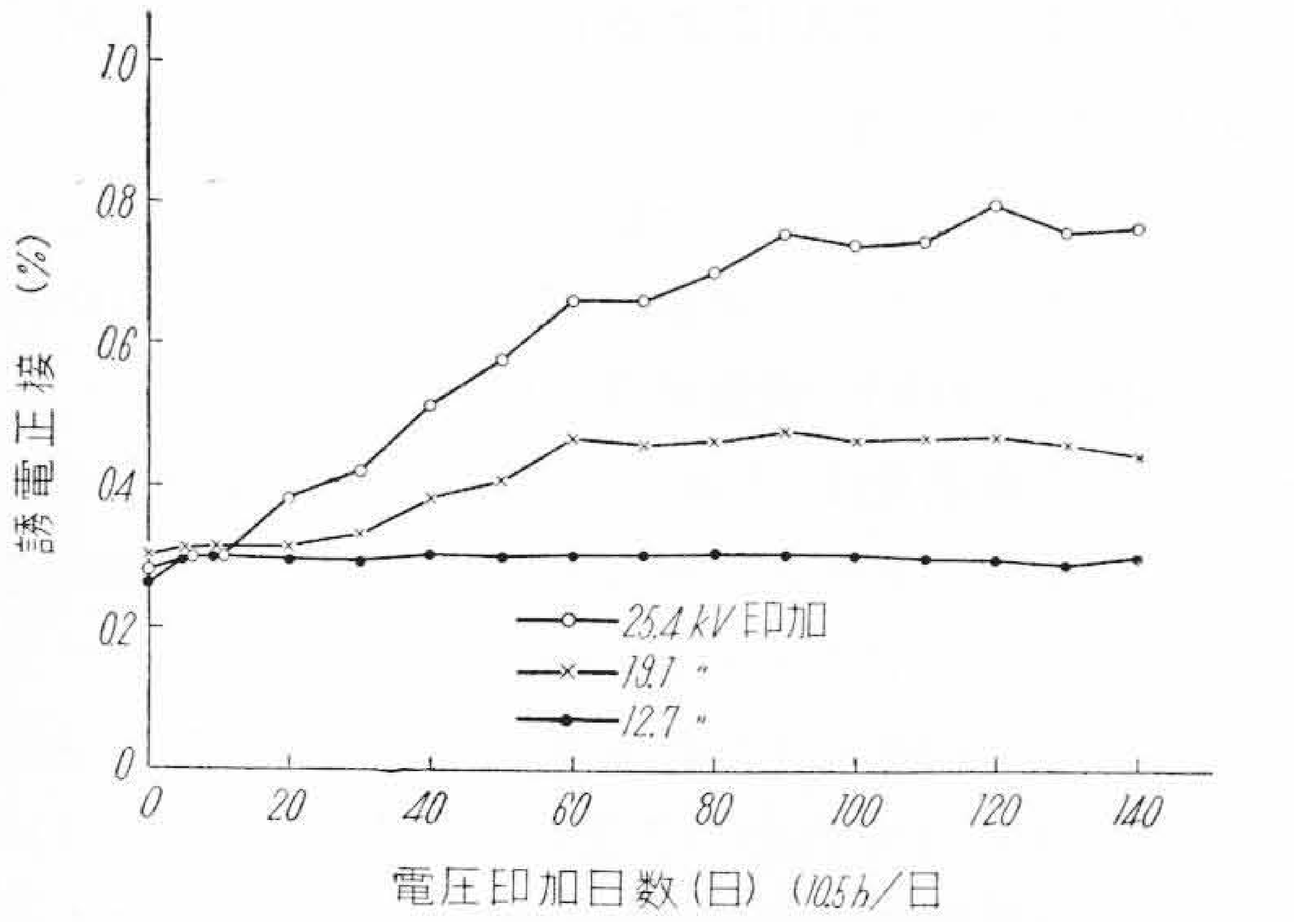
誘電正接電圧特性の変化を第14図に示した。また第15，16図には第14図より求めたイオン化開始電圧の変化と，劣化を表わすものとして低電圧部の誘電正接の値を示した。これらの特性よりボイド放電の様子を知るこ



第14図　低ガス圧ケーブルの誘電正接電圧特性の変化



第15図　自己回復作用によるケーブルのイオン化開始電圧の変化



第16図　放電劣化によるケーブルの誘電正接の変化

とができる。すなわち12.7 kV 印加の試料では，電圧印加後短時間でイオン化開始電圧が印加電圧以上になり，ボイド放電は消滅し，したがって劣化も全然起らないことが示される。19.1 kV 印加のものも，60日ごろから誘電正接は変化せずボイド放電が消滅したことがわかる。ここで**第15図**の特性からはかなり以前にイオン化開始電圧が印加電圧以上になっているはずであるが，実際にボイド放電が完全に消滅するには，この特性よりも遅れることがわかる。25.4 kV 印加の試料においても同様に劣化の進行は非常に遅くなり，遠からず安定化するものと考えられる。

以上の結果により，ケーブルのヒートサイクルはソリッドケーブルの場合のようにイオン化開始電圧の低下の原因とならず，逆に自己回復作用を助長することが考えられる。この実験は完全な水平布設であるために，上記の特性の変化はケーブル中に含まれる油量により影響されるが，同一条件で製作された予備試料についての国鉄規格の油滴下試験結果では滴下油量は少なく，十分規格に合格する値であった。また油浸率も標準の低ガス圧ケーブルとほぼ等しい値であり，このことより現在製作されるケーブルは十分満足な自己回復を示すことが判明した。

ここに**第14図**の特性で初期のイオン化開始電圧の上昇速度は，モデル実験の結果より非常に早くなっているが，これは試料ケーブルが短尺のため製造時の脱油の際に導体を流下する油が多く，絶縁の内層にボイドが存在し，同一油浸量の標準ケーブルよりも初期のイオン化開始電圧が低くなっていたものが，電圧印加後急速な油の移動によりイオン化開始電圧の急上昇が起ったためである。このことは，製造時の脱油方法などが性能に大きく影響しないことを示し，好都合な結果である。

5. 結　　言

モデルならびに実ケーブルの実験によって，低ガス圧ケーブルの自己回復作用について検討し，この作用は実用上きわめて有用な性質であることが確かめられた。これより現在の低ガス圧ケーブルは，ソリッドケーブルに比して常時ケーブルの状態を監視できる長所とともに，絶縁性能上もすぐれたケーブルであることが判明し，20～30 kV の系統に使用するケーブルとしては最適なものであると結論される。さらに最終的結論をうるためには，高低差の大きいところ，たとえば垂直布設の場合の性能について検討する必要があり，これらについては目下実験中であるため稿を改めて報告する予定である。

終りに本研究を進めるに当り，御指導御鞭撻を賜わった東北大学教授鳥山博士，日立電線株式会社電線工場関係者各位，日立製作所日立研究所所長三浦博士，副所長籔野博士，牧部長，井上主任研究員および実験に御協力下さった関係者各位に深謝申上げる。

参　考　文　献

(1)　G. B. Shanklin: Trans. A. I. E. E. 63, 549 (1944)
(2)　加子: 日立評論　別冊 21, 26 (昭 32)
(3)　加子，下山田: 日立評論　別冊 15, 32 (昭 31)
(4)　A. S. T. M. Special Technical Publication No. 198 (1957)
(5)　A. E. W. Austen, Miss W. Hackett: J. I. E. E. 91, 298 (1944)
(6)　S. Whitehead: Dieletric Breakdown of Solids (1953)