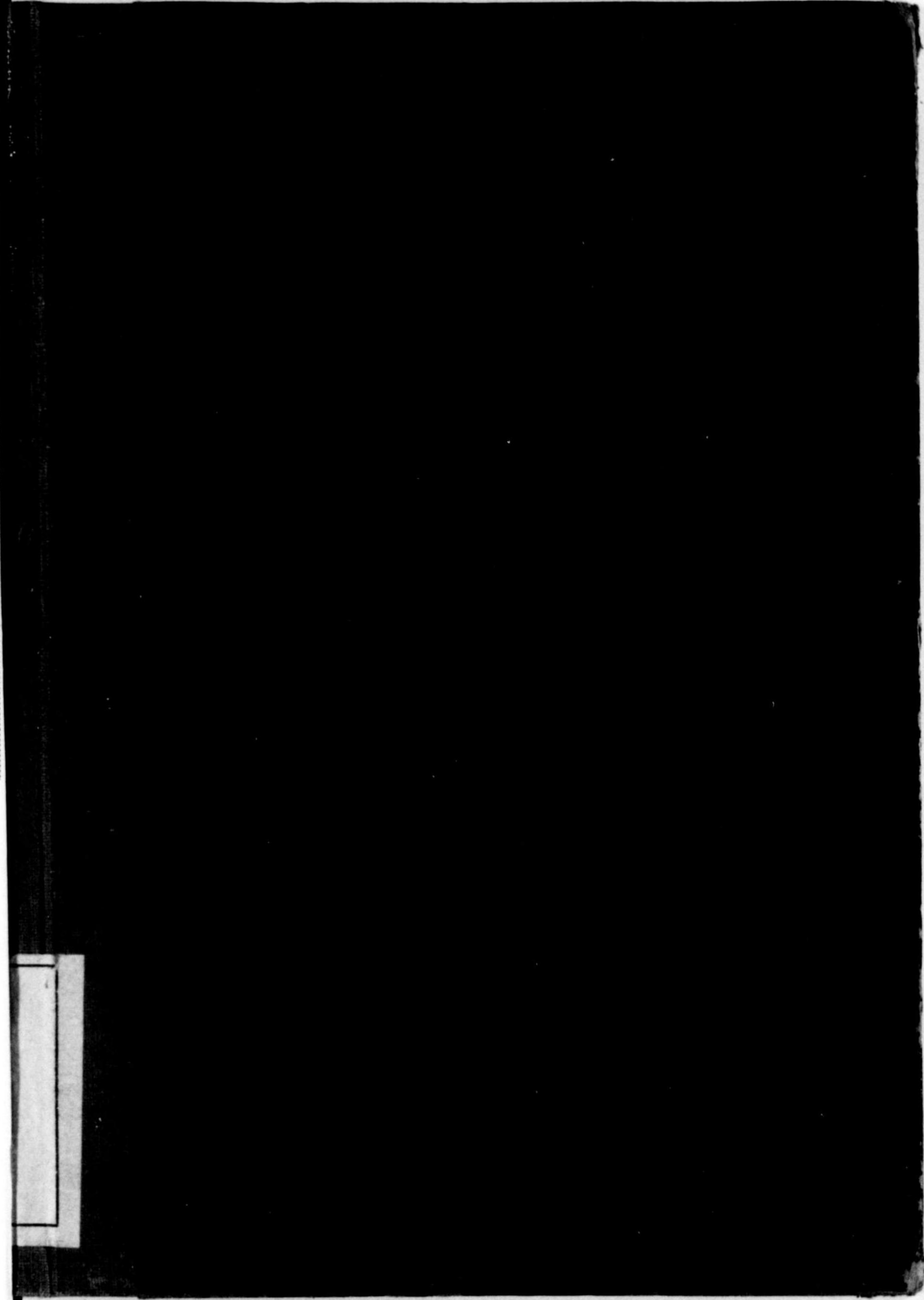




始



921

60

24. 6. 27

2/383

5

541.3
N81



高 電 壓 工 學 (前篇)

東京帝國大學教授 工學博士

西 健 著

東 京 ・ 大 阪

株 式 會 社 才 一 社



發行所寄贈本

921

60

序

明治の末期、筆者が東京帝國大學工科大学々生であつた頃は、實驗室の一隅に置かれた十五萬ボルト、(2kVA)の變壓器が唯一の高電壓實驗の裝置であつた。當時恩師故鳳秀太郎先生は、完備せる高電壓實驗室を計畫されて、その工事は明治の末年に着手されたが、當時としては思ひ切つて國産の機械を注文した爲めに製造が後れて出来上つたのが大正三年であつた。偶猪苗代水力電氣株式会社より摸擬送電線製作費の寄附があり、筆者はその設計製作を命ぜられて之もその翌年には出来上つた。然るに鳳先生は視力漸く衰へて實驗的研究は意の如くならず、實驗室の仕事は斷念するから、此の設備を以てする研究は代つて従事すべしと云ふ悲痛なる御言葉があつた。爾來幾星霜筆者は驚馬に鞭つて一向恩師の名を辱かしめざることを念じて居る。高電壓工學の講義も鳳先生の創始されたもの、筆者は大正十一年に之を繼承して今日に至つて居る。その間の高電壓工學の進歩發達は後にも述べて居るが、急激なる進歩に順應する爲には講義の内容は毎年必ず多少の改廢を續けて來て居る。従つて講述する所を上梓せよとの勸誘は幾度か受けて居るに拘らず改訂の頻繁なるべきを慮つてその儘今日に至つた實情であつた、偶或工場の従業員諸氏に對し所謂成人教育の一部として高電壓工學の講義を爲すことを依頼せられ、専門學校程度の夜學校を修業した人々を目標とする位で一ヶ年續けて來たのであつた。大學の學生と異り筆記に不慣れの爲めに豫稿を作ることをも依頼されたので、それを集めて一部を省略し、又多少の加筆をなし取敢へず、出版することとした。之を譬ふれば大豆から豆腐を作る如く、消化し易き又

吸収し易きを、目標にしたに拘らず、筆者の秃筆は屢滯して意の如くならず、その目的とする所に及ばざること遠きを憾みとする。

尙書中採録した資料は放電現象に関しては本多侃士、石黒美種、兩氏の業績から採り入れたものが多く、又誘電體損に関しては岡崎三郎氏の實測値から採つて居る。その他諸家の著書、論文、等から摘録した分も數多く、これ等の原著者に對し、茲に深厚の敬意と謝意とを表する次第である。


昭和十六年七月

著 者 識

目 次

1.0	電氣應用の發展と高電壓工學	1
1.1	高電壓工學と基礎知識	2
1.2	電界に於ける物質の性能とその變化	2
1.3	物質の電氣的構成	3
1.4	荷電の現象	4
1.5	電離と勵發	5
1.6	移動能度	9
1.7	再結合作用及擴散現象	10
1.8	焰の實驗、空間電荷効果	10
2.0	空氣中の放電現象	11
2.1	空氣の組成	11
2.2	大氣の電離狀態	12
2.3	エックス線にて電離された場合の導電及破壊現象	12
2.4	全破壊と部分破壊	16
2.5	平等電界又は之に近き場合の電氣的破壊現象	18
2.5.1	平面電極(平行板電極)	18
2.5.2	球間隙	20
2.6	不平等電界に於ける電氣的破壊現象	22
2.6.1	圓筒電極	22
	(イ) 同心圓筒	22
	(ロ) 並行圓筒	24
2.6.2	球間隙(間隙の大なる場合)	27
2.6.3	針端間隙	28
2.6.4	双形電極	36

2.7	火花電壓に對する周波數の影響	39
2.8	空氣以外の氣體に於ける放電	41
3.0	液體誘電體	42
3.1	液體誘電體の種類	42
3.1.1	絶縁油中に於ける放電現象	42
3.2	誘電率と誘電體損失	45
4.0	固體誘電體	46
4.1	固體誘電體の種類	46
4.2	誘電率	47
4.2.1	固體誘電體に於ける導電現象	48
4.2.2	表面漏洩電流と表面固有抵抗	53
4.3	交番電界に於ける誘電體損失	55
4.4	導體及誘電體損失に關する學說	59
4.5	固體誘電體の絶縁耐力	63
4.5.1	絶縁耐力の測定	64
4.5.2	熱破壊説と電氣破壊説	66
4.6	水分の影響	73
5.0	複合誘電體	77
5.1	氣體及固體誘電體の組合せ	78
5.2	液體及固體誘電體の組合せ	84
5.3	異なる固體誘電體の組合せ	87
5.4	金屬導體と誘電體と接觸する界面に於ける現象	88
5.5	絶縁された金屬導體に蓄積する電荷	89



高電壓工學(前篇)

1.0 電氣應用の發展と高電壓工學

電氣の應用も今から六七十年前は僅かに電信だけであつた。今日の東京帝國大學の電氣工學科の前身は明治の初年工學寮に設けられた電信學科であつた。その後工學寮は工部大學校となり、更に帝國大學に合併された。然し電信學科の教官諸氏も電燈、電力の方面に熱心に研究を續けて居られ、明治二十年には東京電燈會社が日本橋で營業を開始し、間もなく京都市では疏水の水力電氣を利用し電力の應用が次第に開けて來た。高電壓送電の初めて實施されたのが明治三十二年、福島縣郡山と廣島縣と殆ど同時に一萬一千ボルトの送電が開始され、これが本邦に於ける最初の高電壓送電線であつた。その後電壓は 55 kV となり、77 kV となり、更に 110 kV から 154 kV となつた。内地は公稱電壓 140 kV が最高であるが朝鮮及滿洲では最高電壓 230 kV の送電が開始された。従つて此の如き高電壓回路に使用する電氣機器の設計製作に基礎となるべき知識が必要となるのは云ふまでもない。又電力の方面許りでなく、物理學の研究にも近頃は非常に高い電壓、即ち數百萬ボルトに及ぶものを必要とする様になり、又醫師の使ふエックス線裝置でも外國では百萬ボルト以上の電源電壓のものが診療に利用せられる様になり、之等の裝置は何れも電氣技術者の手に依つて作り出さなければならぬのである。

電圧が高くなると、電圧の低い場合に問題にならなかつた事柄を研究して、それを解決する必要が生じたり、又豫想しなかつた現象が現はれて、それを解決しなければ先に進めない様なことに出會したりする。依つて電圧の高い電氣現象を有効に且安全に利用する爲めに、種々の新しい知識を要し、又その困難を克服するには優秀なる技術を要するわけである。此の方面の事項を取扱ふのが高電圧工学である。

1.1 高電圧工学と基礎知識

高電圧工学で取扱ふ問題、研究すべき問題は相當廣い範圍に亘るのであるから、此の方面の技術を發展させ、研究を進めて行くに必要である基礎となるべき知識は、當然物理學及化學の範圍内であるが、何分電氣の應用が急速の進歩を遂げた爲めに、物理學者、化學者の研究して居ることが必しも吾々に必要な事項まで及んで居ないので、當面の問題を解決するには電氣工学方面の人が直接研究に従事する場合も多い。以下述べようとするのは是等の物理學者、化學者又は電氣技術研究者の研究の成果から、直接高電圧工学と關係のあるものを拾ひ上げ、それ等の基礎知識と實際問題と如何に關聯して居るかを説明して行きたいと思ふ。

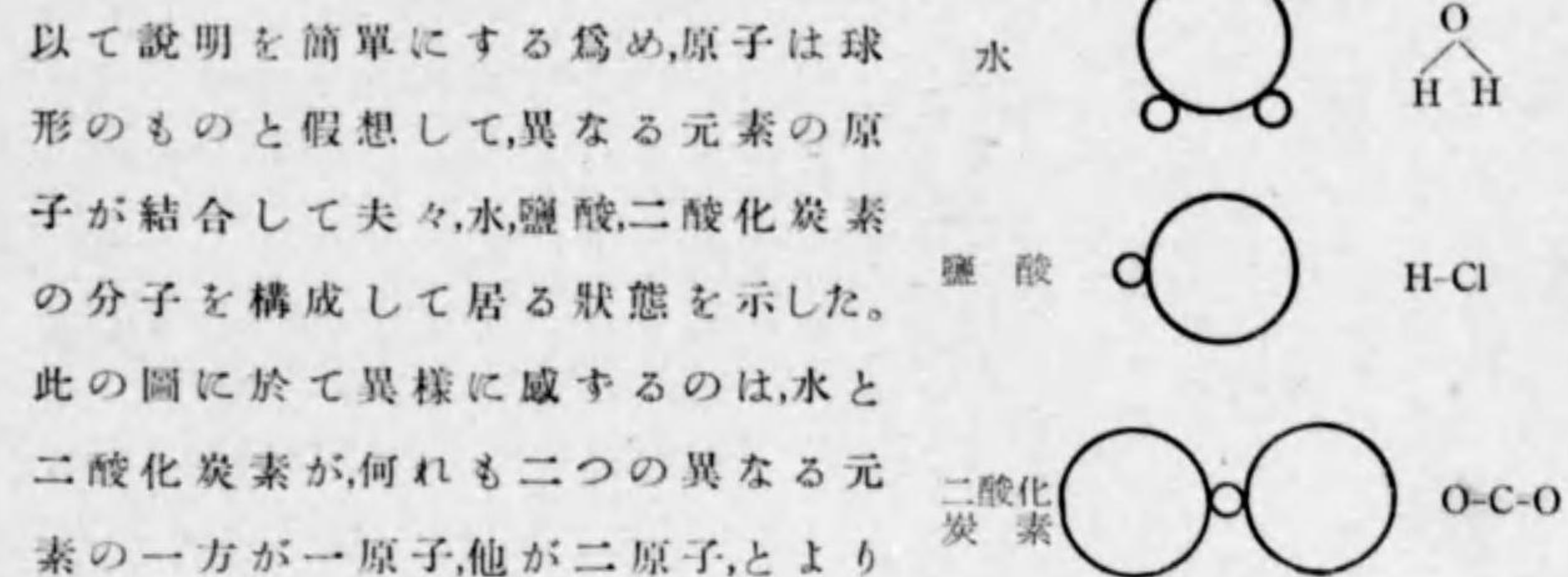
1.2 電界に於ける物質の性能とその變化

高電圧工学で取扱ふ種々の問題の中で、根本的の問題としては、電界に於て物質が如何なる性能を現はすか、特に電界が強くなると、物質の性能が如何に變化して行くか、又は物質そのものが如何に變化するか、等を研究してその真相を明にする必要がある。依つて第一に基礎知識として重要なのは、物質と電氣との關係を明にすること

で、それには次に述べる物質の電氣的構成を一通り知る必要がある。

1.3 物質の電氣的構成

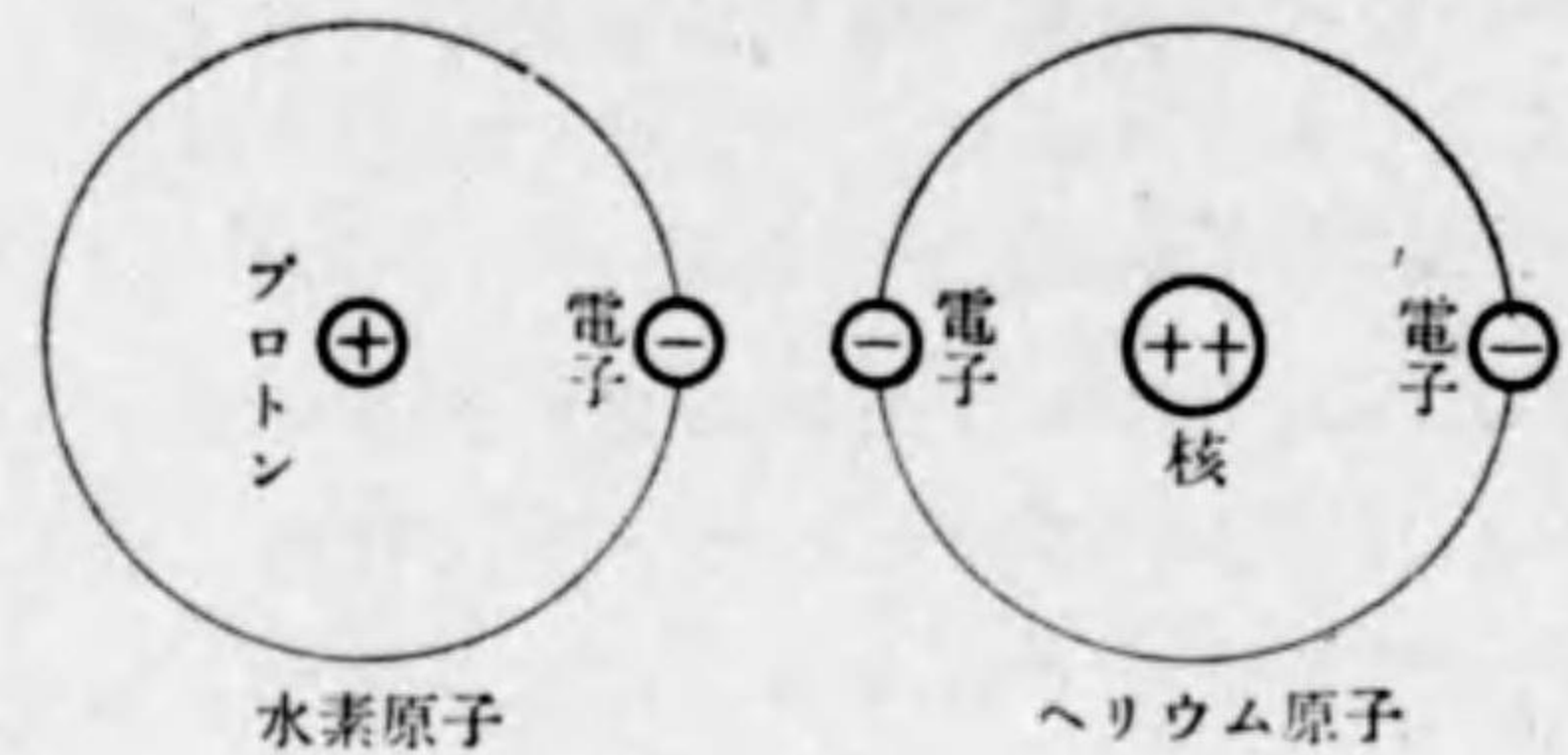
總ての物質は約九十種類の元素の何れかより成り、それが組合せによつて種々なる物質が出来て居ることは化學の教へる所である。これ等の物質が電界に於て如何なる性能を現はし、如何なる變化をするかを攻究するには、分子又は分子を組成する原子の問題にまで入る必要がある。第1圖に模型圖を



第1圖

成るに拘はらず、水に於ては、二つの水素原子が酸素原子に對して非對稱に結合し、二酸化炭素では二つの酸素原子が炭素原子に對稱的に結合して居ることである。兎に角、水は風變りな分子構造を有し、電氣的性質に於ても誘電率が80で他の物質と桁外れな値を有し、その他に於ても著しい特異性が認められる。第1圖に示したのは極めて簡單なもの許りであるが、更に複雑な化合物も同じ様に構造を模型で表はし得るのである。

次は原子の構造に入つて電氣と物質との關係が一層明かになる。第2圖は最簡單な水素原子と水素の次に簡單なヘリウム原子の構造を模型で示したもので、水素に於ては中央に(+)の電荷を有する原子核が在つてその廻りに(-)の電荷を有する電子が運動して居る。



第 2 圖

水素原子核にはプロトン(陽子)と云ふ名がついて居る。ヘリウムに於ては電子が二つあつて、従つて原子核の(+)の電荷も水素の二倍となり、核の構造も稍複雑となる。その他の元素も(+)の電荷を有する核と、その周囲に幾つかの電子とより構成される點では、全く水素、ヘリウムと同様であつて、唯電子の数が異り、従つて原子核の電荷が異なるのである。電子の有する電荷は、

$$e = 4.804 \times 10^{-10} \text{ 静電單位}$$

$$= 1.602 \times 10^{-20} \text{ 電磁單位}$$

で、原子核は、電子の数を N とすれば Ne だけの(+)の電荷を有し、原子としては之に電子の(-)電荷を加へた電荷となるが、(+)と(-)とで打消して結局荷電されて居ない。即ち電氣的に中性である。元素の表には、原子番數と稱する整數が記入してあるが、上記 N は即ち此の原子番數を示す數である。かくの如く總ての物質を組成する各元素は電氣的構成のもので、その構成の如何により、各種の物理的又は化學的性質が各特有のものとなつて現はれるのであるが、それ等の詳細なる記述は専門の書籍に譲り茲では省略する。

1.4 荷電の現象

原子に於て原子核を中心としてその周囲に運動して居る電子の

内一番外側にある電子(水素の場合は一箇だけしかないから、此の一箇の電子をさす)は比較的離れ易い状態にあるので、外からの影響で原子から離れることがある。前に述べた如く、原子内の(+)の電荷と(-)の電荷が相等しいのであるから、一つの電子が離れる時は残りは(+)の e だけの電荷で荷電される。即ち之が荷電の現象で、此の(+)に荷電された原子が單獨にあつても又は他の原子と結合して分子を形成して居る場合でも、かくして出來た帶電粒子は、陽イオンと云つて居る。又原子から離れた電子は普通空氣中であれば、他の中性分子に附着する場合が多い。かくして又(-)に荷電された帶電粒子が出來る、之を陰イオンと云ふ。時によると、電子が二つ分離することがあるが、その場合には(+)の $2e$ だけの電荷を有する陽イオンが出來る。之を要するに物質が荷電されることは、その物質を形成する分子又は原子の中の或ものが、電子が不足となつたり、或は餘分に添加される現象を云ふのである。

1.5 電離と勵發

次に如何なる場合に電子はその母體である原子又は分子から離れて行くか述べよう。(+)の電荷を持つて居る電子が出て行き(+)の電荷を持つた陽イオンが出來る現象を電離と云ふのであるが、電離の行はれる爲めには、或一定量以上のエネルギーを原子又は分子に與へなければならぬ。此の一定量のエネルギーの値即ち臨界値は物質に依つて夫々異なるので、普通電離電壓と云ふ名で數値が示されて居る。若し與へられたエネルギーの量が此の臨界値に達しなければ原子又は分子に變化が起らないかと云へば、必しもさうでなく、別の一定量のエネルギーの値を超過する場合には、原子又は分子は常規の状態から變化して勵發状態となる。此の第二の一定量のエネルギー

の数値も物質特有のもので之を勵發電壓の名で示されて居る。而して陽イオンに電子が再結合して中性分子となる事即ち電離状態から常規の状態に歸る場合、及勵發状態から常規の状態に歸る場合には、先に與へられただけのエネルギーを放出する必要がある。此の放出されるエネルギーは光となつて吾々の眼に感ずる、勿論莖外線の様に眼に見えない部分も含んで居る。ネオンサインとか水銀整流器等、電離及勵發の盛んに行はれて居る所に發光作用が現はれるのはこれが爲めである。

中性分子にエネルギーを與へ、之を電離、又は勵發する道は幾通りかある中で、最も普通に起るのは、電子が電界によつて加速されて運動エネルギーを得、之が中性分子に衝突した場合に、その運動エネルギーの量が前記電離電壓に相當した値以上であれば、その保有エネルギーを中性分子に與へて、電離作用が現はれ、若し電離電壓には不足であるが勵發電壓に相當する値以上であれば勵發現象が現はれるのである。電界に於てA點からB點まで $-e$ の電荷を有する電子が電界の作用で動いた時、電界から得る電子の運動エネルギー量はAの電位を V_A 、Bの電位を V_B とすれば、 $e(V_B - V_A)$ であるから、B點で中性分子と衝突すれば、その際電子の有する運動エネルギーの量はAとBとの電位差に e を乗じたものである。此の如く電子の衝突によつて電離又は勵發の起る場合のエネルギーは電位差に比例して居るので、電離及勵發に必要なエネルギーの量を電壓と同様にボルトで表はし、その名稱も便宜上、電離電壓、勵發電壓と唱へて居るのである。但しエネルギー量を示す數値であるから、その單位は電壓數値を示すボルトと區別して、電子ボルトと云ふ。此の如く電界からエネルギーを得た電子が更に之を中性分子に附與して、電離又は勵發現象の起るのは、電界の強い場合に起り易いのは當然である。1.3に於て物質が

強い電界の中で變化が起ると述べたのは是等の現象及び之に附隨して起る現象を指すのである。

今常温常壓の空氣中に於て電離又は勵發現象を観察しようとするれば數萬ボルト位の相當高い電壓を以て、強い電界を作らないと現象は起らない、之に反し、ガラス管中に氣體を封入し、その氣壓を下げて行くと比較的低い電壓を以て、容易に電離及勵發現象に伴ふ發光作用を観察出来る。此の如き差の生ずる主因は、氣體の密度の差から來るのである。氣體の密度は結局單位體積中の分子の數で定まるもので、氣壓に比例し、絶對温度に反比例するものである。即ち密度の高い氣體中では電子は頻りに中性分子に衝突する爲め、一つの衝突から次の衝突に至るまでの行程が短い結果、電界が十分に強くないと必要なエネルギー量を獲得出来ない。然るに密度が低くなり單位體積中の分子の數が少いならば、衝突から衝突までの行程が長くなり、比較的弱い電界でも必要なエネルギー量が得られるのである。此の如く衝突から衝突までの行程の長さは電離現象には關係の深い量であるから之に電子の自由行程と云ふ名を付けてある。然し實際は自由行程の長さは、衝突の度毎に多少異なるわけであるから吾々はその平均値を以て表はすこととし、之を平均自由行程と名付ける。その値は氣體の種類によつても異り、又同じ氣體では密度によつて異なる。

常規状態から電離、又は勵發状態となつた分子からエネルギーを放出する時發光作用が起るのはエネルギーが電磁波の形で放出されることであるが、時に之と逆の作用も起り得る譯である。即ち外から來た電磁波のエネルギーを吸収して中性分子が電離され、或は勵發されることが起る。此の現象も氣體中の放電現象等に於ては重要なものの一である。

電子が電界により加速されて運動エネルギーを得ると同様に、(+)に荷電された陽イオンも亦電界によつて加速されて運動エネルギーを得るわけで、それが中性分子に衝突すれば、エネルギー量の如何により、之を電離又は勵發するのは當然である。但し陽イオンは電子に較べて、質量も大きく、最小の陽イオンである水素の核でも電子の約1800倍の質量であり、その他の陽イオンは更に大きいので、その平均自由行程も短かく（理論上電子に比し $\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{5.66}$ ）常温、常気壓の空氣中の放電現象等では陽イオンによる電離又は勵發作用は餘り重要でない。但し放射能物質、例へばラヂウムから出る放射線は α 、 β 、 γ の三種あるが、その中の α 線は、ヘリウムの核の(+)に荷電されたものが、相當の速度で飛び出すものであり、之は常温、常気壓の空氣を電離し得るエネルギーを有して居る。エックス線は波長の極めて短い電磁波であるが、これも常温、常気壓の空氣を電離し得るので屢その電離作用を利用することがある。

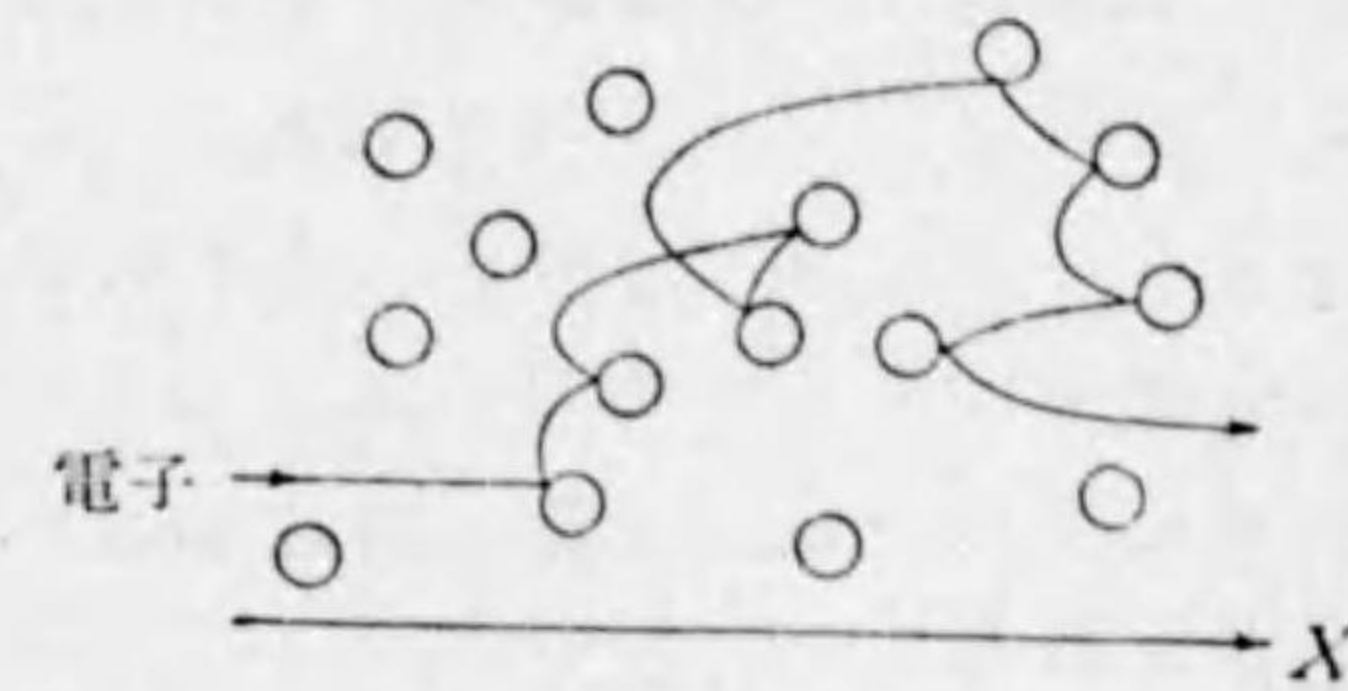
總て氣體は高温度にすれば電離状態となるもので、例へば電弧放電の様に數千度の温度になる時は電離作用が盛に行はれて居る。之は熱電離と名付けられてゐる。

金屬又はその化合物を高温度に熱すると電子を放出する現象がある、之を熱イオン作用と云つて真空管の織條に利用して居るのは人のよく知つて居ることである。又金屬の表面を光線特に紫外線で照射すると電子が放出される現象も類似のものでその電子を光電子と云ひ、光電子管は之を利用したものである。

以上極めて簡単に電離及勵發の現象等を記述したがこれだけでは不十分と思はれるので詳細は専門の書籍、例へば新興基礎電氣工學講座第二卷氣體中の放電、星合正治、本多侃士、共著等を参照されたい。

1.6 移動能度

氣體中に出來た電子、陽イオン、及陰イオン等は電界を加へると電界の方向に詳しく云へば陽イオンは電界の方向、電子と陰イオンはその正反對の方向に運動する事は當然であるが、前にも述べた如く、多數の氣體分子が存在する空間であるから中々真直に進めないで幾度か他の分子に衝突し、衝突の度毎にその方向が變るわけである。然し電界の存する限り、その方向に次第に運ばれることは第3圖に示した如くであらう。此の圖は甚だ亂暴な假定を以て分子は球形に表はしてあり、且電子の運動中に氣體分子は靜止して居るかの様に表はしてあるが、大體の概念は掴み得ると思ふ。同様に陽



第 3 圖

イオン又は陰イオンも電界の在る間は自ら電界の作用で移動が起るわけであるが、何分電子に較べて、質量も直徑も大であるから、その移動の程度には大なる差があるわけである。此の如く是等の帶電粒子が電界中を移動する程度を數量的に表はす爲めに移動能度と云ふ量を考へる。その定義は電界 \mathcal{E} なる時に帶電粒子の平均速度を v とすれば、 $v = u\mathcal{E}$ となる如き u を以て移動能度とするのである。 u は帶電粒子の質量に反比例し、又平均自由行程に比例する量である。

先に述べた如く同じく帶電粒子であつても電子は陽又は陰イオンに比し質量小なることと、平均自由行程大なる爲めに移動能度に於て著しく他に比して大きく、従つて極めて短時間に行はれる現象

に於ては近似的に電子のみ運動し陽イオン等は静止して居ると考へて差支ない。

1.7 再結合作用及擴散現象

氣體中に存在する電子と陽イオンと運動中相會し、再び中性の原子又は分子に復歸することがある。又陽イオンと陰イオンと相會し相中和して二つの中性分子になることもある。是等を再結合作用と云ふ。

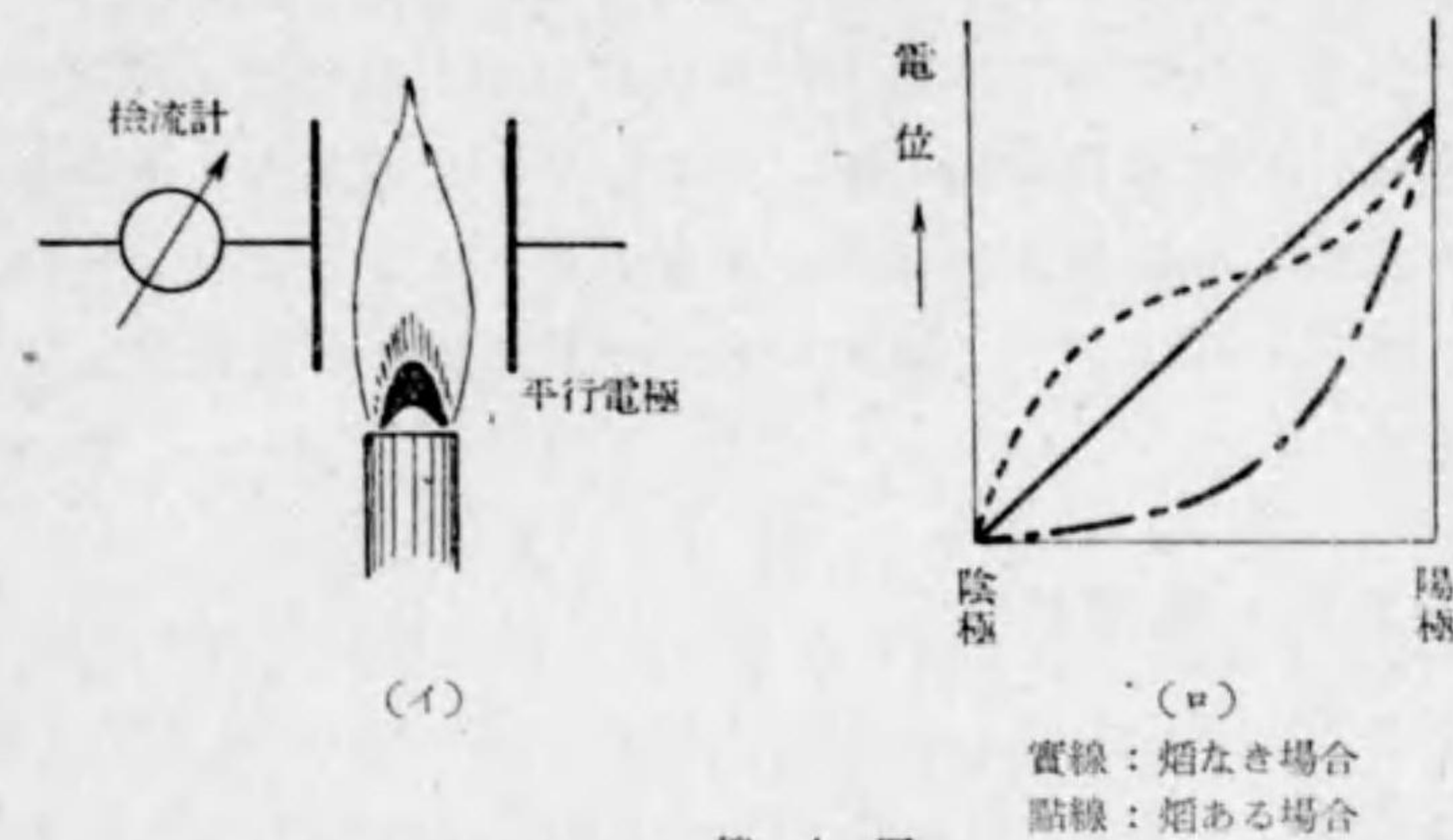
氣體中に電子、又はイオンが多數存在し、その密度が一様でない時には密度の大きい所から小さい所に向つて移動し、密度の差を少くしようとする傾向がある。之が擴散現象である。

氣體中に存在する電子又はイオンは、電離により新に補給しない限り次第に數を減じ終に消滅するのは主として再結合作用と擴散現象との結果である。

1.8 焰の實驗,空間電荷效果

中性原子又は分子から電子が放出される電離現象の起る場合は1.6に於て一通り述べたが、尙一般に化學反應の起る場合に於ては電離現象を伴ふのである。勿論化學反應も一種の電氣現象と考へて差支ないので當然の事とも云へる。簡単な實驗としては焰を用ふるのが便利で、例へば石炭ガスを燃焼させて焰を作る。物が燃焼するのは普通酸化作用で、焰の中はイオンが出来て居る。之を證明するには豫め二つの電極を用意して之に電位差を加へて電流を測定すると殆ど電流は通らないが、第4圖の如く電極の下から焰を作り、電極間は焰で充たす様にするると電流の通るのが檢知される。而して電流の通るのは焰の中に帶電粒子が出来て、是により導電の行は

れて居る證據であつて、更に帶電粒子は(+)も(-)も存在して居ることは電極間の電位を測れば證明出来る。即ち最初焰の無い状態で電



第 4 圖

位の分布を測れば第4圖(b)の実線に示した様に直線を以て表はした如くなり、焰の在る状態で測れば同圖の点線で示した曲線の如き分布を示すであらう。若し電極間の帶電粒子が全部(+)であるか、或は全部(-)であれば此の曲線とは形を異にし、例へば全部(-)であれば鎖線で示した様な分布となる。真空管に於ては帶電粒子が全部電子である故その電位分布は之に相當する様な傾向を示す。此の如く電極間の空間に帶電粒子が存在する爲めに、電位分布が變る現象を空間電荷效果と謂ひ、之に關する知識は高電壓現象の研究に於て重要なものである。

2.0 空氣中の放電現象

2.1 空氣の組成

吾々が高電壓工學に於て普通取扱ふのは主として空氣中の放電

現象であつて、又常温、常壓の範圍に在る場合が多いから、先づ常温、常壓の空氣中の放電現象のみを考へることとする。空氣組成は窒素が約五分の四、酸素が約五分の一、その他極く微量であるが、アルゴン、ネオン、ヘリウム等の不活潑氣體が含まれ、又二酸化炭素や水蒸氣が存在する。殊に我國の様に湿度の高い所では空氣中の水蒸氣が高電壓現象特に放電現象に相當の影響を與へることは後に説明する。

その他次の2.2に述べる様に極めて少數の陽イオン及陰イオンが存在する。

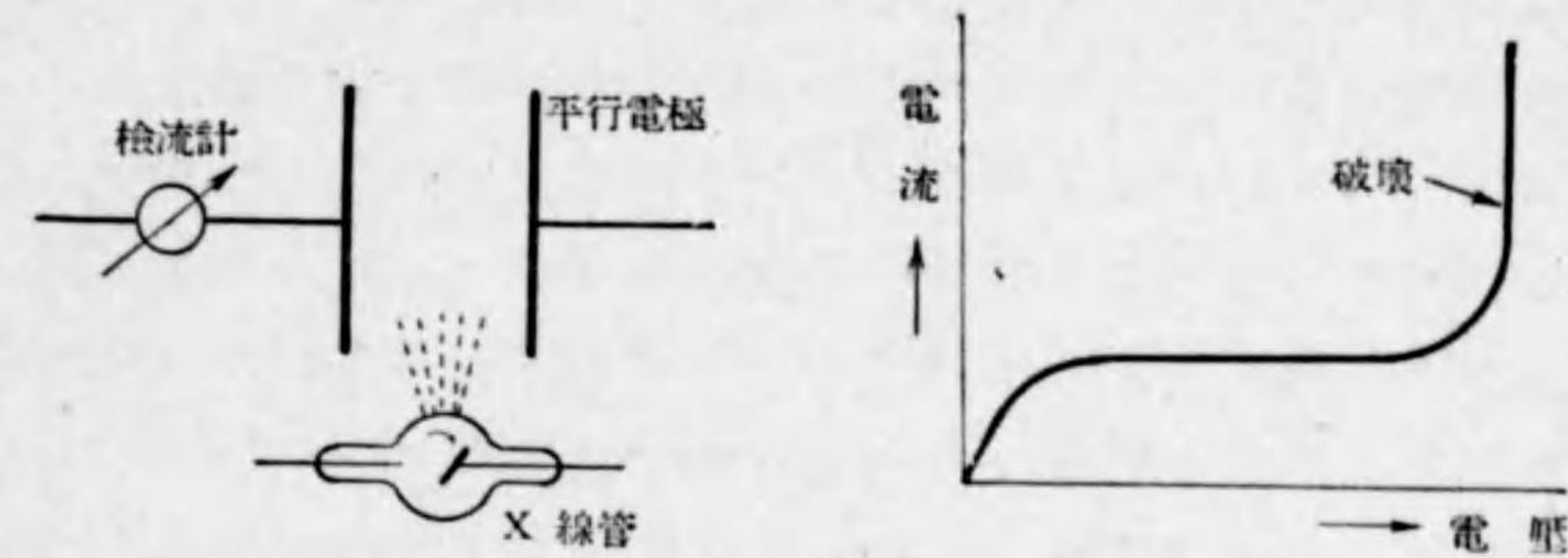
2.2 大氣の電離状態

空氣は完全に近い絶縁物と考へられて居るが、之は實用上かく考へても差支ないだけで實際は極めて僅かであるが導電性がある。これは空氣が常に極めて少し許り電離して、帶電粒子、即ち陽イオン及陰イオンが微量ながら含まれて居る證據である。その電離の原因は、微量ながら地殻に廣く分布されて含まれる放射能物質から出て居る放射線に因るものや、近年問題となつた宇宙線に因るものと説明されて居る。要するに吾々の取扱ふ空氣は極僅かに電離して居ることは承知して置かなければならぬ。然しその導電性は非常に感度の高い計器によつて辛うじて檢知出来る程度である。

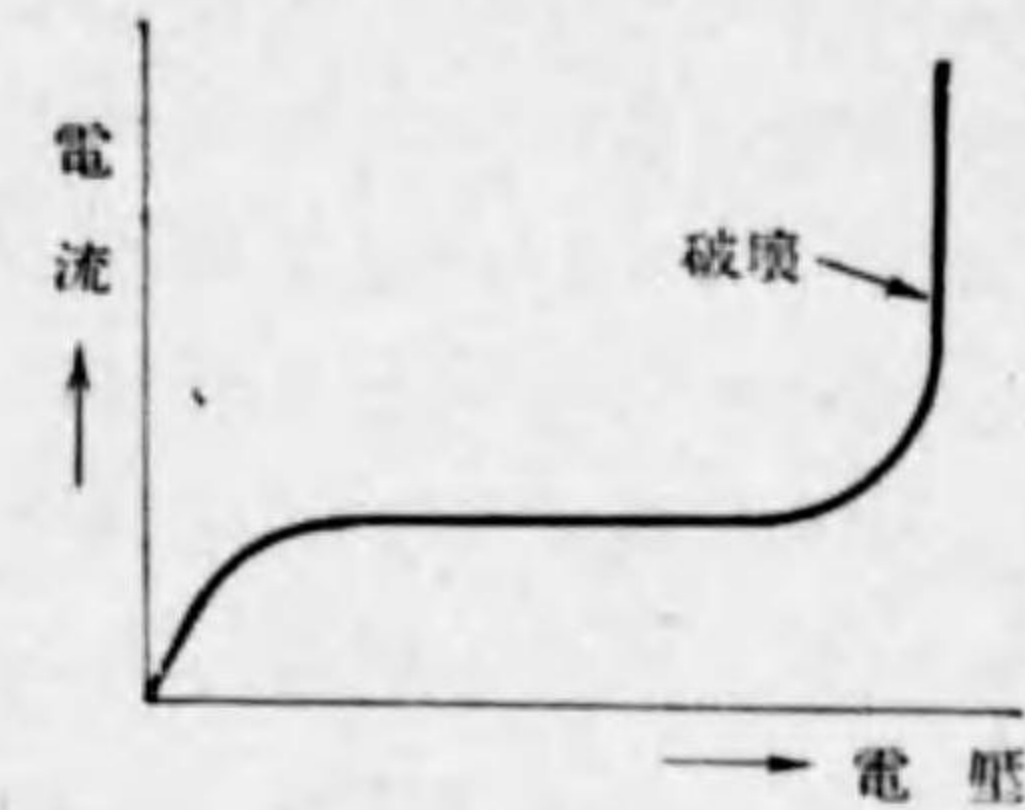
2.3 エックス線にて電離された場合の導電及破壊現象

空氣の導電状態を調べるには、人工的に電離の程度を増加させて通常の計器で容易に測定出来る程度にするのが便宜上必要である。第5圖に示したのはその一例でエックス線を利用し、電極としては平板を二枚平行に置き、その間にある空氣を電離させて居るので

ある。電極間には然るべき電源から電位差を加へ、僅かに通る電流



第 5 圖



第 6 圖

を檢流計で測定する。但し電離は人工的に促進させてあると云ふものゝ電流としては極めて僅かで感度の高い檢流計を必要とするのである。今電極間の電位差、即ち電壓を次第に増してそれに伴ふ電流の値を讀んで行つたとすると第6圖に示す様な變化を爲すのである。そこで電流の變化を初めから辿つて行くと最初は電壓の増加に伴ひ殆ど比例して殖えて行くが、次第に殖え方が減じて終には電壓を増しても電流は一向殖えない、即ち一種の飽和状態に達することが示されて居る。飽和状態として電流は電壓を上げてても變りなく曲線は横軸に平行の直線状態で暫く續いて居るが、電壓の或る値から急に電流が激増する。その際檢流計には何か保護装置を施して居なければ壊れる程度の急激な増加であつて、同時に電極間には火花を發生し、所謂火花放電の現象を見るのである。之をまた空氣が電氣的に破壊したとも謂ふ。

金屬導體に於ては電壓と電流との關係はオーム法則が適用出來て、電流は電壓に比例するのであるが、エックス線等の作用で電離されて導電状態となつた空氣では電壓と電流との關係は第6圖に示す様にオーム法則は適用出來ない。此の曲線が何故に此の如き形

を採るかを説明すれば下の如くである。先づエックス線は一定の強さで電極間の空気を照射して居るものと假定する。即ちその結果単位時間に発生するイオンの数は一定であると見て差支ない。電圧を加へなければ、発生するイオンは再結合と擴散との爲めに消失する故、電極に挟まれた空間の単位體積中のイオンの數、即ちイオンの密度は無限に増大しない、然もイオン密度の増大に伴ひ再結合及擴散作用も増進する爲め或一定の値までで止まつて居る。そこで低い電圧を加へれば、陽イオンは陰極に、陰イオンは陽極に向つて運動し、茲に電流を生ずる、電流の大きさは単位時間に電極に到達するイオンの數に比例するのであるが電圧の低い間、即ち電界の弱い間は電流は大體電圧に比例して増すこと第6圖に示す通りである。然るに電圧を上げて行けば電極に到達するイオンの數は増すことは増すが、何分イオンを製造する電離作用の強さが一定であるから、イオンの補給は限りがある。依つて電流の増加率は電圧の上昇率に及ばない。かくして終に単位時間に発生したイオンが全部電極に運ばれる状態になれば電圧を上げてても電流は少しも増加しない、所謂飽和状態に達して第6圖の如く電流の大きさを示す曲線は水平になつて居る。飽和に達しない前ではエックス線に因り発生したイオンの一部が電極に運ばれ残りが再結合及擴散作用で失はれて居たのが、飽和状態では殆ど全部が電極に運ばれて居ることを示して居る。

然るに更に電圧を上げて行くと新しい現象が始まる。電界が強くなれば他の力を借りずに電界自らが電離を起し得る能力が出來て來る。即ち1.6に述べた様に電界によつて加速された電子が中性分子に衝突して、これを電離する様になる。電界の弱い時はエックス線等により電離されて中性分子から電子が出て残りが陽イオン

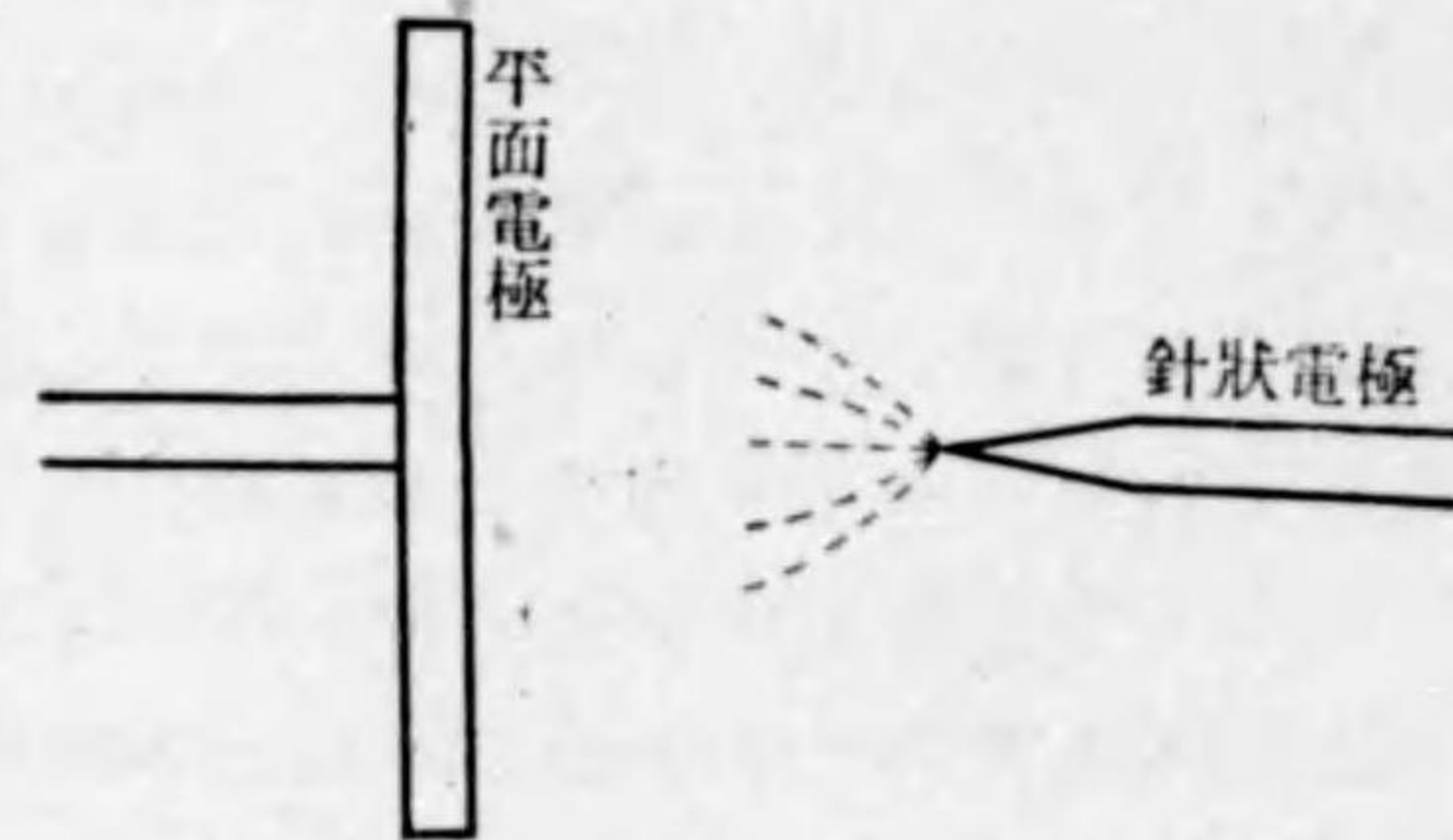
となるのであるが、放出された電子は直に他の中性分子に附着して陰イオンとなつて居る。所が電界が強くなつて來ると電子が中性分子に附着して陰イオンを作る傾向が少くなり、電子は單獨に運動して居る様になる。従つて電子が電界により加速されてエネルギーを得易くなり、そのエネルギー量が中性分子に衝突して電離を起し得る程度となれば電極間に於て発生するイオンの數は急激に増加するに至る。その譯は最初在つた電子が中性分子に衝突して新しく電子が放出されると、新しく出來た電子が他の中性分子を電離し、そこで新しく出て來た電子も亦他の中性分子を電離して、帶電粒子の數は累積的に増加するからである。これを雪崩に譬ふれば、峰に在つた僅かの雪の塊が轉落するとその通り路にある他の雪を轉落させ次第に大きくなつて物凄い大雪崩を生ずるのと同じ様にエックス線によつて発生した帶電粒子の數は僅かでも、電界自身で電離を起し得るに至れば急激に帶電粒子の數は増して第6圖に示す様に電流は急速に増加するのである。此の場合の電流の増加は極めて大で、火花放電となつて現はれる電流の値は飽和状態の電流に比し數十萬或は數百萬倍にも及ぶのである。此の如く一度電界自身が電離を起す程度になれば最初に存在する、即ち種となる電子の數は極めて僅かでも宜しいので茲では實驗の便宜上エックス線を以て電離して居る場合を示したのであるが、2.2に述べた様に空気は普通微弱ながら電離して居るのであるから、エックス線の照射が無くとも電圧を上げて電界の強さが電離を起し得る程度に至れば極めて微量に存在して居る電子が種となり忽ちにして多量のイオンを発生させるので、第6圖に示した實驗でもエックス線の照射を中止して電圧を加へ之を徐々に上げて行くと、大體エックス線の照射ある場合と同じ位の電圧の値で火花放電が見られる。

エックス線の照射で電離を起す場合は電離に必要なエネルギーはエックス線管から出て来るのであるが、電界自ら電離を起す場合にその必要なエネルギーは電源から供給されることは云ふまでもない。

2.4 全破壊と部分破壊

空気中の放電現象はエックス線等で豫め電離させて居ても、居なくとも大體同様である事は2.3に述べた通りであるから以後は簡単に人工的の電離を用ひない場合のみを取扱ふことにする。

一般に氣體が電氣的に破壊する場合に全破壊と部分破壊との區別がある。前に2.3に於て説明した平行板電極に於ては電極間の何處か一點に破壊が起れば直に電極から電極に火花が連結する。之に反し一方又は双方の電極の形が第7圖に示す針の様なものであ



第 7 圖

ると少しく状態が變るのである。第7圖の場合に電壓を低い所より次第に上げて行つたとすると、或電壓の値で電位傾度が外の何處よりも大きい針の先端附近に電離が起る。之は發光作用を呈する故暗室で行へば一層明瞭に觀察出来る。即ち針の先端に近い空氣

が微かに光つて見える。然しその他の部分は光が見えない。此の状態では針の先端に近い空氣のみが破壊されたのであるから部分破壊と謂つて居る。之に對し電極間を火花が連結する状態を全破壊と謂ふ。

部分破壊の状態にも亦幾つかの形式があり、それが段階的に變じて行く即ち上記の状態から更に電壓を上げると微かな光が次第に光を増し、又光輝ある線條を交へ外觀も活潑に動いて居る様に見える同時に音も發する。更に電壓を上げるに伴ひ愈勢を増し發光領域も伸び終に全破壊になつて火花が電極間を連結する。此の部分破壊の間は電流はそれ程大きくないので檢流計で測る程度であるが、これは火花放電に至る道程であつて、コロナ放電と謂ふ。兩電極の形が同一でない場合、極端なる場合としては第7圖の如く一方が針で他は平面である様な場合には、電極間に加へる電壓の極性の如何により、即ち針が(+)である場合と(-)である場合との差で針の先端に現はれる所謂コロナ放電は外觀に於ても明かにその差異が認められる、又次第に電壓を上げて全破壊の起る電壓、所謂火花電壓の値も相當の差がある。

コロナ放電を發生して居る部分破壊の状態では、コロナ放電の發生しない場合に比して電界の分布は相當變つて居る、その原因は1.8に於て述べた空間電荷効果である。1.8に於ては焰の中で電離の行はれて居る場合を説明したのであるが、第7圖の如き場合にも針の先端附近で電離が行はれ相當量のイオンが出來て電界の分布が影響される。今針の方を(+)とし平面電極を(-)とすると陽イオンは針の先から逐ひやられて遠い所まで分布する結果、針の先端近い所の電位傾度は著しく緩和されて電壓を上げててもその割に電界は強くない。従つて電離現象は針端に近い周圍に限られて、それから

少し離れた所まで發展出來ず、コロナ放電の状態に安定を保つて居るのである。

氣體の放電現象に於て全破壊となるのに二つの異つた形式があることは以上述べた二つの例から了解される。即ち一つは平行電極で、電極間の何處でも破壊が起れば直に全破壊となる場合、此の場合には一部分破れたまゝ安定に止つて居ることは絶対に無い。次は針電極の場合で、部分破壊状態が安定に成立し、更に電壓を上げて部分破壊の範圍が逐次に増大し遂に全破壊に至る。かくの如き差異の生ずるのは主として電極の形狀、配置、距離に依つて決定されるのである。

又部分破壊の状態をコロナ放電と總稱して居るが細かく観察すると形態も異つた數種のコロナ放電形式が分類出來る。主としてその外觀から、暈光放電、芒光放電、拂子放電等の名稱がある。

2.5 平等電界又は之に近い場合の電氣的破壊現象

2.4に於て述べた部分破壊を起さず直に全破壊となる場合の一つの例は平等電界又はこれに近い電界の分布状態で起る破壊現象である。以下實用上重要な二三の實例に就いて電氣的破壊現象を述べ各の特異性に關し簡単に説明する。

2.5.1 平面電極(平行板電極)

理論的に云へば無限の廣さを有する平行の面を向き合はすれば平等電界が出來るが、實用上は周邊の曲率を小にして、即ち丸味をつけて第8圖の如く平面電極を配置したものを以て代用する。

電界は縁邊を除き平等である。従つて電界の強さ \mathcal{E} は電極間隔を d とすれば、電壓 V を加へたる時

$$\mathcal{E} = \frac{V}{d}$$

但し V は kV. d は cm. で表した値とする。

常溫、常氣壓の空氣中に於て實測の結果。火花電壓に相當する \mathcal{E} の値は電極距離が數センチメートルの場合に 30 kV/cm 内外である。

電極距離 d が小となれば此の値は高くなり、 d が大になれば低くなる傾向がある。尙ほ電極面が平滑で且つ清淨でない時、即ち表面の仕上げが不完全であつたり、他物が附着し居たりすると、低くなる傾向が強く、肉眼で検査しても發見出來ない程度の原因により著しく火花電壓が低くなる。

平面電極間の如き平等電界では2.4に述べた様な部分破壊は決して發生しない。

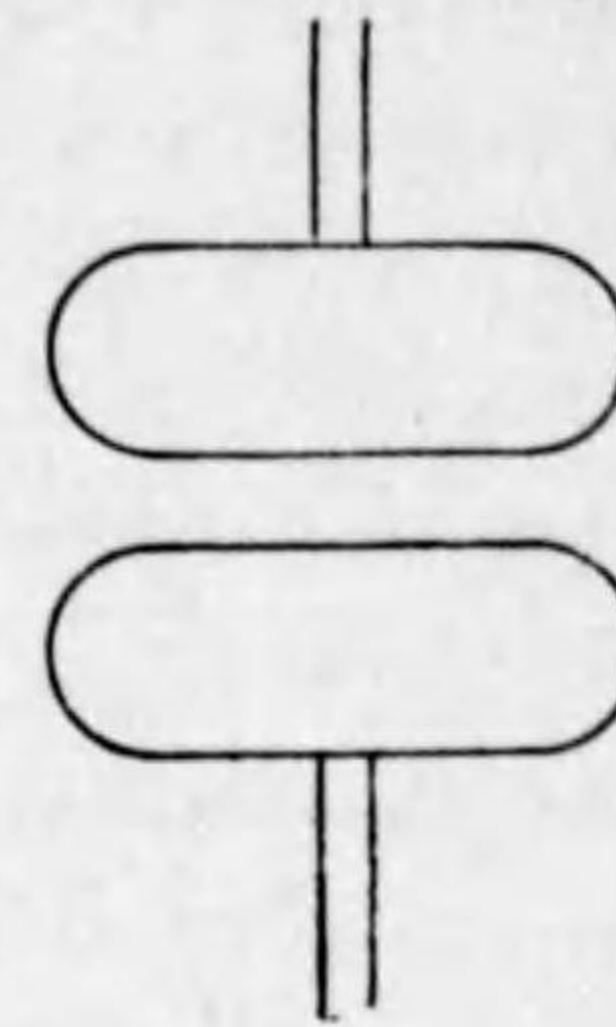
次に空氣の溫度、又は氣壓の變化した場合には火花電壓はその變化に伴つて變化するが、その値は空氣の密度に比例して變る。氣壓 760 mm, 溫度 20°C の空氣の密度を標準にとり、その密度を 1 とし、氣壓が b mm, 溫度が t °C となつた時の空氣密度 δ は次の式で計算する。

$$\delta = 0.386 \frac{b}{273+t}$$

此の如くして算出したものを相對空氣密度と呼ぶことにする。今氣壓 760 mm, 溫度 20°C の空氣中に於て火花電壓が V_0 kV であるとするれば、氣壓 b mm, 溫度 t °C の火花電壓 V は次式で求め得られる。

$$V = \delta V_0 \text{ kV}$$

Paschen は平等電界に近い状態で火花放電の實驗を行ひ火花電壓



第 8 圖

は電極の距離 d と相対空気密度 δ の相乗積、即ち δd の値によつて左右されることを見出した、之を式で示せば

$$V=f(\delta d)$$

となる。此の關係で示される法則をバッシュェンの法則と云ふ。若し温度が一定ならば δ は p に比例する故

$$V=pV_0 \text{ 又は } V=f(pd)$$

で示される關係が成立つ。

依て温度一定なる時は、火花電壓は氣壓が増すと共に限りなく上昇する様に思はれるが實際は大氣壓の前後の或る範圍内に於てのみ火花電壓が氣壓に比例し、氣壓の上昇と共に火花電壓の上昇する割合は次第に減じ、10氣壓以上になると火花電壓上昇率は愈減少する傾向が顯著となる。従つて高電壓絶縁に於て高電壓に耐へる様にする目的で氣壓を高くする場合は10乃至12氣壓を限度として、それ以上の氣壓を採用しないのが普通である。

2.5.2 球 間 隙

球間隙と稱するものは直徑の等しい二つの球狀電極より成り、電極間の距離は或範圍内は自由に變り得る様にした装置で、電壓の測定に用ふるものである。

電極間の距離が球の直徑の以内であれば兩球に挟まれた空間、その最短距離附近に於ては電界の分布は略平等に近いと考へられる。電界の強さは此の邊が最も強く、放電現象は専ら此の附近で起るのであるから、此の場合の放電現象は大體に於て平面電極の場合と同様である。従つて2.5.1に述べた事は大部分此の場合に適用出来る。

同様の理由で以下述べる所の火花電壓の不整現象も亦平面電極に於ても同様に發生するのである。

球間隙を電壓測定に利用するのは、形狀、寸法が極めて簡単に定められ、一定の直徑を有する球電極を一定間隔に置けば、標準状態、即ち760 mm, 20°C の空氣中に於ける火花電壓は一定であるべき筈であるから未知の電壓を加へ、丁度火花放電の起る様な電極間の距離を測定すれば、その電壓の値(交流にては最大値)を求めることが出来るからである。若し氣壓が p 温度が t °C なる時は、相対空氣密度 δ を算出して、電壓は δ に比例するものとして更正を加へ未知電壓の値を定めることが出来る。

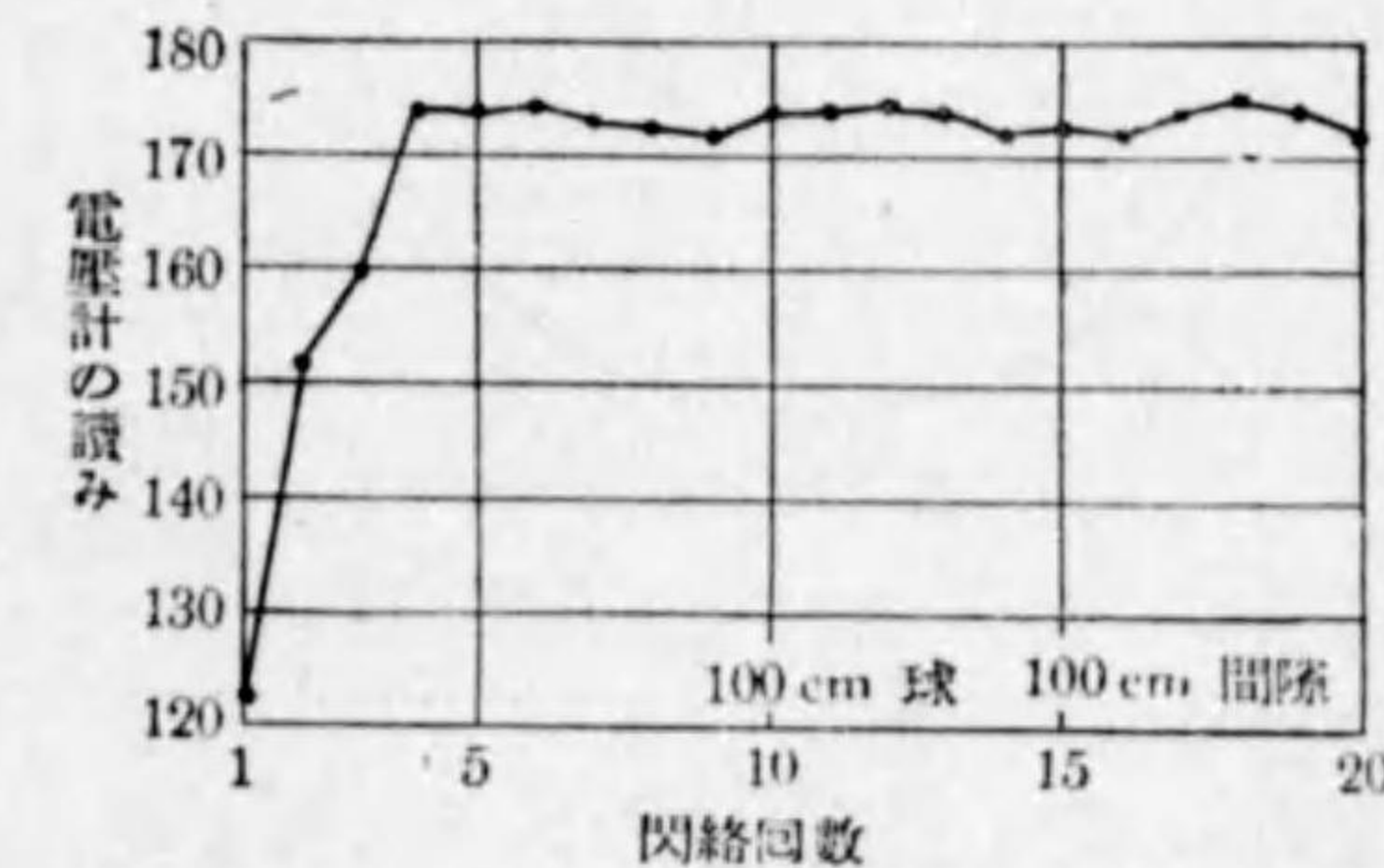
球間隙を以て電壓を測定せんとする場合は、日本電氣工藝委員會、標準規程(球間隙に依る電壓の測定)を参照すべきである。

此の規程に於て注意事項の中に記されて居る事であるが、特に注意すべきは火花電壓不整現象である。

球間隙に電壓を加へて徐々に上昇させると、最初常規の値よりも遙かに低い電壓で放電が起る。更に再び電壓を加へ放電を繰返すと火花電壓は高くなり終に常規の値に達す。故に球間隙を使用する場合には豫備放電として數回火花放電を繰返させた後、實際の計測に用ふべきである。此の現象は球の直徑が大なる場合、即ち

50 cm, 100 cm, 200 cm 等に

於て特に顯著に現はれるが、直徑小なる球に於ては僅かに認められるに過ぎない。第9圖は直徑100 cm の球間隙に就て實測した結果である。球電極は最初アルコールを浸



第 9 圖

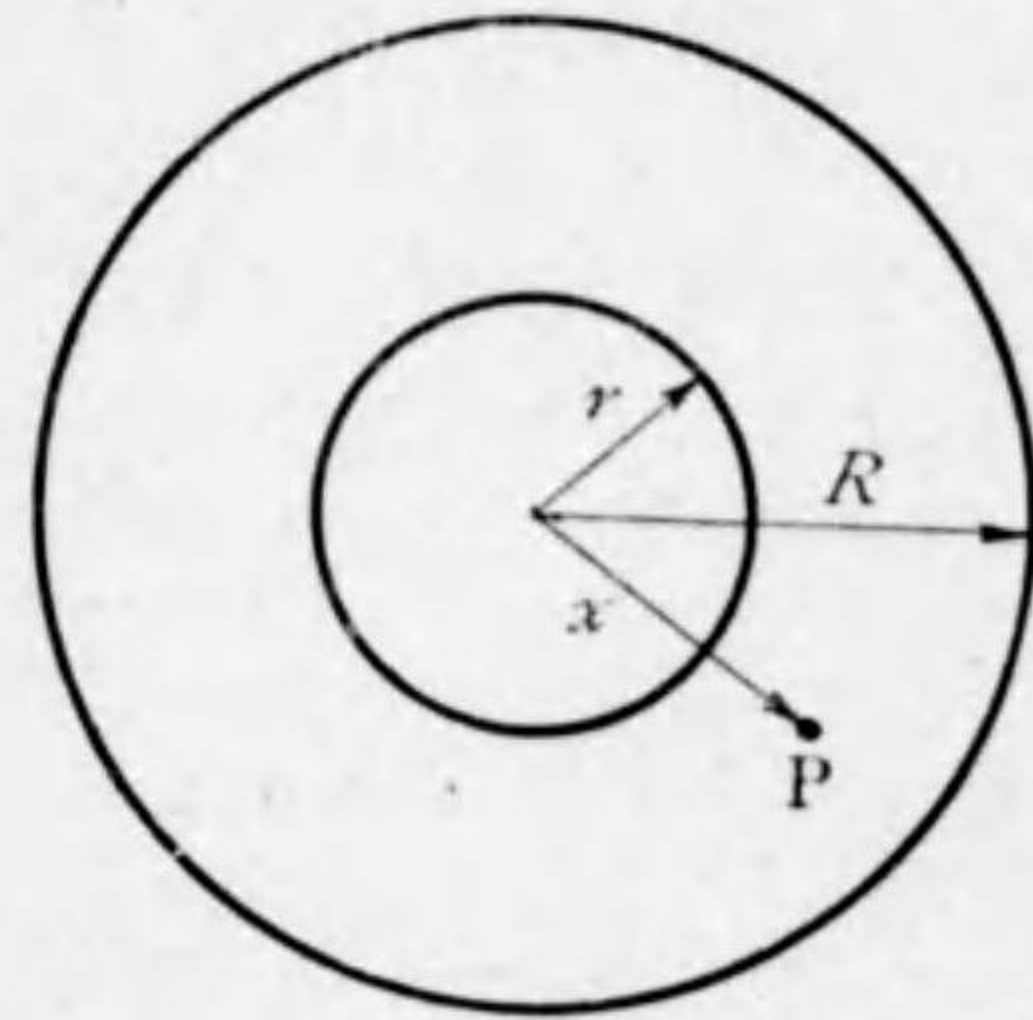
した布でよく拭つた後電圧を加へたのである。此の場合に5回放電を繰返した後は火花電圧は略一定の値となつた。此の場合放電した度毎にアルコールで拭ふ時は一回毎に不規則な値が出る。即ちアルコールで拭ふことが却つて悪い結果を招くので寧ろ球間隙に手を觸れずに數回豫備放電を繰返した後電圧測定を爲すべきである。

2.6 不平等電界に於ける電氣的破壊現象

2.4に述べた様に此の場合には部分破壊を起すこともある、如何なる場合に部分破壊となるかは下に記す例に就いて説明する。

2.6.1 圓筒電極

(1) 同心圓筒



第 10 圖

無限に長い二つの圓筒が第10圖の如く軸を共通に置かれたとして、内部圓筒の外半徑を r cm, 外部圓筒の内半徑を R cm とする。

此の圓筒を電極として V なる電圧が加へられたとすれば、中間の一點 P に於ける電界の強さは、軸心よりの距離を x とすれば下式で與へられる。

$$\mathcal{E} = \frac{V}{x \log \frac{R}{r}} \dots\dots\dots (1)$$

但し \mathcal{E} は電界の強さである。

従つて、電界の強さが最大なる點は、 x の最小なる値、即ち $x=r$ なる點で、之は内部電極の表面に接した點である。此の點の電界の強さを \mathcal{E}_m とすれば

$$\mathcal{E}_m = \frac{V}{r \log \frac{R}{r}} \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (2)$$

但し、 V を kV (キロボルト) で表はした場合である。

今 V なる電圧を低い値から徐々に増して行けば遂に火花放電を發生することは明であるが、その場合に電離作用が先づ電界の強さが最大である内部電極の表面に接した所から發生することは當然である。而して内部電極の半徑 r と外部電極の半徑 R との比、即ち、 $\frac{r}{R}$ の値の如何によつて、初め内部電極の周圍にコロナ放電が現はれ、更に電圧を上げて終りに火花放電となる場合と、最初コロナ放電が現はれずに直ちに火花放電となる場合と二つの場合に分れる。

常溫、常氣壓の空氣中に於ては、 $\frac{R}{r}$ の値が約 3 なる所が限界で、3 より大なれば最初コロナが現はれ、3 より小なれば直ちに火花放電となる。即ち内部圓筒が比較的細い時にコロナ放電が見られる。而してコロナの發生する時の電極表面の電界の強さ、即ち電位傾度は次の式で表はし得る。

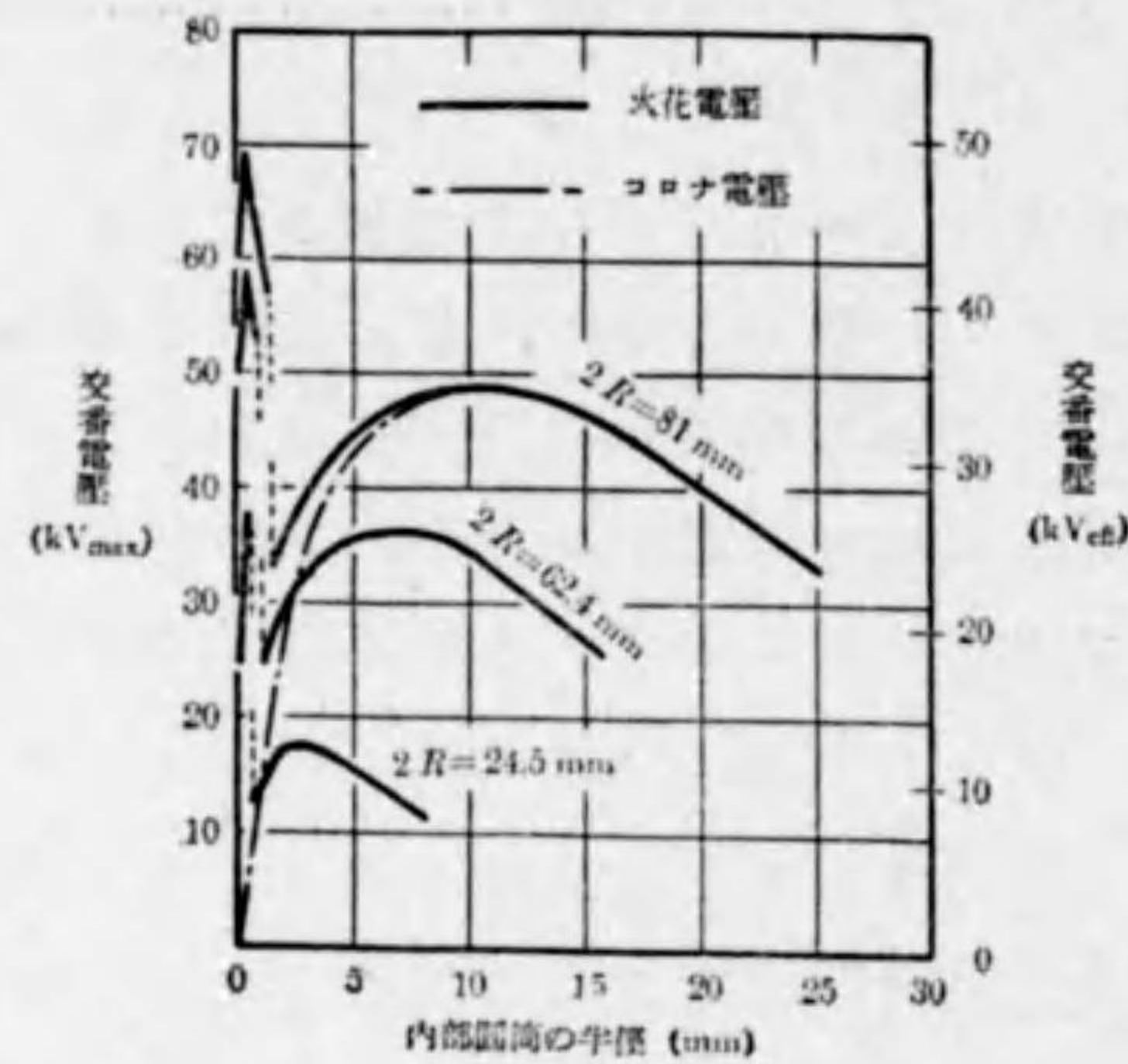
$$\mathcal{E}_m = 30.5 \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{r}} \right) \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (3)$$

従つてコロナ發生電壓 V_c は (3) 式と組合せ

$$V_c = \mathcal{E}_m r \log \frac{R}{r} = 30.5 \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{r}} \right) r \log \frac{R}{r} \text{ kV} \dots\dots (4)$$

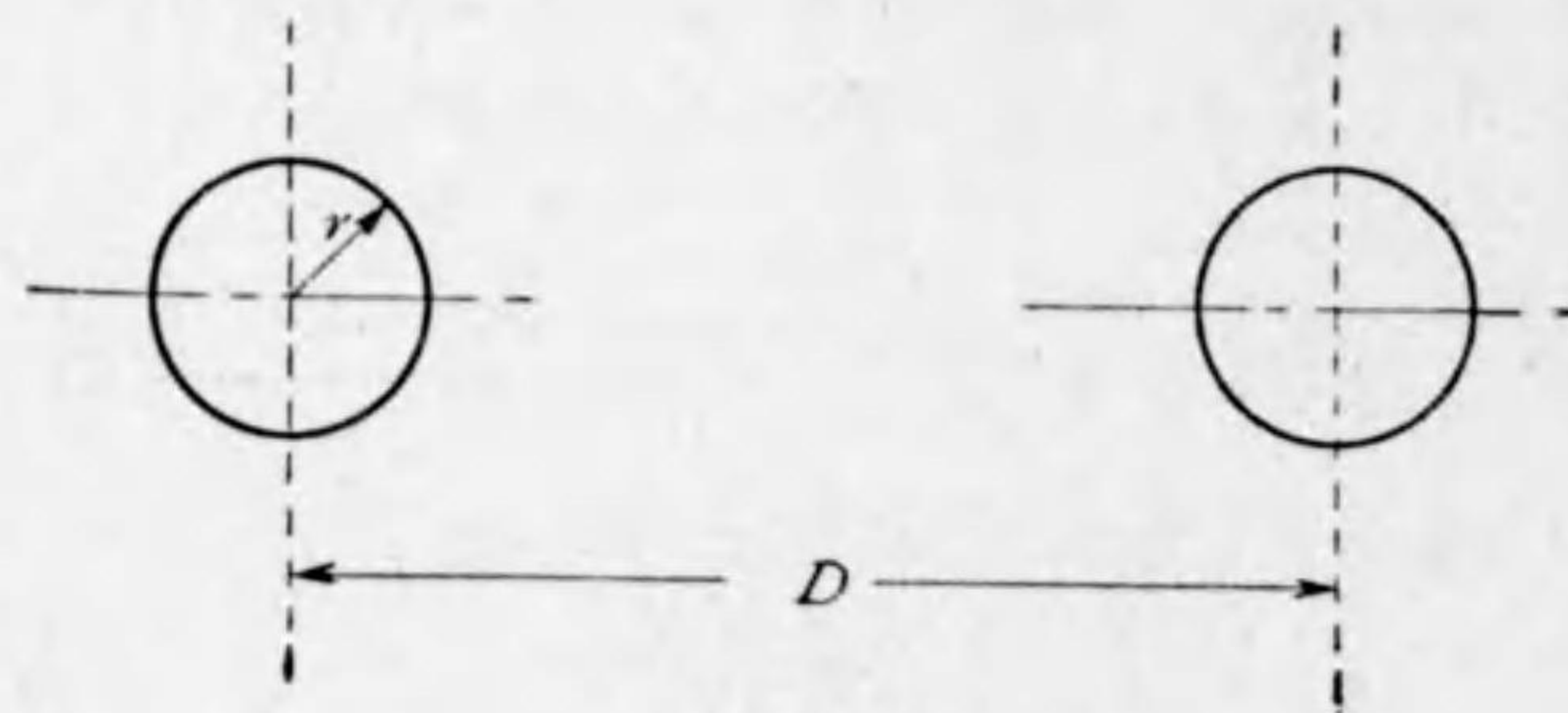
$\frac{R}{r}$ が 3 より小なれば是は火花電圧と一致するが $\frac{R}{r}$ が 3 より大なれば火花電圧は、此の値よりも高くなる。第11圖に於て外部電極

の内径が夫々, 81 mm, 62 mm, 及 24.5 mm なる場合の實測値が示されてある。但しコロナ電壓は鎖線で示し, 81 mm に對してのみ記入し他は省略した。



第 11 圖

(口) 並行圓筒



第 12 圖

圓筒電極が並行に置かれて在る場合は,同心圓筒に比し實用上重要である。何となれば架空送電線で電線の配置を見れば略々此の

場合に相當して居るからである。依つて二つの圓筒電極の半径が等しく,その中心距離 D が半径 r に比して大なる場合のみを取扱ふことにする。

$\frac{D}{2r}$ の値が 100 以上ならば電極の表面に於ける電界の強さ,又は電位傾度は同心圓筒の場合と同様の式で表はすことが出来る。

$$E_m = \frac{V}{2r \log \frac{D}{r}} \text{ kV/cm} \dots \dots \dots (5)$$

但し V は kV で表はした電壓, r は cm で表はす。

此の如く $\frac{D}{r}$ の大なる場合に V を次第に増して行くと終に電極表面にコロナ放電が発生することは 2.5.1 (1) の同心圓筒で $\frac{R}{r}$ の大なる場合と全く同様である。而してコロナを發生する E_m の値は全く同一の式で示される,之を E_c で示すと

$$E_c = 30.5 \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{r}} \right) \text{ kV/cm}$$

従つてコロナを發生する電壓の値は

$$V = 61 \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{r}} \right) r \log \frac{D}{r} \text{ kV} \dots \dots \dots (6)$$

是等の値は氣壓 760 mm, 溫度 20°C の空氣中に於けるもので,氣壓 b mm, 溫度 t °C なる時は

$$E_c = 30.5 \delta \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{\delta r}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

となる。但し δ は相對密氣空度で前と同様

$$\delta = 0.386 \frac{b}{273+t}$$

普通送電線に於ては三相の電壓が加はるので,コロナ電壓の算定には,中性點に對する電壓の値を取り,之を V_c とすれば,

$$V_c = 30.5 \delta \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{\delta r}}\right) r \log \frac{D}{r} \text{ kV (最大値)} \dots\dots (8)$$

$$= 70.2 \delta \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{\delta r}}\right) r \log_{10} \frac{D}{r} \text{ kV (最大値)} \dots\dots (9)$$

實際の電線は圓筒電極とは異り、燃線を用ふる場合が多い、依つてコロナの發生する電壓は上式に示す値よりも幾分か低いのを常とする。此の如く表面の凹凸のある場合の式として m なる係数を入れ、

$$V_c = 30.5 m \delta \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{\delta r}}\right) r \log \frac{D}{r} \dots\dots (10)$$

とする。但し

7 本燃電線に對し $m = 0.87 \sim 0.83$

19 本乃至 61 本燃電線に對し $m = 0.85 \sim 0.80$

近來の所謂超高壓送電線に於ては屢中空電線を採用するのは同じ切斷面積でも直徑を大きくしコロナ電壓を高くするのが目的である。かゝる電線はその表面は成るべく圓筒形になる様な構造として居るが完全に平滑にするのは困難である。従つてかゝる電線を用ひた場合でも m の値は 1 よりも小さい。又コロナの發生は表面に於ける小さな疵とか、汚れ等の爲めに影響を受ける、例へば電線架設の際に硬い物との摩擦の爲めに出來た疵とか、電線にグリースが附いて居るとかでコロナ電壓は幾分低くなる。依つて架線に際しては電線が地面又は硬い物體に直接觸れて擦られない様特に注意を要する。

コロナ放電が起ると、光と音とを發し、化學作用も起るが、必ず電力損失を伴ふ、之をコロナ損と云ふ。

コロナ損はコロナ電壓に於て發生し始め、更に電壓を上げると急激に増加する、同心圓筒又は並行圓筒何れに於ても同様で次の實驗式がある。

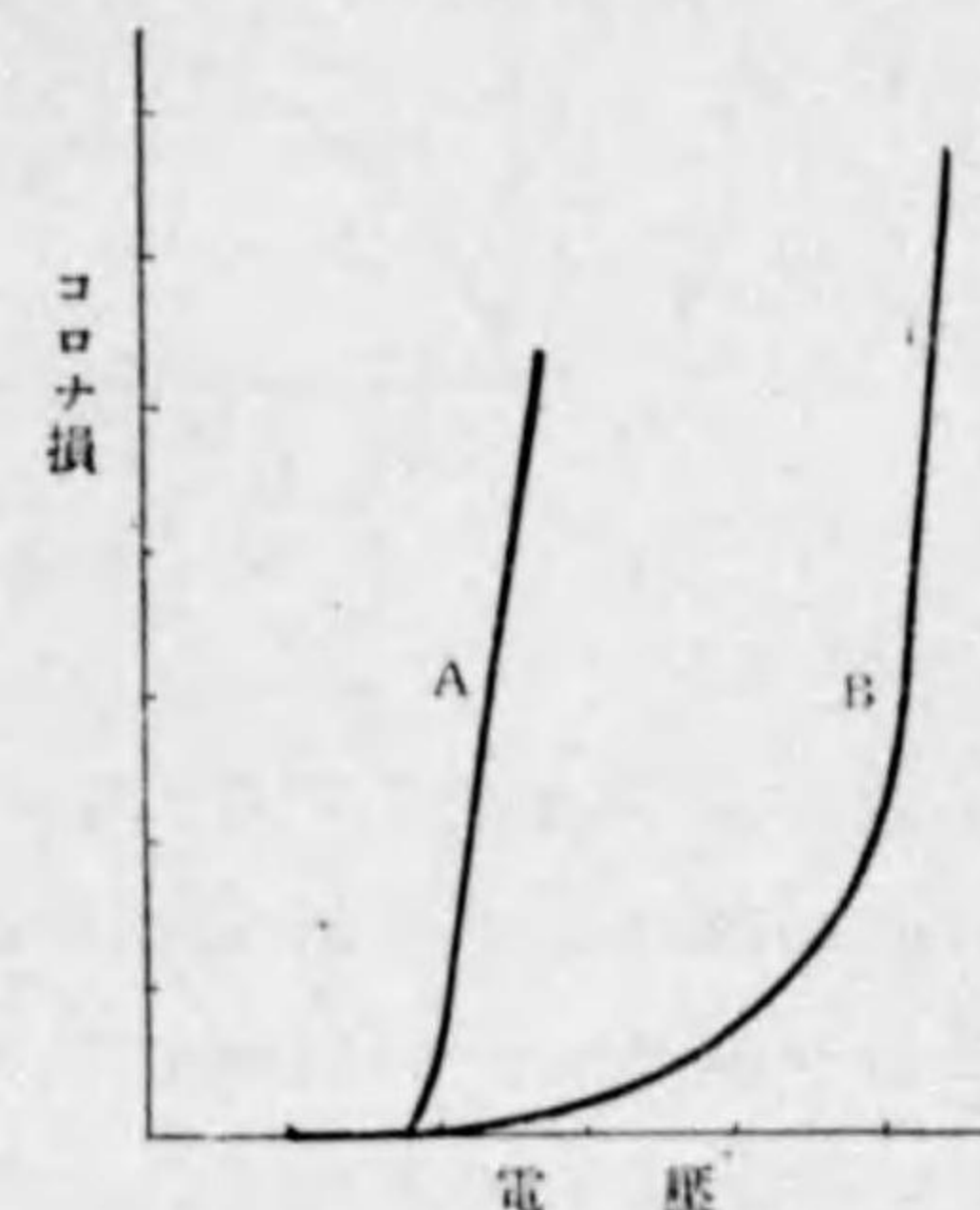
$$P = A(V - V')^2 \quad (\text{ビークの式}) \dots\dots (11)$$

又は $P = BV(V - V'')^2 \quad (\text{ホルムの式}) \dots\dots (12)$

但し V は電壓で、 A, B, V', V'' 等は電極直徑電線の太さ、表面状態、等で定まる定數である。

是等の式は電壓の廣い範圍に亘つて實測値とは一致しない。殊にコロナの發生する電壓に近い所では一般に實測値と異なるのが普通である。特に電線の場合に於ては、細いものと太いものとで電壓

上昇に伴ふコロナ損失の増加が異なる。第 13 圖に示す様に、細い電線ではコロナが發生し始めると急にコロナ損は増加するが、太い電線では最初の増加は比較的徐徐で先になると細い電線と同様な急傾斜で上昇する。此の際肉眼で觀察すると細い電線ではコロナの發生は最初から表面全體に亘つて居り、太い電線では最初は局部的に發生し、電壓上昇に伴ひて全面に行き亘ると云ふ感じがある。



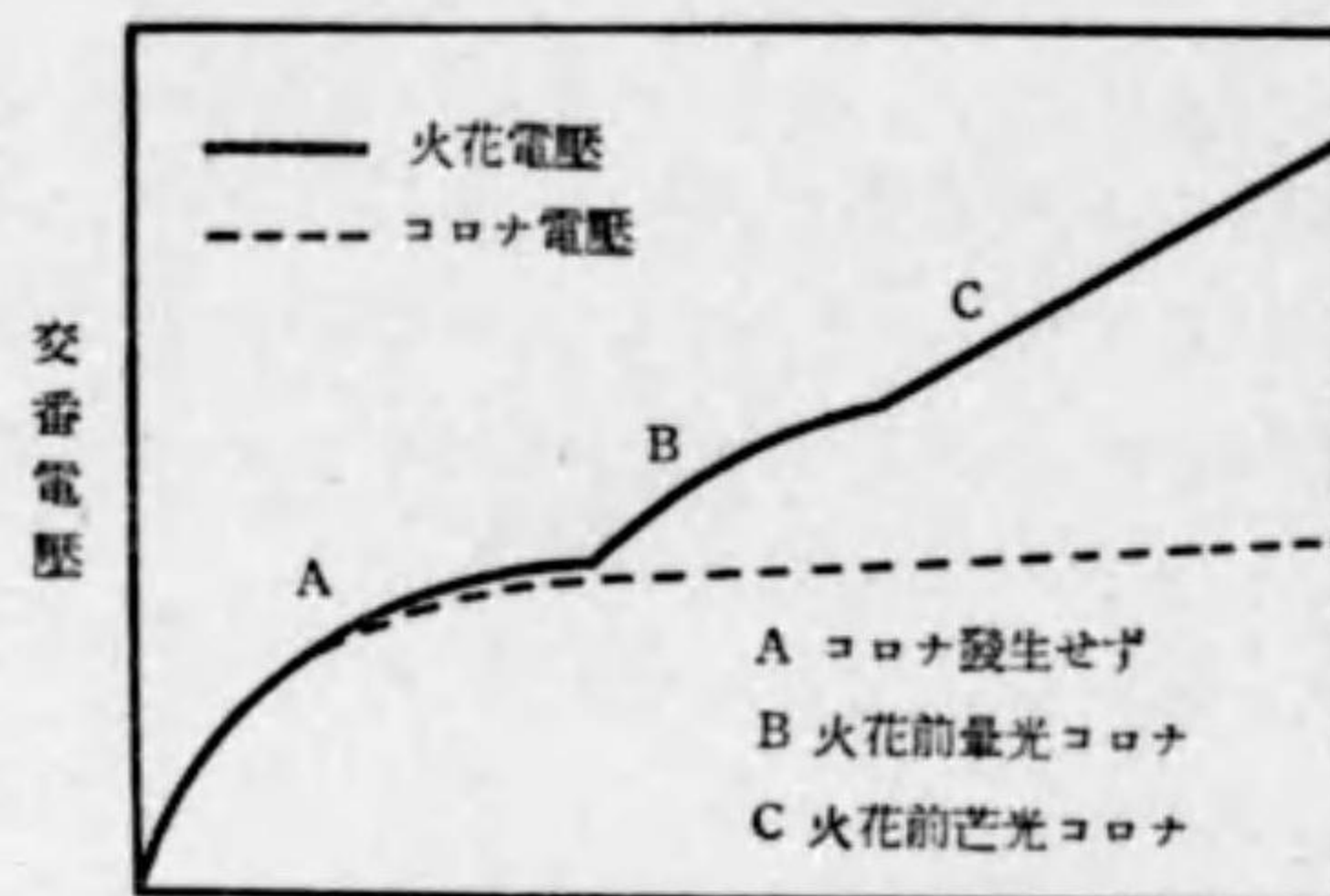
A $r = 2.6 \text{ mm}$ (7 本燃 素線直徑 1.7 mm)
B $r = 9.8 \text{ mm}$ (37 本燃 素線直徑 2.8 mm)

第 13 圖

2.6.2 球間隙(間隙の大なる場合)

球間隙に於ても、間隙が大きくなると、最初コロナ放電を發生し、更に電壓を上げて火花放電となる。此の際發するコロナ放電は外觀より區別して暈光放電及芒光放電なる名稱がある。概して間隙小なる所では暈光コロナより火花放電となり、間隙大なる所では芒光コロナから火花放電に移る。(第 14 圖參照)

芒光コロナの部分は直線に近く、後に述べる針端電極の火花電圧特性と一致する。



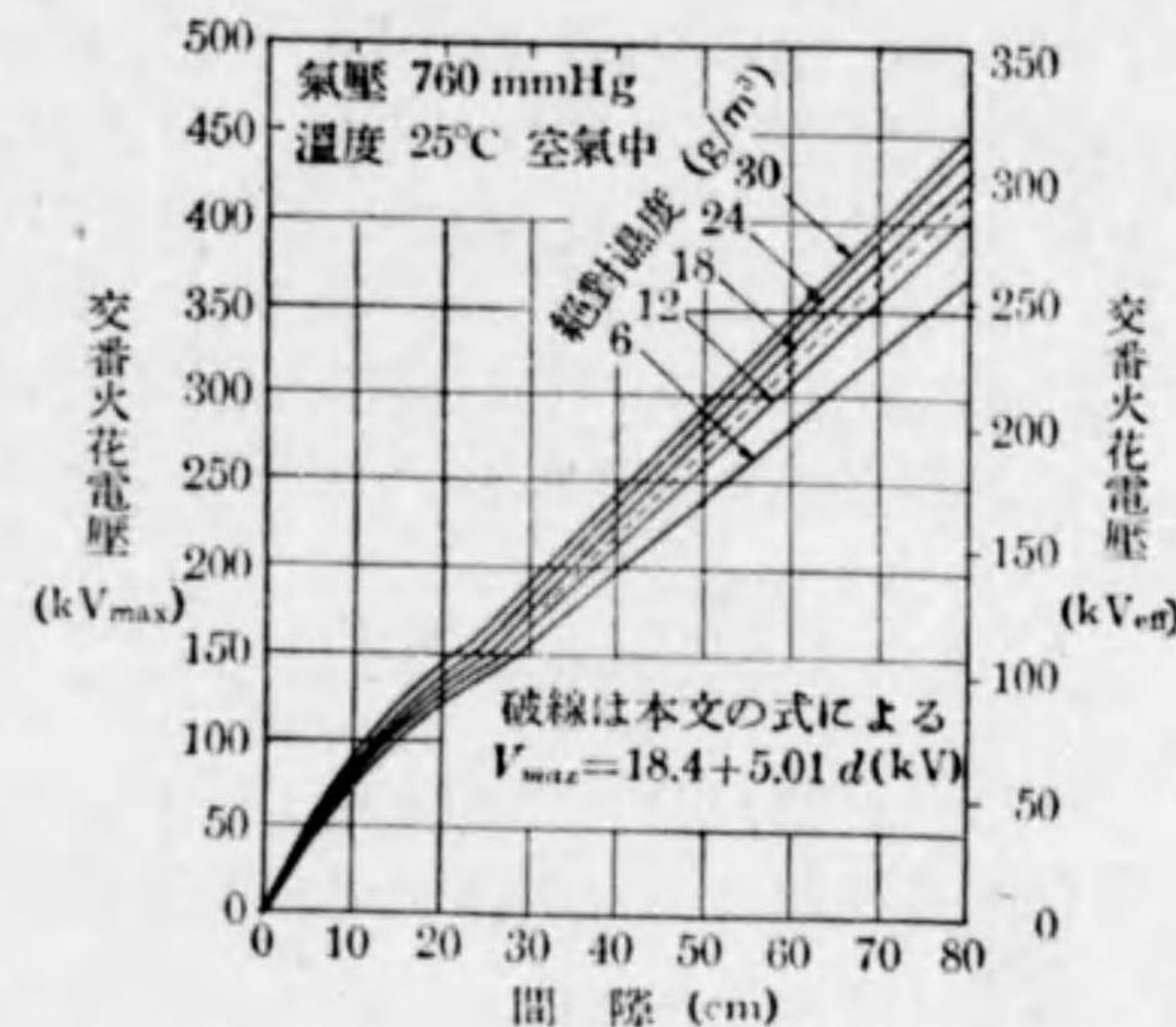
間 隙
第 14 圖

球の直径が大きくなるに従ひ、第14圖に於てBよりCに移る箇所即ち直線部の始まる間隙の長さが次第に大きくなるだけで全體の形は變りがない。尙ほ球狀電極に限らず、一般に電極の大きさに比し間隙の長さが大なる場合には、芒光コロナを發し、電壓を更に上昇して火花放電となる。その電壓と間隙の長さとの關係は第14圖Cの部と同一の直線に近い曲線で表はすことが出来る。

2.6.3 針端間隙

針電極を以て形成した火花間隙で火花間隙の長さとは火花電壓との關係は第14圖Cの部に相當する。此の部分は芒光放電から火花放電に移ることを特徴とする火花放電形式であつて、その特異性と云ふべきは空氣中の水分の多寡によつて火花電壓が變化する點である。空氣中の水分を云ひ表はすに相對濕度と絶對濕度との區別

があるが、茲に火花電壓に影響するのは絶對濕度、即ち空氣一定體積中の水分の量である。之を一立方米中のグラム數で表はすのが普通であるが、第15圖には針端間隙の火花電壓特性で各曲線の傍に記



第 15 圖

入したのが其の場合の絶對濕度の値である。即ち水分の大なる程、即ち濕度の高い程火花電壓は高くなる傾向を示して居る。此の圖の中で破線で示したのは

$$V_{max} = 18.4 + 5.01 d \dots\dots\dots(13)$$

なる方程式に相當する直線で、dは間隙の長さをcmで、V_{max}は火花電壓の最大値をkVで表はしたものである。此の圖に見る如く、此の直線は濕度15g/m³邊に相當する針端電極の火花電壓特性に極めてよく一致して居る。大氣の濕度は普通相對濕度で言ひ表はされて居るので絶對濕度との關係を第1表に示す。

第 1 表

絶対湿度 (g/m ³)	下記温度 (°C) に於ける相対湿度 (%)								
	15°	17°	19°	21°	23°	25°	27°	29°	31°
6	46.9	41.4	36.8	32.8	29.1	26.1	23.3	20.9	19.2
12	93.8	82.8	73.6	65.6	58.3	52.2	46.5	41.8	38.5
18				98.4	87.4	78.3	69.8	62.7	57.7
24							93.0	83.6	76.9

此の表から見ると 15 g/m³ なる湿度は本邦内地に於ては常温に於て普通の程度で従つて

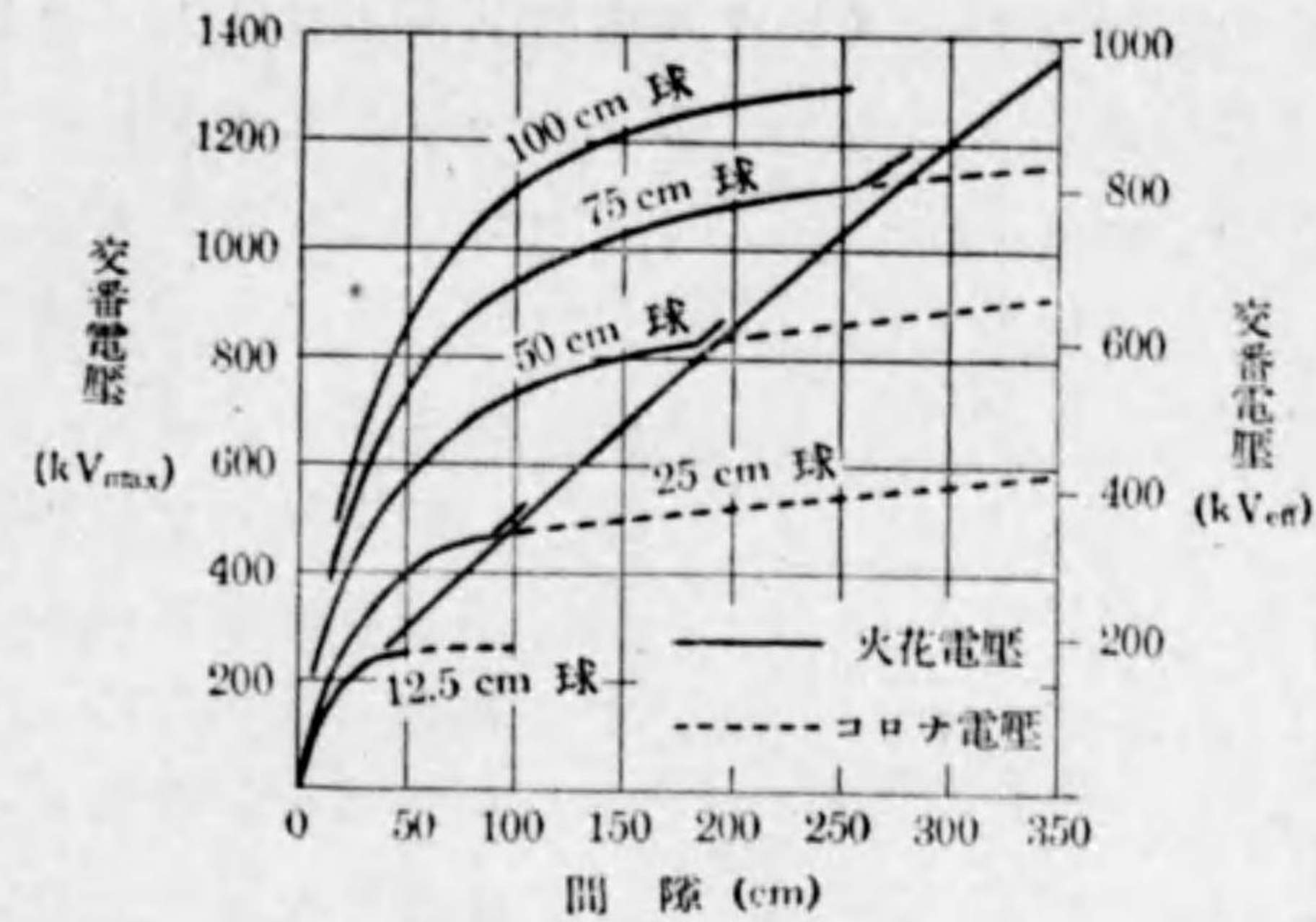
$$V_{max} = 18.4 + 5.01 d \quad (\text{kV}) \quad \dots\dots\dots(13)$$

又は $V_{off} = 13 + 3.55 d \quad (\text{kV}) \quad \dots\dots\dots(14)$

を以て針端間隙の火花特性となし、湿度が異なる時も近似的には適用し得るものとして実用上差支ない。

尙第15圖に示す通り、間隙の長さが 30 cm 以下に於ては火花特性は直線より離れて来るから 30 cm 以下には適用出来ない。又間隙が非常に大きくなると再び直線から離れて来ることは実験上知られて居るが、約 300 cm までは略直線と見て此の式が適用出来る。

球間隙又はその他の形状を成す電極に於ても電極の大きさの割合に間隙の長さが大きくなれば、何れの場合でもその火花特性曲線は針端間隙の火花特性曲線、即ち此の式で示される直線に近似して来ることは既に述べた通りである。唯針端間隙では 30 cm 以上になると直線になるのが他の形状の電極ではその電極の大きさによつて、30 cm より長い間隙になつて始めて直線となる點が異なるので、此の如く直線に近似するに至る間隙の長さは電極の大きさの増すに伴ひ大きくなるのである。此の關係を球間隙に就て示したのが第16圖で



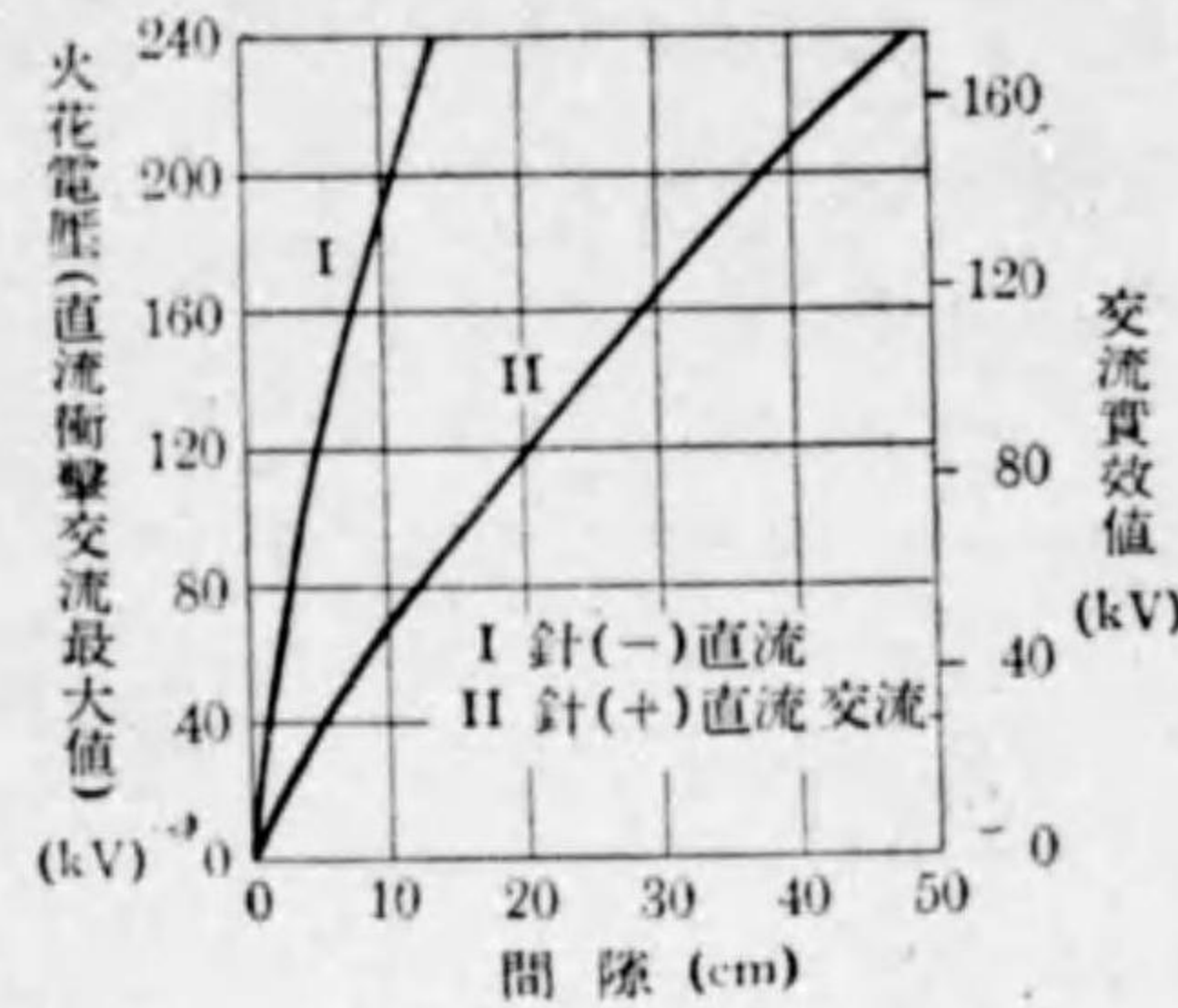
第 16 圖

ある。

以上述べた様に(13)又は(14)なる式は單に針端間隙に限らず、何れの形状の電極に對しても適用出来るもので、如何なる場合も火花電壓の値は或間隙の長さに對して此の式に示された値より低くはならない。勿論大氣の湿度の著しく低い時は第15圖に示す様に多少低くなるが、それは僅かなものとして実用上無視すれば、此の式を以て常温、常氣壓の空氣の絶縁破壊に對する目安として実用上の基準になし得るわけである。即ち常態の空氣はその1 cm 當り平均約5000 V の電壓に耐へるものとして之に安全率を加味して設計すれば宜しいのである。

次に一方が針で他が平面電極である場合は交番電壓に對しては大體に於て針端間隙と同様な火花電壓特性を有す。所が直流電壓を加へる場合は針が+で平面電極が-なる時は交流火花電壓特性と一致するも、針が-で平面電極が+なる時は火花電壓は遙かに高くなり、第17圖に示す様な特性曲線が得られる。此の如く極性に

よつて、その火花電圧値を異にする現象を極性効果と云ひ針-平面の場合はその代表的なるものであるが、一般に異なる形状の電極を組



第 17 圖

時間ではあるが非常に高い電圧が現はれる。

普通此の異常電圧は進行波となつて電線に傳はり送電線の兩端に波及するのである。従つて送電線の碍子及發電所、變電所、開閉所等の機器には短い時間ではあるが異常電圧が加はる。かゝる異常電圧により各部の絶縁が如何なる影響を受けるか、幾何の電圧までは耐へるか、等を調べる爲めに實際雷の爲めに起る異常電圧を模擬した所謂衝擊電圧を人工的に發生させて、之によつて各種の試験を行つて居る。碍子類は勿論、變壓器巻線、套管、遮斷器、斷路器等の外、各種の火花間隙も亦衝擊電圧を加へた時の性能を調べるのである。但し人工的に發生させるには蓄電器の放電を以てし、放電抵抗と靜電容量等を適當に選り雷に因つて起る異常電圧に於て最も頻りに起る電圧波形に近いものにして居る。即ち各國とも衝擊電圧の標準波形なるものを定めて、標準波形の衝擊電圧を以て試験を行ふ様に規程を定めて居る。

合せて火花間隙を形成すれば多少なりとも極性効果を現はすのである。

以上は直流電圧又は商用周波數交番電圧を加へた場合の現象のみに就て述べて來たが實用上重要なものは衝擊電圧を加へた時の火花放電現象である。架空送電線に落雷があると極めて短い

此の如き極めて短い時間だけ火花間隙に電圧が加はる時は、直流電圧、又は交流電圧の場合と多少異つて來ることは當然である。その主として異なる點を述べれば、一般に火花電圧が高くなる傾向がある。火花間隙に電圧を加へ火花放電になるには先に述べた如く、氣體中に存在して居た電子又はイオンが加速されて、他の中性分子に衝突して之を電離するだけのエネルギーが得られる様になつて始めて放電現象が開始されるのである。平面電極又は間隙の小さい球間隙等に於ては、一度電離が起れば極めて短い時間に間隙全體に亘つて破壊が進むので、電圧が加つてから放電の完成するまでに甚だ短い時間を要するに過ぎない。之に反し針端間隙等の不平等電界に於ける放電現象は、一部分だけ破壊して所謂コロナ放電の状態を生じ、電圧が更に高い値に達して火花放電が起る。従つて平面電極等の場合に比して、火花放電の完成に到る迄に手間取るわけで、衝擊電圧の様に一秒の十萬分の一、乃至二萬分の一(數マイクロ秒から數十マイクロ秒)の短時間のみ電圧が加はる時は、その値が直流又は交流火花電圧の程度であつても、火花放電にまで到達しない事があり得べきである。依つて火花放電まで持つて行くには直流又は交流火花電圧値よりも更に高い衝擊電圧を必要とするのは當然である。

衝擊電圧を火花間隙に加へた時の火花電圧特性は交番電圧の場合の如く簡単に表現することは出來ない。先づ火花電圧をどういふ風に定めるかを明瞭にする必要がある。

現在一般に行はれて居るのは50%放電率に相當する電圧を以て火花閃絡電圧と定めて居る。50%の意味は例へば同じ電圧を10回加へて5回放電する様なものをさすのである。蓋し衝擊電圧を火花間隙に加へる場合にその電圧の値が低ければ10回加へて1回も

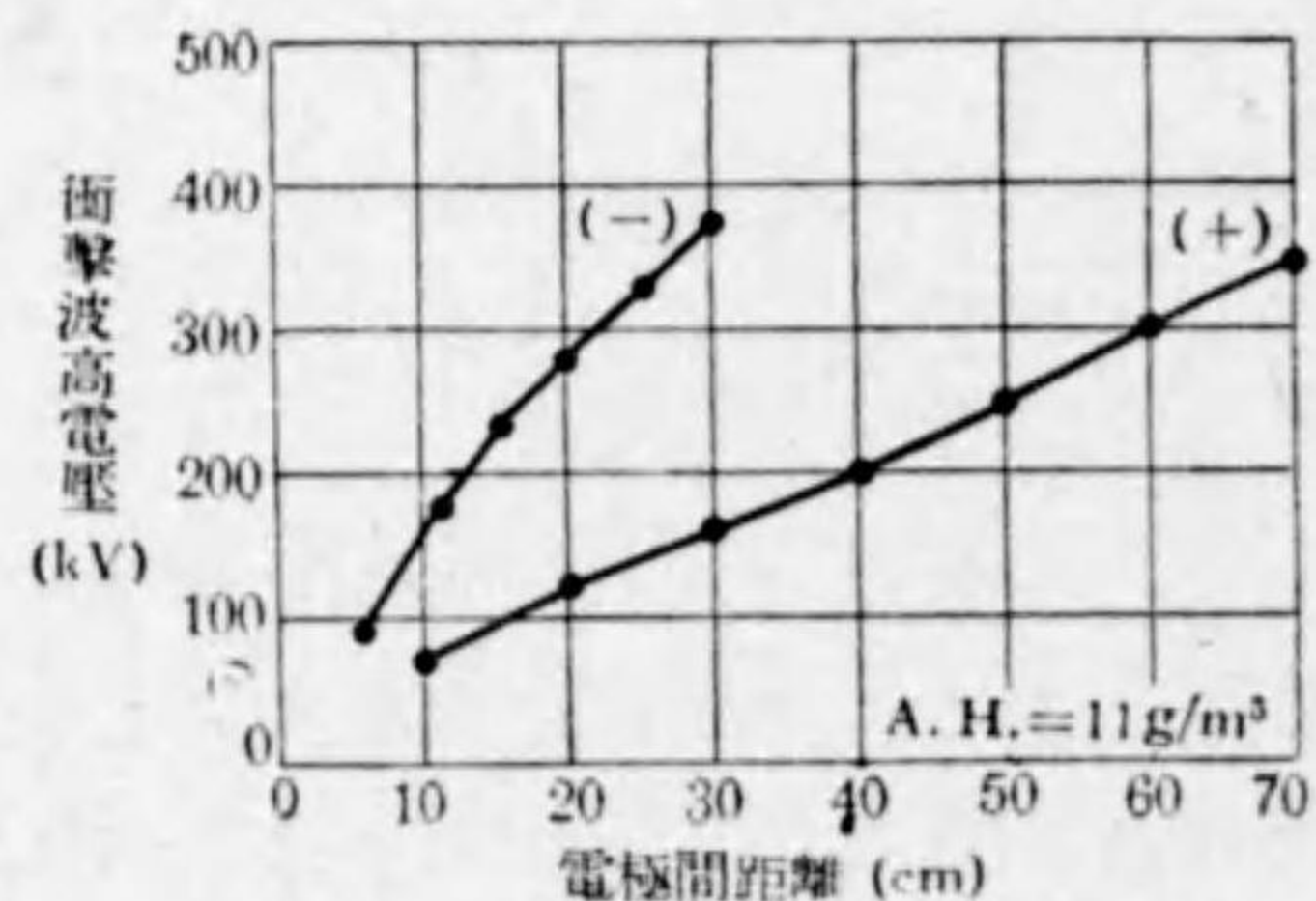
放電が起らない。又電圧の値が十分高いならば10回加へて10回放電が起る、中間の電圧値では10回の内數回放電することもあり得るであらう。その場合に何回放電が起るかは電圧の値によつて變るわけで、今電圧の値を徐々に變へて丁度10回の内5回放電する様になつたならば、その電圧を50%放電率の火花電圧と云ふのである。

此の如く定めた50%放電率火花電圧も衝撃電圧の波形の異なるに伴つて變ることは當然であるから標準の波形を定めて、その波形の衝撃電圧を以て火花電圧を求めるのである。

衝撃電圧を加へた時の火花特性の詳細に就ては後に述べる事にし、差し當り50%放電率火花電圧の値に就て述べれば針端間隙に於ては商用周波數交番電圧を加へた時の火花電圧に比し一般に高い値となる。

幾何程高くなるかは波形によつて異なるが、標準波形波頭の長さ1.5 μ sec, 波尾の高さが波高値の $\frac{1}{2}$ となるまでの長さ40 μ sec)として採用されて居るものに対しては第18圖に示した様な結果が出て居る。

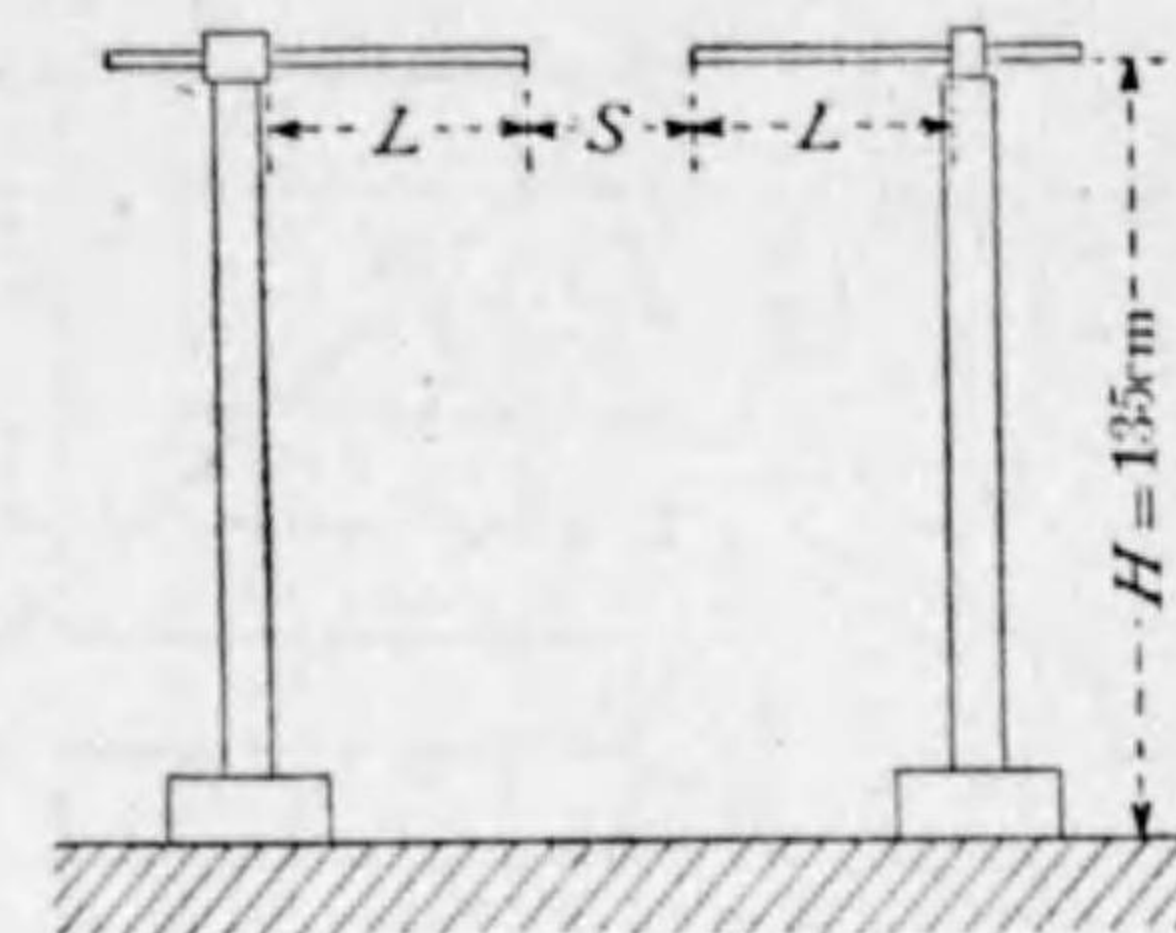
電極の形狀が少しく異なるが變壓器の衝撃電圧試験に於て使用する



第18圖 針對平面間隙の閃絡特性

る棒間隙(切断面積が邊の長さ12.5mmの正方形なる棒を第19圖の如く向き合はせて支持したものの)の衝撃電圧火花特性は第20圖に示した。

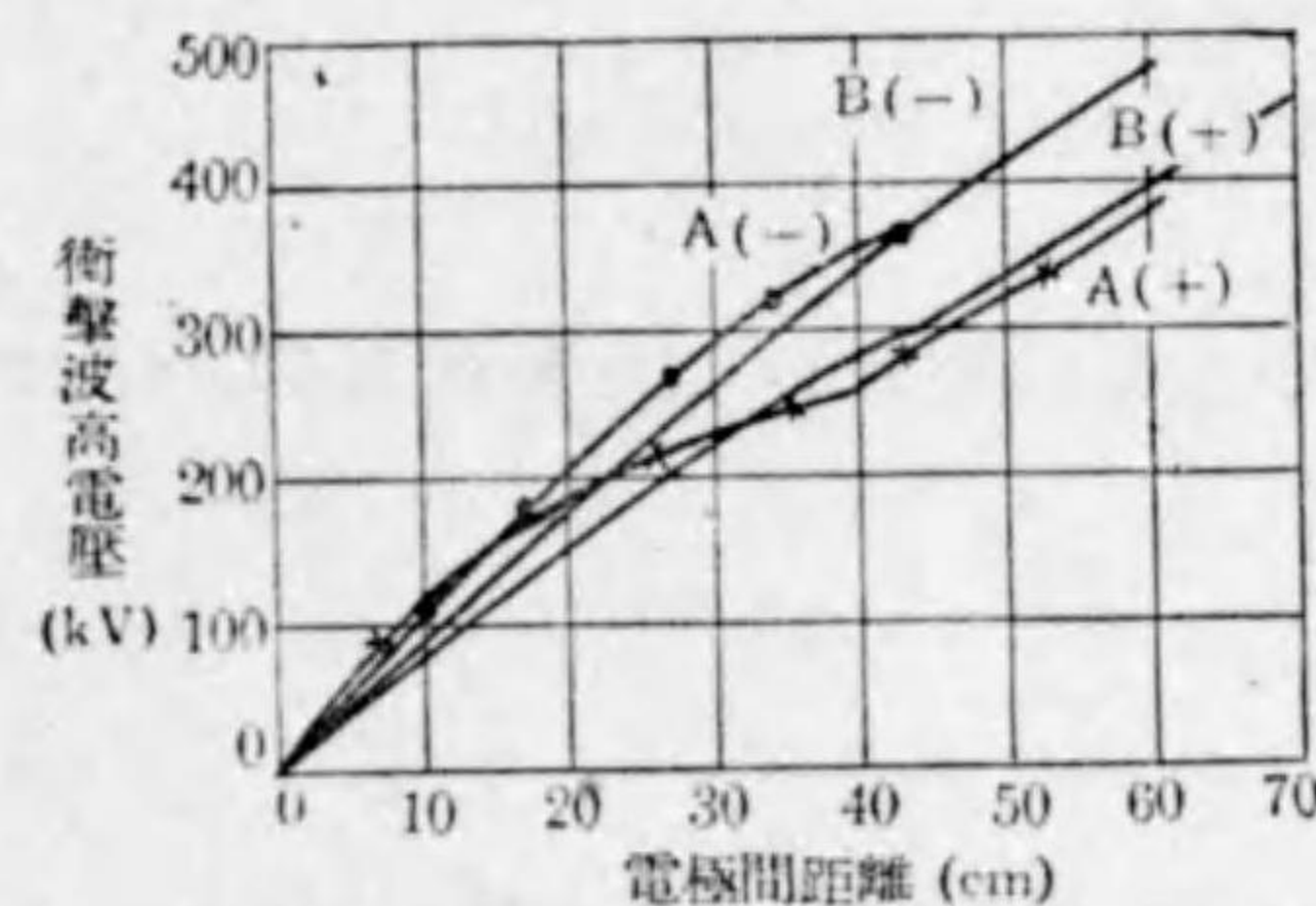
但し、A(+)及A(-)は石黒美種氏の實測値
B(+)及B(-)は歐洲に於ける8箇の實驗所に於ける實測値の平均値



$$H > (1.3S + 10) \text{ cm}$$

$$L > \frac{1}{2} S \text{ cm}$$

第19圖 使用した棒間隙配置

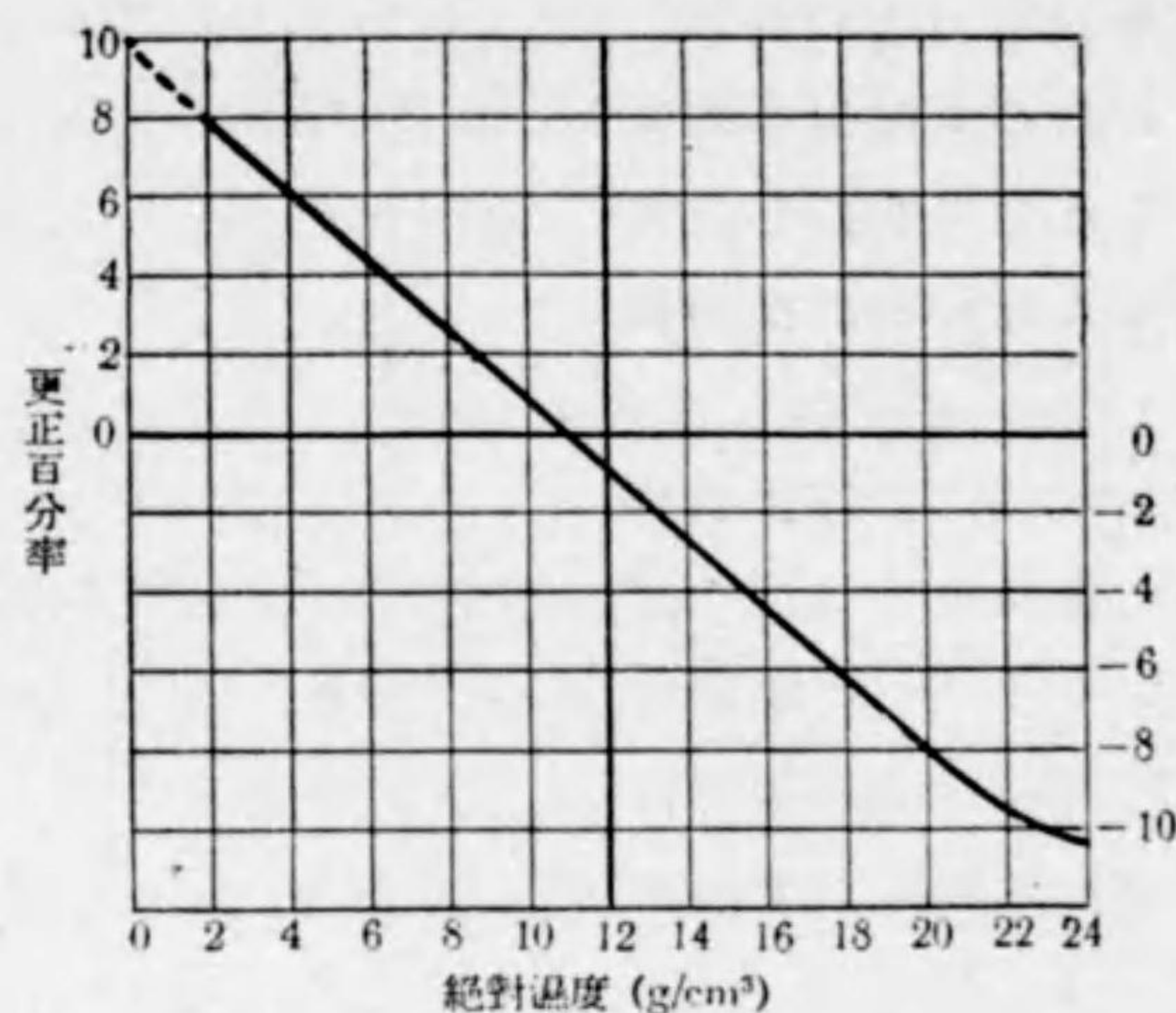


第20圖 角棒間隙の正負標準波に對する閃絡特性

此の現象は衝撃電圧を加へた場合に於ても同様であつて(+)の衝撃電圧を角棒間隙に加へた場合の更正率曲線を第21圖に示した。之によれば絶対湿度が約20 g/m^3 以下は大體直線であつて更正率として g/m^3 毎に約0.9%の割りに火花電圧が上ることを示して居る。此の結果は石黒美種氏の實測によるものであるが、萬國電氣工藝委員會(I.E.C)で採用した値と殆ど一致して居る。

第15圖に示した様に針端間隙に於ては火花電圧は大氣の濕度の影響を蒙るものであるが、針端間隙と同様に芒光コロナから火花放電に進む場合は電極の形狀如何に拘らず同様に濕度の影響を受け、濕度を増すと共に火花電圧が高くなるのである。



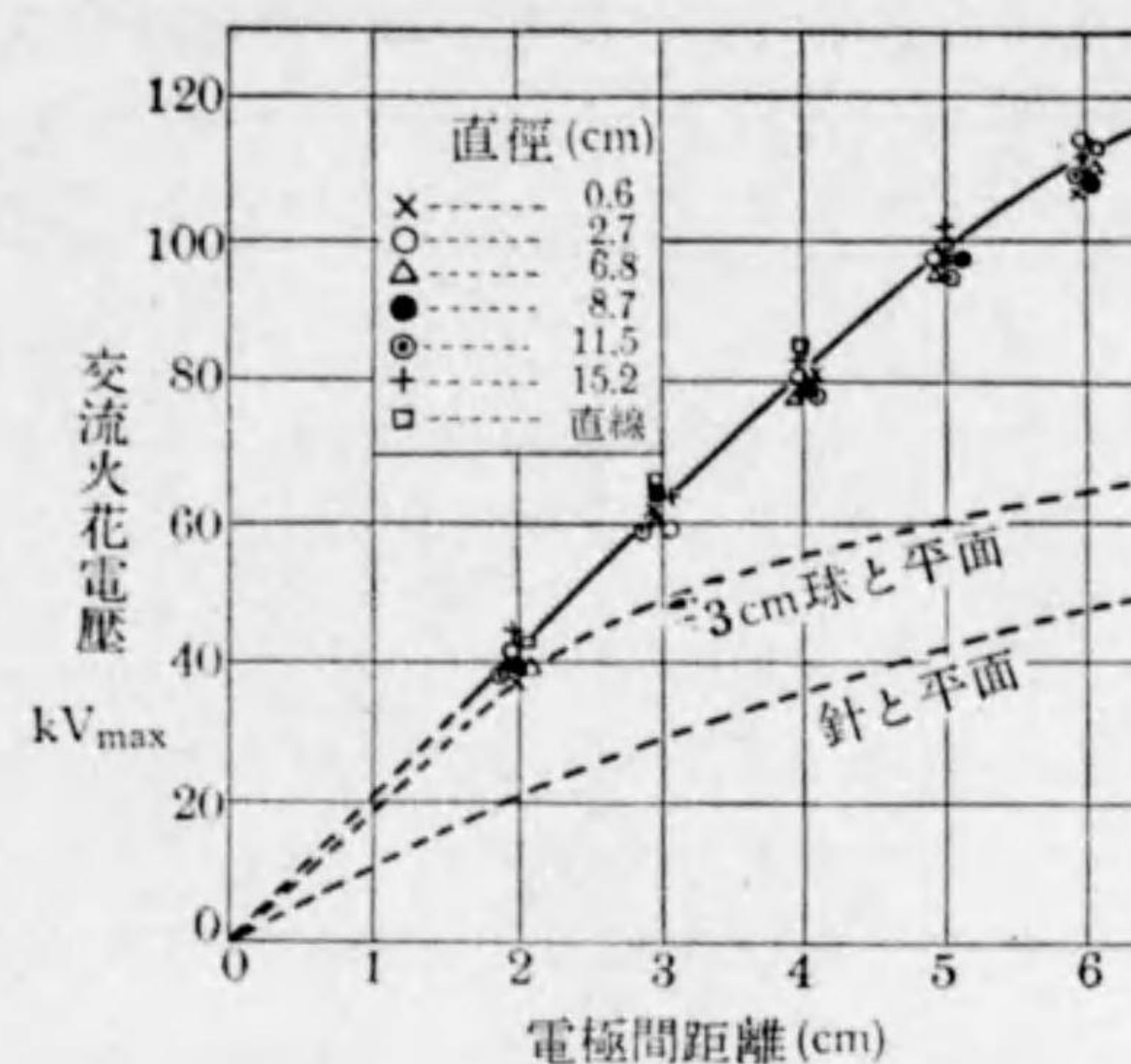


第 21 圖 角棒間隙 (正波) に對する温度修正率曲線

第 18 圖及第 20 圖の結果は上記の修正を加へて絶対湿度 11 g/m^3 に換算した値である。

2-6-4 双形電極

以上述べた如く空気中の放電現象は電極の形状が異なる場合にも本質的には餘り變りはないもので、電極の大きさに比し電極間の距離が大なる時は芒光コロナを發生し、更に電圧が昇れば火花放電となるのが普通である。然るに茲に是等と異つた放電現象を呈する電極がある。それは相對する方向に双物の様に鋭い稜角を有する電極であつて之を双形電極と呼ぶ。刀の様な電極を向き合はせても差支ないが、實驗を行ふには金屬板で圓筒を作り、その一端を双形に磨き上げたものが便利である。第 22 圖は一方に双形電極を用ひ、一方は平板電極を用ひた時の實測の結果で双形電極としては圓筒の

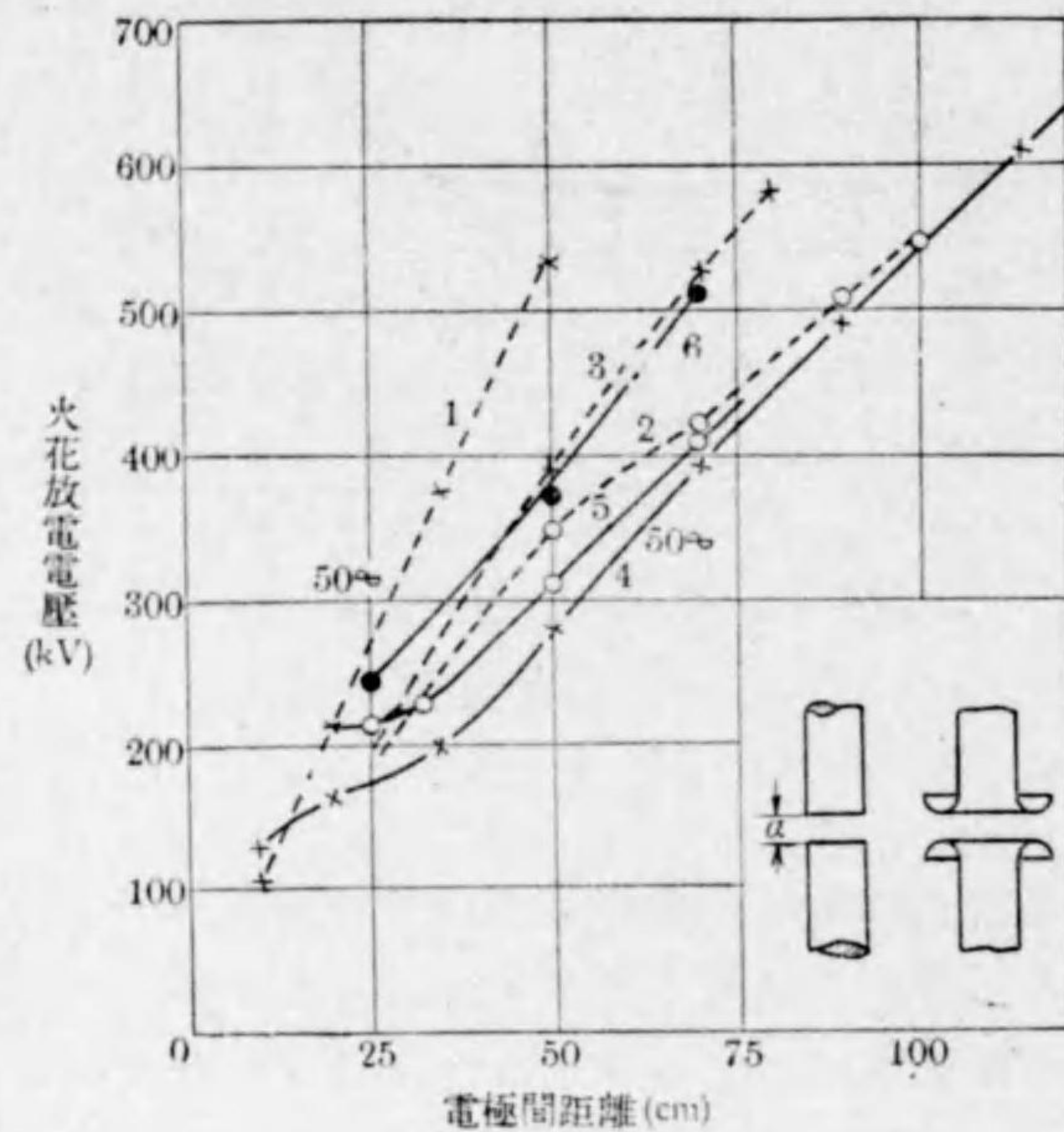


第 22 圖

一端に鋭い刃を作つたもので圓筒の直径は數種の異つたものを作つて試験すると何れも同様な結果を得たことを示して居る。又第 23 圖は二箇の圓筒電極の刃の方を向き合はせて測定した場合で、何れの場合でも針端電極等に比し著しく高い火花放電電圧を示して居る。尙放電の状況を觀察して見ると火花放電の前にコロナ放電は盛に出るが、芒光コロナは見られないで所謂暈光コロナのみが見られる。之が著しく異なる點で双形電極に於ては芒光コロナは發生し悪い状態が存在し、之が爲めに火花電圧が高くなると説明されて居る。若し刃の磨き方が不十分であるとか、或は細い針金を刃に引懸けるとかすると芒光コロナが發生し、遙かに低い電圧で火花放電を發生する。その火花電圧の値は大體に於て針端間隙の同じ電極間の距離に相當した値である。

又双形電極を衝擊電圧を以て試験すると、その火花電圧は交番電

壓を加へた場合に比し低い値となる。即ち針端間隙や棒間隙と變らない電壓値である。



- 1. 50~交流
 - 2. +衝撃電壓
 - 3. -衝撃電壓
 - 4. 50~交流
 - 5. +衝撃電壓
 - 6. -衝撃電壓
- 先端を丸くした電極

第 23 圖

今から約20年前に獨逸に於て套管、臺碍子等に双形金屬環を高壓側と接地側に取付け、その閃絡電壓を高くすることが考案せられ實施の上商品にまでなつて居たが、此の方法は閃絡電壓を上げる目的としては單に商用周波數交番電壓に對して有效であるが、雷の爲め

に發生した様な衝撃性の異常電壓に對しては全く効果が無いわけで實用上無價値と云つて差支ない。數年後には全然之は廢止されたのは寧ろ當然である。但し實驗室内に於て用ふるものならば之を利用して有效であらう。*

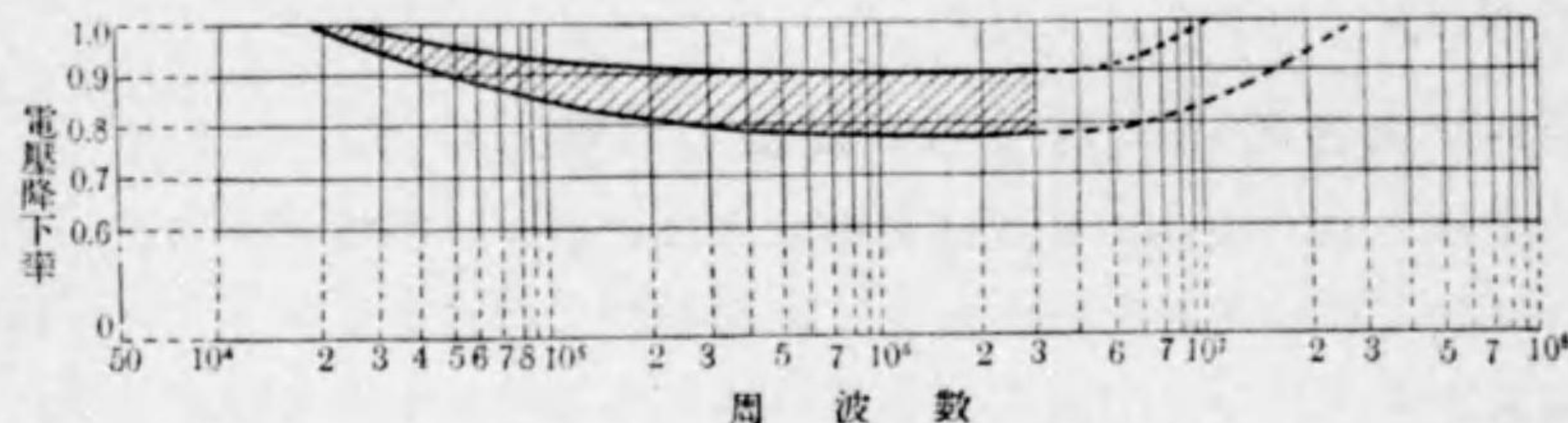
2.7 火花電壓に對する周波數の影響

電極距離が大ならざる球間隙及之に類似する平等電界に近い場合に於て交番電壓を加へた時の火花電壓は周波數が50サイクルから數千サイクルまで變つても略一定である。然るに周波數が更に増して二萬サイクルを越すと周波數の増加に伴ひ火花電壓は減少し始め、最初は急に、次に漸次緩かに低下し、 10^6 サイクル即ち 1000 キロサイクル附近になると略一定に近づき更に周波數を高くすると却つて火花電壓は昇る傾向が現はれる。

斯くの如く周波數の高くなるに伴ひ火花放電の起り易くなるのは次の様に説明されて居る。前に述べた如く中性分子が電離されて(+)イオンと電子とを生じ、電界の強い場合は電子は他の中性分子に附着して(-)イオンを形成する傾向は少く自由電子の状態になつて居る。従つてその移動能度は(+)イオンの移動能度に比し遙かに大きいから速かに移動して(+)イオンが残り火花間隙の中途に空間電荷の分布を生ずる。周波數が高い場合には此のイオンによる空間電荷が残留されて居る間に、電極の極性は逆になる故、新に陰極となつた電極と、此の空間電荷との中間では比較的高い電界を生ずる結果となるから、比較的低い電壓で火花放電となるのである。第24圖は Reukema 氏、Kampschulte 氏、Lassen 氏等の結果を綜合したもので、商用周波數の火花電壓値を 100 で表はし横軸は對數目盛で示した

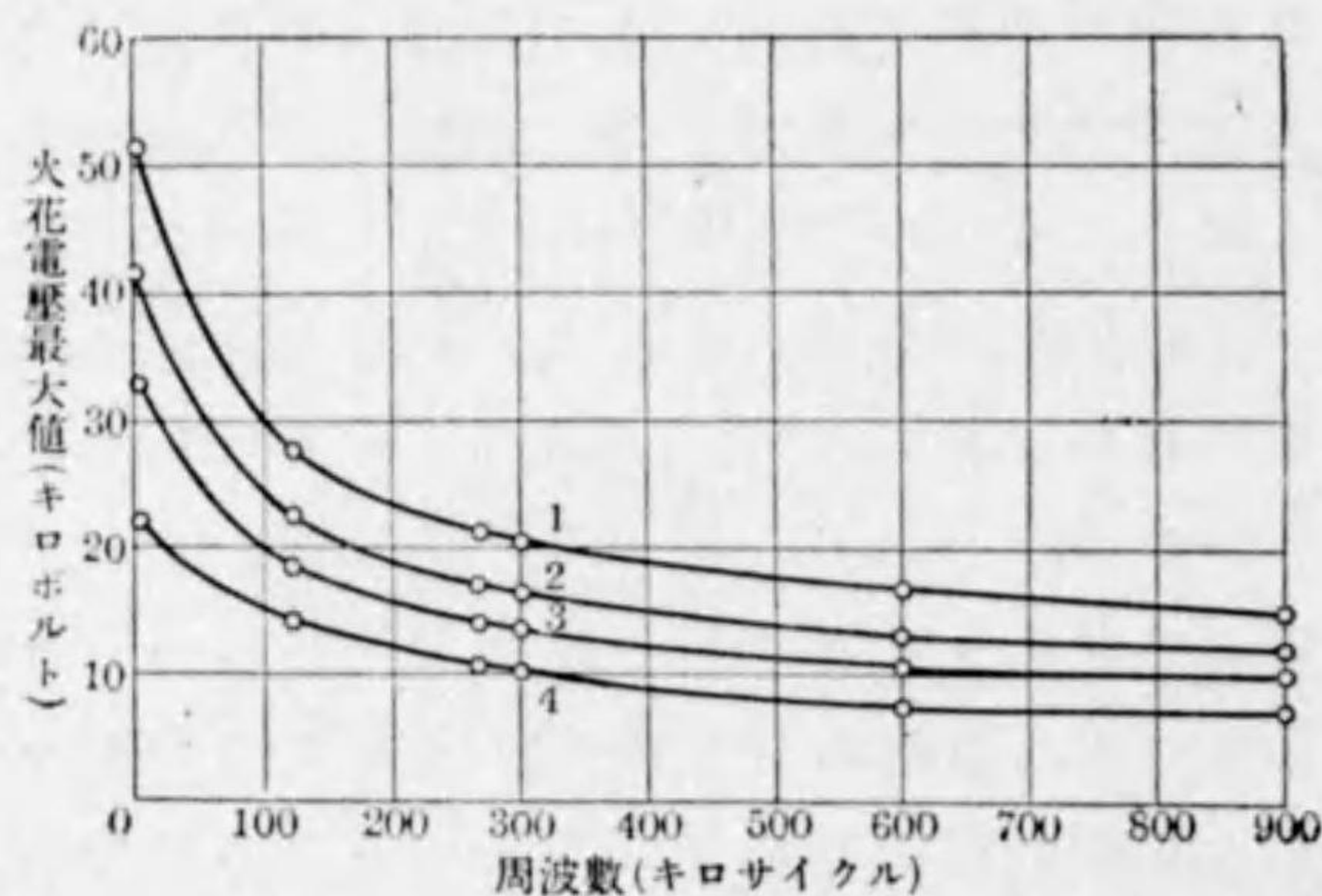
* 双形電極の放電現象に就ては本多銀士氏の詳細なる研究がある。(理化學研究所彙報。昭和三年三月及昭和四年五月)。

周波数の値であつて二萬サイクルまで火花電圧は變りなく、それより高い周波数になると下がり始め、又あとで昇り氣味となることを示して居る。



第 24 圖

次に針端間隙の如き不平等電界の場合は周波数の影響は一層顯著であつて E.W. Seward 氏 (J.I.E.E. Feb. 1939) が得た結果を第 25 圖に示した。此の圖で見ると 500 キロサイクルより高い周波数では火花電圧の低下は甚だ僅かである。



針端間隙
電極距離

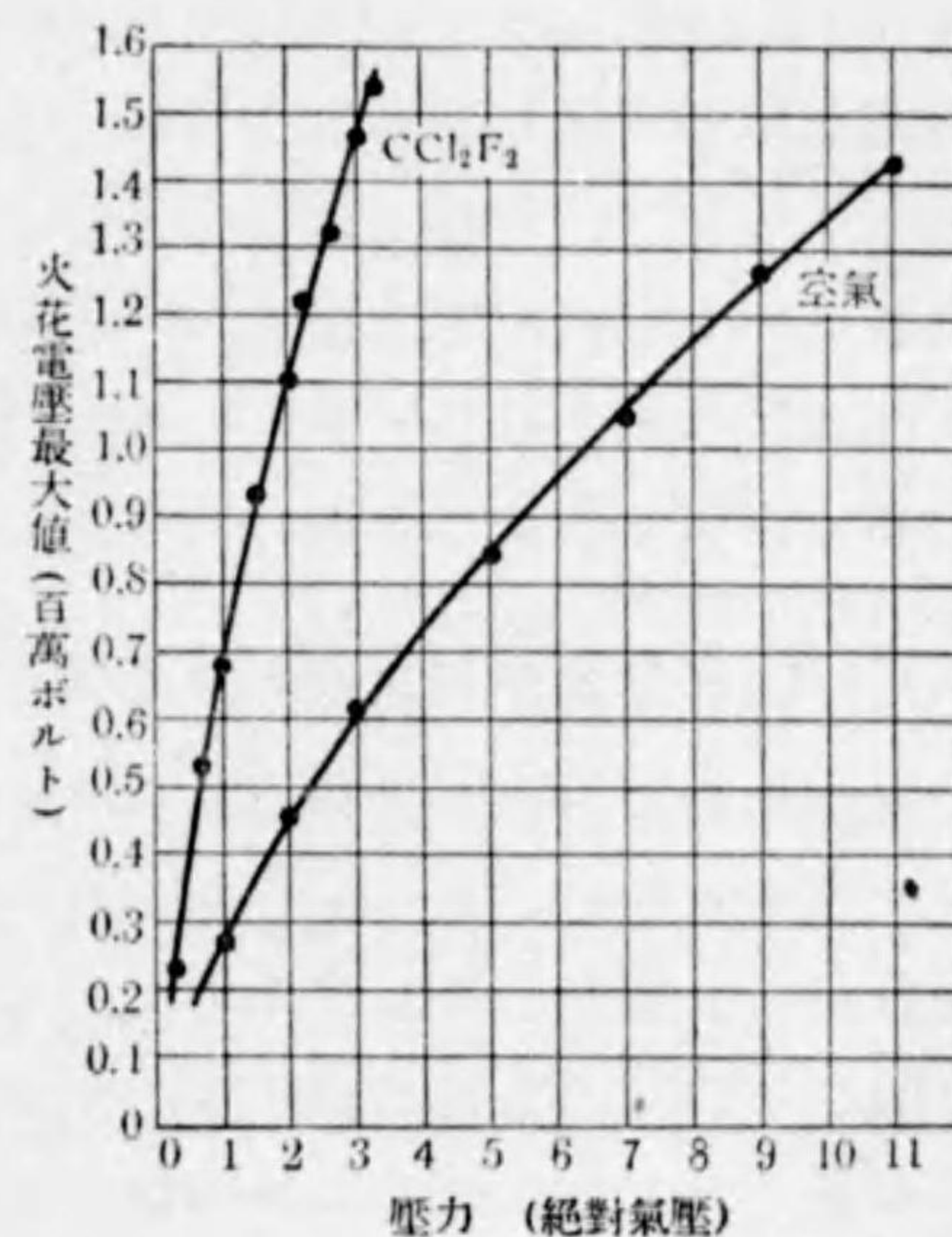
- 1. 60 mm
- 2. 40 mm
- 3. 30 mm
- 4. 20 mm

第 25 圖

2.8 空氣以外の氣體に於ける放電

高電壓工學の範圍で我々が取扱ふ氣體で空氣以外のものと云へば窒素があるが空氣の組成成分の内最も多い氣體であるから窒素中の放電現象は空氣中と大差ないと言つて宜しからう、此の外に近年實用の域に入つたのは炭化水素、即ちメタン CH_4 又はエタン C_2H_6 の水素の幾つかを弗素、鹽素の如きハロゲン元素で置換した氣體である。その内一番多く利用されて居るのは二弗化二鹽化メタン CCl_2F_2 であつて Freon ガスと呼ばれて居る化合物である。之は沸點 -29.8°C で 750°C までは發火せず、且空氣と混合したものが電氣の火花等で爆發の危険は無いと云はれて居る。

ハロゲン元素は先に述べた如く電子に對する親和力が大で、電離によつて電子が遊離しても直に中性分子に捉へられる傾向が強く、従つて遊離電子の状態で活躍する機會が少く、その結果火花放電が空氣中に比し起りにくいわけで、絶縁耐力が高いことが想像される。實際是等のハロゲン元素を含む Freon ガスの如きは第 26 圖に示す様に空氣又は窒素に比し數倍約二倍半の絶縁耐力を有す。その用途は比較的小さな容器に高電壓の装置を密閉して使用する様な場合、例へば病院内で



第 26 圖

高い電圧のエクソ線装置を用ふる場合に此のガスを填充した容器に高電圧装置を収めて居る。

此のガスは火花放電、550°C以上で熱せられた鐵、燃焼して居る油等の存在に於て毒ガスたる鹽素、フオスゲン COCl_2 を發生する故取扱は注意を要す。

3.0 液體誘電體

3.1 液體誘電體の種類

液體誘電體の種類は多數あるが吾々が實際取扱ふのは所謂絶縁油であつて、之には天然に出る石油原油より精製して得られた鑛油と、合成によつて作る合成絶縁油との二種がある。

鑛油の主成分はパラフィン族 ($\text{C}_n \text{H}_{2n+2}$)、ナフテン族 ($\text{C}_n \text{H}_{2n}$)、芳香族 ($\text{C}_n \text{H}_{2n+6}$) 等の炭化水素で尙不飽和炭化水素をも混入して居る。産地によつて或はパラフィン族が主となり、或はナフテン族が主となつたりする。合成絶縁油として現在實用に供せられて居るのは五鹽化ナフニルと、三鹽化ベンゾールとの混合物で不燃性であること、電弧に依る分解ガスが爆發性でないことが特徴である。然し現在は高價である爲め廣く用ひられない。

3.1.1 絶縁油中に於ける放電現象

絶縁油中に二つの電極を入れて之に電位差を與へると油が夾雜物、水分等を含まない時は電圧が低い間は極めて僅かの電流が通るだけである、電圧を次第に増して行くと或値で急に電流が増し同時に火花を観る、即ち此の際電圧と電流とを測定したならば丁度氣體の場合の第6圖に似た曲線が得られる。即ち此の場合も電流の急昇する所で油は電氣的に破壊したと稱するのである。而してその

電圧の値を破壊電圧と云ふ。然し絶縁油の破壊電圧は電極の形狀、寸法及電極間の距離を一定にして試験しても同一の油の試料に對して一定の値が得られないのが普通である。此の如く一定の破壊電圧の値が得られない最大の原因は油の中に入つて居る細塵、特に纖維質の細塵である。是等は油の淨化に濾紙を用ひたり、容器を綿布で拭つたりする時に紙又は木綿の纖維が極めて少量であるが油中に混入し浮游して居るものである。今電極間に電位差が與へられ、その周圍に電界を生ずると是等の細塵は電界の強い方に動き次第に電極の間に集つて來る、その結果電極間には細塵の集りで橋を架けた様な状態となり比較的低い電圧で放電が起る、之を要するに細塵の存在により破壊電圧は見懸け上低く現はれる。即ち油の絶縁耐力が見懸け上低くなる結果となる。又破壊電圧の値が低くなる許りでなく此の試験を數回繰返す時は破壊電圧値は甚だ不同で或は高く或は低く、相當廣い範圍に散在するのである。之は細塵の状態が試験の度毎に異なるからである。

次に油中に水分があると破壊電圧は低下することは當然であるが特に纖維質の細塵が存在する場合に水分に因る破壊電圧の低下は顯著である。依て絶縁油は使用に先立つて必ず適當の方法で處理し實用上差支ない程度に含有水分を除去しなければならない。而して水分含有の程度を知る爲めに一定の形狀、寸法を有する電極間に於て油の絶縁耐力の試験をなし、その破壊電圧の値を求め之により實用上差支ない程度に水分が除去されて居るか否かを検査するのである。油中に浮游する細塵も或る程度は容易に除去出来るが全く之を除去するには非常な手数を要する故、普通變壓器、遮斷器等に使用するものでは多少残つて居る状態にある。

絶縁油は使用中、濕氣を帯びた空氣に觸れると水分を吸収するも

のであるから外氣に觸れぬ様密閉出来る油槽又は容器を必要とする。次に油中破壊現象に深い關係を有するのは油に溶解して居る氣體である。常溫、常氣壓に於て絶縁油には酸素、窒素等の氣體を體積の數割に相當した量を溶解して居り之を真空中で處理して除去した状態で絶縁耐力の測定を行ふ時は破壊電壓は氣體を溶解して居る油に比し高い値を示す、又油が是等の氣體殊に酸素を溶解して居ると劣化の傾向が多い。依つて蓄電器、ケーブル等の紙の含浸に用ふる油は水分を十分除去した上更に真空處理で溶解した氣體を抜き出して使用する。

絶縁油より水分、細塵及溶解せる氣體を出來得る限り除去すればその絶縁耐力は著しく高くなり、750 kV/cm (20°C) と云ふ様な値が得られて居る (東京市電氣研究所、沼倉氏の測定値)。

然しながら此の如き程度にするには非常な手数を要し、又此の状態に永く存続させることも困難を伴ふ故、我々が日常取扱ふ絶縁油は實用上差支なき程度に止めることが經濟的である。依つて吾々が普通取扱ふ油には水分は可なりよく除去してあるが多少の細塵が残り又或程度氣體が溶解して居る状態と承知すべきである。

従つて實用に供せられる絶縁油の絶縁耐力は上記の値より遙かに低くなる、その値は電極の形、距離等で相當廣い範圍に變るのであるが、實際の高電壓絶縁の問題と直接關係の多い場合は電極距離の相當大なる場合で約 90 kV/cm の程度であらう。之に就て實測の例としては米國の D. E. Miner 氏は 87 kV/cm、英國の B. L. Gootlet 氏は 96.5 kV/cm なる値を出して居る。但し油は使用中多少悪くなることを考へ、絶縁の設計で基準に取るべき油の絶縁耐力は此の値の約半分位、空氣に比して一般に 5 倍乃至 8 倍位に取つて宜しからう。勿論使用中水分を吸収し絶縁耐力が低下すれば淨化装置により處理

すれば回復する。此の場合も劣化の程度及回復の程度を檢查するには規程で定まつた試験装置で油の絶縁耐力を測定し、その破壊電壓の値から判断するのである。

實際の高電壓の絶縁に油を使用する場合には成るべく單獨に油だけでなく、固體絶縁物も一緒に用ひることが推奨されて居る。蓋し前述の如く油の中には多少細塵の混入は免れない故、電界の作用により細塵が電界の強い方に移動し集中する危険があるからである。依つて細塵の運動及油中のイオンの運動を妨ぐる様に遮壁を油中に挿入することが行はれて居る。

合成絶縁油の絶縁耐力も大體鑛油と同じ程度で五鹽化デフェニルの實測値を見るに鑛油より少し許り高い値が示されて居る。

衝撃電壓を加へた場合の絶縁油の破壊電壓は商用周波數の交番電壓を加へた場合よりも高い、恐らくは空氣中の如く電極の形狀により却て低くなることはないと思はれる。何れにしても實測の結果は餘り多數でないのと、各實驗者の結果は多少の差があり確實な事は云へない。

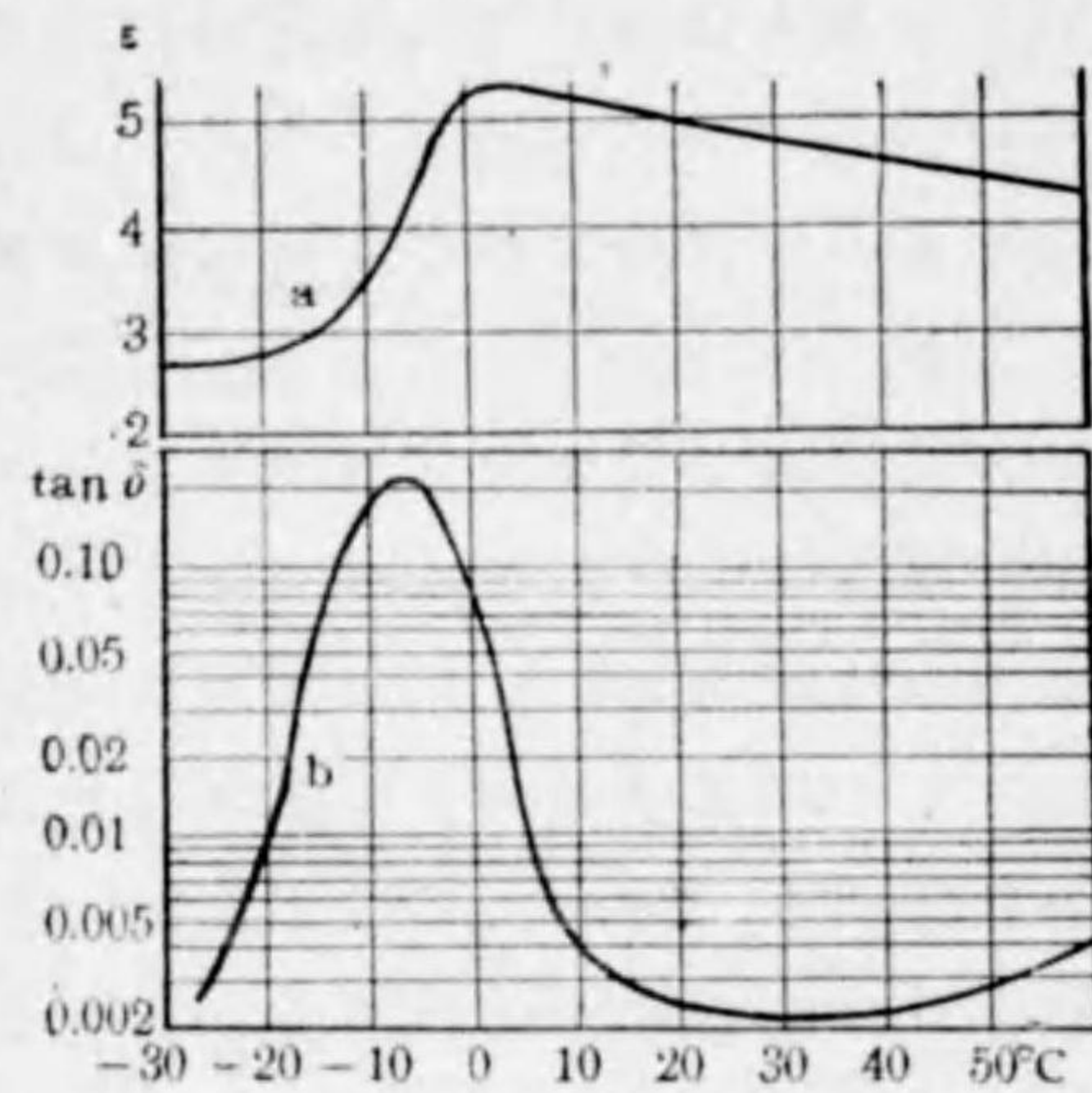
3.2 誘電率と誘電體損失

絶縁油の誘電率は鑛油の方は 2.2~2.45 位、合成絶縁油で現在最も多く使用されて居る種類では 5.1~5.2 の程度である。

一般に固體絶縁材料は交流の電界に於て損失を生ずる、之を誘電體損失と呼んで居るが絶縁油に於ても同様に誘電體損失が発生する。然し其の程度は固體絶縁材料に比して甚だ少い。

材料の誘電體損失の程度を表はすに普通誘電體力率又は損失角の正切即ち $\tan \delta$ が用ひられて居る。絶縁油は十分淨化されたものは $\tan \delta$ の値が 10×10^{-4} の程度である。固體絶縁材料で此の程度に

$\tan \delta$ の小なるものは極めて少い。尙誘電體損失係數として $\epsilon \tan \delta$ (ϵ は誘電率)なるものが材料の性質を比較するには更に合理的であるが、油に對しては 0.0023 の程度である。但し油が不純物を含む時、特に濕氣を含む時は $\tan \delta$ 又は $\epsilon \tan \delta$ は大きくなる。又油が使用中劣化すれば $\tan \delta$ は大となる。依つて逆に $\tan \delta$ を測定すれば油の劣化



溫度に依る五鹽化デフェニルの
誘電體力率 $\tan \delta$ (b 曲線)
誘電率 ϵ (a 曲線)
の變化

第 27 圖

4.0 固體誘電體

4.1 固體誘電體の種類

固體誘電體に屬する物質の品種は極めて多く、硫黃の如き單一の元素より成るものから、水晶の如き簡単な化合物、雲母の如き天然に出る礦物、更に複雑な有機化合物に至るまで絶縁材料として實用上重要な種類のみを數へ上げてても夥しい數となるのである。従つ

の程度を知ることが出来る。

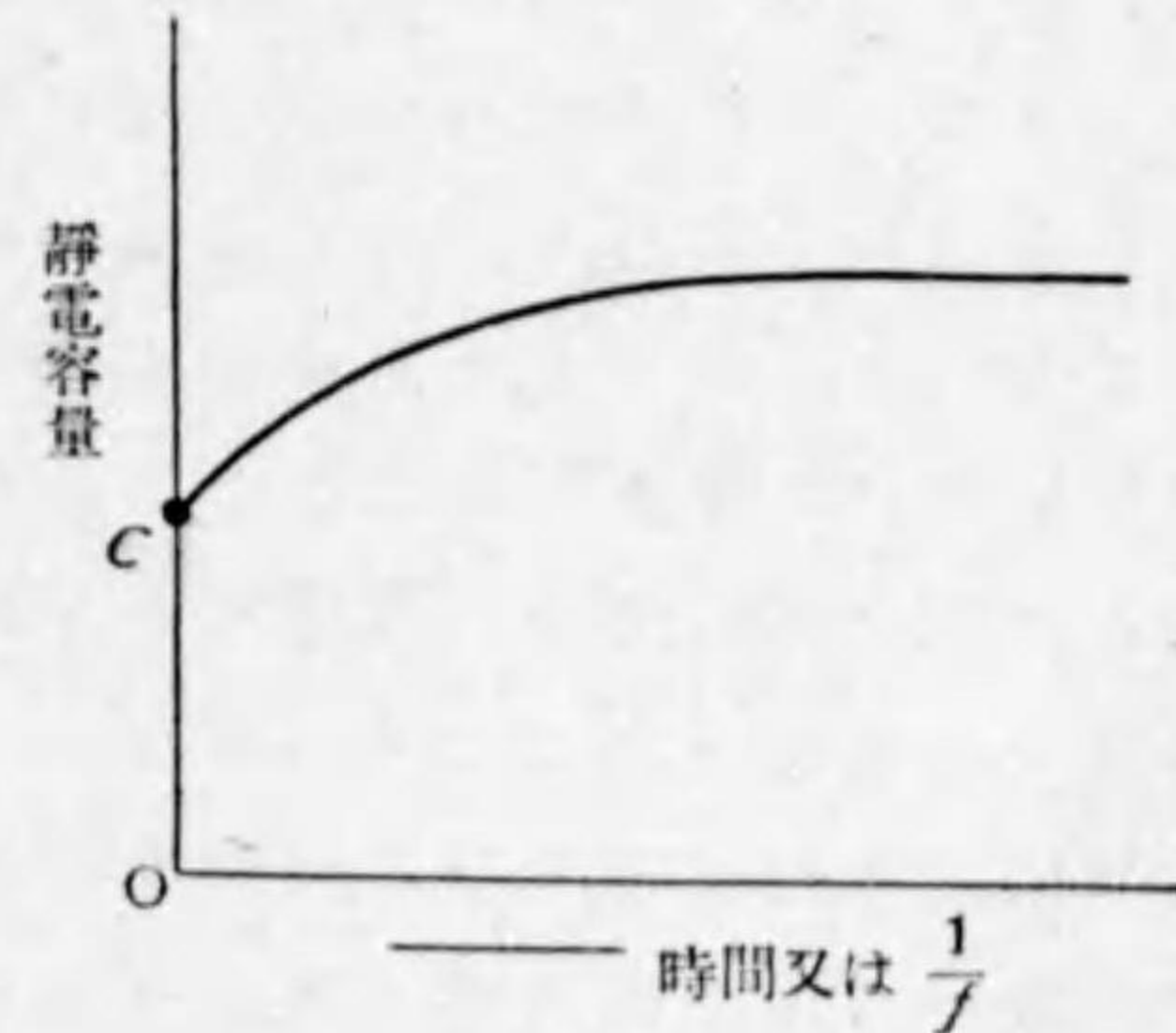
次に溫度の變化に伴ふ誘電體損失の變化は淨化された絶縁油に於ては著しくない、90°Cに於ける損失が20°Cに於ける損失より僅かに大であると云ふ實測の結果がある。不純物を含む油は溫度上昇に伴ひ誘電體損失も著しく増す。合成絶縁油に於ては ϵ 及 $\tan \delta$ の値は第27圖に示す様に 0°C 附近に於て溫度の變化に伴ひ著しく變化する。

て是等の電氣的性質を一つ一つ述べるわけには行かない、主として全般に亘つて共通とも云ふべき諸點、其の他實用上重要な事項を拾ひ上げて簡単に述べる外はない。

4.2 誘電率

固體誘電體にして絶縁材料として使用せらるゝものには其の誘電率はパラフィン等の2位から大抵のものは10以下である。然し特別に大きいものとしてはチタンの酸化物でルチル (Rutile) と呼ばれるものは結晶軸の方向に於ては 173 と云ふ様な非常に大なる誘電率を有して居る。之を利用し適當なる配合材料を加へて作つた窯業製品が市場にあるが、その誘電率は40乃至60である。固體の誘電率は溫度の變化に伴ひ多少その値が變るが、實用上に於て起り得る溫度變動の範圍内では大して問題にならない程度である。

誘電率を測定するには普通は蓄電器の電極間に測定せんとする誘電體を挟み、その静電容量を測定し、同じ電極間に空氣だけ存在して居る場合の静電容量との比を求めるのである。所が直流を以て測定する場合に、充電の時間の長さが變ると、その誘電體を入れた場合の静電容量の實測値が多少變るのである。即ち時間が短くなると静電容量が少く出る、交流で測定する場合は周波數が變ると同様に變る。即ち周波數が増すと静電容量は外見上少くなつた様な結果を示す。之は後に述べる誘電



第 28 圖

體吸收なる性能が影響を現はしたので、實測値を縦軸に、充電時間の長さ又は周波数の逆數 $\frac{1}{f}$ を横軸に取つて静電容量の曲線を引くと第28圖の如くなり、此の曲線を時間零又は周波數無限大の處まで延長するとOCなる充電時間零又は周波數無限大となつたと假定した場合の静電容量の値を示すことは説明するまでもない、OCの値を此の蓄電器の幾何容量 (Geometric capacity) と云ふ。

4.2.1 固体誘電体に於ける導電現象

固体絶縁物を二つの電極間に挟み、電極間に電位差を加へる時には僅かではあるが電流が通る。絶縁物とは云ひながらその導電率は全然零ではない。但し電流の通路に就ては二つあることに注目せねばならぬ。その一つは電極に挟まれた絶縁物の實質を通る電流と更に他の一つは絶縁物の表面、即ち大氣中であれば絶縁物と空氣との界面を通つて流るゝ電流がある。

前者は主として絶縁物の電氣的性質によつて左右されるものであるが、後者は表面漏洩電流と呼ばれ絶縁物の性質にも關係あるも主として空氣中の水分即ち大氣の湿度によつて著しく變動するものである。絶縁材料の固有抵抗を求める場合には表面漏洩電流を除く様にして實質を通過する電流のみを測り、その結果から算出するのである。従つて表面漏洩電流は入つてないと云ふ意味を表はす目的で特に體積固有抵抗と云ふ事がある。之に對して表面漏洩電流だけを考へて、その導電状態を比較して示す目的で表面漏洩抵抗なる名稱を用ふることがある。

體積固有抵抗を求むるに當り表面漏洩電流を除外するには電極を物質中に深く埋入する事も考へられるが之は液狀又は粉末狀より固めて所要の形狀となし得る様な材料でない限り實行が困難で

あるから普通は電極の外側に補助電極を設け、主電極には材料の實質を通る電流のみが集まり表面漏洩電流は補助電極に集る様にして兩者を區別して測定するのである。

扱て此の如く電流を分離して測定出来たものとして、先づ主電極に集る電流に就てのみ説明して行こうと思ふ。第一に電極間に加はる電壓は直流電壓の場合だけを考へる。且此の電壓が急に電極の間に加つたとした場合如何なる電流が通るか。電極の間は固体絶縁物、即ち誘電體で充たされて居るから、之は一つの蓄電器と見ることが出来る。従つて電壓が急に加はる時には充電電流が通る。此の時の電流は普通蓄電器の充電現象として電氣回路の理論で取扱ふものであるが、極めて短い時間で此の現象は所謂過度現象として終了してしまふ。若し此の絶縁材料の導電性が零であれば電流も亦無くなるのであるが、普通は僅かの電流が引續き通る。今此の僅かの電流を測定し得る様な非常に感度の高い檢流計でその電流がその後時間の経過するに伴つて如何に變つて行くかを觀察したものと假定すれば、電流は極めて徐々ではあるが次第に減少して行くのが明に認められる。此の點が普通の金屬導體の導電現象とは著しく異なる點で金屬抵抗體ならば電壓が一定ならば電流も亦一定となり、電壓を電流で割れば抵抗の値が出る。然るに誘電體中の導電現象では電流が一定の値になる迄に非常に長い時間を要する。依つて實用上の便利の爲めに電壓を加へてから一分間経過した時の讀みに相當する電流を求め、之で電壓を除した商を抵抗の値とすることがあるが、之は理論上からは意味のない値である。理論上からは電流が一定の値に落着くまで待つてその値を求めるのが合理的である。又之から抵抗を算出し、更に誘電體の電流の部分の厚さと電流の方向と直角をなす切斷面積から固有抵抗の勘定が出来る。

今電壓を加へてから時間 t 秒経過した時の電流を $I_1(t)$ で示し最後に一定値に達した電流の値を i_0 で示せば $I_1(t)$ は

$$I_1(t) = i_0 + i_1(t) \dots\dots\dots(15)$$

なる形で表はし得る、茲に $i_1(t)$ は t が大となるに従ひ次第に減じ終に零となる電流の部分である。但し t の小なる間はその値は i_0 より遙かに大きく、數倍、數十倍になることもある。

$i_1(t)$ は何れの誘電體に於ても多少に拘らず存在するもので、之を誘電體吸收による電流と云ふ。蓋し電流が i_0 のみとなつた時に電源から切り離して、兩極を檢流計を通じて短絡すれば、蓄電器の放電と同じ様に電極間の靜電容量に相當して放電々流が通るが、之は短時間で終了し其の後に尙引續き電流の通るのが明かに認められる、此の電流も時間と共に減少し終に零となるのであるが短絡後 t 秒を経た時の値を $I_2(t)$ で示せば

$$I_2(t) = i_2(t) \dots\dots\dots(16)$$

なる形で表はし得べく、誘電體の多くのものは $i_2(t)$ は $i_1(t)$ に近い値を示す。

$$\text{即ち } i_1(t) \approx -i_2(t) \dots\dots\dots(17)$$

此の關係は恰も $i_1(t)$ で示された電流で運ばれた電荷が誘電體內に吸收されたのが電壓を取去り更に短絡した爲めに再び放出された様な觀がある。依つて誘電體吸收による電流と云ふ名稱がある所以である。

但し普通に云ふ氣體、液體の吸收される場合の現象とは全然異り別箇の電氣的現象であることは云ふまでもない。此の誘電體吸收現象は誘電體が交番電界に在る場合に生ずる損失、即ち所謂誘電體損失と極めて密接の關係がある。之に就ては後に述べる。

$i_1(t)$ が時間と共に變化する狀況を示す實驗式としては次の如き

ものがある。

$$(i) \quad i_1(t) = at^{-m} \dots\dots\dots(18)$$

$$(ii) \quad i_1(t) = a e^{-bt} \dots\dots\dots(19)$$

$$(iii) \quad i_1'(t) = a_1 e^{-\lambda_1 t} + a_2 e^{-\lambda_2 t} + a_3 e^{-\lambda_3 t} \dots\dots\dots(20)$$

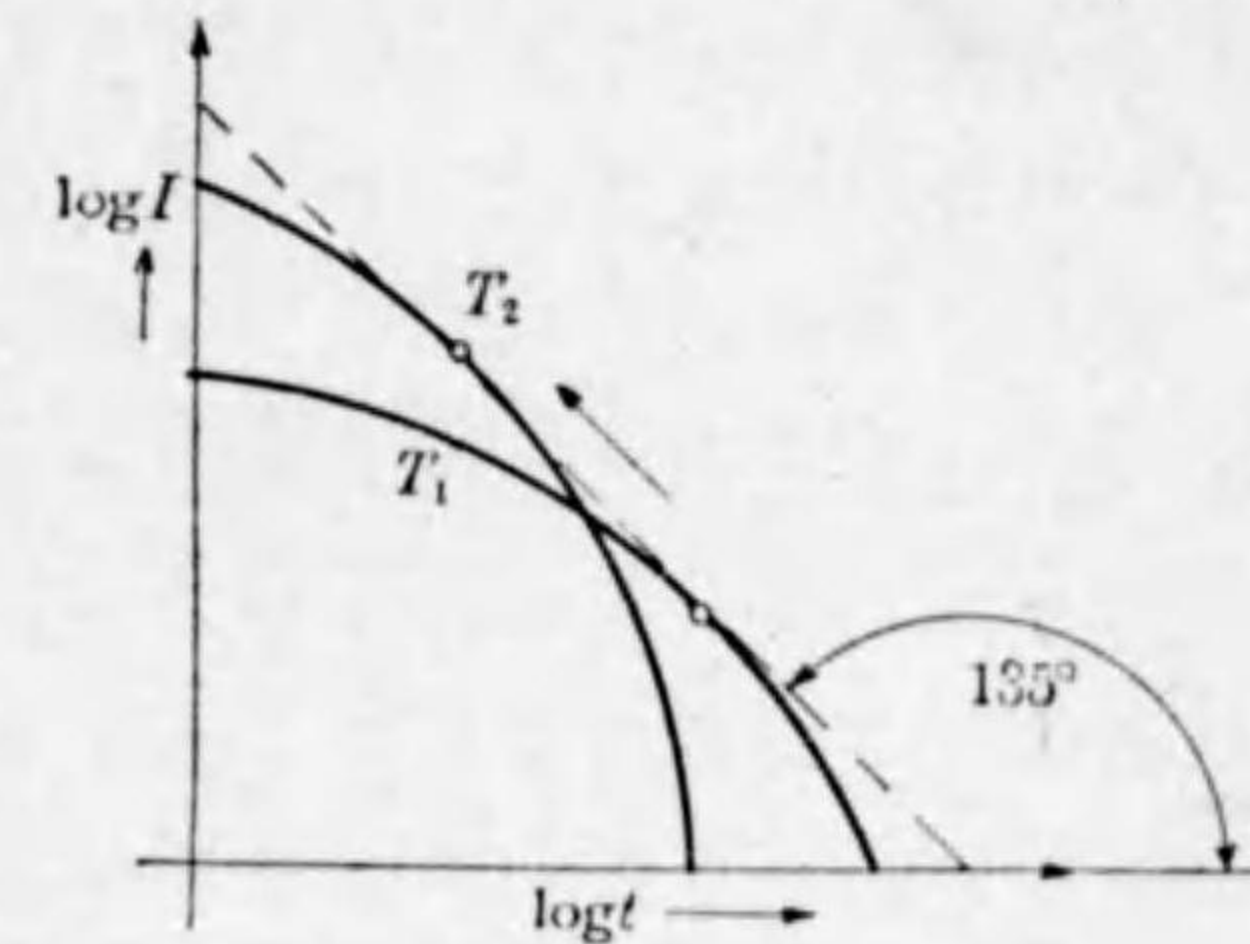
次に電極間に加へた電壓を E_0 とし、電極間の幾何容量を C とすれば

$$i_1(t) = B C E_0 \varphi(t)$$

なる關係がある。即ち誘電體吸收による電流は E_0 及 C に比例することが示されて居る。但し B は定數、 $\varphi(t)$ は時間 t の函數である。

溫度が變化すれば $i_1(t)$ は相當大なる影響を受ける、即ち t の小なる間は電流は溫度の上昇と共に増すのであるが、その代り減少する率が増して早く小さくなる。之を圖示すれば第29圖の如くなる。

但し此の圖は對數目盛で示してある。 T_1 なる曲線は溫度 T_1 なる場合、 T_1 より高い溫度 T_2 なる場合は曲線 T_2 で示してある。



第 29 圖

次に i_0 に就て述べれば i_0 に對する溫度の影響も相當著しいのである。 i_0 の變化を述べる代りに i_0 の値から算出した導電率 σ

又は固有抵抗 ρ が溫度により如何に變化するかを述べよう。

多くの誘電體に於て σ が溫度により變化する狀況は下の實驗式で表はし得る。

$$\sigma_T = \sigma_0 e^{\alpha T} \dots\dots\dots(21)$$

σ_T は溫度 T の時の導電率、

σ_0 は溫度零の時の導電率、

α は誘電體の種類により異なる數で 0.04 から 0.13 の間にある。此

の関係で示された温度の影響が相当大なる事は 10°C の温度上昇により $\alpha=0.04$ なる時は導電率は約1.5倍となり、

$\alpha=0.13$ なる時は導電率は約3.6倍になる事を示して居る事で了解される事と思ふ。

實用上には導電率又は固有抵抗よりも抵抗の値が温度によつて如何に変化するかが直接問題になるので抵抗と温度との関係を示す実験式が種々の誘電體に對して與へられて居る。

ガラスに對しては下の実験式がある。

$$\log R = A + \frac{B}{T} \dots\dots\dots(22)$$

茲に R は抵抗, T は絶對温度, A 及 B はガラスの種類によつて異なる値となる定數である。

此の実験式はガラスのみならず、磁器、その他の窯業製品に對しても大體適用出来ることが實驗上證明されて居る。

又合成樹脂に對しては $\log R = A + \frac{B}{T - T_0}$ なる実験式が適用出来ると云はれて居る。但し T_0 は物質により異なる値を與へる。

之を要するに誘電體と金屬導體と著しく異なる點はその固有抵抗が桁違ひの大差あるのみならず、金屬では温度の上昇と共に抵抗は増すのであるに對し、誘電體では温度の上昇と共に抵抗の値が著しく減少する所にある。従つて攝氏數百度の温度になると、誘電體に化學變化が起らない場合でもその固有抵抗は著しく減少し常温に於て絶緣良好なる材料も殆んど絶緣物としての資格が消滅してしまふのが普通である。依つて高温度に於て相當高い電壓を受ける場合例へば内燃機の點火栓に用ふる絶緣材料の如きは特殊の材料が要求される。

次に金屬導體に於てはオームの法則が正確に適用出来て、抵抗の値は電流又は電壓の値如何に拘らず一定であるが誘電體に於ては

オームの法則は必しも適用出来ない。加はる電壓が比較的 low 従つて誘電體の内部に於ける電界の強さが低い場合には近似的にオームの法則は成立つのであるが電界の強さが著しく高くなると誘電體の導電率は著しく増す傾向が現はれる。Poole氏が雲母に就て實驗して得たものは下式である。

$$\log \sigma = a + b\mathcal{E} \dots\dots\dots(25)$$

但し σ は導電率,

\mathcal{E} は電界の強さ,

a 及 b は定數,

勿論此の式は電界の強さの値が廣い範圍に變る場合には適用出来ない。然し此の式により電界の強さが大となると導電率が相當大きくなることが示されて居る。此の事實は誘電體の電氣的破壊現象を論ずる場合に重要なるものである。

誘電體の中で特に濕氣を吸収し易い材料、例へば紙、布、及その加工品等の纖維質絶緣材料に於てはその固有抵抗の値が吸収した水分の量の多少によつて著しく變る。大氣中に在つては普通水分を吸収して居るが、之を乾燥させるとその抵抗の値は高くなるも再び大氣中に放置すれば抵抗は再び下降する。

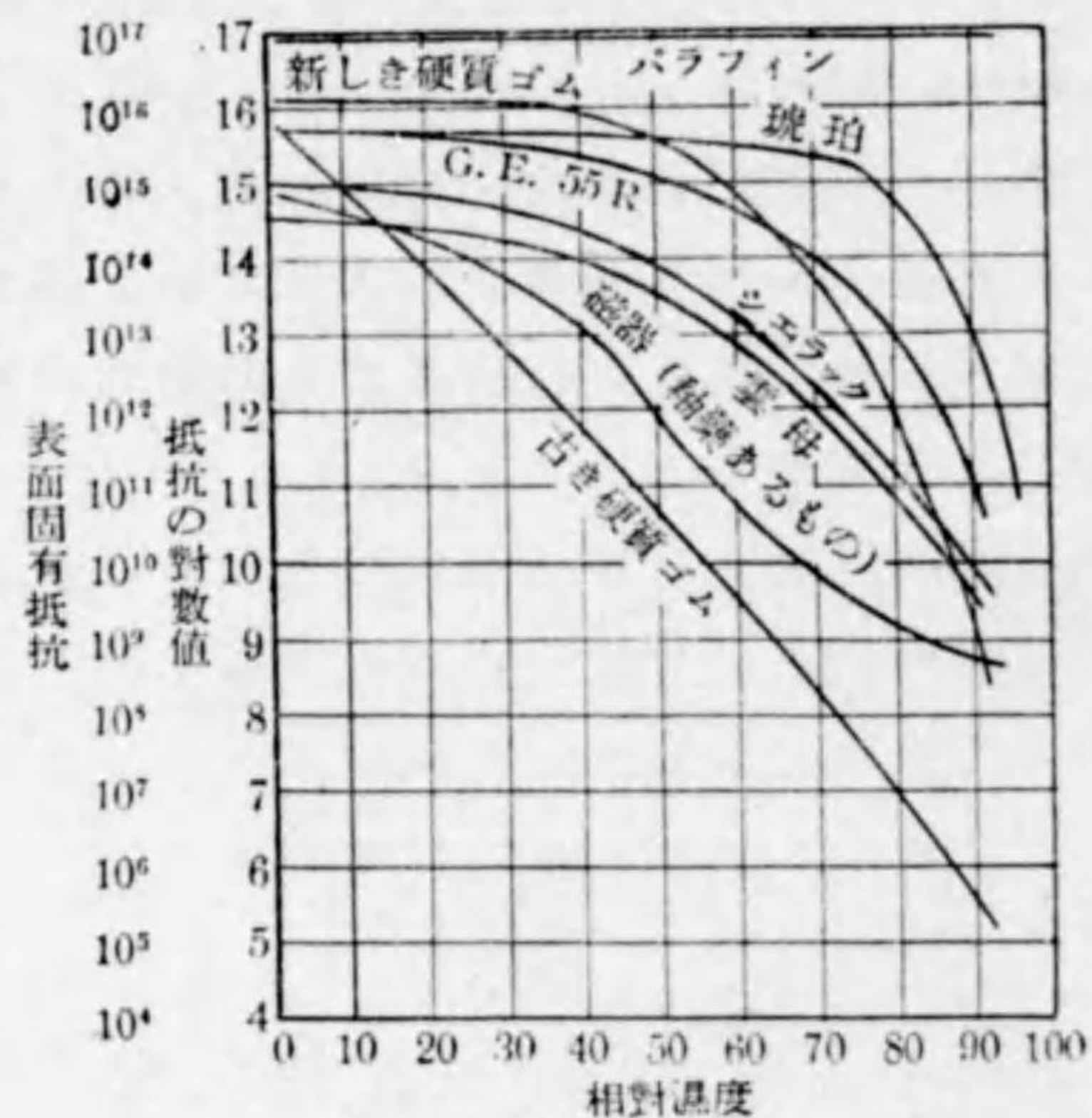
電氣機械の絶緣には普通是等の材料を使用して居るが、逆に絶緣抵抗を測定して材料中に含まれて居る水分の多寡を判別し、乾燥の必要ありや否やを決定する手段として絶緣抵抗測定が行はれる。

4.2.2 表面漏洩電流と表面固有抵抗

表面漏洩電流は前に述べた如く誘電體が大氣中に置かれた場合には大氣の濕度に依つて著しく増減するものである。即ち誘電體の表面に出來た水の薄い膜が主として導電に與るものと認められ

て居る。従つて水に濡れる材料と濡れない材料では著しい差が認められる。濡れない材料は例へばパラフィン、セレン、蜜臘の類、琥珀、ロヂン等の樹脂類、ポリスチロールの様な合成樹脂、硫黄の如きものである。是等の材料に於ては水分が附着するも、薄膜状に擴散せず、細小なる水滴となり相互に連絡しない爲めに導電路として水分が連続しないからである。

第30圖は表面固有抵抗の値として大氣の湿度によつて變化する



第 30 圖

狀況を示したもので縦軸には對數で表はした表面抵抗、横軸は相對湿度である。材料によつては乾燥時の表面抵抗が、90%の相對湿度に於て數百萬分の一に低下することを示して居る。90%の相對湿度は東京に於て梅雨時期には珍しいことでない。尙絶縁物は極めて僅かであるが水に溶解する性質のある場合と全然不溶解性な

る場合とで著しい差がある。例へばガラスはアルカリ金属を含み僅かではあるが水に溶けるが、熔融水晶は外見上は似て居ても水に溶けない爲めガラスの方は湿度の増加に伴ひ表面抵抗が著しく下るが水晶はそれ程でもない。ガラスの場合は僅かながら水に溶ければ電解質であるので導電性が純水に比し大きい爲めである。軸藥をかけた磁器は表面の軸藥がガラスに似た成分である爲め表面抵抗に關する限りガラスによく似た性質を示すのである。

硬質ゴム(エポナイト)は新しい間は表面抵抗の低下は比較的少いが、古くなるに従ひ表面の色も變り導電性の化合物を生ずる結果、圖に示す様に著しく低下する。此の材料の表面が變質する大なる原因は光線殊に紫外線の作用であると云はれて居るから、此の材料を使用した精密なる計測器類は日光の直射は絶対に之を避ける様に平常は成るべく光の當らない所に置くべきである。

表面抵抗は體積固有抵抗と異つて温度の影響を受けることが少い。通常起る範圍の室温の變動に對しては變り無いと假定して差支ない程度である。

4.3 交番電界に於ける誘電體損失

誘電體は交番電界に置けば内部に熱を發生する、之は電氣エネルギーの一部が熱となる爲めで交番電界を作つて居る電源から供給されたものである。即ちオーム損と同様にそれだけ損失となるわけで之を誘電體損失と云ふ。之は電壓の低い回路では問題にならぬ程微量であるが電壓が高くなつても商用周波數では極めて僅かである。然し誘電體は金属と異り熱の不良導體である爲めに内部に發生した熱が外部に發散されにくい結果、電壓が特に高い場合、絶縁の厚い場合等には内部の温度上昇が問題になり後に述べる様に電

氣的破壊の原因にもなるので近年特に重要視されて来た。

又周波数が高くなり無線通信等に用ふる如き高周波数に於ては元來誘電體損は周波数に略比例する關係上損失は相當の量となり温度上昇も著しくなる爲め、近年は特に注目され研究の對象となつて居る。

實用上誘電體損失が問題となる箇所は必ず蓄電器を形成する様な金屬導體、及誘電體の配置である。例へばケーブル、電氣機械の電機子線輪、套管の如きである、従つて電極となるべき導體間に電壓が加はつたならば必ず靜電容量に相當した充電々流が流入するわけである。若し損失が全然無ければ電流の位相は電壓の位相に對し正確に 90° 進んで居る筈である。然るに實際は損失がある爲めに進みの角は 90° より δ だけ少い角となる。即ち $e = E_0 \sin \omega t$ の電壓に對し $i = I \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \delta)$ なる電流が通る。

通常力率は $\cos \varphi$ なる形で表はされて居るが此の場合 $\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta$ である。然し絶縁性良好なる誘電體に於ては δ は極めて小さいから力率の値は δ をラジアンで表し $\cos \varphi = \sin \delta \approx \tan \delta$ なる關係があるので $\tan \delta$ を屢々誘電體力率と云ふ。

δ が 0.1 ラジアン、即ち 6° 以内に於ては此の關係を認めて誤差は殆ど無い。損失の値は $W = E^2 \omega C \tan \delta$ で表し得る。但し E は電壓實効値、 C は靜電容量(幾何容量でなく、周波数 f に於ける値) $\omega = 2\pi f$ である。 C は誘電體の誘電率、誘電體と導體との配置、大さ、及形狀等で定まるもので勿論誘電率に正比例するものである。依つて上式に於て誘電體の種類に依つて變るものは $\tan \delta$ と C であつて、 C が誘電率 ϵ に比例するとすれば誘電體損失は $\epsilon \tan \delta$ に比例することがわかる。

第 2 表

無 機 絶 縁 物 • 乾燥した場合

絶 縁 物	成 分	ϵ	$\tan \delta$ in 10^{-4}						
			50~	800~	10^4 ~	10^5 ~	10^6 ~	10^8 ~	
熔 融 水 晶		4				1.2	1.2	1.2	
雲 母		6.4						9	
普 通 ガ ラ ス	珪 酸 ガ ラス	7.5				100	90	80	
テ レ ッ ク ス		5				32	31	32	
ロ ー レ ッ ク ス		5				20	20	20	
マイカレックス(舊)	雲 母 珪 酸 鉛	8				110	60	40	
ヒッチレックス		9				12	10	10	
普 通 磁 器		5.5~6.5					60 100 140		
タイデントイト(舊)	ステア タ イト	5.6					60	65	
" (新)		6				(8) 40	(7) 20	(7) 110	
テ イ リ ン	"	6				12	10	9	
ノ ー ボ ラ イ ト	"	6				20	10	5	
酸化チタニウム磁器	TiO ₂	110				9	8	8	
酸化チタニウム磁器	TiO ₂	110				7	5	4	

VDE DIN 685 "Keramische Isolierstoffe" 1939 による

硬質磁器(第I類)		6	170~250				60~120
ステアタイト(第II類)	珪酸マグ ネシウム	6	20~30 10~15	8~10			15~20 3~5
チタン化合物含有磁器(第III類)	TiO ₂	60~80 30~45 12~16		3~10 3~65 3~20			3~8 3~20 0.5~3
粘土珪酸マグネシウム含有磁器(第IV類)		5	200				40~70

有 機 絶 縁 物

絶縁物名稱	ϵ	$\tan \delta$ in 10^{-4}						
		50~	10 ³ ~	10 ⁴ ~	10 ⁵ ~	10 ⁶ ~	10 ⁷ ~	10 ⁸ ~
變 壓 器 油	2.3				3	4	10	80
ワゼリン	2.2				5	6	13	
パラフィン	2.4						2	
アムプロイド	2.0				40	45	50	60
スチロール樹脂	2.7				2	3	6	10
エポナイト	{ 3.0 2.9 4.2				75 400	90 84 250	95 73 200	
ベークライト (混合物なし)	3.5					70	63	
フェノールレジジン	{ 4.4 5.2 6.0				500 300	330 400 450	335 390 600	
尿 素 樹 脂 (混合物あり)	7.5				200	300	400	
アクリル酸樹脂	3				260	200	170	

備 考

- (i) 無機絶縁物,有機絶縁物とも同一種類に属するものはまとめて記載す(横罫線にて)。
- (ii) 無機絶縁物の方には最後に VDE Din. 685 の Eigenschaftentafel der Keramische Isolierstoffe (E.T.Z. 1940. H.22. S.496—497) より引用した数字を記載し参考に供す。

かくの如く $\epsilon \tan \delta$ なる積は誘電体損失を観点とし誘電体の良否を論ずる場合に重要な因子であるから之に誘電体損失係数なる名を與へて居る。

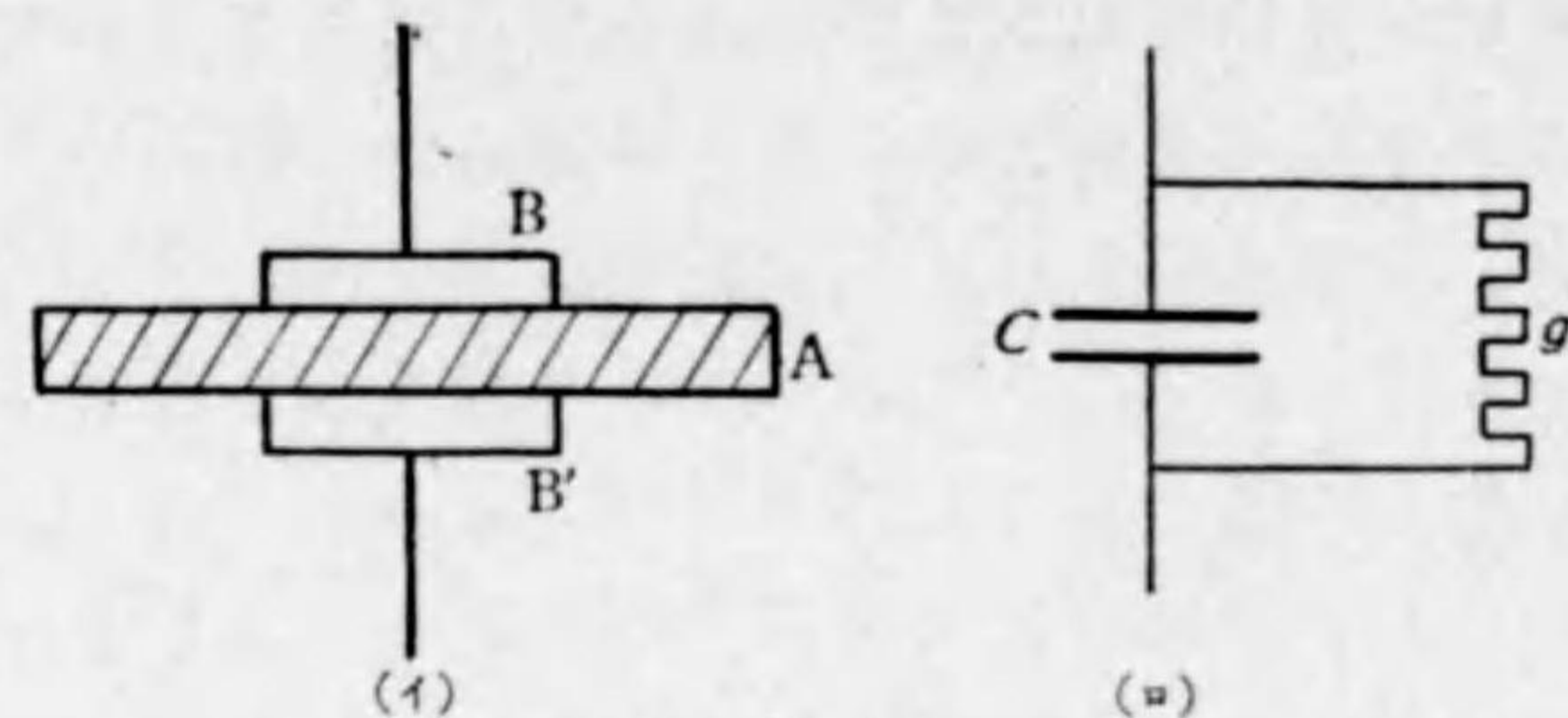
誘電体の $\tan \delta$ の測定は損失が元來少いのであるから精密の測定を要し殊に良好なる絶縁材料に於ては特にその値が小なる爲め誤差が入り易く,正確な値を出すのに困難を感ずる。

普通はシェリングブリッジ法の如きもので測定を行ふのであるが高周波に於ては他の方法が採用されて居る。

高周波に用ふる絶縁材料は特に $\tan \delta$ の小なるものでないと用ふることが出来ない。近年高周波用絶縁材料として研究の結果製造された材料がある。是等の材料と低周波に普通用ひられる材料と各々の $\tan \delta$ の値を比較して示したのが第2表である。

4.4 導電及誘電体損失に関する學說

固体誘電体に於ける導電性は何に歸因するかに就ては古くから研究されて居る問題なるに拘らず未だ不明の領域が多い。比較的明かに了解されて居るのはガラスであつて,ガラス中に含まる、ナトリウムのイオンが主として導電に與り,イオンの運行により電流が通ずるものなる事が實驗的に證明されて居る。他の誘電体に於ては未だ實驗上證明された説明が與へられない現状であるが恐らく同様のイオンに依る導電作用が行はれて居るものと想像される。誘電体損失が如何にして起るものかに就ても澤山の研究が行はれて居る。今誘電体の損失測定を爲す場合を考へ,例へば第31圖(イ)の如くAなる誘電体がB及B'なる電極に挟つて在るのを(ロ)の如く蓄電器Cとコンダクタンスgと並列に接続されたもので代表させ,Cの値は誘電率から,gの値は導電率又は固有抵抗より計算し,損失或は誘電体力率を算出したものと實測値と比較する時は,實測された損失の値,又は力率の値が遙かに大きくなるのが普通である。此の事實は誘電体損失が單に導電によつてのみ起るのではないと



第 31 圖

云ふ事を示して居る。

所が前に述べた誘電体吸収による電流と誘電体損失とは密接の関係があつて、 g が一定値でなく前に示した実験式

$$a_1 E^{-n_1} + a_2 E^{-n_2} + a_3 E^{-n_3}$$

に相當して時間と共に變化するものとして計算すると損失及力率の値は實測値とよく一致する事が實證されて居る。

誘電体吸収現象を物理的に説明せんとする試みは古くからあるので最も有名なのは Maxwell の學説である。此の學説では誘電体が單一の物質より成り不純物を含まない場合には此の現象は起らないが二つ以上の物質より混成されて居ると吸収現象が現はれると云ふのである。多くの誘電体に就て調べて見ると大體に於て異なる物質の混成になる材料は誘電体吸収は顯著で之に反し純粹に近い程此の現象は微弱である。然し相當注意して不純物の混入しない様にして作られた試料でも多少は此の現象が認められる事實があるので Maxwell の學説は確かに一面の事實は説明して居るも全體の説明には不十分である。次にイオンが移動して反對の極性の電極附近に集つて空間電荷を作ることと説明を試みた人もあるが之だけでは總ての場合に適用することは出来ない。

比較的新しく唱へられたのはデバイ (Debye) の双極子説である。

第 1 圖に示した様に或種の化合物は分子の構造上、電気モーメントを有して居る。之を有極分子と云ふ。水はその代表的のものであつて此の如き分子は先に述べた如く、分子内に於て(+)の電荷の重心と(-)の電荷の重心とが一致して居ない結果全體としては電荷は零であるに拘らず電気モーメントを有して居る。丁度永久磁石が磁気モーメントを有し、之を磁界に置けばその軸が磁界の方向に向かはうとすると全く同じ様に電気モーメントを有する有極分子が電界に置かれる時はその軸の方向即ち(+)と(-)との重心を結ぶ方向が電界の方向に一致しようと回轉する傾向を生ずる、水は誘電率が非常に大きく約 80 と云ふ値であるのはその分子構造が第 1 圖に示した様に水素原子の付き方が非對稱で電気モーメント即ち所謂双極子モーメントがある結果であると説明されて居る。

固体の誘電体に於ても同様の性質を有するものがある。特に有機絶縁物の内その分子が多數の原子が長く連結して居る如き構造であつて、その中に OH 基を含むものは OH は(-)の電荷ある爲めに之を交番電界に置けば OH 基は分子の長い方向を軸として回轉せんとする傾向が生ずる。固体にあつてはそれを組成する分子又はその一部が勝手にその方向を變へるわけには行かない。即ちその運動を妨ぐる様な粘性的な反抗する力も生ずるわけで茲に運動に對しエネルギー損失を發生することになる。之が即ち吾人の觀察する誘電体損失であると説明するのがデバイの學説である。

分子の構造がわかつて居る種々の有機絶縁材料に就て誘電体損失又は $\tan \delta$ の測定をした結果を見ると大體デバイの學説の云ふ所と定性的には一致して居る。然し此の學説に基いて計算を爲し、その結果と實測値とを比較すれば相當の差がある。即ち現在に於て此の學説は未だ量的には實測値と一致するまで完全のものでない。

然し前に述べた如く最近高周波の應用が發展し、高周波に於て誘電體損の少い材料が要望されて居る現状にあつて既に二三の優秀なる絶縁材料が市場にあるが更に優秀なる材料、即ち $\epsilon \tan \delta$ の成るべく少いものを造り出すには如何なる分子構造を有するものが適當であるかの指針を與ふる點に於てデバイの學説は實用方面から非常に重要視されて居る。

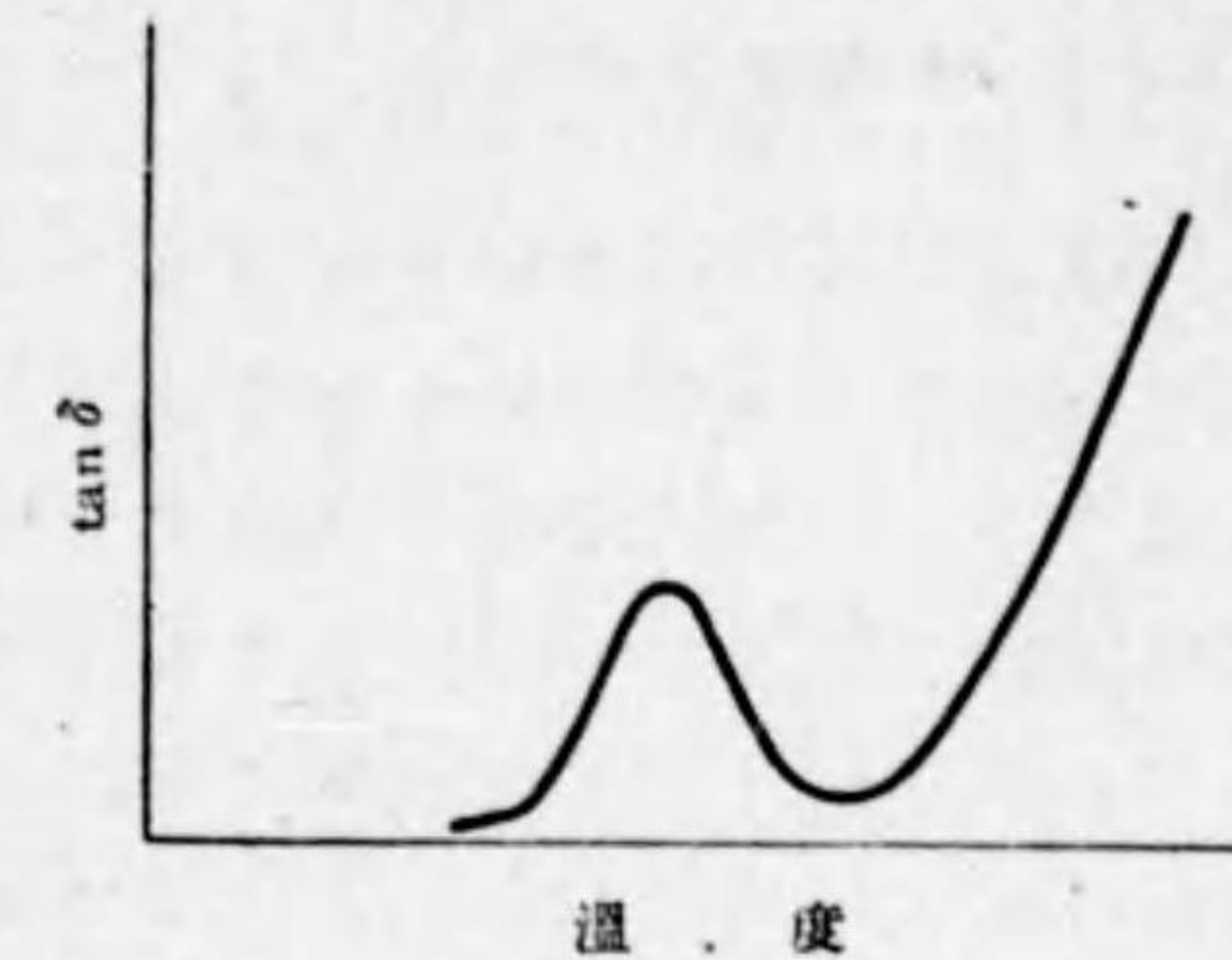
以上の學説三つ夫々異なる觀點を基礎として現象を解説して居るが是等の學説を基礎として數學的に論じて行くと同じ様な數式となり、定性的には同様の結果に到達することは甚だ興味あることである。その結果の一つとして交番電界の周波數を變へた場合に $\tan \delta$ の値は周波數の増すに従ひ大きくなり、周波數の或値で最大値に達し、更に周波數を増す時には却つて小さくなり $\tan \delta$ -周波數曲線を畫くと丁度共振現象の様な山が現はれる。

誘電體が二つ以上の物質よりなり、異なる分子が混入して居る場合には此の山の數が二つ又はそれ以上現はれる、實際廣い範圍に亘つて周波數を變へて實測して見ると理論の示す通りの山が實測結果に於ても明かに現はれる。

次に溫度の影響に就ても理論上から云へば溫度上昇と共に上記共振曲線の山が周波數の高い方に移動することが豫想されるのであり實際試験して見るとその通りになる。

従つて周波數が一定で溫度を變へた場合には溫度の或範圍で $\tan \delta$ -溫度の曲線に共振曲線の様な山が現はれる。更に溫度を上げて行くと第32圖に示す様に $\tan \delta$ は極小値に達した後、溫度の上昇と共に再び大きくなり、終に何處までも昇つて行く、此の如き再び $\tan \delta$ の大きくなる原因は誘電體の導電率が溫度と共に増す爲めであると説明されて居る。

實際に於て樹脂類を含有する絶縁材料に於ては常溫附近に於て第32圖の如き實測結果が得られる、此の如き曲線を誘電體力率のV曲線と云ふことがある。電界の強さと誘電體力率との關係は、電界の小なる間は例へば大概10-kV/cmまでは力率の値は變りない。即ち



第 32 圖

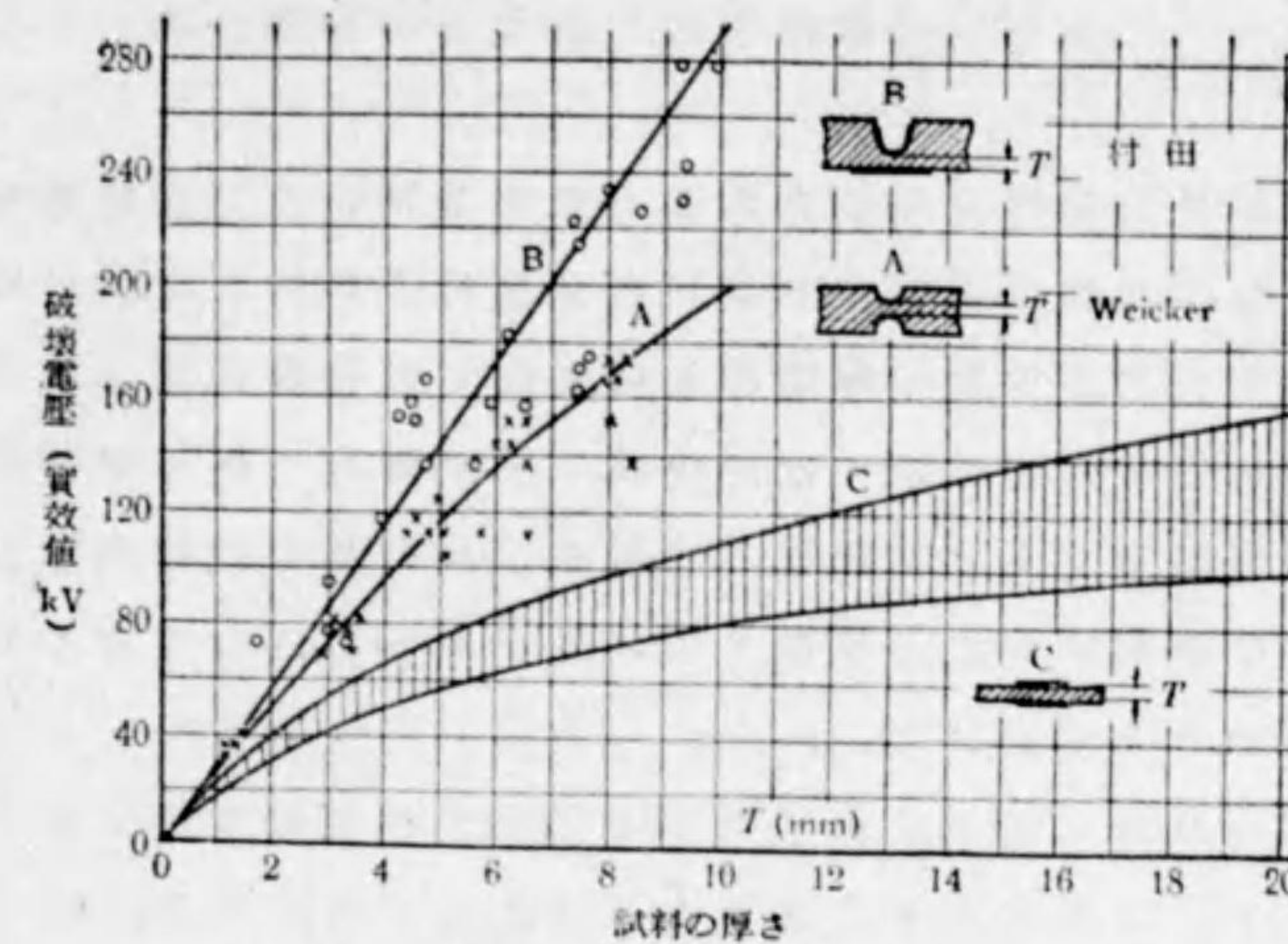
誘電體損失は電界の自乗に比例して増加することは、一定の抵抗を有する金屬導體の場合と全く同様である。然し電界の強さが大きくなると力率が大きくなることもある。此の時には誘電體の實質に多少の變化を生じ之が爲めに力率の増加を來たすことが明かに分つて居る場合と、原因の不明の場合とある。又誘電體の厚さの大なる場合等には元來熱の不良導體である爲めに内部の溫度が表面より高くなり、その部分の $\tan \delta$ が増加することも考へられる。

4.5 固體誘電體の絶縁耐力

固體誘電體は電氣機器、電氣工作物等の絶縁に對し實質的主要材料であるから電界の作用により終に絶縁破壊にまで至る現象を考究することは實用上極めて重要なことである。應用力學、材料力學等に於て構造物の強さ、構成材料の強さを研究する様に我々も絶縁の強さ、絶縁材料の電氣的の強さを對象として研究を行ふ必要があり、此の如き電氣的の強さに對し、絶縁耐力なる名を付けて居る。材料の絶縁耐力は普通 kV/cm 又は kV/mm を以て表はす。

4.5.1 絶縁耐力の測定

固体誘電体の絶縁耐力を測定するには成るべく板状に試料を作り、その両面に金属電極を密着させて、電極間に電圧を加へ、電圧を徐々に上げて終に誘電体が貫通する場合にその電圧を読み、厚さを以て電圧値を除して kV/cm 又は kV/mm が得られるわけである。然しながら空気中に於て此の測定を行ふことは實際上不可能であつて、それは試料の貫通しない内に試料に接した空気中に火花放電を發生するからで、極めて薄い試料でない限り目的は達せられない。そこで古くから行はれて居る方法は絶縁油の中に電極と一緒に試料を入れて試料の外で放電することを防ぎながら電圧を上げて行くのである。所がかくして試料が貫通した場合にその破壊電圧から求め得た絶縁耐力は果してその試料の眞の絶縁耐力であるかと云ふと甚だ疑はしい場合が多いのである。此の事柄を了解するに好い實例は第33圖に示してある。Cは茲に述べた様に單に磁器試料を平板電極で挟んだ場合で、實測値は一本の曲線では表はし得ず、縦線で示した一つの領域で示して居る。所で實際試料の貫通した箇所を檢查して見ると電極に接して居る所は極めて少く大抵電極の周邊又はそれから少し離れた箇所に貫通孔が見出される。依つて實際の試験を觀察すると貫通する前に電極の周邊から油中にコロナ放電が見え、それが強烈となると貫通が起る事實が觀取される、即ち此の場合に貫通が起るのは電極周邊に起つた油中コロナの作用で破壊した結果で、磁器本來の絶縁耐力に相當する電圧よりも遙かに低い電圧の値で貫通したのである。そこで獨逸のヘルムストルフ碍子会社のワイカー (Weicker) 氏は試料の形をAに示す様に電極周邊に相當する部分を厚くしコロナの作用を緩和させて試験した



第33圖 磁器試料油中破壊試験
A, C 常気圧
B. 特に壓力を加へた場合

結果はA曲線に示す様に見懸け上絶縁耐力が高くなつて來た、然し此の場合でも周邊で貫通する場合が多いと報告されて居る。

所で日本碍子会社の村田八東氏は試料の形をBに示す如くAよりも一層回まして、更に油には壓力を加へコロナの發生を抑制して實驗した結果はBの曲線に示す様にAよりも更に高い値が得られる。然しBの場合でも眞の絶縁耐力に相當する値でないことは破壊直前に油中コロナ放電が現はれることから推知されるのである。依つて極端に云へば油中に於ける固体誘電体の絶縁耐力の見懸け上の値は強烈なる油中コロナの發現する電圧を示すに過ぎないのである。此の如く試料を圍繞する媒質即ち此の場合では油或は試料と媒質との界面に起るコロナ現象の爲めに試料の早期的破壊を惹起す現象に就ては之が説明を試みた諸家の學説は多數あるが、未

だ十分にコロナ放電と固体誘電体の破壊との關聯を明かにし得ない。

絶縁油以外の液体を用いたる場合には見懸け上の破壊電圧は變る。従來液体媒質の導電率が高い程見懸け上の破壊電圧は高くなると云ふ報告もあつたが、導電率そのものが直接關係あるわけではなく、導電率の高い液体に於ては油中コロナが発生し難く、又発生してもその勢力の弱いことに歸因して居る。此の如く固体誘電体の見懸け上の絶縁耐力が之を圍繞する媒質の如何によつて變つて來る事を媒質効果と名付ける。

絶縁耐力試験に於ける媒質効果を除去或は緩和する方法としては適當なる導電率を有する媒質を用ふるとか電極の縁を誘電率の高い誘電體で包む方法とか、或は電極の周圍に試料の表面に適當の導電率の物質を塗り付けて置くと云つた様な方法が試みられたが未だ完全なものとは云ひ難い。

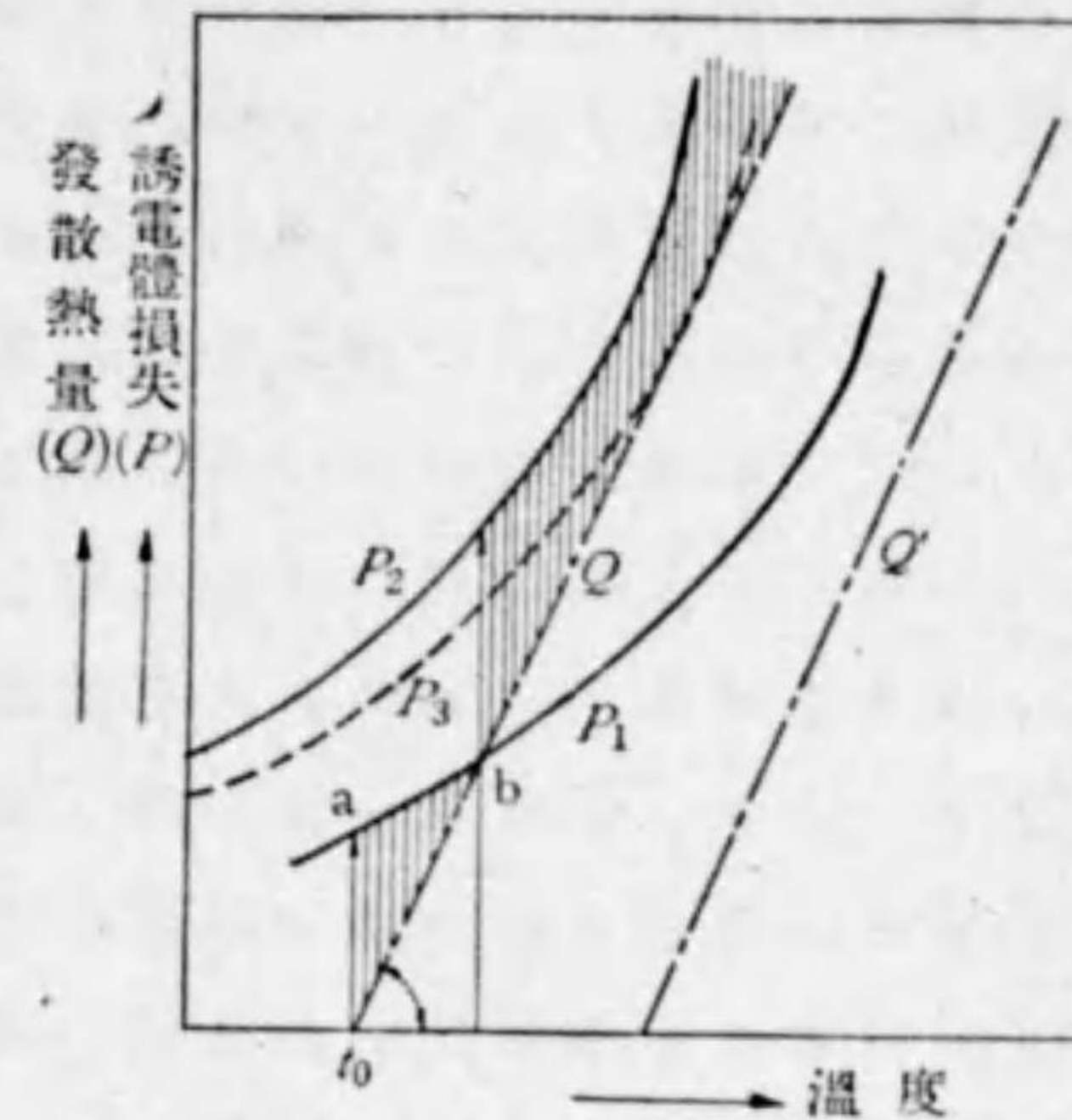
以前は固体絶縁材料は油の中で絶縁耐力の試験を行ふのが普通で、その結果に對し疑問を挟まなかつた結果、教科書、ポケットブックに記載されて居る各種材料の絶縁耐力は媒質効果の爲めに見懸け上低くなつたまゝの値で示されて居る。従つて眞の絶縁耐力の値は是等の値よりも遙かに高い筈である。此の事實は是等の材料を實際に使用する場合に常に心得て置くべきである。

4.5.2 熱破壊説と電氣破壊説

固体誘電體が電界の作用により破壊するに至るまでの物理現象は如何なるものなるかを究明せんとして多くの人々が研究を努め、幾つかの學説が出て居る。その一つが熱破壊説である。此の學説に於ては破壊現象の主因を温度上昇による材質の化學的變化にあ

りとするので、電界の作用により誘電體内に起るエネルギー損失は熱となつて温度上昇を來し、その結果損失も増加する爲め一層温度は上昇して遂に材質の化學的變化を惹起するものなりと説明するのである。勿論電界の弱い場合は損失も少く温度上昇も低く破壊に至るまでに達し得ない。如何なる場合に破壊するまでになるかは第34圖で説明される。

第34圖は普通交番電圧を多く取扱ふ故、交番電圧の場合として示してある。即ち此の場合は誘電體には誘電體損失を生ずる故、一定の電圧を加へた時即ち電界の強さが一定なる時、誘電體損失は誘電體の温度により變化する状態を曲線Pで示して居る。Pの縦軸に示された量は又誘電體内に於て



第 34 圖

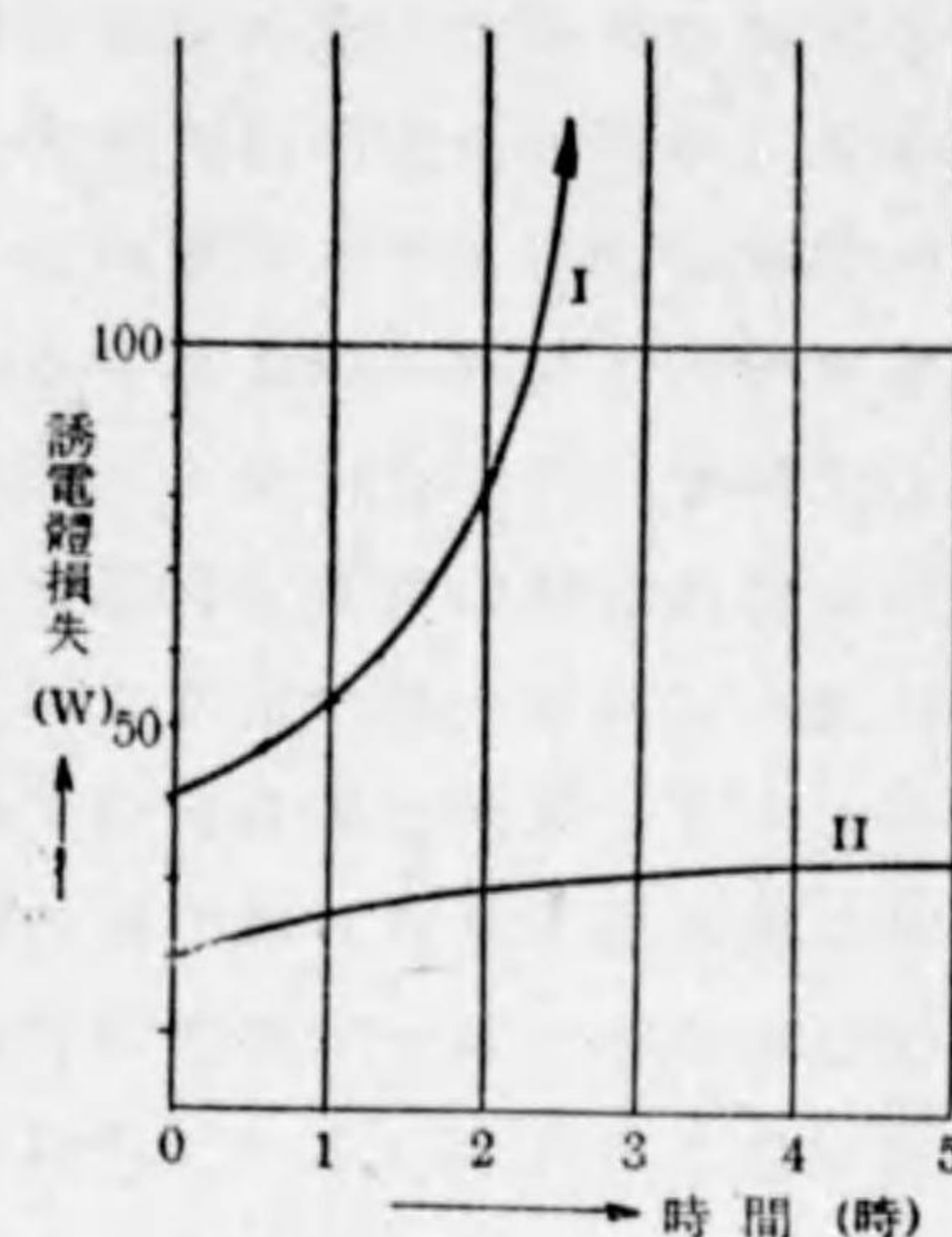
單位時間に發生する熱量と考へてもよい。一方に於て誘電體に發生した熱は外部に發散するのであるが、その發散の割合は外部の周圍温度と誘電體自身の温度との差によつて定まる。簡單に考へて單位時間に發散する熱量は温度差に比例するものと假定すれば發散熱量と温度との關係はQに示した直線で表はし得る。但し t_0 は室温である。加へた電圧の値が變れば誘電體損失が略電圧の自乗に比例して變るのであるが、圖に於ては三つの異なる値の電圧に對し夫々 $P_1 P_2 P_3$ の如き三つの曲線で表はしたものとする。

先づ低い電圧に相當した P_1 を考へて見ると、今室温が t_0 であるとすればその時の電圧が加へられた直後の誘電體損失は $t_0 a$ で表はさ

れる。所がそれに相當する熱を發生する結果温度は昇るわけで誘電體損失も P_1 の曲線に示した様に増加して行くがそれが限りなく増加するか否かは、熱の發散作用の大小によつて定まる。此の場合の發散作用は直線 Q で示されるとすれば、誘電體の温度の上昇に伴ひ熱の發散は盛になり終に b 點に達する時は發生する熱量と發散する熱量と相等しくなり、温度は之以上には昇らず、茲に平衡を保ち、誘電體は破壊するに至らない。之に反し曲線 P_2 に相當する電壓を加へたならば發生する熱量が大なる爲めに發散量が之に及ばず、温度は限りなく昇り終に誘電體は破壊するに至る。此の關係は直線 Q が P_2 に終に交らない事以示されて居る。所が中間の電壓で曲線 P_3 に相當するものであれば曲線 P_3 と直線 Q とは相切する場合で矢張り温度は何處までも昇り誘電體は破壊する事にはなるが、それより少しでも低い電壓ならば發熱と發散とが平衡する状態即ち直線 Q に相交る點があるわけで温度はそれ以上昇らない。即ち P_3 に相當する電壓は極限電壓であり、此の場合の誘電體の絶縁耐力を示す電壓である。圖に於て平行線で示した部分は熱の發生量から發散量を差引いた残りであつて、之が零にならない間は温度は昇るのである。第35圖は上記の現象を示す實例であつて積層紙製套管二種 I 及 II に就て 50 サイクル 6 萬ボルトの電壓を加へ誘電體損失が時間と共に變化する状態を示して居る。但し 90°C の油の中に浸して試験した場合である。I の方は II に比して損失大なる爲め温度が昇り損失は一層増して終に破壊に至つたのに對し、II は損失少く、熱の發散と平衡状態になつた状態を示して居る。此の圖からわかることは I の方でも電壓を加へる時間が短かければ破壊にまでは至らないで再び初めの状態に復歸してしまふ。

又電壓が高くなると損失は略電壓の自乗に比例して増加するも

のであるから、I の曲線は更に急傾斜をなすであらうから破壊に至る時間が著しく短くなることが了解される。依つて電壓を更に高くすると終に電壓を加へる時間が極めて短い場合でも破壊にまで達し得るわけで、之を別の言葉で云ひ表はせば熱破壊の場合には破壊電壓は電壓を加へる時間の長短によつて變ることになる。



第 35 圖

次に誘電體損失は温度によつて増減するもので一般には温度の上昇に伴つて増加する。依つて最初の温度即ち第35圖の場合では 90°C であるが、之が低い時には I の曲線は上昇する割合が緩かになるであらう。場合によつては II の曲線の様になることもあり得るわけである。反對に温度が高くなつた場合は II の曲線に示されたものが I の曲線の如き状態になる場合もあり得るわけである。此の事實は第34圖の Q なる熱の放散を示す線が周圍温度が高くなると Q の如く右の方に移動することになり、 P_1 と交らなくなることも説明し得る。依つて誘電體の破壊電壓は温度によつて變ることが了解し得られる。

一般に誘電體は熱の不良導體であるから、相當の厚さを有する場合に誘電體損により内部に發生した熱は外部に向ひ熱傳導により移つて發散し難いわけで、従つて内部の温度は外側に比し高くなり、熱破壊を起し易いことになる。絶縁耐力を kV/cm で示した場合に

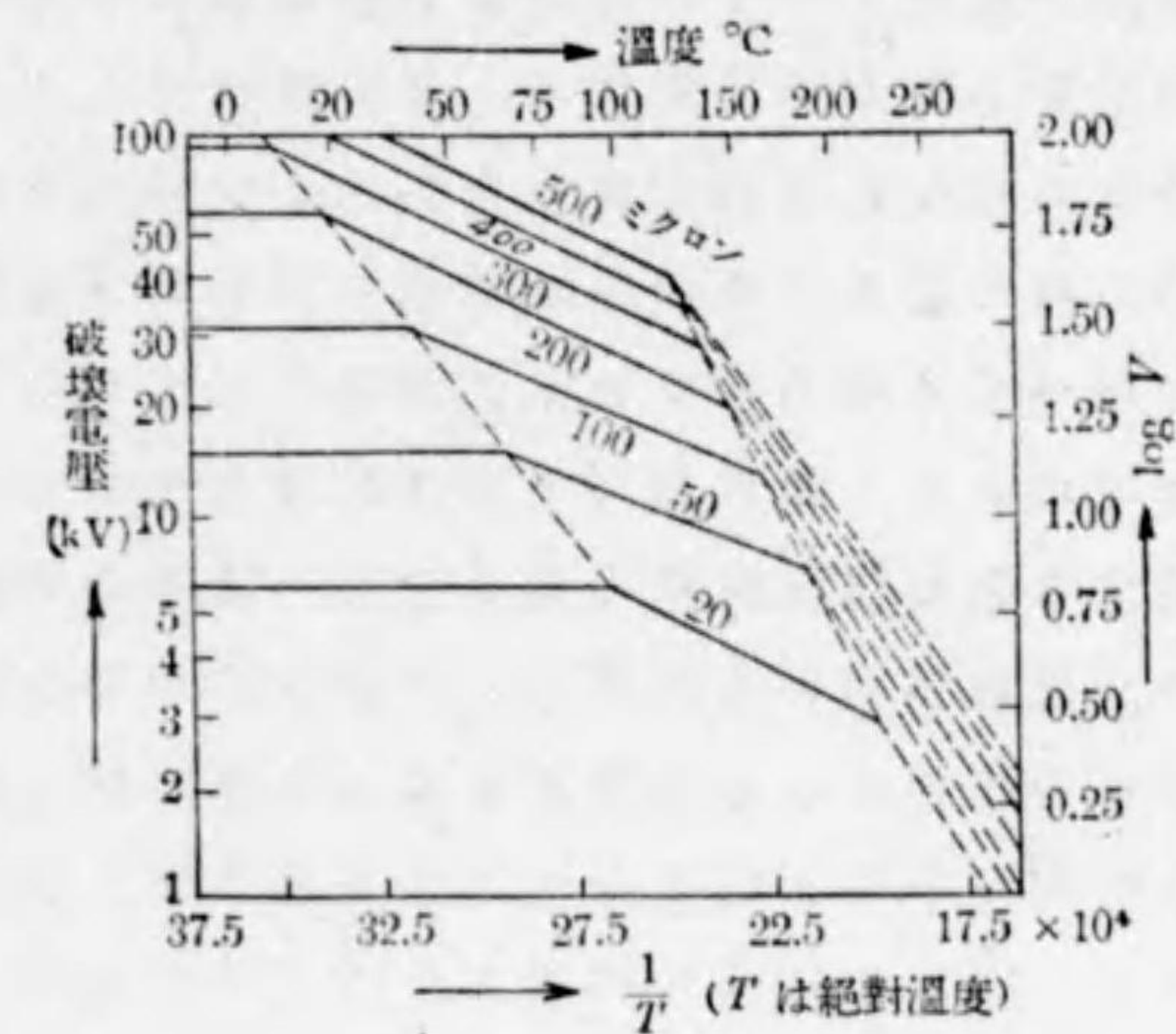
同じ試料であつても薄い場合が厚い場合に比し高くなるのは當然である。厚さ t の試料の破壊電圧を E とすれば厚さを $2t$ としても破壊電圧は $2E$ とならず、それより多少低くなることは歴観測される事實であるが、その理由の一つは熱傳導が不十分なる點である。然し之が唯一の原因でなく、その外にも電氣的の理由もある。

以上は誘電體の均質であると假想したのであるが實際の絶縁材料は決して均質一様ではなく局部的に誘電體損の多い所と少い所とあることは豫想出来る、依つて誘電體損の多い所が最初に熱破壊に至る事は有り得るわけで特に材料の薄い場合に於て局部的の熱破壊現象は起り易い事が了解出来る。

誘電體が熱破壊によつて破れる場合に於ては破壊電圧は周波数の影響を蒙ることは當然である。一般に誘電體損失は周波数と共に増加する(誘電體損失係数が周波数に無關係で一定ならば損失は周波数に比例して増加する。)故破壊電圧は周波数の高くなる程低くなるわけである。極超短波と云ふ如き高周波で電圧の比較的高い場合にはその絶縁材料として特に誘電體損失係数の小さい材料が要求されるのは此の理由からである。

誘電體に電圧が加はり破壊するのは必しも常に熱破壊とは限らないことは極めて短い時間電圧が加はる様な所謂衝擊電圧試験の場合にも誘電體が破壊することで了解される。即ち此の如き場合には熱破壊説で説明されるのとは異つた原因で破壊が起ると考へなければならぬ。その原因を物理的に明確に説明することは今日ではまだ不可能であるが、之を普通電氣的に破壊するのでであると云つて居る。誘電體損失の少い材料及温度の低い場合等に於ては電圧を加へる時間の特に短い場合でなくとも此の如き電氣的破壊の起ることがある。即ち電圧を加へる時間の極めて短い場合でな

く絶縁材料の絶縁耐力を試験して破壊電圧の値が電圧を加へる時間の長短に拘らず略一定値を示す様な結果を得る事がある。又或範圍内に温度が變動しても破壊電圧が變らない事もある。之が一例としてはガラスに就いて研究された結果がある。第36圖に示したのは米國の M.I.T. に於ける研究成績であるが厚さの異つた鉛ガラスを種々の温度で絶縁耐力の試験をした所が圖に示す如く或温



第 36 圖

度までは略一定の破壊電圧値を示し、それから更に温度を上げると破壊電圧の値が下がつて来る、依つて破線で示す限界までの破壊は電氣的破壊でそれから上の温度に於ては熱破壊によつて貫通するのであると説明した、ガラス以外の窯業製品即ち磁器類に於ても温度が高くなるとその絶縁耐力が降下することは一般に認められて居る。此の場合も矢張り熱破壊の状態になつて居ると考へて差支ない。但し電氣的破壊から熱破壊に移る限界は夫々材料の種類に

よつて異り又同じ材料でも厚さに依つても異なることは當然である。

固体誘電体に液体誘電体を組合せた油浸紙はケーブル、蓄電器の材料として重要なものであるが、製造に際し紙の乾燥が十分で又油の乾燥及吸収ガスの除去が実用上完全であれば絶縁耐力を試験する時、電圧を加へる時間が變化しても破壊電圧は略一定である結果が出て居る。勿論電圧を加へる時間は一秒以上の場合である。

然るに紙及油の処理が不十分であると破壊電圧値が電圧を加へる時間によつて變る様な結果を得る。之が説明としては紙及油の処理が不完全なる場合には誘電體損失が大きい爲めに熱破壊になるものと認められて居る。その他紙及油の処理が完全ならば破壊電圧は温度を變へても變らないと云ふ結果も出て居る。

電氣的破壊の場合でも衝撃電圧と云ふ位極めて短い時間に電圧を加へて試験すると商用周波数の電圧を加へた場合に比し破壊電圧は高くなる。絶縁協調の實際問題で絶縁レベルを決定するのは衝撃電圧に依るのであるから、衝撃電圧による絶縁耐力試験は実用上重要なわけであるが、未だ信頼すべき結果は必ずしも多くない。何となれば従來の試験の結果では屢々4.5:1に述べた媒質の影響が入つて居るからで注意を要する。

衝撃電圧を加へて電氣的破壊を爲す場合に一回の試験では貫通しないが、之を繰返し加へると終に破壊に至ることがある、此の場合には一回電圧を加へただけでは全部貫通するには時間が不足であつて、部分的に破壊が起りその後繰返し電圧を加へる毎に破壊が進行するものとして説明されて居る。此の現象も誘電體の種類によつて著しい差があつて、英國 M. V 會社、Goodlet 氏等の行つた實驗の中にプレスボードを試験し、9回目に破壊した試料に於ては豫めその破壊した電圧より僅か4%低い電圧で衝撃電圧試験を數百回繰返

して居つたのであるが此の僅かに低い電圧では何等破壊の徴候が認められなかつたと報告されて居る。然るに他の誘電體では少數回繰返し試験で破壊した電圧より遙かに低い電圧でも多數回繰返せば破壊するに至る、又多數回電圧を加へて破壊に至らない試料の誘電體損を測定して見ると増加して居ること或は50サイクルの破壊電圧値が低くなつて居ること等も實驗で證明されて居る。電極の形狀が對稱でない衝撃電圧試験に於ては、電圧の極性によつて破壊値が異なることが見出されて居る、ペークライトで處理した紙、プレスボード等に於て試験された結果では曲率大なる方の電極が(-)の場合が(+)の場合よりも低い電圧で破壊が起つて居る。(稀には反對の場合もある。A. I. E. E. Trans, July 1940 P.395)

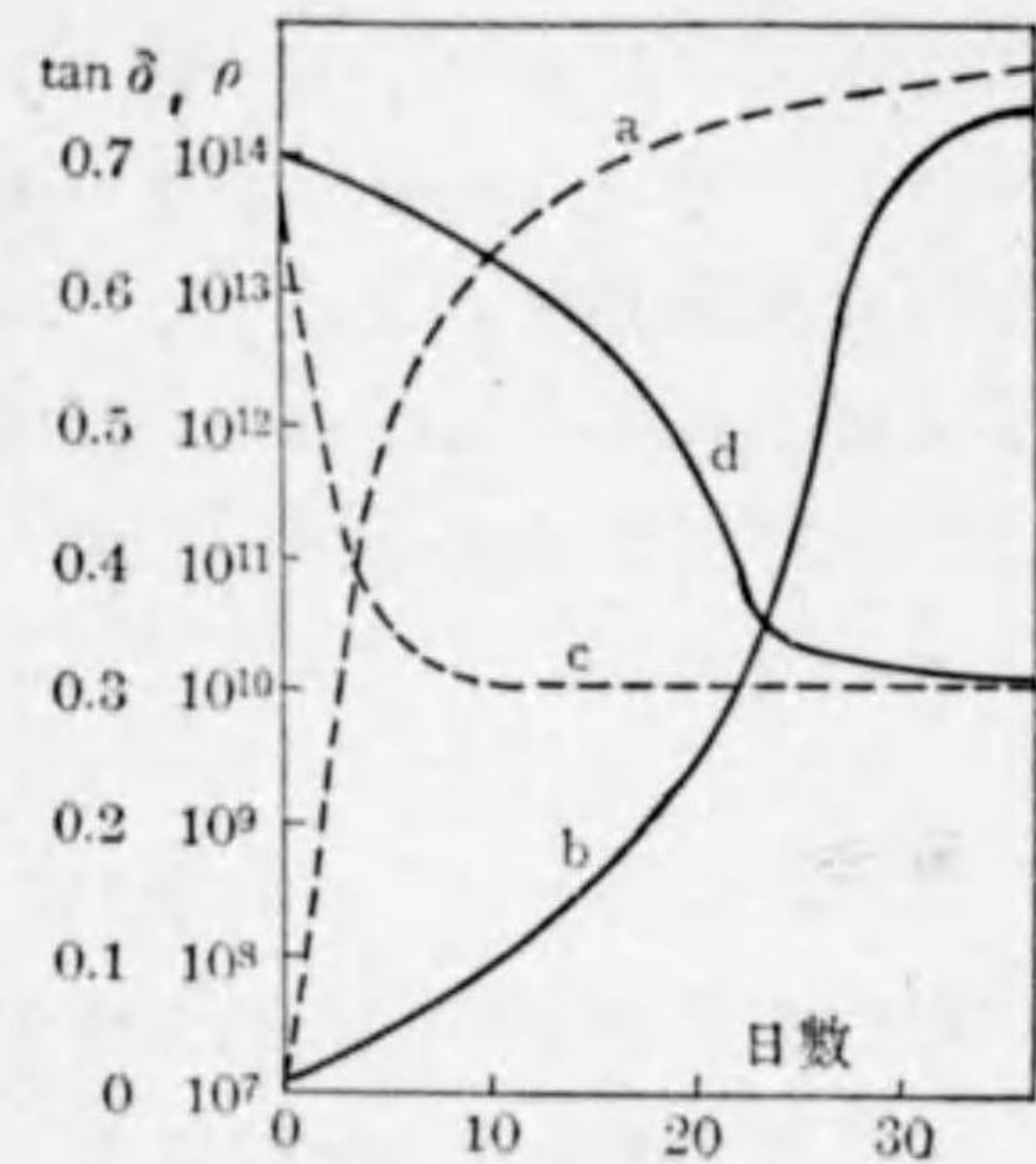
電氣的破壊の理論として多くの人が種々の學説を出して居るが、氣體又は液体の場合に比すれば不明の點が多い。固体誘電體の種類は非常に多いので破壊に至るまでの現象も種類によつて、その主要なるものが夫々異なることもあるし、又幾つかの二次的現象も附隨して起ることも考へられる。之を要するに今後の研究にまつ所が多いのである。

4.6 水分の影響

固体誘電體の中には全然水分を吸収しないものもあるし、又極めて吸濕性の大きなものがある。例へばガラス、磁器等は吸濕性が無いので水分の影響を蒙ること比較的少いのであるが、絶縁材料として重要な纖維質(セルローズ)材料は甚だしく水分を吸収し易く、絶縁物としても性能が之が爲めに悪化し、電氣的事故の原因となることが多い。

纖維質材料として廣く用ひられるものは各種絶縁紙、絶縁布等で

あるが是等は各單獨で用ひられず繊維の間にある空氣及水分を逐ひ出し、その代りに絶縁油、ワニス、コンパウンド類を浸潤させて使用するのが普通である。此の如き處理を爲す目的は空氣が介在する時は強い電界を受けると空氣の部分が先に破壊し、固體誘電體としての絶縁耐力を十分に發揮出來ない故、氣體を油等で置換するにある。^{*}更に又之によつて水分の浸入を防ぐのも目的の一である。然るに此の如き處理によつて水分の浸入を防ぐことは完全とは云へないので、電氣機械を取扱ふ場合よく此の事を心得て居なければならぬ。即ち纖維素絶縁材料をワニス等で處理したものは濕氣を含む空氣中に置けば徐々に空氣中の水分を吸收してその絶縁性が低下するのである。唯、處理しないものに比して水分を吸收する速度



第 37 圖 相對濕度 65% の空氣中に於ける損失角 (tan δ) (a, b) 及固有抵抗 (ρ) の變化 (c, d).
 a) 處理せざるプレスパン
 b) パラフィンにて處理したるプレスパン
 c) 處理せざるプレスパン
 d) パン

^{*}最近に絶縁油の代りに壓力を加へた窒素で填充したケーブルが作られた。但し鉛被によつて完全に外界の濕氣と絶縁してある。

が遅くなるだけで吸收する量は餘り變らない。水分吸收の程度を知るには直流で絶縁抵抗の測定をなし抵抗値の低下から判断するのが最も普通に行はれる方法である。又交流によつて誘電體力率、又は tan δ の測定を爲し、その増加によつて判断することも行はれて居る。第 37 圖は一つの例を示したもので處理したプレスパンも處理しないプレスパンも結局は同一程度の抵抗減少又は誘電體力率の増加を示して居

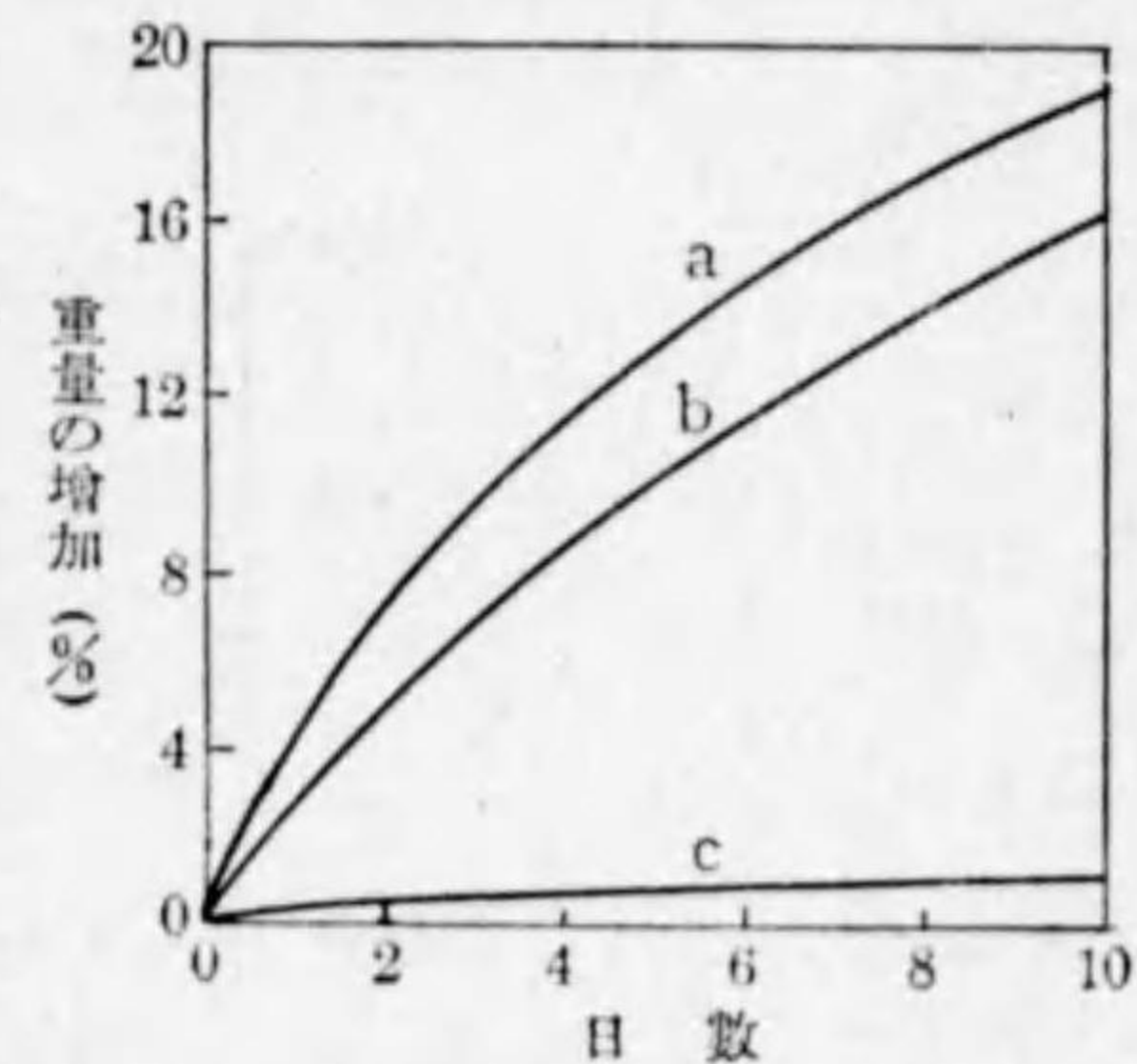
る。

唯濕氣を吸收する速度が處理することにより遅くなつて居ることがわかる。此の如く處理しても、しなくても同一程度の水分が浸入して終に飽和の程度に至る事實から判断して水分は纖維の空隙等に吸收されて居るのでなく實質自身に吸收されて居ると考へなければならぬ。即ち纖維の材質である纖維素(セルローズ)そのものがある定量の水を吸收する性質を有し然も水は纖維の空隙を充たして居る油、ワニス等の含浸劑を通して潛入し纖維素分子に到達したものと看做すべきである。然らば何故に纖維素には水が着き易いかと云ふと、之はその分子の構造に基因して居ると云はれて居

る。纖維素は $(C_6H_{10}O_5)_x$ なる式で示される化合物で $C_6H_7O_2$ が單位となり、多數連結されて居る、その數を x としたのであるが、三つの OH があつて之が水の付き易い原因をなして居ると云はれて居る。

石綿は纖維狀をなして居る礦物であるがその分子は全然纖維素と異り OH がない。之を處理しないで絶縁材料として使用すれば吸濕性を有し、濕氣のある空氣中で絶縁抵抗が減るも之をパラフィンで處理して纖維間の空隙等を填充すれば第 38 圖に示す様に濕氣のある空氣中に放置しても重量の増加は認められず吸濕性は實用上除去出来るのである。

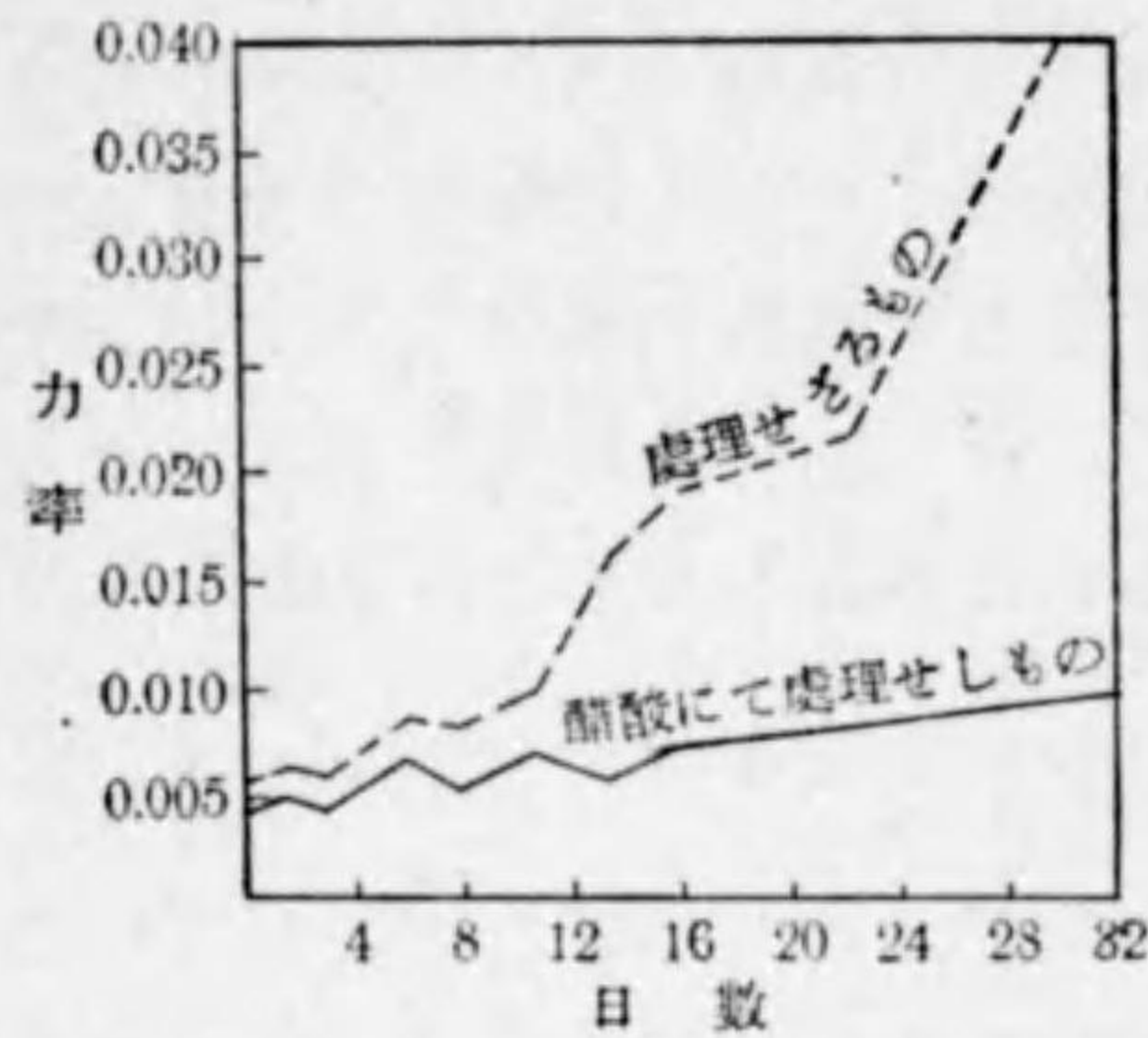
纖維素の吸濕性が OH 基に基因



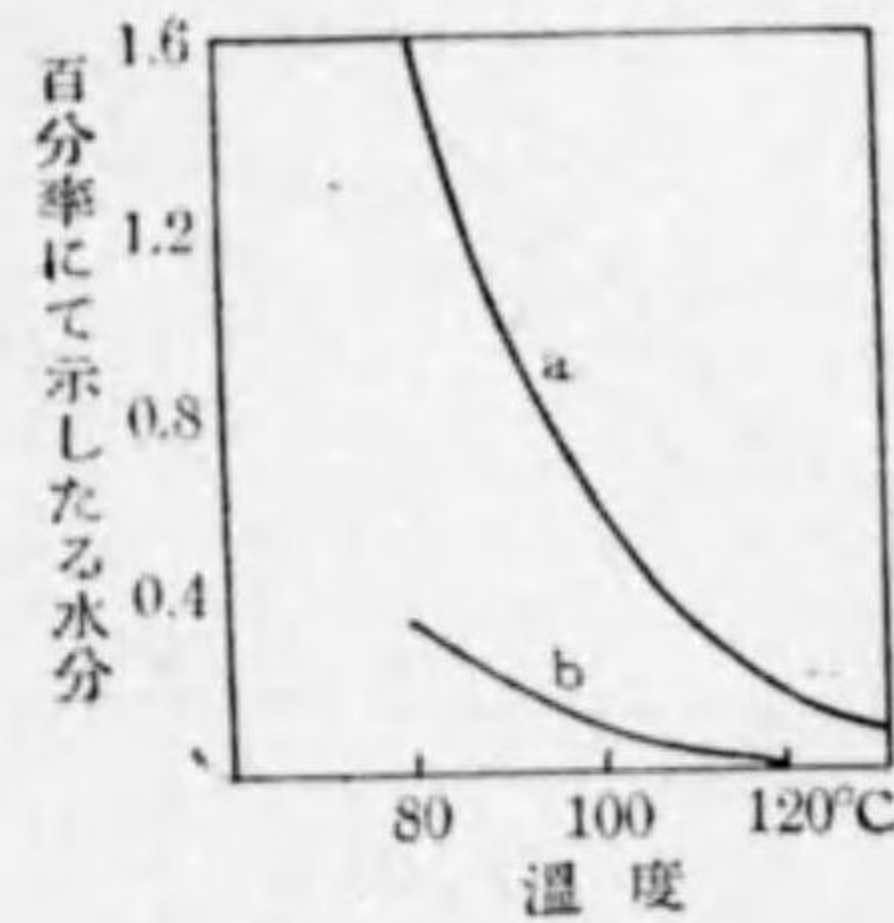
第 38 圖 相對濕度 100% の空氣中に於ける重量増加
 a) 亞麻仁油にて處理せるプレスパン
 b) パラフィンにて處理せるプレスパン
 c) パラフィンにて處理せるアスベスト紙



することは之を醋酸基 O, CO, CH₃ で三個の内、一部又は全部置換したものは著しく吸濕性が減少する事實から推定し得る、第39圖は此の事實を示す實測の結果である。次に纖維素の吸収する濕氣の量が飽和に至る場合の終局の吸濕量は周囲の空氣の相對濕度で變るので、乾燥した状態の纖維素の重量に對する吸収水分の量を百分比で



第39圖 普通の湿度の空氣中に於ける油浸紙の力率の變化



a 氣壓 水銀柱にて 30mm
b 氣壓 水銀柱にて 1mm
第40圖 温度による含有水分の變化

示せば 100% の相對濕度で約 16%, 70% の相對濕度に對し 10%, 40~50% の相對濕度では 4.7% と云ふ實驗結果がある。従つて我國の如く大氣の湿度の高い地方では特に注意する必要がある。又温度及氣壓も吸濕現象に大きな影響を與へることは第40圖の示す實測結果からも判斷出来る。

電氣機械を乾燥するには普通加熱することの有効なるは此の結果からも了解出来る。且絶縁材料の温度が周囲の空氣温度よりも高ければ吸収された水分は放出される。又乾燥により水分を逐ひ出した後に周囲の氣温より常に高い温度に保つて置けば假令湿度の高い空氣中に在るも水分を吸収することがない。電氣機械は一般に使用中は周囲温度よりも高い温度であるから空氣中より水分を吸収して絶縁が悪

くなる虞が皆無である。

然し一旦運轉を中止して置けば温度は大氣と同程度となり、濕氣の浸入することになるが絶縁ワニス、コンパウンド等で處理してあれば浸入の速度は遅いから休止時間が短かければ再使用する時その儘運轉を開始して差支ない、然し休止の時間が長ければ使用に先立ち乾燥作業を行ひ水分を逐出す必要がある。之は定格電壓の低い場合にはその必要は少いが定格電壓の高い場合には絶対に必要である、何となれば水分の浸入により絶縁耐力の低下を來たし、定格電壓で破壊することがあるからである。

絶縁に水分が浸入して居るか否かを判斷する方法としては普通メガー等の計器で絶縁抵抗を測定しその抵抗値から判斷するのである。回轉機に對しては

$$\frac{V}{\text{定格出力 (kW 又は kVA)} + 1000} \text{ メグオーム}$$

但し V は定格電壓で示された値を標準とし、少くとも此の値より高くなければ乾燥してから使用することとする。然し變壓器、その他特別高壓用の機器では此の式に示す値では不適當の場合がある。機器の種類に應じて適當なる判斷を下すべきである。

新造された機器、修理した機器を使用する前及絶縁耐力試験を行ふ場合も之に準じて絶縁抵抗の測定を行ひ、その値が低ければ乾燥作業を行ふべきである。

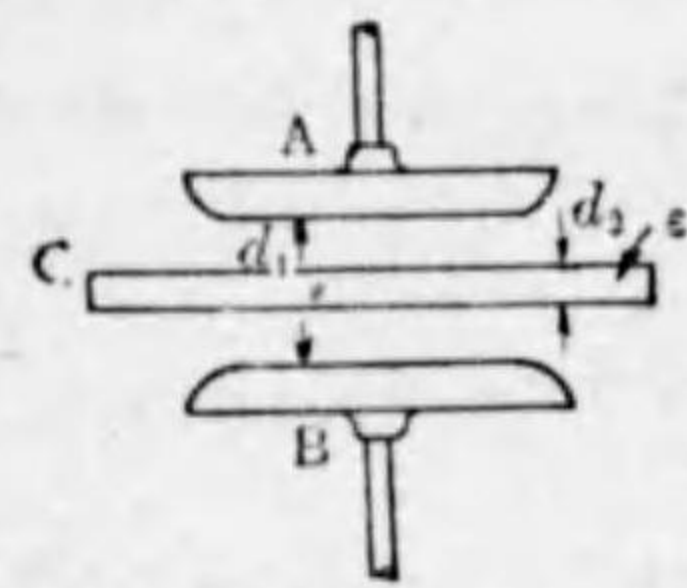
5.0 複合誘電體

絶縁材料が實際使用されて居る状況を見るに氣體、液體又は固體誘電體が單獨に使用されることは甚だ少く、大抵の場合は二種以上組合されて使用されるのである、従つて組合せた状態に於ける現象

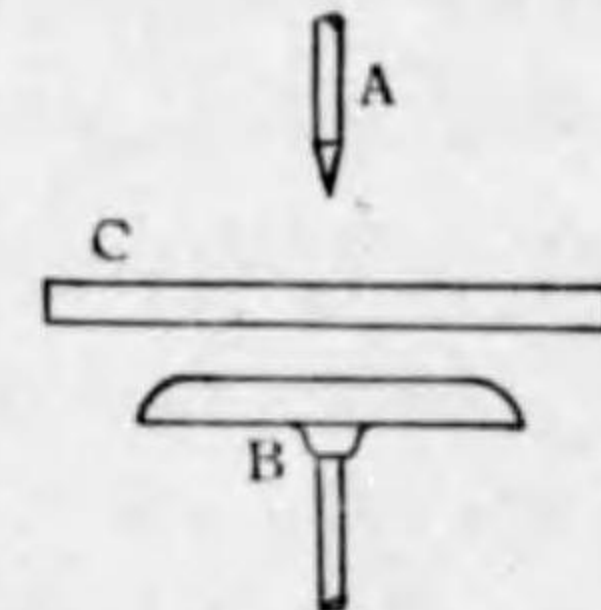
を考究して、その結果を高電圧設計等の基礎知識となす必要がある。

5.1 氣體及固体誘電體の組合せ

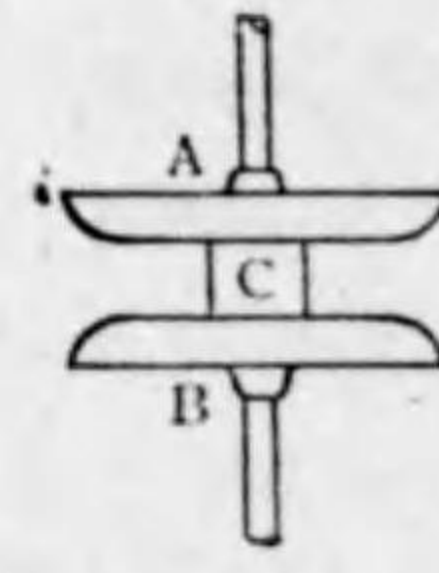
空氣中に固体誘電體の在るのは極めて普通の事で實際に於て多數の例がある。箇々の實例を説明する前に極めて代表的なる場合から説明することにする、第41圖は最も簡單なる場合で d_1 (cm) を距てて平行に置かれた平面電極 A, B の中間に厚さ d_2 (cm), 誘電率 ϵ の板状誘電體 C を電極面に平行に挿入した場合で、この時の電界は周邊を無視すれば平等電界であつて、 V ボルトなる電壓を A B 間に加



第 41 圖



第 42 圖



第 43 圖

へれば C の無い時の電界の強さは $\mathcal{E}_0 = \frac{V}{d_1}$ (V/cm) であるが C の存在により空氣中では

$$\mathcal{E}_1 = \frac{V}{\frac{d_2}{\epsilon} + d_1 - d_2} = \frac{V}{d_1 - \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right)d_2}$$

$$\text{誘電體の中では } \mathcal{E}_2 = \frac{\mathcal{E}_1}{\epsilon} = \frac{V}{d_2 + \epsilon(d_1 - d_2)} \text{ となる。}$$

一般に固体誘電體の絶縁耐力は空氣の絶縁耐力より大きく、且 \mathcal{E}_2 は \mathcal{E}_1 より小であるから V を次第に増して行けば先に空氣の部分に破壊が起る。その時の V の値は $\epsilon > 1$ であれば常に $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_0$ であるから、C の無い場合の破壊電壓より必ず低く、その差は ϵ 及 d_2 の大なる程大きくなる。以上の式では固体誘電體の導電率を無視したが、實

際の絶縁材料では、その導電率が零でない爲、電界の強さは上式に示す値と異なる。例へば直流電壓を加へ A が (+), B が (-) とすれば、A に面する C の表面に近く (-) の電荷が集り、B に面する方には (+) の電荷が集り、 \mathcal{E}_1 の値は上式で示した値よりも大きく \mathcal{E}_2 の値は反對に小さくなる。従つて C の存在による破壊電壓の降下は一層甚しくなる。交番電壓を加へた場合には、かくの如き空間電荷の作用は遙に少い。

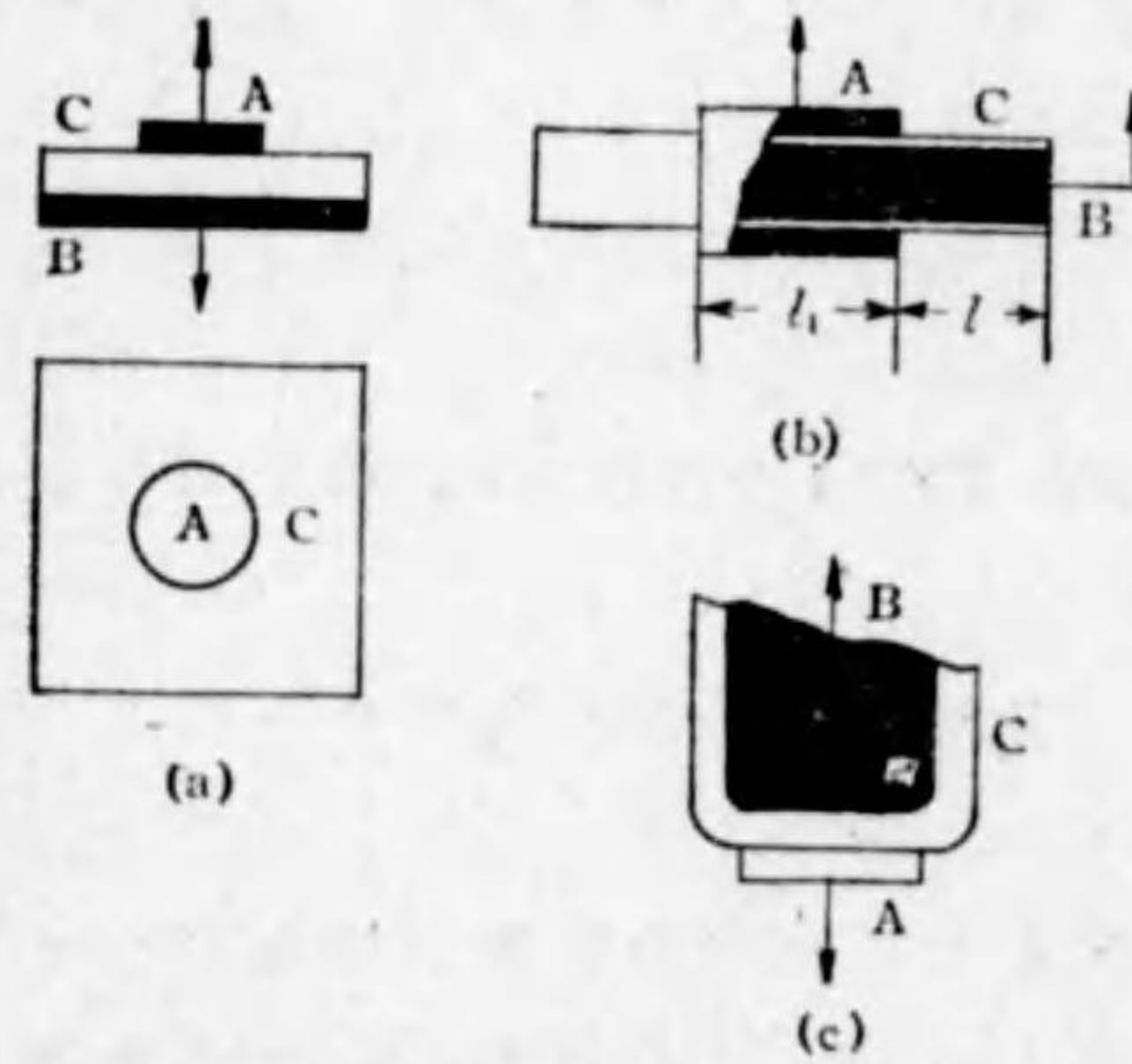
一方の電極が針端電極で第42圖の如き場合には、比較的低い電壓に於て、針端附近の空氣は破壊されコロナ放電が発生する結果空氣中にイオンが豊富に生じ、固体誘電體の存在がこれに作用して一層複雑な現象を呈して、火花放電々壓は C の無い場合に比し或は高く、或は低くなる。これは C の存在が下に列挙する諸因により放電現象に影響する爲めで、その何れが強く現れるかによつて放電現象に夫々特異の諸相を發現させるのである。

- (1) 固体誘電體の誘電率が 1 より大なる爲めに、電位分布が空氣のみの場合と異なる。
- (2) 固体誘電體の表面に電荷が蓄積し、この空間電荷に依つて電位分布が變る。
- (3) 固体誘電體の誘電率、特に表面導電率が空氣に比し大なる爲めに電位分布が變る。
- (4) 固体誘電體の存在によりイオンの運動状態が變り、従つて空間電荷分布も變化し、電位分布並に放電機構までその影響を受ける。

空氣の湿度低く且固体誘電體の表面導電率も低ければ、(2) 及 (4) の作用が顯著に現れる結果、直流電壓を加へ針端電極が (+) なる場合には C を挿入することにより火花放電々壓は著しく昇る。針端電極

が(-)なる場合又は交番電圧に對してはCの存在によつて火花放電電圧は一般に低くなるが、Cが針端電極に近い時には却て高くなることもある。又空氣の濕度の變化に伴ひ火花電圧の變動するのはCの表面に吸着する水分の作用に因るのである。

上下電極間の火花電圧に對し固体誘電體の影響の最も少い例としては、平等電界にその表面が電界に平行するやうに置かれた場合である。第43圖はその一例で平行平面電極AB間に誘電體圓盤Cをその軸が電極に垂直、即ち電界に平行に置いてある。この場合に空氣が十分乾燥して居れば、Cの有無により火花電圧は殆ど變りない。然し普通は空氣中の水分によりCの表面の導電性が増し、一般に濕度の増加に伴ひ火花電圧は低くなる。但しその低下する程度はCの材料、表面の状態によつて著しい差がある。



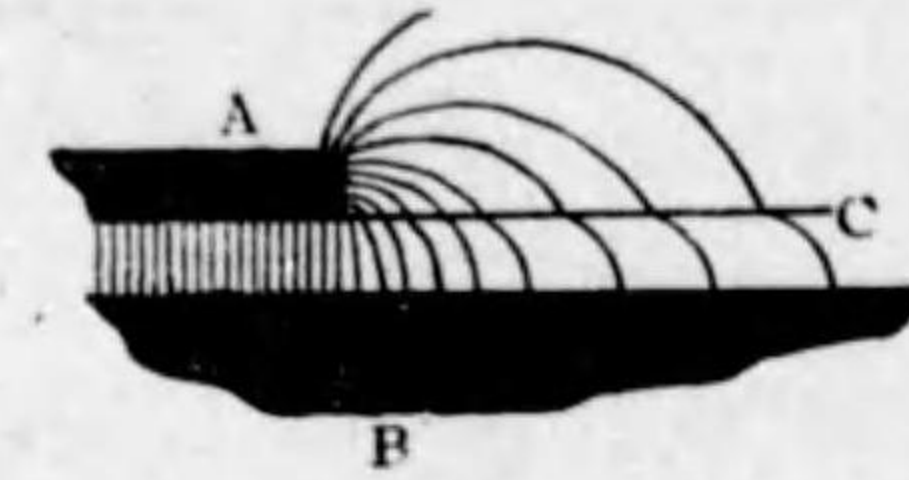
(a) 平板誘電體 (c) 盃狀
(b) 圓筒形

第 44 圖

の量が大きくなると、これが爲に生ずる電界は相當の大さとなり、AB間に加はる電圧は比較的低い場合でも両者が重疊する結果、A

これと反對に誘電體の影響の最も多い場合として第44圖に三つの例を示す。此の三つの例に於て共通の點は第45圖に示す様に小なる電極Aの周邊に於て電界の強さが大で電氣力線は密集し且誘電體表面に直角に近い角度を爲す故電圧を上げて周邊にコロナ放電を發生する状態に於ては誘電體の表面に電荷が蓄積され、電荷

の周邊に於て空氣の破壊はCの表面に沿ふて起り、火花は表面に沿ふて進展し遂にAB間を火花で連結するに至る。此の如き現象を沿面放電と稱し交番電圧を加へた場合に顯著に現はれる。蓋

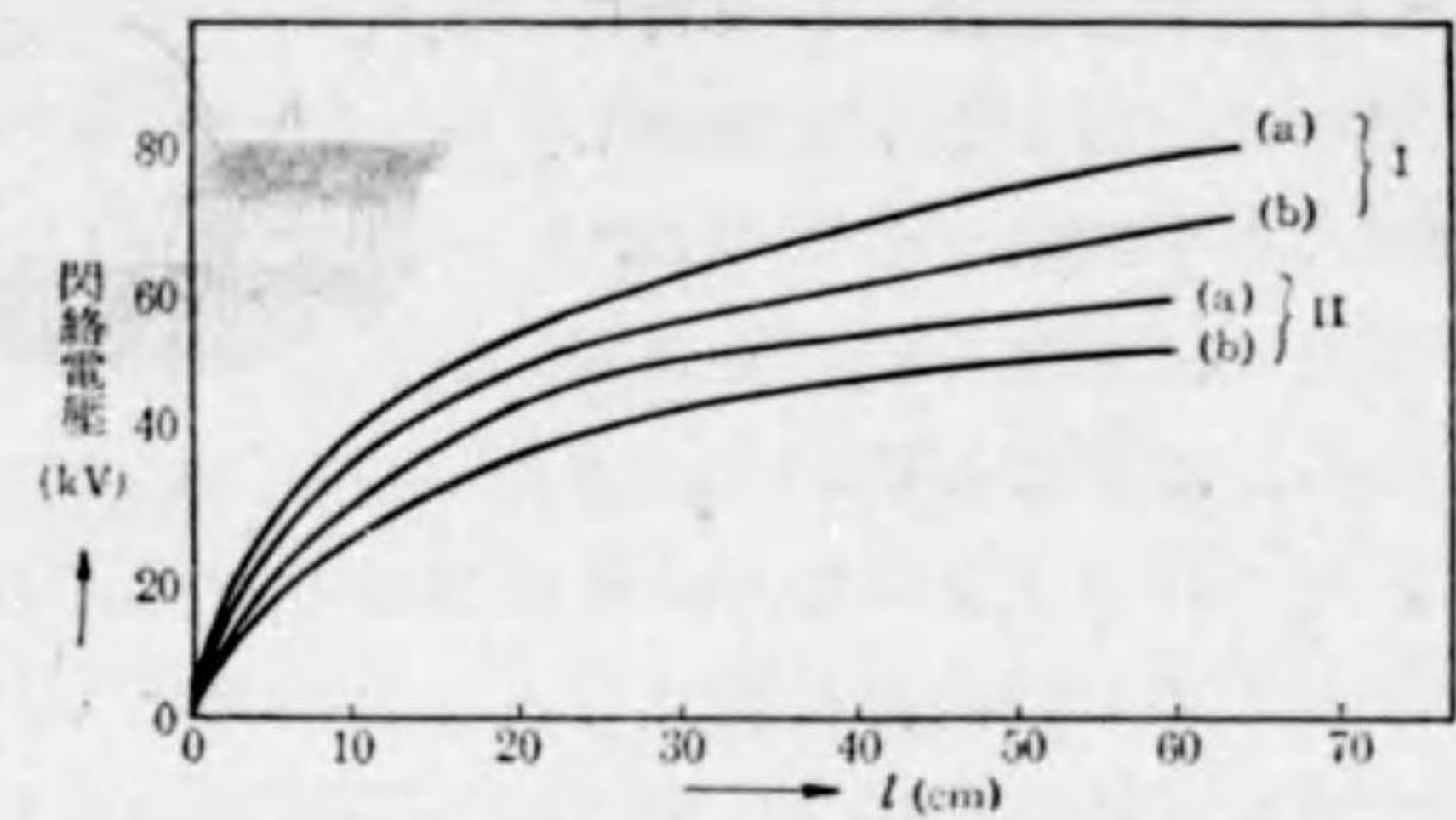


第 45 圖

しAB間に加はる電圧は半周期毎に極性が變るから、Aが(+)である半周期にCの表面に(+)の電荷が蓄積し、次の半周期にAが(-)となると、AとCの表面との間の電位差は電荷の無い場合に比して著しく、高くなるわけで、そのためにコロナが発生し(+)の電荷を中和した上、更に(-)の電荷が表面に蓄積される。従つてその次の半周期でAが(+)になると同様の事が繰返されるのである。

沿面放電の特徴はAとBとの露出部間の距離、例へば第44圖(b)のlを増しても火花閃絡電圧は餘り上昇せず、比較的低い電圧でも火花は意外の距離までも伸び得る點である。

ケーブルの絶縁耐力試験を爲すに當り兩端の被鉛を先端より或る長さに除去して絶縁被覆を露出し心線と鉛被との間に試験電圧を加へると第44圖(b)のlが甚だ大なる場合に相當するわけで、心線はBに、鉛被はAに相當する。而して鉛被を取去り絶縁物を露出した長さはlに相當する。かくの如き試料の絶縁耐力の試験を爲すに當りA及Bの間に電圧を加へると多くの場合に、空氣中に於ては比較的低い電圧で火花閃絡となり、所要の試験電圧まで電圧を上げることが出来ない。第46圖は實際にケーブル工場で試験した結果を示したもので絶縁露出の長さlを變へた場合の閃絡電圧の變化を示して居る。同じlの長さに對し絶縁の厚い66kVのケーブルの方が22kVのケーブルに比し閃絡電圧は多少高くなるにも拘らず普通耐壓試験を行ふ程度まで電圧を上げることは單にlを増す



I. 66 kV ケーブル (a) 電圧を急昇させた場合
 II. 22 kV ケーブル (b) 15分宛連続に電圧を加へた場合

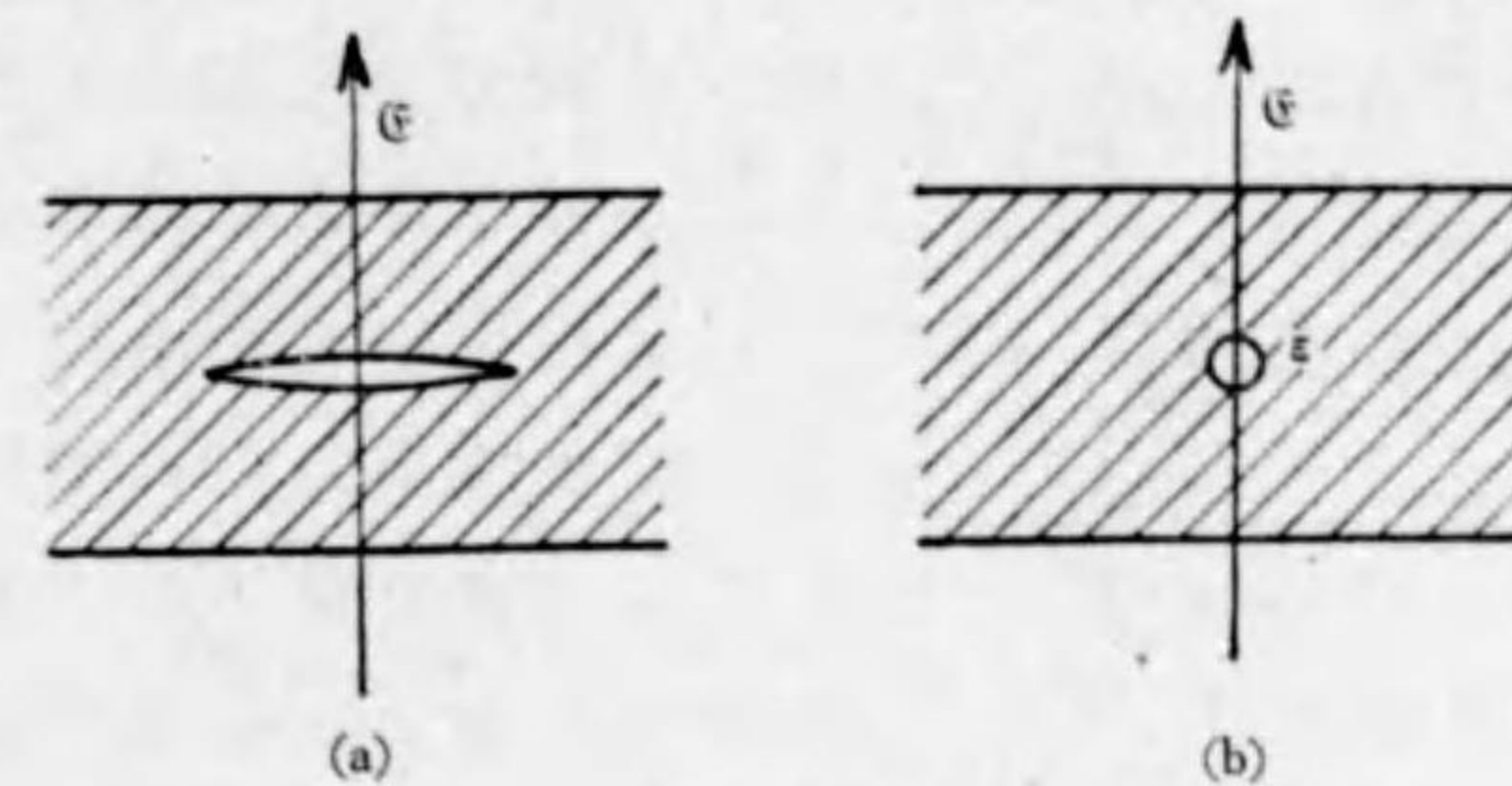
第 46 圖

ことだけでは不可能であることが観取される。従つて試験すべきケーブルの両端に特に沿面放電を阻止し得る様な装置を施して試験を行ふのが普通である。

高電圧絶縁の設計に於ては、かくの如き沿面放電を生ずる箇所が無いやうに努めるのが原則であるが、時に已むを得ず誘電体と導体との組合せがこの事態の発生を餘儀なくすることが起る。之が対策は種々あるが詳しいことは後に套管の所で述べることにして唯こゝでは発電機線輪等に適用する方法にしてA電極の外側に於て誘電体表面を周邊より適當なる距離まで半導体の被覆で包み蓄積電荷の作用を緩和する方法だけを擧げて置く。

次に高電圧絶縁に於て屢問題となるのは固体誘電体の内部に空隙があつてこれに氣體が充たされて居る場合で、機器、ケーブルの絶縁に於ては極めて重大なる問題である。空隙の形状は實際は種々であらうが、代表的のものとして第47圖に示すやうな、(a)誘電体中に極めて薄い層をなす空隙、(b)誘電体中に球状をなした氣泡を例に採

つて見る。簡單の爲に平等電界を想像し、而も(a)の薄層空隙は略平面で電界の方向はこれに垂直であるとする。空隙を充たす氣體の誘電率を1, 誘電体の方を ϵ とすれば、電界の強さは空隙では $\mathcal{E}_1 = D$, 誘電体の中では、 $\mathcal{E}_2 = \frac{D}{\epsilon}$ である。但し D は誘電束密度で、その値は空隙でも誘電体中でも不変である。(b)の場合も誘電率を(a)と同

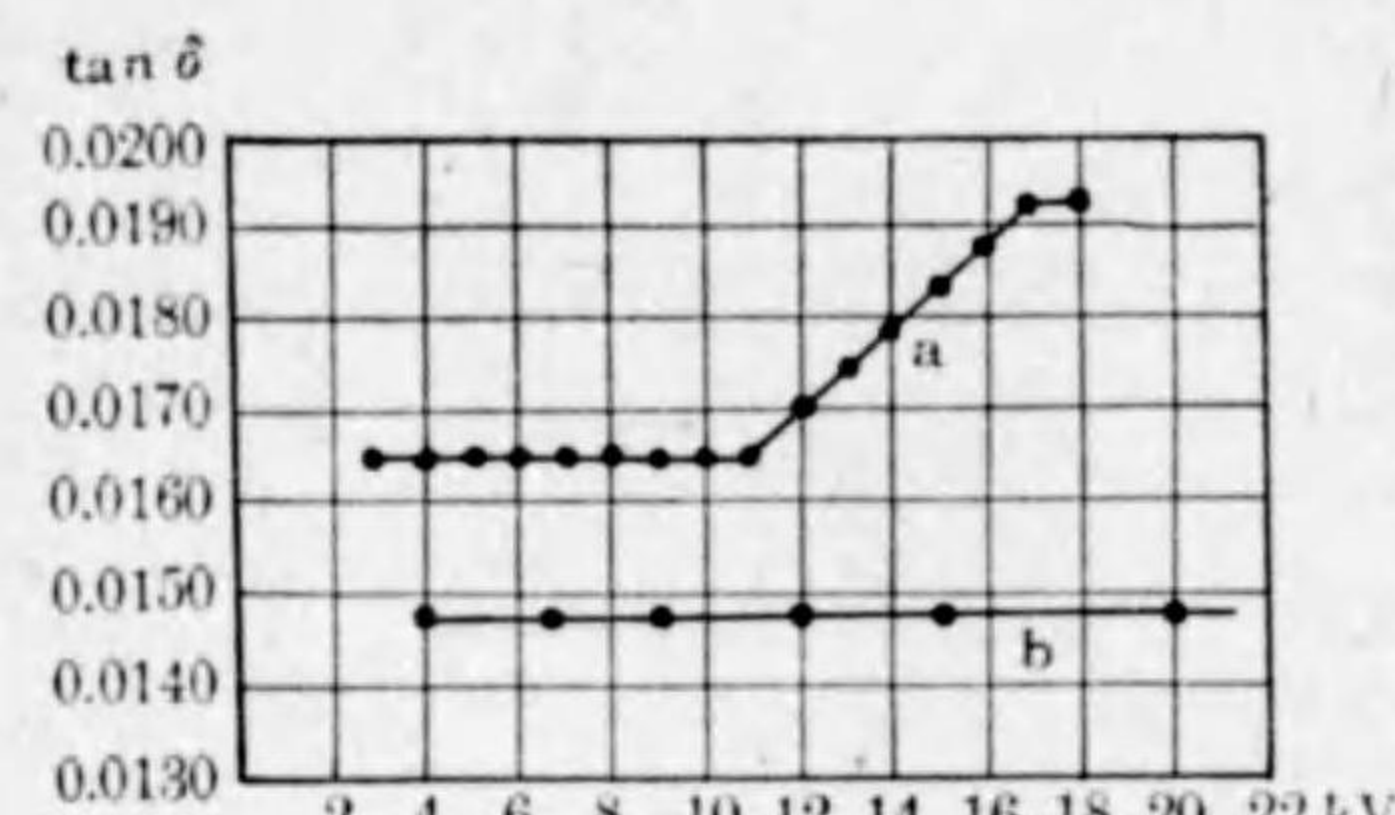


第 47 圖

様とすれば氣泡中の電界の強さは $\mathcal{E}_1 = \frac{3}{2 + (1/\epsilon)} D$, 但し D は氣泡の無い場合の誘電束密度であるが、氣泡が小さければ、その存在により平等電界の攪亂されることは甚だ少なかるべく、従つて誘電体の中では電界の強さは $\mathcal{E}_2 = \frac{D}{\epsilon}$ として實用上差支ない。

以上の二つの代表的場合に、氣體中の電界は誘電体中の電界よりも強く、且氣體の絶縁耐力は一般に固体に比し小であるから電界の強さが増すに伴ひ、先づ空隙中の氣體が破壊して盛にイオンを発生し、これが爲に固体誘電体をも破壊に導くことは當然の結果である。但し材料の種類によつて、その影響の大小はあるわけで、雲母はコロナの影響で劣化すること比較的少く、之に反し纖維質材料は最も顯著にその影響を蒙り破壊される、高電圧の発電機巻線の絶縁に雲母が専ら用ひられるのはコロナの影響が少い點を利用したのである。

何れにしる高電圧絶縁としては、かくの如き空隙の存在することは最も忌むべきことで絶縁施行上特に注意すべきである。又既に完成された製品に對しかゝる缺點の有無を試験する手段としては誘電體損又は力率測定が行はれ、高電圧ケーブルに對しては一般にこの試験法が實用されて居る。第48圖はケーブル試料で空隙あるものと無いものとに就て誘電體力率を電壓を變へながら測定した結果を示して居る。空隙のないものでは一定の値であるのに空隙があると或電壓値から力率が増加して居る。之は空隙に於てイオン化の開始されたことを示して居る。但しケーブルの場合に空隙があれば常に此の如く明瞭に $\tan \delta$ の上昇を示すとは限らない空隙が幾つかあり、その厚さに差があれば各に於てイオン化の發生する電壓は夫々異なるわけで $\tan \delta$ の曲線は電壓の上昇に伴ひ徐々に増加する状態を示す場合がある。尙空隙に發生するコロナの有無を検するに音で聴く方法と電壓を加へずしてエックス線寫眞を撮る方法とある。



a 空隙あるもの b 空隙なきもの

第 48 圖

の場

5.2 液體及固體誘電體の組合せ

絶縁油の如き液體誘電體の中に固體誘電體が存在する場合に現はれる高電圧現象も亦實用上重要なものである。液體誘電體そのものの電氣的性質が氣體に比し複雑であるから前に述べた氣體と固體との場合に比し、この場合の現象は自ら一層複雑性を増すべ

きことは想像に難くない。然し一面には甚だ相似た所もあるので例へば絶縁油中に固體誘電體があり、電界が加はると固體の表面即ち油と固體との界面に電荷が蓄積すること、又第44圖の様な電極と固體誘電體との配置にすれば空氣中に置かれた時と同じ様に沿面放電が發生する等は顯著なる例である。

但し油中で沿面コロナ放電を發生する時はその局部の表面が損傷される。又一度固體の表面に沿ふて火花が閃絡する時は、著しく固體の實質を損傷することがある。而してその程度は材料の種類によつて異なり、例へば磁器の如き空氣中に於ける沿面放電では肉眼を以てその閃絡の痕が認められない様な材料でも油中で閃絡が起る時は表面は蝕んだ様に痕を残し、甚しい場合は新品と取換へる必要が起ることがある。之に反しプレスボードの様な厚紙で油のよくしみ込んだものでは比較的害が少い。

合成樹脂等で紙を重ねて作つた所謂積層板では油中コロナの影響から相當の被害を受ける。依つて高電圧絶縁の設計に於ては固體誘電體の表面に近くコロナ放電及沿面放電の生じ易い導體及絶縁物の組合せを極力避くべきであり。又已むを得ず此の如き配置となつたならば、その箇所にコロナを生ずる様な電界が加はらぬ様にすべきである。尙先に固體誘電體の絶縁耐力の測定に就て述べた如く固體誘電體を絶縁油中に入れて絶縁耐力の試験を爲す時は見掛け上の絶縁耐力の實測値が低く出るのは矢張り此の油中コロナの影響である。

元來絶縁油は高電圧絶縁に用ふる場合は單獨でなく、必ず固體絶縁材料と組合せて用ふべきであるとは3-1-1に於て述べた所である。即ちその理由は電極として油中にある金屬導體間に電壓を加へる時は、油の中に在る細かい塵、特に纖維質の細塵が電界の強い方へ移

動して次第に電極の間に集まり橋を架けた様な状態となり終に火花放電となる虞があるから必ず固体絶縁材料を電極間に挿入して、絶縁の補強を行ふ必要があるからである。而して絶縁補強の方法としては、電極となるべき金属導体の表面に密着させて、油と金属とは直接触れない様にする方法と、電極の中間に板状の隔壁を成す様にする方法とある。勿論此の二つの方法を併用する場合もある。電極となる金属導体の表面を被覆する方法は纖維質細塵が電極間を橋絡するを防ぐに有効であると知られて居る。此の橋絡現象は油が湿気を含む場合に殊に起り易く、又橋絡により絶縁の強度は著しく低下するのは當然の結果である。然るに電極が絶縁物で蔽はれてあれば、一旦電極近く電界の強い所に移動した細塵は再び反撥されて橋絡を形成し難い事が実験上認められて居る。その理由は十分明かでないが兎に角湿気のある油では細塵は電界の強い所から驅逐されて之で絶縁低下の危険が少くなるのである。油が乾燥して居ると多少の細塵の集中は認められるが、危険は少いわけで茲に此の方法の實用上の價値が認められる。且絶縁被覆は厚くなくとも效能があることは実験上認められて居る。電極の距離、形状等で異なるが、此の方法を施して破壊電圧の値は25乃至70%の程度上昇することは實際の例の示す所である。

次に第二の方法も細塵が電界の強い方へ移動することを妨げ、且橋絡の危険を少なくするには極めて有効で、特に電界の不平等なる場合に效能が大きいのである。而して此の絶縁隔壁は面積の相當廣い數枚の板を用ひ油を數層に分割すれば、細塵の量も自然分割されて一つ箇所集り得ず一層效能を發揮出来る。

而して隔壁はその面が出来るだけ電界の方向と直角に、即ち等電位面に一致する様に置くのが有利である。

最も良い例は油入套管であつて、心棒の外は直接固体絶縁材料(例へば紙を巻きつける様な方法)を以て包み、その外側は次第に直径の大きい數枚の絶縁筒を同軸に挿し込んで油の部分に數層に分けてある。

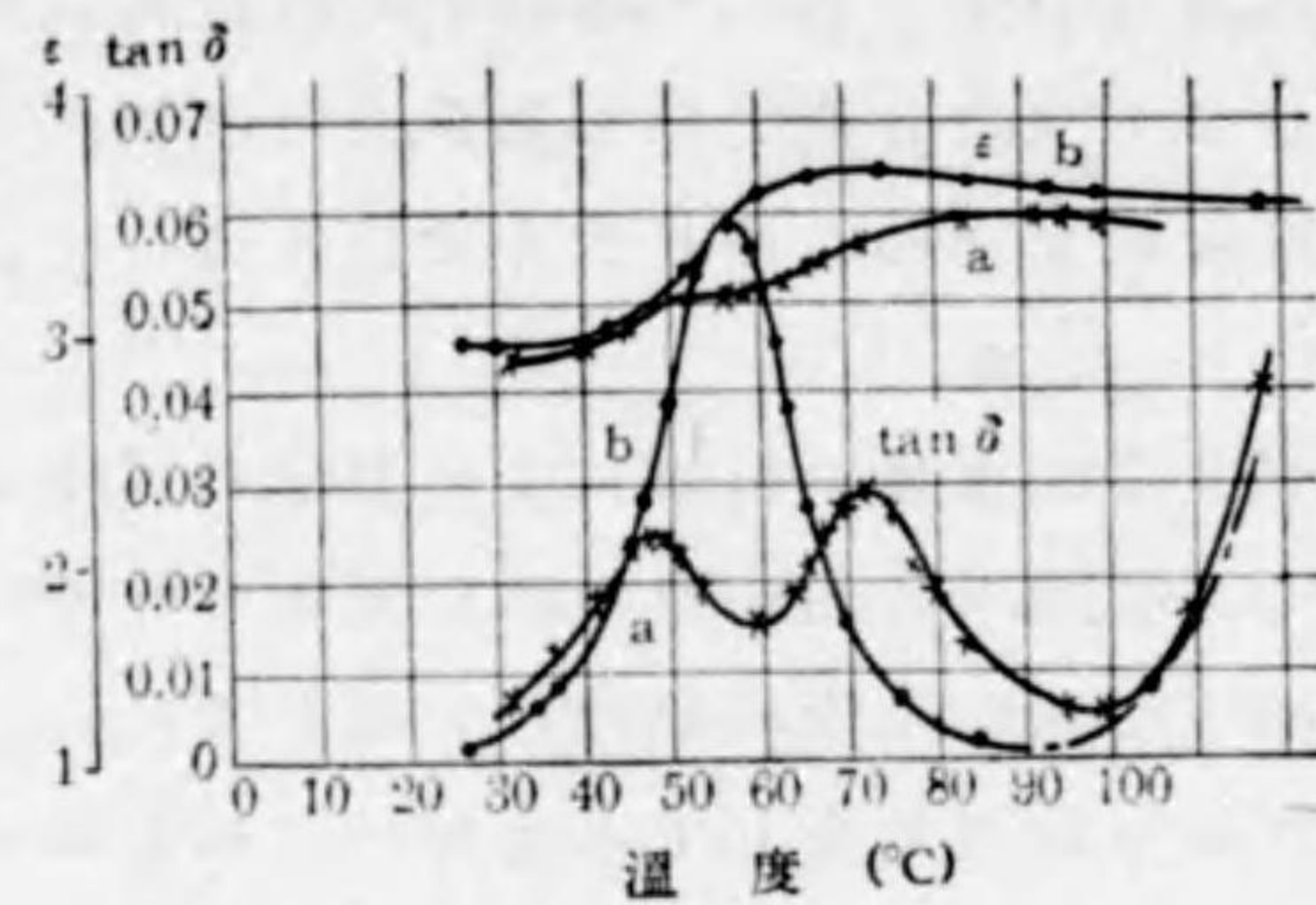
茲に特記すべき事は細塵の橋絡による絶縁の低下は電圧を極めて短時間加へた場合、即ち所謂衝擊電圧の加はる様な時には起らないのである。従つて油に固体絶縁材料を組合せて、その絶縁の強度が向上する率は衝擊電圧に對しては商用周波數電圧に對するものに比しては小さい事は當然であるが信頼度を増す事は明かであり、組合せの效能は確かにあるのである。

5.3 異なる固体誘電体の組合せ

二つ以上の異なる固体誘電体を組合せたものの諸性質は各成分の諸性質を組合せたものに相當することもあれば、或はこれに相當せず別箇のものとなることもある。高電圧絶縁に於て多くの場合に二種以上の材料を組合せて使用するから、組合せ誘電体に關する研究は實用上極めて重要ではあるが、未だ實用上に役立つ様な資料に乏しい。その中から主なる要點を摘出すれば下記の如くである。

- (1) 誘電体損又は力率は多くの場合に組合せた結果各誘電体單獨の場合の何れよりも大となる。
- (2) 組合せた誘電体の等價誘電率は一般に各誘電体の何れよりも大となる。
- (3) 絶縁耐力は組合せた結果強くなることもあれば弱くなることもある。

第49圖は二種の樹脂を組合せた場合に50~で溫度を變へて誘電率 ϵ 及 $\tan\delta$ を實測した結果を示して居る。但しaの方は兩種の板



第 49 圖

を別々に作り單に重ね合せた場合、bの方は兩種の樹脂をよく混合して作った試料に就て實測したものである。此の圖に第32圖を参照して觀察すれば、aの場合は、二種の樹脂を別々に實測すれば各第32圖に示した様な結果を得るのを兩者を重ね合せた結果は兩者を組合せた様な曲線 a になつた事を示し、之に反し兩者を混合した場合の b の方は全く別箇に第32圖に相當する曲線が得られた事を示す事實が認められる。而して b の場合には $\tan \delta$ の最大値が著しく増加し、又誘電率が大きくなつた事が示されて居る。之は唯一つの例に過ぎないが、之に依つて、誘電體の複雑性が窺はれることと思ふ。

5.4 金屬導體と誘電體と接觸する界面に於ける現象

金屬導體と誘電體とはその電氣的性質に於て格段の差あることは誰でも知つて居ることであるが、その差を數字的に示すと今更ながらその差の大なることに驚く程である。即ち金屬導體に於てはその固有抵抗は周知の如く一邊が1cmの正六面體を取り、その相對

する面の間の抵抗値で示すのであるが、その値は何れの金屬でも1オームの百萬分の一から十萬分の一の間即ち 10^{-6} から 10^{-5} の程度であるのに、絶縁材料として利用される誘電體に於ては、百萬オームの百萬倍以上即ち 10^{12} 以上のものが多いのである。此の如く電氣的性質の著しく異つた物質が接觸して居る場合にその接觸面即ち界面に於て特異の現象が起ることは想像に難くない。而して此種の現象が、誘電體の電氣的破壊現象と密接なる關係があるべきことも想像される。然し是に對する理論的研究も亦實驗的研究も餘りないので未だ不明なる點が多い。

以下述べる現象は果して此の界面現象の一つの現はれであるか否かは實驗的の證明も出來ないが、二三の實驗成績から見て關聯した現象と思ふ。

5.5 絶縁された金屬導體に蓄積する電荷

絶縁された金屬導體が電界に在つて、電極にも接觸されず又大地にも接觸されて居ない場合に、電界が交番電界であつても此の絶縁された導體に電荷が蓄積される現象がある。高電壓回路に使用せられる電氣機器に於て、此の如き導體があつて、その高電壓回路にも亦大地にも接觸されて居ない場合に此の導體と大地との間又は高電壓回路に接觸せる他の導體との間に放電を生ずることがある。之は此の導體に蓄積された電荷が増して、大地又は他の導體との間に電位差を生じ終にその間の絶縁を突破して放電を生じたのである。

此の現象は空氣中に於ても亦全體が絶縁油中にある場合でも起つた例がある。絶縁された導體は勿論固體誘電體が絶縁物として之を支持して居るわけで此の金屬導體と誘電體との接觸する界面

に於ける現象も原因の一つと想像される。

何れにしる電気機器に於て此の如き状態の生ずることは避くべきことで機器の設計に當り、此の如き絶縁導體の出来ない様に注意すべきである。蓋し此の如き放電が常に起れば絶縁材料を損傷し、又絶縁油中に起れば、油を劣化する虞があるからである。

索 引

イ		サ	
移動能度	9	再結合作用	10
陰イオン	5	三鹽化ベンゾール	42
ウ		シ	
暈光放電	18	衝撃電壓	32
エ		衝撃電壓試験	72
液體誘電體	42	針端間隙	28
圓筒電極	22	充電々流	49
沿面放電	81	自由行程	7
カ		セ	
界面現象(金屬導體と誘電體との)	88	纖維質材料	73
擴散現象	10	纖維素	75
キ		絶縁された金屬導體に蓄積する電荷	89
球間隙	20, 27	絶縁耐力(固體誘電體の)	63
幾何容量(Geometric capacity)	48	絶縁抵抗測定	53
極性効果(火花電壓の)	32	絶縁油	42
ク		全破壊	16
空間電荷効果	10	ソ	
コ		双極子モーメント	61
光電子	8	相對空氣密度	19
固體誘電體	46	損失角	45
異なる固體誘電體の組合せ	87	タ	
固有抵抗	51	體積固有抵抗	48
コロナ放電	17	$\tan \delta$	45
合成絶縁油	42	$\tan \delta$ -溫度曲線	63
五鹽化チフェニル	42	テ	
50% 放電率	33	デバイ(Debye)の双極子説	60

電氣破壊説	66		
電子ボルト	6		
電 離	5		
電離電壓	5		
ト			
同心圓筒	22		
導電率	51		
ネ			
熱イオン作用	8		
熱電離	8		
熱破壊説	66		
ハ			
双形電極	36		
拂子放電	18		
媒質効果	66		
パッシュェンの法則	20		
ヒ			
標準波形(衝撃電壓の)	32		
表面固有抵抗	53		
表面漏洩抵抗	48		
表面漏洩電流	48, 53		
フ			
複合誘電體	77		
不整現象(火花電壓の)	21		
Freon ガス	41		
V 曲線(誘電體力率の)	63		
部分破壊	16		
		ハ	
		平均自由行程	7
		並行圓筒	24
		平面電極	18
		ホ	
		棒間隙	35
		芒光放電	18
		マ	
		Maxwell の學說	60
		ユ	
		有極分子	61
		誘電體吸收	50
		誘電體損失	45, 50, 55
		誘電體損失係數	46, 58
		誘電體力率	45
		誘電率	47
		ヨ	
		陽イオン	5
		ル	
		ルチル (Rutile)	47
		レ	
		勵發狀態	5
		勵發電壓	6



高電壓工學(前編)

定價 1 圓 30 錢

著者檢印

不許複製
昭和十六年八月十日 印刷
昭和十六年八月十五日 發行

●著者 西 健

●發行兼印刷人 株式會社 オーム社
代表者 古賀 廣治
東京市神田區錦町三丁目一番地

●印刷所 オーム社印刷部
東京市神田區錦町三丁目一番地

●發行所 日本出版文化協會會員番號 105508
株式會社 オーム社
東京市神田區錦町三丁目一番地
振替東京 20018

大阪 オーム社
大阪市北區堂島濱通一丁目七十番地
振替大阪 69205

配給元 日本出版配給株式會社
東京市神田區淡路町二丁目九番地

21383

ち

新興基礎電氣工學

電子とその作用

星合・本多共著 定價 1.80 送料 .12

氣體中の放電

星合・本多共著 定價 1.80 送料 .14

真空工學

星合正治著 定價 1.50 送料 .12

高電壓現象

本多風士著 定價 1.50 送料 .12

誘電體論

酒倉秀雄著 定價 1.50 送料 .14

電子管 (1)

星合正治著 定價 2.20 送料 .14

電子管 (2)

星合正治著 定價 2.00 送料 .14

電子管 (3)

星合正治著 定價 2.10 送料 .14

音響工學

丹村保次郎著 定價 2.00 送料 .14

壓電氣と高周波

古賀逸策著 定價 2.00 送料 .14

電氣化學と電氣滲透

野口・駒形共著 定價 1.50 送料 .12

特殊電氣回路

丹村保次郎著 定價 2.20 送料 .14

541.3
81

541.3-N81ウ



1200500746068

終