

超高圧送電線のラジオ障害に及ぼす正負コロナ

Positive and Negative Coronas Affecting the Radio Interference in Extra-High Voltage Transmission Lines

永 野 宏 郎* 沼 尻 文 哉*
Hiroo Nagano Fumiya Numajiri

内 容 梗 概

超高圧送電線コロナによるラジオ障害は超高圧送電線設計上重要な因子となるものであって、ここ数年にわたり種々研究されている。

送電線導体に発生する交流コロナは電源周波の半サイクルの正負によって正コロナと負コロナとに分けることができる。ラジオ障害はこれら両コロナの作用によるもので、ラジオ障害の解析にはそれぞれのコロナ雑音量を分離して、その影響を調べることが必要になる。

研究の結果、ラジオ障害を与えるコロナ雑音量は正コロナの雑音量であることがわかった。気象条件、印加電圧によっても異なるが、負コロナ雑音量は正コロナ雑音量よりも 10~30 dB 少ない。

一方、正負コロナの特性を比較するため、可視コロナについても正コロナと負コロナを分離して観察した。特に、正コロナの発生には空間電荷が大きく作用していることが認められた。

今後、ラジオ障害の解析には正コロナの特性を分析することが必要である。

1. 緒 言

大電力の経済的送電の必要から送電電圧の昇圧化がはかられているが、電圧の昇圧につれて送電線より発生するコロナが重要な問題となってくる。

超高圧送電線のコロナ現象として、コロナ損失とラジオ障害とがあげられるが、とくに最近では、ラジオ障害が超高圧送電線設計の重要な問題である。設計上必要なデーターをうるため、コロナ雑音量を定量的につかむことが急務とされて、ここ数年間、種々の導体寸法、導体数そのほか導体配置によるコロナ雑音量の測定が世界各国で行われてきた。

複雑なコロナによるラジオ障害も巨視的には大分研究されて貴重な資料が得られたが、導体より発生するコロナが大気条件に左右され、また、大きな変動があるため、信頼のあるコロナ雑音量算定式を確立するのにはまだほど遠いと考えなければならない。コロナ雑音に対して理論的考察も行っているようであるが、まだ、相対的比較に役だつ程度であって、コロナの本質にまで立入っては考えられていない⁽¹⁾⁽²⁾。

周知のように、送電線に発生する交流コロナは正の半サイクルに発生する正コロナと負の半サイクルに発生する負コロナとに分けられる。筆者の一人がさきに報告しているように、正コロナパルスと負コロナパルスとは根本的に発生機構が異なり、正コロナパルスは負コロナパルスに比べてきわめて振幅が大きい、パルス数は非常に少ないという性質をもっている⁽³⁾。したがって、正コロナと負コロナとがそれぞれコロナ雑音量にどのように関係しているかとい

うことが疑問となるに違いない。また、夜間われわれが観察する可視コロナについても、正コロナと負コロナを分離して観測し、各コロナの特性を対応づけることも必要になってくる。

このような観点から、正負コロナを分離して、コロナ雑音に対する影響および可視コロナ特性の研究を行った。可視コロナの特性を調べる上には、導体径の太いものほど正コロナストリーマが伸びやすく観察しやすくなる⁽⁴⁾。そのため試作した 40.5 mmφ 膨脹形(Expanded) ACSR を使用した。特性は通常の ACSR においても変りはない。

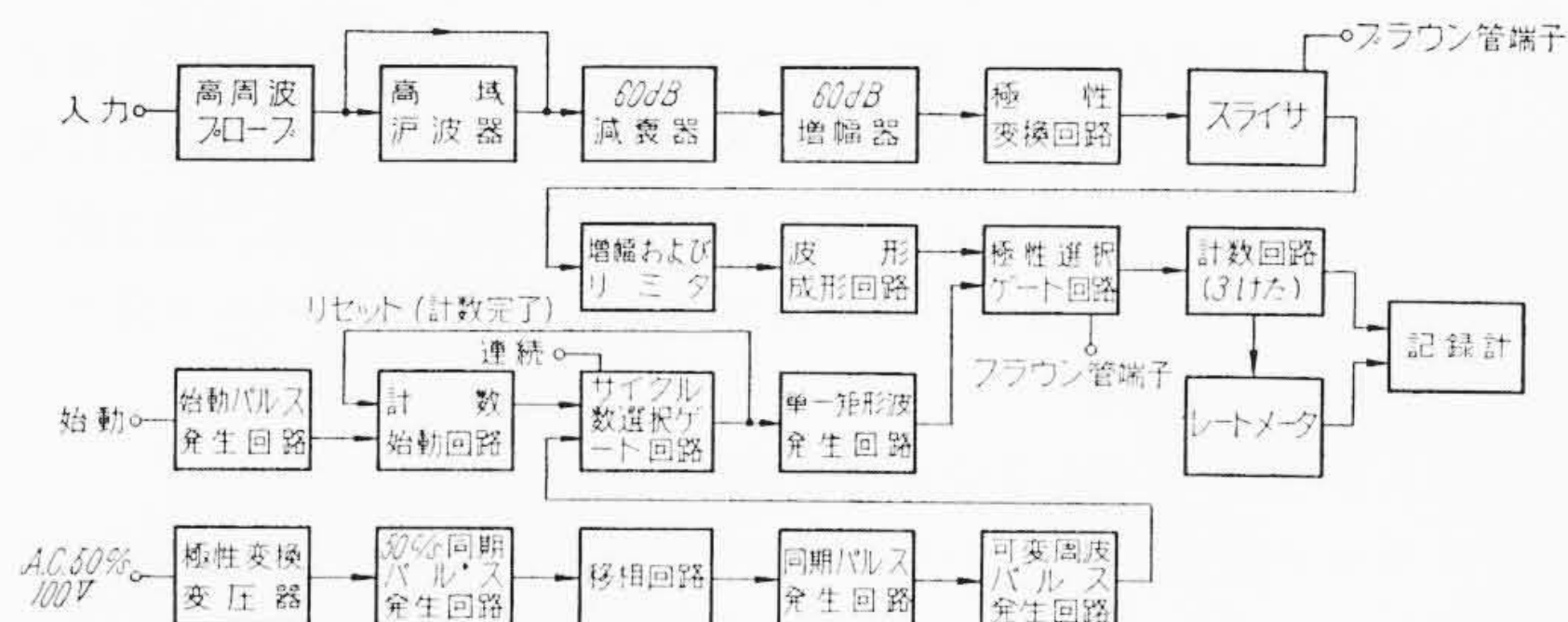
2. コロナパルス分布計数装置

はじめに、コロナパルスの特性を調べるのに必要なコロナパルス分布計数装置について説明しておく。

第1図はコロナパルス分布計数装置のブロックダイアグラムである。交流コロナの正コロナおよび負コロナを分離して、各半サイクル中に発生するコロナパルス数とコロナパルス波高値の分布を測定する装置である。

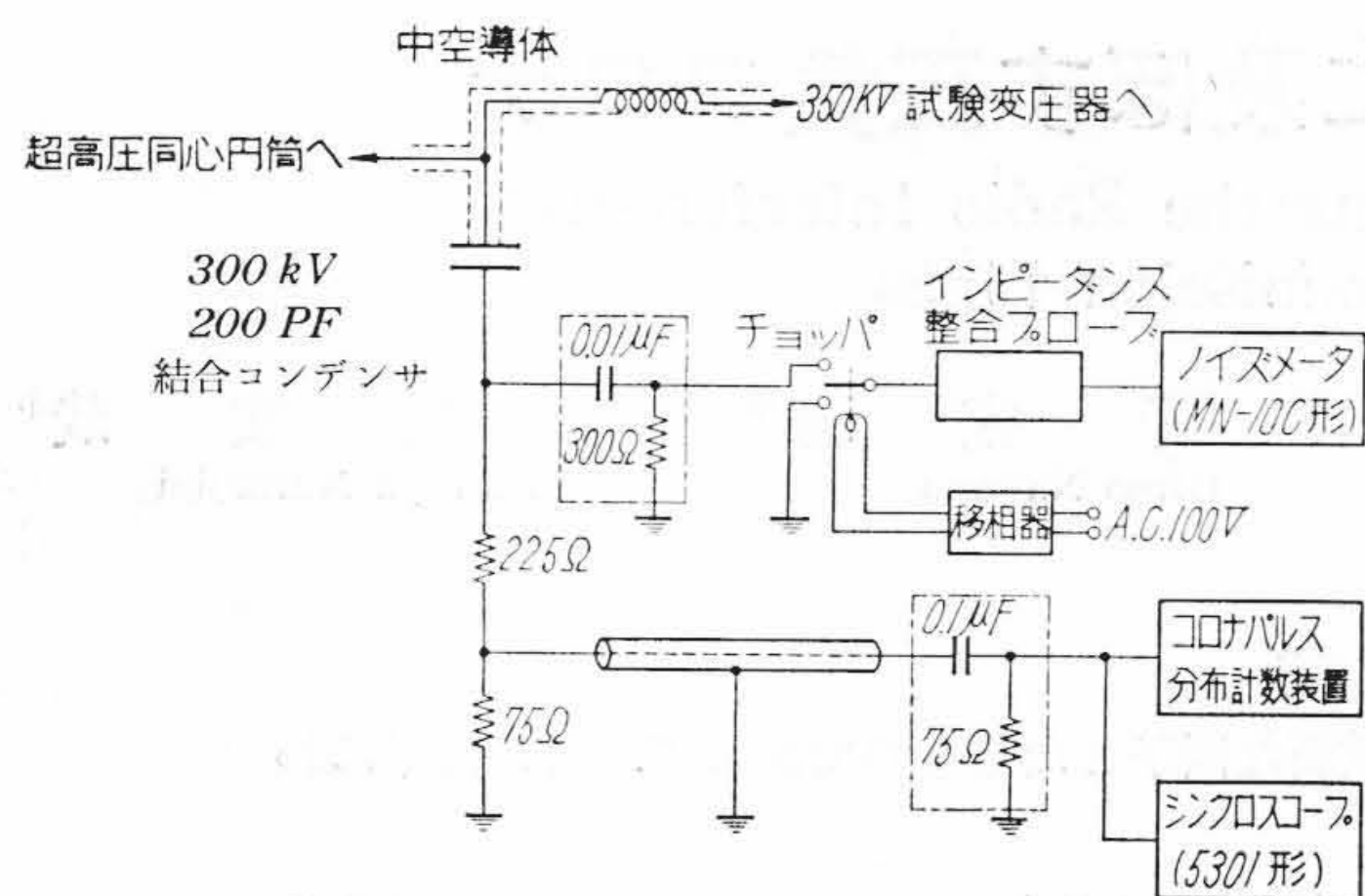
充電電流に重畳したコロナパルスは CR 形高域濾波器によって充電電流を除去して増幅器にはいる。増幅器は 4 kc から 4 Mc まで平坦な周波数特性をもち、最大無ひずみ増幅度は 60 dB である。コロナパルスの周波数成分には 4 Mc よりもはるかに高い成分を含むので、実際にはもっと広帯域の増幅器でなければひずみなく増幅することはできない。したがって、0.1 μs 以上の立上りをもつコロナパルスの波高値は絶対値を示すものではなく、相対的比較しかできないことに注意しなければならない。現在、20 Mc までの広帯域増幅器を製作中である。入力が大きすぎて増幅器が飽和するとパルス頭が割れるため、減衰器によって常に増幅器の線形範囲で使用する。

コロナパルスは正と負では位相が 180 度異なるため、位相変換回路を通して常に負のパルスにして、スライサ・ゲートに入れる。スライサはコロナパルスの成分波高値を調べるもので、一定波高値以上のパルスしか通過させないようなゲート回路である。なお、リミッタで振幅を制限することもできる。スライサおよびリミッタを通過したパルスは波形成形回路に入り、一定振幅、一定幅のパルスに成形される。波形成形回路の最小トリガー入力 1 V であるため、増幅器の増幅度を 60 dB としてコロナパルスの入力 0.1 mV まで応答できる。波形成形回路の出力を一段増幅して計数回路で計数する。



第1図 コロナパルス分布計数装置ブロックダイアグラム

* 日立電線株式会社電線工場



第2図 測定回路

正および負のコロナパルスを別々に計数するには、電源周波 50c/s の正および負の半波に同期して開閉するゲートを置き、正あるいは負のコロナパルスのみを通過させるようにしなければならない。交流 100V 電源に同期して半サイクルごとに開閉する正負サイクル選択ゲートを計数回路の前段にそう入する。ゲートの動作位相は 100V 電源から得た 50c/s 同期パルスによってモノステーブルマルチを動作させ、そのトリガーの幅を調整することによって、二次高圧電源の波形に同期した矩形波を発生させて行っている。

さらに、一定時間中のコロナパルス数の積算値を求めるためサイクル数選択ゲートにおいて1, 2, 5, 10 および 20 サイクルの期間だけパルスを通してやるようにする。一方、連続計数も行ってパルスレートで記録する。

計数回路は一けたに真空管による10進回路，二けた，三けたにデカトロンを使用し，さらに機械的計数装置が付加できるようになっている。連続計数の記録は内蔵するレートメータあるいは直接に記録計によって行われる。計数値にしたがって，記録計は100あるいは1,000回ごとに，レートメータは1, 10, 100および1,000倍に切り換えて記録される。

分解能力はモノステーブルマルチが 2 Mc まで、計数回路は(真空管計数回路のフリップフロップの動作周波数は十分高いがデカトロンの応答周波数が 5 kc しかない)ので全体として 50 kc 以下のパルス周波数にしか応答できない。パルス間隔にして 20 μ s であり、半サイクル 10 ms にパルスが一様に分布するものとして 500 個までである。コロナパルスの分布は一様でないため 300 個前後が限度になる。分解能を上げるためには、さらに一段真空管計数回路を付加する必要がある。

パルスの振幅が大きく減衰器を使用するときには計数できるパルスの最小振幅が変わるので、計数値の比較は0dBに換算して行わなければならない。

3. 正負コロナの雑音量

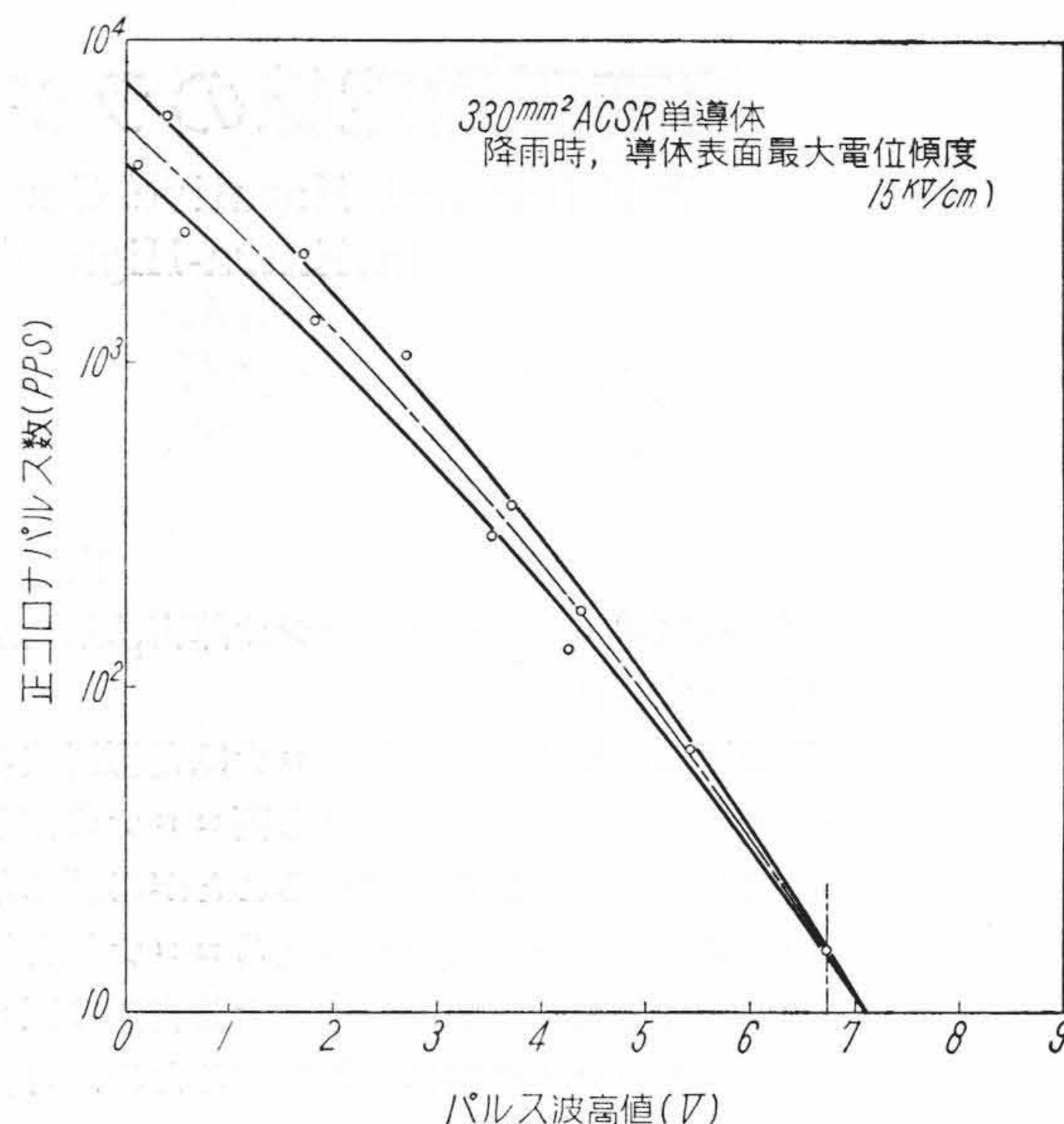
導体のコロナ雑音特性およびコロナパルス特性は超高圧同心円筒を用いて測定した。超高圧同心円筒は内径 3,000 mm ϕ 、長さ 18,000 mm のもので、350 kV 試験変圧器より 150 mm ϕ の中空導体によって電圧を印加する。電源側より誘導される外部雑音を除くため 5 mH 程度の高周波寒流線輪を中途にそう入している⁽³⁾。

導体に発生するコロナはその電圧を 300 kV, 2,000 pF の結合コンデンサの接地側よりインピーダンス整合抵抗を通して取り出し、同軸ケーブルでラジオ障害測定用ノイズメータおよびコロナパルス分布計数装置に導かれる。

3.1 正負コロナ分離測定回路

3.1.1 コロナノイズ測定回路

導体の交流コロナを分離するにはかなり注意することが必要で



第3図 正コロナパルス波高値分布

ある。正と負のサイクルを分離することによって波形が変わったり、コロナ以外の雑音が混入してはならない。また、コロナ雑音電圧を正負分離して測定するときには充電電流を除去する必要がある。

正負コロナを分離するためには高圧電源電圧に同期して正あるいは負の半サイクルの期間だけ入力を通して回路が必要になる。半波整流の高圧電源を用いれば正あるいは負の半サイクルのみの電圧を導体に印加することができるが、正負両サイクルが印加されたときと空間電荷の分布が変わるので正確な結果が得られない。また一方、正と負のコロナパルスは極性が反対であるので、二極管またはゲルマニウムダイオードによって整流することも考えられるが、整流素子の動作特性が問題であって波形ひずみの恐れが多分にある。

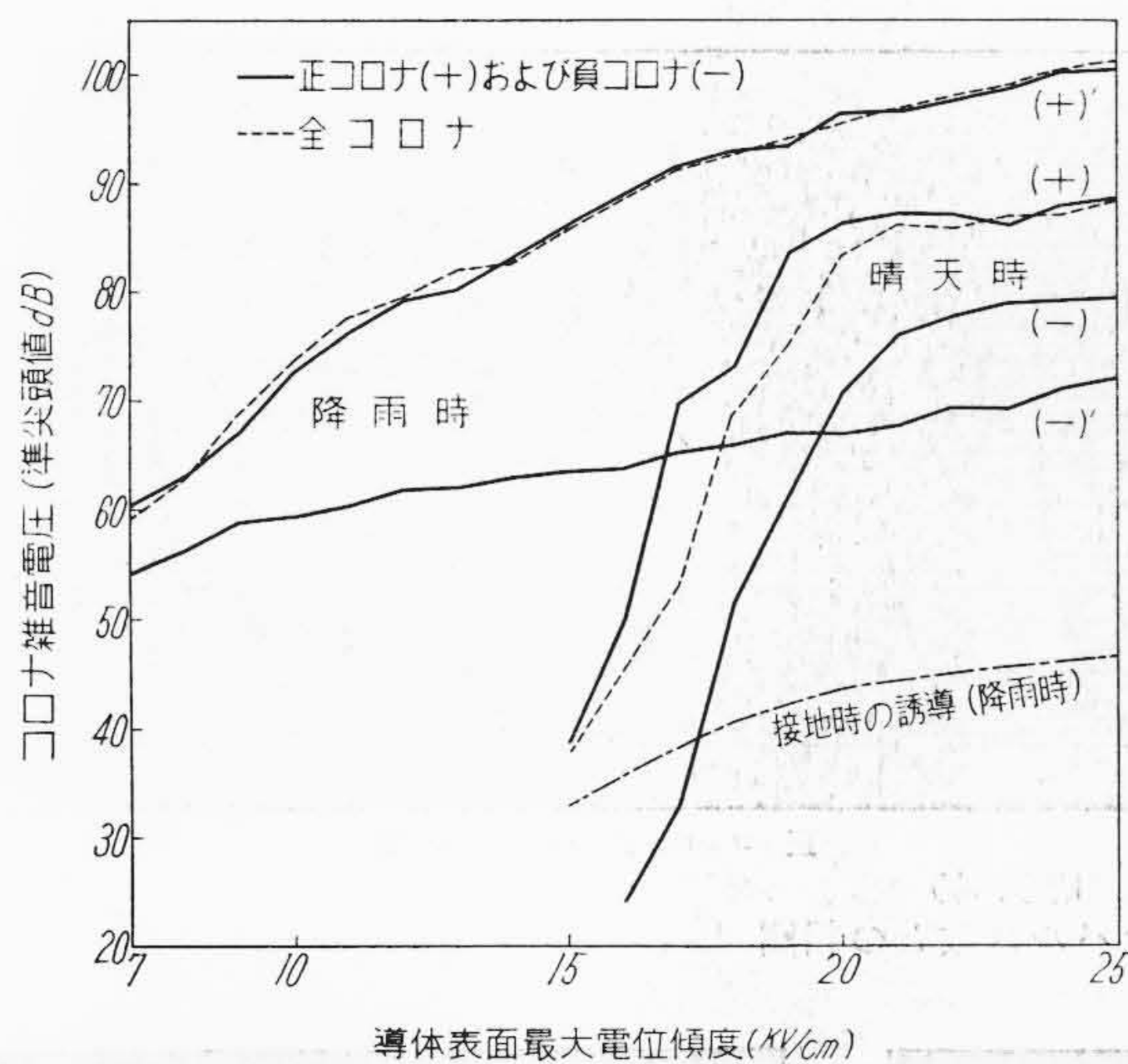
そこで、50 c/s 高圧電源電圧に同期してチョップを働かせることにした。この場合、チョップによる雑音の発生と、チョップ開路時のコロナパルスの誘導に注意しなければならない。

充電電流は電源電圧と90度位相がずれているため、チョップ接点の動作を電源電圧の零点に同期させると充電電流が最大のとき切ることになる。そこで、充電電流は簡単なCR回路によって除去した。ノイズメータの同調周波数は1 Mcであるため、このCR回路によってコロナパルスの低周波成分が除去されるとしてもほとんど問題ではない。CR回路の時定数は3 μ sで50 c/s波の減衰率は-60 dB、立上り0.5 μ sの入力パルスは振幅が約99.5%になるにすぎない。送電線に生じるコロナパルスは立上りが0.5 μ s以下と考えられるのでこの回路によってほとんどひずみをうけないと考えてよい。

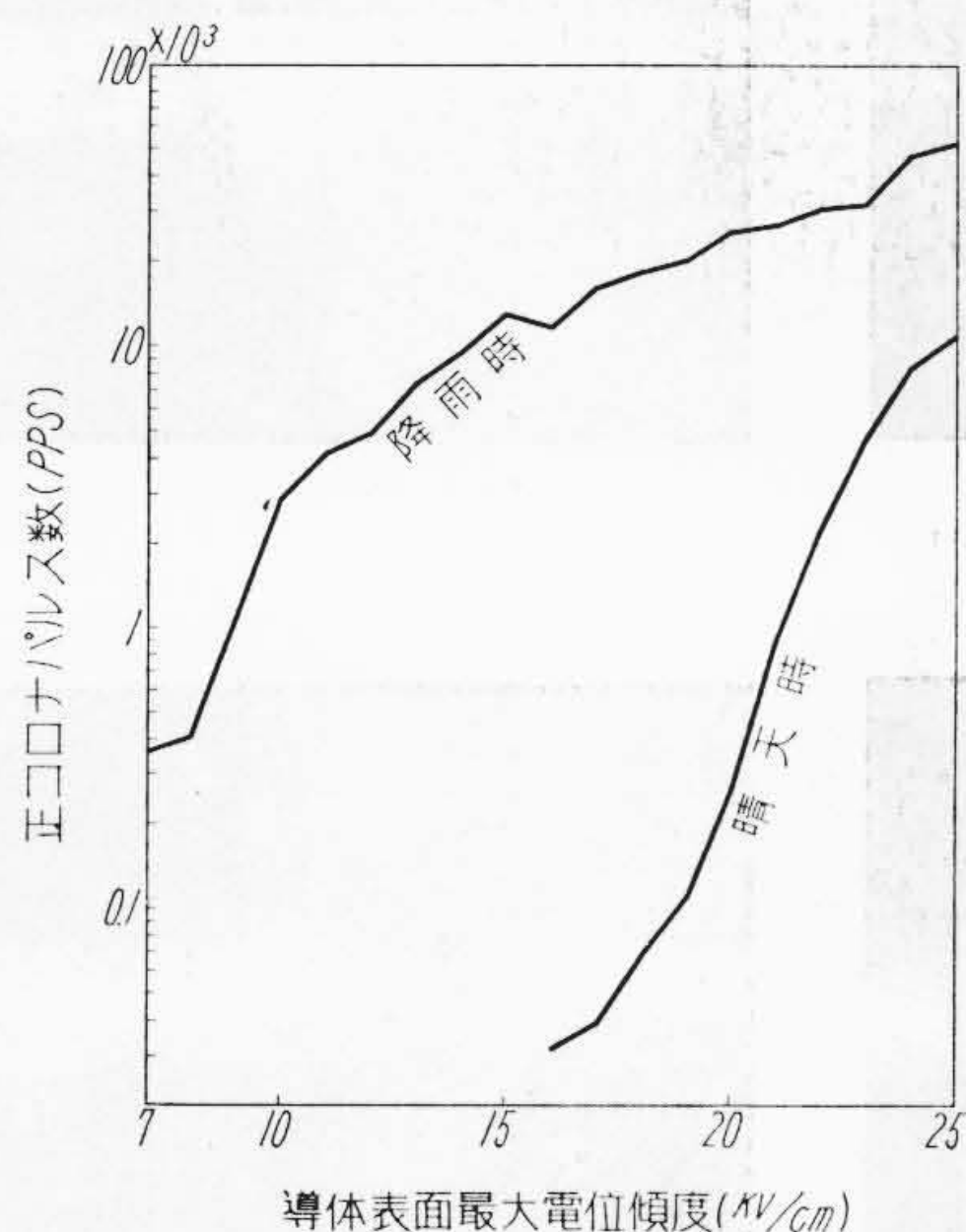
CR 回路によって充電電流を除去したのち、チョップにはいる。チョップ接点の開閉は 50c/s 高圧電源電圧の零点に同期させるが、測定器の入力インピーダンスが高いので、接点開放時には測定器入力を接地してコロナパルス誘導を防いである。第2図に超高圧同心円筒によるコロナ雑音電圧およびコロナパルス分布の測定回路を示す。

3.1.2 コロナパルス分布測定回路

コロナ雑音とコロナパルス特性とを対比するため、コロナ雑音電圧と並行してコロナパルスの数、波高値を測定した。コロナパルスは、時定数 $7.5 \mu\text{s}$ の CR 回路によって充電電流を除去したのち、コロナパルス分布計数装置によって正負パルスを分離して



第4図 コロナ雑音電圧特性



第5図 正コロナパルス数特性

測定される。コロナパルス分布計数装置の計数回路の分解能は 50 kc/s であるので、同心円筒の負コロナパルスは数が多く分解計数することはできない。

負コロナパルスの波高値はほとんど一定であるが、正コロナパルスの波高値はかなり大きな範囲に分布する。第3図は正コロナパルス波高値とパルス数の分布の一例であるが、ばらつきがある。しかし、パルス波高値に対するパルス数の累積ひん度曲線は一定の形を示している。このため、コロナパルス波高値の測定は累積ひん度 99.5% の最大値を測定することにした。

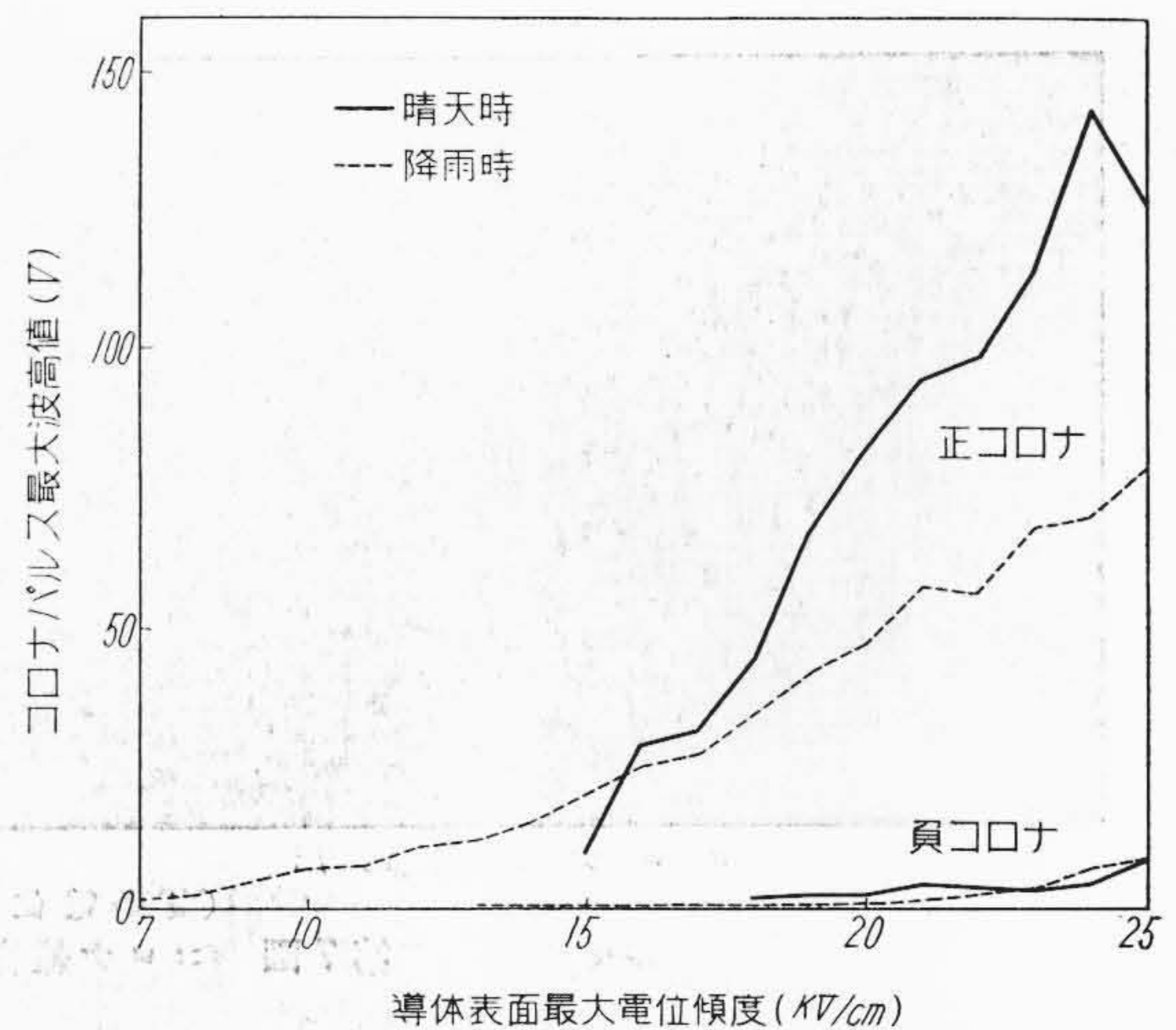
3.2 コロナ雑音電圧特性

第4図は 1 Mc における正、負コロナ雑音電圧、および全コロナ雑音電圧特性を晴天および降雨時について示したものである（正負両コロナによる雑音を全コロナ雑音と呼ぶことにする）。全コロナ雑音電圧は 40.5 mmφ 膨脹形 (Expanded) ACSR の雑音レベルを与えるものである。

晴天時の全コロナ雑音電圧は広範囲の変動があって、統計的な処理によって平均値を求めた。これに反して降雨時には変動が少なかった。

晴天時の全コロナ雑音電圧の測定値はかなりばらつくため10個ほどの平均であるが、雑音電圧は晴天時にはある幅を持つものと考えらるべきである。負コロナ雑音電圧には変動がほとんどない。

晴天時のコロナ雑音の特性についていえば、全コロナ雑音電圧は



第6図 コロナパルス最大波高値特性

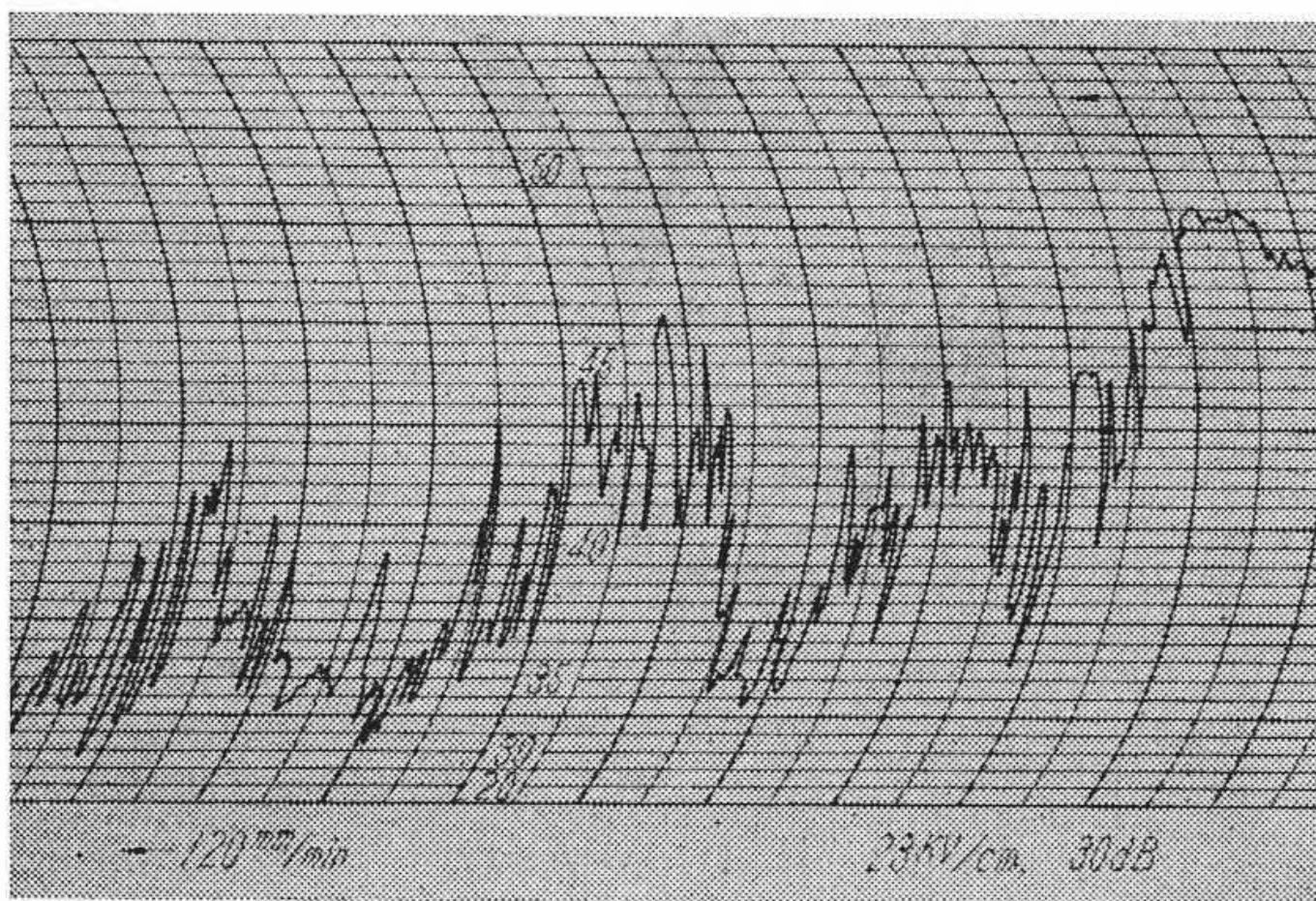
導体表面状況によって大いに異なるが最大電位傾度 16 kV/cm ぐらいから急激に立上り、20 kV/cm をこえると飽和する傾向を持っている。この傾向は導体径の大きいものほどはなはだしい。導体径が小さくなると飽和点は高電位傾度のほうに寄っているようである。導体径によるコロナ雑音およびコロナパルス特性の変化については別の機会に詳細に報告したい。

晴天時の正コロナ雑音電圧も全コロナ雑音電圧と同様にばらつくが、ばらつきの範囲内で両者は同一のコロナ雑音レベルを持つものと考えることができる。負コロナ雑音電圧はこれらよりも 10~20 dB 低く、ほとんどばらつかなかった。しかし、電位傾度の上昇とともに増加し、高電位傾度で飽和する傾向は同じである。電位傾度の上昇にしたがって負コロナ雑音が大きく増加するのは放電点数の増加によるものと考えられている。

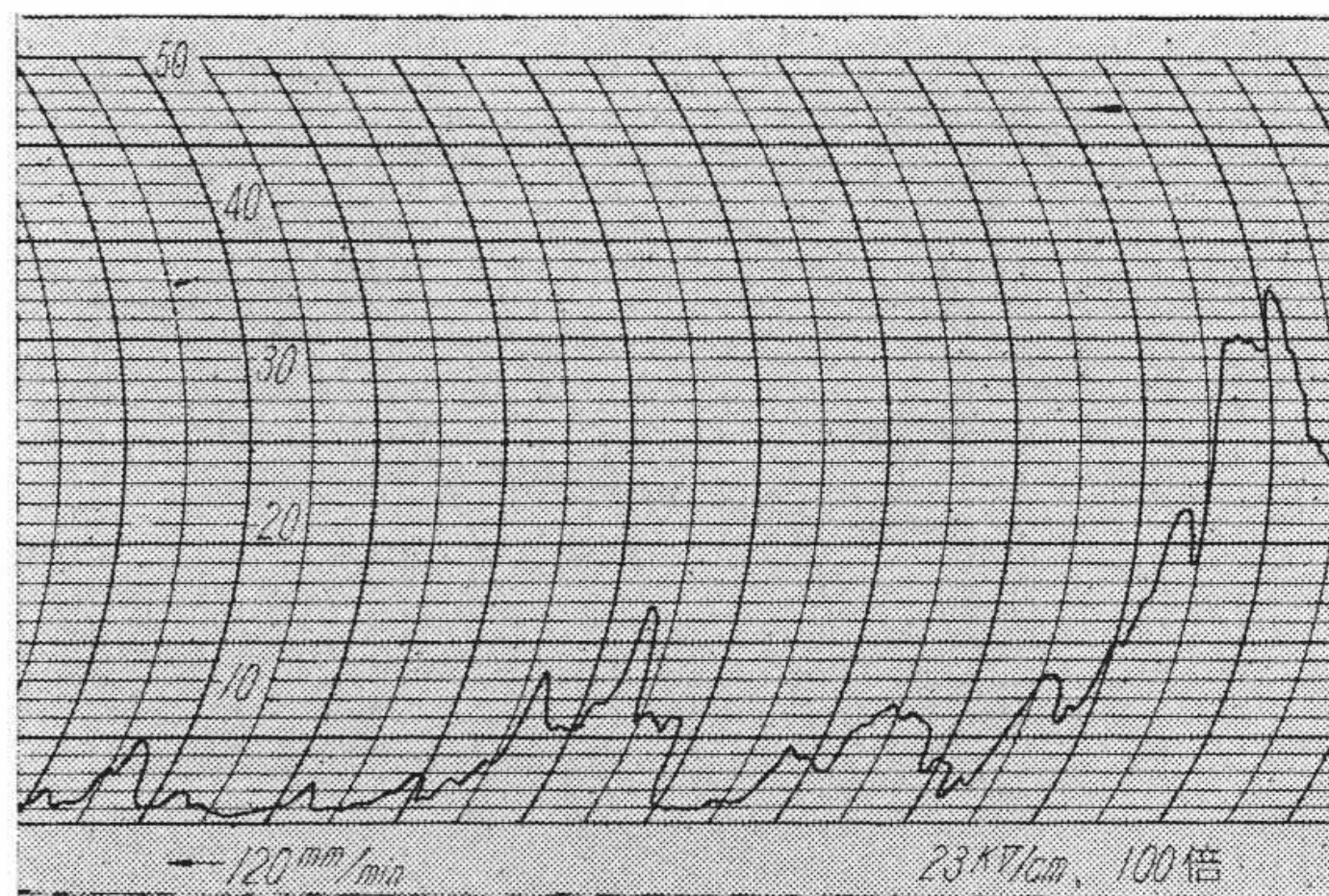
第4図の晴天時の曲線から、コロナ雑音電圧は正コロナと負コロナの雑音レベルの和できまるのではなく、大きいほうの雑音レベルできまると考えてよい。コロナ開始時の導体表面最大電位傾度はもちろん、かなり高い電位傾度でも、正コロナは常時発生せず、空間電荷の状態にしたがって間けつ的に発生する。これに対し、負コロナは導体表面最大電位傾度がコロナ開始電位傾度以上になれば常時発生し、雑音レベルの変動はない。したがって、全コロナ雑音電圧の下限レベルは負コロナの雑音によって定まり、上限は正コロナが全体として多く発生したときの正コロナの雑音レベルとなる。コロナ開始導体表面最大電位傾度近くではある時間正コロナが発生しないことがあり、このときには全コロナ雑音レベルは負コロナ雑音レベルにまで下がるが、電位傾度が高ければ空間電荷の分布によって大きな変動があるとしても、正コロナが全然発生しない期間は確率的にみて少ないので、全コロナ雑音レベルは正コロナ雑音レベルによって一義的にきまると考えてよい。

正コロナの発生は相対空気密度、湿度などの気象条件および空間電荷の分布によって変化することが認められる。特に空間電荷の分布によって正コロナの発生数が大きく左右されるような傾向がみられた。たとえば、正コロナの発生位置が一方方向に移動すること、導体全体に正コロナが多く発生したのち、急に発生が少なくなること、あるいは風の状態によって正コロナの発生が変ることなどである。

降雨時には各コロナ雑音の特性がはっきりしている。降雨時には導体に降下あるいは導体より滴下する水滴があるため、付着する水滴の先端の電位傾度がほかの部分より高くなって、正負コロナともほとんど水滴より発生している。したがって、晴天時よりもずっと低い導体表面最大電位傾度でコロナが発生する。しかも、水滴よりコロナが発生するためコロナの発生点が固定して安定であること、



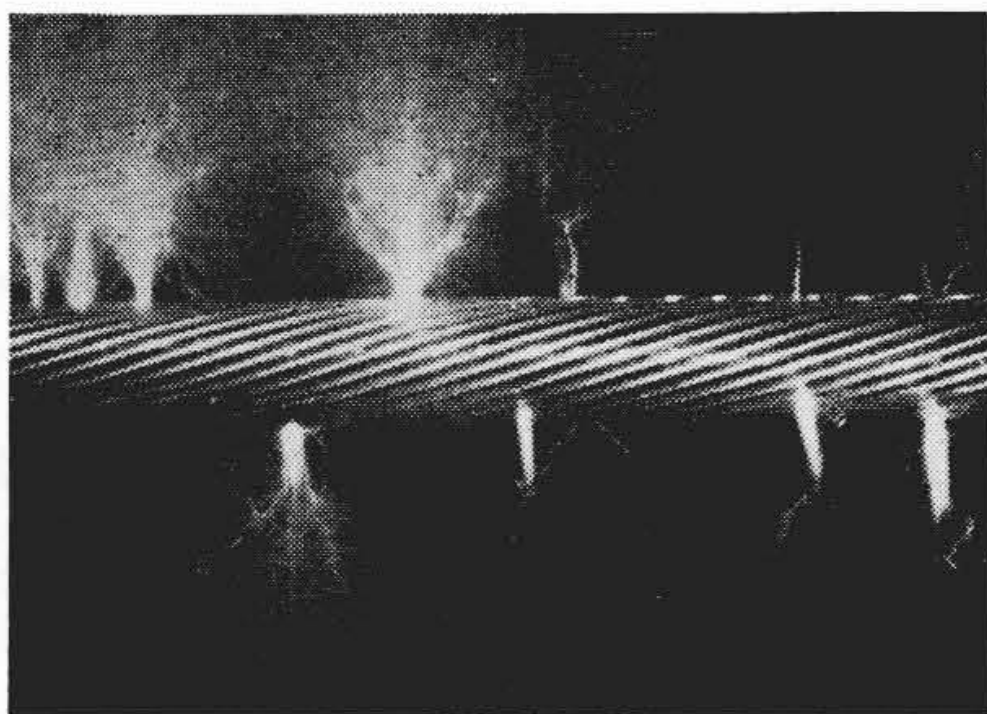
コロナ雑音電圧



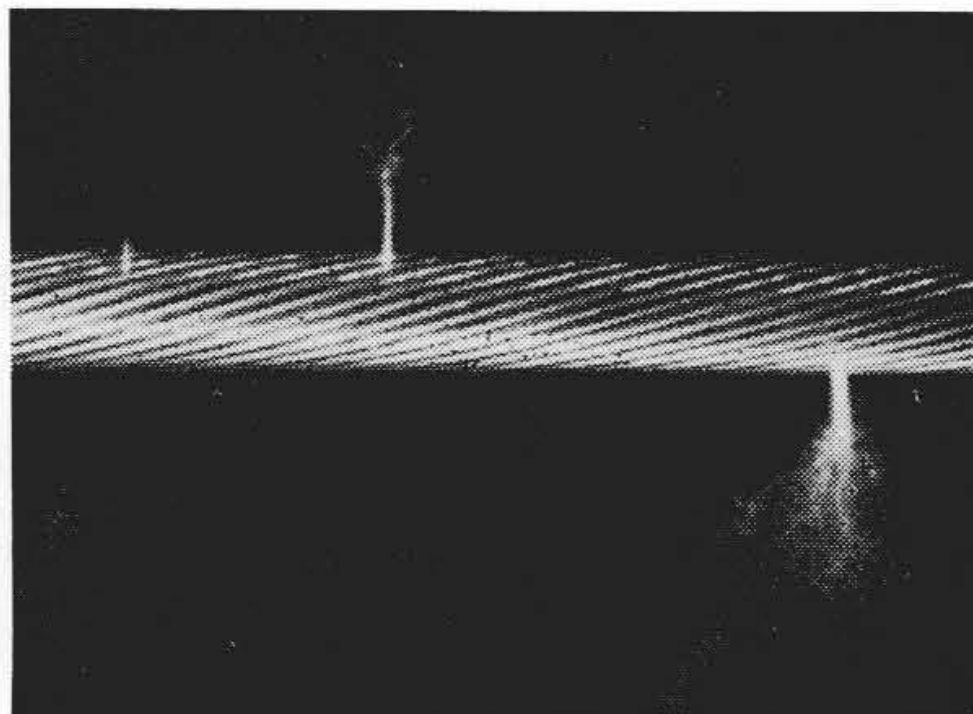
正コロナパルス数

(表面電位傾度 23kV/cm, 晴天時)

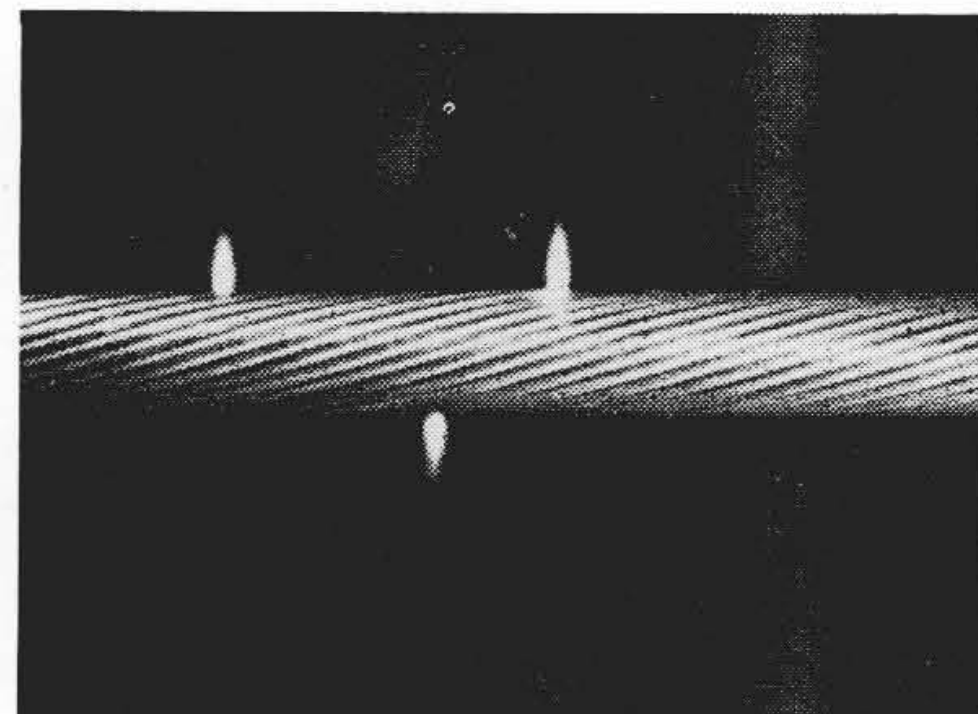
第 7 図 コロナ雑音電圧と正コロナパルス数との相関



(1) 全コロナ



(2) 正コロナ

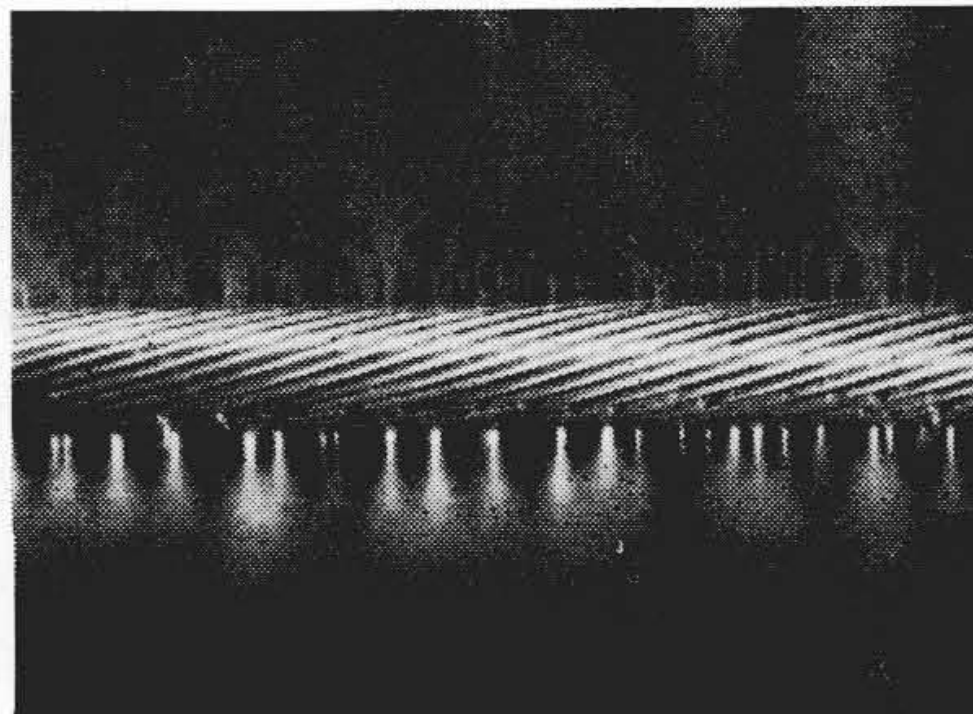


(3) 負コロナ

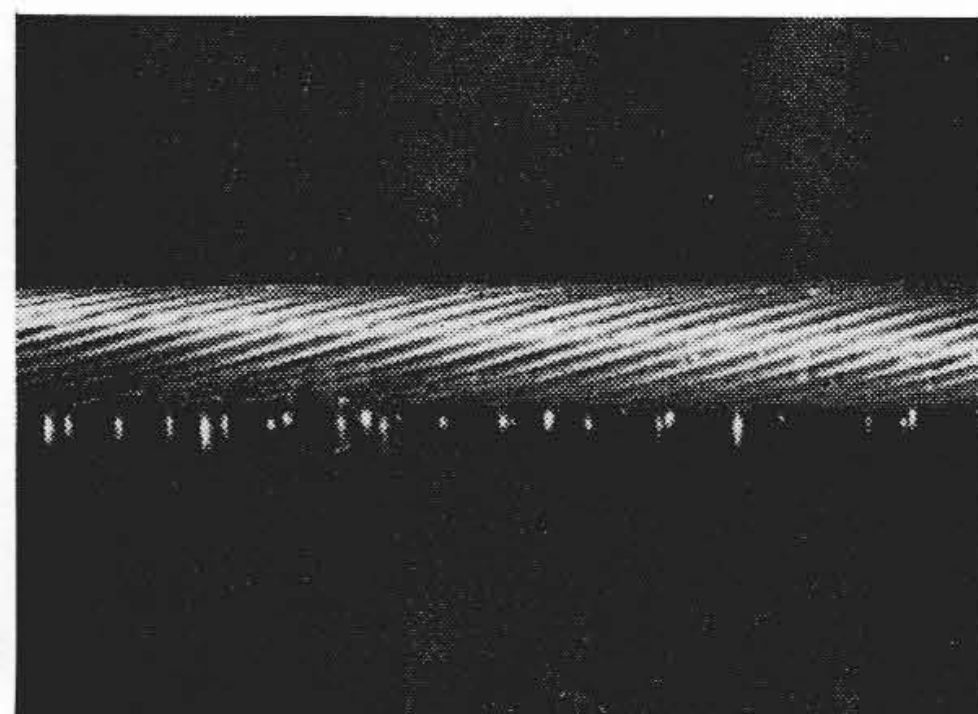
第 8 図 晴天時の可視コロナ



(1) 全コロナ



(2) 正コロナ



(3) 負コロナ

第 9 図 降雨時の可視コロナ

また、導体に付着する水滴が電気力によって飛散するので、水滴はほぼ一定の大きさを保っていることなどから、降雨時には雑音電圧の変動が少ない。したがって、降雨時に全コロナ雑音電圧と正コロナ雑音電圧とは完全に一致している。負コロナ雑音電圧は前二者に比べて低く、導体表面最大電位傾度が増加しても雑音電圧はあまり増大しない。降雨時には晴天時と異なって放電点数は水滴数によってきまり、導体表面最大電位傾度の上昇にしたがって負コロナの発生する位相が広がるのみである。一点からでる負コロナ数は飽和する傾向がある。

晴天時および降雨時とも全コロナ雑音レベルと正コロナ雑音レベルとが等しいことから、ラジオ障害はまったく正コロナの特性によるものと証明される。

なお、第 4 図の鎖線はチョップ接点を接地したときノイズメータに誘導するコロナ雑音を降雨時について示したものであるが、負コロナ雑音レベルよりも 25~30 dB 低く全然問題にならない。

3.3 コロナパルス特性

コロナ雑音特性に対比してコロナパルスの数および最大波高値を調べた。第 5 図は正コロナパルス数、第 6 図は正コロナおよび負コロナパルスの最大波高値である。

正コロナパルス数曲線とコロナ雑音電圧曲線の傾向は非常に似た

ところがある。コロナ雑音が正コロナパルスの特性から一義的に定まることから当然であるが、正コロナパルス数の変動を調べるとコロナ雑音電圧の変動と完全な相関があることが第 7 図より認められる。

なお、第 5 図降雨時の正コロナパルス数は 50 kc を越えるが、減衰をかけて計数した値 0 dB の換算値であるので計数分解限度には達していない。一方負コロナパルス数はきわめて多く計数できないので省略した。負コロナパルスの波高値は正コロナパルスの波高値に比べて小さく数十分の一である。正コロナパルス波高値は晴天、降雨時とも導体表面最大電位傾度に対してほぼ直線的に増加しているが、降雨時のパルス波高値は晴天時のものに比べて小さい。晴天時のパルス波高値がほぼ倍の大きさを持っている一つの理由は、パルス発生点からの電位傾度の減少率を考えた場合、晴天時のコロナが導体表面から発生するのに対し、降雨時には導体に付着する水滴先端から発生するので、電位傾度の減少率が晴天時のほうが小さく、それだけ正コロナストリーマが伸びることに基くものではないかと考えている。すなわち、コロナ開始時以上の導体表面最大電位傾度では、発生した正コロナストリーマは導体より放射状に伸展し、ストリーマ中の正イオン分布と導体の電位との合成で決まるストリーマ先端の電位傾度がコロナ開始電位傾度以下になると、付近のガス

粒子を電離できなくなってストリーマの成長はとまる。この電界分布は導体周囲の空間電荷の分布によって大きく変化するので、ストリーマの特性は空間電荷に大きく左右されることになる。しかし、雨の場合ストリーマが進展しないという一つの理由として、電子と気中の水蒸気の結合も考えられ、これは今後に残された問題である。

負コロナの場合にはパルス波高値はほぼ一定と考えられるが、導体表面最大電位傾度が大きくなると波高値もわずかに大きくなるような傾向もみられる。

4. 正負可視コロナの観察

導体に発生する可視コロナの特性を詳細に調べるため正と負のコロナを分離して観察した。

同期電動機によってストロボを製作し、電源電圧に同期して開閉する回転シャッタを用いて可視コロナを正負に分離した。シャッタ開閉の位相は移相器によって調整する。二次高圧側の位相は導体に取り付けたネオンランプの位相で調べる。

第8図は晴天時の可視コロナである。第9図は降雨時の可視コロナであって、導体表面最大電位傾度はともに 25 kV/cm である。撮影場所、露出時間は同一ではない。

負コロナパルスは正コロナパルスよりも数が多く、伸びも小さいことはコロナパルスの特性から明らかであるが、第8図の晴天時の可視コロナについても、負コロナは一定の位置から一定の方向に伸び、印加電圧の大きさに関係なくほぼ一定の伸びであるのに対し、正コロナは発生位置が変化し、ストリーマの通路も同一でなく、印加電圧の上昇とともに伸びが大きくなる。正コロナストリーマの放電路は直線的ではなく、枝分れするもの、あるいは途中で軸方向、円周方向に曲るものが多い。また導体周囲に沿って回転する場合とか軸方向に正コロナの発生群が移動してゆくような傾向がみられる場合もある。負コロナの発生点は正コロナに比べて多く、正負コロナの発生点は必ずしも同一ではない。正コロナの発生する点に負コロナが全然発生しないこともある。正コロナが多く発生する点に負コロナの発生数が少ないような感じもしたが、正コロナによる空間電荷が関係しているのかどうか不明である。

第9図の降雨時の場合はコロナは正負とも明らかに水滴先端より発生している。正コロナの伸びが晴天時より小さいのは、一つにはコロナ発生点からの電位傾度減少率が関係しているものである。導体上部に出ている細いストリーマの線は降下する霧状の水滴が導体に付着する瞬間に出る正コロナであって、ある値以上の導体表面最大電位傾度になって発生し、降雨停止とともに消滅する。

導体下部より滴下する水滴からは常に正負コロナとも発生している。コロナの発生のために水滴の先端はとがり、水滴の体積はほぼ一定である。すなわち、導体に付着する量は導体に降下する雨量とコ

ロナ放電によって飛散する量との差できまり、降雨時の導体のコロナ雑音特性はまったく付着した水滴の状態できまると考えてよい。

導体表面を極端に傷つけたときには降雨時のコロナ雑音特性には変化なく、晴天時の特性が降雨時の特性に近づいてくる。これは傷によって突起ができて、水滴付着と同じ効果を持つものと解釈できる。

5. 結 言

以上、送電線導体のコロナ雑音に対して正負コロナがいかなる影響を及ぼしているか分析したが、これらを取りまとめれば次のようになる。

- (1) ラジオ障害に関係するコロナ雑音は正コロナによる雑音である。
- (2) 負コロナによる雑音レベルは正コロナの雑音レベルよりも正常運転時約 20 dB 少ない。
- (3) 負コロナパルスの波高値はほぼ一定であるが、正コロナパルスの波高値は電位傾度の増加とともに大きくなる。
- (4) 晴天時の正コロナパルスの発生は間欠的で、発生位置は移動する。これに対して、負コロナパルスは、毎半サイクルに必ず発生する。正負コロナの発生点は同一とは限らない。
- (5) 降雨時には正負コロナとも付着水滴から発生している。滴下する水滴から正負コロナとも発生する。
- (6) 降雨時のコロナ雑音特性は付着水滴の状態によってきまる。
- (7) 導体の傷は水滴と同じ効果をもち、晴天時のコロナ雑音特性を降雨時の特性に近づける。
- (8) コロナ雑音電圧と正コロナパルス数との間には完全な対応がある。

可視コロナについても、正負コロナを実験的に分離してはっきりした対応をつけることができた。

今後、超高圧同心円筒によってコロナ雑音レベルとコロナパルス特性を対比して種々の導体について詳細に研究するとともに、コロナの機構を究明したいと考えている。

終りにご指導下さった電気試験所三田博士、日立電線株式会社電線工場岩田部長、久本部長、大和部長、山本課長、また実験に協力された遠藤君に心からお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) G. E. Adams: T. A. I. E. E. 75, 411 (1956)
- (2) G. E. Adams: Power Apparatus and Systems No. 28, 1569 (1957)
- (3) 永野: 日立評論 別冊 No. 28, 18 (1958)
- (4) 永野, 沼尻: 電学会東京支部大会予稿 No. 205 (昭 33)